

脊线对武夷山针阔混交林群落特征的影响

范敦锦,高亮,周建广,陈世品,林文俊*

(福建农林大学 林学院,福建 福州 350002)

摘要:为探究脊线上发育的中山针阔叶林的群落学特征。采用典型样地法对武夷山国家公园进行植被调查,通过统计林下物种组成、多度、物种多样性和生物量,分析脊线物种多样性随面积的变化趋势与两侧坡向生物量的变化趋势得到脊线森林群落的部分特征。结果表明,脊线样地内共有维管植物24科43属67种,其中裸子植物2科2属2种,被子植物21科40属64种,共2889株。样地最小调查面积为1500 m²,鹿角杜鹃(*R. latoucheae*)、细齿叶桉(*E. nitida*)、箬竹(*I. tessellatus*)分别是乔木层、灌木层、草本层的优势物种。脊线两坡向物种丰富度指数显著差异,地上生物量大于地下生物量且脊线东南坡生物量大于西北坡生物量。脊线植物形态学特征普遍为个体胸径较小(平均5.55 cm),高度低(平均6.79 m),林分密度(1.45 株/m²)较非脊线森林群落大,形成单一冠层,在物种组成和结构上具有独特性,与物种组成相似的中山矮曲林形成鲜明差异。本文首次系统揭示了武夷山脊线森林群落的独特结构特征,填补了脊线地形因子对山地森林生态系统影响机制的研究空白。

关键词:森林群落;脊线;武夷山国家公园;物种多样性;生物量

中图分类号:S718.54

文献标志码:A

文章编号:0253-2395(2025)04-0839-10

Effect of Ridge Line on Community Characteristics of Mixed Forest in Wuyi Mountain

FAN Dunjin, GAO Liang, ZHOU Jianguang, CHEN Shipin, LIN Wenjun*

(College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: To investigate the community characteristics of mid-mountain needle-leaved and broad-leaved forests developed along ridge lines, a vegetation survey was conducted in Wuyishan National Park using the typical quadrat method. By statistically analyzing the species composition, abundance, species diversity, and biomass of understory vegetation, the variation trends of species diversity along the ridge line with area and the biomass changes on both slope aspects were examined to reveal partial features of the ridge line forest community. The results indicated that the ridge line quadrats contained a total of 67 vascular plant species from 43 genera and 24 families, including 2 gymnosperm species from 2 genera and 2 families, and 64 angiosperm species from 40 genera and 21 families, totaling 2889 individuals. The minimum survey area for the quadrats was 1500 m². The dominant species in the tree layer, shrub layer, and herb layer were *Rhododendron latoucheae*, *Eurya nitida*, and *Indocalamus tessellatus*, respectively. Significant differences were observed in species richness indices between the two slope aspects of the ridge line. Aboveground biomass exceeded belowground biomass, and the biomass on the southeastern slope was greater than that on the northwestern slope. The morphological characteristics of ridge line plants generally included smaller individual diameters at breast height (average 5.55 cm), lower heights (average 6.79 m), and higher stand density (1.45 individuals/m²) compared to non-ridge line forest communities, forming

收稿日期:2023-11-15;接受日期:2024-03-04

基金项目:福建省教育厅中青年教师教育科研项目(科技类)(JAT210069)

作者简介:范敦锦(2003-),男,福建厦门人,研究方向为森林群落生物多样性与生物信息学研究。E-mail: fandunjin@foxmail.com

* 通信作者:林文俊(LIN Wenjun),E-mail:linwenjun123@126.com

引文格式:范敦锦,高亮,周建广,等.脊线对武夷山针阔混交林群落特征的影响[J].山西大学学报(自然科学版),2025,48(4):839-848. DOI:10.13451/j.sxu.ns.2024044.

a single canopy layer. These features exhibited uniqueness in species composition and structure, contrasting sharply with mid-mountain dwarf twisted forests of similar species composition. This paper systematically reveals for the first time the unique structural characteristics of forest communities along the Wuyi Mountain ridgeline, filling the research gap on the influence mechanisms of ridgeline topographic factors on mountain forest ecosystems.

Key words: forest community; ridge line; Wuyishan national park; species diversity; biomass

0 引言

生态环境是维持人类社会稳定发展的重要物质基础^[1],而森林生态系统是陆地上生物量最多、面积最大和生产力最高的生态系统^[2]。其中生物量是生态系统生产力的基础和功能的主要表现形式,是研究生态系统碳循环与植物资源分配策略的核心内容^[3-5],其作为森林植物多样性的重要组成部分,在森林水土保持、养分循环、林地生产力维持等方面发挥关键作用^[6-7],是反映生态系统稳定性及群落演替规律的重要指标^[8]。物种多样性是生物多样性在物质层次的表现形式,反映了物种丰富度与分布均匀性并表征群落的稳定性及生境差异^[3-4]。物种多样性与生物量同时作为实现我国碳达峰和碳中和目标的重要影响因素,已成为中国学者普遍关注的热点问题^[9-10]。

武夷山脉是中国东南沿海重要山脉,为东南沿海丘陵与江南丘陵的分界线^[11],属亚热带海洋性季风气候,保存了典型的中亚热带原生性森林生态系^[12]。其山峰的海拔多集中在1 500 m以上,其中最高峰黄岗山海拔为2 160.8 m,是中国大陆东南六省一市海拔最高的山峰^[13]。这些山峰的峰顶常常连成一线,形成独特的脊线中山阔叶林群落。脊线通常有两个坡向相反的斜坡,平地面积狭小,两个斜坡的坡度大多不一致。脊线位于斜坡的最上端,地形陡峭且风化程度较高,土壤养分贫瘠、含水率低,由于较为恶劣的水肥条件^[14]、线状延伸的凸形地貌,导致脊线上发育的森林群落具有冠层单一且较低、物种数量较少、个体较小但密度较大等特点^[15]。同时由于光照等环境因素,在两个不同的坡向上物种多样性还可能呈现不同的水平^[16]。然而地形因子作为主导植被格局的非地带性环境因子^[15,17],目前尚没有关于对脊线物种组成、物种多样性与生物量等群落特征的相关研究报道。这导致无法有效实现对生态系统结构与功能的全面把握,严重阻碍了

