

# 不同坡向桉树人工林的植物群落结构对比研究

吕咏仪<sup>1,2</sup>, 高艳芳<sup>1</sup>, 谢威<sup>1</sup>, 安伟莉<sup>1,3</sup>, 马雅婷<sup>1,4</sup>, 殷祚云<sup>1\*</sup>

(1.仲恺农业工程学院园艺园林学院, 广东 广州 510225; 2.珠海市中心森智能家居科技有限公司, 广东 珠海, 519000;  
3.中国科学院华南植物园, 广东 广州, 510650; 4.星火教育科技有限公司佛山分公司, 广东 佛山, 528000)

**摘要:** 为了解坡向对桉树人工林植物群落结构和植被多样性的影响。本研究对广东省肇庆市四会市内的不同坡向的 5 a 生桉树人工林进行了调查分析, 应用 Berger-Parker 指数、Shannon-Wiener 物种多样性和均匀性指数、Simpson 物种多样性和均匀性指数、Margalef 指数及 Pielou 均匀度指数以测度群落的丰富程度。结果表明: (1) 尾叶桉人工林阳坡物种丰富度大于阴坡; (2) 不同坡向下植被多样性及均匀性表现为阳坡高于阴坡; (3) 阳坡植物种类有 40 种, 隶属 31 科 38 属; 阴坡植物种类有 33 种, 隶属 25 科 33 属; (4) 同一生活型下绝大部分阳坡物种生活型数量较阴坡多。在保证桉树人工林生产力的前提下, 应减少炼山清理、喷撒除草剂等人为活动, 促进桉树人工林群落自然演替, 使之形成相对稳定且物种多样性高的植物群落, 以实现桉树人工林持续经营。

**关键词:** 桉树; 坡向; 群落结构; 物种多样性

中图分类号: S718.54

文献标识码: A

## Comparative Study on Plant Community Structure in *Eucalyptus* Plantations of Different Slope Directions

LV Yongyi<sup>1,2</sup>, GAO Yanfang<sup>1</sup>, XIE Wei<sup>1</sup>, AN Weili<sup>1,3</sup>, MA Yating<sup>1,4</sup>, YIN Zuoyun<sup>1</sup>

(1. Zhongkai College of Horticulture and Landscape Architecture, Guangzhou 510225, Guangdong, China; 2. Zhuhai Xinsen Intelligent Home Technology Limited Company, Zhuhai 519000, Guangdong, China; 3. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650 Guangdong, China; 4. Spark Education Technology Limited Company, Foshan 528000, Guangdong, China)

**Abstract:** The objective of the study reported here was to examine the influence of slope direction on plant community structure and vegetation diversity in *Eucalyptus* plantations. For this, *Eucalyptus* plantations of age 5-years on different slope directions in Sihui City of Zhaoqing City, Guangdong Province were examined. The species diversity and uniformity indices of Berger-Parker, Shannon-Wiener and Simpson as well as the Margalef index and the Pielou uniformity index were used to measure community richness. The results showed that: (1) species richness of *Eucalyptus urophylla* plantations on the sunny slope was greater than that of plantations on the shady slope; (2) the diversity and uniformity of vegetation on different slopes were higher on the sunny slope than on the shady slope; (3) there were 40 plant species belonging to 38 genera and 31 families on the sunny slope, but only 33 species of plants from 33 genera and 25 families and on the shady slope; (4) most species on the sunny slope have more life types than those on the shady slope. On the premise of ensuring the productivity of *Eucalyptus* plantations, human activities such as mountain clearing and herbicide spraying should be reduced to promote the natural succession of plant communities and to encourage relatively stability of plant communities with high species diversity, so as to realize the sustainable management of *Eucalyptus* plantations.

**Key words:** *Eucalyptus*; slope direction; community structure; species diversity

桉树(*Eucalyptus*), 是桃金娘科(Myrtaceae)、桉属(*Eucalyptus*)植物的统称<sup>[1]</sup>, 是我国南方速生丰产

林战略性树种<sup>[2]</sup>。随着市场对木材的需要不断增长, 我国现已由木材生产国变成消费国和进口国<sup>[3]</sup>。目

基金项目: 广东省教育厅省级重大项目(2016KZDXM002)

作者简介: 吕咏仪(1996—), 女, 本科, 林学专业, E-mail:1099469249@qq.com

\*通信作者: 殷祚云(1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事生态学、林学和生物统计学研究, E-mail:yinzuoyun@163.com

致谢: 本研究在野外调查和资料收集中得到林场负责人丁国洪, 调查员丁佩、练金生、周厚龙, 记录员何芷珊的大力支持, 谨此表示衷心感谢!

