

黄河下游滩涂湿地泥沙冲淤格局及影响因素

王艳琪¹, 黄艳伟¹, 朱红雷¹, 张婵¹, 侯翠翠¹, 钱伟峰²,
韩圆², 党丽², 赵淑娟², 郭旭¹, 徐国耀¹

(1. 河南师范大学, 河南 新乡 453002; 2. 孟州黄河湿地保护中心, 河南 焦作 454750)

摘要: [目的] 阐明小浪底水库水沙调控影响下黄河下游典型滩涂湿地的泥沙冲淤格局, 探究利用遥感提取的泥沙冲淤影响因子预测冲淤格局的可行性, 为黄河下游湿地生态保护和高质量发展提供科学参考。[方法] 在黄河下游选取了6个典型滩涂湿地, 通过布设样线和样点, 利用RTK获取了2023—2024年湿地泥沙冲淤数据, 并基于水文资料和多源遥感影像, 分析了相对高程、河道距离、NDVI和水淹时长4个关键因素对泥沙冲淤格局的影响。[结果] (1) 各滩地微地形变化呈现显著空间异质性, 但整体以淤积为主导趋势, 平均淤积量0.152 m; (2) 相对高程、河道距离、NDVI和水淹时长与样点冲淤量的相关系数 r 分别为-0.319, 0.046, -0.129, 0.174, p 值均小于0.05; (3) 采用所有因子建立的泥沙冲淤多元回归模型 $R^2=0.116$, $p<0.001$ 。[结论] 黄河下游滩涂湿地以淤积为主, 冲淤量与各影响因子之间存在显著的统计学相关性, 但其线性关系较弱, 多元回归分析进一步表明, 利用现有因子精准预测冲淤格局的难度较大, 这凸显了该地貌过程形成机制的复杂性。

关键词: 泥沙冲淤; 多源遥感分析; 滩涂湿地; 黄河下游

中图分类号: P931.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0072-08

Sediment erosion-deposition patterns and influencing factors in floodplain wetlands of lower Yellow River

Wang Yanqi¹, Huang Yanwei¹, Zhu Honglei¹, Zhang Chan¹, Hou Cuicui¹, Qian Weifeng²,
Han Yuan², Dang Li², Zhao Shujuan², Guo Xu¹, Xu Guoyao¹

(1. Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453002, China;

2. Mengzhou Yellow River Wetland Conservation Center, Jiaozuo, Henan 454750, China)

Abstract: [Objective] This study aims to elucidate the sediment erosion-deposition patterns in typical floodplain wetlands of the lower Yellow River under the influence of water-sediment regulation by the Xiaolangdi Reservoir and to explore the feasibility of predicting these patterns using remote sensing-derived influencing factors, thereby providing scientific support for ecological protection and high-quality development of the wetlands in this region. [Methods] This study selected six representative floodplain wetlands in the lower Yellow River, where sediment erosion-deposition processes were monitored from 2023 to 2024 using RTK (Real-Time Kinematic) surveys along established transects and sampling points. By integrating hydrological data and multi-source remote sensing imagery, the effects of four key factors—relative elevation, distance from the river channel, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), and inundation duration—on sediment erosion-deposition patterns were analyzed. [Results] (1) Microtopographic changes exhibited significant spatial heterogeneity across the wetlands, though deposition dominated as the overall trend (mean deposition thickness was 0.152 m). (2) The correlation

收稿日期: 2025-04-28

修回日期: 2025-06-10

接受日期: 2025-06-20

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(32271604); 河南省高等学校重点科研项目资助计划(22A180020)

第一作者: 王艳琪(2001—), 女, 河南郑州人, 硕士研究生, 研究方向为植物生态学。E-mail: wangyanqi202399@stu.htu.edu.cn

通信作者: 朱红雷(1987—), 男, 河北邯郸人, 博士, 讲师, 主要从事生态遥感研究。E-mail: zhuhonglei@htu.edu.cn

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

coefficients between relative elevation, distance from the river channel, NDVI, and inundation duration and the amount of erosion-deposition at the sampling points were -0.319 , 0.046 , -0.129 and 0.174 , respectively, with all p -values less than 0.05 . (3) The multiple regression model established using all factors had an R^2 of 0.116 and $p < 0.001$. [Conclusion] The floodplain wetlands in the lower Yellow River are dominated by sediment deposition. While a statistically significant correlation exists between net sediment change and various influencing factors, the linear relationship is relatively weak. Furthermore, multiple regression analysis indicates that accurately predicting sediment erosion-deposition patterns using the existing factors remains challenging, highlighting the complexity of the geomorphic processes in this region.

Keywords: sediment erosion-deposition; multi-source remote sensing analysis; floodplain wetlands; lower Yellow River

泥沙冲淤是改变湿地水文条件(地下水水位和土壤含水量等^[1-3]),塑造湿地生态系统结构与功能的重要驱动力,影响着湿地的地形地貌^[4]与生态环境质量^[5]。研究湿地泥沙冲淤格局及其影响因素对于揭示高泥沙河流湿地的地貌演化规律、优化调水调沙工程的生态调控策略、维护湿地生物多样性及生态系统服务功能具有重要的理论与实践意义。黄河作为世界上含沙量最大的河流,每年有大量泥沙在河道和滩地中输移和沉积。据《2023黄河泥沙公报》统计,2023年黄河输沙量约9.3亿t。小浪底水库作为黄河下游重要工程,其调水调沙运行模式对下游河道和滩地泥沙冲淤格局产生了深远影响。调水调沙期间,水库通过集中下泄大量泥沙和水流,冲刷下游河道,减少淤积^[6-7],并维持河道的行洪能力。然而,这一过程也导致大量泥沙在短时间内集中排放,加剧了滩地泥沙冲淤变化格局的复杂性。

