

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.005.015

平潭岛原生滨海植物群落种间关系

王伟耀, 郑心炫, 吴雅华, 李岩林, 管诗敏, 倪榕蔚, 黄柳菁*

(福建农林大学园林学院, 福建 福州 350002)

摘要: [目的] 平潭岛原生滨海植物群落种间关系分析有助于深入了解滨海植物群落结构特征和共存机制, 对海岛滨海植被的管理恢复与保护有重要的意义。[方法] 本研究在群落调查的基础上, 通过方差比率法 (VR), χ^2 检验, Spearman 秩相关系数检验及典范对应分析 (CCA 排序), 对平潭岛滨海 4 种典型生境类型 (基岩灌丛、低山丘陵灌丛、砂生草甸、基岩草丛) 的植物群落优势种 (重要值 ≥ 1) 进行了种间联结、相关性分析, 并进行生态种组划分。[结果] 4 种生境类型的滨海植物群落总体间均呈显著正关联 ($VR > 1$, $W > \chi^2_{0.05}(N)$), 群落整体处于相对稳定的状态; 多数物种对间的联结性和相关性均不显著 ($P > 0.05$), 种间独立性较强; 总体上正负联结和相关比大于 1, 呈现正联结和正相关趋势。[结论] 对比不同的测度方法, 相较于 χ^2 检验, Spearman 秩相关系数检验种间相关显著率更高, 有较高的灵敏度。利用 R 语言进行 CCA 排序, 并结合种间相关性分析结果, 将原生滨海植物群落中的 51 个优势种划分为 4 个生态种组, 4 个生态种组对应 4 种生境, 在平潭岛原生滨海植被的管理恢复与保护中, 应充分考虑物种的种间关系和环境适应性, 选择合适的生态种组物种进行搭配种植: 在土壤含盐率高的基岩生境选择种植生态种组 I: 滨海前胡 (*Peucedanum japonicum* Thunb.)、假还阳参 (*Crepidiastrum lanceolatum* (Houtt.) Nakai)、单叶蔓荆 (*Vitex trifolia* Linnaeus f.) 等; 在土壤容重大、海拔较高、在岩石裸露率高的环境低山丘陵生境内选择种植生态种组 II: 滨柃 (*Eurya emarginata* (Thunb.) Makino)、胡颓子 (*Elaeagnus pungens* Thunb.)、薜荔 (*Ficus pumila* L.) 等; 在土壤含盐率较低、疏松的砂生土壤的海岸线, 选择种植生态种组 III: 海边月见草 (*Oenothera drummondii* Hook.)、肾叶打碗花 (*Calystegia soldanella* (L.) R. Br.)、珊瑚菜 (*Glehnia littoralis* Fr. Schmidt ex Miq.) 等; 在土壤含水量较大生境内, 选择种植生态种组 IV: 勾儿茶 (*Berchemia sinica* Schneid.)、华南狗娃花 (*Heteropappus ciliosus* Makino)、石蒜 (*Lycoris radiata* (L'Her.) Herb.) 等。

关键词: 海岛; 种间联结; 种间相关; CCA 排序; 生态种组

中图分类号: Q948.12+2.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2021)05-0125-10

植物群落由共存的物种组成, 组成群落的物种在时间和空间上相互影响、彼此关联, 共同适应生存环境, 使得群落处于相对稳定的状态^[1-2]。种间关系是各个物种在不同环境中相互影响、相互作用形成稳定整体的反映^[3], 种间关系的测定有助于正确认识群落的数量和结构特征, 探明群落的共存机制, 为自然植被的管理恢复与保护提供更多的理论

依据^[4]。近年来, 国内外学者关于种间关系的研究多结合于群落结构^[5-8]、生态位^[7, 9-15]、空间格局^[16-18]、群落演替^[2, 19-21]等方面, 有关海岛植物群落种间关系的研究较少^[22-24], 随着近年来海岛的不断发展, 更多的学者关注和重视海岛的生态环境质量。

海岛生态系统相对独立封闭, 淡水资源匮乏, 江河水系稀缺, 受海风侵蚀、盐度高度的影响, 植

收稿日期: 2020-12-04 修回日期: 2021-07-16

基金项目: 国家自然科学基金: 基于叶性状分析城市植被结构和功能的关系及其对城市热环境的响应 (32071578); 福建农林大学学科交叉融合项目: 基于多功能评估的闽台生态城市绿色基础设施网络构建 (YSYL-xkjc-8); 福建农林大学科技创新专项基金项目 CXZX2017312

作者简介: 王伟耀, 硕士研究生。主要研究方向: 植物生态学。Email: 870949144@qq.com

* 通讯作者: 黄柳菁, 博士, 副教授。主要研究方向: 植物生态学。Email: huanglj@fafu.edu.cn

被覆盖率也较低,生态系统整体稳定性较差,生物多样性较低,是典型的生态脆弱区,开发利用不当极易造成生态系统破坏且难以恢复,导致环境恶化,生物资源枯竭^[25-26]。平潭岛于2009年成立综合实验区后,经济得到飞速发展,但过快的开发也使得岛内建筑用地大量增加,原生植被面积剧减,在平潭岛长期受到海浪侵蚀的沙丘或基岩原生生境,不同生境的原生滨海植物群落能够适应大风、盐碱、高温等恶劣的环境,在防风防潮、防沙固沙、涵养水土等方面发挥着不可估量的生态效益^[27]。目前,对于该脆弱生境下植物群落的研究尚不多见,缺乏全面的认识和科学管理的理论资料。因此,本文以平潭岛4种典型生境下的原生滨海植物群落为研究对象,通过种间联结性和相关性分析,并根据物种的生物学特性和环境适应性进行生态种组划分,深入了解平潭岛原生滨海植物群落的结构特征和群落动态,揭示典型生境类型下原生滨海植物群落的种间关系,为滨海植物群落的管理恢复和保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

平潭岛位于福建省东部,其主岛海坛岛是福建省第一大岛,全国第五大岛,位于 $25^{\circ}15' \sim 25^{\circ}45' N$, $119^{\circ}32' \sim 120^{\circ}10' E$ 之间,毗邻台湾海峡,地理条件特殊。平潭岛属亚热带海洋季风性气候,全年气候温和,年平均气温 $19.5^{\circ}C$;雨量充沛,年平均降水量 $900 \sim 2100 mm$;年平均风速 $9.0 m \cdot s^{-1}$,是福建省的强风区之一。岛上土壤沙化严重,有机质含量较低,水土流失严重,生态环境脆弱且易受热带风暴影响,自然植被稀疏,物种多样性较低,群落结构单一,多为灌草丛植物,优势种相对明显。平潭岛分布有黑松(*Pinus thunbergii* Parlatores)、台湾相思(*Acacia confusa* Merr.)和木麻黄(*Casuarina equisetifolia* L.)等建群/优势种,同时分布着滨海特有植物种类:如滨柃(*Eurya emarginata* (Thunb.) Makino)、秋茄树(*Kandelia obovata* Sheue et al.)和海滨藜(*Atriplex maximowicziana* Makino)等^[28]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置及数据采集 在充分踏查的基础上了解全岛滨海植物群落的分布状况,参照相关文献^[29-31],根据实际调研情况,在平潭岛北部-东部-南部海岸线设置16个 $10 m \times 10 m$ 的样方,根

