

连续弯道中河心洲可侵蚀层对水动力的影响分析

柳明洋¹, 李春光^{1,2*}, 赵文娟¹, 吕岁菊², 乔桥¹
(1.宁夏大学, 银川 750021; 2.北方民族大学, 银川 750021)

摘要:【目的】揭示连续弯道中泥沙侵蚀对河流水动力的影响。【方法】基于二维平均深度浅水方程建立河床侵蚀数学模型, 利用 MIKE 21 模拟了黄河宁夏永丰渡口若干河心洲的连续弯道中的水流流速与水深变化过程。【结果】黄河宁夏永丰渡口在 3 h 流量为 1 545 m³/s 条件下, 典型断面处的侵蚀模式相比无侵蚀模式的流速差降低 0.06~0.27 m/s, 水深差降低 0.02~0.32 m, 侵蚀会导致水深和流速更加平稳; 3 h 丰水期河床侵蚀深度最大可达 0.16 m, 最大淤积厚度可达 0.12 m; 6 h 河床侵蚀深度最大可达 0.24 m, 最大淤积厚度可达 0.23 m。随着流量和侵蚀时间的增加, 河床演变趋势没有改变, 河床侵蚀深度和淤积厚度有所变化。【结论】侵蚀会增大水动力条件的稳定性, 河床演变的形态不会随流量的大小而改变, 本研究可为河床治理工作提供参考。

关键词: 黄河; 泥沙; 河床侵蚀; 连续弯道; 数值模拟

中图分类号: TV147

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2021634

OSID:



柳明洋, 李春光, 赵文娟, 等. 连续弯道中河心洲可侵蚀层对水动力的影响分析[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(12): 107-113, 130.

LIU Mingyang, LI Chunguang, ZHAO Wenjuan, et al. Hydrodynamic Flow and Sediment Transport in Bended River with the Presence of Islands[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(12): 107-113, 130.

0 引言

【研究意义】黄河是我国第二长河, 全长 6 300 km, 流域面积约 752 443 km², 流经 9 个省区, 被誉为母亲河。由于黄河属于典型的游荡型河流, 含沙量最高可达到 25 kg/m³。连续弯道河床具有沉积动力条件复杂、冲淤快速的特性, 导致河流频繁改道^[1-4], 在气候变化较大的季节, 将增加极端事件的发生风险, 因此研究黄河泥沙运动特性及河床演变趋势对河流整治具有重要意义。

【研究进展】河床侵蚀是造成河道迁移的主要原因之一^[5-6]。水动力及地质因素控制河流中悬移质和地貌的演变^[7-10]。张金良等^[11]针对花园口—高村河段 2000—2017 年泥沙分布特征及滩区地貌演变情况, 提出了滩区改造方案, 并优化下游泥沙配置。刘欣等^[12]通过研究小浪底水库河槽参数随时间变化的规律, 得到了下游河段形态参数特征。向征平等^[13]通过对南水北调中线一期工程中汉江中游杜家滩滩区河床稳定性进行分析, 为该河段提出了治理意见和建议。不同

地质条件、不平衡水沙关系对河道演变有显著影响。目前对于天然河流复杂的水动力环境已经通过现场实测, 在准确的实验数据的基础上计算河床的侵蚀和淤积^[14-17]。

在河流尺度上河流流体力学最广泛的模拟方法是一维数值解^[18]。但其模拟流动是一维的, 速度在横截面上是平均的, 水位在横截面上是平稳的, 不能尽显天然河流的形态。目前, 计算能力的快速发展, 促进了基于二维浅水动力方程进行河流水动力模拟^[19-23]。槐文信等^[24]对河道一维、二维水流数学模型、水质数学模型基本数学原理、数学解法及典型检验算例进行了工程应用, 解决了河床地形与水动力耦合问题。【切入点】然而, 大多数河床侵蚀的数值研究忽略了侵蚀期间水动力学问题, 不同流量期间的侵蚀会改变河床地形。因此在天然河流中, 将水动力、泥沙输移和河流形态耦合起来研究^[25]。【拟解决的关键问题】本文针对黄河宁夏永丰渡口连续弯曲河段可侵蚀层对水动力的关系进行研究, 分析在侵蚀与无侵蚀状态下水动力要素的变化关系及不同时期河床演变的规律。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

黄河宁夏永丰渡口位于宁夏中卫沙坡头区与中宁县之间, 如图 1 所示。研究区全长 12.75 km, 由 7

收稿日期: 2021-12-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(11761005); 宁夏自然科学基金项目(2021AAC03037)

作者简介: 柳明洋(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事河流水动力学研究。
E-mail: 779144983@qq.com

通信作者: 李春光(1964-), 男, 教授, 主要从事河流水沙数值模拟研究。
E-mail: 2002092@nwnu.edu.cn

个不规则弯道及一个直线段组成,河宽介于 268.28~517.61 m。水流沿程向下游流动,在河道宽广且水流缓慢的区域,泥沙容易淤积。经长期的累积,形成了 $C_{S7} \sim C_{S8}$ 、 $C_{S9} \sim C_{S10}$ 、 $C_{S14} \sim C_{S15}$ 断面处的河心洲。

