



北方平原 农业非点源污染研究

郝芳华 欧阳威 等 著



科学出版社

www.sciencep.com

国家自然科学基金项目“内蒙古农业灌区磷负荷输移机理研究”(No. 40771192)

“黄河流域内蒙古农业灌区非点源污染机理研究”(No. 40471127)

水环境模拟国家重点实验室专项基金课题(08ESPCT-Z)

共同资助

北方平原农业非点源污染研究

郝芳华 欧阳威 等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

针对河套灌区的农业生产特征,本书选择不同时空尺度、不同作物、不同污染物进行室内试验,并与现场观测、模型模拟相结合,重点研究了北方平原灌区水循环特征、土壤氮、磷迁移转化规律及影响因素、农田非点源污染物迁移模拟;系统介绍了北方平原灌区非点源污染的基本原理、迁移特征和研究方法,并有针对性地提出了相应的控制措施。

本书可供生态、环境、农田水利、水文水资源等相关专业的科研人员与管理人员、高等院校相关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

北方平原农业非点源污染研究/郝芳华等著. —北京:科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-027908-8

I. ①北… II. ①郝… III. ①平原-农田-非点污染源-研究-中国
IV. ①X53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 107995 号

责任编辑:朱 丽 王国华 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 6 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2010 年 6 月第一次印刷 印张: 13

印数: 1—1 200 字数: 252 000

定价: 50.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

内蒙古农业灌区位于内蒙古自治区西部的巴彦淖尔市，是我国三大灌区之一，也是我国北方典型的平原型灌区。由于灌区地处于旱、半干旱、半荒漠草原地带，大陆性气候特征明显，降水量小，蒸发量大，自然条件下基本很难产生降水径流，因此灌区作物生产全靠黄河引水灌溉。由于长期依赖灌溉，灌区土地盐渍化严重，因此区域主要作物是抗盐碱能力较强的作物，包括向日葵、小麦、玉米等。近年来，随着化肥施用量的迅速增加，灌区非点源污染逐年上升，对乌梁素海和黄河水质造成巨大影响。目前灌区的地表水和地下水中的氮、磷污染物含量普遍超标，并造成乌梁素海富营养化、水体功能退化。因此，迫切需要从非点源污染机理角度辨析灌区非点源污染产生的根源，探讨灌区非点源污染区别于一般非点源污染的特征，引导灌区走可持续发展之路。

本书基于非点源污染发生机理的一般理论，针对灌区非点源污染发生的特征，分析了灌区陆面水循环模式，构建了灌区水循环模型；耦合水循环与污染物的迁移转化过程，对灌区的非点源污染进行模拟计算；通过土样氮、磷元素含量分析，确定了研究区土壤氮、磷元素的空间分布，通过系列室内模拟试验，获得了土壤的水力特性参数和土样中铵态氮、硝态氮的运移参数；运用多孔介质中饱和、非饱和水分流动和溶质运移一维模型 HYDRUS-1D，对研究区土壤氮元素的迁移转化进行模拟研究；设定不同灌溉、施肥措施情景，获得铵态氮、硝态氮在不同土壤深度的行为特性，为确定田间合理灌溉和施肥措施提供了有力的理论依据。对于水体中磷元素的分析表明，灌、排水渠中总磷含量均变化不大，磷元素通过地表沟渠流失不明显。而对夏灌时期地下水位变化和地下水总磷进行连续监测的结果表明，灌溉期间地下水位埋深较浅，水分纵向迁移活动明显。同时，磷元素随水分向土壤纵向迁移显著，且响应较快，地下水磷含量较高。因此，在灌区的特殊地理条件下，磷元素主要的流失方式是向地下渗漏，并对地下水有较明显的污染。秋浇之后，由于灌溉作用，水分向土壤纵深迁移，各类土壤水分均得到较大补充。对秋浇时期不同作物类型土壤磷含量以及形态的分析发现，在一季耕作中，不同作物对于磷元素的吸收利用存在较大差异，残留在土壤中的磷的含量、形态、迁移能力和吸附能力都存在较大差别，在土层中分布各异，这说明当季土地作物类型对于各层土壤磷含量有一定的影响。通过测定灌渠沉积物物化性质、控制灌渠类型和沉积物悬浮浓度，研究了沉积物对磷吸附的影响。