前,我国桉树人工林面积已达 546.74 万公顷,年产木材 3 000 万立方米以上。随着桉树人工林的发展,每年桉树全产业链的经济效益约 4 000 亿元,对国家和区域经济社会发展产生了举足轻重的影响<sup>[4]</sup>。与此同时,桉树单一种植造成了以生物多样性的减少为核心的一系列生态问题<sup>[5]</sup>。

不同环境因子之间的复杂关系及其与植物群落的耦合关系,其对环境因子变化的响应成为全球变化科学领域的热点问题<sup>[6]</sup>。对于区域尺度而言,地形因子对物种多样性及群落结构具有重要影响,尤其是坡向因子,有研究指出坡向对物种丰富度格局起决定性作用<sup>[7-8]</sup>,是影响巨尾桉(*E. grandis* × *E. urophylla*)人工林林下植被多样性最为关键的立地因子<sup>[9]</sup>。在我国,响应坡向因子对桉树人工林物种多样性的研究较少。本文通过对广东肇庆不同坡向的 5 a 生桉树人工林群落结构及植被多样性进行研究,探究坡向对桉树人工林植被多样性及群落组成的影响,以期为我国南方桉树人工林生境选择、合理种植、人工林天然化培育提供一定的理论依据。

## 1 研究区概况与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于广东省肇庆市四会市江古镇陈村一带(23°45'05" ~ 23°46'97"N, 112°63'25" ~ 112°64'26"E),地处四会市中部偏北,山地地貌。属典型的亚热带季风气候,年均气温 21.3℃,年均降雨量为 1 805 mm,年均日照 1 702.3 h。夏季高温多雨,冬季温和少雨,海拔为 36.78 ~ 39.21 m。土壤类型主要是红壤和黄红壤,土壤层较厚,通常在 1 m 以上。样地原种植松树及其他杂树,砍伐后利用带状开垦、袋苗种植以建植尾叶桉(*E. urophylla*)人工林,株行距为 3.4 m × 1.4 m。第一年营林施肥(N+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+K<sub>2</sub>O)≥30%(15-5-9)枸溶性磷含氯桉树复合肥料)两次,每次施肥 0.5 kg 株<sup>-1</sup>,且铲除杂草;第二年施肥一次,每次施肥 0.8 kg 株<sup>-1</sup>,林下杂草不铲除;后 3 a 均未进行施肥、除草等抚育管理。

表 1 样地基本概况

样地	海拔高度/m	坡向	坡度/°
样地 1	38.30	东南 126°	36.35
样地 2	39.21	南 158°	38.12
样地 3	37.34	正南	37.45
样地 4	37.59	东北 155°	37.00
样地 5	36.78	北 144°	36.25
样地 6	37.40	正北	36.95

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 调查方法与内容

在同一年份不同坡向的桉树人工林内,各设置 20 m × 20 m 的 3 个样地,共 6 个样地。调查内容包括:①样地基本信息:平均海拔高度、坡向、坡度;②群落组成:植物种类、个体数、高度和覆盖度;③以桉树为主,记录数量、冠幅。

#### 1.2.2 研究方法

物种多样性是衡量一定区域内生物资源丰富程度的一个客观指标<sup>[10]</sup>。数据计算分析选用最为常用的 Berger-Parker 指数( $D_{Bp}$ )<sup>[11]</sup>、Margalef 指数( $d_{Ma}$ )<sup>[12]</sup>、Shannon 指数基于信息论的 Shannon-Wiener 物种多样性 (Diversity) 和均匀性 (均匀度, Evenness, Equitability) 指数、基于概率论的 Simpson 物种多样性和均匀性指数<sup>[13-17]</sup>的计算公式。及 Pielou 均匀度指数<sup>[18]</sup>,其中  $D_{Bp}$  指数用来表示优势度,  $d_{Ma}$  用来表示丰富度, Simpson 指数用来度量多样性的概率, Shannon 指数用来测度群落多样性的多寡, Pielou 指数用来测度群落的均匀程度<sup>[19]</sup>。各种生物多样性指数的计算公式所示(表 2)。

