

浙江洛迦山岛的植被类型及特有植物群落的物种和功能多样性

许洛山^{1,2},李玉芬³,郑忠⁴,胡志忠⁴,田文斌⁴,赵慈良⁴,胡军飞⁴,刘海⁴,
欧丹燕⁴,孙元敏^{1,5},阎恩荣^{2*}

(1. 福建省海洋生态保护与修复重点实验室, 福建 厦门 361005; 2. 浙江普陀山森林生态系统定位观测研究站, 生态与环境科学学院, 华东师范大学, 上海 200241; 3. 浙江舟山市农业教育培训中心, 浙江 舟山 316004; 4. 浙江舟山群岛新区普陀山公用事业管理中心, 浙江 舟山 316100; 5. 自然资源部第三海洋研究所, 福建 厦门 361005)

摘要:舟山群岛因面积变化、地理隔离和人类高强度干扰而蕴育着丰富的植被和海岛特有植物群落。基于洛迦山岛 30 个植被样地划分其植被类型, 分析特有植物群落的物种和功能多样性。结果表明, 1) 洛迦山岛植被可划分为常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、常绿灌丛和灌草丛; 按优势种和植物区系特征划分出 10 种群丛或群落类型; 按群落年龄和外貌划分出 10 种演替阶段的群落类型。2) 红楠-普陀樟群落和滨柃-海桐灌丛的胸径级结构均呈“L”形分布, 胸径在 0~5 cm 的个体占比最高。3) 红楠-普陀樟群落的平均密度显著低于滨柃-海桐灌丛 ($P < 0.05$), 其他物种多样性在 2 种群落间无显著差异 ($P > 0.05$); 仅红楠-普陀樟群落的功能离散度和 Rao 二次熵指数显著大于滨柃-海桐灌丛 ($P < 0.05$)。综合发现洛迦山岛植被类型丰富, 海岛特有植物群落结构完整、物种和功能多样性高。研究结果有助于深入理解陆桥型海岛植物群落的构建机制和提升海岛特有植物群落的保护。

关键词:功能多样性; 海岛特有植物群落; 物种多样性; 胸径级结构; 植被分类

中图分类号: Q948

文献标志码: A

文章编号: 1001-7461(2023)06-0074-07

Vegetation Types and Species and Functional Diversity of Endemic Plant Communities on Luojiashan Island in Zhejiang Province

XU Ming-shan^{1,2}, LI Yu-fen³, ZHENG Zhong⁴, HU Zhi-zhong⁴, TIAN Wen-bin⁴, ZHAO Ci-liang⁴,
HU Jun-fei⁴, LIU Hai⁴, OU Dan-yan⁴, SUN Yuan-min^{1,5}, YAN En-rong^{2*}

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Marine Ecological Conservation and Restoration, Xiamen 361005, Fujian, China; 2. Putuo Forest Ecosystem Research and Observation Station, School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 3. Zhoushan Agricultural Education and Training Center, Zhoushan 316004, Zhejiang, China; 4. Public Utility Management Center of Putuo Mountain in Zhoushan Islands New District, Zhoushan, Zhejiang 315114, China; 5. Third Institute of Oceanography, MNR, Xiamen 361005, Fujian, China)

Abstract: Zhoushan Islands often gestate abundant vegetation types and island endemic plant communities due to their changed areas, geographical isolation, and high human disturbance. Based 30 typical plant plots in Luojiashan Island, we classified vegetation types, and analyzed the species and functional diversity of its endemic plant community. The results showed that 1) the vegetation types of Luojiashan Island included evergreen broad-leaved forest, mixed evergreen and deciduous broad-leaved forest, evergreen shrub and shrub grassland. According to the dominant species and floristic characteristics, 10 types of associations or communities were classified. Based on the community age and physiognomy, communities with 10 types of

收稿日期: 2022-09-20 修回日期: 2022-12-03

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(32030068); 福建省海洋生态保护与修复重点实验室 2020 年度开放基金(EPR2020007)。

第一作者: 许洛山, 博士。研究方向: 岛屿生物地理学。E-mail: xums0123@163.com

* 通信作者: 阎恩荣, 教授, 博士生导师。研究方向: 功能生态学和海岛生态学。E-mail: eryan@des.ecnu.edu.cn

successions were divided. 2) The structures of DBH-class of *Cinnamomum japonicum*-*Machilus thunbergii* communities and *Eurya emarginata*-*Pittosporum tobira* shrubs were in "L" type distribution, in which the proportion of individuals with DBH between 0–5 cm was the highest. 3) The average densities of *C. japonicum*-*M. thunbergii* communities were significantly lower than that of *E. emarginata*-*P. tobira* shrubs ($P < 0.05$), for other biodiversity indexes, no significant differences were found between the two mentioned above ($P > 0.05$), except that the functional dispersion and Rao's entropy index of the former were significantly bigger than the later ($P < 0.05$). The comprehensive conclusion is that Luojiaoshan Island is rich in vegetation types, complete community structure, higher species and functional diversity of island endemic communities, and it is a model of vegetation restoration in Zhoushan Islands. This study is helpful to understand the maintenance mechanism and endemic plant communities' protection in land-bridge islands.