研究结果显示，受施肥农田排水的影响，与引水灌区沉积物相比，排水灌渠

沉积物的磷含量偏高,其活性 Fe/Al 较大,沉积物平均粒径较小,两者较大的比表面积使得其沉积物最大可吸附量也偏大。在引水渠,溶解性磷含量和总磷含量均是从上游到下游逐渐变小;在排水渠,由于受外来污水的排入影响,变化规律不明显。受农田土壤和沟渠沉积物吸附作用的影响,排水渠水的磷含量并不比引水渠中的高,甚至显示出对磷输出的削减作用。

本书既是国家自然科学基金项目的研究工作总结,也是项目组成员研究工作的体现。项目组在河套地区工作近六年,培养了多位研究生,验证了项目组的研究假设。在河套广阔的农田上留下了很多同学的足迹;在室内样品分析监测过程中,记录了很多同学的刻苦与勤奋;在热烈的小组讨论中,大家都贡献了自己的想法。本书写作分工如下:第1章绪论由郝芳华、岳勇完成;第2章研究区概况及氮、磷元素分布情况由欧阳威、李鹏、张嘉勋完成;第3章河套灌区义长灌域水循环研究由郝芳华、岳勇完成;第4章河套灌区土壤氮元素迁移转化特征分析由郝芳华、岳勇、李鹏完成;第5章河套灌区土壤氮元素迁移转化模拟试验研究由郝芳华、岳勇、李鹏完成;第6章磷元素迁移规律及影响因素研究由欧阳威、郝芳华、张嘉勋、王云慧、卫新锋完成;第7章灌区非点源污染物空间分布模拟和影响分析由欧阳威、张嘉勋、曾阿妍、张璇完成;第8章河套灌区农田非点源污染调控措施由郝芳华、岳勇完成。第9章结论由欧阳威、郝芳华完成。全书由郝芳华和欧阳威统稿。

内蒙古河套灌区管理总局、沙豪渠试验站,内蒙古自治区水文监测站马桂芬处长、杨锐副局长对项目组多年研究给予了大力的帮助和支持。在项目实施过程中,北京师范大学环境学院程红光副教授、地理学与遥感科学学院杨胜天院长给予了大力支持。在研究过程中,田伟君、孙雯、王晓、王玮、宋凯宇、张敏霞、姚华萍、赵成等都贡献了自己的力量。在书稿的撰写过程中,卫新锋、徐一鸣、陈思扬等同学为本书的校对工作付出了辛勤劳动。同时,本书的出版得到了国家自然科学基金委员会的大力资助。在此一并表示衷心感谢。

全书从农田非点源污染的角度描绘了农田氮、磷在灌溉水体作用下的迁移转化,是涉及环境科学、土壤学、农田水利的跨学科研究,由于条件限制,我们的研究成果还是初步的,书中的不足和谬误之处在所难免,望专家和读者给予批评指正。

作 者

2010年5月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究目的和意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	3
1.2 国内外研究现状分析	3
1.2.1 农业非点源污染机理研究	3
1.2.2 农业非点源污染模型研究	4
1.2.3 污染控制与管理研究	8
1.2.4 灌区非点源污染研究进展	9
1.3 研究目标、内容和技术路线	13
1.3.1 研究目标	13
1.3.2 研究内容	13
第 2 章 研究区概况及氮、磷元素分布情况	15
2.1 自然地理概况	15
2.1.1 水文气象、地形地貌	15
2.1.2 土壤概况	16
2.1.3 植被组成	17
2.2 社会经济概况	19
2.3 灌溉、施肥现状概况	20
2.4 灌区土壤主要氮污染物空间分布规律	22
2.4.1 不同时段土壤氮元素特征分析	22
2.4.2 土壤氮元素的空间结构分析	23
2.4.3 土壤氮元素空间 Kriging 插值结果	27
2.5 灌区土壤磷元素时空分布规律	31
第 3 章 河套灌区义长灌域水循环研究	37
3.1 义长灌域概况	37
3.2 水循环模型参数设置	40
3.2.1 土地利用和土壤参数	40
3.2.2 灌溉制度和作物参数	41

