

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

三峡库区农业非点源污染 特征与控制技术

沈珍瑶 刘瑞民 宫永伟 洪倩 陈磊 著



科学出版社

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

三峡库区农业非点源污染 特征与控制技术

沈珍瑶 刘瑞民 宫永伟 著
洪倩 陈磊

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以三峡库区为研究区,以库区内典型小流域为重点研究对象,深入探讨了三峡库区农业非点源污染的模拟技术与控制技术。在模拟技术方面,创造性地提出了适合三峡库区特征的非点源污染模拟“小流域精细模拟参数推广法”,获得了三峡库区的非点源污染负荷时空分布特征,确定了非点源污染产生的关键源区和关键影响因素;在控制技术方面,建立了适合三峡库区大宁河流域特征的 TMDL 框架,提出了基于水环境功能区划的排污权交易体系,构建了点源与非点源排污权交易模型,同时将工程性与非工程性 BMPs 相结合,对关键源区的 BMPs 设计进行了多目标优化。

本书可供环境科学、环境工程、生态学以及水利学等学科的研究工作者以及大专院校师生参考,也可以作为环境管理部门、农业管理部门以及水资源管理部门决策者和管理者的参考书和工具书。

图书在版编目(CIP)数据

三峡库区农业非点源污染特征与控制技术/沈珍瑶等著. —北京:科学出版社,2015

(环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书)

ISBN 978-7-03-045746-2

I. ①三… II. ①沈… III. ①农业污染源-非点源污染-污染控制-研究-重庆市 IV. ①X501

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 225228 号

责任编辑:刘宝莉 陈 婕 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 10 月第一次印刷 印张:16 3/4 插页:2

字数:340 000

定价:120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

我国作为一个发展中的人口大国,资源环境问题是长期制约经济社会可持续发展的重大问题。党中央、国务院高度重视环境保护工作,提出了建设生态文明、建设资源节约型与环境友好型社会、推进环境保护历史性转变、让江河湖泊休养生息、节能减排是转方式调结构的重要抓手、环境保护是重大民生问题、探索中国环保新道路等一系列新理念新举措。在科学发展观的指导下,“十一五”环境保护工作成效显著,在经济增长超过预期的情况下,主要污染物减排任务超额完成,环境质量持续改善。

随着当前经济的高速增长,资源环境约束进一步强化,环境保护正处于负重爬坡的艰难阶段。治污减排的压力有增无减,环境质量改善的压力不断加大,防范环境风险的压力持续增加,确保核与辐射安全的压力继续加大,应对全球环境问题的压力急剧加大。要破解发展经济与保护环境的难点,解决影响可持续发展和群众健康的突出环境问题,确保环保工作不断上台阶出亮点,必须充分依靠科技创新和科技进步,构建强大坚实的科技支撑体系。

2006年,我国发布了《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》(以下简称《规划纲要》),提出了建设创新型国家战略,科技事业进入了发展的快车道,环保科技也迎来了蓬勃发展的春天。为适应环境保护历史性转变和创新型国家建设的要求,国家环境保护总局于2006年召开了第一次全国环保科技大会,出台了《关于增强环境科技创新能力的若干意见》,确立了科技兴环保战略,建设了环境科技创新体系、环境标准体系、环境技术管理体系三大工程。五年来,在广大环境科技工作者的努力下,水体污染控制与治理科技重大专项启动实施,科技投入持续增加,科技创新能力显著增强;发布了502项新标准,现行国家标准达1263项,环境标准体系建设实现了跨越式发展;完成了100余项环保技术文件的制修订工作,初步建成以重点行业污染防治技术政策、技术指南和工程技术规范为主要内容的国家环境技术管理体系。环境科技为全面完成“十一五”环保规划的各项任务起到了重要的引领和支撑作用。

为优化中央财政科技投入结构,支持市场机制不能有效配置资源的社会公益研究活动,“十一五”期间国家设立了公益性行业科研专项经费。根据财政部、科技部的总体部署,环保公益性行业科研专项紧密围绕《规划纲要》和《国家环境保护“十一五”科技发展规划》确定的重点领域和优先主题,立足环境管理中的科技需求,积极开展应急性、培育性、基础性科学研究。“十一五”期间,环境保护部组织实

