

# 闽南丘陵区长周期桉树人工林综合效益评价

林武星<sup>1</sup>, 黄雍容<sup>1</sup>, 洪长福<sup>2</sup>

(1. 福建省林业科学研究院, 福建 福州 350012; 2. 福建省漳州市林业局, 福建 漳州 363000)

**摘要:**运用层次分析法对闽南丘陵区保留密度分别为 600、900、1 200、1 415 株·hm<sup>-2</sup>的 15 年生桉树人工林综合效益进行评价。以林分蓄积量、出材量、持水量、生物多样性指数、土壤密度、总孔隙度、有机质及速效养分等因子为指标,分别分析了桉树林经济效益、生态效益和地力维持状况,通过综合评判得到长周期桉树林综合效益最高的为保留密度 1 200 株·hm<sup>-2</sup>的林分,从而为桉树人工林可持续发展提供理论依据。

**关键词:**层次分析法;桉树林;林分蓄积;土壤特性;综合评价

**中图分类号:**S718.5 S792.39 **文献标识码** A

## Comprehensive Evaluation on Long Rotation Forest of *Eucalyptus* Plantation in South Fujian Mountain

LIN Wu-xing<sup>1</sup>, HUANG Yong-rong<sup>1</sup>, HONG Chang-fu<sup>2</sup>

(1. Fujian Academy of Forestry, Fuzhou 350012, Fujian, China; 2. Zhangzhou Forestry Administration, Zhangzhou 363000, Fujian, China)

**Abstract:** The analytic hierarchy process was applied to assess comprehensive benefit of 15-year *Eucalyptus* plantation with four different densities including 600, 900, 1 200 and 1 415 trees per hectare in the hill area of southern Fujian Province. The economical, ecological, and soil fertility maintenance values for the *Eucalyptus* plantation with different density were categorized by integrating eight factors involving stand stock, timber output, water holding capacity, biodiversity of underlayer, soil density, total porosity, organic matter and available fertility. The model with best comprehensive value was the tree density of 1 200 trees per hectare for *Eucalyptus* Plantation according to the assessing, which provided a reference for sustainable management of *Eucalyptus* plantation.

**Key words:** Analytical hierarchy process; *Eucalyptus* plantation; stand stock; soil character; comprehensive evaluation

桉树(*Eucalyptus* spp.)是我国南方主要的纸浆工业原料林树种,由于生长迅速及产量高的优良特性,在广东、海南、云南、广西和福建南部等地造林面积不断扩大。不少学者从林地清理、整地和更新方式、施肥、造林密度、间伐技术等方面对桉树林速生丰产技术进行了研究报道<sup>[1-7]</sup>,在不同密度桉树林生长规律、植被多样性、水源涵养功能、土壤肥力状况等都分别开展过研究,并取得丰硕成果<sup>[8-12]</sup>,这对于指导桉树林经营无疑具有重要作用。但以往多仅从短周期(6~8年)桉树林某一方面研究密度效应,缺乏桉树林综合指标对密度的选择,其结果具有较大的片面性。而对于不同保留密度条件下长周期

(12年以上)桉树林多目标选择处于研究空白,为此,本文通过构建层次分析模型对闽南丘陵区保留密度分别为 600、900、1 200、1 415 株·hm<sup>-2</sup>的 15 年生桉树人工林的经济、生态效益及地力维持状况进行研究,筛选出综合效益最高的林分密度,为桉树林科学经营提供技术支撑。

### 1 试验地概况

试验地位于漳州长泰岩溪林场凤山工区,117°45'15" E,24°47'24" N,属南亚热带季风气候,年均气温 21.1℃,最冷月平均气温 12.4℃,绝对最低气温 -2.1℃,无霜期 328 d,最热月平均气温 28.5℃,

收稿日期:2012-09-12

基金项目:福建省林业厅基金资助项目(2002-16)、福建省森林培育与林产品加工利用重点实验室项目资助

作者简介:林武星(1970—),男,福建福清人,博士,教授级高工,主要从事森林生态学研究。Email:linwuxing1970@163.com

绝对最高温 40.9 ℃, >10 ℃有效积温 7 394.7 ℃, 年日照时数 2 037.4 h, 年降水量 1 563 mm, 相对湿度 80%, 年蒸发量 1 267.8 mm, 海拔 230 ~ 295 m, 坡向西南, 坡度 24°~30°, 花岗岩发育的红壤, 土层厚度 >100 cm, 腐殖质层较薄, 立地类型为典型的低山带长坡中部中厚土薄腐殖立地类型。

