

长江中游河道崩岸机理与 综合治理技术

姚仕明 岳红艳 何广水 黎礼刚 著



科学出版社

长江中游河道崩岸机理与 综合治理技术

姚仕明 岳红艳 何广水 黎礼刚 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

崩岸作为河道平面变形的主要形式,直接影响河床演变、河势与岸线稳定,进而影响防洪安全、航道畅通、涉水工程正常运行及岸线利用等,作为河道整治重要组成部分的护岸工程是控制河势与稳定岸线的基本手段,是治理河道崩岸的唯一措施。因此,研究河道崩岸机理与综合治理技术具有重要的理论与实际意义。本书以长江中游河道为主要研究对象,通过现场调查、资料收集与分析、水槽试验、现场试验和理论分析等相结合的技术手段,综合研究揭示了长江中游河道的崩岸机理、不同类型护岸工程效果及破坏机理,提出了河道岸坡稳定性评估方法、护岸工程新技术与设计参数,介绍了环保生态型护岸工程技术及应用实例,展望了生态护岸工程的应用前景。

本书资料翔实、内容丰富,可供河流研究人员、江湖治理与防洪工程技术人员及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

长江中游河道崩岸机理与综合治理技术/姚仕明等著. —北京:科学出版社,2016

ISBN 978-7-03-043689-4

I. ①长… II. ①姚… III. ①长江-中游-护岸-研究 IV. ①TV882.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 048029 号

责任编辑:周 炜 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:左 讯

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 7 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 7 月第一次印刷 印张:25

字数:502 000

定价:158.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

长江中游河道宜昌至湖口全长约 955km,流经湖北、湖南、江西、安徽等省。其岸线崩退不仅改变河道的平面形态,引起上下游河势的调整变化,而且影响防洪、航运、涉水工程的正常运行与岸线利用,以及沿江两岸工农业生产与人民生命、财产的安全等。同时,随着沿江两岸国民经济与社会的发展,对河势、航道、堤岸稳定及河岸带生态环境等方面的要求越来越高,相应河道崩岸所构成的威胁与造成的损失也越来越大。因此,深入开展长江中游河道崩岸机理与综合治理技术研究是十分必要与迫切的。

本书是在水利部公益性行业科研专项经费项目“长江中游河道崩岸综合治理技术研究(200901004)”成果的基础上撰写而成的。全书共 9 章。第 1 章为绪论,介绍开展本研究工作的意义及研究进展;第 2 章介绍长江中游干流河道崩岸与护岸工程现状,以及崩岸时空分布特点与护岸工程存在的主要问题;第 3 章分析长江中游河道崩岸的主要因素,研究揭示崩岸的成因,重点是大尺度、危害性大的崩窝发展过程及水沙输移规律;第 4 章分析指出不同因素对岸坡稳定性的影响,提出河道岸坡监测分析与稳定性评估方法,并以荆江河段为例,结合监测资料,评估监测岸段的稳定性;第 5 章研究揭示粗细颗粒抛石、四面六边体、混凝土铰链排、网模卵石排、钢筋混凝土网架促淤沉箱等水下护岸工程的效果及破坏机理;第 6 章介绍宽缝加筋生态混凝土水上护坡技术与网模卵石排水下护岸技术,针对护岸工程的破坏机理,研究提出不同类型护岸工程的加固技术;第 7 章介绍长江中游河道崩岸治理工程的布置及治理工程的优势技术方案,并提出崩岸综合治理非工程措施;第 8 章调查长江中游环境友好型护岸工程的植物群落分布,试验研究不同植物受水淹没的影响,从护岸材料与护岸结构两方面评价不同护岸工程的优劣,提出环境友好型护岸工程的优化建议;第 9 章为结语,介绍本次研究取得的主要结论,展望生态护岸技术的研究方向与应用前景。

本书分工如下:第 1 章由姚仕明、岳红艳撰写;第 2 章由何广水、姚仕明撰写;第 3 章由岳红艳、姚仕明、陈栋撰写;第 4 章由姚仕明、何广水、王博撰写;第 5 章由岳红艳、姚仕明、陈栋撰写;第 6 章由姚仕明、何广水撰写;第 7 章由何广水撰写;第 8 章由黎礼刚、李凌云、岳红艳、闵凤阳、王天巍、季华撰写;第 9 章由姚仕明撰写。全书由姚仕明与岳红艳统稿。

