





重庆交通大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：胡鹏

日期：2011年5月24日

重庆交通大学学位论文授权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权重庆交通大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。同时授权中国科学技术信息研究所将本人学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并进行信息服务（包括但不限于汇编、复制、发行、信息网络传播等），同时本人保留在其他媒体发表论文的权利。

学位论文作者签名：胡鹏

指导教师签名：杨胜发

日期：2011年5月24日

日期：2011年5月15日

本人同意将本学位论文提交至中国学术期刊（光盘版）电子杂志社 CNKI 系列数据库中全文发布，并按《中国优秀博硕士学位论文全文数据库出版章程》规定享受相关权益。

学位论文作者签名：胡鹏

指导教师签名：杨胜发

日期：2011年5月24日

日期：2011年5月15日



摘 要

三峡工程是综合治理与开发长江的关键性工程,具有巨大的防洪、发电、航运等综合效益。其蓄水运行以后,库区水位抬高,流速降低,库区河段内的水流特性发生改变,对库区内的泥沙运动、河床形态、水流流态等产生较大影响。认识库区泥沙运动的规律直接关系到三峡工程的治理、开发、保护等一系列问题。

本文在分析三峡水库蓄水运行后库区观测资料的基础上,采用数学模型对三峡水库成库初期库区的泥沙淤积的形态、条件及运动规律进行了分析研究。

首先,通过对三峡工程前后各典型水文站的水沙条件变化、河道冲淤特性变化以及淤积物分布变化分析得到,近年来流域径流量总体变化不大,而输沙量明显减少,泥沙变细。蓄水前库区冲淤基本平衡,蓄水后则处于累积性的淤积状态。

其次,以三峡工程 135-139m 蓄水运行阶段作为一个系列。以库区河段水深的不同以及淤积形式的不同,将整个库区河道划分为了三个部分。库区深水段淤积形态表现为深槽平淤;浅水段淤积与河道形态相关;最小水深的变动回水区段则冲淤相间。并总结了各部分河段的河床演变规律,提出了库区各段泥沙淤积的判别条件。库区深水段,发生淤积的最大临界流速为 1.2m/s ,小于此值表现为淤积状态。库区浅水段,当临界流速值 $U > 2.1\text{m/s}$,断面不发生淤积;当 $U \leq 1.2\text{m/s}$,断面一般淤积;而当平均流速处于两临界值之间 $1.2\text{m/s} < U \leq 2.1\text{m/s}$ 时,若为连续弯道或者分汊放宽河道,则发生淤积,否则不淤积。变动回水区段,因没有明显的累积性淤积,只是判断当断面平均流速 $U \geq 2.1\text{m/s}$ 时,一般不发生淤积。

最后,针对库区浅水段河道形态淤积,对连续弯道进行了三维水流数值模拟。结合断面淤积资料分析:大流量下连续弯道主流“走直”,环流将主流区所挟带的细颗粒泥沙从中剥离,并随环流运动。泥沙会被挟带至弯道凸岸下游一侧的缓流区落淤。

关键词: 三峡库区; 河床演变; 数学模型; 淤积判别; 连续弯道



ABSTRACT

Three Gorges Project is the key projects that comprehensively develops the Yangtze River and reservoir management. The project has a huge economic benefits such as flood control, power generation and shipping. After the impoundment, the water level of the reservoir has raise, the velocity reduces, and the flow characteristics of the reservoir aera has changed. It has a great impact on the sediment deposition and erosion, channel morphology, and flow velocity of the reservoir area. So learning about the laws of reservoir sediment transport is directly related to the management, development, protection of the Three Gorges project.

Based on the analysis of the observational data about the Three Gorges Reservoir after impoundment, established the mathematical models to used to research the morphology, conditions and the law of sediment deposition in the reservoir area.

Through analyzing the change of runoff and sediment process, scouring-deposition in quantity and the process of deposit distribution which before and after the three gorges project in typical hydrological station. we known that the basin runoff change rarely in recent years, and sediment discharge reduced obviously, the particle size is diminution. Before the impoundment, scouring and deposition is balanced basically in reach. After the impoundment, it is deposition.

Secondly, take the series of the 135-139m water storage operation phases of the Three Gorges Project (TGP) as an example. According to the different water depth as well as different forms of scouring or deposition, the river channel of the reservoir is divided into three sections: deep-water section, shallow section and the backwater areas. Deposition form in deep-water section is horizontal deposition in the groove of river; in shallow section, the silting is related with the riverway morphology; the backwater areas is alternately deposition and scouring. Besides, this thesis also summaries the rules of river bed change that sediment deposition in all sections. As to deep-section of the reservoir, the maximum critical flow velocity is 1.2m/s, if the value is smaller than that, deposition will happen. As to the shallow section of the reservoir, When the critical velocity is greater then 2.1m/s, deposition will not occur; When the value is smaller then 1.2m/s, the section is deposition; When the velocity in between 1.2m/s and 2.1m/s,



if there are continuous river bend or branching channels, siltation will be occurs, otherwise it doesn't happened. As for the backwater areas, because of there is not alternately deposition, we can only judged that when the average velocity is greater then 2.1m/s, the deposition does not occur.

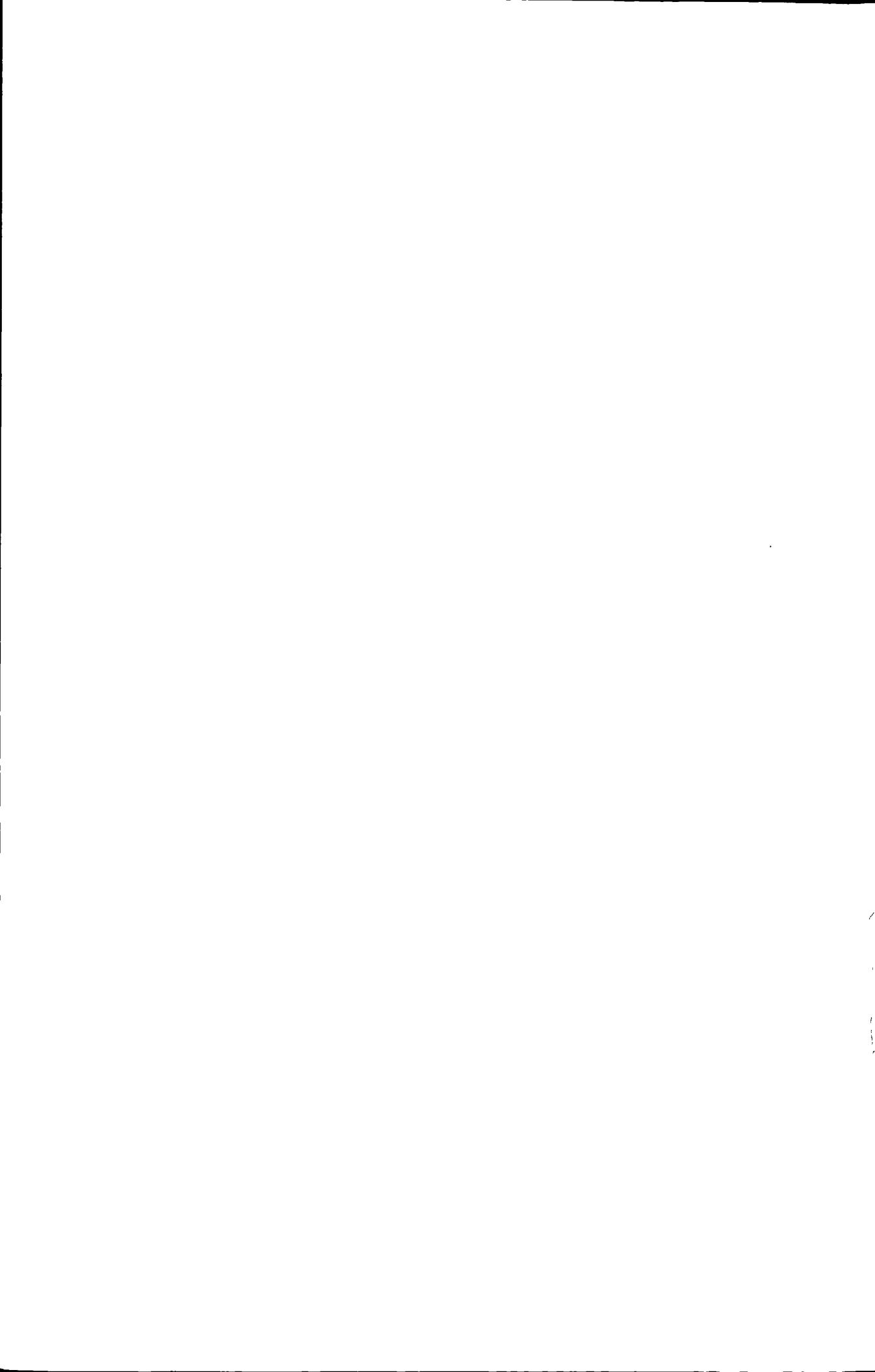
Finally, according to deposition of the shallow section in reservoir. Established the three dimension mathematical model for continuous river bend. Combined with fixed measurement section analysis: the circulation flow will make the small particles sediment from mainstream, and with circulation flow move. because of the mainstream will be "go straight" in continuous curve reach, when the quantity of flow. So the sediment will carry over to small velocity areas, it located in convex bank of downstream in the continuous river bend reach and sink down.

Key Words: three gorges reservoir; bed development; mathematical model; discriminant of sedimentation; continuous river bend

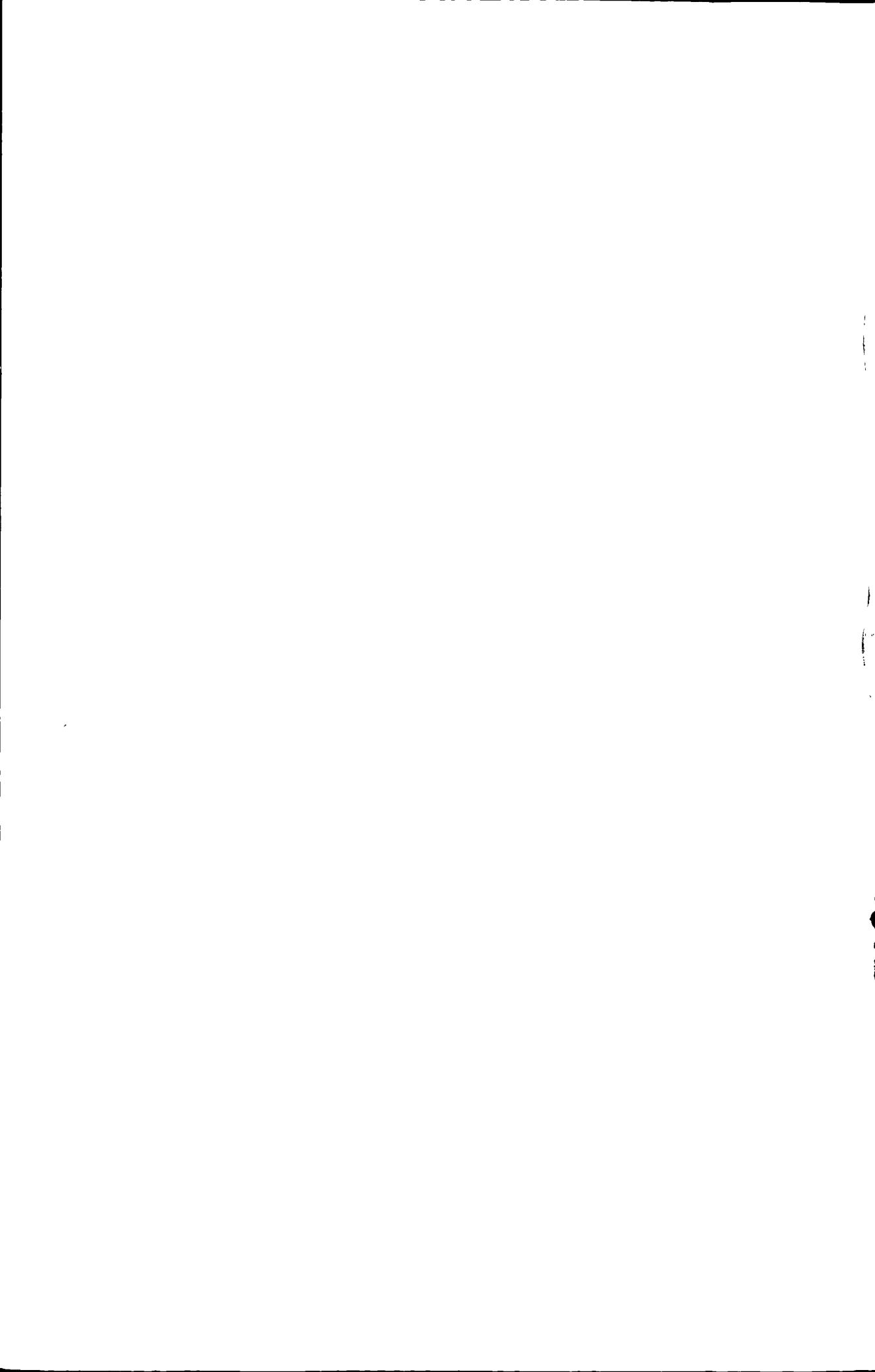


目 录

第一章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 三峡库区泥沙淤积认识及进展	2
1.2.1 上游来水来沙变化研究成果	2
1.2.2 三峡水库淤积量计算研究成果	2
1.2.3 三峡水库变动回水区段物理模型试验成果	3
1.2.4 三峡蓄水以来原型观测分析报告	4
1.3 研究内容及论文创新性	4
1.3.1 研究内容	4
1.3.2 论文创新性	5
第二章 水沙条件变化及泥沙冲淤特性分析	6
2.1 进出库水沙特性	6
2.1.1 入库水沙特性	6
2.1.2 库区水沙特性	7
2.1.3 出库水沙特性	8
2.2 三峡水库泥沙冲淤特性	9
2.2.1 蓄水前冲淤情况	9
2.2.2 蓄水后冲淤总量变化特性	10
2.3 淤积物干容重及床沙变化	14
第三章 库区河床演变规律分析	17
3.1 库区深水段	17
3.2 库区浅水段	22
3.2.1 弯曲型河道	23
3.2.2 分汊型河道	26
3.3 变动回水区	33
3.4 小结	35
第四章 库区泥沙淤积判别	37
4.1 一维模型建立	37
4.1.1 基本方程	37
4.1.2 水头损失计算	38
4.2 模型验证	39



4.2.1 验证资料	39
4.2.2 验证结果	43
4.3 分析指标的选取	48
4.3.1 代表流量的选取	48
4.3.2 判别指标的选取	49
4.4 三峡成库后库区淤积判别	50
4.4.1 库区深水段	51
4.4.2 库区浅水段	52
4.4.3 变动回水区	53
第五章 库区连续弯道三维数值模拟	55
5.1 弯道水沙动力特征	55
5.1.1 弯道水流运动特征	55
5.1.2 弯道泥沙运动特征	56
5.2 数值模拟方法	57
5.2.1 水气两相流的 VOF 模型	57
5.2.2 控制方程	57
5.2.3 数值求解方法	59
5.3 库区连续弯道泥沙淤积分析	61
5.3.1 水动力轴线分析	61
5.3.2 连续弯道水流结构与泥沙淤积分析	62
5.3.3 小结	73
第六章 结论与展望	75
6.1 结论	75
6.2 展望	76
致谢	77
参考文献	78
在学期间发表的论著及取得的科研成果	82



第一章 绪论

1.1 概述

三峡水库于2003年6月1日开始蓄水。2003年6月-2006年8月为135（汛期）~139（非汛期）m调度蓄水运行期，回水末端位于涪陵李渡附近；2006年9月至2008年9月，库水位按144（汛期）~156（非汛期）m调度方式运行，回水末端到达铜锣峡附近；2008年9月开始，三峡水库按175m试验性蓄水方式运行，即汛期水位按145m运行，非汛期蓄水位升至或接近175m，具体蓄水过程见图1.1。2010年10月26日，正式进入145（汛期）~175（非汛期）m正常运行期。

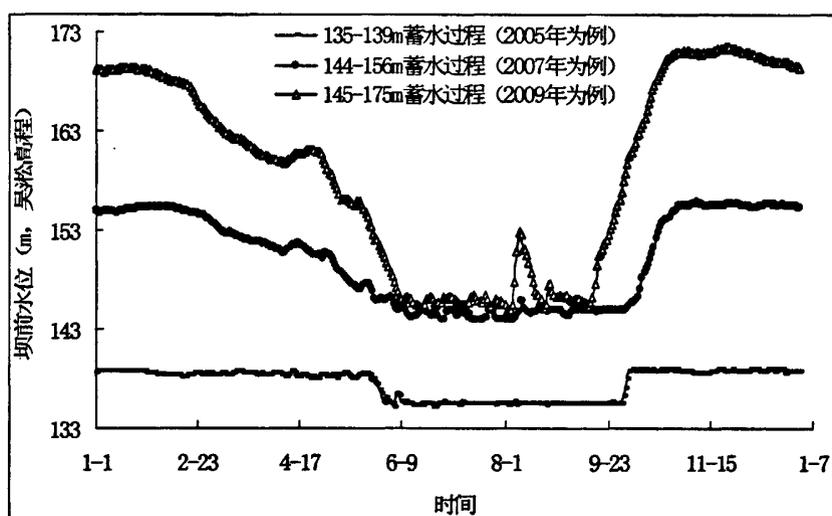


图 1.1 三峡蓄水以来坝前水位过程图

Figure 1.1 The water level before dam for impounding scheme of TGR

三峡工程举世瞩目，是一项伟大的工程，是治理开发长江的关键性骨干工程，具有防洪、发电、航运和供水等综合效益。一直是国内外科研机构和相关专家关注的重点工程。

1.2 选题背景及意义

本论文是依托西部交通建设科技项目“三峡工程库尾航道演变规律研究”对三峡水库蓄水期库区泥沙淤积展开研究。

自三峡水库处于论证阶段以来，相关单位就以理论分析和模型试验及模拟等

手段对其水库蓄水运行后库区泥沙的淤积进行了大量研究。但是限于三峡泥沙问题的复杂性、不确定性以及本学科的发展水平,对于所取得的三峡成库后具体的泥沙淤积形态、淤积量及泥沙运动规律等各项成果尚不完善,它需要成库后的实际资料来加以检验、修正。

三峡工程历七年三期蓄水(135m、156m、175m),现已正式进入正常蓄水调度运行阶段。一直以来所取得的库区原型观测资料为我们提供了真实且宝贵的资料,使得我们对库区泥沙淤积的认识研究进入了一个新的阶段。

1.3 三峡库区泥沙淤积认识及进展

三峡工程泥沙研究工作从1958年就已全面开展,至今已有50余年。针对水库上游来水来沙情况、库区泥沙淤积及重点淤沙浅滩的冲淤变化等问题,国内众多科研机构进行了大量研究,成果较为丰富,以下对其作一个简要介绍:

1.3.1 上游来水来沙变化研究成果

长江水利委员会水文局^{[1][2]}、长江科学院^{[3][4]}等单位对此作了大量工作。

1958-1985年,长江上游三峡库区来沙量(包括输沙量和含沙量)年际变化,呈不规则的周期性变化,连续几年的大沙或连续几年小沙相间出现,主要影响因素是年际降雨量、雨强以及降雨面积和地区分布的变化,各站的泥沙变化过程与径流过程极为相似,且水沙关系较为稳定,没有系统偏离。

近年来,通过对长江上游干流水文站多年的水文资料的搜集、整理,对长江上游水沙变化的过程、变化特点和变化趋势作了分析。对上游主要支流金沙江、沱江、岷江、嘉陵江及乌江流域降水量、水土保持、水利工程拦沙做了详细分析,总结了三峡水库多年来入库水沙情况。在长江上游水系中,金沙江沙量有所增大,岷江、沱江、嘉陵江和乌江输沙量则均有所减小,其中尤以嘉陵江输沙量减小最为明显;上游干流悬移质颗粒中值粒径均表现为沿程变细;通过对长江上游地区新建大中小型水库拦沙作用调查,水库拦沙对各出口控制站的平均减少量为7600万t左右,其中嘉陵江流域最大。

对1966-2001年寸滩站水沙资料进行分析得到:沙质推移质的推移量总体呈现水大沙大、水小沙小的规律,近期推移量有所逐渐减小;0.25-0.5mm粒径组是沙质推移质的主要组成部分。

1.3.2 三峡水库淤积量计算研究成果

水利水电科学研究所^{[5]-[8]}采用1961年至1970年水文系列计算了三峡水利枢

组正常蓄水位 160m 至 180m 共 10 个方案的水库（悬移质）淤积，其中 175m 方案运行 120 年三峡库区累计淤积 200 多亿 m^3 ，万州至涪陵长江淤积 117.5 亿 m^3 ，涪陵至长寿会淤积 12.5 亿 m^3 ，长寿至朝天门河段会淤积 7.76 亿 m^3 。并且指出随着水库累积性淤积，水位也会抬高。按 145-175m 方案运行后 25 年，在寸滩流量 $82800m^3/s$ 时，涪陵水位抬高 6.3m、朝天门水位抬高 2.5m；运行 50 年，涪陵水位抬高 8.8m、朝天门水位抬高 3.7m。

在三峡水库运行三年后，根据 139m 蓄水运行成果，以 1961-1970 年系列年和 1991 系列年作为入库水沙控制条件，根据水库运行方式、汛期调节库容、结合上游是否建电站等布置了 12 个计算方案，长江科学院等 4 家单位分别建立了三峡水库泥沙淤积一维数学模型对三峡库区淤积进行了计算。坝前水位逐步上升方案 B（2003-2006 按 139-135m 蓄水；2006-2009 按 156-140-135m 蓄水；2009-2013 年按 172-152-143m 蓄水；2013 年以后按 175-145m 蓄水）运行至 10 年末三峡库区累计淤积 30.62 亿-31.51 亿 m^3 ，运行 100 年末淤积量为 168.17 亿-174.16 亿 m^3 。

1.3.3 三峡水库变动回水区段物理模型试验成果

南京水利科学研究院^{[9][10]}按窦国仁全沙模型相似理论，对三峡变化回水区段剪刀峡至青草背河段（采用平面比尺 1: 250，水深比尺 1: 100）进行了物理模型试验（采用 1991 至 1970 年水文系列循环试验）。试验结果表明：当水库运行到 80 年，长江段淤积量为 10.2 亿 m^3 ，主要淤积在边滩、支汊、副槽和弯道凸岸以及回流沱内。牛屎碛在水库运行后期燕尾碛、五布政连成一片，形成了广大的淤沙边滩，主流直指牛屎碛面，成为稳定的单一河槽；金川碛河段主要淤积在金川碛面和左副槽，出现了主、副槽移位的河势；王家滩河段进口及出口淤积严重，北槽菜盘子淤积成一片，南槽淤积较少河势稳定。

长江科学院^{[11]-[14]}于 1988 年对变动回水区铜锣峡河段进行了物理模型试验，试验结果表明：野土地河段 175m 运行中后期，其深槽会呈现累积性淤积，一般年份枯水期淤沙不能全部冲走，航槽约右移 100-200m；水葬至麻雀滩淤积形成大边滩，175m 方案深槽右移约 150m，但水深足够，不影响通航。红花碛河段有较大累积性淤积，且淤积向深槽部位发展延伸，但 175m 方案深槽累积性淤沙不多，对航道水深、航宽均无影响。

天津水运工程科学研究所^{[15]-[17]}采用 80 个水文年对三峡工程回水变动区洛碛-长寿河段做了 160m、170m、156m 及 175m 调度方案的动床模型试验。根据试验结果，175m 方案运行初期 20 年末洛碛至长寿河段悬沙淤积总量为 1353 万 m^3 ，其中上、下洛碛、风和尚、灶门子 4 个险滩淤积总量为 675 万 m^3 ，占全河段淤积总

量的 50%，各险滩均有累积性淤积，全河段只有上、下洛碛航槽位移，位移后的新航槽较顺直，但航槽内有五金堆和金钱罐等礁石区流态紊乱。水库运行中后期，泥沙累积性淤积量增加，全河段淤积量第 74 年末达 1.7 亿 m^3 ，4 个滩段淤积量为 4245 万 m^3 ，大部分悬移质淤积于边滩、边滩尾及岸边凹洼处，第 74 年各滩段及全河段悬移质淤积基本处于平衡。全河段除上、下洛碛航槽继续向河心位移外，还有忠水碛左汊枯水淤废而改走右汊及木鱼碛航槽。

武汉水利电力学院^{[18]-[20]}采用平面比尺 1:250 垂直比尺 1:150 对青岩子河段做了 160m、170m 及 175m 三个蓄水方案的动床模型试验。试验结果表明：青岩子河段主要淤积在沙湾、麻雀堆和燕尾碛 3 个部位，其淤积量约占全河段的 80%。金川碛前 20 年被淤满，以后平淤上升，后期淤积高程基本与金川碛齐平；蔺市弯道沿凸岸边堆平行淤升，后期滩顶高程达 156m。

1.3.4 三峡蓄水以来原型观测分析报告

三峡蓄水以来，多家单位对库区做了原型观测分析。

重庆交通大学、长江重庆航运工程勘察设计院^{[21]-[23]}从三峡蓄水以来一直对三峡库区航道泥沙原型进行观测分析，主要分析航道条件的变化及重点险滩的冲淤变化。龙王沱、牛屎碛、青岩子、王家滩、洛碛河段、大箭滩等变动回水区河段由于处在蓄水初期，汛期为天然航道，蓄水以来航道条件变化不大，其中龙王沱、牛屎碛及青岩子河段有所淤积，但量不大。

对 2003 年 3 月至 2004 年 5 月三峡库区土脑子河段进行了水沙同步观测及冲淤分析，冲刷主要出现在消落期。2004 年 3 月 6 日至 5 月 30 日共冲刷了 204.9 万 m^3 ，冲刷量主要集中在高程 130m 以下五羊背至土脑子 2.6km 河段（距坝里程 458.5—455.9km）范围内。但从 2003 年 3 月 3 日起算，经过汛期淤积和汛后及消落期冲刷，到 2004 年 5 月 30 止，土脑子 3km 河段尚剩余 13.3 万 m^3 泥沙未冲刷，其中高程 130m 以下的深槽尚有 28.2 万 m^3 泥沙未被冲刷。

长江水利委员会水文局^[2]对三峡库区（2003~2009）做了冲淤分析。从 2003 年 3 月至 2009 年 11 月三峡库区干流总淤积了 10.8 亿 m^3 ，皇华城河段淤积强度最大，单位河长淤积量为 1890 m^3/km 。

1.4 研究内容及论文创新性

1.4.1 研究内容

论文主要以实测资料分析与一维、三维数学模型相结合的研究手段，对三峡库区成库初期阶段，库区的泥沙运动规律进行分析研究，主要内容如下：

(1) 收集三峡工程蓄水运行以来水沙资料, 分析工程前后其径流量、泥沙以及淤积物特征的变化情况;

(2) 根据实测资料, 以 135-139m 蓄水阶段为一个研究系列, 对库区河段进行河床演变分析;

(3) 建立一维数学模型, 选取长江代表流量进行计算。根据各断面淤积特点, 选取判别指数, 提出库区各河段泥沙淤积的判别规律;

(4) 通过分析知道, 库区浅水段泥沙的淤积与河型有很大的关系, 弯曲型和分汊型河道容易发生淤积。弯曲型河道主要淤积在弯道凸岸下游一侧, 所谓“弯顶背部”淤积。鉴于此种情况, 建立三维数学模型, 探究库区连续弯道的泥沙淤积特点。

1.4.2 论文创新性

(1) 按照水深与泥沙淤积形态的不同, 将三峡库区划分为深水段、浅水段及变动回水区三个部分进行分析, 选取断面平均水深和流速关系作为判别指标, 提出了三峡库区泥沙淤积的判别方法。

(2) 对三峡库区连续弯道部分, 采用实测地形进行三维数学模拟。从连续弯道中水流结构出发, 对其泥沙运动及淤积情况进行了分析。

第二章 水沙条件变化及泥沙冲淤特性分析

2.1 进出库水沙特性

2.1.1 入库水沙特性

以清溪场站作为三峡水 135-139m 蓄水发电期的入库水文站,分析蓄水以来水库的入库水沙变化,各年水沙情况(见表 2.1)。其中,蓄水前多年平均径流量统计年份为 1951~1956、1983~2002 各年;输沙量统计年份为 1951~1955、1984~2002 各年。

(1) 2003 年清溪场站径流量和输沙量分别为 3918 亿 m^3 和 2.11 亿 t, 径流量与多年均值相当, 偏少 3%, 但输沙量偏少 53%。

(2) 2004 年, 三峡入库径流量和输沙量分别为 3898 亿 m^3 和 1.66 亿 t。与多年均值相比, 径流量基本相当, 仅偏少 4%, 但输沙量则偏少 63%。

(3) 2005 年, 三峡入库径流量和输沙量分别为 4296 亿 m^3 和 2.54 亿 t。径流量与多年平均值相比偏大 6%; 入库沙量比多年均值偏少 43%。2005 年清溪场的来水来沙情况属于中水小沙年, 年输沙量的增加主要是由于汛期 7 月、8 月来沙量增加。

(4) 2006 年重庆市遭遇百年一遇旱灾, 长江上游来流量偏小, 清溪场站 2006 径流量为 2780 亿 m^3 , 比蓄水前多年均值少 31%, 其中汛期 7、8、9 月分别偏小 38%、65%和 48%; 悬移质输沙量为 0.962 亿 t, 比蓄水前多年均值少 78%, 其中汛期 7、8、9 月分别减少 69%、95%和 83%。

蓄水后 2003 年~2006 年时段间, 清溪场站平均径流量为 3723 亿 m^3 , 悬移质输沙量为 1.82 亿 t, 较蓄水前多年平均值分别减小 8%和 59%。

表 2.1 清溪场站水沙特征统计表

Table 2.1 Runoff and sediment process at the Qingxichang station

项目	月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10	11	12	全年
径流量 ($10^8 m^3$)	蓄水前多年平	112	92	111	159	271	435	779	696	594	423	230	147	4052
	2003 年	116	82	98	123	240	467	774	562	744	362	193	152	3918
	距蓄前平%	4	-11	-12	-23	-11	7	-1	-19	25	-14	-16	3	-3
	2004 年	116	101	134	192	282	469	556	508	664	446	268	162	3898
	距蓄前平%	3	10	20	21	4	8	-29	-27	12	5	17	10	-4
	2005 年	127	97	132	158	337	412	720	892	537	487	245	151	4296
距蓄前平%	13	5	19	-1	24	-5	-8	28	-10	15	7	3	6	

	2006年	132	112	153	136	244	327	482	244	306	332	181	130	2780
	距蓄前平%	18	22	38	-14	-10	-25	-38	-65	-48	-22	-21	-12	-31
	蓄水后多年平	123	98	129	152	276	419	633	552	563	407	222	149	3723
	距蓄前平%	10	7	16	-4	2	-4	-19	-21	-5	-4	-4	1	-8
输沙量 (10 ⁴ t)	蓄水前多年平	39	23	37	232	110	469	1600	1150	788	2580	508	99	4470
	2003年	22	18	22	53	227	355	6270	3400	648	913	128	42	2110
	距蓄前平%	-44	-22	-41	-77	-79	-24	-61	-70	-18	-65	-75	-58	-53
	2004年	31	15	48	139	550	165	3580	3146	613	1056	205	42	1660
	距蓄前平%	-20	-33	29	-40	-50	-65	-78	-73	-22	-59	-60	-58	-63
	2005年	25	27	19	96	595	159	8999	8491	349	1800	195	42	2540
	距蓄前平%	-36	17	-49	-59	-46	-66	-44	-26	-56	-30	-62	-58	-43
	2006年	27	26	33	95	466	107	4901	613	130	1026	29	17	9618
	距蓄前平%	-31	13	-11	-59	-58	-77	-69	-95	-83	-60	-94	-83	-78
	蓄水后多年平	26	22	31	96	460	197	5938	3913	435	1199	139	36	1818
距蓄前平%	-33	-7	-18	-59	-58	-58	-63	-66	-45	-54	-73	-64	-59	

