

河流崩岸研究进展和问题讨论

顾 轩¹, 姜月华², 杨国强², 金 阳², 梅世嘉², 张 鸿²

¹中国地质科学院, 北京

²中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京

Email: 775335120@qq.com, 316664105@qq.com

收稿日期: 2021年1月25日; 录用日期: 2021年2月19日; 发布日期: 2021年2月26日

摘 要

河流崩岸是江河沿岸常见的地质现象, 具有不可忽视的破坏性, 随着岸线的开发和利用, 河流崩岸逐渐受到相关学者和政府部门的关注和重视。为了加强读者对于国内外河流崩岸研究的了解, 推动河流崩岸的相关研究进程, 本文通过参考大量河流崩岸的研究资料与文献, 回顾了国内外河流崩岸的研究历程, 对河流崩岸的监测手段、模拟方法以及形成机制3个方面的研究进展进行评述。在此基础上, 本文讨论了目前崩岸研究存在缺乏多学科融合研究、理论模式不完善、模拟方法不准确的问题。提出要利用先进的监测技术和方法, 扩大崩岸研究的时间尺度和空间尺度, 加强崩岸的灾害链研究, 为预测河流崩岸及制定防治措施奠定基础。

关键词

河流崩岸, 监测手段, 模拟方法, 形成机制

Research Progress and Problem Discussion on River Bank Collapse

Xuan Gu¹, Yuehua Jiang², Guoqiang Yang², Yang Jin², Shijia Mei², Hong Zhang²

¹Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing

²Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing Jiangsu

Email: 775335120@qq.com, 316664105@qq.com

Received: Jan. 25th, 2021; accepted: Feb. 19th, 2021; published: Feb. 26th, 2021

Abstract

River bank collapse is a common geological phenomenon along the banks of rivers, and its destructivity cannot be ignored. With the development and utilization of shorelines, river bank col-

lapse is now attracting the attention of relevant scholars and government departments. In order to strengthen readers' understanding of the research on bank collapse of rivers at home and abroad, and promote the related research process of river bank collapse, this review demonstrates the research history of river bank collapse at home and abroad by referring to a large number of relevant research materials and documents. This review also remarks the relevant research progress of the monitoring methods, simulation methods and formation mechanisms of river bank collapse. On this basis, this article discusses the lack of multi-discipline fusion research, imperfect theoretical models, and inaccurate simulation methods in current bank collapse research. Furthermore, this article proposes to use advanced monitoring technologies and methods to expand the time scale and spatial scale of bank collapse research, strengthen the research on the disaster chain of bank collapse, and lay the foundation for predicting river bank collapse and formulating prevention measures.

Keywords

River Bank Collapse, Monitoring Method, Simulation Method, Formation Mechanism

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

河流崩岸是指由土石组成的河岸、湖岸因受水流冲刷，在重力作用下土石失去稳定沿河岸的岸坡产生崩落、崩塌和滑坡等现象。这种现象频繁发生于世界上所有的天然江河沿岸，如美国密西西比河下游、欧洲莱茵河历史上都发生过多次崩岸。我国的七大江河也普遍存在崩岸现象，以长江中下游河段最为典型[1][2]，其崩岸现象十分严重，崩岸长度占长江中下游全部江岸的35.7% [3]。尤其是在1998年洪水期间，长江中下游干堤3822公里中，外滩崩岸的长度达1520余公里，占沿江总长度的41% [4]。近年来(2018年12月至2019年11月)，长江干流、主要支流共发生河道崩岸71处，崩岸长度22,423米，其中长江中下游干流20处，长度5095米；主要支流51处，长度17,328米[5]。



Figure 1. Aerial photo of the collapse of the bank in ZhiNan Village
图1. 指南村崩岸航拍照片

崩岸的发生时间短, 坍塌体积大, 坍塌进深远, 而且难于预测, 一旦发生将会导致很多环境、地质问题, 强度大的崩岸甚至直接威胁沿岸人民财产安全。如 2017 年在江苏省扬中市指南村发生的崩岸造成江岸线坍失 540 m, 坍失主江堤 440 m, 坍江最大进深 190 m, 坍入主江堤堤后最大距离 51 m, 坍失房屋 9 户、江堤涵洞 1 座, 坍失面积 9.733 hm² [6] (见图 1)。治理和安置费用达到了 4 亿元。随着岸线的开发利用, 崩岸现象受到了相关部门的重视, 国内外学者对于崩岸进行了大量的研究。

本文通过回顾国内外河流崩岸的研究历程, 对河流崩岸的监测手段、模拟方法以及形成机制 3 个方面的研究进展进行评述, 以期读者对于国内外崩岸研究有进一步的了解, 从而推动河流崩岸的相关研究进程。

2. 国内外研究历程

2.1. 国外研究进展概述

国外对于冲积河流崩岸的研究起步较早, 最早可以追溯到 19 世纪中后期, 但当时研究以经验性的总结分析为主, 鲜有理论性研究成果, 并且也往往局限于某单一学科(王路军, 长江中下游崩岸机理的大型室内实验研究), 如 1863 年 Fergusson J. [7] 通过长时间持续观测, 调查研究由于蜿蜒河流横向摆动引起的河岸崩坍。20 世纪中期, 人类开始大规模开发利用岸线, 借助港口这一天然的运输优势发展交通、贸易及制造等行业, 崩岸现象受到越来越多学者的重视。这一时期的崩岸研究通过在野外实测获得数据, 配合河流崩岸的相关历史资料进行分析, 以研究探寻影响崩岸发生的因素[8] [9]。与此同时, 对于崩岸的野外调查手段、样品采集的方法和室内物理力学实验的技术规范也在不断地进步与完善。1988 年, 美国陆军工程兵团[10] [11] 针对密西西比河的崩岸问题, 开展了野外无扰动取样和室内土工试验测量工作。

