

渗流与侧向流共同作用下的潮沟边壁侵蚀研究进展*

龚 政¹ 王客予^{1,2} 赵 堃¹ 张凯丽¹

(1. 河海大学江苏省海岸海洋资源开发与环境安全重点实验室 江苏南京 210098; 2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司 陕西西安 710065)

摘要 潮沟的边壁侵蚀可以分为水流作用下的边壁冲刷与土块重力作用下的边壁崩塌。前人研究表明, 水流流速、水压及土体干密度等因素均对底床冲刷率有显著影响, 然而侧向边壁的冲刷率量测以及相关影响因素问题亟待解决。前人较多关注侧向流对于边壁崩塌的影响, 而对渗流作用以及渗流与侧向流在边壁侵蚀过程中的共同作用研究较少。近期研究表明, 渗流已成为边壁侵蚀过程中的重要一环。因此, 渗流与侧向流不同动力作用下, 边壁侵蚀的差异性和相似性, 以及两种动力共同作用下的侵蚀机制仍待进一步探究。

关键词 潮沟; 冲刷率; 边壁侵蚀; 渗流

中图分类号 TV149.1 **doi:** 10.11693/hyhz20211100302

潮滩地处海陆之交, 一般发育在沿海平原外缘, 广泛分布在开敞式、港湾型和河口湾型海岸, 比如: 中国东部沿海(Zhang *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2017)、英国西部及东南海岸(Chen *et al.*, 2012)、荷兰西北海岸(Kleinhans *et al.*, 2009)、美国东海岸(Mariotti *et al.*, 2013), 具有宽广性、尺度大、坡度缓、底质颗粒细(由淤泥质黏土、粉砂、粉细砂等组成)等特征(吕亭豫等, 2016)。在淤泥质潮滩的潮间带, 即平均大潮高潮线至平均大潮低潮线之间的潮滩, 由海洋动力, 特别是潮汐作用形成的潮沟系统广泛发育并呈现树枝状、矩形状、平行状或羽状等平面形态结构(Ichoku *et al.*, 1994; 吕亭豫等, 2016)。潮沟为水流及泥沙提供输入与输出潮滩的通道, 对潮滩的地貌动力过程具有重要影响, 随水流运动的营养物质对生态系统稳定有重要意义, 同时潮沟也是潮滩上海陆相互作用最活跃的微地貌单元(Fagherazzi *et al.*, 2012; Lanzoni *et al.*, 2015)。

经典理论将边壁侵蚀从机理上分为两个阶段: (1) 水流作用下的边壁冲刷(水力学过程); (2) 土块重力引起的边壁崩塌(土力学过程)(Rinaldi *et al.*, 2007)。研究表明, 潮沟边壁崩塌是海岸地貌动力过程中重要的一环, 对海岸工程建设构成严重威胁, 例如 2015

年江苏沿海条子泥海域潮沟曲流向岸摆动距离达 1 800 m, 引发了一系列应急抢险工程。此外, 大江大河崩岸现象也十分普遍(夏军强等, 2003; 余文畴等, 2008; 卢金友等, 2017; 假冬冬等, 2021), 由侧向流冲刷形成悬臂及边壁崩塌现场见图 1。据不完全统计, 近 60 年来长江中下游累计崩岸长度超过 1 600 km, 占岸线总长的 37.6%(褚明华等, 2016; 张幸农等, 2021)。此外, 崩塌土块也是河道重要的供沙来源, 例如在美国中西部的黄土区域, 边壁供沙占整个流域供沙的 80%以上(Simon *et al.*, 2000)。

目前研究边壁侵蚀的主要困难之一是缺乏土壤性质数据, 需要改进相关性质的测量方法。虽然目前用于稳定性分析的一些土壤性质, 如液体、沉积物的密度容易量测, 但其他性质和系数获取难度大, 也鲜有现场表征这些性质和系数的方法。即使是主要的侵蚀特性(如冲刷系数、剪切强度、有效黏聚力和临界起动切应力)也难测量, 不能很好地理解它们与其他土壤特性的相互关系, 因此边壁冲刷速率的量测以及相关公式的推算成为亟待解决的问题之一。研究边壁侵蚀的另一个难点是各种机制之间的相互作用。因此, 本文重点回顾边壁冲刷速率量测及其影响因素

* 国家杰出青年科学基金项目, 51925905 号。龚 政, 博士生导师, 教授, E-mail: gongzheng@hhu.edu.cn

通信作者: 王客予, 硕士研究生, E-mail: keyu_wang97@163.com

收稿日期: 2021-11-29, 收修改稿日期: 2022-01-21



图 1 侧向流冲刷形成悬臂及边壁崩塌

Fig.1 Cantilever formed by surface flow and its toppling failure
注: a. 侧向流冲刷岸底形成悬臂; b. 边壁崩塌, 改自文献(Samadi *et al*, 2013)

和渗流和侧向流共同作用下岸壁侵蚀机制两方面的研究进展, 揭示潮滩-潮沟系统多因子共同作用下的崩岸机理, 对于保障海岸工程安全, 以及潮滩系统的科学开发、利用和保护具有现实意义, 对促进多学科交叉具有重要的理论和实际价值。

1 边壁冲刷

边壁冲刷是指水流在特定条件下对侧向土体进行冲刷的现象, 其主要影响因素为水流条件和土体本身的性质。目前对于侧向边壁的土体起动及冲刷研究较少, 大部分研究集中于底床起动和冲刷方面, 其实验方法及量测手段可以在侧向边壁起动冲刷的研究中加以借鉴。现有两种主流的底床土体冲刷率计算公式, 其中一种在曹叔尤公式(曹叔尤等, 1986)的基础上将冲刷率与过量剪应力确定成指数关系, 即:

$$\varepsilon = M \left(\frac{\tau_b}{\tau_c} - 1 \right)^l, \quad (1)$$

式中, ε 为冲刷率, 单位为 m/s; τ_b 为床面切应力, 单位为 Pa; τ_c 为临界起动切应力, 单位为 Pa; M 是有量纲的冲刷常数, 单位为 m/s, 随泥沙类型和各种物化特性而变化; $\frac{\tau_b}{\tau_c} - 1$ 表示过量剪应力; 指数 l 取值与泥沙的性质相关。

