

海南不同降雨量地区桉树人工林与天然林及其他经济林分 植被多样性差异研究

薛世玉¹, 崔之益¹, 徐谔为², 徐大平^{1*}, 杨曾奖¹, 杨光大³, 肖嘉杰³, 刘小金¹, 郭俊誉¹

1. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东广州 510520; 2. 广东生态工程职业学院, 广东广州 510520; 3. 广东省野生动物监测救护中心, 广东广州 510520

摘要: 为探究降雨量和林分类型差异对植被多样性的影响, 选取海南省年降雨量明显差异的 3 个地区设置植被多样性研究试验。经过 2014—2019 年连续 5 a 的调查发现, 试验区天然林中现存植物种类共计 45 科 58 属 61 种, 桉树人工林中有 26 科 37 属 39 种, 芒果人工林、马占相思人工林、橡胶人工林由于频繁的人为经营管理, 其植被多样性相对较低; 不同降雨量地区天然林的物种多样性指数差异显著 ($P < 0.05$), 桉树人工林则差异不显著; 天然林和桉树人工林物种丰富度指数 (R) 随降雨量的增加而增加, 天然林乔木层、灌木层的 Shannon-Wiener 多样性指数 (H)、Simpson 多样性指数 (D)、Pielou 均匀度指数 (J_{sw}) 随着降雨量增加而减小, 草本层则与之相反; 桉树人工林灌木层、草本层的 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数则随降雨量增加而增加; 物种多样性指数的时间动态变化在天然林和桉树人工林灌木层和草本层波动明显, 乔木层的变化则较为平稳。通过分析表明, 降雨量是造成地区物种多样性差异的主要原因, 与天然林相比, 桉树人工林乔木层生态位的缺失是造成其植被多样性较低的主要原因, 其他经济林分加之频繁的铲草施肥等人为经营措施而导致物种多样性更低。基于此, 营建人工混交林或异龄林改造现有纯林促进人工林乔木层生态位的释放, 同时改变其他经济林分经营模式是提高人工林物种多样性的关键。

关键词: 天然林; 桉树林; 降雨量; 植被多样性

中图分类号: S718.54 文献标识码: A

Research of Vegetation Diversity Difference Between *Eucalyptus* Plantation and Natural Forests and Other Stands in Different Rainfall Areas of Hainan Province, China

XUE Shiyu¹, CUI Zhiyi¹, XU Anwei², XU Daping^{1*}, YANG Zengjiang¹, YANG Guangda³, XIAO Jiajie³, LIU Xiaojin¹, GUO Junyu¹

1. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China; 2. Guangdong Eco-Engineering Polytechnic, Guangzhou, Guangdong 510520, China; 3. Guangdong Wildlife Monitoring Rescue Center, Guangzhou, Guangdong 510520, China

Abstract: In order to explore the effects of different rainfall and stand types in the same area on vegetation diversity, three regions with large annual rainfall differences in Hainan were selected to conduct vegetation diversity control experiments with different stand types. The results showed that 61 species, 58 genera, 45 families were present in the natural forests, 39 species, 37 genera, 26 families were present in the *Eucalyptus* plantations, and the vegetation diversity of *Mangifera indica* plantations, *Acacia mangium* plantations and *Hevea brasiliensis* plantations was relatively low

收稿日期 2022-03-17; 修回日期 2022-07-14

基金项目 广东省林业科技创新项目 (No. 2020KJJCX007); 广东省林业厅统筹项目 (No. 2017KJJCX001)。

作者简介 薛世玉 (1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 生物多样性。*通信作者 (Corresponding author): 徐大平 (XU Daping), E-mail: czycyf@163.com。

due to frequent artificial management. The effects of rainfall on species diversity index of natural forest were significant ($P < 0.05$), but no significant difference was found in *Eucalyptus* plantation ($P > 0.05$). The species richness index (R) of natural forest and *Eucalyptus* plantation increased gradually with the increase of rainfall. The Shannon-Wiener diversity index (H), Simpson diversity index (D) and Pielou evenness index (J_{sw}) of tree layer and shrub layer of natural forest decreased with the increase of rainfall, while the herbaceous layer did the opposite. Shannon-Wiener diversity index, Simpson diversity index and Pielou evenness index of shrub layer and herb layer of *Eucalyptus* plantation increased with the increase of rainfall. The fluctuation of species diversity index was mainly in shrub layer and herb layer of natural forest and *Eucalyptus* plantation, and the change of tree layer was relatively stable. The rainfall and canopy shaded effect were the important reason for the differences in regional species diversity, compared with natural forest of *Eucalyptus* plantation tree layer the lack of ecological niche of the vegetation diversity was the main reason for the low and had nothing to do with the tree itself, specific provisions of other economic forest caused by frequent grass fertilizer management was relatively single species diversity. Therefore, the key to improve species diversity of the plantation is to establish a mixed or different-age forest to transform the existing pure forest to promote the release of the niche of the tree layer and change the management mode of other economic stands at the same time.

Keywords: natural forest; *Eucalyptus* forest; rainfall; vegetation diversity

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.05.019

物种多样性能反映森林群落中各物种对资源环境的竞争及协调利用并最终实现共存的结果,是群落功能复杂性和稳定性的重要度量指标^[1-2]。已有研究表明,与人工林相比天然林具有更高的物种多样性,其林分结构也更为合理^[3-6]。而当前人工林在我国南方地区大面积种植,截至 2020 年仅桉树人工种植面积已达到 546 万 hm^2 ^[7],在给当地带来巨大经济效益的同时,其生态效益也不容忽视,开展人工林生态改造全面提升人工林物种多样性已刻不容缓。有关导致人工林物种多样性低于天然林的原因,已有科研工作者展开了大量相关研究,主要集中在林下土壤^[8-9]、林分养分循环^[10-11]、林分竞争化感作用^[12]等方面,而较少对降雨量和林分类型间的差异进行对比研究。降雨量影响植物生长、改变物种间关系,进而影响植物群落的组成和结构,能直接改变土壤水分含量、影响土壤微生物种类及组成等,从而对陆地生态系统的生态过程产生间接影响^[13]。有研究表明,降水量减少会显著降低物种多样性指数和物种丰富度^[14],降水过量也会导致物种多样性降低^[15];亦有研究表明,降雨量变化对物种丰富度和多样性影响差异不显著^[16],目前尚无一致结论。林分类型通过不同的冠层结构改变林下太阳光照强度是影响植被多样性的重要因素^[17-19]。基于此,本文从不同降雨量地区和林分类型展开研究,以期探明水分限制和林分类型对植被多样性的影响,明晰导致人工林物种多样性较低的影响因素,从而为我国人工林近自然化改造和林业整体生态价值提升提供理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于海南省极具代表性的 3 个降雨量差异明显地区:中部山地多雨区(琼中县乌石镇, $19^{\circ}10'N$, $109^{\circ}48'E$, 年均温 $22.5^{\circ}C$, 年均降雨量 2225.70 mm , 年均蒸发量 1429.63 mm)、西部高山丘陵过渡区(昌江县石碌镇, $19^{\circ}17'N$, $109^{\circ}7'E$, 年均温为 $24.6^{\circ}C$, 年均降水量 1712.20 mm , 年均蒸发量 1759.25 mm)、西南部干旱少雨区(乐东县利国镇红五村, $18^{\circ}36'N$, $108^{\circ}54'E$, 年均温 $25^{\circ}C$, 年均降水量 1559.30 mm , 年均蒸发量 1725.60 mm)。

1.2 样地设置

试验于 2014 年开始,2014—2019 年进行连续 5 a 植被多样性调查研究。设立乐东县利国镇红五村、昌江县石碌镇牙营村、琼中县乌石镇 3 个监测点,其中乐东县利国镇红五村设立 1 个天然林样地(天然林因起源不详林龄未知,下同)、3 个桉树人工林样地(林龄 9 a)和 3 个芒果林样地(林龄 9 a);昌江县石碌镇牙营村设立 2 个天然林样地、3 个桉树人工林样地(林龄 9 a)和 3 个马占相思人工林样地(林龄 9 a);琼中乌石镇设立 2 个天然林样地、3 个桉树人工林样地(林龄 2.5 a)和 3 个橡胶林样地(一块样地林龄 43 a,其余林龄 10 a),共设 23 个样地,每个样地面积 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$,样地间设置 2~3 行隔离行。