Key words: functional diversity; island endemic plant community; species diversity; class structure of diameter at breast height; vegetation classification

海岛在漫长的自然演化中蕴育了丰富的植被类型和特有植物群落,其在维持全球生物多样性中扮演着重要角色^[1](Losos, 2009 #13867)。然而,人类干扰导致大部分海岛的天然植被和特有植物群落消失殆尽,仅存留在个别干扰较小的海岛。厘清残存植被的类型和海岛特有植物群落的物种和功能多样性特征,可为海岛植被及其特有植物群落的恢复提供天然模板和理论依据。海岛特有植物群落的形成与进化过程、人类活动、气候等有关^[2-3]。而存留在面积较小海岛的植被和特有植物群落,由于缺乏全面的调查数据,很难精确划分出植被类型,评估其特有植物群落的多样性^[4]。

物种和功能多样性是生物多样性测度的重要指标^[5]。海岛因自然隔离、气候和生境独特,其植物群落的物种和功能多样性有别于大陆植物群落^[6]。对于海岛植物群落,物种多样性综合反映了面积效应和隔离效应及环境对植物的过滤效果。功能多样性反映了海岛植物与特殊气候、地理环境间的关系,可作为海岛植被评价的关键依据^[7]。同时,植物群落物种组成与结构是森林生态系统发挥功能的基础,对物种多样性及群落构建有重要影响^[8]。胸径级结构可直接反映群落的物种组成和结构,影响树高、树冠等功能性状^[9]。目前,很少有研究关注海岛特有植物群落,而研究其多样性有助于系统理解海岛植物群落的构建机制。

舟山群岛地带性植被保存良好、植物区系复杂、地理成分多样^[10]。虽有少量植物物种和功能多样性的研究,但典型海岛特有植物群落的多样性特征还不清晰^[11-12]。本研究以洛迦山岛为例,基于详尽的植被调查数据划分植被类型,分析特有植物群落红楠(*Machilus thunbergii*)-普陀樟(*Cinnamomum japonicum*)群落和滨柃(*Eurya emarginata*)-海桐(*Pittosporum tobira*)灌丛的胸径级结构、物种和功能多样性。

旨在回答2个问题:1)洛迦山岛植被类型及其特征如何;2)洛迦山岛特有植物群落的物种和功能多样性如何,在森林和灌丛间有何差异。该研究不仅有助于全面了解洛迦山岛的植被类型、特有植物群落的多样性,填补洛迦山岛植被研究的空白,而且为海岛植被恢复和保护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

洛迦山岛略呈三角形,位于普陀山岛东南约5.3 km处。地理位置122°26.7'E, 29°58.2'N,面积0.38 km²,最高海拔101.7 m(图1)。该区域年均降雨量1266 mm,年均温度16.83℃,土壤类型为红壤。洛迦山岛植被保存良好,覆盖率达82.2%^[13]。

1.2 植被调查与植物功能性状测定

2016年7–10月,采用法瑞学派的典型样地法全面调查洛迦山岛植被。记录30个样地的群落名称、分层情况、物种名称、多优度-聚集度和盖度等。在此基础上,针对特有植物群落红楠-普陀樟群落和滨柃-海桐灌丛,分别建立3个固定样地,面积分别为20 m×20 m和10 m×10 m。对样地内所有胸径≥1 cm的木本植物定位、挂牌和识别,测定胸径、树高、冠幅等,以及样地的坡度和坡向。同时,估计乔木层和灌木层的平均高度和郁闭度(表1)。共计调查1200株木本植物,属23科,26属,28种。还记录了样地内草本植物的名称、多优度-聚集度等。

植物功能性状的采集与测定参照《植物性状测量手册》^[14]。具体地,对样地内所有木本植物种随机选取3株健康个体,分别在无明显遮阴的林冠处,选择3~5个不同方位的枝条,摘取30片成熟叶,装进自封袋,带回实验室。先用叶面积仪(LI-3100C, USA)测定叶面积,称其鲜重。再装入信封放在75℃烘箱至48 h后称干重,计算单叶面积

