

海南桉树人工林林下植物多样性特征研究

杜 珊, 余雪标*, 史茂源, 周 华, 陈海辉, 黄 海, 吴金群

海南大学林学院, 海南海口 570228

摘 要: 为探究海南桉树人工林林下植物多样性特征, 对不同区域桉树人工林进行植被调查, 采用标准木法和收获法相结合的方法, 测定样方内地上部分的生物量, 再结合灌木层、草本层 α 多样性指数与地上部分生物量构建综合功能指数, 并比较新指数与 α 多样性指数。结果显示: (1) 桉树人工林林下植物共 101 种, 其中灌木层植物共 49 种, 隶属 31 科 45 属, 草本层植物共 52 种, 隶属 28 科 48 属。(2) 不同区域桉树人工林林下灌木层多样性指数差异不显著, 仅临高的草本层 α 多样性指数显著大于其他区域, 说明灌木层多样性水平相近, 而草本层多样性水平更易受环境影响。(3) 不同区域桉树人工林下灌木层、草本层的地上生物量分配差异显著, 灌木层大于草本层, 但是分配比例波动范围较大。(4) 不同区域桉树人工林灌木层综合功能指数 (Yd) 无显著差异, 临高和定安的草本层 Yd 指数显著大于屯昌和东方, 表明不同区域桉树林灌木层的综合功能相近, 草本层的综合功能则是临高和定安明显较强。(5) 灌木层 Yd 指数与 α 多样性指数的相关性很强; 草本层 Yd 指数与 α 多样性指数的相关性一般, 与地上生物量相关性很强。结果表明, 桉树林下植物多样性特征受区域环境影响, 其中草本层比灌木层更易受影响; 灌木层 α 多样性指数对 Yd 指数的影响更大, 草本层则是地上生物量对 Yd 指数的影响更大。Yd 指数可同时反映林下植物的 α 多样性水平和生物量 2 个方面, 是评价桉树人工林林下植被生态功能的良好补充。

关键词: 桉树人工林; 林下植物; α 多样性指数; 地上生物量; Yd 指数

中图分类号: S718.5 文献标识码: A

Characteristics of Understory Plant Diversity of Eucalyptus Plantation in Hainan

DU Shan, YU Xuebiao*, SHI Maoyuan, ZHOU Hua, CHEN Haihui, HUANG Hai, WU Jinqun

College of Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China

Abstract: To investigate the characteristics of plant diversity in the understory of eucalyptus plantations in Hainan, vegetation surveys were conducted in different areas of eucalyptus plantations, and the biomass of the upper part of the interior of the sample plots was measured by combining the standard wood method and the harvesting method, then the α -diversity index of the irrigation and grass layers was combined with the biomass of the above-ground part to construct a comprehensive functional index, and the new index was compared with the α diversity index. There were 101 species of understory plants in eucalyptus plantation, among which 49 species appeared in shrub layer, belonging to 45 genera of 31 families, and 52 species appeared in herb layer, belonging to 48 genera of 28 families. There was no significant difference in the diversity index of understory shrub layer in different regions of eucalyptus plantations. The α diversity index of herbaceous layer in Lingao was significantly higher than that of other areas. It means the diversity level of shrub layer was similar, while the diversity level of herb layer was more affected by environment. There were significant differences in aboveground biomass allocation between shrub layer and grass layer in different regions. Although shrub layer was larger than herb layer, the distribution ratio fluctuated widely. Yd indices of shrub layer of eucalyptus plantations in different areas had no significant difference, and Yd indices of herb layer in Lingao and Ding'an were signifi-

收稿日期 2022-02-21; 修回日期 2022-05-31

基金项目 横向科研项目“桉树人工林生态环境影响监测”(No. RH2000008400)。

作者简介 杜 珊(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 森林生态。*通信作者(Corresponding author): 余雪标(YU Xuebiao), E-mail: yuxuebiao@163.com。

cantly higher than those in Tunchang and Dongfang. It means that the ecological functions of shrub layer in different areas were similar, while the ecological functions of herbaceous layer were obviously stronger than those of Lingao and Ding'an. The Yd index of the shrub layer was strongly correlated with the α -diversity index; the Yd index of the herb layer was generally correlated with the α diversity index and strongly correlated with above-ground biomass. The results show that the plant diversity characteristics of the eucalyptus understory are influenced by the regional environment, with the herbaceous layer being more susceptible than the shrub layer; the α -diversity index of the shrub layer has a greater influence on the Yd index, while the above-ground biomass of the herbaceous layer has a greater influence on the Yd index. The Yd index can reflect both the α -diversity level and biomass of the understory, and is a good complement to evaluate the ecological functions of the understory vegetation of eucalyptus plantations.

Keywords: eucalyptus plantation; understory plant; α species diversity index; aboveground biomass; Yd index

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.01.010

海南自 1917 年引种桉树, 已有百年历史, 现有桉树人工林面积 12.94 万 hm^2 , 蓄积 555.60 万 m^3 ^[1-2], 是海南重要的人工生态系统, 不仅具有很大的经济价值, 还具有不可替代的生态价值, 对推进海南资源节约型和环境友好型社会的建设有着重要贡献。

有关林下植被的研究, 最早可追溯至 19 世纪末^[3], 近几十年国内也已有大量相关研究, 主要包括不同人工林林下植被多样性^[4-6]、林下植被的功能研究^[7-8]、影响林下植被的因素^[9-10]等。目前, 对于人工林植物多样性的定量表述, 往往借助于多样性指数, 这些指数多集中于丰富度、多度、均匀度等方面, 最常用的是 α 多样性指数, 许多学者将这些指数的计算结果用于评价森林生态功能的一部分, 但近年来, 已有一些学者认识到其存在的局限性^[11-13]。在森林生态系统发挥功能的过程中, 生物量也是其结构和功能的重要测度, 它不仅能直接反映群落结构特征和植被生长状况, 还是生态系统功能的重要表现形式^[14-16], 因此林下植被生物量也是评价人工林生态功能的一个重要方面。

目前, 已有一些学者研究相关评价指标体系来评价森林生态功能, 这些指标体系往往包括林分结构因子、环境因子、生物多样性、生物量等多方面因素^[17-19], 更适用于长期监测多方面因子的条件, 而不适宜人工速生林的短期评价。生物量与物种多样性都是植被本身的重要因素, 当人工林林下植被多样性指数水平相近时评价林下植被生态功能, 生物量就是一个很重要的影响因素。研究表明, 生物量的增长会使植被生态服务功能增强, 森林生态系统服务功能的大小与生物量有着十分密切的关系, 一般情况下生态系统功能与生物量呈正比, 即生物量越大, 生态系统的功能

