

池源, 郭振, 石洪华, 覃雪波, 王晓丽. 南长山岛草本植物多样性及影响因子. 华中师范大学学报(自然科学版). 录用待刊

南长山岛草本植物多样性及影响因子

池源¹, 郭振¹, 石洪华^{1*}, 覃雪波², 王晓丽³

(1.国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061; 2.天津自然博物馆, 天津 300201

3.天津理工大学环境科学与安全工程学院, 天津 300384)

摘要: 由于特殊的地理位置和有限的规模大小, 海岛生态系统具有明显的脆弱性特征, 植物多样性对维护海岛生态系统稳定具有基础性作用。以山东南长山岛草本植物为研究对象, 在现场调查的基础上, 分析多样性及其空间分布, 通过 CCA 排序和方差分析, 辨识地形、土壤、人工林和海洋因子对草本植物多样性的影响。结果显示:

(1) 调查记录南长山岛草本植物 85 种, 各样地 Shannon-wiener 指数和 Pielou 指数平均值分别为 2.16 和 0.838, 相邻环境梯度区间的 Jaccard 指数均小于 0.5; (2) 不同样地 Shannon-wiener 指数和 Pielou 指数由林缘至林内均呈降低趋势, 且在土壤 pH、含水率、全磷、全钾较低以及海拔较高的位置总体较高; 在海拔较高和坡度较小的区域, 相邻梯度区间的 Jaccard 指数总体较低; (3) 地形、土壤和人工林均对南长山岛草本植物多样性具有显著影响, 其中海拔、全磷和距林缘距离是最主要的影响因子。

关键词: 海岛生态系统; 草本植物; 生物多样性; 影响因子; 南长山岛

中图分类号: Q948; S718

Diversity and its Impact Factor of Herbaceous Plant on Nanchangshan Island in Shandong Province, China

CHI Yuan¹, GUO Zhen¹, SHI Honghua^{1*}, QIN Xuebo², WANG Xiaoli³

(1 The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 2 Tianjin Natural

History Museum, Tianjin 300201, China; 3 College of Environmental Science and Safety Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: Island ecosystem is vulnerable due to its limited area and isolated space, and biodiversity plays an important role in maintaining the stability of the ecosystem. Herbaceous plant is one of the widely distributed plants on island which is highly diversified and respond well to environment. It is vitally significant for biodiversity conservation to reveal the diversity and its impact factor of herbaceous plant on island. Related studies have indicated that herbaceous plant on island is not only affected by topographic and soil factors, but also probably associated with plantation and ocean. In this study, herbaceous plant on Nanchangshan Island was studied through field investigation and sampling. Species composition and biodiversity were calculated. Then, the impact factor of herbaceous plant diversity was identified using the method of canonical correspondence analysis (CCA) and analysis of variance (ANOVA). The results showed that the number of herbaceous species recorded in the field investigation was as high as 85 species and the plants

基金项目: 科技基础性工作专项项目 (2012FY112500), 海洋公益性行业科研专项项目 (201505012), 国家海洋局第一海洋研究所基本科研业务费专项资金项目 (2015G13)。

第一作者: 池源 (1988-), 男, 硕士, 研究实习员, 从事海岛海岸带植物地理学研究, E-mail: chi yuan@fio.org.cn

通讯作者: 石洪华, 副研究员, 从事海岛生态系统评估研究, E-mail: shihonghua@fio.org.cn

belonged to 75 genera of 31 families. The average Shannon-wiener Index and Pielou Index were 2.16 and 0.838, respectively, and the Jaccard Index between adjacent environmental gradient ranges were all lower than 0.5. The Shannon-wiener Index and Pielou Index tended to reduce from the edge to center of the forest and the 2 indices were generally higher where soil pH, moisture content, total phosphorus and total potassium were low and altitude was high. Meanwhile, the Jaccard Index between adjacent gradient ranges was generally lower where altitude was high and slope was low. Terrain factors, soil factors and plantation factors had played important roles in biodiversity of herbaceous plant on Nanchangshan Island, and altitude, total phosphorus and distance to forest edge were the most important factors.

Key words: Island ecosystem; Herbaceous plant; Biodiversity; Impact Factor; Nanchangshan Island

长期以来,海岛生物多样性一直是保护生物学的研究热点,而植物多样性及其影响因子分析也是生态学和植物地理学研究的重点^[1-2]。海岛是保护海洋环境、维护生态平衡的重要平台,由于特殊的地理位置和有限的面积大小,海岛生态系统具有明显的脆弱性,主要体现在其地域结构相对简单,自我调节和恢复能力较弱^[3-4],且更容易遭受风暴潮、台风、干旱等自然灾害^[5-6]。植物多样性与生态系统结构和功能具有十分密切的关系,大量研究表明,植物多样性在维持和调控生态系统生产力、物质循环和系统稳定性等方面具有重要的基础性作用^[7-9]。对海岛生态系统而言,植物多样性的重要性更加凸显。草本植物是海岛植物中分布最广、种类最多且对环境响应最为敏感的一类植物,是海岛生物多样性保护的重点,弄清楚海岛草本植物多样性及其影响因子对于维护海岛生物多样性具有重要意义。

独特的海岛环境使得草本植物多样性相比大陆而言可能受到更多环境因子的作用。我国海岛大都为基岩海岛,以剥蚀山丘为主要地貌特征,地形和土壤因子成为草本植物多样性的基本环境因子。恶劣的自然环境使得海岛特别是北方海岛原生林木发育不良,人工林建设成为改善海岛生态环境、提升海岛生态功能的重要途径,但人工林建设对原生植物而言实质上是一种人为干扰^[10-11],也可能对草本植物多样性产生影响。此外,海岛生态系统兼具陆、海特征^[12],以海岛陆地为基础和核心,同时拥有海洋属性,一般而言,海岛边缘相比海岛内部更容易受到海洋的影响,从而可能引起草本植物多样性的差异。地形、土壤、人工林和海洋环境共同构成海岛草本植物独特的潜在影响因子^[4,10,12-13],且各环境因子之间也相互联系与作用。正确辨识草本植物多样性的影响因子及其影响程度,能够揭示海岛草本植物多样性的空间变化规律,为海岛原生植物多样性保护提供依据。然而,目前海岛生物多样性的研究多集中在描述统计或者模型构建等方面,且往往以海岛整岛为研究单元^[2,13-14],对于海岛内部多样性空间特征及其影响因子的关注还相对较少。

因此,本文选择我国北方典型海岛——山东省长岛县南长山岛为研究区域,以草本植物为研究对象,在现场调查的基础上,分析多样性的分布特征,通过 CCA 排序和方差分析,辨识草本植物多样性的影响因子及影响程度,为海岛生物多样性保护提供依据。

1 研究区概况

南长山岛位于山东半岛北侧,黄渤海交汇处,北纬 37°55',东经 120°44'(见图 1)。岛体呈 NWW-SEE 走向,岛陆面积约 13.7km²,是山东省最大海岛,岸线长约 24km,以基岩岸线为主。南长山岛所在区域属于东亚季风

气候区，年均气温 12.0°C，1 月平均气温-1.6°C，7 月平均气温 24.5°C；年均降水量 712.7mm，降水多集中在 6-9 月；日照较为充足，年均日照时数 2612h。海岛地势起伏明显，山势大致呈南北走向，最高点海拔约为 156m；土壤主要有棕壤、褐土、潮土三大类，以棕壤土分布面积最大，土层厚度约为 30 cm，多砂砾^[4]。南长山岛是中国北方海岛的典型代表，岛内高程起伏明显，人工林建设广泛，人工林均为防护林，是我国沿海防护林体系的重要组成部分，20 世纪 50 年代以来持续开展种植得到；同时，该岛地表覆盖类型多样，原生草本植物发育完整，种类繁多，是进行植物生态学研究的天然实验室。岛内天然植物群落规模较小，多为草本群落，人工林群落具有较大规模，以黑松和刺槐为主要树种，人工林群落和天然草本群落均为维持海岛原生植物多样性的重要载体；此外，南长山岛开发利用活动较为频繁，城镇建设和农田开垦也是海岛重要的空间利用方式，对原生植物多样性构成影响。根据以往研究，南长山岛地表覆盖类型面积由大到小依次为人工林群落（48.9%）、建设用地（39.6%）、农田（6.2%）、天然群落（4.4%）和裸地（0.9%）^[15]。随着人口聚集度不断提升，城镇化影响逐年增加，南长山岛生物多样性保护面临着严峻挑战^[16]。

