

地表水环境影响评价 数值模拟方法及应用

NUMERICAL SIMULATION METHOD AND
APPLICATION OF SURFACE WATER
ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT

陈凯麒 江春波 / 主编

$$\begin{aligned}\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f_x + \nu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + f_y + \nu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + f_z + \nu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial c}{\partial t} &= D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - v_x \frac{\partial c}{\partial x} - v_y \frac{\partial c}{\partial y} - v_z \frac{\partial c}{\partial z} - \rho \frac{\partial s}{\partial t}\end{aligned}$$

地表水环境影响评价 数值模拟方法及应用

陈凯麒 江春波 主编



中国环境出版集团·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

地表水环境影响评价数值模拟方法及应用/陈凯麒, 江春波
主编. —北京: 中国环境出版集团, 2018.4

ISBN 978-7-5111-3378-6

I. ①地… II. ①陈… ②江… III. ①地面水—水环境—环境影响—环境质量评价—数值模拟—研究 IV. ①X824

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 255429 号

出版人 武德凯
责任编辑 李兰兰
责任校对 任 丽
封面设计 宋 瑞 陈凯麒



更多信息, 请关注
中国环境出版集团
第一分社

出版发行 中国环境出版集团
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67112735 (第一分社)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)
印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2018 年 4 月第 1 版
印 次 2018 年 4 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 31.5
字 数 730 千字
定 价 188.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

《地表水环境影响评价数值模拟方法及应用》

编委会

主 编 陈凯麒 江春波

副主编 王庆改 贾 鹏 韩龙喜 彭文启 李一平 李时蓓

编 委 金 生 潘存鸿 李克锋 罗小峰 周 刚 陈 文

辛文杰 叶清华 梁瑞峰 杜彦良 张 帝 赵懿琚

张贝贝 路川藤 曹晓红 赵晓宏 邱 利 祁昌军

陶 洁 卢绪川 章双双 王艳然 王海燕 李 飒

王亚娥 李 敏 曹 娜 葛德祥 吴玲玲

序

环境污染问题一直是困扰我国环境科学工作者和政府的一个难题。这些年来，水污染、大气污染、固体垃圾污染、土壤污染等损害群众健康的环境事件层出不穷。中央高度重视环境污染治理与保护工作，陆续提出生态文明建设、“两山论”、绿色发展等理念战略，试图从源头扭转我国资源约束趋紧、环境污染严重、生态系统退化的严峻形势。这些理念战略是非常好的，然而我们的环境要保护好，在实际行动中还必须配套以经济、科技、法制建设的支持。可以说，目前环境保护既处于大有作为的战略机遇期，又处于负重前行的关键期。

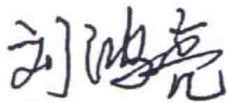
我国环境问题中，地表水环境问题一直很突出，水资源安全保障能力无法适应经济社会的可持续发展。要改变这种形势，必须以改善环境质量为核心，全面提高水环境影响评价有效性，充分发挥环评的源头预防作用。水环境影响评价工作中，水环境的模拟预测是核心内容，通过模拟污染物的迁移转化规律，预测建设项目的环境影响，为建设项目的环境影响评价及审批管理提供技术支持。

我国从 20 世纪 70 年代开展水环境质量评价工作，并于 1993 年正式颁布实施《环境影响评价技术导则 地面水环境》(HJ/T 2.3—93)，导则中推荐了适合河流、湖(库)、河口、海湾等不同水体类型的环境影响预测模型，用来指导地表水环境影响评价工作的开展。2018 年即将发布修订后的地表水导则，在新修订的地表水导则中，更新了最新的预测模型和计算方法。但是基于标准规范制定的篇幅及内容限制，导则中仅给出了预测模型的计算公式和预测要求，缺少对模型理论和技术应用的指导。基于数值模型计算的复杂性，实际环评中，一般需要借助基于数值模型开发的计算软件，进行模拟计算。环评过程中，如何选择适用的数值模型软件？如何应用数值模型软件开展模拟计算？如何提高模型计算的精度？目前实际环评工作中，缺少相

