



湿地水鸟栖息对土壤磷和植物群落特征的影响

王丹枫, 孙当歌, 朱韦光, 曹洪麟

引用本文:

王丹枫,孙当歌,朱韦光,曹洪麟. 湿地水鸟栖息对土壤磷和植物群落特征的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2023, 31(4): 465–472.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4621>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地被植物对广东常绿阔叶林土壤养分的指示作用

Indicative Effect of Ground Vegetation on Soil Nutrient Status in Evergreen Broad-leaved Forest of Guangdong
热带亚热带植物学报. 2020, 28(2): 115–123 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4105>

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>

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>

珊瑚岛礁表层土壤的主要化学性质分析

Main Chemical Properties in the Surface Soil of the Coral-sand Islands
热带亚热带植物学报. 2018, 26(5): 465–472 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3852>

系统发育多样性与系统发育结构在岛屿植物群落保护中的意义——以蜈支洲岛为例

Significance of Phylogenetic Diversity and Phylogenetic Structure in Conservation of Island Plant Communities: A Case of Wuzhizhou Island
热带亚热带植物学报. 2017, 25(5): 419–428 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3712>

向下翻页，浏览PDF全文

湿地水鸟栖息对土壤磷和植物群落特征的影响

王丹枫, 孙当歌, 朱韦光, 曹洪麟*

(中国科学院华南植物园, 广州 510650)

摘要: 为了探究水鸟栖息对土壤磷和植物群落特征的影响, 分别在广东顺德水鸟天堂、广东星湖湿地及江门小鸟天堂 3 地的水鸟栖息区(水鸟区)和非水鸟栖息区(对照区)进行了植物群落调查和土壤理化性质检测。结果表明, 水鸟活动提高了各栖息地土壤的总磷、有效磷和无机磷, 而在顺德、星湖两地水鸟区土壤有机磷含量亦显著高于对照区。各栖息地植物物种丰富度和 shannon 多样性指数均显著小于对照区。土壤 pH、容重、有机质和有效磷 4 种环境因子对植物群落变异影响的总解释率为 46% ($P < 0.05$), 其中有效磷是最大影响因子。这说明水鸟活动显著提高了土壤中各种磷组分的含量, 降低了植物的多样性。
关键词: 土壤磷; 植物多样性; 水鸟; 湿地

doi: 10.11926/jtsb.4621

Effects of Soil Phosphorus Content on Plant Communities in Waterfowl Habitats

WANG Danfeng, SUN Dangge, ZHU Weiguang, CAO Honglin*

(South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: Waterfowl activities transport nutrients, such as nitrogen and phosphorus, to terrestrial habitats, and cause soil nutrient enrichment, which may change the vegetation communities, and species richness of habitat ecosystems. To investigate the influence of waterfowl inhabitation on soil physicochemical properties and plant community characteristics, the changes in plant community and soil physicochemical property were studied in Shunde Waterbird Paradise, Xinghu Wetland, and Jiangmen Little Bird Paradise of Guangdong Province. The results showed that waterbird activities significantly increased the soil total phosphorus, available phosphorus, and inorganic phosphorus contents. In Shunde and Xinghu, the organic phosphorus content of the inhabited area was significantly higher than that of the control area. The plant richness and Shannon diversity index of inhabited areas were significantly lower than those of the control area. The total explanation rate of four environmental factors, including soil pH, density, organic matter, and available phosphorus, on plant community variation were 46% ($P < 0.05$), among which available phosphorus was the most influential factor. Therefore, it was suggested that waterbird activity significantly increases the contents of various phosphorus fractions in the soil and decreases plant diversity.

Key words: Soil available phosphorus; Species diversity; Waterfowl; Wetland

湿地是全世界生产力最高的生态系统之一, 由于其具有广泛的环境功能和生态效益而被描述为地球的肾脏^[1]。自然条件下磷循环为不完全循环,

导致陆地生态系统的磷含量逐渐减少^[2]。全球大约 43% 的自然土地处于磷限制状态^[3], 磷缺乏问题几乎发生在所有陆地生态系统中。而鸟类栖息地土壤

收稿日期: 2022-01-27 接受日期: 2022-03-22

基金项目: 2021 年度自然资源事务管理-生态林业建设专项资金项目([2021]15)资助

This work was supported by the Special Project for Natural Resources Affairs Management-Forestry Ecological Construction in 2021 (Grant No. [2015]15).

作者简介: 王丹枫(1993 年生), 女, 硕士研究生, 研究方向为植物生态学。E-mail: danfengwdf@foxmail.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: caohl@scib.ac.cn

养分却显著区别于其它陆地生态系统, 劭学新等^[4]报道鹭鸟栖息地出现土壤养分富集现象, 这主要与鸟粪输入有关。研究表明, 海鸟能够通过捕食、繁殖等生命活动将大量氮、磷等营养元素从海洋传输到陆地栖息地, 显著提高了栖息地土壤^[5]及沉积物中的磷含量^[6], 进而改变栖息地植被群落及物种丰富度^[7]。相比于氮, 来源于鸟粪中的磷形态相对稳定、滞留能力较强, 能够在栖息地土壤中长期积累^[8], 使海鸟栖息地土壤中全磷及土壤有效磷含量长期处于较高水平^[9]。

