

“八五”国家重点科技攻关项目
“黄河治理与水资源开发利用”系列专著

黄河泥沙冲淤数学模型

钱意颖 曲少军 曹文洪 张原锋 李松恒 韩巧兰 等编著



黄河水利出版社



“八五”国家重点科技攻关项目
“黄河治理与水资源开发利用”系列专著

黄河泥沙冲淤数学模型

钱意颖 曲少军 曹文洪 等编著
张原锋 李松恒 韩巧兰

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书是“八五”国家重点科技攻关项目“黄河治理与水资源开发利用”的研究成果之一。内容包括水力学、水文学和水文水动力学三类泥沙数学模型,泥沙数学模型研究专用数据库,以及各模型验算成果和同一条件下对比计算成果的综合分析。可供从事泥沙研究的科技人员、治黄工作者和有关大专院校师生参考。

“八五”国家重点科技攻关项目
“黄河治理与水资源开发利用”系列专著

黄河泥沙冲淤数学模型

钱意颖 曲少军 曹文洪 张原锋 李松恒 韩巧兰 等编著

责任编辑:杜亚娟

责任印制:常红昕

出版发行:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼12层

邮编:450003

印刷:黄河水利委员会印刷厂

开本:787mm×1092mm 1/16

版别:1998年8月第1版

印次:1998年8月郑州第1次印刷

印张:8.75

印数:1—1000

字数:202千字

ISBN 7-80621-164-0/TV·119

定价:27.00元

**“八五”国家重点科技攻关项目
“黄河治理与水资源开发利用”系列专著
编 审 委 员 会**

主 任 严克强

副主任 董哲仁 陈效国 庄景林

顾 问 徐乾清 龚时旻 吴致尧

委 员 (以姓氏笔画为序)

龙毓骞 朱兰琴 许红波 祁建华

华绍祖 庄景林 严克强 李文学

李春敏 沈国衣 陆亚洲 陈志恺

陈效国 陈霁巍 张启舜 张良弼

府仁寿 姚传江 徐明权 席家治

董保华 董哲仁 潘贤娣 戴定忠

序

黄河流域是中华民族的发祥地,黄河哺育了中国灿烂的古代文明。黄河流域自然资源十分丰富,是我国最大的能源和重化工基地,宁、蒙、汾渭河和黄淮海平原是我国主要的粮棉基地,流域经济发展前景广阔。但是,黄河流域水资源匮乏,人均水资源占有量仅为全国人均的四分之一,单位耕地面积水资源量不足全国的五分之一。近几年来,黄河下游在枯水季节常常出现断流,且断流时间逐年加长,断流河段逐年延伸,给下游沿黄地区的工农业生产和生态环境造成了不良影响。据有关部门的调查统计,1991年~1996年年均造成工农业产值损失30多亿元,其中1995年达70多亿元。

黄河流域降雨时空分布极不均匀,全年降雨量的60%~70%集中在6月~9月份,极易产生洪水。黄河又是世界上泥沙含量最高的大河,河道泥沙淤积形成了下游“地上悬河”,洪水灾害十分频繁。据统计,从先秦时期到民国年间的2500多年中,黄河下游决口1600多次,改道26次,基本上是三年两决口,百年一改道,每次决口和改道都给中华民族带来了极其深重的灾难。

新中国成立以来,人民治黄事业取得了举世瞩目的成就,确保了黄河的岁岁安澜,但是由于黄河流域自然地理环境脆弱,黄河的洪水仍是国家的心腹之患,治理开发任务仍十分艰巨。全国人大七届四次会议通过的《国民经济和社会发展“八五”计划和十年规划纲要》,把黄河治理开发和防洪列为重点,体现了中共中央和国务院对治黄的重视。

当前我国改革开放和社会主义现代化建设已进入一个新的发展阶段。黄河的治理开发,事关我国经济发展的大局。为使我国经济发展实现三步走的目标,治黄作为水利工作的重要组成部分,就必须贯彻落实好“科教兴国”、“科教兴水”和可持续发展战略。黄河的出路在于科技进步。

“黄河治理与水资源开发利用”被列为“八五”国家重点科技攻关项目,既表明了国家对治黄工作的高度重视,也显示出黄河问题的高难度和复杂性。这次科技攻关中广大科研人员深入黄河两岸调查研究,收集了大量的实测资料,在认真汲取以往成果和经验的基础上开展科研试验工作,取得了新的进展和突破,科研成果为黄河的治理与开发提供了大量的科学依据和决策支持。应该说这些成果是集此次科技攻关之大成,是治黄几十年经验总结的集中体现,是广大治黄科技工作者智慧的结晶。

