



长江三峡工程 泥沙问题研究

2001—2005
(第六卷)

长江三峡工程“十五”泥沙研究综合分析

国务院三峡工程建设委员会办公室泥沙专家组
中国长江三峡工程开发总公司三峡工程泥沙专家组

知识产权出版社

长江三峡工程泥沙问题研究 (2001—2005) 第六卷

长江三峡工程“十五”泥沙研究综合分析

国务院三峡工程建设委员会办公室泥沙专家组 编
中国长江三峡工程开发总公司三峡工程泥沙专家组

知识产权出版社

图书在版编目(CIP)数据

长江三峡工程“十五”泥沙研究综合分析/国务院三峡
工程建设委员会办公室泥沙专家组, 中国长江三峡工程
开发总公司三峡工程泥沙专家组编. —北京: 知识产权
出版社, 2008.5

(长江三峡工程泥沙问题研究: 2001—2005; 6)

ISBN 978-7-80198-689-4

I. 长… II. ①中…②国… III. 三峡工程—水库
泥沙—研究报告 IV. TV145 TV882.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 045339 号

长江三峡工程泥沙问题研究
(2001—2005)
(第六卷)

国务院三峡工程建设委员会办公室泥沙专家组 编
中国长江三峡工程开发总公司三峡工程泥沙专家组

责任编辑/石红华 范昭

封面设计/赵景伟 段维东

出版发行/知识产权出版社(北京海淀区蓟门桥西土城路 6 号)

印刷/北京市兴怀印刷厂

开本/889 毫米×1194 毫米 1/16

印张/30.625

字数/915 千字

版次/2008 年 9 月第 1 版 2008 年 9 月第 1 次印刷

印数/500 套

书号/ISBN 978-7-80198-689-4/T·244

定价/900 元/套(全套 6 卷)

三峡工程泥沙专家组

顾 问 林秉南 谢鉴衡

组 长 张 仁

副组长 戴定忠

成 员 陈济生 韩其为 潘庆棠 荣天富 谭 颖 王桂仙 谢葆玲 邓景龙

李昌华 唐存本 曹叔尤

三峡工程泥沙专家组秘书组

组 长 戴定忠(兼)

副组长 谭 颖(兼) 胡春宏

成 员 王桂仙(兼) 朱光裕 范 昭

三峡工程泥沙专家组联络员

曹文洪 卢金友 陈松生 周建红 窦希萍 陈 立 纪国强 潘育明 安凤玲

韩 飞 李国斌 王永忠 胡向阳

本卷各章节编写人员

第1章 负责人、撰写人 戴定忠 张 仁

第2章 负责人 韩其为 曹叔尤 邓景龙 荣天富
撰写人 2.1 毛继新 万建蓉 2.2 许全喜
2.3 韩其为

第3章 负责人 荣天富 韩其为 邓景龙
撰写人 3.1 卢金友 毛继新 黄 悦 3.2 郭继明
3.3 赵世强 郭继明 3.4 王士毅
3.5 郭 炜 徐海涛 3.6 荣天富 韩其为

第4章 负责人 陈济生 王桂仙 谭颖
撰写人 4.1 李云中 4.2 邵学军 李国斌 徐海涛
4.3 李国斌 郭炜 邵学军 4.4 谭 颖 王桂仙

第5章 负责人 潘庆荣 谢葆玲 李昌华 唐存本
撰写人 5.1 李云中 段光磊 5.2 陆永军 邵学军
5.3 陈 立 刘怀汉 5.4 黄 颖
5.5 潘庆荣 谢葆玲

第6章 负责人 张 仁 戴定忠
撰写人 6.1 张 仁 6.2 许全喜 戴定忠 张 仁
6.3 纪国强 张 仁 6.4 毛继新 黄 悦
6.5 张 杰 方春明 6.6 陈稚聪
6.7 周冠伦 6.8 张 仁
附录 张 仁

第7章 负责人、撰写人 张 仁 戴定忠

全书终审 张 仁

顾 问 林秉南 谢鉴衡

出版说明

在“九五”(1996—2000)长江三峡工程泥沙问题研究计划完成后,国务院三峡工程建设委员会办公室(简称三峡建委办)和中国长江三峡工程开发总公司(简称三峡总公司)共同出版了《长江三峡工程泥沙问题研究》(1996—2000)1~8卷本(由知识产权出版社出版并出电子版)。2000年4月起三峡工程泥沙专家组及相关的科研工作由三峡建委办转归三峡总公司管理。在三峡总公司的领导和支持下,制订了“十五”(2001—2005)计划。其中坝下游限到杨家脑河段,距葛洲坝工程约90km。杨家脑以下河段未再列入本次计划(分工由水利部另行考虑)。

2001年1月三峡总公司以三峡技字[2001]12号文“关于长江三峡工程‘十五’期间(2001—2005)泥沙问题研究计划的复函”,原则同意该计划共设5个专题:

- 105-1 三峡水库上游来水来沙的变化及其影响研究;
- 105-2 三峡水库泥沙淤积研究;
- 105-3 三峡工程坝区泥沙问题研究;
- 105-4 三峡水库下游河道演变及对策研究;
- 105-5 课题研究成果综合分析。

此后,三峡总公司还专门委托进行了“2007年蓄水位方案泥沙专题研究”。各项研究的具体内容是在“九五”计划的基础上,紧密结合工程建设和运行的新进展和新需求来安排的。

“十五”计划的研究工作,在三峡总公司的支持下,经过各承担单位的共同努力,已经完成任务。各项成果经泥沙专家组评议后,由三峡总公司按合同要求进行了验收。为了与“九五”研究成果相衔接,“十五”的研究成果文集仍沿用原名,仅将年份更改,即为《长江三峡工程泥沙问题研究》(2001—2005)。上述每个专题编为一卷,共六卷:

- 第一卷 三峡水库上游来水来沙的变化及其影响研究;
- 第二卷 三峡水库泥沙淤积研究;
- 第三卷 三峡工程坝区泥沙问题研究;
- 第四卷 三峡水库下游河道演变及对策研究;
- 第五卷 2007年蓄水位方案泥沙专题研究;
- 第六卷 长江三峡工程“十五”泥沙研究综合分析。

