

闸控大型河网水量水质 耦合模拟及水环境预警

陈炼钢 施 勇 钱 新 著



科学出版社

闸控大型河网水量水质 耦合模拟及水环境预警

陈炼钢 施 勇 钱 新 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书着眼于通过多学科、多模型、多方法的交叉集成来解决流域级闸控大型河网水量水质耦合模拟及水环境预警的复杂问题。内容贯穿了基本理论的介绍、模型的实证构建、模型在水污染事故应急预警与调度中的应用,以及以模型为核心的流域水环境预警平台的开发:①构建了具有自主知识产权的闸控大型河网水文-水动力-水质耦合数学模型;②选择淮河流域中游河网进行了模型的实证建模;③通过模型预警分析优选出了最佳的水污染事故应急调度方案;④以闸控大型河网水文-水动力-水质耦合数学模型为核心研发了基于 WEBGIS 的淮河流域水环境预警与管理系统。

本书可供水量水质模拟、水环境预警等领域的科技人员阅读,亦可供水利、环保主管部门及流域管理机构等负责水资源与水环境保护的管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

闸控大型河网水量水质耦合模拟及水环境预警 / 陈炼钢, 施勇, 钱新著. —北京: 科学出版社, 2013. 11

ISBN 978-7-03-038977-0

I. ①闸… II. ①陈…②施…③钱… III. ①拦河闸-作用-河流-水流量-耦合系统-模拟系统-控制系统-研究②拦河闸-作用-河流水质-耦合系统-模拟系统-控制系统-研究③拦河闸-作用-水文环境-耦合系统-模拟系统-预警系统-研究 IV. ①TV131.1②X824③X143

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 255678 号

责任编辑: 杨向萍 谷 宾 / 责任校对: 宣 慧

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



*

2013 年 11 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2013 年 11 月第一次印刷 印张: 12 1/2

字数: 249 000

定价: 65.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

闸坝的建设与运用对河流生态环境产生胁迫,已成为水利、环境、生态等领域的共识。如何减轻闸坝的胁迫效应、实现闸坝等水利工程的低环境影响利用,是当前学术界和工程界的热点和难点问题。近年的探索性实践表明,最现实可行的途径是改善传统的水库闸坝调度模式,即采用“生态调度”。当前我国水利工程的生态调度以恢复和改善河流水质为阶段目标,其前提是科学定量评估闸坝等水利工程的水文环境效应。构建适应多闸坝河流的水量水质耦合数学模型则是进行定量评估的基础,可为制订闸坝生态调度方案提供科学依据;同时该模型也是进行河流水质预警预报的核心工具,在此基础上开发的水环境预警平台,可为流域水污染事件的应急响应提供技术支撑。

本书针对闸控大型河网水流水质问题的复杂性,对水文、水动力、水质等多学科涉及的与河流水量水质模拟相关的模型、方法进行了交叉集成研究,构建了闸控大型河网水文-水动力-水质耦合数学模型(DHQM);并选择我国多闸坝重污染河流的典型代表——淮河流域中游河网进行了模型的实证建模和应用;在此基础上研发了基于WEBGIS的淮河流域水环境预警与管理系统,并在淮河流域水资源保护局实现了业务化运行。全书共6章,主要内容安排如下:

(1) 第1章,概要论述了闸坝的正负效应,初步梳理了国内外河流水量水质数学模型及流域水环境预警等领域的研究概况,并概要介绍了研究区域——淮河中游的基本情况。

(2) 第2章,针对闸控大型河网水流水质特点以及复杂的实际问题,从理论上构建了一二维嵌套、分块组合的闸控大型河网水文-水动力-水质耦合数学模型。

(3) 第3章,针对淮河流域中游河网,基于DHQM的水量数学模型,构建了分块组合、一二维嵌套的淮河中游河网水量数学模型,并对模型进行了率定检验。

(4) 第4章,基于DHQM的水质数学模型,构建了与淮河中游河网水量数学模型相耦合的分块组合、一二维嵌套的淮河中游河网水质数学模型,并对模型进行了率定检验。

(5) 第5章,针对一具有典型代表性的虚拟水污染事故,应用淮河中游河网水文-水动力-水质耦合数学模型预警分析了多种水情组合及闸坝调度方案下事

故污染团下泄对下游水质及水源地取水安全的影响，并优选出了最佳的水量水质联合应急调度方案。

(6) 第6章，针对淮河流域中游河网，以 DHQM 为核心，采用 J2EE 的 SSH 框架集合，融合 GIS 技术、WEB 技术、富互联网应用技术和 Google 的互联网地图资源，研发了基于 WEBGIS 的流域水环境预警与管理系统平台。