就越强^[20]。已有不少学者对林下植被生物量开展相关研究, 但绝大部分研究是在探究 α 多样性指数与生物量的相关性^[21-23], 虽然在二者相关性的研究方面众多学者得出的结论有所不同, 但是基本共识是生物量与植物多样性均对森林生态系统具有积极的促进作用。

鉴于此, 本研究选取海南不同区域桉树人工林为研究对象, 通过调查林下植物组成, 测定林下植物地上部分生物量, 再以 α 多样性指数与地上生物量的乘积构造综合功能指数 (Yd), 再比较 α 多样性指数与 Yd 指数, 以期能够更合理地判断人工林的生态功能。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

海南岛是仅次于台湾岛的中国第二大岛, 是我国最大的“热带宝地”, 土地总面积 344.2 万 hm^2 , 占全国热带土地面积约 42.5%。海南地处热带北缘, 整体属热带季风气候, 年平均气温 22~27℃, 年光照时长为 1750~2650 h, 光照率为 50%~60%, 年降水量在 1000~2600 mm 之间, 年平均降水量为 1639 mm。海南岛由山地、丘陵、台地、平原构成环形层状地貌, 梯级结构明显, 这样的地形让海南 18 个市(县)的局部气候有明显差异, 可分为湿润区、半湿润区、山地湿润区、半干旱区、半干旱半湿润区五大区。本研究选取定安(DA)、临高(LG)、屯昌(TC)、东方(DF) 4 个调查区域。

1.2 方法

1.2.1 样地、样方设置 2020 年 8 月, 通过查询资料和实地勘查, 在定安(DA)、临高(LG)、屯昌(TC)、东方(DF) 选取林龄相近且具代表性的桉树人工林, 分别设置 3 个 20 m×20 m 的标

准样地,在每个样地中心点用 GPS 定位,记录经纬度和海拔等地理信息。在每个样地的四角分别设置 5 m×5 m 的灌木样方和 1 m×1 m 的草本样方,同时,在每个样地的中心增设 1 个 1 m×1 m 的草本样方,样地概况见表 1。

1.2.2 植被调查 采用样方调查法进行植被调查,用测高仪、卷尺、胸径尺等工具,分乔木层、灌木层、草本层展开,具体如下:

乔木层,在 20 m×20 m 样方内进行每木检尺,记录树高、胸径、枝下高等。

灌木层,调查 5 m×5 m 样方内所有灌木,包括木质藤本植物及胸径 (DBH) <5 cm 的乔木幼苗的种类、高度、盖度等。

草本层,调查 1 m×1 m 样方内所有草本,包括蕨类植物和未在灌木层样方出现的藤本植物的种类、高度、盖度等。

表 1 样地基本信息

Tab. 1 General information of sample sites

区域 Area	经纬度 Latitude and longitude	海拔 Elevation/m	平均树高 Average height/m	平均胸径 Average diameter/cm	平均枝下高 Average underbranch height/m
定安	110.416570°E, 19.621630°N	38.15	12.39±0.13	9.72±0.32	9.51±0.21
	110.416751°E, 19.621947°N	37.72			
	110.417222°E, 19.621976°N	24.44			
临高	109.650172°E, 19.903175°N	40.73	16.23±0.47	12.15±0.16	10.41±0.93
	109.650269°E, 19.903370°N	54.57			
	109.650387°E, 19.903517°N	51.26			
屯昌	110.075823°E, 19.402017°N	237.07	11.85±0.19	10.61±0.18	7.08±0.43
	110.075794°E, 19.401795°N	232.53			
	110.076033°E, 19.401604°N	254.57			
东方	108.773581°E, 18.758069°N	60.94	11.13±0.27	12.03±0.87	5.31±0.34
	108.773724°E, 18.757938°N	66.59			
	108.773508°E, 18.757948°N	55.10			

1.2.3 地上部分生物量测定 采用标准木法与收获法相结合的方法测定 5 m×5 m 样方内灌木的地上生物量;采用全部收获法测定 1 m×1 m 样方内草本的地上生物量^[24]。每种植物取不少于 500 g 的样品(除个别量少的草本植物)带回实验室,用烘箱设置 105℃杀青 30 min,再设置 85℃烘至恒重,称其干重,生物量 (B) 计算公式如下,某一物种的生物量:

$$B = \frac{W_0}{S_0} \quad (1)$$

式中, W_0 为某物种干重, S_0 为调查面积,生物量 B 的单位为 t/hm²。

本研究仅测定所调查植物的地上部分生物量,文中出现生物量均指地上部分生物量。

1.2.4 物种多样性指数 本研究采用森林生态学领域应用广泛的 Patrik 丰富度指数 (D)、Simpson 多样性指数 (R)、Shannon-Wiener 多样性指数 (H)、Pielou 均匀度指数 (J) 4 种指标来测度林下植被生物多样性水平。公式如下^[25]:

$$\text{Patrik 丰富度指数 (D)} = S \quad (2)$$

$$\text{Simpson 多样性指数 (R)} = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (3)$$

$$\text{Shannon-Wiener 多样性指数 (H)} = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (4)$$

$$\text{Pielou 均匀度指数 (J)} = R / \ln S \quad (5)$$

式中, S 为调查样方内的物种数, P_i 为物种 i 个体数占个体数总和的比例, $i=1, 2, 3, \dots, N$, N 为样方内的总个体数。

1.2.5 Yd 指数 将地上生物量分别引入本文所采用的 4 种多样性指数,构建综合功能指数 (Yd):

$$\text{与丰富度指数 (D) 结合: } Yd_1 = D \times \sum_{i=1}^S B_i \quad (6)$$

$$\text{与 Simpson 指数 (R) 结合: } Yd_2 = R \times \sum_{i=1}^S B_i \quad (7)$$

$$\text{与 Shannon-Wiener 指数 (H) 结合: } Yd_3 = H \times \sum_{i=1}^S B_i \quad (8)$$

$$\text{与 Pielou 指数 (J) 结合: } Yd_4 = J \times \sum_{i=1}^S B_i \quad (9)$$

式中, B_i 表示物种 i 的生物量, 单位为 t/hm^2 。

根据 Yd 指数的公式可知, 该指数是多样性指数与生物量相乘的结果, 表明多样性指数与生物量共同决定 Yd 指数的大小, 并且当多样性指数与生物量这 2 个变量其中 1 个数值相近时, 就由另一变量决定 Yd 指数的大小。这种特性与多样性指数和生物量对森林生态服务功能的正相关关系一致^[26]。 α 多样性指数在数值上越大表明其多样性水平越高, 同时, 植被生物量越高表明生态系统服务功能越强, 因此, 由 α 多样性指数与生物量乘积所得的 Yd 指数也是一个正向指标, 即 Yd 指数在数值上越大就表明生态系统的功能性越强。

