



广佛地区典型湿地类型植物多样性与土壤因子的关系

黄燕, 庞兴宸, 陈景锋, 汪理慧, 吴永彬

引用本文:

黄燕, 庞兴宸, 陈景锋, 汪理慧, 吴永彬. 广佛地区典型湿地类型植物多样性与土壤因子的关系[J]. 热带亚热带植物学报, 2022, 30(5): 697–707.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4524>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[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>

[我国南方4种常见人工林林下植物多样性特征及影响因素](#)

Understory Plant Diversity Characteristics and Influencing Factors of Four Common Plantations in South China

热带亚热带植物学报. 2022, 30(1): 1–10 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4413>

[排序法在植物群落与环境关系研究中的应用述评](#)

Overview of Ordination Methods Application in Relationship between Plant Community and Environment

热带亚热带植物学报. 2017, 25(2): 202–208 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3670>

[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>

[嵊州市公益林群落数量分类、排序及环境解析](#)

Numerical Classification, Ordination and Environment Analysis of Public Welfare Forest Community in Shengzhou

热带亚热带植物学报. 2015(3): 334–342 <https://doi.org/10.11926/j.issn.1005-3395.2015.03.016>

[向下翻页，浏览PDF全文](#)

广佛地区典型湿地类型植物多样性与土壤因子的关系

黄燕^{1,2}, 庞兴宸^{1,3}, 陈景锋¹, 汪理慧¹, 吴永彬^{1*}

(1. 华南农业大学林学与风景园林学院, 南粤古驿道植物资源研究中心, 广州 510642; 2. 梅州建鑫森之林投资发展有限公司, 广东 梅州 514000; 3. 深圳市农科集团有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 为了解土壤影响湿地植物多样性的主要因子, 在广佛地区 9 大湿地类型选取 18 个样地为研究对象, 运用方差分析、典范冗余分析(RDA)、典范对应分析(CCA)对群落分布、植物多样性与土壤因子间的相关性进行分析。结果表明, 广佛地区有湿地植物 312 种, 隶属 90 科 198 属, 以禾本科(Gramineae)、莎草科(Cyperaceae)、菊科(Compositae)等为优势科。草本植物占绝对优势, 占 79.17%。主成分评价结果表明, 近海及海岸湿地土壤养分水平较高。RDA 排序分析结果表明土壤因子对植物多样性影响较大的指标是土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮; CCA 排序结果表明土壤环境因子对湿地草本植物群落分布主要影响因子为 pH、速效钾、有效磷。因此, 湿地生态系统比陆地生态系统更为复杂和脆弱, 植物群落与土壤环境因子之间的关系也更为复杂, 湿地植被的分布格局、群落多样性、群落结构和土壤条件及其相互关系受到人为干扰的类型和强度影响更加明显。

关键词: 湿地植物; 植物多样性; 土壤因子; 广佛地区

doi: 10.11926/jtsb.4524

Relationship Between Plant Diversity and Soil Factors of Typical Wetland Types in Guangfo Area

HUANG Yan^{1,2}, PANG Xingchen^{1,3}, CHEN Jingfeng¹, WANG Lihui¹, WU Yongbin^{1*}

(1. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Historical Trail Plant Resources Research Center, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Meizhou Jianxin Senzhilin Investment Development Co., Ltd, Meizhou 514000, Guangdong, China; 3. Shenzhen Nongke Group Co., Ltd, Shenzhen 518000, Guangdong, China)

Abstract: In order to understand the main factors of soil affecting wetland plant diversity, 18 sample plots were selected from 9 wetland types in Guangfo area. The wetland community species composition, plant diversity and soil factors were studied through field work and laboratory experiment. Furthermore, the correlations among community distribution, plant diversity and soil factors were analyzed by variance, canonical redundancy analysis (RDA) and canonical correspondence analysis (CCA). The results showed that there were 312 wetland species, belonging to 90 families and 198 genera, with Gramineae, Cyperaceae and Compositae as the dominant families. In addition, herbs are the most abundant in wetland plants, accounting for 79.17%. The principal component analysis showed that the level of soil nutrients in offshore and coastal wetlands was high. Moreover, the RDA analysis showed that soil factors with a great impact on plant diversity were soil organic matter, total nitrogen,

收稿日期: 2021-09-13

接受日期: 2021-11-09

基金项目: 广东省自然资源厅项目(KJHE2020772); 广州市野生动植物保护管理办公室项目(4400-F18112, 4400-F19102)资助

This work was supported by the Project of Department of Natural Resources of Guangdong Province (Grant No. KJHE2020772); and the Project of Guangzhou Municipal Wildlife Conservation and Management Office (Grant No. 4400-F18112, 4400-F19102).

作者简介: 黄燕(1994 生), 女, 硕士, 主要从事植物分类研究。E-mail: 1176619961@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: ybwu@scau.edu.com

total phosphorus, total potassium and alkali hydrolyzable nitrogen. From CCA, the main influencing factors of soil environmental factors on wetland herb community distribution are pH, available potassium and available phosphorus. In conclusion, wetland ecosystem was more complex and fragile than terrestrial ecosystem, and the relationship between plant community and soil environmental factors was also more complex. The species distribution pattern, community diversity, community structure, soil conditions and their relationship of wetland vegetation are more obviously affected by the human disturbance.

Key words: Wetland plant; Plant diversity; Soil factor; Guangzhou and Foshan

珠三角是我国人口数量最多、创新实力最强、综合发展最快的三大城市群之一,据调查珠三角的湿地共有 5 大类 21 型,总面积达 $7.9 \times 10^5 \text{ hm}^2$,占广东省湿地总面积的 45.1%^[1]。而广州、佛山两市位于珠三角腹地,随着经济快速发展、城市扩张、人口激增、气候变化等的影响,广佛地区环境承载力面临严峻挑战,自然生态格局与生态环境面临着威胁,湿地面积萎缩,物种多样性下降,湿地生态功能和效益下降甚至丧失,这严重危及湿地植物的生存现状^[2-3]。因此,对广佛地区湿地植物群落进行调查、摸清广佛地区湿地植物资源概况,找出影响湿地植物多样性及分布的关键土壤因子具有重要的实践指导作用和理论价值。

目前对于广州和佛山的湿地研究主要集中在湿地生态服务功能^[4]、湿地公园建设^[1]、植物资源^[5]、水体净化^[6-7]等方面,而关于环境因子对湿地植物群落的影响研究较少。湿地植物与环境因子之间的相互作用影响着湿地生态系统的特征,对维持湿地生态系统的稳定起着关键作用^[8]。不同环境因素的不同组合造成植被生物量梯度变化,决定了湿地植物群落的种类和植被类型,这不仅反映了群落在结构和功能等的异质性,也反映了相异的自然环境条件下群落间的关系^[9]。本研究通过对湿地植物群落物种多样性、土壤及水质进行一个多要素的、较为全面的调查,探究湿地植物资源现状,考察湿地植物群落与相关因子的关系,为今后修复和保护湿地植物的多样性、城市湿地生态系统的管理、解决城市湿地退化等环境问题提供有效的理论依据、基础信息和技术支撑。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

以广州市和佛山市为重点研究区域,气候均属于南亚热带季风海洋气候,夏季高温高湿多雨,冬

季低温干燥少雨。广州市地处华南,广东省的中南部,珠江三角洲中北缘,靠近珠江入海口,城镇化率达到 86.34%,市域总面积为 $7\,434.40 \text{ km}^2$ ^[3]。佛山地处广东省中南部,市域总面积 $3\,797.72 \text{ km}^2$,位居珠三角水系的顶部,四面环水,以冲积平原为主^[10]。

