



国家重点基础研究发展计划

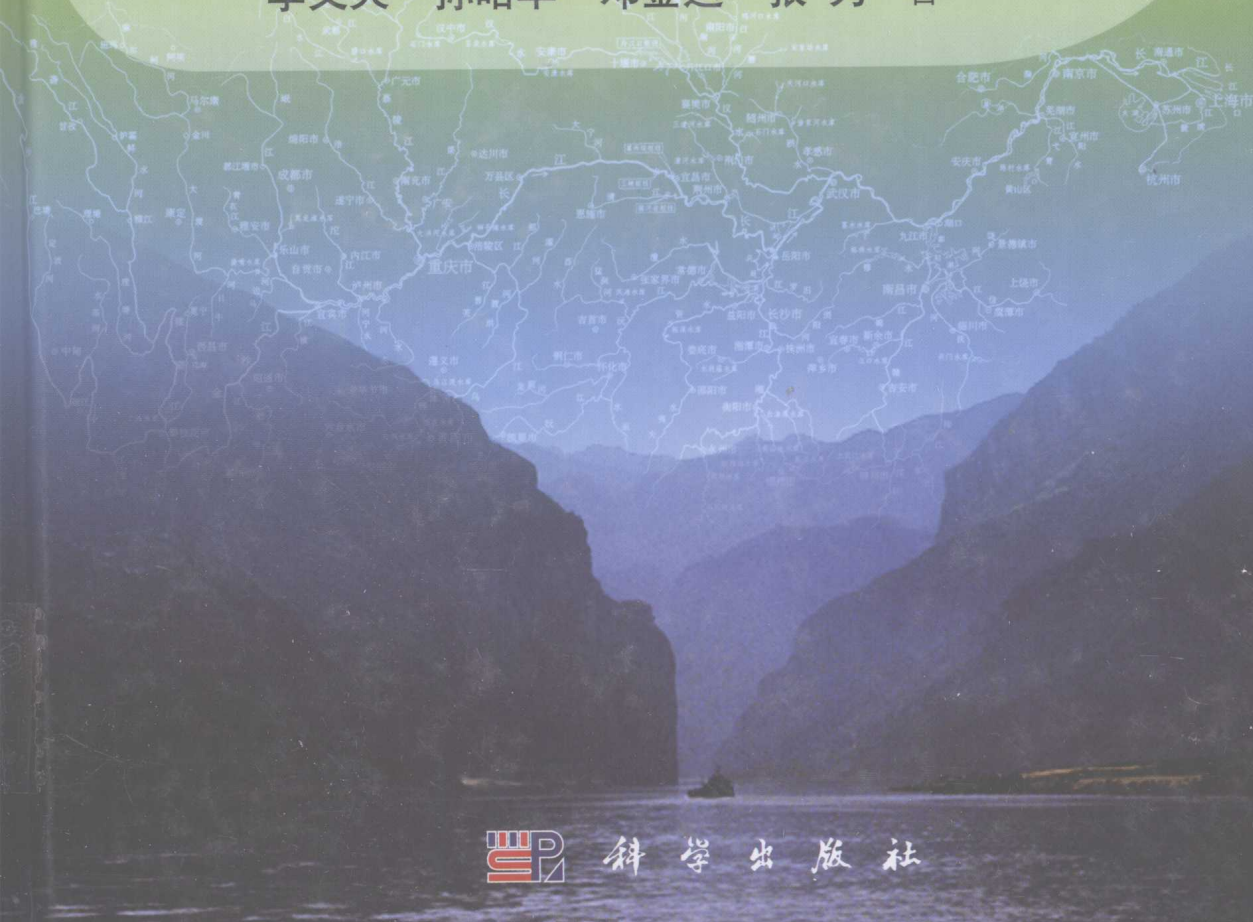
“十一五”国家重点图书出版规划项目

长江流域水沙产输及其与
环境变化耦合机理研究 丛书

长江

水沙调控理论及应用

李义天 孙昭华 邓金运 张为 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版
“十一五”国家重点图书出版规划项目
长江流域水沙产输及其与环境变化耦合机理研究丛书

长江水沙调控理论及应用

李义天 孙昭华 邓金运 张 为 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书重点介绍了作者及其研究团队 20 余年来在长江水沙调控方面开展的工作和取得的成果。全书以长江上游三峡库区与中下游河段(包括洞庭湖区在内)组成的相互依存、相互作用的复杂江湖体系为对象,揭示了自然条件及工程作用下的江湖相互作用机理,提出了多尺度水沙输移高效数值模拟技术,为江湖系统内局部治理与整体协调提供了有效的研究方法和调控原则,在此基础上形成了满足防洪、航运、发电及水资源高效利用的优化调控技术。这些理论与技术在长江及类似流域的水沙调控方面具有推广应用价值。

本书可供从事河流动力学、河床演变与河道整治、长江流域规划与管理等方面研究的科技人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