关方面的技术指导。

《地表水环境影响评价数值模拟方法及应用》一书紧扣上述问题，系统地开展了地表水环境影响评价数值模拟的核心数学理论、技术方法及应用研究，全面地向读者展示了数值模拟的发展历程、规范化建模过程和关键问题处理方法。该书的特点之一是从国内外分别选取 5 种常用数值模型软件，详细介绍了各种模型的基本原理、建模技术和运行特征，并通过实际案例（10 个案例）应用，对每个模型如何应用进行了系统展示剖析；特点之二是系统收集、归纳总结了国际上经典的模型验证案例（3 大类 17 个案例），可以作为今后模型规范化应用的验证算例，结合实际工作用来检验模型计算的精度和准确性。可以说，这是一本非常丰富的、有针对性的地表水环境数值模拟专业书籍，希望借助此书的出版，促进地表水环境影响评价数值模拟的精细化和模型的法规化研究，也希望通过我们的努力让人民生活在这片碧水蓝天之中。

中国工程院院士



2017 年 2 月

前言

环境影响评价制度是从“源头”预防环境污染和生态破坏,实现经济社会可持续发展的重要制度保障。地表水环境影响评价是环境影响评价的重要内容之一,地表水环境影响评价工作开展的主要依据是《环境影响评价技术导则 地面水环境》(HJ 2.3),基于导则篇幅有限,导则中仅是列出了模型的预测方法、模型选择、参数率定和模型验证等要求,没有对模型的原理、理论及如何使用,给出具体的指导和应用介绍,特别是数值模型比较复杂,一般环评从业人员不容易掌握和应用。基于目前地表水环境影响评价数值模拟工作的实际需要和迫切需求,结合实际的地表水环境影响数值模拟实际应用案例,从理论到实践,编制本书,用来指导地表水环境影响评价的数值模拟工作,为全国的地表水环境影响评价数值模拟工作提供技术支持。

随着地表水环境数学模型理论、算法以及计算机技术的快速发展,地表水环境影响预测的数值模拟软件越来越多。到目前为止,针对不同地形情况、不同水域条件、不同空间和时间尺度开发的地表水环境影响预测的数值模拟软件有数百种之多。不同模型软件之间采用的计算理论和算法不尽相同,导致模型间的计算结果存在差别,且不能相互参考、比较,给环境管理决策带来了困难,同时也限制了地表水环境影响预测的数值模拟软件的实际应用。因此,比较不同模型的适用条件和精度,规范模型的建模过程及率定验证步骤,对于地表水环境影响预测来说显得尤为必要。本书回顾了地表水环境影响评价、水动力模型、水质模型及水生态模型的发展历程,对数值模型理论、数值模型建模程序、模型验证案例、国内外常用地表水环境数值模型软件及数值模拟发展前景等进行了梳理归纳,重点介绍了国内外 10 个常用数值模型软件的基本情况、模型架构、模型前处理及数据要求、模型输出及后处理、建模过程和具体应用案例等,为地表水环境影响评价预测提供了参考借鉴,帮助地表水环境影响预测工作人员快速合理地选择和应用模型。

全书共分为 8 章,第 1 章为绪论,主要介绍了环境影响评价制度、地表水环境影响评价、水动力学模型、水质模型、水生态模型的发展历程及国外常用数值模型软件等;第 2 章为地表水环境问题数值模型理论,主要介绍了数值模型的微分方程类型、边界条件、初始条件、数值求解方法等;第 3 章为地表水数值模型建模程序及方法,主要介绍了模拟对象识别、概念模型构建、模型选择、模型区域确定、边界条件与初始条件的确定、模型参

数确定、模型率定验证、模拟方案制订及模拟结果展现等；第4章为生态水力学模型介绍及应用案例，主要介绍了生态水力学模型的发展、模型理论、案例等；第5章为模型验证案例，主要介绍了国内外解析解、室内试验和工程实验3大类17个验证案例；第6章为国外常用数值模型介绍及应用案例，主要介绍了国外5个常用数值模型软件的背景、模型架构、模型前后处理、案例应用等；第7章为国内常用数值模型介绍及应用案例，主要介绍了国内5个常用数值模型软件的背景、模型架构、模型前后处理、案例应用等；第8章为地表水环境影响评价数值模拟发展前景，从水文情势、石油类污染物迁移、水温、生态需水等方面系统概括了地表水环境影响评价数值模拟发展的现状、存在的问题、发展趋势和展望，提出了未来地表水环境影响评价数值模拟发展的方向及需要重点解决的问题。