鸟粪衍生的氮、磷等营养元素可以促进植物生长、改变植物群落结构^[10-11]。研究表明, 不同鸟类栖息地植物群落结构差异主要与栖息地土壤磷酸盐含量有关, 且食性不同的鸟类会以更复杂的方式影响北极高等植被^[12]。在海鸟密度较高的岛屿, 岛上植被以生长迅速的禾本科植物为主, 而海鸟较少的区域则以生长缓慢的低矮灌木为主^[13]。与无海鸟栖息区域相比, 海鸟栖息区域受鸟粪影响植物丰度更高^[14]。而在森林生态系统研究中发现, 物种丰富度随着磷有效性的提高而下降^[15-16]。

退化湿地生态系统特别是水鸟栖息地退化生态系统的修复是湿地修复的主要任务之一。水鸟依据营巢地不同可分为树巢类和芦巢类, 其中白鹭属主要于乔木、灌木、竹林中营巢, 夜鹭属主要于乔木上营巢^[17]。生态系统服务功能退化的单一生境不利于水鸟栖息繁殖^[18], 因此如何在保护水鸟正常栖息繁衍的同时, 构建乔、灌、草物种组成和结构完整的水鸟栖息地森林生态系统, 保障湿地生态系统的自然属性不受破坏是水鸟栖息地修复的关键。

为了探究水鸟活动对于人工湿地植物群落结构和土壤磷分含量的影响, 并降低研究地点差异对于结果的可能影响, 增强结论在广东地区的普适性, 本研究选择广东省内类型相同且水鸟入园时间相近的顺德水鸟天堂(顺德)、广东星湖国家湿地公园(星湖)及江门小鸟天堂国家湿地公园(江门) 3 个人工湿地中分别设立水鸟区和对照区样地, 并提出以下假设: (1) 水鸟繁殖、觅食等活动能够影响栖息地土壤理化性质, 使栖息地出现土壤养分(主要为磷素)富集现象; (2) 水鸟栖息能够影响栖息地植物群落组成, 降低栖息地植物物种多样性, 导致栖息地退化。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

本研究区域分别位于广东省佛山市顺德区、肇庆市及江门市, 属于南亚热带, 是全国光、热、水资源最丰富的地区之一。本研究区域全年气温较高, 年平均气温 21.8 °C, 年均降雨量约为 1 777 mm。

顺德水鸟天堂(22°50'37.78" N, 113°17'22.72" E)位于广东省佛山市顺德区, 为人工湿地, 占地面积约 11.3 hm²。该湿地以麻竹(*Dendrocalamus latiflorus*)、籼竹(*Bambusa blumeana*)和撑篙竹(*B. pervariabilis*)等形成的竹林为主要植被类型, 部分区域种有榕树(*Ficus microcarpa*)。湿地位于公路旁, 部分区域原为农田及鱼塘, 距离人类生活区较近, 受人类活动干扰较严重。水鸟于 1999 年夏季入园, 湿地内栖息水鸟主要为白鹭(*Egretta garzetta*)、夜鹭(*Nycticorax nycticorax*)等。

广东星湖国家湿地公园(23°03'26" N, 112°26'36" E)位于广东省肇庆市端州区星湖景区内, 占地面积约 677 hm²。据管理处记录, 该区域水鸟于 2012 年由七星岩景区落羽杉林迁至星湖湿地南方鸟岛。水鸟种类主要为苍鹭(*Ardea cinerea*)、白鹭、池鹭(*A. bacchus*)、绿鹭(*Butorides striatus*)、夜鹭等。水鸟栖息区域植被类型以草本为主。该湿地公园水鸟栖息区域保护良好, 受人类活动干扰程度较轻。

江门小鸟天堂国家湿地公园(22°27'48.23" N, 113°02'54.53" E)位于广东省江门市新会城区以南 10 km 的天马村, 于 2002 年在原有古榕岛的基础上规划扩建, 建成占地 0.4 hm² 的人工湿地, 以竹林为主要植被类型, 郁闭度较高。据记载该湿地公园的水鸟于 2012 年自古榕岛迁入相邻的竹岛, 竹岛栖息水鸟种类主要为苍鹭、白鹭、绿鹭、池鹭、牛背鹭(*Bubulcus ibi*)、大白鹭(*Egretta alba*)等, 水鸟栖息地保护情况较好。

1.2 样地设置和调查方法

于 2021 年 9—10 月, 在顺德、星湖及江门的水鸟栖息区域(水鸟区)及无水鸟栖息区域(对照)各设置 1 条 10 m×40 m 的样带, 每条样带分成 4 个 10 m×10 m 的样方。为了减少土壤空间异性的影响, 所选对照区样带与水鸟区尽量靠近且林龄和植被类型相似。星湖对照区距离水鸟区直线距离约 655 m; 江门对照区距离水鸟区直线距离约 190 m; 顺德对照区距离水鸟区直线距离约 200 m。顺德、

