



SHUIHUANJING JIANCE PINGJIA YU
SHUIHUA ZHINENGHUA YUCE FANGFA
JI YINGJI ZHILI JUECE XITONG

水环境监测评价与 水华智能化预测方法 及应急治理决策系统

刘载文 王小艺 崔莉凤 著



化学工业出版社

化学工业出版社出版基金资助出版



ING JIANCE PIN

NENGHUA YUCE FANGFA

JITING, ZHILI JUECE XITONG

水环境监测评价与 水华智能化预测方法 及应急治理决策系统

刘载文 王小艺 崔莉凤 著



化学工业出版社

·北京·

本书系统地提出基于智能信息处理技术的水质评价与水华预测方法，以及水华应急治理决策方法，论述了水环境监测和数据远程传输技术，介绍了水华预警软件系统的实现方案。内容主要包括：通过模拟实验研究藻类生长和繁殖的过程，采用主成分分析法和粗糙集理论分析水华暴发的影响因素，探讨了灰色关联度分析方法和多属性决策理论在水体富营养化评价中的应用，研究基于 petri 网和 Agent 的建模仿真技术，分别研究 BP、RBF 和 Elman 等人工神经网络建模方法，建立水华发生的短期预测模型，研究基于最小二乘支持向量机（LSSVM）、小波神经网络组合模型（WANN）、灰色-神经混合预测模型的水华中期预测方法，采用基于多元周期平稳时序分析方法对水华形成过程中的特征因素建模和预测，提出了基于模糊-多属性决策理论、最小风险与最优成本综合约束条件下的模糊-贝叶斯决策方法，以及基于环境成本的模糊灰色关联度的水华应急治理决策方法。

本书可供从事水环境监测、水质评价以及进行水华预测方法研究和应急治理的决策管理人员和工程技术人员参考，也可作为环境工程、自动控制、信息工程、管理工程等专业本科生与研究生的教材或参考书。

图书在版编目（CIP）数据

水环境监测评价与水华智能化预测方法及应急治理决策系统/刘载文，王小艺，崔莉凤著. —北京：化学工业出版社，2013.6

ISBN 978-7-122-16985-3

I. ①水… II. ①刘…②王…③崔… III. ①水环境-环境监测-评价②人工智能-应用-水环境-环境预测③水环境-综合治理-决策系统 IV. ①X832②X143

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 074366 号

责任编辑：刘 哲
责任校对：吴 静

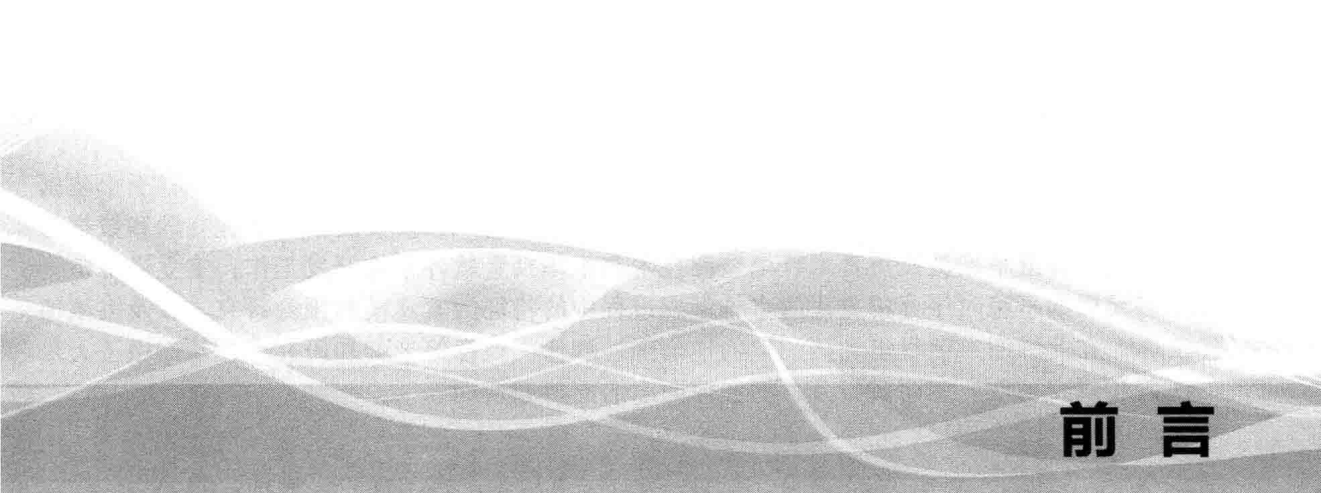
装帧设计：张 辉

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）
印 装：大厂聚鑫印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张 20¼ 字数 564 千字 2013 年 11 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899
网 址：<http://www.cip.com.cn>
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：68.00 元