尽管黄河泥沙冲淤问题备受瞩目,但目前针对黄河滩涂湿地的相关研究相对匮乏,现有成果多集中于河道冲淤演变^[8-12]和防洪安全等^[13-14]方面。当前黄河下游泥沙冲淤研究主要依赖水文站和断面数据,但其站点间隔较大,空间分辨率不足,难以充分揭示滩涂湿地内部的冲淤格局。另一方面,实测数据虽精度较高,但成本高昂、效率低下,同样难以满足区域尺度格局分析的需求。研究表明,相对高程、河道距离、植被覆盖和水淹时长是影响滩涂湿地泥沙冲淤的关键因子^[15-17],且这些因子均可通过遥感技术高效获取。因此,探究这些关键因子与泥沙冲淤的相关性,对于评估利用遥感手段在宏观尺度上反演黄河滩涂湿地泥沙冲淤格局的可行性具有重要意义。基于此,本研究选取黄河下游典型滩涂湿地,通过布设样线并设置样点,分析2023—2024年滩涂湿地的泥沙冲淤格局;同时结合水文资料和多源遥感影像,定量解析相对高程、河道距离、植被覆盖和水淹时长对泥沙冲淤的影响规律。研究旨在深化对黄

河下游滩涂湿地泥沙冲淤过程的认识,并为黄河流域湿地生态保护与高质量发展提供科学依据。

1 研究区位置

通过目视分析2023年黄河下游河南段滩涂湿地的分布情况,发现小浪底至郑州段滩涂湿地较多,郑州至濮阳段滩涂湿地较少且面积较小,湿地农田化现象较为严重。因此,在小浪底坝下至郑州间的黄河河段内选取6个样地,按从上游到下游顺序编号为A,B,E,F,L,M滩地(图1)。其中,A,E和M滩地位于黄河北岸,B,F和L滩地位于黄河南岸。

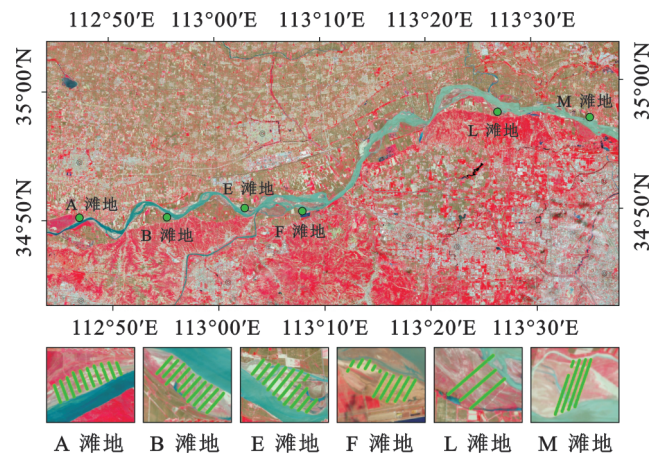


图1 研究区位置

Fig. 1 Location map of study area

2 数据和方法

2.1 滩地冲淤实地调查

滩涂湿地地形实地测量的样线和样点设置如图1所示。其中,A,B,E和F滩地设置10条样线,L和M滩地分别设置3条和4条样线。A,B,L和M滩地样线较为完整,E和F滩地部分样线穿过农田,当地农户为了防止水淹,自行堆积生产坝,因此农田区域的样点没有观测。

表1展示了泥沙冲淤实地调查的时间、样线和样

点的数量。其中,样点数量统计的是被水淹没过的样点。2023年第一次调查时,使用科力达 K20RTK 对样线进行放样,在样线内每隔(10±0.1) m 采集一个

点位的位置和高程信息。2024年调查时,直接对2023年调查过的点位进行放样,重新测量其高程信息。其中,部分点位由于水淹和农田耕作没有观测。

表 1 样地样点调查信息

Table 1 Field survey information on sampling plots and points

滩地	位置	2023年高程测量时间(年-月-日)	2024年高程测量时间(年-月-日)	样线/条	样点/个
A	河南焦作孟州	2023-05-23	2024-04-15	10	284
B	河南郑州巩义	2023-05-23	2024-04-16	10	343
E	河南焦作温县	2023-04-15	2024-05-19	10	669
F	河南郑州巩义	2023-05-24	2024-04-17	10	241
L	河南郑州荥阳	2023-05-24	2024-04-18	3	215
M	河南焦作武陟	2023-04-14	2024-05-18	4	173

2.2 水情数据

研究区水文站点小浪底和花园口 2023 年的水位和流量数据来自水利部黄河水利委员会(<http://www.yrcc.gov.cn/>)发布的实时水情,泥沙数据来自《2023 黄河泥沙公报》。2024 年的地形测量在小浪底调水调沙前开展,小浪底调水调沙前黄河水位较低,湿地不发生淹没。因此,没有收集 2024 年的水文资料。

2.3 河道距离计算

选择 2023 年 6 月 1 日 Sentinel-2B 的影像,使用 Arc Map 10.6 通过目视解译提取河道边界线,利用邻近分析工具计算样点到河道距离。

