

文章编号:1671-6833(2025)06-0135-09

# 花园口-夹河滩段湿地景观格局变化及水沙要素响应关系

窦明<sup>1,2</sup>, 曹莹澍<sup>1</sup>, 米庆彬<sup>1</sup>, 丁俊祥<sup>2</sup>, 王涵<sup>1</sup>, 潘登<sup>3</sup>

(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. 河南省自然资源监测和国土整治院, 河南 郑州 450016)

**摘要:**黄河下游花园口至夹河滩段湿地是黄河廊道生态系统的重要组成部分,其形成、演变和退化与黄河独特的水沙情势变动相关。为明确该区段不同类型湿地景观格局演变特征及其对径流量、输沙量和水位等水沙要素变化的响应机制,以黄河下游花园口至夹河滩段为研究区,利用 1994—2023 年 12 期 Landsat 卫星影像构建湿地景观数据库,通过土地利用转移矩阵和景观格局指数,定量分析湿地类型的时空变化、斑块特征和景观结构;并结合花园口水文站的径流量、水位、输沙量等数据,重点揭示湿地不同类型景观格局特征与水沙要素之间的响应关系。结果表明:①1994—2023 年花园口站径流量呈上升趋势,输沙量与水位整体呈下降趋势;②研究区内河流、坑塘、滩涂和荒草等湿地类型的面积整体呈萎缩态势,年均减少 5.90 km<sup>2</sup>,湿地向耕地的转化最为显著;③景观水平上,调水调沙政策实施后,湿地景观整体连通性增强,景观丰富度和均匀度有所提升且趋于稳定;④坑塘、滩涂和荒草湿地中最大斑块指数、平均斑块面积、蔓延度指数与花园口站输沙量以及水位有显著的相关关系,与输沙量的相关关系较强。研究结果可为黄河流域湿地生态保护和修复提供理论依据。

**关键词:**景观格局变化;水沙要素;响应关系;花园口-夹河滩

**中图分类号:**P33;X171.1;TV147

**文献标志码:**A

**doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2025.03.023

湿地景观格局变化对生态系统功能、生物多样性保护,以及物质迁移等生态过程有重要影响<sup>[1]</sup>。黄河流域湿地资源的过度利用和破坏,导致湿地面积减少和景观格局破碎化程度加剧。黄河下游河道湿地是黄河流域生态系统的核心部分,其形态变化与景观格局的演变密切相关,且与水沙动态、河道边界条件以及水位波动等因素<sup>[2-3]</sup>相互作用;这些因素不仅影响湿地的物理形态变化,还深刻影响湿地的生态功能和空间结构。

近年来,学者们围绕黄河流域湿地景观格局演变及其驱动因素展开了广泛研究。李健明等<sup>[4]</sup>从类型水平和景观水平分析了黄河源区景观格局的动态变化,揭示了社会经济发展和产业结构调整是景观变化的主要驱动因素;Li 等<sup>[5]</sup>通过生态工程方法研究了水文过程对黄河三角洲湿地景观格局的影响,发现径流量和输沙量是湿地格局变化的重要主

导变量;张爱静等<sup>[6]</sup>分析了调水调沙后黄河口湿地景观格局的动态变化,指出湿地生态补水工程和黄河水资源补给是促进景观恢复的主要因素;Dou 等<sup>[7]</sup>通过景观与社会经济指标的相关性分析,揭示了黄河三角洲湿地景观变化与人类活动之间的关系,强调夜间灯光数据可作为人类活动影响的有效替代变量;卢晓宁等<sup>[8]</sup>基于遥感影像与景观生态学方法,探讨了 1973—2013 年黄河三角洲湿地景观演变及驱动因素,指出湿地破碎化严重,且湿地变化受输沙量和径流量周期性波动的显著影响;Qiu 等<sup>[9]</sup>利用多源遥感影像和多元回归方法分析了黄河三角洲湿地景观格局的时空演变及水文驱动因素,发现累计输沙量和径流量对湿地景观变化的解释力分别达 75.7% 和 63.8%;Wei 等<sup>[10]</sup>利用 Sentinel-2 影像和随机森林算法,分析了 2015—2021 年黄河三角洲湿地格局的变化模式及主要驱动因素,发现湿地变

收稿日期:2025-02-24;修订日期:2025-03-24

基金项目:郑州大学院士团队科研启动基金(13432340370);河南省高等学校重点科研项目计划项目(21A570008);河南省科技攻关项目(222102320211);2023 年度河南省自然资源科研项目(2023-382-4)

作者简介:窦明(1975—),男,山东淄博人,郑州大学教授,博士,主要从事水资源与水环境研究,E-mail: dou\_ming@163.com。

引用本文:窦明,曹莹澍,米庆彬,等. 花园口-夹河滩段湿地景观格局变化及水沙要素响应关系[J]. 郑州大学学报(工学版),2025,46(6):135-143. (DOU M, CAO Y S, MI Q B, et al. Changes in wetland landscape patterns and the relationship between water-sediment elements in Huayankou-Jiahetan section[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2025, 46(6): 135-143.)

化主要受到自然和人为因素的双重影响;陈昂等<sup>[11]</sup>基于景观水平指数对黄河下游河道及缓冲区景观格局变化进行了分析,指出河道外 4 km 是景观变化的拐点,但未深入探讨景观变化的驱动因素。

综上,已有研究多集中于黄河源区和三角洲湿地的整体景观变化及驱动因素分析,对黄河下游游荡段不同湿地类型景观格局与水沙水位响应关系的研究相对较少。本文以黄河下游花园口至夹河滩段(简称“花夹段”)廊道湿地为研究区,基于遥感影像数据和水文站水沙水位数据,利用土地利用转移矩阵、景观格局指数、相关分析及回归分析等方法,系统探讨不同类型湿地景观格局变化以及与水沙水位的响应关系。本文旨在为黄河下游湿地保护与生态修复提供理论依据,同时助力黄河流域生态恢复政策的制定和高质量发展目标的实现。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河下游是黄河流域洪水灾害、河道断流威胁较为严重的河段,河势游荡多变、主流摆动频繁<sup>[12]</sup>,黄河大堤以内的土地覆被易受水沙情势的影响。本文选取花园口至夹河滩段游荡型河段作为研究区(审图号:GS(2024)0650),如图 1 所示,该区域以两侧黄河大堤为边界,总长度约为 100 km,面积约为 980 km<sup>2</sup>。区域内主要植被类型包括芦苇(*phragmites communis*)、怪柳(*tamarix chinensis*)、钻叶紫菀(*aster subulatus*)等,土壤以沙土、盐碱土为主<sup>[13]</sup>。近年来,该区域内进行了黄河河道治理、堤防加固等工程,并建有多个引水和灌溉工程,这些工程对研究区的水沙情势、河道形态和湿地景观格局产生了显著影响。