1.2 样地设置

广州市湿地包括 3 大湿地类 11 湿地型,其中三角洲沙洲沙岛型与淤泥质海滩型面积较小且植被贫乏^[11],而佛山的湿地类型主要为河流型,故根据湿地类型与面积选取广州市 9 个类型湿地 13 个样地,另外在佛山市选取 5 个样地进行调查,共计 18 个样地(表 1)。每个样地设置 3 个 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 样方,每个样方包括 4 个 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 乔木样方、4 个 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的灌木样方和 4 个 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 的草本样方。对于沿河岸样地,则采取样带调查法,设置 1 条长为 120 m 的样带,每隔 10 m 设置 1 个 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 的样方,共 12 个样方。

1.3 土壤样品采集和分析

在每个 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 样地内采用五点取样法采集土壤样品,然后混合表层(0~25 cm)土样,每袋 1 kg,贴上标签并记录采集时间、地点等,装入自封袋带回实验室检测土壤化学指标。土壤样品在实验室风干、过筛、研磨、剔除杂质,采用四分法贮存土壤样品。土壤因子指标按照《中华人民共和国林业土壤行业标准》中的方法进行测定(表 2)。

1.4 数据的统计分析

根据样方数据计算植物的重要值,同时利用目前广泛运用的 Patrick 指数(S)、Margalet 指数(F)、Simpson 指数(D)、Shannon-Wiener 指数(H)及 Pielou 均匀度指数(E)测定物种多样性。乔木层和灌木层重要值 = 相对多度 + 相对频度 + 相对显著度;草本层重要值 = 相对盖度 + 相对频度;其中,相对多度 = (某物

表 1 18 个样地概况

Table 1 Informations of 18 sample plots

| 序号 No. | 地点 Location | 区域 District | 经度 (E) Longitude | 纬度 (N) Latitude | 湿地类型 Wetland type |
|-----------|---|--------------------------------------|---------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1 | 流溪河良口段 Liangkou of Liuxi River | 广州市从化区 Conghua District, Guangzhou | 113°43'45" | 23°44'30" | 河流 River |
| 2 | 三坑水库 Sankeng Reservoir | 广州市花都区 Huadu District, Guangzhou | 113°3'53" | 23°27'41" | 库塘 Reservoir pond |
| 3 | 流溪河白云段 Baiyun of Liuxi River | 广州市白云区 Baiyun District, Guangzhou | 113°15'26" | 23°17'8" | 河流 River |
| 4 | 鹤之洲湿地公园 Hezhizhou Wetland Park | 广州市增城区 Zengcheng District, Guangzhou | 113°49'56" | 23°15'5" | 河流 River |
| 5 | 华农树木园 Arboretum in SCAU | 广州市天河区 Tianhe District, Guangzhou | 113°21'22" | 23°9'30" | 库塘 Reservoir pond |
| 6 | 海珠湿地果林 Fruit forest in Haizhu Wetland National Park | 广州市海珠区 Haizhu District, Guangzhou | 113°20'1" | 23°4'37" | 人工复合湿地 Constructed compound wetland |
| 7 | 生鱼洲 Shengyu Island | 广州市黄埔区 Huangpu District, Guangzhou | 113°27'7" | 23°5'9" | 洪泛平原湿地 Floodplain wetland |
| 8 | 前航道 Qian Water Channel | 广州市黄埔区 Huangpu District, Guangzhou | 113°27'4" | 23°5'13" | 河口 Estuarine |
| 9 | 沙湾水道 Shawan Waterway | 广州市番禺区 Panyu District, Guangzhou | 113°32'43" | 22°51'4" | 河口 Estuarine |
| 10 | 龙穴岛北角 North cape of Longxue Island | 广州市南沙区 Nansha District, Guangzhou | 113°35'7" | 22°38'24" | 潮间盐水沼泽 Intertidal saline swamp |
| 11 | 龙穴岛 Longxue Island | 广州市南沙区 Nansha District, Guangzhou | 113°35'11" | 22°42'55" | 水产养殖场 Aquaculture farm |
| 12 | 南沙十涌 10 th Chung, Nansha | 广州市南沙区 Nansha District, Guangzhou | 113°34'24" | 22°40'13" | 人工河 Artificial river |
| 13 | 南沙湿地 Nansha Wetland | 广州市南沙区 Nansha District, Guangzhou | 113°38'7" | 22°36'48" | 红树林 Mangrove |
| 14 | 金沙岛滩涂 Beach of Jinsha Island | 佛山市南海区 Nanhai District, Foshan | 112°58'44" | 23°0'51" | 河流 River |
| 15 | 南海湿地 Wetland of South China Sea | 佛山市南海区 Nanhai District, Foshan | 112°57'37" | 23°4'59" | 河流 River |
| 16 | 金沙岛水保区 Jinsha Island water and soil conservation area | 佛山市南海区 Nanhai District, Foshan | 112°56'19" | 23°7'4" | 河流 River |
| 17 | 南沙涌上游 Upstream of Nansha Chung | 佛山市南海区 Nanhai District, Foshan | 112°55'9" | 23°5'33" | 河流 River |
| 18 | 南沙涌下游 Downstream of Nansha Chung | 佛山市南海区 Nanhai District, Foshan | 112°56'45" | 23°1'28" | 河流 River |

表 2 土壤化学指标检测方法

Table 2 Determination methods of soil chemical indexes

| 序号 No. | 指标 Index | 方法 Method | 参考标准 Reference standard |
|--------|---------------------------------|--------------|-------------------------|
| 1 | pH | 电极电位法 | LY/T 1239-1999 |
| 2 | 土壤有机质 Soil organic matter (SOM) | 重铬酸钾-硫酸溶液氧化法 | LY/T 1237-1999 |
| 3 | 全氮 Total nitrogen (TN) | 凯氏定氮法 | LY/T 1228-1999 |
| 4 | 全磷 Total phosphorus (TP) | 碱熔-钼锑抗比色法 | LY/T 1232-1999 |
| 5 | 全钾 Total potassium (TK) | 酸溶-火焰光度计法 | LY/T 1234-1999 |
| 6 | 碱解氮 Available nitrogen (AN) | 碱解扩散法 | LY/T 1229-1999 |
| 7 | 有效磷 Available phosphorus (AP) | 盐酸-硫酸浸提法 | LY/T 1233-1999 |
| 8 | 速效钾 Available potassium (AK) | 乙酸铵浸提-火焰光度计法 | LY/T 1236-1999 |

种个体数 / 所有物种个体数) × 100%; 相对频度 = (某物种的频度 / 所有物种的频度和) × 100%; 相对显著度 = (某树种的胸高断面积 / 所有树种的总胸高断面积) × 100%; 相对盖度 = (某物种的盖度 / 所有物种的总盖度) × 100%; S = 样方内的物种数目; $F = (S - 1) / \ln N$; $D = 1 - \sum P_i^2$; $H = -\sum P_i \ln P_i$; $E = (H) / \ln S$, 式中, N 为个体总数, P_i 为物种 i 的个体数占群落中所有物种个体数的比例。

