

# 白洋淀湿地不同生境植物群落功能生态位及影响因素分析

张树梓<sup>1,2</sup>, 张树彬<sup>3</sup>, 李联地<sup>1,2</sup>, 任启文<sup>1,2\*</sup>, 郭娇娇<sup>1,2</sup>, 王鑫<sup>1,2</sup>

(1. 河北省林业和草原科学研究院, 石家庄 050061; 2. 河北小五台山森林生态系统国家定位观测研究站, 涿鹿 075600; 3. 河北林业生态建设投资有限公司, 石家庄 050000)

**摘要:** 为研究白洋淀湿地不同生境植物群落功能生态位特征及主要限制性环境因素, 以白洋淀水生植物群落和洲滩草本植物群落为研究对象, 利用功能生态位超体量化不同生境植物群落功能生态位, 利用 Sørensen 指数计算不同生境植物群落功能生态位超体重叠程度, 并探究影响不同生境植物群落功能生态位超体积的关键环境因子。结果发现, 不同生境植物群落功能生态位超体积差异明显, 表现为水生植物群落大于洲滩草本植物群落。2 种生境植物群落功能生态位重叠程度为 0.32。碱解氮、全磷是影响洲滩草本植物群落功能生态位超体积的主要环境因子, 而影响水生植物群落功能生态位超体积的关键环境因子是碱解氮、速效磷和铵态氮。2 种生境植物群落功能生态位超体积均表现为与生境氮元素含量呈显著正相关, 与磷元素含量显著负相关。综上所述, 白洋淀湿地不同生境植物群落功能生态位分化明显, 洲滩草本植物群落功能生态位空间收敛程度更高, 生境中有效氮元素含量和磷元素含量是植物群落功能生态位的主要驱动力。

**关键词:** 白洋淀湿地; 植物群落; 生境; 功能生态位超体积; 环境因子

中图分类号: Q948.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2023)04-0563-07

## Functional niche of plant communities and its influencing factors in different habitats of Baiyangdian wetland

ZHANG Shuzi<sup>1,2</sup>, ZHANG Shubin<sup>3</sup>, LI Liandi<sup>1,2</sup>, REN Qiwen<sup>1,2</sup>, GUO Jiaojiao<sup>1,2</sup>, WANG Xin<sup>1,2</sup>

(1. Hebei Academy of Forestry and Grassland Science, Shijiazhuang 050061; 2. Hebei Xiaowutai Forestry Ecosystem Research Station, Zhulu 075600; 3. Hebei Forestry Investment Co., Ltd., Shijiazhuang 050000)

**Abstract:** In order to study the functional niche characteristics and main limiting environmental factors of plant communities in different habitats of Baiyangdian wetland. This study takes the floodplain herbaceous plant community and the aquatic plant community in Baiyangdian as the research objects. Functional niche hypervolume was used to quantify the functional niche under different habitats in Baiyangdian wetland. Sørensen index was used to calculate the overlap degrees of functional niche hypervolumes for plant communities in different habitats. And then, this study explored the key environment factors affecting the functional niche hypervolumes of plant communities in different habitats. The results showed that the functional niche hypervolumes of plant communities in different habitats was significantly different, the functional niche hypervolumes of aquatic plant community were higher than those of floodplain herbaceous plant community. The overlap degree of functional niche hypervolumes was small between plant communities in the two habitats with overlap index 0.32. Alkaline-hydrolyzable nitrogen and total phosphorous were the main environmental factors affecting the functional niche hypervolumes of floodplain herbaceous plant community. The key environmental factors affecting the functional niche hypervolumes of aquatic plant community included alkaline-hydrolyzable nitrogen, available phosphorous and ammonia nitrogen. The functional niche hypervolumes were significantly positively correlated with the content of nitrogen, and negatively correlated with the content of phosphorous of plant communities in the two habitats. In conclusion, the plant communities showed obvious functional niche differentiation in different habitats, and the convergence degree of functional niche space of floodplain herbaceous plant community was higher than

收稿日期: 2022-08-23

基金项目: 河北省重点研发计划 (20327601D, 22327601D), 河北省林草关键技术创新与示范项目 (2306090) 共同资助。

作者简介: 张树梓, 林业高级工程师。E-mail: zhangsz1984@163.com

\* 通信作者: 任启文, 林业高级工程师。E-mail: blrenqiwen@126.com

aquatic plant community. The content of available nitrogen and phosphorus in the habitats were the main driving force of functional niche of plant community in Baiyangdian wetland.

