

黄河坝下湿地不同景观类型植被演变特征及驱动力

窦明^{1,2}, 米庆彬¹, 张佳男³, 许林军⁴, 杜宗达³, 许伟伟³

(1. 郑州大学 水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 生态与环境学院, 河南 郑州 450001; 3. 河南省海河流域水利事务中心, 河南 新乡 453005; 4. 河南省西霞院水利枢纽输水及灌区工程建设管理局, 河南 焦作 454002)

摘要:为摸清湿地不同景观类型植被群落特征演变及驱动力,对黄河中游西霞院坝下吉利黄河湿地不同景观类型植被群落的生长特征和多样性特征的演变规律进行研究。通过原位调查实验、遥感影像解译,构建基于随机森林的草本植被地上生物量反演模型,分析不同景观类型植被群落的生长特征和多样性特征的演变规律,识别环境因子对不同景观类型植被群落特征演变的驱动作用。结果表明:研究区植被覆盖度等级以高植被覆盖为主,其次是较高植被覆盖;草本植被平均地上生物量整体处于较低植区和中植区,2018—2023年平均地上生物量呈增大-减小-增大的变化趋势,分别于2019年和2022年达到最大值和最小值,平均地上生物量分别为 $331\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $244\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$;滩涂湿地植被表现出湿生植物、中生植物与盐生植物共生的特征;土壤养分因子与植被群落年内特征变化具有显著的相关关系,土地利用类型变化对植被覆盖度有显著影响,尤其是受人类活动影响较大的中等、低植被覆盖区域。

关键词:景观类型; 植被群落特征; 植被覆盖度; 反演模型; 地上生物量

中图分类号: P33; P901 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2026.03.021

湿地是地球生态环境的重要组成部分,与森林、海洋并称为地球的三大生态系统。湿地生态系统独特和复杂的运行机制,致使其对外界干扰极为敏感,尤其是人类活动的加剧,对其稳定性造成了严重威胁。因此,加强湿地生态系统的保护与修复,深入研究湿地生态系统的演变规律及其对水文情势、土壤等的响应,对维护生态平衡、提升湿地生态服务功能具有重要意义。

湿地土地利用类型在人类活动的干扰下发生变化,致使景观格局也发生变化,进而引发生态风险^[1-2]。植被群落特征作为表征景观格局变化的重要参数,其变化反映了景观格局的演变。植被群落特征的传统地面调查虽然精度较高,但耗时耗力且难以实现大范围动态监测。具有覆盖范围广、重访周期短、数据获取成本低等优势遥感技术已成为湿地植被群落特征获取和估算的重要手段。众多学

者采用 Landsat 系列^[3]、MODIS^[4]、Sentinel-1^[5]、Sentinel-2^[6]、高分系列^[7]等对湿地植被群落特征开展了深入的研究,探讨了湿地面积变化的空间格局及其对生态的影响^[8],揭示了影响湿地演变的主要驱动因子^[9],分析了湿地景观格局的动态演变^[10]。但上述研究多集中于区域尺度或湿地某一景观类型的研究与分析,未发现针对湿地特殊景观类型(如嫩滩)的研究。

嫩滩作为特殊的湿地景观类型,具有初级生产力和植被群落简单的特点^[11],但因其常位于坡度较低和季节性洪水淹没的地区,具有极大的不稳定性。近年来,受气候变化和人类活动的影响,嫩滩区域向着稳定的趋势发展,其在生态系统保护、岸堤稳定性修复、水体污染物输移等方面的作用逐渐凸显。针对水文、土壤和植被之间的相互关系和作用机制也成为嫩滩生态系统研究的重点^[12]。目前已有学者

收稿日期:2025-11-20;修订日期:2026-01-06

基金项目:河南省自然科学基金资助项目(242300421224);河南省西霞院水利枢纽输水及灌区工程科研项目(XXYSS/GQ-KYXM-05);郑州大学院士团队科研启动项目(13432340370)

作者简介:窦明(1975—),男,山东桓台人,郑州大学教授,博士,博士生导师,主要从事水资源与水环境研究,E-mail:dou_ming@163.com。

通信作者:米庆彬(1988—),男,河南开封人,郑州大学博士研究生,主要从事水资源与水环境研究,E-mail:miqingbin1119@126.com。

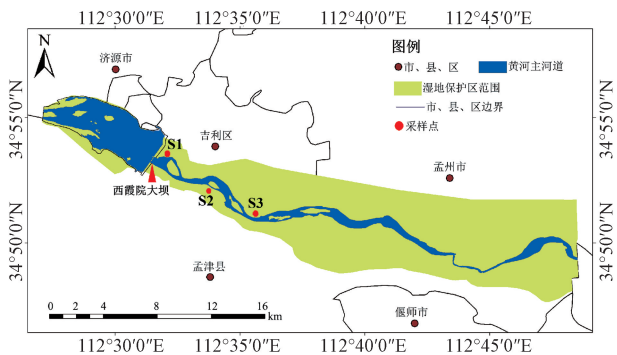
从水文变化对植被群落特征的影响^[13-14]、水文变化对土壤理化性质的改变及土壤微生物和土壤酶活性的影响^[15]、土壤特征改变对植被生长状况的影响^[16]、植被群落间的相互影响^[17]等方面开展研究,一定程度上解释了嫩滩水文、土壤和植被间的相互作用关系,但不同水文情势下植被群落格局变化及其驱动机制仍不明晰。