2 材料与方法

2.1 数据来源

2.1.1 现场调查和采样

2012 年夏季进行草本植物现场调查和取样。选择人工林群落区和天然草本群落区布设样地，以均匀分布为原则，结合地形因素，在 6.33km²的人工林群落区共设置 18 个样地，大小为 20m×20m。此外，虽然南长山岛天然群落面积很小，总面积仅约 0.6km²，但天然群落是原生植物多样性的重要贮存库，其生态条件与人工林群落具有较大差异，因此完整的南长山岛草本植物数据库中应当包含天然群落的部分，在本次调查中增设 2 个代表性样地以获取物种信息，大小为 10m×10m（见图 1）。运用 GPS 手持机和电子罗盘测量各样地的经纬度、海拔、坡度和坡向；统计人工林群落样地中林木种类和数量，测量林木的胸径、树高、冠幅等指标；在每个样地的 4 角和中心共设置 5 个 1m×1m 草本植物样方，记录样方内草本植物种类、株数、盖度、高度。此外，采用多点混合取土样方法在每个样地内选取 3 个土壤取样点，均匀混合后作为该样地的土壤样品，在实验室内除去其中草根、大石砾等杂质，过 2 mm 钢筛并磨细，在 105 °C 高温下烘至恒重，称量并计算土壤含水率，按照《土壤农业化学分析方法》^[17]测试土壤理化性质。

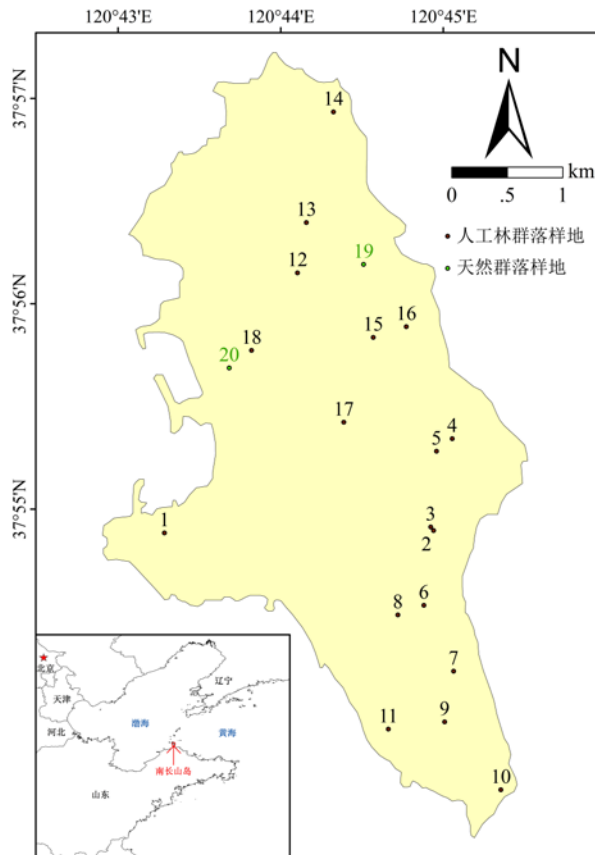


图 1 南长山岛草本植物调查样地

Fig.1 Sampling plots of herbaceous plant on Nanchangshan Island

2.1.2 遥感影像

采用 LANDSAT8 卫星 2013 年 8 月南长山岛所在区域的遥感影像，分辨率 30m。利用 ArcGIS10.0 提取南长山岛轮廓和岛上人工林范围矢量图，经现场验证和图像校正后，根据样地的经纬度信息计算人工林群落样地与海岛岸线和人工林边缘的最近距离。

2.2 数据分析方法

2.2.1 样地环境因子统计

环境因子包括地形因子、土壤因子、人工林因子和海洋因子 4 部分。

地形因子由海拔、坡度、坡向 3 项定量因子组成。其中，记录的原始坡向值按 0-360 顺时针增大，0 为正北，180 为正南，本文以向阳性为原则，按照下式进行标准化：

$$As_x = \frac{1 + \cos\left(\frac{A_x - 180}{180} \times \pi\right)}{2} \quad (1)$$

式中， As_x 为 x 点标准化坡向值， A_x 为 x 点原始坡向值。

土壤因子包括土壤 pH、含水率、全磷、全钾、全氮、总碳 6 项定量因子。

人工林因子选择林分密度、平均胸径×平均树高、距林缘距离 3 项定量因子。林分密度指样地内林木的总株数；平均胸径×平均树高指样地内所有林木平均胸径和平均树高的乘积；距林缘距离是指样地与森林边缘的最近距离。此外，选择群落类型 1 个定性因子。

海洋因子选择距岛岸距离 1 个定量因子，指样地与岛岸的最近距离。环境因子统计结果见表 1。

表1 环境因子统计结果

Tab.1 Statistics results of environmental factors

群落类型	样地	地形因子			土壤因子						人工林因子			海洋因子	
		Al	Sl	As	pH	MC	TP	TK	TN	TC	SD	D×H	DE	DS	
人工林群落	针叶林	1	56	18.0	0.96	6.81	1.98	0.41	2.67	1.32	19.57	48	55.42	72.6	231
	阔叶林	2	51	7.3	0.15	6.68	2.11	0.33	2.80	1.04	9.27	18	77.26	17.3	374
	针叶林	3	53	25.6	0.18	5.36	1.51	0.18	1.80	1.37	17.78	82	76.76	57.8	405
	阔叶林	4	48	24.1	0.50	7.38	2.02	0.46	2.86	1.08	10.44	19	170.86	19.8	457
	混交林	5	68	13.2	0.76	6.96	2.16	0.23	2.18	1.49	17.66	60	94.82	117.5	638
	阔叶林	6	69	42.0	0.82	6.15	2.69	0.30	2.57	1.40	14.17	52	125.78	50.3	361
	针叶林	7	86	24.0	0.89	5.61	1.69	0.25	2.11	1.28	14.62	28	105.78	143.6	259
	针叶林	8	142	8.0	0.72	5.74	1.20	0.32	1.82	1.45	16.35	14	51.09	22.8	605
	针叶林	9	37	33.0	0.96	5.41	1.06	0.18	1.68	0.86	11.12	42	124.58	20.7	475
	针叶林	10	62	46.0	0.65	5.30	2.20	0.29	2.58	1.83	23.06	17	89.64	8.8	71
	阔叶林	11	26	8.0	0.79	7.28	2.41	0.32	2.85	0.34	6.13	19	18.74	22.4	213
	阔叶林	12	42	3.0	0.99	7.58	2.06	0.43	2.94	1.51	17.26	15	273.53	14.7	917
	混交林	13	94	53.0	0.25	7.65	1.58	0.43	2.55	0.55	7.43	11	79.35	7.9	636
	针叶林	14	96	65.0	0.72	5.28	1.31	0.17	1.55	0.76	10.30	25	95.02	6.8	156
	阔叶林	15	56	10.0	0.96	5.35	1.83	0.41	2.10	2.43	23.66	76	179.00	11.5	612
	混交林	16	79	4.0	0.80	5.11	1.14	0.16	1.19	0.90	11.31	31	169.31	60.1	304
	混交林	17	60	11.0	0.67	7.15	2.21	0.52	2.77	1.67	19.78	63	72.27	27.1	1072
	混交林	18	46	29.0	0.88	5.86	1.65	0.22	1.95	1.75	20.01	50	215.98	29.3	553
天然群落	狗尾草	19	20	16.0	0.01	8.33	2.87	0.59	3.76	0.85	13.26	-	-	-	342
	狗尾草	20	25	3.0	1.00	8.01	2.05	0.40	2.50	1.14	13.19	-	-	-	308

注: Al——Altitude 海拔(m), Sl——Slope 坡度(°), As——Aspect 坡向(标准化), pH——酸碱度(无量纲), MC——Moisture Content 含水率(%), TP——Total Phosphorus 全磷(g/kg), TK——Total Potassium 全钾(g/kg), TN——Total Nitrogen 全氮(g/kg), TC——Total Carbon 总碳(g/kg), SD——Stand Density 林分密度(株/样地), D×H——average DBH×TH 平均胸径×平均树高(m×m), DE——Distance to Forest Edge 距林缘距离(m), DS——Distance to Shore 距岛岸距离(m), 下同。

