

长江三峡工程 泥沙问题研究

2001—2005
(第一卷)

三峡水库上游来水来沙的变化及其影响研究

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)
第一卷

三峡水库上游来水来沙的变化及其
影响研究

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

三峡水库上游来水来沙的变化及其影响研究/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; 1)

ISBN 978-7-80198-689-4

I. 三… 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045335号

长江三峡工程泥沙问题研究
(2001—2005)
(第一卷)

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/20.625

字 数/609千字

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 潘庆荣 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

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,已经全面完成。各项任务。各项成果经泥沙专家组议后,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

上游修建骨干水库对三峡水库入库水沙条件的影响	中国水利水电科学研究院 长江水利委员会长江科学院 (1)
上游修建骨干水库对三峡水库入库水沙条件影响的研究	中国水利水电科学研究院 (28)
长江上游修建骨干水库对三峡水库入库水沙条件影响的研究	长江水利委员会长江科学院 (57)
三峡水库上游来水来沙变化分析研究	长江水利委员会水文局 (83)
长江上游干支流主要测站水沙量变化统计分析	长江水利委员会水文局 (165)
长江上游 20 世纪 90 年代新建大中型水库蓄水拦沙作用的调查与分析	长江水利委员会水文局 (250)
三峡水库进库水沙代表系列分析	长江水利委员会长江科学院 (281)
长江寸滩站沙质推移质质量分析计算	中国水利水电科学研究院 (291)
国外水土保持效果资料分析	国际泥沙研究培训中心 清华大学河流研究所 (301)

上游修建骨干水库对三峡水库入库水沙条件的影响

中国水利水电科学研究院
长江水利委员会长江科学院

1 前言

三峡水库坝址位于湖北省宜昌市葛洲坝水利枢纽上游 40km 的三斗坪附近,是一座集防洪、发电及航运等为一体的大型综合水利工程,三斗坪坝址以上流域面积约 100 万 km^2 ,占全流域面积的 55%。三峡水利枢纽于 1997 年 11 月 8 日成功地实现大江截流,转入二期施工阶段;2003 年 6 月实现初期蓄水,初步发挥了三峡工程发电、航运等方面的效益。

泥沙问题是影响三峡工程建设和效益发挥的关键因素之一,一直受到社会各界人士的关注。金沙江的溪洛渡、向家坝水库和嘉陵江的亭子口水库的兴建,可以为三峡水库拦截大量的泥沙,减少三峡水库的淤积,并可以通过水库调度,在枯水期增加下泄流量,从而增加三峡水库的防洪、发电、航运等效益。

本项目是受中国长江三峡开发总公司的委托,运用数学模型研究溪洛渡、向家坝和亭子口水库建成后对三峡水库入库水沙的影响,从而为研究三峡水库及库区内工程建设、水库调度等提供依据。

2 概况

三峡水库入库水沙主要来源于长江上游金沙江和嘉陵江的来水来沙量,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站年平均(1953~1989 年)径流量 3500 亿 m^3 的 60.9%和出库站宜昌站年平均(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、亭子口水库,将对三峡水库入库沙量产生较大影响。

2.1 河道概况

溪洛渡、向家坝水利枢纽位于金沙江下游河段,溪洛渡水利枢纽下距宜宾 184km,坝址以上流域面积 45.44 万 km^2 ;向家坝水电站坝址下距宜宾市 32km,坝址以上流域面积 45.90 万 km^2 。

2.1.1 河道形态

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。

报告编写人:毛继新

编写日期:2005 年 6 月

项目负责人:毛继新 方春明 范北林

项目参加人:韩其为 鲁文 钟正琴 何明民 万建群 宫平 张杰 李荣辉 黄悦 蔺秋生

枯水河宽不到 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‰, 河段内共有滩险 40 处。

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, 水面宽约 100~150m, 在弯滩渡、石溪等峡谷段不足 100m。河段落差约 23.9m, 枯水比降 0.51‰, 河段内共有滩险 13 处。

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, 河段内共有滩险 6 处。

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, 河段内有滩险 5 处。

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, 本河段由数十个相对窄段、较宽段、宽段(含特宽段)组合而成, 且以较宽段和宽段为主, 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, 河段内河床多礁坝, 尤以泸州以下河段分布较多。

