

林窗结构与次生林更新



中国科学院沈阳应用生态研究所
清原森林生态实验站

朱教君(jiaojunzhu@iae.ac.cn)

2013年10月22日

汇告内容

- 其 研究背景简介
- 其 试验林窗设置
- 其 林窗结构量化
- 其 林窗更新过程
- 其 林窗研究展望

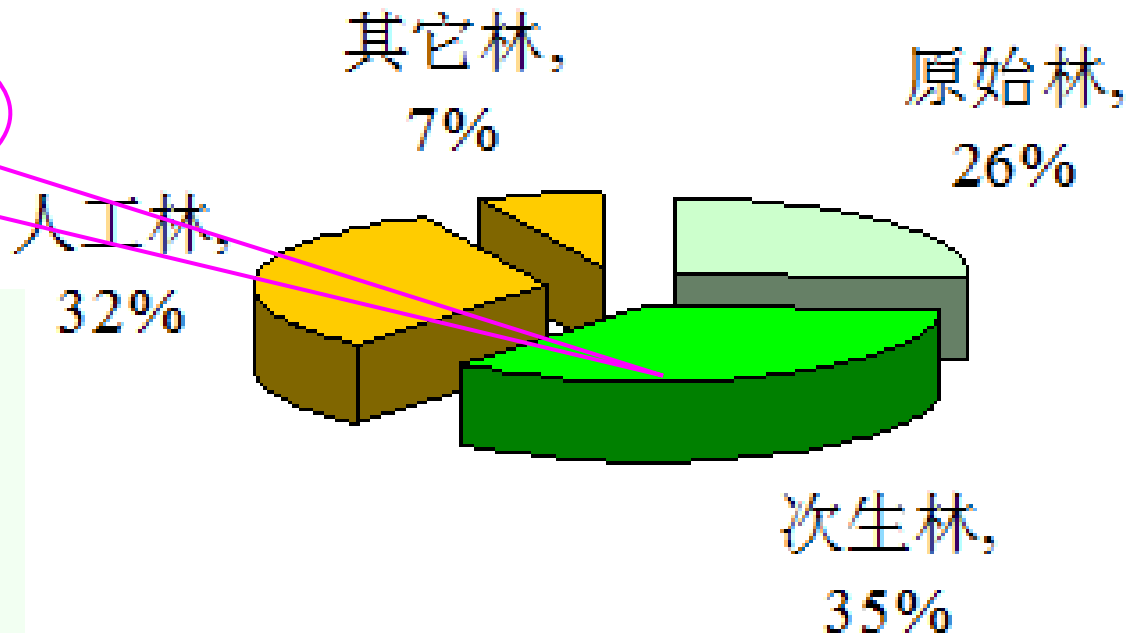
一、研究背景简介

中国森林现状

■ 次生林(Secondary forest)已成为世界森林资源主体(我国次生林占天然林57%)

2010年国家
林业报告

- 提供木材产品
- 分布于江河源头：
涵养水源
保护环境
生态屏障



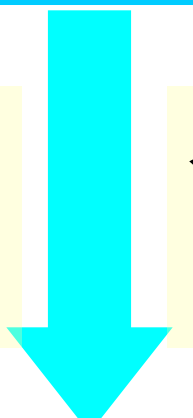
■ 维系生态安全、保障经济可持续发展具有无可替代作用

国家科技需求

- **次生林**：有别于原始林，由于强烈人为干扰，导致原始林结构和功能发生退化而形成的林型
- 人工用材林取代次生林(镶嵌于次生林)

次生林：结构不合理、
生产力低、建
群种更新差

人工林：树种/系统结
构单一、地力
衰退

- 
- 稳定性弱、生态服务功能下降或丧失

需求：恢复次生林、可持续经营人工林

次生林生态系统恢复目标与途径

次生林生态系统
恢复目标

- 促进次生林正向演替
- 恢复固有结构与功能

恢复 ↓ 途径

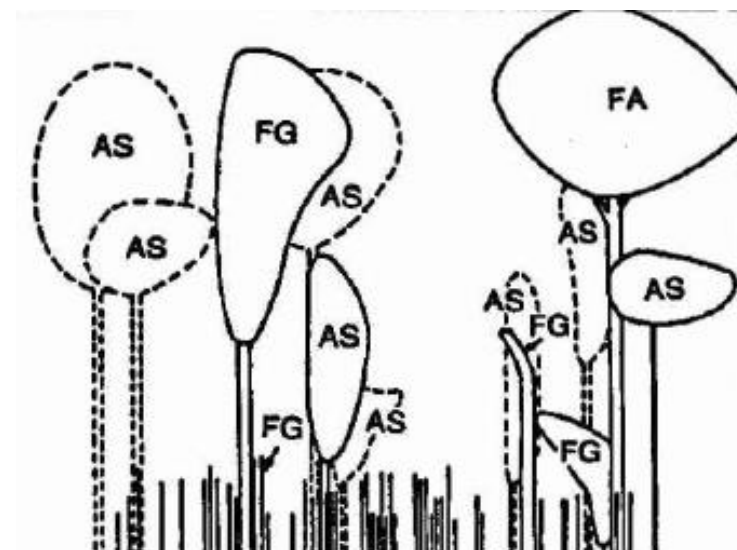
天然更新：林窗更新是核心

➤ 次生林林窗结构与更新过程研究
对实现次生林生态系统恢复目标
具有重要科学价值与现实意义

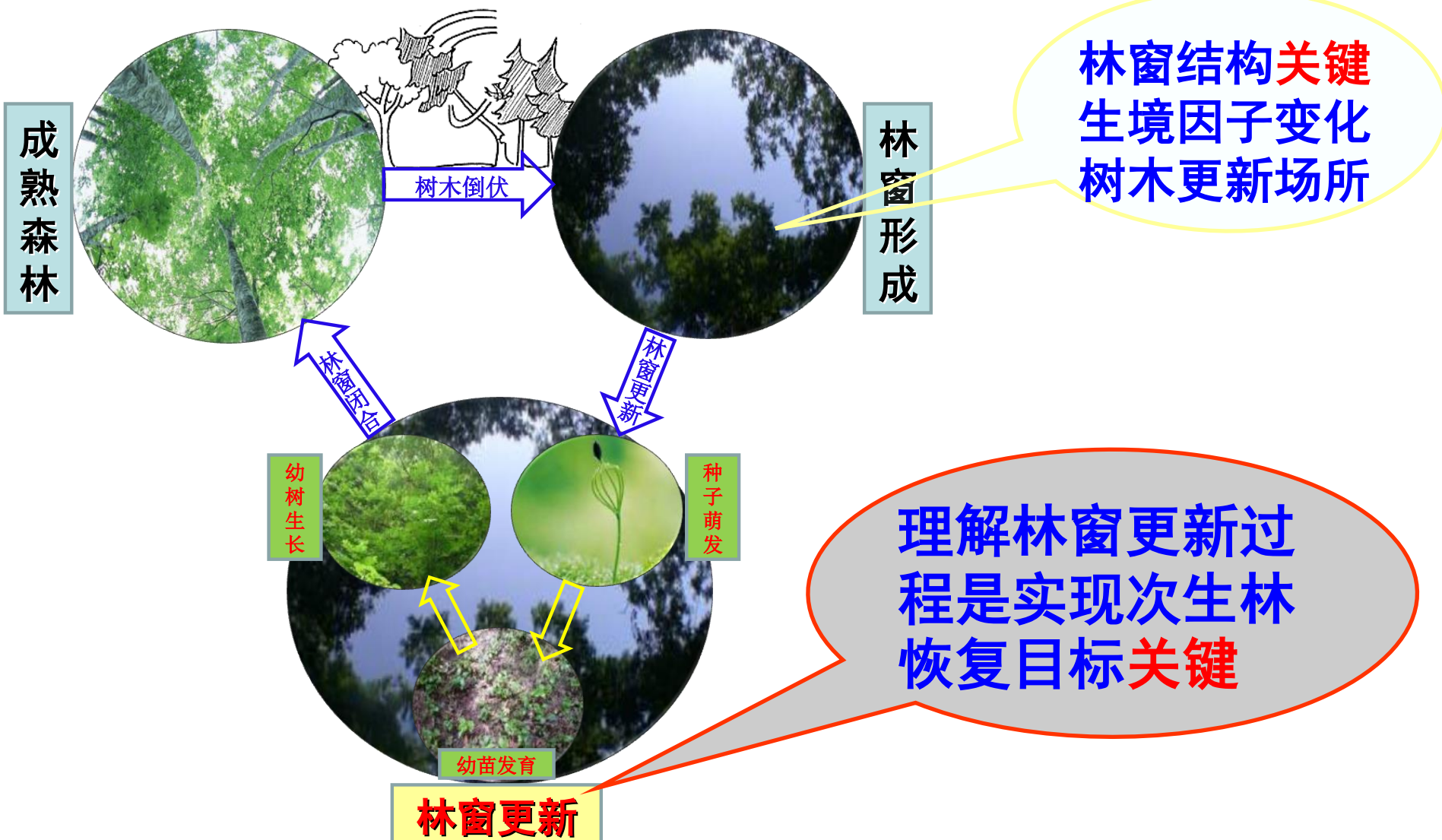
- Madsen & Hahn. *Can J For Res*, 2008 38: 1716-1729
- Schliemann & Bockheim, *For Ecol Manag*, 2011, 261: 1143-115
- Garbarino et al., *Anna For Sci*, 2012, 69: 617-625
- Millington et al., *Ecol Model*, 2013, 253: 17– 27

林窗概念

- **林窗**(Treefall gap): 老龄树死亡、优势树倒伏, 于林冠层形成空隙(Watt, 1947)
- **林窗意义**: 决定森林结构、物种组成及动态→森林演替的驱动力(Augusto et al., 2013)

