

生态仿真优化实验室

Simulation Optimization Lab

---

2023

# 测树学十五讲

15 Lectures on Tree and Forest Mensuration

曹田健

Tianjian Cao

---

西北农林科技大学

Northwest A&F University

## 前言

### Preface

This course is designed for undergraduate or master students who are preparing to engage in an interdisciplinary study in the fields of forest inventory, forest ecology, and forest resources management. The purpose of this course is to show students how to link their knowledge in forest sciences with an interdisciplinary approach, and to help students acquire skills in predicting and assessing the dynamics of forest development with simulation optimization tools.

### 附表

- 附表 1 固定样地调查记录表
- 附表 2 固定样地每木检尺记录表
- 附表 3 角规调查记录表
- 附表 4 草本样方 (1\*1 m<sup>2</sup>) 调查记录表
- 附表 5 灌木样方调查记录表
- 附表 6 灌草生物量调查记录表
- 附表 7 固定样地林木更新调查记录表
- 附表 8 固定样地针叶树种树高生长记录表
- 附表 9 固定样地幼树生长锥数据表
- 附表 10 固定样地幼树采伐木数据表
- 附表 11 角规样地林木更新数据表
- 附表 12 角规样地针叶树幼树树高生长表
- 附表 13 角规样地幼树生长锥数据表
- 附表 14 角规样地幼树采伐木数据表
- 附表 15 带状样地林木调查表 (每木检尺)
- 附表 16 带状样地林木更新调查表
- 附表 17 带状样地针叶树幼树树高生长表
- 附表 18 带状样地幼树生长锥数据表
- 附表 19 带状样地幼树采伐木数据表
- 附表 20 间伐复测样地调查记录
- 附表 21 间伐复测样地每木检尺记录
- 附表 22 间伐复测样地每木检尺记录
- 附表 23 伐桩调查
- 附表 24 枯落物层调查记录表
- 附表 25 土壤剖面调查记录表

## 测树学主要测计量及其单位符号

测计量	惯用符号	米 制		英 制	
		计量单位	符号	计量单位	符号
树干直径	D、d	厘米	cm	英寸	in
林分平均直径	Dg	厘米	cm	英寸	in
林分算术平均直径	$\bar{D}$	厘米	cm	英寸	in
树干断面积	g	平方米	m <sup>2</sup>	平方英尺	ft <sup>2</sup>
林分总断面积	G	平方米	m <sup>2</sup>	平方英尺	ft <sup>2</sup>
林分平均断面积	$\bar{g}$	平方米	m <sup>2</sup>	平方英尺	ft <sup>2</sup>
林分每公顷林木断面积	G/ha	平方米	m <sup>2</sup> /ha	平方英尺每英亩	ft <sup>2</sup> /acre
树干全部或局部长度	L 或 l	米	m	英尺	ft
树木全高或某部位高度	H 或 h	米	m	英尺	ft
林分平均高	H <sub>D</sub>	米	m	英尺	ft
林分算术平均高	$\bar{H}$	米	m	英尺	ft
林分优势木平均高	H <sub>T</sub>	米	m	英尺	ft
树干全部或局部材积	V 或 v	立方米	m <sup>3</sup>	立方英尺、板英尺	ft <sup>3</sup> 、board feet
林分或森林蓄积	M	立方米	m <sup>3</sup>	立方英尺、板英尺	ft <sup>3</sup> 、board feet
林分每公顷林木蓄积量	M/ha	立方米	m <sup>3</sup> /ha	立方英尺、板英尺 (每英亩)	ft <sup>3</sup> 、board feet (/acre)
材积(连年)生长量	Zv	立方米	m <sup>3</sup>	立方英尺、板英尺	ft <sup>3</sup> 、board feet
林木年龄	a	年	a	年	yr
林分年龄	A	年	a	年	yr

# 目录

## Contents

### 第一讲 绪论

第一节 测树学的概念和发展

第二节 测树学在林业实际中的应用

第三节 测树学理论基础

第四节 误差、准确度、精度与测不准原理

Q1. 在林业生产中，早期森林调查数据与近期数据哪一个重要？为什么？

### 第二讲 数据采集设计

第一节 测树因子与数据采集

第二节 抽样设计理论与方法

第三节 测树工具

第四节 教学软件

Q2. 临时样地数据，固定样地数据，解析木数据的采集目的是什么？举例说明不同数据来源的应用。

### 第三讲 林木静态结构

第一节 树干形状与树木结构

第二节 伐倒木树干材积

第三节 单株立木材积

第四节 异速生长原理

Q3. 一元材积表，二元材积表，干形，削度方程的计算原理是什么？其精度提高与误差产生的原因是什么？

### 第四讲 林分临时样地

第一节 林分调查因子

第二节 适地适树原理

第三节 林木大小、立地条件与竞争

第四节 矩形样地、圆形样地与带状样地

Q4. 树高胸径结构，林冠结构，根冠比的生物学原理是什么？为什么要计算林木的结构？

### 第五讲 林分固定样地

第一节 固定样地种类

第二节 固定样地作用

第三节 矩形样地与圆形样地

第四节 大样地

Q5. 为什么要设立固定样地？其目的与理论依据是什么？

### 第六讲 林分静态结构

第一节 林分直径结构

第二节 林分树高结构

### 第三节 林分空间结构

### 第四节 三参数 Weibull 分布

Q6. 人工林与天然林的林分结构有何区别？如何计算混交林的林分结构？如果林分有间伐或病虫害干扰？

## 第七讲 同龄林立地质量

### 第一节 直接法和间接法

### 第二节 地位级和立地指数

### 第三节 林型与地被指示物

### 第四节 密度控制与自疏伐理论

Q7. 直接法和间接法立地质量评价的区别和联系是什么？如果间伐？如果气候变化？

## 第八讲 异龄林立地质量

### 第一节 蓄积与生物量

### 第二节 树高胸径异速关系

### 第三节 立地形

### 第四节 森林生产力

Q8. 混交林立地质量评价采用哪种方法合适？其理论依据是什么？其方法有哪些缺点？

## 第九讲 纯林的林分蓄积

### 第一节 标准木

### 第二节 立木材积表

### 第三节 形高与形数

### 第四节 疏密度与标准表

Q9. 标准木法计算材积的误差是如何产生的？

## 第十讲 混交林林分蓄积

### 第一节 树种组成与林分结构

### 第二节 角规原理与技术

### 第三节 林分断面积

### 第四节 林分株树密度与蓄积

Q10. 角规技术的精度问题，在林分断面积，林分株数，蓄积计算上，其误差产生的原理是什么？

## 第十一讲 林木动态生长

### 第一节 树木生长量与增长率

### 第二节 平均生长量与连年生长量

### 第三节 树木生长方程

### 第四节 代谢尺度理论

Q11. 树木生长，增长率，生长方程的变量及其生物学原理是什么？

## 第十二讲 林分动态生长

### 第一节 解析木数据与年轮气象学

### 第二节 木芯数据与径向生长

### 第三节 单木水平长期复位监测

#### 第四节 径阶净增量与转移概率

Q12. 解析木数据可以提供哪些对林业生产和科研有用的信息？

### 第十三讲 经验生长模型

#### 第一节 全林生长模型

#### 第二节 径阶生长模型

#### 第三节 单木生长模型

#### 第四节 林分密度控制图

Q13. 经验模型按尺度分，需要哪类森林调查/测树/建模数据？

### 第十四讲 过程生长模型

#### 第一节 过程机理模型

#### 第二节 半经验半机理混合模型

#### 第三节 平行系统模型

#### 第四节 林窗理论与森林更新

Q14. 如何提高过程模型的准确性和普适性？

### 第十五讲 生物量与碳计量

#### 第一节 碳平衡理论

#### 第二节 森林碳汇计量方法与数据采集

#### 第三节 森林乔木层和草灌层的碳计量

#### 第四节 森林土壤碳的动态预估

Q15. 森林生产力与森林生物量的计算，如何考虑年龄因素的影响？如果是异龄林？

# 第一讲 绪论

## 第一节 测树学的概念和发展

数据，公式，模型，系统

森林调查数据历史

林分生长模型历史

## 第二节 测树学在林业实际中的应用

林业生产：森林资源调查，林业规划设计

林业科学：生物学/生态学；生物统计学/林业运筹学

## 第三节 测树学理论基础

适地适树原则，异速生长原则，

代谢尺度理论，自稀疏理论，林窗理论

## 第四节 误差、准确度、精度与测不准原理

误差的产生

准确度与精度

风险，概率与不确定性

Q1. 在林业生产中，早期森林调查数据与近期数据哪一个重要？为什么？

## 森林与自然资源

### Forest and Natural Resources

自然资源包括可再生资源 and 不可再生资源。从某种意义上，人类文明史无不与人类对自然资源利用的历史息息相关。因此，森林资源的价值和重要性对人类来说不言而喻。

森林资源作为可再生资源的一种，是自然资源的重要组成部分，其最主要的属性就是可再生性。与其他可再生资源相比，例如，渔业资源、畜牧业资源等，可再生自然资源具有可重复利用的共性。其共性表现在：

第一，S形的生长曲线；第二，资源竞争引起的自然稀疏与密度控制；第三，环境变化导致的干扰、韧性与修复。因而，森林资源的研究方法与渔业资源和畜牧业资源等学科在方法上有相通之处。

理解森林资源的自然资源属性和原理，是森林资源监测与评价学科有别于社会科学方法，从自然科学角度评估森林资源的基础。除此之外，亦有环境经济学、生态经济学和林业经济学等学科，应用微观经济学原理及计量经济学方法，从社会科学视角研究森林和自然资源的利用。

## 森林与自然资源管理的参与方

林业政策制定者：Principle

森林资源管理者：Agency

林业规划设计者：Consultancy

林业科研人员：Research

## 面向经济价值、生态价值与社会价值的森林资源

Towards Economic, Ecological, and Social Values

经济价值：木材价值，生物质能源，林副产品

生态价值：生物多样性，森林碳汇，涵养水源

社会价值：国家公园，城市森林，就业率，贫困率，老年化

## 森林的集约式经营、可持续经营或适应性经营

Intensive management, sustainable management, or adaptive management

粗放式经营：木材生产，涸泽而渔，过牧，梯田，茶山

集约式经营：大径材培育，纸浆林，速生丰产林

可持续经营：退耕还林，恒续林

适应性经营：低效林改造，生态修复，林业应对气候变化

## 测树学在林学中的学科分类

4.00.00 - Forest Assessment, Modelling and Management

国际林联第四分部：森林评估，森林建模和森林经营

<http://www.iufro.org/science/divisions/division-4/>

4.01.00 – Forest mensuration and modelling

4.02.00 – Forest resources inventory and monitoring

4.03.00 – Informatics, modelling and statistics

4.04.00 – Forest management planning

4.05.00 – Managerial economics and accounting

## 森林调查数据采集与数据处理流程

目标定义 Definition

数据采集 Collection

模型验证 Validation

计算存储 Storage

结果分析 Analysis

综合报告 Synthesis

## 第二讲 数据采集设计

### 第一节 测树因子与数据采集

数据尺度:

林木水平 Tree level (林木结构, 林冠结构, 林木大小)

林分水平 Stand level (树种组成, 林分结构, 立地条件, 竞争)

数据来源:

(临时样地, 固定样地, 解析木, 木芯)

数据种类:

资源数据 resource data (蓄积, 覆盖率)

动态数据 dynamics data (生长, 演替)

更新数据 regeneration data (树种, 种子, 幼苗, 幼树, 进界)

枯损数据 mortality data (径阶, 时间, 林分结构)

生物多样性数据 biodiversity data (乔木层, 草灌层, 土壤层)

生态数据 Ecological data (碳, 氮, 水)

### 第二节 抽样设计理论与方法

典型抽样

点抽样, 随机抽样 Point sampling

系统抽样 Systematic sampling

带状抽样 Stripe sampling

群团抽样

分层抽样

...

### 第三节 测树工具

围尺 => 胸径

布鲁莱斯测高仪 => 树高

卷尺 => 冠幅

生长锥 => 木芯

...

### 第四节 教学软件

ForStat, QUASSI, OPTIFOR, Simile, PUME II, Silva, FVS, WestPro, Monsu, Motti, ...

Q2. 临时样地数据, 固定样地数据, 解析木数据的采集目的是什么? 举例说明不同数据来源的应用。

Kiaer 在 19 世纪末介绍了具有代表性样本的应用。随后 Bowley (1912) 将随机抽样思想引入了调查抽样。Neyman (1934) 解释了为什么随机选择优于有目的的选择。基于从给定总体中抽取的一定大小的所有可能样本分布, 他提出样本估计置信区间, 为抽样理论确立了准确的统计学框架 (Bellhouse 1988)。

19 世纪森林资源调查的主要方法是每木调查，之后人们注意到应用有代表性的样本可以减少调查成本 (Loetsch et al. 1973)。早期抽样法在北美、德国和北欧林业方面的应用是目测法。从 1900 至 1920 年，统计知识逐渐被用于林业文献。由于早期的调查是系统的，因此系统抽样方差估计在这些国家被广泛使用。

Israel af Stro:m 19 世纪 30 年代使用了系统带状抽样。Hasel (1938) 和 Osborne (1942) 认为系统调查比随机抽样更能给出蓄积量的近视值。Finney (1948) 提出分层法，考虑最初抽样地点的随机性。

Bitterlich 和 Grosenbaugh 引进不等概率抽样法，提出角规计数抽样法 (Bitterlich 1947)。角规抽样法很快被认为是森林抽样的有效方法，因为对木材蓄积量的兴趣。Grosenbaugh (1952) 应用与大小成比例的概率抽样法 (PPS)，提出点抽样概念。

Scott (1947) 提出了森林连续清查 (CFI) 体系。Bickford (1959) 将永久样地与临时样地资料有机结合，进行部分放回抽样 (SPR)。

基于模型的方法在林业调查中还未被推广 (Matern 1960; Mandallaz 1991; Kangas 1993; Gregoire 1998)。现在卫星影像已经逐渐代替了航片 (Czaplewski 1999)。

## 抽样技术

### 随机抽样

简单随机抽样 (SRS) 是一种最基本的抽样技术，在选择一个具有  $n$  个单元的样本时，每一个可能的  $n$  个样本的组合，都具有相等等被抽中的机会。

简单随机抽样分为可放回抽样和不放回抽样。

对于放回抽样，从总体  $N$  中抽取大小为  $n$  的样本  $s$  的概率  $p(s)$  为：

$$P(s)=1/N^n$$

这是因为从总体中抽出  $N^n$  个大小为  $n$  的样本。在这种情况下，包含概率可以这样计算：用 1 减去没有抽取的某一单元的概率，即，

$$P_i=1-(1-1/N)^n$$

而抽取两个单元  $i$  和  $j$  的概率为：

$$P_{ij}=1-2(1-1/N)^n+(1-2/N)^n$$

另一方面，在不放回抽样中，每个单元只能被抽一次，选择概率和包含概率的计算并不像放回抽样的计算那么容易。其可能的样本数为

$$N!/(N-n)!n!$$

这些被选样本中的每一个样本的概率是它的倒数：

$$p(s)=(N-n)!n!/N!$$

### 系统抽样

系统抽样是指在总体内按等间距抽取样本单元。例如在一系列的树木中每 10 株抽取一株或是在一片林分内按等间距抽取样地。在系统抽样中，每一个典型的第  $k$  个单元均被选入样。这就意味着对抽样单元得进行某种预先排序。这也意味着可能的样地树木只能是  $k$ 。森林资源调查中，如果采用点抽样法，可能的样本数也许是无限的。

例如，在一个 100 ha 林地的一次森林资源调查中，样地被布成方格网，在这个方格里，行距与样地之间的距离均为 100 m。总共测 102 个圆形和点状样地。如果胸径的平均值小于 8 cm，就采用半径为 2.25 m 的圆形样地调查所有林木。否则的话，使用点抽样并取断面系数为 2 的方法，同时如果还有下层林木，也可在 20 m<sup>2</sup> 的圆形样地测量林木。每个样地每公顷林木蓄积量的估计可以被计算出来。系统抽样中的单元不是单独入样的，而且对于系统抽样的标准误没有基于设

计的估计值。简单随机估计量可用于估计总体平均值和总量。在此例中，简单随机估计量也用于估计样本方差。

### 分层抽样

分层意味着把总体划分为互不重叠的副总体，因而使副总体内的变量比在原总体内的变量更为一致。副总体称作层，我们在每个层里选取样本，样本单元可以用各种技术来抽取，包括简单随机抽样和系统抽样。根据抽样条件的不同，总体的分层可以有不同的方法。在森林调查中，森林往往是根据森林类型进行分层的。

在分层抽样中，存在着某种辅助信息。依据这些信息，总体可分为同类的组或层。在很多情况下，分层抽样比简单随机抽样更有效，也就是说分层抽样的标准误较小。通常，层内的选择使用简单随机抽样，但也可以采用系统抽样。各次总体的加权平均记得总体的平均值。

例如，利用航空影像将同样 100 ha 面积进行分层。3 层分别定义为：

层	A(ha)	n	V(m <sup>3</sup> /ha)	SD(m <sup>3</sup> /ha)	Vtot(m <sup>3</sup> )	SD(m <sup>3</sup> )
开阔地	18.0	18	42	6.7	756	121
中龄林	33.3	35	167	10.0	5557	344
成熟林	48.7	49	268	13.3	13033	649

$$V_{ave} = 0.180 \times 41.976 + 0.333 \times 166.84 + 0.486 \times 267.67 = 193 \text{ m}^3/\text{ha}$$

$$SD = \sqrt{0.180^2 \times 45.437 + 0.333^2 \times 100.27 + 0.487^2 \times 177.72} = 7.4 \text{ m}^3/\text{ha}$$

$$V_{tot} = 755.6 + 5557.1 + 13033.4 = 19346 \text{ m}^3$$

$$SD_{tot} = \sqrt{14722 + 111246 + 421372} = 740 \text{ m}^3$$

上面的例子中，各层按照土地面积 A(ha)比例抽样 n，对调查数据汇总后，可以分别计算得到每层每公顷平均林木蓄积 V(m<sup>3</sup>/ha)、每公顷平均林木蓄积的标准误 SD(m<sup>3</sup>/ha)、每层的林木总蓄积 Vtot(m<sup>3</sup>)、林木总蓄积的标准误 SD(m<sup>3</sup>)，进而可以得到整个区域每公顷平均林木蓄积 V\_ave 及其标准误、整个区域林分的总蓄积 SD\_tot 及其标准误。

### 群团抽样

当总体可以分成多个独立的群团时采用群团抽样。在森林资源调查中，往往存在多个相邻的样地或相邻的一片树木组成的群团。如果对树的平均值感兴趣的话，每一块样地也可以视为树的群团。

### 重复抽样

例如刀切法 (jackknife) 和自助法 (bootstrap)。其工作程序如下：

从最初放回抽样样本中抽取 K 个大小为 n 的重复抽样样本。

计算每个重复抽样样本的相关估计值 (例如平均值或比率)。

从重复抽样样本的估计值之间的方差中计算该方差的估计量。

### 抽样设计

我们可以从几个观点来看获取最佳数据。传统地说，可以理解为在预算一定的情况下，抽样设计使估计量的方差 (如平均蓄积) 最小。调查成本可假定包括每一个样本抽样的固定成本、每一群团的成本，每一样地的成本和每一颗样本树的成本。

### 块状抽样

块状抽样采用块状样地调查。在地形较平坦，人员较容易到达的林地内，设置块状样地，进行每木检尺等测量。长方形样地需要一次确定四个角点和边界，而正方形样地还可以从中心开始确定，沿对角线确定四个角点。

### 点抽样

点抽样采用角规测树。一般对于地势险峻，较难到达的林分则进行角规观测。

### 带状抽样

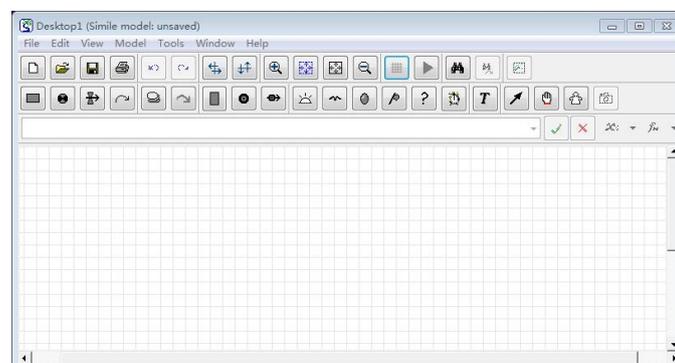
带状样地适用于对于稀少分布的总体进行抽样。可根据小班实际状况，沿垂直于调查地段的地形和流水方向设置带状样地，链宽  $W$  一般为 20m，对于面积较小的密林使用 10m，面积较大的疏散林分使用 40m。带状样地第一条中心线是随机选定，样带之间距离  $D$  根据地形选择为 5 链或 10 链，各带中心的距离应垂直于样带中心线的方向测量，样带末端应形成方形。每个样带按照 10m 分成若干个固定长度的样段，每个样段内按照临时样地的调查方法调查。带状样地理论调查强度为： $I=W/D \times 100(\%)$ 。

调查以小班为单位进行，将每一个小班即作为一个林分，在每个小班中布设一定数量的角规观测点和块状样地。采用设置典型林分方法常常会导致数据结果偏高，采用系统抽样和随机抽样会避免这样问题，但相应野外实际操作困难较大，常常设计的观测位置会因为地形险峻而难以到达。带状样地相对减小了系统偏差（避免林分蓄积的高估），在自疏伐、森林更新、枯损率、生物多样性等调查中，能较好反映实际状况。但是在地形较差区域，操作困难相对更高。最终应根据林分实际状况，选取抽样结构与方法。

### 样本量

样本的单元数受到调查成本的限制，应该选择的最小单元数是由估计值精确度的要求来确定。根据使得样本均值与总体均值的离差小于给定的  $d$  值，及其概率  $1-\alpha$ ，可计算得出理论最小样本量。实际调查中不同调查方法的理论样本量也不同。采用随机取样进行林分调查，角规点数取决于所调查林分的角规计数木株数的变动系数与调查精度的要求。块状样地的数量可以相对少一些，同时由于林分内只有部分地区可以到达，因此样本量也会相应减小。另外，能够设置块状样地的小班一般都是坡面较为平整的林分，可以考虑设置固定块状样地。

## 软件应用案例 1: Simile 模拟森林生长



本节我们介绍 Simile 这款软件，并演示其使用方法。Simile 是一款针对复杂动态系统的仿真建模软件，可以应用于地球、环境和生物科学等诸多领域。Simile 采用独特的基于逻辑的陈述建模（declarative modelling）技术，以清晰的框架和直观可视化的方法，来呈现系统内部的交互作用机制。该软件的优点包括 1) 基于对象的表达方式可以更好的处理离散集合和基于个体的建模；2) 自动生成 C++ 模型代码用于快速执行；3) 即插即用模块操作，支持任意部分模块分离并单独使用；4) 演示插件可以允许用户绘制特定领域图形；5) 陈述性模型表示可以更便捷地采用复合方式操作模型。该软件可在其官网下载（网址 <http://www.simulistics.com/>）。

我们通过一个构建林木生长的例子来熟悉 simile 的基本操作：

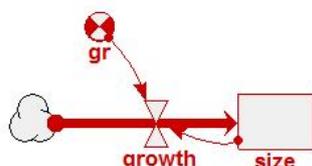
### 1. 模拟单株树的生长

(1) 添加 compartment 图标 ，命名为 size。

(2) 添加 flow 图标 ，命名为 growth。

(3) 添加一个 variable 图标 ，命名为 gr，来代表最大生长速率。

(4) 分别添加从 size 和 gr 到 growth 的关系线 。使用  图标，可以调整各图标和线条位置。当前模型构建如下：

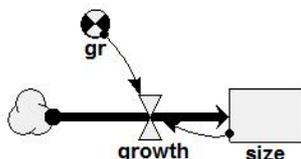


(5) 输入 growth 的计算公式： $gr*(1-size/25)$  该公式意味着树木生长最大值为 25，生长速率在开始时最大，后逐渐减小。

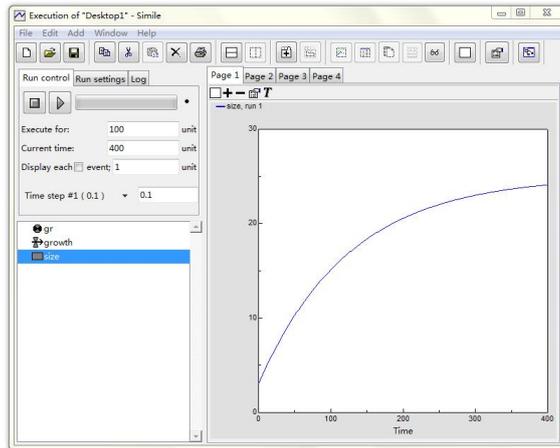
(6) 设置 size 的初始值为 3。

(7) 设置变量 gr 的值为 0.2。

(8) 赋值完成后，图标将变为黑色。



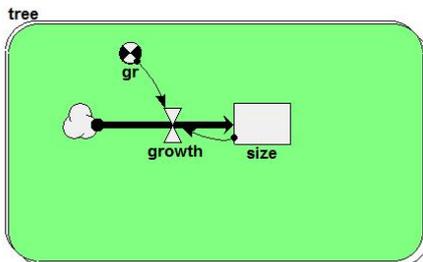
(9) 点击菜单栏 model-ran，选择 create plotter，添加 size 为变量，运行模型，可以绘制 size 的生长曲线。



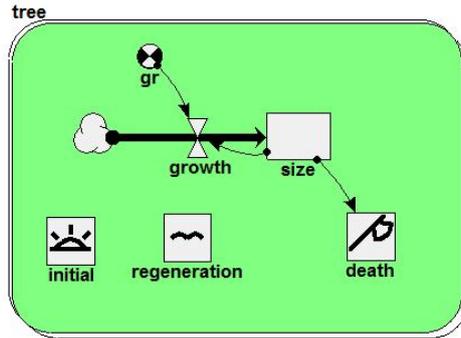
## 2. 将单木扩展至林分层面

- (1) 点击 submodel 按钮 , 选中整个模块。
- (2) 重新命名 submodel 为 tree。

- (3) 使用  按钮, 双击 submodel 内部, 打开 submodel 属性对话框。
- (4) 在 instance 的下拉类别中, 设置为 population。
- (5) 此时可以修改 submodel 的背景颜色。
- (6) 关闭 submodel 属性对话框。



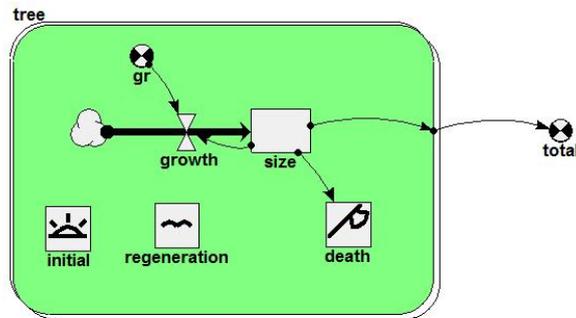
- (7) 将 `gr` 的值由 0.2 修改为 `rand_const(0.1,0.3)`。从而将每个个体随机设置不同的生长速率。
- (8) 添加 creation process 图标 , 代表初始的树木株数, 此处设置为 5。
- (9) 添加 immigration 图标, 代表不断更新的树木, 设置为 2。
- (10) 添加 destruction process 图标, 命名为 `death`, 建立 `size` 对 `death` 的影响, 并将 `death` 赋值 `size>17`, 意味着 `size` 超过 17 时, 树木死亡。
- (11) 现在模型界面如下:



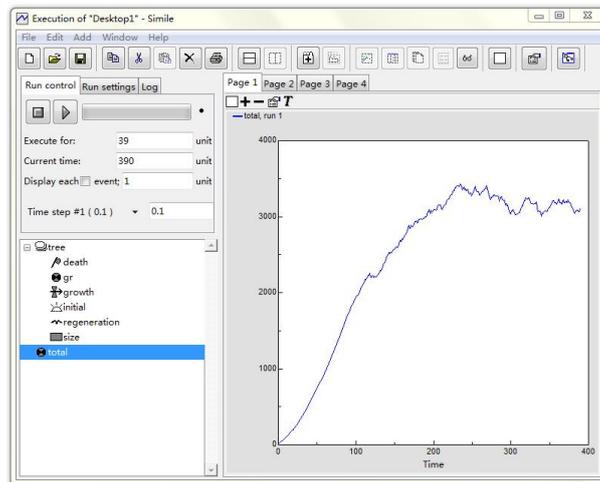
(12) 重建并运行模型。

### 3. 计算林分整体信息

- (1) submodel 外增加变量，命名为 total。
- (2) 将 total 赋值为  $\text{sum}(\{\text{size}\})$ 。



(3) 重新运行模型，并绘制 total 的变化曲线。

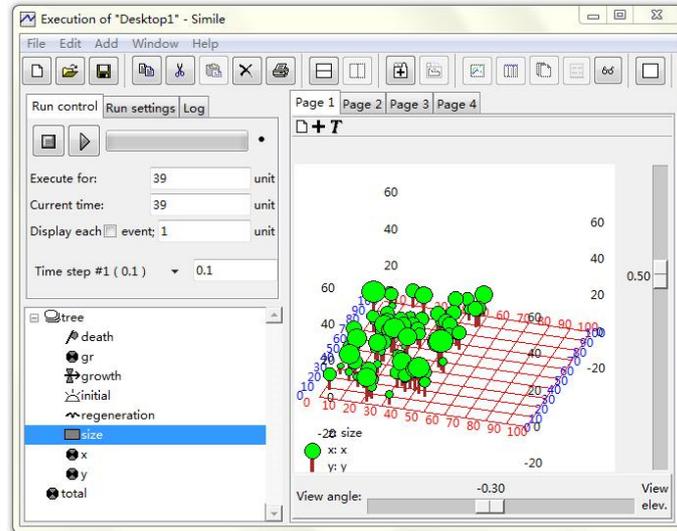


### 4. 林分生长空间可视化

- (1) 在 tree 的子模型内增加两个变量，分别命名为 x 和 y，代表树木坐标位置。
- (2) 分别将 x 和 y 赋值为  $\text{rand\_const}(0,50)$  和  $\text{rand\_const}(0,100)$ ，代表树木生长在 50\*100 的样地内。

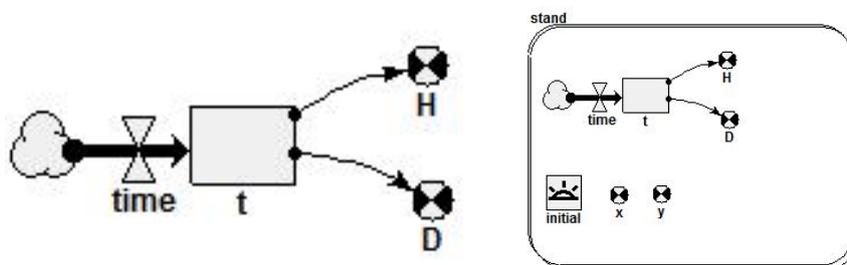
(3) 运行模型，选择图标  类型中的 Lollipop diagram，绘图增加变量，依次按要求提交 x 坐标，y 坐标，和 size 变量。

(4) 运行结果如下：

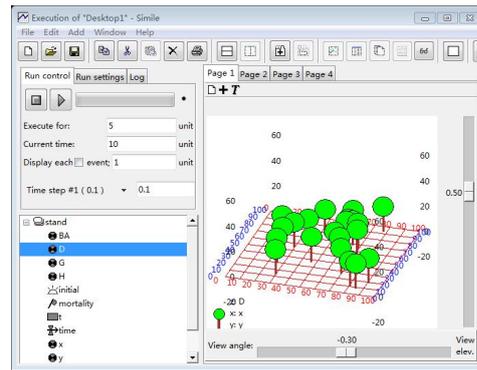
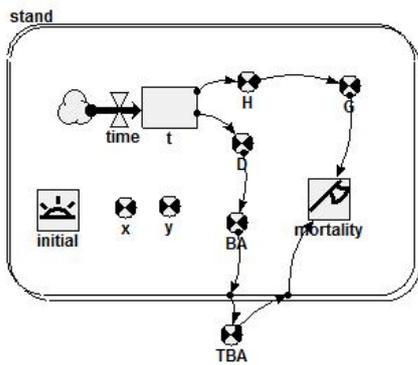


前面演示，是一个单木生长模型的例子，在全林模型的介绍中，现在介绍采用正常林分生长模型来演示 Simile 的模型链接。在构建正常生长收获模型时，继续沿用上节拟合的树高 H-t 模型和胸径 D-t 模型，但因为是正常林分，即要求完满立木度，正常林分的断面积我们由树高-断面积标准表来推算。树高公式为： $H = 22.841 * \exp(-19.284/t)$ ；胸径公式为  $D = 36.149 * \exp(-24.507/t)$ ；胸高断面积公式为  $G = 45.144 / (1 + 3.967 * \exp(-0.185 * H))$ 。

林分平均高与平均胸径以年龄作 t 为自变量，在 Simile 中我们将年龄初始值设置为 t=15，林分年龄增长 time=1，利用树高生长方程与胸径生长方程，推算平均木树高（设置  $H = 22.841 * \exp(-19.284/t)$ ）与平均胸径（设置  $D = 36.149 * \exp(-24.507/t)$ ）。通过 submodels 按钮可以将平均木转换为林分水平（设置 Instances 为 Population），同时我们设置林分初始密度 initial=25（每 100 平方米 25 株），以及树木坐标 x 和 y 为 rand\_const(0,100)。

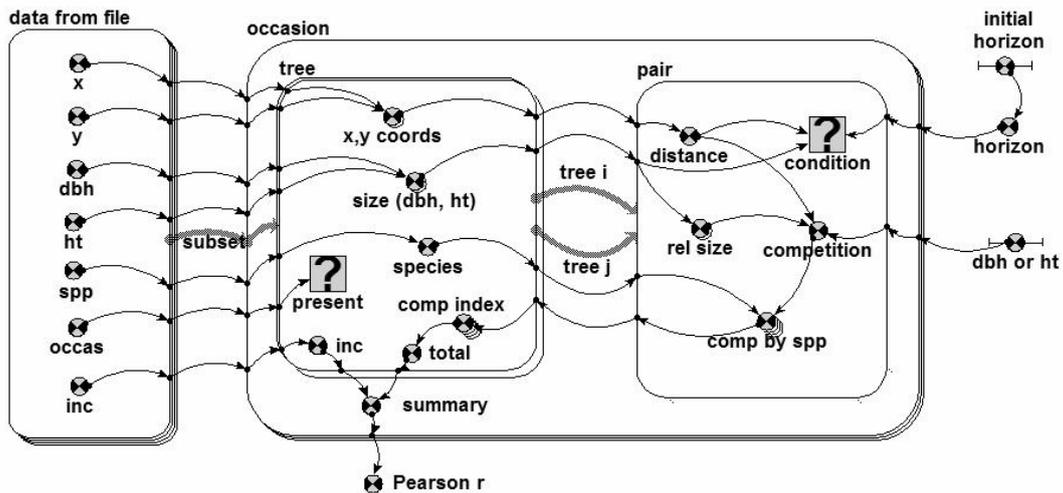


林分的枯损由总断面积来调控。首先计算平均木的断面积  $BA = 3.14 * D^2 / 40000$ ，继而林分总断面积  $TBA = \sum\{BA\}$ 。通过标准表数据进行回归拟合，正常林分的最大断面积为  $G = 45.144 / (1 + 3.967 * \exp(-0.185 * H)) / 100$ 。通过二者差值的比例，可以计算正常林分的枯损率  $mortality = (TBA - G) / TBA$ 。模型结构如下：

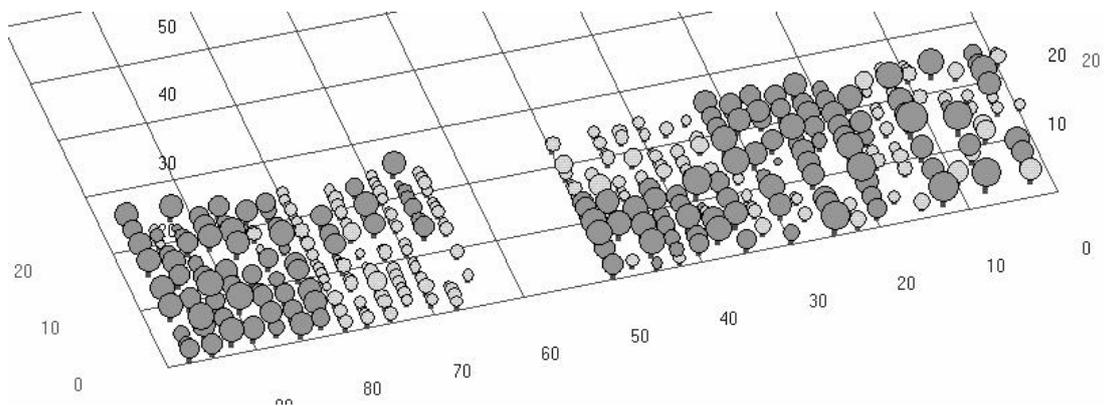


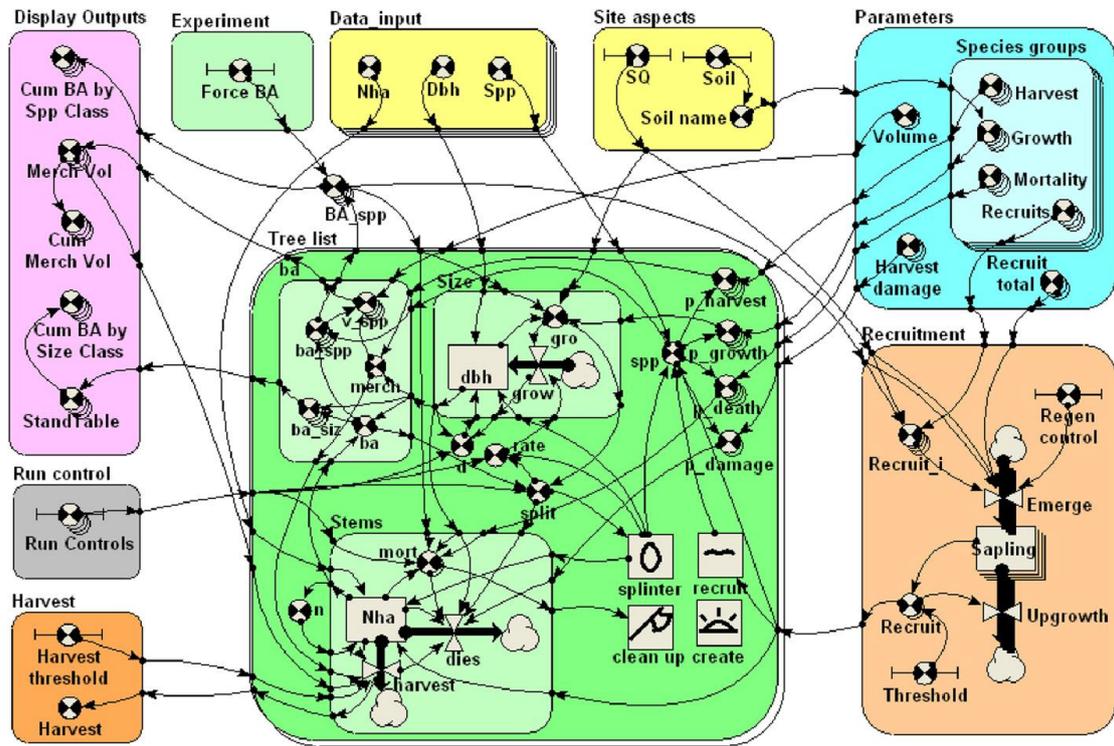
至此，模型的构建与链接完成，可以对正常林分进行生长模拟。与上个例子的不同之处在于，收获表描述的是同龄林的生长状况，每株树代表的是林木平均水平，没有明显区别。

Vanclay（2006）以 Simile 为例展示了混交林生长效果：



Jerome K Vanclay. 2006. Spatially-explicit competition indices and the analysis of mixed species plantings with the Simile modelling environment. *Forest Ecology and Management*, 366: 295-302.





Jerome K Vanclay. 2014. Unsuspected implications arising from assumptions in simulations: insights from recasting a forest growth model in system dynamics. *Forest Ecosystems* 1:7.