(cm^2)、比叶面积(叶片面积/叶片质量, cm^2/g)、叶片干物质含量(叶片干重/叶片鲜重, %)。共测定 16 个物种的 71 株个体的叶片功能性状。

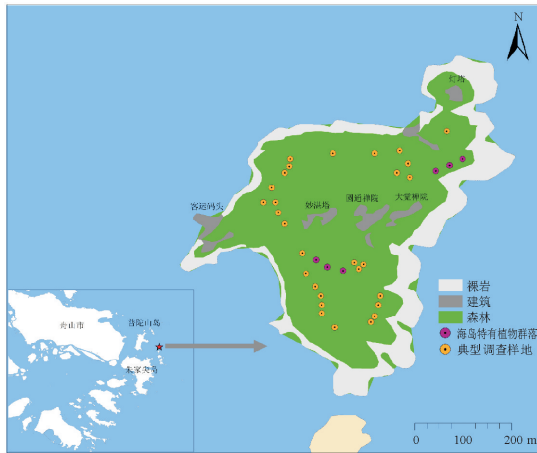


图 1 洛迦山岛 30 个典型样地和 6 个海岛特有植物群落分布

Fig. 1 Distribution of 30 typical plots and 6 island endemic plant communities on Luojiashan Island

1.3 物种多样性

选取物种丰富度、Shannon-Wiener 指数和

Pielou 指数度量海岛特有植物群落的物种多样性。

物种丰富度计算公式为

$$S_A = S \quad (1)$$

式中: S 为物种数目。

Shannon-Wiener 指数计算公式为

$$H = -\sum |n_i/N| \lg(n_i/N) \quad (2)$$

式中: n_i 代表第 i 种的个体数目; N 代表群落中所有个体数目。

Pielou 指数计算公式为

$$J_h = H/\ln S \quad (3)$$

式中: H 为 Shannon-Wiener 指数, S 为物种总数。

1.4 功能多样性

功能多样性指特定生态系统中所有物种或某一群落内物种功能性状的数值和分布范围, 强调群落中物种功能性状的差异^[15]。测度指标有功能丰富度(Functional richness, F_{Ric})、功能均匀度(Functional evenness, F_{Eve})、功能离散度(Functional divergence, F_{Dvar})、Rao 二次熵指数(Rao's quadratic entropy, $R_{\text{ao's}}$)。文中用单叶面积、比叶面积和叶片干物质含量, 在 R 4.1.1 的“FD”包中计算特有植物群落的功能多样性。

表 1 红楠-普陀樟群落和滨柃-海桐灌丛的基本特征

Table 1 Basic characteristics of *Machilus thunbergii*-*Cinnamomum japonicum* communities and *Eurya emarginata*-*Pittosporum tobira* shrublands

植物群落	样地面积/ m^2	个体数	物种丰富度	坡度/ (°)	坡向	乔木层郁闭度 (%)	灌木层郁闭度 (%)	乔木层平均高度/m	灌木层平均高度/m	优势种
红楠-普陀樟群落 1	400	248	24	5	西	85	30	8	2.5	红楠、普陀樟、海桐、柃木
红楠-普陀樟群落 2	400	253	17	7	西	80	30	8.2	2.6	红楠、普陀樟、柃木、天仙果
红楠-普陀樟群落 3	400	325	16	15	西	80	40	9.5	5.5	红楠、普陀樟、柃木、桑
滨柃-海桐灌丛 1	100	118	14	25	东南	/	87	/	3.8	滨柃、海桐、红楠、柃木
滨柃-海桐灌丛 2	100	171	9	26	东南	/	90	/	2.8	滨柃、海桐、红楠、普陀樟
滨柃-海桐灌丛 3	100	132	11	25	东南	/	90	/	3.3	滨柃、红楠、柃木、普陀樟

功能丰富度计算公式为

$$F_{\text{Ric}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ia} - x_{ib})^2} \quad (4)$$

式中: n 为群落内的物种数; x_{ia} 和 x_{ib} 为物种 ab 的性状值。

功能均匀度计算公式为

$$F_{\text{Eve}} = \sum_{i=1}^S \min(P_i, \frac{1}{S}) \quad (5)$$

式中: P_i 为物种 i 的相对性状值; S 为物种数。

功能离散度计算公式为

$$F_{\text{Dvar}} = \frac{2}{\pi} \arctan [5 \times \sum_{i=1}^N [(\ln C_i - \overline{\ln x})^2 \times A_i]] \quad (6)$$

式中: C_i 为第 i 项功能性状的数值; A_i 为第 i 项功能性状的相对丰富度; $\overline{\ln x}$ 为物种性状值自然对数

的加权平均; N 为群落中的物种数。

R_{ao} 二次熵指数公式为

$$R_{\text{ao's}} = \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^S d_{ij} P_i P_j \quad (7)$$

$$d_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_{ik} - x_{jk})^2 \quad (8)$$

式中: P_i 和 P_j 分别为第 i 和 j 个物种在群落中的相对多度; d_{ij} 为物种 i 与物种 j 之间性状相异矩阵的距离或差异; n 为性状数; x_{ik} 为物种 i 的 k 性状值; x_{jk} 为物种 j 的 k 性状值。