长江水沙调控理论及应用 / 李义天等著. —北京:科学出版社,2011

(长江流域水沙产输及其与环境变化耦合机理研究丛书)

ISBN 978-7-03-030409-4

I. ①长… II. ①李… III. ①长沙-含沙水流-控制-研究 IV. ①TV152

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 033461 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:刘小梅

责任印制:赵 博 / 封面设计:鑫联必升

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>

北京佳信达欣艺术印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 3 月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2011 年 3 月第一次印刷 印张:42

印数:1—1 500 字数:829 000

定价:120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

自古以来,人类择水而居,大河流域是人类文明的发祥地。河流在防洪、灌溉、发电、航运、水产养殖、景观等多个方面为人类社会的经济活动提供保障,也在净化水环境、塑造河流地貌、提供多样栖息地条件等方面发挥着重要的生态环境功能。进入工业时代以来,沿江河地区普遍成为各国经济、人口密集分布带,开发利用水资源、防治洪涝干旱灾害成为保障区域经济社会可持续发展的重要内容。然而,国外多条河流上的经验教训表明,大量修建水利工程固然能够防止河水自然泛滥,减轻或避免极端水文事件的破坏作用,提高水资源的利用效率,但水沙过程的过度调节却可能引发河道萎缩、河流功能退化、生态环境恶化等一系列负面效应。正是由于这个原因,国外许多大河流域如密西西比河、科罗拉多河、尼罗河、莱茵河等虽然以水资源开发为中心取得了令人瞩目的成绩,但同时也引发了许多意想不到的水文活力消退、生态环境失衡等不良响应。如何合理调控河流水沙过程,在水资源开发利用的同时避免或减少负面效应,成为流域管理与水利工程建设中迫切需要解决的重大关键科学问题。

建立河流水沙调控理论极为困难,从表面上看是由于河流水资源时空分布不均,防洪、发电、航运及各种用水领域涉及因素多,相互之间矛盾难以协调;但其更深层次的原因是修建水利工程后打破了天然河流的冲淤平衡,河床处于不断冲淤变化过程中。这就使得上下游、左右岸的各种矛盾处于不断转化或激化过程中,不仅需要对各个具体河段水沙过程及冲淤变化进行预测与调控,而且需要在区域或流域的宏观尺度上对水沙过程进行协调。与此相应,揭示河流系统内相互交织的多种物理过程的形成机理与发生发展规律,提出能够对多时空尺度水沙输移与河床变形进行描述和预测的模拟技术,就成为支撑水沙调控的必要理论和技术基础,而以往研究中将工程效应的尺度定位于局部和短期,显然与此有相当的差距,存在大量的工作需要开展。以上问题,在我国正面临着大规模水电开发热潮的长江流域尤其突出。

笔者涉及河流水沙调控是从河流水沙数学模型开始的,研究工作主要围绕着长江流域或者以长江为背景而展开。早期在谢鉴衡院士的指导下开展了河流水沙数学模型的建立与研究,“七五”期间承担了长江三峡工程变动回水区平面二维水沙数学模型的研究任务,在前人研究的基础上,采用数学模型探索了通过推迟水库蓄水及消落时间、降低汛限水位等方式,减少泥沙淤积对航运影响的措施,初步体会到水沙调控的重要性。此后,在 20 世纪 90 年代系统地开展了长江中游荆

江与洞庭湖洪水调度、长江中游水沙灾害研究等工作,2000年以来承担了三峡水库蓄水过程优化研究、长江中下游河道治理、长江流域水沙输移及其与环境变化耦合机理等研究工作。在历时20余年的研究历程中,我们逐渐认识到,与世界其他大型冲积河流相比,长江河湖系统的冲积动力过程更为复杂,水沙调控面临的难题更多。以中游荆江洞庭湖区为例,洞庭湖不仅接纳支流来水,还接纳长江三口分入的水沙,调蓄后重新汇入长江干流,江湖之间水量、沙量交换频繁,导致江湖冲淤多变。由于泥沙冲淤与筑堤、围垦等人类活动交织,江湖格局不断调整,水旱灾害频繁、浅滩碍航严重。三峡水库蓄水后,水沙条件的改变使江湖之间作用关系发生新的调整,上下游之间、干流与湖区之间水沙输移与河床演变之间的耦合作用关系更为复杂,防洪、航运、发电等目标之间矛盾非常突出。因此,从整体的角度揭示江湖相互作用机理,从多尺度对水沙输移的各种效应开展模拟分析,是支撑长江水沙调控的关键理论和技术难题。

我们在充分吸收其他河流已有经验的基础上,结合长江江湖耦合作用的实际特点,逐步揭示了自然条件及人类工程作用下江湖水沙输移和河床调整的规律与机理,突破了已有的模拟技术无法应用于大范围、长时间尺度研究的局限,从而能够协调短期与长期、局部与整体之间的矛盾,形成了长江水沙调控的技术体系,本书正是这些研究成果的归纳和总结。

