



平潭岛台湾相思与黑松不同混交林林下物种多样性与土壤理化性质的关系

温清燕, 肖集泓, 黄阿青, 黄运腾, 邓清雅, 曹晟, 邓传远

引用本文:

温清燕, 肖集泓, 黄阿青, 黄运腾, 邓清雅, 曹晟, 邓传远. 平潭岛台湾相思与黑松不同混交林林下物种多样性与土壤理化性质的关系[J]. 热带亚热带植物学报, 2024, 32(6): 715–724.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4848>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

广州红锥-马占相思林物种组成与多样性研究

Studies on Species Composition and Diversity of *Castanopsis hystrix*-*Acacia mangium* Mixed Forest in Guangzhou

热带亚热带植物学报. 2021, 29(5): 494–502 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4361>

人为干扰对栲树次生林群落物种多样性和土壤理化性质的影响

Effect of Human Disturbance on Species Diversity and Soil Physiochemical Properties of *Castanopsis fargesii* Secondary Forest

热带亚热带植物学报. 2018, 26(4): 355–362 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3843>

金马河温江段河岸带不同生境植物物种多样性与土壤理化性质的动态变化

Dynamic Changes in Plant Diversity and Soil Physical and Chemical Properties in Different Habitats in Wenjiang Section of Jinma River

热带亚热带植物学报. 2021, 29(1): 1–8 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4237>

5种相思树和尾巨桉人工林土壤养分和酶活性特征

Characteristics of Soil Nutrient and Enzyme Activities in Plantations of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* and Five *Acacia* Species

热带亚热带植物学报. 2021, 29(5): 483–493 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4334>

草海国家级自然保护区华山松群落特征及物种多样性研究

热带亚热带植物学报. 2020, 28(1): 44–52 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4063>

向下翻页, 浏览PDF全文

平潭岛台湾相思与黑松不同混交林林下物种多样性与土壤理化性质的关系

温清燕, 肖集泓, 黄阿青, 黄运腾, 邓清雅, 曹晟烜, 邓传远*

(福建农林大学风景园林与艺术学院, 福州 350002)

摘要: 林下植物多样性和土壤理化性质是反映水土保持稳定性和生长力的关键指标。该研究以平潭岛的 5 种典型林分类型: I. 台湾相思(*Acacia confusata*)林、II. 黑松(*Pinus thunbergii*)林、III. 台湾相思+木麻黄(*A. confusata* + *Casuarina equisetifolia*)林、IV. 黑松+台湾相思(*P. thunbergii* + *A. confusata*)林和 V. 黑松+滨柃(*P. thunbergii* + *Eurya emarginata*)林为例, 分析不同林分类型的林下物种多样性与土壤理化因子的差异性, 通过冗余分析探讨土壤理化性质与林下物种多样性之间的相互关系。结果表明, 黑松+台湾相思混合种植更有利于丰富林下物种多样性, 台湾相思+木麻黄植物群落结构简单, 物种多样性水平低下。不同混交类型土壤的理化性质不同, 相对纯林而言, 树种混交有利于提高土壤全钾含量, 台湾相思与木麻黄混合种植有利于提高有机质、全氮、碱解氮和有效磷含量。土壤全钾和水溶性盐总量对林下物种多样性影响最大, 全钾与灌木层和草本层的物种多样性指数均呈负相关; 水溶性盐总量与灌木层物种多样性指数呈正相关, 与草本层物种多样性指数呈负相关。因此, 在今后混交林的营造模式上, 为提高林下物种多样性可以考虑黑松+台湾相思的混合种植; 在提高土壤肥力上考虑台湾相思+木麻黄、黑松+台湾相思混合种植; 同时通过人为抚育间伐和补植等措施进行树种协调, 降低木麻黄化感作用, 并控制土壤全钾和水溶性盐总量, 促进群落长期稳定发展。

关键词: 平潭岛; 混交林; 物种多样性; 土壤理化性质

doi: 10.11926/jtsb.4848

CSTR:32235.14.jtsb.4848

Relationship Between Species Diversity and Soil Physicochemical Properties in Different Mixed Forests of *Acacia confusata* and *Pinus thunbergii* on Pingtan Island

WEN Qingyan, XIAO Jihong, HUANG Aqing, HUANG Yunteng, DENG Qingya, CAO Shengxuan, DENG Chuanyuan*

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

Abstract: Understory plant diversity and soil physicochemical properties are the key indicators of soil and water conservation stability and growth ability. Five typical stand types on Pingtan Island were selected, including *Acacia confusata* forest (I), *Pinus thunbergii* forest (II), *A. confusata* + *Casuarina equisetifolia* forest (III), *P. thunbergii* + *A. confusata* forest (IV) and *P. thunbergii* + *Eurya emarginata* forest (V), the differences of understory plant diversity and soil physicochemical properties in different stand types were analyzed, and explored their relationships through redundancy analysis (RDA). The results showed that the mixed forest of *P. thunbergii* + *A. confusata* was more beneficial to enrich the species diversity in the understory, while the community structure of *A.*

收稿日期: 2023-09-22 接受日期: 2023-12-03

基金项目: 海洋公益性行业科研专项(201505009); 福建省区域发展科技项目计划(2018Y3006); 福建农林大学科技创新专项(CXZX2019086)资助
This work was supported by the Special Project for Scientific Research of Marine Public Welfare Industry (Grant No. 201505009), the Project for Science and Technology Plan for Regional Development in Fujian (Grant No. 2018Y3006), and the Special Project for Science and Technology Innovation of Fujian Agriculture and Forestry University (Grant No. CXZX2019086).

作者简介: 温清燕(1998年生), 女, 硕士研究生, 研究方向为海岛植物应用。E-mail: 2368223468@qq.com

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

confuse + *C. equisetifolia* forest was simple with low species diversity. The soil physicochemical properties of different mixed forests were different. Compared with pure forest, the mixed planting of tree species was beneficial to increase the total potassium content of soil, and *A. confuse* + *C. equisetifolia* and *P. thunbergii* + *E. emarginata* forest were beneficial to enhance soil organic matter content, total nitrogen, alkali-hydrolytic nitrogen and available phosphorus. Soil total K and water soluble salt had the greatest influence on species diversity in understory, and total K was negatively correlated with species diversity index in shrub layer and herbaceous layer. The total water soluble salt was positively correlated with the species diversity index of shrub layer and negatively correlated with the species diversity index of herbaceous layer. Therefore, in order to improve the species diversity of the understory, the mixed planting of *P. thunbergii* + *A. confusa* could be considered. To improve soil fertility, mixed planting of *A. confusa* + *Casuarina equisetifolia*, *P. thunbergii* + *A. confuse* could be considered. At the same time, tree species coordination was carried out through artificial tending, thinning and replanting, so as to reduce allelopathy of *Casuarina equisetifolia*, control total potassium and water soluble salt content in soil for promote long-term stable development of community.

