



长江中下游河道崩岸研究现状及展望^{*}

高清洋¹, 李旺生², 杨 阳², 王晓旭¹, 李晓星²

(1. 长沙理工大学, 湖南 长沙 410114; 2. 交通运输部天津水运工程科学研究院, 天津 300456)

摘要: 基于长江中下游河道崩岸研究现有成果, 从崩岸形态学、水沙动力过程及岸坡稳定性三个角度对现有崩岸研究中的基本观点和需要进一步深入研究的科学问题进行探讨。提出后续研究可以从河势条件和土体自身性质与崩岸形态之间的关系、崩岸区段的复杂水流结构、坡脚处的冲刷过程以及崩塌土体的堆积与分解形式等方面展开。

关键词: 崩岸; 长江中下游; 崩岸形态学; 水沙动力过程; 岸坡稳定性

中图分类号: U 61; TV 143

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)08-0099-07

Research progress and prospects of bank collapse in middle and lower reaches of the Yangtze River

GAO Qing-yang¹, LI Wang-sheng², YANG Yang², WANG Xiao-xu¹, LI Xiao-xing²

(1. Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

Abstract: Based on the existing achievement of research on the bank collapse occurred in the middle and lower reaches of the Yangtze River, this paper probes into the situation of previous studies from three perspectives: the morphological study, the dynamic process of water and sediment and the slope stability. Meanwhile, it points out scientific problems needing further research, and suggests that the relationship between the evolution of river regime, soil properties and morphology of bank collapse, complex flow in the bank collapse section, accumulation at the foot of bank, accumulation and decomposition of collapsed soil will be further directions in the bank collapse research.

Keywords: bank collapse; middle and lower reaches of the Yangtze River; morphological study; dynamic process of water and sediment; slope stability

崩岸是指河道岸坡受水流冲刷持续崩退的物理过程。自 20 世纪 90 年代以来, 仅长江中下游河道的崩岸就多达数百起, 崩岸段长达 1 520 km, 占两岸岸线总长的 35.7%^[1]。近年来, 受三峡水库清水下泄的影响, 来沙量大幅减少, 河段冲淤不平衡, 以致崩岸险情屡屡发生, 严重威胁了堤防安全和航道稳定。随着今后长江经济带战略的延伸推动, 维护长江河道的稳定显得尤为重要,

因此解决这一问题迫在眉睫。

长期以来, 长江中下游河道的崩岸问题一直是学术界关注的热点和难点, 其影响因素较多, 可分为内因和外因, 内因主要指土体自身的性质, 外因有水流作用 (包括冲刷和渗流)、人为影响、温度、地震等^[2-3]。前人研究多从影响因素的角度出发, 借助理论分析、现场观测、模型试验及数值模拟等手段展开分析, 积累了大量成果, 然而

收稿日期: 2016-03-24

***基金项目:** 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (TKS140102)

作者简介: 高清洋 (1991—), 男, 硕士研究生, 研究水力学及河流动力学。

由于其构成要素的复杂性^[4]，目前研究尚不能完全解释其内在机理，仍需不断深入。总结梳理前人成果，对今后长江中下游河道的崩岸研究大有裨益。本文主要从崩岸形态、水沙动力过程和岸坡稳定性 3 个方面展开论述。

1 崩岸形态学研究

崩岸是一个复杂的物理问题，认识此类问题往往首先从其原观形态出发。目前长江中下游河道的崩岸类型按照平面形态大致可划分为 3 类，即窝崩、条崩和洗崩^[2, 5-7]。其中窝崩呈明显的圆弧状，且崩退深度(垂直水流方向)与崩岸长度(平行水流方向)之比一般大于 1:2，发生频率高，破坏规模大，沿岸可达数百米(图 1)，部分呈“鸭梨状”外形的窝崩则称为“口袋型”窝崩^[8-9]。此类窝崩曲率较小，口门区较窄，而崩退深度与崩岸长度相比于口门区宽度则较大；与窝崩外形显著不同的是条崩往往呈现出条带状，即崩岸长度远大于崩退深度，其发生频率与破坏规模均次于窝崩，沿岸达数十米乃至近百米(图 2)；洗崩则多呈台阶状，分布较广，但规模较小，频率较低(图 3)。考虑到长江中下游河道发生的窝崩和条崩数量占崩岸总数的 90% 以上，且破坏规模较大^[2, 7]，因此本文着重选取窝崩和条崩的相关成果进行探讨。