另一种冲刷率公式认为水流切应力大于土体的起动切应力时, 土体才会被水流冲刷(Hanson *et al*, 2001):

$$E = k_d \Delta t (\tau_0 - \tau_c), \quad (2)$$

式中, E 为冲刷厚度, 单位为 m/s; k_d 为土体的冲刷系数, 单位为 $\text{m}^3/(\text{N} \cdot \text{s})$; Δt 为冲刷时间, 单位为 s; τ_0 为水流的平均切应力, 单位为 Pa; τ_c 为临界起动切应力, 单位为 Pa, 相应的冲刷率为:

$$\varepsilon = k_d (\tau_0 - \tau_c). \quad (3)$$

黏性土的抗冲特性主要涉及冲刷率和起动条件等, 而土体起动除水流作用外, 主要受到土体本身物理及力学性质的影响, 因此水流条件与土体本身性质均应在黏性土的抗冲研究中加以考虑(宗全利等, 2014)。在边壁冲刷过程中, 水流入渗会导致土体本身密度、含水率及液塑限等物理性质发生改变, 进一步影响土体的内摩擦角及黏聚力等抗剪强度指标, 土体临界起动切应力随之变化。

1.1 流速对边壁冲刷的影响

黄建维(1989)在水槽实验的基础上, 结合前人的研究成果, 认为均匀容重底床的冲刷率与水流流速近似呈四次方关系。李华国等(1995)通过水槽实验得出了类似的结论, 认为淤泥冲刷率与水流切应力近似呈二次方关系, 与水流流速呈四次方关系。孙志林等(2011)在钱塘江河口河床获取 2 个钻孔共 28 个岩芯, 进行起动和冲刷水槽实验, 发现未充分固结的淤泥冲刷率与相对剩余切应力的二次方呈正比(与流速的四次方近似相关), 而固结已久的淤泥冲刷率与相对剩余切应力呈线性关系(与流速的二次方近似相关), 二者的冲刷常数相差一个数量级。

1.2 水压对边壁冲刷的影响

万兆惠等(1990)通过有压管道实验表明, 粗颗粒泥沙在较大水深条件下的起动流速几乎不受水压的影响; 而黏性细颗粒泥沙的起动流速与水压呈正比。甘甜(2017)比较了水压在不同水力条件下(例如管道和明渠)对黏性泥沙起动的影响, 实验结果表明: 在有压管道中, 泥沙淤积固结初期, 黏结力对黏性泥沙的起动影响不显著, 阻碍黏性泥沙起动的主要因素为管道压力, 在后期, 黏性泥沙黏结力增强, 对其起

动的影响增大。在明渠大水深条件下, 相对水深变化小, 无法对黏性泥沙的起动造成明显影响, 然而在明渠水槽中, 相对水深成为影响黏性泥沙起动的主要因素。明渠中水深的增大改变了土体微团所受薄膜水附加压力, 起动流速和起动切应力随水深的增大而增大。

1.3 土体密度对边壁冲刷的影响

干密度是黏性土颗粒在沉积过程中对外表现的宏观结果, 易于量测获得, 能综合反映出土体在沉降密实过程中土颗粒间黏结力的变化。干密度的差异反映出土体固结度的不同, 土体的固结度在宏观层面影响对外表现的抗冲刷能力, 在微观层面上对应不同的颗粒间黏结力。颗粒间黏结力的大小影响床面泥沙的起动现象: 土体干密度较小时, 土颗粒间黏结力小, 床面泥沙以单颗粒起动为主; 孔隙水逐渐排除的过程中土体干密度逐渐增大, 土颗粒的骨架发生压缩, 黏结力的增大导致床面起动由单颗粒向微团发生过渡; 当土体干密度(或土颗粒间黏结力)增大到一定程度时, 床面泥沙起动则完全表现出微团的运动形式(舒彩文等, 2007)。

Krone(1999)通过对前人的实验数据进行分析后, 认为底床抗冲刷能力随着床层结构冲刷的进展而增加, 底床冲刷率与土体密度呈线性关系, 当颗粒结构几乎完全冲刷到密度较高的结构时, 该线性关系的斜率及截距均发生较大变化。舒彩文等(2007)在前人实验资料的基础上研究了土体干容重及粒径对临界起动切应力的影响, 结果表明, 黏性泥沙的冲刷率与干容重及颗粒间的黏性正相关, 与粒径呈负相关关系; 对于淤泥, 土体冲刷率与干容重则可以量化为六次方的关系, 基于此发现建立了相关的泥沙临界起动切应力公式(舒彩文等, 2007)。

1.4 冲刷系数与起动切应力的计算

从式(2)和式(3)可以看出, 黏性土的冲刷率不仅受到水流流速的影响, 而且与土体的冲刷系数和临界起动切应力密切相关。土体本身的特性在很大程度上影响冲刷系数和临界起动切应力, 其中前者是决定土体冲刷率的最主要因素。

国内外学者分别选取不同地区及植被覆盖条件的土样, 通过实验得到了相应的冲刷系数与土体临界起动切应力的数量关系式, 可归纳为 $k_d=a\cdot\tau_c^b$ 的形式, 其中 a 、 b 均为常数。Hanson 等(2001)在进行了 83 组水下射流实验之后, 得到土体冲刷系数与临界