#### 1.2.3 数据处理

采用 EXCEL 2016 对数据进行整理、运用 origin 2019 (IBM SPSS Statistics, 2015) 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同坡向的桉树林的物种多样性对比

#### 2.1.1 垂直结构物种多样性特征比较

由图 1 可知,样地物种丰富度排序依次为:草本层 > 灌木层 > 乔木层。桉树人工林下阳坡的乔木层 > 灌木层物种丰富度较阴坡高,阳坡灌木层、草本层物种丰富度相近。总体而言,以阳坡物种丰富度较

阴坡高。

乔木林冠层下，阳坡Margalef指数较阴坡大，表现为阳坡乔木层物种丰富度高于阴坡(图2)。Berger-Parker指数、Simpson、Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数表现为阴坡高于阳坡，即阴坡植物多样性及均匀性均优于阳坡。

如图3所示，阳坡灌木层Berger-Parker指数、Margalef指数高于阴坡；阴、阳坡Simpson、Shannon-Wiener多样性指数等指标无明显差别，阴坡Pielou均匀度指数高于阳坡。说明不同坡向对灌木层物种多样性的影响不大，灌木层在阳坡属于优势层，但物种在阴坡分布更为均匀。

由图4可知，阴坡草本层Berger-Parker指数高于阳坡；Margalef指数、Simpson、Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数均为阳坡较高。阴坡草本优势度高于阳坡，但阳坡草本层植被多样性更高，分布更均匀。

表 2 用于各种生物多样性指数计算的公式列表

生物多样性指数	计算公式
Berger-Parker 指数( $D_{BP}$ )	$D_{BP} = \frac{N \cdot n_{max}}{N^2}$
Margalef 指数( $d_{Ma}$ )	$d_{Ma} = \frac{S - 1}{\ln N}$
Simpson 指数( $\lambda$ )	$\lambda = \sum_{i=1}^S P_i^2$
Simpson 指数( $D_{Sim}$ )	$D_{Sim} = 1 - \sum_{i=1}^S p_i^2$
Simpson 指数( $E_{Sim}$ )	$E_{Sim} = \frac{D_{Sim}}{1 - 1/S}$
Shannon 指数( $D_{SW}$ )	$D_{SW} = - \sum_{i=1}^S p_i \log_2 p_i$
Shannon 指数( $D_{swe}$ )	$D_{swe} = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$
Shannon 指数( $E_{SW}$ )	$E_{SW} = \frac{D_{SW}}{\log_2 S}$
Pielou 均匀度指数( $J_e$ )	$J_e = \frac{D_{swe}}{D_{sw}}$