2.1.2 库区水沙特性

万县站地处库区中段位置,各年水沙情况如(表 2.2)。其中,蓄水前多年平均径流量,输沙量统计年份为 1950~2002 各年。将三峡库区万县站来水来沙与多年均值进行比较,有如下变化:

(1) 2003 年万县站径流量和输沙量分别为 3966 亿 m³ 和 1.64 亿 t,与多年平均值相比,径流量偏少 5%,但输沙量减少 65%。

(2) 2004 年,万县站径流量和输沙量分别为 3941 亿 m³ 和 1.29 亿 t。与多年均值相比,径流量偏少 6%,但输沙量减少 73%。

(3) 2005 年,万县站径流量和输沙量分别为 4302 亿 m³ 和 2.05 亿 t。与多年均值相比,径流量变化不大,但输沙量减少 56%。

(4) 2006 年万县站径流量为 2753 亿 m³,比蓄水前多年同期均值少 34%,其中汛期 7、8、9 月分别偏小 39%、66%和 53%。悬移质输沙量为 0.483 亿 t,比蓄水前多年均值少 90%。

蓄水后 2003 年~2006 年时段间,万县站平均径流量为 3741 亿 m³,悬移质输沙量为 1.37 亿 t,较蓄水前多年平均值分别减小 11%和 71%。

表 2.2 万县站水沙特征统计表

Table 2.2 Runoff and sediment process at the Wanxian station

项目	月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	----

径流量 (10^8m^3)	蓄水前多年平均	112	93	109	159	286	453	777	718	633	456	241	151	4187
	2003年	115	81	96	122	244	443	790	570	762	394	193	155	3966
	距蓄前平%	3	-13	-12	-23	-15	-2	2	-21	21	-14	-20	3	-5
	2004年	115	93	118	174	295	495	570	522	708	434	245	173	3941
	距蓄前平%	3	0	8	9	3	9	-27	-27	13	-5	2	15	-6
	2005年	146	99	120	134	308	397	734	895	568	496	252	157	4302
	距蓄前平%	30	6	10	-16	8	-12	-6	25	-10	9	5	4	3
	2006年	119	108	151	150	271	334	477	242	295	297	170	139	2753
	距蓄前平%	6	16	39	-6	-5	-26	-39	-66	-53	-35	-29	-8	-34
	蓄水后多年平均	124	95	121	145	280	417	643	557	583	405	215	156	3741
距蓄前平%	10	2	11	-9	-2	-8	-17	-22	-7	-11	-11	3	-11	
输沙量 (10^4t)	蓄水前多年平均	57	32	50	342	162	522	1431	1230	844	3176	841	180	4659
	2003年	31	13	16	62	450	222	5544	2389	515	504	29	10	1643
	距蓄前平%	-46	-59	-68	-82	-72	-57	-61	-81	-39	-84	-97	-94	-65
	2004年	7	8	9	16	111	995	2946	2314	575	680	34	12	1288
	距蓄前平%	-88	-75	-82	-95	-93	-81	-79	-81	-32	-79	-96	-93	-73
	2005年	5	4	6	10	186	946	7607	7339	298	1342	61	9	2049
	距蓄前平%	-91	-88	-88	-97	-89	-82	-47	-40	-65	-58	-93	-95	-56
	2006年	6	6	9	14	103	420	3509	188	469	91	8	7	4828
	距蓄前平%	-89	-81	-82	-96	-94	-92	-75	-98	-94	-97	-99	-96	-90
	蓄水后多年平均	12	8	10	26	213	1147	4902	3058	359	654	33	10	1366
距蓄前平%	-79	-76	-80	-93	-87	-78	-66	-75	-57	-79	-96	-95	-71	

2.1.3 出库水沙特性

由于黄陵庙设站时间较短,采用宜昌站出库站进行分析,宜昌站各年水沙情况如(表 2.3)。其中,蓄水前多年平均径流量,输沙量统计年份为 1950~2002 各年。

(1) 2003 年宜昌站径流量 4098 亿 m^3 ,与蓄水前多年均值相比偏少 6%;而受三峡水库蓄水拦沙影响,其输沙量仅为 0.98 亿 t,较蓄水前多年均值减少 80%。

(2) 2004 年,宜昌站径流量和输沙量分别为 4141 亿 m^3 和 0.64 亿 t。与蓄水前多年均值相比,径流量偏少约 5%,输沙量偏少 87%。

(3) 2005 年,宜昌站径流量为 4595 亿 m^3 ,较蓄水前多年均值偏大 5%。输沙量为 1.1 亿 t,较蓄水前多年均值减少 78%。

(4) 2006 年宜昌站径流量为 2849 亿 m^3 ,比蓄水前多年均值少 35%,其中汛期 7、8、9 月分别偏小 36%、65%和 56%。悬移质输沙量为 0.09 亿 t,比蓄水前多年均值少 98%。

蓄水后 2003 年~2006 年时段间, 宜昌站平均径流量为 3921 亿 m^3 , 悬移质输沙量为 0.7 亿 t, 较蓄水前多年平均值分别减小 10%和 86%。

表 2.3 宜昌站水沙特征统计表

Table 2.3 Runoff and sediment process at the Yichang station

项目	月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
径流量 ($10^8 m^3$)	蓄水前多年平	114	94	116	171	310	466	804	734	657	483	260	157	4369
	2003 年	117	85	107	146	256	386	873	600	798	378	194	158	4098
	距蓄前平%	3	-10	-8	-15	-17	-17	9	-18	21	-22	-25	1	-6
	2004 年	122	106	147	186	313	536	613	536	731	426	254	165	4141
	距蓄前平%	7	13	27	9	1	15	-24	-27	11	-12	-2	5	-5
	2005 年	134	106	146	185	354	456	771	980	591	477	243	151	4595
	距蓄前平%	18	13	26	8	14	-2	-4	34	-10	-1	-7	-4	5
	2006 年	127	114	166	158	289	350	517	257	288	271	176	139	2849
	距蓄前平%	11	21	43	-8	-7	-25	-36	-65	-56	-44	-32	-11	-35
	蓄水后多年平	125	103	142	169	303	432	694	593	602	388	217	153	3921
距蓄前平%	10	10	22	-1	-2	-7	-14	-19	-8	-20	-17	-3	-10	
输沙量 ($10^4 t$)	蓄水前多年平	56	30	81	449	211	523	1550	1240	863	3450	968	198	4920
	2003 年	14	8	10	46	250	671	4340	766	342	234	19	7	9790
	距蓄前平%	-75	-73	-88	-90	-88	-87	-72	-94	-60	-93	-98	-96	-80
	2004 年	4	4	4	9	40	226	954	544	441	171	24	10	6400
	距蓄前平%	-93	-87	-95	-98	-98	-96	-94	-96	-49	-95	-98	-95	-87
	2005 年	8	7	7	10	48	122	3240	5598	150	410	33	14	11000
	距蓄前平%	-86	-77	-91	-98	-98	-98	-79	-55	-83	-88	-97	-93	-78
	2006 年	5	3	7	7	23	52	691	36	47	23	8	6	908
	距蓄前平%	-91	-90	-91	-98	-99	-99	-96	-100	-99	-99	-99	-97	-98
	蓄水后多年平	8	6	7	18	90	268	2306	1736	234	210	21	9	7025
距蓄前平%	-86	-80	-91	-96	-96	-95	-85	-86	-73	-94	-98	-95	-86	

2.2 三峡水库泥沙冲淤特性

2.2.1 蓄水前冲淤情况

三峡库区岸线参差不齐, 河道宽窄相间, 涨水时峡谷段形成卡口, 卡口上游宽谷段水流不畅, 水位壅高, 比降变缓, 泥沙落淤, 而峡谷段则与之相反, 随着水位升高, 比降流速增大, 河床发生冲刷; 落水期峡谷壅水影响消除, 卡口上游宽谷段比降与流速增大, 河床发生冲刷, 而峡谷段则淤积。因此, 峡谷段年内表现为汛期冲, 枯期淤; 宽谷段为汛期淤, 枯期冲。由于三峡库区宽谷段长度约占

库区总长度的 70%，宽谷段的冲淤规律决定库区整体冲淤规律，因此蓄水前库区内总的冲淤规律为“汛期淤积，枯水冲刷”，“大水年淤，小水年冲”。从年际看（见表 2.4），1996 年 12 月至 2003 年 3 月，大坝至清溪场段总淤积量为 0.17 亿 m^3 ，单位河长淤积量为 3.4 万 m^3/km ，其中洲滩冲刷 0.10 亿 m^3 ，主槽淤积 0.27 亿 m^3 ，表现为“滩冲槽淤”，但量均不大。从沿程分布看，云阳以下库段以淤积为主，云阳以上库段以冲刷为主。无论冲刷或淤积，量都不大，说明蓄水前三峡库区年际间冲淤是基本平衡的。

2.2.2 蓄水后冲淤总量变化特性

2003 年蓄水以来，受坝前水位调度和来水来沙条件的影响，库区水位抬高，流速变缓，水流挟沙能力下降，库区泥沙运动特性较天然情况已发生改变。另外，由于三峡水库是河道型水库，库区较长，且来流量较大，干流部分河段依旧保留了其天然状态的一定特性，在不同时段间也存在冲淤相间、冲淤相对平衡的现象，但从总体上看，三峡水库库区泥沙正经历着累积性的淤积过程，这点从计算成果及进出库水沙统计数据上也有所反映，并且此过程还将长期、持续的进行。

根据三峡库区固断测量资料的计算分析可知（见表 2.4 和表 2.5），两表中分别计算了汛期坝前水位 135（吴淞），流量 60000 m^3/s 和枯季坝前水位 139（吴淞），流量 5000 m^3/s 时对应的库区水面线以下河床冲淤成果；但本论文以下论述内容中所包含的数据仅是以汛期坝前水位 135（吴淞）、流量 60000 m^3/s 水面线为计算条件所得成果），2003 年 3 月至 2006 年 10 月间，三峡水库库区干流累计淤积 5.39 亿 m^3 ，单位河长淤积量为 108.3 万 m^3/km 。其中，各时段冲淤分布的统计数据如下：

2003 年 03 月至 2003 年 10 月：库区干流总淤积量为 1.92 亿 m^3 ，占蓄水以来淤积总量的 35.6%，单位河长淤积量为 38.5 万 m^3/km ；

2003 年 10 月至 2004 年 10 月：库区干流总淤积量为 1.29 亿 m^3 ，占三峡蓄水以来库区干流总淤积量的 23.9%，该时段内单位河长淤积量为 25.8 万 m^3/km 。其中，2003 年 10 月~2004 年 4 月淤积 0.49 亿 m^3 ，单位河长淤积量为 9.8 万 m^3/km ，占蓄水以来淤积总量的 9.1%；2004 年 4 月~2004 年 10 月淤积 0.8 亿 m^3 ，单位河长淤积量为 16 万 m^3/km ，为蓄水以来淤积总量的 14.8%。

2004 年 10 月至 2005 年 10 月：库区干流淤积泥沙 0.94 亿 m^3 ，单位河长淤积量为 18.9 万 m^3/km ，占三峡蓄水以来库区总淤积量的 17.4%。其中，2004 年 10 月~2005 年 4 月干流总体表现为冲刷，冲刷总量为 0.17 亿 m^3 ，单位河长冲刷量为 3.4 万 m^3/km ；2005 年 4 月~10 月期间为淤积，淤积了 1.11 亿 m^3 ，单位河长淤积量

为 $22.3\text{m}^3/\text{km}$ ，占蓄水以来淤积总量的 20.6%。

2005 年 10 月至 2006 年 10 月：库区李渡镇以下干流段淤积泥沙 1.24 亿 m^3 ，单位河长淤积量为 $24.9\text{万 m}^3/\text{km}$ ，占三峡蓄水以来库区总淤积量的 23.0%。其中，2005 年 10 月~2006 年 5 月干流总体表现为淤积，淤积了 0.11 亿 m^3 ，单位河长淤积量为 $2.2\text{万 m}^3/\text{km}$ ，占蓄水以来淤积总量的 2%；2006 年 5 月~2006 年 10 月期间淤积 1.13 亿 m^3 ，单位河长淤积量为 $22.8\text{万 m}^3/\text{km}$ ，占蓄水以来淤积总量的 21.0%。

总的看来，蓄水前库区年内总的冲淤规律为“汛期淤积，枯水冲刷”，“大水年淤，小水年冲”，无论冲刷或淤积，量都不大，冲淤基本平衡，1996 年 12 月至 2003 年 3 月，大坝至清溪场段总淤积量为 0.17 亿 m^3 ，单位河长淤积量为 $3.4\text{万 m}^3/\text{km}$ 。蓄水后三峡水库库区泥沙正经历着累积性的淤积过程，2003 年 3 月至 2006 年 10 月间，三峡水库库区干流累计淤积 5.39 亿 m^3 ，单位河长淤积量为 $108.3\text{万 m}^3/\text{km}$ 。

表 2.4 三峡水库 135-139m 蓄水期库区冲淤量统计表

Table 2.4 Scouring and silting quantity during the TGR operation period of water level from 135 to 139m

河段起止地名	大 坝		庙 河		梯 归		官 渡 口		巫 山		大 溪		白 帝 城		关 刀 峡		云 阳		万 县		忠 县		丰 都		涪 陵		大 坝																
	统计时段	间距(km)	庙	河	梯	归	官	渡	口	巫	山	大	溪	白	帝	城	关	刀	峡	云	阳	万	县	忠	县	丰	都	涪	陵	大	坝												
1996.12~	60000 m ³ /s	214	154	154	614	177	44	28.8	6.7	14.2	53.6	66.7	81.2	58.8	55.1	12.5	499	1714	2652	19621	4876	5472	7990	8072	12866	13544	-1704	-1486	11111	11022	9407	9536	1087	1154	11336	11313	12423	12467	361	26	12467	53913	55167
2003.03~	60000 m ³ /s	221	201	201	694	169	447	1559	-65	2154	1529	2805	1820	1926	907	-17	19216	19621	4876	5472	7990	8072	12866	13544	-1704	-1486	11111	11022	9407	9536	1087	1154	11336	11313	12423	12467	361	26	12467	53913	55167		
2003.10~	60000 m ³ /s	3222	572	572	2354	451	451	1567	-62	2153	1562	2964	1994	2024	825	-5	19621	4876	5472	7990	8072	12866	13544	-1704	-1486	11111	11022	9407	9536	1087	1154	11336	11313	12423	12467	361	26	12467	53913	55167			
2003.10~	60000 m ³ /s	-463	474	474	906	713	713	338	20	-489	-941	-1142	2565	2159	570	165	4876	5472	7990	8072	12866	13544	-1704	-1486	11111	11022	9407	9536	1087	1154	11336	11313	12423	12467	361	26	12467	53913	55167				
2004.04~	60000 m ³ /s	-474	470	470	899	713	713	348	22	-488	-925	-1041	2983	2190	620	156	5472	7990	8072	12866	13544	-1704	-1486	11111	11022	9407	9536	1087	1154	11336	11313	12423	12467	361	26	12467	53913	55167					
2004.04~	60000 m ³ /s	2070	173	173	1589	160	160	294	87	1544	414	2164	1695	548	-1394	-258	7990	8072	12866	13544	-1704	-1486	11111	11022	9407	9536	1087	1154	11336	11313	12423	12467	361	26	12467	53913	55167						
2004.10	60000 m ³ /s	2069	169	169	1593	159	159	289	86	1548	417	2178	1760	531	-1405	-259	8072	12866	13544	-1704	-1486	11111	11022	9407	9536	1087	1154	11336	11313	12423	12467	361	26	12467	53913	55167							
2003.10~	60000 m ³ /s	1607	647	647	2495	873	873	632	108	1055	-528	1022	4261	1612	-824	-93	12866	13544	-1704	-1486	11111	11022	9407	9536	1087	1154	11336	11313	12423	12467	361	26	12467	53913	55167								
2004.10	60000 m ³ /s	1595	638	638	2492	872	872	637	107	1060	-508	1137	4743	1660	-785	-103	13544	-1704	-1486	11111	11022	9407	9536	1087	1154	11336	11313	12423	12467	361	26	12467	53913	55167									
2004.10~	60000 m ³ /s	-331	-29	-29	-151	42	42	136	1	-150	213	86	-952	78	-576	-73	-1704	-1486	11111	11022	9407	9536	1087	1154	11336	11313	12423	12467	361	26	12467	53913	55167										
2005.04	60000 m ³ /s	-339	-30	-30	-160	43	43	140	5	-155	213	93	-857	105	-480	-63	-1486	11111	11022	9407	9536	1087	1154	11336	11313	12423	12467	361	26	12467	53913	55167											
2005.04~	60000 m ³ /s	2519	230	230	1694	248	248	224	-44	908	-158	1640	2033	1832	34	-47	11111	11022	9407	9536	1087	1154	11336	11313	12423	12467	361	26	12467	53913	55167												
2005.10	60000 m ³ /s	2533	224	224	1698	246	246	228	-43	912	-145	1655	2082	1782	-115	-34	11022	9407	9536	1087	1154	11336	11313	12423	12467	361	26	12467	53913	55167													
2004.10~	60000 m ³ /s	2189	200	200	1543	290	290	360	-42	758	56	1726	1081	1910	-542	-120	9407	9536	1087	1154	11336	11313	12423	12467	361	26	12467	53913	55167														
2005.10	60000 m ³ /s	2195	194	194	1538	289	289	367	-38	757	68	1748	1224	1887	-595	-97	9536	1087	1154	11336	11313	12423	12467	361	26	12467	53913	55167															
2005.10~	60000 m ³ /s	-579	131	131	632	-104	-104	194	-46	-449	190	-263	441	308	529	103	1087	1154	11336	11313	12423	12467	361	26	12467	53913	55167																
2006.05	60000 m ³ /s	-585	136	136	614	-106	-106	188	-48	-441	165	-255	425	536	415	110	1154	11336	11313	12423	12467	361	26	12467	53913	55167																	
2006.05~	60000 m ³ /s	833	173	173	931	435	435	600	105	1271	-17	2982	3573	441	79	-70	11336	11313	12423	12467	361	26	12467	53913	55167																		
2006.10	60000 m ³ /s	870	192	192	971	431	431	578	101	1267	27	3017	3563	434	54	-84	11313	12423	12467	361	26	12467	53913	55167																			
2005.10~	60000 m ³ /s	254	304	304	1563	331	331	794	59	822	173	2719	4014	749	608	33	12423	12467	361	26	12467	53913	55167																				
2006.10	60000 m ³ /s	285	328	328	1585	325	325	766	53	826	192	2762	3988	970	361	26	12467	53913	55167																								
2003.03~	60000 m ³ /s	7277	1721	1721	7955	1942	1942	3345	60	4789	1230	8272	11176	6196	149	-197	53913	55167																									
2006.10	60000 m ³ /s	7297	1733	1733	7968	1936	1936	3337	60	4796	1314	8611	11949	6540	-194	-179	55167	55167																									

注：“+”表示淤积，“-”表示冲刷；1996年涪陵~李渡段未测，故未计算冲淤量；60000 m³/s 计算条件指汛期坝前水位 135（吴淞）、流量为 60000 m³/s 时对应水面线；5000 m³/s 计算条件指枯季坝前水位 139（吴淞）、流量为 5000 m³/s 时对应水面线。

表 2.5 三峡水库 135-139m 蓄水期库区单位河长冲淤淤量统计表

河段起止地名	大坝		庙河		秭归		官渡口		巫山		大溪		白帝城		关刀峡		云阳		万县		忠县		丰都		涪陵		大坝		
	间距(km)	~	庙河	~	秭归	~	官渡口	~	巫山	~	大溪	~	白帝城	~	关刀峡	~	云阳	~	万县	~	忠县	~	丰都	~	涪陵	~	李渡	~	李渡
1996.12~	60000 m ³ /s	14.2	14.6	9.3	16.5	45.8	44	4.0	28.8	11.0	6.7	14.2	53.6	8.7	66.7	-8.1	81.2	-2.8	8.0	-4.1	55.1	12.5	499	3.4					
2003.03~	5000 m ³ /s	14.6	14.6	12.2	15.2	15.2	3.8	3.8	15.1	7.0	14.0	15.7	8.7	0.6	0.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	5.1	-1.7	5.3						
2003.03~	60000 m ³ /s	213.7	213.7	34.5	51.4	51.4	10.2	54.1	54.1	-9.7	151.7	28.5	29.1	42.1	42.1	22.4	22.4	22.4	22.4	32.7	16.5	-1.4	38.5						
2003.10~	5000 m ³ /s	213.4	213.4	34.7	51.4	51.4	10.2	54.4	54.4	-9.3	151.6	28.5	29.1	44.4	44.4	24.6	24.6	24.6	24.6	34.4	15.0	-0.4	39.3						
2003.10~	60000 m ³ /s	-30.6	-30.6	28.7	19.8	19.8	16.2	11.7	11.7	3.0	-34.4	-17.6	-17.6	-17.1	-17.1	31.6	31.6	31.6	31.6	36.7	10.3	13.2	9.8						
2004.04~	5000 m ³ /s	-31.4	-31.4	28.5	19.6	19.6	16.2	12.1	12.1	3.2	-34.4	-17.3	-17.3	-15.6	-15.6	36.7	36.7	36.7	36.7	37.3	11.3	12.5	11.0						
2004.04~	60000 m ³ /s	137.1	137.1	10.5	34.7	34.7	3.6	10.2	10.2	13.1	108.7	7.7	7.7	32.4	32.4	20.9	20.9	20.9	20.9	-9.3	-25.3	-20.6	16.0						
2004.10~	5000 m ³ /s	137.0	137.0	10.2	34.8	34.8	3.6	10.0	10.0	12.8	109.0	7.8	7.8	32.7	32.7	21.7	21.7	21.7	21.7	-9.0	-25.5	-20.7	16.2						
2003.10~	60000 m ³ /s	106.4	106.4	39.2	54.5	54.5	19.9	21.9	21.9	16.1	74.3	-9.8	-9.8	15.3	15.3	52.5	52.5	52.5	52.5	27.4	-15.0	-7.4	25.8						
2004.10~	5000 m ³ /s	105.6	105.6	38.7	54.4	54.4	19.8	22.1	22.1	16.0	74.6	-9.5	-9.5	17.0	17.0	58.4	58.4	58.4	58.4	28.2	-14.2	-8.2	27.1						
2004.10~	60000 m ³ /s	-21.9	-21.9	-1.8	-3.3	-3.3	1.0	4.7	4.7	0.2	-10.6	4.0	4.0	1.3	1.3	-11.7	-11.7	-11.7	-11.7	1.3	-10.5	-5.8	-3.4						
2005.04~	5000 m ³ /s	-22.4	-22.4	-1.8	-3.5	-3.5	1.0	4.8	4.8	0.7	-10.9	4.0	4.0	1.4	1.4	-10.6	-10.6	-10.6	-10.6	1.8	-8.7	-5.0	-3.0						
2005.04~	60000 m ³ /s	166.8	166.8	13.9	37.0	37.0	5.6	7.8	7.8	-6.5	63.9	-2.9	-2.9	24.6	24.6	25.0	25.0	25.0	25.0	31.1	0.6	-3.8	22.3						
2005.10~	5000 m ³ /s	167.8	167.8	13.6	37.1	37.1	5.6	7.9	7.9	-6.4	64.2	-2.7	-2.7	24.8	24.8	25.6	25.6	25.6	25.6	30.3	-2.1	-2.7	22.1						
2004.10~	60000 m ³ /s	145.0	145.0	12.1	33.7	33.7	6.6	12.5	12.5	-6.3	53.3	1.0	1.0	25.9	25.9	13.3	13.3	13.3	13.3	32.5	-9.8	-9.6	18.9						
2005.10~	5000 m ³ /s	145.3	145.3	11.8	33.6	33.6	6.6	12.7	12.7	-5.7	53.3	1.3	1.3	26.2	26.2	15.1	15.1	15.1	15.1	32.1	-10.8	-7.8	19.1						
2005.10~	60000 m ³ /s	-38.3	-38.3	7.9	13.8	13.8	-2.4	6.7	6.7	-6.9	-31.6	3.5	3.5	-3.9	-3.9	5.4	5.4	5.4	5.4	5.2	9.6	8.2	2.2						
2006.05~	5000 m ³ /s	-38.7	-38.7	8.2	13.4	13.4	-2.4	6.5	6.5	-7.2	-31.1	3.1	3.1	-3.8	-3.8	5.2	5.2	5.2	5.2	9.1	7.5	8.8	2.3						
2006.05~	60000 m ³ /s	55.2	55.2	10.5	20.3	20.3	9.9	20.8	20.8	15.7	89.5	-0.3	-0.3	44.7	44.7	44.0	44.0	44.0	44.0	7.5	1.4	-5.6	22.7						
2006.10~	5000 m ³ /s	57.6	57.6	11.6	21.2	21.2	9.8	20.1	20.1	15.1	89.2	0.5	0.5	45.2	45.2	43.9	43.9	43.9	43.9	7.4	-1.0	-6.7	22.7						
2005.10~	60000 m ³ /s	16.8	16.8	18.4	34.1	34.1	7.5	27.6	27.6	8.8	57.9	3.2	3.2	40.8	40.8	49.4	49.4	49.4	49.4	12.7	11.0	2.6	24.9						
2006.10~	5000 m ³ /s	18.9	18.9	19.9	34.6	34.6	7.4	26.6	26.6	7.9	58.2	3.6	3.6	41.4	41.4	49.1	49.1	49.1	49.1	16.5	6.6	2.1	25.0						
2003.03~	60000 m ³ /s	481.9	481.9	104.3	173.7	173.7	44.1	116.1	116.1	8.9	337.2	22.9	22.9	124.0	124.0	137.6	137.6	137.6	137.6	105.4	2.7	-15.8	108.0						
2006.10~	5000 m ³ /s	483.2	483.2	105.0	174.0	174.0	44.0	115.9	115.9	8.9	337.7	24.5	24.5	129.1	129.1	147.2	147.2	147.2	147.2	111.2	3.5	-14.3	110.6						

注：“+”表示淤积，“-”表示冲刷；1996年涪陵~李渡段未测，故未计算冲淤量；60000 m³/s 计算条件指汛期前水位 135（吴淞）、流量为 60000 m³/s 时对应水面线；5000 m³/s 计算条件指枯季坝前水位 139（吴淞）、流量为 5000 m³/s 时对应水面线。

2.3 淤积物干容重及床沙变化

(1) 干容重自上而下沿程递减

表 2.6 为三峡库区大坝~铜锣峡河段分河段统计的干容重和粒径的沿程分布。从表中可以看出：干容重的变化总体上表现为自上而下沿程递减。在坝前段和常年回水区的下段受水力条件的影响，淤积的泥沙粒径极细，绝大部分为粘土和细粉土，其孔隙率较大，干容重较小；在常年回水区的中上段，受河流的水力特性等因素影响，即有累积性的淤积，也有冲淤交替，泥沙粒径较粗，粒径级配也更宽，干容重较大；在变动回水区及库尾以上天然河段，具有天然河道的特性，泥沙的粒径更大，级配更宽，干容重也更大。

(2) 床沙沿程细化，自上而下分选

库区淤积物的中值粒径，其沿程分布形态与干容重的沿程分布形态基本相应，即距坝越近的库段，干容重小，淤积物的中值粒径也较小；距坝远的库段，干容重大，淤积物的中值粒径也大一些（如图 2.1）。随着三峡水库进入 175m 试验性蓄水运用，库区水流条件改变，2008 年汛后实测淤积物干容重和中值粒径与 2006 年和 2007 年汛后相比，略有变小和变细。

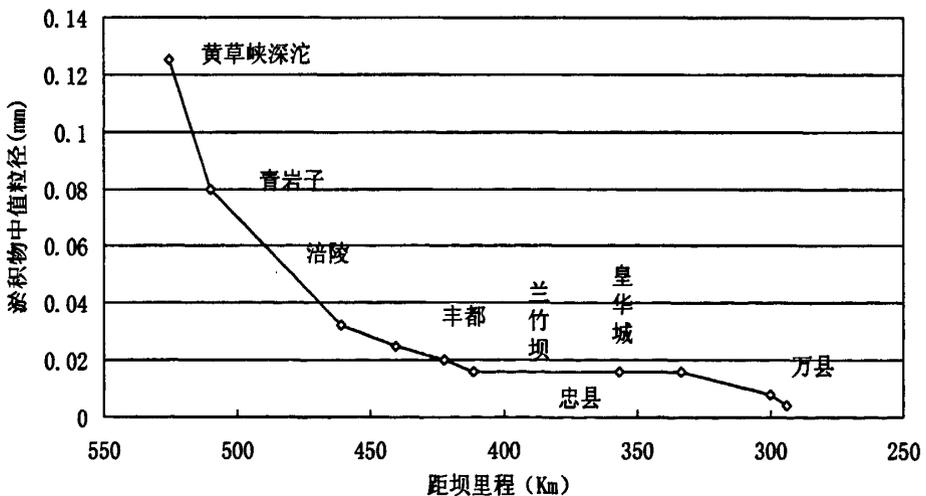


图 2.1 万州至长寿淤积物沿程中值粒径变化

Figure 2.1 The process of median particle size in Wanzhou and Changshou reach

表 2.6 三峡水库 2005~2008 年实测干容重成果统计表
 Table 2.6 Measured dry density statistics of TGR from 2005 to 2008

河段	起止断面	间距(km)	统计	2005 汛前		2005 汛后		2006 汛前		2006 汛后		2007 汛后		2008 汛前	
				γ'_0 (t/m ³)	d ₅₀ (mm)										
大 坝 ~ 庙 河	S30+2 ~ S43	1.26 ~ 22.0	平均	0.820	0.008	0.856	0.010	0.785	0.007	0.727	0.0043	0.712	0.004	0.792	0.005
			最大	0.930	0.012	0.931	0.031	0.940	0.008	0.826	0.007	0.845	0.004	0.835	0.007
			最小	0.735	0.006	0.747	0.006	0.520	0.006	0.610	0.003	0.575	0.003	0.739	0.003
庙 河 ~ 奉 节	S43~ S117	22.0 ~ 168.1	平均	0.793	0.031	0.854	0.029	0.928	0.022	0.800	0.007	0.844	0.006	0.89	0.008
			最大	1.07	0.148	0.955	0.088	1.10	0.300	1.10	0.056	1.16	0.003	1.29	0.066
			最小	0.537	0.007	0.696	0.006	0.746	0.004	0.611	0.003	0.664	0.035	0.653	0.003
奉 节 ~ 云 阳	S117 ~ S152	168.1~ 249.4	平均	0.857	0.089	0.982	0.084	0.883	0.080	0.855	0.062	0.903	0.040	1.01	0.028
			最大	1.05	0.289	1.51	0.299	1.32	0.291	1.30	0.273	1.36	0.256	1.44	0.204
			最小	0.429	0.007	0.730	0.013	0.450	0.003	0.543	0.003	0.542	0.005	0.770	0.005
云 阳 ~ 万 州	S152 ~ S175	249.4~ 298.6	平均	1.01	0.062	0.944	0.025	0.860	0.058	0.859	0.065	0.926	0.032	0.945	0.025
			最大	1.28	0.222	1.06	0.036	1.41	0.371	1.13	0.291	1.22	0.158	1.16	0.179
			最小	0.530	0.014	0.850	0.015	0.680	0.006	0.674	0.006	0.716	0.007	0.794	0.007
万 州 ~ 忠 县	S175 ~ S210	298.6~ 365.2	平均	1.04	0.078	1.11	0.103	0.798	0.055	0.787	0.026	0.915	0.073	0.930	0.071
			最大	1.51	0.301	1.62	0.322	1.20	0.325	1.07	0.276	1.53	0.736	1.42	0.321
			最小	0.450	0.009	0.670	0.012	0.540	0.008	0.565	0.007	0.543	0.007	0.706	0.006

