

地表水环境数值模拟与预测 —— EFDC 建模技术及案例实训

李一平 龚然 (美) 保罗·克雷格 著



科学出版社

地表水环境数值模拟与预测

——EFDC 建模技术及案例实训

李一平 龚然 [美] 保罗·克雷格 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对地表水环境数值模拟与预测的应用展开,全面介绍环境流体动力学模型(environmental fluid dynamics code, EFDC)的基本原理、建模技术和案例实训。全书重点描述了可视化工具 EFDC_Explorer (EE)的基本功能和建模操作方法,并提供6个模型案例作为实训素材,涵盖河流、浅水湖泊、深水湖泊(水库)和河口区域等;同时还将 EE 用户使用过程中最常遇到的各种疑难问题进行归纳和总结。

本书可作为高等院校环境工程、环境科学、水文水资源等相关专业开设现代水环境模拟技术、水环境模拟与预测、水生态系统模拟等课程的研究生教材或参考用书,也可作为使用 EFDC 模型和研究地表水环境数值模拟与预测的高校教师、科研人员、工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

地表水环境数值模拟与预测: EFDC 建模技术及案例实训/李一平, 龚然, (美)保罗·克雷格著. —北京: 科学出版社, 2019.5
ISBN 978-7-03-061103-1

I. ①地… II. ①李… ②龚… ③保… III. ①地面水-水环境质量评价-研究 ②地面水-水质监测-研究 IV. ①X824 ②X832

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 079165 号

责任编辑: 惠 雪 / 责任校对: 杨聪敏
责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 许 瑞

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>

北京汇瑞嘉合文化发展有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 5 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2019 年 5 月第一次印刷 印张: 27 1/2

字数: 534 000

定价: 259.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《地表水环境数值模拟与预测
——EFDC 建模技术及案例实训》

编 委 会

主 编：李一平 龚然 保罗·克雷格 (Paul Craig)

副 主 编：唐春燕 董飞 轩晓博 王健健 贾鹏
于占辉

编委成员：凯斯特·斯坎德雷特 (Kester Scandrett)

罗凡 魏莹莹 施媛媛 姜龙 魏进

序

在我国，地表水是十分珍贵的淡水资源。随着近几十年经济的高速增长，地表水资源短缺、生态环境问题日渐突出，受到了全社会的广泛关注。如何在不破坏水生态环境系统的前提下，通过实施人为控制、水量调度和科学管理的手段，合理地利用水资源，是科学工作者亟待解决的难题。

通常来说，研究地表水生态环境问题的手段包括野外观测、室内试验和数值模拟（数学模型）三大类。其中，数学模型扮演着越来越重要的角色，甚至有些问题由于构建物理模型环境极难实现而只能通过数学模型的方法来研究。同时，数学模型的应用，已从模拟水动力过程和流场分析，或简单水质变量的模拟与预测，发展到了对复杂的水生态环境过程开展模拟与预测。如今的应用非常广泛，例如环境规划、环境保护标准、总量控制、排污许可证、环境影响评价、污染防治规划、环境功能区划、水系规划方案和制定应急预案等诸多方面。所能解决问题的综合性、系统性和复杂程度越来越高，是水环境生态领域研究的热点。

由于地表水环境模型比较复杂，研究者通过自身摸索完成建模的学习成本较高，很多问题在建模的实践中无法解决，在没有参考书和专业指导的情况下，很难正确使用。尽管一些模拟代码或软件配有说明书，但多是泛泛介绍，没有完整的案例可实践，没有技巧可循，存在着很大的使用障碍。同时，在环境管理过程中发现，使用不同环境质量模型预测有关环境政策、标准、技术等实施效果时，即使是同一种情景，也会出现不同的结果，势必影响管理决策的一致性和公平性。

《地表水环境数值模拟与预测——EFDC 建模技术及案例实训》一书紧扣这一亟待解决的问题，对 EFDC 模型的使用进行了详尽的撰述，尤其是采用的 6 个案例，对建模的关键步骤进行具体指导，各有特色，内容非常丰富。全书内容由以下几个部分构成：（1）简述了地表水环境模型的发展历程、研究热点和趋势；（2）详述了 EFDC 模型的基本原理和各模块所使用的基本方程；（3）EFDC_Explorer 功能详解，包括软件每个模块的选项卡简介及操作注意事项等；（4）案例建模详解；描述了包括河流、浅水湖泊、深水湖泊（水库）、河口共 6 个案例从网格构建到结果分析的详细步骤；（5）归纳总结了建模软件使用过程中的各种常见问题，这是许多模型使用者最需要解决的疑难。对于有一定基础的读者在阅读并加以理解之后，应当可独立完成较复杂的模型构建工作。对使用 EFDC 模型的科研人员，具有很

