

何雅琴, 曾纪毅, 陈国杰, 肖集泓, 邓传远. 福建平潭大练岛典型森林群落特征及物种多样性[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28 (3): 759-769
He YQ, Zeng JY, Chen GJ, Xiao GH, Deng CY. Characteristics and species diversity of typical forest community in Dalian Island of Pingtan, Fujian, China [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2022, 28 (3): 759-769

福建平潭大练岛典型森林群落特征及物种多样性

何雅琴 曾纪毅 陈国杰 肖集泓 邓传远✉

福建农林大学园林学院 福州 350002

摘要 为揭示福建平潭大练岛典型森林群落特征及生态学意义, 向大练岛森林植被的更新演替、恢复及可持续性发展提供参考, 应用样方法对其植被类型、物种组成、区系特征、植物功能性状和物种多样性进行调查分析, 并用冗余分析法分析群落物种多样性与环境因子的相关性。结果表明: (1) 在18个样方中, 共记录到维管束植物65科151属178种, 种子植物科、属的 R/T 值(热带分布的科或属数与温带分布的科或属数的比值)分别为3.1、2.1, 均以热带成分为主, 热带性质突出; (2) 在生活型谱上, 以矮小型高位芽植物(35.53%)和一年生植物(25.75%)占比高, 在叶性状方面以小型叶(67.66%)、纸质叶(45.51%)、单叶(85.03%)、非全缘叶(52.69%)、叶有被毛(54.49%)、落叶(67.66%)占据优势; 果实以瘦果(19.76%)、微型果(83.23%)居多; 传播方式以动物传播(44.91%)和风传播(31.14%)为主; (3) 通过组平均聚类法将研究区植被划分为4类群系和10类群丛; (4) 不同植物群落的物种多样性的大小顺序为台湾相思和木麻黄混交林>台湾相思林>黑松和台湾相思混交林>木麻黄林。各植物群落的草本层和灌木层的Simpson优势度指数、Patrick丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数均大于乔木层。 (5) RDA排序表明, 土壤全磷含量、土壤全钾含量、碱解氮、土壤pH值($P < 0.05$)是影响研究区植被多样性指数的主要环境因子, 四者对植被多样性的总解释量为56.90%, 仍存在43.10%未知环境因子及人为干扰等因素影响着植被多样性。本研究表明大练岛植物为适应强风干旱、辐射强、土壤贫瘠的恶劣环境, 其功能性状表现出适应能力、繁殖能力与传播能力相应增强的特征; 不同植被类型和群落不同层片的多样性指数存在差异, 主要受土壤全磷、土壤全钾、碱解氮含量和土壤pH值的影响。(图2 表7 参52)

关键词 大练岛; 森林群落; 群落特征; 物种多样性; 冗余分析

Characteristics and species diversity of typical forest community in Dalian island of Pingtan, Fujian, China

HE Yaqin, ZENG Jiyi, CHEN Guojie, XIAO Jihong & DENG Chuanyuan✉

College of Landscape Agriculture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

Abstract To determine the characteristics and ecological significance of a typical forest community of Dalian Island in Pingtan and provide a reference for the regeneration and succession, restoration and sustainable development of forest vegetation, in this study, field sampling was conducted to investigate the vegetation types, species composition, floristic characteristics, plant functional traits, and species diversity of the typical forest community. Redundancy analysis was used to analyze the correlation between species diversity and environmental factors. The results were as follows: (1) A total of 178 species of vascular plants belonging to 151 genera and 65 families were found in 18 quadrats. The R/T values of family and genera were 3.1 and 2.1 in seed plants, respectively, which were mainly composed of tropical elements with outstanding tropical properties. (2) Nano-phanerophytes (35.53%) and therophytes (25.75%) were prevalent among the vegetation. In terms of leaf characteristics, microphyll (67.66%), papery leaf (45.51%), simple leaf (85.03%), non-entire leaf (52.69%), pilous leaf (54.49%), and fallen leaf (67.66%) occupied the dominant position. The achene and mini fruit accounted for 19.76% and 83.23% of total plants on the island, respectively. The main dispersal mode of island plants tended to be zoochory (44.91%) and anemochory (31.14%). (3) Group average clustering was used to divide the vegetation in the study area, and it consisted of four formation types and ten association types. (4) The diversity of different plant communities was in following order of Form. *Acacia confusa* + *Casuarina equisetifolia* > Form. *Acacia confusa* > Form. *Pinus thunbergii* + *Acacia confusa* > Form. *Casuarina equisetifolia*. The Simpson dominance index, Patrick richness index, and Shannon-Wiener diversity index in the herb layer and shrub layer of each plant community were all higher than that of the tree layer. (5) The redundancy analysis ordination showed that total

收稿日期 Received: 2020-12-01 接受日期 Accepted: 2021-03-16

福建农林大学科技创新专项基金项目(CXZX2019086)和2019年度福建省科技特派员工作经费(KTP19186A)资助 Supported by the Key Project of Fujian Agriculture and Forestry University Science and Technology Innovation (CXZX2019086) and the Fujian Province Science and Technology Commissioner Foundation in 2019 (KTP19186A)

✉通信作者 Corresponding author (E-mail: dengchuanyuan@fafu.edu.cn)

soil phosphorus, total soil potassium, alkaline hydrolyzable nitrogen, and soil pH value ($P < 0.05$) were the main environmental factors affecting the diversity of forest communities in the study area. These factors explained were 56.90% of the variation, while the remaining 43.10% was due to unknown environmental factors and human interference factors affecting the diversity of forest communities. To adapt to the harsh environment caused by strong winds, drought, strong radiation, and poor soil quality on Dalian island, the functional traits of island plants showed the characteristics of enhanced adaptability, reproductive ability, and dispersal ability. The diversity indices for different vegetation types and communities in different layers were different, which was mainly affected by total soil phosphorus, total soil potassium, alkaline hydrolyzable nitrogen contents, and soil pH value.

Keywords Dalian island; forest community; community characteristics; species diversity; redundancy analysis

植物群落结构是一定的植物在具体空间和时间范围内相互作用、彼此适应形成的稳定外貌特征^[1]。植物群落的物种多样性是体现各物种在群落中丰富度、均匀度、优势度的一个综合指标,不仅反映了群落的结构类型、功能、稳定程度、发展阶段等方面的异质性,同时还反映出不同自然环境与植物群落间的相互关系^[2]。植物群落特征和物种多样性一直是生态学研究领域的重要内容,因此植物群落结构和生态系统稳定性间的相互关系、物种多样性与生态环境相关性研究广泛受到学者的重视,已成为生态研究的热点问题。目前国内外学者研究多集中于对内陆植被的物种组成、群落稳定性、群落结构特征、物种多样性方面^[3-7],而对海岛植被的群落结构稳定性、物种多样性与环境相关性等方面缺乏深入研究。与内陆相比,海岛作为一个相对独立而脆弱的生态系统,由于生境异质性、显著的地理隔离、有限面积,使海岛植被在物种多样性、区系组成和植物功能性状等群落特征等方面具有特殊性^[8]。部分学者已针对海岛植被的野生植物资源评价、区系分析、结构特征、物种多样性开展了广泛研究^[9-12],但由于我国岛屿众多,关于海岛典型森林群落特征、物种多样性及其与环境因子的相关性研究还亟须加强。

平潭综合实验区主要由主岛海坛岛和126个周边岛屿组成,其主岛海坛岛是我国第五大海岛,福建第一大岛,近年来受到较多学者的关注,在资源种类、植物区系、植物功能性状等方面已有研究^[13-15],而大练岛作为平潭的第二大有居民海岛,正全面推进生态绿化建设。随着海岛开发力度的加强,对海岛植物群落研究愈显重要,深入研究海岛植被特征,完善各海岛植被的基础资料,将对海岛植被资源可持续利用和生态保护具有科学指导意义。现有研究中仅发现对其植物资源进行了调查^[16]。本研究通过对平潭大练岛典型森林群落的物种组成、区系地理特征、植物功能性状及物种多样性与环境因子相关性进行分析,揭示海岛典型森林群落特征及物种多样性对环境因子的响应,有助于理解海岛植物对环境的适应策略,对大练岛植物群落构建和植被生态修复工作具有重要现实意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大练岛位于福建省福州市平潭综合实验区,地理坐标为119°39'-119°44'E、25°38'-25°40'N,东西长6.26 km,南北宽1.57 km,总面积为9.96 km²,海岸线长20.35 km。研究区属典型的亚热带海洋季风气候,年平均温度19.1℃,年平均降水量1 100 mm,年平均风速近8 m/s,7-8月多台风天气,年平均

径流深441 m,属地下水贫乏区。土壤以红壤、风沙土、盐土为主。全岛森林覆盖率达66.97%^[17],地形以丘陵为主,低丘占全岛面积60%以上,最高海拔238.5 m(围营山)。岛上植被优势种明显,乔木层主要建群种为台湾相思(*Acacia confusa* Merr.)、木麻黄(*Casuarina equisetifolia* L.)、黑松(*Pinus thunbergii* Parlatores)等,灌木层有滨柃[*Eurya emarginata* (Thunb.) Makino]、野牡丹(*Melastoma malabathricum* Linnaeus)、球花脚骨脆(*Casearia glomerata* Roxb.)、雀梅藤[*Sageretia thea* (Osbeck) Johnston.]、梔子(*Gardenia jasminoides* Ellis)等作为优势种。草本层有狗牙根(*Cynodon dactylon* (L.) Pers.)、鬼针草(*Bidens pilosa* L.)、糙叶薹草(*Carex scabrifolia* Steud.)等作为优势种^[16]。

