

水利科学丛书 / SHUILIKEXUECONGSHU

● 薛联青 郝振纯 李 丹 著

流域水环境生态系统 模拟评价与治理

liuyu Shuihuanjing
Shengtai Xitong
Mofa Pingjia yu Zhili

东南大学出版社

水利科学丛书

流域水环境生态系统 模拟评价与治理

薛联青 郝振纯 李 丹 著

东南大学出版社

· 南京 ·

内 容 摘 要

本书主要采用多学科交叉研究的方法,通过理论探索研究、室内外试验和典型小流域应用分析相结合的途径,系统探讨了流域水环境模拟预测及治理问题。本书主要包括五个方面内容:一是探讨了基于有限监测数据及变异性的定量化信息优化监测方法,针对分布式模型的参数确定及尺度转换问题,研究确立了模型输入信息插值及参数外延方法;二是研究分析面源污染的迁移转化机理,建立了相应的定量化计算模式;三是基于流域水环境污染影响因素的不确定性及随机变异性,选择典型小流域,进行了农业非点源污染随机模拟研究;四是紧密联系流域的陆域和湖泊水体,对流域非点源污染负荷进行反演模拟应用,量化了流域污染风险;五是针对流域特性及小流域河湖污水污染特征,构建了流域河网水系水生态改善及效应评价的技术与理论方法,提出了相应的水生态污染治理措施及流域综合治理模式。

本书可供水文学与水资源、环境水利、农业工程、土壤学、环境工程、水利工程等学科的科研人员、大学教师和相关专业的研究生和本科生,以及从事水资源管理领域的技术人员参考和使用。

图书在版编目(CIP)数据

流域水环境生态系统模拟评价与治理 / 薛联青,郝振纯,李丹著.

—南京:东南大学出版社,2009.8

(水利科学丛书)

ISBN 978-7-5641-1761-0

I. 流… II. ①薛…②郝…③李… III. ①流域-水环境-生态系统-评价②流域-水环境-综合治理 IV. X143 X3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 125931 号

流域水环境生态系统模拟评价与治理

出版发行 东南大学出版社
出 版 人 江 汉
社 址 南京市四牌楼 2 号
邮 编 210096
网 址 <http://press.seu.edu.cn>

经 销 江苏省新华书店
印 刷 南京京新印刷厂
开 本 B5
印 张 13.75
字 数 270 千字
版 次 2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 版
印 次 2009 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5641-1761-0
印 数 1—1000
定 价 32.00 元

(本社图书若有质量问题,请与读者服务部联系。电话:025-83792328)

前 言

流域水环境污染已成为不亚于洪灾、旱灾甚至更为严重的灾害,而河流生态环境恶化及其引起的湖泊富营养化也已成为当今频繁发生的环境灾害之一。近年来,我国农业快速发展,化肥施用量逐渐上升,产生的农业非点源污染负荷所占比重也逐年增加,非点源污染对农业生产、水资源、水生态和流域水文特征均产生了严重影响,其危害程度在很多地区显现出来。今后随着经济的持续发展、人口密度的增加以及土地利用类型多元化,流域水体水质下降及富营养化问题将更加严重,流域性水污染问题也将大大加剧水资源危机,水质型的资源短缺形势日益严峻。尤其在不确定的外界水文、气象、气候变化条件下,非点源污染甚至已威胁到水源地供给和安全,尤其是在河网水系密集区域,河流生态环境恶化,河道及农田排磷排氮直接影响着饮用水安全和经济发展。同时由于流域非点源污染受土地利用、土壤类型、地形、植被以及气候、水文等要素的空间不确定性影响,实施全流域实时监测、模拟及控制非常困难,因此建立适合流域面上水环境模拟评价及综合治理方法,已是目前流域生态环境保护的重点和关键问题,系统有效地进行流域水环境的模拟、评价、预测及治理,对我国水资源管理和流域生态环境的健康持续发展将具有重要作用。

作者在总结以往研究成果的基础上,系统采用流域水文学原理、水质模拟方法、随机理论、统计分析、空间分析等理论方法以及环境水利、生态水利等工程措施,进行流域水环境模拟预测和流域水环境治理实践研究,从而为流域水环境的定量化管理提供参考。

全书共分为 12 章。第 1 章总结分析了流域非点源污染和水环境模拟研究中的几个关键问题;第 2 章主要对流域非点源污染信息监测及分布式模拟模型的发展做了概述;在第 3 章中,主要针对流域非点源污染信息监测及模拟尺度问题,研究建立了基于参数外延的非点源污染模拟分析模式,以及流域空间信息变异分析方法;第 4 章选择典型流域进行了大量的小流域野外和室内降雨—径流—产污实验,针对流域产