施了公益性行业科研专项项目 234 项,涉及大气、水、生态、土壤、固废、核与辐射等领域,共有包括中央级科研院所、高等院校、地方环保科研单位和企业等几百家单位参与,逐步形成了优势互补、团结协作、良性竞争、共同发展的环保科技“统一战线”。目前,专项取得了重要研究成果,提出了一系列控制污染和改善环境质量技术方案,形成一批环境监测预警和监督管理技术体系,研发出一批与生态环境保护、国际履约、核与辐射安全相关的关键技术,提出了一系列环境标准、指南和技术规范建议,为解决我国环境保护和环境管理中急需的成套技术和政策制定提供了重要的科技支撑。

为广泛共享“十一五”期间环保公益性行业科研专项项目研究成果,及时总结项目组织管理经验,环境保护部科技标准司组织出版“十一五”环保公益性行业科研专项经费系列丛书。该丛书汇集了一批专项研究的代表性成果,具有较强的学术性和实用性,可以说是环境领域不可多得资料文献。丛书的组织出版,在科技管理上也是一次很好的尝试,我们希望通过这一尝试,能够进一步活跃环保科技的学术氛围,促进科技成果的转化与应用,为探索中国环保新道路提供有力的科技支撑。

中华人民共和国环境保护部副部长

吴晓青

2011 年 10 月

前 言

三峡水库的建设意义十分重大,它在防洪、发电、航运等方面发挥着不可或缺的作用,但一直以来,三峡水库的水环境问题也为国内外所关注。为了保障三峡水库的水质,《三峡库区及其上游水污染防治规划(2001—2010 年)》于 2001 年经国务院批准实施,在三峡库区及其上游全面启动治污工程,一定程度上保障了水库水环境的质量。但三峡库区水环境污染的防治是一个庞大的系统工程,单纯地针对点源污染的治理很难取得良好的效果,还需要系统考虑非点源污染的影响。由于针对非点源污染的研究相对较少,加之非点源污染模拟与控制的复杂性,非点源污染的控制手段和方法尚不完善。因此需要对三峡库区的非点源污染进行深入的研究,为三峡库区的水污染防治提供科学的决策依据。

近年来,我们在环保公益性行业科研专项经费项目“三峡库区农业非点源污染特征及控制技术研究”(No. 200709024)、国家杰出青年科学基金项目“流域水污染控制”(No. 51025933)、国家自然科学基金项目“三峡库区大宁河流域非点源污染的不确定性研究”(No. 40771193)和国家自然科学基金青年基金项目“三峡库区农业非点源污染 BMPs 多目标优化研究”(No. 41001352)等共同资助下,全面开展了有关三峡库区农业非点源污染方面的研究,以库区内典型小流域为重点研究对象,通过资料收集、现场调查、实地监测、计算机模拟、室内统计分析等多种研究方法,阐明了三峡库区农业非点源污染的主要特征,辨析了影响库区农业非点源污染的主要因素,并提出了库区农业非点源污染控制技术路线。

全书共 8 章。第 1 章介绍研究背景以及相关技术的国内外进展,并确定研究模型(SWAT),给出了研究的总体框架;第 2 章介绍三峡库区的概况,以及 SWAT 模型的发展历史、基本原理等;第 3 章提出“小流域精细模拟推广法”计算方法和操作流程,在综合考虑数据可获得性及分区均匀性的基础上将库区划分为四个区域,并在各个分区中选取典型小流域,对于每一个典型小流域分别进行精细模拟;第 4 章汇总三峡库区农业非点源污染模拟结果,并开展污染负荷时空分布特征研究,确定关键源区,分析影响因素,同时探讨下垫面条件对非点源污染影响的不确定性问题;第 5 章选择三峡库区大宁河流域(巫溪段)为研究区,建立研究区的 TMDL 框架,确定合适的安全余量值,并将污染负荷在不同区域间进行分配,提出合理的污染控制体系;第 6 章明确提出排污权的时间效应和空间效应,并基于水环境功能区划构建排污交易模型,分析模型模拟过程中的不确定性大小和不确定性影响等;第 7 章介绍流域层面和源区层面的管理措施控制效果,考察非工程性措施对非点源