特别需要说明的是,本书相关项目是在各参加单位的共同努力下完成的,参加项目研究单位和主要完成人如下。长江科学院:姚仕明、朱勇辉、岳红艳、何广

水、李飞、渠庚、唐峰、陈栋、邹双朝、黎礼刚、李凌云、王家生、李昊洁、魏国远、郭小虎、张文二、黄莉、韩向东、李荣辉、刘亚、崔占峰、党祥、王博、熊连生、谷利华、张慧、刘心愿、周哲华、闵凤阳等；长江勘测规划设计研究院：曾令木、胡春燕、汪红英、王罗斌、任昊、叶小云；湖北省河道堤防建设管理局：杨维明、陈冬桥、张艳霞、闫立艳、张根喜、张卫军、陈飞、方绍清、刘国亮等；湖南省岳阳市长江修防处：胡世忠、吴文胜等；华中农业大学：王天巍、季华（承担了长江中游护岸带植物群落分布调查研究工作）。在项目研究过程中，得到清华大学王兴奎教授，长江科学院余文畴教授级高级工程师、卢金友教授级高级工程师、董耀华教授级高级工程师等指导。在此对他们的辛勤劳动表示诚挚的感谢。

本书得到水利部公益性行业科研专项经费项目(200901004)和国家自然科学基金项目(51379018)的资助，特此致谢。

限于作者水平，书中难免存在疏漏和不妥之处，敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 长江中游干流河道基本情况	1
1.1.1 河道形态	1
1.1.2 水文泥沙特征	3
1.1.3 河道边界条件	6
1.1.4 三峡水库运用以来河床演变主要特点	7
1.2 河道崩岸研究进展	11
1.2.1 国内河道崩岸机理研究进展	11
1.2.2 国外河道崩岸机理研究进展	14
1.2.3 河道崩岸预测研究进展	17
1.3 河道护岸工程研究进展	18
1.3.1 护岸的主要工程形式	18
1.3.2 国内外护岸材料和护岸技术	21
1.4 研究意义	25
参考文献	27
第 2 章 长江中游干流河道崩岸与护岸工程调查与评估	31
2.1 崩岸调查与评估	31
2.1.1 崩岸程度等级评价技术指标	32
2.1.2 崩岸基本情况调查与评估	33
2.1.3 崩岸的时空分布特点	54
2.2 护岸工程调查	60
2.2.1 护岸工程实施与分布情况	60
2.2.2 护岸工程经济寿命	77
2.2.3 护岸工程存在的主要问题	81
2.3 小结	83
参考文献	84
第 3 章 长江中游河道崩岸成因研究	85
3.1 河道崩岸影响因素分析	85
3.1.1 崩岸影响因素的宏观定性分析	85

3.1.2 崩岸影响因素定量分析	92
3.2 长江中游河道崩岸机理	99
3.2.1 河型成因、河道形态与平面变形之间的关系	99
3.2.2 河道崩岸的主导因素	102
3.2.3 河道崩岸的制约因素	115
3.2.4 崩岸在水文年内周期性的变化	122
3.3 典型河岸崩岸成因试验研究	127
3.3.1 模型选沙	127
3.3.2 模型比尺设计	129
3.3.3 试验观测内容	132
3.3.4 二元结构河岸崩塌机理试验成果	134
3.4 小结	164
参考文献	165
第4章 河道岸坡稳定性的影响因素及其评估方法	167
4.1 不同因素对岸坡稳定性的影响	167
4.1.1 河岸稳定性和坡脚侵蚀模型	168
4.1.2 研究断面及河岸组成	168
4.1.3 河岸稳定性计算条件	170
4.1.4 不同条件下河岸稳定性计算与分析	171
4.2 河道岸坡稳定评估方法	176
4.2.1 河道岸坡监测导线分析法	177
4.2.2 河道岸坡稳定性评估方法	179
4.3 河道岸坡稳定性评估方法的应用案例	183
4.3.1 荆江监测岸段岸坡稳定性评估成果	183
4.3.2 红色预警岸段的近岸地形变化趋势分析	189
4.3.3 2011 年红色预警岸段结论检验	191
4.4 小结	192
参考文献	193
第5章 护岸工程效果及破坏机理	194
5.1 护岸工程类型	194
5.2 护岸工程效果观测分析	196
5.2.1 荆江典型河弯段浅地层剖面探测成果	196
5.2.2 荆江典型河弯段护岸工程变化过程原型观测成果	200
5.3 护岸工程效果及破坏机理试验研究	202
5.3.1 概化水槽试验设计	202