据生境类型的不同,将样方分为基岩灌丛、低山丘陵灌丛、砂生草甸、基岩草丛4类,并将每个 $10 m \times 10 m$ 的样方划分为4个海拔和坡向、坡度相似的 $5 m \times 5 m$ 的小样方,共64个(表1),其中,基岩生境以岩石为依托,紧邻海岸线分布,受海风侵袭影响土壤多为风化砂砾土,但土层较薄;低山丘陵生境海拔相对较高,受海风影响有所减弱,土壤孔隙度较大;砂生生境土壤质地疏松,盐分含量较高^[27,32]。对样方进行群落学调查,记录每个样方内植物的物种名称、株数、高度、盖度、生长型等特征,并测定经纬度、海拔高度、坡向、坡位、坡度,每个样方内使用梅花五点法取5个深度为 $20 cm$ 、直径为 $5 cm$ 的土样,并将五点的土壤均匀混合,送回实验室测定pH值。在样方中心位置利用环刀取土样后装入带有编号的自封袋中,使用土壤三参数仪测量测定土壤土表含盐率。

表1 样地基本概况

Table 1 Basic information of the sample plot

样地编号 Plot No.	生境类型 type	小样方数量 Small quadrat number	经度(E) Longitude	纬度(N) Latitude
1	低山丘陵灌丛 Low Hilly Shrublands	4	119°86'	25°46'
	基岩草丛 Bedrock Grass	4		
	基岩灌丛 Bedrock Shrub	12		
2	低山丘陵灌丛 Low Hilly Shrublands	4	119°82'	25°49'
	砂生草甸 Sandy Meadow	4		
3	砂生草甸 Sandy Meadow	8	119°72'	25°42'
	低山丘陵灌丛 Low Hilly Shrublands	4		
4	低山丘陵灌丛 Low Hilly Shrublands	4	119°76'	25°42'
	低山丘陵灌丛 Low Hilly Shrublands	4		
5	低山丘陵灌丛 Low Hilly Shrublands	4	119°75'	25°39'
	砂生草甸 Sandy Meadow	12		
6	低山丘陵灌丛 Low Hilly Shrublands	4	119°78'	25°61'
	低山丘陵灌丛 Low Hilly Shrublands	4		
7	低山丘陵灌丛 Low Hilly Shrublands	4	119°81'	25°61'
	基岩草丛 Bedrock Grass	4		
8	基岩草丛 Bedrock Grass	4	119°77'	25°66'

1.2.2 数据处理 (1)重要值计算。以同种生境类型中的 $5 m \times 5 m$ 样方为基本单位,分别计算每种生境中物种的重要值,并基于4种生境,选择重

要值 ≥ 1 的优势种 (表 2) 进行种间联结和相关性 (相对盖度) / 3。的计算和分析。重要值 = (相对多度 + 相对频度 +

表 2 原生滨海植物优势种种名及缩写

Table 2 Name and abbreviation of main species of native littoral plants

缩写 Abbreviation	种名 Species	全称 Name	缩写 Abbreviation	种名 Species	全称 Name
Bp	白花鬼针草	<i>Bidens pilosa</i> L.	Po	马齿苋	<i>Portulaca oleracea</i> L.
Fp	薜荔	<i>Ficus pumila</i> L.	Ds	马唐	<i>Digitaria sanguinalis</i> (L.) Scop.
Pj	滨海前胡	<i>Peucedanum japonicum</i> Thunb.	Oj	麦冬	<i>Ophiopogon japonicus</i> (L. f.) Ker-Gawl.
Lm	滨海珍珠菜	<i>Lysimachia mauritiana</i> Lam.	Rp	茅莓	<i>Rubus parvifolius</i> L.
Ee	滨柃	<i>Eurya emarginata</i> (Thunb.) Makino	Co	木防己	<i>Cocculus orbiculatus</i> (L.) DC.
Pi	翅果菊	<i>Pterocypsela indica</i> L.	Ce	木麻黄	<i>Casuarina equisetifolia</i> L.
Vt	单叶蔓荆	<i>Vitex trifolia</i> Linnaeus f.	Pr	铺地藜	<i>Panicum repens</i> R. Brown
Go	倒卵叶算盘子	<i>Glochidion obovatum</i> Sieb. et Zucc.	Saj	漆姑草	<i>Sagina japonica</i> (Sw.) Ohwi
Tt	番杏	<i>Tetragonia tetragonioides</i> (Pall.) Kuntze	Sj	千金藤	<i>Stephania japonica</i> (Thunb.) Miers
Cc	芙蓉菊	<i>Crossostephium chinense</i> (Linnaeus) Makino	Ch	青江藤	<i>Celastrus hindsii</i> Benth.
Bs	勾儿茶	<i>Berchemia sinica</i> Schneid.	Hc	肉叶耳草	<i>Hedyotis coreana</i> (Bartling ex Candolle) Fosberg
Zm	沟叶结缕草	<i>Zoysia matrella</i> (L.) Merr.	Cr	沙苦苣菜	<i>Chorisis repens</i> (L.) A. Gray
Sv	狗尾草	<i>Setaria viridis</i> (L.) Beauv.	De	山管	<i>Dianella ensifolia</i> (L.) Redouté
Cd	狗牙根	<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.	Gl	珊瑚菜	<i>Glehnia littoralis</i> Fr. Schmidt ex Miq.
Od	海边月见草	<i>Oenothera drummondii</i> Hook.	Cs	肾叶打碗花	<i>Calystegia soldanella</i> (L.) R. Br.
Ip	厚藤	<i>Ipomoea pescaprae</i> (L.) R. Brown	Lr	石蒜	<i>Lycoris radiata</i> (L'Her.) Herb.
Ep	胡颓子	<i>Elaeagnus pungens</i> Thunb.	Asc	天门冬	<i>Asparagus cochinchinensis</i> (Lour.) Merr.
Hec	华南狗娃花	<i>Heteropappus ciliosus</i> Makino	Bl	铁包金	<i>Berchemia lineata</i> (L.) DC.
Ac	藿香蓟	<i>Ageratum conyzoides</i> L.	At	铁角蕨	<i>Asplenium trichomanes</i> L. Sp.
Ca	积雪草	<i>Centella asiatica</i> (L.) Urban	Cha	狭叶尖头叶藜	<i>Chenopodium acuminatum</i> subsp. <i>virgatum</i> (Thunb.) Kitam.
Jp	筭石菖	<i>Juncus prismatocarpus</i> R. Brown	Cyr	香附子	<i>Cyperus rotundus</i> L.
Cj	蓟	<i>Cirsium japonicum</i> Fisch. ex DC.	Bv	小叶黑面神	<i>Breynia vitis-idaea</i> (Burm. F.) C. E. C. Fischer
Pc	假臭草	<i>Praxelis clematidea</i> Cassini	Mc	野牡丹	<i>Melastoma candidum</i> Linnaeus
Cl	假还阳参	<i>Crepidiastrum lanceolatum</i> (Houtt.) Nakai	Ls	中华补血草	<i>Limonium sinense</i> (Girard) Kuntze
Sl	老鼠芳	<i>Spinifex littoreus</i> (Burm. F.) Merr.	Oc	酢浆草	<i>Oxalis corniculata</i> L.
Wi	了哥王	<i>Wikstroemia indica</i> (L.) C. A. Mey.			