本书主要撰写人员为：第1章陈凯麒、王庆改、彭文启、罗小峰、杜彦良；第2章江春波、张帝；第3章李一平、金生；第4章陈文；第5章周刚、贾鹏、赵懿珺、邱利；第6章贾鹏、韩龙喜、李一平（EFDC模型）、罗小峰（Delft3D模型）、叶清华（Delft3D模型）、陈文（MIKE模型）、李克锋（FLOW-3D模型、River2D模型）、梁瑞峰（FLOW-3D模型、River2D模型）；第7章王庆改、贾鹏、韩龙喜、罗小峰（CJK3D）、辛文杰（CJK3D）、路川藤（CJK3D）、金生（HYDROINFO）、潘存鸿（ZIHE-2DS模型）、李克锋（WWL模型）、陈凯麒（ACEE-HFMS）、梁瑞峰（WWL模型）、张贝贝（ACEE-HFMS）；第8章韩龙喜、陈凯麒。

本书旨在指导地表水环境影响评价数值模型的规范化应用，主要面向环境保护部门的工作人员、环境影响评价的从业人员，以及环境科学、环境工程、环境水利学、环境水文学以及环境生态学等相关专业的从业人员及学生等。

本书出版获得环保公益性行业科研专项（201309062）和国家重点研发计划资助项目（2016YFC0401504）的资助，在写作过程中得到环境保护部环境影响评价司及环境保护部环境工程评估中心领导和同事们的悉心指导和大力帮助；广泛听取了众多专家、学者和管理人员的宝贵建议。同时，中国环境出版社编辑们为本书的出版给予了很多细致的帮助，付出了辛勤劳动，在此一并表示衷心感谢！

由于时间及对该领域研究认识水平有限，书中可能存在一些不足、遗漏甚至错误之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2017年2月

目 录

1 绪 论 1

- 1.1 环境影响评价制度发展综述 / 1
- 1.2 地表水环境影响评价发展综述 / 3
- 1.3 水动力学模型发展历程 / 4
- 1.4 水质模型发展历程 / 19
- 1.5 水生态模型发展历程 / 24
- 1.6 国外常用数值模型软件 / 31
- 1.7 小结 / 39
- 参考文献 / 39

2 地表水环境问题数值模型理论 48

- 2.1 水流运动及污染物迁移扩散方程特征及分类 / 48
- 2.2 数值离散格式 / 55
- 2.3 地表水环境一维模型概述 / 80
- 2.4 地表水环境二维模型概述 / 85
- 2.5 地表水环境三维模型概述 / 90
- 参考文献 / 99

3 地表水数值模型建模程序及方法 103

- 3.1 研究对象及其环境特点 / 103
- 3.2 数学模型组成及概念性模型构建 / 107
- 3.3 数学模型选择 / 108
- 3.4 模型区域确定及网格划分 / 110
- 3.5 边界条件、初始条件及关键预测条件确定 / 117

3.6	模型参数估算方法及其不确定性和敏感性分析 /	123
3.7	模型率定验证 /	129
3.8	预测内容及模型结果展现 /	132
3.9	小结 /	135
	参考文献 /	135
4	生态水力学模型介绍及应用案例	137
4.1	生态水力学模型的发展 /	137
4.2	基于个体模型的理论 /	139
4.3	基于个体模型的主要内容 /	140
4.4	生态水力学模型案例介绍 /	143
4.5	小结 /	153
	参考文献 /	153
5	模型验证案例	155
5.1	解析解案例 /	156
5.2	室内试验案例 /	164
5.3	工程试验案例 /	192
5.4	小结 /	210
	参考文献 /	211
6	国外常用数值模型介绍及应用案例	213
6.1	EFDC 模型 /	213
6.2	Delft3D 模型 /	240
6.3	River2D 模型 /	259
6.4	MIKE 模型 /	280
6.5	Flow-3D 模型 /	316
	参考文献 /	336
7	国内常用数值模型介绍及应用案例	340
7.1	CJK3D 模型 /	340

