

NUMERICAL MODELS OF FLOOD ROUTING AND MORPHOLOGICAL CHANGES
IN SEDIMENT-LADEN RIVERS AND APPLICATIONS

多沙河流洪水演进与冲淤演变

数学模型研究及应用

江恩惠 赵连军 张红武 著

 黄河水利出版社

责任编辑：张豫媛

封面设计：何颖

责任校对：张倩

丁虹岐

责任监制：常红昕

ISBN 978-7-80734-179-6



9 787807 341796 >

定 价：105.00 元

多沙河流洪水演进与冲淤演变 数学模型研究及应用

江恩惠 赵连军 张红武 著

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书论述了多沙河流洪水演进与冲淤演变数学模型的研究及应用情况,共分三篇三十章。第一篇介绍了多沙河流水沙运动基本规律的研究成果,包括泥沙级配、泥沙沉速、泥沙起动、水流流速与紊动强度沿垂线分布、含沙量与悬沙组成沿垂线及河宽分布、动床阻力、水流挟沙力、多沙河流河床变形方程的修正与泥沙连续方程的完善、悬沙与床沙交换基本方程与计算方法、冲积性河流河床综合稳定性指标等;第二篇介绍了模型的建立与验证结果,包括准二维水沙数学模型与平面二维水沙数学模型的建模原理,模型在黄河下游典型洪水与典型系列年、黄河上中游干支流河道冲淤、黄河水利委员会系统模型比试等中的检验与测试结果等;第三篇介绍了模型在治黄中的应用情况,包括黄河下游河道洪水演进预报与汛期实时作业预报、小浪底水库运用方式研究与水库调水调沙试验运用、黄河下游河道洪峰异常增值机理研究、黄河下游河道与滩区综合治理方略研究、渭河东庄水库运用方式研究等。

本书是一部涉及河流动力学、河床演变学、河流模拟技术等学科的科技专著,可供广大治黄工作者、河流泥沙研究人员及大专院校相关专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

多沙河流洪水演进与冲淤演变数学模型研究及应用 / 江恩惠, 赵连军, 张红武著. — 郑州: 黄河水利出版社, 2008.1

ISBN 978-7-80734-179-6

I.多… II.①江… ②赵… ③张… III.①黄河—河道淤积—数学模型—研究 ②黄河—河道冲刷—数学模型—研究 IV.TV882.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 171565 号

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66022940 传真:0371-66022620

E-mail: hhslebs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1 / 16

印张:32.5

字数:790 千字

印数:1-1 000

版次:2008 年 1 月第 1 版

印次:2008 年 1 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978-7-80734-179-6/TV · 494

定价:105.00 元

序 一

近年来,以计算水动力学、河流泥沙运动力学、河床演变学等学科为基础的河流泥沙数学模型,得到了长足的发展,成为预测冲积性河流水流泥沙运动及河床演变的重要工具,其与实体模型相互补充、相互印证,解决了实际工程中的诸多难题。而且,因其具有运行成本低廉、不受工作场地及工作环境制约等优势,发展前景十分广阔。

黄河是世界著名的多沙河流,其输沙量之大居世界之冠,特别是黄河下游河道的淤积抬升,形成了举世闻名的“地上悬河”,造成河势的游荡不定,给防洪安全带来了巨大压力。黄河数学模型的研究始于20世纪50年代,当时以经验模型开发为主。在20世纪80年代末,随着数值计算方法的改进与计算机速度的提升,黄河水动力学模型得到了迅速发展,许多模型在工程实践中得到应用。但由于泥沙运动基本理论的研究进展相对缓慢,模型的预测精度并不令人满意。

《多沙河流洪水演进与冲淤演变数学模型研究及应用》一书,是本书作者带领其攻坚小组十多年努力攻关的结晶。众所周知,像黄河这样的多沙河流,大量泥沙的搬运与输移,使得这些河流的水资源开发利用、水利水电工程建设、防洪安全等都成了世界性难题。多沙河流数学模型的研究无疑对河道防洪、水库调度及河流综合治理与开发具有重要的积极意义。