版权所有 违者必究



前言

人类文明大多起源于江湖流域，随着经济社会的发展，使得湖泊及江河流域受到程度不同的污染，在河湖水体污染中，富营养化是最普遍、危害最大的水环境问题之一，水华是水体富营养化的一种典型表现。随着水体富营养化的加剧，湖泊发生水华的现象也越来越普遍，使生态系统遭受严重破坏，给人们生活带来极大危害。水体富营养化和水华暴发造成的环境和经济问题越来越引起人们的关注，已经成为一个全球性的重大水环境问题。

随着我国经济快速发展，水资源的短缺和水污染问题的日益加剧，中国被联合国认定为世界上最缺水的 13 个国家之一。环境保护是我国的一项基本国策，水华预防和治理是保护城乡环境的重要措施，已成为我国水资源保护急需解决的一个重大问题。因此，如何建立描述水华形成过程的数学模型，进而合理地预测水华发生，并对水华暴发这一非常规突发事件做出针对性的应急治理决策，对最大限度地保护和利用水环境、促进水环境保护和技术进步具有重要意义。

水华是在人类活动的干扰下，多种因素长期相互作用的结果。除了营养物质（氮、磷）以外，其他影响因子还包括化学因素（如 pH 值、溶解氧、化学需氧量、电导率等）、气候因素（如光照、温度和降水等）、地理和物理因素（如湖库地质状况、水流等）、生物因子（如水植物和鱼的种类数量等）。由于影响水华发生的因素众多，且各因素之间存在着相关性和非线性，目前对于水华发生的临界因素和机理还不是十分清楚，使得研究水华生成机理变得十分困难。

通过对实验数据、历史数据和现场监测数据的信息挖掘与分析，采用智能信息处理理论和技术研究水质评价问题、水华形成过程与模型，以及水华智能预测与应急治理决策方法，是一个崭新课题，涉及控制科学、智能科学、环境工程、管理科学、计算机技术与信息处理等多个学科领域。诸多的理论和技术问题有待探讨，研究工作具有重要的学术研究价值和重大的应用前景，所研究的理论及方法可以推广到其他公共安全突发事件研究中。

本项目组从 2006 年开始对课题进行广泛深入的研究，历经 6 年多的工作，先后得到了北京市自然科学基金委员会（重点项目 8101003、2102013）、国家自然科学基金委员会（面上项目 51179002）、北京市科委（专项 Z080109024208139、科技新星项目）、北京市教育委员会（科技创新平台、学术创新团队 PHR201007123）等的资助，以及北京市水文总站、水利部太湖流域管理局、北京安恒测试技术公司、苏州市自来水公司等给予的大力支持和帮助，他们为我们提供了大量数据和在北京、无锡、苏州等水域的实验与应用，使研究工作和项目应用取得预期效果和明显的经济社会效益。

本书是对我们研究成果的总结，由于许多工作是探索性的，不足和不妥之处请读者指正见谅。我们希望本书对从事水环境监测、水质评价，以及进行水华预测方法的研究和应急治理的决策管理人员和工程技术人员有所帮助或参考，起到抛砖引玉的作用，共同推动水华预

测与水华应急治理决策方法研究的深入，为促进水环境保护和技术进步贡献绵薄之力。

本书由刘载文教授组织撰写，并负责水华预测方法等研究和全书的统稿工作；王小艺副教授负责水质评价与水华应急治理决策方法等研究；崔莉凤教授负责水华机理实验和数据分析等研究；许继平副教授负责水环境监测技术与水华预警软件系统开发工作；王立讲师负责基于多元周期平稳时序分析方法的水华形成过程中的特征因素建模和预测研究，以及书稿编排工作。在此感谢本项目组和研究室的连晓峰、魏伟、施彦等老师和研究生，他们做了大量的实验和研究工作，感谢黄振芳、刘波等同志的支持和帮助。

