

福建平潭无居民岛屿空间特征对植物多样性的影响

张 群¹, 刘 阳¹, 陈 颖¹, 谢艳秋¹, 张琳婷², 邓传远^{1*}

(1 福建农林大学 风景园林与艺术学院, 福州 350002; 2 自然资源部海岛研究中心, 福建平潭 350400)

摘 要: 为了明确岛屿空间特征对植物物种多样性的影响, 该研究应用样线法和样方法对福建省平潭主岛周边 19 座无居民海岛进行植被调查, 统计分析每座岛屿的物种丰富度和典型植物群落的 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数; 采用多种函数对种-面积关系进行拟合, 并利用冗余分析影响岛屿典型植物群落物种多样性的空间因素, 以探究岛屿植物物种多样性的形成与维持机制。结果表明: (1) 平潭主岛周边 19 座无居民岛屿中有 12 座岛屿以典型的岛屿森林群落为主, 有 2 座岛屿以灌草丛为主且缺乏乔木层, 有 5 座岛屿只有草丛覆盖。 (2) 19 座岛屿的植物物种丰富度均随岛屿面积的增加而增加, 当岛屿面积增加到 7.184 hm² 时, 物种数量增加的速率减慢。 (3) 岛屿的面积、周长、周长面积比、近岸距离是影响物种多样性的主要空间特征, 其中岛屿的面积、周长越大, 周长面积比、近岸距离越小, 岛屿的物种丰富度越高。 (4) 在岛屿典型植物群落中, 乔木层的物种多样性主要受岛屿面积、周长、周长面积比的影响, 而灌、草层的物种多样性主要受近岸距离的影响。研究认为, 岛屿面积达到 7.184 hm² 是能够保证大部分常见植物种的生存空间; 距离大陆越近的岛屿越有利于物种间的扩散, 其物种的迁入率越高, 从而使岛屿的物种多样性提高。

关键词: 平潭无居民岛屿; 植被群落; 空间特征; 物种多样性

中图分类号: Q948.11; Q151.95

文献标志码: A

Effects of Spatial Characteristics on Plant Diversity on Uninhabited Islands in Pingtan, Fujian

ZHANG Qun¹, LIU Yang¹, CHEN Ying¹, XIE Yanqiu¹, ZHANG Linting², DENG Chuanyuan^{1*}

(1 College of Landscape Architecture and Art, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2 Island Research Center, Ministry of Natural Resources, Pingtan, Fujian 350400, China)

Abstract: In order to clarify the impact of island spatial characteristics on plant species diversity, this study applied the sample line method and sampling method to conduct vegetation survey on 19 uninhabited islands around the main island of Pingtan, Fujian Province, and statistically analyzed the species richness of each island and the Margalef richness index, Shannon-Wiener diversity index, Simpson diversity index and Pielou evenness index of typical plant communities. We used multiple functions to fit the species-area relationship, and used Redundancy analysis to explore the spatial factors that affect the species diversity of typical plant communities on the island, so as to explore the formation and maintenance mechanism of

收稿日期: 2022-05-08; 修改稿收到日期: 2023-02-16

基金项目: 福建省科技计划 (2018Y3006); 2019 年度福建省科技特派员工作经费 (KTP19186A); 福建农林大学科技创新专项基金 (CXZX2019086)

作者简介: 张 群 (1998—), 男, 在读硕士研究生, 研究方向为海岛植被生态与植物资源应用。E-mail: 1916927220@qq.com

* 通信作者: 邓传远, 副教授, 研究方向为海岛植物资源与海岛生态优化。E-mail: dengchuanyuan@fafu.edu.cn

plant species diversity on the islands. The results show that: (1) among the 19 uninhabited islands around the main island of Pingtan, 12 islands are dominated by typical island forest communities, 2 islands are dominated by shrub and grass layers and lack of tree layer, and 5 islands are only covered by grass. (2) The plant species richness of the 19 islands increased with the increase of the island area. When the island area increased to 7.184 hm², the rate of species increase slowed down. (3) The area, perimeter, perimeter area ratio and inshore distance of the island are the main spatial characteristics that affect species diversity. The larger the area and perimeter of the island, the smaller the perimeter area ratio and inshore distance, the higher the species richness of the island. (4) In the typical plant communities of the island, the species diversity of the tree layer is mainly affected by the island area, perimeter and perimeter area ratio, while the species diversity of the shrub and grass layers is mainly affected by the inshore distance. According to the research, the island area of 7.184 hm² can guarantee the survival space of most common plant species. The closer the island is to the mainland, the more conducive it is to the spread of species, and the higher its species immigration rate, thus improving the island's species diversity.

Key words: Pingtan uninhabited island; vegetation community; spatial characteristics; species diversity

