DOI: 10.5846/stxb202007201898

齐睿, 王春平, 李子豪, 周紫羽, 王晶, 刘意帆, 叶永忠, 赵河, 陈云, 袁志良. 不同积水生境对河南黄河湿地植物多样性的影响. 生态学报, 2021, 41(21): 8578-8588.

Qi R, Wang C P, Li Z H, Zhou Z Y, Wang J, Liu Y F, Ye Y Z, Zhao H, Chen Y, Yuan Z L. Difference of plant diversity in different waterlogging habitats in the Yellow River wetland in Henan Province. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21): 8578-8588.

不同积水生境对河南黄河湿地植物多样性的影响

齐睿¹, 王春平², 李子豪³, 周紫羽³, 王晶⁴, 刘意帆³, 叶永忠³, 赵河⁵, 陈云³, 袁志良^{3,*}

1 河南农业大学风景园林与艺术学院, 郑州 450002

2 河南省林业调查规划院, 郑州 450045

3 河南农业大学生命科学学院, 郑州 450002

4 河南省伏牛山南北过渡带森林生态系统野外科学观测研究站, 郑州 450000

5 河南省地质调查院, 郑州 450001

摘要: 湿地作为水陆交替的过渡地带, 承担着重要的生态服务功能, 湿地植物是生态功能作用发挥的基础。不同积水生境与湿地植物物种组成和分布关系密切。黄河流域是国家的重要生态屏障, 湿地面积广阔, 河南黄河湿地作为黄河湿地的重要组成部分, 其积水生境对植物多样性的影响尚不清晰。为研究河南黄河湿地植物的多样性现状以及积水生境对其植物多样性的影响, 采用样方和样线相结合的方法对河南省 7 个黄河湿地自然保护区中的湿地植物进行调查, 共设置样方 981 个。重点分析了不同积水生境湿地植物的主要群系和物种组成, 研究了各生境物种多样性和群落多样性特征(α 多样性), 对比了的不同积水生境植物物种组成相似性和群落间相似程度(β 多样性), 明确了各生境的植物物种排序和指示种。结果表明: (1) 河南黄河湿地植物群系以草本群系为主, 共发现 188 种湿地植物, 分属 56 科, 138 属; (2) 不同积水状况湿地植物物种丰富度大小依次为: 季节性积水 > 永久性积水 > 间歇性积水 > 季节性水涝, 主要群系总数与物种丰富度趋势表现一致; (3) 不同积水生境湿地植物的物种组成存在显著差异, 季节性积水和永久性积水生境中植物物种组成相似性和群落间相似程度最高, 各积水生境均有明显的优势种和指示种。河南黄河湿地积水生境在不同流段差异显著, 不同积水生境下植物多样性和主要植物群系有明显区别, 进行湿地生态建设时, 建议优先保护季节性积水生境, 减少季节性水涝生境的产生, 以达到维持物种多样性, 发挥湿地最大生态价值的目的。

关键词: 黄河; 湿地植物; 积水生境; 生物多样性

Difference of plant diversity in different waterlogging habitats in the Yellow River wetland in Henan Province

QI Rui¹, WANG Chunping², LI Zihao³, ZHOU Ziyu³, WANG Jing⁴, LIU Yifan³, YE Yongzhong³, ZHAO He⁵, CHEN Yun³, YUAN Zhiliang^{3,*}

1 College of Landscape Architecture and Art, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

2 Henan Forestry Investigation and Planning Institute, Zhengzhou 450045, China

3 College of Life Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

4 Field Scientific Observation and Research Station of Transitional Zone of South and North in the Funiu Mountains in Henan, Zhengzhou 450000, China

5 Henan Institute of Geological Survey, Zhengzhou 450001, China

基金项目: 国家自然科学基金(U1704115); 河南省自然资源厅科技攻关项目(豫财招标采购-2021-178-9); 河南省林业科学研究院基本科研业务费(2021JB02014); 河南省自然科学基金青年基金(212300410166)

收稿日期: 2020-07-20; **网络出版日期:** 2021-07-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zlyuan163@163.com

Abstract: As a transitional zone between land and water, wetland plays an important role in ecological services. Wetland plants are the basis of ecological function. The composition and distribution of plant species are closely related to different water habitats. The Yellow River basin is an important ecological barrier for the country, and the wetland area is vast. The Yellow River wetland in Henan is an important part of the Yellow River wetland. However, the effects of waterlogged habitats on plant diversity are still unclear. In order to study the plant diversity of the Yellow River wetland in Henan Province and the influence of waterlogging habitats on its plant diversity, we utilized the method of combining quadrat and transect to investigate wetland plants in seven Yellow River wetland nature reserves in Henan Province. In these reserves, a total of 981 quadrats were set for investigation. This research focused on analyzing the composition of main flora and species of wetland plants in different waterlogging habitats. Therefore, we studied the characteristics of species diversity and community diversity (α diversity) in different habitats, and compared the similarity of plant species composition and degree of similarity between communities (β diversity) in different waterlogging habitats. Moreover, the sequence and indicator species of plant species in the seven habitats were also clearly identified. The results show that: (1) Herbaceous flora is the main flora in Henan Yellow River wetland. A total of 188 species of wetland plants, belonging to 138 genera and 56 families, were found. (2) Under different standing water conditions, the plant species richness was in the order of seasonal ponding > permanent ponding > intermittent ponding > seasonal waterlogging. In addition, the total number of major communities was consistent with the trend of species richness. (3) There are significant differences in plant species composition among different waterlogging habitats. The similarity of plant species composition and communities between seasonal ponding and permanent ponding habitats was the highest. There were obvious dominant species and indicator species in each waterlogging habitat. The hydrological habitats of the Yellow River wetland in Henan province were significantly different in different flow segments. There are obvious differences of plant diversity and main plant groups in different waterlogging habitats in the Yellow River wetland in Henan province. Under the circumstances, we suggest giving priority to the protection of seasonal ponding habitats and reducing the occurrence of seasonal waterlogging habitats during wetland ecological construction, so that we can achieve the purpose of maintaining species diversity and giving full play to the maximum ecological value of wetlands.

