



生态仿真优化实验室  
Simulation Optimization Lab



西北农林科技大学  
Northwest A&F University

# 栎类林立地质量评价与森林生产力预估方法

## Site evaluation and forest productivity for mixed forest stands: a three-stage modeling approach

曹田健 Tianjian Cao  
Prof., DSc. (For.)  
Simulation Optimization Lab  
Northwest A & F University



## 汇报提纲 Contents

- 立地质量评价方法 Literature review
- 立地质量动态变化 Dynamics of site fertility
- 间伐效应与森林生产力 Thinning response
- 多源数据与立地型 Multi- data and site form
- 基于林型的立地类型 Forest type and site type
- 生物量与森林生产力 Biomass production



## 立地质量评价方法 **Methods for site evaluation**

	<b>Direct</b>	<b>Indirect</b>
<i>Phytocentric</i>	Wood volume	Tree height
<i>Geocentric</i>	Soil moisture & nutrient status Photosynthetically active radiation	Climate Land form Physiography Plant indicators
	林分蓄积量或收获量法	树种间生长量关系法
	林分高	多元地位指数法
		植被物指示法

Source: Vanclay (1994), 孟宪宇 (2006)



## 常用立地质量评价方法

- 地理因子立地类型（例如，刘建军等 1996）
- 地被指示物立地类型（Cajander 1949）
- 林分平均高（地位级 Site class）
  - 中国, 前苏联
- 同龄林优势高（立地指数 Site index）
  - H100（针叶林，芬兰、瑞典、德国）
  - H50（阔叶林，芬兰、德国、西班牙）
  - H40（针叶林，挪威）
  - H20, 30, 40, ...阔叶林？针叶林？标准？（中国）
- 异龄林树高胸径关系（立地型 Site form）
  - 澳大利亚 (Vanclay and Henry 1988)



## 立地质量评价方法优缺点 Ad & disad -vantages

- **Geocentric method.** 地理因子法易于分类（例如，刘建军等，1996），却缺乏作为立地条件影响林分生长的生物学解释。
- **Site index.** 天然混交林异龄、混交的林分结构特点，降低了优势树高和年龄的关系，立地指数模型难以运用（雷相东和李希菲，2003）。
- **Site Class.** 地位级法简便易行（例如，李悦黎和杜纪山，1993），但其精度和准确性相对低于立地指数。
- **Site form.** 基准胸径对应的优势树高值作为评价立地质量的指标称为立地形（Vanclay and Henry, 1988）。
- **Plant indicators.** 根据植被类型评价林分立地质量能反映所有环境因子对植被生长的影响 (Cajander 1949).

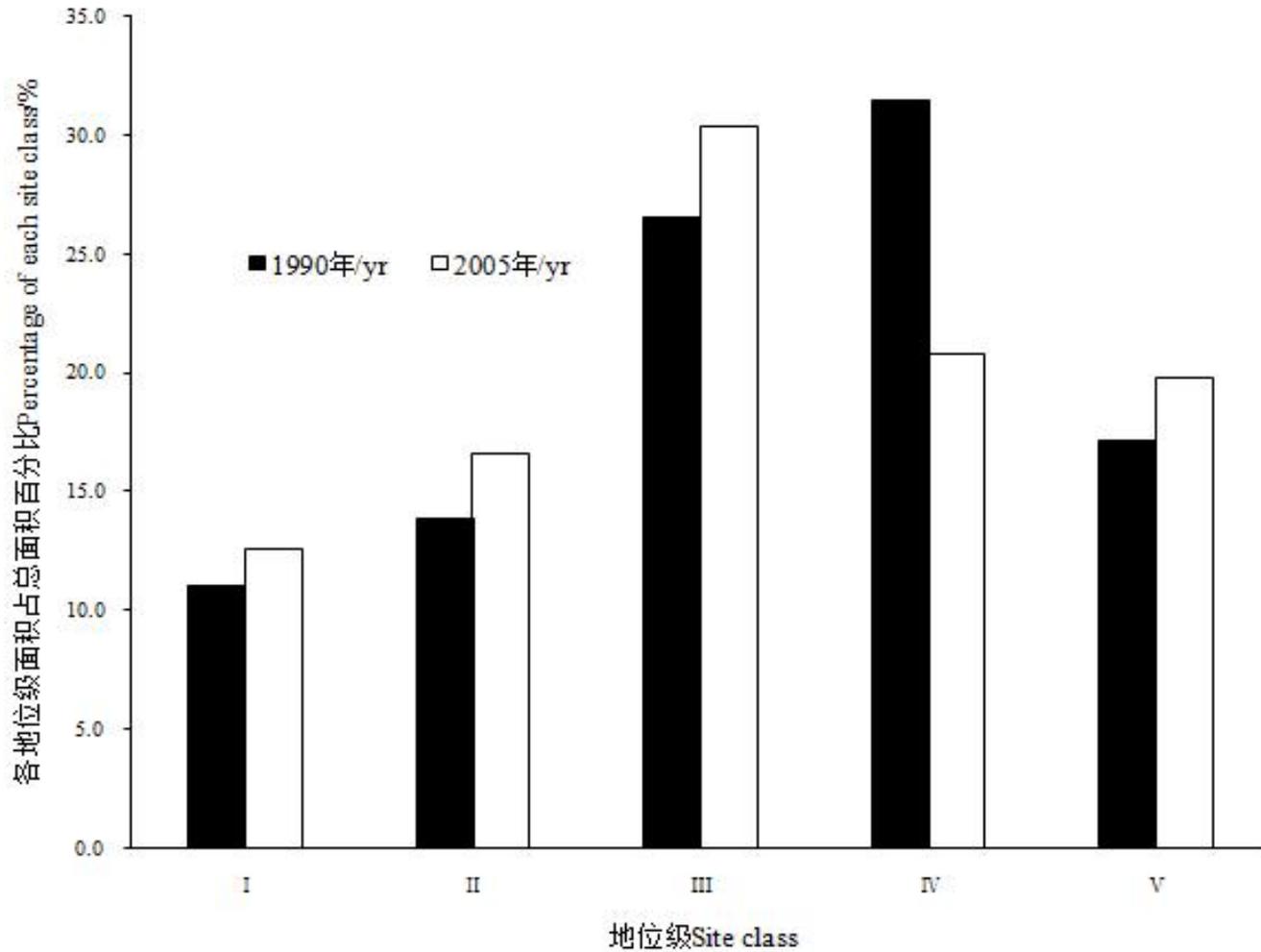


## 立地质量变化 **Dynamics of site fertility**

- 封山育林的研究表明，封育能有效促进林分立地质量改善和群落演替（裴卫国和李铁华 2000）
- 1950-1990期间，欧洲森林的立木蓄积量增加了**43%**，这与林分立地质量的提高有关 (Kuusela 1994)。
- 12个欧洲国家，特别是中欧地区森林均表现为立地质量提高（Kahle and Hans 2008）。
- 中幼龄天然次生林生态系统仍处于动态演替阶段，树种组成、林分结构等均未达到稳定的顶级群落。
- 如果采用单一指标（例如，地位级）比较天然林采伐前和天然次生林恢复过程中（例如，中幼龄林）的立地质量，易导致立地质量下降的评价结果 (李悦黎和杜纪山 1993)。



## 秦岭火地塘教学林场立地质量变化





## 立地质量与森林抚育经营

Table 1. *Number of thinnings in optimal management regimes for Norway spruce and Scots pine site indices,  $H(100)$*

$r$	Norway spruce					Scots pine					
	21	24	27	30	33	15	18	21	24	27	30
0.5	2	2	2	3	2	1	2	3	4	6	6
1.0	2	2	2	2	2	2	2	3	3	5	5
1.5	2	2	2	2	2	2	2	2	3	4	4
2.0	2	2	2	2	2	1	2	2	2	3	4
2.5	2	2	2	2	1	1	1	2	2	3	3
3.0	<b>2</b>	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3
3.5	<b>2</b>	<b>2</b>	2	2	2	1	1	1	2	2	2
4.0	1	<b>2</b>	2	2	2	0	1	1	<b>2</b>	2	2
4.5	1	<b>2</b>	<b>2</b>	2	1	0	0	1	1	<b>2</b>	2
5.0	1	<b>2</b>	<b>2</b>	2	2	0	0	1	1	<b>2</b>	2
5.5	1	1	1	2	2	0	0	0	1	1	2
6.0	1	1	1	2	2	0	0	0	1	1	2
6.5	1	1	1	2	2	0	0	0	0	1	1
7.0	0	1	1	2	2	0	0	0	0	1	1

Roman: positive bare-land value; bold: negative bare-land value.