2.4 NDVI 提取

选用 2023 年 6 月 1 日的 Sentinel-2B 影像,提取样点对应的 NDVI 值,分析植被覆盖对泥沙冲淤的影响。Sentinel-2B L2A 数据可在欧空局网站免费获取(Copernicus Browser, <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>)。采用 ENVI 5.6 计算 NDVI,并提取样点对应的 NDVI 值。

NDVI 的具体公式如下:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

式中: NIR 为近红外波段反射率; R 为红波段反射率。

2.5 淹没时长计算

2.5.1 卫星影像获取和处理 采用高分 1 号、环境 2 号系列卫星影像分析湿地的淹没情况。高分一号 01 星(GF1_WFV:L1A)(16m 宽视场相机)、环境 2A、环境 2B 号卫星(HJ2A,HJ2B_CCD:L1A)(16 m 光学相机)卫星影像来自中国资源卫星应用中心(<https://www.cresda.com/>)。以 2023 年 6 月 8 日—2023 年 7 月 16 日的 12 个影像来提取调查样点淹没天数(表 2)。Sentinel-1 SAR 在研究区获取数据的时间间隔较长(12 d),且与多光谱影像时间重合。因此,本研究没有采用 Sentinel-1 SAR 分析湿地的淹没情况。

表 2 淹没天数统计采用的卫星影像

Table 2 Satellite imagery used for inundation duration statistics

获取影像日期 (年-月-日)	卫星类型	获取影像日期 (年-月-日)	卫星类型
2023-06-08	高分一号 01 星(GF1)	2023-06-26	环境 2B 号卫星(HJ2B)
2023-06-09	环境 2B 号卫星(HJ2B)	2023-06-30	环境 2B 号卫星(HJ2B)
2023-06-10	环境 2B 号卫星(HJ2B)	2023-07-04	环境 2B 号卫星(HJ2B)
2023-06-13	环境 2B 号卫星(HJ2B)	2023-07-08	环境 2B 号卫星(HJ2B)
2023-06-14	环境 2B 号卫星(HJ2B)	2023-07-15	环境 2A 号卫星(HJ2A)
2023-06-22	环境 2B 号卫星(HJ2B)	2023-07-16	高分一号 01 星(GF1)

2.5.2 淹没时长计算 为更好地区分水体和陆地,使用水体指数 NDWI 以凸显影像中的水体信息。

$$NDWI = \frac{G - NIR}{G + NIR} \quad (2)$$

式中: G 为绿波段反射率; NIR 为近红外波段反射率。

首先在 ENVI 5.6 计算水体指数 NDWI,根据影像中水体所在区域的 NDWI 的范围,设置相应的阈值,大于阈值的地方为水体,小于阈值的地方为陆地和其他;将提取水体后的 12 个影像导入 Arc Map

10.6,同时导入样点的位置数据,通过多值提取至点工具计算样点在影像中是否被淹没,用 0 表示样点未被淹没,用 1 表示样点被淹没。数据统计后,根据影像获取日期来计算样点的淹水时长,具体公式如下:

$$\Delta T = (T_e - T_s) + 1 \quad (3)$$

$$T = \sum_{k=1}^n \Delta T_1 + \Delta T_2 + \dots + \Delta T_n \quad (4)$$

式中: ΔT 为样点在遥感影像监测期内的一段连续淹没时的水淹天数统计; T_e 为监测影像中该连续淹没

时间段的淹没结束的成像日期;Ts为监测影像中该连续淹没时间段的淹没开始的成像日期;T为该样点在12个影像中总的淹没时长, $n \leq 12$ 。

3 结果与分析

3.1 2023年研究区水沙概况

表3为2023年小浪底和花园口水文站逐月径流

量与输沙量。2023年,小浪底站月径流量6月、7月最高,实测径流量为102.48亿 m^3 ,占全年的38.2%;花园口站月径流量同样6月、7月最高,实测径流量为112.86亿 m^3 ,占全年的36.8%。小浪底输沙量集中在7月、8月和9月,其他月份水库没有排沙,只下泄清水。花园口6月、7月和8月的输沙量占年输沙量的79.3%。

表3 2023年小浪底、花园口水文站逐月径流量与输沙量

Table 3 Monthly runoff and sediment load at Xiaolangdi and Huayuankou hydrological stations in 2023

月份	水文站	1月	2月	3月	4月	5月	6月
月径流量/亿 m^3	小浪底	12.80	9.02	21.27	19.67	25.34	67.39
	花园口	10.77	10.55	21.35	21.67	28.39	69.47
月输沙量/万t	小浪底	0	0	0	0	0	0
	花园口	68.0	42.3	346	371	525	3010
月份	水文站	7月	8月	9月	10月	11月	12月
月径流量/亿 m^3	小浪底	35.09	13.61	16.77	16.55	15.86	14.97
	花园口	43.39	19.34	22.19	23.60	18.61	17.97
月输沙量/万t	小浪底	13600	715	61.20	0	0	0
	花园口	5730	1020	495	343	196	177
年径流量/亿 m^3	小浪底	268.5					
	花园口	307.1					
6—7月径流量/亿 m^3	小浪底	102.48					
	花园口	112.86					
年输沙量/亿t	小浪底	1.44					
	花园口	1.23					
7—9月输沙量/亿t	小浪底	1.44					
6—8月输沙量/亿t	花园口	0.976					

图2为2023年5—8月的小浪底、花园口丰水期前后逐日流量-水位图。可以发现,小浪底和花园口的流量有两个较为明显的波动。第一次波动出现在6月5日左右,小浪底和花园口的峰值流量分别为3190,2710 m^3/s ,水位分别为135.75,89.93m。第2个波动出现在6月21日—7月16日,黄河水利委员会于