1.3 植被物种多样性监测

于 2014—2019 年每年 12 月监测各标准样地内植被多样性变化情况,包括乔木层、灌木层、

草本层。乔木层沿每块样地对角线设置 3 块 10 m×10 m 样方，调查记录各个样方内各株树木的种类、数量、高度、盖度；灌木层在标准样地的四角及样地正中共设置 5 个 5 m×5 m 永久监测样方，记录样方内的灌木（含木质藤本植物）种类、数量、高度、盖度；草本层在标准样地的四角及样地正中共设置 5 个 2 m×2 m 永久监测样方，记录样方内草本植物的种类、数量、高度、盖度。分别计算物种的重要值（ I ）、丰富度指数（ R ）、Simpson 多样性指数（ D ）、Shannon-Wiener 多样性指数（ H ）和 Pielou 均匀度指数（ J_{sw} ）。具体计算公式如下^[20-21]：

重要值（ I ）=（相对多度+相对高度+相对盖度）/3

相对多度 = 某个种的株数/所有种的总株数

相对高度 = 某个种的高度/所有种的总高度

相对盖度 = 某个种的盖度/所有种的总盖度

丰富度指数（ R ）= S

Simpson 多样性指数（ D ）= $1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$

Shannon-Wiener 多样性指数（ H ）= $1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$

Pielou 均匀度指数（ J_{sw} ）= $H/\ln S$

式中， S 为样方内物种的总数； P_i 为 i 物种的个体数占样方总个体数的比。

1.4 数据处理

运用 Microsoft Excel 2010 软件对数据进行处理并制图，采用 SPSS 20.0 软件进行数据统计分析，对物种多样性指数进行单因素方差分析

（one-way-ANOVA），并采用双因素方差分析（two-way-ANOVA）检验降雨量和林分类型对物种多样性指数的交互效应，用 Duncan's 法进行多重对比。

2 结果与分析

2.1 植被多样性组成与重要值变化特征

经过调查表明，不同降雨量地区同一林分类型的物种组成差异明显（表 1）。天然林琼中乌石的年平均物种组成为 44 科 56 属 62 种，昌江牙营为 43 科 55 属 58 种，乐东红五为 36 科 51 属 57 种，物种数随降雨量的减少呈逐渐降低的趋势；桉树林呈现相同变化趋势，琼中乌石的年平均物种组成为 23 科 37 属 38 种，昌江牙营为 24 科 34 属 36 种，乐东红五则为 21 科 31 属 32 种；经济林中，琼中乌石的年平均物种组成为 15 科 24 属 25 种，昌江牙营为 19 科 24 属 26 种，乐东红五为 7 科 9 属 9 种，综合经济林分类型差异来看，降雨量可能不是影响其植被多样性的主要因素，经济林受人类除草、施肥等抚育管理措施的影响更为剧烈。

不同雨量区植被优势物种组成差异亦较明显。其中乐东红五天然林乔木层主要以红鳞蒲桃、闭花木、黑叶谷木等为主；昌江牙营则主要分布有黄杞、丛花山矾、贡甲等植被，琼中乌石则主要以芳槁润楠、三角槭、鹅掌柴等为主要植被类型。不同降雨量地区天然林灌木层物种组成上，乐东红五主要有刺桑、叶被木、狗骨柴等植被；昌江牙营则以九节、罗伞、锡叶藤等为主；琼中

表 1 2014—2018 年不同降雨量地区不同林分物种组成

Tab. 1 Species composition of different stands in different rainfall areas from 2014 to 2018

地点 Site	林分 Forest type	2014			2015			2016			2017			2018		
		科 Family	属 genus	种 Species	科 Family	属 genus	种 Species	科 Family	属 genus	种 Species	科 Family	属 genus	种 Species	科 Family	属 genus	种 Species
乐东 红五	天然林	36	50	56	35	48	55	35	51	58	35	51	58	37	53	58
	桉树林	17	22	23	18	25	26	23	32	33	23	37	38	23	37	38
	芒果林	4	6	6	6	7	7	9	12	12	7	9	9	7	9	9
昌江 牙营	天然林	41	52	55	42	54	56	44	56	60	44	57	60	45	58	61
	桉树林	22	31	33	18	25	27	26	39	41	26	39	41	26	35	39
	马占相思林	18	22	24	16	19	20	22	28	29	21	28	30	17	25	27
琼中 乌石	天然林	45	56	62	45	56	61	45	58	63	45	58	63	39	52	59
	桉树林	21	35	36	23	37	37	25	42	43	24	38	40	23	32	33
	橡胶林	17	25	26	16	25	26	17	27	28	15	25	26	11	17	17

乌石以九节、假鹰爪、鹅掌柴等植被在灌木层占据绝对优势。在不同降雨量地区天然林草本层物种构成上亦有较大差异,其中乐东红五以海金沙、莎草、毛马唐等构成草本层主体;昌江牙营主要有假益智、扇叶铁线蕨、山菅等植被;琼中乌石则以扇叶铁线蕨、竹节草、山菅等植被为主。

研究区域内桉树林和经济林(芒果林、马占相思、橡胶)均由人工种植而来,因人为定植和经营管理使林分乔木层中桉树、芒果、马占相思、橡胶占据绝对优势。但不同降雨量地区的灌木层和草本层还是有较大差异,其中桉树林灌木层中,乐东红五以刺桑、巴豆、破布叶等为主;昌江牙营则以山鸡椒、悬钩子、野牡丹为主;琼中乌石以乌荑莓、山乌柏、粗叶榕等植物占据绝对优势。桉树林草本层中,乐东红五以飞机草、含羞草等为主;昌江牙营主要以两耳草、飞机草等为主;琼中乌石以竹节草和飞机草为主。经济林优势种组成上,与乐东红五样地其他林分相比,乐东红五芒果林因人为除草、施肥等管理措施使芒果林灌木层基本无植被存在,草本层则主要有牛筋草、阔叶丰花草等植被零星分布。昌江牙营样地的马占相思林灌木层主要有银柴、潺槁木姜子、野牡丹等植被分布,草本层则有蔓生莠竹、火炭母、飞机草等植被。琼中乌石的橡胶林灌木层主要以狗牙花和银柴等为主,草本层则以野茼蒿和毛马唐等植被占据优势。导致以上结果的主要原因可能是不同植被对降雨量的不同偏好性,同时不同的优势物种构成的群落空间结构又加剧了不同降雨量地区间物种组成的分化。

不同降雨量地区各林层优势度排名前 3 物种重要值累计计算结果表明,乐东红五天然林乔木层、灌木层、草本层连续 5 a 重要值累计平均值分别为 41.24%、56.16%、79.90%,昌江牙营分别为 61.26%、54.20%、81.18%,琼中乌石则分别为 57.32%、56.92%、59.52%。桉树林乔木层因桉树的速生和人为定植桉树占据了绝对优势,不同雨量区桉树灌木层、草本层排名前 3 优势种重要值累计则存在明显差异,其中乐东红五桉树林灌木层、草本层分别为 53.74%、70.72%,昌江牙营分别为 54.20%、65.50%,琼中乌石则分别为 52.08%、59.26%。芒果林、马占相思、橡胶林乔木层为目标经济树种完全占据,芒果林更因频繁的抚育管理措施导致灌木层植被缺失,具体排名前 3 优势种累计值表现为,乐东红五芒果林草本层为

62.86%,昌江牙营马占相思灌木层和草本层分别为 48.02%和 74.82%,琼中乌石橡胶林为 54.66%、55.36%。随着降雨量的增加天然林乔木层和草本层排名前 3 物种的重要值累计有先增后降的变化趋势,灌木层的变化则较为平稳。桉树林和经济林灌木层和草本层重要值的变化对降雨量的响应不明显。结果表明,随着降雨量的增加,各林层生长竞争更加激烈,灌木层、草本层物种组成相对稳定,降雨量对物种分布和群落结构具有较大影响。