1.5 数据分析

按(物种相对多度+相对盖度+相对树高)/3×100%计算物种重要值, 其中, 物种相对盖度用相对胸高断面面积表示。典型样地的物种重要值计算: 将多优度-聚集度(5 级)量化为相对重要值, 每级占 20%。按样地的乔木层、灌木层、草本层分别计算物

种重要值,得到样地水平的物种重要值矩阵。首先,依据植被外貌和群落结构,用 Ellenberg 列表法对整个群落类型进行划分,再用双向指示种分析法(TWINSPAN)对样地进行数量分类,参照两者结果,划分出洛迦山岛的植被类型并描述其特征;其次,分析普陀樟-红楠群落和滨柃-海桐灌丛的胸径级结构;最后,用 T 检验分析普陀樟-红楠群落和滨柃-海桐灌丛在群落结构、物种和功能多样性的差异性;所有分析均在 R4. 1. 1 中进行,绘图在 Origin 8. 5 中实施。

表 2 洛迦山岛的植被分类
Table 2 Vegetation classification of Luojiashan Island

一级单位	二级单位	三级单位	一级单位	二级单位	三级单位
植被型	群丛或群落	演替阶段群落	植被型	群丛或群落	演替阶段群落
常绿阔叶林	红楠群丛	红楠林	常绿灌丛	滨柃-海桐群落	滨柃-海桐灌丛
	红楠-普陀樟群落	红楠-普陀樟林		白茅群落	白茅草丛
	红楠-全缘冬青群落	红楠-全缘冬青林		五节芒群落	五节芒草丛
常绿落叶阔叶混交林	红楠-桑群落	红楠-桑林	灌草丛	芒草群落	芒草草丛
	普陀樟-天仙果群落	普陀樟-天仙果林		单叶蔓荆群落	单叶蔓荆灌草丛

2.2 特有植物群落的结构特征

红楠-普陀樟群落和滨柃-海桐灌丛的胸径级结构均呈“L”形分布,属生长稳定型群落。红楠-普陀

2 结果与分析

2.1 植被类型和群落结构特征

洛迦山岛植被可分为常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、常绿灌丛和灌草丛;按优势种和植物区系特征划分为红楠群丛、红楠-普陀樟群落、红楠-全缘冬青群落、红楠-桑群落、普陀樟-天仙果群落、滨柃-海桐群落、白茅群落、五节芒群落、芒草群落和单叶蔓荆群落;按演替阶段和群落年龄划分出 10 种群落类型(表 2)。

樟群落大径级个体较多,部分植株胸径>30 cm。滨柃-海桐灌丛以中小径级个体为主。胸径在 0~5 cm 的个体在 2 种群落中占比较高(图 2)。

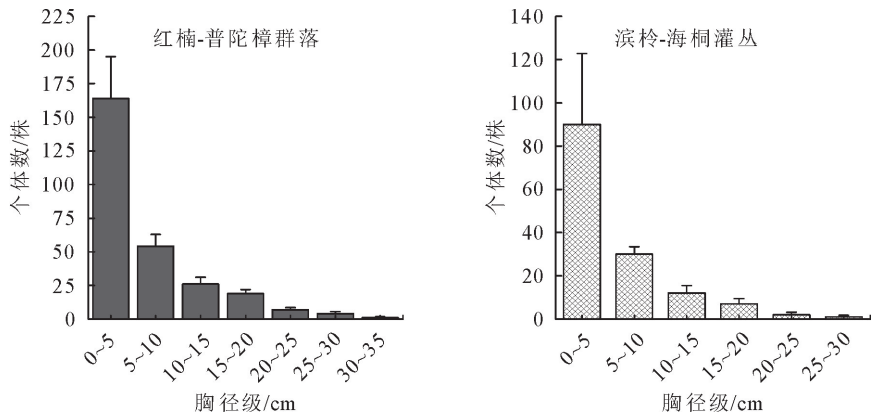


图 2 红楠-普陀樟群落和滨柃-海桐灌丛的胸径级结构

Fig. 2 DBH-class of *M. thunbergii*-*C. japonicum* communities and *E. emarginata*-*P. tobira* shrubs

2.3 特有植物群落的多样性特征

2.3.1 物种多样性 红楠-普陀樟群落的物种丰富度、Pielou 指数、Shannon-Wiener 指数分别为 19 ± 4 、 0.72 ± 0.02 、 0.90 ± 0.09 ;滨柃-海桐灌丛的物种丰富度、Pielou 指数、Shannon-Wiener 指数分别为 13 ± 3 、 0.76 ± 0.07 、 0.78 ± 0.08 。红楠-普陀樟群落的林分密度($0.69 \text{ 株}/\text{m}^2$)显著小于滨柃-海桐灌丛的($1.40 \text{ 株}/\text{m}^2$)($t = -4.20, P < 0.05$),但物种丰富度、Pielou 指数和 Shannon-Wiener 指数在两群落间无显著差异($P > 0.05$)(图 3)。