好的参考意义。

可以说，这是一本内容丰富、有针对性和实践意义的专业书籍，希望借助此书的出版，促进我国地表水环境模型未来的规范化工作，也希望通过我们的努力，实现人与自然的和谐共处。



2019年5月

前 言

地表水环境数值模拟与预测是当前认识和研究地表水环境演变规律,预测污染物质的迁移和转化,以及地表水资源管理和工程措施决策等方面的重要工具之一。自 1925 年的 S-P (Streeter-Phelps) 模型开始算起至今,水环境模型的发展历史已超过 90 年,由一维稳态到三维非稳态,由简单变量的单一模型到多模块的耦合模型。随着计算机技术的发展和算法的优化,世界各国的研究者们陆续集成和开发出几十种地表水环境模型和可视化工具软件。

本书介绍的环境流体动力学模型 (environmental fluid dynamics code, EFDC) 可用于模拟三维的水动力、泥沙输运、物质输移、水质、沉水植物和底泥沉积成岩等过程,该模型是由美国弗吉尼亚海洋研究所 John M. Hamrick 博士于 1988 年最早开始开发的。EFDC 模型当前已被广泛应用于地表水环境的模拟与预测,包括河流、湖泊、水库、湿地、河口、海湾和海岸带等,用于解决预测与评价、工程项目方案决策、发展 TMDLs 计划和制定环境事件应急预案等问题。自 1998 年以来,美国 DSI 公司 (Dynamic Solutions-International, LLC) 为 EFDC 模型程序提供持续的改进,包括增添了许多新的功能和特性,并开发了友好的用户界面 EFDC_Explorer (EE)。EE 的不断改进促使更多的用户敢于尝试使用 EFDC 模型,改变了原先只有少数专业科研人员使用代码的状况。在美国,EFDC 模型是美国环保局 (EPA) 推荐使用的标准模型之一。在我国,环境规划和环境影响评价界希望推出标准化模型,其中 EFDC 模型的被接纳度位于前列,但目前尚未见专门讲解 EFDC 模型理论和建模方法的专著。本书正是基于这些亟待解决的问题而撰写,重点介绍使用 EFDC 模型的建模技术,附以 6 个真实且具有很强代表性的案例,力求让读者快速掌握建模思路和 EE 操作方法,并正确地、规范地、有效率地进行模型的构建工作。

全书共分为八章。第 1 章为绪论,主要介绍地表水环境模型的发展历程、研究热点和发展趋势;第 2 章为环境流体动力学模型 (EFDC) 基本理论,简述了 EFDC 模型七大模块的基本原理和主要控制方程;第 3 章为地表水环境模型构建程序与 EFDC_Explorer 基本功能,详细讲解了地表水环境模型的构建程序,并以 EFDC_Explorer Version 8.3 (EE8.3) 为例,全面介绍 EE 的基本使用方法;第 4~7 章为案例实训部分,分别列举了 6 个代表性的案例,涵盖河流、浅水湖泊、深水湖泊 (水库) 和河口地区,并详细描述了这些不同特点的案例模型构建的具体过程,

包括网格生成、初始和边界条件的设定、模型参数设定、模型敏感性和不确定性分析、参数率定、情景模拟和模型应用等环节，充分展示了不同模拟对象之间在建模思路和方法上的共性和区别；第 8 章为 EFDC_Explorer 常见问题及处理方法，主要介绍 EFDC 模型的代码结构和输入文件，并列举了常见错误及其处理方法。

本书的主要撰写人员为：第 1 章，李一平、龚然；第 2 章，龚然（翻译）、保罗·克雷格（Paul Craig）、凯斯特·斯坎德雷特（Kester Scandrett）；第 3 章，李一平、轩晓博、龚然、唐春燕、贾鹏、于占辉、魏进、罗凡；第 4 章，李一平、董飞、魏莹莹；第 5 章，李一平、龚然、唐春燕、姜龙、罗凡、魏莹莹；第 6 章，李一平、施媛媛；第 7 章，王健健；第 8 章，唐春燕、施媛媛。全书由龚然统稿整理，罗凡、魏莹莹、施媛媛等协助。