图 1 石首茅林口窝崩



图 2 沙市腊林洲条崩



图 3 调关洗崩

1.1 河势条件

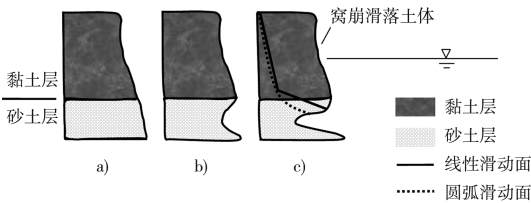
长江中下游河道的崩岸形态主要受 2 个方面的作用：一是河势条件(可细分为水沙动力条件及河床边界条件)，二是土体自身性质。河势条件与崩岸现象之间存在着作用与反作用的关系^[5, 10-16]。一方面，特定的河势条件影响了崩岸的形成，诸如主流贴岸等水沙动力条件将直接导致水流对壁面的剪切力增强，加剧岸坡坡脚处砂土层的冲刷，如弯道、地形、边坡棱角等河床边界条件则构成了影响崩岸能否发生和岸坡变形速率的基本物质条件^[13]；另一方面，崩岸的形成又反过来对河势条件产生影响，即崩岸使得岸坡形态和河床边界发生直接变化，进而可能改变局部的河势条件，相关研究如刘万利等^[15]利用数值模拟手段研究了戴家洲河段不同崩岸情况下的流速分布、分流比及河床冲淤变化。

据已有资料显示，河势条件与特定崩岸类型及形态之间也同样存在联系^[2, 17]，如窝崩多发生在切角较大的迎流顶冲河段或者弯道凹岸，条崩则多处于深泓贴岸的较平顺河段^[18]，然而到目前为止，有关河势条件与崩岸形态相关关系的系统研究尚不多见。在试验研究方面，王延贵^[17]研究了弯道情况下入射角大小与崩岸形态的关系，发现当顶冲入射角在 30°~60°之间可以冲刷形成一个崩退深度与崩岸长度之比维持在 1:3 左右、形似窝崩的崩岸现象。这一成果对后续的研究有一定启发作用，但考虑到试验忽略了土体性质、渗流影响等，可靠性有待进一步验证。

1.2 土体自身性质

从土体自身性质的角度而言，目前研究多集中于土体结构对崩岸形态影响的探讨^[8, 15, 17, 19]。长

江中下游河道的土体结构多为由上部黏土层和下部砂土层组成的二元结构,以荆江河段为例,上荆江河段的上部黏土层厚度较大,介于 20~30 m,明显大于下部砂土层的厚度,且砂土层顶板往往淹没于枯水位之下;而下荆江河段的黏土层厚度较薄,一般仅为 1~3 m,下部砂土层却较厚,其顶板一般在枯水位之上。根据现场观测,上荆江河段崩岸的产生主要是由于近岸水流冲刷坡脚,导致岸坡变陡变深,继而在土体自重、降水等的作用下失稳,以线性或圆弧崩塌的形式滑入河槽(窝崩)(图 4);而下荆江河段崩岸的产生则是由于坡顶处先形成拉伸裂缝,当下部砂土层受水流淘刷,上部悬空土体宽度达到临界值后,这部分悬空土体便会以绕某一中心轴旋转的形式向河槽方向坍塌倾覆(条崩)^[2, 17](图 5)。由此看来,土体自身性质与崩岸形态之间存在着很大的联系。



注: a)、b)、c) 为伴随时间变化的岸坡崩塌演变。

图 4 窝崩过程

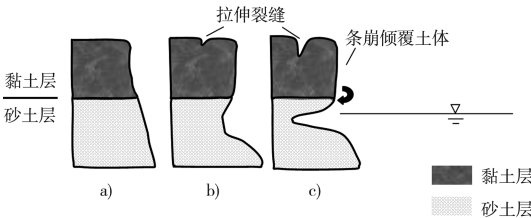


图 5 条崩过程

崩岸形态学方面的研究充实了长江中下游河道崩岸研究的成果,从河势条件的角度出发可从宏观上解释河段内崩岸频繁化、剧烈化的原因^[10-13];从土体自身性质的角度出发,可初步解释特定崩岸形态形成的内在原因^[1-2, 17-22]。然而全面地认识崩岸现象还需要从更为细观、微观的层面来揭示崩岸的内在机理,为此部分学者从水沙动力过程的角度来进一步深入展开。