2.2.2 多样性计算

(1) 物种统计和重要值计算

统计人工林群落样地和天然群落样地的草本植物物种，梳理各物种所属科、属以及不同科、属所占比例。

计算样地内物种的重要值，方法如下^[18]：

$$IV_{s,i} = \left(\frac{Ab_{s,i}}{Ab_s} + \frac{Co_{s,i}}{Co_s} + \frac{He_{s,i}}{He_s} \right) / 3 \quad (2)$$

式中： $IV_{s,i}$ 为样地 s 中物种 i 的重要值， $Ab_{s,i}$ 为样地 s 内物种 i 的多度， Ab_s 为样地 s 物种多度之和， $Co_{s,i}$ 为样地 s 内物种 i 的盖度， Co_s 为样地 s 物种盖度之和， $He_{s,i}$ 为样地 s 内物种 i 的高度， He_s 为样地 s 物种高度之和。根据物种在各样地的重要值之和，筛选出南长山岛常见种（重要值前 10 位物种）和优势种（重要值前 3 位物种）。

(2) 多样性计算

从 α 多样性和 β 多样性两个角度计算南长山岛草本植物多样性。 α 多样性采用目前在国内外相关研究中普遍应用的 Shannon-Wiener 指数 (H') 和 Pielou 指数 (E)，前者侧重于反映群落物种的复杂程度，后者则更加强调整群落物种的均匀度。计算方法如下^[19]：

$$H'_s = - \sum_{i=1}^n IV_{s,i} \ln IV_{s,i} \quad (3)$$

$$E_s = H'_s / \ln(N_s) \quad (4)$$

式中， H'_s 、 E_s 分别为样地 s 的 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数， N_s 为样地 s 的物种数量。基于此计算各样地的 α 多样性。

β 多样性选择 Jaccard 指数以反映不同环境梯度的群落之间物种组成的变化，该指数在多样性研究中有着广泛的应用和良好的效果^[20-22]，计算方法如下^[22]：

$$J = a / (a + b + c) \quad (5)$$

式中， J 为不同环境梯度群落之间的 Jaccard 指数， a 为两个环境梯度共有的物种数， b 是仅存在于第一个环境梯度的物种数， c 是仅存在于第二个环境梯度的物种数。

本文从空间环境因子入手，选择海拔、坡度、坡向和离岸距离四个因子分析不同环境梯度群落之间的 β 多样性。按照海拔、坡度、坡向和离岸距离由小到大的顺序，将 18 个人工林样地平均划分为 6 个梯度区间，统计各区间内部的物种数量，进而计算相邻梯度区间的 β 多样性。

2.2.3 影响因子辨识

(1) CCA 排序

通过 Canoco4.5 软件对 18 个人工林群落样地进行 CCA 排序，以“18×77”物种重要值矩阵组成物种数据，以“18×13”定量环境因子矩阵构成环境数据。运用 Monte Carlo 置换检验进行排序轴的显著性检验。为了辨识不同环境因子的影响，采用向前引入法分析各环境因子的影响程度。显著性由 Monte Carlo 置换检验来确定，影响程度由每个环境因子的典范特征值来确定。

(2) 方差分析

基于 SPSS18.0, 运用单因素方差分析 (Oneway ANOVA) 对环境因子的多样性影响进行进一步的验证。为了避免重复研究, 在方差分析中仅对代表海岛典型特征的人工林因子和海洋因子进行分析。

3 结果与分析

3.1 物种统计结果

南长山岛 20 个样地共记录草本植物 85 种, 分属 31 科 75 属。在科水平上, 菊科 (Compositae) 拥有物种数量最多, 达 22 种; 其次为禾本科 (Gramineae) 10 种、百合科 (Liliaceae) 5 种和唇形科 (Labiatae) 5 种。在属水平上, 蒿属 (*Artemisia*) 拥有最多物种 5 种, 其余大部分为一属一种, 少数为一属二种。18 个人工林群落样地共有草本植物 77 种, 分属 31 科 69 属; 2 个天然群落样地共有草本植物 26 种, 分属 14 科 22 属。

草本植物常见种见表 2, 人工林群落草本植物优势种是中华隐子草、艾和大披针藁草, 天然群落草本植物优势种为狗尾草、艾和苘麻。

表 2 南长山岛草本植物常见种
Tab.2 Common species of herbaceous plant on Nanchangshan Island

次序 Rank	人工林群落物种 Species in plantation community	天然群落物种 Species in natural community
1	中华隐子草 <i>Cleistogenes chinensis</i>	狗尾草 <i>Setaria viridis</i>
2	艾 <i>Artemisia argyi</i>	艾 <i>Artemisia argyi</i>
3	大披针藁草 <i>Carex lanceolata</i>	苘麻 <i>Abutilon theophrasti</i>
4	黄花蒿 <i>Artemisia annua</i>	鹅观草 <i>Roegneria kamoji</i>
5	荻 <i>Triarrhena sacchariflora</i>	金盏银盘 <i>Bidens biternata</i>
6	狭叶珍珠菜 <i>Lysimachia pentapetala</i>	益母草 <i>Leonurus artemisia</i>
7	茜草 <i>Rubia cordifolia</i>	寸金草 <i>Clinopodium megalanthum</i>
8	芨芨草 <i>Achnatherum splendens</i>	灰绿藜 <i>Chenopodium glaucum</i>
9	绵枣儿 <i>Scilla scilloides</i>	大披针藁草 <i>Carex lanceolata</i>
10	早开堇菜 <i>Viola prionantha</i>	反枝苋 <i>Amaranthus retroflexus</i>

3.2 物种多样性计算结果

3.2.1 α 多样性

α 多样性结果见图 2, 以 25%、50%、75% 百分位数为间隔点进行数值等级划分。各样地 Shannon-wiener 指数平均值为 2.16, 最小值为 1.44 (样地 7), 最大值为 2.68 (样地 14); Pielou 指数平均值为 0.838, 最小值为 0.702 (样地 1), 最大值为 0.894 (样地 14)。

