

DOI: 10.20103/j.stxb.202411242878

黄运腾, 钱志军, 曹晟烜, 王晓盈, 罗真, 彭正东, 王迎雪, 陈颖, 林曼妮, 邓传远. 闽东海岛台湾相思人工林群落物种多样性和功能多样性特征及其影响因子. 生态学报, 2025, 45(11): 5527-5540.

Huang Y T, Qian Z J, Cao S X, Wang X Y, Luo Z, Peng Z D, Wang Y X, Chen Y, Lin M N, Deng C Y. Species diversity and functional diversity of *Acacia confusa* Plantation Forest community and its influencing factors on the islands in eastern Fujian. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(11): 5527-5540.

# 闽东海岛台湾相思人工林群落物种多样性和功能多样性特征及其影响因子

黄运腾, 钱志军, 曹晟烜, 王晓盈, 罗真, 彭正东, 王迎雪, 陈颖, 林曼妮, 邓传远\*

福建农林大学风景园林与艺术学院, 福州 350002

**摘要:** 台湾相思广泛分布于热带和亚热带沿海地区, 在海岛生态系统中起重要作用。以闽东地区 6 座海岛的台湾相思 (*Acacia confusa*) 人工林为研究对象, 基于群落调查, 采用相关性分析、冗余分析、逐步回归分析和结构方程模型等方法, 探究环境因子对群落物种多样性、功能多样性的影响及其相互的关系。结果发现: (1) 粗芦岛物种 Shannon-Wiener 多样性指数、琅岐岛物种 Pielou 均匀度指数显著低于其他海岛, 6 座海岛的 Simpson 多样性指数和 Patrick 丰富度指数不存在显著差异, 4 个功能多样性指数均存在显著差异。(2) 功能丰富度指数 FRic 和 4 个物种多样性指数相关性显著, 且均呈正相关; Rao 二次熵指数 RaoQ 与 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数和 Patrick 丰富度指数相关性显著, 且均呈负相关; 功能分歧度指数 FDiv 与物种 Pielou 均匀度指数存在显著负相关。除功能丰富度指数 FRic 外, 其余功能多样性指数与物种多样性指数之间的拟合相关性均较弱。(3) 土壤全氮、土壤全磷、海拔、坡向、郁闭度和风速共 6 个环境因子对物种多样性指数有显著性影响 ( $P < 0.05$ ); 土壤全钾、水溶性盐总量、海拔、郁闭度和距海岸距离共 5 个环境因子对功能多样性指数有显著性影响 ( $P < 0.05$ )。 (4) 土壤 pH 和土壤全钾是影响群落物种多样性和功能多样性的显著因子; 郁闭度是影响群落多样性的重要因子, 且直接作用大于间接作用; 年均降水量能直接影响群落物种多样性, 通过影响郁闭度和土壤全钾的路径间接影响功能多样性。综上, 闽东地区不同海岛台湾相思林群落的物种多样性和功能多样性存在显著差异, 且受土壤、地形和气候三者共同影响。研究可为海岛人工林建设与生物多样性保护提供理论支持。

**关键词:** 闽东地区; 海岛; 台湾相思林; 物种多样性; 功能多样性

## Species diversity and functional diversity of *Acacia confusa* Plantation Forest community and its influencing factors on the islands in eastern Fujian

HUANG Yunteng, QIAN Zhijun, CAO Shengxuan, WANG Xiaoying, LUO Zhen, PENG Zhengdong, WANG Yingxue, CHEN Ying, LIN Manni, DENG Chuanyuan\*

School of Landscape Architecture and Art, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

**Abstract:** *Acacia confusa* is widely distributed in tropical and subtropical coastal regions and plays a significant role in island ecosystems. This article took the *Acacia confusa* Plantation Forest on six islands in the Eastern Fujian area as the research object. To analyze the impacts of environmental factors on species diversity and functional diversity within the communities, as well as the relationships among them, this study employed correlation analysis, redundancy analysis, multiple stepwise regression analyses and structural equation modeling based on community surveys. The results showed

基金项目: 撂荒沙地适生物种引种研究与应用示范技术 (115/KH230123A); 福建农林大学科技创新专项基金项目 (CXZX2019086)

收稿日期: 2024-11-24; 网络出版日期: 2025-03-11

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dengchuanyuan@fafu.edu.cn

that: 1. The Shannon-Wiener diversity index ( $H$ ) of species on Culu Island and the Pielou evenness index ( $J$ ) of species on Langqi Island were significantly lower than those on other islands. There was no significant difference between Simpson's diversity index ( $D$ ) and Patrick's richness index ( $R$ ), but significant differences in the four functional diversity indices among the six islands. 2. The functional richness index (FRic) exhibited a significant positive correlation with four species diversity indices; the Rao's quadratic entropy index (RaoQ) showed significant negative correlations with the Shannon diversity index ( $H$ ), Simpson diversity index ( $D$ ), and Patrick richness index ( $R$ ) of species. Additionally, there was a significant negative correlation between the functional divergence index (FDiv) and the Pielou's evenness index ( $J$ ). Except for the functional richness index (FRic), the fitting correlations between the other functional diversity indices and the species diversity indices were all relatively weak. 3. Redundancy analysis indicated that six environmental factors—soil total nitrogen, soil total phosphorus, altitude, slope aspect, crown density, and wind speed—had significant impacts on species diversity indices ( $P < 0.05$ ); five environmental factors, including soil total potassium, total content of water-soluble salts, altitude, crown density, and distance from the coastline, significantly influenced functional diversity indices ( $P < 0.05$ ). 4. The structural equation model revealed that soil factors such as pH and total potassium are significant factors influencing species diversity and functional diversity in communities. Crown density is a crucial factor affecting community diversity, with direct effects outweighing indirect effects. Mean annual precipitation directly affects species diversity, while its impact on functional diversity is indirectly mediated through crown density and soil total potassium. In summary, there are significant differences in the species diversity and functional diversity of *Acacia confusa* communities on different islands in the Eastern Fujian area, which are jointly influenced by soil, topography, and climate factors. This study provides theoretical support for the construction of island plantations and the conservation of biodiversity.

**Key Words:** eastern Fujian area; islands; *Acacia confusa* forest; species diversity; functional diversity

群落物种多样性和功能多样性是生态系统功能研究的重要内容<sup>[1]</sup>。物种多样性反映的是植物群落物种组成的丰富程度,功能多样性则展现出群落中植物功能性状对环境的响应机制和分布状况<sup>[2-3]</sup>。物种多样性和功能多样性研究可反映群落水平上生态系统对环境变化的响应能力,是探究植物在环境中的适生策略,预测生态系统功能的关键因子<sup>[4]</sup>。在不同环境梯度上,物种多样性和功能多样性会因气候、地形、土壤等环境条件的差异而表现出不同的规律,目前关于物种多样性与功能多样性的关系尚未达成一致普适性观点<sup>[1,5-6]</sup>。因此,研究不同环境条件下生态系统物种多样性与功能多样性的特征及其之间的关系,可增进对不同物种群落多样性认知的深度与广度,也可以揭示植物群落对环境的适应机制。

人工林在发展初期以木材生产为首要目标,多为单一树种种植,群落结构简单,物种多样性较低,生态功能较差<sup>[7]</sup>。随着经济全球化进程的加速,生态环境保护压力增大,人工林经营目标正向生态系统服务功能转变<sup>[8]</sup>。台湾相思(*Acacia confusa*)是含羞草科金合欢属(*Acacia*)常绿乔木,是滨海重要防护林和景观树种。海岛生态系统脆弱,台湾相思因其抗逆性极强、抗风性良好且具有固氮能力而广泛应用于海岛人工林建设<sup>[9]</sup>。闽东地区海岛的台湾相思人工林大部分于20世纪人工种植辅以飞机播种而成,现已逐渐演替为半自然林,是海岛典型植物群落,其林下植物种类丰富,群落结构相对稳定,对维持海岛生态系统稳定具有重要意义。目前关于海岛台湾相思人工林的群落多样性研究较少,本文以闽东6座大型海岛的台湾相思林群落为研究对象,探究其群落的多样性特征及其与环境因子的关系,以期对海岛台湾相思人工林的经营管理、群落结构优化、海岛植被修复和人工林建设提供一定的参考。

## 1 研究区概况

闽东地区位于福建东部,包括福州、宁德两市。闽东地区海岛众多,其中海坛岛为福建第一大岛,中国第五大岛<sup>[10]</sup>。闽东地属亚热带季风湿润气候区,海岛地区受海洋气候调节,为亚热带海洋性季风气候,年降水

