

21世纪高等学校研究生教材



北京市高等教育精品教材

环境科学与工程系列教材

# 流域水质模型与模拟

LIUYU SHUIZHI MOXING YU MONI

■ 郝芳华 李春晖 赵彦伟 程红光 / 编 著



北京师范大学出版集团  
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP  
北京师范大学出版社

21世纪高等学校研究生教材

 北京市高等教育精品教材

环境科学与工程系列教材

# 流域水质模型与模拟

LIUYU SHUIZHI MOXING YU MONI

郝芳华 李春晖 赵彦伟 程红光 / 编 著



北京师范大学出版集团  
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP  
北京师范大学出版社

---

图书在版编目(CIP)数据

流域水质模型与模拟 / 郝芳华等编著. —北京: 北京师范大学出版社, 2008. 10  
(环境科学与工程系列教材)  
ISBN 978-7-303-09199-7

I. 流… II. 郝… III. 流域-水质模型-高等学校-教材 IV. X824

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 042826 号

---

---

出版发行: 北京师范大学出版社 [www. bnup. com. cn](http://www.bnup.com.cn)  
北京新街口外大街 19 号  
邮政编码: 100875

印 刷: 北京新丰印刷厂  
经 销: 全国新华书店  
开 本: 170 mm × 230 mm  
印 张: 22. 75  
字 数: 308 千字  
印 数: 1 ~ 3 000 册  
版 次: 2008 年 11 月第 1 版  
印 次: 2008 年 11 月第 1 次印刷  
定 价: 36. 00 元

---

责任编辑: 胡廷兰      装帧设计: 高 霞  
责任校对: 李 菡      责任印制: 李 丽

**版权所有 侵权必究**

反盗版、侵权举报电话: 010-58800697

北京读者服务部电话: 010-58808104

外埠邮购电话: 010-58808083

本书如有印装质量问题, 请与印制管理部联系调换。

印制管理部电话: 010-58800825

# 前言

水环境问题是伴随着人类社会经济活动的非理性发展而出现的。流域水环境污染已成为我国目前最严重的环境问题之一。对流域内各种污染进行量化研究、影响评价以及污染治理时,最为有效和直接的研究方法是建立相关水质模型,进行时间序列和空间序列上的模拟,为流域水质预测、管理和规划等提供有力的技术与方法支持。因此,流域水质模型与模拟是环境污染研究与治理的重要技术和手段,也是环境科学研究领域的主要内容之一。

在传统的环境科学教材中,水质模型与模拟往往作为环境系统模拟的一部分进行讲授,由于课时限制,往往对这部分内容介绍得较为简单,学生很难掌握和实际应用,而且对国内外最新进展缺乏了解。北京师范大学自1998年开设“水质模型与模拟”课程以来,面向研究生系统介绍水质模型与模拟相关知识,并结合国内外最新进展,介绍最新水质模型的原理和应用实例,已经取得了丰富的经验,本书即是在此基础上逐渐形成的。

本书以流域为研究对象,对流域中的河流、湖泊(水库)、河口、近海以及陆面污染的水质模型和流域水质管理模型进行详细论述,主要包括流域水质模型

与模拟的分类与发展、水质模型与模拟的一般方法步骤、污染物迁移转化的规律、河流水质模型、河口水质模型、湖库水质模型、污水排海水质模型、流域非点源模型和流域水质管理与规划模型。根据多年的水质模型教学和科研工作经验,吸取国内外一系列先进的研究成果,系统阐述流域水质模型与模拟的理论和方法,并给出模型的大量应用实例,具有新颖性、科学性和系统性的特点。

本书在北京市教委“北京高等教育精品教材建设”项目和北京师范大学“硕士研究生学位基础课程建设”项目资助下完成。全书共八章,由郝芳华主编,各章编写人员如下:第1章,赵彦伟、郝芳华、徐菲;第2章,赵彦伟、郝芳华、李春晖、徐菲;第3章,郝芳华、陈灌春;第4章和第5章,李春晖、郑小康;第6章,郝芳华、陈灌春;第7章,程红光、王丹;第8章,程红光、龚莉。全书由郝芳华和李春晖设计、统稿。另外,吴睿、汪思慧、庞爱萍、吴婧、周晓萃和欧阳威等在资料搜集和书稿校正等方面做了许多工作,在此向他们表示感谢!本书在编写过程中,参考了国内外相关著作和学术期刊文献,许多实例也是近年来的研究成果,特向这些作者致谢!