污染的削减效果,然后在亚流域层面将工程性与非工程性措施相结合,开展 BMPs 多目标优化设计工作;第 8 章为结论。

本书写作分工如下:第 1 章由刘瑞民、沈珍瑶撰写;第 2 章由陈磊、刘瑞民撰写;第 3 章由沈珍瑶、刘瑞民、洪倩、王秀娟、孙宗亮撰写;第 4 章由洪倩、沈珍瑶撰写;第 5 章由宫永伟、沈珍瑶、陈磊撰写;第 6 章由韩兆兴、沈珍瑶撰写;第 7 章由许亮、刘瑞民、洪倩撰写;第 8 章由刘瑞民、陈磊撰写。全书由沈珍瑶和刘瑞民统稿。此外,参加研究和书稿整理工作的还有谢晖、黄琴、廖谦、陈涛、张培培、邱嘉丽、王嘉薇、于雯雯等。本书内容涉及的相关研究得到了水利部长江水利委员会、西南大学等单位的大力支持,在此深表谢意。

由于作者水平所限,不妥之处在所难免,欢迎批评指正。

作 者

2014 年 12 月

目 录

序

前言

第 1 章 总论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究进展	3
1.2.1 大尺度非点源污染定量化研究	5
1.2.2 非点源污染的不确定性影响	10
1.2.3 非点源污染管理控制研究	11
1.2.4 三峡库区非点源污染研究进展	13
1.3 研究内容	14
参考文献	15
第 2 章 研究区概况及模型介绍	26
2.1 研究区概况	26
2.1.1 地域范围	26
2.1.2 地质地貌	27
2.1.3 气候地理	27
2.1.4 水文特征	29
2.1.5 水质状况	30
2.1.6 农业发展状况	31
2.1.7 社会经济情况	31
2.1.8 生态环境问题	31
2.2 SWAT 模型介绍	33
2.2.1 基本原理	34
2.2.2 水文过程	34
2.2.3 侵蚀过程	36
2.2.4 营养物质迁移	37
2.2.5 参数率定及验证	39
参考文献	40
第 3 章 三峡库区典型流域非点源污染研究	41
3.1 小流域精细模拟参数推广法	41

3.2 研究区分区及典型小流域选取·····	42
3.2.1 分区研究进展·····	42
3.2.2 三峡库区分区·····	43
3.3 御临河流域非点源污染精细模拟·····	47
3.3.1 流域概况·····	47
3.3.2 数据库构建·····	47
3.3.3 参数率定及验证·····	57
3.4 小江流域的非点源污染精细模拟·····	61
3.4.1 流域概况·····	61
3.4.2 数据库构建·····	62
3.4.3 参数率定及验证·····	64
3.5 大宁河流域非点源污染精细模拟·····	67
3.5.1 流域概况·····	67
3.5.2 数据库构建·····	68
3.5.3 参数率定及验证·····	71
3.6 香溪河流域非点源污染精细模拟·····	75
3.6.1 流域概况·····	75
3.6.2 数据库构建·····	75
3.6.3 参数率定及验证·····	77
3.7 基于参数推广的分区模拟及研究·····	80
3.7.1 数据库构建·····	80
3.7.2 分区模拟概况·····	82
3.7.3 推广模拟验证·····	83
3.8 小结·····	84
参考文献·····	84
第4章 三峡库区农业非点源污染特征研究 ·····	86
4.1 三峡库区农业非点源污染时空分布特征·····	86
4.1.1 空间分布特征·····	86
4.1.2 时间分布特征·····	91
4.1.3 关键源区识别·····	97
4.2 三峡库区农业非点源污染影响因素分析·····	106
4.2.1 下垫面条件对非点源污染的影响·····	106
4.2.2 不同影响因素的方差分析·····	123
4.3 不同下垫面条件的不确定性分析·····	125
4.3.1 FOEA 方法介绍·····	126