## 软件应用案例 2: WinDENDRO 的木芯样本年轮宽度分析

**摘要:** 树木年轮资料具有定年准确、连续性强、分辨率高和分布广泛等特点。研究采用 WinDENDRO 年轮分析系统对火地塘教学试验林场主要树种 297 个木芯样本的年轮宽度进行分析,通过年轮自动识别和人工判读确认,并对部分出现异常的样本数据进行交叉定年,得到了较为准确的树木年龄和连续的直径生长量数据,有效补充了建立树木生长模型的数据种类和精度。

**关键词:** WinDENDRO; 木芯样本; 年轮宽度; 交叉定年

树木年轮不仅记录了树木自身的年龄,而且从树木年轮的变化中,我们可以了解到树木历年的生长情况、抚育管理措施等信息。对树木年轮资料的获取多采用切割树盘做解析木的办法,但是,获取、处理和打磨圆盘既费工又费时,而且解析木法具有破坏性,在诸如保护树种和自然保护区内,或者是需要长期连续观测调查的样地中,这种方法并不可行(于显威等, 2011)。较为快捷、经济而又对环境影响较小的抽样方法就是用生长锥采集木芯样本。

随着计算机处理技术的飞跃发展,使得设计出一套自动识别定标树木年轮的系统成为可能,将计算机图像处理和图像分析技术融入到树木年轮的自动识别中有着非常重要的意义。但是目前对于年轮图像的自动识别和分析的研究还不是很多,用于年轮分析的仪器主要是树木年轮分析系统,如加拿大 REGENT 公司的 WinDENDRO 和德国 Frank Rinn 公司的 LINTAB(何海, 2005)。本研究中所使用的年轮分析系统为 WinDENDRO。

目前,对木芯样本分析得到的年轮资料主要用于建立不同区域长时期的树轮年表并重建过去数百年乃至数千年的气候特征(邵雪梅, 1997; 王萑等, 2003), 揭示森林的自然或人为干扰历史及其对森林群落的结构和动态的影响(Santoro 等, 2001), 以及探讨大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加等全球气候变化问题(Martinellin, 2004)。而这些年轮资料很少用于建立树木生长模型来预测森林的动态变化。秦岭林区火地塘教学试验林场缺乏连续观测的森林调查数据, 从而限制了生长收获模型的构建和对树木生长过程的研究。

本研究的目的在于通过对 4 个树种木芯样本年轮宽度的分析, 对 WinDENDRO 年轮分析系统的使用注意事项和实际操作中的一些技巧做一个简单的介绍, 以便同行参考。同时, 通过对秦岭林区主要树种木芯样本年轮宽度的分析, 为火地塘林场的主要树种补充较为准确的年龄数据和连续的直径生长数据, 为下一步建立秦岭林区主要树种的全林分模型和单树模型提供数据基础。

#### 木芯样本来源

所有木芯样本均取自生态仿真优化实验室于 2012-2013 年在西北农林科技大学火地塘教学试验林场对秦岭林区四个主要树种(油松、落叶松、华山松和锐齿栎)进行的森林经理调查, 包括角规绕测调查、临时样地调查和固定样地调查, 共 297 个木芯样本。

#### 样本采集

角规绕测调查中, 一个小班内至少选取一株优势树种接近平均直径的树木和优势树木分别打生长锥取木芯。样地调查中, 选取每个样地中优势树种接近平均直径的树木和优势树木分别打生长锥取木芯。通常在每个样木的东西和南北方向分别取木芯样本。在 2012 年的调查中木芯样本均取自胸径处, 而在 2013 年的调查中增加了地径处木芯样本的钻取。

#### 样本预处理

##### 样本固定

在木芯样本风干以后, 用胶水将完全干燥的木芯样本粘在样本板上, 并贴上标签纸标记样本信息。样本板是根据木芯的直径制作的固定木条, 样本板中央槽沟的宽度与木芯的直径相当, 深度不超过木芯直径的一半, 用于放置和固定木芯。需要注意的是, 固定木芯时尽量让有髓心的一侧朝上, 以减少不必要的测量误差。在所有木芯样本中有部分已经折断, 在处理时尽量将断口准确对齐后粘在样本板上, 不能轻易丢弃。

##### 样本打磨

待粘在样本板上的木芯样本晾干后, 按顺序先后使用粗砂纸(P280 或 P320)、细砂纸(P800 或 P1000)打磨木芯样本, 直至样本表面平整、光滑、明亮, 尽量能清晰地看到每一条树木年轮。所选砂纸型号按 GB 9258-88 的规定。在实际操作中, 如果木芯样本较难打磨, 可以用砂布(P80 或 P100)代替粗砂纸。

##### 样本扫描

使用 WinDENDRO 年轮分析系统配套的扫描仪对木芯样本进行扫描。扫描时将木芯样本正面向下, 水平放置于扫描仪的扫描区域。WinDENDRO 中一共有三种图像保存格式: jpeg (\*.jpg)、tiff (\*.tif) 和 bitmap (\*.bmp), 本次实验中选择 tiff 格式来保存木芯扫描图像。在每次扫描前都要进行图像预览, 因此, 当需要扫描的木芯样本数量较多时, 可以将多个样本并排放置在扫描区域分别扫描, 以节省图像预览的时间

## 木芯样本分析

使用 WinDENDRO 年轮分析系统对木芯样本的扫描图像进行分析。WinDENDRO 可以进行年轮宽度和密度两方面的分析，在本次实验中只进行了年轮宽度的分析。

### 路径创建和年轮自动识别

加载完木芯图像后，WinDENDRO 需要指明被测年轮的位置，此时需要人工的在图像上创建路径。路径创建的起点从髓心开始，终点到树皮方向，起点和终点均不能太靠近图像的边缘，否则 WinDENDRO 有可能自动关闭。

创建路径时需要定义木芯样本的信息，包括树木标识、位置标识、样本树木高度、最末年轮时间等（图 1）。其中树木标识和最末年轮时间两项是必须填写的，前者是数据转换为十进制格式后测量序列的唯一标识；后者与定年有关，且最末年轮的年代不一定是木芯的采集时间，比如在生长季节采集的样本，当年的晚材尚未形成，则不测量最外一轮，而输入前一年的年份（胡晓荣,2007）。

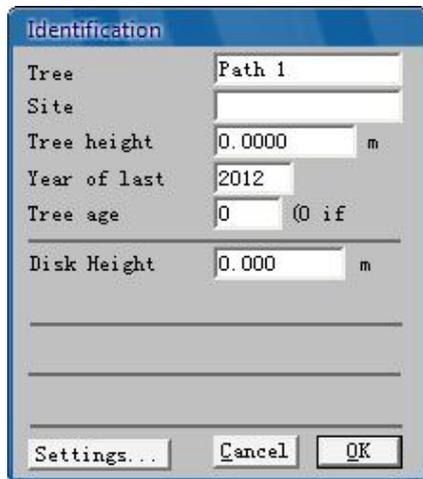


图 1 Identification 窗口

年轮自动识别时，需要设定年轮自动识别的参数，年轮边界线有垂直和相切两种界定方式，一般选择相切的方式（图 2）。

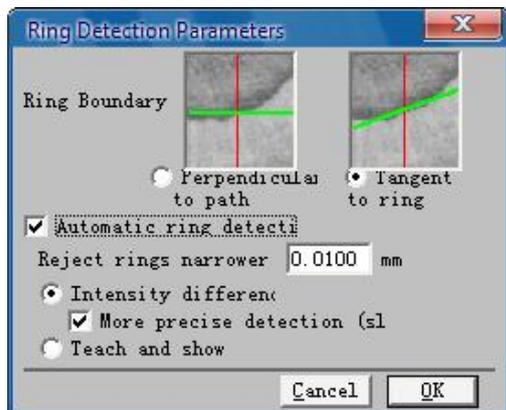


图 2 年轮自动识别参数设置

## 人工判读确认

路径创建完成后，即产生了年轮宽度及与之相关的测量数据。自动完成识别后，还需要通过人工的判读来对识别结果作仔细观察修改，使每个年轮标志短线代表一个真正的年轮界限。在活动路径内，如果存在遗漏的年轮，用鼠标在应该存在年轮界限的位置单击一次，即可增加一条年轮边界短线。如果存在多选年轮或伪年轮，将鼠标停留在所要删除的伪轮边界短线上，当其呈黄色时，表明已经选中，单击删除该年轮短线或按 **Delete** 键删除。

自动识别的边界短线经常会偏离正确位置，需要调整边界短线的位置。按住“**Shift**”键，用鼠标点击边界线中央拖动到适合的位置。或者将鼠标停留在要调整的边界短线上，呈黄色后，用字母键“**W**”上移，“**Z**”键下移，调整到合适位置为止。

如果需要调整边界短线方向，按住“**Shift**”键，鼠标点击边界短线的一端，调整到适合的方向使其与年轮轮廓外切。

### 数据和分析图像文件的保存

人工判读完成后，WinDENDRO 系统会产生两种文件：图像文件和数据文件。通常情况下要保存分析后的图像文件，以便在实际工作中对原始数据进行核对。被分析过的图像一般情况下在其他图像软件上看不到分析结果，只有在 WinDENDRO 系统下，再次打开保存的图像时才可以看到先前分析的内容。

年轮宽度及与之相关的测量数据文件以\*.txt 文本格式保存，WinDENDRO 默认只保存年轮宽度数据。在本次木芯样本的分析中，还保存了早材晚材的相关信息，需要在“Data/Ring Based Format”下弹出的“Ring Based Files Format”窗口勾选相应选项（图 3）。

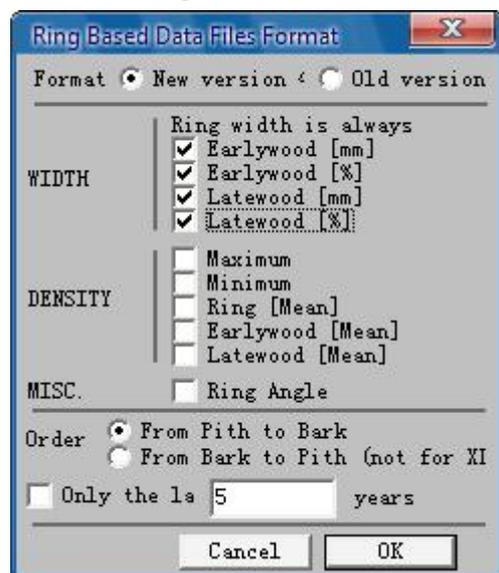


图 3 年轮基本数据文件格式窗口

### 木芯样本分析结果

表 1 为 2012-2013 年生态仿真优化实验室在火地塘林场采集到的木芯样本的分析结果。油松角规观测点木芯样本主要在 2012 年 7-8 月采集，油松固定样地木芯样本和落叶松木芯样本主要在 2012 年 10 月采集，华山松和锐齿栎木芯样本在 2013 年 7-10 月采集。相比于 2012 年的木芯样本，2013 年调查中增加了对地径处木芯样本的采集。另外，2013 年采集的木芯样本中分别有 1 个华山松和 9 个锐齿栎样本年轮难以辨认，没有进行分析。

表 1 2012-2013 年火地塘林场木芯样本分析结果

单位：根

树种	采集木芯	分析木芯	固定样地木芯	临时样地木芯	角规观测点木芯	胸径木芯	地径木芯	平均木木芯	优势木木芯
油松	86	86	7	0	79	84	2	84	2
落叶松	37	37	2	14	21	37	0	34	3
华山松	90	89	41	0	48	50	39	74	15
锐齿栎	84	75	31	0	44	57	18	74	1

### 数据文件分析

木芯样本分析完成以后，在保存的文本文件中，数据呈行排列，每条路径的数据都由 5 行组成，分别表示树轮全轮宽度、树轮早材宽度、树轮晚材宽度、树轮早材所占百分比和树轮晚材所占百分比（图 4）。每组数据前面几十列都是与样本相关的信息和系统设置的信息，最后一部分才是分析测量的数据。其中第 1 列是样本路径标识，第 2 列是最末年轮时间，第 7 列是该路径测定的年龄。

TreeName	Path identification	Site identification	YearLastRing	Sapwood Tree height	Tree age	SectionHeight	User variable	RingCount	DataType
Path 1	2012	0.000 0	0.000 30	RINGWIDTH	5	扫描图 147.tif 2013-11-21 15:14:06		142 2185 8 RGB I	
Path 1	2012	0.000 0	0.000 30	EARLYWIDTH	5	扫描图 147.tif 2013-11-21 15:14:06		142 2185 8 RGB I	
Path 1	2012	0.000 0	0.000 30	LATEWIDTH	5	扫描图 147.tif 2013-11-21 15:14:06		142 2185 8 RGB I	
Path 1	2012	0.000 0	0.000 30	EARLYWIDTH%	5	扫描图 147.tif 2013-11-21 15:14:06		142 2185 8 RGB I	
Path 1	2012	0.000 0	0.000 30	LATEWIDTH%	5	扫描图 147.tif 2013-11-21 15:14:06		142 2185 8 RGB I	
Path 2	2012	0.000 0	0.000 36	RINGWIDTH	5	扫描图 147.tif 2013-11-21 15:14:06		142 2185 8 RGB I	
Path 2	2012	0.000 0	0.000 36	EARLYWIDTH	5	扫描图 147.tif 2013-11-21 15:14:06		142 2185 8 RGB I	
Path 2	2012	0.000 0	0.000 36	LATEWIDTH	5	扫描图 147.tif 2013-11-21 15:14:06		142 2185 8 RGB I	
Path 2	2012	0.000 0	0.000 36	EARLYWIDTH%	5	扫描图 147.tif 2013-11-21 15:14:06		142 2185 8 RGB I	
Path 2	2012	0.000 0	0.000 36	LATEWIDTH%	5	扫描图 147.tif 2013-11-21 15:14:06		142 2185 8 RGB I	

图 4 木芯样本数据文件

### 交叉定年

在分析木芯样本过程中，如果木芯只是刚穿过髓心，就只能一条路径；而如果打通了树干得到了完整的木芯样本，则可以创建两条路径。如果创建了两条路径，而两条路径分析得到的年龄不同，我们就需要通过交叉定年来进行校正，即对相关的年轮宽度曲线进行对比，结合图像的年轮判别以更正测量和定年错误（图 5）。其方法是切换到“Rings Width”窗口，利用自动生成的年轮宽度曲线进行直观的交叉定年及测量错误检查。同一株树或同一林分相同树种的年轮宽度曲线一般应该表现出相似的特征，如果年轮宽度曲线在某一点出与另一曲线差异甚大，则此处可能存在测量或定年错误，需要与实际的木芯样本认真比对。



图5 年轮宽度曲线图

如果木芯样本进行交叉定年后的两条路径年龄仍然不同,则可能是由于木芯样本在采集过程中在某一端有所缺失,这种情况下木芯样本的年龄一般按照年龄较大的路径。年龄较小路径的起始年代与另一条相同,而最外层的年代小于较大年龄路径的年代。如果路径年龄较小明显是由于髓心部分缺失引起,则该路径外层的年代与较大年龄路径的外层年代相同,而最内层的年代较大。

本研究采用 WinDENDRO 年轮分析系统对 2012-2013 年生态仿真优化实验室在火地塘教学试验林场调查采集到的四个主要树种(油松、落叶松、华山松和锐齿栎)的 297 个木芯样本进行年轮宽度的测量分析,通过年轮自动识别和人工判读确认,并对部分出现异常的样本数据进行交叉定年,得到了较为准确可靠的树木年龄和年轮宽度数据。

树木年龄数据可以广泛的应用到生长收获模型中全林分模型和单树模型各个模块的构建中,而年轮宽度数据可以提供较准确的连续的直径生长量,从一定程度上解决了单树模型中直径生长模块缺乏连续观测的直径生长数据的问题。通过建立树木生长模型,能够预测出林分或树木的生长变化动态规律,从而合理的调整经营措施,使森林向着能最大程度满足人们需求的方向发展。

四个树种木芯样本的扫描结果中,油松、落叶松和华山松的图像扫描结果明显优于锐齿栎,而且锐齿栎的早材和晚材数据不可靠。一方面是因为针叶树的早材和晚材生长对比比较鲜明,年轮界限比阔叶树明显;另一方面则是由于锐齿栎的材质较硬,木质较紧密,钻取木芯的过程中木芯样本往往易被汁液浸黑,极大的增加了样本处理和扫描分析的难度。一个理论上可行的方法是在钻取木芯的过程中尽量不要停顿,一次性取出,减小木芯在树内的摩擦。但是由于人力有限,这个方法一般很难实现。

采集木芯样本时,由于不同的采样者的采样高度不同,加上有时为了避开树木的结疤、树节及发生空腐的部分,采样高度不能保证都在 1.3m 处,采样较高的木芯会比采样较低的木芯缺失一些年轮(Vicente, 2003),因此胸径处的木芯样本的实际年龄可能会有所偏差。而由于生长锥本身的构造所限,地径处的采样也并非紧贴地面,而是距离地面一定高度。

WinDENDRO 年轮分析系统可以进行年轮宽度和密度两方面的分析，年轮宽度的分析可以得到连续的直径生长数据，而密度分析则可以获得树干解析的数据。在本研究中只进行了年轮宽度的分析，因为我们只能采集到木芯样本而密度分析则需要用到树木圆盘的样本。

参考文献：

Santoro A E, Lombardero M J, Ayres M P et al. Interactions Between Fire and Bark Beetles in An Old Growth in Pine Forest [J]. *Forest Ecology and Management*. 2001, 144: 245-254.

Martelli N. Climate from Dendrochronology: Latest Developments and Results [J]. *Global and Planetary Changes*, 2004, 40: 129-139.

Vicente R. Tree age estimates in *Fagus sylvatica* and *Quercus robur* testing previous and improved methods [J]. *Plant Ecology*. 2003, 167: 193-212.

何海. 使用 WinDENDRO 测量树轮宽度及交叉定年方法[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*. 2005, 22(4): 39-44.

胡晓荣. 树木年轮自动识别与提取[D]. 南京林业大学. 2007.

邵雪梅. 树木年代学的若干进展[J]. *第四纪研究*. 1997, 16(3): 265-271.

王葶, 于丹, 李江凤等. 树木年轮宽度与气候变化关系研究进展[J]. *植物生态学报*. 2003, 27: 23-33.

于显威, 王百田. 油松人工林年轮定年研究[J]. *沈阳农业大学学报*. 2011, 42(3): 316-320.

# 第三讲 林木静态结构

## 第一节 树干形状与林木结构

Tree level, Whorl level, Branch level

大小结构：胸径-树高

林冠结构：冠幅-胸径，冠长-树高，根冠比

管道理论：断面积，心材，边材，林冠

## 第二节 伐倒木树干材积

不带皮？

圆柱体，抛物线体，圆锥体，凹曲线体

大径材，小径材，节子数量，节子大小

木材等级，心材，边材，木材密度

锯材，纸浆材，能源木

PUME II

## 第三节 单株立木材积

带皮？

胸高形数  $f_{1.3}$ ，  $V=f_{1.3}*g_{1.3}*h$

实验形数  $f_{\epsilon}$ ，  $V=f_{\epsilon}*g_{1.3}*(h+3)$

## 第四节 异速生长原理

碳分配，生物量分配

胸径，断面积，树高

Q3. 一元材积表，二元材积表，干形，削度方程的计算原理是什么？其精度提高与误差产生的原因是什么？

异速生长原理

$w_i = \alpha * w^{\beta}$

## 第四讲 林分临时样地

### 第一节 林分调查因子

年龄，起源，立地质量，树种组成，林分结构，  
平均胸径，平均高，优势高，林分密度，断面积，蓄积  
林型，立地类型，草灌，腐殖质层，土壤理化性质，土壤微生物  
叶面积指数，生物量，碳储量  
降水，温度，海拔，坡度，坡位，坡向

### 第二节 适地适树原理

林业科研和林业生产首要原则，  
species-specific,  
site-specific

### 第三节 林木大小、立地条件与竞争

大小（胸径，树高），立地（立地指数，地位级，立地形），竞争（密度，断面积，蓄积）

### 第四节 矩形样地、圆形样地与带状样地

样地设计需要考虑的问题：预算成本，测树效率，数据质量

样地设计按目的分：

森林普查网格点样地，森林资源面样地，森林作业设计样地  
生物多样性样地，人工混交林样地，林分密度控制样地，林窗更新演替样地

Q4. 树高胸径结构，林冠结构，根冠比的生物学原理是什么？为什么要计算林木的结构？

#### 小班定位

进行野外调查，首先需要在野外准确的找到需要调查的林分（小班）。

利用林业基本图、地形图和 GPS 坐标，参照往年的森林调查数据，在实地根据道路、河流等地形条件和林分组成来确定林分位置。

GPS 默认坐标系统为 WGS84，在使用时需在设置菜单-单位-坐标系统一栏中，修改为西安 80。在进入林分之前应大致确定小班边界，谨慎选择最佳路线进入林分，期间要不断地用罗盘仪校正方向。

在每个观测点中心，用 GPS 中保存航点坐标，并在注释中标注所属林班小班观测点编号，以方便数据存储和再次寻找该样地。

#### 块状样地调查

##### 块状样地境界测量

常规的块状样地设置方法有以下两种：

（1）一种方法是确定四条边的方位和长度，先选定样地西南角点，再按顺时针方向，先往正北方向（0 方位角）测出西北角点，然后往正东方向（90 方位角）测出东北角点，再往正南方向（180

方位角)，测出东南角点，最后回测到起点，并计算闭合差。如果周界测量闭合差大于 0.5%，则应该进行重测，直到满足小与 0.5% 为止。

(2) 对于正方形样地另一种方法采用对角线法设置，从中心点确定对角线的方位，在对角线上用皮尺量取 1/2 对角线长度，定出样地的四个角点，然后用皮尺量出由四个角点围成的长方形周长。如果周长误差大于 0.5%，则应进行重测，直到满足小与 0.5% 的要求为止。对于面积为 0.0667 公顷的方形样地，其边长为 25.85 米，对角线长度为 36.52 米。

在实际调查工作中还应注意：

(1) 用罗盘仪测角，用测绳量距离。坡度 5° 以上应改算为水平距，相对闭合差不能超过各边总长的 1/200。

(2) 为使块状样地在调查作用时保持有明显的边界，应将测线上的灌木和杂草清除。测量四周边界时，边界外缘的树木在面向块状样地一面的树干上要作出明显标记。

(3) 设置块状样地时，用测绳量好距离并设好标桩后，测绳不用收回，可以用作块状样地调查时的边界，在该块状样地全部调查完之后再收回。

(4) 设置块状样地时，应将块状样地与已知测线明显地物标相联，在小班地图上标记块状样地的地点及在林分中的相对位置，记录 GPS 定位坐标，并将块状样地设置的大小、形状在块状样地调查表上按比例绘制略图。

(5) 设置固定块状样地时，需在四角埋设永久性标桩。埋桩时，写字面要朝向块状样地的角线方向。

标桩规格：用针叶树剥皮制作，粗 20cm，长 1.5m，埋入地下 70cm。流水帽砍成圆锥形，流水帽下隔 5cm 以下砍出写字面，长 25cm，宽 15cm。用铅油（或红漆）写出块状样地号、块状样地面积及设年月日。

(6) 许多林分具有不规则的边界，因此样带的末端要形成方形，以便按矩形来计算带的面积。

#### 块状样地调查内容

##### (1) 每木检尺

在块状样地内分别树种、活立木、枯立木、倒木，测定每株树木的胸径。测定者从块状样地的一端开始，由坡上方沿着等高线按“S”形路线向坡下方进行检尺。使用围尺（直径卷尺）测量树木胸径，精度为 0.1cm。

测径时应注意：

- 1) 必须将围尺拉紧平围树干后才能读数，应使围尺围在垂直于树干的平面上，防止倾斜，否则易产生偏大的误差。
- 2) 测胸径时必须测定距地面 1.3m 处的直径，在坡地量测坡上 1.3m 处直径。
- 3) 在 1.3m 以下分叉的树应视为两株树，分别检尺。
- 4) 一般以 5cm 作为起测胸径。
- 5) 测定位于块状样地境界上的树木时，本着北要南不要，取东舍西的原则。
- 6) 凡测过的树木，应用粉笔在树上向前进的方向作出记号，以免重测或漏测。

##### (2) 树高测定

使用勃鲁莱测高器测树高，精确到 0.5m。其刻度盘上标有不同水平距离(15m, 20m, 30m, 40m)时所对应的不同仰角和俯角的树高读数。测高时，首先选测某一水平距离，然后，分别以下情况测算树高：

在平地上测高：测者立于测点，按下仪器按钮，使指针自由下垂，用瞄准器对准树梢后，即按下制动钮，固定指针，在度盘上读出对应于所选测水平距离的数据 h，再加上测者眼高 l，即为全树高 H。

在坡地测高：先观测树梢，求得  $h_1$ ，再观测树基，求得  $h_2$ ，若两次观测角度正负号相异时(仰角为正，俯角为负)，则树高为二者绝对值之和。两次观测角度正负号相同，则树木全高(H)为二者绝对值之差。

测高时应注意：

- 1) 测高时一定要两次读数之和(差)。
- 2) 测高的水平距离应尽量与树高相同。在坡地测高时，应根据坡度将水平距改算为斜距。
- 3) 对生长歪斜的树木进行测高时，应该测定其实际生长的树高，而不是其垂直高度。

另外，有时在林下视野较差，不能使用勃鲁莱测高器测定树高，需要调查人员对树高进行估测。但在此之前，要对调查人员估测树高的能力进行训练和考察：选择视野较好，可以实测树高的树木，先进行估测，然后实测，比较二者的差距，反复进行多次，降低估测误差。进行估测时，选择周围合适的参照物（如使用鱼竿，或者以邻近的可以测出树高的树木作为参照物），使误差尽量控制在 0.5m 以内；估测时，不能站在坡下；也可由至少两人同时估测树高，然后取平均值。

### (3) 树冠测定

树冠的测定要测枝下高 ( $H_b$ ) 和冠幅 ( $C_w$ )。枝下高用测高仪进行测量，精确到 0.5m。冠幅用皮尺测量，按东西、南北两个方向测量，精确到 0.1m。

### (4) 林木分级

测定林木分级时，采用克拉夫特的生长分级法：

I 级——优势木，树高和直径最大，树冠很大，且伸出一一般林冠之上；

II 级——亚优势木，树高略次于 I 级，树冠向四周发育，在大小上也仅次于 I 级木；

III 级——中等木，生长尚好，但树高和直径较前两级林木为差，树冠较窄，位于林冠的中层。

IV 级——被压木，树高和直径生长都非常落后，树冠受挤压，通常都是小径木。其中又可分为两个亚级：

IVa 级：树冠狭窄，侧方被压，但枝条在主干上分布均匀，树冠能伸入林冠层中；

IVb 级：树冠偏生，只有树冠的顶部才伸入林冠层，侧方和上方均受压制。

V 级——濒死木，完全位于林冠下层，生长极落后，树冠稀疏而不规则。又可分为两个亚级：

Va 级：生长极落后的濒死木；

Vb 级：枯死木。

### (5) 年龄测定

针叶树的幼树可以通过数轮生枝来确定年龄，但应加上生长达最基部一个轮生枝高度所需的年数。对块状样地中优势树种接近平均直径的树木和优势树在胸径处分别打生长锥，测定林分胸径处的平均年龄和优势树胸径处的年龄。

外业调查时采用生长锥钻取木芯来获得年轮数据，所得年龄为胸高年龄，外业记录统一标记为胸高年龄。另外为便于数据使用，必须调查树木实际生物学年龄，至少每个树种都应记录其到达胸高时的年龄，方法包括：

- 1) 寻找针叶树幼树或下部枝条未脱落的小树，查数其从根部至胸高处的轮生枝，从而确定到达胸高时的年龄。
- 2) 咨询当地管护人员和居民，确定前一次主伐、栽植、抚育间伐的时间等信息。
- 3) 选取坡度较大的地方，站在坡下于接近树木基部处钻取木芯，查数年轮数。直接得到树木生物学年龄。

另外还可以通过查阅相关资料文献（如生长过程表、解析木资料等），来折算生物年龄与胸高年龄间的关系。

### (6) 地形地势的测定

分别测定块状样地的坡位（上、中、下坡及谷地）、坡向、坡度和海拔。坡向记录方向角。测定坡度时，如果坡度变化较大，则应向上和向下分别测定坡度取平均值。

### (7) 样木定位

固定样地每株树编号以后，还应进行样木定位。

样木方位角和水平距反映样木在样地范围内的位置，是样木定位测量的主要因子。样木方位角和水平距的测定，原则上要求以样地中心点为基点，采用罗盘仪和皮尺进行测量。对于地形复杂，不便在样地中心点定位的样木，可以选择四个角点中的一个为基点进行定位，但需要在记录表上记录清楚。方位角以度为单位，水平距离以米为单位，均保留一位小数（对于圆形样地和角规样地，水平距离要求保留两位小数）。

为了直观反映样木在样地中的位置，应该根据每株样木的方位角和水平距（或其他定位测量数据）绘制样木位置分布图。对于样地内有标识作用的明显地物和地类分界线，也应标识在样木位置分布图上，方便下期样木复位。对于每一个样木，应当用罗盘仪测出样木相对于固定样地主要中心的方位角，用测距工具测出样木距固定样地的水平距。测量方位角时，把罗盘仪架在固定样地中心，并水平放置，测量顺序为东北—东南—西南—西北象限。测距离时，应当在测完单个样木的方位角时，测量此样木的水平距。由于坡度太陡，不能一次完成水平测距时，应当分段测量水平距。

实际调查中，根据具体情况，也可以用测绳将样地均分成 4 块（或更多）采用 x 轴与 y 轴的平面坐标形式记录样木位置。

### (8) 其他

- 1) 块状样地的两对角线上树冠覆盖的总长度与两对角线的总长之比，作为郁闭度的估测值。
- 2) 更新树种应为能够生长成为大乔木的幼树。
- 3) 如果有不认识的灌木（或地被物）分布较多，则应采集植物标本带回鉴定并补充记录。
- 4) 块状样地只进行乔木调查时，3 人每组即可。若同时进行灌草、更新、土壤、生物量调查时，需要根据具体数据的采集要求，每组增加人手。
- 5) 以上分工应根据实地情况与工作量进行调整。在进行测量时，树高、冠幅等，往往需要 2-3 人相互配合进行，在地形陡峭地区进行调查时，即便是胸径测量，也需要配合进行。

### 标准地的基本要求

在林分内，按照平均状态的要求所确定的能够充分代表林分总体特征平均水平的地块，称作典型样地，简称标准地。这种典型选样的调查方法，虽然无法表达出调查结果的精度与误差，但是，只要认真选定标准地进行实测，其调查结果仍然是可靠的，完全满足营林工作的需要。标准地的调查内容与前面所述块状样地调查相同，但在设置时与抽样样地不同。

(1) 对林分进行全面观察，掌握林分的特点，再结合地形条件和视野状况，选择具有代表性的地段设置块状样地。并且不能跨越林分。

(2) 块状样地设在混交林中时，其树种、林分密度分布应均匀。

(3) 块状样地不能跨越河流、道路或伐开的调查线，且应远离林缘（至少应距林缘为 1 倍林分平均高的距离）。

### 标准地的形状和面积

标准地的形状一般为矩形，有时因地形变化也可为多边形。

标准地面积应依据调查目的、林分状况如林龄及林分密度等因素而定。一般面积不宜过小，否则难以保证标准地具有充分的代表性，依此调查结果推算林分总体时会产生很大的偏差；但是标准地面积过大，相应的工作量和成本也增大。我国林业部（1986）林业专业调查主要规定中规定：天然林标准地面积：一般在寒温带、温带林区采用 500-1000m<sup>2</sup>；亚热带、热带林区采用 1000-5000m<sup>2</sup>。此外，也可用林木株数控制标准地面积，一般采用主林层林木株数 200 株左右。人工林和幼林标准地面积可以酌情减小。

在实际调查工作中，为了确定标准地的面积，可以预先选定 400m<sup>2</sup> 的小样方，查数林木株数，据以推算应设置的标准地的面积。

#### 临时样地调查

第一司尺员：①操作森林罗盘仪确定边界方向。②按次序测量块状样地内每株树的胸径、冠幅。

第二司尺员：①根据罗盘仪，手持测绳，用砍刀割灌，穿越林分确定边界。②依次量测块状样地内每株树的树高与枝下高。

记录员：①携带相关文件资料，记录各测量数值填入表格。②在记录观测点坐标时分别记录 GPS 坐标与地图坐标。③钻取生长锥以得到林分年龄。④记录林下灌草及更新状况。

实际操作时，由于地形、视野和准确度等方面的要求，可以借鉴小块状样地确定边界的方法，不计算闭合差。

#### 固定样地调查

前三人组织分工与临时块状样地调查相同，只需增加第三司尺员。

第三司尺员：①利用斧子或砍刀制作永久块状样地标桩。②用 30m 测绳连接块状样地边界中点，确定块状样地树木坐标。③用砍刀刮去老化树皮，用油漆对树木编号。

### 3.4 带状样地调查

带状样地分工与临时块状样地调查相同，可看作是由小块状样地边界相互拼接而成的大样地。

#### 3.4.1 基线设置

带状抽样中，抽样单元是按预定的间距及统一的宽度来布设的连续样带，链宽一般为 20m，对于面积较小的密林使用 10m，面积大的疏散林分使用 40m，带间距由抽样强度和扩大系数求出。确定链宽和链间距后，用 100 米（小班较大选用 200 米）测绳沿平行于等高线的方向牵拉测绳，形成一条基线。根据链宽和链间距确定第一条带的带边界起始点，用森林罗盘仪确定第一条带的边界终止点（如有坡度需进行改正）。

#### 3.4.2 起始边确定（从坡底向山脊）

确定带的边界起始点后，用森林罗盘仪进行带下边界方位角的确定（基线的方位角加减 90 度），然后沿着森林罗盘仪的方向牵拉 100 米测绳，根据样段长度进行坡度改正后定点，到山脊后不满一个样段长度的量出实际距离后进行坡度改正并作记录。

#### 3.4.3 终止边确定（从山脊向坡底）

起始边界确定后，到山脊用森林罗盘仪进行样带上边界的确定（方位角为基线的方位角）。终止边的确定由一人用手持罗盘仪（方位角为基线方位角减加 90 度），在上边界点的位置由山脊向坡地牵拉 100 米测绳，直到第一条链的终止点，终止点的位置上可以站一个人进行引导。

## 四、专项调查

灌草、土壤、间伐等专项调查时，应在块状样地基础上相应补充调查人员。

### 4.1 土壤因子调查

土壤容重指自然结构状况下单位体积土壤的烘干重量，通常以 g/cm<sup>3</sup> 表示。一般用环刀法测定。

土壤总孔隙度是指土壤中的总孔隙量占土壤总体积的百分率。其包括毛管孔隙和非毛管孔隙。

土壤最大持水量（饱和持水量）是指土壤中的全部孔隙都充满水分时的土壤含水量。

土壤自然含水量（质量%）是指单位体积的自然土壤中的水分含量与同体积的干土质量之比。

#### 4.1.1 土壤剖面及取样

（1）在标准地旁边挖一土壤剖面，深及母质层（C 层），土层厚者挖 1.0m 深。

记录土壤类型、发生层次（A、AB、B、C）、厚度、质地、石砾含量（石砾量占该土层体积的%）等项目，填写表 8 土壤剖面调查表。

（2）在土层 0~10cm、10~20cm、20~40cm、40~60cm、60~80cm、80~100cm 的中间分别用环刀采取土样（保证环刀内的土壤结构不受破坏），用锋利的土壤刀削平环刀表面，盖好用天平测其鲜重（供计算容重和孔隙度用）；各层另取少量样品（10-40 克）放入铝盒（供测含水量用），在现地用天平测其鲜重。

（3）在野外估测土壤质地的方法：取少量土壤，加水湿润，然后揉搓，搓成细条并弯成直径 2.5-3 厘米大小的土环，根据以下所表现的性质确定质地。

砂土：不能搓成细条。

砂壤土：只能搓成细条。

轻壤土：能搓成 3mm 直径的条，但易断裂。

中壤土：能搓成完整的细条，但弯曲时易断裂。

重壤土：能搓成完整细条，弯成圆圈时易断裂。

粘土：能搓成完整细条，并能弯成圆圈。

#### 4.1.2 土壤水分及物理性质的测定

（1）将装有湿土的环刀揭去上下底盖，仅留一填有滤纸的有网眼的底盖，放入平底方形塑料盆（盆高 15 cm）中，注入并保持盆中水层的高度至环刀上沿为止，使其吸水达 12 小时（质地粘重的可放时间长些），盖上上、下底盖，水平取出，立即称重（A），即可算出最大持水量（%、毫米）。

（2）将上述称重量（A）后的环刀去掉底盖，将其放置在铺有干沙的平底方形塑料盆中达 2 小时，此时环刀土壤中的非毛细管水分已全部流出，但环刀中的毛细管中仍充满水分，盖上底盖，立即称重（B），即可算出毛管持水量（%、毫米），进而推算出非毛管持水量（容积，%）。

（3）将铝盒内土壤样品，放入 105℃ 经 8h 烘干后，称其干重，求算水分换算系数。

#### 4.1.3 土壤调查计算

（1）水分换算系数（K1）=烘干土样重 / 湿土样重

环刀内湿土重 \* K1 = 环刀内烘干土重

土壤含水量（质量 %）= [（环刀内湿土重 - 环刀内干土重） / 环刀内干土重] \* 100 %

土壤容重（g/cm<sup>3</sup>）= 环刀内烘干土重 / 环刀容积

土壤含水量（容积 %）= 土壤含水量（质量 %）\* 土壤容重（g/cm<sup>3</sup>）

土壤自然贮水量(mm)= 0.1 \* 土壤含水量（容积 %）\* 土层厚度(cm)

（2）最大持水量(%)=[(浸润 12h 后环刀内湿土重(A)-环刀内干土重) / 环刀内干土重]\*100%

最大持水量（mm）= 0.1 \* 土层厚度(cm) \* 土壤容重（g/cm<sup>3</sup>） \* 最大持水量(%)

（3）毛管持水量(%)=[(在干沙上搁置 2 小时后环刀内湿土重(B)-环刀内干土重) / 环刀内干土重] \* 100%

毛管持水量(mm)=0.1\*土层厚度(cm)\*土壤容重（g/cm<sup>3</sup>）\*毛管持水量(%)

（4）毛管孔隙度(%)=毛管持水量(%) \* 土壤容重（g/cm<sup>3</sup>）

（5）非毛管孔隙度(%)=土壤总孔隙度（%）- 毛管孔隙度(%)

注：土壤总孔隙度（%）可以根据土壤容重的测定结果查土壤容积与总孔隙度关系表获得。

## 4.2 灌草因子调查

### 4.2.1 灌草样地选取

根据当地的主要立地—植被类型，选择典型地段，对灌丛植被、草坡进行样方调查。

立地类型划分可以优先考虑海拔、坡向、坡位或土层厚度等主要立地因子。

分不同的立地—植被类型设置样地或样方，灌丛样方面积为 5m × 5m，草坡样方面积 1m × 1m。

每种类型选设样方 3-5 个。

对于有明显时间影响的植被类型，可以分年龄阶段布设样地或样方。

另外，灌丛样方中应该再选取有代表性的 20cm×20cm 枯枝落物样方 1-3 个。

#### 4.2.2 灌草基本情况

调查样地位置（林场、林班、小班）、地理座标（记录 GPS 读数）、立地因子（海拔、坡向、坡度、坡位、土壤厚度等）、灌丛和草坡的土地利用历史和现利用方式，年龄，分布，平均高度，丛径，地径，覆盖度等。填写灌丛草坡样地封面。

#### 4.2.3 灌草生物多样性

分别记录 1m×1m、5m×5m 样方内所有（或主要）草本植物和灌木种类、数量、平均高度、盖度以及草本总盖度，填草本及灌木样方调查记录表。

#### 4.2.4 生物量调查

分别采集样方外 1m×1m 和 5m×5m 临时样方内的草本和灌木各若干株用于生物量的计算。其中，草本分离地上部分和地下部分，灌木分离叶、枝、须根（直径≤2mm）、细根（直径为 2~10mm）和粗根（直径>10mm），用密封袋密封，带回实验室。

用分析天平称各部分的鲜重，60℃烘干后测算含水率以换算标准地内的灌、草总生物量干重。

填灌草生物量记录表，并建立地上-地下等各部分间的生物量关系。

#### 4.3 枯落物调查

在 5 个 20cm×20cm 的样方内，测定枯枝落物层的厚度，区分出未分解层、半分解层和已分解层，精确到 0.1cm。

并按照分层获取一些样品，装入塑料带内带回实验室，称取鲜重，60℃烘干称重以后称取干重，称量到 0.1 克，填写枯落物层调查记录表。

#### 4.4 更新调查

在固定样地、临时样地、间伐样地、带状样地和角规样地内记载所有乔木种类、数量、林龄，每株乔木的高度、胸径、冠幅、枝下高等各项指标，目测郁闭度。对直径小于起测胸径（5 cm）的所有幼苗幼树，分别记录其树种、起源（人工/天然、实生/萌生）、树高和年龄等基本信息。其主要样地布置方法及测量指标如下：

在临时样地、固定样地、间伐样地和带状样地（分样段）四周及中心分别布置 5 个 2m×2m 的样方进行每木检尺，调查样方内所有幼苗、幼树。在角规样地中以半径为 2.07m 的圆内作为更新幼苗、幼树每木检尺，以半径为 3.99m 的圆内调查幼树生长（幼苗：h<1.3m，幼树：h≥1.3m，DBH<5 cm）。主要调查内容如下：

（1）每木检尺：调查样方内所有幼苗幼树的树高、胸径、地径和冠幅；针叶树种通过数轮生枝来确定年龄，依次记录年龄及相应的高度；高度大于 1.3m 的幼树记录其胸径。

（2）记录乔木层的林冠高度、幼树的冠长、每个样方内的枯落物厚度以及乔木层树冠在样方内的投影面积比例（目测）。

（3）对样方内的每棵幼苗幼树进行挂牌，调查枯损率。

（4）幼树树干解析（DBH<5 cm）：对 DBH<5 cm 的幼树进行采伐，在每个样方内对不同树种分别挑选一株健康的、无病害的幼树进行采伐，截取圆盘（胸径处必须截取圆盘），进行树高生长分析。

（5）幼树生长锥数据获取：①针叶树和锐齿栎胸径为 5-10cm。②红桦胸径为 5-15cm。胸径在以上范围内的树种分别在胸径处打生长锥，并在记录表上对号做标记，记录该树种的树高、胸径、冠幅，枝下高。

#### 4.5 间伐样地调查

##### 4.5.1 数据需求

（1）获得样地内不同径阶树木 5 年内胸径生长量；

各个径阶枯损株数；

以及 5 年内幼树进界株数；  
经纬坐标、林下灌木、草本和土壤的详细信息。

#### 4.5.2 样木定位和编号方法

固定样地需要对每株树进行样木定位和编号。

调查时，应测量并记录每株树的胸径、树高、东西冠幅、南北冠幅和年龄。

如果为异龄混交林，年龄数据较难获得，有条件的话，可以分别选取不同树种的标准木钻取木芯测量。

描述立地条件需要记录坡度（数值）、坡向（方位角）、海拔和土壤类型。

如果调查区域可划分为不同林型的话，还应该记录样地林分所属林型。

对于长期和固定样地，进入起测径阶的样木都要以样地为单元进行编号，并长期保持不变，对于新设样地，检尺样木从 1 开始编号，要求做到不重不漏。

对于复测样地，复位为样木的编号保持不变，样木被采伐或枯死后，原有编号原则上不再使用，新测样木接原来前期的最大编号续编。

### 五、调查组织

#### 5.1 调查人员

- (1) 参与项目的科研人员；
- (2) 在实验室攻读学位的研究生；
- (3) 协助实验室外业工作的科研助理。

#### 5.2 经费预算

科目	备注
仪器设备费	实验室配备手持 GPS、生长锥、对讲机、手持罗盘仪、森林罗盘仪、角规、测高器等设备。其他仪器设备可从学校实验管理中心借用。
交通费	用于往返学校和调查地区之间的交通费用。
租车费	野外调查有时距离较远，难以步行到达或为提高外业调查效率乘车时，可租用当地车辆。
劳务费	用于雇佣观测和调查人员的劳务性费用。每工作日基本津贴 50 元。
伙食住宿费	用于野外调查时的住宿及伙食。
保险费	对进行外业工作的人员设立短期健康保险和意外伤害保险，以减少因意外事故或特定事件的出现所导致的损失。

#### 5.3 外业时间

(1) 外业调查一般安排在夏季（6-8 月）进行。但需注意 7、8 月份处于雨季，许多时候外业工作会因为下雨而无法进行。

(2) 秋季（9-11 月）亦可利用林业综合实习时间安排外业工作。秋季外业白昼短，气温低，需做好防寒准备。同时注意避开山沟雨季涨水。

(3) 春季和冬季主要是外业设计的准备工作和外业资料整理的内业工作。

### 六、数据整理

#### 6.1 外业记录表

已记录和未记录的外业记录表格，应该分开保存。每天晚上要将当天外业记录过的表格取出，按照观测点顺序检查整理好，装入专门的文件袋中保存。

#### 6.2 生长锥样本

打生长锥时，如果取出的木芯完好，则在东西和南北方向各打一个，用纸包起来粘好，放在盒子中妥善保存；如果木芯损坏，则根据年轮数出年龄，木芯可不保存。

### 6.3 灌草标本

外业调查记录时如果遇到一些不能识别的灌木或地被物，应该采集植物标本（尽量采集带花带果的标本），装在塑料袋内带回，回去后查阅工具书鉴定，并记录其识别特征，确保再次遇到时能够准确识别。如果自己难以鉴定，则应将标本用标本夹压好（注意定期换纸），找专业人员鉴定。

### 6.4 数据计算

#### 6.4.1 块状样地

##### （1）林分各树种的平均直径

平均直径是林分平均断面积所对应的直径，是林木胸径平方的平均数：

$$D_{\bar{g}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n D_i^2}{N}}$$

##### （2）林分各树种的平均高

根据每木检尺测得的胸径和树高，绘制树高一胸径曲线，以林分各树种的平均直径在树高曲线上查出相应的树高为林分各树种的平均高。

##### （3）优势木的平均高

在每木检尺数据中，选取 3—5 株最高或胸径最大的立木取其算术平均值。

##### （4）冠幅及树冠竞争因子（CCF）

以每棵树东西和南北方向的冠幅取算术平均值。

林分中所有树木可能拥有的潜在最大树冠面积之和与林地面积的比值称为树冠竞争因子（CCF）。具体确定方法为：

① 利用自由树的冠幅 CW 与胸径 D 建立线性回归方程，即

$$CW = a + b \cdot D$$

② 计算树木的潜在最大树冠面积 MCA：对于一株胸径为  $D_i$  的自由树其最大树冠面积  $MCA_i$  为  $(MCA)_i = \pi \cdot (a + b \cdot D)^2 / 4$

③ 将单位面积林分中所有树木的  $MCA_i$  相加，即为该林分的 CCF。

一般我们将 CCF 作为林分密度的指标之一，对于单木而言描述竞争的指标有很多，包括相对直径、相对断面积、竞争木距离等，应根据具体数据状况选择。

##### （5）各树种蓄积量

根据块状样地计算蓄积量的方法有很多种，结合我们块状样地调查的数据，采用二元材积表法。

① 首先将树木的胸径按照径阶整化：平均直径 6—12cm，采用 2cm 为一径阶；平均直径在 12cm 以上，以 4cm 为一径阶。

② 在树高曲线上查出各径阶的树高。

③ 根据各径阶树高及直径查该树种的二元材积表，得各径阶单株材积。

④ 根据每木检尺查出各径阶株数，乘以单株木材积，即得各径阶材积。总和后，即得块状样地蓄积量（M）。

$$M = n_1 v_1 + n_2 v_2 + \dots + n_x v_x$$

式中： $n_1, n_2, \dots, n_n$ ——各径阶株数；

$v_1, v_2, \dots, v_n$ ——各径阶单株材积。

⑤ 根据块状样地的面积，即可将块状样地蓄积量换算为林分中该树种的每公顷蓄积量。

##### （6）树种组成

按各树种蓄积量占总蓄积量的成数计算，并用十分数表示。在组成式中，各树种的顺序按组成系数大小依次排列；如果某一树种的蓄积量不足林分总蓄积的 5%，但大于 2%时，则在组成式中用“+”号表示；若某一树种的蓄积少于林分总蓄积的 2%时，则在组成式中用“-”号表示。

#### 6.4.2 角规测树

##### (1) 坡度改正

用杆式角规测定断面积时，还应测量该角规点计数范围内林地的坡度  $\theta$ 。若  $\theta > 5^\circ$  时，绕测计数结果应进行坡度改正，即

$$Z = Z_{\theta} \cdot \sec\theta$$

式中： $Z_{\theta}$ ——在坡地上绕测计数值；

$Z$ ——在水平地面上绕测计数值。

##### (2) 计算每公顷断面积

$$G = F \cdot Z$$

或

$$G = F \cdot Z_{\theta} \cdot \sec\theta \quad (\text{在坡地上时})$$

##### (3) 计算林分蓄积量

根据每公顷断面积和各树种的平均高，可以计算出林分各树种的每公顷蓄积量。利用平均实验形数法计算：

$$M = G \cdot (\bar{H} + 3) \cdot f_a$$

式中： $f_a$ ——平均实验形数，可查表获得。

#### 6.5 录入汇总

在内业数据计算时，将外业记录表和内业计算结果誊抄到专门的记录表格内，并将数据录入制好的电子表格中保存。纸质版的表格按林班和小班的顺序整理好，分别林班装入不同的文件袋中，并用记号笔在袋上作好年份和林班标记，放入资料柜中保存。

