

庆祝长江科学院建院50周年

长江科学院科技论文精选

SELECTED PAPERS OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF
CHANGJIANG SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE

1951—2001

长江科学院 编



中国科学技术出版社

庆祝长江科学院建院 50 周年

长江科学院科技论文精选

SELECTED PAPERS OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF
CHANGJIANG SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE

(1951 – 2001)

长江科学院 编

中国科学技术出版社

·北 京·

图书在版编目 (C I P) 数据

长江科学院科技论文精选/长江科学院编. —北京:
中国科学技术出版社, 2001. 9

ISBN 7-5046-3168-X

I. 长… II. 长… III. 水利工程-科学研究-文集
IV. TV-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 066839 号

中国科学技术出版社出版

北京海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码: 100081

电话: 62179148 62173865

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

长江水利委员会航测信息工程院印刷

*

开本: 880 毫米×1230 毫米 1/16 印张: 26 字数: 900 千字

2001 年 9 月第 1 版 2001 年 9 月第 1 次印刷

印数: 1-1 000 册 定价: 98.00 元

(凡购买本社的图书, 如有缺页、倒页、
脱页者, 本社发行部负责调换)

编辑人员名单

主 编：王德厚

副主编：张政权 陶 欣 陈元明

编 辑：曾小汉 徐 平 周少军 彭昌水 陈 虹

孟祥芳 刘 文 王 昶 王 慰 车子刚

评审专家名单

包承纲 陈华康 董学晟 王德厚 杨 淳 陈子湘

蒋硕忠 殷瑞兰 刘大明 林绍忠 刘崇熙 程展林

吴昌瑜 汪在芹 龚壁建 郭建业 田 野 杨栽和

周力峰 黄作森 徐 平

序

秋风送爽，丹桂飘香。金秋时节里我们迎来了长江科学院 50 年华诞。半个世纪的治江伟业，铸造了长江科学院的辉煌。50 年的风风雨雨，造就了一代又一代治水科技英豪。

长江科学院从诞生之日起，就致力于长江的开发与治理，以长江的水利水电科学研究为己任。先后为长江流域的荆江分洪、汉江分洪、丹江口、葛洲坝、万安、隔河岩、三峡、南水北调、水布垭等 200 余个大中型水利水电工程建设、长江干支流河道治理以及其他行业建设开展了大量的科学试验研究工作，攻克了许多关键技术难题，取得了数以万计的科研成果。同时，完成了国家科技攻关项目、国家自然科学基金重大（重点）项目和省部级重点项目及基金项目 500 余项，取得了百余项具有国际先进水平的重大科研成果，为水利学科理论发展及公益性研究做出了巨大贡献。

本论文集从建院 50 年来的数千篇科技论文中遴选出 110 篇作为代表作。这是长江科学院人集体智慧的结晶，也是长江科学院人 50 年来艰苦创业、开拓进取的见证，更是长江科学院人“团结、奉献、科学、创新”的精神再现。这些论文发表于 50 年来的不同时期，涵盖了长江科学院现有的十多个研究专业。从不同的侧面体现了长江科学院的学术风范，从不同的角度反映了长江科学院的科研实力。其作者中，既有鬓发花白、壮心不已的老一代水利专家，也有蓬勃向上、勇于创新的中青年科研人员。

作为窗口，它从不同的科研项目具体体现了长江科学院多专业、多学科、多领域的科研广度；用不同的研究手段和方法充分显示了长江科学院的科研水平。从这些论文取得的巨大经济效益和社会效益来看，有力地证明了长江科学院人勇于开拓、善于钻研的创新能力。

50 年的工程实践铸造了长江科学院的辉煌，同时，也造就出了几代长江科学院的水利专家！这本论文集的作者中，就有泥沙专家、水工专家、河工专家、材料结构专家、土工专家、爆破专家、渗流专家等等。他们有幸加入了长江科

学院，长江科学院也有幸获得了与他们合作的机会。他们中的一些老专家亲眼目睹了长江科学院的创立，与长江科学院一起成长，从幼稚走向成熟，从起点走向成功。

今天，在长江科学院庆祝自己 50 岁生日的人群中，已经看不见曾经为长江科学院的创建和发展作出重大贡献、与长江科学院共同走过风雨征程的几位老水利专家的身影了！他们为了水利事业鞠躬尽瘁，忘我工作，不计较个人得失，把自己有限的生命投入到无限的为水利水电工程服务之中。没有他们昨日的奉献，就没有长江科学院的今天！他们是我们今天最应记住的人，最应尊敬的人，最应怀念的人，最应歌颂的人。

我们把此文集作为一份生日贺礼，敬献给前进中的长江科学院！同时也把此文集视为一束鲜花，敬献给各位水利界的同仁和朋友！敬献给每一位亲爱的读者！

沈泰 2001.8.

目 录

序	沈泰
---------	----

河流泥沙与江湖治理研究

三峡水库长期使用研究	唐日长 (1)
水库不平衡输沙的初步研究	韩其为 张威 黄煜龄等 (5)
低水头枢纽凸岸工程的引水防沙研究	唐日长 陈华康 龙超平 (21)
三峡工程坝区泥沙问题试验研究	梁中贤 郭炜 张九蓉 (25)
葛洲坝枢纽三江下引航道水沙运动规律研究	殷瑞兰 王巧 张政权 (30)
下荆江裁弯经验总结	潘庆燊 袁金炼 曾静贤等 (33)
长江中下游分汊河型成因研究	罗海超 周学文 尤联元等 (49)
长江分汊河道口门水流及输沙特性	余文畴 (55)
天然河弯水流动力轴线的研究	张植堂 林万泉 沈勇健 (64)
长江泥沙起动流速公式探讨	卢金友 (71)
利用水平附壁射流破异重流理论探讨	张政权 段文忠 (77)
长江入海泥沙扩散与北支淤积泥沙来源	史立人 魏特 沈惠漱 (81)
三峡水库的修建对长江口盐水入侵影响的初探	沈惠漱 黄煜龄 (89)
河口潮流河段二维非恒定流数模研究及应用	董耀华 黄煜龄 (93)
实体模型变率研究	姚仕明 张玉琴 李会云 (99)