2.2 不同林分类型植被多样性差异

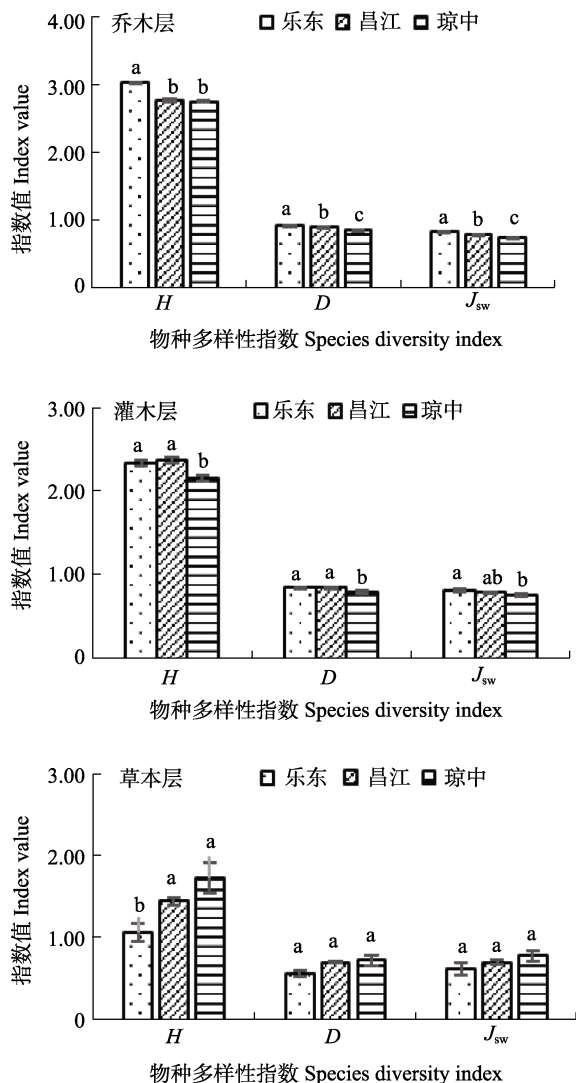
2.2.1 天然林

研究表明,不同降雨量和林分类型对物种多样性指数的交互效应不显著($P>0.05$),天然林物种丰富度指数在不同降雨量地区差异显著($P<0.05$),其中琼中乌石与乐东红五、昌江牙营间差异极显著($P<0.01$)。群落中物种丰富度越高表明群落的复杂程度越高,对外界干扰抵抗能力也越强。通过逐年调查表明,天然林的物种丰富度指数随年降雨量的增加逐渐升高,这主要是因为丰富的降雨为植被的生长提供了充足的水分和营养,促进了植被的生长。进一步分析表明,不同降雨量地区间天然林乔木层、灌木层、草本层的物种丰富度指数差异极显著($P<0.01$),琼中乌石的乔木层和草本层物种数量显著高于乐东红五和昌江牙营,表明降雨量对天然林物种丰富度的促进作用可能更多发生在乔木和草本层,对灌木层的影响则相对较小。

Shannon-Wiener 多样性指数(H),各种间个体分配越均匀,其值就越大。不同降雨量地区间天然林乔木层、灌木层、草本层的 H 值差异极显著($P<0.01$),乔木层中,乐东红五的 H 值最高;灌木层中,昌江牙营的 H 值最高;草本层则是琼中乌石 H 值最高(图 1),表明不同的降雨量可能作用于林分的不同空间结构,从而对该地区的物种多样性产生影响。较低的降雨不利于高大乔木层的维持,使乐东红五乔木层的物种分布均匀度较高;在林冠的荫闭作用和草本层对资源竞争的综合作用下,昌江牙营因中等程度降雨量,为灌木层植被分布提供了条件;琼中乌石因较高的降雨量易出现高大乔木层,草本大多集中分布在林冠空隙处,从而造成分布相对较为均匀的格局。

Simpson 多样性指数(D)表示在无限大小的群落中,随机取样的 2 个个体属于不同种的概率。Pielou 均匀度指数(J_{sw})反映群落中全部物种个

体数目的分布状况，对于物种数一定的群落，各物种之间个体数量分布越均匀，多样性越高；而对于个体数量分布均匀的群落，物种数越多，多样性越高。不同降雨量地区天然林的 D 值和 J_{sw} 值在各林层间差异极显著 ($P<0.01$)，乔木层、灌木层的 D 值和 J_{sw} 值随降雨量的增加而降低，草本层的 D 值和 J_{sw} 值则随降雨量的增加逐渐升高 (图 1)，这可能是由于随降雨量的增加乔木层和灌木层高大植被数量占比增加，其较强的荫蔽作用降低了单位面积的植被总数量，使乔木层和灌木层植被的 D 值和 J_{sw} 值降低，草本层分布的大多是短生长周期的菊科和禾本科植被，林冠透射

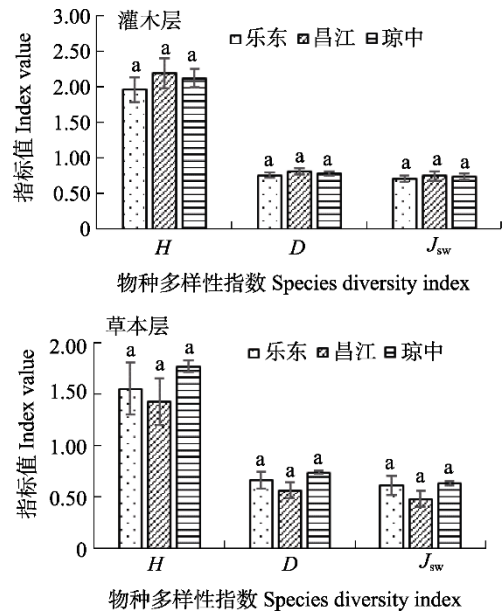


同一指数不同小写字母表示地点间差异显著 ($P<0.05$)。Different lowercase letters in the same index indicate significant difference between sites ($P<0.05$)。

图 1 不同降雨量地区天然林物种多样性指数
Fig. 1 Species diversity index of natural forest in different rainfall areas

光和较高降水量使草本层植被数量较多，空间分布相对均匀。

2.2.2 桉树人工林 通过分析表明，不同降雨量地区的桉树人工林物种丰富度指数无显著性差异 ($P>0.05$)，但均随降雨量减少而逐渐降低。在林层分布上，桉树林灌木层植被以琼中乌石的物种丰富度最高，达到 20 种，乐东红五和昌江牙营则均只有 18 种；草本层则以昌江牙营的物种丰富度最高 (18 种)，乐东红五最低 (12 种)。整体反映出桉树林速生特性对水分的极高需求，降雨量成为驱动桉树林物种多样性增加的重要因素。基于此，多样性指数变化上，桉树灌木层的 H 值、 D 值、 J_{sw} 值均表现为昌江牙营>琼中乌石>乐东红五；草本层的 H 值、 D 值、 J_{sw} 值均表现为琼中乌石>乐东红五>昌江牙营 (图 2)。



同一指数不同小写字母表示地点间差异显著 ($P<0.05$)。Different lowercase letters in the same index indicate significant difference between sites ($P<0.05$)。

图 2 不同雨量区桉树人工林物种多样性指数
Fig. 2 Species diversity index of *Eucalyptus* plantation in different rainfall areas

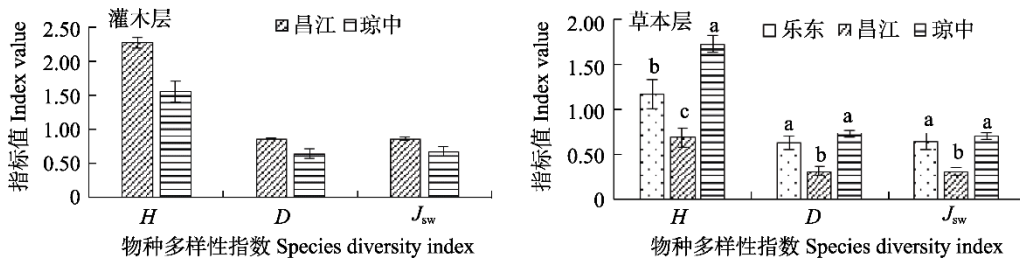
2.2.3 经济林 经济林分受到人类经营措施的强烈扰动，物种丰富度较低，林层结构简单。但是不同降雨量地区经济林分的物种多样性指数也呈显著差异 ($P<0.05$)。因频繁的除草施肥等抚育措施，乐东芒果林的灌木层基本无植被存在；昌江马占相思林与琼中橡胶林相比，一方面因橡胶林林龄较大，另一方面受降雨的影响，琼中橡胶林植株高大对灌木层的隐蔽作用更加强烈，因而昌