1.2 数据来源及数据预处理

1.2.1 数据来源

本文所需的数据有水文数据和遥感影像数据。

水文数据:1994—2023 年花园口水文站径流量、输沙量和水位数据来源于水利部黄河水利委员会官方网站(<http://www.yrcc.gov.cn/>),汛期数据选取 8—10 月。遥感影像数据:1994—2023 年共 12 期(1994、1996、1999、2002、2004、2007、2009、2013、2015、2018、2020、2023 年)分辨率为 30 m 的 Landsat TM/ETM+/OLI 遥感影像,来源于美国地质调查局(USGS)网站(<http://earthexplorer.usgs.gov/>)。影像拍摄时间集中在 8—10 月,云量小于 30%,此阶段湿地植被生长旺盛,易于辨识,且位于小浪底调水调沙后,有助于研究水沙水位变化对湿地生态的影响。

1.2.2 遥感数据预处理

将研究区内的景观类型划分为湿地和非湿地两类。湿地类型包括河流湿地、坑塘湿地、滩涂湿地以及荒草湿地;非湿地类型仅保留人类活动强烈的耕地和建设用地,以减少分类误差,研究区土地利用分类特征见表 1。

本文借助 ENVI 5.3 软件对 Landsat 影像进行数据预处理,具体包括:通过 Radiometric Calibration 工具进行辐射定标、采用 FLAASH 模块进行大气校正(大气模型为 Tropical,气溶胶模式为 Rural)、完成影像拼接和基于研究区矢量边界裁剪,确保影像完整覆盖研究区。结合 Google Earth 高清影像和实地调查数据,根据不同景观类型的光谱、几何、纹理、色调和空间分布等特征,均匀选取各类 ROI 训练样本(每类不少于 120 个,分离度>1.85),采用最大似然监督分类法与人工目视解译相结合进行监督分类,并利用 Majority 和 Clump 方法对分类结果中的小斑块进行平滑处理,构建研究区景观空间数据集;分类结果利用混淆矩阵进行精度验证,得到的总体分类准确率均在 85%左右,kappa 系数均在 0.8 以上,能够满足使用要求。最后,将研究区土地利用分类结果,导入 ArcGIS10.2 软件,并统一为 WGS\_1984 坐标系,便于后续分析处理。

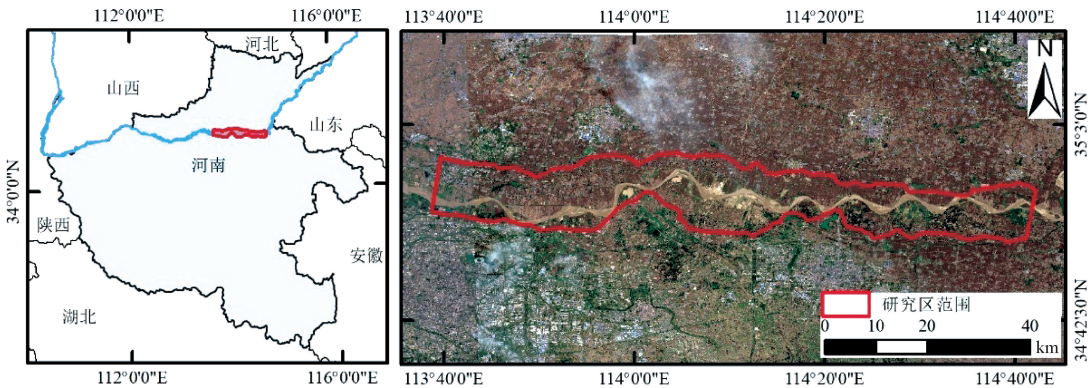


图 1 研究区地理位置

Figure 1 Geographical location of the study area

表 1 研究区土地利用分类特征

| Table 1 Characteristics of land use classification in the study area |      |                                |                                                                                   |
|----------------------------------------------------------------------|------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 类型                                                                   | 子类型  | 特征                             | Landsat 影像特征                                                                      |
| 湿地                                                                   | 河流湿地 | 黄河主河道形成的区域                     |  |
|                                                                      | 坑塘湿地 | 河道摆动后形成的积水区域及鱼塘养殖区域等           |  |
|                                                                      | 滩涂湿地 | 靠近黄河主河道两侧分布,主要为河间滩、嫩滩等,基本无植被覆盖 |  |
|                                                                      | 荒草湿地 | 靠近黄河主河道,生长有芦苇或怪柳等种群            |  |
| 非湿地                                                                  | 建设用地 | 城镇、村庄、交通等建设用地                  |  |
|                                                                      | 耕地   | 分布规则,多种植小麦、玉米、大豆等旱地作物          |  |

注:以 2023 年 Landsat8 影像的 6,5,4 波段为例展示各地类影像特征。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用转移分析

土地利用转移矩阵可以全面反映不同景观类型变化的结构、来源及方向<sup>[14]</sup>。本文基于 ArcGIS10.2 平台叠加分析工具对 1994—2023 年不同时段景观类型间的动态变化进行分析,其计算公式为

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $P$  表示各类景观的面积; $i$  和  $j$  分别表示研究期开始和结束时的湿地类型; $n$  表示湿地类型总数。