5.3.2 研究内容和试验条件	206
5.3.3 护岸工程试验成果	206
5.4 小结	252
参考文献	254
第6章 护岸工程新技术与加固技术研究	255
6.1 宽缝加筋生态混凝土护坡工程新技术研究	255
6.1.1 护坡工程结构设计	255
6.1.2 护坡工程使用安全及其他性能分析	258
6.1.3 应用实例	260
6.2 网模卵石排水下护岸工程新技术研究	261
6.2.1 网模卵石排的原材料调研	261
6.2.2 网模卵石排水下护岸的结构设计	266
6.2.3 网模卵石排水下护岸工程的应用实例	268
6.3 护岸工程加固技术研究	269
6.3.1 护岸工程段近岸河床演变特点	269
6.3.2 不同类型护岸工程的水毁机理分析	270
6.3.3 分析遴选加固工程的材料结构形式	273
6.3.4 护岸工程加固部位与控制标准	278
6.4 小结	279
参考文献	280
第7章 长江中游河道崩岸综合治理研究	281
7.1 崩岸综合治理工程措施	281
7.1.1 崩岸综合治理工程布置	281
7.1.2 崩岸综合治理工程优势技术分析	300
7.1.3 崩岸治理工程技术设计基本方案和优势技术方案组合	307
7.2 崩岸综合治理非工程措施	319
7.3 小结	319
参考文献	320
第8章 环境友好型护岸技术及应用评价	321
8.1 环境友好型护岸技术概念	321
8.2 长江中下游护岸带植物群落分布调查	323
8.2.1 样地选择与调查方法	323
8.2.2 护岸带植物群落的总体分布规律	325
8.2.3 护岸带物种分布的环境影响因素	331
8.2.4 耐淹性护坡物种	333

8.2.5	不同护岸措施对植物种类和多样性影响的调查成果	333
8.3	生态护岸工程的优化方案	336
8.3.1	护岸工程的材料优化	336
8.3.2	护岸工程的结构优化	336
8.3.3	护岸带物种选择原则及优化方案	337
8.3.4	护岸工程的分区优化方案	338
8.4	环境友好型护岸技术应用评价体系及评价模型	338
8.4.1	环境友好型护岸技术评价指标体系	339
8.4.2	评价的层次分析法模型	349
8.5	护岸工程的材料评价	353
8.5.1	护岸材料能耗及碳排放研究现状	353
8.5.2	护岸材料的基本情况	355
8.5.3	主要能源及原材料运输过程中的能耗和碳排放系数	356
8.5.4	护岸工程中主要天然原材料生产过程能耗及碳排放系数	357
8.5.5	护岸工程中主要工业制成品的能耗及碳排放系数	363
8.5.6	主要护岸结构形式的碳排放系数比较	365
8.5.7	护岸工程材料能耗及碳排放的总体评价	366
8.6	护岸工程结构的评价	367
8.7	下荆江生态护岸带分区	371
8.7.1	背景	372
8.7.2	计算方法选取	373
8.7.3	水位计算成果及分区意义	375
8.7.4	河岸生态护岸带分区结果	380
8.8	结论与建议	381
8.8.1	结论	381
8.8.2	建议	382
	参考文献	383
第9章	结语	387
9.1	主要结论	387
9.2	展望	390

第 1 章 绪 论

1.1 长江中游干流河道基本情况

1.1.1 河道形态

长江中游干流河道自宜昌至湖口全长约 955km,由宜枝(60.8km)、上荆江(171.7km)、下荆江(175.5km)、岳阳(77.0km)、武汉(70.3km)、鄂黄(60.8km)与九江(90.7km,含湖口~小孤山长 37.8km 的下游段)等 7 个重点河段和陆溪口(22.4km)、嘉鱼(31.6km)、簪洲湾(73.8km)、叶家洲(28.2km)、团风(28.8km)、韦源口(33.3km)、田家镇(34.3km)与龙坪(31.6km)等 8 个一般河段组成^[1],沿程流经山区与平原河流过渡段(宜枝河段)、冲积平原,并受两岸众多天然节点控制,形成宽窄相间的平面形态,主要由顺直形(图 1.1)、弯曲形(图 1.2)、蜿蜒形(图 1.3)和分汉形(图 1.4)等 4 类河型组成,以分汉形最为发育。长江中游干流河道深泓高程沿程呈锯齿形起伏状变化,总体表现为河道宽阔处深泓高程高、河道窄处或弯道顶冲段或节点段深泓高程低,长江中游深泓高程最低点位于田家镇河段的马口附近,其高程为-90.0m 左右;沿程横断面形态变化与河道平面形态、河道边界条件、河床组成等因素有关,一般情况下,单一弯道段的断面形态以偏“V”形为主,长直过渡段与顺直微弯单一河道的断面形态以“U”形或偏“U”形为主,而对于分汉河段或多股流路共存的河段,其断面形态复杂,由两个或两个以上的凹槽复合而成,多表现为“W”形或偏“W”形。长江中游河道河床组成以杨家脑为界,其上游为砂卵石河床,在水流冲刷作用下可形成粗化覆盖层,抗冲性较强,其下游为沙质河床,其河床中值粒径多为 0.16~0.20mm,抗冲性较弱。总体而言,



