

实验一 森林调查数据预处理

1.1 样地数据

1.1.1 样地种类

森林调查数据能够服务于多种目标，基于不同的调查目的，需要采取不同的调查技术。根据是否进行定位复测，样地可以分为临时样地与固定（永久）样地。按照样地形状又可以分为块状样地、带状样地、以及点抽样（角规）样地。

表 不同调查目标下的样地设计（Vanclay, 1994）

样地特征	调查目标			
	资源调查	连续森林调查	生长建模	立地监测
永久性	临时	永久	永久	永久
样地面积	可变 $\propto$ 树木大小	固定	固定	固定
样地内变异	异质	均质	均质	均质
样地设置	分层随机抽样	系统抽样	分层随机抽样	立意抽样或系统抽样
抽样单元	样地	样地	树木	植被区块

注：立意抽样又称“判断抽样”，是指根据调查人员的主观经验从总体样本中选择那些被判断为最能代表总体的单位作样本的抽样方法。

1.1.2 样地数量

受森林调查的资金和人员调配的影响，样地调查的数量也要受到成本的限制。在样地设计时，样地的数量应当高于估计精确度对应的最小单元数。假设调查要求样本平均值偏离实际总体平均值 μ 的离差小于给定的 d 值，其概率为 $1-\alpha$ ，即概率 $p(|\bar{y} - \mu| \leq d) = 1 - \alpha$ ，则样地的数量，即样本的大小 n 可以相应计算出来。

如果假定样本平均值呈正态分布，不放回抽样的离差计算公式为：

$$d = z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{N-n}{N} \frac{S}{\sqrt{n}}}$$

上式中 $z_{\alpha/2}$ 为正态分布的临界值， N 为总体， S 为总体标准差，由上式可得样本量 n 的计算公式为：

$$n = \left(\frac{z_{\alpha/2}}{d}\right)^2 \left(\frac{N-n}{N}\right) S^2$$

上式中 n 出现在方程两边，无法直接计算。事实上，当总体无限大时，样本大小为：

$$n_0 = \left(\frac{z_{\alpha/2}}{d}\right)^2 S^2$$

进而在此基础上，得到有限总体的样本数为：

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

上述计算中需要知道总体的方差 S^2 ，但总体方差通常未知。可以从以往调查或试验中进行估计。若方差通过样本估计得到，则以学生 t 分布取代正态分布，相应临界值为 $t_{\alpha/2}$ 。

下面通过例子来理解样地设计中样本量确定的方法：

假设某林场需要对有 100hm^2 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 $15\text{m}^3/\text{hm}^2$ ，计算需要设计多少个 $20\text{m} \times 20\text{m}$ 的矩形样地。（已知总体标准差为 $50\text{m}^3/\text{hm}^2$ ）

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 $20\text{m} \times 20\text{m}$ 的矩形样地，总林地面积为 100hm^2 ，进而有限总体的大小为：

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

最终，对于有限总体所需设计的样地数量为：

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

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 $15\text{m}^3/\text{hm}^2$ 。

1.1.3 样地调查误差

当林业工作者获得样地调查数据以后，需要由样地信息推算林分整体水平，如林分断面积、蓄积、生物量、碳汇等，此时基于抽样方法、样地数量等因素，可以对样地调查的误差进行评估。现以分层抽样调查林分蓄积的例子来进行演示说明：

某林场对其 20hm^2 林地按照龄组分成 3 层进行样地调查（样地为 $20\text{m} \times 30\text{m}$ 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。

表 分层及样地信息

层	林地面积 A	样地数量 n	各样地每公顷蓄积 y (m^3/hm^2)
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^3/hm^2) 为：

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

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

$$\hat{y}_3 = \frac{1}{n_3} \sum_1^{n_3} y_{3i} = \frac{1}{6} \sum_1^6 y_{3i} = \frac{122 + 135 + 140 + 127 + 136 + 121}{6} = 130.2 \text{ m}^3/\text{hm}^2$$

在计算均值的标准误之前，首先要计算样本的方差：

$$s_{y1}^2 = \frac{1}{n_1} \sum_1^{n_1} (y_{1i} - \hat{y}_1)^2 = 21.1$$

$$s_{y2}^2 = \frac{1}{n_2} \sum_1^{n_2} (y_{2i} - \hat{y}_2)^2 = 44.3$$

$$s_{y3}^2 = \frac{1}{n_3} \sum_1^{n_3} (y_{3i} - \hat{y}_3)^2 = 52.5$$

相应每公顷林木蓄积量的标准误为：

$$s_{\hat{y}_1} = \sqrt{\left(1 - \frac{n_1}{N_1}\right) \frac{s_{y1}^2}{n_1}} = \sqrt{\left(1 - \frac{8}{10/0.06}\right) \frac{21.1}{8}} = 1.59 \text{ m}^3/\text{hm}^2$$

$$s_{\hat{y}_2} = \sqrt{\left(1 - \frac{n_2}{N_2}\right) \frac{s_{y2}^2}{n_2}} = \sqrt{\left(1 - \frac{6}{6/0.06}\right) \frac{44.3}{6}} = 2.63 \text{ m}^3/\text{hm}^2$$

$$s_{\hat{y}_3} = \sqrt{\left(1 - \frac{n_3}{N_3}\right) \frac{s_{y3}^2}{n_3}} = \sqrt{\left(1 - \frac{4}{4/0.06}\right) \frac{52.5}{4}} = 2.83 \text{ m}^3/\text{hm}^2$$

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：

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

相应其标准误为：

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

整个林地的总蓄积为：

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

整个林地总蓄积的标准误为：

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

1.2 林分调查因子

1.2.1 林分调查因子的测算方法

林业调查中，将能够客观反映林分特征的因子称为林分调查因子。林分调查因子的测定和计算，是森林经理学、森林培育学、森林生态学等林学学科的专业基础。

(1) 平均胸径（Average diameter at breast height）

林分平均胸径并不是林木胸径的平均水平，而是林木胸高断面积的平均水平。即先计算林分平均断面积，再求出所对应的直径作为林分平均直径。

首先根据每木调查的结果，计算出林分（或标准地）内部林木断面积的总和（ G ）与平均断面积 $\bar{g}$ ；其次，求出与 $\bar{g}$ 相对应的直径作为林分平均直径（ $\bar{D}$ ）。即：林分平均胸径实际上是林分内各株树木胸径的平方平均数。推导如下：

$$\begin{aligned} G &= \sum_{i=1}^N g_i \\ \bar{g} &= \frac{G}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N g_i}{N} \\ \bar{g} &= \pi R^2 = \frac{\pi}{4} d^2 \\ \bar{D} &= \sqrt{\frac{4}{\pi} \bar{g}} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{\sum_{i=1}^N g_i}{N}} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{\sum_{i=1}^N \frac{\pi}{4} d_i^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N d_i^2}{N}} \end{aligned}$$

(2) 林分平均年龄与平均树高（Stand age and Average height）

平均年龄的计算，通常有两种方法。

A 算术平均年龄：在林分内查记若干树木的年龄，求其算术平均数，作为林分平均年龄。

B 断面积加权平均年龄：

$$A = \frac{A_1 G_1 + A_2 G_2 + \dots + A_n G_n}{G_1 + G_2 + \dots + G_n}$$

式中： $A_1 A_2 A_3 \dots A_n$ ——各径阶的算术平均年龄；

$G_1 G_2 G_3 \cdots G_n$ ——各径阶的断面积合计

林分平均高的计算，也通常有两种方法。

A 根据林分平均直径在树高曲线上确定的树高。

B 依据林分各径阶林分的算术平均高与对应径阶林木胸高断面积加权。

注意，一般而言无论是林分年龄还是林分树高，采用加权法计算较为精确。

(3) 树种组成 (species composition)

组成林分的树种成分称作树种组成。在混交林中常以树种组成系数表达各树种在林分中所占的数量比例。所谓树种组成系数是某树种蓄积(或断面积)占林分总蓄积(或总断面积)的比重。

树种组成系数式的构成：由树种名称所占蓄积的成数(树种组成系数)组成系数通常有十分法表示，即各树种组成系数之和等于 10。

对于树种是纯林的，如油松纯林，其组成式则为：“10 油”，对于混交林，写组成式有严格的规定如下：

① 组成系数最大的树种(优势树种：蓄积量比重最大的树种)写在最前面，其余的依次排列；

② 组成系数相同时，应先写目的树种(最符合经营目的的树种)

③ 对蓄积比重不足 5%，但大于 2%的树种，在组成式中用“+”表示，小于 2%的用“-”表示。

例如：有一林分由云杉、桦木、冷杉、山杨组成，各树种蓄积量分别为：云杉 404m^3 ；桦木 94m^3 ；冷杉 21m^3 ；山杨 6m^3 。求树种组成式。

(1) 计算林分总蓄积量= $404+94+21+6=525$

(2) 计算各树种蓄积量的比重：

云杉= $404/525=0.77\approx 8$ ；

桦木= $94/525=0.18\approx 2$

冷杉= $21/525=0.04$ ；

山杨= $6/525=0.01$

所以该林分的组成式为：“8 云 2 桦+冷-山”

(4) 其它林分调查因子

A 根据林分起源，林分可分为天然林和人工林。

B 根据乔木树冠所形成的层次，可以讲林分分成单层林和复层林。

C 林分密度条件可以通过株数密度、疏密度和郁闭度来描述。

D 立地质量通过地位级或地位指数来进行评价。

E 林分蓄积量的测定可以通过材积表(材积方程)、实验形数法、标准表等多种方法进行计算。

F 森林木材资源的经济价值通过林木质量等级、林分出材率和可及度来进行描述。

1.2.2 每木检尺数据的内业计算

在标准地或样地内进行每株树木的实测称为每木检尺，是林分调查时常见的方法之一。下面我们通过每木检尺的样地数据来熟悉林分调查因子的内业计算方法。

林业调查组对一天然松栎混交林分进行样地调查，下表为其 20m*20m 矩形样地内每木检尺的数据，试计算该林分树种组成、平均胸径、平均树高、林分密度、每公顷断面积、蓄积量等主要调查因子。

编号	树种	胸径 (cm)	树高 (m)	编号	树种	胸径 (cm)	树高 (m)
1	油松	19.0	12.2	17	油松	18.2	12.3
2	油松	18.3	11.8	18	锐齿栎	14.3	9.8
3	锐齿栎	14.6	10.5	19	锐齿栎	19.9	11.0
4	锐齿栎	11.3	9.7	20	油松	19.6	13.1
5	油松	23.5	15.4	21	华山松	23.8	15.3
6	油松	22.6	14.7	22	油松	23.2	15.1
7	华山松	18.4	12.0	23	油松	22.5	14.6
8	油松	15.1	10.0	24	锐齿栎	25.9	12.1
9	锐齿栎	14.6	10.5	25	油松	24.3	16.0
10	华山松	24.4	15.2	26	锐齿栎	22.2	11.4
11	华山松	24.9	16.2	27	油松	21.7	14.0
12	锐齿栎	17.6	11.2	28	华山松	24.3	12.0
13	锐齿栎	20.2	11.8	29	油松	13.4	10.2
14	油松	17.2	11.1	30	锐齿栎	8.0	7.5
15	油松	14.2	10.0	31	锐齿栎	11.0	9.0
16	油松	16.4	11.1				

从上表中已知样地内共 31 株树，其中油松 15 株，锐齿栎 11 株，华山松 5 株。

$$\text{总林分密度: } N_{tot} = \frac{n_{tot}}{A} = \frac{31}{20 \times 20 / 10000} = 775 \text{ 株/hm}^2$$

$$\text{油松株数密度: } N_1 = \frac{n_1}{A} = \frac{15}{20 \times 20 / 10000} = 375 \text{ 株/hm}^2$$

$$\text{锐齿栎株数密度: } N_2 = \frac{n_2}{A} = \frac{11}{20 \times 20 / 10000} = 275 \text{ 株/hm}^2$$

$$\text{华山松株数密度: } N_3 = \frac{n_3}{A} = \frac{5}{20 \times 20 / 10000} = 125 \text{ 株/hm}^2$$

样地内林木总断面积:

$$G_{tot} = \sum_{i=1}^{n_{tot}} g_i = \sum_{i=1}^{n_{tot}} \frac{\pi}{4} d_i^2 = 0.9174 \text{ m}^2$$

继而得到林分平均胸径:

$$\bar{D}_{tot} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \bar{g}} = \sqrt{\frac{4 G_{tot}}{\pi n_{tot}}} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \times \frac{0.9174 \times 10000}{31}} = 19.4 \text{ cm}$$

实际上林分断面积一般采用每公顷断面积表示，即

$$BA_{tot} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^{n_{tot}} g_i = \frac{1}{20 \times 20 / 10000} \times 0.9174 = 22.9 \text{ m}^2/\text{hm}^2$$