这次出版的项目和专题的系列专著,其目的就是把这些成果推荐给读者,并期望得以推广应用,以提高治黄工作的整体水平,加速流域治理和经济发展的步伐,取得更大的经济、社会和环境效益。

毋庸置疑,黄河问题是很复杂的。黄河自身因水沙的变化而处于不断的变化之中,在其发展过程中还会不断出现新情况和新问题,现已取得的成果只是人们现阶段的认识,要彻底解决黄河问题,还有一段很长的路要走,可以说是任重而道远。我们应当继续加强现场观测、试验和研究工作,探索黄河的规律,不断提高科技水平,充分推广应用新的科技成果,使黄河的治理开发工作不断取得新成就。

严 克 强

1997年7月17日

总 前 言

新中国成立以来,对黄河治理开发进行了大量的科学研究工作。50年代,曾组织各方面力量对全流域进行了大规模综合考察和科学试验研究,在此基础上编制了“黄河综合利用规划技术经济报告”,为黄河的全面治理开发做出了贡献。60年代,围绕三门峡水利枢纽工程改建和改变运用方式,开展了水库淤积、河道演变规律、河道整治工程和防洪等方面的试验研究。70年代,开展了三门峡水库运用泥沙问题基本经验总结、高含沙水流特性研究和水坠坝技术试验推广。80年代,开展了黄土高原地区综合治理、黄河流域环境变迁和水沙变化、水资源利用、引黄灌区泥沙处理和黄河防洪工程技术等方面的试验研究工作。几十年来的治黄研究工作,取得了一大批具有国际先进水平的成果,形成了一支多学科、高水平的科研队伍,并广泛开展了国际交流合作。

“七五”后期,水利部和中国科学院提出的关于加强黄河综合治理与开发研究工作的建议,得到国务院主要领导的高度重视,在各方面专家充分论证的基础上,国家科委把“黄河治理与水资源开发利用”列为“八五”国家重点科技攻关项目,由水利部、中国科学院和地质矿产部作为项目主持部门,组织有关科技人员进行跨部门、多学科联合攻关。经过充分论证,项目分解为7个课题、22个专题和92个子专题分别开展工作。经过近4年的卓越工作,取得了辉煌的成绩,经专家鉴定委员会对成果的全面鉴定,22个专题中有2个专题成果总体达到国际领先水平,8个专题成果总体达到国际先进水平、部分达到国际领先水平,9个专题成果总体达到国际先进水平,3个专题成果总体达到国内领先水平、部分达到国际先进水平,项目通过了国家科委组织的验收。攻关成果应用所创造的经济、社会和环境效益是长期的和巨大的,其影响也将是深远的。

为了使已取得的成果在黄河治理和开发中发挥更大的作用,并在实践中不断深化,给后人留下一份宝贵的科学财富,水利部有关部门决定编辑出版这套系列专著,其中包括20册专题专著和1册项目综合专著。专题专著由原专题负责人组织编写,对原专题报告进行提炼和深化,其主要编写人员与专题研究人员不尽相同。综合专著由“黄河治理与水资源开发利用”系列专著编审委员会组织专人编写。本丛书因篇幅较大,编审委员会难以逐篇审定,故责成专著主要编写人分别请部分顾问和委员审稿。

由于编辑出版整个过程时间仓促,加之水平有限,难免有不足和错误之处,敬请批评指正。

“黄河治理与水资源开发利用”

系列专著编审委员会

1997年9月

前 言

“黄河泥沙冲淤数学模型”主要是“黄河泥沙冲淤数学模型的应用”专题(编号为 85-926-02-04)的部分研究成果,该专题是“八五”国家重点科技攻关项目“黄河治理与水资源开发利用”(编号 85-926)中的一个重点攻关内容。专题承担单位为黄河水利委员会黄河水利科学研究院,负责人是钱意颖和张启卫。

研究目的是“结合黄河含沙量高、来水来沙变幅大、河床冲淤迅速的特点,扩展、补充和完善已建立的、比较适合于黄河的泥沙冲淤数学模型,提高模型的实用性,并进行黄河中下游河道、水库泥沙冲淤演变过程预测以及各种减淤措施对下游河道减淤效果的方案计算”。主攻目标为:

(1) 提出适用于黄河下游、水库冲淤演变的水动力学泥沙冲淤数学模型,水库、河道与河口配套的计算方法。

(2) 数学模型中采用的方法既要有理论根据,又要有实际资料验证,不同系列验证计算的冲淤量过程及其分布基本符合实测资料,三门峡水库潼关高程也基本符合实际情况。

(3) 模型要能够计算粗细泥沙调整、滩槽水流和泥沙交换,并且考虑河宽变化的影响,尽量少用经验参数,并适用于未来不同水沙系列及调水调沙的预报计算。

(4) 提出关于黄河中下游河道冲淤演变趋势和各种减淤措施对黄河下游河道减淤效果的主要方案(4 个~6 个)的计算成果。预报计算成果要基本合理,符合一般概念和特性,主要方案需用两个模型平行计算、互相检验。

(5) 计算软件(包括源程序)和计算结果以软盘形式提供。对于模型的物理图式、功能、程序结构及变量符号意义、输入数据格式的要求、输出数据格式和意义等,要有详细的使用说明书。

本专题根据研究目的和主攻目标,结合实际情况,设置了 8 个子专题,组织国内有关单位和科研人员协作攻关。各个专题名称、承担单位和参加人员如下:

85-926-02-04-01 黄河中游水库和下游河道水动力学泥沙冲淤数学模型及方案计算之一,清华大学水利水电工程系,王士强、谢树楠、程志明、陈骥。

85-926-02-04-02 黄河中游水库和下游河道水动力学泥沙冲淤数学模型及方案计算之二,黄河水利委员会水利科学研究院,曲少军、张启卫、高际平、吴保生、韩巧兰。

85-926-02-04-03 黄河中游水库和下游河道水动力学泥沙冲淤数学模型及方案计算之三,武汉水利电力大学河流工程系,韦直林、赵良奎、付小平。

85-926-02-04-04 禹门口至黄河口水文水动力学泥沙冲淤数学模型及方案计算,中国水利水电科学研究院泥沙研究所,曹文洪、张启舜、姜乃森、马喜祥、付玲燕。

85-926-02-04-05 禹门口至黄河口水文学泥沙冲淤数学模型及方案计算,黄河水利委员会水利科学研究院,李松恒、张原锋、刘月兰。

85-926-02-04-06 黄河水库泥沙冲淤数学模型及方案计算,中国水利水电科学研

究院泥沙研究所,孙卫东。

85-926-02-04-07 黄河河口段一维水流泥沙数学模型研究,河海大学水资源水文系,陈国祥、陈界仁、刘开平。

85-926-02-04-08 黄河泥沙数学模型专用数据库,黄河水利委员会水利科学研究院,张原锋、韩巧兰、付崇进。

共计五个单位,27人。

攻关的技术路线:鉴于黄河泥沙问题的复杂性,用一维数学模型确切地模拟黄河泥沙运行和河床冲淤演变是很困难的。已有的各类数学模型的理论基础不同,并各具特色。在子专题设计和选择承担单位时,注意到包括水文学、水文水动力学和水动力学三类模型结合进行攻关,特别是水动力学模型国内外已普遍应用,研究单位又多,而黄河的研究基础较差,故组织了五个单位进行协作研究,以便在协作攻关中发挥各自的优势和特长,不同模型的计算成果可以相互比较,保证攻关任务的圆满完成和预报成果的可靠性。

为便于各模型进行调试及验证,进行了黄河泥沙数学模型专用数据库的建设。三门峡水库运用三十余年来,不同运用方式对水沙调节作用的不同,由此引起库区和下游河道的冲淤变化不同。数据库按照三门峡水库的具体运用情况,将全部资料分为蓄水拦沙期、滞洪排沙期和蓄清排浑运用期,分别进行系统整理,实行微机科学管理。要求各数学模型使用数据库资料进行调试和全面的验算。