量大,降水季节变化明显,每年7—8月受台风影响较大。闽东海岛地形以丘陵山地为主,平原地区相对较少,最高峰为海坛岛君山,最高点海拔434m。研究区内优势种明显,植被结构较为单一,台湾相思、木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)和桉(*Eucalyptus robusta*)分布最广。

## 2 材料与方

### 2.1 样地设置与调查

于2021—2024年的6—8月采用样方法陆续对海坛岛、大练岛、琅岐岛、粗芦岛、西洋岛和浮鹰岛6座大型海岛的台湾相思人工林主要分布区进行群落学调查,样方遵循均匀性、可达性、合理性原则,共设立80个20m×20m台湾相思乔木样方,各岛基本情况和样方数量见表1。样方4角布设4个面积为5m×5m的灌木样方,4个角及中心位置布设5个面积1m×1m的草本样方,同时记录乔木层、灌木层和草本层每一棵植株的种名、胸径、株高和冠幅等数量信息<sup>[11]</sup>。

表1 各海岛基本信息

Table 1 Basic information of each island

海岛 Island	面积/km <sup>2</sup> Area	经纬度 Latitude and longitude	样方数量 Number
海坛岛 Haitan island (HT)	278.6	25°16′—25°44′N, 119°32′—120°10′E	24
大练岛 Dalian island (DL)	9.9	25°38′—25°40′N, 119°39′—119°44′E	9
琅岐岛 Langqi island (LQ)	94.0	26°04′—26°08′N, 119°33′—119°41′E	14
粗芦岛 Culu island (CL)	16.7	26°08′—26°11′N, 119°36′—119°40′E	12
西洋岛 Xiyang island (XY)	7.9	26°29′—26°32′N, 120°01′—120°04′E	12
浮鹰岛 Fuying island (FY)	11.2	26°33′—26°36′N, 120°70′—120°10′E	9

### 2.2 环境因子测定

环境因子共17个,包括4个地理环境因子,3个气候因子,9个土壤化学指标和郁闭度(Crown density, CD)。地理环境因子包括海拔(Altitude, AL)、坡度(Slope, SL)、坡向(Slope aspect, SA)和距海岸线距离。每个样方的海拔、经纬度信息利用GPS定位仪记录,坡度和坡向通过森林罗盘仪记录,为方便计算,参考陈宝瑞<sup>[12]</sup>的方法对坡向进行标准化。距海岸线距离(Distance from coastline, DC)采用Google Earth的“标尺”工具获取,采用林冠数字图像Photoshop分析法测定群落郁闭度<sup>[13]</sup>。

气候因子年均温(Mean annual temperature/°C, MAT)和年均降水量(Mean annual precipitation/mm, MAP)从国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn>)获取,风速(Wind speed/(m/s), WS)从国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)获取,气候数据均在ArcGIS 10.6中进行提取。

采用五点取样法在样方四角及中心位置分别进行取样,挖取深度为15—20cm的土样装入自封袋并编号,带回实验室自然阴干。土样研磨后依次过100目和20目筛后,分别称出100g用于化学指标的测定。9项土壤化学指标根据鲁如坤<sup>[14]</sup>的方法,对土壤因子中pH值(pH)、水溶性盐总量(Total content of water-soluble salt, S)、全磷(Total phosphorus, TP)、全钾(Total potassium, TK)、全氮(Total nitrogen, TN)、有机质(Soil organic matter, SOM)、有效磷(Available phosphorus, AP)、速效钾(Available potassium, AK)、碱解氮(Alkaline hydrolyzable nitrogen, AN)共9项指标进行测定(表2)。其中,海坛岛、大练岛、粗芦岛土壤理化性质参数来源于本课题组的先前研究工作,具体参见王春晓<sup>[15]</sup>、赖敏英<sup>[16]</sup>、何雅琴<sup>[17]</sup>、马晓迪<sup>[18]</sup>的毕业论文,浮鹰岛和琅岐岛土壤理化性质参数引自己发表文献<sup>[19—20]</sup>。

### 2.3 物种功能性状选择

从物种发生和群落建立角度,选取与物种来源、营养生长和繁殖扩散相关的16类性状进行研究(表3)<sup>[2,21—22]</sup>。性状数据主要通过实地调查以及资料查询,包括《福建植物志》《中国植物志》《中国种子植物属的分布区类型》和全球植物性状数据库(Plant Trait Database, TRY v.6.0)等。其中,本地植物是指自然分布于

闽东地区的物种;外来植物指自然分布于闽东范围外,由人类有意或无意引入的物种;入侵物种信息的确定以中国外来入侵物种信息系统(<http://www.iplant.cn/ias/protlist>)为准。

表 2 不同海岛土壤化学指标平均值

Table 2 Average value of soil chemical indexes on different islands

指标 Index	海坛岛 HT	大练岛 DL	琅岐岛 LQ	粗芦岛 CL	西洋岛 XY	浮鹰岛 FY
土壤 pH	4.66±0.13	5.00±0.38	4.34±0.11	4.95±0.15	5.05±0.09	5.63±0.19
水溶性盐总量 S/(g/kg)	1.14±0.14	0.95±0.16	0.64±0.05	1.38±0.07	0.42±0.05	1.39±0.12
全磷 TP/(g/kg)	0.27±0.01	0.52±0.04	0.31±0.02	0.23±0.02	0.23±0.02	0.48±0.07
全钾 TK/(g/kg)	2.66±0.24	15.23±1.05	8.03±1.45	7.63±0.95	29.91±0.66	2.24±0.15
全氮 TN/(g/kg)	2.02±0.15	3.21±0.58	2.04±0.17	1.62±0.19	1.54±0.07	1.36±0.17
有机质 SOM/(g/kg)	38.76±2.77	60.29±11.65	46.91±3.91	33.40±2.47	29.57±1.80	24.81±2.92
有效磷 AP/(g/kg)	7.65±0.89	8.88±1.31	9.49±2.52	2.39±0.22	1.06±0.14	5.39±1.33
速效钾 AK/(g/kg)	0.15±0.01	0.16±0.01	0.11±0.02	0.15±0.02	0.10±0.01	0.32±0.05
碱解氮 AN/(g/kg)	0.19±0.01	0.24±0.04	0.23±0.02	0.22±0.02	0.10±0.01	0.13±0.01

S:水溶性盐总量 Total content of water-soluble salt;TP:全磷 Total phosphorus;TK:全钾 Total potassium;TN:全氮 Total nitrogen;SOM:有机质 Soil organic matter;AP:有效磷 Available phosphorus;AK:速效钾 Available potassium;AN:碱解氮 Alkaline hydrolyzable nitrogen

表 3 研究选取的性状及其数据来源

Table 3 The traits selected for the study and data sources

性状 Traits	数据类型 Trait type	功能特征类型 Trait state	数据来源 Data sources
生活型 Life form	名称数据	1 一年生草本;2 多年生草本;3 藤本;4 灌木;5 乔木	《福建植物志》 《中国植物志》
物种来源 Origin	名称数据	1 本地植物;2 国内外来植物;3 国外外来植物;4 入侵植物	《福建植物志》 《中国植物志》
地理成分 Floristic zone	名称数据	1 世界分布;2 热带分布;3 温带分布;4 中国特有	《中国种子植物属的分布区类型》
叶级 Leaf level	名称数据	1 鳞型叶(0—0.25 cm <sup>2</sup> );2 微型叶(0.25—2.25 cm <sup>2</sup> );3 小型叶(2.25—20.25 cm <sup>2</sup> );4 中型叶(20.25—182.25 cm <sup>2</sup> );5 大型叶(182.25—1642.25 cm <sup>2</sup> )	《福建植物志》, 实地调查
叶质 Leaf texture	名称数据	1 纸质;2 草质;3 革质;4 肉质;5 膜质	《福建植物志》, 实地调查
花色 Flower color	名称数据	1 花被不明显;2 绿色系;3 白色系;4 蓝紫色系;5 黄色系;6 红色系;7 两种及以上花色	《福建植物志》, 实地调查
始花期 Initial flowering stage	数值数据	植物开始开花的月份,1—12	《福建植物志》, 实地调查
开花持续期 Florescence	数值数据	从始花期到末花期,1—12	《福建植物志》, 实地调查
授粉方式 Pollination mode	名称数据	1 风媒授粉;2 虫媒授粉	TRY v.6.0
果皮类型 Fruit pericarp type	名称数据	1 干果;2 肉果	《福建植物志》, 实地调查
果熟期 Fruit ripening period	数值数据	植物开始结果的月份,1—12	《福建植物志》, 实地调查
种子扩散方式 Dispersal mode	名称数据	1 自体扩散;2 风扩散;3 动物扩散;4 水扩散	TRY v.6.0
植株被刺 Prickly	名称数据	1 有;2 无	《福建植物志》,实地调查
株高 Plant height	数值数据	以米为单位	实地调查
盖度 Plant cover	数值数据	盖度百分比	实地调查
多度 Plant abundance	数值数据	个体数量	实地调查