## 2 研究方法

### 2.1 试验设计

1990-07 炼山整地挖穴, 规格 70 cm × 40 cm × 35 cm, 株行距 2 m × 3 m, 造林密度 1 665 株 · hm<sup>-2</sup>。1991-03 造林, 苗木来源为广西钦州林业科学研究所巨尾桉 (*E. grandis* W. Hill ex Maiden × *E. urophylla* S. T. Blake) 桉树扦插容器苗, 苗高 25 cm。3.5 年生时开始间伐, 开展不同保留密度 (600、900、1 200、1 415 株 · hm<sup>-2</sup>) 试验, 完全随机区组设计, 每区组 4 个小区, 小区面积 20 m × 20 m, 分别于上、中、下坡设 3 个区组。

### 2.2 调查方法

2.2.1 生长量调查 2006-07, 分别每个小区进行每木调查, 项目包括桉树胸径、树高、枝下高、冠幅、郁闭度, 计算蓄积量。根据每个小区林木平均胸径和树高选择 1 株标准木, 按 4、2 m 造材, 用 GB4814-84《原木材积表》量测出材量。

2.2.2 持水量调查 在每个小区内取标准木上部、中部、下部 3 条活枝称质量, 浸水 2 h 后再称质量, 测定林冠层持水量。每小区内以梅花形设 5 个 2 m × 2 m 小样方, 拔出小样方内所有活地被物并称质量, 浸水 2 h 后再称, 测定活地被物持水量; 收集枯枝落叶称质量, 烘干 6 h 后称质量, 再浸水 12 h 称质量, 测定枯枝落叶持水量<sup>[13]</sup>; 土壤持水量、土壤渗透能力、土壤排水能力和土壤贮水量采用环刀法测定<sup>[14-15]</sup>。

2.2.3 物种多样性调查与计算 每小区内以梅花形设 5 个 2 m × 2 m 小样方, 调查每个小样方中灌木、草本和藤本的种类、高度、多度和盖度。物种多样性 Simpson 指数  $D = N(N-1) / \sum N_i(N_i-1)$ , 式中:  $N_i$  表示某个种的个体数目,  $N$  表示所有种个体树木总和<sup>[16]</sup>。

2.2.4 土壤取样与分析 每小区按“S”形路线 5 点分别采集 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 层的土样供做养分化学分析, 并用“环刀法”采集 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 的原状土做水分物理性状测定。土壤水分物理

性质按常规方法测定, 土壤化学分析按国际分析方法测定<sup>[14-15]</sup>。

### 2.3 评价模型建立

2.3.1 层次分析结构模型 利用 T. L. Saaty<sup>[17]</sup> 提出的层次分析法, 建立不同密度桉树林综合评价体系 (图 1)。由经济效益、生态效益、地力维持等 3 个因子组成模型的准则层, 指标层由各对应因子构成。

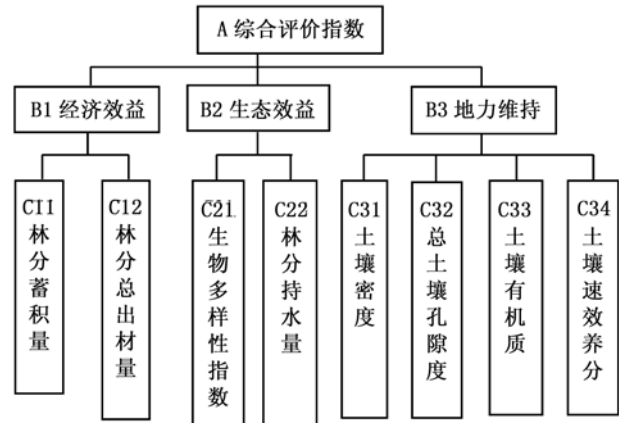


图1 桉树林综合效益评价层次结构模型

2.3.2 评价因子权重的确定 组织相关专家对桉树林的经济效益、生态效益和地力维持等因子进行权重打分, 按层次结构建立 A-B、B-C 的判别矩阵, 计算矩阵最大特征根及其对应的特征向量 (权重) (见表 1)。实测值进行归一化处理成为标准化数据。