20 世纪 80 年代至今, 随着研究的深入, 单一学科方向的研究已经满足不了研究需求, 为了模拟崩岸的形成过程, 达到揭示崩岸形成机制的目的, 欧美等发达国家开始进行多学科联合的研究工作, 并在此基础上提出了多种岸坡崩塌的概念模型[12] [13] [14] [15] [16]。概念模型的提出促进了崩岸研究由定性分析到定量分析的转变, 对于崩岸模型的数值模拟成为了新的研究重点。学者们不断改进模型, 通过添加新的参数来完善模型, 渗流、孔隙水、岸坡表面植物的种类及年龄等因素被纳入影响岸坡土体稳定性因素的考虑范围[17] [18]。大量高科技也被用于崩岸的调查和动态监测中, 如电感应侵蚀针、激光雷达系统、三维激光扫描仪、多波束测深仪[19] [20] [21] [22] [23] 等。得益于遥感影像和航空拍摄技术的发展, 学者们使用高分辨率遥感影像分析大尺度空间区域及时间跨度的河岸崩塌量动态变化, 这使得崩岸研究更加系统化。

2.2. 国内研究进展概述

相对于国外, 我国对于崩岸的研究起步较晚。国内研究早期主要以经验观察为主, 研究对象也只是单个或几个崩岸。20 世纪 70 年代, 荆江河床试验站、汉口水文总站和南京河床实验站根据长江河道观测资料对长江的崩岸进行分析[24], 是国内较早对于崩岸的研究。随后陈引川[25]、余文畴[26]、王家云[27], 黄本胜[28] 等人从水流作用, 岸滩土体本身物理性质, 河床变化等多个角度研究崩岸, 但当时国内对崩岸现象的认识和治理还处在感性和经验阶段, 对于崩岸的机理缺乏系统性的研究, 其研究对象也相对集中在长江中下游和黄河流域。

21 世纪以来, 我国的河流崩岸研究取得了一系列成果。主要体现在: 通过收集野外调查、数据采集、对崩岸进行分类[29], 设计各种崩岸室内试验模型, 对崩岸的形成机理及预测进行了广泛研究[4] [30] [31] [32]; 对崩岸进行长期监测[33], 填补了缺乏准确的长期监测数据来支持崩岸演变的空缺; 量化影响崩岸发生的因素, 并进行岸坡稳定性评价[34]; 运用多种监测设备组成的多模态传感器系统对崩岸进行融合研究[35] [36]; 崩岸治理技术的极大提高[37] [38]。研究的对象也从长江、黄河扩大到黑龙江、乌苏里江、珠江、汉江等河流[39]。

2.3. 国内外河流崩岸研究总体进展及差异性

由上述国内外关于河流崩岸的研究进展可以看出, 河流崩岸研究总体进展是由定性的经验认识到定量的理论研究发展的过程, 研究思维也从单一学科的研究发展成多学科的联合研究。早期河流崩岸的研究重点关注崩岸产生原因、发展速度以及影响因素, 之后的研究重点包含评价河岸的稳定性、预测崩岸发生的可能性和规模、模拟重建崩岸过程、分析崩岸发育特征和形成机制、探究崩岸治理技术等多个方面。研究手段从野外调查观测发展为如今的室内实验、数值模拟、遥感和航拍、多模态传感器系统融合研究等多种手段共同研究。

国内外河流崩岸研究差异性主要体现在研究的起步时间、研究对象的范围和调查监测的手段上。国外河流崩岸的研究起步较国内早。国外对于崩岸研究的直接成果并不多, 他们主要是从河岸侵蚀与河岸稳定性出发[40], 研究对象主要为某一地区或河段的崩岸总体, 很少对单个崩岸进行研究; 而国内对一些典型的大型崩岸从岸坡土体、水流冲刷、地下水渗流等各个方面进行独立研究。在调查监测手段上, 国外采用河岸侵蚀监测的方法监测崩岸, 国内的监测手段针对性更强, 比如采用多模态传感器系统、超声波深度查找器、高密度电法等方法对崩岸进行监测[33] [35] [36] [41], 具有高精度、长周期、轻工作量等优势。

3. 河流崩岸的监测

为了及时掌握河流岸坡的侵蚀情况, 发现或预报潜在崩岸险情, 同时获取崩岸发生过程中的地质数据, 必须对岸坡进行具有全面性、系统性和连续性的监测。监测方法目前主要为以下三种: 野外观测、地形测量、遥感影像和航空拍摄。这三种方法分别对应不同的空间尺度: 野外观测的监测范围在数米至数百米, 地形测量的监测范围是数公里, 遥感影像的监测范围为数公里至数十公里。

