



跌坎溯源冲刷的影响因素与两种发展模式

杨飞^{1,2}, 王远见^{1,2}, 江恩慧^{1,2*}

1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 郑州 450003;

2. 水利部黄河下游河道与河口治理重点实验室, 郑州 450003

* E-mail: jiangenhui@hky.yrcc.gov.cn

收稿日期: 2023-08-28; 接受日期: 2023-10-13; 网络版发表日期: 2024-01-08

国家“十四五”重点研发计划项目(编号: 2021YFC3200400)、水利部重大科技项目(编号: SKR-2022021)、国家自然科学基金项目(批准号: 52179066)、黄河水利科学研究院基本科研业务费专项(编号: HKY-JBYW-2022-12)和黄河水利科学研究院科技发展基金项目(编号: 黄科发 202111)资助

摘要 水位降至水库淤积三角洲顶点高程以下时, 顶点处形成的跌坎溯源冲刷是动态的河流裂点. 本文采用水沙动力学模型模拟室内水槽试验和实际大型水库中的跌坎溯源冲刷过程. 水槽试验模拟结果能够较好地反演非黏性沙跌坎的快速衰减过程和黏性沙跌坎的持续稳定溯源冲刷过程. 非黏性沙跌坎冲刷后河床坡度较大且大于上游顶坡, 跌坎快速衰减. 黏性沙跌坎中水流切应力超过临界起动切应力的部分才能产生冲刷, 最大冲刷位置靠近跌坎底部, 使得跌坎能够持续稳定存在. 对于小浪底水库的淤积三角洲, 黏性沙跌坎在2020年汛期低水位运行时呈现逐渐衰减的溯源冲刷过程, 模型较为准确地模拟了该跌坎的位置变化与冲刷塑造的淤积纵剖面. 实际大尺度黏性沙跌坎与水槽试验中非黏性沙跌坎的溯源冲刷过程更为接近. 结合数值模拟算例可以确定跌坎存在两种溯源发展模式: 衰减型跌坎和增强型跌坎. 两者塑造的地形差异明显, 增强型跌坎下游河床坡度比上游要缓, 而衰减型跌坎相反. 非黏性沙跌坎属于衰减型跌坎. 跌坎高度、跌坎顶坡坡度、泥沙粒径、单宽流量等控制变量均存在阈值, 使得跌坎在衰减型和增强型之间变化.

关键词 溯源冲刷, 水库三角洲, 衰减型跌坎, 增强型跌坎, 黏性沙

1 引言

河流溯源侵蚀形成的河道纵向跌坎称为河流裂点. 长期存在的河流裂点可分为两类. 一类是由基岩河床构成的裂点, 其缓慢的溯源迁移是地貌演化的重要标志, 盖层抗蚀会引起裂点呈垂阶型^[1]. 研究者可以通过河道水力侵蚀模型对基岩裂点溯源迁移速率进行量化^[2,3], 确定流域对地质构造和气候的地貌响应时间^[4],

判定流域隆升过程. 另一类是由河床结构构成的裂点, 由山区河流剧烈下切过程中局部河谷崩塌滑坡产生的大量石块堆积形成^[5], 短时期内位置稳定, 能够有效阻滞泥沙, 形成U形河谷^[6]. 这两类裂点通常能够保存较长的地质时期, 裂点的溯源迁移过程无法进行观测.

水库坝前水位降低导致坝前水深或三角洲顶点以上一段水深小于平衡水深而产生溯源冲刷^[7,8]. 溯源冲刷可以分为全程剥蚀和局部跌坎两种类型^[9], 其中局

引用格式: 杨飞, 王远见, 江恩慧. 跌坎溯源冲刷的影响因素与两种发展模式. 中国科学: 技术科学, 2024, 54: 1390–1398

Yang F, Wang Y J, Jiang E H. Influence factors and two evolution patterns for retrogressive erosion of step (in Chinese). Sci Sin Tech, 2024, 54: 1390–1398, doi: [10.1360/SST-2023-0274](https://doi.org/10.1360/SST-2023-0274)

部跌坎与黏性泥沙关系密切, 非黏性泥沙构成的跌坎会快速消失^[10]. 库区淤积三角洲顶点在水库水位降低至顶点以下时构成的跌坎, 可看作是另一种形式的河流裂点. 本文在描述跌坎时采用淤积三角洲的空间概念, 跌坎的顶坡段指跌坎上游, 前坡段指跌坎本身. 水库在低水位排沙运用过程中, 水流冲刷能力强, 河床变形剧烈^[11], 跌坎的溯源迁移速率较快, 短时期内能够观测到跌坎溯源迁移的整个过程. 因此, 开展水库溯源冲刷的观测、模拟对于理解河流裂点的溯源迁移过程具有重要科学意义.

溯源冲刷历时短、强度大, 是一种水库高效排沙方式, 已在国内外一些水库得到运用^[7]. 近年来, 黄河中游万家寨、三门峡^[12-14]、小浪底水库^[15-17]通过速降水位产生溯源冲刷, 库容得到不同程度的恢复. 因此, 研究水库跌坎溯源冲刷的影响因素具有明显的工程意义.

