



当代
杰出青年
科学文库

水质基准理论与方法学 及其案例研究

吴丰昌 等 编著



科学出版社

当代杰出青年科学文库

水质基准理论与方法学及其案例研究

吴丰昌 等 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是近年水质基准理论与方法系列成果的总结与深化,在把握国内外最新成果的基础上,形成适合我国区域特点和国情的保护水生生物水质基准理论与方法学及其7种典型污染物水质基准推导的综合技术文件。本书以中国水生生物为保护目标,从理论、方法和典型案例三个方面阐述水质基准制定的原理、方法和应用。本书第1~3章介绍水质基准理论与方法学;附录A~附录G描述7种典型污染物水质基准推导的全过程分析与综合应用,是环境科学研究、水质基准与水质标准制定的参考性资料,为国内外环境标准制定/修订和环境管理研究提供指导。

本书适合环境基准、风险评估、毒理学、生物学和环境科学等领域的科研人员和管理人员阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

水质基准理论与方法学及其案例研究 / 吴丰昌等编著. —北京: 科学出版社, 2012

(当代杰出青年科学文库)

ISBN 978-7-03-034620-9

I. 水… II. 吴… III. 水质标准—研究 IV. X-651

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 117673 号

责任编辑: 罗 吉 尚 雁/责任校对: 鲁 素

责任印制: 赵德静/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>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 6 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2012 年 6 月第一次印刷 印张: 18 3/4

字数: 375 000

定价: 69.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《当代杰出青年科学文库》编委会

主 编 白春礼

副主编 (按汉语拼音排序)

程津培 李家洋 谢和平 赵沁平 朱道本

编 委 (按汉语拼音排序)

柴玉成	崔一平	傅伯杰	高 抒	龚健雅
郭 雷	郝吉明	何鸣鸿	洪友士	胡海岩
康 乐	李晋闽	罗 毅	南策文	彭练矛
沈 岩	万立骏	王 牧	魏于全	鄢江兴
袁亚湘	张 杰	张 荣	张伟平	张先恩
张亚平	张玉奎	郑兰荪		

《水质基准理论与方法学及其案例研究》

编委会

主 编 吴丰昌

副主编 李会仙

编 委	张瑞卿	冯承莲	苏海磊	李玉爽	郭广慧
	杜东阳	杨苏文	赵晓丽	常 红	廖海清
	徐范范	穆云松	刘跃丹	孙福红	徐利斌

序

水质基准是进行水环境质量评价、确定水环境保护目标与方向的科学依据。构建符合我国区域特点和国情的国家环境基准体系,把握环境保护与发展的尺度,支撑我国环境标准的制定/修订工作,保障我国的环境与生态安全。依据水质基准,科学制定水质标准,这是我国当前环境科技创新的重要体现。

20 世纪 60 年代以来,美国根据《清洁水法》的要求,投入巨资,开展了长期系统的水质基准研究。目前,已基本形成了比较完整的水质基准体系,奠定了美国在国际环境保护领域中的领先地位,明确了水质基准在水环境标准制定中的法律地位。几十年来,日本、加拿大和澳大利亚等发达国家相继着手构建各自的水质基准体系。国家水质基准体系已成为国际环境保护领域的发展趋势和国家环境安全的发展战略。

水质基准是制定水质标准的基础和科学依据,是环境基准(土壤、大气和水质基准)的重要组成部分,是水环境保护和环境管理工作的基石。水质基准理论与方法学是水质基准研究的关键,水质基准典型案例研究是水质基准得以应用的先导。在国际水质基准的发展史上,形成以美国为主体,其他发达国家并进,适合各自区域特征和环境问题所需的水质基准体系,同时带动与基准相关的生物学、毒理与生态效应、环境化学和风险评价等学科的发展。我国所关心的水环境质量问题和别国不尽相同。所有这些都要求建立更加符合我国国情、反映当前我国环境科学研究成果的环境基准科学发展的理论、方法和应用体系。

几十年来,中国为保护环境进行了不懈努力。为了满足人们对环境保护的诉求,开展适合我国区域特征和社会经济发展的水质基准研究已经成为我国环境保护研究领域的趋势和潮流,新的历史背景和发展阶段赋予“中国制造”水质基准新的内涵和使命。从国内外水质基准的发展历程及中国当前水质基准的要求看,水质基准体系是环境风险管理发展模式创新过程中出现的新经济学理念,是建立在生态环境容量和资源承载力基础上的发展形态,将环境保护目标与方向作为实现可持续发展的重要支柱。水质基准体系有别于传统环境管理的发展模式,它是使环境、社会和经济效益达到完美统一的全新风险管理理念。