1.2 样地设置与调查

基于文献资料收集^[16]和实地踏查,于2020年4-5月和8-9月采用标准样方法对大练岛(围营山、牛智山、月举山、洋坪顶)森林群落进行设置调查。根据种-面积曲线的研究方法,亚热带常绿阔叶林取样面积 $\geq 1\ 200\text{ m}^2$ 即具有足够的代表性^[18],共设置18个面积为20 m $\times$ 20 m的森林样方(表1)。运用GPS定位仪来记录每个样方的经纬度及海拔信息,使用森林罗盘仪记录每个样方的坡度、坡向及坡位。对20 m $\times$ 20 m乔木层样方中每一植株(株高 $\geq 3\text{ m}$ 或胸径 $\geq 3\text{ cm}$)的种名、胸径、株高、冠幅、枝下高等信息进行登记,再从大样方的4个对角设置4个面积为5 m $\times$ 5 m灌木层样方,登记灌木层植物的种名、株高、冠幅、数量等信息,同时在大样方四角及中心位置选取5个面积为1 m $\times$ 1 m草本层样方,记录草本植物种名、数量、盖度、株高。样方内无法鉴定的植物采集标本,拍摄并做好标记带回实验室,邀请海岛专家及参考《福建植物志》^[19]、《中国植物志》^[20]资料鉴定。

1.3 数据处理与分析

参考相关文献资料,整理出大练岛森林群落的植物名录和样方数据,根据《福建植物志》^[19]、《中国植物志》^[20]资料区分原生种和外来种,采用吴征镒的“八纲系统”对研究区种子植物科、属进行界定,按照吴征镒等“世界种子植物科的分布区类型”和“中国种子植物属的分布区类型”的划分标准^[21-22]进行区系地理成分统计。 R/T 值^[23]为热带分布的科或属数与温带分布的科或属数的比值。采用组平均聚类法来划分植物群落类型。采用冗余分析法来分析环境因子与植物群落物种多样性的相关性。应用卡方检验比较大练岛森林植被区系地理成分和植物功能性状与不同海岛和内陆山体的差异。

选择群落组成种类的15项定性功能性状,划分为生长型、生活型、潜在最大高度、对光的耐受性、叶级、叶质、叶缘、叶型、叶被毛、叶生活周期、开花期、总开花持续时间、果

表1 样地概况
Table 1 General information of the sampling plots

样地编号 Plots No.	经度 Longitude ($\alpha/^{\circ}$)	纬度 Latitude ($\beta/^{\circ}$)	海拔 Elevation (h/m)	坡度 Slope ($\theta/^{\circ}$)	坡向 Slope aspect	坡位 Slope position	受风情况 Wind factor
D1	119°42'39.03"	25°38'58.10"	156.9	26.6	N	Us	Ws
D2	119°42'11.58"	25°38'40.04"	40.2	31.6	ES	Ds	Ls
D3	119°42'14.25"	25°38'31.01"	27.6	35.3	WS	Ds	Ws
D4	119°42'39.46"	25°38'57.27"	172.9	41.2	N	Us	Ws
D5	119°42'41.41"	25°38'55.95"	190.2	42.0	N	Us	Ws
D6	119°42'44.64"	25°39'32.58"	40.4	25.2	WS	Ds	Ws
D7	119°42'44.70"	25°39'34.16"	68.2	27.8	WS	Ms	Ws
D8	119°42'42.27"	25°39'38.68"	98.7	5.3	WS	Ms	Ws
D9	119°42'38.37"	25°39'34.40"	68.4	17.6	EN	Ms	Ls
D10	119°42'44.87"	25°39'42.13"	73.6	16.4	WS	Ms	Ws
D11	119°42'42.24"	25°39'39.85"	70.3	12.3	EN	Ms	Ls
D12	119°41'36.13"	25°38'57.51"	192.7	13.8	WN	Us	Ws
D13	119°41'33.82"	25°38'52.46"	178.6	14.8	WN	Us	Ws
D14	119°41'24.88"	25°38'52.46"	177.4	13.0	S	Us	Ls
D15	119°40'25.38"	25°39'31.31"	63.5	34.8	EN	Ms	Ws
D16	119°40'17.11"	25°39'8.97"	45.7	40.7	ES	Ds	Ws
D17	119°40'18.33"	25°39'5.73"	26.6	4.0	ES	Ds	Ws
D18	119°40'20.06"	25°39'8.36"	28.7	9.8	E	Ds	Ws

E: 东坡; S: 南坡; W: 西坡; N: 北坡; ES: 东南坡; EN: 东北坡; WS: 西南坡; WN: 西北坡; Us: 上坡; Ms: 中坡; Ds: 下坡; Va: 谷; Ws: 迎风坡; Ls: 背风坡。
E: East slope; S: South slope; W: West slope; N: North slope; ES: Southeast slope; EN: Northeast slope; WS: Southwest slope; WN: Northwest slope; Us: Upslope; Ms: Midslope; Ds: Downslope; Va: Valley; Ws: Windward slope; Ls: Leeward slope.

实类型、果实大小、传播方式。其中生长型分为乔木、灌木、草本、藤本^[24]。生活型划分为大型高位芽植物(30 m)、中型高位芽植物(8-30 m)、小型高位芽植物(2-8 m)、矮小型高位芽植物(0.25-2 m)、地上芽植物(30 m)、地面芽植物、隐芽植物、藤本附生植物、一年生植物^[25]。潜在最大高度可划分为< 5 m, 5-10 m, > 10 m。叶质分为纸质叶、革质叶、草质叶、膜质叶、肉质叶^[26-27]；叶型分为单叶和复叶；叶级分为鳞型叶(0-0.25 cm²)、微型叶(0.25-2.25 cm²)、小型叶(2.25-20.25 cm²)、中型叶(20.25-182.25 cm²)和大型叶(182.25-1 642.25 cm²)；叶缘分为全缘叶和非全缘叶；叶被毛分为有被毛和无被毛；叶生活周期分为常绿和落叶。果实类型分为蒴果、瘦果、颖果、核果等^[28]；果实大小按果径分为微型果(≤ 1 cm)、小型果(1-2.3 cm)、中型果(2.3-3.7 cm)、大型果(≥ 3.7 cm)、开花期划分为早(2-5月份开花)、中(6-7月份开花)、晚(8-10月份开花)；总开花持续时间短(1个月左右)、中(2-3个月)、长(4个月以上)。传播方式分为动物传播、风力传播、水力传播、人力传播、自体传播^[29]。

群落的物种重要值(IV)、Simpson优势度指数(D)、Shannon-Wiener多样性指数(H)、Pielou均匀度指数(J_{sw})及Patrick丰富度指数(R)的计算公式^[11, 30]如下：

乔木层、灌木层：
$$IV = (\text{相对密度} + \text{相对显著度} + \text{相对频度}) / 3$$

草本层：
$$IV = (\text{相对频度} + \text{相对显著度}) / 2$$

$$R = S$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

$$H = - \sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i)$$

$$J_{sw} = \frac{H}{\ln S}$$

其中，乔木层的相对显著度采用胸高(1.3 m处)断面积计算，灌木层和草本层的相对显著度则以植物的盖度进行计算，S表示所调查样方的物种数，N为所有物种的个数之和，N_i代表第i种的个体数，i = 1, 2, 3, ..., S, P_i = N_i/N, P_i表示第i个物种

的重要值。
群落多样性指数采用乔、灌、草各层多样性指数结合加权参数进行计算(公式如下)，其中，D为群落总体多样性指数，D₁、D₂、D₃表示乔、灌、草各层的多样性指数，W₁、W₂、W₃表示乔、灌、草各层的权重系数，分别赋值0.5、0.3、0.2^[11]。根据每一群落类型中所含的各样方的多样性指数取平均值，即得到各群落类型的多样性指数^[31]。

$$D = W_1 D_1 + W_2 D_2 + W_3 D_3$$

采用五点取样法对每个样方内的土壤进行采样，选择直径为5 cm的取土钻，钻取25 cm深的土壤样品，将其混合装入编号的自封袋中，带回实验室处理，研磨过筛后贮存以供土壤化学指标实验分析。根据《土壤农业化学分析方法》^[32]的方法，对土壤样品的有机质、pH值、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾、水溶性盐总量共9项指标均进行3次重复测定。

2 结果与分析

2.1 物种组成

统计18个样方调查数据，发现维管束植物共计178种，隶属于65科151属，属种系数为84.83%。其中以被子植物为主，共计56科142属166种，蕨类植物8科8属11种，裸子植物仅1科1属1种。研究区植物来源统计，乡土植物62科130属151种，外来植物16科26属27种。科组成上，以菊科(Compositae)和禾本科(Poaceae)为主，仅含1种的科有37个，占总科数的56.92%，如樟科(Lauraceae)、山矾科(Symplocaceae)、无患子科(Sapindaceae)等；属组成上，优势属不明显，以仅含1种的属(128个)优势显著，占总属数的84.77%，主要有藁草属(Carex)、山蚂蝗属(Desmodium)、莠花属(Wikstroemia)等；含2-5种的属共23个，占总属数15.23%，如大戟属(Euphorbia)、榕属(Ficus)、蒲桃属(Syzygium)等；可见，研究区的科属组成复杂多样。

2.2 种子植物的地理成分

根据维管束植物名录，剔除蕨类植物8科8属11种，对

57科143属167种进行种子植物区系地理成分分析。在科级水平上,将研究区种子植物57科地理成分划分为6个类型4个变型,由表2可知,热带成分分布科占绝对优势,共计31科(含48属55种),占总科数(除世界广布科外)的83.78%;其中以泛热带分布类型为主,共计21科(含34属39种),主要有大戟科(Euphorbiaceae)、锦葵科(Malvaceae)、芸香科(Rutaceae)等。其次是世界广布科20个(96属101种),占总科数的35.09%,包含菊科、禾本科、蔷薇科(Rosaceae)等。温带成分分布科仅6个(10属11种),占总科数(除世界广布科外)的16.22%,温带成分中,北温带分布3科,分别是百合科(Liliaceae)、松科(Pinaceae)、忍冬科(Caprifoliaceae),北温带和南温带间断分布2科,分别是胡颓子科(Elaeagnaceae)、杨柳科(Salicaceae),东亚分布仅1科为海桐花科(Pittosporaceae)。大练岛种子植物科的R/T值为3.1,可见科的地理特征以热带性质为主。