基于溯源冲刷过程中输沙率和河段比降、流量关系具有较强的相关关系^[18], 对跌坎溯源冲刷进行模式概化是水库冲淤计算中较为成熟的方法^[19]. 如余明辉等人^[20]在一维水库水沙非饱和输沙模型中, 添加了溯源冲刷的模式概化计算方法. 由于模式概化依赖于实测资料的经验总结, 对实际水库调度的动态响应存在欠缺. 目前跌坎的水沙动力过程越来越受到关注, 以沟道周期性跌坎(阶梯)和沟头跌坎的理论研究较为充分. Parker和Izumi^[21]理论确立了沟道周期性跌坎会随着临界起动弗劳德数的下降、无跌坎正常水深弗劳德数的上升而变陡; Curran^[22]通过水槽试验确立了砾石河床跌坎成因的三种河床变形模式; Balmforth和Vakil^[23]采用水沙模型分析得到周期性跌坎与滚波的相互作用关系; Zeng等人^[24]在水沙模型中考虑跌水潭侵蚀的作用确定了黄河高原沟道内跌水潭对周期性跌坎演化的控制作用; Alonso等人^[25]建立了沟头跌坎发展演化的解析模型; Zhang等人^[26]的室内试验得出跌坎高度能够显著影响沟头侵蚀的发展, 随后发现消能池设计可以有效消减沟头跌水能量^[27]. 对于黄土高原细沟沟头, 不同流量和坡度^[28]、沟头高度和土壤质地^[29]的室内试验对沟头溯源侵蚀产沙和形态发育产生明显的影响. 水库跌坎溯源冲刷的水沙动力过程关注较少. Wang等人^[30]采用高速水流冲刷通量公式模拟跌坎溯源冲刷中陡坡冲刷. 余铖峥等人^[31]通过改进挟沙力公式中参数的取值方法实现对三门峡库区的溯源冲刷过

程的模拟. 黄河水利科学研究院在2020年小浪底水库低水位排沙时期观测到跌坎溯源冲刷的整个过程. 本文以该次观测为基础, 构建了能够模拟急缓流交替的水库溯源冲刷一维水沙动力学模型, 通过跌坎溯源冲刷水槽试验验证了模型合理性. 通过该数值模型对不同情景下的溯源冲刷过程进行模拟, 揭示了跌坎溯源过程对不同控制因素的响应机制, 阐明了不同类型跌坎的动态演化趋势, 为揭示跌坎演化机制提供了重要依据.

2 模型介绍

本文研究的侧重点在于溯源冲刷中跌坎逆水流方向的演进过程及响应规律, 可通过一维水沙模型的多情景模拟实现, 相关成果可以拓展到地貌学中裂点演化; 该一维模型的局限性是无法刻画溯源冲刷过程中的库区三维地形变化和冲淤量调整, 这不是本文关注的问题. 采用的一维水沙数值模型由一维水流连续方程、一维动量方程、一维悬移质泥沙输运方程和一维河床变形方程来描述水库的跌坎溯源冲刷过程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} &= -gh \frac{\partial Z}{\partial x} - C_f u^2, \\ \frac{\partial hc}{\partial t} + \frac{\partial huc}{\partial x} &= E - D, \\ (1 - \lambda_p) \frac{\partial \eta}{\partial t} &= D - E, \end{aligned} \quad (1)$$

其中, h 为水流水深, u 为垂向平均流速, η 为床面高程, t 为时间, x 为水平沿程距离, λ_p 为河床孔隙率, g 为重力加速度, C_f 为阻力系数, c 为垂向平均含沙量, $E = a\omega c_*$ 为床面泥沙起悬上扬通量, $D = a\omega c$ 为泥沙沉降通量, c_* 为挟沙力(当床面剪切力 τ_b 大于泥沙临界起动切应力 τ_c 时, 泥沙粒径较细时挟沙力采用修正的Engelund-Hansen公式^[32]), α 为恢复饱和系数, ω 为泥沙颗粒沉速. 泥沙群体黏性和非黏性特征的粒径区分具有地域属性, 两者之间没有严格界限, 粉沙处于两者过渡态, 本文采用0.01 mm界定均匀沙, 采用中值粒径0.025 mm界定非均匀沙, 符合黄河中游的泥沙性质, 黏性沙的存在使得非均匀沙整体呈现出一定的黏性.

已有研究证明^[30,31], 采用有限体积法能够较好地模拟水库溯源冲刷过程. 本文模型求解采用有限体积

法HLL格式^[33], 水流泥沙过程数值求解为非耦合方式, 即先联立水流连续方程和水流运动方程求解各断面的流量和水位, 再利用泥沙连续方程和河床变形方程求解断面平均含沙量以及冲淤厚度。

3 模型验证

3.1 非黏性沙溯源冲刷水槽试验

选择Chen和Chen^[10]的一组水槽试验进行模拟, 水槽尺寸为 $2\text{ m} \times 0.1\text{ m} \times 0.2\text{ m}$, 该组试验初始前坡坡度(前坡段河床坡度)1, 进口为清水流量 $0.00021\text{ m}^3/\text{s}$, 床沙中值粒径 0.6 mm , 几何标准差1.4(近似均匀沙), 数值模拟的空间步长为 0.01 m , 时间步长 0.01 s , 采用试验10 s时的实测地形作为模拟的初始地形条件, 床沙为非黏性沙, 对应临界剪切力 τ_c 为零。

图1为不同时刻非黏性沙溯源冲刷水槽试验实测与模拟地形对比。水槽试验中整个溯源冲刷过程历时较短, 跌坎顶坡坡度在不同时刻能够维持基本不变, 冲刷后塑造的下游河床坡度比初始顶坡坡度较陡, 跌坎高度不断下降, 跌坎快速消失后, 转变为到后期的旋进式冲刷。模拟结果整体上与实际过程较为一致, 区别在于模拟的非黏性沙跌坎最大冲刷位置靠近跌坎上游, 冲刷量上上下下, 溯源过程中河床坡度变缓, 跌坎快速衰减。模型能够对非黏性沙跌坎的溯源冲刷过程进行模拟。

