

中国农村环境解困管理丛书

栾胜基/主编

南方流域农业面源 污染控制政策仿真

Policy Simulation of Controlling Agricultural Non-point
Source Pollution in Southern Watershed

杨顺顺 徐 鹏 李丽丽/著

非点源



科学出版社

国际科技合作专项项目“中国农业转型期流域营养盐
输出及管理的合作研究”(2012DFG92020)

湖南省自然科学基金青年项目“基于计算实验的
南方流域农业面源污染经济型控制政策模拟”(2015JJ3083)

资 助

南方流域农业面源 污染控制政策仿真

Policy Simulation of Controlling Agricultural Non-point
Source Pollution in Southern Watershed

杨顺顺 徐 鹏 李丽丽/著

科 学 出 版 社

内 容 简 介

针对我国农业面源污染控制这一热点问题,本书将基于农户尺度的多主体模型 MAREM 与荷兰学者开发的流域营养盐输出模型 NEWS 通过数据输入输出相连接,形成一套分析“农业环境政策变化-农户行为响应-农业面源污染物排放量变动-河流输运量和河口环境改变”全过程影响链条的集成方法平台。本书详细阐述了模型集成和政策设计思路、NEWS 模型的本地化修正过程、MAREM 模型的程序结构,以及利用该集成模型组,在长江流域、珠江流域、北江流域三个不同流域尺度的化肥税、农药税等农业面源污染控制政策仿真案例研究结果。该模型集成手段将为我国流域农业面源污染,以及近海富营养化控制提供探索性的分析思路和技术支持。

本书可供环境学、系统科学和农村经济学的研究者,农业环境政策的制定者和实践者,对农村和近海环境管理、营养盐管理或复杂系统分析方法等相关领域有兴趣的学者及社会人士参考阅读;同时,也可供高等院校相关专业师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

南方流域农业面源污染控制政策仿真 / 杨顺顺, 徐鹏, 李丽丽著. —北京: 科学出版社, 2017. 6

(中国农村环境管理解困丛书)

ISBN 978-7-03-053359-3

I. ①南… II. ①杨…②徐…③李… III. ①农业污染源-面源污染-污染控制-环境政策-中国 IV. ①X501

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 123623 号

责任编辑: 林 剑 / 责任校对: 彭 涛
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 无极书装

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>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2017 年 6 月第一次印刷 印张: 18

字数: 366 000

定价: 109.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

丛书序

过去几十年，不断借鉴西方工业化农业生产模式改造传统农业的过程中，我国成功地解决了粮食供给问题，但当前农业转型期表现出的问题也不可忽视。农业供给侧由产量绝对不足的匮乏，逐步转变为品种、品质难以匹配需求升级的相对失衡；农业生态环境质量受损，土壤肥力减退及污染、化肥农药过度使用、畜禽养殖污染严重等问题日益普遍。现阶段，在城市、工业点源污染控制和治理能力迅速提高的前提下，中国农村环境保护形势之严峻、利益之复杂、任务之艰巨更加凸显。同时，我国县级以上农村基层环境管理职权缺失、构建困难，环保基础设施建设严重滞后，农村环境管理业已成为我国环境管理体系中的短板。农村环境状态的优劣不仅关系到能否为国家经济发展提供良好的物质基础和生态服务，也关系到能否为几亿农民的生活质量和身体健康提供基本的保障条件。

中国农村环境问题的根源在哪里？

政治家可溯源于城乡之间二元管理体制的制度原因，社会学家可归因于农村社区公众参与乏力，经济学家认为是公共物品管理的“搭便车”现象，环境学家则更倾向化肥农药过量使用……每一种解释都有其合理性，都能说明某一方面问题的严重程度。我们虽然是环境学的研究者，但不能仅仅停留在从污染物的治理角度认识农村环境问题，而应该有全局的视角和意识，将各环境要素整合到农村社会的大背景中进行思考。

我国正处在传统农业向现代农业的转化过程中，传统农村社会形态与非传统农村社会形态并存且广泛交织，传统农村社会正在以各种方式接受现代化的元素。然而，现代科技、工业化和城市化的高速发展，并没有给中国的农村带来福音，相反“三农”问题日趋严重。尽管现代生产要素已经广泛应用到我国农村生产和生活的各个领域，但并没有实现我国农村的普遍富裕和资源的有效利用。当农户传统的生产方式和生活方式与现代生产和生活要素尚未彼此适应，随之而来的便是各种形式的现代环境问题。因此，农村环境问题的根源在于传统农村生产和生存方式与现代生产和生活方式的冲突，而在这个冲突当中的矛盾主体则是农户。