## 2.4 物种多样性和功能多样性计算

### (1) 物种多样性<sup>[23]</sup>

群落物种多样性指数选用 Shannon-Wiener 多样性指数 (Shannon-Wiener diversity index,  $H$ )、Pielou 均匀度指数 (Pielou evenness index,  $J$ )、Simpson 多样性指数 (Simpson diversity index,  $D$ ) 和 Patrick 丰富度指数 (Patrick richness index,  $R$ ), 计算公式如下:

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

$$\text{Pielou 均匀度指数: } J = H / \ln S$$

$$\text{Simpson 多样性指数: } D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

$$\text{Patrick 丰富度指数: } R = S$$

式中,  $S$  为物种数;  $P_i$  为第  $i$  个物种的相对多度,  $P_i = N_i / N$ ;  $N$  为所有物种个体数总和;  $N_i$  为第  $i$  个物种的个体总数。

### (2) 功能多样性<sup>[24-25]</sup>

功能多样性选取功能丰富度指数 (Functional richness index, FRic)、功能均匀度指数 (Functional evenness index, FEve)、功能分歧度指数 (Functional divergence index, FDiv)、Rao 二次熵指数 (Rao's quadratic entropy index, RaoQ), 计算公式如下:

$$\text{功能丰富度指数: } \text{FRic} = \frac{\text{SFci}}{R_c}$$

式中, SFci 为群落  $i$  内物种占据的生态位,  $R_c$  为群落中性状  $C$  占据生态位。

$$\text{功能均匀度指数: } \text{FEve} = \frac{\sum_{i=1}^{S-1} \min = (\text{PEW}_i, \frac{1}{S-1}) - \frac{1}{S-1}}{1 - \frac{1}{S-1}}$$

$$\text{PEW}_i = \frac{EW_i}{\sum_{i=1}^{S-1} EW_i}$$

$$EW_i = \frac{\text{dist}(i, j)}{n_i + n_j}$$

式中,  $i$  为分支长,  $\text{PEW}_i$  是分支长的权重,  $EW_i$  为均匀度权重,  $\text{dist}(i, j)$  为物种  $i$  和  $j$  的欧氏距离,  $n_i$  表示物种  $i$  的数目。

$$\text{功能分歧度指数 (FDiv): } \text{FDiv} = \frac{\delta d + \overline{dG}}{\delta |d| + \overline{dG}}$$

$$\delta d = \sum_{i=1}^S P_i \times (dG_i - \overline{dG})$$

式中,  $dG_i$  是欧氏距离,  $dG$  是各物种性状欧氏距离的均值,  $\delta |d|$  是对  $\delta d$  计算时取距离差绝对值所得,  $P_i$  为第  $i$  个物种的相对多度。

$$\text{Rao 二次熵指数: } \text{RaoQ} = \sum_{i=1}^{S-1} \sum_{i=i+1}^S d_{ij} p_i p_j$$

式中,  $p_i$  为物种  $i$  占群落中总物种个体数的比例。

## 2.5 数据处理

采用 Excel 2022 计算植物株高、盖度、多度以及曲线拟合, R 4.2.3 计算群落多样性和 Spearman 相关性分析, 采用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析、Duncan 多重比较和逐步回归分析, 采用 Canoco 5.0 进行冗余分析,

采用 AMOS 26.0 构建路径分析模型,绘图于 Adobe Illustrator 2023 中进行。

### 3 结果与分析

#### 3.1 海岛台湾相思人工林群落的物种组成

闽东地区六座海岛 80 个台湾相思人工林群落内,维管束植物共计 105 科 282 属 404 种(含种下分类单位),其中被子植物 85 科 256 属 371 种,裸子植物 3 科 3 属 4 种,分别为黑松(*Pinus thunbergii*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、罗汉松(*Podocarpus macrophyllus*)和杉木(*Cunninghamia lanceolata*),蕨类植物 17 科 22 属 29 种(表 4),其中台湾相思林乔木层植物共有 21 种,灌木层植物 202 种,草本层植物 197 种。六座海岛中,海坛岛物种丰富度最大,粗芦岛物种丰富度最小。

表 4 海岛台湾相思人工林群落的物种组成

Table 4 The species composition of the *Acacia confusa* forest community

岛屿 Island	被子植物 Angiosperms			裸子植物 Gymnosperms			蕨类植物 Pteridophytes		
	科 Family	属 Genus	种 Species	科 Family	属 Genus	种 Species	科 Family	属 Genus	种 Species
海坛岛 HT	61	141	177	1	1	2	10	12	15
大练岛 DL	53	96	116	1	1	1	4	6	8
琅岐岛 LQ	61	131	165	2	2	2	10	14	14
粗芦岛 CL	45	87	109	2	2	2	8	10	12
西洋岛 XY	56	104	121	1	1	1	8	11	12
浮鹰岛 FY	44	96	118	0	0	0	4	4	4
总计 Total	85	256	371	3	3	4	17	22	29

#### 3.2 物种多样性及其差异

台湾相思群落物种的 Shannon-Wiener 多样性指数  $H$  与 Pielou 均匀度指数  $J$  在不同海岛间存在显著差异

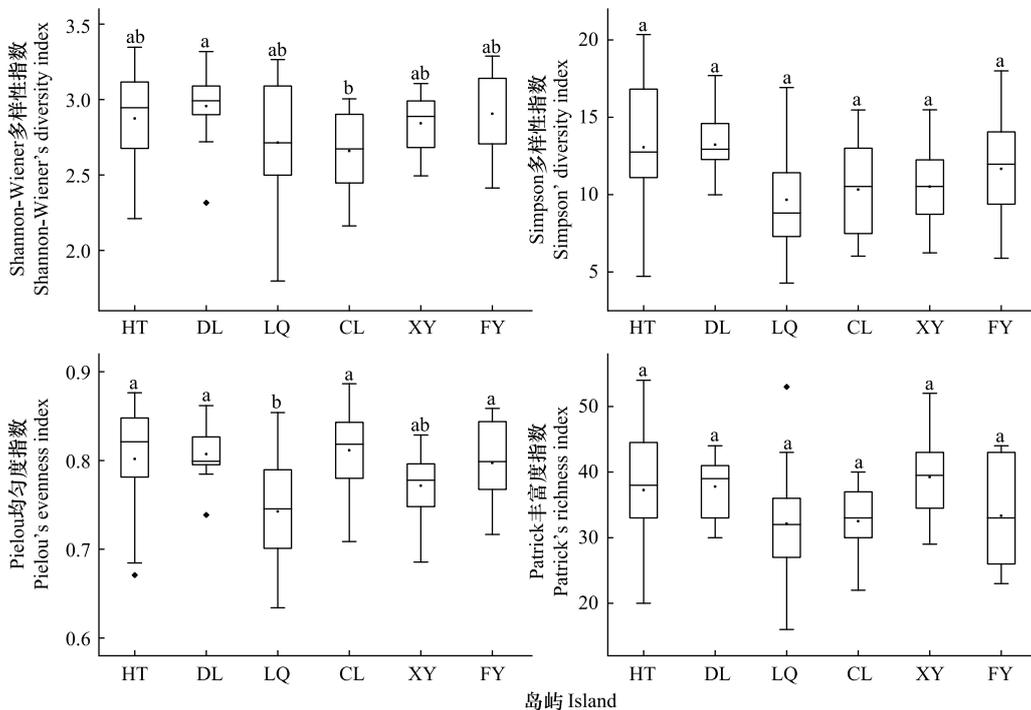


图 1 不同海岛台湾相思群落的物种多样性

Fig.1 Species diversity of *Acacia confusa* communities on different islands

不同小写字母表示不同海岛之间差异显著( $P < 0.05$ );HT: 海坛岛;DL: 大练岛;LQ: 琅岐岛;CL: 粗芦岛;XY: 西洋岛;FY: 浮鹰岛

( $P < 0.05$ ) (图 1)。大练岛的物种 Shannon-Wiener 多样性指数  $H$  显著高于粗芦岛, 海坛岛、大练岛、粗芦岛和浮鹰岛的物种 Pielou 均匀度指数  $J$  显著高于琅岐岛。台湾相思群落的 Simpson 多样性指数  $D$  和 Patrick 丰富度指数  $R$  在不同海岛环境下不存在显著差异 ( $P > 0.05$ ), 两者的最高值均出现在海坛岛, 最低值均出现在琅岐岛。