2.1.2 河岸及床面组成

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在 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
可冲床面所占比例 (%)	4.6	10.6	28	43.0	51.1	67.8	61.4	49.0	41.1	66.0	61.8

根据勘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 $d_{50}=73.2\sim 160.1\text{mm}$, 深层 $d_{50}=45.1\sim 102.7\text{mm}$ 。

2.1.3 支流入汇

屏山—重庆河段, 横亘于四川盆地南部, 大小支流众多, 树枝状水系十分发育。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]。

2.1.4 天然冲淤情况

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($d\leq 1\text{mm}$)泥沙在本河段基本不淤, 只是当大洪水时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)时才会产生较为明显的河床演变。

2.2 溪洛渡、向家坝水库概况

溪洛渡水电站位于金沙江下游云南省永善县与四川省凉山彝族自治州雷波县相接壤的溪洛渡峡谷, 是金沙江下游河道开发规划中的第 3 个梯级。溪洛渡水电站距雷波县城 17km, 与永善县城直线距离 3km, 公路里程 7km, 与下游宜宾河道距离 184km。坝址处控制流域面积 45.44 万 km^2 , 占金沙江流域总面积的 96%, 多年平均来水量 1457 亿 m^3 。峡谷区长 3.8km, 枯水期水位 370.6m, 江面宽 70~140m。

河床覆盖层厚度 20~30m。坝址基岩为二叠系上统峨眉山玄武岩。枯季最小流量 $1060\text{m}^3/\text{s}$ ，实测最大洪水 $29000\text{m}^3/\text{s}$ ，多年平均流量 $4620\text{m}^3/\text{s}$ ，历史最大洪水 $3.69\text{万 m}^3/\text{s}$ ，年输沙量 2.43 亿 t。它是一座以发电为主，兼有防洪、拦沙和改善下游航运条件等综合效益，并可为下游电站进行梯级补偿的水利枢纽工程。电站水库设计洪水位 598.82m，汛限水位 560m，校核洪水位 609.7m，正常蓄水位 600m，对应库容 115.7亿 m^3 ，死水位 540m，调节库容 64.6亿 m^3 ，库容系数 4.3%，属季调节水库，水库枯季下泄流量 $2000\text{m}^3/\text{s}$ 。防洪库容 46.5亿 m^3 ，可使宜宾市防洪标准由目前 20 年一遇提高到百年一遇。拦河大坝为混凝土双曲拱坝，最大坝高 278m，坝顶高程 610m，装机容量 1260 万 kW，年发电量 571 亿 kW·h。其工程规模仅次于三峡，为全国第二大水电站，设计工期 12 年 2 个月，施工准备期 3 年 6 个月。2002 年 9 月 18 日经国务院正式立项，2003 年 8 月 5 日，两岸场内交通开工。

向家坝水电站是金沙江干流梯级开发的最下游一个梯级，坝址位于四川省宜宾县（左岸）和云南省水富县（右岸）交界的向家坝峡谷出口处，上游距离溪洛渡坝址 156.6km，下游距宜宾市 33km，离水富港 2.5km。至重庆、武汉和上海的直线距离分别为 240km、980km 和 1660km，距三峡工程坝址 670km。其控制流域面积 45.88万 km^2 ，占金沙江流域面积的 97%。库内较大支流有大沱溪、中都河、西宁河。向家坝水电站的开发任务以发电为主，同时改善上、下游通航条件，结合防洪和拦沙，兼顾灌溉和漂木，并且具有为上游梯级电站进行反调节的作用。向家坝水电站正常蓄水位 380m，总库容 51.85亿 m^3 ，调节库容 9.05亿 m^3 ，为不完全季调节水库。电站总装机容量 600 万 kW，多年平均发电量 $302.72\text{亿 kW}\cdot\text{h}$ 。电站建成后，除提供稳定可靠的电能外，河道通航标准由 V 级提高到 IV 级，并为下游 218.3 万亩农田的灌溉和灌区内城镇居民的生产生活用水等提供充足的水源。同时，向家坝水库可以运用腾空的库容，发挥滞洪错峰作用，从而提高下游城镇特别是宜宾市的防洪能力。此外，向家坝水库形成后，将减缓三峡工程的泥沙淤积。工程已于 2004 年 6 月 15 日启动。