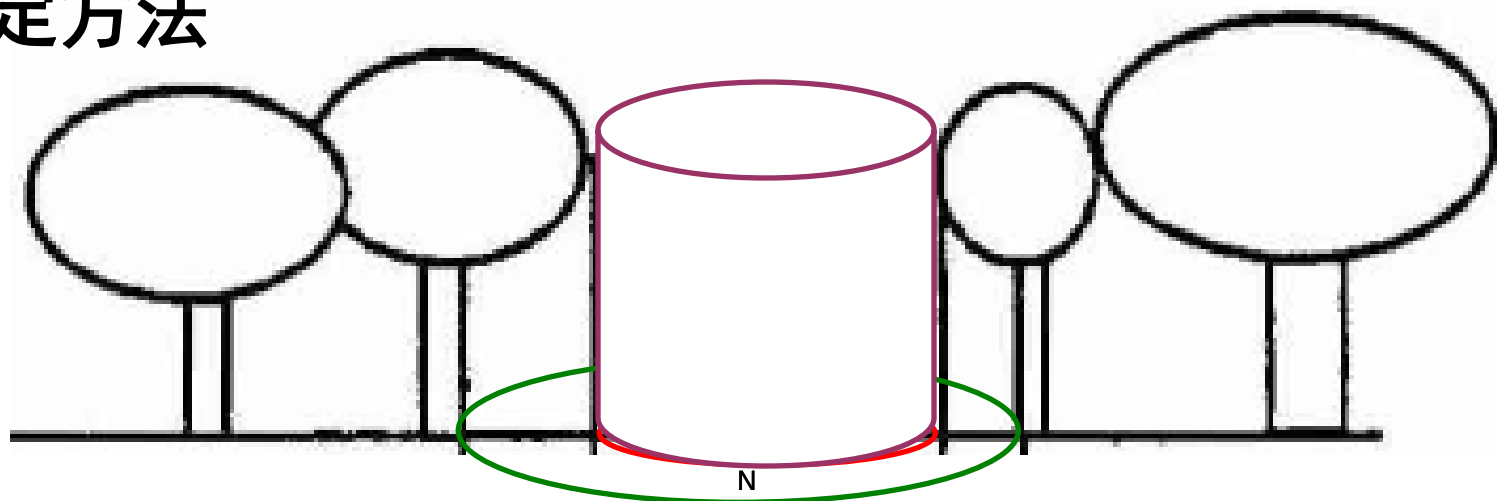


林窗与森林更新演替

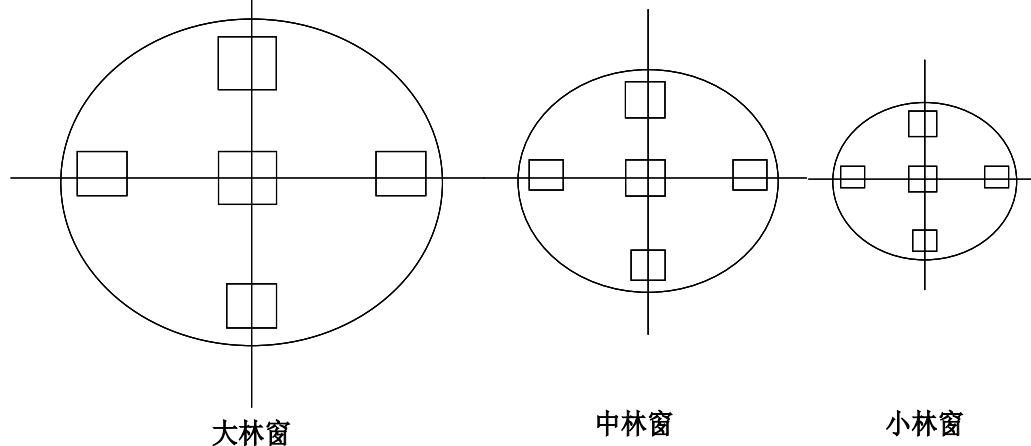


林窗结构特征与林窗更新存在问题

■ **林窗结构特征**：大小、形状、边缘木高度等，缺乏有效确定方法



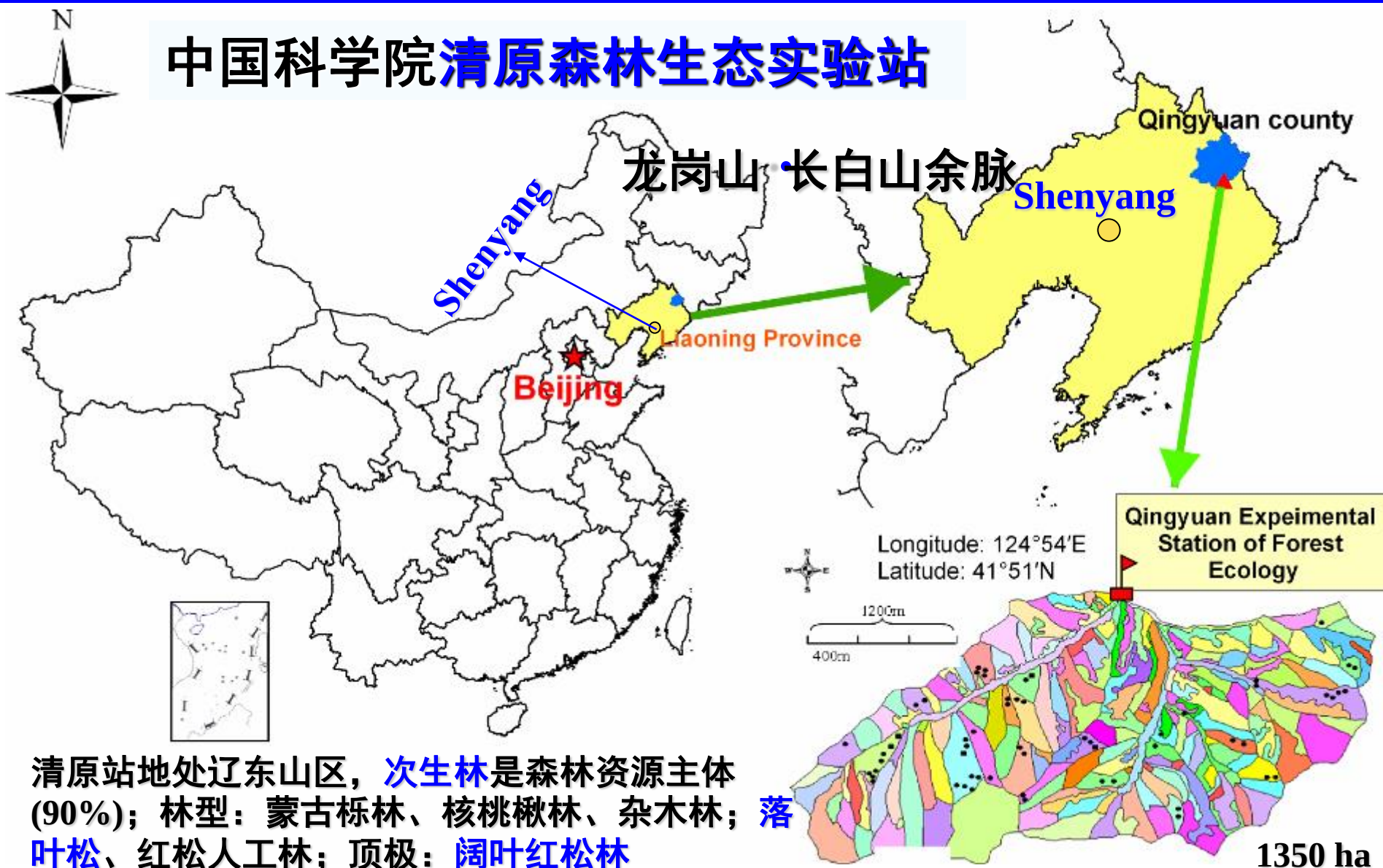
■ **林窗更新研究**：由于林窗结构不清，林窗环境和更新机制研究受到限制



二、试验林窗设置

研究区概况与试验设置

中国科学院清原森林生态实验站





➤ 2003年建站



➤ 2012年院管站



研究区概况与试验设置

- ★ Secondary forest (80%)
- ★ Mosaic patterns
- ★ Larch plantation
- ★ Korea pine plantation

- Rainfall: 810.9 mm
- Mean T: 4.7°C
- Max. T: 36.5°C
- Min. T: -37.6°C
- Frost-free P: 130 days
- Altitude: 520-1160 m

Secondary forest



Secondary Forest

Larch plantation



Korea pine plantation

Mixed Forests



Larch plantation



Korea pine plantation



研究区概况与试验设置

■ 2003雪风干扰形成林窗固定监测样地(43块)



压弯受害



干折受害



掘根受害



冠折受害



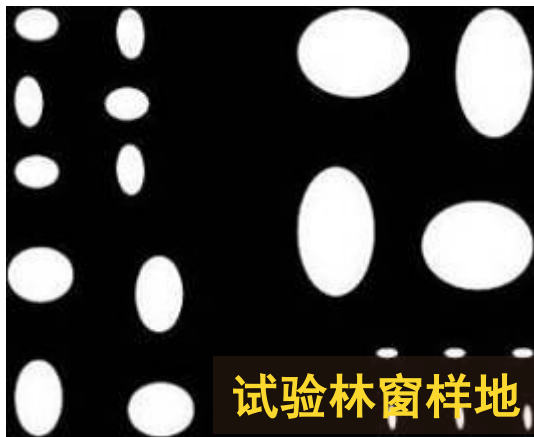
研究区概况与试验设置

◆ 2004年人工/天然林窗试验设置(12+18块)



人工林窗设置

- 时间：2004-05
- 方式：间伐
- 大小：0.5, 1.0, 1.5
- 数量：2大, 4中, 6小



天然林窗设置

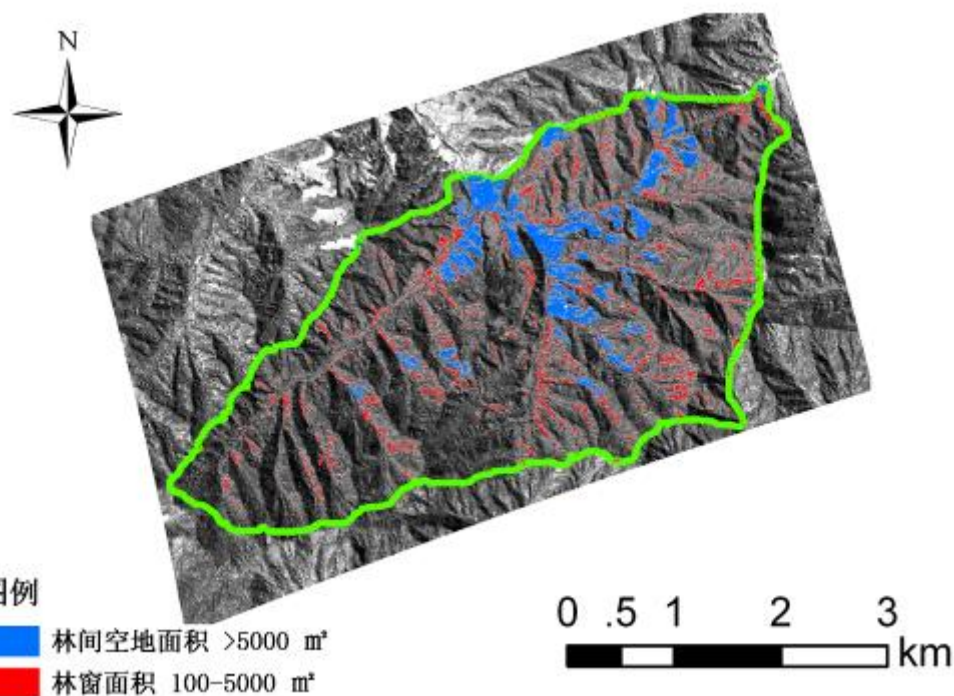
- 时间：2005
- 方式：自然干扰
- 大小：0.5, 1.0, 1.5
- 数量：4大, 5中, 9小

研究区概况与试验设置

■ 2004(连续监测)、2011人工林间伐形成林窗(2.7+10.5 ha)

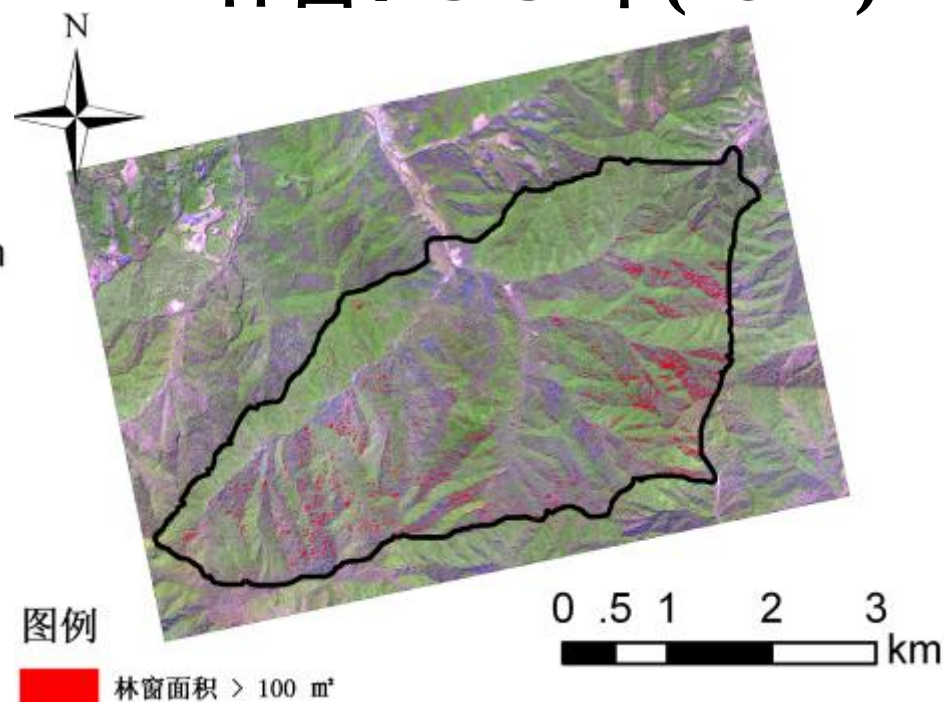


研究区概况与试验设置



1964年7月锁眼影像，
分辨率7.5m

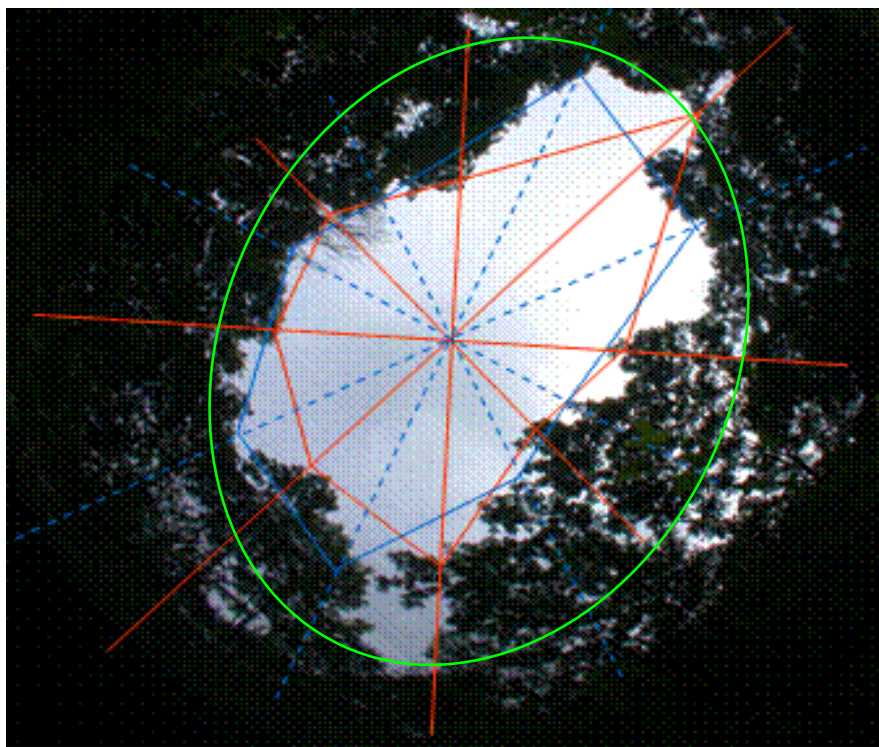
- 2008年7月高清影像，分辨率0.5m
- 林窗：5754个($>8\text{m}^2$)



三、林窗结构量化

1、林窗面积计算新方法

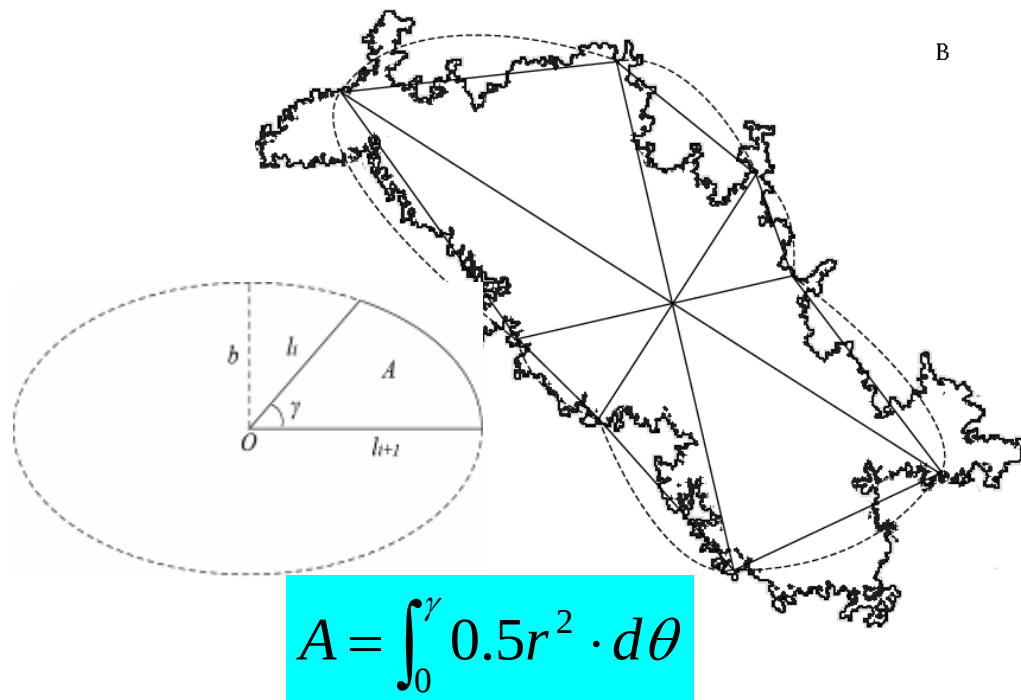
传统林窗面积计算方法——八、十六边法等（16边法最精确）：精度与林窗划分边数和野外测度工作量成正比