3.2.3 气象过程线及参数	43
3.2.4 引水过程线及工程参数	46
3.3 水循环过程分析	47
3.3.1 灌排模式分析	47
3.3.2 土壤水动态分析	51
3.3.3 地下水动态分析	61
3.3.4 降水与蒸散发特征	65
3.4 灌域水循环特征	68
3.5 小结	70
第4章 河套灌区土壤氮元素迁移转化特征分析	71
4.1 土壤氮元素迁移转化过程试验	71
4.1.1 试验设计	71
4.1.2 试验结果与分析	72
4.2 参数确定室内试验	77
4.2.1 土壤水分特征曲线的测定	77
4.2.2 饱和导水率 K_s 的测定	79
4.2.3 纵向弥散度 D_L 的测定	80
4.2.4 土壤铵态氮吸附参数测定	83
4.2.5 硝化一级速率常数 μ_w 的测定	85
4.3 小结	86
第5章 河套灌区土壤氮元素迁移转化模拟试验研究	87
5.1 模型的可靠性验证	87
5.1.1 HYDRUS-1D 模型的参数的敏感性分析	87
5.1.2 模型对试验数据的再现性评价	88
5.2 参数初步选取及边界条件的确定	92
5.2.1 基本参数的分析选用	92
5.2.2 模型初始边界条件的确定	93
5.2.3 氮元素迁移转化模拟结果与分析	94
5.3 不同灌溉、施肥情景下氮元素迁移转化模拟计算	97
5.3.1 不同灌水强度情景模拟	97
5.3.2 不同浓度表施措施情景模拟	99
5.3.3 灌施情景模拟	100
5.3.4 河套灌区合理灌溉、施肥对策	100
5.4 小结	101

第 6 章 磷元素迁移规律及影响因素研究	103
6.1 磷元素迁移土柱试验	103
6.1.1 试验设计	103
6.1.2 土壤水分变化研究	105
6.1.3 总磷淋失研究	107
6.2 土壤总磷迁移影响模拟研究	108
6.2.1 灌溉对土壤总磷迁移影响模拟研究	108
6.2.2 灌溉水量对磷元素迁移影响研究	112
6.2.3 施肥量对磷元素迁移影响研究	115
6.2.4 灌溉期间不同作物类型土地磷分布影响研究	117
6.3 不同级别灌渠中表层沉积物无机磷形态和对磷的吸附	122
6.3.1 材料和方法	122
6.3.2 结果	127
6.3.3 讨论	133
6.4 夏灌对河套灌区磷元素迁移的影响	136
6.4.1 材料与方法	136
6.4.2 试验结果与分析	138
6.4.3 结论和讨论	150
6.5 小结	150
第 7 章 灌区非点源污染物空间分布模拟和影响分析	153
7.1 非点源污染负荷比较	153
7.1.1 不同作物的污染负荷比较	153
7.1.2 不同流失方式的污染负荷比较	154
7.1.3 不同管理模式下的污染负荷比较	155
7.2 秋浇盐分变化影响研究	156
7.2.1 研究方法	157
7.2.2 结果	158
7.2.3 讨论	161
7.2.4 结论	163
7.3 夏、秋浇氮与磷流失变化研究	163
7.3.1 研究方法	163
7.3.2 结果	164
7.3.3 讨论	169
7.3.4 结论	170
7.4 解放闸灌域地下水埋深与磷含量研究	171

7.4.1	解放闸灌域自然地理概况	171
7.4.2	灌域地下水埋深与降水量、蒸发量及引水量相关性分析	171
7.4.3	灌域地下水磷的分布规律	172
7.5	小结	180
第8章	河套灌区农田非点源污染调控措施	182
8.1	灌区非点源污染治理存在的问题	182
8.2	灌区非点源污染调控措施	183
8.2.1	污染源控制	183
8.2.2	截汇控制	184
8.2.3	治水调控	186
8.3	灌区生态环境维育	187
8.4	小结	188
第9章	结论	190
参考文献		194

第 1 章 绪 论

1.1 研究目的和意义

1.1.1 研究背景

水环境的污染物的排放方式包括点源和非点源 (non-point source, NPS) 两种不同类型。与集中排放进入环境的点源污染不同, 由农业、养殖业、农村地区甚至分散的小工厂等释放的非点源污染负荷没有固定的排放点或入河口, 在时间和空间上随机地进入环境, 难以被监测和控制。非点源污染有广义和狭义两种理解: 广义的非点源污染源是指时空上无法定点监测的, 与大气、水文、土壤、植被、地质、地貌、地形等环境条件和人类活动密切相关的, 可随时随地发生的, 直接对大气、土壤、水体构成污染的污染物来源。狭义的非点源污染指对水环境的非点源污染, 其来源极其广泛, 包括农田中过量施用的化肥、农药, 耕地或林地产生的水土流失, 生活区或畜禽养殖所带来的营养盐流失, 大气干湿沉降等 (郑粉莉等, 2004)。由于非点源污染的随机性和不易察觉性, 在 20 世纪 60 年代以前, 人们一直认为点源是造成水污染的主要原因, 直到点源污染控制达到一定水平之后, 非点源污染对环境危害的严重性才逐渐为人们所认识 (Hao et al., 2004)。非点源污染携带的泥沙淤积在水体中, 降低水体生态功能; 大量的营养盐引起水体富营养化, 破坏水生生物的生存环境; 污染饮用水源, 危害人体健康 (张水龙和庄季屏, 1998)。近年来, 非点源污染这一十分普遍的环境污染问题引起了各国环境保护部门的高度重视。