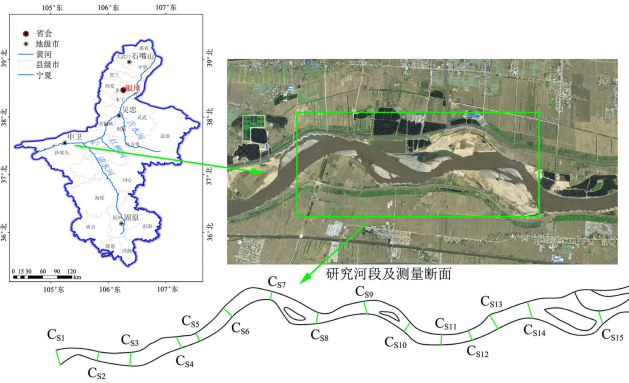


图 1 研究区域示意

Fig.1 Schematic diagram of the study area

1.2 模型概述

1.2.1 MIKE 21 软件

MIKE 21 被广泛用于模拟河流、湖泊及海洋的水流、泥沙及水环境。经历几十年的发展,模型精度和准确性不断完善,在浅水自由表面中具有强大的处理能力^[25]。该模型在丹麦、澳洲及国内广泛应用,本研究利用该模型模拟了黄河宁夏永丰渡口水动力和河床侵蚀过程。

1.2.2 水动力模型

采用 MIKE 21 Flow Mode 模拟黄河宁夏永丰渡口水体的水动力环境,包括水动力模型和平均扩散模型。水动力模型是基于三维不可压缩和雷诺数平均分布的 N-S 方程,模拟多种力作用下水位和流速随时间的变化。垂直方向以低速浅水为主,垂直加速度小于重力加速度,垂向湍流效应较小,满足 Bonssinesq 假设和流体静压力假设。控制方程为二维非恒定浅水方程。

1.2.3 侵蚀模型

泥沙输移模型是基于给定地形条件下相应的水动力条件,求解波洪共同作用下具有均匀力度的非黏性方程,通过引入对河床变形速率的反馈机制进行计算,反映了河床在侵蚀和沉积作用下的高程演变。

1.3 径流变化情景设计

根据黄河宁夏段径流、降水及其他环境因子的时空格局变化,不同季节、不同流量对连续弯曲河道侵蚀会产生不同的影响。本文将全年划分为 3 个时段^[26],枯水期为 12 月下旬至次年 3 月上旬,流量为 $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$;平水期(春汛期)为 3 月下旬—7 月上旬,流量为 $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$;丰水期(夏汛期)为 7 月下旬—10 月下旬,流

量为 $3\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。根据对黄河宁夏河段的长期观测,对不同时期径流量取特定值,分别模拟了枯水期、平水期、丰水期流量侵蚀事件。

1.4 模型建立与检验

1.4.1 永丰渡口模型建立及参数率定

研究数据来源于 2019 年 6 月 20 日的黄河宁夏永丰渡口实测资料。将研究区域划分为 15 个断面,利用声学多普勒剖面仪、GPS-RTK、激光粒度分布仪对研究区域流速、水深、高程、悬移质量及粒径进行测量。对研究区域进行线性插值,建立精确可靠的数学模型。MIKE 21 FM 数值格式采用单元中心 FV 空间离散格式,空间域采用三角形网格单元离散,利用有限积分法求解浅水方程。

模拟区域共计 16 258 个节点,总网格数为 30 391 个,三角形网格最小角度为 30° ,网格最小分辨率为 10 m,时间步长为 30 s,最小时间步长为 0.01 s,见图 2。因河心洲附近水力特性复杂,对河心洲区域进行加密处理。放大区域为典型研究区域三维地形,并将所划分的网格附于地形上。曼宁系数率定结果为 $43\text{ m}^{1/3}/\text{s}$,水平涡黏系数取默认值 0.28。在 MIKE 21 泥沙输移模块中,泥沙孔隙率设为 0.4,密度设为 $2\,650\text{ kg}/\text{m}^3$,中值粒径设为 0.15 mm。

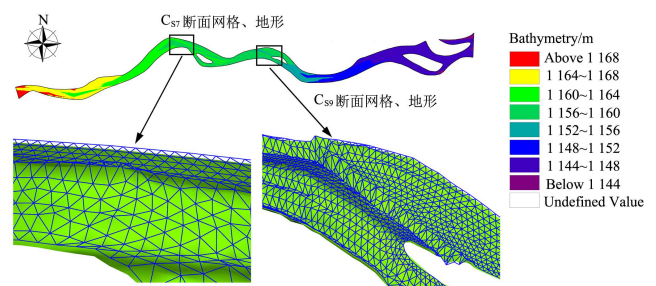


图 2 研究区域地形及网格划分

Fig.2 Study area topography and grid division

1.4.2 模型验证

本文对黄河宁夏永丰渡口的测量时间属于平水期,模拟时间为 2019 年 6 月 20 日 00:00—03:00,模型上游开边界设置恒定流,下游开边界设置水面高程,并将模拟结果与实测结果进行比较。上游流量为断面 C_{S1} 实测值 $1\,545\text{ m}^3/\text{s}$;下游高程为断面 C_{S15} 水面高程 1 147.067 m。对典型断面 C_{S7} 、 C_{S8} 、 C_{S9} 、 C_{S10} 的流速、水深进行验证。如图 3 所示,水深模拟值全部落在实测值上;实测流速值部分分布在模拟值两侧,并保持相同趋势。表 1 对典型断面实测与模拟的平均水深、平均流速进行了统计,水深误差控制在 1.7% 以下,流速误差控制在 2.8% 以下,流速差较大的原因是测量过程中水面非静止,流动过程中存在脉动,导致实测流速在一定范围内波动。