江马占相思林的 H 值、 D 值、 J_{sw} 值均大于琼中橡胶林。草本层乐东芒果林较大的株行距和灌木层植被的缺失，琼中橡胶林充足的降雨都极大促进了草本层植被的生长，昌江马占相思林在二者上均处于居中水平，最终导致在经济林灌木层和草本层的 H 值、 D 值、 J_{sw} 值均为琼中>乐东>昌江（图 3）。

2.3 不同林分类型植被多样性的时间动态特征

2.3.1 天然林 (1) 乔木层。2014—2018 年，天然林乔木层的丰富度指数 (R) 整体变化平稳，

昌江牙营可能因适宜的降雨量使乔木层的生长空间尚未完全封闭，因而呈逐年增长的趋势，琼中乌石和乐东红五的变化极小（图 4A）。乐东红五因雨量限制，高大树木较少使物种分布更趋均匀，因而 H 值较高，昌江牙营和琼中乌石基本持平，且整体呈缓慢上升趋势（图 4B）。受降水和林冠荫闭的综合影响，天然林乔木层的 D 值和 J_{sw} 值变化趋势相近，且整体表现为乐东>昌江>琼中（图 4C~图 4D）。



同一指数不同小写字母表示地点间差异显著 ($P<0.05$)。 Different lowercase letters in the same index indicate significant difference between sites ($P<0.05$).

图 3 不同降雨量地区经济林物种多样性指数

Fig. 3 Species diversity index of economic forest in different rainfall areas

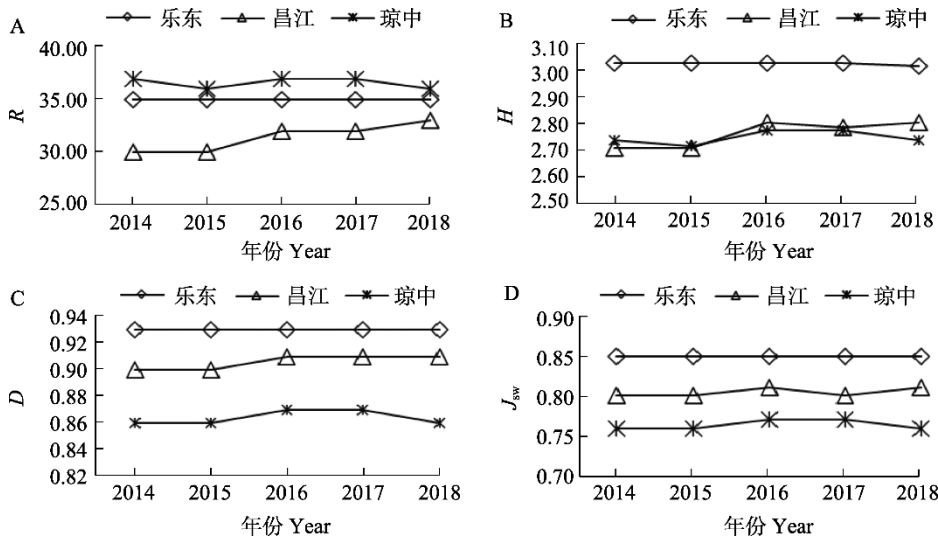


图 4 不同降雨量地区天然林乔木层物种多样性指数的时间动态变化

Fig. 4 Temporal dynamics of tree layer species diversity index in natural forests in different rainfall areas

(2) 灌木层。2014—2018 年，天然林灌木层物种多样性指数的时间动态变化较乔木层更为复杂，灌木层的 R 值随时间变化整体呈上升趋势，其中昌江牙营的 R 值处于较高水平，乐东红五和昌江牙营的 R 值相近且处于较低水平（图 5A）。不同降雨量地区天然林灌木层的 H 值、 D 值、 J_{sw} 值均随时间变化整体呈先降后增的趋势，且昌江牙营和乐东红五处于较高水平，琼中乌石最低（图

5B~图 5D），这可能是由于乔木层的持续生长加剧了对灌木层的胁迫作用，而随着乔木层生长速度的减缓，灌木层植被有一定的增加。

(3) 草本层。2014—2018 年，相较于天然林乔木层和灌木层，天然林草本层的物种数较少，整体结构简单，其中， R 值表现为琼中乌石>昌江牙营>乐东红五；时间动态变化上，昌江牙营和乐东红五的 R 值变化平缓，琼中乌石在 2014—2017

年变化平缓, 2017—2018 年则急剧降低(图 6A)。H 值、D 值、 J_{sw} 值整体均以琼中乌石最高, 昌江牙营次之, 乐东红五最低(图 6B~图 6D); 时间

变化趋势上, 琼中乌石呈先降后增再降的变化趋势, 昌江牙营和乐东红五则相对平稳, 这可能与年际降水的变化趋势有关。

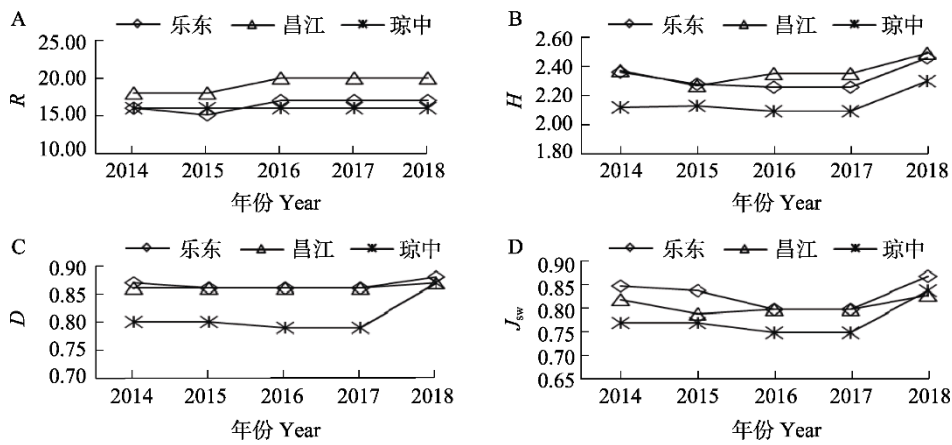


图 5 不同降雨量地区天然林灌木层物种多样性指数的时间动态变化

Fig. 5 Temporal dynamics of shrub layer species diversity index in natural forests in different rainfall areas

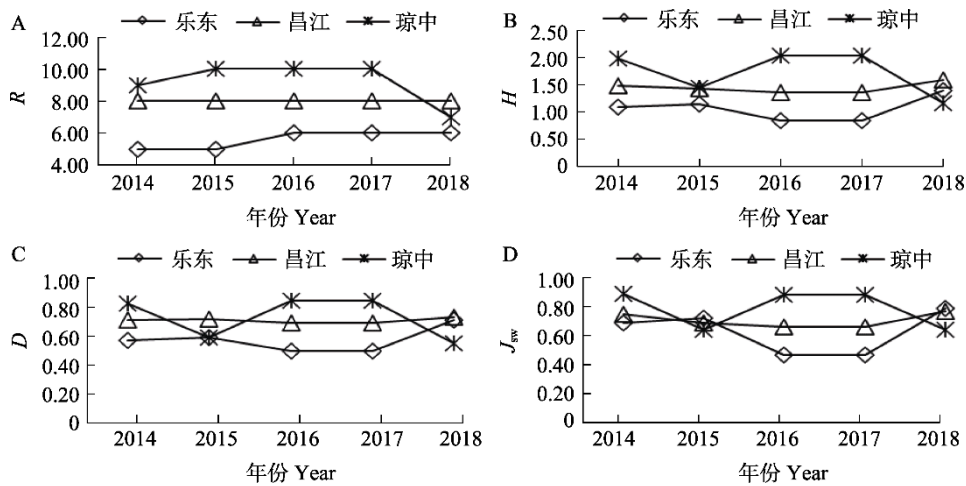


图 6 不同降雨量地区天然林草本层物种多样性指数时间动态变化

Fig. 6 Temporal dynamics of species diversity index of herbaceous layer in natural forests in different rainfall areas