3.2 黏性沙溯源冲刷水槽试验

黏性沙溯源冲刷水槽试验在“模型黄河”试验基地完成, 试验水槽尺寸为 $6\text{ m} \times 0.3\text{ m} \times 0.8\text{ m}$, 采用非均匀粉煤灰(算术平均粒径约 0.02 mm , 几何标准差4.2, 粒

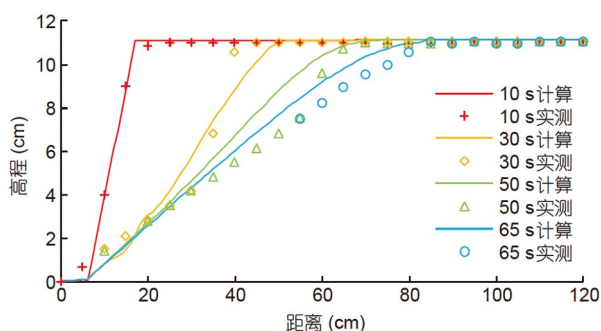


图1 非黏性沙溯源冲刷水槽试验实测与模拟地形对比
Figure 1 Comparisons between measured and calculated bed profile changes for noncohesive sand retrogressive erosion.

径小于 0.01 mm 颗粒占比超过0.5, 泥沙颗粒密度约为 2.17 kg/m^3)泥浆在水槽中自然沉降排水固结, 对淤积体表层进行切削剥离来塑造淤积体形态。选择一组试验, 进口采用流量为 $0.0005\text{ m}^3/\text{s}$ 的清水, 跌坎顶坡坡度(顶坡段河床坡度)约0.001, 放水冲刷一段时间后开始试验测量。间隔5 min采用水位测针测量中心线地形变化, 测量时暂停进口水流。本组水槽试验的跌坎高约24 cm, 下游水深约7 cm, 数值模拟的空间步长为 0.01 m , 时间步长 0.01 s , 模拟的初始地形条件按24 cm的平均跌坎高度进行设置, 由0 min实测地形概化得到, 临界剪切力 τ_c 设置为2 Pa。

图2为不同时刻黏性沙溯源冲刷水槽试验实测与模拟地形对比, 整个试验过程中跌坎的前坡坡度较陡, 近似垂直, 水流在跌坎顶部跌落并与前坡段脱离接触, 最大冲刷位置靠近跌坎底部, 该处跌水对跌坎底部产生强烈的射流冲刷, 前坡段在水流和自身重力下以块体的形式失稳滑塌, 两种作用下实现跌坎的溯源冲刷, 且跌坎能够持续稳定存在。观测到跌坎的位置均匀变化, 相应跌坎溯源移动速度基本不变, 跌坎形状没有明显变化。进口流量与下游水位保持恒定, 跌坎溯源过程中用于冲刷的水流能量一致, 实际淤积物的非均质性和块体滑塌的不稳定性等因素使得跌坎冲刷后地形有明显的起伏波动。模型中通过设置最大前坡坡度来模拟跌坎底部冲刷伴随的滑塌作用, 模拟的跌坎形状和溯源速度与实测过程基本一致, 跌坎冲刷后地形相对平整。

3.3 小浪底水库库区跌坎溯源冲刷观测

小浪底水库2020年实施了低水位大流量排沙调

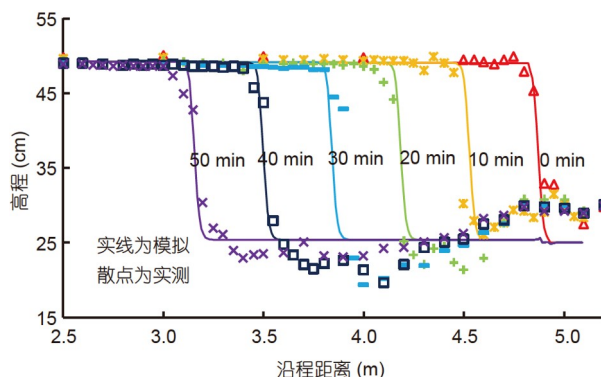


图2 黏性沙溯源冲刷水槽试验实测与模拟地形对比
Figure 2 Comparisons between measured and calculated bed profile changes for cohesive sediment retrogressive erosion.

度, 在库区内发生了显著的溯源冲刷. 坝前水位从7月1日8时234.79 m持续下降至7月10日2时211.82 m后, 13天内水位基本不变, 7月20日17时211.71 m下降至7月23日8时205.36 m, 低水位持续至8月6日后抬升, 其他时期坝前水位均高于210 m. 7月23日18时, 在断面HH3(距坝3.34 km)处发现跌坎冲刷(图3), 7月28日16时发展到断面HH11处(距坝16.39 km)(图4), 8月3日11时发展到断面HH13上游200 m(距坝20.59 km)处. 虽然库区淤积物黏性泥沙较多, 但形成的跌坎前坡坡度要比水槽试验中小很多. 以2020年汛前实测小浪底库区地形为基础, 模拟本次库区跌坎的形成演化过程.

选择7月23日至8月6日库区坝前35 km范围河道深泓线变化过程进行模拟, 设置泥沙中值粒径为0.01 mm (2020年该区域汛前床沙测量的中值粒径为0.005~0.012 mm), 恢复饱和系数为0.8, 河床孔隙率0.65, 泥沙临界起动切应力 τ_c 设置为11 Pa, 计算时间步长10 s, 空



图3 (网络版彩图) 2020年7月23日小浪底水库跌坎在HH3断面处

Figure 3 (Color online) Step located at HH3 section on 23 June, 2020 at Xiaolangdi reservoir.



