

三峡库区

农村面源污染解析

倪九派 邵景安 谢德体 / 著

SANXIA KUQU
NONGCUN MIANYUAN
WURAN JIEXI



科学出版社

三峡库区农村面源污染解析

倪九派 邵景安 谢德体 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以三峡库区这一特殊的地理区域为研究区,从宏观格局、微观机理两个层面,利用多元数据集,沿着土地利用、水土流失、面源污染形成的“源-汇”格局识别、污染负荷模拟、驱动动因分析的轨迹,重点对三峡库区的农村面源污染状况进行了深入解析,实现了宏观格局分析与微观机理识别的有机结合,以及宏观数据与微观调查、访谈数据的互相验证。本书在三峡库区土地利用、水土流失、面源污染“源-汇”格局与负荷模拟及动力机制方面得出的科学认识,很大程度上丰富了人们对三峡库区农村面源污染格局与形成过程的理解和认识,为未来制定应对或减缓三峡库区农村面源污染的发生与发展对策提供了科学依据。

本书可作为大中专院校、科研院所与生态环境领域的研究人员、政府决策者的参考用书,同时可为正在进行或将要开展的三峡库区农村面源污染防治工作提供理论基础,有助于从源头上制定出农村面源污染消减对策。

图书在版编目(CIP)数据

三峡库区农村面源污染解析 / 倪九派, 邵景安, 谢德体著. —北京: 科学出版社, 2017.9

ISBN 978-7-03-052623-6

I. ①三… II. ①倪… ②邵… III. ①三峡水利工程-农业污染源-面源污染-研究 IV. ①X501

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 086880 号

责任编辑: 张 展 孟 锐 / 责任校对: 王 翔

责任印制: 罗 科 / 封面设计: 墨创文化

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>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年9月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017年9月第一次印刷 印张: 15

字数: 350千字

定价: 96.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

面源污染问题日益突出，急需解决。一方面，随着点源污染逐步得到有效治理和控制，面源污染逐步上升为影响环境尤其是水环境的主要污染问题，成为土壤污染、农产品质量下降、水体水质污染等方面的主要影响因素；另一方面，随着工业化、城镇化和现代化进程的加快，社会经济的快速发展与资源环境之间的矛盾日益激化，所造成的面源污染对城镇和农村的环境压力持续加大，已成为影响和制约国家和地区全面发展的关键问题。日益突出的面源污染问题已引起政府和学者的诸多关注，国家出台了一系列的政策和治理方法，例如，2015 年中央 1 号文件对“加强农业生态治理”做出专门部署，强调要加强农业面源污染治理；2015 年的全国农业生态环境保护与治理工作会议决定，力争到 2020 年，中国农田灌溉水利用系数提高到 0.55 以上，农作物化肥及农药使用总量实现零增长，75% 以上的规模畜禽养殖场（区）实现配套建设废弃物储存、处理、利用设施，秸秆综合利用率达 85% 以上，当季农膜回收率达到 80% 以上，在耕地重金属污染治理方面建立了长效机制。尽管如此，我国面源污染所引起的环境恶化趋势仍未得到根本性扭转，面源污染物的排放量仍占有很大比例，尤其是农业面源污染，急需得到有效解决。

三峡库区农业化肥的高施用量、严重的水土流失、大坝建设后的回水效应及库区的移民大开发建设等，使库区流域的水环境安全面临严峻形势。尽管国家及区域层面在水土保持和水质保护方面有大量投入，且已取得对水库安全运行、流域生态安全具有重要意义的成绩，但在库区地形起伏、化肥（农药）施用增加、大型工程扰动等的胁迫下，水土流失及其所携带的养分元素并未显著减少，部分支流仍有水华现象出现。依据《2015 年长江三峡工程生态与环境监测公报》，采用农用地小区监测结果进行推算，2014 年库区全年流失农药 38.4t，比上年减少 2.9t。其中，有机磷类农药 23.8t，除草剂类农药 5.7t，氨基甲酸酯类农药 2.8t，菊酯类农药 2.7t，其他类农药 3.4t。2014 年，库区共施用化肥（折纯量） 1.3×10^5 t，其中氮肥 8.5×10^4 t，磷肥 3.6×10^4 t，钾肥 0.9×10^4 t，单位面积用量为 0.32 t/hm^2 。对 38 个主要支流 77 个水体富营养监测断面发现，水华敏感期（3~10 月）水体处于富营养状态的断面比为 7.8%~37.7%，中度富营养状态的断面比为 58.4%~85.7%。