图 1.1 顺直形河段河势图(岳阳河段)



图 1.2 弯曲形河段河势图(沙市、公安与郝穴河段)



图 1.3 蜿蜒形河段河势图(下荆江出口熊家洲河段)



(a) 弯曲形分汊河道



(b) 鹅头形与顺直微弯形分汊河道

图 1.4 分汊形河段河势图

宜昌至枝城河段,河岸抗冲能力强,历年岸线稳定少变,仅个别地段发生崩岸;荆江河段松滋口以下由丘陵过渡到冲积平原,两岸抗冲能力逐渐减弱,崩岸时有发生,尤其是下荆江河道蜿蜒曲折,横向变形大,崩岸剧烈;城陵矶以下河段两岸抗冲能力也比较弱,在水流作用下常发生崩岸。

1.1.2 水文泥沙特征

由于受长江干流三峡工程蓄水运用、洞庭湖与鄱阳湖水系及支流汉江等水利水电工程建设和人类活动的影响,长江中游干流河道的主要控制站的水沙条件发生了较大的变化,对其冲淤过程及演变也带来了一定的影响。

三峡水库下游干流河道的径流量主要来自长江上游、洞庭湖水系、汉江支流、鄱阳湖水系以及沿程区间其他支流等,除了荆江河段因右岸的松滋口、太平口、藕池口等三口(以下简称三口,调弦口于1959年建闸控制)分流入洞庭湖使沿程年径流量减少外,其他干流河道的年径流量因湖泊及支流入汇沿程增加。三峡水库蓄水运用前,长江上游宜昌站,洞庭湖湘江、资水、沅江、澧水(以下简称四水),皇庄站,鄱阳湖赣江、抚河、信江、饶河、修河等五河(以下简称五河)多年平均径流量分别占大通站的48.3%、18.7%、5.3%、12.2%,共计占大通站的84.5%。三峡水库蓄水运用以来,宜昌站、洞庭湖四水、皇庄站、鄱阳湖五河多年平均径流量(2003~2007年)分别占大通站的48.3%、19.0%、6.0%、11.2%,共计占大通站的84.5%。三峡水库蓄水运用前后相比,洞庭湖四水年均径流量占大通站的百分比增加0.3%、皇庄站增加0.7%、鄱阳湖五河减小1.0%、宜昌站保持一致。因此,三峡水库下游主要水系在其蓄水前后的年均径流量比例组成并没有发生显著变化^[2]。

三峡水库蓄水运用以来(2003~2012年),坝下游干流河道各控制站年均径流量较蓄水前多年平均(2002年以前)值有所偏枯,偏小幅度均在10%以内;输沙量减小更为明显,各站减幅均在65%以上,减小幅度沿程递减,宜昌站、汉口站与大通站输沙量分别为0.482亿t、1.143亿t、1.450亿t,与蓄水前均值相比,减幅分别为90%、71%、66%;三峡水库蓄水运用前宜昌站至大通站的含沙量沿程减小,年均含沙量由 $1.13\text{kg}/\text{m}^3$ 减为 $0.472\text{kg}/\text{m}^3$,即大通站的含沙量约为宜昌站的42%;三峡水库蓄水运用后,宜昌站含沙量大幅度减少,仅为三峡水库蓄水前的10.7%,而且粒径也明显变细,宜昌站至监利站的含沙量因河床冲刷补给沿程增加,螺山站因洞庭湖出口城陵矶站低含沙水流的入汇而有所减小,汉口站、大通站的含沙量因沿程的冲刷补给稍有增加,但汉口站、大通站减幅仍很明显,仅为三峡水库蓄水前的20.5%、36.7%。三峡水库蓄水运用前后水库下游泥沙来源及输移过程发生显著变化,三峡水库蓄水运用前水库下游河道泥沙主要来自长江上游,宜昌站与汉口站、大通站多年平均输沙量相比分别为123.6%、