Key Words: the Yellow River; wetland plants; water accumulation; biodiversity

湿地为人类社会提供了许多重要的生态服务,如何有效改变湿地格局,增加湿地生态价值一直是植物学家和生态学家关注的重点^[1]。湿地植物多样性和水土保持密切相关,是衡量湿地生态服务价值和生态系统稳定性的重要指标^[2-3]。研究发现,湿地植物多样性主要受地下水、地表水、地形地貌或地表成分等非地带性因素影响^[4],积水生境作为湿地区分地下水和地表水时间分布的水文分类标准,与植被分布关系密切。已发现不同积水生境下其土壤水分和特性存在显著差异,从而与植被的空间分布关系密切^[5-6]。沼泽、湖泊等湿地类型中不同积水状况对湿地植物多样性的影响已经得到证明^[7-8]。河流湿地季节性水土差异较大,植物受河流径流量周期性变化影响,与积水环境的关系表现更为紧密^[9-10]。但目前关于河流湿地植物多样性的研究缺乏与河流的季节性联系,将河流湿地按照积水生境不同进行分类,能够更好地反映水文时间周期对植物多样性的影响,从而明确更具生态价值的湿地水文结构。

黄河是我国北方地区重要的“生态廊道”,黄河湿地是我国生态安全的重要屏障^[11]。由于黄河流域内各地的气候、地形、土壤和人类活动差别极大^[12],形成了各湿地间植物物种的巨大差异^[13]。河南省地处黄河中下游交汇区,这里黄河河床逐渐变宽,流速平缓,每年6月—10月受黄河汛期影响河道游荡不定,形成了大面积滩涂和泛洪平原湿地。因为黄河存在春夏连旱、旱涝急转的特点,中下游水域调控不当会给流域增加更多的生态风险^[14],湿地作为河流与陆地的缓冲区,在此承担了极其重要的生态安全功能。随着黄河湿地得到重视,退耕还湿、退滩还植举措相继展开,了解湿地植物多样性与河流季节性水文环境的关系,才能合理规划湿

地范围,从而达到更高的生态收益。但目前关于河南黄河湿地的研究,内容上主要集中在各保护区动植物资源本底调查^[15-16]等基础普查方面,缺乏该区域生境与生物多样性的关联性研究,其中积水生境作为影响河流湿地植被的重要因素,对河南黄河湿地植物多样性的影响尚不清晰。另外,目前针对河南黄河湿地的研究在尺度上多以单个自然保护区为研究对象^[17],缺少整体性研究,植物多样性在河南黄河流域的整体分布情况尚不清楚。

为了探究河南黄河湿地中不同积水生境的植物多样性差异,本研究选择黄河中下游河南区段的 7 个湿地自然保护区作为研究对象,研究区域涵盖所有黄河流经河南的自然保护区。调查保护区内湿地植物的物种组成和所处积水生境,分析不同生境下湿地植物物种丰富度和多样性指数的变化,以明确河南黄河湿地植物对不同积水生境的偏好,为黄河湿地生物多样性保护和流域生态建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域共涉及河南省黄河湿地自然保护区 7 个(表 1),隶属于河南省 6 个省辖市 20 个县市区。所属区域为暖温带半湿润型季风气候,年平均气温为 12—16℃,年平均降水量为 500—900 mm,年蒸发量 1300—2100 mm,年均相对湿度 65%—77%,河南黄河湿地地形复杂,海拔整体呈由西向东逐渐降低,土壤以黄棕壤和黄沙壤为主^[18-19]。

表 1 河南省 7 个黄河湿地自然保护区地理信息概况

Table 1 Geographical information overview of 7 Yellow River wetland nature reserves in Henan Province

