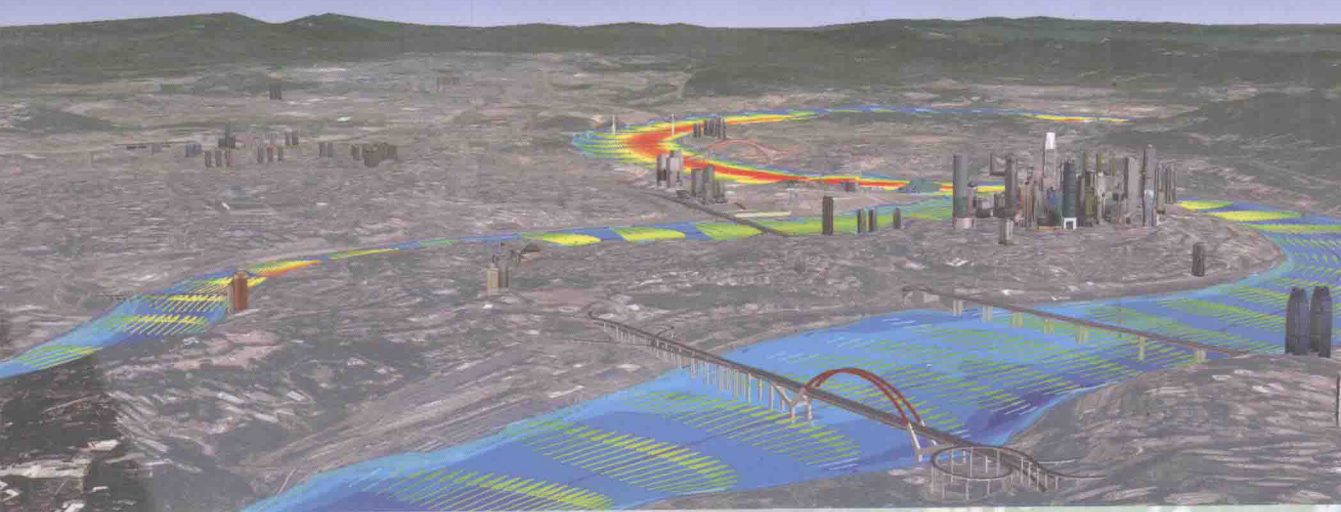


# 河流数值模拟 与信息化应用

张细兵 崔占峰 张杰 王敏 著



中国水利水电出版社

[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

# 河流数值模拟 与信息化应用

张细兵 崔占峰 张杰 王敏 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

随着计算机技术快速发展, 河流数值模拟技术在水利水电工程领域中发挥的作用越来越大。本书从网格划分、数值计算方法、可视化技术等方面作了系统阐述。全书共 11 章, 分别为概述, 网格剖分技术, 一维水沙模型及离散求解, 二维水沙水质模型及离散求解, 三维水流水质模型及离散求解, 河流数值模拟的信息化, 水流运动模拟, 河道泥沙模拟, 分蓄洪区与溃坝洪水模拟, 温排水数值模拟, 物质运输数值模拟。

本书可供从事可视化技术研究、应用的水利技术人员使用, 也可供相关院校的水利专业师生参考。

### 图书在版编目 (C I P) 数据

河流数值模拟与信息化应用 / 张细兵等著. -- 北京:  
中国水利水电出版社, 2014. 4  
ISBN 978-7-5170-1865-0

I. ①河… II. ①张… III. ①河流泥沙—数值模拟—研究②河流泥沙—信息化—研究 IV. ①TV142

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第064096号

书 名	河流数值模拟与信息化应用
作 者	张细兵 崔占峰 张杰 王敏 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 20 印张 474 千字
版 次	2014 年 4 月第 1 版 2014 年 4 月第 1 次印刷
印 数	0001—1200 册
定 价	80.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

随着计算机技术快速发展, 河流数值模拟技术在水利水电工程领域中发挥的作用越来越大。近几十年来, 国内数值模拟技术的发展速度较快, 但相对国外成熟的商业化软件而言, 还存在较大差距。如何在工程实践中更好地运用数值模拟这一手段, 加快推进数学模型的软件化和信息化, 本书从网格划分、数值计算方法、可视化技术等方面进行了总结与探讨, 并研制了“基于虚拟地球的河流水沙水质数值模拟与演示系统”, 该软件在水(潮)流运动、泥沙输移、分蓄洪区洪水演进、温排水、污染物浓度扩散、水质模拟等方面得到成功运用, 实际工程应用实例超过 200 项。当今世界已经进入信息时代, 基于互联网环境的物联网、大数据、云计算、移动网、智慧地球等热门技术发展方兴未艾, 其应用正在迅速促进社会发展, 加剧市场竞争, 深刻地改变着人们的生活。近年来, 随着信息技术的迅猛发展和水利事业的全面推进, 水利信息化逐步深入。我们发现, 在处理、发布和查询各类信息时, 大量的信息与空间地理位置有关。为此, 如何将流域基础数据和河流数值模拟成果进行信息化, 并可直接发布在互联网上, 是本书关注的重点。河流数值模拟信息化不仅能够加深我们对所研究问题的认识, 而且可推动水利信息的共享, 从而更好地服务于工程科研和流域管理。目前, 关于河流模拟信息化的研究还非常少见, 为此我们对河流数值模拟信息化方法、平台构建及应用进行了探索性研究, 并研制了“基于虚拟地球的数字河流信息查询管理平台”, 实现了流域基础数据和河流模拟成果的同步信息化。