本书的研究得到了国家水体污染控制与治理科技重大专项“淮河-沙颍河水质水量联合调度改善水质关键技术研究”(2009ZX07210-006)、国家自然科学基金青年科学基金项目“闸坝对河流水文连续性的时空影响规律研究”(51209137)和水利部公益性行业科研专项“淮河流域水环境安全保障关键技术研究”(201001015)的支持；在上述项目的研究过程中，得到了淮河流域水资源保护局、淮河水利委员会水文局、中国科学院地理科学与资源研究所、清华大学、南京大学、武汉大学、郑州大学、星球数码科技有限公司等单位诸多领导和专家的大力帮助和指导；本书的出版还得到了南京水利科学研究院出版基金的资助，在此一并深表感谢！

由于闸控大型河网水环境问题极为复杂，限于作者水平，书中疏漏在所难免，请各位读者指正。

作 者

2013 年 8 月于南京

lgchen81@gmail.com

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究概况	3
1.2.1 河流水量数学模型研究概况	4
1.2.2 河流水质数学模型研究概况	8
1.2.3 河流水量水质数学模型耦合研究概况	11
1.2.4 流域水环境预警研究概况	11
1.2.5 存在的主要问题	11
1.3 研究区域简介	12
1.3.1 河流水系概况	12
1.3.2 水资源概况	14
1.3.3 社会经济概况	14
1.3.4 水利工程概况	15
1.3.5 水环境概况	16
1.3.6 水资源及水环境问题	18
1.4 主要研究内容	19
第2章 闸控大型河网水文-水动力-水质耦合数学模型	22
2.1 模型整体框架	22
2.2 河道径流模拟模块	24
2.2.1 一维河网水动力学模拟	24
2.2.2 径流演进水文学模拟	30
2.2.3 平面二维水动力学模拟	32
2.3 闸坝调度过程模拟模块	37
2.3.1 基本方程	37
2.3.2 数值算法	38
2.4 河道水质模拟模块	43
2.4.1 基本方程	43
2.4.2 一维河网水质模型数值算法	47

2.4.3 平面二维水质模型数值算法	49
2.5 区间入流及入河污染负荷估算模块	51
2.5.1 区间入流过程估算	51
2.5.2 区间入河污染负荷过程估算	51
2.6 水质预警实时校正模块	53
第3章 实证建模 I：淮河中游河网水量数学模型	56
3.1 模型结构	56
3.2 河道地形	62
3.2.1 一维模型地形	62
3.2.2 二维模型地形	63
3.3 模型参数	65
3.3.1 一维河网水量模拟模型参数	65
3.3.2 平面二维水动力模拟模型参数	68
3.4 一维河网水量模拟模型验证	69
3.4.1 模型率定	69
3.4.2 模型检验	73
3.4.3 精度评定	78
3.5 平面二维水动力模拟模型验证	81
3.5.1 模型率定	81
3.5.2 模型检验	83
3.5.3 精度评定	88
第4章 实证建模 II：淮河中游河网水质数学模型	89
4.1 模型结构	89
4.2 模型参数	89
4.2.1 综合扩散系数	91
4.2.2 生化降解系数	93
4.3 一维河网水质模拟模型验证	94
4.3.1 模型率定	94
4.3.2 模型检验	98
4.3.3 精度评定	102
4.4 平面二维水质模拟模型验证	104
4.4.1 模型率定	104
4.4.2 模型检验	109
4.4.3 精度评定	115