本书出版获得国家重点研发计划项目（2017YEC0405203）、水体污染控制与治理科技重大专项（2017ZX07204003，2017ZX07101004-001）、南京工程学院基金项目（JCYJ201619，ZKJ201804）的共同资助。在本书的撰写过程中，得到了国家环境保护环境影响评价数值模拟重点实验室的大力支持，广泛听取了众多专家、学者和管理人员的宝贵建议，在此一并表示衷心感谢！

由于作者知识水平有限以及对该领域的研究认识水平尚浅，书中的错误、缺点和不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

作 者

2019 年 4 月

目 录

序

前言

| | |
|---|----|
| 1 绪论 | 1 |
| 1.1 引言 | 1 |
| 1.2 地表水环境数学模型简述 | 2 |
| 1.2.1 水动力学模型 | 2 |
| 1.2.2 水质模型 | 3 |
| 1.2.3 水生态模型 | 3 |
| 1.3 地表水环境数学模型研究热点和发展趋势 | 4 |
| 1.3.1 模型参数敏感性和不确定性 | 4 |
| 1.3.2 模型模拟的精度影响因素 | 6 |
| 1.3.3 模型应用范围的扩展 | 7 |
| 1.3.4 模型综合化、平台化和法规化 | 8 |
| 1.3.5 模型与新兴技术的结合 | 8 |
| 1.4 常用地表水环境数学模型功能对比及 EFDC 模型简介 | 9 |
| 1.4.1 常用地表水环境数学模型功能对比 | 9 |
| 1.4.2 环境流体动力学模型 (EFDC) 及 EFDC_Explorer 简介 | 10 |
| 参考文献 | 18 |
| 2 环境流体动力学模型 (EFDC) 基本理论 | 22 |
| 2.1 水动力模块 | 22 |
| 2.1.1 水平和垂向坐标系 | 22 |
| 2.1.2 水动力基本方程 | 23 |
| 2.1.3 垂向紊流闭合 | 24 |
| 2.1.4 EFDC 模型垂向分层选项 | 26 |
| 2.2 物质运输模块 | 28 |
| 2.2.1 对流-扩散传输的基本方程 | 28 |
| 2.2.2 染料/水龄 | 28 |
| 2.3 温度和传热模块 | 29 |
| 2.3.1 热传递的基本方程 | 29 |

| | | |
|-------|---------------------------------|-----|
| 2.3.2 | 水体表面热交换 | 29 |
| 2.3.3 | 沉积床温度模块 | 32 |
| 2.3.4 | 冰封模块 | 33 |
| 2.4 | 泥沙输运模块 | 34 |
| 2.4.1 | 悬浮泥沙输运的基本方程 | 35 |
| 2.4.2 | 原有的 EFDC 模型泥沙输运模块 | 35 |
| 2.4.3 | 新的泥沙输运解决方案 (SEDZLJ 模型) | 41 |
| 2.5 | 水质与富营养化模块 | 49 |
| 2.5.1 | 概述 | 49 |
| 2.5.2 | 水柱富营养化控制方程 | 51 |
| 2.5.3 | 水生植物和附生植物 | 64 |
| 2.5.4 | 大型藻类/底栖藻类 | 70 |
| 2.5.5 | 沉积成岩与内源释放 | 71 |
| 2.6 | 有毒物质污染与运移模块 | 75 |
| 2.6.1 | 基本方程 | 76 |
| 2.6.2 | 有毒物质损失项 | 77 |
| 2.7 | 拉格朗日粒子追踪模块 | 78 |
| 2.7.1 | 基本方程和随机游动 | 78 |
| 2.7.2 | 溢油模型 | 79 |
| | 参考文献 | 79 |
| 3 | 地表水环境模型构建程序与 EFDC_Explorer 基本功能 | 82 |
| 3.1 | 地表水环境模型构建程序及方法 | 82 |
| 3.1.1 | 问题分析和对象识别 | 82 |
| 3.1.2 | 模型的选择 | 85 |
| 3.1.3 | 研究区域的确定和网格划分 | 87 |
| 3.1.4 | 边界条件与初始条件的确定 | 89 |
| 3.1.5 | 模型参数不确定性和敏感性分析 | 91 |
| 3.1.6 | 模型的率定和验证 | 95 |
| 3.1.7 | 模拟结果展现与分析 | 96 |
| 3.2 | EFDC_Explorer (EE) 基本概述 | 100 |
| 3.2.1 | Windows 系统环境协议 | 100 |
| 3.2.2 | 提示工具和 Operator 函数 | 100 |
| 3.2.3 | 单位和术语 | 101 |
| 3.2.4 | EE 文件 | 101 |
| 3.3 | EE8.3 主要工具栏 | 103 |