起动切应力的定量关系式为 $k_d=2\times10^{-7}\tau_c^{-0.5}$; Wynn 等(2004)针对位于美国弗吉尼亚州西南部的河岸土体进行了 142 组实验, 得到该地区受到植被覆盖的土体冲刷系数与临界起动切应力的定量关系式为 $k_d=3.1\times10^{-6}\tau_c^{-0.37}$; Karmaker 等(2011)在印度雅鲁藏布江河岸上进行 58 次现场淹没射流实验后, 得到土体冲刷系数与临界起动切应力的定量关系式为 $k_d=3.1\times10^{-6}\tau_c^{-0.185}$; 宗全利等(2014)对荆江段河岸黏性土进行冲刷实验后, 通过数据拟合得到该河段边壁黏性土冲刷系数与临界起动切应力关系式为 $k_d=7.677\times10^{-6}\tau_c^{-1.949}$ 。

不难发现, 黏性土体的冲刷系数与临界起动切应力之间确实存在某种数量关系, 但不同的植被覆盖条件与土体本身性质决定了该关系式中 a 、 b 两个常数的大小。含水率增大导致黏性土体塑性增强, 土体冲刷难度增大, 这是 Karmaker 与宗全利等实验结果中冲刷系数差异大的原因之一。此外, 宗全利等(2014)实验土体黏粒含量 $C_c=24.6\%$, Hanson、Wynn、Karmaker 等实验土体黏粒含量 C_c 均在 50%以上, 黏粒含量减小则土体黏性减小, 越容易冲刷, 所以冲刷系数越大。另外, 土样来源及实验条件也会影响实验结果, Hanson、Wynn、Karmaker 等实验均在现场进行, 但 Hanson 等实验关注床面土体, Wynn、Karmaker 等实验针对河岸土体起动, 且水流对河岸的冲刷作用受到覆盖在其上的植被影响, 在一定程度上导致了关系式中的冲刷系数计算结果偏小; 宗全利等在实验前将黏性土与水搅拌均匀, 静置一段时间使土体在自重作用下固结, 以此得到实验土样, 而 Hanson、Wynn 等实验结果均是针对原状土体现场测得, 不同的土样获取方式在一定程度上影响计算结果。

通过对土体冲刷及临界起动切应力影响因素的回顾, 发现大部分研究集中于底床起动和冲刷方面, 对于侧向边壁的土体起动及冲刷研究较少, 且大部分研究对于流速、水压、土体密度等因素对于土体冲刷速率的影响意见不一。鉴于侧向边壁土颗粒受力与底床土颗粒受力不尽相同(侧壁颗粒由于重量分量的作用沿坡面向下滑动, 是边壁坍塌的驱动力之一; 而底床颗粒则受到沿水流方向的拖曳力驱动作用(Aldefae *et al*, 2020)), 建议后续对侧向边壁冲刷率的影响因素进行实验分析, 提出相关冲刷率计算公式。此外, 应尽量采用现场取样及测试, 以便得到更加贴近实际的实验结果。

2 渗流对边壁侵蚀的影响

在较长一段时间里, 渗流的隐蔽性和复杂性是研究其影响边壁侵蚀的难点所在。Hagerty 和 Fox 等列举了一些原因: 渗流侵蚀是一种非常复杂的机理, 在一次暴雨后, 许多不同的条件都会造成严重的渗流侵蚀, 而在另一次暴雨之后, 渗流侵蚀的规模可以忽略不计(Hagerty *et al.*, 1991; Fox *et al.*, 2010)。此外, 其他边壁侵蚀的机制可能会将渗流造成的侵蚀掩盖, 例如河岸的侵蚀可能被误解为完全由侧向流侵蚀造成。在近期的研究中, 与地下水流动相关的孔隙水含量和压力的变化被认为是控制堤岸坍塌发生的最重要因素之一(Simon *et al.*, 2000; Darby *et al.*, 2007; Rinaldi *et al.*, 2008, 2013)。然而迄今为止发展起来的数学模型虽可用于获得河床和河岸变形, 但仅适用于有限的边界条件。此外, 由于边壁侵蚀现象缺乏局部的详细数据, 对于坡度和水流等相关条件的数值模拟存在一定困难。因此, 需要更多的现场或实验室研究来标定和验证多种条件下与河岸侵蚀相关的动

态特征(Shu *et al.*, 2019)。

2.1 渗流影响边壁侵蚀的实验研究

不少学者通过渗漏仪实验(Fox *et al.*, 2006, 2007; Lindow *et al.*, 2009; Karmaker *et al.*, 2013)揭示了渗流导致边壁侵蚀的基本过程: (1) 渗流底切; (2) 在岸坡或岸顶表面形成拉裂; (3) 岸坡坍塌。渗漏仪实验模拟渗流作用下的边壁侵蚀过程见图 2。Fox 等(2007)通过实验发现, 渗流侵蚀的作用略大于土壤孔隙水压力增加在边壁侵蚀中的作用。拉裂缝是渗流过程中土体基质吸力的降低和底切诱导弯矩共同作用的结果。边壁坍塌后形成的岸趾对边壁起到一定的保护作用, 阻碍了侧向流的进一步侵蚀和渗流的底切过程。只有侧向流或人工将岸趾移除之后, 渗流底切才会继续进行, 这项工作表明了今后将河流侵蚀和渗流侵蚀同时进行研究的必要性(Midgley *et al.*, 2013)。边壁崩塌土体在河床上的输移范围及程度, 关系到边壁的二次崩塌以及河床的冲淤变形, 而后者的改变又会反过来影响边壁的稳定(Fox *et al.*, 2014)。

