

白洋淀湿地不同生境植物群落功能多样性和功能冗余及其对环境因子的响应^{*}

张树梓^{1,2} 张树彬³ 任启文^{1,2} 王鑫^{1,2}
李联地^{1,2}

(1. 河北省林业和草原科学研究院, 河北 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, 河北 涿鹿 075600; 3. 河北林业生态建设投资有限公司, 河北 石家庄, 050000)

摘要 功能多样性和功能冗余与植物群落稳定性和抗干扰能力密切相关, 评估植物群落功能多样性、功能冗余以及主要环境驱动因子能够为生物多样性保护和生态系统功能维持提供重要参考。文章针对白洋淀湿地水生植物群落和洲滩草本植物群落, 选取比叶面积、叶绿素含量、叶干物质含量、植物氮含量、植物磷含量、植物钾含量 6 个植物功能性状, 利用基于性状概率密度的功能指数评估白洋淀湿地不同生境植物群落功能多样性和功能冗余, 利用多元回归检验影响植物群落功能多样性和功能冗余的关键环境因子。结果发现, 白洋淀洲滩草本植物群落功能丰富度和功能冗余显著高于 ($P < 0.05$) 水生植物群落, 而功能均匀度和功能分散度显著低于水生植物群落。功能丰富度和功能冗余与物种丰富度显著正相关, 功能分散度与物种多样性表现为显著负相关。生境中有效氮含量和磷元素含量是影响白洋淀湿地 2 种生境植物群落功能多样性和功能冗余的主要环境因子, 另外, 土壤自然含水量和 pH 值对洲滩草本植物群落功能特征也有显著影响, 与水生植物群落功能特征显著相关的环境因子还包括化学需氧量、水体砷和底泥速效钾。研究结果表明丰富群落物种库、调节和改善生境条件是提高白洋淀湿地植物群落功能多样性和功能冗余水平的有效途径。

关键词 白洋淀湿地; 生境; 植物群落; 功能多样性; 功能冗余; 环境因子

中图分类号: Q948.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-2053 (2022) 06-0054-09

Functional Diversity and Functional Redundancy of Plant Communities in Different Habitats of Baiyangdian Wetland and Their Responses to Environmental Factors

ZHANG Shuzi^{1,2} ZHANG Shubin³ REN Qiwen^{1,2} WANG Xin^{1,2}
LI Liandi^{1,2}

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

Abstract Functional diversity and functional redundancy are closely related to the stability and resilience to disturbance of plant communities. Assessing the functional diversity, functional redundancy and main environment-driving factors of plant communities can provide important references for biodiversity protection

^{*} 基金项目: 河北省重点研发计划 (20327601D)。

第一作者: 张树梓 (1984—), 男, 工程师, 主要从事群落生态学研究, E-mail: zhangsz1984@163.com。

通信作者: 李联地 (1971—), 男, 高级工程师, 主要从事自然保护地监测与研究, E-mail: 2196519317@qq.com。

and ecosystem function maintenance. In this study, based on the aquatic plant community and the floodplain herbaceous plant community, six plant functional traits, including specific leaf area, chlorophyll content, leaf dry matter content, plant nitrogen content, plant phosphorus and plant potassium content, were selected to evaluate the functional diversity and functional redundancy of plant communities under different habitats in Baiyangdian wetland by using the functional indices based on trait probability density. Multiple regression was used to assess the effects of the environmental factors on the functional diversity and functional redundancy of plant communities. The results showed that the functional richness and functional redundancy of floodplain herbaceous plant community were significantly higher than those of the aquatic plant community, while functional evenness and functional divergence were significantly lower than those of the aquatic plant community. Functional richness and functional redundancy were significantly positively correlated with the species richness, functional divergence and species richness were significantly negatively correlated. The content of available nitrogen and phosphorous in the habitat were the main environmental factors affecting the functional diversity and functional redundancy of the plant communities in the two habitats of Baiyangdian Wetland. In addition, soil water content and pH value also had a significant effect on the functional characteristics of the floodplain herbaceous plant community, and the environmental factors significantly correlated to the functional characteristics of the aquatic plant community also included chemical oxygen demand, water arsenic and soil available potassium. The results suggested that enriching community species pool, regulating and improving habitat conditions was an effective way to improve the functional diversity and functional redundancy of plant community in Baiyangdian Wetland.