**Key words:** Baiyangdian wetland; plant community; habitats; functional niche hypervolume; environmental factor

湿地是由水陆相互作用、相互交错形成的介于陆地与水域之间的生态系统,与海洋、森林并称为地球三大生态系统,被誉为“地球之肾”,其具有蓄水、净化污水、调节气候等多种独特生态功能,不仅是全球生态系统的重要组成部分之一,同时也是人类最重要生存环境之一<sup>[1-2]</sup>,具有巨大的生态、经济和社会效益。植物群落作为湿地生态系统三大组成要素之一,是湿地生态系统核心生产者,维持和承载着湿地生态系统的物理过程和生物功能,其结构、功能和生态特征能综合反映湿地生态环境的基本特点和功能特性,对维持湿地生态系统稳定有重要作用<sup>[3-4]</sup>。

生态位是一个抽象的生态学概念,用以描述物种的生态学意义,表征物种对环境的需求,进而揭示物种分布、群落构建等一系列生态学过程<sup>[5]</sup>。生态位概念在不断发展的过程中,不断的进行修订和扩展,其中侧重物种影响环境的功能生态位,成为群落生态学研究的重点。Hutchinson 提出的 N-维超体积概念,使量化生态位空间,研究生态位占用模式成为可能<sup>[6]</sup>。然而, Hutchinson 生态位空间资源轴在自然植物群落中测量较为困难。在功能性状延伸到植物研究领域后,成为解决植物领域重要生态学问题的有效途径<sup>[7-8]</sup>。生态学家提出了用生态位占据功能性状空间大小/位置来替代 Hutchinson 生态位空间资源轴的方法<sup>[9-10]</sup>。功能生态位描述了在植物功能性状构建的多维生态位空间中,物种在多维功能轴上的相对位置,可以反映物种对环境的适应策略<sup>[11-12]</sup>。功能生态位超体积和功能生态位超体积重叠通常用于分析群落的功能生态位,其中,功能生态位超体积主要是用以量化群落中物种占据的多维功能生态位空间的大小,能够反映群落中物种对资源的利用效率。而功能生态位超体积重叠反映了群落间功能生态位的相似程度,群落间的重叠程度越高表明物种功能越接近<sup>[13]</sup>。国内外学者已在多种生态系统中开展了功能生态位的研究,例如, Li 等<sup>[14]</sup>利用超体积算法研究了不同胁迫和干扰环境下草本植物群落功能生态位,结果表明群落功能生态位随物种丰富度增加而增大,生境过滤和限制相似性作用都决定了群落功能生态位模式,但作用强度没有随着胁迫和干扰的梯度而变化。de la Riva 等<sup>[15]</sup>研究了西班牙不同植物群落功能生态位超体

积沿环境梯度的变化模式,结果发现河岸林的功能生态位超体积最大,而山脊林功能空间最小。

环境条件是影响植物群落功能生态位的重要因素,不同植物群落由于生境条件的差异,会导致群落功能生态位体积的变化。适宜的环境条件有利于群落功能生态位空间的扩大,而胁迫环境下的群落,植物功能性状的整合度会提高,从而对功能生态位空间产生抑制作用<sup>[16]</sup>。另外,环境筛作用表明如果物种不具备适应群落环境条件的性状组合,那么将无法在群落中定居和生长,使群落性状范围变窄,从而限制了群落的功能生态位体积<sup>[17-19]</sup>。功能生态位超体积能够反映群落功能多样性水平,对群落生态功能的发挥具有重要影响。目前,在湿地生态系统中,大多数研究多集中在物种生态位宽度、生态位重叠及种间联结性的研究<sup>[20-21]</sup>,利用植物功能性状评估群落功能生态位的成果较少。因此,有必要开展相关方面的研究,探索湿地植物群落功能生态位模式及对环境条件的响应,对湿地植物群落生物多样性保护和恢复具有重要意义。

本研究以白洋淀湿地洲滩草本植物群落和水生植物群落为研究对象,在群落调查和植物功能性状测定的基础上,利用功能生态位超体积量化白洋淀湿地洲滩和水生 2 种生境条件的植物群落功能生态位空间,并利用功能生态位超体积重叠反映 2 种生境植物功能生态位的相似程度。利用多元回归分析白洋淀湿地不同植物群落功能生态位超体积对环境因素的响应。旨在为揭示白洋淀湿地植物群落功能生态位特征随生境的变化规律以及主要限制性环境因子,以期为白洋淀湿地植物群落生态功能的保护和恢复提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

白洋淀湿地被誉为“华北之肾”,是我国北方最具代表性的湖泊和草本沼泽湿地,地理范围: 38°43'~39°2'N, 115°38'~116°7'E,总面积 366 km<sup>2</sup>,属大清河水系,主要由诸多大小不等的淀泊和壕沟组成。白洋淀地势平坦,总体上呈现出自西北向东南略倾斜,海拔范围 5~10 m,属东部季风区暖温带大陆季风性气候,四季分明,年平均气温 9.9 °C,年均降水量为 563.9 mm,全年降水主要集中在 6—8