本书作者在水利部创新项目“黄河下游平面二维泥沙数学模型”、“黄河下游实用水位预报方法的研究与开发”和黄河水利委员会治黄重点项目“黄河下游泥沙数学模型的研究”等研究成果的支持下,在系统总结现有黄河泥沙数学模型研发与应用经验的基础上,立足黄河,针对多沙河流水沙运动的特殊性,开展了多沙河流水沙运动基本规律和数值模拟技术的深入研究,其内容涉及泥沙级配的调整变化、浑水沉速、泥沙起动、水流挟沙力(输沙模式)、动床阻力、床沙与悬移质泥沙交换规律、含沙量及其组成沿垂向与横向分布规律、河床综合稳定性指标等多项水沙运动基本理论方面的技术难题。以上述研究成果为依托,构建的适应于多沙河流的准二维水动力学泥沙数学模型,实现了模型研发与水沙运动基本理论研究的结合,特别是该模型通过引入附加系数 K_1 及泥沙非饱和系数 f_1 ,完善了河床变形方程和泥沙连续方程,使其更适用于黄河的河流特性。

尤其值得一提的是,该模型不仅在黄河干支流治理规划、小浪底水库运用方式研究、小浪底水库调水调沙等治黄实践中广泛应用,而且在河道冲淤演变与洪水演进预报中的许多预测结果也得到了黄河实测资料的印证。同时,该模型还能对黄河水沙演进过程中出现的一些异常现象进行较好的模拟和预报,因此得到了同行专家的高度评价。

本书从研究手段、论证过程到结论都有不少独到之处。书中的某些探索研究,对促进学术发展、引导后续工作也有很大的借鉴作用。此外,书中的许多基本理论研究成果对黄河水沙输移规律研究、水沙调控与河道治理方案研究及动床模型相似律研究等都有很好的参考价值。

目前，黄河水利委员会正积极开展“三条黄河”建设。水沙数学模型预测预报系统是“数字黄河”的核心构件。该书的出版，不仅对“数字黄河”建设具有重要的借鉴作用，而且对“原型黄河”与“模型黄河”建设也具有积极的指导意义。

李国英

2007年1月19日

序 二

黄河的多沙，在造就了广阔的黄淮海大平原的同时也引起下游河道的持续淤积抬升，成为著名的“地上悬河”。特别是近二十年来，受自然气候和人类活动的综合影响，进入黄河下游的水量减少的更多，沙量相对更大，“二级悬河”态势日益加剧，给防洪安全带来了巨大压力。为深入研究黄河下游河道的冲淤演变规律、科学预测河道未来发展趋势，早在 20 世纪 50 年代，有些学者就开始研制以经验模型为主体的泥沙数学模型；20 世纪 80 年代以后，水动力学泥沙数学模型得到了迅速发展，并在治黄实践中得到应用。但因黄河来沙量巨大，水沙组合与河床演变十分复杂，而挟沙水流特别是高含沙水流泥沙输移与演变机理研究还不成熟，许多模型应用于黄河以后，预测结果很难满足生产要求，直接影响了其实用价值。

《多沙河流洪水演进与冲淤演变数学模型研究及应用》一书，是本书作者对黄河水沙数学模型理论研究、模型构建、整体验证与推广应用等方面技术成果的系统总结。该模型在研制与不断完善的过程中，始终注重相关泥沙运动基本理论的探讨，立足模型的通用性和实用性，坚持开发与应用相结合。在广泛吸纳已有模型经验的基础上，大胆引用泥沙研究的最新成果，完善模型的功能，提高模型计算精度。

在泥沙运动基本理论方面，本书作者主要开展了多沙河流河床变形方程的修正与泥沙连续方程的完善、附加系数 K_1 及泥沙非饱和系数 f_1 通用表达式的建立、流速和含沙量及悬沙组成沿垂线分布规律、泥沙起动流速、水流紊动强度沿垂线分布规律、高含沙水流挟沙力、多沙河流动床阻力、多沙河流悬沙与床沙级配、非均匀沙清水与浑水沉速、悬移质泥沙与床沙交换基本方程及计算方法、含沙量与悬沙组成沿河宽分布规律、冲积性河流河床综合稳定性指标等研究。这些成果，不仅对黄河数学模型开发提供了重要参考，也极大地促进了河流泥沙动力学学科的发展。