(2) 总体关联性检验。不同生境类型植物群落中所有物种的关联程度可以通过物种间联结指数 (VR) [33] 来测定, 计算公式为:

$$\delta_T^2 = \sum_{i=1}^S P_i(1 - P_i) \quad P_i = n_i/N$$

$$S_T^2 = (1/N) \sum_{j=1}^N (T_j - t)^2 \quad VR = S_T^2/\delta_T^2$$

式中: S 为每种生境类型中物种数, P_i 为物种 i 出现的频度, N 为总样方数, T_j 是样方 j 中出现

的物种总数, n_i 物种 i 出现的样方数, t 为全部样方物种的平均数; S_T^2 为所有样方物种数的方差, δ_T^2 为所有物种出现频度的方差。

在独立性零假设条件下, VR 期望值为 1。若 $VR = 1$ 时, 接受零假设, 群落种间总体无关联; 若 $VR > 1$ 时, 群落种间总体呈正关联; 当 $VR < 1$ 时, 群落种间总体呈负关联。选取统计量 W 检验 VR 值偏离 1 的显著程度 ($W = N \times VR$), 如果

$\chi^2_{0.95}(N) < W < \chi^2_{0.05}(N)$, 则物种总体间关联不显著, 反之, 若 $W < \chi^2_{0.95}(N)$ 或 $W > \chi^2_{0.05}(N)$, 物种总体关联显著。

(3) 种间联结性。种间联结性的测定以优势种在样方中是否存在的二元数据为依据, 计算出物种对间 a 、 b 、 c 、 d 的值, a 为 2 个物种同时出现的样方数, b 、 c 分别为仅有 1 个物种出现的样方数, d 为 2 个物种均未出现的样方数, N 为样方总数。计算 χ^2 值的 Yates 连续校正公式^[34] 如下:

$$\chi^2 = \frac{N \left(|ad - bc| - \frac{1}{2}N \right)^2}{(a+b)(a+c)(b+d)(c+d)}$$

当 $\chi^2 < 3.841$ 时, 种间联结独立, 差异不显著; 当 $3.841 < \chi^2 < 6.635$ 时, 种间有一定生态联结且差异显著; 当 $\chi^2 > 6.635$ 时, 种间有较强的生态联结且差异极显著。当 $ad > bc$ 时为正联结, $ad < bc$ 则为负联结。当某一物种的频度为 100% 时, 应给该种一个加权值, 令式中的 b 、 d 值均为 1, 这样就能更客观地反映 2 个种之间的实际联结情况。

(4) 种间相关性测定。Spearman 秩相关系数检验应用定量数据而非二元数据, 能更清楚地反映物种之间共同出现的概率。在本研究中, 采用多度为指标处理数据所构成的数据矩阵进行 Spearman 秩相关系数检验^[35]。

$r_s(i, k)$ 为 Spearman 秩相关系数, 计算公式^[36] 如下:

$$r_s(i, k) = 1 - \frac{6 \sum_{j=1}^N d_{ij}^2}{N^3 - N}$$

式中: N 为样方数, $d_j = (\chi_{ij} - \chi_{kj})$, χ_{ij} 为种 i 在样方 j 中的秩, χ_{kj} 为种 k 在样方 j 中的秩。

(5) 典范对应分析 (CCA)。本研究选用平潭岛原生滨海植物群落中优势种 51×16 的重要值数据矩阵与 7×16 的环境因子矩阵进行 CCA 分析, 研究环境因子对种间关系的影响。CCA 分析使用 R 4.0.2 版本, 调用了 Vegan 包库中的 cca() 函数进行 CCA 分析, 并采用 ggplot2 包库进行图形绘制。

(6) 生态种组划分。在植物群落中, 生态习性相近的物种可以归类为同一生态种组^[20], 同一生态种组在适应环境和获取资源等方面表现较为一致, 且种间关系通常为正相关。为了反映出原生滨海植物群落不同生境中的适应能力, 结合种间相关性分析的结果及自身的生物学特性与 CCA 排序

的结果, 以尽量多的种间正相关种对为原则, 以种间负相关为界限, 基于 4 种生境, 对原生滨海植物群落的优势种进行生态种组的划分。

2 结果与分析

2.1 总体间关联性分析

根据主要物种的存在与否的二元数据矩阵, 对 4 种生境类型的原生滨海植物群落进行整体相关性检验, 如表 3 所示。

表 3 物种总体相关性检验结果
Table 3 Test results of the overall correlation of plant species

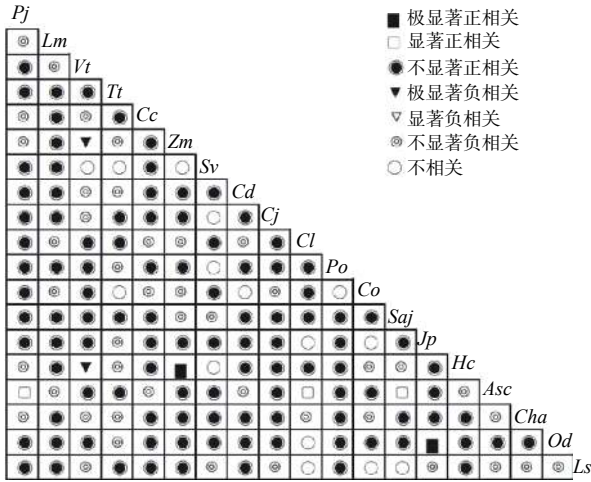
	基岩灌丛 Bedrock Shrub	低山丘陵灌丛 Low Hilly Shrublands	砂生草甸 Sandy Meadow	基岩草丛 Bedrock Grass
方差比率 VR	3.41	1.62	1.92	2.21
检验统计量 W	40.98	32.40	46.08	17.75

4 种生境类型植物群落的 VR 值均大于 1, 说明物种之间表现出正联结。用统计量 W 检测 VR 值偏离 1 的显著性, 结果显示: 4 种生境类型的统计量 W 均满足 $W > \chi^2_{0.05}(N)$, 为显著正关联。

2.2 种间关联性分析

对 4 种生境类型中优势种植物采用 χ^2 检验进行研究发现 (图 1): 在基岩灌丛 19 个优势种组成的 171 个种对中, 呈正负联结及无联结的种对分别占总对数的 64.9% (111 对)、26.3% (45 对)、8.8% (15 对), 正负联结比 2.5, 其中呈极显著正联结和显著正联结的种对占总对数的 1.17% (2 对) 和 1.75% (3 对), 包括沟叶结缕草 (Zm) 与肉叶耳草 (Hc)、筭石菖 (Jp) 与海边月见草 (Od)、滨海前胡 (Pj) 与天门冬 (Asc)、假还阳参 (Cl) 与天门冬 (Asc)、漆姑草 (Saj) 与天门冬 (Asc), 大多数种对未达到显著相关; 呈极显著负联结的种对占总对数的 1.17% (2 对), 包括单叶蔓荆 (Vt) 与沟叶结缕草 (Zm)、单叶蔓荆 (Vt) 与肉叶耳草 (Hc)。