海岛由于海水阻隔而与陆地产生隔离,形成了特殊的生境,具有地理隔离、生物类群简单等特点,多种因素导致了海岛生态的脆弱性^[1-2]。植被作为海岛生态环境的重要组成部分,是影响海岛生态系统的重要因素,开展海岛物种丰富度和物种多样性及其分布格局的调查研究,对于建设生态海岛具有重要意义^[3]。种-面积关系是生态学理论中建立较早的模型之一,它将物种数量和面积的关系简化为一个数学公式,定量表达了物种丰富度随取样面积增大而不断增加的变化趋势^[4-5]。岛屿生物地理学理论认为岛屿上物种的丰富度取决于面积和隔离程度,面积决定了物种的灭绝率,隔离程度决定了物种的迁入率^[5]。该理论被提出后迅速发展,其应用之广,影响之深,超过其他有关岛屿的生态学理论,但是也伴随着许多争议^[1]。后来有学者指出岛屿的物种数量除了受面积、隔离程度影响外,还有受其他因素的影响,比如 Robert T. McMaster^[6]研究发现美国东北部和加拿大东南部海岸附近 22 座岛屿的植物物种丰富度受岛屿面积、纬度和近岸距离的影响;王金旺等^[5]与肖兰等^[7]研究指出,除岛屿面积和隔离程度外,岛屿的岸线长度、最高点高程、周长面积比、形状指数和岛屿生境多样性也显著影响植物的物种丰富度。由此可见影响岛屿物种丰富度的因素是比较复杂的,并且由于研究区域的不同,影响因素也会存在差异,传统的岛屿生物地理学理论并不完善,后人正通过不断研究对该问题进行补充。

岛屿生物地理学理论有一定的局限性,它把岛屿几乎所有的生物学特征都归结为一个变量,即物种数量,只关注岛屿上物种数目与面积的关系,而没有考虑到物种内部个体的大小与分布情况^[8]。物种

多样性能够表征生物群落和生态系统的结构复杂性,体现群落的结构类型、组织水平、发展阶段、稳定程度和生境差异,具有重要的生态学意义,一般利用多样性指数反映物种多样性水平^[9]。有学者研究了岛屿面积、隔离程度与物种多样性的关系,比如孙雀等^[10]将面积与多样性指数进行拟合,结果表明千岛湖地区岛屿的植物群落中仅有乔木和木本植物的 Shannon-Wiener 多样性指数与岛屿面积关系拟合较好;朱晓彤^[11]指出舟山群岛地区木本植物物种多样性的生物地理格局符合岛屿生物地理学理论,即物种多样性随海岛面积的增大而增加,随离大陆距离的增加而降低。由于生物多样性水平不只是与物种数量有关,那么物种多样性是否也直接受到岛屿面积、隔离程度等空间特征的影响还未有定论。本研究对平潭周边地区的 19 座岛屿进行了植被调查,旨在探究岛屿的空间特征对岛屿的物种丰富度和典型植物群落多样性的影响。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

平潭位于福建省东部(25°15'~25°45'N,119°32'~120°10'E),隔台湾海峡与台湾相望,由以平潭岛(或称海坛岛)为主岛的 126 个岛屿组成。平潭属于亚热带海洋性季风气候,温暖湿润,雨量充沛,年平均降水量为 900~2 100 mm,多集中在 2~6 月;季风显著,夏季偏南风,其余季节主要为东北风,年平均风速 6.9 m/s,全年有 125 d 以上都是大风天气(风力 7 级以上),并常遭受台风影响,是福建省强风区之一;年均温 19.6℃,全年最热日和最冷日均温分别是 27.9℃、10.2℃;年均蒸发量(1 300 mm)

大于年均降雨量(1 172 mm),夏季常高温干旱^[12-13]。平潭周边分布有大大小小的众多海岛,是研究海岛植被的天然实验室,本研究选取了平潭主岛周边 19 座无居民海岛进行研究,分别是北香炉屿、大嵩岛、小嵩岛、红山屿、光幼屿、黄门岛、龙母屿、大怀屿、北官屿、姜山岛、白姜岛、大屿岛、赤鞋特岛、横屿、山白岛、山洲岛、坪洲岛、东洲岛、古螺屿,各岛屿位置分布见图 1。

1.2 研究方法

1.2.1 岛屿植被数据的获取 19 座岛屿的植被数据来源于课题组自 2019 至 2020 年的海岛植被调查。植被调查采取样线法和样方法相结合的方式进行。样线法设置方法为环岛样线和东西向或南北向沿岛屿中部设置样线的方式,记录样线左右 5 m 出现的植物,并结合样方法记载到的植物种类,统计岛屿的物种丰富度。采用样方法对岛屿上典型植被群落进行调查,根据岛上的植被情况,有乔木分布则设置 20 m×20 m 的森林样方,只有灌丛分布的则设置 10 m×10 m 的灌丛样方,记录每个样方的物种与环境信息,灌木和草本记录植物的种名、高度、冠幅、数量、盖度,乔木在灌草记录的指标上补充记录

其胸径^[14]。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,邀请植物分类专家及参考《福建植物志》^[15]、《中国植物志》^[16]资料鉴定。