模型构建完成后，一维模型通过了黄河下游 1982 年大水少沙年、1988 年中水多沙年和 1977 年、1992 年、1996 年各具代表性的高含沙洪水年等典型洪水和 1960~1965 年三门峡水库下泄清水期、1999~2002 年小浪底水库下泄清水期、河道发生大幅度冲淤交替变化的 1976~1995 年等系列年，黄河宁夏河段 1993~1999 年、渭河下游 1990~1995 年及咸阳到三门峡大坝 1994~1999 年等系列年的系统验证，验证结果与实测值吻合良好，表明该模型的可靠性。二维模型也通过了初步的检验。

在模型应用方面，本书作者采用“河道洪水演进与河床冲淤演变非恒定流泥沙数学模型”，成功开展了黄河下游 1997 年汛期洪水演进预测与 1998 年汛期洪水实时作业预报计算，模拟结果与汛期实测结果基本一致，为当年汛期黄河防洪决策提供了技术支持，开展的黄河 2002 年、2004 年调水调沙方案计算结果也被后来实测资料印证，为小浪底水库调水调沙方案制定提供了决策依据。此外，该模型在宁蒙河道冲淤演变预测、下游滩区治理、南水北调沁河改道方案论证、小浪底水库与泾河东庄水库运用方式研究等项目中也体现了其应用价值。

该模型的前身“河道洪水演进与河床冲淤演变非恒定流泥沙数学模型”，先后参加了1998年、2001年、2002年由水利部国际合作与科技司、黄河水利委员会组织的黄河数学模型大比试，取得了优异成绩，获得同行专家的高度评价。评议专家认为：该模型关键技术和参数的处理方法有其独特之处，基本可以达到模拟洪水演进的目的，计算结果合理，黄河水利委员会今后应重点改进和发展此模型，以提高洪峰水位和洪水传播时间预报的准确性。特别是2002年专家评议结果指出，该模型理论基础强，功能全面，模拟预测精度高，可作为未来黄河河道水沙数学模型整合的基础。

该书内容丰富，模型理论基础扎实，关键技术参数处理独特，可预测性强，计算结果贴近黄河实际情况，研究成果已经得到了广泛的应用。相信该书的出版，不仅能够丰富河流泥沙动力学与多沙河流模拟技术的学科内容，而且还给今后黄河及其他数学模型模拟技术与水平的进一步提高起到巨大的推动作用，同时也会对黄河治理开发方案的科学制定和治黄实践的理论与技术水平的提高做出应有的贡献。

陈效国

2007.4.26

前 言

我国幅员辽阔, 河流众多, 水资源丰富。但由于气候和流域地质构造的差异, 河流的径流与输沙量也明显不同。北方的河流, 多数流经干旱、半干旱的沙漠、沙地、黄土高原地区, 流域内水土流失量较大。特别是黄河流域, 很多支流的含沙量极高, 汛期经常发生高含沙洪水, 使得黄河成为世界瞩目的多沙河流。大量泥沙的输移及沉积给多沙河流水资源的开发利用及水利水电工程建设与安全运行带来了诸多困难。

近半个多世纪以来, 随着流体力学、数值计算方法的发展和计算机计算速度的提高, 河流泥沙数学模型的研究也有了很大进步, 并在许多河流治理开发工作中得到了广泛应用。目前, 数学模型已成为河流治理规划与水利水电工程开发建设中不可或缺的研究手段之一。由于泥沙基本理论的发展相对滞后, 特别是多沙河流泥沙运移规律研究还很不成熟, 虽然国内外开发的河流泥沙数学模型非常多, 但运用于像黄河这样的多沙河流时, 计算结果与实际情况往往相差较大, 计算精度难以满足生产要求。

20世纪80年代末、90年代初, 随着国民经济的复苏, 黄河水利委员会(以下简称黄委会)也开始加大治黄实践的力度。1987年4月国土规划研究中心在郑州召开了黄河下游河道发展前景及战略对策座谈会, 讨论的课题包括: 黄河下游河道整治目标、整治河道加大泄洪排沙能力、利用干流水库调水调沙减少河道淤积等; 1987年10月中国科学院地理所和黄委会又在郑州召开了中美黄河下游防洪措施学术讨论会; 1988年5月水利部再次在郑州召开了治黄规划座谈会, 全国政协副主席钱正英、水利部部长杨振怀等参加了会议。在这些大背景下, 黄委会决定加快黄河下游防洪重点河段花园口至东坝头游荡性河道整治的步伐。