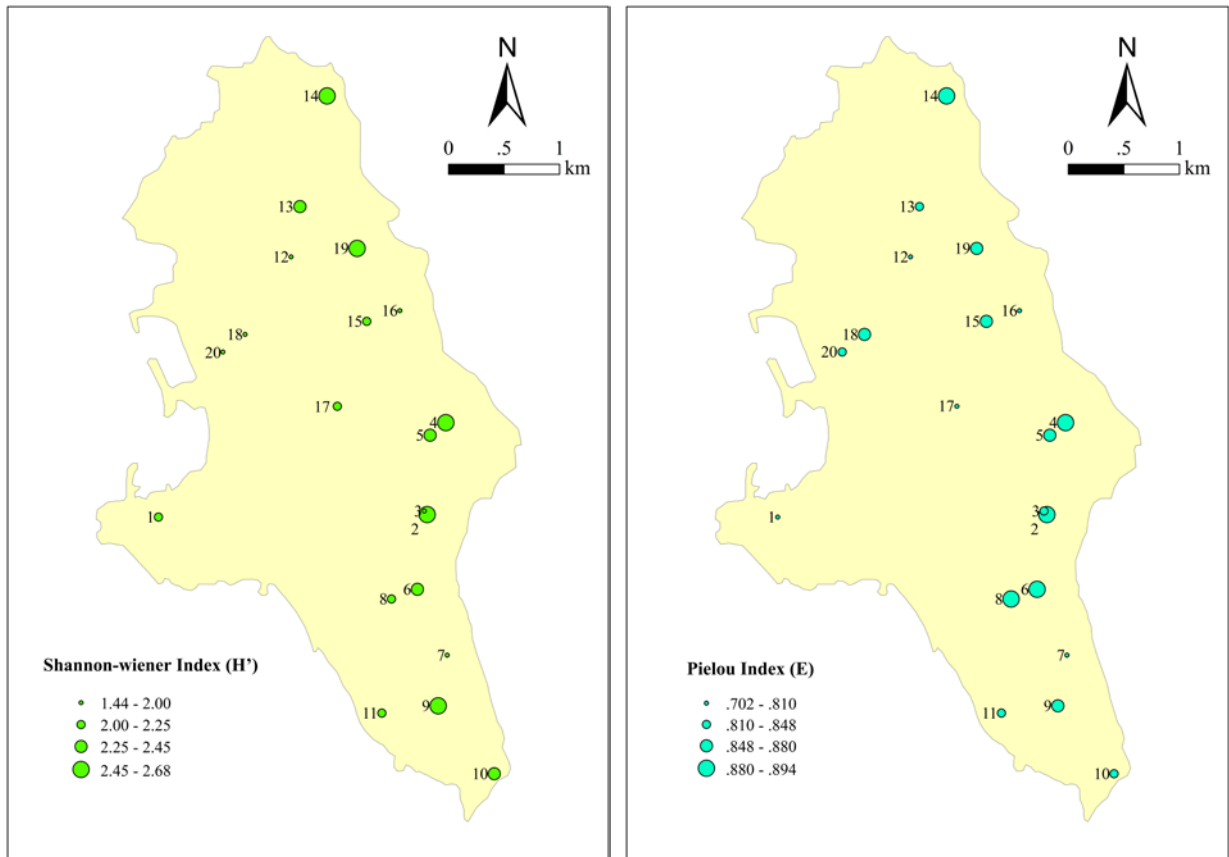
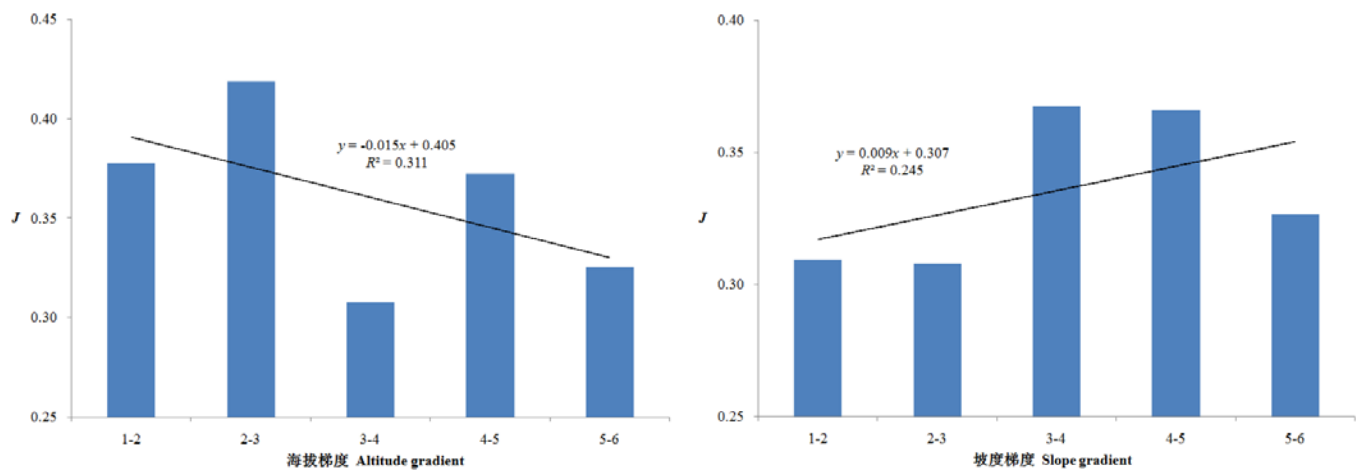


图2 南长山岛草本植物 α 多样性

Fig.2 Shannon-wiener Index and Pielou Index of herbaceous plant on Nanchangshan Island

3.2.2 β 多样性

β 多样性结果见图 3。不同环境因子相邻梯度区间的 Jaccard 指数均小于 0.5；随着海拔的升高，Jaccard 指数总体呈较为明显的下降趋势；随着坡度的增大，Jaccard 指数有所上升；随着坡向和距岛岸距离的增大，Jaccard 指数的变化趋势不明显。



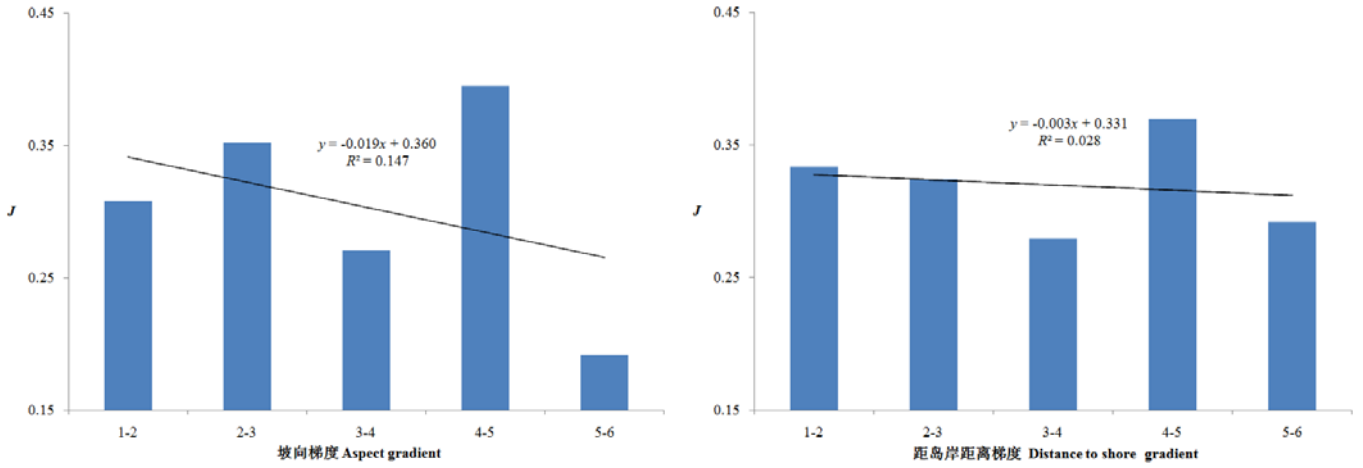


图 3 南长山岛草本植物 β 多样性

Fig.3 Jaccard Index of herbaceous plant on Nanchangshan Island

3.3 CCA 排序结果

3.3.1 CCA 排序图

CCA 排序结果显示,所有排序轴具有显著性($P < 0.05$),第一轴-第四轴物种-环境关系方差累计贡献率为 52.6% (表 3)。CCA 第一轴与距林缘距离呈显著正相关,第二轴与土壤 pH、含水率、全磷和全钾显著正相关,第三轴与坡度具有显著正相关,第四轴与林分密度具有显著负相关,与平均胸径 \times 平均树高具有显著正相关。

表 3 CCA 排序概要与相关系数

Tab.3 Summary and correlation coefficient of CCA ordination

项目	Axis1	Axis2	Axis 3	Axis 4	
所有典范轴的显著性检验	P=0.032				
特征值	0.610	0.504	0.398	0.359	
物种-环境相关性	0.985	0.992	0.995	0.991	
物种方差累计贡献率%	13.6	24.9	33.8	41.8	
物种-环境关系方差累计贡献率%	17.2	31.3	42.5	52.6	
地形因子	AI	0.4346	-0.4704*	-0.1864	0.0043
	SI	0.0987	-0.3696	0.4722*	-0.0925
	As	0.0827	0.2841	0.4197	0.4085
土壤因子	pH	-0.3923	0.4537*	-0.0475	0.2696
	MC	-0.1302	0.5515*	-0.0055	-0.0186
	TP	-0.3260	0.6420**	0.0056	0.0760
	TK	-0.2100	0.5643*	0.0391	0.2032
	TN	0.0786	0.1614	-0.2163	-0.0585
	TC	0.0835	0.0678	-0.1779	-0.0016
人工林因子	SD	-0.0945	0.1604	-0.2023	-0.5113*
	D \times H	-0.2185	0.1691	-0.0918	0.4934*
	DE	0.6464**	0.2058	-0.3214	0.0331
海洋因子	DS	-0.3149	0.2832	-0.1643	0.0248