注： $n_{max}$  为个体数量最多物种的个体数量；S 为样方内物种总数；N 为样方内个体总株数。

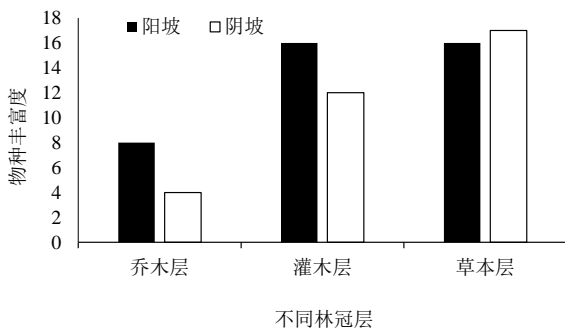


图 1 不同坡向不同冠层物种丰富度比较

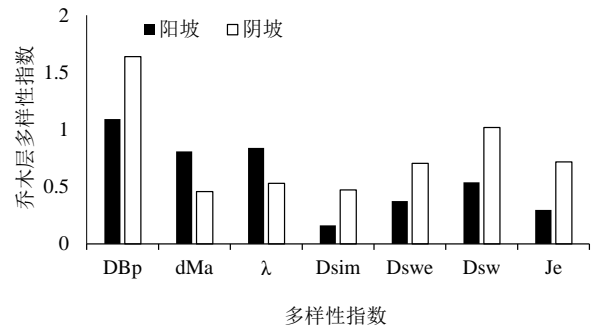


图 2 不同坡向乔木层物种多样性指数比较

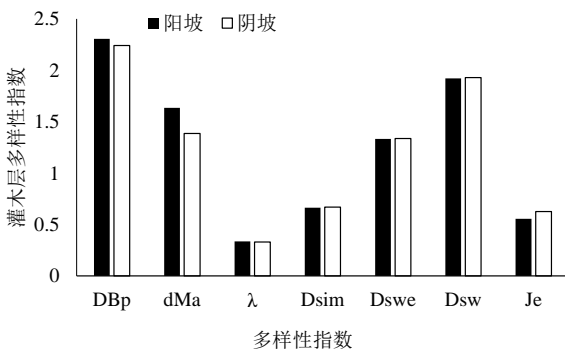


图 3 不同坡向灌木层物种多样性指数比较

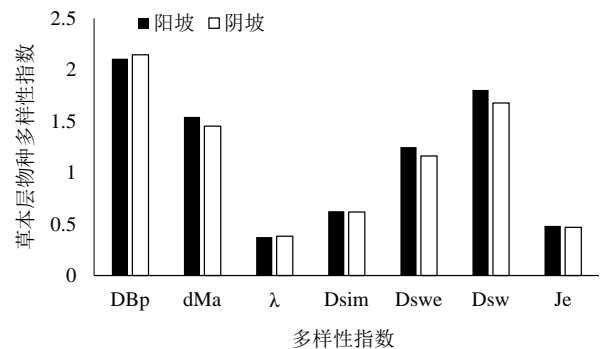


图 4 不同坡向草本层物种多样性指数比较

2.1.2 总体物种多样性特征比较

阳坡的物种数、个体数、Shannon-Wiener 多样性指数、均匀性指数均高于阴坡, Simpson 多样性

指数及均匀度指数表现为阴坡大于阳坡。在阳坡环境下, 光照充足, 适宜林下植物生长发育, 群落的稳定性好。

表 3 不同坡向桉树人工林的林下植物物种多样性比较

坡向	物种数	个体数	$D_{SW}$	$E_{SW}$	$D_{Sim}$	$E_{Sim}$
阳坡	40	10 807	2.8	0.5	0.2	0.2
阴坡	33	6 903	2.5	0.5	0.3	0.3

2.2 不同坡向的桉树林的群落组成对比

2.2.1 水平结构群落特征比较

植物群落水平结构即植物群落在水平空间配置状况或水平格局, 由表 4(仅列出密度大于 0.1%的物种)可知, 尾叶桉作为造林主要树种, 数量多, 长势好, 属乔木层的优势种; 阴坡的火炭母(*Polygonum chinense*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)、牛筋草(*Eleusine indica*)、野蔷薇(*Rosa multiflora*)、粗叶悬钩子(*Rubus alceaefolius*)、姬蕨(*Hypolepis punctata*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等多度和密度均较高, 属于阴坡桉树林的优势种, 除火炭母和野牡丹(*Melastoma candidum*)外, 其他优势种多度和密度均较阳坡低; 阳坡优势种有马唐、火炭母、牛筋草、姬蕨、野蔷薇、凤尾蕨(*Pteris cretica*)等; 相对而言, 阳坡环境更能满足大多数草本、灌木的生长需求, 由于有利的环境条件, 马唐等喜阳植被成为了优势种; 阴坡较为湿润遮荫, 适合火炭母等喜阴湿温暖的植物的生长。

2.2.2 垂直结构群落组成分析

群落内垂直层次结构及其物种多样性的动态是垂直生态梯度的直接反映<sup>[20]</sup>。本研究中阳坡植物种类有 40 种, 隶属 31 科 38 属, 其中乔木层 8 种, 分属于 7 科 7 属; 灌木层 16 种, 分属于 13 科 16 属; 草本层 16 种, 分属于 13 科 16 属。阴坡植物种类有 33 种, 隶属于 25 科 33 属, 其中乔木层 4 种, 分属于 4 科 4 属; 灌木层 12 种, 分属于 9 科 12 属; 草本层 17 种, 分属于 12 科 17 属, 阴坡植物种类较阳坡少 7 种, 阴坡草本层植物种类较多, 林下环境更适合草本植物生长。阳坡垂直结构物种种类比阴坡丰富, 群落结构丰富度较高, 稳定性较好。