另外对于 GPS 中所存储的数据，需要在外业工作结束后统一导入计算机中保存。GPS 型号 Garmin GPSmap 60CSx 和 Garmin GPSmap 62sc,可在佳明官方网站下载 Trip&Waypoint Manager 软件，利用数据线将手持 GPS 中存储的航点、航线、航迹数据导出（航点为主）。

## 第五讲 林分固定样地

### 第一节 固定样地种类

### 第二节 固定样地作用

### 第三节 矩形样地与圆形样地

### 第四节 大样地

#### 固定样地案例

##### Permanent sampling plot

森林调查最理想数据一般来源于固定样地。固定样地需要对每株树进行样木定位和编号。调查时，测量并记录每株树的胸径、树高、第一枝下高、东西冠幅、南北冠幅和年龄。对于长期复位监测的固定样地，进入起测径阶的样木均以样地为单元进行编号，并长期保持不变。对于新设样地，检尺样木从 1 开始编号，要求做到不重不漏，对于复测样地，复位为样木的编号保持不变，样木被采伐或枯死后，原有编号原则上不再使用，新测样木接原来前期的最大编号续编。这种方法可以在下期调查时（如 5 年之后），获得准确的单木的生长、枯损和更新的数据。

描述立地条件需要记录坡度（数值）、坡向（方位角）、海拔和土壤类型。如果调查区域可划分为不同林型的话，还应该记录样地林分所属林型。在实际调查时，一般还需要记录经纬坐标、林下灌木、草本和土壤的详细信息。如果为异龄混交林，年龄数据较难获得，有条件的话，可以分别选取不同树种的标准木钻取木芯测量。

#### C1.1 调查目的

- （1）定期调查林分蓄积、结构和组成变化，获取森林动态发展的经验数据。
- （2）分期采集森林土壤水文和碳氮比数据，研究水分、养分与森林演替机制。
- （3）长期记录树木蒸腾和光合作用观测数据，分析林木生长机理。

#### C1.2 调查背景

森林调查设计首先要准备调查背景。需查阅文献和资料，获取调查地区的基本概况，以及林分的基本概况。调查地区概况包括该调查区域的地理位置、温度、降水、日照时间、湿度、土壤等因子的概况。林分概况则包括林地面积、林班小班划分、林分种植和采伐的历史，以往对于林分调查的相关结果等。为避免重复性工作，还应尽可能收集森林的历史数据。

#### C1.3 数据需求

调查前应明确所需要的建模数据，从而在调查设计和实施过程中，避免遗漏关键性的调查因子。模型各模块数据要求如下：

模块	数据需求	数据获取方法
胸径生长模型	单木五年间带皮胸径生长量 (cm) 1. 单木胸径 (cm)。 2. 胸径大于 5cm 的树木的总林分胸高断面积 (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )。 3. 比对象木胸径大的胸高断面积和 (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )。 4. 有效描述立地条件的因子, 如林型、土壤、地形等。 5. 树冠竞争 (如 CCF, CR 等)	尽管临时样地调查可以获取包括胸径、树高、冠幅、林型 (灌草)、土壤、地形 (坡度、坡向、海拔) 等数据, 但是完整的单木模型系统对于数据的要求十分严格, 部分必需的数据通过临时样地调查方法往往难以获得, 尤其是以下四项数据: 1. 单木五年间带皮胸径生长量 (cm); 2. 单木五年间存活概率; 3. 进界株数 (株/每公顷); 4. 五年生长后的进界树的平均胸径。 因此, 为构建单木生长模型, 需要建立样木定位的固定样地, 并进行复测。调查样地内每棵树的胸径、树高、冠幅, 并记录样地内 5 年间的枯损木, 幼树进界株数和进界后平均胸径。
树高模型	单木树高 (m) 1. 异龄林: 胸径 (cm); 同龄林: 年龄 (year)。 2. 有效描述立地条件的因子, 如林型、土壤、地形等。	
存活模型 (枯损模型)	单木五年间存活的概率 1. 单木胸径 (cm)。 2. 胸径大于 5cm 的树木的总林分胸高断面积 (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )。 3. 比对象木胸径大的胸高断面积和 (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )。	
进界模型	进界株数 (株/每公顷) 1. 胸径大于 5cm 的树木的总林分胸高断面积 (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )。 2. 各树种林分密度 (株/每公顷)。	
进界胸径生长模型	五年生长后的进界树的平均胸径 1. 胸径大于 5cm 的树木的总林分胸高断面积 (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> ) 2. 有效描述立地条件的因子, 如林型、土壤、地形等。	

注: 土壤及腐殖质厚度、灌草调查、所属林型等应列入调查项目。进界树的确认可根据解析木或幼树生长量计算判断。

## 调查图纸

### (1) 林场基本图

该图用 A3 纸打印，并对林班号、小班号、小班优势树种进行标注，是实地确定小班位置最主要的工具，每个调查小组复印 2 张。

### (2) 等高线地形图

该图用 A3 纸张打印，在对于地形和标志性地物的描述上，比林场基本图更准确详细，每个调查小组复印 1 张。

### (3) 以卫星图片作为底板的林班基本图

利用 Arcgis 软件将卫星图片作为底板，将整个林场基本图分为林班，注明林班号、小班号、优势树种，用 A4 纸彩印作为底稿，每小组复印一份。在野外调查时，需利用该图查出观测点坐标，并在图中标注出观测点的位置。

### (4) 3D 地形图

利用 google earth 软件查询林场的卫星 3D 图，然后将林班和小班的 arcgis 文件导入 google earth 中，即可得到带有小班标注的 3D 地形图。

## 仪器设备

两种调查方法所需要的工具基本相同：

	角规调查	临时样地	固定样地	带状样地	总数
名称	数量	数量	数量	数量	
罗盘仪及支架		1	1	1	3
测绳		100m	100m+50m*2	100m*2+50*2	
角规	1				1
直径卷尺	2	2	2	2	8
布鲁莱斯测高器	1	1	1	1	4
皮尺	1	1	1	1	4
生长锥	1	1	1	1	4
罗盘仪	1	1	1	1	4
海拔仪（GPS 可替代）	1	1	1	1	4
GPS	1	1	1	1	4
砍刀	1	1	1 砍刀+1 斧子	1	5
计算器	1	1	1	1	4
游标卡尺	1	1	1		3
对讲机	2	2	2	2	8
油漆及毛刷			1		
粉笔（盒）	1	1	1	1	4
生长锥				1	1

其他还需要准备存放木芯的纸、双面胶和盒子、临时存放标本的塑料袋、配套 GPS 的充电电池、固定样地标准坐标的网格纸等。油漆在使用时最好可以和汽油和酒精进行稀释，避免油漆过于黏稠。

# 第六讲 林分静态结构

## 第一节 林分直径结构

2D horizontal, competition of light

## 第二节 林分树高结构

2D vertical, competition of light

## 第三节 林分空间结构

3D, competition of N? H<sub>2</sub>O?

## 第四节 三参数 Weibull 分布

概率密度函数

Q6. 人工林与天然林的林分结构有何区别？如何计算混交林的林分结构？如果林分有间伐或病虫害干扰？

混交 vs. 纯林

动态 vs. 静态

干扰, 生物 vs. 非生物

林分直径是最直观也是最重要的林分调查因子之一，它不仅直接影响林木的树冠和干形也影响林木的树高生长、材积的增加。知道林分的直径结构是预测林分直径结构和评估一个林分经济、生态和社会效益的依据，也是编制林分出材量表、生长过程表等林业用表的基础。知道林分内的直径结构还可为制定一个林分的森林经营方案和经营措施提供理论支撑 (孟宪宇 2009)。林分内的各个树种的胸径按径阶的分布情况，称为林分的直径结构(stand diameter structure)，也称为林分的直径分布(stand diameter distribution) (孟宪宇 2006)。林分的直径分布情况也与林分内的蓄积量以及林分的各种功能如水源涵养、木材产量等有密切的关系。最优林分结构是指在一个轮伐期内，某林分能够在单位时间内林分的蓄积生长量能达到最大并且可以实现永续利用，具有稳定的树种组成的林分结构(Adams 1974)。最优的林分结构能够充分发挥森林的各种功能(张建国, 2004)，是能够持续并且稳定地发挥一个森林的社会、生态和经济三大效益的动态结构，而不是简单的以投入和收获之间的差值来衡量的(Pukkala 2010)。如果仅追求的是林分蓄积生长量最大这一目标，同龄林的林分蓄积生长量能达到的最大值要比异龄林能达到的最大值要大 (Tahvonen 2010)，但是同龄林的林分结构具有不可持续性，一旦遭到破坏后不易恢复，更会带来的是巨大的损失(Hanewinkel 2010)，而且在同龄林中小径级的林木的生长周期也长、经济价值很低，还容易发生危害大径级林木的情况，如枯死、风倒等灾害(Hanewinkel 1998)。所以异龄林的林分直径结构的研究具有重要的经济、生态以及社会价值。

从 20 世纪 60 年代以来，对林分直径分布的研究，从研究过程来讲，主要经历了静态模拟和动态预测两个过程(孟宪宇 1991)。在 20 世纪 70 年代前是静态拟合阶段，最初应用较多的是相对直径法，但其由于拟合精度过低，而且也不能对直径的动态分布给出合理的预测，所以它逐渐被概率密度函数法所取代 (张建国 2004)。从 20 世纪 60 年代至今，概率密度法预测直径分布得到了广泛的使用，概率密度法主要用概率密度函数来拟合直径分布，概率密度函数如主要包括： $\beta$  分布(Clutter and Bennett 1965)、正态分布、

Weibull 分布(Bailey and Dell 1973)、对数正态分布 (Biss and Reinke 1964)、负指数分布 (Meyer 1943)、限定性函数 (Reinke; 陆元昌)、Logistic 分布 (Verhulst; 惠刚盈 1995)、倒 J 型对数分布 (陆元昌 2005)、SB 分布(Bailey and Dell 1973; Hafley and Schreuder 1990)、 $r$  分布(Nelson 1964)、Compertz 分布 (Benjamin Gompertz 1825; 吴承祯 1998)、Richards 分布 (Richards 1959) 等描述林分直径分布结构。表 1-1 列出了常见的直径结构模型方程及其说明。

正态分布函数、Weibull 分布函数和  $\beta$  分布函数在直径分布中应用最多，其中正态分布函数主要应用于拟合同龄林的林分直径分布。其次应用较多的是对数正态分布函数、负指数分布函数、倒 J 型对数分布函数和限定性分布函数，其中研究异龄林直径分布的主要有负指数分布函数和倒 J 型对数分布函数。应用较少的是 Logistic 分布函数和 SB 分布函数。应用最少的为  $r$  分布函数、Compertz 函数和 Richards 函数。近年来，Weibull 分布用的最普遍，这主要是因为 Weibull 分布的参数求解方法比较简单，并且在应用 Weibull 分布求得参数值后，可以对各个参数的意义做出直观的解释，而且其形式灵活多样，可以拟合不同偏斜度和形状的直径分布。Maltamo(1997)用 Weibull 分布函数拟合挪威云杉和欧洲赤松混交林的直径分布，无论是分别对树种还是整个样地都取得了比较好的拟合效果，但当用整个林分的分布模型预测每个树种的分布时，过高的估计小径阶的株数，而对大径阶的株数过低的估计了。Zhang 等(2001)对两个 Weibull 分布进行混合，结果表明这种方法对呈现双峰的旋转“S”型异龄林分的直径分布有较好的拟合结果。亢新刚等 (2003) 对长白山金沟岭林场的云杉冷杉针阔混交林直径结构进行了研究，表明 Weibull 分布与负指数分布都可以很好拟合针阔混交林的直径分布。亢新刚(2003)等在金沟岭林场利用过伐林区检查法，对云杉和冷杉的针阔混交林利用 Weibull 分布函数和负指数分布函数拟合了该类型林分的直径分布，分析了连续 14 年来检查法经营针阔混交林林分的直径结构。Sarkkola (2004) 用 Weibull 分布分析了欧洲赤松(*pinus sylvestris*)的林分直径结构，描述了该林分直径结构在 29-66 年生的林分中变化情况。Palahi 等(2006)采用截断的二参数 Weibull 方程对西班牙东北部的 Catalonia 地区的三个主要树种欧洲赤松、欧洲黑松和地中海白松分别建立了直径分布的参数预估模型，并比较了回归和优化两种方法估计参数模型系数的过程，发现优化方法得到了比回归方法更好的结果。

Gul 等 (2005) 用 Sterba' s 修正竞争密度函数和负指数直径分布对异龄林林分直径分布进行分析，取得了理想的结果。Van Laar 等(1997)认为负指数函数对天然异龄林的直径分布拟合效果比较好。Meyer(2009)在研究了异龄林的直径结构后指出：“未受干扰的天然异龄林可用负指数方程来表达林分直径分布”。陆元昌 (2005) 建立了一个可以拟合异龄林直径结构的新直径分布函数——倒 J 型对数函数，其研究结果表明通过与 Weibull 分布函数、负指数分布函数和限定线分布函数的比较，此分布函数和 Weibull 分布函数可以对异龄林的直径分布进行很好的拟合。段爱国 (2002) 对理论方程的发展来源和数学解析性等方面的研究分析时，发现包括 Gompertz 方程、Korf 方程、Richards 方程、Logistic 方程等这些具有“S”型或近似“S”型的方程，它们在某些情况下都可以用来拟合林分的直径分布。比利时数学家 Verhulst 在描述人口的增长规律时，首次提出并应用了 Logistic 方程。后来，惠刚盈 (1991) 在拟合林分直径分布时，也应用了 Logistic 方程，结果显示 Logistic 方程对林分直径分布预估的合格率能达到了 88%以上。

然而，目前这么多研究表明，没有一个明确的结论说明哪一个模型最适合于异龄林针阔混交林林木分布模型。因此，通过比较几个可能的分布模型，根据它们在实际数据中的拟合效果，来确定究竟哪个模型最适合描述本地区的林分直径结构。

表 6-1 林分直径分布主要模型

Table6-1 Main stand diameter distribution model

概率密度函数(Probability density function)	说明(Explanation)
正态分布函数(Normal distribution function) $F(x) = 1/(\sqrt{2\pi} \cdot \delta) \exp(-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\delta^2})$	$x$ 和 $\bar{x}$ 为直径实测值和平均值; $\delta$ 为直径 $x$ 的标准差
$\beta$ 分布函数( $\beta$ distribution function) $F(x) = x^{a-1}(1-x)^{b-1}/\beta(a, b)$	$a, b$ 为形状参数, $0 \leq x \leq 1$
Weibull 分布函数(Weibull distribution function) $F_x(x, a, b, c) \begin{cases} (\frac{c}{b}) * (\frac{x-a}{b})^{c-1} \times \exp[-(\frac{x-a}{b})^c] \\ 0 \end{cases}$	$a \geq 0, b, c > 0$ ; $a$ 为位置参数(直径分布最小径阶下限值); $b$ 为尺度参数; $c$ 为形状参数
对数正态分布函数(Lognormal distribution function) $F(x) = 1/(\sqrt{2\pi}c) \exp(-(\log(x) - b)^2/(2c^2))$	$b$ 为变量 $\log(x)$ 的数学期望值; $c$ 为随机变量 $\log(x)$ 的标准差
负指数分布函数(Negative exponential distribution function) $Y = ae^{-bx}$	$Y$ 为每个径阶的林木株数; $x$ 为径阶; $e$ 为自然对数的底; $a$ 和 $b$ 为表示直径分布特征的常数
倒J型对数分布函数(Logarithmic J-shaped function) $N = \exp(a * e^{-bD})$	$N$ 为株数; $D$ 为胸径; $a, b$ 为模型参数
限定性函数 (Limiting function) $N_{max} = a_0 D_g^{a_1}$	$N_{max}$ 为活立木最大株数; $D_g$ 为平均直径的平方; $a_0, a_1$ 是模型参数
Logistic 分布函数(Logistic Distribution function) $F(x) = \frac{c}{1 + e^{a-bx}}$	$F(x)$ 为林木株数; $x$ 为林木直径; $a, b, c$ 为模型参数。
S <sub>B</sub> Johnson 函数 (S <sub>B</sub> Johnson function) $F(x) = \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} \frac{\lambda}{(x-\xi)(\xi+\lambda-x)} \exp(-\frac{[(y + \delta \ln(\frac{x-\xi}{\xi+\lambda-x}))]^2}{2})$	$F(x)$ 为株数累积概率; $X$ 为林木直径; $\sigma, \lambda, \xi$ 为模型参数
r分布函数( $r$ distribution function) $F(x) = \lambda e^{(-\lambda x)(\lambda x)^{(x-1)}/\Gamma(x)}$	$F(x)$ 为株数累积概率; $x$ 为林木直径; $\lambda$ 为模型参数
Compertz 函数(Compertz function) $F(x) = K \exp(-e^{-bx})$	$F(x)$ 为株数累积概率; $K, a, b > 0$ , $K$ 为 $F(x)$ 上的渐近值; $a$ 为与 $F(x)$ 初始值相关的参数, $b$ 为内禀增长率
Richards 函数(Richards function) $F(x) = A[(1-b)e^{kx}]^{\frac{1}{1-m}}$	

林分直径的动态预测. 动态预测是指研究人员在建立林分直径结构模型时, 主要利用矩阵模型(Matrix Model)(孟宪宇 1991)、参数预测模型(Parameter Prediction Method, PPM) (Bailey 1980)和参数回收模型(Parameter Recovery Method, PRM) (Burk and Newberry 1984)等技术。其主要发展是在 20 世纪 70 年代后的时期。Usher(1966)根据把由难以确定的年龄构成的矩阵模型改为径阶结构的矩阵模型的独特思路建立了森林的矩阵模型(直径转移模拟)。Kolstroem(1992)为芬兰云杉建立了一个简单而又非常有吸引力的进级速率模型。Favrichon(1998)采用了两个阶段的矩阵模型来预估林分直径分布的变化, 而且还分析了抚育间伐等经营措施对林分生长和收获的影响。

参数回收模型是通过对那些决定分布的变量也就是分布曲线上较为重要点,进行估计,然后利用数学方法找出这些变量与分布函数参数之间的特殊关系,从而达到预测可以用来林分直径的目的。Hyink(1981)根据 Strub 和 Burhaet(1975)的方法提出了一种用来描述直径分布参数的方法即参数回收模型(PRM)。

Matney 和 Sullivan(1982)、Knoebel Burkhardt 和 Beck(1986)、Lenhart(1987,1988)、Lenhart(1988)、Bowling(1989)、孟宪宇(1991)、江希钊(1997)等的研究,都采用了参数回收模型。

参数预测模型对未来直径分布的各种参数值的预估是直接根据林分的主要特征值,例如林分优势高、林分平均直径、林分年龄、林分密度等进行的。而参数预测法的主要步骤则是,首先利用理论直径的分布函数来模拟实测值,然后再建立分布函数的各个参数与林分特征因子之间的关系,这些特征因子一般主要选取那些容易获得的。Smalley 和 Bailey(1974)在对美国 Tennessee、Alabama 和 Georgia 等州高地的松树人工林资料建立了 Weibull 分布的各个参数的参数估计方程。Clutter 和 Belcher(1978)、Halfey 和 Bennett(1979)、Freduccia(1979)、Dell(1979)、Burkhardt(1981)、Campos(1981)、西泽正久(1976-1977)、李凤日(1987)、李梦(1998)等相继选用了参数预测法进行进行相关研究。在一个林分中,直径分布是有一定规律的,知道了一个林分的直径分布规律,可以用来预测这个林分生长过程、估计林分内各径阶的分布状态和林分蓄积量。从研究的对象来说,现实林分可划分为两大类,即同龄纯林(even-age and pure forest)和异龄混交林(uneven-age and mixed forest)。从林分的总体特征上看,异龄林的结构和同龄林的结构存在着明显的不同。Daniel(1979)指出,异龄林与同龄林在林分结构上有明显的差异。从林相和直径结构来看,一个同龄林的林分可以形成一个齐一且匀称的林冠,而且同龄林中有些林木尽管在生长上落后于其它林木,直径也较小,但其树高仍然长到与其它生长较好的林木同一林冠层水平,小径阶的林木和大径阶的林木株数都较少,而中等径阶的林木株数较多,呈现正态分布的形式;而异龄林林分的林冠却是不整齐也不匀称的,小径阶的林木株数很多,但随着林木直径的增大,其径阶所对应的株数开始迅速减少,当达到一定直径值后,其径阶所对应得林木株数减少的幅度逐渐平缓,呈现近似双曲线形式的反 J(inverse J-shaped curve)。在异龄林和同龄林这两种典型林分的直径结构形状之间,还存在着许多其它形状的,而且林分直径分布曲线的形状与林相、林型等其它因素都有较大的关系。

因为可能受到林分自身的演替过程、树种特性、树种组成、立地条件、更新过程以及自然灾害、人为破坏、采伐方式及强度等因素的影响,所以异龄林直径结构的曲线形式比较多样而且复杂。林冠整齐的复层异龄林,直径分布为双峰山状的曲线,而林冠不整齐的异龄林分,则会呈现不规则的山状曲线。

本研究运用 Weibull 分布、负指数分布、倒 J 形对数分布和 Logistic 分布四种分布对秦岭南坡 127 块松栎林直径分布进行拟合,获得最适合整个林分的直径分布函数,并建立其参数预估方程;然后研究不同密度、海拔、林分平均胸径和不同立地条件对秦岭南坡松栎林直径分布的影响;研究秦岭林区的华山松、锐齿栎和油松三个树种的直径分布规律。

#### 直径分布规律的研究方法

林分的直径分布规律随着树种的不同而呈现出不同的分布规律,即使相同树种,在不同的立地条件下有时也呈现出不同的分布。因此,直径分布一直是林业研究的重点,近些年来,概率密度分布函数越来越多地被应用到该方面。

常用的概率密度分布函数有正态分布函数、Weibull 分布函数、倒 J 形对数分布函数、负指数分布函数、Logistic 分布函数、指数分布函数以及对数正态分布函数等,由于本研究区域主要是天然次生林,根据以前的研究,天然林直径分布规律呈现倒“J”形分布。因此,本研究采用能拟合倒“J”形曲线的分布函数:Weibull 分布、负指数分布、倒 J 形对数分布以及 Logistic 分布等四种分布函数对秦岭南坡的松栎林直径分布规律进行研究。

### 三参数 Weibull 分布函数

$$F(D) = \begin{cases} \left(\frac{c}{b}\right) * \left(\frac{D-a}{b}\right)^{c-1} \times \exp\left[-\left(\frac{D-a}{b}\right)^c\right] & a \leq D, \quad abc > 0 \\ 0 & a > D \end{cases}$$

式中：F(D)为林木株数；D 为对应径阶直径；a、b、c 分别为位置参数、尺度参数、形状参数；此函数的参数求解方法有矩法、百分位法、单纯形法及最大似然法等，其中以最大似然法最准确(孟宪宇 1991)。参数 b、c 的似然解为：

$$F(x) = \begin{cases} \frac{\sum_1^k f_i(x_i-a)^c \ln(x_i-a)}{\sum_1^k f_i(x_i-a)^c} - \frac{1}{c} = \frac{1}{N} \sum_1^k f_i \times \ln(x_i - a) \\ b = \left[\frac{1}{N} \sum_1^k f_i(x_i - a)^c\right]^{\frac{1}{c}} \end{cases}$$

式中：F(x)——对应径阶株数百分比；  
a——林分直径最小径阶下限值；  
k——径阶数；  
fi——第 i 径阶内林木株数；  
N——总株数；  
xi——第 i 径阶中值。

当 a=0, c<1 时，为反 J 型分布；1<c<3.6 时为具有正偏的山状曲线；c=3.6 时，Weibull 分布近似于正态分布曲线；c>3.6 时，分布曲线由正偏逐渐移向左偏。c=2 时，为 x<sup>2</sup> 分布的特殊情况，即 Rayleigh 分布；当 c → ∞，变单点分布。

各径阶的理论株数计算公式为：

$$F(D) = N \times M \times \frac{c}{b} \left(\frac{D_i-a}{b}\right)^{c-1} \exp\left[-\left(\frac{D_i-a}{b}\right)^c\right]$$

式中：F(D)——每个径阶的林木株数；  
M——径阶距；  
Di——第 i 径阶中值；

### 负指数分布函数

$$F(D) = Ke^{-ax}$$

Van Laar 等(1997)推荐此函数作为天然异龄林的直径分布模型。此函数采用矩估计的方法求解：

$$V_1 = \int_0^{\infty} bD_i e^{-bD} dD = \frac{1}{b} \int_0^{\infty} (bD_i)^2 e^{-bD} d(bD) = \frac{1}{b} \Gamma(2)$$

因为  $\Gamma(2) = 1$ ，所以由(5)式解得：

$$b = \frac{1}{D} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n D_i/n}$$

式中：F(D)——每个径阶的林木株数；  
x——径阶；  
a 和 k——直径分布参数。

### 倒 J 形对数分布函数

陆元昌 (2005) 建立了一个名为倒 J 型对数函数的新的直径分布函数, 此函数对异龄林的直径分布的拟合效果较好。倒 J 形对数分布函数为:

$$Y = \exp(a * e^{-bx})$$

式中: Y 为每公顷株数; x 为林木胸径; a 和 b 为模型参数。

### Logistic 分布函数

$$F(D) = \frac{c}{1 + e^{a-bx}}$$

式中: F(D)——林木株数;

x——径阶;

a, b, c——函数参数。

### 直径分布规律的检验

#### χ<sup>2</sup> 检验

通过 χ<sup>2</sup> 检验对各分布函数拟合林分直径分布规律的效果进行检验, 可以知道各分布函数是否适合用来描述林分直径分布规律。

设 x=(x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>, …, x<sub>n</sub>) 为实测的各径阶株数组成的数列, y=(y<sub>1</sub>, y<sub>2</sub>, …, y<sub>n</sub>) 为利用上述某一种分布函数拟合得到的各径阶株数组成的数列。则 χ<sup>2</sup> 计算公式为:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - y_i)^2}{y_i}$$

式中: x<sub>i</sub>——各径阶实测的实际株数;

y<sub>i</sub>——各径阶拟合的理论株数。

χ<sup>2</sup> 检验的自由度为 n-r-1, n 为样本的容量, r 为某种分布函数对应参数的个数。设置信度为 95%, 则 χ<sup>2</sup><sub>0.05</sub> 为置信度为 95% 时的 χ<sup>2</sup> 上侧分位数的值。若 χ<sup>2</sup> < χ<sup>2</sup><sub>0.05</sub>, 则认为该分布函数可用来描述林分直径的分布规律, 且两者之间的关系显著, 否则, 则认为该分布函数不适合描述林分直径的分布规律。

### 适合率的计算

分布函数适合率是指在所有参加分布函数拟合的样地中, 能通过 χ<sup>2</sup> 检验的样地总数占总样地数的百分比。计算公式为:

$$Q_j = \frac{M_j}{M}$$

式中: Q<sub>j</sub>——j 分布函数的适合率;

j——分布函数;

M<sub>j</sub>——适合 j 分布函数的样地数;

M——参与分布函数拟合的样地总数;

适合率最大的分布函数确定为林分的最终拟合函数。

### 2.2.5 偏度峰度的计算

偏度和峰度是描述林分直径分布特征的主要指标, 偏度和峰度计算公式为:

$$SK = \frac{\mu^3}{\rho^3}$$

偏度:

$$ST = \frac{\mu_4}{\rho^4} - 4$$

峰度:

式中:  $\mu_3$ 、 $\mu_4$  分别为三阶、四阶中心矩,  $\rho$  为标准差。

偏度 (SK) 表示非曲线对称分布的偏斜方向和偏斜的程度, 当  $SK > 0$ , 表示曲线向左偏;  $SK < 0$ , 表示曲线向右偏; SK 的绝对值越大, 表明偏斜程度越大。峰度 (ST) 表示分布曲线平坦或尖削的程度, 当  $ST > 0$ , 表示曲线较尖削;  $SK < 0$ , 表示曲线较平坦, 正态分布的峰度 (ST) 为 0; ST 绝对值越大, 表明曲线与正态分布的差别越大 (李荣伟 2000)。

### 直径分布动态预测模型的构建

根据直径分布函数拟合的效果, 对比找出最适合拟合的直径分布函数, 然后分别求出每个样地的该拟合分布的函数参数 ( $a_1, a_2, \dots, a_n$ ) 的值, 形成分布函数参数与样地林分特征因子 (林分平均高、平均胸径、株数密度等)、直径分布主要指标 (SK, ST 等) 及标准地的调查因子 (海拔、坡度等), 建立分布函数的参数预估模型。各参数模型的一般表达式如下:

$$a_1 = f_1(N, HT, G, \dots)$$

$$a_2 = f_2(N, HT, G, \dots)$$

$$a_3 = f_3(N, HT, G, \dots)$$

...

...

$$a_n = f_n(N, HT, G, \dots)$$

式中: N——林分密度;

HT——优势木平均高;

G——林分断面积。

因为可能在建立模型参数预估方程时, 用调查的或计算出的林分的特征因子、直径分布主要指标和标准地的调查因子等一个因子来估计的回归模型时, 经常不能充分的表达林分的重要信息。但是用林分的特征因子、直径分布主要指标和标准地的调查因子等多因子来拟合时, 所以保证得到的参数预估方程精度和稳定性首先就要诊断所用变量间是否存在多重共线关系及其严重程度。一旦出现某个变量与其他几个变量间存在多重共线性, 那么将会使参数预估方程的建立出现以下几个问题: (1) 各个自变量对别的自变量的影响程度很难精确的鉴别; (2) 模型回归参数估计量的方差大, 导致预估的参数值可能不准确; (3) 减少或增加一个观测值对估计的参数值可能十分的敏感。

本文采用方差膨胀因子 (VIF, Variance Inflation Factor) 作为共线性的检验指标。

$$VIF = \frac{1}{1 - R_j^2}$$

式中:  $R_j^2$  表示第 j 个自变量对其它自变量进行回归得到的判定系数  $R^2$ 。

自变量 j 的 VIF 值越大, 说明其与其他自变量间存在共线性的可能性越大。通常, 当  $VIF > 10$  时, 认为变量  $x_j$  与其它变量之间存在多重的共线性 (付小勇 2007), 应当予以删除。

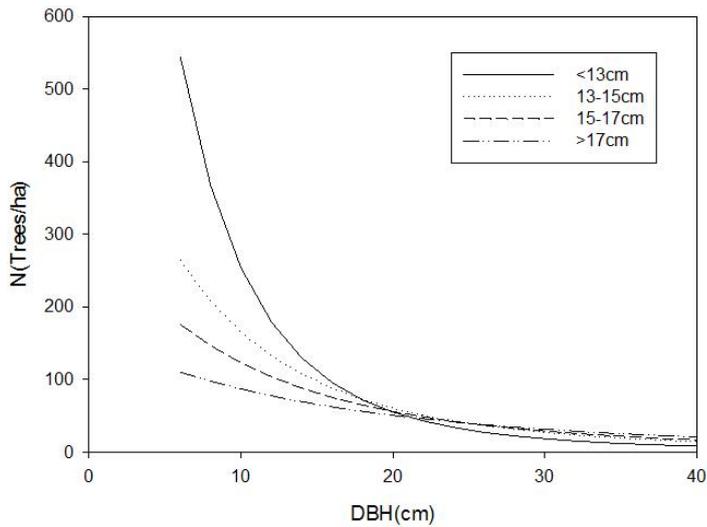


图.不同林分平均胸径直径分布

Fig. Distribution in different Stand Breast Height

从上图可以看出林分的平均胸径越大，即林分内竞争越激烈，其小径阶的林木株数越少。这是因为一个林分类各树种间的竞争越大，对光照、养分以及水分的竞争就越大，会导致小树难以更新生长，所以小径阶的林木株数较少。相反，林分的平均胸径越小，即林分内竞争较小，其小径阶的林木株数越多。林分平均胸径小于 13cm，胸径在 6cm 左右的林木株数比林分平均胸径大于 17cm，胸径在 6cm 左右的林木株数要多一倍多，由此可知，林分内的竞争越小，越有利于小径阶林木的生长。这与林分密度的研究结论相一致。

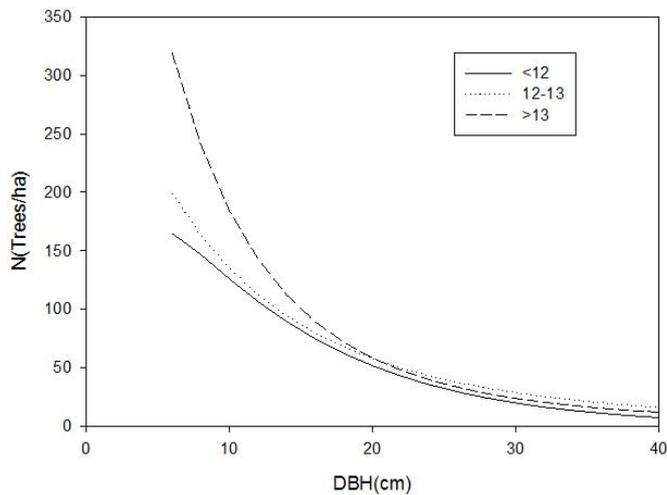


图. 锐齿栎林不同立地形条件下直径分布

Fig. Different SF conditions stand diameter distribution of forest dominated by *Quercus aliena* var. *acuteserrata*

从上图可以看出在锐齿栎林分内随着立地形的增大，即立地质量越好，在各个胸径的林木株数都越多，立地质量越好，林木数量越多。立地形大于 13 的林分其小径阶的林木株数要比立地形小于 12 的要多 150 株每公顷左右，说明立地质量越好林木的更新越多。

# 第七讲 同龄林立地质量

第一节 直接法和间接法

第二节 地位级和立地指数

第三节 林型与地被指示物

第四节 密度控制与自疏伐理论

Q7. 直接法和间接法立地质量评价的区别和联系是什么？如果间伐？如果气候变化？

立地质量的不确定性

指标，动态，混交

不同学科对森林立地质量的评价角度有所不同。从森林经理学科的角度说，是指土壤的肥沃程度对森林生长与收获的影响。从森林生态学科的视角来看，是指光照、水分和养分对森林生产力的影响。

直接法和间接法立地评价

立地质量评价方法可以分为植物群落学和地理学两大类（表 2.1），其中根据树高计算的地位级和立地指数多用来衡量森林立地条件，是最常见的立地质量评价指标。

表. 森林立地质量评价方法分类

	森林生产力（直接法）	生长与收获（间接法）
植物群落 Phytocentric	例如，蓄积测定 volume measurements	例如，立地指数 site index; 生境类型 habitat type
地理 Geocentric	例如，土壤质地 soil texture; 土壤湿度 soil moisture; 有效辐射 available radiation	例如，坡向 aspect; 海拔 elevation; 纬度 latitude; 经度 longitude

文献：Skovsgaard and Vanclay（2008）

地位级（site class）反映的是林分平均高与林分年龄的关系，按相同年龄时林分条件平均高的变动幅度划分为若干个等级，以罗马数字 I, II, III, IV, V 表示立地质量的高低。中国森林一类和二类调查均沿用前苏联体系，以地位级作为森林立地质量指标。超出地位级表范围的还可用，例如 Ia 或 Va 等来表示。地位级的优点是数据容易获取，且易于测算。缺点是精度较低。

立地指数（site index）是指林分优势高与特定基准年龄的关系。由于采用优势高地关系，立地指数的精度要明显高于地位级，因而在欧美使用较为普遍。在基准年龄的选择上，针叶树常用树高生长趋于稳定的成熟林或过熟林年龄，例如德国和芬兰为 100 年。北欧亦有用中龄林 40 年，例如，挪威。

地位级、立地指数的原理：Logistic 理论生长方程

蓄积、生物量与森林生产力

无论是地位级、立地指数，还是立地形，森林立地质量的评价问题，最终都要回到森林生产力上。在林业生产方面，立地质量高的森林可以预期更多的木材产出。在生态环保方面，立地质量好的森林意味着更大的生物量和碳汇潜力。

立地质量是决定森林生长的三大要素之一。

Volume=森林蓄积 => 生物量 => 森林生产力

Size=林木大小

Site=立地质量

Comp=竞争

Volume = f(Size,Site,Comp)

$dV/dt = f(\text{Size,Site,Comp} | Vt)$

GPP=初级生产力 => NPP 净生产力 => 生物量 => 森林生产力

LUE=光有效利用率

WUE=水有效利用率

NUE=养分有效利用率

$GPP=f(LUE)*WUE*NUE$

林分密度

$N \sim H_{dom} \quad \ln N = \beta - 2 * \ln H_{dom}$

$N \sim D \quad \ln N = \beta - 1.6 * \ln D$

$N \sim V \quad \ln N = \beta - 3/2 * \ln V$

$N \sim G \quad dN/N = -2(G/G_{max})^3 * dD/D$

空间竞争

CCF

RS

# 第八讲 异龄林立地质量

## 第一节 蓄积与生物量

直接法

## 第二节 树高胸径异速关系

H-D

立地条件,  $H_{D0}$

竞争, BAL

## 第三节 立地形

林分密度?

## 第四节 森林生产力

经营周期?

Q8. 混交林立地质量评价采用哪种方法合适? 其理论依据是什么? 其方法有哪些缺点?

立地质量评价的测不准问题:

立地形的原理: 林木异速生长关系

立地形 (site form) 表示树高和胸径的林木结构大小关系。在缺乏年龄数据的情况下, 亦可用于天然林的立地质量评价。例如, 热带雨林, 温带针阔混交林等异龄林。立地形的主要缺点是树高-胸径关系易受林分密度影响。其次, 基准胸径的选用, 对评价结果也有一定的影响。

根据吴恒等人 (2015) 的比较结果, 立地指数适用于人工林或针叶林, 这一类型的林分结构基本为同龄林, 呈正态分布。而立地形适用于天然林, 这些林分结构一般为异龄林, 呈倒 J 型偏左分布。或受干扰严重的针叶林, 例如, 华山松大小蠹虫害。

立地形的计算

立地形(SF)是一种评价立地质量好坏的方法, 其应用较为简单, 可以避免确定林分的年龄, 所以本文用立地形来划分不同的立地质量, 利用立地形模型计算不同优势树种林分的立地形, 具体计算公式引用如下:

油松林 SF 计算公式:

$$SF = H_{D_0} + \frac{S_{D_0} \{H - [1.3 + 27.0429(1 - e^{-0.0260D_g^{1.0243}})]\}}{S_{D_i}}$$

式中:  $S_{D_i} = -0.500 + 2.593 \lg(D)$ ;  $S_{D_0} = 2.7549$ ;  $H_{D_0} = 12.0$ ;

H——林分平均高;

Dg——林分平均胸径

华山松林 SF 计算公式:

$$SF = H_{D_0} + \frac{S_{D_0} \left\{ H - \left[ 1.3 + 53.9288e^{-\left(\frac{4.1461}{D^{0.3248}}\right)} \right] \right\}}{S_{D_i}}$$

式中:  $S_{D_i} = 1.913 + 0.3581g(D)$ ;  $S_{D_0} = 2.3788$ ;  $H_{D_0} = 12.6$ ;

H——林分平均高;

Dg——林分平均胸径

锐齿栎林 SF 计算公式:

$$SF = H_{D_0} - H_{D_0} \frac{C_{D_0}}{C_{D_i}} \left\{ 1 - \frac{H}{1.3 + 17.5012 \left( 1 - e^{-0.1747D_g^{0.5880}} \right)} \right\}$$

式中:  $C_{D_i} = 0.060 + \frac{1.809}{D}$ ;  $C_{D_0} = 0.2108$ ;  $H_{D_0} = 10.5$ ;

H——林分平均高;

Dg——林分平均胸径

立地质量指标的不确定性: 不同指标体系的评价结果存在误差

采用不同的立地质量评价指标, 森林立地质量评价结果有可能会出偏差。一般认为, 立地指数的准确性最高, 地位级和立地地形次之。因此, 在有合适的优势高和年龄数据情况下, 例如, 标准地每木检尺的一类数据, 多倾向采用立地指数作为代表立地质量的变量。如果只有平均高和平均年龄, 例如, 基于角规点抽样的二类数据, 不得不用地位级。而对于异龄林或天然林, 目前国内外都还没有比基于树高-胸径异速生长关系的立地地形更好的方法。

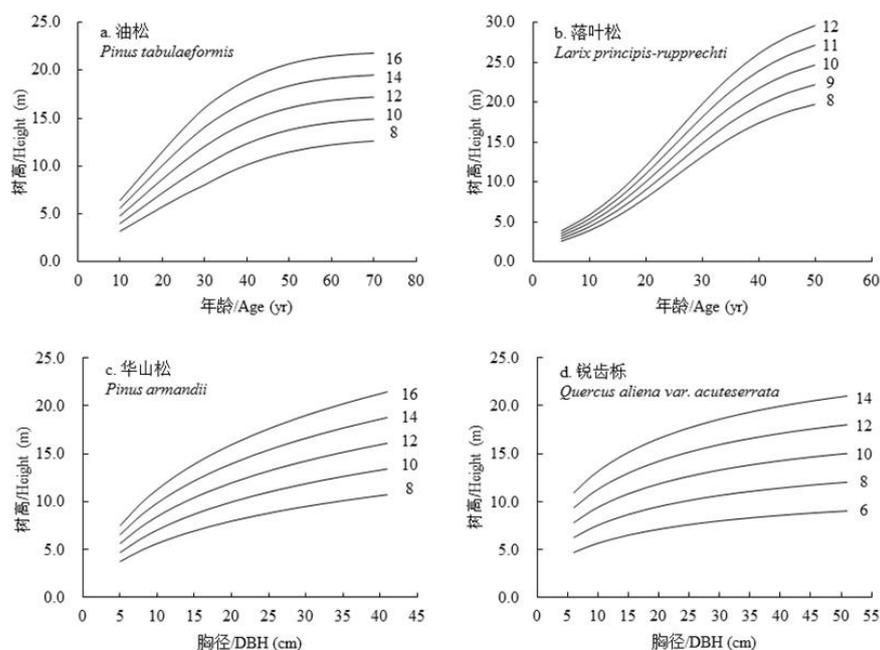


图 3-1 油松 (a) 落叶松 (b) 立地指数、华山松 (c) 锐齿栎 (d) 立地地形曲线簇。

Fig.3-1 Examples of site index and site form curves by species.

(2) 森林动态变化的不确定性：森林演替、立地退化、生态恢复

森林是不断动态变化中的生态系统，其动态变化体现在演替过程和演替方向。森林的演替过程由森林生长、枯损和更新组成。在没有干扰的情况下，森林演替一般是正向演替。由于自然环境的变化和选择，也有可能呈现多态演替。如果干扰破坏严重，森林演替还有可能出现逆向演替。

演替导致了树种组成和林分结构的动态变化，从而给以某一特定树种生长为准的立地质量评价方法带来了困难。造成这一问题的原因是因为：第一，假定森林生长是确定性的；第二，假定森林生长是连续的。这两个假设条件简化了现实中的森林生态系统的随机性和不确定性。

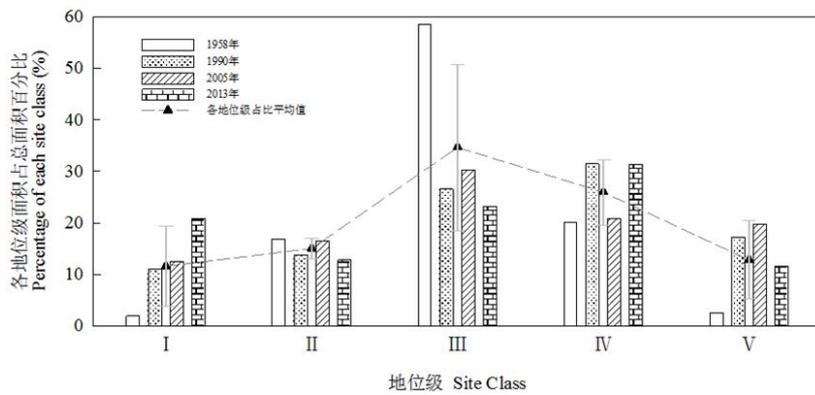
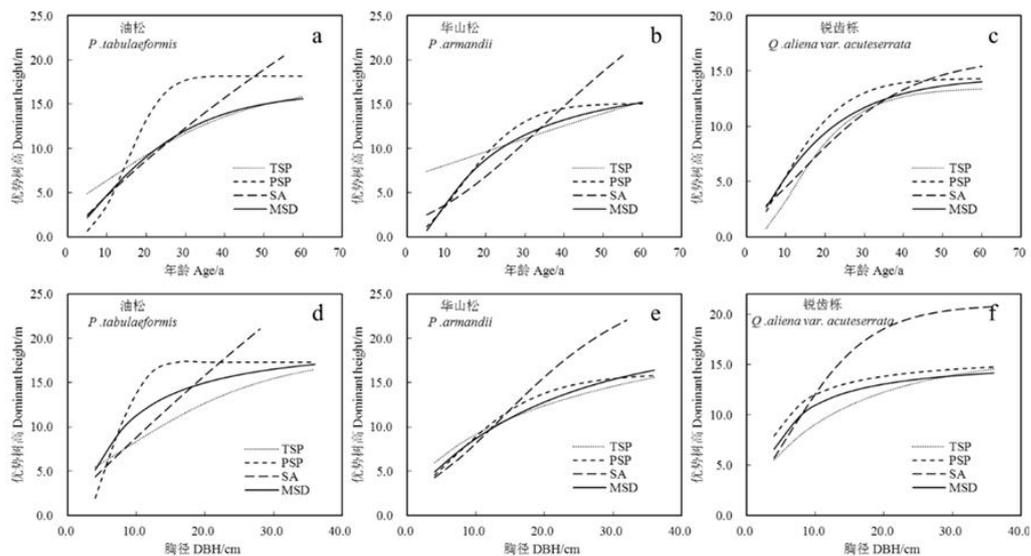


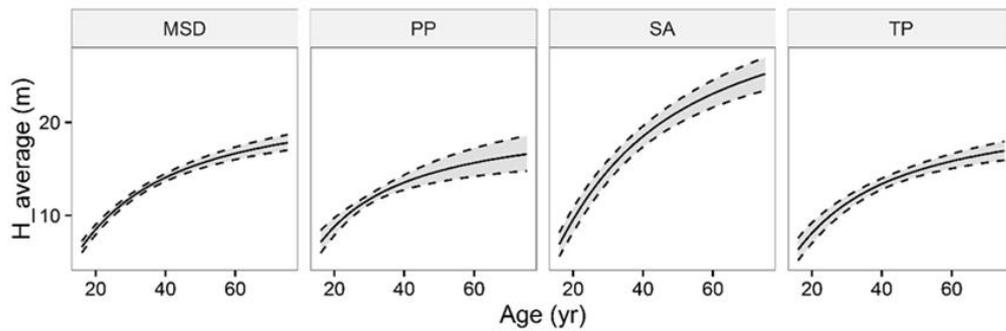
图 5-1 各地位级组成比例变化。

Fig.5-1 Changes of each site class percentage.