早期的野外观测主要采用侵蚀针法与断面法对河岸进行调查与动态监测。侵蚀针法最早由 Wolman [8] 使用于崩岸的监测中, 通过定期测量测针出露于地表的长度来反映侵蚀深度, 在岸坡侵蚀崩塌的监测工作中起到了非常重要的作用[42]。但这种方法只能得到短期的观测数据, 易受人为干扰, 甚至侵蚀针可能随河岸崩塌而丢失。为了更好地了解地层分布情况、岩性特征、土体渗透系数以及满足土工实验的取样要求, 在研究区布设工程地质钻孔与水文地质钻孔进行水文监测, 并放入水位计监测地下水水位、温度等, 必要时还可以建立地下水监测网做更深入的调查研究[43]。

随着遥感技术和航拍技术的发展, 遥感影像、航空摄影成了学者们监测崩岸的常用手段, 这些技术可用来监测较大空间和较长时间尺度上的河岸崩塌情况, 具有重复周期短、分辨率高、节省人力、不易扰动河岸等优点。杨则东[44]等人利用多时相遥感资料, 监测分析了长江安徽段岸带变迁形式和崩岸特征, 并按 12 个不同河型段进行了具体分析和研究。Rose [23] 利用航片、机载激光雷达结合的方式监测了新西兰怀波阿河 16 公里和 28 公里的河岸在过去的 5 年中河岸的侵蚀崩塌情况。

近年来, 崩岸研究对于地形的精度要求不断提高, 不少地形测绘技术被应用于崩岸监测。陆上地形监测一般采用三维激光扫描、全站仪电子平板、草图编码法(GNSS RTK 或全站仪极坐标法采集数据)等方法, 水下地形监测技术一般包括浅地层剖面测量技术、单波束和多波束测量技术[45]。张家豪[35] [36] 利用多波束测深仪、三维激光扫描仪、浅地层剖面仪、双频 ADCP、Trimble-差分 GPS、RTK 等组成的多模态传感器系统(见图 2), 对长江铜陵太阳洲水道凹岸河段窝崩边坡的沉积地貌和水动力特征进行陆上与水下联合测量和三维地形数据的融合调查研究, 该方法集成度高, 克服了传统人工接触测量方法或遥感影像法的不易实施性和不准确性。另外, 为了获得长期监测数据 Ji [33] 使用超声波深度查找器对蓄水库区进行长达数年的监测。物探技术也被用来辅助监测调查, 汤金云[41]于 2009 年将高密度电法技术应用于崩岸的调查, 该技术的原理是采用点阵式布电极通过向大地供直流电建立起稳定的人工电场, 在地表某点观测垂向和水平

方向的电阻率变化,以达到地质解释的目的。该技术采集量大、效率高、地电信息丰富。林松[46]等人在随后的研究中使用了该方法,但高密度电法也有局限性,如要求地形起伏不能太大、成本较高等。

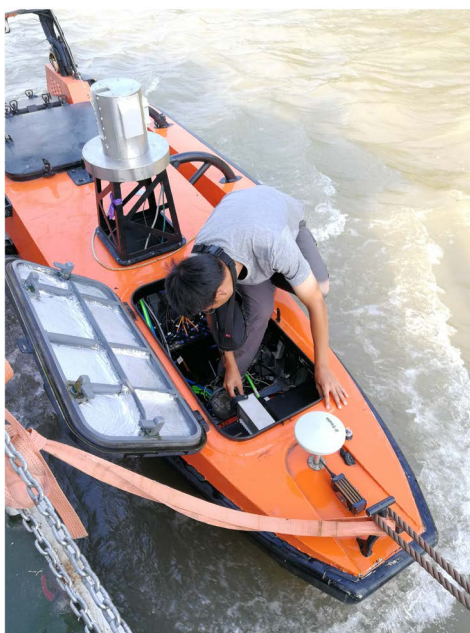


Figure 2. Unmanned ship equipped with multi-modal sensor system
图 2. 搭载多模态传感器系统的无人船

此外还有其他的一些监测调查方法,如 Boorman [47]利用 EMD (Erosion Measurement Device)装置调查植被岸坡的抗侵蚀能力。中国地质调查局南京地质调查中心利用光纤监控技术构建了堤防安全分布式光纤监控系统(见图 3),弥补了当前常规监测手段测点密度低、无法长距离和大范围、测试效率低、自动化程度低等不足,为崩岸监测提供了新的技术手段。

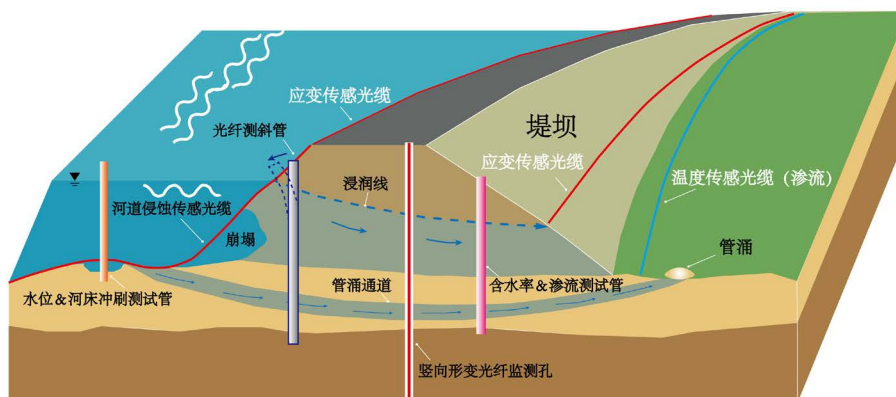


Figure 3. Schematic diagram of a distributed optical fiber monitoring system for dike safety
图 3. 堤防安全分布式光纤监控系统示意图