污特性,对空间信息进行了外延插值建模;第5章研究建立了流域非均匀采样优化模型,并进行了实例分析;第6章介绍并构建了分布式水文模型,结合实例讨论了流域水环境模拟中的参数确定。第7、8章阐述了非点源污染的产生机理,定量化模拟了实验流域氮磷流失规律,以此进行了典型流域农业非点源污染的随机模拟及风险分析,建立了基于Kriging的非点源污染风险评估方法;第9章针对应用实例,研究了典型流域非点源污染负荷反演模拟计算方法;第10、11、12章主要集中讨论了流域水环境生态系统评价及综合治理模式,针对流域特性及小流域河湖污染特征,选择流域性平原河网和小流域湖泊,构建了水生态改善及效应评价的技术方法,提出了相应水生态污染治理措施及流域综合治理措施,为其他相似流域水环境保护提供参考。

本书是作者在流域水文模拟和水环境保护领域长期的研究成果的总结,其中部分内容是作者承担国家自然科学基金项目(基金号:50609006)“基于参数外延的样本监测及分布式面源模型应用研究”、“河海大学优秀创新人才支持计划”等的研究成果,也包括了作者部分其他相关科研成果和论文。在本书撰写过程中,冯键、吴义峰给予了大力支持,参与了第11章节的编写工作,黄硕、吴春玲、康殷等人参与了大量的野外监测、室内实验工作,并参与了本书整编及校验工作,在此表示感谢。同时对作者所引用的参考文献的作者及不甚疏漏的引文作者也一并致谢。

本书的出版得到国家自然科学基金(基金号:50609006)、河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室及“河海大学优秀创新人才支持计划”的资助。

由于作者水平有限,在编写过程中难免存在不当之处,敬请读者和有关专家给予批评指正。

作 者
2009年7月
河海大学

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 概述	(1)
1.1.1 流域水环境问题	(1)
1.1.2 农业非点源污染	(3)
1.2 非点源污染的不确定性	(5)
1.3 非点源污染研究中的几个关键问题	(6)
1.4 流域水环境模拟研究发展趋势	(9)
第 2 章 非点源污染信息监测与模拟研究	(11)
2.1 水污染模拟方法	(11)
2.2 非点源污染模型研究概述	(11)
2.3 分布式非点源模型模拟尺度	(19)
2.4 非点源污染信息的监测采样方法研究	(22)
2.5 非点源污染模型不确定性和参数识别研究	(25)
第 3 章 基于参数外延的非点源污染监测及分析模式	(28)
3.1 非点源污染的定量化随机监测	(28)
3.2 基于参数外延的非点源污染模拟分析模式	(29)
3.3 农业非点源污染样本信息监测系统设计	(32)
3.4 非点源污染信息监测及定量模拟尺度	(35)
3.5 基于 Kriging 原理的信息变异性分析方法	(38)
第 4 章 非点源污染信息变异性统计及插值	(40)
4.1 典型流域产污影响因素特征统计	(40)
4.2 流域非点源污染本底值监测及统计分析	(42)
4.2.1 样本信息监测	(42)
4.2.2 样本信息统计特征	(44)
4.3 基于 Kriging 的空间变异模型建立及有效估值	(46)
4.4 小流域典型降雨—径流—产污实验	(47)
4.5 原状土柱产污特性实验监测	(53)
4.5.1 人工降雨模拟实验	(53)
4.5.2 土壤中硝态氮存储结构实验分析	(54)