本书共 11 章, 首先对河流数值模拟基本理论和模拟方法进行了介绍(见第 3~第 5 章), 然后介绍了模型软件和信息化平台的研制(见第 6 章), 接着对模型的应用进行介绍(见第 7~第 11 章), 并对数值模拟中关键问题进行了探讨。各章主要内容说明如下: 第 1 章阐述了国内外河流数值模拟研究现状, 介绍了国外河流模拟方面的一些通用软件, 对目前国内数值模拟存在的问题进行了分析, 同时还对信息化发展趋势及河流数值模拟信息化方法进行了介绍; 第 2 章对目前较为先进、应用较为广泛的网格划分方法进行探讨, 将结构网格和非结构网格结合起来, 发挥各自所长, 使其更好适应复杂边界计算域的模拟, 同时对网格插值技术进行了介绍; 第 3~第 5 章分别对一维、二维、

三维模型的基本方程与离散求解方法作了介绍；第6章介绍了信息化技术的发展和应用情况，并对研制的基于虚拟地球的河流水沙水质数值模拟平台和信息化平台作了介绍；第7章介绍了水流模型涉及到的网格选取、参系数取值、率定与验证要求、计算条件选取、工程概化等关键问题，详细介绍了水流数学模型在涉河工程累积影响模拟，洞庭湖、鄱阳湖洪水演进模拟，河口、海岸潮流模拟等方面的应用；第8章首先介绍了泥沙模型参数取值（包括泥沙扩散系数、水流挟沙力、挟沙力级配、泥沙饱和恢复系数等）、河床级配调整及动岸模拟方法，然后选取长江中下游武汉河段、湖口附近河段和扬中河段进行了泥沙输移和河床冲淤计算；第9章首先介绍了分蓄洪区和溃坝洪水模拟计算参数的确定方法，然后介绍了模型在荆江分洪区、东西湖分洪区和唐家山堰塞湖溃坝中的洪水演进模拟情况；第10章首先对温排水模型参数取值进行了介绍（包括水面综合散热系数、热扩散系数等），介绍了温排水监测和模型验证的相关要求，然后选取天然河道和湖泊进行了温排水影响的计算分析；第11章分别选取径流河段、感潮河段、河口海岸等不同水域，模拟了电厂余氯排放、盐潮入侵、溢油、污染物扩散、水质等物质输运问题。

本书的主要技术特点：一是多网格、多算法、多功能的数值模拟技术；二是由传统的河流水沙的模拟扩展到河流系统（水沙、水质等）的模拟；三是模型的系统化、软件化，为实现河流数值模拟的商业化奠定基础；四是河流基础数据和数值模拟成果的可视化与信息化。本书在写作过程中着重体现模拟技术的实用性和可操作性，相关技术和方法可为涉河工程防洪评价、分蓄洪区洪水评价、航道论证、取水口温排水论证、水环境论证、河口海岸潮流模拟、工程泥沙模拟等专题研究提供技术支持。受作者研究经历所限，书中应用实例多以长江流域为背景，但相关技术和处理方法也可推广应用于其他河流。通过对本书的阅读，无论是初学者还是专业人员，无论是模型开发者还是模型使用者，都可以从河流数值模拟基本理论、模拟方法、软件开发及实践运用、河流信息化等方面得到一定启发。若通过本书的介绍，能推动国内数学模型的软件化和模拟成果的信息化，则是作者最大的期望。

本书第1~第2章、第4~第7章、第9~第11章由长江科学院张细兵博士撰写，长江科学院崔占峰博士撰写第8章，并参加编写第9章；张杰教授级高级工程师参加编写第7章和第11章，王敏博士撰写第3章。书中部分研究成果来自作者博士学位论文与硕士学位论文成果，还有部分成果来自于作者在长江科学院完成的科研成果报告。武汉大学刘士和教授、杨中华教授和长江科学院卢金友教授级高级工程师对本书提出了许多宝贵意见，在此深表感

谢！此外，长江科学院胡向阳高级工程师、杨君工程师、袁莉同志等对本书的编排与出版给予了帮助，在此一并表示感谢！

限于作者水平和现阶段的认识，书中资料引用难免存在一些疏漏和不足之处，衷心希望读者批评指正。

作 者

2013年12月

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 概述</b> .....	1
1.1 河流水沙与河流系统研究概述 .....	1
1.2 河流数值模拟研究进展 .....	4
1.3 河流模拟信息化发展趋势 .....	16
1.4 本书研究内容 .....	18
参考文献 .....	19
<b>第 2 章 网格剖分技术</b> .....	25
2.1 网格类型 .....	25
2.2 一般网格生成方法 .....	26
2.3 河道贴体网格生成技术 .....	33
2.4 网格地形插值技术 .....	41
参考文献 .....	46
<b>第 3 章 一维水沙模型及离散求解</b> .....	48
3.1 模型基本方程 .....	48
3.2 模型方程离散求解 .....	50
参考文献 .....	51
<b>第 4 章 二维水沙水质模型及离散求解</b> .....	52
4.1 模型基本方程 .....	52
4.2 定解条件 .....	54
4.3 常用离散方法简介 .....	62
4.4 有限差分法 .....	70
4.5 有限元法 .....	75
4.6 有限体积法 .....	84
4.7 不同算法比较 .....	94
4.8 无网格法简介 .....	98
参考文献 .....	100
<b>第 5 章 三维水流水质模型及离散求解</b> .....	102
5.1 模型基本方程 .....	102
5.2 定解条件及相关问题处理 .....	103