黄河坝下湿地国家级自然保护区为黄河流域重要的生态屏障,其保护和恢复对维护区域安全、保障黄河水资源的可持续利用具有重要意义。该保护区的孟津段位于黄河中游西霞院水库坝下,具有典型的湿地景观格局、完善的生态系统和丰富的生物多样性,在调节区域气候、净化水质及维持水平衡等方面发挥着关键作用。然而,受气候变化、人类活动及水文条件变化的影响,湿地生态系统面临面积缩减、功能退化等挑战。因此,深入研究该区域的生态系统演变规律及其对水文变化的响应,对揭示湿地生态系统健康、制定科学的保护与发展策略具有重要的科学价值和现实意义。本文以河南黄河湿地国家级自然保护区西霞院水库坝下湿地为研究区,基于原位实验和遥感影像解译,分析不同景观类型植被的演变特征,探究不同景观类型植被演变的驱动力,以期为湿地管理、滩涂保护及了解植被群落演替提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄河中游西霞院水库坝下至南开仪断面,面积约 170.26 km²,包含河南黄河湿地国家级自然保护区吉利片区,其中黄河主槽长度 39.6 km,如图 1 所示。研究区湿地植被以一年生或多年生草本植物为主,包括芦苇、假苇拂子茅、钻叶紫菀、小蓬草、朝天委陵菜、宽叶香蒲等。受水库调度和调水调沙的影响,区内滩区年过水量、过水次数、水湿天数逐步减少;部分主槽明显缩窄,漫滩流量逐渐增大,更多滩地被开发,引发河流廊道环境结构变化、湿地面积萎缩、生物多样性衰减、植被逆向演替等生态环境危机。根据黄河下游花园口水文站 1960—2022 年水沙监测数据,年均水量由 1960—1999 年的 389.08 × 10⁸ m³ 减少至 2000—2022 年的 289.98 × 10⁸ m³,减幅 25.47%,年均输沙量由 10.24 × 10⁸ t 锐减至 1.24 × 10⁸ t,减幅达 87.89%。同期汛期水量和输沙量占比也由 60.36% 和 84.25% 分别降低到 55.08% 和 73.72%,如图 2 所示。



注:该图基于审图号为 GS(2022)18735 的标准地图制作。

图 1 研究区范围及样地设置

Figure 1 The study area scope and sample plot setup

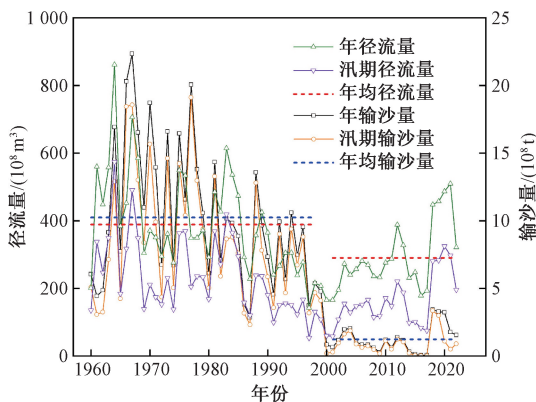


图 2 花园口站不同时期的水沙变化特征

Figure 2 The characteristics of water-sediment variations at Huayuankou Station in different periods

1.2 研究区嫩滩植被群落原位调查实验

1.2.1 样地设置与样品采集

在西霞院水库坝下 11 km 范围内选取不同人类活动干扰下的 3 处嫩滩(S1、S2 和 S3)作为实验样地,如图 1 所示,于 2023 年开展 3 次植被群落特征原位调查实验。每处样地设置 1~3 个 10 m × 10 m 的实验样方,记录地理位置,包括海拔、经度和纬度等,每一个实验样方内沿对角线设置 3 个 1 m × 1 m 的亚样方进行植物群落调查。调查的群落特征指标主要包括物种组成、每个物种株数、平均高度和盖度,并获取地上生物量。对于样方内草本植物株数的计量,如果草本植物成丛生型或莲座型生长,则分开计算株数;如果样方内为单一物种且均匀分布,则调查代表性的 25 cm × 25 cm 面积中的株数再按面积推算样方株数;如果样方内物种分布不均匀,则对 1 m × 1 m 亚样方进行全部调查。同时采用目测估计法获取植物群落盖度。地上生物量原则上将样方内所有植物沿地表剪取,在 105 °C 杀青后于 65 °C 下烘干至恒重,进而换算地上生物量;如果样方内呈单一物种均匀分布,则采集代表性的 50 cm × 50 cm 面积中的地上生物量再按面积推算样方总地上生物

量。最后,利用土钻法(内径 5 cm,长度 20 cm)在每个实验样地内随机采集 5 个土芯,将其充分混合,得到一个复合样品。将采集的植被与土壤样品放置于低温保存箱中保存,运回实验室等待进一步处理。同时,采用 MPM-160B 土壤水分速测仪现场测量不同深度(20 cm、60 cm 和 100 cm)的土壤含水量。

1.2.2 土壤样品采集及理化性质测定

将采集的土壤样品过筛(2 mm),并分为两份,其中一份样品在 -20 °C 下保存,用于无机氮的测定;另一份样品风干后研磨,用于 pH、总碳、总氮和全磷的测定。无机氮(即硝态氮和铵态氮)浓度采用连续流分析仪(Autoanalyser 3; Seal Analytical, GmbH Germany)测定经 2 mol·L⁻¹的 KCl 萃取后的溶液获得。土壤 pH 使用 pH 计(型号 pH-2, INESA Instrument)在土壤和水的体积比为 1:2.5 的土壤悬浮液中进行测定。采用元素分析仪(Vario EL III; Elementar, Langensfeld, Germany)测定土壤总碳和总氮。在 H₂SO₄ 和 HClO₄ 消解后,采用电感耦合等离子体-原子发射光谱仪(ICP-OES)(Optima 5300 DV, Perkin Elmer)测量全磷浓度。采用钼蓝比色法测定土壤有效磷浓度(Olsen & Sommers, 1982)。

1.3 基于原位实验的物种多样性计算

物种多样性通过多样性指数、丰富度指数、优势度指数和均匀度指数来衡量。其中多样性指数选择 Shannon-Wiener 指数(H),丰富度指数选择 Patrick 丰富度指数(R),优势度指数选择 Simpson 优势度指数(D),均匀性指数选择 Pielou 均匀度指数(E_{pi})。各指数的计算公式分别如式(1)~式(4)所示:

$$H = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i; \quad (1)$$

$$R = S; \quad (2)$$

$$D = \sum_{i=1}^s (N_i/N)^2; \quad (3)$$

$$E_{pi} = H/\ln S. \quad (4)$$

式中: S 为样地内的物种数目; P_i 为物种 i 的相对重要值, $P_i = N_i/N$; N_i 为物种 i 的数量; N 为所在样地的各个物种的数量之和。