该时间段实施调水调沙。小浪底和花园口的峰值流量分别为4460,4560 m^3/s ,峰值水位分别为136.43,90.66m,水位较平水期水位分别上涨2.63,2.01m,大范围湿地被淹没。7月17日到汛期结束,小浪底和花园口流量降至最低时流量分别为347,652 m^3/s ,水位分别为132.54,88.34m。

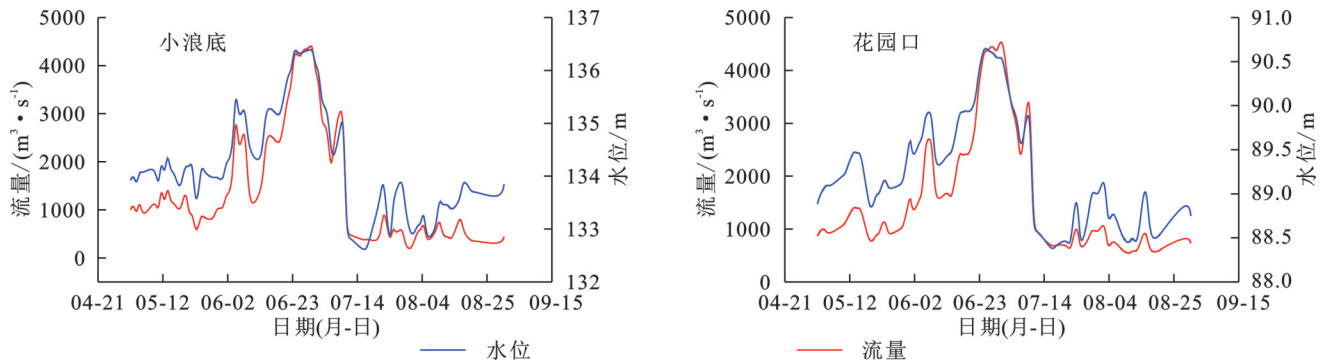


图2 2023年5—8月小浪底、花园口水文站逐日流量-水位图

Fig. 2 Daily discharge-water level curves at Xiaolangdi and Huayuankou hydrological stations (May-August 2023)

3.2 各滩地泥沙冲淤状况

表4以淤积和冲蚀最大值、最小值、平均值和标准差描述了各滩地整体地形变化。图3展示了各滩涂湿

地淹没样点冲淤状况的空间分布。综合表4,图3发现,研究区各滩地微地形变化呈现显著空间异质性,但整体以淤积为主导趋势(平均淤积量0.152m),各滩地

淤积点占比均高于冲蚀点占比。具体表现为F滩地平均淤积量最大(0.208 m),其次为B滩地(0.191 m)和A滩地(0.189 m)。E滩地呈现出最大冲刷深度(1.896 m)与最大淤积深度(1.507 m)的极端值,但其平均淤积量(0.153 m)仍维持正值。L滩地具有次高的最大淤积深度(1.486 m)和冲刷深度(1.327 m),其平均淤

积量(0.021 m)接近冲淤平衡状态;淤积点和冲蚀点占比相差最小(淤积占比54.4%,冲蚀占比45.6%)。M滩地最大淤积量为0.926 m,最大冲刷量为0.123 m,平均淤积量为0.097 m;淤积点和冲蚀点占比相差最大(淤积占比85.5%,冲蚀占比14.5%)。此外,滩地的冲淤格局并没有表现出明显的上下游趋势。

表4 各滩地冲淤量描述性统计

Table 4 Descriptive statistics of sediment erosion-deposition volumes across floodplains

滩地编号	平均冲淤量/m	淤积点占总数的比例/%	淤积概况				冲蚀点占总数的比例/%	冲蚀概况			
			最大值/m	最小值/m	平均值/m	标准差		最大值/m	最小值/m	平均值/m	标准差
A	0.189	84.5	0.810	0.000	0.287	0.181	15.5	-0.004	-1.121	-0.346	0.342
B	0.191	80.2	1.232	0.001	0.248	0.267	19.8	-0.001	-0.635	-0.041	0.104
E	0.153	73.2	1.507	0.003	0.399	0.288	26.8	-0.001	-1.896	-0.519	0.476
F	0.208	81.7	1.089	0.000	0.266	0.247	18.3	-0.001	-0.565	-0.052	0.114
L	0.021	54.4	1.486	0.001	0.073	0.217	45.6	-0.001	-1.327	-0.040	0.132
M	0.097	85.5	0.926	0.001	0.116	0.155	14.5	-0.001	-0.123	-0.019	0.024

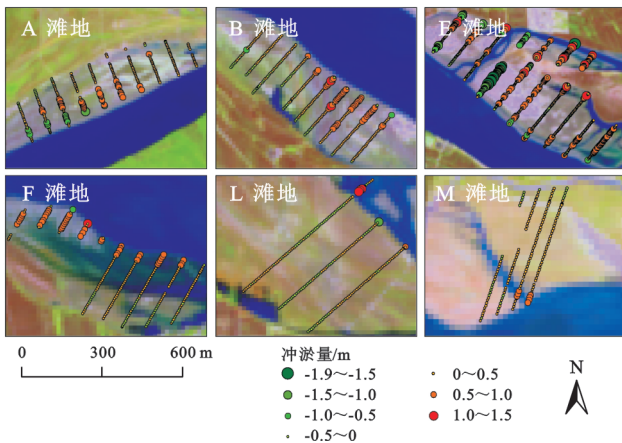


图3 2023—2024年淹没样点的冲淤量

Fig. 3 Sediment erosion-deposition volumes of inundated sampling points (2023—2024)