本书可用作高等院校环境科学与工程专业、水文水资源专业以及相关专业的高年级本科生或者研究生的教材或参考书,也可供从事环境保护、水文水资源等研究工作的专业人员参考。另外本书附有课件讲义,以便学生学习和教师授课。

由于作者水平有限,书中难免有不完善之处,敬请读者不吝赐教!

编者

2008年1月于北京

# 目 录

## 第 1 章 绪 论 /1

- 1.1 水质模拟的意义 /3
  - 1.1.1 水环境问题 /3
  - 1.1.2 水质模拟的意义与作用 /7
- 1.2 流域水质模型的定义与分类 /8
  - 1.2.1 流域水质模型的定义 /8
  - 1.2.2 流域水质模型的分类 /9
- 1.3 流域水质模型的产生与发展 /10
  - 1.3.1 地表水质模型 /10
  - 1.3.2 非点源模型 /11
  - 1.3.3 流域水质管理模型 /12
- 1.4 水质模型建立的方法与步骤 /13
- 1.5 参数估值与模型求解的一般方法 /15
  - 1.5.1 参数估值的一般方法 /15
  - 1.5.2 模型求解的一般方法 /17

## 第 2 章 流域水污染物迁移与转化 /19

- 2.1 流域概述 /21
  - 2.1.1 流域的定义 /21
  - 2.1.2 流域的基本特征 /22

- 2.2 流域水文过程 /23
  - 2.2.1 水文循环与水量平衡 /23
  - 2.2.2 陆面产汇流过程 /26
  - 2.2.3 水体水文过程 /32
- 2.3 流域水污染物迁移转化 /46
  - 2.3.1 污染物陆面迁移 /46
  - 2.3.2 污染物在水体中的迁移与转化 /47
  - 2.3.3 污染物迁移与转化基本模型 /59

### 第3章 河流水质模型 /63

- 3.1 一维水质模型 /65
  - 3.1.1 单一河段水质模型 /65
  - 3.1.2 多河段水质模型 /73
  - 3.1.3 含支流的河流矩阵模型 /77
- 3.2 二维水质模型 /79
  - 3.2.1 BOD 二维模型 /79
  - 3.2.2 DO 二维模型 /81
- 3.3 其他水质模型 /82
  - 3.3.1 QUAL 河流水质综合模型 /82
  - 3.3.2 重金属污染模型 /91
  - 3.3.3 WASP 模型 /97
  - 3.3.4 国内外部分其他水质模型简介 /109

### 第4章 河口水质模型 /117

- 4.1 河口水质模型的基本方程 /119
  - 4.1.1 一维模型 /120
  - 4.1.2 二维模型 /126
  - 4.1.3 河口生态水质模型 /128

## 4.2 其他模型 /135

## 4.3 案例分析 /136

**第5章 湖泊水库水质模型 /139**

## 5.1 湖泊水库污染特征 /141

## 5.1.1 湖泊水库污染来源与途径 /141

## 5.1.2 营养源与营养负荷 /143

## 5.1.3 富营养化的控制因子 /145

## 5.1.4 湖泊水库富营养化判别标准 /148

## 5.2 湖泊水库温度模型 /151

## 5.2.1 均匀混合温度模型 /151

## 5.2.2 分层温度模型 /153

## 5.3 湖泊水库水质模型 /156

## 5.3.1 湖库完全混合箱式模型 /156

## 5.3.2 湖库分层水质模型 /159

## 5.4 湖泊水库富营养化模型 /161

## 5.4.1 经验模型 /162

## 5.4.2 生态模型 /164

## 5.4.3 生态动力学模型 /169

## 5.5 湖泊水库生态系统模型 /169

## 5.5.1 概念模型 /169

## 5.5.2 一般数学表达式 /170

## 5.5.3 系统模拟 /171

## 5.6 湖泊水库水质模拟通用软件介绍 /174

## 5.6.1 WQRRS 模型 /174

## 5.6.2 SELECT /176

## 5.6.3 CE QUALR1 和 CE QUALW2 /176

## 5.6.4 BETTER /177

- 5.6.5 COORS 和 LARM /177
- 5.6.6 EFDC /178
- 5.6.7 MIKE /178
- 5.7 案例分析 /179
- 5.7.1 三亚市赤田水库水质预测 /179
- 5.7.2 阳澄湖富营养化综合评价与环境容量分析 /180