著者

2013 年 1 月于北京工商大学

1 第 1 章 水环境监测、水质评价与水华预测概论 1

1.1	水体富营养化与水华的危害	1
1.1.1	水体富营养化	1
1.1.2	水华的概念及与水体富营养化关系	2
1.1.3	藻类水华产生的主要过程	3
1.1.4	水华的危害	4
1.2	水体富营养化评价方法	5
1.2.1	水体富营养化评价标准	5
1.2.2	富营养化评价模型	6
1.2.2.1	营养指数法	6
1.2.2.2	浮游植物生态模型	7
1.2.2.3	生态动力学模型	7
1.2.2.4	不确定性分析和回归模型	7
1.2.2.5	人工神经网络模型	7
1.3	水华预测建模方法	8
1.3.1	基于机理生态建模方法	8
1.3.1.1	回归模型	8
1.3.1.2	总磷平衡模型	8
1.3.1.3	生态动力学模型	9
1.3.1.4	非线性回归模型	9
1.3.2	基于人工智能的建模方法	10
1.3.2.1	人工神经网络的预测模型	10
1.3.2.2	组合智能方法的预测模型	11
1.4	水环境监测技术及应用	12
1.5	本章小结	13

2 第 2 章 “水华”成因及规律的实验与阈值点研究 14

2.1	概述	14
2.2	实验设计与方法	14

2.2.1	模拟自然条件	14
2.2.2	藻种的预培养和保存	15
2.2.3	正交实验条件选择	15
2.2.4	藻类生长实验	16
2.2.5	各指标测定方法	16
2.3	实验结果与分析	18
2.3.1	藻类生长曲线分析	19
2.3.1.1	叶绿素 a 表征藻类生长曲线	19
2.3.1.2	不同 N/P 条件下藻类生长曲线	20
2.3.2	表征指标的相关性分析 (DO、pH 和 chl-a)	21
2.3.3	Δ DO 与 Δ pH 预测“水华”暴发的研究	23
2.3.4	藻类生长比增长速率影响因素的研究	25
2.3.5	藻类生长感官指标分析	26
2.4	微量元素对藻类生长的影响	27
2.4.1	微量元素	27
2.4.2	微量元素作用实验 (铁、锰及不同 Mn^{2+} 浓度对藻类生长的影响)	28
2.4.3	各指标测定方法和仪器药品	28
2.4.3.1	指标测定方法	28
2.4.3.2	实验仪器及药品	28
2.4.4	微量元素对藻类生长的影响	29
2.4.4.1	不同 Fe^{3+} 浓度对藻类生长的影响	29
2.4.4.2	不同 Mn^{2+} 浓度对藻类生长的影响	31
2.4.4.3	不同氮磷比对藻类增长的影响与 Fe^{3+} 影响的比较	32
2.5	水力搅动对藻类生长的影响	33
2.5.1	实验设计与方法	33
2.5.2	实验结果与分析	34
2.5.2.1	有无水力搅动对藻类生长影响	34
2.5.2.2	不同水力搅动强度对藻类生长影响	35
2.5.3	小结	35
2.6	“水华”阈值与暴发点的研究	36
2.6.1	藻类生长趋势分析	36
2.6.1.1	叶绿素 a 低浓度 ($<40\mu g \cdot L^{-1}$) 条件下与藻密度相关性分析	36
2.6.1.2	叶绿素 a 高浓度 ($>40\mu g \cdot L^{-1}$) 条件下与藻密度相关性分析	37
2.6.2	突变理论与蓝藻暴发点模型构建	38
2.6.2.1	突变理论与尖点模型	39
2.6.2.2	蓝藻水华暴发点突变模型的建立	40
2.6.3	尖点突变模型在湖库蓝藻水华形成机理分析中的应用	41
2.6.3.1	样本选择	41
2.6.3.2	蓝藻水华生长综合机理模型仿真	41
2.6.3.3	小结	42
2.6.4	“水华”阈值的研究	42
2.6.4.1	水华暴发感官指标	42

2.6.4.2 北京长河水系水华评价	42
2.7 本章小结	44

3

第3章

水体富营养化评价方法研究

45

3.1 概述	45
3.1.1 营养因素	46
3.1.2 非营养因素	46
3.2 水体富营养化评价标准与指标	47
3.2.1 水体富营养化评价标准	47
3.2.2 水体富营养化评价指标	47
3.2.2.1 水体指标	48
3.2.2.2 表征指标	48
3.2.2.3 感官指标	48
3.3 水体富营养化评价模型	48
3.3.1 评分模型	49
3.3.2 营养指数模型	49
3.3.2.1 卡森指数法 (TSI)	49
3.3.2.2 修正的卡森指数法	49
3.3.2.3 综合营养状态指数法	50
3.3.2.4 改进的综合营养指数法	50
3.3.3 灰色理论评价模型	51
3.4 多属性决策的水体富营养化评价	52
3.4.1 多属性决策理论	52
3.4.2 优化权重获取模型	53
3.4.3 算法步骤	53
3.5 灰色关联分析评价方法	53
3.5.1 灰色关联因素和关联算子集	54
3.5.2 灰色关联公理与灰色关联度	54
3.5.2.1 广义灰色关联度	55
3.5.2.2 灰色相对关联度	55
3.5.2.3 灰色综合关联度	56
3.5.3 灰色关联分析法的步骤	56
3.5.4 改进的灰色关联分析	57
3.5.5 改进的灰色关联分析在水体富营养化评价的应用	58
3.5.5.1 水体富营养化评价步骤	58
3.5.5.2 评价结果比较	60
3.6 水体富营养化评价方法应用	61
3.6.1 综合营养指数的评价方法	61
3.6.1.1 水体评价数据的确定	61
3.6.1.2 水体评价结果比较	61
3.6.2 几种评价方法应用比较	62