用 R 语言对典型样地物种丰富度(Patrick 指数)进行聚类分析并结合主成分分析对样地土壤状况进行评价, 用 Vegan 包进行物种多样性及分布与环境因子的相关性排序分析, 运用“统计产品与服务

解决方案”软件(statistical product service solutions, SPSS)进行描述统计。典范冗余分析(redundancy analysis, RDA)或典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)是基于对应分析(correspondence analysis, CA)发展而来的一种排序方法, 将对应分析与多元回归分析相结合, 每一步计算均与环境因子进行回归, 又称多元直接梯度分析。为反映植物多样性与土壤因子的关系, 采用基于线性模型的 RDA 与基于单峰模型的 CCA 进行分析。排序前构建样方-植物矩阵, 为了选择合适的排序方式首先进行除趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA)对矩阵进行判断, 若 DCA 排序前 4 轴结果中最大值

大于 4, 选择 CCA 排序; 若 DCA 小于 3 则选择 RDA 排序; 3~4 表示 2 种排序方式均可。为检验土壤因子是否具有显著影响性, 采用蒙特卡洛(Monte Carlo)法进行显著性检验。

2 结果和分析

2.1 湿地植物组成

根据调查结果, 共记录湿地植物 312 种, 隶属于 90 科 198 属, 其中, 双子叶植物 54 科 106 属 150

种, 单子叶植物 22 科 75 属 139 种, 裸子植物 1 科 2 属 3 种, 蕨类植物 13 科 15 属 20 种。禾本科(*Gramineae*)与莎草科(*Cyperaceae*)的种数最为丰富, 分别是 34 和 31 种。此外蓼科(*Polygonaceae*)、天南星科(*Araceae*)、菊科(*Compositae*)、玄参科(*Scrophulariaceae*)及泽泻科(*Alismataceae*)的种类也较为丰富, 分别有 16、14、12、11 和 11 种。根据样方数据计算植物的多样性指数, 由表 3 可见, 草本层物种丰富度在广佛地区典型湿地群落物种丰富度中贡献率最大。

表 3 样地的植物多样性指标

Table 3 Plant diversity indexes of plots

| 层次 Layer | 指标 Index | 最大 Maximum | 最小 Minimum | 平均 Average | 标准误差 Standard error | 变异系数 Coefficient of variation |
|--------------|---|---------------|---------------|---------------|------------------------|----------------------------------|
| 乔木层 Tree | Patrick 指数 Patrick index (ST) | 11.00 | 0.00 | 2.940 0 | 3.702 00 | 13.703 |
| | Simpson 指数 Simpson index (DT) | 0.78 | 0.00 | 0.212 8 | 0.300 02 | 0.090 |
| | Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index (HT) | 1.82 | 0.00 | 0.447 8 | 0.644 53 | 0.415 |
| | Pielou 均匀度指数 Pielou index (ET) | 0.82 | 0.00 | 0.249 4 | 0.323 54 | 0.105 |
| | Margalet 指数 Margalet index (FT) | 2.27 | 0.00 | 0.545 0 | 0.782 89 | 0.613 |
| 灌木层 Shrub | Patrick 指数 Patrick index (SS) | 14.00 | 0.00 | 3.780 0 | 4.596 00 | 21.124 |
| | Simpson 指数 Simpson index (DS) | 0.90 | 0.00 | 0.358 0 | 0.350 00 | 0.122 |
| | Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index (HS) | 2.43 | 0.00 | 0.743 3 | 0.811 95 | 0.659 |
| | Pielou 均匀度指数 Pielou index (ES) | 1.00 | 0.00 | 0.449 4 | 0.413 04 | 0.171 |
| | Margalet 指数 Margalet index (FS) | 3.63 | 0.00 | 0.928 9 | 1.127 14 | 1.270 |
| 草本层 Herb | Patrick 指数 Patrick index (SH) | 25.00 | 4.00 | 12.220 0 | 6.726 00 | 45.242 |
| | Simpson 指数 Simpson index (DH) | 0.92 | 0.41 | 0.778 3 | 0.137 72 | 0.019 |
| | Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index (HH) | 2.79 | 0.81 | 1.932 2 | 0.584 02 | 0.341 |
| | Pielou 均匀度指数 Pielou index (EH) | 0.94 | 0.59 | 0.813 9 | 0.096 48 | 0.009 |

2.2 湿地植物丰富度的聚类分析

采用 R 语言 ward 最小方法聚类法, 根据 Jaccard 相似系数, 将 18 个样地的植物群落分成 3 大类(图 1), 各样地不同层次优势植物的重要值见表 4。

第 1 类为 1~6 号样地, 地点分别是流溪河良口、花都三坑水库、流溪河白云段、增江鹤之洲、华农树木园、海珠湿地果林, 湿地类型为河流、库塘 2 种。优势乔木为水翁(*Syzygium nervosum*)、落羽杉(*Taxodium distichum*)等, 优势草本为三裂叶蟛蜞菊(*Sphagneticola trilobata*)、野芋(*Colocasia esculentum*)等。

第 2 类有 7~10、12、13 等 6 个样地, 分别是生鱼洲、前航道、沙湾水道、龙穴岛北角、南沙十涌, 均靠近海岸, 湿地类型为洪泛平原湿地、河口、潮间盐水沼泽、人工输水河 5 大类。近海植物群落以灌木和草本植物为主, 灌木优势种有老鼠簕(*Acanthus ilicifolius*)、鱼藤(*Derris trifoliata*)、假茉莉

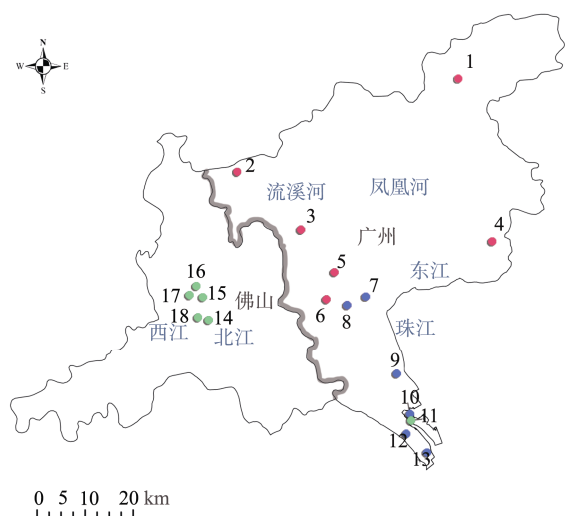


图 1 调查地点分布图。1~18 见表 1; 红色: 第 1 类样地; 蓝色: 第 2 类样地; 绿色: 第 3 类样地。

Fig. 1 Distribution of survey plots. 1-18 see Table 1. Red: The first type plots; Blue: The second type plots; Green: The third type plots.