在低山丘陵灌丛 24 个优势种组成的 276 个种对中 (图 2), 呈正负联结及无联结的种对分别占总对数的 54.0% (149 对)、44.9% (124 对)、1.1% (3 对), 正负联结比 1.2, 其中, 呈极显著正联结的占总对数的 2.17% (6 对), 包括沟叶结缕草 (Zm) 与假还阳参 (Cl)、麦冬 (Oj) 和天门冬 (Asc)、千金藤 (Sj) 与小叶黑面神 (Bv)、



注: 物种缩写同表 2, 下同

Notes: Species abbreviations are the same as Table 2. The same below

图 1 基岩灌丛优势种间联结 χ^2 检验半矩阵图

Fig. 1 The semi-matrix diagram of χ^2 test of dominant species in bedrock shrub

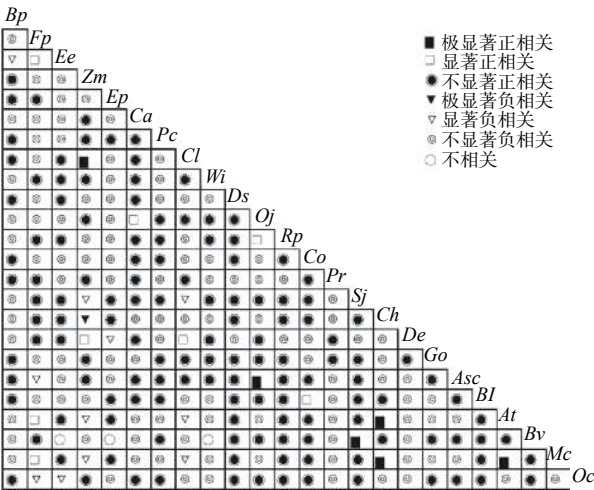


图 2 低山丘陵灌丛优势种间联结 χ^2 检验半矩阵图

Fig. 2 The semi-matrix diagram of χ^2 test for the association between dominant species of shrub in low hilly area

青江藤 (*Ch*) 与铁角蕨 (*At*)、青江藤 (*Ch*) 与野牡丹 (*Mc*)、铁角蕨 (*At*) 与野牡丹 (*Mc*); 呈显著正联结的种对占总对数的 2.90% (8 对), 包括薜荔 (*Fp*) 与滨柃 (*Ee*)、薜荔 (*Fp*) 与铁角蕨 (*At*)、薜荔 (*Fp*) 与野牡丹 (*Mc*)、沟叶结缕草 (*Zm*) 与山菅 (*De*)、积雪草 (*Ca*) 与麦冬 (*Oj*)、假还阳参 (*Cl*) 与山菅 (*De*)、麦冬 (*Oj*) 与茅莓 (*Rp*)、木防己 (*Co*) 与铁包金 (*BI*); 呈极显著负联结的种对占总对数的 0.36% (1 对), 为沟叶结缕草 (*Zm*) 与青江藤

(*Ch*); 呈显著负联结的种对占总对数的 3.99% (11 对), 包括沟叶结缕草 (*Zm*) 与千金藤 (*Sj*)、白花鬼针草 (*Bp*) 与滨柃 (*Ee*)、薜荔 (*Fp*) 与天门冬 (*Asc*)、薜荔 (*Fp*) 与酢浆草 (*Oc*)、滨柃 (*Ee*) 与酢浆草 (*Oc*)、沟叶结缕草 (*Zm*) 与铁角蕨 (*At*)、沟叶结缕草 (*Zm*) 与野牡丹 (*Mc*)、胡颓子 (*Ep*) 与山菅 (*De*)、假还阳参 (*Cl*) 与千金藤 (*Sj*)、假还阳参 (*Cl*) 与铁角蕨 (*At*)、假还阳参 (*Cl*) 与野牡丹 (*Mc*)。

在砂生草甸 14 个优势种组成的 91 个种对中 (图 3), 呈正负联结的种对分别占总对数的 59.3% (54 对)、40.7% (37 对), 正负联结比 1.5, 其中, 呈极显著正联结的种对占总对数的 3.30% (3 对), 包括翅果菊 (*Pi*) 与藿香蓟 (*Ac*)、厚藤 (*Ip*) 与肾叶打碗花 (*Cs*)、老鼠芳 (*Sl*) 与珊瑚菜 (*Gl*); 呈显著正联结的种对占总对数的 9.89% (9 对), 包括翅果菊 (*Pi*) 与老鼠芳 (*Sl*)、翅果菊 (*Pi*) 与木麻黄 (*Ce*)、翅果菊 (*Pi*) 与珊瑚菜 (*Gl*)、番杏 (*Tt*) 与沙苦菜菜 (*Cr*)、藿香蓟 (*Ac*) 与老鼠芳 (*Sl*)、藿香蓟 (*Ac*) 与木麻黄 (*Ce*)、藿香蓟 (*Ac*) 与珊瑚菜 (*Gl*)、老鼠芳 (*Sl*) 与木麻黄 (*Ce*)、木麻黄 (*Ce*) 与珊瑚菜 (*Gl*); 呈极显著负联结的种对占总对数的 2.20% (2 对), 包括老鼠芳 (*Sl*) 与沙苦菜菜 (*Cr*)、沙苦菜菜 (*Cr*) 与珊瑚菜 (*Gl*); 呈显著负联结的种对占总对数的 4.40% (4 对), 包括翅果菊 (*Pi*) 与沙苦菜菜 (*Cr*)、番杏 (*Tt*) 与珊瑚菜 (*Gl*)、藿香蓟 (*Ac*) 与沙苦菜菜 (*Cr*)、木麻黄 (*Ce*) 与沙苦菜菜 (*Cr*)。

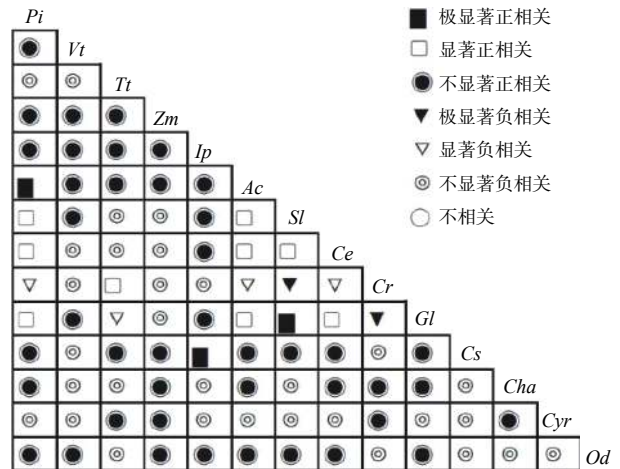


图 3 砂生草甸优势种间联结 χ^2 检验半矩阵图

Fig. 3 Semi-matrix diagram of association χ^2 test among dominant species in sandy meadow