### 3.3 功能多样性及其差异

台湾相思群落物种的 4 个功能多样性指数在不同海岛均存在显著差异 ( $P < 0.05$ ) (图 2)。粗芦岛的功能丰富度指数 FRic 显著低于海坛岛、大练岛、西洋岛和浮鹰岛; 浮鹰岛的功能均匀度指数 FEve 显著高于海坛岛、琅岐岛和西洋岛; 粗芦岛的功能分歧度指数 FDiv 显著低于琅岐岛和浮鹰岛; 西洋岛的 Rao 二次熵指数 RaoQ 显著低于大练岛、琅岐岛、粗芦岛和浮鹰岛。

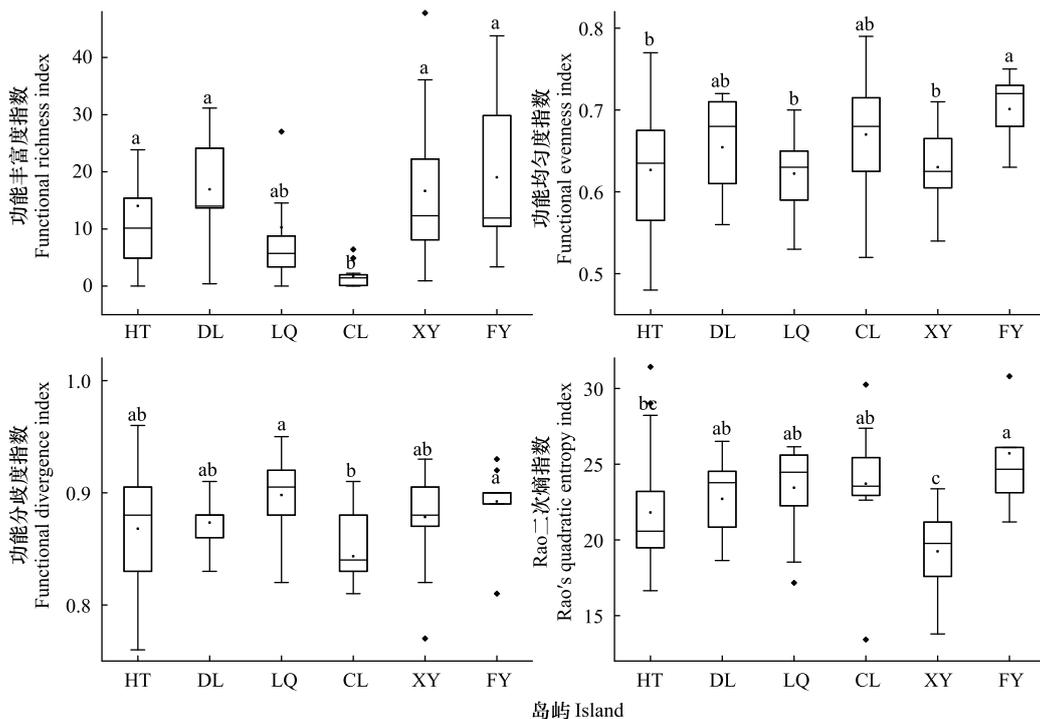


图 2 不同海岛台湾相思群落的功能多样性

Fig.2 Functional diversity of *Acacia confusa* communities on different islands

### 3.4 物种多样性与功能多样性的关系

群落多样性指数之间的 Spearman 相关分析 (表 5) 表明, 发现四个物种多样性指数之间均呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 功能均匀度指数 FEve、功能分歧度指数 FDiv 和 Rao 二次熵指数 RaoQ 之间呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。功能丰富度指数 FRic 与四个物种多样性指数均呈显著正相关, 功能分歧度指数 FDiv 与物种 Pielou 均匀度指数  $J$  存在显著负相关 ( $P < 0.05$ ), Rao 二次熵指数 RaoQ 与 Shannon-Wiener 多样性指数  $H$ 、Simpson 多样性指数  $D$  和 Patrick 丰富度指数  $R$  均存在显著负相关, 其他功能多样性指数与物种多样性指数之间无显著相关关系。

对海岛台湾相思群落的物种多样性指数和功能多样性指数进行线性拟合 (表 6), 除功能丰富度指数 FRic 外, 其余功能多样性指数与 4 个物种多样性指数之间的相关性均较弱。功能丰富度指数 FRic 和 Shannon-Wiener 多样性指数  $H$ 、Pielou 均匀度指数  $J$  和 Simpson 多样性指数  $D$  有较强的相关性, 最优拟合方程均为幂函数, 与 Patrick 丰富度指数  $R$  指数的最优拟合函数为二次多项式函数。

### 3.5 环境因子对物种多样性和功能多样性的影响

DCA 结果显示, 群落物种多样性与功能多样性和样方的最大梯度长度分别为 1.42 和 0.16, 因此选取

RDA 线性模式进行排序,通过冗余分析来探究群落多样性指数与环境因子之间的关系。其中响应变量为4个多样性指数,解释变量为9个土壤化学指标,4个地理环境因子,3个气候因子和郁闭度,共计17个。群落物种多样性的RDA中,前2轴的累计解释量为39.98%(图3)。蒙特卡罗检验(表7)筛选出土壤全氮、土壤全磷、海拔、坡向,郁闭度和风速共6个对物种多样性指数有显著性影响的环境因子( $P<0.05$ )。群落功能多样性的RDA中,前2轴的累计解释量为23.33%(图4)。蒙特卡罗检验(表7)筛选出土壤全钾、水溶性盐总量、海拔、郁闭度和距海岸距离共5个对功能多样性指数有显著性影响的环境因子( $P<0.05$ )。

表5 物种多样性与功能多样性的 Spearman 相关性检验

Table 5 Spearman correlation test between species diversity and functional diversity

指数 Index	功能丰富度指数 FRic	功能均匀度指数 FEve	功能分歧度指数 FDiv	Rao 二次熵指数 RaoQ	Shannon-Wiener 多样性指数 H	Simpson 多样性指数 D	Pielou 均匀度指数 J
功能均匀度指数 FEve	0.064						
功能分歧度指数 FDiv	0.041	0.232 *					
Rao 二次熵指数 RaoQ	-0.128	0.285 *	0.484 **				
Shannon-Wiener 多样性指数 H	0.587 **	0.195	-0.065	-0.239 *			
Simpson 多样性指数 D	0.462 **	0.087	-0.167	-0.246 *	0.908 **		
Pielou 均匀度指数 J	0.266 *	0.189	-0.271 *	-0.114	0.799 **	0.879 **	
Patrick 丰富度指数 R	0.694 **	0.154	-0.010	-0.361 **	0.811 **	0.659 **	0.481 **

FRic:功能丰富度指数 Functional richness index; FEve:功能均匀度指数 Functional evenness index; FDiv:功能分歧度指数 Functional divergence index; RaoQ:Rao 二次熵指数 Rao's quadratic entropy index; H:Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index; J:Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index; D:Simpson 多样性指数 Simpson diversity index; R:Patrick 丰富度指数 Patrick richness index; \*  $P<0.05$  \*\*  $P<0.01$  \*\*\*  $P<0.001$

表6 群落功能多样性指数和物种多样性指数的关系拟合

Table 6 Fitting the relationship between community functional diversity index and species diversity index

功能多样性指数 Functional diversity	物种多样性指数 Species diversity	拟合方程 Fitted equation	$R^2$
功能丰富度指数 FRic	H	$y = 7 \times 10^{-6}x + 13.068$	$R^2 = 0.6303$
	D	$y = 0.0024x + 3.2024$	$R^2 = 0.3658$
	J	$y = 53.012x + 9.8382$	$R^2 = 0.1354$
	R	$y = 0.0525x^2 - 2.494x + 31.665$	$R^2 = 0.5803$
功能均匀度指数 FEve	H	$y = 0.5316x^{0.1817}$	$R^2 = 0.0444$
	D	$y = 0.0002x^2 - 0.0024x + 0.6485$	$R^2 = 0.0093$
	J	$y = 2.6928x^2 - 3.9426x + 2.0704$	$R^2 = 0.0608$
	R	$y = 0.4861x^{0.0781}$	$R^2 = 0.0344$
功能分歧度指数 FDiv	H	$y = 0.0447x^2 - 0.2519x + 1.2249$	$R^2 = 0.0213$
	D	$y = 0.0005x^2 - 0.0128x + 0.9545$	$R^2 = 0.0581$
	J	$y = 1.4927x^2 - 2.5234x + 1.9313$	$R^2 = 0.0891$
	R	$y = 0.0001x^2 - 0.0072x + 0.9961$	$R^2 = 0.0362$
Rao 二次熵指数 RaoQ	H	$y = 2.041x^2 - 13.916x + 45.34$	$R^2 = 0.0623$
	D	$y = 0.0389x^2 - 1.1661x + 30.196$	$R^2 = 0.0925$
	J	$y = 1.4927x^2 - 2.5234x + 1.9313$	$R^2 = 0.0891$
	R	$y = 0.0037x^2 - 0.4321x + 32.933$	$R^2 = 0.1375$