7.2	HYDROINFO 模型 /	372
7.3	ZIHE-2DS 模型 /	405
7.4	WWL 模型 /	424
7.5	分步杂交法平面二维模型 /	442
	参考文献 /	449

8	地表水环境影响评价数值模拟发展前景	452
---	-------------------	-----

8.1	研究方法与手段的综合应用 /	452
8.2	水文情势与水环境容量研究 /	454
8.3	非点源污染模型研究 /	458
8.4	石油类污染物迁移运动数学模型研究 /	462
8.5	沉降性污染物迁移运动数学模型研究 /	469
8.6	湖库水温数学模型研究 /	474
8.7	生态流量及水力学模型 /	477
8.8	小结 /	485
	参考文献 /	486

附表:	国外常见水环境模型官方网站	490
-----	---------------	-----



绪 论

环境影响评价是对规划和建设项目实施后可能造成的环境影响进行分析、预测和评估,提出预防或者减轻不良环境影响的对策和措施,进行跟踪监测的方法与制度。环境影响评价制度是从“源头”预防环境污染和生态破坏,实现经济社会可持续发展的重要制度保障。环境影响评价对“两高一资”、产能过剩和低水平重复建设等项目严把准入关口,通过“上大压小”“以新带老”“污染物总量控制”等方式治理老污染,促进产业结构升级。根据对 2013 年审批的国家级建设项目统计数据进行分析,通过环境影响评价制度实施“以新带老”及“区域平衡替代”要求可削减化学需氧量 180 多万 t、氨氮 140 多万 t。2015 年国家级环评审批建设项目 159 个,涉及总投资约 1.5 万亿元,因为环境问题,不予审批 21 个,涉及总投资 1 170 多亿元。通过环境影响评价和总量控制、区域削减政策联合实施,实现了增产不增污、增产减污的环境保护目标,严格控制了“两高一资”、产能过剩和低水平重复建设的发生,遏制了环境污染和生态破坏进一步恶化的势头。环境影响评价工作促进了经济发展方式的转变,缓解了传统发展方式与资源环境压力的矛盾,控制了新污染,削减了老污染,推进实现节能减排,有效预防了环境污染和生态破坏。环境影响评价制度在参与国家宏观调控、优化产业结构、转变经济增长方式、推进节能减排、遏制环境违法行为等方面发挥了重大作用。

1.1 环境影响评价制度发展综述

环境影响评价最早是在 1964 年加拿大召开的一次国际环境质量评价的学术会议上提出,而作为一项正式的法律制度则首创于美国,1969 年美国率先颁布了《国家环境政策法》,并于 1970 年 1 月 1 日起正式实施。继美国建立环境影响评价制度后,先后已有 100 多个国家建立了环境影响评价制度,把环境影响评价作为政府管理中必须遵循的一项制度确立起来。我国于 1973 年 8 月,在北京召开的第一次全国环境保护会议上,通过了“全面规划、合理布局、综合利用、化害为利、依靠群众、大家动手、保护环境、造福人民”的环境保护工作方针,初步孕育了环境影响评价的思想。1979 年颁布了《中华人民共和国环境保护法(试行)》,其中规定新建、改建和扩建工程时,必须提出对环境影响的报告书,经环境保护部门和其他有关部门审查批准后才能进行设计。1981 年颁布了《基本建设项目环