4. 河流崩岸的模拟

长期以来,学者们一直致力于重建崩岸的形成过程,以期对崩岸的形成机制和岸坡稳定性评价有更深的研究。模拟是直接反应崩岸形成过程的手段,也是能将研究量化的方法。冲积河流崩岸的模拟分为

室内水槽的物理模拟和数值模拟两种。早期的理论不够成熟,物理模拟还是主要的手段,研究发展至今,形成了物理模拟与数值模拟相结合、相互验证的局面。

关于室内水槽的物理模拟,王路军[48]利用概化水槽实验开展了直道和弯道水流模拟型实验在多因素组合作用下单一因素变化对岸坡稳定性影响的模拟研究。王延贵[4]选用精煤、电木粉和塑料沙作为试验用沙,设计了崩岸机理试验模型,成功模拟出了弯曲河道与顺直河道的崩塌以及四种崩塌形式(滑崩、倒崩、片崩、条崩)。Stefanovic [49]利用室内水槽实验,模拟在降雨和控制径流条件下的曲折河岸崩塌过程。室内水槽的物理模拟是一种直观的研究崩岸的方法,但由于其空间局限性,模拟结果与实际仍然存在误差。

数值模拟方面, BSTEM (Bank Stability and Toe Erosion Model)是目前较为成熟的河岸稳定性计算模型。BSTEM 模型以 Osman 提出的河床冲刷与河岸侵蚀模型为基础[12], Darby [14]通过增加孔隙水重量与静水压力来研究不同土体特性对河岸稳定性影响, Simon [50]又在此基础上提出了分层模拟的想法,形成了“河岸稳定性及坡脚侵蚀模型”(BSTEM)的雏形。后期经过 Midgley [51]等人的改进,在模型中增加了崩塌角的计算程序,河岸坡度、高度为基础生产简单剖面的功能,河岸的几何形态模块,植物根系固土模型和纤维束模型[18] [52];并且简化了一些代码,去除了一些假设条件;整合了多种河岸安全系数的计算方法和崩塌机制。直至今日 BSTEM 已经发展到 5.4 版本,具备相当完善的崩岸过程模拟功能和预测功能,不仅可用于评价岸坡稳定性,还可根据输入的参数估算崩塌的规模。宗全利[53]采用 BSTEM 模型对二元结构河岸的崩塌过程进行了模拟。李志威[54]采用 BSTEM 模拟黄河源弯曲河流了河岸侵蚀和崩塌过程,丁彬[32]利用 BSTEM 模型对长江安徽段和悦洲典型断面的岸坡崩退过程进行了模拟。但是 BSTEM 模型仍然存在一些不足[55],比如模型计算需要依赖庞大的野外资料收集,成本较高;无法考虑岸坡上部荷载对稳定性的影响,对上部荷载较高的岸坡进行模拟的结果与实际相差较大等。除了上述模型,学者们基于不同的研究角度,提出其它数值模型。夏军强[56] [57] [58]将平面二维水沙数学模型与建立在力学基础上的粘性河岸冲刷模型结合,建立了河床变形的平面二维混合模型,该模型能同时模拟天然河道的纵向与横向变形,尤其适用于河床纵横向变化都十分剧烈的河段。假冬冬[59]建立了河道摆动的三维数值模型来模拟荆江典型河段河岸崩塌及处理由崩岸引起的河道摆动过程。此外,常规的数值模拟软件比如 Flac 3D、Matlab、Geo-studio [42] [60] [61]等也可以运用于崩岸的数值模拟研究。

5. 河流崩岸的形成机制

河流的复合河岸通常表现为二元结构,即上层为粘土或淤泥质粘土,下层为粉细砂层[62] [63] [64]。在水流冲刷作用下,砂土与粘性土的运动特点和运动机理是不一样的。对于松散的砂土,重力起主要作用,当水流流速大于泥沙临界起动流速时,土体颗粒将随着水流流失;对于粘性土,土颗粒间粘结力、静电引力及胶结作用力起主导作用,其最小临界抗冲流速比粉细砂大得多。因此,上层粘土很难被冲动,而下层粉细砂土非常容易达到起动状态。下层砂土流失,上层粘土失去支撑不断下陷崩塌。

水流作用包括三个方面:纵向水流冲刷作用、弯道环流作用和回流淘刷作用。一般情况下纵向水流冲刷作用是影响河流崩岸的首要因素。根据水流挟沙力表达式 $S = k(U^3/gh\omega)^m$ 发现纵向水流越靠近岸流速越大,近岸单宽流量越大,水流的剪切应力越大,对河床和河岸的冲刷作用也越强。水流冲刷走了泥沙,河流宽度增加,近岸水流速也随之增大,如此反复,冲刷作用强度越来越大[65] [66]。根据统计,蜿蜒河道的迁移过程中最有可能发生河岸冲刷与崩岸, Nanson [67]、Biedenharn [68]研究表明弯道处沿着凹岸的河水流速增加,导致弯曲段的冲刷普遍要比顺直段严重。李宝璋[69]的研究发现在汛期,河流水流量与流速均增大,纵向水流冲刷作用增强,岸坡不断遭到侵蚀,河流宽度增加,回流极易出现在水流突然扩大的一侧。当河流水流的副流远离主流区,便会出现封闭的环向流动,形成回流区。只要回流区的回流强