众所周知, 由于黄河问题的复杂性, 黄河实体模型一直是黄河泥沙研究的重要手段之一。因此, 黄委会责成黄河水利科学研究院建设“黄河下游花园口至东坝头河段动床模型”, 开展相关的河道整治方案的比选、河道整治对输水输沙的影响、河道整治工程对包括高含沙洪水在内的各种典型洪水的适应性等方面的试验研究。

长期以来, 许多泥沙界的老前辈开展了大量的动床模型相似律与模拟技术的研究, 但高含沙洪水的准确模拟一直是困扰科技人员的技术难题。黄委会时任黄河水利科学研究院河道整治研究室主任、花园口至东坝头河道整治项目负责人的张红武教授带领项目组全体成员, 迎难而上, 抓住问题的关键, 开展了大量的理论研究、概化模型试验研究和相关的应用基础研究, 提出了一套系统的“黄河高含沙洪水模型相似律”, 指导了当时的花园口至东坝头河道模型试验的研究工作, 首次实现了真正意义上的黄河高含沙洪水模拟。该成果获得了1998年水利部科技进步二等奖, 目前已被黄河泥沙模型乃至全国其他大江大河实体模型试验与研究广泛引用, 为泥沙学科的发展发挥了重要作用。

反思实体模型相似律的研究过程和当时泥沙数学模型研究现状, 我们认为黄河泥沙数学模型要想取得成功, 关键在于泥沙模块计算的准确与否。由此, 项目组在黄委会治黄科研专项项目“黄河游荡性河道冲淤变形及洪水演进数值模拟”(合同编号: 94Z05)、“黄河

花园口至夹河滩河段汛期洪水数值模拟预测”(合同编号:95Z03)、黄河防汛项目“黄河花园口至高村河段洪水数学模型计算”、“黄河花园口至高村河段数学模型1997年洪水预测计算”、“黄河铁谢至孙口河段洪水演进泥沙数学模型研究”等项目的资助下,借鉴“黄河高含沙洪水模型相似律”的研究经验,针对数学模型中许多泥沙输移模拟计算中的关键技术问题开展专项攻关,修正和完善了多沙河流河床变形方程与泥沙连续方程、建立了附加系数 K_1 及泥沙非饱和系数 f_1 通用表达式,并对流速、含沙量及悬沙组成沿垂线分布规律、泥沙起动流速、水流紊动强度沿垂线分布规律、高含沙水流挟沙力、多沙河流动床阻力、含沙量与悬沙组成沿河宽分布规律、冲积性河流河床综合稳定性指标等许多基本问题开展了深入探讨,提出了相关的符合黄河实际的理论和经验公式。项目组将这些研究成果先后引入模型,不断丰富模型功能,提高其模拟预测精度,最终完成了“河道洪水演进与冲淤演变准二维泥沙数学模型”的开发与研制。采用大量黄河干、支流与典型洪水及典型系列年实测资料对模型进行系统检验,结果表明,无论是一般洪水还是高含沙洪水,该模型均能成功复演其水沙演进传播与造床过程,计算的沿程水位变化、洪峰与沙峰传播过程、河道冲淤量时空分布与实测结果基本一致。继而,项目组又完成了黄委会治黄专项、水利部创新项目“黄河下游平面二维泥沙数学模型研究”与开发(合同编号:97Z01、SZ9857)。

此后,项目组又在国家自然科学基金重大项目“江河泥沙灾害形成机理及其防治研究”(项目编号:59890200)、国家自然科学基金委员会和黄委会联合基金资助重点项目“黄河下游河道整治约束机制及调控效应”(项目编号:50339020)、“八五”国家重点攻关科技攻关项目“黄河下游河道演变基本规律”(项目编号:85-926-02-01)、“九五”国家重点攻关科技攻关项目“黄河中下游河道防洪减淤运用关键技术研究”(项目编号:98-928-02-01)、水利部科技创新项目“黄河下游实用水位预报方法的研究与开发”(项目编号:SZ9860)、水利部“94·8”计划技术创新与转化项目“黄河高含沙洪水‘揭河底’机理研究”(项目编号:CT200517)、水利部科技创新项目“黄河下游河道均衡输沙关系与游荡性河道治理理论”(项目编号:XDS2007-11)及其他黄委会重点项目的资助下,我们又完成了多沙河流悬沙与床沙级配、非均匀沙清水与浑水沉速、悬移质泥沙与床沙交换基本方程及计算方法的研究,不断完善了“河道洪水演进与冲淤演变准二维泥沙数学模型”的功能,使计算精度进一步提高,并不断将该模型的使用范围逐步扩大到整个黄河下游、黄河上中游干流及其支流。