1.3.2 景观格局指数分析

景观指数是定量分析景观格局特征的重要方法,可反映景观空间结构及配置情况<sup>[15]</sup>,在景观生态学研究中的应用广泛。本文选取湿地景观格局指数时,重点考虑两个方面:一是能够反映湿地景观的空间结构、斑块特征及连通性;二是准确描述湿地景观的多样性、均匀性和聚集性。结合现有研究<sup>[16-18]</sup>,从斑块类型和景观水平两个层面选取了共计 10 个关键指标,见表 2。在斑块类型水平,选取边缘密度指数  $ED$ 、最大斑块指数  $LPI$ 、景观形状指数  $LSI$ 、平均斑块面积  $AREA\_MN$ 、斑块结合度指数  $COHESION$ 。在景观类型水平,选取平均斑块面积、斑块密度  $PD$ 、

聚合度指数  $AI$ 、蔓延度指数  $CONTAG$ 、香浓多样性指数  $SHDI$ 、香浓均匀度指数  $SHEI$ 。本文的景观格局指数均采用 Fragstats 4.2 景观格局分析软件计算。

表 2 景观格局指数相应生态学意义

| Table 2 Corresponding ecological significance of landscape pattern index |       |                           |
|--------------------------------------------------------------------------|-------|---------------------------|
| 景观指数                                                                     | 应用尺度  | 生态学含义                     |
| 边缘密度                                                                     | 类型    | 反映景观被边界分割的程度              |
| 最大斑块                                                                     | 类型    | 反映景观中优势种特征或景观规模           |
| 景观形状                                                                     | 类型    | 反映景观中不同类型斑块分布和连接程度        |
| 斑块结合度                                                                    | 类型    | 反映斑块间的相互结合程度              |
| 平均斑块面积                                                                   | 类型/景观 | 反映景观被分割的破碎程度以及景观空间结构的复杂程度 |
| 斑块密度                                                                     | 景观    | 反映景观的空间异质性程度              |
| 聚合度                                                                      | 景观    | 反映同类型斑块的连通程度              |
| 蔓延度                                                                      | 景观    | 反映不同景观团聚程度或延展趋势           |
| 香浓多样性                                                                    | 景观    | 反映景观中不同斑块的复杂性和变异性         |
| 香浓均匀度                                                                    | 景观    | 反映景观中不同斑块类型在面积分布上的均匀程度    |

1.3.3 响应关系分析

为建立湿地景观格局指数与水沙要素指标间的响应关系,采用 Pearson 相关法,分析不同水沙要素与湿地类型景观格局指数之间的相关程度,并选取与水沙要素相关性较强的景观格局指数,构建相应的回归方程,以定量分析湿地景观格局指数与水沙要素之间的响应关系。

Pearson 法是通过进行两个变量之间相关分析时的常用方法。记样本为  $(x_i, y_i)$ , 样本数为  $n$ , 则样本的 Pearson 相关系数  $r$  表示为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

式中: $x_i, y_i$  为两个变量序列的第  $i$  个样本; $\bar{x}, \bar{y}$  为对应样本序列的平均值。

文中对数据的相关性分析和回归分析均在 IBM SPSS Statistics25 软件下实现。

2 结果与分析

2.1 花园口站水沙水位变化特征分析

对花园口水文站 1994—2023 年的年径流量、汛期径流量、年输沙量和汛期输沙量,以及汛期最高/最低水位,进行线性趋势分析,如图 2 所示。

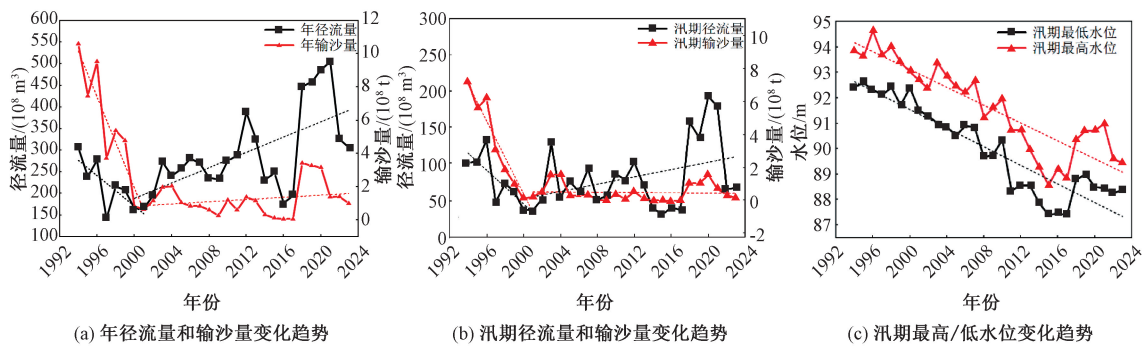


图 2 1994—2023 年花园口站水沙水位变化趋势

Figure 2 Variation trend of water and sediment level in Huayankou Station from 1994 to 2023

近 30 年花园口站径流量整体呈波动上升趋势,尤其是小浪底水库调水调沙后(2018—2021 年),年径流量连续增长,2021 年达到峰值  $504.63 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。汛期径流量虽波动变化,但仍保持高流量状态,这得益于小浪底水库的调控改善了水资源分配,提升了汛期径流量。

年输沙量和汛期输沙量整体呈下降趋势,1994 年达到峰值后呈下降态势。小浪底调水调沙实施后,输沙量显著减少,2006—2017 年多数年份不足  $10^8 \text{ t}$ ;2018 年后虽略有回升,但总体仍处于低水平。小浪底水库的泥沙拦截、水流调节及沉积作用,减少了汛期下游输沙量,显著降低了黄河下游的泥沙输送。

汛期最高水位在 1994—2002 年间波动较大,2002 年后,其呈波动下降趋势,年均下降约  $0.18 \text{ m}$ ;最低水位亦呈下降趋势,2015—2017 年因上游来水量减少进一步降低。

2.2 湿地土地利用类型变化特征分析

2.2.1 土地利用类型面积变化

1994—2023 年黄河滩区土地利用类型分布见图 3。截至 2023 年,耕地(占比 64%)是黄河沿岸主要土地利用类型,其次为建设用地、荒草湿地、河流湿地、滩涂湿地及坑塘湿地。整体来看,土地利用类型在此期间发生了显著变化,耕地及建设用地面积分别以  $8.97 \text{ km}^2/\text{a}$  和  $0.97 \text{ km}^2/\text{a}$  的速度增加;而河流、坑塘、滩涂和荒草湿地面积整体呈现萎缩态势,年均减少  $5.90 \text{ km}^2$ 。