5.3	模型方程的离散	104
5.4	离散方程的求解	107
	参考文献	107
<b>第6章</b>	<b>河流数值模拟的信息化</b>	<b>108</b>
6.1	信息技术简介	108
6.2	河流信息化技术应用	115
6.3	河流数值模拟系统开发	127
6.4	河流信息化平台开发	146
	参考文献	157
<b>第7章</b>	<b>水流运动模拟</b>	<b>158</b>
7.1	模型范围及相关问题处理	158
7.2	模型率定与验证要求	163
7.3	工程概化	164
7.4	在河道中的应用	173
7.5	在洞庭湖区的应用	183
7.6	在鄱阳湖区的应用	194
7.7	在长江口的应用	203
7.8	在海岸的应用	214
	参考文献	216
<b>第8章</b>	<b>河道泥沙模拟</b>	<b>217</b>
8.1	参数选取及相关问题处理	217
8.2	模型率定与验证	224
8.3	在径流河段的应用	226
8.4	在感潮河段的应用	240
	参考文献	243
<b>第9章</b>	<b>分蓄洪区与溃坝洪水模拟</b>	<b>245</b>
9.1	参数选取及相关问题处理	245
9.2	分蓄洪区洪水模拟	248
9.3	溃坝洪水模拟	254
	参考文献	267
<b>第10章</b>	<b>温排水数值模拟</b>	<b>268</b>
10.1	参数选取	269
10.2	模型率定与验证要求	270
10.3	概化模型计算	271
10.4	河道温排水模拟	275
10.5	湖泊温排水模拟	281



参考文献 .....	287
<b>第 11 章 物质运输数值模拟 .....</b>	<b>289</b>
11.1 河道余氯排放模拟 .....	289
11.2 河口咸潮入侵模拟 .....	294
11.3 海岸浓度扩散模拟 .....	297
11.4 水质模拟 .....	299
11.5 溢油模拟 .....	303
参考文献 .....	306

# 第 1 章 概 述

## 1.1 河流水沙与河流系统研究概述

20 世纪 80 年代以前,国内对于河流的研究,多关注于河流水沙基本理论、河床演变规律,以及相关的防洪、河道治理等问题。20 世纪 90 年代以后,随着社会经济的发展,水电开发和工业化进程的不断推进,河流污染和生态环境问题逐步引起人们的关注,河流系统功能的概念应运而生。河流系统是指河道中相互联系的水、沙、河床以及生态系统之间形成的复杂体系。河流系统中的物理、化学、生物等各种过程涉及了地貌学、河床演变学、河流动力学、沉积学、水文水环境、生态学等多个学科。

### 1.1.1 河流水沙理论研究概述

河流水沙基本理论包括河流动力学和河床演变学在内的泥沙研究,它的母体在欧美各国为水力学,属于技术科学范畴;而在前苏联则被视为地球物理学的一部分,属于基础科学范畴。随着经济的发展,水利工程和港口航道工程的建设日趋增多,泥沙问题越来越突出,这对泥沙运动理论研究提供了良好的机遇。国内自 20 世纪 50 年代便开始河流水沙基本理论研究,张瑞瑾<sup>[1-2]</sup>、沙玉清<sup>[3]</sup>、钱宁<sup>[4-5]</sup>、窦国仁<sup>[6-7]</sup>、韩其为<sup>[8-9]</sup>等老一代科学家为泥沙学科的发展奠定了基础。王兆印<sup>[10]</sup>等对 20 世纪 90 年代中期以前欧美各国的泥沙研究进展作了详细的叙述。王光谦<sup>[11]</sup>简要说明了泥沙学科的特点,介绍了我国泥沙研究取得的重要成果,讨论了泥沙学科未来的发展趋势,并在流域泥沙方面开展了深入研究。周志德<sup>[12]</sup>在总结 20 世纪泥沙研究发展概况时,认为在 20 世纪上半叶逐步积累的基础上,作为一个标志性成果,1950 年汉斯·爱因斯坦提出了第一个泥沙运动力学理论体系;在 20 世纪下半叶进入百家争鸣时代,20 世纪 70 年代以来又根据大量实测资料,利用计算机进行回归分析得到阻力和输沙率公式,而不拘泥于发展新的理论。

20 世纪 80 年代以来,随着大江大河治理和大型水电工程开发的推动,逐步发展与完善了泥沙学科<sup>[13-18]</sup>,基本理论体系不断完善和丰富。

#### 1. 泥沙的沉降特性

泥沙沉速是研究泥沙运动特性的基础。Stokes 提出了关于圆球颗粒在无限水体中运动的水流阻力公式,张瑞瑾、窦国仁、冈恰洛夫、沙玉清等学者对泥沙沉降规律都进行过深入研究。

#### 2. 泥沙的起动特性

泥沙起动是泥沙运动理论中最基本的问题之一。沙莫夫(1959)、唐存本(1963)、张瑞瑾(1961)、窦国仁(1960)分别导出了天然均匀沙起动流速公式。张瑞瑾认为细颗粒之间的黏聚力是由颗粒间的吸着水与薄膜水不传递静水压力引起的,从而推导出了均匀散粒泥沙与黏性细泥沙在内的统一的起动流速公式。卢金友(1991)根据长江泥沙实测资