1.4 基于遥感影像的植被覆盖度及草本植被地上生物量计算与反演

1.4.1 数据来源

卫星遥感数据采用 Sentinel-1 号 GRD 产品和 Sentinel-2 卫星 L1C 级数据产品,其中 Sentinel-1 数据类型为干涉宽幅 IW 模式下的 VH、VV 极化数据, Sentinel-2 选取 B2、B3、B4、B5、B6、B7、B8、B8a、B11、

B12 这 10 个波段的光谱信息。空间分辨率为 10 m。选择 2018—2023 年植被生长茂盛、植被覆盖度高的 8—10 月份期间云量低于 5% 时的影像。

1.4.2 基于 NDVI 的植被覆盖度计算

采用修正的像元二分模型^[18]计算植被覆盖度,计算公式如下:

$$FVC = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}). \quad (5)$$

式中: $NDVI_{max}$ 和 $NDVI_{min}$ 分别为区域内 $NDVI$ 的最大值和最小值,考虑存在噪声,分别取对应该置信度为 95% 和 5% 的 $NDVI$ 值为最大值和最小值,经过处理得到的植被覆盖度 FVC 介于 0~1。将植被覆盖度分为 5 个等级:[0, 0.1) 为无覆盖度; [0.1, 0.3) 为低覆盖度; [0.3, 0.5) 为中等覆盖度; [0.5, 0.7) 为较高覆盖度; [0.7, 1.0] 为高覆盖度。

1.4.3 基于随机森林的草本植被地上生物量反演模型

根据植被群落特征原位调查实验,利用 Sentinel-1 和 Sentinel-2 两种遥感数据源,提取多个与湿地植被生物量相关的特征因子,并结合实测生物量数据,采用随机森林方法构建基于 Sentinel-1 和 Sentinel-2 协同的多源遥感湿地植被生物量反演模型。模型最优参数经调试后设置为分类器数量为 500; 叶子节点的最小样本数为 2,最大特征数为 7;决策树最大深度为 3。同时将地上生物量(AB)分为五级:低植区($0 \leq AB < 200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)、较低植区($200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \leq AB < 300 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)、中植区($300 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \leq AB < 400 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)、较高植区($400 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \leq AB < 500 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) 和高植区($AB \geq 500 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)。第一级和第二级表示地上生物量较低,植被生长受限;第三级表示地上生物量适中、植被生长相对旺盛;第四级和第五级表示地上生物量积累丰富、植被生长繁茂。

1.5 统计分析

采用 Pearson 相关性分析方法探究植被群落特征与自然和人为因素间的相关性。利用 Excel 2019 软件进行数据前期处理,运用 Origin 2024 软件及 R4.4.1 软件进行统计分析和作图。

2 结果

2.1 研究区植被覆盖度年际变化

2018—2023 年研究区不同等级植被覆盖度分布及面积变化如图 3 所示。由图 3(a)~图 3(f)可以看出,研究区植被覆盖度等级以高植被覆盖和较高植被覆盖为主;中等植被覆盖主要分布在人口聚集区,主要受到人为因素的影响;低植被覆盖和无植被覆盖主体为河流滩涂与水产养殖。根据图 3(g),

高植被覆盖度面积显著大于其他植被覆盖度面积,其次是较高植被覆盖度面积,中等植被覆盖度面积和无植被覆盖度面积,低植被覆盖度面积最小。2019年高植被覆盖度、中等植被覆盖度和无植被覆盖度面积出现显著突变点,高植被覆盖度面积显著减小,中等植被覆盖度和无植被覆盖度面积显著增加。2018—2023年高植被覆盖度面积占研究区总面积的比例分别为42.45%、31.58%、40.71%、41.28%、41.88%、49.25%,呈先减小后增大的趋势,由2018年的71.80 km²减小至2019年的53.49 km²,然后逐渐增大至2023年的83.40 km²。较高植被覆盖度面积变化相对平稳,整体在31.12~39.07 km²之间变化,最大值和最小值分别出现在2021年和2019年,其值分别为39.07 km²和31.12 km²。中植被覆盖度面积和无植被覆盖度面积变化趋势一致,均呈现先增大后减小的趋势,分别由2018年的12.68 km²和13.03 km²增大至2019年的20.05 km²和20.94 km²,然后逐渐减小至2023年的7.10 km²和9.40 km²。低植被覆盖度面积整体较小,在6.75~14.08 km²之间波动变化,占研究区总面积的比例分别为12.46%、9.04%、12.76%、6.75%、12.55%、14.08%。总的来看,高植被覆盖度的占比逐渐增加,中等植被覆盖度和无植被覆盖度的占比减少,土地覆盖质量整体得到改善。

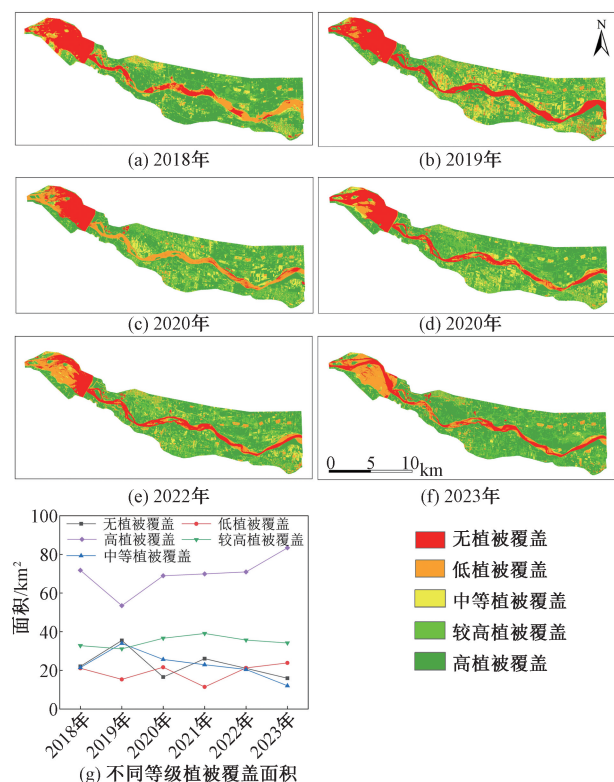


图3 2018—2023年不同等级植被覆盖度分布
Figure 3 The vegetation coverage distribution of different levels from 2018 to 2023