对该地区生态系统的可持续管理和保护措施的科学制定与实施,限制了该区域生态环境的健康发展。因此,为了解这类森林群落的主要特征,选择其中较有代表性的中山区域的脊线设置样地进行调查和分析,是理解其植被格局形成机制以及生态系统稳定性的关键一步,为有针对性地推动生态环境保护和可持续利用提供必要的科学依据,为其生态学功能研究和长期监测工作的开展提供参考。

1 数据与方法

1.1 样地概况

武夷山国家公园位于福建省北部,属于亚热带湿润季风气候,年平均气温8.5℃~18℃,年平均降雨量1 486 mm~2 015 mm,年平均湿度78%~84%,年平均雾日达120 d^[18]。样地位于武夷山国家公园中山区域(东经117°44',北纬27°46'),海拔1 700 m。样地概况见表1。

表1 样地概况

Table 1 General situation of the sample plots

样地	海拔/m	坡向	平均胸径/cm	平均树高/m	密度(株/m ²)
-01	1 652~1 658	东南	6.06	6.96	1.44
-02	1 649~1 655	西北	5.11	6.62	1.66

1.2 研究方法

1.2.1 调查方法

2023年7月,以脊线为中心线延伸100 m,东南、西北两向斜坡各延伸10 m,布设面积为2 000 m²的样地。将样地划分为20个相邻的10 m×10 m样方用于调查,其中位于东南坡的样地西南向东北编号1—10,并附后缀-01;位于西北坡的样地编号与东南坡相同,同时附后缀-02。记录样地内的物种名、胸径(乔木层)、地径(灌木层)、高度和盖度(草本层)。

1.2.2 重要值计算方法

根据调查数据统计出样地内的乔木层、灌

木层、草本层的物种数、个体数、平均胸径与胸高断面积等数值,以此计算样地内的重要值,公式如下:重要值(IV)=(相对多度+相对频度+相对优势度)/3^[19],式中相对密度=(某种植物的个体数/样地内全部植物的个体数)×100%;相对频度=(某种植物的频度/所有种的频度之和)×100%,其中频度为某种植物在所有样地中出现的次数;相对优势度=(某种植物的胸高断面积之和/全部胸高断面积之和)×100%^[20]。

1.2.3 物种多样性计算方法

生态优势度指数 Simpson (D): $D = 1 - \sum_{i=1}^S (N_i/N)^2$ ^[21]; 丰富度指数 Gleason 指数 (G): $G = (S - 1) / \ln A$; Shannon-Wiener 指数 (H): $H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$ ^[22]; 物种间相遇概率: $PIE = \sum_{i=1}^S N_i(N - N_i) / [N(N - 1)]$; 均匀度指数 Pielou 指数 (J): $J = H / \ln S$ 。其中 S 为样地中的物种数, A 为样地面积, N_i 为第 i 个物种的个体数, N 为所有物种个体数之和, $P_i = N_i / N$ ($i = 1, 2, \dots, S$)^[23]。

1.2.4 生物量计算方法

生物量分析采用 Ouyang 等的异速生长方程进行计算^[24],具体方程见表 2。

1.2.5 数据处理与分析

通过统计分析软件对不同样方各多样性指数与生物量进行显著性差异 ($P=0.05$), 并使用 R 4.2.1 进行数据可视化分析。

2 结果与分析

2.1 种-面积曲线

根据武夷山国家公园脊线森林群落样地的调查结果绘制种-面积图(图 1), 得到拟合方程为 $y = 13.768 \ln(x) - 32.55$ ($R^2 = 0.9463$)。结果表明, 脊线样地的物种数在取样面积较小时随取样面积的增大而迅速增大, 其增大速率在取样面积为 500 m² 时增大速率开始减缓。在取样面积到达 1 500 m² 时物种数基本不再增加, 此时样地内共有 67 个物种, 占样地总物种的 98.5%。当取样面积到达 1 600 m² 时样地内 67 个物种全部出现。

2.2 群落组成

样地内共有维管植物 24 科 43 属 67 种, 包

表 2 不同物种或者不同类型物种生物量的自然对数与个体胸径间关系的异速生长方程

Table 2 Allometric growth equation of the relationship between the natural logarithm of biomass of different species or different types of species and individual diameter

物种或类型	组分	异速生长方程
黄山松等 裸子植物	主干生物量	$\ln(B) = -1.815 + 2.178 \times \ln(\text{DBH})$
	枝生物量	$\ln(B) = -4.943 + 2.552 \times \ln(\text{DBH})$
	叶生物量	$\ln(B) = -5.466 + 2.333 \times \ln(\text{DBH})$
甜槠等 壳斗科物种	根生物量	$\ln(B) = -5.206 + 2.728 \times \ln(\text{DBH})$
	主干生物量	$\ln(B) = -1.915 + 2.358 \times \ln(\text{DBH})$
	枝生物量	$\ln(B) = -4.837 + 2.835 \times \ln(\text{DBH})$
疏齿木荷等 山茶科物种	叶生物量	$\ln(B) = -5.394 + 2.750 \times \ln(\text{DBH})$
	根生物量	$\ln(B) = -4.957 + 2.948 \times \ln(\text{DBH})$
	主干生物量	$\ln(B) = -2.419 + 2.442 \times \ln(\text{DBH})$
浙江新木 姜子等 樟科物种	枝生物量	$\ln(B) = -2.657 + 2.108 \times \ln(\text{DBH})$
	叶生物量	$\ln(B) = -2.747 + 1.577 \times \ln(\text{DBH})$
	根生物量	$\ln(B) = -3.221 + 2.233 \times \ln(\text{DBH})$
其他 常绿物种	主干生物量	$\ln(B) = -2.554 + 2.326 \times \ln(\text{DBH})$
	枝生物量	$\ln(B) = -3.231 + 2.294 \times \ln(\text{DBH})$
	叶生物量	$\ln(B) = -3.039 + 1.579 \times \ln(\text{DBH})$
	根生物量	$\ln(B) = -2.242 + 1.928 \times \ln(\text{DBH})$
	主干生物量	$\ln(B) = -2.428 + 2.419 \times \ln(\text{DBH})$
	枝生物量	$\ln(B) = -3.406 + 2.375 \times \ln(\text{DBH})$
	叶生物量	$\ln(B) = -3.760 + 2.013 \times \ln(\text{DBH})$
	根生物量	$\ln(B) = -3.329 + 2.343 \times \ln(\text{DBH})$