1.2.2 岛屿空间特征数据的获取 利用岛屿面积(area,A)、周长(perimeter,Per)、最高点高程(highest

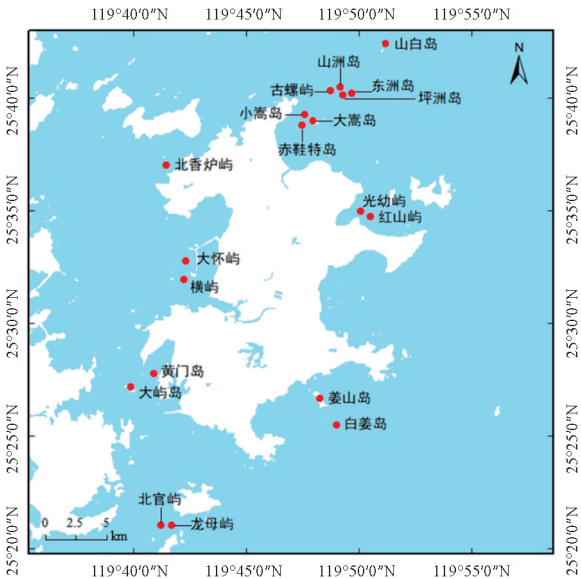


图 1 岛屿位置分布图
Fig.1 Location distribution of islands

表 1 岛屿基本信息
Table 1 Basic information of the island

岛屿名称 Name of the island	面积 Area /m ²	周长 Perimeter /m	最高点高程 Highest point elevation/m	近岸距离 Inshore distance/km	距平潭岛距离 Distance from Pingtan Island/m	物种丰富度 Species richness
北香炉屿 BXLY	40 952.4	845.7	15.6	9.79	598.3	111
大嵩岛 DSD	282 400.1	2 503.4	51.8	20.14	1 162.1	144
小嵩岛 XSD	55 469.1	1 340.8	36.8	19.43	878.5	110
红山屿 HSY	30 676.6	1 015.0	20.8	23.05	677.7	53
光幼屿 GYY	62 157.6	1 075.4	24.2	22.57	319.2	77
黄门岛 HMD	71 845.2	1 417.3	34.7	3.89	154.2	114
龙母屿 LMY	28 815.6	801.2	20.2	3.88	8140.0	102
大怀屿 DHY	37 095.8	969.4	26.8	9.07	630.0	94
北官屿 BGY	149 868.7	1 739.5	40.9	3.23	8 420.0	103
姜山岛 JSD	402 440.6	4 739.7	68.0	15.01	1 120.0	115
白姜岛 BJD	36 656.8	1 092.2	33.6	16.12	3 920.0	57
大屿岛 DYD	221 622.0	2 715.7	45.1	2.35	1 036.0	106
赤鞋特岛 CXTD	23 101.0	736.8	28.9	19.77	1 144.5	31
横屿 HY	30 528.9	891.0	22.0	8.84	520.0	71
山白岛 SBD	17 963.8	578.5	34.6	22.75	8 205.5	21
山洲岛 SZD	39 916.9	877.4	52.2	20.74	3 298.3	43
坪洲岛 PZD	50 176.9	909.1	40.0	21.09	3 382.1	44
东洲岛 DZD	33 803.0	937.2	36.0	21.27	4 106.5	15
古螺屿 GLY	10 238.1	428.4	33.2	20.33	2 635.1	31

point elevation, H)、近岸距离 (inshore distance, I_d)、距平潭岛距离 (distance from Pingtan Island, D)、周长面积比 (perimeter area ratio, PAR)、形状指数 (Shape index, SI) 来描述岛屿的空间特征, 从自然资源部海岛研究中心平台获取了海岛面积、岸线长度、近岸距离、距平潭岛距离、最高点高程 5 项基础数据 (表 1)。根据面积、岸线长度计算岛屿的周长面积比、形状指数, 其中 PAR=Per/A, 为岛屿边缘的相对长度, 表征岛屿的边缘效应; SI 反映岛屿形状的复杂程度, 由公式 SI=Per/[2×(Π×A)^{0.5}] 计算而得^[5,7]。物种丰富度 (species richness, S) 为样线法结合样方法进行植物调查所得物种数量。

1.2.3 数据处理与分析 岛屿上典型植物群落的物种重要值 (IV)、Margalef 丰富度指数 (D_m)、Shannon-Wiener 多样性指数 (H'_e)、Simpson 多样性指数 (D)、Pielou 均匀度指数 (J_e) 的计算公式^[17-19] 如下:

乔木层重要值: IV=(相对密度+相对显著度+相对频度)/3

灌木层、草本层重要值: IV=(相对盖度+相对高度)/2

Margalef 丰富度指数: $D_m = \frac{(S-1)}{\ln N}$

Shannon-Wiener 多样性指数: $H'_e = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$

Simpson 优势度指数: $D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$

Pielou 均匀度指数: $J_e = \frac{H'_e}{\ln S}$

式中, S 为样方内物种数, N 为所有物种个体的总数, $i=1,2,3,\dots,S$, P_i 为物种的重要值。

岛屿种-面积关系的拟合使用非分段函数与分段函数, 其中非分段函数为线性函数、二次函数、三次函数、复合函数、幂函数、S 型曲线、增长函数、指数函数、对数函数, Logistic 函数和逆函数共 11 种方程, 在 SPSS 23.0 中进行拟合^[7]。分段函数的拟合使用 segmented 程序包进行拟合并画图, 该过程在 R 4.0.4 中进行。物种的重要值和多样性指数的计算在 Excel 软件中进行, 运用冗余分析 (redundancy analysis) 探究影响植物物种多样性的因素^[20-21], 分析过程在 Canoco 5.0 中完成。

2 结果与分析

2.1 岛屿种-面积关系拟合

从选定的 12 种函数的拟合情况来看 (表 2), 对数函数 ($R^2=0.529, P<0.05$) 和分段函数 ($R^2=0.559, P<0.05$) 对种-面积关系的拟合度最高, 选择拟合度最高的 2 个曲线拟合图来表现种-面积关系 (图 2)。岛屿的物种数随岛屿面积的增加而增加, 在岛屿面积较小时, 物种数随着面积的增加而迅速增加, 但当岛屿面积增大到 7.184 hm² 后, 物种数增加的速率开始减慢。