本书第一至第五卷汇集的是各单位的研究成果。有个别文章持有不同观点,未强求一致,尊重作者的看法,但不代表泥沙专家组的意见或观点。第六卷综合分析报告是由专家组组织编写、经集体讨论写成的。全书编审工作在泥沙专家组顾问林秉南院士、谢鉴衡院士,组长张仁教授指导下进行。参加各卷编审工作的有戴定忠、陈济生、韩其为、潘庆荣、荣天富、谭颖、王桂仙、谢葆玲、邓景龙、唐存本、曹叔尤。承担主要编辑工作的有戴定忠、谭颖、潘庆荣、胡春宏、王桂仙、朱光裕、范昭。各有关单位及曹文洪、卢金友、陈松生、周建红、窦希萍、陈立、纪国强、潘育明、安凤玲等为“十五”计划的完成和本书的编辑出版做出了贡献,特此致谢。

限于水平,错误与遗漏在所难免,敬请批评指正。

编者
2007年4月

目 录

第 1 章 概述	(1)
第 2 章 三峡水库上游来水来沙的变化及其影响研究	(3)
2.1 上游修建骨干水库对三峡水库入库水沙条件的影响	(3)
2.2 近年来上游水沙变化分析	(24)
2.3 结语	(62)
第 3 章 三峡水库泥沙淤积研究	(67)
3.1 水库淤积计算分析	(67)
3.2 重庆主城区河段走沙过程分析	(98)
3.3 重庆主城区河段泥沙冲淤对防洪、航运影响及对策分析	(122)
3.4 2003 年蓄水后回水末端冲淤变化与航道条件调查研究及对比分析	(181)
3.5 2003 年蓄水前后库区泥沙原型观测成果分析	(195)
3.6 结语	(218)
第 4 章 三峡工程坝区泥沙问题研究	(223)
4.1 三峡坝区水文泥沙原型观测与模型对比分析	(224)
4.2 有地下电厂后坝区泥沙淤积及电厂前淤积形态与流态试验研究	(250)
4.3 有地下电厂后上下游引航道冲沙措施试验研究	(276)
4.4 结语	(309)
第 5 章 三峡水库下游宜昌至杨家脑河段河道演变及对策研究	(312)
5.1 三峡水库蓄水运行三年来宜昌至杨家脑河段河床演变分析	(312)
5.2 两坝间及葛洲坝枢纽下游近坝段河道冲淤研究	(343)
5.3 坝下游冲刷对枝城至江口河段浅滩影响与整治研究	(350)
5.4 宜昌至杨家脑河段综合治理措施研究	(376)
5.5 结语	(390)
第 6 章 长江三峡工程 2007 年蓄水位方案泥沙专题研究	(393)
6.1 三峡工程的分期蓄水问题	(393)
6.2 长江上游近期水沙变化与趋势研究	(395)
6.3 三峡水库运用水位及设计参数	(399)
6.4 泥沙冲淤一维数学模型计算	(409)
6.5 泥沙冲淤二维数学模型计算	(423)
6.6 重庆主城区河段泥沙实体模型试验	(435)
6.7 170m/172m 蓄水位方案通航条件及对策分析研究	(461)
6.8 关于 2007 年蓄水位运行方案的结论和建议	(475)
附录: 评论和意见	(476)
第 7 章 结语	(479)
7.1 主要成果	(479)
7.2 对下阶段工作的建议	(482)

第1章 概述

长江三峡工程“十五”(2001~2005)泥沙问题研究计划,经中国长江三峡工程开发总公司于2001年元月21日以“三峡技字[2001]12号文”同意后,开始组织实施。研究的主要内容包括:

1. “九五”期间已进行初步研究并需要继续研究的项目,包括配合施工进程的项目;
2. 2003年三峡工程开始围堰蓄水、发电和通航后,应随之进行相应的泥沙观测、分析和验证工作,以深化对三峡工程泥沙问题的研究;
3. 上游溪洛渡工程的建设可能在“十五”期间确定,亭子口与向家坝工程的建设也将相继进行。这些大型骨干工程对三峡水库来水来沙的影响,需要进行研究。据此,本计划共设5个专题,12个子题。即

105-1 三峡水库上游来水来沙的变化及其影响。其中子题有:

- 105-1-01 上游修建骨干水库对三峡水库入库水沙条件的影响;
- 105-1-02 近年来上游水沙变化分析;
- 105-1-03 国外水土保持效果资料分析。

105-2 三峡水库泥沙淤积研究。其中子题有:

- 105-2-01 水库淤积计算分析;
- 105-2-02 变动回水区冲淤变化研究;
- 105-2-03 2003年蓄水前后库区泥沙原型观测成果分析。

105-3 三峡工程坝区泥沙问题研究。其中子题有:

- 105-3-01 坝区河段冲刷及河势变化的观测分析;
- 105-3-02 上下游引航道(包括口门区)冲刷变化的观测分析及防淤清淤冲沙措施的研究;
- 105-3-03 电厂前泥沙淤积形态及过机泥沙的观测分析。

105-4 三峡水库下游河道演变及对策研究。其中子题有:

- 105-4-01 葛洲坝枢纽下游河道冲刷及对策研究;
- 105-4-02 江口镇上下浅滩整治方案研究;
- 105-4-03 宜昌至杨家脑河段综合治理措施。