表 4 样地中优势种的重要值

Table 4 Importance value of dominant species in plots

| 类型 Type | 样地 Plot | 乔木层 Tree | | 灌木层 Shrub | | 草本层 Herb | |
|------------|--------------------------------|--|--------------------------------|--|--------------------------|--|-------|
| | | 植物 Species | IV | 植物 Species | IV | 植物 Species | IV |
| I | 1 | 水翁 <i>Syzygium nervosum</i> | 30.79 | 灰莉 <i>Fagraea ceilanica</i> | 17.86 | 铺地黍 <i>Panicum repens</i> | 15.69 |
| | 2 | - | | - | | 铺地黍 <i>P. repens</i> | 16.09 |
| | 3 | 池杉 <i>Taxodium distichum</i> var. <i>imbricatum</i> | 43.48 | 水翁 <i>Syzygium nervosum</i> | 84.19 | 菜蕨 <i>Diplazium esculentum</i> | 39.60 |
| | 4 | 荔枝 <i>Litchi chinensis</i> | 89.75 | 假柿木姜子 <i>Litsea monopetala</i> | 47.24 | 菜蕨 <i>D. esculentum</i> | 22.31 |
| | 5 | 落羽杉 <i>Taxodium distichum</i> | 58.80 | 野牡丹 <i>Melastoma candidum</i> | 31.74 | 三裂叶虻蜞菊 <i>Sphagneticola trilobata</i> | 15.91 |
| | 6 | 荔枝 <i>Litchi chinensis</i> | 42.32 | 花叶鹅掌藤 <i>Schefflera arboricola</i> 'Variegata' | 53.34 | 野芋 <i>Colocasia esculentum</i> var. <i>antiquorum</i> | 19.39 |
| II | 7 | 池杉 <i>Taxodium distichum</i> var. <i>imbricatum</i> | 82.02 | 鱼藤 <i>Derris trifoliata</i> | 87.02 | 短叶荳苳 <i>Cyperus malaccensis</i> subsp. <i>monophyllus</i> | 23.53 |
| | 8 | - | | - | | 芦苇 <i>Phragmites australis</i> | 40.55 |
| | 9 | 无瓣海桑 <i>Sonneratia apetala</i> | 100.00 | 老鼠箭 <i>Acanthus ilicifolius</i> | 45.91 | 短叶荳苳 <i>Cyperus malaccensis</i> subsp. <i>monophyllus</i> | 75.39 |
| | 10 | - | | 鱼藤 <i>Derris trifoliata</i> | 43.76 | 短叶荳苳 <i>C. malaccensis</i> subsp. <i>monophyllus</i> | 42.22 |
| | 12 | 大蕉 <i>Musa×paradisiaca</i> | 81.24 | 鱼藤 <i>D. trifoliata</i> | 40.61 | 芦苇 <i>Phragmites australis</i> | 45.55 |
| 13 | 无瓣海桑 <i>Sonneratia apetala</i> | 79.37 | 东方紫金牛 <i>Ardisia elliptica</i> | 31.88 | 海芋 <i>Alocasia odora</i> | 31.91 | |
| III | 11 | - | | - | | 空心莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i> | 64.56 |
| | 14 | - | | - | | 野芋 <i>Colocasia esculentum</i> var. <i>antiquorum</i> | 23.64 |
| | 15 | 池杉 <i>Taxodium distichum</i> var. <i>imbricatum</i> | 43.61 | 水黄皮 <i>Pongamia pinnata</i> | 63.64 | 星毛蕨 <i>Ampelopteris proliferata</i> | 44.48 |
| | 16 | - | | - | | 空心莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i> | 19.96 |
| | 17 | - | | - | | 空心莲子草 <i>A. philoxeroides</i> | 28.84 |
| | 18 | - | | - | | 水蓼 <i>Polygonum hydropiper</i> | 33.91 |

1~18 见表 1; IV: 重要值。下表同。

1-18 see Table 1; IV: Importance value. The same is following Tables.

(*Clerodendrum fragrans*), 草本优势种为短叶荳苳 (*Cyperus malaccensis* subsp. *monophyllus*)、芦苇 (*Phragmites australis*)、三裂叶虻蜞菊, 主要乔木为红树植物无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)。

第 3 类包括 11、14~18 号样地, 分别是龙穴岛水产养殖场、金沙岛滩涂、南海湿地、金沙岛水保区、南沙涌上游、南沙涌下游, 湿地类型为水产养殖场和河流。均为典型的草本植物群落, 优势种为丛枝蓼(*Persicaria posumbu*)、水蓼、空心莲子草、假蛇尾草(*Mnesithea laevis*)、光蓼(*Persicaria glabra*)等。

2.3 湿地植物群落与土壤因子的关系

土壤因子特征 从表 5 可见, 土壤指标含量变化较大的有 TK、AP 和 AK, 同时土壤 N、P、K 含量总体上呈现 K>N>P。

主成分分析 以特征值 ≥1 或累计贡献率 ≥85% 为标准, 对 8 个湿地土壤因子进行主成分分析。

主成分 1、主成分 2 的累计贡献值达 70.654%, 表明这 2 个主成分已经代表原来变量的大多数信息。根据旋转后主成分荷载矩阵和得分系数矩阵, 主成分 1 主要有 SOM、TN、AN 等指标, 为正相关关系。主成分 2 主要与 pH、TP、TK、AP 有关, 呈正相关关系。2 个主成分得分的表达式为: $G_1 = -0.158G_{pH} + 0.286G_{SOM} + 0.288G_{TN} + 0.165G_{TP} - 0.053G_{TK} + 0.298G_{AN} + 0.076G_{AP} - 0.03G_{AK}$; $G_2 = 0.298G_{pH} - 0.032G_{SOM} + 0.043G_{TN} + 0.282G_{TP} + 0.248G_{TK} - 0.053G_{AN} + 0.303G_{AP} + 0.278G_{AK}$ 。将 2 个主成分得分与其对应的方差贡献率的比例相乘后综合, 则为总得分(G), 建立土壤指标评价函数: $G = 0.3981G_1 + 0.30844G_2$ 。由表 6 可见, 综合得分排名前 3 的为 8、3、13 样地, 分别是前航道、流溪河白云段、南沙湿地, 近海及海岸湿地综合得分较高。

湿地植物多样性与土壤环境因子的排序分析 经 DCA 分析, 样地-物种多样性指标矩阵的 4 个排序轴分别为 1.192 1、1.127 37、0.805 732 和 0.749 447,

表 5 样地土壤养分的主要特征

Table 5 Main characteristics of soil nutrients in survey plots

| 指标 Index | 平均 Mean | 标准差 Standard deviation | 极小 Minimum | 极大 Maximum | 变异系数 Coefficient of variation |
|------------|------------|------------------------|------------|------------|-------------------------------|
| pH | 6.798 67 | 0.858 097 | 4.500 | 8.240 | 0.736 |
| SOM (g/kg) | 33.966 60 | 17.124 046 | 10.806 | 96.948 | 293.233 |
| TN (g/kg) | 1.474 70 | 0.513763 | 0.504 | 3.313 | 0.264 |
| TP (g/kg) | 0.771 06 | 0.393 936 | 0.154 | 1.774 | 0.155 |
| TK (g/kg) | 17.247 86 | 5.021 110 | 1.296 | 28.727 | 25.212 |
| AN (mg/kg) | 93.997 76 | 34.557 301 | 42.720 | 216.187 | 1 194.207 |
| AP (mg/kg) | 26.558 81 | 26.728 999 | 0.050 | 114.700 | 714.439 |
| AK (mg/kg) | 126.906 90 | 69.525 962 | 21.630 | 401.845 | 4 833.859 |

SOM、TN、TP、TK、AN、AP、AK 见表 2。下图同。

SOM, TN, TP, TK, AN, AP, and AK see Table 2. The same is following Figures.