料,提出了长江不同种类泥沙的起动流速计算公式。

### 3. 水流挟沙力

水流挟沙力是指在一定的来水来沙条件下单位水体所能挟带和输运的悬移质中的床沙质数量。在解决工程泥沙问题时,水流挟沙力规律是必然要遇到的难题之一。在数学模型中计算河床变形时,要根据挟沙力计算的结果来判断河道的冲淤特性。因此水流挟沙能力一直是工程界和学术界研究的热点问题之一,受到学者们的普遍关注。

关于水流挟沙力,已从不同理论和假设进行了大量研究,取得了丰富的研究成果。张瑞瑾(1961)整理了大量的长江、黄河、渠道及水槽实验资料后,基于“制紊假说”,得到了广泛应用的悬移质挟沙力经验公式。20世纪70年代,窦国仁从能量观点出发,导出了悬移质全沙的水流挟沙力公式,并利用长江和黄河各水文站测验资料及水槽资料进行了验证。杨志达(1973)从单位水流功率的理论模式入手,建立了包括沙质推移质在内的水流挟沙力公式。王士强(1992)从床沙、推移质、悬移质相互交换、相互衔接的物理图形出发,在力学分析、随机分析及紊动扩散分析基础上,提出推移质、悬移质和全沙统一的非均匀沙挟沙力公式,计算结果与实测值符合良好。近期余明辉(1999)等以“制紊假说”为理论基础,考虑浑水相对黏滞性、上游来水来沙条件和床沙级配等因素对水流挟沙力的不同影响,建立了非均匀沙分组挟沙力公式。

对非均匀沙分组挟沙力级配的计算,也有考虑悬移质来沙级配的韩其为方法(1980),也有考虑水流条件和床沙级配的李义天方法(1987)等。

总的说来,以上工作或是对原有公式的改进,或是将颗粒运动的必然性和随机性相结合进行推导,或者从两相流能量方程出发,得出水流挟沙规律。固液两相流理论是研究泥沙运动的基础,刘士和教授(2007)基于两相流理论建立了低浓度挟沙水流运动数学模型。由于两相紊流的结构十分复杂,目前还没有比较成熟的理论能够描述其变化规律,因此在推导时往往要作一些近似处理。因此挟沙力规律还需要更深入的探讨。

### 4. 推移质运动

自法国的 Du Boys 在 1879 年提出第一个推移质输沙率公式以来,据不完全统计,目前各种推移质输沙率公式已超过 50 个。天然河流一般为非均匀沙,对于非均匀沙推移质输沙率的计算有两种方法:一是采用代表粒径计算总的输沙率;二是分不同的粒径级分别计算出各级粒径的输沙率。韩其为(1984)开展泥沙运动统计理论研究,得出非均匀沙运动统计规律;窦国仁(1960)用平均流速为主要指标,导出均匀沙的推移质输沙率公式,其应用也较广泛;刘兴年(1999)从试验与原型观测出发,对宽级配非均匀推移质运动规律进行了系统的研究;卢金友(2009)根据原型观测与水槽试验,提出了适用于长江上游河流的推移质输沙率公式。

总之,泥沙科学经历了几十年的积累,随着国民经济的发展,水利工程和航道工程的建设,泥沙问题越来越受关注,这对于学科发展提供了很好的机遇和条件。水流泥沙数学模型的发展推动着泥沙基本理论研究的进步,目前水库淤积模拟已具备了较高的模拟精度,但坝下冲刷模拟受理论不成熟和河床组成复杂等因素影响,模拟精度仍不够,泥沙模拟技术的提高有待进一步对泥沙内在运动规律的探索。



### 1.1.2 河流系统研究概述

长期以来,国内外学者在防洪安全、河势稳定、航道畅通、生态环境保护等问题的研究上进行了深入研究,积累了丰富的经验,但统一以河流系统功能的概念研究河流系统的各种行为和资源属性却是近20年来的新生事物。河流的水流泥沙过程具有多种属性,对于河流地貌系统、生态系统的稳定均起着至关重要的作用。首先,水流是塑造河床的直接动力,泥沙则是改变河床形态的物质基础。其次,河流地貌过程直接决定了栖息地分布和多样性,而且径流过程的多重属性(总径流量、变化幅度、变化周期、各流量级的频率分布、洪水出现时机、持续时间、流量过程变化率等)对于栖息地形态保持、泥沙与养料输移、稀释污染、维持河床基质组成、淹没滩地及缓流区起着不同的作用,流量事件(涨水、落水、洪峰、春汛等)也是一些生态事件的触发因子(如一些鱼类的洄游、产卵),这些对于生态多样性和完整性的维持起着重要作用。

20世纪90年代以来,受全球气候变化和河流上游修建水库、流域内水土保持、采砂等人类活动的影响,长江、黄河等大江大河来水量有所偏小,但来沙量明显减少。围绕水沙条件变化情况下的水沙输移、河道演变、防洪、泥沙调度、生态环境等问题,国内开展了大量的研究,主要包括以下几个方面。

#### 1. 人类活动影响下的水沙输移规律

水沙输移过程是河床塑造的基本动力,但目前对水沙输移规律,尤其是冲刷条件下调整规律仍存在认识上的不足。为此,多位学者开展了有关含沙量恢复过程与机理的研究。含沙量恢复的研究涉及到河流动力学中水流挟沙力、床沙交换、泥沙恢复饱和系数等基本概念,也直接影响到长河段水沙数学模型中输沙模式,目前的研究对于机理认识有一定的帮助,但由于问题本身的复杂性,其中仍有一些假定或经验系数,需作进一步的研究。