注: B 表示生物量(kg), DBH 表示个体胸径(cm)。

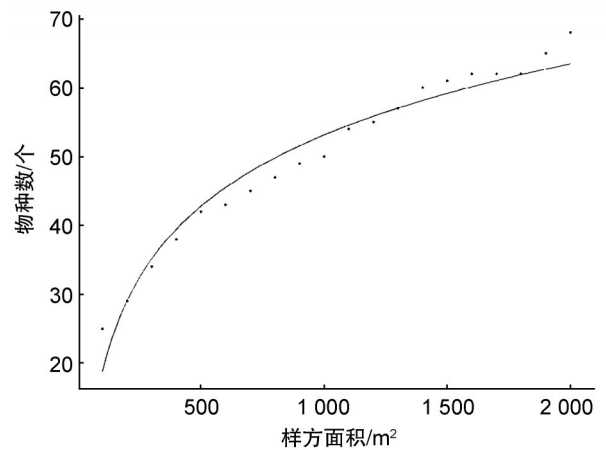


图 1 脊线森林群落种-面积曲线
Fig. 1 Species-area curve in the plot

括裸子植物 2 科 2 属 2 种和被子植物 21 科 40 属 64 种, 个体数共 2 889 株, 其中裸子植物 2 种, 为杉木 (*C. lanceolata*) 和黄山松 (*P. taiwanensis*)。各层次物种重要值统计结果如表 3 所示。乔木层中的优势种为鹿角杜鹃, 黄山松和银马花, 其重要值分别为 18.12%、16.94% 和 14.79%。

灌木层中的优势种为细齿叶柃(*E. nitida*)、马银花和鸭公树(*N. chui*),其重要值分别为37.52%、8.38%和6.25%。草本层中重要值最高的为箬竹,其重要值为72.41%。这些物种对脊线生境适应性较高。

表3 乔木层和灌木层主要物种的重要值

Table 3 Important values of major species in arbor and shrub layers

乔木层		灌木层	
物种	IV/%	物种	IV/%
鹿角杜鹃	18.12	细齿叶柃	13.69
黄山松	16.94	马银花	8.94
马银花	14.79	鸭公树	7.35
疏齿木荷	11.8	厚叶厚皮香	7.01
丁香杜鹃	5.22	多脉青冈	6.42

2.3 物种多样性差异分析

多样性指数计算结果见表4与图2。由表4可知,东南坡共有58种植物,共1429株,西北坡有43种植物,共1600株,两坡向的多样性指数差异较小。图2表明,各物种多样性随着面积的增加而增加,Simpson指数与物种间相遇概率PIE在调查面积到达1000 m²后增加速率趋于平稳,Pielous均匀度、Shannon-Wiener和Gleason丰富度指数随面积增加而增加,无减缓趋势。其中Gleason丰富度指数在面积达到1700 m²时降低,这是由于随着面积的增加物种数保持不变造成的。通过*t*检验得到Simpson指数(*D*)、Shannon-Wiener指数(*H*)、物种间相遇概率PIE、均匀度指数Pielou指数(*J*)、Gleason指数(*G*)的*P*值分别为0.094、0.1、0.076、0.541与0.034,只有Gleason指数(*G*)*P*值小于0.05,即东西坡之间丰富度指数存在显著差异。

2.4 脊线生物量差异分析

两坡向生物量比较见图3。西北坡平均生物量为3345 kg,东南坡平均生物量为3793 kg。其中西北坡共6块样方生物量大于平均生物量,1002生物量最大。东南坡共4块样方生物量大于平均生物量,其中0701样地的生物量最大。在生物量分配上,两坡向地上生物量均大于地下生物量。西北坡生物量为33454 kg,东南坡生物量为37926 kg。随面积的增加,两坡向生物量均以稳定的增长速率上升。

表4 不同坡向多样性指数与差异比较

Table 4 Diversity index and difference comparison of east-west aspect

样方名称	坡位	物种数	株数	<i>D</i>	<i>H</i>	PIE	<i>J</i> /%	<i>G</i>
0101	WN	25	211	0.83	2.25	0.83	76.38	4.13
0102	WN	19	229	0.75	2.03	0.76	65.52	4.78
0201	WN	18	172	0.78	1.96	0.79	74.46	3.04
0202	WN	22	251	0.81	2.05	0.82	77.63	3.04
0301	WN	18	206	0.77	1.79	0.77	69.73	2.82
0302	WN	14	186	0.72	1.72	0.73	63.60	3.26
0401	WN	19	149	0.74	1.91	0.75	68.76	3.47
0402	WN	14	151	0.62	1.52	0.63	59.42	2.82
0501	WN	21	114	0.80	2.22	0.80	75.49	4.13
0502	WN	13	134	0.83	2.19	0.83	73.14	4.34
0601	ES	19	129	0.82	2.25	0.83	69.97	5.43
0602	ES	15	150	0.76	1.91	0.76	65.95	3.91
0701	ES	17	101	0.72	1.74	0.73	60.25	3.91
0702	ES	16	124	0.82	2.25	0.83	76.28	4.13
0801	ES	17	135	0.78	2.16	0.79	71.05	4.56
0802	ES	13	134	0.80	2.16	0.80	73.20	4.13
0901	ES	16	121	0.82	2.10	0.83	74.27	3.69
0902	ES	19	150	0.73	1.83	0.74	64.73	3.69
1001	ES	30	100	0.80	2.09	0.81	75.46	3.47
1002	ES	20	151	0.93	3.06	0.94	90.11	6.51
显著性水平				0.094	0.1	0.076	0.541	0.034*

注:*D*:生态优势度指数;*H*:Shannon-Wiener指数;PIE:物种间相遇概率;*J*:Pielous均匀度指数;*G*:物种丰富度指数。坡位一列中WN表示西北坡向,ES表示东南坡向。