黄河花夹段湿地类别主要包括河流、坑塘、滩涂和荒草 4 种,湿地总面积在过去 30 年里呈现“先减少、后增加,再减少”的发展态势。根据湿地总面积变化情况,可大致分为 3 个阶段:1994—2004 年、2005—2013 年、2014—2023 年,见图 4。湿地面积的阶段性变化与水沙要素的波动密切相关,特别是在 2002 年黄河调水调沙政策实施后,湿地面积变化幅度趋于平缓。

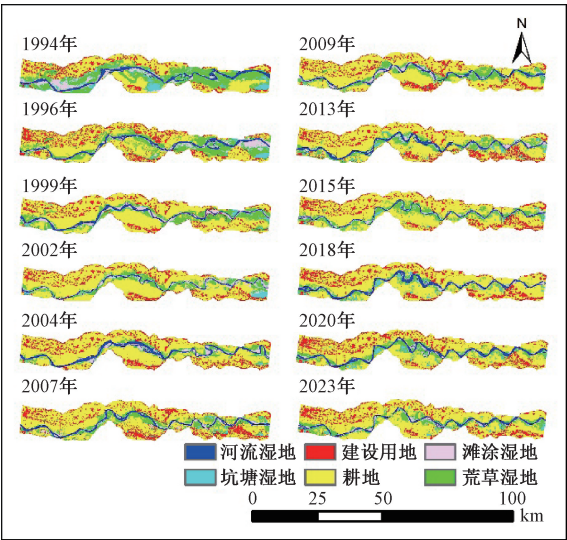


图 3 1994—2023 年研究区土地利用解译图

Figure 3 Interpretive map of land use in the study area from 1994 to 2023

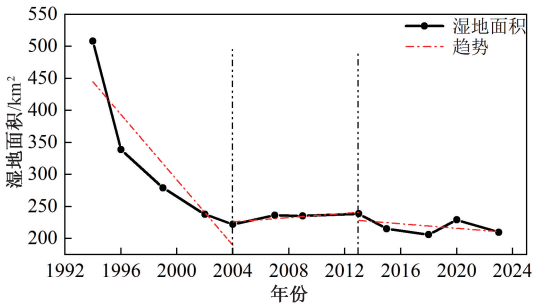


图 4 1994—2023 年湿地面积变化

Figure 4 Wetland area change from 1994 to 2023

第 1 阶段,湿地面积显著减少,在小浪底水库建成前下降尤为明显,占比由 52%(1994 年)减少至 24%(2002 年)。第 2 阶段,湿地面积缓慢增加,主要得益于小浪底水库调控后径流量的增加和输沙量的减少,为湿地提供了稳定的水分供给,促进植被生长和生态系统稳定;同时,汛期水位调控减弱了水文情势的扰动,进一步推动湿地恢复与形成。第 3 阶段,湿地面积呈波动变化,2018 年之前的径流量、输

沙量和水位长期处于低水平,对湿地的补水和维持产生了负面影响,导致面积持续萎缩;2018 年以后,随着径流量、输沙量和水位回升,湿地面积有所增加,但总体面积仍呈下降趋势,总降幅为 12.02%。

2.2.2 土地利用类型转移变化

在 ArcGIS10.2 中对 1994 年、2004 年、2013 年和 2023 年景观类型图进行叠加分析,获取 3 个阶段的景观类型转移情况,如图 5 所示。第 1 阶段,研究区大多数湿地转为滩区耕地(93.09%),其中以荒草湿地(54.64%)和滩涂湿地(20.41%)的转出为主。第 2 阶段,非湿地转入面积大于湿地转出面积,且非湿地转入主要来自耕地(92.28%);耕地转变为荒草湿地(32.59%)、河流湿地(27.98%)和坑塘湿地(20.75%)。第 3 阶段,湿地面积波动减小,以荒草湿地(52.87%)、和坑塘湿地(24%)的转出为主。研究区 3 个阶段内湿地面积变化以荒草湿地与耕地的相互转化为主,其中耕地累计转为荒草湿地 52.66 km<sup>2</sup>,荒草湿地转为耕地 231.22 km<sup>2</sup>,转换多集中在河道两侧。

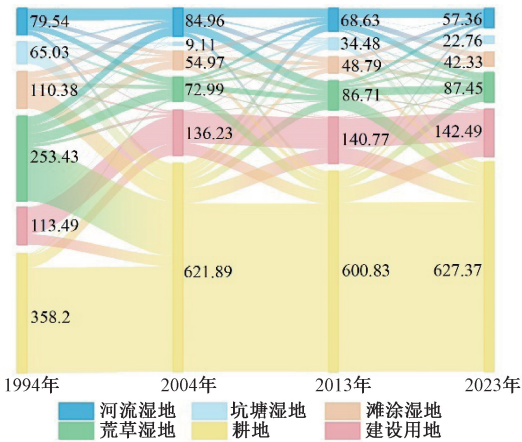


图 5 1994—2023 年研究区内不同景观类型转移方向及面积 (km<sup>2</sup>)

Figure 5 Transfer direction and area of different landscape types in the study area from 1994 to 2023 (km<sup>2</sup>)

2.3 湿地景观格局演变分析

2.3.1 斑块类型水平

基于湿地景观数据计算并分析了各类景观的斑块水平指数变化如图 6 所示。

荒草湿地 *ED* 值高,斑块形状复杂且与其他景观类型连接性强,增强了其稳定性和适应环境变化的能力。河流湿地与耕地 *AREA\_MN* 值波动显著,可能降低局部景观稳定性;坑塘、滩涂、荒草湿地 *AREA\_MN* 值较小,表明其空间分布较复杂。尽管耕地 *LPI* 呈下降趋势,仍为优势景观类型;河流湿地的 *LPI* 较大,是维护湿地环境稳定与生物多样性的关