农业活动被认为是非点源污染的主要来源之一。农业活动的广泛性、普遍性是引起地表水和地下水非点源污染的主要原因 (陈利顶和傅伯杰, 2000)。有研究表明, 农业非点源污染影响了世界陆地面积的 30%~50% (Dennis et al., 1999)。美国国家环境保护署 (USEPA) 发现农业非点源污染对水资源污染的贡献率接近 50% (苑韶峰和吕军, 2004)。发展中国家在工业化和城市化程度不高、农业生产占主导地位的条件下, 非点源污染尤其是农业非点源污染更显重要, 是控制和改善水环境质量必须考虑的主要问题之一 (Novotny, 1999)。在我国, 近年来农业活动所造成的污染在非点源污染中也占主要地位 (程红光等, 2005)。

目前, 全世界的农灌区面积超过了 2.7 亿 hm^2 , 这些农灌区仅占全球耕地面积的 1/6, 但提供了世界农业 40% 的产量 (WCD, 2004)。在干旱和半干旱地

区,农田灌溉和肥料是作物生长的必要元素,是农业增产的最重要投入(Kellogg, 1994)。2000年,世界范围的平均肥料用量约为 $145\text{kg}/\text{hm}^2$,欧洲肥料用量达到 $400\text{kg}/\text{hm}^2$,发展中国家的化肥用量也在不断增加(WCD, 2004)。这种增加是在利用率低下的情况下的不利增加,在欧洲只有 $50\%\sim 70\%$ 的施用化肥被作物利用,剩余的则通过挥发、反硝化或淋溶而损失(Kengnil et al., 1994)。过量施用化肥和灌溉方式的不当,使土壤中残存的确态氮很难以有机氮的形式固定,导致土壤的蓄水保肥能力降低,农田排水、径流及渗漏损失增大,不仅使土壤肥效作用下降、农业成本加大,而且对地下水和周围的生态环境造成的污染日益严峻。

降水不足、水资源短缺和时空分布不均决定了干旱与半干旱地区的农业生产需要进行农田灌溉。灌溉农田的粮食产量比非灌溉农田增产 $3000\sim 4000\text{kg}/\text{hm}^2$,灌溉效益非常显著。2003年,我国农田灌区面积已达 0.534 亿 hm^2 ,面积在 2 万 hm^2 以上的大型灌区面积占全国耕地面积的 11.3% (高占义和穆建新, 2003),粮食产量占全国总产量的 22% ,农业生产总值占全国农业生产总值的 33% 。大型灌区在农业生产、农村和城乡发展中发挥着重要作用的同时(朱瑶等, 2003),也伴随着土壤、肥分资源的流失等生态退化问题。将我国的大型灌区化肥施用量按 $403\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (实物量)计,氮肥随农田排水和暴雨径流的流失率按 15% 计,则全国大型灌区每年有 9.55 亿 kg 的氮肥汇入河道和湖泊(徐谦, 1996)。根据宋蕾等(2001)对关中宝鸡峡、交口灌区排水对渭河影响的研究,渭河每年从点污染源接纳的氨氮为 $156.6\sim 203.3\text{t}$,从两个灌区接纳的氨氮约 $6076\text{t}/\text{a}$,非点源污染负荷远远大于点源,成为河道的主要污染源。灌溉产生的非点源污染使干旱和半干旱地区的地表、地下水资源可循环利用功能降低或丧失,有限的水资源变得更加短缺(杨志峰等, 2002)。