水工水力学研究

三峡工程导流底孔布置及方案比较水力学研究	杨淳 罗佩金 陈红霞 (103)
对三峡水利枢纽泄水建筑物及电厂布置的研究	朱光淬 何益源 周胜等 (108)
三峡工程溢流坝泄洪深孔有压短进水口体型的试验研究	丁灼仪 (113)
三峡升船机承船厢整体动态特性研究	杨淳 曾祥 (122)
三峡工程二期围堰深水截流堤头坍塌研究	杨文俊 刘力中 柏林等 (130)
三峡船闸输水阀门水力学试验研究	徐勤勤 (138)
三峡电站进水口体型优化试验研究	王友亮 徐诗银 刘然心 (145)
三峡工程泄洪深孔跌坎掺气体型模型试验研究	周赤 韩继斌 朱世洪等 (150)
长江三峡工程非恒定流通航条件研究	孙尔雨 朱庆福 杨文俊等 (154)
葛洲坝工程大江截流若干水力学问题的试验研究和基本结论	刘大明 汪定扬 王先明 (162)
葛洲坝二江闸底流消能研究的有关问题	李麟祯 (170)
葛洲坝水利枢纽一期工程运行初期水力学方面的基本情况及问题	宁廷俊 沈德贤 (179)
不衬砌岩石隧洞摩阻特性的探讨	丁灼仪 (184)
突扩跌坎型门座的水力特性研究	金峰 周赤 廖仁强等 (190)
自航船模与航道水力学试验研究中的几个问题的认识与实践	陈永奎 焦春文 (199)

自航船模的航行特性及其相似衡准	陈永奎 (207)
用岩块放大法模拟岩基冲刷的试验研究	陈忠儒 陈义东 (212)

工程结构研究

地质力学模型材料研究和若干试验技术的探讨	沈泰 邹竹荪 (219)
岩基上重力坝的系统破坏概率	付秀堂 沈泰 陈进等 (226)
气温骤降与大体积混凝土表面裂缝	龚召熊 罗承管 张锡祥 (231)
用于土工和结构模型实验的离心机设计简介	王学东 (236)
大体积混凝土结构仿真应力分析的快速算法	林绍忠 (243)
重力坝深(底)孔断面钢筋混凝土模型试验研究	陈进 王光纶 段云岭等 (245)
三峡枢纽溢流坝段坝体应力三维光弹性实验研究	马迁 (250)
葛洲坝工程二江泄水闸基岩稳定安全度的评价	龚召熊 郭春茂 韩世浩 (256)
三峡永久船闸第三闸首接触问题仿真计算	徐跃之 黄作森 林绍忠 (262)
分析拱坝应力的分载位移法	林绍忠 杨仲侯 (266)
结构模型试验内部位移计的研制及位移观测自动化	黄薇 陈进 (272)
三峡大坝导流底孔弧形闸门流激振动水弹性模型试验研究	吴杰芳 张林让 陈敏中等 (275)
乌江构皮滩双曲拱坝抗震性能有限元分析研究	陈敏中 徐德毅 吴杰芳 (279)

土力学与渗流研究

离心试验技术在土石坝工程中的应用	饶锡保 包承纲 (285)
三峡二期围堰饱和-非饱和渗流分析	任大春 吴昌瑜 朱国胜 (290)
用均匀设计优选三峡围堰柔性材料配合比	李青云 蒋顺清 孙厚才等 (294)
解析元素法及其在水工渗流问题中的应用研究	吴昌瑜 (298)
加筋复合土体的力学机理分析	丁金华 包承纲 (304)
膨胀土边坡的现场吸力量测	龚壁卫 包承纲 刘艳华等 (309)
三峡工程永久船闸高边坡降雨入渗实验研究	张家发 张伟 朱国胜等 (313)
南水北调中线工程总干渠水泥土衬砌试验研究	孙厚才 李青云 陈智勇等 (317)
随机场理论在重力式码头地基承载力概率计算中的应用	包承纲 黄卫峰 张庆华 (321)
深水抛填土的抗渗强度研究	李思慎 徐隆庆 伍碧秀 (326)
隧洞拱冠砂土位移与破坏的离心模型试验研究	周小文 濮家骝 包承纲 (332)
格形钢板桩码头侧向变形分析方法研究	程展林 饶锡保 (336)
碎石桩处理深厚层软土地基效果分析	曹星 刘小峰 定培中 (339)
梁柱式海洋平台基础与土相互作用的离心模型试验	李玫 包承纲 单人玢 (342)

岩石力学与工程研究

葛洲坝岩体变形特性分析	董学晟 (346)
碎块体的力学性质	田野 (350)
葛洲坝工程二江泄水闸下游大型岩体抗力试验	任放 (358)
后张预应力锚索摩阻试验研究	龚壁新 刘允芳 罗超文等 (362)
深钻孔地应力测量和地应力场分析及其应用	刘允芳 龚壁新 罗超文等 (367)

三峡船闸边坡卸荷带岩体力学性质试验研究	周火明 李维树 熊诗湖等 (373)
嵌岩桩受力机理分析	明可前 (376)
岩石流变特性及高边坡稳定性流变分析	夏熙伦 徐平 丁秀丽 (379)
DDA 数值模型及其在岩体工程上的初步应用研究	邬爱清 任放 董学晟 (386)
三峡船闸高边坡考虑开挖卸荷效应的位移反分析	盛谦 丁秀丽 冯夏庭等 (390)
高边坡岩体开挖卸荷效应流变数值分析	徐平 周火明 (397)
三峡大坝左厂房 3# 坝段坝基渗流场与应力场耦合分析	丁秀丽 盛谦 (401)
三峡坝基建基面岩体质量验收标准	鲁先元 高鹏飞 肖国强 (406)