度足够大, 区内泥沙便会处于流动状态, 水流不断对岸壁产生冲刷破坏。长江中下游典型的“口袋型”窝崩的形成原因就是河流中存在大尺度纵轴螺旋流[25]。

随着对于崩岸机理的研究逐步深入, 学者们发现单一的水流冲刷导致崩塌并不能解释所有的崩岸现象, 因此提出了新的观点。国外 Darby [14]通过增加孔隙水重量与静水压力来研究不同土体特性对河岸稳定性影响, 进而分析崩岸原因, 认为导致崩岸发生的因素并不一定局限于河岸侵蚀与坡脚冲刷加深。国内王家云[27]、王永[70]在研究长江安徽河段崩岸后认为其主要影响因素是水流的冲刷作用, 其次是河岸地质条件及高低水位的突变产生的外渗压力。Hagerty [63] [64]研究发现发生崩岸的模式分别为拉力破坏、悬臂破坏和切应力破坏, 发生以上破坏的原因主要是地下水渗透作用。由于土体渗透性, 河流中的水位与地下水位不一致时会产生渗漏与管涌, 向外渗出的水流使沙层中的沙粒起动并搬运外移, 结果往往使淘蚀层中形成裂缝, 裂缝的发展使岸滩实际强度减小, 最终导致河岸崩塌。地下水虽对崩岸的发生具有一定的影响, 但并非是产生崩岸的必要条件。

土体液化也是导致崩岸发生的原因之一。在地震产生的循环荷载作用下, 土体中的超孔隙水压力迅速上升, 土体抗剪强度逐渐降低, 当已液化土的抗剪能力很小时, 上覆非液化土层在沿液化界面的自重分力和土层的水平地震力的作用下产生滑移[4] [48]。岸坡土体受水流浸泡, 会发生纵向的裂隙。在汛期, 水位不断升高, 虽然水位上升会导致河岸侧向压力增大, 但土体浸泡后的稳定性降低, 同时水流顺着裂隙进入土体, 加剧了土体的崩坏。枯水期的水位降落很快, 平衡岸坡的饱和土体的侧向水压力迅速减小, 此时土体的稳定性已不如从前, 极有可能发生崩塌[70]。

此外, 还有一些其他的因素会导致崩岸。Docherty [71]在格陵兰岛东北部对热侵蚀引起的河岸崩塌进行了分析, 证明了冻融作用对崩岸的影响, 但这种影响仅限于高纬度存在冻土层地区。Zeyl [72]在研究马尼托巴省北部尼尔森河某处崩岸时发现季节性霜冻的提前同样会导致崩岸的发生, 间接说明了地层在控制河岸崩塌中的重要性。Simon [18]分析了岸坡土壤中水分含量、植物的种类和年龄等对岸坡稳定性的影响, 结果表明植物对于岸坡稳定性的贡献可能是有益的也可能是有害的。Prosser [73]的研究表明裸露的粘土和基岩河岸会在风化作用下发生崩塌, 目前对于陆面风化作用的研究较少。

总之, 影响崩岸的发生的因素众多, 目前公认以水流冲刷、河岸地质条件以及地下水渗流为主。其它因素如冻融、季节性霜冻异常、船舶行驶波浪、风化作用等在特定条件下会对崩岸的形成起控制作用。并且不仅在二元结构的河岸, 在一些多层结构河岸也能发生崩岸。

6. 存在问题及展望

6.1. 存在问题

尽管国内外学者对河流崩岸进行了大量研究, 从感性的经验认识到系统性的理论研究, 研究成果不断丰富, 但崩岸现象受多种营力共同作用, 研究难度较大, 存在以下问题: 1) 在崩岸的形成机制研究方面, 多学科的融合研究的深入程度不够。由于崩岸形成机理涉及诸多学科, 包括水文学、水利学、土力学、泥沙动力学和流体力学等, 这些学科的影响因素本身十分复杂互相影响, 且各学科学者研究重心不一样, 导致研究结果虽有依据, 但依然存在明显分歧。如何确定各因素在崩岸形成过程中的影响程度, 是目前崩岸机理研究中的难题, 也是成功揭示崩岸机理的关键。2) 在崩岸的监测方面, 目前的研究只关注某个河段短期的监测结果, 鲜有涉及宏观尺度的地质条件因素对于崩岸的影响, 同时也缺乏对崩岸长期监测的数据。3) 在崩岸的模拟方面, 物理模型由于其空间局限性, 结果误差较大且不能及时更新以满足对不同条件崩岸的研究需求; 数值模型需要依赖庞大的野外资料收集来提高模型的准确性, 成本较高。4) 在崩岸的治理方面, 没有考虑对于崩岸发生之后所带来的一系列次生灾害的治理研究。5) 人为因素对

于崩岸的影响程度尚不明确。人类的活动比如上游修建大坝、开采水下砂矿床、水厂取水等在目前的研究中并没有被重视。

6.2. 展望

根据河流崩岸的研究现状并且为了弥补上述研究不足之处, 笔者对于未来的研究主要提出以下几点展望: 1) 通过继续研究, 明确各影响因素与河流崩岸的相关性, 探究复杂条件成因下崩岸的形成机制。优化完善崩岸的数值模型, 在提高准确性的基础上简化模型, 提高求解效率, 使模型适用于更多不同条件的崩岸, 并且通过监测与调查不断论证模拟结果, 达到精准预测崩岸的目标。2) 结合遥感影像、航拍技术、地理信息系统、卫星定位系统等技术, 对大尺度范围内的崩岸进行统一标准的调查、量化分析, 进而得出河流崩岸在空间尺度和时间尺度上的分布规律, 对不同区域的崩岸进行对比研究。3) 使用基于无人机、无人船以及分布式光纤技术的海陆空多维融合监测方法, 对崩岸进行全方位、大尺度、长周期的监测, 大大减少由于测量方式不统一、数据传输不同步等引起的误差。4) 加强崩岸的灾害链研究。崩岸发生之后, 往往会诱发出一连串的次生灾害, 各灾害间的内在联系还需要进一步讨论与研究, 能量守恒、能量转化传递与再分配是研究它的重要线索和依据。同时需要在潮区界变动、河槽冲刷、河床微地貌变化等方面取得进一步认识, 为岸滩防护和修复、沿岸防洪、桥墩维护等提供了技术支撑。