第5章 模型应用：水污染事故应急预案与调度	118
5.1 水污染事故情景设置	118
5.2 方案Ⅰ——前期大流量快速下泄	119
5.2.1 淮干来水偏枯 ($Q=100\text{m}^3/\text{s}$)	119
5.2.2 淮干来水中等 ($Q=200\text{m}^3/\text{s}$)	121
5.2.3 淮干来水充沛 ($Q=300\text{m}^3/\text{s}$)	123
5.2.4 对比分析	125
5.3 方案Ⅱ——后期大流量快速下泄	126
5.3.1 淮干来水偏枯 ($Q=100\text{m}^3/\text{s}$)	126
5.3.2 淮干来水中等 ($Q=200\text{m}^3/\text{s}$)	128
5.3.3 淮干来水充沛 ($Q=300\text{m}^3/\text{s}$)	130
5.3.4 对比分析	132
5.4 方案Ⅲ——小流量慢速下泄	133
5.4.1 持续下泄	133
5.4.2 分期下泄	134
5.4.3 对比分析	135
5.5 应急调度方案优选	135
第6章 流域水环境预警与管理系统平台	137
6.1 系统架构	137
6.1.1 逻辑架构	137
6.1.2 技术框架	138
6.2 系统开发平台及关键技术	139
6.2.1 J2EE	139
6.2.2 FLEX	141
6.2.3 GIS	142
6.3 系统数据库	144
6.3.1 属性数据库	146
6.3.2 空间数据库	146
6.4 系统功能	146
6.4.1 水环境信息的数字化管理	147
6.4.2 水环境实时预警	148
6.4.3 水环境调度预警	151
6.4.4 成果展示	154
6.5 应用案例——2004年7月淮河流域特大水污染事故仿真	156

6.5.1 水情再现成果	157
6.5.2 水质再现成果	162
6.6 应用案例——2012 年 7 月上中旬水情水质过程预警	168
6.6.1 水情预警成果	169
6.6.2 水质预警成果	175
参考文献	179
后记	187

第 1 章 绪 论

闸坝等水利工程在发挥防洪、供水、灌溉、发电、航运等巨大社会效益的同时,由于其调蓄功能对河流水文情势的改变,进而驱动物质输移、生态环境及生物群落发生演变,导致河流生态环境系统出现一系列的负面效应,这已成为水利、环境、生态等领域的共识。如何减轻闸坝的胁迫效应、实现闸坝等水利工程的低环境影响利用,是当前学术界和工程界的热点和难点。闸控河流水量水质耦合数学模型是量化闸坝水文环境效应的基础工具,可为进一步制定闸坝生态调度方案提供科学依据,同时也是进行河流水质预警预报的核心手段。

1.1 研究背景及意义

随着全球经济的快速发展,为满足人类社会对水资源日益增长的需求,闸坝等水利工程的数量从 20 世纪中期开始急剧增加,到 20 世纪 70 年代达到顶峰,全球平均每天有 2~3 座大坝竣工。据国际大坝委员会统计,截至 2003 年全世界高于 15m 或库容大于 100 万 m^3 的大坝总数为 49697 座^[1],水闸至少有 80 万座^[2]。其中,我国 15m 以上大坝占世界一半,水闸多达 5 万余座,位居全球第一^[1,3]。世界水资源所调查表明:在全世界 106 个流域中,46% 的流域至少拥有一座大坝;大坝控制了美国和欧盟领土 60%~65% 的河流;在亚洲,近一半的河流受到闸坝影响,而且不止一座^[4]。

水库、闸坝等水利工程的建设和运用,在防洪、供水、灌溉、发电、航运等方面发挥着巨大的功效,在支撑人类社会经济发展方面具有不可替代的作用。目前,洪水依然是世界上最频繁、危害最大的灾难之一。1992~1996 年,洪水平均每年影响 6500 万人的正常生活^[5],危害超过其他任何灾难。筑坝可以拦蓄部分洪水,削减破坏性洪峰,从而减轻水库下游的洪水损失。当前全球 30%~40% 的灌溉区用水依赖水利设施,世界 50% 的水闸是专门或主要为灌溉而修建的,灌溉农业产量占世界农业产量的 40%^[6],为全球粮食安全作出了巨大贡献。随着世界人口的持续增长,修建水库、闸坝等水利工程是保证可靠供水的一条主要途径,可以满足高速增长的城市生活和工业需要。作为低成本、可再生的低碳能源,水电被人类接受并提倡。特别是在全球气候变暖的今天,水电占世界电力供应的 19%,全球 150 多个国家开发了水电^[6]。与公路、铁路及航空相比,航运是