Key words: Pingtan Island; Mixed forest; Species diversity; Soil physicochemical properties

森林的发展与环境是密切相关的,森林生态系统与其土壤环境和植物生长情况三者间相互制约又协同发展,对构建稳定的生态环境起到了极其重要的作用^[1]。植物群落林下物种多样性和土壤理化性质是反映森林群落稳定性的关键指标^[2],通过了解不同林分类型植物群落林下物种多样性与土壤理化性质之间的相互关系,有利于针对不同林分类型建立稳定的群落结构,进而优化森林生态系统。对于如何构建稳定森林群落,大量研究证明,营造混交林在一定程度上可通过改善土壤理化性质提升林分涵养水源功能和减少林木病虫害发生,进而提高植物物种多样性及林分生产力,从而建立更稳定的森林生态系统^[3]。因此,探讨何种营造模式能发挥混交林最大生态效益对构建稳定的森林生态系统尤为重要。

海岛具有特殊的地理位置,环境上同时受到大陆性气候和海洋性气候的影响,因此为了维持良好的区域稳定,其内部生态系统的屏障作用就显得尤为重要^[4]。平潭岛是福建第一大岛、我国的第五大岛,台湾相思(*Acacia confusa*)和黑松(*Pinus thunbergii*)是主要造林树种,对于防风固沙、保护土壤、固氮释氧等方面具有重要作用^[5],但目前岛上的植物群落存在着一些问题,其中包括大面积单一纯林引起的更新演替慢、群落生态系统衰退等问题。为此,营造优势混交林、构建稳定的群落结构,可有效提高平潭地区海岛生境植被屏障作用。

目前,不同学者通过对平潭岛不同类型群落及其影响因子的分析提出了各种观点。如对台湾相思

群落的优势种群生态位的研究表明,物种重要值、分布频度和种间关系共同影响着生态位宽度^[6];对典型海岸草丛沙堆植物群落水势日变化特征及其影响因素的研究表明,群落水势日变化与大气水势具有较好的相关性^[7];岛屿空间特征对植物多样性的影响研究表明,在岛屿典型植物群落中乔木层和灌草层的物种多样性分别受岛屿面积、周长、周长面积比和近岸距离的影响^[8];在分析不同演替阶段下海岛植物功能性状与环境因子的变化规律研究表明,土壤有机质和全氮含量是影响海岛植物演替过程中功能性状变化的关键环境因子^[9]。这些对平潭岛的研究展现了不同植物群落对于不同环境的适应性变化,然而,已有的研究对象大多针对某一种固定、单一的群落类型,目前仍缺少对不同群落类型的混交效果进行对比分析与讨论。在对内陆地区的不同人工林植物群落的调查研究表明,不同类型树种混交后引起的环境适应情况有所不同^[10-14]。那么,在平潭岛,不同混交林的物种多样性和土壤环境又有什么差异和受什么影响呢?哪种混交林的生态效益最好呢?

为解决以上科学问题,本研究选取平潭地区人为干扰较少的无人岛屿,以平潭地区典型树种台湾相思、黑松纯林及其混交林为研究对象,对不同林分类型土壤理化性质进行分析对比,探讨其林下灌草层物种多样性差异及与土壤理化因子的相互关系,分析不同林分类型林下植物生长情况和土壤理化性质对混交类型的响应情况,旨在摸清采用哪些树种的混交方式才能发挥混交林最优生态效益的

问题, 为区域树种合理配置提供科学依据, 为平潭地区构建稳定的森林生态系统提供理论基础和实践参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

平潭岛(25°15'~25°45' N, 119°32'~120°10' E)位于福建省平潭综合实验区, 面积约 324.13 km², 海岸线长约 408 km, 岛内的最高海拔位于君山, 约为 434.6 m。平潭岛的气候为亚热带海洋性季风气候, 夏季风以西南风为主, 其余季节风向多为东北风, 年均风速约为 6.9 m/s, 平潭岛作为福建省最强风的地区之一, 海湾地区全年 7 级以上大风日数达 125 d^[15]。平潭岛土壤种类丰富, 土壤类型多以砖红壤和沙壤为主, 沙化严重, 土壤贫瘠, 生境脆弱^[16]。

1.2 样方设置

6 座岛屿的数据来源于课题组 2019 至 2021 年的海岛植被调查结果, 调查利用典型样方法, 在林龄相近的典型群落地段上设置 20 m×20 m 的样地。利用 GPS 定位仪和森林罗盘仪, 记录每条样线的轨迹和每个样方的经纬度、海拔、坡度、坡向和坡位等信息。对样地内的乔木(株高≥3 m 或胸径≥3 cm)

进行每木检尺, 记录种名, 测量树高、胸径、冠幅、枝下高, 再分别在大样方的四个角各设置 1 个 5 m×5 m 的灌木样方、在样方的四角以及中心位置各设置一个 1 m×1 m 的草本样方, 记录样方内所有物种的种名、高度、冠幅(盖度)、数量等信息。本研究主要选取平潭 6 个无居民岛屿, 在林龄成熟, 郁闭度大于 75%, 具有代表性的典型群落, 共设置 27 个样方, 其中黄门岛 3 个、大嵩岛 9 个、小嵩岛 2 个、红山屿 2 个、光幼屿 6 个、北香炉屿 5 个(表 1), 以台湾相思林、黑松林、台湾相思+木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)林、黑松+台湾相思林和黑松+滨柃(*Eurya emarginata*)林共 5 种林分类型为研究对象(表 2)。

1.3 土壤理化性质测定

在每个样方的中心位置和四角挖取 25 cm 深的土样, 带回实验室后将其进行风干、去除杂质、过筛、研磨等, 最后运用二分法对样方内的土壤均匀混合成一个土壤样品。按《土壤农业化学分析方法》^[17]对所取土壤样品的 pH 值、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾和水溶性盐总量共 9 项指标进行测定。