表 2 函数拟合统计量
Table 2 Function fitting statistics

函数模型 Functional model		函数方程 Functional equation	R ²	P
线性函数 Linear function	S = 2.218A + 56.919		0.372	0.006
对数函数 Logarithmic function	S = 27.598 + 29.289lnA		0.529	0.000
逆函数 Inverse function	S = -114.743/A + 107.005		0.434	0.002
二次函数 Quadratic function	S = -0.13A ² + 7.070A + 38.654		0.495	0.004
三次函数 Cubic function	S = 0.006A ³ - 0.52A ² + 13.046		0.524	0.009
复合函数 Compound function	S = e ^{18.919} · 2.809 ^A		0.270	0.023
幂函数 Power function	S = e ^{30.727} · A ^{0.448}		0.432	0.002
S 型函数 Sigmoid function	S = e ^(4.669 - 1.865/A)		0.400	0.004
增长函数 Growth function	S = e ^(3.89 + 0.32A)		0.270	0.023
指数函数 Exponential function	S = e ^{48.919} · e ^{0.32A}		0.270	0.023
Logistic 函数 Logistic function	S = 1/(1.02 · e ^{0.969A})		0.270	0.023
分段函数 Piecewise function	S = (A<7.184)(17.565+12.442A) + (A≥7.184)(103.004+0.549A)		0.559	0.015

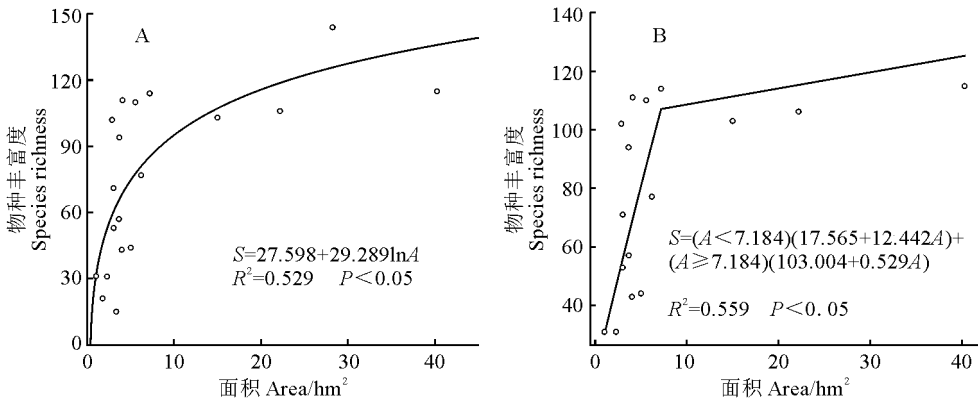
注: R² 表示方程拟合度, P 表示显著性
Note: R² represents the fitting degree of the equation, and P represents significance

2.2 岛屿植物物种多样性的影响因素

2.2.1 19座岛屿典型植物群落物种多样性概况

平潭主岛周边19座岛屿植物群落乔、灌、草三层的物种多样性指数见表3。岛屿典型植物群落不同层

次的Margalef丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数、Simpson多样性指数和Pielou均匀度指数整体为草本层>灌木层>乔木层。19座岛屿中有12座岛屿以典型的岛屿森林群落为主,有2座岛屿



A. 对数函数拟合;B. 分段函数拟合
图2 19座岛屿的种-面积关系
A. Logarithmic function fit; B. Piecewise function fit
Fig.2 Species area relationship of the 19 islands

表3 海岛典型植被群落多样性指数

Table 3 Diversity indexes of typical vegetation communities on the islands

岛屿名称 Name of the island	乔木层 Tree layer				灌木层 Shrub layer				草本层 Grass layer			
	D_m	H'_e	D	J_e	D_m	H'_e	D	J_e	D_m	H'_e	D	J_e
北香炉岛 BXLY	0.33	0.71	0.48	0.64	1.96	0.86	0.40	0.33	3.59	2.57	0.91	0.86
大嵩岛 DSD	1.25	1.34	0.67	0.61	2.09	1.62	0.69	0.58	4.83	2.60	0.89	0.75
小嵩岛 XSD	0.38	0.69	0.44	0.63	1.19	0.95	0.44	0.43	1.90	1.89	0.82	0.82
红山岛 HSY	0.22	0.10	0.04	0.14	1.41	1.64	0.77	0.71	2.06	1.73	0.74	0.70
光幼岛 GYY	0.50	0.60	0.30	0.43	2.39	1.87	0.76	0.68	4.26	2.25	0.84	0.71
黄门岛 HMD	0.64	0.28	0.11	0.17	2.83	1.83	0.77	0.61	4.26	1.93	0.76	0.67
龙母岛 LMY	1.05	1.06	0.60	0.54	2.44	1.53	0.70	0.53	4.53	2.52	0.86	0.83
大怀岛 DHY	0.58	0.59	0.31	0.42	2.16	1.92	0.79	0.71	4.00	2.40	0.88	0.79
北官岛 BGY	0.50	0.40	0.23	0.29	3.03	2.26	0.86	0.75	3.89	2.01	0.78	0.66
姜山岛 JSD	0.35	0.89	0.56	0.81	2.12	1.01	0.55	0.39	4.39	2.07	0.76	0.66
白姜岛 BJD	0.00	0.00	0.00	0.00	1.09	1.76	0.80	0.85	4.42	2.21	0.86	0.73
大屿岛 DYD	0.00	0.00	0.00	0.00	2.29	1.58	0.70	0.69	2.35	2.05	0.84	0.89
赤鞋特岛 CXTD	—	—	—	—	2.41	0.46	0.16	0.20	2.73	1.55	0.73	0.80
横岛 HY	—	—	—	—	0.00	0.00	0.00	0.00	5.54	2.06	0.74	0.60
山白岛 SBD	—	—	—	—	—	—	—	—	2.13	1.38	0.62	0.63
山洲岛 SZD	—	—	—	—	—	—	—	—	2.77	1.41	0.64	0.57
坪洲岛 PZD	—	—	—	—	—	—	—	—	2.30	1.88	0.81	0.68
东洲岛 DZD	—	—	—	—	—	—	—	—	1.31	1.55	0.73	0.74
古螺岛 GLY	—	—	—	—	—	—	—	—	1.81	2.08	0.85	0.84