3.3 相对高程与泥沙冲淤的关系

以2023年各滩地最低高程的样点(河道水面)为基准面,利用各滩地样点高程值与基准面的落差值作为相对高程。图4为相对高程和泥沙冲淤量的散点图。滩地的相对高程与泥沙冲淤整体呈负相关趋势($R^2=0.1019$, $p<0.0001$)。相对高程在0.5 m以内的样点表现为淤积;相对高程在0.5~2.0 m的样点,冲蚀和淤积现象并存,淤积样点较多;样点的相对高程在2.0~3.0 m,样点主要表现为冲刷,少量样点表现为冲淤平衡。

3.4 河道距离对泥沙冲淤的影响

从图3中可以看出,靠近主河道和河汉的样点冲蚀和淤积现象并存,且变化更为剧烈。以A滩地为例,靠近河道的点位冲淤量变化在1.0 m左右,距河

道较远的地方变化不大,地形变化在0.5 m以内。B滩地和F滩地靠近河岸的样点更多地表现为淤积。E滩地内河汉纵横,地形较为复杂,冲淤变化也最为剧烈,其中一条样线靠近河汉,整体表现为强烈的冲蚀。L滩地和M滩地,仅有少量靠近河岸的样点表现出较为强烈的冲蚀和淤积,大部分样点冲淤变化较小。样点河道距离与泥沙冲淤整体呈正相关趋势($R^2=0.0016$, $p=0.0436$),多数表现为淤积状态,且淤积量集中在1.0 m以内。

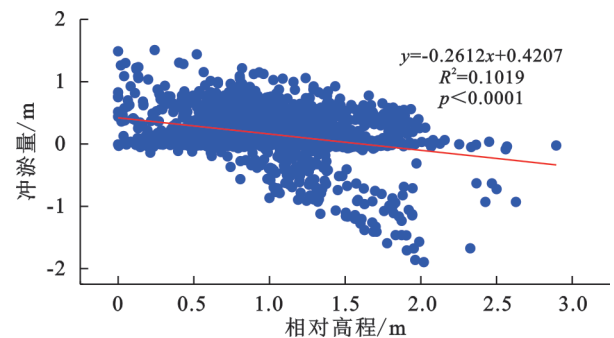


图4 相对高程与冲淤量关系

Fig. 4 Relationship between relative elevation and sediment erosion-deposition volumes

3.5 NDVI与泥沙冲淤的关系

图5展示了各滩涂湿地淹没样点处NDVI分布状况。从图中可以看出,靠近主河道和河汉的样点NDVI较小。A滩地和B滩地靠近河岸样点的NDVI(0.1~0.3)相较于光滩的样点(0.2~0.4)更小。E滩地内河汉纵横,地形较为复杂,NDVI值均小于0.3,且靠近河汉和河道的样点NDVI值更小(-0.2~0.1)。F滩地、L滩地和M滩地,靠近或处于河道、河汉的部

分样点处 NDVI 值为负(-0.2~0)。

图 6 为调水调沙前后 NDVI 与冲淤量关系的散点图。如图 6A 所示,调水调沙前(2023 年 6 月 1 日)各样点处的 NDVI 与泥沙冲淤变化关系呈负相关($R^2=0.0163, p<0.0001$),植被覆盖少的样点处,即 NDVI 为-0.1~0.05 时,主要以淤积为主;NDVI 为 0.05~0.2 时,冲蚀和淤积现象并存;NDVI 在 0.2~0.4,即植被覆盖较高时,样点主要表现为淤积,但淤积量明显小于 NDVI 为-0.1~0.05 时的样点。如图 6B 所示,调水调沙后(2024 年 6 月 15 日)各样点处 NDVI 与泥沙冲淤变化关系呈正相关($R^2=0.0737, p<0.0001$)。图 6C 为调水调沙前后样点处 NDVI 变化与泥沙冲淤关系为显著正相关($R^2=0.1851, p<0.0001$),表明泥沙淤积量越大,植被的 NDVI 值越高。

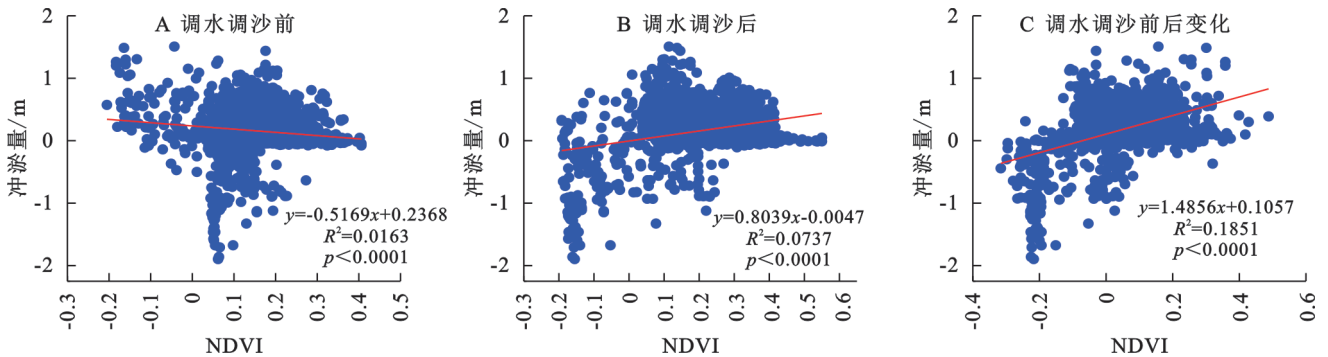


图 6 调水调沙前、调水调沙后、调水调沙前后变化 NDVI 与冲淤量的关系

Fig. 6 Relationships between NDVI and sediment erosion-deposition volumes: before water-sediment regulation, after water-sediment regulation, and changes before and after regulation