图4 (网络版彩图) 2020年7月28日小浪底水库跌坎上溯至HH11断面处

Figure 4 (Color online) Step located at HH11 section on 28 June, 2020 at Xiaolangdi reservoir.

间步长0.75 m, 不考虑河宽的沿程变化, 按照三门峡水文站水沙实测数据设置进口. 模拟初始地形采用处理后的汛前纵坡面, 模拟得到的跌坎位置变化与实测对比如图5所示, 小浪底库区深泓线变化的模拟结果如图6所示. 可以看出, 实测跌坎在向上游溯源过程中逐渐消失, 模拟的跌坎位置变化过程与实测十分接近, 跌坎深泓线溯源速度与实测基本一致, 跌坎消失位置与实际基本吻合. 最终的模拟纵剖面与汛后实测纵坡面几乎完全重合. 距坝35 km以上库区, 深泓线高程在220 m以上, 溯源冲刷基本消失. 将小浪底水库库区溯源冲刷与黏性沙和非黏性沙溯源冲刷水槽试验中的地形变化过程对比发现, 虽然研究范围内库区淤积物多为黏性泥沙, 但其形态与水槽试验中非黏性沙跌坎的溯源冲刷过程更为接近, 跌坎呈现出冲刷强度逐渐减

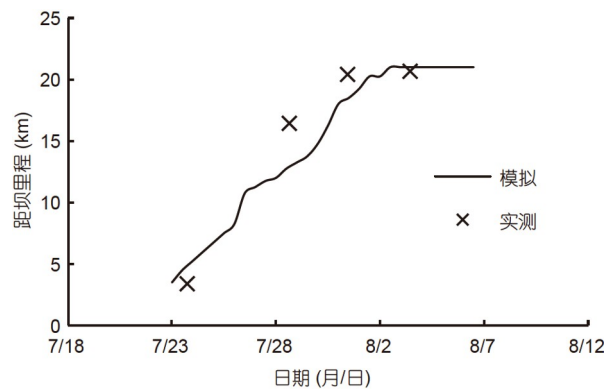


图5 2020年小浪底水库跌坎位置变化的测量和模拟结果对比

Figure 5 Comparisons between measured and calculated step location changes at Xiaolangdi reservoir in 2020.

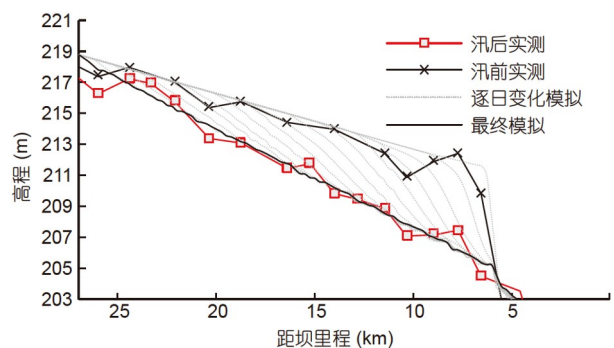


图6 (网络版彩图) 2020年小浪底水库跌坎溯源冲刷过程地形变化的实测和模拟对比

Figure 6 (Color online) Comparisons between measured and calculated bed profile changes at Xiaolangdi reservoir in 2020.

弱, 前坡坡度变缓的特征, 初步认为是黏性沙的临界剪切应力没有随着尺度变化而同步改变, 导致大尺度跌坎情况下黏性沙的临界剪切应力相对较小, 表现出近似非黏性沙跌坎演化特征. 综上, 所建立的模型能够模拟跌坎溯源冲刷过程.

4 因子分析

在水库溯源冲刷多情景模拟中, 首先拟定基础的对照算例. 水库库区回水长度为500 m, 其中跌坎顶坡长度350 m、顶坡坡度0.003, 跌坎水平长度150 m, 跌坎高度 H 为0.09 m(下游水位2.54 m, 跌坎前缘正常水位2.63 m, 以两者水位差计算跌坎高度), 前坡坡度0.01. 床沙中值粒径 D_{50} 为0.03 mm, 水库进口单宽流量 q 为 $0.167 \text{ m}^2/\text{s}$, 跌坎上游按照平衡输沙计算, 初始纵坡面按照三角洲淤积形态. 该条件下的计算结果见图7. 基础对照算例结果表明, 随溯源冲刷的发展, 跌坎不断向库区上游推进, 水面线上的水跃也随之向上游演进, 跌坎的前坡坡度不断变缓, 逐渐趋近顶坡坡度而最终消失, 受跌坎下游淹没水流消能作用, 跌坎并非整体向上游推进, 跌坎根部仍留在原处.

4.1 不同初始跌坎高度

随水库水位的降低, 三角洲淤积顶点逐步出露, 库区水位与三角洲顶点上游处水位构成一定的高差, 该处水流由缓流变为急流, 出现跌水并形成跌坎. 库区水位的差异对应初始跌坎高度的差异, 两者高差越大, 跌坎高度越高. 不同跌坎高度对应的溯源冲刷过程算例结果如图8所示.