115.2%,扣除荆江分流后进入洞庭湖区的泥沙淤积,加上沿程支流水系泥沙入汇,干流河道泥沙输移基本平衡。三峡水库蓄水运用后,水库下游河道泥沙输移平衡被打破,宜昌站与汉口站、大通站多年平均值(2003~2012年)相比分别为42.2%、33.2%,长江上游的来沙量不及汉口站输沙量的一半、仅为大通站输沙量的1/3,这意味着水库下游河道由三峡水库蓄水前输沙基本平衡转为总体冲刷状态。三峡水库蓄水运用前后水库下游主要水文站径流量、输沙量和含沙量统计见表1.1和表1.2。

表 1.1 长江中游主要水文站径流量、输沙量和含沙量统计

项目	统计时段	宜昌	枝城	沙市	监利	螺山	汉口	大通
径流量/ 10^8m^3	多年平均(三峡蓄水前)	4369	4450	3942	3576	6460	7111	9052
	2003~2012年平均	3978	4073	3758	3631	5880	6693	8376
输沙量/ 10^4t	多年平均(三峡蓄水前)	49200	50000	43400	35800	40900	39800	42700
	2003~2012年平均	4821	5845	6928	8358	9648	11426	14500
含沙量/(kg/m^3)	多年平均(三峡蓄水前)	1.13	1.12	1.10	1.00	0.633	0.560	0.472
	2003~2012年平均	0.121	0.144	0.184	0.230	0.164	0.171	0.173

注:三峡工程蓄水前统计年份,宜昌站为1950~2002年,枝城站为1955~2002年(其中1960~1991年为宜昌+长阳站),沙市站为1956~2002年(1956~1990年为新厂站),监利站为1951~2002年(缺1960~1966年),螺山站和汉口站均为1954~2002年。

表 1.2 长江中游主要分、汇流径流量、输沙量和含沙量统计

项目	统计时段	松滋口	太平口	藕池口	洞庭湖 城陵矶	汉江 仙桃	鄱阳湖 湖口
径流量/ 10^8m^3	多年平均(三峡蓄水前)	417	162	326	2965	404	1501
	2003~2012年平均	293	92	109	2292	—	1403
输沙量/ 10^4t	多年平均(三峡蓄水前)	4610	1880	5850	4290	3820	953
	2003~2012年平均	591	159	376	1746	—	1241
含沙量/(kg/m^3)	多年平均(三峡蓄水前)	1.11	1.16	1.79	0.145	0.946	0.063
	2003~2012年平均	0.202	0.173	0.345	0.076	—	0.088

注:三峡工程蓄水前统计年份,松滋口(新江口+沙道观)、太平口(弥陀寺)、藕池口(康家岗+管家铺)为1956~2002年,洞庭湖城陵矶站为1952~2002年,汉江仙桃站为1955~2002年(缺1968~1971年),鄱阳湖湖口站为1952~2002年。

三峡水库蓄水前,宜昌站至大通站的悬沙多年平均中值粒径为0.009~0.012mm,以粒径小于0.031mm的泥沙含量所占比例最大,超过65%,沿程各站年均泥沙输移量为2.54亿~3.72亿t,粒径为0.031~0.125mm的泥沙含量约19%,沿程各站年均泥沙输移量为0.69亿~0.93亿t,粒径大于0.125mm的泥沙

含量沿程变化相对较大,最小为枝城站,泥沙含量为 6.9%,最大为螺山站,泥沙含量为 13.5%,沿程各站年均泥沙输移量为 0.31 亿~0.44 亿 t。三峡水库蓄水后,大量泥沙被拦截在库内,水库下泄的水流含沙量大幅度减小,出库泥沙粒径明显偏细,与三峡水库蓄水运用前相比,主要变化表现如下。

(1) 沿程悬沙中值粒径变化范围增大,由蓄水前的 0.009~0.012mm 变为 0.005~0.038mm,以监利站的中值粒径为最大,宜昌站为最小,大通站未变,主要是由河床冲刷补给和粗细泥沙的沿程交换所致。