三峡库区生态环境特殊，移民压力大，尤其在传统耕作模式下，过度耕作、超载放牧、不合理投入农用化学品以及不合理排放种养殖有机污染废弃物，造成大量泥沙、化肥、农药及畜禽粪便进入三峡水库，导致三峡库区面源污染日趋严重，面源污染问题一直存在于三峡库区建设发展过程中，这已经成为水库安全运营和经济发展所必须面对的关键“瓶颈”问题。作为区域环境问题，面源污染研究已成为水环境问题研究中的热点与前沿。面源污染的研究之所以如此重要，一方面是基于面源污染所带来的环境问题需

要多学科理论的支撑,另一方面是基于面源污染特点所引起的研究难点,尤其是基于大尺度空间范围的面源污染负荷估算模拟与影响评价,需要寻找更适合三峡库区这一大尺度区域的模型模拟和评价方法。

从大的方面看,面源污染的空间信息技术理论、影响面源污染的阻力与动力理论、“源-汇”景观理论是三峡库区面源污染解析所必须使用的重要理论依据和方法思路。其中,面源污染的空间信息技术主要体现在GIS与RS的应用中。一方面,多数的面源污染负荷模拟与影响评价模型所需数据涉及众多空间数据,包括数字高程模型数据(DEM)、多时相土地利用分类数据、反映植被覆盖的植被指数、土壤类型空间分布、气象站点数据等,这些数据的获取均需要GIS和RS的理论技术相辅助;另一方面,模型的自身构建需要GIS和RS软件的参与,进行模型集成,构建出适应大尺度空间的模型体系,如修正的通用土壤流失方程模型的构建、对输出系数模型的改进等。通过GIS和RS相关理论技术,能够使所模拟的面源污染负荷量更为显著地显示出时空上的异质性。

面源污染的发生、发展伴随着一系列的地表过程,主要包括土地利用、降雨侵蚀、土壤侵蚀及泥沙输移和污染物迁移转换(张永龙等,1998;Edwards et al.,2008),也就是溶解态和吸附态的面源污染物随着水、沙运动而迁移转换,这些过程包含物质与能量的分散与聚集,必定存在空间阻力与动力的作用,阻力与动力的相互转化改变着面源污染的空间路径,使面源污染物汇集于水体而形成污染。在进行面源污染负荷模拟和影响评价过程中,对于大尺度空间,必须要考虑影响面源污染过程的阻力作用和动力作用,以此对经典模型进行改进,对相关单一化系数进行空间异质化,从而提高模拟精度和评价准确度。

“源-汇”景观理论属于景观生态学中格局与过程的耦合关系问题。该理论认为,“源”景观对面源污染过程起到促进作用,“源”的作用强、污染风险大,而“汇”景观则起到阻碍作用,“汇”的作用强、污染风险小(陈利顶等,2003、2006)。例如,农田是营养物质迁出的“源”,其对农业地区水环境污染的最主要贡献来源于化肥、有机肥和农药等的使用,因此农田的“源”作用强,“汇”作用弱;而林、园或草地则是接纳营养物质的“汇”,对污染物存在吸附截留作用,因此“汇”作用强,“源”作用弱(Robert et al.,2005;Edwards et al.,2008)。因此,不同的“源”“汇”景观类型及其组合通过影响下垫面的自然水文过程来影响污染物迁移负荷,进而影响受纳水体的水质。面源污染最终是由养分在时空过程上的“盈-亏”非均衡所导致、由“源”和“汇”的增减平衡及其空间关系所控制。所以控制、管理流域水体污染的重要途径之一是需要结合具体的空间过程来识别评价农业面源污染形成的“源-汇”格局,做到减“源”增“汇”,优化“源-汇”空间组合,调控养分流动在进入受纳水体前的时空平衡过程。

为此,在对三峡库区面源污染进行解析的过程中,必须将土地利用、水土流失、“源-汇”格局、污染负荷、驱动因素等方面融为一体,从土地利用研究入手,分析水土流失的形成过程,再认识污染物形成的“源-汇”格局与污染负荷,最后查明污染物形成的主要动力因素。