不同初始跌坎高度对应的最大冲刷强度变化过程如图9(a)所示, 图中无量纲跌坎高度 $H^* = H/D_{50}$. 可以

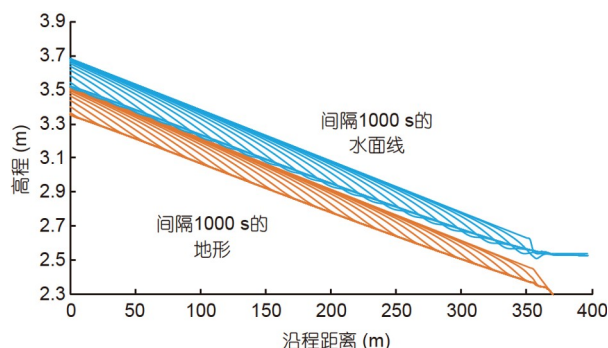


图7 溯源冲刷过程对照算例

Figure 7 Control group for stepped retrogressive erosion.

看出, 水库运用水位越低, 对应跌坎高度越高, 溯源冲刷效果越好. 较小的初始跌坎高度下, 溯源冲刷强度逐渐减小, 溯源冲刷后的下游河床坡度要比原来大, 跌坎逐渐趋于消失; 较大的初始高度下, 跌坎能够长期维持, 溯源冲刷后的下游河床坡度比原来小, 溯源冲刷强度逐渐增加. 因此, 跌坎初始高度的差异对后续跌坎溯源发展趋势的影响很大, 跌坎冲刷对水库运用水位的响应关键在于三角洲顶点出露高低.

4.2 不同顶坡坡度

将最大冲刷强度作为跌坎的规模指标, 不同顶坡坡度对应的溯源冲刷过程算例结果如图9(b)所示. 顶坡坡度越大, 溯源冲刷效果越好. 顶坡坡度较小时, 跌坎根部受淹没水流消能作用大, 溯源冲刷速率比跌坎上部的小, 导致跌坎逐渐趋于平缓, 冲刷逐渐减弱, 最终跌坎消失时塑造的顶坡坡度比原来略大; 顶坡坡度较大时, 顶坡段本身水动力强, 相同跌坎高度下跌坎的冲刷能力也强, 跌坎高度会因为跌坎下游的逐渐刷深而加大, 导致跌坎溯源过程愈演愈烈, 冲刷强度不

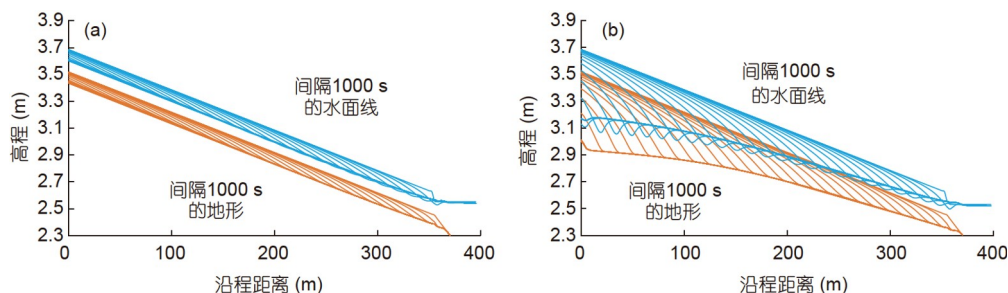


图8 不同初始跌坎高度对应的跌坎演化过程. (a) $H=0.08 \text{ m}$; (b) $H=0.10 \text{ m}$

Figure 8 Step evolution processes for different step heights. (a) $H=0.08 \text{ m}$; (b) $H=0.10 \text{ m}$.