中国农村环境解困的出路在何方？

传统的农村社会必须要接受和容纳现代化的元素，现代化的农村社会难以放弃农村固有的传统，因为这些传统积累了千百年来农村与自然和谐共生的智慧。

要实现现代文明成果与传统生存智慧的完美结合,关键在于如何在传统和现代的碰撞中找到平衡点,或者说融合点。这也是农户环境行为演变的最终目标。正如舒尔茨关于理性小农的论断,改变传统农业的本质,重点在于提供给小农可以合理运用的“现代生产要素”。保护农村环境,需要对农户经济行为进行正确引导,使得他们可以在传统农业向现代农业的转化过程中,真正做到合理运用“现代生产要素”,努力避免农户经济行为对环境的负面影响。同时,也要认识到,传统农户基本特征的逐渐消失同样激化了传统与现代的冲突,农村生产系统中传统的物质循环和污染消纳途径逐步地在现代要素应用中被挤出,这加深了我国农村环境问题的严重性。因此,尊重和引导农户的理性选择是化解传统农村生产和生存方式与现代生产和生活方式冲突的重要途径。

农户作为基本经济组织形式,其生产行为既是经济过程,又是生态过程。相对于城市的居民和企业而言,农户对环境的理解不仅仅是污染物存在的形式,更重要的是其污染和破坏的过程是在剥夺他们自己的生产要素,蚕食他们自己的生活空间。从这种意义上理解,农户具备关心环境的原动力,因为环境就是农户生产与生活的来源与归宿,农户的行为实际上是一种寻求经济和生态共生的过程。但遗憾的是,这种过程在现行制度的缺位和短期经济利益的影响下开始被扭曲,离开既有的轨道,而且渐行渐远。

农户在我国农村“社会-经济-环境”系统中占有的核心地位不言而喻,在这个具有非线性、开放式、动态演化特点的复杂农村环境系统中,研究农户的行为与环境的关系是一件困难且极具挑战的工作。本丛书以农户环境行为为视角,厘清农村环境问题产生的原因,从而提出农村环境管理的途径。丛书中所提出的研究方法既不同于农业生产环境的研究,也不同于村落环境的研究,而是以农户为研究切入点,将农户作为农村环境的主体,研究农户行为与环境的关系,借鉴现行的城市环境管理模式,探寻改进我国农村环境管理政策与实践的突破口。

北京大学农村环境课题组在20世纪末开始致力于农村环境污染及防治的研究,先后得到国家自然科学基金委员会、环境保护部、科学技术部和联合国环境署的多方支持。有数十位研究生在不同时期分赴各地农村地区开展了各类的实地调研和环境监测,完成各类论文和科研报告多份,取得了一系列的研究进展和应用成果,现以丛书形式公开出版,以飨读者。

若本丛书多个方面的讨论,能提供给读者更多迸发思想火花的机会,那么其刊行会更有意义。

栾胜基

2011年12月2日于南国燕园塘琅山下

目 录

第 1 章 导论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 本书构成及技术路线	3
第 2 章 农业面源污染控制理论回顾	6
2.1 农业面源污染的模拟技术	6
2.2 农业面源污染控制政策研究	20
第 3 章 模型集成的总体思路	26
3.1 模型集成设计思路	26
3.2 面向问题和政策设计思路	30
第 4 章 NEWS 模型的本地化修正	34
4.1 调研概况	34
4.2 农户访谈分析	38
4.3 水质监测结果与分析	46
4.4 土壤监测结果与分析	54
第 5 章 MAREM 模型的程序结构	58
5.1 运行环境设置和准备工作	58
5.2 程序子类设计解析	60
第 6 章 长江流域农业面源污染核算及特征分析	73
6.1 核算方法	73
6.2 长江流域分区域农业面源污染核算分析	74
6.3 核算分析结论	92
第 7 章 基于 MAREM-SD 联用的珠江流域农业面源污染政策仿真	94
7.1 研究区域概况	94
7.2 珠江流域营养盐污染 SD 仿真系统构建	100
7.3 基于 SD 仿真系统的珠江流域营养盐输出模拟	133
7.4 基于模型联用的农业控制政策情景分析	144
7.5 本章小结	162
第 8 章 基于 MAREM-NEWS 耦合的北江流域农业面源污染政策仿真	165
8.1 研究区域环境数据库的构建	165

8.2 北江流域营养盐输出模拟	190
8.3 基于 MAREM-NEWS 耦合模型的政策情景分析	218
第9章 结论与展望	245
9.1 主要结论	245
9.2 展望	247
参考文献	249
附录	265
后记	278