2 水沙动力过程研究

就水流运动的角度而言,水流动力条件是长江中下游河道崩岸中首要的触发因素,也是改变河岸及河床的最活跃因素^[6]。一方面,岸坡土体受水流作用(如纵向水流、竖轴回流、横向环流、波浪等)而冲刷、分解形成新的泥沙被水流挟带,或者随着水流流速的趋缓,水体中的泥沙颗粒淤积于岸坡,另一方面岸坡土体又反作用于周边的水流运动,两者相互制约,趋于平衡;就泥沙运动的角度而言,崩岸是水流携沙与岸坡泥沙输移互换直至趋于平衡的过程,故而崩岸又可理解为是以泥沙运动为纽带,通过水流和岸坡相互作用的结果,而泥沙在其中扮演着不可或缺的角色。由此看来,崩岸过程中的水流运动和泥沙运动相互影响,不可分割,故而综合两者从水沙动力过程的角度展开来研究崩岸问题较为合适^[5, 15, 23-24]。

长江中下游河道的弯道处多呈现较为典型的崩岸现象,余文畴等^[6, 10, 25-28]从水沙动力过程的宏观角度出发来研究弯道崩岸,且往往结合水流动力轴线、横向环流及冲淤分布 3 个方面展开。从图 6 可以看出,水流进入弯道后,在凹岸的顶托作用下,水流动力轴线偏移至凸岸附近;随后,在弯道离心力的作用下,逐渐脱离凸岸,朝凹岸侧偏移;至顶弯及顶弯略向下游处时,水流动力轴线紧贴凹岸运动,强烈冲刷凹岸岸壁,这一现象一直维持至弯道出口,构成了长江中下游弯道崩岸的首要触发因素;此外,余文畴^[6]还认为弯道水流受离心力的惯性作用,至凹岸边界时其动能在岸壁处转化为位能,凹岸侧水位升高,在横比降作用下将产生一个横向主环流,同时由于水流的顶冲作用在岸壁壅高的水面以下可能存在一个“滞点”,“滞点”以上也将形成一个与上述横向主环流反向的横向次环流。这一观点在随后的研究中也逐步得到了印证,如图 7 所示的 1#断面横向环流分布显示,弯道顶弯处的确存在 2 个大小不一、方向相反的横向环流。由于横向环流的客观存在,又引发了弯道横向输沙的不平衡。首先纵向主流与横向环流一起构成了复杂的纵轴螺旋流,螺旋流以较大能量将含沙量较少的水体带

至凹岸，并折向河底攫取泥沙，将含沙量较大的凹岸底部水流带向凸岸边滩，宏观表现为由砂土层组成的凹岸坡脚不断冲深冲刷，岸坡持续变高变陡，稳定性下降而易发生崩塌，相反地凸岸侧边滩则不断淤积，这一冲淤分布情况已基本能够解释弯道处崩岸平面分布的原因。从水沙动力过程研究的微观角度看，目前研究多从砂土颗粒及黏土粒团起动流速的角度出发，定性对比了砂土及黏土的抗冲性。已有研究发现当水深为 5~20 m，黏土(粒径上限为 0.005 mm)的临界抗冲流速是砂土(粒径下限为 0.05 mm)抗冲流速的 4.5~9 倍，且随水深的增大而两者相差不断增大，由此初步解释了坡脚砂土层易冲而崩后黏性覆土层较稳固形成“镇脚”(镇脚通常指利用抗冲性较好的材料覆于坡脚以起到保护坡脚的作用)的原因。