同理可得各树种的平均胸径与每公顷断面积：

$$\text{油松: } \bar{D}_1 = 19.6 \text{ cm} \quad BA_1 = 11.3 \text{ m}^2/\text{hm}^2$$

$$\text{锐齿栎: } \bar{D}_2 = 17.1 \text{ cm} \quad BA_2 = 6.3 \text{ m}^2/\text{hm}^2$$

$$\text{华山松: } \bar{D}_3 = 23.3 \text{ cm} \quad BA_3 = 5.3 \text{ m}^2/\text{hm}^2$$

平均树高可以通过断面积加权进行计算：

$$\text{油松: } \bar{H}_1 = \frac{1}{G_1} \sum_{i=1}^{n_1} g_i h_i = 15.3 \text{ m}$$

$$\text{锐齿栎: } \bar{H}_2 = 10.6 \text{ m}$$

$$\text{华山松: } \bar{H}_3 = 14.4 \text{ m}$$

$$\text{林分平均高: } \bar{H}_{tot} = \frac{BA_1 \times H_1 + BA_2 \times H_2 + BA_3 \times H_3}{BA_{tot}} = 13.8 \text{ m}$$

蓄积量的计算方法很多，这里我们采用实验形数法，即

$$M = (H + 3) \times BA \times f_{\theta}$$

油松、锐齿栎、华山松的实验形数分别为 0.41, 0.40, 0.42。蓄积量为：

$$\text{油松: } M_1 = (H_1 + 3) \times BA_1 \times f_{\theta_1} = (15.3 + 3) \times 11.3 \times 0.41 = 84.8 \text{ m}^3/\text{hm}^2$$

$$\text{锐齿栎: } M_2 = (H_2 + 3) \times BA_2 \times f_{\theta_2} = (10.6 + 3) \times 6.3 \times 0.40 = 34.3 \text{ m}^3/\text{hm}^2$$

$$\text{华山松: } M_3 = (H_3 + 3) \times BA_3 \times f_{\theta_3} = (14.4 + 3) \times 5.3 \times 0.42 = 38.7 \text{ m}^3/\text{hm}^2$$

$$\text{林分总蓄积: } M_{tot} = M_1 + M_2 + M_3 = 157.8 \text{ m}^3/\text{hm}^2$$

根据各树种蓄积量可以写出林分树种组成式：

$$\text{油松} = \frac{M_1}{M_{tot}} = \frac{84.8}{157.8} = 0.54$$

$$\text{锐齿栎} = \frac{M_2}{M_{tot}} = \frac{34.3}{157.8} = 0.22$$

$$\text{华山松} = \frac{M_3}{M_{tot}} = \frac{38.7}{157.8} = 0.25$$

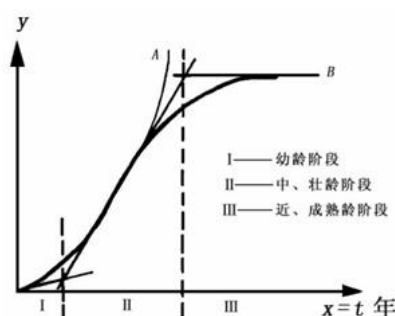
该林分树种组成式为：5 油 3 华 2 栎。

实验二 生物统计回归分析

2.1 理论生长方程

树木的生长方程 (growth equation) 是指描述某树种 (组) 各调查因子总生长量 y (t) 随年龄 (t) 生长变化规律的数学模型。由于树木生长受立地条件、气候条件、人为

经营措施等多种因子的影响，因而同一树种的单株树木生长过程往往不尽相同。生长方程是用来描述树木某调查因子变化规律的数学模型，所以它是该树种某调查因子的平均生长过程，也就是在均值意义上的生长方程。



由于树木的生长速度是随树木年龄的增加而变化，即由缓慢—旺盛—缓慢—最终停止，因此反映总生长量变化过程的曲线是一个呈“S”形曲线的生长方程，从这条曲线上能明显看出有两个弯或3个阶段。如果沿曲线的弯曲处作3条直线，以其相交处为界限，第一段大致相当于幼龄阶段，第二段相当于中、壮龄阶段，第三段相当于近、成熟龄阶段，如上图所示。树木生长方程的特点为：

(1) 当 $t=0$ 时 $y(t)=0$ 。此条件称之为树木生长方程应满足的初始条件。

(2) $y(t)$ 存在一条渐进线 $y(t)=A$ ， A 是该树木生长极大值。

(3) 由于树木生长是依靠细胞的增殖不断地增长它的直径、树高和材积，所以树木的生长是不可逆的，使得 $y(t)$ 是关于年龄 (t) 的单调非减函数。

(4) $y(t)$ 是关于 t 的连续且光滑的函数曲线。

典型的树木生长曲线的形状近似呈“S”型，常用的树木生长方程有：

(1) 舒马克 (Schumacher) 方程

$$y = ae^{-b/t}$$

(2) 单分子 (Mitscherlich) 式

$$y = a(1 - e^{-bt})$$

(3) 逻辑斯蒂 (Logistic) 方程

$$y = \frac{a}{(1 + ce^{-bt})}$$

(4) 坎派兹 (Gompertz) 方程

$$y = ae^{-be^{-ct}}$$

(5) 考尔夫 (Korf) 方程

$$y = ae^{-bt^{-c}}$$

(6) 理查德 (Richards) 方程

$$y = a(1 - e^{-bt})^c$$

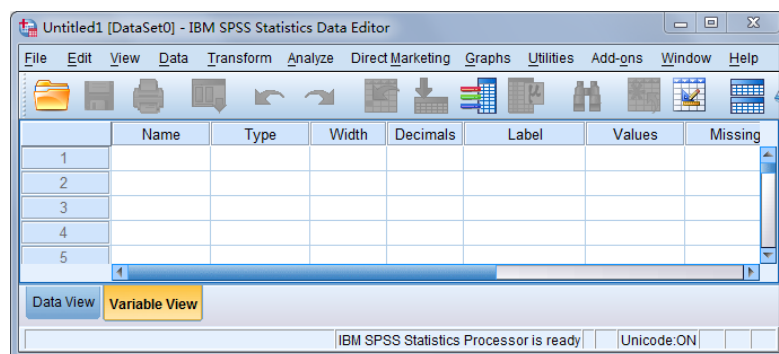
式中， y 为树木调查因子（胸径、树高、断面积或蓄积）； t 为林木年龄； a 、 b 、 c 为待定参数，其中参数 a 为树木各调查因子的最大值 (y_{max})； e 为自然对数。

2.2 SPSS 基础

林木生长方程一般为非线性方程，而非线性模型参数拟合计算难度较大，可以通过借助 SPSS 软件来实现。

SPSS 最初软件全称为“社会科学统计软件包”(Statistical Package for the Social Sciences)，随着 SPSS 产品服务领域的扩大和服务深度的增加，SPSS 公司已于 2000 年正式将英文全称更改为“统计产品与服务解决方案”(Statistical Product and Service Solutions)。SPSS 统计分析过程包括描述性统计、均值比较、一般线性模型、相关分析、回归分析、对数线性模型、聚类分析、数据简化、生存分析、时间序列分析、多重响应等几大类，每类中又分为多个统计过程。本章内容围绕构建林木生长模型展开，重点介绍非线性回归技术，本小节简单介绍 SPSS 的数据输入与变量定义。

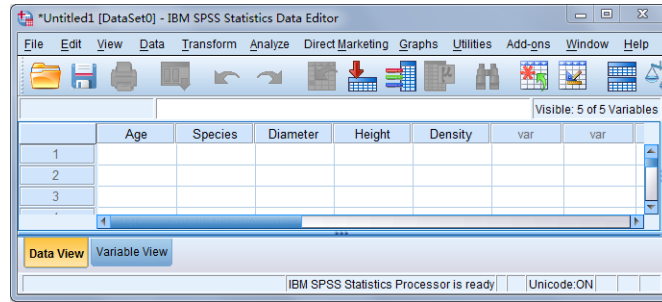
以 SPSS 22.0 为例，当我们将软件打开时，其界面如下图所示：



注意上图左下角，有一个名为 Data View 标签和一个名为 Variable View 的标签，点击 Data View 标签可以看到数据，而点击 Variable View 标签可以看到变量特征。我们的操作一般从点击 Variable View 标签进行变量定义开始。

- (1) Name (名称) 即对变量进行命名，若命名违反规则，SPSS 会自动弹出提醒。
- (2) Type (类型) 有 8 种不同类型可供选择。默认的是 Numeric (数值型) 变量。点击 Type 格子可以更改变量类型。String (字符型) 也是常用变量类型之一。
- (3) Width (宽度) 默认数据最高为 8 位数，通常不需要更改。
- (4) Decimals (小数点位数) 作用是控制数据在 Data View 中以几位小数的形式显示，但并不影响数据的存储。
- (5) Label (标签) 通过文字描述变量的意义或特征，说明其含义。
- (6) Values (数值标签) 主要用于正态分布变量或等级变量，帮助用户记住定义规则，也可以对数值输出的结果进行标注。例如定义 1=“优秀”，2=“良好”，3=“一般”等。
- (7) Missing (缺失) 存在缺失值时，用于输入缺失值的表示方式。
- (8) Columns (列) 控制每一列显示的宽度，默认值为 8，通常不必调整。
- (9) Align (对齐方式) 默认字符为右对齐，字符为左对齐，可修改。
- (10) Measure (测量方法) 默认设置为数值变量为 Scale (度量)，字符变量为 Nominal (名义)。
- (11) Role (角色) 定义变量在后续统计分析中的作用。

变量定义完成后，点击 Data View 的标签，界面将呈现数据界面，变量名都列在顶部，每一行表示不同的个体，即可进行数据的录入。如下图所示：



最好介绍文件的保存和读取操作。点击左上角 **File**，然后点击 **Save As...** 可以改变文件保存路径以及命名文件名称，SPSS 默认后缀 **.sav**，点击 **Save as type** 可以选择其他保存格式。文件的打开可以通过 **File-Open-Data...**，选择文件类型后读入数据，除了 **.sav** 为后缀的文件，SPSS 也能读取电子表格形式的文件，包括 **Excel**、**Lotus** 和 **dBase**，还可以读取一些其他统计软件的数据，如 **SAS** 和 **Systat**，以及文字编辑软件产生的以 **.dat** 或 **.txt** 为后缀的文件。

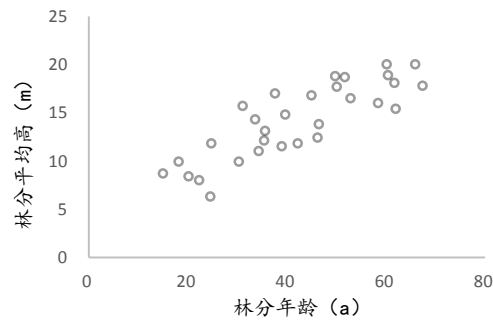
2.3 非线性回归拟合

本节通过林分树高生长模型的例子，对非线性回归技术进行介绍。

下表为某林区 30 个油松林样地调查的林分年龄与林分平均树高数据，试根据样地数据，任选理论方程，构建林分树高-年龄的生长预测模型。

样地 编号	林分年 龄 (a)	林分平均 高 (m)	样地 编号	林分年 龄 (a)	林分平均 高 (m)	样地 编号	林分年 龄 (a)	林分平均 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）。



本例中我们尝试拟合 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，我们将其假定为 25，另外假定 20 年时林分平均树高为 8m，则估计参数 b 的初始值计算过程为

$$\text{代入 } a、\text{树高、年龄数值得：} \quad 8 = 25 \times \exp(-b/20)$$

$$\text{两边取对数得：} \quad \ln 8 = \ln 25 - b/20$$

$$\text{即 } b \text{ 值为：} \quad b = (\ln 25 - \ln 8) \times 20 = 23$$

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 $a \cdot \exp(-b/t)$ 。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。

(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 History ^b			
Iteration Number ^a	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

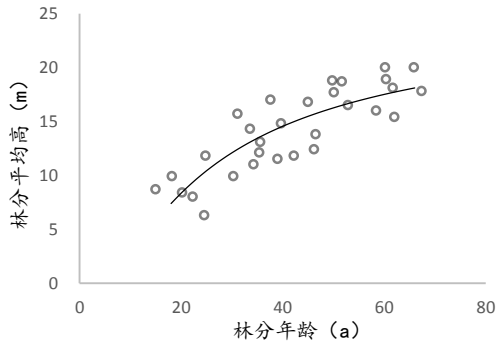
迭代历史记录中给出了迭代各步的残差平方和和参数 a 、 b 的估计值，连续残差平方和之间的相对减少量小于特定收敛判据 1.0E-08 时迭代终止。

Parameter Estimates			
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 ^a			
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

$$a. R \text{ squared} = 1 - (\text{Residual Sum of Squares}) / (\text{Corrected Sum of Squares}) = .694.$$

ANOVA 给出了非线性模型统计量的摘要，决定系数 R² 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。