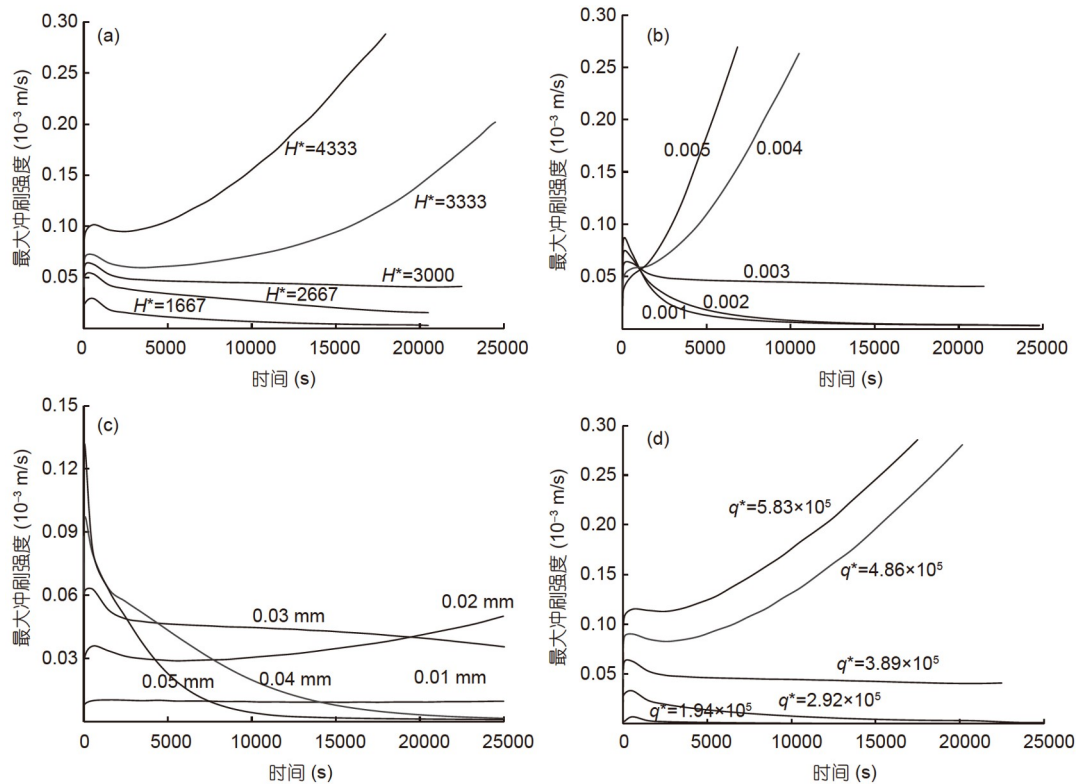


图 9 各控制因素调整下跌坎最大冲刷强度变化过程。(a) 不同跌坎高度; (b) 不同顶坡坡度; (c) 不同床沙粒径; (d) 不同单宽流量

Figure 9 Changes of maximum scouring intensity of step under control factors adjustment. (a) Different step heights; (b) different top slopes; (c) different bed material sizes; (d) different unit discharges.

断增强。由于较小的顶坡坡度对应跌坎前缘的正常水位较高, 形成较大的跌坎高度, 使其初始冲刷强度较高。

4.3 不同床沙粒径

浑水在库区演进过程中存在悬沙与床沙的交换过程, 悬沙中值粒径沿程减小, 不同河段的床沙级配组成存在相应差异。假定来沙与床沙为均匀沙, 不同泥沙粒径对应的溯源冲刷过程算例结果如图9(c)所示。可以看出, 0.01~0.05 mm床沙粒径的范围内, 泥沙越细越难侵蚀。较细的床沙条件下, 跌坎溯源过程比较缓慢, 但跌坎能够长期存在; 较粗泥沙的跌坎演进-消亡过程较快, 后续的溯源冲刷是没有跌坎情况下发生的, 冲刷后的顶坡段比降没有变化。粒径越大, 初始冲刷强度越大, 但随跌坎的迅速消亡, 冲刷强度迅速下降; 而粒径较小情境下, 虽然初始冲刷强度不高, 但能够长期稳定在一定水平。泥沙越粗越容易侵蚀, 溯源冲刷地形调整速度越快。

4.4 不同单宽流量

对单宽流量的改变, 通过引起溯源冲刷强度差异, 不同单宽流量的溯源冲刷过程算例结果如图9(d)所示, 图中无量纲单宽流量 $q^* = q / \sqrt{gD_{50}^3}$ 。可以看出, 不同单宽流量下跌坎演化过程跌坎前后缓流状态的正常水深不同, 对应不同的跌坎水流冲刷能力以及下游淹没水深。流量较小情况下, 下游淹没水深较小, 跌坎水流冲刷能力较低, 溯源冲刷速度慢, 同时跌坎根部的侵蚀能力不足, 跌坎衰减速度快; 流量较大情况下, 情况相反, 跌坎溯源冲刷速度快, 同时跌坎根部侵蚀能力较强, 跌坎衰减速度变慢。总的来说, 通过联合调度可使来流流量增加, 对跌坎冲刷有利。

5 跌坎溯源冲刷的两种模式

基于上述分析发现, 各个不同控制因素都存在阈

值, 超出阈值时, 跌坎会逐渐加强, 低于阈值时, 跌坎会逐渐衰减. 因此, 水库溯源冲刷过程的冲刷形态一般可分为两类: 一种为跌坎高差不断减小, 逐渐走向消亡的衰减型跌坎; 另一种为能长期稳定存在的增强型跌坎. 两种跌坎对跌坎上游冲刷效果各不相同, 增强型跌坎塑造地形比原有地形要缓或持平, 而逐渐衰减型跌坎塑造的地形要陡.

两种跌坎也会因水库不同的调度措施发生相互转化. 当坝前淤积三角洲洲面床沙粒径较粗、顶坡坡度较缓、坝前水位降低较少、来流流量较小时形成短期存在的衰减型跌坎, 跌坎高度逐渐降低, 冲刷强度逐渐下降, 前文非黏性沙溯源冲刷水槽试验(3.1节)和小浪底水库低水位冲刷的三角洲顶点(3.3节)即为衰减型跌坎. 反之, 则形成能长期存在的增强型跌坎, 黏性沙跌坎(3.2节)即为增强型跌坎. 长期存在的增强型跌坎在一定条件下可分化为多级跌坎^[21]. 在小浪底库区洲面段同样观测到多处小规模黏性沙跌坎即为增强型跌坎, 能在低流量情况下可以存在较长时间, 基本不发生

溯源移动.

6 结论

水库淤积三角洲顶点处的跌坎溯源冲刷是一个河流裂点溯源侵蚀的天然实验. 通过研究本文得出以下主要结论.

(1) 采用水沙动力学模型能够较好地反演黏性沙和非黏性沙跌坎的溯源冲刷过程.

(2) 实际水库中大尺度黏性沙跌坎与室内水槽试验中非黏性沙跌坎的溯源冲刷过程更为接近.

(3) 对于跌坎的溯源冲刷过程, 跌坎高度增加、顶坡坡度变陡、泥沙粒径变细、来水流量增加等都有利于跌坎的长期稳定存在.

(4) 跌坎存在两种溯源发展模式: 跌坎高差不断减小、逐渐走向消亡的衰减型跌坎和可长期存在的增强型跌坎. 各个不同控制因素都存在阈值, 使得两种发展模式可以进行相互转化.

致谢 黏性沙水槽试验在杨洲等人的通力协助下得以顺利实施, 小浪底水库跌坎溯源冲刷原型观测资料由马怀宝等人提供, 在此深表谢忱.