2.3 嘉陵江及亭子口水库概况

嘉陵江发源于秦岭南麓，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 15.98万 km^2 ，流域内森林覆盖率约为 13.7%。流域内小支流众多，流域面积 1.00万 km^2 以上的支流有西汉水、白龙江、渠河、涪江，构成扇形水系，各水系上游均为山区，为峡谷河流。干流的东西两源在略阳汇合，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，河流自北向南经川中盆地；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。

亭子口水库位于嘉陵江中下游的苍溪县境内，是嘉陵江干流开发 16 个梯级中唯一的多目标综合利用枢纽，控制流域面积 6.28万 km^2 ，装机容量 90 万 kW，正常蓄水位 458m，死水位 438m，库容 52亿 m^3 ，其中兴利库容 24亿 m^3 。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。

3 数学模型简介

3.1 中国水利水电科学研究院数学模型（NENUS 模型）

中国水利水电科学研究院计算采用的是一维恒定非均匀不平衡微冲微淤数学模型（MI-NENUS-3），其计算方法及模型中挟沙能力系数、糙率变化的处理方法与以往的研究基本一致。

3.1.1 基本方程

(1) 水流运动方程

$$H_{i,j} = H_{i,j+1} + \frac{n_{j+1}^2 \Delta x_{j+1}}{2} \left[\frac{Q_{i,j+1}^2 B_{i,j+1}^3}{A_{i,j+1}^{10}} + \frac{Q_{i,j}^2 B_{i,j}^3}{A_{i,j}^{10}} \right] + \frac{1}{2g} \left[\frac{Q_{i,j+1}^2}{A_{i,j+1}^5} - \frac{Q_{i,j}^2}{A_{i,j}^5} \right] \quad (3-1-1)$$

式中: H 为水位 (m); n 为糙率; Q 为流量 (m^3/s); A 为过水面积 (m^2); B 为水面宽度 (m); Δx 为断面间距 (m); g 为重力加速度; i 为时段编号, j 为断面编号 (自上游向下游编排)。

(2) 水流连续方程

① 支流入汇断面:

$$Q_{i,j} = Q_{i,j-1} + Q_{i,j\text{支}} \quad (3-1-2)$$

② 无支流入汇断面:

$$Q_{i,j} = Q_{i,0} + (Q_{i,1} - Q_{i,0}) \frac{\sum_{k=1}^j \Delta x_k}{\Delta L} \quad (3-1-3)$$

式中: 脚标 “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

$$S_{i,j,L} = P_{4,L,j,j}^* S_{i,j}^* (\omega^*) + [P_{4,L,j,j-1} S_{i,j-1} - P_{4,L,j,j-1}^* S_{i,j-1}^* (\omega^*)] \cdot e^{\frac{\alpha \Delta x_{j-1}}{A_j}} + [P_{4,L,j,j-1}^* S_{i,j-1}^* (\omega^*) - P_{4,L,j,j}^* S_{i,j}^* (\omega^*)] \cdot \frac{\lambda_{i,j}}{\alpha \Delta x_j} (1 - e^{\frac{\alpha \Delta x_{j-1}}{A_j}}) \quad (3-1-4)$$

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; $P_{4,L}^*$ 为悬移质挟沙能力级配; 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

$$\lambda_{i,j} = \frac{Q_{i,j-1} + Q_{i,j}}{\omega(L)(B_{i,j-1} + B_{i,j})} \quad (3-1-5)$$

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

$$\Delta a_{i,j} = \frac{Q_{i,j-1} S_{i,j-1} - Q_{i,j} S_{i,j}}{\gamma'_{i,j} \Delta x_{j+1}} \Delta t_i \quad (3-1-6)$$

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), 一般应取初期淤积物干密度, 由淤积物级配决定, 初期干密度与级配关系见文献[4]。

(5) 推移质冲淤河床变形方程

$$\Delta a_{b,i,j} = \frac{Q_{b,i,j-1} - Q_{b,i,j}}{\gamma'_{b,i,j} \Delta x_j} \Delta t_i \quad (3-1-7)$$