建筑材料研究

混凝土集料级配包围垛密理论	刘崇熙 (410)
坝工混凝土耐久寿命问题	刘崇熙 汪在芹 李珍 (417)
水工碾压混凝土的胶凝材料研究	董维佳 吴超寰 (425)
碱-骨料反应在我国的工程实践	徐华荣 陈梅良 (432)
水电工程中环氧树脂的开发应用	蒋硕忠 薛希亮 (438)
葛洲坝工程抗冲耐磨混凝土的研究	陈万桂 张远曙 (442)
碾压混凝土的层面结合研究	杨华全 周守贤 (446)
CW 系化学灌浆材料的研制	魏涛 汪在芹 薛希亮等 (450)
三峡工程二期围堰防渗墙塑性混凝土特性	王迎春 李家正 朱冠美等 (453)
黄麻土工布降解对土壤肥力的影响	汪在芹 李珍 高强等 (457)
丙烯酸盐化学灌浆材料的研究及其应用	谭日升 (461)
几种速凝水泥系灌浆材料的特性	
——葛洲坝大江电厂基础强透水区固结灌浆封堵材料的研究	陈旭荣 (467)

安全监测与滑坡治理研究

三峡工程安全监测系统总体结构优化研究	王德厚 杨栽和 (471)
三峡二期围堰工作性态分析及变形预测	冯兴常 (477)
三峡永久船闸开挖边坡岩体力学参数反分析	李端有 李迪 马水山 (482)
新滩滑坡位移反分析	董学晟 李迪 叶查贵 (486)
滑坡监控与豆芽棚滑坡治理	王德厚 付冰清 (491)
岩石边(滑)坡稳定性的判识	李迪 马水山 (495)
清江库岸滑坡体位移曲线及变形趋势研究	马水山 张保军 李端有 (502)
长江三峡新滩滑坡的滑动机理和前景预测	李兴国 (507)

工程爆破研究

工程爆破振动的破坏标准	张正宇 (513)
三峡高土石围堰水下爆炸压实技术研究	佟锦岳 石教往 (519)
面板堆石坝级配料开采爆破块度预报模型及爆破设计参数优化研究	吴新霞 彭朝晖 张正宇 (524)
万吨级船坞坞口岩坎水下控制爆破	赵根 (528)
爆破振动自记仪研制与应用	付有才 钱喜萍 (531)

仪器设备与自动化研究

三峡升船机模型及测量系统研究	陶亦寿 龚壁建 阮世永等 (536)
三峡多级船闸水力学试验检测控制系统	龚壁建 何国荣 王伟民 (540)
大型发电机中性点接地装置的研制	薛紫球 (544)
用伺服电机控制的水轮机电液调速器	吴应文 陈德军 王丽娟 (549)
巨型水轮机调速器比例集成式电液随动装置	郭建业 罗禹权 郭恩 (554)
葛洲坝水电厂 WDST-200-4.0 型双微机调速器的研制与实践	贾宝良 (557)
水轮机可编程调速器若干问题研究	潘熙和 周国斌 (561)
基于特征辨识的 PID 水轮机调速器研究	易俗 (564)
GJY 型灌浆自动记录仪及其在水利水电工程中的应用	余济禹 林耀祥 宋相国等 (567)
三峡工程安全监测数据库管理系统研究	胡金莲 陈扬友 陈万桂 (570)
多媒体计算机技术在水利工程中的应用	陈连礼 周力峰 (576)
医用体外震波水囊式碎石机的研制与应用	顾梅林 (579)
长江科学院科研成果信息管理系统	周力峰 李进军 徐洪林 (583)
后 记	(586)

三峡水库长期使用研究

唐日长

摘要:本文介绍水库长期使用的基本依据和运用规划。三峡水库属河道型水库,具有长期使用的优越条件;采用“蓄清排浑”的运用方式,正常蓄水位 175m 方案,运用 100a 后,可以保留水库有效库容 86%~92%;水库回水变动区泥沙淤积较少;重庆市 1%洪水水位约为 199.2m,上游建库后,将不超过 196m。

关键词:三峡工程;水库长期使用;正常蓄水位;有效库容;洪水水位

水库是水利水电工程综合利用水资源的重要组成部分。在蓄水运用情况下,随着泥沙在库区淤积,水库的有效库容日益减少,终至淤废。20 世纪 40 年代以来,美、日、苏等国开始注意研究水库泥沙淤积规律和解决水库泥沙淤积的措施。研究中心是减轻水库泥沙淤积,延长水库使用期限。具体措施有以下几方面。

(1) 防止土壤流失,减少泥沙入库。美国在水土流失地区进行了较长期的研究,取得减少入库泥沙的经验。

(2) 增加水库库容,延长水库使用年限。具体措施有:在水库规划时考虑堆沙库容,加高大坝以增加水库库容,在水库上游兴建新水库拦沙等。

(3) 汛期降低水位运用,排沙减淤。老阿斯旺水库和前苏联一些小水电站汛期降低水位运用,取得较好效果;但因影响工程近期效益问题未能很好解决,未被广泛采用。

(4) 定期空库冲沙,恢复库容。这种方法仅适用于季节性运用水库。

(5) 机械清淤。主要用于小型水库处理泥沙淤积问题。

水库长期使用是在以往研究的基础上,根据我国水利水电工程建设的经验,总结研究得出的成果。它的特点是通过合理规划,改进水库运用方式,使水库既能保留大部分有效库容长期使用,又不影响工程近期效益,做到远近结合,充分发挥工程的综合效益。本文介绍水库长期使用的主要研究成果,三峡枢纽水库长期使用的优越条件、运用方式、可以长期使用的有效库容,以及水库库尾泥沙淤积和洪水位抬高情况。