2.3.2 功能多样性 红楠-普陀樟群落的功能丰富度(0.60)显著大于滨柃-海桐灌丛(0.05)($P <$

0.001);红楠-普陀樟群落的 Rao 二次熵指数(2.47)显著大于滨柃-海桐灌丛(1.13)($t = 3.55, P = 0.03$);红楠-普陀樟群落和滨柃-海桐灌丛在功能均匀度和功能离散度上无显著差异($P > 0.05$),红楠-普陀樟群落的功能均匀度和离散度分别为 0.26 ± 0.10 和 0.86 ± 0.07 ;滨柃-海桐灌丛的功能均匀度和离散度分别为 0.28 ± 0.04 和 0.64 ± 0.11 (图 4)。

3 讨论

3.1 洛迦山岛植被特征

洛迦山岛植被是亚热带海岛型植被的典型代表,类型有常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、常绿

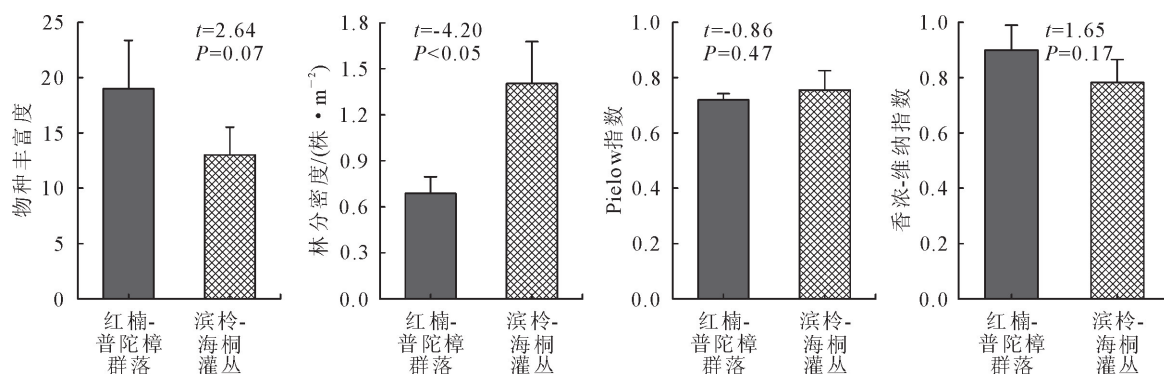


图3 红楠-普陀樟群落和滨柃-海桐灌丛的物种多样性

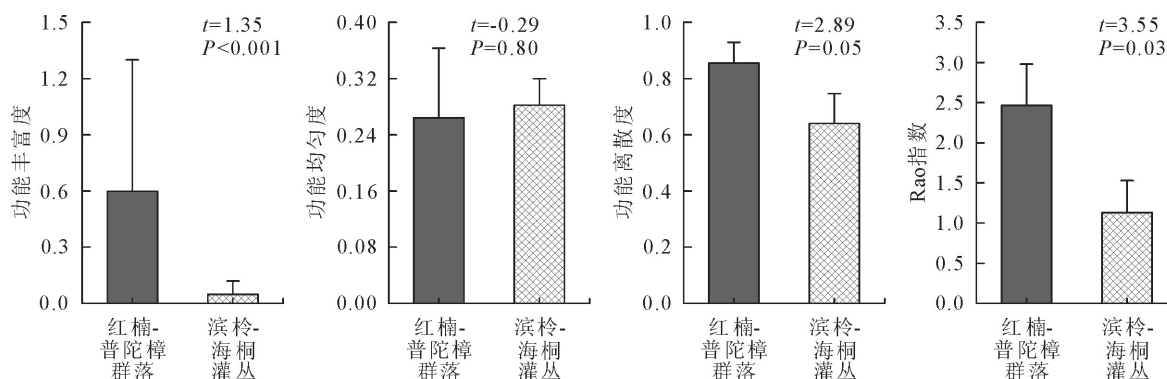
Fig. 3 Species diversity of *M. thunbergii*-*C. japonicum* communities and *E. emarginata*-*P. tobira* shrubs

图4 红楠-普陀樟群落和滨柃-海桐灌丛的功能多样性

Fig. 4 Functional diversity of *M. thunbergii*-*C. japonicum* communities and *E. emarginata*-*P. tobira* shrubs