105-5 课题研究成果综合分析 with 总报告。

有关三峡水库蓄水后对杨家脑以下河道和两湖的影响及对策研究等内容,未列入“十五”计划,另由水利主管部门安排。涉及航道、港口部分,交通部门另立了专题研究。

在三峡工程总公司的支持下,各承担单位按合同要求完成结题任务,提交了研究成果报告。仍按“九五”成果模式,汇编成册出版,共分6卷。第一卷《三峡水库上游来水来沙的变化及其影响研究》,第二卷《三峡水库泥沙淤积研究》,第三卷《三峡工程坝区泥沙问题研究》,第四卷《三峡水库下游河道演变及对策研究》,第五卷《2007年蓄水位方案泥沙专题研究》,第六卷《长江三峡工程“十五”泥沙研究综合分析》。其中《2007年蓄水位方案泥沙专题研究》是由泥沙专家组组织长江委水文局、设计院、科学院、中国水科院、清华大学、西南水运科研所、长江航道局等单位进行研究提出的成果,经三峡工程总公司验收,汇编作为第五卷。该项成果,明确指出2007年蓄水位可以抬升至172m,泥沙问题不是障碍因素,水位取决于工程等其他因素。对此问题,专家组曾向有关领导、院士、专家和三峡工程总公司分别汇报、听取意见。长江委设计院采用了研究成果,三峡工程总公司组织专家咨询会议亦采纳了该项成果的结论,认为从泥沙问题角度看,2007年蓄水位上升至172m是可行的。

第六卷《长江三峡工程“十五”泥沙研究综合分析》是由专家组组织编写、经集体讨论写成的。在其第七章“结语”中，将“十五”的“主要成果”和“建议”作了阐述。

在此尚要说明的是，汇编成果中各项报告的结语基本上反映了承担单位或参与人员的认识，泥沙专家组在统筹协调中，不强求一致，求同存异。由于目前泥沙模拟技术水平及诸多不确定因素，预测水库淤积和河道变化的定量精度和验证实测资料的成果等存在差异和不同的认识，实属正常。

国务院领导对三峡工程原型泥沙观测和科研工作十分重视，2004年3月3日又作出重要批示：“对三峡水库蓄水后泥沙冲淤变化和影响，应该加强观测和研究，此项工作由三峡办牵头”。

在编制原型观测计划时，有两点经泥沙专家组认真讨论，取得共识。

1. 进一步明确原型观测的目标。泥沙问题是影响三峡工程正常运行与发挥效益的关键技术之一。然而限于泥沙问题的复杂性、不确定性和泥沙科学当今的水平，以往的研究成果不可能十分准确。在三峡工程2003年开始蓄水后，上下游的泥沙问题将逐渐显现，必须通过原型观测及时发现问题，监测泥沙的冲淤演变，并验证以往作出的预报，以便修正模拟技术，及时采取对策，为尽量发挥工程效益和减少负面影响提供科学依据。其具体目标是：

- ① 全面掌握蓄水以前上下游河道天然状况的本底资料；
- ② 为论证确定分期蓄水方案提供科学依据；
- ③ 实时监测蓄水后上下游的冲淤变化，及时发现问题，以便采取对策；
- ④ 验证采用过的模拟技术（包括主要参数），进一步提高三峡工程泥沙预报的可靠度。

2. 将观测年限延长10年。该原型观测计划延长至2019年，即在水库水位蓄至正常水位175m后，继续观测10年，进一步验证各项预报成果及模拟技术。但这不等于10年后不再观测。从工程运行管理的要求看，泥沙原型观测和研究分析工作应一直跟踪、观测下去，只是观测的内容、强度等将随时进行调整。

泥沙专家组的日常工作、“十五”成果汇编及出版工作，均由泥沙专家组秘书组负责，主要参加人员有戴定忠、谭颖、胡春宏、王桂仙、朱光裕、范昭等。

第2章 三峡水库上游来水来沙的变化及其影响研究

三峡水库泥沙淤积在很大程度上决定于入库沙量和级配。在“十五”期间,对来沙量的变化及其对水库淤积的影响,共设计了三个子题进行研究:上游修建骨干水库对三峡水库水沙条件的影响、近年来上游水沙变化分析、外国水土保持效果的初步分析。

上游修建骨干水库对三峡入库水沙条件的影响,主要研究金沙江溪洛渡、向家坝及嘉陵江亭子口三个水库修建后的作用。目前已确定溪洛渡、向家坝分别在2012年和2014年开始发电,其拦沙作用即将显现,而且它们均有巨大库容,减少三峡水库来沙的作用至少在100年左右。亭子口水库虽未最后确定开工日程,但为期不远了。三个水库的拦沙作用以它们设计、规划中的数据为准,但要考虑其坝下游直至三峡水库入库站的河段冲刷和泥沙补给。由于河段长,时间长,研究手段采用水科院与长科院的数学模型沿程计算。这两个模型是非均匀悬移质不平衡输沙模型,既可以用于水库,也可以用于河道。同时,模型中均有非均匀推移质计算,包括卵石部分。

近年来上游水沙条件变化子题主要针对进入20世纪90年代以后,三峡水库入库沙量发生大幅度减少而设计。以宜昌(三峡水库出库站)、寸滩(干流入库站之一)、北碚(嘉陵江入库站)三站为例,1991~2000年年平均来沙量较之1990年多年平均值分别减少1.04亿t、1.05亿t和1.019亿t。这是历史上从未发生过的现象,显然不是同条件下水文资料的随机波动。尤其是嘉陵江减少值已占1990年以前多年平均值的71.3%,这将会对三峡水库嘉陵江库区及其他库段的泥沙淤积产生巨大影响。与此同时,入库泥沙的大幅减少,也伴随着级配的一定程度的变细,这将对水库变动回水区产生一定的影响。总之,该课题的研究是十分必要的,研究的内容除嘉陵江外还包括金沙江、岷江、沱江、乌江等的泥沙变化及减少情况。同时,还要研究减少的原因,包括径流量变化、水利工程拦沙、水土保持综合治理以及河道采砂等。只有这样,才能判别哪些部分减少是短期现象,哪些部分是长期有效。

为了重点研究水土保持的减沙作用,我们开展了美国水土保持效果初步分析。该项研究收集了一些美国的资料,以评估长期、大面积水土保持的效果。所以借鉴美国的资料,是因为从20世纪30年代开始,他们对水土保持已很重视,有相应的法律,实行了各种措施,收到了很好的效果,也有较丰富的资料。由于收集到的资料有限,该项研究报告未列入总报告正文,收入子题报告汇编。