实验三 森林立地质量评价

3.1 立地质量评价方法

立地条件是根据适地适树原则，提高森林生产力的首要因素。在造林规划设计、森林抚育经营和森林经营规划等林业生产实践中，立地质量评价是不可或缺的前提。科学的立地评价方法在林分水平上对提高林分生长收获预估的准确性，优化抚育经营设计，实现森林可持

续经营具有极其重要的意义。

立地质量评价方法分类 (Skovsgaard and Vanclay, 2008)

	直接法	间接法
植物群落学方法 (Phytocentric)	蓄积测定 (volume measurements)	立地指数 (site index) ; 生境类型 (habitat type)
地理学方法 (Geocentric)	土壤质地 (soil texture) ;土壤湿度 (soil moisture) ;有效辐射 (available radiation)	坡向 (aspect) ;海拔 (elevation) ;纬度 (latitude) ;经度 (longitude)

评估林分生产力的立地质量评价方法可以分为生物因子法和地理因子法两大类,其中属于生物因子法的地位级和立地指数是立地质量评价最常用的方法。

地位级 (site class) 是反映林地生产力的一种相对度量指标,它是依据林分条件平均高与林分年龄的关系,按相同年龄时林分条件平均高与林分平均年龄的关系,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,通常为 5~7 级,以罗马数字 I II III……符号依次表示立地质量的高低,将每一地位级所对应的各个年龄时的平均高列成表,称为地位级表。

立地指数 (site index) 是指在某一立地上特定基准年龄时林分优势木的平均高度。依据林分优势木平均高与林分优势木年龄的关系所编制的表,称为立地指数表。

3.2 地位级表的编制

本节将通过例子来介绍简单的编制地位级表的过程。

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 (数据见 2.3 非线性回归拟合),试根据样地数据,任选理论方程,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数据点。

(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。

前两部在 2.3 节非线性回归拟合中已经完成。

(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。结果如下图所示:

2.3.sav [DataSet1] - IBM SPSS Statistics Data Editor

File Edit View Data Transform Analyze Direct Marketing Graphs Utilities Add-ons Window Help

1: RESID .37677813160102 Visible: 4 of 4 Variables

	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						

Data View Variable View

IBM SPSS Statistics Processor is ready Unicode:ON

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。

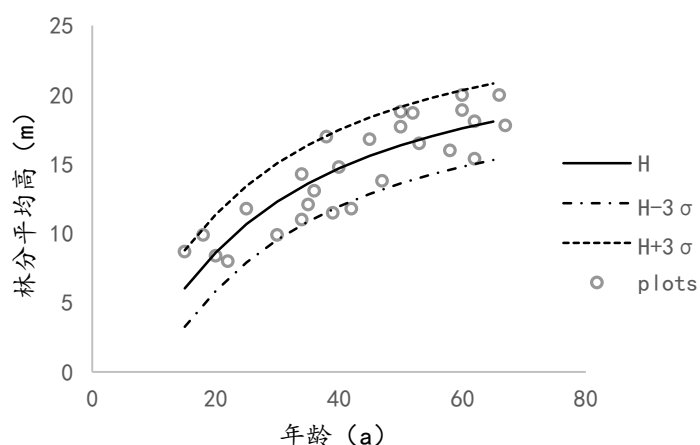
这里我们采用 SPSS Analyze—Regression—Nonlinear（分析-回归-非线性）功能重新拟合曲线，得到方程如下：

$$H = 25.117e^{-21.391/t}$$

(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，列成表就是地位级表。

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。

该林区油松地位级表

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。

实验四 林分生长与收获预估

4.1 全林模型

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。本节通过下面的例子，来演示并说明经验收获表的编制方法：

某林场对所辖林区内的油松林分开展样地调查，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

No.	t	H	D	G	No.	t	H	D	G
1	60	19.2	29.0	26.0	21	58	16.5	22.5	23.8
2	36	11.6	21.4	20.6	22	34	12.8	19.1	24.4
3	37	13.9	14.1	26.2	23	25	11.1	14.0	20.0
4	59	16.4	21.8	23.3	24	46	16.1	19.6	26.1
5	62	15.0	21.1	27.4	25	45	15.3	18.9	21.6
6	20	11.4	14.1	18.2	26	56	16.9	23.9	28.7
7	63	17.3	27.8	27.9	27	57	16.1	21.6	27.5
8	48	14.1	22.9	21.1	28	20	9.3	11.3	12.9

9	46	15.6	22.0	25.5	29	46	14.9	24.1	24.0
10	67	18.5	23.8	22.5	30	53	13.8	20.6	27.2
11	72	19.1	32.5	30.8	31	25	12.2	19.2	15.0
12	42	15.2	21.6	20.5	32	33	12.6	18.0	17.4
13	26	9.9	12.2	16.6	33	43	15.1	17.5	21.6
14	38	12.4	15.2	23.4	34	35	12.7	21.6	27.3
15	24	8.0	8.2	16.7	35	43	15.3	23.9	23.0
16	54	16.8	23.8	22.1	36	66	17.2	23.2	23.1
17	45	13.4	19.7	21.9	37	31	12.2	14.4	19.2
18	58	16.5	26.4	27.9	38	54	13.7	19.9	26.8
19	41	13.8	18.3	22.9	39	64	16.7	23.3	26.9
20	40	13.0	16.6	27.4	40	31	12.7	16.3	23.3

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（m²/hm²）

- (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：

$$\begin{aligned}
 H &= 22.841e^{-19.284/t} \\
 D &= 36.149e^{-24.507/t} \\
 G &= 33.767e^{-15.443/t}
 \end{aligned}$$

- (3) 一般收获表中，还需要具备林分密度、蓄积量等信息。
- 林分密度可以通过下式计算：

$$N = 40000 \times \frac{G}{\pi \times D^2}$$

林分蓄积可以通过两种方法得到：

立木材积方程法（如油松）

$$V = 0.33123 \times D^2 \times H + 0.00805 \times D \times H - 0.00274 \times D^2 + 0.00002$$

(注：此式 D 的单位为 m)

平均实验形数法

$$V = (H + 3) \times G \times f_{\theta}$$

（其中f_θ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。

第Ⅱ地位级油松收获表

年龄	树高	平均胸径	林分密度	林分断面积	单木材积	林分蓄积
(a)	(m)	(cm)	(株/hm ²)	(m ² /hm ²)	(m ³)	(m ³)

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

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。

4.2 径阶模型

某天然林按照 10cm 的阶距分为三个径阶等级，林分内径阶分布见下表：

当前林分径阶分布					
径阶等级	胸径范围(cm)	株数密度 (/hm ²)	平均胸径 (cm)	平均木断面积 (m ²)	林分断面积 (m ² /ha)
1	10-19.9	840	15	0.02	14.8
2	20-34.9	234	27	0.06	13.4
3	35+	14	40	0.13	1.8
合计		1088			30.0

上表中的数据，只需知道前两列的林分密度与平均胸径，即可计算后两列的平均木及林分断面积，这里为了方便后续计算演示将其列出。

本例构建的径阶模型中，我们用 y_{it} 代表时间 t 时第 i 等级径阶的株数密度。由时间 t 经过一个周期到达时间 $t+1$ 时，各径阶株数为：

$$\begin{aligned}y_{1,t+1} &= a_1y_{1t} + R_t \\ y_{2,t+1} &= b_1y_{1t} + a_2y_{2t} \\ y_{3,t+1} &= b_2y_{2t} + a_3y_{3t}\end{aligned}$$

式中， R_t 表示从 t 至 $t+1$ 这段时间内，幼树进界（更新）到第 1 级径阶的株数； a_i 表示时间 t 时在第 i 级径阶的树木，时间 $t+1$ 时仍保留在 i 径阶的比例； b_i 表示时间 t 时在第 i 级径阶的树木，时间 $t+1$ 时进入第 $i+1$ 级径阶比例。实际上我们可以推算出该时间周期内第 i 级径阶死亡的林木比例为 $1 - a_i - b_i$ 。这里我们设定预测的时间周期很短，树木胸径生长量低于 10cm，而不会发生越级生长。

林木保留、进阶、枯损等规律，需要通过固定样地的长期观测得到。本例中假定通过固定样地试验，已知林分 5 年内的径阶转移概率如下表所示：

5 年内的径阶转移概率			
径阶等级	保留比例	进阶比例	枯损比例
i	a_i	b_i	$1 - a_i - b_i$

1	0.80	0.04	0.16
2	0.90	0.02	0.08
3	0.90	0.00	0.10

将上表中的概率代入径阶生长模型，得到：

$$y_{1,t+1} = 0.80y_{1t} + R_t$$

$$y_{2,t+1} = 0.04y_{1t} + 0.90y_{2t}$$

$$y_{3,t+1} = 0.02y_{2t} + 0.90y_{3t}$$

上述模型中，还需要确定进界的林木数量 R_t ，最简单的办法是假定其为常数。但实际上，林木更新进界规律与林分当前断面积和密度有关，这里我们假定已知进界方程为：

$$R_t = 109 - 9.7G_t + 0.3N_t$$

式中 R_t 为5年间每公顷的进界株数， G_t 为林分断面积， N_t 为林分密度。林分密度和林分断面积可以分别计算得到：

$$N_t = y_{1t} + y_{2t} + y_{3t}$$

$$G_t = 0.02y_{1t} + 0.06y_{2t} + 0.13y_{3t}$$

由此可以得到进界方程的完整形式：

$$R_t = 109 + 0.12y_{1t} - 0.29y_{2t} - 0.96y_{3t}$$

将其代入径阶生长模型，可以得到径阶生长模型的最终形式：

$$y_{1,t+1} = 0.92y_{1t} - 0.29y_{2t} - 0.96y_{3t} + 109$$

$$y_{2,t+1} = 0.04y_{1t} + 0.90y_{2t}$$

$$y_{3,t+1} = 0.02y_{2t} + 0.90y_{3t}$$

通过给模型，我们可以对林分未来的径阶分布进行动态模拟，已知初始林分状况为：

$$y_{10} = 840, y_{20} = 234, y_{30} = 14 \text{ (株/hm}^2\text{)}$$

将初始林分状况代入径阶生长模型，可以得到林分5年后各径阶的株数：

$$y_{1,1} = 0.92 \times 840 - 0.29 \times 234 - 0.96 \times 14 + 109 = 801 \text{ (株/hm}^2\text{)}$$

$$y_{2,1} = 0.04 \times 840 + 0.90 \times 234 = 224 \text{ (株/hm}^2\text{)}$$

$$y_{3,1} = 0.02 \times 234 + 0.90 \times 14 = 17 \text{ (株/hm}^2\text{)}$$

实际上，将林分状态反复迭代，可以得到林分未来很长时间的径阶动态变化，这里可以通过 Excel 即可实现：

1	A	B	C	D	E	F	G	H
2	林分径阶动态							
3	每公顷株数							
4	年	第1径阶	第2径阶	第3径阶				
5	0	840	234	14				
6	5	801	244	17				
7	10	758	252	20				
8	15	714	257	23				
9	20	669	260	26				
10	25	624	261	29				
11	30	580	259	31				
12	35	537	257	33				
13	40	497	253	35				
14	45	459	247	37				
15	50	425	241	38				
16	55	394	234	39				
17	60	366	226	40				
18	65	342	218	40				
19	70	322	210	41				
20	75	305	202	41				
21	单元格计算公式							
22	公式				相似单元格			
23	A5	=A4+5			A6:A19			
24	B5	=0.92*B4-0.29*C4-0.96*D4+109			B6:B19			
25	C5	=0.04*B4+0.90*C4			C6:C19			
26	D5	=0.02*C4+0.90*D4			D6:D19			
27								

4.3 单木模型

本节以 Pukkala et al. (2009) 构建的用于模拟芬兰异龄林动态的单树模型系统为例，对单树模型的结构、数据需求及模拟方法进行说明。

对于异龄林而言，构建单树模型系统需要下列模型部分(Vanclay, 1994; Trasobares et al., 2004): 1) 单木胸径生长模型; 2) 单木树高模型或树高生长模型; 3) 单木存活模型(枯损模型); 4) 进界模型; 5) 进界胸径生长模型。Pukkala et al. (2009) 的单树模型系统开发了以上提到的模型组，以 5 年的时间间隔用于模拟胸径生长和进界生长。

(1) 5年间胸径生长量模型的形式如下:

$$\ln(i_d) = a_1 + a_2 BAL_{Spruce} + a_3 BAL_{Other} + a_4 \ln(G) + a_5 \sqrt{d} + a_6 d^2 + a_7 MT + a_8 VT + a_9 CT + a_{10} CIT + a_{11} \ln(TS)$$

式中 i_d 是五年带皮胸径生长量 (cm), d 是胸高处直径 (cm), G 是胸径大于5cm的树木的总林分胸高断面积 ($m^2 ha^{-1}$), TS 是积温 (日度)。 MT, VT, CT 和 CIT 是指示变量, 分别代表立地类型是Myrtillus (MT), Vaccinium (VT), Calluna (CT) 或者 Cladonia 及更差立地 (CIT)。在一个林分中, 只有一个指示变量等于1其它等于0。如果所有的指示变量都等于0, 模型预测的生长为Oxalis-Myrtillus类型。 BAL 是指比对象木胸径大的胸高断面积和 ($m^2 ha^{-1}$), 是分别云杉 (BAL_{Spruce}) 和其它树种 (BAL_{Other}) 计算。 BAL 描述了树木在林分中所处的竞争位置。