Source: Hyytiäinen & Tahvonen (2002)

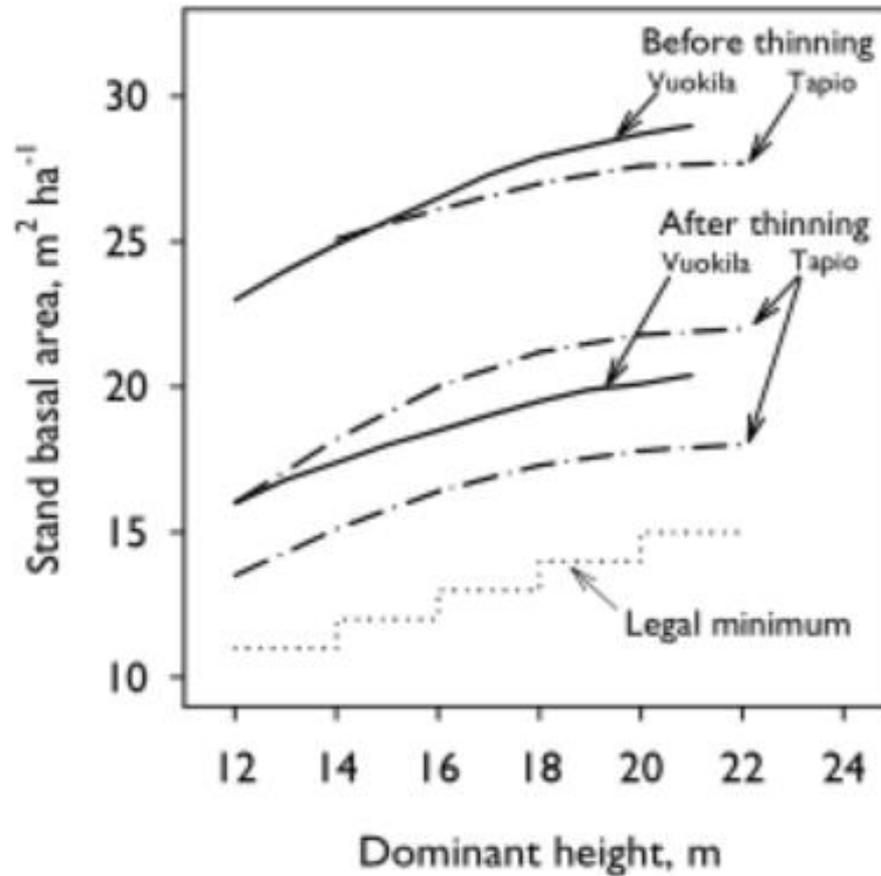


## 德国和芬兰森林抚育经营文献

- Assmann, E. 1970. The Principles of Forest Yield Study, 506. Pergamon Press, Oxford.
- Tapio. 2001. Recommendations for Good Silviculture. Metsätalouden Kehittämiskeskus Tapio, Libris Oy, Helsinki. (In Finnish). 95 pp.



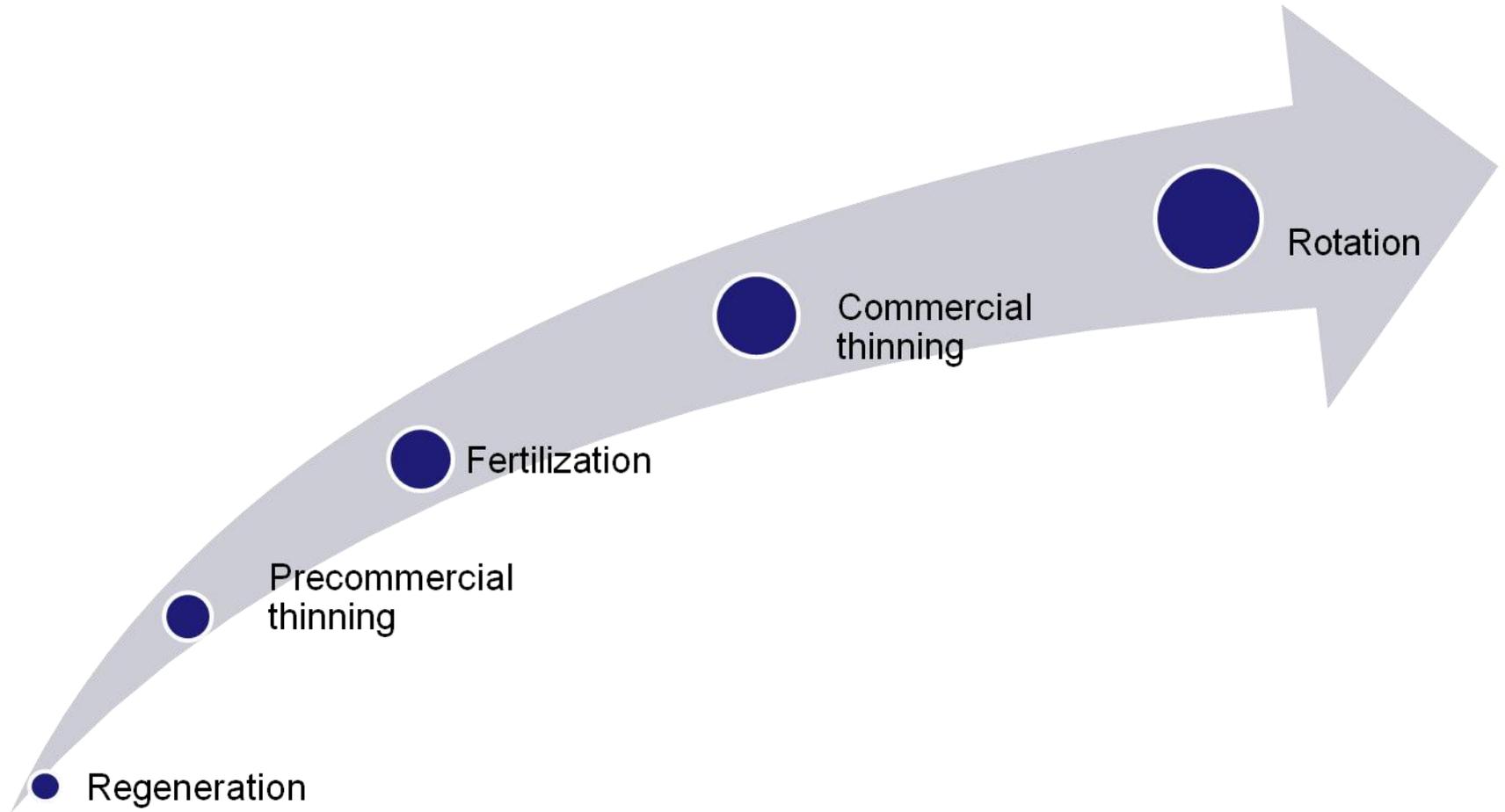
## 森林抚育规程 **Silvicultural recommendations**



Source: Hyytiäinen (2003)