第1章 导 论

1.1 问题的提出

我国近年来一直承受着严重的水环境污染的困扰，大部分江河流域在污染治理和水质保持方面压力凸显。为应对日益严峻的水环境问题，中国政府不断加大水污染的治理力度，自 2010 年以来，我国的工业废水达标排放率已超过 95%（据《2011 中国环境统计年鉴》），但相对于工业和城镇生活水污染主要以点源形式存在的特点，农业水环境污染主要以面源排放为主，污染源面积广阔，采用类似于工业源的集中处理技术进行治理则略显勉强。从陆源污染物排放层面，2006~2009 年进行的第一次全国污染源普查结果显示，由于缺乏有效的农业面源治理手段，目前农业源已成为我国水环境污染最重要的贡献源，能否有效控制农业面源污染是决定我国流域水环境管理能否取得成效的关键命题。而从陆源污染物与近海环境影响关系层面，通过河流这一连接陆地和海洋的桥梁，淡水生态系统的水质恶化和对河口和近海环境也造成了一系列的传导型影响，如厌氧环境造成的近海富营养化、赤潮爆发、生物多样性减少等。蓝色国土是我国发展海洋经济的重要基础，我国社会经济活动活跃地区大多位于南方流域沿海范围，近海水环境问题也已成为威胁我国社会经济可持续发展的重要问题，近海水域污染研究与农业面源污染研究同属热点研究问题，从农业面源污染传导而致的近海营养盐污染问题也是本书涉及的重要研究对象之一。

与学界大多数研究类似，本书所指的农业面源污染仅针对水污染方面，由于农户的生产和消费过程相互结合，目前国内学界研究中对农业面源的测算都包括了农户生活消费部分，本书的农业面源污染估算范围也涵盖生活源。农业面源污染属农村内源性环境问题，与农户的生产过程和消费过程息息相关，其产生的根本原因可归宿于现阶段大量涌入农村的各种现代生产和消费元素，与农户传统的生产技能、生活方式、物质循环方式及农村薄弱的环保基础设施的不匹配，导致出现化肥、农药等污染性生产要素高强度施用，畜禽排泄物消纳不足、管理不善等现象。农业面源污染的典型污染物主要包括总氮（TN）、总磷（TP）和化学需氧量（COD）等，其中又以氮磷负荷造成的营养盐污染为主，若对第一次全国污染源普查结果用等标污染负荷进行折算，农业源中 TN 和 TP 的等标污染负荷

率已超过 85%，氮磷营养盐的增加会造成水体富营养化、水体底层低氧或缺氧，进而引发湖泊、河口和近海赤潮、生物多样性锐减等一系列严重的环境安全问题，因此本书对农业面源污染问题的关注更多地集中于营养盐污染问题。

农业面源污染是农户群体行为的共同后果，其在农业生产和农村消费中产生，具有污染源面积广、分散性、难以进行管网收集、距离集中处理设施远的特点，除集中居住区生活污染源外较难采用通常的工程手段进行治理。因此，有必要考虑从干预农户行为出发，从源头上控制和降低面源污染物的产生和排放量。农户是我国最基本的农业经济组织（李秉龙和薛兴利，2003），由于我国现阶段农户脱贫致富的期望常紧迫于农业环境治理的压力，因而城市环境治理中的命令控制型政策不宜直接移植于农业面源污染治理，必须从市场经济型政策入手，实现农户增收和环境保护的双赢，才可能促成政策实施的长效性。本书试图通过多主体建模技术和进行计算机可控经济学实验的方式，在计算机中构建若干类符合我国南方案例流域自然社会条件的典型人工村落和在其中“生活”的数百户虚拟农户，模拟各类面源污染经济型控制政策下农户行为的响应，评价农户经济条件和环境质量的变动水平。与丛书中《农村环境管理模拟：农户行为的仿真分析》一书的区别和发展如下：其一是本书的研究案例区域由全国平均情况转向农业面源污染，以及河流营养盐输出更为严峻的南方流域，并将底古税情景由化肥税转向多种污染性生产要素的联合税收，使农业面源污染控制的政策设计与现实情况联系更为紧密；其二是本书将基于多主体建模技术的 MAREM 模型（多主体农户和农村环境管理模型）通过系统动力学模型，与宏观尺度流域营养盐输出模型（global nutrient export from watersheds NEWS model）及 Global NEWS（以下简称 NEWS）模型相连接，发挥不同模型技术的优势，形成了能够全程分析“社会经济政策变化-农户行为变化-农业面源污染物排放量变化-污染物河流输运-河口和近海环境变化”的集成模型组，并选择南方流域中不同的流域尺度对集成模型组进行了实证研究。