由群落多样性指数与环境因子的 Spearman 相关性可知(图5),物种多样性 H 和 D 指数主要受郁闭度和土壤全氮影响,物种均匀度 J 指数主要受郁闭度、风速和水溶性总盐影响;R 指数除受郁闭度和水溶性总盐影响之外,还与海拔、土壤 pH 显著相关。功能多样性指数 FRic 主要受土壤全磷影响;FDiv 指数与海拔、郁闭

度、风速和水溶性总盐影响;RaoQ 指数主要受土壤郁闭度和土壤水溶性总盐、土壤全钾,土壤有效磷和土壤速效钾影响。其中,环境因子郁闭度、风速和水溶性总盐共同影响着群落物种多样性和功能多样性。

表 7 显著影响多样性指数的环境因子蒙特卡罗检验

Table 7 Monte Carlo test for environmental factors significantly influencing diversity indices

指数 Index	环境因子 Environmental factors	解释量% Explanation	<i>F</i>	<i>P</i>
物种多样性 Species diversity	<i>CD</i>	10.7	11.6	0.002 **
	<i>WS</i>	6.3	5.6	0.006 **
	<i>AL</i>	4.5	3.7	0.022 *
	<i>SA</i>	3.8	3.6	0.036 *
	<i>TP</i>	3.6	2.9	0.048 *
	<i>TN</i>	3.4	3.1	0.048 *
功能多样性 Functional diversity	<i>CD</i>	6.3	5.7	0.002 **
	<i>DC</i>	3.6	3.1	0.026 *
	<i>S</i>	2.9	2.7	0.028 *
	<i>AL</i>	3.3	2.7	0.042 *
	<i>TK</i>	3.1	2.5	0.046 *

*CD*: 郁闭度 Crown density; *WS*: 风速 Wind speed; *AL*: 海拔 Altitude; *SA*: 坡向 Slope aspect; *DC*: 距海岸距离 Distance from coastline

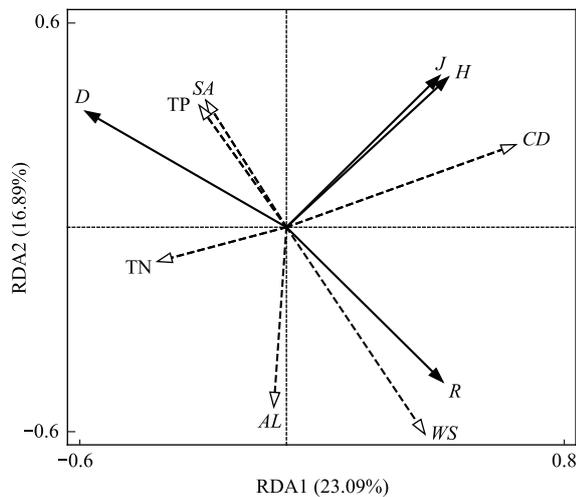


图 3 群落物种多样性与环境因子的冗余分析

Fig.3 Redundancy analysis between community species diversity and environmental factors

*H*: Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index; *J*: Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index; *D*: Simpson 多样性指数 Simpson diversity index; *R*: Patrick 丰富度指数 Patrick richness index; *CD*: 郁闭度 Crown density; *WS*: 风速 Wind speed; *AL*: 海拔 Altitude; *SA*: 坡向 Slope aspect; *TP*: 土壤全磷 Total phosphorus; *TN*: 土壤全氮 Total nitrogen

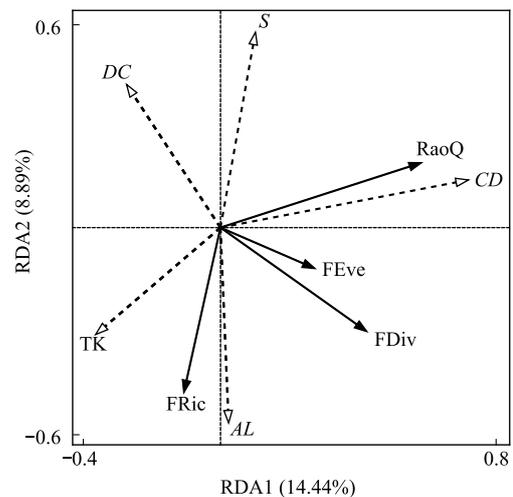


图 4 群落功能多样性与环境因子的冗余分析

Fig.4 Redundancy analysis between community functional diversity and environmental factors

*FRic*: 功能丰富度指数 Functional richness index; *FEve*: 功能均匀度指数 Functional evenness index; *FDiv*: 功能分歧度指数 Functional divergence index; *RaoQ*: Rao 二次熵指数 Rao's quadratic entropy index; *DC*: 距海岸距离 Distance from coastline; *S*: 水溶性盐总量 Total content of water-soluble salt; *TK*: 土壤全钾 Total potassium

为进一步明确环境因子对群落物种多样性和功能多样性的影响,将其有显著影响的因子分别进行多元逐步回归分析(表 8)和结构方程模型构建(图 6、7)。在逐步回归分析中,四个物种多样性指数均存在环境因子对其有显著影响,故采取主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)对四个指数进行降维处理,主成分(PCA 1)具有 86.12% 的方差解释率,能较好地代表 4 个物种多样性指数。功能多样性指数 *FRic* 和 *FEve* 在模型构建中均无显著影响因子,故选取 *FDiv* 和 *RaoQ* 指数直接进行分析。结果表明,土壤因子中影响物种多样

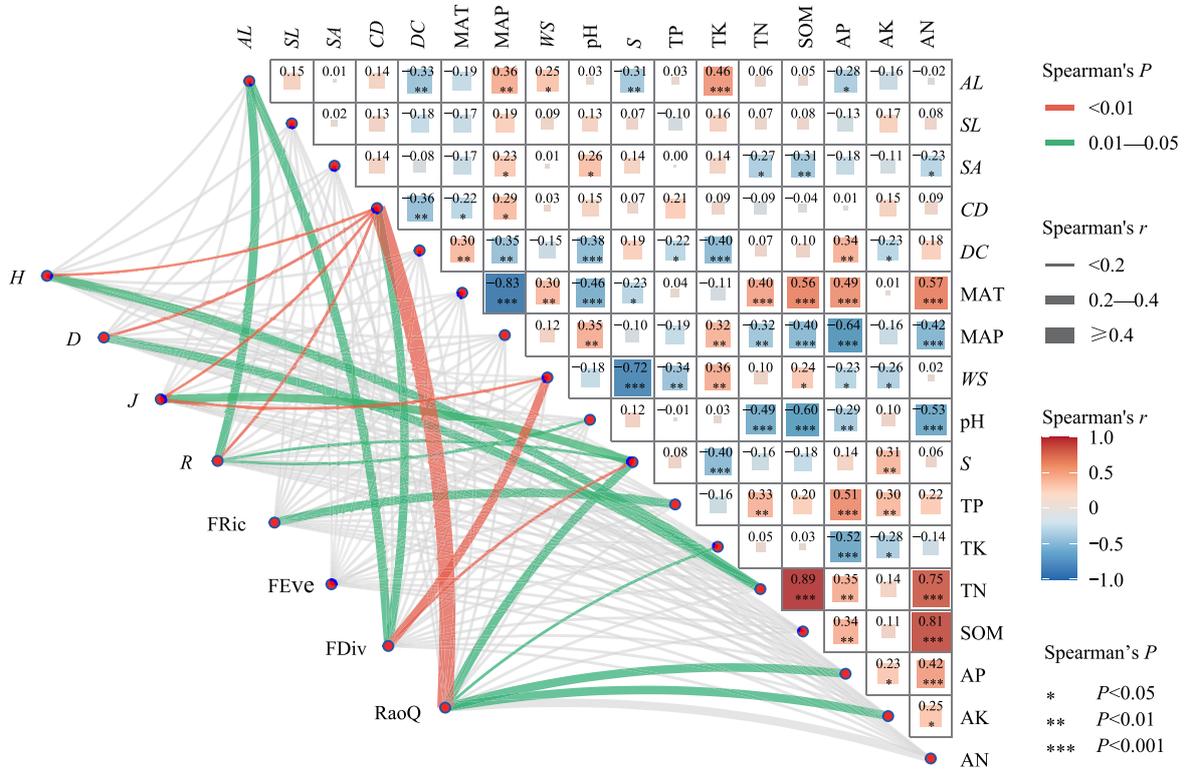


图 5 群落物种多样性、功能多样性与环境因子的 Spearman 相关性

Fig.5 Spearman correlation between community species diversity, functional diversity, and environmental factors