4.6	实验流域不同尺度的氮磷变异性统计	(57)
4.7	变异因子提取及空间数据外延插值	(66)
4.7.1	变异因子选取和数据预处理	(66)
4.7.2	空间数据外延插值建模	(68)
第5章	农业非点源空间信息优化采样方法	(72)
5.1	优化样本数确定方法	(72)
5.2	优化采样结构设计	(74)
5.3	确定最优采样间距	(76)
5.4	野外实验非均匀采样模型的建立	(77)
5.5	优化采样方法的应用及对比分析	(79)
第6章	分布式水文模型建立	(84)
6.1	流域水文模拟	(84)
6.2	分布式水文模型构建	(84)
6.2.1	流域水文模型概述	(84)
6.2.2	产汇流模型	(85)
6.2.3	产流计算方法	(86)
6.2.4	汇流演算	(88)
6.3	实验流域模型参数确定	(89)
6.3.1	土壤下渗参数	(89)
6.3.2	产汇流模型参数	(91)
6.3.3	水土流失特性参数	(94)
第7章	非点源污染产生机理及氮磷定量化模拟	(97)
7.1	非点源污染产生机理	(97)
7.1.1	降雨径流过程污染	(98)
7.1.2	土壤侵蚀过程污染	(99)
7.1.3	地表溶质溶出过程	(101)
7.1.4	土壤溶质入渗过程	(101)
7.2	氮磷素污染负荷模型	(102)
7.3	实验流域氮磷污染定量化模拟验证	(104)
7.3.1	径流过程模拟	(104)
7.3.2	氮磷素流失规律模拟	(105)
7.3.3	氮磷素模拟误差分析	(108)
第8章	典型流域农业非点源污染的随机模拟及风险分析	(111)
8.1	分布式模型参数敏感性	(111)

8.1.1 敏感性分析方法及参数确定	(111)
8.1.2 非点源污染模拟敏感性参数计算	(112)
8.2 农田土壤氮磷随机场的确立	(114)
8.2.1 基于贝叶斯理论的条件模拟	(114)
8.2.2 流域氮磷污染条件模拟	(116)
8.3 基于信息外延的农业非点源污染随机模拟	(122)
8.4 基于 Kriging 的非点源污染风险评估方法	(129)
8.5 典型流域农业非点源污染风险影响分析	(130)
8.6 研究展望	(134)
第 9 章 流域非点源污染负荷反演模拟	(135)
9.1 引言	(135)
9.2 流域水环境污染反演计算理论与方法	(136)
9.2.1 反演模拟方法	(136)
9.2.2 建立水环境数学模型	(138)
9.3 典型流域非点源污染反演模拟分析	(138)
9.3.1 研究区概况	(138)
9.3.2 面源污染负荷反演计算	(139)
9.3.3 结果分析	(140)
9.4 基于 SWAT 模型的流域非点源污染反演模拟应用	(141)
9.4.1 分布式非点源模型应用	(141)
9.4.2 SWAT 模型结构描述	(142)
9.4.3 理论与方法	(143)
9.4.4 应用实例研究	(146)
第 10 章 流域水环境生态系统综合治理模式	(152)
10.1 流域水环境生态系统治理理念	(152)
10.2 流域水环境系统污染评价	(153)
10.3 流域水环境综合治理模式	(154)
10.3.1 流域生态治理理论基础及原则	(154)
10.3.2 小流域河湖环境治理模式	(155)
第 11 章 平原河网流域水环境情景模拟及污染治理	(159)
11.1 引言	(159)
11.2 平原河网的非点源污染负荷模拟	(159)
11.2.1 自然地理概况	(159)
11.2.2 小流域产汇流计算	(160)

11.2.3	流域 DEM 提取	(163)
11.2.4	典型流域污染负荷情景模拟计算	(167)
11.3	研究区非点源污染治理应用	(171)
11.4	研究区河网水污染水利工程治理应用	(176)
11.4.1	引言	(176)
11.4.2	感潮河网水动力学模型建立及求解	(177)
11.4.3	河网非稳态水质模型建立及求解	(178)
11.4.4	引江调水方案设计及评价	(180)
第 12 章	小流域湖泊水环境治理应用	(184)
12.1	湖泊污染治理	(184)
12.2	材料与实验方法	(185)
12.3	动态复水模拟实验	(187)
12.3.1	底泥磷释放	(188)
12.3.2	底泥氮释放	(190)
12.3.3	底泥上覆水 P 含量变化监测	(192)
12.3.4	底泥上覆水 N 含量变化监测	(194)
12.4	水土界面物质交换动态复水数学模拟	(195)
12.5	小流域环境综合治理	(197)
参考文献		(198)