“河道洪水演进与冲淤演变准二维泥沙数学模型”,先后参加了黄委会组织的1988年、2001年、2002年的数学模型比试,取得优异成绩,获得同行专家的高度评价。采用该模型开展的1997年、1998年、1999年、2002年汛期洪水演进预测与1998年汛期实时作业预报,计算结果与汛期洪水表现吻合很好,为当年汛期防洪调度提供了重要参考。

在2002年、2004年黄河调水调沙过程中,采用该模型开展的多方案计算,为调水调沙方案制定与效果评估提供了技术支持,许多计算成果也被后来黄河下游实测资料所印证。此外,该模型在小浪底水库运用方式研究、泾河东庄水库运用方式研究、黄河下游河道综合治理及黄河上中游干、支流开发等方面开展了大量计算研究,提出了很多宝贵成果,取得了巨大经济效益与社会效益。

《多沙河流洪水演进与冲淤演变数学模型研究及应用》是项目组成员近十年来在数学模型研发与应用方面研究成果系统总结,是项目组全体人员劳动成果与智慧的结晶,本书

共分三篇三十章。第一章至第十三章为第一篇，主要介绍了水沙运动基本理论研究成果；第十四章至第十九章为第二篇，主要介绍了水沙数学模型的建立与验证情况；第二十章至第三十章为第三篇，主要介绍了准二维非恒定流水沙数学模型在黄河干、支流治理与开发中的应用成果。

参加该项研究的人员除本书作者外，韦直林、刘雪梅、谈广鸣、张清、陈书奎、赵新建、曹永涛、马怀宝、董其华、黄鸿海、余欣、郑春梅、刘建明、张俊华、李涛、陈大宏、黄远东、尚红霞、刘月兰、郑邦民、张林忠、王艳平、陈新峰、张淑英、郑国栋、李书霞、刘燕、夏修杰、冯顺新、许雨新、顾霜妹、万强、刘杰、李小平、冯小香、崔占峰、李春玲、吴腾等也参加了相关的研究工作。

书中引用了许多相关参考文献，在此谨向这些文献的作者表示感谢。

鉴于多沙河流水沙输移与模拟技术的复杂性，书中有些内容仍有待今后的工作中进一步完善或补充。同时，由于作者学识水平、文笔能力有限，错漏之处难免，敬请读者批评指正。

作 者

2007年3月

目 录

| | |
|---------------------|------|
| 序 一 | 李国英 |
| 序 二 | 陈效国 |
| 前 言 | |
| 绪 论 | (1) |
| 第一节 我国多沙河流状况 | (2) |
| 第二节 多沙河流数学模型研究历史回顾 | (4) |
| 第三节 近期黄河泥沙数学模型的研究进展 | (10) |
| 第四节 多沙河流模拟计算存在的主要问题 | (11) |
| 第五节 本书的主要内容和进展 | (12) |
| 参考文献 | (17) |

第一篇 水沙运动基本理论研究

| | |
|--------------------------|------|
| 第一章 天然河流泥沙级配研究 | (21) |
| 第一节 天然河流泥沙级配研究现状述评 | (21) |
| 第二节 悬移质泥沙级配研究 | (25) |
| 第三节 细颗粒床沙级配研究 | (30) |
| 第四节 粗颗粒或卵石床沙级配研究 | (32) |
| 参考文献 | (36) |
| 第二章 泥沙沉降规律研究 | (38) |
| 第一节 单颗粒泥沙沉速 | (38) |
| 第二节 天然非均匀沙清水混合沉速 | (41) |
| 第三节 高含沙水流泥沙群体沉速 | (42) |
| 参考文献 | (49) |
| 第三章 河道水流流速沿垂线分布规律 | (51) |
| 第一节 河道水流流速沿垂线分布研究现状 | (51) |
| 第二节 紊流涡团模式 | (54) |
| 第三节 河道挟沙水流流速沿垂线分布公式的建立 | (56) |
| 第四节 实验和天然资料对公式的检验 | (57) |
| 参考文献 | (63) |
| 第四章 泥沙起动流速与水流紊动强度沿垂线分布规律 | (64) |
| 第一节 泥沙的起动流速 | (64) |
| 第二节 水流紊动强度沿垂线分布规律 | (70) |
| 参考文献 | (73) |
| 第五章 河道挟沙水流含沙量沿垂线分布规律 | (74) |
| 第一节 河道挟沙水流含沙量沿垂线分布研究现状 | (74) |
| 第二节 河道挟沙水流含沙量垂线分布统一公式 | (79) |