2.1 上游修建骨干水库对三峡水库入库水沙条件的影响

三峡水库入库水沙主要来源于长江上游的金沙江和嘉陵江,尤其是来沙量。两江多年(1954~1989年)平均径流量(屏山+北碚)2131亿 m^3 ,分别占三峡水库入库站寸滩年平均(1953~1989年)径流量3500亿 m^3 的60.9%和出库站宜昌年平均(1953~1989年)径流量4390亿 m^3 的48.5%;两江多年(1954~1989年)平均输沙量(屏山+北碚)3.81亿t,分别占三峡水库入库站寸滩站年平均(1953~1989年)输沙量4.6亿t的82.8%和出库站宜昌站年平均(1953~1989年)输沙量5.23亿t的72.8%,在金沙江和嘉陵江修建溪洛渡、向家坝、亭子口等骨干水库,将对三峡水库入库沙量产生较大影响。本节将利用数学模型及资料分析研究金沙江修建溪洛渡、向家坝水库和嘉陵江修建亭子口水库对三峡水库入库水沙条件的影响。

2.1.1 研究河道概况

本节研究的主要河段为金沙江溪洛渡至长江寸滩,全长约518km。溪洛渡至新市镇河段长80.8km,两岸为中山,河流下切形成峡谷型河道,谷峰高差约700~1000m。枯水期河宽不到100m,在某些滩

口束水处仅 30~50m; 河段总落差 69.9m, 枯水比降 0.87‰。新市镇至屏山河段长 47km, 地形为低山向丘陵过渡, 谷峰高差约 300~700m。河道为峡谷型向宽浅型过渡, 枯水水面宽约 100~150m, 在弯弯滩、石溪等峡谷段不足 100m; 河段落差约 23.9m, 枯水比降 0.51‰。屏山至向家坝枢纽坝址河段长 28.82km, 为低山峡谷河段, 两岸山高约 100~500m, 河床比降 0.24‰, 该段枯水河宽 50~200m。向家坝枢纽坝址至宜宾段长 30km, 为峡谷型向宽浅型过渡河段。该段江面明显开阔, 两岸有阶地及河漫滩出现, 水流约束力显著降低, 水面宽达 100~500m, 屏山至宜宾河段天然比降约 0.29‰。宜宾至重庆河段长 380km 左右, 比降为 0.26‰。宜宾至重庆河段平面外形特点是宽窄相间, 呈藕节状, 较宽段和宽段约占本河段全长约 95.3%; 而窄段(含峡谷)只占 4.7%; 河床宽窄悬殊大, 最大河宽达 3000m, 最小河宽仅 180m, 河段内河床多碛坝, 尤以泸州以下河段分布较多。

溪洛渡至宜宾河段主要由基岩、坡积体、沟口泥石流堆积体、沟口沙卵石堆积体等组成[12]。扣除不可冲的基岩和坡积体, 可冲面积占河道面积的 43%以下。宜宾至重庆河道河岸及河床主要由沙卵石洲滩、裸露基岩和坡积裙等组成, 可冲面积占河道面积的 68%以下, 如表 2-1-1 所示。

表 2-1-1 各河段可冲床面占河段总面积的百分数

河 段	溪洛渡 —— 新市镇	新市镇 —— 屏山	屏山 —— 向家坝	向家坝 —— 宜宾	宜宾 —— 南溪	南溪 —— 江安	江安 —— 泸州	泸州 —— 合江	合江 —— 朱沱	朱沱 —— 兰家沱	兰家沱 —— 重庆
可冲床面所占 百分数 (%)	4.6	10.6	28	43.0	51.1	67.8	61.4	49.0	41.1	66.0	61.8

根据坑测取样和洲滩床面取样资料^[12,13], 床沙主要由大于 1mm 的卵砾石组成, 小于 1mm 的泥沙颗粒所占比重在 15%以下, 表层床沙各河段中值粒径 $d_{50}=73.2\sim160.1\text{mm}$, 深层 $d_{50}=45.1\sim102.7\text{mm}$ 。

屏山—重庆河段, 横亘于四川盆地南部, 大小支流众多, 树枝状水系十分发达。自上往下的主要支流有横江、岷江、沱江、赤水河和嘉陵江, 基本特点是北岸支流如岷江、沱江、嘉陵江多源远流长, 尤其是岷江和嘉陵江的流量较大, 如岷江的汇流比可达 0.80, 嘉陵江的汇流比可达 0.60。而南岸支流则相对短小, 形成南北水系的不对称格局^[13]。

天然情况下, 溪洛渡至寸滩河道基本处于冲淤相对平衡状态。由于床沙粗, 流速大, 所以悬移质 ($d\leq1\text{mm}$) 泥沙在本河段基本不淤, 只是在大洪水时在塑造洲滩中起了一定作用。参加造床的泥沙主要为 $d>1\text{mm}$ 的卵砾石, 每年冲淤数量有限, 只有当水力因素发生突变(如大洪水)才会产生较为明显的河床演变。

嘉陵江是所研究河段内最大的支流, 发源于秦岭南麓, 流经陕西、甘肃、四川、重庆四省市, 干流全长 1120km, 流域控制面积约 159800km², 流域内森林覆盖率约为 13.7%。流域内小支流众多, 流域面积 10000km² 以上的支流有西汉水、白龙江、渠江、涪江, 构成扇形水系, 各水系上游均为山区, 为峡谷河流。干流的東西两源在略阳汇合, 沿江与广元的昭化接纳白龙江, 再往南部汇入东河和西河。嘉陵江干流自广元以下河谷逐渐开阔, 至武胜及合川又汇入渠江及涪江, 后经北碚抵重庆汇入长江。

嘉陵江干流广元以上为上游, 大部分为坚硬和半坚硬岩石组成的高山峡谷区, 河谷狭窄, 水流湍急, 自然比降达 3.8‰; 广元至合川为中游, 多为半坚硬或坚硬岩石组成的丘陵宽谷区, 河道宽度在 70~400m 之间, 河流自北向南纵贯川中盆地; 合川至重庆为下游, 为高山峡谷区与丘陵宽谷区相间分布区, 水面宽 150~400m。