内蒙古河套灌区位于黄河流域干旱、半干旱地区,农业生产潜力大,是我国三大灌区之一和重要的农业产区、商品粮基地。降水的年际变化大,年内分配不均,农作物缺水严重,加之灌区蒸发强烈,导致这一地区的农业生产全部依靠引水灌溉,黄河是本灌区的主要水源。灌区在提供大量商品粮的同时,由于当地农民习惯在每次灌溉前将化肥撒入农田,并采用大水漫灌方式,灌田回水携带残留的氮、磷等污染物进入地表水和地下水,非点源污染日益严重。在当前的耕作制度及灌溉模式下,河套灌区每年秋浇损失氮约 0.26 亿 kg ,是当年施肥量的 20.3% 。目前河套灌区地表水和地下水中的氮、磷普遍超标,尤其是硝态氮淋失相当严重(冯兆忠等, 2005)。总排干、部分分排干等地表水中总氮高达 $20\sim 30\text{mg}/\text{L}$ (刘振英, 2004)。自河套灌区的农田排水进入乌梁素海,导致湖泊富营养化迅速发展,使乌梁素海过早地进入了沼泽化阶段。大量的农田灌溉排水经过乌梁素海进入黄河,给下游带来大量的氮、磷营养物,

引起黄河中下游干流水质的恶化。

1.1.2 研究意义

巴比伦第一王朝创造的法典中指出：“人类为了生存，不得不依赖于灌溉。”历史证明，灌溉对解决人类的粮食短缺问题有极其重要的作用，但是灌溉发展中也存在着一些严重的问题，土壤盐渍化是其中之一，此问题在干旱、半干旱灌区更加突出。于是，各个国家大力发展灌溉技术和管理制度，不断探索和调整灌区的灌溉排水模式，用于盐渍化的控制。然而，正是这种对盐渍化的过分关注转移了人们对灌区其他问题的注意力。灌排模式的调整可能会引起灌区其他环境问题，农田灌溉过量引水洗盐，引起水量平衡的破坏，如果施肥不当，将导致农田营养物质的累积和流失。因此，除盐渍化问题外，灌区非点源污染也是有必要研究的关键问题之一（岳勇，2007）。

从整体来说，灌区开发对生态环境引起影响最大的是灌溉系统及灌排模式，它改变了天然水循环路径，引起水量分布的不均匀和水循环强度的增大，农田退水携带大量的氮、磷和农药污染物返回水环境，引起水体的非点源污染。河套灌区位于干旱、半干旱的西北黄河流域，属于典型引黄灌溉的冲积平原灌区，拥有大量人工建设的灌溉渠系和排水沟，有特定的灌溉制度和灌排模式，非点源污染日益加重，具有研究的典型性。

因此，本书基于灌区农业、生态和环境可持续发展的最终目的，以河套灌区为例，系统地探究灌区非点源污染产生的根源，从灌排模式角度探讨灌区非点源污染的机理和时空分布特征，在防治灌区盐渍化的同时，做到与非点源污染控制并举，为治理河套灌区污染、保护乌梁素海湿地生态系统的服务功能和减轻黄河中下游干流水质污染提供科学依据，具有重大的理论价值和实践意义。

1.2 国内外研究现状分析

由于农业非点源污染的特殊性，其研究一直以来都是环境科学领域的热点问题。在此期间，研究内容从理论体系、研究方法向管理手段及新技术应用逐步扩展；研究方法由初期的定性研究转向定量研究，由统计、调查研究转向系统性的模型模拟；研究尺度从实验小区转向时空分异的大尺度流域（黄虹等，2004）。目前农业非点源污染研究主要集中在污染机理、模型计算和污染控制与管理等三个方面（贺缠生等，1998）。

1.2.1 农业非点源污染机理研究

农业非点源污染的发生机理是模拟计算、污染控制与治理的基础，也是农业

非点源污染研究的核心内容。按照农业非点源污染物的运移方式和特征,可将农业非点源污染分为降雨径流、土壤侵蚀、地表溶质溶出及土壤溶质渗漏四个过程(罗良国和闻大中,2000)。这四个过程相互联系、相互作用,共同构成农业非点源污染的连续动态发生机理。

农业非点源污染与水文循环,尤其是与降水径流关系密切。降水是引起农业非点源污染的原始动力。降水动能冲击作用加上降水所形成的地表径流(或灌溉)的冲刷作用使得土壤颗粒、有机物、化肥等随地表径流流入受纳水体,是农业非点源污染发生的前提和基础(李怀恩等,1997a)。因此基于农业非点源污染的动态过程,重点研究降水径流特征与污染发生的关系,尤其是降水径流的空间差异性,对揭示农业非点源污染的规律和根源,服务于农业非点源污染控制和治理有重要意义(Grunwald and Norton, 1999)。