#### 2. 水沙变化与河床演变响应机理

关于水沙变化与河床演变响应机理,中外学者从各种角度做了大量工作。随着水库下游冲刷演变、河型转化现象的普遍出现,国内外学者逐渐开始对此展开调查研究,对工程影响下的演变过程取得了大量的实测资料。对水库下游再造床过程的问题,地学界和水利学界从观测资料分析、试验模拟等多个方面开展了研究,探讨了河谷区域自然条件和水沙条件对水库下游河道冲淤变化、河相关系调整、河床地貌再造等方面的影响。从现有研究来看,由于对天然河流演变机理的认识尚未十分明了,水库下游河势变化趋势从理论上预测也是比较困难的,目前主要依赖于原型资料的分析 and 河床冲淤演变的模拟预测。

#### 3. 水沙变化条件下的防洪问题

水沙变化对防洪的影响体现在以下几个方面:一是河床冲淤变化对洪水位的影响;二是洪水遭遇组合的规律变化;三是由于河势变化引起近岸河床的冲刷进而影响堤防安全。在国内外水库等工程的下游,水沙变化后河床变形对洪水位产生影响的现象均较常见。如法国 Garonne 河由于上游修水库及河道渠化、人为采砂,下游河道下切展宽严重,河槽容量加大,漫滩次数减少但滩面糙率加大,大洪峰传播速度较建库前大大减缓。河床变形的影响引起广泛的重视,但目前的研究多限于单因素和单河段。关于大范围内的洪水模拟,大多是针对比较稳定的河床边界,仅仅限于对水流过程的描述而较少考虑河床变形。



#### 4. 水沙变化条件下的水库调度优化问题

在多沙河流上修建大型水利枢纽工程, 水库泥沙淤积问题是面临的关键技术问题, 目前一般采用“蓄清排浑”的运用方式。但随着近年大江大河来沙显著减少, 这一传统运用方式也在实际应用中不断优化完善, 如三峡水库试验性蓄水以来, 考虑到坝下游供水需求增加、防洪还存在薄弱环节等因素, 尝试进行了提前蓄水、中小洪水调度、汛限水位浮动等不同优化调度方案。由于上游来沙减少再加之水库的拦沙作用, 将引起坝下游发生长距离的冲刷和枯水位下降, 进而影响河道岸坡稳定与沿岸取水。因此, 水库调度方式需根据新的需求和新的情况, 不断进行调整优化。

#### 5. 水沙变化条件下的生态环境问题

水沙调节后河流生态环境问题包括对生态环境状态评估、生态环境需水量估算等方面。如 Bunn 总结了水沙变化后对河流生态环境可能产生的各种影响; Sparks、Ward 等讨论了流量过程变化对生态栖息地以及生物多样性的重要作用。国内外关于生态需水量的研究是河流研究的热点问题。此外, 河流沿岸污染物排放和火(核)电厂温水排放, 也对河流生态环境带来一定影响, 尤其是大量排放口密集排放, 形成数公里的污染带, 破坏水环境并影响供水安全。

## 1.2 河流数值模拟研究进展

### 1.2.1 数值模拟技术研究进展

河道及水库工程规划设计往往需要借助于河流模拟手段, 进行水流运动、河床冲淤变形、污染物浓度扩散的定量和定性评估, 逐渐使数学模型成为研究河道水流、泥沙和水环境问题的重要方法和手段, 并在理论上和实践上得到补充和完善。随着计算机技术的发展, 数学模型在水利水电科研工作中发挥着越来越大的作用, 相对实体模型而言, 其优点在于经济、周期短、不受场地限制等。国外河流数值模拟研究已到了商业化应用阶段, 已研制出 MIKE、DELFT3D、SMS、FAST2D 等商业化软件。国内开始河流数值模拟的研究相对较晚, 目前国内许多科研机构及高校均研制了自己的模型, 但能通用化、商业化应用的较少, 以下就国内外研究进展进行介绍。

#### 1.2.1.1 水沙模型

目前, 一维模型较成熟, 二维模型已得到广泛应用, 三维模型在完善之中。以下主要对二、三维模型进行介绍。

##### 1. 二维模型

平面二维模型在工程计算中应用较为普遍。在国内, 许多学者均进行了相关研究。例如周建军、林秉南<sup>[19]</sup>于 1991 年建立了平面二维泥沙输移数学模型; 陆永军<sup>[20]</sup>对在航道整治工程局部水流结构及河床冲淤有较深入的研究; 赵明登<sup>[21]</sup>对二维泥沙模型及工程应用进行了探讨; 槐文信<sup>[22]</sup>建立了河道及分蓄洪区的二维洪水演进模型; 钟德钰<sup>[23]</sup>等考虑横向环流输沙及河岸冲刷变形对平面二维模型进行了扩展; 刘士和<sup>[24]</sup>基于两相流理论建立了低浓度挟沙水流运动数学模型。在国外, 也研制了大量成功的二维模型, 如荷兰 Delft 实验室的 Van Rijn 模型<sup>[25]</sup>、丹麦 DHI 水利所的 MIKE21 模型<sup>[26]</sup>、德国 Karlsruhe 大学的

FAST 2D 模型、美国密西西比大学水科学计算中心的 CCHE2D 模型等。目前, 河流水沙输移理论还不够完善, 大多数平面二维泥沙模型计算方法还是借用一维模型概念, 如河道水流挟沙力、泥沙恢复饱和系数等。但经过实测资料的率定后, 其模拟成果可基本满足生产实践的需要。