2.3.2 桉树人工林 (1) 灌木层。桉树人工林的乔木层以桉树占据绝对优势, 其他乔木无法占据优势生态位。灌木层则具有相对较高的物种多样性, 其中, 2014—2017 年 R 值以琼中乌石最高, 2017—2018 年则昌江牙营和乐东红五较高(图 7A)。桉树灌木层 H 值、D 值、 J_{sw} 值的动态变化趋势相似, 受桉树乔木林生长速度变化的影响呈先降后增的变化趋势(图 7B~图 7D)。

(2) 草本层。2014—2018 年, 相较于桉树人工林灌木层, 不同降雨量地区桉树人工林草本层物种多样性指数的时间动态变化趋势有较大差异, 其中, 昌江牙营 R 值最高, 琼中乌石次之, 乐东红五最低, 变化趋势相近, 整体呈先增后降的

变化趋势(图 8A)。桉树草本层受乔木层、灌木层植被和降雨量年际变化的综合影响, H 值、D 值、 J_{sw} 值均以琼中乌石最高, 乐东红五和昌江牙营则相近; 整体变化趋势上琼中乌石变化平缓, 昌江牙营和乐东红五呈“M”型变化趋势(图 8B~图 8D)。

2.3.3 经济林 2014—2018 年, 经济林 R 值低, 林分结构简单, 乔木层被人为定植树种完全占据, 灌木层和草本层受人为因素影响变化亦较大, 灌木层和草本层的 R 值整体上呈先增后降的变化趋势(图 9A、图 10A), 这可能与降水量的变化有关。经济林灌木层的 H 值、D 值、 J_{sw} 值整体变化平稳, 且昌江牙营马占相思林始终大于琼中乌石橡胶林(图 9B~图 9D), 这可能与乔木层植被变

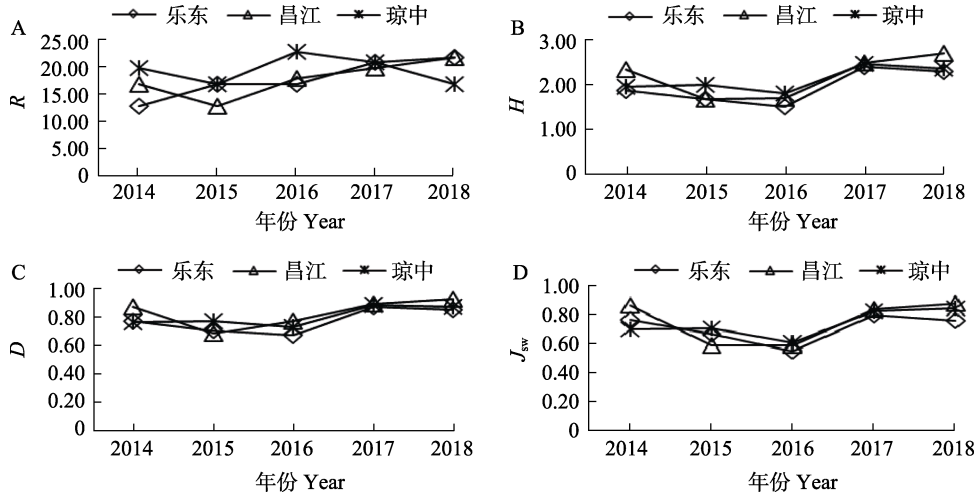


图 7 不同降雨量地区桉树人工林灌木层物种多样性指数的时间动态变化

Fig. 7 Temporal dynamics of species diversity index in shrub layer of *Eucalyptus* plantations in different rainfall areas

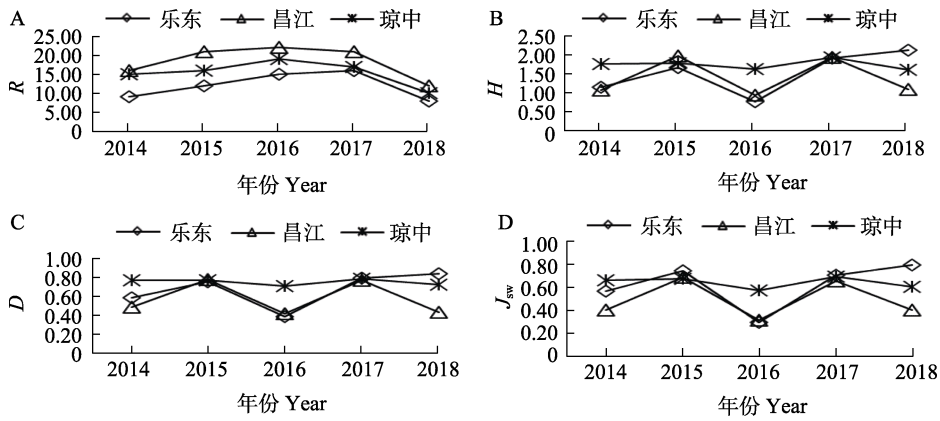


图 8 不同降雨量地区桉树人工林草本层物种多样性指数的时间动态变化

Fig. 8 Temporal dynamics of species diversity index in herbaceous layer of *Eucalyptus* plantations in different rainfall areas

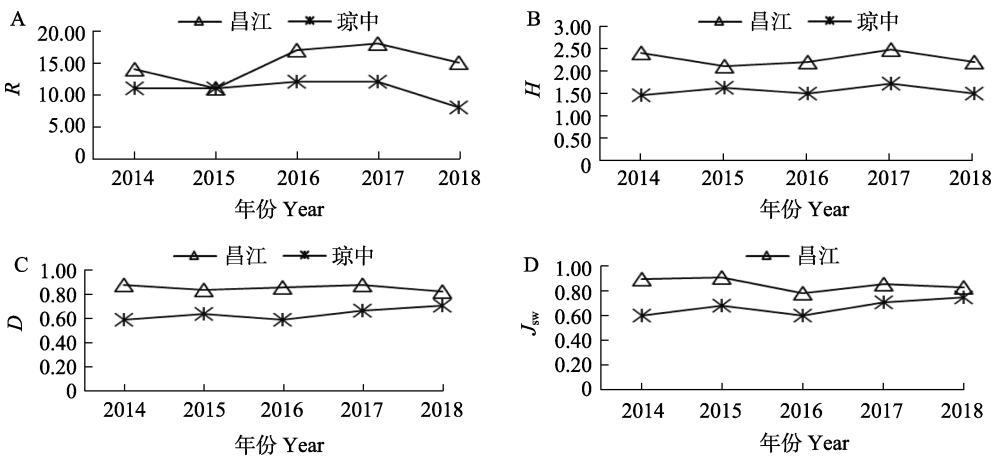


图 9 不同降雨量地区经济林灌木层物种多样性指数的时间动态变化

Fig. 9 Temporal dynamics of species diversity index in shrub layer of economic forest in different rainfall areas