Key words Baiyangdian wetland; habitats; plant community; functional diversity; functional redundancy; environmental factor

地球正在进入由人类活动引起的第六次生物大灭绝期,大量物种面临着灭绝的风险^[1-2]。生物多样性的丧失对群落的影响不仅是物种多样性简单的减少,还会改变群落中物种功能性状的组成、丰度和分布范围(功能多样性)和执行相似功能的物种多样性(功能冗余)^[3]。物种对环境变化的响应和对群落功能的贡献取决于物种所具有的功能性状^[4]。群落中,具有不同功能性状组合的物种可能执行不同的功能,因此,生物多样性的丧失可能会降低群落功能多样性和功能冗余,从而对群落功能和稳定性造成直接影响。功能多样性将物种功能性状与群落功能有机结合,用物种功能性状对群落功能进行描述^[5],可以反映群落中物种生态策略的多样性,与群落资源动态、稳定性和抗干扰能力密切相关^[6-7]。功能多样性可以用于解决诸多生态问题,例如,揭示不同尺度上潜在生物和非生物过程、气候变化对生物多样性的影响以及生态修复等^[8]。功能冗余是在群落受到干扰造成物种丧失的情况下,对维持生态系统过程提供的保险作用,这种补偿主要是通过群落中执行类似功能但对干扰或环境变化反应不同的

物种来实现^[9]。群落中功能是否比物种更为重要主要取决于群落的功能冗余程度,例如,在高度功能冗余的群落中,冗余种损失对群落影响较弱,而在功能冗余程度较低的群落,一个物种可能就代表了一个功能,这种情况下物种的损失就相当于群落功能的丧失^[10-11]。

白洋淀湿地是雄安新区的重要水系,是雄安新区蓝绿空间的重要组成部分,具有“以淀兴城、城淀共荣”的重要生态功能。植物群落作为湿地生态系统的核心生产者,决定了湿地生态系统的结构和功能,同时也维系着湿地生态系统稳定健康^[12]。评估白洋淀湿地植物群落的功能多样性和功能冗余对于在不断变化的环境条件下湿地生态系统保护和修复有着重要意义。本研究在对白洋淀湿地不同生境植物群落调查和植物功能性状测定的基础上,分析基于性状概率密度(Trait probability density, TPD)的功能多样性和功能冗余度随不同生境植物群落的变化规律,辨析影响植物群落功能特征的主要限制性环境因子,旨在为白洋淀湿地不同生境植物群落生物多样性保护和修复,以及生态系统功能维持提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

白洋淀湿地位于京津冀腹地,是华北平原最大的湖泊和草本沼泽湿地,也是雄安新区的重要水系,地理范围为: N38°43′~39°2′, E115°38′~116°7′, 总面积 366 km², 属大清河水系, 由 143 个大小不同的淀泊和约 3 700 条壕沟组成, 海拔范围 5~10 m, 呈现出由西北向东南略倾斜。白洋淀属暖温带大陆季风性气候, 四季分明, 年平均气温 9.9 ℃, 年降水量 563.9 mm, 降水主要集中在 6—8 月, 无霜期 203 d^[13]。土壤母质主要为湖相沉积物^[14], 以沼泽土为主, 养分含量较高, 物种多样性丰富^[15]。

1.2 样地设置和群落调查

2021 年 8 月至 9 月, 利用样带法和样方法对白洋淀湿地水生和洲滩两种生境类型进行植物群落调查, 在全面踏查的基础上, 选择人为干扰较少的区域设置调查样带, 样带间隔 200 m 以上, 垂直于水陆交界线, 在每个样带设置 3 个 2 m × 2 m 的植物群落样方, 样方间隔不小于 5 m。在水生和洲滩两种生境分别布设 10 个样带, 共计调查了 30 个水生植物样方和 30 个洲滩草本植物样方。在每个植物样方中, 记录每个物种名称、多度、盖度、健康状况以及分布状况。

1.3 植物样品采集与功能性状测定

对洲滩草本植物样方和水生植物样方中调查到的所有植物物种进行样品采集, 当某一物种个体多度大于 5 株时, 至少采集 5 株进行功能性状测定, 当物种个体数小于 5 株时, 采集所有个体测定其功能性状。采集过程中选择个体发育成熟、健康的植株进行采样和测定, 主要测定植物功能性状指标为: 比叶面积 (cm²/g)、叶绿素含量 (mg/g)、叶干物质含量 (g/g)、植物氮含量 (mg/g)、磷含量 (mg/g)、钾含量 (mg/g)。叶面积使用叶面积仪测定, 比叶面积为叶面积除以叶片干质量。叶干物质含量是叶片干质量与叶片鲜重的比值。叶绿素利用叶绿素仪测定。植物样品带回实验室在 60℃ 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^[16]进行。

1.4 环境因子测定

因生境条件的差异, 本研究对洲滩草本植物群落和水生植物群落分别采集环境因子。针对洲滩草本植物群落, 主要采集土壤的物理和化学性质, 在每个样方沿对角线选择 3 个取样点, 利用环刀法测定土壤容重、最大持水量、自然含水量和毛管孔隙度。同时用铝盒取混合土样带回实验室测定土壤化学性质, 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,