经过这次协作攻关,“黄河泥沙冲淤数学模型的应用”专题提出了适用于黄河的泥沙数学模型共有三类七套。其中,水文学和水文水动力学模型各一套,计算范围从禹门口到黄河口。在五套水动力学模型中,有三套可以进行水库和河道联合计算(计算范围从潼关到利津),一套可以进行水库计算,一套可以进行河口段计算(计算范围从利津到黄河口)。这些模型充分吸收了泥沙基本理论研究的最新成果,详细分析研究了黄河水库、河道的冲淤特点,在计算模式、模型结构、功能及输入和输出处理等方面,以及数学模型中的一些关键技术问题上做了大量深入细致的研究工作,并对三门峡水库建成后不同运用方式下库区和下游河道的泥沙冲淤过程进行了系统的验算,验算结果基本符合实际情况。同时,各模型还进行了一些方案计算,为分析研究黄河水沙变化对黄河中下游河道冲淤的影响和研究三门峡、小浪底等水库调节水沙对下游河道的减淤作用提供了科学依据;还可以检验各模型计算成果的合理性和可比性。计算结果表明:各模型的计算成果是合理的,可以互相进行检验和印证,这在黄河泥沙数学模型研究的历史上是一个新的进展。

本书主要反映“黄河泥沙冲淤数学模型的应用”专题中数学模型的研究成果,计算方案只是用来分析检验各模型的适用性、合理性和可比性。但是,本专题的水动力学模型适用范围只是从潼关到黄河口,而在本攻关项目中另一专题——“拦减粗泥沙对黄河河道冲淤变化影响(85-926-03-03)”中有龙门至潼关河段和水库的水动力学模型,即张仁、梁国亭主持的黄河中游一维泥沙冲淤数学模型,曹如轩主持的黄河龙—潼河段泥沙数学模型和王兴奎主持的黄河中游水库泥沙数学模型。为了全面反映适用于黄河泥沙冲淤数学模型的研究开发情况,征得该专题负责人张仁、程秀文和各模型负责人同意,本书也纳入了这几个模型,便于今后应用和研究时参考。

本书主要根据各子专题向专题提交的研究报告编写而成。参加编写的人员为:第一

章,钱意颖;第二章,曲少军,梁国亭;第三、五章,张原锋,李松恒;第四章,曹文洪;第六章,韩巧兰。最后由钱意颖、韩巧兰统稿。本书由水利部黄河水利委员会原总工程师龙毓骞审定。在编写过程中,得到了龙毓骞、张仁、程秀文等同志和各子专题负责人的大力支持和帮助,特此表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免有欠妥和错误之处,敬请读者批评指正。

编 者

1997 年 11 月

本研究专题承担单位及人员

专 题 名 称	黄河泥沙冲淤数学模型的应用				
承 担 单 位	黄河水利委员会水利科学研究院				
专 题 负 责 人	钱意颖 张启卫				
主要完成人员	(以姓氏笔画为序)				
	王士强	韦直林	孙卫东	曲少军	李松恒
	张启卫	陈界仁	张原锋	钱意颖	曹文洪
参加研究人员					
子专题 1	谢树楠	程志明	陈 骥		
子专题 2	高际平	吴保生	韩巧兰		
子专题 3	赵良奎	付小平			
子专题 4	张启舜	姜乃森	马喜祥	傅玲燕	
子专题 5	张原锋	刘月兰			
子专题 6					
子专题 7	陈国祥	刘开平			
子专题 8	韩巧兰	付崇进			
报告执笔人	王士强	韦直林	孙卫东	曲少军	李松恒
	张启卫	陈界仁	张原锋	钱意颖	曹文洪

目 录

第一章 黄河泥沙数学模型发展概况	(1)
第一节 三门峡水库建成以前	(1)
第二节 三门峡水库改建时期	(4)
第三节 近十几年来的发展	(7)
第二章 水动力学泥沙数学模型	(11)
第一节 黄河中游水库和下游河段联合计算的泥沙数学模型	(12)
第二节 禹门口至潼关河段泥沙数学模型	(42)
第三节 黄河中游水库泥沙数学模型	(54)
第四节 黄河河口段泥沙数学模型	(66)
第三章 水文学泥沙数学模型	(75)
第一节 实测输沙率精度论证	(75)
第二节 禹门口至潼关的泥沙冲淤计算方法	(77)
第三节 潼关至三门峡水库的泥沙冲淤计算方法	(79)
第四节 黄河下游及利津以下至河口河道泥沙冲淤计算方法	(82)
第四章 水文水动力学泥沙数学模型	(88)
第一节 基本计算公式	(89)
第二节 全程统一计算的模式	(92)
第三节 模型验证计算	(95)
第五章 黄河泥沙数学模型专用数据库	(101)
第一节 水流、泥沙资料数据集	(101)
第二节 数学模型调试、验证计算资料数据集	(101)
第三节 黄河泥沙数学模型专用数据库管理系统	(103)
第六章 各模型验证计算和比较计算成果的综合分析	(110)
第一节 各模型验证计算成果的统一分析	(110)
第二节 各模型统一条件的比较计算	(112)
第三节 几点认识和建议	(123)