月, 无霜期 203 d<sup>[22]</sup>。淀区土壤以沼泽土为主, 土壤养分较高, 植物种类繁多, 物种多样性丰富<sup>[23]</sup>。

### 1.2 样地设置和群落调查

在对白洋淀湿地全面踏查的基础上, 选择水生和洲滩 2 种典型生境进行植物群落调查, 在人为干扰较少的区域, 设置垂直于水陆交界线的样带, 样带之间间隔至少 200 m, 在每个样带中设置 3 个间隔不少于 5 m 的植物样方(样方大小为 2 m×2 m), 本研究在 2 种生境中分别设置了 10 个样带, 共计调查 60 个植物群落样方, 其中水生植物群落样方 30 个, 洲滩草本植物群落样方 30 个。在每个样方内, 参考中国植物志 (FRPS) (<http://www.iplant.cn/frps>) 对物种进行鉴定, 记录每个物种的多度, 盖度和分布状况。

### 1.3 植物功能性状测定

对调查到的 2 种生境植物群落中所有物种采集样品测定其功能性状, 每一个植物样方中的物种选择不少于 5 个发育成熟、健康的个体进行采集, 个体数少于 5 个的, 对全部个体进行采集。测定功能性状指标包括: 比叶面积( $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )、叶绿素含量( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )、叶干物质含量( $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )、植物氮含量( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )、磷含量( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )、钾含量( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )。其中, 比叶面积是叶面积除以叶片干重, 叶面积利用叶面积仪测定。叶干物质含量是叶片干重除以叶片鲜重。叶绿素利用叶绿素仪测定。植物样品带回实验室在 60 °C 烘箱中烘干后测定植物氮含量、磷含量和钾含量, 测定方法参照植物功能性状测量标准<sup>[24]</sup>进行。

### 1.4 环境因子测定

本研究对洲滩草本植物群落和水生植物群落的环境因子进行分别采集。洲滩草本植物群落主要采集土壤的物理、化学性质, 在每个样方沿对角线选择 3 个取样点, 利用环刀和铝盒采集土壤样品, 带回实验室测定土壤物理、化学性质, 主要包括: 土壤容重、最大持水量、自然含水量、毛管孔隙度、pH 值、有机质、碱解氮、速效磷、速效钾、全氮、全磷和全钾, 其中物理性质采用环刀法测定, pH 值用电位法测定, 有机质采用重铬酸钾外热源法测定、碱解氮采用碱解扩散吸收法测定、速效磷采用钼锑抗比色法测定、速效钾用乙酸铵浸提法测定、全氮采用半微量开氏法测定、全磷采用钼锑抗比色法测定、全钾采用火焰光度法测定<sup>[25]</sup>。

水生植物样方主要采集水环境因子和底泥环境因子。测定的水环境因子主要包括: 水深、透明度、pH 值、电导率、化学需氧量、铵态氮、硝态氮、全氮、全磷、砷和铅。其中水深和透明度利用萨氏透

明度盘和带刻度的绳子测定, 其他因子利用采水器采集水样带回实验室按照《地表水环境质量标准 (GB3838-2002)》<sup>[26]</sup>测定, 电导率用电导率仪测定、化学需氧量用重铬酸盐法测定、铵态氮采用纳氏试剂分光光度法测定、硝态氮采用紫外分光光度法测定、全氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定、全磷采用钼锑抗分光光度法测定、砷采用二乙基二硫代氨基甲酸银分光光度法测定、铅采用原子吸收分光光度法测定。底泥环境因子主要包括: pH 值、有机质、碱解氮、速效磷、速效钾、全氮、全磷和全钾, 利用底泥采集器采集样品带回实验室自然风干后测定, 测定方法与洲滩草本植物群落土壤测定方法相同。

利用 Pearson 相关分析对环境因子进行筛选, 以消除环境因子之间可能存在的较高的共线性, 以相关系数 $>0.8$  为标准。水生植物群落保留 12 个环境变量, 分别为: 水体指标为透明度、电导率、化学需氧量、铵态氮、硝态氮、全磷、砷、铅, 底泥指标包括 pH 值、碱解氮、速效磷、速效钾。洲滩植物群落保留 6 个环境变量: 自然含水量、土壤容重、pH 值、全磷、全钾、碱解氮。