式中: $\Delta a_{b,i,j}$ 为由推移质引起的 j 断面冲淤面积 (m^2); Q_b 为断面推移质输沙率 (kg/s)。其余符号意义同前。

3.1.2 悬移质计算辅助方程

(1) 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^[7,8], 其方程可按三种输沙状态来确定:

① 明显淤积。所谓明显淤积是指各组粒径泥沙都发生一定程度淤积(至少不发生冲刷)。这种淤积在床面淤积速度较快时出现。从瞬时情况看, 在淤积过程中床面泥沙中虽有被冲起但冲起后又淤下, 所以从累计效果看床面泥沙不会被冲起, 即此时的床面变形和悬移质运动与原河床无关。在明显淤积条件下, 可从理论上证明^[5]:

$$P_{4,L,I,J}^* = P_{4,L,I,J} \quad (3-1-8)$$

式中: $P_{4,L}^*$ 为悬移质挟沙能力级配; $P_{4,L}$ 为悬移质级配。

② 明显冲刷。明显冲刷是指各组粒径泥沙都发生一定程度的冲刷(至少不发生淤积)。这种冲刷在床面冲刷速度较快时出现。从瞬时情况看, 在冲刷过程中悬移质泥沙虽有被淤下的, 但淤下后又被冲起, 所以从累计效果看, 悬移质不会被淤下, 即含沙量和悬沙级配的沿程变化单纯由于沿程冲起泥沙数量和级配而引起。明显冲刷条件下, 有近似关系^[8,9]:

$$P_{4,L,I,J}^* \approx P_{4,L,I,J} \quad (3-1-9)$$

明显冲刷和明显淤积状态下的挟沙能力级配等于或约等于悬移质级配, 统称为明显冲淤。以这种挟沙能力级配所建立的模型相应称之为明显冲淤模型。其挟沙能力公式为:

$$S_{i,j}^* = K_0 \frac{Q_{i,j}^{3m} B_{i,j}^m}{A_{i,j}^{4m} \omega_{i,j}^m} \quad (3-1-10)$$

而

$$\omega_{i,j}^m = \sum_{L=1}^N P_{4,L,I,J}^* \omega(L)^m \quad (3-1-11)$$

式中: K_0 为挟沙能力系数, 需根据实际河段而定; m 为指数, $m=0.92$ 。

③ 微冲微淤。微冲微淤是指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。

根据文献^[7,8], 给出微冲微淤挟沙能力级配如下:

$$P_{4,L}^* = P_{4,0}^* P_{4,L,1,0} \frac{S_0}{S^*(\omega^*)} + P_{4,0}^* P_{4,L,2,0} \frac{S_0}{S^*(\omega^*)} \frac{S^*(L)}{S^*(\omega_1^*)} + \left[1 - \frac{P_{4,0}^* S_0}{S^*(\omega_1^*)} - \frac{P_{4,0}^* S_0}{S^*(\omega_1^*)} \right] \frac{P_{4,1}^* P_{4,L,1,1}}{S^*(\omega^*)} \quad (3-1-12)$$

式中: 脚标带“0”的为相应参数在短河段进口断面的值, $S^*(L)$ 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(3-1-10)、式(3-1-11)即可。其中

$$P_{4,L}^* = \sum_{L=1}^K P_{4,L,0} \quad (3-1-13)$$

$$P_{4,L,1,0} = \begin{cases} \frac{P_{4,L,0}}{P_{4,0}^*} & (L=1, 2, \dots, K) \\ 0 & (L=K+1, K+2, \dots, N) \end{cases} \quad (3-1-14)$$

$$P_{4,0}^* = \sum_{L=K+1}^N P_{4,L,0} \quad (3-1-15)$$

$$P_{4,L,2,0} = \begin{cases} 0 & (L=1, 2, \dots, K) \\ \frac{P_{4,L,0}}{P_{4,0}^*} & (L=K+1, K+2, \dots, N) \end{cases} \quad (3-1-16)$$