1.4 数据的统计分析

样方数据整理后, 植物优势程度以重要值作为

表 1 岛屿基本信息

Table 1 Basic information of the island

岛屿 Island	面积 Area (m ²)	周长 Perimeter (m)	最高点高程 (m) Highest point elevation	近岸距离 (km) Inshore distance	距平潭岛距离 (m) Distance from Pingtan Island
黄门岛 Huangmen island	71 845.2	1 417.3	34.7	3.89	154.2
大嵩岛 Dasong island	282 400.1	2 503.4	51.8	20.14	1 162.1
小嵩岛 Xiao island	55 469.1	1 340.8	36.8	19.43	878.5
红山屿 Hongshan island	30 676.6	1 015.0	20.8	23.05	677.7
光幼屿 Guangyou island	65 157.6	1 075.4	24.2	22.57	319.2

表 2 样地基本情况

Table 2 Basic information of plots

林分类型 Stand type	海拔 Altitude (m)	坡度 Slope (°)	平均树高 (m) Mean tree height	平均胸径 (m) Mean diameter at breast height
I	24~38	8~60	4.98	6.47
II	30~35	25~45	1.76	3.86
III	27~28	18~46	6.02	8.15
IV	25~30	28~40	1.88	3.50
V	26~49	7~48	1.89	4.04

I: 台湾相思林; II: 黑松林; III: 台湾相思+木麻黄; IV: 黑松+台湾相思林; V: 黑松+滨柃林。下同

I: *Acacia confusa* forest; II: *Pinus thunbergii* forest; III: *Acacia confusa* + *Casuarina equisetifolia* forest; IV: *Pinus thunbergii* + *Acacia confusa* forest; V: *Pinus thunbergii* + *Eurya emarginata* forest. The same below

指标, 计算不同林分类型 27 个样方各层片物种重要值(IV), 乔、灌层 $IV=(\text{相对频度}+\text{相对多度}+\text{相对优势度})/3$; 草本层 $IV=(\text{相对频度}+\text{相对多度})/2$ 。采用 α 多样性指数(Margalef 丰富度指数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数)计算不同林分中灌木层和草本层的物种多样性指数^[18-19]。采用 SPSS 27.0 单因素方差分析(One-Way ANOVA)检测不同林分类型下灌草层物种多样性指数与土壤理化性质的显著性差异。利用 Canoco 5.0 软件进行冗余分析(Redundancy analysis, RDA)解释 9 项土壤理化性质与研究区内 27 个样方各层片总的物种多样性指数的相互关系。

表 3 不同林分类型优势种的重要值

Table 3 Importance values (IV) of dominant species in different stand types

林分类型 Stand type	层次 Layer	优势种 Dominant species	重要值 IV /%
I	灌木层 Shrub (SL)	滨柃 <i>Eurya emarginata</i>	23.82
		梔子 <i>Gardenia jasminoides</i>	16.15
		台湾相思 <i>Acacia confusa</i>	13.19
	草本层 Herb (HL)	火炭母 <i>Polygonum chinense</i>	16.96
		酢浆草 <i>Oxalis corniculata</i>	12.74
		弓果黍 <i>Cyrtococcum patens</i>	12.10
II	灌木层 Shrub (SL)	黑松 <i>Pinus thunbergii</i>	28.66
		铁包金 <i>Berchemia lineata</i>	19.30
		算盘子 <i>Glochidion puberum</i>	16.54
	草本层 Herb (HL)	山菅 <i>Dianella ensifolia</i>	19.34
		华南狗娃花 <i>Aster asagrayi</i>	13.67
		爵床 <i>Justicia procumbens</i>	9.41
III	灌木层 Shrub (SL)	木麻黄 <i>Casuarina equisetifolia</i>	73.76
		台湾相思 <i>Acacia confusa</i>	14.82
		雀梅藤 <i>Sageretia thea</i>	7.71
	草本层 Herb (HL)	求米草 <i>Oplismenus undulatifolius</i>	23.33
		火炭母 <i>Polygonum chinense</i>	22.22
		酢浆草 <i>Oxalis corniculata</i>	8.89
IV	灌木层 Shrub (SL)	车桑子 <i>Dodonaea viscosa</i>	46.38
		雀梅藤 <i>Sageretia thea</i>	7.80
		梔子 <i>Gardenia jasminoides</i>	5.44
	草本层 Herb (HL)	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	17.68
		茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i>	10.63
		积雪草 <i>Centella asiatica</i>	9.54
V	灌木层 Shrub (SL)	滨柃 <i>Eurya emarginata</i>	55.37
		黑松 <i>Pinus thunbergii</i>	12.22
		铁包金 <i>Berchemia lineata</i>	5.57
	草本层 Herb (HL)	积雪草 <i>Centella asiatica</i>	19.50
		狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	10.18
		瓜子金 <i>Polygala japonica</i>	11.42

2 结果和分析

2.1 林下植物组成与物种多样性分析

不同林分类型林下灌草层植物生长情况不同, 从表 3 可见, 台湾相思林灌木层植物共 16 科 18 种, 种类较多且出现了与乔木层树种不一致的优势种, 包括滨柃、梔子; 草本层 9 科 18 种, 火炭母占优势。台湾相思+木麻黄林林下树种较少, 灌木层共 4 科 4 种, 主要以乔木层树种木麻黄幼苗占优势。黑松+台湾相思林灌木层共 15 科 20 种, 优势种为车桑子, 占绝对优势, 乔木层幼苗并未成为优势种。黑松+滨柃林灌木层共 11 科 14 种, 优势种以乔木

层树种幼苗居多, 滨桉占绝对优势。

从图 1, 2 可见, 台湾相思+木麻黄林灌木层的 4 个多样性指数及草本层的 Shannon-Wiener 指数均最小, 且其灌木层 Margalef 指数和 Pielou 指数均显著低于其他 4 种林分类型($P<0.05$)。黑松+台湾相思林灌草层的 Margalef 指数和 Shannon-Wiener 指数均最大, 且灌木层的 Margalef 指数显著高于除台湾相思林外的其他 3 种林分类型($P<0.05$)。