近年来,中国国家环境基准研究受到政府部门和科学家的日益关注。虽然起步较晚,但在科技部和环境保护部的支持下,国家业已设立多个项目,开展探索研究,旨在建立基于中国区域特征和国情的国家水环境基准体系。973 计划以中国环境科学研究院为依托单位,2008 年设立项目“湖泊水环境质量演变与水环境

基准研究”，以湖泊为例，系统建立比较完善的水质基准理论、方法和案例研究。同时，环境基准与风险评估国家重点实验室承担大量国家环境基准研究项目，取得较多的科研成果。该书是编著者近年来一系列成果的系统总结。

该书是一本全面阐述水质基准理论、方法和应用成果的专著，研究内容揭示了科学前沿问题，该书首次采用我国生物区系的毒理学数据，建立了7种典型污染物的标准技术文件，对我国环境质量标准制定/修订和风险管理具有重要的理论和实际指导意义。从整个国家环境管理实际需求的角度来看，该书阐述的水质基准研究成果将有力地推动中国环境基准研究。

在该书出版之际，我很高兴为之作序，感谢编著者为该书出版付出的努力，感谢广大环境保护工作者对中国环境基准建设的贡献。

中国工程院院士
中国环境科学研究院院长



2012年5月18日

前 言

水质基准，以人与环境和谐可持续发展为目标，是水环境质量标准、相关管理与政策法规的理论依据；是整个水环境保护和管理工作的基石。随着我国社会经济的持续快速发展，环境污染已成为制约我国社会经济可持续发展的瓶颈。目前，我国局部地区污染严重，生态环境质量退化，环境污染事件频发，生态安全受到严重威胁，污染治理和生态环境保护任务十分繁重。我国生态系统特征差异性显著，生态效应复杂，目前缺乏适合我国区域特点和污染控制需要的水质基准体系研究。

美国在推动国际水质基准研究方面起着重要作用。到目前为止，美国环境保护局根据 1985 年《推导保护水生生物及其用途的国家定量水质基准技术指南》提出水质基准推导框架，颁布 167 种污染物的国家基准推荐值，并进行多次修订。几十年来，美国和其他发达国家一直致力于水质基准理论和方法学的研究，并在敏感物种、污染物类型、敏感毒性终点界定、风险评估和理化因素的综合模型等方面取得重要进展。由于区域特点和国情不同，不同国家水质基准体系有所差异。国内水质基准研究起步较晚，我们愿意与兄弟单位及同事共同推动中国水质基准的研究。“中国制造”水质基准理论、方法与应用已成为我国当前环境保护科研领域的热点之一。

2008 年，在国家重点基础研究发展计划(973 计划)“湖泊水环境质量演变与水环境基准研究”和国家环境保护公益性行业科研专项“我国环境基准技术框架与典型案例预研究”的资助下，中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室较为系统地开展了水质基准理论与方法学及其典型的案例研究。本书就是在此基础上编著而成的。

本书是对《水质基准的理论与方法学导论》一书的补充和深化。《水质基准的理论与方法学导论》出版于 2010 年，提供了目前美国水质基准推导的理论与方法学——毒性百分数排序法的系统总结，论述涉及基准理论与相关参数的许多基本概念，并对环境暴露、生物富集和风险评估等国际前沿学科做了详细的总结。本书是作者近年来一系列成果的系统总结、深化和综合运用，系统提升了水质基准理论与方法学，开展了 7 种典型污染物(镉、无机汞、锌、铬、硝基苯、苯、四溴双酚 A)中国水质基准推导的综合运用，分别推导其基准值，并形成了各自标准的技术文件。相对来说，本书在《水质基准的理论与方法学导论》的基础上，补充了目前国际通用的另一种水生生物基准推导方法——物种敏感度分布法的理论和

方法学，并对两种不同方法水质基准推导进行综合分析对比。此外，本书提出了我国水生生物区系特征及水质基准推导的物种选择原则。

本书包括正文和附录。正文介绍水质基准理论与方法学，包括第 1~3 章。第 1 章由张瑞卿、李会仙、吴丰昌完成，介绍水质基准的概念、分类和展望。第 2 章由苏海磊、李会仙、吴丰昌完成，介绍我国水生生物区系特征及水质基准推导的物种选择。第 3 章由李会仙、吴丰昌完成，介绍保护水生生物水质基准推导的理论和方法。附录介绍案例研究，包括附录 A~附录 G，由多位同志完成，付出辛勤劳动。附录分工：冯承莲负责附录 A、附录 C，张瑞卿、李会仙负责附录 B，杜东阳负责附录 D，张瑞卿、李会仙负责附录 E，李玉爽、郭广慧负责附录 F，杨苏文、徐范范负责附录 G。最后由李会仙完成全书统稿和校稿工作。