$P_{4,L,0}$ 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。

$$S^*(\omega_{1,0}) = \frac{1}{\sum_{L=1}^K \frac{P_{4,L,0}}{S^*(L)}} \quad (3-1-17)$$

$$S^*(\omega_{2,0}) = \sum_{L=K+1}^N P_{4,L,0} S^*(L) \quad (3-1-18)$$

$$S^*(\omega_1^*) = \sum_{L=1}^M P_{1,L,1} S^*(L) \quad (3-1-19)$$

$$P_1 = \sum_{L=1}^n P_{1,L,1} \quad (3-1-20)$$

$$P_{1,L,1} = \begin{cases} \frac{P_{1,L,1}}{P_1} & (L=1, 2, \dots, n) \\ 0 & (L=n+1, n+2, \dots, M) \end{cases} \quad (3-1-21)$$

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; $P'_{4,L,1}$ 为与该组床沙级配 $P_{4,L,1}$ 相应的挟沙能力级配; $S^*(\omega_{1,1}^*)$ 为其相应的挟沙能力。

取从冲刷开始 ($\lambda^* = 0$) 至冲刷后 (λ^*) 与粗化床沙 $P_{1,L,1}$ 相应的平均挟沙能力级配, 即

$$P'_{4,L,1} = \frac{1}{\lambda^*} \int_0^{\lambda^*} P'_{4,L,1}(\tau) d\tau \quad (3-1-22)$$

此处

$$P'_{4,L,1} = \left[\frac{\omega_m}{\omega(L)} \right]^m P_{4,L,1} \quad (3-1-23)$$

而 ω_m 由

$$\sum_{L=1}^n P'_{4,L,1} = 1 \quad (3-1-24)$$

试算确定。

从式 (3-1-12) 可知, 微冲微淤挟沙能力级配由三部分组成: 第一部分为悬移质中的细颗粒, 这些来沙从累计效果看是不淤的, 因此它的挟沙能力就是这部分来沙; 第二部分为悬移质中的较粗颗粒, 这一部分泥沙转成床沙后, 只有部分能转成挟沙能力; 第三部分为从床沙中冲起来的部分。

微冲微淤挟沙能力公式为^[6]

$$S^*(\omega^*) = S_0 P'_{4,0} + S_0 P_{4,0} \frac{S^*(\omega_{2,0}^*)}{S^*(\omega_1^*)} + \left[1 - \frac{P'_{4,0} S_0}{S^*(\omega_{1,0}^*)} - \frac{P'_{4,0} S_0}{S^*(\omega_1^*)} \right] P_1 S^*(\omega_{1,1}^*) \quad (3-1-25)$$

符号意义同前。

水库下游冲刷过程一般都是细沙冲、粗沙淤的分选过程。也就是说, 当水流强度不是很大时, 各组泥沙有冲有淤, 冲淤性质可能不完全一样。所以, 从物理模式来看, 微冲微淤模型更能反映实际情况。

(2) 悬移质级配变化

① 明显淤积。明显淤积时悬移质级配为^[10]

$$P_{4,L,j,j} = P_{4,L,j,j-1} (1 - \lambda_{q,j})^{\left[\frac{\omega(L)}{\omega_{q,L,j,j}} \right]^m - 1} \quad (L=1, 2, \dots, n) \quad (3-1-26)$$

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,

$$\lambda_{i,j} = \frac{S_{i,j-1}Q_{i,j-1} - S_{i,j}Q_{i,j}}{S_{i,j-1}Q_{i,j-1}} \quad (3-1-27)$$

$\omega_{m,j}$ 为中值沉速, 由

$$\sum_{L=1}^N P_{4,L,j} = 1 \quad (3-1-28)$$

确定。

② 明显冲刷。明显冲刷时的悬移质级配为^[10]

$$P_{4,L,j} = \frac{1}{1 - \lambda_{i,j}} \left[P_{4,L,j-1} - \frac{\lambda_{i,j}}{\lambda_{i,j}^*} P_{1,L,j-1} \lambda_{i,j}^{*\omega_{m,j}} \right] \quad (3-1-29)$$