### 1.5 数据分析

本研究利用 n-维超体积算法(n-dimensional hypervolume measurement)通过核密度估计函数(kernel density estimation)计算物种所占据功能性状空间来量化不同生境植物群落的功能生态位空间<sup>[13]</sup>。该算法是将一组代表物种的点投影到 n 维超级空间中定义一个高维形状。为确保计算精度利用自动带宽函数来确定相关参数, 阈值设置为 95 %<sup>[11]</sup>。为了减少维度数量, 对所有调查到的物种的功能性状观测值进行主成分分析(principal component analysis, PCA), 由于前 3 个主成分轴累计方差贡献率达到 80 %以上(表 1), 因此本研究利用前 3 个主成分轴上物种载荷值计算不同生境植物群落功能生态位超体积。同时利用 Sørensen 指数计算不同生境植物群落功能生态位超体积重叠程度, 衡量群落间功能生态位的相似性<sup>[15]</sup>。

另外, 由于水生植物群落通常由不同生活型物种组成, 因此, 本研究利用 Sørensen 指数计算水生植物群落不同生活型物种之间的功能生态位超体积重叠程度, 评估不同生活型物种间功能生态位差异。

为了分析环境因子对不同生境植物群落功能生态位超体积的影响, 本研究利用 n-维超体积算法计算了每个植物样方的物种占据的功能生态位超体积(2 种生境合计 60 个样方)。利用多元逐步回归检

验影响不同生境植物群落功能生态位超体积的关键环境因子,首先,为消除各变量之间量纲差异,对数据进行了 Z-score 标准化处理。然后,再利用 Pearson 相关分析不同生境植物群落样方的功能生态位超体积与环境因子相关性,达到显著水平的环境因子纳入多元逐步回归分析,最后,以功能生态位超体积为响应变量,环境因子为解释变量,构建回归矩阵,进行多元逐步回归和模型选择,利用 AIC 值进行最优模型选择,利用最优模型环境变量的重要性来确定环境因子对不同生境植物群落功能生态位超体积的影响<sup>[27]</sup>。

表 1 植物功能性状的主成分分析

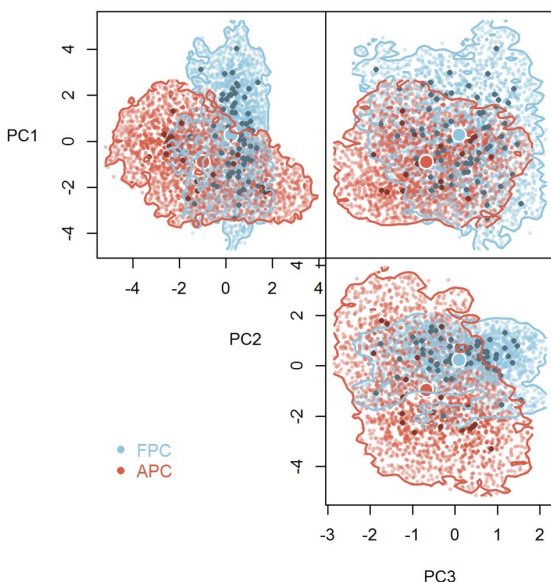
Table 1 Principal component analysis (PCA) of plant functional trait data

| 项目       | PC1    | PC2    | PC3    |
|----------|--------|--------|--------|
| 方差贡献率/%  | 0.440  | 0.273  | 0.122  |
| 特征值      | 1.624  | 1.156  | 0.856  |
| 性状载荷比叶面积 | 0.379  | 0.483  | 0.446  |
| 叶绿素含量    | 0.091  | 0.702  | -0.641 |
| 植物氮含量    | 0.447  | -0.142 | -0.065 |
| 植物磷含量    | 0.512  | 0.127  | 0.384  |
| 植物钾含量    | 0.496  | -0.097 | -0.383 |
| 叶干物质含量   | -0.380 | 0.480  | 0.305  |

## 2 结果与分析

### 2.1 不同生境植物群落物种组成特征

通过对白洋淀 2 种生境植物群落调查,共调查到植物 74 种,隶属 34 科 58 属。水生植物群落调查



FPC: 洲滩植物群落; APC: 水生植物群落。

图 1 不同生境植物群落功能生态位超体积的变化规律

Figure 1 Variation of functional niche hypervolumes for plant communities in different habitats

到植物 18 种,隶属 12 科 13 属,其中优势种主要包括:芦苇(*Phragmites australis*)、莲(*Nelumbo nucifera*)、香蒲(*Typha orientalis*)、篦齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)。水生植物群落中共包含 3 种生活型物种,分别为挺水型、浮叶型和沉水型。洲滩草本植物群落共调查到植物 57 种,隶属 24 科 46 属,其中,以禾本科(Gramineae)和菊科(Compositae)物种为优势种。