在属级水平上,将研究区种子植物143属地理成分划分为13个类型6个变型(表2)。其中世界广布属18个(25种),占总属数的12.59%,包括悬钩子属(*Rubus*)、莎草属(*Cyperus*)、堇菜属(*Viola*)等。热带成分分布类型共84属122种,占总属数(除世界广布属外)的67.20%,热带成分中以泛热带分布数量最多,共49属60种,有紫金牛属(*Ardisia*)、九节属(*Psychotria*)、南蛇藤属(*Celastrus*)等。温带成分有40属,占总属数(除世界广布属外)的32.00%,其中以北温带分布为主,共15属17种,有樱属(*Cerasus*)、龙芽草属(*Agrimonia*)、风轮菜属(*Clinopodium*)等。大练岛种子植物属的R/T值为2.1,可见属的地理成分以热带成分占主要优势,热带性质显著。

表2 大练岛种子植物的分布区类型
Table 2 Statistics of plant families in Dalian Island

分布区类型 Distribution type	科 Family		属 Genus	
	数量 Number	占比 Percentage (P/%)	数量 Number	占比 Percentage (P/%)
1 世界广布 Cosmopolitan	20	—	18	—
2 泛热带分布 Pantropic	21	56.76	49	39.20
2-1热带亚洲-大洋洲和热带美洲 Trop. As.-Australasia and Trop. Amer.	1	2.70	—	—
2-2热带亚洲-热带非洲-热带美洲 Trop. As.-Trop. Afr.-Trop. Amer.	—	—	2	1.60
2S以南半球为主的泛热带 Pantropic especially S. Hemisphere	4	10.81	—	—
3 热带亚洲、热带南美洲间断分布 Trop. As. & Trop. Amer. disjuncted	2	5.41	6	4.80
4 旧世界热带 OW Trop.	—	—	12	9.60
4-1热带亚洲、非洲和大洋洲间断或星散分布 Trop. As. & Trop. Afr. & Trop. Australasia disjuncted or dispersed	—	—	1	0.80
5 热带亚洲至热带大洋洲 Trop. As. to Trop. Australasia Oceania	2	5.41	8	6.40
6 热带亚洲至热带非洲 Trop. As. to Trop. Afr.	—	—	4	3.20
6d南非(主要是好望角) S. Afr. (chiefly Cape)	1	2.70	—	—
7 热带亚洲 Trop. As.	—	—	2	1.60
热带小计 Trop. Total	31	83.78	84	67.20
8 北温带 N. Temp.	3	8.11	15	12.00
8-4北温带和南温带间断分布 N. Temp. & S. Temp.	2	5.41	1	0.80
9 东亚及北美间断分布 E. As. & N. Amer. disjuncted	—	—	6	4.80
10 旧世界温带 Temp. Eurasia	—	—	5	4.00
10-1地中海区,至西亚(或中亚)和东亚间断分布 Medit. to W. As. (or C. As.) & E. As. disjuncted	—	—	3	2.40
10-3欧亚和南非间断分布 Eurasia & S. Afr. disjuncted	—	—	1	0.80
12 地中海区、西亚至中亚 Medit. & W. to C. As.	—	—	2	1.60
14 东亚 E. As.	1	2.70	6	4.80
14-2(14SJ)中国至日本 China-Japan	—	—	1	0.80
温带小计 Temp. Total	6	16.22	40	32.00
15 中国特有 Endemic to China	—	—	1	0.80
合计 Total	57	100.00	143	100.00

2.3 群落组成种类的植物功能性状

对大练岛18个样方内调查发现167种种子植物的15个性状进行统计分析,结果见表3。由表3可知,在生长型上,大练岛草本植物数量最多,占总种数的53.29%。从生活型看,以矮小高位芽植物和一年生植物为主,分别占比为36.53%、25.75%,这二者占比优势显著,缺乏大型高位芽植物。植物潜在最大高度< 5 m的植物占比较大(75.45%)。研究区以阳生植物为主(50.90%),依次是中性植物(31.14%)、阴生植物(17.96%)。在叶性上,以小型叶、纸质叶、单叶、非全缘叶、叶有被毛、落叶占据优势,分别占总种数的67.66%、45.51%、85.03%、52.69%、54.49%、67.66%。在开花期上,研究区集中在6-7月(中)开花植物占比最高(44.91%)。在总开花持续时间上,花期持续4个月以上(长)的植物占比最高,为41.32%。在果实类型方面,以蒴果、瘦果、浆果、颖果、核果这五者的比重最大,占比总和为70.66%。果实大小以微型果(139种)占绝对优势,占比高达83.23%。传播方式主要通过动物传播和风传播,占比总和高达76.05%。

2.4 植物群落类型,物种多样性与环境因子的相关性

2.4.1 植物群落类型划分 根据计算18个样方重要值,由表4可知,乔木层优势种有台湾相思、木麻黄、黑松,灌木层优势种有滨柃、雀梅藤、福建胡颓子(*Elaeagnus oldhamii* Maximowicz)、球花脚骨脆、车桑子[*Dodonaea viscosa* (L.) Jacq.]等,草本层优势种有鬼针草、糙叶薹草、狗牙根等。采用组平均聚类法对大练岛的植被类型进行聚类分析。根据聚类结果绘制聚类树(图1),由图1可知,当欧式距离为22时,将大练岛的植被类型分为两类,即先划分出木麻黄群系,即样方D16-D18,其次是台湾相思+木麻黄群系,即样方D2-D3、D13,当欧式距离为15时,进一步将黑松+台湾相思群系(即

表3 平潭大练岛植物功能性状统计
Table 3 Statistics of plant functional traits in Dalian island

功能性状 Functional trait		种数比例 Species percentage (P/%)	功能性状 Functional traits		种数比例 Species percentage (P/%)
类别 Style			类别 Style		
生长型 Growth form	乔木 Arbor	9 (5.39)	果实类型 Fruit type	蒴果 Capsule	26 (15.57)
	灌木 Shrub	60 (35.93)		瘦果 Achene	33 (19.76)
	草本 Herb	89 (53.29)		核果 Drupe	16 (9.58)
	藤本 Climber	9 (5.39)		浆果 Berry	29 (17.37)
生活型 Life form	大型高位芽植物 Mega-phanerophyte	—		颖果 Caryopsis	14 (8.38)
	中型高位芽植物 Meso-phanerophyte	9 (5.39)		坚果 Nut	9 (5.39)
	小型高位芽植物 Micro-phanerophyte	15 (8.98)		胞果 Utride	9 (5.39)
	矮小型高位芽植物 Nano-phanerophyte	61 (36.53)		荚果 Legume	7 (4.19)
	地上芽植物 Chamaephytes	10 (5.99)		分果 Schizocarp	7 (4.19)
	地面芽植物 Hemicryptophyte	13 (7.78)		蓇葖果 Follicle	4 (2.40)
	隐芽植物 Cryptophyte	7 (4.19)		聚合果 Aggregate	3 (1.80)
	藤本附生 Epiphytes and liana	9 (5.39)		聚花果 Multiple fruit	3 (1.80)
	一年生植物 Therophyte	43 (25.75)		囊果 Cystocarp	2 (1.20)
叶级 Leaf area	鳞型叶 Leptophyll	2 (1.20)		球果 Cone	2 (1.20)
	微型叶 Nanophyll	18 (10.78)		梨果 Pome	2 (1.20)
	小型叶 Microphyll	113 (67.66)		角果 Silique	1 (0.60)
	中型叶 Mesophyll	28 (16.77)	果实大小 Fruit size	微型果 Minimal fruit	139 (83.23)
	大型叶 Macrophyll	6 (3.59)		小型果 Small fruit	16 (9.58)
叶质 Leaf quality	纸质 Papery	76 (45.51)		中型果 Medium fruit	5 (2.99)
	草质 Herbaceous	31 (18.56)	传播方式 Dispersal mode	大型果 Large fruit	7 (4.19)
	革质 Leathery	46 (27.54)		动物传播 Zoochore	75 (44.91)
	肉质 Fleshy	7 (4.19)		风传播 Anemochory	52 (31.14)
	膜质 Membranous	7 (4.19)		水传播 Hydrochory	14 (8.38)
叶型 Leaf type	单叶 Simple leaf	142 (85.03)		自体传播 Autologous spread	9 (5.39)
	复叶 Compound leaf	25 (14.97)		人力传播 Anthropochory	17 (10.18)
叶缘 Leaf margin	全缘叶 Entire leaf	79 (47.31)	潜在最大高度 Potential maximum height (h/m)	< 5	126 (75.45)
	非全缘叶 Non-entire leaf	88 (52.69)		5-10	15 (8.98)
叶被毛 Leaf coat	叶有毛 Pilous leaf	91 (54.49)		> 10	26 (15.57)
	叶无毛 Non-pilous leaf	76 (45.51)	开花期 Flowering stage	早 Early	54 (32.34)
叶生活周期 Leaf life cycle	常绿叶 Evergreen leaf	54 (32.34)		中 Middle	75 (44.91)
	落叶 Fallen leaf	113 (67.66)		晚 Late	38 (22.75)
对光的耐受性 Tolerance to light	阳性植物 Heliophilous plants	85 (50.90)	开花持续时间 Flowering duration	短 Short	39 (23.35)
	中性植物 Neutral plants	52 (31.14)		中 Middle	59 (35.33)
	阴性植物 Shade tolerant plants	30 (17.96)		长 Long	69 (41.32)

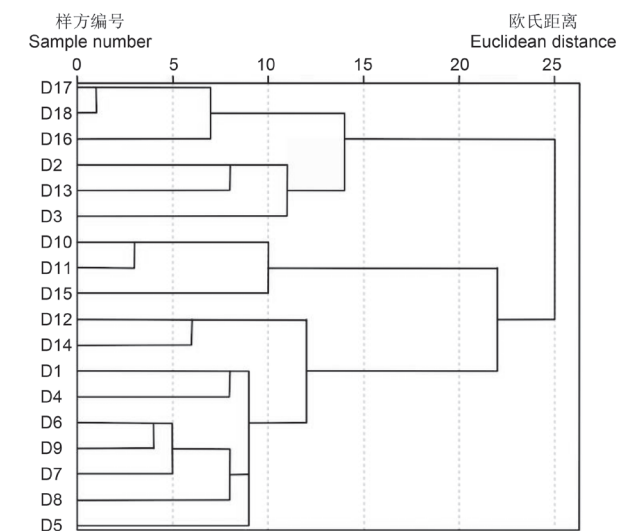


图1 大练岛植物群落组平均聚类图。
Fig. 1 The group average clustering diagram of plant communities in Dalian Island.