## 第6章 污水排海水质模型 /185

- 6.1 污水排海工程概述 /187
- 6.1.1 污水排海工程历史 /187
- 6.1.2 污水排海工程原理 /188
- 6.2 污水排海工程影响因素 /190
- 6.2.1 气象要素 /190
- 6.2.2 海洋水文状况 /190
- 6.2.3 扩散稀释系数 /193
- 6.2.4 大肠杆菌衰减率对外养
- 6.3 排海污染物混合稀释过程 /197
- 6.3.1 初始稀释 /197
- 6.3.2 污染羽流再稀释预测阶段 /200
- 6.3.3 长期扩散和输移阶段 /201
- 6.4 污水排海水质模型 /201
- 6.4.1 初始稀释模型 /201
- 6.4.2 再稀释数学模型 /209
- 6.4.3 二维流体动力学模型 /218
- 6.4.4 潮流混合模型 /219
- 6.4.5 WAHMO 模型 /222
- 6.4.6 全场模型 /229
- 6.5 案例分析 /231

- 6.5.1 大连湾排海污染物迁移转化模拟 / 231
- 6.5.2 深圳市政污水排海工程对海域水质影响模拟 / 233

## 第 7 章 流域非点源模型 / 235

- 7.1 非点源污染概述 / 237
  - 7.1.1 非点源污染的产生过程 / 238
  - 7.1.2 非点源污染的主要类型 / 239
  - 7.1.3 主要非点源污染物及其标准 / 240
- 7.2 流域水文过程模拟 / 241
  - 7.2.1 水文模拟概述 / 241
  - 7.2.2 水文过程模型 / 242
- 7.3 土壤侵蚀与产沙过程模拟 / 246
  - 7.3.1 侵蚀产沙模拟 / 246
  - 7.3.2 土壤养分及其流失 / 256
- 7.4 主要非点源污染物在环境介质中的迁移转化模拟 / 258
  - 7.4.1 氮元素 / 258
  - 7.4.2 磷元素 / 259
- 7.5 流域非点源污染模型 / 260
  - 7.5.1 流域非点源污染模型的基本概念 / 261
  - 7.5.2 常用模型 / 262
  - 7.5.3 GIS 在非点源模拟中的应用 / 269
- 7.6 情景分析与模拟 / 271
  - 7.6.1 概述 / 271
  - 7.6.2 情景分析方法 / 273
- 7.7 案例分析 / 277
  - 7.7.1 洛河流域非点源分布式模拟 / 277
  - 7.7.2 洛河流域非点源 SWAT 情景模拟 / 284

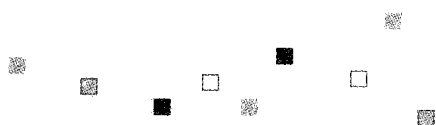
## 第 8 章 基于水质模型的流域水质管理 /289

- 8.1 流域水质管理概述 /291
- 8.2 流域水质管理模型 /292
  - 8.2.1 BASINS 模型 /292
  - 8.2.2 WARMF 模型 /298
- 8.3 水质评价模型 /301
  - 8.3.1 流域污染源评价 /301
  - 8.3.2 流域水质评价 /303
- 8.4 流域水质规划模型 /305
  - 8.4.1 流域水功能分区 /305
  - 8.4.2 流域水环境容量模型 /314
  - 8.4.3 流域污染物总量控制 /324
- 8.5 案例分析 /335
  - 8.5.1 宁波市水环境功能区划 /335
  - 8.5.2 BASINS 模型实例研究 /337
  - 8.5.3 WARMF 模型实例研究 /339

## 参考文献 /343

# 第 1 章

## 绪 论





流域水质模型是描述流域污染物随时间和空间迁移、转化规律的数学方程，可以模拟污染物在流域中迁移、转化的特征和规律，还可以对水质发展趋势进行预测。本章主要结合目前水环境问题，讨论流域水质模型与模拟的意义；对水质模型进行分类，并从地表水质模型、非点源模型和流域水质管理模型三个方面总结国内外研究进展；最后介绍水质模型建立的一般方法与步骤，并特别论述了参数估值与模型求解的几种方法。