| | | |
|--------|-----------------------|-----|
| 3.3.1 | EFDC 模型目标文件管理 | 103 |
| 3.3.2 | Julian 日期与公历日期的转换器 | 105 |
| 3.3.3 | 常用工具包 | 106 |
| 3.3.4 | 网格工具和实用程序 | 106 |
| 3.3.5 | 文本编辑 | 107 |
| 3.3.6 | 运行模型 | 107 |
| 3.3.7 | 运行时间 | 108 |
| 3.3.8 | 平面视图查看器 | 109 |
| 3.3.9 | 剖面视图查看器 | 109 |
| 3.3.10 | 生成新模型 | 110 |
| 3.4 | 前处理操作界面 | 111 |
| 3.4.1 | 地图选项卡 | 111 |
| 3.4.2 | 描述选项卡 | 112 |
| 3.4.3 | 区域选项卡 | 112 |
| 3.4.4 | 激活模块选项卡 | 121 |
| 3.4.5 | 时间/链接选项卡 | 122 |
| 3.4.6 | 水动力选项卡 | 123 |
| 3.4.7 | 波浪选项卡 | 130 |
| 3.4.8 | 盐度选项卡 | 130 |
| 3.4.9 | 温度选项卡 | 131 |
| 3.4.10 | 染料/水龄选项卡 | 133 |
| 3.4.11 | 泥沙选项卡 | 135 |
| 3.4.12 | 水质选项卡 | 141 |
| 3.4.13 | 拉格朗日粒子追踪 (LPT) 选项卡 | 147 |
| 3.5 | 后处理操作界面 | 150 |
| 3.5.1 | 模型率定 | 150 |
| 3.5.2 | 模型比较 | 158 |
| 3.6 | ViewPlan (2D) 平面视图 | 159 |
| 3.6.1 | 模拟结果加载 | 161 |
| 3.6.2 | ViewPlan 视窗 | 162 |
| 3.6.3 | ViewPlan 显示选项 | 171 |
| 3.6.4 | 常规预处理功能 | 175 |
| 3.6.5 | 常用后处理功能 | 176 |
| 3.6.6 | ViewPlan 主要视图选项 | 177 |
| 3.7 | ViewProfile (2D) 剖面视图 | 193 |
| 3.7.1 | 切面/剖面 | 194 |

| | | |
|-------|----------------------|-----|
| 3.7.2 | 主要显示选项 | 194 |
| 3.7.3 | 功能键 | 196 |
| | 参考文献 | 197 |
| 4 | 河流水动力模拟案例实训 | 198 |
| 4.1 | 项目概况 | 198 |
| 4.2 | 河流 CVLGrid 曲线正交网格绘制 | 199 |
| 4.2.1 | 网格构建 | 199 |
| 4.2.2 | 网格文件导入 EE8.3 及时间步长确定 | 208 |
| 4.3 | 边界条件设置 | 212 |
| 4.3.1 | 设置水位边界条件时间序列 | 212 |
| 4.3.2 | 设置排污口流量边界条件时间序列 | 214 |
| 4.3.3 | 设置燃料浓度边界条件 | 215 |
| 4.3.4 | 模型边界位置及类型设置 | 215 |
| 4.4 | 初始条件设置 | 220 |
| 4.4.1 | 水位数据导入 | 220 |
| 4.4.2 | Dye 模块激活 | 220 |
| 4.5 | 模型率定验证 | 223 |
| 4.5.1 | 模型率定验证步骤 | 223 |
| 4.5.2 | 率定验证结果 | 225 |
| 4.5.3 | 模拟结果分析 | 225 |
| 4.6 | 模型使用小结 | 227 |
| | 参考文献 | 228 |
| 5 | 浅水湖泊水动力和富营养化模拟案例实训 | 229 |
| 5.1 | 水动力模拟案例 | 229 |
| 5.1.1 | 项目概况 | 229 |
| 5.1.2 | 网格划分及时间步长确定 | 230 |
| 5.1.3 | 边界条件设置 | 235 |
| 5.1.4 | 初始条件设置 | 243 |
| 5.1.5 | 模型参数不确定性和敏感性分析 | 244 |
| 5.1.6 | 模型的率定和验证 | 253 |
| 5.1.7 | 情景模拟方案 | 256 |
| 5.1.8 | 模拟结果与讨论 | 257 |
| 5.1.9 | 水动力模型使用小结 | 259 |
| 5.2 | 水质富营养化模拟案例 | 260 |
| 5.2.1 | 项目概况 | 260 |