- 问题：目前所有计算方法都低估了林窗的实际面积；传统八边形法林窗面积估算受起始测量位置影响——不同研究间林窗大小不具可比性
- 新计算林窗面积方法——椭圆扇形法(elliptical-sector method)

1、林窗面积计算新方法

配对	2种方法林窗面积均差值 (均值±方差) (m ²)	显著性 (P, 双尾)
$A_{\text{ESM}} - A_{\text{EOM}_m}$	14.34 ± 3.21	0.0002
$A_{\text{ESM}} - A_{\text{EQM}_m}$	55.35 ± 13.33	0.0005
$A_{\text{EOM}_m} - A_{\text{EQM}_m}$	41.01 ± 10.2	0.0007
$A_{\text{EOM}_1} - A_{\text{EOM}_2}$	17.66 ± 5.5	0.0044
$A_{16\text{EES}} - A_{\text{ESM}}$	14.74 ± 3.44	0.0004
$A_{8\text{EES}_1} - A_{\text{EOM}_1}$	22.12 ± 8.13	0.0132
$A_{8\text{EES}_2} - A_{\text{EOM}_2}$	42.42 ± 10.26	0.0005
$A_{16\text{EES}} - A_{8\text{EES}_1}$	-1.87 ± 5.05	0.7154
$A_{16\text{EES}} - A_{8\text{EES}_2}$	-4.5 ± 4.68	0.3474
$A_{8\text{EES}_1} - A_{8\text{EES}_2}$	-2.63 ± 9.22	0.7782



利用野外8边形法得到与野外16边形法相同效果——野外工作减半，达到“事半功倍”的效果

纠正(Watt, 1948)八边形法错误、获得更精确结果

2、双半球影像确定林窗立体结构

- 问题：目前野外测量林窗复杂、费时
- 对策：提出采用半球影像快速、准确测量林窗特征（林窗面积、形状与边缘木高度）
- 单张照片——林窗面积、形状
- 双张照片——林窗面积、形状与边缘木高度



2、双半球影像确定林窗立体结构

◆林窗立体结构——大小、形状与边缘木高度



工具：鱼眼镜头相机、可伸缩和调节水平三角架

测量：在林窗内某一固定位置距地面不同2高度处各拍摄1张半球面影像，**2次拍摄高差**是唯一需要记录的参数

原理：基于鱼眼镜头广角特性及其特定的投影方式(**极坐标**)

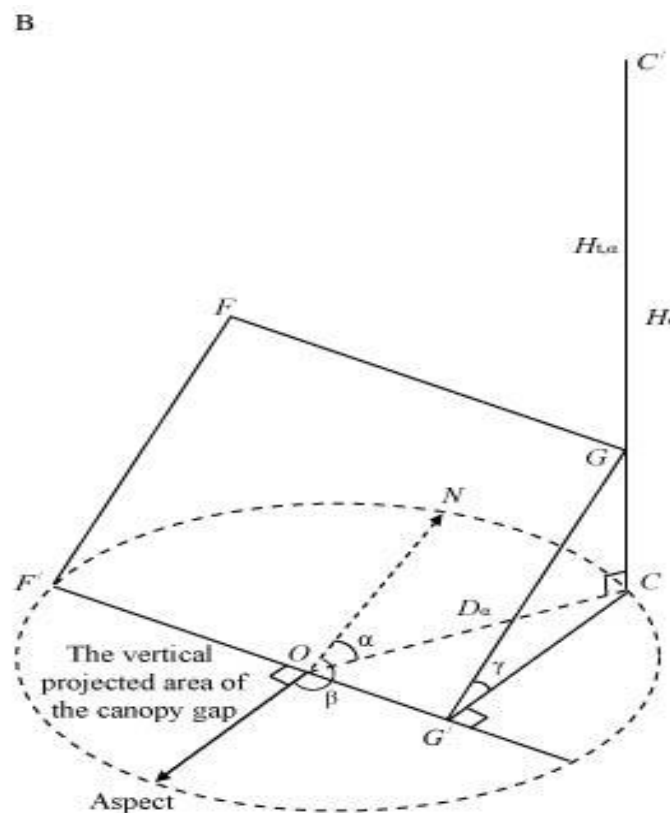


2、双半球影像确定林窗立体结构

✓双照片法： 原理

$$D_{\alpha} = d \cdot \tan(\theta_{h,\alpha}) \cdot \tan(\theta_{l,\alpha}) / (\tan(\theta_{h,\alpha}) - \tan(\theta_{l,\alpha}))$$

$$H_{\alpha} = d \cdot \tan(\theta_{h,\alpha}) / (\tan(\theta_{h,\alpha}) - \tan(\theta_{l,\alpha})) + h$$



2、双半球影像确定林窗立体结构

➤ 林窗面积

$$A = 0.5 \sum_{i=1}^n D_{\alpha(i+1)} \cdot D_{\alpha(i)} \cdot \sin(\alpha(i+1) - \alpha(i))$$

➤ 林窗周长

$$P = \sum_{i=1}^n \sqrt{(D_{\alpha(i+1)} - D_{\alpha(i)} \cdot \cos(\alpha(i+1) - \alpha(i)))^2 + (D_{\alpha(i)} \cdot \sin(\alpha(i+1) - \alpha(i)))^2}$$

➤ 林窗形状指数

$$P/A \quad \& \quad SI = P / 2\sqrt{\pi A}$$

➤ 各方位边缘木高

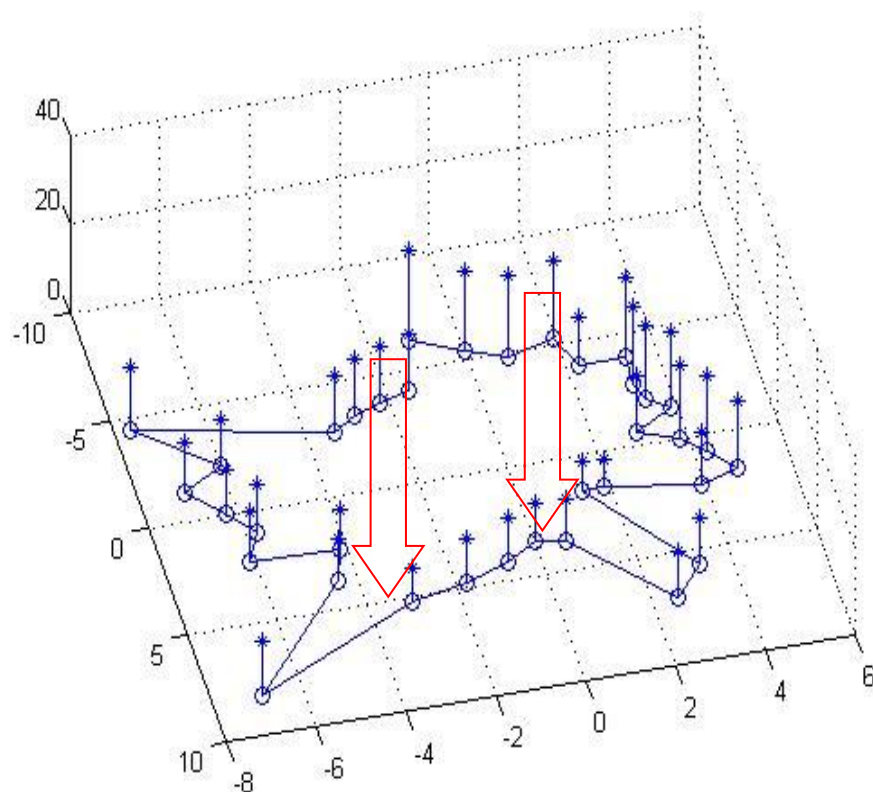
$$H_{t,\alpha} = H_{\alpha} + D_{\alpha} \cdot \cos(\alpha - \beta) \cdot \tan(\gamma)$$

式中， α , β , γ 分别为方位角、坡向、坡度

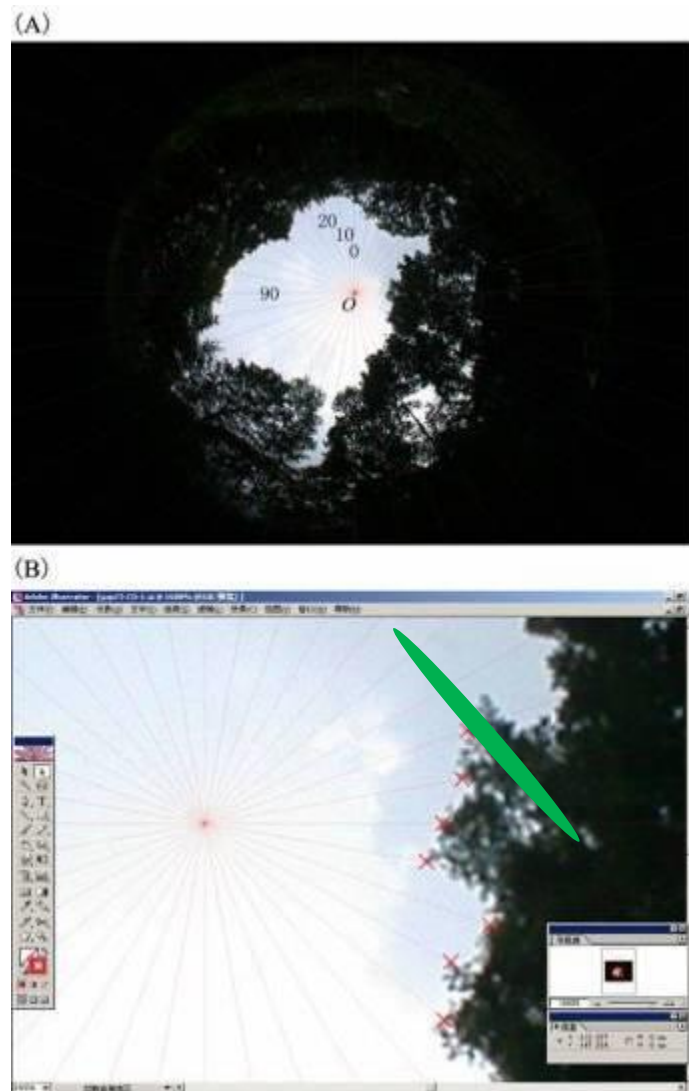


2、双半球影像确定林窗立体结构

相片拍摄、处理与计算



林窗大小、形状与边缘木高



2、双半球影像确定林窗立体结构

➤ 林窗大小检验

说明:

A_{EES} , A_{ESM} 分别代表等角椭圆扇形法, 16边形法测量的林窗面积;

A_{c10} , A_{c20} , A_{c30} 为双半球面影像法的3个角度间隔处理;

$A_{d0.3}$, $A_{d0.5}$, $A_{d0.8}$ 为双半球面影像法的3个高差处理。

* $p < 0.01$, ** $p < 0.001$.

表. 不同方法测得的林窗面积的统计分析

方法配对	相关系数	Wilcoxon配对 方差检验 (Z值)
A_{c10} vs. A_{16EES}	0.990**	-0.078
A_{c20} vs. A_{16EES}	0.985**	-0.706
A_{c30} vs. A_{16EES}	0.994**	-1.177
A_{c10} vs. A_{ESM}	0.991**	-2.746*
A_{c20} vs. A_{ESM}	0.986**	-1.412
A_{c30} vs. A_{ESM}	0.995**	-1.490
A_{16EES} vs. A_{ESM}	1.000**	-3.059*
$A_{d0.3}$ vs. A_{8EES}	0.983**	-0.785
$A_{d0.5}$ vs. A_{8EES}	0.934**	-0.282
$A_{d0.8}$ vs. A_{8EES}	0.867**	-1.036

检验结果: 16边形法确定林窗大小无显著差异 ($P < 0.05$)

2、双半球影像确定林窗立体结构

➤ 林窗边缘木高度检验

表.双半球面影像法测得的边缘木平均高与实测值的比较

说明:

H_{c10} , H_{c20} , H_{c30} ,
 $H_{d0.3}$, $H_{d0.5}$, $H_{d0.8}$, 分
 别代表双半球面影像法
 的3个角度间隔处理, 3
 个高差处理;

H_a , H_n 为实测的人工
 林窗和天然林窗的边缘
 木平均高。

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$.