(2) 三峡水库蓄水运用后下游干流河道控制站的年均输沙量沿程增加,但各粒径级泥沙沿程恢复程度不同,粒径小于 0.031mm 的泥沙所占比例仍最大,但较蓄水前有所减少,监利站减少最多,其比例不足 50%,该粒径级的泥沙沿程增加,年均值由宜昌站的 0.402 亿 t 增加至大通站的 1.072 亿 t;粒径为 0.031~0.125mm 的泥沙所占比例有所减少,年均输沙量宜昌站至监利站沿程增加,监利站至螺山站有所减小,螺山站至大通站沿程增加;粒径大于 0.125mm 的泥沙所占比例除宜昌站与大通站外均增加,其中监利站增幅最大,由蓄水前的 9.6% 增加至蓄水后的 34.2%,该粒径级的年均输沙量到监利站恢复至最高水平,接近蓄水前的水平,汉口站该粒径级泥沙输移量在蓄水前后相近,但至大通站该粒径级的泥沙输移量明显减少,不足汉口站的 50%。

(3) 2013 年,宜昌站的悬沙中值粒径又增加至 0.009mm,水库下游河道其他主要控制站的悬沙中值粒径差距有所减小,但悬沙中值粒径最大仍为监利站,为 0.019mm,与 2003~2012 年的年均值相比,粒径小于 0.031mm 的泥沙所占比例有所增加,粒径为 0.031~0.125mm 和大于 0.125mm 的泥沙所占比例有所减少。详见表 1.3 和图 1.5。

表 1.3 三峡水库坝下游主要控制站不同粒径级沙重百分数对比^[3]

范围	测站 时段	沙重百分数/%							
		黄陵庙	宜昌	枝城	沙市	监利	螺山	汉口	大通
$d \leq 0.031\text{mm}$	多年平均	—	73.9	74.5	68.8	71.2	67.5	73.9	73.0
	2003~2012 年	88.3	86.0	72.7	60.0	48.1	61.5	61.5	74.9
	2013 年	91.9	91.6	88.6	76.6	61.5	73.8	69.5	80.0
$0.031\text{mm} < d \leq 0.125\text{mm}$	多年平均	—	17.1	18.6	21.4	19.2	19.0	18.3	19.2
	2003~2012 年	8.5	8.0	10.9	13.1	18.7	14.4	16.4	17.8
	2013 年	7.7	7.5	9.9	11.5	15.5	12.2	15.8	13.7
$d > 0.125\text{mm}$	多年平均	—	9.0	6.9	9.8	9.6	13.5	7.8	7.8
	2003~2012 年	3.2	6.0	16.4	27.1	34.2	24.1	21.2	7.3
	2013 年	0.4	0.9	1.5	11.9	23.0	14.0	14.7	6.3

续表

范围	测站 时段	沙重百分数/%							
		黄陵庙	宜昌	枝城	沙市	监利	螺山	汉口	大通
中值粒径/mm	多年平均	—	0.009	0.009	0.012	0.009	0.012	0.010	0.009
	2003~2012 年	0.005	0.005	0.008	0.015	0.038	0.014	0.015	0.009
	2013 年	0.009	0.009	0.010	0.012	0.019	0.012	0.013	0.009

注:①宜昌、监利站多年平均统计年份为 1986~2002 年;枝城站多年平均统计年份为 1992~2002 年;沙市站多年平均统计年份为 1991~2002 年;螺山站、汉口站、大通站多年平均统计年份为 1987~2002 年。②2010~2013 年长江干流各主要测站的悬移质泥沙颗粒分析均采用激光粒度仪。

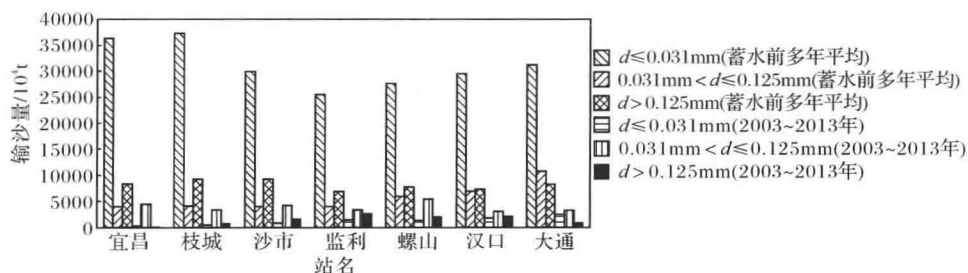


图 1.5 三峡水库运用前后下游控制站不同粒径级泥沙输移量对比

1.1.3 河道边界条件

除宜昌至枝城河段为山区向平原河流过渡及沿江两岸分布的山体与硬土质岸坡外,长江中游干流河道主要由上层为黏性土、下层为粉细砂或细砂组成二元结构为主的河岸,其上、下层的抗冲性差别大,上层的黏土层抗冲性较强,而下层的细砂层抗冲性较差。