河床组成以卵石为主, 河滩上有粘土夹沙出现, 根据河滩卵石取样资料分析, 卵石粒径范围在 11~200mm 之间。

2.1.2 泥沙冲淤一维数学模型简介

目前, 一维水流泥沙数学模型在理论及实践上都发展得较为成熟, 在国内广泛应用于水库淤积及河床变形的长时段、长河段计算研究中。但是, 由于挟沙水流与可动河床的作用相当复杂, 即使一维

问题至今也未能解决得十分彻底，多数研究院所及大专院校开发了自己的数学模型，各家模型的差别主要在于分组挟沙能力计算中的挟沙能力级配的取值概念有所不同，有的取悬移质级配作为挟沙能力级配，有的取表层床沙级配作为挟沙能力级配，也有的通过某种经验性的权重关系使两者结合起来，等等，这正说明它们还处在发展和改进之中。

1. 一维数学模型基本方程

(1) 水流运动方程

$$\frac{\partial U}{\partial t} + g \frac{\partial Z}{\partial x} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{U^2}{C^2 R} = 0 \quad (2-1-1)$$

(2) 连续方程

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (2-1-2)$$

(3) 河床变形方程

$$\frac{\partial(G)}{\partial x} + B \frac{\partial(hS)}{\partial t} + \rho' B \frac{\partial Z_0}{\partial t} = 0 \quad (2-1-3)$$

(4) 水流挟沙力方程

$$S^* = S^*(U, H, \omega, \dots) \quad (2-1-4)$$

(5) 推移质输沙率公式

$$g_b = g_b(U, h, d, \dots) \quad (2-1-5)$$

(6) 悬移质泥沙连续方程

$$\frac{\partial(QS)}{\partial x} + \frac{\partial(AS)}{\partial t} + \alpha B(S - S^*)\omega = 0 \quad (2-1-6)$$

式中：\$Z\$ 为水位；\$Z_0\$ 为断面平均高程；\$Q\$ 为流量；\$U\$ 为流速；\$A\$ 为过水面积；\$H\$ 为水深；\$g\$ 为重力加速度；\$S\$、\$S^*\$ 分别为断面平均含沙量及挟沙力；\$\rho'\$ 为泥沙干密度；\$\Delta A\$ 为冲淤面积；\$B\$ 为水面宽；\$x\$ 为沿程距离；\$t\$ 为时间；\$\omega\$ 为泥沙颗粒静水沉速；\$G\$ 为断面总输沙率，\$G = BhUs + Bg_b\$，当不考虑推移质时 \$G = BhUs\$，\$g_b\$ 为断面单宽推移质输沙率；\$d\$ 为粒径；\$\alpha\$ 为恢复饱和系数。

由于天然河道极不规则，很难求出上述方程组的解析解，因此通常采用数值方法对上述方程组求解。不同的数学模型采用的求解方法不尽相同，下面简要介绍中国水利水电科学研究院（水科院）和长江科学院（长科院）的模型求解方法。

2. 水科院数学模型解法及基本参数的确定

(1) 水流运动方程

$$Z_{i,j} = Z_{i,j+1} + \frac{n_{j+1}^2 \Delta x_{j+1}}{2} \left[\frac{Q_{i,j+1}^2 B_{i,j+1}^3}{A_{i,j+1}^{10}} + \frac{Q_{i,j}^2 B_{i,j}^3}{A_{i,j}^{10}} \right] + \frac{1}{2g} \left[\frac{Q_{i,j+1}^2}{A_{i,j+1}^2} - \frac{Q_{i,j}^2}{A_{i,j}^2} \right] \quad (2-1-7)$$

式中：\$n\$ 为糙率；\$i\$ 为时段编号；\$j\$ 为断面编号（自上游向下游编排）；其他符号意义同前。

(2) 水流连续方程

① 支流入汇断面

$$Q_{i,j} = Q_{i,j-1} + Q_{i,支} \quad (2-1-8)$$

② 无支流入汇断面

$$Q_{i,j} = Q_{i,0} + (Q_{i,1} - Q_{i,0}) \frac{\sum_{k=1}^j \Delta x_k}{\Delta L} \quad (2-1-9)$$

式中：下标“0”、“1”分别表示计算河段的进、出口断面值； ΔL 为该河段总长度（m）；其余符号意义同前。

(3) 悬移质含沙量方程

$$S_{i,j,L} = P_{4,L,i,j}^* S_{i,j}^*(\omega^*) + \left[\dot{P}_{4,L,i,j-1} S_{i,j-1} - P_{4,L,i,j-1}^* S_{i,j-1}^*(\omega^*) \right] \cdot e^{-\frac{\alpha \Delta x_{j+1}}{\lambda_L}} + \left[P_{4,L,i,j-1}^* S_{i,j-1}^*(\omega^*) - P_{4,L,i,j}^* S_{i,j}^*(\omega^*) \right] \cdot \frac{\lambda_L}{\alpha \Delta x_j} (1 - e^{-\frac{\alpha \Delta x_{j+1}}{\lambda_L}}) \quad (2-1-10)$$

式中： S 为含沙量（ kg/m^3 ）； S^* 为挟沙能力（ kg/m^3 ）； $P_{4,L}$ 为悬移质级配； $P_{4,L}^*$ 为挟沙能力级配； ω^* 为与挟沙能力级配相应的沉速（ m/s ）； α 为恢复饱和系数，淤积时取 0.25，冲刷时取 1.0；脚标“ L ”表示泥沙的组数。其中

$$\lambda_L = \frac{Q_{i,j-1} + Q_{i,j}}{\omega(L)(B_{i,j-1} + B_{i,j})} \quad (2-1-11)$$

式中： $\omega(L)$ 为第 L 组泥沙的沉速（ m/s ）；其余符号意义同前。

(4) 悬移质冲淤河床变形方程

$$\Delta a_{i,j} = \frac{Q_{i,j-1} S_{i,j-1} - Q_{i,j} S_{i,j}}{\gamma'_{i,j} \Delta x_{j+1}} \Delta t_i \quad (2-1-12)$$