## 1.1 水质模拟的意义

### 1.1.1 水环境问题

水环境问题伴随着人类社会经济活动的非理性发展而出现。通常所说的水环境问题是指由于人类的生产和生活活动，使自然水环境系统失去平衡，反过来影响人类生存和发展的问題。流域水环境问题是指在整個流域范围内，包括河流、湖库、河口以及陆域等，由于人类不合理生产、生活活动，使水体受到污染、水生态系统遭到破坏而引发的问題。目前，国内外流域水环境恶化趋势仍未得到有效控制，在发展中国家表现得尤为突出。

#### 1.1.1.1 水域水环境污染

##### (1) 河流水环境污染

河流受到的负面影响越来越严重，工业化、城市化过程中排放入河的生产和生活废水含有大量的各类污染物，引发水体污染，进而导致水质恶化，生态功能丧失，严重破坏河流原有的平衡状态。据调查，全世界未受人类影响的河流所剩无几，大部分亚洲、非洲、拉丁美洲及东欧国家均存在不同程度的河流污染问题。在非洲，各类河流被未经处理的工业与生活污水污染，河流的稀释与净化功能丧失，生态功能受到严重损害。在欧洲，人类高强度、高频率地利用河流是从五百多年前开始的，使许多河流成为传输城市废物和污水的下水道，其自然生态完整性已经基本丧失，如泰晤士河、莱茵河等。

在我国，河流水环境污染情况更为严重，这些污染破坏了水生物的生存环境，严重影响了河流的生态功能，并加剧水生生境的退化。2005 年，我国环境监测网所覆盖的七大水系的 411 个地表水监测断面中，Ⅰ～Ⅲ类、Ⅳ～Ⅴ类和劣Ⅴ类水质的断面比例分别达到 41%，32% 和 27% (图 1-1)。七大水系中，仅珠江、长江水质较好，辽河、淮河、黄河、松花江水质较差，海河污染严重。从整体上看，我国河流呈现出以耗氧有机物为主要污染物、以水体黑臭为主要特征的污染现象，严重阻碍了我国可持续发展的进程。

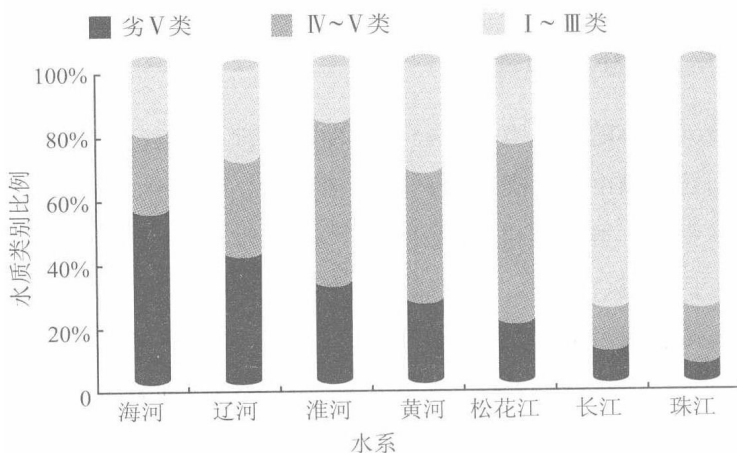


图 1-1 2005 年七大水系水质类别比较

## (2) 湖泊(水库)水环境污染

在湖泊(水库)方面，水体富营养化现象较为突出。工业及城市生活污水中含有大量有机污染物，农业非点源也含有大量的营养物质，包括氮、磷和碳等，它们会汇集到湖泊(水库)中累积。适量的污染物质及营养物质对湖泊(水库)生物生长是有益的，有利于维持良好的生态平衡。但累积含量超过一定的限值，会引起藻类异常增殖，导致富营养化发生。严重时，会因为水中溶解氧的消耗，导致鱼类等水生动植物缺氧死亡，湖(库)水发黄发臭。严重富营养化发生时，还会造成湖泊(水库)丧失基本的水体功能，形成脏臭不堪的“死湖”。