3 分析与讨论

植物群落的物种数通常会与调查者圈定的样地面积与取样策略相关,一般认为选定的样方面积要涵盖样地的大部分物种。根据植株大小和密度确定样方数目和大小,计算种-面积的关系曲线的拐点可得到样地调查所需的最小面积^[25]。武夷山国家公园脊线森林群落的物种数随调查面积的增大而增大,在面积1500 m²时物种数增量趋于0,以此确定最小调查面积为1500 m²,其远小于非脊线森林群落的常绿阔叶林的最小样方面积4800 m²^[26]。从物种丰富度来看,脊线样地内共有24科43属67种,远小于非脊线森林群落的常绿阔叶林的最小样方面积内的物种数100~120^[27]。林分内乔木个体普遍较小,胸径1.0 cm~19.0 cm,平均5.55 cm,高度3.0 m~22.0 m,平均6.79 m,低于非脊线森林群落的常绿阔叶林的最小样方面积内的平均胸

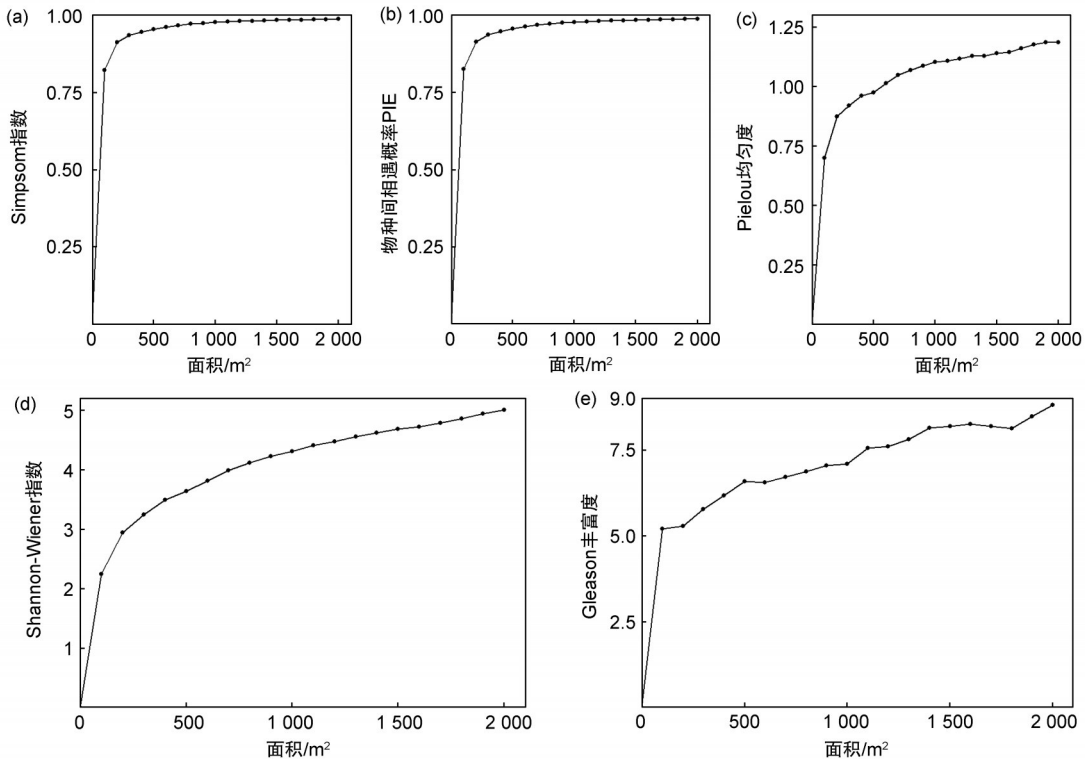


图2 样地针阔混交林乔木层与灌木层随面积的物种多样性变化

(a) Simpson 指数随面积变化趋势; (b) 物种间相遇概率随面积变化趋势; (c) Pielou 均匀度随面积变化趋势; (d) Shannon-Wiener 指数随面积变化趋势; (e) Gleason 丰富度随面积变化趋势。

Fig. 2 Species diversity of arbor layer and shrub layer with area of mixed needle and broad forest

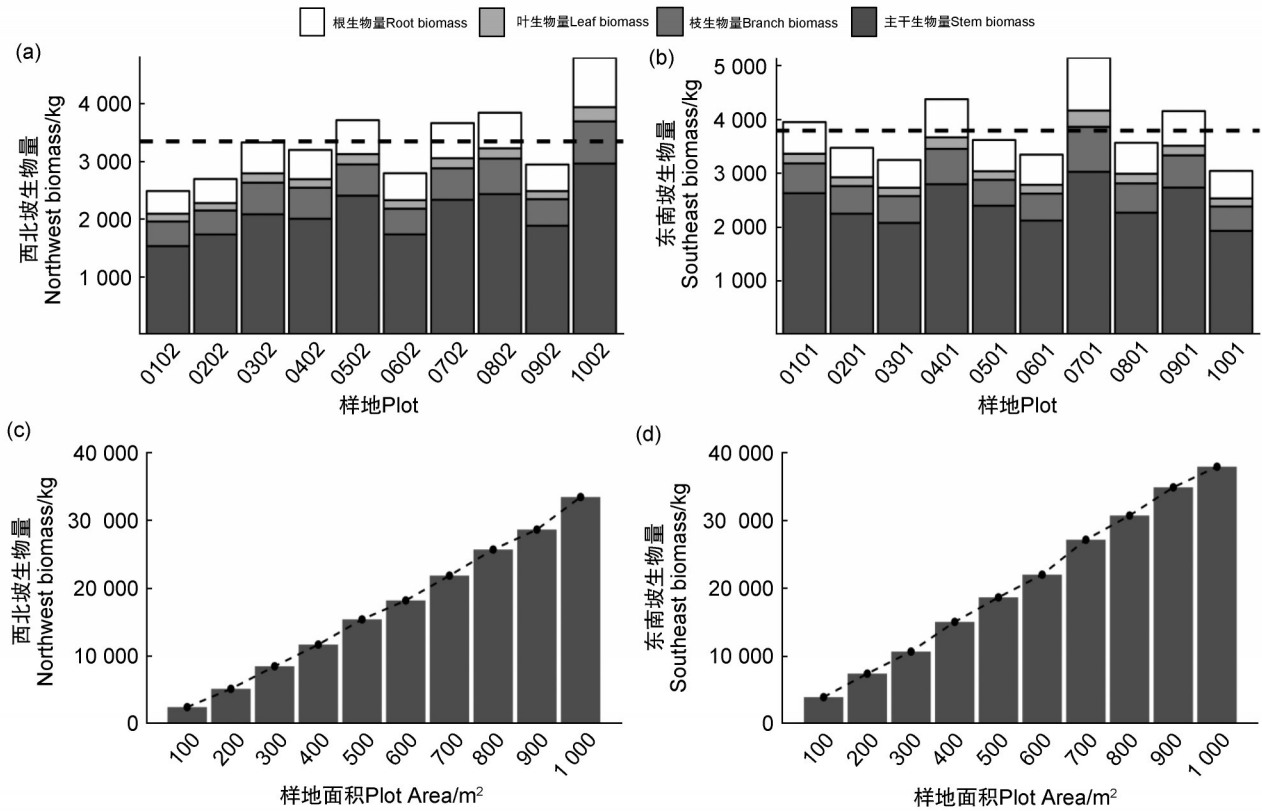
(a) Simpson index variation trend with area; (b) probability of interspecies encounter variation trend with area; (c) Pielou's evenness variation trend with area; (d) shannon-wiener index variation trend with area; (e) gleason richness variation trend with area.