4.3.2 基于土地利用的不确定性分析	127
4.3.3 基于土壤类型的不确定性分析	133
4.4 小结	138
参考文献	139
第5章 典型小流域 TMDL 框架及负荷分配	142
5.1 国内外相关研究进展	142
5.1.1 总量控制技术进展	142
5.1.2 TMDL 技术进展	144
5.2 大宁河流域 TMDL 框架	146
5.2.1 TMDL 一般流程	146
5.2.2 大宁河 TMDL 框架	149
5.2.3 水质问题描述	150
5.2.4 流域分区	151
5.2.5 流域水沙和总磷模拟	153
5.2.6 污染源评价	154
5.2.7 负荷计算和分配方法	156
5.3 污染模拟不确定性分析	157
5.3.1 模型参数的不确定性分析	158
5.3.2 模型输入的不确定性分析	165
5.3.3 模型结构的不确定性分析	168
5.4 TMDL 负荷分配方案	171
5.4.1 三类不确定性的比较	171
5.4.2 MOS 的确定	172
5.4.3 负荷分配	173
5.5 不同分区治理措施建议	176
5.6 小结	179
参考文献	179
第6章 点源/非点源排污权交易及不确定性	184
6.1 排污权交易的时空效应	184
6.1.1 排污权交易的时间效应	184
6.1.2 排污权交易的空间效应	188
6.2 点源/非点源排污权交易模型	191
6.2.1 必要性分析	191
6.2.2 模型假设	192
6.2.3 基于水环境功能区划的模拟模型	192

6.2.4	模型计算流程	193
6.3	典型流域排污权交易模型	193
6.3.1	环境容量时间划分	193
6.3.2	环境容量计算结果	194
6.3.3	收益成本函数	198
6.3.4	污染物排放情况及空间效应	198
6.3.5	基于概率约束的排污交易模型	200
6.4	模型模拟结果分析	202
6.4.1	总消减成本	204
6.4.2	水环境功能约束	205
6.4.3	概率约束分析	206
6.4.4	与 MOS 的关系分析	208
6.4.5	工程性减排措施	209
6.4.6	非点源污染消减的不确定性	216
6.4.7	制度设计	218
6.5	小结	219
	参考文献	220
第 7 章	最佳管理措施模拟及优化设计研究	223
7.1	最佳管理措施简介	223
7.2	典型流域管理措施模拟	225
7.2.1	土地利用方式变化	225
7.2.2	耕作管理措施	226
7.2.3	化肥施用管理	229
7.2.4	管理措施综合比较	230
7.3	亚流域 BMPs 优化设计	231
7.3.1	BMPs 数据库构建	231
7.3.2	优化程序设计	239
7.3.3	设计方案及结果讨论	242
7.4	小结	251
	参考文献	251
第 8 章	结论	254
	彩图	

第 1 章 总 论

1.1 研究背景

随着社会经济的迅速发展,流域(区域)水环境污染问题也越来越突出。造成水环境污染的来源,可分为点源(point source, PS)污染和非点源(nonpoint source, NPS)污染两大类(Edwards, Withers, 2008; 沈珍瑶等, 2008)。点源污染一般指工业废水和城市生活污水的排放,通常由排污口排入水体,其污染源具有集中性;而非点源污染是指降雨产流过程中的冲刷或侵蚀或者灌溉等使得大面积上的污染物进入水体而造成的污染,其污染源具有广泛性、随机性和不确定性(夏军, 2004; Ongley et al., 2010; Faramarzi et al., 2013)。非点源污染主要包括城市非点源污染和农业非点源污染。就目前而言,农业非点源污染对水体的影响更为显著(Shortle et al., 2012; Shen et al., 2013c)。