星湖及江门的水鸟区和对照区均为人工湿地,且均高于湖堤,因此土壤是恒干的。对每个样方中胸径 ≥ 1 cm的乔木进行每木检尺,并记录种名、树高、胸径等信息。在每个样方中随机设立1个5 m \times 5 m的灌木层样方和1个2 m \times 2 m的草本层样方,调查并记录灌木层内胸径 < 1 cm且树高 > 50 cm的灌木和草本层样方中所有草本植物的种类、高度、冠幅或盖度等信息。

1.3 土壤样品的采集和测定

2021年9—10月,植物调查时进行土壤样品采集。在每条样带中随机选择8个采样点,除去采样点表面凋落物后使用不锈钢土钻采集0~10 cm的土壤,混合。土壤样品自然风干后,过2 mm筛去除植物细根及石砾,用于测量土壤pH、容重、有机质、全氮、全磷、有效磷、有机磷及无机磷。

土壤pH采用pH计(Starter2100, Ohaus, USA)测定(土:水=1:2.5, W/V),土壤容重采用环刀法测定^[19],有机质采用TOC分析仪测定^[20],全氮参照《HJ 717—2014 土壤质量全氮的测定凯氏法》测定,有效氮采用碱解扩散法测定^[21],全磷采用《HJ 632—2011 土壤总磷的测定碱熔-钼锑抗分光光度法》测定,有效磷采用双酸(HCL-H₂SO₄)浸提-钼锑抗比色法测定^[22],有机磷及无机磷采用硫酸与氢氧化钠浸提法测定。

1.4 数据分析

生物多样性分析采用物种的丰富度指数、多样性指数和均匀度指数。丰富度指数 Richness= S ; Shannon-Wiener 指数 $S_w = -\sum P_i \ln P_i$; Pielou 指数 $E = S_w / \log_2 S$, 式中, S 为样方的植物种数; P_i 为种 i 的个体数占总个体数的比率。

使用 R4.1.2 进行数据分析,采用 t 检验或 Kruskal-Wallis 检验对比同一地点对照区与水鸟栖息地土壤理化性质、植物物种多样性指数差异。采用基于转化的冗余分析(tb-RDA)分析群落物种组成受环境变量约束的关系,显著性水平设置为 $P < 0.05$ 。

2 结果和分析

2.1 土壤理化性质

顺德、江门、星湖的土壤为酸性土壤,对照区土壤pH值显著高于水鸟区,说明鸟粪输入显著降低了土壤pH值。星湖水鸟区土壤有机质含量(71.7 g/kg)与对照区(50.2 g/kg)存在显著差异,而顺德和江门的水鸟区与对照区的土壤有机质含量差异并不显著。由表1可见,土壤全氮含量的变化趋势与土壤有机质基本一致,除星湖水鸟区比对照区的含量高1.4 g/kg外,其余2个地区的水鸟区与对照区差异不显著。

3个地区的土壤全磷含量变化趋势与土壤有机质、全氮不同。水鸟区土壤全磷含量为星湖(6.4 g/kg) $>$ 顺德(2.9 g/kg) $>$ 江门(1.7 g/kg),对照区土壤全磷含量显著低于水鸟区($P < 0.05$)。同为水鸟区,星湖的土壤有效磷含量最高,约为顺德的3.9倍,江门的最小。而对照区,土壤有效磷含量最高为江门,其次为星湖、顺德。水鸟区与对照区的土壤全磷、有效磷含量差异显著,说明水鸟活动提高了栖息地土壤全磷、有效磷含量。

土壤有机磷主要包括核蛋白、核酸、磷脂等,在微生物的矿化作用下,土壤有机磷可以转化为无机磷酸盐并被植物吸收利用。顺德、星湖水鸟区的

表1 土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties

地点 Location	样地 Plot	pH	土壤有机质 Soil organic matter (g/kg)	全氮 Total nitrogen (g/kg)	全磷 Total phosphorus (g/kg)	有效磷 Available phosphorus (mg/kg)	土壤有机磷 Soil organic phosphorus (mg/kg)	土壤无机磷 Soil inorganic phosphorus (mg/kg)
顺德 Shunde	水鸟区 Waterfowl	4.5 \pm 0.1b	40.2 \pm 2.7	2.1 \pm 0.1	2.4 \pm 0.7a	521.7 \pm 184.1a	178.0 \pm 41.5a	2 183.2 \pm 597.9a
	对照区 Control	6.3 \pm 0.1a	44.3 \pm 2.2	2.0 \pm 0.1	0.4 \pm 0.0b	8.2 \pm 0.6b	52.9 \pm 0.5b	363.0 \pm 28.5b
江门 Jiangmen	水鸟区 Waterfowl	4.2 \pm 0.0b	31.4 \pm 2.1a	1.9 \pm 0.1a	1.8 \pm 0.1a	162.2 \pm 20.0a	119.6 \pm 10.6	1 636.9 \pm 125.4
	对照区 Control	6.6 \pm 0.1a	28.0 \pm 2.3a	1.4 \pm 0.1b	1.4 \pm 0.1b	46.3 \pm 15.1b	147.4 \pm 20.7	1 286.9 \pm 115.1
星湖 Xinghu	水鸟区 Waterfowl	3.6 \pm 0.1b	71.7 \pm 5.6a	4.3 \pm 0.3a	6.0 \pm 0.8a	2 009.8 \pm 102.1a	342.5 \pm 107.6a	5 696.8 \pm 745.9a
	对照区 Control	7.1 \pm 0.1a	50.2 \pm 4.3a	2.9 \pm 0.2b	0.4 \pm 0.0b	9.2 \pm 1.0b	91.2 \pm 9.3b	352.7 \pm 17.6b