径与平均高度^[27]。林分密度为 1.45 株/m², 高于非脊线森林群落的常绿阔叶林的最小样方面积内的个体密度^[28]。这些结果表明脊线森林群落中植物的丰富度、胸径大小和个体数较非脊线森林群落小, 但林分密度较大。这是由于脊线位于两坡向的交汇处, 其只存在面积极小的平地, 林下植物集中生长在较为平缓的脊线上, 形成林分密度较大的森林群落。林分密度通过影响林内光、热和水分等生态因子的分配, 造成森林环境的异质性, 林下植被竞争异质性资源导致其物种多样性水平、生物量发生变化^[10]。因此可推测脊线相对贫瘠的生境条件和种内外竞争是导致脊线与非脊线森林群落差异的主要原因。

脊线是不同坡向的交线, 坡向之间环境差异大。坡向作为重要地形因子之一, 它通过影响物质和能量的再分配进一步影响土壤养分、水分等生境条件, 进而改变群落物种的组成和分布^[29-30]。在森林群落中, 拥有丰富的物种组成可

以防止昆虫病害攻击^[31], 同时也能提供更为多样的动物栖息地^[32], 生物多样性(丰富度和均匀度)的高低决定了该区域生态系统能否健康的运行^[33]。脊线样地为西南-东北走向, 向两侧 10 m 分为东南坡向与西北坡向, 即半阳坡与半阴坡。两种坡向立地间, 坡向直接影响着树木的生长环境条件。结果表明东南坡与西北坡的丰富度指数存在显著性差异, 两坡向随面积增加生物量的增加趋势相似。由于半阳坡相对于半阴坡有着气温高、风力较小, 土壤深厚的更适宜大多数树种生长的生态环境^[34], 东南坡(37 926.41 kg)总生物量较西北坡(33 454.10 kg)大。

生物量分配格局是决定植物获取资源、竞争以及繁殖能力的重要因素, 也是反映植物竞争能力的重要指标^[35]。面积与密度和生物量的对比如图 4 所示, 样地内林分密度随面积的增加呈下降趋势, 这与海拔变化和地形的陡峭程度相关, 也与植物的分布数量有关。根据林分密度的计算公式, 随着面积的增加林分密度



注: (a)、(b)为两坡向生物量分配(包括乔木、灌木与草本层)示意图, (c)、(d)为两坡向总生物量随面积的变化示意图。

图3 不同坡向生物量比较

(a) 西北坡生物量分配示意图; (b) 东南坡生物量分配示意图; (c) 西北坡生物量随面积变化示意图; (d) 东南坡生物量随面积变化示意图。

Fig. 3 Biomass comparison between east-south and west-north aspect

(a) Schematic plot of biomass allocation in the northwest slope; (b) schematic plot of biomass allocation on the southeastern slope; (c) schematic plot of biomass variation with area in the northwestern slope region; (d) schematic plot of biomass variation with area on the southeastern slope.

若呈降低趋势,说明植株数量的增加率随面积增加而降低,最终导致整体密度随面积增加而减小。图4表明生物量增加率随样地面积的增加降低,前文结果中东南坡生物量由西南向东北呈高低起伏变化,主干生物量变化率最大。西北坡生物量由西南向东北呈逐步上升趋势,推测这与地形的陡峭程度相关,小范围的起伏地形会导致土壤肥力的变化,同时导致同一坡向的植物受光和受风力影响的程度出现差异,最终呈现同一坡向生物量的起伏变化。有研究认为,植被多样性与生物量关系还可能存在取样效应和生态位互补效应两种效应的影响^[36],但本文研究的结果中并没有表现出明显的相关关系。

根据调查分析结果,鹿角杜鹃生长旺盛,多度大,是脊线样地中的优势种。有研究表明,武夷山鹿角杜鹃林通常位于海拔较高的地区,

同时鹿角杜鹃林乔木层通过占据优越的生态位以单一物种占优势。大多数植物竞争的主要特征是需要完全相同的资源,如日光、水、二氧化碳和矿质营养物^[37]。而脊线森林群落独特的生境致使植物需要在土壤盖度小、水肥条件恶劣的环境下生长,同时陡峭狭长的地形限制植物胸径的生长,在这种环境下只有少数植物能够竞争到生长所必需的资源。因此在脊线上生长有大量的胸径小而密度大的植株,如鹿角杜鹃、马银花。植物多样性随海拔多样性梯度变化的结果差别很大^[38],位于山体顶部的脊线乔木层中优势明显的有杜鹃花科、山茶科(Theaceae)与松科(Pinaceae),而灌木层中仅山茶科的细齿叶柃优势度相对较高,箬竹在草本层中占最大优势。值得注意的是,与脊线森林群落相比,武夷山国家公园中的中山矮曲林也同样