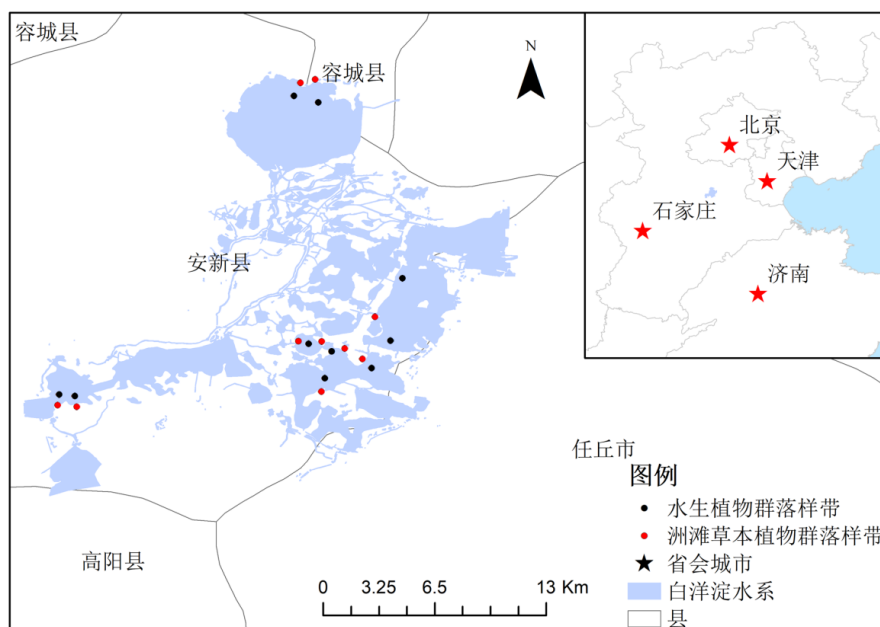


图 1 白洋淀植物群落采样点分布

Fig.1 Sampling sites of plant communities in Baiyangdian wetland

其中,用电位法测定土壤 pH 值、重铬酸钾外热源法测定有机质、碱解扩散吸收法测定碱解氮、钼锑抗比色法测定速效磷、乙酸铵浸提法测定速效钾、半微量开氏法测定全氮、钼锑抗比色法测定全磷、火焰光度法测定全钾^[17]。

针对水生植物群落,使用萨氏透明度盘和带刻度的绳子测定水体透明度和水深,利用采水器采集水样,带回实验室参照国家地表水环境质量标准方法(GB3838-2002)测定水样的 pH 值、电导率、水体化学需氧量、铵态氮、硝态氮、全氮、全磷、砷和铅,其中,用电导率仪测定电导率、重铬酸盐法测定化学需氧量、纳氏试剂分光光度法测定铵态氮、紫外分光光度法测定硝态氮、碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定全氮、钼锑抗分光光度法测定全磷、二乙基二硫代氨基甲酸银分光光度法测定砷、原子吸收分光光度法测定铅。利用采泥器采集底泥样品,自然风干后测定底泥化学性质,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,测定方法同洲滩草本植物群落土壤化学性质测定方法。

1.5 数据分析

1.5.1 基于性状概率密度的功能指数 本研究利用基于性状概率密度的功能指数评估白洋淀湿地不同生境植物群落功能特征。首先,对 6 个植物功能性状进行主成分分析(Principal component analysis, PCA),实现对功能性状数据降维^[1],选择特征值大于 1 的前两个主成分轴计算群落功能多样性指数和功能冗余(表 1)。

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

主成分轴 PCs	PC1	PC2
方差贡献率 /%Proportion of Variance	0.440	0.273
特征值 Eigenvalue	1.624	1.156
性状载荷 Trait loadings		
比叶面积 Specific leaf area	0.379	0.483
叶绿素含量 Chlorophyll content	0.091	0.702
氮含量 Nitrogen concentration	0.447	-0.142
磷含量 Phosphorus concentration	0.512	0.127
钾含量 Potassium concentration	0.496	-0.097
叶干物质含量 Leaf dry matter content	-0.380	0.480

(1) 功能丰富度 (FRic), 是指一个群落占据功能空间的大小。计算过程中首先将功能空间划分为由大小相同的单元组成的 N- 维网格 (N-dimensional grid), 然后, 计算每个单元的 TPD 值, TPD 值大于 0 的网格所占据的功能空间即为群落的功能丰富度。群落的 TPD 值是以群落中每个物种的 TPD_s 值, 通过物种多度加权累加计算获得^[18-20]。群落中物种的 TPD_s(x) 计算公式如下:

$$\text{TPD}_s(x; H) = n^{-1} \sum_{i=1}^n K_H(x - X_i)$$

式中, $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T$ 为 N- 维性状空间, $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iN})^T, i = 1, 2, \dots, n$. 其中, X 为群落中某一物种性状 N 的 n 个观测值。 H 代表带宽矩阵。 $K(x)$ 是一个对称概率函数。