同列数据后不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同

Data followed different letters within column indicate significant difference at 0.05 level. The same below

土壤有机质均显著高于对照区。水鸟区中,星湖的土壤有机质含量最高,其次为顺德,江门土壤有机质含量最少。而对照区中,江门土壤有机质含量分别比顺德、星湖高 178.6%和 61.6%。顺德、江门、星湖的水鸟区土壤有机磷含量均显著高于对照区。在顺德、江门和星湖的水鸟栖息区域中,星湖的土壤有机磷含量最高,分别是顺德、江门的 2.6、3.5 倍。

由表 2 可知,顺德、江门的水鸟区与对照区土壤的 C:N 存在显著差异,且对照区均高于水鸟区。顺德、星湖水鸟区与对照区的土壤 C:P、C:N 均存在显著差异,均以星湖的最大。但江门水鸟区与对照区间的土壤 C:P 和 N:P 均无显著差异。

表 2 土壤的化学计量学

Table 2 Soil chemometrics

地点 Location	样地 Plot	C:N	C:P	N:P
顺德 Shunde	水鸟区 Waterfowl	11.0±0.3b	12.4±8.2b	1.1±0.7b
	对照区 Control	13.4±3.0a	61.2±5.9a	4.8±1.0a
江门 Jiangmen	水鸟区 Waterfowl	9.8±1.5b	10.9±2.7a	1.1±0.2a
	对照区 Control	12.0±0.7a	12.4±2.5a	1.0±0.2a
星湖 Xinghu	水鸟区 Waterfowl	9.7±0.6a	7.6±4.2b	0.8±0.4b
	对照区 Control	10.0±0.5a	65.5±12.7a	6.5±1.1a

2.2 水鸟栖息区的植物物种多样性

江门水鸟区主要植被类型为人工竹林,郁闭度约 80%,乔木层有 3 种维管束植物,隶属于 2 科 2 属,样地内未见灌木、草本。对照区为人工竹林混交林,共有维管束植物 22 种,隶属于 17 科 19 属。

顺德水鸟区主要植被类型为人工竹林,林下无灌木,乔木层和草本层共有 4 种维管束植物,隶属

于 4 科 4 属。对照区为人工竹林混交林,共有维管束植物 17 种,隶属于 13 科 15 属,其中乔木、灌木、草本层物种数分别占物种总数的 41.2%、29.4% 和 29.4%。

星湖的水鸟区为次生林,共有 19 种维管束植物,隶属于 14 科 17 属,草本层植物种类占总种数的 52.6%,乔木层中榕属植物占该层植物种数的 44.4%,水鸟区未见灌木,乔木层有大量树木干枯死亡。对照区也为次生林,共有 24 种维管束植物,隶属于 15 科 18 属,灌木层植物种类最多,占总种数的 45.8%,乔木层占 33.3%,草本层占 20.9%。

由图 1 可知,同一地点的水鸟区与对照区物种丰富度差异显著($P<0.05$)。星湖对照区的植物物种丰富度(Richness)、多样性指数(Shannon-Wiener 指数)及均匀度指数(Pielou 指数)均最高,说明星湖对照区的植物物种多样性最高、植被分布最均匀。且星湖对照区的植物物种丰富度及均匀度指数均显著高于水鸟区,其余两地也表现出相似的规律。星湖、顺德、江门水鸟区的植物物种丰富度、多样性指数及均匀度指数依次为星湖>顺德>江门,与栖息地土壤有效磷含量变化趋势一致,说明水鸟向栖息地输入的磷素对该区域植物群落造成了一定影响。

2.3 植物群落与环境因子的冗余分析

从环境因子数据中通过前向选择方法筛选出土壤 pH、容重、土壤有机质及土壤有效磷 4 种环境因子,结合对应区域植物群落数据进行 RDA 分析。根据分析结果,RDA1、RDA2 轴分别解释了总变异的 21.2%、13.2%。所选 4 个环境因子对植物群落变异影响的总解释率为 46%,有效磷、土壤有