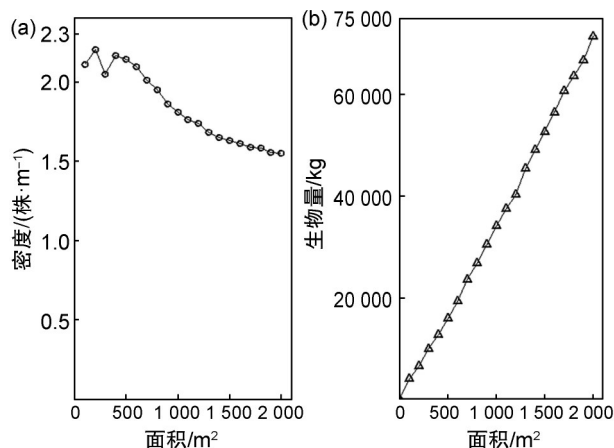


图4 总生物量与林分密度的关系比较

(a) 林分密度随面积变化趋势图;(b) 总生物量随面积变化趋势图。

Fig. 4 Comparison of the relationship between east-west slope biomass and stand density

(a) Stand density variation trend plot with area; (b) total biomass variation trend plot with area.

生长在中高海拔地区,生境与脊线森林群落一致,主要由杜鹃花科组成^[39]。但由于常年的风力影响,顶芽受到损害而侧芽发育,导致中山矮曲林林木生长低矮弯曲,茎秆粗短^[40],这与同样位于山体顶部的脊线森林群落的树干通直纤细有着明显的差异。这可能是由于脊线森林群落中植物顶芽的抗风能力较中山矮曲林林木的强,亦或有其他的顶芽保护机制,须未来进一步深入研究揭示其机制。

4 结论

本文调查的脊线样地呈西南-东北走向,海拔自西南向东北缓慢升高,高差8 m,植被密度较大,但个体胸径和树高相对较小,物种数相对同海拔非脊线森林群落较少,形成了单一冠层的林分结构。脊线两侧10 m范围内的物种多样性差异不显著,物种丰富度指数差异显著,东南坡总生物量大于西北坡,脊线物种的形态学特征与物种组成相似的中山矮曲林形成鲜明差异,脊线生态系统在物种组成和结构上具有独特性。长期监测工作和生态学功能研究将成为后续研究的重要方向,以更全面地了解脊线生态系统的动态变化及其对环境的响应。这一系列研究将为相关领域的知识填补提供有益信息,为可持续管理和保护提供科学支持。

参考文献:

- [1] 中国环境监测总站. 中国生态环境质量评价研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
China National Environment Monitoring Centre. Study on Evaluation of Ecological Environment Quality in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2004.
- [2] TEMESGEN H, AFFLECK D, POUDEL K, *et al.* A Review of the Challenges and Opportunities in Estimating above Ground Forest Biomass Using Tree-level Models [J]. *Scand J For Res*, 2015: 1-10. DOI: 10.1080/02827581.2015.1012114.
- [3] 汝海丽, 张海东, 焦峰, 等. 黄土丘陵区微地形对草地植物群落结构组成和功能特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, **27**(1): 25-32. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201601.039.
RU H L, ZHANG H D, JIAO F, *et al.* Impact of Micro-landform on Grassland Plant Community Structure and Function in the Hilly Loess Plateau Region, China[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2016, **27**(1): 25-32. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201601.039.
- [4] 汪殿蓓, 暨淑仪, 陈飞鹏. 植物群落物种多样性研究综述[J]. *生态学杂志*, 2001, **20**(4): 55-60.
WANG D P, JI S Y, CHEN F P. A Review on the Species Diversity of Plant Community[J]. *Chin J Ecol*, 2001, **20**(4): 55-60.
- [5] 张健, 刘国彬. 黄土丘陵区不同植被恢复模式对沟谷地植物群落生物量和物种多样性的影响[J]. *自然资源学报*, 2010, **25**(2): 207-217. DOI: 10.11849/zrzyxb.2010.02.005.
ZHANG J, LIU G B. The Influence of Plant Community Biomass and Species Diversity of Different Vegetation Restoration Patterns in the Gully Area of the Hilly Loess Region[J]. *J Nat Resour*, 2010, **25**(2): 207-217. DOI: 10.11849/zrzyxb.2010.02.005.
- [6] 郑晓阳, 赵冲, 刘青青, 等. 成熟杉木人工林林下草本层生态位特征[J]. *生态学杂志*, 2018, **37**(2): 332-338. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201802.031.
ZHENG X Y, ZHAO C, LIU Q Q, *et al.* Niche Characteristics of Understory Herb Layer in a Mature Chinese Fir Plantation[J]. *Chin J Ecol*, 2018, **37**(2): 332-338. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201802.031.
- [7] 金艳强, 包维楷. 四川柏木人工林林下植被生物量与林分结构的关系[J]. *生态学报*, 2014, **34**(20): 5849-5859. DOI: 10.5846/stxb201301210127.
JIN Y Q, BAO W K. Relationships of the Understory Biomass with Stand Structure of the Sichuan Cypress Plantation Forests across Sichuan Basin, China[J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34**(20): 5849-5859. DOI: 10.5846/stxb201301210127.