第一章 黄河泥沙数学模型发展概况

泥沙数学模型是研究泥沙问题的重要手段之一,它具有周期短、投资少的巨大优势。在流域规划和工程建设的规划阶段,一些国家早在 50 年代就已广泛使用一维泥沙数学模型(泥沙冲淤计算方法)对大型水库的淤积和坝下游河道的冲淤变化进行长距离、长时段的河床变形计算,预测在河流上修建水库后对库区泥沙淤积和坝下游河道冲刷的影响。对坝区局部河段,则用二维泥沙数学模型进行冲淤计算^[1]。当时由于计算条件的限制,在基本方程和计算方法上做了很大的简化。随着计算机和计算技术的迅速发展,泥沙数学模型进展很大。一维泥沙数学模型一般用于研究长河段、长时段的河床变形,在理论上和应用上都相对比较成熟;二维、三维泥沙数学模型已经建立,逐渐趋向完善,计算成果用图像演示,计算机软件朝商品化发展^[2]。

黄河泥沙数学模型的研究,是与流域规划、工程建设和管理运用等生产问题紧密结合的,主要用于研究长河段、长时段的河床演变和水沙变化情况。根据黄河治理情况及在各时期泥沙数学模型的应用情况和研究成果,大致可以分为三个阶段,即三门峡水库建成以前、三门峡水库改建时期和近十几年来的发展。现将这三个时期在生产上使用的主要计算方法及研究成果作一简要的回顾,以期了解黄河泥沙数学模型的发展概况。

第一节 三门峡水库建成以前

三门峡水库是 1955 年经全国人民代表大会批准通过的黄河综合利用规划选定的第一期工程,开发目标是以防洪为主,综合利用。1960 年 9 月建成投入运用,枢纽工程位于河南省三门峡市,控制流域面积 68.84 万 km²,占全流域面积的 91.5%,天然径流量 498.4 亿 m³,年沙量 16 亿 t,分别占全河总量的 86% 和 98%。由此可知,三门峡水库控制黄河洪水和泥沙的作用很大,由此引起的泥沙问题是在规划设计阶段中的一个重点研究课题。

一、三门峡枢纽工程规划阶段的泥沙计算方法

(一)水库泥沙淤积计算

50 年代初期,在编制黄河综合利用技术经济报告时,考虑到入库泥沙多,认为常用的用死库容除以年淤积量计算水库寿命的方法不合理,也不能满足水库调节计算的要求,于是采用水流连续方程和泥沙连续方程联解的方法^[3]。即

水流连续方程:

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

式中:Q 为流量;x 为流程;A 为过水面积;t 为时间。用有限差的型式进行水库调洪计算

时,则改写为

$$Q_i = Q_0 - F_i \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (1-2)$$

式中: Q_i 为库内某断面的流量; Q_0 为进库流量; F_i 为该断面以上的水库库面积; Δh 为在计算时段(Δt)内库水位的升降值。

泥沙连续方程为

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + \gamma_s \frac{\partial A_d}{\partial t} = 0 \quad \text{或} \quad \frac{\partial Q_s}{\partial x} + \gamma_s B \frac{\partial Z}{\partial t} = 0 \quad (1-3)$$

式中: A_d 为冲淤面积; B 为水流宽度; Z 为河底高程; γ_s 为淤积土容重; Q_s 为输沙率。以有限差型式进行库区逐段泥沙淤积计算时,则改写为

$$(Q_i S_i - Q_{i+1} \cdot S_{i+1}) \Delta t = \gamma_s \Delta V \quad (1-4)$$

式中: Q_i 、 S_i 分别为进入某河段的流量和含沙量; Q_{i+1} 、 S_{i+1} 分别为流出某河段的流量和含沙量; ΔV 为淤积体积。河段出口的含沙量,采用前苏联国定标准推荐的挟沙力公式,即 E. A. 扎马林公式计算,使用时还用引黄渠道和黄河下游河道实测资料进行验证,验算结果偏小,使用时该公式乘以修正系数 5。

计算中采用一些假定条件:在水流计算中没有用水流运动方程,假定库区水面是平的;在泥沙淤积计算中未考虑推移质;在悬移质淤积过程中,假定粗泥沙先淤,细泥沙后淤;泥沙在横断面的淤积面是平的;库水位下降时,脱离回水的河段不进行冲刷计算等。通过计算,还指出对扎马林公式的适用性、回水和淤积的影响,降水冲刷作用和横断面淤积分布等问题有待于进一步研究。