1.3 数据处理

本研究采用 Excel 2019 和 SPSS 26.0 软件对实验数据进行整理和分析, 采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和皮尔逊相关分析法 (Pearson) 进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 桉树人工林林下植被的组成

桉树人工林林下植物共 101 种, 其中灌木层 49 种, 隶属 31 科 45 属, 草本层 52 种, 隶属 28 科 48 属。定安的桉树人工林林下植物有 16 科 21 属 21 种; 临高的桉树人工林林下植物有 29 科 39 属 42 种; 屯昌的桉树人工林林下植物有 27 科 34 属 35 种; 东方的桉树人工林林下植物有 22 科 30 属 32 种 (表 2)。由此可知, 4 个区域桉树人工林林下植物科、属、种的数量从大到小顺序一致, 均为临高>屯昌>东方>定安。灌木层植物的科数量为屯昌>东方>临高>定安, 属和种的数量为东方>屯昌>临高>定安; 草本层科、属、种的数量均为临高>屯昌>东方>定安。

表 2 不同区域桉树人工林林下植被组成概况

Tab. 2 Understory vegetation composition of eucalyptus plantations in different areas

区域 Area	植被层 Vegetation layer	科 Family	属 Genus	种 Species
定安	灌木层	9	12	12
	草本层	7	9	9
临高	灌木层	12	14	14
	草本层	18	25	28
屯昌	灌木层	15	16	17
	草本层	13	18	18
东方	灌木层	13	19	21
	草本层	10	11	11

桉树人工林下灌木层、草本层主要植物种类见表 3 (表中仅列出非单种科)。定安的灌木层优势科为大戟科 (Euphorbiaceae)、马鞭草科 (Verbenaceae) 和芸香科 (Rutaceae), 各有 2 种; 临高的灌木层优势科为马鞭草科和茜草科 (Rubiaceae), 各有 2 种; 屯昌的灌木层优势科为大戟科和樟科 (Lauraceae), 各有 2 种; 东方的灌木层中大戟科为明显优势科, 有 5 种, 番荔枝科 (Annonaceae)、樟科 (Lauraceae)、楝科 (Meliaceae)、椴树科 (Tiliaceae) 为次优势科, 分别有 2 种。定安的草本层优势科为禾本科 (Gramineae), 临高的草本层优势科为豆科 (Leguminosae)、茜草科、禾本科、海金沙科 (Lygodiaceae), 分别有 5、4、3、2 种。屯昌的草本层优势科为菊科 (Asteraceae)、禾本科、乌毛蕨科 (Blechnaceae) 和豆科, 分别有 3、2、2、2 种。东方的草本层优势科为豆科, 有 2 种。综上可知, 不同区域桉树林下灌木层、草本层的优势科具有一定的相似性, 但又有差异; 大戟科和禾本科分别为海南桉树人工林灌木层和草本层中的绝对优势科, 对桉树人工林林下生态系统的稳定性至关重要。

2.2 桉树人工林林下植物的多样性指数

海南不同区域桉树人工林下灌木层、草本层的 α 多样性指数, 即丰富度指数 (D)、Simpson 指数 (R)、Shannon-Wiener 指数 (H) 和 Pielou 指数 (J) 见图 1。灌木层方面, 丰富度指数介于 6.667~11.333 之间, 东方>屯昌>临高>定安; Simpson 指数介于 0.435~0.576 之间, 临高>屯昌>东方>定安; Shannon 指数介于 0.763~1.125 之间, 东方>临高>屯昌>定安; Pielou 指数介于 0.6360~0.808 之间, 临高>屯昌>定安>东方, 4 个指数在不同区域均无显著差异。草本层方面, 丰富度指数介于 6.333~13.333 之间, 临高>屯昌>东方>定安, 临高的丰富度指数显著大于东方和定安 ($P<0.05$); Simpson 指数介于 0.502~0.729 之间, Shannon 指数介于 0.864~1.401 之间, 二者均为临高>屯昌>定安>东方, 且临高的显著大于其他区域 ($P<0.05$); Pielou 指数介于 0.743~0.931 之间, 临高>屯昌>定安>东方。说明临高和东方的灌木层多样性水平较高, 定安最低, 但是水平相差小; 临高的草本层多样性水平最高, 其次是屯昌、定安、东方。

表 3 桉树人工林林下植被主要组成植物名录
Tab. 3 Main species composition of understory vegetation in eucalyptus plantation