湿地名称 The name of wetlands	海拔范围 Altitude range/m	经度范围 Longitude range/(° E)	纬度范围 Latitude range/(° N)	平均水位 The average water level/m
河南黄河湿地国家级自然保护区 Henan Yellow River wetland national nature reserve	60—335	110°22′49″— 115°00′23.59″	34°34′35.10″— 35°58′12″	119
河南开封柳园口湿地省级自然保护区 Henan Kaifeng Liuyankou wetland provincial nature reserve	51—77	114°15′57″— 114°49′55″	34°28′24″— 34°59′49″	74.5
河南濮阳黄河湿地省级自然保护区 Henan Puyang Yellow River wetland provincial nature reserve	38—65	114°42′27.8″— 115°10′04.4″	34°56′41.4″— 35°25′38.5″	59
河南省郑州黄河国家湿地公园 Henan Zhengzhou Yellow River national wetland park	78—112	113°29′23″— 113°39′24″	34°54′25″— 34°55′30″	93
河南新乡黄河湿地鸟类国家级自然保护区 Henan Xinxiang Yellow River wetland birds national nature reserve	57—71	114°25′30.1″— 114°47′42.3″	34°55′46.4″— 35°56′13.9″	62
河南郑州黄河湿地省级自然保护区 Henan Zhengzhou Yellow River wetland provincial nature reserve	75—107	112°54′49″— 113°54′59″	34°50′04″— 34°57′59″	93
三门峡库区湿地 Sanmenxia reservoir area wetland	285—325	110°22′48″— 111°15′25.9″	34°34′17.2″— 34°48′23.1″	317

1.2 样地设置

采用样方和样线相结合的方法,为充分减少不同保护区间植物群落差异,在每个保护区垂直河道方向设置勘察样线,共计 7 条。在每条样线上按照积水生境类型设置样地进行调查,在样地中根据主要植物群落情况分别设置乔木样方,灌木样方和草本样方。乔木样方大小为 20 m×20 m,灌木样方 4 m×4 m,草本样方 1 m×1 m。采取定性调查与定量调查相结合的方式,乔木调查主要植物群系、优势物种的平均高度、平均冠幅、平均胸径和株数;灌木调查主要植物群系、优势物种的平均盖度、平均高度和株数;草本调查植物群系、优势物种的平均盖度和平均高度。样地位置使用 GPS 进行定位,同时记录样地地理坐标、海拔、主林层和小生境等样

方生境指标。

研究设置乔木样方 118 个,灌木样方 21 个,草本样方 792 个,共计 981 个。其中河南黄河湿地国家级自然保护区 608 个,河南开封柳园口湿地省级自然保护区 89 个,河南濮阳黄河湿地鸟类国家级自然保护区 20 个,河南省郑州黄河国家湿地公园 30 个,河南新乡黄河湿地鸟类国家级自然保护区 22 个,河南郑州黄河湿地省级自然保护区 48 个,三门峡库区湿地 164 个样方。具体分布如图 1。

根据地表水与地下水存在时间不同,将样方分为不同的积水生境类型,具体分为季节性积水生境、间歇性积水生境、季节性水涝生境和永久性积水生境。具体划分依据为:季节性积水生境指的是地表被积水半永久覆盖,且当地表无积水时地下水充足;间歇性积水生境为地表积水时间很短暂,且当地表无积水时地下水并不充足;季节性水涝为地表长时间被水饱和,但地下水并不充足;永久性积水生境为除了特别干旱年份地表永久被天然水覆盖,地下水长时间表现丰盈。各保护区样方中,共计季节性积水生境样方 652 个、季节性水涝生境 10 个、间歇性积水生境 66 个和永久性积水生境 253 个。各自然保护区内均有季节性积水生境和永久性积水生境出现,除了河南濮阳黄河湿地省级自然保护区以永久性积水生境为主外,河南省其他自然保护区中季节性积水生境最多。季节性水涝仅在河南黄河湿地国家级自然保护区内出现,河南新乡黄河湿地鸟类国家级自然保护区和河南黄河湿地国家级自然保护区中存在间歇性积水生境。各保护区积水生境样方数量详见图 2。

图 1 本研究设置的 981 个样方的地理位置分布

Fig.1 Geographical location distribution of 981 quadrats set in this study

A: 三门峡库区湿地; B: 河南黄河湿地国家级自然保护区; C: 河南开封柳园口湿地省级自然保护区; D: 河南濮阳黄河湿地省级自然保护区; E: 河南省郑州黄河国家湿地公园; F: 河南新乡黄河湿地鸟类国家级自然保护区; G: 河南郑州黄河湿地省级自然保护区

1.3 数据分析

物种 α 多样性指数主要用于分析均匀生境下的物种多样性。从物种丰富度、物种多样性、优势度以及均匀度四个方面选择 Patrick 丰富度指数、Shannon 多样性指数、Simpson 优势度指数及 Pielou 均匀度指数^[20-21], 用于比较四种积水状况下植物群系的丰富度。

(1) Patrick 丰富度指数

$$D = S$$

(2) Shannon 多样性指数

$$H' = - \sum P_i \ln P_i / S$$

(3) Simpson 优势度 指数

$$D = 1 - \sum P_i^2$$

(4) Pielou 均匀度指数

$$J = H/\ln S$$

式中, S 为样方内物种的总数, P_i 是第 i 种的个体数。

物种 β 多样性指数用于比较两种不同群落、环境类型之间的相似程度, 选取 Jaccard 指数及 Sorenson 指数。Jaccard 指数及 Sorenson 指数越大, 证明两个群落及环境类型之间的相似程度越大。