农业非点源污染中的土壤侵蚀是在降水及径流的作用下土壤颗粒剥离、迁移的降水侵蚀过程。土壤侵蚀所产生的泥沙是除农业活动施用的农药、化肥之外,农业非点源污染物的又一个主要来源,泥沙所吸附的各种氮、磷营养物会给受纳水体带来种种不良影响,并且人类生产活动可能加剧这种影响(黄金良等,2004)。泥沙传输量与径流量、坡面特征、土壤和植被等多种因素相关(王秀英和曹文洪,1999)。

当单次降水强度大于入渗能力或者包气带中土壤含水量达到饱和时,将产生地表径流,径流对土体表现为侵蚀和冲洗作用。土壤中的污染物将通过侵蚀、混合、溶解、解吸、扩散作用不断释放到地表径流中并随地表径流迁移(Fisher et al., 2000),这便形成了农业非点源污染的地表溶质溶出过程。地表溶出过程是表层土壤与降雨径流的相互作用过程,它受径流期间水文循环、土壤性质、土地利用和污染物存在形态等多重因素的影响(杨金玲和张甘霖,2003)。

农业非点源污染的土壤溶质渗漏过程是指污染物在降水或灌溉作用下以溶解态的形式向下层土壤的垂向迁移,是土壤中溶质在对流、扩散和化学反应耦合作用下的运移过程,以及污染物在下渗过程中所发生的一系列物理、化学、生物反应。这些下渗的溶质(污染物)不但对所在区域的地下水水质构成了潜在威胁,而且影响着与所在区域地下水有水文循环关系的其他水体。土壤特性、作物生长、土壤微生物及灌溉模式和肥料施用状况是影响土壤渗漏的主要因素(Refsgaard et al., 1999)。

1.2.2 农业非点源污染模型研究

农业非点源污染模型是对农业非点源污染问题和过程的数字描述,是研究非点源污染机理过程以及获取农业非点源污染控制与治理基础数据的最直接、有效的方法。应用农业非点源污染模型,在时间和空间上对非点源污染产生的机理进

行数学模拟分析,在定性基础上对整个农业非点源发生的复杂污染过程做出定量化描述,对农业非点源污染控制与治理的科学决策具有关键而重要的价值。一般分为经验模型和机理模型。

1. 经验型农业非点源污染模型

经验型模型是在一定条件下,由典型样区的监测实验提取数据,在水质与水文参数(降雨、径流)以及土地利用、地形地貌、景观植被、坡度、土壤性质等参数之间建立经验关系,可能是一个简单的关系式,也可能是一个复杂的回归方程(史志华等,2002a)。经验型模型一般用于流域非点源污染负荷量的计算,评价污染负荷在不同季节或年际间的变化及水质的长期变化趋势(李怀恩等,1997a),并可以应用于流域规划。

20世纪70年代是农业非点源模型的发展期,出现了一些基于接纳水体分析,根据土地利用与污染负荷相关关系建立的简单经验模型。这一时期的非点源污染模型基本上是一些面向统计的回归模型,以研究农业非点源污染的一般特征、影响因素,长期平均污染负荷为主,如农药输送与径流模型(pesticide transport and runoff, PTR),暴雨水质管理模型(storm water management model, SWMM)、流域管理模型(watershed management model, WMM)、通用流域负荷功能模型(general water load function, GWLF)、输出系数法等。经验型模型应用简便,对数据要求低,便于推广,在20世纪80年代与计算机和遥感、地理信息系统(GIS)技术结合后,至今仍被用于评估大尺度流域上营养物质的来源及影响。

2. 机理型农业非点源污染模型

经验型农业非点源污染模型没有考虑污染物在流失过程中的降解和转化过程,不能模拟短期的水质问题,并且包含的区域特征的经验性限制了模型的可移植性与精确性。为了克服经验性模型的缺陷,在20世纪70年代中后期,农业非点源污染研究开始重点着眼于对非点源污染过程的监测和非点源污染物理化学变化过程,机理型模型因而逐渐成为模型开发的主要方向。

机理型农业非点源污染模型以水文循环为基础,通过一定的数学算法研究水分在空气、土壤等介质中的迁移、转化过程,从而进一步研究土壤侵蚀,泥沙及营养物的迁移、转化和流失,评价它们对地表水和地下水水质的影响;同时还考虑了农药、化肥等污染物在不同介质中的物理、化学、生物过程(薛金凤等,2002)。机理型农业非点源污染模型综合了水文模型、土壤侵蚀模型和污染物迁移转化模型的内容,将它们有机地联系在一起,形成一个完整的系统性模型。它能够定量描述非点源污染发生的连续过程,有效地协调了简单方法的经验性和纯