第 1 章 绪 论

1.1 概述

1.1.1 流域水环境问题

水污染是指水体因某种物质的介入,而导致其化学、物理、生物或者放射性等方面特征的改变,并进一步影响水的有效利用,危害人体健康或者破坏生态环境,造成水质恶化的现象。流域水污染是目前我国面临的最主要的水环境问题^[1,2],我国的环境污染问题是与工业化相伴而生的,20 世纪五六十年代,工业化刚刚起步,环境污染问题尚不突出,但生态恶化问题经历数千年的累积,已经积重难返。20 世纪 80 年代以后,改革开放带来了经济的高速发展,伴随着工业化的大规模展开,我国的环境污染渐呈加剧之势,特别是农业机械化和乡镇企业的异军突起,环境污染向农村急剧蔓延,生态破坏的范围也在扩大,环境问题与人口问题一样,已成为社会经济发展的重大难题。在过去很长的一段时间里,大众普遍认为造成水环境污染的罪魁祸首是如工业废水等的点源排污。目前,我国环境保护工作虽取得一定进展,但形势仍然非常严峻,即便点源污染控制技术日益成熟,但环境恶化问题并没有完全好转的趋势,水环境污染问题仍然较为突出,环境污染从城市向农村扩展,治理难点也由点源污染向非点源污染转化。根据国内外相关研究报告,即使全面控制点源污染,江河的水质达标率也只有 65%,而湖泊的水质达标率仅为 42%,某些物种灭绝、植被破坏、土地退化,以及全球性的环境问题正严重地威胁着我国经济的发展和环境的改善,中国水污染中面源污染的问题日益突出,富营养化所带来的水质恶化和生态破坏,直接影响并降低了水资源利用价值,如近年来太湖频繁发生“蓝藻大爆发”的污染事故,严重影响了区域经济发展,这就使得人们的关注焦点逐渐转向另一大污染来源——非点源^[3~6]。

通常所说的非点源污染(Non-point Source Pollution)是由于土地利用活动产生的溶解的或固体的污染物从非特定的地点随着降水产生的径流,进入受纳水体造成的污染。按照美国环保局的划分,可将非点源污染细分为农业、林业、航运、公路、城市等类型,其中尤以农业非点源污染所占比重最大。非点源污染由于分布广泛、监测难度大,并且受水文、土壤、植被、气象等因素影响而具有较大的不确

定性,相对于点源污染更难以治理,尤其是农业非点源其污染程度和复杂度更高,所以国内外对非点源污染的研究主要集中于农业非点源污染的防治和农业最佳管理模式等方面^[7~11]。

近年来,水污染的一个重要特征是富营养化,特别是湖泊水系,由于大量的泥沙、营养物质以及有毒有害物质等进入江河湖库,在减少水体溶解氧的同时,造成水体的污染物浓度上升、有毒有害物质增加,引起水体发黑变臭,产生了严重的水体富营养化^[5]。欧洲对地表和地下水中氮、磷的研究表明,农业是磷和泥沙的主要来源^[11]。美国研究报告也指出,在进入地表水体的污染物中,46%的泥沙、47%的总磷和52%的总氮均来自于农业径流污染,农业已经成为全美河流污染的第一污染源^[12~16]。在中国,农业非点源污染造成的环境恶化现象更为突出,大部分水体富营养化进程加快,不少平原湖泊及水库富营养化趋势加剧。我国化肥年施用总量已远远超过发达国家为防止化肥对水体污染而设置的安全上限^[7]。据统计,目前我国化肥施用量约400 kg/hm²,农药的年施用量也达到了50万~60万t,是世界上化肥施用量最多的国家之一。由于化肥农药的过量施用,其有效利用率低,使得大部分流失进入水体,成为水体富营养化的首要来源。我国污染较严重的流域如太湖、巢湖、滇池等已经呈现氮、磷等营养盐类引起的湖泊富营养化,鄱阳湖、洞庭湖目前虽然维持在中营养化水平,但磷、氮含量偏高,正处于向富营养化过渡的阶段。据粗略估算,目前水体污染物中来自工业、生活和农业面源污染的大约各占1/3^[7,11]。在国家评价的富营养化严重的11个湖泊中,巢湖总氮、总磷分别超标2.73倍和8.22倍,滇池总氮、总磷分别超标2.03倍和4.96倍(中国环境状况公报),导致富营养化的氮素和磷素,主要是通过面源输送的,其污染有很大一部分来源于农业非点源,如太湖总氮来自工业的只占33%,总磷来自工业的只占12%(中国环境报);巢湖总氮的68%、总磷的74%来自面源;滇池由农田带入的氮、磷量分别为流域水体径流负荷的53%和62%。大型湖泊营养盐浓度上升,有的已出现极度富营养化状态,且农业非点源污染的比例在逐年上升,从世界范围来看,非点源污染已成为水环境污染的重要方式^[9,10]。

不仅如此,地表水污染已通过入渗殃及地下水,加之化肥、农药的不合理使用,使地下水水质每况愈下。我国是世界上水土流失最严重的国家之一,水土流失也加剧了流域水环境的污染程度,泥沙中所携带的氮、磷来是造成江河湖库面源污染的主要原因之一^[12]。据相关研究报道,全国水土流失面积367万km²,占国土面积的38%,其中水力侵蚀面积179万km²。每年流失土壤50多亿t,严重影响土壤肥力。全国每年因水土流失新增荒漠化面积2100km²,土地利用价值和承载能力降低。每年因水土流失而损失的耕地面积达7万多hm²。黄土高原每年水土流失带走的氮、