(3) 森林数据类型的不确定性：一类数据、二类数据、多源数据

解析木数据明显高估林分水平的树高生长，究其原因通常是解析木在长势好、典型、具有代表性的林分中选取。固定样地数据存在类似问题，其原因也是典型抽样带来的高估。





多源数据建模可以显著降低树高预测的不确定性，是值得推荐的方法。

理论上，用生物量计算的森林生产力可以解释不同树种之间的差异来反映立地质量。例如，针叶树和阔叶树，针阔混交林等的立地质量评价。但同时也有生物量计算的年龄影响问题，以及最大潜在生产力的计算问题。

QUASSI 应用案例： 评价立地条件

数据来源： 30 块油松林样地调查数据（实验指导书 p.49）

QUASSI Fortran 版（英文）：<http://www.optifor.cn/model/QUASSI.rar>

QUASSI Python 版（双语）：<https://github.com/gmh123-jpg/QUASSI>

问题 1：应用 QUASSI 地位级表，评价 30 块油松林的地位级

问题 2：比较实生林地位级表（实验指导书 p.113），分析与问题 1 计算结果的异同。

问题 3：应用 QUASSI 生长过程表或生长模型，计算 30 块油松林的潜在生产力（Hint：主伐年龄参考主要树种龄组划分表，实验指导书 p.133）

问题 4：比较问题 1 和 3 计算结果的差异，分析产生差异的原因。

## 第九讲 纯林的林分蓄积

第一节 标准木

第二节 立木材积表

第三节 形高与形数

第四节 疏密度与标准表

Q9. 标准木法计算材积的误差是如何产生的？

陕西省主要树种平均实验形数表

树种	冷杉,云杉	华山松,铁杉,泡桐	油松	山杨,光皮桦	栎类	红桦,白桦,马尾松,杂木,刺槐	侧柏
实验形数	0.45	0.43	0.42	0.41	0.40	0.39	0.38

(摘自《陕西林业工作手册》，陕西省林业厅编 1964)

注：1. 栎类包括锐齿栎、槲栎、枹树（栎）、栓皮栎、麻栎等。杂木包括漆树、柳、槭、鹅耳枥、千金榆、榆、五角枫等。

2. 平均实验形数用来计算林分蓄积量，也可代替材积表来计算每木检尺的蓄积量，以及单株材积。计算公式： $V=(H+3)*G*f_3$

式中， $V$ 为蓄积量， $H$ 为平均树高， $G$ 为胸高断面积， $f_3$ 为平均实验形数。

例 1：已测得华山松林分平均树高为 15 米，每公顷断面积为 28 平方米，则

$$V = (15+3)*28*0.43 = 217 \text{ m}^3$$

例 2：已测得陕北林区某油松林分平均树高是 11 米，胸高断面积是每公顷 16 平方米，查陕北林区油松标准表 11 米高处断面积为 22.4，蓄积量为 132 立方米。则

$$\text{疏密度} = 16.0/22.4 = 0.71, \text{ 每公顷蓄积量} = 0.71*132 = 94 \text{ m}^3$$

例 3：如进行目测调查，在陕北林区某油松林分中目测平均树高是 13 米，疏密度是 0.6，查油松标准表 13 米高处蓄积量是 163，则

$$\text{每公顷蓄积量} = 163*0.6 = 98 \text{ m}^3$$

陕西省主要树种龄组划分表

树种	起源	龄级期限	龄组及年龄				
			幼龄林	中龄林	近熟林	成熟林	过熟林
云杉、铁杉、落叶松、 冷杉、侧柏、杜松	天然	20	1 - 40	41 - 60	61 - 80	81 - 120	121+
	人工	10	1 - 20	21 - 60	61 - 80	81 - 100	101+
油松、华山松、 白皮松、马尾松	天然	10	1 - 20	21 - 40	41 - 50	51 - 70	71+
	人工	10	1 - 20	21 - 40	41 - 50	51 - 60	61+
红桦、白桦、光皮桦、栎类 等硬阔叶树	天然	10	1 - 20	21 - 40	41 - 50	51 - 60	61+
	人工	10	1 - 10	11 - 20	21 - 30	31 - 40	41+
杨类、柳树、泡桐 及其它软阔叶树	天然	10	1 - 10	11 - 20	21 - 30	31 - 40	41+
	人工	5	1 - 10	11 - 15	16 - 20	21 - 25	26+
杉木	天然	10	1 - 10	11 - 20	21 - 30	31 - 40	41+
	人工	5	1 - 10	11 - 20	21 - 25	26 - 30	31+
刺槐	人工	5	1 - 10	11 - 20	21 - 25	26 - 30	31+
竹子		2	1 - 2	3 - 4	5 - 6	7 - 8	9+

陕西森林优势树种组的划分及其顺序表

序号	优势树种组
1	冷杉；
2	云杉；
3	柏类（包括杜松）；
4	铁杉；
5	落叶松；
6	油松（包括白皮松、樟子松、黑松）；
7	华山松；
8	马尾松（包括云南松）；
9	杉木（包括水杉）；
10	栎类（包括各种栎类树种）；
11	桦类（包括白桦、红桦、光皮桦等桦树）；
12	杨类（包括山杨、卜氏杨、青杨、小叶杨及其他杨类）；
13	硬阔（包括刺槐、中槐、楸树、千金榆、樟、榆、臭椿等）；
14	软阔（包括柳、泡桐、枫杨、椴树、槭树、五角枫等）；
15	小径竹（包括慈竹、水竹、木竹、苦竹等）；
16	大径竹（包括毛竹、斑竹等）。

（《陕西省森林资源调查补充技术规程》，陕西省林业厅 1983）

## 陕西省二元立木材积方程

基于材积方程可计算单木材积与林分蓄积。二元材积模型是根据材积与胸径、树高两个因子的回归关系而拟合的树木单株材积模型，是编制二元材积表的基础。二元材积方程基于形数计算方法： $V = G \cdot H \cdot f_{1.3}$

其中  $V$  为材积， $f_{1.3}$  为 1.3m 高度的形数。

- (1) 秦岭、巴山、关山地区油松： $f_{1.3} = 0.71900D^{-0.09214} H^{-0.03059}$
- (2) 秦岭、巴山、关山地区华山松： $f_{1.3} = 0.68917D^{-0.18723} H^{0.10529}$
- (3) 秦岭、巴山、关山地区栎类： $f_{1.3} = 0.72770D^{-0.16639} H^{0.01493}$
- (4) 秦岭、巴山、关山地区桦类： $f_{1.3} = 0.05243D^{-0.13367} H^{0.14526}$
- (5) 秦岭、巴山、关山地区杨类： $f_{1.3} = 0.99575D^{-0.00885} H^{-0.24569}$
- (6) 秦岭、巴山、关山地区阔杂： $f_{1.3} = 0.66275D^{-0.18862} H^{-0.00755}$
- (7) 桥山、黄龙山地区栎类： $f_{1.3} = 0.77267D^{-0.010067} H^{-0.05273}$
- (8) 桥山、黄龙山地区杨类： $f_{1.3} = 0.78438D^{-0.07453} H^{-0.09236}$
- (9) 桥山、黄龙山地区白桦： $f_{1.3} = 0.7391D^{-0.22027} H^{0.064443}$
- (10) 杉木： $f_{1.3} = 0.53643 - 0.0013223D + 0.77058\frac{1}{H} - 0.046331 \log D$
- (11) 马尾松： $f_{1.3} = 0.77825D^{-0.16660} H^{-0.01591}$

(《陕西省二元立木材积表》，陕西省林业勘察设计院编 1975)

秦岭林区主要树种林分断面积与蓄积量标准表（疏密度 1.0）

单位：树高（m）；断面积（m<sup>2</sup>）；蓄积量（m<sup>3</sup>）

平均树高	冷杉		山杨		栎类		华山松、油松			红桦、光皮桦			平均树高
	断面积	蓄积量	断面积	蓄积量	断面积	蓄积量	断面积	蓄积量		断面积	蓄积量		
								华山松	油松		红桦	光皮桦	
5			13.8	45						16.0	50	52	5
6	31.7	128	14.9	55						18.3	64	68	6
7	33.8	152	16.0	66						20.1	78	82	7
8	35.4	175	17.1	77	21.4	94	22.4	106	103	21.7	93	98	8
9	36.6	198	18.2	90	23.4	112	25.3	131	128	22.9	107	113	9
10	37.7	221	19.3	103	25.2	131	28.0	157	153	23.8	121	127	10
11	38.5	243	20.4	117	27.1	152	30.4	183	179	24.5	134	141	11
12	39.2	265	21.5	132	28.6	172	32.3	208	203	25.1	147	154	12
13	39.8	287	22.6	148	30.0	192	33.9	233	228	25.6	160	168	13
14	40.2	308	23.7	165	31.1	211	35.2	257	251	26.1	173	182	14
15	40.6	329	24.8	183	32.0	230	36.4	282	275	26.5	186	196	15
16	41.0	351	25.8	201	32.8	249	37.5	306	299	26.8	199	209	16
17	41.4	373	27.0	221	33.6	269	38.4	330	323	27.1	211	222	17
18	41.7	394	28.0	241	34.3	288	39.2	354	346	27.3	224	235	18
19	42.0	416	29.1	262	34.9	307	39.9	377	369	27.6	237	249	19
20	42.2	437	30.3	286	35.4	326	40.6	402	392	27.8	249	262	20
21	42.4	458	31.4	309	36.0	346	41.2	425	415	28.0	262	276	21
22	42.6	479	32.4	332	36.4	364	41.7	448	438	28.2	275	289	22
23	42.8	501	33.4	356	36.8	383	42.2	472	461	28.3	287	302	23
24	43.0	522			37.2	402	42.7	496	484	28.4	299	314	24
25	43.1	543			37.5	420	43.1	519	507	28.5	311	327	25
26							43.5	542	530				26
27							43.8	565	552				27
28							44.2	589	575				28
29							44.4	611	597				29
30							44.8	636	621				30
31							45.0	658	643				31
32							45.3	682	666				32
33							45.5	704	688				33

陕北林区主要树种林分断面积与蓄积量标准表（疏密度 1.0）

单位：树高 H (m)；断面积 BA (m<sup>2</sup>)；蓄积量 V (m<sup>3</sup>)

H	油松		山杨		栎类		白桦		侧柏		H
	断面积	蓄积量									
4	14.1	41	9.7	28			10.1	28	15.7	42	4
5	15.4	52	10.9	36	16.7	53	11.2	35	16.4	50	5
6	16.7	63	12.0	44	17.6	63	12.3	43	17.1	58	6
7	18.0	76	13.2	54	18.4	74	13.5	53	17.7	67	7
8	19.2	89	14.3	64	19.1	84	14.6	63	18.3	76	8
9	20.4	103	15.5	76	19.8	95	15.7	73	18.8	86	9
10	21.4	117	16.7	89	20.4	106	16.8	85	19.2	95	10
11	22.4	132	17.8	102	21.0	118	17.9	98	19.6	104	11
12	23.3	147	19.0	117	21.5	129	19.0	111	19.9	113	12
13	24.2	163	20.2	133	22.0	141	20.0	125	20.1	122	13
14	25.0	179	21.4	149			21.0	139			14
15	25.7	194	22.5	166			22.1	155			15
16	26.3	210	23.7	185			23.1	171			16
17	26.9	226	24.9	204			24.1	188			17
18	27.5	243	26.0	224			25.1	206			18
19	28.0	259	27.2	245			26.1	224			19

标准表是用来计算林分疏密度与蓄积量的数表。

# 第十讲 混交林林分蓄积

第一节 树种组成与林分结构

第二节 角规原理与技术

第三节 林分断面积

第四节 林分株树密度与蓄积

Q10. 角规技术的精度问题，在林分断面积，林分株数，蓄积计算上，其误差产生的原理是什么？

角规测树

角规点数的确定

一般采用典型取样的方法，角规点要选在对林分有代表性的位置，避免将角规点设在林分过疏或过密处，角规点数的选择参照下表：

林分面积 (hm <sup>2</sup> )	1	2	3	4	5	6	7~8	9~10	11~15	>16
角规点个数	5	7	9	11	12	14	15	16	17	18

$$n = \left( \frac{t \cdot c}{E} \right)^2$$

如果采用随机取样的方法，则角规点数  $n = \left( \frac{t \cdot c}{E} \right)^2$ ，式中：t——可靠性指标：当可靠性为 95% 时，t=1.96；c——变动系数：对于天然林的观测系数一般为 30% 左右，对于人工林（因为林分比较均匀，变动较小）一般为 20%，常用全距法估算；E——相对误差。

注意：角规点实地确定后，应在对应的小班地图上标出该点在小班中的大致位置。

### 4.3.2 角规常数 (F) 的选择

角规测树通常采用杆式角规。角规常数 (F) 即断面积系数 (basal area factor, 缩写为 BAF)，意义是每株相割的树干直径相当于每公顷有 Fm<sup>2</sup> 的断面积。选择不同的角规缺口与尺长的比值，即可得到不同的角规常数 (F)。

F	杆式角规的比例			
	开口 a (cm)	杆长 l (cm)	开口 a (cm)	杆长 l (cm)
0.5	0.70	50	1	70.71
1.0	1.00	50	1	50.00
2.0	1.41	50	1	35.36
4.0	2.00	50	1	25.00

根据经验，在一个点上绕测计数为 15 株左右的 F 值较合适。

角规绕测技术

立于测点上，把无缺口的一端紧贴于眼下，选一起点，用角规依次观测周围所有林木的胸高部位，并按下列规则计数。

- (1) 凡林木直径大于缺口宽的(相割)，计数为 1；
- (2) 凡林木直径等于缺口宽的(相切)，计数为 0.5；
- (3) 凡林木直径小于缺口宽的(相余)，计数为 0。

绕测技术是影响角规测树精度的主要因素，必须严格要求，认真操作。绕测时需要注意以下几点：

- ①绕测时，绕测员每测一棵树，说出树种和割切，记录员重复一遍并记录。
- ②角规点的位置不能任意移动。眼睛观测点与地面样点保持一致，当遇到树木被遮挡时，可向左右适当移动，但应保持该树至样点的同样间距，观测后仍回原点再继续绕测。
- ③消除漏测与重测。通常用正绕与反绕两次结果进行检验，当计数株数相差超过 1 时，应该重新绕测，否则取两次的平均数。
- ④认真确定临界树。绕测时，对于相切的树木，必须认真观测，如距离较远不易判断时，应采取

$$R = \frac{50}{\sqrt{F}} D$$

实测距离进行判断。方法是测定树木胸径，计算样圆半径  $R = \frac{50}{\sqrt{F}} D$ ，然后测定树木到样点的距离  $S$ 。

若  $S = R$ ，相切；

若  $S > R$ ，相余；

若  $S < R$ ，相割。

#### 林缘误差的消除

在典型取样调查时，角规点尽量不要选在靠近林缘处，如果靠近林缘，则绕测时样圆可能会超出林地边界范围，造成林缘误差。

消除林缘误差的方法是划出林缘带，具体方法是：按样点周围最粗树木的胸径计算出样圆半径

$$R = \frac{50}{\sqrt{F}} D$$

，按样圆半径画出林缘带。布点时凡是角规点落在林缘带范围内时，则不能进行全圆绕测，而应根据具体情况，面向林内绕测半圆， $1/4$  或  $1/3$ ，然后把绕测结果加大一倍，4 倍 或 3 倍，作为该角规点的全圆绕测结果。

#### 胸径和树高的测定

分别树种测定平均胸径、平均地径和平均高，并测定林分中优势木的胸径、地径和树高。

1) 平均胸径是林分平均断面所对应的直径，是林木胸径平方的平均数。需要分别树种测定每株树的胸径，然后计算得到。

2) 每个树种选取 3-5 株相当于平均胸径大小的树木测地径和树高，取其平均值为平均地径和平均树高。

3) 在林分中选择 3 株树高最高、树冠完整的树木作为优势木，测定其胸径、地径和树高。

胸径、树高的测定方法参照块状样地调查。

#### 年龄、地理及林下因子的测定

(1) 一个小班内至少需要选取一株优势树种接近平均直径的树木和优势树木分别打生长锥（最好每个观测点都打一个），测定年龄。

(2) 坡位分为山脊、上坡、中坡、下坡。坡向、坡度、海拔的测定参照块状样地调查。

(3) 更新和林下植被的测定参照块状样地调查。

#### 角规调查小组

(1) 每组 3 人

司尺员：①用手持罗盘仪测量坡度、坡向。②在观测点周围选取 3 株胸径最粗或树高最大的树进行检尺每 100m<sup>2</sup> 测一株树高最高、树冠完整的树木。③根据角规员所确定的优势树种的平均木，钻取生长锥以得到林分年龄。

角规员：①用杆式角规进行角规绕测。②根据进入角规检尺范围内的树木，确定各树种接近平均胸径的 3-5 株树，分别量测胸径、地径、树高。

记录员：①携带相关文件资料，记录各测量数值填入表格。②在记录观测点坐标时分别记录 GPS 坐标与地图坐标。③记录林下灌草及更新状况。

#### (2) 每组 2 人

司尺员：①用手持罗盘仪测量坡度、坡向。②用杆式角规进行角规绕测。③根据进入角规检尺范围内的树木，确定各树种接近平均胸径的 3-5 株树，同时确定 2-3 棵优势木，量测胸径、地径、树高。

记录员：①携带相关文件资料，记录各测量数值填入表格。②在记录观测点坐标时分别记录 GPS 坐标与地图坐标。③根据角规员所确定的优势树种的平均木，钻取生长锥以得到林分年龄。④记录林下灌草及更新状况。

立地质量、林木结构和林分结构是生长与收获预估的先决条件。

建模方式：至上而下、至下而上

建模学科：生长建模、生态建模

模型类别：白箱模型、灰箱模型、黑箱模型

建模机理：经验模型、过程模型、混合模型

模型尺度：区域水平、景观水平、森林水平、林分水平、径阶水平、单木水平

林木结构与林分结构

单木水平静态模型：基于林木结构的异速生长关系 Allometric relationships，即单木水平的异速生长规律。

例如，树高-胸径公式：

$H=1.3+\exp(a+b/(1+d))$ , Wykoff et al. (1982)

$H=1.3+a*D^b$ , Stage (1975)

$H=1.3+a*D/(b+D)$ , Gunst ad Mason (1980)

$H=1.3+a*\exp(-b*D^c)$ , Curtis (1967)

$H=1.3+a(1-\exp(-b*D^c))$ , Huang et al. (1992)

$H=1.3+a(1-\exp(-b*D))^c$ , Richards (1959)

$H=1.3+a/(1+b*\exp(-c*D))$ , Pearl and Reed (1920)

$H=1.3+\exp(a+b*D^c)$ , Larsen and Han (1987)

$H=1.3+a*D^b(b*D^c)$ , Sibbesen (1981)

$H=1.3+a*H_{dom}^b*(1-\exp(-c*D))^d$ , Guo et al. (2019)

$H=1.3+(a+b*CCF+c*BAL)*(1-\exp(-d*D^e))$ , Guo et al. (2019)

其他常见的林木异速生长关系还有：冠幅-胸径公式，冠长-树高公式，根冠比公式，生物量模型等。

林木结构的动态变化问题：例，从幼龄林到成熟林的生物量分配动态变化

林分水平静态模型：

树高-胸径公式

生物量公式

直径分布模型

人工林和天然林的三大区别：

树种组成：纯林 vs. 混交

林层结构：单层 vs. 复层

年龄结构：同龄 vs. 异龄

林分结构的动态变化问题：森林演替的动态变化、人为干扰（例，间伐）、自然干扰（例，野火）

例，林分直径三参数 Weibull 分布:

$$f(x)=(c/b)*((x-a)/b)^{(c-1)}*\exp(-((x-a)/b)^c); x \geq a, b > 0, c > 0$$

Characterizing diameter distributions for uneven-aged pine-oak mixed forests in the Qinling Mountains of China (Sun et al. 2019).

$$f(x)=(c/b)*((x-a)/b)^{(c-1)}*\exp(-((x-a)/b)^c); x \geq a, b > 0, c > 0$$

$$y_s=f(D_{qs}, BA_s, N_s, D_q, BA, N, H_d, RS, D_{qs}/D_q, BA_s/BA, N_s/N)$$

$$b=-a(G_1/G_2)+sq((a/G_2)^2*(G_1^2-G_2)+(D_q^2/G_2))$$

$$b^2(G_2-G_1^2)-D_{hat\_var}=0$$

直径分布的预测通过 Weibull 函数来实现，其概率密度方程为:

$$f(x; \beta_1, \beta_2, \beta_3) = \left(\frac{\beta_3}{\beta_2}\right) \left(\frac{x-\beta_1}{\beta_2}\right)^{\beta_3-1} \exp\left[-\left(\frac{x-\beta_1}{\beta_2}\right)^{\beta_3}\right]$$

式中， $\beta_1$ ， $\beta_2$ ，和  $\beta_3$  分别为 Weibull 分布的位置、尺度和形状参数， $x$  表示立木胸径。位置参数  $\beta_1$  被设定为固定值 5cm，即起测径阶下限。基于林分平均胸径和胸径的方差，采用矩估计参数回收的方法来计算尺度和形状参数。胸径方差的回归方程式为

$$D_{var} = \exp[b_1 + b_2 \ln(D) + b_3 \ln(TBA)]$$

式中  $D_{var}$  表示胸径方差。参数  $b_i$  采用累积分布函数回归 (CDFR (cumulative distribution function regression)) 的方法进行拟合，具体拟合过程参见 Cao (2004) 中的 SAS (Statistical Analysis System) 代码。 $\beta_2$  和  $\beta_3$  的参数回收过程为:

$$\beta_2 = -\beta_1 G_1/G_2 + \left[ \left( \beta_1/G_2 \right)^2 (G_1^2 - G_2) + D^2/G_2 \right]^{0.5}$$

$$\beta_2^2 (G_2 - G_1^2) - D_{var} = 0$$

式中  $G_i$  表示  $\Gamma(1 + i/\beta_3)$ ;  $\Gamma(\cdot)$  表示完整的 gamma 函数。

Table 3.1. Regression equations for diameter variance ( $D_{var}$ ) and Weibull parameter  $c$  for pine-oak forests.

	$D_{var}(b_i), i=1,2,\dots,4$ / $c_j, j=1,2,\dots,6$	$R^2$
All	$\exp(b_1+b_2*\ln(BA)+b_3*(N/1000)$	0.5344
	$\exp(c_1+c_2*D_q+c_3*\ln(BA)+c_4*N/1000$	0.1908
<i>Pinus tabulaeformis</i>	$\exp(b_1+b_2*\ln(D_{q1})+b_3*\ln(BA_1)+b_4*(D_{q1}/D_q)$	0.4682
	$\exp(c_1+c_2*D_q+c_3*\ln(BA)+c_4*N/1000+c_5(D_{q1}/D_q)+c_6(BA_1/BA)$	0.4001
<i>Pinus armandii</i>	$\exp(b_1+b_2*D_q^2+b_3*\ln(BA_2)+b_4*\ln(N_2)+b_5*(N_2/N)$	0.5227
	$\exp(c_1+c_2*D_q+c_3*\ln(BA)+c_4*N/1000+c_5(BA_2/BA)$	0.2250

<i>Quecus aliena</i>	$\exp(b_1+b_2D_q3+b_3\ln(BA_3)+b_4\ln(N)+b_5(N_3/N))$	0.5256
	$\exp(c_1+c_2(N_3/1000)+c_3\ln(Hd)+c_4RS+c_5(N_3/N))$	0.3397
Others	$\exp(b_1+b_2D_q4+b_3\ln(BA_4)+b_4\ln(N_4))$	0.5782
	$\exp(c_1+c_2D_q4+c_3\ln(BA)+c_4\ln(Hd)+c_5RS+c_6(D_q4/D_q))$	0.1069

# 第十一讲 林木动态生长

第一节 树木生长量与生长率

第二节 平均生长量与连年生长量

第三节 树木生长方程

第四节 代谢尺度理论

Q11. 树木生长，生长率，生长方程的变量及其生物学原理是什么？

出材率，大径材 vs. 小径材

采伐运输，大径材 vs. 小径材

Tree species composition	f(mix)
Stand structure	f(di)
Stand density control	N/ha
Stand stocking control	BA/ha
Thinning and rotation	Thin%
Forest regeneration	R(zeta)

林木生长理论与模型

Metabolic Scaling Theory 代谢异速生长理论 (3/4 幂律)

Metabolic scaling theory (MST) shows that the rate at which networks deliver energy to an organism is proportional to its mass raised to the 3/4 power.

$$\ln(iv) = a_t + \alpha_t \cdot \ln(v)$$

$$B = B_0 \cdot M^{(3/4)}$$

Equation set of forest dynamics

I	$w_i = \alpha \cdot w^{\beta}$	} The allometric relationship of tree structure The probability density function of stand structure The metabolic scaling theory of tree growth The -3/2 self-thinning rule of stand density control The gap model theory of forest regeneration
II	$f(d_i) = f(A, S, D)$	
III	$\ln iv = \alpha + 3/4 \cdot \ln v$	
IV	$\ln N = \alpha - 3/2 \cdot \ln V$	
V	$R = \alpha - \beta \cdot G + \gamma \cdot S$	

森林动态方程组

I	$w_i = \alpha \cdot w^{\beta}$	} 林木异速生长定律 林分结构概率密度分布规律 林木生长新陈代谢尺度理论 林分密度自疏伐理论 森林更新林窗理论
II	$f(d_i) = f(A, S, D)$	
III	$\ln iv = \alpha + 3/4 \cdot \ln v$	
IV	$\ln N = \alpha - 3/2 \cdot \ln V$	
V	$R = \alpha - \beta \cdot G + \gamma \cdot S$	

## 第十二讲 林分动态生长

### 第一节 解析木数据与年轮气象学

平均木，优势木  
立地条件，林分密度  
树种组成，林分结构

### 第二节 木芯数据与径向生长

生长锥，木芯样本  
年轮扫描仪  
多元统计，非线性回归  
时间序列分析

### 第三节 单木水平长期复位监测

生态定位站，径向微生长测量  
森林一类清查，固定样地，每木检尺

### 第四节 径阶净增量与转移概率

转移概率矩阵模型

Q12. 解析木数据可以提供哪些对林业生产和科研有用的信息？

### 物种增长理论与模型

理论一：纯林（单树种）的无限资源生长定律，森林资源增长符合指数规律，exponential 模型

$$N(t+\Delta t)-N(t)=r\Delta tN(t)$$

$$dN/dt=rN$$

$$N(t)=N_0\exp(r(t-t_0))$$

理论二：纯林（单树种）的有限资源种内生存规律，即改进的逻辑斯蒂 Logistic 模型

$$dN/dt=r(1-N/N_{\max})N$$

$$N(t)=N_{\max}/((1+(N_{\max}/N_0-1)\exp(-rt)))$$

理论三：森林生态系统的种间竞争规律，即 Lotka-Volterra 生态系统模型

$$dN_1/dt=r_1(1-(N_1+\alpha_1N_2)/N_{\max1})N_1,$$

$$dN_2/dt=r_2(1-(N_2+\alpha_2N_1)/N_{\max2})N_2.$$

## 树木年轮学

建立模型首先要获取林木生长数据，而树龄、早材率、晚材率等数据不能直接测量得出，需要用到树木年轮学相关知识。树木年轮学以树木年轮为材料进行分析定年，年轮中记载了大量与环境有关的变量，能够确定具体日期，进而探测到气象信息，重建气候变化过程(黄敬 2022)。Chen 等利用油松早材宽度年表重建了 1691-2006 年中国中北部的降水记录(Chen 2013)。除了从较为宏观的年轮宽度，还可以从微观的树木细胞结构入手，Helama 通过研究霜冻后的细胞结构来追溯火山爆发的年代(Helama 2010)。树木年轮资料具有定年精确、分辨率高等特性，使得树木年轮研究更具有可行性。树木年轮研究的主要对象常常是树轮的宽度、密度，这些数据可用于分析树木的自身生长状况和生长发育规律。Wagner 等学者借助激光雷达系统对林木进行体积分析，得到树木在特定时间点的体积和碳储量(Wagner 2018)。本文的研究对象油松(*Pinus tabulaeformis*)是我国北方地区主要造林树种之一,该树种在园林绿化、水土保持、植被恢复等方面作用显著(刘平 2009)，因其对气候因子响应敏感，其年轮数据已被广泛用于树木年轮学的研究中(李颖辉 2022)。

获取树木年轮资料常利用生长锥采集木芯样本，这种方法简便快捷，成本较低，不需要将树木截断，不会对林木本身及周边环境造成严重破坏。借助计算机分析软件可以对木芯样本进行扫描分析，本次研究选用的是加拿大 REGENT 公司的 WinDENDRO 年轮分析系统。该年轮分析系统分为硬件系统、软件系统两部分，硬件系统的主要作用是对木芯进行扫描并获取年轮图像，而软件部分则是在得到年轮图像后对其进行分析并获取实验数据。WinDENDRO 可以在图像分析过程中进行交叉定年，即对相关的年轮宽度曲线进行对比，结合图像的年轮判别以更正测量和定年错误(何海 2005)。

## 时间序列分析在生态学中的应用

随着各类学科之间相互交叉的产生，研究人员逐渐将时间序列分析方法应用于林业生态学等研究中。时间序列就是一系列随着时间变化的有序数据，而时间序列分析就是通过对时间序列进行的观察、探究，发现数据随时间变化的规律，并对序列将来的走势进行预测(王雨茜 2013)。早期的时间序列分析被称为描述性时间序列分析，主要通过直观的数据比较和绘图观测来寻找时间序列中蕴含的规律(陈磊 2012)。然而在新的研究领域内，因描述性时间序列分析不能深入挖掘时间序列中蕴藏的信息，存在着很大的局限性，为了准确把握随机序列的变化规律，从 1920 年开始，科学家们开始利用数理统计学原理分析时间序列(汪仁官 1982)，并把研究的重心转移到分析序列值内在的相关关系上，时间序列分析由此诞生了(陈磊 2012)。早在上世纪 90 年代，邱学清等人就借助时间序列分析的方法，建立了黑荆树林分总生长量的模型，对林分平均直径、平均高、蓄积量的月总生长量进行了预测(邱学清 1989)。吴承侦等人运用多维时间序列分析的方法，以五物种影响杉木直径生长的主导气象要素作为控制因子，建立了杉木直径生长的 CAR 模型，从而对杉木直径生长进行一年预测(吴承侦 1999)。刘素青等通过对胸径、树高进行分析，发现二者之间存在着协整关系，即胸径的生长有利于树高的生长，得出在今后森林培育中应当更加注重对胸径的培育这一结论(刘素清 2007)。

传统的时间序列分析方法主要有滑动平均法、指数平滑法等，应用于确定性时间序列的分析。随着该方法的不断发展，目前常用的时间序列分析基本模型包括 ARMA 模型和 ARIMA 模型，其预测精度有很大提升。

## 树木径向生长对气候因子的响应

树木的生长与气候有着密不可分等关系，近年来由于全球气候变化，林木的生长也必然会受到影响，树木径向生长对气候变化的响应逐渐成为全球关注研究的热点问题之一(王延芳 2020)。研究表明，不同物种对升温造成的干旱胁迫反应不同，黄菠萝生长随温度升高而升高，但蒙古栎生长却随温度升高而呈下降趋势(韩金生 2019)。研究人员发现在干旱地区，干旱可能是影响未来白云杉生产力的主要气候因素，并最终影响其在未来气候变化中生存的能力。此外，其他气候因子，如降雪和夏季温度，也将是重要的决定因素，随着时间的推移，森林生

态系统对气候变化的响应可能会发生改变(Griesbauer 2012)。有研究表明,不同植被类型的全新世植被气候的敏感性存在差异,低海拔地区的松树和栎树对季风引起的降水变化更敏感,而高海拔地区的桦树对全新世初期的温度变化更敏感(Liu 2014)。

进行时间序列建模前需要先对序列进行平稳性检验和白噪声检验。一个平稳性时间序列,其样本数据的均值、方差等统计量在未来仍能保持不变,即随机变量的历史和现状具有一定的可延续性,这样才能以随机变量的历史和现状推测其未来(管河山 2016)。因此,对序列进行平稳性检验是进行预测前至关重要的一步。平稳性检验一种方法是观察时序图,根据图像是否有趋势性、季节性、周期性等判断序列是否平稳;另一种方法是画出自相关图,根据图像特征判断序列是否平稳(刘荣其 2009)。

白噪声检验又称纯随机性检验,用于检验序列是否为纯随机序列。如果一个序列是纯随机序列,那么它的序列值之间应该没有任何相关关系,这些大小不同的数据完全是由随机波动造成的,利用这些数据无法提取有用信息对未来进行预测。白噪声检验不仅可在建模前检验序列是否有继续研究的价值,而且可以在建模后对残差进行检验,根据是否提取出全部信息判断模型的有效性。在进行白噪声检验时,由于观察序列的有限性,导致纯随机序列的样本自相关系数不会绝对为零。所以,当某序列的自相关系数在零值附近,或者说位于 2 倍标准差之内时,可以认为它是纯随机性序列。

序列预处理完成后可对其进行建模分析,本研究用到的时间序列建模方法有:

#### (1) 简单指数平滑法

指数平滑法是布朗所提出,布朗认为时间序列的态势具有稳定性和规则性,因此时间序列可被合理地顺势推延;认为最近的过去趋势,在某种程度上会持续到最近的未来,因此将较大的权数放在最近的资料上。

指数平滑法是通过计算指数平滑值,配合一定的时间序列预测模型来对现象的未来进行预测。其原理是任一期的指数平滑值是本期实际观测值与前一期指数平滑值的加权平均。简单指数平滑法适用于没有明显趋势或季节性的数据(Hyndman 2018)。

#### (2) Holt 两参数指数平滑法

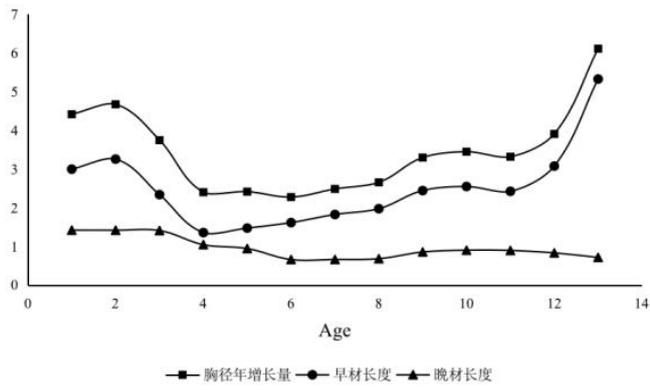
实际上,时间序列常常并非平稳性时间序列,而是带有一定趋势性的,Holt 将简单指数平滑法扩展到可以预测具有趋势的数据,提出了 Holt 两参数指数平滑法,该方法可用于对含有线性趋势的序列进行修匀。

其基本思想为:假设序列有一个比较稳定的,即每期增加或减少  $r$  的线性趋势,那么第  $t$  期的预测值应该是第  $t-1$  期的实际值与每期固定趋势变动值的加和。然而受随机因素的影响,每期的变动值实际上不会总是为  $r$ ,该值也会随着时间变化而处于上下波动之中,故趋势序列也是一个随机序列。

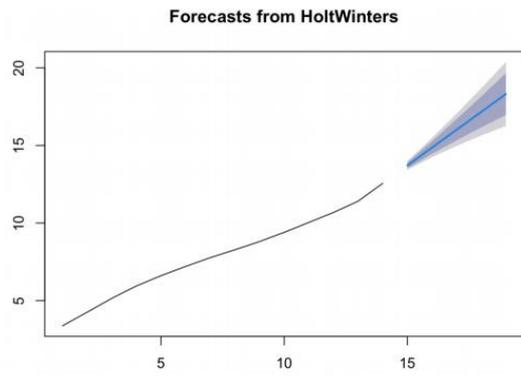
#### (3) ARMA 模型

ARMA 模型又称为自回归移动平均模型,是目前最常用的拟合平稳序列的模型。可细分为 AR 模型、MA 模型和 ARMA 模型三大类。

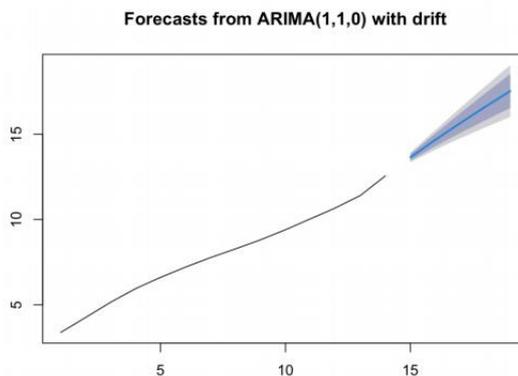
AR 模型即自回归模型(autoregressive model),自回归中的“自”表明该模型是对变量自身进行的回归,该模型的预测原理是基于目标变量历史数据的组合对目标变量进行预测。MA 模型即移动平均模型(moving average model),其原理是利用历史预测误差来建立一个类似回归的模型。ARMA 模型就是将差分和自回归模型以及移动平均模型结合起来得到的。



油松胸径年增长率、早材长度、晚材长度折线图



(a) 油松胸径序列 ARIMA(1,1,0)预测图



(b)油松胸径序列 ARIMA(1,1,0)预测图

# 第十三讲 经验生长模型

第一节 全林生长模型

第二节 径阶生长模型

第三节 单木生长模型

第四节 林分密度控制图

Q13. 经验模型按尺度分，需要哪类森林调查/测树/建模数据？

Table 1. A classification of growth and yield models (Cao 2003).

Models of stand development	Definition and description
Whole-stand models	
Density-free whole-stand models Normal yield tables Empirical yield tables for average current stands	Density-free models assume a predetermined stand density development over the rotation. For a given species, site, and location, stand development is a function of time only, and follows a predefined trajectory.
Variable-density whole-stand models Predict current volumes a. Explicit models b. Implicit models (diameter distribution) Predict future growth and volumes a. Explicit models i. Direct growth prediction ii. Stand density prediction b. Implicit models (diameter distribution)	For a considerable period of time, these models were the prevailing basis of stand projection and they still are used in practice.  A relationship between variables is implicit when the variables in the equation are defined and the dependent variable(s) identified, but the relationship is not quantified. When this relationship is specified, it becomes explicit.
Diameter class models  Empirical stand table projections  Diameter class growth models	The diameter class models separately simulate the growth in each diameter class by calculating the characteristics, volume, and growth of the average tree in each class and multiplying this average tree by the inventoried number of stems in each class.  The two diameter class methods are distinguished by whether actual radial increment data collected from the subject stand are used to model the trees or whether generalized growth functions based on research sample data are used.
Age/stage-structured models	These models are based on grouping individuals into cohorts, characterized by the age, size, or developmental state of an individual. Tree growth is described as a transition from one stage to another.
Individual-tree models  Distance-dependent  Distance-independent	Individual-tree models are usually grouped into two classes: distance-dependent and distance-independent, based on whether or not they utilize information about the locations of other trees close to the subject tree.
Process based models	Process based models operate on a representation of the physiological processes of the tree. The structure and resolution varies but typical processes included are photosynthesis, respiration, allocation, and decomposition.

Source: Valsta, L. 1993. Stand management optimization based on growth simulators. p.11-13

Davis et al. 2001. Forest Management. p.186-187

Formodels - European Institute of Planted Forest (plantedforests.org)

[https://www.plantedforests.org/formodels\\_database\\_forest\\_modeles\\_liste/](https://www.plantedforests.org/formodels_database_forest_modeles_liste/)

全林模型最早产生于 19 世纪 80 年代的德国，是用于模拟森林生长量与林分产量的方法。如今，已经广泛应用于林业研究和实践中。按照是否将林分密度作为自变量，全林模型可以分为固定密度模型和可变密度模型。在固定密度全林模型中，又可以按照林分具有的最大密度或者平均密度，分为正常收获模型（即正常收获表）和经验收获模型（即经验收获表）。

正常林分是指适度郁闭（疏密度为 1.0 或完满立木度）、林木生长健康且林木在林地上分布较均匀的林分。这种林分在某一里地条件下，密度适中、生长发育正常、蓄积量最高。反映正常林分各主要调查因子生长过程的数表，称作正常收获表（normal yield table）。以现实林分为对象，以实现林分中的具有平均密度状态的林分为基础所编制的收获表，称作经验收获表（empirical yield table），亦称作现实收获表。

例. 全林模型的构建。基于临时样地的调查数据，可以构建用于估算林分平均高、林分断面积、林分平均胸径的全林模型系统。全林模型的最大优点是林分水平蓄积预测的准确性，而且这一模型仅需要临时样地的最基本信息就可以构建。该技术在秦岭林区和黄土高原已被成功应用于油松（廖梓延等 2017, Tian et al. 2020），华山松（薛海连等 2021），以及辽东栎（Yang et al. 2020）可变密度全林模型的开发。需要注意的是，这一模型系统方便用于给定林分密度指数数值的情况下，生成可变密度林分收获表，但是不适用于特定的真实林分。

基于完满立木度林分林分密度（N）与平均胸径（D）的关系，采用 Reineke (1933)的林分密度指数（SDI）来描述同龄林内的竞争环境。林分总断面积模型和平均胸径模型采用了 Schumacher 模型（Schumacher 1939）的基本结构，林分密度则是基于林分断面积与平均胸径的关系推算出来。可变密度全林模型主要计算公式如下：

$$SDI = N \cdot (Dg/20)^{\alpha_1}$$

$$BA = \alpha_2 \cdot H_{dom}^{\alpha_3} \cdot \exp(-\alpha_4 \cdot (SDI/1000)^{-\alpha_5} / Age)$$

$$N = 40000 \cdot BA / (\pi \cdot Dg^2)$$

其中 SDI 为林分密度指数，Dg 林分平均胸径，BA 林分胸高断面积，H<sub>dom</sub> 林分优势高，Age 林分年龄，N 每公顷株数密度， $\alpha_1-5$  待拟合参数。

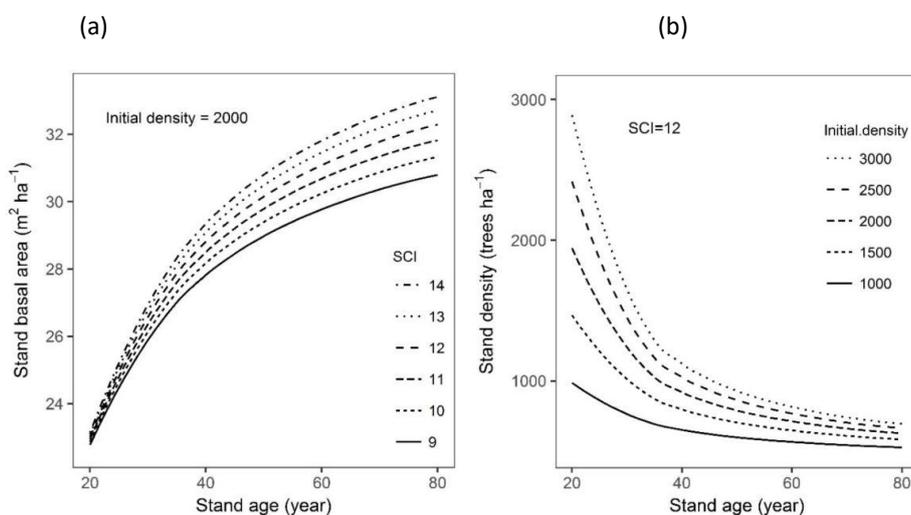


图. (a) 不同地位级指数下林分断面积生长过程。(b) 不同初始密度下的林分枯损过程。

Fig. (a) Development of stand total basal area on different sites. (b) Development of stand density with different initial density.