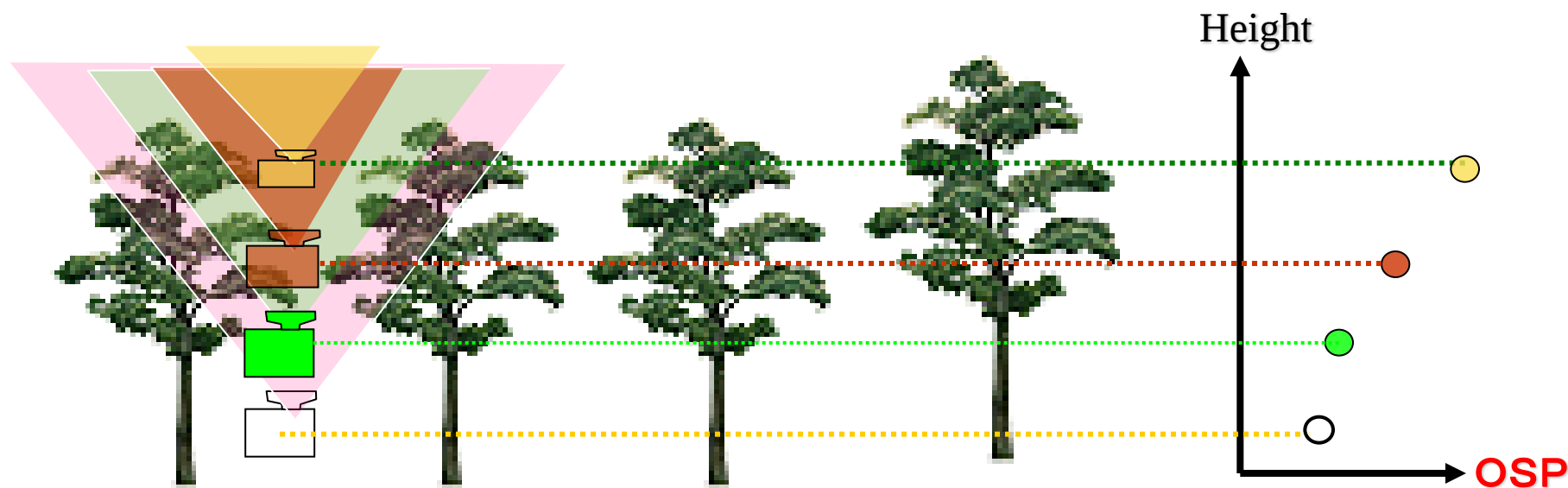
方法配对	相关系数	配对 t 检验	
		t	p
H_{c10} vs. H_a	0.615*	0.874	0.401
H_{c20} vs. H_a	0.635*	0.794	0.444
H_{c30} vs. H_a	0.556	0.978	0.349
$H_{d0.3}$ vs. H_n	0.637*	1.763	0.101
$H_{d0.5}$ vs. H_n	0.832**	-0.656	0.523
$H_{d0.8}$ vs. H_n	0.856**	0.758	0.462

检验结果: 与实地测定的树木高度无显著差异 ($P < 0.05$)

3、林窗闭合后林分垂直结构

➤ 林分垂直结构表达与量化

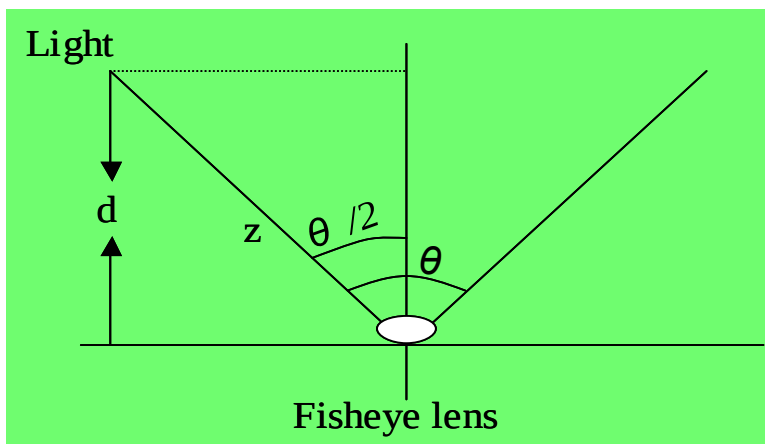
提出林分透光分层疏透度(OSP)概念



林分透光分层疏透度（定义）：林内一定高度以上，单位空间内未被林分要素所遮挡空间量的比率

3、林窗闭合后林分垂直结构

OSP在林内的分布规律



$$\ln\left(\frac{P_z}{P_0}\right) = -vz$$

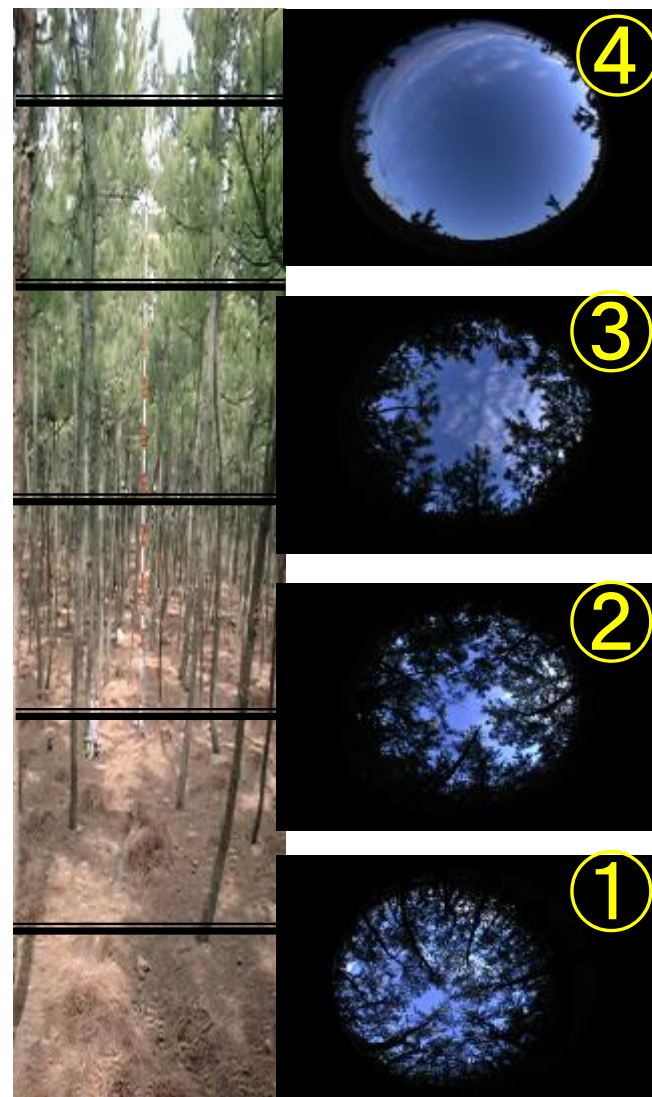
Beer-
Lambert's
law

$$P_{z\theta(n)} = P_0 \exp\left[-\left(\frac{v_1 d_1}{\cos(\frac{\theta}{2})} + \frac{v_2 d_2}{\cos(\frac{\theta}{2})} + \dots + \frac{v_n d_n}{\cos(\frac{\theta}{2})}\right)\right]$$

$$v_n = -\frac{\ln[P_{zn}(z)] - \ln[P_{zn-1}(z_{n-1})]}{z} = \frac{\ln[P_{zn-1}(z_{n-1})] - \ln[P_{zn}(z)]}{z}$$

$P_{zn}(z)$: OSP分布, v_n : 消光系数, z : 高度

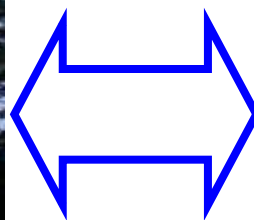
消光系数 v_n 发生突然变化



四、林窗更新过程

林窗更新过程

形成**林窗**/结构变化/环境因子



成熟森林



种子传播



种子活性
保存/萌发



幼苗建植



林分郁闭、林窗消
失、垂直结构形成
.....

发育



1、林窗光环境变化

林窗光指数GLI和光照时长

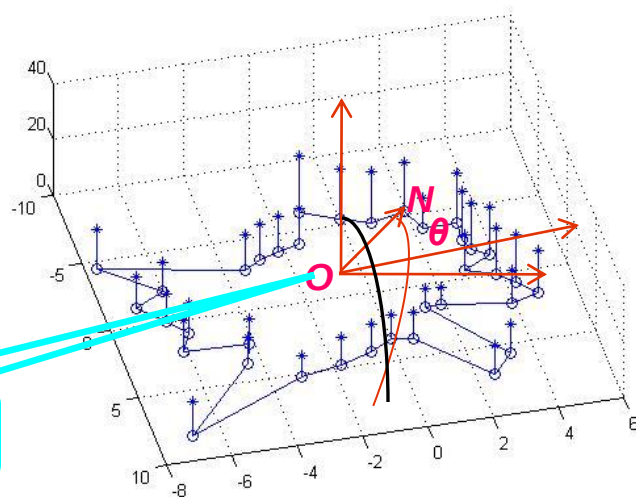
- GLI (gap light index): Canham (1988) 在Ecology发表, 目前使用最广泛的估测林窗光环境方法。
- 问题: GLI需要林窗坐标(gap coordinate), 林窗任一点坐标的确定要通过一张半球面影像获取。
- **改进:** 依据林窗立体结构、坡度和坡向计算林窗坐标

$$GLI = (T_{diffuse} \cdot P_{diffuse} + T_{beam} \cdot P_{beam}) \times 100$$

$$T_{diffuse} = \sum_{i=a}^b \cos(A_i) / \sum_{i=1}^N \cos(A_i)$$

$$T_{beam} = \sum_{t=a}^b \cos(Z_t) / \sum_{t=1}^N \cos(Z_t)$$

林窗坐标



1、林窗光环境变化

计算公式一林窗坐标、光照时长

林窗立体结构

$$D = f(\theta), \quad H = g(\theta), \quad (0 \leq \theta < 360)$$

射线PE极坐标方程

$$D_{PE} = \frac{d(\theta_P) \cdot (\cos \theta_P - \tan(\pi/2 - \alpha) \cdot \sin \theta_P)}{\cos \theta - \tan(\pi/2 - \alpha) \cdot \sin \theta}, \quad (\alpha \neq 0)$$

线段PE长度

$$PE = \sqrt{(d(\theta_P) \cdot \sin \theta_P - f(\theta_E) \cdot \sin \theta_E)^2 + (d(\theta_P) \cdot \cos \theta_P - f(\theta_E) \cdot \cos \theta_E)^2}$$

P点沿 α 方位到林冠的仰角

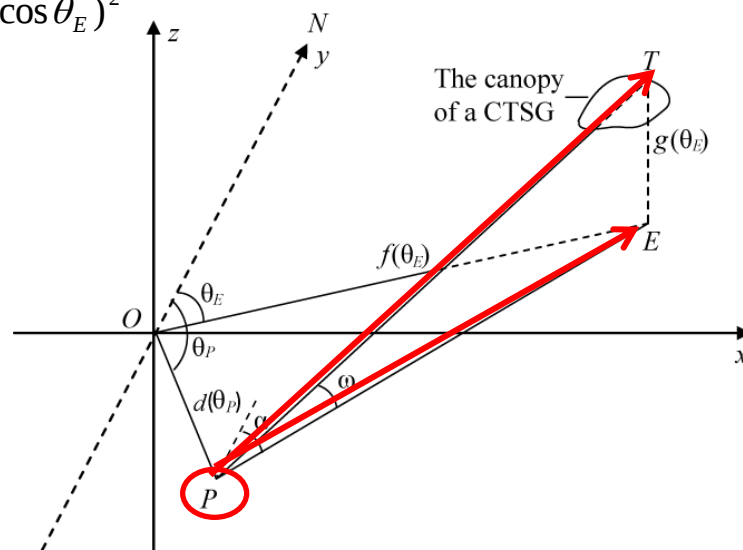
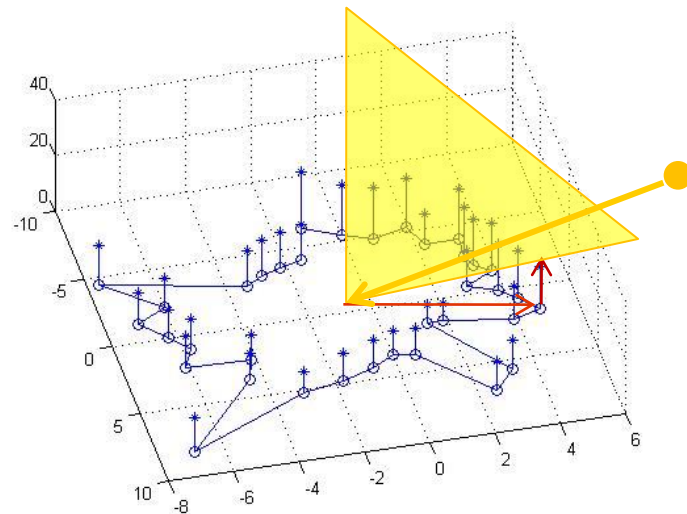
$$\omega = \arctan\left(\frac{g(\theta_E) - h(\theta_P)}{PE}\right), \quad (PE \neq 0)$$

P点沿 α 方位的天顶角

$$Z = \pi/2 - \omega$$

P点光照时长 (PSD)