式中: $P_{1,L,j-1}$ 为该计算时段冲刷开始时的床沙级配; $\omega_{m,j}$ 由 $\sum_{L=1}^N P_{4,L,j} = 1$ 确定; λ^* 为冲刷百分数, 表示泥沙冲刷分选程度, 由式 (3-1-30) 定义:

$$\lambda^* = \frac{\Delta h'_{i,j}}{\Delta h_0 + \Delta h'_{i,j}} = \frac{Q_{i,j}S_{i,j} - Q_{i,j-1}S_{i,j-1}}{(Q_{i,j}S_{i,j} - Q_{i,j-1}S_{i,j-1})\Delta t_i + B_k\Delta h_0\gamma'_{i,j}} \quad (3-1-30)$$

式中: $\Delta h'$ 为虚冲刷厚度, 表示单位面积上冲刷泥沙质量 (t/m^2); Δh_0 为参加冲刷分选厚度 (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 (3-1-4) 求出分组含沙量, 再求悬移质级配。

$$P_{4,L,j} = \frac{S_{L,j}}{\sum_{L=1}^N S_{L,j}} \quad (3-1-31)$$

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式 (3-1-12) 和式 (3-1-25) 必须满足

$$\frac{P'_{4,j-1}S_{i,j-1}}{S'_{i,j-1}(\omega_i)} + \frac{P_{4,j-1}S_{i,j-1}}{S'_{i,j}(L)} < 1 \quad (3-1-32)$$

当不满足式 (3-1-32) 时, 模型自动转入明显冲淤模型计算。

3.1.3 卵石推移质计算方程

(1) 均匀沙单宽输沙率公式^[11]

$$\lambda_{q_b}(L) = \frac{q_b(L)}{\gamma_s D_L \omega_{L,L}} = K_1 \left(\frac{V_{b,L}}{\omega_{L,L}} \right)^m \quad (3-1-33)$$

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); $\omega_{L,L}$ 为第 L 组泥沙的特征速度

$$\omega_{L,L} = \sqrt{32.67 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} D_L + \frac{0.186 \times 10^{-7}}{D_L} \left(3 - \frac{t}{\delta_i} \right) \left[\left(\frac{\delta_i}{t} \right)^2 - 1 \right] + 1.55 \times 10^{-7} \frac{H}{D_L} \left(1 - \frac{t}{\delta_i} \right) \left(3 - \frac{t}{\delta_i} \right)} \quad (3-1-34)$$

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_i 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

$$V_{b,L} = 3.73 u_* = 3.73 \frac{\bar{V}}{6.5 \left(\frac{H}{D_t} \right)^{4+1g\left(\frac{H}{D}\right)}} \quad (3-1-35)$$

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 (3-1-33) 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:

$$Q_{b,L} = K_2 q_b(L) B' P_{1,L} \quad (3-1-36)$$

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 可由式 (3-1-37) 确定^[11]:

$$K_2 = \frac{f\left[\frac{D_b}{\bar{D}}, \frac{V_{b,L}}{\omega_{b,L}}\right]}{f\left[1, \frac{V_{b,L}}{\omega_{b,L}}\right]} \quad (3-1-37)$$

$P_{1,L}$ 为有效床沙级配, 为

$$P_{1,L} = \beta P'_{1,L} + (1 - \beta) P_{b,L} \quad (3-1-38)$$

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

$$Q_b = \sum Q_{b,L} \quad (3-1-39)$$

推移质级配为

$$P_{b,L} = \frac{Q_{b,L}}{Q_b} \quad (3-1-40)$$

3.2 长江科学院数学模型 (HELIU 模型)

3.2.1 一维河床冲淤基本方程组

(1) 水流运动方程和连续方程

$$\frac{\partial Z}{\partial x} + J_f + \frac{1}{2g} \frac{\partial U^2}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} = 0 \quad (3-2-1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (3-2-2)$$

(2) 悬移质泥沙连续方程

$$\frac{\partial(QS_i)}{\partial x} + \frac{\partial(AS_i)}{\partial t} + \alpha B(S_i - S_{*i})\omega_i = 0 \quad (i=1, 2, \dots, 8) \quad (3-2-3)$$

(3) 水流挟沙能力方程

$$S_* = S_*(U, Z, \omega, \dots) \quad (3-2-4)$$

(4) 推移质输沙率方程

$$G_b = G_b(U, Z, d, \dots) \quad (3-2-5)$$

(5) 悬移质河床变形方程

$$\frac{\partial(QS)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma'_s \Delta A)}{\partial t} + \frac{\partial(AS)}{\partial t} = 0 \quad (3-2-6)$$