## 2. 三维模型

三维泥沙模型起步于 20 世纪 80 年代, 其标志性成果是 1986 年 McAnally 等<sup>[27]</sup>的河口泥沙模型和 Wang、Adeff<sup>[28]</sup>的河流泥沙模型。Van Rijn<sup>[29-30]</sup>于 1987 年建立了一个组合式的三维泥沙模型, 其中水位由平面二维模型计算, 流速垂线分布采用对数流速分布公式得到。Demuren-Rodi<sup>[31]</sup>于 1986 年采用  $k-\epsilon$  紊流模式模拟了弯道中的污染物扩散运动; 后来, Demuren 将这一模式拓展应用于悬移质输移的模拟<sup>[32]</sup>和弯道处推移质运动的模拟<sup>[33]</sup>。Shimizu<sup>[34]</sup>于 1990 年采用三维泥沙数学模型对弯曲河道模型试验中的泥沙输运进行了模拟。Frenette 等<sup>[35]</sup>于 1992 年建立了一个只考虑泥沙淤积的三维泥沙模型, 对点源泥沙从上游向下流的扩散和沉积进行了模拟。Prinos<sup>[36]</sup>于 1993 年采用三维模型, 模拟了复式断面明渠中悬移质输移过程, 并分析了等流速线、含沙量和紊动扩散之间的相互关系及其对泥沙输移的影响。Wang, Jia<sup>[37]</sup>于 1995 年开发了 CCHE3D 模型, 主要用于平原河流中水沙输运和河床变形的模拟, 尤其是桥墩局部冲刷问题的模拟。此后, Lin、Falconer<sup>[38]</sup>于 1996 年建立了河口水沙三维模型; Olsen 等<sup>[39-40]</sup>建立三维模型, 模拟分沙器周围的泥沙输移和冲刷; Gessler、Hall 等<sup>[41]</sup>于 1999 年利用美国工程兵团研制的 CH3D、CH3D-SED 模型, 计算弯道上的河床冲淤。21 世纪以来, Wu、Rodi 等<sup>[42]</sup>于 2000 年建立了一个河道水沙三维模型。另外, ECOMSED<sup>[43]</sup>三维水沙模型在近年来也获得了广泛的应用, 它能够处理黏性沙和非黏性沙输移。Oslen<sup>[44]</sup>于 2003 年使用基于非结构网格的三维模型, 模拟了实验的小弯道冲淤演变过程。

国内三维泥沙模型发展较晚, 周华君<sup>[45]</sup>于 1992 年建立了曲线网格上的三维泥沙模型, 并应用于长江口计算; 方红卫等<sup>[46-47]</sup>于 2000 年建立了非正交曲线网格上的三维不平衡输沙悬沙模型, 模拟了三峡水库近坝段的河床淤积过程; 夏云峰<sup>[48]</sup>于 2002 年建立了感潮河道的二、三维潮流泥沙数学模型; 陆永军等<sup>[49]</sup>于 2003 年以窦国仁紊流随机理论为基础<sup>[50]</sup>, 建立了三维悬沙数学模型, 并用于计算长江上游局部河段的河床冲淤计算; 黄国鲜<sup>[51]</sup>于 2006 年建立了三维模型, 并对弯曲与分汊河型转化的物理机理进行了模拟研究; 冯小香、张小峰<sup>[52]</sup>于 2006 年建立了三维泥沙模型, 模拟了水库坝前冲刷漏斗; 刘士和<sup>[53]</sup>在《工程湍流》一书中对两相流三维水沙及浓度场数学模型的建立与应用进行了详细的论述。

## 3. 复合模型

为减少计算量, 许多学者对复合数学模型(又称为嵌套模型)也进行了研究。在国内, 黄群、姜加虎<sup>[54]</sup>于 1998 年较早应用嵌套模式研究了马山区围垦对梅梁湖风生流的影响。张修忠、王光谦<sup>[55]</sup>于 2001 年对河道作一维简化, 对口外海域作二维处理, 建立了河道及河口的一、二维嵌套模型, 对嵌套连接条件等问题进行了研究。张蔚、严以新等<sup>[56]</sup>于 2006 年利用三级联合解法, 建立了珠江三角洲河网区一、二维非恒定流嵌套模型。在国外, Dallimore 等<sup>[57]</sup>于 2003 年实现了潜流模型与三维河口湖泊模型的复合, Carr、



Smith<sup>[58]</sup>于 2006 年嵌套了一维 MOUSE 模型和二维 MIKE 21 模型, Bolle 等<sup>[59]</sup>于 2006 年嵌套了一维 SOBEK 模型和二维 Delft FLS 模型, 实现了下水道网络与自由水面水流之间的整体计算, 类似的 Leandro<sup>[60]</sup>等 (2009) 的工作。

在二、三维复合模型研究方面, 国内外研究则较少, 少数的二、三维复合模型研究仅限于水流计算, 且通常为自由水面模型与较简单的非自由水面模型的复合, 如尹则高等<sup>[61]</sup>于 2008 年建立宽浅河道二维与管道水流三维的嵌套模型, 对嵌套连接和初、边界条件等进行了研究。

### 1.2.1.2 分蓄洪区模型

#### 1. 溃口发展研究现状

目前, 对于分洪溃口口门展宽过程的模拟有以下方法: 利用溃口实测资料, 建立经验公式的方法<sup>[62-63]</sup>; 数值计算方法, 梁林等<sup>[64]</sup>应用数值计算方法对堤防溃口口门的横向展宽进行了模拟, 取得了较好的结果。