2.2 研究区草本湿地植被地上生物量年际变化

2018—2023年研究区植被平均地上生物量及不同等级地上生物量面积变化如图4所示。

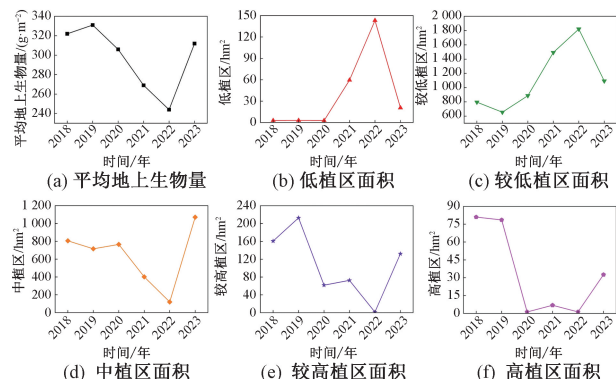


图4 2018—2023年平均地上生物量及不同等级地上生物量所占面积

Figure 4 The average above-ground biomass and the area occupied by different levels of above ground biomass from 2018 to 2023

2018—2023年研究区植被平均地上生物量及不同等级地上生物量面积变化如图4所示。如图4(a)所示,2018—2023年平均地上生物量分别于2019年和2022年达到最大值和最小值,此时平均地上生物量分别为331 g·m⁻²和244 g·m⁻²,整体处于较低植区和中植区。如图4(b)所示,2020年以前,植被地上生物量所占面积最小的为低植区,所占面积的平均值为2.84 hm²,占总面积的比例不足0.2%。如图4(c)和4(d)所示,2020年前植被地上生物量等级主要以较低植区和中植区为主,所占面积均在600 hm²以上,约占植被地上生物量总面积的40%。如图4(e)和4(f)所示,较高植区由2018年的150.52 hm²降至2020年的61.71 hm²,高植区则由2018年80.98 hm²降至2020年的1.20 hm²,所占面积比例分别由2018年的9.70%和4.89%下降至2020年的4.16%和0.08%。如图4(b)和4(c)所示,2020—2022年,低植区和较低植区所占面积于2022年达到最大值,分别为143.16 hm²和1821.35 hm²,相较于2020年以前的最小值分别增加了5049.64%和200.86%。如图4(d)和4(e)所示,中植区所占面积由2020年的764.89 hm²下降至2022年的119.57 hm²,下降了84.37%;较高植区则由2020年的61.71 hm²降至2022年的1.21 hm²,下降了98.03%。如图4(f)所示,2020—2022年,高植区所占面积变化较为平稳,分别为1.20 hm²、6.84 hm²、1.22 hm²。如图4(b)和4(c)所示,2022—2023年,低植区和较低植区所占面积相较于2022年的143.16 hm²和1821.35 hm²分别减少了

122.54 hm² 和 728.70 hm², 减小比例分别为 85.60%和 40.01%。如图 4(d)、4(e)和 4(f)所示, 中植区、较高植区和高植区所占面积于 2023 年分别增加至 1 070.36, 132.05, 32.52 hm², 较 2022 年分别增加了 795.17%、10 904.17%和 2 610.00%。

2.3 研究区滩涂湿地植被群落演变特征

2.3.1 植被群落生长演变特征

植被群落生长特征如图 5 所示。如图 5(a)所示, 样地 S2 具有最大的地上生物量, 整体维持在 290~330 g·m⁻²; 样地 S3 地上生物量次之, 调水调沙前(B-WSR)、调水调沙中(M-WSR)和调水调沙后(A-WSR)分别为 138.47、262.14, 218.29 g·m⁻²; 样地 S1 地上生物量最小, 整体在 130~175 g·m⁻²变化。如图 5(b)所示, 样地 S1 平均高度调水调沙前最低, 平均高度为 45.3 cm, 调水调沙后最高, 达到 84.0 cm; 样地 S2 相差不大, 整体维持在 60.9~65.9 cm; 样地 S3 调水调沙中和调水调沙后较高, 平均高度分别为 80.0 cm 和 77 cm, 显著高于调水调沙前的 44.5 cm。如图 5(c)所示, 样地 S1 盖度调水调沙后高于调水调沙前和调水调沙中, 分别为 35.0%、33.3%和 51.7%; 样地 S2 最大盖度出现在调水调沙中, 为 60.0%, 高于调水调沙前和调水调沙后的 43.3%和 31.7%; 样地 S3 调水调沙中盖度为 75.0%, 显著高于调水调沙前和调水调沙后, 分别是调水调沙前和调水调沙后的 2.04 倍和 1.61 倍。如图 5(d)所示, 样地 S1 调水调沙后植株密度显著大于调水调沙前和调水调沙中, 分别为 150.0, 205.3, 552.7 株/m²; 样地 S2 和 S3 最大植株密度均出现在调水调沙中, 分别为 659.3 株/m²和 470.7 株/m², 样地 S2 调水调沙前植株密度略大于调水调沙后, 样地 S3 则相反。