(2) 树高模型是Hossfeld模型的修正形式:

$$h = \frac{a_1 + a_2 MT^+ + a_3 VT + a_4 CT + a_5 CIT}{1 + (b_1/d) + (b_2/d^2)}$$

式中 h 是树高 (m) 而 d 是胸径 (cm)。 MT^+ 是指示变量, 如果立地类型是Myrtillus或者更好则等于1 (否则 $MT^+ = 0$)。

(3) 存活模型的形式如下:

$$p_6 = \frac{1}{1 + \exp[-(a_1 + a_2 \sqrt{d} + a_3 \ln(G) + a_4 BAL_{Spruce} + a_5 BAL)]}$$

式中 p_6 是六年间存活的概率。模型的系数表明大树存活的概率高于小树, 并且树木面临高的竞争时存活概率最低。六年间的存活概率可以转换为5年的概率, 公式为 $p_5 = p_6^{5/6}$ 。

(4) 进界模型提供了未来5年内胸径超过5cm的林木株数。与存活模型相似，一个模型针对云杉拟合，另外一个针对松树及桦木。模型形式为：

$$\ln(In + 1) = a_1 + a_2\sqrt{G} + a_3 \ln(G) + a_4\sqrt{N_{Spruce}} + a_5\sqrt{N_{Other}} + a_6MT^{-}$$

式中 In 表示进界株数 (ha^{-1})， N_{Other} 是每公顷非云杉树种的株数 ($\text{dbh} > 5 \text{ cm}$)， N_{Spruce} 是每公顷云杉的株数 ($\text{dbh} > 5 \text{ cm}$)。 MT 是立地的指示变量，指 *Myrtillus* 类型或者更差立地。 G 是胸径高于 5cm 的每公顷断面积 ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$)。

(5) 进界树木胸径生长模型如下：

$$\ln(D) = a_1 + a_2 \ln(G) + a_3MT + a_4VT^{-}$$

式中 D 是5年生长后的进界树的平均胸径。 VT 是指示变量，代表立地类型为*Vaccinium* 或者更差的立地条件。

相比全林模型与径阶模型，单树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。

单树模型建模数据需求

单木生长模型 系统子模块	数据需求
单木胸径生长模型	输出变量：单木五年间带皮胸径生长量 (cm) 输入变量：1. 单木胸径 (cm)。 2. 胸径大于 5cm 的树木的总林分胸高断面积 ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$)。 3. 比对象木胸径大的胸高断面积和 ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$)。 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 等，可选)
单木树高模型	输出变量：单木树高 (m) 输入变量：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。
单木存活模型 (枯损模型)	输出变量：单木五年间存活的概率 输入变量：1. 单木胸径 (cm)。 2. 胸径大于 5cm 的树木的总林分胸高断面积 ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$)。 3. 比对象木胸径大的胸高断面积和 ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$)。
进界模型	输出变量：进界株数 (株/每公顷) 输入变量：1. 胸径大于 5cm 的树木的总林分胸高断面积 ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$)。 2. 各树种林分密度 (株/每公顷)。
进界胸径生长模型	输出变量：五年生长后的进界树的平均胸径 输入变量：1. 胸径高于 5cm 的每公顷断面积 ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$) 2. 有效描述立地条件的因子，如林型、土壤、地形等。

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. 单木五年间存活的概率；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。

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

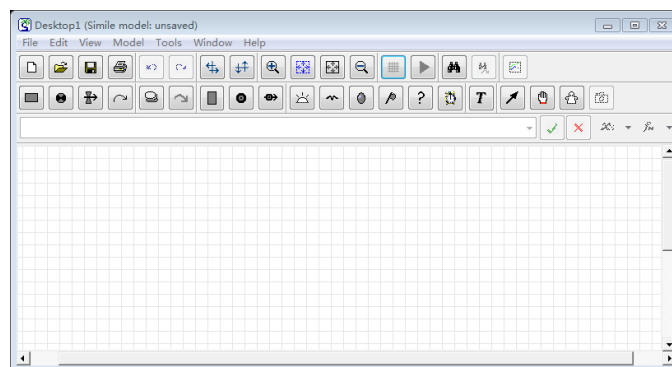
树存活概率，若存活概率高于0-1均匀分布随机数则按保留株计算；2）计算每棵树胸径生长量，并加到现在的胸径上；3）利用树高模型更新树高；4）预测进界林木的数量、初始胸径和树高；5）根据预测的进界生长来增加新树到样地中。

实验五 林分生长模型的链接

5.1 simile 基础

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书建模（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/>）。

下面我们通过一个构建林木生长的例子来熟悉 simile 的基本操作：



Simile 的界面

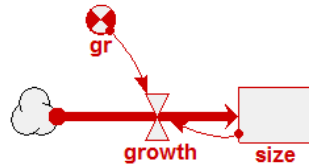
1. 模拟单株树的生长

(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：

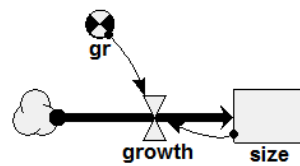


(5) 输入 **growth** 的计算公式: $gr*(1-size/25)$ 该公式意味着树木生长最大值为 25, 生长速率在开始时最大, 后逐渐减小。

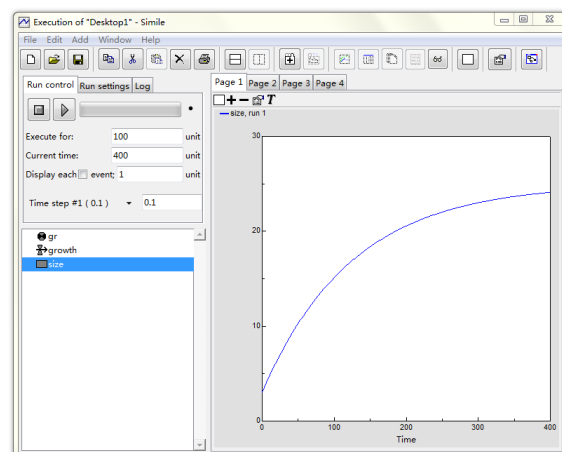
(6) 设置 **size** 的初始值为 3。

(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。

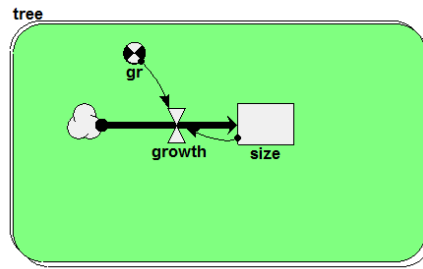
(2) 重新命名 submodel 为 tree。

(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。



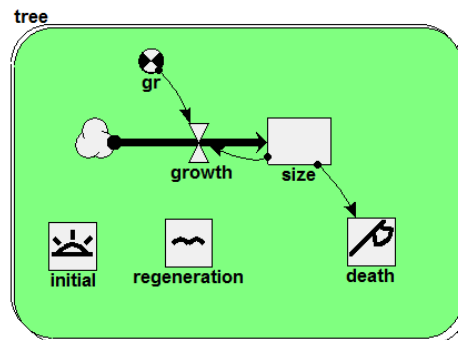
(7) 将 gr 的值由 0.2 修改为 $\text{rand_const}(0.1,0.3)$ 。从而将每个个体随机设置不同的生长速率。

(8) 添加 creation process 图标 ，代表初始的树木株数，此处设置为 5。

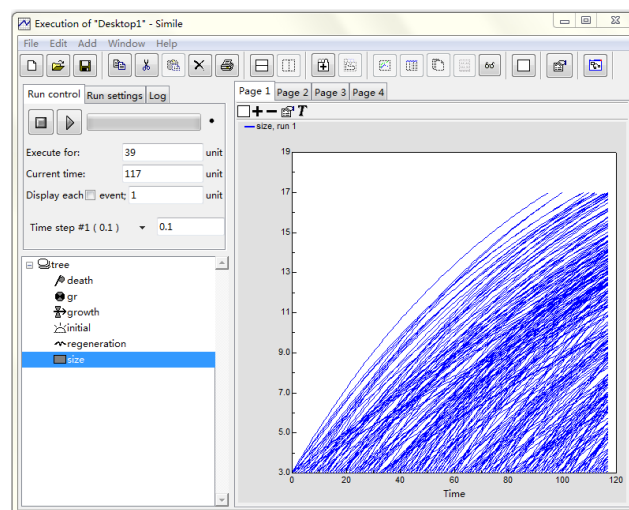
(9) 添加 immigration 图标，代表不断更新的树木，设置为 2。

(10) 添加 destruction process 图标，命名为 death，建立 size 对 death 的影响，并将 death 赋值 $\text{size} > 17$ ，意味着 size 超过 17 时，树木死亡。

(11) 现模型界面如下：



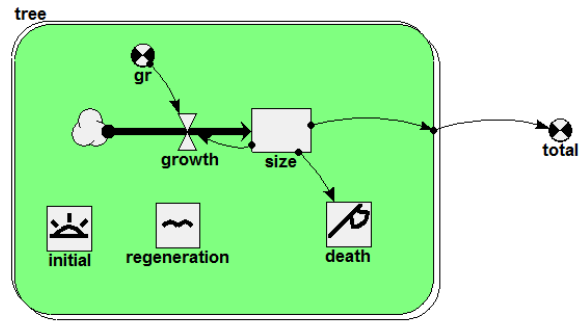
(12) 重建并运行模型，此时绘制 size 的生长曲线，效果如下：



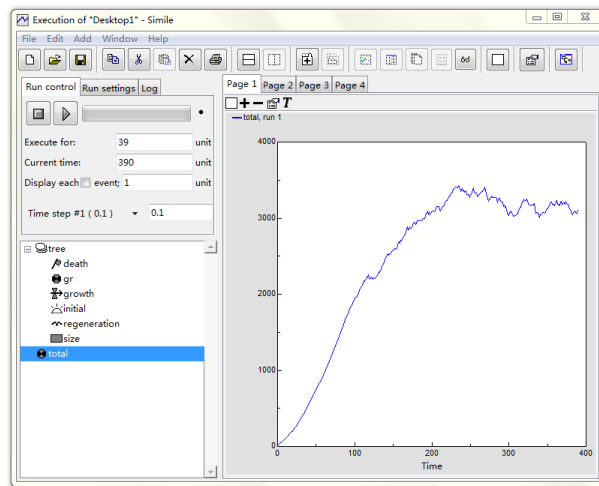
3. 计算林分整体信息

(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。



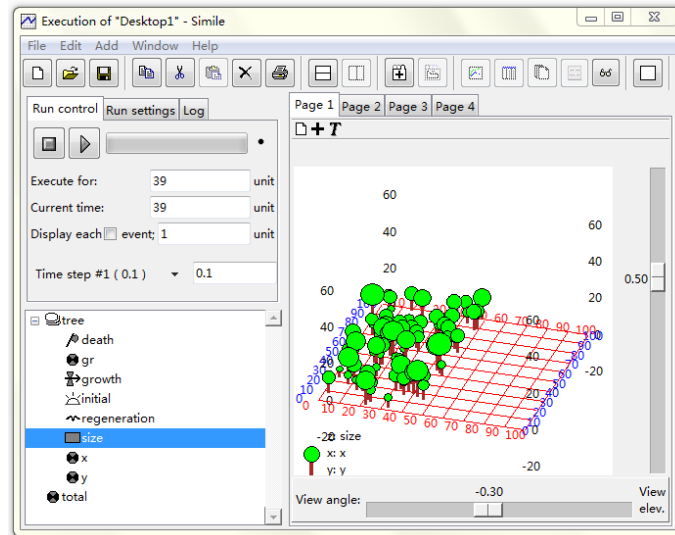
4. 林分生长空间可视化

(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 `rand_const(0,50)` 和 `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：



5.2 全林模型的链接

上一节 Simile 的演示，实际上是一个单木生长模型的例子，在 4.1 全林模型的介绍中，我们演示了现实（经验）林分生长模型的构建方法，在本节中我们将介绍采用正常林分生长模型来演示 Simile 的模型链接。