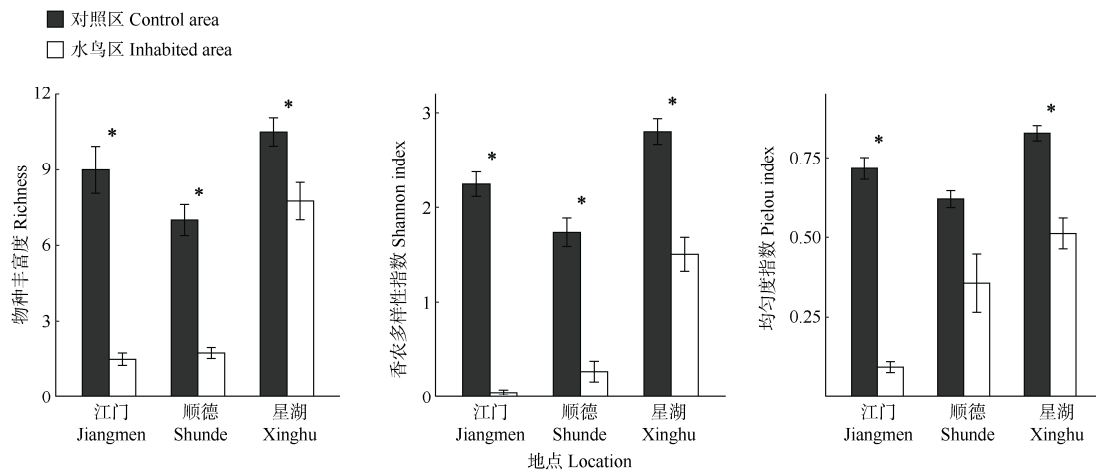


图 1 植物物种多样性指数的变化。*: $P<0.05$

Fig. 1 Changes in species diversity indexes. *: $P<0.05$

机质、pH 及容重与植物群落关系均达到显著水平 ($P < 0.05$)。环境因子对植物群落结构的影响顺序由大到小排序为有效磷>土壤有机质>容重>pH。由图 2

可见, 水鸟区植物群落主要受土壤有效磷及土壤有机质影响更大, 对照区植物群落主要受土壤 pH 及容重影响。

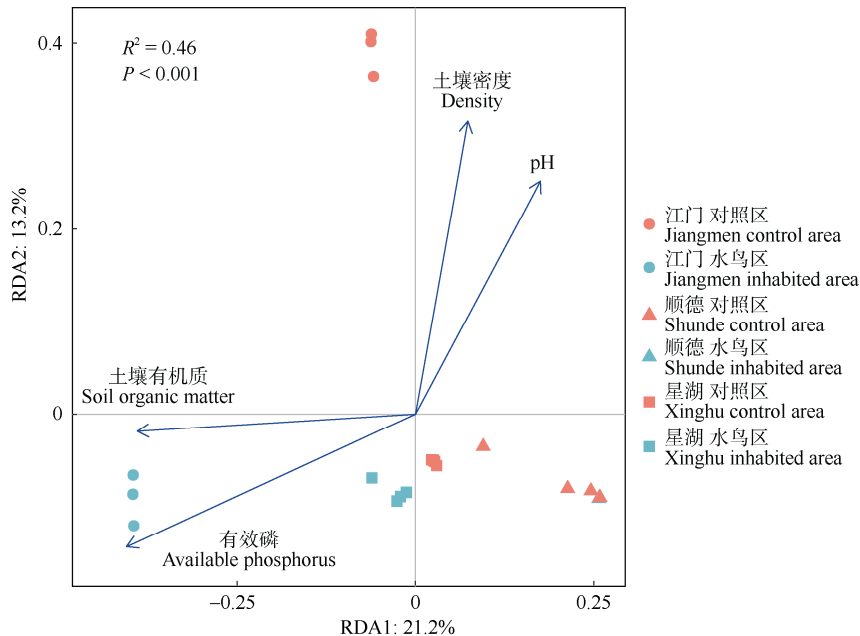


图2 植物物种多样性与环境因子间的 RDA 排序

Fig. 2 RDA ranking between plant diversity and environmental factors

3 结论和讨论

我国土壤表层磷含量为 0.2~1.1 g/kg^[23], 广东省 2006—2010 年间耕地土壤有效磷均值为(41.1±4.9) mg/kg^[24]。江门、顺德、星湖水鸟栖息区土壤全磷含量均高于上述水平, 且水鸟栖息区域的土壤全磷、有效磷均显著高于对照区, 说明鸟粪显著提高水鸟栖息区域土壤肥力, 影响了土壤理化性质, 这与前人研究结果相符^[8,25]。土壤磷素可分为有机磷及无机磷, 其中土壤无机磷包括铁磷、铝磷、钙磷和闭蓄态磷, 约占土壤全磷的 50%~80%^[26-27]。顺德、江门及星湖土壤磷素主要以无机磷形式存在, 水鸟栖息区域无机磷占全磷的 92%~94%, 高于平均水平, 可能是由于水鸟通过鸟粪向栖息地输入磷素的主要形态为无机磷^[28], 这进一步说明水鸟栖息地鸟粪输入影响了土壤磷素的积累及形态。

物种多样性是植物丰富度与其分布均匀性的综合指标, 体现了种群及群落的发展变化^[29]。植物群落与土壤理化性质密切相关^[30], 土壤有机质及氮素对植物群落多样性有重要影响^[31], 但这并不适用于水鸟栖息地。栖息地乔木和灌木随着鸟粪沉积、

土壤营养物质含量增加而减少^[32-33]。Zwolicki 等^[12]报道海鸟栖息地部分乔木和灌木被蕨类、草本和苔藓取代; Gillham 等^[34]报道海鸟栖息地植物群落中一年生草本显著多于对照区。本研究中, 星湖水鸟区木本植物生长受到明显抑制, 未见灌木, 而草本层物种丰富度、盖度较高, 这与前人的研究结论相似。江门、顺德水鸟栖息地主要以竹林为主, 未见灌木, 但林下草本数量极少, 其可能原因是竹林林分郁闭度较高, 林下没有充足的光照条件导致物种丰富度降低^[35]。