1) 本书的学术价值。目前采用计算实验方法模拟完整的经济系统的范例并不多见，国内的研究热点也集中于城市经济系统模拟（方美琪和张树人，2005），而整合了农户生产、消费、从业选择行为和农村环境评估的模拟方法在国内外都鲜见报道。针对我国农村“社会-经济-环境”系统非线性、开放式、动态演化的特点，本书将进一步完善作者开发的多主体农户和农村环境管理模型（MAREM），在提出从模拟农户行为对政策的响应入手分析我国农业面源污染控制策略的新视角后，将 MAREM 模型与经典的环境学模型相组合，用以分析陆源-海源污染物产生和输移情况，并针对南方流域的实际情况积累更多的政策研究案例。本书将有助于丰富多主体建模技术和计算实验方法在我国环境学界的结

合应用,在复杂经济管理系统方法论研究方面也具备一定的理论和方法探索性。

2) 本书的现实意义。我国农村环境保护不可能采用污染转移输出的扩张式发展模式,必须依靠依托自身条件,优化发展模式,重构人与自然的和谐关系。我国南方流域复种系数高,化肥投入强度显著高于全国平均水平,氮磷排放量高;加之气候湿润、水网密集,水污染物流失率高,导致农业面源污染形势更为严峻,许多重要河流、湖泊都存在着严重的富营养化问题,使得珠江口、长江口等近海富营养化风险加剧(Qu and Kroeze, 2010)。考虑到农业政策的复杂性和敏感性,本书通过计算实验的方式测试政策效果,一定程度上降低了现实世界政策调整的资金、时间成本,回避了可能出现的风险;而通过微观的农户行为模型与宏观的营养盐输出模型的结合,不仅能进一步分析陆源污染对河流、海洋环境的影响,也提供了一种如何通过近海环境控制目标倒逼相关流域农业面源污染控制政策的设计目标的模拟技术。本书的研究结果将为南方流域农业面源污染严重地区的农业环境治理经济型政策设计和创新提供思路和决策依据。

1.2 本书构成及技术路线

本书共9章,按内容可分割为两个主要篇目,上篇为理论和方法篇,包括第1~5章内容;下篇为集成模型组在不同流域的实证应用,包括第6~9章内容。

上篇内容构成:

第1章为导论,阐述本书的研究对象、目标、意义及全书的章节逻辑框架和技术路线。从方法学上,本书致力于形成一个微观和中宏观尺度、社会经济学和自然科学集成应用的模型组;从实践应用上,本书希望通过对不同流域尺度的政策设计和仿真模拟,探索减缓农业面源污染及其所导致的近海污染的农业经济类环境管控政策。

第2章为农业面源污染控制理论回顾,主要分为对模型技术和农业环境政策的回顾。在农业面源污染的模型方法上,梳理了其发展历程,对比分析了国内外常见流域面源污染模型的应用范围和优劣势,特别对流域营养盐模型进行了单独回顾;在农业面源污染控制政策上,对欧美国家和我国在命令控制型与经济型刺激政策方面的演变进行了分析。

第3章为本书提出的3类模型集成的总体思路和相应的政策设计思路解析。重点讨论了3类模型在联合应用上的互补性、软连接思路和仍待进一步解决的问题,以及集成模型组拟针对解决的流域现状研究、模型本地化修正等技术问题,并对本书中在经济市场型政策设计中的倾向性进行了解释。

第4章为NEWS模型的本地化修正(按珠江流域)研究,是本书研究团队

花费了大量人力、物力的监测和调研结果。NEWS 是国际科技合作项目中荷兰方提供的模型技术,是研究全球范围内流域营养盐向近海输出的有效工具。为修正 NEWS 模型中本书涉及的主要案例流域——珠江流域的相关参数,使之更符合实际情况,研究团队通过开展实地水质和土壤监测、农户访谈,并将该结果用于调整关键参数和修改计算方程,实现了 NEWS 模型的本地化。

第 5 章为 MAREM 模型的程序结构分析,是本书中带有答疑性质的(多主体模型在同领域研究中属于使用频度较低的方法)一个相对特殊的章节。在对程序运行环境设置说明的前提下,以观察员 Swarm、模型 Swarm 和代表农户的 3 个最主要的 JAVA 文件的编写为重点,介绍了 MAREM 模型中运行和调用逻辑,供希望使用 Swarm 平台的学者参考。