随着点源污染控制能力的提高,非点源污染的严重性已逐渐表现出来,非点源污染成为了水环境污染的主要原因(Liu et al., 2013)。全球约有 30%~50%的地表水受到非点源污染的影响(Dennis et al., 1997)。目前,在美国,水污染主要来自于非点源污染,据估计,即使点源全部实现零排放,河流达标率也仅有 65%(Arhonditsis et al., 2000)。丹麦 270 条河流 94%的氮负荷、52%的磷负荷是由非点源污染引起的,而农业非点源正是各种导致水体污染的最主要因素之一(Kronvang et al., 1996)。荷兰农业非点源输出提供的总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)分别占水环境污染总量的 60%和 40%~50%(Boers, 1996)。此外,许多其他国家也发现由农业非点源污染导致的水环境恶化问题正日益凸显(Granlund et al., 2000; Collins, Anthony, 2008; Fonseca et al., 2014)。

在我国,非点源污染已对水环境造成重大影响,许多流域均有相关报道。其中,云南洱海的非点源负荷占总负荷的 60%~80%(杨建云, 2004),山东南四湖流域非点源氮磷污染约占 40%~60%(李爽等, 2013),太湖非点源污染负荷占总负荷的 40%~60%(金洋等, 2007),而在滇池流域,悬浮物、总氮和总磷的主要贡献者也均为非点源污染(邢可霞等, 2004),此外,在我国的黄河流域(程红光等, 2006; 于婕, 李怀恩, 2013)、长江流域(刘瑞民等, 2006a; 龙天渝等, 2008; 刘瑞民等, 2008; 田甜等, 2011)、珠江流域(程炯等, 2008; 李开明等, 2013)以及松辽流域(王秀娟等, 2009; 汤洁等, 2012; 刘瑞民等, 2013)等流域,非点源污染也不容忽视。在水污染控制方面,自我国实施流域污染物总量控制以来,水环境质量有了一定的改善。但长

期以来,我国在流域水环境管理中以点源污染治理为主,较少考虑非点源污染对水质的影响。忽视对非点源污染的控制,既不利于总量控制的顺利实施,又很难达到预期的环境目标(沈珍瑶,韩兆兴,2010)。

近年来,长江流域三峡库区的非点源污染尤为严重(钟成华,2004;余炜敏等,2004;梁常德等,2007;王秀娟等,2011)。由表 1.1~表 1.3 可见,近年来三峡库区部分一级支流断面的水质状况不容乐观,几大典型支流如御临河、澎溪河、大宁河和香溪河等河流的水质经常超标,水质污染严重影响着三峡水库水环境功能的发挥。随着库区点源污染的有效治理,农业非点源污染已经日趋成为库区水体的主要污染来源,特别是来自农田的固体悬浮物对长江水体的污染贡献率达到 90%(余炜敏,2005)。这是由库区的特殊性所决定的,三峡库区地貌主要以丘陵、山地为主,耕地类型大多数为坡耕地,且库区植被覆盖率低,很容易造成水土流失。对于库区水体来说,一方面,径流携带的大量泥沙进入库区,不仅增加水体悬浮物负荷,还会在库区沉积,减小库区有效库容;另一方面,土壤中大量养分也随土坡流失而被带入库区水体,成为非点源污染物,严重影响库区水质。农业非点源污染对三峡库区水体环境存在极大的安全隐患,已经成为水质恶化的主要原因之一(Shen et al., 2009;贾海燕等,2011;宋林旭等,2013)。农业非点源污染对三峡库区水质污染(尤其是氨氮)的贡献率会越来越高,研究三峡库区的非点源污染负荷的时空分布,为流域水资源保护规划提供科学依据已经成为亟待解决的问题。

表 1.1 2005 年三峡库区一级支流断面水质类别

断面名称	所属河流	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	全年
北碚	嘉陵江	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	V	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
临江门	嘉陵江	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	V	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
武隆	乌江	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
御临河口	御临河	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	V	Ⅳ	V	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ
澎溪河口	澎溪河	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ
大宁河口	大宁河	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
香溪河口	香溪河	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	V	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ