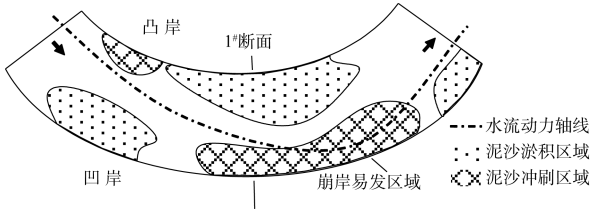
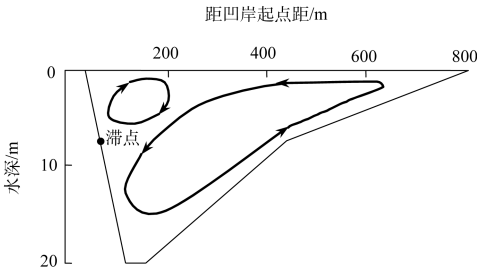
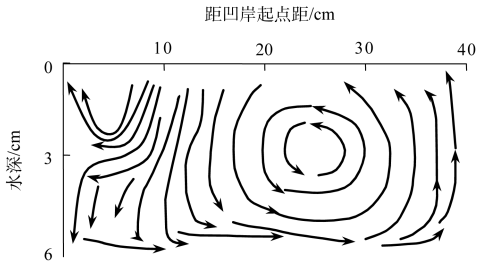


图 6 弯道水流动力轴线及河床冲淤变化



a) 下荆江河段131断面实测资料^[6]



b) 明渠弯道水流试验资料^[27]

图 7 弯道处 1#断面横向环流分布

从水沙动力过程角度展开的研究多借助模型试验手段^[2, 26-29]，如王路军等^[2]采用水槽试验模拟

了多种变量(水头差、坡比、顶冲角、退水速度、河道形态及二元结构等)对崩岸的影响，假冬冬等^[30]结合水槽与土工离心试验，对长江河道中流滑型崩岸的侧蚀模式进行初步分析，余明辉等^[30]模拟了不同河床、岸坡及水位条件下非黏性岸坡崩塌与河床冲淤的交互影响过程。然而眼下对水流冲刷坡脚引发崩岸的过程，崩塌土体的堆积及分解形式，以及诸如渗流和负压^[18]等因素对崩岸的影响程度等尚未有完整和清晰的认识。究其原因，源于目前对崩岸区段复杂的水沙动力过程仍未有直观、详尽的数据加以阐明。如余明辉等^[31]为探究水流对壁面剪切力的作用分布以及坡脚处的冲刷现象，在试验中沿河宽方向选定了 5 条等距测深线，每条测深线上选取 1~3 个测深点进行流速量测，绘成了较为简易的三维流场分布图。然而到目前为止，试验模拟所获得的流场量测结果仍不够精细，尚不足以形成崩岸区段三维水流场动态发展的完整认识，且眼下的流速量测数据受技术手段的限制多为时均流速值，可能掩盖了事实上对土体剪切作用更为强烈的脉冲流速，因此若能从试验量测的方面来认识崩岸区段复杂的三维水流场运动，便可直观、有力地解释崩岸过程的来龙去脉。

3 岸坡稳定性研究

崩岸的过程从本质上讲是岸坡失稳的响应结果，而岸坡稳定性又与内力的分布有关，伴随着土体自重、水流冲刷、渗流等影响，岸坡内力分布持续变化，直至影响其稳定性而失稳，以挫落、滑落、倾覆的形式发生崩塌。崩塌土体一部分被水流挟带流失，另一部分则堆积在坡脚形成较稳定岸坡，停止崩岸或者不稳定岸坡，继续发展。倘若崩塌土体持续受冲，继续发展便可导致岸坡的再次崩塌，如此循环直至水流动力条件减弱，或岸坡趋缓，或渗流影响减弱而停止^[1, 6, 22]。

近年来，国内外学者基于岸坡静力平衡的崩滑计算量化研究了大量河段的岸坡稳定性，计算研究从单一土质岸坡到二元结构岸坡再到多元结

构岸坡，从静态分析到动态分析，从干燥到饱和再到非饱和状态等不断深入。总结来看，基于岸坡稳定性角度的研究主要侧重于影响因子^[17]及分析算法^[35]这两方面，两者相互制约，相互促进。一方面，随着边坡稳定分析算法的改进及研究层次的深入，各种可能导致崩岸的因素逐渐被考虑并纳入计算，如 Millar 等^[34]提出摩擦休止角，随后 Darby 等^[35]引入孔隙水压力及静水压力，国内段金曦等^[38-39]考虑了动水压力的影响，王路军等^[2, 36-37]研究了水位差或者退水速度对岸坡稳定性的影响，王路军等^[2, 17]考虑了土体结构和抗冲性能，王延贵等^[17, 32-33, 40]则分别关注了渗流和植被的影响；另一方面，不同学者基于不同学术观点和影响因子的考虑，提出了不同的分析算法，如 Bishop 法、Morgenstern-Price 法、瑞典圆弧动条分法和三维极限平衡分析法等^[39]，所得结果虽不尽相同，但不同的分析算法均能基于前人成果不断改进，逐步完善。