表 4 桉树人工林不同坡向林下植物的主要物种

坡向	种名	种的多度/株	密度/%
阴坡	火炭母	2 745	2.3
	马唐	2 253	1.9
	牛筋草	507	0.4
	野蔷薇	367	0.3
	粗叶悬钩子	243	0.2
	姬蕨	169	0.1
	尾叶桉	157	0.1
	刺槐	100	0.1
	凤尾蕨	79	0.1
	玉叶金花 ( <i>Mussaenda Pubescens</i> )	71	0.1
野牡丹	62	0.1	
阳坡	马唐	4248	3.5
	火炭母	728	1.8
	牛筋草	1290	1.1
	姬蕨	775	0.6
	野蔷薇	741	0.6
	粗叶悬钩子	576	0.5
	凤尾蕨	216	0.2
	玉叶金花	207	0.2
尾叶桉	162	0.1	
马樱丹 ( <i>Lantana camara</i> )	11	0.1	

表 5 不同坡向桉树人工林林下植物的群落种类

坡向	林层	科	属	种
阳坡	乔木层	7	7	8
	灌木层	13	16	16
	草本层	13	16	16
	总计	31	38	40
阴坡	乔木层	4	4	4
	灌木层	9	12	12
	草本层	12	17	17
	总计	25	33	33

### 2.2.3 群落生活型分析

群落外貌主要由生活型决定,本研究从层片结构分析植物的群落组成,以比较阴坡和阳坡群落结构的差异。由图 5 可知,灌木类植物生活型数量远高于其他生活型,在阳坡、阴坡均作为优势生活型

存在。同一生活型下绝大部分阳坡物种生活型数量较阴坡多,以落叶乔木最为显著,其次是灌木类、攀援灌木类及草本类。多年生草本及多年生藤本类生活型数量表现为阴坡>阳坡,与垂直结构群落分析结果吻合。

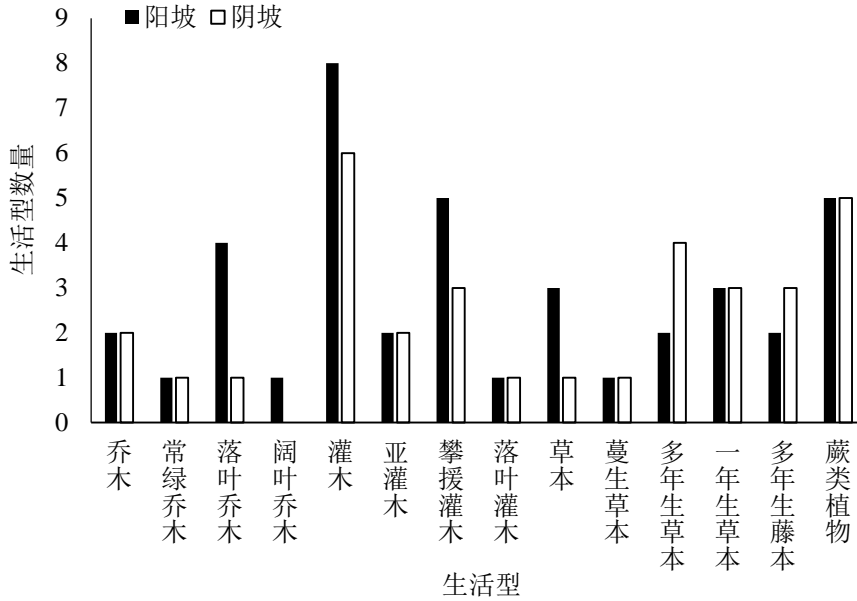


图 5 不同坡向桉树林的物种生活型数量和种类对比

## 3 结论

(1) 在广东的亚热带季风气候条件下,尾叶桉人工林阳坡物种丰富度大于阴坡,不同林冠层物种丰富度大小排序为:草本层>灌木层>乔木层。阳坡的乔木层、灌木层物种丰富度较阴坡高,草本层与之相反。

(2) 阴坡乔木层物种丰富度低,但植物多样性及均匀性均优于阳坡;对于灌木层而言,坡向对其物种多样性的影响不大,阴、阳两坡灌木层的多样性指数均大于草本层和乔木层,且在林内分布更均匀,为优势层;在草本层中,阳坡草本层植被多样性更高,分布更均匀;不同坡向下全部冠层植被多样性及均匀性表现为阳坡高于阴坡。