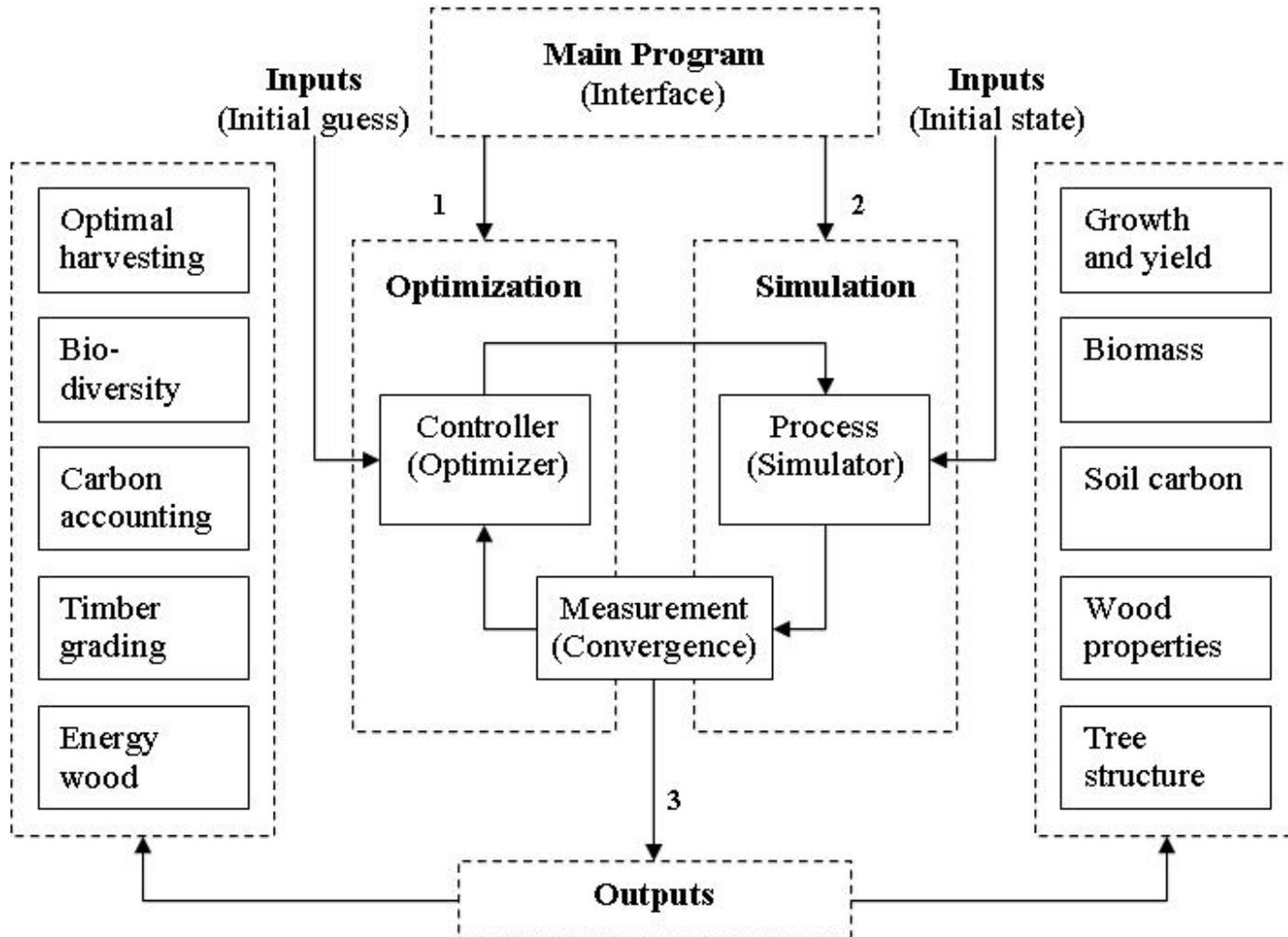


## 森林经营周期与森林经营规划





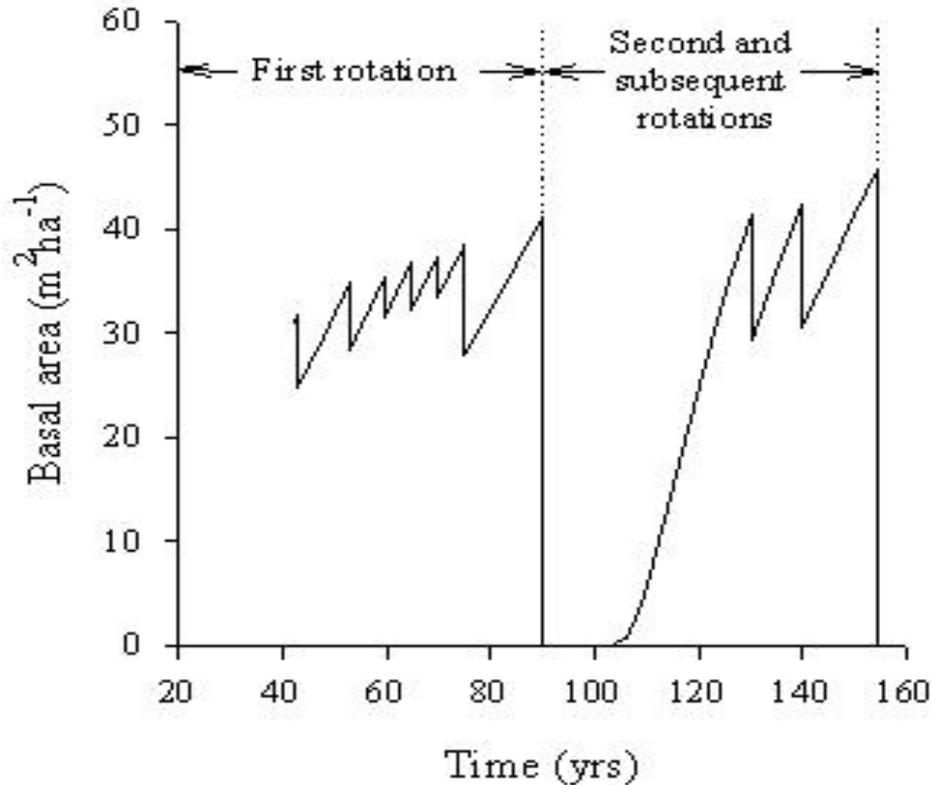
# OptiFor 基于仿真优化的森林经营规划系统



Source: Cao (2010)



## 同龄林经营技术 Even-aged management



### 优化间伐技术

- 间伐次数
- 间伐时间
- 间伐类型
- 间伐强度
- 轮伐期

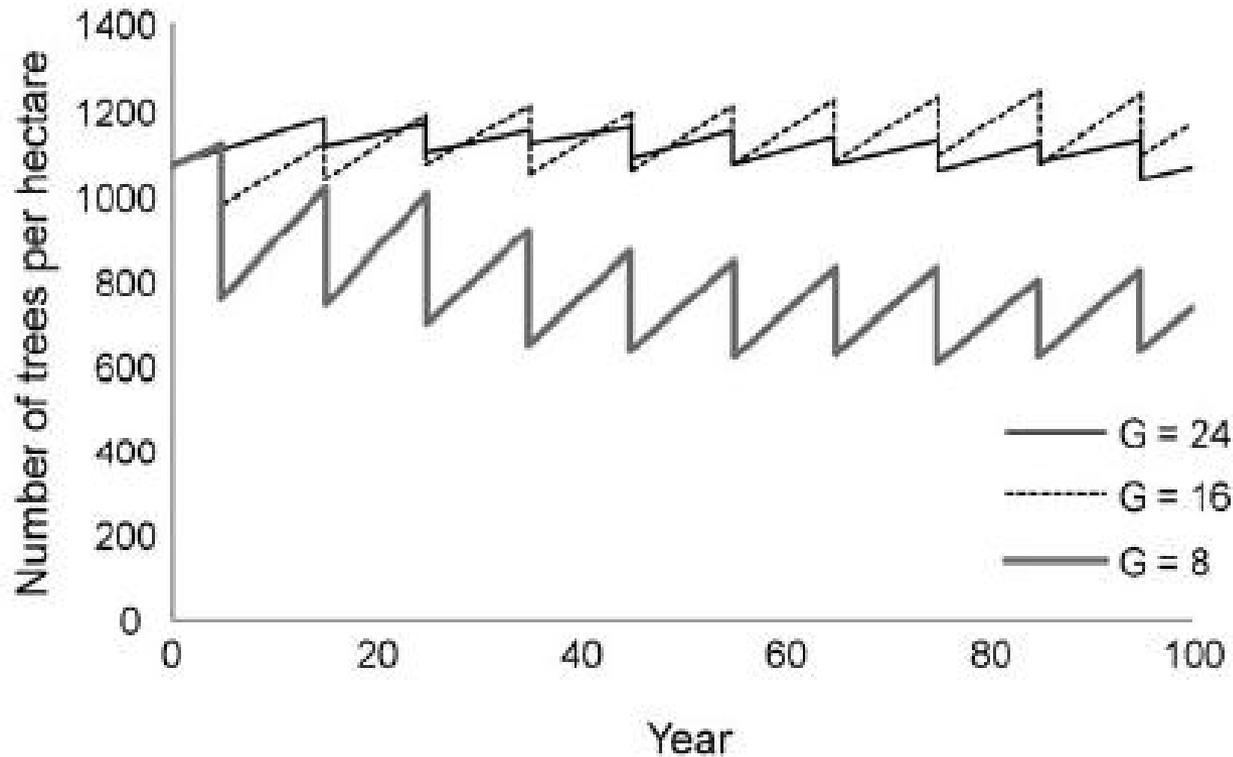
决策变量

$$\begin{aligned} N &= n_{\text{thin}}(t_{\text{pthin}} + 1) + 1 \\ &= 6(6+1)+1 \\ &= 43 \end{aligned}$$

Source: Cao et al. (2006)



## 异龄林经营技术 Uneven-aged management



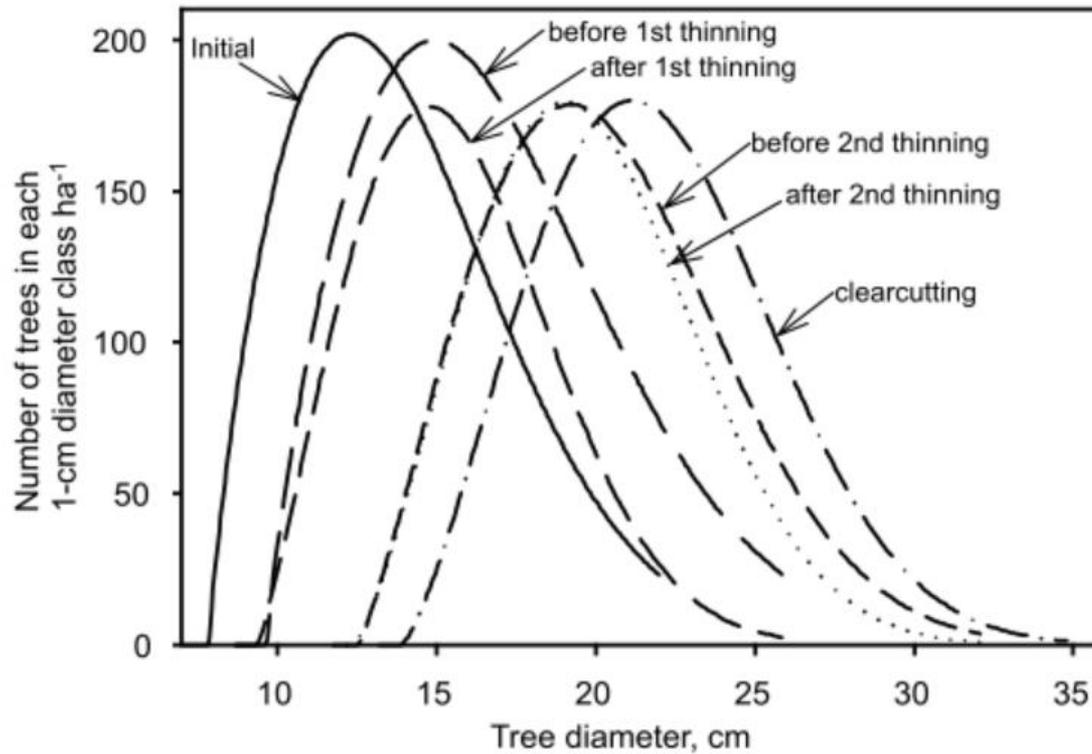
### 优化间伐技术

- 间伐树种
- 间伐时间
- 间伐类型
- 间伐强度
- 间伐间隔期

Source: Pukkala et al. (2009)