目 录

第一章 国内外研究进展	1
第一节 面源污染的研究现状	1
一、面源污染的概念及现状	1
二、面源污染的类型	2
三、面源污染的形成机制	4
第二节 面源污染中氮、磷污染研究	5
一、面源污染中氮素流失特征及防控	5
二、面源污染中磷素流失特征及防控	6
三、面源污染中氮、磷污染负荷模拟	8
第三节 面源污染评价	9
一、面源污染评价类型	9
二、面源污染评价指标体系	9
三、面源污染评价模型	11
第四节 三峡库区面源污染	12
一、三峡库区面源污染的现状	12
二、三峡库区面源污染负荷模型研究	13
三、三峡库区水体质量及其变化	14
第五节 未来展望	15
第二章 土地利用	17
第一节 三峡库区土地利用变化特征分析	17
一、材料与方法	18
二、结果与分析	22
三、小结	30
第二节 三峡库区土地利用驱动力评价及格局分析	31
一、材料与方法	32
二、结果与分析	35
三、小结	40
第三节 三峡库区土地利用未来情景多因素耦合模拟	41
一、材料与方法	42
二、结果与分析	46
三、小结	58

第三章 水土流失	59
第一节 三峡库区不同土地利用背景水土流失时空变化及其分布规律	59
一、材料与方法	60
二、结果与分析	61
三、结论	67
第二节 三峡库区土壤侵蚀强度模拟	67
一、材料与方法	68
二、结果与分析	69
三、小结	75
第四章 面源污染形成的“源—汇”格局识别	76
第一节 三峡库区面源污染形成的景观阻/动力评价与“源—汇”格局识别	76
一、材料与方法	77
二、结果与分析	82
三、小结	87
第二节 三峡库区农业面源污染“源—汇”风险格局识别	88
一、材料与方法	89
二、结果与分析	93
三、小结	98
第五章 污染负荷模拟	99
第一节 三峡库区不同土地利用下溶解态氮、磷污染负荷模拟	99
一、材料与方法	100
二、结果与分析	103
三、小结	109
第二节 三峡库区泥沙输移比估算与吸附态氮、磷污染负荷模拟	110
一、材料与方法	111
二、结果与分析	113
三、小结	121
第三节 三峡库区长江干流入出库水质评价及其变化趋势	121
一、材料与方法	122
二、结果与分析	126
三、小结	134
第四节 三峡库区重庆段农村面源污染时空格局演变特征	135
一、材料与方法	135
二、结果与分析	139
三、小结	148
第五节 三峡库区重庆段水质时空格局演变特征	149
一、材料与方法	150
二、结果与分析	153

三、小结 157

第六章 驱动动因分析 159

第一节 三峡库区不同农业经营模式肥料投入评估及其变化特征 159

一、材料与方法 160

二、结果与分析 163

三、小结 167

第二节 三峡库区(重庆段)种植业污染负荷空间分布 167

一、材料与方法 168

二、结果与分析 172

三、小结 178

第三节 生计多样化背景下种植业非点源污染负荷演变 178

一、材料与方法 179

二、结果与分析 183

三、小结 191

第四节 重庆市农业面源污染源的 EKC 实证分析 192

一、材料与方法 192

二、结果与分析 194

三、小结 200

第七章 结论 202

参考文献 209

第一章 国内外研究进展

随着现代经济的发展,农业面源污染日益严重,据统计,30%~60%的环境污染来自于农业面源污染(杨修等,2005),其中土壤污染和水体污染形势严峻,已经成为制约我国农业可持续发展的重要因素(吴磊,2012;刘涓等,2014),甚至威胁人类的生活。近年来,控制农业面源污染已成为国内外的研究热点,学者们围绕着农业面源污染展开了大量的研究,也提出了防治农业面源污染的措施,保护农业生产环境是农业可持续发展的必然趋势和选择。

第一节 面源污染的研究现状

一、面源污染的概念及现状

面源污染(non-point source pollution, NPSP)是一个区域环境问题,是相对于点源污染(point source pollution, PSP)的概念(杨林章等,2013a)。早在20世纪30年代,国际上就提出了“面源污染”的概念,直到60年代,学者们才开始对面源污染有全面认识并开始进行研究(Novotny et al., 1987)。美国清洁水法修正案(The Clean Water Act, 简称CWA, 1997)将面源污染定义为“污染物以广域的、分散的、微量的形式进入地表和地下水” (魏欣, 2014)。Novotny等(1994)认为“面源污染是指溶解的和固体的污染物从非特定的地点,在降水(或融雪)冲刷作用下,通过径流过程而汇入受纳水体(包括河流、湖泊、水库和海湾等)并引起水体的富营养化或其他形式的污染”。根据面源污染发生的区域和过程的特点,一般可以分为农业面源污染和城市面源污染两大类。