磷、钾就达 4 000 万 t,相当于全国一年的化肥产量^[17~23]。

这些水环境问题产生的原因是随着经济社会的发展,城市规模的不断扩大,用水量的持续增大,造成排入江河湖库的废污水不断增加^[22],而无节制地排放未经处理的废污水更是河湖污染的主要原因。据水利部门最新调查资料,目前废污水排放量已超过 20 世纪 80 年代初的一倍以上,年排废污水达 600 亿 t,这些废污水 80% 以上未经处理直接排入江河湖库,成为主要的污染源,除此之外,水土流失以及化肥、农药的不合理使用也是造成河湖污染的重要原因^[21]。当前,我国水污染的一个重要特征是富营养化,特别是湖泊水系。据专家估算:近 50% 的氮、磷来自于水土流失造成的非点源污染。此外,水资源短缺与水污染互为因果,以及水土资源的不合理开发利用,加剧了水环境恶化,由于水资源短缺,水体稀释能力低,我国流域环境污染和生态环境更趋恶化,已到了岌岌可危的地步,解决目前突出的流域水环境污染问题及相关问题已备受关注^[20,24,25]。

1.1.2 农业非点源污染

非点源污染起源于分散、多样的区域,其地理边界和位置难以识别和确定,其危害规模大,防治困难。农业非点源污染是人们在从事农业生产活动时,农田中的土壤颗粒、化肥、农药或其他有机、无机污染物质,在降水或灌溉过程中,随地表径流、农田排水和土壤渗漏等进入水体,对地表和地下水体造成的污染主要包括化肥污染、农药污染、集约化养殖场污染等^[26~28]。相关研究表明,土壤侵蚀与水土流失是规模最大、危害程度最严重的农业非点源污染成因之一,降雨作用引发土壤侵蚀和水土流失中夹带大量的氮磷营养物质,是水体富营养化的主要诱因。此外,过量施用的化肥和农药在雨水或漫灌淋溶后随径流进入水体,引起水质污染,即为人们常说的农田氮磷污染^[29,30]。水资源是经济社会发展的重要支撑和保障,近年来随着我国农业的快速发展,化肥施用量逐渐上升,由此产生的农业非点源污染负荷所占比重逐年增加,其产生的污染对农业生产、水资源、水生生物栖息地和流域水文特征均有着严重影响,其危害程度已经在我国很多地区显现出来,造成的水资源短缺形势也日益严峻,如何有效地监测和防治农业非点源污染,对我国水资源管理和环境保护具有极其重要的作用。

非点源污染研究是继点源污染研究之后,兴起的又一个国际环境问题研究的活跃领域^[11,31~33]。由于农业非点源污染形成过程受区域地理条件、气候条件、土壤条件、土壤结构、土地利用方式、植被覆盖和降水过程等多种因素的影响,因此具有其特殊的污染特性。概括起来,农业非点源污染特殊的性质表现为污染发生的随机性、分布范围广、形成过程复杂、潜伏性强、排放途径及排放污染物的不确定性、污染负荷的时空差异性以及模拟监测与控制困难等属性。具体为:

(1) 随机性。非点源污染的起源和形成过程很大程度上决定于大范围的区域降水过程,由于降水的随机性和其他影响因子的不确定性,从而决定了非点源污染的形成具有较大的随机性,地表径流、农田排水、土壤侵蚀等的规模和强度均与降水过程密切相关^[17]。分析非点源污染的产生,可以发现它主要受水文循环过程的影响和支配,而降雨径流具有随机性,由此产生的非点源污染也必然具有很强的随机性。

(2) 时空延滞性。农业非点源污染往往伴随降雨径流产生,在很大程度上与降雨和径流立即发生密切相关,农药和化肥在农田存在的时间长短决定着非点源污染形成的时空滞后性。

(3) 广泛变异性。由于非点源污染涉及多个污染者,在给定的区域内它们的排放是相互交叉的,加之不同的地理、气象、水文条件对污染物的迁移转化影响很大,与点源污染的集中性相反,非点源污染物在进入地表水或下渗到地下水之前,主要产生在广阔的土地上并在地面迁移,地表分布范围广泛并具有分散的特征,它随流域内土地利用状况、地形地貌、水文特征、气候、天气等的不同而具有空间异质性和时间上的不均匀性^[34~36]。