(3) 阳坡植物种类有 40 种,隶属 31 科 38 属;阴坡植物种类有 33 种,隶属 25 科 33 属。阴、阳两

坡优势树种种类差异不大,但各物种个体数有较大差异。

(4) 在生活型方面,灌木类生活型数量远多于其他生活型,在阳坡、阴坡均为优势生活型。同一生活型下绝大部分阳坡物种生活型数量较阴坡多,其中以落叶乔木最显著。

## 4 讨论

群落物种组成、植被多样性与地形因子的相关关系被广泛讨论,朱宏光等<sup>[21]</sup>指出坡向是造成桉树萌芽林和植苗林林下植被分布差异的最重要因素。坡向是水、光、热等生态因子进行再分配的重要环境条件,不同坡向决定了不同类型植物的生长发育潜力,形成不同的群落结构及多样性状况。在一个局部的地区内,因尺度较小,物种丰富度、多样性指数和均匀度指会受到较多环境因素的影响。植物

通过个体、种群和群落数量变化特征来对周围的生境产生相应变化,环境也会因此发生变化<sup>[22]</sup>。

本研究阳坡乔木层物种丰富度大于阴坡,可能因为阳坡日照时间更充足,更能满足木本植物的生长。坡向对灌木层的多样性指数无显著影响,说明灌木对坡向因子的变化并不敏感,这与李芹等<sup>[23]</sup>的研究结果相似。阴坡的光照条件不足,影响了乔木的生长幅度,也降低了乔灌木冠层的物种丰富度;阴坡乔木层物种丰富度较阳坡低,林下植物可利用该优势,给耐荫喜湿的植物提供了更多自然资源,所以林下草本物种优势度、多样性指数均大于阳坡;本文中阳坡环境更能满足马唐等喜阳草本植物的生长需求;阴坡较为湿润遮荫,适宜火炭母等喜阴湿的植物生长。吴昊等<sup>[24]</sup>研究表明阳坡植物蒸腾作用强,导致土壤含水量低,适宜喜阳耐旱植被定居生存;而阴坡水分条件优越,有利于喜温暖湿润的植物生长发育。就总冠层而言,不同坡向下全部冠层物种丰富度、植被多样性及均匀性表现为阳坡高于阴坡,刘丽艳等<sup>[25]</sup>也得出了同样的结论。

研究样地在1 a生时营林者使用化学除草清理林地,对林地的肥力干扰严重,间接降低了物种多样性。使用除草剂可以全部灭杀林下植物,部分植物易重新生长并成为优势种,而较多的植物短时间内较难恢复。林下植物可促进营养元素在地表富集,对改善土壤肥力、减少水土流失具有明显作用<sup>[26]</sup>。此外,林下植被多样性的提高,还可有效减少林分病虫害的发生,增加森林系统的稳定性。对于人工林,其所发挥的生态功能显然不能与乔木层物种多样性高、林下植被丰富的天然林相比,人工林生物多样性也是一个重要且颇具争议的话题<sup>[27]</sup>,而人工林建植造成生物多样性减少是一个普遍的现象<sup>[28]</sup>。生物多样性既能维持群落系统的功能运行<sup>[29]</sup>,又能反映群落的结构类型、组织水平和稳定性<sup>[30]</sup>。研究植物群落多样性对促进生态系统功能,维持群落的稳定发展具有重要意义<sup>[31]</sup>。对于备受关注的桉树人工林而言,应注意保护物种多样性,改善复层结构,提高生态效益,促进群落的可持续发展<sup>[33]</sup>。桉树是阳性树种,对阳光和水分的需求量大,应种植在阳坡,并适当保留林下本土树种。在保证尾叶桉人工

林生产力的前提下,避免皆伐,以延长土壤肥力的生态恢复期;减少人为活动(炼山、喷撒除草剂等),促进群落自然演替,以形成相对稳定且物种多样性高的植物群落,才能实现可持续经营。