河段	起止断面	间距(km)	统计	2005 汛前		2005 汛后		2006 汛前		2006 汛后		2007 汛后		2008 汛前	
				γ_0 (t/m ³)	d ₅₀ (mm)										
忠 ~ 丰 都	S210 ~ S240	365.213~ 428.127	平均	1.05	0.180	1.38	0.179	1.04	0.130	0.913	0.060	0.900	0.034	0.933	0.023
			最大	1.56	0.453	1.79	0.270	1.37	0.266	1.48	0.186	1.24	0.216	1.20	0.157
			最小	0.431	0.009	0.910	0.087	0.640	0.009	0.624	0.007	0.680	0.006	0.725	0.006
大 ~ 丰 都	S30+2 ~ S240	1.264 ~ 428.127	平均	0.932	0.081	1.08	0.093	0.896	0.065	0.830	0.038	0.876	0.034	0.928	0.028
			最大	1.56	0.453	1.79	0.322	1.41	0.371	1.48	0.291	1.53	0.736	1.44	0.321
			最小	0.429	0.006	0.670	0.006	0.450	0.004	0.543	0.003	0.542	0.003	0.653	0.003
丰 ~ 李 渡	S240 ~ S272	428.127~ 495.342	平均	0.994	0.184	1.47	0.247	1.46	30.1	1.31	15.8	1.39	8.96	1.13	0.019
			最大	1.83	0.450	1.92	0.510	2.22	136.8	1.90	104.0	1.95	87.3	1.46	0.116
			最小	0.540	0.020	0.770	0.013	0.730	0.025	0.738	0.015	0.660	0.009	0.826	0.005
李 ~ 铜 锣 峡	S272 ~ S321	495.342~ 594.676	平均					1.83	59.1	1.81	73.9	1.80	59.8	1.65	61.2
			最大					2.18	115.9	2.19	141.0	2.25	154.0	2.30	163.0
			最小					0.970	0.170	1.19	0.099	0.842	0.053	1.13	0.013
丰 ~ 铜 锣 峡	S240 ~ S321	428.127~ 594.676	平均					1.69	47.7	1.58	48.1	1.65	42.7	1.46	39.3
			最大					2.22	136.8	2.19	141.0	2.25	154.0	2.30	163.0
			最小					0.730	0.025	0.738	0.015	0.660	0.009	0.826	0.005
大 ~ 铜 锣 峡 (李渡)	S30+2 ~ S321	1.264 ~ 594.676	平均	0.951	0.112	1.16	0.127	1.11	13.2	1.04	13.6	1.10	12.5	1.09	11.8
			最大	1.83	0.453	1.92	0.510	2.22	136.8	2.19	141.0	2.25	154.0	2.30	163.0
			最小	0.429	0.006	0.670	0.006	0.450	0.003	0.543	0.003	0.542	0.003	0.653	0.003

第三章 库区河床演变规律分析

三峡水库成库以来,库区河道总体表现为泥沙的累积性淤积趋势。从库区泥沙淤积沿程分布来看,常年库区淤积强度大于变动回水区,特别是近坝位置河段淤积强度最大;库尾河段,泥沙淤积相对较小。而从库区淤积部位来看,泥沙主要淤积在宽谷段,窄深段淤积较少,而且近坝段同库区河段淤积表现有所不同。

三峡库区两岸一般为基岩组成,故岸线基本稳定,三峡成库以后长江干线河势沿程基本保持不变。泥沙冲淤变化引起的河道演变主要表现在深泓和断面形态的变化,即河床的垂向冲淤变化。

本章以库区各河段不同的泥沙淤积形态和水深条件的特点,将三峡库区划分为库区深水段、库区浅水段及变动回水区段三个部分。各部分河床演变如下分析,库区固定观测断面布置见图 3.1。

3.1 库区深水段

该河段位于云阳以下,大坝至庙河(S30~S40-1)段为近坝区域,长约 15.1km,蓄水以来,该河段累积单位河长淤积量为全库区之最,且泥沙主要淤积在大坝至美人沱河段的主槽部位。从各时段间冲淤变化来看,该河段汛期以淤积为主,枯季一般表现为冲刷。2007 年近坝段淤积泥沙 547 万 m^3 ,单位河长淤积量为 36.2 万 m^3/km 。蓄水以来,2003 年 3 月~2007 年 10 月段累计淤积 7824 万 m^3 ,占库区干流总淤积量的 12.1%,单位河长淤积量为 518.1 万 m^3/km 。

近坝区各段面淤积形态是主槽平淤,如(见图 3.2) S31+1、S32+1、S34。蓄水以来,S31+1 断面在 2003 年河床深泓抬高 26.7m,是库区深槽淤积厚度最大的断面之一,2004 年和 2005 年深槽又分别淤积抬升了 13.4m 和 6.9m,2006 年中该断面总体表现为冲刷,深泓刷深 2.3m,蓄水以来该断面累积淤高 44.7m,深泓变化量仅次于 S34。

S32+1 断面在 2003 年 3 月~2005 年 10 月间该断面淤积面积达 10531 m^2 ,为库区面积变化最大的断面之一;在 2005 年 10 月~2006 年 10 月间该断面面积又淤积减小了 115 m^2 ;自蓄水以来该断面累计淤积面积为 10646 m^2 ,依旧为库区面积变化最大的断面之一。S34 位于西天咀,该断面以主槽淤积为主,2003 年深泓淤高 16.3m,2004 年、2005 年又分别淤厚了 27.8m、9.3m,虽然在 2006 年中该断面总体也呈现为冲刷状态,刷深了 1.7m,但蓄水以来该断面深泓累积淤积抬高了 51.7m,依旧是全河段深泓抬升最大的断面。

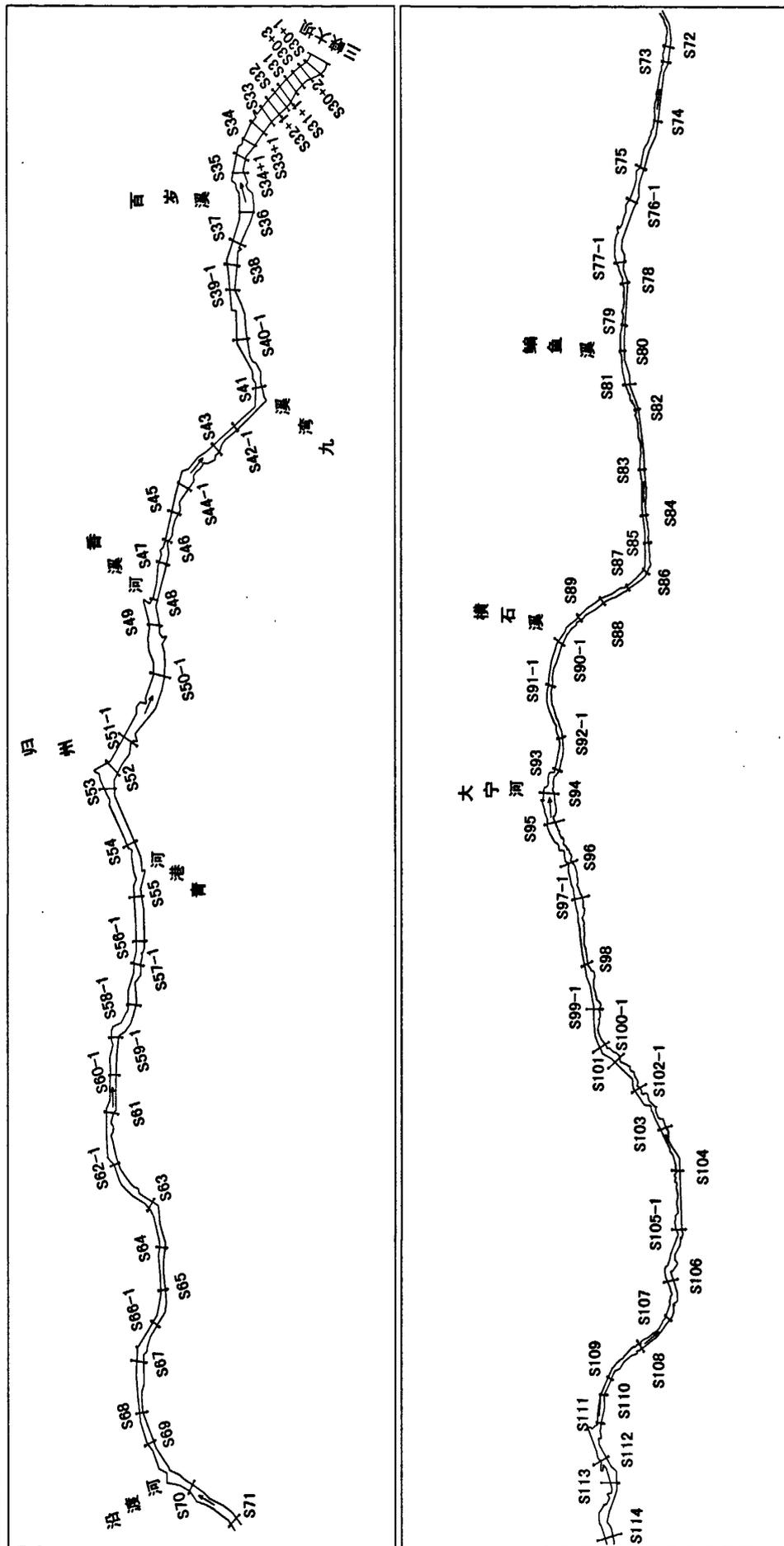


图 3.1a 库区固定观测断面布置图

Figure 3.1a Fixed measurement section layout plan

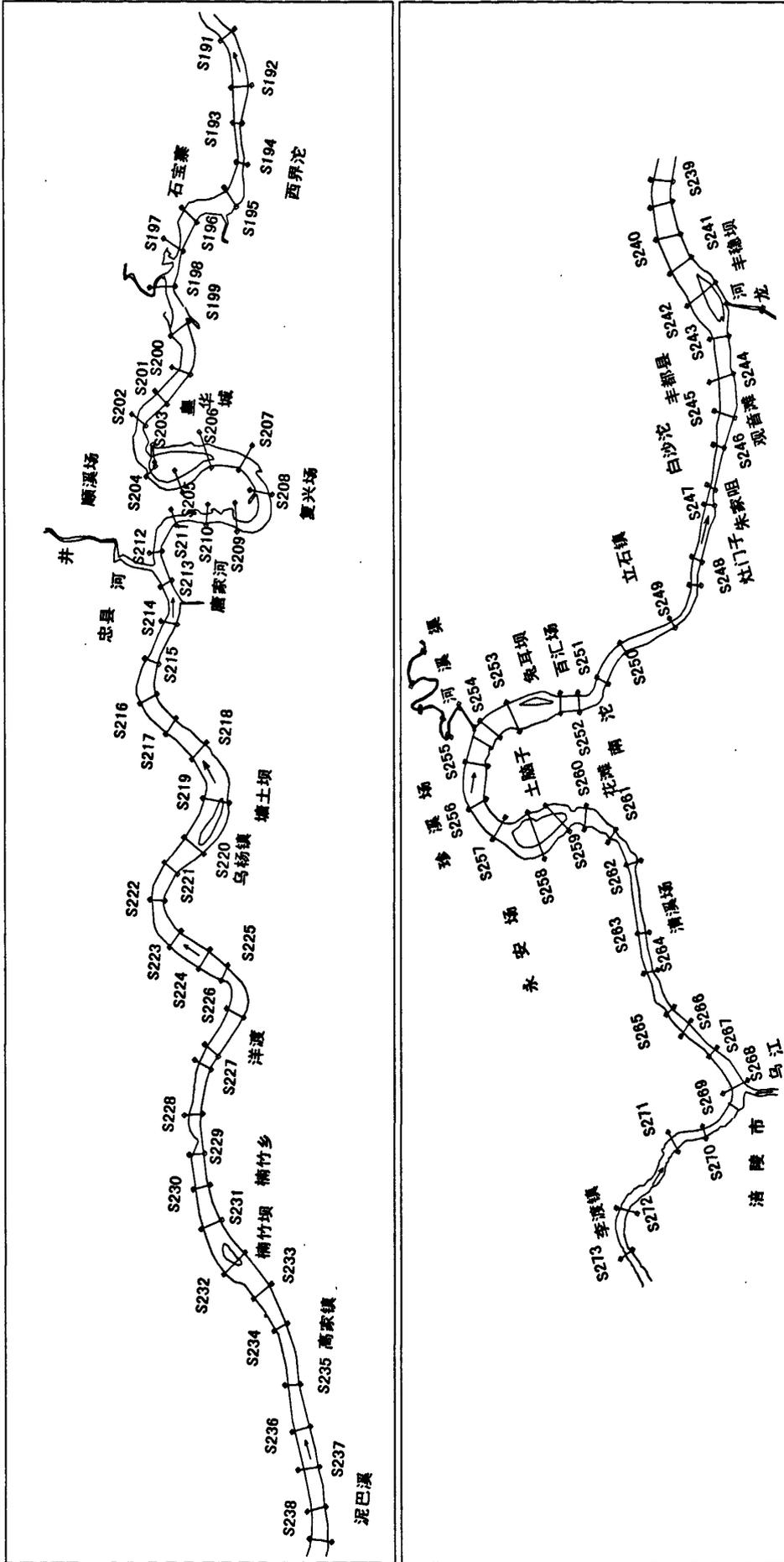
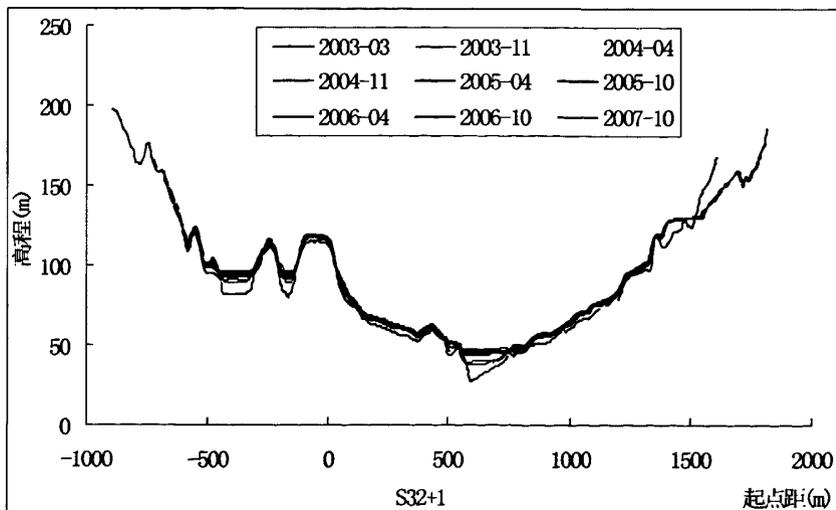
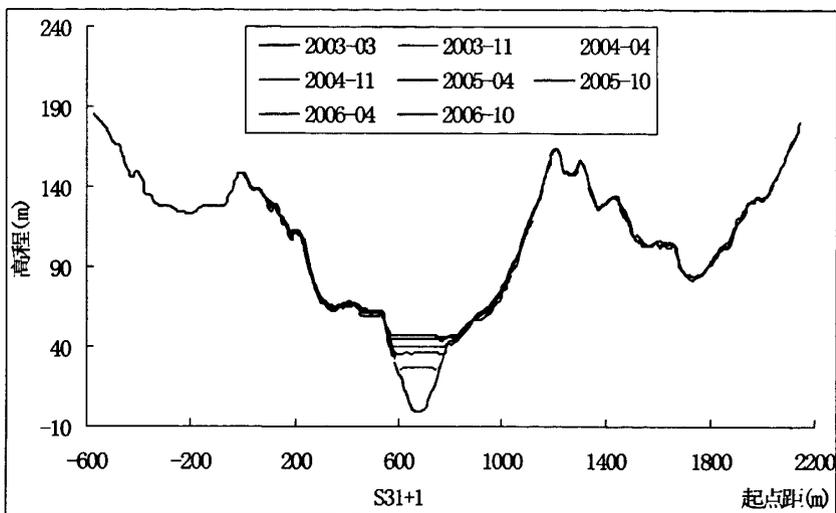


图 3.1c 库区固定观测断面布置图

Figure 3.1c Fixed measurement section layout plan

分析其淤积原因,是因为库区深水段河道受水库回水影响最大,不管是窄深段,还是宽阔段,其主槽以内都将出现逐年平淤抬高的趋势,而主河槽形态也基本由原来的“V”形变为宽底的“U”形或者矩形。

库区深水段断面的淤积形态除主槽的平淤以外,还表现出全断面淤积的趋势。在河道地形的横断上,只要地形线的坡度较缓、满足泥沙水下休止角的要求,则断面发生淤积。由于窄深段断面地形坡度较大,因而泥沙主要淤积在主槽以内相,如 S31+1、S34 断面,而宽谷段因两岸地形坡度较缓,满足泥沙水下休止角的要求,泥沙除了主槽平淤以外,还出现沿断面湿周的普遍淤积,如 S32+1 断面。



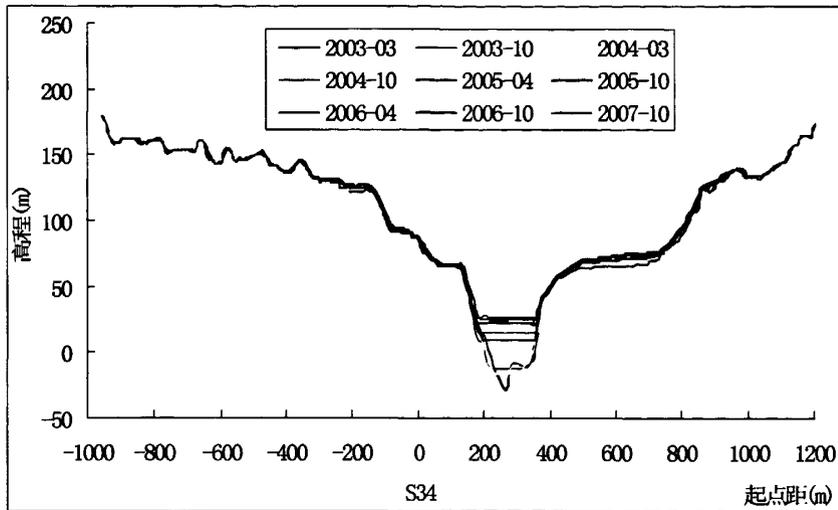


图 3.2 深水段河演断面冲淤变化图

Figure 3.2 Section scouring and silting process in deep-water reach

该河段河道断面泥沙淤积的另外一个趋势则是随着水库运行年限的增加，河槽底部逐年抬高，但淤积强度逐年减缓，在成库初期即有达到淤积平衡的趋势。从三峡水库近坝区多个典型河道断面的多变地形变化对比来看，在成库初期，泥沙大量落淤，河槽底部迅速抬高。如 S31+1 断面，在成库第一年即 2003 年，主河槽底部抬升达到 26m，2004 年末在此基础上又抬升了 13m，2006 年末则继续抬升了约 5m，2007 年末抬升了约 4m，2008 年末抬升了约 3m，2009 年末抬升了约 2.5m。

3.2 库区浅水段

该河段位于云阳以上丰都以下，常年受回水影响，水位大幅抬升，比降变小，流速减缓，容易造成泥沙的大量淤积。但从近年来库区干流河道的实际观测资料分析来看，库区浅水段的泥沙淤积并不呈连续分布，而是同河道平面形态类型有着极大的关系，部分河段甚至出现不淤反冲的现象，因而对于库区浅水段内的泥沙淤积规律需要根据河道平面形态分类加以分析。

河流的河型^[24]一般分为流荡、分汊、弯曲及顺直四种，而长江上游是典型的山区河流，河床组成基本为基岩，一般不会成为流荡性河流。所以对该段河型可分为弯曲型、顺直型及分汊型。当然也有两种河型相结合的河段，如黄华城河段是属于弯曲分汊型河段。一般顺直型河段水流较为集中，水位抬高后主流带变化不大，不易淤积。故根据此河段的淤积特点主要分析弯曲型和分汊型两类。

3.2.1 弯曲型河道

弯道中，由于螺旋流的存在，所以形成了特定的水流泥沙输移运动。

三峡蓄水后，水位的增加、流速和比降的减缓，以及汛后泥沙冲刷力度减弱，都使得泥沙淤积更为严重。弯曲半径越小，淤积强度越大。如武陵至楠竹坝段、土脑子、龙王沱、牛屎碛河段等。选取库区浅水段典型河段分析：

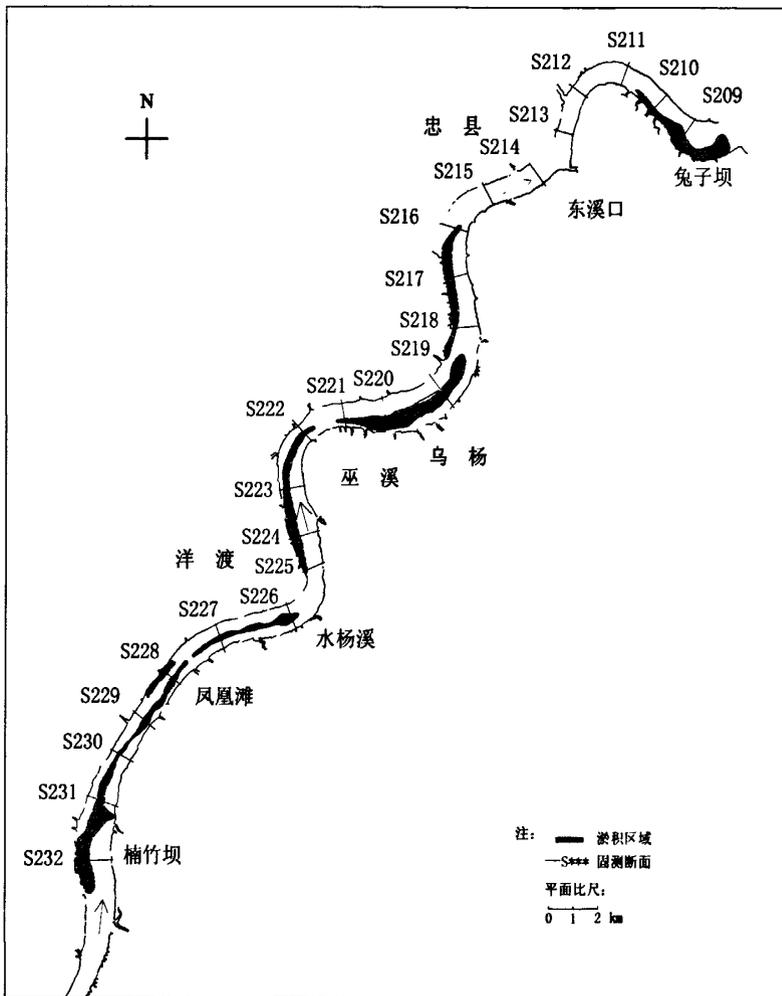


图 3.3 兔子坝至楠竹乡河段淤积分布图（2003-2007 年）

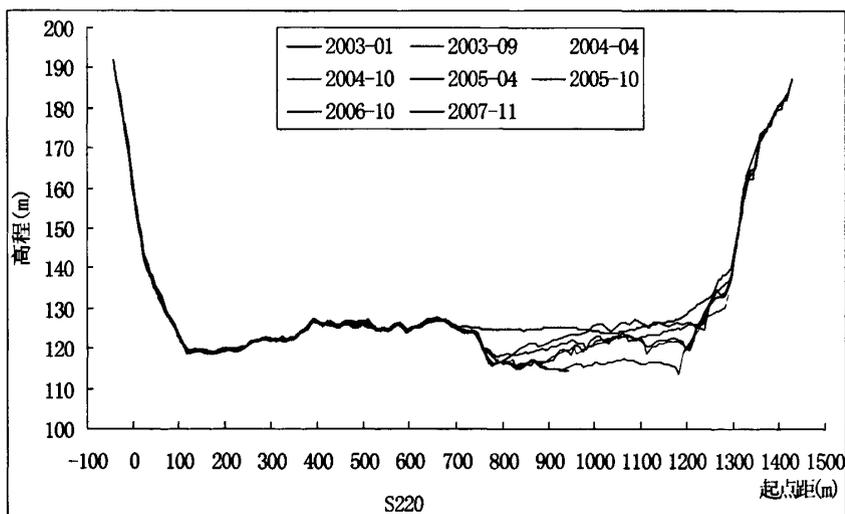
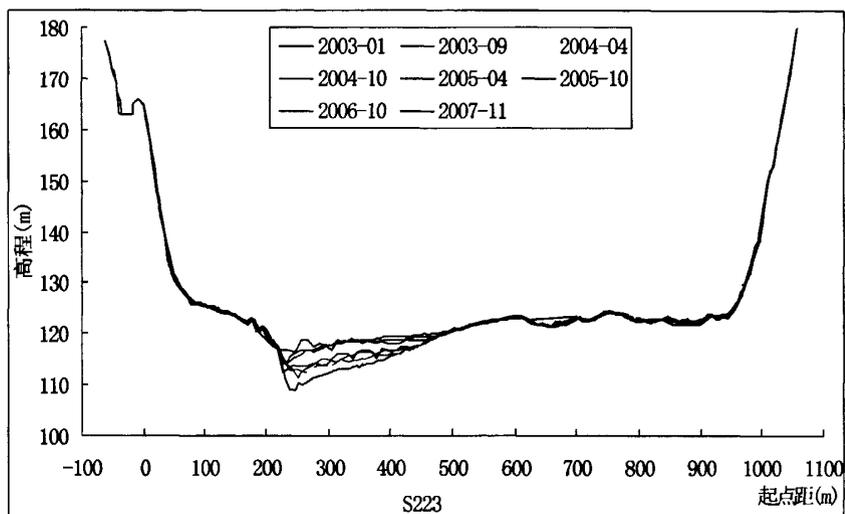
Figure 3.3 Silting distribution in Tuziba-Nanzhuxiang reach

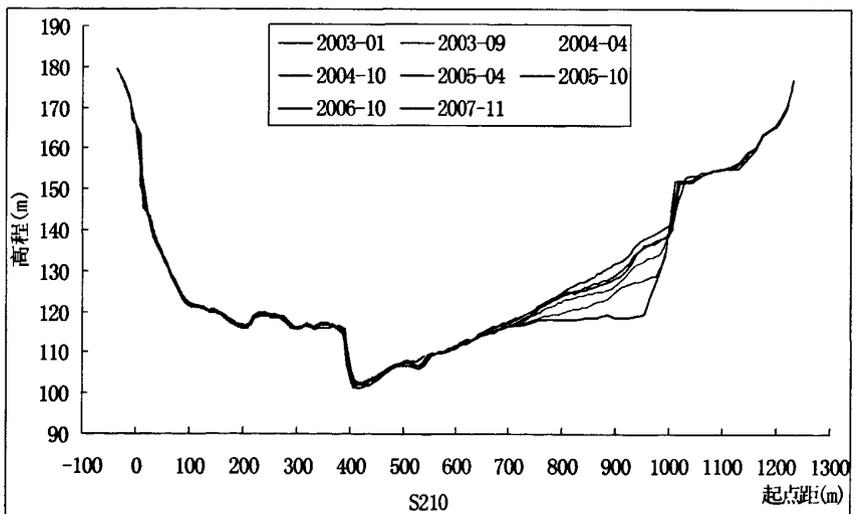
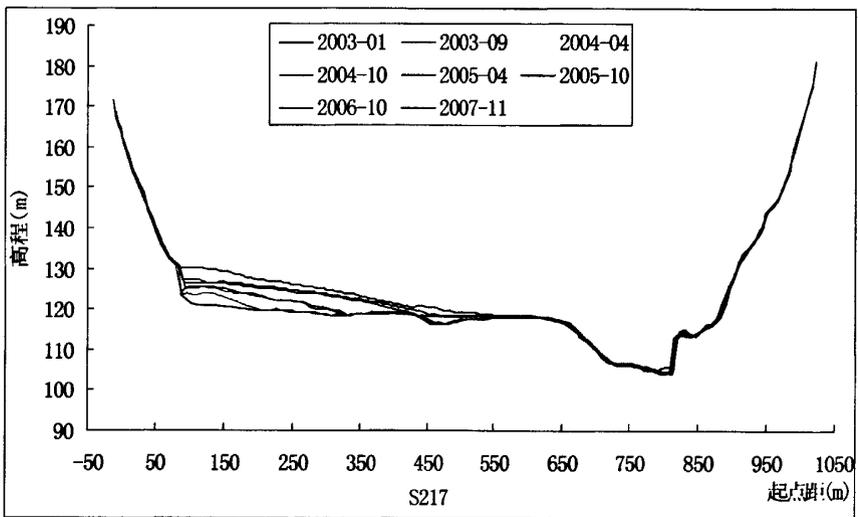
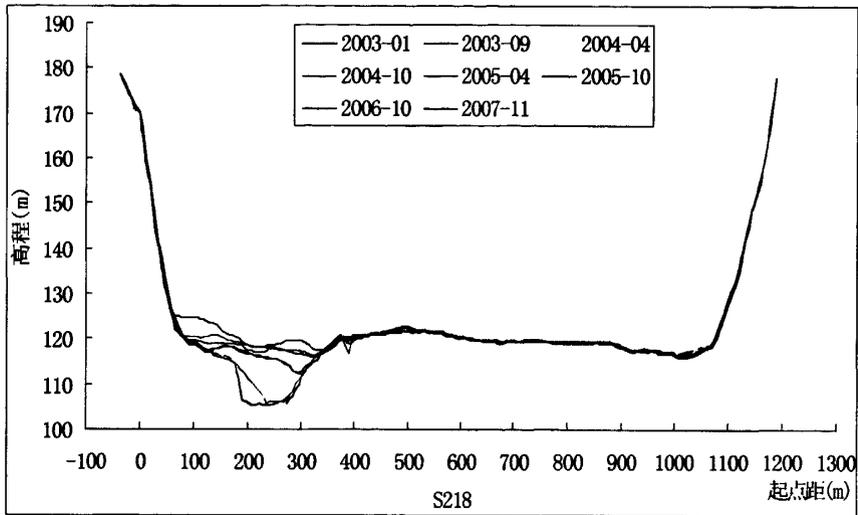
兔子坝至楠竹乡河段位于距宜昌 411km—454km 之间，全长 43km，地跨忠县、丰都二县，处于三峡常年库区上段。该河段河道弯曲，由多个弯道所构成，并且河道开阔，最宽处可以达到约 2000m 以上，最窄处也有 600m 以上。深泓线高低起伏较大，最低处深泓线高程小于 50m；最高处超过 120m，

位于老林湾，两者相差近 70m。全河段岸线曲折，并且有多条溪沟汇入，并在宽阔地带形成冲击扇，如乌杨镇河段。

蓄水前该河段水深、水流条件较好，无碍航浅滩、急滩。蓄水后，水位大幅抬升，水流条件更加有利通航，但是因处在常年库区中上段，蓄水后泥沙大量落淤，淤积位置主要集中在弯道凸岸下游位置（见图 3.3 所示）。根据实测 2003-2007 年实测地形，各观测断面的淤积形态见图（3.4）。