3.6 水淹时长和泥沙冲淤的关系

图 7 为各滩地样点的冲淤量与水淹时长的关系。从图中可以发现,水淹时长与泥沙冲淤量整体呈正相关趋势($R^2=0.0298, p<0.0001$)(图 7,总滩地)。其中,淹没时长为 0~20 d 时,冲淤变化不大,以冲刷为主;淹没时长为 20~40 d 时,以淤积为主。E 滩地水淹时长与泥沙冲淤量相关性不显著,其他滩地水淹时长与泥沙冲淤都表现为强正相关, R^2 介于 0.02~0.17,显著性值(p)均小于 0.05。其中,L 滩地的 R^2 值最大,为 0.172 1,A 滩地的 R^2 值最小,为 0.014 5。

3.7 多因素对泥沙冲淤格局的影响

采用多元线性回归来检验 A 滩地与总滩地的泥沙冲淤量与各影响因素之间的关系。A 滩地位于黄河湿地国家级自然保护区,受到人为干扰相较于其他滩地小,故单独对 A 滩地进行多元线性回归分析。以泥沙冲淤量为因变量,以相对高程、离河道距离、NDVI 和水淹时长为自变量,综合考虑自变量共线性以及成分变量相关性的显著程度,将所有自变量都放入多元线性回归模型进行分析。

结果表明 A 滩地泥沙冲淤量的变异主要受相对

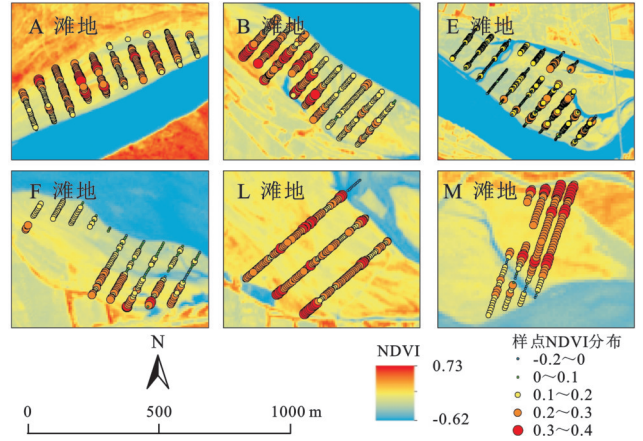


图 5 2023 年 6 月 1 日影像的淹没样点处 NDVI 分布状况
Fig. 5 NDVI distribution at inundated sampling points based on June 1, 2023 imagery

高程(标准化系数 $Beta=-0.091, p=0.224$)、离河道距离 ($Beta=0.070, p=0.300$)、NDVI ($Beta=0.249, p<0.001$)、水淹时长 ($Beta=0.197, p=0.018$) 的驱动,而相对高程和离河道距离的影响不显著。由于高度多重共线性,相对高程和离河道距离变量被删除,再进行多元线性回归后,回归模型显著, $F=12.335, p<0.001, R^2=0.074$,泥沙冲淤量的变异主要受 NDVI ($Beta=0.268, p<0.001$)、水淹时长 ($Beta=0.231, p<0.001$) 的影响,两者会对泥沙冲淤量显著正向影响。NDVI 和水淹时长二者对泥沙冲淤量的影响相似。

总滩地中回归模型显著, $F=85.3, p<0.001, R^2=0.116$,相对高程 ($Beta=-0.317, p<0.001$)、NDVI ($Beta=-0.095, p<0.001$) 会对泥沙冲淤量产生显著负向影响;离河道距离 ($Beta=0.085, p<0.001$) 会对泥沙冲淤量产生显著正向影响。其中 NDVI 和离河道距离对泥沙冲淤量有显著影响,但可能由于在影响滩地泥沙冲淤量的变化的因素中植被和距离比重不大,故回归标准化系数为-0.095, 0.085。相对高程的标准化系数最高 ($Beta=-0.317$),其对泥沙冲淤量的调控占主导地位。