表 2 不同生境植物群落环境因子的均值和变异系数

Table 2 Average values and coefficient of variation for environmental factors for plant communities in different habitats

| 群落类型   | 环境指标                         | 均值       | 变异系数  |
|--------|------------------------------|----------|-------|
| 洲滩植物群落 | 自然含水量/(g·kg <sup>-1</sup> )  | 209.96   | 14.91 |
|        | 土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )   | 1.36     | 10.66 |
|        | pH 值                         | 8.12     | 2.04  |
|        | 全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )     | 0.82     | 43.40 |
| 水生植物群落 | 全钾/(g·kg <sup>-1</sup> )     | 7.23     | 42.70 |
|        | 碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )   | 45.98    | 57.59 |
|        | 透明度/m                        | 0.72     | 19.14 |
|        | 电导率/(μs·cm <sup>-1</sup> )   | 1 170.87 | 33.27 |
|        | 化学需氧量/(mg·L <sup>-1</sup> )  | 37.83    | 14.68 |
|        | 铵态氮/(mg·L <sup>-1</sup> )    | 0.30     | 61.36 |
|        | 硝态氮/(mg·L <sup>-1</sup> )    | 1.29     | 3.18  |
|        | 全磷/(mg·L <sup>-1</sup> )     | 7.23     | 27.82 |
|        | 砷/(μg·L <sup>-1</sup> )      | 2.87     | 27.35 |
|        | 铅/(μg·L <sup>-1</sup> )      | 3.46     | 10.76 |
|        | 底泥 pH 值                      | 7.85     | 2.62  |
|        | 底泥碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 119.00   | 67.62 |
|        | 底泥速效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 17.52    | 58.40 |
|        | 底泥速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 313.83   | 44.51 |

### 2.2 不同生境植物群落功能生态位超体积

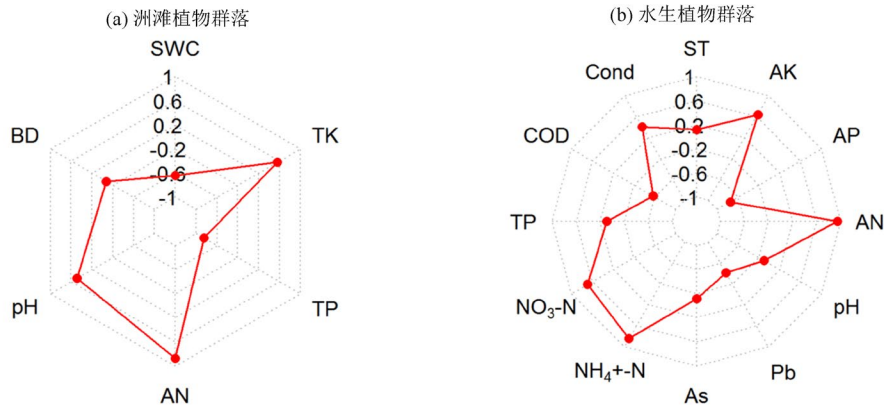
白洋淀湿地不同生境植物群落功能生态位超体积如图 1 所示,洲滩草本植物群落功能生态位超体积与水生植物群落差异较大,其中洲滩草本植物群落功能生态位超体积为 75.39,水生植物群落功能生态位超体积为 111.36。2 种生境植物群落功能生态位重叠程度为 0.32。通过计算水生植物群落不同生活型物种功能生态位重叠程度结果显示:挺水型与浮叶型、沉水型物种功能生态位重叠程度分别为 0.06、0.01,浮叶型与沉水型物种功能生态位重叠程度为 0.19。

### 2.3 影响不同生境植物群落生态位超体积的关键环境因子分析

白洋淀湿地不同生境植物群落主要环境指标详见表 2。利用 Pearson 相关分析结果显示洲滩草本植物群落功能生态位超体积与碱解氮、全磷和自然含

水量显著相关( $P<0.05$ ), 其中, 碱解氮与功能生态位超体积显著正相关, 全磷和自然含水量与功能生态位超体积显著负相关。水生植物群落功能生态位超体积与碱解氮、速效磷、铵态氮、速效钾、化学

需氧量和硝态氮显著相关( $P<0.05$ ), 其中, 与功能生态位超体积显著正相关的变量有碱解氮、铵态氮、速效钾和硝态氮, 速效磷和化学需氧量与功能生态位超体积显著负相关(图2)。