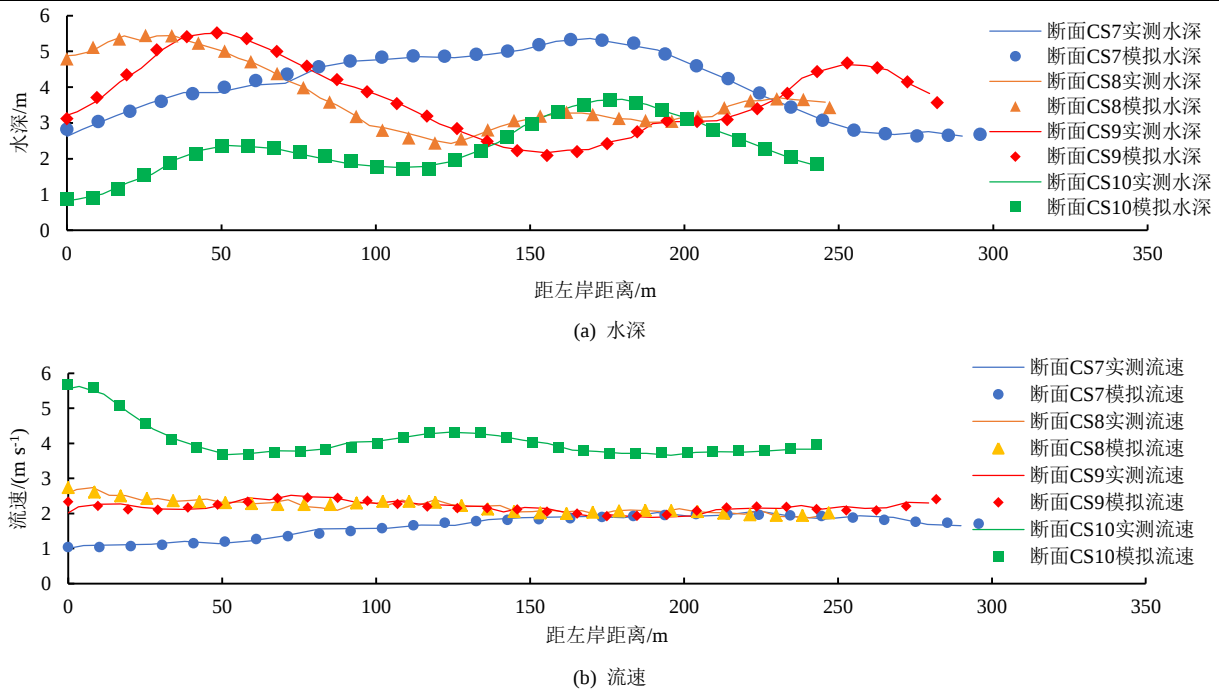


图3 水动力模型验证

Fig.3 Validation of Hydrodynamic model

表1 典型横断面水深和流速实测值与模拟值比较

Table 1 Comparison of water depth and flow rate on some typical cross sections

类别	C _{S7} 断面平均水深/m	C _{S8} 断面平均水深/m	C _{S9} 断面平均水深/m	C _{S10} 断面平均水深/m
实测水深	4.066	3.728	3.731	2.328
模拟水深	4.053	3.748	3.723	2.289
相对误差/%	0.32	0.54	0.19	1.7
类别	C _{S7} 断面平均流速/(m s ⁻¹)	C _{S8} 断面平均流速/(m s ⁻¹)	C _{S9} 断面平均流速/(m s ⁻¹)	C _{S10} 断面平均流速/(m s ⁻¹)
实测流速	1.667	2.205	2.186	4.021
模拟流速	1.620	2.202	2.179	4.073
相对误差/%	2.8	0.13	0.32	1.3