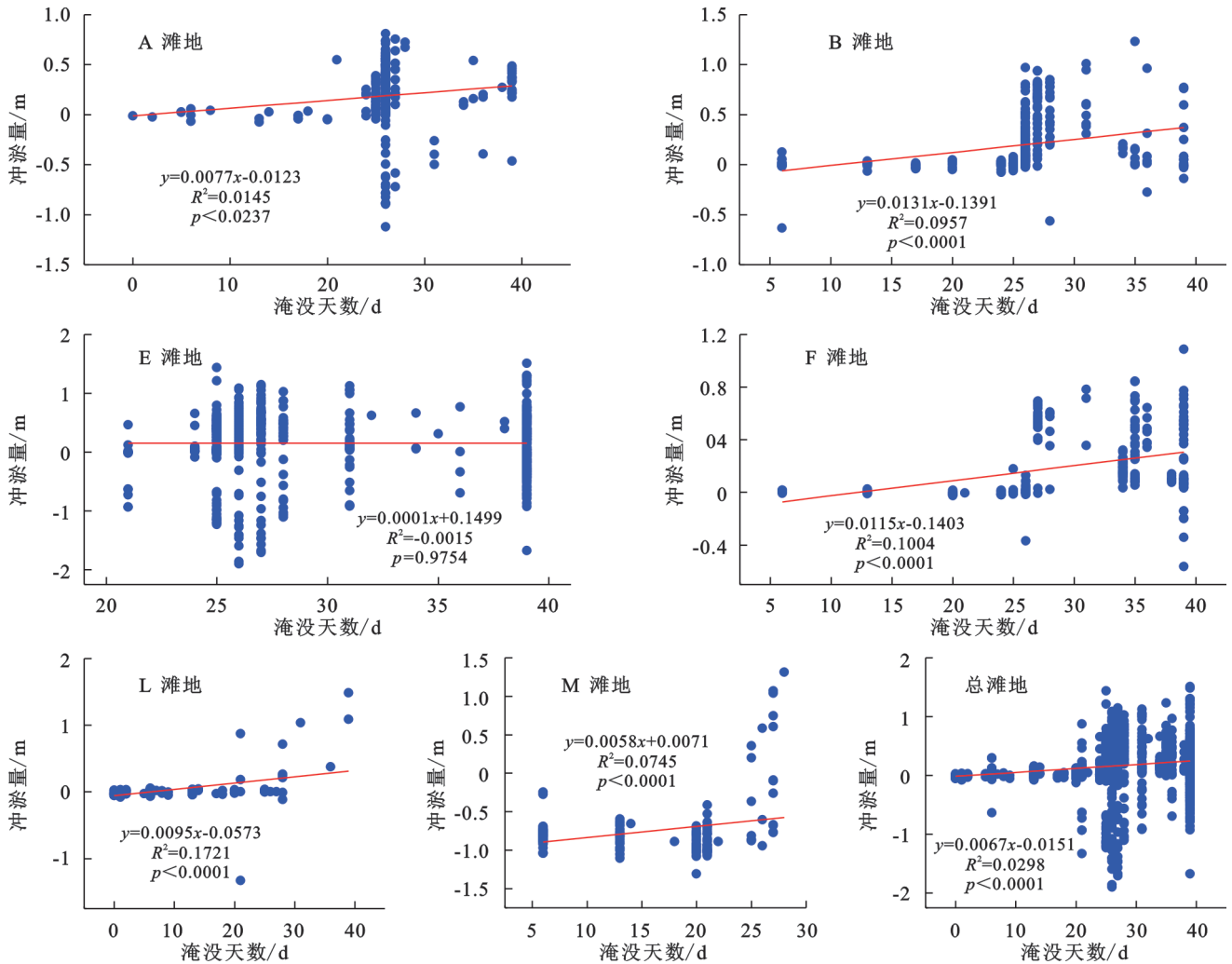


图 7 各个滩地与总滩地冲淤量与水淹时长关系

Fig. 7 Relationships between inundation duration and sediment erosion-deposition volumes for individual floodplains and entire study area

4 讨论

现有研究主要基于水文站点水沙资料关注黄河下游河道的冲淤演变,本研究利用RTK实测数据分析了黄河下游典型滩涂湿地的泥沙冲淤格局,为黄河下游湿地生态保护提供了参考。结果表明,各滩地泥沙冲淤呈现显著空间异质性,但整体以淤积为主导趋势(平均淤积量0.152 m)。这与张原锋等^[18]基于1950—1999年黄河下游17次大漫滩洪水观测资料得出的结论一致,即黄河下游漫滩洪水期间滩地淤积、主槽冲刷。本研究仅使用了2023年、2024年的数据,缺乏时间序列的数据来深入分析其演变特征及生态效应。对黄河下游滩涂湿地泥沙冲淤格局进行长时间序列监测主要面临两方面难点:(1)自然原因。黄河下游滩涂湿地的面积与位置变化频繁。时间序列遥感影像分析表明,滩涂湿地的淤积过程并非持续发生。当滩涂湿地高程达到一定程度,洪水不再漫滩时,受河流侧蚀与河道摆动影响,原有滩地会逐渐崩解直至消失,而在河

道另一侧或下游区域则会淤积形成新的滩涂湿地。(2)人为原因。当滩涂湿地发育至一定规模时,部分区域常被开垦为农田(主要种植小麦)。因其整个生长期(恰逢黄河下游枯水期及小浪底水库调水调沙之前)水库通常不放水,为耕作提供了条件。开垦耕地会显著改变原有地形,这给实地监测带来困难。本研究在2024年减少的监测样点,主要由耕地开垦所致。

此外,本研究还分析了影响泥沙冲淤格局的关键因素。结果表明,无论是单因素还是多因素分析,湿地泥沙冲淤量与相对高程、河道距离、植被覆盖度及淹水时长等影响因素均呈现较弱的相关性,这凸显了黄河下游泥沙冲淤格局形成的复杂性。其中,相对高程和淹水时长是两个等效的因素。本研究相对高程是通过实际测量获取的,淹水时长则是通过时序的遥感影像间接获取的。受卫星重访周期和云层覆盖限制,无法获取每日有效影像,这导致估算的淹水时长存在误差,进而降低了其与泥沙冲淤量之间的相关性。另一方面,植被覆盖度与泥沙沉积量整体呈负相关。图6A显