样方D10-D11、D15)和台湾相思群系(即样方D1、D4-D9、D12、D14)划分出来,基于聚类树结果和实地调查情况,取欧氏距离7.5,将研究区18个样地划分为10类群丛(表5)。关于

表3中研究样地植被型的划分见论文讨论部分“3.1 大练岛典型森林植被的系统分类”。

2.4.2 植物群落物种多样性与环境因子的相关性 根据调查数据统计18个样方群落整体的及各层片物种多样性指数(含Patrick丰富度指数、Simpson优势度指数、Shannon-Wiener多样性指数、Pielous均匀度指数)见表5。在群落各层片上,灌木层和草本层的Simpson优势度指数、Patrick丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数均高于同样方的乔木层。对研究区代表群系的样方进行多样性指数统计计算,代表群系的多样性指数见表6,由表6结果可知,台湾相思+木麻黄群系的Patrick丰富度指数(13.9)、Simpson优势度指数(0.75)、Shannon-Wiener多样性指数(1.95)、Pielou均匀度指数(0.79)均高于其他3类群落,木麻黄群落的多样性指数最低。

对18个样方的植物多样性指数(包括样方整体和各层片的Shannon-Wiener多样性指数、Patrick丰富度指数、Simpson优势度指数和Pielou均匀度指数)和环境因子(包含附表1的9个土壤因子和表1的4个地形因子)进行RDA分析。结果见图2。RDA分析筛选出4个显著影响物种多样性的环境因子($P < 0.05$),分别是土壤全磷(TP)、土壤全钾(TK)、土壤pH值和碱解氮(AN),土壤全磷与乔灌木层、整体群落的Shannon-Wiener多样性指数、Patrick丰富度指数、Simpson

表4 大练岛植被特征及物种多样性指数

Table 4 The species diversity index and characteristics of vegetation in Dalian Island

样方号 Sample number	层次 Layer		优势种 Dominant species	重要值 Important Value (IV/%)	物种数 Species number	群落多样性 Species diversity				群落各层次多样性 Diversity of different layers			
						H	J _{sw}	R	D	H	J _{sw}	R	D
D1	乔木层	Tree layer	台湾相思 <i>Acacia confusa</i>	60.15	42	1.55	0.75	9.3	0.70	0.93	0.67	4	0.56
	灌木层	Shrub layer	滨柃 <i>Eurya emarginata</i>	37.78	65					2.08	0.74	17	0.82
	草本层	Herb layer	韩信草 <i>Scutellaria indica</i>	14.57	10					2.31	0.97	11	0.89
D2	乔木层	Tree layer	木麻黄 <i>Casuarina equisetifolia</i>	50.42	26	1.91	0.71	14.3	0.72	1.18	0.56	8	0.53
	灌木层	Shrub layer	蓬蘽 <i>Rubus hirsutus</i>	12.27	58					2.39	0.81	19	0.88
	草本层	Herb layer	鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	12.00	21					2.99	0.95	23	0.94
D3	乔木层	Tree layer	台湾相思 <i>Acacia confusa</i>	43.54	6	2.19	0.89	14.6	0.85	1.60	0.89	6	0.77
	灌木层	Shrub layer	福建胡颓子 <i>Elaeagnus oldhamii</i>	15.17	5					2.49	0.86	18	0.90
	草本层	Herb layer	芒 <i>Miscanthus sinensis</i>	11.79	25					3.23	0.94	31	0.95
D4	乔木层	Tree layer	台湾相思 <i>Acacia confusa</i>	51.62	40	1.58	0.85	10.9	0.65	0.57	0.83	2	0.39
	灌木层	Shrub layer	滨柃 <i>Eurya emarginata</i>	24.81	36					2.46	0.81	21	0.89
	草本层	Herb layer	纤毛鸭嘴草 <i>Ischaemum ciliare</i>	14.73	15					2.78	0.96	18	0.93
D5	乔木层	Tree layer	台湾相思 <i>Acacia confusa</i>	49.57	28	1.73	0.91	10.1	0.76	1.05	0.95	3	0.63
	灌木层	Shrub layer	滨柃 <i>Eurya emarginata</i>	14.99	44					2.41	0.81	20	0.88
	草本层	Herb layer	糙叶蕹草 <i>Carex scabrifolia</i>	21.65	10					2.40	0.94	13	0.89
D6	乔木层	Tree layer	台湾相思 <i>Acacia confusa</i>	77.82	51	1.41	0.55	11.3	0.51	0.36	0.22	5	0.14
	灌木层	Shrub layer	梔子 <i>Gardenia jasminoides</i>	12.38	69					2.49	0.81	22	0.88
	草本层	Herb layer	糙叶蕹草 <i>Carex scabrifolia</i>	14.34	10					2.41	0.97	11	0.90
D7	乔木层	Tree layer	台湾相思 <i>Acacia confusa</i>	71.22	84	1.57	0.62	12.3	0.61	0.69	0.38	6	0.31
	灌木层	Shrub layer	梔子 <i>Gardenia jasminoides</i>	9.15	59					2.52	0.80	23	0.90
	草本层	Herb layer	糙叶蕹草 <i>Carex scabrifolia</i>	16.79	12					2.36	0.95	12	0.90
D8	乔木层	Tree layer	台湾相思 <i>Acacia confusa</i>	50.93	28	1.88	0.74	14.1	0.75	1.18	0.61	7	0.60
	灌木层	Shrub layer	滨柃 <i>Eurya emarginata</i>	25.55	50					2.70	0.82	28	0.90
	草本层	Herb layer	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	15.12	20					2.40	0.96	11	0.90
D9	乔木层	Tree layer	台湾相思 <i>Acacia confusa</i>	85.11	35	1.51	0.62	11.9	0.55	0.39	0.35	3	0.19
	灌木层	Shrub layer	福建胡颓子 <i>Elaeagnus oldhamii</i>	16.15	38					2.76	0.85	26	0.92
	草本层	Herb layer	鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	16.30	23					2.42	0.94	13	0.90
D10	乔木层	Tree layer	黑松 <i>Pinus thunbergii</i>	59.54	153	1.50	0.57	13.2	0.55	0.42	0.30	4	0.19
	灌木层	Shrub layer	滨柃 <i>Eurya emarginata</i>	24.89	138					2.47	0.78	24	0.89
	草本层	Herb layer	鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	16.13	30					2.75	0.92	20	0.92
D11	乔木层	Tree layer	黑松 <i>Pinus thunbergii</i>	58.82	136	1.65	0.61	14.4	0.58	0.48	0.34	4	0.24
	灌木层	Shrub layer	滨柃 <i>Eurya emarginata</i>	18.81	32					2.76	0.85	26	0.92
	草本层	Herb layer	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	16.24	40					2.92	0.93	23	0.93
D12	乔木层	Tree layer	台湾相思 <i>Acacia confusa</i>	75.45	15	1.64	0.92	11.9	0.69	0.69	0.99	2	0.49
	灌木层	Shrub layer	球花脚骨脆 <i>Casearia glomerata</i>	22.53	40					2.44	0.78	23	0.86
	草本层	Herb layer	鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	14.65	35					2.79	0.93	20	0.93
D13	乔木层	Tree layer	木麻黄 <i>Casuarina equisetifolia</i>	52.31	20	1.76	0.77	12.8	0.68	0.71	0.64	3	0.43
	灌木层	Shrub layer	艳山姜 <i>Alpinia zerumbet</i>	18.12	17					2.78	0.86	25	0.92
	草本层	Herb layer	鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	11.75	15					2.87	0.97	19	0.94
D14	乔木层	Tree layer	台湾相思 <i>Acacia confusa</i>	49.76	31	1.99	0.83	12.7	0.81	1.43	0.79	7	0.72
	灌木层	Shrub layer	艳山姜 <i>Alpinia zerumbet</i>	22.85	35					2.35	0.85	16	0.88
	草本层	Herb layer	鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	15.89	22					2.84	0.92	22	0.93
D15	乔木层	Tree layer	黑松 <i>Pinus thunbergii</i>	54.42	47	1.51	0.67	11.6	0.54	0.32	0.46	2	0.17
	灌木层	Shrub layer	车桑子 <i>Dodonaea viscosa</i>	16.15	76					2.50	0.83	20	0.89
	草本层	Herb layer	纤毛鸭嘴草 <i>Ischaemum ciliare</i>	9.90	15					2.99	0.95	23	0.94
D16	乔木层	Tree layer	木麻黄 <i>Casuarina equisetifolia</i>	78.62	60	1.29	0.54	9.4	0.46	0.14	0.21	2	0.06
	灌木层	Shrub layer	车桑子 <i>Dodonaea viscosa</i>	16.55	86					2.32	0.80	18	0.84
	草本层	Herb layer	芒 <i>Miscanthus sinensis</i>	13.03	9					2.60	0.96	15	0.91
D17	乔木层	Tree layer	木麻黄 <i>Casuarina equisetifolia</i>	78.03	58	1.26	0.50	9.1	0.47	0.17	0.15	3	0.07
	灌木层	Shrub layer	肖梵天花 <i>Urena lobata</i>	20.30	55					2.20	0.79	16	0.84
	草本层	Herb layer	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	12.32	19					2.55	0.94	14	0.91
D18	乔木层	Tree layer	木麻黄 <i>Casuarina equisetifolia</i>	100.00	28	1.13	0.42	8.4	0.43	0	-	1	0
	灌木层	Shrub layer	肖梵天花 <i>Urena lobata</i>	16.76	43					2.27	0.77	19	0.83
	草本层	Herb layer	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	17.00	16					2.23	0.93	11	0.88

H: Shannon-Wiener指数; J_{sw}: Pielous指数; R: Patrick指数; D: Simpson指数.H: Shannon-Wiener index; J_{sw}: Pielous index; R: Patrick index; D: Simpson index.

