

# 长江中下游条崩型崩岸机理分析

赵 堃<sup>1</sup>, 龚 政<sup>1,2</sup>, 陈海英<sup>3</sup>

- (1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;  
2. 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;  
3. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

**摘要:**针对条崩型崩岸的形成原因,提出3点预防及治理措施:创新护脚设计工艺,以草包袋装土护坡来局部代替抛石护脚,或将航道疏浚土吹填在边滩上,通过自然力量将泥沙输送到危险河段区域,减少河道冲刷,降低崩岸频率;合理规划船舶通航,针对不同护岸等级的河道,制定相应标准的船舶航速,对于枯水季和洪水季,也应确定船舶的最大通行数;以岸堤稳定为原则,尽可能少地进行抛石等硬质工程,通过植被根系来限制岸坡顶部张裂缝的形成和发展。

**关键词:**长江崩岸;条崩型崩岸;崩岸治理;生态护岸

中图分类号:TU431 文献标识码:A 文章编号:1007-7839(2021)S2-0053-04

## Discussion on mechanism of bank strip collapse in middle and lower reaches of the Yangtze River

ZHAO kun<sup>1</sup>, GONG Zheng<sup>1,2</sup>, CHEN Haiying<sup>3</sup>

- (1. State Key Laboratory of Hydrology, Water Resources and Hydraulic Engineering science, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Coastal And Marine Resources Development and Environmental Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
3. China Communications Shanghai Waterway Survey and Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

**Abstract:** In view of the cause of bank collapse, three prevention and treatment measures are proposed: innovative landslide prevention skirting design technology, use straw bags to fill the slope to partially replace the riprap landslide prevention skirting, or waterway dredging soil reclamation on the beach, sediment transport by the forces of nature to dangerous river area, reduce the channel scouring, reduce frequency of may; reasonable ship navigation planning, according to different levels of bank protection of the river, formulate the corresponding standard ship speed, for the dry season and flood season, should also determine the maximum number of ships; Ecological bank protection is to reproduce the green coastline of the Yangtze River. In accordance with the principle of bank stability, the slope protection concept of "soft if it can be soft, hard if it needs to be hard" is adopted.

**Key words:** The Yangtze River bank caving; strip collapse; bank caving treatment; ecological revetment

崩岸是指江河岸坡、洪漫滩地或出露潮沟的崩塌破坏,是一种危害性较大的自然灾害。因其严重影响沿江堤防的防洪安全和河势稳定,对沿江生态环境保护、建设现代化经济体系意义重大。按照崩

岸外观形态,可分为洗崩、条崩和窝崩。其中,条崩在长江中下游河段尤为常见,据不完全统计,长江中下游大规模崩岸事件中,条崩占比高达80%<sup>[1-2]</sup>。近10年来,随着上游水库群的建立,长江中下游干

收稿日期:2021-09-13

作者简介:赵堃(1991—),男,博士后,研究方向为潮沟边壁坍塌机理及其地貌效应。E-mail:zk1357@hhu.edu.cn

流的水沙条件发生显著变化,据大通站监测数据表明,2003—2017 年间,长江干流年均输沙量较蓄水前减少 68%。输沙量的锐减导致了河床冲刷的加剧,引起条崩型崩岸更加频繁地发生。如,荆江河段、镇扬河段等报导<sup>[3-4]</sup>。

条崩型崩岸涉及多学科内容,从机理上可分为 2 个阶段:岸壁下部水流冲刷引起的边壁侵蚀(水力学过程),以及岸壁上部土块自重引起的边壁坍塌(土力学过程)。目前,国内对于条崩型崩岸的研究大多从河道历史演变,水沙条件变化和崩岸时空分布规律入手<sup>[5-7]</sup>。针对崩岸中的土力学过程,虽然国内外有不少研究成果<sup>[8-12]</sup>,但崩岸的力学机理尚不完全清晰,缺少系统性的、基于应力-应变角度的分析。