长江中游河道河床组成沿程变化总的趋势是由粗变细。宜枝河段河道顺直微弯,河床覆盖层厚 0~30m,以砂砾石为主,近年来河段总体以冲刷为主,但仍有一定储量的砂砾石料,床沙以中粗砂为主;河床岸坡绝大部分由砂岩、砂砾岩基岩或老黏土组成,仅枝城附近的清江河口附近发育有少量的第四系冲积层砂、土质岸坡;岸坡及河势较为稳定。荆江河段河道蜿蜒曲折,河床覆盖层厚度达 100m 以上,该段水流侧向侵蚀作用强,动力下切作用弱,床沙以水流挟带沉积的细砂为主;两岸堤防岸坡以土质、砂质岸坡为主,局部地段为淤积质岸坡;河势及岸坡的稳定性均较差。城汉河段除簰洲湾河段弯曲蜿蜒外,基本比较顺直,河床覆盖层厚度为 50~100m,床沙的分布及质量、储量与河道内古河床沉积砂层密切相关;堤防岸坡以土质岸坡为主,局部存在砂质、淤泥质岸坡,总体岸坡稳定性较差,且左岸岸坡较右岸岸坡稳定性差,河势相对稳定。武汉以下两岸基岩节点成对或交

错发育,河道相对较为顺直,河床覆盖层厚度一般为20~40m;现河床大部分已下切至老的沉积细砂、中砂甚至砂砾石层中;堤防岸坡为双层结构,上部为黏土、壤土土质岸坡,下部为粉细砂层砂质岸坡。

新中国成立以来,长江中游干流河道经过六十多年的治理,其河道边界条件已发生显著变化,崩岸段基本得到治理,大大限制了平滩河槽的横向变形范围与幅度,对控制长江中游总体河势稳定起到了重要作用。下荆江系统裁弯工程与河势控制工程、界牌河段防洪与航运综合整治工程、武汉河段江滩综合治理等重点河段整治工程有效控制了这些河段的河势。2000年以来,交通部门先后实施了长江航道清淤应急工程,自上而下实施了长江中游枝江河段浅滩航道整治工程、三八滩守护工程、瓦口子、马家咀、周公堤至天星洲、藕池口、碾子湾、监利乌龟洲、界牌河段二期、陆溪口、嘉鱼至燕子窝、武桥水道、罗湖洲、戴家洲、牯牛沙、武穴水道、张家洲南港下浅区等航道整治工程,对控制与稳定中枯水河槽发挥了重要作用。

总体而言,长江中游干流河道实施的大量整治工程增强了河道边界的抗冲性,限制了河道横向变形的范围与幅度,达到了控制总体河势基本稳定的目标。长江中游干流河道正逐渐成为受人类影响与约束越来越强的河道。

1.1.4 三峡水库运用以来河床演变主要特点^[4]

经过六十多年的治理,长江中游护岸工程与河(航)道整治工程的实施,增强了河道边界的稳定性与抗冲性,限制了河道横向变形范围与幅度,有效控制了河道的总体河势。

(1) 三峡水库运用以来,进入长江中下游河道的泥沙大幅度减少,其河道冲淤由总体基本平衡转为总体冲刷。

据统计^[2],2002年以前,由长江上游宜昌站、洞庭湖水系城陵矶站、支流汉江皇庄站及鄱阳湖水系湖口站进入长江中下游干流河道的年均泥沙量合计为5.97亿t,而荆江三口分流进入洞庭湖的年均泥沙量为1.33亿t,大通站年均输沙量为4.27亿t,进出宜昌至大通干流河道的年均输沙量差值为0.37亿t,约占进入干流河道总年均输沙量的6.2%。据统计^[5],20世纪80年代末90年代初,长江中下游干流河道年均采砂量约为0.26亿t,近年来,长江中下游干流河道年均采砂量已超过0.40亿t。考虑到长江中下游干流河道建筑砂石料开采与吹填采砂等的影响,其年均开采砂石量与进出宜昌至大通干流河道的年均输沙量差值相差不大,因此可认为三峡水库运用前长江中下游干流河道输沙基本平衡。三峡水库蓄水后,宜昌站的年均输沙量不足其蓄水前的1/10,为0.482亿t,而宜昌以下沿程输沙量逐渐增加,至大通站年均输沙量增加为1.448亿t,约占该站蓄水前平均值的34%。长江上游、两湖水系及支流汉江进入干流的年均泥沙量为0.684亿t,荆江三口、大通站输出的年均泥沙量为1.557亿t,进出相差0.873亿t。由此可看出,