(1) Jaccard 指数

$$C_j = a/(a+b+c) \times 100\%$$

(2) Sorenson 指数

$$C_s = 2a/(2a+b+c) \times 100\%$$

a 为两个生境或积水状况类型共有的物种数量, b 和 c 为两个生境或积水状况类型所独有的物种数量。

所有数据基于 R 语言软件进行数据分析和图像绘制。通过运行“betadisper”函数来评估不同积水划分对湿地植物 β 多样性的影响, 并进行方差分析, 比较不同积水生境间湿地植物多样性差异, 使用“vegan”包中的“Betadisper”命令实现^[22]。通过 PCoA (principal co-ordinates analysis) 排序, 将不同积水生境的植物物种的特征值和特征向量进行排序, 选择主要排在前两位的特征值, 绘制图像使物种间差异可视化。使用“indicspecies”软件包对不同积水生境的植物进行指示种分析^[23]。指示种分析的因变量为湿地植物物种丰富度矩阵, 计算物种与样本之间关系的强度与生态位宽度, 筛选出不同积水生境的指示物种 ($P \leq 0.05$ 显著性水平)。

2 结果与分析

2.1 湿地植物群系及物种组成

河南黄河湿地保护区主要植被群系以草本群系为主, 包含了莎草型湿地植被、禾草型湿地植被和杂类草湿地植被等, 是典型的草丛湿地植被型湿地^[24]。湿地中出现最多的植物群系为芦苇群系 (*Phragmites australis*), 频度大于百分之五的植物群系有三个, 分别是芦苇群系、狗牙根群系 (*Cynodon dactylon*) 和宽叶香蒲群系 (*Typha latifolia*), 具体频率和生境分布详见表 2。调查发现, 湿地植物中不仅包含了黄河中游分布广泛的稗群系 (*Echinochloa crus-galli*)、狗尾草群系 (*Setaria viridis*)、假苇拂子茅群系 (*Calamagrostis pseudophragmites*) 和蒹蒿群系 (*Artemisia anethoides*), 还有黄河下游湿地常见的植物群系荻群系 (*Miscanthus sacchariflorus*)、蓟群系 (*Cirsium japonicum*) 和怪柳群系 (*Tamarix chinensis*)^[25-26]。

本次在河南黄河湿地 7 个自然保护区境内共发现 188 种植物, 分属 56 科, 138 属。含十种以上的科分别为菊科 (Asteraceae), 禾本科 (Poaceae), 豆科 (Fabaceae), 莎草科 (Cyperaceae) 4 科, 共计包含 88 种。其中菊科有 35 种, 禾本科有 30 种, 豆科有 13 种, 莎草科有 11 种。属内种数最多的是蒿属 (*Artemisia*), 含 9 个种, 其余较多是属有蓼属 (*Persicaria*)、莎草属 (*Cyperus*)、稗属 (*Echinochloa*)、眼子菜属 (*Potamogeton*) 等。绝大多数的属内只有一个物种, 共计 110 个, 占属总数的 78.57%。

调查发现, 出现频度最大的物种为芦苇 (*Phragmites australis*), 出现频度大于百分之五的物种有三个, 分别是芦苇、狗牙根 (*Cynodon dactylon*) 和狗尾草 (*Setaria viridis*)。这三个物种的分布最广泛, 但主要分布小生境却不尽相同, 芦苇主要分布在水中, 坑塘和河滩边, 狗牙根主要分布在河滩边和堤坝旁, 狗尾草主要分布在河岸边和河漫滩地带。其它出现频度较高的物种有葎草 (*Humulus scandens*), 异型莎草 (*Cyperus difformis*), 宽叶香蒲 (*Typha latifolia*), 苍耳 (*Xanthium strumarium*), 加杨 (*Populus × canadensis*), 酢浆草 (*Oxalis corniculata*), 阿尔泰狗娃花 (*Aster altaicus*), 具体频率和生境分布详见表 3。

图 2 不同自然保护区中不同积水生境样方数量

Fig. 2 Different nature reserves contain quadrat in different waterlogging habitats

表 2 河南黄河湿地高频出现植物群系

Table 2 High-frequency wetland plant formation of Yellow river in Henan

植物群系 Plant formation	频度 Frequency/%	积水生境分布 Distribution of stagnant water habitat
芦苇群系 <i>Phragmites australis</i> formation	9.54	季节性积水、间歇性积水、永久性积水
狗牙根群系 <i>Cynodon dactylon</i> formation	7.48	季节性积水、间歇性积水、永久性积水
宽叶香蒲群系 <i>Typha latifolia</i> formation	5.79	季节性积水、永久性积水
异型莎草群系 <i>Cyperus difformis</i> formation	4.06	季节性积水、间歇性积水
苍耳群系 <i>Xanthium strumarium</i> formation	3.83	季节性积水、间歇性积水、永久性积水
早熟禾群系 <i>Poa annua</i> formation	3.48	季节性积水、间歇性积水
加杨 <i>Populus×canadensis</i> formation	2.63	季节性积水、季节性水涝、间歇性积水、永久性积水
葎草群系 <i>Humulus scandens</i> formation	2.58	季节性积水、间歇性积水、永久性积水
灯心草群系 <i>Juncus effusus</i> formation	2.49	季节性积水、永久性积水
苘麻群系 <i>Abutilon theophrasti</i> formation	2.41	季节性积水、永久性积水