参考文献

- 1 Haviv I, Enzel Y, Whipple K X, et al. Evolution of vertical knickpoints (waterfalls) with resistant caprock: Insights from numerical modeling. *J Geophys Res*, 2010, 115: F03028
- 2 Berlin M M, Anderson R S. Modeling of knickpoint retreat on the Roan Plateau, western Colorado. *J Geophys Res*, 2007, 112: F03S06
- 3 Zhang H P, Zhang P Z, Fan Q C. Initiation and recession of the fluvial knickpoints: A case study from the Yalu River-Wangtian'e volcanic region, northeastern China (in Chinese). *Sci China Earth Sci*, 2011, 54: 1746–1753 [张会平, 张培震, 樊祺诚. 河流裂点的发育及其溯源迁移: 以鸭绿江-望天鹅火山区为例. 中国科学: 地球科学, 2011, 54: 1746–1753]
- 4 Wang Y Z, Zhang H P, Zheng D W, et al. River longitudinal profiles under transient state and the related tectonic signals (in Chinese). *Quat Sci*, 2018, 38: 220–231 [王一舟, 张会平, 郑德文, 等. 非均衡河道高程剖面及其蕴含的构造活动信息. 第四纪研究, 2018, 38: 220–231]
- 5 Liu H X, Wang Z Y, Lu Y J, et al. Mechanism of morphological evolution in incised river and its relationship to streambed structures (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2011, 22: 367–372 [刘怀湘, 王兆印, 陆永军, 等. 山区下切河流地貌演变机理及其与河床结构的关系. 水科学进展, 2011, 22: 367–372]
- 6 Yu G A, Wang Z Y, Liu L, et al. Drainage network and fluvial morphology features of Yarlung Tsangpo River under the impact of neotectonic movement (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2012, 23: 163–169 [余国安, 王兆印, 刘乐, 等. 新构造运动影响下的雅鲁藏布江水系发育和河流地貌特征. 水科学进展, 2012, 23: 163–169]
- 7 Han Q W. Reservoir Sedimentation (in Chinese). Beijing: Science Press, 2003. 272–315 [韩其为. 水库淤积. 北京: 科学出版社, 2003. 272–315]
- 8 Morris G, Fan J H. Reservoir Sedimentation Handbook. New York: McGraw-Hill Book Company, 1998
- 9 Zhang G G. An experiment study on the form of headwater erosion in reservoir (in Chinese). *J Sediment Res*, 1993, 3: 86–94 [张跟广. 水库溯源

冲刷模式初探. 泥沙研究, 1993, 3: 86–94]