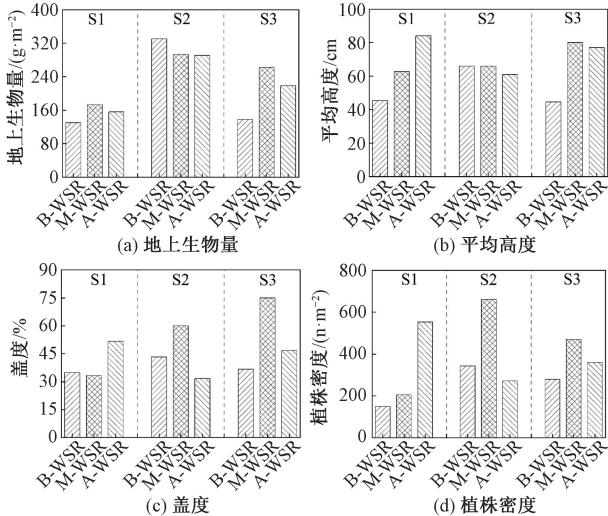


Figure 5 Vegetation community growth characteristics

2.3.2 植被群落多样性演变特征

样地 S1、S2 和 S3 不同时期植被群落物种分布如图 6 所示。样地 S1 不同时期物种丰富度分别为 4, 7, 4, 出现频率最高的植被为怪柳和狗牙根, 其中怪柳主要出现在调水调沙前和调水调沙后, 数量均为 52 株, 狗牙根则主要出现调水调沙后, 数量为 460 株。出现频率次之为芦苇和钻叶紫菀, 芦苇主要出现在调水调沙前和调水调沙中, 且具有较大的数量(108 株和 126 株); 钻叶紫菀出现在调水调沙中和调水调沙后, 调水调沙后数量显著大于调水调沙中(117 株和 46 株)。样地 S2 不同时期物种丰富度分别为 5、7、4, 出现频率最高的植被为怪柳和芦苇, 均表现为调水调沙前长势良好, 调水调沙中次之, 调水调沙后数量较少, 两种植被调水调沙前、调水调沙中和调水调沙后数量分别为 157 株、64 株、48 株和 196 株、128 株、64 株。出现频率次之为钻叶紫菀和白茅, 均出现在调水调沙中和调水调沙后, 其中钻叶紫菀具有较大的数量(690 株和 278 株)。样地 S3 不同时期物种丰富度分别为 9、4、5, 出现频率最高的植被为怪柳、芦苇和钻叶紫菀, 其中怪柳主要出现在调水调沙前, 数量为 89 株, 芦苇主要出现在调水调沙中, 数量为 253 株, 钻叶紫菀主要出现在调水调沙后, 数量为 388 株。出现频率次之为狗牙根, 主要出现在调水调沙后, 数量为 428 株。

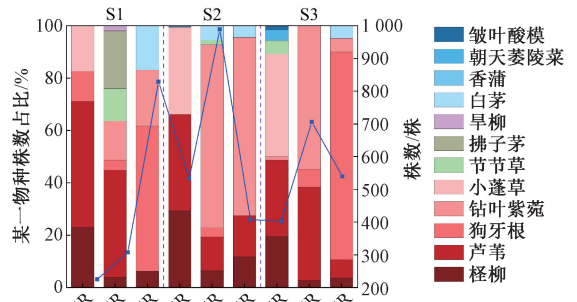


Figure 6 植被群落物种分布

Figure 6 The species distribution of vegetation communities

根据统计的物种丰富度, 计算了香农多样性指数、辛普森优势度指数和 Pielou 均匀度指数。如图 7(a)所示, 样地 S1 调水调沙中 Shannon-Wiener 指数最大, 为 1.57, 调水调沙前和调水调沙后相差不大, 分别为 1.24 和 1.13; 样地 S2 在各时期相差不大, 呈阶梯式减小, 分别为 1.13、1.04 和 0.94; 样地 S3 调水调沙前最大, 为 1.56, 显著大于调水调沙中和调水调沙后的 0.97 和 0.79。如图 7(b)所示, 样地 S1 调水调沙后 Simpson 优势度指数最大, 为 0.39, 调水调沙中-最小, 为 0.26; 样地 S2 调水调沙

中和调水调沙后相差不大,分别为 0.51 和 0.50,调水调沙前最小,为 0.36;样地 S3 呈阶梯式增长,调水调沙后最大,调水调沙前最小,分别为 0.64 和 0.27。如图 7(c) 所示,样地 S1 调水调沙中 Pielou 均匀度指数最大,为 1.13,调水调沙前和调水调沙后相差不大,分别为 0.90 和 0.82;样地 S2 各时期相差不大,呈阶梯式减小,相应的值分别为 0.82、0.75 和 0.70;样地 S3 调水调沙前显著大于调水调沙中和调水调沙后,调水调沙前为 1.13,分别是调水调沙中和调水调沙后的 1.61 倍和 1.98 倍。