表 3 河南黄河湿地高频出现植物

Table 3 High-frequency wetland plant of Yellow river in Henan

物种 Species	科 Family	频度 Frequency/%	积水生境分布 Distribution of stagnant water habitat
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	禾本科 Poaceae	7.71	季节性积水、间歇性积水、永久性积水
狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	禾本科 Poaceae	6.15	季节性积水、间歇性积水、永久性积水
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	禾本科 Poaceae	5.66	季节性积水、间歇性积水、永久性积水
葎草 <i>Humulus scandens</i>	桑科 Moraceae	4.46	季节性积水、季节性水涝、间歇性积水、永久性积水
异型莎草 <i>Cyperus difformis</i>	莎草科 Cyperaceae	3.97	季节性积水、间歇性积水、永久性积水
宽叶香蒲 <i>Typha latifolia</i>	香蒲科 Typhaceae	3.39	季节性积水、间歇性积水、永久性积水
苍耳 <i>Xanthium strumarium</i>	菊科 Asteraceae	2.94	季节性积水、间歇性积水、永久性积水
加杨 <i>Populus×canadensis</i>	杨柳科 Salicaceae	2.36	季节性积水、间歇性积水、永久性积水
酢浆草 <i>Oxalis corniculata</i>	酢浆草科 Oxalidaceae	2.14	季节性积水、季节性水涝、永久性积水
阿尔泰狗娃花 <i>Aster altaicus</i>	菊科 Asteraceae	2.01	季节性积水

2.2 不同积水生境湿地植物多样性

不同积水生境湿地植物物种丰富度差异显著,在科属种水平丰富度表现一致,即:季节性积水>永久性积水>间歇性积水>季节性水涝(图 3)。由湿地主要植物群系种类统计可知,主要群系种类总数与物种丰富度整体趋势表现一致:季节性积水>永久性积水>间歇性积水>季节性水涝(图 4)。其中季节性水涝中没有草本群系,间歇性积水不存在灌木群系。总体上看,湿地植被群系以草本群系为主,每种积水生境都存在乔木群系,灌木群系最少,季节性积水、永久性积水和间歇性积水的草本群系丰富度很高远超木本植物群系,而季节性水涝中以灌木群系为主。

不同积水状况下植物物种 α 多样性指数差异显著(图 5)。其中 Shannon 多样性指数和 Simpson 优势度指数四种积水生境的趋势相同,与物种组成趋势相反,表明季节性积水植物群落复杂程度最高,所包含的植物信息量最大,群落各植被的优势最不明显。Pielou 均匀度指数间歇性积水最大,其植物群落分布最为均匀。整体

图 3 不同积水生境湿地植物物种丰富度

Fig.3 Species richness of wetland plants in different standing water habitats

上来看,季节性积水和永久性积水的物种 α 多样性指数差异较小,但其他类生境比较差异很大,这两类积水生境的植物群落格局上更为相似。

图4 不同积水生境下主要植物群系种类统计

Fig.4 Statistics of main plant groups in different standing water habitats

2.3 不同积水生境湿地植物物种组成相似性

不同积水生境间植物物种的差异如图6所示,四种积水生境下特有科数目在科、属、种、植物群系四个水平上表现一致,均为:季节性积水>永久性积水>间歇性积水>季节性水涝。不同生境两两相比之下,季节性积水和永久性积水各水平共有数均为最大、相似度最高,物种和群系最为相似。季节性水涝和其他三种生境不仅各水平的共有数量最少,相似度远低于其他三种生境,与其他生境的物种差异最大。从科水平上看四种积水情况共有科有5个,分别为豆科(Fabaceae)、唇形科(Lamiaceae)、杨柳科(Salicaceae)和旋花科(Convolvulaceae)。在属、种和植物群系水平上比较,四种积水生境共有植物仅存加杨(*Populus × canadensis*)1种。与同科水平上的关联程度相比,季节性水涝和其他三种积水状况所有科共有,属中1个与所有生境共有,5个属与永久性积水共有,即在科水平上季节性水涝与其他三种积水生境都有关系,但是实际上与永久性积水的关系更密切。在种水平的对比中,与在科属水平上比较不同的是,季节性水涝出现了一个特有种黄荆(*Vitex negundo*),表明虽然在属水平关联程度上永久性积水和季节性水涝最为接近,但还存在区别。由图6可以看出,季节性积水与永久性积水的共有群系与种水平上对比有所减少,季节性积水与永久性积水的物种相近,但主要植物群系仍存在差异;季节性水涝和其他三种积水情况的共有群系数依旧最少,即季节性水涝与其它生境在物种和主要群系方面都有很大差别。