每个断面取 5 次水样，利用激光粒度分布仪对悬移质量进行测定，对建立在水动力学模型上的泥沙输移模型进行验证，结果如图 4 所示。悬移质的实测值

落在了模拟值上或与模拟值相接近，说明模拟结果符合研究区域的水力环境，同时映射了典型断面内悬移质的分布，可见泥沙输移模型适配于该研究区域。

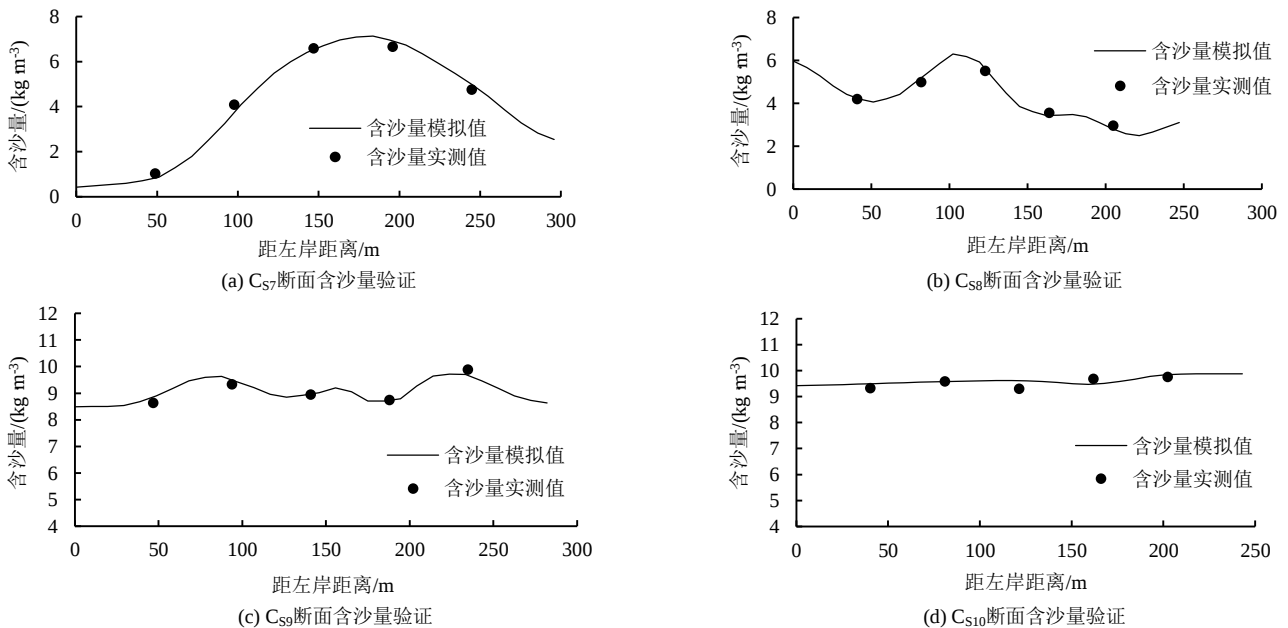


图4 含沙量数学模型验证

Fig.4 Validation of mathematical model of sand content

2 结果与分析

2.1 河床侵蚀对水动力的影响

河床侵蚀是影响河流水动力的重要因素,对水动力学要素有重要影响。通过对宁夏黄河永丰渡口河段进行模拟,时间步长为 3 h、流量为 $1545 \text{ m}^3/\text{s}$,研究河床侵蚀与水动力之间的相互作用。图 5 为不同模式下水动力学要素(流速、水深)分布。

河床对水深和流速有较大的影响,河床宽度的变化使相对应区域的流速、水深随之改变,侵蚀模式相对于无侵蚀模式水深和流速存在差异。截取 4 个水动

力学要素差距较大断面为研究对象,A 断面位于河心洲中间处,B 断面位于连续弯道相邻处,C 断面位于河心洲上游,D 断面位于河心洲下游。从图 5(a)、图 5(b)可以看出,相比无侵蚀模式,侵蚀模式流速分布突变范围更小,流速分布更加均匀且平稳;从图 5(c)、图 5(d)可以看出,除断面 D 外,侵蚀模式相对于无侵蚀模式水深变化不大,研究区域水深在 2 种模式下分布相近,表明侵蚀会在一定程度上增加水动力要素的稳定性。

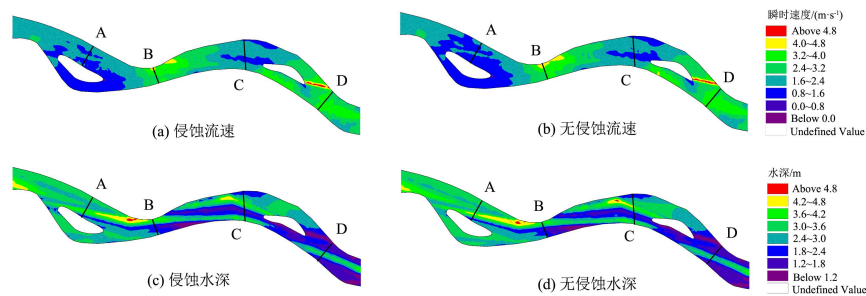


图5 不同模式下水动力要素分布

Fig.5 Distribution of hydrodynamic elements in different models

图 6 为断面 A、B、C、D 侵蚀模式相比无侵蚀模式的水动力学要素分布。如图 6(a)所示,典型断面流速在侵蚀模式下最大值小于无侵蚀模式下的最大值,最小值大于无侵蚀模式下的最小值,断面 B 尤为突出,侵蚀模式下最大流速为 3.20 m/s ,最小流速为 1.84 m/s ,最大流速与最小流速之差(以下简称流速差)为 1.36 m/s ;无侵蚀模式下的最大

流速为 3.37 m/s ,最小流速为 1.82 m/s ,流速差为 1.55 m/s ;侵蚀模式相比无侵蚀模式流速差降低了 0.19 m/s 。图 6(b)为 2 种模式下的水深差,D 断面最大水深与最小水深之差(以下简称水深差)降低了 0.32 m 。这些定量分析说明侵蚀会降低断面及研究区域的流速差、水深差。