3.6.3 富营养化评价结果.....	63
3.7 本章小结	64

4

第4章

水华形成过程分析与智能建模方法

65

4.1 基于 Petri 网的湖库水华形成过程建模	65
4.1.1 模糊理论.....	65
4.1.1.1 模糊理论概述.....	65
4.1.1.2 模糊集理论基本概念.....	66
4.1.2 Petri 网	67
4.1.2.1 Petri 网概述	67
4.1.2.2 Petri 网算法	67
4.1.3 模糊理论与 Petri 网在叶绿素预测中的应用	69
4.2 基于多 Agent 的湖库水华机理建模	79
4.2.1 Agent 技术和 ABM 的研究现状	79
4.2.2 影响水华形成过程的因素分析.....	81
4.2.3 水华形成过程 Agent 系统内部机理策略	81
4.2.3.1 概述.....	81
4.2.3.2 水体内部生化反应建模.....	81
4.2.3.3 生长模型参数动态率定.....	82
4.2.3.4 小结.....	85
4.2.4 水华形成过程 Agent 仿真与建模	85
4.2.4.1 基于 Agent 的水华指标行为建模	85
4.2.4.2 水华形成机理模型动态仿真.....	87
4.2.4.3 仿真系统运行与实现.....	87
4.3 本章小结	89

5

第5章

水华暴发主要因素分析与预测指标体系研究

90

5.1 水华暴发的影响因素	90
5.1.1 化学因素.....	90
5.1.2 物理因素.....	91
5.1.3 生物因素.....	92
5.2 水华暴发主要因素实验	92
5.2.1 实验设计与方法.....	92
5.2.1.1 藻种的预培养和保存.....	92
5.2.1.2 实验因素及水平的选择.....	93
5.2.1.3 正交实验各组条件选择.....	93
5.2.1.4 正交实验方法及具体步骤.....	93
5.2.2 实验结果与分析.....	93
5.3 水华预测指标体系构建	95
5.3.1 粗糙集确定水华预测指标.....	96

5.3.1.1	粗糙集理论	96
5.3.1.2	基于粗糙集理论的水华预测指标选取	97
5.3.2	主成分分析法确定水华预测指标	98
5.3.2.1	主成分分析法	98
5.3.2.2	基于主成分分析法的水华预测指标选取	100
5.3.3	水华预测模型的输入输出变量确定	100
5.3.4	水华预测指标体系	101
5.3.5	小结	101
5.4	水华综合评价模型及在预测中的应用	101
5.4.1	综合评价模型理论	102
5.4.1.1	非线性极小值原理	102
5.4.1.2	灰色预测理论	102
5.4.1.3	改进的 GM(1,1) 模型	107
5.4.2	藻类生长模型研究	107
5.4.2.1	藻类生长模型的建立	107
5.4.2.2	模型中参数的率定结果	108
5.4.2.3	结果验证及分析	110
5.4.3	水华综合评价模型	110
5.4.3.1	水华综合评价函数的构建	110
5.4.3.2	模型中各参数的确定	110
5.4.3.3	计算水华综合评价函数	111
5.4.3.4	水华综合评价函数计算结果及分析	111
5.4.4	水华综合评价模型与灰色预测相结合用于水华预测	113
5.4.4.1	GM(1,1)、改进的 GM(1,1) 模型预测结果比较	113
5.4.4.2	预测结果分析	115
5.4.5	小结	115
5.5	本章小结	115

6 第 6 章水华智能化短期预测方法 116

6.1	概述	116
6.1.1	前向型神经网络	118
6.1.2	反馈型神经网络	118
6.1.3	两种类型各自典型网络的比较	118
6.2	基于 BP 神经网络的水华短期预测方法	118
6.2.1	BP 神经元模型和网络结构	118
6.2.1.1	BP 网络结构及其算法	118
6.2.1.2	BP 算法的改进	122
6.2.2	基于 BP 神经网络的水华短期预测模型建立与仿真	124
6.2.2.1	主导变量与数据预处理	124
6.2.2.2	预测模型的建立与仿真分析	126
6.2.2.3	不同间隔时间的预测对比	128