研究工作依托于国家“973”计划项目“长江流域水沙产输及其与环境变化耦合机理”(编号:2003CB415200)、国家自然科学基金课题等多项国家及地方重点科研项目,解决了三峡工程、长江中游蓄滞洪区调度、长江黄金水道建设等重大工程设计和安全运行的一系列难题,也在以下多个方面取得了进展。

(1) 揭示了江湖相互作用机理:突破了水库上下游纵剖面调整机理与规律等核心难点,全面揭示了广义江湖系统内不同尺度冲积过程的相互作用机理,建立了上游来沙量、江湖水沙分汇特性及四水尾间水位之间的相互作用关系,阐明了自然演变及人类活动引起河道纵剖面变化对江湖水沙分配及蓄泄能力的作用机制以及淤积位置转移导致同流量下水位抬高的机理,解决了江湖治理中局部与整体冲积过程之间的响应关系难以确定的理论难题。

(2) 提出了多尺度水沙输移高效数值模拟技术:提出汉点分组解法、含沙量与挟沙力级配高效算法,突破了多重尺度冲积过程难以整体模拟的瓶颈,为江湖系统内局部治理与整体协调提供了有效的研究方法;创建等参元网格法以及阻力、挟沙力沿河宽分布等计算模式,解决了流速、含沙量、河床冲淤平面分布模拟易失真的难题。

(3) 形成了多尺度水沙调控的若干关键技术,其中水库淤积形态与径流过程联合调度技术的创建,实现了从径流调度到水沙联合调度的升华;平原河流蓄滞洪体系洪水调度技术的提出,使江湖复杂水系内整体的水量、动量守恒和圩垸溃决、

水量吞吐等详细过程得以兼顾;大型冲积河流航道控导关键技术的提出,实现了航道整治从多年平衡河流到水沙过程突变条件的跨越。

(4) 针对三峡水库蓄水过程中长江江湖系统内存在的防洪、航运、用水及发电之间难以协调的矛盾,根据以上成果提出了能满足各方需求的优化调度技术,为江湖系统和三峡水库运行的水沙过程整体协调提供了支撑。

本书是笔者与笔者众多研究生集体智慧的结晶,参加研究工作的主要人员除本书作者外,还有李荣、曹志芳、彭杨、王威、吴道喜、何用、黄颖、王秀英、陈建、刘云、要威、江凌、甘富万、郭小虎、陈飞、葛华等。研究过程中得到水资源与水电工程科学国家重点实验室的大力支持。

长江是中华民族的母亲河,水沙丰沛,源远流长,是世界上冲积过程最为复杂的河流之一。调控长江水沙、实现人水和谐,任重而道远,本书只是在该方面开展的一些初步探索。限于作者水平有限,经验不足,书中难免会有疏漏和不足之处,恳请读者批评指正。

作 者

2010 年 10 月于武昌珞珈山

目 录

前言

第 1 章 长江水沙调控的现状与趋势	1
1.1 长江流域水资源开发现状与发展趋势	1
1.1.1 水量资源开发利用趋势	2
1.1.2 水能资源开发利用趋势	3
1.2 长江流域水沙输移特点及其效应	4
1.2.1 来水来沙特点	4
1.2.2 河湖边界的冲淤特点	5
1.2.3 人类因素对水沙输移及河床演变的影响	6
1.3 长江水沙调控的必要性及可行性	9
1.3.1 长江水沙调控的必要性	10
1.3.2 长江水沙调控的可行性	12
1.4 河流水沙调控现状及发展趋势	14
1.4.1 水沙调控工程实践的发展历程	14
1.4.2 水沙调控面临的问题	19
1.4.3 水沙调控相关理论的发展趋势	24
1.5 长江水沙调控的独特性	28
1.5.1 长江水沙调控的复杂性	28
1.5.2 长江水沙调控的关键问题	29
1.6 本书的主要内容	30
参考文献	32
第 2 章 长江水沙调控的原理	36
2.1 水沙调控的对象与目标	36
2.1.1 长江水沙调控的对象	37
2.1.2 长江水沙调控的特点	41
2.1.3 长江水沙调控的原则	44
2.2 水沙调控的模式与途径	52
2.2.1 水沙调控的目标分解	52
2.2.2 水沙调控的多模块集成	57
2.3 水沙调控的关键技术	60