从淤积图分布图可以看出，在三峡蓄水后，全河段发生了大量淤积，主要淤积在弯道的凸岸下首或者两反向弯道结合部。目前为至，可能由于蓄水年限比较短，淤积体间还未完全相连，但随着蓄水的继续进行，已经有所发展。





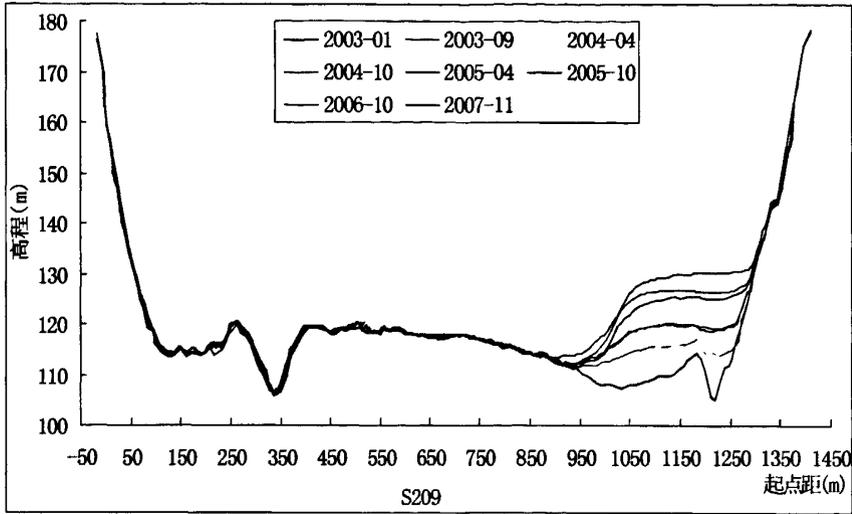


图 3.4 兔子坝至楠竹乡河演断面淤积变化图

Figure 3.4 Section scouring and silting process in Tuziba-Nanzhuxiang reach

3.2.2 分叉型河道

该类河道水流进入分流区后，断面扩大，水流分散，分流区内平均流速也沿程减小，常出现泥沙落淤，而三峡蓄水后水位大幅抬升，水流趋直，造成某一汉道形成缓流区，使得缓流区汉道大幅淤积；在汇流区，由于两股水流汇合后相互冲击、挤压和摩擦作用，在江心洲尾部一般会形成一系列小漩涡，水流能量减小，导致泥沙淤积。万县至长寿段分汉河段一般都淤积在江心洲尾部或缓流区汉道，如兰竹坝、凤尾坝河段、青岩子河段及皇华城河段。典型河段如下：

(1) 楠竹坝

兰竹坝蓄水以来，河道冲淤发生较大变化，呈明显累积性淤积的特性，淤积主要范围在蓄水前左侧主航槽以及兰竹坝尾部（见图 3.5），从河演断面冲淤变化来看，兰竹坝在蓄水初期就开始明显累积性淤积，如河演 S232 断面在三峡蓄水第一年部分断面泥沙淤积高度就达到了 13m 之多，在整个 135-139m 蓄水期共淤高 20m，在 144-156m 蓄水期淤积速度依然较大，直至试验性蓄水以来淤积速度稍有减缓，但 2009 年较 2008 年仍有 2.5m 的淤积，目前 S232 断面淤积高程已接近 145m。S233 河演断面在 135-139m 蓄水期基本上冲淤变化不大，到 144-156m 蓄水期开始出现淤积趋势，在 144-156 蓄水第一年就有 4m 的淤积厚度，进入 175m 试验性蓄水，淤积速度有所减缓，其中 2009 年较 2008 年淤积厚度 1.2m 左右。S232、S233 断面淤积范围主要在兰

竹坝左侧深槽内。S231 断面位于兰竹坝洲尾，蓄水以来表现出冲淤相间现象，其中在 144-156 蓄水期发生了淤积，但是在 175m 试验性蓄水期间淤积部位发生了摆动，但是总体还是表现为淤积，其中右侧深槽也开始表现出淤积形态。具体淤积范围与形态见图 3.6。

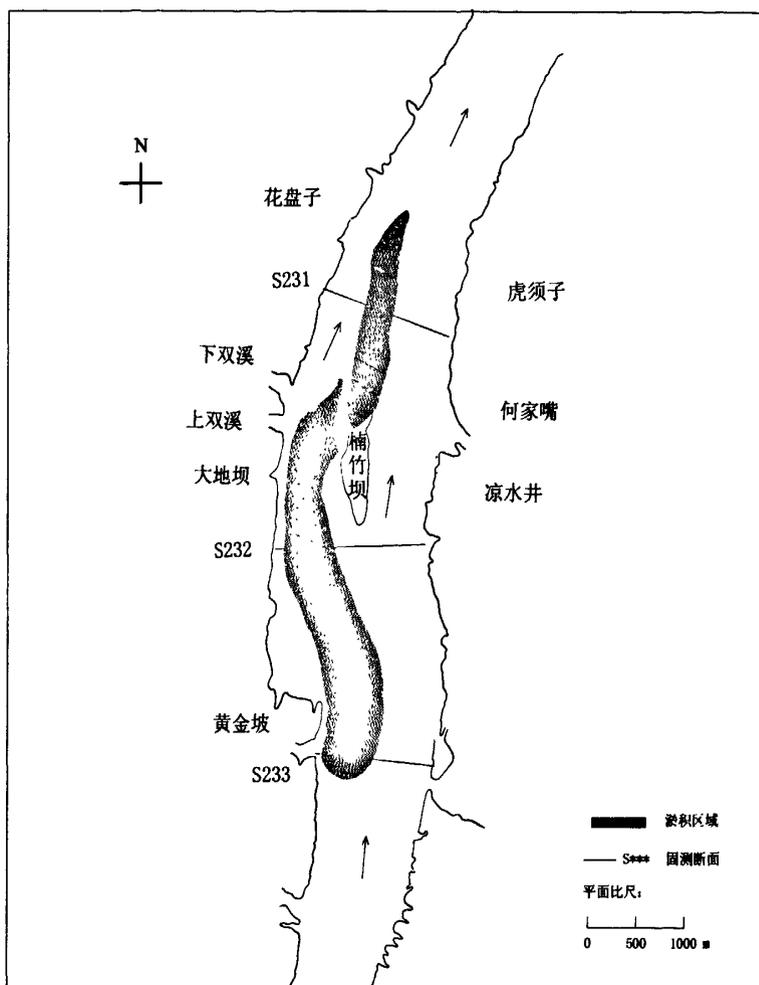


图 3.5 楠竹坝河段淤积图（2003-2007 年）

Figure 3.5 Silting distribution in Nanzhuba reach

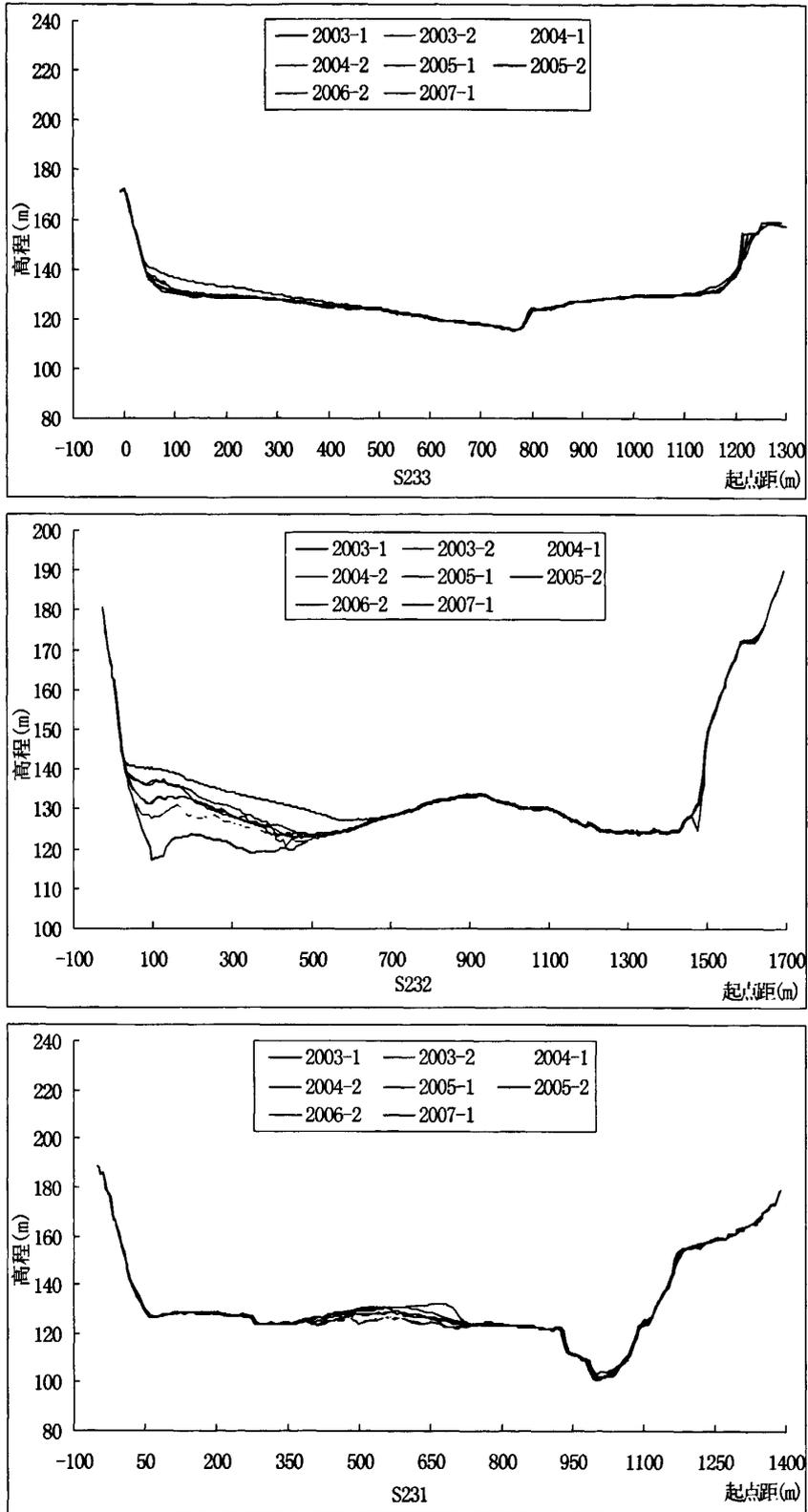


图 3.6 楠竹坝河演断面淤积变化图

Figure 3.6 Section scouring and silting process in Nanzhuba reach

(2) 凤尾坝

凤尾坝河段位于丰都县城长江河段，距宜昌里程 479km-482km 之间，河道微弯。水流从西南往东北向流入，河宽从 S243 的 850m 迅速扩展到 1850m，在最宽处，凤尾坝横卧江中，把长江分为东西两槽。东槽有龙河、刀鞘溪注入。西槽为主槽，只有西槽通航，该河段水流较缓，航道顺直，通航条件较好。145m 蓄水后，凤尾坝面积大大缩小，当水位为 165m 时，凤尾坝会被全部淹没。

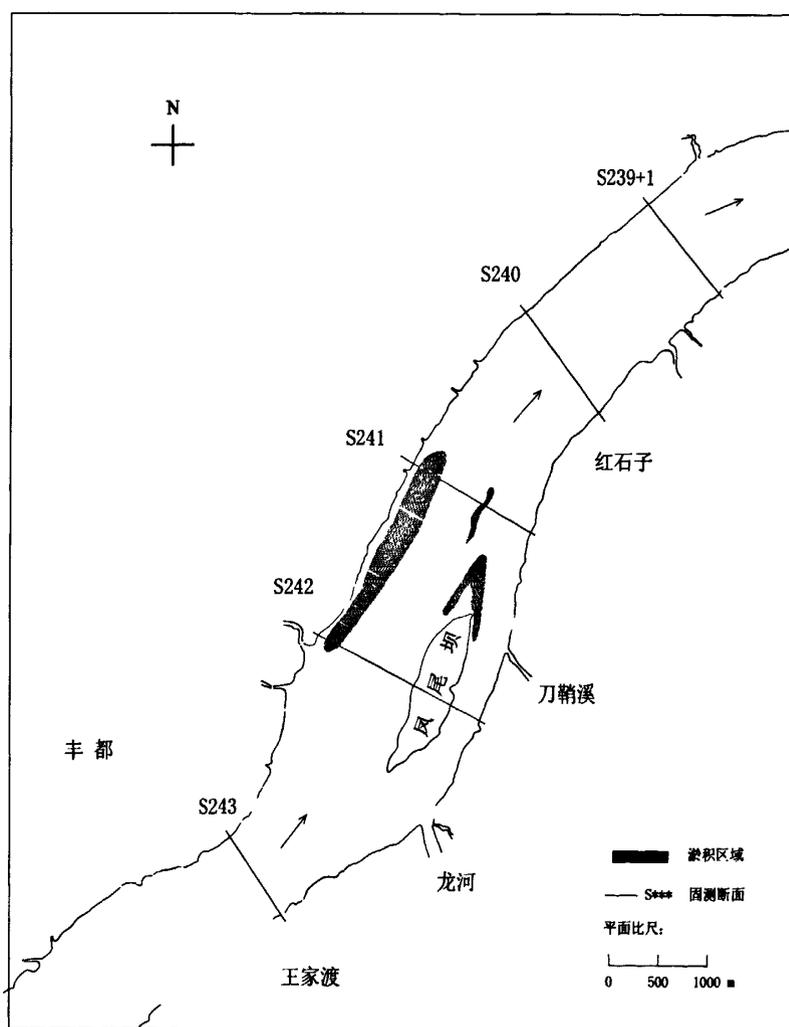


图 3.7 凤尾坝河段淤积图 (2003-2007 年)

Figure 3.7 Silting distribution in Fengweiba reach

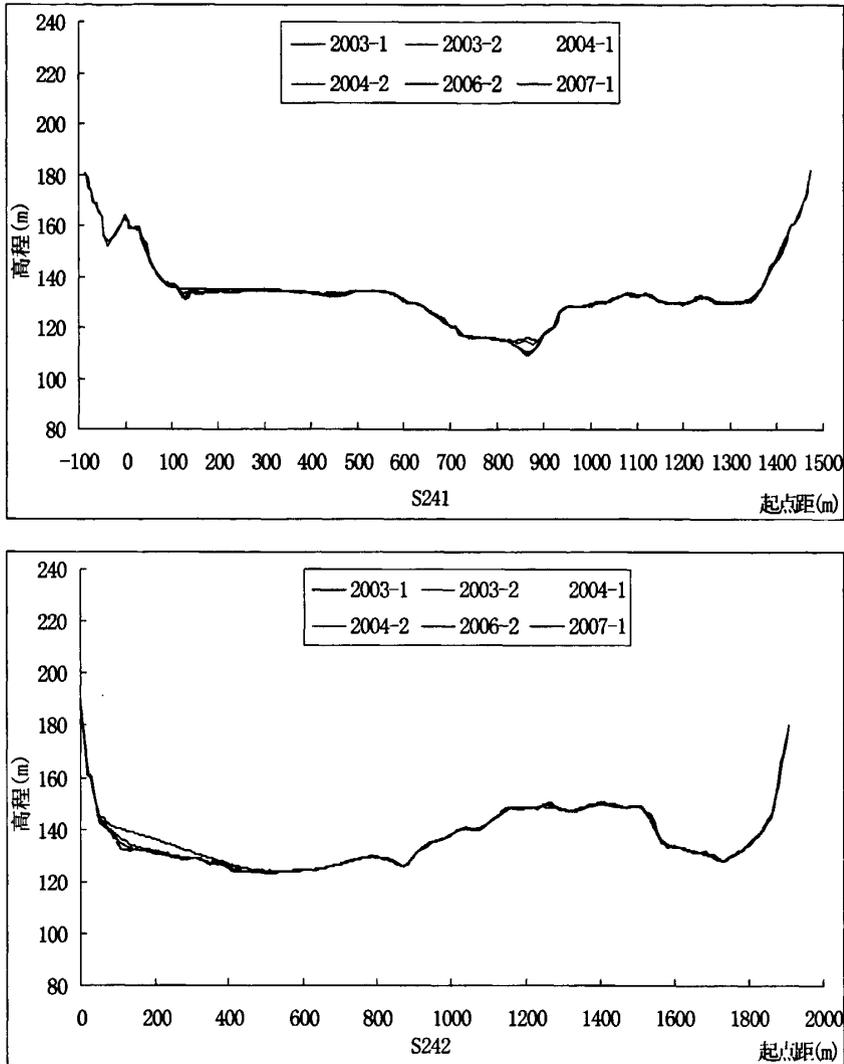


图 3.8 凤尾坝河演断面淤积变化图 (2003-2007 年)

Figure 3.8 Section scouring and silting process in Fengweiba reach

(3) 皇华城

三峡蓄水前, 皇华城河段为汛淤枯冲的, 全年基本保持冲淤平衡。但是, 水位抬高后, 该段为分叉河段 (如图 3.9), 主流带区直, 左槽过流大幅减小, 特别是在枯水期, 造成左槽汛期淤积的泥沙难以冲刷。而右槽过流量有所加大, 水位抬高对流速的影响相比左槽要小, 所以三峡蓄水后左槽呈现累积性淤积, 而右槽基本为冲淤平衡。

依据 2007 年 11 月测图与 2003 年 3 月测图相比较, 蓄水后皇华城河段累积性淤积趋势较为明显 (见图 3.10), 淤积量很大, 淤积部位主要集中在航道

的左槽,自蓄水以来,该断面面积因淤积减小了 12350 m^2 ,变化率高达 37.1%,为整个库区过水面积变化最大的断面。目前,其河床主槽已高于副槽。

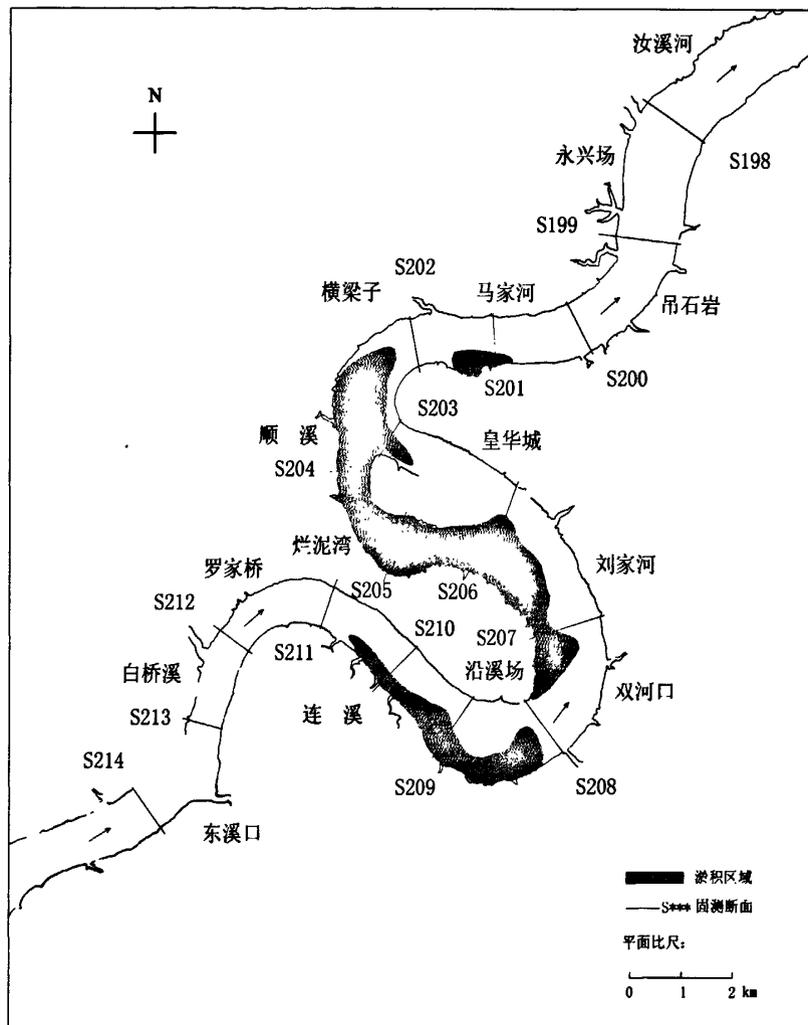
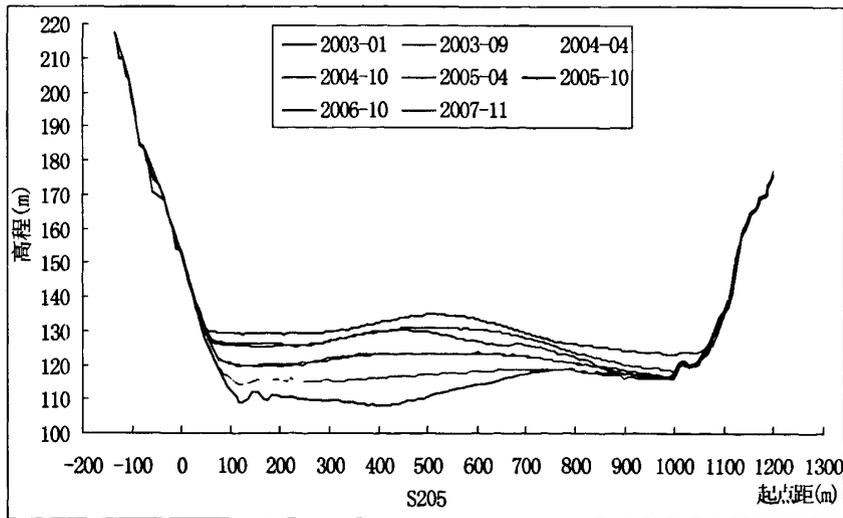
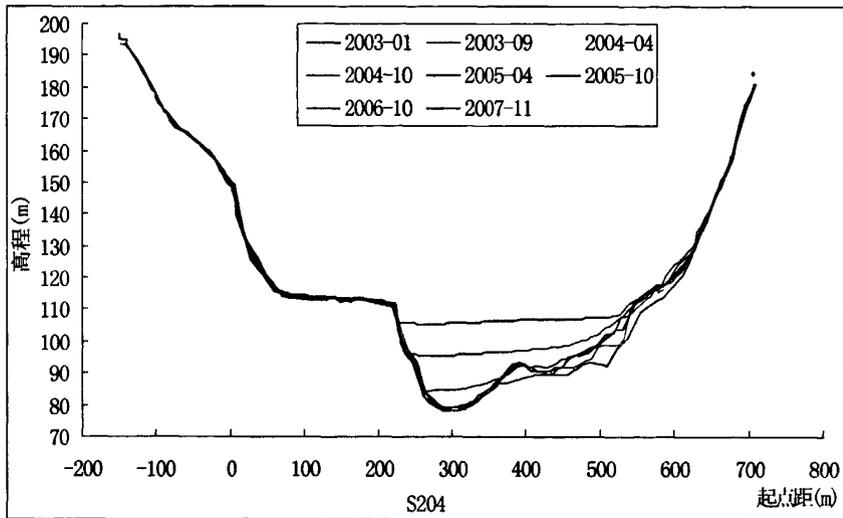
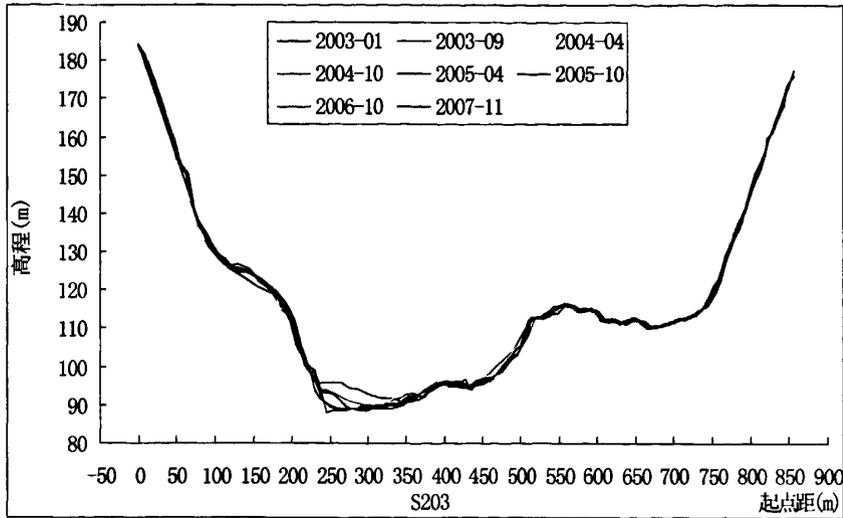


图 3.9 皇华城河段淤积图 (2003-2007 年)

Figure 3.9 Silting distribution in Huanghuacheng reach



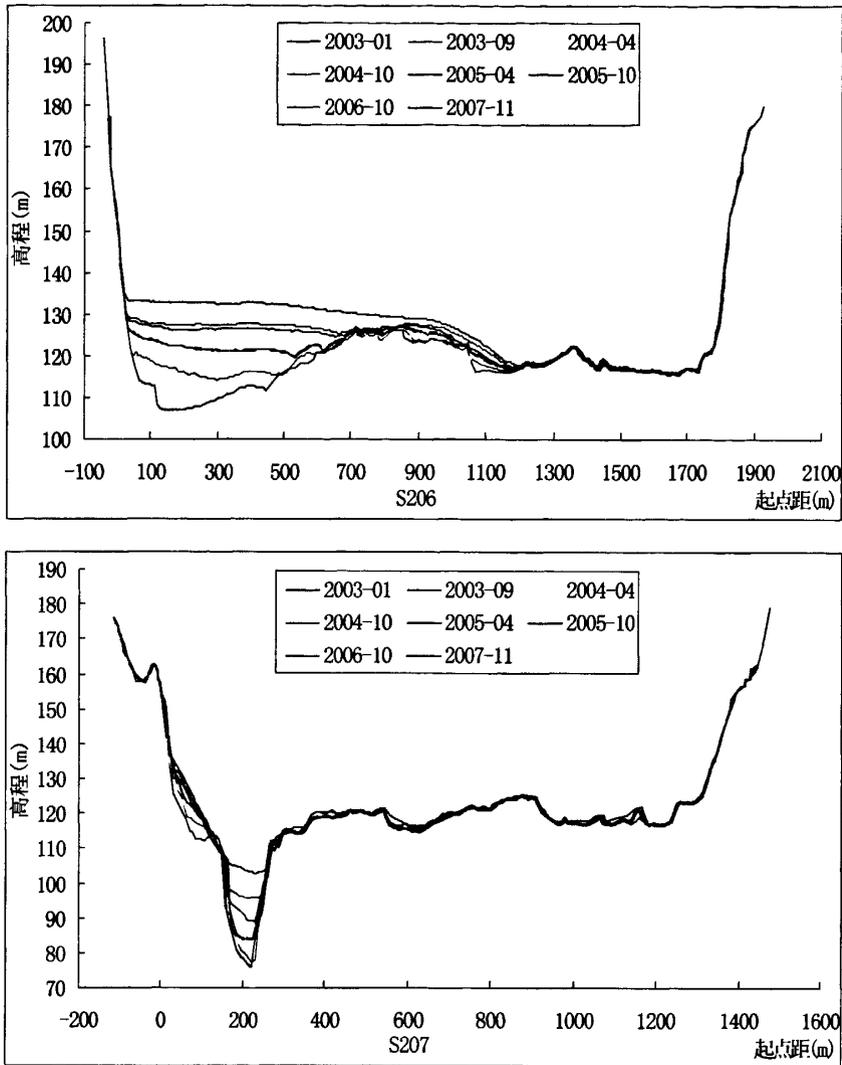


图 3.10 皇华城河演断面淤积变化图

Figure 3.10 Section scouring and silting process in Huanghuacheng reach

3.3 变动回水区

丰都至李渡段为三峡 135-139m 蓄水运行变动回水区段。在初期蓄水运用期，坝前水位 156m，干流静库长约 600km（平交点位于铜锣峡附近）；在正常蓄水运用期，坝前水位 175m，干流静库长约 660km（平交点位于江津附近）。三峡水库变动回水区范围长达 200~300km，在这几百公里的河道内，既有峡谷段，又有开阔段，顺直、弯曲、分汊型河道交替存在。

水库蓄水后，变动回水区仍有冲有淤，但总体没有出现单向淤积现象。个别累积性淤积部位主要出现在江心洲的洲尾，如丰稳坝洲尾；输沙不畅河

段的深槽内，如乌江交汇口下游郭家嘴河段；主流带易发生偏移河段，如土脑子河段。

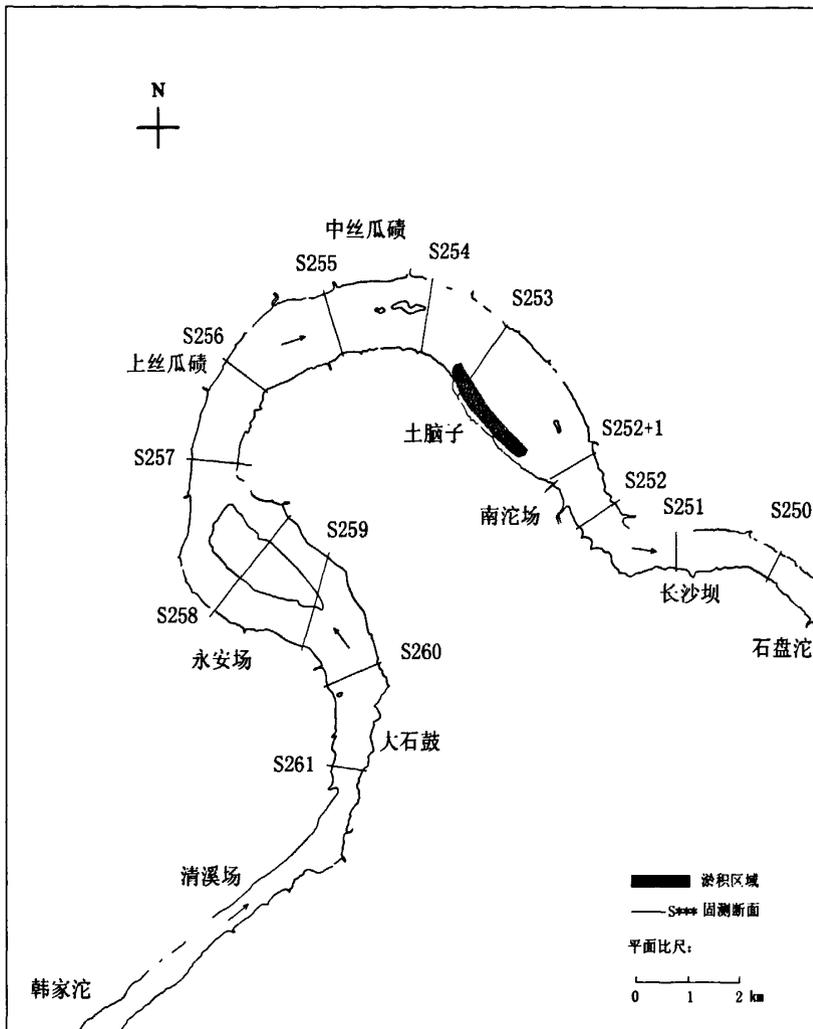


图 3.11 土脑子河段淤积图 (139m 蓄水)

Figure 3.11 Silting distribution in Tunaozi reach

土脑子河段位于三峡水库涪陵至丰都之间，航道里程 507 km，上起五羊背凸嘴上游 500m 的蔡家滩，下止鹭鸶盘，长约 3km，河势图见图 3.11。该河段上距长江清溪场水文站约 17km，下距三峡大坝 454.9km，处于丝瓜碛弯道以下。丝瓜碛弯道凹向右岸，为中心角近 180° 的急弯。受地质构造作用影响，土脑子河段边界条件比较复杂，右侧土脑子一带岸线凹进，深槽紧贴右岸，河道展宽；兔耳碛及右侧的下丝瓜碛将河道在 145m 高程以下时分为三汊。河