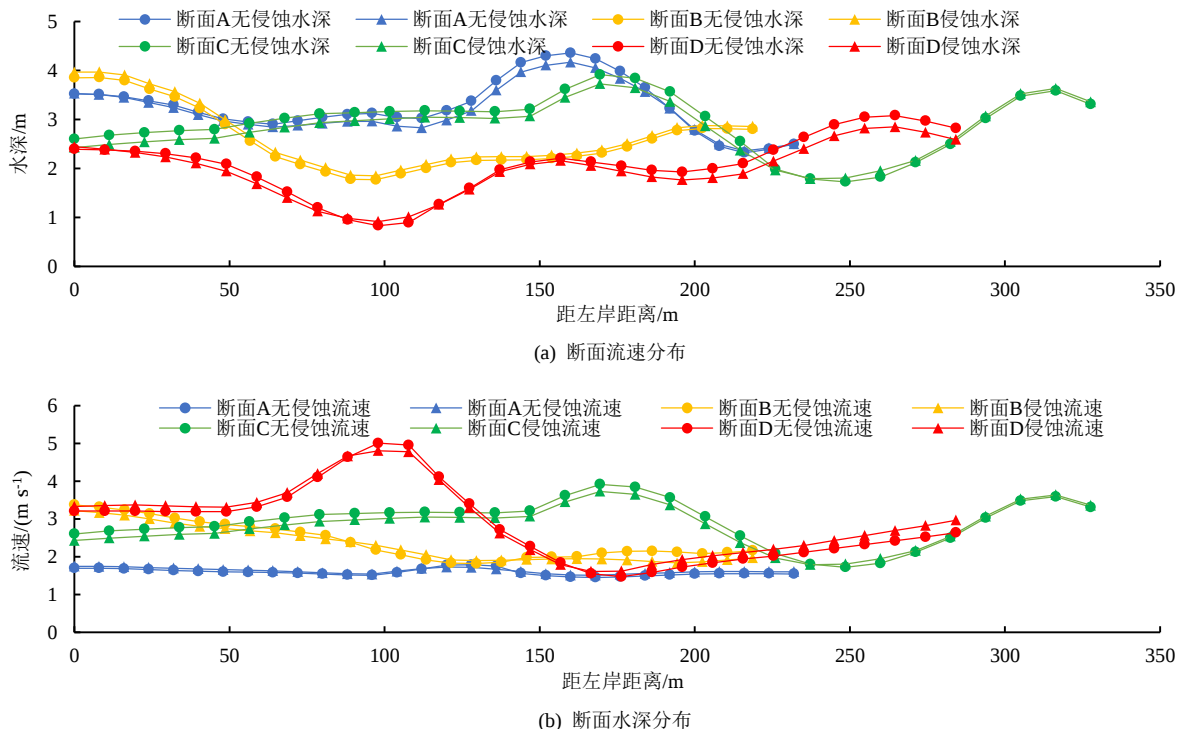


图6 2种模式下水动力学要素对比

Fig.6 Comparison of hydrodynamic elements in the two models

2.2 流量同河床侵蚀在 3 h 和 6 h 的变化

流量变化是河床演变的重要参考因素，长时间的侵蚀、淤积会造成河床剧烈变形。本文同时考虑 2 种因素来分析河床演变的趋势，如图 7 所示。

从图 7 (a)、图 7 (b)、图 7 (c) 可以看出，侵蚀时长同为 3 h，不同情境下，随着流量的增加侵蚀深度、淤积厚度均有不同程度的增加，侵蚀或沉积的

面积保持不变；将模拟时间提升至 6 h，如图 7 (d)、图 7 (e)、图 7 (f) 所示，侵蚀深度、淤积厚度发生了明显的增加；同一时期，侵蚀深度或淤积厚度与时间呈正相关性，丰水期变化最为明显。对比 6 种工况，不同时间步长、不同情景河床侵蚀或淤积出现的位置高度一致，仅河床高程变化存在差异。

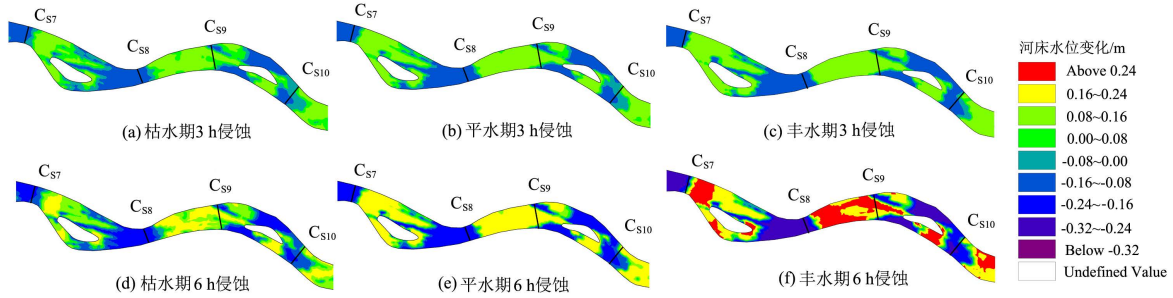


图7 不同时间、不同流量对侵蚀形态

Fig.7 Erosion patterns at different times of day and at different flows

同时对实测断面不同时间步长、不同时期侵蚀变化进行统计，如表 2 所示。C_{S7}、C_{S8} 断面在 3 h 模拟中仅表现为侵蚀状态，最大侵蚀深度为 0.16 m，随着模拟时间提升至 6 h，均未出现淤积，并且 C_{S8} 断面最大侵蚀深度达到了 0.24 m；C_{S9}、C_{S10} 断面既有侵蚀区域又有冲刷区域，6 h 河床高程变化明显高于 3 h。河床演变是漫长的累积结果，长时间侵蚀会引起河床较大的变形。

2.3 不同情景下河床侵蚀对水动力的影响

不同时期径流量对河流水动力影响显著，不同时期可侵蚀河床面对河流的水动力学因素同样有一定影响。

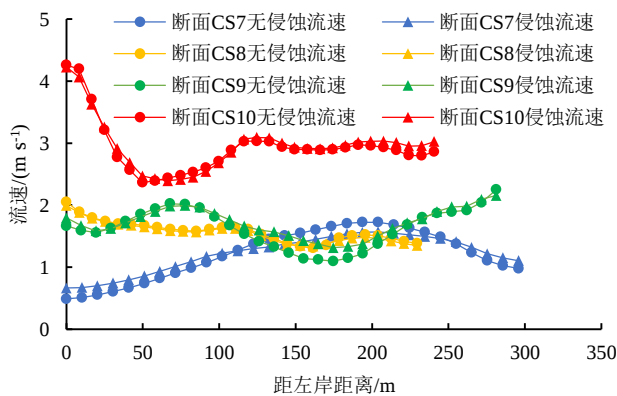
从图 8 (a)、图 8 (c)、图 8 (e) 可以看出，不同情景下 2 种模式有不同程度的变化，随着来水流量的增加，同一断面不同情景流速呈增长趋势，并且 2 种模式在 3 种情境下流速变化趋势保持高度一致；侵蚀模式下的流速始终小于无侵蚀模式下的流速，最小流速始终大于无侵蚀模式下的流速，流速差最大点