$$PSD = S \cdot \sum_{t=0}^D I_t$$



1、林窗光环境变化

- 林窗光指数(GLI)分布格局:
- 光照最强值位于林窗内中心偏北处
- 同纬度林窗内光环境受林窗立体结构、坡度和坡向影响

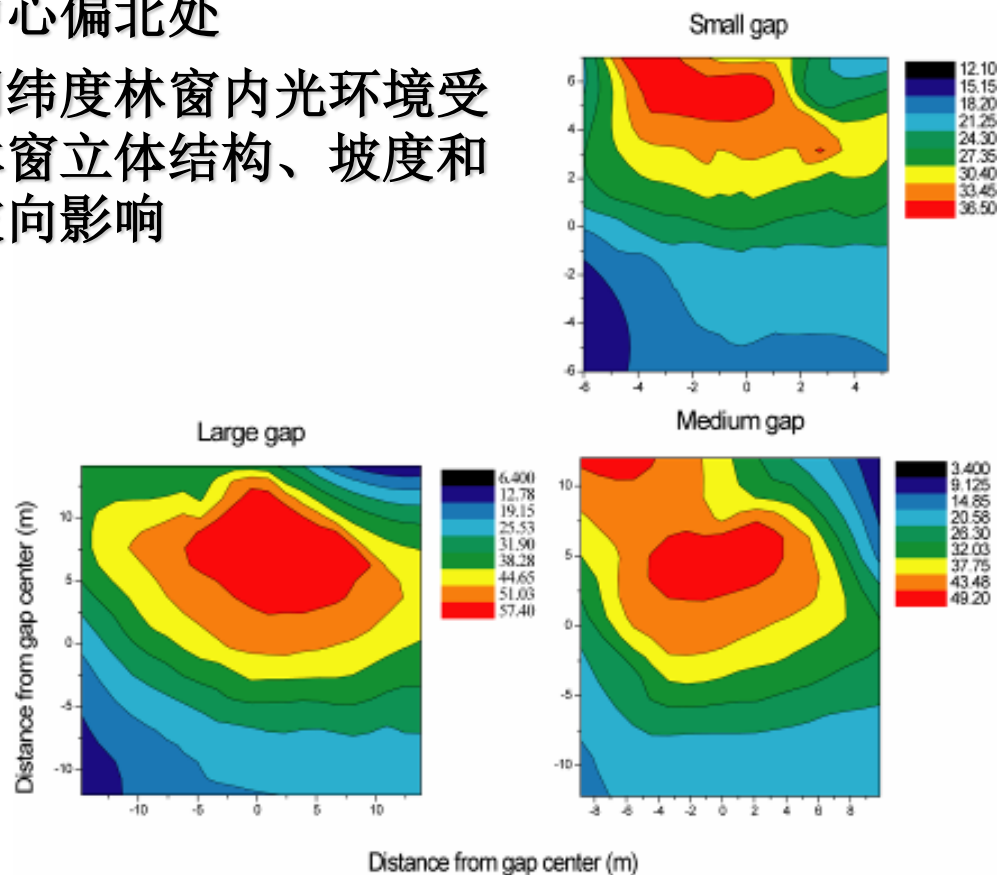
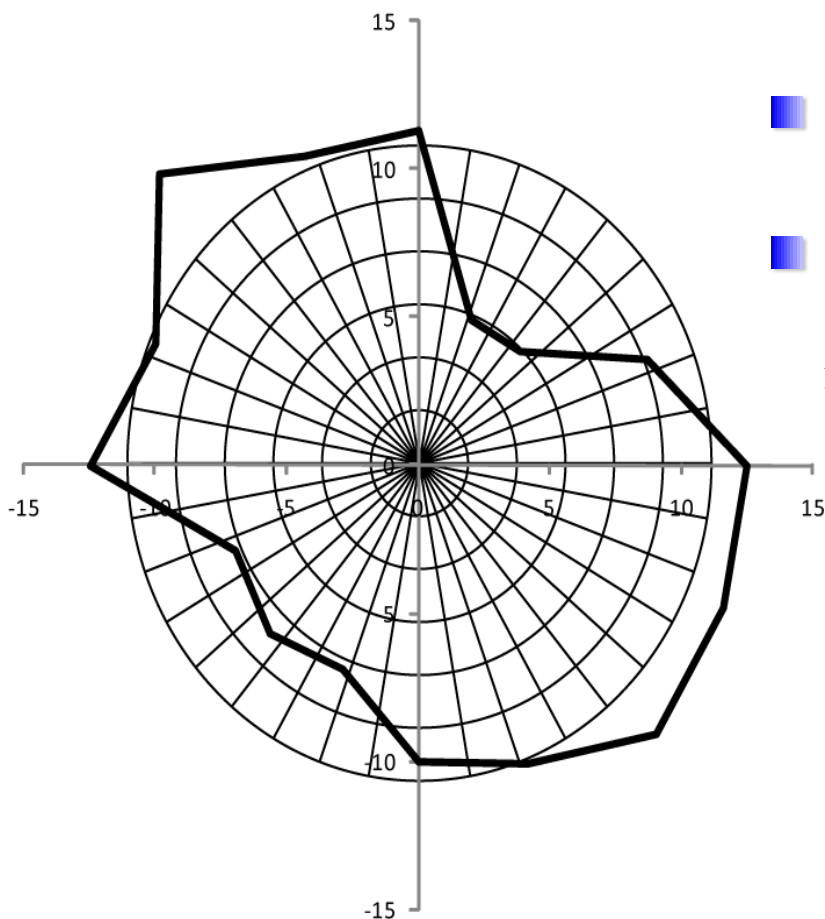


Fig. GLI of canopy gaps

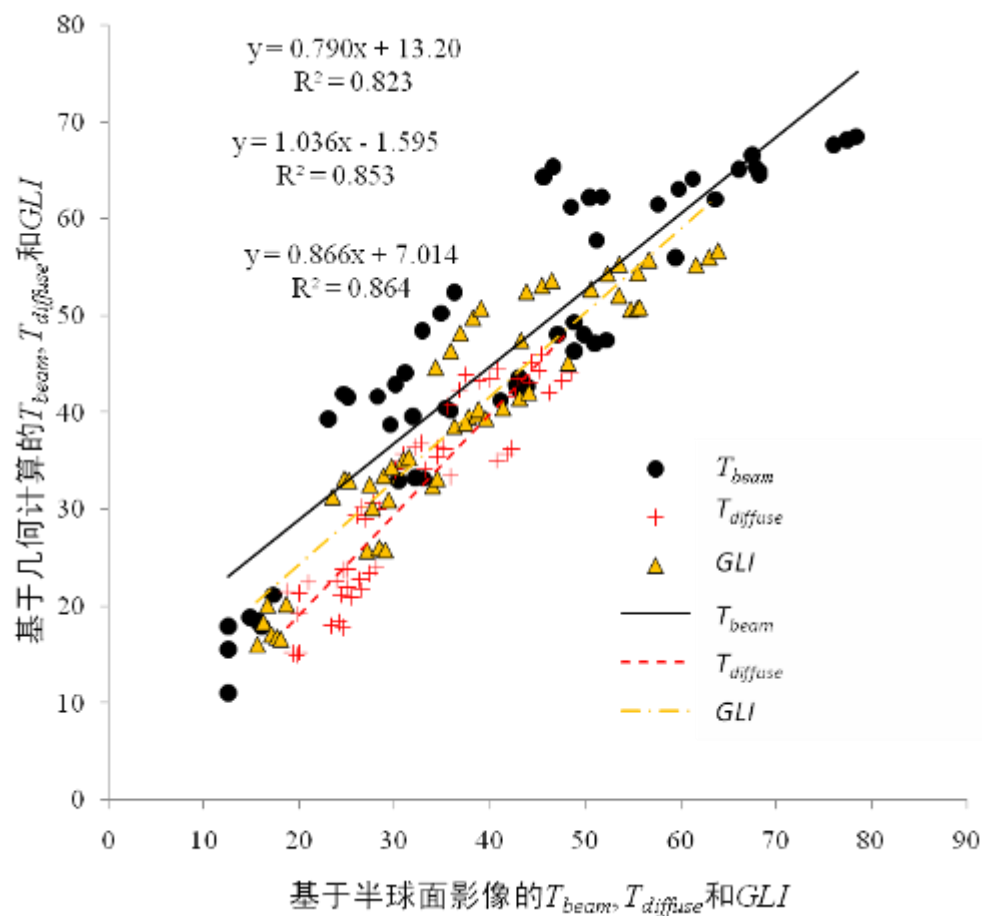
1、林窗光环境变化

➤ 林窗光指数(GLI)的检验结果

两种方法测得的GLI
存在显著正相关性
除中林窗外，二者
不存在显著差异

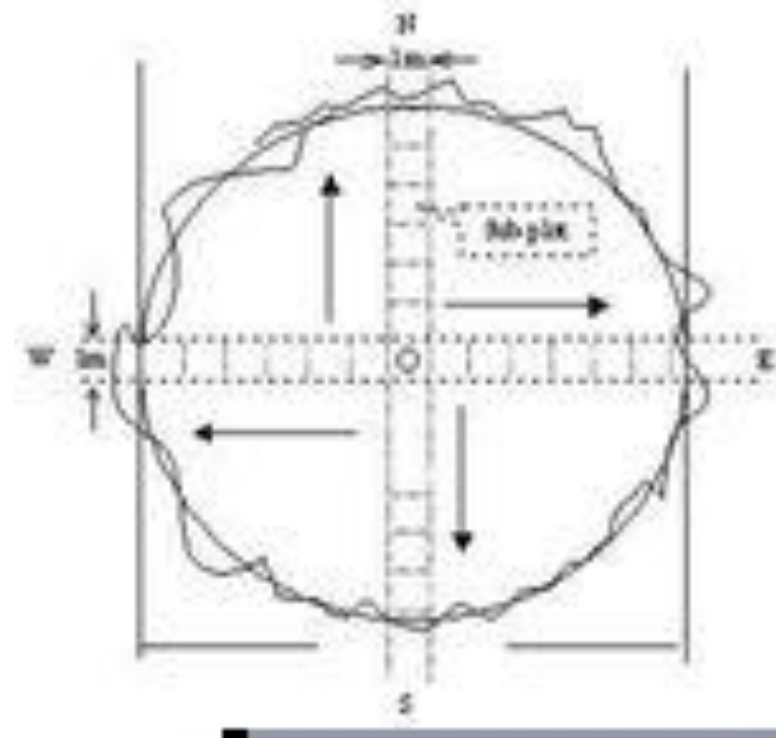
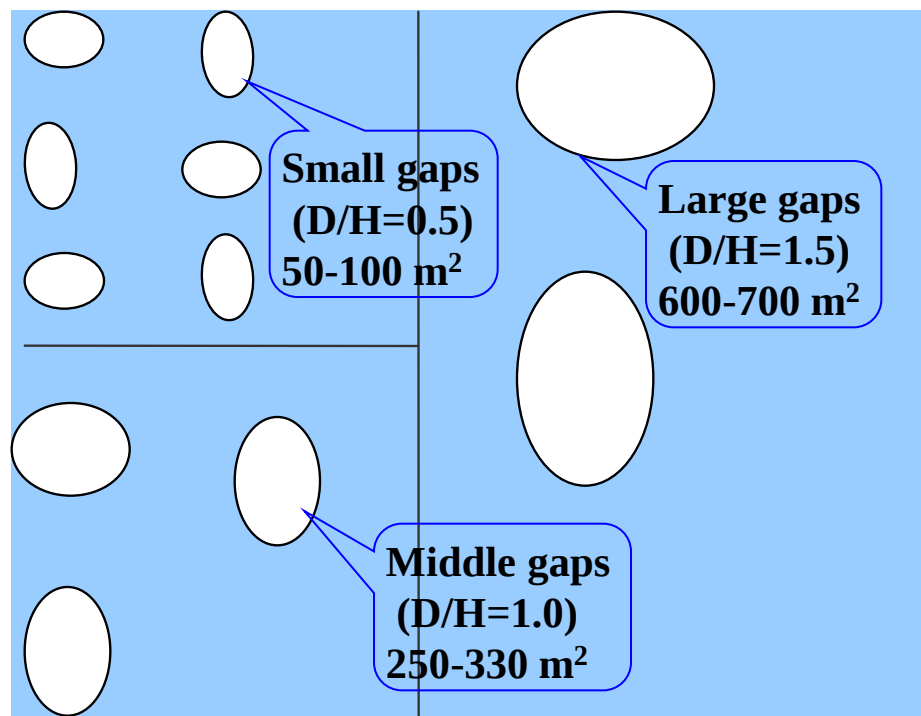
结论：

改进的**GLI**具有较
好的精度



2、林窗种子库变化动态

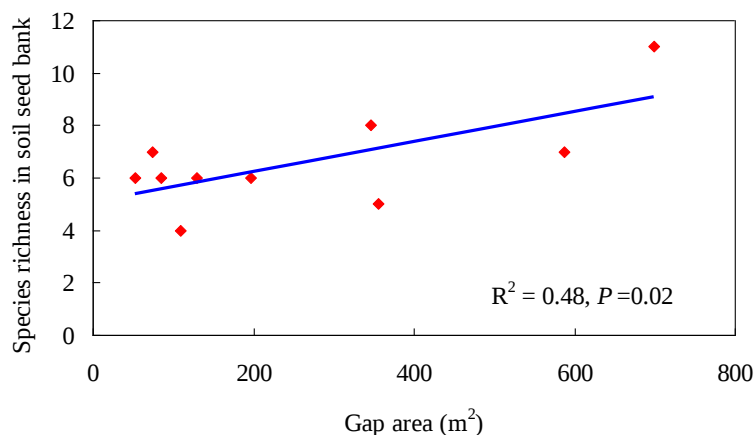
◆ 林窗结构与早期更新的关系——试验设置



Two large gaps of the size >500 m², three medium gaps of the size 500–150 m², and five small gaps of the size <150 m².

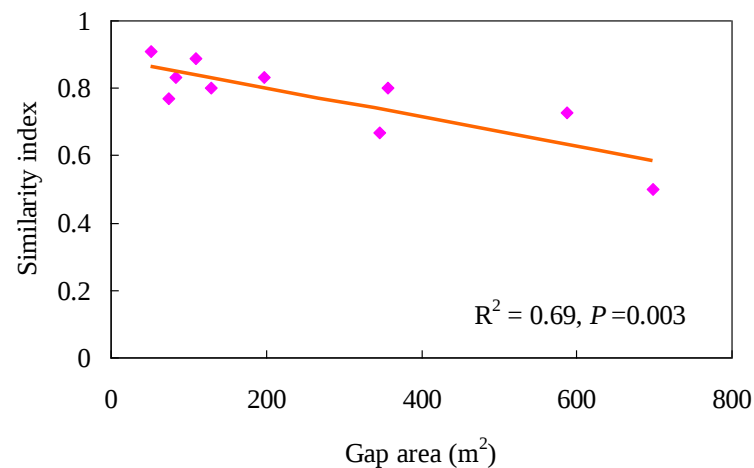
2、林窗种子库变化动态

◆ 林窗形成的土壤种子库分布规律



种子库物种丰富度与林窗面积正相关 ($P < 0.05$)

三种不同大小林窗

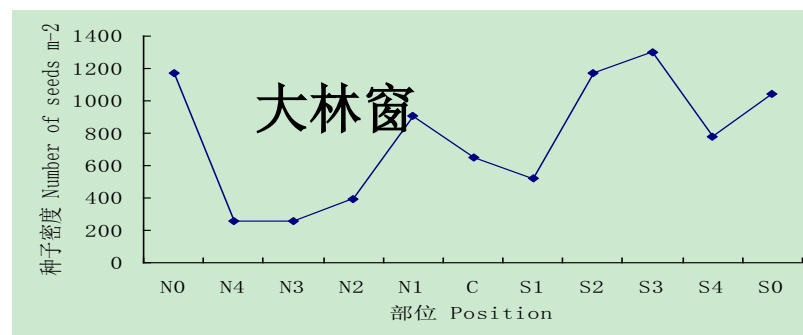
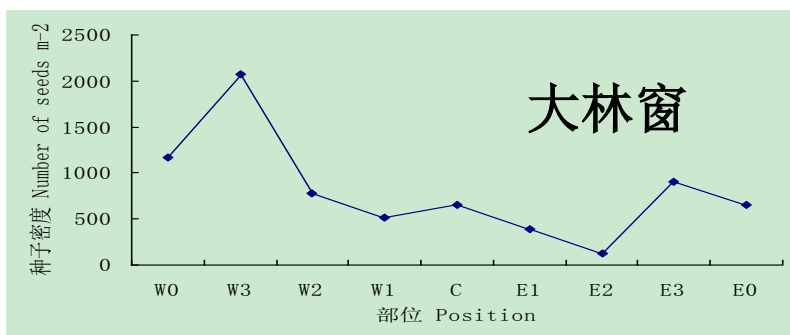