示,无植被覆盖的光滩样点主要表现为泥沙淤积;而有植被覆盖的样点,尽管淤积点较多,但侵蚀现象亦相当普遍。根据图中数据分布,可识别出一个阈值:当 $NDVI < -0.05$ 时,样点主要表现为泥沙淤积;当 $-0.05 < NDVI < 0.25$ 时,淤积与侵蚀并存;当 $NDVI > 0.25$ 时,样点再次主要表现为泥沙淤积。这一植被覆盖与冲淤关系的模式与现有研究结论存在差异。例如,张新森^[19]在长江口崇明东滩的研究表明,光滩区域以侵蚀为主,而盐沼植被通过削弱水动力、降低水体挟沙能力促进了淤积。类似地,多项研究^[20-21]也指出植被通常会增加局部沉积物的沉积。本研究观测到的植被区侵蚀现象,可能与研究区域特有的水沙动力条件、优势植被类型以及悬沙浓度的时间变化等因素有关。

5 结论

(1) 2023—2024年黄河下游滩涂湿地的泥沙冲淤格局整体以淤积为主,样点最大淤积量与最大冲刷量分别达1.507 m和1.896 m,平均淤积量0.152 m。此外,滩地的冲淤格局并没有表现出明显的上下游趋势。

(2) 以相对高程、离河道距离、NDVI和水淹时长为因子,对泥沙冲淤量进行了单因素和多因素分析。单因素分析结果表明,各因子与泥沙冲淤量均存在显著但微弱的线性关系($0.001 < R^2 < 0.102, p < 0.05$)。多因素分析结果表明,当考虑所有因子时,模型解释力仍有限($R^2 = 0.116, p < 0.001$),凸显了泥沙冲淤格局形成的复杂性。

参考文献 (References):

- [1] 曾红霞,赵成章,王毓芳,等.盐池湾高寒湿地景观格局演变及其影响因素[J].干旱区研究,2021,38(6):1771-1781.
Zeng H X, Zhao C Z, Wang Y F, et al. Landscape pattern evolution and its influencing factors of alpine wetland in Yanchi Bay [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1771-1781.
- [2] 康满萍.苏干湖湿地土壤水盐的空间格局及其影响因素[D].兰州:西北师范大学,2021.
Kang M P. Spatial pattern of soil water and salt in Sugan Lake wetland and its influencing factors [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2021.
- [3] 潘瑛,谢永宏,陈心胜,等.湿地植物对泥沙淤积的适应[J].生态学杂志,2011,30(1):155-161.
Pan Y, Xie Y H, Chen X S, et al. Adaptation of wetland plants to sedimentation stress: a review [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(1): 155-161.
- [4] 陈月庆,武黎黎,章光新,等.湿地水文连通研究综述[J].南水北调与水利科技,2019,17(1):26-38.
Chen Y Q, Wu L L, Zhang G X, et al. Review of wetland hydrological connectivity [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(1): 26-38.
- [5] 王军,姚仕明,周银军.我国河流泥沙资源利用的发展与展望[J].泥沙研究,2019,44(1):73-80.
Wang J, Yao S M, Zhou Y J. Review on river sediment resources utilization in China [J]. Journal of Sediment Research, 2019, 44(1): 73-80.
- [6] 张原锋,王平,张凯文.黄河水沙调控技术及应用实践综述[J].水利发展研究,2025,25(2):6-12,94.
Zhang Y F, Wang P, Zhang K W. Review on water-sediment regulation technology and practice [J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(2): 6-12, 94.
- [7] 郭庆超,胡春宏,曹文洪,等.黄河中下游大型水库对下游河道的减淤作用[J].水利学报,2005,36(5):511-518.
Guo Q C, Hu C H, Cao W H, et al. Effect of large-scale reservoirs on sedimentation reduction in Lower Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(5): 511-518.
- [8] 郑钊,郭庆超,黄烈敏,等.黄河下游河道11月至次年5月时期输沙和冲淤规律研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2020,18(2):95-103.
Zheng Z, Guo Q C, Huang L M, et al. Study on regularity of sediment transport and sedimentation in the Lower Yellow River during November to May next year [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2020, 18(2): 95-103.
- [9] 李小平,刘晓燕,李勇.黄河下游河道未来冲淤趋势研究[J].人民黄河,2016,38(9):1-3,7.
Li X P, Liu X Y, Li Y. Study on erosion and deposition trend in the future in the lower Yellow River [J]. Yellow River, 2016, 38(9): 1-3, 7.
- [10] 胡春宏,张治昊.黄河下游漫滩洪水造床机理与水沙调控指标研究[J].中国科学:技术科学,2015,45(10):1043-1051.
Hu C H, Zhang Z H. The research of mechanism of constructing riverbed and index of flow and sediment of floodwater in the Lower Yellow River [J]. Scientia Sinica: Technologica, 2015, 45(10): 1043-1051.
- [11] 王远见,王强,刘彦晖,等.小浪底水库运行以来对黄河下游河道河床演变特性的影响[J].水利学报,2024,55(5):505-515.
Wang Y J, Wang Q, Liu Y H, et al. Morphological effects of the operation of Xiaolangdi Reservoir on the lower Yellow River in recent years [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(5): 505-515.
- [12] 沈逸,吴保生,王彦君,等.小浪底水库运用以来黄河下游河道冲淤的时空规律与模拟[J].地理学报,2023,78(11):2735-2749.
Shen Y, Wu B S, Wang Y J, et al. Temporal and spatial laws and simulations of erosion and deposition in the lower Yellow River since the operation of the Xiaolangdi Reservoir [J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(11): 2735-2749.