农业面源污染(agriculture non-point source pollution, ANPSP)是面源污染最主要的组成部分,具有来源多、随机性、分散性、防治难度大、广域性等特点(吴岩等,2011;廖川康等,2015),不仅会造成水环境污染,而且还会破坏土壤结构,造成土壤板结、大气污染等(张淑荣等,2001;全为民等,2002;李秀芬等,2010;黄秋婵等,2011)。因此,农业面源污染有广义和狭义两种概念。狭义上的农业面源污染主要局限于对水环境的污染,是指在农业生产和生活过程中,农田中的颗粒,氮、磷等农药及其他有机或无机污染物质不及时或者不适当处理,在降水或灌溉过程中,通过农田地表径流、农田排水或地下淋溶,大量污染物质进入水体,造成地表水和地下水的污染(李金峰,2015);广义上的农业面源污染不仅局限于水体污染,还指在农业生产和生活过程中产生的过量或者未经有效处理的污染物(化学肥料、农药、重金属和畜禽粪便等),从非特定的地点,以不同形式对土壤、水体、大气及农产品造成的污染(吴岩等,2011)。本书研究的

主要是农业面源污染对水环境的影响,即狭义上的农业面源污染。

国内外的农业面源污染形势严峻,水环境与土壤深受农业面源污染的危害(李自林, 2013)。20 世纪中后期(50~80 年代),发达国家快速发展集约化农业,大量使用各种农用化学品,导致农业面源污染问题日益严重(张维理等, 2004a)。早在 20 世纪末, Dennis 等(1998)研究发现,全球范围内的地表水体有 30%~50%受到面源污染的影响,全球约有 $1.14 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 的耕地出现了不同程度退化,主要是由农业面源污染所导致的。据美国国家环境保护局 2003 年调查发现,约有 40% 的美国河流和湖泊水体受到了农业面源污染,同时也引发了地下水污染和湿地退化。Vighi 等(1987)和欧洲环境署(European Environment Agency)2003 年调查表明,欧洲国家同样面临农业面源污染问题,由此引发的地下水硝酸盐污染和地表水磷富集的问题日趋升级,据统计,欧洲的地表水污染总负荷的 24%~71%来自农业面源污染排放的磷。德国著名的赖谢瑙岛(Reichenau),草药和蔬菜生产是当地的支柱产业,但是大量施用化肥和农药,导致该岛地下水体受到污染,最终影响了饮用水,严重影响了该岛的生活和生产(张维理等, 2004a)。

我国农业面源污染的程度和广度已经超过了欧洲国家,并日益突出(宋涛等, 2010; 吴永红等, 2011)。2000 年,国家环境保护部调查发现,生活污水和农业面源污染对进入“三河三湖”流域的总氮、总磷的贡献率达到了 84%~90%,而仅有小部分是通过工业废水进入的(国家环境保护部, 2000)。张维理等(2004b)对中国 2300 多个县的农业生产活动与农业面源污染相关情况进行了调查,指出我国仍存在由农业面源污染引起的水体污染严重的流域和高污染的风险区。马国霞等(2012)对我国内地 31 个省、市、自治区的农业面源排放量进行了计算,认为如果不加大力度对面源污染进行治理,至 2030 年,农业面源污染中 COD(化学需氧量)排放量可能会从 2007 年的 $1.057 \times 10^7 \text{ t}$ 上升到 $1.4665 \times 10^7 \text{ t}$ 。2008 年,我国七大水系中超过 20% 断面的水质属水质标准劣 V 类(饶静等, 2011),在全国重点监控的湖、库中,部分频繁发生水华现象,严重影响饮水安全(周生贤, 2008)。2010 年 2 月公布的《第一次全国污染源普查公报》显示,在 5.996×10^6 个普查对象中,农业源达到了 2.899×10^6 个,可见对水环境污染影响较大的污染物主要是来自农业,其中农业排放的总氮($2.7046 \times 10^6 \text{ t}$)和总磷($2.847 \times 10^5 \text{ t}$)均超过了排放总量的 50%,分别达到了 57.2%和 67.4%,且 COD 的排放量($1.32409 \times 10^7 \text{ t}$)约占总排放量的 43.7%(饶静等, 2011)。《2012 年中国环境状况公报》显示农业 COD 排放量($1.1538 \times 10^7 \text{ t}$)达到了全国废水排放总量的 47.6%(金书秦等, 2013)。面对日益突出的农业面源污染问题,对其加强研究迫在眉睫。早在 20 世纪 60 年代,美国、日本和英国等发达国家对农业面源污染就开始了系统的研究;70 年代后,全球各地也逐渐开始重视农业面源污染;随着人们意识的加强,80 年代农业面源污染研究蓬勃发展;90 年代至今,新的农业面源污染物成为研究热点(樊娟等, 2008)。