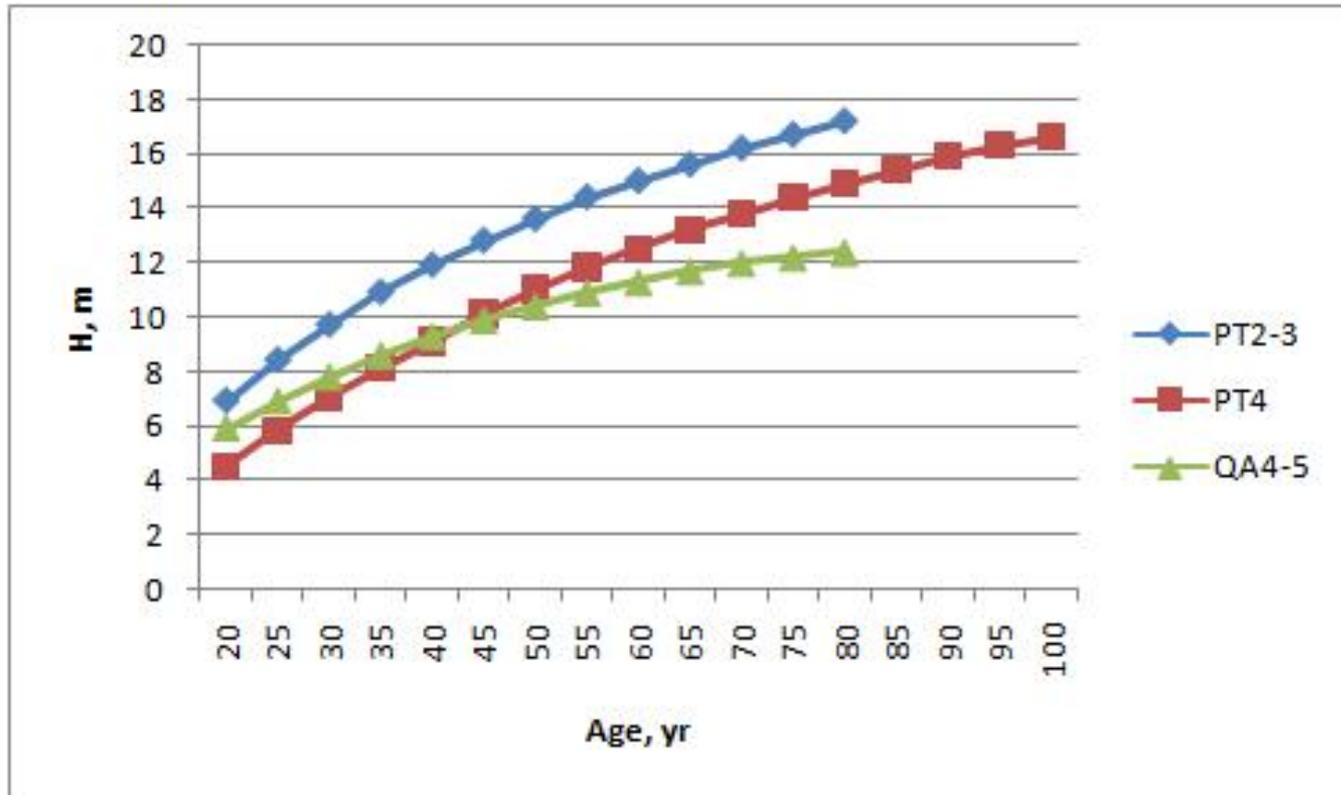
## 林分结构与优化间伐



Source: Cao (2003)

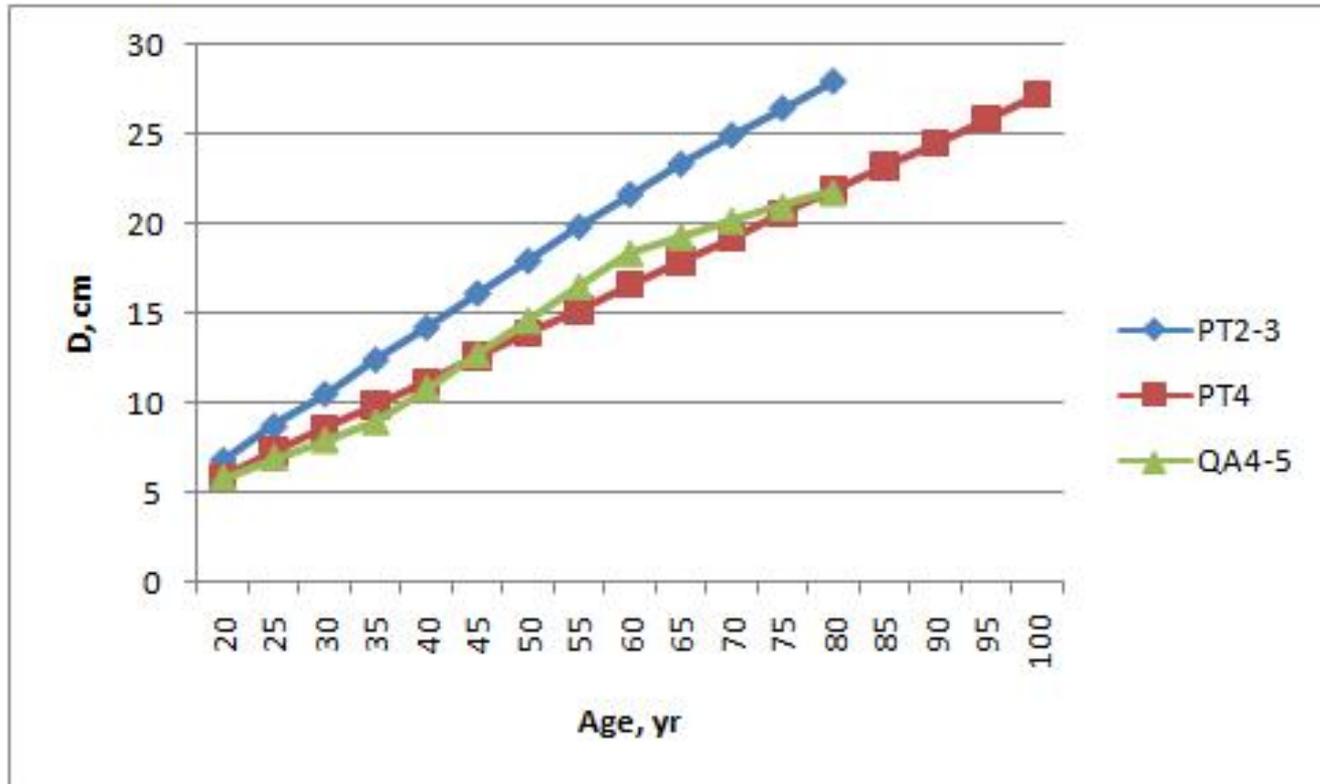


## 陕北松栎林生长过程表（树高 / 年龄）





## 陕北松栎林生长过程表（胸径 / 年龄）





## 林分生长与收获预估 **Growth and yield**

### ■ Site 立地条件

- 水、肥、土、热、气
- 坡度、坡位、坡向、海拔
- 地位级 **SC**，立地类型 **ST**，立地指数 **SI**

### ■ Size 林木大小

- **DBH, H, BA**

### ■ Competition 竞争

- 林冠层（郁闭度、**CR**、**CCF**）
- 乔木层（自疏伐、密度控制、**BAL**）
- 草灌层（进界 **Ingrowth**）



## 森林类型、立地类型与立地质量

### ■ 林分水平

- 可变密度全林生长模型
- 地位级，立地型

### ■ 森林类型（~=立地类型？）

- 立地条件，肥沃/贫瘠
- 林分结构，树种，树高/林层，胸径/年龄

### ■ 径级水平

- 转移矩阵模型？单木生长模型？
- 立地指数，生物量，森林生产力

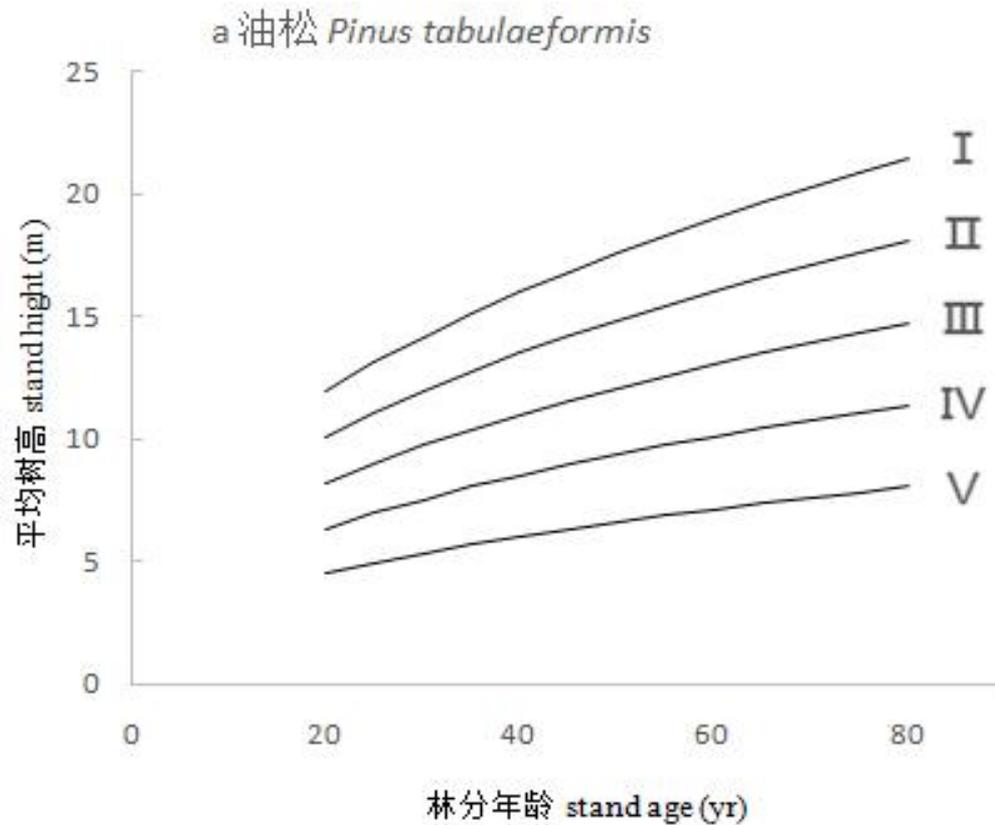


## 多源数据建模 Multiple inventory data

- 临时样地 Temporary plots => Whole-stand model
  - 数据量大，数据采集简便易行，适用全林模型
  - 已采集  $196 + 88$  (桥山) = 284块
  - 数据需求 700 块
- 固定样地 Permanent plots => Individual-tree model
  - 数据量小，适用单木模型，缺少长期复位监测
  - 已采集  $2 + 20$  (桥山) = 32块
  - 数据需求 300 块
- 解析木 Stem analysis => model calibration
  - 数据可靠性高，模型校正，破坏性实验
  - 数据需求 12 ( 优势平均2\*树种3\*立地类型2=12)
- 模拟样地 Simulated plots => Individual-tree model
  - 数据详细，补充实测数据，可靠性待验证