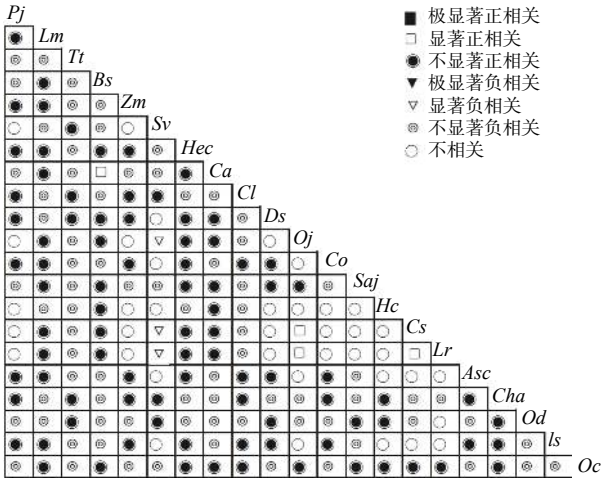


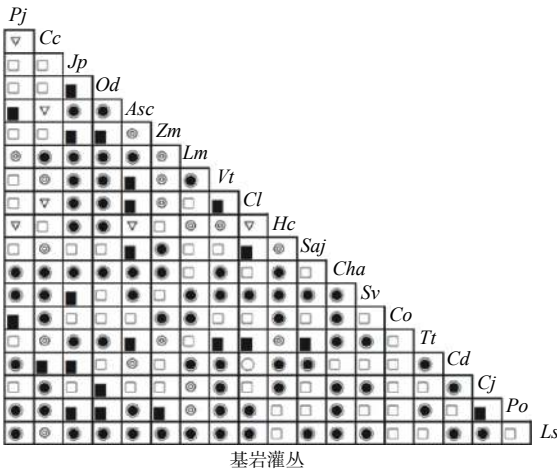
图4 基岩草丛优势种种间联结 χ^2 检验半矩阵图
 Fig. 4 The semi-matrix diagram of χ^2 test for the association of dominant species grass

在基岩草丛 21 个优势种组成的 210 个种对中 (图 4), 呈正负联结及无联结的种对分别占总对

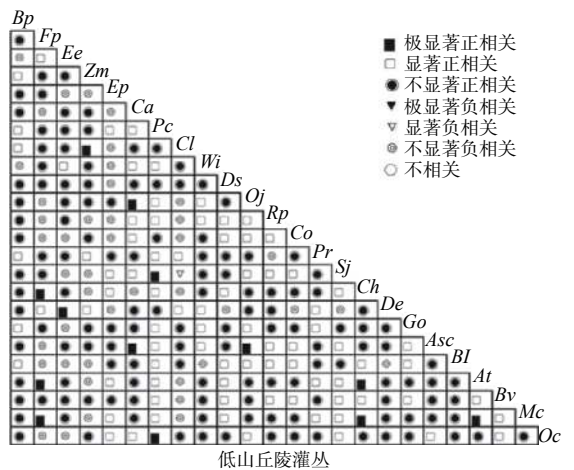
数的 43.8% (92 对)、38.1% (80 对)、18.1% (38 对), 正负联结比 1.15, 其中, 显著正联结的种对占总对数的 1.9% (4 对), 包括勾儿茶 (*Bs*) 与积雪草 (*Ca*)、麦冬 (*Oj*) 与肾叶打碗花 (*Cs*)、麦冬 (*Oj*) 与石蒜 (*Lr*)、肾叶打碗花 (*Cs*) 与石蒜 (*Lr*); 呈显著负联结的种对占总对数的 1.43% (3 对), 包括狗尾草 (*Sv*) 与麦冬 (*Oj*)、狗尾草 (*Sv*) 与肾叶打碗花 (*Cs*)、狗尾草 (*Sv*) 与石蒜 (*Lr*)。

2.3 Spearman 秩相关系数检验

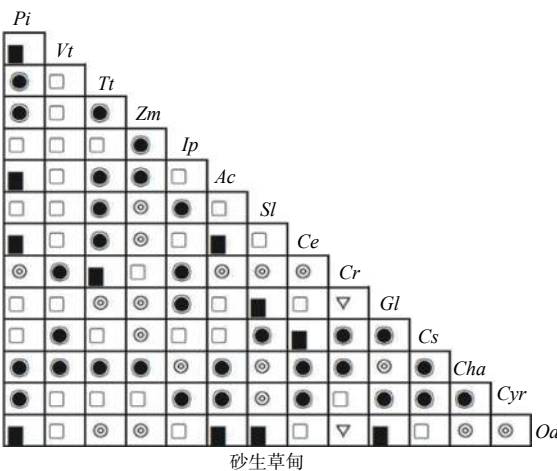
根据 Spearman 秩相关系数检验结果 (图 5) 显示: 在基岩灌丛 19 个优势种组成的 171 个种对中, 呈正、负相关及无相关种对分别为 147 对、23 对和 1 对, 分别占总对数的 86.0%、13.4% 和 0.6%, 正负比 6.4, 其中, 呈极显著正相关的 22 对, 呈显著正相关的 53 对, 分别占总对数的 12.9% 和 31.0%; 呈显著负相关的 6 对, 占总对数的 3.5%。在低山丘陵灌丛 24 个优势种组成的 276 种对中,