境保护管理办法》，要求建设单位及其主管部门，必须在基本建设项目可行性研究的基础上，编制基本建设项目环境影响报告书，并对环境影响评价的适用范围、评价内容、工作程序等都作了较为详细的规定。1986年3月颁布了《建设项目环境保护管理办法》，进一步细化了环境影响评价的内容及管理的要求。1989年12月颁布实施了《中华人民共和国环境保护法》，对建设项目环境影响评价的内容和审批程序作了解释。20世纪90年代，环境影响评价工作发展更快。1990年6月颁布了《建设项目环境保护管理程序》，确定了建设项目五个主要阶段的环境管理及程序，再一次明确了环境影响评价参与的阶段及报告书、报告表的不同要求，以及对环境影响评价文件编制单位的资格要求。1993年《中国环境与发展十大对策》中明确要求“在项目建设中，必须严格按照法律规定——先评价、后建设”，同年发布了《环境影响评价技术导则 总纲》，规定了建设项目环境影响评价的一般性原则、方法、内容和要求。并于同年《环境影响评价技术导则 地面水环境》(HJ/T 2.3—93)颁布以后，国家开始对建设项目的环境影响进行分类管理，按评价要求分为编制环境影响报告书、编制环境影响报告表和填报环境影响登记表三类。1996年8月3日发布的《国务院关于环境保护若干问题的决定》中对建设项目环境影响评价进行了较为详细的阐述。1998年11月，国务院第10次常务会议通过了《建设项目环境保护管理条例》并发布实施，该条例对环境影响评价的分类、适用范围、程序、环境影响报告书的内容以及相应的法律责任等都做了明确规定。2002年10月28日，第九届全国人大常委会通过了《中华人民共和国环境影响评价法》(以下简称《环评法》)，自2003年9月1日起实施。《环评法》的实施是我国环境保护工作从末端治理走向源头控制的一个重大转变，是“预防为主”原则的最佳体现。《环评法》中首次提出了规划环境影响评价要求，从项目环境影响评价拓展到规划环境影响评价。《环评法》实施后，配套的法规、导则、标准等不断推出并及时更新。2003年8月发布了《规划环境影响评价技术导则(试行)》(HJ/T 130—2003)，2006年发布了《环境影响评价公众参与暂行办法》，2008年以后先后修订了大气环境、声环境、生态影响和总纲的环境影响评价技术导则，2009年发布了《规划环境影响评价条例》，2011年发布了《环境影响评价技术导则 地下水环境》(HJ 610—2011)，并于2016年1月发布修订版的《环境影响评价技术导则 地下水环境》(HJ 610—2016)，2014年6月发布了《规划环境影响评价技术导则 总纲》。环境保护部于2009年年初组织开展了五大区域战略环评，随后相继开展了西部大开发战略环评、中部地区发展战略环评，以及长三角、珠三角、京津冀战略环评、长江经济带战略环评等，我国的环境影响评价又拓展到战略环境影响评价领域，标志着环境保护参与综合决策进入了新的阶段。2015年新修订的《中华人民共和国环境保护法》正式实施，进一步明确了规划环境影响评价的法律地位，同时提出，经济和技术政策应当充分考虑对环境的影响，听取有关方面和专家的意见，政策环评雏形初现。从1980—1981年北京师范大学承担中国第一例环评项目“永平铜矿环境影响评价研究”以来，我国环境影响评价制度不断发展完善，对我国的环境保护事业甚至对整个社会的经济发展产生了深远影响。