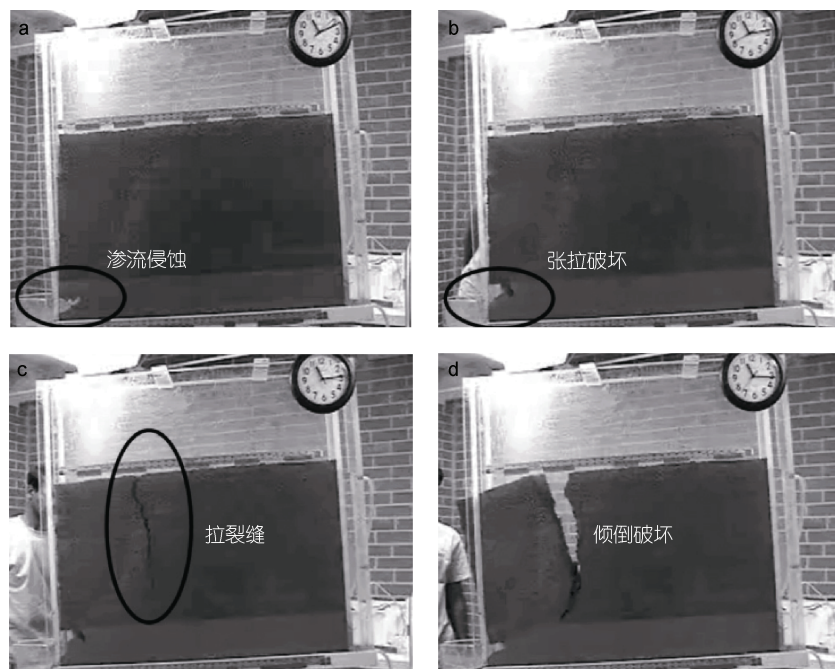


图 2 渗漏仪模拟渗流作用下的边壁侵蚀过程

Fig.2 Using lysimeter to simulate the process of bank erosion under the action of seepage
注: 改自文献(Fox *et al.*, 2010)

上述实验研究大多采用二维渗漏仪进行, 忽略了崩岸沿宽度方向的差异, 且二维模型无法模拟非均匀悬臂破坏、黏性岸坡附近和内部复杂的水流特性、泥沙运动的纵向坡度、孔隙水压力和崩塌块体效

应(Fox *et al.*, 2007; Patsinghasanee *et al.*, 2017)。此外, SLOPE/W 数值模型预测的边壁坍塌时间比在渗漏仪实验中观察到的更早, 可能原因是土体受到了渗漏仪两侧边壁的压缩力(Fox *et al.*, 2007)。Chu-Agor 等

(2008)在 Fox 等(2006)二维模型实验的基础上进行改进, 使用三维模型进行渗漏实验, 在此基础上建立了泥沙输移函数, 但仍存在渗流入口集中, 模型比尺较小, 无法真实还原土体应力的变化过程等问题。因此, 需建立渗流影响边壁侵蚀的三维原型实验系统进行进一步研究。

2.2 渗流作用下的边壁侵蚀机制

渗流可以通过三种不同的机制导致边壁侵蚀:

(1) 增加土壤孔隙水压力, 降低土体的抗剪强度(Fox *et al.*, 2014)。室内水槽研究表明, 当非饱和孔隙水压力增加到接近饱和时, 土壤最初的临界剪应力或抗侵蚀能力有所提高, 而抗剪强度明显下降, 地表侵蚀速率增加了一个数量级(Khanal *et al.*, 2020)。

(2) 渗流梯度力(Fox *et al.*, 2014)。当渗流压力大于土的抗剪强度时, 土体会发生拉伸或“突出”破坏, 而土体的抗剪强度因含水量增大而降低, 渗流力的增大和土体抗剪强度降低是实验中观察到的拉伸或“突出”破坏的原因(Chu-Agor *et al.*, 2008)。孔隙水压力和基质吸力均随地下水位的变化而变化, 前者起到侵蚀作用, 后者起到表观黏聚力的作用。在洪水退水或落潮期, 静水压力迅速下降, 平均地下水位的滞后变化导致孔隙水压力相对较高, 不利于岸坡稳定。因此, 堤岸坍塌大多发生在水位下降期(Deng *et al.*, 2019)。相关实验发现, 增大渗透水头, 黏性土可蚀性随之增加, 土体内湿润锋推进速度加快, 崩岸速度加快; 对于同一渗透水头, 随着岸高的降低, 崩岸泥沙质量减少, 但渗流侵蚀对岸坡泥沙总量的贡献率增加(Fox *et al.*, 2006; Al-Madhhachi *et al.*, 2011)。

(3) 渗流颗粒的移动和底切(Fox *et al.*, 2014)。渗流梯度力小于土块的初始抗力时, 颗粒移动(即渗透侵蚀)和土体下切导致边壁崩塌, 这是由渗流和孔隙水压力累积的合力造成的(Chu-Agor *et al.*, 2008)。

2.3 渗流与侧向流共同作用下的边壁侵蚀机制

渗流与其他导致边壁侵蚀(即河流侵蚀、围压和植被)的因子间复杂相互作用, 使得人们很难充分了解渗流对边壁侵蚀的作用(Fox *et al.*, 2006)。复杂的原因主要在于难以量化影响崩岸这一现象的土壤、水文和岩土机制, 以及理解它们之间的相互作用。相关研究表明, 渗流本身似乎不是造成侵蚀的主要因素。然而, 当有其他因素(如降雨)引起侵蚀时, 渗流会影响侵蚀速率。渗流对侵蚀的影响最能通过土体可蚀性的变化来确定, 表明渗流与土体可蚀性有直接关系。这表明土体可蚀性既受土体本身特性的影响, 又受土