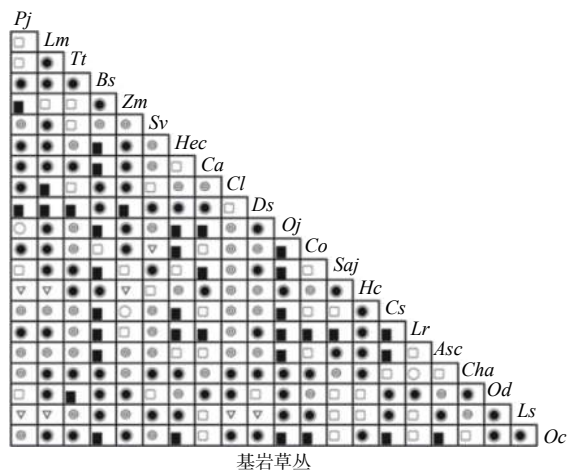
基岩灌丛



低山丘陵灌丛



砂生草甸



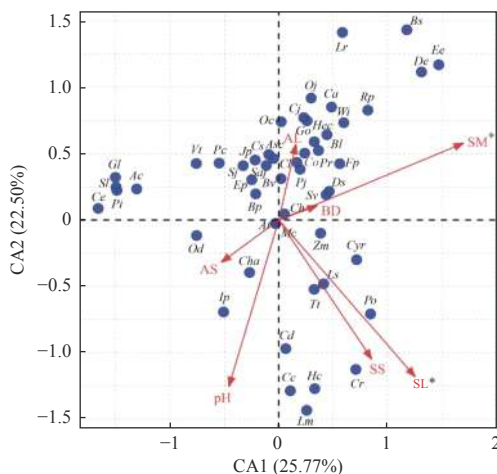
基岩草甸

图5 Spearman 秩相关系数检验图
 Fig. 5 Spearman rank correlation coefficient test

呈正、负相关的种对分别为 233 对和 43 对, 分别占总对数的 84.4% 和 15.6%, 正负比 5.4, 其中, 呈极显著正相关的 13 对, 呈显著正相关的 82 对, 分别占总对数的 4.7% 和 29.7%; 呈显著负相关的仅有 1 对。在砂生草甸 14 个优势种对组成的 91 个种对中, 呈正、负相关的种对分别为 72 对和 19 对, 分别占总对数的 79.1% 和 20.9%。正负比 3.8, 其中, 呈极显著正相关的 11 对, 呈显著正相关的 30 对, 分别占总对数的 12.1% 和 33.0%; 呈显著负相关的仅有 2 对, 占总对数的 2.2%。在基岩草丛 21 个优势种组成的 210 个种对中, 呈正、负相关和无相关的种对分别为 152 对、55 对和 3 对, 分别占总对数的 72.4%、26.2% 和 1.4%, 正负比 2.8, 其中, 呈极显著正相关的 36 对, 呈显著正相关的 39 对, 分别占 17.1% 和 18.6%; 呈显著负相关的 8 对, 占总对数的 3.8%。与 χ^2 检验相比, 4 种生境的原生滨海植物种群对间正相关的趋势明显增大, 呈显著与极显著的相关种对明显增多, 但仍有大多数种对呈不显著相关, 无显著的协变关系^[37]。

2.4 生态种组划分

根据 CCA 排序结果 (图 6) 可知: 导致生态种组分化的主要因子是土壤水分和坡度。利用 CCA 排序结果, 并结合以上 Spearman 秩相关系数检验结果, 对应 4 种生境, 将平潭岛原生滨海植物



注 Notes: 物种缩写同表 2。SS: 土壤含盐率 Soil salinity; SM: 土壤含水率 Soil moisture content; BD: 土壤容重 Soil bulk density; pH: 土壤 pH Soil pH; AS: 坡向 Aspect; SL: 坡度 Slope; AL: 海拔 Altitude
Notes: Species are abbreviated as Table 2. SS: Soil salinity. SM: Soil moisture content. BD: Soil bulk density. pH: Soil pH. AS: Slope Aspect. SL: Slope. AL: Altitude

图 6 原生滨海植物优势种与环境因的 CCA 排序图

Fig. 6 CCA sequence diagram of dominant species and environmental factors of native coastal plants

优势种分为 4 个生态种组:

生态种组 I: 滨海前胡 (*Pj*)、假还阳参 (*Cl*)、单叶蔓荆 (*Vt*)、筭石菖 (*Jp*)、天门冬 (*Asc*)、木防己 (*Co*)、狗尾草 (*Sv*)、漆姑草 (*Saj*)、马齿苋 (*Po*)、番杏 (*Tr*)、薊 (*Cj*)。该生态种组的物种广泛分布于基岩灌丛生境, 组内种间关系主要呈显著正相关, 少数呈极显著正相关, 与生境中其他物种呈不显著正相关或负相关; 组内物种有盐生植物 (单叶蔓荆、假还阳参等) 和耐盐碱植物 (滨海前胡、天门冬等), 有较强的耐盐碱能力, 能生长在长期受海风侵袭的岩石石缝中, 可以适应该生境中土壤含盐率、pH 较高、土壤孔隙度较高的特点。

生态种组 II: 滨柃 (*Ee*)、野牡丹 (*Mc*)、胡颓子 (*Ep*)、了哥王 (*Wi*)、茅莓 (*Rp*)、青江藤 (*Ch*)、薜荔 (*Fp*)。该生态种组主要生长在低山丘陵灌丛生境内。组内种间关系主要为极显著正相关, 少数呈显著正相关, 与生境中其他物种多呈不显著正相关, 少数呈不显著负相关。组内植物为耐干旱瘠薄的阳性植物, 耐旱性极强, 能通过数量庞大的根系改变土壤结构, 可生长在土壤瘠薄、海拔较高、阳光直射的岩壁及裸露山坡上, 能适应该生境海拔较高、土壤容重较高的特点。

生态种组 III: 狭叶尖头叶藜 (*Cha*)、海边月见草 (*Od*)、肾叶打碗花 (*Cs*)、沙苦苣菜 (*Cr*)、厚藤 (*Ip*)、老鼠芳 (*Sl*)、珊瑚菜 (*Gl*) 等。该生态种组分布在砂生草甸生境中。组内种间关系主要为极显著正相关, 少数呈显著正相关, 与生境中其他物种多为不显著正相关, 少数为不显著负相关。组内植物茎多为匍匐或稍直立, 如老鼠芳平卧地面部分可达数米, 能良好生长在土壤质地疏松的砂土, 对土壤含盐率和含水率要求较低。

生态种组 IV: 勾儿茶 (*Bs*)、马唐 (*Ds*)、华南狗娃花 (*Hec*)、积雪草 (*Ca*)、石蒜 (*Lr*)、麦冬 (*Oj*)、酢浆草 (*Oc*)。该生态种组主要分布在基岩草丛生境, 组内种间关系主要为极显著正相关, 少数为显著正相关, 与生境中的其他物种多为不显著负相关, 少数为不显著正相关。组内物种喜湿耐阴、对土壤适应能力较强, 能适应该生境中土壤含水率较高的特点。

3 讨论

3.1 测度方法比较分析

对比 χ^2 检验与 Spearman 秩相关系数检验结

果,从关联程度看,绝大多数种对均呈不显著关联,2种方法具有一致性^[38];但 χ^2 检验中呈显著和极显著相关的种对数量远少于Spearman秩相关系数检验,说明Spearman秩相关系数检验灵敏度高于 χ^2 检验^[39];在种间关系的正负方向上,2种测度方法也表现出不同的情况,如在基岩灌丛中,滨海前胡与狭叶尖头叶藜间的秩相关检验结果为正相关,而 χ^2 检验结果为负联结,表明2种方法也存在一定的差异^[38],这与多数学者得到的结果一致^[3,6,19,37,40]。总体关联性检验能反映出群落内各种群间相关性的总体趋势,却不能反映不同物种对的种间关系^[37]; χ^2 检验能反映种对间联结是否显著,但由于只以物种出现与不出现数据为根据,忽略了物种的定量数据(多度、盖度)为依据,种间相关测定能反映出种群间数量变化的趋势及程度,不同测度方法各有优缺点,综合运用各种测度方法才能更好的反映种间的亲和性及其程度,得出可靠的结论^[30]。