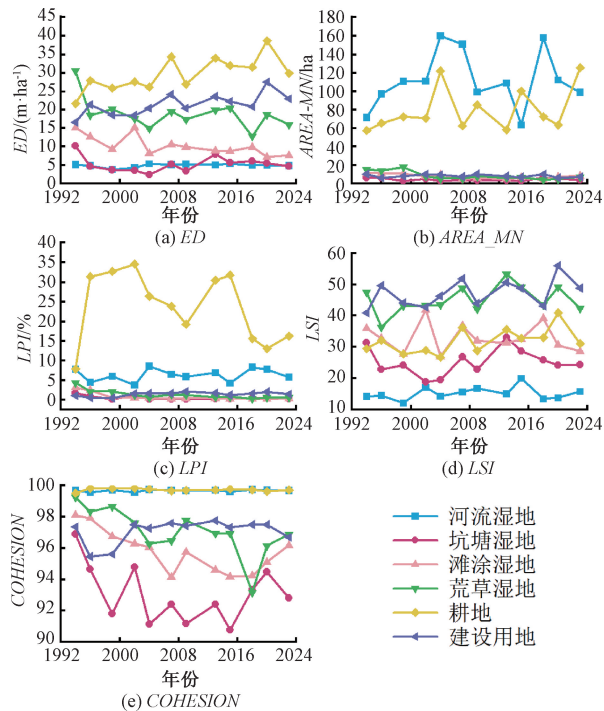


图 6 1994—2023 年研究区斑块类型水平指数变化

Figure 6 The horizontal index of patch types in the study area from 1994 to 2023

键类型<sup>[19]</sup>。坑塘湿地与滩涂湿地主要分布于河道边缘,周边土地利用类型单一且形状简单,*LSI* 值较低;荒草湿地 *LSI* 值较高,斑块形状复杂,有利于内外环境交互作用。此外,河流湿地与耕地的 *COHESION* 值超过 99,显示斑块高度聚集;而坑塘湿地 *COHESION* 均值约 93,分布相对分散,可能与黄河下游区域分散的鱼塘养殖活动有关。

2.3.2 景观类型水平

景观类型水平指标综合反映研究区域内斑块的整体结构与变化见图 7。

研究期内,湿地景观格局呈现阶段性变化,与黄河水沙环境和调水调沙措施密切相关。1994—2004 年,湿地面积大幅减少,*PD* 下降,*AREA\_MN* 增加,*CONTAG* 和 *AI* 显著上升,景观破碎化减弱,聚集度增强,但 *SHDI* 和 *SHEI* 下降,湿地景观异质性和均衡性降低。2005 年后,湿地面积略有回升,*PD* 波动,*AREA\_MN* 略有下降,*CONTAG* 虽维持高水平但有所下降,*SHDI* 和 *SHEI* 小幅回升,景观破碎化微增但异质性有所改善,调水调沙措施有效缓解了湿地退化,促进植被恢复,提升景观丰富度和均匀度。2014—2023 年,湿地面积整体减少,*PD* 降低,*AREA\_MN*、*AI* 和 *CONTAG* 增长微弱,景观斑块的分散性减弱,*SHDI* 和 *SHEI* 基本保持稳定,景观异质性和多样性趋于平衡,且可能形成以芦苇等为主的优势种群格局<sup>[20-21]</sup>。该阶段高输沙量和水位下降推动了湿

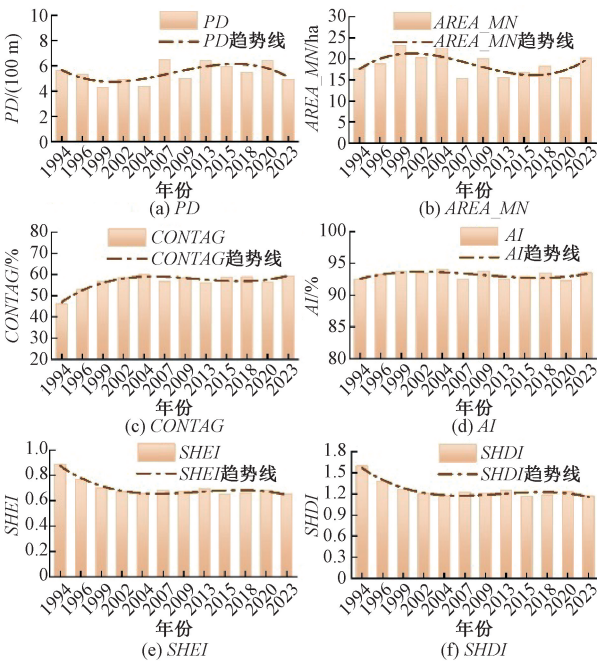


图 7 1994—2023 年研究区景观类型水平指数变化  
Figure 7 Changes of landscape type horizontal index in the study area from 1994 to 2023

地斑块聚合,增强了连通性和稳定性。总体而言,

调水调沙通过调控径流量、输沙量和水位,驱动湿地格局演变,改善湿地连通性并促进景观格局趋于稳定。

2.4 湿地景观格局指数与水文情势响应关系

基于 1994—2023 年花园口站的水沙水位数据,采用 Pearson 相关系数法计算了花夹段湿地景观格局指数 ( $ED$ 、 $LSI$ 、 $LPI$ 、 $AREA\_MN$ 、 $COHESION$ ) 与水文要素 (年径流量、汛期径流量、年输沙量、汛期输沙量、汛期最高/低水位) 之间的相关系数见图 8,并从中选取与水文要素相关性较强的景观格局指数,构建相应的回归方程,见表 3。其中,  $Q_{\text{年}}$  为年径流量;  $Q_{\text{汛}}$  为汛期径流量;  $Q_{\text{年}}$  为年输沙量;  $Q_{\text{汛}}$  为汛期输沙量;  $H_{\text{低}}$  为汛期最低水位;  $H_{\text{高}}$  为汛期最高水位。

由图 8 可知,滩涂湿地  $ED$  指数与水位正相关,而与径流输沙量的相关性较弱,表明水位的涨落直接影响滩涂湿地的淹没面积和干湿交替频率,从而塑造湿地边缘形态。 $LPI$  指数与输沙量强正相关,尤其滩涂湿地中,与汛期/年输沙量的相关系数均超过 0.91,反映出高输沙量通过淤积作用显著促进斑块扩展和稳定。荒草湿地与坑塘湿地的  $LPI$  指数变化进一步验证了输沙量对湿地形态的驱动作用。滩涂湿地、荒草湿地的  $AREA\_MN$  指数与年输沙量和