| | | |
|------|----------------------------------|-------|
| 第三节 | 含沙量沿垂线分布公式的分析与验证..... | (81) |
| | 参考文献..... | (83) |
| 第六章 | 多沙河流动床阻力变化规律..... | (84) |
| 第一节 | 冲积性河道沙波运动..... | (84) |
| 第二节 | 动床阻力研究现状..... | (87) |
| 第三节 | 冲积性河道糙率公式的建立..... | (90) |
| 第四节 | 冲积性河道糙率公式的检验..... | (93) |
| | 参考文献..... | (94) |
| 第七章 | 多沙河流水流挟沙力..... | (96) |
| 第一节 | 水流挟沙力研究现状..... | (96) |
| 第二节 | 挟沙水流能耗图形及床沙质挟沙能力..... | (102) |
| 第三节 | 水流挟沙能力通用公式..... | (105) |
| 第四节 | 挟沙能力公式的检验与分析..... | (107) |
| | 参考文献..... | (113) |
| 第八章 | 多沙河流河床变形方程与泥沙连续方程之完善..... | (114) |
| 第一节 | 泥沙恢复饱和系数理论值讨论..... | (114) |
| 第二节 | 多沙河流河床变形方程的改进..... | (115) |
| 第三节 | 准二维数学模型泥沙连续方程的修正..... | (118) |
| 第四节 | 河床变形方程中主要参数的计算..... | (120) |
| | 参考文献..... | (123) |
| 第九章 | 多沙河流悬移质泥沙与床沙交换规律..... | (124) |
| 第一节 | 悬移质泥沙与床沙交换计算研究现状..... | (124) |
| 第二节 | 一维非恒定挟沙水流悬沙与床沙交换粒径变化基本方程..... | (132) |
| 第三节 | 平面二维非恒定挟沙水流悬沙与床沙交换粒径变化基本方程..... | (135) |
| 第四节 | 三维挟沙水流悬移质泥沙平均粒径变化基本方程..... | (137) |
| | 参考文献..... | (139) |
| 第十章 | 河道挟沙水流悬沙组成沿垂线分布规律..... | (140) |
| 第一节 | 悬沙组成沿垂线分布研究现状..... | (140) |
| 第二节 | 悬沙平均粒径沿垂线分布规律与含沙量沿垂线分布规律的关系..... | (140) |
| 第三节 | 悬沙粒径沿垂线分布公式的建立..... | (142) |
| 第四节 | 悬沙组成沿垂线分布公式的讨论与分析..... | (146) |
| | 参考文献..... | (148) |
| 第十一章 | 多沙河流悬沙与床沙交换计算方法研究..... | (150) |
| 第一节 | 冲淤物平均粒径 d_c 的变化规律研究..... | (150) |
| 第二节 | 冲淤物粒径二阶圆心矩 ξ_c 的变化规律研究..... | (154) |
| 第三节 | 混合层厚度 H_c 及床沙粒径调整计算方法..... | (155) |
| 第四节 | 悬移质泥沙与床沙交换规律计算方法的检验..... | (157) |
| | 参考文献..... | (161) |

| | |
|--------------------------------|-------|
| 第十二章 悬移质含沙量与悬沙组成沿河宽分布规律 | (163) |
| 第一节 悬移质含沙量沿河宽分布研究现状 | (163) |
| 第二节 悬移质含沙量沿河宽分布规律 | (164) |
| 第三节 悬沙组成沿河宽分布规律 | (168) |
| 参考文献 | (172) |
| 第十三章 冲积性河流河型成因与河床综合稳定性指标 | (173) |
| 第一节 冲积性河流河型成因与稳定性指标研究现状 | (173) |
| 第二节 冲积性河流河型成因试验研究 | (175) |
| 第三节 游荡性河段河型转化试验研究 | (179) |
| 第四节 河床综合稳定性指标研究 | (187) |
| 参考文献 | (192) |