最经济且污染最小的运输方式，河道修建水库闸坝后，航运条件改善，航运期增长，通航能力大大提高。

由于事物两面性和人类认识阶段局限性的客观存在，闸坝等水利工程在发挥巨大社会经济效益的同时，也给河流生态环境系统带来一定影响，主要表现为以下三类变化：①水文、水质及泥沙的改变；②由第一类变化导致的河流形态、藻类等初级生产力的变化；③由第一、二类变化导致的大型无脊椎动物群落及其他生物的变化^[7]。其中，水利工程对河流水文及水质的影响是最直接的，也是其他所有生态环境效应的基础。水库、闸坝等水利工程影响河流系统的源动力，来自于其调蓄功能对河流水文情势的改变，进而驱动物质输移、生境及生物群落发生演变，最终导致河流生态环境系统出现一系列的负面效应。闸坝调控对河流水文情势的改变主要表现在坝上下游水位不连续、坝上水位抬高；径流季节性分配均化、洪枯水流量变幅减弱；洪峰坦化、洪水历时延长，一些小的洪水过程甚至消失，河流水文极值出现的频率大大减少；闸坝调控引起的坝上下游水位、河流流量及水文极值的变化，将直接导致河流流速发生变化，坝上流速显著降低，下游近坝河段流速加大；此外，闸坝的调节常使坝下河段高低流量频繁变化，闸门开启下游流量增加，闸门关闭下游流量减小，且流量变幅较大，坝下河段径流高低脉冲频繁出现^[8]。闸坝等水利工程对河流水文情势的改变，直接伴随的就是河流污染物质迁移转化规律的改变以及污染负荷在河道中时空分布的变化。闸坝阻断了污染物质通量在上下游之间的连续性，坝上水体流速减慢，滞留时间增长，有利于污染物质沉降。原本可以输送出流域的污染物质大量沉积于坝上，一定条件下污染物质再悬浮易导致水体二次污染；此外，营养盐的大量积累有利于藻类生长，易导致富营养化；另外，坝上流速的减小降低了水气界面交换速率和污染物质的迁移扩散能力，坝上水体自净能力减弱，进而影响到河流的纳污能力。根据长江水利委员会提交的三峡库区纳污能力和限制排放总量计算结果，库区水体的纳污能力随着三峡水库蓄水位升高而不断降低^[9]。此外，针对水资源短缺、环境保护滞后且径流年内变化剧烈的多闸坝流域，非汛期闸坝关闸蓄水，闸下河道长期处于断流状态，成为排污通道，水质污染严重；闸上蓄水在不断重复利用的过程中持续接纳随退水而带入的污染物质，水质从汛末初蓄时的良好不断恶化，逐步演化成重污染水体；进入来年汛期后，闸蓄重污染水体随洪水集中下泄形成高浓度污水团，频频引发全流域水污染事件，对河流生态环境造成灾难性后果。位列我国十大水污染事件之首的淮河水污染事件就是这一问题的典型。

目前所观测到的闸坝等水利工程对河流生态环境的胁迫，有一部分是不可避免的；但更多是由于人类认识阶段的局限性，导致以往水利工程的建设和运用忽略了河流处于一个完整的自然-社会-经济复合生态系统中这一基本事实，孤立