1 主要研究成果

1.1 研究过程和内容

20 世纪 60 年代初期,黄河三门峡水库蓄水运

用后,库区严重淤积,党中央毛泽东主席、国务院周恩来总理非常重视,并关心三峡枢纽水库的寿命问题。1964 年,原长江流域规划办公室林一山主任提出探索水库长期使用课题,并于当年 8 月带领科技人员赴华北、东北、西北各地调查永定河官厅水库、浑河大伙房水库、柳河闹得海水库、老哈河红山水库、黄河青铜峡水库和三门峡水库、清水河长山头水库和张家湾水库,同时搜集国内外水库淤积和运用资料。在调查的 8 座水库中,张家湾水库已淤废;官厅水库、三门峡水库等淤积十分严重;淤积分布有 3 种形态,即三角洲、锥体形和带状形。经过分析研究,由长江科学院(以下简称长科院)提出“水库淤积调查报告”^[1]。报告认为:水库的运用方式对水库淤积过程的数量、分布和最终淤积情况,均有重大影响;但不同运用方式,库区淤积平衡阶段的河床坡降和断面等特性则是一致的。因此,通过改进水库运用方式,降低水库的“侵蚀基准面”高程,以长期保留水库大部分有效库容,实现长期使用是可能的。此外,根据天然河流水沙过程年内分布特点,年输沙量绝大部分集中分布在汛期,有利于通过水库运用,调水排沙。山区河流建库前,水流挟沙力是不饱和的;建库后,库区淤积形成的平衡河床坡降远小于建库前的河床坡降。天然河流的上述特点又为水库长期使用提供了条件。水库长期使用的运用方式是结合工程综合利用要求,汛期降低库水位,调水排沙;汛后少沙季节蓄水运用。这种运用方式简称“蓄清排浑”,能长期保留水库的大部分有效库容。

1966 年林一山主任提出“水库长期使用问题”研究报告^[2]。报告认为:水库可以长期保持部分有效库容的理论根据是山区河流水流挟沙力不饱和,建库后由泥沙淤积形成的平衡坡降较建库前的河床坡降为小。主张在峡谷河段的下游修建高坝,有利于保持更大的“不淤”库容。保持“不淤”库容是开发河流的最大利益所在。水库长期使用的调度是汛期

排沙、汛后蓄水;应通过河流规划,拟订统一的水库调度计划,以最大限度地发挥“不淤”库容的综合效益。长江水量丰沛,利用汛期弃水多的季节排沙,能更好地发挥工程近期综合效益。

在此期间,长科院对长江三峡水库、汉江丹江口水库、岷江偏窗子水库、白龙江宝珠寺水库和黄河八里胡同水库、竹峪水库等按水库长期使用的运用方式,估算长期使用库容。同时,查勘黄河三门峡水库、盐锅峡水库、渭河宝鸡峡水库等,并参加黑松林水库、水槽子水库排沙试验,补充搜集了大量资料^[3]。

黄河三门峡水库于1960年9月蓄水运用,库区严重淤积;1962年改为“滞洪排沙”运用,仍未解决库区严重淤积问题。经1964年底及1969年6月两次改建,扩大泄洪流量。1970年7月以后,汛期降低坝前水位运用,水库淤积得到控制。1974年以后,水库配合防洪、防凌、灌溉、发电等综合利用,进行水沙调节,保持了335m以下的58亿 m^3 库容,潼关河床基本上保持了稳定,控制了淤积上延。

20世纪70年代,长科院在以往研究的基础上,对水库长期使用的平衡形态及冲淤变形计算进行了研究,提出了报告^[4]。报告对水库淤积过程和相对平衡的阶段,以及悬移质泥沙淤积平衡纵剖面、横剖面、保留库容、推移质泥沙淤积纵剖面、水库淤积平衡后年内冲淤变化等问题进行了研究,提出了计算方法。

通过以上水库长期使用问题研究和工程实践,1980年3月,在第1次河流泥沙国际学术讨论会上,宣读了由清华大学水利系、长科院、黄河水利科学研究所协作,提出“论长期使用库容”论文^[5]。论文认为:水库长期使用的运用方式可以兼顾枢纽的当前效益和长远利益。对长期使用的运用方式而言,河道型水库远比湖泊型水库优越;长期使用库容与原始库容的比例,河道型水库较湖泊型水库大。长期使用运用方式的汛期排沙水位是制定调水调沙方案的关键,它决定当前效益的发挥程度、长期使用库容的大小以及泄流规模等,应当慎重对待。

1.2 合理规划运用方式

通过以上多年来有关水库长期使用问题研究和工程实践,对远近结合,合理规划水库长期使用的运用方式,已基本清楚,为三峡枢纽水库长期使用研究,做了大量基本工作。

国内外大量水库淤积实测资料表明;不论多沙河流或少沙河流,在河流汛期来沙多的季节,降低水位排沙,可以长期保留水库大部分库容。因此水库

长期使用的运用方式是汛期降低水位运用,汛后蓄水运用。汛期降低水位运用,除满足排沙要求外,应同时满足工程规划的发电水头和防洪库容,因而汛期降低水位是有限制的。当入库流量较大,根据下游防洪需要,库水位上升,调蓄洪水;洪峰过后,库水位仍降低运行。汛后蓄水运用是根据工程规划的发电、航运和灌溉等综合利用要求,确定正常蓄水位。枯水期水库水位逐步消落,调节下泄流量,以满足电站保证出力和下游航运、灌溉的要求。根据以上规划,水库长期使用的运用方式,包括汛期限制水位、正常蓄水位和枯季消落水位。每级水位均需合理规划确定,以达到既能长期保留水库大部分有效库容,又能远近结合,充分发挥工程的综合效益。

1.3 长期使用水库的平衡状态

水库长期保留库容与原库容之比与库区河流特性密切相关。天然河流的河床坡降从上游到下游逐渐减小。上游山区河流的河岸均系山地或丘陵,河床为基岩、砾石、卵石组成;河床坡降大,水流挟沙力不饱和。中下游冲积河流的河岸多系冲积土层,河床一般为中细沙组成;河床坡降较小,水流挟沙力处于饱和状态。

水利水电工程一般兴建在山区河流;库区悬移质泥沙淤积基本平衡后形成的河床坡降一般接近水库下游冲积河流的河床坡降。设建库前河床坡降为 J_0 ,库区悬移质泥沙淤积基本平衡后形成的河床坡降为 J_K , J_K/J_0 值反映建库前库区水流挟沙力不饱和程度。 J_K/J_0 值越小,建库前库区水流挟沙力不饱和程度越大。