## 1 条崩型崩岸的形成原因

条崩型崩岸又被称为悬臂破坏(cantilever failure),常见于二元结构河岸,如荆江河段。由于河岸组成为上部黏土、下部沙土,在水流的作用下,形成悬臂状结构。根据破坏时的驱动力不同,条崩型崩岸又可进一步分为绕轴破坏和剪切破坏。其中,绕轴破坏以旋转运动为特征,当岸壁顶部出现张裂缝,且重力力矩克服了土体内聚力和植被根系提供的抵抗力矩时发生。与之相对应的,剪切破坏由土体重力驱动,剪切破坏沿垂直或倾斜面发生,从岸壁顶部裂缝自上而下分离悬臂土块。

关于条崩型崩岸发生的力学机理,以往研究大多从力学平衡出发,建立经典的岸坡稳定性模型<sup>[13-15]</sup>。虽然岸坡稳定性模型可以较为合理地预测边壁侵蚀速率和岸线演变<sup>[16-17]</sup>,该方法仍然存在一些局限性,最主要的是假定破坏面以外的土体不受变形影响<sup>[18]</sup>。为阐明土体变形对边壁稳定性的影响,有学者通过数学模型发现崩岸过程可由土体单元的应力状态描述<sup>[19]</sup>。当岸壁高度较大时,坍塌过程可描述为:坡脚土体单元剪切破坏(阶段 1),岸壁顶部土体单元拉破坏(阶段 2)以及形成贯穿坡脚和岸壁顶部的破坏面(阶段 3),如图 1 所示;而对于较小的岸壁高度,岸壁中部土体单元拉破坏(阶段 1),岸壁顶部土体单元拉破坏(阶段 2)以及形成贯穿的破坏面(阶段 3)是常见的边壁坍塌过程。与此同时,有学者通过物理模型实验发现,条崩型崩岸的绕轴和剪切破坏机理可通过岸壁高度和近岸水深的比值,即相对水深来区分<sup>[20]</sup>。当相对水深较大时( $\geq 2$ ),由于基质吸力的降低,岸壁中部出现裂缝

并发展为张拉破坏,形成悬臂状的岸壁结构。在悬臂扭矩的作用下,岸壁顶部出现裂缝,随即发生绕轴破坏,见图 2 左侧部分。与之不同的是,当相对水深较小时,裂缝首先出现在岸壁顶部,随后悬臂土块沿着剪破面缓缓滑入水中,发生剪切破坏,如图 2 右侧部分所示。

综上所述,条崩型崩岸过程可由应力-应变分析法进行描述,其形成原因可归结于以下 2 点:岸壁下部水流冲刷,形成悬臂状结构,引起坡脚土体单元剪切破坏;悬臂顶部土体单元发生拉破坏,形成张裂缝,触发绕轴或剪切破坏。

## 2 条崩型崩岸预防及治理

### 2.1 因势利导,创新护坡设计工艺

长江中下游的护岸工程一般以枯水位为界分为水上护坡和水上护脚。在长江崩岸的应急治理工程中,抛石是切实可行的水下护脚治理措施之一,因此被众多工程项目所采用<sup>[21-25]</sup>。抛石护脚往往选取粒径大小合适的石块,将受到冲击的河岸整体覆盖,从而提高其抗冲性能,保护岸壁下部原本疏松的土体不被冲刷殆尽。近年,长江中下游河段崩岸频繁发生,其根本原因在于上游来沙量锐减。虽然抛石护脚有效限制了局部崩岸的发生,但是并未从根本上解决上游来沙量减少的问题,相反在一定程度上阻碍了河道从活跃状态转为稳定状态。因此,崩岸治理如同大禹治水,“在疏不在堵”。笔者借鉴浙江温州市海岸带保护修复工程、荷兰“沙引擎”海滩补沙项目以及过往长江崩岸治理项目<sup>[26-27]</sup>,提出以草包袋装土护脚,用以局部代替抛石护坡的设想。该方法遵循“日常抛泥,应急抛石”的指导原则,通过日常在危险河段上游投放袋装土后,由自然力量将泥沙输送到下游危险河段区域,减少河道冲刷,降低崩岸的发生频率。草包袋孔隙选取需依据补沙粒径和近岸流速确定,若草包袋孔隙率较大,容易漏泥,很难装满,施工操作有难度;若采用小孔隙土工袋,又存在需要船舶、泥浆泵灌装施工,施工繁琐,且泥沙难于冲刷,无法达到补沙目的。此外,还可借鉴上海横沙东滩修复工程项目,在生态环境允许的情况下<sup>[28]</sup>,将航道疏浚土吹填在边滩上,泥沙输移堆积在深槽内,保护岸滩。