目前，无论是发达国家还是发展中国家，都存在不同程度的湖泊(水库)富营养化问题。日本琵琶湖受到城市和农业发展的影响，富营养化现象极为严重，尽管采取了一定的治理措施，水质已经有所好转，但仍未能从根本上解决问题。在我国，据 2005 年中国环境状况公报，28 个国控重点湖(库)中，满足Ⅱ类水质的湖(库)仅 2 个，占 7%；Ⅲ类水质的湖(库)6 个，占 21%；Ⅳ类水质的湖(库)3 个，占 11%；Ⅴ类水质的湖(库)5 个，占 18%；劣Ⅴ类水质湖(库)12 个，高达 43%。其中，主要湖泊中，太湖、滇池和巢湖水质均为劣Ⅴ类，主要污染指标均为总氮和总磷(表 1-1)。以太湖为例，2005 年，太湖湖体高锰酸盐指数和总磷年均值分别为Ⅲ类、Ⅳ类，但由于总氮污染严重，湖体水质仍为劣Ⅴ类；湖体营养状态指数为 62，处于中度富营养状态。多年积累的结果，导致 2007 年 6 月太湖蓝藻暴发，水体发黑发臭，在无锡及其周边引发了严重的水危机，受到全世界的广泛关注。

表 1-1 2005 年重点湖(库)水质类别

| 水系         | 个数 | I 类 | Ⅱ类 | Ⅲ类 | Ⅳ类 | Ⅴ类 | 劣Ⅴ类 | 主要污染指标 |
|------------|----|-----|----|----|----|----|-----|--------|
| 三湖         | 3  | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 3   |        |
| 大型淡水湖      | 10 | 0   | 1  | 2  | 2  | 2  | 3   |        |
| 城市内湖       | 5  | 0   | 0  | 0  | 0  | 2  | 3   | 总氮、总磷  |
| 大型水库       | 10 | 0   | 1  | 4  | 1  | 1  | 3   |        |
| 总计         | 28 | 0   | 2  | 6  | 3  | 5  | 12  |        |
| 2004 年比例/% |    | 0   | 8  | 18 | 15 | 22 | 37  |        |
| 2005 年比例/% |    | 0   | 7  | 21 | 11 | 18 | 43  |        |

(3)河口水环境污染

河口是江河的入海口，是从陆地到海洋、从淡水到咸水的过渡地带。在河口，江河中的淡水和海洋中的咸水进行混合，二者相互作用形成了复杂的区域。正是由于位于河流与海洋的交汇处，因此河口营养物质丰富，生物生产力大，生态环境多变，其理化环境与河流和海洋均有差异，是一种独特的生态系统。换言之，河口位置的独特性决定了河口水环境是一个

多因素共同作用的混合系统。它的水质主要受上游径流的大小、来水的水质、江段所接纳的排污负荷、地理地形以及潮汐作用等因素的综合影响。

受人类活动的影响,如农业生产活动和城市工业生产过程中排出大量污水,河流入海物质流除了淡水径流及其挟带的固体径流——泥沙外,还包括化学径流(污染物和营养盐),这造成河口地区的严重污染。近年的监测数据表明,长江口营养盐入海通量和污染物排海量大幅增加,以致长江口及邻近海域成为我国沿海劣质水分布面积最大、富营养化多发的区域,长江口水质不到Ⅳ类。另外,据2001~2006年《广东省海洋环境质量公报》,珠江口海域已经连续6年被列为严重污染区域。总体上看,我国河口的水环境状况不容乐观,呈现加重趋势。

### 1.1.1.2 陆域非点源污染

非点源污染(non-point source pollution)亦称面源污染,它是指溶解性或固体污染物在大面积降水和径流冲刷作用下,汇入受纳水体而引起的水体污染。非点源污染一般主要来源于降水(或融雪)产生的径流。雨水(或融雪)形成径流的过程中,会溶入大量的污染物,如生活垃圾、大气中的粉尘、重金属等。若这些径流未经处理而直接进入河流、湖泊中,就会造成河流、湖泊的富营养化或其他形式的污染。与点源相比,非点源污染的影响范围广、来源不确定,具有明显的区域性特征。在不同地区,由于社会经济活动方式及下垫面的差异,起主导作用的污染源类型不同,如农业化肥农药污染、农村牲畜粪便污染、城市径流污染、林区非点源污染等。污染类型广、污染方式复杂且难于控制,非点源污染已经成为了世界范围内面临的主要水环境问题。

在发达国家,由于基本实现了点源污染的有效治理,非点源逐步成为水环境的重要污染源甚至首要污染源。在美国,60%的水体水污染来自于非点源污染,总体上看,非点源污染负荷占负荷总量的2/3,其中农业贡献率为75%左右。就部分污染物而言,美国江河中73%的BOD,92%的悬浮物和83%的细菌均来自非点源;丹麦的大部分河流中94%的氮负荷、52%