| | | |
|-------|--------------------|-----|
| 5.2.2 | 边界条件设置 | 261 |
| 5.2.3 | 初始条件和参数设置 | 266 |
| 5.2.4 | 模型参数不确定性和敏感性分析 | 271 |
| 5.2.5 | 模型率定和验证 | 281 |
| 5.2.6 | 情景模拟方案 | 285 |
| 5.2.7 | 模拟结果与讨论 | 285 |
| 5.2.8 | 水质富营养化模型使用小结 | 289 |
| 5.3 | 沉积物成岩模拟案例 | 289 |
| 5.3.1 | 项目概况 | 289 |
| 5.3.2 | 网格划分 | 292 |
| 5.3.3 | 边界条件设置 | 292 |
| 5.3.4 | 初始条件设置 | 294 |
| 5.3.5 | 不确定性和敏感性分析 | 295 |
| 5.3.6 | 模型率定验证 | 298 |
| 5.3.7 | 沉积物成岩模型关键参数设置 | 300 |
| 5.3.8 | 模拟结果与讨论 | 304 |
| 5.3.9 | 沉积成岩模型使用小结 | 309 |
| | 参考文献 | 309 |
| 6 | 深水水库水动力及水温数值模拟案例实训 | 312 |
| 6.1 | 项目概况 | 312 |
| 6.1.1 | 项目背景与研究目标 | 312 |
| 6.1.2 | 项目区域概况 | 313 |
| 6.2 | 网格划分和时间步长设置 | 314 |
| 6.2.1 | 网格划分 | 314 |
| 6.2.2 | 时间步长设置 | 316 |
| 6.3 | 边界条件设置 | 317 |
| 6.3.1 | 流量数据 | 318 |
| 6.3.2 | 水温数据 | 320 |
| 6.3.3 | 风场数据 | 321 |
| 6.3.4 | 大气数据 | 322 |
| 6.4 | 初始条件设置 | 323 |
| 6.5 | 模型率定验证 | 325 |
| 6.5.1 | 模型的校验 | 325 |
| 6.5.2 | 模型关键参数设置 | 326 |
| 6.6 | 情景模拟方案 | 327 |

| | | |
|-------|--------------------------|-----|
| 6.6.1 | 研究水位下降对水动力过程的影响 | 327 |
| 6.6.2 | σ 坐标水平压力梯度误差降低方法 | 327 |
| 6.6.3 | SGZ 混合坐标下水平压力梯度误差降低方法 | 329 |
| 6.7 | 模拟结果与讨论 | 330 |
| 6.7.1 | 探究水位下降对水动力过程的影响 | 330 |
| 6.7.2 | σ 坐标下水平压力梯度误差降低方法 | 334 |
| 6.7.3 | SGZ 混合坐标下水平压力梯度误差降低方法 | 335 |
| 6.8 | 模型使用小结 | 339 |
| | 参考文献 | 340 |
| 7 | 河口泥沙输移及盐水入侵模拟案例实训 | 342 |
| 7.1 | 项目概况 | 342 |
| 7.2 | 网格划分及相关设置 | 343 |
| 7.2.1 | 网格划分类型 | 343 |
| 7.2.2 | 网格划分 | 344 |
| 7.2.3 | 地形高程设置 | 347 |
| 7.2.4 | 时间步长设置 | 348 |
| 7.3 | 边界条件设置 | 349 |
| 7.3.1 | 流量数据 | 349 |
| 7.3.2 | 示踪剂数据 | 351 |
| 7.3.3 | 盐度数据 | 353 |
| 7.3.4 | 潮汐调和数据 | 353 |
| 7.3.5 | 泥沙数据 | 354 |
| 7.3.6 | 边界条件设置步骤 | 356 |
| 7.4 | 初始条件设置 | 359 |
| 7.5 | 模型关键参数设置 | 361 |
| 7.5.1 | 模块确定 | 361 |
| 7.5.2 | 水动力参数 | 362 |
| 7.5.3 | 泥沙参数 | 363 |
| 7.6 | 模型率定验证 | 366 |
| 7.7 | 模拟结果与讨论 | 368 |
| 7.7.1 | 流场分布 | 368 |
| 7.7.2 | 盐水入侵模拟分析 | 371 |
| 7.7.3 | 泥沙输移模拟分析 | 373 |
| 7.8 | 模型使用小结 | 376 |