本研究结果表明, 土壤有效磷及土壤有机质为水鸟栖息地植物物种多样性的主要影响因子, 土壤磷含量与植物群落多样性存在明显相关性^[36]。这与前人^[13-14]研究结果不同, 可能是由于本研究中 3 处水鸟栖息地筑巢时间较前人的研究更短, 同时也反映出水鸟栖息地生态系统结构差异和空间异质性。土壤营养物质能够影响植物物种多样性, 研究表明植物物种多样性的提高有利于提高植物生产力同时平衡土壤 C:N:P^[37]。因此保护水鸟栖息地植物多样性, 修复栖息地退化的生态系统对水鸟栖息地长期发展尤为重要。

一般来说,土壤有机质输入量主要受有机残体归还量及腐殖化难易程度的影响。土壤有机质包含非腐殖质物质和腐殖质物质,其中腐殖质物质为土壤有机质的主要成分,新鲜动植物残体进入土壤后,经微生物分解彻底转化合成腐殖质^[27]。湿地鸟粪的输入能够提高凋落物分解速率,有利于养分释放^[38]。土壤有机质的分解转化主要是在微生物的主导下进行的,微生物主要以碳、氮构成自身细胞,其生命活动最适有机质的 C:N 约为 25:1^[27]。当 C:N<25:1 时,有利于微生物分解有机质,并将多余的氮素释放进土壤成为养分。可见,本研究中水鸟栖息地鸟粪输入、土壤 C:N 促进了枯落物分解转化及土壤有机质分解,改变栖息地植物有效营养物质含量^[39],最终影响植物群落物种多样性。氮、磷是植物生长的主要限制性营养元素,星湖、顺德水鸟区的土壤 N:P 显著高于对照区,这意味着水鸟区更容易受到氮限制^[40],可能与水鸟向栖息地输入大量磷素有关。土壤养分的限制类型可以通过 N:P 判断,N:P 升高意味着受到的磷限制增强,星湖、顺德对照区土壤 N:P 显著高于水鸟区,星湖 N:P 高于顺德、江门对照区,表明星湖、顺德对照区植物生长受磷限制且星湖受磷限制作用更强。

综上,水鸟栖息地土壤全磷、有效磷含量均显著高于无水鸟栖息区域。受水鸟活动影响,栖息地植被主要以草本类为主,少见灌木。顺德、星湖、江门研究区域植物群落与环境因子的冗余分析结果表明水鸟栖息地植物群落物种多样性与土壤有效磷、有机质含量有显著相关性,无水鸟栖息区域则与土壤容重、pH 值显著相关。水鸟栖息会造成栖息地磷素富集,从而可能对适应低磷环境的植物造成胁迫,因此,在恢复水鸟栖息地植被时建议选择适应高磷胁迫的植物,如榕属植物、苦楝(*Melia azedarach*)、乌桕(*Triadica sebifera*)、朴树(*Celtis sinensis*)、樟树(*Cinnamomum camphora*)等四旁树种。

参考文献

- [1] WU C Y, CHEN W, CAO C X, et al. Diagnosis of wetland ecosystem health in the Zoige wetland, Sichuan of China [J]. *Wetlands*, 2018, 38(3): 469–484. doi: 10.1007/s13157-018-0992-y.
- [2] LI B. Ecology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 1–399. [李博. 生态学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 1–399.]
- [3] DU E Z, TERRER C, PELLEGRINI A F A, et al. Global patterns of terrestrial nitrogen and phosphorus limitation [J]. *Nat Geosci*, 2020, 13(3): 221–226. doi: 10.1038/s41561-019-0530-4.
- [4] SHAO X X, YANG H, LIU X C, et al. Nutrient accumulation characteristics of soil in egret habitat in Hangzhou Bay Wetland [J]. *J Forest Environ*, 2019, 39(4): 404–409. doi: 10.13324/j.cnki.jfcf.2019.04.012. [邵学新, 杨慧, 刘旭川, 等. 杭州湾湿地鹭鸟栖息地土壤养分累积特征 [J]. *森林与环境学报*, 2019, 39(4): 404–409. doi: 10.13324/j.cnki.jfcf.2019.04.012.]
- [5] OTERO X L, TEJADA O, MARTÍN-PASTOR M, et al. Phosphorus in seagull colonies and the effect on the habitats. The case of yellow-legged gulls (*Larus michahellis*) in the Atlantic Islands National Park (Galicia-NW Spain) [J]. *Sci Total Environ*, 2015, 532: 383–397. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.06.013.
- [6] LITAOR M I, REICHMANN O, DENTE E, et al. The impact of ornithogenic inputs on phosphorous transport from altered wetland soils to waterways in East Mediterranean ecosystem [J]. *Sci Total Environ*, 2014, 473–474: 36–42. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.11.126.
- [7] DUDA M P, GLEW J R, MICHELUTTI N, et al. Long-term changes in terrestrial vegetation linked to shifts in a colonial seabird population [J]. *Ecosystems*, 2020, 23(8): 1643–1656. doi: 10.1007/s10021-020-00494-8.
- [8] IRICK D L, GU B H, LI Y C, et al. Wading bird guano enrichment of soil nutrients in tree islands of the Florida Everglades [J]. *Sci Total Environ*, 2015, 532: 40–47. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.05.097.
- [9] ZHONG H T, KIM Y N, SMITH C, et al. Seabird guano and phosphorus fractionation in a rhizosphere with earthworms [J]. *Appl Soil Ecol*, 2017, 120: 197–205. doi: 10.1016/j.apsoil.2017.08.006.
- [10] BOKHORST S, CONVEY P, AERTS R. Nitrogen inputs by marine vertebrates drive abundance and richness in Antarctic terrestrial ecosystems [J]. *Curr Biol*, 2019, 29(10): 1721–1727.e3. doi: 10.1016/j.cub.2019.04.038.
- [11] ELLIS J C. Marine birds on land: A review of plant biomass, species richness, and community composition in seabird colonies [J]. *Plant Ecol*, 2005, 181(2): 227–241. doi: 10.1007/s11258-005-7147-y.
- [12] ZWOLICKI A, ZMUDCZYŃSKA-SKARBK K, MATUŁA J, et al. Differential responses of arctic vegetation to nutrient enrichment by plankton- and fish-eating colonial seabirds in Spitsbergen [J]. *Front Plant Sci*, 2016, 7: 1959. doi: 10.3389/fpls.2016.01959.
- [13] MARON J L, ESTES J A, CROLL D A, et al. An introduced predator alters Aleutian Island plant communities by thwarting nutrient subsidies [J]. *Ecol Monogr*, 2006, 76(1): 3–24.
- [14] WAIT D A, AUBREY D P, ANDERSON W B. Seabird guano influences on desert islands: Soil chemistry and herbaceous species richness and productivity [J]. *J Arid Environ*, 2005, 60(4): 681–695.