#### 参考文献

- [1] PING L, XIE Z Q. Effects of introducing Eucalyptus on indigenous biodiversity[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2009,20(7):1765-1774.
- [2] 杨尚东,吴俊,谭宏伟,等.红壤区桉树人工林炼山后土壤肥力变化及其生态评价[J].*生态学报*,2013,33(24):7788-7797.
- [3] 刘能文,毛传伟,胡帆.木材市场供需情况与展望[J].*中国人造板*,2019,26(1):33-37.
- [4] 国家林业和草原局.中国森林资源报告(2014—2018)[M].北京:中国林业出版社,2019.
- [5] 钟宇.不同立地类型巨桉人工林生物多样性特征[D].成都:四川农业大学,2009.
- [6] 刘冠成,黄雅曦,王庆贵,等.环境因子对植物物种多样性的影响研究进展[J].*中国农学通报*,2018,34(13):83-89.
- [7] 张育新,马克明,祁建,等.北京东灵山海拔梯度上辽东栎种群结构和空间分布[J].*生态学报*,2009,29(6):2789-2796.
- [8] 黄润霞,徐明锋,刘婷,等.亚热带5种森林类型林下植物物种多样性及其环境解释[J].*西南林业大学学报(自然科学)*,2020,40(2):53-62.
- [9] 赵一鹤.巨尾桉工业原料林群落结构与林下植物物种多样性研究[D].北京:中国林业科学研究院,2008.
- [10] 孙玉军,马炜,刘艳红.与物种多样性有关的长白落叶松人工林生物量[J].*生态学报*,2015,35(10):3329-3338.
- [11] BERGER W H, PARKER F L. Diversity of planktonic foraminifera in deep-sea sediments[J].*Science*,1970,168:1345-1347.
- [12] MARGALEF R. Information theory in ecology[J]. *General Systematics*,1958,3:36-71.
- [13] SIMPSON E H. Measurement of diversity[J]. *Nature*,1949,163:688
- [14] 连辉明,曾令海,何波祥,等.热带次生林经营引入物种选择[J].*广东林业科技*,2008,24(4):75-81.
- [15] YIN Z Y, REN H, ZHANG Q M, et al. Species abundance in a forest community in South China: a case of Poisson

- lognormal distribution[J]. *Journey of Integrative Plant Biology*, 2005, 47(7): 801-810.
- [16] KREBS C J. *Ecology: the Experimental Analysis of Distribution and Abundance*[M]. 5th ed. San Francisco, CA: Benjamin Cummings, 2001.
- [17] 殷祚云. 植物群落中物种的多度与分布格局模拟[D]. 北京: 中国科学院, 2005.
- [18] PIELOU E C. The measurement of diversity in different types of biological collections[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, 13: 131-144.
- [19] 孙凡洲, 于仁成, 徐子钧, 等. 应用 Excel 软件计算生物多样性指数[J]. *海洋科学*, 2015, 36(4): 57-62.
- [20] 郭正刚, 刘慧霞, 孙学刚, 等. 白龙江上游地区森林植物群落物种多样性的研究[J]. *植物生态学报*, 2003, 27(3): 388-395.
- [21] 朱宏光, 熊江波, 尤业民, 等. 不同更新方式巨尾桉林下植物群落变化及其环境解释[J]. *广西科学*, 2014, 21(5): 469-476.
- [22] 张立杰, 赵文智, 何志斌. 青海云杉(*Picea*)种群格局的分形特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2008, 28(4): 1383-1389.
- [23] 李芹, 容丽, 王敏. 地形对喀斯特山地植物物种多样性及分布格局的影响[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(6): 27-34.
- [24] 吴昊, 王得祥, 黄青平, 等. 环境因子对秦岭南坡中段松栎混交林物种多样性的影响[J]. *西北农林科技大学学报* (自然科学版), 2012, 40(9): 41-50.
- [25] 刘丽艳, 张峰, 秦浩. 山西太行山森林群落物种多样性研究[J]. *山西大学学报(自然科学版)*, 2019, 42(3): 673-681.
- [26] 林开敏, 俞新妥, 洪伟, 等. 杉木人工林林下植物对土壤肥力的影响[J]. *林业科学*, 2001, 37(S1): 94-98.
- [27] 褚建民, 卢琦, 崔向慧, 等. 人工林林下植被多样性研究进展[J]. *世界林业研究*, 2007(3): 9-13.
- [28] HARTLEY M J. Rationale and methods for conserving biodiversity in plantation forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 155(1/3): 81-95.
- [29] 崔宁洁, 张丹桔, 刘洋, 等. 马尾松人工林不同大小林窗植物多样性及其季节动态[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(5): 477-490.
- [30] 邓莉萍, 白雪娇, 秦胜金, 等. 辽东山区次生林物种多样性的空间分布及尺度效应[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(7): 2197-2204.
- [31] 郝建锋, 李艳, 齐锦秋, 等. 人为干扰对碧峰峡栲树次生林群落物种多样性及其优势种群生态位的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(23): 7678-7688.
- [32] 韩文娟, 张文辉, 何景峰, 等. 不同坡向油松人工林建群种群结构及群落特征分析[J]. *西北农林科技大学学报* (自然科学版), 2012, 40(3): 47-55.