段两岸均为坚硬岩石组成，床面为石质河床，绝大部分为卵石和砾石覆盖，部分年内有淤沙。河道横断面基本为“U”型，河道开阔，洪水期一般洪水河宽大于 1000m，最宽达 1600m；枯水期下丝瓜碛、兔儿坝露出，河道狭窄，河宽仅 300m 左右。

土脑子河段是川江三大淤沙河段之一，三峡水库蓄水前，该河段每年淤沙数量仅次于臭盐碛、楠竹坝，而居于第三位。当流量大于 $15000\text{m}^3/\text{s}$ 时，主流逐渐向左岸移动，五羊背至土脑子一带形成回流漫水区域，泥沙大量落淤，此时间内航线也随主流左移。汛后随着水位退落，中泓逐渐向右回移，右侧深槽内泥沙将产生冲刷，航迹线又逐渐回归至右侧深槽，年内呈周期性往复摆动。蓄水前本河道枯水期航行条件较差，航道的显著特点是航槽弯曲、窄浅、水流湍急，属通航控制性河道。蓄水后水深抬升较大，航道条件较蓄水前有较大提高，但航道水流条件的改善也加剧了土脑子河段泥沙淤积情况（如图 3.12）。

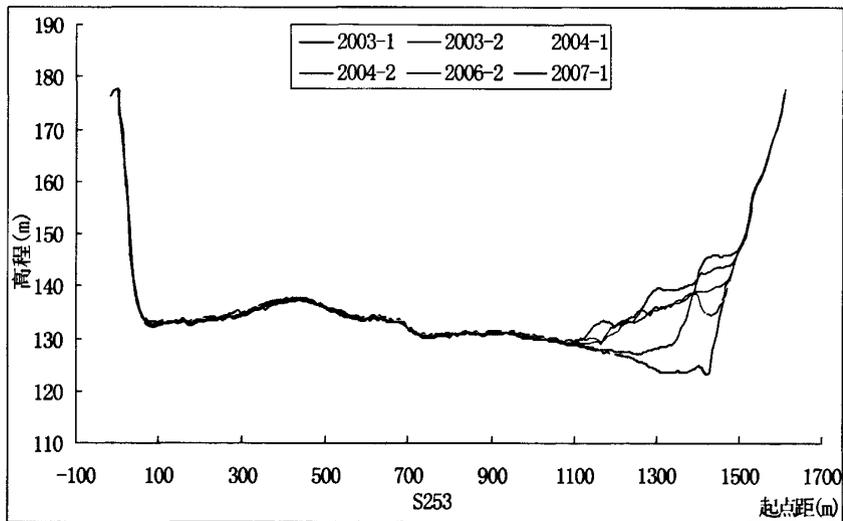


图 3.12 土脑子河演断面淤积图变化图

Figure 3.12 Section scouring and silting process in Tunaozi reach

3.4 小结

(1) 库区深水段为全河段水深最大区域，此段自蓄水以来，泥沙表现为段面平淤的形态，且淤积强度为库区最大。但随着水库运行年限的增加，淤积强度逐渐减缓。

(2) 库区浅水段淤积主要以所属河型有关。弯曲型河段的泥沙淤积主要

发生在弯道凸岸下游一侧及反向弯道过渡段，并且有弯曲半径越小，淤积强度越大的现象；分汊型河段，自水流进入分流区后，由于受水位大幅抬高的影响，水流趋直，某一汊道流速大幅减小形成缓流区，造成严重淤积；在汇流区，由于两股水流汇合后相互冲击、挤压和摩擦作用，在江心洲尾部一般会形成一系列小漩涡，水流能量减小，导致泥沙淤积。所以缓流区汊道及洲尾是其主要淤积区。

(3) 变动回水区在蓄水后，淤积强度较弱，没有出现单向淤积现象。个别累积性淤积情况，也出现在弯曲型、分叉型及河道放宽段位置。

第四章 库区泥沙淤积判别

本章采用长河段一维水流数学模型,考虑库区乌江入汇情况,计算三峡库区沿程水力参数。通过库区实测水面线的验证以及库区各断面的实际淤积情况,选取判别指标,对库区各段泥沙淤积的条件进行了探讨。提出了相应河段泥沙淤积的判别标准。

4.1 一维模型建立

4.1.1 基本方程

一维水流运动和连续方程:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial UQ}{\partial x} + gA \frac{\partial Z}{\partial x} = -\frac{B}{\rho} \tau_b \quad (4.2)$$

式中: A —过水面积; Q —流量; U —断面平均流速; Z —水位; B —水面宽度; x —河段水平方向,沿下游为正; t —时间; ρ —水的密度; τ_b —河底切应力。

由于所研究的问题为长河段、长时段内发生的,在实际计算中对方程组进行简化。将整个计算时段划分为小的计算时段,将长河段划分为若干个短河段,可按恒定非均匀流考虑,水流运动变为:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (4.3)$$

$$Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_f + h_j \quad (4.4)$$

式中: Z_2 、 Z_1 —计算段上、下游断面水位; V_2 、 V_1 —计算段上、下游断面平均流速; α_2 、 α_1 —计算段上、下游断面的动能修正系数,一般取 1.05; h_f —沿程水头损失; h_j —局部水头损失。

在流量、尾段水位和水头损失确定后,即可由(4.4)式算出河道断面的各水力要素。

4.1.2 水头损失计算

(1) 沿程水头损失

沿程阻力损失主要决定于均匀流的坡降，可表示为：

$$h_f = \frac{n^2 Q^2 \Delta x}{2} \left(\frac{\chi_1^{4/3}}{A_1^{10/3}} + \frac{\chi_2^{4/3}}{A_2^{10/3}} \right) \quad (4.5)$$

式中： χ_1 、 χ_2 —计算段上、下游断面湿周； A_1 、 A_2 —计算段上、下游断面过水面积； n —断面综合糙率。

断面综合糙率采用 Einstein 的阻力叠加法确定^[25]。

$$n^{3/2} \chi = n_w^{3/2} \chi_w + n_b^{3/2} \chi_b \quad (4.6)$$

式中： χ_w 、 χ_b —计算断面的河岸湿周和河床湿周； n_w 、 n_b —计算断面的河岸糙率和河床糙率。

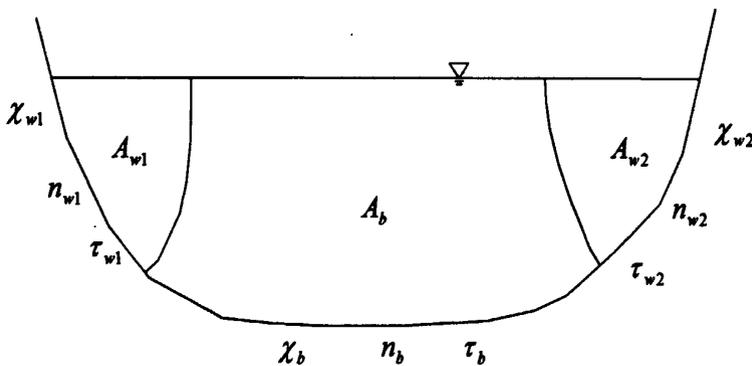


图 4.1 Einstein 的阻力叠加法参数示意图

Figure 4.1 The parameters of Einstein's resistance superposition method

(2) 局部水头损失

局部阻力损失主要包括断面突然扩缩引起的局部水头损失和弯道平面形态引起的水头损失。

1) 断面突然扩缩引起的局部水头损失

断面突然扩缩局部阻力系数与河槽形态、收缩或放宽的比例以及水流情况有关，局部水头损失 h_j 可按下式计算：

$$h_{j1} = \xi_{j1} \frac{V_1^2}{2g} \quad (4.7)$$

$$\text{收缩时}(A_1 < A_2, V_1 > V_2): \xi_{j1} = \beta \frac{V_1}{V_2} \quad (4.8)$$

$$\text{扩宽时}(A_1 > A_2, V_1 < V_2): \xi_{j1} = \beta \frac{V_2}{V_1} \quad (4.9)$$

式中: ξ_{j1} 为断面突然扩缩局部阻力损失系数, β 值在缺乏实测资料情况下可取 $\beta=0.1 \sim 0.5$ 。

2) 弯道平面形态引起的水头损失

弯道附加的局部阻力损失可参考下式计算:

$$h_{j2} = \xi_{j2} \left(\frac{V_1^2}{2g} + \frac{V_2^2}{2g} \right) \quad (4.10)$$

$$\xi_{j2} = \frac{19.62l}{C^2 R} \left(1 + 0.75 \sqrt{\frac{B}{r}} \right) \quad (4.11)$$

式中: R —为水力半径; r —为河段弯曲半径; l —为河弯长度; C —谢才系数。

4.2 模型验证

数学模型建立的正确性由模型验证环节来检验, 只有获得了验证的模型, 其计算成果的可靠性才能保证。为此, 本文建立的一维恒定水流数学模型针对计算河段进行了多组实测水面线的验证。根据实测数据的验证结果, 确定出坝前不同水位条件下的库区沿程糙率。

4.2.1 验证资料

(1) 地形数据

全河段均采用长委水文局 2003 年 10 月的大断面地形数据, 测图比例 1:5000。

(2) 水文数据选择

资料收集了 2007、2008 年三峡库区沿程每日平均水位 (共 25 个水位站) 以及朱沱、寸滩、清溪场、万州水文站的每日平均流量数据。以 2007、2008 年的实测成果验证。

(3) 计算断面的划分

计算断面综合考虑了河道形态、水流条件以及计算工作量等因素。共划分 424 个计算断面, 且与长委水文局固测断面相对应。计算断面与沿程主要地名、水文站、水位站的对应关系见表 4.1。

表 4.1 三峡库区水位计算断面编号及相应位置对照表

Table 4.1 Computation section number corresponding to position reference

断面号	距坝 距离(m)	固测 断面	地名	断面号	距坝 距离(m)	固测 断面	地名
1	0		大坝	271	506398.6	S275+1	
2	800	S30+1		272	507195.5		
73	124135	S95-1	巫山	273	508217.5	S277	
92	162943	S114	奉节	274	509177.7		
150	285519	S169	万州	275	510085		
194	370612	S213	忠县	276	510993	S557+1	
226	434093	S242		277	512662	S278+1	
227	436440.2	S243	丰都	278	514394.3	S280	
228	438353.8	S244		279	515357.5	S281	大河口
229	440165.9	S245		280	517227	S282	
230	441718.3	S246	白沙陀	281	518185.6		
231	443742.8	S246+1		282	519234.7		
232	444581.4	S247		283	520427.6		
233	447310.2	S248		284	521851		
234	448554.2	S248+1		285	523089	S284+1	
235	450827.3	S249		286	524768.4	S285	
236	453672.2	S250		287	527095.9	S287+1	卫东
237	455609.6	S251		288	527873.3		
238	456845.5	S251+2	南沱	289	528844.5		
239	458418.7	S252+1		290	530117.1		
240	461030.3	S253		291	531136		
241	462390.7	S254		292	531936.8		
242	464209.4	S255		293	532632.7	S289	
243	466178.5	S256		294	533927.9	S290	
244	467833.9	S257		295	535359.7	S290+1	长寿
245	469836.5	S258		296	536832.8	S292	
246	472713	S260		297	538904.8	S293	
247	474465.2	S261		298	540297.9	S294	
248	476188.8	S262		299	541885.4	S295	
249	479573.9	S263	清溪场	300	543358.9	S296+1	
250	481509.5	S264		301	544248.9		
251	483664.8	S265		302	545312.5		扇沱
252	485812.3	S266		303	546680.4	S297	
253	487943.3	S267		304	548662.4	S298	
254	488712.7		乌江	305	550105.4	S299	
255	489979	S269	涪陵	306	551268.7	S300	
256	491142.2			307	552143.7		
257	492020.3	S270		308	553295.7	S301	
258	493254.8			309	554271.7		
259	494344.8	S271		310	555212.7	S302	麻柳嘴
260	495048.5			311	556574.2	S303	

断面号	距坝 距离(m)	固测 断面	地名	断面号	距坝 距离(m)	固测 断面	地名
261	495852			312	558184	S304	
262	496668.2	S272		313	559732.9		
263	497796.7	S272+1	沙溪沟	314	561857.1	S306	
264	498970.2			315	563249.6		太洪岗
265	500192.6	S273		316	564939.1	S307	
266	501159.6			317	566278.7		
267	502400.4	S274+1		318	567425.7	S308+1\S309+1	
268	503253.6			319	568391		
269	504145.3	S274+2		320	569465		
270	505085.6		北拱	321	570474		
322	571493	S310+S311		374	621712.3	CY29	鹅公岩
323	572922	S311+1	羊角背	375	622683.8	CY30	
324	573658			376	623087.7	CY31	
325	574573			377	623784.1	CY32	
326	575722			378	624654.4	CY33	
327	577506			379	624984.6	CY34	
328	578244			380	626574.1	CY35	
329	578895			381	628260.4	CY36	
330	579783	S315		382	629460	CY37	
331	581186			383	630526.3	CY38	
332	582495	S316		384	632053.8	CY39	骆中子
333	583501			385	633707.4	CY40	
334	584564	S317	鱼嘴	386	634978.8	S343+1	
335	585926			387	636795.2	S344	
336	587009	S318		388	640033.5	S345	
337	588498			389	642279.7	S346	
338	589934			390	643980		钓二嘴
339	591567	S320		391	645040.3	S347	
340	592840			392	646136	S348	
341	594094	S321		393	648313.3	S349	
342	595290	S322		394	649553.7	S350	
343	595881			395	650661.1	S351	
344	596581			396	652128.6	S352	
345	597271	S323	铜锣峡	397	653550.6	S353	
346	599061.9	CY03		398	655403	S354	小南海
347	600525.7	CY04		399	656794.4	S355	
348	601452.3	CY05		400	658331		
349	602382.4	CY06		401	659356		
350	603780.7	CY07		402	659947.8	S356	
351	604425.7	CY08		403	661583		
352	604937.5	CY08.1	寸滩	404	662056.5	S357	
353	605435.7	CY09		405	663289		
354	605872.2	CY09.1		406	663999		
355	606444.1	CY10		407	664244.3	S358	

断面号	距坝 距离(m)	固测 断面	地名	断面号	距坝 距离(m)	固测 断面	地名
356	607451.3	CY11		408	665777		
357	608368.9	CY12		409	666721	S359	双龙
358	609873.7	CY13		410	668217		
359	610690.1	CY14	嘉陵江	411	668724.4	S360	
360	611863.2	CY15		412	671054.2	S361	
361	612302.1	CY16	玄坛庙	413	672715.9	S362	
362	612773.6	CY17	重庆	414	674325		
363	613239.6	CY18		415	675016.9	S363	
364	613518.8	CY19		416	677125		
365	614023.7	CY20		417	677631.9	S364	
366	614414.3	CY21		418	679547		
367	614863.4	CY22		419	680264.4	S365	
368	615743.9	CY23		420	681600		
369	616997.4	CY24		421	681947.7	S366	江津
370	618070.7	CY25		422	683282		
371	618877.5	CY26		423	684401.5	S367	塔坪
372	620144.2	CY27		424	685678.5	S368	
373	620913.7	CY28					

(4) 验证时间的选取

选取了2007-2008年144-156m调度运行和2008年175-145-155m试运行两个阶段两年的库区水位流量过程数据,作为模型验证的基础数据。根据这两年的坝前水位调度过程、库区沿程各水文站及水位站的水位流量过程分阶段选取多个需要验证的流量级。

选取要验证的流量级时考虑的因素主要有:

- 1) 坝前调度阶段实测水位与计算起始水位对应;
- 2) 所选验证流量-水位与要计算的流量—水位尽量接近;
- 3) 分析了计算河段沿程主要控制水文站的水位、流量过程,根据水文特征找出次历时洪水过程;
- 4) 考虑到数据的有效性和真实性,需选择多组洪水过程验证对比。

经过反复筛选,最终选定8组洪水过程进行验证,见表4.2。

表 4.2 验证时间选取表

Table4.2 Selection verification period

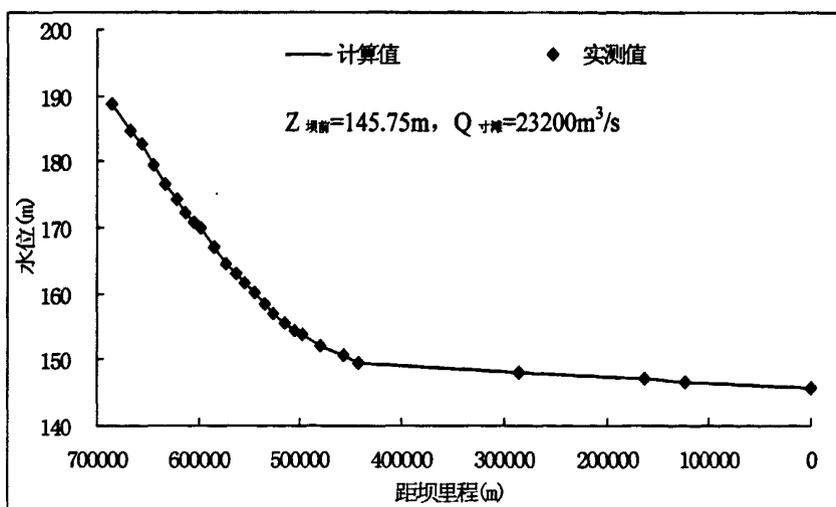
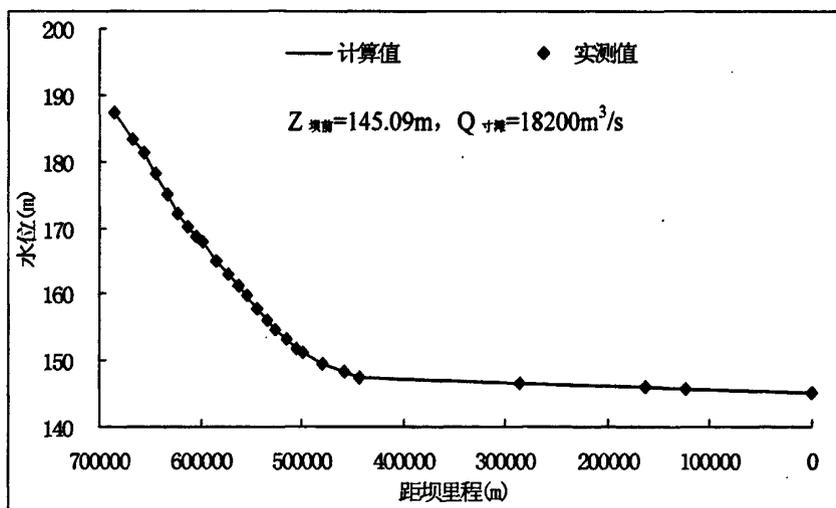
序号	验证时间	坝前水位(m)	流量(m ³ /s)		
			万州	寸滩	朱沱
1	2008-06-17	145.09	19500	18200	15000

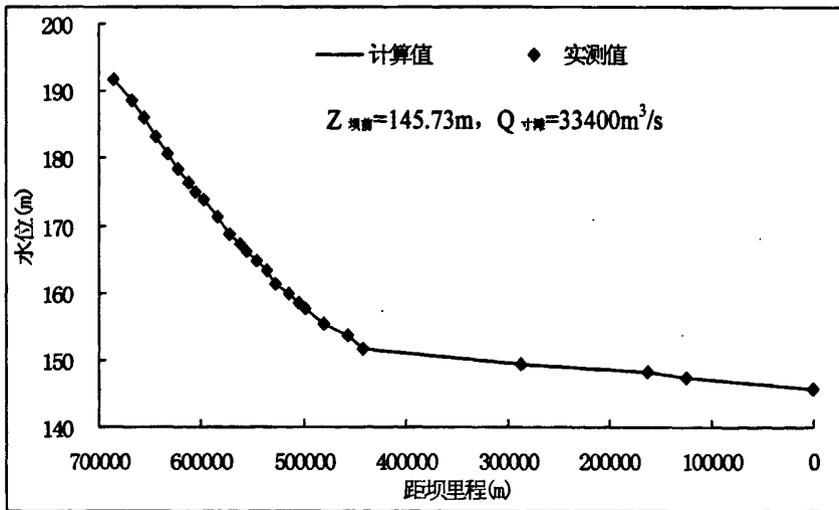
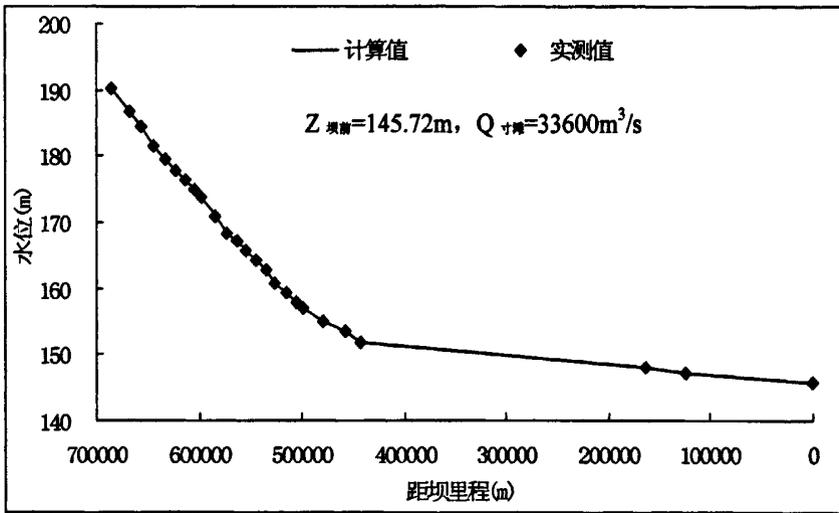
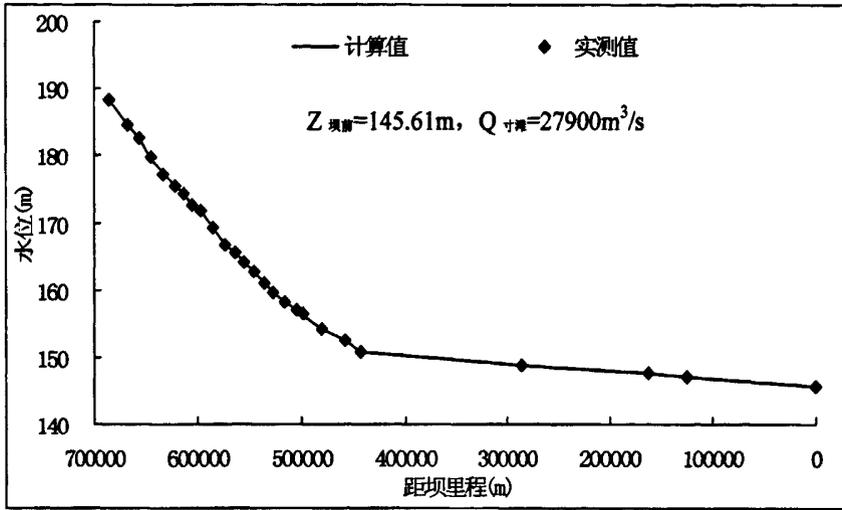
2	2008-07-07	145.75	25300	23200	18700
3	2008-07-24	145.61	31700	27900	18000
4	2008-09-12	145.72	34200	33600	23000
5	2008-08-12	145.73	34200	33400	30400
6	2008-10-14	155.58	14100	13000	10300
7	2008-11-23	171.33	9760	7730	5990
8	2008-12-25	169.46	4770	4430	3650

4.2.2 验证结果

针对表 4.2 所选取的 8 个验证时间段一一进行了库区沿程共 25 个水位站水位的验证, 图 4.2 为所选 8 个时间的水位验证结果图以及表 4.3 列出了计算值与实测值的验证差值和计算所确定的河段糙率值。

对所有具有实测水位的 25 个站进行了实测水位和计算水位的对比和分析, 两者差值较小, 偏差在正负 10cm 左右, 认为数学模型计算水位与实际情况吻合较好。





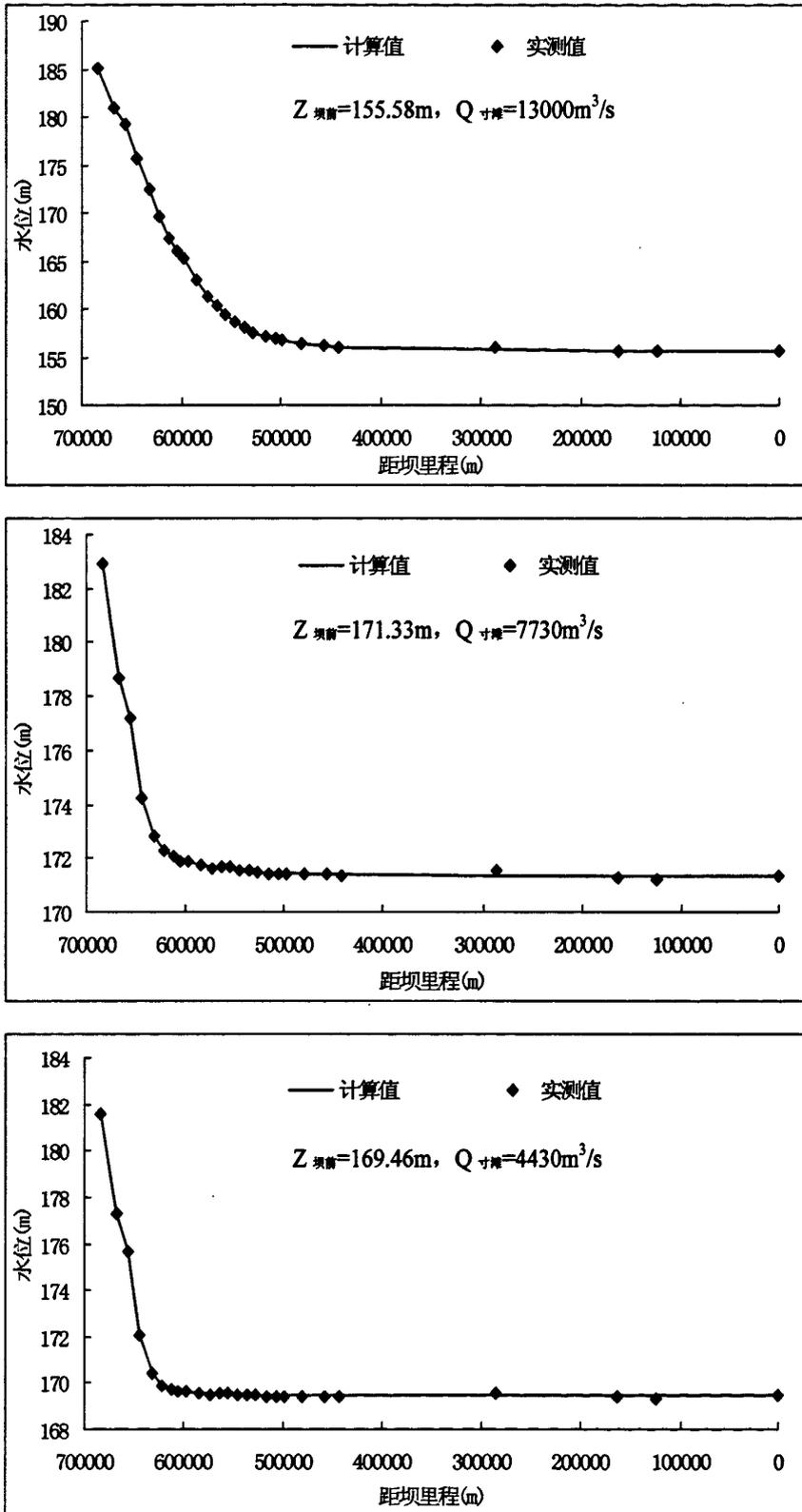


图 4.2 计算与实测水位验证图

Figure 4.2 Water level verification

表 4.3a 沿程水位验证差值及糙率表 (单位: m)

Table 4.3a The longitudinal water level verify and the roughness in reach

地名	断面号	Z _{测深} =145.092m Q _{测深} =18200m ³ /s		Z _{测深} =145.752m Q _{测深} =23200m ³ /s		Z _{测深} =145.612m Q _{测深} =27900m ³ /s		Z _{测深} =145.722m Q _{测深} =33600m ³ /s	
		计算与实测差值	糙率值	计算与实测差值	糙率值	计算与实测差值	糙率值	计算与实测差值	糙率值
塔坪	423	-0.06	0.03	-0.006	0.03	-0.005	0.03	0.005	0.029
双龙	409	0.017	0.037	0.028	0.036	-0.022	0.036	-0.041	0.036
小南海	398	-0.006	0.037	0.032	0.037	0.004	0.037	0.008	0.038
钓二嘴	390	-0.032	0.037	-0.009	0.035	-0.007	0.035	-0.02	0.034
落中子	384	-0.012	0.035	0.013	0.034	0.015	0.036	0.008	0.036
鹅公岩	374	-0.02	0.035	0.005	0.035	-0.014	0.036	-0.013	0.034
玄坛庙	361	0.009	0.039	0	0.04	-0.017	0.038	0.033	0.04
寸滩	352	0.017	0.034	-0.029	0.035	0.033	0.035	-0.02	0.037
铜锣峡	345	-0.036	0.04	0.027	0.041	0.018	0.04	-0.026	0.04
鱼嘴	334	0.021	0.039	0.021	0.041	-0.028	0.042	-0.004	0.042
羊角背	323	-0.02	0.029	-0.015	0.028	0.041	0.028	0.029	0.028
太洪岗	315	0.036	0.038	-0.031	0.033	-0.028	0.033	0.003	0.032
麻柳嘴	310	-0.045	0.029	-0.049	0.028	0.009	0.032	-0.02	0.03
扇沱	302	-0.003	0.035	-0.002	0.035	-0.057	0.038	-0.006	0.035
长寿	295	-0.015	0.041	0.006	0.041	-0.006	0.045	0.01	0.05
卫东	287	0.04	0.033	0.016	0.034	-0.033	0.036	-0.025	0.035
大河口	279	0.014	0.035	-0.007	0.032	-0.038	0.033	0.007	0.031
北拱	270	0.001	0.034	0.024	0.035	0.047	0.039	0.017	0.035
沙溪沟	263	-0.024	0.04	0.039	0.041	-0.013	0.043	-0.013	0.039
消溪场	249	0.008	0.04	0.001	0.041	-0.004	0.042	0.015	0.04
南沱	238	0.04	0.053	-0.002	0.054	-0.034	0.054	-0.03	0.052
白沙沱	230	0.025	0.025	-0.058	0.027	0.037	0.027	0.007	0.027
奉节	92	-0.028	0.067	0.003	0.067	0.014	0.066	0.001	0.062
茅坪	1	0	0.064	0	0.063	0	0.063	0	0.062

表 4.3b 沿程水位验证差值及糙率表 (单位: m)