林窗与林下种子库物种组成相似性随林窗面积增加而减小 ($P < 0.05$)



2、林窗种子库变化动态

◆ 不同大小林窗土壤种子库分布规律

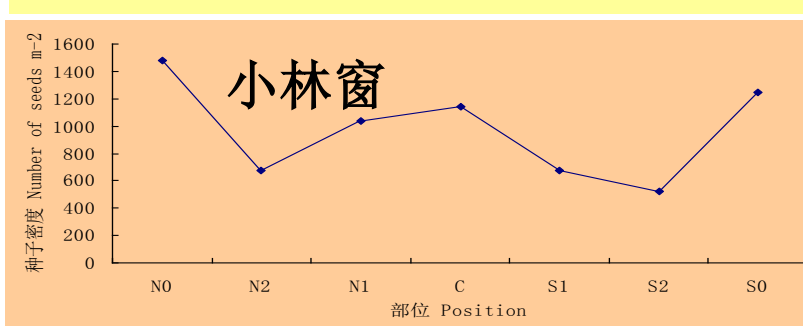
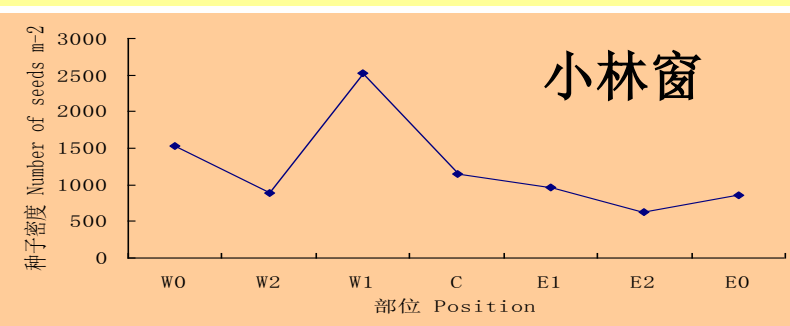
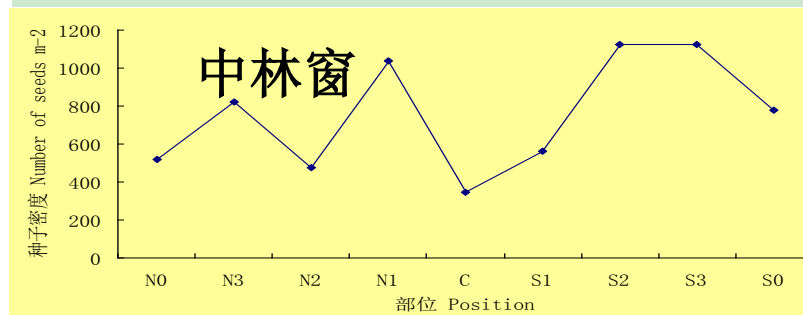
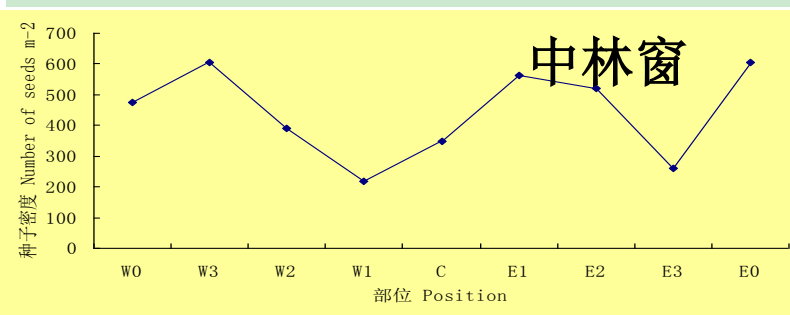


种子密度的最大值并不出现在林窗中央：

- 大林窗的西-南部

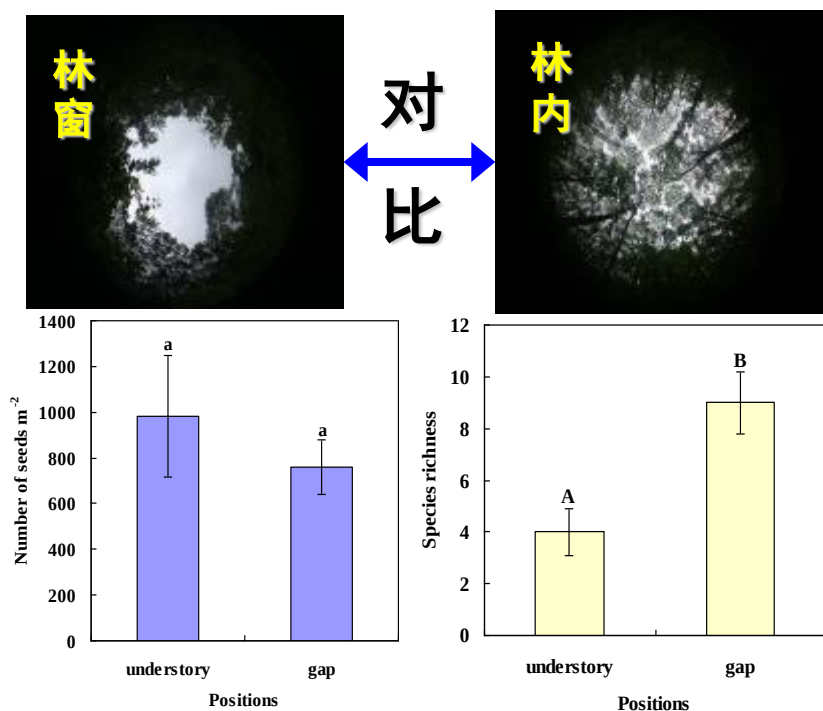
- 中林窗的东-南部

- 小林窗的西-北部



2、林窗种子库变化动态

◆ 林窗形成的土壤种子库分布规律

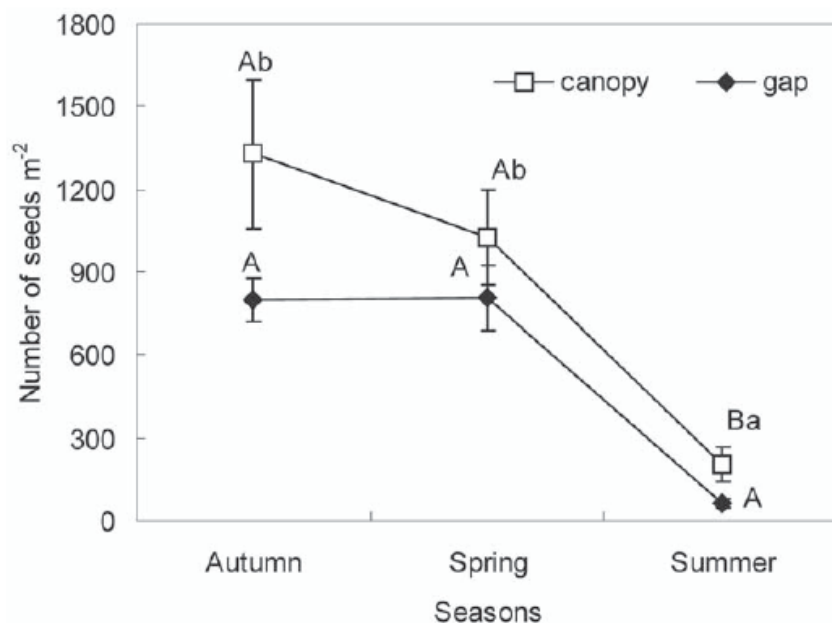


- 林窗形成有利于更多品种的种子进入土壤——林窗内的种子种类是林内的**1.25**倍，提升种子入侵机会
- 林窗形成未改变种子库数量(密度)

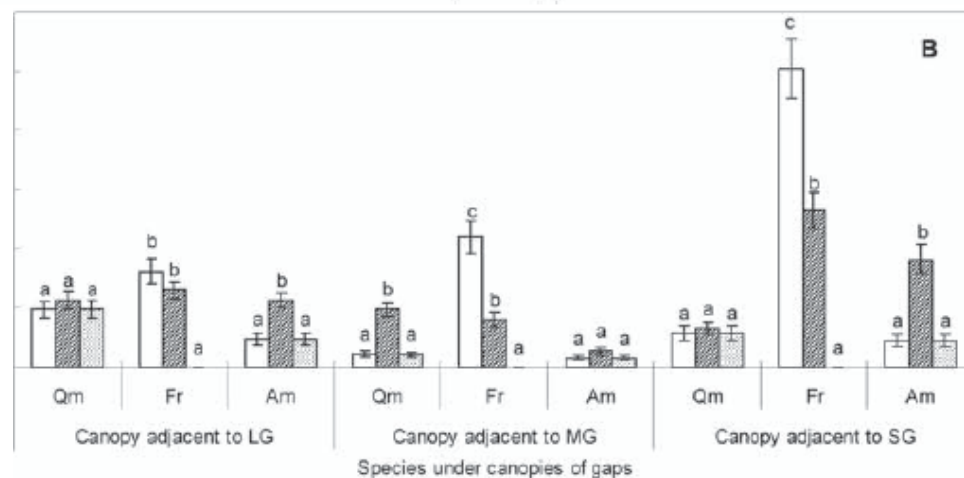
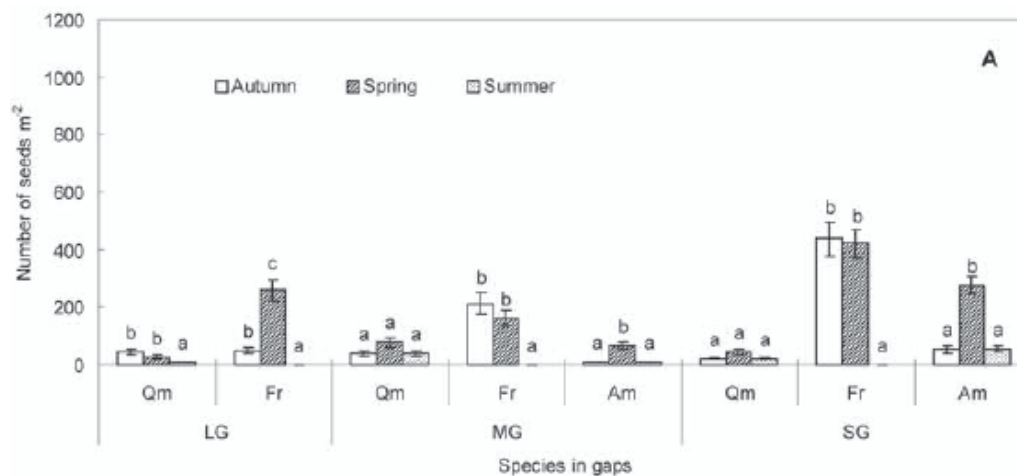
适合种子入侵和种子库发展为地上植被的次生林最佳林窗面积： $150\text{m}^2 < A < 500\text{m}^2$

3、林窗幼苗库——林窗依赖种

◆ 林窗幼苗出现动态与规律

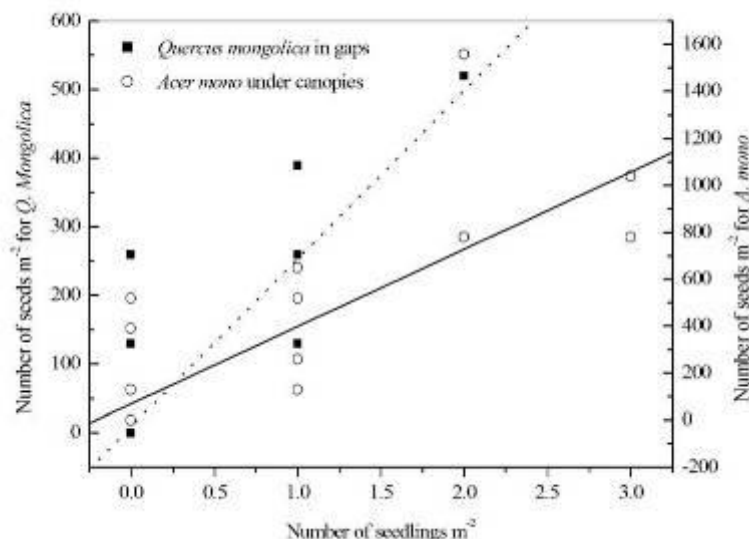


Seasonal dynamics of total soil seed banks in gaps and under canopies



3、林窗幼苗库——林窗依赖种

◆ 林窗影响幼苗出现的机制



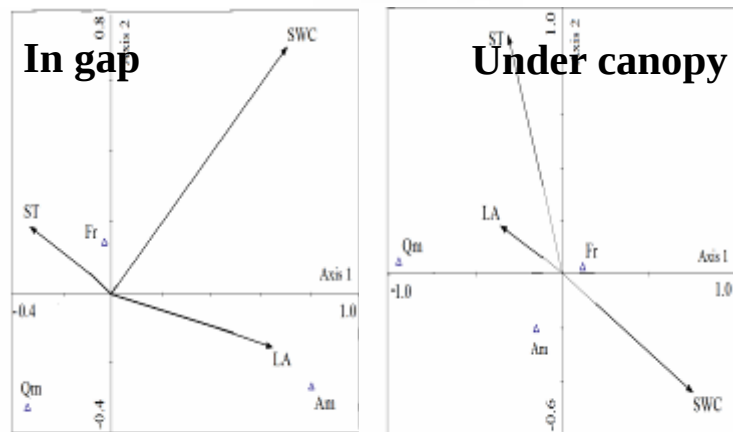
- 林窗形成促进蒙古栎、色木槭“林窗依赖种”幼苗出现
- 作用机制：改变环境因子

限制因子变化

林内：土壤温度



林窗：土壤含水量



- 种子库对林窗幼苗出现的贡献率 < 10%，90% → ?