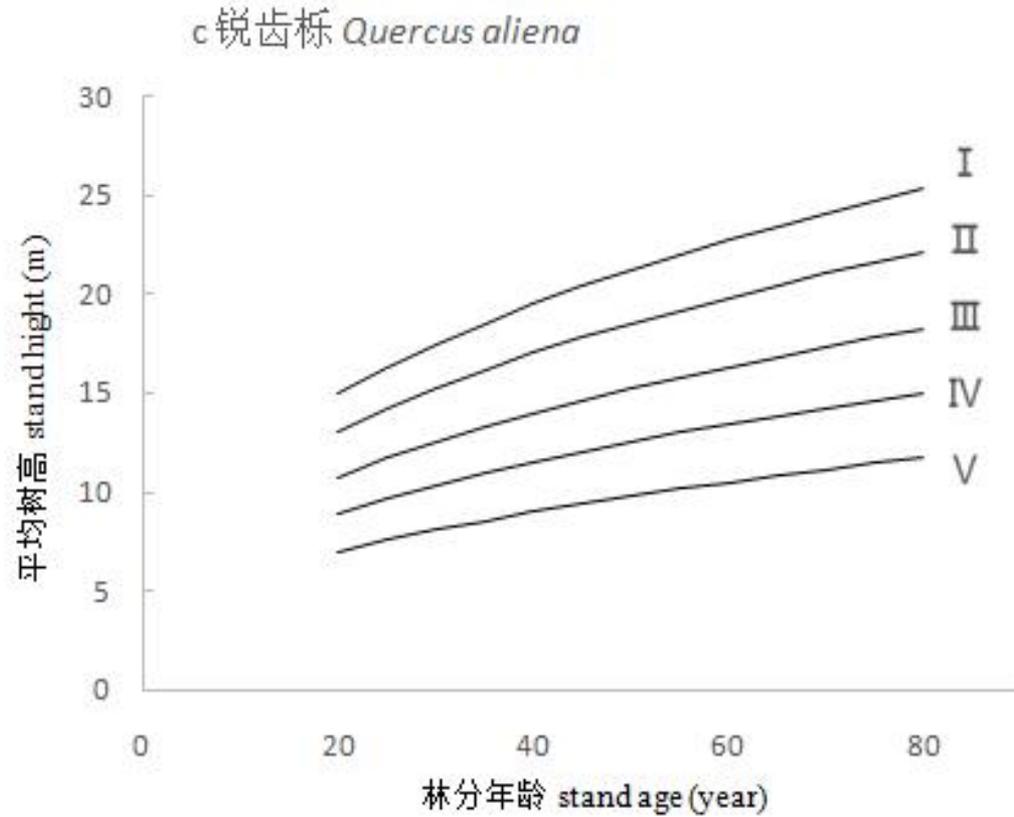


## QUASSI 1.0 全林模型 Whole-stand model





## QUASSI 1.0 全林模型 Whole-stand model





## 立地指数 Site index

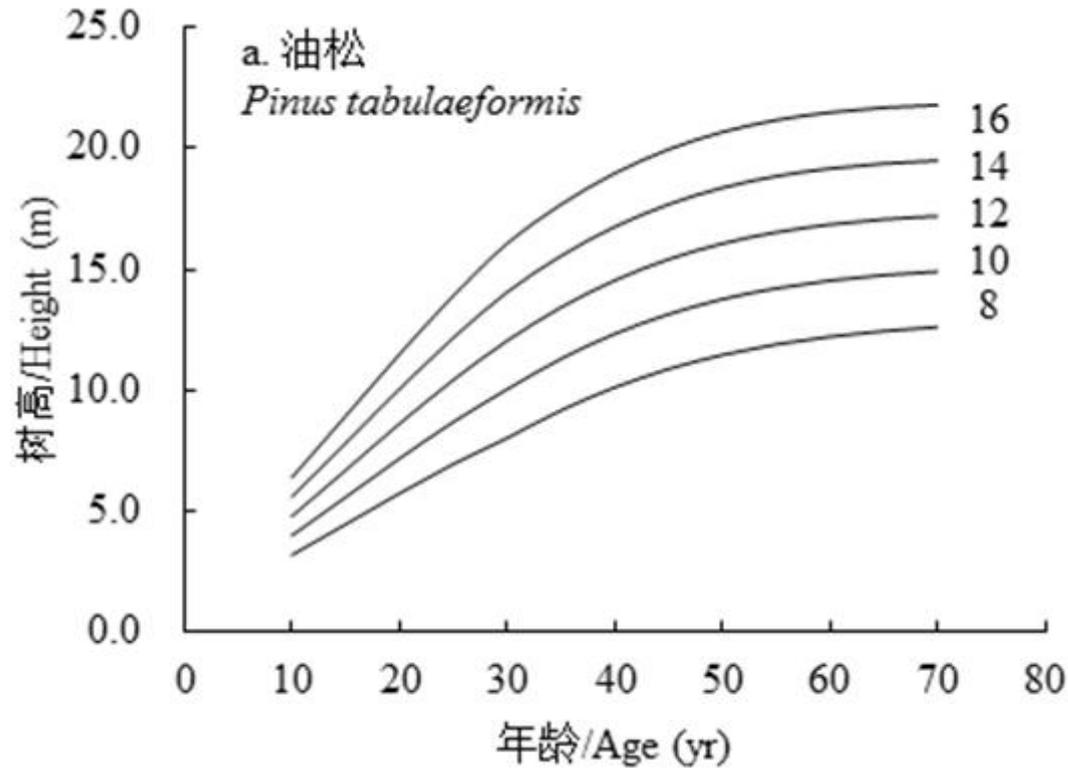
- 立地指数被广泛用于人工林和天然针叶林的立地质量评价。
- 人工林（同龄林）和天然针叶林（相对同龄）的树高和年龄相关性强，其优势树高值易从样地观测获得，能有效预测蓄积生长和收获。
- 立地指数对树高测量误差敏感，同时需要准确的优势树高生长方程。

### 异龄、复层、混交的天然次生林？

- Nigh（1995）和Wang（1998）利用几何回归的方法，实现混交林中不同树种之间立地质量评估的转化。当每个树种没有足够的树高和年龄数据时，对立地指数方程的转化不失为一种替代解决树种之间差异的方法。



## 油松 *Pinus tabulaeformis* 立地指数曲线簇



Source: 吴恒等 (2015)

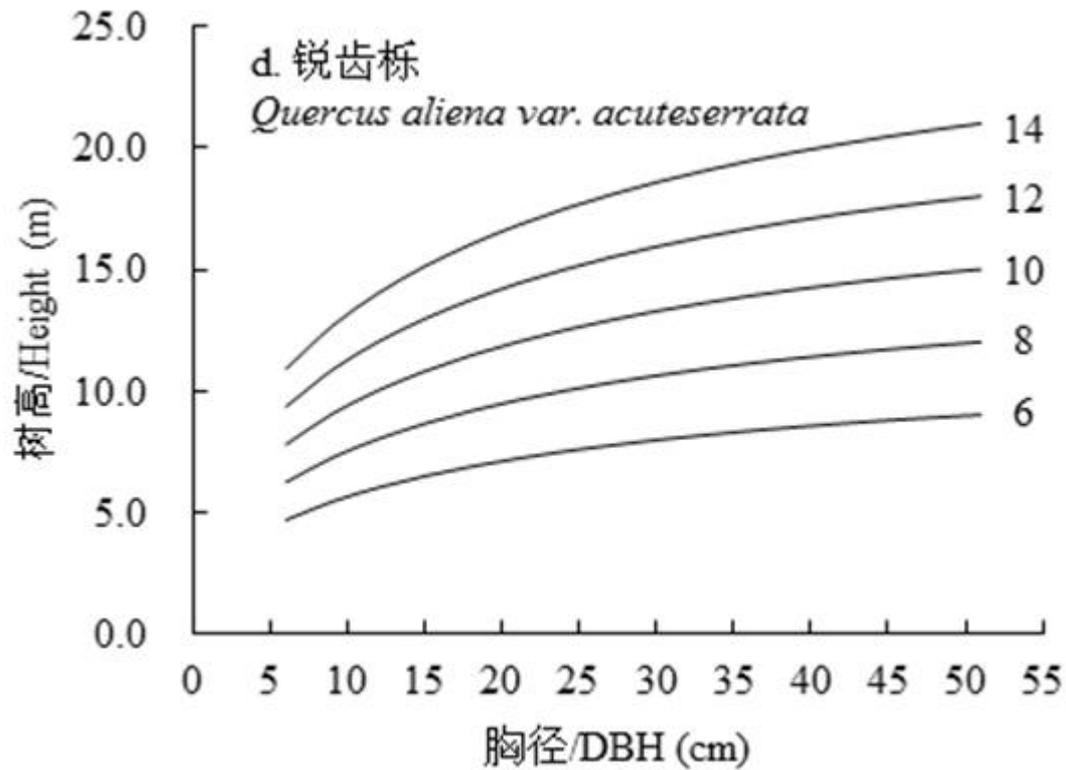


## 立地型 Site form

- 基准胸径对应的优势树高值作为评价立地质量的指标称为立地形（Vanclay and Henry, 1988）。
- 采用胸径或林分总断面积代替林分年龄与优势树高平均值建立回归模型评价立地生产力，能解决混交林年龄结构不规则的问题（Huang and Titus, 1994）。
- 基准胸径的选择影响着立地形的准确评估，根据调查数据中出现频次较多的胸径值为基准胸径的方法缺少合理的生物学解释。
- 林分密度影响林分胸径生长，降低立地形评价立地质量的准确性（Wang, 1998）。
- 立地形因其简便易行，目前仍是评价混交林立地质量的有效方法。



## 锐齿栎 *Quercus aliena* 立地型曲线簇



Source: 吴恒等 (2015)