(二) 下游河道冲刷计算

计算方法仍采用泥沙连续方程和扎马林公式联解,在求解方程时用 И. И. 列维的图解法解偏微分方程^[4]。当时由于对影响冲刷的因素研究不够,为了使计算工作简化,在计算中作了若干假定,如不考虑横向变形和床沙的粗化;河宽假定 500 m 固定不变等。当时也认为这样的计算成果不能代表真实情况,仅可作为研究参考^[5]。

二、三门峡水库设计阶段的泥沙计算方法

三门峡水利枢纽的设计委托原苏联电站部水电设计院列宁格勒分院进行,并聘请 И. И. 列维为泥沙方面设计的顾问。采用计算和物理模型试验相结合的方法研究泥沙问题。水库泥沙淤积计算方法采用列维提出的计算方法[●],除水流连续方程和泥沙连续方程外,还用水流运动方程计算水面线。水流运动方程为

$$\frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{\eta}{2g} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q}{A} \right)^2 + \frac{Q^2}{K^2} + \frac{1}{g} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q}{A} \right) \quad (1-5)$$

式中: Z 为水位; g 为重力加速度; η 为修正系数; K 为流量模数。

在计算中,水流挟沙力采用 B. C. 克诺罗斯公式^[6],并根据我国官厅水库形成异常重流的实测资料分析成果,对三门峡水库的异重流排沙作用进行了估算。

● 原苏联列宁格勒工业大学工程水文学教研室,黄河水库淤积计算的初步意见,黄河流域规划委员会,1956年5月

三、三门峡枢纽施工时期的泥沙研究

三门峡枢纽工程计划在 1958 年截流,黄河水利委员会根据治黄发展形势和国家要求,编制《黄河流域水土保持规划》、《三门峡以上干支流综合利用规划》和《黄河下游综合利用规划》,简称“黄河三大规划”。同时组织国内有关科研院校分别在郑州和武功成立黄河下游研究组和建立了三门峡水库野外试验场^[7],结合黄河三大规划,共同研究三门峡水库建成后库区淤积和下游河道冲刷发展趋势及其治理对策。这两项试验研究工作,当时列入了中苏科技协作项目,苏方派 K. И. 罗辛斯基等来华协助工作。研究方法采用计算、模型试验和实测资料相结合。计算方法主要采用 K. И. 罗辛斯基的河床纵向变形计算方法^①。这个计算方法,是采用有限差法联解水流连续方程、水流运动方程和泥沙连续方程。为简化计算,采用一些假定:①根据来水流量过程线,用流量变化不大的时段的平均值作为时段来水流量;将河道形状大致相同的河段划分为一个河段,并将其中一个横断面简化为简单的几何图形(如矩形)代表该河段的断面形状;把支流汇入口或引水口放在每个河段的上段或下端,这样可以将复杂的非恒定非均匀流简化为恒定渐变流或恒定均匀流。②认为在冲刷或淤积过程中,含沙量沿纵向恢复饱和的距离很短,因此,假定每河段的出口含沙量即为其水流挟沙力。③假定计算水面线时,河床不发生冲淤,而在进行河床冲淤计算时,假定水面线不变,为了避免由此假定而引起很大的误差,将每次计算的冲淤厚度限制在 0.5 m 或 1/4 水深之内。④断面简化为滩地和主槽两部分,计算中,在冲刷河段,如水流不漫滩仅冲主槽,水流漫滩后,假定滩槽的冲刷深度相等;在壅水淤积河段,假定主槽与滩地平行淤积,滩槽高差保持不变。⑤在每个计算河段内,河床的冲刷或淤积均平行于原河床。