4、落叶松间伐形成林窗对更新影响

■ 间伐产生林窗对落叶松人工林更新影响

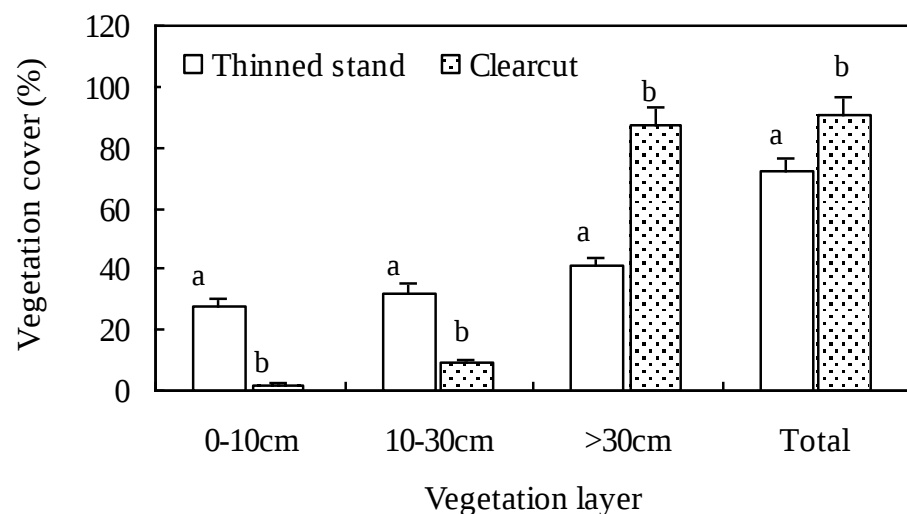


Thinning in larch plantations: 1994, 2004

NT: Non-treated, retaining both litter cover and understory vegetation cover;
 VR: Competing vegetation removed, removing understory vegetation cover only;
 LR: Litter removed, removing litter cover to expose the soil;
 BS: Bare soil, removing both litter cover and understory vegetation cover to expose the soil;
 BSE: Bare soil plus animal enclosure, the same as BS, but with predator exclusion screens (20 cm tall × 100 cm wide × 100 cm long, 0.5 cm × 0.5 cm wire mesh, covered on top, and set 5 cm into the ground) to prevent birds and rodents from entering. Two months after sowing, the screens were removed.

4、落叶松间伐形成林窗对更新影响

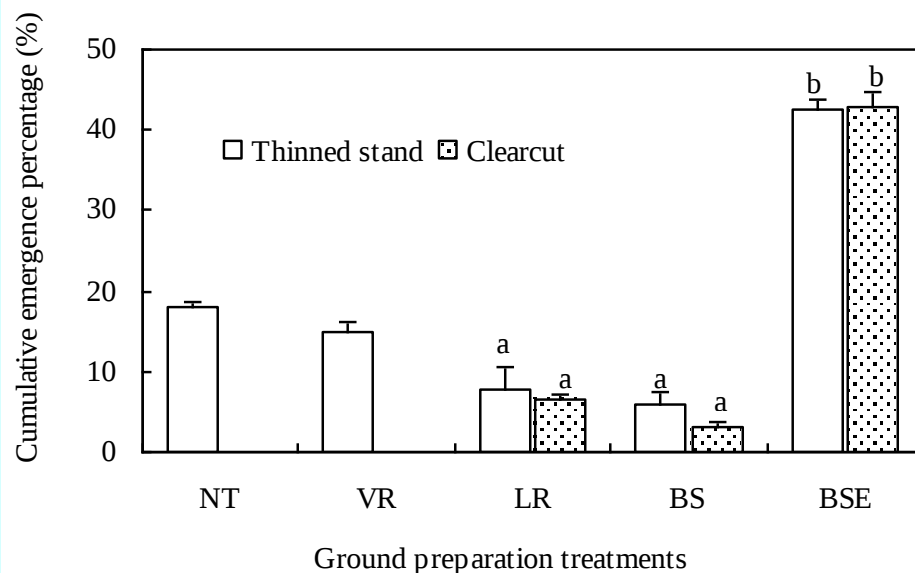
◆ 落叶松更新——种子雨、种子萌发及幼苗出现



Percentage of understory vegetation cover divided into 0–10 cm, 10–30 cm, 30 cm and total by heights in June 2004

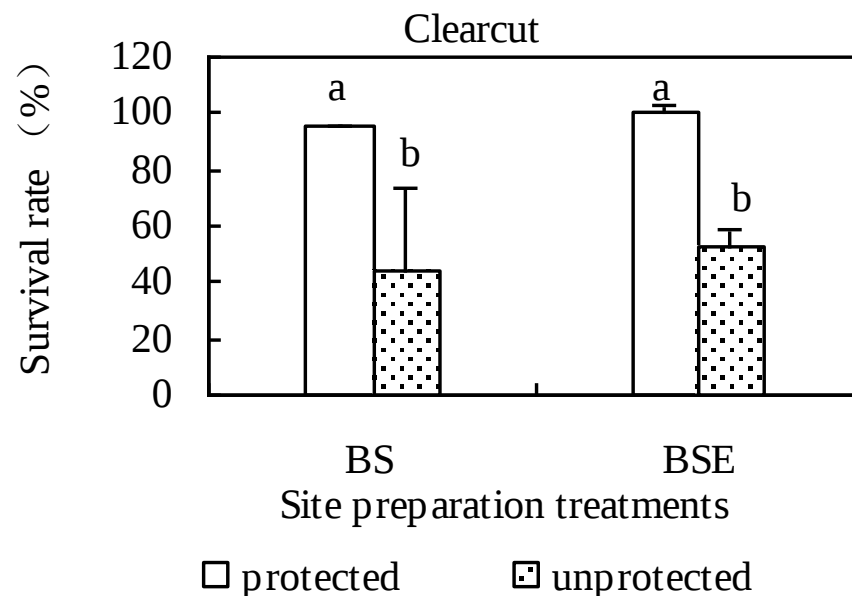
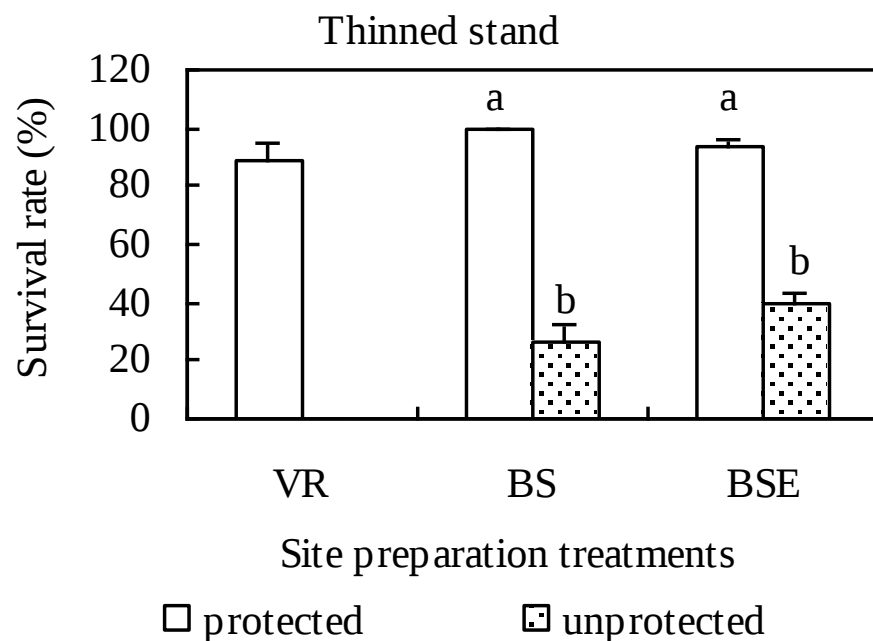
落叶松种子萌发、幼苗出土数量满足更新需求

Cumulative emergence percentage (CEP) of *Larix olgensis* seedlings in relation to site preparation treatments.



4、落叶松间伐形成林窗对更新影响

◆ 落叶松更新——幼苗存活



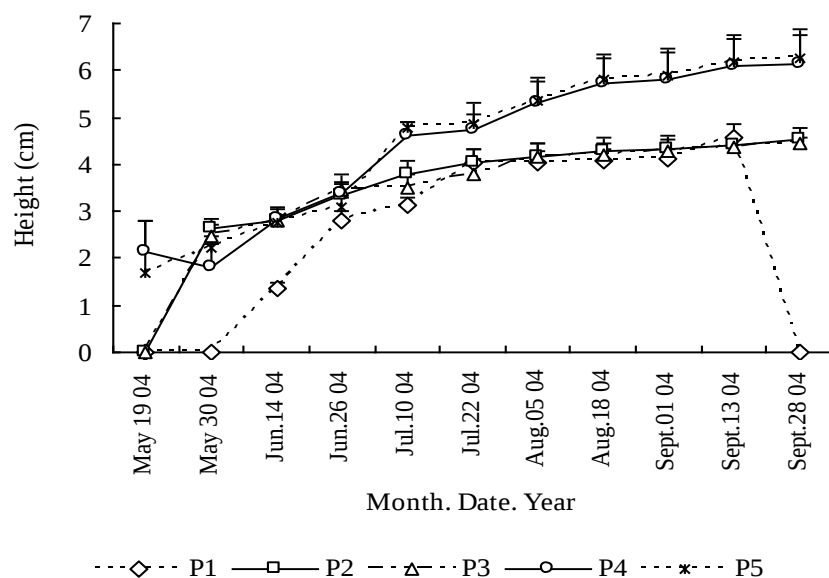
Differences in seedling survival between frost-protected and frost-unprotected treatments in plots in the thinned stand and clearcut

幼苗在间伐处理+林下植被控制、裸露土壤及防护处理下均很好成活

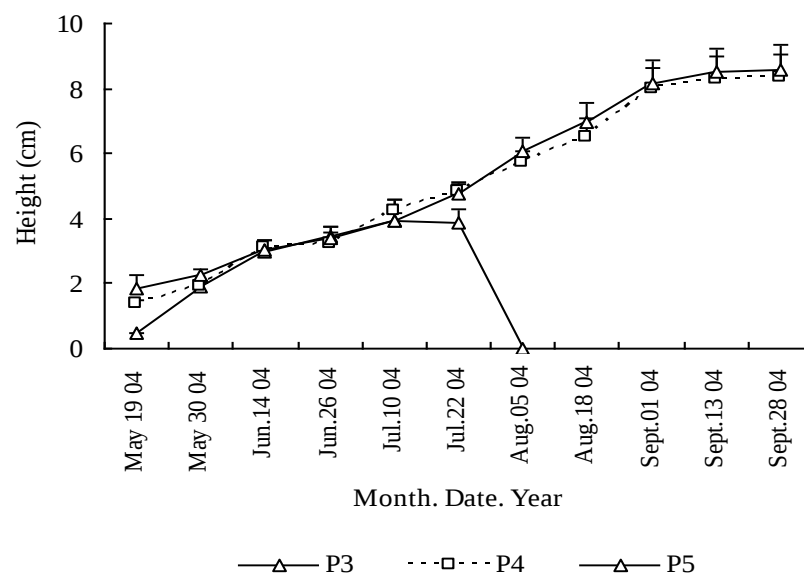
4、落叶松间伐形成林窗对更新影响

◆ 落叶松更新——幼苗建植、生长受阻

T1 (Open stand plot)



T2 (Clearcut plot)



Mean growth parameters of *L. olgensis* seedlings by site preparation

- 落叶松幼苗生长受阻、主要影响因素：光环境
- 建植成功：高光强、林下植被低竞争及与裸露土壤环境

Zhu JJ et al., 2008. *New Forest*

4、落叶松间伐形成林窗对更新影响

◆ 落叶松林内阔叶树种更新

A: 2004 间伐

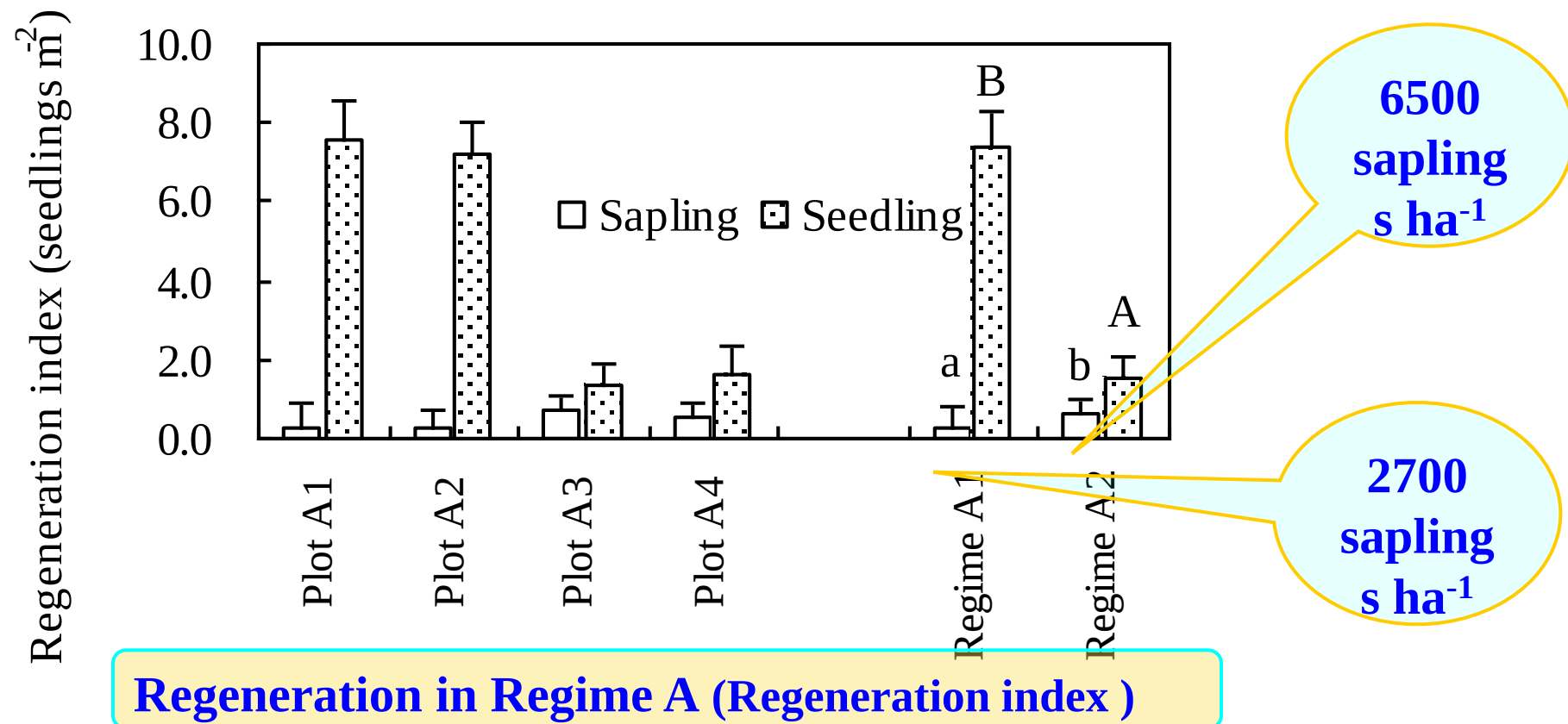
Thinning Regimes	Stem density (trees·ha ⁻¹)		Basal area (m ² ·ha ⁻¹)		Mean DBH (cm)	
	BT*	AT*	BT	AT	BT	AT
Regime A1	1513	925	17.23	38.79	12.1	23.2
Regime A2	1546	663	19.59	35.03	12.7	26.0