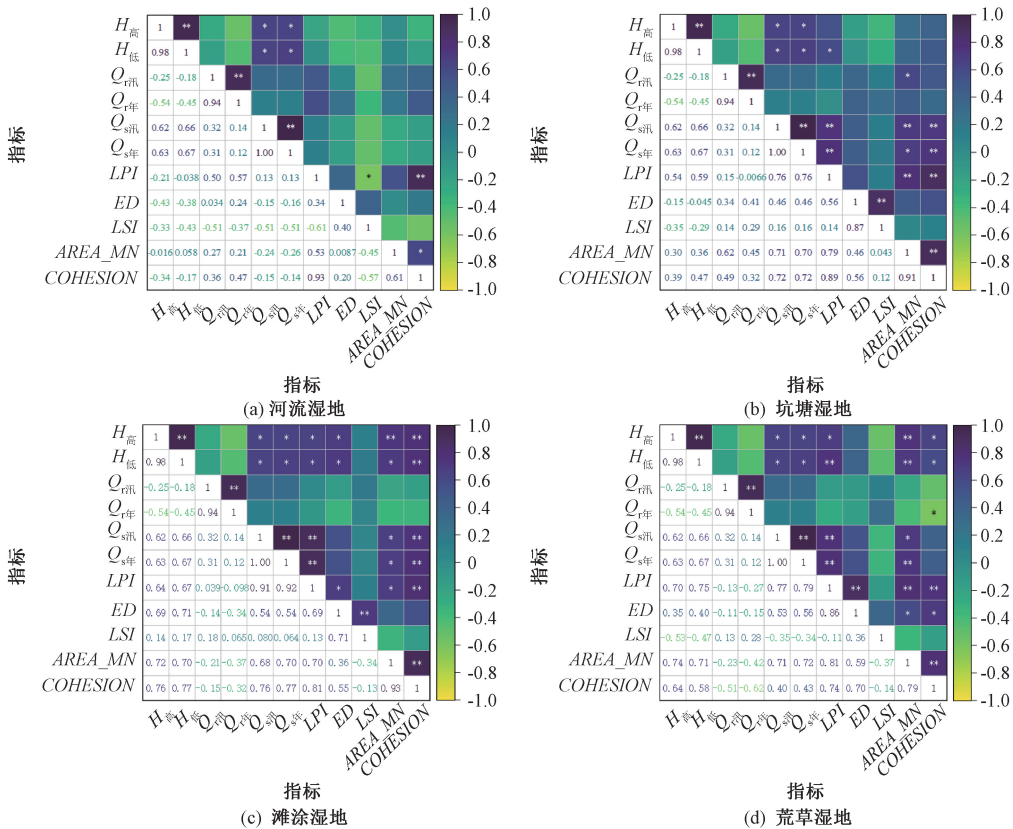


图 8 湿地类型景观格局指数与水沙及水位指标相关分析结果图

Figure 8 Map of correlation analysis results between wetland type landscape pattern index and water and sediment level index

表 3 研究区湿地斑块水平景观格局指数与水沙水位因子回归分析

Table 3 Regression analysis of wetland patch horizontal landscape pattern index and water and sediment level factor in the study area

| 湿地类型 | 景观格局指数     | 回归方程                                                           | 决定系数 $R^2$ |
|------|------------|----------------------------------------------------------------|------------|
| 坑塘湿地 | $LPI$      | $LPI = 0.099Q_{s年} + 0.032H_{低} - 2.687$                       | 0.60       |
|      | $AREA\_MN$ | $AREA\_MN = 0.011Q_{汛} + 0.194Q_{s汛} + 0.112H_{低} - 7.726$     | 0.69       |
|      | $COHESION$ | $COHESION = 0.012Q_{汛} + 0.225Q_{s年} + 0.266H_{低} + 66.843$    | 0.63       |
| 滩涂湿地 | $LPI$      | $LPI = -0.004Q_{r年} + 0.302Q_{s年} - 0.124H_{低} + 12.02$        | 0.90       |
|      | $ED$       | $ED = -0.005Q_{r年} + 0.188Q_{s年} + 0.742H_{低} - 55.729$        | 0.52       |
|      | $AREA\_MN$ | $AREA\_MN = -0.013Q_{r年} + 0.537Q_{s年} - 0.012H_{高} + 10.795$  | 0.69       |
|      | $COHESION$ | $COHESION = -0.005Q_{r年} + 0.309Q_{s汛} + 0.107H_{低} + 86.902$  | 0.76       |
| 荒草湿地 | $LPI$      | $LPI = -0.004Q_{r年} + 0.251Q_{s年} + 0.047H_{低} - 2.418$        | 0.76       |
|      | $AREA\_MN$ | $AREA\_MN = -0.03Q_{r年} + 1.139Q_{s年} - 0.425H_{高} + 52.876$   | 0.78       |
|      | $COHESION$ | $COHESION = -0.015Q_{r年} + 0.309Q_{s年} - 0.257H_{高} + 124.033$ | 0.66       |

汛期输沙量正相关,反映出输沙量增加促进湿地斑块的扩展;而荒草湿地  $COHESION$  指数与年径流量负相关,表明年径流量增加可能加剧湿地斑块分散性。调水调沙期间的高输沙量和水位下降稳定了湿地边缘形态,为湿地植被恢复和生态系统维持创造了有利条件。

基于多元线性回归分析(表 3),不同类型湿地对水沙水位变化的响应差异显著。坑塘湿地的  $AREA\_MN$  及  $COHESION$  随径流量、输沙量及汛期最低水位的增加而增加(决定系数分别为 0.69,0.63),表明其对水沙水位变化敏感性较高; $LPI$  则受到年输沙量与汛期最低水位驱动(决定系数为 0.60)。滩涂湿地的  $LPI$  和  $AREA\_ME$  在径流量减少及汛期水位降低时显著增加,同时年输沙量的增加也进一步促进了滩涂湿地的斑块扩展(决定系数分别为 0.90 和 0.69),表明高输沙量和低水位通过增加滩区暴露面积和淤积能力,有效推动了滩涂湿地的形成与扩展。荒草湿地响应复杂, $LPI$  受年输沙量和汛期最低水位的正向驱动(决定系数为 0.76);而年径流量和汛期最高水位冲刷作用可能削弱湿地斑块聚集性,导致其  $AREA\_MN$  和  $COHESION$  下降。