本书涵盖水质基准、水质标准、环境管理、环境暴露、风险评估、毒理学、环境科学、生物学和生态学等多学科的综合知识，由于编著者水平有限，书中难免存在疏漏和错误之处，敬请各位读者指正。

本书的研究成果得到以下资助，特此感谢：

(1) 国家重点基础研究发展计划(973 计划)“湖泊水环境质量演变与水环境基准研究”(2008CB418200)；

(2) 国家环境保护公益性行业科研专项重大项目“我国环境基准技术框架与典型案例预研究”(201009032)。

编著者

2011 年 11 月 2 日

目 录

序

前言

第 1 章	水质基准的概况	1
1.1	基本概念	1
1.2	分类和表达方式	2
1.3	科学内涵	3
1.4	开展研究的必要性	4
第 2 章	中国水生生物区系特征及水质基准推导的物种选择	7
2.1	引言	7
2.2	生物区系特征	8
2.2.1	我国淡水生物区系特征	8
2.2.2	太湖生物区系特征	9
2.2.3	北美洲五大湖生物区系特征	35
2.3	保护水生生物水质基准推导的物种选择	42
2.3.1	美国保护水生生物水质基准推导的物种选择	43
2.3.2	加拿大保护水生生物水质基准推导的物种选择	44
2.3.3	澳大利亚和新西兰保护水生生物水质基准推导的物种选择	44
2.3.4	欧盟保护水生生物水质基准推导的物种选择	45
2.3.5	中国保护水生生物水质基准推导的物种选择	47
2.4	保护人体健康水质基准推导的物种选择	51
2.4.1	美国保护人体健康水质基准的物种选择	51
2.4.2	加拿大保护人体健康水质基准的物种选择	52
2.4.3	澳大利亚和新西兰保护人体健康水质基准的物种选择	52
2.4.4	欧盟保护人体健康水质基准的物种选择	52
2.4.5	中国保护人体健康水质基准的物种选择	53
2.5	保护野生生物水质基准推导的物种选择	54
2.5.1	美国保护野生生物水质基准的物种选择	54
2.5.2	加拿大保护野生生物水质基准的物种选择	55
2.5.3	澳大利亚和新西兰保护野生生物水质基准的物种选择	55
2.5.4	欧盟保护野生生物水质基准的物种选择	55

2.5.5 中国保护野生生物水质基准的物种选择	56
2.6 沉积物质量基准的物种选择	57
2.6.1 美国沉积物质量基准的物种选择	57
2.6.2 加拿大沉积物质量基准的物种选择	57
2.6.3 澳大利亚和新西兰沉积物质量基准的物种选择	58
2.6.4 欧盟沉积物质量基准的物种选择	59
2.6.5 中国沉积物质量基准的物种选择	60
2.7 结论与展望	61
2.7.1 结论	61
2.7.2 展望	62
第3章 保护水生生物水质基准推导的理论和方法	64
3.1 相关重要概念	64
3.2 污染物相关数据的收集和质量评估	66
3.2.1 污染物的物理、化学数据	66
3.2.2 水体中的浓度	67
3.2.3 环境行为、归趋及持久性	67
3.2.4 暴露和吸收途径	67
3.2.5 毒理学信息	68
3.2.6 毒性作用机制	68
3.2.7 生物有效性	69
3.2.8 生物富集	69
3.2.9 其他数据	70
3.3 受试物种筛选原则	70
3.3.1 物种敏感度分布法	70
3.3.2 毒性百分数排序法	72
3.4 室内毒性实验设计	74
3.4.1 动物急性毒性实验设计	74
3.4.2 动物慢性毒性实验设计	75
3.4.3 植物毒性实验设计	76
3.4.4 生物富集实验设计	77
3.5 实验数据筛选	77
3.5.1 不同毒性实验数据筛选原则	77
3.5.2 毒性效应终点的选择	80
3.5.3 物种敏感度分布法毒性数据筛选原则	81
3.6 采用物种敏感度分布法推导水质基准	81