水库平面形态一般分为湖泊型和河道型。建库后,库区悬移质泥沙淤积基本平衡后形成的稳定河槽与冲积平原河流形成稳定河槽的规律基本上是一致的。对于过宽的库面将逐渐淤成广阔的滩地并形成单一稳定河槽。水库长期使用的有效库容在汛期限制水位以上,由于汛后蓄水,来沙量少,滩库容淤积缓慢。考虑滩库容最终将淤废,所以长期使用库容不包括滩库容。水库长期使用淤积基本平衡后,库区纵横剖面见示意图1。

从图1看出:水库长期保留库容与原库容之比,河道型水库较湖泊型水库大, J_K/J_0 值较小的水库比 J_K/J_0 值较大的水库大。

水库悬移质泥沙淤积基本平衡后的河床坡降 J_K 和稳定断面的水深(h_K)、河宽(b_K)原则上可以应用冲积河道的公式计算;对于公式中的系数和指数则应根据具体情况和实际资料研究确定。长科院提出的平衡坡降 J_K 计算公式^[4]为:

$$J_K = 47.3 \frac{n^2 \cdot \zeta^{0.4} \cdot \bar{S}^{0.678} \bar{\omega}^{0.73}}{Q^{0.2}} \quad (1)$$

式中, J_K 为平衡坡降, n 为曼宁糙率, ζ 为河相系数, $\bar{Q}$ 为造床期平均流量 (m^3/s), $\bar{S}$ 为同期平均含沙量 (kg/m^3), $\bar{\omega}$ 为平均沉速 (m/s)。

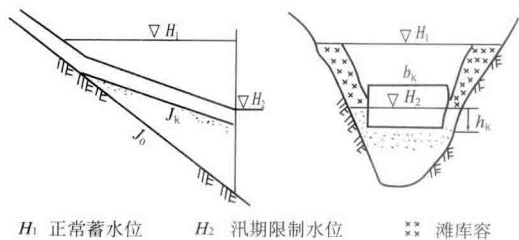


图1 水库长期使用库区纵横剖面示意图

当平衡坡降已知, 可以计算稳定断面河宽和水深:

$$h_K = \left[\frac{n \cdot \bar{Q}}{\zeta^2 \cdot J_K^{1/2}} \right]^{3/11} \quad (2)$$

$$b_K = \zeta^2 \cdot h_K^2 \quad (3)$$

稳定河槽的边坡系数 m 值可参考水库下游河道实测资料研究确定; 估算时, 汛期限制水位以下取 3~5, 以上取 5~7。

2 三峡水库长期使用研究

2.1 长期使用的优越条件

(1) 长江水量大、含沙量小。三峡水库库区建库前河床主要为基岩、卵石组成, 水流挟沙力不饱和和程度大; 水库下游长江中游河段水流挟沙力处于冲淤平衡状态。建库后库区悬移质淤积平衡坡降 J_K 与建库前库区河床坡降 J_0 的比值较小, 约为 0.23。黄河三门峡水库的 J_K/J_0 值为 0.66。

(2) 三峡水库属河道型水库。坝址上游约 650km 的库区为峡谷与宽谷相间。大部分库段的河宽不超过 1 000m, 小于水库下游上荆江河段平滩河宽 1 320m。水库的有效库容主要为槽库容, 滩库容很小。

(3) 三峡工程担负重要的防洪任务, 汛期需降低库水位, 腾空库容准备调洪; 同时汛期弃水多, 有利排沙。因此, “蓄清排浑”的运用方式与枢纽综合利用要求一致。

以上条件说明, 三峡水库长期保留库容与原库容的比值可以较大。根据水库不平衡输沙数学模型计算成果, 三峡工程 175m 正常蓄水位方案运用 100a 后, 防洪库容能保留 86%, 调节库容能保留

92%^[6]。

2.2 175m 方案运用方式

经过充分论证, 三峡枢纽正常蓄水位选用 175m, 汛期限制水位选用 145m, 枯季消落水位选用 155m。每年 5 月末至 6 月初水库水位降至汛期限制水位 145m。整个汛期 6~9 月, 来沙量占年来沙量的 88%~90%, 来水量占年径流量的 61%。除入库流量大于下游河道安全泄量时拦蓄超额洪峰, 水库水位抬高外, 一般维持 145m 运行。超过电站过流能力的水量, 由溢流坝段底孔下泄。汛末 10 月水库蓄水, 逐步升高至 175m 运行。12 月至翌年 4 月底, 库水位按电网调峰要求运行, 并逐步降落, 以保证电站出力。枯季消落最低高程不低于 155m, 以保证水库回水变动区航道水深。三峡水库 175m 方案运行示意图 2。

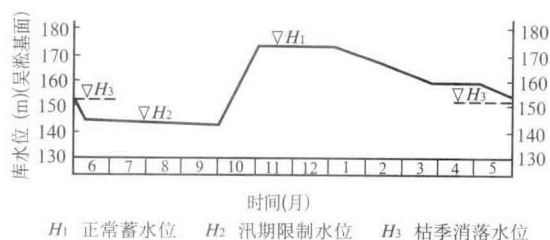


图2 水库 175m 方案运行示意图

三峡水库采用“蓄清排浑”运用方式, 既能长期保留大部分有效库容, 又不影响工程的综合效益。175m 正常蓄水位方案防洪库容 221.5 亿 m^3 , 调节库容 165 亿 m^3 , 最小水头 71m, 平均水头 90.1m, 装机容量 1 768 万 kW, 保证出力 499 万 kW, 改善航道 570~650km, 万吨船队可通航重庆^[6]。

2.3 库尾泥沙淤积与洪水位抬高情况

水库库尾泥沙淤积关系到库尾段两岸城镇、农田淹没、浸没、排水和河道航运等重要问题, 曾形象地称为“翘尾巴”淤积。水库库尾泥沙淤积末端是指库区悬移质泥沙淤积平衡后形成的河床坡降 J_K 与建库前河床坡降 J_0 的交点。水库库尾泥沙淤积末端是否超过水库正常蓄水位与建库前河床的平交点, 一般作为“翘尾巴”淤积的判断标准。当淤积末端高程低于正常蓄水位时, 属于不“翘尾巴”淤积; 当淤积末端高程高于正常蓄水位时, 属于“翘尾巴”淤积^[7]。