小浪底调水调沙后的 8—10 月份是湿地景观格局变化的关键时段。在此期间,径流量、输沙量和水位变动共同塑造了湿地的空间格局。滩涂湿地因高输沙量和水位下降而快速扩展,形成稳定的淤积斑块,连通性与稳定性显著提升;荒草湿地则呈现斑块扩展与冲刷效应的叠加,面积增加的同时连通性略有下降;坑塘湿地因水位下降和输沙量增加,其平均斑块面积和结合度显著提升,呈现出持续扩展的趋势。总体来看,调水调沙通过调控径流量、输沙量和水位条件,有效驱动了湿地景观格局的动态演变。输沙量的增加直接促进了湿地斑块的扩展,水位下

降则进一步塑造了湿地的淹没范围和分布特征,而径流量的变化主要通过边缘冲刷及水量输送对湿地斑块的形态产生间接影响。调水调沙不仅在削减洪峰、优化河道水沙平衡方面发挥了关键作用,同时也为黄河下游湿地生态修复提供了帮助。未来,应进一步优化调水调沙的时序与强度,以最大限度提升其生态效益,助力湿地保护与恢复目标的实现。

3 结论

本研究基于 1994—2023 年 Landsat 遥感影像和花园口水文站的水沙水位数据,分析了黄河下游花园口至夹河滩段湿地景观格局变化特征及其水沙要素响应关系。主要结论如下。

- (1) 近 30 年来,花园口站径流量波动上升,小浪底水库调控有效提升了汛期径流量并促进湿地生态恢复;输沙量减少并维持低水平;汛期水位整体下降,反映水库调控与上游来水变化的综合影响。这些变化为湿地景观格局演变提供了外部驱动条件。
- (2) 花夹段湿地景观分布以河流和临岸为主;湿地总面积整体下降,向非湿地的转换面积达到 443 km<sup>2</sup>,主要变为滩区耕地,而非湿地向湿地的转换面积仅 143.06 km<sup>2</sup>。
- (3) 花夹段湿地景观格局指数表明河流湿地为主要类型,具有较高的稳定性;荒草湿地形态复杂且稳定;坑塘和滩涂湿地形态简单分散。景观水平上,调水调沙政策实施后,湿地景观整体连通性增强,景观丰富度和均匀度提升且趋于稳定。
- (4) 滩涂、荒草和坑塘湿地在地形和生态特点上各不相同,但其最大斑块指数、平均斑块面积、蔓延度指数都对输沙量和水位变化敏感,且受输沙量的影响尤为显著。

因此,未来应加强水沙调控、提升水资源利用效

率<sup>[22]</sup>,减少水沙波动对湿地景观的影响;同时,针对滩涂和荒草湿地,实施科学的生态修复项目,提升湿地环境质量和生物多样性,促进生态系统可持续发展。此外,本文构建的回归模型仅考虑了水沙要素的影响,下一步研究可以聚焦于不同类型湿地景观变化的驱动机制,以及在不同水沙条件下的适应性策略,为湿地保护与管理提供更科学的依据。

参考文献:

[1] 徐晓龙,王新军,朱新萍,等. 1996—2015 年巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地景观格局演变分析[J]. 自然资源学报, 2018, 33(11): 1897–1911.  
XU X L, WANG X J, ZHU X P, et al. Landscape pattern changes in alpine wetland of bayanbulak swan lake during 1996—2015[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(11): 1897–1911.

[2] 程亦菲,夏军强,周美蓉,等. 黄河下游游荡段过流能力调整对水沙条件与断面形态的响应[J]. 水科学进展, 2020, 31(3): 337–347.  
CHENG Y F, XIA J Q, ZHOU M R, et al. Response of flood discharge capacity to the incoming flow and sediment regime and channel geometry in the braided reach of the Lower Yellow River[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(3): 337–347.

[3] 郝伏勤,高传德,黄锦辉,等. 黄河下游河道湿地浅析[J]. 人民黄河, 2005, 27(4): 5–7, 63.  
HAO F Q, GAO C D, HUANG J H, et al. A brief analysis on channel wetlands of the Lower Yellow River[J]. Yellow River, 2005, 27(4): 5–7, 63.

[4] 李健明,祁雪姣,李佳君,等. 黄河源区 1990—2020 年景观格局动态及驱动因素分析[J]. 水生态学杂志, 2025, 46(1): 20–33.  
LI J M, QI X J, LI J J, et al. Landscape pattern dynamics and driving forces in the Yellow River source area, 1990—2020[J]. Journal of Hydroecology, 2025, 46(1): 20–33.

[5] LI S N, WANG G X, DENG W, et al. Influence of hydrology process on wetland landscape pattern: a case study in the Yellow River Delta[J]. Ecological Engineering, 2009, 35(12): 1719–1726.

[6] 张爱静,董哲仁,赵进勇,等. 黄河调水调沙期河口湿地景观格局演变[J]. 人民黄河, 2013, 35(7): 69–72.  
ZHANG A J, DONG Z R, ZHAO J Y, et al. The evolution of wetland landscape pattern of the Yellow River Estuary during water and sediment regulation[J]. Yellow River, 2013, 35(7): 69–72.

[7] DOU X Y, GUO H D, ZHANG L, et al. Dynamic landscapes and the influence of human activities in the Yellow River Delta wetland region[J]. Science of the Total Environment, 2023, 899: 166239.

[8] 卢晓宁,张静怡,洪佳,等. 基于遥感影像的黄河三角洲湿地景观演变及驱动因素分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊 1): 214–223.

LU X N, ZHANG J Y, HONG J, et al. Analysis of wetland landscape evaluation and its driving factors in Yellow River Delta based on remote sensing image[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(S1): 214–223.

[9] 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.

[10] WEI C X, GUO B, FAN Y W, et al. The change pattern and its dominant driving factors of wetlands in the Yellow River Delta based on sentinel-2 images[J]. Remote Sensing, 2022, 14(17): 4388.