(2) 功能均匀度 (FEve), 表示性状空间内物种分布的均匀性。计算公式为^[19]:

$$\text{FEve} = \sum_{i=1}^N \min(V \times \text{TPD}(x=i), V \times N^{-1})$$

式中, V 代表每个单元格的大小, N 代表群落的 TPD 占据的单元格个数。

(3) 功能分散度 (FDiv), 表示功能性状空间中物种分布的分散性,

$$\text{FDiv} = \frac{\Delta d + \overline{dG}}{\Delta |d| + \overline{dG}}$$

式中: $\overline{dG}$ 表示群落 TPD 值大于 0 的单元格到功能空间重心坐标的平均距离。 Δd 和 $\Delta |d|$ 分别表示所有 TPD 值大于 0 的单元格相对于重心坐标距离的相对多度加权偏差和绝对多度加权偏差之和。

(4) 功能冗余 (FR), 定义为如果两个物种占据功能空间相似的部分, 则被视为功能冗余。针对 N- 维网格中每一个单元, 计算 TPD 值大于零的物种数量 (M), 公式如下^[19]:

$$\text{FR} = \left(\sum_{i=1}^N M_i \times V \times \text{TPD}_{C_i} \right) - 1$$

基于 TPD 的功能指计算基于 R 4.1.1 程序“TPD”和“ks”包完成^[19, 21]。

1.5.2 功能指数与环境因子相关性分析 本研究为避免环境因子之间存在较高的共线性, 通过

Pearson 相关分析对环境因子进行检验筛选,以相关性系数 >0.8 为标准。经筛选后,水生植物群落保留环境变量分别为:水环境指标包含透明度、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。洲滩草本植物群落保留环境变量为:自然含水量、土壤容重、pH 值、全磷、全钾、碱解氮。

广义线性模型框架下的多元回归可用于描述因变量与一系列解释变量之间的关系,而 MSMI (Model selection and multi-model inference) 功能可以从多元回归分析中生成的所有可能的模型中筛选出最佳模型。因此,本研究利用多元回归和 MSMI 功能检验影响群落功能多样性和功能冗余的关键环境因子,首先。构建回归矩阵,以功能指数为响应变量,环境变量为解释变量,为消除各变量之间的量纲差异,对回归矩阵进行 Z-score 标准化处理。然后,利用多元回归和 MSMI 功能构建最优回归模型并进行显著性检验,以 AIC 值为标准进行最优模型选择^[22]。

2 结果与分析

2.1 不同生境植物群落功能多样性与功能冗余

白洋淀洲滩草本植物群落和水生植物群落功能多样性和功能冗余均存在显著差异(图 2),其中,功能丰富度洲滩草本植物群落显著高于水生

植物群落,功能均匀度和功能分散度水生植物群落显著高于洲滩草本植物群落。洲滩草本植物群落功能冗余显著高于水生植物群落。

2.2 不同生境植物群落功能指数与物种丰富度的关系

功能丰富度($p<0.001$, $R^2=0.92$)和功能冗余($p<0.001$, $R^2=0.92$)均与物种丰富度显著正相关。功能分散度与物种多样性表现为显著负相关($p=0.005$, $R^2=0.13$)。功能均匀度与物种多样性没有表现出显著的线性相关关系($p=0.11$, $R^2=0.04$)(图 3)。

2.3 不同生境植物群落物种多样性影响因子分析

通过多元回归和最优模型选择分析功能指数与环境因子关系发现,在洲滩草本植物群落,功能丰富度、功能均匀度和功能冗余与环境因子呈现显著相关性($p<0.05$),其中,全磷与功能丰富度、功能均匀度和功能冗余显著负相关,自然含水量与功能丰富度显著负相关,pH 值与功能均匀度显著正相关,碱解氮与功能冗余显著正相关(表 2)。

水生植物群落中,功能多样性指数与功能冗余均与环境因子呈现显著相关性($p<0.05$),其中,功能丰富度与底泥碱解氮显著正相关,与底泥速效磷显著负相关。功能均匀度与水体硝态氮显著正相关,与底泥速效钾显著负相关。功能分散度主要受化学需氧量、水体全磷和底泥碱解氮影响,其中与化学需氧量和底泥碱解氮正相关,与水体全磷负相关。功能冗余与水体铵态氮显著

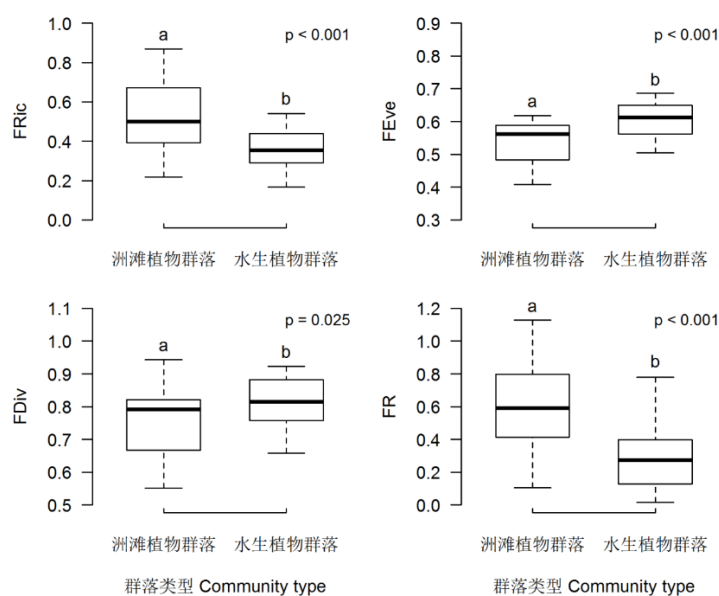


图 2 不同生境植物群落功能多样性和功能冗余变化规律

Fig. 2 Variation of functional diversity and functional redundancy of plant communities in different habitats