注:河口断面水质评价执行《地表水环境质量标准 GB 3838—2002》湖库标准,下同。

表 1.2 2006 年三峡库区一级支流断面水质类别

断面名称	所属河流	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	全年
北碚	嘉陵江	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	V	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ
临江门	嘉陵江	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	V	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ
武隆	乌江	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ

续表

断面名称	所属河流	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	全年
御临河口	御临河	V	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ	V	Ⅳ	V	Ⅳ	Ⅲ	V	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
澎溪河口	澎溪河	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
大宁河口	大宁河	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
香溪河口	香溪河	Ⅳ	V	Ⅳ	劣 V	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ

表 1.3 2007 年三峡库区一级支流断面水质类别

断面名称	所属河流	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	全年
北 碚	嘉陵江	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
临江门	嘉陵江	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅳ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
武 隆	乌 江	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
御临河口	御临河	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	V	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ
澎溪河口	澎溪河	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
大宁河口	大宁河	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ
香溪河口	香溪河	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ

1.2 国内外研究进展

非点源污染研究开始于 20 世纪 60 年代,主要对以下几个方面进行了研究:非点源污染机理、污染定量化以及污染管理与控制(王晓燕,2003;Shen et al., 2012)。这三个方面环环相扣相辅相成。在近半个世纪的研究历程中,机理方面已针对非点源污染的过程间相互作用及内部各子过程进行了深入探索,如降雨-径流关系(Linsley et al., 1949; Kohler, Richards, 1962; Hewlett et al., 1977; Mack, 1995)、土壤侵蚀(Wischmeier, Smith, 1965; 1978; Morgan, 1988; Morgan et al., 1998)、污染物迁移(Young et al., 1989; Liu et al., 2014)、受纳水体水质等。定量化研究方面,随着对机理研究的不断进步,也经历了从黑箱到灰箱再到白箱的发展过程,具体而言,则是从经验模型(Haith, 1976; Liu et al., 2009)发展到半机理或机理模型(Abbott et al., 1986a; Abbott et al., 1986b; Arnold et al., 1995; Chen et al., 2013);随着 3S 技术的引入,与其他领域的模型进行耦合形成大型综合化模型也已成为目前的热点(Romstad, 2003; Yang et al., 2007)。研究尺度也不断增大,已从最开始的农田尺度(Litwin, Donigian, 1978; Williams et al., 1985)到中小流域尺度(Ascough et al., 1997; 张雪松等, 2003; 王晓燕等, 2004; Ribarova et al., 2008; Shen et al., 2013b),再发展到超过 10000km² 的大尺度流域或区域(Bourauoi

et al., 2005; 刘瑞民等, 2006b; 庞靖鹏, 2007; Shen et al., 2013a), 尤其针对前两者, 已经逐步建立起一系列适用模型。管理和控制是非点源污染研究的最终目的, 包括关键源区的识别(Guo et al., 2004; Huang, Hong, 2010)和最佳管理措施研究(Ristenpart, 1999; D'Arcy, Frost, 2001; Wallbrink, Croke, 2002; Rao et al., 2009)等。

我国的非点源污染相关研究始于 20 世纪 80 年代, 由于这一时期是国外发达国家非点源污染模型大发展的时期, 因此受此影响, 这一时期我国的非点源污染多是农业非点源的宏观特征与负荷定量计算模型的初步研究。期间所采用的模型多是在国外研究成果的基础上根据我国的实际情况进行修改得到的(郑一, 王学军, 2002; 沈珍瑶等, 2008)。

进入 20 世纪 90 年代, 随着对非点源污染问题的进一步研究, 农业非点源定量模型取得了进一步的发展。施为光(2000)以四川清平水库为例, 将流域非点源污染负荷分为地面径流污染负荷、地下径流污染负荷和壤中流污染负荷, 用水文学方法找出典型水文年河水中地下径流成分, 然后分割出壤中流和地下径流, 再根据实测的水质和水量资料计算流域非点源污染负荷。李怀恩(1996)建立了用逆高斯分布瞬时单位线法计算流域汇流的非点源污染物迁移机理模型, 较好地模拟了于桥水库及宝象河流域洪水、泥沙和多种污染物的产出和迁移。此后, 李怀恩等(1997)又通过对非点源污染负荷率过程的标准化处理, 提出另一个简单易用的流域非点源污染产污模型, 实测资料表明, 该方法可用于多种不同类型的污染物, 但不适用于次暴雨产生的污染负荷及其过程。李定强等(1998)分析了杨子坑小流域主要非点源污染物氮、磷随降雨径流过程的动态变化规律, 建立了降雨量-径流量、径流量-污染物负荷输出量之间的数学统计模型, 并用该模型对流域的非点源污染负荷总量进行了计算, 得出了流域非点源污染物流失规律。