(6) 推移质河床变形方程

$$\frac{\partial(G_b)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma'_s \Delta A_2)}{\partial t} = 0 \quad (3-2-7)$$

上述各式中: Z 为水位; Q 为流量; J_f 为能坡; U 为流速; A 为过水面积; H 为水深; g 为重力加速度; S 、 S_s 分别为断面平均含沙量及挟沙力; G_b 为推移质输沙率; γ'_s 为干密度; ΔA_1 、 ΔA_2 分别为悬移质和推移质冲淤面积; B 为水面宽; x 为沿程距离; t 为时间; ω 为泥沙颗粒静水沉速; 脚标“ i ”为第 i 粒径组; d 为粒径; α 为恢复饱和系数 (淤积时取 0.25, 冲刷时取 1.0)。

3.2.2 基本方程组的简化

由于所研究的问题是长时期、长河段内发生的, 在实际计算时对基本方程组进行了简化。简化的假定是将整个计算时段划分成若干小的计算时段, 将长河段划分为若干个短河段, 且在计算时段内, 短河段内除 ΔA 以外, 其他因子不变, 即按恒定流考虑, 而在不同时段不同河段各因子可以不同, 并忽略微小量 $\frac{\partial U}{\partial t}$ 、 $\frac{\partial(AS)}{\partial t}$ 等。经差分方程变换、整理得如下应用方程。

(1) 水面线计算式

$$Z = Z_0 + \frac{n^2 Q^2 \Delta x}{2} \left(\frac{B^{4/3}}{A^{10/3}} + \frac{B_0^{4/3}}{A_0^{10/3}} \right) + \frac{U_0^2 - U^2}{2g} \quad (3-2-8)$$

(2) 悬移质含沙量变化方程

$$S_i = S_{i-1} + (S_{oi} - S_{ui})e^{-Y} + (S_{ui} - S_{i-1})Y^{-1}(1 - e^{-Y}) \quad (i=1, 2, \dots, 8) \quad (3-2-9)$$

式中: $Y = \frac{\alpha \omega_i \Delta x}{q}$; $S_{oi} = K_i S_{mi}$; $S_{ui} = k \left(\frac{U^3}{gh \omega_i} \right)^{m_i}$, 采用 $m_i = 0.92$, $k/g^{m_i} = 0.0175$, 得 $S_{ui} = 0.0175 \frac{Q^{2.76} B^{0.92}}{A^{1.68} \omega_i^{0.92}}$, $\omega_i^{0.92} = \sum_{j=1}^8 P_j \omega_j^{0.92}$; K_i 为分组挟沙力系数, 采用窦国仁公式 $K_i = \frac{(P_i/\omega_i)^\theta}{\sum_{j=1}^8 (P_j/\omega_j)^\theta}$; P_i 为悬移质级配, 由式 (3-2-10) 计算:

$$P_i = \begin{cases} P_{oi} & \text{平衡} \\ \frac{G_{s0i} - \Delta G_{si}}{\sum (G_{s0i} - \Delta G_{si})} & \text{不平衡} \end{cases} \quad (3-2-10)$$

(3) 悬移质引起的河床变形

$$\Delta Z_i = \sum_{j=1}^8 \frac{(Q_{s0i} S_{oi} - QS_i) \Delta t}{\gamma'_s B \Delta x} \quad (3-2-11)$$

(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:

$$\frac{V_d}{\sqrt{gd}} \sim \frac{q_s}{d \sqrt{gd}} \quad (3-2-12)$$

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

(5) 泥沙启动流速公式(张瑞瑾公式)

$$U_c = \left(\frac{h}{d} \right)^{0.14} \sqrt{17.6 \frac{\rho_s - \rho}{\rho} d + 0.000000605 \frac{10+h}{d^{0.72}}} \quad (3-2-13)$$

(6) 推移质引起的河床变形

$$\Delta Z_2 = \sum_{i=0}^{16} \frac{(G_{b0i} - G_{bi}) \Delta t}{\gamma'_{si} B \Delta x} \quad (3-2-14)$$