物理模型的复杂性,有助于掌握污染物流失过程的时空变化规律,为合理开发和利用水资源提供决策依据(Novotny and Olem, 1993)。但机理型非点源污染模型将影响非点源污染的各个环境因素进行了简化,使其难以完全准确地模拟非点源污染发生的过程,因此在应用时应尽量遵循模型使用的范围和条件(王晓燕, 1996)。

1) 非点源污染发生过程模型

当前研究通常采用水文模型(降雨径流模型)、土壤侵蚀模型和污染物迁移转化模型三部分对农业非点源污染进行定量化模拟分析。水循环模型是用数学语言或物理模型对现实水文系统进行概化,并在一定条件下对实际水文系统的水文变量进行模拟与预测的数学工具,它是整个非点源污染模型的基础(郝芳华等, 2003)。其中,最具代表性的径流系数模型是美国水土保持局研制的SCS-CN模型,它被广泛用于农业非点源污染研究(史志华等, 2002b)。

土壤侵蚀模型模拟土壤侵蚀并建立与降雨径流、下垫面状况的定量关系,是非点源污染模型的中间层次。土壤侵蚀模型研究始于1914年美国密苏里大学建立的“侵蚀小区”。最早也是最经典的农业非点源污染土壤侵蚀模型,是20世纪60年代后期提出的用以估算长期平均土壤流失的通用土壤流失方程USLE(universal soil loss equation)。后来,在USLE的基础上,通过对各因子含义和算法的修改,形成了模拟灵活性更高、适用范围更广、适用于不同生态系统且能用于单次降水土壤侵蚀预报的RUSLE(revised universal soil loss equation)模型(王东川和卢玉东, 2004)和MUSLE(modified universal soil loss equation)模型(刘枫等, 1988; 刘宝元等, 1999)。

污染物迁移转化模型模拟不同类型的污染物在水文循环作用下,对水体所造成的污染负荷,以及污染物在水文循环各个环节的动态过程,是非点源污染模型的最后一个层次。按照对污染物迁移转化的模拟过程,污染物迁移转化模型分为两类:一类是污染物迁移宏观负荷模型;另一类是污染物迁移微观机理模型。典型的污染物宏观模型有早期的AGNPS(agricultural non-point source)模型和CNPS(coastal non-point source)模型,微观机理模型的代表模型有CREAM(chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems)、SWRRB(simulation for water resources in rural basins)和EPIC(erosion productivity impact calculator)(Arnold et al., 1993)。

2) 综合型机理模型

早期的机理模型以水文循环模型为基础,模拟农业非点源污染的不同过程,进行连续时间序列响应分析。较著名的有非点源污染系列模型PTR-HSP-ARM-NPS、农业化学品迁移模型(ACTM)、统一迁移转化模型(unite transportation model, UTM)等(董亮, 2001)。20世纪80年代,农业非点源污染

研究范围扩大、类型增多, 污染物迁移机理研究更加深入, 新一代实用型、注重管理的农业非点源污染模型应运而生, 发展迅猛。由美国农业部开发的农业管理系统中的 CREAM 奠定了非点源污染模型发展的“里程碑”。在 CREAM 基础上, 学者又提出了流域非点源污染模型 (areal nonpoint source watershed environment response simulation, ANSWERS)、EPIC (李怀恩和沈晋, 1996)。同期, 我国学者夏青等 (1985) 建立了计算非点源污染负荷的沱江流域模型, 但因它对基础数据、技术手段要求较高而在我国未得到广泛应用。这一时期, 农业非点源污染模型取得了两个重要进展: 一是从经验统计模型发展到机理模型; 二是从长期平均污染负荷输出或单场降雨分析上升到连续的时间序列响应分析。并且多数模型只能适用于很小的集水面积, 从而限制了模型的推广和应用。

20 世纪 90 年代以来, 陆续出现了水土评价工具模型 (soil and water assessment tool, SWAT) (王中根等, 2003)、集水区多目标环境分析系统 (better assessment science integrating point and nonpoint source, BASINS)、农业非点源污染模型 (AGNPS 2001) 等大型的综合机理模型。我国学者也曾尝试进行机理模型的开发研究, 李怀恩等 (1997b) 提出非点源污染迁移逆高斯模型、分布瞬时单位线模型和流域产物模型, 并建立了流域非点源污染模型系统。