6.2.2.4	三种改进算法的预测对比	130
6.3	基于 RBF 神经网络的水华短期预测方法	131
6.3.1	RBP 神经元模型和网络结构	131
6.3.1.1	径向基 (RBF) 神经元模型	131
6.3.1.2	RBF 神经网络结构	132
6.3.1.3	基于不同时间序列输入量的 RBF 神经网络模型分析	133
6.3.1.4	基于 MATLAB 工具箱的 RBF 网络设计	137
6.3.1.5	小结	137
6.3.2	基于 RBF 的水华短期预测模型模型建立与仿真	137
6.3.2.1	RBF 预测模型的建立	137
6.3.2.2	仿真分析	138
6.3.2.3	径向基函数宽度与网络拟合能力分析	140
6.3.2.4	径向基函数宽度与网络泛化性能分析	141
6.3.2.5	短期 RBF 神经网络的输入变量的敏感度分析	143
6.3.2.6	RBF 与 BP 网络水华预测软测量模型的比较	143
6.3.3	小结	146
6.4	基于 Elman 神经网络的水华短期预测方法	146
6.4.1	Elman 神经元模型和网络结构	146
6.4.1.1	Elman 网络特点	146
6.4.1.2	Elman 神经元及函数	147
6.4.1.3	Elman 的学习算法	147
6.4.1.4	Elman 网络的改进	147
6.4.2	基于 Elman 神经网络的水华短期预测模型建立与仿真	149
6.4.2.1	Elman 神经网络预测模型的建立	149
6.4.2.2	北京市河湖水华短期预测	152
6.4.2.3	Elman 模型测试及其泛化能力分析	154
6.4.2.4	Elman 网络与 BP 网络两种预测模型对比	156
6.5	基于灰色理论与神经网络的水华预测模型	158
6.5.1	灰色系统模型	158
6.5.1.1	灰色理论概述	158
6.5.1.2	灰色系统建模原理	159
6.5.1.3	灰色系统预测	161
6.5.1.4	GM(1,1) 预测模型	162
6.5.2	灰色理论与神经网络在叶绿素预测中的应用	163
6.5.2.1	预测指标的确定	163
6.5.2.2	灰色理论与神经网络预测步骤	164
6.5.2.3	实验与仿真结果	165
6.5.3	灰色系统模型的原理及改进	166
6.5.3.1	灰色系统的优化	166
6.5.3.2	灰色理论的应用	167
6.6	基于过程神经网络的水华预测建模	168
6.6.1	过程神经元网络	168

6.6.1.1	过程神经元	168
6.6.1.2	过程神经网络基本模型	168
6.6.2	基于过程神经网络的水华预测方法	169
6.6.2.1	基于函数正交基的 PNN 预测算法	169
6.6.2.2	PNN 算法改进	170
6.6.2.3	水华预测过程神经网络算法实现	170
6.6.3	过程神经网络在水华预测中的应用	171
6.6.4	本节小结	173
6.7	本章小结	173

第 7 章

水华智能化中长期预测方法

175

7.1	基于支持向量机的水华中期预测方法	175
7.1.1	回归型支持向量机	176
7.1.1.1	支持向量机的核	176
7.1.1.2	非线性回归算法	176
7.1.1.3	常用的核函数	177
7.1.2	基于最小二乘支持向量机的水华中期预测模型建立与仿真	178
7.1.2.1	最小二乘支持向量机算法	178
7.1.2.2	最小二乘支持向量机参数选择	179
7.1.2.3	LSSVM 建模	179
7.1.2.4	模型参数选择	180
7.1.2.5	LSSVM 中期预测及结果分析	180
7.1.2.6	支持向量机模型与神经网络模型对比	182
7.1.2.7	最小二乘支持向量机在北京市河湖水华中期预测中的应用	183
7.2	基于小波神经网络的水华中期预测方法	185
7.2.1	小波分析	185
7.2.1.1	一维连续小波变换	186
7.2.1.2	离散小波变换	186
7.2.1.3	多分辨率分析	187
7.2.1.4	快速小波变换	188
7.2.2	基于 WANN 网络的水华中期预测模型建立与仿真	188
7.2.2.1	WANN 网络构建	188
7.2.2.2	离散小波变换	189
7.2.2.3	隐层神经元个数的选择	189
7.2.2.4	实验结果与分析	189
7.2.2.5	WANN 与 BP 预测结果比较	191
7.3	基于灰色理论与神经网络的水华长期预测方法	193
7.3.1	灰色理论与神经网络在水华预测中的应用	193
7.3.1.1	WPGM (1, 1)-BP 神经网络模型	193
7.3.1.2	改进的灰色 WPGM (1, 1)-BP 神经网络模型	194
7.3.1.3	灰色-神经网络水华预测模型建立步骤	196