2.3.1	边界条件的确定原则	60
2.3.2	模拟技术的要求	62
	参考文献	65
第3章	水沙过程与河床变形耦合作用机理	67
3.1	水利工程对水沙过程的影响效应	67
3.1.1	单个水利工程	68
3.1.2	水利工程群体	73
3.2	非平衡状态下河道纵向水沙输移特性	77
3.2.1	水库淤积平衡纵剖面与其影响因素的关系	77
3.2.2	冲刷条件下非均匀沙的沿程恢复机制	92
3.3	水沙过程与河道平面形态稳定性	114
3.3.1	河床横向变化的一般特性	114
3.3.2	水库下游河床横向变化	124
3.4	冲积河流浅滩演变规律	131
3.4.1	浅滩演变一般特性	131
3.4.2	水沙条件变化后的浅滩演变	148
	参考文献	150
第4章	水沙调控数学模型关键技术	155
4.1	水沙调控模拟系统	155
4.2	水沙输移模型的方法与模式	157
4.2.1	长河段大范围水沙输移模拟的计算方法	157
4.2.2	水沙输移模拟的计算模式	189
4.2.3	水沙输移快速计算方法	195
4.3	水沙调控模型	199
4.3.1	水库调度模型	199
4.3.2	洪水调度模型	208
4.3.3	平面形态控导模型	214
	参考文献	219
第5章	长江上游大型水利工程与水沙过程相互作用	221
5.1	大型水利工程调度与水库泥沙淤积	221
5.1.1	三峡水库概况	221
5.1.2	水库一维泥沙数学模型验证	224
5.1.3	三峡水库泥沙淤积特征	230
5.1.4	调度方式对泥沙淤积的影响	235
5.1.5	上游建库对三峡水库泥沙淤积的影响	241

5.2 变动回水区泥沙淤积对航运的影响	245
5.2.1 三峡水库变动回水区概况	245
5.2.2 水沙条件	246
5.2.3 泥沙淤积对水库回水及浅滩水深的影响	246
5.2.4 重点浅滩演变规律及航运状况	249
5.2.5 上游建库后泥沙淤积对变动回水区航道条件的影响	258
5.3 大型水利工程对下泄水沙过程的影响	260
5.3.1 三峡水库下泄水沙过程变化	260
5.3.2 上游建库后三峡下泄水沙过程变化	266
参考文献	268
第6章 长江中下游冲刷与河势调整	270
6.1 三峡水库下游水沙条件及河床冲淤变化	270
6.1.1 出库水沙过程与沿程水沙条件	271
6.1.2 沿程河床冲淤及河床组成变化	277
6.2 沙卵石河段冲刷与枯水位下降	280
6.2.1 冲淤与枯水位的关系	281
6.2.2 冲刷极限状态的枯水位与局部比降	290
6.2.3 重点浅滩变化趋势	300
6.3 荆江河段冲刷及河势变化	313
6.3.1 冲刷过程中的河势变化	313
6.3.2 重点浅滩段变化	329
6.4 分汊河段演变特点及冲刷过程中河势变化	353
6.4.1 分汊河道演变规律及影响因素	354
6.4.2 分汊河段冲刷特点	355
6.4.3 典型分汊浅滩段演变	357
参考文献	364
第7章 长江中游河湖水沙输移与洪灾相互作用机理	366
7.1 长江中游致灾性洪水的组成与遭遇特性	366
7.1.1 洪水来源与组成	367
7.1.2 洪水遭遇特性	371
7.1.3 长江中游设计洪水	375
7.2 长江中游江湖水沙分配调整与洪灾加剧	385
7.2.1 长江中游水沙分配调整与河湖形态变化	385
7.2.2 泥沙淤积对长江中游洪水蓄泄能力的影响	390
7.3 三峡工程建成后长江中游河床冲淤与水位变化	395

7.3.1	三峡水库蓄水以来荆江河段冲刷量分析	396
7.3.2	三峡水库蓄水后河床冲淤对城陵矶水位的影响	404
7.3.3	三峡水库蓄水后长江中下游长河段冲刷数值模拟	410
7.3.4	三峡水库蓄水后荆江三口分流比变化趋势	421
7.4	三峡工程建成后长江中游洪灾发展趋势	436
7.4.1	三峡水库对长江中游的防洪效应	436
7.4.2	三峡水库蓄水对汉江堤防的威胁	443
	参考文献	447
第8章	长江中下游河床变形与水流条件控导原则	450
8.1	长江中下游河道崩岸机理及判别方法	450
8.1.1	长江中下游崩岸分类及其特点	450
8.1.2	稳定岸坡的计算方法	455
8.1.3	稳定岸坡影响因素分析	458
8.1.4	稳定岸坡变化规律	463
8.1.5	稳定岸坡合理性检验	473
8.2	长江中下游冲刷过程中航道整治原则与参数	476
8.2.1	设计水位变化	477
8.2.2	整治水位及整治宽度变化	492
8.3	水库下游不同河型河势控导原则	519
8.3.1	河势控导原则	519
8.3.2	整治建筑物布置	521
	参考文献	525
第9章	长江水沙调控应用与实践	527
9.1	长江水沙调控体系	527
9.1.1	长江水沙调控需求	527
9.1.2	长江水沙调控原则	532
9.1.3	长江水沙调控体系分解与集成	534
9.2	长江上游水库调度	537
9.2.1	三峡水库蓄水过程优化调度	537
9.2.2	梯级水库水沙联合优化调度	550
9.3	长江中游洪水调度	558
9.3.1	长江中游洪水调度原则	558
9.3.2	长江中游蓄滞洪区的简化	562
9.3.3	长江中游荆江洞庭湖区河网结构的形成	563
9.3.4	模型验证	566