SWC: 自然含水量; TK: 全钾; TP: 全磷; AN: 碱解氮; pH: pH 值; BD: 土壤容重; ST: 透明度; Cond: 电导率; COD: 化学需氧量; NO<sub>3</sub>-N: 硝态氮; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N: 铵态氮; As: 砷; Pb: 铅; AP: 速效磷; AK: 速效钾。下同。

图 2 不同生境植物群落功能生态位超体积与环境因子的关系

Figure 2 Relationship between functional niche hypervolumes and environmental factors for plant communities in different habitats

表 3 环境因子对不同生境植物群落功能生态位超体积的重要性

Table 3 Importance of environmental factors on functional niche hypervolumes for plant communities in different habitats

| 群落类型   | 环境变量                            | 变量重要性   | P 值       |
|--------|---------------------------------|---------|-----------|
| 洲滩植物群落 | AN                              | +(0.86) | 0.039*    |
|        | TP                              | -(0.72) | 0.048*    |
|        | SWC                             | -(0.11) | 0.490     |
| 水生植物群落 | AN                              | +(1)    | <0.001*** |
|        | AP                              | -(0.84) | 0.048*    |
|        | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | +(0.81) | 0.038*    |
|        | AK                              | +(0.14) | 0.322     |
|        | COD                             | -(0.09) | 0.392     |
|        | NO <sub>3</sub> -N              | +(0.08) | 0.533     |

多元逐步回归和最优模型选择结果显示, 碱解氮对洲滩草本植物群落功能生态位超体积重要性最高, 达到 0.86, 其次为全磷, 变量重要性为 0.72。对水生植物群落功能生态位超体积影响显著的环境因子分别为碱解氮、速效磷和铵态氮, 变量重要性分别为 1、0.84、0.81 (表 3)。

### 3 讨论与结论

本研究利用 n-维超体积算法量化了白洋淀湿地不同生境植物群落功能生态位空间, 结果发现物种丰富度相对较低的水生植物群落功能生态位超体积大于洲滩草本植物群落, 表明了水生植物群落物种对资源的利用效率更高, 同时也说明了洲滩草本植

物群落功能生态位空间相对更为收敛。这与其他研究认为的群落功能生态位体积随着物种丰富度的增加而增加的结论不一致<sup>[14, 17, 28]</sup>。这可能主要由 2 种生境植物群落较大的物种组成差异造成的。虽然在本次调查中, 水生植物样方只包含 18 种植物, 而在洲滩草本植物样方共调查到植物 57 种, 然而, 水生植物群落由于特殊的生境条件导致群落内不同生活型物种共存, 例如, 挺水型、浮叶型和沉水型。通常不同生活型物种之间功能性状分化较大 (尤其是叶性状), 本研究通过分析水生植物群落不同生活型物种功能生态位重叠程度也证明了不同生活型物种之间的功能生态位存在明显差异, 有助于群落功能空间的扩展, 从而导致水生植物群落拥有更大的功能生态位超体积。有研究认为功能性状较为相似的物种功能生态位也较为相近, 总体呈聚集状态<sup>[29]</sup>, 而植物群落中具有极端或独特的性状值的物种, 在一定程度上有助于扩展群落的功能生态位空间<sup>[30]</sup>。相反, 洲滩草本植物群落的物种组成和陆域生境条件限制了植物功能性状的范围, 在一定程度上阻碍了功能空间的扩展<sup>[15]</sup>。另外, 尽管大多数研究都表明群落功能生态位体积与物种丰富度正相关, 但相对于中性过程期望值, 物种在功能空间中的分布更聚集, 表明了群落功能生态位体积受生境过滤作用更为显著, 并且在一定区域范围内物种丰富度相对丰富的群落受生境过滤作用可能更强<sup>[10, 17, 28]</sup>。白洋淀湿地 2 种生境植物群落功能生态位空间差异较

大,功能生态位超体积重叠程度仅为0.32,表明了不同生境植物群落功能生态位分化明显。有研究表明群落功能空间的差异主要是由环境异质性造成的,物种为适应不同环境条件导致功能性状分化明显,功能空间差异显著,导致功能生态位重叠比例较小<sup>[14,31]</sup>。

非生物环境因子对植物功能性状具有塑造作用,不同的功能性状表现为对环境的不同适应机制,因而性状之间的权衡显著影响植物群落功能特征<sup>[32-33]</sup>。本研究发现白洋淀不同生境植物群落功能生态位超体积与环境因子显著相关,环境因子对2种生境植物群落生态位超体积的重要性表现出了相似的趋势。生境中碱解氮是影响2种生境生态位超体积的最重要因素,并且表现出随碱解氮含量的增加,群落功能生态位超体积越大。另外水生植物群落生态位超体积与水体铵态氮也表现为显著正相关,重要性达到0.81。研究结果表明了生境中有效氮元素含量越高,群落中物种对生态位空间及资源的利用更为充分。生境中氮元素含量是植物生长发育的必需元素,对群落植物功能性状多样性显著正相关<sup>[19,34-35]</sup>,因此会对提高群落功能异质性,增大群落功能生态位超体积产生积极作用。