- [15] CEULEMANS T, STEVENS C J, DUCHATEAU L, et al. Soil phosphorus constrains biodiversity across European grasslands [J]. *Glob Change Biol*, 2014, 20(12): 3814–3822.
- [16] WASSEN M J, VENTERINK H O, LAPSHINA E D, et al. Endangered plants persist under phosphorus limitation [J]. *Nature*, 2005, 437(7058): 547–550.
- [17] DENG T P. A preliminary study on nidification habitat selection and niche of Ardeidae birds [D]. Zhengzhou: Henan University, 2008. [邓天鹏. 鹭科鸟类营巢地选择和生态位的研究 [D]. 郑州: 河南大学, 2008.]
- [18] GE P Y, YANG T W, ZHANG P, et al. Ecological restoration project for Yancheng Coastal Wetland based on bird habitat demand: A case study of Chenjiagang Reservoir [J]. *Wetl Sci Manag*, 2021, 17(4): 33–36. [戈萍燕, 杨崇武, 张鹏, 等. 基于鸟类栖息需求的盐城滨海湿地生态修复工程: 以陈家港水库生态修复工程为例 [J]. *湿地科学与管理*, 2021, 17(4): 33–36. doi: 10.3969/j.issn.1673-3290.2021.04.07.]
- [19] HU H R, TIAN K. Guidance Course for Soil Experiment [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2012: 1–107. [胡慧蓉, 田昆. 土壤学实验指导教程 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2012: 1–107.]
- [20] QIAN B, LIU L, XIAO X. Comparative tests on different methods for content of soil organic matter [J]. *J Hohai Univ (Nat Sci)*, 2011, 39(1): 34–38. [钱宝, 刘凌, 肖潇. 土壤有机质测定方法对比分析 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(1): 34–38. doi: 10.3876/j.issn.1000-1980.2011.01.008.]
- [21] LI J Y. Determination of hydrolyzable nitrogen in soil (alkaline hydrolysis diffusion method) [J]. *Inform Agric Sci Technol*, 2010(10): 15. [李金彦. 土壤水解性氮的测定(碱解扩散法) [J]. *农业科技与信息*, 2010(10): 15. doi: 10.3969/j.issn.1003-6997.2010.10.008.]
- [22] QIAO R Z, DONG H Y, SUN Q W. Phosphorus determination methods of forest soil: LY/T 1232–2015 [S]. Beijing: China Quality and Standards Publishing & Media Co., Ltd, 2015: 1–16. [焦如珍, 董红玉, 孙启武. 森林土壤磷的测定: LY/T 1232–2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 1–16.]
- [23] SUN X Y. Pedology [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005: 1–358. [孙向阳. 土壤学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2005: 1–358.]
- [24] ZENG Z B, ZENG S J, TANG J D, et al. Space-temporal variation of farmland soil AP in Guangdong Province and their causing factors [J]. *Ecol Environ Sci*, 2014, 23(3): 444–451. [曾招兵, 曾思坚, 汤建东, 等. 广东省耕地土壤有效磷时空变化特征及影响因素分析 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(3): 444–451. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2014.03.012.]
- [25] ZHAO Y H, WU M, SHAO X X. Impact of egrets habitation on accumulation and distribution of various forms of phosphorus in soils of Hangzhou Bay wetland [J]. *Acta Ecol Sin*, 2021, 41(20): 8246–8255. [赵亦欢, 吴明, 邵学新. 鹭鸟栖息对杭州湾湿地土壤磷累积及形态分布的影响 [J]. *生态学报*, 2021, 41(20): 8246–8255. doi: 10.5846/stxb202010192658.]
- [26] CHEN G C, GAN L, WANG S L, et al. Progress in geochemistry of phosphorus in soils [J]. *Geology-Geochemistry*, 2001, 29(2): 78–81. [陈刚才, 甘露, 王仕禄, 等. 土壤元素磷的地球化学 [J]. *地质地球化学*, 2001, 29(2): 78–81. doi: 10.3969/j.issn.1672-9250.2001.02.013.]
- [27] HU H R, BEI R T, WANG Y X. Forest Pedology [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2019: 1–274. [胡慧蓉, 贝蓉塔, 王艳霞. 森林土壤学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2019: 1–274.]
- [28] LUIS O X, DE LA PEÑA-LASTRA S, PÉREZ-ALBERTI A, et al. Seabird colonies as important global drivers in the nitrogen and phosphorus cycles [J]. *Nat Commun*, 2018, 9(1): 246. doi: 10.1038/s41467-017-02446-8.
- [29] PENG S L, CHEN Z H. Research on the species diversity of plant of the subtropical forests in Guangdong [J]. *Ecol Sci*, 1983(2): 98–104. [彭少麟, 陈章和. 广东亚热带森林群落物种多样性 [J]. *生态科学*, 1983(2): 98–104.]
- [30] SIEFERT A, RAVENSCROFT C, ALTHOFF D, et al. Scale dependence of vegetation-environment relationships: A meta-analysis of multivariate data [J]. *J Veg Sci*, 2012, 23(5): 942–951. doi: 10.1111/j.1654-1103.2012.01401.x.
- [31] LI X N, ZHANG W W, ZHAO C Q, et al. Plant diversity and soil physicochemical properties in the wasteland of Yanqing District [J]. *Acta Agrest Sin*, 2019, 27(3): 695–701. [李晓娜, 张微微, 赵春桥, 等. 延庆区荒滩地土壤理化性质及其对植物多样性的影响 [J]. *草地学报*, 2019, 27(3): 695–701. doi: 10.11733/j.issn.1007-0435.2019.03.023.]
- [32] HEBERT C E, DUFFE J, WESELOH D V C, et al. Unique island habitats may be threatened by double-crested cormorants [J]. *J Wildl Manage*, 2005, 69(1): 68–76. doi: 10.2193/0022-541X(2005)069<0068: UIHMBT>2.0.CO;2.
- [33] STEWART E M, MICHELUTTI N, SHENSTONE-HARRIS S, et al. Tracking the history and ecological changes of rising double-crested cormorant populations using pond sediments from islands in Eastern Lake Ontario [J]. *PLoS One*, 2015, 10(7): e0134167. doi: 10.1371/journal.pone.0134167.
- [34] GILLHAM M. Destruction of indigenous heath vegetation in Victorian sea-bird colonies [J]. *Aust J Bot*, 1960, 8(3): 277–317. doi: 10.1071/BT9600277.
- [35] ZHAN M C, GUAN F Y, YAN Y J, et al. Effects of strip harvesting on