注: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, 下同。

根据第一轴和第二轴作出 CCA 二维排序图。环境因子在排序轴的投影位置和长度代表着其与排序轴相关性的方向和大小。随着第一轴由左向右,距林缘距离显著增加;随着第二轴由下向上,土壤 pH、含水率、全磷和全钾显著上升,海拔显著下降。可以发现,样地在第一轴右侧相对较少,说明更多的样地分布在距林缘距离相对

较小的位置；样地在第二轴上下两侧分布基本一致，表明不同样地的土壤 pH、含水率、全磷、全钾和海拔等环境因子具有较为均匀的差异。

为了清楚地解读样地 α 多样性与环境因子的关系，采用不同颜色显示各样地 α 多样性的大小（图 4）。可见， α 多样性随着距林缘距离的增大总体上均呈减少趋势，同时，土壤 pH、含水率、全磷、全钾较小以及海拔较高的位置， α 多样性总体较高。

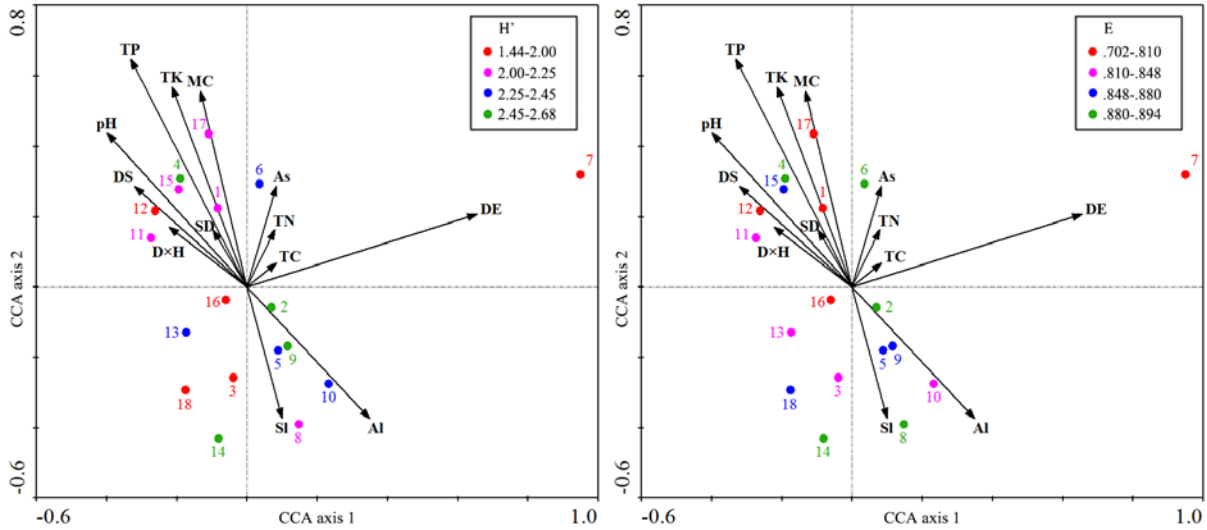


图 4 样地生物多样性 CCA 排序图

Fig.4 CCA ordination diagram of biodiversity of sample plots

总物种 CCA 排序图见图 5。物种在 CCA 排序图中分布特征与样地分布特征基本一致；同时，物种分布既表现出明显的集中性，也具有一定的分散性特征，说明部分物种的环境特征较为相似，具有较为一致的环境要求，同时一些物种所处环境具有独特性，与其他物种的环境特征表现出明显的差异。

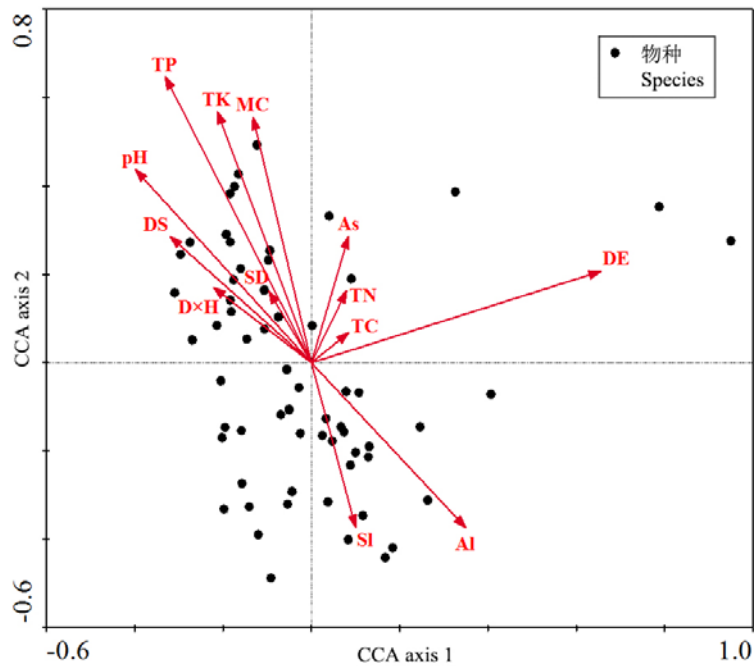


图 5 物种 CCA 排序图

Fig.5 CCA ordination diagram of all species

常见种 CCA 排序图见图 6，序号对应物种参见表 2，重要值按物种 1-10 依次减小。常见种中，芨芨草更倾

向分布于距林缘距离较大的位置，狭叶珍珠菜主要分布于土壤 pH、含水率、全磷、全钾较低且海拔较高的位置，其余常见种均分布于排序图中心附近，说明这些物种对于环境具有较为普遍的适应性。

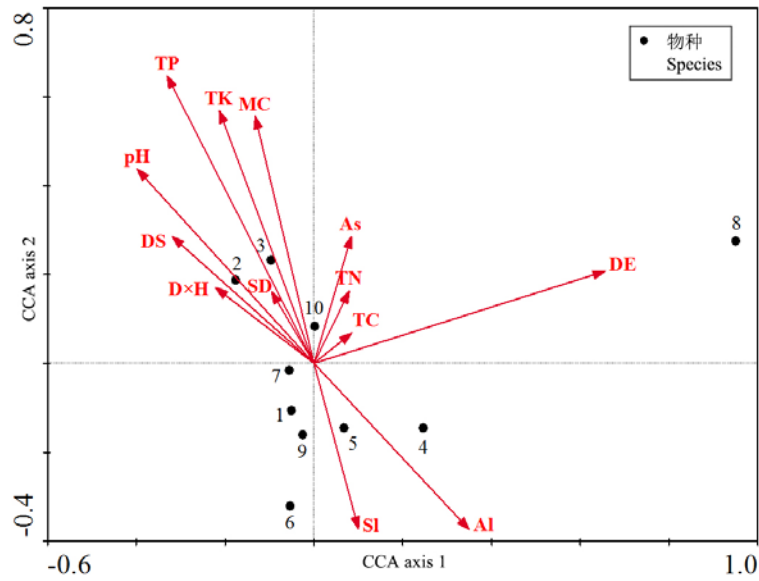


图 6 常见种 CCA 排序图
Fig.6 CCA ordination diagram of common species

3.3.2 环境因子影响程度

不同环境因子的影响程度见表 4。13 个环境因子中，海拔、全磷和距林缘距离具有显著性影响，其中全磷在 0.01 水平上显著，海拔和距林缘距离在 0.05 水平上显著。

表 4 环境因子对物种的影响程度

Tab.4 Impacts of environmental factors on species

序号	环境因子	解释量	显著性
1	AI	0.35	0.032*
2	SI	0.28	0.238
3	As	0.28	0.192
4	MC	0.2	0.556
5	pH	0.27	0.274
6	TP	0.39	0.01**
7	TK	0.18	0.578
8	TN	0.18	0.64
9	TC	0.25	0.344
10	SD	0.27	0.248
11	D×H	0.29	0.19
12	DE	0.39	0.044*
13	DS	0.22	0.426

不同环境因子之间相关系数见表 5。土壤 pH、含水率、全磷和全钾两两之间显著正相关，土壤全氮、总碳和林分密度两两之间显著正相关，距岛岸距离分别与土壤 pH 和全磷显著正相关，其余因子之间相关性不显著。