9.3.5 长江中游水库及蓄滞洪区联合洪水调度	574
9.4 长江中下游崩岸控制	583
9.4.1 三峡水库蓄水后深泓冲刷深度分析	583
9.4.2 三峡水库蓄水后崩岸预测方法	591
9.4.3 三峡水库蓄水后长江中下游可能崩岸位置分布	593
9.4.4 三峡水库蓄水后实测资料检验	606
9.4.5 三峡水库蓄水后长江中下游河道崩岸防治方略	613
9.5 长江中游沙卵石河段治理	615
9.5.1 三峡水库蓄水后沙卵石河段的航运问题	615
9.5.2 芦家河坡陡流急整治	616
9.5.3 宜昌与昌门溪水位下降控制	628
9.6 长江中下游沙质河段航道整治	636
9.6.1 三峡水库蓄水对沙质河段洲滩演变的影响	636
9.6.2 三峡水库蓄水后沙质浅滩的航道问题及治理思路	640
9.6.3 典型浅滩整治实例	642
参考文献	657

第 1 章 长江水沙调控的现状与趋势

开发利用长江流域丰富的水资源,不仅可提供大量电力、改善我国能源结构、缓解能源紧缺问题,而且有利于促进西部经济社会发展、提高中下游防洪能力、实现水资源优化配置,以及向北方跨流域调水、解决北方干旱缺水问题。然而,随着水资源开发力度的增加,工程规模和体系不断扩大,必然将对天然的径流、泥沙过程造成较大干扰,对上、中、下游的河流环境造成明显影响,甚至危及河流系统功能整体健康。世界大河流域水资源开发的经验表明,对河流的水沙过程进行科学有序的调节,将其控制在合理的限度之内,是避免负面效应的有效途径。长江流域水资源极为重要,保持流域河流系统功能健康更加重要。如何在水资源开发利用的同时,避免负面效应或灾害的发生,已成为最急迫需要研究和解决的重大关键问题。本章结合长江流域水资源开发的现状和趋势,论述了长江水沙调控的必要性和可行性,结合当前相关领域的发展趋势以及长江流域的实际特点,分析了长江水沙调控的特殊性。

1.1 长江流域水资源开发现状与发展趋势

长江是我国第一大河,流域内 80% 以上的土地面积适宜于人类的生活、生产和各类社会经济活动,在全球流域面积大于 100 万 km^2 的大江大河中举世无双。长江横跨我国东、中、西三大经济区,东达太平洋,西控大西南,区位优势无与伦比。长江经济带迅速崛起,发展成为我国基础原材料、机电工业和高新技术等优势产业集中地、现代金融密集区,比较优势全国领先。随着西电东送、西气东输、青藏铁路和南水北调等与长江流域息息相关的四大战略性工程的实施,随着以上海为龙头,以南京、武汉、重庆为中心的开放型一体化经济的迅速发展,长江流域的战略地位更加重要。

经济社会的不断发展必然带来越来越高的资源和能源需求。长江流域丰富的水量与水能资源,是维持流域乃至国家经济社会稳定发展的基本保障。从水资源蕴藏量来看,多年平均长江流域水资源总量为 9616 亿 m^3 ,占全国水资源总量的 36%,其中地表水资源 9560 亿 m^3 ,每平方千米水资源量 54 万 m^3 ,为全国平均值的 1.9 倍,是我国水资源较为丰富的地域之一。从水能资源蕴藏量来看,长江流域水系庞大,河川径流丰沛,落差达 5400m,水能理论蕴藏量为 2.68 亿 kW ,约占全国水能资源的 40%;可能开发的约为 1.97 亿 kW ,占流域总量的 89%,占全国可

能开发水能资源的 53.4%。

众所周知,长江经济带的发展依赖于水,西部大开发成败的关键在于水,解决我国北方干旱缺水问题的“南水北调”工程的成败仍在于水,长江的水资源是这些重大经济发展战略实施中最重要的战略资源。长江流域的水能资源可开发率远远超过世界其他大河,充分开发利用长江水能资源,无疑对促进西部大开发、改善我国能源结构、促进西电东送等均有不可替代的作用。

1.1.1 水量资源开发利用趋势

水资源是世界各国公认的最根本、最基础的战略资源。虽然长江流域水资源丰富,但目前长江流域的用水、耗水量约为总水量的 20%,大大低于国际通行的 35%~40% 的标准,尚有较大的开发余地,而我国的水资源分布呈现南多北少、汛枯分明的不均衡局面,进一步开发长江水资源对于提高流域乃至全国的水资源保障能力具有重要意义。