三峡枢纽采用“蓄清排浑”运用方式, 汛期库水位降低运用, 回水末端下移。回水变动区库段除拦蓄超额洪峰时段外, 汛期不受回水影响, 基本上保持了建库前汛期冲刷特点, 泥沙淤积量很少。根据数

学模型计算,175m 正常蓄水位方案运用 100a 后,长寿以上回水变动区库段淤积量仅占干流库段总淤积量的 3.5%;淤积末端高程为 164m,距坝约 610km;正常蓄水位 175m 与原河床平交点距坝约 650km,属于不“翘尾巴”淤积。枢纽运用 100a 后,如遇 100a 一遇洪水,库尾重庆市洪水位高程约 199.2m,抬高约 4.9m;考虑上游建库拦沙,泥沙淤积量将进一步减少,重庆市洪水位将不超过 196m。

3 结 语

三峡水库长期使用问题经过 20 余年的研究,对水库长期使用的基本依据、运用规划、影响长期保留库容的因素以及长期使用水库的平衡形态和估算方法等,均取得比较系统的研究成果。

长江水量丰沛,含沙量小。三峡水库系河道型水库,建库前库区水流挟沙力不饱和程度大,具有长期使用的优越条件。水库 175m 正常蓄水位方案运用 100a 后,防洪库容能保留 86%,调节库容能保留 92%;回水变动区泥沙淤积量很少,淤积末端属于不

“翘尾巴”淤积。如遇 100a 一遇洪水,重庆市洪水位约 199.2m,考虑上游建库拦沙,将不超过 196m。

参考文献:

- [1] 唐日长. 水库淤积调查报告. 人民长江, 1964(3).
- [2] 林一山. 水库长期使用问题(1966). 人民长江, 1978(2).
- [3] 张植堂. 水库长期使用问题研究. 长江科学院河流泥沙研究的发展, 1988.
- [4] 韩其为. 长期使用水库的平衡形态及淤积变形研究. 人民长江, 1978(2).
- [5] 夏震寰, 韩其为, 焦恩泽. 论长期使用库容. 河流泥沙国际学术讨论会论文集, 1980.
- [6] 水利部长江流域规划办公室. 长江三峡水利枢纽可行性研究报告, 1989.
- [7] 张植堂. 关于水库淤积末端相对高度问题的分析. 长江科学院院报, 1988(3).

作者简介:唐日长,男,长江科学院,教授级高级工程师。本文原载于《长江科学院院报》1992 年增刊。

水库不平衡输沙的初步研究

韩其为 张威 黄煜龄 沈锡琪 何秀玲
陈中坻 庞午昌 罗敏逊 吴天一

摘要:本文初步研究了稳定非均匀水流稳定不平衡输沙的基本规律:包括含沙量沿程变化,淤积时悬移质级配分选,冲刷时河床质级配分选,以及河床质与悬移质的关系等,导出了相应的公式,并用实际资料进行了验证。本文研究对象虽然侧重于水库,但公式和结论尚带有一般性。

关键词:不平衡输沙;悬移质级配分选;非均匀沙

水库中的悬沙淤积是非常复杂的,到目前为止,研究的程度还很不够。我们认为水库淤积是水库泥沙运动,即不平衡输沙的结果。要想从复杂的水库淤积现象中抓住主要矛盾,要想从本质上研究水库淤积,必须研究水库不平衡输沙的一般规律。

从一些文献可以看出,以往研究悬移质不平衡输沙,主要是研究含沙量沿程变化。这方面的研究一般采用两种途径,一种途径是在一定边界条件下解二维扩散方程,求出含沙量沿程和沿垂线的分布^[1~6]。另一种途径是按照一维问题,在一定假定下研究平均含沙量沿程变化的规律^[7~9]。由第一种途径得到的解较为全面,但假定条件较强,底部边界条件实际上难以确定。第二种途径抓住了平均含沙量沿程变化的主要矛盾,得到的结果较为简单,但不同作者对基本方程的建立是从不同角度出发,没有与泥沙运动的扩散方程联系起来,而且所得结果也只限于均匀水流的条件。这两种研究途径的已有结果的共同问题,是缺乏足够实际资料的验证,特别是采用第一种途径的某些外国研究者,往往只是以得到数字结果而告终,没有与实际联系起来。

在悬移质不平衡输沙时,不仅含沙量沿程变化,同时悬移质级配也发生变化,相应地河床质级配也发生变化。而且后两者的变化,又在一定程度上影响到含沙量的变化。因此不平衡输沙的全面研究,除含沙量外,应包括悬移质级配、河床质级配等方面的内容。但是以往多数作者仅研究均匀沙的不平衡输沙,避开了这两个问题。个别作者也曾企图将均匀沙的结果按分组不平衡输沙的概念引伸到非均匀沙,但是由于没有单独研究悬移质级配的变化,不得不假定断面挟沙能力沿程不变^[10],或者假定底部挟沙能力沿程不变^[5],而这正是与级配变化相抵触的。因此他们实际是在研究分组含沙量变化时,不考虑级配的变化,然后再据此求出后者。据我们了解

Н.Ф.茨维季柯娃^[1]曾同时考虑挟沙能力与悬移质级配的变化,但是描述后者的公式未加丝毫论证。

我们从水库淤积计算出发,认为与其孤立地研究均匀水流的二维不平衡输沙的个别问题(如均匀沙的含沙量变化),还不如全面研究不均匀水流一维不平衡输沙的三个问题。下面分四个部分来阐述我们初步研究的结果。

1 平均含沙量沿程变化

1.1 均匀沙平均含沙量沿程变化

前面已论述及,按照第二种途径研究平均含沙量沿程变化,前人做了不少工作,对于均匀流得到了比较简单的、基本一致的微分方程。问题是推导的方法不一致,没有将这个方程与泥沙运动的扩散方程联系起来。以致使习惯使用扩散方程的人感到怀疑。下面我们对非均匀水流,从扩散方程出发,导出平均含沙量沿程变化的微分方程,以说明第一种途径与第二种途径的理论基础是相同的。