相比全林模型与径阶模型，单木模型具有更强大的功能，尤其对于异龄林的生长与择伐的模拟，但是其相应对于数据的要求也更加严格。构建单木模型系统需要下列5个模块：单木胸径生长模块；单木树高模型或树高生长模块；单木存活模块或枯损模块；进界模块；幼树胸径生长模型 (Vanclay, 1994; Trasobares et al., 2004)。

在模型用于林分生长动态模拟时，一个5年生长期按下列步骤进行仿真：1) 计算每棵树存活的概率，若存活概率高于0-1均匀分布随机数则按保留株计算；2) 计算每棵树胸径生长量，并加到现在的胸径上；3) 利用树高模型更新树高；4) 预测进界林木的数量、初始胸径和树高；5) 根据预测的进界生长来增加新树到样地中。

Tian et al. (2020) 基于三阶段建模法开发的单木模型系统，结合贝叶斯方法和虚拟数据，以5年的时间间隔用于模拟胸径生长和进界生长。该模型体系主要包括与距离无关的胸径生长、存活概率、树高预测三个模块。

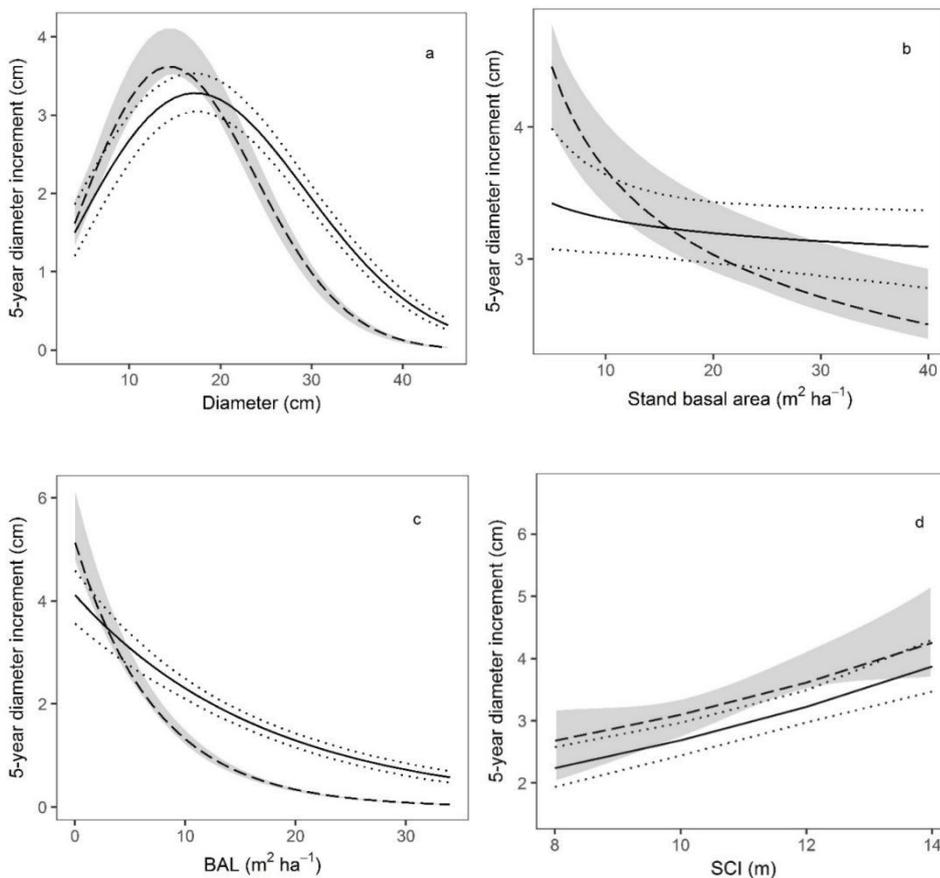


图 基于虚拟数据与木芯数据拟合的胸径生长模型敏感性差异

**Fig.** Comparison of individual-tree diameter increment predictions based on simulated virtual data and increment cores approach.

## 自疏伐与林分密度控制

理论：Reineke 的 1.605 自疏系数与 Yoda 的 -3/2 法则，即林分水平的异速生长规律。

$$\ln(N) = \beta - 2/3 * \ln(V), \text{ (Yoda et al., 1963)}$$

$$\ln(N) = \beta - 1.6 * \ln(D), \text{ (Reineke, 1933)}$$

其他改进模型:

$$\ln(N) = \beta - 2 \cdot \ln(HT), \text{ (mitchell, 1975; Garcia, 2009; Burkhardt, 2013)}$$

$$\ln(N) = \beta \cdot (H - 1.3) / D, \text{ (Vanclay, 2009)}$$

$$RS = \sqrt{10000/N} / HT, \text{ (Hurt, 1926)}$$

Gmax, (Assmann, 1970; Steba and Monserud, 1993)

$$dN/N = -2 \cdot (G/G_{max})^n \cdot dD/D, \text{ } G_{max} = G \cdot (1 - (N/N_0)^n)^{-1/n}, \text{ (Vanclay, 2010)}$$

与距离有关 Distance-dependant 的竞争指数: Hegy 指数

与林冠竞争 Crown competition 有关的指标: CPA, CCF, CR

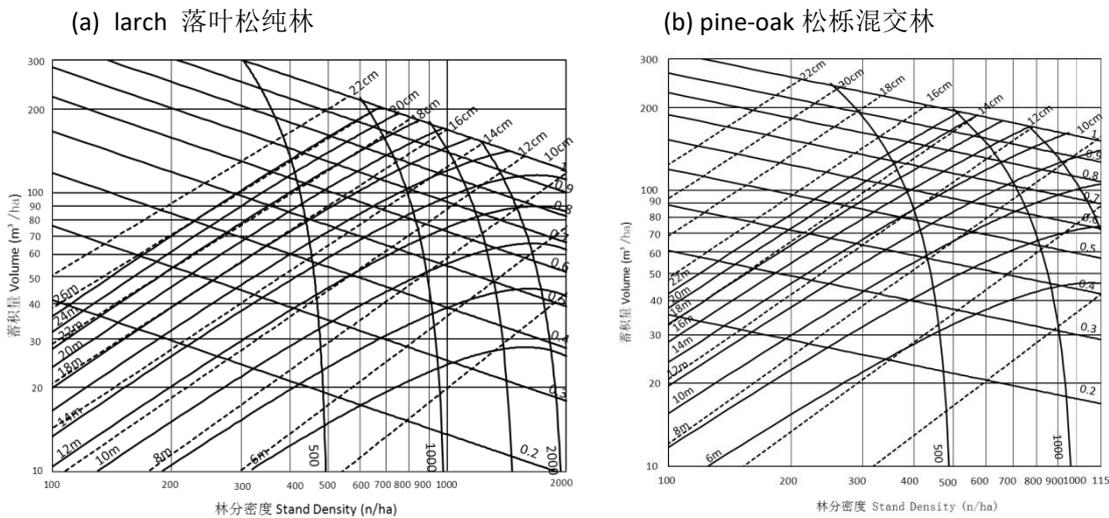


图. 林分密度控制图

### 林分密度控制图的绘制

在双对数坐标系  $\log N - \log V$  中, 对应于不同树高阶、径阶, 任取一林分密度值  $N$ , 就有一个对应的林分蓄积量值  $V$ , 将  $(N, V)$  值成对展绘与其中, 连接成平滑曲线, 便可得到等树高曲线、等直径曲线。

在双对数坐标系  $\log N - \log V$  中, 利用最大密度线模型、各疏密度级模型, 任取一林分密度值  $N$ , 就有一个对应的林分蓄积量值  $V$ , 将  $(N, V)$  值成对展绘与其中, 连接成平滑曲线, 便可绘出最大密度线, 即疏密度为 1 的蓄积上线。同时可以绘制出各等疏密度线。

将不同初值密度  $N_0$ , 带入求得的自然稀疏线模型中, 任取一林分密度值  $N$ , 就有一个对应的林分蓄积量值  $V$ , 将  $(N, V)$  值成对展绘与其中, 连接成平滑曲线, 便可得到自然稀疏线。

集中绘制 5 组曲线于双对数坐标系中, 便可以得到落叶松人工林的林分密度控制图。以及松栎混交林的林分密度控制图。

从图中可以明显看出人工林与天然混交林最大密度线斜率的差异。人工林大于天然林, 这是由于人工林比天然林速生的原因。在编制最大密度线时, 落叶松人工林 Yoda 公式的  $b$  参数值为 -1.483, 松栎混交林为 -1.304, 接近于 1.5, 这说明其满足 3/2 法则。

## 生长与收获预估的数据采集

经验模型：DBH, H, Age, Cw, Cl, Cr

全林模型：随机抽样，二类数据，林分水平

径阶模型：分层抽样，复测数据，径阶水平

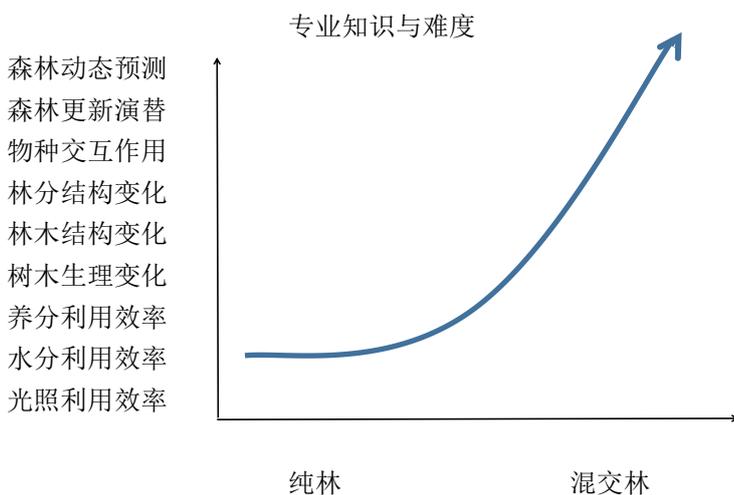
单木模型：系统抽样，一类数据，单木水平

更新数据：带状抽样/大样地，复测数据

枯损数据：带状抽样/大样地，复测数据

尽管临时样地调查可以获取包括胸径、树高、冠幅、林型（灌草）、土壤、地形（坡度、坡向、海拔）等数据，但是完整的单木模型系统对于数据的要求十分严格，部分必需的数据通过临时样地调查方法往往难以获得，尤其是以下数据：单木五年间带皮胸径生长量（cm）；单木五年间存活概率；进界株数（株/每公顷）；五年生长后的进界树的平均胸径。因此，为构建单木生长模型，需要建立样木定位的固定样地，并进行复测。调查样地内每棵树的胸径、树高、冠幅，并记录样地内5年间的枯损木，幼树进界株数和进界后平均胸径。

## 纯林与混交林的森林生产力和生物多样性



## 理论一：生产生态学 Production Ecology

初级生产力  $GPP = \text{资源总供给} * \text{获取资源的部分} * \text{资源利用效率}$

养分有效利用率 NUE

水分有效利用率 WUE

光照有效利用率 LUE

## 理论二：结构-功能复杂性 Structure-functional complexity

林分结构变化与 APAR 变化

LUE 变化与 C 分配

林分密度对 WUE 的影响

## 理论三：森林生态复杂系统

生态复杂系统的复杂度：

树种组成、林分结构、生态系统功能的复杂度

生态复杂系统的重要度：

优势树种、优势林层、优势高的重要度

生态复杂系统的可靠度：

生态系统的脆弱性、敏感性、不确定性、自适应性

生物多样性 => 稳定的生态系统 => 生态恢复

生物多样性 => 森林生产力 => 森林碳汇功能

生物多样性 => 结构与功能 => 生态系统服务

森林生态系统定位观测指标体系：森林蓄积、森林生长、林分结构、树种组成、森林生物量、生物多样性、森林小气候、森林气象、森林土壤、森林水文、森林健康。

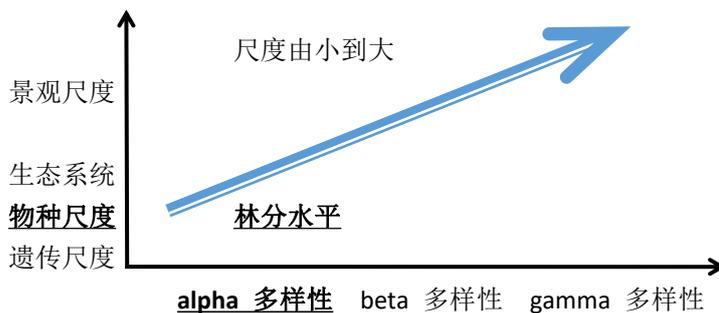
林分结构：胸径结构 => 大小多样性，树高结构 => 冠层多样性，年龄结构 => 龄级多样性

粗木质残体：枯倒木 => 森林微生物，森林昆虫 => 生态链

濒危物种：胸径结构，树种组成，年龄结构（生境） => 敏感物种密度

草灌层的物种多样性：林型，群落，地被指示物，气候响应，间伐响应

土壤层的微生物多样性：凋落物，土壤碳库，动态分解



森林生态复杂系统建模方法：

三阶段建模法（降低系统的不确定性）

平行系统建模（提高系统的可靠性）

重要度研究是系统优化，灵敏度分析，可靠性设计，风险分析，及资源配置的主要数学工具（偏微分）

系统单元对时间的导数 => 时间对系统可靠性的影响

随机过程与重要度结合 => 时间累积和过程变化对系统可靠性的影响

重要度研究包括：

结构重要度，

概率重要度，

周期重要度

综合重要度：(Si et al. 2014. SAS 软件研究所采用)

## Stochastic processes 随机过程

泊松过程: 单一变量  $\lambda$  决定了某一时间内事件的发生率

更新过程: 事件间隔是独立的且为同分布随机变量

交替更新过程: 事件时间在两分布中不断交替变换

非齐次泊松过程: 事件发生时间为非稳态序列

连续时间马尔科夫链: 通过时间区间  $(0, S]$  上的转置, 生成服从指数分布的事件时间  $T$  以及为离散值的过程状态  $X(t)$

## 天然林动态预测

Tropical forests 热带, 雨林, 300+ tree species

Temperate forests 温带, 松栎林, 松桦林, 30+ tree species

Boreal forests 北寒带, 云冷杉林, 泰加林, 3+ tree species

原始林, 例如, 亚马逊, 西双版纳; 天然次生林, 皆伐后天然更新, 例如, 秦岭。

北美, 天然林, 人工林; 北欧, 人工林, 纯林; 中欧, 人工混交林; 中国, 天然次生林。

天然林的抵抗力与修复力

生物与非生物胁迫

森林生态系统的脆弱性评价 Vulnerability assessment of forest ecosystem

干旱胁迫, 混交度对水分利用和 WUE 的影响 => 树种组成调整

	非干旱年度	干旱年度
Sp1	$\text{delta}_D * 100\%$	$\text{delta}_D * 50\%$
Sp2	$\text{delta}_D * 100\%$	$\text{delta}_D * 95\%$

风暴胁迫, Windstorm/Snowstorm => 林层结构调整/林冠结构调整

野火胁迫, 草灌层对野火概率的影响 => 林分结构调整

病虫胁迫,

病菌扩散/季节 => 森林作业季节调整/年龄结构调整

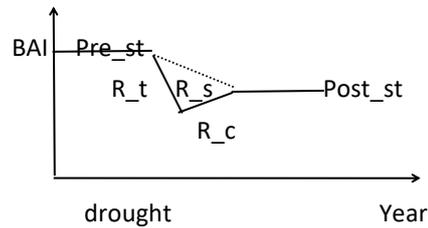
虫口率/成熟林 => 树种组成调整/年龄结构调整

例如, 华山松大小蠹虫害枯损率  $Mor_t = a_0 + a_1 \cdot Dg + a_2 \cdot H + a_3 \cdot Age$ , 其中  $Mor_t$  为线性枯损率,  $Dg$  平均胸径,  $H$  平均高,  $Age$  年龄,  $a_0 - a_3$  待拟合参数。如果考虑年龄限制因素, 则其非线性枯损率可以表达为  $Mor_{nl} = 1 / (1 + Age_{mor} \cdot \exp(-\beta \cdot Age))$ , 其中  $Mor_{nl}$  非线性枯损率,  $Age_{mor}$  为因大小蠹虫害开始枯损的起始约束年龄,  $\beta$  待拟合参数。

## 森林的抵抗力 resistance 与森林韧性/修复力 forest resilience

干旱胁迫的修复力分析 Resilience analysis of drought impacts

Pre-stress, Pre\_st  
Resistance, R\_t  
Resilience, R\_s  
Recovery, R\_c  
Post\_stress, Post\_st



混交林，树种互补，还是竞争？

混交树种互补案例

例如，深根系树种与浅根系树种在干旱年份的水分利用效率变化。

e.g., BAI vs WUE, increment core data/climate data

天然林林木结构动态变化

混交、异龄、复层

(树种组成、年龄结构、林层结构)

天然林的林木结构

立地质量对树高胸径/林冠结构的影响

年龄对树高胸径/林冠结构的影响

林层对树高胸径/林冠结构的影响

混交度对树高胸径/林冠结构的影响， tree-by-tree mixture vs group-by-group mixture

胸径动态变化，阔叶树 vs 针叶树

针叶树， increased

阔叶树， decreased

树高动态变化，林层

纯林

混交林

针叶树  $\Delta H_{sp1} * 100\%$

$\Delta H_{sp1} * (1-10\%)$

阔叶树  $\Delta H_{sp2} * 100\%$

$\Delta H_{sp2} * (1+2\%)$

树高胸径结构， Site effects? Competition!

天然林的森林生产力预估

中欧混交试验林 141 triplets in Central Europe

Silver fir/Norway spruce,

Norway spruce/Scots pine,

Norway spruce/European larch,

Norway spruce/European beech,

Norway spruce/red alder,  
Scots pine/European beech,  
European larch/European beech,  
European beech/sessile oak,  
European beech/Douglas-fir

天然林的森林生产力

LUE, 天然林 vs 人工林

WUE, 天然林 vs 人工林

NUE, 天然林 vs 人工林

$P1+P2 = P12$

$P1+P2 < P12$

$P1+P2 > P12$

年龄对生产力影响的动态变化, 混交林 vs 相对纯林

T1(young), T2, T3, T4(mature)

T1,  $P12 < P1+P2$

T2,  $P12 < P1+P2$

T2~T3,  $P12 = P1+P2$

T3,  $P12 > P1+P2$

T4,  $P12 > P1+P2$

天然林的更新与演替预测

理论基础

林窗模型理论 The gap model theory

森林更新的波动性 Wave properties of forest regeneration

林分密度对更新的影响

立地质量对更新的影响

幼树幼苗的枯损: Density-dependant, Species-dependant, Site-dependant

进界的预测 Prediction of ingrowth/recruitment

$R = a - \alpha * G + \beta * N$

$R = a - \alpha * G + \beta * S$

$R = \zeta * R_{max} * f(L) * S$ , if  $\zeta < f(L) * S$

天然林动态预测数据需求: NFI 数据、更新数据、枯损数据、解析木数据、木芯数据、气象数据、幼树树高生长数据、幼树幼苗枯损数据。

# 第十四讲 过程生长模型

第一节 过程机理模型

第二节 半经验半机理混合模型

第三节 平行系统模型

第四节 林窗理论与森林更新

Q14. 如何提高过程模型的准确性和普适性?

Farquhar 光合作用公式

The Farquhar et al. (1980) biochemical equation

$$A_n = \min\left(\frac{V_{cmax} \cdot (C_i - \Gamma^*)}{C_i + K_C \cdot (1 + \frac{O_i}{K_O})}, \left(\frac{J}{4}\right) \cdot \left(\frac{C_i - \Gamma^*}{C_i + 2 \cdot \Gamma^*}\right)\right) - R_d$$

$A_n$ , net photosynthesis

$V_{cmax}$ , carboxylation

$J_{max}$ , regeneration of ribulose

$J_{max}$  和  $V_{cmax}$  受温度的影响，且这一关系相对不同树种皆表现恒定。

$C_i$ , ambient CO2 concentration

$O_i$ , ambient O2 concentration

$GAMMA^*$ , CO2 compensation point in the absence of mitochondrial respiration

$J$ , rate of electron transport

$R_d$ , rate of mitochondrial respiration

$K_C$  and  $K_O$ , the Michaelis-Menten coefficients of Rubisco activity for CO2 and O2

第一节 碳平衡理论

林木生长的碳平衡模型 *A carbon balance model of tree growth*

$$W_r = \alpha_r \cdot W_f$$

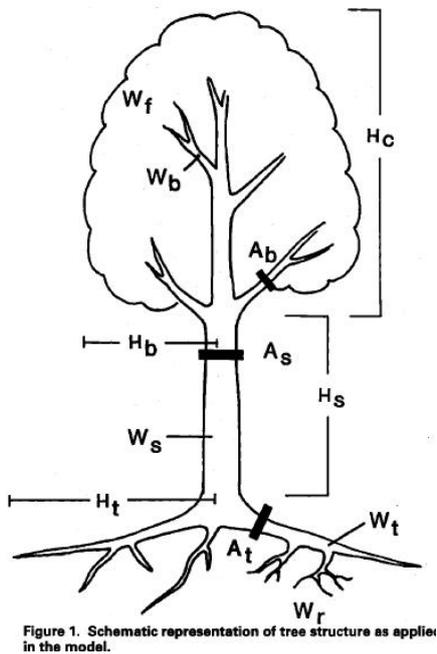
$$W_f = \xi' \cdot A_c^\zeta$$

$$dW_i/dt = G_i - S_i$$

$$G = \sigma_i(G_i) = (P-R) \cdot Y^{(-1)}$$

$$R_m = r_1(W_f + W_r) + r_2(W_s + W_b + W_t)$$

G 为树木总生长量，i 代表树木不同器官，P 指光合作用生产量，R<sub>m</sub> 为维持呼吸作用，R 指呼吸作用消耗量，Y 为转化因子，P<sub>0</sub> 为单位面积最大光合利用率，N 为每单位林木株数，K 为消光系数，L 为叶面积指数，W 为干重，r<sub>1</sub>、r<sub>2</sub> 为经验参数。



### 管道模型理论 The pipe-model theory

$$A_i = \alpha_i * W_f, i=s,b,t$$

$$W_f = \alpha * SW_{cba}$$

### Beer-Lambert 法则 The Beer-Lambert law

$$P = P_0 * (1 - \exp(-k * L)) / N$$

碳分配的优先权: 呼吸, 树叶, 细根, 树干

### 碳分配的三种方法 Three primary approaches to carbon allocation

#### 管道模型 Pipe model

管道模型理论假设, 树根和树叶间由管道相连。

树根 Roots + 管道 Pipes + 树叶 Foliage

#### 功能平衡 Functional balance

功能平衡理论认为, 在关键的生理过程中, 存在很强的关系。例如, 由树叶固定的碳与根系获得的氮成一定的比例 (根冠比)。

#### 优化分割 Optimal partitioning

在树木, 环境条件和资源有效性间架构关联

## 过程模型数据需求

定位复测，科研样地。

气象数据（WUE），

土壤数据（NUE），

光合仪数据（LUE），

碳通量塔数据（VPD），

小时/天/月/季度/年。

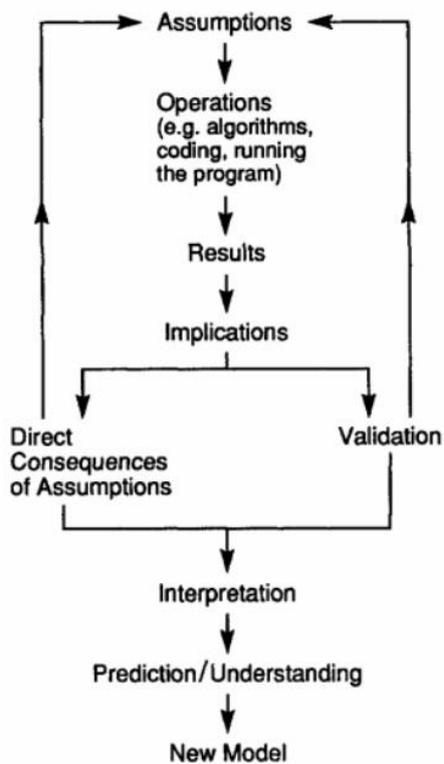
案例：应用 OptiFor 评估森林碳汇

OptiFor 教学版 <http://www.optifor.cn/model/optifor-setup.rar>

问题 1：分别设计 1-5 次间伐方案，模拟计算木材价值和碳汇价值（默认木材价格，折现率，碳汇价格）

问题 2：优化间伐方案（Hint: 间伐次数，间伐时间，间伐强度），计算优化后木材价值和碳汇价值（默认木材价格，折现率，碳汇价格）

问题 3：以 10%，30%，50% 递增碳汇价格，比较碳汇价格提升后的净现值和轮伐期。



# 气候变化对森林冲击评价

气象学 – 农林气象学  
生物学 – 全球变化生物学  
土壤学 – 森林土壤学

气候变化对森林的影响

气候变化对树种迁移的冲击  
区域尺度上森林结构的变化  
气候变化导致的立地质量变化  
林分尺度上森林生产力的影响  
过程机理阐释树木生长的变化  
气候变化下森林的适应性经营

气候变化的仿真与分析

气候变化属性：连续性，波动性，随机性  
应用数学工具：时间序列分析，傅立叶变换，随机过程

数学建模三大技术：优化，仿真，统计

随机模型分类：

第一类，参数里包含随机项  
第二类，变量是随机的  
第三类，模型是随机的

主流随机建模技术的发展过程：

蒙特卡洛仿真 => 蒙特卡洛-马尔科夫链 MCMC => 贝叶斯分析

## 随机数源代码

```
C SIMULATION MODELING AND ANALYSIS
C Law and Kelton 1982
c
C-----
C CHAPTER SIX RANDOM-NUMBER GENERATORS
C-----
C Coded by Tianjian Cao, 07/01/2009
c
C Figure 6.1 FORTRAN function RAND
C for PMMLCG Zi=(7^5*Z_i-1) (mod 2^31 - 1)
C for 32-bit (or larger) words.

FUNCTION RAND(IX)
INTEGER A, P, IX, B15, B16, XHI, XALO, LEFTLO, FHI, K
```

```
DATA A/16807/, B15/32768/, B16/65536/, P/2147483647/
```

```
XHI=IX/B16
```

```
XALO=(IX-XHI*B16)*A
```

```
LEFTLO=XALO/B16
```

```
FHI=XHI*A+LEFTLO
```

```
K=FHI/B15
```

```
IX=((XALO-LEFTLO*B16)-P)+(FHI-K*B15)*B16)+K
```

```
IF (IX.LT.0) IX=IX+P
```

```
RAND=FLOAT (IX)*4.656612875E-10
```

```
RETURN
```

```
END
```

C Figure 6.2 FORTRAN function DRAND for PMMLCG  $Z_i = (7^5 * Z_{i-1}) \pmod{2^{31} - 1}$

C for 16-bit (or larger) words.

```
DOUBLE PRECISION FUNCTION DRAND (IX)
```

```
DOUBLE PRECISION A, P, IX, B15, B16, XHI, XALO, LEFTLO, FHI, K
```

```
DATA A/16807. DO/, B15/32768. DO/, B16/65536. DO/, P/2147483647. DO/
```

```
XHI=IX/B16
```

```
XHI=XHI-DMOD(XHI, 1. DO)
```

```
XALO=(IX-XHI*B16)*A
```

```
LEFTLO=XALO/B16
```

```
LEFTLO=LEFTLO-DMOD(LEFTLO, 1. DO)
```

```
FHI=XHI*A+LEFTLO
```

```
K=FHI/B15
```

```
K=K-DMOD(K, 1. DO)
```

```
IX=((XALO-LEFTLO*B16)-P)+(FHI-K*B15)*B16)+K
```

```
IF (IX.LT.0. DO) IX=IX+P
```

```
DRAND=IX*4.656612875D-10
```

```
RETURN
```

```
END
```

气候敏感性生长模型的预测

*经验模型的预测方法*

$\Delta G = f(\text{Size}, \text{Site}, \text{Comp})$

大小因子 (Size) : e.g. 胸径 D, 树高 H

立地因子 (Site) : e.g. 立地指数 SI, 地位级 SC

竞争因子 (Comp) : e.g. 胸高断面积 BA, 林分密度指数 SDI

$$\Delta G = f(\text{Size, Site, Comp, Clim})$$

气候因子 (Clim) : e.g. 温度 Temp 和降水 Prec 变量

优点: 数据容易获得, 统计回归技术简单

缺点: 环境变化, 即立地质量变化。温度和降水与立地质量的共线性问题。

过程模型的预测方法

从影响光合作用, 养分循环, 以及降水和蒸腾的生理过程机理, 自上而下计算森林的初级生产力。

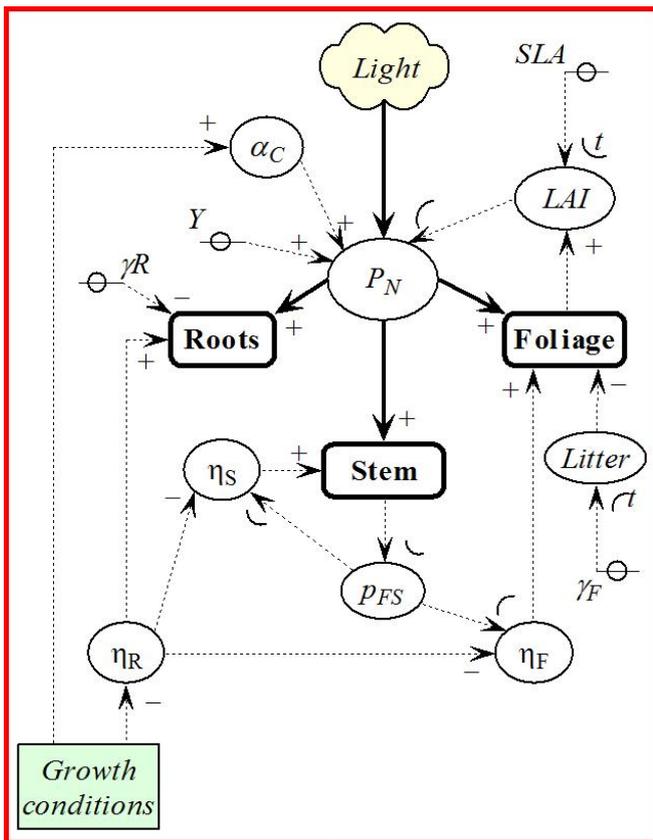


图 6.2 过程模型数据的输入-输出流程

$$GPP = f(\text{LUE, APAR, Temp, VPD})$$

$$APAR = (1 - \exp(-k \cdot LAI))$$

LAI (Leaf Area Index) 叶面积指数, k 消光系数

优点: 适用范围广, 变量解释性强, 模型具备生物学意义。

缺点: 精度不如经验模型

## 极端气候事件与生态修复

国际上极端气候事件对森林的影响研究成果在 1990 年起已开始探索。2010 年以后更加强了生态学、林学和地学的交叉学科研究。2020 年开始，以欧盟为代表的大型项目 EU Horizon 陆续启动。应用森林生态系统的脆弱性评估，森林适应性经营，增强森林韧性等一系列 CSF (Climate-Smart Forestry) 理论和技术，开始了新一轮林业应对气候变化研究。

- 森林火灾： 国内，火灾发生，火灾蔓延，  
(东北大小兴安岭)  
国际，火灾等级/大小/频率= $f(\text{湿度}/\text{树种}/\text{可及度})$ ； $M_{\text{火灾}}=f(\text{林分结构}/\text{草灌})$   
(挪威，西班牙)
- 森林干旱： 国内，年轮气象学， $G=f(\text{年龄}/\text{降水})$   
国际， $M_{\text{干旱}}=f(\text{年龄}/\text{土壤湿度})$ ，幼树/幼苗 vs 大树  
(德国，西班牙)
- 森林风灾： 国内，空白...?  
国际， $M_{\text{风倒}}=f(\text{林缘}/\text{树高}/\text{风速}/\text{时间})$ ，  
(芬兰)
- 森林病虫害： 国内，空白...?  
国际，经验模型， $M_{\text{病虫害}}=f(\text{胸径}/\text{年龄})$   
(芬兰)

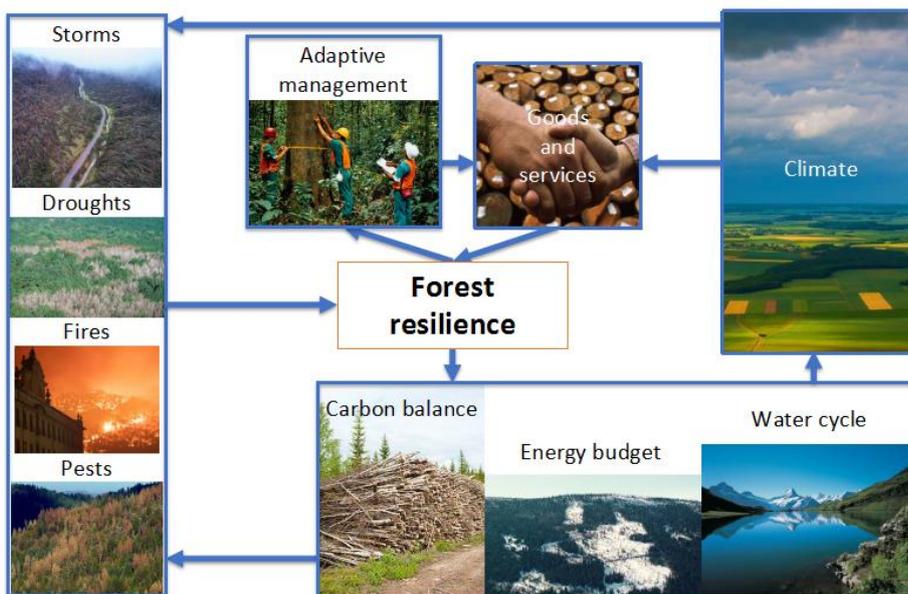


图. The EU Horizon program.

国内研究在极端气候事件大多属于大尺度区域水平的宏观预测。其技术应用主要为经验概率，例如，马尔科夫链转移概率矩阵等技术。

极端事件和生态修复的研究，目前国内基本处于空白。

气候变化冲击的数据需求

经验模型的数据需求

在经验生长模型的数据需求基础上，增加温度和降水数据。

温度：e.g. 年均温，10°C以上年积温

降水：e.g. 年降水，生长季降水

数据来源：森林调查数据（一类，二类，三类），解析木数据，气象站数据

#### *过程模型的数据需求*

光合：e.g. 叶面积指数 LAI，消光系数 k，

蒸腾：e.g. 饱和气压差 VPD

温度：e.g. 年均温，季均温，月均温，10°C以上年积温，5°C以上年积温

降水：e.g. 年降水，季降水，月降水

霜冻：霜冻天数

土壤：N，P，K，土壤湿度指数 SMI

数据来源：手持光合仪数据，碳通量塔数据，气象站数据

3PG 过程模型应用案例：分析气候变化影响

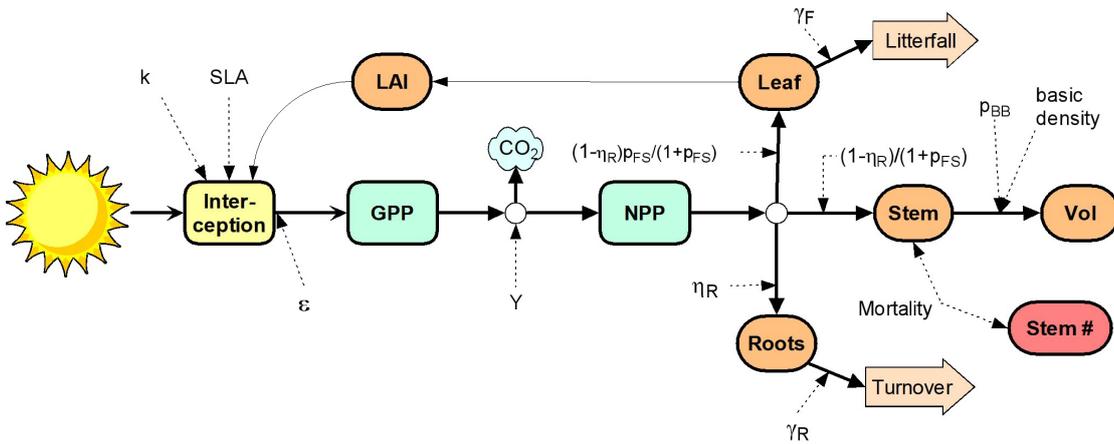


图. 过程模型 3PG 框架结构

3PG 模型是 Landsberg and Waring (1997) 基于关键生理学过程发展的异速生长模型。它主要以气温、降雨量、霜冻天数等气候因子为输入，模拟树木生长的光合作用、碳平衡、水平衡、凋落物分解等过程，预测树木各器官生物量、林分蓄积、平均胸径等。不同树种的 3PG 模型已被本地化，比如湿地松 (González-Benecke et al. 2014)、中国东北长白落叶松 (Xie et al. 2017)。Forrester and Tang (2016) 开发了混交林的 3PG 模型。3PG 不仅可以预测林分因子，也能模拟抚育后林分的长期反应 (Landsberg et al. 2001) 以及生产力的预测。但它对 CO<sub>2</sub> 浓度不敏感，所以限制了它在气候变化影响中的应用 (Schwalm and Ek 2001)，并且在所分析的参数中，表示立地质量的参数的灵敏度处于中等灵敏程度 (Esprey et al. 2004)。

如今，3PG 模型已被澳洲、北美、欧洲、南非、亚洲的一些国家和地区作为森林管理工具来使用 (Coops et al., 2001; Carlos A et al., 2014; César Pérez-Cruzado et al., 2011)。在我国，也有不少研究人员通过 3-PG 模型对桉树林、杉木林和橡胶林、阔叶红松林等林分进行生物量预测、碳循环分析等 (花利忠, 2004; 刘伟, 2016; 赵梅芳, 2008; 朱智强和蒋菊生, 2010; 常晓晴等, 2019)。

初级生产力的模拟

(1) 水气压差因子 ( $f_{(D)}$ ) 表达式:

$$f_D(D) = e^{(-kg*VPD)}$$

其中，kg 为参数、VPD 计算公式如下:

$$VPD = 0.6 * e_s(T \max) - e_s(T \min)$$

其中  $e_s(T)$  指饱和水气压差 (saturation water vapor pressure), 计算方法为:

$$e_s(T) = 0.6107 * \frac{17.26T}{e^{T+237.3}}$$

(2) 温度对光合作用的影响因子 ( $f_{temp}$ ) 可用下式表示:

$$f_{\text{temp}}(T_{\text{ave}}) = \frac{T_a - T_{\text{min}}}{T_{\text{opt}} - T_{\text{min}}} * \left( \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{ave}}}{T_{\text{max}} - T_{\text{opt}}} \right)^{\frac{T_{\text{max}} - T_{\text{opt}}}{T_{\text{opt}} - T_{\text{min}}}}$$

其中  $T_{\text{ave}}$  为月平均气温,  $T_{\text{opt}}$  为光合作用最适气温,  $T_{\text{max}}$  为光合作用最高气温,  $T_{\text{min}}$  为光合作用最低气温。

(3) 林分年龄对光合作用影响因子  $f_a$  表达式:

$$f_a(t) = \frac{1}{1 + \left( \frac{t}{(0.95 * \text{age}_{\text{max}}) n_{\text{age}}} \right)}$$

其中  $t$  是林龄,  $\text{age}_{\text{max}}$  是林分生长可能的最大年龄。

(4) 土壤含水量对光合作用的影响因子  $f_{\text{sw}}$  表达式为:

$$f_{\text{sw}}(sw_1) = \frac{1}{1 + \left( \frac{1 - sw_1}{s_1} \right)^{ns}}$$

$sw_1$  代表土壤含水率, 秦岭火地塘林区土壤立地类型参数  $s_1=0.6$ ,  $ns=7$ 。

(5) 霜冻对光合的影响因子表示为:

$$f_F(d_f) = 1 - K_F \left( \frac{d_f}{30} \right)$$

$d_f$  为每月霜冻天数,  $K_F$  为霜冻影响因子。

(6) 立地质量对光合作用的影响因子表示为:

$$f_N(FR) = 1 - (1 - f_{N0}) * (1 - FR)^{N_{fN}}$$

$FR$  代表土壤肥沃程度 ( $0 \leq FR \leq 1$ ),  $N_{fN}$  为指数,  $m$  可计算如下:

$$m = m_0 + (1 - m_0) * FR$$

$m_0$  为参数。

(7) 冠层量子效率  $\alpha_c = \alpha_{cx} \varphi f_{\text{temp}} f_N f_{fr}$ , 其中  $\varphi = f_a \min\{f_D, f_{sw}\}$ ,  $\alpha_{cx}$  为最大冠层量子效率。

(8) 有效光合辐射表达式如下:

$$\Phi_{pa} = \Phi_p (1 - e^{(-k * LAI)})$$

$\Phi_p$  为林冠层上方有效光合辐射,  $k$  为消光系数。LAI 为叶面积指数 (leaf area index), 计算公式如下:

$$LAI = 0.1 * Wf * \sigma$$

其中  $Wf$  为叶重,  $\sigma = \sigma_1 + (\sigma_0 - \sigma_1) * e^{\left(-\ln 2 * \left(\frac{t}{t_\sigma}\right)^2\right)}$ ,  $\sigma_0$  为林分初始状态时比叶面积,  $\sigma_1$  为林分成熟时的比叶面积,  $t_\sigma$  为比叶面积为  $\frac{\sigma_0 + \sigma_1}{2}$  时的林分年龄。

$$(9) \text{ 总光合作用率 } P_G = 0.552 * \alpha_C * \Phi_{pa},$$

$$(10) \text{ 净光合作用率 } P_N = 0.47 * P_G。$$

### 碳平衡与分配

$$\Delta Wf = P_N \eta_f - \gamma_f Wf \Delta t - mf(Wf/N) \Delta N$$

$$\Delta Wr = P_N \eta_r - \gamma_r Wr \Delta t - mr(Wr/N) \Delta N$$

$$\Delta Ws = P_N \eta_s - ms(Ws/N) \Delta N$$

其中  $Wf, Wr, Ws$  分别是树叶重、树根重、树干重;  $\eta_f, \eta_r, \eta_s$  是光合物质在各器官中的分配比例;  $\gamma_f, \gamma_r$  为树叶和根的凋落速率;  $N$  是林分密度;  $Wf/N, Wr/N, Ws/N$  为树的叶、根、干生物量平均值,  $mf, mr, ms$  为树死后  $Wf/N, Wr/N, Ws/N$  损失的比例。

光合作用物质给树干分配的比例:

$$\eta_s = \frac{1 - \eta_r}{1 + p_{fs}}$$

而

$$P_{fs} = \frac{\eta_f}{\eta_s} = a_p * DBH^{n_p}$$

其中

$$a_p = \frac{p_2}{2^{n_p}}, \quad n_p = \frac{\ln\left(\frac{p_{20}}{p_2}\right)}{\ln_{10}}$$

$p_2, p_{20}$  分别为  $DBH=2\text{cm}, 20\text{cm}$  时的参数。

光合作用物质给树根的分配比例:

$$\eta_r = \frac{\eta_{rx} \eta_{rn}}{\eta_{rn} + (\eta_{rx} - \eta_{rn}) m \varphi}$$

光合作用物质给树叶的分配比例:

$$\eta_f = \eta_s * p_{fs}$$

$\gamma_r$  为常数,  $\gamma_f$  计算如下:

$$\gamma_f = \frac{\gamma_{f1}\gamma_{f0}}{\gamma_{f0} + (\gamma_{f1} - \gamma_{f0})e^{-kt}}$$

$\gamma_{f0}$  为林分初始时的叶分解速率,  $\gamma_{f1}$  为最大的分解速率,  $k$  的表达式如下:

$$k = \frac{1}{t_{\gamma_f}} \ln \left( 1 + \frac{\gamma_{f1}}{\gamma_{f0}} \right)$$

其中  $t_{\gamma_f}$  为当  $\gamma_f = \frac{\gamma_{f1} + \gamma_{f0}}{2}$  时的林分年龄。

表 . 辽东栎 3PG 过程模型参数

3-PG 参数	符号	单位	参数值	参数来源
<b>立地属性</b>				
肥力等级	FR	-	0.5	本研究测定
<b>生物量分配和转化</b>				
<b>异速生长关系和分配</b>				
胸径为 2 cm 时叶与干的分配比例	P <sub>2</sub>	-	0.9	本研究测定
胸径为 20 cm 时叶与干的分配比例	P <sub>20</sub>	-	0.32	本研究测定
分配给根的净光合作用的最大比例	$\eta_{Rx}$	-	0.75	本研究测定
分配给根的净光合作用的最小比例	$\eta_{Rn}$	-	0.25	本研究测定
<b>凋落物和根的转化</b>				
成熟林分叶凋落速率	$\gamma_{Fx}$	1/month	0.015	本研究测定
初始林分叶凋落速率	$\gamma_{F0}$	1/month	0.008	本研究测定
叶凋落速率为中值时的林分年龄	$t_{rf}$	months	48	本研究测定
根的月平均转化率	$\gamma_r$	1/month	0.011	本研究测定
<b>NPP 和生长调节因子</b>				
<b>温度因子</b>				
生长所需最低温度	T <sub>min</sub>	deg. C	-8	罗伟祥等, 1991
生长所需最适温度	T <sub>opt</sub>	deg. C	6	杨平等, 2021
生长所需最高温度	T <sub>max</sub>	deg. C	38	王宏伟等, 2021
<b>霜冻因子</b>				
霜冻一天引起停止生长的天数	k <sub>F</sub>	days	1	Default
<b>土壤水因子</b>				
土壤水分减少 50%时的相对缺水量	c <sub>0</sub>	-	0.6	Sands (2001)
土壤水分减少时影响生长的指数	n <sub>0</sub>	-	7	Sands (2001)
<b>肥力因子</b>				
FR = 0 时 m 的值	m <sub>0</sub>	-	0	Landsberg and Waring (1997)
FR = 0 时的值	f <sub>N0</sub>	-	0.3	本研究测定

在 $f_N$ 中 (1-FR) 的指数	$n_{fN}$	-	1	Landsberg and Waring (1997)
<b>年龄因子</b>				
用于计算相对年龄的最大林分年龄	$Age_{max}$	years	200	本研究测定
林龄引起的对生长影响的指数	$n_{age}$	-	4	Landsberg and Waring (1997)
林龄对生长影响等于 0.5 时的相对林龄	$r_{age}$	-	0.95	Default
<b>枯损和自然整枝</b>				
最大年龄时的枯损率	$\gamma_{NX}$	%/year	4.8	本研究测定
初始年龄时的枯损率	$\gamma_{N0}$	%/year	6	本研究测定
枯损率为 $(\gamma_{N0} + \gamma_{NX}) / 2$ 时的年龄	$t_{\gamma N}$	years	45	本研究测定
<b>冠层结构</b>				
<b>比叶面积</b>				
初始年龄的比叶面积	$\sigma_0$	$m^2/kg$	2	本研究测定
成熟时的比叶面积	$\sigma_1$	$m^2/kg$	6	本研究测定
比叶面积为 $(\sigma_0 + \sigma_1) / 2$ 时的年龄	$t_{\sigma}$	years	45	本研究测定
<b>光截留</b>				
消光系数	$k$	-	0.5	Landsberg and Waring (1997)
<b>生产力和呼吸</b>				

### 林分密度的模拟

通过输入研究地的气候数据、立地条件及有关参数，利用参数本地化后的 3PG 模型模拟了初始年龄为 20 a、初始密度为 6667 trees/ha 的辽东栎林分 20 a-50 a 的林分密度变化情况(图 1)。结果显示，在初始密度为 6667 trees/ha 的林分中，由 3PG 预测的林分密度与实测结果相差不大，模拟精度均在 95%以上（仅在 35 a 时低估了 6.87%），平均模拟精度达 96.52%，预测结果  $R^2$  为 0.9951。由此可见，3PG 模型能够很好地模拟陕北辽东栎林的林分密度变化。

### 生物量的模拟

利用参数本地化后的 3PG 模型模拟了初始年龄为 20 a、初始密度为 6667 trees/ha 的辽东栎林分 20 a-50 a 的胸径、树高生长情况，并与生物量公式计算值作比较（图 2）。结果显示，3PG 模型对辽东栎林分三十年间的根生物量、干生物量和总生物量都有良好的模拟效果：其中 3PG 对干生物量的模拟精度最高，平均模拟精度为 95.24%，最大偏差为 9.63%， $R^2$  为 0.9997；根生物量和总生物量的平均模拟精度分别为 92.69%和 94.42%，其中根生物量的模拟值除了在 25 a 时相比生物量公式低估了 18.27%外，最大偏差不超过 10.12%，而总生物量除了在 25 a 和 35 a 是分别低估 11.45%和高估 10.52%外，剩下最大偏差不超过 6.85%。相比之下，3PG 对根生物量的模拟效果较为不理想，平均模拟精度仅为 88.89%，最大偏差达到了 28.5%。

Deterministic 确定性，所有信息已知

=> Decision making under certainty 知己知彼

Probabilistic 概率性，部分信息已知

=> Decision making under risk 知己不知彼

Stochastic 随机性，信息未知

=> Decision making under uncertainty 不知己不知彼

环境对森林动态变化的影响的两种方式

单因素独立影响:  $f(\text{环境}) = f(L)+f(T)+f(N)+f(SM)$

多因素共同影响:  $f(\text{环境}) = f(L)*f(T)*f(N)*f(SM)$

敏感度分析与不确定性分析

基于概率的风险管理

$NPV_{\text{real}} = NPV_{\text{max}} * (1-P_i)$

$P_i = \text{Risk}_i\%$ ,

$i = 1$ , 自然干扰

$i = 2$ , 人为干扰

$i = 3$ , 金融风险

$i = 4$ , 政策风险

极小化风险目标函数

Risks  $\approx$  Costs

Min.  $f(\text{Costs})$

s.t.  $dG/dt = f(\text{Size,Site,Comp})$

敏感度分析

Size =  $f(D,H,V,CR,CL,CW)$

Site =  $f(SI,Soil,Temp,Prec,Slop,Elev)$

Comp =  $f(N,BA,RS,BAL,CCF, CPA)$

p: 输入参数 input parameter

Y: 输出 output

输入上微小的改变会扩大到多大的输出结果变化?