表1 不同保留密度桉树人工林各层次指标的权重

B 层指标	权重	C 层指标	权重
经济效益	0.45	林分蓄积量	0.40
		林分总出材量	0.60
生态效益	0.25	生物多样性指数	0.30
		林分持水量	0.70
地力维持	0.30	土壤密度	0.15
		土壤总孔隙度	0.15
		土壤有机质	0.40
		土壤速效养分	0.30

2.3.3 评价方法 假设  $L$  层有  $m$  个评价项目, 每一个项目有  $n$  个评价因子, 其对应的权重  $u_j$  可以组成一个权重矩阵:  $U = (u_1, u_2, u_3, \dots, u_n)$ 。而对于  $m$  个评价项目中的  $n$  个评价因子, 根据实测值归一化转换, 可以构成一个  $m \times n$  阶的矩阵  $A = (a_{ij})_{m \times n}$ , 那么,  $m$  个评价项目中第  $i$  个项目的评价

值可以由  $A$  中第  $i$  行元素与权重矩阵  $U$  中对应元素的乘积之和来决定,因此,第  $L$  层中  $m$  个评价项目的评价值即由  $A$  至  $U$  的乘积  $U \times A^T$  构成。所以从最下层逐层往上进行实现不同保留密度桉树林的多目标综合评价,根据评价值的大小对不同密度桉树林进行排序。

### 3 结果与分析

#### 3.1 经济效益评价

采用林分蓄积量和总出材量 2 个指标作为桉树人工林经济效益评价的因子,其实测值见表 2、3。通过方差分析,不同保留密度林分平均胸径、单株材积、蓄积量和总出材量存在显著差异。根据评价方法,对表 2、3 中的林分蓄积量和出材量数据进行标准化处理后,得到经济效益评价因子矩阵:

$$U_1 = \begin{pmatrix} 0.2011 & 0.2356 \\ 0.2411 & 0.2466 \\ 0.2764 & 0.2629 \\ 0.2814 & 0.2549 \end{pmatrix}$$

由此,不同密度桉树林经济效益  $B_1$  评价值为  $A_1 \times U_1^T$ , 即  $B_1 = (0.4, 0.6) \times U_1^T = (0.2218, 0.2444, 0.2683, 0.2655)$ 。从经济效益评价结果可知,保留密度为 1 200 株  $\cdot$   $\text{hm}^{-2}$  桉树林的经济价值最大,其次为保留密度 1 415 株  $\cdot$   $\text{hm}^{-2}$  的桉树林分,保留密度为 600 株  $\cdot$   $\text{hm}^{-2}$  桉树林的经济价值最小,说明桉树林经营中保留株数太少其经济效益很低,这是因为人工林保留密度太小,虽然单株生长量大,但由于数量少,林分总蓄积量和总出材量过低,导致经济产出小,而适当的保留密度的林分有较高的蓄积量和出材量,经济效益也高。

表 2 不同保留密度桉树林生长量

保留密度/(株 $\cdot$ $\text{hm}^{-2}$ )	平均胸径/cm	平均树高/m	平均材积/( $\text{m}^3 \cdot$ 株 $^{-1}$ )	林分蓄积量/( $\text{m}^3 \cdot$ $\text{hm}^{-2}$ )
600	24.4	27.3	0.6732	408.39
900	21.8	26.8	0.5380	484.22
1 200	20.3	26.3	0.4627	555.28
1 415	19.0	25.7	0.3995	565.29

$$F_d = 10.35^{**}, F_h = 4.22, F_v = 18.31^{**}, F_g = 36.53^{**}; F_{0.05}(3,6) = 4.76, F_{0.01}(3,6) = 9.78$$