计算中的河道糙率是根据实测资料建立了糙率与流速的关系,在简化断面时结合水面线的调试计算确定。在水流挟流力计算中,把运动的泥沙分别为造床质和非造床质两部分,分界粒径为 0.03 mm,即粒径大于 0.03 mm 者为造床质。根据 K. И. 罗辛斯基的建议,采用实测资料分析,建立 $V/h^{0.2} \sim S$ 点群的包线经验关系,作为造床质的挟沙能力(V 为断面平均流速, h 为水深, S 为造床质含沙量);粒径小于 0.03 mm 者非造床质,在冲刷计算中,根据床沙组成中非造床质的含量,将造床质计算的冲刷量中相应增加一个系数;在淤积计算中,根据实测泥沙级配资料分别计算造床质和非造床质的平均沉速,再用 E. A. 扎马林公式分别计算其挟沙能力。最后计算出非造床质与造床质挟沙能力的比值,以此比值乘以造床质挟沙能力关系图中的下限值作为非造床质的挟沙能力。当时根据实测资料分析认为^②:①造床质挟沙能力关系的包线是点群的极限范围,在计算中可能引起冲刷量偏小,淤积量偏大。②在河床冲刷和淤积过程中,含沙量恢复饱和和长度不是很短,而是很长,为此又用 A. B. 卡拉乌舍夫的不平衡输沙方程进行计算,计算结果还是很短,这是一个有待研究的问题。③滩槽冲淤分配不符合黄河洪水期槽冲滩淤的特点,曾用该方法将滩地和主槽分别进行计算,计算结果比较符合实际情况。④河床冲淤过程中,床沙的

① 黄委会水利科学研究所·黄河下游河床纵向变形计算方法技术总结,1959 年

② 黄委会水利科学研究所·黄河下游河床纵向变形计算方法的研究,1959 年

粗化和细化对挟沙能力的影响,直接影响到河床冲刷或淤积达到相对平衡的状况。据岗李坝下极限冲刷计算结果,当流量为 $6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,若不考虑地质条件,则冲刷深度将达 24.7 m ,若考虑当地的地质条件,则冲刷深度仅有 15.7 m ,两者相差很大。

第二节 三门峡水库改建时期

1960 年 9 月三门峡水库投入运用,由于水库严重淤积,1962 年 3 月改为滞洪运用。由于水库淤积引起水库运用方式改变的主要原因是,在规划设计阶段考虑的入库泥沙量偏少和水土保持的减沙作用估计过大过快。泥沙冲淤计算方法也是一个问题。据实测资料分析,规划设计阶段采用的泥沙冲淤计算方法的计算成果,在库区淤积中没有反映出淤积延伸的情况,而下游河道实际发生的冲刷深度和速度远较计算值为小。

三门峡水库改建时期的泥沙冲淤计算方法的主要特点,正如钱宁、麦乔威在 1963 年三门峡水利枢纽问题第二次技术讨论会上指出的那样^[8],是基于当时对河床自动调整作用的内在机理是一个尚待阐明的研究课题,在这个过程的全部力学关系未能澄清之前,不得不借助于一些经验性的方法,也就是利用决定调整作用的外在条件来反映挟沙能力的内在调整过程。为此,在三门峡水库改建过程中,在水库上下游广泛开展了水文、泥沙和河床演变的观测,同时广泛搜集类似河流水库上下游的观测资料,结合模型试验,详细分析了库区和下河道自动调整的内在机理,建立相应的经验关系式,为三门峡水库不同改建方案进行比较计算提供了科学决策的依据。经实践检验,三门峡水库改建是成功的。这时期具有代表性的泥沙冲淤计算方法主要有:以黄委会水利科学研究所(即今黄河水利科学研究院)为主的黄河下游河床演变计算方法和以北京水利水电科学研究院河渠研究所(即今中国水利水电科学研究院泥沙研究所)为主的三门峡水库泥沙的计算方法,这两种方法在三门峡水库改建和运用中不断补充、完善和发展,都能进行水库和河道泥沙冲淤的联合计算,在生产上发挥重要作用,在理论上各具特色,在“八五”国家重大科技攻关时分别命名为水文学模型和水文水动力学模型。

一、水文学模型

(一) 三门峡水库拦洪运用时下游河床演变计算方法

1963 年该方法提出来时基于下列三个主要假定^[8,9]。①三门峡水库改为拦洪水库后,其运用特点是汛期拦洪滞沙,非汛期泄洪排沙,下游河道将发生冲淤交替的往复变形。另外,在天然状态下,由于来水地区不同,来沙条件各异,也常发生冲淤交替的往复变形。所以,只要修水库后下游河道的挟沙能力调整不超过历年实测资料的范围,就可以在全面分析下游河道的挟沙能力变化规律的基础上,制订修建水库后的河床变形计算。②水库增建后,下游河道在清水下泄期发生冲刷的河段很快回淤,使挟沙能力恢复到过去的水平。③在计算挟沙能力时,不考虑先前冲淤引起河床粗化和细化的影响,作为较长时期的平均情况来说,这样是允许的。