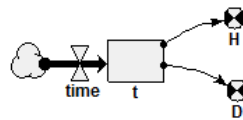
(1) 在构建正常生长收获模型时，我们继续沿用 4.1 节拟合的树高 $H-t$ 模型和胸径 $D-t$ 模型，但由于是正常林分，即要求完满立木度，正常林分的断面积我们由树高-断面积标准表来推算。公式如下：

$$H = 22.841e^{-19.284/t}$$

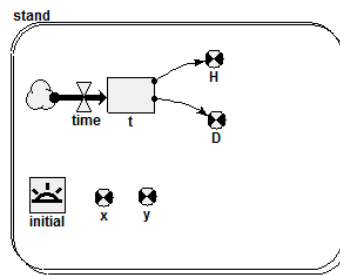
$$D = 36.149e^{-24.507/t}$$

$$G = \frac{45.144}{1 + 3.967 \times e^{-0.185 \times H}}$$

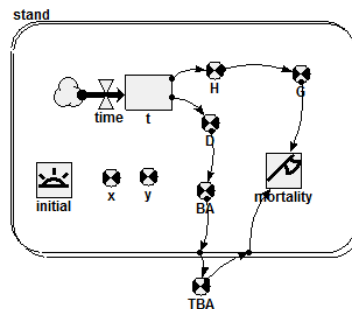
(2) 林分平均高与平均胸径以年龄作 t 为自变量，在 Simile 中我们将年龄初始值设置为 $t=15$ ，林分年龄增长 $time=1$ ，利用树高生长方程与胸径生长方程，推算平均木树高（设置 $H=22.841 \times \exp(-19.284/t)$ ）与平均胸径（设置 $D=36.149 \times \exp(-24.507/t)$ ）。



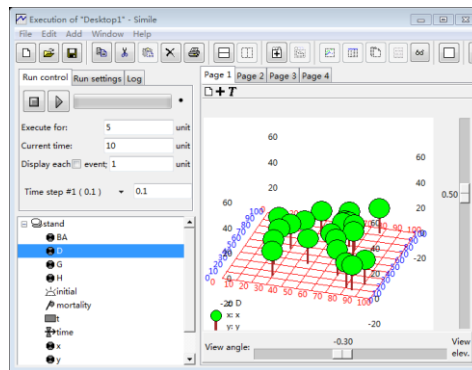
(3) 通过 submodels 按钮可以将平均木转换为林分水平（设置 Instances 为 Population），同时我们设置林分初始密度 $initial=25$ （每 100 平方米 25 株），以及树木坐标 x 和 y 为 $rand_const(0, 100)$ 。



(4) 林分的枯损由总断面积来调控。首先计算平均木的断面积 $BA = 3.14 * D * D / 40000$ ，继而林分总断面积 $TBA = \text{sum}(\{BA\})$ 。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 $\text{mortality} = (TBA - G) / TBA$ 。模型结构如下：



(5) 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。以 Lollipop diagram 为例展示的生长效果如下：



实验六 森林经营决策方法

6.1 同龄林经营规划

同龄林是指林分中林木的年龄相对一致的森林。同龄林的结构相对比较简单，生长比较单一，经营技术较为简单，经营措施易于实施。林业上对于森林经营规划的研究，最初都是从同龄林开始，直指当前，世界上营造的人工林绝大多数仍为同龄林，并且多为同龄纯林。本节将通过介绍同龄纯林进行林分改造的例子，对规划求解的方法进行演示：

某林场中两个林班需要进行林分改造（下图 a），林班 1 面积 60 公顷，林班 2 面积 90 公顷。两个林班目前均为薪炭林，但是二者土壤条件不同，林分生长也相应有差别。林场主希望利用 15 年的时间将整个林地改造为轮伐期为 15 年永续经营的用材林。即始终保持

三分之一的林地树木年龄为 0-5 年，三分之一的林地树木年龄为 6-10 年，三分之一的林地林分年龄为 11-15 年（下图 b）。当林分年龄为 15 年时即进行采伐并人工更新。表 1 给出了改造过程中薪炭林每公顷薪炭材产量，由于林木的不断生长，每次改造的木材收获都会相应增加。林场主需要解决的问题是如何在林分改造的过程中获得最高的木材产出。

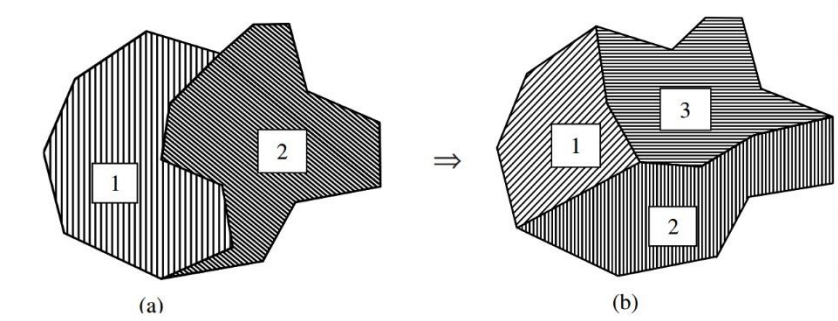


表 薪炭林在改造过程中的产量

林班		产量 (吨/hm ²)		
编号	面积 (hm ²)	前五年	中间 5 年	后 5 年
1	60	16	23	33
2	90	24	32	45

下面我们介绍如何构建并求解该线性规划模型：

(1) 决策变量：

我们设置 X_{ij} 表示 i 林班第 j 期改造时采伐面积。共有 2 个林班， i 的取值为 1 或 2。最终的林分要求 15 年轮伐期，每 5 年采伐等面积林分，因此改造时期也需要分 3 次进行， j 的取值为 1, 2, 3，代表改造时间为第一、第二和第三个 5 年。1 林班的采伐决策变量为 X_{11} 、 X_{12} 和 X_{13} ；2 林班的采伐决策变量为 X_{21} 、 X_{22} 和 X_{23} 。

(2) 约束条件

林班面积约束：

$$\begin{aligned} X_{11} + X_{12} + X_{13} &= 60 \text{ hm}^2 \\ X_{21} + X_{22} + X_{23} &= 90 \text{ hm}^2 \end{aligned}$$

采伐面积约束：

$$\begin{aligned} X_{11} + X_{21} &= \frac{60 + 90}{3} = 50 \text{ hm}^2 \\ X_{12} + X_{22} &= 50 \text{ hm}^2 \\ X_{13} + X_{23} &= 50 \text{ hm}^2 \end{aligned}$$

(3) 目标函数：

$$Z = 16X_{11} + 23X_{12} + 33X_{13} + 24X_{21} + 32X_{22} + 45X_{23} \text{ (吨)}$$

(4) 完整的线性规划模型为：

$$\max Z = 16X_{11} + 23X_{12} + 33X_{13} + 24X_{21} + 32X_{22} + 45X_{23}$$

Subject to:

$$\begin{aligned} X_{11} + X_{12} + X_{13} &= 60 \\ X_{21} + X_{22} + X_{23} &= 90 \end{aligned}$$

$$X_{11} + X_{21} = 50$$

$$X_{12} + X_{22} = 50$$

$$X_{13} + X_{23} = 50$$

假设价格为每吨 10 元，折现率为 0.05，间隔时间以每个 5 年中点计算，例如 2 林班第三个 5 年折现值为：

$$\frac{45 \times 10}{(1 + 0.05)^{12.5}} = 24.5 \text{ 元/吨}$$

经过折现计算的目标函数为：

$$\max Z' = 141.6X_{11} + 159.5X_{12} + 179.3X_{13} + 212.4X_{21} + 221.9X_{22} + 244.5X_{23}$$

利用 Excel Solver 求解线性规划模型

	A	B	C	D	E	F	G
1	同龄林经营规划案例						
2	薪炭材价格	10	(元/吨)	周期	5	(年)	
3	折现率	5.0%					
4		周期					林班面积
5		1	2	3	合计		约束
6		林地转换 (公顷)					
7	1林班	0	50	10	60 =		60
8	2林班	50	0	40	90 =		90
9	合计	50	50	50	150		
10	采伐面积约束	50	50	50	150		
11		产量 (吨/年)					
12	1林班	16	23	33			
13	2林班	24	32	45			
14		出材量 (吨)					
15	1林班	0	1150	330	1480		
16	2林班	1200	0	1800	3000		
17	合计	1200	1150	2130	4480		
18		收益现值 (元/公顷)					
19	1林班	141.6	159.5	179.3			
20	2林班	212.4	221.9	244.5			
21		收益现值 (元)					
22	1林班	0	7976	1793	9769		
23	2林班	10622	0	9782	20404		
24	合计	10622	7976	11575	30173	max	
25		计算过程说明					
26							
27	单元格	公式				同类单元格	
28	E7	=SUM(B7:D7)				E7:E10, E15:E17, E22:E24	
29							
30	B9	=SUM(B7:B8)				B9:D9, B17:D17, B24:D24	
31							
32	B15	=B7*B12				B15:D16	
33	B19	=B12*Price/(1+Rate)^(B\$5*D-D/2)				B19:D20	
34	B22	=B19*B7				B22:D23	
35							

规划求解参数

设置目标单元格:

通过更改可变单元格:

遵守约束:

选择求解方法:

求解方法: 为光滑非线性规划求解问题选择 GRG 非线性引擎。为线性规划求解问题选择单纯线性规划引擎。并为非光滑规划求解问题选择演化引擎。

帮助(H) 求解(S) 关闭(Q)

6.2 异龄林经营规划

异龄林是指林分中林木年龄相差一个龄级以上的森林。异龄林的林分结构复杂，多为多树种混交的复层异龄林。异龄林的经营技术复杂，木材生产的成本较高，但林分抗逆性较强，生长稳定，具有良好生态效益。随着人们对于森林生态系统认识的深入，异龄林的经营比例也会随之增加。本节将通过径阶生长模型来介绍简单的异龄林经营规划技术：

在 4.2 节径阶模型的介绍中，我们对天然林是生长动态进行了模拟。基于该模型，我们可以对异龄林进行经营规划。先来回顾一下该径阶生长模型：

$$y_{1,t+1} = 0.92y_{1t} - 0.29y_{2t} - 0.96y_{3t} + 109$$

$$y_{2,t+1} = 0.04y_{1t} + 0.90y_{2t}$$

$$y_{3,t+1} = 0.02y_{2t} + 0.90y_{3t}$$

上式中, y_{it} 代表时间 t 时第 i 等级径阶的株数密度。模型描述了, 由时间 t 经过一个周期 (5 年) 到达时间 $t+1$ 时, 各径阶株数的变化规律。

若该天然林管理单位希望每五年进行择伐作业, 既保证林分径阶结构能长期保持稳定, 又能最大化的提供恒定持续的木材产出, 则应当如何进行采伐规划? (已知各等级径阶单木材积及价格如下表所示)

径阶等级 i	单木材积 (m ³)	单木价格 (元)
1	0.2	3
2	0.5	80
3	1	200

原来的模型只是描述林分自然状态下的生长动态, 如果加入择伐, 则需要对其修正。我们用 h_{it} 代表时间 t 时采伐收获第 i 等级径阶的株数, 则伐后株数为 $y_{it} - h_{it}$, 原生长模型变成:

$$y_{1,t+1} = 0.92(y_{1t} - h_{1t}) - 0.29(y_{2t} - h_{2t}) - 0.96(y_{3t} - h_{3t}) + 109$$

$$y_{2,t+1} = 0.04(y_{1t} - h_{1t}) + 0.90(y_{2t} - h_{2t})$$

$$y_{3,t+1} = 0.02(y_{2t} - h_{2t}) + 0.90(y_{3t} - h_{3t})$$

林分径阶结构能长期保持稳定, 意味着各径阶株数不变的约束:

$$y_{i,t+1} = y_{i,t}$$

采伐量必然无法超过当前立木株数, 并且为非负数:

$$h_{i,t} \leq y_{i,t}$$

$$h_{i,t} \geq 0$$

我们设定将每 5 年的木材收益作为优化目标:

$$\max Z = 3h_{1t} + 80h_{2t} + 200h_{3t}$$

通过 Excel 规划求解功能来进行求解, 得:

	A	B	C	D	E
1	最大化木材收益				
2			株数		
3	径阶	y_t		y_{t+1}	
4	等级	(株/公顷)		(株/公顷)	
5	1	1362.5		1362.5	
6	2	54.5		54.5	
7	3	0.0		0.0	
8			择伐		
9	径阶	h_t	价格		
10	等级	(株/公顷)	(元/株)		
11	1	0	3.00		
12	2	54.5	80.00		
13	3	0	200.00		
14	木材收益		4360	(元/公顷/5年)	
15			max		
16					
17			主要单元格公式		
18	计算公式				
19	D5	=0.92*(B3-B11)-0.29*(B6-B12)-0.96*(B7-B13)+109			
20	D6	=0.04*(B3-B11)+0.90*(B6-B12)			
21	D7	=0.02*(B6-B12)+0.90*(B7-B13)			
22	C14	=SUMPRODUCT(C11:C13,B11:B13)			

上述最优解所规划的林分, 在林木生长到第 2 径阶等级时全部择伐掉, 以获得最高木材收益。如果考虑到林木大小的多样性, 可以增加对第 3 等级径阶材积或株数的约束, 例如我规定 $y_{3,t} \geq 3$, 则最优解变为:

	A	B	C	D	E
1	最大化木材收益				
2			株数		
3	径阶	y_t		y_{t+1}	
4	等级	(株/公顷)		(株/公顷)	
5	1	1272.1		1272.1	
6	2	64.4		64.4	
7	3	3.0		3.0	
8			择伐		
9	径阶	h_t	价格		
10	等级	(株/公顷)	(元/株)		
11	1	0	3.00		
12	2	49.385	80.00		
13	3	0	200.00		
14	木材收益		3950.8	(元/公顷/5年)	
15			max		
16					
17			主要单元格公式		
18	计算公式				
19	D5	=0.92*(B5-B11)-0.29*(B6-B12)-0.96*(B7-B13)+109			
20	D6	=0.04*(B5-B11)+0.90*(B6-B12)			
21	D7	=0.02*(B6-B12)+0.90*(B7-B13)			
22	C14	=SUMPRODUCT(C11:C13,B11:B13)			

6.3 加载规划求解宏

在 Office EXCEL 2003 版本中，通过点击菜单【工具】——【宏】——【加载宏】，加载【规划求解加载项】便可以加载该宏。

在 Office EXCEL 2007、2010 及 2013 的版本中，通过点击【文件】选项卡，打开【选项】对话框，单击左侧【加载项】标签，在右侧单击【转到】按钮，打开【加载宏】对话框，勾选【规划求解加载项】复选框，单击【确定】按钮，即可在工具栏的【数据】选项卡中出现【分析】选项组，上面就有了【规划求解】按钮。

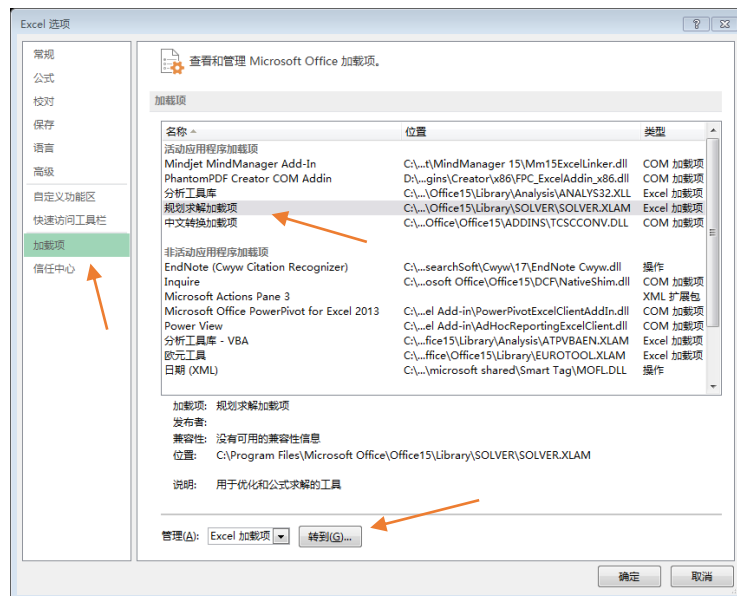
下面以 Excel 2013 来进行演示说明：

- (1) 在 Excel 2013 窗口单击左上角的【文件】按钮，打开的菜单点击【选项】命令

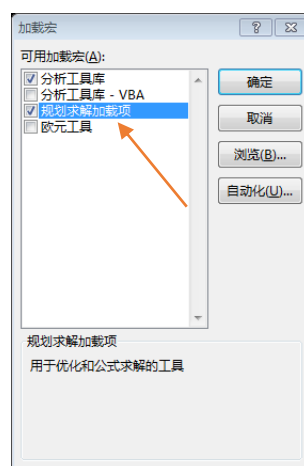


- (2) 打开【Excel 选项】对话框，在左侧列表选择【加载项】

- (3) 单击打开右侧的【管理】下拉菜单，选择【Excel 加载项】，点击【转到】按钮



(4) 打开【加载宏】对话框，在【可用加载宏】框中勾选【规划求解加载项】，单击【确定】按钮

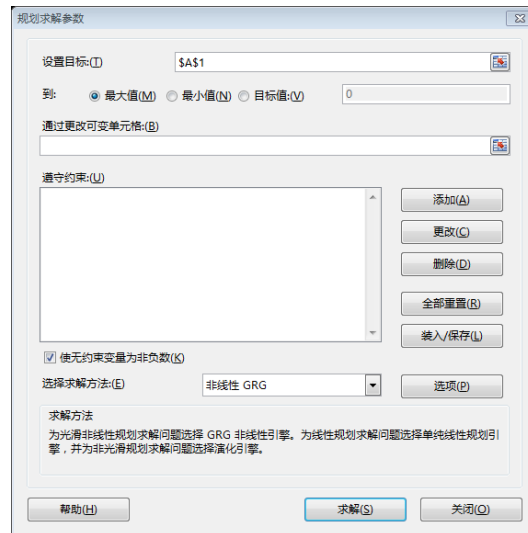


(5) 在功能区切换到【数据】选项卡，【规划求解】就在【分析】组中



(6) 鼠标悬停在【规划求解】按钮上，可得到该功能的即时帮助信息

(7) 点击“规划求解”按钮，打开了【规划求解参数】对话框，在这里面就可以进行相关参数的设置



实验七 森林多功能服务价值

7.1 木材收益

市场经济条件下，林业生产获得两大类产品（或服务），一类是有价格的各种林产品，它们是可以用于交换的商品，包括木材、食用菌、茶果等。这类产品可以为经营者独占，并且可以出售、转让、租赁等获取利益。由于有价格信息，可以通过市场进行资源配置。而另外一种是无价格的各种产出与服务，如保持水土、涵养水源、防风固沙、改善气候、美化环境等这些服务的占有和消费是难以排除他人的，经营者无法通过出售和交换占有其利益，也难以通过市场来实现资源配置。

传统森林经营管理简单地把森林作为木材生产的场所来对待，将森林的木材生产以外其它的资源视为附属性的存在，在相当长的时间里未予重视。本节将通过同龄林林木资产评估的例子，来介绍森林的木材价值：

某林班为落叶松中龄林（地位级 II），面积 10 hm^2 ，年龄 25，蓄积 $185 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，主伐年龄 40 年。查 II 地位级落叶松生长过程表，50 年 $390 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，45 年 $380 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，40 年 $350 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，25 年 $200 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。

落叶松价格，原木 1050 元/ m^3 ，综合 500 元/ m^3 ；

出材率，落叶松原木 25%，落叶松综合 45%；

营林成本 90 元/年/ hm^2 ，采运成本 140 元/ m^3 ；

销售费用 10 元/ m^3 ，管理费用 5%；

A =增值税 6%，城建税= $A \times 5\%$ ，教育附加费= $A \times 3\%$ ；

育林基金 12%，维简费 8%，林业保护建设费 5 元/ m^3 。

试用收获现值法评价该林分林木价值（贴现率 6%）。

45 年时，出材率落叶松原木 30%，落叶松综合 40 %；

50 年时，出材率落叶松原木 40%，落叶松综合 30%；

主伐年龄应选择 40，45，或 50？如果贴现率为 10%，3%？

由于问题所提供的信息过于繁杂，我们首先计算主伐年龄为 40 年，折现率为 6%的情

况。将其分步骤来完成：

(1) 预测主伐时蓄积量 (m^3/hm^2)

条件中已知林分年龄 25，蓄积 $185 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，主伐年龄 40 年。查生长过程表，40 年 $350 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，25 年 $200 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。

$$M=185 \times 350 / 200 = 323.75 \text{ (m}^3/\text{hm}^2\text{)}$$

(2) 主伐时原木及综合纯收入 ($\text{元}/\text{m}^3$)

通过价格和税费信息可以计算每立方米木材纯收入。落叶松价格，原木 $1050 \text{ 元}/\text{m}^3$ ，综合 $500 \text{ 元}/\text{m}^3$ ；采运成本 $140 \text{ 元}/\text{m}^3$ ；销售费用 $10 \text{ 元}/\text{m}^3$ ，管理费用 5%；A=增值税 6%，城建税=A*5%，教育附加费=A*3%；育林基金 12%，维简费 8%，林业保护建设费 $5 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

主伐时每立方米原木纯收入 (元)：

$$A_1 = 1050 - 140 - 10 - 1050 \times 5\% - 1050 \times 6\% \times (1 + 5\% + 3\%) - 1050 \times (12\% + 8\%) - 5 = 564.5$$

主伐时每立方米综合材纯收入 (元)：

$$A_2 = 500 - 140 - 10 - 500 \times 5\% - 500 \times 6\% \times (1 + 5\% + 3\%) - 500 \times (12\% + 8\%) - 5 = 187.6$$

(4) 营林管护成本合计 (元)

营林管护成本每年都需要支出，考虑到 6% 的折现率，实际总的管护成本为等比数列求和运算，在此不再进行推导。已知营林成本 $90 \text{ 元}/\text{年}/\text{hm}^2$ ，林分年龄 25，主伐年龄 40 年，管护成本合计可以由以下公式计算：

$$T = V \times \frac{(1+i)^{u-n} - 1}{i(1+i)^{u-n}} = 90 \times \frac{(1+0.06)^{40-25} - 1}{0.06 \times (1+0.06)^{40-25}} = 874.1 \text{ (元)}$$

(5) 资产总评估值 (元)

林班面积 10 hm^2 (S)；出材率 (f)，落叶松原木 25%，落叶松综合 45%；主伐蓄积量 (M)、木材价格 (A)、管护成本 (T) 均已计算得到。则总的资产评估价值为：

$$\begin{aligned} E &= \frac{S \times M \times (f_1 \times A_1 + f_2 \times A_2)}{(1+i)^{u-n}} - S \times T \\ &= \frac{10 \times 323.75 \times (0.25 \times 564.5 + 0.45 \times 187.6)}{(1+0.06)^{40-25}} - 10 \times 874.1 \\ &= 295\,933 \text{ (元)} \end{aligned}$$

(6) 其他主伐年龄及折现率的情况

折现率	3%			6%			10%		
主伐年龄 (年)	40	45	50	40	45	50	40	45	50
资产评估值 (元)	457,924	462,211	470,314	295,933	257,514	225,582	167,951	120,021	85,746

一般而言，更高的折现率会导致更低的资产评估值，原木出材率的升高会导致采伐时的木材收益更高，但是更晚的主伐意味着更低的贴现值，实际森林主伐年龄的确定，要考虑诸多因素的综合影响。

7.2 物种多样性

生物多样性是人类赖以生存的生物资源。有的生物已被人们作为资源所利用，而更多的生物人们尚未知其利用价值，属于潜在的生物资源。本节将介绍在特定地理区域的生态系统

中，对动物或植物的物种多样性进行描述和评价的方法。

已知研究人员对不同地理区域的 A 和 B 生态系统进行了系统抽样调查，A 区域 100 公顷，设置 20 个观测样点，B 区域 400 公顷，设置 50 个观测样点，分别对植被种类进行调查记录，如下表所示，试对两个区域的物种多样性进行量化比较。

观测到的植被个体数量		
物种	A 生态系统	B 生态系统
1	120	100
2	50	150
3	40	200
4	25	30
5	10	5
6	6	3
7	0	2
8	1	0
9	0	2
10	0	1
合计	252	493

对上表进行分析，我们发现 A 生态系统中观测到 7 个物种，B 生态系统中观测到 9 个物种，但我们还不能仅据此判断二者的生物多样性。

使用 Shannon 指数（Shannon, 1948）是描述物种多样性和相对丰富度的常用方法，可以通过下式来描述物种多样性：

$$H' = - \sum_{i=1}^S \frac{N_i}{N} \ln \frac{N_i}{N}$$

H' 为物种多样性， N 为各物种总个体数， N_i 为第 i 个物种的个体数， S 为物种种类数。

结合 Evenness 均匀度，也能够比较好的描述物种多样性：

$$E = \frac{H'}{S}$$

式中， E 为均匀度， H' 为 Shannon 指数， S 为物种的种类数。

重新计算各多样性指标如下：

各多样性指标		
	A 生态系统	B 生态系统
物种数 S	7	9
Shannon 指数 H'	1.434573	1.356843
均匀度 E	0.204939	0.15076

一般来说，生态系统中的物种的种类数越多，每个物种的个体数越多，并且各物种的个体数分布越均匀，生态系统也就更加稳定。在上述例子中，尽管 B ($S=9$) 生态系统的物种种类数多于 A ($S=7$)，但 A 生态系统却具有更高的 Shannon 多样性指数，同时均匀度更高一些。

需要注意的是 A 生态系统地理区域的面积只有 B 生态系统面积的四分之一，如果折算到相同的单位面积，A 生态系统的物种多样性应该会更加明显高于 B 生态系统。另外，调查中如果涉及濒危物种，在多样性方面则需要单独考虑。

7.3 生物量与碳汇

当前，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，森林的碳汇作用因而也日益得到重视。本节介绍生物量模型的方法计算林分碳储量。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。我们将通过下面的例子进行演示说明：

在 4.1 全林模型这一节中，我们编制了秦岭地区某林场第Ⅱ地位级油松收获表，该模型可以模拟油松同龄林林分生长过程，包括胸径、树高、林分密度、断面积及蓄积等。请在此基础上，根据秦岭地区油松生物量模型，结合含碳率研究，模拟油松同龄林林分碳储量随年龄的动态变化过程。