区域 Area	植被层 Vegetation layer	编号 No.	科 Family	属 Genus	种 Specie	
定安	灌木层	1	大戟科 Euphorbiaceae	野桐属 <i>Mallotus</i>	白背叶 <i>Mallotus apelta</i>	
		2	大戟科 Euphorbiaceae	银柴属 <i>Aporosa</i>	银柴 <i>Aporosa dioica</i>	
		3	马鞭草科 Verbenaceae	大青属 <i>Clerodendrum</i>	大青 <i>Clerodendrum cyrtophyllum</i>	
		4	马鞭草科 Verbenaceae	马缨丹属 <i>Lantana</i>	马缨丹 <i>Lantana camara</i>	
		5	芸香科 Rutaceae	蜜茶萸属 <i>Melicope</i>	三桠苦 <i>Evodia lepta</i>	
		6	芸香科 Rutaceae	山油柑属 <i>Acronychia</i>	山油柑 <i>Acronychia pedunculata</i>	
					其他 6 种 Other 6 species	
	草本层	1	禾本科 Gramineae	求米草属 <i>Oplismenus</i>	竹叶草 <i>Oplismenus compositus</i>	
		2	禾本科 Gramineae	显子草属 <i>Phaenosperma</i>	显子草 <i>Phaenosperma globosa</i>	
		3	禾本科 Gramineae	白茅属 <i>Imperata</i>	白茅 <i>Imperata cylindrica</i>	
					其他 7 种 Other 7 species	
	临高	灌木层	1	马鞭草科 Verbenaceae	大青属 <i>Clerodendrum</i>	大青 <i>Clerodendrum cyrtophyllum</i>
			2	马鞭草科 Verbenaceae	马缨丹属 <i>Lantana</i>	马缨丹 <i>Lantana camara</i>
3			茜草科 Rubiaceae	九节属 <i>Psychotria</i>	九节 <i>Psychotria asiatica</i>	
4			茜草科 Rubiaceae	玉叶金花属 <i>Mussaenda</i>	玉叶金花 <i>Mussaenda pubescens</i>	
					其他 10 种 Other 10 species	
草本层		1	豆科 Leguminosae	猪屎豆属 <i>Crotalaria</i>	光萼猪屎豆 <i>Crotalaria trichotoma</i>	
		2	豆科 Leguminosae	野扁豆属 <i>Dunbaria</i>	野扁豆 <i>Dunbaria villosa</i>	
		3	豆科 Leguminosae	链荚豆属 <i>Alysicarpus</i>	链荚豆 <i>Alysicarpus vaginalis</i>	
		4	豆科 Leguminosae	山蚂蝗属 <i>Desmodium</i>	小叶三点金 <i>Desmodium microphyllum</i>	
		5	豆科 Leguminosae	山蚂蝗属 <i>Desmodium</i>	假地豆 <i>Desmodium heterocarpon</i>	
		6	茜草科 Rubiaceae	耳草属 <i>Hedyotis</i>	耳草 <i>Hedyotis auricularia</i>	
		7	茜草科 Rubiaceae	鸡矢藤属 <i>Paederia</i>	臭鸡矢藤 <i>Paederia foetida</i>	
		8	茜草科 Rubiaceae	钮扣草属 <i>Spermacoce</i>	丰花草 <i>Spermacoce pusilla</i>	
		9	茜草科 Rubiaceae	钮扣草属 <i>Spermacoce</i>	阔叶丰花草 <i>Spermacoce alata</i>	
		10	禾本科 Gramineae	黍属 <i>Panicum</i>	短叶黍 <i>Panicum brevifolium</i>	
		11	禾本科 Gramineae	淡竹叶属 <i>Lophatherum</i>	淡竹叶 <i>Lophatherum gracile</i>	
		12	禾本科 Gramineae	荩草属 <i>Arthraxon</i>	荩草 <i>Arthraxon hispidus</i>	
		13	海金沙科 Lygodiaceae	海金沙属 <i>Lygodium</i>	海金沙 <i>Lygodium japonicum</i>	
		14	海金沙科 Lygodiaceae	海金沙属 <i>Lygodium</i>	小叶海金沙 <i>Lygodium microphyllum</i>	
					其他 14 种 Other 14 species	
屯昌		灌木层	1	大戟科 Euphorbiaceae	野桐属 <i>Mallotus</i>	白背叶 <i>Mallotus apelta</i>
			2	大戟科 Euphorbiaceae	银柴属 <i>Aporosa</i>	银柴 <i>Aporosa dioica</i>
	3		樟科 Lauraceae	樟属 <i>Cinnamomum</i>	猴樟 <i>Cinnamomum bodinieri</i>	
	4		樟科 Lauraceae	樟属 <i>Cinnamomum</i>	黄樟 <i>Cinnamomum parthenoxylon</i>	
					其他 13 种 Other 13 species	
	草本层	1	菊科 Asteraceae	假臭草属 <i>Praxelis</i>	假臭草 <i>Praxelis clematidea</i>	
		2	菊科 Asteraceae	苦苣菜属 <i>Ixeris</i>	苦苣菜 <i>Ixeris polycephala</i>	
		3	菊科 Asteraceae	泽兰属 <i>Chromolaena</i>	飞机草 <i>Chromolaena odorata</i>	
		4	禾本科 Gramineae	求米草属 <i>Oplismenus</i>	竹叶草 <i>Oplismenus compositus</i>	
		5	禾本科 Gramineae	筒轴茅属 <i>Rottboellia</i>	筒轴茅 <i>Rottboellia cochinchinensis</i>	
		6	乌毛蕨科 Blechnaceae	苏铁蕨属 <i>Brainea</i>	苏铁蕨 <i>Brainea insignis</i>	
		7	乌毛蕨科 Blechnaceae	乌毛蕨属 <i>Blechnum</i>	乌毛蕨 <i>Blechnum orientale</i>	
		8	豆科 Fabaceae	含羞草属 <i>Mimosa</i>	含羞草 <i>Mimosa pudica</i>	
		9	豆科 Fabaceae	葫芦茶属 <i>Tadehagi</i>	葫芦茶 <i>Tadehagi triquetrum</i>	
				其他 9 种 Other 9 species		
东方	灌木层	1	大戟科 Euphorbiaceae	银柴属 <i>Aporosa</i>	银柴 <i>Aporosa dioica</i>	
		2	大戟科 Euphorbiaceae	野桐属 <i>Mallotus</i>	白背叶 <i>Mallotus apelta</i>	
		3	大戟科 Euphorbiaceae	野桐属 <i>Mallotus</i>	粗糠柴 <i>Mallotus philippensis</i>	