3.6.1 累积概率计算	83
3.6.2 模型选择	83
3.6.3 物种敏感度分布曲线的拟合	85
3.6.4 基准值的确定	85
3.7 采用毒性百分数排序法确定基准相关数值	87
3.7.1 最终急性值和最终慢性值的推导方法	89
3.7.2 最终植物值的推导方法	92
3.7.3 最终残留值的推导方法	93
3.7.4 基准最大浓度和基准连续浓度的推导方法	94
3.8 水质基准值的审核	95
3.8.1 毒性百分数排序法基准的审核	95
3.8.2 物种敏感度分布法基准的审核	96
3.9 讨论与展望	97
3.9.1 综合对比分析	97
3.9.2 展望	98
参考文献	101

附录 案例研究

附录 A 镉	109
A1 简介	109
A1.1 性质和用途	109
A1.2 来源和分布	109
A1.3 存在形式	110
A1.4 迁移转化	111
A1.5 毒性	111
A2 水生生物基准推导	113
A2.1 数据获取和筛选	113
A2.2 物种敏感度分布法推导基准	120
A2.3 毒性百分数排序法推导基准	123
A3 生物学基准探讨	127
A4 水质基准的审核	127
A4.1 不同国家水质基准的比较	128
A4.2 水质基准与标准的比较	129
A5 水质基准与暴露浓度的比较	130
A6 展望与讨论	130

A6.1 敏感物种	130
A6.2 模型选择	130
A6.3 其他考虑因素	131
参考文献	131
附录 B 无机汞	135
B1 简介	135
B1.1 性质和用途	135
B1.2 来源和分布	136
B1.3 存在形式	137
B1.4 迁移转化	137
B2 毒性	138
B2.1 对藻类的毒性效应	138
B2.2 对无脊椎动物的毒性效应	138
B2.3 对鱼类的毒性效应	139
B2.4 对两栖类生物的毒性效应	139
B2.5 生物富集效应	140
B3 水生生物基准推导	141
B3.1 物种和毒性数据筛选	141
B3.2 毒性数据汇总	141
B3.3 物种敏感度分布法推导基准	142
B3.4 毒性百分数排序法推导基准	144
B4 生物学基准探讨	145
B5 水质基准的审核	148
B6 水质基准与暴露浓度的比较	149
B7 小结	149
参考文献	150
附录 C 锌	154
C1 简介	154
C1.1 性质和用途	154
C1.2 来源和分布	155
C1.3 存在形式	155
C1.4 迁移转化	156
C1.5 毒性	157
C2 水生生物基准推导	159
C2.1 数据获取和筛选	159

C2.2 物种敏感度分布法推导基准	166
C2.3 毒性百分数排序法推导基准	168
C3 生物学基准探讨	170
C4 水质基准的审核	171
C4.1 不同国家水质基准的比较	171
C4.2 水质基准与标准的比较	172
C5 水质基准与暴露浓度的比较	173
C6 展望与讨论	173
C6.1 敏感物种	173
C6.2 模型选择	174
C6.3 其他考虑因素	174
参考文献	175
附录 D 铬	182
D1 简介	182
D1.1 性质和用途	182
D1.2 来源和分布	183
D1.3 存在形式	183
D1.4 迁移转化	184
D1.5 毒性	185
D2 水生生物基准推导	186
D2.1 数据获取和筛选	186
D2.2 物种敏感度分布法推导基准	201
D2.3 毒性百分数排序法推导基准	206
D3 生物学基准探讨	210
D4 水质基准的审核	211
D4.1 不同国家水质基准的比较	211
D4.2 铬的水质基准与标准的比较	212
D5 水质基准与暴露浓度的比较	212
D6 展望与讨论	213
D6.1 污染物	213
D6.2 数据获取和敏感物种	213
D6.3 模型选择	214
D6.4 其他考虑因素	214
参考文献	214
附录 E 硝基苯	223