B: 1994 间伐

Thinning Regimes	Stem density (trees·ha ⁻¹)		Basal area (m ² ·ha ⁻¹)		Mean DBH (cm)	
	BT*	AT*	BT	AT	BT	AT
Regime B1	1620	1029	34.00	28.14	15.4	18.1
Regime B2	1920	961	41.83	25.94	15.8	17.7



4、落叶松间伐形成林窗对更新影响



Regeneration index of saplings ranged from 0.25 to 0.73 saplings m^{-2} , from 1.39 to 7.56 seedlings m^{-2} for seedlings. Significant differences were found between Regime A1 and A2 for both sapling and seedling

4、落叶松间伐形成林窗对更新影响

Tree species	Regime A1 Mean			Regime A2 Mean		
	Nsa	MI _{sa} 1	Nse	Nsa	MI _{sa} 2	Nse
<i>Acer mono</i>	861	0.29	1007	2702	0.35	2405
<i>Fraxinus rhynchophylla</i>	587	0.23	69633	1120	0.16	11174
<i>Fraxinus mandshurica</i>	70	0.03	976	601	0.09	443
<i>Ulmus laciniata</i>	168	0.02	285	481	0.09	263
<i>Acer pseudo-sieboldianum</i>	171	0.06	73	447	0.09	343
<i>Quercus mongolica</i>	253	0.11	666	338	0.05	170
<i>Ulmus macrocarpa</i>				197	0.03	
<i>Acer ukurunduense</i>				66	0.01	
<i>Cornus controversa</i>	395	0.15	1148	66	0.02	
<i>Sophora japonica</i>	140	0.05	87	66	0.02	88
<i>Alnus sibirica</i>	78	0.03	156			
<i>Juglans mandshurica</i>						44
<i>Pinus koraiensis</i>						44
<i>Sorbus pohuashanensis</i>	86	0.03	177			
Sum	2724	1.00	74020	6465	1.00	15083

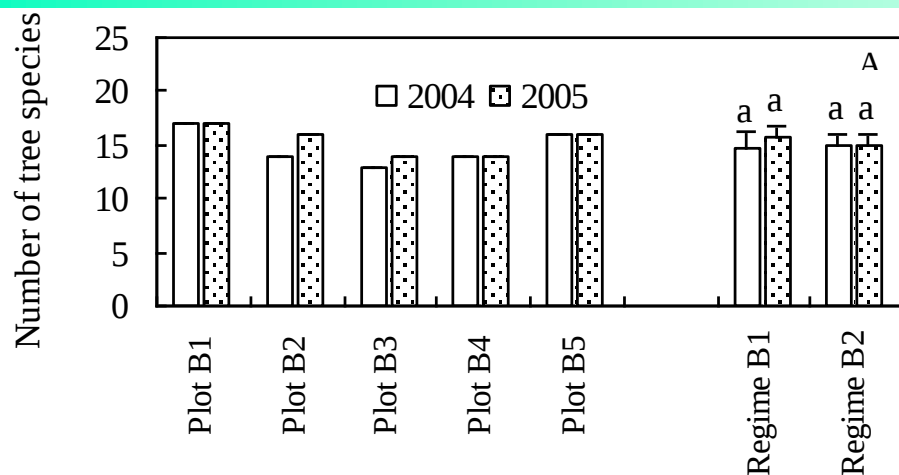
■ The most abundant sapling species: *Acer mono*, 861 and 2702 saplings ha⁻¹ for Regime A1 & A2 respectively.

■ Significant difference between Regime A1 & A2.

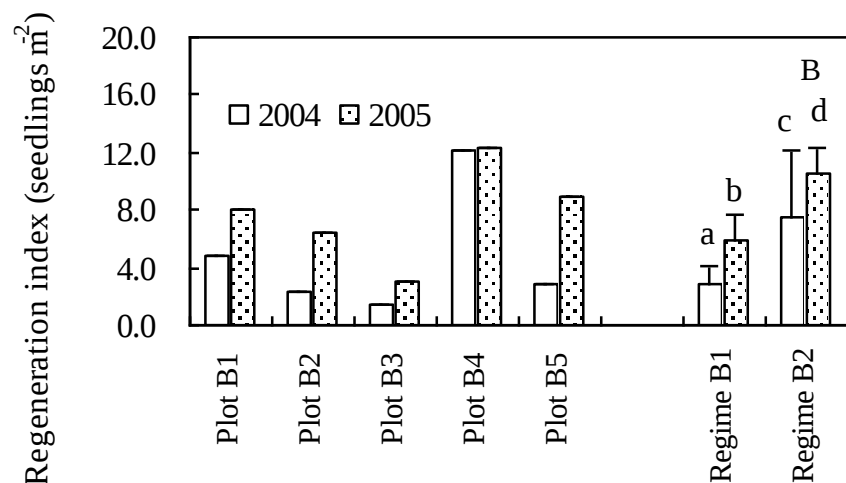
■ Regime A2, the rank is *Acer mono*, *Fraxinus rhynchophylla*, *A. pseudo-sieboldianum*, *F. mandshurica*, *Ulmus laciniata* and *Quercus mongolica*

Regeneration in Regime A (saplings or seedlings ha⁻¹)

4、落叶松间伐形成林窗对更新影响

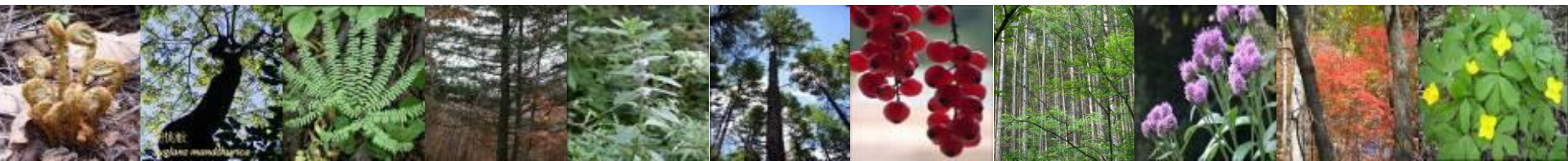


■ The number of regeneration tree species in each plot was around 15 in both 2004 and 2005; and there were no significant differences.



■ Regeneration index ranged from 2.3 to 12.3 seedlings per m^2 . Significant differences were found between plots and between 2004 and 2005

Regeneration in Regime B



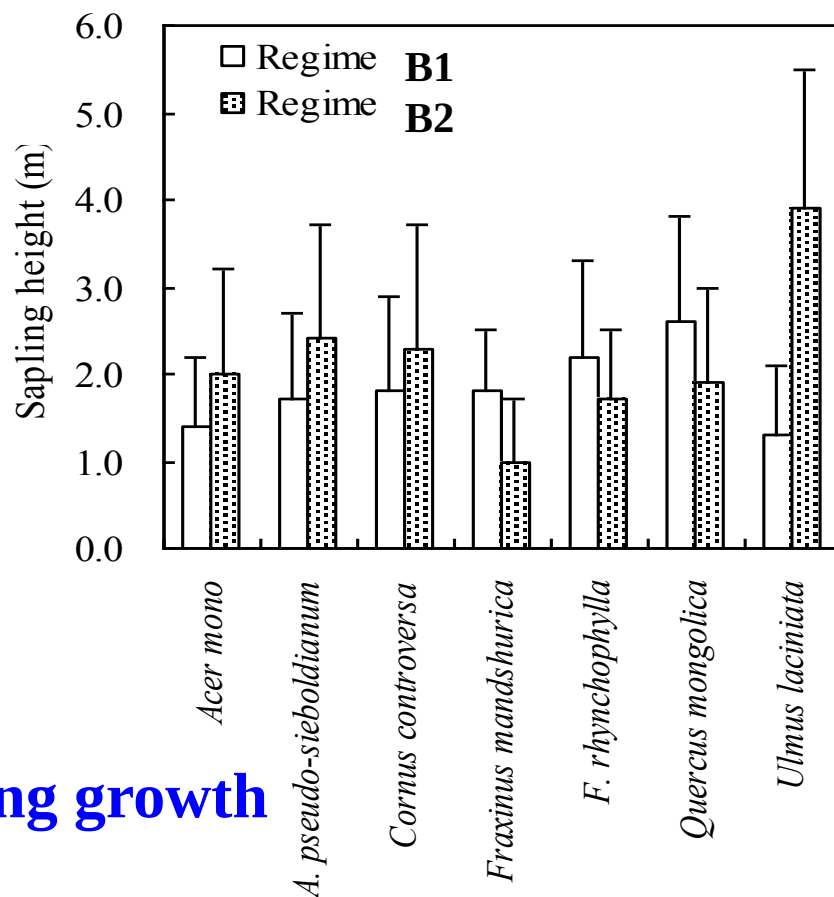
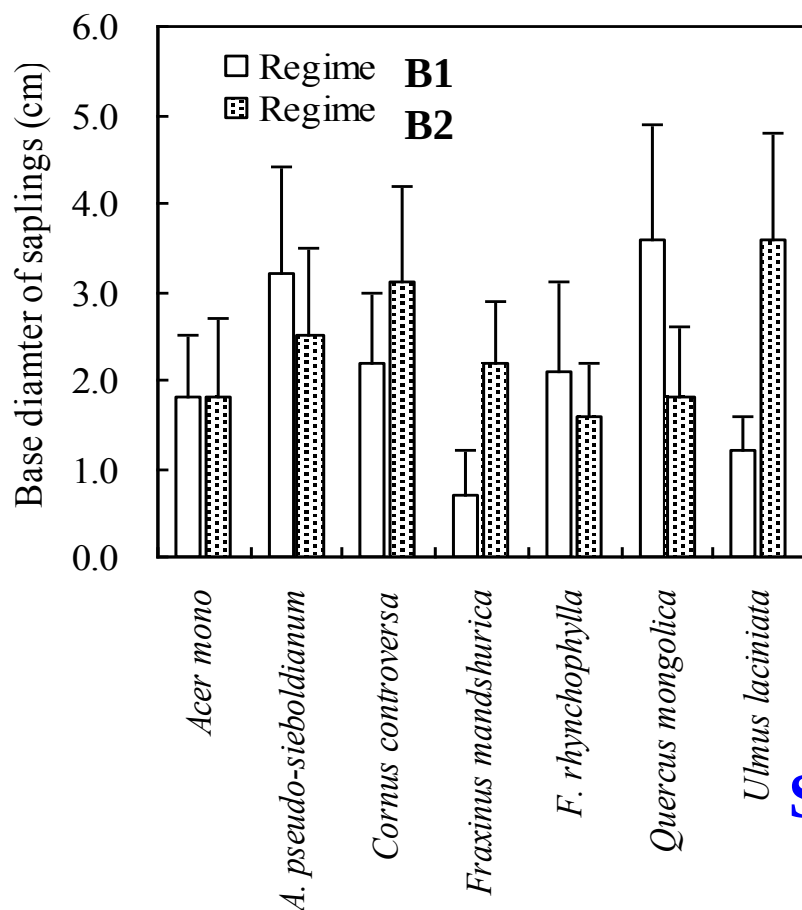
4、落叶松间伐形成林窗对更新影响

Tree species	Regime B1 Mean		Regime B2 Mean	
	NS1	NS2	NS1	NS2
<i>Fraxinus rhynchophylla</i>	256	453	2158	2232
<i>Acer mono</i>	224	204	413	573
<i>Phellodendron amurense</i>	142	570	227	1334
<i>Quercus mongolica</i>	84	101	95	173
<i>Acer pseudo-sieboldianum</i>	80	55	34	51
<i>Ulmus pumila</i>	79	203	5	46
<i>Cornus controversa</i>	66	304	19	191
<i>Fraxinus mandshurica</i>	39	37	30	49
<i>Pinus koraiensis</i>	39	50	13	13
<i>Sophora japonica</i>	36	39	36	36
<i>Juglans mandshurica</i>	33	57	43	86
<i>Alnus sibirica</i>	23	23	21	21
<i>Tilia amurensis</i>	17	19	8	16
Sum	1134	2327	3028	4241

Although the significant differences were found between Regime B1 and B2, and between 2004 and 2005, the regeneration was quite well. The average regeneration index was more than 7 seedlings m^{-2} in the first two year after thinning.

Regeneration in Regime B (seedling individuals in each plot, 400 m^2)

4、落叶松间伐形成林窗对更新影响



Sapling growth

➤ 落叶松人工林内阔叶树种更新初步成功，可能形成落叶松与阔叶树的混交林

致谢

- 中科院百人计划、野外观测研究网络基础设施建设
- 国家自然科学基金(30830085, 31330016)
- 国家973计划 (2012CB416900)
- 闫巧玲：2007-研究组成员
- 于立忠：2006-研究组成员
- 杨 凯：2006-博士研究生、研究组成员
- 孙一荣：2005-研究组成员、在职博士研究生
- 郑 晓：2010-博士研究生、研究组成员
- 宋立宋：2009-博士研究生、研究组成员
- 李明财：2008-博士后合作、研究组特聘成员
- 胡理乐：2005-2008博士研究生
- 王 凯：2009-2011博士研究生
- 张 敏：2007-2012硕博士连读研究生
- 张广奇：2008-硕博士连读研究生
- 张维维：2012-博士研究生
- 卢德亮：2012-硕博士连读研究生
- 宋 媛：2013-博士研究生





谢谢!

敬请指导!