第二篇 模型的建立与验证

| | |
|---|-------|
| 第十四章 准二维非恒定流水沙数学模型及数值方法 | (195) |
| 第一节 准二维非恒定流水沙数学模型基本方程 | (195) |
| 第二节 准二维非恒定流水沙数学模型数值方法 | (199) |
| 参考文献 | (204) |
| 第十五章 黄河下游典型洪水对准二维非恒定流水沙数学模型的验证 | (205) |
| 第一节 1988 年洪水的验证 | (205) |
| 第二节 1992 年洪水的验证 | (206) |
| 第三节 1977 年洪水的验证 | (207) |
| 第四节 1982 年洪水的验证 | (211) |
| 第五节 1996 年洪水的验证 | (213) |
| 参考文献 | (216) |
| 第十六章 黄河下游典型系列年对准二维非恒定流水沙数学模型的验证 | (217) |
| 第一节 三门峡水库下泄清水期水沙系列的验证 | (217) |
| 第二节 小浪底水库下泄清水期水沙系列的验证 | (221) |
| 第三节 黄河下游长期枯水系列的验证 | (226) |
| 参考文献 | (229) |
| 第十七章 准二维非恒定流水沙数学模型在黄委会模型比试中的检验 | (230) |
| 第一节 1998 年模型比试结果 | (230) |
| 第二节 2001 年第一次模型比试结果 | (233) |
| 第三节 2001 年第二次模型比试结果 | (239) |
| 第四节 2002 年小浪底水库调水调沙期间模型比试结果 | (244) |
| 参考文献 | (248) |
| 第十八章 准二维非恒定流水沙数学模型在黄河上中游干支流河道 冲淤演变中的验证 | (250) |
| 第一节 准二维水沙数学模型在宁夏河段河道冲淤演变中的验证 | (250) |
| 第二节 准二维水沙数学模型在渭河下游河段河道冲淤演变中的验证 | (253) |

| | | |
|------|-----------------------------------|-------|
| 第三节 | 准二维水沙数学模型在咸阳—三门峡大坝河段冲淤演变中的验证..... | (259) |
| | 参考文献..... | (261) |
| 第十九章 | 黄河下游平面二维水沙数学模型研究..... | (262) |
| 第一节 | 黄河下游平面二维水沙数学模型的构建..... | (262) |
| 第二节 | 黄河下游平面二维水沙数学模型的验证..... | (274) |
| 第三节 | 黄河下游平面二维水沙数学模型可视化系统开发..... | (280) |
| | 参考文献..... | (286) |

第三篇 模型在黄河治理与开发中的应用

| | | |
|-------|---|-------|
| 第二十章 | 黄河下游汛期洪水演进预测与实时作业预报..... | (289) |
| 第一节 | 1996年汛期洪水演进预测..... | (289) |
| 第二节 | 1997年汛期洪水演进预测..... | (290) |
| 第三节 | 1998年汛期洪水演进预测..... | (297) |
| 第四节 | 1998年汛期洪水演进实时作业预报..... | (300) |
| 第五节 | 1999年汛期洪水演进预测..... | (302) |
| 第六节 | 2002年汛期洪水演进预测..... | (309) |
| | 参考文献..... | (312) |
| 第二十一章 | 小浪底水库不同运用方案下黄河下游冲淤演变预测..... | (314) |
| 第一节 | 小浪底水库拦沙运用第一年下游河道冲淤演变预测..... | (314) |
| 第二节 | 小浪底水库拦沙运用前三年黄河下游河道冲淤演变预测..... | (316) |
| 第三节 | 小浪底水库运用二十年黄河下游河道冲淤演变预测..... | (318) |
| 第四节 | 小浪底水库正式运用一年后下游河道减淤效果分析..... | (329) |
| | 参考文献..... | (330) |
| 第二十二章 | 黄河调水调沙试验下游河道冲淤演变预测..... | (331) |
| 第一节 | 2002年黄河首次调水调沙方案计算..... | (331) |
| 第二节 | 2002年9月小流量排沙期间下游沿程引水对河道演变影响研究..... | (333) |
| 第三节 | 2004年调水调沙小浪底水库不同泄流历时下游河道 洪水演进变形预测..... | (335) |
| 第四节 | 不同流量下艾山以下河道不淤临界含沙量研究..... | (336) |
| 第五节 | 2004年黄河调水调沙下游人工爆破扰沙方案效果研究..... | (339) |
| 第六节 | 2004年黄河调水调沙试验人工扰沙减淤效果分析..... | (342) |
| | 参考文献..... | (347) |
| 第二十三章 | 小浪底水库异重流排沙期黄河下游洪峰增值机理及其模拟..... | (348) |
| 第一节 | 黄河下游洪峰异常增值现象及其不利影响..... | (348) |
| 第二节 | 黄河下游河道洪峰异常增值机理探讨..... | (352) |
| 第三节 | “04·8”、“05·7”洪水洪峰异常增值模拟计算..... | (357) |
| | 参考文献..... | (362) |
| 第二十四章 | 黄河下游滩区不同治理模式对河道冲淤演变影响研究..... | (363) |
| 第一节 | 黄河下游滩区治理模式与模型计算概况..... | (363) |