1.2 地表水环境影响评价发展综述

在环境影响评价发展的各个阶段,地表水环境影响评价都是环境影响评价工作的重要内容之一。在环境影响评价领域,地表水定义为存在于陆地表面的各种河流(包括运河、渠道)、湖泊、水库、入海河口和近岸海域等水体。从环境影响评价工作开始,贯穿于整个环境影响评价发展的过程,地表水环境影响评价一直作为环境影响评价的重要内容之一纳入环境影响评价工作内容的范畴。1981年颁布的《基本建设项目环境保护管理办法》明确规定,对建设项目的污染物排放量需要分析对周围水文、水环境的影响,并作为环境影响评价报告中的重要内容。1993年发布并于2011年修订的《环境影响评价技术导则 总纲》中明确地表水环境影响现状调查、预测与评价是环境影响评价工作的重要内容。2002年《中华人民共和国环境影响评价法》颁布后,地表水环境影响评价不仅是建设项目环境影响评价的重点,也是规划项目环境影响评价的重要内容。地表水环境影响评价的基本任务是对实施建设项目的地表水环境影响的范围与影响程度进行分析、预测和评价,提出相应的地表水环境污染防治措施和水环境监测计划。进行地表水环境影响评价的建设项目,对其外排污水的水质、水量控制应符合国家或者地方水污染排放标准,并满足受纳水体的水环境容量、区域排污总量控制。为了规范和指导地表水环境影响评价工作的开展,1993年发布了《环境影响评价技术导则 地面水环境》(HJ/T 2.3—93),该导则一经发布,就成为指导地表水环境影响评价工作的指南,导则颁布距今已经有20多年的历史,在我国地表水环境影响评价方面发挥了重要作用。导则里详细明确了地表水环境影响评价需要开展的主要工作内容、技术方法等,地表水环境影响评价工作的主要内容包括评价工作等级的划分、环境现状的调查、环境现状的评价、环境水力学参数的选取、环境影响预测及环境影响评价的评价等,并对各项工作的内容进行了详细规定。

地表水环境影响预测是地表水环评导则的重要内容,也是地表水环境影响评价的重要内容,环境影响预测结果决定了水污染防治措施的选取和环保投资的大小,环境影响预测在整个环评过程中起着重要作用。《环境影响评价技术导则 地面水环境》(HJ/T 2.3—93)中给出了适合河流、湖(库)、河口、海湾等各类水体类型的环境影响预测模式,其中包括持久性污染物、非持久性污染物、酸碱污染物、废热预测的各类解析解稳态预测模型及部分数值模型。《环境影响评价技术导则 地面水环境》在20多年来的地表水环境影响评价中起着指南针和指挥棒的作用,指导着地表水环境影响评价预测中数学模型的选取及环境影响评价工作的开展。

2018年即将发布新修订的《环境影响评价技术导则 地表水环境》,在新修订的地表水导则中,以改善环境质量为核心,提出了更严格的水环境预测计算要求。在地表水环境影响预测中,常用的数值模型软件有很多,国际上发展较为成熟且在我国应用比较广泛的数值模型软件有EFDC、MIKE、Delft3D等。国内在水环境数值模型软件开发应用方面也

有了长足的发展，开发了比较成熟的数值模型软件，应用较多的有浙江省水利河口研究院开发的 ZIHE2DS、四川大学开发的立面二维水温预测模型 WWL、南京水利科学研究院开发的 CJK3D、大连理工大学开发的 Hydroinfo 等。

1.3 水动力学模型发展历程

水动力学是研究水体运动的科学。水动力学作为一门科学始于 18 世纪初，欧拉和丹尼尔·伯努利是这一领域中杰出的先驱者。水动力学模型作为描述水体运动方式的一种工具，在计算机大规模使用之前，主要是指基于相似率的物理模型，而现在所提到和使用的的水动力学模型大多指数学模型。因此，本节只重点介绍水动力学数学模型的发展历程。水动力学物理模型的相关内容可以参考 H. 科巴斯（Helmut Kobus）主编的《水力模拟》、南京水利科学研究所及水利水电科学研究院编著的《水工模型试验》、左东启等编著的《模型试验的理论和方法》等文献。

在认识到流体的黏滞性之前，人们采用 Newton 第二定律建立了理想流体的运动方程，即流体运动与流体面积力与体积力的关系。在认识到流体的黏滞性后，法国工程师 Claude Navier 和爱尔兰数学家 George Stokes 分别于 1821 年和 1845 年推导出纳维-斯托克斯方程（Navier-Stokes equations），简称 N-S 方程，即描述黏性不可压缩流体动量守恒的运动方程，通过在理想流体的运动方程基础上增加流体黏滞应力，建立了实际流体的运动方程体系，从而奠定了流体力学的基础。1883 年 Reynolds 通过系统的实验，发现了流体有层流和紊流两种流态，1904 年 Prandtl 提出了边界层概念，标志着水动力学进入了现代水力学的发展阶段。人们在 N-S 方程基础上，添加变量和方程来描述紊流特性。这些方程均为非线性偏微分方程，求解十分困难和复杂。近一个世纪，紊流的数学求解是经典物理学中最为棘手和“臭名昭著”的问题之一。诺贝尔奖得主 R. Feynman 曾说“紊流为经典物理未解决的最重要的问题”。1932 年，物理学家 H. Lamb 生前在英国科学促进协会的报告上说，“我死后进入天堂，想从上帝那里得到对两个问题的启示：一是量子电动力学，二是紊流，第一个问题或许还有希望”。Lamb 未能预想到计算机和计算流体力学（Computational Fluid Dynamic, CFD）的发展让紊流的求解或逼近求解得以实现，并由此极大地推动了航天、环境等诸多领域的科技进步。