2.2 土壤理化性质分析

利用单因素方差分析对 5 种林分类型的土壤理化因子进行差异比较(表 4), 在土壤的有机质、全氮、碱解氮含量上, 台湾相思+木麻黄林均显著高于黑松林和黑松+滨桉林($P<0.05$)。黑松+滨桉林和台湾相思+木麻黄林的全钾含量显著高于台湾相思林和黑松林($P<0.05$); 台湾相思+木麻黄林的有效磷含量显著高于其他 4 种林分类型($P<0.05$); 黑松林和黑松+滨桉林的有效磷含量显著低于台湾相思林和台湾相思+木麻黄林($P<0.05$)。

2.3 物种多样性与土壤理化性质的关系

对各样方各层片的物种多样性指数(Margalef 指数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数)和 9 个土壤因子进行 RDA 分析(图 3), 第 1 排序轴解释了 31.64%, 第 2 排序轴解释 15.33%, 4 轴累计总解释量为 55.57%, 前 2 排序轴能很好地反映灌草层物种多样性与土壤因子之间的相关性。土壤全钾和水溶性盐总量对各层片物种多样性影响最大。其中全钾与群落灌木层和草本层的物种多样性指数均呈负相关; 水溶性盐总量与群落灌木层多样性指数呈正相关, 与草本层物种多样性指数呈负

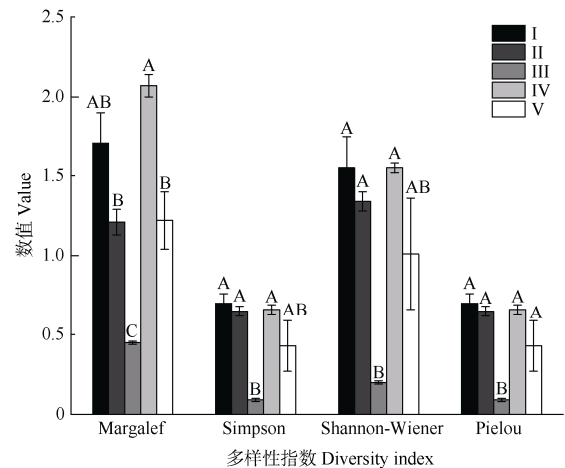


图 1 不同林分类型灌木多样性指数。柱上不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同

Fig. 1 Diversity index in shrub layer of different stand types. Different letters upon column indicate significant differences at 0.05 level. The same below

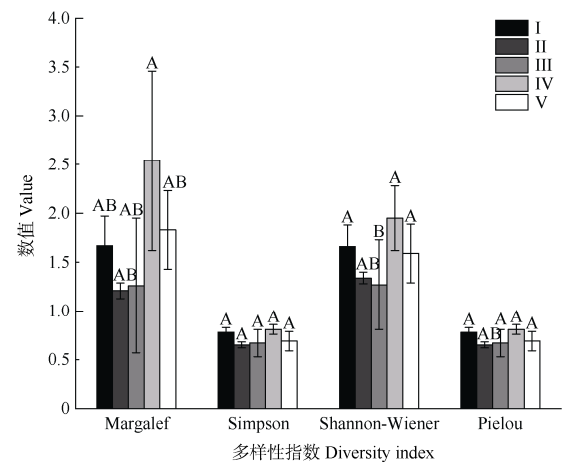


图 2 不同林分类型草本多样性指数

Fig. 2 Herbaceous diversity index of different stand types

表 4 不同林分类型的土壤理化性质

Table 4 Soil physical and chemical properties in different stand types

项目 Item	I	II	III	IV	V
pH	5.08±0.42a	5.91±0.30a	5.65±0.23a	5.91±1.23a	5.55±0.79a
有机质 Organic matter (SOM)	38.46±30.35ab	15.13±2.08b	51.10±16.98a	28.37±1.25ab	15.48±2.51b
全氮 Total nitrogen (TN)	0.18±0.13ab	0.06±0.01b	0.24±0.08a	0.11±0.00ab	0.06±0.01b
全磷 Total phosphorus (TP)	0.02±0.01a	0.01±0.01a	0.02±0.00a	0.01±0.00a	0.01±0.00a
全钾 Total potassium (TK)	1.66±0.23b	1.92±0.21b	2.74±0.23a	2.13±0.32ab	2.79±0.56a
碱解氮 Alkali-hydrolyzed nitrogen (AN)	160.60±100.98ab	59.25±6.99b	197.80±50.86a	117.70±6.93ab	53.53±10.20b
有效磷 Available phosphorus (AP)	13.08±2.87b	8.51±2.25cd	16.96±1.35a	12.35±2.19bc	7.12±0.71d
速效钾 Available potassium (AK)	160.27±118.13a	111.17±45.07a	126.45±9.22a	153.02±60.74a	113.82±29.76a
水溶性盐总量 Total water-soluble salt (TS)	0.95±0.52a	0.79±0.28a	0.41±0.46a	0.73±0.07a	0.43±0.06a

同行数据后不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同

Data followed different letters at the same line indicate significant differences at 0.05 level. The same below

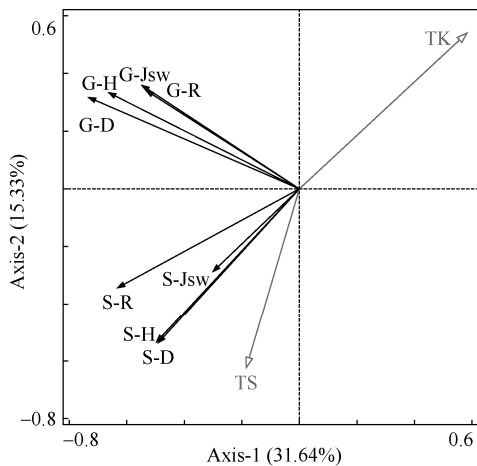


图3 物种多样性与环境因子的 RDA 分析。S: 灌木层; G: 草本层; R: Marglelf 指数; H: Shannon-Wiener 指数; D: Simpson 指数; Jsw: Pielou 指数; TK: 全钾; TS: 水溶性盐总量。

Fig. 3 Redundancy analysis of species diversity and environmental factors. S: Shrub layer; R: Marglelf index; H: Shannon-Wiener index; D: Simpson index; Jsw: Pielou index; G: Herb layer; TK: Total potassium; TS: Total water-soluble salt.