现在我们考虑二维稳定非均匀水流稳定不平衡输沙(均匀沙)时含沙量变化的基本方程。在所考虑的条件下,如将坐标按图 1 放置,则扩散方程为:

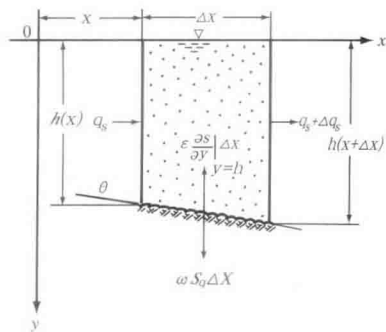


图 1

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(u_x S)}{\partial x} + \frac{\partial(u_y S)}{\partial y} \\ &= \frac{\partial}{\partial y}(\epsilon_y \frac{\partial S}{\partial y}) - \frac{\partial(\omega S)}{\partial y}, \end{aligned} \quad (1)$$

这里 u 为水流的时均速度, S 为含沙量, ω 为泥沙沉速, ϵ_y 为泥沙在紊动作用下沿 y 方向的扩散系数。将上式乘以 dy , 由 $y=0$ 至 $y=h(x)$ 间积分。

$$\begin{aligned} & \int_0^{h(x)} \frac{\partial(u_x S)}{\partial x} dy + \int_0^{h(x)} \frac{\partial(u_y S)}{\partial y} dy \\ &= \int_0^{h(x)} \frac{\partial}{\partial y}(\epsilon_y \frac{\partial S}{\partial y} - \omega S) dy, \end{aligned}$$

考虑到水流方向是平行于界面, 即 $u_y|_{y=0}=0$ 和 $u_y|_{y=h}=u_x \tan \theta = u_x \frac{dh}{dx}$, 以及等式

$$\begin{aligned} & \int_0^{h(x)} \frac{\partial(u_y S)}{\partial y} dy = u_y S|_0^{h(x)} = u_x S|_{y=h(x)} \cdot \tan \theta \\ &= u_x S|_{y=h(x)} \cdot h'(x), \\ & \int_0^{h(x)} \frac{\partial(u_x S)}{\partial x} dy + \int_0^{h(x)} \frac{\partial(u_y S)}{\partial y} dy \\ &= \int_0^{h(x)} \frac{\partial(u_x S)}{\partial x} dy + u_x S|_{y=h(x)} \cdot h'(x) \\ &= \frac{d}{dx} \int_0^{h(x)} u_x S dy = \frac{dq_s}{dx}, \\ & (\epsilon_y \frac{\partial S}{\partial y} - \omega S)_{y=0} = 0, \end{aligned}$$

则得

$$\frac{dq_s}{dx} = q \frac{dS_{cp}}{dx} = \epsilon_y \frac{\partial S}{\partial y}|_{y=h} - \omega S_g \quad (2)$$

这里 q_s 为单宽输沙率, q 为单宽流量, S_g 为底部含沙量, S_{cp} 为平均含沙量。为了确定 $\epsilon_y(\partial S/\partial y)$ 的数值, 可以引进底部挟沙能力 ρ_g 。当河底床沙可以上扬时, 我们假定河底含沙量梯度 $\frac{\partial S}{\partial y}|_{y=0}$ 只与当时的水力条件有关, 而不依赖于 S_g 。这样, 以冲淤平衡时的下沉量 $\omega \rho_g$ 来表示 $\epsilon_y \frac{\partial S}{\partial y}|_{y=0}$ 之后, (2) 式变为

$$\frac{dS}{dx} = -\frac{\omega}{q}(S_g - \rho_g) \quad (3)$$

引用 $\alpha = \frac{S_g}{S_{cp}}$, $\alpha_K = \frac{\rho_g}{\rho_{cp}}$ 并去掉脚标“cp”之后有

$$\frac{dS}{dx} = -\frac{\omega}{q}(\alpha S - \alpha_K \rho) \quad (4)$$

这就是二维稳定非均匀水流平均含沙量沿程变化的基本方程。当然, 它也可以根据图 1 直接由沙量平衡导出; 这说明从积分二维扩散方程与按沙量平衡得到的结果是完全一致的。

在二维情况, α 和 α_K 均有明确的物理意义。对于实际的三维情况, 问题就复杂得多, 特别是由于在

上述推导过程中的近似性, 以及某些未考虑的因素。因此, 对于实际水流的不平衡输沙, α 和 α_K 已具有综合系数的性质。而且此时再分别确定它们已无多大实际意义, 故近似地采用 $\alpha = \alpha_K$, 并称为恢复饱和系数。其数值则为待定, 从而得到

$$\frac{dS}{dx} = -\alpha \frac{\omega}{q}(S - \rho), \quad (5)$$

根据我们分析实测资料的经验, 对于一般三维情况, 不管冲淤, α 均小于 1, 以选用 0.5 甚至更小较合适。只是对于水槽清水, α 才接近 1 或略大些。

一阶线性方程(5)可以改写成

$$\frac{d(S - \rho)}{dx} = -\alpha \frac{\omega}{q}(S - \rho) - \frac{d\rho}{dx},$$

积分后得到

$$S - \rho = (S_0 - \rho_0)e^{-\frac{\alpha\omega L}{q}} - e^{-\frac{\alpha\omega x}{q}} \int_0^L e^{\frac{\alpha\omega x}{q}} \frac{d\rho}{dx} dx \quad (6)$$