体中水流条件的影响(Owoputi *et al.*, 2001)。

近年来, 一些学者研究了侧向流对河岸边壁侵蚀的影响。Samadi 等(2013)采用人工开挖的方式代替侧向流进行实验, 并将数值模型得到的应力和形变分布与实验室观测结果进行了比较, 研究发现边壁发生倾倒破坏的可能性大于剪切破坏。Patsinghasanee 等(2017)通过对泰国 U-Tapao 河岸的实验结果和现场数据进行数值模拟, 对悬臂破坏的机理进行了分析研究, 开发了可以较准确地模拟边壁破坏机制与悬臂形状的数值模型。Thi 等(2019)关注侧向流的涨落速率与边壁土体性质的影响, 研究发现水位不变时, 土体密度更大、黏聚力更高的边壁容易出现更大更深的崩塌破坏, 水位变化率低时, 侧向流的入渗成为边壁侵蚀的主要因素, 而水位变化率高时, 边壁侵蚀以悬臂的倾倒破坏为主。Aldefae 等(2021)发现边壁土体侵蚀率随着侧向流流速的下降而降低。

Van Eerdt(1985)和 Gabet(1998)对潮汐环境中的崩岸进行了开创性的工作, 用梁破坏分析方法研究了悬臂形盐沼堤岸和悬崖的稳定性。Ginsberg 等(1990)证明了崩岸是如何导致侵蚀尖顶形状的发展的, 其研究大坡角是潮汐槽岸崩塌的主要原因。Zhao 等(2020)主要关注潮沟边壁高度与近岸水深的作用, 结果表明边壁的后退速率随边壁高度与近岸水深之比的增大而先增大后减小。Zhang 等(2021)对潮沟边壁破坏面的三维结构进一步分析后发现破坏面角与岸坡后退距离呈线性负相关。

前人对于边壁侵蚀的研究多倾向于孤立地看待单个过程, 但边壁侵蚀是渗流、侧向流等多因素相互作用的综合结果(Wolman, 1959; Thorne, 1982; Lawler *et al.*, 1997)。简而言之, 孤立地看待侧向流或渗流等因素在边壁侵蚀中的作用, 会导致对相关过程的预测出现偏差(Darby *et al.*, 2007)。因此, 多位学者提出建议, 今后的研究应尝试将渗流侵蚀与侧向流侵蚀相结合, 对崩岸机理的认识应涵盖侧向流平均水位涨落速率和渗流水头等多方面因素(Fox *et al.*, 2010; Karmaker *et al.*, 2013; Thi *et al.*, 2019)。

对渗流与侧向流共同作用下边壁侵蚀机制的研究较少, 部分学者通过对比研究发现, 在只有侧向流作用于边壁的情况下, 土体内孔隙水压力从试验开始到结束一直保持稳定(Ning *et al.*, 2011)。侧向流一方面冲刷岸底促进悬臂的形成, 加速边壁坍塌的过程; 另一方面通过对边壁由外向内的静水压力在一定程度上支撑边壁, 在此过程中水流的入渗加强了

边壁土体的抗滑移能力(叶威等, 2019), 水流持续时间长短影响冲刷崩塌过程。在侧向流和渗流的共同作用下, 土体内孔隙水压力开始时增长较快, 然后增长速度逐渐减小, 最后达到稳定状态。相比于只存在侧向流的情况, 两种因素共同作用下边壁崩塌更容易发生。在相同流速、不同渗透压力的条件下, 渗流水力坡度越大, 破坏发生的时间越早, 破坏的范围也越大(Ning *et al.*, 2011)。

3 河岸与潮沟边壁侵蚀的差异性

河岸与潮沟系统拥有相似之处, 二者均具有复杂的树枝网状结构及蜿蜒曲流的特性(Coco *et al.*, 2013), 在潮沟系统的研究中借鉴河岸侵蚀的方法基本可行, 但需要考虑两个系统的差异所带来的影响。主要的区别在于二者水流驱动力的不同: 潮沟内的水流受潮汐及波浪影响较大(Hibma *et al.*, 2004; De Swart *et al.*, 2009; Bondoni *et al.*, 2014), 潮流以潮周期为时间尺度, 在潮沟内往复运动, 流速变化剧烈, 其最大流速时刻为涨潮初期及落潮后期(Zhang *et al.*, 2016); 河流主要受地形和上游径流影响(Bondoni *et al.*, 2014), 以季节为时间尺度, 单向流态稳定, 其最大流速与高水位同时出现(Bayliss-Smith *et al.*, 1979)。Xin 等(2011)的数值模型研究强调了潮滩水文研究的复杂机制, 发现在潮周期内, 渗流存在明显的不对称性, 在由海向陆的方向上潮滩土体内孔隙水循环的特征时间尺度逐渐减少多个数量级。其研究表明渗流过程在一定的空间尺度下对于潮沟形态的演变具有重要作用。往复流的存在使得潮沟边壁土壤饱和度始终保持较高水平, 自陆向海的土体淹没历时不同导致土体强度与破坏频率的空间差异(D'Alpaos *et al.*, 2006)。Simon 等(2000)认为边壁坍塌主要由洪水衰退期的静水压力迅速丧失导致。与河流环境下二元河岸土体各向异性沿边壁剖面方向不同的是(夏军强等, 2013; 邓珊珊等, 2020), 潮汐环境中潮沟边壁土体受往复流影响而导致的各项异性主要表现在垂直于海岸的方向。风浪和盐度等因素亦可通过改变土体的孔隙水压力分布(Francalanci *et al.*, 2013)或土壤分散过程(Masoodi *et al.*, 2019)影响潮沟边壁稳定性。因此, 涨落潮的频繁出现对潮沟边壁侵蚀产生显著的影响。