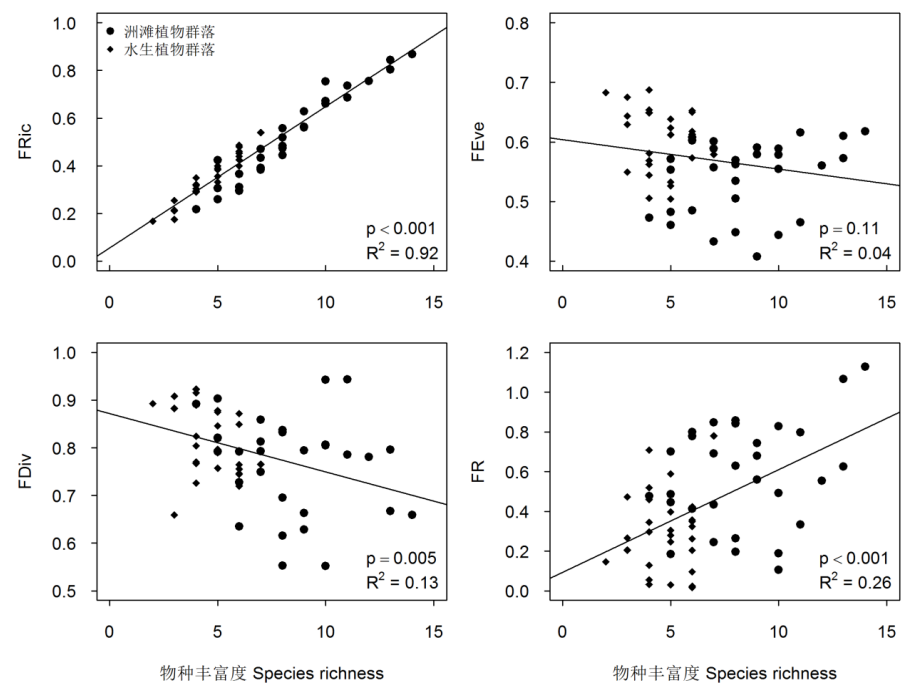


图 3 不同生境植物群落物种丰富度与功能多样性和功能冗余的关系
Fig.3 Relationship between species richness and functional diversity and functional redundancy of plant communities in different habitats

表 2 洲滩草本植物群落功能指数与环境因子的多元回归与模型选择

Table 2 Multiple regression and model selection of functional indices and environmental factors of floodplain herbaceous plant community

功能指数 Functional indices	环境变量 Environmental variables						回归参数 Parameters		
	SWC	BD	pH	AN	TP	TK	R ²	AIC	P
FRic	-0.48				-0.59		0.71	32.3	0.015
FEve			0.56		-0.63		0.54	35.8	0.043
FDiv							0.34	39.3	0.347
FR				0.51	-0.51		0.59	36.3	0.048

注：SWC：自然含水量 soli water content；BD：土壤容重 soil bulk density；pH：pH 值 pH value；AN 碱解氮 alkaline-hydrolyzable nitrogen；TP：全磷 total phosphorous；TK：全钾 total potassium。

表 3 水生植物群落功能指数与环境因子的多元回归与模型选择

Table 3 Multiple regression and model selection of functional indices and environmental factors of aquatic plant community

功能指数 Functional indices	环境变量 Environmental variables												回归参数 Parameters		
	ST	Cond	COD	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ -N	TP	As	Pb	pH	AN	AP	AK	R ²	AIC	P
FRic										0.43	-0.49		0.53	45.6	0.043
FEve					0.54							-0.43	0.56	42.3	0.033
FDiv			0.43			-0.43				0.42			0.72	41.0	0.022
FR				0.47			-0.55						0.54	44.4	0.042

注：ST：透明度 transparency；Cond：电导率 electrical conductivity；COD：化学需氧量 chemical oxygen demand；NH₄⁺-N：铵态氮 ammonia nitrogen；NO₃-N：硝态氮 nitrate nitrogen；TP：全磷 total phosphorous；As：砷 arsenic；Pb：铅 lead；pH：pH 值 pH value；AN 碱解氮 alkaline-hydrolyzable nitrogen；AP：速效磷 available phosphorous；AK：速效钾 available potassium。