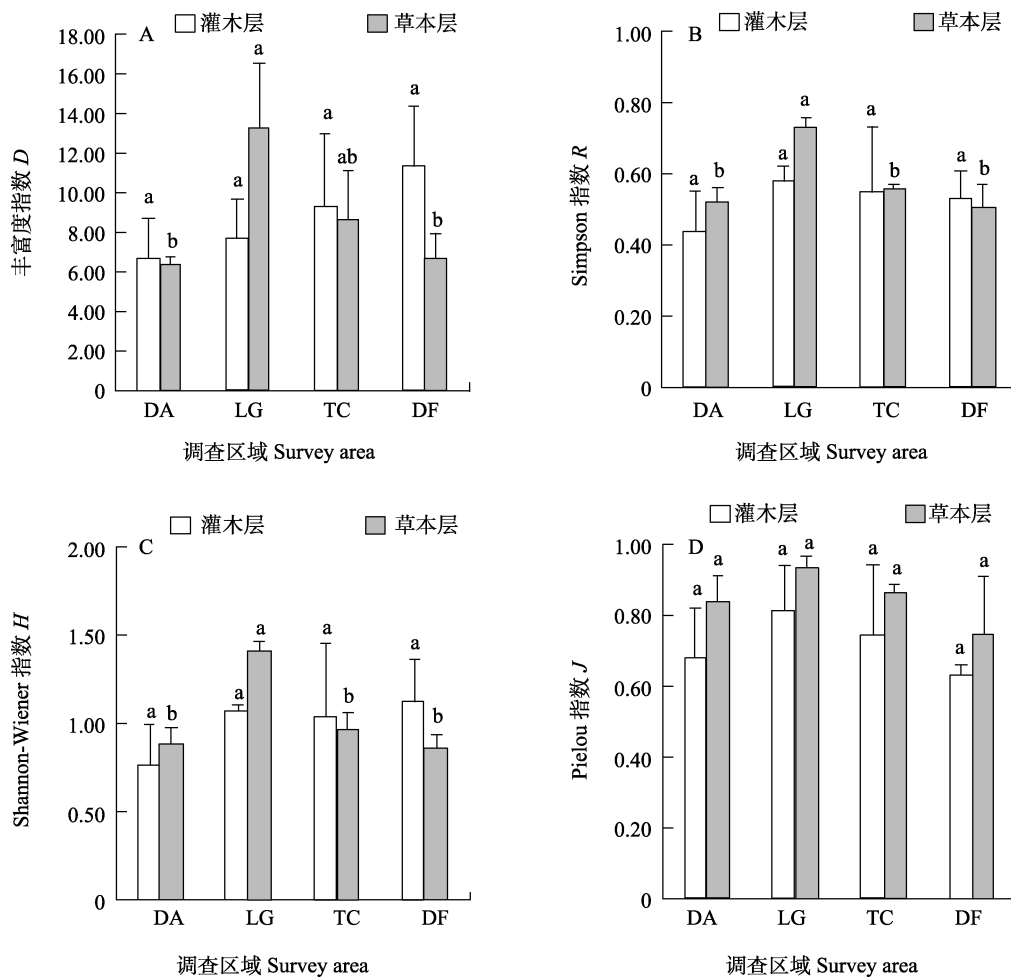
续表 3 桉树人工林林下植被主要组成植物名录

Tab. 3 Main species composition of understory vegetation in eucalyptus plantation (continued)

区域 Area	植被层 Vegetation layer	编号 No.	科 Family	属 Genus	种 Specie		
东方	灌木层	4	大戟科 Euphorbiaceae	野桐属 <i>Mallotus</i>	锈毛野桐 <i>Mallotus anomalus</i>		
		5	大戟科 Euphorbiaceae	黑面神属 <i>Breynia</i>	黑面神 <i>Breynia fruticosa</i>		
		6	番荔枝科 Annonaceae	暗罗属 <i>Polyalthia</i>	海南暗罗 <i>Polyalthia laui</i>		
		7	番荔枝科 Annonaceae	假鹰爪属 <i>Desmos</i>	假鹰爪 <i>Desmos chinensis</i>		
		8	樟科 Lauraceae	木姜子属 <i>Litsea</i>	假桉木姜子 <i>Litsea monopetala</i>		
		9	樟科 Lauraceae	樟属 <i>Cinnamomum</i>	阴香 <i>Cinnamomum burmannii</i>		
		10	椴树科 Tiliaceae	扁担杆属 <i>Grewia</i>	扁担杆 <i>Grewia biloba</i>		
		11	椴树科 Tiliaceae	破布叶属 <i>Microcos</i>	破布叶 <i>Microcos paniculata</i>		
		12	楝科 Meliaceae	楝属 <i>Melia</i>	楝 <i>Melia azedarach</i>		
		13	楝科 Meliaceae	地黄连属 <i>Munronia</i>	羽状地黄连 <i>Munronia pinnata</i>		
						其他 8 种 Other 8 species	
			草本层	1	豆科 Fabaceae	鸡血藤属 <i>Callerya</i>	美丽鸡血藤 <i>Callerya speciosa</i>
				2	豆科 Fabaceae	黄檀属 <i>Dalbergia</i>	象鼻藤 <i>Dalbergia mimosoides</i>
					其他 9 种 Other 9 species		

注：表中仅列出不同区域桉树林灌木层、草本层的非单种科。

Note: The table lists only non-monotypic families of eucalyptus forest irrigation and grass layer in different areas.



不同小写字母表示差异显著 (P < 0.05)。

Different lowercase letters indicate significant difference (P < 0.05).

图 1 不同区域桉树人工林林下植物多样性指数

Fig. 1 Understory plant diversity indices of eucalyptus plantations in different areas

2.3 桉树人工林林下植被的地上生物量

海南不同区域桉树人工林下植被地上部分生物量分配情况见表 4。林下灌木层、草本层地上部分生物量总计为 2.35~3.71 t/hm²，表现为定安>屯昌>临高>东方，两两之间差异显著 ($P<0.05$)。灌木层占比 51.75%~88.65%，表现为屯昌>东方>定安>临高，且屯昌和东方显著高于定安和临高 ($P<0.05$)；草本层占比 11.35%~48.43%，表现为定安>临高>屯昌>东方，两两之间差异显著 ($P<0.05$)。说明在不同区域桉树林下灌木层、草本层地上部分生物量分配情况有差异。

表 4 不同区域桉树人工林下植被地上生物量分配情况
Tab. 4 Distribution of aboveground biomass under eucalyptus plantations indifferent areas t/hm²

区域 Area	灌木 Shrub	草本 Herb	总计 Total
定安	1.91±0.05 ^b	1.79±0.05 ^a	3.71±0.08 ^a
临高	1.57±0.05 ^c	1.23±0.07 ^b	2.80±0.02 ^c
屯昌	2.19±0.06 ^a	0.75±0.06 ^c	2.93±0.05 ^b
东方	2.06±0.07 ^a	0.28±0.07 ^d	2.35±0.01 ^d

注：不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$).

2.4 Yd 指数的应用

不同区域桉树人工林的 Yd 指数见表 5。灌木层方面，Yd₁ 指数：东方>屯昌>定安>临高，Yd₂ 指数：屯昌>东方>临高>定安，Yd₃ 指数：东方>屯昌>临高>定安，Yd₄ 指数：屯昌>东方=定安>临高，4 个 Yd 指数在不同区域无显著差异。草本层方面，Yd₁ 指数：临高>定安>屯昌>东方，且临高显著大于屯昌和东方 ($P<0.05$)；Yd₂ 指数和 Yd₃ 指数的结果一致，定安>临高>屯昌>东方，且定安和临高之间无显著差异，但均显著大于屯昌和临高 ($P<0.05$)；Yd₄ 指数：定安>临高>屯昌>东方，两两之间差异显著 ($P<0.05$)。说明 4 个区域的桉树林灌木层综合功能水平相当；而东方的草本层 Yd 指数均最小，并且定安和临高基本大于屯昌和东方，说明桉树林下定安和临高的草本层综合功能较强，东方最弱。

2.5 Yd 指数与多样性指数、生物量的相关性分析

由表 6 可知，桉树人工林灌木层丰富度 (D) 与 Yd₁、Yd₂、Yd₃ 指数均呈极显著正相关 ($P<0.01$)；Simpson 指数 (R) 与 4 个 Yd 指数均

表 5 不同区域桉树人工林林下植被的 Yd 指数

Tab. 5 Yd index of understory plant of eucalyptus plantations in different areas

区域 Area	灌木层 Shrub				草本层 Herb			
	Yd ₁	Yd ₂	Yd ₃	Yd ₄	Yd ₁	Yd ₂	Yd ₃	Yd ₄
定安	12.83±4.22 ^a	0.84±0.23 ^a	1.47±0.48 ^a	1.30±0.29 ^a	11.34±0.54 ^{ab}	0.93±0.05 ^a	1.58±0.13 ^a	1.50±0.12 ^a
临高	12.01±3.00 ^a	0.91±0.07 ^a	1.68±0.01 ^a	1.27±0.21 ^a	16.47±4.70 ^a	0.89±0.05 ^a	1.76±0.06 ^a	1.14±0.07 ^b
屯昌	20.49±8.13 ^a	1.20±0.42 ^a	2.30±0.91 ^a	1.63±0.46 ^a	6.60±2.42 ^{bc}	0.41±0.04 ^b	0.72±0.13 ^b	0.64±0.03 ^c
东方	23.20±5.81 ^a	1.09±0.13 ^a	2.31±0.42 ^a	1.30±0.02 ^a	1.82±0.04 ^c	0.15±0.05 ^c	0.25±0.07 ^c	0.22±0.10 ^d

注：同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$).