式中： $\Delta a_{i,j}$ 为 j 断面冲淤面积（ m^2 ）； Δt_i 为 i 时段时间步长（s）； $\gamma'_{i,j}$ 为淤积物干密度（ kg/m^3 ）。

(5) 挟沙能力及挟沙能力级配方程

所谓挟沙能力级配就是与挟沙能力相应的级配，它等于在同样水流和床沙条件下，输沙达到平衡时的悬移质级配。根据韩其为等人的研究，在明显冲淤（各组粒径泥沙同时发生一定程度冲刷或淤积）状况下，挟沙能力级配等于或近似等于悬移质级配。

明显冲淤挟沙能力公式为：

$$S_{i,j}^* = K_0 \frac{Q_{i,j}^{3m} B_{i,j}^m}{A_{i,j}^{4m} \omega_{i,j}^m} \quad (2-1-13)$$

式中： K_0 为挟沙能力系数，本次研究中取 0.02； m 为指数，取 0.92； $P_{4,L}^*$ 为悬移质挟沙能力级配；

$$\omega_{i,j}^m = \sum_{L=1}^N P_{4,L,i,j}^* \omega(L)^m$$

微冲微淤状况下，由于各组泥沙的冲淤性质可能不一样，有几组泥沙被冲起，而另有几组可能发生淤积，微冲微淤时挟沙能力级配与悬移质级配不完全一致，挟沙能力级配不但跟悬移质级配有关，还跟床沙级配有关。

微冲微淤挟沙能力公式为：

$$S^*(\omega^*) = S_0 P'_{4,0} + S_0 P''_{4,0} \frac{S^*(\omega_{2,0})}{S^*(\omega_1^*)} + \left[1 - \frac{P'_{4,0} S_0}{S^*(\omega_{1,0})} - \frac{P''_{4,0} S_0}{S^*(\omega_1^*)} \right] P_1 S^*(\omega_{1,1}^*) \quad (2-1-14)$$

微冲微淤挟沙能力级配如下：

$$P_{4,L}^* = P'_{4,0} P_{4,L,1,0} \frac{S_0}{S^*(\omega_1^*)} + P''_{4,0} P_{4,L,2,0} \frac{S_0}{S^*(\omega^*)} \frac{S^*(L)}{S^*(\omega_1^*)} + \left[1 - \frac{P'_{4,0} S_0}{S^*(\omega_{1,0})} - \frac{P''_{4,0} S_0}{S^*(\omega_1^*)} \right] P_1 P_{4,L,1,1}^* \frac{S^*(\omega_{1,1}^*)}{S^*(\omega^*)} \quad (2-1-15)$$

式中：脚标带“0”的为相应参数在河段进口断面的值； $S^*(L)$ 为第 L 组泥沙的均匀沙挟沙能力，即用均匀沙沉速 $\omega(L)$ 代入式（2-1-13）即可。其中

$$P'_{4,L} = \sum_{L=1}^K P_{4,L,0} \quad (2-1-16)$$

$$P_{4,L,1,0} = \begin{cases} \frac{P_{4,L,0}}{P'_{4,0}} & (L=1,2,\dots,K) \\ 0 & (L=K+1,K+2,\dots,N) \end{cases} \quad (2-1-17)$$

$$P''_{4,0} = \sum_{L=K+1}^N P_{4,L,0} \quad (2-1-18)$$

$$P_{4,L,2,0} = \begin{cases} 0 & (L=1,2,\dots,K) \\ \frac{P_{4,L,0}}{P''_{4,0}} & (L=K+1,K+2,\dots,N) \end{cases} \quad (2-1-19)$$

式中： $P_{4,L,0}$ 为进口断面悬移质级配； K 为悬移质中的细颗粒组数； N 为悬移质总组数。

$$S^*(\omega_{1,0}) = \frac{1}{\sum_{L=1}^K \frac{P_{4,L,1,0}}{S^*(L)}} \quad (2-1-20)$$

$$S^*(\omega_{2,0}) = \sum_{L=K+1}^N P_{4,L,1,0} S^*(L) \quad (2-1-21)$$

$$S^*(\omega_1^*) = \sum_{L=1}^M P_{1,L,1} S^*(L) \quad (2-1-22)$$

$$P_1 = \sum_{L=1}^n P_{1,L,1} \quad (2-1-23)$$

$$P_{1,L,1,1} = \begin{cases} \frac{P_{1,L,1}}{P_1} & (L=1,2,\dots,n) \\ 0 & (L=n+1,n+2,\dots,M) \end{cases} \quad (2-1-24)$$

式中： $P_{1,L,1}$ 为床沙级配； n 为床沙中可悬浮泥沙组数； M 为床沙总组数； $P_{4,L,1,1}$ 为与该组床沙级配 $P_{4,L,1,1}$ 相应的挟沙能力级配； $S^*(\omega_{1,1}^*)$ 为其相应的挟沙能力。

(6) 悬移质级配变化

① 明显淤积。

明显淤积时悬移质级配为：

$$P_{4,L,i,j} = P_{4,L,i,j-1} (1 - \lambda_{i,j})^{\left[\frac{\omega(L)}{\omega_{m,i,j}} \right]^\theta - 1} \quad (L=1,2,\dots,N) \quad (2-1-25)$$

式中： θ 为修正指数，湖泊型水库取 $\theta = \frac{1}{2}$ ，河道型水库取 $\theta = \frac{3}{4}$ ； λ 为淤积百分数； $\omega_{m,i,j}$ 为中值沉速，

由 $\sum_{L=1}^N P_{4,L,i,j} = 1$ 确定。

$$\lambda_{i,j} = \frac{S_{i,j-1} Q_{i,j-1} - S_{i,j} Q_{i,j}}{S_{i,j-1} Q_{i,j-1}} \quad (2-1-26)$$

② 明显冲刷。

明显冲刷时的悬移质级配为：

$$P_{4,L,i,j} = \frac{1}{1 - \lambda_{i,j}} \left[P_{4,L,i,j-1} - \frac{\lambda_{i,j}}{\lambda_{i,j}^*} P_{1,L,i-1,j} \lambda^{\frac{\omega(L)}{\omega_{m,i,j}}} \right] \quad (2-1-27)$$