地强调人类的需求、轻视甚至忽略了自然生态环境系统的需求,其结果是在给人类带来巨大经济利益的同时,给河流生态环境系统造成胁迫^[10]。人类的生存离不开水利工程,任何事物的存在都是利弊相依的,绝不能因为闸坝对河流生态环境系统的负面影响就因噎废食,一味地反坝和拆坝。但也必须正视其不利效应,想方设法减轻闸坝等水利工程对河流生态环境系统的胁迫。目前最现实可行的途径是改善传统的水库闸坝调度模式,采用“生态调度”^[11, 12]。水利工程生态调度,是指水库闸坝在实现防洪、发电、供水、灌溉、航运等社会经济目标的同时,兼顾河流生态环境系统需求的调度方式;既要满足人类对水资源的需求,又要尽量满足生态环境系统的需水要求^[11, 13]。国内外已经开展的水利工程生态调度初步实践,证明其对河流生态环境系统的恢复与保护作用非常明显^[14-17],是改善河湖水系连通性的重要非工程措施,是水利工程可持续利用的发展方向,相关领域的研究已经成为当前国际研究的前沿和热点。河流生态环境系统恢复与保护的发展阶段总体上可以分为水质恢复阶段和生态恢复阶段,生态恢复是在水质恢复的基础上进行的。我国河流水质恶化趋势还未得到全面有效遏制,河流生态环境系统恢复与保护工作总体上还处于水质恢复与改善阶段,全面进入河流生态恢复建设尚待时日。因此,当前我国水利工程生态调度的阶段目标是恢复和改善河流水质^[10]。

针对当前我国水利工程以恢复和改善河流水质为阶段目标的生态调度,其前提是科学定量评估闸坝等水利工程的水文环境效应,而构建适应多闸坝河流的水量水质耦合数学模型则是进行定量评估的基础。在此基础上,闸坝生态调度模式的制定,也需要多闸坝河流水量水质耦合数学模型作为核心工具,定量研究一系列调度方案对河流水质的影响,为优选出最有利于恢复和改善河流水质的闸坝调度方案提供科学依据。此外,为有效应对多闸坝重污染河流闸蓄污水洪污遭遇频频引发全流域特大水污染事件这一严峻的现实问题,也迫切需要研究适应闸控大型河网的水量水质耦合数学模型。并以此为核心研发相应的水环境预警平台,在事故不可避免地发生之后,能快速定量预报事故污染团的时空推移变化,对流域重点城市、水源地、生态保护区等敏感点或敏感区做出预警,为采取有效的应急响应措施提供科学依据,最大程度控制事故的影响范围和减轻事故危害后果。

1.2 国内外研究概况

污染物进入河流后随水流运动,在运动过程中受到水力、水文、物理、化学、生物、生态、气候等因素的影响,引起污染物的对流、扩散、混合、稀释和降解^[18]。河流水量水质耦合数学模型就是研究水流及其携带的污染物质在河道

中运动规律的基本数学工具。自 1871 年圣维南建立一维非恒定水流运动方程、1925 年 Streeter-Phelps 提出 DO-BOD 氧平衡模型, 水量水质耦合模型从一维到二维和三维、从单一河道到河网、从单一组分到多组分相互作用再到包含生态学过程的发展非常迅速^[19]; 随着计算机及信息科学的高速发展, 水量水质耦合数学模型的应用也越来越广泛, 已成为流域水环境管理必不可少的基本工具。

1.2.1 河流水量数学模型研究概况

从建模采用的学科方法来划分, 河流水量数学模型可以分为两类: ①基于水文学方法的河流水量数学模型; ②基于水动力学方法的河流水量数学模型。下面分别对其研究概况予以简述。

1.2.1.1 基于水文学方法的河流水量数学模型

基于水文学方法的河流水量数学模型主要可以分为两类: ①经验统计模型; ②物理概念模型。

经验统计模型依据对大量的各种各样错综复杂情况下监测数据的统计分析和科学归纳, 并依靠大量预报经验的积累和运用得出系列经验相关关系, 主要包括: 相应水位(流量)法, 建立下游站下一时段水位(流量)与上游站前一时段水位(流量)的相关关系; 合成流量法, 建立上游合成流量与下游流量或洪峰水位的相关关系; 水位(流量)涨差法, 利用河道上下游水位或流量的涨落差建立相关关系^[20-22]。目前, 我国 600 多个水文预报站共拥有近 1000 套基于经验统计模型的实用预报方案, 这些方案既有一定的理论依据, 又有大量实测资料为基础, 能充分结合流域特征, 一般具有较高的预报精度^[20]。经验统计模型实质上是一种黑箱模型, 输入和输出之间的数学关系不用物理规则导出, 模型参数的识别完全依赖于实测的入流、出流资料^[23]。由于经验统计模型依赖的是历史长系列水文资料之间的统计关系, 该类模型的适用条件是水文序列具有一致性。但是随着以人类活动和气候变化为主的环境变化的加剧, 原来的水文序列失去一致性, 原有的经验统计关系也失去了代表性, 导致模型在变化环境下的应用受到的局限越来越大^[20]。