第一,长江流域的洪水是中华民族的心腹之患。据历史记载^[1],从公元前 206 年(西汉)至公元 1911 年(清末)的 2117 年间,长江共发生洪灾 214 次,平均约 10 年一次。其中,唐代平均 18 年一次,宋、元时期平均 5 年一次,明、清时期平均 4 年一次。近代以来,长江中下游连续发生 1931 年、1935 年、1954 年、1998 年特大洪水,严重威胁着两岸人民群众生命财产安全。因而,利用水资源调节工程对径流过程实施调节,降低洪灾风险,是保障流域经济、社会可持续发展的迫切需要^[2]。

第二,长江径流主要由降雨产生,季风对水资源的年内、年际分配影响很大。以宜昌以上的长江上游为例,5~9 月主汛期的降雨量占了年均总量的 79.1%,枯期仅占 20.9%,而大气环流异常常常造成周期性的干旱事件。研究表明,我国的西南、长江中下游等区域存在以 5~20 年为周期的春季干旱缺水^[3],2004 年大气环流异常导致长江南部出现 1951 年以来最为严重的秋季干旱事件^[4],2006 年 7~8 月持续的高温与少雨导致长江上游出现大范围严重干旱,长江上游 7 月份来水量比历史同期平均值偏少超过 40%,长江上游水位大幅下降,8 月 9 日宜昌出现历史最小流量。这些事实表明,长江流域内的水资源利用程度仍需提高,尤其需要更加完备的水资源保障工程体系来提高水资源调蓄能力,使汛期洪水能够资源化^[5],增加可供水源。

第三,我国水资源分布总体呈现南多北少的局面,北方地区自 20 世纪 80 年代以来水资源短缺的矛盾日趋严重,采用南水北调工程实现跨流域调水,将长江流域一部分水量输送至北方可缓解该区域的水资源短缺。根据规划,南水北调工程从东、中、西三条线路合计年调水量 380 亿~480 亿 m^3 ,占长江水资源总量的 4% 左右^[6],相当于在北方增加一条黄河的供水量。

第四,经济发展、人口增长对水资源的需求越来越高。根据预计,至 2020 年全

国年用水总量将达 6000 亿~6500 亿 m^3 , 是 2002 年的 1.1~1.2 倍^[7]。长江流域人口密集度高, 经济发达, 需水增加更快。相关预测表明, 长江流域 2010 年总需水量约 3029 亿 m^3 , 2030 年总需水量达 3926 亿 m^3 , 远景水资源利用率将可能达到 40%~50%^[8]。如果不安排新的供水工程, 开源与节流并举, 水资源供需矛盾将会随着经济发展而日益突出。

1.1.2 水能资源开发利用趋势

除了水资源利用方面的需求之外, 开发长江水能资源也是我国经济社会发展的必然趋势。近几十年来, 我国的 GDP 年增长率持续保持在 8% 以上, 预计达 2020 年国内生产总值要比 2000 年“翻两番”。经济增长必然伴随能源需求的高速增长, 根据 2003 年国内发电总装机容量 3.91 亿 kW 计算, 估计 2020 年装机容量将达 9.5 亿 kW 以上。我国的能源结构组成中, 煤电占 74% 左右, 居于主导地位。然而, 我国的人均煤炭占有量只有世界平均水平的 55%, 煤炭属于不可再生资源, 按照当前的开采速度 17 亿 t/a, 80 年后我国的煤炭资源将会耗竭。除此之外, 火力发电还造成环境污染、交通运输等方面的压力, 从发达国家的经验来看, 采用水力发电改善能源结构成为一种普遍趋势。我国的水能资源居世界第一位, 人均接近世界平均水平, 水能是我国现有能源中唯一可以大规模开发的可再生能源, 其开发兼有一次能源建设与二次能源建设的双重功能, 并且有利于减少环境污染、缓解交通压力。然而, 目前我国的水电装机容量仅占全国电力的 24%, 开发程度仅 22.3%, 远远滞后于世界其他国家(见表 1.1)。因此, 经济发展和能源结构决定今后 15~20 年内将是我国水电的快速发展期^[9]。

表 1.1 世界各国水能开发情况

国家	可开发总出力/亿 kW	已开发容量/亿 kW	开发比/%	备注
中国	4.48	1	22.3	2004 年资料
美国	1.943	0.84	43.3	1986 年资料
加拿大	1.529	0.66	42.9	1997 年资料
巴西	2.13	0.55	25.6	1997 年资料
俄罗斯	2.69	0.62	23.1	1986 年资料
印度	0.84	0.22	26.2	1997 年资料
日本	0.35	0.33	95.0	1986 年资料
法国	0.22	0.21	92.1	1986 年资料
挪威	0.38	0.26	58.4	1997 年资料
意大利	0.19	0.18	93.0	1986 年资料
西班牙	0.29	0.18	61.6	1997 年资料