注: D_m . Margalef 丰富度指数; H'_e . Shannon-Wiener 多样性指数; D. Simpson 多样性指数; J_e . Pielou 均匀度指数
Note: D_m . Margalef richness index; H'_e . Shannon-Wiener index; D. Simpson index; J_e . Pielou index

典型植物类型以灌草丛为主,缺乏乔木层,有 5 座岛屿只有草丛覆盖。乔木层的 Margalef 丰富度指数在 0~1.25,Shannon-Wiener 多样性指数在 0~1.34,Simpson 多样性指数在 0~0.67,Pielou 均匀度指数在 0~0.81,其中大嵩岛的物种多样性最高,白姜岛、大屿岛因只有一种乔木,物种多样性最低。灌木层的 Margalef 丰富度指数在 0~3.03,Shannon-Wiener 多样性指数在 0~2.26,Simpson 多样性指数在 0~0.86,Pielou 均匀度指数在 0~0.85,其中北官岛的物种多样性最高,14 座具有灌木组成的岛屿中,横屿由于只有一种灌木,物种多样性最低。19 座岛屿的草本层均具有较高的物种多样性,Margalef 丰富度指数在 1.31~5.54,Shannon-Wiener 多样性指数在 1.41~2.60,Simpson 多样性指数在 0.62~0.91,Pielou 均匀度指数在 0.57~0.89。

2.2.2 岛屿空间特征与物种多样性的冗余分析

以岛屿的 7 项空间特征作为解释变量,岛屿的物种丰富度和典型植物群落的各层次的多样性指数作为响应变量,进行 RDA 分析,进而筛选出四个对物种多样性有显著影响的空间特征($P<0.05$),分别是岛屿面积、周长、近岸距离和周长面积比。以上四项空间特征对物种多样性变异的总解释量为 65.4%,第一轴的解释量为 65.35%,占总解释量的 99.98%,且第一轴通过了蒙特卡罗 (Monte Carlo) 检验($P=0.002$),说明排序结果可信,并且仅第一轴就能够较好地解释物种多样性与环境因子的关系。

RDA 排序图中(图 3),红色空间箭头代表岛屿空间特征,蓝色实心箭头代表物种多样性指数,箭头间的余弦值表示变量之间的相关性^[22]。RDA 排序图表明,解释变量中岛屿的面积、周长之间为正相关,其两者与周长面积比为负相关,近岸距离与其他三项空间特征相关性不显著。响应变量中各项物种多样性指标之间也具有一定的相关性,岛屿物种丰

富度与典型植物群落各层次的物种多样性指数为正相关。岛屿物种丰富度与第一轴的夹角最小,与典型植物群落各层次的物种多样性指数相比,受到空间特征的影响较大,其与面积、周长为正相关,与近岸距离、周长面积比为负相关。在典型植物群落中,乔木层的物种多样性与岛屿面积、周长、周长面积比的相关性更大,为正相关,与近岸距离的相关性较小;灌、草层的物种多样性与岛屿的近岸距离相关性更大,为负相关,与面积、周长、周长面积比的相关性较小。

通过单独效应与条件效应统计表(表 4)可知,在单独效应中,岛屿的周长面积比、面积、周长和近岸距离对物种多样性的单独解释量较高($P<0.01$),

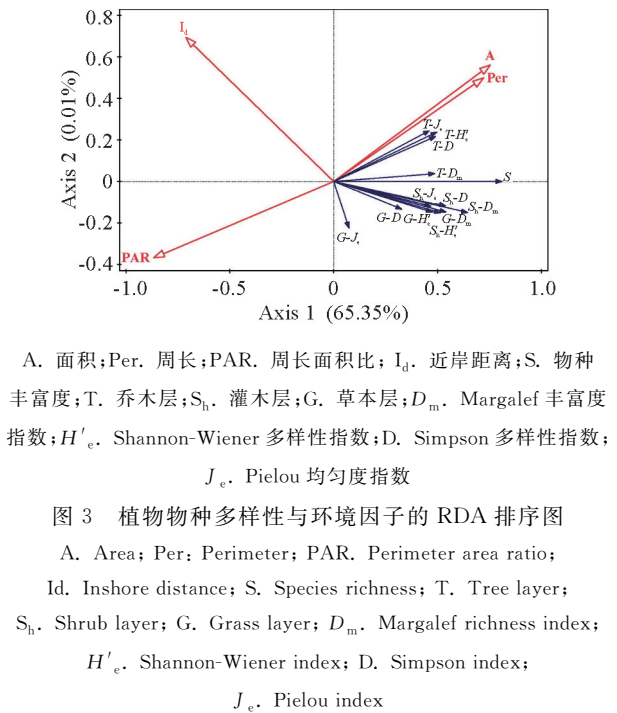


图 3 植物物种多样性与环境因子的 RDA 排序图

表 4 单独效应与条件效应统计表

Table 4 Statistical table of simple effect and conditional effect

单独效应 Simple effect				条件效应 Conditional effect			
变量 Variable	解释量 Explains/%	F	P	变量 Variable	解释量 Explains/%	F	P
PAR	49.0	16.3	0.002 **	PAR	49.0	16.3	0.004 **
A	37.1	10.0	0.002 **	Id	13.4	5.7	0.04 *
Per	33.9	8.7	0.006 **	A	2.7	1.1	0.354
Id	33.1	8.4	0.004 **	Per	0.3	0.1	0.752