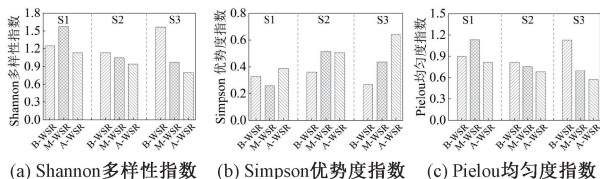


图 7 植被群落多样性变化特征

Figure 7 The diversity changes characteristics of vegetation communities

2.4 不同时间尺度植被群落特征与环境因子的相关关系

不同时间尺度植被群落特征与环境因子间存在显著的相关关系,如图 8 所示。年内尺度不同时期与植被群落特征具有显著相关关系的环境因子发生了明显变化,年际尺度除中等植被覆盖外,整体与环境因子相关关系不显著。对于年内尺度,如图 8(a) 所示,调水调沙前植被群落特征与环境因子表现出较好的相关性。其中地上生物量 (AB) 与 20, 60, 100 cm 土壤含水量 ($\theta-20$ 、 $\theta-60$ 、 $\theta-100$) 和温度 (T) 表现出显著的正相关关系 ($p < 0.01$), 平均高度 (AH) 和盖度 (C) 分别与 20 cm 和 60 cm 土壤含水量表现出显著的正相关关系 ($p < 0.05$); 植株密度 (TS) 和物种丰富度 (R) 分别与硝态氮 (NN) 和铵态氮 (AN) 表现出显著的正相关关系 ($p < 0.05$)。香农多样性指数 (H) 与全磷 (TP) 表现出显著的负相关关系 ($p < 0.05$), 优势度指数 (D) 与全磷则表现出显著的正相关关系 ($p < 0.01$); 未发现与均匀度指数 (E) 具有显著相关性的环境因子。如图 8(b) 所示,调水调沙中植被群落特征中除地上生物量外,其余特征指标与环境因子间未表现出显著的相关性,地上生物量与总碳 (TC) 表现出显著的正相关关系 ($p < 0.05$)。如图 8(c) 所示,调水调沙后植被群落特征中除平均高度外,其余特征因素与 Pielou 环境因子间未表现出显著的相关性,平均高度与总氮 (TN) 和总碳均表现出显著的负相关关系 ($p < 0.05$)。如图 8(d) 所示,中植被覆盖 ($M-VC$) 与年径流量 (W) 和水

域面积 (S) 变化表现为显著的正相关关系 ($p < 0.05$), 与耕地面积 (CA) 和建设用地面积 (A) 变化表现为显著的负相关关系 ($p < 0.05$)。高植被覆盖 ($H-VC$) 与建设用地面积变化表现为显著的正相关关系 ($p < 0.05$), 其余指标与环境因子未表现出显著的相关性。

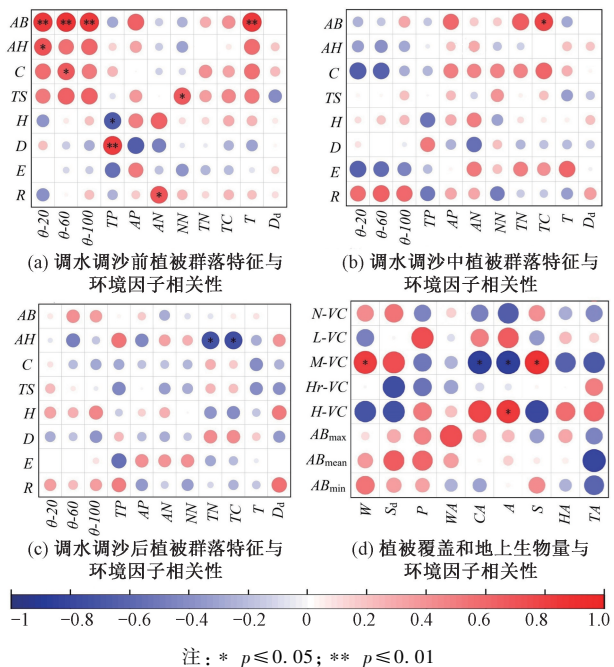


图 8 不同景观类型植被群落特征与环境因子的相关关系
Figure 8 The correlation between the characteristics of vegetation communities of different landscape types and environmental factors

3 讨论

3.1 植被群落特征年内变化的影响因素

同一时期不同人类活动干扰下可能因其作用机制的差异而对植物群落特征产生不同的影响^[19]。本研究中,样地 S1 处于自然保护区范围内,人类活动较少;样地 S2 为河流冲积形成的滩地,是众多露营爱好者的集散地,人类活动较多;样地 S3 紧挨农田,受农业种植影响显著。相对于样地 S3,较多人类活动对植被群落地上生物量具有促进作用,而人类活动较少的自然保护区则对地上生物量具有一定的抑制作用。调水调沙前和调水调沙中地上生物量的变化可能与平均高度、盖度和植株密度的变化有关^[20],而调水调沙后则可能与植株数量有关,如图 3 和图 4 所示。研究发现,同一样地不同时期平均高度、盖度和植株密度表现出显著的差异,同一时期不同样地间同样存在显著的差异,表明农田种植与较多人类活动对群落内植被的生长具有显著的影响,并通过改变群落内植被的生长而影响地上生

物量^[21]。

本文结果表明,地上生物量与物种丰富度之间存在显著的负相关关系。例如样地 S2 调水调沙前在较小物种丰富度 ($R=5$) 时具有最大的地上生物量 ($330.48 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$),而样地 S3 调水调沙前却在较大物种丰富度 ($R=9$) 时具有相对较小的地上生物量 ($138.47 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$);样地 S1 调水调沙中在较大物种丰富度 ($R=7$) 时具有最小的地上生物量 ($173.02 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$),而样地 S3 调水调沙中却在较小物种丰富度 ($R=4$) 时具有较大的地上生物量 ($218.29 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$),如图 3(a) 和图 4 所示。这与以往的认识,即物种多样性能够促进生物量的积累相矛盾^[22]。以往的研究发现,物种多样性能够提高生态系统的生物量生产力及其稳定性^[23-24]。这表明较多人类活动下生物多样性的提高对生物量生产力的促进影响较小,而更可能是通过其他途径影响生物量生产力,这也说明为什么样地 S2 调水调沙前植被群落具有较高的地上生物量,但其物种丰富度 ($R=5$) 却显著低于调水调沙 S3 ($R=9$)。较多人为活动干扰下植物群落具有较高的物种丰富度,这可能是由于一定程度的干扰降低了种间竞争,使有限资源得以更好地分配给不同物种所致。相反,在农田种植干扰下,由于较高的外源养分输入,使得一些优势物种,例如芦苇,其在高养分环境下占据竞争优势,表现出较快的生长速率和高大的植株。这将压缩群落内其他物种的生存空间,进而导致物种丰富度相对降低^[25]。此外,如图 3(b) 所示,样地 S2 植被群落具有相对稳定的平均高度,这可能是较多人类活动抑制了植被地上与地下部分的生长所致。整体上,与样地 S1 植被群落相比,较多人类活动和农田种植能够维持较高的地上生物量生产力,同时对生物多样性具有积极效应。这些发现强调在进行嫩滩生态系统修复与保护中,需要理清不同人类活动对嫩滩植被群落的影响差异,开展适应、针对性的恢复与保护措施的重要性。