土壤全磷和底泥速效磷分别对洲滩草本植物群落和水生植物群落功能生态位超体积的影响达到了显著水平,重要性仅次于生境中碱解氮含量,并且均表现为负相关,表明了生境中较高的磷元素含量成为白洋淀植物群落生态位超体积的限制性因素。这可能是由于长期以来白洋淀湿地含磷污染物的外源输入以及植物残体的大量沉积,导致的内源污染负荷比较严重有关<sup>[36-37]</sup>。随着雄安新区的设立,一系列生态修复措施的实施,白洋淀湿地的生态环境得到了有效改善,植物群落的功能稳定性也得到了很大提升。然而,生态环境的治理是一个长期工程,长期积累的内源污染负荷对白洋淀植物群落功能生态位超体积仍会产生一定影响。本研究结果意味着生境中有效氮元素含量和磷元素含量充当了白洋淀植物群落功能生态位超体积的生境筛,因此,通过施用菌剂促进植物残体降解释放氮元素、水生植物定期收割、选择去磷功能较强的乡土植物富集种植等措施是优化生境条件,提高植物群落功能生态位超体积的有效手段。

本研究比较了白洋淀湿地不同生境植物群落功能生态位超体积的差异,分析了不同生境植物群落功能生态位超体积的重叠程度,探讨了影响不同生境植物群落功能生态位超体积的关键环境因子。研

究发现,水生植物群落功能生态位超体积高于洲滩草本植物群落,洲滩草本植物群落功能生态位表现出更强的聚集性。2种生境植物群落功能生态位重叠较小,表明白洋淀湿地不同生境植物群落中物种功能差异较大,功能生态位分化明显。决定洲滩草本植物群落功能生态位超体积的主要环境因素为碱解氮、全磷,而对水生植物群落影响最为显著的环境因素为碱解氮、速效磷和铵态氮,并且2种生境植物群落均表现为与生境氮元素含量呈显著正相关,与磷元素含量显著负相关。本研究结果能够为白洋淀湿地植物群落功能稳定性保护与恢复提供依据,同时有助于制定更具针对性的白洋淀湿地植物群落保护策略。

### 参考文献:

- [1] 刘俊国,赵丹丹,叶斌.雄安新区白洋淀生态属性辨析及生态修复保护研究[J].生态学报,2019,39(9):3019-3025.
- [2] ZHAO H, WANG X D, CAI Y J, et al. Wetland transitions and protection under rapid urban expansion: a case study of Pearl River Estuary, China[J]. Sustainability, 2016, 8(5): 471.
- [3] 王琪,朱卫红,付婧,等.长白山不同海拔湿地植物群落结构及其物种多样性研究[J].延边大学学报(自然科学版),2010,36(1):78-83.
- [4] 张全军,于秀波,胡斌华.鄱阳湖南矶湿地植物群落分布特征研究[J].资源科学,2013,35(1):42-49.
- [5] 牛克昌,储诚进,王志恒.动态生态位:构建群落生态学理论的新框架[J].中国科学(生命科学),2022,52(3):403-417.
- [6] HUTCHINSON G E. Concluding remarks[J]. Cold Spring Harb Symp Quant Biol, 1957, 22: 415-427.
- [7] LAVOREL S, GRIGULIS K, LAMARQUE P, et al. Using plant functional traits to understand the landscape distribution of multiple ecosystem services[J]. J Ecol, 2011, 99(1): 135-147.
- [8] MCGILL B J, ENQUIST B J, WEIHER E, et al. Rebuilding community ecology from functional traits[J]. Trends Ecol Evol, 2006, 21(4): 178-185.
- [9] RICKLEFS R E, MARQUIS R J. Species richness and niche space for temperate and tropical folivores[J]. Oecologia, 2012, 168(1): 213-220.
- [10] LAMANNA C, BLONDER B, VIOLLE C, et al. Functional trait space and the latitudinal diversity gradient[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2014, 111(38): 13745-13750.
- [11] BLONDER B. Hypervolume concepts in niche-and trait-based ecology[J]. Ecography, 2018, 41(9): 1441-1455.
- [12] RAFFARD A, SANTOUL F, BLANCHET S, et al. Linking intraspecific variability in trophic and functional niches along an environmental gradient[J]. Freshw Biol, 2020, 65(8): 1401-1411.