因此对湿地植物群落各层多样性指数与 8 个土壤环境因子进行 RDA 排序。经 RDA 排序后可知, 环境因子对物种多样性的解释量为 77.64%, 不能解释的量为 22.36%。采用 *permutest* 函数, 经 999 次进行蒙特卡洛检验, 经检验, 显著性为 0.001, 具有极显著相关关系, 该排序的结果可以接受土壤环境因子对物种多样性的解释量。由排序结果可知, 前两轴的共同解释量为 88.53%, 包含了大部分的信息, 因此采用前两轴进行分析。应用 *envfit* 函数对土壤因子与 RDA 前两轴进行相关性分析, 找出影响植物多样性的关键土壤因子。由图 2 可见, 第一排序轴主要反映的是 TK 和 SOM 的变化, TK 从左到右逐渐增大, SOM 从左到右逐渐减小; 第二排序轴

反映了 TP、AP 的变化, 从下至上逐渐减小。SOM 与乔木层和灌木层物种多样性呈正相关关系, 与草本层 *DH* 呈正相关关系, 与 *HH*、*SH* 呈负相关关系。TK 与草本层的物种多样性呈正相关关系; TN 与草本层物种多样性呈正相关关系。对湿地植物多样性影响较大的土壤因子为 SOM、TN、TP、TK 和 AN。

湿地植物群落分布与土壤环境因子的排序分析 草本植物是湿地中种类最丰富的类群, 受环境因子的影响更加明显。因此选取草本层植物群落与环境因子进行排序分析。在排序前进行 DCA 分析, 样方-草本层物种重要值矩阵的 4 个排序轴值最大值为 6.107 8, 因此选取 CCA 分析, 经 CCA 排序

表 6 土壤主成分综合得分

Table 6 Comprehensive score of soil principal components

| 样地 Plot | G1 | G2 | G | 综合排序 Ranking |
|---------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| 1 | 18.463 953 90 | 37.139 075 88 | 18.805 676 61 | 15 |
| 2 | 21.919 593 01 | 14.306 181 18 | 13.138 788 50 | 17 |
| 3 | 54.161 017 45 | 42.438 370 50 | 34.651 192 04 | 2 |
| 4 | 31.466 317 42 | 18.809 507 50 | 18.328 345 46 | 16 |
| 5 | 54.577 576 08 | 3.190 743 52 | 22.711 485 97 | 14 |
| 6 | 51.188 903 88 | 40.073 717 73 | 32.738 640 13 | 5 |
| 7 | 39.907 747 84 | 33.993 235 45 | 26.372 147 96 | 9 |
| 8 | 54.522 737 74 | 74.787 672 26 | 44.773 011 52 | 1 |
| 9 | 32.937 837 97 | 55.020 954 15 | 30.083 216 39 | 6 |
| 11 | 23.665 448 88 | 55.338 268 71 | 26.489 750 80 | 8 |
| 12 | 45.928 264 10 | 49.170 506 31 | 33.450 192 91 | 4 |
| 13 | 25.370 862 97 | 77.424 546 27 | 33.980 967 60 | 3 |
| 14 | 29.298 010 70 | 45.953 564 63 | 25.837 455 53 | 10 |
| 15 | 44.815 852 18 | 25.089 114 69 | 25.579 677 29 | 11 |
| 16 | 31.413 805 46 | 36.487 005 15 | 23.759 887 82 | 13 |
| 17 | 27.687 678 47 | 41.758 816 68 | 23.902 554 22 | 12 |
| 18 | 32.030 017 22 | 49.287 622 33 | 27.953 424 09 | 7 |

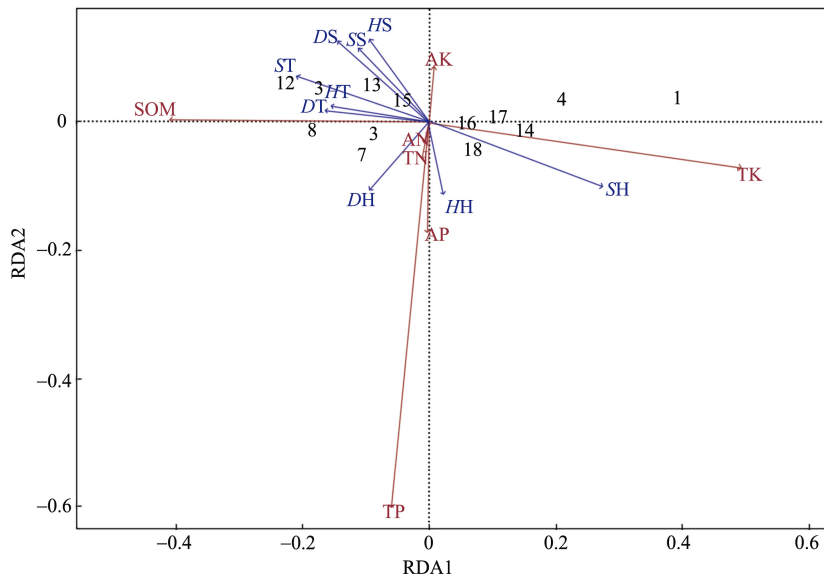


图 2 湿地植物多样性与土壤环境因子 RDA 排序图。ST、DT、HT、SS、DS、HS、SH、DH 和 HH 见表 3。

Fig. 2 RDA ranking map of wetland plant diversity and soil environmental factors. ST, DT, HT, SS, DS, HS, SH, DH, and HH see Table 3.

后，土壤环境因子对植物群落分布的解释量为 100%，经过蒙特卡洛置换检验值显著性为 0.001，前两轴的共同解释量为 81.421%，采用前两轴进行分析。由图 3 可见，第一排序轴主要反映的是 AP、TP、SOM，AP、TP 从左到右逐渐增大，SOM 从左至右逐渐减小；第二排序轴反映了 AK、AN 的变化，AN 从上至下逐渐增大，AK 从上至下逐渐减小。

pH 与草龙(*Ludwigia hyssopifolia*)、稗草(*Echinochloa crusgalli*)、糙毛蓼(*Polygonum strigosum*)等成正相关关系，AP 对蔗草(*Scirpus triqueter*)、丛枝蓼、短叶荳苳、光蓼影响较大，AK 与薄叶碎米蕨(*Cheilanthes tenuifolia*)、糙毛蓼、草龙等物种呈明显的正相关关系。对湿地植物群落分布影响最大的土壤环境指标是 pH、AP 和 AK。

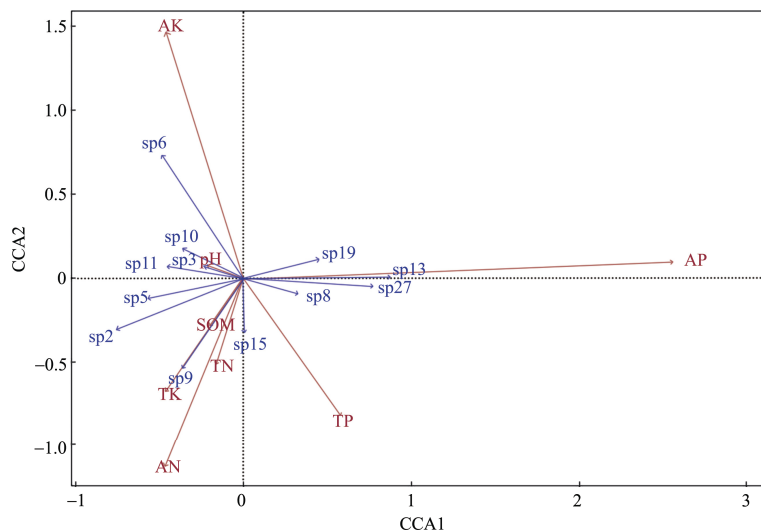


图 3 草本层物种重要值(前 12 种)与土壤因子 CCA 排序图。sp2: 白花鬼针草; sp3: 稗草; sp5: 半边旗; sp6: 薄叶碎米蕨; sp8: 蔗草; sp9: 菜蕨; sp10: 糙毛蓼; sp11: 草龙; sp13: 丛枝蓼; sp15: 大花水蓑衣; sp19: 短叶荳苳; sp27: 光蓼。