正相关, 与水体砷显著负相关 (表 3)。

3 结论与讨论

本研究利用基于性状概率密度的方法评估了白洋淀不同生境植物群落功能多样性和功能冗余差异, 结果发现洲滩草本植物群落功能丰富度显著高于水生植物群落, 而功能均匀度和功能分散度显著低于水生植物群落, 表明了洲滩草本植物群落中占据功能空间较大, 对生境中资源的占有量较大, 但是利用率要低于水生植物群落, 并且水生植物群落生态位分化更为明显^[7,23]。洲滩草本植物群落功能丰富度较高可能与不同生境植物群落物种丰富度的差异相关, 本次调查中洲滩草本植物群落物种丰富度明显高于水生植物群落。大量研究表明群落功能丰富度与物种丰富度显著正相关^[5, 24], 本研究中群落功能丰富度与物种丰富度也呈现出正相关关系 ($p<0.001$, $R^2=0.92$)。水生植物群落功能分散度显著高于洲滩草本植物群落, 并且功能分散度与物种丰富度呈现出显著的负相关关系 ($p=0.005$, $R^2=0.13$), 这可能是由于水生植物群落较为特殊的物种组成结构造成的, 水生植物群落特殊的生境条件导致群落内由不同生境偏好的物种组成, 物种之间的功能性状有较大的分化, 从而导致水生植物群落较高的功能分散度。另外, 还有可能是由于洲滩草本植物群落受环境筛作用更为明显, 限制了群落内性状的分布范围, 共存物种性状值表现为低发散的分布模式, 导致洲滩草本植物群落功能分散度较低^[25-26]。

功能冗余种占据着功能空间相似的部分, 因此, 群落中功能冗余种丧失对群落功能丰富度不会产生较大影响^[27]。本研究结果发现洲滩草本植物群落功能冗余显著高于水生植物群落, 表明了洲滩草本植物群落抗干扰能力更强, 对物种丧失的敏感性较低, 并且, 功能冗余受物种丰富度的影响, 表现为随着群落物种丰富度增加而增加, 这与大多数研究相一致^[28-30], 主要反映了物种丰富的群落物种间存在更高程度的功能重叠, 群落抗干扰能力更强。同时也表明了物种丰富度较低的群落更容易受到物种丧失的影响, 在这种情况下, 物种的丧失会对群落功能产生严重影响。洲滩草本植物群落与水生植物群落功能冗余的差异同样也可能是由于不同的生境条件造成的, 在洲滩草本植物群落物种为适应环境条件 (例如水资

源的可利用性), 物种间性状差异较小, 而在水生植物群落不同生活型 (例如, 挺水型、浮叶型和沉水型等) 物种共存, 导致了功能冗余度的降低^[19]。

环境条件类似一个“筛子”, 作用在于筛选适宜局域生境的物种, 植物群落构建过程中, 经过环境过滤, 其中具有适应性状的物种才能在群落中定居、存活、生长, 因此, 环境筛作用会使群落内物种性状表现趋同适应^[31-32]。另外, 环境因子对植物功能性状也具有一定塑造作用, 进而影响植物群落的功能多样性和功能冗余^[33]。通过评估影响白洋淀湿地不同生境植物群落功能特征的主要环境因子, 结果发现不同的生境植物群落功能多样性和功能冗余与环境因子显著相关。并且, 不同功能指数与环境因子组合的响应不相同, 表明了环境过滤作用影响 2 种生境植物群落功能结构, 部分环境因子对物种进行筛选, 导致无法适应局域生境的物种淘汰, 改变了群落物种组成, 进而对群落功能结构造成影响。土壤自然含水量是洲滩草本植物群落功能丰富度的一个主要限制性因子, 这可能与植物对土壤水分条件的生态适应性相关, 有研究表明土壤自然含水量与湿地植物群落物种丰富度显著负相关^[34], 进而会影响群落的功能丰富度。值得关注的是, 白洋淀洲滩草本植物群落和水生植物群落对生境中养分元素含量的响应表现相似, 主要表现为生境中有效氮含量和磷元素含量是影响群落功能特征的主要环境因子, 其中生境中有效氮含量与功能多样性和功能冗余呈正相关关系, 而磷元素含量与功能多样性和功能冗余呈负相关关系。有研究表明生境中氮、磷、钾等养分元素对植物的生长发育和分布有显著的影响^[35-36]。湿地生态系统中水体的硝态氮、铵态氮以及土壤碱解氮可以直接被植物吸收利用, 是植物氮素营养的主要来源^[37], 因此, 生境中适宜的有效氮含量对群落中物种的定植、扩散和更新有积极作用, 从而影响群落的物种组成结构和功能结构。磷元素含量是白洋淀 2 种生境植物群落功能多样性和功能冗余的主要限制性因子, 表明了生境中磷元素含量超出了植物需求的适宜浓度范围, 对群落功能特征产生了限制性的影响。长期以来, 白洋淀湿地环境由于受到气候干旱、社会发展和人口增长造成的工业和生活污水的影响, 有机质、磷污染较为严重。近年来,