4 结论和建议

目前研究边壁侵蚀的主要困难之一是缺乏土壤性质数据, 需要改进相关侵蚀特性与土壤性质的测

量方法。前人研究表明, 底床泥沙冲刷速率与流速正相关, 而与静水压力、土体干密度负相关, 但就某一种因素对冲刷率的影响程度意见尚未统一, 且大多数研究针对底床冲刷, 较少研究关注边壁的侧向冲刷过程, 因此边壁冲刷侵蚀速率的量测及其影响因素成为亟待解决的问题之一。边壁侵蚀的另一个研究难点是各种机制之间的相互作用。例如, 前人大多研究侧向流冲刷条件下边壁的侵蚀坍塌, 而对渗流作用以及渗流与侧向流在边壁侵蚀过程中的共同作用研究较少。近期研究表明, 渗流侵蚀是导致边壁侵蚀破坏的重要因素, 可以通过三种不同的机制导致边壁侵蚀: (1) 增加土壤孔隙水压力, 降低土体的抗剪强度; (2) 渗流梯度力; (3) 渗流颗粒的移动和底切。渗流与侧向流不同动力作用下, 边壁侵蚀的差异性和相似性, 以及两种动力共同作用下的侵蚀机制仍待进一步探究。

边壁侵蚀的实验研究较多针对河流环境下尺度较大的分层边壁, 且多使用降比尺的模型实验进行探索, 而对受潮流影响的尺度相对小的潮沟边壁关注不足。虽然二者的研究方法可以相互借鉴, 但潮沟环境中往复流的水力特性及细颗粒的泥沙性质带来的影响仍不可忽略。针对潮流、渗流对泥滩潮沟等海岸环境的影响, 建议从以下方面进行探究: (1) 潮流与渗流不同动力下, 潮沟边壁侵蚀的差异性和相似性。(2) 潮流与渗流共同作用下潮沟边壁的侵蚀机制。应采用水槽实验与数值模拟手段, 考虑水流和土体性质的影响, 优化边壁冲刷速率经验公式, 基于实验建立渗流水力坡度与边壁侵蚀速率的经验公式, 分析边壁侵蚀类型及破坏频率和距离等指标, 明确侵蚀过程控制因素及贡献率。(3) 考虑潮汐环境中往复流的水动力特性及细颗粒的泥沙性质对潮沟边壁侵蚀的影响。(4) 植被根系较高的抗拉强度与吸水的特性对边壁稳定性影响显著, 建议可以从植被与地下水的共同作用入手, 将生物因素纳入多因子共同作用下的边壁侵蚀研究中来。除渗流及侧向流外, 植被、土壤性质、波浪、底栖生物等因素均对潮沟边壁稳定性造成不同程度的影响, 对多因子驱动下潮沟边壁侵蚀的研究将有助于完善潮滩-潮沟边壁侵蚀动力地貌模型, 从本质上阐明潮沟崩岸的力学机理与周期性的侵蚀机制, 对于保障海岸工程安全, 以及潮滩资源的科学开发、利用和保护具有现实意义, 对促进多学科交叉具有重要的理论和实际价值。