为了进一步比较两种不同积水生境中植物群落的相似程度,选取 Sorensen 指数和 Jacard 指数,结果如图7。永久性积水与季节性积水的相似性最大,Sorensen 指数为 0.56, Jacard 指数为 0.3889,共同物种高达 70 种,优势物种也较为相似。间歇性积水与永久性积水、季节性积水两种生境的 Sorensen 指数和 Jacard 指数十分接近,表明间歇性积水与两种生境的共同物种大部分同时也是永久性积水和季节性积水的共同物种。季节性水涝与其他三种生境 β 多样性指数都很小,即它与其他生境植物群落的相似程度最低。

图5 不同积水状况植物 α 多样性指数分析

Fig.5 Analysis of α diversity index of plant under different standing water habitats

图 6 不同积水生境下湿地植物的关联

Fig.6 Association of wetland plants in different standing water habitats

图 7 不同积水状况植物 β 多样性指数分析Fig.7 Analysis of β diversity index of plant under different standing water habitats

2.4 不同积水生境间物种排序与指示种分析

由图 8 可知,通过 Betadisper 分析和方差分析,不同积水生境中植物的分布存在显著差异 ($F=95.732$, $P<0.001$)。季节性积水与永久性积水物种组成最为相似,季节性水涝与其它三种积水生境的物种组成均存在很大差异。

指标种分析表明,4 种积水生境共有 33 个指标种。季节性积水、季节性水涝、间歇性积水和永久性积水分别有 11 种、5 种、11 种和 6 种指示种。季节性积水主要由阿尔泰狗娃花(*Aster altaicus*)、艾(*Artemisia argyi*)、车前(*Plantago asiatica*)等组成。季节性水涝生境主要由白刺花(*Sophora davidii*)、黄荆(*Vitex negundo*)、加杨(*Populus × canadensis*)等组成。间歇性积水主要由斑茅(*Saccharum arundinaceum*)、臭草(*Melica scabrosa*)、大车前(*Plantago major*)等组成。永久性积水主要由齿果酸模(*Rumex dentatus*)、春蓼(*Polygonum persicaria*)、浮萍(*Lemna minor*)等组成(表 4)。

3 结论与讨论

本研究在 7 个河南黄河湿地保护区中共收集到植物 188 种,隶属 56 科,138 属。湿地植物的优势科菊科(*Asteraceae*),禾本科(*Poaceae*),豆科(*Fabaceae*)和莎草科(*Cyperaceae*),这与前人对于郑州黄河湿地自然保护区^[27]的植物资源调查结果基本一致。研究发现出现频率最高的芦苇(*Phragmites australis*),狗牙根(*Cynodon dactylon*)和狗尾草(*Setaria viridis*)是暖温带-亚热带湿润半湿润气候条件下平原湿地中的优势物种,符合河南的地理特征和气候条件。湿地植物包含了黄河中游和下游分布广泛的植物群系,体现了河南黄河湿地植物物种组成的中下游过渡性特征。

图 8 积水生境对湿地植物 β 多样性的影响

Fig.8 Effect of water conditions on beta diversity of the wetland plants by running the betadisper function

采用方差分析来检验这些距离在演替之间的差异;PCoA1 和 PCoA2 分别是“betadisper”分析中的第一个和第二个排序轴

表 4 4 种积水生境的指示种分析 ($P \leq 0.05$ 显著性水平)

Table 4 Indicator species analysis in four water conditions ($P \leq 0.05$ level of significance)

物种 Species	积水生境 Water conditions	P	物种 Species	积水生境 Water conditions	P
阿尔泰狗娃花 <i>Aster altaicus</i>	季节性积水	0.01	斑茅 <i>Saccharum arundinaceum</i>	间歇性积水	0.01
艾 <i>Artemisia argyi</i>	季节性积水	0.01	怪柳 <i>Tamarix chinensis</i>	间歇性积水	0.03
车前 <i>Plantago asiatica</i>	季节性积水	0.01	臭草 <i>Melica scabrosa</i>	间歇性积水	0.01
酢浆草 <i>Oxalis corniculata</i>	季节性积水	0.01	大车前 <i>Plantago major</i>	间歇性积水	0.01
打碗花 <i>Calystegia hederacea</i>	季节性积水	0.02	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	间歇性积水	0.01
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	季节性积水	0.01	小蓬草 <i>Erigeron canadensis</i>	间歇性积水	0.01
鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	季节性积水	0.05	狼尾草 <i>Pennisetum alopecuroides</i>	间歇性积水	0.02
节节麦 <i>Aegilops tauschii</i>	季节性积水	0.03	荔枝草 <i>Salvia plebeia</i>	间歇性积水	0.01
葎草 <i>Humulus scandens</i>	季节性积水	0.03	牡蒿 <i>Artemisia japonica</i>	间歇性积水	0.01
马齿苋 <i>Portulaca oleracea</i>	季节性积水	0.03	木犀草 <i>Reseda odorata</i>	间歇性积水	0.03
异型莎草 <i>Cyperus difformis</i>	季节性积水	0.01	茵草 <i>Beckmannia syzigachne</i>	间歇性积水	0.03
白刺花 <i>Sophora davidii</i>	季节性水涝	0.01	稗 <i>Echinochloa crus-galli</i>	永久性积水	0.02
黄荆 <i>Vitex negundo</i>	季节性水涝	0.01	齿果酸模 <i>Rumex dentatus</i>	永久性积水	0.01
加杨 <i>Populus × canadensis</i>	季节性水涝	0.01	春蓼 <i>Polygonum persicaria</i>	永久性积水	0.01
菟丝子 <i>Cuscuta chinensis</i>	季节性水涝	0.03	浮萍 <i>Lemna minor</i>	永久性积水	0.01
紫德槐 <i>Amorpha fruticosa</i>	季节性水涝	0.05	旱柳 <i>Salix matsudana</i>	永久性积水	0.01
			喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	永久性积水	0.01