How do small changes in input propagate to results?

敏感度  $S = \partial Y / \partial p$

不同组成部分的相对重要度是什么？

What is the relative importance of different components?

相对敏感度  $S_R = \partial Y / \partial p * p / Y$

不确定性分析方法：

Monte Carlo Simulation 蒙特卡洛仿真

MCMC (Markov Chain Monte Carlo)

Bayesian Analysis 贝叶斯分析 (条件概率)

森林枯损与更新的不确定性

森林风险损失 => 枯损率或存活率 Mortality rate or Survival rate

森林生态修复 => 更新与进界 Regeneration and Recruitment

森林生态系统动态模型的两种形式：

确定性模型：

森林生长,  $dD/dt = \alpha * D^\beta$ ,  $\ln(iv) = a_t + \alpha_t * \ln(V)$

随机性模型：

森林枯损,  $\ln(N) = \zeta * (\alpha - \beta * \ln(V))$

森林更新,  $R = \zeta * (a - \alpha * G + \beta * SI)$

$\zeta = \text{rand}[0,1]$

从概率的角度来说，树木的枯损在森林的发育过程中是一件小概率但又非常重要的事件。树木的枯损也受到诸如林分密度，森林病虫害，林火，风等外界因子影响 (Monserud 1999)，同时，林木枯损在种群动态变化、生态系统生物多样性和结构多样性等方面有着显著的影响。

自Reineke (1933) 提出林分密度竞争效应后，林分密度控制的研究进入了量化阶段。Yoda (1963) 提出的-3/2 自然稀疏法则被人们称为森林生态学中心法则。随后Ando (1968) 将这种密度制约关系应用编制能形象直观的反应相对密度和林分动态变化过程的密度控制图。虽然众多研究从理论上指出了-3/2 法则的不足 (White et al.1980; Westoby 1984; Weller 1987; Zeide 1987; Enquist et al. 1998; 韩文轩与方精云 2008)，林分水平的-3/2 自疏法则枯损率预估以其实用性仍受到广泛的认可 (Long et al. 1984; Hutchings 1981; 曾德慧 2000; 江希钊 2001; 吴冬秀等 2002; 吴承祯 2005)。

Flewelling and Monserud (2002)总结归纳了五种常用的枯损经验模型建模方法，包括Logit 模型, 最小二乘法,

Walker-Duncan 算法, 加权最小二乘法, 以及最大似然法。这些方法在固定样地数据充足情况下, 可以胜任枯损模型的构建。然而, 在林业实践中长期连续观测的单树水平枯损数据往往较难获得, 而临时样地数据仅能完成林分水平诸如林分密度指数 (Reineke 1933)、自疏线(Yoda 1963)和相对密度(Curtis 1982)的计算, 难以实现单木水平枯损的预测。

静态的进界建模方法假定观测的进界数量在数据收集期内代表林分长期的平均水平, 这些数量不会随时间的变化发生大的变化(Mendoza and Setyarso 1986), 这种方法主要用在矩阵模型中(Usher 1966; Buongiorno and Michie 1980; Vanclay 1992)。

动态进界模型能将林分特征作为解释变量应用到统计回归中, 用一些简单的线形模型和非线形模型来预测进界的数量(Adams and Ek 1974; Hann 1980; Shifley et al. 1993)。这些模型在进界发生的情况预测较好, 对于进界不发生的情况则预测效果较差。因此, 随后有学者用两阶段法来预测进界(Hamilton and Brickell 1983; Vanclay 1992; Schweiger and Sterba 1997; Qin 1998; Kariuki 2005; Adame et al. 2010)。在两阶段模型中, 第一阶段通过逻辑斯蒂方程预测进界发生的概率, 第二阶段预测在进界发生的情况下用条件概率来预测进界的数量, 条件函数通常用普通的线性回归来估计。

## 森林枯损与更新的随机过程

随机相位振荡问题

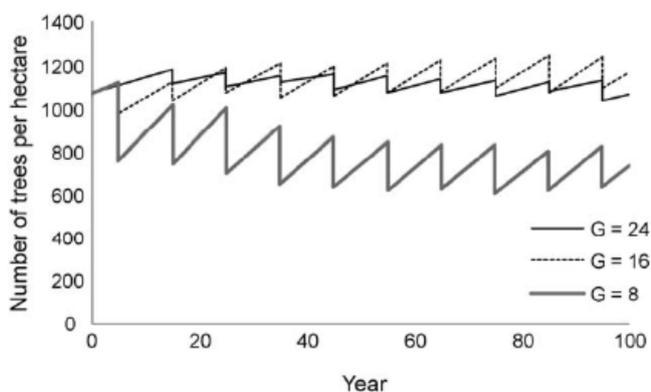
令  $X(\omega, t) = A \sin(\theta t + \xi(\omega))$ ,

$\xi(\omega)$  是定义在  $[0, 2\pi]$  上服从均匀分布的随机变量,

$\theta$  是给定常数,

则  $X(\omega, t)$  是定义在概率空间上的一个随机过程。

例. 异龄林更新与枯损的波动性



随机过程定义

设  $(X(t), t \text{ belongs to } T)$  为一随机过程, 如果对于每个  $t \text{ belongs to } T$ ,  $E(X(t))$  存在, 则其数学期望是  $t$  的函数, 定义为:

$$E(X(t)) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot dF(t, x)$$

其中  $F(t, x)$  为随机过程的依维分布函数。

随机过程分类

泊松过程: 单一变量  $\lambda$  决定了某一时间内事件的发生率

更新过程: 事件间隔是独立的且为同分布随机变量

交替更新过程: 事件时间在两分布中不断交替变换

非齐次泊松过程: 事件发生时间为非稳态序列

连续时间马尔科夫链: 通过时间区间  $(0, S]$  上的转置, 生成服从指数分布的事件时间  $T$  以及为离散值的过程状态  $X(t)$

森林更新是一个复杂的随机过程，天然更新会受到气候变化、环境变化、人为干扰等多因素影响，尤其是受到自然灾害等不确定性的影响，如雪灾、霜冻、风倒、火灾、病虫害等。对于森林生长动态预估来说，进界的预测相对于种子传播、萌芽、幼苗及幼树生长其他几个更新的过程尤为重要。

对森林的更新预测在回归分析基础上，采用贝叶斯方法预测进界的不确定性。随机变量  $f(Y)$  描述为离散变量的概率密度（如泊松分布、负二项分布、二项分布等）。将  $Y_{ij}$  考虑为有两部分组成的混合模型：

- 1) 零发生的概率（Zero-state）；
- 2) 服从泊松分布（Poisson-state）。

针对计数过程中的随机性，考虑每一个  $Y_{ij}$  都有一个不可观测的随机变量  $Z_{ij}$ ，代表了两种状态（Zero-state and Poisson-state）， $Z_{ij}$  为服从伯努利分布（参数为  $\omega_{ij}$ ），因此， $P(Z_{ij}=1)=\omega_{ij}$  表示  $Y_{ij}=0$  产生于零分布（Zero-state）， $P(Z_{ij}=0)=1-\omega_{ij}$  表示  $Y_{ij}$  产生于泊松分布（Poisson-state）。

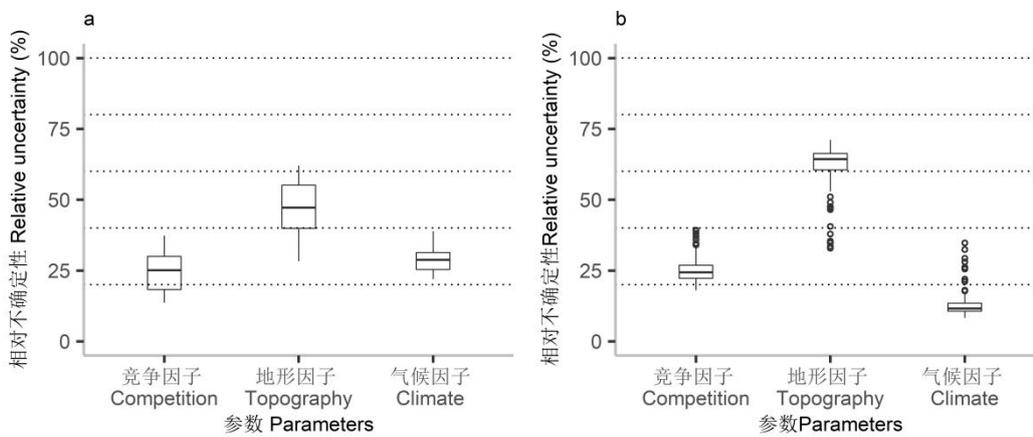


图. 油松 (a) 和锐齿栎 (b) 更新模型中参数不确定性分解和量化

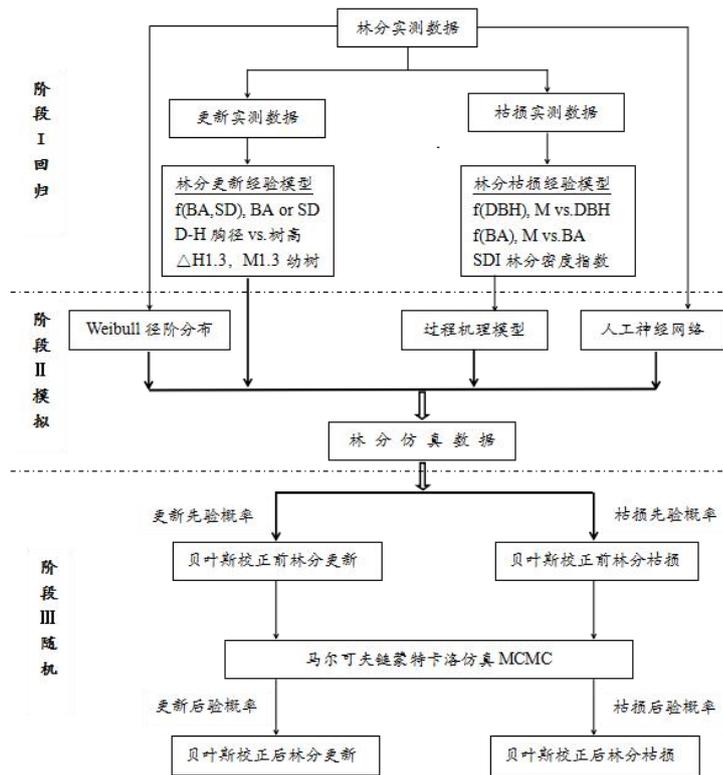


图. 基于三阶段建模法的森林更新与枯损预估

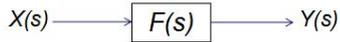
三阶段建模法的主要目的是，分三阶段采用统计回归技术、人工智能技术、随机过程技术，提高森林更新和枯损不确定性预估的可靠性。第一阶段，“回归”：使用常规生物统计学回归技术拟合经验数据，确保模型预测在林分水平上的准确性。第二阶段，“模拟”：以第一阶段的输出作为约束条件，通过Weibull分布、过程模型、人工神经网络技术生成模拟数据，补充建模数据量，进行单木水平的二次拟合。第三阶段，“随机”：以第二阶段的输出作为先验信息，基于贝叶斯理论在新数据的条件下对原参数的不确定性，通过参数可能取值的联合概率分布进行校正。

# 森林平行仿真优化系统

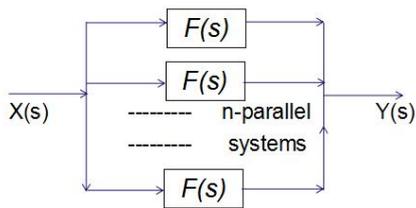
钱学森 1954. 工程控制论. 麦格劳希尔出版公司. USA

冗余控制 Control of errors: Reliability by duplication; Method of multiplexing; Error in executive component; Error of multiplexing systems

“This particular method of synthesizing a reliable system out of unreliable elements is called the method of multiplexing by von Neumann.” -- 钱学森 Hsue-shen Tsien



■ a simple system 开环串联系统



■ n-parallel systems 闭环并联系统

图. 冗余控制系统 (redraw from Tsien 1954)

经验模型校正步骤 (Hynynen et al. 2002):

- (1) 计算  $Bias = \ln(H) - \ln(H^*)$ ,
- (2) 计算  $H^*(cal) = \exp(\ln(H^*) + Bias^*)$ ,
- (3) 计算校正后树高  $H(cal) = Cratio * H^* \exp(Bias^*)$ ,  
where  $Cratio = H(obs)_{mean} / H(cal)$

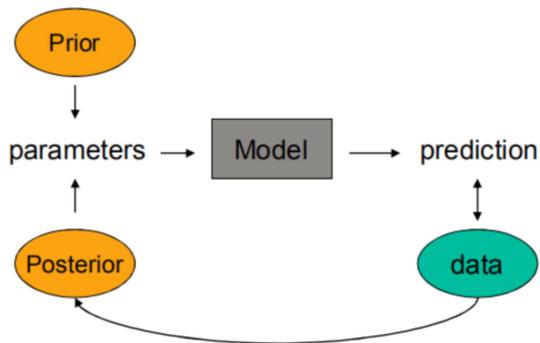


图. 过程模型校正流程 (Mäkelä 2011)

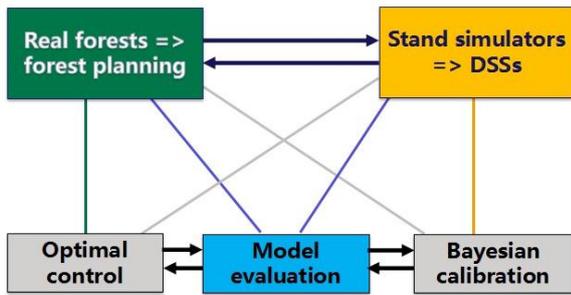


图. OptiFor-QUASSI 森林平行仿真优化系统

森林风险的数据需求

森林调查数据：一类数据，二类数据，三类数据

森林更新数据：幼树幼苗更新，幼树幼苗死亡率，幼树树高生长，解析木数据

森林枯损数据：枯立木倒木，胸径，树高，复位监测数据

森林火灾数据：火灾数据共享网，文献数据

森林风灾数据：气象数据网站，文献数据

森林雪灾数据：气象数据网站，文献数据

森林病虫害数据：文献数据

# 第十五讲 生物量与碳计量

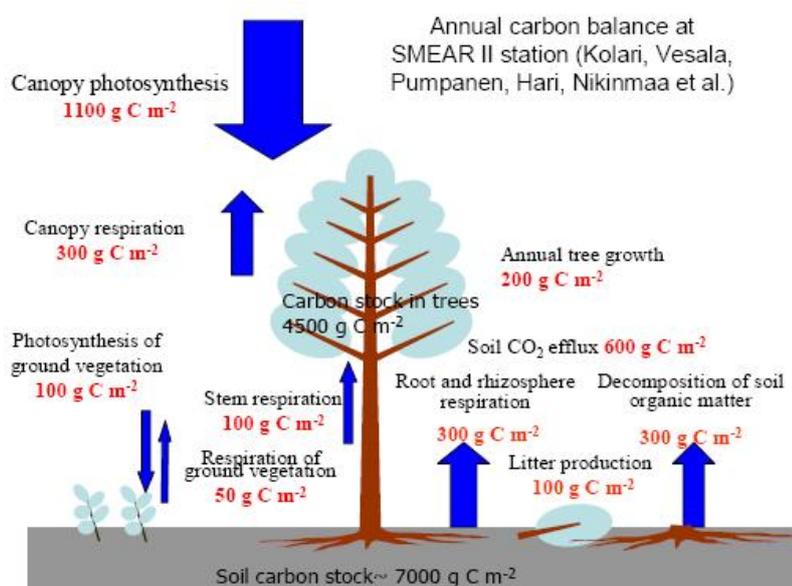
第一节 碳平衡理论

第二节 森林碳汇计量方法与数据采集

第三节 森林乔木层和草灌层的碳计量

第四节 森林土壤碳的动态预估

Q15. 森林生产力与森林生物量的计算，如何考虑年龄因素的影响？如果是异龄林？



## 森林碳汇

全球气候发生着以变暖为主要特征的显著变化，大气中温室气体特别是二氧化碳浓度的增加是导致全球气候变暖的主要因素之一，因而森林的碳汇作用也日益得到重视。

森林碳汇计量的经验方法 Empirical approaches

自下而上 Bottom-up

原理：林木结构的异速生长关系

森林碳汇计量的过程方法 Process-based approaches

自上而下 Top-down

原理：光合作用与碳平衡理论

森林乔木层的碳计量。通过生物量模型估计的方法，利用已知的易测因子的数据，如胸径、树高、林分密度等，可以推算出树木各器官生物量，进而推算出林分的生物量。通过含碳量的相关研究，将各器官生物量乘以其含碳率，就得到各器官含碳率，进而得到林分总的碳储量。

## 第二节 森林碳汇计量方法

### 蓄积-生物量法

$$W_{tot} = f(V)$$

$$W_i = f_i(D)$$

$$W_i = f_i(D,H)$$

### 生物扩展因子法 BEF (Biomass Expansion Factor)

$$BEF_i = W_i/V$$

$$BEF(t) = a+b*\exp(-0.01*t)$$

### 过程机理模型法

$$NPP = r\_NPP * GPP$$

$$G\_t = NPP/C\_c, C\_c \sim 0.5$$

$$GPP = f\_APAR * GPP\_max$$

$$f\_APAR = (1 - \exp(-k * LAI))$$

$$GPP\_max = \sigma_{i=1}^{365}(LUE_i, PAR_i, f\_iPAR, f\_iTemp, f\_iVPD)$$

例，从收获表中提取特定的林分生长动态信息，油松收获表信息如下：

年龄 (a)	树高 (m)	平均胸径 (cm)	林分密度 (株/hm <sup>2</sup> )
20	8.7	10.6	1764
40	14.1	19.6	762
60	16.6	24.0	576

查询该地区油松生物量方程，得到下表为各器官生物量回归方程（陈存根，1996）：

器官	回归方程
干	$\ln W_S = 1.04086 \ln(D^2 H) - 4.63143$
皮	$\ln W_{BA} = 0.77396 \ln(D^2 H) - 4.69348$
枝	$\ln W_B = 2.57733 \ln D - 4.08026$
叶	$\ln W_L = 2.57495 \ln D - 5.11712$
根	$\ln W_R = 2.28692 \ln D - 4.14198$

基于上述模型，只需将林分树高、胸径信息代入，即可算出平均木各器官生物量，再乘以林分密度，即可得到林分每公顷的生物量。油松林分各器官生物量（吨/公顷）：

年龄	干	皮	枝	叶	根	合计
20	22.3	3.3	13.1	4.6	6.2	49.7
40	57.1	5.4	27.5	9.7	10.9	110.7
60	78.0	6.4	35.2	12.4	13.2	145.2

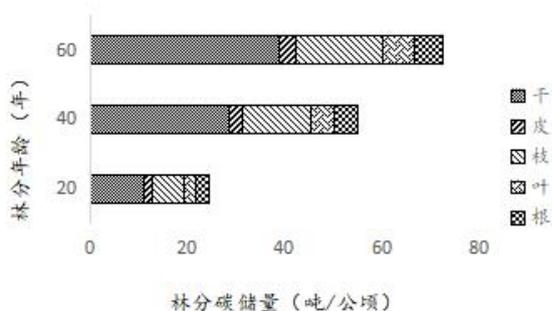
将林分各器官生物量与含碳率相乘，即可得到林分的碳储量。含碳率设定的 50% 是 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 的通用数据，但实际上活体植物的碳含量常因树种和器官的不同而异，采用侯琳等 (2009) 利用分析仪测定的秦岭油松干、皮、枝、叶、根的含碳率，如下表所示：

器官	含碳率 (%)
干	49.95
皮	49.25
枝	50.8
叶	51.45
根	44.25

继而可以得到油松林分各器官的碳储量：油松林分各器官碳储量 (吨/公顷)

年龄	干	皮	枝	叶	根	合计
20	11.2	1.6	6.7	2.4	2.8	24.6
40	28.5	2.7	14.0	5.0	4.8	55.0
60	39.0	3.1	17.9	6.4	5.8	72.2

把结果绘制成条形图可以对不同时期林分碳储量进行比较：



### 森林经营对碳汇的影响

森林的碳贮存功能及其变化与大气 CO<sub>2</sub> 浓度变化有密切的关系，通过一些林业措施，可起到减排增汇的作用。在减缓气候变化的各种努力中，林业活动具有十分重要和不可替代的地位。合理的森林经营可以提高森林的碳固存和碳密度。通过调整森林经营的周期，合理控制林分的密度，增强林分的管护水平，可以使森林在更大程度上发挥其碳汇功能。

我国人口众多，相应人均森林资源的占有量非常低，尤其是土地资源十分有限，因此必须加强对现有森林资源的经营管理，提高森林生产力和资源质量，来提高森林的碳储量。同时，森林还可以定期为人类提供一定数量的木材产品，这些木材产品作为工业原料和生活用品的替代品，可以减少化石能源的使用。间伐会暂时降低森林碳储量，但是可以提供一部分木材产出，同时可以加速林分生长，增加林分碳固存效率。因此，探究抚育间伐对林分碳储量的影响对于研究森林经营与碳汇有着重要意义。

由于森林生物量测定的工作量非常大，而且耗时费力，因而抚育间伐的研究多侧重于对林分胸径、树高、蓄积量的影响上，不单独测定生物量。但是通过生物量模型估计的方法，利用已知的易测因子的数据，可以推算出树木各器官生物量，进而推算出林分的生物量。

本研究对林分乔木层生物量的计算采用生物量方程计算的方法，也称为林木生物量回归估计法，是通过样本观测值建立树木各分量干重与树木其他测树因子之间的一个或一组数学表达式，该数学表达式也称为林木生物量模型，包括线性模型、非线性模型和多项式模型。非线性模型应用最为广泛，其中相对生长模型最具有代表性，是所有模型中应用最为普遍的一类模型。相对生长模型是指指数或对数关系反映林木维量之间按比例协调增长的模型。

油松单木各组分的生物量  $W$  (kg) 与单木胸径  $D$  (cm) 和树高  $H$  (m) 之间都存在着紧密的相对生长关系： $W=a(D^2H)^b$  或者  $W=ad^b$ 。可将上述两个方程变换为双双对数方程： $\ln W=a+b*\ln(D^2H)$  或  $\ln W=a+b*\ln(D)$ 。同时，有研究表明，林分各组分生物量  $W$  (t/ha) 都与林分平均胸径  $D$  (cm)、林分平均高  $H$  (m) 及林分立木密度  $n$  (株/ha) 紧密相关，存在如下的关系式： $\ln W=a+b*\ln(n*D^2H)$  或  $\ln W=a+b*\ln(n*D^2)$ 。表 4.1 给出了陕北桥山林区单木及林分生物量方程的有关参数  $a$  和  $b$ 。

表. 陕北（桥山）油松生物量方程参数

Table 4.1 Parameters of the biomass equations for *Pinus tabulaeformis* Carr.in Shannxi Qiaoshan

组分 component	$\ln W=a+b*\ln(D^2H)$		$\ln W=a+b*\ln(D)$		$\ln W=a+b*\ln(n*D^2H)$		$\ln W=a+b*\ln(n*D^2)$	
	a	b	a	b	a	b	a	b
干带皮	-3.40824	0.927516	-2.75731	2.428910	-9.8328	0.937154	-11.2197	1.24544
枝	-3.86239	0.850470	-3.26935	2.228450	-9.6722	0.850716	-11.0089	1.13694
叶	-1.53547	0.416061	-1.31594	1.114210	-3.8492	0.365020	-4.8649	0.52407
根	-3.74208	0.862277	-2.98374	2.208650	-9.3094	0.824482	-11.0976	1.14227

在设计抚育间伐方案时，我们每次通过间伐将林分密度降低到生长过程表 5 年后的密度，利用试验样地的枯损率来估算 5 年间的林分枯损，之后由于密度再次与收获表接近仍采用原收获表的枯损率，直至下一次间伐。

$$P_{thin}/P_{unthin} = P_{thin\#}/P_{unthin\#}$$

式中， $P_{thin}$  是试验样地间伐后枯损率， $P_{unthin}$  是未间伐样地枯损率， $P_{thin\#}$  是设计间伐方案预测的林分枯损率， $P_{unthin\#}$  是原收获表的枯损率。

抚育间伐对林分生长的影响

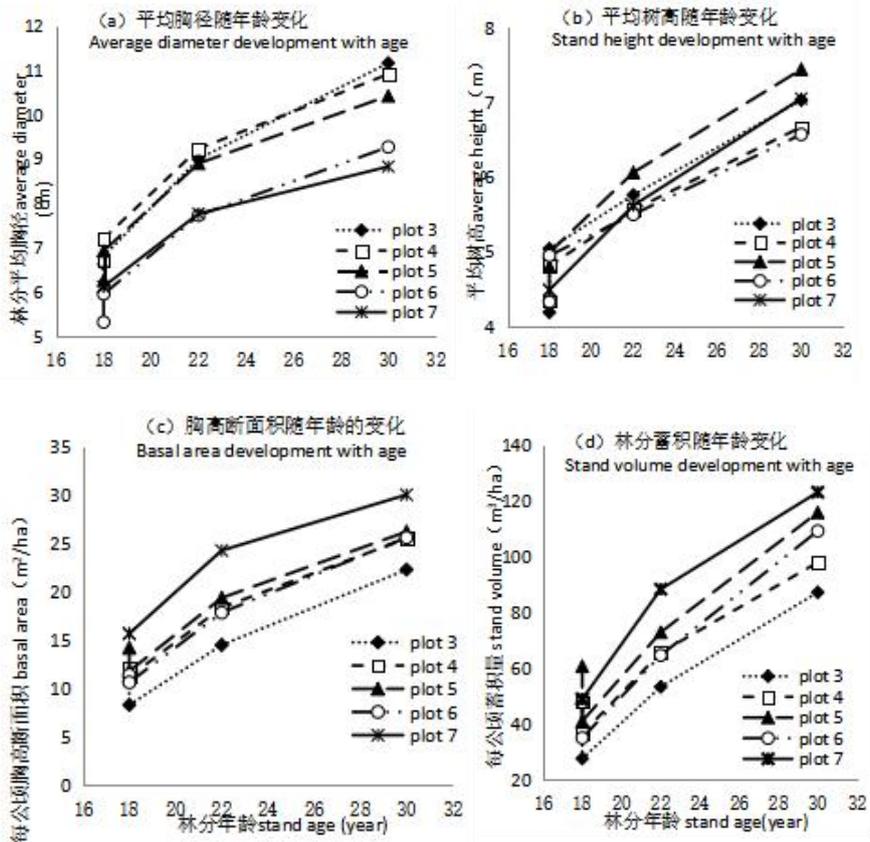


图. 间伐林分生长过程

Figure 4.1 The process of stand growth for thinning experimental plots

抚育间伐对于林分胸径、树高、林分密度、蓄积等各因子产生影响，进而也会影响林分生物量的生长。通过生物量方程的方法，可以计算得到不同保留密度下，单木及林分各器官组分的生物量，从而进行间伐对生物量影响的分析比较。通过林分抚育间伐、生物量和含碳率等方面的研究，我们最终可以通过计算得到抚育间伐对于油松林乔木层碳储量的影响效果。

间伐后保留密度低的林分平均木的生物量要明显高于保留密度高的林分及未间伐林分的平均木生物量，这是由于间伐促进了林分平均胸径的生长，进而由生物量方程计算得到的单木生物量也会增加。这是从单木的角度来比较的，但是由于林分密度的下降，林分乔木层整体的生物量

在间伐刚完成的前四年（18~22年），不同保留密度林分生物量的相对增长率差别并不大，在间伐后的后八年里，保留密度高的林分其生长率明显会小于保留密度低的林分，其中密度最高林分，即未间伐的 plot 7 的生物量生长率仅为 plot 1 的 68.45%。说明降低保留密度对于林分生物量生长的促进作用在间伐 5~12 年时会比刚刚间伐完成后的 4 年更加显著。

抚育间伐后，保留密度较低的 plot 3、plot 4、plot 5 的单木碳储量明显高于保留密度较高的 plot 6 和未间伐密度最高的 plot 7。其中 plot 3 保留密度最低，在林分 22 年时（间伐当年），单木碳储量还略低于 plot 4 和 plot 5，但在林分 30 年时（伐后第 12 年），单木碳储量明显是最高的一组样地。

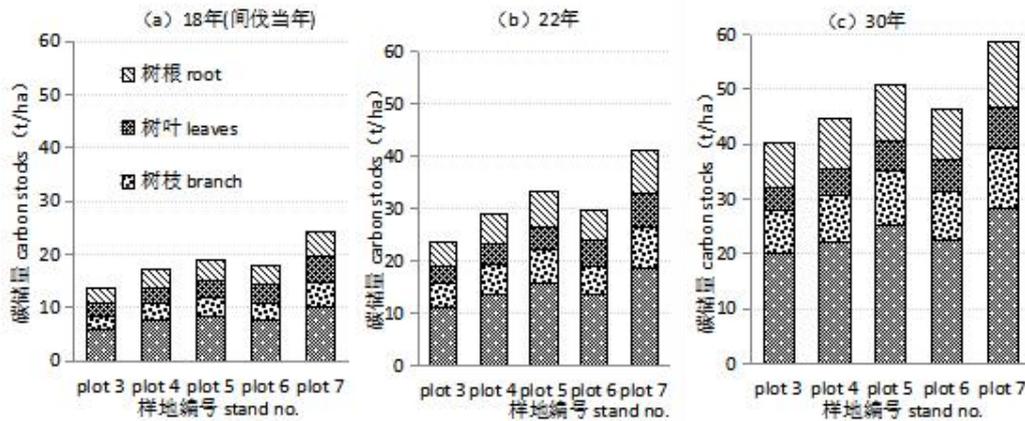


图. 间伐对油松林碳储量的影响

Figure .. Effects of thinning on stand carbon stocks

从间伐后不同保留密度的角度进行分析，间伐当年（林分 18 年）保留密度较低的林分会明显低于保留密度较高的林分，在随后的 12 年间，尽管较低保留密度的林分碳储量有着较快的增长，但依然会低于保留密度较高的林分（图 4.2）。说明抚育间伐对于林分碳储量的降低，并不能在很短的时间里被间伐后的生长促进效应所弥补。这种间伐与碳储量的关系，会因间伐强度、树种、环境条件等因素的改变而不同。

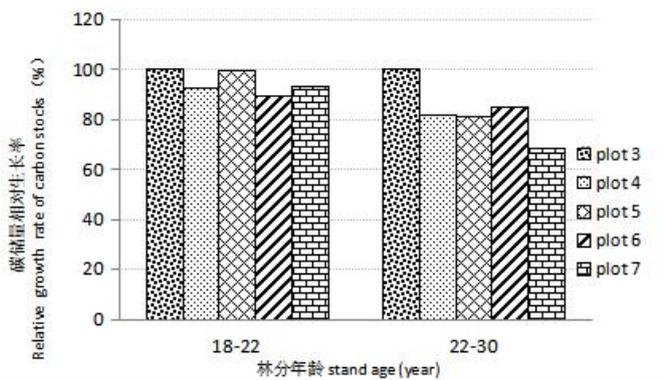


图. 以 plot 3 为基准林分碳储量年相对生长率的比较

Figure. Relative growth rate of carbon stocks based on plot 3

从图 4.3 可以看出，整体上保留密度低的林分生长率高于保留密度高的林分，说明抚育间伐对林分碳储量的生长具有促进作用。而且促进的效应大小与间伐后的时间有关，在林分 18-22 年，即抚育间伐后的前四年，保留密度低的林分其年相对生长率略高于保留密度高的林分，但是在林分的第 22-30 年时，低密度林分的生长率（plot 3）就明显高于其他样地林分，保留密度最高的林分（即未间伐林分 plot 7）的生长率仅为 plot 3 样地林分的 68.4%。说明间伐对于林分碳储量生长的促进作用，在间伐后的 5-12 年会比间伐后的前四年更加明显。

森林碳汇研究的数据需求。由于研究对象的时空尺度和所采用研究手段的不同，森林碳储量数据需求根据研究方法大致可以分为 3 类：样地清查法、模型模拟法和遥感估算法。

样地清查法是指通过设置典型样地进行林分调查，从而获取森林植被不同器官及枯落物的生物量，并对各组分生物量的含碳率进行测定，最后将不同组分生物量乘以各植物器官的含碳率，就得到了森林植被各组分的碳储量；森林凋落物量通过凋落收集器直接收集，森林土壤的碳储量则根据土壤剖面有机碳含量计算。

模型模拟法搜集大量林分蓄积量和生物量的相关数据的基础上，分别不同森林类型建立林分蓄积量与林分生物量的模型，计算得到林分生物量后，再用林分生物量乘以森林植物的平均含碳率得到某一森林类型的碳储量。

遥感估算法是根据不同植被的反射光谱不同的原理，从而获得植物叶绿素含量和生长状况的相互关系，然后利用叶绿素含量与生物量的转换关系得到林分的生物量，因此可用遥感数据估算森林植被的生物量。采用遥感估算法测算林分的碳固存量，实际上是利用遥感手段获得各种植被状态的相关参数，同时进行一定量的地面调查，对植被的空间分类与时间序列进行分析，从而得到林分生物量的时空分布和动态，并由此计算得到林分碳固存量。

从可持续森林经营 SFM 到气候型智慧林业 CSF，森林多功能服务的理论由多目标（MCDM）方法应用，发展到生命周期评价（Life Cycle Assessment）、权衡分析（Trade-off Analysis），及详尽的 SFM 和 CSF 多功能服务指标体系。

表. 欧盟森林多功能服务指标体系（MCPEF,2002）

Criterion 标准	Indicator 指标
C1: 碳循环 Maintenance and appropriate enhancement of forest resources and their contribution to global carbon cycles	Growing stock, Total volume, Age structure and/or diameter distribution, Carbon stocks, GHG emissions
C2: 森林健康 Maintenance of forest ecosystem health and vitality	Soil condition, Fire hazard, Wind hazard, Pest and disease hazard, Broadleaved tree mixture is maintained, Felling and skidding damage, Water use, Forest resources/growing stock, Forest biodiversity
C3: 林产品 Maintenance and encouragement of productive functions of forests (wood and non-wood)	Wood products, Non-wood products, Productivity of the principal forest production, Value and quantity of marketed roundwood, Other productions
C4: 生物多样性 Maintenance, conservation and appropriate enhancement of biological diversity in forest ecosystems	Understorey shrub diversity, Tree species composition/structural diversity, Long-lived and cavernous trees, Volume of standing and lying deadwood
C5: 水土保持 Maintenance and appropriate enhancement of protective function in forest management	土壤侵蚀 Evidence of erosion, 水质 Water quality
C6: 社会经济 Maintenance of other socioeconomic functions and conditions	森林游憩 Recreational services

注：林分水平指标，节选自 Mäkelä et al. (2012)

## 适应气候变化 **Climate Adaptation** vs. 减缓气候变化 **Climate Mitigation**

Adaptation measures of forests that maintain or improve their ability to grow under current and projected climatic conditions and increase their resistance and resilience. The adaptive capacity to changes in climate and to the timing and size of climate-induced disturbances (e.g., fires, extreme storm events, pests and diseases) can be enhanced by promoting genetic, compositional, structural, and functional diversity at both stand and landscape scales. This includes facilitating natural regeneration and planting of native as well as non-native tree species, genetic variants and individuals that are considered to be adapted to future conditions. Increased connectivity assists the migration of forest species.

Mitigation of climate change by forests is a combination of carbon sequestration by trees, carbon storage by forest ecosystems, especially soils, and forest derived products, such as structural timber, and by carbon substitution, directly by replacing fossil fuels with bioenergy and indirectly through use of wood to substitute for higher carbon footprint materials.

可持续森林经营 + 气候变化 => 气候型智慧林业 **Climate-Smart Forestry (CSF)**

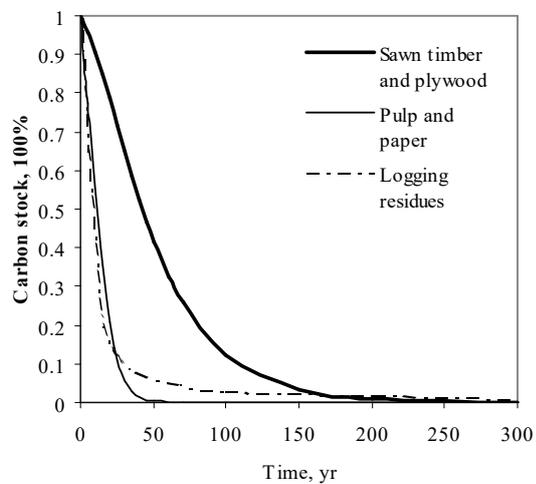
Climate-Smart Forestry (CSF) is an emerging branch of sustainable forest management that aims to manage forests in response to climate change. Climate-Smart Forestry is sustainable adaptive forest management and governance to protect and enhance the potential of forests to adapt to, and mitigate climate change. The aim is to sustain ecosystem integrity and functions and to ensure the continuous delivery of ecosystem goods and services, while minimising the impact of climate-induced changes on mountain forests on well-being and nature's contribution to people.

## 碳平衡生命周期评价 Life Cycle Assessment (LCA)

木材产品在绿色环保、低碳低能耗，可再生等方面，具有其它产品无法比拟的优势，是金属、化工等高能耗产业的优良替代品。推广提倡使用木材产品，一方面可以从碳排放的角度，减缓其它工业品生产过程中产生的碳排放。另一方面可以充分利用森林可再生和碳汇的优势，不断从森林资源获取木材产品，增加碳汇。使得碳以各种木材产品形式存留于森林之外，减缓其回到大气中的过程，达到减缓气候变化的目的。

例. 木材产品生命周期: 木制建筑, 200~300 年; 实木家具, 50~100 年; 胶合板, 10~20 年; 纸制品, 1~3 年; 能源木, 0 年.

例. 森林土壤碳平衡. 森林土壤碳动态模型 YASSO (Liski et al. 2005)



Source: Cao et al. (2010)

## Forest Models in Europe

[https://www.plantedforests.org/formodels\\_database\\_forest\\_modeles\\_liste/modeles\\_affiche.php?id=?](https://www.plantedforests.org/formodels_database_forest_modeles_liste/modeles_affiche.php?id=?)