E1	简介	223
E1.1	性质和用途	223
E1.2	来源和分布	223
E1.3	迁移转化	225
E2	毒性	226
E2.1	对藻类的毒性效应	226
E2.2	对无脊椎动物的毒性效应	226
E2.3	对鱼类的毒性效应	227
E2.4	对两栖动物的毒性效应	228
E2.5	生物累积效应	228
E3	水生生物水质基准的推导	229
E3.1	物种和毒性数据筛选	229
E3.2	毒性数据汇总	229
E3.3	物种敏感度分布法推导基准	229
E3.4	毒性百分数排序法推导基准	233
E3.5	方法对比分析	235
E3.6	生物区系对水质基准的影响	236
E4	水质基准的审核	236
E5	水质基准与水体暴露浓度的对比	237
E6	小结	238
	参考文献	238
附录 F	苯	243
F1	简介	243
F1.1	性质和用途	243
F1.2	生产和使用	243
F1.3	污染与暴露	244
F1.4	存在形式	244
F1.5	环境归趋	244
F1.6	毒性与危害	245
F1.7	影响毒性的因素	246
F1.8	生物富集能力与效应	247
F1.9	生物暴露	247
F2	水生生物基准推导	247
F2.1	数据获取	247
F2.2	数据筛选	248

F2.3	毒性数据汇总	251
F2.4	物种敏感度分布法推导基准	251
F2.5	毒性百分数排序法推导基准	254
F3	生物学基准探讨	255
F4	水质基准的审核	255
F4.1	两种方法推导值的比较	255
F4.2	不同国家基准值或标准值的比较	256
F4.3	本研究与我国现有标准的比较	256
F5	水质基准与暴露浓度的比较	256
F6	讨论	257
F6.1	数据获取	257
F6.2	模型选择	257
F6.3	其他考虑因素	257
	参考文献	258
附录 G	四溴双酚 A	261
G1	简介	261
G1.1	性质和用途	261
G1.2	来源和分布	261
G1.3	存在形式	262
G1.4	迁移转化	263
G1.5	毒性	264
G2	水生生物基准推导	265
G2.1	数据获取和筛选	265
G2.2	物种敏感度分布法推导基准	270
G2.3	毒性百分数排序法推导基准	272
G3	水质基准的审核	276
G4	水质基准与暴露浓度的比较	276
G5	展望与讨论	276
G5.1	敏感物种	276
G5.2	模型选择	277
G5.3	其他考虑因素	277
	参考文献	277
	术语表	281

第 1 章 水质基准的概况

水质基准的全称是水环境质量基准(ambient water quality criteria, AWQC), 这是制定水环境质量标准以及评价、预测、控制与治理的重要依据。保护特定水体用途的水质基准包括水体的指定用途、功能和抗退化政策, 构成水质基准的关键部分, 是制定/修订水质基准的基石和核心(US EPA, 1998a)。水质基准描述了支持指定水体用途的水质, 反映了污染物在水体中最大可接受浓度的科学信息。水质基准是在研究特定化学物质在环境中的行为和生态毒理效应等基础上科学确定的, 并没有考虑社会、经济及技术等方面的因素, 水质基准体现了国际环境科学研究的最新成果。

环境质量基准的研究起始于 19 世纪末, 1898 年俄国卫生学家 A. Φ. 尼基京斯基在《医生》杂志发表了《石油制品对河流水质和鱼类的影响》一文, 阐述了原油、重油和其他石油制品对鱼类的毒害, 提出了环境质量基准的概念(郑乃彤, 陆昌淼, 1983)。1907 年, Marsh 发表《工业废水对鱼类的影响》一文, 这是美国最早关于污染物对水生生物影响的研究(US EPA, 1976)。20 世纪 60 年代, 加利福尼亚州首次发布了“水质基准”报告, 此后美国相继发表了《绿皮书》(1968)、《蓝皮书》(1973)、《红皮书》(1976)和《金皮书》(1986)等一系列水质基准文献。1980 年, 美国环境保护局(US EPA)初步制定了确定水质基准的技术指南, 1983 年和 1985 年进行了两次修订, 鼓励各州开展地区性基准的研究工作, 以反映水环境差异的影响(夏青, 张旭辉, 1990)。美国环境保护局为各州和部落制定推荐的水质基准推导方法和水质基准值, 由于各州的区域环境差异, 允许各州直接采用美国环境保护局推荐的水质基准或根据当地环境条件重新计算水质基准。1998 年, 美国又开始制定区域性营养物基准。目前美国环境保护局已经发布包括河流、湖库以及湿地等水域的营养物基准制定导则, 制定了 14 个生态区域的营养物水质基准。到目前为止, 美国、日本和欧洲发达国家初步建立国家水质基准体系。

1.1 基本概念

关于水质基准的概念, 不同的国家和学者对其都持有不同的表述。欧美国家对水质基准的研究比较深入和全面, 与基准相对应的英文有“benchmark”和“criteria”(criterion 的复数), 我国学者对于这两个词的翻译以及基准的含义一直存在很大争议。“Benchmark”(或 benchmark value)是在保护生态受体的指南或标