## 栎类林立地质量评价问题和难点

- 基准年龄的确定
- 基准胸径的确定
- 原始林或成熟林数据
- 优势木解析木数据
- 长期连续复位监测数据
- 单木生长模型



## 栎类林型 Forest types for oak stands

林型	海拔	坡向	坡位	水分	主要树种
辽东栎-土庄绣线菊-披针叶苔草群丛	1390-1450	南坡、东南坡	上坡	较差	辽东栎、油松、土庄绣线菊、榛子、火绒草
辽东栎-虎榛子-披针叶苔草群丛	1380-1460	西北坡		较好	辽东栎、油松、白桦、榛子、龙芽草、北柴胡
辽东栎-胡枝子-大油芒群丛	1300-1360	北坡、东北坡	中下坡	较好	辽东栎、白桦、胡枝子、连翘、榛子等
辽东栎-水栒子-披针叶苔草群丛	1400	北坡	下坡	较好	辽东栎、油松、白桦、水栒子、榛子
辽东栎-白刺花-草地早熟禾群丛	1400	西南坡	中上坡	较差	辽东栎、侧柏、白刺花、北京丁香、山桃、虎榛子
辽东栎-黄蔷薇-华北风毛菊群丛	1290-1320	东南坡、西南坡	上坡	较差	辽东栎、油松、黄蔷薇、卫矛、虎榛子

Source: 康永祥 (2007)



## 栎类立地类型 Site types for oak stands



辽东栎-黄蔷薇



辽东栎-胡枝子



## 栎类立地类型 Site types for oak stands



栎类混交-黄蔷薇



栎类混交-胡枝子



## 栎类立地类型 Site types for oak stands

林型	海拔 (m)			坡度			坡位	蓄积 (m <sup>3</sup> )		
	最低	最高	平均	最小	最大	平均		最小	最大	平均
辽东栎-黄蔷薇	1048	1606	1404	0°	55°	29°	中上坡及山脊	22.2	260.5	90.3
辽东栎-胡枝子	1079	1519	1376	10°	45°	34°	中下坡	38.2	105.3	78
槲栎-黄蔷薇	1334	1509	1463	20°	40°	34°	中上坡及山脊	32.6	145.4	86.1
槲栎-胡枝子	1116	1495	1366	20°	48°	33°	中上坡	47.0	115.2	81.8
麻栎-黄蔷薇	1071	1388	1254	2°	31°	16.7°	中上坡	61.3	119.0	80.2
麻栎-胡枝子	1133	1377	1224	5°	35°	15.3°	中下坡	34.0	162.6	77.8

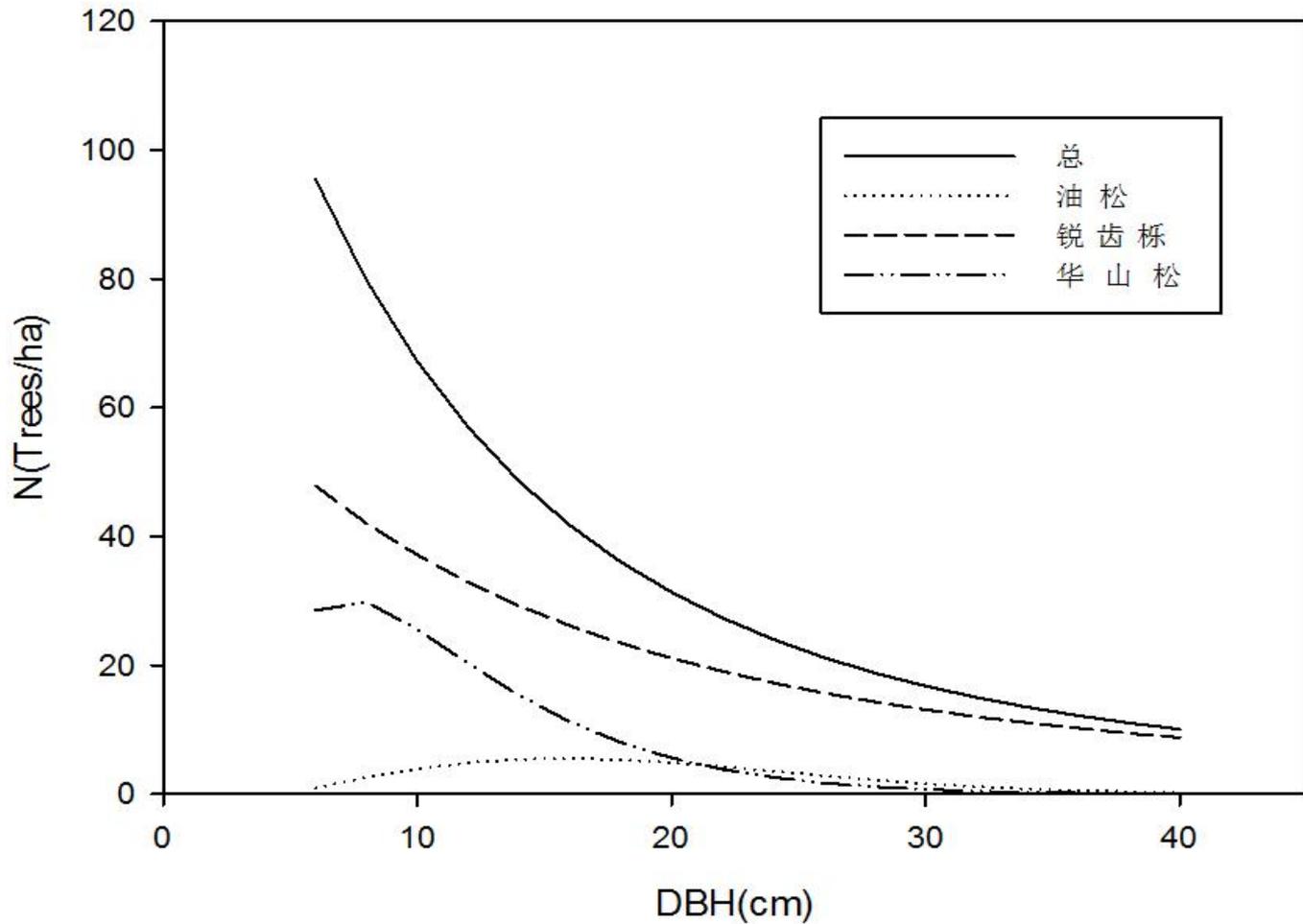


## OptiFor Parameter 参数优化工具包

- 采用三参数 Weibull 分布分析不同林型林分结构。
- 按林分水平、树种/林层水平、径级水平分析树种组成和径阶分布。
- 应用 OptiFor Parameter 优化工具包，优化 Weibull 分布参数。
- 以林分水平数据模拟单木水平的胸径 ( $d$ )、树高 ( $h$ ) 和大于对象木的胸高断面积 ( $BAL$ ) 等建模数据，补充单木模型建模数据量。
- 基于异龄林生长模型 QUASSI 框架，尝试将林型作为反映立地条件的变量 ( $Site\ Type, ST$ ) 纳入单木生长模型。