表 6 桉树人工林林下灌木层 Yd 指数与多样性指数的相关性

Tab. 6 Correlation between Yd index and diversity index in shrub layer of eucalyptus plantation

指标 Index	D	R	H	J	B	Yd ₁	Yd ₂	Yd ₃	Yd ₄
D	1								
R	0.687 [*]	1							
H	0.850 ^{**}	0.955 ^{**}	1						
J	0.255	0.852 ^{**}	0.670 [*]	1					
B	0.272	-0.018	0.062	-0.175	1				
Yd ₁	0.963 ^{**}	0.637 [*]	0.791 ^{**}	0.220	0.510	1			
Yd ₂	0.747 ^{**}	0.883 ^{**}	0.882 ^{**}	0.674 [*]	0.448	0.814 ^{**}	1		
Yd ₃	0.864 ^{**}	0.857 ^{**}	0.923 ^{**}	0.546	0.436	0.905 ^{**}	0.972 ^{**}	1	
Yd ₄	0.423	0.789 ^{**}	0.675 [*]	0.820 ^{**}	0.411	0.522	0.897 ^{**}	0.777 ^{**}	1

注：*表示显著相关 ($P<0.05$)；**表示极显著相关 ($P<0.01$)。

Note: * represents significant correlation ($P<0.05$); ** represents extremely significant correlation ($P<0.01$).

呈显著正相关 ($P<0.05$), 且与 Yd_2 、 Yd_3 、 Yd_4 指数均呈极显著正相关 ($P<0.01$); Shannon-Wiener 指数 (H) 与 4 个 Yd 指数均呈显著正相关 ($P<0.05$), 且与 Yd_1 、 Yd_2 、 Yd_3 指数均呈极显著正相关 ($P<0.01$); Pielou 指数 (J) 与 Yd_4 指数呈极显著正相关 ($P<0.01$), 同时与 Yd_2 指数呈显著正相关 ($P<0.05$)。α 多样性指数与地上生物量 (B) 的相关系数有正有负, 且绝对值很小; Yd 指数与地上生物量均呈正相关 ($P<0.05$), 且均呈显著水平。由此可知, 桉树人工林下灌木层 α 多样性指数与 Yd 指数关系十分密切。

由表 7 可知, 桉树人工林草本层的丰富度指数 (D) 与 Yd_1 指数呈极显著正相关关系 ($P<0.01$); Simpson 指数 (R) 与 Yd_1 指数、 Yd_3 指数呈显著正相关 ($P<0.05$); Shannon-Wiener 指数 (H) 与 Yd_1 指数呈极显著正相关 ($P<0.01$), 同时与 Yd_3 指数呈显著正相关 ($P<0.05$); 而地上生物量 (B) 与 4 种 Yd 指数均呈极显著正相关关系 ($P<0.01$)。由此可知, 只有 Yd_1 指数、 Yd_3 指数与 α 多样性指数呈显著相关, 表明 Yd 指数与 α 多样性指数的相关性一般, 主要是因为此时 Yd 指数与地上部分生物量的相关性极强。

表 7 桉树人工林林下草本层 Yd 指数与多样性指数的相关系数

Tab. 7 Correlation between Yd index and diversity index in herbaceous layer of eucalyptus plantation

指标 Index	D	R	H	J	B	Yd_1	Yd_2	Yd_3	Yd_4
D	1								
R	0.735**	1							
H	0.812**	0.964**	1						
J	0.295	0.749**	0.561	1					
B	0.106	0.217	0.196	0.329	1				
Yd_1	0.759**	0.704*	0.715**	0.498	0.708**	1			
Yd_2	0.364	0.527	0.508	0.508	0.940**	0.869**	1		
Yd_3	0.472	0.631*	0.632*	0.519	0.880**	0.906**	0.987**	1	
Yd_4	0.180	0.346	0.302	0.470	0.982**	0.762**	0.970**	0.919**	1

注: *表示显著相关 ($P<0.05$); **表示极显著相关 ($P<0.01$)。

Note: * represents significant correlation ($P<0.05$); ** represents extremely significant correlation ($P<0.01$).

3 讨论

通过对海南岛不同区域桉树人工林的调查发现, 桉树人工林下植物共 101 种, 灌木层植物有 31 科 45 属 49 种, 草本层植物有 28 科 48 属 52 种。与杨再鸿等^[27]调查海南岛桉树人工林 224 种植物相比, 种类数不到一半, 主要是因为本研究的调查范围较小, 但是本次调查显示的几个优势科和出现频率较高的白背叶、银柴、飞机草等与之相似, 说明随着近年来桉树人工林群落的发展, 这些植物仍适宜桉树林下的生长环境。

林下植物多样性指数反映了林下植物的均匀度和丰富度, 与群落的结构类型、林分发展阶段及稳定程度有关^[28]。本研究结果显示, 不同区域桉树人工林灌木层的 4 种多样性指数均无显著差异, 临高的桉树人工林草本层 3 种多样性指数显著大于另外 3 个区域, 这说明不同区域对桉树人工林下的草本层植物组成影响较大, 因为草本植物的生长周期较短, 更易受其他因素的干扰, 对环境的响应更为敏感^[29]。

地上部分生物量能够较好地反映生态系统的结构与功能, 地上部分生物量的大小和分布是受多种因素的共同作用^[30]。本研究结果显示, 桉树林下灌木层地上部分生物量为 $(1.57\pm 0.05)\sim(2.19\pm 0.06)\text{t}/\text{hm}^2$, 草本层地上部分生物量为 $(0.28\pm 0.07)\sim(1.79\pm 0.05)\text{t}/\text{hm}^2$, 虽然灌木层生物量始终大于草本层, 但因分布区域不同其分配比例波动幅度较大。相关性分析结果显示, 桉树林灌木层、草本层 α 多样性指数与地上生物量无显著相关性, 这与庞荣荣等^[31]对太白山次生林的研究结果一致, 这可能是研究尺度相同导致的, 同时这一结果也证明 α 多样性指数与生物量对林下植被层生态功能的反映并不一致。