7.3.2 基于灰色-神经网络的水华长期预测模型建立与仿真	197
7.4 本章小结	201

8

第8章

水华时序预测及因素分析方法

202

8.1 引言	202
8.2 水华时序预测	204
8.2.1 监测数据采集及预处理	204
8.2.2 特征因素筛选	204
8.2.3 特征因素时序建模	205
8.2.3.1 确定特征因素时序结构	205
8.2.3.2 建立特征因素时序周期项模型	205
8.2.3.3 建立特征因素时序随机项模型	206
8.2.3.4 建立特征因素多元周期平稳时序模型	206
8.2.4 特征因素时序预测	208
8.2.4.1 特征因素多重潜周期多元自回归混合模型预测	208
8.2.4.2 多重潜周期多元自回归混合模型灰色预测	208
8.3 水华特征因素分析	209
8.3.1 预测误差计算	209
8.3.2 因素分析	210
8.4 水华时序预测及因素分析实例	211
8.4.1 水华时序预测	211
8.4.1.1 特征因素监测数据采集及预处理	211
8.4.1.2 特征因素筛选	211
8.4.1.3 特征因素时序建模	215
8.4.1.4 水华特征因素多元时序预测	217
8.4.2 水华特征因素分析	217
8.4.2.1 预测误差计算	217
8.4.2.2 因素分析	217
8.4.3 特征因素预测结果比较	218
8.5 本章小结	224

9

第9章

水华应急处理决策方法

225

9.1 水华主要治理方法与应急处理决策方法	225
9.1.1 水华主要治理方法	225
9.1.2 应急处理决策方法	227
9.2 水华治理决策指标体系构建	228
9.2.1 指标体系构建原则	228
9.2.2 水华治理决策指标体系构建	228
9.3 模糊-多属性决策理论及其水华应急治理决策中的应用	229
9.3.1 决策理论与原理	229

9.3.2	多属性决策方法	230
9.3.3	模糊-多属性决策理论应用的基本步骤	233
9.3.3.1	建立决策矩阵及规范化	233
9.3.3.2	属性权重的获取	234
9.3.3.3	水华应急治理决策实现	234
9.3.4	基于多属性理论的湖库藻类水华应急决策方法的实现	234
9.3.5	基于模糊-多属性理论的北京湖库水华应急决策方法应用	236
9.3.6	小结	238
9.4	基于带有约束条件的模糊-贝叶斯决策水华应急治理决策方法	239
9.4.1	贝叶斯决策理论	239
9.4.1.1	决策理论与原理	239
9.4.1.2	贝叶斯决策方法	239
9.4.2	基于综合约束的贝叶斯决策理论在水华应急治理中的应用	239
9.4.2.1	综合约束条件构建	239
9.4.2.2	概率的模糊化处理	241
9.4.3	基于模糊-贝叶斯理论的水华应急治理决策实现	241
9.4.4	小结	244
9.5	基于环境成本的模糊灰色关联度的多目标决策方法	244
9.5.1	环境成本多目标决策模型建立方法	244
9.5.2	分层矩阵构建	245
9.5.3	参考方案确定	246
9.5.4	灰色关联度理论	246
9.5.4.1	灰色关联度理论	246
9.5.4.2	灰色关联度计算	246
9.5.5	水华应急治理模糊-灰色关联度方法	247
9.5.5.1	决策层次及规范化	247
9.5.5.2	水华应急治理决策仿真	249
9.5.6	小结	251
9.6	基于贝叶斯决策理论的水华治理决策方法	251
9.6.1	贝叶斯决策理论基础	251
9.6.2	基于贝叶斯决策理论的水华治理决策方法	251
9.6.2.1	水华治理决策多指标体系的确立	251
9.6.2.2	水华治理决策模型	251
9.6.2.3	水华治理贝叶斯决策方法	254
9.6.3	本节小结	260
9.7	本章小结	260