(4) 形成机理的复杂性。农业和化肥的施用是造成农业非点源污染的主要来源,在不同外界水文降水条件时,营养盐的流失速率和方式也具有较大差异,受产汇流过程等诸多因素间的相互影响,营养盐迁移转化具有明显的季节性影响特性,并随化肥等施用量、施用方式和灌溉排水形式的不同,污染发生和运移过程机理复杂,较难模拟。

(5) 潜伏性和不易监测性。由于非点源污染信息不对称、随机性和高度不确定性的存在,大多数非点源污染具有分散性、隐蔽性、不易监测、难以量化等特征,很难具体监测到单个污染者的排放量,排放的分散性导致其地理边界和空间位置的不易识别。农业非点源污染往往伴随降雨径流而产生,因此在农田中施用农药化肥后,如果没有降雨或者不进行灌溉,其可能造成的污染会比较微弱,但若发生降雨,其危害性会立刻显现出来,是一种具有潜在危害性的污染源^[18,37]。

(6) 不可控性。非点源污染的来源、发生机理的复杂性以及污染物存在的潜伏性和监测的不确定性都增大了定量研究农业非点源污染的难度,从而使非点源污染具有与点源污染治理不同的特点,即不可控性。

除了城市和工业发展所带来的污染,农业本身的过程性污染较为严重,与我国农业大国地位相匹配,农业的变化对于社会、环境都很敏感,与集中排放的点源相对比,非点源影响更为广泛、问题更为复杂、管理更加困难,危害性更大,对可持续发展影响更加深远。近年来,运用遥感(RS)、地理信息系统(GIS)可以对非点源污染进行模型化描述和模拟,为监控、预测和检验提供有力的数据支持^[38~40]。

但由于农业非点源污染特殊的性质,如随机性、分布的广泛性、形成机理的模糊性,以及气候、水文要素等空间不确定性影响,其信息监测更为复杂和困难,这在很大程度上也限制了非点源污染模拟模型信息采集及其应用。通过监测及量化研究可以较好地实现农业非点源污染的预测,不仅是解决农业非点源污染问题的关键所在,也是众多研究者所关注的重点难题。

1.2 非点源污染的不确定性

流域非点源污染一般是指由降雨引起的各种污染物从土壤圈向水圈的扩散。由于非点源污染涉及多个污染者,在给定的区域内它们的排放是相互交叉的,加之不同的地理、气象、水文条件对污染物的迁移转化影响很大,非点源污染发生随机、污染负荷在时空上的变化幅度很大,并且受土地利用、土壤特性、地形、植被以及气候、降雨径流等要素的空间不确定性影响大,因此与点源污染的集中性相反,非点源污染具有分散性的特征^[41~43]。它随流域内土地利用状况、地形地貌、水文特征、气候、天气等的不同而具有空间异质性和时间上的不均匀性和不确定性,表现为污染发生的随机性、机理过程的复杂性、排放途径及排放污染物的不确定性、污染负荷的时空差异性以及模拟监测与控制的困难性。

非点源污染的不确定性简单地说,就是不确定地点、不确定时间、不确定途径、不确定量^[44]。由于非点源污染信息不对称、随机性和高度不确定性的存在,大多数非点源污染具有分散性、隐蔽性、随机性、不易监测、难以量化等特征,使得对其研究和管制具有较大的难度,尤其是农业非点源污染涉及随机变量和随机影响。例如,农作物的生产会受到自然的影响(天气等),因为降雨量的大小和密度、温度、湿度的变化会直接影响化学制品(农药、化肥等)对水体的污染情况。

对于非点源污染来说,其不确定性可分为面源污染物产生(包括进入水域)的不确定性和概化模型的不确定性。从污染产生的途径考虑,非点源污染与区域的降水、土壤结构、农作物类型、气候、地质地貌等密切相关,非点源污染的不确定性多为自然的不确定性,主要有受概率控制的随机现象,如降雨的发生时间、地点、量级及时间和空间分布过程等,可以理解为自然现象或事件本来具有的不确定性;由于未完全掌握其机理^[45],产生的对变化规律描述与分辨的不确定性,可以理解为以离散的、要素不全的和受时空尺度限制的手段所获取的资料数据来描述、模拟和研究复杂的非点源产生和迁移转化过程所引起的不确定性。