物理概念模型是在一维非恒定流圣维南方程组简化的基础上, 依据河段的水量平衡原理与蓄泄关系把河段上游断面入流过程演算为下游断面出流过程的方法^[22]。该法将河道概化为若干渠道和水库的组合, 以此反映水流在河道中的推移和坦化^[24]。实质上是通过河槽调蓄作用的计算来反映河道水流运动的变化规律。这类模型主要包括: 马斯京根法、特征河长法、扩散波模拟法、滞时演进法以及线性动力波法等^[22]。物理概念模型使用简便、对资料要求不高、适用性强,

目前已成为河道汇流计算中重要的一类方法。在上述几种物理概念模型中,最具代表性的是马斯京根法,它开创了河道流量演算的水文学方法。该法是麦肯锡(MaCarthy)于1938年针对美国俄亥俄州的马斯京根河提出的,已在世界上众多河流的流量演算中得到了广泛的应用。其特点是计算简单、所需资料少、当满足其使用条件时精度令人满意^[25]。自20世纪50年代起,我国对马斯京根法进行了深入的研究,并逐步加以改进,同时在我国7大江河流域的河段流量演算中广泛应用。时至今日,依然有大量的研究在不断改进马斯京根法,并提出了很多优化马斯京根流量演算参数的新方法,如遗传算法^[26, 27]、神经网络^[28]、蚁群算法^[29]、抗差算法^[30]、免疫离子群算法^[31]等。

1.2.1.2 基于水动力学方法的河流水量数学模型

按参数的空间分布特性,水动力学数学模型可分为一维、二维和三维模型。对于河流而言,水深一般较浅,其垂向尺度相比横向尺度和纵向尺度要小很多,因此一般假定水动力要素在垂向上平均分布,将实际复杂的三维水动力学问题简化为平面二维水动力学问题和纵向一维水动力学问题。对于大型流域而言,由于其主要的空间尺度是纵向,再加上计算量的原因,一般从整体上采用一维河网水动力学数学模型计算水流的演进和运动规律;但对于具有侧向入流、排污的局部河段,需要采用平面二维水动力-水质数学模型才能反映侧向入污在达到断面均匀混合之前的空间浓度分布。

1) 一维河网水动力学数学模型

一维河网水动力学数学模型实质上是对一维非恒定圣维南方程组的数值求解,在选择差分格式将圣维南方程组进行差分离散时,有显格式和隐格式两种不同的方法。显式差分法具有易于理解、便于编制计算程序的优点,但由于显式差分是有条件稳定的,因而用这种差分格式来求解河网非恒定流的模型目前应用很少见,现今绝大多数模型采用隐格式来进行河网非恒定流的计算^[32]。在众多隐式离散格式中,Preissmann四点偏心隐式差分格式是使用较为普遍的一种,该格式具有适用于非均匀空间步长、处理边界条件简单、计算稳定性和收敛性好以及显式无迭代求解计算效率高等优点^[33]。一维河网非恒定流水力计算通常有四种数值解法:直接解法、分级解法、组合单元法、松弛迭代法^[34]。

直接解法是早期河网计算中常用的方法,它的基本思想是直接求解由内断面方程和边界方程组成的方程组。该方法未知数较多,在河网规模较大的情况下,所形成的线性方程组的系数矩阵为一极不规则、不对称的大型稀疏矩阵,

存在存储量多、计算量大的问题,从而限制了计算速度的提高。为提高计算效率,需缩小矩阵规模,我国学者李岳生等于1977年提出了河网非恒定流隐式方程组稀疏矩阵解法^[35],该方法能有效地节省存储空间并提高计算速度。然而,该法矩阵中需包含所有断面的未知数,方程规模仍然较大,实际应用受到限制。