| | |
|--|------------|
| 参考文献 | 377 |
| 8 EFDC_Explorer 常见问题及处理方法 | 378 |
| 8.1 模型代码结构 | 378 |
| 8.1.1 EFDC 程序及功能简介 | 378 |
| 8.1.2 模型的输入文件 | 381 |
| 8.2 水动力模块常见问题解析 | 384 |
| 8.2.1 网格与坐标系统 | 384 |
| 8.2.2 常见运行错误 | 386 |
| 8.2.3 干湿边界问题 | 387 |
| 8.2.4 Jet plume 和 Near field 模型 | 388 |
| 8.2.5 垂向黏滞系数和扩散系数 | 388 |
| 8.2.6 风场设置 | 392 |
| 8.2.7 气象数据设置 (ASER.INP) | 394 |
| 8.2.8 水动力模块率定验证参数 | 396 |
| 8.2.9 时间步长设置 | 396 |
| 8.2.10 风浪模块 | 397 |
| 8.2.11 热启动 | 397 |
| 8.2.12 其他问题 | 399 |
| 8.3 运输模块常见问题解析 | 399 |
| 8.3.1 染料 (dye) | 399 |
| 8.3.2 水龄 (water age) | 400 |
| 8.4 温度和热传输模块常见问题解析 | 401 |
| 8.5 泥沙模块常见问题解析 | 402 |
| 8.6 有毒物质模块常见问题解析 | 406 |
| 8.7 水质模块常见问题解析 | 406 |
| 8.7.1 水质边界设置 | 406 |
| 8.7.2 TSS | 406 |
| 8.7.3 藻类 | 406 |
| 8.7.4 水质指标 | 408 |
| 8.7.5 底泥释放通量 (sediment flux) | 409 |
| 8.8 拉格朗日粒子追踪 (LPT) 常见问题解析 | 410 |
| 8.9 本章小结 | 412 |
| 参考文献 | 413 |
| 附录 A EFDC 内部数组可视化介绍 | 414 |
| 附录 B 数据格式 | 416 |

1 绪 论

1.1 引 言

自 19 世纪弗劳德 (W. Froude) 奠定了物理比尺模型的理论基础, 并首次应用于模型试验后, 物理模型一直是研究流体力学和水力学工程问题的唯一手段。但随着工程问题的大尺度化、边界条件的复杂化和考虑到经济的合理性, 仅依赖物理模型的研究远不能满足实际需求, 因此数学模型的发展受到广泛重视。

数学模型方法是将已知的问题方程化描述, 在一定的定解条件 (初始条件和边界条件) 下求解数学方程, 从而达到模拟某个环境参数, 以解决实际工程问题的一系列方法。采用传统的公式计算, 其实也是一种“数学模拟”, 计算公式也是一种“数学模型”。但由于它只涉及初等数学理论, 能解决的问题十分简单, 还不能算是真正的数学模型。20 世纪 60 年代以后, 随着计算机技术的蓬勃发展, 大量的数学模型被建立, 用以解决一系列的工程问题。之后, 数学模型涉及的范围和内容越发广泛化和系统化, 其功能已远远超过物理模型。