下篇内容构成:

第 6 章为大流域尺度——长江流域农业面源污染清单分析案例。该章对长江干流流经的 9 个省份 10 余年来农业面源主要污染物排放量进行了核算,在对全流域污染现状有总体认识的基础上,揭示了不同流域板块、不同省域的农业面源污染贡献源结构特征和污染物分类特征及其变化规律。

第 7 章为中流域尺度——珠江流域 MAREM-SD 集成模型应用案例。该章建立了一个包含农业生产、农村生活、城镇点源子系统的珠江流域营养盐排放系统动力学模型。将 MAREM 模型(用珠江流域数据修正后)模拟的化肥税-农药税实施结果中各类生产要素的削减,作为 SD 模型的输入,得到税收政策对珠江流域整体农业面源污染的影响和相应的对策建议。

第 8 章为小流域尺度——北江流域 MAREM-NEWS 集成模型应用案例。该章将 NEWS 模型参数使用北江流域数据进行修正,模拟了北江流域营养盐对河口的输出情况。使用 MAREM(用北江流域数据修正后)模型分析了化肥税-农药税实施情景(较之珠江案例,这里还增加考虑了税收实施后农作物出售价格有变化的情景),将 MAREM 模型输出结果作为 NEWS 模型的输入数据,得到不同政策情景下北江营养盐输出变化趋势和相应的政策建议。

第 9 章为全书的结论与展望部分,从技术层面和实证层面对模型集成效果和政策仿真结果进行了归纳总结,提出了未来研究可在方法学和政策设计角度进一步完善的探索方向。

本书的研究过程可用图 1-1 的技术路线加以说明。

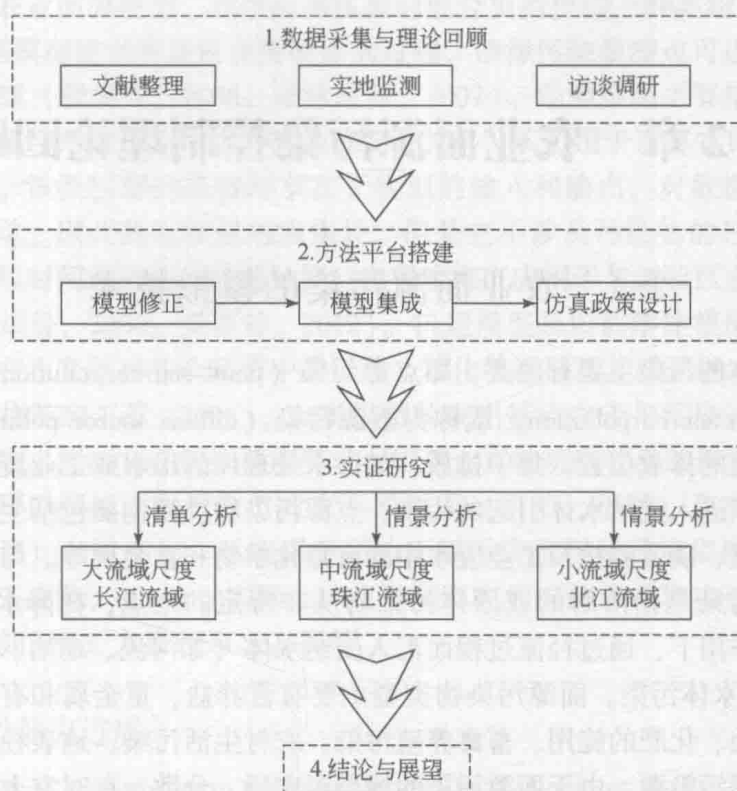


图 1-1 本书研究的技术路线图

第2章 农业面源污染控制理论回顾

2.1 农业面源污染的模拟技术

流域水体的污染主要有两类，即点源污染（point source pollution）和面源污染（non-point source pollution）或称为散源污染（diffuse source pollution）。点源污染具有固定的排放位置，集中排放，如污水处理厂的出水或工业废水通过集中排水管道直接进入受纳水体引起的污染。点源污染物类型主要包括生活污水中的病原体和含氮、磷营养盐及工业废水中的有毒化学物和重金属等。与点源污染相对应，面源污染是指溶解的或固体污染物从非特定的地点，在降水（或融雪）和径流冲刷作用下，通过径流过程而汇入受纳水体（如河流、湖泊、水库、海湾等），引起的水体污染。面源污染物类型主要有营养盐、重金属和有机物等，产生自土壤侵蚀、化肥的施用、畜禽养殖污染、农村生活污染、地表径流污染和大气干湿沉降等污染源。由于面源污染的污染源广泛、分散，在时空上具有随机性和不确定性，且污染物的输移机理复杂，对面源污染负荷的量化研究与治理工作的难度较大。