分级解法思想首先由荷兰水力学专家 Dronkers 于1969年提出^[36],其基本思想是先将未知数集中到汉点上,待汉点未知数求出后,再将各河段作为单一河段求解;其目的是减少方程组中的变量个数,从而降低需要求解的线性方程组的阶数,以利于存贮及减少运算量。基于这一思想,我国学者张二骏等于1982年提出了河网非恒定流的三级联合解法^[37],将控制方程分为微段、河段、汉点三级,逐级处理,再联合运算,在汉点上仅保留水位或流量一个未知数,求得河网中各微段断面的水位、流量等值;吴寿红于1985年提出了河网非恒定流的四级解法^[38],实质是在三级连接方程组的基础上,通过外河段追赶方程直接消元反代求解,消去边界点上的未知数,仅保留河网内部汉点的未知数;李义天于1997年在分级解法的基础上发展出汉点分组解法^[39],其特点是根据实际工程需要灵活方便地将河网中的汉点分为任意多组,进一步降低线性方程组的阶数;1999年侯玉等提出汉点分组解法的一般理论^[40],利用矩阵的分块计算技术将一般分级解法形成的原汉点水位关系应用于汉点分组,从而简化递推过程。在分级解法中,以节点水位法使用较为普遍,效果也更好。该法先将问题归结为关于节点水位的方程组,然后再求解节点间各断面的水位、流量。

组合单元法是由法国水力学专家 Cunge 于1975年提出的^[41]。其基本思想是将河网地区水力特性相似、水位变幅不大的某一片水体概化为一个单元,取单元几何中心的水位为代表水位,采用谢才公式模拟单元间流量交换,根据水量守恒建立每一单元微分形式的水量守恒方程,离散并得到以单元水位为自变量的代数方程,辅以边界条件即可求出各单元的代表水位及单元间的流量。国内韩龙喜等曾应用此法进行河网地区水力模拟^[42]。组合单元法对河道进行简单概化,以单元为计算单位,计算相对简单,适用于水位、流量变化不大的大尺度水域的水力模拟。但对计算区域内水位、流量变化较大的河网,组合单元法就不再适用。姚琪等将分级解法与组合单元法相结合,提出了兼含这两种方法优点的混合方法^[43]。混合方法的基本思想是将河网的水域分为骨干河道和成片水域两类,对骨干河道采用分级解法,对成片水域则采用组合单元法。同时引入当量河宽的概念,把成片水域的调蓄作用概化为骨干河道的滩地,将其纳入分级解法一并计算。

松弛迭代法是 Fread 于1973年提出的^[44],其基本思想是将河网分解为一条

条单一河道,再对每条河道分别进行求解,求解时对汇流点处各河道的流量先给出预估值,再用松弛迭代方法进行校正,逐步逼近其精确值。这样就将复杂的大型河网水力数值模拟问题简化为一系列单一河道水力数值模拟问题。单一河道采用 Newton-Raphson 方法求解非线性离散圣维南方程组。该法最大的优点是求解的每条单一河道所形成的线性方程组非常简单:系数矩阵都为五对角阵,且每行最多仅有四个非零元素。国内徐小明等对该法进行了较为深入的研究和改进^[34, 45-48]。