注:PAR. 周长面积比;A. 面积;Per. 周长;Id. 近岸距离. **, $P<0.01$; *, $P<0.05$
Note:PAR. Perimeter area ratio; A. Area; Per. Perimeter; Id. Inshore distance. **, $P<0.01$; *, $P<0.05$

分别为 49.0%、37.1%、33.9% 和 33.1%。在条件效应中,周长面积比、近岸距离对物种多样性有着较高的解释量($P < 0.05$),分别为 49.0% 和 13.4%,而岛屿面积和周长的解释量变得较小且不显著($P > 0.05$),并且由于面积、周长、周长面积比之间存在较强相关性,所以三者对物种多样性的变异存在共同解释部分,周长面积比对面积、周长产生的效应存在遮掩,即岛屿的面积、周长是通过周长面积比来影响植物物种多样性的。

3 讨 论

3.1 岛屿物种丰富度的影响因素

从 19 座岛屿的种-面积拟合结果来看,物种丰富度与面积的关系遵循对数函数的规律,结果符合岛屿生物地理学中面积与物种丰富度的关系。拟合模型的选择除了研究者们常用的函数模型外,还运用了分段函数进行拟合,拟合效果较好,也能直观地体现出物种数随面积增加速率变化的拐点,可以用来表达种-面积的关系。在平潭主岛周边的 19 座岛屿中,当岛屿面积大于 7.184 hm^2 时,面积的增加对于物种数量的影响减小。岛屿面积影响着物种的生存空间,面积越大,包含的异质生境类型就越多,供植物生存空间也越大,物种生存的概率也随之增加^[13]。所以对于该地区的小型海岛来说,面积为 7.184 hm^2 大的岛屿能够保证大部分植物常见种的生存空间。

除了岛屿的面积以外,周长、周长面积比、近岸距离也影响着岛屿植物的物种丰富度。周长面积比常用来表征边缘效应,但对于岛屿来说,反映的却是岛屿岸线的相对长度,体现的是小型岛屿沿岸带岩石裸露区所占岛屿面积的大小^[5,23]。研究结果中周长面积比的解释率最高,并且遮掩了面积、周长产生的效应,是因为其由面积、周长计算而来,与面积、周长存在共线性,而且周长面积比相较于岛屿的面积、周长,更能体现植被在岛屿上的实际生存空间,所以周长面积比的解释率最高。岛屿上物种的来源,一般是起源于邻近的大陆或较大的岛^[24]。岛屿的近岸距离限制了物种的迁入与迁出,岛屿距离大陆越远,物种的传播就越困难。从 19 座岛屿的分布位置来看,近岸距离的差异要比距平潭岛距离的差异更大,其对物种丰富度产生了显著影响,说明平潭岛周边的 19 座岛屿上物种来源不只是平潭岛,还受到大陆的影响。有相关研究^[7,25]指出岛屿的最高点高程显著影响物种丰富度,但是由于研究区各岛屿的海

拔均较低,最高点高程最大的仅为 68.0 m ,地形缺乏起伏,且岛屿形状复杂程度差异不强,对物种丰富度的影响并不显著。

3.2 岛屿典型植物群落物种多样性的影响因素

物种多样性是群落生态学的核心问题,也是生态学的中心议题之一,为了解释物种多样性,许多学者提出了不同假说,比如生产力学说、空间异质性学说、气候稳定性学说等^[26]。张大勇等^[26]融合了各种多样性学说,提出群落内物种多样性受到 4 个基本因子所控制,它们分别是:生态位的数量、区域物种库的大小、物种迁入速率以及物种灭绝速率。研究结果显示岛屿面积对典型植物群落中乔木层的物种多样性影响较大,而对灌、草层的物种多样性影响较小,因为乔木生存需要较大的生存空间,面积较小的岛屿通常无法形成典型森林群落,即使有乔木种类生存,也会因生存空间的不足有灭绝的危险,所以乔木层的物种多样性受到岛屿面积的影响较大。灌木、草本生存所需空间相较于乔木小得多,所以受到岛屿面积的制约较小。

种库假说认为种库在空间上主要有两个层次:区域种库和实际种库,前者指某一生境所拥有的潜在物种数量,主要由生物地理过程所决定;后者则为调查的群落中实际出现的物种数量,植物群落的实际种库大小受到区域种库的显著影响^[27-28]。研究结果显示岛屿的近岸距离对典型植物群落中乔木层的物种多样性影响较小,对灌、草层的物种多样性影响较大。因为平潭岛及周围的岛屿上分布的典型森林群落类型较少,主要有木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)林、台湾相思(*Acacia confusa*)林和黑松(*Pinus thunbergii*)林,且通常由人工种植^[29-30],所以在平潭地区的区域种库内乔木的种类较少,在每座岛屿的实际种库中乔木种类会更少,所以乔木层物种多样性受到近岸距离的限制较小。灌木、草本能较好地适应岛屿环境,且种类相对较多,其种子的传播一般借助风力、海水或鸟类^[7,31],这种传播方式会受到近岸距离影响,距离大陆越近的岛屿,越有利于物种间的扩散,其物种的迁入率越高,从而导致物种多样性增加。