相关。全钾和水溶性盐总量这 2 个土壤因子对物种多样性的总解释量为 30.2%，表明还有 69.8% 的其他因素影响了群落物种多样性。

3 讨论和结论

3.1 物种多样性指数

Margalef 指数主要反映了群落中所含物种的多少，本研究中，黑松+台湾相思林的 Margalef 指数和 Shannon-Wiener 指数在灌草层均最大，且灌木层 Margalef 指数显著高于除台湾相思林外的其他 3 种林分类型。相对于其他林分类型，黑松+台湾相思混交更有利于丰富灌木层物种多样性水平。其原因可能是黑松+台湾相思混交后，豆科(Fabaceae)植物台湾相思的固氮能力改善了林下生境条件，增大其林下物种丰富度。肖集泓^[20]在琅岐岛 3 类森林群落的最小取样面积研究中也证明琅岐岛台湾相思的固氮能力使实际群落丰富度大于该研究设置样方范围的丰富度。此外，黑松+台湾相思林灌木层最优势种为喜光灌木车桑子，雀梅藤、狗牙根和茵陈蒿也较喜光，而黑松的林冠较窄，与台湾相思混交后，使得林下环境中能获取较多的光照，林下物种多样性水平得以提高。可见利用种间关系相互协调的树种进行混交后可改善群落结构，从而提高了人

工林生态系统的稳定性^[21-22]。

Shannon-Wiener 指数用来描述调查植物群落局域生境内多样性指数，多与 Simpson 指数共同使用说明；Pielou 均匀度指数反映了各物种个体数目分配的均匀程度，Pielou 均匀度指数越高，植物群落结构越稳定^[23]。台湾相思+木麻黄林物种多样性水平低下，在灌木层的 4 个多样性指数及在草本层的 Shannon-Wiener 指数中均为最小，且灌木层 Marglelf 指数和 Pielou 指数均显著低于其他 4 种林分类型，可见台湾相思+木麻黄混交后降低了林下灌草层的物种数与群落复杂性。其原因可能是本研究区内的台湾相思+木麻黄混交林乔木层优势树种生长高度和胸径均较大，台湾相思生长对相邻的强阳性树种木麻黄产生遮蔽，从而对林下光照、水分和温度等自然因素造成影响，木麻黄和台湾相思幼苗在灌木层上占据了绝对优势，使群落内其他物种分布更为单一。此外，金学伟等^[24]研究表明木麻黄和台湾相思在混植栽培方式下，会通过改变自身形态或营养成分抑制对方，两者激烈竞争；同时木麻黄的化感作用使临近物种生长受限，影响群落物种复杂度形成^[25]。因此，较之其他林分类型，台湾相思+木麻黄林各层片的结构表现就更为简单，不利于林下群落稳定性的形成。

3.2 土壤理化性质

已有研究表明，与单一的木麻黄纯林相比，木麻黄与其他树种混交后的林下植物多样性^[26]、土壤结构和肥力条件^[27-28]均比纯林好。土壤理化性质因林分类型不同而存在显著差异，物种多样性与土壤理化性质之间是相互作用的，物种多样性的变化可能随之引起土壤因子各性质发生改变^[29]。本研究的台湾相思+木麻黄林林下物种多样性较低，但土壤有机质、全氮和碱解氮含量显著高于黑松林和黑松+滨柃林，这可能与台湾相思自身固氮能力有关，台湾相思提高了群落的土壤肥力，改善了群落生态环境功能^[30]。同时，台湾相思+木麻黄林全钾含量显著高于台湾相思林和黑松林，有效磷含量显著高于其他 4 种林分类型，这可能是由于林下较厚的残枝落叶分解产生的肥力回馈土壤所致；另一方面，台湾相思+木麻黄林冠幅大结构紧凑，能降低强风影响和雨水对钾离子的淋洗，有效维持土壤全钾含量。对于土壤有效磷，因磷素主要富集于较细的土壤颗粒上，土壤侵蚀对土壤磷含量的影响比较明显^[31]，台湾相思+木麻黄林下的厚层凋落物能保

护表层土壤,防止林地水土流失,以此留住土壤有效磷,这与王新宇等^[32]在近自然化培育对人工林地土壤理化性质的影响的研究结果一致。

相对于台湾相思林和台湾相思+木麻黄林,黑松林和黑松+滨柃林的有效磷含量显著较低。有研究表明,磷素在土壤中通常形成难溶性盐沉淀,根系分泌物中的有机酸对活化土壤难溶性的磷具有重要的作用^[33],黑松在微酸性土壤中的游离态铁离子和铝离子易与磷结合形成磷酸铁和磷酸铝而沉淀^[34],从而降低了黑松群落有效磷含量,且黑松+滨柃林下灌木层 Margalef 指数较低,这使地表裸露面积较大,地表径流增强,容易导致土壤母质中磷素的释放^[35]。

3.3 物种多样性指数与土壤理化因子的相互关系

对物种多样性指数和 9 个土壤因子进行 RDA 分析后,最大的影响因子是土壤全钾和水溶性盐总量。土壤全钾反映了土壤钾素的总储量,土壤钾素对植物抗旱性、抗盐性、抗高温性、抗倒伏性等功能性状具有一定作用,在海岛高温、高盐、强风、干旱的环境中占据极为重要的地位^[36];此外,海岛土壤多为肥力低的沙壤土,土壤的钾供应能力较弱,且在高温多雨的沿海地区钾素易受风雨淋溶^[37-38],因此,植物生长所需的钾元素成为了重要限制性因素。全钾与群落灌木层和草本层的物种多样性指数均呈负相关,这与魏艳艳等^[39]在浙江省无居民海岛植物与土壤 pH 值和养分关系的研究有所不同,却与闫玮明等^[40]和何雅琴等^[41]在福建平潭大练岛典型森林群落特征及物种多样性的研究结果一致。其原因可能是适量的钾元素有助于植物的生长发育,但较高却会抑制生长^[42];本研究中,全钾含量较高的台湾相思+木麻黄林和黑松+滨柃林下灌木层多样性水平却不高,说明较高的养分含量不一定对群落生长有利。

土壤中的盐分是衡量土壤的矿质程度的指标,也是判断土壤健康的指标之一^[43],在海岛盐碱环境下,土壤水溶性盐总量同样是物种多样性的重要影响因子。尹德洁等^[44]的研究表明群落整体的多样性指数与土壤水溶性盐总量成负相关,表明土壤中高盐分含量会降低群落的物种多样性指数,影响植物群落的分布;然而贺强等^[45]的研究表明黄河河口盐沼植被多样性与土壤盐分呈显著正相关。本研究中水溶性盐总量与灌木层多样性指数呈正相关,与草本层物种多样性指数呈负相关,原因可能是灌木层