位于 C_{S10} 断面的 0.42 m/s。图 7 (b)、图 7 (d)、图 7 (f) 为实测断面水深分布，枯水期 C_{S9} 断面无侵蚀模式最大水深与最小水深差为 3.39 m，无侵蚀模式相对于侵蚀模式水深差降低了 0.56 m，其余断面也有不同程度的降低。

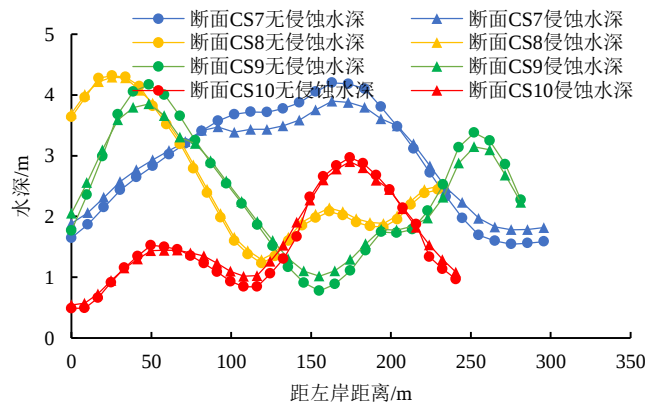
表2 不同流量下河床变形情况

Table 2 River bed deformation at different flow discharges

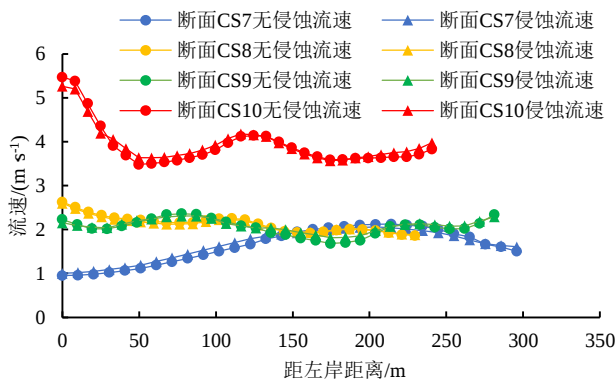
模拟 时长/h	断面	最大淤积厚度/m			最大侵蚀深度/m		
		枯水期	平水期	丰水期	枯水期	平水期	丰水期
3	C _{S7}	\	\	\	0.11	0.12	0.16
	C _{S8}	\	\	\	0.12	0.14	0.16
	C _{S9}	0.10	0.11	0.12	0.09	0.10	0.11
	C _{S10}	0.06	0.09	0.11	0.07	0.10	0.12
6	C _{S7}	\	\	\	0.15	0.19	0.23
	C _{S8}	\	\	\	0.16	0.20	0.24
	C _{S9}	0.16	0.20	0.24	0.12	0.17	0.23
	C _{S10}	0.09	0.06	0.15	0.17	0.20	0.25



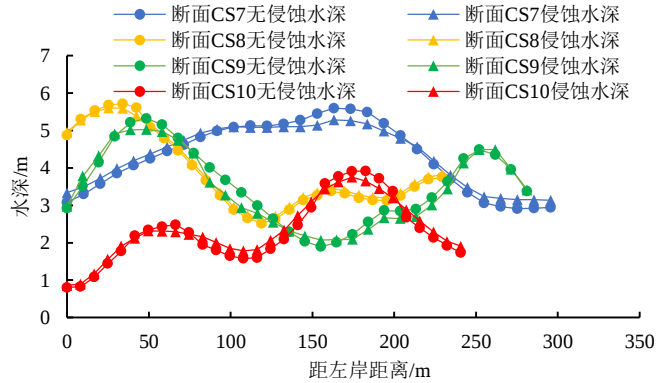
(a) 枯水期断面流速分布



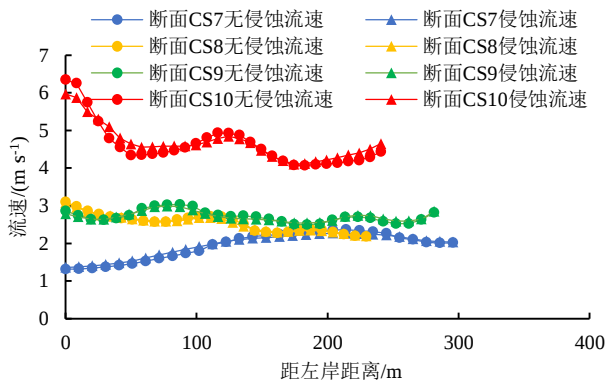
(b) 枯水期断面水深分布



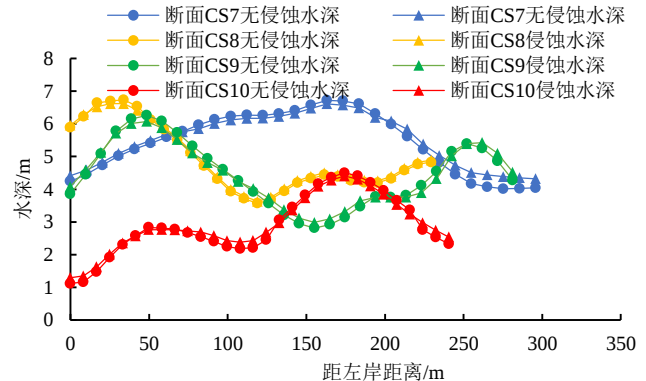
(c) 平水期断面流速分布



(d) 平水期断面水深分布



(e) 丰水期断面流速分布



(f) 丰水期断面水深分布

图8 不同情境下2种模式水动力学要素

Fig.8 Comparison of the hydrodynamic elements of the two models under different scenarios