优势度指数、Pielou均匀度指数呈正相关,与草本层的Shannon-Wiener多样性指数、Patrick丰富度指数、Simpson优势度指数呈正相关,与草本层的Pielou均匀度指数呈负相关;土壤全钾与乔、灌、草本层和整体群落的Shannon-Wiener多样性指数、Patrick丰富度指数、Simpson优势度指数、Pielou均匀度指数呈负相关;土壤pH值与草本层的Pielou

均匀度指数,灌木层的Shannon-Wiener多样性指数、Patrick丰富度指数、Simpson优势度指数呈负相关,与乔木层、整体群落的Shannon-Wiener多样性指数、Patrick丰富度指数、Simpson优势度指数、Pielou均匀度指数呈正相关,与草本层Shannon-Wiener多样性指数、Patrick丰富度指数、Simpson优势度指数呈正相关,与灌木层Pielou均匀度指数呈正相关;

表5 大练岛植被类型
Table 5 Vegetation types in Dalian Island

植被型 Vegetation type	群系 Formation	群丛 Association
常绿针阔叶混交林 Evergreen coniferous and broad-leaved mixed forest	黑松+台湾相思群系 Form. <i>Pinus thunbergii</i> + <i>Acacia confusa</i>	黑松+台湾相思-滨柃+野牡丹-狗牙根群丛 Ass. <i>Pinus thunbergii</i> + <i>Acacia confusa</i> - <i>Eurya emarginata</i> + <i>Melastoma malabathricum</i> - <i>Cynodon dactylon</i>
		黑松+台湾相思-车桑子+了哥王-纤毛鸭嘴草群丛 Ass. <i>Pinus thunbergii</i> + <i>Acacia confusa</i> - <i>Dodonaea viscosa</i> + <i>Wikstroemia indica</i> - <i>Ischaemum ciliare</i>
		台湾相思-滨柃-韩信草群丛 Ass. <i>Acacia confusa</i> - <i>Eurya emarginata</i> - <i>Scutellaria indica</i>
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest	台湾相思群系 Form. <i>Acacia confusa</i>	台湾相思-球花脚骨脆+艳山姜-鬼针草群丛 Ass. <i>Acacia confusa</i> - <i>Casuarina equisetifolia</i> + <i>Alpinia zerumbet</i> - <i>Bidens pilosa</i>
		台湾相思-椴树-糙叶蕨群丛 Ass. <i>Acacia confusa</i> - <i>Gardenia jasminoides</i> - <i>Carex scabrifolia</i>
		台湾相思-滨柃+福建胡颓子-狗牙根群丛 Ass. <i>Acacia confusa</i> - <i>Eurya emarginata</i> + <i>Elaeagnus oldhamii</i> - <i>Cynodon dactylon</i>
常绿阔叶及退化叶混交林 Evergreen broad-leaved and degraded-leaves mixed forest	台湾相思+木麻黄群系 Form. <i>Acacia confusa</i> + <i>Casuarina equisetifolia</i>	台湾相思+木麻黄-球花脚骨脆-鬼针草群丛 Ass. <i>Acacia confusa</i> + <i>Casuarina equisetifolia</i> - <i>Casuarina glomerata</i> - <i>Bidens pilosa</i>
		台湾相思+木麻黄-福建胡颓子-芒群丛 Ass. <i>Acacia confusa</i> + <i>Casuarina equisetifolia</i> - <i>Elaeagnus oldhamii</i> - <i>Miscanthus sinensis</i>
		木麻黄-车桑子+雀梅藤-芒群丛 Ass. <i>Casuarina equisetifolia</i> - <i>Wikstroemia indica</i> + <i>Sageretia thea</i> - <i>Miscanthus sinensis</i>
退化叶林 Degenerated-leaves forest	木麻黄群系 Form. <i>Casuarina equisetifolia</i>	木麻黄-肖梵天花-鬼针草+狗牙根群丛 Ass. <i>Casuarina equisetifolia</i> - <i>Urena lobata</i> - <i>Bidens pilosa</i> + <i>Cynodon dactylon</i>

表6 大练岛不同植物群落的物种多样性指数
Table 6 Diversity index and different plant communities in Dalian Island

植物群落类型 Types of plant community	乔木层 Tree layer				灌木层 Shrub layer				草本层 Herb layer				群落多样性 Species diversity			
	H	J _{sw}	R	D	H	J _{sw}	R	D	H	J _{sw}	R	D	H	J _{sw}	R	D
黑松+台湾相思群系 Form. <i>Pinus thunbergii</i> + <i>Acacia confusa</i>	0.41	0.37	3.33	0.20	2.58	0.82	23.33	0.91	2.89	0.97	22.00	0.94	1.55	0.62	13.07	0.56
台湾相思群系 Form. <i>Acacia confusa</i>	0.81	0.64	4.33	0.45	2.47	0.81	21.78	0.88	2.52	0.95	14.56	0.91	1.65	0.75	11.61	0.67
台湾相思+木麻黄群系 Form. <i>Acacia confusa</i> + <i>Casuarina equisetifolia</i>	1.16	0.70	5.67	0.58	2.55	0.84	20.67	0.90	3.03	0.95	24.33	0.94	1.95	0.79	13.9	0.75
木麻黄群系 Form. <i>Casuarina equisetifolia</i>	0.10	0.12	2	0.38	2.26	0.79	17	0.84	2.46	0.94	13.33	0.90	1.23	0.49	8.97	0.45

H: Shannon-Wiener指数; J_{sw}: Pielous指数; R: Patrick指数; D: Simpson指数.
H: Shannon-Wiener index; J_{sw}: Pielous index; R: Patrick index; D: Simpson index.

碱解氮与草本层的Shannon-Wiener多样性指数、Patrick丰富度指数、Simpson优势度指数呈负相关,与乔灌木层、整体群落的Shannon-Wiener多样性指数、Patrick丰富度指数、Simpson优势度指数、Pielou均匀度指数呈正相关,与草本层的Pielou均匀度指数呈正相关。

RDA排序表明,土壤全磷、土壤全钾、土壤pH值、碱解氮是影响大练岛典型森林群落物种多样性的主要环境因子,共同对物种多样性的总解释量为56.90%,表示还有43.10%的未知因素影响了植物群落的物种多样性。

3 讨论

3.1 大练岛典型森林植被的系统分类

海岛生境条件较为严苛,与邻近内陆地区的植被相比,次生性质异常明显,本研究样地的森林植被为20世纪飞机播种造林后形成的,是由人工抚育转变为自然抚育,现处于近自然状态的植被类型,根据学者阎恩荣的观点^[33],可划分为具次生性质的自然植被,或称之为半自然植被。在此基础上,参照《中国植被》^[34]关于自然植被的分类,本论文选用植被型、群系和群丛3个等级的植被分类单位对研究地的植被进行分类。由于《中国植被》在高等级分类单位中,除了以生活型为标准外,

叶型(形态外貌)也是一个重要的分类标准,本论文中乔木木麻黄为建群种的群落在高等级植被分类划分时既不能归入针叶林,也无法归入阔叶林,尽管有些植被分类中把木麻黄林归入阔叶林^[23],但是,木麻黄小枝木贼状,叶片退化为鳞片的形态特征,明显与阔叶林的叶形形态特征相悖,有鉴于此,本论文参考学者王炜等^[35]和张坚强^[12]的观点,把乔木木麻黄为建群种的群落的高级(植被型)植被单位划分为退化叶林。同理,以乔木台湾相思为建群种的群落中,台湾相思叶型为大型复叶,但复叶仅在幼苗时存在,成苗时复叶退化,仅叶柄膨大成叶状,被称之为叶状柄,因此,乔木台湾相思为建群种的群落的高级植被分类单位可被划分为半退化叶林,但目前学界都把台湾相思林归为常绿阔叶林^[16, 36],本研究根据主流观点,依旧把台湾相思群落的高级植物分类单位归为常绿阔叶林。木麻黄、台湾相思、黑松等为建群种的群落是平潭海岛的主要植被类型^[37],木麻黄群落和台湾相思群落的高级植被分类单位分别划分为退化叶林和半退化叶林,有利于突显海岛植被区别于邻近内陆植被的显著特征,也不违背《中国植被》中高级植被分类单位的分类准则,但综合主流观点和叶型特征,本论文倾向于把木麻黄为建群种的群落的高级植被单位界定为退化叶林,而把台湾相思为建群种的群落的高级植被单位界定为常绿阔叶林。综上所述,研究样地的植被型划分为4类(表5)。根据群

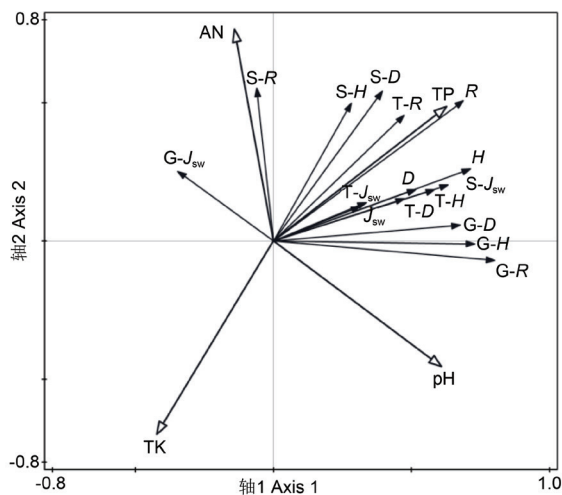


图2 样方与环境因子的冗余分析。H: Shannon-Wiener指数; J_{sw} : Pielous指数; R: Patrick指数; D: Simpson指数。T-H: 乔木层Shannon-Wiener指数; $T-J_{sw}$: 乔木层Pielous指数; T-R: 乔木层Patrick指数; T-D: 乔木层Simpson指数; S-H: 灌木层Shannon-Wiener指数; $S-J_{sw}$: 灌木层Pielous指数; S-R: 灌木层Patrick指数; S-D: 灌木层Simpson指数; G-H: 草本层Shannon-Wiener指数; $G-J_{sw}$: 草本层Pielous指数; G-R: 草本层Patrick指数; G-D: 草本层Simpson指数。TP: 土壤全磷; TK: 土壤全钾; AN: 碱解氮。

Fig. 2 Redundancy analysis of sample and environmental factors. H: Shannon-Wiener index; J_{sw} : Pielous index; R: Patrick index; D: Simpson index. T-H: Tree layer Shannon-Wiener index; $T-J_{sw}$: Tree layer Pielous index; T-R: Tree layer Patrick index; T-D: Tree layer Simpson index; S-H: Shrub layer Shannon-Wiener index; $S-J_{sw}$: Shrub layer Pielous index; S-R: Shrub layer Patrick index; S-D: Shrub layer Simpson index; G-H: Grass layer Shannon-Wiener index; $G-J_{sw}$: Grass layer Pielous index; G-R: Grass layer Patrick index; G-D: Grass layer Simpson index. TP: Soil total phosphorus; TK: Soil total potassium; AN: Alkaline hydrolyzable nitrogen.