- [8] SU X P, WANG M H, HUANG Z Q, *et al.* Forest Understorey Vegetation: Colonization and the Availability and Heterogeneity of Resources[J]. *Forests*, 2019, **10**(11): 944. DOI: 10.3390/f10110944.
- [9] 付德刚, 乔显娟, 王新媛, 等. 林龄对黑松人工林植被层生物量分配的影响[J/OL]. 分子植物育种, 2023: 1-10. (2023-10-08) [2023-11-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20231007.1317.006.html>.
FU D G, QIAO X J, WANG X Y, *et al.* Effect of Forest Age on Biomass Allocation of the Vegetation Layer of *Pinus thunbergii* Parlartore Artificial Forest[J/OL]. *Mol Plant Breed*, 2023: 1-10. (2023-10-08)[2023-11-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20231007.1317.006.html>.
- [10] 陈波兰, 吴雨茹, 钟欣艺, 等. 林分密度对云顶山柏木人工林林下物种多样性和生物量的影响[J]. 四川农业大学学报, 2023, **41**(4): 665-672. DOI: 10.16036/j.issn.1000-2650.202305240.
CHEN B L, WU Y R, ZHONG X Y, *et al.* Effects of Stand Density on Understory Plant Diversity and Biomass in a *Cupressus funebris* Plantation in Yunding Mountain[J]. *J Sichuan Agric Univ*, 2023, **41**(4): 665-672. DOI: 10.16036/j.issn.1000-2650.202305240.
- [11] 李明森. 中国大百科全书-中国山川: 普及本[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1999.
LI M S. Encyclopedia of china-China mountains and rivers: popular edition[M]. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 1999.
- [12] 何东进, 洪伟, 胡海清, 等. 武夷山风景名胜区景观空间格局变化及其干扰效应模拟[J]. 生态学报, 2004, **24**(8): 1602-1610. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-0933.2004.08.005.
HE D J, HONG W, HU H Q, *et al.* Modeling Landscape Pattern Dynamics and Their Effects Under Different Disturbances in Wuyishan Scenery District[J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, **24**(8): 1602-1610. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-0933.2004.08.005.
- [13] 郑成洋, 方精云. 福建黄岗山东南坡气温的垂直变化[J]. 气象学报, 2004, **62**(2): 251-255. DOI: 10.3321/j.issn: 0577-6619.2004.02.012.
ZHENG C Y, FANG J Y. Changes in Air Temperature Variables along Altitudinal Gradient in Mt. huanggang, China[J]. *Acta Meteor Sin*, 2004, **62**(2): 251-255. DOI: 10.3321/j.issn: 0577-6619.2004.02.012.
- [14] 聂道平. 不同立地条件的杉木人工林生产力和养分循环[J]. 林业科学研究, 1993, **6**(6): 643-649.
NIE D P. A Comparasion of the Productivity and Nutrient Cycling of Chinese Fir Plantationin Different Site Conditions[J]. *For Res*, 1993, **6**(6): 643-649.
- [15] 王家鸣, 许涵, 李意德, 等. 地形异质性对尖峰岭热带山地雨林木本植物群落结构及多样性的影响[J]. 林业科学, 2018, **54**(1): 1-11. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20180101.
WANG J M, XU H, LI Y D, *et al.* Effects of Topographic Heterogeneity on Community Structure and Diversity of Woody Plants in Jianfengling Tropical Montane Rainforest[J]. *Sci Silvae Sin*, 2018, **54**(1): 1-11. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20180101.
- [16] 何其华, 何永华, 包维楷. 干旱半干旱区山地土壤水分动态变化[J]. 山地学报, 2003, **21**(2): 149-156. DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2003.02.003.
HE Q H, HE Y H, BAO W K. Research on Dynamics of Soil Moisture in Arid and Semiarid Mountainous Areas[J]. *J Mt Res*, 2003, **21**(2): 149-156. DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2003.02.003.
- [17] WOODWARD F I, MCKEE I F. Vegetation and Climate [J]. *Environ Int*, 1991, **17**(6): 535-546. DOI: 10.1016/0160-4120(91)90166-n.
- [18] 曾钦滕, 罗萧, 方福清, 等. 福建武夷山黄岗山东南坡植物物种 β 多样性沿海拔梯度研究[J]. 安徽农学通报, 2018, **24**(18): 90-92. DOI: 10.16377/j.cnki.issn1007-7731.2018.18.042.
ZENG Q M, LUO X, FANG F Q, *et al.* Study on β Diversity of Plant Species on the Southern Slope of Huanggang Mountain in Wuyishan, Fujian Province along the Elevation Gradient[J]. *Anhui Agric Sci Bull*, 2018, **24**(18): 90-92. DOI: 10.16377/j.cnki.issn1007-7731.2018.18.042.
- [19] CURTIS J T, MCINTOSH R P. An Upland Forest Continuum in the Prairie-forest Border Region of Wisconsin [J]. *Ecology*, 1951, **32**(3): 476-496. DOI: 10.2307/1931725.
- [20] 李雪楠, 杞金华, 徐志雄, 等. 云南哀牢山退化常绿阔叶林乔木多样性和生物量的恢复[J/OL]. 热带亚热带植物学报, 2023: 1-11. (2023-10-11)[2023.11.15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1374.Q.20231010.1010.004.html>.
LI X N, QI J H, XU Z X, *et al.* Recovery of Tree Species Diversity and Biomass of Degraded Evergreen Broad-leaved Forest in Ailao Mountain, Yunnan Province, Southwest China[J/OL]. *J Trop Subtrop Bot*, 2023: 1-11. (2023-10-11) [2023.11.15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1374.Q.20231010.1010.004.html>.
- [21] 陈礼清, 张健. 巨桉人工林物种多样性研究(I): 物种多样性特征[J]. 四川农业大学学报, 2003, **21**(4): 308-312. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2650.2003.04.009.
CHEN L Q, ZHANG J. Study on Species Diversity of *Eucalyptus grandis* Plantation: Characteristic of Species Diversity[J]. *J Sichuan Agric Univ*, 2003, **21**(4): 308-312. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2650.2003.04.009.
- [22] LAKIĆEVIĆ M, SRĐEVIĆ B. Measuring Biodiversity in Forest Communities-A Role of Biodiversity Indices