| | | |
|-------|--|-------|
| 第二节 | 小浪底水库调水调沙运用计算结果及其分析 | (371) |
| 第三节 | 小浪底水库不调水调沙运用计算结果及其分析 | (391) |
| 第四节 | 主要结论 | (393) |
| 参考文献 | | (394) |
| 第二十五章 | 黄河下游生产堤不同处置方案对河道演变影响研究 | (395) |
| 第一节 | 黄河下游生产堤处置方案与模型计算概况 | (395) |
| 第二节 | 2004~2019年小浪底水库运用计算结果 | (397) |
| 第三节 | 2020~2054年古贤水库运用计算结果 | (402) |
| 第四节 | 2020~2034年无工程控制计算结果 | (406) |
| 第五节 | 主要结论 | (410) |
| 参考文献 | | (410) |
| 第二十六章 | 黄河下游人工淤滩形成相对窄深河槽对洪水演进影响预测 | (411) |
| 第一节 | 黄河下游人工淤滩模式与模型计算概况 | (411) |
| 第二节 | 东坝头—陶城铺河段人工淤滩形成相对窄深河槽对 洪水演进影响预测 | (412) |
| 第三节 | 黄河下游人工淤滩形成相对窄深河槽试验方案对 洪水演进的影响预测 | (425) |
| 参考文献 | | (431) |
| 第二十七章 | 宁夏河段洪水演进与河道冲淤演变预测 | (432) |
| 第一节 | 宁夏河段河道与模型计算概况 | (432) |
| 第二节 | 宁夏河段现状地形条件下20年一遇洪水模拟 | (432) |
| 第三节 | 宁夏河段未来20年河床冲淤演变预测 | (436) |
| 第四节 | 宁夏河段未来20年设防水位计算 | (438) |
| 第五节 | 宁夏河段整治流量下沿程水位计算 | (440) |
| 参考文献 | | (441) |
| 第二十八章 | 泾河东庄水库运用对渭河下游及三门峡库区冲淤影响预测 | (442) |
| 第一节 | 泾河东庄水库与渭河下游及三门峡库区概况 | (442) |
| 第二节 | 典型系列与东庄水库调水调沙运用条件下渭河下游冲淤预测 | (451) |
| 第三节 | 50年设计系列东庄水库运用对渭河下游及三门峡库区冲淤影响 | (454) |
| 第四节 | 校核46年系列东庄水库运用对渭河下游及三门峡库区冲淤影响 | (467) |
| 第五节 | 泾河50年偏丰系列东庄水库运用对渭河下游及 三门峡库区冲淤影响 | (475) |
| 第六节 | 咸阳50年偏丰系列东庄水库运用对渭河下游及 三门峡库区冲淤影响 | (478) |
| 第七节 | 主要结论 | (481) |
| 参考文献 | | (481) |
| 第二十九章 | 小江调水济渭对渭河及三门峡库区冲淤影响预测 | (482) |
| 第一节 | 小江调水济渭与模型计算概况 | (482) |
| 第二节 | 小江调水济渭对渭河及三门峡库区冲淤影响预测 | (485) |

| | |
|----------------------------------|-------|
| 第三十章 南水北调中线沁河改道方案河道溯源冲刷计算..... | (493) |
| 第一节 沁河五龙口至武陟河段造床流量与床沙起动流速分析..... | (493) |
| 第二节 改道后河床溯源冲刷最终稳定纵剖面计算..... | (495) |
| 参考文献..... | (502) |
| 后 记..... | (503) |