虽然 α 多样性水平与地上生物量对林下植被的生态功能的影响均是正向的, 但二者的关系并无定论^[23], 本研究提出的 Yd 指数则直接将这 2 个方面结合, 以此来判断桉树林下植被的综合功能。本研究结果表明, 不同区域桉树人工林的灌木层 Yd 指数均无显著差异, 这与 α 多样性指数

结果相同,因为不同区域的 α 多样性指数和地上生物量在数值上较为接近, Yd 指数结果是对 α 多样性指数和地上生物量的综合反映;临高和定安的草本层 Yd 指数均大于屯昌和东方,这与 α 多样性指数的比较结果不同,这是由于地上生物量部分相差较大,对 Yd 指数结果产生了一定影响。

4 结论

本研究以海南桉树人工林为研究对象,通过样方调查和统计分析,得到 4 个不同区域桉树林林下植物组成、多样性及地上生物量特征;并将 α 多样性指数与地上生物量结合构造一个综合性的 Yd 指数,结果发现 Yd 指数将生物量纳入公式,综合考虑多样性与生物量 2 个重要方面,能更为准确地表示桉树人工林林下植被的生态功能性。本研究能反映一段时间内海南桉树人工林的林下植被特征,这对于研究整个人工林长期过程来说是必不可少的,能为制定更科学、更合理的热带人工林经营措施提供理论依据。构建的综合功能指数可为人工林生态系统功能的短期评价提供新思路,但是影响林下植被的因素是多方面的,包括林分结构、环境因子等,今后将继续探索 Yd 指数的影响因子。

参考文献

- [1] 张晓晖,余雪标,黄金城. 海南省桉树人工林生态系统服务功能价值评估[J]. 热带林业, 2006(3): 25-27, 42.
ZHANG X H, YU X B, HUANG J C. Ecosystem service evaluation of eucalyptus plantation in Hainan Province[J]. Tropical Forestry, 2006(3): 25-27, 42. (in Chinese)
- [2] 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: 210.
National Forestry and Grassland Administration. China forest resources report 2014—2018[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2019: 210. (in Chinese)
- [3] 周兆杰,刘智强. 人工林林下植被的结构与功能研究进展[J]. 黑龙江科技信息, 2012(25): 235.
ZHOU Z J, LIU Z Q. A research on the structure and the function of understory vegetation in planation[J]. Scientific and Technological Innovation, 2012(25): 235. (in Chinese)
- [4] 庄雪影,邱美玲. 香港三种人工林下植物多样性的调查[J]. 热带亚热带植物学报, 1998(3): 196-202.
ZHUANG X Y, QIU M L. An investigation of floristic diversity of three types of planations in Hong Kong[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 1998(3): 196-202. (in Chinese)
- [5] 陈彩虹,田大伦,方晰,田蜜. 城郊 4 种人工林林下植被物种多样性、生物量与土壤养分相关性[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 213-217.
CHEN C H, TIAN D L, FANG X, TIAN M. Correlativity between undergrowth vegetation species diversity/biomass and soil fertility of four types planted forest in suburbs[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(6): 213-217. (in Chinese)
- [6] 方怡然,蔡金桓,薛立. 3种改造人工林的林下植物多样性和土壤物理性质[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(4): 87-92.
FANG Y R, CAI J H, XUE L. Undergrowth plant diversity and soil physical properties in three reformed plantations[J]. Journal of South China Agricultural University, 2018, 39(4): 87-92. (in Chinese)
- [7] ZHAO L, HU Y L, LIN G G, GAO Y C, FANG Y T, ZENG D H. Mixing effects of understory plant litter on decomposition and nutrient release of tree litter in two plantations in Northeast China[J]. PLoS ONE, 2018, 8(10): e76334.
- [8] 余济云,曾思齐,陈彩虹. 低效马尾松水保林林下植被及生态功能恢复研究 II 恢复成效的分析与评价[J]. 中南林业调查规划, 2002(3): 1-3.
SHE J Y, ZENG S Q, CHEN C H. Study on the recovery of the ecological function and the vegetation under the forests of the low-effect water & soil conservation forests of *Masson Pine* II. The analysis and evaluating of the efficiency[J]. Central South Forest Inventory and Planning, 2002(3): 1-3. (in Chinese)
- [9] 于立忠,朱教君,孔祥文,胡万良,谭学仁. 人为干扰(间伐)对红松人工林林下植物多样性的影响[J]. 生态学报, 2006(11): 3757-3764.
YU L Z, ZHU J J, KONG X W, HU W L, TAN X R. The effects of anthropogenic disturbances (thinning) on plant species diversity of *Pinus koreansis* plantations[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006(11): 3757-3764. (in Chinese)
- [10] 李婷婷,鱼舜尧,吴傲森,顾栋磊,许航,郝建锋. 林分因子对云顶山不同人工林林下植物多样性的影响[J]. 西北植物学报, 2019, 39(8): 1463-1471.
LI T T, YU S Y, WU A M, GU D L, XU H, HAO J F. Effects of stand factors on understory species diversity of different plantations in Yunding Mountain[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2019, 39(8): 1463-1471. (in Chinese)
- [11] 陈廷贵,张金屯. 十五个物种多样性指数的比较研究[J]. 河南科学, 1999(S1): 62-64, 78.
CHEN T G, ZHANG J T. A comparison of fifteen species diversity indices[J]. Henan Science, 1999(S1): 62-64, 78. (in Chinese)