随着雄安新区的设立, 白洋淀的生态补水工程和一系列环境治理措施的实施, 有效遏制了污染物的外源输入, 生态环境得到了明显改善, 然而, 长期以来污染物质的外源输入导致了白洋淀内源负荷较为严重^[38-39], 会对植物群落的功能结构产生影响。因此, 针对受环境过滤明显的白洋淀两种生境植物群落, 进行植物筛选和优化配置不仅可以提高群落功能多样性和功能冗余的有效方式, 而且对生境改善也有一定的促进作用, 例如, 使用已知的能够耐受当前环境条件, 并且对具有环境净化效果的本地物种(例如去磷功能较强的植物)进行富集种植对生境条件的改善具有促进作用^[40]。另外, 为防止植物残体造成有机质大量沉积, 应对不同生境采取针对性的管理措施, 一方面, 定期对水生植物进行收割或捕捞, 对洲滩草本植物定期清理植物碎屑, 另一方面, 控制生境中有机质的分解速率, 将生境中营养盐浓度控制在适宜植物生长的范围内, 不仅可以消减生境中内源污染, 对植物群落功能多样性保护和群落稳定性也有重要意义。总的来说, 本研究探明了生境中有效氮含量和磷元素含量充当了白洋淀植物群落功能特征的环境筛, 因此, 从植物群落功能特征的保护与恢复角度, 白洋淀湿地植物群落还需要实施科学合理的管理措施改善生境条件, 以达到构建稳定的功能多样化植物群落, 建立健康和稳定的生境的目的。

综上所述, 白洋淀湿地洲滩草本植物群落和水生植物群落物种所占功能空间的大小及在功能空间中的分布模式存在显著差异, 表现为洲滩草本植物群落功能丰富度较高, 而功能均匀度和功能分散度较低。物种丰富度高的群落抗干扰能力更强, 洲滩草本植物群落功能上更为冗余, 而水生植物群落更易受到人为或气候干扰。因此, 通过筛选能够耐受或者净化环境的物种丰富群落物种库, 对提高群落功能多样性和抗干扰能力具有积极作用。环境过滤作用显著影响群落的功能多样性和功能冗余。无论是洲滩草本植物群落还是水生植物群落, 生境中有效氮含量和磷含量都是群落功能特征的主要驱动力, 在白洋淀湿地的保护、管理和修复过程中对关键环境指标进行调节和改善也是植物群落功能多样性保护的有效途径。

参考文献

- [1] CARMONA C P, TAMME R, PRTEL M, et al. Erosion of global functional diversity across the tree of life[J]. *Science Advances*, 2021, 7(13): eabf2675.
- [2] BARNOSKY A D, MATZKE N, TOMIYA S, et al. Has the Earth's sixth mass extinction already arrived?[J]. *Nature*, 2011, 471(7336): 51-57.
- [3] MONGE-GONZÁLEZ M L, GUERRERO-RAMÍREZ N, KRÖMER T, et al. Functional diversity and redundancy of tropical forests shift with elevation and forest-use intensity[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2021, 58(7): 1365-2664.
- [4] CERNANSKY R. The biodiversity revolution[J]. *Nature*, 2017, 546(7656): 22-24.
- [5] PETCHEY O L, GASTON K J. Functional diversity: back to basics and looking forward[J]. *Ecology Letters*, 2006, 9(6): 741-758.
- [6] SCHMITT S, MARÉCHAUX I, CHAVE J, et al. Functional diversity improves tropical forest resilience: Insights from a long-term virtual experiment[J]. *Journal of Ecology*, 2019, 108(3): 831-843.
- [7] MOUCHET M A, VILLÉGER S, MASON N W H, et al. Functional diversity measures: an overview of their redundancy and their ability to discriminate community assembly rules[J]. *Functional Ecology*, 2010, 24(4): 867-876.
- [8] DURÁN S, MARTIN R E, DÍAZ S, et al. Informing trait-based ecology by assessing remotely sensed functional diversity across a broad tropical temperature gradient[J]. *Science Advances*, 2019, 5(12): eaaw8114.
- [9] PILLAR V D, BLANCO C C, MÜLLER S C, et al. Functional redundancy and stability in plant communities[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2013, 24(5): 963-974.
- [10] GUILLEMOT N, KULBICKI M, CHABANET P, et al. Functional redundancy patterns reveal non-random assembly rules in a species-rich marine assemblage[J]. *PLoS One*, 2011, 6(10): e26735.
- [11] FONSECA C R, GANADE G. Species functional redundancy, random extinctions and the stability of ecosystems[J]. *Journal of Ecology*, 2001, 89: 118-125.
- [12] BAATTRUP-PEDERSEN A, JENSEN K, THODSEN H, et al. Effects of stream flooding on the distribution and diversity of groundwater-dependent vegetation in riparian areas[J]. *Freshwater Biology*, 2013, 58(4): 817-827.
- [13] 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.
- [14] 徐志涛, 陈鹏飞, 周世健, 等. 白洋淀流域土地覆被变化