计算水动力学是 CFD 的重要组成部分，同时也伴随 CFD 的发展而不断发展。国际上一般认为，1910—1917 年英国气象学家 Richardson L. F. 在天气预报模型方面的探索性研究工作，标志着 CFD 的诞生。1965 年，Harlow 和 Welch 发表的《流体动力学的计算机实验》一文中，着重介绍和展望了计算机在流体力学中的巨大作用。从此，通常把 20 世纪 60 年代中期看成是 CFD 兴起的时间。受计算科学软硬件发展的驱动，CFD 取得了很大成就，1997 年 Moin 和 Kim 在《科学美国人》上发表《用超级计算机处理紊流》一文中称超级计算机（supercomputer）和 CFD 的结合是建立 N-S 方程以来最伟大的成就之一。有关计算空气动力

力学的计算方法、网格技术、湍流模型、大涡模拟等的系统综述,可以重点参考阎超等 2011 年在《力学进展》上发表的《CFD 模拟方法的发展成就与展望》。CFD 的迅速发展及取得的成就直接影响和推动了计算水动力学的发展,CFD 在计算方法、网格技术、湍流模型、大涡模拟等方面的新理论与新方法,在计算水动力学或水动力学数学模型领域中均对其有所借鉴或拓展。

1.3.1 一维水动力学模型进展

1.3.1.1 一维水动力学模型及其数值方法

1871 年法国科学家 Saint-Venant 提出一维水流运动的圣维南方程 (Saint-Venant equations),由连续方程与动量方程组成,在数学上属于一阶拟线性双曲线型偏微分方程组,是计算一维河道及河网水流的基本方程。求解 Saint-Venant 方程组的历史较长,方法众多,按数值离散的基本原理可分为有限差分法 (Finite Difference Method, FDM)、特征线法 (Method of Characteristics, MOC) 等。

Stokes (1953) 首次将完整的 Saint-Venant 方程组用于 Ohio 河的洪水计算,之后 Liggett 和 Woolhiser (1967)、Martin 和 DeFazio (1969)、Strelkoff 等 (1970)、Dronkers (1969)、Balloffet (1969)、Johnson (1974) 及 Liggett 和 Cunge (1975) 等给出了显式差分格式的表达式及分析结果。对于各种隐式差分格式的数值稳定性和精度问题, Cunge (1966)、Abbott 和 Ionescu (1967)、Dronkers (1969)、Gunaratnam 和 Perkins (1970)、Fread (1974)、Liggett 和 Cunge (1975) 以及 Ponce 和 Simons (1977) 都从线性化稳定性分析的角度进行过研究,得到隐式差分格式的稳定性与时间和空间步长无关的结论。然而, Chaudhry 和 Contractor (1973)、Fread (1973) 以及 Crounse (1975) 发现对于瞬间变化巨大的水流模拟,若时间步长过大,则会出现数值不稳定,对于有界面在纵向及垂向变化迅速而引起的非线性,也会出现数值不稳定。同时,时间步长受精度、波形、Courant 条件、空间步长及隐式差分格式类型的限制。