植物与草本层植物的耐盐碱程度不同,灌木层多为乔木层优势种幼苗,台湾相思、木麻黄、黑松与滨柃等均具有较强的抗性,且车桑子与雀梅藤等均对土壤环境适应性强,而草本层积雪草、火炭母等耐盐碱性不高,对土质有一定要求,从而对不同含量的土壤水溶性盐总量表现出不一样的响应机制。

本研究探讨了不同林分类型下灌木层的物种多样性以及土壤理化因子的相互关系,得出几项显著的结果,为构建稳定混交林应采用何种营造模式提供依据。黑松+台湾相思林相较于台湾相思+木麻黄林物种丰富度更高,群落稳定性更强,而台湾相思+木麻黄林相对于其他林分类型土壤肥力高,但单一优势种和化感作用严重制约了林下灌木层植物的物种多样性水平,不利于群落的长期稳定发展,因此未来台湾相思与黑松森林经营中要结合考虑这两个问题,在今后混交林的营造模式上,为了提高林下物种多样性可以考虑黑松+台湾相思的混合种植;在提高土壤肥力上考虑一定程度的台湾相思+木麻黄混合种植;同时通过人为抚育间伐和补植等进行树种协调,降低木麻黄化感作用,并控制土壤全钾和水溶性盐总量的含量促进群落长期稳定发展。此外,RDA 分析结果表明,还有 69.8% 的其他因素影响了群落物种多样性,因此后续还应结合其他影响因素进行深入探究,如地形因素、种群关系等。

参考文献

- [1] ZHOU R H, SU T C, YU J, et al. Species diversity and soil physico-chemical properties of different communities in Bifengxia evergreen broad-leaved forest [J]. *Chin J Ecol*, 2022, 41(1): 1-8. [周润惠, 苏天成, 喻静, 等. 碧峰峡常绿阔叶林不同群落物种多样性和土壤理化性质 [J]. *生态学杂志*, 2022, 41(1): 1-8. doi: 10.13292/j.1000-4890.2022.01.019.]
- [2] LI K. The influence mechanism of *Robinia pseudoacacia* plantation conversion model on its community structure and soil properties [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2019. [李坤. 刺槐人工林转换模式对群落结构和土壤性质的影响机制 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2019. doi: 10.27277/d.cnki.gsdnu.2019.000051.]
- [3] HU L D, ZHOU H J, HUANG Y Z, et al. A study on plant species diversity and soil carbon and nitrogen in different *Cunninghamia lanceolata* stand types [J]. *Ecol Environ Sci*, 2022, 31(3): 451-459. [胡靓达, 周海菊, 黄永珍, 等. 不同杉木林分类型植物多样性及其土壤碳氮关系的研究 [J]. *生态环境学报*, 2022, 31(3): 451-459. doi:

- 10.16258/j.cnki.1674-5906.2022.03.003.]
- [4] GUAN S M, ZHENG X X, WU Y H, et al. Species diversity and functional diversity of primary vegetation on the coast of Pingtan Island [J]. *J Southwest For Univ*, 2021, 41(6): 71–78. [管诗敏, 郑心炫, 吴雅华, 等. 平潭岛海岸自然植被物种和功能多样性特征 [J]. *西南林业大学学报*, 2021, 41(6): 71–78. doi: 10.11929/j.swfu.202101048.]
- [5] LAI M Y, XIAO J H, LI M, et al. Carbon storage and its influencing factors in tree layer of plant community in Pingtan Island [J]. *J Shandong For Sci Technol*, 2022, 52(6): 19–26. [赖敏英, 肖集泓, 李媚, 等. 平潭岛植物群落乔木层碳储量及影响因素研究 [J]. *山东林业科技*, 2022, 52(6): 19–26. doi: 10.3969/j.issn.1002-2724.2022.06.004.]
- [6] MA X D, JIANG D G, LIU Z L, et al. Niche of dominant plant populations of *Acacia confusa* community in Pingtan Island [J]. *Chin J Trop Crops*, 2022, 43(12): 2614–2625. [马晓迪, 姜德刚, 刘子琳, 等. 平潭岛台湾相思群落优势种群生态位研究 [J]. *热带作物学报*, 2022, 43(12): 2614–2625. doi: 10.3969/j.issn.1000-2561.2022.12.024.]
- [7] YANG X J, DU J H, ZHANG C J, et al. Diurnal variations of water potential and its influencing factors in typical plant communities on coppice dunes of Pingtan Island [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, 36(9): 2614–2619. [杨显基, 杜建会, 张楚杰, 等. 平潭岛典型海岸草从沙堆植物群落水势日变化特征及其影响因素 [J]. *生态学报*, 2016, 36(9): 2614–2619. doi: 10.5846/stxb201411172277.]
- [8] ZHANG Q, LIU Y, CHEN Y, et al. Effects of spatial characteristics on plant diversity on uninhabited Islands in Pingtan, Fujian [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2023, 43(3): 503–511. [张群, 刘阳, 陈颖, 等. 福建平潭无居民岛屿空间特征对植物多样性的影响 [J]. *西北植物学报*, 2023, 43(3): 503–511. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2023.03.0503.]
- [9] ZHANG Z K, ZHENG X X, LIN H Z, et al. Summary of changes in plant functional traits and environmental factors in different successional stages of island plants [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, 39(10): 3749–3758. [张增可, 郑心炫, 林华贞, 等. 海岛植物不同演替阶段植物功能性状与环境因子的变化规律 [J]. *生态学报*, 2019, 39(10): 3749–3758. doi: 10.5846/stxb201807051468.]
- [10] FENG J Y, HUANG C M, SHI X Y, et al. Changes of soil physical and chemical properties of forest land in the early stage of *Eucalyptus* and *Erythrophleum fordii* mixed forest [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2017, 24(3): 295–300. [冯娇银, 黄昌谋, 施喜元, 等. 桉树与格木混交初期土壤理化性质的变化 [J]. *水土保持研究*, 2017, 24(3): 295–300. doi: 10.13869/j.cnki.rswc.2017.03.051.]
- [11] WANG J R, SHI W K, WU H F, et al. Characteristics of leaf functional traits of typical coniferous plantations in northern Shanxi and their relationship with soil factors [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2023, 43(5): 835–845. [王洁茹, 石文凯, 吴会峰, 等. 晋北典型针叶人工林叶功能性状特征及其与土壤因子的关系 [J]. *西北植物学报*, 2023, 43(5): 835–845. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2023.05.0835.]
- [12] MO Y F, WANG J Y, CHEN L, et al. Effects of different mixed models on growth and plant diversity in *Eucalyptus* plantations [J]. *SW China J Agric Sci*, 2022, 35(5): 1185–1192. [莫雅芳, 王家妍, 陈亮, 等. 不同混交模式对桉树人工林生长及植物多样性的影响 [J]. *西南农业学报*, 2022, 35(5): 1185–1192. doi: 10.16213/j.cnki.scjas.2022.5.026.]
- [13] SUN Y K, TANG J M, WANG Y. Soil physical-chemical properties and comprehensive evaluation of *Larix kaempferi* plantations under different management models [J]. *J NE For Univ*, 2022, 50(6): 70–75. [孙拥康, 汤景明, 王怡. 不同经营模式日本落叶松人工林土壤理化性质及综合评价 [J]. *东北林业大学学报*, 2022, 50(6): 70–75. doi: 10.13759/j.cnki.dlxb.2022.06.011.]
- [14] DU M Y, ZHANG L J, PEI S X, et al. Soft physical characteristics in different types of *Pinus tabulaeformis* mixed forest [J]. *Chin J Ecol*, 2020, 39(11): 3588–3595. [杜满义, 张连金, 裴顺祥, 等. 不同类型油松混交林土壤物理特性 [J]. *生态学杂志*, 2020, 39(11): 3588–3595. doi: 10.13292/j.1000-4890.202011.021.]
- [15] CAI X H, LIAO K. Analysis of climatic characteristics for gale in Pingtan of Fujian [J]. *J Minjiang Univ*, 2011, 32(5): 130–133. [蔡晓禾, 廖廓. 福建平潭大风气候特征分析 [J]. *闽江学院学报*, 2011, 32(5): 130–133. doi: 10.3969/j.issn.1009-7821.2011.05.031.]
- [16] ZHAO L H. Evaluation of island city's ecological vulnerability based on GIS and RS: A case study of Pingtan Island [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2018. [赵林洪. 基于 GIS 和 RS 的海岛型城市生态脆弱性评价——以平潭岛为例 [D]. 福州: 福州大学, 2018.]
- [17] LU R K. *Methods for Agrochemical Analysis of Soils* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [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, 2000.]
- [18] SONG Y C. *Vegetation Ecology* [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2017: 44–84. [宋永昌. 植被生态学 [M]. 第 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2017: 44–84.]
- [19] ZHANG J T. *Quantitative Ecology* [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2011: 20–123. [张金屯. 数量生态学 [M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2011: 20–123.]
- [20] XIAO J H, ZHANG L T, WANG C X, et al. Minimum sample area of three forest communities in Langqi Island [J]. *Plant Sci J*, 2023, 41(3): 279–291. [肖集泓, 张琳婷, 王春晓, 等. 琅岐岛 3 类森林群落的最小取样面积研究 [J]. *植物科学学报*, 2023, 41(3): 279–291. doi: 10.11913/PSJ.2095-0837.22185.]
- [21] REN Y W, ZHONG X Y, YI H P, et al. Effects of different stand types on leaf functional traits, understory species diversity and soil nutrients [J]. *For Res*, 2023, 36(2): 161–168. [任奕炜, 钟小瑛, 衣华鹏, 等.