### 2.2 统筹兼顾,合理规划船舶通航

长江作为重要的水运运输途径,随着经济发展,其所承载的通航压力与日俱增。随着船舶或船队航速提高、规模变大以及装载吨位增大,所产生

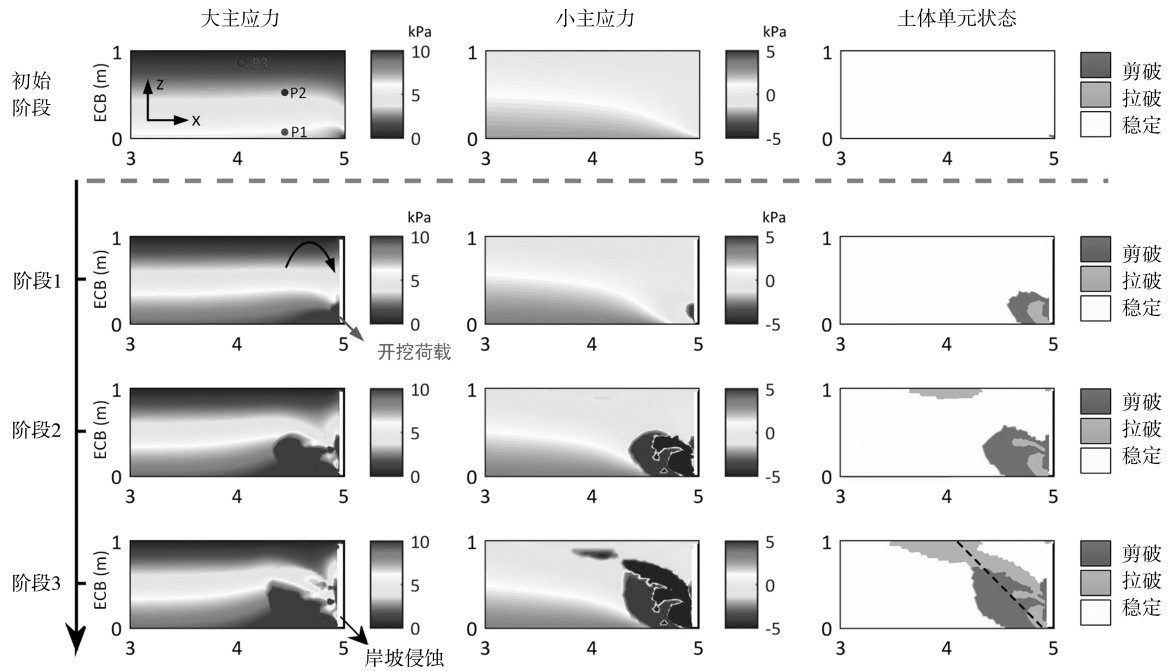


图 1 崩岸过程中的土体应力变化

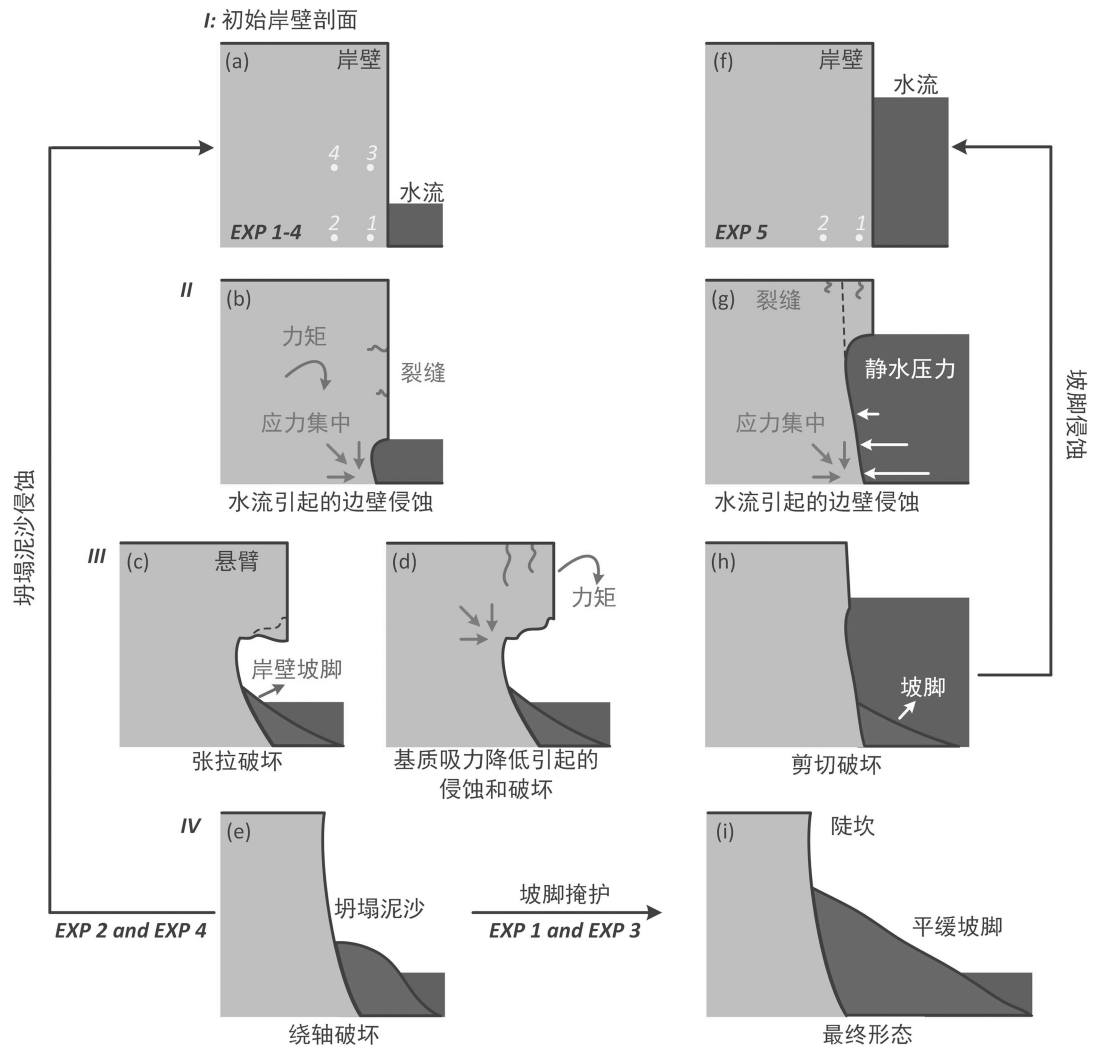


图 2 相对水深对边壁坍塌类型影响示意

的水体动能也相应增大,其中船行波的变化最为明显,给长江两侧岸壁带来极大的危害<sup>[29-30]</sup>。船行波引发的破坏机制可总结为:岸壁坡脚侵蚀;岸壁剖面土壤颗粒侵蚀,即波浪侵蚀;土体机械疲劳;孔隙水压力变化。上述破坏机制,尤其是岸壁坡脚侵蚀,主要取决于船舶航速、航道水深、岸壁土体性质、岸壁坡度以及航道与岸滩距离。因此,根据《长江中下游护岸工程技术要求》等相关技术要求,笔者认为对于不同护岸等级的河道,需研究并制定出不同标准的船舶航速。此外,对于枯水季和洪水季,也应依据航道临界速度(由航道水深决定),确定船舶的日最大通行数和单次最大通行数,合理安排船舶通行。