灌丛。常绿阔叶林是洛迦山岛唯一存留近自然状态的地带性植被,林分结构完整,处于演替中后期。常绿阔叶树种在部分地段作为建群种(普陀樟和红楠),或在落叶林灌木层成为优势种(柃木),反映了洛迦山岛植被朝演替后期发展的良好潜能和态势^[16]。常绿阔叶林乔木层平均高度 8 m,郁闭度 85%,优势种有红楠、普陀樟、朴树(*Celtis sinensis*)、椿叶花椒(*Zanthoxylum ailanthoides*)等;灌木层高度约 2.5 m,郁闭度 30%,优势种有海桐、柃木(*Eurya japonica*)、榔榆(*Ulmus parvifolia*)等;草本层平均高度 0.15 m,郁闭度 50%,优势种为大吴风草(*Farfugium japonicum*)、鸡矢藤(*Paederia scandens*)和兰花三七;常绿落叶阔叶混交林是亚热带山地垂直带的常见植被,在洛迦山岛分布面积小。乔木层平均高度 7.2 m,郁闭度 85%,优势种有普陀樟、红楠、桑(*Morus alba*)等;灌木层平均高度 2.1 m,郁闭度 30%,优势种有柃木、海桐、天仙果(*Ficus erecta*)、榔榆等;草本层平均高度 0.2 m,郁闭度 60%,优势种为大吴风草(*Farfugium japonicum*);滨柃-海桐常绿灌丛物种组成简单,植株稠密,能适应严酷生境。平均高度 2.6 m,郁闭度 90%,优势种有滨柃、海桐、柃木、椿叶花椒、女贞(*Ligustrum lucidum*)等;草本层平均高度 0.1 m,郁闭度 30%,优

势种有大吴风草、菝葜(*Smilax china*)、雀梅藤(*Sageretia thea*)等;灌草丛也是洛迦山岛植被的重要组成部分,有白茅(*Imperata cylindrica*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、芒草(*Epimeredi indica*)和单叶蔓荆(*Vitex trifolia*)灌草丛。平均高度约 1.2 m,郁闭度 70%,优势种为白茅、芒草等(表 3)。

3.2 洛迦山岛特有植物群落的物种和功能多样性

红楠-普陀樟群落和滨柃-海桐灌丛是洛迦山岛特有植物群落,外貌整齐,结构完整,以小径级个体占优,群落结构属增长型异龄林。两群落的林分密度差异很大,因为滨柃-海桐灌丛分布在滨海崖壁,面临强风、海水、贫瘠等胁迫。植物为适应严酷生境表现出植株密集、紧凑、矮小和整齐的群落外貌。该群落虽然林分密度大能抵抗风力,但物种间竞争加剧,部分个体遭受淘汰。同时,林内光照不足,制约了林下幼苗更新,林分逐渐演替为不稳定的单层林,抵御自然灾害的能力下降^[9]。红楠-普陀樟群落分布在生境优越的东南坡,土层较厚,资源丰富,能适应更多的物种。同时,树木高大,林分密度较低,林下植物更新强,物种多样性高。洛迦山岛红楠-普陀樟群落和滨柃-海桐灌丛的功能离散度和 Rao 二次熵指数有显著差异,反映群落内植物功能性状的趋异性^[7]。红楠-普陀樟群落的功能多样性大于滨柃-

表 3 洛迦山岛不同植被类型的分层特征

Table 3 Hierarchical characteristics of different vegetation types on Luojiashan Island

植被类型	乔木层		灌木层		草本层	
	平均高度/m	郁闭度(%)	平均高度/m	郁闭度(%)	平均高度/m	郁闭度(%)
常绿阔叶林	8	85	2.5	30	0.15	50
常绿落叶阔叶混交林	7.2	85	2.1	30	0.2	60
常绿灌丛	—	—	2.6	90	0.1	30
灌草丛	—	—	1.2	70	0.7	90

海桐灌丛,表明红楠-普陀樟群落的资源配置被有效利用,即生态位分化^[18]。而在养分贫瘠和水分可用性低的生境中,滨桉-海桐灌丛中的植物功能发育有所限制。如物种丰富度与土壤容重和土壤总碳正相关,而功能均匀度则相反^[18]。

植物在长期的自然选择下,形成了适应当地生态地理环境而具有特定结构的群落类型^[19]。对于洛迦山岛,红楠-普陀樟群落和滨桉-海桐灌丛是适应强风、干旱等形成的特定群落。不同的是,相比滨桉-海桐灌丛,红楠-普陀樟群落人为干扰较大,需要加强管理。此外,每日游客数量不能超过生态承载阈值。还要强化生态管理,防止引入外来物种,破坏生态平衡^[20]。以上措施的实行能保证洛迦山岛发挥最大的生态价值。洛迦山岛作为舟山群岛极为典型的海岛,是舟山群岛植被恢复重要的样板林。此外,舟山群岛还有其他海岛特有植物群落,如普陀山岛的台湾蚊母树群落和红山茶群落,朱家尖岛的普陀樟群落和红楠群落等,林龄较大、结构稳定、生态价值高,需要维持植被生态系统的结构与功能的稳定性^[21-22]。洛迦山岛作为舟山群岛独具代表性的海岛,由于寺庙的长期庇护,拥有舟山群岛最为典型、丰富的地带性植被。海岛特有植物群落普陀樟-红楠群落和滨桉-海桐灌丛结构完整,属于生长稳定型,其物种多样性和功能多样性高。洛迦山岛拥有大量的乡土和稀有物种资源,是舟山群岛植被恢复的天然模板,要加强保护与管理,维持自然演替。

致谢:感谢华东师范大学赵延涛、周刘丽、刘翔宇、尹芳、程浚洋、朱丹妮、宋彦君等参与野外调查。

参考文献:

[1] KREFT H, JETZ W, MUTKE J, *et al.* Global diversity of island floras from a macroecological perspective[J]. *Ecology Letters*, 2008, 11(2): 116-127.