采用经验公式的方法模拟分洪口门的展宽过程, 方法尽管简单, 但具有很大的局限性: 只能在资料来源的范围内适用; 不能考虑到分洪口门的几何形态、土体特性对口门展宽过程的影响; 不能考虑到口门冲刷、崩塌时内在的力学机理。

蓄滞洪区分洪口门横向冲刷与崩塌过程是一个力学问题, 因此以力学分析方法为基础, 采用数值计算方法能较好地模拟分洪口门展宽过程。Osman 等<sup>[65-66]</sup>提出了黏性土河岸的概化冲刷模型, 该模型既考虑了近岸水流对河岸的横向冲刷作用, 也考虑了河岸在重力作用下的失稳崩塌过程, 但该模型仅考虑床面冲刷时河岸的稳定性分析, 而没有考虑床面淤积时岸坡的稳定问题, 实际应用中受到一定的限制。夏军强等<sup>[67-70]</sup>对该方法进行改进, 并将改进后的模型应用于黏性土河岸的横向冲刷计算。该方法对黏性土河岸横向展宽模拟较为理想, 梁林等人第一次将其应用到对堤防溃口口门的横向展宽的模拟, 并对黄河溃堤口门展宽过程进行了计算, 取得了较为理想的结果。

#### 2. 分洪区洪水演进模型研究现状

国内许多学者曾开展过分蓄洪区洪水演进问题的研究, 如武汉大学的余明辉、张小峰<sup>[71]</sup>, 建立了分蓄洪区洪水演进数学模型, 模型基于矩形网格, 采用有限体积法或有限差分算法; 王嘉松<sup>[72]</sup>采用基于矩形网格的有限差分算法对局部溃坝水流演进问题进行了研究; 王志刚<sup>[73]</sup>采用基于矩形网格的有限体积对局部溃坝水流研究问题进行了研究; Delis<sup>[74]</sup>对一些明渠中溃坝水流模型进行了评价和分析; Macchione 和 Morelli<sup>[75]</sup>提出了用于求解溃坝水流的 MacComack 格式, 此格式分预测与校正两步实现: 预测步用空间后差, 校正步对平均解按通量前差校正, 也可预测步采用前差, 而校正步用后差, 或者奇偶时间步轮流执行以上两种方案。国外许多商业化的软件也具备了分蓄洪区洪水演进功能, 如丹麦 DHI 水环境研究所研制的 MIKE - Flood 模型能进行分蓄洪区洪水演进的一、二维嵌套研究; 美国密西西比大学研制的 CCHE - Flood 能进行溃坝后的洪水演进研究等。但以上模型大都采用结构化网格, 且仅针对分蓄洪区水流问题进行模拟, 未考虑泥沙输移和河床冲淤问题。

### 1.2.1.3 温度场模型

随着河流上大量热电厂的修建, 电厂温排水带来的环境和生态问题越来越严重, 国内



外对电厂温排水的研究一直是一个热点。美国学者从 20 世纪 70 年代就开始了温排放流场和水质变化的研究, Beer 等就 Michigan 湖的温排放进行了环境影响的研究工作, 1975 年 Louisville 大学开始预测温排放的温度分布。Demuren<sup>[76]</sup>1983 年进行了明渠的侧向排放实验。Lin BinLiang<sup>[77-78]</sup>于 1996 年建立了河口和海湾的平面二维模型对英国的 Humber 湾进行了污染物浓度场的计算。Sladkovich<sup>[79]</sup>于 2000 年进行了平面二维浅水水生态环境模拟。Rueda - Valdivia<sup>[81]</sup>于 2001 年建立了三维湖泊模型, 并对 Oaks 湖进行水温模拟。沈永明<sup>[81-82]</sup>建立了近海水域盐度、温度、浓度等多组分相互耦合的三维湍流模型, 分别对英国的 Cardiff 湾、日本的博多湾、中国香港的维多利亚港和大连湾的水环境进行了模拟, Francois boulot<sup>[83]</sup>对英吉利海峡法国电厂温排水进行了模拟, John<sup>[84]</sup>对核电厂温排水进行了模拟。