上述各影响因子的作用方式和作用效果亟待理论推导结合现场或试验量测等手段加以确定并表达，如研究发现水流的瞬间脉冲力对岸坡土体的振动和掀起作用不可小觑，而在眼下的岸坡稳定性计算中只能以平均剪切力、滑面摩擦力等形式来间接表述水流对岸坡的影响；此外，目前借助常规的岸坡稳定性分析方法已能基本阐明崩岸临界状态时的力学判别指标，但这一方法在时间上是静态的，所探究的也往往是特定情形或固定指标下的三维岸坡稳定性。但是，伴随着时间推移，外部因素（如水沙条件变化、渗流影响、坡脚冲淤等）的耦合变化使得岸坡土体的稳定性可能随之发生量变直至质变，不利于正确合理地评估岸坡稳定性，因而基于动态发展的分析算法将是今后崩岸研究的趋势；其三，目前认识到在水流动力条件强劲的情况下，部分崩塌土体无法停留在坡脚形成“镇脚”也是崩岸持续横向发展的关键，这一不利情形应在基于动态分析的岸坡稳定性研究中有所体现。

前人借助试验手段来研究岸坡稳定性的较

早^[2, 27]，但当前仍面临着两大难点，即土体结构的模拟和渗流模拟；此外关于岸坡稳定性的数值模拟研究也已有所进展，然而其中部分成果还需探讨，论证并加以优化。例如，就三维岸坡土体的模拟而言，周瑞丽等^[49]基于倪小东^[50-51]首提的颗粒离散元法理论对条崩过程进行模拟并分析，由此证明该法的合理性。然而在对退水期岸坡模型的构建中考虑还不够充分，如不能客观模拟随河道水位升降而动态变化的渗流影响等；唐金武等^[53]利用下砂土层的稳定坡比来作为崩岸预测的指标，与实测资料对比吻合较好，然而在稳定性计算中忽略了上部悬空黏土层的抗拉应力。总结来看，眼下与岸坡稳定性相关的数值模拟研究也面临着诸多难点，如三维螺旋水流场的模拟，岸坡土体的模拟，土体的崩塌形式及堆积位置，随河道水位升降的渗流影响等^[2, 49]，故而眼下采用水流—泥沙—岸坡—渗流耦合变化的数学模型较少，多采用水流—岸坡、渗流—岸坡或水流—泥沙—岸坡模型，与实际情况相比难免有所出入。

4 展望

自三峡蓄水以来，由于清水冲刷，长江中下游河道崩岸呈现日益频繁化的趋势，对于目前及今后的堤防安全和航道稳定建设极为不利，因此迫切需要解决这一问题。然而限于研究手段和试验条件，眼下对崩岸机理的认识仍然是表观的、初浅的，对其具体成因及发展模式仍未明了，研究亟待深入。基于前文梳理，后续开展的崩岸形态学、水沙动力过程和岸坡稳定性三方面研究中，考虑到水沙动力过程的研究能够为其余二者提供较为明晰的力学解释，可以优先从这一方面着手。

关于长江中下游河道的崩岸研究需要进一步探讨的问题较多，主要集中在以下几点：崩岸形态学方面，河势条件和土体自身性质与崩岸形态之间有何关系？水沙动力过程方面，应如何了解崩岸区段复杂的水流结构？目前已经认识到坡脚处的冲刷是岸坡崩塌的关键，那么坡脚处具体是怎样的冲刷过程？在岸坡稳定性方面，崩塌土体

无法停留于坡脚形成“镇脚”是崩岸持续崩退的关键,那么崩后土体的堆积及分解形式在基于动态发展的岸坡稳定性计算中应当如何体现?对这些问题进行探讨既可以丰富河流动力学、泥沙运动力学及土力学的研究内容,又可以实现长江中下游河道的崩岸研究在理论、概念与方法上的完善和更新。