地表水环境数学模型是数学模型在地表水环境领域的应用, 大致可划分为水动力学模型、水质模型和水生态模型三大类。其基本原理是基于计算机技术, 将气象条件、水动力条件、水质边界条件等因素进行量化约束。通过求解方程组, 获得所求参数的时空分布特征及迁移转化规律, 并以此为基础, 进一步分析和判别各环境因子之间的相互关系, 以及根据研究需要, 进行模拟与预测等应用。通常, 研究水环境问题的手段主要包括野外观测、室内试验和数值模拟。其中, 应用数学模型的手段, 在解决水环境问题中扮演着越来越重要的角色。水环境数学模型的应用, 已不是从前的仅仅模拟水动力过程, 或简单水质变量的模拟与预测; 其如今的应用非常广泛, 涵盖水质模拟与预测、水环境容量计算、水系规划方案和制定应急预案等诸多方面, 解决问题的综合性、系统性和复杂程度越来越高。数学模型的研究和应用已成为水环境生态领域的热点。

国内外当前大量采用数学模型的方法, 对河流、湖泊 (水库)、河口、海岸带的水动力/水量、水质及富营养化、泥沙输运等过程, 进行系统性的定量研究。其中不乏成功的经典案例, 如美国奥基乔比湖水环境生态模型 (Lake Okechobee environment model, LOEM)。LOEM 能精确地描述奥基乔比湖水动力、沉积物、水质和沉水植物的变化过程, 为其管理工作提供了有力的工具, 堪称水环境模型的经

典之作。再如,我国的太湖富营养化模型,建立了包含水动力、风浪、沉积物、水质和拉格朗日粒子追踪等模块的综合模型,服务于“引江济太”工程项目和太湖水生态环境的保护和管理。

在中国经济高速增长,成为世界第二大经济体的背景下,作为世界上最大的发展中国家和人口最多的国家,快速的经济增长已受限于水资源短缺和水环境污染等问题。《中国环境状况公报(2017年)》显示,全国地表水1940个水质断面(点位)中,Ⅳ类、Ⅴ类和劣Ⅴ类水占32.7%;全国112个重点湖泊(水库)中,水质Ⅳ类及Ⅳ类以下的湖泊(水库)数量为42个,占37.5%,主要污染指标为总磷、化学需氧量和高锰酸盐指数。“十二五”期间,由于国家大力实施了水环境综合整治,全国地表水国控断面劣Ⅴ类比例下降了6.8%。2015年4月,国家出台了《水污染防治行动计划》(“水十条”),明确提出解决水环境污染问题的目标和时间期限。显然,保护未受损的河湖水系和修复已退化的水生态系统,既是国家未来水环境工作的重点,也是国家水安全的保障。掌握水环境生态系统的演进过程和规律是开展这些工作的关键步骤,水环境数学模型的应用必将在此过程中发挥重要的作用。

1.2 地表水环境数学模型简述

1.2.1 水动力学模型

近代以来,对于实际液体的水动力学模型,起步于 Navier 和 Stokes 分别于 1821 年和 1845 年推导出的纳维-斯托克斯方程(Navier-Stokes equations, 即 N-S 方程)。之后,法国科学家 Saint-Venant 于 1871 年首次提出了计算河道及河网水流的一维运动基本方程——圣维南方程(Saint-Venant equations)。自此,水动力学模型开始在河流和河网上逐步展开应用;20 世纪 60 年代后,随着圣维南方程的广泛应用,各种求解方法的数值稳定性和精度问题得以深入研究。同时,平原地区河道交错,水流流向/流速易受潮汐、水利调度等影响,由此催生了涉及面更广的河网模型^[1]。在湖(库)方面, Hesen 于 1956 年最早提出浅水平面二维水动力学模型。之后湖泊水动力学模型的发展,主要应用于解决水流运动,包括风生环流、吞吐流,以及深水湖库因温度分层而存在的垂向密度流^[2,3]。

紊流理论的不断发展和计算机技术的突飞猛进,为水动力学模型在计算方法、网络技术、紊流模型、大涡模拟等方面提供了有效借鉴,直接数值模拟(DNS)、Reynolds 平均模型(RANS)和大涡模拟(LES)等方法得以应用,使 N-S 方程进一步得到修正。此外,水动力学模型在洋流领域的研究还起到推动紊流机理深入探索的作用。洋流模型由最初的 POM 模型发展至 ECOM 模型,如今为更加完善的 FVCOM 模型^[4,5];在河口海岸区域,水动力学模型解决了存在潮汐作用下的紊流混合,因盐度