Fig. 3 CCA ranking diagram of species importance value in herb layer (top 12) and soil factors. Sp2: *Bidens pilosa*; sp3: *Echinochloa crusgalli*; sp5: *Pteris semipinnata*; sp6: *Cheilanthes tenuifolia*; sp8: *Scirpus triqueter*; sp9: *Diplazium esculentum*; sp10: *Persicaria strigosa*; sp11: *Ludwigia hyssopifolia*; sp13: *Persicaria posumbu*; sp15: *Hygrophila megalantha*; sp19: *Cyperus malaccensis* subsp. *monophyllus*; sp27: *Persicaria glabra*.

3 结论和讨论

3.1 湿地植物资源的保护与利用

我国湿地植物资源丰富,植物种数超 2 000 余种,但是目前在人工湿地中得到应用并产生效果的只有几十种^[12]。以广州的湿地公园为例,主要植物种类包括莲(*Nelumbo nucifera*)、睡莲(*Nymphaea tetragona*)、泽泻慈姑(*Sagittaria platyphylla*)、美人蕉(*Canna indica*)、再力花(*Thalia dealbata*)、梭鱼草(*Pontederia cordata*)等,其中还有许多种类属于外来栽培物种,许多原生湿地植物尚未被利用,这与广东省丰富的湿地植物资源很不匹配,且曾作为猪饲料引进的外来植物空心莲子草、凤眼蓝(*Eichhornia crassipes*)、大藻(*Pistia stratiotes*)等,入侵大面积的水域,这些植物种类通常形成单优群落,严重占据了本土植物的生长空间^[13-14]。对外来植物的定期人工清除不应局限于湿地内,还应聚焦于人类主要活动范围如公路两侧、住宅用地和耕地内的外来植物,避免其随着人类活动而逐步扩大入侵面积,可结合生物防治^[15]。在防治的基础上还应大力促进生态种养,减少除草剂的使用,对水质较差的水域进行水环境综合整治,促进本土湿地植物多样性的恢复和保育,有利于抵御外来植物的入侵^[16-17]。湿地植物以被子植物为主,单子叶植物以禾本科和莎草科的种类居多,莎草科以莎草属的种类居多,双子叶植物以蓼科、天南星科和菊科为主,蓼科中的蓼属(*Persicaria*)种类也比较多,这与广州地区和广东省湿地植物的调研结果基本一致^[13-14,18]。这些科属植物大多属于广东地区乡土植物,都具有应用于湿地公园的潜力。

3.2 人为干扰对湿地植物多样性的影响

植物多样性排前 4 的为流溪河良口段、海珠湿地、华南农业大学树木园和南沙湿地,可能是流溪河良口段为流溪河靠近源头部分,为水源保护区,人口较少,人为干扰活动小。海珠湿地则通过生境恢复、生物恢复等手段,清除入侵植物、人工引入乡土物种等方式优化区域群落结构,从而提高植物物种多样性^[19]。华南农业大学树木园为植物种质资源保存基地,分为引种试验区、水生植物区等 6 个功能区,植物资源丰富,生态良好^[20]。南沙湿地通过封闭育林和对外开放相结合的方式,以乡土红树植物为主、适度引进外来植物和清理入侵植物等恢

复红树林,丰富植物多样性^[21],这些都符合中度干扰理论。而排名最后的 3 个样地是前航道、龙穴岛水产养殖场和南沙涌下游,原因可能是前航道以及南沙涌由于硬质驳岸,湿地的面积小,生态系统遭到破坏,从而导致湿地植物多样性不高,而龙穴岛水产养殖场为人工湿地,仅种植荷花,物种单一,这也说明湿地生境类型可能是影响植物多样性的关键因素,而生境类型又受到面积、土壤、水文等多个因素的共同作用。

3.3 植物多样性与土壤因子的关系

土壤状况约束着植物的生长发育,土壤环境的差别致使植物群落物种多样性产生变化,湿地土壤中的养分水平与湿地植物多样性也息息相关^[22-24]。Burnside 等^[25]研究表明植被与土壤因子密切相关,特别是植被演替与土壤变化更能体现二者是相互作用、相互影响;植物群落的类型和土壤质量的高低变化对植物群落演替起着关键作用,土壤性质是植物群落类型的最终决定因子。

本研究 RDA 排序结果表明,土壤环境因子中对植物多样性影响最大的指标是 TP、TN、AN,其次为 SOM、TK、AP,这与前人^[26-28]的研究结果一致。本研究 CCA 排序结果表明,影响湿地植物群落分布最重要的土壤因子为 AP,其次为 pH、AK。董磊等^[29]采用 CCA 分析研究了土壤因子对鄱阳湖洲滩湿地植被分布的影响,认为 pH、TK 是影响湿地植物分布的重要要素;唐明艳等^[30]的研究表明,土壤 TK、TN 含量是影响湿地植物物种分布的重要因子。这可能是场地受到的人为干扰程度不尽相同,以及不同的水域环境和气候对植物分布也有较大影响。对不同湿地类型在大气候与流量相似条件下,水流流速及淋溶效应等不同,导致了土壤各养分不同^[31]。土壤养分含量的差异性分布,又会反过来影响植物群落结构。同时本研究的取样时间只局限于同一季节,时间跨度较小可能也是影响结果准确性的重要原因,不同月份的样方数据可能有一定波动性。未来的研究可倾向于广佛湿地生态系统对气候变化响应的整体特征和空间分异。植物的指标数值只是植被动态变化过程中的一个阶段性特征,环境的波动会造成群落多样性的复杂化。各研究表明,湿地生态系统比陆地生态系统更为复杂和脆弱,植物群落与土壤环境因子之间的关系也更为复杂,湿地植被的分布格局、群落多样性、群

落结构和土壤条件及其相互关系受到人为干扰的类型和强度影响更加明显^[32-34]。

综上, 本研究区共有湿地植物 312 种, 隶属于 90 科 198 属, 草本植物占绝对优势。湿地植物多样性表现为草本层 > 灌木层 > 乔木层。土壤状况较好的区域为前航道、流溪河白云段、南沙湿地, 分别属于河口水域、永久性河流、红树林湿地类型。土壤环境因子对植物多样性影响最大的指标是 SOM、TN、TP、TK 和 AN, 对湿地草本植物群落分布影响的主要因子是 pH、AK 和 AP。