### 2.3 生态护岸,再现长江绿色岸线

现阶段长江干、支流航道已建护岸大多以抛石、混凝土铰链排和钢筋混凝土网架促淤沉箱为主。上述结构虽然限制了岸坡顶部张裂缝的形成,满足了护坡的基本要求,但水域和陆域通过人为抛石衔接,导致自然岸坡“硬化”,破坏了河岸带自身健康的生态系统,可能造成的不良影响包括:(1)水体表面护坡工程大幅降低水生生物数量;(2)抛石、下放沉箱排等显著影响某些鱼类的产卵生殖区域;(3)作业船舶对水生生物觅食、迁移带来严重影响。因此,逐步取代传统抛石、混凝土铰链排相结合的护岸模式,生态型护岸势在必行。考虑到现阶段长江崩岸险情依然严峻,笔者建议采用传统抛石与植被护坡相结合的方式。以岸堤稳定为原则,采用“能软就软,需硬则硬”的护坡理念,尽可能少地进行抛石等硬质工程,用植被根系提供的内聚力来限制岸坡顶部张裂缝的形成和发展。此外,植被种类的选取还应根据当地土质和气候条件、岸壁坡度以及船行波强度,这些因素直接影响到生态护岸的结构型式和功能的发挥,因此不能套用现有的生态护岸形式,而应针对各干、支流河段特点开展对应的研究和应用<sup>[31-32]</sup>。

## 3 结 论

针对条崩型崩岸的形成原因:岸壁下部水流冲刷,形成悬臂状结构;悬臂顶部形成张裂缝,触发绕轴或剪切破坏,提出3点预治理措施:提出以草口袋装土护脚用以局部代替抛石护坡的设想,遵循“日常抛泥,应急抛石”的指导原则,并将航道疏浚土吹填在边滩上,由自然力量将泥沙输送到下游危险河段区域,减少河道冲刷,降低崩岸的发生频率;

针对不同护岸等级的河道,研究并制定出不同标准的船舶航速,对于枯水季和洪水季,依据航道临界速度,确定船舶的日最大通行数和单次最大通行数;采用传统抛石与植被护坡相结合的方式,采用“能软就软,需硬则硬”的护坡理念,尽可能少地进行抛石等硬质工程,用植被根系提供的内聚力来限制岸坡顶部张裂缝的形成和发展。

### 参考文献:

- [1] 张幸农,蒋传丰,陈长英,等. 江河崩岸的类型与特征[J]. 水利水电科技进展, 2008(5):66-70.
- [2] 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(1):8-11.
- [3] 凌哲,罗龙洪,吕馨怡,等. 长江镇扬河段世业洲左汉口门演变分析与思考[J]. 江苏水利, 2021(3):6-10.
- [4] 张幸农,假冬冬,陈长英. 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, 2021, 29(1):55-63.
- [5] 夏军强,周美蓉,许全喜,等. 三峡工程运用后长江中游河床调整及崩岸特点[J]. 人民长江, 2020, 51(1):16-27.
- [6] 夏军强,林芬芬,周美蓉,等. 三峡工程运用后荆江段崩岸过程及特点[J]. 水科学进展, 2017, 28(4):543-552.
- [7] 高清洋,李旺生,杨阳,等. 长江中下游河道崩岸研究现状及展望[J]. 水运工程, 2016(8):99-105.
- [8] OSMAN A M, THORNE C R. Riverbank stability analysis. I: Theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114(2):134-150.
- [9] 黄本胜,白玉川,万艳春. 河岸崩塌机理的理论模式及其计算[J]. 水利学报, 2002(9):49-54.
- [10] 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.
- [11] 王延贵,匡尚富,陈吟. 洪水位变化对岸滩稳定性的影响[J]. 水利学报, 2015, 46(12):1398-1405.
- [12] 岳红艳,姚仕明,朱勇辉,等. 二元结构河岸崩塌机理试验研究[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(4):26-30.
- [13] RINALDI M, DARBY S E. 9 Modelling river - bank - erosion processes and mass failure mechanisms: progress towards fully coupled simulations [J]. Developments in Earth Surface Processes, 2007(11):213-239.
- [14] 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.
- [15] 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. (下转第92页)

区国家农业绿色发展先行区建设,开展常州滨江毗陵潮水利风景区创建。

## 4 结 语

针对《长江保护法》,常州水利部门将认真学习贯彻,规范管理,并协同其他部门,持续开展治理与保护,努力实现水利设施应有的兴利除害效益。

### 参考文献:

- [1] 张吉成,任庆海,张新宇,等. 常州市城市防洪管理信息化系统设计[J]. 水利信息化, 2016(4):59-61.
- [2] 殷奇红,刘晨烨,刘丹杰. 城市防洪工程的信息化探

索[J]. 江苏水利, 2018(7):34-38.