表 5 环境因子之间的相关系数

Tab.5 Correlation coefficient among different environmental factors

	AI	SI	As	MC	pH	TP	TK	TN	TC	SD	D×H	DE	DS
AI	1	0.205	-0.1109	-0.4275	-0.2513	-0.1032	-0.4039	-0.0084	-0.0223	-0.2764	-0.2452	0.1089	-0.0056
SI		1	-0.1955	-0.105	-0.2279	-0.2502	-0.1558	-0.2093	-0.1507	-0.1133	-0.1289	-0.1995	-0.3897

As	1	0.0042	-0.1671	-0.0288	-0.1343	0.3039	0.3534	0.1177	0.3805	0.2133	0.0578
MC		1	0.5339*	0.4919*	0.8162**	0.1899	0.1415	0.0705	-0.0818	0.051	0.0559
pH			1	0.7116**	0.798**	-0.2754	-0.2913	-0.2795	-0.0296	-0.0951	0.4672*
TP				1	0.7818**	0.2134	0.1443	-0.1153	0.0328	-0.3055	0.54*
TK					1	0.0267	-0.0105	-0.2337	-0.0663	-0.1796	0.2293
TN						1	0.9359**	0.5347*	0.3778	0.0596	0.3252
TC							1	0.5543*	0.2482	0.1272	0.2391
SD								1	0.0375	0.2892	0.2322
D×H									1	-0.1272	0.3439
DE										1	-0.1424
DS											1

3.4 方差分析结果

(1) 人工林因子

对不同林分密度下 α 多样性特征进行分析, 可以发现, 随着林分密度的增加, Shannon-wiener 指数和 Pielou 指数均呈现波动趋势(图 7), ANOVA 结果显示不同林分密度区间下 2 个指数的差异不显著($P_H=0.634, P_E=0.978$)。随着距林缘距离的增大, Shannon-wiener 指数和 Pielou 指数逐渐降低(图 8), ANOVA 结果显示不同林缘距离条件下 2 个指数均具有显著差异($P_H=0.034, P_E=0.043$)。

本文共记录 3 种人工林群落类型: 针叶林(以黑松为建群种)、阔叶林(以刺槐为建群种)和混交林(以黑松和刺槐为建群种)。Shannon-wiener 指数和 Pielou 指数的大小顺序为阔叶林、针叶林和混交林(图 9), 但 ANOVA 结果显示不同人工林群落类型草本植物 α 多样性的差异并不显著($P_H=0.771, P_E=0.751$)。

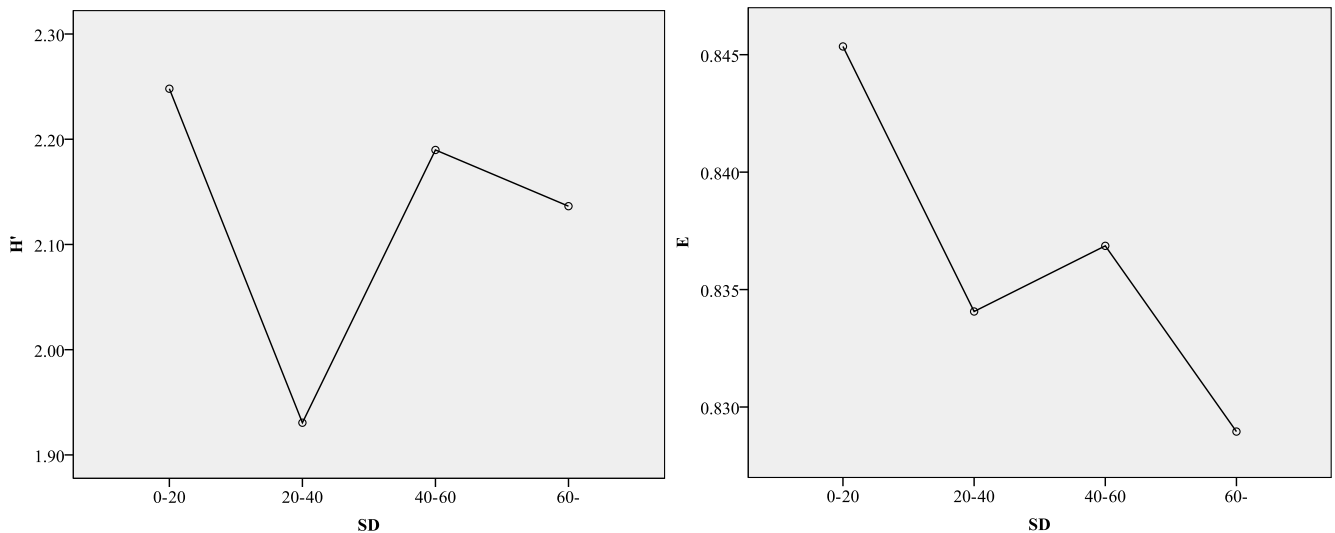


图 7 不同林分密度物种多样性

Fig.7 Biodiversity in different stand density

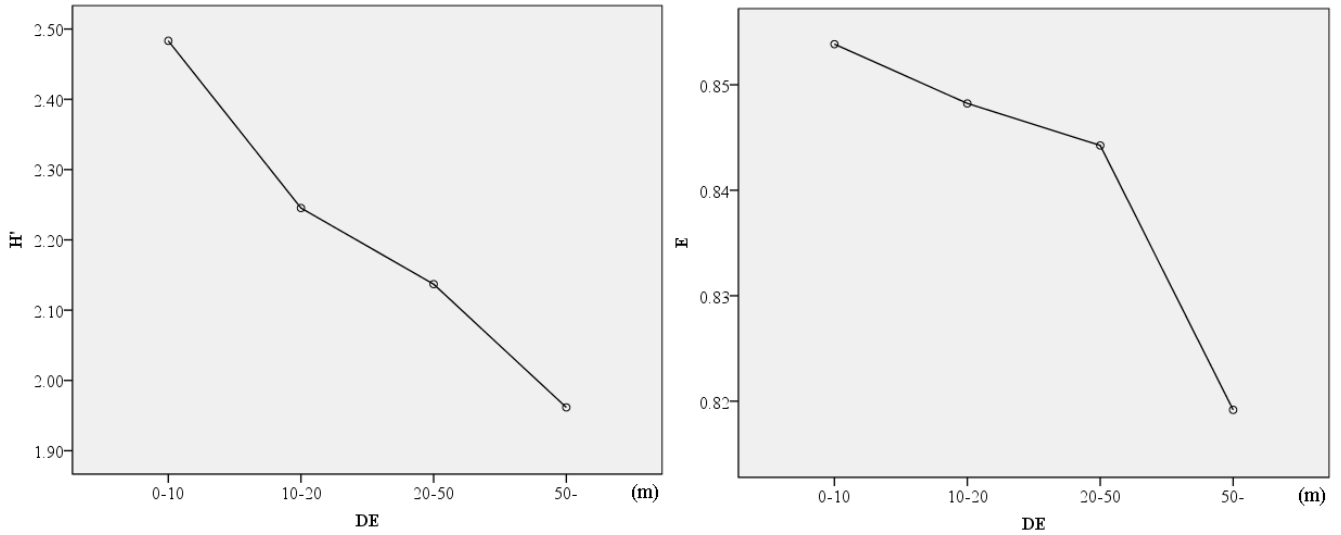
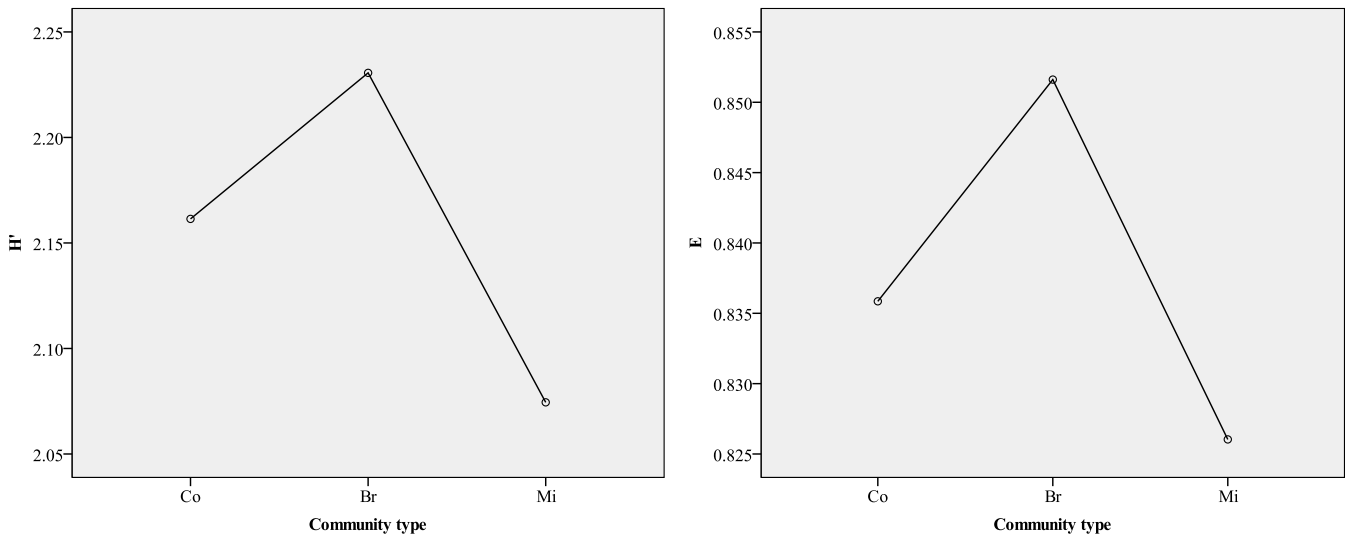