这个计算方法的主要特点是:①利用实测资料进行计算,计算方法建立在全面分析黄河下游河床冲淤变化客观规律的基础上,反映了在不平衡输沙情况下挟沙能力的自动调

整过程。②滩槽分开计算,并考虑滩槽泥沙的横向交换,滩槽高差自动计算调整,只有在滩槽高差减小到一定极限,河床发生强烈摆动以后,才不分滩槽,假定全面断面平均上升。③主槽冲淤计算主要利用上站造床质含沙量作参数的流量与造床质输沙率关系曲线(或关系式,即 $Q_s = K^a \cdot S^b$ 上,式中: Q_s 、 Q 分别为本站的造床质输沙率和流量; S_s 为上站的造床质含沙量; k 为系数; a 、 b 为指数,均由各水文站实测资料确定)。④滩地冲淤的计算:由于黄河下游平面形态为宽窄相同的藕节形,水流自窄段进入宽段,大量泥沙自主槽搬上滩地,自宽段进入下一个窄段,滩地淤积后,较清的水流又汇入主槽,水沙沿程滩槽交换是一个连续过程。计算滩地冲淤时,在两个水文站间,根据河道平面形态划分若干小河段,由窄段进入宽段的滩、槽含沙量关系与流量分配和滩、槽宽度的比值有关,由实测资料分析确定,滩槽流量分配则用曼宁公式计算;小河段的滩地出口含沙量用滩地计算的水力泥沙因素代入挟沙能力公式计算,而后用小河段进、出口的含沙量差计算冲淤量,依次类推,逐段进行计算到下一个水文站断面。在计算各小河段的主槽冲淤时,各小河段的主槽造床质输沙率即按上述方法求得,但当计算到水文站断面时,则用该站的流量与造床质输沙率关系来确定。两站相应关系计算的总冲淤量,扣去滩地小河段冲淤量的代数和,即得到主槽的冲淤量。⑤充分考虑了造床质的造床作用,非造床质的造滩作用。造床质与非造床质的临界粒径不是一个常数,而是在床沙与运动中的泥沙断交换过程中,随着来水来沙条件的不断变化而变化。据实测资料分析,就一个水文站来说,其临界粒径是随季节和流量的变化而变化的,各站即使在同一季节和相同流量情况下,临界粒径也不同。

(二) 龙门以下干流河道冲淤计算方法^[10]

这是在 1975 年~1977 年进行治黄规划过程中,为研究各种规划方案对黄河下游减淤作用而提出来的。计算方法的原理和特点与上述方法^[9]基本一致,可以说是上述方法的扩展和完善。计算河段包括龙门至潼关、潼关至三门峡和黄河下游三大段,黄河下游又分三门峡至花园口、花园口至高村、高村至艾山、艾山至利津四个河段。

本次计算方法中的输沙率均采用实测悬移质输沙率,不分造床质和非造床质。各河段的输沙率关系式,龙门至潼关河段可以说和上述方法一致,只是将上站含沙量换为来沙系数(S/Q);黄河下游各站的输沙率关系式中除了原来考虑的因素外,又增加了上站悬移质来沙中粒径小于 0.05 mm 所占比值及本河段主槽前期冲淤量对下站输沙率的影响。滩槽冲淤计算方法原理与上述方法相同,只是具体计算步骤略有不同。先根据进口断面的总输沙率,计算出口断面的主槽输沙率,而后算出断面的总输沙率。然后用直线内插法求出各小河段的进口输沙率,再分别计算各小河段的滩地输沙率和滩地的挟沙能力,从而计算滩地冲淤量;潼关至三门峡库区的计算方法基本上与三门峡水库第二次改建时计算方法一致,详见水文水动力学部分。由于黄河流域各地区来的泥沙粗细不同,以及水库采取拦粗排细的运用方式进入下游河道的泥沙组成具有显著的区别,对河道冲淤变化的影响也不同,为此建立了分组泥沙的冲淤计算方法。计算方案时用 BCY 语言编制计算程序,用 TQ16 计算机进行计算。

(三) 实测输沙率经实测断面法冲淤量修正后的黄河下游河道冲淤计算方法

黄河下游的实测输沙率计算的冲淤量和实测断面计算的冲淤量不一致,是一个长期没有解决的问题,而根据断面计算的冲淤变化与同流量水位的变化一致。据龙毓骞等研