7. 结论

1) 本文通过回顾国内外河流崩岸的研究历程, 综述了国内外河流崩岸研究总体进展, 初步分析了国内外河流崩岸在研究的起步时间、研究对象的范围和调查监测的手段上的差异性。在此基础上, 对河流崩岸的监测手段、模拟方法以及形成机制 3 个方面的研究进展进行评述, 并提出目前崩岸研究存在的问题和对未来研究的展望。

2) 河流崩岸的监测主要有三种: 野外观测、地形测量、遥感影像和航空拍摄。分别对应不同的空间尺度。目前的崩岸监测手段在监测数据的精度上已经达到了较高的水准, 但是在监测的广度和周期方面仍存在不足。

3) 河流崩岸的模拟分为室内水槽的物理模拟和数值模拟两种, 在实际研究时二者常常相互结合、相互验证。物理模拟由于其空间局限性, 存在较大的误差。数值模拟需要依赖庞大的数据支撑来提高精确度, 成本较高, 且对于影响因素的考虑不够周全。

4) 目前研究认为水流冲刷、河岸地质条件以及地下水渗流是影响崩岸发生的主要因素。其它因素如冻融、季节性霜冻异常、船舶行驶波浪、风化作用等在特定条件下会对崩岸的形成起控制作用。目前研究忽视了对于人类活动的研究, 人为因素对于崩岸的影响程度尚不明确。

基金项目

中国地质调查局“长江经济带地质环境综合调查工程(编号: 0531)”和“长江三角洲经济区环境地质调查(编号: 0531189、DD20160246)”项目联合资助。

参考文献

- [1] 张幸农, 蒋传丰, 应强, 等. 江河崩岸问题研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(3): 80-83.
- [2] 高清洋. 长江中下游河道基于坡脚冲刷的崩岸试验研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2017.
- [3] 汪闻韶. 土的动力强度和液化特性[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [4] 王延贵. 冲积河流岸滩崩塌机理的理论分析及试验研究[D]: [硕士学位论文]; [博士学位论文]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2003.