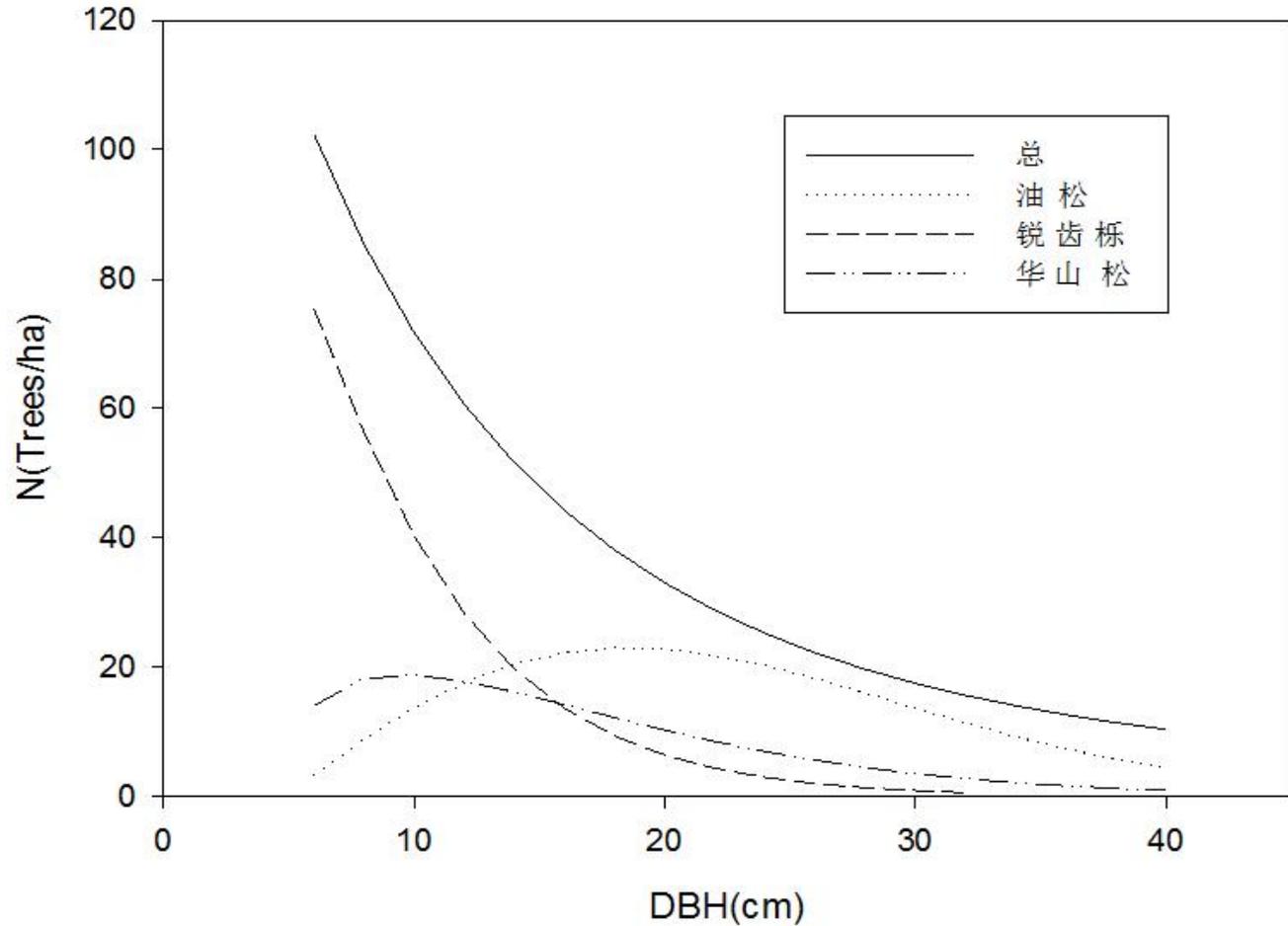


## 松栎林 Weibull 分布 (栎类优势)



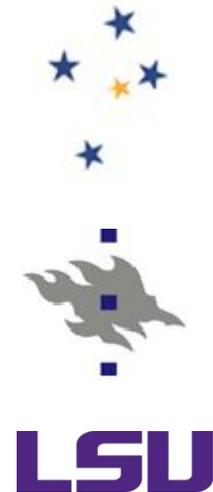
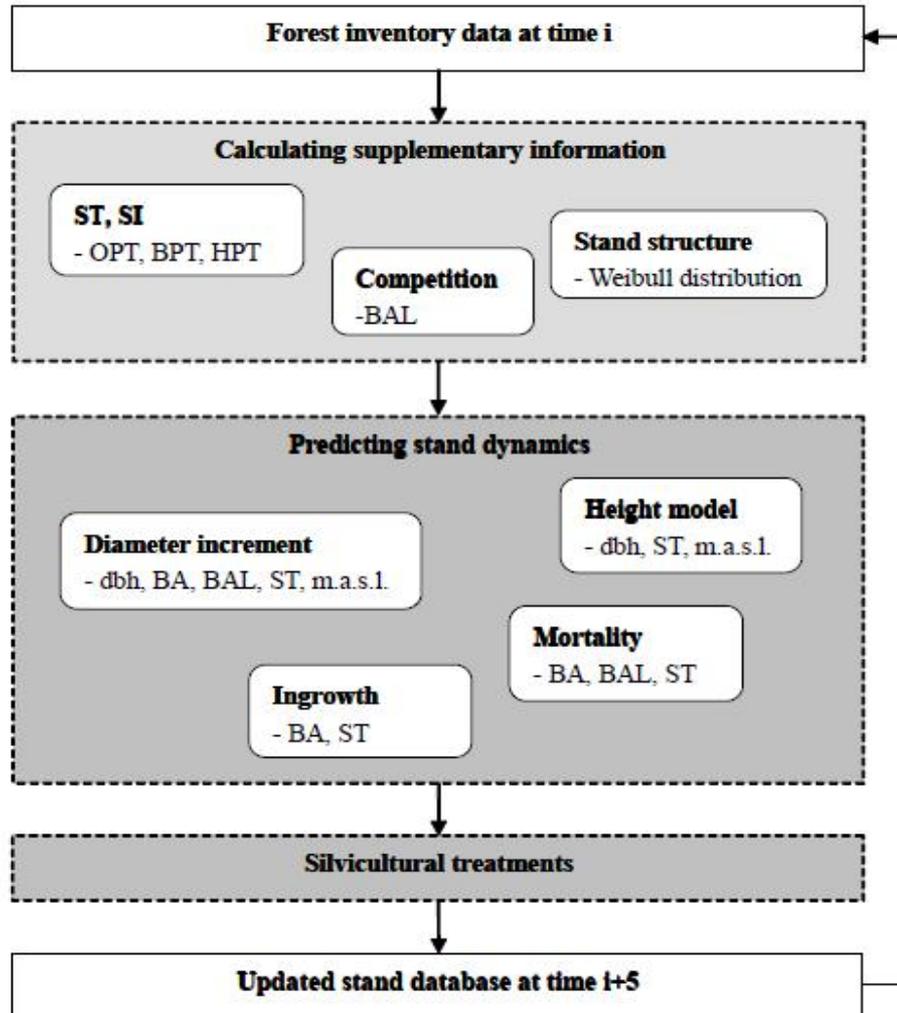


## 松栎林 Weibull 分布 (油松优势)





# QUASSI 异龄林生长模型





## OptiFor Parameter, con't

- 应用 OptiFor Parameter 优化工具包，本地化 CROBAS 过程模型参数。
- 从过程和机理角度，计算混交林生物量，预测林分生长与收获。
- 探索缺乏经验数据情况下的建模方法。研究人为干扰、气候环境变化等因素对森林生态系统动态演替的影响
- 量化森林抚育经营的间伐效应等促进森林生产力和近自然演替的作用。



## 基于过程的单木模型 CROBAS

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

$$P = P_0(1-e^{-KL})/N$$

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

- $G$ 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， $R_m$ 为维持呼吸作用， $R$ 指呼吸作用消耗量， $Y$ 为转化因子， $P_0$ 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， $r_1$ 、 $r_2$ 为经验参数。

Source: Mäkelä (1997)

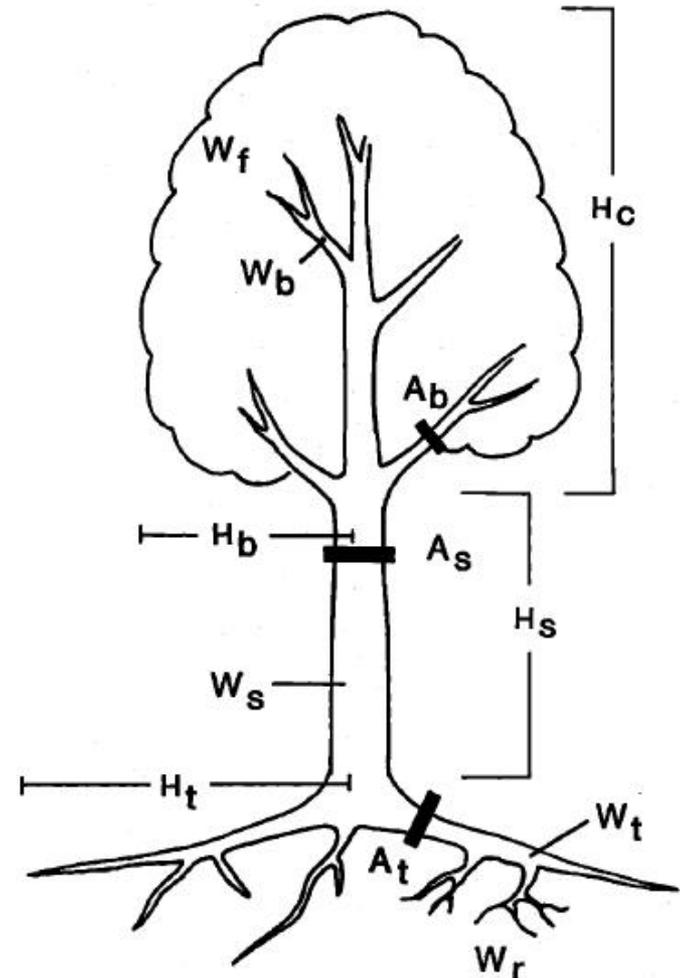


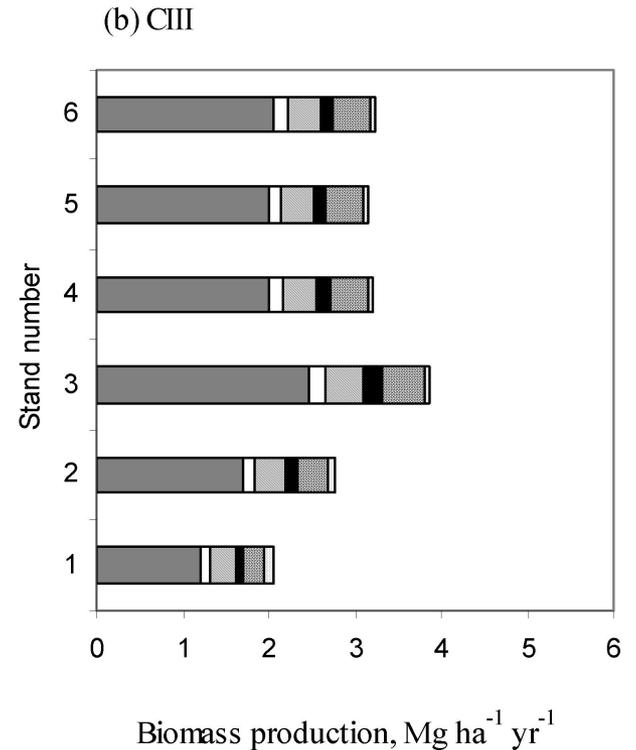
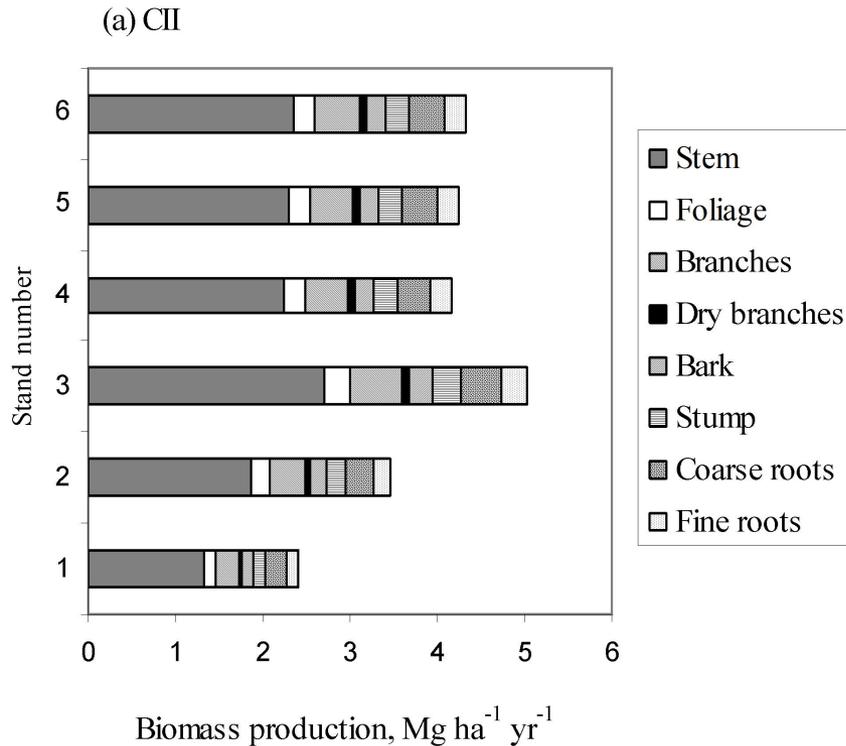
Figure 1. Schematic representation of tree structure as applied in the model.