Table 4.3b The longitudinal water level verify and the roughness in reach

地名	断面号	Z _测 =145.732m Q _测 =33400m ³ /s		Z _测 =155.58m Q _测 =13000m ³ /s		Z _测 =171.330m Q _测 =7730m ³ /s		Z _测 =169.460m Q _测 =4430m ³ /s	
		计算与实测差值	糙率值	计算与实测差值	糙率值	计算与实测差值	糙率值	计算与实测差值	糙率值
塔坪	423	0.006	0.025	-0.007	0.03	0.003	0.031	0.023	0.031
双龙	409	0.035	0.035	0.003	0.037	-0.007	0.041	-0.037	0.047
小南海	398	0.005	0.034	0.031	0.033	0.021	0.035	-0.029	0.036
钓二嘴	390	0.037	0.033	0.016	0.037	0.026	0.038	-0.014	0.042
落中子	384	0.027	0.033	0.006	0.033	0.036	0.035	0.026	0.035
鹅公岩	374	0.009	0.033	0.016	0.0355	-0.004	0.035	-0.014	0.037
玄坛庙	361	-0.002	0.04	-0.012	0.037	0.018	0.038	-0.042	0.035
寸滩	352	-0.035	0.036	-0.008	0.036	0.042	0.038	-0.028	0.03
铜锣峡	345	0.004	0.039	-0.013	0.038	0.027	0.037	-0.003	0.03
鱼嘴	334	0	0.042	0.016	0.043	0.046	0.04	0.026	0.028
羊角背	323	0.017	0.029	0.006	0.028	0.076	0.03	0.076	0.044
太洪岗	315	-0.025	0.032	0.005	0.037	0.005	0.05	-0.035	0.045
麻柳嘴	310	0.003	0.031	-0.019	0.029	-0.049	0.05	-0.079	0.037
扇沱	302	0.025	0.037	0.011	0.034	0.001	0.049	-0.009	0.034
长寿	295	0.035	0.051	-0.048	0.043	0.002	0.048	-0.018	0.027
卫东	287	-0.024	0.036	0.028	0.039	0.008	0.048	0.018	0.027
大河口	279	-0.04	0.032	0	0.034	0.03	0.036	0.1	0.02
北拱	270	0.012	0.039	-0.008	0.03	0.022	0.036	0.052	0.02
沙溪沟	263	0.019	0.043	0.006	0.047	0.036	0.037	0.056	0.02
消溪场	249	0.024	0.043	-0.023	0.047	0.007	0.037	0.067	0.02
南沱	238	-0.004	0.058	-0.014	0.036	0.016	0.037	0.056	0.02
白沙沱	230	-0.014	0.027	0.007	0.036	0.037	0.031	0.027	0.02
奉节	92	0.033	0.067	-0.043	0.055	0.047	0.027	0.047	0.02
茅坪	1	0	0.064	0	0.025	0	0.027	0	0.02

4.3 分析指标的选取

4.3.1 代表流量的选取

三峡水库 139m 蓄水运行时, 上游来流量较小, 河道容易发生淤积, 但来沙量小, 淤积强度不大; 当水库以 135m 蓄水运行时, 河道处于洪水期。根据挟沙力表达

达 $S_s = K \left(\frac{U^3}{gR\omega} \right)^m$, 可以知道挟沙力 S_s 与流速 U 成正比关系, 即随着流速的增加,

泥沙运动也愈剧烈。泥沙随着流量的增加, 流速增大, 也由淤积慢慢转向被冲刷。

因此, 河道来水量及其过程和与之相应的来沙量及其过程是决定河床形态最主要的因素, 这两者都因时而变。为分析河道泥沙的变化, 就需要找到一个代表流量(造床流量)。此流量对塑造河床形态所起的作用最大。

目前确定造床流量的方法在理论上还不够成熟, 在实际工作中一般采用马卡维耶夫法、平滩水位法以及一些经验方法。

马卡维耶夫提出^{[26][27]}可以采用对河床综合造床作用最大的几级流量作为造床流量。水流对河床的塑造作用通常来说应包含两个方面的因素, 一是造床强度, 二是造床的历时, 造床强度取决于输沙率的大小, 而造床历时则取决于各级流量的洪水出现的频率。所以造床流量可以采用输沙率与历时乘积最大时的流量作为造床流量:

$$F_G = GP = Q^m JP \quad (4.12)$$

式中, F_G 、 G 、 P 、 Q 、 J 分别表示造床作用、输沙率、洪水频率、流量及洪水比降。

收集了寸滩 1991 年—2008 年实测每日平均流量资料。将其整理, 按照 $2000\text{m}^3/\text{s}$ 的区间大小, 将所有流量数据划分 29 个相等区间, 并确定落入各区间的流量次数占整个分析时段内观测流量次数的频率 P 。

对于比降 J , 通过收集寸滩站 1981 年、2004 年、2005 年实测资料以及重庆河段物理模型资料(长科院), 见表 4.5。拟合(图 4.15)得到寸滩站流量和比降关系:

$$J = 4.5255Q^{-0.0864} \quad (4.13)$$

式中: Q 为流量 (m^3/s), J 为比降(万分之一)。

表 4.4 寸滩站比降-流量关系实测资料收集情况

Table 4.4 The collection of materials between slope-flow at Cuntan

序号	流量(m ³ /s)	比降(万分之)	资料来源
1	8150	2.08	2004 年实测
2	10000	2.02	2005 年实测
3	15500	2.00	2004 年实测
4	25500	1.85	2005 年实测
5	36500	1.85	重庆河段模型资料(长科院)
6	69100	1.76	重庆河段模型资料(长科院)
7	88100	1.66	1981 年大洪水实测资料

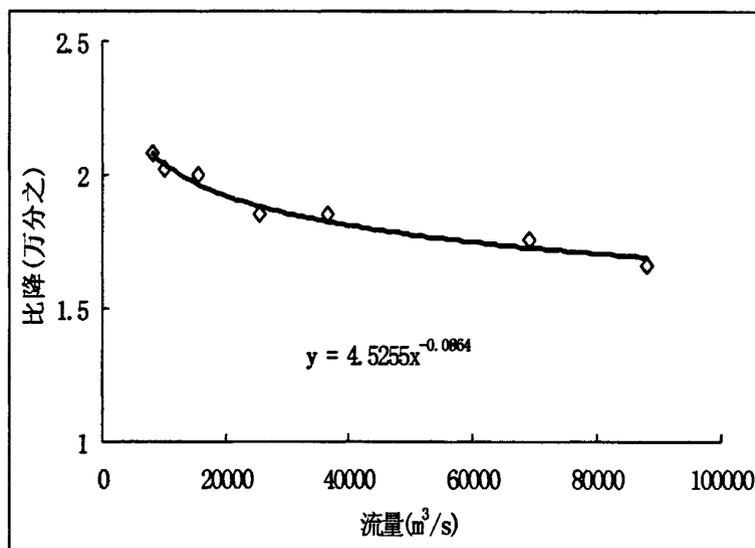


图 4.3 寸滩站比降-流量关系

Figure 4.3 The relationship between slope and flow at Cuntan station

按照公式 4.12, m 取经验值 2。最后求得 F_G 值。随后绘制 $Q^m \cdot JP \sim Q$ 关系曲线图(见图 4.4)。从图中查出 $Q^m \cdot JP$ 的最大值所对应的流量值 Q 为 $39068.18 \text{ m}^3/\text{s}$, 对应与万州站流量为 $40460 \text{ m}^3/\text{s}$ 。此值即为我们所需的代表流量值。

4.3.2 判别指标的选取

泥沙的冲淤及河床的演变和水流的流速及水深有较大的关系, 因而在泥沙运动动力学里面提出关于泥沙冲淤的流速指标就包括泥沙起动流速、止动流速, 而直接关系河床冲淤的水流挟沙力指标的主要参数也是流速, 因而采用水流速度及水

深的组合关系来判别泥沙冲淤是符合河流动力学基本原理的科学方法。

泥沙大规模输移一般集中发生于洪水期,分析洪水期三峡库区不同河段的流速、水深分布同该河段泥沙淤积间的关系,可以获得该河段泥沙淤积的判断指标。由于三峡成库以后库区河段受回水影响,水流速度大幅减缓,流速分布趋于均匀化,为简化分析方法,因而采用断面平均流速和平均水深作为判别指标的计算和分析的依据。

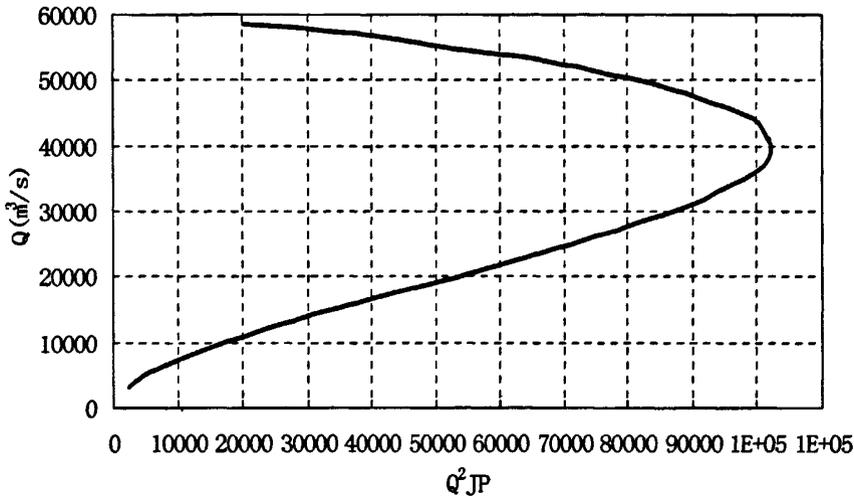


图 4.4 $Q^2 JP \sim Q$ 关系曲线

Figure 4.4 The relation curve between $Q^2 JP$ and Q

4.4 三峡成库后库区淤积判别

根据三峡成库以后常年库区内 243 个库区原型观测断面统计,迄今为止共有 126 个断面发生淤积,117 个断面没有发生淤积,而涪陵以上的变动回水区内的 107 个断面则没有出现明显的泥沙累积性淤积。统计分析常年库区内 243 个断面及变动回水区内的 107 个断面在汛期常遇流量时的平均流速和水深,并将其组成的数据对进行分析,以研究库区河道泥沙淤积的规律,如图 4.5 所示。从图中统计的结果表明,其淤积规律同所在三峡库区的位置以及水深的分布有密切的联系,并在不同的水深段表现出不同的特性,因而考虑将整个库区划分为三段分析其淤积规律。考虑到 135-139m 蓄水运行期,变动回水区段数据点较少,则更具收集的资料在本章分析变动回水区段的淤积判别部分,加入了 145-175m 运行时的数据,以增强其代表性。

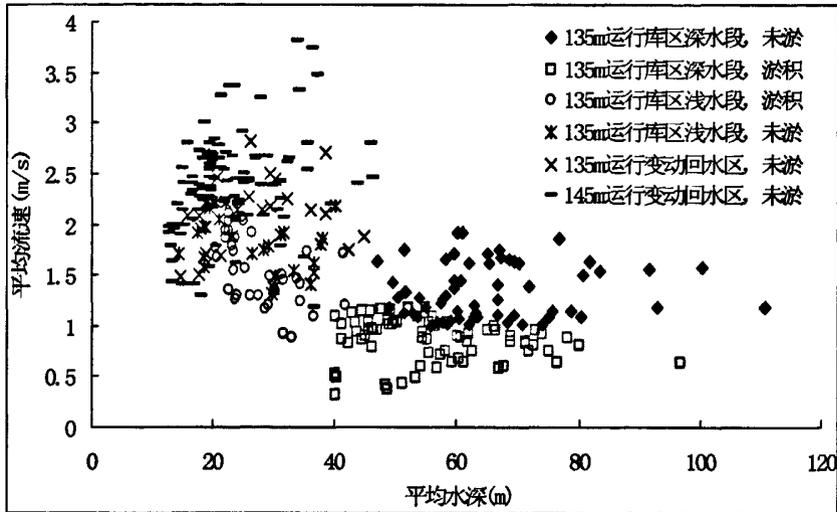


图 4.5 库区河段淤积断面平均水深和流速的关系图

Figure 4.5 The relationship of average depth and velocity in silting section at reservoir

4.4.1 库区深水段

在该河段内共有 84 个断面发生淤积, 62 个断面未发生淤积, 其随水深及流速的分布如图 4.6 所示。

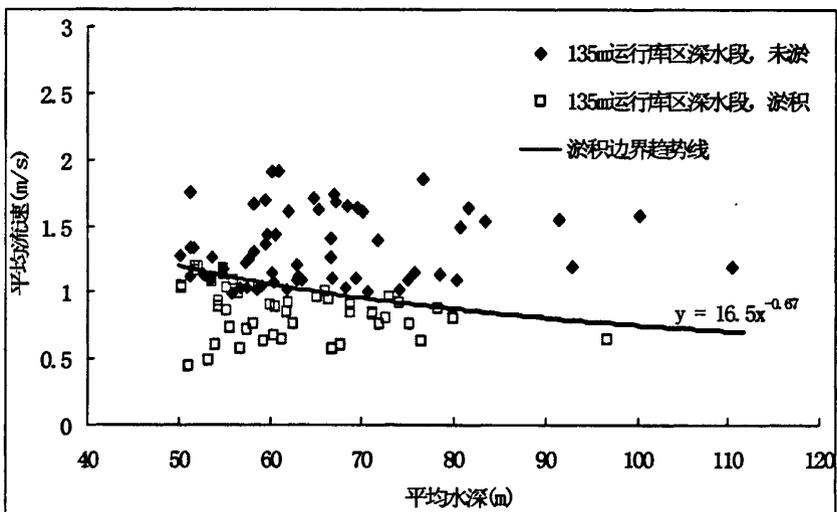


图 4.6 库区深水段淤积断面平均水深和流速的关系图

Figure 4.6 The relationship of average depth and velocity in silting section at deep-water reach

从库区深水段内淤积断面与未淤积断面对比关系来看,该段水深超过 50m 以后,其发生淤积与否与断面平均流速关系较大。

对比水深及流速关系可以发现,其淤积发生的临界条件的趋势线并不是一条直线。淤积边界随着水深的增加,发生淤积的临界流速逐渐减小;趋势线在水深小的时候变化快,水深大时变化幅度趋缓,而在水深超过 100m 以后,其接近于常数值。根据发生淤积断面的边界,可以做出一条用幂函数表达的曲线来表示其发生淤积的临界条件:

$$U = 16.5H^{-\frac{2}{3}} \quad (4.14)$$

式中, U 、 H 分别表示断面平均流速和水深,上式适用条件为水深大于 50m。

由图 4.6 及公式 4.14 分析可得,在常年库区的深水段内,发生淤积的最大临界流速为 1.2m/s。

4.4.2 库区浅水段

该河段内共有 76 个断面发生淤积,25 个断面未发生淤积,其随水深及流速的分布如图 4.7 所示。

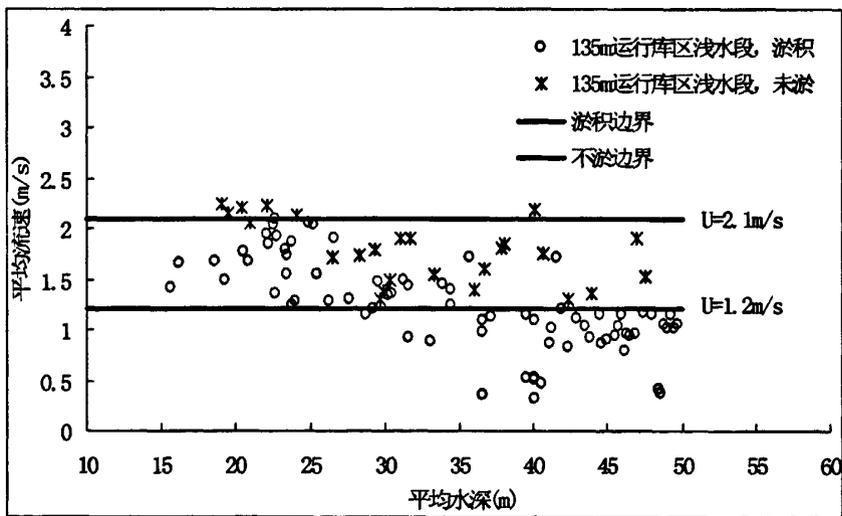


图 4.7 库区浅水段淤积断面与平均水深和流速的关系图

Figure 4.7 The relationship of average depth and velocity
in silting section at shallow reach

对比该区域内的淤积断面的流速及水深的分布关系可知,当断面平均流速小于 1.2m/s 时,基本上会发生断面的泥沙淤积。当断面平均流速大于 2.1m/s 时,一

般不会发生淤积。

而流速位于 $1.2\sim 2.1\text{m/s}$ 之间时, 其发生淤积与否则同所在河段的平面形态有关。如果所在河道平面形态呈分汊放宽型或者连续弯曲河道, 则容易发生淤积; 若河道平面形态为顺直型则发生淤积的可能性较小。

因此, 常年库区浅水段泥沙淤积的判别标准可以归纳为:

(1) $U > 2.1\text{m/s}$, 不发生淤积;

(2) $U \leq 1.2\text{m/s}$, 发生淤积;

(3) $1.2\text{m/s} < U \leq 2.1\text{m/s}$, 若为连续弯道或者分汊放宽河道, 则发生淤积, 否则不淤积。

4.4.3 变动回水区

三峡水库成库以来, 在 $135\sim 139\text{m}$ 蓄水阶段, 变动回水区范围在丰都以上, $145\sim 175\text{m}$ 蓄水阶段, 涪陵以上为变动回水区。为分析变动回水区泥沙淤积的判别标准, 分别对 $135\sim 139\text{m}$ 丰都至涪陵河段内 25 个、 175m 蓄水阶段涪陵至重庆河段内 107 个共计 132 个变动回水区内原型观测断面进行泥沙淤积分析, 132 个断面的淤积与流速及水深对比关系见图 4.8 所示。

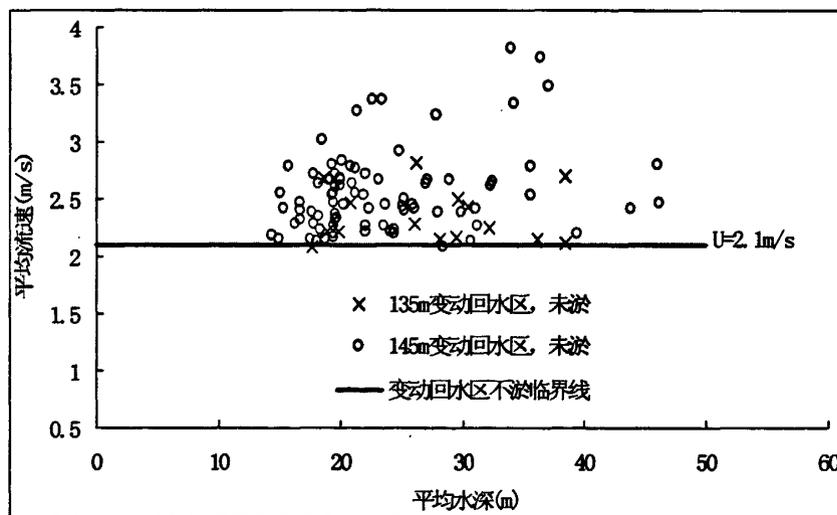


图 4.8 变动回水区淤积断面平均水深和流速的关系图

Figure 4.8 The relationship of average depth and velocity
in silting section at the variable backwater region

从变动回水区的断面淤积对比图可知, 在 $135\sim 139\text{m}$ 、以及始于 2008 年的 175m 试验性蓄水阶段, 变动回水区未现明显的断面泥沙累积性淤积现象, 因而无法给

出变动回水区断面泥沙淤积的临界判别指标。

而对比两个蓄水阶段的变动回水区内的断面平均流速可以发现，所有断面的平均流速均大于 2.1m/s，所以可以 2.1m/s 作为变动回水区不淤积的临界条件，即在变动回水区，有如下规律：

$U \geq 2.1m/s$ ，则不发生淤积。

但是，尽管从目前变动回水区的断面分析资料来看，没有出现明显的断面泥沙累积性淤积，但实际上在局部河段还是出现了一些泥沙淤积现象。综合来看，这些泥沙淤积区域主要发生在河道较为宽阔的河段两岸的回水区、缓流区内，这些区域内因汛期通常为水深较大的回水沱，容易导致泥沙落淤。在天然情况下，这些淤积的泥沙每年汛后基本上可以被带走；而目前三峡水库蓄水时间提前，进程加快，使得每年 9 月份以后的走沙期消失，汛期淤积的泥沙在当年不能被带走，冲刷期延至第二年库区的消落期，这时候尽管水库水位降低，但由于长江来流量不大，水位较低，不足以将头年的泥沙冲走，因而逐渐累积下来形成淤积。如位于重庆铜锣峡下游的郭家沱等。

第五章 库区连续弯道三维数值模拟

根据库区各段河床演变规律的分析,三峡库区浅水段泥沙的淤积主要是与河段所属河型有直接关系,并不类似与深水段的“主槽平淤”形态。浅水段连续弯道内淤积是集中在弯道凸岸下游一侧,被形象的表述为“弯道背部淤积”。弯道水流结构异常复杂,属典型的三维流动。因此,想要了解和探讨这类河段的泥沙淤积情况,建立一个三维水流模型是非常重要的。

本章中,选取库区凤凰滩至东溪口河段,即“三湾”河段为本次计算河段。位于忠县与丰都二县之间,处于三峡常年回水区上段。由4个连续弯道组成。

5.1 弯道水沙动力特征

5.1.1 弯道水流运动特征

① 弯道水流动力轴线

水动力轴线,是连结水流流程各断面内的最大纵向垂线平均流速曲线。亦称主流线。反映了水流最大动量所在的位置,对河床演变有重大影响。我们认为水流动力轴线的变化与水流条件、河弯平面外形特征与过水断面特征有关。

主要特点:1)在弯道进口段或者在弯道上游的过渡段,常偏靠凸岸,进入弯道以后,即逐渐向凹岸转移,至弯顶稍上部位开始偏靠凹岸。顶冲点向下相当长的距离内,主流贴近凹岸。2)在枯水期水位低,水流动量小,主流线曲率较大,靠近凹岸流动。洪水期水位高、水流动量大,惯性作用强,以致主流曲率相对较小,离开凹岸,趋向河中心位置。且顶冲点位置也随主流变化,即“低水上提”、“高水下挫”现象。

② 弯道环流

弯道水流是一个三维的水流运动现象。Thompson认为其弯道的环流是由于近床面和自由面流体之间离心加速度的不同而引起的。在床面附近流动流体因河床阻力而受到阻滞,在自由面附近运动较快。这就造成表层水流向凹岸的径向运动和凹岸自由面升高,同时由于静压力梯度指向凸岸,近床面的低流速流体向凸岸运动^[1]。因此在弯曲河道中的泥沙运动也是以螺旋流的存在定性描述,认为螺旋流的存在使得泥沙从凹岸向凸岸搬运,形成了特定水流泥沙条件下的床面形态。

Prandtl于1952年确定了两种环流的类型^[28]:

(1) 扭曲诱发环流

同第一类的Prandtl流动,这种环流发生在河道横向流动漩涡产生扭曲,造成

沿流线方向的分量的情况。而扭曲通常是由河道平面形状的非均匀性造成的，弯曲河道正是如此。

(2) 应力诱发环流

如同第二类 Prandtl 流动，应力诱发流动的产生不需要河道平面形状发生变形。这种流动常存在于具有非圆形横断面的河道中，因为此处中的紊动水流为各向异性。

应力诱发的环流，发生在河床和岸壁边界互相影响的非圆形管道和河道的角落部位。Einstein 和 Shen 于 1964 年确认这种环流，当床面和边坡粗糙度不同时较易发生^[29]。

天然河流，无论是顺直的或者是弯曲的，水流流动都是充分紊动的。在顺直河道中，由于在角落部位紊动水流的各向异性，而存在第二类环流。如果水流流经弯道，第一类型的环流将叠加在现存的第二类流动之上。

5.1.2 弯道泥沙运动特征

① 悬移质运动

作曲线运动的弯道水流，因垂线上各点的环流旋度不同而各取不同的运动轨迹，在平面上将作扇形展开，垂线的位置不同，扇形展开的程度也不同。流线在平面上展开的结果，将使含沙量高的水体和较粗的泥沙集中靠近凸岸，而凹岸区的水相对较清，泥沙要细一些，含沙量在垂线上的分布也要均匀一些。所以，悬移质运动与螺旋流的关系是非常密切的。

② 推移质运动

弯道中推移质运动具有成带性运动的特点。一种观点认为，河弯的发展完全取决于弯道内泥沙的横向输移，即在同一弯道内，泥沙由凹岸向凸岸输移，所谓“异岸输移”。另一种观点，凹岸冲刷的泥沙，几乎全部淤积在下一河弯的凸岸部分，而只有少量的泥沙横跨河床淤在同一河弯的凸岸，所谓“同岸输移”。

但是曾庆华^[30]、张瑞瑾^[31]及王博^[32]等人研究证明，推移质同岸输移规模要大于异岸输移规模；同岸输移泥沙的运动轨迹呈“半江人字形”，由凹岸运移到过渡段的中央部分，就受到下一弯道环流的影响，而运行到下一个弯道的凸岸边滩，异岸输移的泥沙，则是越过深槽，由凹岸运行到本弯道的凸岸和下一个弯道的凹岸；异岸输移的规模随流量的增加而减少。

5.2 数值模拟方法

5.2.1 水气两相流的 VOF 模型

带有自由表面的水流流动是一种极普遍的自然现象, 如何追踪模拟自由表面一直是数值模拟研究的重点, 人们在实践中提出了许多解决方法, 本研究选用 VOF 法追踪自由表面^[33]。该方法的基本思想是: 定义函数 $\alpha_w(x, y, z, t)$ 和 $\alpha_a(x, y, z, t)$ 分别代表计算区域内水和气占计算区域的体积分数 (体积的相对比例)。在每个单元中, 水和气的体积分数之和为 1, 即:

$$\alpha_w + \alpha_a = 1 \quad (5.1)$$

对于某个计算单元而言, 存在下面三种情况:

$\alpha_w = 1$ 表示该单元完全被水充满;

$\alpha_w = 0$ 表示该单元完全被气充满;

$0 < \alpha_w < 1$ 表示该单元部分是水, 部分是气, 有水气界面。

显然, 自由表面问题属于第三种情况。水的体积分数 α_w 的梯度可以用来确定自由边界的法线方向。计算出各单元的 α_w 数值及其梯度之后, 就可以确定各单元中自由边界的近似位置。

水的体积分数 α_w 的控制微分方程为:

$$\frac{\partial \alpha_w}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_w}{\partial x_i} = 0 \quad (5.2)$$

式中, t 为时间, u_i 和 x_i 分别为速度分量和坐标分量 ($i=1, 2, 3$)。水气界面的跟踪即通过求解该连续方程来完成。

5.2.2 控制方程

在 VOF 模型中, 由于水和气共有相同的速度场和压力场, 因而对水气两相流可以像单相流那样采用一组方程来描述流场^[34]。本研究采用的 $k-\varepsilon$ 紊流模型, 连续方程、动量方程和 RNG $k-\varepsilon$ 方程分别表示如下:

$$\text{连续方程: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5.3)$$

$$\text{动量方程: } \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (5.4)$$

$$k \text{ 方程: } \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu + \mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (5.5)$$

$$\varepsilon \text{ 方程: } \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu + \mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5.6)$$

式中, ρ 和 μ 分别为体积分数的密度和分子粘性系数。 p 为修正压力; μ_t 为紊流粘性系数, 它可由紊动能 k 和紊动耗散率 ε 求出:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5.7)$$

其中, ρ 为经验常数; ρ 和 ρ 分别为 ρ 和 ρ 的紊流普朗特数; ρ 为平均速度梯度引起的问动能产生项, 由下式定义:

$$G = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5.8)$$

上述方程中的各项系数取值见表 5.1

表 5.1 控制方程中的常数

Table 5.1 Constant value in governing equation

C_μ	C_k	C_ε	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$
0.09	1.0	1.3	1.44	1.92

以上各张量表达式中, $i=1, 2, 3$, 即 $\{x_i=x, y, z\}$, $\{u_i= u, v, w\}$; j 为求和下标。

引入 VOF 模型的 $k-\varepsilon$ 紊流模型方程与单相流的 $k-\varepsilon$ 模型形式是完全相同的。只是密度 ρ 和 μ 的具体表达式不同, ρ 和 μ 是体积分数的函数, 而不是常数。它们可由下式表示:

$$\rho = \alpha_w \rho_w + (1 - \alpha_w) \rho_a \quad (5.9)$$

$$\mu = \alpha_w \mu_w + (1 - \alpha_w) \mu_a \quad (5.10)$$

式中, α_w 为水的体积分数, ρ_w 和 ρ_a 分别水和气的密度。 μ_w 和 μ_a 分别为水和气的分子粘性系数。通过对水的体积分数 α_w 的迭代求解, 水气混合流体的 ρ 和 μ 值随时都可由式 (5.9)、(5.10) 求出。

5.2.3 数值求解方法

在前面所建立的方程组 (5.1) ~ (5.10), 还必须采用一定的数值求解算法才能求解出全部计算域的未知变量。本研究采用控制体积法来离散计算区域, 然后在每个控制体积中对微分方程进行积分, 再把积分方程线性化, 得到各未知变量, 如速度、压力、紊动能 k 等的代数方程组, 最后求解方程组即可求出各未知变量^[35]。为方便起见, 将方程 (5.3) ~ (5.6) 写成如下的通用形式:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (U\phi) - \nabla \cdot (\Gamma_{\phi} \nabla \phi) = S_{\phi} \quad (5.11)$$

式中, t 和 U 分别为时间和速度矢量, ϕ 为通用变量, 可用来代表 u, v, w, k 和 ε 等变量。 Γ_{ϕ} 为变量 ϕ 的扩散系数, S_{ϕ} 为方程的源项, 各输运方程中, Γ_{ϕ} 和 ϕ 的具体形式见表 5.2。

表 5.2 方程 (11) 中 ϕ 、 Γ_{ϕ} 和 S_{ϕ} 的具体形式Table 5.2 Morphology in parameters (ϕ , Γ_{ϕ} and S_{ϕ}) in the equation (11)

方 程	ϕ	Γ_{ϕ}	S_{ϕ}
连续方程	ρ	0	0
动量方程	$\rho \mu$	$\mu + \mu_t$	$\frac{\partial \Gamma}{\partial x_i}$
k 方程	ρk	$u + \frac{u_t}{\sigma_k}$	$G - \rho \varepsilon$
ε 方程	$\rho \varepsilon$	$u + \frac{u_t}{\sigma_k}$	$C_{1k} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{2E} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$

① 方程的离散及线性化

对较为简单的恒定流情况, 在任意控制体积 V 上对方程 (5.11) 的积分为:

$$\int \rho \phi U d\Lambda = \int \Gamma_{\phi} \nabla \phi \cdot d\Lambda + \int S_{\phi} dV \quad (5.12)$$

对方程(5.12)式进行离散, 得:

$$\sum_f^{N_f} U_f \phi_f A_f = \sum_f^{N_f} \Gamma_{\phi} (\nabla \phi)_n A_f + S_{\phi} V \quad (5.13)$$

式中 f 为某个面, N_f 为围成单元的面的个数, U_f 和 ϕ_f 分别为穿过面的法向

速度和 ϕ 值, A_f 为 f 面的面积。 $(\nabla\phi)_n$ 为 ϕ 的梯度在 f 面法线方向的投影大小, V 为控制体体积。

离散方程(5.13)中包含控制体中心及相邻控制体中心的未知变量, 通常方程对这些变量是非线性的, 可用下列公式对方程(5.13)进行线性化:

$$a_p\phi = \sum_{nb} a_{nb}\phi_{nb} + b \quad (5.14)$$

式中下标 nb 表示相邻控制体, a_p 和 a_{nb} 分别为和 ϕ 和 ϕ_{nb} 的线性化系数。

对于非恒定流, 除了需在空间上对控制方程进行离散外, 还须对时间进行离散, 对变量的通用时间方程可写为:

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} = F(\phi) \quad (5.15)$$

式中函数 F 代表所有的空间离散项, 对时间的偏微分采用一阶向后差分格式进行离散:

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = F(\phi) \quad (5.16)$$

式中 F 的值采用隐式格式, 即 $F(\phi^{n+1})$ 的值, 则上式可写为:

$$\phi^{n+1} = \phi^n + \Delta t F(\phi^{n+1}) \quad (5.17)$$

此隐式方程可通过对 ϕ^{n+1} 赋初值 ϕ^1 , 并对上式进行迭代求解。全隐式格式的优点是对任何时间步长都无条件收敛。

②压力-速度耦合算法

在方程(5.4)中, 压力梯度为动量方程中源项的组成部分之一, 但是, 没有用来直接求解压力的方程。这就必须采用一定的措施来反映压力变化对速度场的影响。本文采用(SIMPLE—Consistent)算法对压力和速度场进行耦合计算。SIMPLEC算法是SIMPLE(semi-implicit Method for Pressure Linked Equations)算法的一种改进形式, 它利用速度和压力的耦合关系来确保质量守恒并通过求解连续方程获得压力场。

③边界条件处理

(1) 固壁边界

固体边壁采用考虑边壁粗糙影响的壁函数法处理, 糙率选取为0.035。

(2) 自由表面

采用三维VOF法进行计算, 水面以上边界为大气压力, 并按照对称边界处理。

(3) 进、出口条件

进口边界划分为水流速度进口和空气速度进口, 并给定初始进口速度 u 和 k 、

ε , 其中, k 、 ε 按经验公式 $k=0.0144u^2$ 和 $\varepsilon=k^{1.5}/(0.5h)$ 给出, h 为计算起始断面的平均水深, 紊动能正应力为紊动能的 $1/3$, 切应力为 0 。出口边界划分为压力出口和质量出口, 其中, k 、 ε 采用与进口相同的经验公式计算, 则 u 、 h 为出口断面的流速和水深。

5.3 库区连续弯道泥沙淤积分析

5.3.1 水动力轴线分析

由计算结果分析, 河段中从第 I 弯道开始主流线就已偏向凸岸一侧; 到达第 II 弯道时主流依旧靠近凸岸附近, 顶冲点位置位于凹岸下游位置; 第 III 弯道情况一样, 主流靠近凸岸一侧。第 IV 弯段, 弯顶前部位有塘土坝将河道分为两汉, 主流由前弯经过塘土坝左槽后, 与右槽水流汇合, 见图 5.1 所示。总的看来, 连续弯道的水动力轴线是由“凸岸—凸岸”, 大流速带位于凸岸靠近河道中心位置一侧, 顶冲点位于弯道凹岸下游附近, 水流“走直”趋势明显。

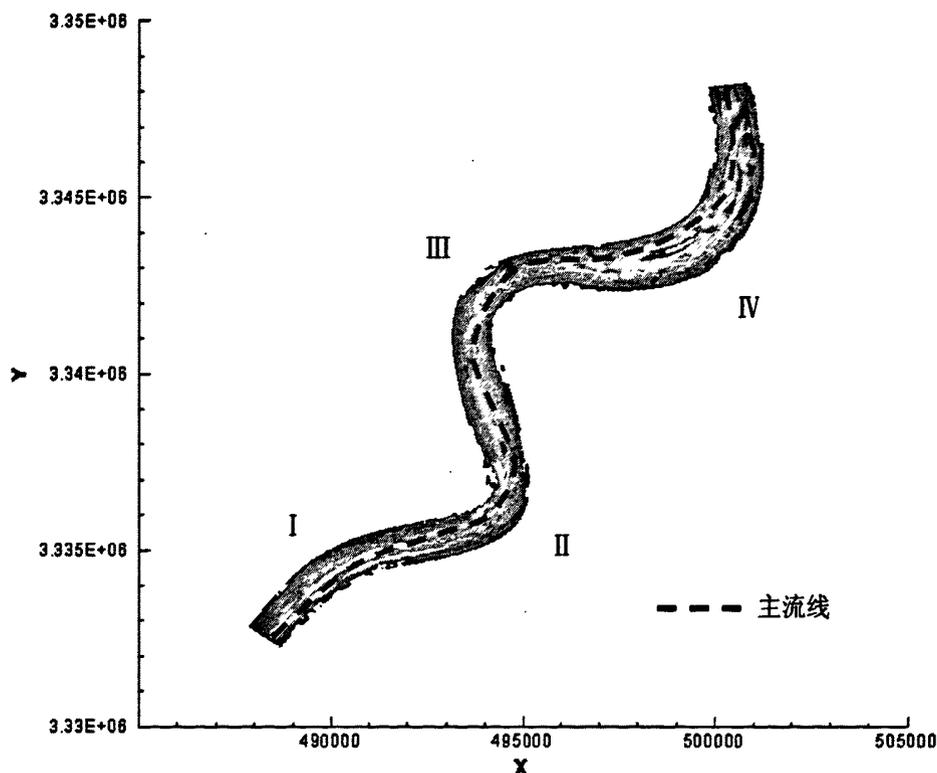


图 5.1 水动力轴线示意图

Figure 5.1 The flow dynamic axis

这种现象, 与李琳琳^[37], 王博^[32]等人的研究成果吻合。两者均对单个弯道和

连续弯道的纵向水流（主流线）做了较细致的研究。认为连续弯道与单个弯道的主流区有所不同。单个弯道水流进入弯道后，主流区偏向凸岸，凹岸流速降低，在弯顶前凸岸一侧形成高流速区；经过弯顶后，水流在凸岸下游近壁区脱离边壁，形成回流区，同时高流速区转移至凹岸。连续弯道中，随着上游来流量的增大，弯道中最大纵向流速的位置由弯顶前凸岸处向弯顶下移，顶冲点下移，主流线由偏向凸岸一侧向流道中部移动，纵向流速沿弯道宽度方向的分布趋于均匀，所谓低水傍岸，高水居中。

5.3.2 连续弯道水流结构与泥沙淤积分析

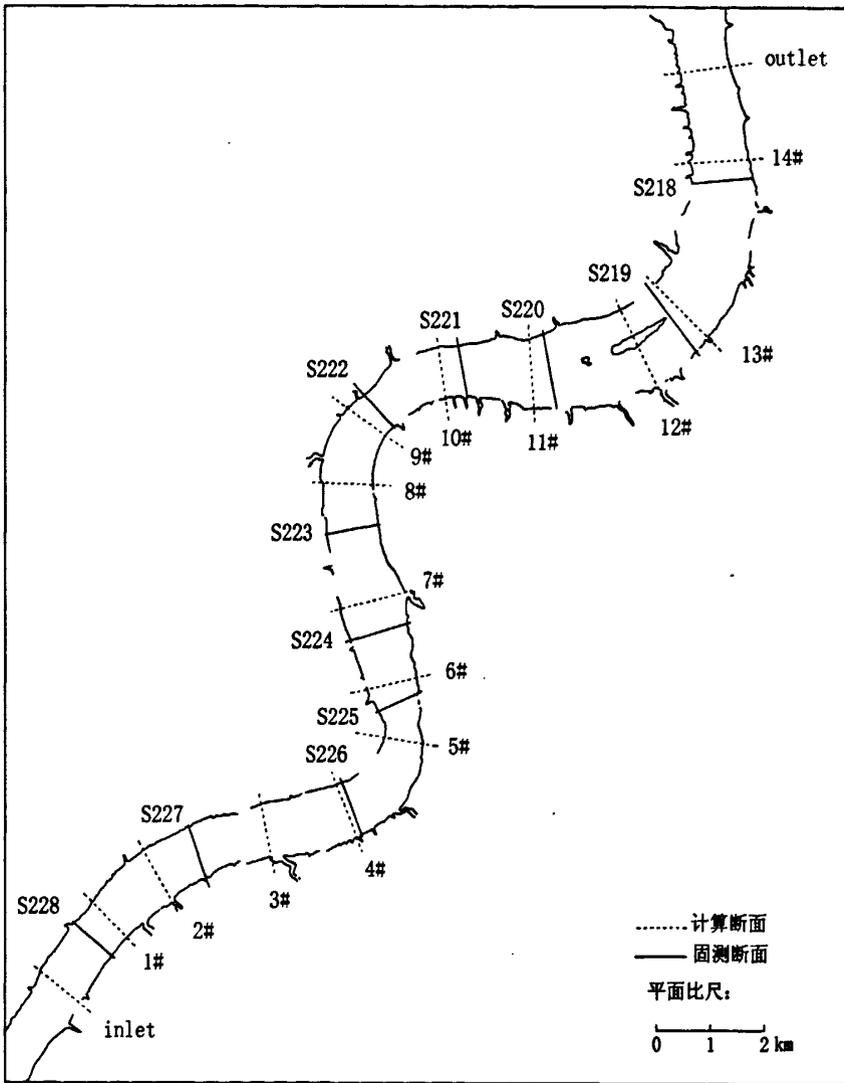
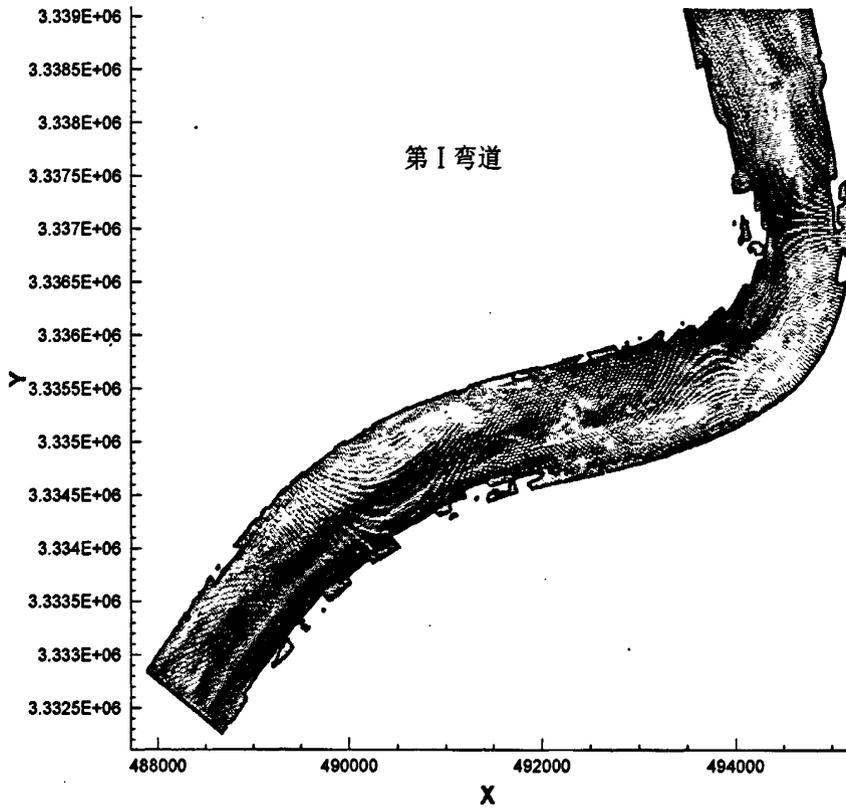


图 5.2 断面布置图

Figure 5.2 Analysis section layout plan



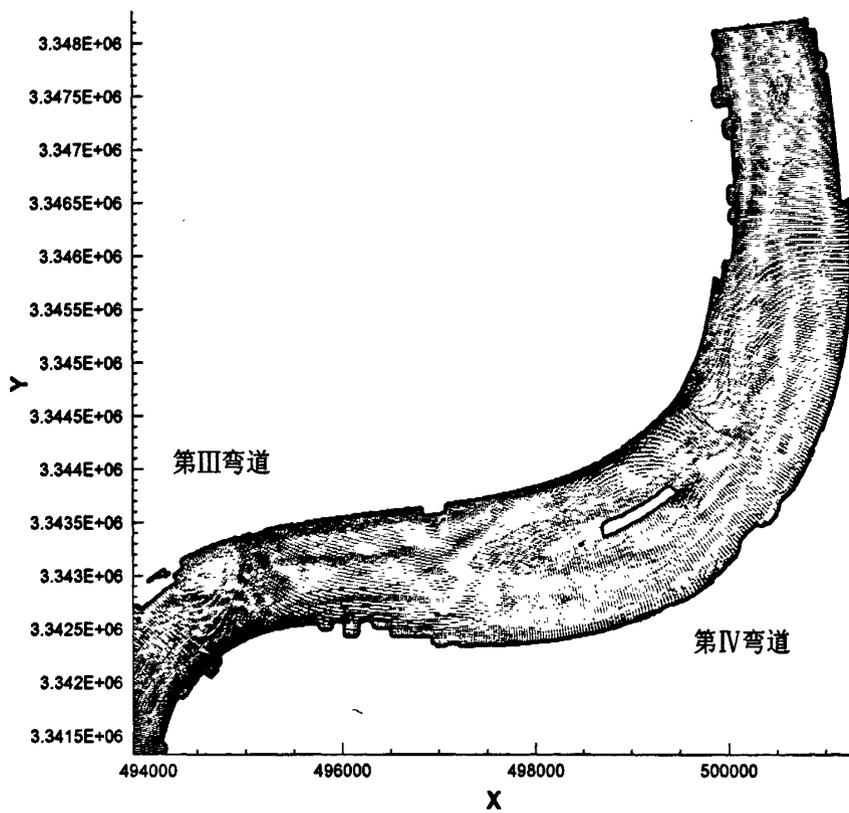
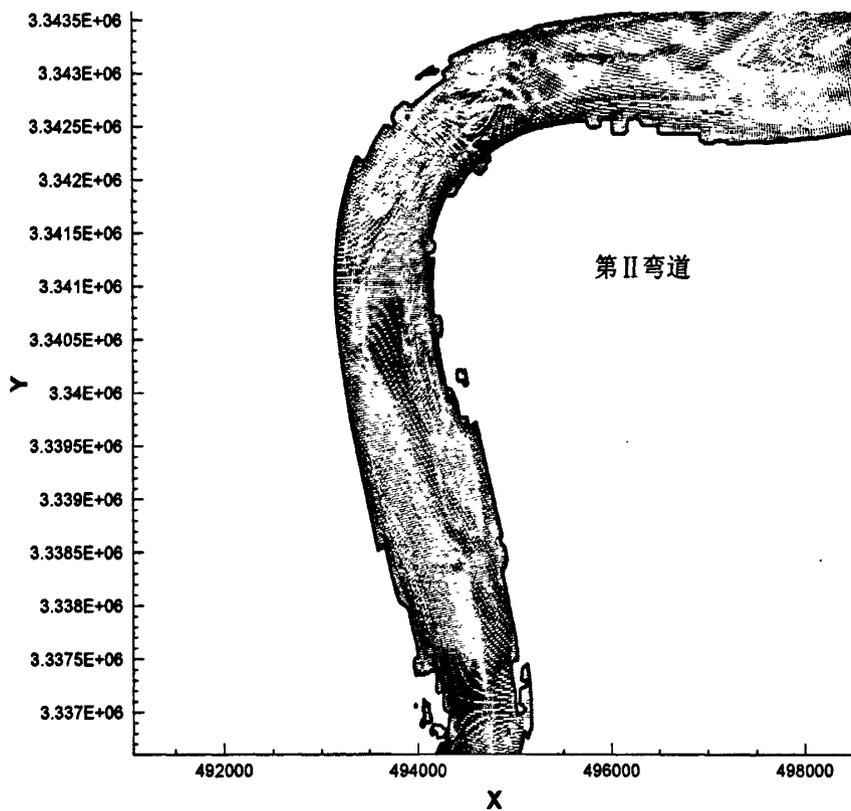


图 5.3 平面流速分布图

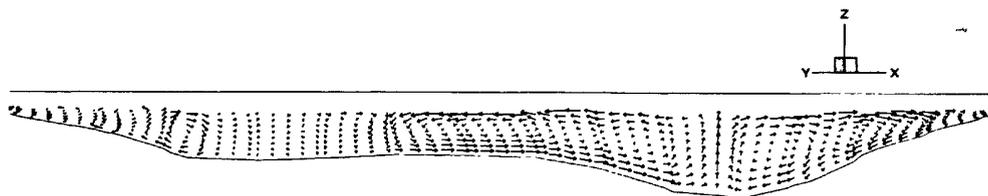
Figure 5.3 The figure of plane velocity value

三峡水库自 2003 年 6 月开始蓄水以后, 万州~丰都河段属于常年库区范围以内。由万州~丰都河段内 17 个淤积体上的级配曲线分析, 淤积泥沙中值粒径除 2004 年基本上在 0.2mm 以外, 2005 年以后一般都在 0.1mm 以下, 而且粒径在 0.1mm 以下的泥沙多数淤积体上占到了 95% 以上。总体来看, 该河段泥沙淤积主要是 0.1mm 以下的细沙。所以本文主要对细颗粒泥沙淤积淤积进行讨论。

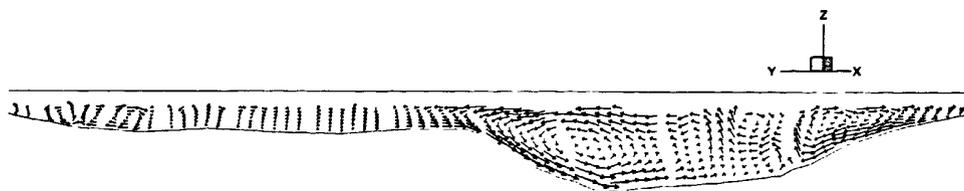
第 I 弯道:

从进口之后, 水流进入弯道, 到达 I 弯弯顶处时, 正向环流就已经发育良好 (如图 5.4), 环流底部指向凸岸, 表层指向凹岸。右侧上方伴随小强度反向环流。考虑到主流带是反映水流最大动量所在的位置, 所以, 泥沙运动最活跃的地方也应该在此。

第 I 弯道凸岸一侧为主流带区 (见图 5.3, 平面流速分布图), 根据断面水流投影, 强度较大的环流也位于凸岸一侧的深槽内。分析其泥沙运动情况, 一般细颗粒泥沙受到环流作用的影响, 会被强度较大的环流挟带至缓流区落淤。这与此段部位的淤积情况吻合 (如图 5.5), 靠近凸岸一侧的深槽内, 淤积相对较少, 而主要淤积在凹岸一侧的低流速区域。环流作用将主流泥沙挟带至河道两侧方向位置。被带至两侧的泥沙也可分为两种情况落淤。1、由于环流的减弱和重力的作用, 到达缓流区后落淤; 2、被挟带的泥沙受到二次环流作用, 再次挟带落淤。



1#



2#

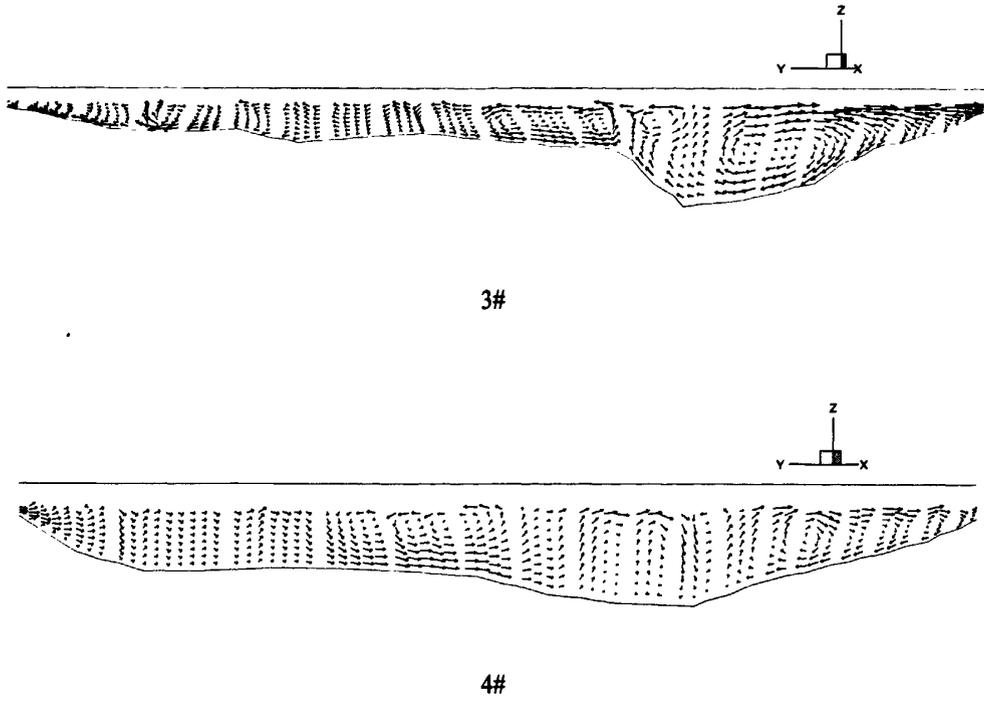
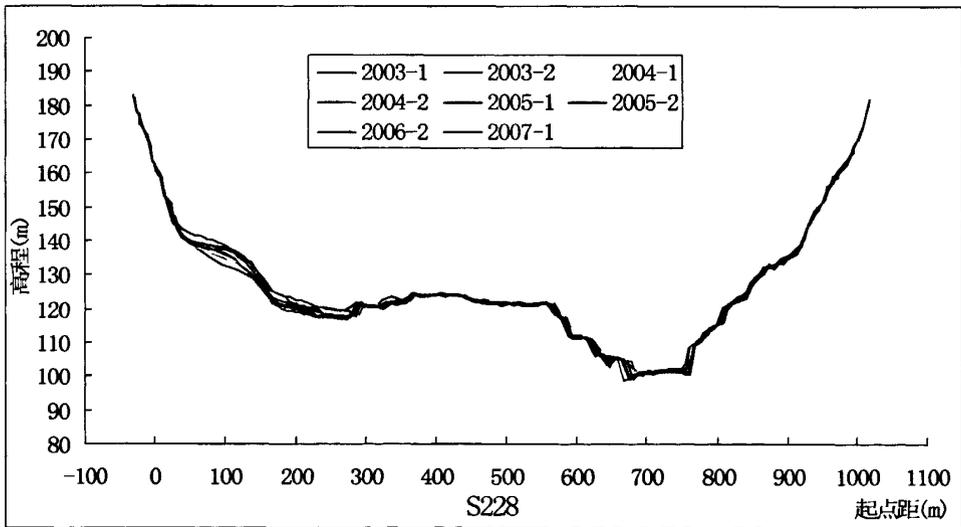


图 5.4 横向环流变化图 I

Figure 5.4 Variations of circulation flow in bend flow I



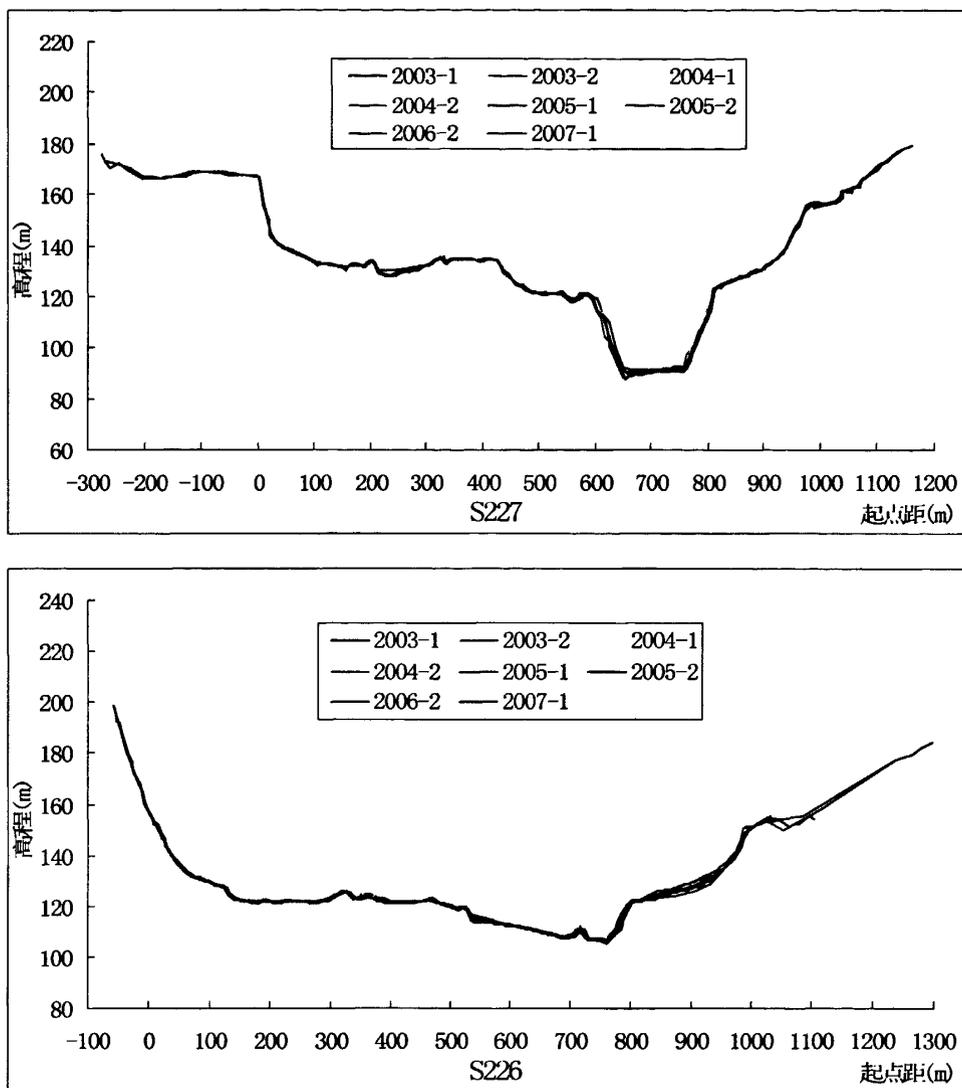


图 5.5 实测断面淤积情况 I
Figure 5.5 The measured value of silting section I

第 II 弯道:

在第 II 弯道顶部位置处, 反向环流占据绝对优势 (如图 5.6, 5#)。并没有形成类似于单弯道环流结构, 即环流底部指向凸岸, 表层指向凹岸。分析其原因, 是由于 I 弯所产生的环流结构的惯性作用, 且几乎没有过渡段调整。这直接影响着 II 弯的环流结构。

弯顶之后, 主流带偏向河道中间位置, 且主流两侧存在环流, (如图 5.6) 亦将主流所挟带的泥沙由环流带至左岸环流区落淤, 形成“弯道背部淤积”这种现象。观察图 5.6, 5#、6#、7#及 8#环流结构形式, 都是伴随在主流带两侧, 且主流所在位置, 淤积强度均较小。实测断面可以说明这点 (如图 5.7)。

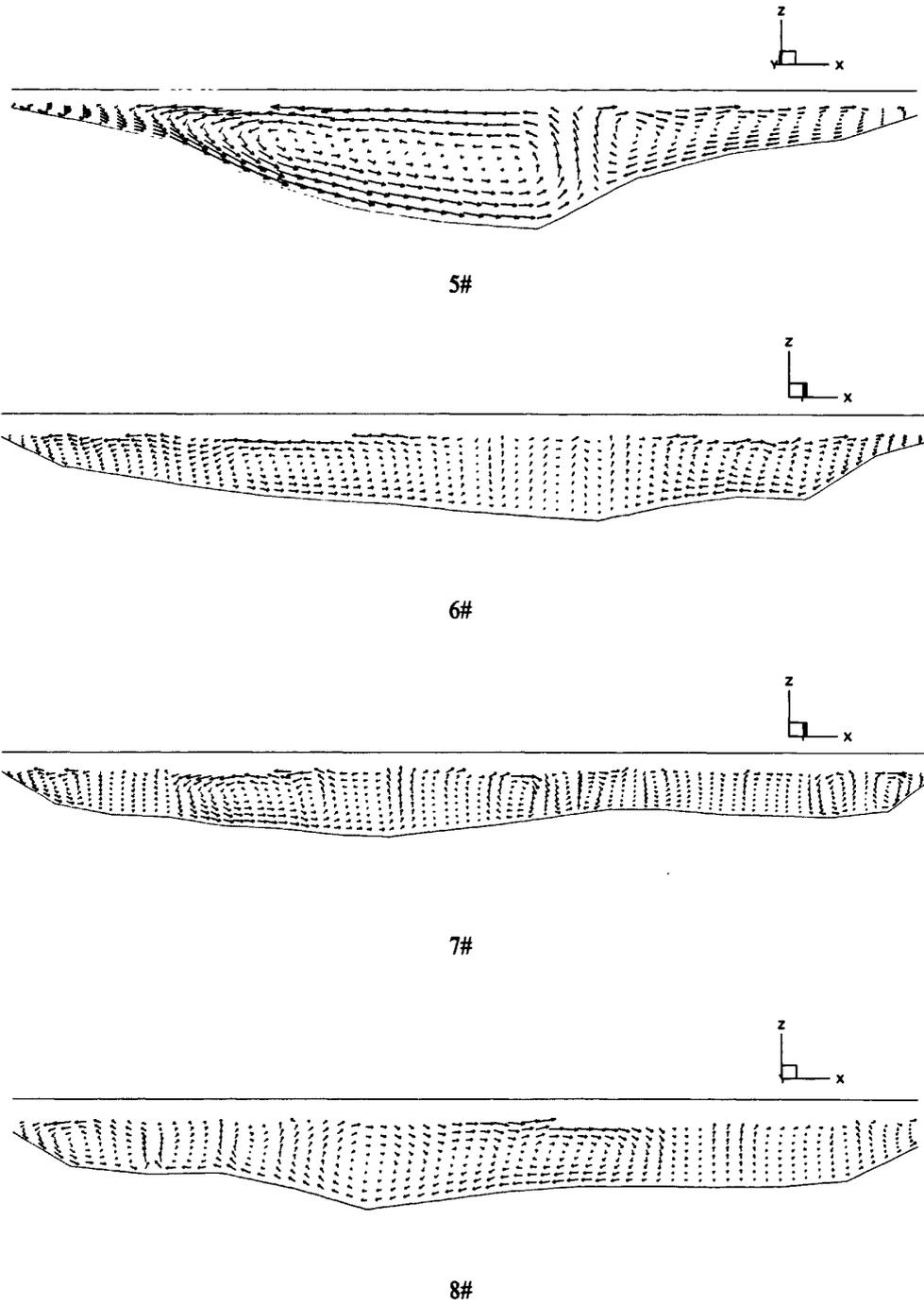


图 5.6 横向环流变化图 II

Figure 5.6 Variations of circulation flow in bend flow II

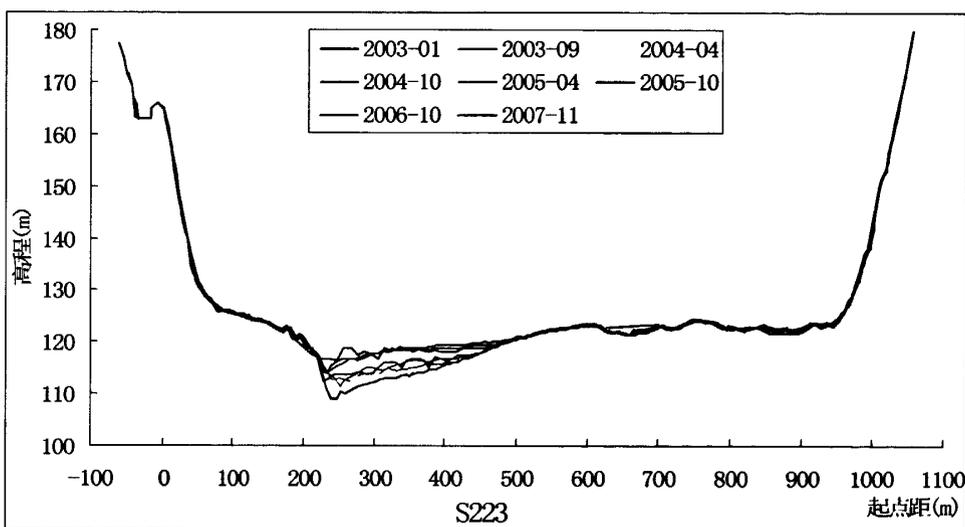
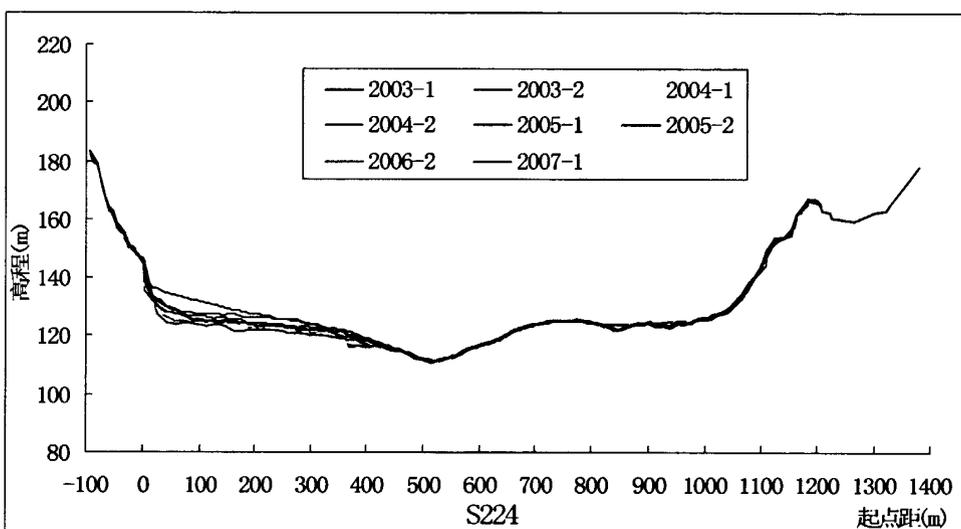
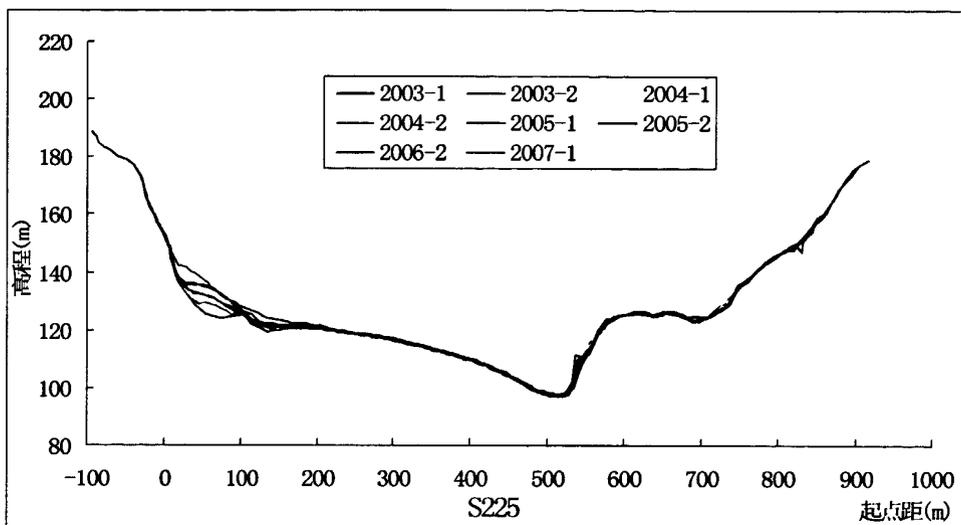