- [13] BLONDER B, LAMANNA C, VIOLLE C, et al. The n-dimensional hypervolume[J]. *Glob Ecol Biogeogr*, 2014, 23(5): 595-609.
- [14] LI Y Z, SHIPLEY B. Functional niche occupation and species richness in herbaceous plant communities along experimental gradients of stress and disturbance[J]. *Ann Bot*, 2019, 124(5): 861-867.
- [15] DE LA RIVA E G, MARAÑÓN T, VIOLLE C, et al. Biogeochemical and ecomorphological niche segregation of Mediterranean woody species along a local gradient[J]. *Front Plant Sci*, 2017, 8: 1242.
- [16] HE D, BISWAS S R, XU M S, et al. The importance of intraspecific trait variability in promoting functional niche dimensionality[J]. *Ecography*, 2021, 44(3): 380-390.
- [17] LI Y Z, SHIPLEY B, PRICE J N, et al. Habitat filtering determines the functional niche occupancy of plant communities worldwide[J]. *J Ecol*, 2018, 106(3): 1001-1009.
- [18] KATABUCHI M, KUROKAWA H, DAVIES S J, et al. Soil resource availability shapes community trait structure in a species-rich dipterocarp forest[J]. *J Ecol*, 2012, 100(3): 643-651.
- [19] OHDO T, TAKAHASHI K. Plant species richness and community assembly along gradients of elevation and soil nitrogen availability[J]. *AoB PLANTS*, 2020, 12(3): plaa014.
- [20] 安瑞志, 张鹏, 达珍, 等. 西藏麦地卡湿地不同水文期原生动植物优势种生态位及其种间联结性[J]. *林业科学*, 2021, 57(2): 126-138.
- [21] 王昱, 毕润成, 茹文明. 山西浊漳河北源湿地草本植物群落优势种生态位与种间关系[J]. *草业科学*, 2018, 35(2): 276-285.
- [22] 郑志鑫, 陈雪, 罗雪晶, 等. 白洋淀湿地种子植物资源调查分析[J]. *河北大学学报(自然科学版)*, 2017, 37(4): 440-448.
- [23] 刘莎, 刘存歧, 李博, 等. 白洋淀芦苇台地土壤理化因子及其酶活性特征[J]. *湿地科学*, 2012, 10(1): 74-80.
- [24] PÉREZ-HARGUINDEGUY N, DÍAZ S, GARNIER E, et al. New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide[J]. *Aust J Bot*, 2013, 61(3): 167-234.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [26] 环境保护局科技标准司. 地表水环境质量标准: GB3838—2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [27] CALCAGNO V, DE MAZANCOURT C. glmulti: AnRPackage for easy automated model selection with (generalized) linear models[J]. *J Stat Soft*, 2010, 34(12): 1-29.
- [28] SWENSON N G, WEISER M D. On the packing and filling of functional space in eastern North American tree assemblages[J]. *Ecography*, 2014, 37(11): 1056-1062.
- [29] ACKERLY D D, CORNWELL W K. A trait-based approach to community assembly: partitioning of species trait values into within- and among-community components[J]. *Ecol Lett*, 2007, 10(2): 135-145.
- [30] ZHANG S, ZANG R, SHEIL D. Rare and common species contribute disproportionately to the functional variation within tropical forests[J]. *J Environ Manag*, 2022, 304: 114332.
- [31] CORNWELL W K, SCHWILK D W, ACKERLY D D. A trait-based test for habitat filtering: convex hull volume[J]. *Ecology*, 2006, 87(6): 1466-1471.
- [32] WEBB C T, HOETING J A, AMES G M, et al. A structured and dynamic framework to advance traits-based theory and prediction in ecology[J]. *Ecol Lett*, 2010, 13(3): 267-283.
- [33] 郑丽婷, 苏田, 刘翔宇, 等. 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[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(2): 343-351.
- [34] ŠÍMOVÁ I, SANDEL B, ENQUIST B J, et al. The relationship of woody plant size and leaf nutrient content to large-scale productivity for forests across the Americas[J]. *J Ecol*, 2019, 107(5): 2278-2290.
- [35] MAO W, FELTON A J, ZHANG T H. Linking changes to intraspecific trait diversity to community functional diversity and biomass in response to snow and nitrogen addition within an Inner Mongolian grassland[J]. *Front Plant Sci*, 2017, 8: 339.
- [36] 刘晨宇, 张美一, 尹铮, 等. 白洋淀多种生境沉积物有机质来源解析及其演变[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(4): 237-247.
- [37] 鲍艳磊, 田冰, 张瑜, 等. 雄安新区河流健康评价[J]. *生态学报*, 2021, 41(15): 5988-5997.