图 8 不同距林缘距离的物种多样性

Fig.8 Biodiversity in different distance-to-forest edge



注: Co, Coniferous forest community 针叶林群落; Br, Broad-leaf forest community 阔叶林群落; Mi, Mixed forest community 混交林群落.

图 9 不同人工林类型物种多样性

Fig.9 Biodiversity in different plantation community type

(2) 海洋因子

在不同距岛岸距离条件下, Shannon-wiener 指数和 Pielou 指数呈现波动变化 (图 10), ANOVA 结果显示其不具有显著差异 ($P_H=0.862$, $P_E=0.405$)。

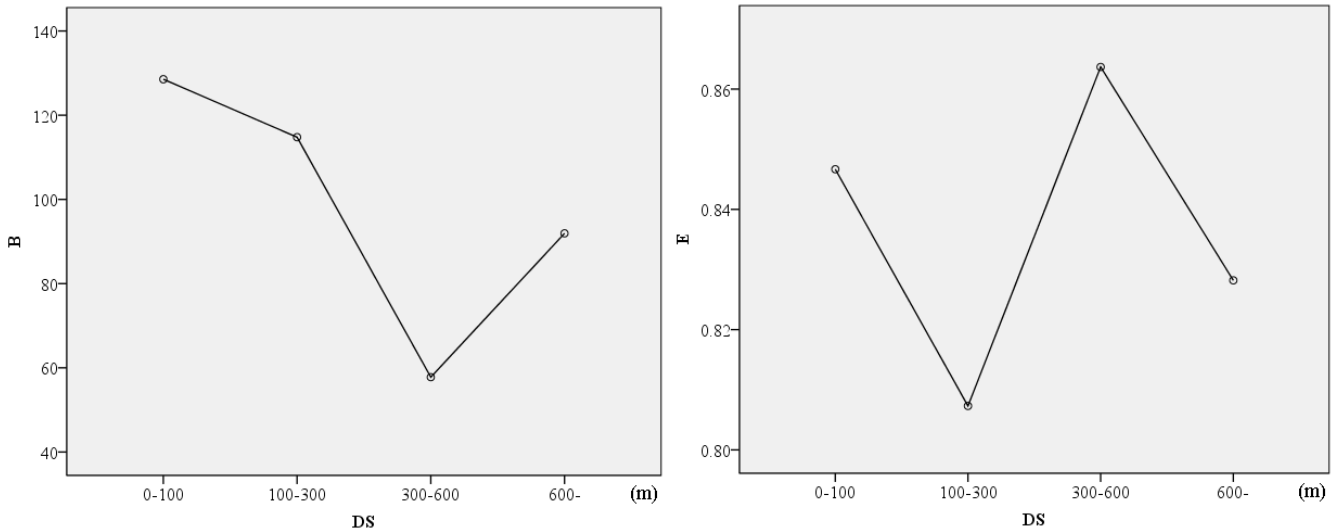


图 10 不同距岛岸距离的物种多样性

Fig.10 Biodiversity in different distance-to-shore

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 物种构成与多样性分析

南长山岛虽然原生木本植物发育较差，但草本植物种类繁多，分布广泛，本文共记录草本植物 85 种，远高于面积相仿（12.5km²）的浙江普陀山岛记录的草本植物物种数（25 种）^[23]。人工林群落是南长山岛最主要的群落类型，林下草本植物的常见种与天然群落表现出明显的差异，说明人工林建设对于南长山岛草本植物的分布格局产生了影响。

α 多样性中 Shannon-wiener 指数平均值为 2.16，小于五台山高山草甸和甘南高寒草甸的 Shannon-wiener 指数，但 Pielou 指数大小与其基本相当^[24-26]，这表明南长山岛单位面积的物种复杂程度相对偏低，但均匀程度尚可。 β 多样性结果显示不同环境因子相邻梯度区间的 Jaccard 指数均小于 0.5，这说明不同环境条件物种构成的差异较大；同时，随着海拔的增大和坡度的减小，Jaccard 指数总体呈减少趋势，说明高海拔和低坡度区域相邻生境物种构成的差异相对较小，这与杨子松等关于岷江上游河谷植物群落的研究结果相一致^[27]。

4.1.2 影响因子分析

CCA 排序结果显示了第一轴-第四轴物种-环境关系方差累计贡献率为 52.6%，包含着较为丰富的生态信息，但仍有 40% 以上的变异未得到解释。这主要是由于采用的备选环境因子数量达 13 个，构成“18×13”定量环境因子矩阵，且环境因子包含 4 个不同方面，排序轴难以解释各变量的全部变异性。不过，结果同时显示所有排序轴具有显著性，且各排序轴物种-环境相关性均达 0.9 以上，说明本文的排序结果是可信的。

(1) 地形因子

地形因子通过改变光照、温度、水分等生态条件以及人类干扰程度对植物多样性产生作用^[28]。研究结果显示，海拔对南长山岛草本植物的 α 多样性和 β 多样性具有重要影响。南长山岛人类活动较为频繁，在海拔相对较低的区域，牛羊放养、人类踩踏等均会对草本植物带来干扰，而海拔较高的位置干扰程度较小，生境条件良好，从而使得 α 多样性较高，生境条件的稳定也带来了相邻梯度物种构成的一致性，使得 β 多样性较低。坡度较大的

位置同样受到较小的人类干扰,但过大的坡度也会限制植物的生长,使得坡度对 α 多样性影响不明显;而低坡度区域由于生境条件更加一致,其 β 多样性总体偏低。理论上,坡向越接近正南能够获得更多的太阳辐射,带来物种多样性的增加^[24],但南向也更容易受到干旱的胁迫,对植物多样性带来限制^[25-26],这可能是坡向影响不显著的原因。

(2) 土壤因子

土壤因子通过影响根系与土壤的生理生化作用进而作用于植被的生长^[4]。本文结果显示,土壤含水率、pH、全磷和全钾较高的位置,草本植物 α 多样性总体偏低,其中全磷的影响在 0.01 水平上显著,同时,上述 4 个因子两两之间均显著正相关。土壤水是植被生长发育需水的主要来源,磷、钾是植物生长所必需的营养元素,南长山岛总体较为干旱,土壤贫瘠且含水率偏低,较高的生物多样性往往表示着较高的生产力,也表明群落能够充分地吸收土壤中的水分和营养元素,造成水分和营养元素的减少^[29];大多数土壤养分在相对酸性的环境下具有更强的有效性^[30],本文结果同样显示了 pH 值较低的样地拥有更高的 α 多样性。研究结果同时表明,土壤全氮和总碳与多样性关系不明显,但与林分密度 (SD) 呈显著正相关。土壤中碳、氮元素的多寡与生态系统状况关系密切^[31],林木数量的增多往往带来凋落物的增加,而凋落物则是土壤碳、氮元素的重要来源。