- [5] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报 2019 [R]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
- [6] 栾华龙, 刘同宦, 高华峰, 等. 新水沙情势下长江中下游干流岸线保护研究——以扬中市 2017 年江堤崩岸治理为例[J]. 人民长江, 2019, 50(8): 14-19.
- [7] Fergusson, J. (1863) On Recent Changes in the Delta of the Ganges. *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, **19**, 321-354.
- [8] Wolman, MG. (1959) Factors Influencing Erosion of a Cohesive River Bank. *American Journal of Science*, **257**, 204-216.
- [9] Twidale, C.R. (1964) Erosion of an Alluvial Bank at Birdwood, South Australia. *Zeitschrift für Geomorphologie*, **8**, 189-211. <https://doi.org/10.1127/zfg/8/1964/189>
- [10] Torrey, V.H., Dunbar, J.B. and Peterson, R.W. (1988) Retrogressive Failures in Sand Deposits of the Mississippi River. Report 1. Field Investigations, Laboratory Studies and Analysis of the Hypothesized Failure Mechanism.
- [11] Torrey, V.H. (1988) Retrogressive Failures in Sand Deposits of the Mississippi River. Report 2. Empirical Evidence in Support of the Hypothesized Failure Mechanism and Development of the Levee Safety Flow Slide Monitoring System.
- [12] Osman, A.M. and Thorne, C.R. (1988) Riverbank Stability Analysis. I: Theory. *Journal of Hydraulic Engineering*, **114**, 134-150. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1988\)114:2\(134\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:2(134))
- [13] Thorne, C.R. and Osman, A.M. (1988) Riverbank Stability Analysis. II: Applications. *Journal of Hydraulic Engineering*, **114**, 151-172. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1988\)114:2\(151\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:2(151))
- [14] Darby, S.E. and Thorne, C.R. (1992) Simulation of Near Bank Aggradation and Degradation for Width Adjustment Models. *Proceedings of the Second International Conference on Hydraulic and Environmental Modelling of Coastal, Estuarine and River Waters*, Aldershot, 431-442.
- [15] Darby, S.E. and Thorne, C.R. (1996) Numerical Simulation of Widening and Bed Deformation of Straight Sand-Bed Rivers. I: Model Development. *Journal of Hydraulic Engineering*, **122**, 184-193. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1996\)122:4\(184\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1996)122:4(184))
- [16] Darby, S.E., Thorne, C.R. and Simon, A. (1996) Numerical Simulation of Widening and Bed Deformation of Straight Sand-Bed Rivers. II: Model Evaluation. *Journal of Hydraulic Engineering*, **122**, 194-202. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1996\)122:4\(194\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1996)122:4(194))
- [17] Darby, S.E. and Thorne, C.R. (1996) Development and Testing of Riverbank-Stability Analysis. *Journal of Hydraulic Engineering*, **122**, 443-454. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1996\)122:8\(443\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1996)122:8(443))
- [18] Simon, A. and Curini, A.J.C. (2002) Quantifying the Mechanical and Hydrologic Effects of Riparian Vegetation on Streambank Stability. *Earth Surface Processes and Landforms*, **27**, 527-546. <https://doi.org/10.1002/esp.325>
- [19] Lawler, D.M. (1989) Some New Developments in Erosion Monitoring: 1. The Potential of Optoelectronic Techniques. School of Geography, University of Birmingham Working Paper 47, 44.
- [20] Thoma, D.P., Gupta, S.C., Bauer, M.E. and Kirchoff, C.E. (2005) Airborne Laser Scanning for Riverbank Erosion Assessment. *Remote Sensing of Environment*, **95**, 493-501. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.01.012>
- [21] Korpela, I., Koskinen, M., Vasander, H., et al. (2009) Airborne Small-Footprint Discrete-Return LiDAR Data in the Assessment of Boreal Mire Surface Patterns, Vegetation, and Habitats. *Forest Ecology and Management*, **258**, 1549-1566. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.07.007>
- [22] Pizzuto, J., O'Neal, M. and Stotts, S. (2010) On the Retreat of Forested, Cohesive Riverbanks. *Geomorphology*, **116**, 341-352. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.11.008>
- [23] De Rose, R.C. and Basher, L.R. (2011) Measurement of River Bank and Cliff Erosion from Sequential LIDAR and Historical Aerial Photography. *Geomorphology*, **126**, 132-147. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.10.037>
- [24] 中国科学院地理研究所. 长江九江至河口段河床边界条件及其与崩岸的关系[M]. 武汉: 科学出版社, 1978.
- [25] 陈引川, 彭海鹰. 长江下游大窝崩的发生及防护[C]//长江中下游护岸论文集(第三集). 武汉: 长江水利水电科学研究院, 1985: 112-116.
- [26] 余文畴, 卢金友. 长江河道崩岸与护岸[M]. 北京: 水利水电出版社, 2008.
- [27] 王家云, 董光林. 安徽省长江护岸工程损坏及崩岸原因分析[J]. 水利管理技术, 1998, 18(1): 62-64.
- [28] 黄本胜, 李思平, 邱静, 等. 冲积河流岸坡的稳定性计算模型初步研究[C]//李天义. 河流模拟理论与实践. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1998: 50-55.
- [29] 张幸农, 蒋传丰, 陈长英, 应强. 江河崩岸的类型与特征[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(5): 66-70.
- [30] 张幸农, 应强, 陈长英, 张思和. 江河崩岸的概化模拟试验研究[J]. 水利学报, 2009, 40(3): 263-267.
- [31] 秦亚斌. 崩岸的模型试验及数值模拟分析[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.