面源污染的量化研究主要方法有野外试验、室内模拟试验、水质监测分析和模型数值模拟等。由于面源污染来源的广泛性和发生的随机性，面源污染具有明显的时空异质性，因此通过建立适合研究流域的面源污染模型，进行数值模拟研究是面源污染负荷定量化研究的重要手段，尤其是针对下垫面复杂的大尺度流域。完整的面源污染模型系统一般由4个子模型构成，即水文子模型、侵蚀和泥沙输移子模型、污染物转化子模型、受纳水体水质子模型。面源污染负荷模型包含前三个子模型，这方面研究主要对流域陆域面源污染产生及其输移转化过程进行定量描述，分析面源污染产生的时间和空间特征，识别其主要来源和迁移路径，预报污染产生的负荷，进一步评估土地利用变化，以及不同管理与技术措施对面源污染负荷的影响。受纳水体水质子模型主要用于模拟面源污染进入水体后的迁移转化规律及其对水环境影响。然而，不同的面源污染模型实际上具有不完全相同的模型子结构，它们在水文过程、污染物迁移过程、不同类型污染负荷计算和时空尺度分析等方面也具有不完全相同的模拟性能（王慧亮等，2013）。

由于面源污染负荷的产生和输移过程受土地利用类型影响较大，面源污染模

型可以分为农业面源模型、城市面源模型和混合负荷模型三种类型(姚瑞华等, 2012)。根据模型建立的途径和所模拟的过程, 面源污染模型也可以分为经验模型和机理模型(程炯等, 2006; 张秋玲等, 2007)。经验模型主要描述流域土地利用或径流量与污染负荷与之间的经验统计关系, 从而用于计算农田等用地的面源污染负荷。该类模型的关键环节在于模型的输入和输出, 对数据精度的要求低、操作简单, 因此具有较强的实用性。但是它不涉及污染物的迁移过程和机理, 不适合短时间内的污染负荷计算, 也很难推广应用于与试验区差异较大的其他区域(程炯等, 2006; 夏军等, 2012)。机理模型是以数学建模的方式, 模拟面源污染物在水文循环各个环节中的迁移、转化等过程及其对受纳水体产生污染的模型(赖格英和于革, 2005)。此类模型的突出特点在于把污染过程内化为模型的基本机制, 同时它在数据精度要求上较高, 它的功能较经验模型具有较大的进步, 不仅可以模拟面源污染负荷在不同时间(季节、年间)和空间(农田等土地利用类型)上的变化, 还能用于评估面源污染管理和政策实施效果(程炯等, 2006; 王晓燕, 2011)。实际上, 此类模型在相应的子模块中也融合了一些经验公式, 如 USLE 方程和 SCS 方程等。

2.1.1 国外研究进展

发达国家在点源污染得以控制的背景下较早开始关注面源污染, 逐步完善相关研究理论、量化方法及管理手段。从研究趋势来看, 面源污染模型研究由简单的经验模型和统计分析模型转向机理模型, 由单场暴雨分析或者平均负荷输出研究转向连续、长期的响应分析研究, 由集总模式转向分布模式, 由单纯的污染模型转向与地理信息系统(GIS)等技术和政策模型的耦合, 研究的不断升级增强了模型对污染源的识别、控制和管理(夏军等, 2012; 马蔚纯等, 2003)。

(1) 20 世纪 60 年代

国外面源污染研究兴起于 20 世纪 60 年代。这一时期水文与土壤侵蚀模型研究取得一定进展, 成为今后面源污染研究的基础。这一时期典型的水文模型有 Green-Ampt 入渗方程(Maidment, 1993), Horton 入渗方程(Horton, 1933, 1940), Stanford 模型(Crawford and Linsley, 1966), SCS (soil conservation service) 径流曲线方程(United States Department of Agriculture, 1964)等。其中, SCS 径流曲线方程是基于降雨径流量与土地利用方式、土壤类型和含水量之间的关系开发的用于估算地表径流量的经验模型。该模型由于计算过程简单, 所需参数较少, 并且有效地考虑了流域下垫面的特点, 是一种较有效的计算小流域降雨径流量的方法。此时期典型的土壤侵蚀模型为美国农业部水土保持局提出的通用土壤流失方程(universal soil loss equation, USLE)(Wischmeier and Smith,