SL:坡度 Slope;MAT:年均温 Mean annual temperature;MAP:年均降水量 Mean annual precipitation;SOM:有机质 Soil organic matter;AP:有效磷 Available phosphorus;AK:速效钾 Available potassium;AN:碱解氮 Alkaline hydrolyzable nitrogen

性的主要是土壤全磷、土壤 pH,影响功能多样性的主要是土壤全钾;郁闭度能够直接影响物种多样性和功能多样性,且直接作用大于间接作用;气候因子中风速和年均降水量对群落多样性有较大影响,其中年均降水量能直接也能间接影响物种多样性的大小,对功能多样性的影响主要是通过影响郁闭度和土壤全钾间接作用;风速直接影响物种多样性,且更多是通过影响土壤全钾间接影响功能多样性;地理环境因子中,距海岸线距离能直接影响物种多样性,也能通过影响风速、土壤 pH 和土壤有效磷间接作用;坡向、海拔主要通过影响土壤 pH 和土壤全钾间接影响群落多样性。

表 8 群落物种多样性、功能多样性与环境因子的多元逐步回归

Table 8 Multiple stepwise regression analysis of species diversity, functional diversity, and environmental factors

指数 Index	回归方程 Regression equation	F	R <sup>2</sup>	P
Simpson 多样性指数 D	$y = 24.246 - 0.203 \times CD + 7.688 \times TP$	12.749	0.249	$P < 0.000$ ***
Shannon-Wiener 多样性指数 H	$y = 4.154 - 0.014 \times CD + 1.076 \times TP - 0.017 \times AP - 0.108 \times pH$	8.263	0.306	$P < 0.000$ ***
Pielou 均匀度指数 J	$y = 1.009 - 0.003 \times CD - 0.052 \times WS - 0.017 \times DC + 0.007 \times SA + 0.145 \times AN$	8.918	0.376	$P < 0.000$ ***
Patrick 丰富度指数 R	$y = 76.88 - 0.357 \times CD - 2.486 \times DC - 2.997 \times pH + 0.03 \times AL$	8.337	0.308	$P < 0.000$ ***
功能分歧度指数 FDiv	$y = 0.765 + 0.029 \times WS + 0.001 \times CD - 0.005 \times SA$	7.173	0.221	$P < 0.000$ ***
Rao 二次熵指数 RaoQ	$y = 11.246 + 0.169 \times CD - 0.138 \times TK$	15.626	0.289	$P < 0.000$ ***

## 4 讨论

### 4.1 海岛台湾相思林群落多样性特征

物种多样性是反映群落生态系统复杂性和稳定性的重要指标,物种多样性水平越高,群落结构越复

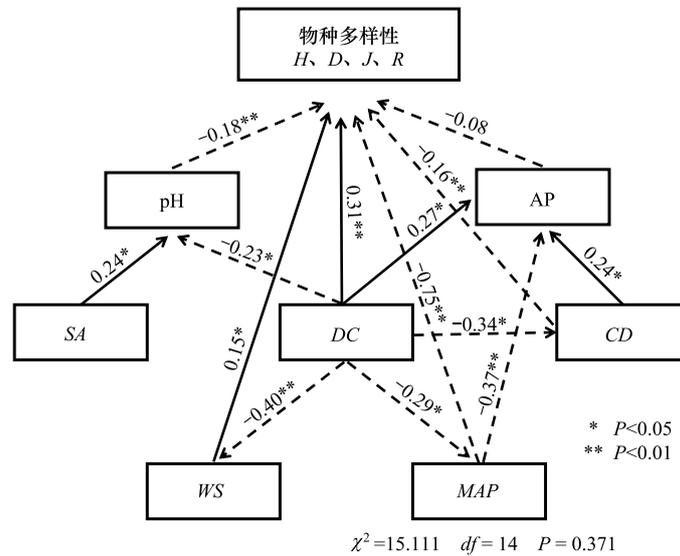


图 6 环境因子与群落物种多样性的结构方程模型

Fig.6 Structural equation model of the relationship between environmental factors and species diversity

杂<sup>[26]</sup>。本研究 6 座海岛中,海坛岛在闽东地区海岛中面积最大,因此其物种数最多。岛屿面积是对植物丰富度影响最大的环境因子,岛屿面积越大,物种种类越丰富,这可能也是 4 个物种多样性指数的最大值均出现在海坛岛的原因<sup>[27]</sup>。粗芦岛的 Shannon-Wiener 多样性指数  $H$  在海岛中最低,据实地调查,虽然其面积并非最小,但相较于其他海岛,芒萁在粗芦岛台湾相思群落草本层中重要值较大,而芒萁对海岛植物群落物种多样性具有显著影响<sup>[28]</sup>。除 Shannon-Wiener 多样性指数  $H$  外,琅岐岛的其他 3 个物种多样性指数均低于另外 5 座海岛,这可能与 Shannon-Wiener 多样性指数  $H$  本身特点有关,当物种丰富度较大时,Shannon-Wiener 指数会较高<sup>[23]</sup>。而 Pielou 均匀度指数  $J$  代表物种分布的均匀程度,海岛生境的异质性和不同程度的人为干扰是影响群落物种均匀度的重要因素。琅岐岛灌木层的雀梅藤、马缨丹和草本层的菴草、狗尾草,较其他物种重要值优势明显,对其他物种的发展形成抑制作用,使得群落整体均匀度较低。

群落功能丰富度指数  $FRic$  是指物种占据生态位空间的大小,功能分歧度指数  $FDiv$  是物种性状空间分化程度<sup>[29-30]</sup>。本研究中,4 个功能多样性指数在 6 座海岛间均存在显著差异,这可能是海岛地理位置的不同,导致气候等诸多环境因子存在差异,不同海岛种群为适应不同的生态环境和资源条件,产生独特的生态位分化,群落中物种功能性状更加多样化。粗芦岛台湾相思群落  $FRic$  和  $FDiv$  指数显著低于其他 5 座海岛,这一结果可能与其物种丰富度较低有关,由于粗芦岛较其他海岛群落单个优势种明显,如草本层的菴草和灌木层的山牡荆,导致种内竞争较强而种间竞争较弱,群落内存在较多能够利用的性状空间。西洋岛的功能多样性  $RaoQ$  指数在 6 座海岛中最低,但其丰富度指数  $R$  居于较高水平,说明西洋岛的台湾相思群落内物种能够充分

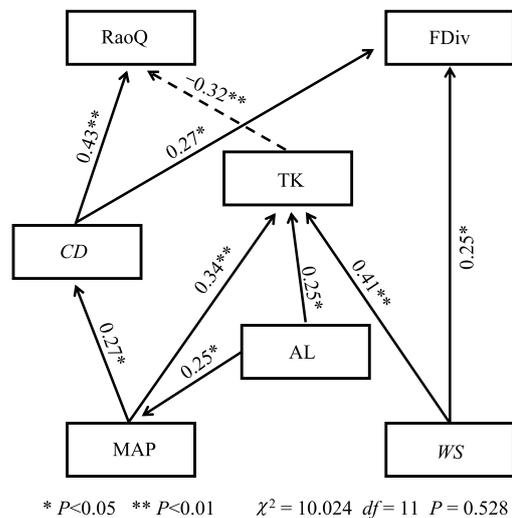


图 7 环境因子与群落功能多样性的结构方程模型

Fig.7 Structural equation model of the relationship between environmental factors and functional diversity

占据各种生态位,种间竞争激烈,群落正处于动态演替过程中。这与物种多样性中的均匀度指数  $J$  相对应,粗芦岛台湾相思群落的均匀度指数  $J$  值高,种间竞争弱,群落相对稳定;西洋岛台湾相思群落的均匀度指数  $J$  值低,竞争激烈,群落还在动态演替过程中<sup>[31]</sup>。