图 5.7 实测断面淤积情况 II

Figure 5.7 The measured value of silting section II

第III弯道:

III弯弯顶处地形较为复杂(图 5.8, 9#), 以正向环流占主要优势。主流带位于凸岸偏向中间一侧, 依照环流形式, 可以推断, 此处淤积会发生在主流带两侧的权利槽及左槽部位。

弯顶之后, 由于惯性力作用, 其环流形式是以弯顶处正向环流形态占主导。且环流底部强度较大, 而上部强度较小(如图 5.8)。这就意味着, 泥沙会被挟带至右岸方向。前方“塘土坝”将河道分为左右两槽, 主流由左槽经过, 更加加剧了右槽的淤积强度。实测断面淤积见图 5.9。

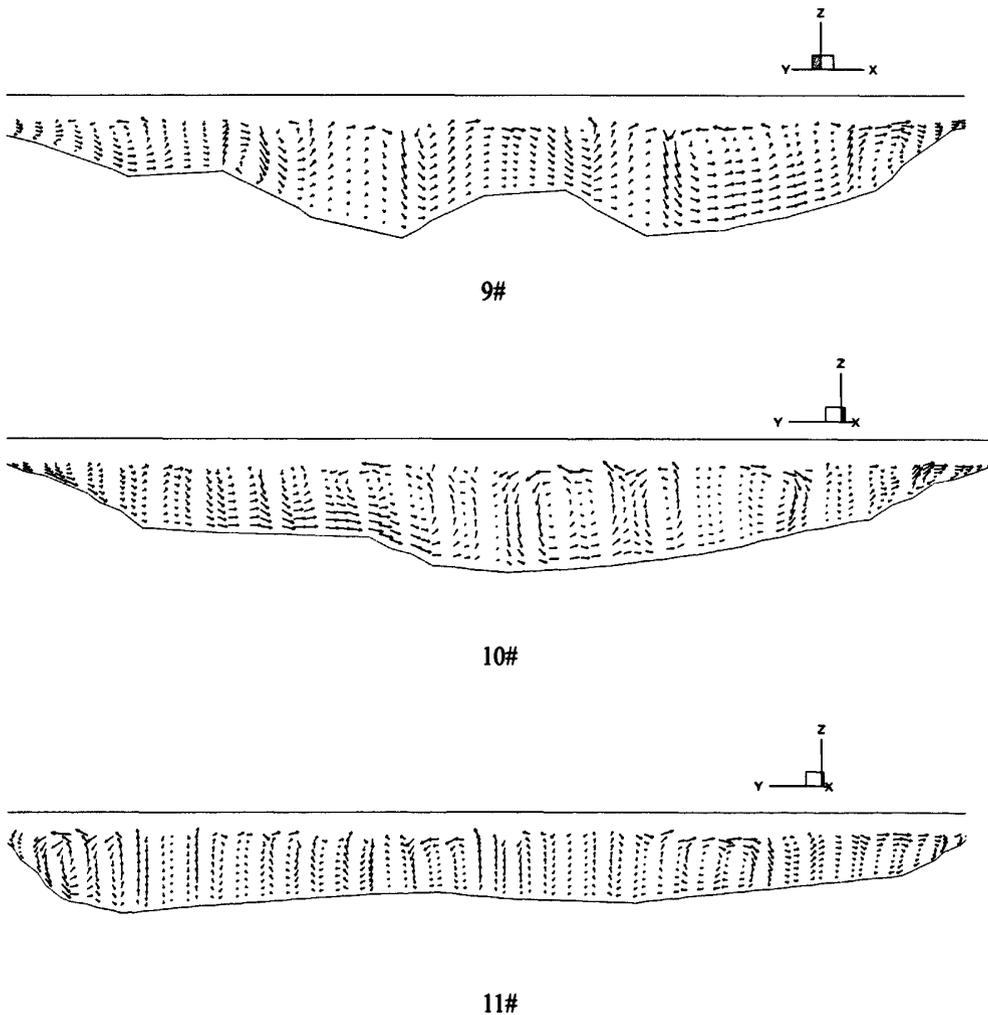
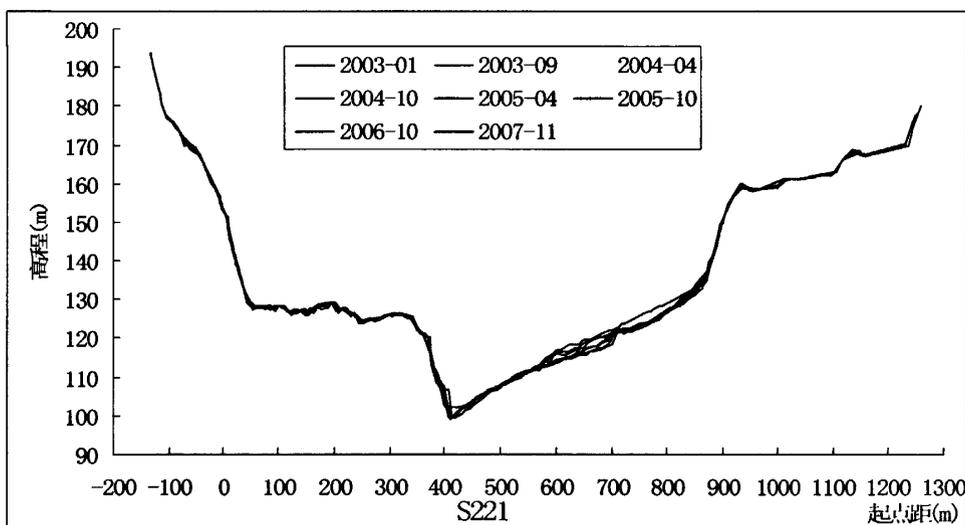
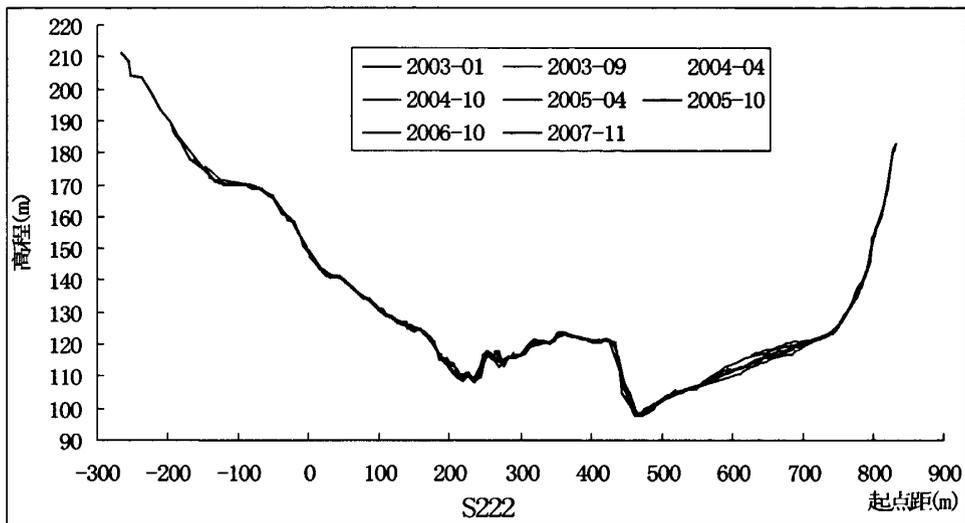


图 5.8 横向环流变化图III

Figure5.8 Variations of circulation flow in bend flow III



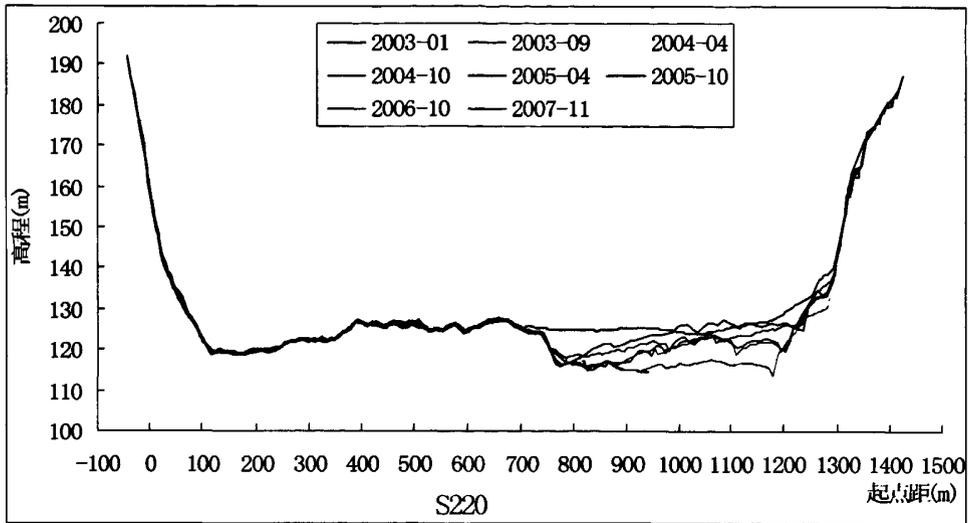


图 5.9 实测断面淤积情况III

Figure 5.9 The measured value of silting section III

第IV弯道:

IV弯弯顶前由“塘土坝”将河道分为左右两槽，弯顶处正好为两槽水流汇合处。流态复杂。环流结构紊乱。之后，水流逐渐平顺，环流减弱，只是在河道两岸回流位置和左侧深槽位置出现强度不大的环流结构。这个可能是有由于计算河段选取有关，计算时，将河段进口与出口断面都看作是充分发展的。而实际中，计算断面 14#（如图 5.2 所示）后依旧是弯道，其水流结构要受下游河床形态的限制。因此本文不作详细分析。

由计算分析发现，水流在 I 弯道位置的环流结构是常态的形式，即弯道环流底部指向凸岸，表层指向凹岸。而且我们通常认为凸岸的淤积是由此造成。但是到了第 II 弯段处反向环流占据绝对优势。并没有形成类似于单弯道环流结构。这种现象与王平义^[38]，唐仁杰^[39]，芮德繁^[40]等人所作的试验研究成果结论一致。

王平义曾在由四个弯段组成的梯形断面正弦派生曲线连结弯道概化模型中（见图 5.10），详细观测了环流强度沿程变化。根据沿程施测断面，1 号弯道产生了“典型环流”后，其后面 2 号，3 号，4 号弯道及沿程均存在 1 号弯道所产生的环流形态。

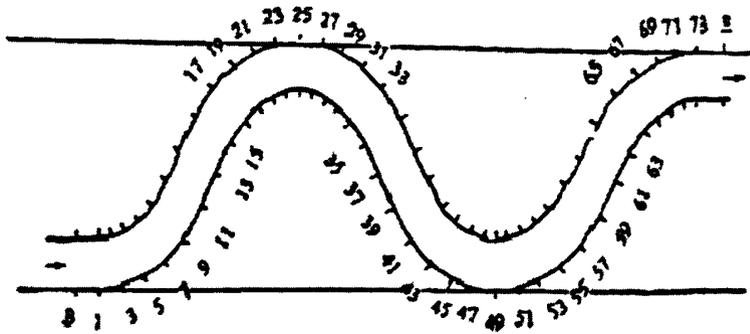


图 5.10 王平义试验布置

Figure 5.10 The experiment section layout plan of Wang Pinyi

唐仁杰采用的连续弯道为两圆弧反向连结水槽两圆弧中心角均为 120° ，底部及侧壁为水泥砂浆抹面，也为梯形断面，如图 5.11。试验表明，前弯弯顶处环流与单个弯道环流现象一致，到了后弯弯顶处，环流主要形态与前弯弯顶处一致，与单个弯道环流相反。此外，芮德繁的数值模拟与试验结果也得到了相类似的结果。

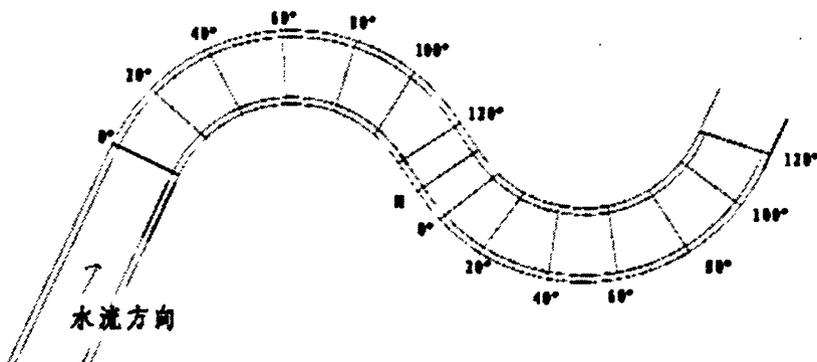


图 5.11 唐仁杰试验布置

Figure 5.11 The experiment section layout plan of Tang Renjie

5.3.3 小结

(1) 连续弯道的水流结构与单个弯道存在较大的差异。一般，连续弯道第一个弯道所产生的环流结构与单弯道环流结构一致，即环流表层向凹岸运动，底部流向指向凸岸。由于前面弯道改变了水流结构，所以当进入第二个弯道时，水流条件就已经改变，所以会不同于单弯道的环流结构。第一个弯段所产生的环流形态将一直影响下游河段水流流态。

(2) 河道断面深槽位置一般都有环流存在，且环流底部流向一般沿着槽壁下滑。水流近河道两岸位置，会出现小型的环流结构。

(3) 环流结构受到来自上游环流的惯性力影响外，根据水动力轴线的位置进行调整。主流带区两侧一般伴随环流。

(4) 细颗粒泥沙随主流带运动，主流两侧的环流将其从主流中剥离，之后随着环流运动，被挟带至缓流区落淤。

(5) “弯道背部淤积”现象是因为弯顶后“主流走直”，凸岸下游一般处于缓流区。所以主流“伴随”的环流将其挟带至凸岸下游一侧淤积。

第六章 结论与展望

6.1 结论

本文通过实测资料分析、数模计算等手段,系统的分析了三峡水库成库初期库区的泥沙淤积情况,探讨了库区泥沙淤积的形态、条件及运动规律。本文的主要研究结论可归纳为以下几个方面:

(1) 分析了三峡成库后进出库水沙条件及成库前后的泥沙冲淤特性。长江上游近年来流域径流量总体变化不大,而输沙量明显减少,泥沙变细;蓄水前库区内总的冲淤规律为“汛期淤积,枯水冲刷”,“大水年淤,小水年冲”,无论冲刷或淤积,量都不大,冲淤基本平衡,蓄水后三峡水库库区泥沙正经历着累积性的淤积过程。

(2) 通过对三峡库区河段淤积形态、部位及淤积物特征的分析。库区深水段淤积形态表现为深槽内淤积,且此段表现出全断面淤积趋势,淤积强度大。库区浅水段淤积形态与河型相关,弯曲型河道凸岸下游一侧易于发生淤积;分汊型河道洲尾部位常发生淤积。变动回水区有冲有淤,个别累积性的淤积也常发生在弯曲及分汊型河道位置。

(3) 建立一维数学模型,选取特征流量及判别指标,结合实测资料对库区运行初期泥沙淤积判别进行了分析,认为:

库区深水段,发生淤积的最大临界流速为 1.2m/s 。

库区浅水段, 1) $U > 2.1\text{m/s}$, 不发生淤积; 2) $U \leq 1.2\text{m/s}$, 发生淤积; 3) $1.2\text{m/s} < U \leq 2.1\text{m/s}$, 若为连续弯道或者分汊放宽河道, 则发生淤积, 否则不淤积。

变动回水区,因没有明显的累积性淤积,只是判断当断面平均流速 $U \geq 2.1\text{m/s}$ 时,一般不发生淤积。

(4) 通过对连续弯道水流运动的数学模拟,结合实测淤积断面分析,认为弯道凸岸下游位置的淤积形态,是由于弯道环流所引起。主流带一般泥沙运动较为剧烈,弯道环流会将主流所挟带的泥沙从中剥离,随环流运动。被挟带的泥沙可分两种情况落淤。1) 随着环流强度的递减及重力作用,落淤; 2) 第一次被环流剥离的泥沙受到二次环流作用,挟带至落淤。

6.2 展望

通过本文对三峡水库成库初期库区泥沙淤积的分析研究,能够对库区后续运行的泥沙淤积起到一定的预测作用,但是限制于泥沙淤积的形态、范围及总的淤积趋势。对于部位淤积量还尚难精确计算推求得到。对于研究所得各项结论,还需从理论、实验及日后观测资料进一步验证、完善。

天然河流连续弯道受到地形等条件的限制,其水流结构相当复杂,与试验室采用的规整型水槽试验结果存在一定差异。由于时间所限,本文仅对天然连续弯道进行了理论分析和三维数学模拟,缺少实际资料,数据对其验证。对于此种情况,若能加以物理模型进行验证。可以进一步了解三峡库区泥沙运动的机理。

致谢

本论文是在导师杨胜发教授的悉心指导下完成的。在三年时间中，我的每一点成绩，都无不凝聚着导师的心血和汗水。导师知识渊博、思维敏锐、工作干练、带人热忱以及对事业的执着和富于创新的精神都深深感染着我，并将成为我终身受益的精神财富！值此论文完成之际，谨向他致以崇高的敬意和衷心的感谢！

感谢课题组胡江老师、付旭辉老师、张艾文老师、兰艳萍老师以及杨胜全老师在学习和生活中给予多方面的帮助。各位老师认真的科研态度、热情淳朴的带人风格，积极上进的学术态度，一直都是我学习榜样！在此，表示我对他们最真挚的谢意！

在本文的研究过程中，还得到了杨忠超老师和同窗刘开佳的帮助和指导。本论文能得以顺利的完成，与您们悉心的指导是分不开的。在此，表示衷心感谢！

感谢河海学院及研究生部全体老师给予多方面的帮助和鼓励！

在学校期间，与王涛、王涵、赵晓马、刘勇、张乐、夏文颖、李立强、刘腾、颜雪丽、王筱、张帅帅、张鹏、谢龙、龚久南等师兄（姐）师弟（妹）以及同门胡鹏飞、袁观栋、罗羚源的相互讨论、学习，使我受益匪浅，此对他们一并表示诚挚的感谢！

此外，感谢同舍室友及各位同窗，因为你们，三年的学习生活愉快而又充实！

要特别感谢我远在家乡的父母及亲人！感谢他们这么多年的支持和鼓励，在生活上和精神上给予作者最强大的动力！

最后，衷心感谢评阅论文的各位专家、教授！

参考文献

- [1] 长江三峡以上地区来沙历年变化趋势分析. 长江水利委员会水文局, 1987.
- [2] 2009年度三峡水库进出库水沙特性、水库淤积及坝下游河道冲刷简要分析. 长江水利委员会水文局, 2010.
- [3] 胡向阳. 三峡工程泥沙研究进展综述. 人民长江, 2000, 31(01): 22-24.
- [4] 蔺秋生, 黄莉, 姚仕明. 长江上游干流近期水沙变化规律分析. 人民长江, 2010, 41(10): 5-8.
- [5] 三峡工程水库不同方案悬移质淤积计算及分析. 水利水电科学研究院, 1986.
- [6] 三峡工程变动回水区重庆港区冲淤计算. 水利水电科学研究院, 1987.
- [7] 三峡工程重庆河段动床模型试验研究. 水利水电科学研究院, 1986.
- [8] 三峡工程重庆河段泥沙模型 175m 方案试验报告. 水利水电科学研究院, 1987.
- [9] 三峡工程回水变动区长模型 175 米方案试验阶段报告. 南京水利科学研究院, 1988.
- [10] 三峡工程 170 米蓄水方案水库运用前期坝区泥沙淤积试验报告. 南京水利科学研究院, 1987.
- [11] 三峡工程 175m 方案水库泥沙数学模型计算成果分析. 长江科学院, 1988.
- [12] 三峡工程变动回水区铜锣峡河段泥沙模型 160 和 170 米方案试验报告. 长江科学院, 1988.
- [13] 三峡工程变动回水区铜锣峡河段泥沙模型 175 和 180 米方案试验报告. 长江科学院, 1988.
- [14] 三峡工程变动回水区铜锣峡河段泥沙模型试验成果综合分析. 长江科学院, 1987.
- [15] 三峡工程变动回水区洛碛-长寿河段泥沙模型 160 米方案试验报告. 天津水运工程科学研究所, 1986.
- [16] 三峡工程变动回水区洛碛-长寿河段泥沙模型 170 米方案试验报告. 天津水运工程科学研究所, 1987.
- [17] 三峡工程变动回水区洛碛-长寿河段泥沙模型(156、175 米)分期蓄水方案试验报告. 天津水运工程科学研究所, 1987.
- [18] 三峡工程 160 方案和 170 方案青岩子河段泥沙问题实验研究. 武汉水利电力学院, 1986.
- [19] 三峡工程 175 方案青岩子河段泥沙问题实验研究. 武汉水利电力学院, 1987.
- [20] 三峡工程变动回水区青岩子河段不同蓄水方案模型试验成果综述. 武汉水利电力学院, 1987.
- [21] 长江三峡工程航道泥沙原型观测 2005-2006 年度分析报告. 长江航道规划设计研究院、长江重庆航运工程勘察设计院, 2007.
- [22] 长江三峡工程航道泥沙原型观测 2006-2007 年度分析报告. 长江航道规划设计研究院、长江重庆航运工程勘察设计院, 2007.

- [23] 长江三峡工程航道泥沙原型观测 2007-2008 年度分析报告. 长江航道规划设计研究院、长江重庆航运工程勘察设计院, 2008.
- [24] 钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学. 北京: 科学出版社, 1987.
- [25] 王兴奎, 邵学军, 王光谦, 吴保生. 河流动力学. 北京: 科学出版社, 2004.
- [26] Маккавеев Н. Й. Русло реки и эрозия в её бассейне. издат. А. Н. СССР. 1955.
- [27] 虞邦义, 郁玉锁, 赵凯. 淮河中游造床流量计算. 河海大学学报 (自然科学版), 2010, 38 (03): 210-214.
- [28] Prandtl, L., Essentials of Fluid Dynamics. 1st ed., Blackie, London, England, 1952.
- [29] Einstein, H. A. and Shen, H. W., A Study on Meandering in Straight Alluvial Channels. Journal of Geophysical Research, Vol.69, No.24, December, 1964.
- [30] 曾庆华. 弯道河床演变中的几个问题研究. 人民长江, NO.1, 1978.
- [31] 张瑞瑾, 谢葆玲. 蜿蜒性河段演变规律探讨. 河流泥沙国际学术讨论会论文集, Vol.1, pp. 427-436, 1980.
- [32] 王博. 连续弯道水流及床面变形的试验研究. 北京: 清华大学, 2008.
- [33] 张光碧, 邓军, 刘超等. 河道水流三维流速场的数值模拟研究. 四川大学学报 (工程科学版), 2007, 39 (01): 58-62.
- [34] 王福军. 计算流体力学分析-CDF软件原理与应用. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [35] 李福田, 倪浩清. 工程湍流模式的研究开发及其应用. 水利学报, 2001, 5 (05), 22-23.
- [36] 方杰. VOF方法在水利水电工程中的应用和探索. 南京: 河海大学, 2005.
- [37] 李琳琳, 余锡平. 连续弯道内水流运动的特点. 水运工程, 2009, (11): 138-142.
- [38] 王平义. 弯曲河道动力学. 成都科技大学出版社, 1995.
- [39] 唐仁杰. 连续两弯明渠水流特性水槽试验研究. 长沙: 长沙理工大学, 2009.
- [40] 芮德繁. 连续弯道环流运动与泥沙冲淤特性的数值模拟及实验. 成都: 四川大学, 2005.
- [41] 陈晓云, 罗宏, 杨胜发. 三峡工程库尾航道演变规律研究. 武汉: 长江航道局, 2010.
- [42] 谢鉴衡. 河床演变及整治. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- [43] 杨胜发, 方铎. 三峡水库变动回水区河道推移质输移特性研究. 水利电力技术, 2003, 34 (02): 5-8.
- [44] Leshziner, M. A. and Rodi, W., Calculation of Strongly Curved Open Channel Flow. J. Hydraul. Div. ASCE, October, 1979.
- [45] Yen, B. C., Characteristics of Subcritical Flow in a Meandering Channel. Ph. D. Dissertation, State University of Iowa, 1965.
- [46] Wang Pingyi. Analysis of the Secondary Currents of the Outer Bank Erosion in Channel Bends. 7th IAHR Symposium on Stochastic Hydraulics, Queensland, Australia, 29-31, 1996.

- [47] 2007年度三峡工程洛碛至长寿河段河床演变分析. 长江水利委员会水文局, 2008.
- [48] 2007年度三峡工程库区大坝至铜锣峡段冲淤分析. 长江水利委员会水文局, 2008.
- [49] 2007年度三峡工程库区涪陵河段河床演变分析. 长江水利委员会水文局, 2008.
- [50] 2007年度三峡工程库区土脑子浅滩河段河道演变分析. 长江水利委员会水文局, 2008.
- [51] 2007年度三峡工程库区青岩子浅滩河段河床演变分析. 长江水利委员会水文局, 2008.
- [52] 三峡工程泥沙分析研究. 长江水利委员会水文局. 2008.
- [53] 杨胜发等. 三峡水库成库初期库区沿程水位计算分析报告. 重庆: 重庆交通大学, 2010.
- [54] 三峡库区(175m运用初期)设计最低通航水位计算与分析. 长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆交通大学, 2010.
- [55] 黄煜龄, 黄悦. 三峡水库变动回水区最低通航水位计算分析. 武汉: 长江水利委员会长江科学院, 1995.
- [56] 黄悦. 三峡水库运用后变动回水区最低通航水位计算分析. 武汉: 长江水利委员会长江科学院, 2004.
- [57] Hirt C. W. and Nichols B. D. Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundary Compute. Phys, 1981, 39, 201-225.
- [58] Wang Pingyi, FangDuo, Cai Jinde and Wu Chigong. A Three-dimensional Flow Model in Channel Bends. Proceedings of 8th Congress of ADP-IAHR, pp. B-319-B-330, India, 1992.
- [59] Engelund, F., Flow and Bed Topography in Channel Bends. J. Hydraul. Div. ASCE, Vol.100 (HY11), pp. 1631-1648, November, 1974.
- [60] 熊莉芳, 林源, 李世武. $k-\varepsilon$ 湍流模型及其在FLUENT软件中的应用. 工业加热. 2007, 36 (04): 13-15.
- [61] Jacqmin D. Calculation of two-phase Navier-Stokes flows using phase-field modeling. Compute Phys, 1999, 155: 96-127.
- [62] Daly B. J. Numerical Study of Two Fluid Rayleigh-Taylor Instability. Physics of Fluids, 1967, 10: 297-307.
- [63] Glenn Robert Price. A piecewise parabolic volume tacking method for the numerical simulation of interfacial flow. In USA: The university of CALGARY, 2000.
- [64] 张绪进, 母德伟, 陈贤玮. 上游来水来沙变化及对三峡水库回水变动区泥沙淤积的影响. 水运工程, 2009, (08): 94-97.
- [65] 陈建, 李义天, 邓金运等. 水沙条件变化对三峡水库泥沙淤积的影响. 水力发电学报, 2008, 27 (02): 97-102.
- [66] 樊云, 李云中, 王宝成. 三峡135m库水位运用初期坝前泥沙淤积分析. 人民长江, 2006, 37 (12): 72-74.
- [67] 张娜, 代文良, 朱辉, 李俊. 三峡水库淤积物初期干容重试验初步分析. 人民长江, 2006,

37 (12): 59-61, 88.

[68] 韩其为. 水库淤积. 北京: 科学出版社, 2003.

[69] 潘庆荣, 杨国录, 府仁寿. 三峡工程泥沙问题研究. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.

[70] 交通部天津水运工程科学研究所. JTJ/T232—98, 内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程. 人民交通出版社, 1998.

在学期间发表的论著及取得的科研成果

在学期间发表的论著

1. 杨胜发, 胡鹏, 胡江. 三峡水库 175m 蓄水初期库区沿程水位分析. 重庆交通大学学报, 2011.
2. 胡鹏, 胡江. 中咀坡水电工程溢洪道水工模型试验研究. 重庆交通大学学报, 2010.

在学期间取得的科研成果

1. 奉节县石马河河道治理工程动床物理模型试验研究, 辅研;
2. 中咀坡水电工程水工模型试验研究, 主研;
3. 三峡水库成库初期库区沿程水位计算分析, 主研;
4. 三峡库区支流航道及重庆港区泥沙淤积分析, 辅研;