参考文献

- [1] QU M, ZHANG C X, CHEN P. Present situation and development countermeasures of wetland parks in Pearl River delta area [J]. *For Inv Plant*, 2016, 41(3): 59–62. doi: 10.3969/j.issn.1671-3168.2016.03.014.
屈明, 张春霞, 陈盼. 珠江三角洲地区湿地公园建设现状及发展对策研究 [J]. *林业调查规划*, 2016, 41(3): 59–62. doi: 10.3969/j.issn.1671-3168.2016.03.014.
- [2] HAN D Y, YANG Y X, YANG Y, et al. Recent advances in wetland degradation research [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, 32(4): 1293–1307. doi: 10.5846/stxb201012011707.
韩大勇, 杨永兴, 杨杨, 等. 湿地退化研究进展 [J]. *生态学报*, 2012, 32(4): 1293–1307. doi: 10.5846/stxb201012011707.
- [3] ZHOU T, XIAN L J, XU S J. Spatial distribution of wetland parks and its influence factors in Pearl River Delta [J]. *Wetl Sci*, 2018, 16(6): 707–716. doi: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2018.06.003.
周婷, 洗丽君, 徐颂军. 珠江三角洲湿地公园的空间分布特征及其影响因素分析 [J]. *湿地科学*, 2018, 16(6): 707–716. doi: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2018.06.003.
- [4] XIE H Y, GUO C X. Evaluation of Haizhu wetland ecosystem service value in Guangzhou [J]. *Trop Geomorphol*, 2018, 39(1): 26–33.
谢慧莹, 郭程轩. 广州海珠湿地生态系统服务价值评估 [J]. *热带地貌*, 2018, 39(1): 26–33.
- [5] HUANG Y, MAO J Z, ZHAN H X, et al. Plant resources of Haizhu National Wetland Park, Guangzhou [J]. *For Environ Sci*, 2018, 34(5): 81–85. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2018.05.015.
黄燕, 毛君竹, 詹红星, 等. 广州海珠国家湿地公园植物资源研究 [J]. *林业与环境科学*, 2018, 34(5): 81–85. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2018.05.015.
- [6] YAO R, ZENG X P, ZHANG X X, et al. Study on water sludge purification by aquatic plants in wetland of Guangzhou [J]. *Chin Landsc Arch*, 2018, 34(8): 82–85. doi: 10.3969/j.issn.1000-6664.2018.08.016.
姚睿, 曾小平, 张潇潇, 等. 水生植物对广州湿地水体污泥的净化作用研究 [J]. *中国园林*, 2018, 34(8): 82–85. doi: 10.3969/j.issn.1000-6664.2018.08.016.
- [7] LI Q F, LI Z A, REN H, et al. The role of wetland plants and soils in decontamination of heavy metals [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2004, 12(3): 273–279. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2004.03.016.
李勤奋, 李志安, 任海, 等. 湿地系统中植物和土壤在治理重金属污染中的作用 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2004, 12(3): 273–279. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2004.03.016.
- [8] XU S S, SUN G J, LIU H M, et al. The relationship between riparian vegetation and environmental factors in Heihe River Basin [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, 31(9): 2421–2429.
许莎莎, 孙国钧, 刘慧明, 等. 黑河河岸植被与环境因子间的相互作用 [J]. *生态学报*, 2011, 31(9): 2421–2429.
- [9] LIU G C, HUANG Y X, WANG Q G, et al. Effects of environmental factors on plant species diversity: Research progress [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2018, 34(13): 83–89.
刘冠成, 黄雅曦, 王庆贵, 等. 环境因子对植物物种多样性的影响研究进展 [J]. *中国农学通报*, 2018, 34(13): 83–89.
- [10] TAN J D, KE H, ZHAO H J, et al. Research on application of urban greening plants of Foshan City [J]. *J Foshan Univ (Nat Sci)*, 2017, 35(1): 46–52. doi: 10.13797/j.cnki.jfosu.1008-0171.2017.0008.
谭家得, 柯欢, 赵鸿杰, 等. 佛山市城市绿地植物应用研究 [J]. *佛山科学技术学院学报(自然科学版)*, 2017, 35(1): 46–52. doi: 10.13797/j.cnki.jfosu.1008-0171.2017.0008.
- [11] CHEN P, HU Y H, QU M. Present situation and protection management countermeasures of wetland resources in Guangzhou [J]. *For Inv Plant*, 2017, 42(3): 31–35. doi: 10.3969/j.issn.1671-3168.2017.03.008.
陈盼, 胡喻华, 屈明. 广州市湿地资源现状及保护管理对策 [J]. *林业调查规划*, 2017, 42(3): 31–35. doi: 10.3969/j.issn.1671-3168.2017.03.008.
- [12] NIU X J. Research progress on floral communities in constructed wetland in China [J]. *Sichuan Environ*, 2005, 24(5): 45–47. doi: 10.3969/j.issn.1001-3644.2005.05.014.
牛晓君. 我国人工湿地植物系统的研究进展 [J]. *四川环境*, 2005, 24(5): 45–47. doi: 10.3969/j.issn.1001-3644.2005.05.014.
- [13] YUAN X C, ZHANG W W, WANG F G, et al. Current status and conservation strategies of wetland plants in Guangdong Province, China [J]. *Plant Sci J*, 2018, 36(2): 211–220. doi: 10.11913/PSJ.2095-0837.2018.20211.
袁晓初, 张弯弯, 王发国, 等. 广东省湿地维管植物资源现状及保护利用 [J]. *植物科学学报*, 2018, 36(2): 211–220. doi: 10.11913/PSJ.2095-0837.2018.20211.