长江流域是我国水能资源的“富矿”，流域内可开发水能资源 1.97 亿 kW，占全国的 53.4%，而煤炭和石油资源蕴藏量仅为全国的 7.7% 和 2.4%，水能占长江流域能源资源总量的 50% 以上^[10]。据统计，长江流域的水能全部开发之后，年均发电量将达 10 275 亿 kW·h，相当于 12 个三峡电站，每年可节省发电用煤 5.6 亿 t，少排 CO₂ 约 12 亿 t、SO₂ 约 2400 万 t 以及大量废渣、飘尘^[6]。因此，长江流域的能源分布情况决定了在电力结构上必须“因地制宜”，把优先发展水力发电作为搞好长江流域能源平衡的战略性措施，加快水能资源开发。除此之外，长江流域的可开发水能资源主要集中于上游，占全流域 89%，加快西部水电开发，加大“西电东送”的力度，也是推进西部开发，实行区域协调发展战略最有效最可行的战略措施。

综上所述，今后一段时期内长江流域水资源（包括水能资源）开发将是大势所趋，优先开发建设综合效益大的大型工程将是其主要途径。实际上，大坝是具有防洪、水资源开发、清洁能源生产、航运等综合功能的基础设施，长江上游大型水库群的建成，不但使长江流域的水资源保障工程体系得到加强，而且能够满足本流域综合治理和开发的多项需求。

1.2 长江流域水沙输移特点及其效应

长江流域呈东西长、南北短的狭长形，其中宜昌以上的上游长度约 4500km，控制流域面积 100 万 km²。长江上游主要流经山地、丘陵，河谷深切，河道窄深，比降较大，河床稳定；长江中下游进入冲积平原，河道比降变小，水流平缓，河道边界易于冲淤变形。这些地质、地貌特点决定了长江水沙来量主要源于上游，而天然情况下水沙输移引起的边界条件变化，主要集中于中下游的冲积平原区。

1.2.1 来水来沙特点

长江流域内雨量丰沛，多年平均降雨量为 1100mm 左右，降雨量自西向东递减，降雨主要集中于夏秋季节，4~10 月的雨量占全年降雨量的 70% 以上。由于上游面积占了流域面积的绝大部分，因而尽管中下游存在着洞庭湖水系、鄱阳湖水系以及汉江等众多支流沿程入汇，但宜昌水量仍占大通入海水量的 50% 左右（见表 1.2），洞庭湖、鄱阳湖各占大通流量 16%~22%。由于支流众多，干流相继承泄各支流来水，因而长江干流径流年际变幅不大，变差系数为 0.11~0.16。长江干流径流的多年变化主要是丰枯水年的交替。以出现频率 $P < 25\%$ 者为丰水年， $P > 75\%$ 者为枯水年，对长江各站年平均流量做频率分析，表明在宜昌、汉口两站 100 年左右的系列中，连续丰水期和枯水期交替出现各有 6~7 次，平均 15~16 年出现一次连续丰水期与连续枯水期的循环过程。

表 1.2 2003 年前长江干流多年水沙特征统计值

项目	宜昌	汉口	大通
年均径流量/亿 m^3	4382	7112	9051
年均输沙量/亿 t	5.01	4.04	4.33
多年平均含沙量/(kg/m^3)	1.14	0.573	0.486
多年平均中值粒径/mm	0.022	0.018	0.017

尽管长江中下游的洪水径流也主要来源于上游,但洞庭湖、汉江、鄱阳湖几大支流水系的作用也不可忽视。一般情况下,上游与中下游干支流洪水汇集时间先后错开,且中间有湖泊、河槽调蓄,不致酿成严重洪水,但由于洪水来源众多,相互迭加,自上而下使得洪水历时逐渐延长,洪峰缓涨缓落,宜昌站一次洪水过程在20~30d,汉口、大通超过50d。超长的洪水历时使得较长时段内江湖水位较高,一旦天气反常,上游洪水与中下游洪水遭遇,将造成溃口分洪的不利局面。