表 3 不同保留密度桉树林出材量、出材率

保留密度/(株 $\cdot$ $\text{hm}^{-2}$ )	主伐出材量/( $\text{m}^3 \cdot$ $\text{hm}^{-2}$ )			出材率/%	间伐出材量/( $\text{m}^3 \cdot$ $\text{hm}^{-2}$ )	总出材量/( $\text{m}^3 \cdot$ $\text{hm}^{-2}$ )
	规格材	非规格材	合计			
600	222.28	82.86	310.14	76.7	29.92	340.32
900	190.89	146.52	337.41	69.5	18.89	356.30
1 200	212.16	159.60	371.76	67.0	8.10	379.86
1 415	117.44	250.74	368.18	65.0	0.00	368.18

$$F_o = 7.26^*, F_{0.05}(3,6) = 4.76, F_{0.01}(3,6) = 9.78$$

#### 3.2 生态效益评价

林分持水量是表征土壤结构和渗透性能主要指标,是森林生态系统稳定性的重要环节;而林下植被作为森林生态系统的组成部分,对土壤水源涵养、改善地力和提高林分生产力等方面有独特作用,二者有机结合能较好体现森林生态效益。通过不同保留密度桉树林的林分持水量和植被多样性指数实测值数据(表 4)的归一化处理得到生态效益评价矩

阵  $U_2 = \begin{pmatrix} 0.2720 & 0.2292 \\ 0.2566 & 0.2393 \\ 0.2392 & 0.2821 \\ 0.2322 & 0.2493 \end{pmatrix}$ , 所以,桉树林生态效益

$B_2$  评价值为  $A_2 \times U_2^T$ , 即  $B_2 = (0.3, 0.7) \times U_2^T = (0.2420, 0.2445, 0.2692, 0.2442)$ 。由此可知,桉树林中生态效益最大的是保留密度为 1 200 株  $\cdot$   $\text{hm}^{-2}$  的林分,保留密度为 900 株  $\cdot$   $\text{hm}^{-2}$  的林分其次,而 600 株  $\cdot$   $\text{hm}^{-2}$  的林分生态效益最小。这是因为保留密度为 1 200 株  $\cdot$   $\text{hm}^{-2}$  的桉树林持水量最大,而生物多样性指数也较高,因此林分的生态效益值最大,而保留密度为 600 株  $\cdot$   $\text{hm}^{-2}$  的林分虽然生物多样性丰富,但由于水源涵养能力最低,总的生态效益最差。

表4 不同保留密度桉树林持水量和生物多样性指数

保留密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	林冠层/ (t·hm <sup>-2</sup> )	林下植被层/ (t·hm <sup>-2</sup> )	枯枝落叶层/ (t·hm <sup>-2</sup> )	地上部分/ (t·hm <sup>-2</sup> )	0~40 cm 土层/ (t·hm <sup>-2</sup> )	林分/ (t·hm <sup>-2</sup> )	生物多样性 指数
600	7.53	1.27	0.52	9.32	136.72	146.04	0.915 3
900	9.46	1.05	0.63	11.14	141.35	152.49	0.863 5
1 200	12.61	0.85	0.71	14.17	165.59	179.76	0.805 2
1 415	10.25	0.76	0.84	11.85	147.01	158.86	0.781 6

### 3.3 地力维持评价

随着集约化经营水平的提高,桉树林主伐年限不断缩短,林地上养分消耗大,加剧了地力衰退,因此,如何从密度管理的角度探索有利于桉树林地力维持是一个研究课题。本文选择土壤密度、总孔隙度、有机质和速效养分等因子作为评价桉树林地力维持的指标,其中速效养分包括速效 N、速效 P 和速效 K,由于土壤密度与土壤肥力呈负相关,所以对土壤密度实测值归一化处理得到标准化数据为负值,通过对各指标实测值(表5)归一化处理得到地力维持评价因子矩阵:

$$U_3 = \begin{pmatrix} -0.293 1 & 0.219 0 & 0.169 9 & 0.216 9 \\ -0.250 6 & 0.250 5 & 0.215 5 & 0.246 0 \\ -0.222 3 & 0.270 6 & 0.337 1 & 0.276 8 \\ -0.234 0 & 0.259 9 & 0.277 5 & 0.260 3 \end{pmatrix}, \text{所}$$