- Chinese)
- [12] 王寿兵. 对传统生物多样性指数的质疑[J]. 复旦学报(自然科学版), 2003(6): 867-868, 874.
WANG S B. A question on the traditional biodiversity index[J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2003(6): 867-868, 874. (in Chinese)
- [13] 许晴, 张放, 许中旗, 贾彦龙, 尤建民. Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数若干特征的分析及“稀释效应”[J]. 草业科学, 2011, 28(4): 527-531.
XU Q, ZHANG F, XU Z Q, JIA Y L, YOU J M. Some characteristics of Simpson index and the Shannon-Wiener index and their dilution effect[J]. Pratacultural Science, 2011, 28(4): 527-531. (in Chinese)
- [14] CAZZOLLA G R, CASTALDI S, LINDSELL J A, COOMES D A, MARCHETTI M, MAESANO M, ARIANNA D P, PAPARELLA F, VALENTINI R. The impact of selective logging and clearcutting on forest structure, tree diversity and above-ground biomass of African tropical forests[J]. Ecological Research, 2015, 30(1): 119-132.
- [15] RIZVI R H, DHYANI S K, YADAV R S, RAMESH S. Biomass production and carbon stock of poplar agroforestry systems in Yamunanagar and Saharanpur districts of north-western India[J]. Current Science, 2011, 100(5): 736-742.
- [16] 陈灵芝, 钱迎倩. 生物多样性科学前沿[J]. 生态学报, 1997(6): 3-10.
CHEN L Z, QIAN Y Q. Frontiers in biodiversity science[J]. Acta Ecologica Sinica, 1997(6): 3-10. (in Chinese)
- [17] 张彦雷. 山西太岳山油松人工林多功能快速评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
ZHANG Y L. A study on multi-function rapid evaluation of *Pinus Tabulaeformis* plantations on Taiyue Mountain, Shanxi Province[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014. (in Chinese)
- [18] 郭靖, 王让会, 张仁平, 宁虎森. 新疆荒漠区几种典型人工林生态服务功能综合评价[J]. 干旱区研究, 2014, 31(6): 1153-1157.
GUO J, WANG R H, ZHANG R P, NING H S. Comprehensive evaluation on ecosystem services of several typical plantation in desert region of Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(6): 1153-1157. (in Chinese)
- [19] 吴敬东. 长沙市枫香人工林生态系统服务功能及价值评估研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012.
WU J D. Research on assessing the ecosystem service function and value of the *Liquidambar formosana* planation in Changsha[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2012. (in Chinese)
- [20] 方精云, 柯金虎, 唐志尧, 陈安平. 生物生产力的“4P”概念、估算及其相互关系[J]. 植物生态学报, 2001(4): 414-419.
FANG J Y, KE J H, TANG Z Y, CHEN A P. Implications and destinations of four terrestrial productivity parameters[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2001(4): 414-419. (in Chinese)
- [21] 温远光, 陈放, 刘世荣, 梁宏温, 元昌安, 朱宏光. 广西桉树人工林物种多样性与生物量关系[J]. 林业科学, 2008(4): 14-19.
WEN Y G, CHEN F, LIU S R, LIANG H W, YUAN C A, ZHU H G. Relationship between species diversity and biomass of eucalyptus plantation in Guangxi[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008(4): 14-19. (in Chinese)
- [22] 杨路存, 赵玉红, 徐文华, 周国英. 青海省高寒灌丛物种多样性、生物量及其关系[J]. 生态学报, 2018, 38(1): 309-315.
YANG L C, ZHAO Y H, XU W H, ZHOU G Y. Species diversity, biomass, and their relationship in the alpine shruberies of Qinghai Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1): 309-315. (in Chinese)
- [23] 马洁, 薛建辉, 吴永波, 李东昌, 高婷, 钱刘兵. 贵州省喀斯特山地 3 种人工林林下植物多样性和地上部生物量及其相关性[J]. 植物资源与环境学报, 2021, 30(1): 17-26.
MA J, XUE J H, WU Y B, LI D C, GAO T, QIAN L B. Diversity and above-ground biomass of undergrowth plants of 3 plantations in karst mountainous region of Guizhou Province and their correlation[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2021, 30(1): 17-26. (in Chinese)
- [24] 季蕾, 亢新刚, 郭韦韦, 汪晶, 张青. 金沟岭林场 3 种林型不同郁闭度林下灌草生物量[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(9): 29-33, 39.
JI L, KANG X G, GUO W W, WANG J, ZHANG Q. Biomass of shrub and herb under three forest types with different canopy densities in Jingouling forest farm[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2016, 44(9): 29-33, 39. (in Chinese)
- [25] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 I. α 多样性的测度方法(下)[J]. 生物多样性, 1994(4): 231-239.
MA K P, LIU Y M. Measurement of biotic community diversity I. The measurement methods of α diversity(2)[J]. Biodiversity Science, 1994(4): 231-239. (in Chinese)
- [26] 吕婧娴, 王得祥, 张宋智, 何志美, 保积存, 黄青平. 小陇山林区不同密度油松人工林林下物种多样性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(11): 49-56.
LV J X, WANG D X, ZHANG S Z, HE Z M, BAO J C, HUANG Q P. Study on the species diversity of under growth in the different stand densities of *Pinus tabulaeformis* plantation of Xiaolongshan area[J]. Journal of Northwest A & F

- University (Natural Science Edition), 2010, 38(11): 49-56. (in Chinese)
- [27] 杨再鸿, 杨小波, 李跃烈, 余雪标, 吴庆书. 海南岛桉树林林下植被物种组成及生物量[J]. 东北林业大学学报, 2008(5): 25-27.
YANG Z H, YANG X B, LI Y L, YU X B, WU Q S. Species component and biomass of understory vegetation in eucalyptus plantation in Hainan Island[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2008(5): 25-27. (in Chinese)
- [28] 闫玮明, 孙冰, 裴男才, 王旭, 李非凡, 罗鑫华, 邹滨. 粤北阔叶人工林和次生林植物多样性与土壤理化性质相关性研究[J]. 生态环境学报, 2019, 28(5): 898-907.
YAN W M, SUN B, PEI N C, WANG X, LI F F, LUO X H, ZOU B. Correlation analyses on plant diversity and soil physical-chemical properties between evergreen broad-leaved plantations and natural secondary forests in North Guangdong, China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(5): 898-907. (in Chinese)
- [29] 崔宁洁, 陈小红, 刘洋, 张健, 杨万勤. 不同林龄马尾松人工林林下灌木和草本多样性[J]. 生态学报, 2014, 34(15): 4313-4323.
CUI N J, CHEN X H, LIU Y, ZHANG J, YANG W Q. Shrub and herb diversity at different ages of *Pinus massoniana* plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(15): 4313-4323. (in Chinese)
- [30] 杨晨晨, 陈宽, 周延林, 等. 放牧对锡林郭勒草甸草原群落特征及生产力的影响[J]. 中国草地学报, 2021, 43(5): 58-66.
YANY C C, CHEN K, ZHOU Y L. Effects of grazing on community characteristics and productivity of Xilingol meadow steppe[J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(5): 58-66. (in Chinese)
- [31] 庞荣荣, 彭洁莹, 闫琰. 太白山次生锐齿栎林地上生物量影响因素[J]. 林业科学, 2021, 57(10): 157-165.
PANG R R, PENG J Y, YAN Y. Factors influencing above-ground biomass in the secondary forest of *Quercus aliena* var. *acutiserrata* in Taibai Mountain [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(10): 157-165. (in Chinese)