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):80-84.
- [2] 王路军.长江中下游崩岸机理的大型室内试验研究[D].南京:河海大学,2005.
- [3] 姜辉.长江江都嘶马弯道崩岸灾害机制及其预测[D].南京:河海大学,2006.
- [4] 陈凤玉,姚仕明.国内外崩岸成因与治理研究综述[C]//第十四届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集.北京:北京水利水电出版社,2001.
- [5] 徐永年,梁志勇,王向东,等.长江九江河段河床演变与崩岸问题研究[J].泥沙研究,2001(4):41-46.
- [6] 余文畴,卢金友.长江河道崩岸与护岸[M].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [7] 于俊杰,魏乃颐,蒋仁,等.长江(镇江—泰州段)崩岸地质灾害类型、特征及成因机制[J].资源调查与环境,2013,34(2):127-132.
- [8] 余文畴.长江中下游河道“口袋型”崩窝形成机理初步研究[J].人民长江,2007,38(6):40-42.
- [9] 张幸农,陈长英,应强等.渐进式崩岸基本特征及其形成原因[J].泥沙研究,2012(3):46-50.
- [10] 谢月秋.长江中下游河道崩岸机理初析及崩岸治理[D].南京:河海大学,2007.
- [11] 季成康,方波,罗红雨.长江嘶马河段河床演变与崩岸问题研究[C]//第八届全国海事技术研讨会论文集.上海:中国造船编辑部,2002.
- [12] 沈伟,杜亚南.长江下游江苏沙钢段近期河床监测分析及演变趋势[C]//长江堤防建设管理及护岸工程论文集.武汉:长江出版社,2006.
- [13] 余文畴.长江中下游河道崩岸机理中的河床边界条件[J].长江科学院院报,2008,25(1):8-11.
- [14] 刘东风.长江安徽段崩岸灾害原因分析及治理新思路[C]//2009年安徽省科协年会暨第五届安徽水利论坛论文集.合肥:安徽人民出版社,2009:176-181.
- [15] 岳红艳,余文畴.长江中下游河道崩岸研究[C]//第六届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集.郑州:黄河水利出版社,2005:613-620.
- [16] 刘万利,李旺生,李一兵,等.长江中游戴家洲河段崩岸特性及护岸措施研究[J].水道港口,2013,34(2):133-138.
- [17] 王延贵.冲积河流岸滩崩塌机理的理论分析及试验研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2003.
- [18] 王媛,李冬田.长江中下游崩岸分布规律及窝崩的平面旋涡形成机制[J].岩土力学,2008,29(4):919-924.
- [19] 夏军强,宗全利,许全喜,等.下荆江二元结构河岸土体特性及崩岸机理[J].水科学进展,2013,24(6):810-820.
- [20] 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.
- [21] 于俊杰,魏乃颐,蒋仁,等.长江(镇江—泰州段)崩岸地质灾害类型、特征及成因机制[J].资源调查与环境,2013,34(2):127-132.
- [22] 王龙,罗玉龙.崩岸机理研究进展[J].水利规划与设计,2013(2):49-51.
- [23] 陆付民,李建林.崩岸的形成机理及防治方法[J].人民黄河,2005,27(8):16-17.
- [24] 张伟.长江江都嘶马弯道冲刷深度研究[D].南京:河海大学,2006.
- [25] 岳红艳,余文畴.长江河道崩岸机理[J].人民长江,2002,33(8):20-22.
- [26] 假冬冬,张幸农,应强,等.流滑型崩岸河岸侧蚀模式初探[J].水科学进展,2011,22(6):813-817.
- [27] 余明辉,申康,吴松柏,等.水力冲刷过程中塌岸淤床交互影响试验[J].水科学进展,2013,24(5):675-682.
- [28] 沈婷,李国英,张幸农.水流冲刷过程中河岸崩塌问题研究[J].岩土力学,2005(S1):260-263.
- [29] 朱海丽,李志威,胡夏嵩,等.黄河源草甸型弯曲河流的悬臂式崩岸机制[J].水利学报,2015,46(7):836-843.
- [30] Millar R G, Quick M C. Effect of bank stability on geometry of gravel rivers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993, 119(12): 1 343-1 363.
- [31] Darby S E, Thome C R. Simulation of rear bank aggradation and degradation for width adjustment models[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 121(4): 382-385.