群落物种多样性和功能多样性关系密切<sup>[32]</sup>。本文中,台湾相思群落物种多样性指数与 FRic 指数和 FEve 指数均呈正相关,与 FDiv 指数、RaoQ 指数均呈负相关,这可能与其本身多样性含义有关。物种多样性涵盖了物种丰富度和物种分布均匀程度等方面,而功能多样性侧重于描述特定群落中植物功能性状值的分布状况<sup>[33]</sup>。一定范围内,群落物种多样性的增大,物种间出现功能差异性的概率也相应增大,使得功能丰富度和均匀度增大,功能分歧度降低;而物种多样性的减少,也将导致功能性状的丢失,使功能丰富度变小,功能性状更为分散<sup>[34]</sup>。功能丰富度指数 FRic 与物种丰富度指数  $R$  为极显著正相关,但其拟合模型为曲线函数,说明不同群落的拟合函数并不完全相同,物种丰富度仅在一定范围能反映功能丰富度的变化趋势<sup>[35]</sup>。而 Rao 二次熵指数 RaoQ 与物种丰富度指数  $R$  为极显著负相关,可能是因为海岛生境恶劣,现演替阶段台湾相思群落内物种多样性已达饱和状态,物种丰富度的增加使资源的竞争更加激烈,导致各物种功能上的趋同,从而降低功能多样性。

#### 4.2 物种多样性和功能多样性与环境因子的关系

植物群落的多样性受到多种环境因素影响,在小尺度上地形与土壤因子起主要作用,在大尺度上则为海拔和气候因子<sup>[36-37]</sup>。本研究中,闽东海岛台湾相思林群落多样性受到土壤、地形和气候三者共同影响,这可能是样地选择尺度的原因,6 座海岛介于一般大小尺度研究之间。土壤 pH 值和土壤全钾是直接影响群落多样性的显著因子。土壤 pH 通过影响植物的生长发育来影响群落多样性,土壤全钾与速效钾显著相关 ( $P < 0.05$ ),较高的速效钾含量会提高植物的抗逆性,使优势植物占据更多的空间生态位,从而降低群落多样性<sup>[38]</sup>。海拔与群落物种丰富度指数  $R$  和功能分歧度指数 FDiv 显著相关 ( $P < 0.05$ ),海拔是直接影响物种丰富度的重要因子,物种丰富度随着海拔的升高而不断降低<sup>[39]</sup>。此外,海拔通过影响土壤全钾进而影响功能 RaoQ 指数,而 RaoQ 指数与物种丰富度指数  $R$  和功能分歧度指数 FDiv 关系显著(表 5)。坡向主要通过影响土壤温度和水分间接影响植物群落组成和生态系统功能<sup>[40]</sup>,因此在 Spearman 相关性检验中与群落多样性指数并无直接关系。坡向通过影响土壤 pH 值间接作用于群落物种多样性,在功能多样性方面则是与郁闭度和风速协同作用,共同对功能多样性形成影响。距海岸距离是影响海岛植物群落多样性的重要环境因子,通常距海岸线越近,植物越容易受到海风、盐雾等因素影响<sup>[41]</sup>。冗余分析和结构方程模型中发现,距海岸线距离与群落郁闭度、年均降水量、土壤 pH 值、全钾极显著负相关,与土壤全磷、速效钾显著负相关,与年均温、土壤有效磷极显著正相关,诸多环境因子协同作用下,共同影响着台湾相思林群落多样性。

气候因子中,风速和年均降水量对台湾相思群落多样性有较大影响。在冗余分析和 Spearman 分析中,年均降水量和物种、功能多样性无直接关系;在结构方程模型中,年均降水量能直接或间接影响物种多样性,且路径系数均较大。温暖湿润的气候有利于增加多年生植物丰富度,而炎热干燥则有利于增加一年生植物的多样性<sup>[42]</sup>。短期内降水量的增加对植物多样性没有显著影响,但在降水本就丰富的地区,年均降水量对物种丰富度起重要作用<sup>[43-44]</sup>。闽东地区海岛为典型的亚热带海洋性季风气候,年降水量大,但其降水季节变化明显,雨旱两季分明,极大地促进了台湾相思群落林下物种丰富度的增加。物种多样性增大的同时,功能多样性也随之增大。结构方程模型显示,年均降水量通过群落郁闭度和土壤全钾的间接作用,进而影响群落功能多样性,这可能是郁闭度和土壤全钾对植物叶片面积,植物高度、冠层的促进作用<sup>[45]</sup>。在冗余分析和结构方程模型中,风速和物种多样性、功能多样性均为正相关关系,即一定的风速有利于植物群落多样性的增加,这可能与植物的传播繁殖有关<sup>[46]</sup>。在 Spearman 分析中,风速与土壤全氮、全磷、有效磷、速效钾均为显著负相关,与土壤全钾,土壤有机质为显著正相关。风的搬运作用使海水中的钾离子进入海岛土壤,也让土壤中含氮、磷的有机质细小颗粒在植物群落中聚集,这可能是台湾相思群落物种多样性和功能多样性增加的原因。

群落郁闭度是影响海岛林下灌木分布的关键环境因子<sup>[47]</sup>。本研究所调查台湾相思人工林群落均以台湾

相思为单一建群种,乔木层物种丰富度较低(21/404),群落丰富度主要来源于灌木层(202/404)和草本层(197/404)。在冗余分析、Spearman 分析和结构方程模型中郁闭度均是影响群落物种多样性和功能多样性的重要因子。研究表明,郁闭度在一定范围内时,物种丰富度与之呈正相关关系,而超出这个范围,物种丰富度会随之降低<sup>[48]</sup>。郁闭度与台湾相思林群落物种多样性呈显著负相关,与功能 FDiv 指数和 RaoQ 指数呈显著正相关。调查中发现,海岛的台湾相思人工林经过多年的演替,群落逐渐达到相对稳定状态,大多群落郁闭度较高,林下灌草层物种丰富。随着郁闭度的增加,超过最大物种丰富度的适应范围,群落构建的生态过滤机制使得群落林下物种对生态位的竞争更加激烈,不耐荫的植物被淘汰,导致物种多样性的降低。而在较高郁闭度的环境下,群落中会增加更多的喜阴植物和具有特定生态功能的植物,使群落物种的功能性状更为分散,从而增加群落功能多样性。此外,郁闭度也可以通过影响年均温和年均降水量的间接作用,改变土壤理化性质,进而对群落多样性产生影响。

## 5 结论

对闽东 6 个大型海岛共 80 个台湾相思人工林群落调查发现,不同海岛间的群落物种多样性和功能多样性差异显著,其中海坛岛物种丰富度最高,粗芦岛最低。群落物种多样性和功能多样性之间的关系较复杂,功能丰富度指数 FRic 与 4 个物种多样性指数非线性拟合相关性较强。台湾相思林群落多样性受到土壤,地形和气候三者共同影响,其中郁闭度和年均降水量的影响较大。建群种台湾相思幼苗在灌草层并不占据较高重要值,可能是因为台湾相思属于阳性树种,在郁闭度较高的环境下不能占据优势。因此在未来台湾相思林管理中,要注意控制林间郁闭度的大小,以保持较高的群落多样性,促进群落的正向稳定演替。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] 王凯,王聪,冯晓明,伍星,傅伯杰.生物多样性与生态系统多功能性的关系研究进展.生态学报,2022,42(1):11-23.
- [ 2 ] 韩涛涛,唐玄,任海,王俊,刘楠,郭勤峰.群落/生态系统功能多样性研究方法及其展望.生态学报,2021,41(8):3286-3295.
- [ 3 ] Petchey O L, Gaston K J. Functional diversity: back to basics and looking forward. Ecology Letters, 2006, 9(6): 741-758.
- [ 4 ] 潘权,郑华,王志恒,文志,杨延征.植物功能性状对生态系统服务影响研究进展.植物生态学报,2021,45(10):1140-1153.
- [ 5 ] 向琳,陈芳清,官守鹏,王玉兵,吕坤.井冈山鹿角杜鹃群落灌木层功能多样性及其随海拔梯度的变化.生态学报,2019,39(21):8144-8155.
- [ 6 ] 刘旻霞,南笑宁,张国娟,李博文,徐璐,穆若兰,李亮,于瑞新.高寒草甸不同坡向植物群落物种多样性与功能多样性的关系.生态学报,2021,41(13):5398-5407.
- [ 7 ] 池源,郭振,石洪华,高莉媛.北长山岛人工林健康状况评价.生态科学,2017,36(1):215-223.
- [ 8 ] 刘世荣,杨予静,王晖.中国人工林经营发展战略与对策:从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营.生态学报,2018,38(1):1-10.
- [ 9 ] 徐华林,袁天天,王蕾,关开朗,廖文波.广东内伶仃岛台湾相思群落在 15 年间的演替研究.生态科学,2016,35(4):12-22.
- [ 10 ] 董锁成,郭文卿,洪扬文.岛屿资源类型与开发模式——以大福州沿海岛屿为例.自然资源,1995(6):13-19.
- [ 11 ] 王国宏,方精云,郭柯,谢宗强,唐志尧,沈泽昊,王仁卿,王襄平,王德利,强胜,于丹,彭少麟,达良俊,刘庆,梁存柱.《中国植被志》研编内容与规范.植物生态学报,2020,44(2):128-178.
- [ 12 ] 陈宝瑞,李海山,朱玉霞,李刚,辛晓平,张宏斌,周磊.呼伦贝尔草原植物群落空间格局及其环境解释.生态学报,2010,30(5):1265-1271.
- [ 13 ] 祁有祥,骆汉,赵廷宁.郁闭度简易测量方法试验研究.林业实用技术,2009(11):62-63.
- [ 14 ] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法.北京:中国农业科技出版社,1999.
- [ 15 ] 王春晓.平潭森林公园 3 种林分外来入侵植物的入侵特征[D].福州:福建农林大学,2024.
- [ 16 ] 赖敏英.平潭岛三十六脚湖周围山体植物群落特征与生物量研究[D].福州:福建农林大学,20223
- [ 17 ] 何雅琴.大练岛典型植物群落特征及优势种滨柃叶功能性状研究[D].福州:福建农林大学,2021.
- [ 18 ] 马晓迪.粗芦岛植物群落结构特征及种间关联研究[D].福州:福建农林大学,2023.
- [ 19 ] Liu Y, Huang Y T, Wang Y X, Wang C X, Xiao Z X, Shen S Y, Zeng J Y, Deng C Y. Characteristics and species diversity of semi-natural plant communities on langqi island. Biology, 2023, 13(1): 11.
- [ 20 ] 黄运腾,杨铭,曹晟焯,罗真,朱琦琦,邓传远.环境因子对霞浦浮鹰岛杜虹花叶功能性状特征的影响.东北林业大学学报,2024,52(10):59-65.