随着“3S”技术的发展, 我国也开始将地理信息系统(geographic information system, GIS)技术应用到农业非点源污染模型的研究中, 并取得了一定成果。董亮等(1999)应用 GIS 建立了西湖流域非点源污染信息数据库; 王云鹏(2000)建立了基于遥感(remote sensing, RS)和 GIS 的非点源信息系统, 并得到初步应用; 王少平等(2002)对上海集约化畜禽养殖带来的非点源污染负荷及时空分布规律进行了深入研究, 将模拟实验、GIS 技术和非点源污染模型相结合, 探讨了苏州河流域的非点源污染负荷及时空演变规律; 王宁等(2002)用 Arc/Info 和通用土壤流失方程对吉林松湖流域土壤及非点源污染物的流失量进行了定量描述, 得出污染物流失的危险发生区以及各地理要素的空间分布, 并分析了其相互关系; 郝芳华等(2002)利用 RS 和 GIS 技术对北京官厅水库流域不同典型水文年的非点源污染负荷进行了模拟研究; 李家科等(2008)利用非点源模型对渭河流域非点源进行了模拟计算, 结果表明率定好的模型在中国具有很好的适用性。王晓燕等(2008)在密

云水库北部,对研究区非点源污染负荷的时空变化进行模拟,并分析了最佳管理措施对非点源污染控制效果。

但我国起步较晚且研究范围较窄,仅涉及非点源污染负荷评价、模型介绍及模型与地理信息系统结合技术等,参与人员还较少,且研究存在一定的阶段性和孤立性,还未形成体系,更未延展深入到系统性的管理、政策的研究。总体而言,在机理研究和中小尺度的定量化研究方面已经取得一定成果,在管理和控制研究方面则相对薄弱(赵同谦等,2008;郭鸿鹏等,2008)。

1.2.1 大尺度非点源污染定量化研究

1. 定量化研究方法

目前,非点源污染定量化研究方法主要包括野外实地监测、人工模拟和计算机模拟等,其中计算机模拟方法不仅可以估算非点源污染负荷量,还可以模拟非点源污染的物理、化学及生物过程,并对非点源污染的情况进行预测。随着模型的不断完善,模型模拟研究成为非点源污染研究最重要的方法(Zhang et al., 2014)。尤其是面对大尺度流域或区域(10000km²以上)的复杂性,实地监测和人工模拟的效果有限,因此,模型模拟是大尺度非点源污染定量化研究的普遍选择(Ding et al., 2010)。

归纳起来大致有以下四种模型模拟方法:

(1) 大尺度全局匡算模型。该模型的核心为综合考虑自然作用-社会作用的二元结构模型,其中,地形、降水和土壤结构属于自然影响因子,而土地利用方式和开发强度属于社会影响因子(郝芳华等,2006;杨胜天等,2006)。程红光等(2006)利用该模型对黄河流域非点源污染负荷进行了估算与分析,通过流域内非点源污染类型划分(农业生产、农村居民点、畜禽养殖和城市径流)决定参数分类,再根据文献资料、典型区调查和现场试验的结果对模型中的参数进行率定,研究结果表明2000年黄河流域的TN、TP非点源污染负荷已超过点源的污染负荷;吸附态TN负荷占TN污染负荷总量的69%,吸附态TP负荷则只占32%。该估算方法体系对大尺度的水资源规划具有较好的指导意义,但模型对非点源污染过程作了较大程度的简化,而非点源污染是一个极其复杂的降雨径流和污染物转化过程,该方法更多的是从大尺度和规划层面上做了一定的探索,更适于面向规划层次的需求,适合于无水质资料地区,而对具体管理措施的制定则需要具有更高精度的估算方法。