3.2 植被群落特征年际变化的影响因素

如图 8(d) 所示,中植被覆盖与年径流量、耕地面积、建设用地和水域面积变化呈显著的相关关系,这与其主要分布在受人为因素影响显著的区域具有较强的一致性。河道水通过补给土壤水、淹没、冲刷以及滩槽交换等作用影响植被生长,而流量作为河道重要的水文特征,对于植被影响是多方面的。研究区黄河主河槽稳定,横向过程受限制,近河区域水分供给较为充足,水分对植被生长的限制较弱,流量与植被覆盖度的相关性不强,这也说明低植被覆盖和无植被覆盖与年径流量无显著相关关系。随着离

河距离增加,河水补充地下水,水分对植被生长的限制逐步恢复,流量与植被覆盖度的相关性增强,当植被离河超过一定距离后,流量与植被覆盖度的相关性增强^[9]。可见年径流量主要通过补给地下水改变对植被生长的限制,从而影响植被覆盖度的变化。苗晨等^[26] 研究指出,华北平原植被覆盖度变化与该区域农业耕作密切相关。根据对研究区土地利用类型的分析,耕地面积占研究区总面积的 45% 以上,且近年来仍有增加的趋势。表明农田耕作主要通过农作物的轮种来影响中等植被覆盖的变化。

4 结论

(1) 采用随机森林方法构建基于 Sentinel-1 和 Sentinel-2 协同的多源遥感湿地植被生物量反演模型精度较高,相应的 $RMSE$ 和 R^2 分别为 57.35 和 0.73。

(2) 通过原位调查实验发现,研究区嫩滩植被表现出湿生植物、中生植物与盐生植物共生的特征,其中盐生植物多分布在河岸附近,而中生和湿生植物则分布在距河岸稍远处;代表性优势物种是怪柳、芦苇、钻叶紫菀和狗牙根。

(3) 土壤养分因子与植被群落年内特征变化具有显著的相关性,植被群落特征变化和土壤养分因子受人为干扰影响显著,植被群落特征间具有显著的关系。

(4) 土地利用类型的变化对植被覆盖度有显著的影响,尤其是受人类活动影响较大的中低植被覆盖区域。

(5) 黄河嫩滩作为湿地中受水沙影响最明显的区域,植被群落特征和土壤理化性质处在持续不断的变化中,仍需对该区域开展持续调查和监测,以便更好地摸清嫩滩植被群落的演变过程。此外,更高精度遥感影像的获取和解译对长时间序列植被群落演变的研究具有显著影响。

参考文献:

- [1] XU T, WENG B S, YAN D H, et al. Wetlands of international importance: status, threats, and future protection [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(10): 1818.
 - [2] 万俊锋,宋一帆,郭林,等. 人为干扰对黄河湿地植物群落的影响及其机制[J]. 郑州大学学报(工学版), 2024, 45(4): 102-110.
- WAN J F, SONG Y F, GUO L, et al. Effects of human disturbances on plant community of the Yellow River wetland and its mechanisms[J]. Journal of Zhengzhou Uni-

- versity (Engineering Science), 2024, 45(4): 102-110.
- [3] MZURI R T, OMAR A A, MUSTAFA Y T. Spatiotemporal analysis of vegetation cover and its response to terrain and climate factors in duhok governorate, Kurdistan Region, Iraq[J]. The Iraqi Geological Journal, 2021, 54(1A): 110-126.
- [4] NING L N, PENG W F, YU Y N, et al. Quantifying vegetation change and driving mechanism analysis in Sichuan from 2000 to 2020[J]. Frontiers in Environmental Science, 2023, 11: 1261295.
- [5] 王士俊, 刘苗, 赵钰, 等. 多源遥感数据耦合 CBA-Wheat 模型的冬小麦生物量估算研究[J]. 遥感学报, 2024, 28(12): 3123-3135.
- WANG S J, LIU M, ZHAO Y, et al. Estimating winter wheat biomass by coupling the CBA-Wheat model and multispectral remote sensing[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2024, 28(12): 3123-3135.
- [6] QIU M Q, LIU Y X, CHEN P, et al. Spatio-temporal changes and hydrological forces of wetland landscape pattern in the Yellow River Delta during 1986—2022[J]. Landscape Ecology, 2024, 39(3): 51.
- [7] 杨菲菲, 张王菲, 赵磊, 等. 基于 GF-1 数据的二阶段遥感特征优选与森林地上生物量反演模型[J]. 林业科学, 2025, 61(4): 9-19.
- YANG F F, ZHANG W F, ZHAO L, et al. Two-stage remote sensing feature optimization and GF-1 data-supported forest above-ground biomass inversion[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2025, 61(4): 9-19.
- [8] ROA-FUENTES L, VILLAMIZAR-PEÑA L A, MANTILLA-CARREÑO J A, et al. Functional diversity and species diversity in flooded and unflooded tropical forests[J]. Acta Oecologica, 2022, 114: 103814.
- [9] 李瑶, 戴文鸿, 高嵩, 等. 黄河下游植被覆盖度动态变化及其与水沙过程关系[J]. 人民黄河, 2022, 44(4): 31-37, 52.
- LI Y, DAI W H, GAO S, et al. Vegetation dynamic variation and its relations with water-sediment processes in lower Yellow River[J]. Yellow River, 2022, 44(4): 31-37, 52.
- [10] 杜鹏举, 孙煜航, 赵志杰, 等. 黄河下游宽滩区及其沿线植被覆盖度变化特征[J]. 人民黄河, 2022, 44(7): 99-104.
- DU P J, SUN Y H, ZHAO Z J, et al. Study on the variation characteristics of vegetation coverage along the lower Yellow River floodplain[J]. Yellow River, 2022, 44(7): 99-104.
- [11] LV X F, MA B, YU J B, et al. Bacterial community structure and function shift along a successional series of tidal flats in the Yellow River Delta[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 36550.
- [12] 李雅, 于秀波, 刘宇, 等. 湿地植物功能性状对水文过程的响应研究进展[J]. 生态学杂志, 2018, 37(3): 952-959.
- LI Y, YU X B, LIU Y, et al. Response of wetland plant functional traits to hydrological processes: a review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(3): 952-959.
- [13] GRYGORUK M, KOCHANEK K, MIROSLAW-SWIATEK D. Analysis of long-term changes in inundation characteristics of near-natural temperate riparian habitats in the Lower Basin of the Biebrza Valley, Poland[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2021, 36: 100844.
- [14] HOPPENREIJS J H T, ECKSTEIN R L, LIND L. Pressures on boreal riparian vegetation: a literature review[J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2022, 9: 806130.
- [15] 李志娟, 肖宇童, 吕佳霖, 等. 不同土地利用方式对黄河(河南段)桃花峪滩区土壤酶活性的影响[J]. 湿地科学, 2024, 22(6): 922-929.
- LI Z J, XIAO Y T, LYU J L, et al. Effects of different land use types on soil enzyme activity in Taohuayu floodplain of the Henan section of Yellow River[J]. Wetland Science, 2024, 22(6): 922-929.
- [16] MENG L, QU F Z, BI X L, et al. Elemental stoichiometry (C, N, P) of soil in the Yellow River Delta nature reserve: understanding N and P status of soil in the coastal estuary[J]. Science of the Total Environment, 2021, 751: 141737.
- [17] SILKNETTER S, CREED R P, BROWN B L, et al. Positive biotic interactions in freshwaters: a review and research directive[J]. Freshwater Biology, 2020, 65(4): 811-832.
- [18] 马红斌, 王庆, 王秦湘. 基于 NDVI 的多沙粗沙区植被覆盖度研究[J]. 人民黄河, 2012, 34(12): 94-95, 111.
- MA H B, WANG Q, WANG Q X. Research of vegetation coverage in the coarse sand area based on NDVI[J]. Yellow River, 2012, 34(12): 94-95, 111.
- [19] 孙玉真, 王志泰, 包玉, 等. 城市遗存山体植被群落特征对不同的人为干扰方式及强度的响应[J]. 生态学报, 2023, 43(11): 4632-4650.
- SUN Y Z, WANG Z T, BAO Y, et al. Response of plant community characteristics of urban remnant mountains to different ways and intensity of artificial disturbance[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11): 4632-4650.
- [20] 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]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(1): 1024-1034.