河南黄河湿地的积水生境多为季节性积水,这是因为黄河有径流时空分布不均的特点。特别是在黄河中

下游区域,汛期径流量占全年的 60% 以上^[28],主要集中在几场暴雨时期,而非汛期降水普遍偏少,水文环境鲜明的季节变化决定了河南黄河湿地以季节性积水为主。研究发现,7 个保护区的平均水位呈由西向东依次递减趋势,位于中上游的三门峡库区湿地和河南黄河湿地国家级自然保护区平均水位分别为 317 m 和 119 m,其他保护区水位均在 100 m 以下。全年维持的较高水位使得永久性积水生境主要集中在三门峡库区湿地和河南黄河湿地国家级自然保护区两个保护区内,稳定充沛的水文环境使季节性积水和永久性积水的植物多样性显著高于季节性水涝和间歇性积水。

各积水生境间的植物多样性差异显著,是由水文条件的不同决定的。在湿地生态系统中,水分状况直接影响土壤物理特性差异,从而导致了地表植物群落类型的不同^[29]。四种积水生境植物中,季节性积水物种多样性最高,这是因为季节性积水在一段时间内生境条件稳定,较高的地下水位能够使适应不同水分条件的中旱生植物和湿生植物生存。季节性水涝物种多样性最小,一方面是因为河南黄河湿地中只有少量该类型生境存在,使得样方数量较少;另一方面,调查发现该生境中只有乔木和灌木植物,表明地表水的饱和,使原有中生植物和旱生植物不能适应水环境逐渐死亡^[30],同时地下水的短缺使水生植物亦不能存活,所以只有部分抗逆性较强的木本植物能够生存。

通过对不同积水生境间植物物种和群系的对比,发现季节性积水和永久性积水生境的关联程度最高。调查发现,随着保护区的平均水位由西向东依次递减,季节性积水和永久性积水生境的比例却在逐渐增加,这说明水位的下降使得永久性积水因地表水不足而转变为季节性积水生境,推测两种生境的水文环境相较于其他生境最为接近,而地表水和地下水水位能够直接影响湿地植物群落的物种组成和多样性^[8],因此两种生境也就形成了更为相似的植物群落。也有研究表明,湿地中常年积水区和季节性积水区土壤活性有机碳含量都处于较高水平,与其他积水生境差异显著^[31],土壤含水量是影响生物多样性的主要因素^[32],所以季节性积水和永久性积水不仅有较多的共同物种,而且植物比其他生境更为丰富。

综上所述,不同积水生境在河南黄河湿地的分布和湿地间植物群落存在显著差异,各生境水文环境反映了植物物种的丰富程度。在未来河南黄河湿地生物多样性保护方面,建议优先保护季节性积水和永久性积水生境区域,以最大限度的保护植物物种丰富程度;在生态建设方面,注意增加水系连通性以增强水文环境的稳定性^[33],减少季节性水涝生境的形成。为方便对比,本研究 7 个湿地的植物调查选择在同一季节进行,但黄河湿地的水文环境存在明显的季节性变化,实验没有将积水情况以年周期定量,仅以水文时间周期做了分类,因此无法确切得出水文环境与湿地植物多样性的定量关系。随着更多观测数据和积累,不同积水生境的年周期水分变化会更加明确,未来有望更细致地分析和理解水环境因子对河南黄河湿地植物多样性的作用机制。

参考文献 (References):

- [1] Engelhardt K A M, Ritchie M E. Effects of macrophyte species richness on wetland ecosystem functioning and services. *Nature*, 2001, 411(6838): 687-689.
- [2] Tilman D, Lehman C L, Thomson K T. Plant diversity and ecosystem productivity: theoretical considerations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1997, 94(5): 1857-1861.
- [3] Chang J, Fan X, Sun H Y, Zhang C B, Song C C, Chang S X, Gu B J, Liu Y, Li D, Wang Y, Ge Y. Plant species richness enhances nitrous oxide emissions in microcosms of constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 2014, 64: 108-115.
- [4] 刘坤, 戴俊贤, 唐成丰, 王立龙, 顾长明, 卢萍, 周小春, 周守标. 安徽湿地维管植物多样性及植被分类系统. *生态学报*, 2014, 34(19): 5434-5444.
- [5] 许佳宁. 湿地植物多样性及功能性状对土壤水分变化的响应[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [6] 谢彬山, 朱海丽, 李本锋, 胡夏嵩. 黄河源区曲流滨河植被空间分布与土壤特性关系研究. *泥沙研究*, 2019, 44(6): 66-73.
- [7] 周晓彤. 生境类型及积水状况对南四湖湖滨带湿地草本植物多样性的影响[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [8] 王铭, 曹议文, 王升忠, 李鸿凯, 董彦民, 徐志伟, 徐娜, 王国栋. 水位和草丘微地貌对巴音布鲁克高寒沼泽植物群落物种多样性的影响. *湿地科学*, 2016, 14(5): 635-640.