落重要值的组平均聚类,并结合《中国植被》群系划分依建群种是否相同和群从划分依各层片的建群种是否相同,研究样地可明显划分出4个群系和10个群丛(表5)。

大练岛森林群落受到人为干扰和群落环境恶化影响,导致植被破坏,乔木层多为人工补植的栽培种类,灌木层和草本层多为野生植物,呈现半自然特性。在前人研究中,一年生植物占比优势显著是植被次生性质的表现^[12, 38]。这是由于原生植被遭到破坏后,高位芽植物生态位丧失,而一年生植物凭借极强的生命力和繁殖能力在适应海岛强风、高温干旱的环境中占据优势,迅速生长发育抢占新生态位所导致。在北亚热带次生森林植被中,灌木和草本植物占比高^[38]。研究区植被以一年生植物、灌木和草本植物占比优势明显,是植被次生性质的表现。与同为亚热带海洋季风气候的浙江普陀山相比,地带性植被保存较好,其主要森林群落为以青冈[Cyclobalanopsis glauca (Thunberg) Oersted]、蚊母树(Distylium racemosum Sieb. et Zucc.)、香樟[Cinnamomum camphora (L.) Presl]等为主的常绿阔叶林群落,在亚热带常绿阔叶林中都以壳斗科(Fagaceae)、樟科等占优势^[39],而研究区仅发现以台湾相思为主的常绿阔叶林,则出现以豆科(Fagaceae)为主的现象,在大练岛森林群落中优势树种为台湾相思、木麻黄、黑松,未发现亚热带常绿阔叶林中的典型优势树种青冈、苦槠[Castanopsis sclerophylla (Lindl. et Paxton) Schottky]、木荷(Schima superba Gardn. et Champ.)等分布。

3.2 大练岛典型群落植物区系地理成分和功能性状特点及其生态适应意义

研究地的植物组成中,含1种的科有37个,占总科数的

56.92%,仅含1种的属128个,占总属数的84.77%,可见大练岛研究区域植物间并非以亲缘关系而群居,而是在相同生境下趋同适应生存。这与中国大多数海岛植物的物种组成类似^[18, 23, 40-42]。但菊科含24种,禾本科含16种,可能与菊科和禾本科植物功能性状适应海岛生境有关,如菊科的瘦果适合风力传播扩散,禾本科叶功能性状耐热抗旱,研究区域菊科和禾本科植物多也与中国其他海岛的植物组成类似。但研究区域与临近内陆地区典型植被亚热带常绿阔叶林以壳斗科、樟科、木兰科(Magnoliaceae)等为优势科明显不同^[43-44]。经卡方检验,平潭大练岛植物各类热带成分科(83.78%)与平潭6个无居民海岛(86.11%)^[23]、平潭大屿岛(81.82%)^[45]、平潭海坛岛公园(81.08%)^[10]和平潭海坛岛全范围(76.36%)^[14]无显著差异($P > 0.05$),同理,大练岛植物各类热带成分属(67.20%)与平潭6个无居民海岛(72.30%)^[23]、平潭大屿岛(69.6%)^[45]、平潭海坛岛全范围(62.82%)^[14]无显著差异($P > 0.05$),这表明平潭大练岛与其他平潭海岛较一致,科、属的热带性质显著,符合平潭地处亚热带的分布特点,也符合植物区系地理成分是与区域气候相适应的规律。但进一步的比较发现,平潭6个无居民海岛^[23]、平潭大练岛研究区域与平潭海坛岛全范围^[14]的科属地理成分占比是逐次降低的,平潭6个无居民海岛^[23]科热带成分占比(86.11%)高于平潭海坛岛全范围(76.36%)^[14],经卡方检验, P 值接近0.05($P = 0.071$),这一变化趋势可能与海岛的海拔高度有关,平潭6个无居民海岛(海拔高度15.8-51.8 m)、平潭大练岛研究区域(围营山最高海拔238.5 m)与平潭海坛岛全范围(君山最高海拔434.6 m)海拔高度是逐渐增高的,推测随海岛随海拔升高,物种丰富度逐渐增多,而增多的物种数大部分由温带成分科属构成,因此,热带科属占比逐渐降低。与邻近内陆地区比较,经卡方检验,大练岛研究区域植物各类热带成分科(83.78%)均显著高于汀江源自然保护区科(71%)^[46]、梁野山自然保护区科(69.67%)^[47]、武夷山自然保护区科(66.07%)^[48]($P < 0.05$),与梅花山自然保护区科(74.24%)^[49]无显著差异,大练岛研究区域植物各类热带成分属(67.20%)显著高于武夷山自然保护区科属(50.29%)^[48]($P = 0.015$),而与汀江源自然保护区(57.59%)^[46]、梁野山自然保护区属(60.82%)^[47]、梅花山自然保护区属(63.09%)^[49]无显著差异。推测这一结果除了与海岛强风、高温干旱、光照强等自然条件相关,也与海拔高度有关,内陆山地海拔高度远大于海岛山地高度,武夷山最高峰海拔2 158 m。关于海岛植物区系地理成分与海岛山体海拔高度的关系,还需进一步研究。

海岛植物易受环境异质性影响,具突出的功能性状^[8]。本研究大练岛森林植被植物组成31项功能性状与平潭6个无居民海岛^[23]比较发现,大练岛森林植被高位芽植物极显著高于平潭6个无居民海岛(卡方检验, $P = 0.001$),地面芽植物极显著低于平潭6个无居民海岛的(卡方检验, $P = 0.000$),草质叶显著低于平潭6个无居民海岛的(卡方检验, $P = 0.05$),革质叶显著高于平潭6个无居民海岛的(卡方检验, $P = 0.015$)。推测这些功能性状的变动与风有关,风可能是主导因子之一,平潭是世界三大风口之一,平潭6个无居民海岛由于海拔低(海拔高度15.8-51.8 m),面积小,岛上植被遭受强风胁迫严重,而大练岛为有居民海岛,研究区域周边有防护林,有居民海岛面积大,由不同山体构成,山体海拔高度比无居民海岛高,具不同地形,受防护林保护的不同地形森林植被遭受风胁迫程度明显小于无居民海岛,这导致两地植被物种组成功

能性状的差异,以适应两种不同生境.海岛与大陆森林野生植被植物功能性状的分布差异已有研究^[8,50],本研究大练岛森林植被与内陆梅花山自然保护区常绿阔叶林的叶级特征比较,倾向于支持已有的观点,海岛与大陆森林野生植被的植物功能性状的分布有差异,二者适应-繁殖-传播的进化机制不同.

3.3 大练岛典型群落物种多样性特征及环境因子解释

RDA分析表明,土壤全磷含量和土壤碱解氮含量极显著影响研究区植被多样性指数,土壤pH和土壤全钾含量显著影响研究区植被多样性指数.已有的研究表明,海岛土壤严重缺乏氮磷^[16-17],如沿海地区高温多雨,易使土壤磷元素大量流失,并且土壤风化严重,磷元素被铁铝氧化物吸附固定,使植物生长必需的磷元素缺失,导致磷元素成为海岛森林植物群落的限制性营养元素,同时,已有研究表明,海岛植物群落适合生长在土壤偏酸性的土壤中^[51-52],因此,一定程度上土壤N、P含量和土壤pH值的提高,有助于提高植物群落多样性,本研究中18个样方乔木层和整体植物多样性指数与土壤全磷含量、土壤碱解氮含量和土壤pH值呈正相关,倾向于支持已有观点,一定程度上土壤N、P含量和土壤pH值的升高有助于植物生长发育和定居,进而提高群落植物多样性.但是,土壤N、P含量和土壤pH值对植物群落各层片的影响并非都是正相关的,如本研究中土壤pH值与草本层的Pielou均匀度指数,灌木层的Shannon-Wiener多样性指数、Patrick丰富度指数、Simpson优势度指数呈负相关,这一相关趋势可能表明群落在发育为稳定群落过程中,不同层片在对空间等资源的竞争中,可能会出现不同层片植物相互抑制.本研究中的RDA分析表明,全钾与乔、灌、草本层和整体群落的植物多样性指数呈负相关,由于土壤全钾并非全为植物可吸收利用的钾,关于这一相关分析趋势的群落生态学意义还需进一步研究.

4 结论

本研究应用样方调查法,对福建省平潭大练岛典型森林群落的植被类型、物种组成、植物功能性状和物种多样性进

行研究,并用冗余分析法分析了群落物种多样性与土壤地形因子的相关性.根据调查样方计算重要值,并依据组平均聚类法把大练岛典型森林群落划分为4个植被型、4个群系和10个群丛.海岛地理位置独特,受土壤贫瘠、强风等生境因子的影响,具较独特且有别于陆地的森林群落,本研究在大练岛典型森林群落的高级植被分类单位植被型中划分出了退化叶林,因此,关于海岛植被的分类,特别是高等级分类单位的确定,还有进一步研究空间,今后应展开更多样地的调查,综合分析结果,确定植被分类准则,形成更完善植被分类系统.乔木层、灌木层和草本层的优势种可进行引种驯化并开发应用,对海岛生态修复和优化具有潜在应用意义.

大练岛典型森林群落科属的热带成分显著,与平潭综合实验区其他岛屿较为一致,而高于邻近的内陆山地,对大练岛典型森林群落科属的区系地理成分与邻近岛屿和内陆山地的比较发现,海拔可能是影响区系地理成分的一个重要因素,但这一观点未获得统计分析结果的支持,因此阐明海岛植物区系地理成分与地形因子的相关性等科学问题值得进一步研究.植物功能性状易受海岛异质生境的影响,本研究对比大练岛(有居民海岛)和邻近无居民海岛的典型植被的植物功能性状推测,风可能是有居民海岛和无居民海岛植物功能性状不同的一个主要影响因子,今后将更深入探讨海岛植物功能性状及其与环境因子的相关性研究,客观揭示海岛植物对生存环境的响应及适应策略.