Name	Class	Categor.	Type	Country	Organisation	Author	Year	Id=
Laricio	Dynamic	Growth	Empirical	France	CEMAGREF; IDF; INRA	Meredieu C.	1998	<a href="#">2</a>
Fagacées-Hêtre	Dynamic	Growth	Empirical	France	ENGREF; INRA	Jean-François Dhôt...	1996	4
Fagacées-Chêne	Dynamic	Growth	Empirical	France	ENGREF; INRA	Jean-François Dhôt...	1998	5
ASPECTS	Dynamic	Growth	Empirical	Belgium	UDL	Daniel Rasse & Louis...	2001	3
CAPIS	Dynamic	Growth	Empirical	France	CEMAGREF	Goreaud d'apres Puk...	2001	6
SIMOPCOSOR	Dynamic	Growth	Process-based	France	CEMAGREF; ENGREF	Goreaud	2000	7
Eucalypt	Dynamic	Growth	Empirical	France	CIRAD; ECOsa	L. Saint-André	2002	8
Mountain	Dynamic	Growth	Empirical	France	CEMAGREF	B. Courbaud	2002	9
Ventoux	Dynamic	Growth	Empirical	France	INRA	Ph. Dreyfus	2002	11
Selva	Dynamic	Growth	Empirical	France	CIRAD	S. Gourlet- Fleury	1997	12
CA1	Dynamic	Growth	Empirical	France	INRA	François Courbet	2003	13
PP3	Dynamic	Growth	Empirical	France	INRA	C. Meredieu, Ph. Dre...	2002	15
Biomass PPM gal	Static	Biomass	Tree	Spain	USC	Balboa et al.	2005	16
Biomass Rad Gal	Static	Biomass	Tree	Spain	USC	Balboa et al.	2005	17
Eucalypt gal	Static	Biomass	Tree	Spain	USC	Balboa et al.	2005	18
Allometric Qcus Gal	Static	Biomass	Tree	Spain	USC	Balboa et al.	2005	<a href="#">19</a>
Allometric Bet GAI	Static	Biomass	Tree	Spain	USC	Balboa et al.	2005	<a href="#">20</a>
med_shrubs	Static	Biomass	Understorey	France	INRA	D. Armand, M. Etienn...	1993	<a href="#">21</a>
RODAL	Dynamic	Growth	Empirical	Spain	FORECOTEC H	PALAHÍ; PUKKALA; TRS...	2005	<a href="#">22</a>
PiroPinus	Dynamic	Fire	Prescribed fire	Portugal	UTAD	Fernandes	2001	<a href="#">23</a>
Unevenaged stands	Dynamic	Growth	Empirical	France	AFOCEL	AFOCEL	2012	<a href="#">34</a>
MOSES	Dynamic	Growth	Empirical	Austria	BOKU	Hubert Hasenauer	1998	<a href="#">24</a>
BioS-BCG	Dynamic	Growth	Process-based	Austria	BOKU	Hubert Hasenauer	1998	<a href="#">26</a>
PrognAus	Dynamic	Growth	Empirical	Austria	BOKU	Hubert Hasenauer	2012	<a href="#">27</a>
PP1	Dynamic	Growth	Empirical	France	INRA	Lemoine B.	1991	<a href="#">1</a>
AFODOUG	Dynamic	Growth	Empirical	France	AFOCEL	AFOCEL	1999	<a href="#">30</a>
AFOEPI	Dynamic	Growth	Empirical	France	AFOCEL	AFOCEL	1999	<a href="#">31</a>
AFOPIN	Dynamic	Growth	Empirical	France	AFOCEL	AFOCEL	1999	<a href="#">32</a>

Evenaged stands	Dynamic	Growth	Empirical	France	AFOCEL	AFOCEL	2012	<a href="#">33</a>
3PG-EG-PT	Dynamic	Growth	Process-based	Portugal	ISA	ISA	2012	<a href="#">37</a>
GLOBULUS 2.1	Dynamic	Growth	Empirical	Portugal	ISA	ISA	2001	<a href="#">38</a>
GLOBTREE	Dynamic	Growth	Empirical	Portugal	ISA	ISA	2003	<a href="#">39</a>
PBLEIRIA e PBRAVO	Dynamic	Growth	Empirical	Portugal	ISA	ISA	1987	<a href="#">40</a>
MODISPINASTE R	Dynamic	Growth	Empirical	Portugal	UTAD	Teresa Fonseca	2004	<a href="#">43</a>
PINASTER-tree	Dynamic	Growth	Empirical	Portugal	ISA	ISA	2002	<a href="#">44</a>
CASTANEA	Dynamic	Growth	Empirical	Portugal	ISA	ISA	2004	<a href="#">46</a>
RODALbis	Dynamic	Growth	Empirical	Spain	FORECOTEC H	Pukkala et al.	2003	<a href="#">47</a>
SILVES	Dynamic	Growth	Empirical	Spain	INIA	Río Gaztelurrutia, ...	1998	<a href="#">48</a>
ERVITI	Dynamic	Growth	Empirical	Spain	University Politechn...	Erviti, J. J.	1991	<a href="#">49</a>
GESMO	Dynamic	Growth	Empirical	Spain	Universidad de Santi...	Castedo, F. & Diégu...	2004	<a href="#">50</a>
GOTILWA+	Dynamic	Growth	Process-based	Spain	CREAF	Gracia, C. et al.	2002	<a href="#">51</a>
ALCORNOCQUE	Dynamic	Growth	Empirical	Spain	INIA	Sánchez-González, ..	2005	<a href="#">52</a>
CAÑADAS	Dynamic	Growth	Empirical	Spain	INIA	Cañadas, N.	2000	<a href="#">53</a>
ESPINEL	Dynamic	Growth	Empirical	Spain	IKT	Espinel, S. et al.	1997	<a href="#">54</a>
ALVAREZ	Dynamic	Growth	Empirical	Spain	USC	Alvarez Gonzalez, J.	1999	<a href="#">55</a>
PALAHÍ	Dynamic	Growth	Empirical	Spain	FORECOTEC H	Palahí, et al.	2002	<a href="#">56</a>
SILVA	Dynamic	Growth	Empirical	Germany	TUM	Pretzsch, H. et al.	1992	<a href="#">57</a>
BALANCE	Dynamic	Growth	Process-based	Germany	TUM	Roetzer, Grote, Pret...	1999	<a href="#">58</a>
WALDPLANER	Dynamic	Growth	Empirical	Germany	FRSLS	Nagel, J.	2006	<a href="#">59</a>
BWIN	Dynamic	Growth	Empirical	Germany	FRSLS	Nagel, J.	2005	<a href="#">60</a>
PEP 2.0	Dynamic	Growth	Empirical	Germany	FVA	Yue, C. et al.	2006	<a href="#">61</a>
W+	Dynamic	Growth	Empirical	Germany	FVA	Yue C. et al.	2000	<a href="#">62</a>
SIZE CLASS MODEL	Dynamic	Growth	Empirical	Germany	FVA	Kandler, G.	2012	<a href="#">63</a>
WEHAM	Dynamic	Growth	Empirical	Germany	FVA	Bosch, B.	2002	<a href="#">64</a>
Soderberg	Dynamic	Growth	Empirical	Sweden	SLU	Soderberg, U.	1986	<a href="#">65</a>
EKO	Dynamic	Growth	Empirical	Sweden	SLU	Eko, P-M.	1985	<a href="#">66</a>
AGESTAM	Dynamic	Growth	Empirical	Sweden	SLU	Agestam, E.	2012	<a href="#">67</a>
ProdMod	Dynamic	Growth	Empirical	Sweden	SLU	Eko, P-M.	1995	<a href="#">68</a>
Hugin	Dynamic	Growth	Empirical	Sweden	SLU	Lundstrom, A. et al.	2012	<a href="#">69</a>
Forest management pl...	Dynamic	Growth	Empirical	Sweden	SLU	Jonsson, B. et al.	1993	<a href="#">70</a>
WoodPaM	Dynamic	Growth	Empirical	Switzerla nd	EPFL	Gillet F.	2008	<a href="#">72</a>
SIBYLA	Dynamic	Growth	Empirical	Slovakia	TUZ	Marek Fabrika et. al	2005	<a href="#">73</a>
GARCIA-RUIZ	Dynamic	Growth	Empirical	Spain	ENCE	Oscar Garcia &	2003	<a href="#">74</a>

						Feder...		
PinasterSiteIndex	Dynamic	Growth	Empirical	Canada	UNBC	Oscar Garcia	2005	<a href="#">75</a>
EFISCEN	Dynamic	large scale	empirical	Europe	Alterra & EFI	Schelhaas, M.J., J. ...	2010	<a href="#">71</a>
PNN	Dynamic	Growth	Empirical	France	INRA	Ph. Dreyfus	1993	<a href="#">10</a>
PBIRROL	Dynamic	Growth	Empirical	Portugal	ISA	Cristina Alegria	2003	<a href="#">42</a>
SUBER	Dynamic	Growth	Empirical	Portugal	ISA	Margarida Tomé; Joa...	2011	<a href="#">79</a>
Dryads	Dynamic	Growth	Empirical	Portugal	ISA; UE	Universidade de Évo...	2002	<a href="#">45</a>
CASMOFOR	Static	carbon	Forest carbon	Hungary	HFRI	Zoltan Somogyi	2002	<a href="#">76</a>
IberoPs	Dynamic	Growth	Empirical	Spain	INIA	Lizarralde & Bravo	2008	<a href="#">77</a>
Ibero Pp	Dynamic	Growth	Empirical	Spain	INIA	Lizarralde & Bravo	2008	<a href="#">78</a>
BilCowExpert_20 01	Static	Berries	Expert model	Finland	UEF	Ihalainen, M. & Pukk...	2001	<a href="#">84</a>
BilCowExpert_20 02	Static	Berries	Expert model	Finland	UEF	Ihalainen, M., Alho,...	2002	<a href="#">85</a>
BilCowExpert_20 05	Static	Berries	Expert model	Finland	UEF	Ihalainen, M., Pukka...	2005	<a href="#">86</a>
Bilberry_2009	Static	Berries	None	Finland	METLA	Miina, J., Hotanen, ...	2009	<a href="#">82</a>
MUSHSORIA 1.0	Static	Mushroo ms	Yield models	Spain	CESEFOR; UEF	F. Martínez-Peña, ...	2012	<a href="#">88</a>
Cowberry_2013	Static	Berries	None	Finland	METLA	Turtiainen M., Miina...	2013	<a href="#">83</a>
BilCowEmpirical_ 2003	Static	Berries	None	Finland	METLA	Ihalainen, M., Salo,...	2003	<a href="#">87</a>
MUSHCAT 1.0	Static	Mushroo ms	Yield models	Spain	CTFC,UEF,U DL	J.A. Bonet, T. Pukka...	2008	<a href="#">89</a>
MUSHCAT 2.0	Static	Mushroo ms	Yield models	Spain	CTFC,UEF,U DL	J.A. Bonet, M. Palah...	2010	<a href="#">90</a>
MUSHCAT 3.0	Static	Mushroo ms	Yield models	Spain	CTFC,UEF,U DL	Bonet, J.A.; de Migu...	2012	<a href="#">91</a>
González-Olabar ria	Dynamic	Fire	Fire probability	Spain	CTFC	González-Olabarria	2006	<a href="#">99</a>
Yield Table of Chest...	Dynamic	Growth	Empirical	Turkey	KTU	Fikret KAPUCU, Hakk&...	2002	<a href="#">94</a>
laurel leaf model	Dynamic	Growth	Empirical	Turkey	AU	Saadettin Güler	2006	<a href="#">95</a>
PINEA2	Dynamic	Growth	Empirical	Spain	INIA	Rafael Calama	2007	<a href="#">96</a>
FORECAST	Dynamic	Growth	Process-based	Canada	UBC	Kimmins J.P.	1999	<a href="#">97</a>
PINEL	Dynamic	Growth	Process-based	Spain	PUN	Blanco J.A. et al	2005	<a href="#">98</a>
MEDFATE	Static	water balance	Process-based	Spain	CTFC	Miquel De Cáceres	2015	<a href="#">100</a>
BWINPRO-S	Dynamic	Growth	Empirical	Germany	ALU Freiburg	Schroeder et al. 200...	2005	<a href="#">101</a>
MEDFIRE	Dynamic	large scale	Process-based	Spain	CTFC	Brotos et al	2013	<a href="#">102</a>
MEDSPREAD	Dynamic	Fire	Fire probability	Spain	CTFC	Duane et al.	2016	<a href="#">103</a>

MEDLUC	Dynamic	LULC	Process-based	Spain	CTFC	Aquilué et al.	2017	<a href="#">104</a>
Heureka	Dynamic	Growth	Empirical	Sweden	SLU	Ljusk Ola Eriksson	2017	<a href="#">105</a>
SIMA	Dynamic	Growth	Process based	Finland	UEF	Kellomäki et al.	1992	<a href="#">106</a>
Recreation value mod...	Static	Recreation	Recreation	Sweden	SLU	Lindhagen	2007	<a href="#">107</a>
Process-based	Static	Soil carbon	Soil carbon	Sweden	SLU	Stendahl	2006	<a href="#">108</a>
Habitat models	Static	Habitat	Habitat model	Sweden	SLU	Edenius, Mikusinski ...	2012	<a href="#">109</a>
MONSU	Dynamic	Growth	Empirical	Finland	UEF	Pukkala, T., Lähde,...	2013	<a href="#">110</a>
PBurnPPinaster	Dynamic	Fire	Fire risk	Portugal	ISA	Marques S., Garcia-G...	2017	<a href="#">111</a>
MortEucglobPT	Dynamic	Fire	Fire Damage	Portugal	ISA	Marques S., Garcia-G...	2011	<a href="#">112</a>
AmountMortalityEucPT	Dynamic	Fire	Fire Damage	Portugal	ISA	Marques S., Garcia-G...	2011	<a href="#">113</a>
TreemortalityEucPT	Dynamic	Fire	Fire Damage	Portugal	ISA	Marques S., Garcia-G...	2011	<a href="#">114</a>
Shrub_BiomassGrowth	Dynamic	Growth	Empirical	Portugal	ISA	Botequim, Brigitte et...	2015	<a href="#">115</a>
ProbStandMort_Mixed	Dynamic	Fire	Fire Damage	Portugal	ISA	Botequim, B. et al.	2017	<a href="#">118</a>
ProburnEC	Dynamic	Fire	Fire probability	Portugal	ISA	Brigite Botequim	2013	<a href="#">117</a>
PburnEC	Dynamic	Fire	Fire probability	Portugal	ISA	Botequim, Brigitte et...	2013	<a href="#">116</a>
PropStandMort_Mixed	Dynamic	Fire	Fire Damage	Portugal	ISA	Botequim, B. et al.	2017	<a href="#">119</a>
ProbTreeMort_Mixed	Dynamic	Fire	Fire Damage	Portugal	ISA	Botequim, B. et al.	2017	<a href="#">120</a>
ARBORE	Dynamic	Growth	Process-based	Chile	Pontificia Universidad...	Fernández MP; Vera ...	2011	<a href="#">121</a>
Simulador INSIGNE	Dynamic	Growth	Empirical	Chile	Universidad de Conce...	Proyecto Simulador R...	2000	<a href="#">122</a>

## References

- Alder, D., Synnott, T. J. 1992. Permanent sample plot techniques for mixed tropical forest.
- Bazaraa M.; Sherali H.; Shetty C. 2006. *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*. Third Edition. A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION
- Bellhouse, D. 1988. Systematic sampling. *Handbook of statistics*, 6, 125-145.
- Bitterlich, W. 1952. Die winkelzählprobe. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 71(7), 215-225.
- Bolte A. ; Ammer C. ; Löf M. et al. 2009. Adaptive forest management in central Europe: Climate change impacts, strategies and integrative concept. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 24: 6, 473 - 482.
- Bowley, A. L. 1912. The measurement of employment: an experiment. *Journal of the Royal Statistical Society*, 75(8), 791-829.
- Buckland, W. R. 1951. A review of the literature of systematic sampling. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 208-215.
- Buongiorno, J., Gilles, J. K. 2003. *Decision methods for forest resource managers*: Academic Press.
- Burkhart, H. E., Tomé, M. 2012. *Modeling forest trees and stands*: Springer Science & Business Media.
- Davis, L. S., Norman Johnson, K., Bettinger, P. S., Howard, T. E., Alván Encinas, L., Salazar, M., . . . Hyde, W. 2001. *Forest management: to sustain ecological, economic, and social values*: Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima (Perú).
- Finney, D. 1948. Random and systematic sampling in timber surveys. *Forestry*, 22(1), 64-99.
- Grosenbaugh, L. 1952. Plotless timber estimates--new, fast, easy. *Journal of Forestry*, 50(1), 32-37.
- Kangas, A., Maltamo, M. 2006. *Forest inventory: methodology and applications (Vol. 10)*: Springer Science & Business Media.
- Law A. 2007. *Simulation Modeling and Analysis: Fourth Edition*. The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Liang, J., Buongiorno, J., Monserud, R. A., Kruger, E. L., Zhou, M. 2007. Effects of diversity of tree species and size on forest basal area growth, recruitment, and mortality. *Forest Ecology and Management*, 243(1), 116-127.
- Lindner M. 2000. Developing adaptive forest management strategies to cope with climate change. *Tree Physiology* 20, 299-307.
- Loetsch, F., Zohrer, F., Haller, K., Panzer, K. (1973). *Forest Inventory Volume II*: JSTOR.
- Lohmander P. 2007. Adaptive optimization of forest management in a stochastic world. In Weintraub et al. (eds.) 2007. *Handbook of Operations Research in Natural Resources*. Springer.
- Mahnken et al. 2022. Accuracy, realism and general applicability of European forest models. *Global Change Biology*.
- Miettinen K. 1999. *Nonlinear Multiobjective Optimization*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Muys B.; Hynynen J.; Palahi m. et al. 2010. Simulation tools for decision support to adaptive forest management in Europe. *Forest Systems* 19(SI), 86-99.
- Mäkelä A.; Landsberg J.; Ek A. et al. 2000. Process-based models for forest ecosystem management: current state of the art and challenges for practical implementation. *Tree Physiology* 20, 289-298.
- Neyman, J. 1934. On the two different aspects of the representative method: the method of stratified sampling and the method of purposive selection. *Journal of the Royal Statistical Society*, 97(4), 558-625.
- Pukkala, T., Lahde, E., Laiho, O. 2009. Growth and yield models for uneven-sized forest stands in Finland. *Forest Ecology and Management*, 258(3), 207-216.

- Spittlehouse D. & Stewart R. 2003. Adaptation to climate change in forest management. *BC Journal of Ecosystem and Management* 4: (1).
- Taha H. 2017. *Operations Research: An Introduction*. Global Editio, Tenth Edition. Pearson Education, Ltd.
- Vanclay, J. K. 1994. Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests. *School of Environmental Science and Management Papers*, 537.
- Van Oijen M.; Rougier J.; Smith R. 2005. Bayesian calibration of process-based forest models: bridging the gap between models and data. *Tree Physiology* 25, 915-927.
- Weiskittel, A. R., Hann, D. W., Kershaw Jr, J. A., Vanclay, J. K. 2011. *Forest growth and yield modeling*: John Wiley & Sons.
- West, P. W., West, P. W. 2009. *Tree and forest measurement*: Springer.
- Yang, Y., Monserud, R. A., Huang, S. 2004. An evaluation of diagnostic tests and their roles in validating forest biometric models. *Canadian journal of forest research*, 34(3), 619-629.
- Yousefpour, Rasoul; Temperli, Christian; Jacobsen, Jette B. et al. 2017. A framework for modeling adaptive forest management and decision making under climate change. *Ecology and Society* 22(4), <http://doi.org/10.5751/ES-09614-220440>
- 陈存根, 龚立群, 彭鸿, 刘晓正. 1996. 秦岭锐齿栎林的生物量和生产力. *西北林学院学报*(S1), 103-114.
- 陈存根, 彭鸿. 1996. 秦岭火地塘林区主要森林类型的现存量 and 生产力. *西北林学院学报*(S1), 92-102.
- 侯琳. (2009). 秦岭火地塘林区天然次生油松林碳平衡研究. (博士), 西北农林科技大学. Available from Cnki
- 侯琳, 雷瑞德, 王得祥, 尚廉斌, 赵辉. 2009. 秦岭火地塘林区油松群落乔木层的碳密度. *东北林业大学学报*(01), 23-25.
- 孟宪宇. 2006. *测树学*: 中国林业出版社.
- 陕西省林业勘察设计院. 1975. 陕西省二元立木材积表.
- 陕西省林业厅. 1964. *陕西林业工作手册*.
- 陕西省林业厅. 1985. *林业工作手册*.
- 吴恒, 党坤良, 田相林, 孙帅超, 陈书军, 赵鹏祥, 曹田健. 2015. 秦岭林区天然次生林与人工林立地质量评价. *林业科学*(04), 78-88.

**Tab. 1A** Overview of main processes implemented in all forest models as well as examples of model applications (Mahnken et al. 2022)

Model	Photosynthesis	Autotrophic respiration	Carbon allocation	Structure development		Mortality	Example applications	Model class
				Height	Diameter			
3D-CMCC-FEM LUE	LUE(16)	Maintenance respiration + dynamic growth respiration (32, 33)	Dynamic allocation based on phenology, light and water availability (sensu 34)	Allometric equations from DBH	Allometric equations from stem biomass	Age-dependent + self-thinning + NSC pool depletion + stochastic	35, 36, 37, 38	H
3D-CMCC-FEM BGC	Farquhar, von Caemmerer and Berry	Maintenance respiration + dynamic growth respiration (32, 33)	Dynamic allocation based on phenology, LA and WA	Allometric equations from DBH	Allometric equations from stem biomass	Age-dependent, self-thinning, NSC pool depletion, stochastic	41, 42	P
4C	LUE (12, 43)	Constant fraction of GPP	Dynamic allocation pipe-model and functional balance	Function of foliage mass and crown architecture	Dependent on carbon allocation	Self-thinning + carbon starvation + age-related (44)	45	P
GOTILWA+	Farquhar (39)	Maintenance respiration + dynamic growth respiration	Dynamic allocation pipe-model, functional balance	Allometric equations from DBH	Follows from carbon allocation	NSC pool depletion + loss of active sapwood	46, 47, 48	P
Landscape-DNDC (PSIM)	Farquhar (39)	Maintenance respiration (49) + growth respiration (fixed fraction)	Sink-source approach driven by phenology (50)	Based on stem carbon allocation and density-dependent h:d (51)	Based on stem carbon allocation and density-dependent h:d (51)	Fixed fraction + density related limits (52)	53, 54, 55	P

*Note:* Models are classified according to their complexity into empirical (E), hybrid (H) and process-based (P) types. This classification is based on expert judgment to provide a rough overview of model complexity; in reality, these models align along a continuum from more empirical to more process-based models. References are indicated by numbers.

*References:* 1: Aussenac et al. (2021); 2: Toigo et al. (2015); 3: Vallet and Pérot (2018); 4: Toigo et al. (2018); 5: Fabrika and Ďurský (2005); 6: Hlásny et al. (2014); 7: Merganic et al. (2020); 8: Moore (1989); 9: Mina et al. (2015); 10: Huber et al. (2020); 11: Huber et al. (2021); 12: Haxeltine and Prentice (1996a); 13: Bohn et al. (2014); 14: Rödiger et al. (2017); 15: Bohn et al. (2018); 16: Monteith et al. (1977); 17: Landsberg and Waring (1997); 18: Gupta and Sharma (2019); 19: Trotsiuk et al. (2020); 20: Xenakis et al. (2008); 21: Augustynczik and Yousefpour (2021); 22: van Oijen et al. (2014); 23: Cameron et al. (2013); 24: Mäkelä et al. (2008); 25: Peltoniemi et al. (2015); 26: Mäkelä (1997); 27: Minunno et al. (2019); 28: Kallioikoski et al. (2018); 29: Kallioikoski et al. (2019); 30: Holmberg et al. (2019); 31: Forsius et al. (2021); 32: McCree and Setlick (1970); 33: Thornley (1970); 34: Friedlingstein et al. (1999); 35: Collalti et al. (2014); 36: Collalti et al. (2016); 37: Collalti et al. (2018); 38: Marconi et al. (2017); 39: Farquhar et al. (1980); 40: de Pury and Farquhar (1997); 41: Collalti et al. (2019); 42: Collalti, Tjoelker, et al. (2020); 43: Haxeltine and Prentice (1996b); 44: Botkin et al. (1972); 45: Gutsch et al. (2018); 46: Sabaté et al. (2002); 47: Keenan et al. (2011); 48: Nadal-Sala et al. (2019); 49: Canell and Thornley (2000); 50: Grote (1998); 51: Grote et al. (2020); 52: Grote et al. (2011); 53: Lindauer et al. (2014); 54: Schweier et al. (2017); 55: Dirnböck et al. (2020).

Abbreviations: DBH, diameter at breast height; GPP, gross primary productivity; NA, not included explicitly; NSC, non-structural carbon; VPD, vapour pressure deficit.

**Tab. 1B** Overview of main processes implemented in all forest models as well as examples of model applications (Mahnken et al. 2022)

Model	Photosynthesis	Autotrophic respiration	Carbon	Structure development			Example applications	Model class
				Height	Diameter	Mortality		
SALEM	NA	NA	NA	Allometric equation (1)	Diameter, density, and site index specific stand level-dependent increment model (1, 2)	Diameter-dependent specific self thinning (1)	1, 3, 4	E
SIBYLA	NA	NA	NA	Empirical: based on tree age, site specification, tree vitality and competition	Empirical: based on site specification, tree vitality and competition	Empirical: based on tree dimensions, growth and stand density	5, 6, 7	E
ForClim v.3.3		NA	NA	Derived from diameter increment under consideration of light availability and climate specific maximum tree height	Modified carbon budget model (8) considering environmental constraints	Age-related, stress-related	v.3.3: 9; for most recent version v.4.0.1 see 10, 11	H
FORMIND	Light-use efficiency (12)	Maintenance respiration + dynamic growth respiration	Dynamic allocation based on phenology, temperature, light and water availability	Allometric equations	Dependent on carbon allocation to stem mass and current DBH of the tree	Carbon-based stress mortality	13, 14, 15	H
3PG	Light-use efficiency (16)	Constant fraction of GPP allocation	Dynamic based on age, size, ...	Allometric equation from DBH, competition, etc.	Dependent on carbon allocation to stem mass and current DBH of the tree	Age-dependent + stress-related + self-thinning	17, 18, 19	H
3PGN-BW	Light-use efficiency (16)	Maintenance respiration + dynamic growth respiration	Dynamic allocation based on environmental modifiers	Allometric equations	Dependent on carbon allocation to stem mass and current DBH of the tree	Age-dependent + stress-related + self-thinning with stochastic component	20, 21	H
BASFOR	Light-use efficiency	Fixed ratio NPP/GPP	Branch and stem fractions constant, leaf and root fractions functions of water- and nitrogen status	Function of stem dry matter	Function of stem dry matter and height	NA	22, 23	H
PREBAS	Light-use efficiency (24, 25)	Maintenance respiration + growth respiration (26)	Dynamic allocation based on pipe-model and functional balance theories and crown allometry	Follows from carbon allocation (27)	Follows from carbon allocation (27)	Competition		28,

**附表 1 固定样地调查记录表**

林班号：                      小班号：                      样地号：                      样地规格：

GPS 坐标：                      地图坐标：

坡度：                      坡位：                      坡向：

海拔：                      郁闭度：

调查员：                      调查日期：

罗盘仪测量记录

测站	方位角	倾斜角	斜距	水平距	累计

误差检验：

补充记录：

经营类型：                      更新树种组成及年龄：                      更新每公顷株数：

高度：      m      分布情况：                      生长情况：                      更新等级：

下木主要种类：                      覆盖度：      高度：      m      分布：

地被物主要种类：                      覆盖度：                      分布：

土壤名称：                      质地：                      厚度：      cm      干湿度：



附表 3 角规调查记录表

林班号：            小班号：            观测点号：            GPS 坐标：            地图坐标：  
 Fg:            坡度：            坡位：            坡向：            海拔：            郁闭度：  
 调查员：            调查日期：

树种																	
	割	切	割	切	割	切	割	切	割	切	割	切	割	切	割	切	
计数																	
胸径																	
地径																	
树高																	
年龄																	

树种									胸径	树种	优势树高	
	割	切	割	切	割	切	割	切				
计数												
胸径												
地径												
树高												
年龄												

说明：枯立木、散生木、倒木不另外设计表格，记录时直接在树种一栏中加括号注解，如记为：油松（枯立木）。坡向记为方位角或者方向角。

单位：胸径（cm），地径（cm），树高（m），年龄（年）。优势树高在调查时选择 3 株最高或胸径最大的立木测定。

补充记录：以上调查年龄为：木芯年龄（生长至胸高处时年龄：    ）    生物年龄

经营类型：            更新树种组成及年龄：            更新每公顷株数：            高度：    m    分布情况：            生长情况：            更新等级：

生长至胸高处时年龄：    下木主要种类：            覆盖度：            高度：    m    分布：

地被物主要种类：            覆盖度：            分布：            土壤名称：            质地：            厚度：    cm    干湿度：

**附表 4 草本样方 (1\*1 m<sup>2</sup>) 调查记录表**

地点： 时间： 林班号： 小班号： 样地号： 调查员：

草本总覆盖度： %， 平均高： m， 分布： 草本总重（湿）： （干）： g/m<sup>2</sup>：

草本样方号	种名	数量	盖度	平均高(m)	湿重(g) *	干重(g) *
1						
2						
3						

注： \*表示只在部分重点样地分草种进行调查，而不是全部样地

草本样方 (1\*1 m<sup>2</sup>) 调查记录表 (续)

地点:            时间:            林班号:            小班号:            样地号:            调查员:

草本样方号	种名	数量	盖度	平均高(m)	湿重(g)*	干重(g)*
4						
5						

注: \*表示只在部分重点样地分草种进行调查, 而不是全部样地  
其他记录或说明:

附表 5 灌木样方调查记录表

地点： 时间： 林班号： 小班号： 样地号： 调查员：  
 灌木总覆盖度： %，平均高： m， 分布： 灌木总重（湿）： （干）： g/m<sup>2</sup>：

灌木样方号	种名	数量	盖度	平均高(m)	湿重(g)*	干重(g)*
1						
2						
3						

注：\*表示只在部分重点样地分灌木进行生物量调查，而不是全部样地

灌木样方调查记录表（续）

地点：            时间：            林班号：            小班号：            样地号：            调查员：

灌木样方号	种名	数量	盖度	平均高(m)	湿重(g)*	干重(g)*
4						
5						

注：\*表示只在部分重点样地分灌木进行生物量调查，而不是全部样地  
其他记录或说明：

**附表 6 灌草生物量调查记录表**

地点： 时间： 林班号： 小班号： 样地号： 调查员：

样方号	生物量 (g/m <sup>2</sup> )					
	灌木			草本		
	总鲜重	总干重	含水率	总鲜重	总干重	含水率
1						
2						
3						
4						
5						
平均值						

记录说明：

灌草生物量调查记录表

地点： 时间： 林班号： 小班号： 样地号： 调查人：

样方号	生物量 (g/m <sup>2</sup> )					
	灌木			草本		
	总鲜重	总干重	含水率	总鲜重	总干重	含水率
1						
2						
3						
4						
5						
平均值						

记录说明：

































附表 23 伐桩调查

林场： 林班号： 小班号： 样地号：

伐桩号	伐桩高度	伐桩直径	伐桩地径	树种	采伐年龄	X 轴坐标	Y 轴坐标
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							
25							
26							
27							

伐桩高度 (cm)；伐桩直径 (cm)；伐桩地径 (cm)；坐标 (m)。

附表 24 枯落物层调查记录表

地点： 时间： 林班号： 小班号： 样地号： 调查员：

1*1m 2 样方 号	枯落物厚度 (cm)			总鲜重 (g)			样品鲜重 (g)			样品干重 (g)			总干重 (g)
	OL	OF	OH	OL	OF	OH	OL	OF	OH	OL	OF	OH	

1													
2													
3													
4													
5													
平均													

注：OL、OF、OH 分别表示未分解层、半分解层、已分解层。

记录说明：

枯落物层调查记录表

地点：            时间：            林班号：            小班号：            样地号：            调查员：

1*1m 2 样方 号	枯落物厚度 (cm)			总鲜重 (g)			样品鲜重 (g)			样品干重 (g)			总干重 (g)
	OL	OF	OH	OL	OF	OH	OL	OF	OH	OL	OF	OH	
1													
2													
3													
4													
5													
平均													

注：OL、OF、OH 分别表示未分解层、半分解层、已分解层。

记录说明：

**附表 25 土壤剖面调查记录表**

地点： 时间： 林班号： 小班号： 样地号： 调查员：  
 剖面地形（海拔： 米；坡向： 坡度： 坡位： 小地形： ）  
 森林/植被情况： 主要树种： 林龄：  
 枯落物层总厚度： cm；未分解层： cm；半分解层： cm；已分解层 cm  
 土壤名称： 当地土壤名称： 地表土壤侵蚀情况：  
 母岩及母质： 地下水埋深： 米；排水条件：  
 土地利用历史与现状：  
 初渗速度  $f_0$ : mm/min；稳渗速度  $f_c$ : mm/min；消退系数  $k$ ：  
 土壤剖面记载

发生层次	土层 (cm)	形态描述											
		湿度	颜色	质地	结构	根系	PH值	新生体	侵入体	碳酸盐	石粒含量	其他	

水分物理性质

发生层次	土层 (cm)	容重 $g/cm^3$	毛管孔隙度 %	非毛管孔隙度 %	总孔隙度 %	毛管持水量 mm	非毛管持水量 mm	饱和持水量 mm	饱和导水率	其它

土层 (cm)	10	20	30	40
环刀内湿重				
铝盒内湿重				
A				
B				

注：土壤调查内容相对较多，应根据实际数据需求、调查成本等进行调整。

## 苏联实生林地位级表

年龄	实生林高度 (M)							年龄
	I a	I	II	III	IV	V	V a	
10	5 - 4	4 - 3	3 - 2	2 - 1				10
20	12 - 10	9 - 8	7 - 6	6 - 5	4 - 3	2	1	20
30	16 - 14	13 - 12	11 - 10	9 - 8	7 - 6	5 - 4	3 - 2	30
40	20 - 18	17 - 15	14 - 13	12 - 11	9 - 8	7 - 5	4 - 3	40
50	24 - 21	20 - 18	17 - 15	14 - 12	11 - 9	8 - 6	5 - 4	50
60	28 - 24	23 - 20	19 - 17	16 - 14	13 - 11	10 - 8	7 - 5	60
70	30 - 26	25 - 22	21 - 19	18 - 16	15 - 12	11 - 9	8 - 6	70
80	32 - 28	27 - 24	23 - 21	20 - 17	16 - 14	13 - 11	10 - 7	80
90	34 - 30	29 - 26	25 - 23	22 - 19	18 - 15	14 - 12	11 - 8	90
100	35 - 31	30 - 27	26 - 24	23 - 20	19 - 16	15 - 13	12 - 9	100
110	36 - 32	31 - 29	28 - 25	24 - 21	20 - 17	16 - 13	12 - 10	110
120	38 - 34	33 - 30	29 - 26	25 - 22	21 - 18	17 - 14	13 - 10	120
130	38 - 34	33 - 30	29 - 26	25 - 22	21 - 18	17 - 14	13 - 10	130
140	39 - 35	34 - 31	30 - 27	26 - 23	22 - 18	17 - 14	13 - 10	140
150	39 - 35	34 - 31	30 - 27	26 - 23	22 - 19	18 - 14	13 - 10	150
160	40 - 36	35 - 31	30 - 27	26 - 23	22 - 19	18 - 14	13 - 10	160

注：①陕西省在森林调查中针叶树一般用实生林地位级表；阔叶树一般用萌生林地位级表。

②地位级是依林分中优势森林树种的年龄和树高确定。

③例：80年油松的树高是12米时属V地位级。

### 苏联萌生林地位级表

年龄	实生林高度 (M)							年龄
	I a	I	II	III	IV	V	Va	
5	5	4	3	2	1.5	1		5
10	7	6	5	4	3	2	1	10
15	11	10 - 9	8 - 7	6	5	4 - 3	2 - 1.5	15
20	14	13 - 12	11 - 10	9 - 8	7 - 6	5 - 4	3 - 2	20
25	16	15 - 13	12 - 11	10 - 9	8 - 7	6 - 5	4 - 3	25
30	18	17 - 16	15 - 13	12 - 11	10 - 8	7 - 6	5 - 4	30
35	20	19 - 17	16 - 14	13 - 12	11 - 10	9 - 7	6 - 5	35
40	21	20 - 19	18 - 16	15 - 13	12 - 11	10 - 8	7 - 5	40
45	23	22 - 20	19 - 17	16 - 14	13 - 11.5	11 - 8.5	8 - 5.5	45
50	25	24 - 21	20 - 18	17 - 15	14 - 12	11 - 8.5	8 - 6	50
55	26	25 - 23	22 - 19	18 - 16	15 - 13	12 - 9	8 - 6	55
60	27	26 - 24	23 - 20	19 - 16.5	16 - 13.5	13 - 9.5	9 - 6.5	60
65	28	27 - 24.5	24 - 21	20 - 17	16 - 13.5	13 - 10	9 - 7	65
70	28.5	28 - 25	24 - 21.5	21 - 18	17 - 14	13 - 10.5	10 - 7.5	70
75	29	28 - 25.5	25 - 22	21 - 18.5	18 - 14.5	14 - 11	10 - 8	75
80	30	29 - 26	25 - 23	22 - 19	18 - 15	14 - 12	11 - 8.5	80
85	31	30 - 27	26 - 23.5	23 - 20	19 - 15.5	15 - 13	12 - 8.5	85
90	31	30 - 27	26 - 23.5	23 - 20	19 - 15.5	15 - 13	12 - 8.5	90
100	31	30 - 28	27 - 24	23 - 21	20 - 16	15 - 13	12 - 8.5	100
110	32	31 - 28.5	28 - 25	24 - 21	20 - 17	16 - 13.5	13 - 9	110
120	33	32 - 29	28 - 26	25 - 22	21 - 18	17 - 13.5	13 - 9	120

## 测树学习题集（初级）

B1 现测得一株毛白杨的树高为 21.0 m，胸径为 28.0 cm，胸高形率为 0.7。请根据形数与形率关系，计算该树的材积（常数  $c$  取值为 0.20）。

B2 站在被测树木的坡上方，距离某树水平距离 18m 的地方，用勃鲁莱测高器测高，在 15m 刻划带上读树梢的读数为 15m，树根读数为 1.3m，求该树木的高度。

B3 设单株落叶松  $h=13.6m$ ， $ba=0.0283m^2$ ， $v=0.1572m^3$ ，试计算实验形数  $f_e$ 。

B4 某松栎混交林总面积 14 ha，现设置 20m\*30m 标准地一块。标准地每木检尺结果及一元材积表如下所示，请计算该混交林树种组成及林分总蓄积量。

**B4.1 标准地每木检尺统计表**

径阶 cm	4	6	8	10	12	14	16	18	20
油松 stem				4	9	16	8	9	3
榿栎 stem	1	2	5	2		5	4		1

**B4.2 一元材积表**

径阶 cm	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
油松 $m^3$	0.00487	0.01236	0.02421	0.04077	0.06243	0.08949	0.12230	0.16100	0.20590	0.25720
榿栎 $m^3$	0.00432	0.00702	0.01522	0.02635	0.04211	0.06258	0.08622	0.11450	0.14480	0.17750

B5 设单株落叶松  $h=13.6m$ ，按 2m 区分段区分求积，每段直径量测结果如下表所示，树干材积  $v$  计算结果为 0.1572。请计算以下各形数与形率： $f_{1.3}$ 、 $f_e$ 、 $q_{0.1}$ 、 $q_0$ 、 $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$ 。

$l_i$ , m	$d_i$ , cm	$g_i$ , $m^2$	note
0	21.6	0.036	地径
1.3	19.0	0.0283	胸径
1.36	18.8	0.0277	1/10 h
2	18.4	0.0266	
3.4	15.3	0.0184	1/4 h
4	14.2	0.0158	
6	12.0	0.0113	
6.8	11.2	0.0098	1/2 h
8	8.0	0.0050	
10	4.2	0.0014	
10.2	4.1	0.0013	3/4 h
12	2.8	0.0006	梢底

B6 某山杨白桦林，总面积为 6.4 ha，设置 20m\*30m 标准地一块，请根据标准地每木检尺结果及山杨、白桦一元材积表计算：（1）山杨树种的平均直径  $D_g$ ；（2）计算该林分蓄积量  $V_{tot}$ ；（3）林分树种组成系数，写出树种组成式。

**B6.1 标准地每木检尺统计表**

径阶 cm	4	6	8	10	12	14	16	18	20
山杨 stem		3	8	12	16	14	7	2	
白桦 stem	2	5	2	11	6	3	5		

**B6.2 一元材积表**

径阶 cm	4	6	8	10	12	14	16	18	20
山杨 $m^3$	0.004	0.006	0.016	0.029	0.046	0.067	0.091	0.113	0.161
白桦 $m^3$	0.004	0.009	0.019	0.032	0.051	0.075	0.103	0.135	0.171

B7 某标准地每木检尺结果如下表，请计算该标准地的平均胸径。

径阶 cm	8	12	16	20	24	28	32	36	40
株数 stem	10	24	21	27	22	21	9	7	1

B8 某马尾松林总面积为 7.9 ha。现设置 20m\*30m 标准地一块。根据标准地每木检尺结果，林分胸高断面积  $BA=2.0144 m^2$ ，林分平均高  $H=16.0 m$ 。请根据下列马尾松标准表计算该林分蓄积量  $V$ 。

H, m	BA, m <sup>2</sup> /ha	V, m <sup>3</sup> /ha	H, m	BA, m <sup>2</sup> /ha	V, m <sup>3</sup> /ha
10	27.1	145	17	41.6	340
11	29.4	169	18	43.4	372
12	31.5	195	19	45.2	403
13	33.7	222	20	47.0	435
14	35.7	250	21	48.6	466
15	37.8	280	22	50.3	498
16	39.7	309	23	51.9	529

B9 已知某落叶松林分的总断面积为  $25.6 m^2$ ，林分平均高为 21 m，落叶松平均实验形数为 0.41。请计算该林分的蓄积量。

B10 某松桦混交林总面积 3 公顷，设置 2 个角规控制检尺点（P1，P2），角规断面系数  $F_g=1.0$ ，请根据一元材积形高表计算该松桦林的总蓄积。

**B10.1 角规控制检尺表**

径阶 cm	4	6	8	10	12	14	16	18	20
华山松 P1	0	1	0	1	2	2	0	2	1
红桦 P1	0	0	1	2	3	0	1	0	0
槲栎 P1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
华山松 P2	1	0	2	0	3	2	0	1	0
红桦 P2	0	1	0	2	0	2	1	0	0

榲栌 P2	0	0	1	0	1	0	0	0	0
-------	---	---	---	---	---	---	---	---	---

**B10.2 一元材积形高表**

径阶 cm	4	6	8	10	12	14	16	18	20
华山松 v, m <sup>3</sup>	0.00487	0.1236	0.02421	0.04077	0.06243	0.08949	0.12230	0.16100	0.20290
红桦 v, m <sup>3</sup>	0.00432	0.00702	0.01522	0.02635	0.04211	0.06258	0.08622	0.11450	0.14480
榲栌 v, m <sup>3</sup>	0.00512	0.00925	0.01856	0.03122	0.04955	0.07012	0.09625	0.12250	0.15180
华山松 f <sub>h</sub>	3.04	3.43	3.78	4.08	5.52	5.82	6.09	6.33	6.56
红桦 f <sub>h</sub>	2.44	2.48	3.03	3.36	3.73	4.07	4.29	4.50	4.61
榲栌 f <sub>h</sub>	3.08	3.27	3.69	3.98	4.38	4.56	4.79	4.82	4.83

## 测树学习题集（中级）

M1 假设某林场需要对有 100 ha 林地进行基于系统抽样的样地调查，调查目标是确定平均每公顷林木的蓄积量。现要求在 95% 置信区间下，可允许的离差不超过 15 m<sup>3</sup>/ha，计算需要设计多少个 20m\*20m 的矩形样地？（已知总体标准差为 50m<sup>3</sup>/ha）

估算一个无限总体所需的样本大小为： $n_0 = \left(\frac{z_{\alpha/2}}{d}\right)^2 S^2 = \left(\frac{1.96}{15}\right)^2 50^2 = 42.68$

已知样地为 20m\*20m 的矩形样地，总林地面积为 100ha，进而有限总体的大小为：

$$N = \frac{100}{20 \times 20 \div 10000} = 2500$$

$$n = \frac{n_0}{\left(1 + \frac{n_0}{N}\right)} = \frac{42.68}{\left(1 + \frac{42.68}{2500}\right)} = 41.96$$

最终，对于有限总体所需设计的样地数量为：

综上所述，需要设计 42 块调查样地，才能使得蓄积量调查在 95%置信区间下，可允许的离差不超过 15m<sup>3</sup>/ha。

M2 某林场对其 20 ha 林地按照龄组分成 3 层进行样地调查(样地为 20m\*30m 矩形样地)，分层信息及样地调查结果如下表所示，试计算各层每公顷蓄积及总蓄积，整个区域每公顷蓄积及总蓄积，以及其相应标准误。

分层及样地信息

	面积 A, ha	样地 n	各样地每公顷蓄积 y (m <sup>3</sup> /ha)							
幼龄林	10	8	36	42	41	42	30	35	43	44
中龄林	6	6	80	83	77	88	72	68		
成熟林	4	6	122	135	140	127	136	121		

基于样地计算各层每公顷林木平均蓄积量 (m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>) 为：

$$\hat{y}_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} y_{1i} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 y_{1i} = \frac{36+42+41+42+30+35+43+44}{8} = 39.1 \text{ m}^3/\text{hm}^2$$

$$\hat{y}_2 = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} y_{2i} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 y_{2i} = \frac{80+83+77+88+72+68}{6} = 78.0 \text{ m}^3/\text{hm}^2$$

$$\hat{y}_3 = \frac{1}{n_3} \sum_{i=1}^{n_3} y_{3i} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 y_{3i} = \frac{122+135+140+127+136+121}{6} = 130.2 \text{ m}^3/\text{hm}^2$$