参 考 文 献

- 万兆惠, 宋天成, 何青, 1990. 水压力对细颗粒泥沙起动流速影响的试验研究[J]. 泥沙研究(4): 62-69.
- 邓珊珊, 夏军强, 宗全利, 等, 2020. 下荆江典型河段芦苇根系特性及其对二元结构河岸稳定的影响[J]. 泥沙研究, 45(5): 13-19.
- 甘甜, 2017. 管道压力与水深对黏性泥沙起动影响分析[J]. 中国农村水利水电(11): 143-147, 154.
- 卢金友, 朱勇辉, 岳红艳, 等, 2017. 长江中下游崩岸治理与河道整治技术[J]. 水利水电快报, 38(11): 6-14.
- 叶威, 章光, 胡少华, 等, 2019. 河流冲刷作用下堤岸稳定性演化分析[J]. 水利水电快报, 40(1): 42-47.
- 吕亭豫, 龚政, 张长宽, 等, 2016. 粉砂淤泥质潮滩潮沟形态特征及发育演变过程研究现状[J]. 河海大学学报(自然科学版), 44(2): 178-188.
- 孙志林, 张翀超, 黄赛花, 等, 2011. 黏性非均匀沙的冲刷[J]. 泥沙研究(3): 44-48.
- 李华国, 袁美琦, 张秀芹, 1995. 淤泥临界起动条件及冲刷率试验研究[J]. 水道港口(3): 20-26.
- 余文畴, 卢金友, 2008. 长江河道崩岸与护岸[M]. 北京: 中国水利水电出版社.
- 张幸农, 假冬冬, 陈长英, 2021. 长江中下游崩岸时空分布特征与规律[J]. 应用基础与工程科学学报, 29(1): 55-63.
- 宗全利, 夏军强, 张翼, 等, 2014. 荆江段河岸黏性土体抗冲特性试验[J]. 水科学进展, 25(4): 567-574.
- 夏军强, 王光谦, 吴保生, 2003. 黄河下游河床纵向与横向变形的数值模拟——I 二维混合模型的建立[J]. 水科学进展, 14(4): 389-395.
- 夏军强, 宗全利, 许全喜, 等, 2013. 下荆江二元结构河岸土体特性及崩岸机理[J]. 水科学进展, 24(6): 810-820.
- 黄建维, 1989. 黏性泥沙在盐水中冲刷和沉降特性的试验研究[J]. 海洋工程(1): 61-70.
- 曹叔尤, 杜国翰, 1986. 黏性土冲淤的试验研究[J]. 泥沙研究(4): 73-82.
- 假冬冬, 杨俊, 陈长英, 等, 2021. 中国北方季节性冰冻河流岸滩崩塌数值模拟——以松花江为例[J]. 水科学进展, 32(5): 717-726.
- 舒彩文, 王军, 谈广鸣, 2007. 干容重对黏性淤积物起动和冲刷的影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 40(1): 25-28.
- 褚明华, 黄先龙, 2016. 2016 年长江中下游崩岸应急整治思考[J]. 中国水利(21): 10-11, 16.
- ALDEFAE A H, ALKHAFI R A, 2021. Experimental and numerical modeling to investigate the riverbank's stability[J]. SN Applied Sciences, 3(2): 164.
- ALDEFAE A H, AL-KHAFI R A, SHAMKHI M S, *et al*, 2020. Erosion, sediments transport and riverbank stability: a review [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 901: 012014.
- AL-MADHHACHI A T, HANSON G J, FOX G A, *et al*, 2011. Measuring erodibility of cohesive soils using laboratory jet erosion tests [M] // BEIGHLEY II R E, KILLGORE N W. World Environmental and Water Resources Congress 2011. Palm Springs, California, United States: American Society of Civil Engineers.
- BAYLISS-SMITH T P, HEALEY R, LAILEY R, *et al*, 1979. Tidal flows in salt marsh creeks [J]. Estuarine and Coastal Marine Science, 9(3): 235-255.
- BENDONI M, FRANCALANCI S, CAPPIETTI L, *et al*, 2014. On salt marshes retreat: experiments and modeling toppling failures induced by wind waves [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 119(3): 603-620.
- CHEN X D, ZHANG C K, PATERSON D M, *et al*, 2017. Hindered erosion: the biological mediation of noncohesive sediment behavior [J]. Water Resources Research, 53(6): 4787-4801.
- CHEN Y, THOMPSON C E L, COLLINS M B, 2012. Saltmarsh creek bank stability: biostabilisation and consolidation with depth [J]. Continental Shelf Research, 35: 64-74.
- CHU-AGOR M L, FOX G A, CANCIENNE R M, *et al*, 2008. Seepage caused tension failures and erosion undercutting of hillslopes [J]. Journal of Hydrology, 359(3/4): 247-259.
- COCO G, ZHOU Z, VAN MAANEN B, *et al*, 2013. Morphodynamics of tidal networks: advances and challenges [J]. Marine Geology, 346: 1-16.
- D'ALPAOS A, LANZONI S, MUDD S M, *et al*, 2006. Modeling the influence of hydroperiod and vegetation on the cross-sectional formation of tidal channels [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 69(3/4): 311-324.
- DARBY S E, RINALDI M, DAPPORTO S, 2007. Coupled simulations of fluvial erosion and mass wasting for cohesive river banks [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 112(F3): F03022.
- DE SWART H E, ZIMMERMAN J T F, 2009. Morphodynamics of tidal inlet systems [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 41: 203-229.
- DENG S S, XIA J Q, ZHOU M R, 2019. Coupled two-dimensional modeling of bed evolution and bank erosion in the Upper JingJiang Reach of Middle Yangtze River [J]. Geomorphology, 344: 10-24.
- FAGHERAZZI S, KIRWAN M L, MUDD S M, *et al*, 2012. Numerical models of salt marsh evolution: ecological, geomorphic, and climatic factors [J]. Reviews of Geophysics, 50(1): RG1002.
- FOX G A, CHU-AGOR M L, WILSON G V, 2007. Erosion of noncohesive sediment by ground water seepage: lysimeter experiments and stability modeling [J]. Soil Science Society of America Journal, 71(6): 1822-1830.
- FOX G A, FELICE R G, 2014. Bank undercutting and tension failure by groundwater seepage: predicting failure mechanisms [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 39(6): 758-765.
- FOX G A, WILSON G V, 2010. The role of subsurface flow in hillslope and stream bank erosion: a review [J]. Soil Science Society of America Journal, 74(3): 717-733.
- FOX G A, WILSON G V, PERIKETI R K, *et al*, 2006. Sediment transport model for seepage erosion of streambank sediment [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 11(6): 603-611.