大练岛典型森林植被多样性水平不高,主要受土壤全磷含量、土壤全钾含量、碱解氮、土壤pH值的影响.RDA排序结果的环境解释量为56.90%,仍存在43.10%的未知环境因子如气象、气候及人为干扰因素对植被多样性造成影响,具体原因有待深入研究.在今后海岛植被研究中,可增加样地数量分季节进行长期调查统计,并将纳入人为干扰因子及相关环境指标进行长期检测,揭示海岛植被多样性与环境间的变化规律.同时,本论文发现大练岛不同层片对土壤化学因子的响应不同,值得进一步从种群竞争和种群发育等方面进行深入研究.

参考文献 [References]

- 刘召强, 刘艺平, 冯理明, 贺丹, 孔德政. 额尔齐斯河流域垂枝桦林群落结构特征与物种多样性相关分析[J]. 西北植物学报, 2020, 40 (3): 532-542 [Liu ZQ, Liu YP, Feng LM, He D, Kong DZ. Differences in community characteristics, species diversity, and their coupling associations among *Betula pendula* forest in Irtysh river watershed [J]. *Acta Bot Bor-Occid Sin*, 2020, 40 (3): 532-542]
- 赵娜, 鲁绍伟, 李少宁, 吴记贵, 范雅倩. 北京松山自然保护区典型植物群落物种多样性研究[J]. 西北植物学报, 2018, 38 (11): 2120-2128 [Zhao N, Lu SW, Li SN, Wu JG, Fan YQ. Study on plant diversity of typical plant communities in Songshan nature reserve, Beijing [J]. *Acta Bot Bor-Occid Sin*, 2018, 38 (11): 2120-2128]
- Dar PA, Reshi ZA. Impact of alien species on species composition, floristic and functional diversity of aquatic and terrestrial ecosystems [J]. *Trop Ecol*, 2020, 61 (4): 446-459
- 张滋芳, 毕润成, 张钦弟, 许强. 珍稀濒危植物矮牡丹生存群落优势种间联结性及群落稳定性[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25 (2): 291-299 [Zhang ZF, Bi RC, Zhang QD, Xu Q. Community stability and inter-specific associations between the rare plant *Paeonia suffruticosa* Andr. var. *spontanea* Rehd and dominant species [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2019, 25 (2): 291-299]
- 姚俊宇, 伍炫蓓, 孙千惠, 吴霞, 姚小兰, 郝建锋, 齐锦秋. 林窗大小对川西马尾松人工林林下物种多样性和生物量的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24 (2): 214-220 [Yao JY, Wu XB, Sun QH, Wu X, Yao XL, Hao JF, Qi JQ. Effects of canopy gap size on understory species diversity and biomass in a *Pinus massoniana* plantation in Western Sichuan [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2018, 24 (2): 214-220]
- Hattermann D, Markus BR, Otte A, Eckstein RL. New insights into island vegetation composition and species diversity-Consistent and conditional responses across contrasting insular habitats at the plot-scale [J]. *PLoS ONE*, 2018, 13 (7): 1-22
- Tilak PG, Tej NM. Effect of disturbance on plant species diversity in moist tropical forest of eastern Nepal [J]. *Our Nat*, 2018, 16 (1): 1-7
- 黄柳菁, 张增可, 郑俊鸣, 黄少君, 林丽丽, 王齐, 邓传远, 刘兴诏. 大陆性海岛野生植物功能性状特征及其演变趋势——以平潭岛为例[J]. 热带亚热带植物学报, 2017, 25 (5): 429-437 [Huang LJ, Zhang ZK, Zheng JM, Huang SJ, Lin LL, Wang Q, Deng CY, Liu XZ.

- Functional traits and evolution trend of wild plants in continental Island: a case study of Pingtan Island [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2017, **25** (5): 429-437]
- 9 何雅琴, 刘健行, 魏凯, 史晓洁, 陈国杰, 曹晟烜, 邓传远. 基于灰色关联度的平潭野生草本花卉开发应用评价[J]. 草业科学, 2020, **37** (8): 1497-1507 [He YQ, Liu JX, Wei K, Shi XJ, Chen GJ, Cao SX, Deng CY. Evaluation on the development and application of Pingtan wild herbaceous flowers based on Grey Relational Degree [J]. *Pratac Sci*, 2020, **37** (8): 1497-1507]
 - 10 郑俊鸣, 张嘉灵, 赵东铭, 白珮珮, 吴端聪, 邓传远, 郑郁善. 福建海坛岛公园种子植物的区系特征[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2018, **47** (5): 587-592 [Zheng JM, Zhang JL, Chao DM, Bai PP, Wu DC, Deng CY, Zheng YS. Seed plant flora of parks in Haitan Island, Fujian province [J]. *J Fujian Agric For Univ (Nat Sci)*, 2018, **47** (5): 587-592]
 - 11 齐婷婷. 庙岛群岛森林植物群落结构及其土壤固碳的研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2015 [Qi TT. Study on the forest plant community structure and soil carbon sequestration in the forest of Miaodao Arcipelago [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2015]
 - 12 张坚强. 海坛岛次生植被物种多样性与群落特征[D]. 福州: 福建农林大学, 2019 [Zhang JQ. Species diversity and community characteristics of secondary vegetation in Haitan Island [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019]
 - 13 朱雪平, 郑俊鸣, 方笑, 朱丹丹, 邓传远. 平潭海坛岛公园观花植物资源调查及其园林应用分析[J]. 防护林科技, 2016, **34** (12): 28-31+56 [Zhu XP, Zheng JM, Fang X, Zhu DD, Deng CY. Flowering plants resources and their application in garden in Haitan Island Park of Pingtan city [J]. *Protect For Sci Technol*, 2016, **34** (12): 28-31+56]
 - 14 叶志勇. 福建平潭岛种子植物区系地理及外来植物对其影响[J]. 广西植物, 2017, **37** (3): 280-293 [Ye ZY. Flora of seed plants in Pingtan Island, Fujian and effects of exotic plants [J]. *Guihaia*, 2017, **37** (3): 280-293]
 - 15 张增可, 郑心炫, 林华贞, 林欣, 黄柳菁. 海岛植物不同演替阶段植物功能性状与环境因子的变化规律[J]. 生态学报, 2019, **39** (10): 3749-3758 [Zhang ZK, Zheng XU, Lin HZ, Lin X, Huang LJ. Summary of changes in plant functional traits and environmental factors in different succession stages of island plants [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, **39** (10): 3749-3758]
 - 16 福建南部沿岸/《中国海岛志》编辑委员会. 中国海岛志. 福建卷. 第3册[M]. 北京: 海洋出版社, 2014 [South Coast of Fujian/Editorial Board of China Island History. China Island History. Volume 3 [M]. Beijing: Ocean Press, 2014]
 - 17 李圆圆. 福建海坛岛及周围岛屿苔藓植物多样性和生物地理学研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2020 [Li YY. Bryophytic Diversity and Biogeography of Haitan Island and its surrounding islands, Fujian province [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2020]
 - 18 张坚强, 张琳婷, 赵东铭, 吴端聪, 白珮珮, 邓传远. 珠海淇澳岛次生植被特征及物种多样性[J]. 西北植物学报, 2019, **39** (1): 173-184 [Zhang JQ, Zhang LT, Zhao DM, Wu DC, Bai PP, Deng CY. Characteristics and species diversity of secondary vegetation on Qi'ao Island, zhuhai [J]. *Acta Bot Bor-Occid Sin*, 2019, **39** (1): 173-184]
 - 19 福建植物志编辑委员会. 福建植物志[M]. 福州: 科学技术出版社, 1982 [Editing Committee of Fujian Flora. Annals of Fujian flora [M]. Fuzhou: Science and Technology Press, 1982]
 - 20 中国科学院《中国植物志》编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 2004 [Editorial Board of Flora of China, Chinese Academy of Sciences. Flora of China [M]. Beijing: Science Press, 2004]
 - 21 吴征镒. 《世界种子植物科的分布区类型系统》的修订[J]. 云南植物研究, 2003, **24** (5): 535-538 [Wu ZY. The areal-types of the world Families of seed plant [J]. *Acta Bot Yunnan*, 2003, **24** (5): 535-538]
 - 22 吴征镒. 中国种子植物属的分布区类型[J]. 云南植物研究, 1991, **13** (S4): 1-139 [Wu ZY. Distribution type of genus of seed plants in China [J]. *Acta Bot Yunnan*, 1991, **13** (S4): 1-139]
 - 23 郑建忠. 平潭6个海岛植物群落特征及相关环境因子研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2019 [Zheng JZ. Plant community characteristics and related environmental factors in 6 islands of Pingtan [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019]
 - 24 陈有民. 园林树木学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2011 [Chen YM. Garden and Dendrology [M]. Beijing: China Forestry Press, 2011]
 - 25 王梅岭. 中国亚热带常绿阔叶林生活型的研究[J]. 生态学报, 1987, **6** (2): 21-23+17 [Wang MD. Study on lif-forms of evergreen broad-leaved forest in subtropics of China [J]. *Chin J Ecol*, 1987, **6** (2): 21-23+17]
 - 26 Raunkiaer C. The Life Forms of Plants and Statistical Plant Geography [M]. Clarraph Press, 1934: 368-378
 - 27 Pajmans K. An analysisi of four tropical rain forest sites in New Guinea [J]. *J Ecol*, 1970, **58** (1): 77-101
 - 28 贺学礼. 植物生物学[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 1-404 [He XL. Plant Biology [M]. Beijing: Science Press, 2017: 1-404]
 - 29 马绍宾, 李德铎. 高等植物的散布与进化 I. 散布体类型、数量、寿命及散布机制[J]. 云南植物研究, 2002, **24** (5): 569-582 [Ma SB, Li D. Dispersal and evolution in higher plants I. dispers, their quantity and life span as well as dispersal mechanism [J]. *Acta Bot Yunnan*, 2002, **24** (5): 569-582]
 - 30 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2011 [Zhang JT. Quantitative Ecology [M]. Beijing: Science Press, 2011]
 - 31 李军玲, 张金屯. 太行山中段植物群落物种多样性与环境的关系[J]. 应用与环境生物学报, 2006, **7** (6): 766-771 [Li JL, Zhang JT. The relationship between plant community species diversity and environment in the middle section of Taihang Mountain [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2006, **7** (6): 766-771]
 - 32 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学出版社, 1999: 296-338 [Lu RK. Methods of Soil Agricultural Chemistry Analysis [M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1999: 296-338]
 - 33 阎荣恩, 朝慈良, 胡军飞. 普陀山植被-类型、结构、功能、管护[M]. 北京: 科学出版社, 2018 [Yan RE, Chao CL, Hu JF. Vegetation of Putuo Island: Type, Structure, Function, and Management [M]. Beijing: Science Press, 2018]
 - 34 中国植被编辑委员会. 中国植被[M]. 北京: 科学出版社, 1983 [China Vegetation Editorial Committee. China Vegetation [M]. Beijing: Science Press, 1983]
 - 35 王炜, 裴浩, 王鑫厅. 优势种植被分类系统的逻辑分析与示例方案化[J]. 生物多样性, 2016, **24** (2): 136-147 [Wang W, Pei H, Wang XT. A logic analysis on vegetation classification system based on dominant species with an illustrational scheme [J]. *Biodiv Sci*, 2016, **24** (2): 136-147]
 - 36 陈树培, 邓义, 陈炳辉, 曹洪麟, 丘向宇. 广东海岛植被和林业[M]. 广州: 广东科技出版社, 1994 [Chen SP, Deng Y, Chen BH, Cao HL, Qiu XY. Island Vegetation and Forestry in Guangdong [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1994]
 - 37 张巧. 平潭岛四种主要沿海防护林生态效益评价[D]. 福州: 福建师范大学, 2015 [Zhang Qiao. The ecological benefits evaluation of four main coastal shelterbelt forests in Pingtan [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2015]
 - 38 安树青, 赵儒林. 中国北亚热带次生森林植被的特征分析[J]. 南