化直接相关。经济林草本层的时间动态变化凸显出人为干扰的强烈作用， H 、 D 、 J_{sw} 值乐东红五芒果林因为芒果林的年度抚育和采摘干扰变化最

为剧烈，昌江牙营马占相思林和琼中乌石橡胶林受人为和降雨年际变化影响时间变化亦较为剧烈（图 10B~图 10D）。

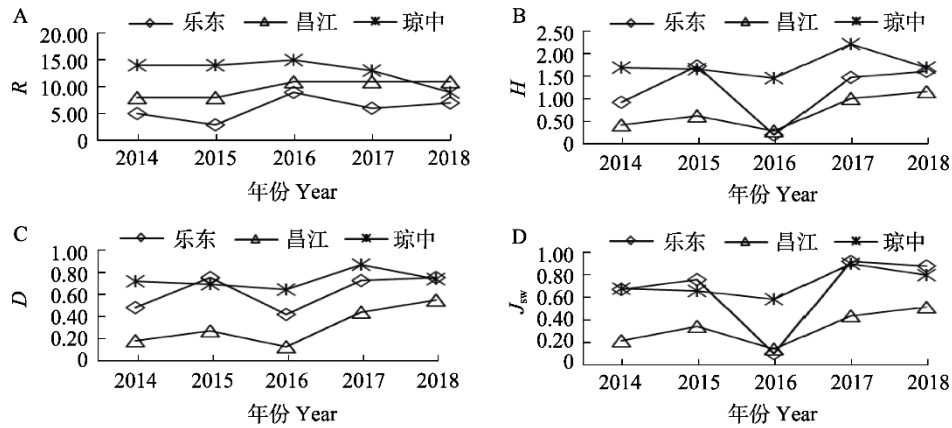


图 10 不同降雨量地区经济林草本层物种多样性指数的时间动态变化

Fig. 10 Temporal dynamics of species diversity index in herbaceous layer of economic forest in different rainfall areas

3 讨论

3.1 不同降雨量对林分植被多样性的影响

降雨量是影响植被生长的重要环境因素，依据降水量的不同可以划分出不同的植被带，同时呈现不同的景观格局^[22]。不同降雨量会导致物种的分布发生相应的偏好性从而呈现多样的聚落格局，不同降雨量地区的不同物种分布造成地区间植被多样性的显著差异^[23-24]。同一树种同一植被型对雨量的响应程度又如何，这点非常值得探究。对于天然林的区域差异性研究表明降水会成为限制林分发展的重要因素，一定范围内降雨量增加会显著增加植被多样性，但达到某一阈值后其增加幅度则有所减缓^[25-26]。本研究发现，在琼中多雨区天然林的乔木层、灌木层 H 值、 D 值、 J_{sw} 值均随降雨量的增加而减小，而草本层则与之相反。已有研究表明，桉树在不同地区种植其生长速度、蓄积量、林下植被多样性均具有较大差异^[27-29]。这除受降雨量的影响外，树种的生长荫闭作用对于一些植被生态位的侵占也是不容忽视的重要因素。桉树林中由于乔木层极强的荫闭作用，灌木层主要以一些攀缘植物和较耐阴植物为主^[30]，这在一定程度上塑造了桉树林的植被类型，同时也是桉树林植被多样性相对较低的一个影响因素。通过不同降雨量地区天然林、桉树林、经济林的比较，发现降雨量对于植被的调节作用极强，特别在天然林中具有主要的主导地位，同时林分类型亦是不可忽视的一个重要影响因素。天然林中由于乔木层和灌木层的层层遮荫作用，最终到达草本层的资源极其有限，因而草本层逐渐演变出以短生长周期为主的菊科和禾本科植物^[30]，桉树林和经济林中亦呈现相似的结果。

3.2 降雨量影响下不同林分的植被多样性特征

在同一地区同一降水量影响下，与桉树林相比，天然林对水分的截留和涵养作用更加明显^[31-32]，这在植被多样性上也有明显体现。植被多样性一般随降雨量的增加而增加，这在不同降雨量地区桉树林物种多样性指数变化特征中得到了验证。但植被多样性特征不仅受物种数量的影响同时也受分布均匀度的影响。本研究发现，降雨量相对较小地区天然林的物种多样性指数反而高于降雨量较多地区，分析发现主要是物种分布均匀度影响所致，降雨量较多地区植株一般较为高大，这导致单位面积内物种数量减少，同时对下层植被的隐蔽作用亦加强。本研究表明，琼中乌石多雨区天然林乔木层和灌木层的 R 值均高于少雨区的乐东红五和过渡区的昌江牙营，但 H 值、 D 值、 J_{sw} 值则整体呈现出乐东红五>昌江牙营>琼中乌石的变化格局。从物种竞争角度分析，降雨量的多少导致不同的物种组成格局^[33-35]，降雨量较大地区植被生境相对优越，种间竞争相对缓和，区域优势物种分布广泛，由此造成植被物种的分布出现区域集中分布^[36-37]，而在降雨量相对较少地区，水资源竞争相对激烈，不利于单一物种的大面积分布^[38-39]，这在一定程度上也解释了降雨量较多地区物种多样性指数反而小于少雨区的现象。

3.3 不同林分植被多样性的时间变化规律

天然林乔木层的物种多样性指数随时间变化差异极小，这表明天然林随时间变化的稳定性和抗干扰能力^[40-42]。而天然林灌木层和草本层的物种多样性指数则随时间变化波动较大，这主要与乔木层的隐蔽作用导致的物种演替和年际降雨量变化有关^[43]。桉树林灌木层、草本层植被多样性

指数随时间波动变化极为显著,这可能与桉树速生特性引起乔木层荫闭导致下层生长空间的动态变化有关^[29],其次与降雨量的时间变化有关。

桉树林和经济林中,由于乔木层完全被人工定植树种占据,导致人工林物种多样性的时间动态变化很大程度受上层乔木树种生长规律的影响,本研究发现随着人工林乔木层的快速生长,灌木层和草本层的物种多样性指数会出现降低现象,而随着乔木树种生长速度减缓物种多样性则有所增加。林分多样性指数对降雨量年际变化的响应并非简单的线性关系,同时受降雨量增加对树木生长速度的调节和树木生长带来的荫闭作用的双重调节,这是一个复杂的动态平衡过程,这种耦合效应是今后开展物种多样性研究的重要方向之一^[15]。

4 结论

通过对海南省不同降雨量地区不同林分类型植被多样性差异的对比研究,发现降雨量对地区的植被多样性格局具有较大的影响,且 R 值随降雨量的增加而增大。但研究表明,天然林乔木层和灌木层的 H 值、 D 值、 J_{sw} 值随降雨量增大而减小。同时在与天然林的对比研究中发现,桉树人工林物种多样性相对较低,主要由乔木层单一的群落结构和林下生态位缺失造成,经济林更多地受人为经营管理的影响。基于此,在人工林营建中应加强不同群落结构层次的构建,采取合理的经营管理措施,从而逐步提升人工林生态效益。