- [32] 丁彬. 长江安徽段弯道河岸崩岸的模型试验及数值分析[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [33] Ji, F., Liu, C., Shi, Y., *et al.* (2019) Characteristics and Parameters of Bank Collapse in Coarse-Grained-Material Reservoirs Based on Back Analysis and Long Sequence Monitoring. *Geomorphology*, **333**, 92-104. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.02.018>
- [34] 岳红艳, 余文畴. 长江河道崩岸机理初步探讨[C]//长江护岸及堤防防渗工程论文选集. 水利部长江水利委员会, 2001: 56-59.
- [35] 张家豪, 周丰年, 程和琴, 石盛玉, 周权平, 姜月华. 基于多模态传感器系统的长江下游窝崩边坡稳定性分析[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(1): 155-162.
- [36] 张家豪, 周丰年, 程和琴, 等. 多模态传感器系统在河槽边坡地貌测量中的应用[J]. 测绘通报, 2018(3): 102-107.
- [37] 卢多敏, 刘红宾. 黄河潼关至三门峡河段塌岸治理分析[J]. 人民黄河, 1999(2): 1-3.
- [38] 仲琳, 臧英平, 钱海峰, 等. 河道崩岸治理方法及典型实例分析[J]. 中国水利, 2011(16): 31-33.
- [39] 戴海伦, 代加兵, 舒安平, 等. 河岸侵蚀研究进展综述[J]. 地球科学进展, 2013, 28(9): 988-996.
- [40] 谢月秋. 长江中下游河道崩岸机理初析及崩岸治理[D]: [硕士学位论文]. 南京: 河海大学, 2007.
- [41] 汤金云, 谢蒙, 汤浩. 综合物探技术在库岸滑坡体调查中的应用[J]. 人民珠江, 2009, 30(6): 34-36+42.
- [42] 胡宏祥. 巢湖北岸中东部水土迁移过程及规律研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.
- [43] Hu, X.L., Tang, H.M., Li, C.D., *et al.* (2012) Stability of Huangtupo I# Landslide under Three Gorges Reservoir Operation. *Applied Mechanics and Materials*, **170-173**, 1116-1123. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.170-173.1116>
- [44] 杨则东, 陈有明, 鹿献章, 刘同庆, 黄燕, 张幼莹. 长江安徽段岸带变迁及崩岸遥感调查研究[J]. 国土资源遥感, 2010(S1): 91-97.
- [45] 冯传勇, 郑亚慧, 周儒夫. 长江中下游崩岸监测技术应用研究[J]. 水利水电快报, 2018, 39(3): 47-50+52.
- [46] 林松, 王薇, 邓小虎, 查雁鸿, 周红伟, 程逸. 三峡库区典型滑坡地球物理实测及其意义——以万州区四方碑滑坡为例[J]. 地球科学, 2019, 44(9): 3135.
- [47] Boorman, L.A. and Hazelden, J. (2012) The Use of a New Portable Erosion Measuring Device for Assessing the Erodibility of the Surface Layers of Flood Embankments. *Soil Use and Management*, **28**, 120-127. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00374.x>
- [48] 王路军. 长江中下游崩岸机理的大型室内试验研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 河海大学, 2005.
- [49] Stefanovic, J.R. and Bryan, R.B. (2007) Experimental Study of Rill Bank Collapse. *Earth Surface Processes and Landforms*, **32**, 180-196. <https://doi.org/10.1002/esp.1396>
- [50] Simon, A., Curini, A., Darby, S.E., *et al.* (2000) Bank and Near-Bank Processes in an Incised Channel. *Geomorphology*, **35**, 193-217. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(00\)00036-2](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(00)00036-2)
- [51] Midgley, T.L., Fox, G.A. and Heeren, D.M. (2012) Evaluation of the Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM) for Predicting Lateral Retreat on Composite Streambanks. *Geomorphology*, **145-146**, 107-114. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.044>
- [52] 张超波. 林木根系固土护坡力学基础研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [53] 宗全利, 夏军强, 邓春艳, 许全喜. 基于 BSTEM 模型的二元结构河岸崩塌过程模拟[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(3): 69-78.
- [54] 李志威, 郭楠, 胡旭跃, 朱海丽, 吴新宇. 基于 BSTEM 模型的黄河源草甸型弯曲河流崩岸过程模拟[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(3): 509-519.
- [55] 刘艳锋, 王莉. BSTEM 模型的原理、功能模块及其应用研究[J]. 中国水土保持, 2010(10): 24-27.
- [56] 夏军强, 王光谦, 吴保生. 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, 2003(4): 289-295.
- [57] 夏军强, 王光谦, 吴保生. 黄河下游河床纵向与横向变形的数值模拟——II 二维混合模型的应用[J]. 水科学进展, 2003(4): 296-300.
- [58] 夏军强, 王光谦, 张红武. 黄河下游游荡型河段洪水演进与河床变形过程的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展 (A 辑), 2003, 18(3): 306-313.
- [59] 假冬冬. 非均质河岸河道摆动的三维数值模拟[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2010.
- [60] 陈洁, 陶桂兰, 吴俊东. 基于 Matlab 的下荆江二元岸坡崩塌过程动态模拟[J]. 水道港口, 2018, 39(6): 716-722.

- [61] 杨素勤. 水流中土工包沉落模型试验与土工包护岸数值分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 河海大学, 2007.
- [62] 党祥. 二元结构河岸崩塌机理试验研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 长江科学院, 2012.
- [63] Hagerty, D.J., Spoor, M.F. and Parola, A.C. (1993) Near Bank Impacts of River Stage Control. *Journal of Hydraulic Engineering*, **121**, 196-207. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1995\)121:2\(196\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:2(196))
- [64] Hagerty, D.J., Spoor, M.F. and Kennedy, J.F. (1986) Interactive Mechanisms of Alluvial-Stream Bank Erosion. *Proceedings of the Third International Symposium on river Sedimentation*, 1160-1168.
- [65] 王新宏. 冲积河道纵向冲淤和横向变形数值模拟研究及应用[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2000.
- [66] 张安琪. 水流淘刷作用下土质边坡稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
- [67] Nanson, G.C. and Hickin, E.J. (1986) A statistical Analysis of Bank Erosion and Channel Migration in Western Canada. *Geological Society of America Bulletin*, **97**, 497-504. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1986\)97<497:ASAOBE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1986)97<497:ASAOBE>2.0.CO;2)
- [68] Biedenbarn, D.S., Combs, P.G., Hill, G.J., *et al.* (2015) Relationship between Channel Migration and Radius of Curvature on the Red River. *Sediment Transport Modeling*. ASCE.
- [69] 李宝璋. 浅谈长江南京河段窝崩成因及防护[J]. 人民长江, 1992, 23(11): 26-28.
- [70] 王永. 长江安徽段崩岸原因及治理措施分析[J]. 人民长江, 1999, 30(10): 19-20.
- [71] Docherty, C.L., Hannah, D.M., Riis, T., *et al.* (2017) Large Thermo-Erosional Tunnel for a River in Northeast Greenland. *Polar Science*, **14**, 83-87. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2017.08.001>
- [72] Zeyl, D.P.V., Penner, L.A. and Halim, R.A. (2013) A Slope Failure Caused by Drainage Cutoff through the Advancement of Seasonal Frost, Hudson Bay Lowland. *Landslides*, **10**, 315-322. <https://doi.org/10.1007/s10346-012-0377-x>
- [73] Prosser, I.P., Hughes, A.O. and Rutherford, I.D. (2000) Bank Erosion of an Incised Upland Channel by Subaerial Processes: Tasmania, Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*, **25**, 1085-1101. [https://doi.org/10.1002/1096-9837\(200009\)25:10<1085::AID-ESP118>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/1096-9837(200009)25:10<1085::AID-ESP118>3.0.CO;2-K)