在计算均值的标准误之前，首先要计算样本的方差： $s_{y1}^2 = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} (y_{1i} - \hat{y}_1)^2 = 21.1$

$$s_{y2}^2 = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} (y_{2i} - \hat{y}_2)^2 = 44.3$$

$$s_{y_3}^2 = \frac{1}{n_3} \sum_{i=1}^{n_3} (y_{3i} - \hat{y}_3)^2 = 52.5$$

相应每公顷林木蓄积量的标准误为：

$$s_{\hat{y}_1} = \sqrt{\left(1 - \frac{n_1}{N_1}\right) \frac{s_{y_1}^2}{n_1}} = \sqrt{\left(1 - \frac{8}{10/0.06}\right) \frac{21.2}{8}} = 1.59 \text{ m}^3/\text{hm}^2$$

$$s_{\hat{y}_2} = \sqrt{\left(1 - \frac{n_2}{N_2}\right) \frac{s_{y_2}^2}{n_2}} = \sqrt{\left(1 - \frac{6}{6/0.06}\right) \frac{44.3}{6}} = 2.63 \text{ m}^3/\text{hm}^2$$

$$s_{\hat{y}_3} = \sqrt{\left(1 - \frac{n_3}{N_3}\right) \frac{s_{y_3}^2}{n_3}} = \sqrt{\left(1 - \frac{6}{4/0.06}\right) \frac{52.5}{6}} = 2.83 \text{ m}^3/\text{hm}^2$$

每层林分的总蓄积为：

$$\hat{T}_1 = A_1 \hat{y}_1 = 10 \times 39.1 = 391.0 \text{ m}^3$$

$$\hat{T}_2 = A_2 \hat{y}_2 = 6 \times 78.0 = 468.0 \text{ m}^3$$

$$\hat{T}_3 = A_3 \hat{y}_3 = 4 \times 130.2 = 520.8 \text{ m}^3$$

每层林木总蓄积的标准误为：

$$s_{\hat{T}_1} = \sqrt{\text{var}(\hat{T}_1)} = \sqrt{A_1^2 \text{var}(\hat{y}_1)} = \sqrt{10^2 \times 1.59^2} = 15.9 \text{ m}^3$$

$$s_{\hat{T}_2} = \sqrt{\text{var}(\hat{T}_2)} = \sqrt{A_2^2 \text{var}(\hat{y}_2)} = \sqrt{6^2 \times 2.63^2} = 15.8 \text{ m}^3$$

$$s_{\hat{T}_3} = \sqrt{\text{var}(\hat{T}_3)} = \sqrt{A_3^2 \text{var}(\hat{y}_3)} = \sqrt{4^2 \times 2.83^2} = 11.3 \text{ m}^3$$

整个林地区域平均每公顷林木蓄积为：

$$\hat{y}_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^3 \frac{A_i}{A} \hat{y}_i = \frac{10}{20} \times 39.1 + \frac{6}{20} \times 78.0 + \frac{4}{20} \times 130.2 = 69.0 \text{ m}^3/\text{hm}^2$$

相应其标准误为：

$$S_{\hat{y}_{\text{tot}}} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left(\frac{A_i}{A}\right)^2 \text{var}(\hat{y}_i)} = \sqrt{\left(\frac{10}{20}\right)^2 \times 1.59^2 + \left(\frac{6}{20}\right)^2 \times 2.63^2 + \left(\frac{4}{20}\right)^2 \times 2.83^2} = 1.25 \text{ m}^3/\text{hm}^2$$

整个林地的总蓄积为：

$$T_{\text{tot}} = \hat{T}_1 + \hat{T}_2 + \hat{T}_3 = 391.0 + 468.0 + 520.8 = 1379.8 \text{ m}^3$$

整个林地总蓄积的标准误为：

$$S_{T_{\text{tot}}} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \text{var}(\hat{T}_i)} = \sqrt{s_{\hat{T}_1}^2 + s_{\hat{T}_2}^2 + s_{\hat{T}_3}^2} = \sqrt{15.9^2 + 15.8^2 + 11.3^2} = 25.1 \text{ m}^3$$

**M3** 请根据标准地调查所测定的林木胸径和树高数据（表 M3.1），1）绘制树高胸径曲线；2）计算备选树高曲线方程的参数，根据统计检验结果筛选模型；3）应用选用的树高曲线图计算的各径阶平均高、林分平均高。

根据散点分布趋势随手绘制一条均匀圆滑的曲线，即为树高曲线。要用径阶平均胸径对应的树高值与曲线值和株数进行曲线的调整。利用调整后的曲线，依据林分平均直径（ $D_g$ ）由树高曲线上查出相应的树高，即为林分条件平均高。同理可由树高曲线确定各径阶的平均高。

表 M3.1 樟子松人工林树高测定数据

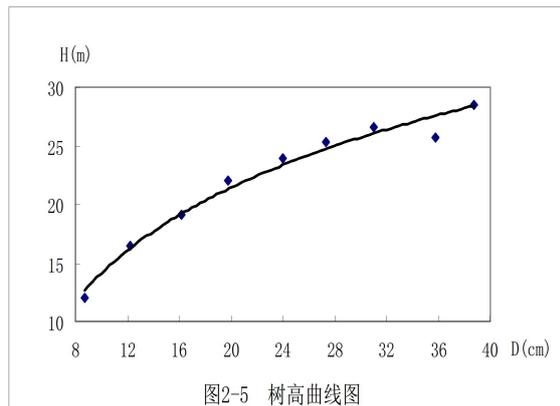
序号	胸径	树高									
1	11.9	6.90	21	12.5	10.40	41	18.2	10.00	61	15.5	10.95
2	8.6	6.75	22	11.0	10.25	42	14.8	9.65	62	13.2	10.90
3	7.5	6.00	23	9.4	9.70	43	12.5	9.15	63	10.1	9.90
4	5.3	4.50	24	6.6	8.95	44	10.5	8.70	64	14.0	10.80
5	4.2	5.30	25	20.9	10.80	45	8.1	8.80	65	27.4	18.90
6	21.2	18.50	26	17.2	10.90	46	11.6	9.40	66	22.5	17.33
7	28.1	18.80	27	15.0	9.50	47	12.0	8.90	67	20.6	16.70
8	24.7	18.90	28	12.6	9.20	48	17.5	10.00	68	18.6	17.73
9	21.3	17.80	29	8.8	7.80	49	16.3	10.35	69	15.6	14.80
10	19.9	18.60	30	26.8	18.50	50	13.9	9.55	70	33.6	20.00
11	15.7	17.10	31	24.6	18.30	51	11.5	9.90	71	31.6	18.60
12	8.6	8.00	32	22.0	16.90	52	8.0	9.10	72	29.4	18.45
13	13.3	9.30	33	18.8	17.50	53	12.2	9.65	73	26.7	16.43
14	11.1	8.50	34	13.5	15.50	54	10.5	8.40	74	25.4	15.10
15	10.3	9.00	35	14.3	15.10	55	20.9	14.90	75	27.5	19.00
16	8.5	7.65	36	20.7	16.50	56	10.5	10.20	76	25.2	18.35
17	6.5	7.40	37	17.2	14.90	57	10.3	8.95	77	24.2	19.00
18	10.5	10.00	38	15.2	13.60	58	10.9	8.60	78	22.8	19.15
19	9.7	8.95	39	13.2	14.10	59	20.0	11.30	79	19.9	18.15
20	15.7	10.75	40	10.7	14.20	60	18.2	11.65	80	20.1	11.60

树高曲线实质是一条平均值曲线，但同一份资料每人随手绘出的曲线常常会不相同，必须通过检查调整保证曲线反映出平均值。通常采用计算平均离差的方法进行调整，平均离差的计算方法为：

$$\Delta = \sum_{i=1}^k f_i (H_{O_i} - H_{T_i})$$

$$\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{\sum_{i=1}^k f_i}$$

式中： $\Delta$ —离差代数数和；  
 $f_i$ —第*i*径阶的林木株数；  
 $H_{O_i}$ —第*i*径阶林木平均高的实际值；  
 $H_{T_i}$ —第*i*径阶林木平均高的曲线值；  
 $k$ —径阶个数；  
 $\bar{\Delta}$ —平均离差。



根据离差的“+”或“-”调整曲线的高低，直到调整后的曲线满足平均离差等于“0”或接近“0”，曲线可以使用。采用图解法绘制树高曲线，方法简便易行，但绘制技术和实践经验要求较高，否则难以保证树高曲线的绘制质量。

**备选方程。**表 M1.2 中列出了具有代表性的 22 种树高曲线方程。实际工作中，可以根据不同的树种选用这些树高曲线方程。确定备选模型的方法有两种：a) 根据专业理论知识（从理论上推导或根据以往的经验）和前人研究结果来确定；b) 在 a 不能确定的情况下，通过观测自变量和因变量之间散点图，并结合专业知识确定模型的大体类型。只有一个自变量时，根据散点图并结合专业知识较容易确定曲线类型和模型。但是，对于多个自变量的问题，由于变量之间的相互影响很难确定候选模型。分析者可以根据以往类似问题的研究结果，并通过分析各个自变量和因变量的散点图来确定。

**参数估计。**测树学中的树高曲线、削度方程、树木生长方程及收获模型等，均属于典型的非线性回归模型，估计参数时需采用非线性回归，例如，最小二乘法。在非线形回归模型参数估计时，初始值的选择非常重要。如果初始值选择不当，就可能收敛很慢，或者收敛到局部极小值，甚至不收敛。

表 M3.2 树高曲线方程一览表

方程名称	树高曲线方程
双曲线	$H = a - \frac{b}{D+c}$
柯列尔(Роляер, 1878)	$H = 1.3 + aD^b e^{-cD}$
Goulding (1986)	$H = 1.3 + \left(a + \frac{b}{D}\right)^{-2.5}$
Schumacher (1939)	$H = 1.3 + ae^{-\frac{b}{D}}$
Wykoff et al.(1982)	$H = 1.3 + ae^{-\frac{b}{(D+1)}}$
Ratkowsky (1990)	$H = 1.3 + ae^{-\frac{b}{(D+c)}}$
Hossfeld (1822)	$H = 1.3 + \frac{a}{(1 + bD^{-c})}$
Bates and Watts (1980)	$H = 1.3 + \frac{aD}{(b + D)}$
Loetsh et al. (1973)	$H = 1.3 + \frac{D^2}{(a + bD)^2}$
Curtis (1967)	$H = 1.3 + \frac{a}{(1 + D^{-1})^b}$
Curtis (1967)	$H = 1.3 + \frac{D^2}{(a + bD + cD^2)}$
Levakovic (1935)	$H = 1.3 + \frac{a}{(1 + bD^{-d})^c}$ , d=1,2或其他常数
Yoshida (1928)	$H = 1.3 + \frac{a}{(1 + bD^{-c})} + d$
Ratkowsky and Reedy (1986)	$H = 1.3 + \frac{a}{(1 + bD^{-c})}$
Korf (1939)	$H = 1.3 + ae^{-bD^{-c}}$
修正Weibull (Yang, 1978)	$H = 1.3 + a(1 - e^{-bD^c})$
Logistic (1838)	$H = 1.3 + \frac{a}{1 + be^{-cD}}$
Mitscherlich (1919)	$H = 1.3 + a(1 - be^{-cD})$
Gompertz (1825)	$H = 1.3 + ae^{-be^{-cD}}$
Richards (1959)	$H = 1.3 + a(1 - e^{-cD})^b$
Sloboda (1971)	$H = 1.3 + ae^{-be^{-cD^d}}$
Sibbesen (1981)	$H = 1.3 + aD^{bD^{-c}}$

**统计检验。**结合各候选模型参数检验结果，进一步比较各模型拟合统计量，从中选择几个最佳模型（一般 2—3 个）作为最终模型的候选模型进行的残差分析和独立性检验。

对于线性和内线性回归模型，可以采用 MSE,  $R^2$ ,  $R_a^2$ , AIC 和 PRESS 等拟合统计量作为比较和评价备选模型的标准。各统计量的表达式和具体比较方法如下：

$$\text{残差均方 (MSE)} \quad MSE = SSE / (n - p)$$

MSE 统计量广泛地用作选定模型的标准，一般选择具有最小 MSE 值的备选回归作为最终模型。然而，当分析者的目的在于估计参数或者是选定一个模型用于外推的目的，这种方法是适合的；如果分析者的目的是为了选择一个用于提供可靠估计值的模型（林业上的回归分析多为此目的），MSE 统计量可能应该按以下方法使用。

- ①  $p$  值很大时, 绘 MSE 对应于  $p$  个变量的关系图, MSE 值通常围绕着一水平线上下波动。MSE 值与线的关系表示了  $\delta^2$  值, 因为 MSE 值常为  $\delta^2$  的满意估计值。
- ② 由备选模型中选择最终模型, 应具备以下两点最优配合的原则: (i) 模型最小, 即自变量最少; (ii) 具有合理的最为近于  $\delta^2$  值的 MSE 值。

**相关指数 ( $R^2$ )** 
$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

随着模型中自变量个数的增多,  $R^2$  值会变小, 同时, 很少以  $R^2$  最大作为选择最优方程的依据。选择最优模型的依据应该是: (a) 变量越少越好; (b)  $R^2$  值实质上不小于  $R^2_{\max}$  ( $R^2$  的最大值)。如果最大模型中所含的变量也存在于其他模型之中, 通常, 可以用  $R^2$  值对应于  $p$  值作图。这种典型图反映了在  $p$  值大的情况下  $R^2$  值随着  $p$  值的减小而接近于  $R^2_{\max}$  的上渐近线。然而, 有一个点, 它是  $R^2$  值急骤下降的起点, 这个点对应  $p$  值相应的模型常被定为最终模型。

**修正的相关指数 ( $R_a^2$ )** 
$$R_a^2 = 1 - (1 - R^2) \left( \frac{n-1}{n-p} \right) = 1 - SSE \left( \frac{n-1}{SST} \right)$$

这个统计量基本上与 MSE 等价, MSE 更便于解释。因此, 作为选择模型的标准, MSE 优于  $R_a^2$ 。以上介绍的几种基于预测的统计量都有一个共同的缺点, 即在计算某点的预测偏差时, 该点曾在建立回归模型时已经使用过。PRESS 统计量克服了这一缺点:

**预测平方和统计量 (PRESS)** 
$$PRESS = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{ip})^2$$

式中  $y_i$  为第  $i$  个  $Y$  的观测值;

$\hat{y}_{ip}$  为原始数据中删除第  $i$  个样本观测值后, 按  $p$  个参数模型拟合回归方程计算出相应的第  $i$  个观测值  $x_i$  的因变量  $y$  的预测值。

PRESS 统计量的计算, 要求使用  $n$  个不同数据, 分别拟合  $p$  个参数的模型之后, 对于每一个回归分别求出相应的 PRESS 统计量。采用 PRESS 统计量选择模型, 实际上是最优调和两种有时相矛盾因素的方法。第一种是选择较小  $p$  值的模型; 第二种是选择 PRESS 值并不比备选模型 PRESS 值中最小的  $PRESS_{\min}$  值明显过大的模型。近年来, 人们越来越多地采用 PRESS 统计量作为选择模型标准, 特别是将预测作为建模的目的时, 这个统计量具有直观的吸引力。但是, 当数据组过多时, 计算工作量过大。

**Akaike 信息量准则 (AIC)** 
$$AIC = -\frac{n}{2} \ln(SSE) - p$$

AIC 统计量应用比较广泛, 即可用于时间序列分析种的自回归阶数的确定, 也可用于回归自变量的选择。采用 AIC 选择模型的标准是选择使 (13-55) 达到最小的自变量子集。

在各备选回归模型中, 这 5 个统计量作为反映拟合程度优劣的指标, 分析者将寻求当 MSE、PRESS 和 AIC 值小,  $R^2$  和  $R_a^2$  值大的方程。考虑将这些统计量作为评价备选回归模型的标准时, 应区别两种不同情况:

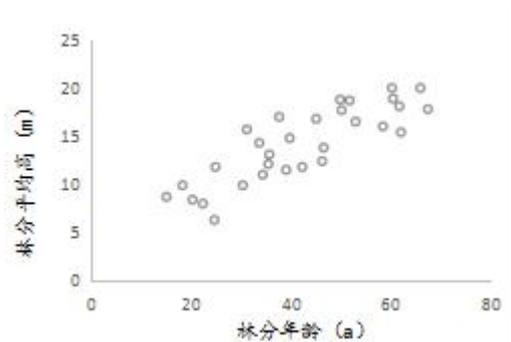
- ① 所需评价的各种模型具有相同的变量个数 ( $p$  在被评价的模型组内是个常数)。
- ② 每个评价的模型具有不同的变量个数 ( $p$  在每个被评价模型中不等)。

如果所有的备选模型变量数相同, 则 MSE,  $R^2$ ,  $R_a^2$  和 AIC 统计量是等价标准。例如, 具有最小 MSE 值的模型同样具备最大的 AIC,  $R^2$  和  $R_a^2$  值。PRESS 统计量和其他 4 个标准难以直接比较, 而以 PRESS 值的大小顺序, 可能与其他 4 个标准所排的次序不同。然而, 当样本单元很大时, PRESS 值应与 MSE 值相近, 在这种情况下, 由 PRESS 值排序将会与其他 5 个标准排序相一致。

M4 某林区 30 个油松林样地调查的林分年龄与林分平均树高数据如下表。试根据样地数据，选择理论方程，构建林分树高-年龄的生长预测模型。

No.	年龄 (a)	平均高 (m)	No.	年龄 (a)	平均高 (m)	No.	年龄 (a)	平均高 (m)
1	62	18.1	11	34	11.0	21	46	12.4
2	20	8.4	12	25	6.3	22	39	11.5
3	15	8.7	13	60	20.0	23	22	8.0
4	36	13.1	14	47	13.8	24	31	15.7
5	30	9.9	15	67	17.8	25	50	17.7
6	18	9.9	16	52	18.7	26	62	15.4
7	35	12.1	17	40	14.8	27	34	14.3
8	38	17.0	18	42	11.8	28	45	16.8
9	60	18.9	19	50	18.8	29	53	16.5
10	66	20.0	20	25	11.8	30	58	16.0

(1) 整理林分平均胸径与林分年龄相对应的数据，绘制树高-年龄散点图，检查明显远离样点群的数据点的正确性（是否为记录或转录错误）。



本例尝试拟合 Schumacher 方程。在 SPSS 非线性拟合时，首先对参数的初始值进行估计，Schumacher 方程中，参数 a 为树高生长极大值，将其假定为 25，另外假定 20 年时林分平均树高为 8m。估计参数 b 的初始值计算过程如下：

$$\text{代入 a、树高、年龄数值得：} 8 = 25 * \exp(-b/20)$$

$$\text{两边取对数得：} \ln(8) = \ln(25) - b/20$$

$$\text{即 b 值为：} b = (\ln(25) - \ln(8)) * 20 = 23$$

最终获得参数 a 和 b 的初始值分别为 25 和 23。如果在确定初始值时无法计算明确的范围，可以先根据对函数的了解设定参数的初始值，再在约束对话框设定参数的数值范围。

(2) 调用 SPSS 非线性回归功能。对变量进行定义，包括年龄 t 和树高 H，录入数据（或直接读取数据文件）。按 Analyze—Regression—Nonlinear（分析-回归-非线性）顺序打开主对话框。将变量 H(树高)设置为因变量，送入 Dependent 框中。在 Model Expression 框中输入估计的模型表达式  $a * \exp(-b/t)$ 。在 Parameters 框中根据前面计算的结果，设定 a 的初始值为 25，b 的初始值为

23. 在 Save 对话框中选在 Predicted value、Residuals 选项，即可生成每个数据点的模型预测值与残差值。

(3) 分析输出结果

SPSS 在完成拟合计算后，会生成统计分析报告，对回归分析结果进行汇总。

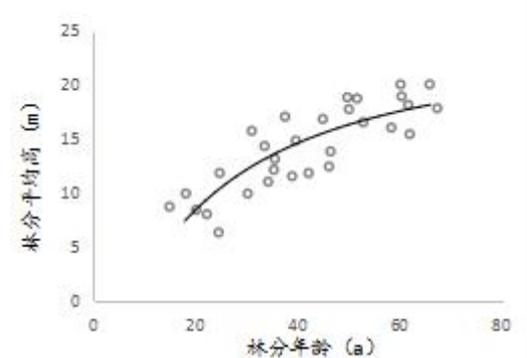
Iteration Number <sup>a</sup>	Residual Sum of Squares	Parameter	
		a	b
1.0	140.767	25.000	23.000
1.1	134.191	25.402	22.273
2.0	134.191	25.402	22.273
2.1	134.189	25.369	22.236
3.0	134.189	25.369	22.236
3.1	134.189	25.367	22.232
4.0	134.189	25.367	22.232
4.1	134.189	25.367	22.232

迭代历史记录中给出了迭代各步的残差平方和和参数 a、b 的估计值，连续残差平方和之间的相对减少量小于特定收敛判据 1.0E-08 时迭代终止。

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
a	25.367	2.013	21.244	29.491
b	22.232	3.243	15.590	28.874

参数估计值表给出了 a 和 b 的最终计算值，标准误，95%置信区间的上下限。a=25.367, b=22.232, 从而得到模型的最终形式（下图中曲线）：

$$H = 25.367e^{-22.232/t}$$



**Correlations of Parameter Estimates**

	a	b
a	1.000	.938
b	.938	1.000

参数估计值的相关性绝对值较高，很可能是由于模型中参数过多（较少的模型参数就能很好的拟合数据），或观测数据量与准确性过低等原因。

**ANOVA<sup>a</sup>**

Source	Sum of Squares	df	Mean Squares
Regression	6330.471	2	3165.235
Residual	134.189	28	4.792
Uncorrected Total	6464.660	30	
Corrected Total	438.159	29	

Dependent variable: H

a. R squared =  $1 - (\text{Residual Sum of Squares}) / (\text{Corrected Sum of Squares})$   
= .694.

ANOVA 给出了非线性模型统计量的摘要，决定系数  $R^2$  反映了模型对于数据的拟合程度，如果模型拟合程度非常差，决定系数也可能是负值。

**M5 已知某林区 30 个油松林样地调查的林分年龄与林分平均树高数据（M4），试根据样地数据，选择理论方程，编制该林区油松地位级表。**

（1）根据样地调查数据，整理绘制林分平均高与平均年龄的散点图，观察其规律并剔除明显错误的点。

（2）依据散点的分布状况与趋势，通过非线性回归拟合技术，拟合并绘制一条平均树高生长曲线。

（3）以该导向曲线为基础计算树高残差绝对值的标准差，以 3 倍（或 2 倍）标准差为上下限，剔除异常数据点。

调用 SPSS 非线性回归功能时。在 Save 对话框中选中 Predicted value、Residuals 选项，即可生成每个数据点的模型预测值与残差值。结果如下图所示：

	t	H	PRED_	RESID	var	var	var	var	var	var
1	62	18.1	17.72	.38						
2	20	8.4	8.35	.05						
3	15	8.7	5.76	2.94						
4	36	13.1	13.68	-.58						
5	30	9.9	12.09	-2.19						
6	18	9.9	7.38	2.52						
7	35	12.1	13.44	-1.34						
8	38	17.0	14.13	2.87						
9	60	18.9	17.51	1.39						
10	66	20.0	18.11	1.89						
11	34	11.0	13.19	-2.19						
12	25	6.3	10.42	-4.12						

其中 PRED\_ 为模型预测值，而 RESID 为残差值。对残差取绝对值后计算标准差，按 3 倍标准差原则，本例中我们剔除了 3 块样地。

(4) 利用剩余样地数据，根据平均高生长曲线特点，重新选择并拟合林分平均高生长方程。

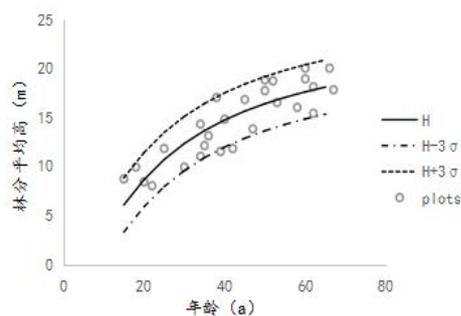
这里我们采用 SPSS Analyze—Regression—Nonlinear (分析-回归-非线性) 功能重新拟合曲线，得到方程如下：

$$H = 25.117e^{-21.391/t}$$

(5) 根据各龄阶的树高理论值与实际值，计算出龄阶树高残差的标准差与龄阶的回归曲线。

由于本例中样地数量过少，分龄阶后某些龄阶数据点只有 3 个，计算标准差的意义不大，我们只计算总的残差绝对值标准差。  $\sigma = 0.921$ 。

(6) 依据林分平均高生长曲线(方程)，及树高标准差曲线，以 3 倍标准差确定地位级的上下限曲线。



地位级上下限及数据散点

(7) 依据上下限曲线所夹的面积及预定的地位级数，采用等分方法确定各地位级上下限，列表就是地位级表。

常见地位级表为 5~7 级，以罗马数字 I II III……符号依次表示立地质量的高低，这里由于样地数量较少，我们仅将其分为 3 个等级。

林区油松地位级表

年龄 (a) · 树高 (m)	II	III	IV
20	9.5-11.4	7.7-9.4	5.9-7.6
30	13.2-15.1	11.4-13.1	9.5-11.3
40	15.6-17.5	13.8-15.5	11.9-13.7
50	17.3-19.1	15.5-17.2	13.6-15.4
60	18.5-20.3	16.7-18.4	14.8-16.6

立地指数表（或称地位指数表）的编制与地位级表编制方法类似，区别在于其采用优势木树高数据。编表方法有标准差调整法、变动系数调整法及相对优势高调整法等，在立地评价中亦有着广泛应用。

M6 某林场对所辖林区内的油松林开展样地调查，下表为第Ⅱ地位级的 40 块样地数据，请根据以下样地信息，编制该地位级的油松林分经验收获表。

第Ⅱ地位级的 40 块油松样地数据

年龄 (a)	树高 (m)	平均胸径 (cm)	林分密度 (株/hm <sup>2</sup> )	林分断面积 (m <sup>2</sup> /ha)	单木材积 (m <sup>3</sup> )	林分蓄积 (m <sup>3</sup> )
15	6.3	7.1	3086	12.1	0.0140	43.2
20	8.7	10.6	1764	15.6	0.0399	70.4
25	10.6	13.6	1261	18.2	0.0759	95.6
30	12.0	16.0	1008	20.2	0.1169	117.8
35	13.2	17.9	859	21.7	0.1594	136.9
40	14.1	19.6	762	23.0	0.2014	153.5
45	14.9	21.0	694	24.0	0.2417	167.8
50	15.5	22.1	644	24.8	0.2798	180.3
55	16.1	23.2	606	25.5	0.3154	191.2
60	16.6	24.0	576	26.1	0.3486	200.8
65	17.0	24.8	552	26.6	0.3794	209.4

注：表中 t 代表林分年龄 (a)，H 表示林分平均高 (m)，D 表示林分平均胸径 (cm)，G 代表林分断面积 (m<sup>2</sup>/ha)

(1) 编制收获表，需要对编表样本，在立地条件分级的基础上进行归类（可依据地位级或地位指数），分别立地条件计算林分调查因子。（上表中已完成该步骤）

(2) 在分类统计的基础上，结合本例已知的样地调查信息，以年龄 t 为自变量，建立 H-t、D-t、G-t 的回归模型。树高、胸径及林分断面积都可以通过理论方程进行拟合，这里我们选择参数较少的 Schumacher 方程，回归分析得到：

$$H = 22.841e^{-19.284/t}$$

$$D = 36.149e^{-24.507/t}$$

$$G = 33.767e^{-15.443/t}$$

第Ⅱ地位级油松收获表

年龄 (a)	树高 (m)	平均胸径 (cm)	林分密度 (株/hm <sup>2</sup> )	林分断面积 (m <sup>2</sup> /ha)	单木材积 (m <sup>3</sup> )	林分蓄积 (m <sup>3</sup> )
15	6.3	7.1	3086	12.1	0.0140	43.2
20	8.7	10.6	1764	15.6	0.0399	70.4
25	10.6	13.6	1261	18.2	0.0759	95.6
30	12.0	16.0	1008	20.2	0.1169	117.8
35	13.2	17.9	859	21.7	0.1594	136.9
40	14.1	19.6	762	23.0	0.2014	153.5
45	14.9	21.0	694	24.0	0.2417	167.8
50	15.5	22.1	644	24.8	0.2798	180.3
55	16.1	23.2	606	25.5	0.3154	191.2
60	16.6	24.0	576	26.1	0.3486	200.8
65	17.0	24.8	552	26.6	0.3794	209.4

(3) 一般收获表中，还需要具备林分密度、蓄积量等信息。另外，根据收集的调查资料，收获表中还可以补充树皮率、去皮蓄积、形数、平均生长量及连年生长量等林分信息。

林分密度可以通过下式计算： $N=40000 * (G/Pi * D^2)$

林分蓄积可以通过两种方法得到：

立木材积方程法  $V = 0.33123 * D^2 * H + 0.00805 * D * H - 0.00274 * D^2 + 0.00002$

平均实验形数法  $V = (H+3) * G * f_e$

其中油松立木材积公式中  $D, m$ 。  $f_e$  为实验形数，油松实验形数取 0.41。这里需要注意，同一树种在不同地区，材积方程与实验形数的取值也相应不同。

## 测树学习题集（高级）

1. Tree height (H) from a forest stand were measured in one meter classes and tree diameter (D) in 2 cm classes. The following table shows the observed joint distribution.

D	H										
	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
0-2	0.085	0.08	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0
2-4	0.026	0.036	0.098	0.036	0.021	0.003	0	0	0	0	0
4-6	0	0.003	0.023	0.102	0.13	0.065	0.013	0	0	0	0
6-8	0	0	0.001	0.008	0.033	0.057	0.065	0.063	0.006	0	0
8-10	0	0	0	0	0.002	0.005	0.008	0.013	0.011	0.003	0
10-12	0	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0	0.001

- Compute the marginal distributions of tree diameter and height.
- What is the probability that the diameter of a tree falls between 2 and 10 cm?
- What is the probability that the height of a tree falls between 4 and 10 meters?
- What is the probability that the diameter of a tree falls between 2 and 10 cm and height falls between 4 and 10 meters?
- Compute the conditional distribution of height when diameter is 6-8 cm.
- Compute the conditional distribution of diameter when tree height is 3-4 meters.
- Compute the conditional distribution of height when tree diameter is 4-10 cm.

2. Simulate square 20 by 20 meter sample plot from a forest stand, where the stand density is 1000 trees per ha, trees are located randomly, and tree diameter follows Weibull(5; 15) distribution as follows

- Generate the realized number of sample trees for the plot from Poisson( $\lambda A$ ) distribution, where  $\lambda$  is stand density and A is the plot area.
- Generate x and y coordinates for tree locations from the Uniform distribution.
- Generate tree diameters from the Weibull distribution.
- Plot the trees using plot(x,y,cex), where x and y are coordinates and cex is the size of symbol which is proportional to tree diameter.
- Fit Weibull distribution to the simulated data using the method of maximum likelihood.

3. Show that if X follows the two-parameter version of beta distribution, then  $Y = a + (b-a)X$  follows the four-parametric version of the beta distribution. Based on this relationship, derive the expected value and variance of Y .

4. In a forest stand, tree joint distribution of tree diameter and height is characterized with the Multinormal distribution with  $E[D, H]^T = [20, 18]^T$ , and  $cov[D, H] = \begin{bmatrix} 9 & 3 \\ 3 & 4 \end{bmatrix}$

- Predict tree heights for a tree with known diameter of 10 cm using BLP.
- List the properties of your estimate assuming that the multivariate normality holds.
- Plot the implicitly assumed H-D curve. Hint, predict heights for several diameters with regular intervals and plot the results.
- Write down the mathematical expression of the assumed H-D relationship.

5. Data plot48.txt includes data from one measured plot. The variables in the data are: puunro=tree id, pl=tree species (1=pine),  $x_k$ =x-coordinate of the tree location in the stand,  $y_k$ =y-coordinate of tree location in the stand, d=tree diameter (cm), h=tree height (m), t=tree age,  $ig_1$ =basal area growth during the coming 5 year period,  $id_1$ =diameter growth in the coming 5 year period,  $ig_2$ =past basal area growth,  $id_2$ =past diameter growth. The aim is to model the coming basal are growth ( $ig_1$ ) of a tree using information on past growth, and current age, diameter and height of the tree.

- (a) Graphically explore the relationships of potential explanatory variables and  $ig_1$ . What would you do with the one outlier of the data.
- (b) Start from model  $ig1_i = b_0 + b_1*ig2_i + e_i$ . Check the validity of your assumptions, and find a model that best fulfills the assumptions.
- (c) Include other predictors and test whether they improved the model or not. Report your final model.
- (d) Extra. Using different models for spatial autocorrelation structures, test whether the model could be improved by taking into account the spatial autocorrelation.

5. File hdmod.R includes functions that can be used for easy application of the longitudinal height models of (Mehtätalo 2004) and (Mehtätalo 2005a).

- (a) Run the code using the measurements given in the example at the end of the file.
- (b) Use the model for prediction for a pine stand stand with DGM=30 cm, and two sample trees measured 10 years ago. At that time, DGM was 22 cm, and the measured diameters were 15 and 22 cm, and the corresponding heights were 14 and 19 meters.
- (c) Plot the fixed part predictions, and localized H-D curves 10 years before and now.

6. Using plots 1-16 of data pinevol, analyze the dependence of tree volume on diameter. Use the fitted model for prediction for plot 51. Some help for this data can be found in Lappi et al. (2006).

## Terminology

These definitions are based largely on the IUFRO-SAF standard (Ford-Robertson 1977), except where otherwise indicated (Vanclay 1994).

**Accretion:** survivor growth plus the increment on trees that died between the first and second measures. Also called gross growth of initial volume.

**Accurate:** how close an estimate is to the true value, thus implying precision and freedom from bias.

**Allometric:** a relationship which maintains constant proportions so that  $Y = \alpha X^\beta$  or  $\ln Y = \ln(\alpha) + \beta \ln X$  (e.g. the volume of a cube is the cube of its side, irrespective of its size).

**Anamorphic curves:** a series curves or equations scaled so that each is a simple constant times the base curve. For example, the high curve might be 1.2 times the average, and the low curve might 0.8 times the average (cf. polymorphic).

**Basal area** of a tree (g): the cross-sectional area of a tree stem (including the bark) at breast height. The basal area of a stand (G) is the sum of the cross-sectional areas at breast height of all trees on a defined area.

**Bias:** the difference between the expectation of a sample estimator and the true population value, systematically distorting results. May arise in sampling, measurement or estimation due to poor calibration of an instrument (e.g. a stretched tape), or by favouring (perhaps unintentionally) one outcome over others.

**Binary variable:** a variable that takes the value zero or one.

**Breast height:** standardized point for measuring trees, usually 1.3 m or 4.5 ft above ground level, depending on the country.

**Cohort:** a group of individuals which are similar in some respect. For modelling, a cohort of trees would normally be the same species, and have similar size.

**Continuous forest inventory (CFI):** a method of dynamic sampling using permanent plots which are often systematically located and invisibly marked so that they are treated the same as the rest of the forest.

**Crown competition factor:** an index of competition based on the potential open-grown crown area of a tree, expressed as a percentage, cf  $w_o$  cf  $C = 100E(Bc / 4) / 2 \cdot 10000$ . Canopy closure occurs at about  $C = 100$ , and high values indicate more competition (Krajicek et al. 1961).

**Crown ratio:** the ratio of full live crown length to total tree height.

**Cutting cycle:** the planned, recurring lapse of time between successive harvests in a forest stand.

**Dbh (d):** diameter at breast height (1.3 m or 4.5 ft, depending on country) over bark. Trees with buttresses are usually above the buttress instead of a breast height. Dbh and other diameters may be measured with a calliper or a diameter tape.

**Deliquescent:** tree growth habit usually found in "broad-leaved" trees, where the stem is not continuous from the ground to the tip of the tree, but merges into the crown either gradually or abruptly. Cf. excurrent = coniferous.

**Diameter tape:** A tape measure graduated in B units (e.g. cm) so that the diameter may be read from the tape when it is placed around the circumference of the stem.

**Dominant:** one of 4 crown classes (dominant, co-dominant, intermediate, suppressed) based on relative status of forest trees. Dominant trees have their crowns in the upper part of the canopy and are largely freegrowing.

**Dynamic inventory:** inventory on successive occasions to detect change, usually by sampling with permanent plots.

**Even-aged:** forest stand composed of trees of approximately the same age (i.e. generally the maximum range in age should be less than 10 years).

**Expansion factor:** the number of trees (per hectare or per plot) represented by a single record during simulation by a tree list model.

**Experiment:** A planned inquiry to obtain new information or to confirm or refute an hypothesis or the outcome of a previous experiment, using a formal procedure (the experiment design) to control factors which may influence the outcome.

**Explanatory variable:** a variable which is used as a basis to predict other details which may be more difficult to measure. E.g. diameter may be an explanatory variable in a volume equation to predict tree volume. Also known as an independent or regressor variable.

**Extrapolation:** prediction beyond the range of the calibration data (cf. interpolation).

**Fecundity:** the number of individuals produced for each mature tree in a matrix model (cf. recruitment).

**Forest:** a plant community predominantly of trees and other woody vegetation, growing more or less closely together.

**Girth:** the measurement around the stem of a tree or log. When you measure a tree with a diameter tape, you measure the girth to get an estimate of the diameter.

**Growth:** the change in size of an individual or stand of trees (cf. yield).

**Harvesting:** refers to both logging (felling and extraction of timber) and thinning (felling in an immature crop primarily to stimulate growth of the residual trees). I refer to thinning in immature pure, even-aged stands, and to logging in uneven-aged mixed stands.

**Heterogeneous:** implies that members of a sample or population differ to a greater or lesser extent, in respect of some or all parameters of interest (cf. homogeneous).

**Heteroscedastic:** heterogeneous variance.

**Homogeneous:** implies that all the members of a sample or population are similar in respect of some or all of their parameters. E.g. homogenized milk is treated so that it retains the same composition throughout (i.e. the cream doesn't float to the top). Cf. heterogeneous.

**Ingrowth:** individuals entering a size class in a size class model (cf. upgrowth, recruitment).

**Interpolation:** prediction within the range of calibration data (cf. extrapolation).

**Inventory:** measuring and recording the number, size, condition, etc. of one or more species in a forest, generally above a specified size limit, either by total enumeration, or by sampling using plots.

**Light-demanding:** tree species which are intolerant of shade and require sunlight to grow satisfactorily.

**Logging:** felling and extraction of timber from a forest.

**Markov assumption:** that the transition probabilities in a Markov chain depend only on the state of the system and not on any external factors or past events.

**Markov chain:** a representation of a system as a finite number of discrete states.

**Mixed forest:** forest comprising two or more species, generally with the major species comprising <80% of a stand.

**Model:** a simplified representation of some aspect of reality (not to be confused with the normative meaning of the word, something worthy of being imitated). Specifically in a statistical context, a model is a formalized expression of a theory. Generally, a growth model may include a series of mathematical equations, the numerical values embedded in those equations, the logic necessary to link these equations in a meaningful way, and the computer code necessary to implement the model on a computer.

**Movement ratio:** the proportion of individuals in a class advancing to the next size class, calculated as expected increment divided by class width of a size class model (cf. upgrowth).

**Natural basal area:** the maximum or limiting basal area which an undisturbed stand will tend towards. This limit may be site-specific, so it serves as a measure of site productivity.

**Natural forest:** forest established by natural regeneration (cf. plantation). It refers to forests managed with selection harvesting systems which maintain an uneven-aged structure.

**Parameter:** a quantitative characteristic of an individual or population. E.g. the mean, variance, and constants describing an equation fitted to data.

**Pioneer:** a plant species capable of invading bare sites and persisting there until displaced by succession. Thus early successional stands may be dominated by these species. Typically, these species have seeds that are light and easily dispersed by wind or animals, and individuals are often fast-growing and short-lived.

**Plantation:** a forest established artificially by sowing or planting (cf. natural forest). This book assumes that plantations are even-aged and single species, even though this is not always true in practice.

**Point sample:** a form of sampling with probability proportional to size (PPS) using a horizontal variable radius plot defined by a central point and an angle gauge.

**Polymorphic curves:** series of curves of different shapes (cf. anamorphic). Typically used for modelling height growth, when these curves increase monotonically and do not cross.

**Precise:** the degree to which estimates are clustered about their own average, or the repeatability of a measurement or estimate.

**Predominant height:** the average total height of a specified number of the tallest trees per unit area. Often determined as the mean of the tallest tree on each of several non-overlapping sampling units. Cf. top height.

**Pure:** stand composed principally of one species (i.e. over 80% by stem number, basal area or volume).

**Qualitative variable:** a variable that may take  $n+1$  possible values (e.g. 1, 2, 3; A, B, C; or dominant, intermediate, suppressed; etc.), and which is represented in regression analyses by a set of  $n$  binary variables  $z_i$ , with  $z_i = 1$  when the qualitative variable takes the value  $i$ , and zero otherwise.

**Rainforest:** evergreen forest at least 30 m high, rich in epiphytes and woody lianas, occurring in areas where temperature, humidity and rainfall are high throughout the year (e.g. over 18°C and over 100 mm rain each month, see e.g. Whitmore 1990).

**Recruitment:** trees that have entered a particular size category, usually the smallest in the model, during a specified period. Also known as ingrowth, especially in size class models.

**Regeneration (natural):** renewal of a forest stand by self-sown seed or vegetative means including coppice, suckers and lignotubers. Artificial regeneration included sowing and planting.

**Response variable:** a variable predicted from one or more explanatory variables. Also known as a dependent variable.

**Sample:** a subset of a population used to estimate characteristics of that population.

**Serial correlation:** correlation between successive observations on the same sample unit. E.g. if a tree grows faster than average during one period, it is likely to continue to be faster during subsequent periods, so errors from the expected growth trends ( $e=y-y_{hat}$ ) will generally be positive.

**Shade tolerant:** tree species able to survive and grow under shade.

**Silviculture:** the science and art of cultivating forest crops (cf. agriculture). More specifically, the theory and practice of controlling the establishment, composition, structure and growth of forests.

**Site class:** an objective classification of site productivity into several classes (cf. site quality).

**Site index:** the top or predominant height of an even-aged forest stand at a specified index age, often estimated for stands of other ages using a height–age curve.

**Site productivity:** the potential of a specified species and site to produce wood. Note that it is the inherent capability of the site, which may not be achieved by all silvicultural regimes. Site index, site quality and site class are approximate measures of the true site productivity.

**Site quality:** a subjective appraisal of site productivity, often by a visual assessment into relative (i.e. good-poor) classes (cf. site class).

**Stand:** a group of trees having sufficient uniformity in composition and spatial arrangement to constitute a silvicultural entity or sampling unit.

**Stand table:** a table showing the number of trees by species and diameter classes, generally per unit area of a stand.

**Static inventory:** inventory on a single occasion to record the present state of the forest.

**Stationary assumption:** assumption that the transition probabilities in a Markov chain do not change over time.

**Stratum:** a subdivision of the population which is more homogeneous with respect to the variable of interest than the population as a whole. Plural is strata.

**Survivor growth:** growth on trees that are alive (and above a specified measurement limit) at both the first and second measures on a permanent plot. Does not include recruitment. Differs from accretion in that it does not include increment on trees that died between the two measures.

**Thinning:** the felling of trees in an immature stand, primarily to stimulate growth of the residual trees. May include both non-commercial (the thinned trees may be too small or defective to have any commercial value) and commercial thinning.

**Top height:** the average total height of a specified number of the thickest trees per unit area. Cf. predominant height.

**Total height ( $h$ ):** the vertical distance from the ground to the highest point on the tree.

**Uneven-aged:** stand composed of intermingling trees that differ markedly in age.

**Uppgrowth:** individuals moving from one size class to another in a size class model (cf. movement ratio, ingrowth).

**Usher assumption:** defining the states of a matrix model or Markov chain so that individuals can progress at most, one size class during a single time-step.

**Variable:** a characteristic that may vary from one individual in a population to another, and which relates to some property of the individual. E.g. height and diameter of trees.

**Variance:** a measure of the variability of a sample or population.

**Voucher specimen:** a plant sample taken to assist identification, for lodgement in an herbarium. Specimens should, if possible, include several leaves joined to a branchlet, any fertile material (buds, flowers and fruits), and any other distinctive parts (e.g. bark). These should be pressed, dried and mounted on paper, or preserved in alcohol. All parts should be clearly labelled with tree and plot numbers, location, date and collector.

**Yield:** the final size of an individual or group of individuals at the end of a given period (cf. growth).

**Yield class:** a measure of site productivity based on the maximum mean annual volume increment.