长江泥沙含量不大,但因径流量大,总输沙量仍然较大。类似于径流量主要来源于上游的特点,长江干流来沙量也集中于宜昌以上,并且其集中程度较径流更加明显。从天然情况下多年平均的沿程含沙量变化来看,干流屏山站含沙量为 $1.71\text{kg}/\text{m}^3$,随着沿途嘉陵江、乌江水量不断入汇,至宜昌站含沙量减为 $1.20\text{kg}/\text{m}^3$,进入中下游后,随着洞庭湖四水、鄱阳湖水系低含沙水流的不断汇入,干流含沙量减小为 $0.5\sim 1.0\text{kg}/\text{m}^3$;从沿程的悬移质输沙量来看,屏山站为2.4亿t,宜昌为5.3亿t,大通站多年平均输沙量约4.7亿t。宜昌以下输沙量减小的原因主要在于中下游河湖系统的沉积所致,以洞庭湖为例,三峡水库蓄水前长江干流输入洞庭湖的泥沙占洞庭湖入湖沙量的77%~87%,大部分淤积在湖内,年淤积量超过1亿t。长江泥沙输移的年内特征主要表现为来沙量集中于汛期,宜昌站汛期输沙量占全年的85%~98%。其中,7~9月占57%~79%,较径流量更加集中。金沙江干流汛期(6~9月)输沙量占年输沙量的84.1%~97.5%,汛期与枯期相差6~40倍,其中最大月平均输沙量是最小月平均输沙量的80~3400倍。

长江的输沙量年际也存在波动,除了受径流量影响之外,与主要产沙区的降雨情况也紧密相关。宜昌以上的沙量来源主要集中于金沙江与嘉陵江流域,金沙江多年平均悬移质输沙量约占宜昌的46%,嘉陵江占27%,两者合计占宜昌站的73%,特大年份如1974年高达90%。由于产沙区较为集中,因而很大程度上这两个流域的降雨影响着年际沙量的波动,汛期降雨量大小、时空分布直接影响水沙量的组合搭配,这些将引起中下游河床年内、年际的冲淤变形。

1.2.2 河湖边界的冲淤特点

长江自宜昌出三峡进入中下游冲积平原区,其中宜昌—江口为山区河流向平

原河流的过渡段,河床组成主要为沙卵石。该河段内两岸多低山丘陵,河岸抗冲性强,河道外形稳定少变,在荆江裁弯、葛洲坝蓄水等原因引起的冲刷过程中,河床调整主要表现为纵向冲刷引起的深泓变化和水位降低。

长江中下游自江口以下为沙质河床,其中又以城陵矶为界,上下游分别呈现弯曲和分汉的河型特征。枝城—城陵矶河段习称荆江,该河段的演变特征主要表现为凹岸冲刷、凸岸淤积引起的弯顶曲率、顶冲点位置等方面变化,尤其以藕池口以下的下荆江河段最为典型,历史上不断蜿蜒摆动,反复裁弯取直。除此之外,由于沙质河床抗冲性弱,易于因外界条件的变化而产生明显冲淤变化,20世纪60年代末至70年代初实施的下荆江人工裁弯工程缩短河长78km,造成了剧烈的溯源冲刷,裁弯前后沙市枯水位下降达1m以上。虽然随着两岸护岸工程的逐渐完善,近期以来江口以下弯曲河段的平面轮廓已比较稳定,但以边心滩切割消长,主泓移位为主的局部河势变化一直存在。

城陵矶以下分汉河段的形成与两岸分布的低山、基岩等控制性节点有密切关系,呈现出顺直放宽型、鹅头型等不同特征。除了鹅头型分汉段周期性的主支移位之外,长江中下游的分汉河段比较稳定,汛、枯期之间支汉分流比周期性调整,使得支汉能够长期维持冲淤平衡。然而,由于泥沙易于在分汉段进出口的分汇流区淤积,在一些水沙条件较为不利的年份,汉道进出口会形成碍航的浅区。

总体来看,长江中下游的各段河道经历了复杂的历史演变过程,虽有部分山丘阶地的控制而没有发生重大迁徙和改道,但主流摆动、河道形态的变化仍然十分频繁。近代以来,两岸的堤防、护岸工程逐渐完善,河道摆动逐步得到控制,长江的总体河势轮廓已基本稳定,但一些局部河段的河势变化依然存在,主要表现为主流局部摆动,主支汉易位,江心洲滩的切割、淤并,弯曲河段顶冲点摆动等,这些变化与水沙条件的年际波动,尤其是一些特大洪水事件有关。

长江中下游河道边界变化的另一种主要形式是泥沙淤积引起的河湖关系调整。长江中下游沿岸分布着众多通江湖泊与洼地,这些湖泊主要位于古云梦泽经长江泥沙长期淤积而形成湖积平原上,其中以洞庭湖、鄱阳湖及江汉湖群最为典型。这些湖泊与长江干支流之间存在着复杂的连通关系,对于长江洪水起着重要的分泄、调蓄、滞纳作用,同时也是泥沙沉积的主要场所。长期以来,随着干支流泥沙的逐年淤积,湖泊变浅,洲滩不断被围垦开发利用,湖泊面积日益减小,其调蓄洪水的功能日趋减少。目前,平原区内最大的两个湖泊——洞庭湖和鄱阳湖仍与长江相通,它们的演变与长江河道演变息息相关,同时也制约着区域内防洪形势、生态环境等方面发展趋势。

1.2.3 人类因素对水沙输移及河床演变的影响

长江流域开发历史悠久,各种人类活动显著影响着流域内的水沙输移过程及