从非点源污染集总和分布式模型结构本身以及计算模拟过程来看,非点源的不确定性大致可来源于:(1)复合环境系统中各因素的随机性;(2)样本信息监测及数据采集的不确定性,包括数据缺失;(3)在建立模型和参数率定过程中,因素

间相互作用关系考虑简单和忽略小尺度范围的时空变异性,从而影响模型结构和参数的不确定性。在实际中,引起非点源污染的因素是复杂多样的、不确定的,必然会引起较大的误差^[46~48]。总体看来,非点源污染预测模拟控制中的不确定性主要是模型结构和模型参数的不确定性,即模型自身固有的不确定性,主要产生于在模型中采用了一些不正确的假设来简化复杂的实际过程和因素间的关系,对物理量之间的相关关系和污染物实际运移过程掌握不清楚,模型应用区域与模型条件不统一。除此之外,由于自然条件的多变性、监测难度和现有数据的不足,使得样本信息缺乏代表性、缺乏经验和历史累积的数据,从而很大程度上也引起了模型参数的不确定性,造成污染模拟预测和分析的不确定性。

由上述可知,对于模型结构的不确定性,一般通过开发适合实际情况的模型来克服。与点源污染相比,非点源污染的研究与控制具有较大的难度,特别是其所体现的不确定性问题是非点源污染防治的关键之一,目前国内外针对非点源的不确定性研究是以模型参数的不确定性研究为主^[25,49],研究方法也是以参数不确定性为研究对象。因此,通过非点源污染的不确定性研究,得出影响非点源污染的形成和负荷的重要因素,可以有针对性地进行非点源污染的预防和管理,为水污染防治提供科学的依据。

1.3 非点源污染研究中的几个关键问题

如上所述,非点源污染对农业生产、水资源、水生生物栖息地和流域水文特征均有着严重影响,目前对于非点源污染的影响因素的研究多集中于定性及相关性方面,主要包括地表径流、土地利用类型、土地利用结构对污染物迁移的影响、污染元素在土体内的流失、畜禽养殖业对环境的影响以及污染物的去除机理等。非点源污染的定量化的研究也主要集中于监测控制与模拟分析两个方面^[49,50]。对污染源的监测与控制在于有效及时地发现污染产生的源头,直接在源头提出有效的控制措施,将非点源污染物的排放控制在最低限度。其次是在污染物产生—分解—输送的过程中进行相应的运移转化的机理分析,从而了解污染物的扩散方式和途径,并达到提早预报控制和减少污染物排入水域。

从20世纪70年代开始,国内外学者针对非点源污染展开了深入的研究^[51~55],概括起来主要集中于:模型基本理论研究,主要包括污染物在土壤圈中的行为以及污染物在外界条件下(如降水、灌溉等)从土壤向水体扩散的过程这两个方面。农业非点源污染模型是量化研究的重要工具,到目前为止,已经出现了大量的经验模型,以及以污染物产生迁移转化机理为基础、兼顾不同时空尺度、具有物理机制的分布式非点源污染模型。这些模型的出现及完善大大促进了农

业非点源污染的定量化研究工作。然而对非点源机理研究的成果多具有地域性,结论及成果能否推广应用于其他地区还有待验证。监测技术及采样方法的研究:尽管随着计算机等高新技术的快速发展,3S(GIS、GPS、RS)与常规的非点源污染监测方法相结合,大大提高了数据采集及处理的能力,但由于非点源污染起源于分散的多样区域,且地理边界与发生位置难以识别与确定,实现有效快速的监测仍存在一定困难。管理及控制措施的研究:在理论研究的基础上,进行农业非点源污染管理模式的研究也取得了一定进展。但是由于受农业非点源污染自身特点的限制,并且人们对其认识起步较晚,因此在研究中还面临一些必须解决的关键问题:

(1) 对农业非点源污染的机理研究有待深入。农业非点源污染的产污机制是进行监测、模拟及治理的基础,已有很多学者针对其迁移转化规律进行了实验及理论分析。虽然对农业非点源污染的形成过程有比较直观的认识,但要把复杂的物理过程抽象成纯粹的理论模型,仍需要做进一步的深入研究。比如关于地表土的氮、磷等营养物质如何迁移到水体中,以及在这个迁移过程中污染物的相互转化机理机制还未完全搞清楚。污染过程机理研究的缺乏及不足使得研究成果难以与控制管理相结合,这也成为制约我国非点源污染研究的重要因素。