物种多样性指数综合表现了群落中物种的丰富度和不同物种多度分布的均匀程度,多样性指数越高说明群落中物种数量多,不同物种的个体数量分布越均匀^[19,32]。本研究未对群落中物种的均匀度的影响因素进行探讨,因为物种的均匀度情况可能与群落内部物种生态位特征或种间关系有关,比如

张贵平^[33]指出物种的分布频数与物种生态位宽度有很大关系;魏凯等^[34]指出台湾相思、紫珠(*Calli-carpa bodinieri*)在调查中分布较广,并且在各群系分布较为均匀,导致生态位宽度最大。本研究探讨

了生物地理层面各因素对于岛屿植物物种多样性的影响,未涉及群落内部的生态过程,比如群落内竞争、捕食关系等,所以有待进一步研究。

参考文献:

[1] 邬建国. 岛屿生物地理学理论: 模型与应用[J]. 生态杂志, 1989, **8**(6): 34-39.
WU J G. The theory of island biogeography: Model and application[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1989, **8**(6): 34-39.

[2] 池源, 石洪华, 郭振, 等. 海岛生态脆弱性的内涵、特征及成因探析[J]. 海洋学报, 2015, **37**(12): 93-105.
CHI Y, SHI H H, GUO Z, *et al.* Connotation, features and causes of island ecological vulnerability[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, **37**(12): 93-105.

[3] 位彬, 衣华鹏, 祝贺, 等. 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 H P, ZHU H, *et al.* Species diversity and spatial pattern of plants on Nanchangshan Island[J]. *Journal of Ludong University* (Natural Science Edition), 2019, **35**(1): 14-22.

[4] GLEASON H A. On the relation between species and area[J]. *Ecology*, 1922, **3**(2): 158-162.

[5] 王金旺, 魏馨, 陈秋夏, 等. 温州沿海小型海岛植物丰富度和 β 多样性及其影响因子[J]. 生态学报, 2017, **37**(2): 523-540.
WANG J W, WEI X, CHEN Q X, *et al.* Factors affecting species richness and beta diversity of vascular plants on small Islands in the Wenzhou region of Eastern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(2): 523-540.

[6] MCMASTER R T. Factors influencing vascular plant diversity on 22 islands off the coast of eastern North America[J]. *Journal of Biogeography*, 2005, **32**(3): 475-492.

[7] 肖兰, 张琳婷, 杨盛昌, 等. 厦门近岸海域无居民海岛植物区系和物种组成相似性[J]. 生物多样性, 2018, **26**(11): 1 212-1 222.
XIAO L, ZHANG L T, YANG S C, *et al.* Flora and species composition similarity of the uninhabited islands in the near-shore Xiamen [J]. *Biodiversity Science*, 2018, **26**(11): 1 212-1 222.

[8] 赵淑清, 方精云, 雷光春. 物种保护的理论基础——从岛屿生物地理学理论到集合种群理论[J]. 生态学报, 2001, **21**(7): 1 171-1 179.
ZHAO S Q, FANG J Y, LEI G C. Theoretical basis for species conservation: From the theory of island biogeography to metapopulation dynamic theory[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(7): 1 171-1 179.

[9] 许晴, 张放, 许中旗, 等. Simpson 指数和 Shannon-Wie-

ner 指数若干特征的分析及“稀释效应”[J]. 草业科学, 2011, **28**(4): 527-531.
XU Q, ZHANG F, XU Z Q, *et al.* Some characteristics of Simpson index and the Shannon-Wiener index and their dilution effect[J]. *Pratacultural Science*, 2011, **28**(4): 527-531.

[10] 孙雀, 卢剑波, 张凤凤, 等. 植物物种多样性与岛屿面积的关系[J]. 生态学报, 2009, **29**(5): 2 195-2 202.
SUN Q, LU J B, ZHANG F F, *et al.* Plant species diversity in relation to island size[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(5): 2 195-2 202.

[11] 朱晓彤. 舟山群岛木本植物物种与功能多样性的分布格局及影响因素[D]. 上海: 华东师范大学, 2020.

[12] 张增可, 吴雅华, 黄柳菁, 等. 海岛森林不同演替阶段土壤和植物的碳、氮、磷化学计量特征[J]. 西北植物学报, 2019, **39**(5): 925-934.
ZHANG Z K, WU Y H, HUANG L J, *et al.* C, N and P stoichiometry of soil and plant in different forest successional stages in island[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, **39**(5): 925-934.

[13] 谢艳秋, 黄晖, 曾纪毅, 等. 福建大型海岛山体植物组成及其空间特征影响因素研究[J]. 西北植物学报, 2021, **41**(12): 2 142-2 152.
XIE Y Q, HUANG H, ZENG J Y, *et al.* Study on the plants composition and affecting factors of spatial characteristics of large-scale island mountains in Fujian Province[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(12): 2 142-2 152.

[14] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范[J]. 生物多样性, 2009, **17**(6): 533-548.
FANG J Y, WANG X P, SHEN Z H, *et al.* Methods and protocols for plant community inventory[J]. *Biodiversity Science*, 2009, **17**(6): 533-548.

[15] 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.

[16] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志-第一卷-总论[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

[17] 王育松, 上官铁梁. 关于重要值计算方法的若干问题[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2010, **33**(2): 312-316.
WANG Y S, SHANGGUAN T L. Discussion on calculating method of important values[J]. *Journal of Shanxi University* (Natural Science Edition), 2010, **33**(2): 312-316.