- [21] 骆沁宇, 张梦园, 李晓璐, 范舒欣, 董丽. 北京城市绿地不同生境下自生植物的多样性特征及功能性状组成. *生态学报*, 2024, 44(11): 4744-4757.
- [22] 邢世平. 山西太岳山地区辽东栎林物种多样性和功能性状的分布特征及其环境解释[D]. 北京: 北京林业大学, 2022.
- [23] 张金屯. 数量生态学. 3 版. 北京: 科学出版社, 2018.
- [24] Laliberté E, Legendre P. A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits. *Ecology*, 2010, 91(1): 299-305.
- [25] 宋彦涛, 王平, 周道玮. 植物群落功能多样性计算方法. *生态学杂志*, 2011, 30(9): 2053-2059.
- [26] 胡彦雯, 林森炫, 陈贝贝, 赵秀海. 青海省东北部森林林下物种多样性的驱动因素. *北京林业大学学报*, 2024, 46(6): 28-37.
- [27] 商晓凡, 张健, 高浩杰, 库伟鹏, 毕玉科, 李修鹏, 阎恩荣. 岛屿面积与气候共同影响舟山群岛种子植物丰富度格局. *生物多样性*, 2023, 31(12): 116-127.
- [28] 王迎雪, 肖泓泓, 邓清雅, 朱琦琦, 王彬彬, 林曼妮, 罗真, 陈颖, 邓传远. 海岛马尾松林下芒萁和生境对植物多样性及乔木更新多样性的影响. *生态学报*, 2025, 45(6): 1-17.
- [29] Villéger S, Mason N W H, Mouillot D. New multidimensional functional diversity indices for a multifaceted framework in functional ecology. *Ecology*, 2008, 89(8): 2290-2301.
- [30] Mason N W H, Mouillot D, Lee W G, Wilson J B. Functional richness, functional evenness and functional divergence: the primary components of functional diversity. *Oikos*, 2005, 111(1): 112-118.
- [31] Hillebrand H, Bennett D M, Cadotte M W. Consequences of dominance: a review of evenness effects on local and regional ecosystem processes. *Ecology*, 2008, 89(6): 1510-1520.
- [32] 李瑞新, 丁勇, 马文静, 牛建明, 张庆. 植物功能多样性及其与生态系统功能关系研究进展. *生态环境学报*, 2016, 25(6): 1069-1075.
- [33] 黄林娟, 于燕妹, 安小菲, 余林兰, 薛跃规. 天坑森林植物群落叶功能性状、物种多样性和功能多样性特征. *生态学报*, 2022, 42(24): 10264-10275.
- [34] 郑丽婷, 苏田, 刘翔宇, 尹芳, 郭超, 妥彬, 阎恩荣. 庙岛群岛典型植物群落物种、功能、结构多样性及其对环境因子的响应. *应用生态学报*, 2018, 29(2): 343-351.
- [35] 董世魁, 汤琳, 张相铨, 刘世梁, 刘全儒, 苏旭坤, 张勇, 武晓宇, 赵珍珍, 李钰, 沙威. 高寒草地植物物种多样性与功能多样性的关系. *生态学报*, 2017, 37(5): 1472-1483.
- [36] Zu K L, Luo A, Shrestha N, Liu B, Wang Z H, Zhu X Y. Altitudinal biodiversity patterns of seed plants along Gongga Mountain in the southeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(17): 9586-9596.
- [37] Liang H, Fu T, Gao H, Li M, Liu J. Climatic and Non-Climatic Drivers of Plant Diversity along an Altitudinal Gradient in the Taihang Mountains of Northern China. *Diversity*, 2023, 15(1): 66.
- [38] 宁盼, 侯晓巍, 胡云云, 文妙霞, 刘超, 侯琳. 青海省大果圆柏群落物种多样性与土壤因子的关系. *西北植物学报*, 2021, 41(11): 1924-1931.
- [39] 李梦佳, 何中声, 江蓝, 谷新光, 晋梦然, 陈博, 刘金福. 戴云山物种多样性与系统发育多样性海拔梯度分布格局及驱动因子. *生态学报*, 2021, 41(3): 1148-1157.
- [40] Zhang Q P, Fang R Y, Deng C Y, Zhao H J, Shen M H, Wang Q. Slope aspect effects on plant community characteristics and soil properties of alpine meadows on Eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecological Indicators*, 2022, 143: 109400.
- [41] 张群. 福建海岛车桑子灌丛群落特征及其叶功能性状研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2023.
- [42] Soliveres S, Maestre F T, Eldridge D J, Delgado-Baquerizo M, Quero J L, Bowker M A, Gallardo A. Plant diversity and ecosystem multifunctionality peak at intermediate levels of woody cover in global drylands. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, 23(12): 1408-1416.
- [43] Cleland E E, Collins S L, Dickson T L, Farrer E C, Gross K L, Gherardi L A, Hallett L M, Hobbs R J, Hsu J S, Turnbull L, Suding K N. Sensitivity of grassland plant community composition to spatial vs. temporal variation in precipitation. *Ecology*, 2013, 94(8): 1687-1696.
- [44] 孙岩, 何明珠, 王立. 降水控制对荒漠植物群落物种多样性和生物量的影响. *生态学报*, 2018, 38(7): 2425-2433.
- [45] Condit R, Ashton P, Bunyavejchewin S, Dattaraja H S, Davies S, Esufali S, Ewango C, Foster R, Gunatilleke I N, Gunatilleke C S, Hall P, Harms K E, Hart T, Hernandez C, Hubbell S, Itoh A, Kiratiprayoon S, Lafrankie J, de Lao S L, Makana J R, Noor M N S, Kassim A R, Russo S, Sukumar R, Samper C, Suresh H S, Tan S, Thomas S, Valencia R, Vallejo M, Villa G, Zillio T. The importance of demographic niches to tree diversity. *Science*, 2006, 313(5783): 98-101.
- [46] 徐霞, 成亚薇, 江红蕾, 李霞, 刘颖慧. 风速变化对草原生态系统的影响研究进展. *生态学报*, 2017, 37(12): 4289-4298.
- [47] 齐婷婷, 王晓丽, 冯圻, 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. *西北植物学报*, 2015, 35(5): 1044-1051.
- [48] 王依瑞, 王彦辉, 段文标, 李平平, 于澎涛, 甄理, 李志鑫, 尚会军. 黄土高原刺槐人工林郁闭度对林下植物多样性特征的影响. *应用生态学报*, 2023, 34(2): 305-314.