这些机理模型很多是集空间信息处理、数据库技术、数学计算、可视化等功能于一体的专业软件, 它们的出现使得农业非点源污染问题的研究更为精确和深入。

3. 非点源污染模型与 GIS 的集成

从基于过程的模型发展到综合性的机理模型, 模型研究在农业非点源污染机理过程模拟、探讨污染负荷时空分布、标示关键源区、模拟管理措施等方面取得了突破性进展。但它们真正在农业非点源污染管理控制中发挥重大作用是在 GIS 与这些机理模型成功集成之后, 这种集成也成为当前农业非点源污染机理研究的主要手段和方向 (姚长青, 2006)。

非点源污染研究在流域等地理空间背景下进行, 涉及诸多的空间参数。以 GIS 为核心的“3S”技术可以方便地采集、管理和分析这些空间数据; 而利用这些空间数据, 非点源污染模型能够更为合理地表达复杂的污染机理过程, 因此二者结合是模型研究发展的必然趋势。

GIS 结合分布式参数模型在模型参数提取、模拟结果显示等方面发挥了积极作用, 20 世纪 80 年代广泛应用于美国、欧洲、澳大利亚等地区的土壤侵蚀、污染物输出等问题的解决 (Basnyat et al., 2000)。20 世纪 90 年代以后, 大型的实用化的分布式机理模型 (如 AGNPS、BASINS、SWAT、VIC 等) 与桌面式

GIS 软件集成,大量地应用于农业非点源污染的机理过程模拟,提高了参数输入、校验的速率和模拟结果的可视化程度(周慧平等,2004)。

我国研究者也开始将 GIS 手段与模型进行集成,用于农业非点源污染研究的实践,如 GIS 技术与 USLE 相结合在南方江西红壤地区(游松财和李文卿,1999)、四川三峡库区(蔡崇法等,1998)进行了土壤侵蚀量的估算与水土保持规划等;AGNPS、AnnAGNPS、SWAT 被引入我国,与 GIS 技术结合检验其适用性(郝芳华,2003)。机理模型与 GIS 等技术的结合使数学模型在农业非点源污染研究中的作用更加明显。

1.2.3 污染控制与管理研究

非点源污染控制与治理涉及政府政策、管理措施、工程技术、市场调节及公众教育等,目前主要围绕农田景观设计或人工措施并结合政策管理对非点源污染进行控制,美国早在 1979 年就提出了最佳管理措施(BMP)概念来解决非点源污染这一难题。农业非点源污染控制是利用合适的技术,如利用农田景观、生态技术和人工措施等,对农业非点源污染的“源”和“汇”两个环节进行控制。目前研究多针对能够减少地表水中氮、磷流失的农业措施展开,主要措施包括利用河岸带、湿地等的拦截作用,根系吸收,利用植被弱化地表径流与侵蚀,保守性耕作等。

目前,政府或环保部门提出的政策、法规和公众教育等组成的综合性的管理措施是从宏观上对农业非点源污染进行有效控制的途径之一,2000 年,欧盟颁布《水框架法令》,强调以“范围广泛、预防性的、经济的、综合性的”管理措施控制农业非点源污染(Heinz et al., 2002);美国和加拿大对整个五大湖地区水环境污染的研究中,通过公众教育使得全社会认识到土地利用活动对水质的影响,使非点源污染的控制管理措施得到了有效的实施,至今对全世界的非点源污染控制具有重要的指导意义。

非点源污染控制的经济手段也大量涌现。Segerson (1988)最早提出非点源污染环境税概念。在西欧,部分国家建立了以合理谨慎的经济刺激方法减少农药的使用量的市场机制(Berntsen et al., 2003)。有研究将总量控制和点源-非点源排污交易方法引入非点源污染控制,并加入非点源污染不确定性对交易平衡和交易比例的影响(Wang et al., 2004)。由于单一经济刺激手段与政策目的不能完全契合,研究者又提出了经济手段的组合式方法。

20 世纪末至 21 世纪初,我国虽然在多个流域和地区进行了一系列污染控制研究工作(张玉珍,2003),但由于参与人员极少,研究存在阶段性和孤立性,因此延伸到管理、政策的研究还不多见,实际运用的非点源污染控制与管理措施主要是一些水土保持措施(李贵宝和尹澄清,2001)。国内外的农业非点源污染