我国学者从 20 世纪 80 年代开始着手相关研究, 到现在已经有了比较长足的发展。倪浩清<sup>[85]</sup>建立了大尺度水域深度平均的湍流水环境模式, 并应用于温排水的模拟。1995 年华祖林进行了电厂温排放对感潮河段环境水体影响的预测研究, 分别采用了二维水流水质数值模拟和物理模型方法<sup>[86]</sup>; 1996 年吴碧君等<sup>[87]</sup>和余明辉等<sup>[88]</sup>分别采取二维水流水质方程, 应用剖开算子法求解电厂温排放的温升分布; 1998 年韩康<sup>[89]</sup>等运用嵌套方法模拟计算了三亚电厂附近海域潮流, 给出了三亚电厂温排水的温升场特征值; 徐啸等<sup>[90]</sup>采用三角形网格显式有限节点法计算了漳州后石电厂温排放流场和温升; 邹金安等<sup>[91]</sup>进行温排放二维计算, 利用窄缝法处理动边界建立了风潮耦合模型预报大港电厂温排放对受纳海域的影响; 1999 年罗斌等<sup>[92]</sup>在三角形网格基础上建立了温排放的有限节点法预测计算模型, 并用滑动边界条件处理水位的变化问题; 2002 年陈华<sup>[93]</sup>利用平面二维数学模型对后石电厂海区做了流场和温度场的数值模拟; 2003 年李振海等<sup>[94]</sup>进行二维数值计算, 动量方程的对流项采用迎风格式, 扩散项采用中心差分格式, 连续方程与热输运方程采用控制体积法解出了大亚湾填海工程实施后惠州 LNG 电厂温排放的流场和温升场; 吴海杰等<sup>[95]</sup>通过建立二阶 Osher 格式水流-温度模型, 对大唐吕四港火电厂一期工程温排水进行了数值模拟; 郝瑞霞<sup>[96]</sup>等结合拟建的深圳前湾电厂冷却水工程实际, 对电厂温排水排入附近海域的流速场和温度场进行了平面二维数值模拟; 朱军政<sup>[97]</sup>采用沿水深平均二维水动力及物质输运数值模型进行强潮海湾流场、温度场的计算, 分析了温排水在不同因素影响下的温升包络面积、取水口温升变化的特点, 分析了网格尺寸大小及综合海面散热系数对温升的影响。在三维温度场研究方面, 杨纯等<sup>[98]</sup>采用简化的三维模型, 预测辽西(高岭)电厂温排水受纳水域的流场和温度场; 黄平<sup>[99]</sup>提出了一种准三维的温排水数值模型; 1997 年王丽霞等<sup>[100]</sup>建立了三维热扩散预测模型, 对黄岛电厂温排放进行了模拟计算; 2004 年郝瑞霞等<sup>[101]</sup>采用浮力修正的  $k-\epsilon$  湍流模型, 以准三维离散型边界拟合坐标变换下的控制体积法, 进行了滨海电厂冷却水工程的潮汐水流和热传输的数值模拟; 2006 年王一航等<sup>[102]</sup>基于 POM 模式, 对北海近岸的庄河电厂附近海域进行了潮汐潮流和温排水三维数值模拟; 孙艳涛等<sup>[103]</sup>于 2008 年采用平面二维温排水数学模型, 对河道电厂温排水进行了模拟计算; 周成成等<sup>[104]</sup>于 2008 年采用曲线坐标系平面二维温排水模型, 对内河电厂温排水进行了数值模拟; 张晓艳等<sup>[105]</sup>于 2011 年采用平面二维温排水数学模型, 对滨海电厂不同取排水布置方案进行了模拟; 2011 年陈沐松<sup>[106]</sup>等采用 MIKE21 模型, 对常州某



垃圾电厂进行了温排水影响的模拟；贺益英<sup>[107-108]</sup>和黄艳<sup>[109]</sup>等就温排水对水环境的影响及对策进行了分析研究。总之，国内外在温排水数学模型研究方面应用较多的还是远区模式的二维模型，也有少量模拟取排水口局部的三维模型，大范围的全场三维模型还受到计算量大等因素的制约。

#### 1.2.1.4 水质模型

对于水质安全的问题，国内外开展了大量的研究。

在研究内容上，新的取水口建设或者取水口改造，均需要对取水口水质进行论证，分析径流量、上游来水水质、污染负荷控制对取水口的水质影响，从而论证设置取水口的合理性。在取水口附近涉水工程建设的环境影响评价中，需要对工程建设施工期和运行期对于取水口的可能影响进行论证和分析，并提出必要的防治补救措施。

在研究方法上，现场监测、理论分析和模型预测成为研究水质问题的主要手段。我国的城市水环境监测建设已经十分完备，具有现代化的监测手段和大量的实施监测数据，对这些海量数据进行有效的分析整理和计算，提出合理的污染物控制和治理措施，是目前环境监测工作者的一项重要课题。此外，污染物进入水环境后，由于物理、化学和生物作用的综合效应，其行为的变化是十分复杂的，很难直接认识它们。这就需要用水质模型（水环境数学模型）对污染物水环境的行为进行模拟和预测，以便给出全面而清晰的变化规律及发展趋势。用模型的方法进行模拟和预测，既经济又省时，是水环境质量科学决策的有效手段。经过几十年的发展，河流水质模型由早期的简单 SP 模型到现在的大型生态动力学模型，已经形成了多套大型商业软件，例如 QUAL 系列、EFDC、WASP 等等，在水质管理、评价中发挥着重要的作用。水质模型在理论上从最初的质量平衡原理发展到现在的随机理论、灰色理论和模糊理论；在实际应用上，从最初的城市排水工程设计发展到现在的污染物水环境过程模拟、水环境质量评价、污染物水环境行为预测、水生物污染暴露程度分析和水资源科学管理规划等水环境保护的各个方面；在研究方法上，从最初的解析解和浓度表达发展到现在的以人工神经网络模拟辅助解析及与地理信息系统相结合的数值解和逸度表达法。这些成果都极大地推动了水环境管理技术的现代化。

尽管如此，水质模型还有其局限性，主要体现在：水质污染机理还有许多不清楚之处，很多过程难以用数学方法表达、模拟，建模时必须经过一定程度的概化，容易失真；模型复杂，导致许多参数难以准确地度量 and 估值，参数的随机性也会引起结果的不确定性。随着人们对水质变化机理的认识和研究范围的不断扩大，水质模型研究的参数和状态变量越来越多，参数的选取和确定是制约很多大型水质模型在实际应用的关键因素。

因此，从水质模型的使用上来讲，一般都是针对具体的水环境问题（水质指标、关键影响参数等）建立起针对性的模型，然后经过实测数据的率定和验证，再进行相应的预测分析。

### 1.2.2 国内外相关机构研究进展

#### 1.2.2.1 国内研究进展

与国际先进水平相比，国内水流泥沙数学模型及计算机应用虽然起步较晚，但开发和