- FRANCALANCI S, BENDONI M, RINALDI M, *et al*, 2013. Ecomorphodynamic evolution of salt marshes: experimental observations of bank retreat processes [J]. *Geomorphology*, 195: 53-65.
- GABET E J, 1998. Lateral migration and bank erosion in a saltmarsh tidal channel in San Francisco Bay, California [J]. *Estuaries*, 21(4): 745-753.
- GINSBERG S S, PERILLO G M E, 1990. Channel bank recession in the Bahía Blanca estuary, Argentina [J]. *Journal of Coastal Research*, 6(4): 999-1010.
- HAGERTY D J, 1991. Piping/sapping erosion. I: basic considerations [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(8): 991-1008.
- HANSON G J, SIMON A, 2001. Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the midwestern USA [J]. *Hydrological Processes*, 15(1): 23-38.
- HIBMA A, STIVE M J F, WANG Z B, 2004. Estuarine morphodynamics [J]. *Coastal Engineering*, 51(8/9): 765-778.
- ICHOKU C, CHOROWICZ J, 1994. A numerical approach to the analysis and classification of channel network patterns [J]. *Water Resources Research*, 30(2): 161-174.
- KARMAKER T, DUTTA S, 2011. Erodibility of fine soil from the composite river bank of Brahmaputra in India [J]. *Hydrological Processes*, 25(1): 104-111.
- KARMAKER T, DUTTA S, 2013. Modeling seepage erosion and bank retreat in a composite river bank [J]. *Journal of Hydrology*, 476: 178-187.
- KHANAL A, FOX G A, GUERTAULT L, 2020. Soil moisture impacts linear and nonlinear erodibility parameters from jet erosion tests [J]. *Transactions of the ASABE*, 63(4): 1123-1131.
- KLEINHANS M G, SCHUURMAN F, BAKX W, *et al*, 2009. Meandering channel dynamics in highly cohesive sediment on an intertidal mud flat in the Westerschelde estuary, the Netherlands [J]. *Geomorphology*, 105(3/4): 261-276.
- KRONE R B, 1999. Effects of bed structure on erosion of cohesive sediments [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(12): 1297-1301.
- LANZONI S, D'ALPAOS A, 2015. On funneling of tidal channels [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120(3): 433-452.
- LAWLER D M, THORNE C R, HOOKE J M, 1997. Bank erosion and instability [M] // THORNE C, HEY R, NEWSON M. *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. New York: John Wiley and Sons Ltd: 137-172.
- LINDOW N, FOX G A, EVANS R O, 2009. Seepage erosion in layered stream bank material [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(12): 1693-1701.
- MARIOTTI G, FAGHERAZZI S, 2013. Critical width of tidal flats triggers marsh collapse in the absence of sea-level rise [J]. *Proceedings of the national Academy of Sciences*, 110(14): 5353-5356.
- MASOODI A, TABATABAI M R M, NOORZAD A, *et al*, 2019. Riverbank stability under the influence of soil dispersion phenomenon [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 24(3): 05019001.
- MIDGLEY T L, FOX G A, WILSON G V, *et al*, 2013. Seepage-induced streambank erosion and instability: in situ constant-head experiments [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(10): 1200-1210.
- NING B, WU S Q, TAN Y F, *et al*, 2011. Coupling effect of seepage flow and river flow on the bank failure [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 23(6): 834-840.
- OWOPUTI L O, STOLTE W J, 2001. The role of seepage in erodibility [J]. *Hydrological Processes*, 15(1): 13-22.
- PATISINGHASANEE S, KIMURA I, SHIMIZU Y, *et al*, 2017. Cantilever failure investigations for cohesive riverbanks [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, 170(2): 93-108.
- RINALDI M, DARBY S E, 2007. 9 Modelling river-bank-erosion processes and mass failure mechanisms: progress towards fully coupled simulations [J]. *Developments in Earth Surface Processes*, 11: 213-239.
- RINALDI M, MENGONI B, LUPPI L, *et al*, 2008. Numerical simulation of hydrodynamics and bank erosion in a river bend [J]. *Water Resources Research*, 44(9): W09428.
- RINALDI M, NARDI L, 2013. Modeling interactions between riverbank hydrology and mass failures [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(10): 1231-1240.
- SAMADI A, AMIRI-TOKALDANY E, DAVOUDI M H, *et al*, 2013. Experimental and numerical investigation of the stability of overhanging riverbanks [J]. *Geomorphology*, 184: 1-19.
- SHU A P, DUAN G S, RUBINATO M, *et al*, 2019. An experimental study on mechanisms for sediment transformation due to riverbank collapse [J]. *Water*, 11(3): 529.
- SIMON A, CURINI A, DARBY S E, *et al*, 2000. Bank and near-bank processes in an incised channel [J]. *Geomorphology*, 35(3/4): 193-217.
- THI T D, DO MINH D, 2019. Riverbank stability assessment under river water level changes and hydraulic erosion [J]. *Water*, 11(12): 2598.
- THORNE C R, 1982. Processes and mechanisms of river bank erosion [M] // HEY R D, BATHURST J C, THORNE C R. *Gravel Bed Rivers*. New York: Wiley: 227-271.
- VAN EERDT M M, 1985. Salt marsh cliff stability in the oosterschelde [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10(2): 95-106.
- WOLMAN M G, 1959. Factors influencing erosion of a cohesive river bank [J]. *American Journal of Science*, 257(3): 204-216.
- WYNN T M, MOSTAGHIMI S, ALPHIN E F, 2004. The effects of vegetation on stream bank erosion [C] *American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2004 ASAE Annual Meeting. Paper No.042226*. <https://doi.org/10.13031/2013.16423>.
- XIN P, YUAN L R, LI L, *et al*, 2011. Tidally driven multiscale pore water flow in a creek-marsh system [J]. *Water Resources Research*, 47(7): W07534.

- ZHANG K L, GONG Z, ZHAO K, *et al*, 2021. Experimental and numerical modeling of overhanging riverbank stability [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126(10): e2021JF006109.
- ZHANG Q, GONG Z, ZHANG C K, *et al*, 2016. Velocity and sediment surge: what do we see at times of very shallow water on intertidal mudflats? [J]. *Continental Shelf Research*, 113: 10-20.
- ZHAO K, GONG Z, ZHANG K L, *et al*, 2020. Laboratory experiments of bank collapse: the role of bank height and near-bank water depth [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125(5): e2019JF005281.

RESEARCH PROGRESS ON BANK EROSION OF TIDAL CHANNEL UNDER COUPLED EFFECT OF SEEPAGE AND SURFACE FLOW

GONG Zheng¹, WANG Ke-Yu^{1,2}, ZHAO Kun¹, ZHANG Kai-Li¹

(1. *Jiangsu Key Laboratory of Coast Ocean Resources Development and Environment Security, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *PowerChina Northwest Engineering Co. Ltd., Xi'an 710065, China*)

Abstract The bank erosion of tidal channel can be divided into bank scouring by flow and bank collapse by gravity. Previous studies have shown that flow velocity, water pressure, soil dry density, and other factors would affect the bed scouring rate. However, the measurements of scouring rate of sidewall bank and related influencing factors need remain unsolved. Previous studies paid more attention to the influence of surface flow on bank collapse, but less on seepage and the coupled effect of seepage and surface flow on bank instability. Recent studies show that seepage play an important role in the destabilization of tidal channel bank. In the future, the difference and similarity of bank erosion under different dynamic actions of seepage and surface flow, and the destabilization mechanism of tidal channel bank under the coupled effect of the two forces need to be explored.

Key words tidal channel; scour rate; bank erosion; seepage