京大学学报(自然科学版),1991 (2): 323-331 [An SQ, Zhao RL, Analysis of characteristics of secondary forest vegetation in the north subtropical zone of China [J]. *J Nanjing Agric For Univ (Nat Sci)*,1991, **37** (2): 323-331]

39 徐悦, 钱逸凡, 伊力塔, 余树全. 普陀山森林群落结构与生物多样性研究[J]. *浙江林业科技*, 2013, **33** (5): 74-80 [Xu Y, Qian YF, Yi LT, Yu SQ. Study on forest community structure and biodiversity in Putuoshan Island [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2013, **33** (5): 74-80]

40 位彬, 衣华鹏, 祝贺, 徐洋, 兰思群. 南长山岛植物物种多样性及其空间格局分析[J]. *鲁东大学学报(自然科学版)*, 2019, **35** (1): 14-22 [Wei B, Yi HP, Zhu H, Xu Y, Lan SQ. Species diversity and spatial pattern of plants on Nanchangshan Island [J]. *J Ludong Univ (Nat Sci)*, 2019, **35** (1): 14-22]

41 何雅琴, 曾纪毅, 陈国杰, 肖集泓, 彭特, 陈越琳, 邓传远. 福建省连江县6个海岛维管植物资源调查与分析[J]. *热带作物学报*, 2021, **42** (7): 2102-2108 [He YQ, Zeng JY, Chen GJ, Xiao JH, Peng T, Chen YL, Deng CY. Investigation and analysis of vascular plant resources in Lianjiang [J]. *J Trop Crop*, 2021, **42** (7): 2102-2108]

42 张凯迪, 魏艳艳, 龚元, 郭智娟, 赵敏. 浙江沿海无居民海岛植物群落物种组成及多样性[J]. *地球环境学报*, 2019, **10** (1): 58-68 [Zhang KD, Wei YY, Gong Y, Guo ZJ, Zhao M. Floristic composition and diversity of plant communities of the nonresidential islands of Zhejiang, China [J]. *J Earth Environ*, 2019, **10** (1): 58-68]

43 郑维艳, 曾文豪, 唐一思, 石慰, 曹坤芳. 中国大陆北热带及亚热带地区樟科、壳斗科物种多样性及其生物地理格局分析[J]. *生态学报*, 2018, **38** (24): 8676-8687 [Zheng WY, Zeng WH, Tang YS, Shi W, Cao KF. Species diversity and biogeographic patterns of Lauraceae and Fagaceae in northern tropical and subtropical regions of China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38** (24): 8676- 8687]

44 陈晓熹, 李群, 黄久香, 黄清华, 陈流保, 杨新东, 王发国, 许涵. 翁源青云山自然保护区亚热带常绿阔叶林群落结构和区系特征[J]. *林业科学研究*, 2020, **33** (5): 77-85 [Chen XX, Li Q, Huang JX, Huang QH, Chen LB, Yang XD, Wang FG, Xu H. The community structure and floristic characteristics of subtropical evergreen broadleaved forest in Qingyunshan nature reserve, Guangdong [J]. *For Sci Res*, 2020, **33** (5): 77-85]

45 郑俊鸣, 方笑, 朱雪平, 朱丹丹, 邓传远. 平潭大屿岛植物资源及其多样性研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2016, **43** (4): 640-645 [Zheng JM, Fang X, Zhu XP, Zhu DD, Deng CY. Research on plant resources and diversity of Lantau island in Pingtan [J]. *J Anhui Agric Univ*, 2016, **43** (4): 640-645]

46 陈开森, 邓元德, 吕国梁, 刘连勇. 福建汀江源自然保护区种子植物区系研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2020, **40** (6): 7-15+33 [Chen KS, Deng YD, Lu GL, Liu LY. Research on seed plant flora of Tingjiangyuan nature reserve in Fujian province [J]. *J Centr S Unive For Technol*, 2020, **40** (6): 7-15+33]

47 邓元德, 何宗明, 庄崇洋. 福建梁野山国家级自然保护区种子植物区系研究[J]. *西北植物学报*, 2015, **35** (4): 830-836 [Deng YD, He ZM, Zhuang CY. Seed plant flora of Liangyeshan national nature reserve in Fujian province [J]. *Acta Bot Bor-Occid Sin*, 2015, **35** (4): 830-836]

48 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 YY. Research on the ecological characteristics of five nature forest communities in Wuyishan nature reserve [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2008]

49 孔祥海. 福建梅花山国家级自然保护区常绿阔叶林生态学研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2008 [Kong XH. Research on the ecology of evergreen broad-leaved forest in Meihuashan national nature reserve in Fujian province [D]. Xiamen: Xiamen University, 2008]

50 Carlos GV, Pedro M, Pugnaire FI, Joanna JM, Moreira XQ, Jaume F. Leaf functional traits and insular colonization: Subtropical islands as a melting pot of trait diversity in a widespread plant lineage [J]. *Biogeography*, 2020, **47** (11): 2362-2376

51 白珮珮. 海坛岛典型灌丛群落特征和物种多样性[D]. 福州: 福建农林大学, 2020 [Bai PP. Community characteristics and species diversity of dominant shrubs community in Haitan Islands [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019]

52 齐婷婷, 王晓丽, 冯妍, 石洪华. 庙岛群岛南五岛灌木群落结构及其对环境因子的响应[J]. *西北植物学报*, 2015, **35** (5): 1044-1051 [Qi TT, Wang XL, Feng X, Shi HH. Population structure of shrub in the Southern Five Islands of Miaodao Archipelago and its response to the environmental factors [J]. *Acta Bot Bor Occid Sin*, 2015, **35** (5): 1044-1051]

附表1 土壤化学指标

Table 1 Chemical indicators of soil

样方编号 Species number	pH	水溶性盐总量 S (w/g kg ⁻¹)	有机质 SOM (w/g kg ⁻¹)	全氮 TN (P/%)	全磷 TP (P/%)	全钾 TK (P/%)	碱解氮 AN (w/mg kg ⁻¹)	有效磷 AP (w/mg kg ⁻¹)	速效钾 AK (w/mg kg ⁻¹)
D1	4.5	1.0	57.0	0.324	0.045	1.93	265.5	8.8	176
D2	5.1	1.7	68.6	0.343	0.087	1.37	265.5	8.1	233
D3	6.1	0.4	37.1	0.193	0.125	1.51	175.7	31.1	113
D4	4.3	1.0	56.9	0.329	0.046	1.72	228.1	9.5	150
D5	4.5	0.8	64.8	0.359	0.050	1.69	280.4	10.6	176
D6	4.3	1.2	111	0.596	0.067	1.01	381.4	16.6	193
D7	4.3	1.2	95.1	0.482	0.070	1.17	321.6	9.9	156
D8	5.3	0.9	95.0	0.441	0.056	1.38	325.3	7.8	210
D9	4.7	0.6	21.8	0.118	0.054	1.52	119.6	2.9	113
D10	5.3	1.6	91.3	0.296	0.055	1.64	243.0	6.7	153
D11	5.8	1.0	91.8	0.342	0.060	0.896	265.5	5.0	153
D12	5.2	0.05	13.5	0.088	0.045	1.11	82.3	4.1	180
D13	5.2	0.05	11.2	0.073	0.044	1.16	63.6	6.5	140
D14	7.9	1.8	27.5	0.155	0.036	1.08	130.9	9.7	532
D15	5.7	0.3	14.7	0.069	0.018	1.36	82.3	3.7	183
D16	6.1	0.7	9.39	0.044	0.021	1.71	48.6	2.2	136
D17	5.1	0.2	7.41	0.041	0.014	1.63	44.9	2.3	83
D18	5.8	0.4	9.57	0.046	0.015	1.85	48.6	3.2	57

S: Soluble salts; SOM: Soil organic matter; TN: Total Nitrogen; TP: Total phosphorus; TK: Total potassium; AN: Alkaline hydrolyzable nitrogen; AP: Available phosphorus; AK: Available potassium.