[32] 别必雄,徐卫亚,谢守益,等.长江宜都河段茶店崩岸机理与防治研究[J].工程地质学报,2000,8(3):272-276.

[33] 邓珊珊,夏军强,李洁,等.河道内水位变化对上荆江河段岸坡稳定性影响分析[J].水利学报,2015,46(7):844-852.

[34] 段金曦,段文忠,朱矩蓉.河岸崩塌与稳定分析[J].武汉大学学报:工学版,2004,37(6):17-21.

[35] 余明辉,邓银玲,白静.影响非黏性岸滩稳定坡度的机理研究[J].水利学报,2010,41(3):1.

[36] 姚志雄,周健,吴波.渗流潜蚀作用下堤岸的崩塌机理研究[J].水力发电学报,2015,34(9):52-58.

[37] 孙敏,张勇.长江江苏河段嘶马弯道窝崩与护岸研究[J].边坡工程,2004,8(2):70-73.

[38] 宗全利,夏军强,邓春艳,等.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.

[39] 蒋泽锋,朱大勇,沈银,等.水流冲刷过程中的边坡临界滑动场及河岸崩塌问题研究[J].岩土力学,2015,36(2):21-27.

[40] Nagata N,Hosoda T,Muramoto Y. Numerical analysis of river channel process with bank erosion[J]. Journal of Hydraulic Engineering Asce,2000,126(4):243-252.

[41] Rinaldi M,Mengoni B E,Luppib L,et al. Numerical simulation of hydrodynamics and bank erosion in a river bend[J].Water Resources Rresearch,2008(44):1-17.

[42] Rutherford I D,Grove J R.The influence of trees on stream bank erosion: Evidence from root-plate abutments [J]. Riparian Vegetation and Fluvial Geomorphology Water Science and Application,2004(8):141-152.

[43] David L R.A geomorphological approach to restoration of incise drivers [C]//Proceedings of the Conference on Management of Landscapes,1997.

[44] Couper P R. Space and time in river bank erosion research: A review[J]. Royal Geographical Society,2004,36(4),387-403.

[45] 周瑞丽,刘欣.岸坡条崩现象的细观颗粒流数值模拟[J].人民黄河,2013,35(5):118-123.

[46] 倪小东.运用离散元法研究土体管涌机理[D].南京:河海大学,2006.

[47] 倪小东.土体细观渗透破坏颗粒流理论与试验研究[D].南京:河海大学,2010.

[48] Jason P J,Raymond T. Hydraulic erosion of cohesive riverbanks[J].Geomorphology,2006(76):193-206.

[49] 唐金武,邓金运,由星莹,等.长江中下游河道崩岸预测方法[J].四川大学学报:工程科学版,2012,44(1):75-81.

(本 文 编 辑 郭 雪 珍)

(上 接 第 98 页)

[3] 杨克君.复式河槽水流阻力及泥沙输移特性研究 [D]. 成都:四川大学,2006.

[4] Cox R G.Effective hydraulic roughness for channels having bed roughness different from bank roughness: A state of the art report [R]. USA: US Army Engineer Waterways Experiment Station,1973.

[5] Horton R E. Separate roughness coefficients for channel bottom and sides [J]. Engineering News Record,1933,111(22):652-653.

[6] Einstein H A. Der hydraulische oder profil-radius [J]. Schweizerische Bauzeitung,1934,103(8):89-91.

[7] Pavlovskij N N, On a design formula for uniform movement in channels with nonhomogeneous walls [J]. All-Union Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering,1931(3):157-164.

[8] Lotter G K.Considerations on hydraulic design of channels with different roughness of walls[J].All-Union Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering,1933(9):238-241.

[9] Krishnamurthy M,Christensen B A.Equivalent roughness for shallow channel[J].Journal of the hydraulics division,1972,98(12):2257-2263.

[10] Knight D W, Demetriou J D. Flood plain and main channel flow interaction [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1983,109(8):1073-1092.

[11] James M,Brown B J.Geometric parameters that influence floodplain flow[R].USA:US Army Engineer Waterways Experiment Station,1977.

[12] 幸韵.山区河流一维非恒定流数学模型精度改进方法[D].重庆:重庆交通大学,2015.

(本 文 编 辑 武 亚 庆)