(1) 从收获表中提取特定的林分生长动态信息，包括年龄、胸径、树高、密度。

油松收获表信息

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

(2) 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

(4) 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

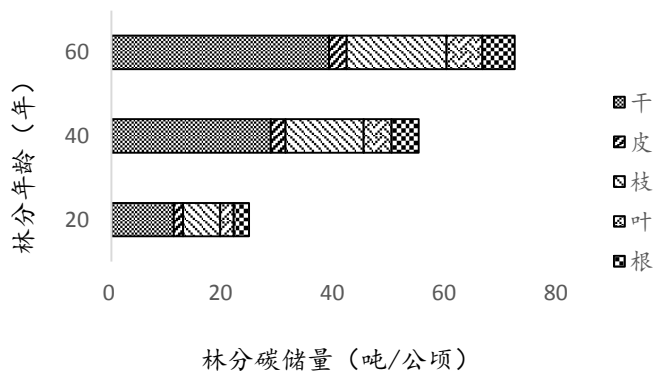
树种和器官的不同而异，采用侯琳等（2009）利用分析仪测定的秦岭油松干、皮、枝、叶、根的含碳率，如下表所示：

秦岭油松各器官含碳率	
器官	含碳率 (%)
干	49.95
皮	49.25
枝	50.8
叶	51.45
根	44.25

继而我们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

这里我们把结果绘制成条形图可以更加方便地对不同时期林分碳储量进行比较：



7.4 层次分析法

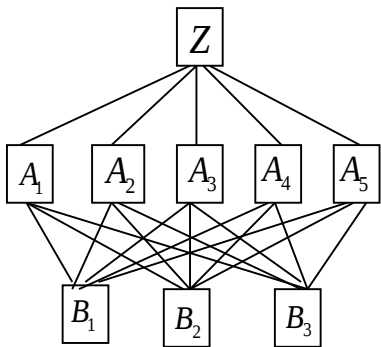
层次分析法（AHP）是美国运筹学家匹茨堡大学教授萨蒂(T. L. Saaty)于上世纪 70 年代初,为美国国防部研究“根据各个工业部门对国家福利的贡献大小而进行电力分配”课题时，应用网络系统理论和多目标综合评价方法，提出的一种层次权重决策分析方法。这种方法的特点是在对复杂的决策问题的本质、影响因素及其内在关系等进行深入分析的基础上，利用较少的定量信息使决策的思维过程数学化，从而为多目标、多准则或无结构特性的复杂决策问题提供简便的决策方法，是一种对难于完全定量的复杂系统做出决策的模型和方法。下面我们将通过一个林业经营实践的例子对层次分析法进行演示：

为充分发挥森林多功能服务的功能，某林场重新编制了 3 套森林经营方案，尽管都兼顾了木材生产、碳汇、多样性、森林健康和游憩价值 5 个目标，但侧重点和实施方案各有不同，现需对这 3 个方案进行评价并选择最佳方案。

（1）建立层次结构模型

将决策的目标、考虑的因素(决策准则)和决策对象按它们之间的相互关系分为最高层、中间层和最低层,绘出层次结构图。包括1) 最高层:决策的目的、要解决的问题;2) 最低层:决策时的备选方案;3) 中间层:考虑的因素、决策的准则。

Z 表示森林经营多功能服务的目标; A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 分别代表森林的木材生产、碳汇、



多样性、森林健康和游憩价值等因素; B_1, B_2, B_3 代表3套森林经营方案。

(2) 构造判断(成对比较)矩阵及一致性检验

在确定各层次各因素之间的权重时,如果只是定性的结果,则常常不容易被别人接受,因而 Santy 等人提出:一致矩阵法,即:1) 不把所有因素放在一起比较,而是两两相互比较;2) 对此时采用相对尺度,以尽可能减少性质不同的诸因素相互比较的困难,以提高准确度。判断矩阵元素 a_{ij} 的标度方法如下:

标度	含义
1	表示两个因素相比,具有同样重要性
3	该因素比另一个因素稍微重要
5	该因素比另一个因素明显重要
7	该因素比另一个因素强烈重要
9	该因素比另一个因素极端重要
2,4,6,8	上述两相邻判断的中值
倒数	因素 i 与 j 比较的判断 a_{ij} , 则因素 j 与 i 比较的判断 $a_{ji}=1/a_{ij}$

该例子中,通过专家打分的方法,可以得到成对比较矩阵如下:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 4 & 3 & 3 \\ 2 & 1 & 7 & 5 & 5 \\ 1/4 & 1/7 & 1 & 1/2 & 1/3 \\ 1/3 & 1/5 & 2 & 1 & 1 \\ 1/3 & 1/5 & 3 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

稍加分析就发现上述成对比较矩阵有问题,例如在打分过程中, $a_{21}=2$, $a_{13}=4$, 则理论上, a_{23} 应该为 8, 但上表中却为 7, 在成对比较中允许不一致,但要确定不一致的允许范围。对于不一致(但在允许范围内)的成对比较阵 A , Saaty 等人建议用对应于最大特征根 λ 的特征向量作为权向量 w , 即 $Aw = \lambda w$ 。

定义一致性的指标为: $CI = \frac{\lambda - n}{n-1}$

实际应用中，采用一致性比率： $CR = \frac{CI}{RI}$

随机一致性指标 RI

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

当 CR 小于 0.1 时， A 的不一致程度在容许范围之内，有满意的一致性，通过一致性检验。可用其归一化特征向量作为权向量，否则要重新构造对比较矩阵 A ，对 a_{ij} 加以调整。

本例中，可计算得到矩阵 A 的最大特征根 $\lambda=5.073$ ，权向量(特征向量) $w = (0.263, 0.475, 0.055, 0.090, 0.110)^T$ 。

一致性指标： $CI = \frac{5.073-5}{5-1} = 0.018$

随机一致性指标： $RI=1.12$ (查表)

一致性比率： $CR = \frac{0.018}{1.12} = 0.016 < 0.1$

(3) 层次单排序及其一致性检验

层次单排序是指同一层次因素对于上一层次因素某因素相对重要性的排序权值,能否确认层次单排序，需要进行一致性检验。

假设通过专家打分，对于木材生产而言三个方案的对比矩阵为：

$$B_a = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 5 \\ 1/2 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

对于碳汇价值而言三个方案的对比矩阵为：

$$B_b = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/8 \\ 3 & 1 & 1/3 \\ 8 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

对于多样性而言三个方案的对比矩阵为：

$$B_c = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 1 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

对于森林健康而言三个方案的对比矩阵为：

$$B_d = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 4 \\ 1/3 & 1 & 1 \\ 1/4 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

对于游憩价值而言三个方案的对比矩阵为：

$$B_e = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1/4 \\ 1 & 1 & 1/4 \\ 4 & 4 & 1 \end{bmatrix}$$

层次单排序权向量及一致性性检验

k	1	2	3	4	5
---	---	---	---	---	---

W_{k1}	0.595	0.082	0.429	0.633	0.166
W_{k2}	0.277	0.236	0.429	0.193	0.166
W_{k3}	0.129	0.682	0.142	0.175	0.668
λ_k	3.005	3.002	3	3.009	3
CI_k	0.003	0.001	0	0.005	0
RI_k	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58

计算 CR_k 可知 B_a, B_b, B_c, B_d, B_e 均通过一致性检验。

(4) 计算层次总排序权值和一致性检验

计算某一层次所有因素对于最高层(总目标)相对重要性的权值,称为层次总排序。这一过程是从最高层次到最低层次依次进行的,计算最下层对最上层总排序的权向量。

本例中,经营方案1对森林经营总目标权值为:

$$0.595 \times 0.263 + 0.082 \times 0.475 + 0.429 \times 0.055 + 0.633 \times 0.099 + 0.166 \times 0.110 = 0.3$$

同理可得方案2和方案3对经营总目标权值为0.246和0.456。

决策层对总目标的权向量为: (0.3, 0.246, 0.456)

一致性检验为:

$$CR = \frac{0.263 \times 0.003 + 0.475 \times 0.001 + 0.055 \times 0 + 0.099 \times 0.005 + 0.110 \times 0}{0.58} = 0.015 < 0.1$$

因而层次总排序通过一致性检验。权向量为(0.3, 0.246, 0.456)可作为最后的决策依据。各方案进行排序为:

$$B_3 > B_1 > B_2$$

即第三个经营方案为最优经营方案。

实验八 非市场价值评估

8.1 支付意愿法

支付意愿(willingness to pay, WTP)是指消费者为获得一种商品、一次机会或一种享受而愿意支付的货币资金。是消费者对特定物品或劳务的个人估价,带有强烈的主观评价成分。在环境质量公共物品的需求分析和环境经济影响评价中,支付意愿被广泛应用。本节通过一个意愿调查法的案例来进行说明:

选取江西省某县作为调查点,调查该地区森林环境效益的经济价值。

(1) 经过了调查,设计了调查问卷。询问被调查者对禁止砍伐周边森林资源及保护居住地的良好生态环境愿意支付的价格。

(2) 通过对调查问卷进行分析处理,根据对被调查者所在的区域是否为林区,职业,不同文化程度,以及不同的平均收入进行排序分类。

(3) 根据统计处理结果,被调查人员的数量为185人,总支付意愿(WTP)值为152046元,平均值为821.87元。

(4) 背景资料:该地区人口为55万人。根据最近的森林资源清查初步成果资料,有林地为

21.33 万 hm²，森林总蓄积量为 850 万 m³，假定全县的林木生长量为蓄积量的 10%。

(5) 根据调查资料的处理结果，全县的户均支付意愿 (WTP) 为 822 元，家庭的人口平均数为 5 人，将全县的户均支付意愿 (WTP) 换算成以立方米为单位的环境单价：

$$\begin{aligned} \text{环境单价} &= \text{用户支付意愿} \times \text{全县人口} \div \text{家庭人口平均数} \div \text{林木生长量} \\ &= 822 \times 55 \div 5 \div 85 = 106 \text{ (元/m}^3\text{)} \end{aligned}$$

8.2 旅行成本法

旅行成本（费用）法是一种评价无价格商品的方法。利用旅行费用来算环境质量发生变化后给旅游场所带来效益上的变化，从而估算除环境质量变化造成的经济损失或收益。人们游览风景区通常不付费或付费很少，旅行费用主要是交通费、时间的机会成本等，通过调查，可以构建旅游场所的年游览人次与旅行费用和其他因素的相关模型，进而对其服务价值进行评估。本节将通过一个森林公园门票定价及价值评估的例子来对旅行成本法进行说明：

某森林公园在试营业阶段，对来访游客进行统计调查，按来访游客的距离及交通便捷程度，将游客来源划分成 5 个区域，并对各区域的游客人口数、旅行的成本、每人每年来访的次数进行了统计，结果如下表所示，请根据以获得的信息，为该森林公园拟定门票价格并对该森林公园进行价值评估。

区域	游客人口	人均旅行成本（元）	每人每年来访次数	门票价格（元）
1	100	2.50	25	0
2	500	5.00	20	0
3	5,000	10.00	10	0
4	10,000	12.50	5	0
5	1,000,000	15.00	0	0

对上表数据进行分析，我们可以发现，人均旅游成本与每人每年的来访次数间，存在特定的游客需求关系，如下图：

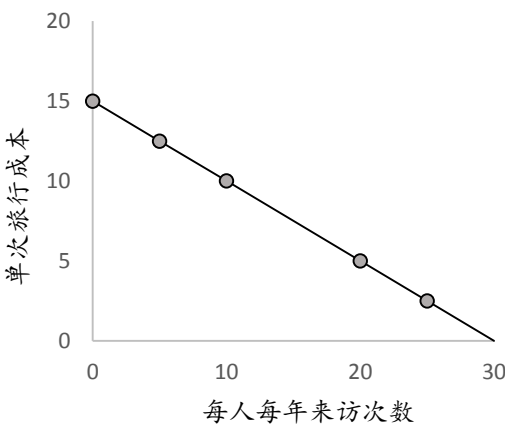


图 各区域游客旅游需求曲线

增加门票收费，相应也就增加了旅行成本，不同的门票价格将直接影响游客每人每年来访次数，人均每年将来访次数乘以游客人口数，就得到总的游客访问量，即如下表所

示：

不同区域游客每人每年来访次数					
区域	门票价格（元）				
	0.0	2.50	5.00	10.00	15.00
1	25	20	15	5	0
2	20	15	10	0	0
3	10	5	0	0	0
4	5	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0

不同门票价格下总的游客访问量					
区域	门票价格（元）				
	0.0	2.50	5.00	10.00	15.00
1	2,500	2,000	1,500	500	0
2	10,000	7,500	5,000	0	0
3	50,000	25,000	0	0	0
4	50,000	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
合计	112,500	34,500	6,500	500	0