这里加注脚“0”表示进口断面的值, 不加注脚表示出口断面的值, L 为积分河段长度。这个公式对于二维情况下任意的不均匀水流都是适合的。现在我们考虑最简单二维不均匀流, 它的水深在所考虑的长度内按直线变化, 即

$$h = h_0 + \frac{h_L - h_0}{L}x, \quad (7)$$

其中 h_L 为出口断面水深。这种概化的不均匀水流, 能在一定程度上反映天然水库的本质特点, 具有一定实际意义。设挟沙能力公式为(这并非一般性)

$$\rho = K \left(\frac{q^3}{gh^4\omega} \right)^m,$$

则有

$$\begin{aligned} \rho &= K \left(\frac{q^3}{gh^4\omega} \right)^m \\ &= K \left(\frac{q^3}{gh_0^4\omega} \right)^m \frac{1}{\left[1 + \frac{(h_L - h_0)}{h_0} \frac{x}{L} \right]^{4m}} \\ &\doteq \rho_0 \left[1 - 4m \frac{h_L - h_0}{h_0} \frac{x}{L} \right] \\ \rho &= \rho_0 \left[1 - 4m \frac{h_L - h_0}{h_0} \frac{x}{L} \right], \\ \frac{d\rho}{dx} &= -4m \frac{h_L - h_0}{h_0} \frac{\rho_0}{L} = -\frac{\rho_0 - \rho_L}{L} \end{aligned} \quad (8)$$

这里 ρ_L 表示出口断面的挟沙能力。去掉式(8)中 ρ_L 的注脚“L”, 将其代入式(6), 得到

$$\begin{aligned} S &= \rho + (S_0 - \rho_0)e^{-\frac{\alpha\omega L}{q}} \\ &\quad + (\rho_0 - \rho) \frac{q}{\alpha\omega L} (1 - e^{-\frac{\alpha\omega L}{q}}) \end{aligned}$$

由于 $q/\omega = l$ 表示泥沙在层流中由水面落到河底的

距离即落距,故上式又可写成

$$S = \rho + (S_0 - \rho_0)e^{-\frac{\alpha L}{l}} + (\rho_0 - \rho) \frac{l}{\alpha L}(1 - e^{-\frac{\alpha L}{l}}) \tag{9}$$

公式(9)描述了二维稳定非均匀水流稳定不平衡输沙时含沙量沿程变化的规律。它指出出口断面的含沙量决定于进口断面的含沙量 S_0 ,挟沙能力 ρ_0 ,出口断面的挟沙能力 ρ 及河段的相对长度 L/l 和恢复饱和系数 α 。从出口断面含沙量的结构看,它由三部分组成:本断面的挟沙能力 ρ ,进口断面剩

余含沙量 $(S_0 - \rho_0)$ 经过距离 L/l 衰减后剩下的部分 $(S_0 - \rho_0)e^{-\frac{\alpha L}{l}}$,以及由于水力因素变化引起该河段挟沙能力变化的修正值。为了对这三项的大小有一数量概念,在表 1 中列出根据打渔张窝头寺沉沙条渠资料计算的这三项的结果。对于均匀流,则 $\rho_0 - \rho$ 为零,故最后一项消失,即为 Мухев、Караушев、窦国仁等公式的形式。但是从表 1 中可以看出,如略去非均匀流项即挟沙能力变化项,与实测值的差别就更大了。

表 1

断面编号	ρ	$(S_0 - \rho_0) \times e^{-\frac{\alpha L}{l}}$	$(\rho_0 - \rho) \frac{l}{\alpha L}(1 - e^{-\frac{\alpha L}{l}})$	计算 S (kg/m^3)	实测 S (kg/m^3)
2	26.2	5.42	- 8.22	23.4	30.8
3	23.4	- 1.64	2.24	24.0	27.8
4	13.3	0.33	7.57	21.2	23.5
5	9.77	5.64	3.09	18.5	19.2
6	6.97	8.73	2.50	18.2	17.6
7	7.46	9.56	- 0.32	16.7	16.7
8	9.33	9.24	- 1.77	16.8	14.8
9	24.6	7.06	- 14.8	16.9	14.3

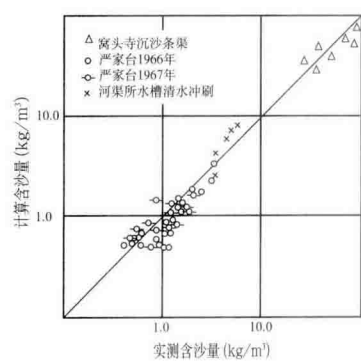


图 2

公式(9)与实际资料比较的情况见图 2。从图 2 中可以看出,由公式(9)计算的含沙量误差一般不超过 20% ~ 30%,而且各种资料并没有随着距离增长误差愈来愈大的趋向。由于单次资料难于消除某些偶然因素和有一定测验误差,因此取用某个时段的平均含沙量误差更小。这里尚应指出的是,在计算中所引用的挟沙能力公式是一致的,即本文第四部分式(51);所用的恢复饱和系数 α ,除水槽清水资料取作 1 外,其余三维情况不分冲淤,一律取作 1/2。从图 2 中还可以看出,即令对于清水冲刷的资料,式

(9)仍然能描述,这是因为我们推导它时,并没有限淤积条件。

1.2 不均匀沙含沙量沿程变化

对于实际的不均匀泥沙,式(9)原则上是不能普遍适用的。那么在哪些条件下能应用?不能应用时用什么公式代替等都是应该讨论的问题。能否直接将式(9)用于分组含沙量,也是需要证明的。

为了较方便研究不均匀泥沙的含沙量和挟沙能力的结构,需要引用一个概念,即挟带各粒径组饱和含沙量所需要的“水量(体积)百分数 K_i ”。对于一定水流,设不均匀沙的总含沙量为 S ,各粒径组的含沙量(挟沙能力)为 S_i ,显然根据各组泥沙重量百分数 P_i 的定义,有

$$S_i = P_i S (i = 1, 2, \cdots, n), \tag{10}$$

$$\rho_i = P_i \rho_0 (i = 1, 2, \cdots, n). \tag{11}$$

现在设想将各粒径组泥沙分别集中,并将单位体积水量分成 n 组,各组“水量百分数” K_i 的大小以能挟带 ρ_i 为原则。这样,再将各粒径组分组含沙量分配到相应的水量组后,各水量组均挟带均匀沙了。这种分法的可能性,是以水流挟带泥沙(当含沙量不很大时)后不致明显影响水流本身的事实为前提。如