[2] WEIGELT P, JETZ W, KREFT H. Bioclimatic and physical characterization of the world's islands[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(38): 15307-15312.

[3] IRL S D, HARTER D E, STEINBAUER M J, *et al.* Climate vs. topography-spatial patterns of plant species diversity and endemism on a high-elevation island[J]. *Journal of Ecology*,

2015, 103(6): 1621-1633.

[4] 许洛山, 朱晓彤, 王万胜, 等. 上海大金山岛植被分类与制图——基于网格化清查方法[J]. *广西植物*, 2022, 42(8): 1273-1283.

XU M S, ZHU X T, WANG W S, *et al.* Vegetation classification and mapping of Dajinshan island: a grid inventory—based approach[J]. *Guihaia*, 2022, 42(8): 1273-1283. (in Chinese)

[5] 江小雷, 张卫国. 功能多样性及其研究方法[J]. *生态学报*, 2010, 30(10): 2766-2773.

JIANG X L, ZHANG W G. Functional diversity and its research method[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(10): 2766-2773. (in Chinese)

[6] KIER G, KREFT H, LEE T M, *et al.* A global assessment of endemism and species richness across island and mainland regions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(23): 9322-9327.

[7] WHITTAKER R J, RIGAL F, BORGES PAV, *et al.* Functional biogeography of oceanic islands and the scaling of functional diversity in the Azores[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(38): 13709-13714.

[8] 梁楠, 马慧晶, 冯帆, 等. 华北亚高山 3 个典型森林群落的树种组成与结构研究[J]. *山西农业大学学报: 自然科学版*, 2018, 38(12): 55-61.

LIANG N, MA H J, FENG F, *et al.* The tree species composition and structure of three typical forest communities in subalpine North China[J]. *Journal of Shanxi Agriculture University: Natural Science Edition*, 2018, 38(12): 55-61. (in Chinese)

[9] 王梅, 达光文, 王英成, 等. 祁连山青海云杉天然林分径级结构空间分布格局分析[J]. *林业资源管理*, 2013, 6: 17-132.

WANG M, DA G W, WANG Y C, *et al.* Analysis on spatial distribution pattern of diameter-class structure for natural *Pinus crassifolia* forest stand in Qilian Mountains[J]. *Forest Resources Management*, 2013, 6: 17-132. (in Chinese)

[10] 陈征海, 唐正良, 裘宝林. 浙江海岛植物区系的研究[J]. *云南植物研究*, 1995, 17(4): 405-412.

CHEN Z H, TANG Z L, QIU B L. A study on the flora of the islands of Zhejiang Province[J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 1995, 17(4): 405-412. (in Chinese)

[11] 郑俊鸣, 方笑, 朱雪平, 等. 外马廊山岛植被特性与植物多样性[J]. *广西植物*, 2017, 37(3): 271-279.

ZHENG J M, FANG X, ZHU X P, *et al.* Vegetation characteristics and plant diversity of Waimalangshan island, Zhoushan[J]. *Guihaia*, 2017, 37(3): 271-279. (in Chinese)

[12] 高浩杰, 王国明, 郁庆君. 舟山市种子植物物种多样性及其分布特征[J]. *植物科学学报*, 2015, 33(1): 61-71.