3 讨论

河床侵蚀是重要的天然河流过程,对水动力学要素有重要影响,河流在不同径流下最终演变趋势保持一致。数学模型是预测和控制河床侵蚀变形问题的有效工具,可以利用二维方法来模拟侵蚀问题,通过数值模拟来评估可侵蚀床面对水动力因素的影响,解决不同情景下的侵蚀问题。本文提出了二维水动力和泥沙输移耦合模型,相较于文献[4,8,10,19,23]中的单一水动力模型而言,耦合模型具有高保真性,更有利于模拟天然河流的流动状态。本文所建立的数学模型重现了宁夏永丰渡口河段河的流运动状态,对比侵蚀模型与无侵蚀模型发现,2种模式流速、水深趋势基本一致,但侵蚀模式下更加平稳;在典型断面A、B、C、D中,侵蚀模式流速差最大降低了0.19 m/s,水深差降低了0.32 m,侵蚀模式在一定程度上增加了水动力因素的稳定性。此外,相对于文献[27]不同工况河床演变的床面变化,本文增加了侵蚀时间变量,更准确地模拟了河床演变的趋势。流量和侵蚀时间均为变量的情况下,侵蚀区域、淤积面积保持一致,径流量、时间的变化只改变床面高度,河床侵蚀的形态未改变,在长期冲刷下,河床演变的趋势必将一致。

本研究以水沙耦合模型为基础研究了河床侵蚀与水动力之间的关系,阐明了不同情景下水动力学要素与泥沙输移之间的关系,应用水动力学模型与泥沙输移模型分析河床侵蚀和淤积,重现天然河流复杂演变趋势,使模型兼顾预测和治理。本文的研究结果可对河流水动力要素进行测量,通过数值模拟的方式,评估河床演变的趋势,可作为河床演变风险监测的有力工具。

4 结论

- 1) 侵蚀会增加水动力与泥沙输移的稳定性。
- 2) 对比连续弯道河心洲侵蚀与无侵蚀过程,得出侵蚀对流速和水深有很大影响。在流量为 $1\ 545\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,给定时间步长侵蚀模式下的流速差降低了 $0.06\sim 0.27\ \text{m/s}$,水深差降低了 $0.02\sim 0.32\ \text{m}$,侵蚀模式下的水深、流速更加平稳,无侵蚀模式下的流速、水深存在较大的突变。
- 3) 对比枯水期、平水期、丰水期3种不同时期的径流量对侵蚀模式的影响,不同时期的径流量影响沉积或侵蚀强度;侵蚀时间的增长只改变了侵蚀深度和沉积厚度,不影响侵蚀模式。

参考文献:

- [1] CHEN Yin, WANG Yangui. Changes in river connectivity indexes in the lower Yellow River between 1960 and 2015[J]. *River Research and Applications*, 2019, 35(9): 1 377-1 386.
- [2] WANG Fuqiang, ZHANG Ruijia, ZHAO Heng, et al. Dynamic evolution of the Yellow River delta coastline based on multi-source remote sensing[J]. *Ecology Environment & Conservation*, 2019, 28(107): 615-627.
- [3] WANG Kai. Evolution of Yellow River delta coastline based on remote sensing from 1976 to 2014, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2019, 29(2): 3-13.
- [4] JI Hongyu, PAN Shunqi, CHEN Shenliang. Impact of river discharge on hydrodynamics and sedimentary processes at Yellow River Delta[J]. *Marine Geology*, 2020, 425: 106 210.
- [5] DAS Vikas Kumar, ROY Sayahnya, BARMSN Krishnendu, et al. Cohesive river bank erosion mechanism under wave-current interaction: A flume study[J]. *Science Letter*, 2020, 129(1): 1-20.
- [6] 柴元方, 李义天, 李思璇, 等. 长江流域近期水沙变化趋势及成因分析[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(3): 94-101.
- [7] CHAI Yuanfang, LI Yitian, LI Sixuan, et al. Analysis of recent water and sand trends and causes in the Yangtze River basin[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(3): 94-101.
- [8] HOOKE J M. An analysis of the processes of river bank erosion[J]. *Journal of Hydrology*, 1979, 42(1): 39-62.
- [9] 许栋, 白玉川. 蜿蜒河流横向摆动及河谷地形沉积过程数值模拟[J]. *泥沙研究*, 2010(4): 68-72.
- [10] XU Dong, BAI Yuchuan. Numerical simulation of lateral oscillation of meandering rivers and sedimentary processes in river valley topography[J]. *Journal of Sediment Research*, 2010(4): 68-72.
- [11] CLARK L A, WYNN T M. Methods for determining stream bank critical shear stress: Implications for erosion rate predictions[J]. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 2005, 50(1): 95-106.
- [12] 杨晨, 徐明德, 郭媛. 基于 MIKE21 的汾河水库突发环境事件数值模拟[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(11): 115-121.
- [13] YANG Chen, XU Mingde, GUO Yuan. Numerical simulation of environmental emergencies in Fen River reservoir based on MIKE21[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(11): 115-121.
- [14] 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.
- [15] ZHANG Jinliang, LI Yan, BAI Yuchuan, et al. Spatial and temporal distribution of sediment and geomorphological evolution in the lower reaches of the Yellow River from Huayankou to Gaocun[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(7): 759-769.
- [16] 刘欣, 刘远征. 小浪底水库调水调沙以来黄河下游游荡河段河床演变研究[J]. *泥沙研究*, 2019, 44(5): 56-60.
- [17] LIU Xin, LIU Yuanzheng. Study on the evolution of riverbed in the lower reaches of the Yellow River since the transfer of water and sand from Xiaolangdi Reservoir[J]. *Journal of Sediment Research*, 2019, 44(5): 56-60.
- [18] 向征平, 霍少君, 杜莹. 南水北调中线一期工程对汉江中游杜家滩滩段河道演变的影响及治理研究[J]. *中国水运. 航道科技*, 2018(2): 8-12.
- [19] XIANG Zhengping, HUO Shaojun, DU Ying. Study on the impact of the South-North Water Diversion Central Line Phase I Project on the evolution of the river channel in the middle reaches of Han River in Dujiatan Tan section and its management[J]. *China Water Transportation(Science & Technology for Waterway)*, 2018(2): 8-12.
- [20] ABOLFAZL Nazari-Giglou, AIDIN Jabbari-Sahebari, AHMAD Shakibaeinia, et al. An experimental study of sediment transport in channel confluences[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2016, 31(1): 87-96.
- [21] YUAN Saiyu, YANG Hongwu, YANG Xiao, et al. Water flow and sediment transport at open-channel confluences: an experimental study[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2018, 56(3): 333-350.
- [22] GUILLEN-LUDENA Sebastian, FRANCA Mario J, CARDOSO Antonio H. et al. Hydro-morphodynamic evolution in a 90 degrees movable bed discordant confluence with low discharge ratio[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*: 2015, 40(14): 1 927-1 938.
- [23] 王之晗, 夏叶, 于合理, 等. 侵蚀基准面对石亭江双盛段河床演变的影响[J]. *工程科学与技术*, 2017, 49(S2): 67-73.
- [24] WANG Zhihan, XIA Ye, YU Heli, et al. Influence of erosion datum on the evolution of riverbed in Shuangsheng section of Shiting River[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2017, 49(S2): 67-73.
- [25] ARMAS Andrei, BEILICCI Robert, BEILICCI Erika. Numerical Limitations of 1D Hydraulic Models Using MIKE11 or HEC-RAS software—Case study of Baraolt River, Romania[J]. *Materials Science and Engineering*, 2017, 245(7): 1-7.
- [26] 许慧, 李国斌, 尚倩倩, 等. 淹没丁坝群二维水流数值模拟新方法[J]. *水科学进展*, 2014, 25(3): 407-413.
- [27] XU Hui, LI Guobin, SHANG Qianqian, et al. A new method for numerical simulation of two-dimensional water flow in submerged ding dam complex[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(3): 407-413.
- [28] SHIMOZONO T, SHIMOZONO S. Coastal vulnerability analysis during tsunami-induced levee overflow and breaching by a high-resolution flood model[J]. *Coastal Engineering*, 2016, 107(1): 116-126.
- [29] 刘鸿涛, 于明舟, 牛炎, 等. 梯形渠道翼柱型量水槽试验研究与数值模拟[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(9): 101-107.
- [30] LIU Hongtao, YU Mingzhou, NIU Yan, et al. Experimental study and numerical simulation of trapezoidal channel wing-column type water measuring tank[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(9): 101-107.
- [31] 张大伟, 权锦, 马建明, 等. 基于 Godunov 格式的流域地表径流二维数值模拟[J]. *水利学报*, 2018, 49(7): 787-794, 802.
- [32] ZHANG Dawei, QUAN Jin, MA Jianming, et al. Two-dimensional numerical simulation of watershed surface runoff based on Godunov format[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(7): 787-794, 802.
- [33] 吴凡, 肖龙飞, 刘明月, 等. 矩形截面半潜式平台波浪耦合作用涡激运动响应二维数值模拟[J]. *上海交通大学学报*, 2016, 50(3): 460-465, 471.
- [34] WU Fan, XIAO Longfei, LIU Mingyue, et al. Two-dimensional numerical simulation of eddy motion response of a semi-submersible platform with rectangular cross section by wave-current coupling[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2016, 50(3): 460-465, 471.
- [35] 槐文信, 赵明登, 童汉毅. 河道及近海水流的数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [36] HUAI Wenxin, ZHAO Mingdeng, TONG Hanyi. Numerical simulation of river and offshore currents[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [37] SANTILLAN David, CUETO Felgueroso Luis, SORDOWARD Alvaro, et al. Influence of Erodible Beds on Shallow Water Hydrodynamics during Flood Events[J]. *Water*, 2020, 12(12): 1-23.
- [38] 邴龙飞, 邵全琴, 刘纪远, 等. 基于小波分析的长江和黄河源区汛期、枯水期径流特征[J]. *地理科学*, 2011, 31(2): 232-238.
- [39] BING Longfei, SHAO Quanqin, LIU Jiyuan, et al. Wavelet-based analysis of runoff characteristics of the Yangtze and Yellow River source ares during flood and dry periods[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(2): 232-238.
- [40] QIAO Qiao, LI Chunguang, JING Hefang, et al. Impact of an artificial chute cutoff on the river morphology and flow structure in Sipaikou area of the Upper Yellow River[J]. *Journal of Mountain Science*, 2021, 18(12): 3 275-3 290.