3.2 平潭岛原生滨海植物群落种间关系特点

生态位理论认为,群落的构建是在特定环境的过滤下,物种间经过相互作用,在局域生境中定居和共存的过程,种间关系与生态位的重叠程度密切相关。平潭岛常年受海风侵蚀,土壤盐度较高,淡水资源匮乏,面对严苛的生境条件,经过长时间的发展,植物群落选择了避免对有限资源的竞争,对资源和空间的竞争缓和^[37],生态位分离,各物种占据着自己的生态位,因此,在本研究中,4种生境类型的原生滨海植物群落优势种种对间的联结性和相关性多为不显著,种对间独立性较强,与同样具有严苛生境条件的金佛山、桂林喀斯特植物群落研究结果相似^[37]。一方面,通过特定生境筛选的2个物种往往表现出相似的生物学特性,能够实现对资源的分割,即能利用其它物种不可利用的资源,生态位重叠度较高,进而在种间关系上表现为正相关,如低山丘陵灌丛生境中的薜荔与胡颓子都具有较强的耐干旱能力,基岩灌丛生境中的滨海前胡和单叶蔓荆都具有较强的耐盐碱能力,因此在本研究中,正联结和正相关的种对比例较高;另一方面,相同物种对在不同生境类型中的呈现出的种间关系也并不完全一致,如假还阳参与天门冬在基岩灌丛中表现为显著正联结和极显著正相关,但在低山丘陵灌丛生境中表现为不显著正联结和不显著正相关,在基岩草丛生境中则表现为不显著正联结和不

显著负相关。这表明在不同生境下,相同物种对为了更好地适应环境,种间关系表现出差异,即2个物种生态位过度重叠,由相互依存变为相互竞争,与管涔山撂荒地植物群落种间关系^[19]研究结果一致;再加上海岛脆弱的生态环境和开发利用不当等人为因素的干扰,主要优势种对资源的利用会受到影响,竞争力差的物种对资源的获取能力得到提高,加剧了对生境的需求完全不同的物种对之间的竞争。因此,在4种生境类型的原生滨海植物群落中,负联结和负相关的物种对占有一部分比例。总体看,平潭岛原生滨海植物群落呈正联结和正相关的趋势,与总体性关联检验一致,群落整体处于相对稳定的状态,与浙江普陀山岛和海南岛吊罗山海岛^[2]植物群落种间关系研究结果相似,与处于不稳定阶段的广州南澳岛植物群落^[24]研究结果相反。

在此次调查期间发现,试验调查地范围外的原生滨海植物群落,由于人为因素的干扰,生境出现了不同程度的退化,直接影响到了原生滨海植物群落的自然更新,为了保护原生滨海植物群落,加强对原生滨海植物群落的科学研究刻不容缓。综合植物群落种间关系及环境因子的分析不仅能揭示植物群落现状,更易阐明不同种间关系的内因,为植物群落的生存和发展创造良好的环境。

3.3 生态种组分类及指示意义

生态种组是对资源利用、环境适应能力、群落功能作用表现出相似的物种组合,同一生态种组的物种有相似的环境适应性,物种对间相互依存,有较显著的正联结与正相关性^[30]。海岛原生滨海植物群落分布在海岸最前线,能生长在干旱、强风、盐碱度高等逆境中,优势植物大多具备耐盐性、耐阴性、抗风性等特性,在平潭岛原生滨海植被的管理恢复与保护中,选择合适的生态种组物种进行搭配种植尤为重要。

本研究对应4种生境,将原生滨海植物群落优势种划分为4个生态种组:生态种组Ⅰ中的植物叶片较小且厚,起到贮水及抵御海风侵袭的作用,有较强的抗盐碱能力,可用于盐碱地绿化及滩涂改造。生态种组Ⅱ中的耐干旱植物叶片多被毛或被蜡,能有效的降低植物的裸露面积,藤蔓植物茎节的不定根能让植物牢牢的抓住光滑的岩壁,滨铃、野牡丹等植物能通过数量庞大的根系改良土壤结构,该生态种组可用于土壤贫瘠地的植被改造或一些护坡植被。生态种组Ⅲ中的植物较低矮,多为匍

匍生长,可种植在海风较强、土壤较疏松的海岸线。不仅能起到防风固沙的作用,肾叶打碗花、海边月见草、珊瑚菜等植物也能构成独特的滨海原生植被景观。此外,珊瑚菜作为国家二级重点保护植物,渐危种,受到人工种植防护林的影响,其种群仅在长江澳小面积分布,在种植防护林的过程中应更注意对珊瑚菜的保护。生态种组Ⅳ中的植物喜湿耐阴,分布在土壤含水率较大生境内,可生长在林下或岩石下,作为树荫下的地被应用,其中,石蒜、麦冬等植物也能在园林绿化中起到很好的效果。

4 结论

本研究中,平潭岛4种生境类型的原生滨海植物群落优势种总体均呈显著正关联,种间联结和种间相关有较高的正负比,处于相对稳定的状态,根据物种的种间关系和环境适应性,基于4种生境,将平潭岛原生滨海植物优势种划分为4个生态种组。在海岛滨海植被的保护和建设中,应划定保护范围,避免人为干扰,遵循适地适树的原则,充分考虑物种的种间关系和环境适应性,在不同的生境中选择合适的生态种组进行搭配种植,加强对原生滨海植被的保护。

参考文献:

- [1] 张桂萍,张峰,茹文明.山西绵山植被木本植物优势种群种间关联[J].生态学杂志,2006,25(3):295-298.
- [2] 王文进,张明,刘福德,等.海南岛吊罗山热带山地雨林两个演替阶段的种间联结性[J].生物多样性,2007,15(3):257-263.
- [3] 史作民,刘世荣,程瑞梅,等.宝天曼落叶阔叶林种间联结性研究[J].林业科学,2001,37(2):29-35.
- [4] 张先平,王孟本,张伟锋,等.庞泉沟国家自然保护区森林群落木本植物种间关系的分析[J].植物研究,2007,27(3):350-355.
- [5] 崔海军,张勇,张银峰,等.贵州娘娘山湿地藓类沼泽植物群落特征及优势种群种间关系[J].生态学杂志,2018,37(9):2619-2626.
- [6] 何光熊,闫帮国,纪中华,等.元谋干热河谷Savanna草地优势植物的种间关系[J].草业学报,2018,27(6):62-71.
- [7] 王显,华润成,茹文明.山西浊漳河北源湿地草本植物群落优势种生态位与种间关系[J].草业科学,2018,35(2):276-285.
- [8] 王伟,郭倩,康海军,等.线叶蒿草草地群落构成及种间关联分析[J].西北植物学报,2015,35(10):2096-2102.
- [9] 郭英英,李素清.十八河铜尾矿库草本植物群落优势种群种间关系[J].中国水土保持科学,2019,17(4):18-25.
- [10] 李霖,李素清.阳泉矿区煤矸石山复垦地不同植被下草本植物群落优势种群种间关系及生态位[J].中国农学通报,2019,35(1):80-87.
- [11] 白文霞,李素清,狄晓艳.安太堡露天煤矿复垦地不同植被类型下草本植物群落优势种群种间关联[J].应用与环境生物学报,2018,24(1):140-145.
- [12] 简小枚,税伟,陈毅萍,等.云南中度退化的喀斯特天坑草地植物群落优势种群种间关系[J].应用生态学报,2018,29(2):492-500.
- [13] 马丰丰,潘高,李锡泉,等.桂西南喀斯特山地木本植物群落种间关系及CCA排序[J].北京林业大学学报,2017,39(6):32-44.
- [14] 燕亚媛,金一兰,刘思齐,等.内蒙古草原优势种群种间关联特征分析[J].内蒙古大学学报:自然科学版,2016,47(6):617-624.
- [15] 郑超超,伊力塔,张超,等.浙江江山公益林物种种间关系及CCA排序[J].生态学报,2015,35(22):7511-7521.
- [16] 张志永,时忠杰,杨晓晖,等.浑善达克沙地榆树疏林中木本植物空间格局及种内和种间关系分析[J].植物资源与环境学报,2019,28(3):33-43.
- [17] 姚成亮,胡永春,范新宇,等.木札岭世界地质公园优势种锐齿槲栎的种内关系和群落种间关系[J].河南农业大学学报,2019,53(1):56-63.
- [18] 贾希洋,马红彬,周瑶,等.不同生态恢复措施对宁夏典型草原优势植物种群分布格局及种间关系的影响[C]//中国草学会.2018中国草学会年会论文集.中国草学会,2018:12.
- [19] 刘秀珍,张峰,张金屯,等.管涔山撂荒地植物群落演替过程中优势种群种间关系分析[J].山西大学学报:自然科学版,2010,33(1):142-146.
- [20] 周先叶,王伯荪,李鸣光,等.广东黑石顶自然保护区森林次生演替过程中群落的种间联结性分析[J].植物生态学报,2000,24(3):332-339.
- [21] 张岗岗,王得祥,张明霞,等.秦岭南坡松栎林群落演替过程中种间联结性和相关性研究[J].西北植物学报,2015,35(8):1657-1668.
- [22] 魏凯,郑建忠,杨铭,等.平潭光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.
- [23] 刘翔宇,何东,田文斌,等.浙江普陀山岛森林木本植物的种间关联格局[J].植物生态学报,2017,41(12):1219-1227.
- [24] 谭一波,詹潮安,杨海东,等.广东南澳岛华润桐群落主要树种种间联结性[J].中南林业科技大学学报,2012,32(11):92-99.
- [25] 李荔,马永驰.海岛生态脆弱性研究综述与展望[J].海洋开发与管理,2018,35(10):60-67.
- [26] 郑俊鸣.海坛岛公园植物多样性及群落结构的夏季微气候分析评价[D].福州:福建农林大学,2017.
- [27] 郑俊鸣,张嘉灵,郑建忠,等.中国海岛植被修复的适生植物[J].世界林业研究,2017,30(3):86-90.
- [28] 黄柳菁,张增可,郑俊鸣,等.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.
- [29] 杜虎,彭晚霞,宋同清,等.桂北喀斯特峰丛洼地植物群落特征及其与土壤的耦合关系[J].植物生态学报,2013,37(3):197-208.
- [30] 郑生猛,盖奕爽,谢强,等.桂西北喀斯特峰丛洼地典型灌丛植物种间关系及环境解释[J].农业现代化研究,2016,37(6):1198-1205.
- [31] 罗金环,洪文君,何书奋,等.极小种群海南假韶子群落物种及种群结构研究[J].西南农业学报,2018,31(9):1912-1918.
- [32] 吴沙沙,兰思仁,闫淑君,等.福建省海岸植物资源调查及园林应用综合评价[J].植物资源与环境学报,2014,23(2):100-106.
- [33] Dolph S. A variance test for detecting species associations, with some example applications[J]. Dolph Schluter, 1984, 65(3): 998.
- [34] 王伯荪,彭少麟.南亚热带常绿阔叶林种间联结测定技术研究——I.种间联结测式的探讨与修正[J].植物生态学与地植物

学丛刊, 1985, 9 (4): 274-285.

- [35] 郭俊兵, 狄晓艳, 李素清. 山西大同矿区煤矸石山自然定居植物群落优势种种间关系[J]. 生态学杂志, 2015, 34 (12): 3327-3332.
- [36] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [37] 周先容, 汪建华, 尚 进, 等. 金佛山喀斯特山地巴山榿树灌丛群落优势灌木种群的种间关系[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2016, 38 (9): 88-94.

- [38] 菅 瑞, 马姜明, 莫燕华, 等. 桂林喀斯特石山櫟木群落不同恢复阶段种间联结研究[J]. 广西植物, 2021, 41 (05): 746-757.
- [39] 张震云, 周 伶, 上官铁梁, 等. 半干旱区锦鸡儿群落优势种种间关系[J]. 生态学杂志, 2011, 30 (9): 1868-1874.
- [40] 汪建华, 赵群芬, 李旭光, 等. 南川金佛山甑子岩灌丛群落优势种种间关系研究[J]. 西南农业大学学报, 2001, 23 (4): 293-296.

Interspecific Relationship of Primary Coastal Plant Communities in Pingtan Island

WANG Wei-yao, ZHENG Xin-xuan, WU Ya-hua, LI Yan-lin, GUAN Shi-min, NI Rong-wei, HUANG Liu-jing

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

Abstract: [Objective] To analyze the interspecific relationship of primary coastal plant communities in Pingtan Island and further understand the structural characteristics and coexistence mechanism of coastal plant communities. [Method] Based on community survey, the interspecific association and correlation analysis of dominant species (importance value ny) of plant community in four typical habitat types (bedrock shrub, hilly shrub, sandy meadow and bedrock grass) in Pingtan Island were carried out by the variance ratio method (VR), in Pingtan Island were carried out by the variance ratio method (lysis of dominant specie(CCA sorting), and the ecological species groups were divided. [Result] The coastal plant communities of the four habitats were significantly positively correlated ($VR > 1$, $W > \chi^2_{0.05}(N)$), and the community was relatively stable as a whole. The association and correlation between most species pairs were not significant ($P > 0.05$), and the interspecific independence was strong. Overall positive and negative association and correlation ratio was greater than 1, showing a positive association and positive correlation trend. [Conclusion] Spearman rank correlation coefficient test has higher significance rate of interspecific correlation and higher sensitivity than χ pearman rank correlation coefficient test has higher significance racan be divided into 4 ecological species groups according to the results of R language CCA sorting and interspecific correlation analysis. These 4 groups correspond to 4 habitats. In the restoration and protection of native coastal vegetation in Pingtan Island, the interspecific relationship and environmental adaptability of species should be fully considered, and the appropriate ecological species groups should be selected for planting. In the bedrock habitat with high soil salinity, the ecological species group I: *Peucedanum japonicum*, *Crepidiastrum lanceolatum*, *Vitex trifolia*, etc. The ecological species group II is suitable for planting in the low mountains and hills with large soil volume, high altitude and high rock exposure rate: *Eurya emarginata*, *Elaeagnus pungens*, *Ficus pumila*, etc. On the coastline of sandy soil with low soil salinity and loose soil, ecological species group III is selected for planting: *Oenothera drummondii*, *Calystegia soldanella*, *Glehnia littoralis*, etc. In the soil with relatively high water content, ecological species IV is selected for planting: *Berchemia sinica*, *Heteropappus ciliosus*, *Lycoris radiata*, etc.

Keywords: island plant; interspecific association; interspecific correlation; CCA sorting; ecological species group

(责任编辑: 张 研)