## 生物量与森林生产力评价方法比较

■ (a) 生物扩展因子法 (BEF)

■ (b) 过程模型法



Source: Cao et al. (2010)

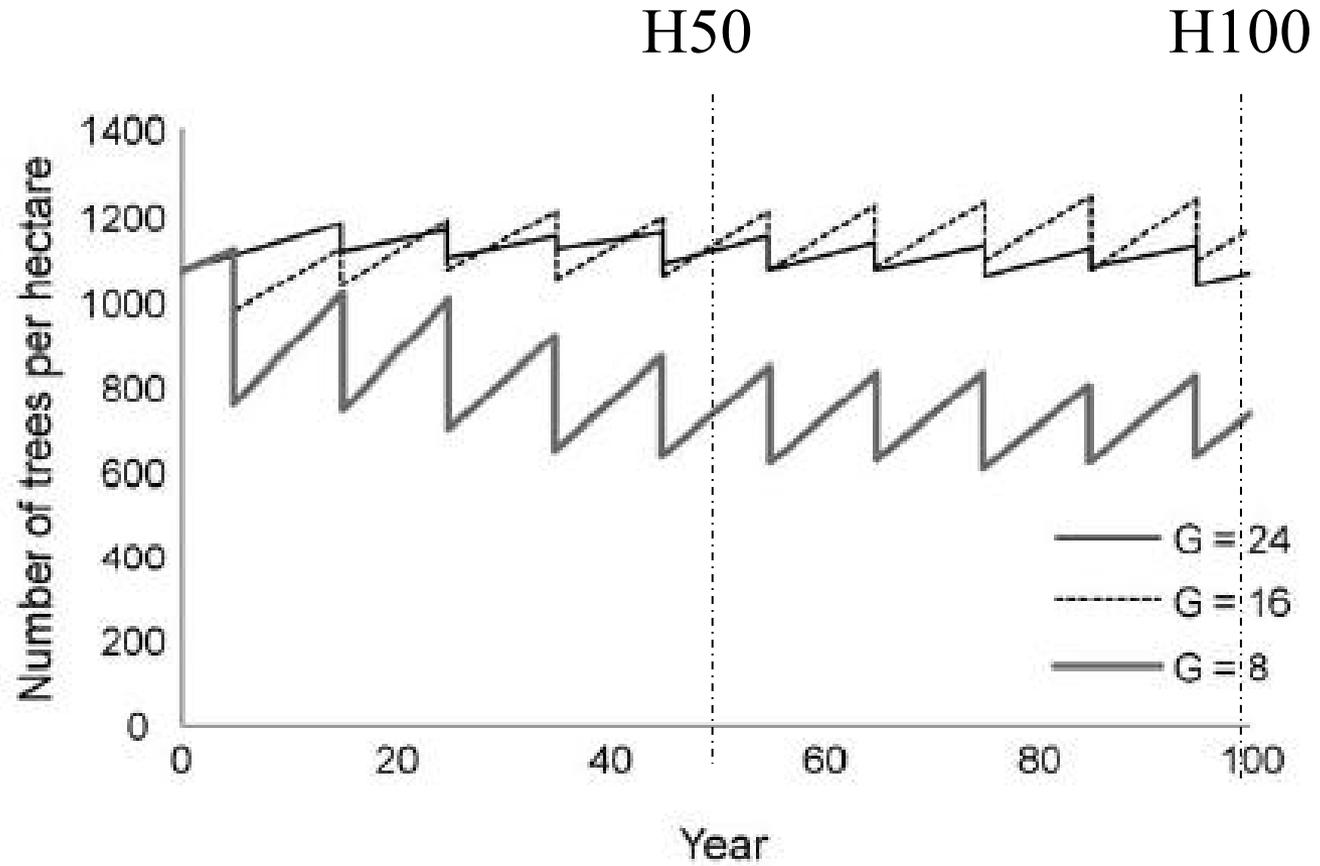


## 生物量法评价立地质量

- 本地化过程模型 CROBAS 参数 & 三参数 Weibull 分布  
=> 单木水平的生长预估
- Li-Cor 6400 便携式光合作用测量系统  
=> 补充实测数据
- 基于过程的单木模型  
⇒ 生物量 Biomass production



## 基准年龄与基准胸径的预估





## 栎类林立地质量评价体系

- 栎类林立地类型
  - 栎类-胡枝子、栎类-黄蔷薇、松栎林
- H50 和 H100 标准
  - H50 阔叶树，H100 针叶树
- 栎类林 => 立地型
- 松栎林（油松优势）=> 立地指数
- 混交林 => 生物量 => 森林生产力



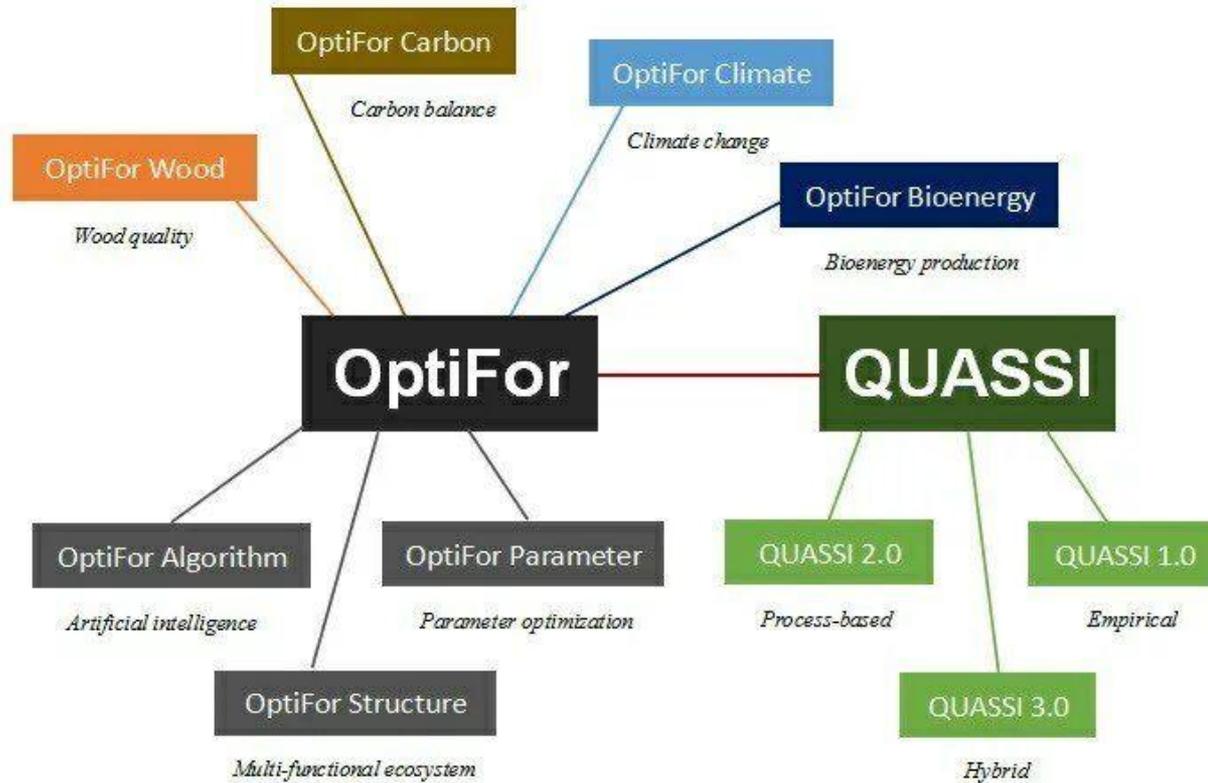
## 三阶段建模法 A three-stage modeling approach

### ***Mission Impossible*** 在不可能建模的情况下建模

- Stage 1. Whole-stand model 全林模型实测数据保证预测的准确性
  - with empirical observations
- Stage 2. Process-based model 过程机理模型补充模拟数据
  - ecological sensitivity analysis
- Stage 3. Hybrid model 混合建模系统可靠性优化校正
  - empirical + simulated data
  - reliability optimization



# The OptiFor Family





## 参考文献 References

- Cao, T., 2003. Optimal harvesting for even-aged Norway spruce using an individual-tree model. Finnish Forest Research Institute, Research Papers 897. 44 pp. ISBN 951-40-1886-9, ISSN 0358-4283.
- Cao, T., 2010. Silvicultural decisions based on simulation-optimization systems. Dissertationes Forestales 103. 48 + 53 pp. ISBN 978-951-651-296-2, ISSN 1795-7389.
- Cao, T., Valsta, L., Mäkelä, A., 2010. A comparison of carbon assessment methods for optimizing timber production and carbon sequestration in Scots pine stands. Forest Ecology and Management. 260, 1726-1734.
- 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. Vol. 51, No. 4. 78-88.
- 曹田健, 田相林, 孙帅超. 2016. 森林资源监测与评价: 方法与应用. 西北农林科技大学. 141 p.



请各位专家批评指正!

***Thank You!***

***www.optifor.cn***

***cao@nwafu.edu.cn***