第10章

河湖水质评价及水华预警系统实现

261

10.1	系统设计与实现	261
10.1.1	系统结构	261
10.1.2	水质信息采集终端设计	262

10.2	监控系统体系结构与工作原理	263
10.2.1	监测系统总体框架	263
10.2.2	GPRS 技术与特点	263
10.2.3	监测系统 GPRS 的组网方式	265
10.2.4	系统配置	265
10.2.5	系统工作原理	265
10.2.6	数据传输通信原理	266
10.2.7	远程监测站工作方式	266
10.2.8	通信协议的设计	267
10.3	远程监测软件	267
10.3.1	远程端与数据中心软件	267
10.3.2	实时数据采集程序	267
10.3.3	软件平台与结构	267
10.3.4	软件实现技术	268
10.3.4.1	Windows Sockets 网络接口技术	268
10.3.4.2	VB 调用 MATLAB 的 ActiveX 技术	268
10.3.4.3	MATLAB 的 COM-Builder 技术	271
10.3.4.4	MATLAB 与 Access 数据库的连接	272
10.3.4.5	VB 与 Access 数据库的连接	272
10.3.4.6	VB 的数据传输技术	273
10.4	水华智能预测与预警应用系统	275
10.4.1	水质评价及水华预警系统 (应用系统一)	275
10.4.1.1	系统的主操作界面	275
10.4.1.2	数据采集模块	275
10.4.1.3	数据查询模块	275
10.4.1.4	水质评价模块	276
10.4.1.5	水华预警模块	277
10.4.2	叶绿素与溶解氧预测软件系统 (应用系统二)	279
10.4.2.1	叶绿素预测子系统	279
10.4.2.2	溶解氧预测子系统	279
10.4.3	湖库水质监测与水华应急治理决策系统 (应用系统三)	282
10.4.3.1	系统框架	282
10.4.3.2	系统实现	284
10.4.3.3	系统算法实现	285
10.4.4	太湖水质远程监测与信息管理系统 (应用系统四)	291
10.4.4.1	GPRS 远程无线传输技术	291
10.4.4.2	基于 GPRS 的水质远程监测接口设计	296
10.4.4.3	系统架构与主要功能	302
10.4.4.4	软件结构	304
10.4.4.5	系统软件功能与界面	305
10.5	本章小结	309

第 1 章

水环境监测、水质评价与水华预测概论

随着经济社会的发展,水体富营养化已经成为一个全球性的重大水环境问题。随着全球水体富营养化的加剧,湖泊发生水华现象也越来越普遍,它造成的环境和经济问题越来越引起人们的关注。各国为控制富营养化进行了大量研究与实践,近 20 年来,我国对湖泊富营养化状况、产生原因进行了一系列研究与防治的实践,但是,富营养化仍未得到有效控制。本章简述水华与水体富营养化概念、水华的影响因素,以及目前 GPRS 在水质信息采集中的应用,并分析了水质评价和水华预测的研究及现状。

自古以来,河湖就是陆地生态系统的重要组成部分,人类文明大多起源于江湖流域。然而,由于人类生存作息的长期影响,使得湖泊及流域系统不断发生着巨大变化。据联合国环境规划署 UNEP (United Nations Environment Programme) 的一项调查表明,在全球范围内 30%~40% 的湖泊和水库遭受不同程度富营养化的影响。欧洲、非洲、北美洲和南美洲分别有 53%、28%、48% 和 41% 的湖泊存在不同程度的富营养化现象,亚太地区 54% 的湖泊处于富营养化状态。在我国,早在 20 世纪 60 年代太湖中已经发现有蓝藻水华出现。20 世纪 80 年代初,进行调查的 34 个湖泊中有一半以上的湖泊面积属于富营养化状态。我国约有 2 万多个湖泊,90 年代以来,全国淡水水体的富营养化状况更加严重,60% 的天然湖泊有不同程度的富营养化污染现象。水华的暴发,破坏了水体中的生物多样性,严重制约了经济建设和社会发展。近年来,中央和地方为治理富营养化湖泊藻类水华投入了大量资金,滇池耗资 40 亿,太湖耗资 100 亿,一些小型城市湖泊的治理也动辄上亿元。

例如,我国太湖等流域自 80 年代就开始投入大量的资金对其水华发生和治理进行研究,但 2007 年 5 月,太湖梅梁湾还是暴发了大规模的蓝藻水华。为什么准确预测水华的暴发不容易?这是因为水华的发生机理非常复杂,影响因素很多,给水华机理建模带来了一定难度。目前普遍采用的是神经网络等智能方法对水华进行预测,取得了一定的成效,开阔了研究思路,但是它们仍处于研究的初步阶段,而以特定河湖为背景建立起来的预测模型,也只能在满足一定条件的河湖环境下发挥预测作用。

随着经济社会的发展,水体富营养化已经成为一个全球性的重大水环境问题,随着全球水体富营养化的加剧,湖泊发生水华现象也越来越普遍,它造成的环境和经济问题越来越引起人们的关注。因而对水质评价和水华预测方法的研究具有重要的理论研究价值和广阔的实际应用前景。