- GAO H J, WANG G M, YU Q J. Distribution characteristics and species diversity of seed plants in Zhoushan, Zhejiang[J]. Plant Science Journal, 2015, 33(1): 61-71. (in Chinese)
- [13] 中国海岛志编纂委员会. 中国海岛志浙江卷: 第二册(舟山群岛南部) [M]. 北京: 海洋出版社, 2014.
- [14] CORNELISSEN JHC, GARNIER E, DIAZ S, *et al.* A handbook of protocols for standardized and easy measurement of plant functional traits worldwide[J]. Australian Journal of Botany, 2003, 51: 335-380.
- [15] LAVOREL S, GRIGULIS K, MCINTYR E, *et al.* Assessing functional diversity in the field: methodology matters! [J]. Functional Ecology, 2008, 22: 134-147.
- [16] 庄杰. 舟山海岛典型植物群落结构及优化对策研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2012.
- [17] DIAZ S, CABIDO M. Vive la différence: plant functional diversity matters to ecosystem processes[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2001, 16(11): 0-655.
- [18] 郑丽婷, 苏田, 刘翔宇, 等. 庙岛群岛典型植物群落物种、功能、结构多样性及其对环境因子的响应[J]. 应用生态学报, 2018, 29(2): 343-351.
- ZHENG L T, SU T, LIU X Y, *et al.* Species, functional, structural diversity of typical plant communities and their responses to environmental factors in Miao Archipelago, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(2): 343-351. (in Chinese)
- [19] 杜茜, 沈海亮, 王季槐. 宁夏荒漠草原植物群落结构和物种多样性研究[J]. 生态学杂志, 2006, 25(2): 222-224.
- DU Q, SHEN H L, WANG J H. Studies on plant community composition and species diversity of desert meadow in Ningxia [J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(2): 222-224. (in Chinese)
- [20] 李明阳, 徐海根. 外来入侵物种对森林生态系统影响间接经济损失评估[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(2): 156-159.
- LI M Y, XU H G. Indirect economic loss evaluation of effect of alien invasive species on forest ecological system[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2005, 20(2): 156-159. (in Chinese)
- [21] 赵慈良, 赵延涛, 田文斌, 等. 浙江普陀山台湾蚊母树的种群结构与点格局[J]. 福建林业科技, 2016, 43(3): 39-45.
- ZHAO C L, ZHAO Y T, TIAN W B, *et al.* Population structure and point pattern of distylium gracile in Putuo Mountain, Zhejiang Province[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2016, 43(3): 39-45. (in Chinese)
- [22] 石娇星. 舟山群岛植被分类与制图[D]. 上海: 华东师范大学, 2021.

(上接第 66 页)

- [16] 李江飞, 王瑜, 颜廷雨, 等. 云南油杉叶绿体基因组密码子偏好性分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(4): 30-39.
- LI J F, WANG Y, YAN T Y, *et al.* Analysis on codon usage bias of *Keteleeria evelyniana* chloroplast genome[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, 42(4): 30-39. (in Chinese)
- [17] 刘潮, 韩利红, 吴丽芳, 等. 辣椒基因组密码子使用偏性分析[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(5): 16-22.
- LIU C, HAN L H, WU L F, *et al.* Genome-wide codon usage bias analysis of *Capsicum annuum* [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(5): 16-22. (in Chinese)
- [18] 关云会, 姚文燕, 杨青淑, 等. 西藏凹乳芹叶绿体基因组密码子偏好性分析[J]. 分子植物育种, 2021, 19(23): 7771-7781.
- GUAN Y H, YAO W Y, YANG Q S, *et al.* Analysis of codon bias in the chloroplast genome of *Vicatia thibetica* de Boiss [J]. Molecular Plant Breeding, 2021, 19(23): 7771-7781. (in Chinese)
- [19] 吴妙丽, 陈世品, 陈辉. 竹亚科叶绿体基因组的密码子使用偏性分析[J]. 森林与环境学报, 2019, 39(1): 9-14.
- WU M L, CHEN S P, CHEN H. Codon preference of chloroplast genome of Bambusoideae[J]. Journal of Forest and Environment, 2019, 39(1): 9-14. (in Chinese)
- [20] 梁湘兰, 郭松. 苦马豆叶绿体基因组密码子偏好性分析[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(2): 121-126.
- LIANG X L, GUO S. Codon usage bias in the chloroplast genome of *Sphaerophysa salsula* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(2): 121-126. (in Chinese)
- [21] 梁晓静, 朱昌叁, 李开祥, 等. 香樟转录组基因密码子偏好性分析[J]. 广西植物, 2021, 41(12): 2077-2083.
- LIANG X J, ZHU C S, LI K X, *et al.* Codon bias of transcribed genes in *Cinnamomum camphora* [J]. Guihaia, 2021, 41(12): 2077-2083. (in Chinese)
- [22] 王鹏良, 杨利平, 吴红英, 等. 普通油茶叶绿体基因组密码子偏好性分析[J]. 广西植物, 2018, 38(2): 135-144.
- WANG P L, YANG L P, WU H Y, *et al.* Condon preference of chloroplast genome in *Camellia oleifera* [J]. Guihaia, 2018, 38(2): 135-144. (in Chinese)
- [23] 屈亚亚, 辛静, 冯发玉, 等. 香花枇杷质体基因组序列密码子偏性分析[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(4): 138-144.
- QU Y Y, XIN J, FENG F Y, *et al.* Codon usage bias in chloroplast genome of *Eriobotrya fragrans* Champ. ex Benth. [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(4): 138-144. (in Chinese)
- [24] 马建文, 顾锡亭, 王珊, 等. 元宝枫 KCS 基因家族的鉴定及时空表达分析[J]. 经济林研究, 2022, 40(2): 201-214.
- MA J W, GU X T, WANG S, *et al.* Identification and spatio-temporal expression profiles of the KCS gene family in *Acer truncatum* [J]. Non-wood Forest Research, 2022, 40(2): 201-214. (in Chinese)