[18] 陈胜群, 韦小丽, 安明态, 等. 贵州百里杜鹃自然保护区不同演替阶段植物群落物种多样性[J]. 西北植物学报, 2019, **39**(7): 1 298-1 306.

CHEN S Q, WEI X L, AN M T, *et al.* Species diversity of plant communities at different succession stages in Baili *Rhododendron* Nature Reserve of Guizhou[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, **39**(7): 1 298-1 306.

[19] 马克平,黄建辉,于顺利,等. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究Ⅱ丰富度、均匀度和物种多样性指数[J]. 生态学报, 1995, **15**(3): 268-277.

MA K P, HUANG J H, YU S L, *et al.* Plant community diversity in Dngling Mountain, Beijing, China: Ⅱ. species richness, evenness and species diversities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, **15**(3): 268-277.

[20] 尤业明,徐佳玉,蔡道雄,等. 广西凭祥不同年龄红椎林林下植物物种多样性及其环境解释[J]. 生态学报, 2016, **36**(1): 164-172.

YOU Y M, XU J Y, CAI D X, *et al.* Environmental factors affecting plant species diversity of understory plant communities in a *Castanopsis hystrix* plantation chronosequence in Pingxiang, Guangxi, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(1): 164-172.

[21] 张喜亭,张建宇,李斯雯,等. 大兴安岭双河保护区植物多样性和群落结构特征分析[J]. 北京林业大学学报, 2021, **43**(7): 79-87.

ZHANG X T, ZHANG J Y, LI S W, *et al.* Characteristics of plant diversity and community structure in Shuanghe Nature Reserve in Daxing'anling area of northeastern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, **43**(7): 79-87.

[22] 任 平,王远征,付 博,等. 不同引种地白背三七主要活性成分分析及其对生态因子的响应[J]. 西北植物学报, 2018, **38**(9): 1 727-1 732.

REN P, WANG Y Z, FU B, *et al.* Analysis of active components in *Gynura divaricata* from different introduced regions and their response to ecological factors[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2018, **38**(9): 1 727-1 732.

[23] 廉振民,于广志. 边缘效应与生物多样性[J]. 生物多样性, 2000, **8**(1): 120-125.

LIAN Z M, YU G Z. Edge effect and biodiversity[J]. *Chinese Biodiversity*, 2000, **8**(1): 120-125.

[24] 王 军. 岛屿生物地理平衡理论简评[J]. 化石, 1997, (2): 20-22.

WANG J. A brief comment on the theory of island biogeographic balance[J]. *Fossils*, 1997, (2): 20-22.

[25] 吴端聪,肖 兰,张琳婷,等. 平潭周边海岛植物丰富度、相似度与岛屿空间特征的关系[J]. 亚热带农业研究, 2020, **16**(1): 35-41.

WU D C, XIAO L, ZHANG L T, *et al.* Relationship between plant richness, similarity, and spatial characteristics of islands around Pingtan [J]. *Subtropical Agriculture Research*, 2020, **16**(1): 35-41.

[26] 张大勇,姜新华. 群落内物种多样性发生与维持的一个假说[J]. 生物多样性, 1997, **5**(3): 161-167.

ZHANG D Y, JIANG X H. Study on sampling intensity of species diversity of grassland community in the Songnen Plain of China[J]. *Chinese Biodiversity*, 1997, **5**(3): 161-167.

[27] 方精云,王襄平,唐志尧. 局域和区域过程共同控制着群落的物种多样性: 种库假说[J]. 生物多样性, 2009, **17**(6): 605-612.

FANG J Y, WANG X P, TANG Z Y. Local and regional processes control species richness of plant communities: The species pool hypothesis[J]. *Biodiversity Science*, 2009, **17**(6): 605-612.

[28] 罗 宁,刘尊驰,于 航,等. 古尔班通古特沙漠南部植物多样性的区域差异[J]. 生态学报, 2016, **36**(12): 3 572-3 581.

LUO N, LIU Z C, YU H, *et al.* Regional differences in plant diversity in the southern Gurbantonggut desert[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(12): 3 572-3 581.

[29] 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 Z Y. Flora of seed plants in Pingtan Island, Fujian and effects of exotic plants[J]. *Guihaia*, 2017, **37**(3): 280-293.

[30] 陈玉珍,汤坤贤,孙元敏,等. 平潭周边典型海岛临海坡地植被分布特征与修复应用[J]. 海洋开发与管理, 2020, **37**(11): 57-62.

CHEN Y Z, TANG K X, SUN Y M, *et al.* Vegetation distribution characteristics of typical Islands in Pingtan and the application in island restoration[J]. *Ocean Development and Management*, 2020, **37**(11): 57-62.

[31] 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.

[32] 马克平,刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(下)[J]. 生物多样性, 1994, **2**(4): 231-239.

MA K P, LIU Y M. Measuring methods of biodiversity I . Measuring methods of α diversity (part two) [J]. *Chinese Biodiversity*, 1994, **2**(4): 231-239.

[33] 张贵平. 侧柏群落数量生态研究[D]. 太原: 山西大学, 2009.

[34] 魏 凯,郑建忠,杨 铭,等. 平潭光幼屿典型植物群落优势种生态位特征[J]. 森林与环境学报, 2020, **40**(3): 290-297.

WEI K, ZHENG J Z, YANG M, *et al.* Niche characteristics of dominant species in typical plant communities in Guangyou Island, Pingtan[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2020, **40**(3): 290-297.

(编辑:潘新社)