(7) 河床总变形为

$$\Delta Z = \Delta Z_1 + \Delta Z_2 \quad (3-2-15)$$

(8) 断面形态修改: 宽浅断面沿湿周等厚变形修改; 窄深断面按水平变形修改。

上述各式中: Δt 为时段; Δx 为两断面间距; S_i 、 S_{ei} 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 为非均匀沙平均流速; 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_s 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。

4 数学模型验证

中国水利水电科学研究院和长江科学研究院于 1997 年参与了溪洛渡、向家坝水库比选的研究工作, 此次模型的验证主要是在以往工作的基础上, 根据现在所掌握的实际资料情况进行的。

4.1 验证河段水沙条件

模型验证河段为屏山一寸滩河段, 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 4-1-1 所示。

表 4-1-1 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 北碚站	
	输沙量	径流量	输沙量	径流量	输沙量	径流量	输沙量	径流量	输沙量	径流量	输沙量	径流量
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

注: 表中单位, 输沙量为万 t, 径流量为亿 m³。

从表 4-1-1 中可以看出, 长江寸滩站的水沙主要来自金沙江、岷江和嘉陵江。6 年平均看, 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%, 三站的多年平均含沙量分别为 $1.85\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $0.612\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $2.176\text{kg}/\text{m}^3$ 。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。如嘉陵江北碚站的含沙量 1981 年为 $3.47\text{kg}/\text{m}^3$, 1984 年为 $2.69\text{kg}/\text{m}^3$ 。

根据现有的资料, 汛期 6~10 月进口断面屏山站及支流岷江、沱江的悬移质级配逐月给定, 非汛期(1~5 月、11~12 月)用各年实测枯水期平均级配给定。嘉陵江由于缺乏系统资料, 用多年平均级配代替。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 4-1-2、表 4-1-3 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。

表 4-1-2 枯水期多年平均级配表 (1980~1985 年)

站 名	小于某粒径 (mm) 的沙重百分数 (%)						
	0.005	0.01	0.025	0.05	0.10	0.25	0.50
屏山	8.67	15.23	30.84	50.99	79.34	95.01	100.00
朱沱	14.55	25.15	45.99	69.34	91.97	98.09	100.00
寸滩	13.47	23.70	43.02	61.53	81.92	92.96	100.00
高场	9.14	14.83	25.28	39.94	81.27	96.07	100.00
李家湾	17.85	29.83	46.79	61.35	95.13	99.45	100.00

表 4-1-3 汛期多年平均级配表 (1980~1985 年)

站 名	小于某粒径 (mm) 的沙重百分数 (%)						
	0.005	0.01	0.025	0.05	0.10	0.25	0.50
屏山	11.22	20.95	40.99	63.54	82.44	93.11	100.00
朱沱	14.71	25.25	43.55	64.19	83.84	94.57	100.00
寸滩	15.01	27.00	48.15	68.22	84.7	93.88	100.00
高场	10.45	19.03	36.71	57.43	82.56	93.58	100.00
李家湾	17.60	30.12	47.76	62.72	87.72	98.19	100.00

根据有关单位提供的卵石推移质多年平均输沙量资料, 支流岷江为 44.4 万 t, 沱江为 2.8 万 t, 横江为 2.0 万 t, 赤水河为 2.0 万 t。干流进口屏山年卵石推移质量, 在验证计算中采用 78 万 t。

4.2 河道糙率

模型计算中, 河道糙率的确定直接影响水力计算结果, 但由于影响河道糙率的因素复杂, 模型中多根据实测水文资料试糙求得河道综合糙率。长江科学院根据研究河段的特性, 分 10 个河段反求于不同流量下各河段的糙率, 模型计算时根据流量插值求得河段糙率; 中国水利水电科学研究院鉴于计算河段水系复杂, 汇入的支流多等特点, 为了反映支流入汇特别是大支流入汇对干流的影响, 如壅水抬高水位等, 确定研究河段糙率时, 在根据各控制水文站的水位—流量关系求河段综合糙率时, 还考虑了各支流的汇流比的影响。不同河段的初始糙率值详见文献[1, 2]。