游客访问量乘以门票价格可以得到门票总收入，通过门票价格改变带来的游客数量变化，可以推算支付意愿，而合计的支付意愿减去门票收入可以得到消费者剩余。计算结果汇总如下：

不同门票价格的旅游需求、支付意愿及消费者剩余							
门票价格(1)	访问量(2)	增加的来访问量(3)	门票收入(4)=(1)×(2)	增加的支付意愿(5)	支付意愿合计(6)	平均支付意愿(7)=(6)÷(2)	消费者剩余(8)=(6)-(4)
0.0	112,500		0		253,750	2.26	253,750
		78,000		97,500			
2.50	34,500		86,250		156,250	4.53	70,000
		28,000		105,000			
5.00	6,500		32,500		51,250	7.88	18,750
		6,000		45,000			
10.00	500		5,000		6,250	12.50	1,250
		500		6,250			

15.00	0	0	0	0	0
-------	---	---	---	---	---

计算说明：增加的支付意愿可以通过门票价格改变后旅游人数的变化乘以门票均值得到，例如 2.50 元与 5.00 元均值为 3.75 元，旅游人数变化为 $34,500 - 6,500 = 28,000$ ，则增加的支付意愿为 $28,000 \times 3.75 = 105,000$ 。总的支付意愿为增加支付意愿的合计，例如对于 2.50 元门票价格，总支付意愿为 $6,250 + 45,000 + 105,000 = 156,250$ 。

实验九 风险与不确定性

9.1 马尔科夫链描述林分动态

尽管越来越多的仿真模型系统可以预测林分未来的状态，但真实世界中的森林生长受到各种不可预测因素的干扰，具有很大程度的不确定性。在漫长的森林经营周期内，各种突发自然灾害的发生，又使得森林经营具有一定的风险。本章我们将通过马尔科夫链（Markov Chains）来描述林分状态的不确定性，并预测森林的景观特征和经济收益。

马尔可夫链，因安德烈·马尔可夫（A. A. Markov, 1856—1922）得名，是数学中具有马尔可夫性质的离散事件随机过程。该过程中，在给定当前知识或信息的情况下，过去（即当前以前的历史状态）对于预测将来（即当前以后的未来状态）是无关的。本节将通过一个简单的马尔科夫链来对林分状态的转移进行模拟。

某林区森林按蓄积量可以分为低（L）、中（M）、高（H）三种林分状态，L 状态意味着蓄积量最低，即小于 $40\text{m}^3/\text{hm}^2$ ，M 状态意味着林分蓄积状态处于中等水平，介于 $40\text{m}^3/\text{hm}^2$ 到 $70\text{m}^3/\text{hm}^2$ 之间，H 状态意味着林分当前有较高蓄积量，一般高于 $70\text{m}^3/\text{hm}^2$ 。由于林分的自然生长、突发性的自然灾害和人为经营措施和干扰，林分的状态经常会从一个等级到达转移到另外一个等级。马尔科夫链模型将这种状态转移以一种概率方式表示，如下表所示：

自然状态下林分每 20 年转移概率

初始林分 状态 i	终止林分状态		
	L	M	H
L	0.4	0.6	
M		0.3	0.7
H	0.05	0.05	0.9

由上表可知，初始状态为 L 的林分，在 20 年后，有 0.4 的可能性仍然为 L 状态，但也有 0.6 的可能性将处于 M 状态。同理，若当前林分状态为 H，则 20 年后，有 0.9 的概率仍为 H 状态，各有 0.05 的概率处于 L 状态和 M 状态。

例如，若当前整个林区森林都处于 L 状态，即：

$$p_0 = [1 \quad 0 \quad 0]$$

通过马尔科夫模型可以预测该林区 20 年后的状态为：

$$p_1 = p_0 p = [1 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} 0.4 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.7 \\ 0.05 & 0.05 & 0.9 \end{bmatrix} = [0.4 \quad 0.6 \quad 0]$$

这意味着 20 年后 40%的林分将处于 L 状态，60%的林分处于 M 状态。

然后我们以 20 年后林分状态为初始状态，乘以转移概率矩阵，得到 40 年后林分状态为：

$$p_2 = p_1 P = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.7 \\ 0.05 & 0.05 & 0.9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.16 & 0.42 & 0.42 \end{bmatrix}$$

如果我们将转移概率矩阵反复相乘来迭代，可以得到林分未来的最终稳定状态：

$$p^* = \begin{bmatrix} 0.07 & 0.12 & 0.82 \end{bmatrix}$$

在模拟林分状态时，我们采用 BP（Berger-Parker）指数来描述景观的多样性：

$$BP_t = \frac{p_{Lt} + p_{Mt} + p_{Ht}}{\max(p_{Lt}, p_{Mt}, p_{Ht})}$$

式中 p_{it} 表示 t 时间时 i 状态林分的面积比例。BP 值最低为 1，意味着全部林分处于同一状态，最高值为 3，意味着各状态林分面积相等。

林分状态的转移和模拟可以通过 Excel 来实现：

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	林分动态										
2		状态				BP	20年状态转移概率				
3	年	L	M	H		指数	P	L	M	H	
4	0	1.00	0.00	0.00		1.0	L	0.40	0.60	0.00	
5	20	0.40	0.60	0.00		1.7	M	0.00	0.30	0.70	
6	40	0.16	0.42	0.42		2.4	H	0.05	0.05	0.90	
7	60	0.09	0.24	0.67		1.5					
8	80	0.07	0.16	0.77		1.3					
9	100	0.07	0.13	0.81		1.2					
10	120	0.07	0.12	0.82		1.2					
11	140	0.07	0.12	0.82		1.2					
12	160	0.07	0.12	0.82		1.2					
13	180	0.07	0.12	0.82		1.2					
14	200	0.07	0.12	0.82		1.2					
15	220	0.07	0.12	0.82		1.2					
16	240	0.07	0.12	0.82		1.2					
17											
18	单元格	公式				相似单元格					
19	A5	=A4+20				A5:A16					
20	B5:D5*	{=MMULT(B4:D4,I\$4:K\$6)}				B5:D16					
21	F4	=SUM(B4:D4)/MAX(B4:D4)				F4:F16					
22	* 选中 B5:D5，输入公式 =MMULT(B4:D4,I\$4:K\$6)，										
23	然后按 CTRL+SHIFT+ENTER.										

另外，我们还可以通过状态转移概率，计算林分保持在当前状态的平均滞留时间 m_i ：

$$m_i = \frac{D}{(1 - p_{ii})}$$

上式中 D 为单个预测的时间周期， p_{ii} 为单个周期内保持当前状态的概率。例如，L 状态林分滞留在当前林分的平均时间为：

$$m_L = \frac{20}{(1 - 0.40)} = 33.3 \text{ 年}$$

即 L 状态的林分平均 33.3 年不会发生状态改变。

各林分状态的平均滞留时间

状态 i	20 年状态不变的概率 p_{ii}	期望滞留时间 m_i (年)
--------	----------------------	------------------

L	0.4	33.3
M	0.3	28.6
H	0.9	200.0

同时，我们也可以计算林分状态发生改变后，重新回到该状态的平均时间：

$$m_{ii} = \frac{D}{\pi_i}$$

上式中 π_i 为林分达到稳定状态时的概率。由此计算可得下表：

各林分重回原状态的平均时间		
状态 i	稳定状态概率 π_i	重回原状态时间 m_{ii} （年）
L	0.07	285.7
M	0.12	166.7
H	0.82	24.4

由上表可知，状态为 L 的林分脱离后重回该状态的平均时间为 285.7 年。

9.2 经营措施对林分生长不确定性的影响

上一节中我们模拟了带有不确定性的林分自然状态下的生长，这一节我们将探讨经营措施对林分生长的影响。

林分经营者希望通过采伐作业获得木材产出，方法是以 20 年作为周期，另 L 状态与 M 状态的林分自然生长，而将较为成熟的 H 状态林分进行择伐，择伐后林分状态转变为 L 或 M 状态。人为干扰后的状态转移概率如下表所示：

经营措施下的状态转移概率			
初始林分 状态 i	终止林分状态		
	L	M	H
L	0.4	0.6	
M		0.3	0.7
H	0.4	0.6	

按新的状态转移矩阵，我们可以重新对林分的生长进行模拟，如下图：

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	林分动态										
2	状态					BP	20年状态转移概率				
3	年	L	M	H		指数	P	L	M	H	
4	0	1.00	0.00	0.00		1.0	L	0.40	0.60	0.00	
5	20	0.40	0.60	0.00		1.7	M	0.00	0.30	0.70	
6	40	0.16	0.42	0.42		2.4	H	0.40	0.60	0.00	
7	60	0.23	0.47	0.29	2.1						
8	80	0.21	0.46	0.33	2.2						
9	100	0.22	0.46	0.32	2.2						
10	120	0.21	0.46	0.32	2.2						
11	140	0.22	0.46	0.32	2.2						
12	160	0.22	0.46	0.32	2.2						
13	180	0.22	0.46	0.32	2.2						
14	200	0.22	0.46	0.32	2.2						
15	220	0.22	0.46	0.32	2.2						
16	240	0.22	0.46	0.32	2.2						
17											
18	单元格	公式							相似单元格		
19	A5	=A4+20							A5:A16		
20	B5:D5*	{=MMULT(B4:D4,I\$4:K\$6)}							B5:D16		
21	F4	=SUM(B4:D4)/MAX(B4:D4)							F4:F16		
22	* 选中 B5:D5, 输入公式 =MMULT(B4:D4,I\$4:K\$6),										
23	然后按 CTRL+SHIFT+ENTER.										

同理可以计算得到各林分状态的平均滞留时间和重返时间：

经营措施下的平均滞留时间		
状态 i	20 年状态不变的概率 p_{ii}	期望滞留时间 m_i (年)
L	0.4	33.3
M	0.3	28.6
H	0.00	20.0

经营措施下重回原状态的平均时间		
状态 i	稳定状态概率 π_i	重回原状态时间 m_{ii} （年）
L	0.22	90.9
M	0.46	43.5
H	0.32	62.5

9.3 基于风险的林分价值评估

由于各种不确定因素的存在，我们对于林分未来状态的预测采用概率转移的方法。从上节的例题中可以看出，经营措施可以带来木材产出，这里我们假设对状态为 H 的林分进行择伐，每公顷的经济收益为 7000 元，L 状态和 M 状态的林分不进行采伐作业，现在我们将探讨如何对林分进行价值评估。

考虑到折现率（r）的存在，未来林分的收益进行贴现，需要乘以特定系数（d）：

$$d = \frac{1}{(1+r)^{20}}$$

状态 L 和状态 M 的林分不进行采伐，无法直接测算其经济价值，这里我们采用向后递推的方法，用 $V_{i,t}$ 表示计划作业 t 周期时的林分价值，那么距离作业 $t+1$ 个周期的期望收益现值为：

$$V_{i,t+1} = R_i + d(p_{iL}V_{Lt} + p_{iM}V_{Mt} + p_{iH}V_{Ht})$$

R_i 为各林分状态下的经济收益，H 状态林分每公顷收益为 7000 元，L 状态与 M 状态不能采伐，收益为 0，即：

$$R_L = 0, R_M = 0, R_H = 7000$$

向后递推时，我们设置 $t=0$ 时的期望收益均为 0 以方便计算，即：

$$V_{L0} = V_{M0} = V_{H0} = 0$$

通过向后递推的方法，可以得到各状态林分价值的评估：

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	林分价值评估											
2	年	各状态现值				20年转移概率					收益	
3		L	M	H		G	L	M	H		状态	元/公顷
4	0	0	0	0	L	0.40	0.60	0.00	L	0		
5	20	0	0	7000	M	0.00	0.30	0.70	M	0		
6	40	0	1847	7000	H	0.40	0.60	0.00	H	7000		
7	60	418	2056	7418								
8	80	528	2189	7528					折算系数	d	0.38	
9	100	575	2234	7575					折现率 (/年)	r	0.05	
10	120	592	2251	7592								
11	140	598	2257	7598								
12	160	601	2260	7601								
13	180	602	2261	7602								
14	200	602	2261	7602								
15	220	602	2261	7602								
16												
17	单元格	公式									相似单元格	
18	A5	=A4+20									A5:A15	
19	B5	=L\$4+d*SUMPRODUCT(G\$4:I\$4,B4:D4)									B5:B15	
20	C5	=L\$5+d*SUMPRODUCT(G\$5:I\$5,B4:D4)									C5:C15	
21	D5	=L\$6+d*SUMPRODUCT(G\$6:I\$6,B4:D4)									D5:D15	
22	L8	=1/(1+L9)^20										

各状态林分期望收益的折现值为：

$$V_L^* = 602 \text{ 元}/\text{hm}^2$$

$$V_M^* = 2261 \text{ 元}/\text{hm}^2$$

$$V_H^* = 7602 \text{ 元}/\text{hm}^2$$

尽管 L 状态与 M 状态的林分并不会进行采伐，当终究会在某个时间到达 H 状态，因此仍可以计算出其潜在的价值。