(3) 人工林因子

现有研究中,关于人工林建设对原生植物多样性的影响一直充满争议,一些研究认为,人工林建设对原生植物多样性影响较大,人工林的物种较为单调,且大都是由入侵性强的先锋树种构成,是原生植物多样性维持的威胁^[32];同时也有研究表明人工林对原生植物影响较小,在某些情况下还具有正面作用^[33]。本文 CCA 排序和方差分析结果均显示林分密度 (SD) 和平均胸径×平均树高 (D×H) 2 个因子的影响不明显,但距林缘距离 (DE) 对多样性表现出了显著的影响。林缘和林内由于光照、气温、风速等微环境条件的不同往往带来多样性的差异,本文结果显示位于林缘区域的样地拥有更高的 α 多样性,这与 Young 等^[34]的研究结果相一致。人工林建设总体对南长山岛草本植物构成了重要影响,一方面表现在林下常见种与天然群落的差异,另一方面表现在由林缘到林内 α 多样性的逐渐降低。

(4) 海洋因子

研究结果表明距岛岸距离 (DS) 对草本植物的 α 多样性和 β 多样性影响不大。一般而言,距离岛岸越近的植物群落可能更容易受到海洋的影响,但本文的研究结果表明海岛边缘与内部的 α 多样性并未有明显差异, β 多样性也没有表现出规律变化。这说明海洋因子在南长山岛草本植物多样性分布中不具有主导作用,也可能是山体和林冠的阻隔作用,使得海洋因子对草本植物的影响受到阻隔和削弱,从而未表现出规律性。

4.2 结论

本文以南长山岛为例,以草本植物为研究对象,在现场调查和采样的基础上,分析多样性及其空间特征,进而通过 CCA 排序和方差分析辨识多样性的影响因子,主要结论如下:

(1) 现场调查记录草本植物 85 种,其中人工林群落 77 种,天然群落 26 种,二者在常见种构成上具有明显差异。各样地 Shannon-wiener 指数和 Pielou 指数平均值分别为 2.16 和 0.838。不同环境因子相邻梯度区间的 Jaccard

指数均小于 0.5。

(2) Shannon-wiener 指数和 Pielou 指数随着距林缘距离的增大总体呈减小趋势, 土壤 pH、含水率、全磷、全钾较小以及海拔较高的位置, 2 个指标总体较高。常见种中芨芨草更倾向分布于距林缘距离较大的位置, 狭叶珍珠菜主要分布于土壤 pH、含水率、全磷、全钾较低且海拔较高的位置, 其余常见种对于环境因子具有较为普遍的适应性。在海拔较高和坡度较小的区域, 相邻梯度区间的 Jaccard 指数总体较小, 但坡向和距岛岸距离对 Jaccard 指数影响不明显。

(3) 地形因子、土壤因子和人工林建设均对南长山岛草本植物多样性的空间分布具有显著影响, 其中全磷、距林缘距离和海拔是最主要的影响因子。

参考文献

- [1] 钱迎倩, 马克平. 生物多样性研究的原理与方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1994.
- [2] Jonathan B L, Robert E R. The Theory of Island Biogeography Revisited [M]. Princeton: Princeton University Press, 2010.
- [3] 王晓丽, 王媛, 石洪华, 等. 海岛陆地生态系统固碳估算方法[J]. 生态学报, 2014, 34(1):88-96.
- [4] 石洪华, 王晓丽, 王媛, 等. 北长山岛森林乔木层碳储量及其影响因子[J]. 生态学报, 2013, 33(19): 6363-6372.
- [5] Qie L, Lee T M, Sodhi N S, et al. Dung beetle assemblages on tropical land-bridge islands: small island effect and vulnerable species [J]. Journal of Biogeography, 2011, 38(4):792-804.
- [6] Bustamante-Sánchez M A, Armesto J J, Landis D. Seed limitation during early forest succession in a rural landscape on Chiloé Island, Chile: implications for temperate forest restoration [J]. Journal of Applied Ecology, 2012, 49(5): 1103-1112.
- [7] Heywood V H. Global biodiversity assessment [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [8] Cardinale B J, Srivastava D S, Duffy J E, et al. Effects of biodiversity on the functioning of trophic groups and ecosystems [J]. Nature, 2006, 443: 989-992.
- [9] 马克平. 生物多样性与生态系统功能的实验研究[J]. 生物多样性, 2013, 21(3): 247-248.
- [10] Rosoman G. The plantation effects [M]. Greenpeace New Zealand, 1994, 48p.
- [11] Michelsen O, McDevitt J E, Coelho C R V. A comparison of three methods to assess land use impacts on biodiversity in a case study of forestry plantations in New Zealand [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2014, 19: 1214-1225.
- [12] 石洪华, 郑伟, 丁德文, 等. 典型海岛生态系统服务及价值评估[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(6):743-748.
- [13] 任丽君, 徐志宏, 卢剑波, 等. 千岛湖岛屿特征与节肢动物多样性的关系[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9):2255-2261.
- [14] Chen X Y, He F L. Speciation and endemism under the model of island biogeography [J]. Ecology, 2009, 90:39-45.
- [15] 池源, 石洪华, 王晓丽, 等. 庙岛群岛南五岛生态系统净初级生产力空间分布及其影响因子[J]. 生态学报, 2013, 33(19): 6363-6372.

2015,35(23) DOI: 10.5846/stxb201405040880

- [16] 郑伟, 沈程程, 乔明阳, 等.长岛自然保护区生态系统维护的条件价值评估[J]. 生态学报, 2014, 34(1):82-87.
- [17] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [18] 张金屯.数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [19] 马克平, 刘玉明.生物群落多样性的测度方法: $I \alpha$ 多样性的测度方法(下) [J]. 生物多样性, 1994, 2(4):231-239.
- [20] Nekola J C, White P S The distance decay of similarity in biogeography and ecology. *Journal of Biogeography*, 1999, 26: 867-878.
- [21] MacNally R, Fleishman E, Bulluck L P, et al. Comparative influence of spatial scale on beta diversity within regional assemblages of birds and butterflies. *Journal of Biogeography*, 2004, 31: 917-929.
- [22] Qian H. Global comparisons of beta diversity among mammals, birds, reptiles, and amphibians across spatial scales and taxonomic ranks. *Journal of Systematics and Evolution*, 2009, 47 (5):509-514.
- [23] 李军玲, 张金屯, 邹春辉, 等.旅游开发下普陀山植物群落类型及其排序[J]. 林业科学, 2012, 48(7):174-181.
- [24] 江源, 黄晓霞, 刘全儒,等. 五台山高山、亚高山草甸植物多样性格局分析[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2009, 45(1):91-95.
- [25] 刘旻霞, 王刚. 高寒草甸植物群落多样性及土壤因子对坡向的响应[J]. 生态学杂志, 2013, 32(2):259-265.
- [26] 聂莹莹, 李新娥, 王刚. 阳坡-阴坡生境梯度上植物群落 α 多样性与 β 多样性的变化模式及与环境因子的关系[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2010, 46(3):73-79.
- [27] 杨子松, 权秋梅. 岷江上游干旱河谷荒坡植物群落的 β 多样性分析[J]. 中国水土保持, 2013(1): 50-53.
- [28] Currie J D, Paquin V .Large-scale biogeographical patterns of species richness of trees [J]. *Nature*,1987, 329: 326-327.
- [29] Elton C S. The ecology of invasions by animals and plants [M]. Chicago: University of Chicago Press, 2000.
- [30] Khattak R A, Hussain Z. Evaluation of soil fertility status and nutrition of orchards [J]. *Soil & Environment*, 2007, 226: 22-32.
- [31] 冯宗炜, 王效科, 吴刚. 中国森林生态系统的生物量和生产力[M]. 北京:科学出版社, 1999.
- [32] Jocque C A. A terrestrial baselines study of the Viphya Pulpmill project area [M]. Rome: FAO, 1977.
- [33] Allen R B, Platt K H, Coker R E J. Understory species composition patterns in a *Pinus radiata* D. Don plantation on the central North Island Volcanic Plateau, New Zealand [J]. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 1995, 25: 301-317.
- [34] Young A, Mitchell N. Microclimatic and vegetation edge effects in a fragmented podocarp-broadleaf forest in New Zealand [J]. *Biological Conservation*, 1994, 67: 63-72.