[11] 陈昂,隋欣,王东胜,等. 黄河下游河道沿岸景观格局时空动态变化研究[J]. 水电能源科学, 2014, 32(11): 107–110.  
CHEN A, SUI X, WANG D S, et al. Spatial and temporal dynamic variation research of Yellow River downstream coastal landscape[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(11): 107–110.

[12] 张金良,李岩,白玉川,等. 黄河下游花园口-高村河段泥沙时空分布及地貌演变[J]. 水利学报, 2021, 52(7): 759–769.  
ZHANG J L, LI Y, BAI Y C, et al. Sediment temporal-spatial distribution and geomorphological evolution in the Huayankou-Gaocun reach in the lower Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(7): 759–769.

[13] 申志锋. 灌区、沙碱与稻作: 近代以来豫北黄卫之间土地生态变迁与民众生计适应[J]. 清华大学学报(哲学社会科学版), 2024, 39(4): 77–99, 230.  
SHEN Z F. Irrigation district, sand alkali and paddy cultivation: land ecological changes and people's livelihood adaptation between the Yellow River and the Wei River in northern Henan since the modern times[J]. Journal of Tsinghua University (Philosophy and Social Sciences), 2024, 39(4): 77–99, 230.

[14] GUO P F, ZHANG F F, WANG H Y. The response of ecosystem service value to land use change in the middle and lower Yellow River: a case study of the Henan section[J]. Ecological Indicators, 2022, 140: 109019.

[15] 布仁仓,胡远满,常禹,等. 景观指数之间的相关分析[J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2764–2775.  
BU R C, HU Y M, CHANG Y, et al. A correlation analysis on landscape metrics[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(10): 2764–2775.

[16] WANG Q X, ZHANG P Y, CHANG Y H, et al. Landscape pattern evolution and ecological risk assessment of the Yellow River Basin based on optimal scale[J]. Ecological Indicators, 2024, 158: 111381.

[17] WANG Q, WANG H J. Spatiotemporal dynamics and evolution relationships between land-use/land cover change and landscape pattern in response to rapid urban sprawl process: a case study in Wuhan, China[J]. Ecological Engineering, 2022, 182: 106716.

[18] 梁加乐,陈万旭,李江风,等. 黄河流域景观破碎化

时空特征及其成因探测[J]. 生态学报, 2022, 42(5): 1993–2009.

LIANG J L, CHEN W X, LI J F, et al. Spatiotemporal patterns of landscape fragmentation and causes in the Yellow River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5): 1993–2009.

[19] 张会萍, 肖曼, 曾曼芸, 等. 河南段黄河湿地水文因子对植物多样性的影响[J]. 河南农业大学学报, 2022, 56(5): 822–829.

ZHANG H P, XIAO M, ZENG M Y, et al. Effects of hydrological environment on plant diversity in the Yellow River Wetland of Henan Section[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2022, 56(5): 822–829.

[20] 李雅, 赵晓东, 梁少民, 等. 黄河干流河南段河岸带湿地植物分布特征[J]. 人民黄河, 2023, 45(增刊1): 54–55.

LI Y, ZHAO X D, LIANG S M, et al. Distribution characteristics of wetland plants in the riparian zone of Henan section of the Yellow River mainstream[J]. Yellow River, 2023, 45(S1): 54–55.

[21] 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 University (Engineering Science), 2024, 45(4): 102–110.

[22] 左其亨, 王鹏抗, 张志卓, 等. 黄河流域水资源利用水平及提升途径[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(3): 12–19.

ZUO Q T, WANG P K, ZHANG Z Z, et al. Utilization level and improvement approach of water resources in the Yellow River Basin[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(3): 12–19.

Changes in Wetland Landscape Patterns and the Relationship Between Water-sediment Elements in Huayuankou-Jiahetan Section

DOU Ming<sup>1,2</sup>, CAO Yingshu<sup>1</sup>, MI Qingbin<sup>1</sup>, DING Junxiang<sup>2</sup>, WANG Han<sup>1</sup>, PAN Deng<sup>3</sup>

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Institute of Natural Resources Monitoring and Comprehensive Land Improvement of Henan Province, Zhengzhou 450016, Chian)

**Abstract:** The wetland area between Huayuankou and Jiahetan in the lower reaches of the Yellow River is a vital component of the Yellow River corridor ecosystem. Its formation, evolution, and degradation are closely linked to the unique variations in the river’s water and sediment dynamics. To clarify the evolution characteristics of different types of wetland landscape patterns in this section and their response mechanisms to changes in water and sediment elements such as runoff, sediment transport volume and water level, in this study the section of the Yellow River from Huayuankou to Jiahetan was examined. Utilizing 12 phases of Landsat satellite imagery from 1994 to 2023, a wetland landscape database was constructed. The study employed land use transfer matrices and landscape pattern index methods to quantitatively analyze the spatiotemporal changes in wetland types, patch characteristics, and landscape structure. Subsequently, by integrating the flow, water level, sediment concentration and other data from the Huayuankou station, the response relationship between the landscape pattern characteristics of different types of wetlands and water and sediment elements was highlighted. The results indicated that: ①From 1994 to 2023, the runoff at the Huayuankou Station showed an upward trend, while sediment discharge and water levels exhibited an overall downward trend. ②The areas of wetland types such as rivers, ponds, mudflats, and wild grasslands in the study area showed an overall shrinking trend, with an average annual reduction of 5.90 km<sup>2</sup>. The most significant transformation was the conversion of wetlands into farmland. ③At the landscape level, following the implementation of the water and sediment regulation policy, the overall connectivity of wetland landscapes improved, while landscape richness and evenness increased and tended to stabilize. ④In pond wetlands, mudflat wetlands, and wild grassland wetlands, indices such as the largest patch index, mean patch area, and contagion index showed significant correlations with sediment discharge and water level at the Huayuankou Station, with a particularly stronger correlation with sediment discharge. The findings of this study provided a theoretical basis for wetland ecological protection and restoration in the Yellow River Basin.

**Keywords:** landscape pattern change; water-sediment elements; response relationship; Huayuankou-Jiahetan