参考文献

- [1] 张柳桦,齐锦秋,李婷婷,鱼舜尧,张满月,张荣,郝建锋. 林分密度对新津文峰山马尾松人工林林下物种多样性和生物量的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5709-5717.
ZHANG L H, QI J Q, LI T T, YU S Y, ZHANG X Y, ZHANG R, HAO J F. Effects of stand density on understory plant diversity and biomass in a *Pinus massoniana* plantation in Wenfeng Mountain, Xinjin County[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5709-5717. (in Chinese)
- [2] GUO Q F. The diversity-biomass-productivity relationships in grassland management and restoration[J]. Basic and Applied Ecology, 2007, 8(3): 199-208.
- [3] 金亚宁,管增艳,石松林,许倩,贾龙玉,曹吉鑫,陈圣宾,李景吉,王国严,彭培好. 川西云杉人工林与天然林群落空间分布格局及种间关联性[J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(3): 495-504.
JING Y N, GUAN Z Y, SHI S L, XU Q, JIA L Y, CAO J X, CHEN S B, LI J J, WANG G Y, PENG P H. Spatial distribution pattern and interspecific correlation between plantation and natural forest of *Picea likiangensis* var. *rubescens* in western Sichuan, China[J]. Journal of Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2022, 39(3): 495-504. (in Chinese)
- [4] 王金池,黄清麟,严铭海,黄如楚,郑群瑞. 由巨桉人工林转型的 13 年生青冈栎天然林特征[J]. 林业科学, 2021, 57(9): 13-20.
WANG J C, HUANG Q L, YAN M H, HUANG R C, ZHENG Q R. Characteristics of 13-year-old *Cyclobalanopsis glauca* natural forest converted from *Eucalyptus grandis* plantation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(9): 13-20. (in Chinese)
- [5] 王健敏,刘娟,陈晓鸣,温庆忠,段兆尧,赖兴会. 云南松天然林及人工林群落结构和物种多样性比较[J]. 林业科学研究, 2010, 23(4): 515-522.
WANG J M, LIU J, CHEN X M, WEN Q Z, DUAN Z Y, LAI X H. Comparison of community structures and species diversity in natural forests and forest plantation of *Pinus yunnanensis*[J]. Forest Research, 2010, 23(4): 515-522. (in Chinese)
- [6] 张永利,鲁绍伟,杨峰伟. 华北土石山区人工林与天然林结构与功能研究[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(6): 63-68.
ZHANG Y L, LU S W, YANG F W. Study on the configuration and function between natural and artificial forests in rocky mountain area of Northern China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007, 26(6): 63-68. (in Chinese)
- [7] 杨嘉麒,邓海燕,张港隆,胡中洋,莫晓勇. 4 种混交比例对桉树-红椎人工混交林生长和土壤养分的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(11): 90-97.
YANG J Q, DENG H Y, ZHANG G L, HU Z Y, MO X Y. Effects of four mixed ratios on the growth and soil nutrient of *Eucalyptus-Castanopsis hystrix* mixed plantations[J]. Journal of Central South Forestry and Technology University, 2021, 41(11): 90-97. (in Chinese)
- [8] 李明臣. 桉树林取代马尾松疏林后群落组成结构与土壤理化性质的变化[D]. 南宁: 广西大学, 2007.
LI M C. Effects of *Eucalyptus* plantation replacing open *Pinus massoniana* forest on community compositions and soil physical-chemical proprieties[D]. Nanning: Guangxi University, 2007. (in Chinese)
- [9] 廖观荣,林书蓉,李淑仪,蓝佩玲,廖新荣,王尚明,杨国清,简明,林琳,陈孝. 雷州半岛桉树人工林地力退化的现状和特征[J]. 土壤与环境, 2002, 11(1): 25-28.
LIAO G R, LIN S R, LI S Y, LAN P L, LIAO X R, WANG S M, YANG G Q, JIAN M, LIN L, CHEN X. The current status and characteristics of land capacity degeneration of

- Eucalyptus* plantation in Leizhou Peninsula[J]. Soil and Environmental Sciences, 2002, 11(1): 25-28. (in Chinese)
- [10] 廖观荣, 钟继洪, 李淑仪, 蓝佩玲, 廖新荣, 王尚明, 杨国清, 简明, 李宏. 桉树人工林生态系统养分循环和平衡研究 II. 桉树人工林生态系统的养分循环[J]. 生态环境, 2003, 12(3): 296-299.
LIAO G R, ZHONG J H, LI S Y, LAN P L, LIAO X R, WANG S M, YANG G Q, JIAN M, LI H. The nutrient cycling and balance of *Eucalyptus* plantation ecosystem II. The nutrient cycling of *Eucalyptus* plantation ecosystem[J]. Ecology and Environment, 2003, 12(3): 296-299. (in Chinese)
- [11] 徐大平, 张宁南. 桉树人工林生态效应研究进展[J]. 广西林业科学, 2006, 35(4): 179-187, 201.
XU D P, ZHANG N N. Research progress on ecological effect of *Eucalyptus* plantation[J]. Guangxi Forestry Science, 2006, 35(4): 179-187, 201. (in Chinese)
- [12] 朱宇林, 谭萍, 陆绍锋, 张贵强, 曾英玲. 桉树叶水浸提液对 4 种植物种子化感作用的生物测定[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(1): 134-137.
ZHU Y L, TAN P, LU S F, ZHANG G Q, ZENG Y L. Bioassay of allelopathic activity of water extract of *Eucalyptus* leaves on seed germination of different kinds of plants[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(1): 134-137. (in Chinese)
- [13] 郭亚飞, 张丽华, 赵锐锋, 谢忠奎, 王军锋, 蒿廉伊, 高江平, 王梦梦, 高晗. 月尺度视角下荒漠草原植物群落特征对降水变化的响应[J]. 生态学杂志, 2021, 40(7): 1895-1906.
GUO Y F, ZHANG L H, ZHAO R F, XIE Z K, WANG J F, HAO L Y, GAO J P, WANG M M, GAO H. Response of plant community characteristics to precipitation change in desert steppe from a monthly-scale perspective[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(7): 1895-1906. (in Chinese)
- [14] 杜忠毓, 安慧, 王波, 文志林, 张雅柔, 吴秀芝, 李巧玲. 养分添加和降水变化对荒漠草原植物群落物种多样性和生物量的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(4): 1100-1110.
DU Z Y, AN H, WANG B, WEN Z L, ZHANG Y R, WU X Z, LI Q L. Effects of nutrient addition and precipitation manipulation on plant species diversity and biomass in a desert grassland[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(4): 1100-1110. (in Chinese)
- [15] 李一春, 余海龙, 王攀, 牛玉斌, 樊瑾, 朱湾湾, 黄菊莹. 降水量对荒漠草原植物群落多样性和 C : N : P 生态化学计量特征的影响[J]. 中国草地学报, 2020, 42(1): 117-126.
LI Y C, YU H L, WANG P, NIU Y B, PAN J, ZHU W W, HUANG J Y. Effects of precipitation on plant community diversity and C : N : P ecological stoichiometry in a desert steppe of Ningxia, Northwestern China[J]. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(1): 117-126. (in Chinese)
- [16] 李长斌, 彭云峰, 赵殿智, 宁祎, 周国英. 降水变化和氮素添加对青藏高原高寒草原群落结构和物种多样性的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 185-191.
LI C B, PENG Y F, ZHAO D Z, NING Y, ZHOU G Y. Effects of precipitation change and nitrogen addition on community structure and plant diversity in an alpine steppe on the Qinghai-Tibetan plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(6): 185-191. (in Chinese)
- [17] 何鹏, 程飞, 杨梅, 何方中. 广西望天树人工林和天然林冠层光环境特征与其生长的关系[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(7): 29-33.
HE P, CHENG F, YANG M, HE F Z. Light environment analysis of artificial and natural canopy of *Parashorea chinensis* in Guangxi[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(7): 29-33. (in Chinese)
- [18] 黄团冲, 贺康宁, 王先棒, 王世雷. 北川河流域森林冠层结构对林下植被多样性的影响[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(4): 106-114.
HUANG T C, HE K N, WANG X B, WANG S L. Effects of forest canopy structure on the diversity of understory vegetation in Beichuan River basin of an alpine region[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(4): 106-114. (in Chinese)
- [19] 谭一波, 何琴飞, 郑威, 彭玉华, 侯远瑞, 何峰, 申文辉. 珠江流域中上游防护林冠层结构对林下植被的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(12): 3148-3156.
TAN Y B, HE Q F, ZHENG W, PENG Y H, HOU Y R, HE F, SHEN W H. Effects of canopy structure on understory vegetation in shelterbelt forests along the middle and upper reaches of Pearl River[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(12): 3148-3156. (in Chinese)
- [20] 徐雪蕾, 孙玉军, 周华, 张鹏, 胡杨, 王新杰. 间伐强度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响[J]. 林业科学, 2019, 55(3): 1-12.
XU X L, SUN Y J, ZHOU H, ZHANG P, HU Y, WANG X J. Effects of thinning intensity on understory growth and soil properties in Chinese fir plantation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(3): 1-12. (in Chinese)
- [21] 张康, 黄开栋, 赵小军, 余建炜, 郑旭, 唐罗忠. 修枝对杨树人工林林内小气候及林下植被的短期效应[J]. 生态环境学报, 2019, 28(8): 1548-1556.
ZHANG K, HUANG K D, ZHAO X J, SHE J W, ZHENG X, TANG L Z. Effects of pruning on microclimate and understory vegetation in a poplar plantation[J]. Ecology and Environment Sciences, 2019, 28(8): 1548-1556. (in Chinese)
- [22] 袁杰, 曹广超, 杨登兴, 曹生奎, 刁二龙, 赵美亮. 祁连山