1965)。USLE 是一个考虑了地形因子、土壤可蚀性因子、降雨侵蚀力因子、土壤侵蚀控制措施因子及作物管理因子五个因素的经验统计模型,可以模拟不同土地利用类型或不同流域管理措施下的水土流失状况,曾得到广泛的应用。但早期的 USLE 无法进行次降雨土壤侵蚀的预报,不太适用于垄作、等高耕作及带状耕作措施等。后期经修正完善,USLE 发展为修正后的通用土壤流失方程 (revised universal soil loss equation, RUSLE) (Renard et al., 1991), 可以进行次降雨土壤侵蚀预报。

(2) 20 世纪 70 年代

这一时期,面源污染模型研究的主要特点:一方面是模型由简单的经验统计模型发展到了复杂的机理模型,能够描述污染物的迁移转化机理;另一方面是模型逐渐由长期平均负荷输出或单场暴雨分析上升到连续的时间响应模型分析。

20 世纪 70 年代初,面源污染模型研究开始关注面源污染特征、污染影响因素、单场暴雨和长期平均污染负荷输出过程。相关研究成果有早期的农药输移和径流模型 (pesticide transport and runoff, PTR) (Crawford and Donigian, 1973) 和城市暴雨管理模型 (storm water management model, SWMM) (Metcalf and Eddy et al., 1971)。70 年代中期,面源污染的影响因素和宏观特征研究由相关因素分析和时空差异分析,转向与面源污染控制密切相关的主控因子和主控源区空间分析。同时,这一时期提出了一些复杂的机理模型和连续时间系列响应模型,如统一运输模型 (unified transport model, UTM) (Frere et al., 1975), 但是这些模型对实测资料要求高,主要适用于小区域研究,难以进行大范围推广应用。USLE 在此时也开始广泛地应用于各类面源污染负荷的定量计算。

(3) 20 世纪 80 年代

20 世纪 80 年代,面源污染的基础研究涉及的地域更广、类型也更多样,污染因素分析和污染物迁移转化机理研究更加深入。面源污染模型研究向实用方向发展,重点关注模型在面源控制和管理中的应用。这一时期提出的代表性模型有农田化学污染物、径流和侵蚀管理系统 (chemicals, runoff and erosion form agricultural management systems, CREAMS) 模型 (Knisel, 1980), 用于农业典型缓坡小流域径流、侵蚀和面源污染物运移模拟的 ANSWERS (areal non-point source watershed environment response simulation) 模型 (Beasley et al., 1980), 用于较大型流域水文和水质模拟的 HSPF (hydrologic simulation program fortran) 模型 (Barnwell and Johanson, 1981), 农田小区 EPIC (erosion-productivity impact calculator) 模型 (Williams et al., 1983), 用于模拟大型流域面源污染模拟的 SWRRB (simulator for water resources in rural basins) 模型 (Williams et al., 1985), 用于农田尺度的水侵蚀预报模型 WEPP (water erosion prediction project)

模型 (Foster and Lane, 1987), 用于模拟农业管理活动对地下水影响的 GLEAMS (groundwater loading effects of agricultural management systems) 模型 (Leonard et al., 1987), 农业面源污染 (agricultural non-point source pollution, AGNPS) 模型 (Young et al., 1989) 等。这些模型能很好地描述污染物迁移转化的过程和机理, 在面源污染的负荷模拟上也有较高的精度, 但是它们空间分析能力很有限。

(4) 20 世纪 90 年代至今

20 世纪 90 年代至今, 陆续出现了一些大型的连续-分布式参数机理模型, 如 SWAT (soil and water assessment tool) (Arnold et al., 1993)、BASINS (better assessment science integrating point and non-point sources) (Whittemore, 1998) 和 AnnAGNPS (Cronshey and Theurer, 1998) 等, 使得面源污染问题的模拟研究更为精确和深入。与此同时, GIS 技术开始大量应用于面源污染负荷的模拟研究。ArcGIS 软件与 CREAMS、ANSWERS、AnnAGNPS、SWAT 等机理模型集成, 能够为模型提供强大的网格数据分析和空间分析功能, 使得一些非点源污染机理模型兼具数据储存、数学运算、空间信息处理、图表输出等多种功能, 成为现阶段甚至未来面源污染研究的主要手段和方向之一, 被广泛地应用于模拟面源污染过程、探讨污染负荷时空分布、标识关键源区、评估管理方案效果、提供最佳管理措施等; 但是, 经验统计模型在面源污染模型中仍占据一定的作用。面源污染过程复杂, 对面源迁移转化机理进行无限精细的描述, 非但不一定能增加模型的精度, 反而可能带来新的误差, 而且使得模型的输入参数增加, 操作更为复杂, 运行成本更高。这一时期, 一些经验统计模型仍然得到重视及应用。例如, 输出系数模型最早于 20 世纪 70 年代由美国和加拿大学者在研究土地利用-营养负荷-湖泊富氧氧化关系的过程中提出, 它主要利用污染物输出系数和土地利用类型估算流域输出的面源污染负荷, 后因 Johnes (1996) 及其他一些学者的研究不断得以改进。