1.1 水体富营养化与水华的危害

1.1.1 水体富营养化

一般来说,水体富营养化是指氮、磷等营养物质大量进入水体,引起藻类及其他浮游生物迅

速繁殖、水体透明度和溶解氧量下降、水质恶化、鱼类及其他生物大量死亡的水体污染现象，给生态系统带来严重后果。实际上，湖泊富营养化是一种在湖泊自然演化中的自然过程，也就是说它在自然条件下也是存在的，但是过程非常缓慢，往往是以地质年代来计算的。但随着人口的增加和工农业生产大规模的迅速发展，大量含有氮、磷营养物质的生活污水和工业污水排入湖泊、河流和水库，大大加速了湖泊富营养化的进程，所以前者称为自然富营养化，后者称为人为富营养化。到 20 世纪中后期，当富营养化及其影响成为人们关注的问题时，其所指的是人为富营养化。国际经济发展合作组织（OECD）将这种“水体中由于营养盐的增加而导致藻类和水生植物生产力的增加、水质下降等一系列的变化，从而使水的用途受到影响”的现象定义为湖泊的富营养化，并给出了相应的评价标准。

1.1.2 水华的概念及与水体富营养化关系

水华，亦称“水花”或“藻花”（water bloom, water-flower or algal bloom），国外常将有害藻水华称之为“HAB”（harmful algal blooms）。通常是指淡水池塘、河流、湖泊、水库等水体受到污染，氮、磷等营养物质大量增加，致使水体达到富营养化或严重富营养化状态，在一定的温度、光照等条件下，某些藻类发生暴发性的繁殖，引起明显的水色变化，并在水面形成或薄或厚的绿色或其他颜色的藻类漂浮物现象。由此可见，水华属于藻型富营养化，是水体富营养化的典型特征之一，是水体富营养化状态下生态平衡遭破坏的集中体现。因此，水华是水体富营养化的表现，水华发生时水体必然已经达到富营养化，而富营养化时水体不一定会出现水华，水华的出现是以水体富营养化为前提条件的。

本质上说，这两者的关系应该是特殊和一般、外因和内因的辩证统一关系。水体营养化状况水平是对水质进行评价的根本描述，通常可分为贫营养、中营养、富营养等三个主要阶段。富营养化阶段就是按照水质评价标准认为各项指标均已超标，或者达到较高的水平，此时的水质恶化，主要是指水体中的营养盐含量超标，这是富营养化对水中生物和人类的健康安全构成威胁的原因。而水华是指水体中的水生植物在营养充足以及外部条件满足的情况下，发生了暴发性的增长，耗费了水体中大量的氧气，对水中其他生物和人类构成了危害。另外，水体富营养状况的具体程度与水华的发生也没有必然联系，只能说富营养化程度越高，发生水华的概率就越大。

水华与富营养化是两个不同的概念，但又互相紧密联系。它们的影响因素不尽相同，富营养化的成因一般认为是由于水域外污染物的大量排入，而水华的发生则需要更多的诸如气温、光照等外在因素的影响。水华的出现，从表观现象上看是瞬时的“暴发”，但是其本质却显然有一个逐渐发展与形成的过程，这一过程是伴随着水体的富营养化状况和气候等其他因素的变化而进行的，它是藻类生物量在水体中逐渐增加的一个缓慢、可以预测的过程。所以，对水华发生的影响因素进行深入分析和研究是对水华进行准确定义和有效预测的前提。

目前，对于湖泊水库营养状态评价标准的某些部分还持有不同意见。首先，透明度作为一种影响水华发生的物理因素，主要受水体的营养状况影响，水体富营养状况越严重的时候，水体的叶绿素就越多，在合适的条件下形成了大量藻类，降低了透明度。也就是说，透明度的降低是水体富营养状况的结果，富营养化是根本原因。其次，叶绿素含量的提高也是以水体富营养状况为前提条件的，并且随着季节的变化比较明显，而水体的营养状况与季节并无本质关系，它主要受水体的外来污染物等污染程度影响。最后，各项指标的最高值不应该一概而论，各地区各水域的状况都有所差别，参考指标的最高值不应该也不可能统一。本书认为水体营养状况评价指标应该主要指示水体的污染程度，而且应该以营养物质或元素为主要参考指标，除了总磷、总氮、高锰酸盐指数外，还应该包括微量元素、COD 等。并且在制定水体营养状况标准时，应该考虑各参考指标的权重，毕竟它们对水体营养状况的影响是不同的。在这项工作中，可以充分发挥神经网络