- [3] 常州市城市防洪工程管理处. 常州市长江堤防防洪能力提升一期工程竣工验收运行管理工作报告[R]. 常州:常州市城市防洪工程管理处, 2021.
- [4] 常州市泓帆科信勘测技术服务有限公司. 2020 年度长江魏村饮用水源地长效管理与保护评估报告[R]. 常州:常州市泓帆科信勘测技术服务有限公司, 2020.
- [5] 吴海洋. 长江大保护背景下常州沿江区域发展研究[J]. 市场周刊, 2020(6):66-68.
- [6] 狄立新. 以鱼养水 常州打造现代渔业[J]. 江苏农村经济, 2009(10):47-48.

(上接第 56 页)

- [16] DENG S, XIA J, ZHOU M, et al. Coupled modeling of bank retreat processes in the Upper Jingjiang Reach, China[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2018.
- [17] XIA J, ZONG Q, DENG S, et al. Seasonal variations in composite riverbank stability in the Lower Jingjiang Reach, China [J]. Journal of Hydrology, 2014, 519 (Part D):3664-3673.
- [18] SAMADI A, AMIRI - TOKALDANY E, DAVOUDI M H, et al. Experimental and numerical investigation of the stability of overhanging riverbanks[J]. Geomorphology, 2013, 184(15):1-19.
- [19] ZHAO K, GONG Z, XU F, et al. The role of collapsed bank soil on tidal channel evolution: A process - based model involving bank collapse and sediment dynamics [J]. Water Resources Research, 2019, 55(11):9051-9071.
- [20] ZHAO K, GONG Z, ZHANG K, et al. Laboratory experiments of bank collapse: the role of bank height and near - bank water depth [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2020, 125(5):e2019J-e5281J.
- [21] GONG Z, ZHAO K, ZHANG C, et al. The role of bank collapse on tidal creek ontogeny: A novel process - based model for bank retreat[J]. Geomorphology, 2018, 311: 13-26.
- [22] 伏洲,周宏萍,曹驰宇. 浅析长江干流崩岸治理抛石护岸质量控制[J]. 江苏水利, 2020(12):61-64.
- [23] 李金瑞,丁兵. 安徽省长江崩岸应急治理工程效果分析及建议[J]. 人民长江, 2020, 51(8):1-7.
- [24] 卢金友,朱勇辉,岳红艳,等. 长江中下游崩岸治理与河道整治技术[J]. 水利水电快报, 2017, 38(11): 6-14.
- [25] 褚明华,黄先龙. 2016 年长江中下游崩岸应急整治思考[J]. 中国水利, 2016(21):10-11.
- [26] 杨梦云,张根喜,朱勇辉. 上荆江河段南五洲崩岸整治工程护岸形式选择[J]. 长江科学院院报, 2012, 29 (12):10-14.
- [27] 周金岩. 长江中下游河道崩岸治理方案比选与分析 [J]. 水利建设与管理, 2020, 40(9):5-10.
- [28] 陆梅珍. 长江中下游崩岸状况防治及水生态保护探讨 [J]. 科技创新与应用, 2021(3):135-137.
- [29] 黄成国,胡士兵. 某航道岸坡防冲刷分析及护岸对策 [J]. 科技信息, 2012(18):424-425.
- [30] 张璠,张绪进,尹崇清. 船行波与运河岸坡的研究综述[J]. 中国水运(学术版), 2006(5):19-20.
- [31] 徐星璐,吴志易,张贺城,等. 内河航道船行波及其研究现状[J]. 中国水运(下半月), 2013, 13(11):9-10.
- [32] 姚仕明,岳红艳. 长江中下游生态护岸工程发展趋势浅析[J]. 中国水利, 2012(6):18-21.