式中: $P_{1,L,i-1,j}$ 为该计算时段冲刷开始时的床沙级配; $\omega_{m,i,j}$ 由 $\sum_{L=1}^N P_{4,L,i,j} = 1$ 确定; λ^* 为冲刷百分数, 表示泥沙冲刷分选程度, 由式 (2-1-28) 定义:

$$\lambda^* = \frac{\Delta h'_{i,j}}{\Delta h'_0 + \Delta h'_{i,j}} = \frac{(Q_{i,j} S_{i,j} - Q_{i,j-1} S_{i,j-1})}{(Q_{i,j} S_{i,j} - Q_{i,j-1} S_{i,j-1}) \Delta t_i + B_k \Delta h'_0 \gamma'_{i,j}} \quad (2-1-28)$$

式中: $\Delta h'$ 为虚冲刷厚度, 表示单位面积上冲刷泥沙重量 (t/m^2); $\Delta h'_0$ 为参加冲刷分选的厚度 (t/m^2); B_k 为稳定河宽 (m); 其余符号意义同前。

③ 微冲微淤。

微冲微淤时悬移质级配的确定是先由式 (2-1-10) 求出分组含沙量, 再求悬移质级配:

$$P_{4,L,i,j} = \frac{S_{L,i,j}}{\sum_{L=1}^N S_{L,i,j}} \quad (2-1-29)$$

微冲微淤是指一次冲刷过程的冲刷幅度较小, 各组泥沙有冲有淤, 这与明显冲淤的性质是完全不同的。微冲微淤的使用范围是:

$$\frac{P'_{4,0} S_0}{S^*(\omega_{1,0})} + \frac{P''_0 S_0}{S^*(\omega_1^*)} < 1 \quad (2-1-30)$$

(7) 卵石推移质计算方程

① 均匀沙单宽输沙率公式^[11]。

$$\lambda_{q_b}(L) = \frac{q_b(L)}{\gamma_s d_L \omega_{1,L}} = K_1 \left(\frac{V_{b,L}}{\omega_{1,L}} \right)^{m_1} \quad (2-1-31)$$

式中: $\lambda_{q_b}(L)$ 为无量纲均匀沙推移质单宽输沙率; $q_b(L)$ 为均匀沙推移质单宽输沙率 ($kg/s \cdot m$); γ_s 为泥沙密度, $\gamma_s = 2650$ (kg/m^3); d_L 为第 L 组泥沙颗粒粒径 (m); $\omega_{1,L}$ 为第 L 组泥沙的特征速度

$$\omega_{1,L} = \sqrt{32.67 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} d_L + \frac{0.186 \times 10^{-7}}{d_L} \left(3 - \frac{t}{\delta_1} \right) \left[\left(\frac{\delta_1}{t} \right)^2 - 1 \right] + 1.55 \times 10^{-7} \frac{H}{d_L} \left(1 - \frac{t}{\delta_1} \right) \left(3 - \frac{t}{\delta_1} \right)} \quad (2-1-32)$$

式中: γ 为水的密度, $\gamma = 1000 kg/m^3$; H 为水深 (m); t 为泥沙颗粒间的空隙 (m); δ_1 为薄膜水厚度, $\delta_1 = 4.0 \times 10^{-7} m$; $V_{b,L}$ 为作用在颗粒上的底部流速, 它与平均流速的关系为

$$V_{b,L} = 3.73 u_* = 3.73 \frac{\bar{V}}{6.5 \left(\frac{H}{d_L} \right)^{4 + \lg \left(\frac{H}{d} \right)}} \quad (2-1-33)$$

式中: u_* 为摩阻流速 (m/s); $\bar{V}$ 为断面平均流速 (m/s); m_1 和 K_1 参数的取值详见文献[3]。

② 非均匀沙的推移质输沙率公式。

由于在同样的水力条件下, 不均匀沙较细颗粒的输沙率低于同粒径的均匀沙的输沙率, 而较粗颗粒的输沙率要高于同粒径的均匀沙的输沙率^[11], 所以在引用式 (2-1-31) 计算不均匀沙推移质输沙率时, 必须引入天然河道不均匀沙分组推移质输沙校正系数 K_2 。则非均匀沙的推移质输沙率公式为

$$Q_{b,L} = K_2 q_b(L) B' P_{1,L} \quad (2-1-34)$$

式中: $Q_{b,L}$ 为非均匀沙的推移质输沙率 (kg/s), B' 为推移质有效输沙宽度。 K_2 可由下式确定^[11]:

$$K_2 = \frac{f\left[\frac{d_L}{d}, \frac{V_{b,L}}{\omega_{1,L}}\right]}{f\left[1, \frac{V_{b,L}}{\omega_{1,L}}\right]} \quad (2-1-35)$$

$P_{1,L}$ 为有效床沙级配, 为

$$P_{1,L} = \beta P'_{1,L} + (1 - \beta) P_{b,L} \quad (2-1-36)$$

式中: $P'_{1,L}$ 为实际床沙级配; $P_{b,L}$ 为推移质级配; β 为床沙级配所占的权重, 取 $\beta=1/3$ 。

③ 推移质总输沙率及推移质级配。

推移质总输沙率为

$$Q_b = \sum Q_{b,L} \quad (2-1-37)$$

推移质级配为

$$P_{b,L} = \frac{Q_{b,L}}{Q_b} \quad (2-1-38)$$

3. 长科院数学模型解法及基本参数的确定

长科院一维数学模型和水科院模型在数值解法及挟沙能力和淤积计算等方面有诸多相同之处, 基本方程经方程变换、整理得如下应用方程。

(1) 水面线计算式

$$Z = Z_0 + \frac{n^2 Q^2 \Delta x}{2} \left(\frac{B^{4/3}}{A^{10/3}} + \frac{B_0^{4/3}}{A_0^{10/3}} \right) + \frac{U_0^2 - U^2}{2g} \quad (2-1-39)$$