- 及其生态服务价值评价[J].生态科学, 2018, 37(6): 83-90.
- [15] 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.
- [16] PÉREZ-HARGUINDEGUY N, Díaz S, GARNIER E, et al. New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide[J]. Australian Journal of Botany, 2013, 61(3): 167-234.
- [17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京: 中国农业出版社.2005.
- [18] BLONDER B, LAMANNA C, VIOLLE C, et al. The n-dimensional hypervolume[J]. Global Ecology and Biogeography, 2014, 23(5): 595-609.
- [19] CARMONA C P, DE BELLO F, MASON N W H, et al. Trait probability density (TPD): measuring functional diversity across scales based on TPD with R[J]. Ecology, 2019, 100(12): e02876.
- [20] CARMONA C P, BELLO F D, MASON N, et al. The Density Awakens: A Reply to Blonder[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2016, 31(9): 667-669.
- [21] DUONG T. ks: Kernel density estimation and kernel discriminant analysis for multivariate data in R[J]. Journal of Statistical Software, 2007, 21(7): 1-16.
- [22] CALCAGNO V, DE MAZANCOURT C. glmulti: An R package for easy automated model selection with (generalized) linear models[J]. Journal of statistical software, 2010, 34(12): 1-29.
- [23] MASON N W H, MOUILLOT D, LEE W G, et al. Functional richness, functional evenness and functional divergence: the primary components of functional diversity[J]. Oikos, 2005, 111(1): 112-118.
- [24] WHITFIELD T J S, LASKY J R, DAMAS K, et al. Species richness, forest structure, and functional diversity during succession in the New Guinea Lowlands[J]. Biotropica, 2014, 46(5): 538-548.
- [25] GALLAGHER R V, HUGHES L, LEISHMAN M R. Species loss and gain in communities under future climate change: consequences for functional diversity[J]. Ecography, 2013, 36(5): 531-540.
- [26] MAYFIELD M, BONI M, DAILY G, et al. Species and functional diversity of native and human-dominated plant communities[J]. Ecology, 2005, 86(9): 2365-2372.
- [27] SASAKI T, KATABUCHI M, KAMIYAMA C, et al. Vulnerability of moorland plant communities to environmental change: consequences of realistic species loss on functional diversity[J]. Journal of Applied Ecology, 2014, 51(2): 299-308.
- [28] TILMAN D, ISBELL F, COWLES J M. Biodiversity and ecosystem functioning[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2014, 45(1): 471-493.
- [29] MOUILLOT D, Villéger S, PARRAVICINI V, et al. Functional over-redundancy and high functional vulnerability in global fish faunas on tropical reefs[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2014, 111(38): 13757-13762.
- [30] 王恒方, 吕光辉, 周耀治, 等.不同水盐梯度下功能多样性和功能冗余对荒漠植物群落稳定性的影响[J].生态学报, 2017, 37(23): 7928-7937.
- [31] MESSIER J, MCGILL B J, LECHOWICZ M J. How do traits vary across ecological scales? A case for trait-based ecology[J]. Ecology Letters, 2010, 13(7): 838-848.
- [32] LAVOREL S, GARNIER E. Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail[J]. Functional Ecology, 2002, 16(5): 545-556.
- [33] KATTGE J, OGLE K, Bönisch G, et al. A generic structure for plant trait databases[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2011, 2(2): 202-213.
- [34] RONGOEI P J K, KIPKEMBOI J, KARIUKI S T, et al. Effects of water depth and livelihood activities on plant species composition and diversity in Nyando floodplain wetland, Kenya[J]. Wetlands Ecology and Management, 2014, 22(2): 177-189.
- [35] 肖石红, 张卫强, 黄钰辉, 等.深圳铁岗-石岩市级湿地自然保护区典型次生林物种多样性与土壤化学性质[J].林业与环境科学, 2020, 36(4): 35-40.
- [36] 孙红斌, 王佐霖, 朱子维, 等.深圳市坝光湿地园银叶树群落优势树种与土壤生态化学计量特征分析[J].林业与环境科学, 2018, 34(6): 15-20.
- [37] 刘佩佩, 白军红, 王婷婷, 等.白洋淀优势植物群落生物量及其影响因子[J].湿地科学, 2013, 11(04): 482-487.
- [38] TANG C, YI Y, YANG Z, et al. Effects of ecological flow release patterns on water quality and ecological restoration of a large shallow lake[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 174(10): 577-590.
- [39] 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.
- [40] 蒋梦冉, 刘小冬, 许铭宇, 等.不同植物配置模式对景观水质保持的影响[J].林业与环境科学, 2020, 36(3): 35-43.