以,桉树林地力维持  $B_3$  评价值为  $A_3 \times U_3^T$ , 即  $B_3 = (0.15, 0.15, 0.40, 0.30) \times U_3^T = (0.121 9, 0.160 0, 0.225 0, 0.193 0)$ , 由此可知,桉树人工林中,保留密度为 1 200 株·hm<sup>-2</sup> 的林分对地力维持的能力最强,其次是 1 415 株·hm<sup>-2</sup> 的林分,而保留密度为 600 株·hm<sup>-2</sup> 的林分土壤肥力最低。这是因为桉树林保留密度为 1 200 株·hm<sup>-2</sup> 时,土壤有机质、速效养分含量及土壤孔隙度均最大,而土壤密度最小,说明桉树在该密度条件下,土壤通透性和肥力状况最好;而保留密度为 600 株·hm<sup>-2</sup> 的林分,其土壤密度最大,土壤养分含量和总孔隙度最小,土壤结构和地力最差。

表5 不同保留密度桉树林土壤理化性质

保留密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	土层厚度/ cm	土壤密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度/ %	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	水解 N/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效 P/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效 K/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
600	0~20	1.427	59.62	10.369	39.574	8.157	68.263
	20~40	1.483	56.18	8.717	35.235	7.061	63.730
900	0~20	1.220	68.18	13.146	45.262	10.390	75.866
	20~40	1.517	62.31	11.085	40.817	8.417	70.235
1 200	0~20	1.082	73.67	20.573	53.761	13.025	81.193
	20~40	1.256	69.68	17.242	48.903	10.727	73.251
1 415	0~20	1.139	70.74	16.926	51.072	11.853	76.258
	20~40	1.358	64.82	12.571	47.336	9.764	71.039

### 3.4 综合效益评价

根据桉树林经济效益、生态效益和地力维持的权重及  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  的评价值,得到不同保留密度桉树林综合效益评价价值  $P$ 。

$$P = (0.45, 0.25, 0.3) \times U^T = (0.45, 0.25, 0.3) \times \begin{pmatrix} 0.221 8 & 0.242 0 & 0.121 9 \\ 0.244 4 & 0.244 5 & 0.160 0 \\ 0.268 3 & 0.269 2 & 0.225 0 \\ 0.265 5 & 0.244 2 & 0.193 0 \end{pmatrix}^T = (0.196 9,$$

0.219 1, 0.255 5, 0.238 5)。可见,在 4 种不同保留密度的桉树林中,密度为 1 200 株·hm<sup>-2</sup> 的林分综

合效益最高,其次是密度为 1 415 株·hm<sup>-2</sup> 的林分,900 株·hm<sup>-2</sup> 的桉树林综合效益第三,而密度为 600 株·hm<sup>-2</sup> 的林分综合效益最小。

## 4 讨论与结论

有关密度对桉树人工林影响的研究有较多的报道,但基本上仅限于对桉树林短周期经营过程中某一侧面的分析,如李保福等<sup>[8]</sup>研究了不同密度巨尾桉的生长规律和轮伐期,郑郁善等<sup>[9-10]</sup>分别报道了不同密度巨尾桉水源涵养功能和土壤培肥能力,洪长福等<sup>[11]</sup>研究了不同密度尾桉林下植被多样性,

杨伟东等<sup>[12]</sup>分析了不同密度尾叶桉(*E. urophylla* S. T. Blake)生长差异,等等。而对于综合不同密度桉树林经济、生态效益及地力维持分析评价的研究以往未有。由于桉树林经营中出现的片面追求产量和尽量缩短采伐年限的不恰当营林策略,造成了林分生物多样性和土壤持水能力下降以及地力衰退等不良局面<sup>[18-23]</sup>。因此,桉树林发展必须适当延长轮伐期以减少人为活动对林地干扰的频率,并从林分产量、稳定性、生物多样性和地力维持等方面综合考虑,以确保桉树人工林可持续发展和林地的持续利用。

不同密度桉树林在生长量、水土保持性能、物种多样性和土壤肥力等方面互有优劣,需要通过多指标的综合才能作出科学的评价,近年来,层次分析法在林业上得到广泛应用<sup>[22]</sup>,不少研究利用该方法对森林进行综合评价<sup>[25-27]</sup>。本文采用层次分析模型对闽南山地不同保留密度的15年生巨尾桉桉树林综合研究,确定了15年桉树林最佳保留密度为1 200株·hm<sup>-2</sup>,从而为我国南方山区桉树人工林合理经营提供了科学依据。