(2) 采样方法需要进一步改进和提高^[56~58]。农业非点源污染的研究涉及大量的时空数据,这些时空数据又因为地形、降雨及人为等因素的影响,具有很强的时空异质性,这给监测带来了比较大的困难,同时耗费大量人力、物力和财力,得到的采样信息常常造成信息冗余,甚至在很多情况下也不具有完全的代表性,因此,提高监测效率和采样信息的有效性是亟须解决的问题。

(3) 模型的适用范围有待扩大。虽然已经提出了各种非点源污染模型,但真正明确了水文基础和污染物迁移转化机理的模型还处于研究状态,应用于实践的较少,而且模型中有很多参数都需要相当大的信息量来确定,这对于资料匮乏的大流域来说是不现实的,模型对资料的依赖性太强以及参数太多都限制了模型的应用范围。

(4) 治理措施不完善,管理及控制措施考虑不够全面。许多管理措施只考虑了对地表水质的改善,而忽略了地下水质;某些最佳管理措施的应用考虑欠周全,如利用湿地截污时,虽然利用了湿地蓄存非点源污染物的能力,却降低了其本身的生态效益,如保土耕作,它通过减少地表径流及雨点对土壤的冲击与侵蚀来控制水土和农用化学物的流失,但也有可能会增加生物有效磷和可溶性磷的流失。

我国非点源污染试验与监测条件尚达不到国外的先进水平,几乎更难完成分布式模型计算,可利用的数据信息量较少,往往只能基于已有的少量监测资料,通过相关模式的推演来计算污染物流失量,使得计算结果的可靠性较差。非点源污

染起源于分散的多样区域,且地理边界与发生位置难以识别与确定,导致无法准确快速的监测,同时已有的监测点也不具有完全的代表性,使得计算结果不可靠,造成研究上的困难,如何实现监测点的代表性以最大程度地反映各影响因素的时空变异性,是进行非点源污染研究中信息数据获取的首要解决的关键问题。

目前已有很多成熟的非点源污染模型,但各种模型都有自身的局限性,在推广应用到其他地区时往往效果欠佳,尤其是具有物理基础的分布式非点源污染模型结构复杂,参数繁多,需要大量的输入信息^[59~61]。受非点源自身特点的限制,非点源污染的理论模型框架和体系虽然已基本建立,但在模拟尺度的扩展问题上,现在的模型仍主要体现在特定小尺度面积上。限制模型应用的重要原因就是模型对监测资料的需求量大,依赖程度高,参数移植困难,而我国由于受实验和监测条件的限制,几乎很难完成分布式模型的计算精度^[62~64]。非点源污染起源于分散的多样区域,且地理边界与发生位置难以识别与确定,导致无法准确快速的监测,同时已有的监测点也不具有完全的代表性,使得计算结果不可靠,造成研究上的困难。主要表现为一是对非点源污染的机理研究有待深入,虽然已经提出了各种非点源污染模型,但模型中有很多参数都需要相当大的信息量来确定,这对于资料匮乏的大流域来说是不现实的;二是已有模型对资料的依赖性太强,参数多,率定移植都很困难,这些因素大大限制了模型的应用范围。

非点源污染是引起水环境质量不断恶化的一个重要原因,要从根本上解决环境污染问题,除了继续重视点源治理外,控制和减少非点源污染也是一大关键。虽然可利用的模型发展已经比较成熟,但是正如上述,非点源污染的监测难度大导致研究所需的信息严重匮乏,无法满足直接进行计算的需求^[65,66]。因此,通过理论分析、室内实验研究和野外典型区实验相结合的途径,研究如何充分利用已获得的信息、监测数据,分析了解相关参数的变异性规律,建立经济、快速监测的定量化指导性定位和模型参数外延方法,减少时间冗余和空间监测的变量维数,是实现分布式模型在不同尺度上推广应用迫切需要解决的问题^[67~70]。同时针对分布式模型在其模拟运用中的有效信息获取、外界环境因子变异性、输入信息即参数外延确定及尺度转换问题,研究如何利用随机理论、多元统计原理以及多参数多变量变异性分析和协同估计等理论方法,充分利用已获得的信息、监测数据分析非点源污染产生及其影响因素的空间变异性,实现多元时空变量输入、输出及参数信息的协同估计,并利用已有的点源监测资料以及有限的非点源污染信息,借助于水环境数学模型分析不确定条件下的非点源污染产出及其影响因素,并反演非点源污染的空间分布,也是我们今后分析非点源污染问题的一个有效途径。该研究不仅对模型的实际应用具有指导作用,研究成果也将有利于区域非点源污染的监测、控制和管理,对少资料或无资料区域的非点源污染模拟和预测具