(2) 悬移质含沙量变化方程

$$S_i = S_{*i} + (S_{oi} - S_{*oi})e^{-Y} + (S_{*oi} - S_{*i})Y^{-1}(1 - e^{-Y}) \quad (i=1, 2, \dots, 8) \quad (2-1-40)$$

$$\text{式中: } Y = \frac{\alpha \omega_i \Delta x}{q}; \quad S_{*i} = K_i S_{*m}; \quad S_{*m} = 0.0175 \frac{Q^{2.76} B^{0.92}}{A^{3.68} \omega_m^{0.92}}; \quad \omega_m^{0.92} = \sum_{i=1}^8 P_i \omega_i^{0.92}。$$

K_i 为分组挟沙力系数, 采用窦国仁公式:

$$K_i = \frac{(P_i / \omega_i)^\beta}{\sum_{i=1}^8 (P_i / \omega_i)^\beta}$$

P_i 为悬移质级配, 由下式计算:

$$P_i = \begin{cases} P_{oi} & \text{平衡} \\ \frac{G_{soi} - \Delta G_{si}}{\sum (G_{soi} - \Delta G_{si})} & \text{不平衡} \end{cases}$$

(3) 悬移质引起的河床变形

$$\Delta Z_1 = \sum_{i=1}^8 \frac{(Q_0 S_{oi} - Q S_i) \Delta t}{\gamma'_{si} B \Delta x} \quad (2-1-41)$$

(4) 推移质输沙率

推移质输沙率用长江科学院提出的推移质输沙经验曲线求得。输沙曲线的关系式为:

$$\frac{V_d}{\sqrt{gd}} \sim \frac{q_s}{d \sqrt{gd}} \quad (2-1-42)$$

式中: $V_d = \frac{m+1}{m} \left/ \left(\frac{h}{d} \right)^{\frac{1}{m}} U \right.$; $m = 4.7 \left(\frac{h}{d_{50}} \right)^{0.06}$

(5) 泥沙启动流速公式 (张瑞瑾公式)

$$U_c = \left(\frac{h}{d} \right)^{0.14} \sqrt{17.6 \frac{\rho_s - \rho}{\rho} d + 0.000000605 \frac{10 + h}{d^{0.72}}} \quad (2-1-43)$$

(6) 推移质引起的河床变形

$$\Delta Z_2 = \sum_{i=9}^{16} \frac{(G_{boi} - G_{bi}) \Delta t}{\gamma'_{si} B \Delta x} \quad (2-1-44)$$

(7) 河床总变形为

$$\Delta Z = \Delta Z_1 + \Delta Z_2 \quad (2-1-45)$$

上述各式中: Δt 为时段; Δx 为两断面间距; S_i 、 S_{*i} 分别为分组含沙量及挟沙力; S_m 为断面总的挟沙力; q 为单宽流量; ω_m 为非均匀沙平均沉速; k 和 m 分别为挟沙力系数和指数; β 为指数, 取 $1/6$; U_d 为近床面流速; U_c 为床沙启动流速; d 为粒径; h 为水深; q_b 为推移质单宽输沙率; G_b 为推移质总输沙率; G_s 为断面悬移质输沙率; 脚标 “0” 代表已知断面。

2.1.3 数学模型验证

据中国水利水电科学研究院和长江科学研究所掌握的实际资料, 模型验证河段取为屏山一寸滩河段, 上游控制站为屏山水文站, 沿程考虑横江、岷江、沱江、赤水河、嘉陵江等支流入汇。验证时段为 1980~1985 年, 各控制站的年均及多年平均水沙资料如表 2-1-2 所示。

表 2-1-2 进口站 1980~1985 年实测水沙特征值

年份	金沙江屏山站		横江横江站		岷江高场站		沱江李家湾站		赤水河赤水站		嘉陵江北碛站	
	输沙量 (万 t)	径流量 (亿 m ³)	输沙量 (万 t)	径流量 (亿 m ³)	输沙量 (万 t)	径流量 (亿 m ³)	输沙量 (万 t)	径流量 (亿 m ³)	输沙量 (万 t)	径流量 (亿 m ³)	输沙量 (万 t)	径流量 (亿 m ³)
1980	23700	1520	1100	74	3640	898	480	104	450	83	13860	700
1981	25600	1419	1780	89	7350	941	3560	170	330	63	35670	1027
1982	20600	1267	1020	85	4130	823	2280	135	790	95	11550	739
1983	24600	1204	2290	98	3690	803	1530	144	1580	101	18180	1072
1984	25700	1236	2170	100	7400	898	1350	154	570	85	22620	841
1985	32800	1586	1560	93	6720	1004	450	124	610	86	8420	688
平均	25400	1372	1650	90	5470	894	1420	139	720	86	18390	845

长江寸滩站的水沙主要来自金沙江、岷江和嘉陵江。从 1980~1985 年 6 年平均值看, 屏山、高场、北碚的水量占寸滩水量的百分比分别为 38.7%、25.2%、23.8%, 输沙量占寸滩站的百分比分别为 49.1%、10.55%、35.5%, 三站的年平均含沙量分别为 1.85kg/m^3 、 0.612kg/m^3 、 2.176kg/m^3 。可见岷江为少沙河流, 而金沙江和嘉陵江的泥沙含沙量较高。如嘉陵江北碛站的含沙量 1981 年为 3.47kg/m^3 , 1984 年为 2.69kg/m^3 。

根据现有的资料, 数学模型验证计算时, 汛期 6~10 月进口断面屏山站及支流岷江、沱江的悬移质级配取月平均值, 非汛期 (1~5 月、11~12 月) 采用各年实测枯水期平均级配值。嘉陵江由于缺乏系统资料, 悬移质级配采用多年平均值。赤水河缺乏实测资料, 考虑其入汇水沙比很小, 计算中未考虑来沙组成对干流泥沙组成的影响。

表 2-1-3、表 2-1-4 为各站多年悬移质级配, 从中可以看出悬移质泥沙主要以 $0.01\sim 0.1\text{mm}$ 的中细沙为主, 非汛期的悬移质比汛期略粗。