- [9] 田华丽, 夏艺, 梁士楚, 田丰, 吴华静, 覃盈盈. 桂林漓江湿地植被种类组成及其区系成分. 湿地科学, 2015, 13(1): 103-110.
- [10] 娄彦景, 赵魁义, 马克平. 洪河自然保护区典型湿地植物群落组成及物种多样性梯度变化. 生态学报, 2007, 27(9): 3883-3891.
- [11] Meng W Q, He M X, Hu B B, Mo X Q, Li H Y, Liu B Q, Wang Z L. Status of wetlands in China: a review of extent, degradation, issues and recommendations for improvement. Ocean & Coastal Management, 2017, 146: 50-59.
- [12] 钱崇, 吴中伦. 黄河流域植物的分布概况. 地理学报, 1954, 20(3): 267-278.
- [13] 李帅, 张婕, 上官铁梁, 郭东罡. 黄河中游湿地植物分类学多样性研究. 植物科学学报, 2015, 33(6): 775-783.
- [14] 刘继平. 河南黄河湿地资源现状与保护. 中南林业调查规划, 2015, 34(3): 5-8.
- [15] 张志铭, 张璐, 叶永忠. 郑州黄河湿地自然保护区植被群落物种多样性调查. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2010, 31(2): 81-85.
- [16] 赵腾飞, 郭准, 郭净净, 李杰峰, 刘洋洋, 马朝红. 黄河湿地孟津段生态环境状况及对策研究. 西北林学院学报, 2019, 34(1): 170-174, 197-197.
- [17] 罗先香, 单宇, 杨建强. 黄河口及邻近海域浮游植物群落分布特征及与水环境的关系. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 048(004): 16-23.
- [18] 廖秉华. 黄河流域河南段不同环境梯度下的植物多样性及其动态研究[D]. 开封: 河南大学, 2013.
- [19] 郭静静. 黄河流域河南段不同环境梯度下菊科植物多样性研究[D]. 开封: 河南大学, 2011.
- [20] Benayas R, José M, Scheiner S M. Plant diversity, biogeography and environment in Iberia: patterns and possible causal factors. Journal of Vegetation Science, 2002, 13(2): 245-258.
- [21] Chesson P. Mechanisms of maintenance of species diversity. Annual Review of Ecology and Systematics, 2000, 31: 343-366.
- [22] Simpson G L, Solymos P, Stevens M, Wagner H. vegan: Community Ecology Package. time international, 2010.
- [23] De Cáceres M. How to Use the Indicspecies Package (ver. 1.7.1). Catalonia: Centre Tecnològic Forestal de Catalunya, 2013.
- [24] 严承高, 张明祥. 中国湿地植被及其保护对策. 湿地科学, 2005, 3(3): 210-215.
- [25] 王雪宏, 栗云召, 孟焕, 董洪芳, 郭岳, 佟守正. 黄河三角洲新生湿地植物群落分布格局. 地理科学, 2015, 35(8): 1021-1026.
- [26] 张天举, 陈永金, 刘加珍. 黄河三角洲湿地不同植物群落土壤盐分分布特征. 浙江农业学报, 2018, 030(011): 1915-1924.
- [27] 孙浩冉, 孙森. 郑州黄河湿地自然保护区植被组成及其区系成分. 湿地科学, 2018, 16(2): 185-195.
- [28] 王金花, 康玲玲, 史学建, 王云璋, 王玲玲. 黄河中游多沙粗沙区近 40 年降水特征分析. 干旱区资源与环境, 2007, 21(11): 44-47.
- [29] 侯翠翠. 水文条件变化对三江平原沼泽湿地土壤碳蓄积的影响[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2012.
- [30] 仲雨清. 巴音布鲁克草原湿地景观格局变化及其水文驱动机制研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2015.
- [31] 吴江琪, 马维伟, 李广, 王辉, 罗永忠, 聂志刚, 薛景文. 尕斯库勒湖湿地沼泽化草甸中不同积水区土壤活性有机碳含量. 湿地科学, 2017, 15(1): 137-143.
- [32] 聂莹莹, 李新娥, 王刚. 阳坡-阴坡生境梯度上植物群落 α 多样性与 β 多样性的变化模式及与环境因子的关系. 兰州大学学报: 自然科学版, 2010, 46(3): 73-79.
- [33] 韩广轩, 牛振国, 栾兆擎, 王光美, 张俪文, 管博. 河口三角洲湿地健康生态圈构建: 理论与方法. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2787-2796.