在上述4种一维河网非恒定流数值解法中,分级解法特别是其中的三级解法是目前应用最多和最为成熟的算法^[33]。

2) 平面二维水动力数学模型

平面二维水动力数学模型常用的数值计算方法有:有限差分法、有限元法和有限体积法。

有限差分法是流体力学数值解法中最经典且最常用的方法,它是一种直接将微分问题变为代数问题的数值解法。其基本思想是将微分方程中的各个微分项离散成微小矩形网格上各临近节点的差商,得到一个以各节点上函数值为未知变量的代数方程,然后进行求解。有限差分法建立在经典的数学逼近理论的基础上,数学概念直观、表达简单,其解的存在性、收敛性、稳定性已得到充分证明,是较成熟的方法。平面二维水动力数学模型常采用的差分法有交替方向隐格式法(alternating direction implicit method, ADI)和剖开算子法。ADI法是由 Peaceman-Rachford 和 Douglas 于 1955 年同时提出,是一种专门求解二维问题的特殊分步解法^[49]。ADI 法具有显式和隐式两种差分格式的优点,表达式简单,不像完全隐格式那样,每一步都需要通过迭代求解一个大型代数方程组,因而所需内存少,计算量也相应减小。计算过程中没有显格式常常出现的波动现象,具有较好的计算稳定性和精度,因而在河道与河口海岸的二维计算中广泛应用^[50-55]。剖开算子法是由苏联人 Yanenko 等于 20 世纪 50 年代末至 60 年代初提出的,是数值计算中的一种分裂解法^[56]。该法在数学上,是将一个微分算子分裂成多个简单算子的线性组合,在各分步长上分别求这些简单算子的解,从而得到整个步长的数值解。剖开算子法可以将一个复杂的数学物理问题转化为较简单的问题来处理,这在数值处理和计算上带来了许多方便之处。国内何少苓、周建军、王船海、胡庆云、丁道扬、吴时强等都剖开算子法进行了一定的研究和应用^[57-65],取得了较好的效果,同时也指出了该法的一些弱点,如物理现象被解体等。在二维水流数学模型计算中,有限差分法得到了广泛的应用,但其一般只适应于矩形网格,在计算域概化及数值解精度方面存在着一定的困难,若格式不当将引起解的

不稳定甚至出现伪物理现象。

有限元法在流体力学中应用始于 20 世纪 60 年代。其基本思想是：将区域划分成若干任意形状的单元，在单元上用插值函数进行插值，然后用一定的权函数将微分方程离散，得到相应的代数方程组然后求解。常见的有限元计算方法有直接法、变分法、加权余量法和能量平衡法等。其优点是网格划分灵活，可以较好地拟合复杂边界，网格节点可局部加密，稳定性好，精度高，适合于几何、物理条件复杂的问题；缺点是物理意义不是很明确，而且占内存较大，计算时间较长，此外，在误差估计、收敛性和稳定性等方面的理论与有限差分法相比还显得不够成熟和完善。国内谭维炎、韦直林、江春波、李东风、龙江等都采用该方法进行过天然河流水沙运动的模拟计算^[66-72]。

有限体积法是 McDonald 于 1971 年首次用于求解二维欧拉方程的基础上发展起来的^[73]，起初这一算法主要用于空气动力学领域的数值计算，直到 20 世纪 80 年代末期才将其引入浅水流动的模拟中^[74]。其基本思想是：将计算区域离散成不重复的微小控制体积，将基本方程对每一控制体积分，之后结合有限差分法离散积分后的方程式得出一组以计算节点上物理量为未知数的代数方程组并进行求解。有限体积法采用守恒型的积分控制方程，物理意义明确，能在整个计算域上保持守恒，不要求变量的可微性，适于求解含弱解的方程；可采用任意形状的非结构网格单元，能像有限元一样适用于不规则网格和复杂边界情况；形成的离散网格和离散方程接近有限差分法，具备有限差分法离散格式的灵活性和计算的高效率^[73]。我国学者谭维炎、胡四一等在这一领域做出了突出贡献，将空气动力学中一系列高精度、高分辨率的数值计算格式如 FVS、FDS、Osher、FCT、TVD 等应用于一、二维浅水流中的河道明渠流、潮汐流场、弯包溢流、溃坝、堰闸、漫滩和决堤流动计算中，成功地解决了水下地形、床面阻力和边界条件等一系列计算问题，特别是静水压力项和底坡项平衡的“和谐”性问题，获得了满意的结果^[73, 75-83]。

在上述三种常用数值算法中，有限体积法兼具有限差分法离散格式灵活和有限单元法拟合复杂边界能力的双重优势，既能高精度计算光滑流动，又能高分辨率自动捕捉激波，且不产生虚假振动。此方法已成为流体计算领域内最有效和最成功的数值计算方法，并在工程实践中得到广泛应用^[73, 74, 84]。

1.2.2 河流水质数学模型研究概况

自 1925 年 Streeter-Phelps 在 Ohio 河建立河流水质模型以来，水质模型的研究已经历了如下 3 个阶段^[19, 85-87]：①线性系统模型阶段，以氧平衡模型为核心，模型中考虑的水质因子包括 BOD、DO、有机氮、氨氮、亚硝酸盐氮和硝酸盐氮