#### 参考文献:

- [1] 张友育. 林地清理方式对巨尾桉萌芽林生态效应的影响[J]. 安徽农学通报, 2008, 14(11): 177-178
- [2] 何木林. 不同营林措施对桉树人工林可持续经营影响[J]. 防护林科技, 2009(2): 14-16
- [3] 张友育. 闽南山地桉树不同种植密度试验效果分析[J]. 福建热作科技, 2006, 31(2): 3-4
- [4] 洪长福. 速生桉树间伐技术探讨与间伐效果分析[J]. 福建林业科技, 2001, 28(1): 28-30
- [5] 高集美. 桉树抚育间伐强度效应分析[J]. 河北林业科技, 2010(1): 20-21
- [6] 白嘉雨. 桉树速生丰产培育技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993: 28
- [7] 王理平, 陈少雄. 巨尾桉纸浆材丰产栽培技术研究[J]. 林业科技通讯, 1997(7): 22-24
- [8] 李宝福, 张顺恒. 不同造林密度巨尾桉生长规律及轮伐期确定[J]. 福建林业科技, 2000, 27(增): 19-22
- [9] 郑郁善, 陈礼光, 洪长福. 沿海丘陵巨尾桉人工林水源涵养功能研究[J]. 江西农业大学学报, 2000, 22(2): 220-224
- [10] 郑郁善, 洪长福, 陈礼光. 沿海丘陵巨尾桉人工林土壤培肥能力研究[J]. 福建林学院学报, 2001, 21(4): 312-315
- [11] 洪长福, 柯建国, 黄龙杰. 尾叶桉人工林林下植被多样性研究[J]. 桉树科技, 2003(2): 1-10
- [12] 杨伟东, 钟罗生. 新引种的尾叶桉造林密度试验研究[J]. 桉树科技, 1997(2): 37-41
- [13] 郑郁善. 杉木毛竹混交林水文效应的研究[J]. 福建林学院学报, 1995, 5(4): 325-330
- [14] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化性状[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987
- [15] 张万儒. 森林土壤定位研究方法[M]. 北京: 中国林业出版社, 1984
- [16] 林开敏, 俞新妥, 洪伟. 杉木人工林林下植物对土壤肥力的影响[J]. 林业科学, 2001, 37(Sp. 1): 94-98
- [17] Saaty T L. The Analytic Hierarchy Process[M]. New York: McGraw-Hill, 1980
- [18] 谢耀坚. 中国桉树人工林可持续经营战略初探[J]. 世界林业研究, 2003, 16(5): 59-64
- [19] 温远光, 刘世荣, 陈放. 桉树工业人工林的生态问题和可持续经营[J]. 广西科学院学报, 2005, 21(1): 13-18
- [20] Shiva V, Bandyopadhyay J. *Eucalyptus*—a disastrous tree for india[J]. The Ecologist, 1983, 13(5): 184-187
- [21] Poore M E, Fries C. The ecological effect of *Eucalyptus*[C]. Rome: FAO Forestry Papers, 1985: 59
- [22] Florence R G. Perceptions of the *Eucalyptus* as an exotic: an ecological interpretation [C]. Proc International Eucalypt Symposium, 1991
- [23] Davidson J. Ecological aspect of *Eucalyptus* plantation[C]. Proc regional expert consultation on *Eucalyptus*, RAPA/FAO, Bangkok, 1993
- [24] 陈森. 层次分析法在林业生产决策中的应用[J]. 中南林业调查规划, 1993(4): 1-6
- [25] 陈如英. 层次分析法在闽南沿海山地混交林优化模式选择上应用[J]. 湖南环境生物职业技术学院学报, 2006, 12(4): 353-355
- [26] 韩锦春, 李宏开. 马尾松混交林混交模式的多层次综合评判[J]. 植物生态学报, 2000, 24(4): 498-501
- [27] 马祥庆, 庄孟能. 杉木拟赤杨混交林林分生产力及生态效应研究[J]. 植物生态学报, 1998, 22(2): 178-185