对 Saint-Venant 方程组的隐式差分格式,其线性方程组的求解技术极为重要。较为有效的是 Fread (1971) 的关于五对角元的压缩存贮消元法及 Liggett 和 Cunge (1975) 的双追赶法,这两种方法在目前的河网水力数值模拟中使用较为普遍。然而,这两种方法均存在绝对值较小的数作除数会引起计算中断或数值不稳定的隐患。在众多离散格式中, Preissmann (1961) 加权四点隐式格式是使用较为普遍的一种,该格式具有空间步长非均匀、边界条件处理简单、无条件稳定、精度较高等优点。另外,还有如 DHI 的 MIKE11 一维河道计算所采用的六点格式,但六点格式存在等空间变长网格的限制,且处理边界条件时要比四点格式复杂。

特征线法 (MOC) 源自 Massau (1899) 对浅水方程进行图解积分,在 $x-t$ 平面上绘制特征线,在其交点上确定因变量来依次求解。20 世纪 50 年代初林秉南首次提出一维水流

计算的特征线法，之后又出现了二维水流的特征线法。特征线法与有限差分法的主要区别为沿特征成立的特征方程的利用（又称相容关系），而不是普通空间坐标原始方程的利用。特征线法将时间离散和空间离散一起处理，其优点是能反映问题中信息传播特征，算法符合水流运动的物理机理，且稳定性好，计算精度高，较适于双曲线型和抛物线型问题。但由于特征线往往不在所需位置上相交，通常要在需要的位置上采用插值技术，给数值计算带来不少困难。为了避免特征线法的这些缺点，Hartree（1953）发展了特征有限差分法，该方法通过指定计算时段，反求相交于指定时段的特征线，来控制计算点的分布。特征线法求解格式复杂，尤其对高维问题更为烦琐。目前，特征线法较少用于数值计算，多作为了解其他数值方法的基础。

1.3.1.2 一维水动力学模型相关问题处理方法

一维河道水动力模型所模拟河道范围较大、河道断面形态多样、地形条件多变，计算中不仅要考虑区间降雨产流、人类活动的取用耗排、多河道交汇分流、冰冻融雪、地下水作用等对水量平衡的影响，同时需要考虑各种水工构筑物、桥梁等对动量和能量产生的影响。因此，一维河道水动力学模型在实际应用中对上述问题的处理方法也处于不断拓展之中。

天然河道断面形态通常包括主河槽与河滩两部分，当河流水位高于漫滩时，其水流运动常呈现二维特点，如果河道水流再简单按照单一河道进行计算，会存在较大偏差。对漫滩河道水流处理方法包括：一是简单地将河滩区域按照源汇项进行处理；二是将主槽与河滩进行分区，对不同分区水流分别建立一维水动力学模型进行模拟分析。赵克玉（2004）把按断面平均流速计算的水流动量，改变为将横断面划分成若干个子断面，动量方程中的动量项取各子断面动量之和，可以消除横向流速分布不均匀的影响。赖锡军等（2005）利用积分方法获得了漫滩河道全断面水流的积分方程组，建立了漫滩河道洪水演算的一维水动力学模型，以模拟计算露滩、漫滩和露滩、漫滩交替的3种水流运动。

河流中的大量过水设施，如水闸、堰、涵洞、桥梁等，对水流的影响往往较大，因此在一维河流动力学模型中需要予以模拟。在闸、堰、涵的计算中，一般根据设计的流量与水头损失的参数，在差分离散格式中进行修正，主要是依据设计的水位-流量（ $H-Q$ ）关系进行设定。对于水流通过桥梁等模拟中，桥梁对水流的作用主要体现在两个方面：一是拱桥的形状在一定的水位条件下，影响过水能力，如Biery和Delleur提出自由表面水流过拱桥计算公式；二是桥墩的大小对水流的束窄作用以及不同形状对能量损失产生的作用，如Nagler和Yarnell提出不同形状的桥墩对水流能量损失的影响。河道上其他的涉水构筑物，如河堤整治工程中的丁坝、垛、渡口等，模型计算通常需要考虑以上两个方面，率定适合的河段阻力系数进行计算。

北方河流在寒冷的冬季常发生结冰现象，冰盖的出现和发展使得渠道的水流条件发生变化，因此需要应用水力学、冰水力学和传热学等理论，构建河道一维冰水动力学模型，合理处理冰盖河道（ice covered river）水流阻力系数及冰塞（ice jam）对水流的影响。