长江中下游宜昌至大通河段总体处于冲刷状态,冲刷主要发生在宜昌至监利段,年均冲刷量为 0.463 亿 t。

根据长江中下游干流河道历年实测的河道地形图分析^[6,7],1966 年 5 月~1998 年 10 月,宜昌至大通河段平滩河槽累积淤积量为 6.71 亿 m^3 ,年均淤积强度为 1.81 万 m^3/km ;宜昌至湖口河段 1975~1998 年平滩河槽累积淤积量为 3.78 亿 m^3 ,年均淤积强度为 1.72 万 m^3/km ;1998 年 10 月~2002 年 10 月,平滩河槽累积冲刷量为 5.47 亿 m^3 ,年均冲刷强度为 14.33 万 m^3/km ;1975~2002 年,平滩河槽累积冲刷量为 1.69 亿 m^3 ,年均冲刷强度为 0.65 万 m^3/km ;可以看出三峡水库蓄水运用前宜昌至湖口河段总体冲淤基本平衡。三峡水库蓄水运用以来,宜昌至湖口河段平滩河槽冲刷量为 11.876 亿 m^3 ,且冲刷以枯水河槽为主,其冲刷量为 10.575 亿 m^3 。从冲淤量沿程分布来看,宜昌至城陵矶河段河床冲刷较为剧烈,平滩河槽下的冲刷量为 7.664 亿 m^3 ,占总冲刷量的 65%;城陵矶至汉口、汉口至湖口河段冲刷量分别为 1.256 亿 m^3 、2.957 亿 m^3 ,分别占总冲刷量的 11%、25%。

(2) 宜昌至枝城近坝段受三峡水库蓄水影响时间最早,其砂卵石河床冲刷粗化速度快且冲淤渐趋相对平衡状态。

三峡水库蓄水运用以来,宜枝河段河床冲刷发展速度快。根据河道实测资料统计分析^[8],宜枝河段在 2002 年 9 月~2012 年 10 月平滩河槽累积冲刷泥沙 1.45 亿 m^3 (包括河道采砂的影响),年均冲刷强度约为 24.6 万 m^3/km ,河床平均冲深约 2.2m,主要为枯水河槽的冲刷,累积冲刷 1.32 亿 m^3 ,占平滩河槽冲刷量的 91%。宜昌河段(宜 34~宜 5)与宜都河段(宜 5~枝 3)相比,其平滩河槽的年平均冲刷强度约为宜都河段的 30%。

三峡水库蓄水运用以来,宜枝河段冲刷总体随时间推移,冲刷强度逐渐减弱,同时也可以看出,本河段冲刷量与宜昌站的径流量存在一定的关系,年径流量大其冲刷量相对也大(图 1.6)。例如,2006 年宜昌站年径流量明显偏小,该河段冲淤量很小;2008 年宜昌站的年径流量并不小但冲淤量也很小,主要原因是 2008 年汛期月均径流量相对均匀,缺少大流量的冲刷作用,而且 2008 年发生了罕见的秋季洪水,10 月份与 11 月份的径流量比一般年份多 300 亿 m^3 ,加上期间下游河道水位较低,其所引起的冲刷比较剧烈,而这期间的冲刷在进行年度冲淤计算时计入下一年度,这可能就是 2008 年本河段冲淤基本平衡而 2009 年径流量虽不大而冲刷相对严重的主要原因。

宜枝河段剧烈冲刷引起该河段的洲滩总体呈现萎缩状态,深槽变化较洲滩变化更为剧烈,深槽变化以范围扩展、槽底高程降低为主,深泓纵剖面平均冲刷下切 3.8m,断面宽深比减小。伴随河床冲刷,床沙粗化明显,床沙 d_{50} 由 2003 年 11 月的 0.638mm 增大到 2012 年 10 月的 23.59mm,根据泥沙起动公式^[9]计算,在水深为 3~20m 范围内,其起动流速由 0.61~0.84m/s 增加为 1.32~1.81m/s,由此可