2.1.2 国内研究进展

与国外研究相比, 国内对面源污染的研究起步较晚, 开始于 20 世纪 80 年代初的水库、湖泊富营养化和河流水质规划研究等。20 世纪 80 年代中后期, 国内学者对农业及城区面源污染的宏观特征与污染负荷计算模型进行了初步研究。一方面, 部分国外面源污染模型被引进、提高和应用。例如, 刘枫等 (1988) 以于桥水库流域为案例, 借鉴国外的 USLE 模型并对模型各因子加以修正, 然后将其用于研究于桥水库流域面源污染发生的时空规律。另一方面, 一些学者根据水文、水质监测数据和土地利用方式等资料建立了经验统计模型。例如, 朱萱等 (1985) 通过对农田暴雨径流逐小时的水量、水质进行同步监测, 计算了于桥水

库流域各汇水区暴雨径流过程逐小时的径流量与流域污染物输出量,在此基础上建立了径流量与相应的污染负荷量之间的线性统计关系。

20世纪90年代以来,我国对面源污染的研究更为深入,许多国内学者对面源污染的产污机理与影响因素进行了探讨研究。例如,张瑜芳等(1996)基于室内外试验,建立了排水条件下土壤水和地下水中氮素运移、转化和流失计算模型。李怀恩等(1997)建立了一套流域面源污染机理模型,构建了以逆高斯瞬时单位线模型为基础的面源污染物迁移子模型和流域汇流子模型。黄满湘等(2003)通过田间模拟降雨径流试验研究建立了北京地区农田暴雨径流氮素流失与降雨强度、施肥因子和作物覆盖的关系。李强坤等(2008)在平均浓度法的基础上建立了多沙河流域面源污染负荷估算模型。这一时期,许多国外发展的面源污染模型,尤其是机理模型被国内学者引进并大量应用。其中,SWAT、HSPF、AGNPS和AnnAGNPS模型的应用较为广泛,并以中小型流域的研究为主,且常与GIS技术结合,通过GIS技术进行数据的提取和表达。例如,王飞儿等(2003)运用AnnAGNPS模型预测了千岛湖流域面源氮、磷输出总量及其时空分布规律。洪华生等(2004)采用GIS技术与AGNPS模型结合模拟了九龙江上游两个农业流域的氮磷流失情况。邢可霞等(2004)采用HSPF模型,基于1988年和1989年的水质监测数据及相关资料模拟了滇池流域的水文、水质过程,结果发现,在1988年枯水年,大约1/3的总氮、总磷入湖负荷量来自流域面源。郝芳华等(2006)应用SWAT模型模拟了官厅水库流域和黑河流域的径流、泥沙和氮、磷等营养盐负荷,并通过情景模拟讨论了不同管理措施的效果。桂峰和于革(2006)应用SWAT模型,模拟了1951~1960年传统农业条件下洪湖流域营养盐输移的规律,结果表明传统农业条件下,流域营养盐输出有明显的季节特征,且受耕作制度影响。沈珍瑶等(2008)采用SWAT模型研究了三峡库区张家冲小流域和大宁河流域的面源污染。胥彦玲等(2009)则将GIS技术与SWAT模型相结合,并将其应用于黑河流域,且研究结果显示了SWAT模型在黑河流域面源污染模拟中的可靠性。王晓燕(2011)综合研究了SWAT模型在密云水库流域面源污染模拟中的应用,AnnAGNPS模型和HSPF模型在潮河流域面源污染模拟中的应用,以及GIS技术支持下的经验模型在石匣小流域面源污染模拟中的应用,并对各模型的应用效果进行了对比分析。

虽然引进国外的机理模型是当前国内农业面源污染模拟研究的主要趋势,但是这些模型在国内应用时应当考虑到中外流域水文特征的差异,农田水资源管理方式的差异,农作物种类和耕作方式的差异,以及畜禽养殖污染特征的差异。国内一些学者已经尝试对外面面源污染模型适当做出改进。例如,Xie和Cui(2011)分析了SWAT模型的水文模拟方法在应用于水稻田时存在的问题,并针