- 10 Chen L K, Chen S C. Retrogressive erosion and longitudinal profile evolution in noncohesive material. *Int J Sediment Res*, 2006, 21: 113–122
- 11 Zhang J H, Li T, Ma H B. Proceedings on water and sediment regulation in Xiaolangdi Reservoir (in Chinese). *J Sediment Res*, 2016, 2: 68–75 [张俊华, 李涛, 马怀宝. 小浪底水库调水调沙研究新进展. 泥沙研究, 2016, 2: 68–75]
- 12 Liang G T, Wang Y J, Yang Y. Study on influence of Sanmenxia reservoir operation on its erosion and deposition (in Chinese). *J Sediment Res*, 2001, 2: 59–61 [梁国亭, 王育杰, 杨燕. 三门峡水库运用对库区冲淤影响的研究. 泥沙研究, 2001, 2: 59–61]
- 13 Zheng S, Wu B S, Hou S Z, et al. Spatial and temporal erosion and deposition processes and the delayed response of the Sanmenxia Reservoir (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2019, 50: 1433–1445 [郑珊, 吴保生, 侯素珍, 等. 三门峡水库时空冲淤与滞后响应. 水利学报, 2019, 50: 1433–1445]
- 14 Chen J G, Zhou W H, Han S S, et al. Influences of retrogressive erosion of reservoir on sedimentation of its downstream river channel—A case study on Sanmenxia reservoir and the Lower Yellow River. *Int J Sediment Res*, 2017, 32: 373–383
- 15 Wang T, Ma H B, Wang Y J, et al. Effect of sediment discharge in Xiaolangdi Reservoir from 2018 to 2020 (in Chinese). *Yellow River*, 2023, 45: 47–51 [王婷, 马怀宝, 王远见, 等. 小浪底水库2018–2020年排沙运用效果研究. 人民黄河, 2023, 45: 47–51]
- 16 Zhang J H, Chen S K, Li S X, et al. Sediment transport and morphological changes of the Xiaolangdi Reservoir in early sediment impoundment period (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2007, 38: 1085–1089 [张俊华, 陈书奎, 李书霞, 等. 小浪底水库拦沙初期泥沙输移及河床变形研究. 水利学报, 2007, 38: 1085–1089]
- 17 Li T, Zhang J H, Xia J Q, et al. Experimental study of retrogressive erosion efficiency evaluation in Xiaolangdi Reservoir model (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2016, 27: 716–725 [李涛, 张俊华, 夏军强, 等. 小浪底水库溯源冲刷效率评估试验. 水科学进展, 2016, 27: 716–725]
- 18 Liang G T, Jiang N Q, Yu X, et al. Research and verification of sediment mathematical model in Sanmenxia Reservoir (in Chinese). *Yellow River*, 2009, 31: 33–35 [梁国亭, 姜乃迁, 余欣, 等. 三门峡库区泥沙数学模型研究与验证. 人民黄河, 2009, 31: 33–35]
- 19 Fan J H, Morris G L. Reservoir sedimentation. II: Reservoir desiltation and long-term storage capacity. *J Hydraul Eng*, 1992, 118: 370–384
- 20 Yu M H, Zhu Q, Yang G L, et al. Improvement and application of one-dimensional numerical model of flow and sediment with retrogressive erosion (in Chinese). *J Sediment Res*, 2021, 46: 1–6 [余明辉, 祝求, 杨国录, 等. 考虑溯源冲刷的一维水沙数学模型拓展及应用. 泥沙研究, 2021, 46: 1–6]
- 21 Parker G, Izumi N. Purely erosional cyclic and solitary steps created by flow over a cohesive bed. *J Fluid Mech*, 2000, 419: 203–238
- 22 Curran J C. Step-pool formation models and associated step spacing. *Earth Surf Processes Landf*, 2007, 32: 1611–1627
- 23 Balmforth N J, Vakil A. Cyclic steps and roll waves in shallow water flow over an erodible bed. *J Fluid Mech*, 2012, 695: 35–62
- 24 Zeng X, Blom A, Czapiga M J, et al. Erosional cyclic steps governed by plunge pool erosion: A parametric study based on field, laboratory, and model data. *JGR Earth Surf*, 2021, 126: e2020JF006034
- 25 Alonso C V, Bennett S J, Stein O R. Predicting head cut erosion and migration in concentrated flows typical of upland areas. *Water Resour Res*, 2002, 38: 39
- 26 Zhang B J, Xiong D H, Su Z A, et al. Effects of initial step height on the headcut erosion of bank gullies: A case study using a 3D photo-reconstruction method in the dry-hot valley region of southwest China. *Phys Geography*, 2016, 37: 409–429
- 27 Zhang B J, Wu H, Xiong D H, et al. The benefit of measures of energy dissipation and erosion reduction by falling water in gully head of dry hot valley (in Chinese). *Soil Water Conserv China*, 2020, 460: 32–35, 5 [张宝军, 吴汉, 熊东红, 等. 干热河谷冲沟沟头跌水消能减蚀措施效益试验初探. 中国水土保持, 2020, 460: 32–35, 5]
- 28 Qin C, He C, Zheng F L, et al. Quantitative research of rill head advancing process on loessial hillslope (in Chinese). *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2018, 34: 160–167 [覃超, 何超, 郑粉莉, 等. 黄土坡面细沟沟头溯源侵蚀的量化研究. 农业工程学报, 2018, 34: 160–167]
- 29 Wang R, Li P, Han J C, et al. Effects of gully head height and soil texture on headward erosion characteristics and topography evolution (in Chinese). *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2021, 37: 91–99 [王睿, 李鹏, 韩建纯, 等. 沟头高度和土壤质地对细沟溯源侵蚀特征和形态发育的影响. 农业工程学报, 2021, 37: 91–99]
- 30 Wang Z H, Xia J Q, Zhou M R, et al. One-dimensional morphodynamic model for retrogressive erosion based on a sediment entrainment theory at high flow velocity. *Int J Sediment Res*, 2021, 36: 306–316
- 31 Yu C Z, Xia J Q, Wang Z H, et al. A one-dimensional mathematical model for reservoir retrogressive scour and its application (in Chinese). *J Sediment Res*, 2023, 48: 9–16, 60 [余铨峥, 夏军强, 王增辉, 等. 一维水库溯源冲刷数学模型及其应用. 泥沙研究, 2023, 48: 9–16, 60]
- 32 Ma H B, Nittrouer J A, Wu B S, et al. Universal relation with regime transition for sediment transport in fine-grained rivers. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2020, 117: 171–176

- 33 Ying X Y, Wang S S Y. Improved implementation of the HLL approximate Riemann solver for one-dimensional open channel flows. *J Hydraul Res*, 2008, 46: 21–34

Influence factors and two evolution patterns for retrogressive erosion of step

YANG Fei^{1,2}, WANG YuanJian^{1,2} & JIANG EnHui^{1,2}

¹ Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China;

² Key Laboratory of Lower Yellow River Channel and Estuary Regulation, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China

The stepped retrogressive erosion formed at the rollover point of the reservoir delta is a natural dynamic knickpoint when the water level drops below the rollover point elevation. This study presents a one-dimensional flow and sediment numerical model to simulate the stepped retrogressive erosion in laboratory flume experiments and a field large-scale reservoir. The rapid attenuation scouring process of the non-cohesive sediment step and the continuous and stable scouring process of the cohesive sediment step were well predicted. The formed downstream bed slope is larger than the top-slope and the step fast decays. Erosion occurs only at the part where the flow shear exceeds the critical bed shear stress in the cohesive sediment step. The maximum erosion is located at the bottom of the step, which enables stable existence of cohesive sediment step. For the fine-grained delta deposits in the Xiaolangdi Reservoir, the gradual and slow attenuation of the cohesive sediment step caused by lowering water level operation during the 2020 flood season has been observed. The simulated changes of the step location and the final longitudinal profile shaped by erosion match well with the observed features. The field large-scale cohesive sediment step in the reservoir is closer to that of non-cohesive sediment step in the flume. Combined with the numerical cases, it can be determined that there are two development types for the stepped retrogressive erosion: Attenuation type step and enhancement type step. The bed formed by the two types are significantly different, and the attenuation type step has a slower downstream slope than the upstream, while the enhancement type is the opposite. The control variables, such as the step height, upstream slope, sediment size, and unit discharge, all have thresholds, which cause the retrogressive erosion to transform between attenuation and enhancement types.

retrogressive erosion, reservoir delta, attenuation step, enhancement step, cohesive sediment

doi: [10.1360/SST-2023-0274](https://doi.org/10.1360/SST-2023-0274)