- [14] GUO Y N, SU F, WANG R J. Investigation and analysis on plants of wetland parks in Guangzhou [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2020, 28(6): 607–614. doi: 10.11926/jtsb.4178.
郭亚男, 苏凡, 王瑞江. 广州市湿地公园植物调查与分析 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2020, 28(6): 607–614. doi: 10.11926/jtsb.4178.
- [15] LI E H, YANG C, CAI X B, et al. Plant diversity and protection measures in Honghu Wetland [J]. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2021, 30(3): 623–635. doi: 10.11870/cjlyzyyhj202103010.
厉恩华, 杨超, 蔡晓斌, 等. 洪湖湿地植物多样性与保护对策 [J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(3): 623–635. doi: 10.11870/cjlyzyyhj202103010.
- [16] YUAN B D, XU N, CHEN J Y, et al. Investigation and study on plant communities in the dike of Xinli Lake National Wetland Park in Beizhen, Liaoning Province [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2021, 49(17): 102–106. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.17.028.
袁宝东, 徐宁, 陈继宇, 等. 辽宁北镇新立湖国家湿地公园湖塘堤坝植物群落调查研究 [J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(17): 102–106. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.17.028.
- [17] XIE Y, XU Y F, YOU J R, et al. Species composition, flora and invasion hazard of alien plants in Huangjinhe National Wetland Park [J]. *Chin J Ecol*, 2020, 39(11): 3613–3622. doi: 10.13292/j.1000-4890.202011.005.
谢勇, 徐永福, 游健荣, 等. 黄河国家湿地公园外来植物种类组成、区系与入侵危害 [J]. *生态学杂志*, 2020, 39(11): 3613–3622. doi: 10.13292/j.1000-4890.202011.005.
- [18] CHEN R B, ZHANG L, CHEN Z H, et al. Investigation and analysis of wetland vascular plants in Guangzhou area [J]. *Ecol Sci*, 2007, 26(4): 311–318. doi: 10.3969/j.issn.1008-8873.2007.04.005.
陈锐彬, 张丽, 陈章和, 等. 广州地区湿地维管植物资源调查与分析 [J]. *生态科学*, 2007, 26(4): 311–318. doi: 10.3969/j.issn.1008-8873.2007.04.005.
- [19] ZHANG D D, CHEN B L, FENG Y J. Technical approach to ecological restoration of Guangzhou Haizhu National Wetland Park [J]. *Wetl Sci Manag*, 2016, 12(4): 39–41. doi: 10.3969/j.issn.1673-3290.2016.04.10.
张大达, 陈本亮, 冯永军. 广州海珠国家湿地公园生态恢复技术初探 [J]. *湿地科学与管理*, 2016, 12(4): 39–41. doi: 10.3969/j.issn.1673-3290.2016.04.10.
- [20] WU Y B, FENG Z J. Rare and endangered plants and national key protected plants for ex situ conservation in South China Agricultural University arboretum [J]. *J S China Agric Univ*, 2006, 27(3): 118–121. doi: 10.3969/j.issn.1001-411X.2006.03.033.
吴永彬, 冯志坚. 华南农业大学树木园稀有濒危植物和国家重点保护植物的迁地保护 [J]. *华南农业大学学报*, 2006, 27(3): 118–121. doi: 10.3969/j.issn.1001-411X.2006.03.033.
- [21] WANG C L. Study on degradation and restoration methods of mangrove wetland: A case study on Guangdong Nansha Wetland Park mangrove wetland and Zhanjiang mangrove wetland [J]. *Art Sci Technol*, 2019, 32(12): 174, 176. doi: 10.3969/j.issn.1004-9436.2019.12.117.
王成林. 红树林湿地的退化与修复方法研究——以广东南沙湿地公园红树林湿地以及湛江红树林湿地为例 [J]. *艺术科技*, 2019, 32(12): 174, 176. doi: 10.3969/j.issn.1004-9436.2019.12.117.
- [22] ZHANG Q P, ZHANG L, ZHANG X, et al. Plant-diversity of urban wetland in Lanzhou [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2011, 39(34): 21195–21197. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2011.34.102.
张起鹏, 张丽, 张旭, 等. 兰州城市湿地植物多样性 [J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(34): 21195–21197. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2011.34.102.
- [23] XIAO D R, TIAN K, ZHANG L Q. Relationship between plant diversity and soil fertility in Napahai wetland of northwestern Yunnan Plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, 28(7): 3116–3124.
肖德荣, 田昆, 张利权. 滇西北高原纳帕海湿地植物多样性与土壤肥力的关系 [J]. *生态学报*, 2008, 28(7): 3116–3124.
- [24] LIU X M, ZHOU Z F, ZHANG H T, et al. Assessment of water quality and its spatial and temporal characteristics of rivers in karst mountain area based on principal component analysis: A case study on Zhangwei River in Guizhou Province [J]. *Environ Eng*, 2019, 37(10): 49–54. doi: 10.13205/j.hjgc.201910008.
刘贤梅, 周忠发, 张昊天, 等. 基于主成分分析的喀斯特山区河流水质评价及水质时空特征分析: 以贵州省张维河为例 [J]. *环境工程*, 2019, 37(10): 49–54. doi: 10.13205/j.hjgc.201910008.
- [25] BURNSIDE N G, JOYCE C B, PUURMANN E, et al. Use of vegetation classification and plant indicators to assess grazing abandonment in Estonian coastal wetlands [J]. *J Veg Sci*, 2007, 18(5): 645–654. doi: 10.1111/j.1654-1103.2007.tb02578.x.
- [26] LI Y H, LI F D, MA W. Study on the features of plant diversity and its impact factors in the wetlands surrounding the Ebinur Lake [J]. *Ecol Sci*, 2016, 35(3): 78–84. doi: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2016.03.012.
李艳红, 李发东, 马雯. 艾比湖湿地植物多样性特征及其影响因素研究 [J]. *生态科学*, 2016, 35(3): 78–84. doi: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2016.03.012.
- [27] LUO Y, SU D R, JI B M, et al. Vegetation community characteristics of different meadows and their relationship with soil factors in Huihe Wetland [J]. *Acta Pratacul Sin*, 2018, 27(3): 33–43. doi: 10.11686/cyxb2017184.
罗琰, 苏德荣, 纪宝明, 等. 辉河湿地不同草甸植被群落特征及其

- 与土壤因子的关系 [J]. 草业学报, 2018, 27(3): 33–43. doi: 10.11686/cyxb2017184.
- [28] LIU J J. Study on features of plant diversity and environmental factors in Danjiang Wetland [J]. SW China J Agric Sci, 2017, 30(12): 2811–2819. doi: 10.16213/j.cnki.scjas.2017.12.033.
- 刘俊娟. 丹江湿地植物多样性特征及其环境影响因素 [J]. 西南农业学报, 2017, 30(12): 2811–2819. doi: 10.16213/j.cnki.scjas.2017.12.033.
- [29] DONG L, XU L G, XU J X, et al. Effects of soil environmental factors on vegetation distribution in Shoaly wetlands typical to Poyang Lake [J]. Acta Pedol Sin, 2014, 51(3): 618–626. doi: 10.11766/trxb201307230347.
- 董磊, 徐力刚, 许加星, 等. 鄱阳湖典型洲滩湿地土壤环境因子对植被分布影响研究 [J]. 土壤学报, 2014, 51(3): 618–626. doi: 10.11766/trxb201307230347.
- [30] TANG M Y, YANG Y X. Changes in vegetation and soil characteristics under tourism disturbance in lakeside wetland of northwest Yunnan plateau, southwest China [J]. Chin J Appl Ecol, 2014, 25(5): 1283–1292. doi: 10.13287/j.1001-9332.2014.0096.
- 唐明艳, 杨永兴. 旅游干扰下滇西北高原湖滨湿地植被及土壤变化特征 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(5): 1283–1292. doi: 10.13287/j.1001-9332.2014.0096.
- [31] MA J H, MA X Z. A study on the migration and accumulation laws of soil materials in the juncture of Qinling-Huanghuai [J]. Mount Res, 1997, 15(1): 36–41.
- 马建华, 马向忠. 秦岭-黄淮平原交界带土壤物质迁移与积累 [J]. 山地研究, 1997, 15(1): 36–41.
- [32] JIA H J, LI S, HAO J, et al. Study on the relationship between water factors and plant diversity of wetland in the middle reaches of the Yellow River (Longmen-Fenhe river into the Yellow River entrance) [J]. J Shanxi Agric Sci, 2017, 45(8): 1325–1330. doi: 10.3969/j.issn.1002-2481.2017.08.26.
- 贾蕙君, 李帅, 郝婧, 等. 黄河中游(龙门-汾河入黄口)水分因子与湿地植物多样性的相关关系研究 [J]. 山西农业科学, 2017, 45(8): 1325–1330. doi: 10.3969/j.issn.1002-2481.2017.08.26.
- [33] ZHAO T L, ZHAO R. Study on the correlation between soil environmental factors and plant diversity in the middle reaches of Yellow River (Longmen-Fenhe River Estuary) [J]. For Sci Technol, 2017(8): 36–40. doi: 10.13456/j.cnki.lykt.2017.08.015.
- 赵天梁, 赵蓉. 黄河中游(龙门-汾河入黄口)土壤含盐量与湿地植物多样性的相关关系研究 [J]. 林业科技通讯, 2017(8): 36–40. doi: 10.13456/j.cnki.lykt.2017.08.015.
- [34] XIONG S J, JOHANSSON M E, HUGHES F M R, et al. Interactive effects of soil moisture, vegetation canopy, plant litter and seed addition on plant diversity in a wetland community [J]. J Ecol, 2003, 91(6): 976–986. doi: 10.1046/j.1365-2745.2003.00827.x.