(2) 输出系数法。输出系数法由北美发起,之后经过发展和完善形成较为成熟的输出系数模型(Johnes, 1996)。利用相对容易得到的土地利用状况等资料直接建立土地利用与水体非点源污染之间的相关关系,通过多元线性相关分析确定输出系数,不考虑对非点源污染机理分析和对污染物转化相关的实地监测过程,节省了模型建立、参数确定和负荷估算的成本与时间(刘瑞民等,2008;王晓燕等,

2009a)。一般将非点源污染分为城镇用地、农村、农田、人口、牲畜等几大类,再根据土地利用类型的不同(耕地类型按种植作物的不同再进行细分)、居民非点源污染物的排放量、牲畜的数量及分布来确定各自的输出系数。该模型在中小尺度的应用广泛,结果较令人满意(Mattikalli, Richards, 1996; Worrall, Burt, 1999; Khadam, Kaluarachchi, 2006; Bowes et al., 2008)。但不可忽视的是,该模型是对非点源多年平均情况较为稳定的估计,适用于降雨均匀、地势平坦地区,面对降雨多变、地形复杂破碎的大尺度流域,由于缺乏对空间异质性的考虑,在对研究区进行非点源时空演变预测、模拟方面则显得灵敏性和准确度不足,受到一定的限制(Shrestha et al., 2008a)。

(3) 改进的输出系数法。针对传统输出系数法的不足,丁晓雯等(2008)提出了改进的输出系数法,引入表征降雨空间异质性和地形空间异质性的因子,并利用该模型对长江上游非点源污染变化规律进行了研究,结果表明,改进的输出系数模拟可以有效提高输出系数法在大尺度流域应用的精确性,在一定程度上弥补了传统输出系数法在空间异质性上考虑不足的缺陷。也有其他学者从其他角度作出了相应改进,且研究显示在评价污染负荷时可以提高精度(蔡明等, 2004; Shrestha et al., 2008a; Shrestha et al., 2008b)。但输出系数法从本质上来讲是基于经验的估算模型,在机理方面的缺失会影响其估算结果的科学性,尤其是无法准确量化污染物河道迁移过程,一般引入“入河系数”进行简单换算。入河系数是一个基于流域损失的概念,在大尺度流域的应用具有一定的局限性。由于大尺度的流域河网复杂,不同区域的流域特征分异明显,用同一入河系数来估算不同河网区域的非点源污染入河量的方法忽略了流域特征的异质性;同时,在模拟步长方面,输出系数法较适合模拟年际变化,而在月际变化上则有所不足。因此,改进的输出系数法在整体精度上的不足使得其在大尺度精细量化估算上仍然有一定的局限性。

(4) 小流域模拟汇总法。该方法主要应用机理模型对研究区的小流域逐一进行模拟,然后将每一流域的模拟结果经过一定的数学方法转换汇总形成整个研究区的非点源污染模拟结果。庞靖鹏(2007)应用该方法将流域面积为 15000 km² 的密云水库流域分成潮河水系和白河水系分别进行定量化估计,取得了较好的效果。该方法可以获得精确的结果,但是机理模型的应用是一个复杂的过程,在每个小流域进行精确模拟预示着需要一系列烦琐的参数率定和结果验证,当流域的支流水系较复杂时,工作量将会成倍增加。同时,更为重要的一点是,该方法对数据的要求很高,在实测数据充足的基础上,机理模型的应用才能达到满意的模拟效果。而我国的非点源污染定量化研究起步较晚,细致全面的长时间序列监测数据可获得性差,因此,该方法更适合于发达国家在数据较全面的情况下应用。

亦有将机理模型直接应用于大尺度流域的研究,但一般只对针对水文过程进行模拟,如刘昌明等(2003)应用水文模型对高达 42 万 km² 的黄河源头区进行了年