- 黑河源区植被 NDVI 时空变化特征及影响因素分析[J]. 生态科学, 2021, 40(5): 172-182.
- YUAN J, CAO G C, YANG D X, CAO S K, DIAO E L, ZHAO M L. Temporal and spatial variation characteristics and influencing factors of vegetation NDVI in Heihe Source Region of Qilian Mountains[J]. Ecological Science, 2021, 40(5): 172-182. (in Chinese)
- [23] 童珊, 曹广超, 曹生奎. 近 34 年祁连山南坡植被覆盖变化与气象因子关系研究[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(12): 2655-2664.
- TONG S, CAO G C, CAO S K. Study on the relationship between vegetation cover change and meteorological factors in the southern slope of Qilian Mountains in the past 34 years[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(12): 2655-2664. (in Chinese)
- [24] 田义超, 梁铭忠. 北部湾沿海地区植被覆盖对气温和降水的旬响应特征[J]. 自然资源学报, 2016, 31(3): 488-502.
- TIAN Y C, LIANG M Z. The NDVI characteristics of vegetation and its ten-day response to temperature and precipitation in Beibu Gulf coastal region[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(3): 488-502. (in Chinese)
- [25] 刘宪锋, 任志远. 西北地区植被覆盖变化及其与气候因子的关系[J]. 中国农业科学, 2012, 45(10): 1954-1963.
- LIU X F, REN Z Y. Vegetation coverage change and its relationship with climate factors in Northwest China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(10): 1954-1963. (in Chinese)
- [26] 刘正佳, 邵全琴. 三江源地区植被覆盖度变化及其与气候因子的关系[J]. 水土保持研究, 2014, 21(6): 334-339.
- LIU Z J, SHAO Q Q. Vegetation coverage change and its response to climate change in Three-River Headwaters region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(6): 334-339. (in Chinese)
- [27] ALABACK P B. Dynamics of understory biomass in sitka spruce-western hemlock forests of southeast Alaska[J]. Ecology, 1982, 63(6): 1932-1948.
- [28] STEWART G H. Forest development in canopy openings in old-growth *Pseudotsuga* forests of the western Cascade Range, Oregon[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1986, 16(3): 558-568.
- [29] 杨再鸿, 杨小波, 余雪标, 李跃烈, 吴庆书. 海南桉树林林下植物多样性特点的简单相关分析[J]. 浙江林学院学报, 2007, 24(6): 725-730.
- YANG Z H, YANG X B, YU X B, LI Y L, WU Q S. Single factor correlation analysis of diversity in an *Eucalyptus* plantation understory on Hainan Island[J]. Journal of Forestry College, 2007, 24(6): 725-730. (in Chinese)
- [30] 罗毓明, 谭向平, 邹晓君, 饶兴权, 林永标, 申卫军. 我国南方 4 种常见人工林林下植物多样性特征及影响因素[J]. 热带亚热带植物学报, 2022, 30(1): 1-10.
- LUO Y M, TAN X P, ZOU X J, RAO X Q, LIN Y B, SHEN W J. Understory plant diversity characteristics and influencing factors of four common plantations in South China[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2022, 30(1): 1-10. (in Chinese)
- [31] 漆良华, 张旭东, 周金星, 周小玲, 田育新, 魏远, 吴建平, 柯裕洲. 湘西北小流域典型植被恢复群落土壤贮水量与入渗特性[J]. 林业科学, 2007, 43(4): 1-8.
- QI L H, ZHANG X D, ZHOU J X, ZHOU X L, TIAN Y X, WEI Y, WU J P, KE Y Z. Soil water holding capacities and infiltration characteristics of vegetation restoration communities in watershed, Northwest Hu'nan[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(4): 1-8. (in Chinese)
- [32] 闫东锋, 吴明作, 杨喜田. 宝天曼国家级自然保护区栎类天然林林分空间结构特征[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(9): 52-53, 77.
- YAN D F, WU M Z, YANG X T. Spatial structure characteristic of quercus natural forests in Baotianman National Nature Reserve[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(9): 52-53, 77. (in Chinese)
- [33] 陈惠君, 杜虎, 宋同清, 彭晚霞, 张浩, 苏樑, 曾馥平. 木论喀斯特常绿落叶阔叶混交林群丛数量分类及稳定性[J]. 生物多样性, 2019, 27(10): 1056-1068.
- CHEN H J, DU H, SONG T Q, PENG W X, ZAHNG H, SU L, ZENG F P. Numerical classification of associations and their stabilities of karst evergreen deciduous broad-leaved mixed forests in Mulun National Nature Reserve[J]. Biodiversity Science, 2019, 27(10): 1056-1068. (in Chinese)
- [34] 皇甫昭, 王斌, 丁涛, 向悟生, 李先琨, 周爱萍. 弄岗北热带喀斯特季节性雨林群丛数量分类及与环境的关系[J]. 生物多样性, 2014, 22(2): 157-166.
- HUANG F Z, WANG B, DING T, XIANG W S, LI X K, ZHOU A P. Numerical classification of associations in a northern tropical karst seasonal rain forest and the relationships of these associations with environmental factors[J]. Biodiversity Science, 2014, 22(2): 157-166. (in Chinese)
- [35] 赖江山, 米湘成, 任海保, 马克平. 基于多元回归树的常绿阔叶林群丛数量分类: 以古田山 24 公顷森林样地为例[J]. 植物生态学报, 2010, 34(7): 761-769.
- LAI J S, MI X C, REN H B, MA K P. Numerical classification of associations in subtropical evergreen broad-leaved forest based on multivariate regression trees: a case study of 24 hm² Gutianshan forest plot in China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(7): 761-769. (in Chinese)
- [36] FANG X F, SHEN G C, YANG Q S, LIU H M, MA Z P, DEANE D C, WANG X H. Habitat heterogeneity explains mosaics of evergreen and deciduous trees at local-scales in a

- subtropical evergreen broad-leaved forest[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2017, 28(2): 379-388.
- [37] FENG G, SVENNING J C, MI X C, JIU Q, RAO M, REN H B, BEBBER D P, MA K P. Anthropogenic disturbance shapes phylogenetic and functional tree community structure in a subtropical forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, 313: 188-198.
- [38] DORMANN C F, MCPHERSON J M, ARAÚJO M B, BIVAND R, BOLLIGER J, CARL G, DAVIES R G, HIRZEL A, JETZ W, KISSLING W D, KÜHN I, OHLEMÜLLER R, PERES-NETO P R, REINEKING B, SCHRÖDER B, SCHURR F M, WILSON R. Methods to account for spatial autocorrelation in the analysis of species distributional data: a review[J]. *Ecography*, 2007, 30(5): 609-628.
- [39] KISSLING W D, CARL G. Spatial autocorrelation and the selection of simultaneous autoregressive models[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2008, 17(1): 59-71.
- [40] 刘铭波, 韩海荣, 程小琴, 蔡锰柯, 刘慧敏. 山西灵空山典型天然林空间结构特征及其对生产力的影响[J]. *西北林学院学报*, 2022, 37(1): 33-40.
- LIU M B, HAN H R, CHENG X Q, CAI M K, LIU H M. Spatial structure characteristics and their influences on productivity of typical natural forests in the Lingkong Mountain, Shanxi Province[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, 37(1): 33-40. (in Chinese)
- [41] 惠刚盈, 赵中华, 陈明辉. 描述森林结构的重要变量[J]. *温带林业研究*, 2020, 3(1): 14-20.
- HUI G Y, ZHAO Z H, CHEN M H. Important variables describing forest structure[J]. *Journal of Temperate Forestry Research*, 2020, 3(1): 14-20. (in Chinese)
- [42] 娄明华, 白超, 惠刚盈, 汤孟平. 7个林木大小多样性指数表达能力比较[J]. *生物多样性*, 2019, 27(4): 449-456.
- LOU M H, BAI C, HUI G Y, TANG M P. Comparison of distinguish ability on seven tree size diversity indices[J]. *Biodiversity*, 2019, 27(4): 449-456. (in Chinese)
- [43] 王海星, 张克斌, 曹永翔, 杨秀莲. 西北半干旱区湿地生态系统植物群落多样性的研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(5): 141-146.
- WANG H X, ZHANG K B, CAO Y X, YANG X L. Plant community diversity of wetland ecosystem in a semi-arid region of Northwestern China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(5): 141-146. (in Chinese)