- 不同林分类型对叶功能性状、林下物种多样性及土壤养分的影响 [J]. 林业科学研究, 2023, 36(2): 161–168. doi: 10.12403/j.1001-1498.20220492.]
- [22] KNAAPEN J P, SCHEFFER M, HARMS B. Estimating habitat isolation in landscape planning [J]. *Landsc Urban Plan*, 1992, 23(1): 1–16. doi: 10.1016/0169-2046(92)90060-D.
- [23] SHEN G F. *Silvicultur* [M]. Beijing: China Forestry Press, 2001. [沈国舫. 森林培育学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.]
- [24] JIN X W, CHEN C, YUAN F, et al. Effects of mixed-planting pattern on photosynthetic characteristics and growth of *Casuarina equisetifolia* and *Acacia confusa* seedlings [J]. *J NW For Univ*, 2023, 38(4): 127–133. [金学伟, 陈灿, 袁锋, 等. 木麻黄和台湾相思苗木混植对生长和营养含量的影响 [J]. 西北林学院学报, 2023, 38(4): 127–133. doi: 10.3969/j.issn.1001-7461.2023.04.16.]
- [25] LI J, LIU Y, HONG T, et al. Effect of two allelochemicals on reactive oxygen content and protective enzyme activity in branchlet of *Casuarina equisetifolia* seedling [J]. *J Plant Res Environ*, 2013, 22(2): 30–38. [李键, 刘奕, 洪滔, 等. 2种化感成分对木麻黄幼苗小枝活性氧含量和保护酶活性的影响 [J]. 植物资源与环境学报, 2013, 22(2): 30–38. doi: 10.3969/j.issn.1674-7895.2013.02.04.]
- [26] 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 Bot Boreali-Occid Sin*, 2019, 39(5): 925–934. [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. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2019.05.0925.]
- [27] LI Y Q. Investigation of plant diversity under three different plantations in Wenchang Hainan [J]. *Trop For*, 2020, 48(2): 17–20. [李燕清. 海南文昌3种主要人工林下植物多样性调查 [J]. 热带林业, 2020, 48(2): 17–20. doi: 10.3969/j.issn.1672-0938.2020.02.004.]
- [28] SHI C K. Mixed afforestation of *Eucalyptus* and *Casuarina equisetifolia* in coastal hilly and mountainous areas of southern Fujian [J]. *Anhui Agric Sci Bull*, 2011, 17(17): 140–141. [施成坤. 闽南沿海丘陵山地桉树木麻黄混交造林研究 [J]. 安徽农学通报, 2011, 17(17): 140–141. doi: 10.16377/j.cnki.issn1007-7731.2011.17.091.]
- [29] WANG X Y, XUE Y, SU S F, et al. Effects of pure and mixed plantations of *Casuarina equisetifolia* on soil profile physico-chemical properties [J]. *Guihaia*, 2022, 42(8): 1315–1324. [王小燕, 薛杨, 宿少锋, 等. 木麻黄纯林及其混交林对土壤剖面理化性质的影响 [J]. 广西植物, 2022, 42(8): 1315–1324. doi: 10.11931/guihaia.gxzw202012048.]
- [30] CAO Y Q, ZHANG Z F, JIANG S S, et al. Growth promoting effect of plant growth-promoting rhizobacteria on tree seedlings suitable for afforestation in rocky desertified region [J]. *Guihaia*, 2021, 41(5): 738–745. [曹彦强, 张中峰, 蒋士宋, 等. 根际促生菌对石漠化地区造林苗木的促生效应 [J]. 广西植物, 2021, 41(5): 738–745. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201911003.]
- [31] LI L. Study on soil ecological effect of differential land use in red soil hilly region of southern China [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010. [李灵. 南方红壤丘陵区不同土地利用的土壤生态效应研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2010.]
- [32] WANG X Y, WANG Q C. Effects of the close-to-nature cultivation of *Larix olgensis* and *Fraxinus mandshurica* on the soil physiochemical properties [J]. *Sci Silv Sin*, 2008, 44(12): 21–27. [王新宇, 王庆成. 水曲柳落叶松人工林近自然化培育对林地土壤理化性质的影响 [J]. 林业科学, 2008, 44(12): 21–27. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.2008.12.004.]
- [33] LI Z A, ZOU B, DING Y Z, et al. Key factors of forest litter decomposition and research progress [J]. *Chin J Ecol*, 2004, 23(6): 77–83. [李志安, 邹碧, 丁永祯, 等. 森林凋落物分解重要影响因子及其研究进展 [J]. 生态学杂志, 2004, 23(6): 77–83.]
- [34] WANG H. Phosphate adsorption on iron oxides and iron oxides-humic acid complexes [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015. [王慧. 铁氧化物及其胡敏酸复合体对磷酸盐的吸附研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.]
- [35] WANG X, HU Y K, ADILLA R, et al. Effects of soil salt on the niche of main plant species in alpine meadow [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2008, 19(7): 1448–1454. [王鑫, 胡玉昆, 热合木都拉·阿迪拉, 等. 土壤盐分对高寒草甸主要植物生态位的影响 [J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1448–1454.]
- [36] HUANG C Y, XU J M. *Soil Science* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [黄昌勇, 徐建民. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [37] ZHANG J Y. The characteristics of plant community and its response to environment in the northern islands of South China Sea [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020. [张家涌. 中国南海北部海岛植物群落特征及其对环境的响应 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020. doi: 10.27136/d.cnki.ghunu.2020.000442.]
- [38] CUI Q F, CHENG Q, YANG X T. Soil ecological stoichiometry characteristics of the *Platyclusus orientalis* forest in the south Taihang Mountain [J]. *J W China For Sci*, 2020, 49(1): 20–24. [崔秋芳, 程倩, 杨喜田. 南太行山区侧柏纯林及其混交林土壤生态化学计量特征 [J]. 西部林业科学, 2020, 49(1): 20–24. doi: 10.16473/j.cnki.xblykx.1972.2020.01.004.]
- [39] WEI Y Y, ZHANG K D, XU L, et al. Relationship between plant, and soil pH and nutrients in non-residential islands [J]. *J NE For Univ*, 2019, 47(11): 81–85. [魏艳艳, 张凯迪, 徐良, 等. 浙江省无居民海

- 岛植物与土壤 pH 值和养分的关系 [J]. 东北林业大学学报, 2019, 47 (11): 81–85. doi: 10.13759/j.cnki.dlxb.2019.11.016.]
- [40] YAN W M, SUN B, PEI N C, et al. Correlation analyses on plant diversity and soil physical-chemical properties between evergreen broad-leaved plantations and natural secondary forests in north Guangdong, China [J]. *Ecol Environ Sci*, 28(5): 898–907. [闫玮明, 孙冰, 裴男才, 等. 粤北阔叶人工林和次生林植物多样性与土壤理化性质相关性研究 [J]. 生态环境学报, 2019, 28(5): 898–907. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2019.05.006.]
- [41] HE Y Q, ZENG J Y, CHEN G J, et al. Characteristics and species diversity of typical forest community in Dalian Island of Pingtan, Fujian, China [J]. *Chin Appl Environ Biol*, 2022, 28(3): 759–769. [何雅琴, 曾纪毅, 陈国杰, 等. 福建平潭大练岛典型森林群落特征及物种多样性 [J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(3): 759–769. doi: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2020.12002.]
- [42] XU Y, DENG L. Relationships of fine root morphology and soil physicochemical properties in different mingling intensity of *Picea crassifolia* in Qilian Mountains [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2023, 30 (3): 181–187. [徐莹, 邓磊. 祁连山不同混交度青海云杉林细根形态特征及与土壤理化性质的关系 [J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 181–187. doi: 10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.029.]
- [43] LIU J H, LI X Y, WANG Y L, et al. Effects of different forest ages of *Xanthoceras sorbifolia* plantations on soil nutrients in sandy wasteland [J]. *For Sci Technol*, 2021(2): 55–57. [刘建海, 李小燕, 王艺林, 等. 不同林龄文冠果人工林对沙荒地土壤养分的影响 [J]. 林业科技通讯, 2021(2): 55–57. doi: 10.13456/j.cnki.lykt.2020.03.10.0005.]
- [44] YIN D J, ZHANG J, JING R, et al. Relationships between plant community and soil chemical factors in coastal saline area of Shandong, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2018, 29(11): 3521–3529. [尹德洁, 张洁, 荆瑞, 等. 山东滨海盐渍区植物群落与土壤化学因子的关系 [J]. 应用生态学报, 2018, 29(11): 3521–3529. doi: 10.13287/j.1001-9332.201811.007.]
- [45] HE Q, CUI B S, ZHAO X S, et al. Relationships between salt marsh vegetation distribution/diversity and soil chemical factors in the Yellow River Estuary, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, 29(2): 676–687. [贺强, 崔保山, 赵欣胜, 等. 黄河河口盐沼植被分布、多样性与土壤化学因子的相关关系 [J]. 生态学报, 2009, 29(2): 676–687. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2009.02.016.]