- [J]. *Contemp Agricu*, 2018, **67**(1): 65–70. DOI: 10.2478/contagri-2018-0010.
- [23] 许新宇, 关昶翔, 兰思仁. 2002—2015年武夷山中亚热带常绿阔叶林乔木的物种组成及其多样性[J]. 分子植物育种, 2023, **21**(12): 4151–4157. DOI: 10.13271/j.mpb.021.004151.
- XU X Y, GUAN C X, LAN S R. Species Composition and Diversity of Subtropical Evergreen Broad-leaved Forest Trees in Wuyi Mountain during 2002-2015[J]. *Mol Plant Breed*, 2023, **21**(12): 4151–4157. DOI: 10.13271/j.mpb.021.004151.
- [24] OUYANG S, XIANG W, WANG X P, *et al.* Significant Effects of Biodiversity on Forest Biomass During the Succession of Subtropical Forest in South China[J]. *For Ecol Manag*, 2016, **372**: 291–302. DOI: 10.1016/J.FORECO.2016.04.020.
- [25] 杨青. 武夷山国家公园大安源甜槠群落主要种群生态位研究[J]. 武夷科学, 2023, **39**(1): 23–30. DOI: 10.15914/j.cnki.wywx.2023.01.03.
- YANG Q. Niche Analysis of the Main Populations of the *Castanopsis eyrei* Community in Daanyuan, Wuyishan National Park[J]. *Wuyi Sci J*, 2023, **39**(1): 23–30. DOI: 10.15914/j.cnki.wywx.2023.01.03.
- [26] 杨云方. 武夷山典型常绿阔叶林群落的组成和物种分布格局[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- YANG Y F. Species Composition and Distribution Pattern of the Typical Evergreen Broad-leaved Forest in Wuyi Mountains[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2013.
- [27] 丁晖, 杨云方, 徐海根, 等. 武夷山典型常绿阔叶林物种组成与群落结构[J]. 生态学报, 2015, **35**(4): 1142–1154. DOI: 10.5846/stxb201305050924.
- DING H, YANG Y F, XU H G, *et al.* Species Composition and Community Structure of the Typical Evergreen Broad-leaved Forest in the Wuyi Mountains of Southeastern China[J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35**(4): 1142–1154. DOI: 10.5846/stxb201305050924.
- [28] 丁晖, 陈水飞, 徐辉, 等. 2013—2018年武夷山亚热带常绿阔叶林乔木层动态[J]. 生态学报, 2022, **42**(8): 3458–3469. DOI: 10.5846/stxb202007051746.
- DING H, CHEN S F, XU H, *et al.* Dynamics of Arbor Layer in the Subtropical Evergreen Broad-leaved Forest in the Wuyi Mountains, Fujian Province, Southeastern China in 2013-2018[J]. *Acta Ecol Sin*, 2022, **42**(8): 3458–3469. DOI: 10.5846/stxb202007051746.
- [29] 刘旻霞. 甘南高寒草甸植物元素含量与土壤因子对坡向梯度的响应[J]. 生态学报, 2017, **37**(24): 8275–8284. DOI: 10.5846/stxb201611302456.
- LIU M X. Response of Plant Element Content and Soil Factors to the Slope Gradient of Alpine Meadows in Gannan[J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37**(24): 8275–8284. DOI: 10.5846/stxb201611302456.
- [30] 张博文, 秦娟, 任忠明, 等. 坡向对北亚热带区马尾松纯林及不同针阔混交林型林下植物多样性的影响[J]. 生态环境学报, 2022, **31**(6): 1091–1100. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2022.06.003.
- ZHANG B W, QIN J, REN Z M, *et al.* Effects of Slope Aspect on Understory Plant Diversity of *Pinus massoniana* Pure Forest and Different Coniferous and Broad-leaved Mixed Forest Types in North Subtropical Region[J]. *Ecol Environ Sci*, 2022, **31**(6): 1091–1100. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2022.06.003.
- [31] FREER-SMITH P H, WEBBER J F. Tree Pests and Diseases: The Threat to Biodiversity and the Delivery of Ecosystem Services[J]. *Biodivers Conserv*, 2017, **26**(13): 3167–3181. DOI: 10.1007/s10531-015-1019-0.
- [32] ZHAO Q, MASON T H E, AZERIA E T, *et al.* Robust Predictive Performance of Indicator Species Despite Different Co-occurrence Patterns of Birds in Natural and Managed Boreal Forests[J]. *For Ecol Manag*, 2017, **397**: 108–116. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.04.034.
- [33] STIRLING G, WILSEY B. Empirical Relationships between Species Richness, Evenness, and Proportional Diversity[J]. *Am Nat*, 2001, **158**(3): 286–299. DOI: 10.1086/321317.
- [34] 杨志慧, 王梦蕾, 孙照斌, 等. 不同坡向白桦木材材性与生长特性及其相关性研究[J]. 林业机械与木工设备, 2023, **51**(8): 23–29. DOI: 10.13279/j.cnki.fmwe.20231019.010.
- YANG Z H, WANG M L, SUN Z B, *et al.* The Study on the Wood Properties and Growth Characteristics of *Betula platyphylla* in Different Slope Directions and Their Correlation[J]. *For Mach Woodwork Equip*, 2023, **51**(8): 23–29. DOI: 10.13279/j.cnki.fmwe.20231019.010.
- [35] 黎磊, 周道玮, 盛连喜. 密度制约决定的植物生物量分配格局[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(8): 1579–1589. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2011.0265.
- LI L, ZHOU D W, SHENG L X. Density Dependence-determined Plant Biomass Allocation Pattern[J]. *Chin J Ecol*, 2011, **30**(8): 1579–1589. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2011.0265.
- [36] 陈彭祯霓, 任亮晶, 罗辑, 等. 海螺沟冰川退缩区原生演替序列植被物种多样性与生物量的关系[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28**(5): 1129–1136. DOI: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2021.03059.
- CHEN P, REN L J, LUO J, *et al.* Relationship between Biodiversity and Biomass along the Primary Succession Chronosequence in the Foreland of the Hailuoguo Glacier[J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, **28**(5):

- 1129-1136. DOI: 10.19675/j. cnki. 1006-687x. 2021.03059.
- [37] 张艳艳. 武夷山自然保护区不同森林群落生态学特征的比较研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2008.
ZHANG Y Y. Research on the Ecological Characteristics of Five Natural Forest Communities in Wuyishan Nature Reserve[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2008.
- [38] WILSON J B, SYKES M T. Some Tests for Niche Limitation by Examination of Species Diversity in the Dunedin Area, New Zealand[J]. *N Z J Bot*, 1988, **26**(2): 237-244. DOI: 10.1080/0028825x.1988.10410115.
- [39] 袁荣斌, 叶岑, 陈海婴, 等. 黄岗山一千米高差, 六个植被带[J]. 森林与人类, 2015(2): 56-59.
YUAN R B, YE C, CHEN H Y, *et al.* Huanggang Mountain is 1000 Meters High, with Six Vegetation Belts[J]. *For Humankind*, 2015(2): 56-59.
- [40] 卢凤鸣. 武夷山植被垂直分布调查分析[J]. 科学时代, 2009(1): 72-73.
LU F M. Investigation and Analysis on Vertical Distribution of Vegetation in Wuyishan[J]. *Sci Times*, 2009(1): 72-73.