- [21] 曾国燕, 叶茂, 李苗苗, 等. 阿尔泰山富蕴地区草地群落生物量、物种多样性及其与环境因子的相关性[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2025, 53(4): 120-131.
ZENG G Y, YE M, LI M M, et al. Biomass and species diversity of grassland communities and their correlation with environmental factors in Fuyun area, Altai Mountains[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2025, 53(4): 120-131.
- [22] LIN S X, FAN C Y, WANG J, et al. Chronic anthropogenic disturbance mediates the biodiversity-productivity relationship across stand ages in a large temperate forest region[J]. Journal of Applied Ecology, 2024, 61(3): 502-512.
- [23] YUAN Z Q, ALI A, WANG S P, et al. Temporal stability of aboveground biomass is governed by species asynchrony in temperate forests[J]. Ecological Indicators, 2019, 107:105661.
- [24] LUO Y H, CADOTTE M W, BURGESS K S, et al. Greater than the sum of the parts: how the species composition in different forest strata influence ecosystem function[J]. Ecology Letters, 2019, 22(9): 1449-1461.
- [25] 宋红丽, 牟晓杰, 刘兴土. 人为干扰活动对黄河三角洲滨海湿地典型植被生长的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(12): 2307-2314.
SONG H L, MOU X J, LIU X T. Anthropogenic effect on wetland vegetation growth in the Yellow River Delta[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(12): 2307-2314.
- [26] 苗晨, 申双和, 贾根锁. 华北平原不同生长发育期作物长势对气候因子的响应研究[J]. 气候与环境研究, 2014, 19(6): 703-712.
MIAO C, SHEN S H, JIA G S. Response of cropland NDVI to climatic factors during different phenophases in the North China Plain[J]. Climatic and Environmental Research, 2014, 19(6): 703-712.

Study on the Evolution Characteristics and Driving Forces of Vegetation in Different Landscape Types of the Wetland Below the Yellow River Dam

DOU Ming^{1,2}, MI Qingbin¹, ZHANG Jianan³, XU Linjun⁴, DU Zongda³, XU Weiwei³

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Ecological and Environmental, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Henan Haihe River Basin Water Resources Affairs Center, Zhengzhou 453005, China; 4. Water Conservancy and Irrigation District Engineering Construction Administration of Xixia Yuan Water Conservancy Project, Jiaozuo 454002, China)

Abstract: To understand the evolution of vegetation community characteristics and driving forces in different landscape types, the evolution rule of the growth and diversity characteristics of vegetation communities in different landscape types of the Jili Yellow River Wetland downstream of the Xixia Yuan Dam in the middle reaches of the Yellow River were studied. Through on-site investigation, remote sensing image interpretation, and constructing aboveground biomass inversion model of herbaceous vegetation based on random forest, the growth characteristics and diversity characteristics of vegetation communities in different landscape types were analyzed, and the driving effects of environmental factors on the evolution of vegetation community characteristics in different landscape types were identified. The results showed that the vegetation coverage grade in the study area was mainly high vegetation coverage, followed by relatively high vegetation coverage. The average aboveground biomass of herbaceous vegetation was generally in the low and medium plant zones, and showed a trend of increase-decrease-increase from 2018 to 2023, reaching the maximum and minimum values in 2019 and 2022, respectively, with $331 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ and $244 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$. The vegetation in the tidal flat wetland showed the characteristics of coexistence of hygrophytes, mesophytes and halophytes. Soil nutrient factors had a significant correlation with the intra-annual characteristics changes of the vegetation communities in tidal flat wetland. While the land use types changes had a significant impact on vegetation coverage, especially in the areas with medium and low vegetation coverage that were more significantly.

Keywords: landscape type; characteristics of vegetation communities; vegetation coverage; inversion model; aboveground biomass