- species diversity of undergrowth in bamboo (*Phyllostachys edulis*) forest [J]. *Acta Ecol Sin*, 2020, 40(12): 4169–4179. [詹美春, 官凤英, 晏颖杰, 等. 带状采伐对毛竹林林下植被物种多样性的影响 [J]. *生态学报*, 2020, 40(12): 4169–4179. doi: 10.5846/stxb201902200301.]
- [36] NEWBERY D M C, GARTLAN J S, MCKEY D B, et al. The influence of drainage and soil phosphorus on the vegetation of Douala-Edea Forest Reserve, Cameroun [J]. *Vegetatio*, 1986, 65(3): 149–162. doi: 10.1007/BF00044815.
- [37] CHEN X L, CHEN H Y H. Plant mixture balances terrestrial ecosystem C:N:P stoichiometry [J]. *Nat Commun*, 2021, 12(1): 4562. doi: 10.1038/s41467-021-24889-w.
- [38] ZHANG Q J, ZHANG G S, WAN S X, et al. Effects of herbivorous overwintering migratory birds' droppings on the decomposition of *Carex cinerascens* Kükenth and C, N, P release in Lake Poyang wetland [J]. *J Lake Sci*, 2019, 31(3): 814–824. [张全军, 张广帅, 万松贤, 等. 鄱阳湖植食越冬候鸟粪便对洲滩湿地藁草枯落物分解过程及碳、氮、磷释放的影响 [J]. *湖泊科学*, 2019, 31(3): 814–824. doi: 10.18307/2019.0319.]
- [39] ELWOOD J W, NEWBOLD J D, TRIMBLE A F, et al. The limiting role of phosphorus in a woodland stream ecosystem: Effects of P enrichment on leaf decomposition and primary producers [J]. *Ecology*, 1981, 62(1): 146–158. doi: 10.2307/1936678.
- [40] YU M F, TAO Y X, LIU W Z, et al. C, N, and P stoichiometry and their interaction with different plant communities and soils in subtropical riparian wetlands [J]. *Environ Pollut Res*, 2020, 27(1): 1024–1034. doi: 10.1007/s11356-019-07004-x.