二、面源污染的类型

面源污染根据污染物的来源可以分为农业面源污染和城市面源污染,张维理等(2014b)按照面源污染来源划分了 6 种类型,包括:①农田径流、淋溶或者侧渗;②畜禽和放牧草场的径流;③农村小村落生活面源;④湖泊、河流上的家禽和水产养殖;⑤城

乡结合部无污水管道和垃圾处理系统的城区和大乡镇场地径流；⑥矿区径流。

(一) 农业面源污染

农业面源污染是最重要且分布最广泛的面源污染，其污染物的主要来源是农业生产活动过程中化肥、农药、农膜等农用化学物质过量使用以及畜禽粪便、农村生活污水和垃圾等不合理排放(张晖, 2010)。

化肥污染：我国是世界化肥生产和消费的第一大国(占世界总产量的 35%)，但是化肥的利用率较低(我国的氮肥、磷肥、钾肥利用率分别为 30%~40%、10%~15%、40%~60%)，远低于发达国家(赵志坚等, 2012；浦碧雯, 2013；洪传春等, 2015)。农业生产中大量施用化肥，容易引起土壤、大气和水体环境的污染。

农药污染：美国国家环境保护局把农业面源污染列为全美水体环境污染(河流和湖泊)的第一污染源。据统计，美国每年产生 5×10^8 t 农药，但是约 30% 未被利用，造成地下水和地表水水质污染(Griffin, 1991)。根据 2011 年数据显示，我国农药原药的产量(2.6487×10^6 t)比 2010 年增长了 21.53%，农药的不合理使用和残留，以及由此带来的现实和潜在危险影响着人体健康。

农膜污染：为满足人类的生存需求，设施农业迅速发展，大量的塑料地膜(不易降解或降解后产生有害物质)残留在土壤中，污染农田生态系统(白云龙等, 2015)。据统计，我国农膜年残留量高达 3.5×10^5 t，约有 42% 的农膜残留在土壤中，严重污染农田环境。

畜牧业污染：畜禽养殖过程中产生大量的畜禽粪便(含有有机污染物)，如果不经任何处理直接排放会引起氮、磷污染，矿物质元素污染，生物病源污染等(Ajzen, 2002；栾江等, 2013)，并导致水体和大气的污染。

农业废弃物污染：我国是农业大国，每年产生大量的农业废弃物，其中秸秆的能源相当于 3.5×10^8 t 的标煤；而大多数的农业废弃物并没有被合理利用，而是焚烧或者丢弃，严重污染了大气和水体，危害人体健康(刘金鹏等, 2011)。

农村生活污染：我国农村人口多且居住分散，生活垃圾和污水等不好管控，由此引发的生态环境污染不容忽视(张中杰, 2007；梁流涛等, 2010)。

农业面源污染来源多，因此具有分散性、隐蔽性、随机性、不确定性、广泛性、难监测性和潜伏性等特点。

(二) 城市面源污染

城市面源污染是指城市地面中的污染物在降水条件下，随水从非特定的地点汇入湖泊或者河流，引起地表水和地下水水体污染(赵剑强, 2002)。美国国家环境保护局将城市面源污染列入河流湖泊的第三大污染源(杨荣泉等, 2004)，美国因建筑业的地表径流引起的地表水污染占据了 5%(Line et al., 1994)。我国对城市面源污染的研究起步较晚，20 世纪 80 年代初才开始对北京的城市径流污染进行研究，随后陆续在全国大中城市中开展(宫莹等, 2003)。丁程程等(2011)研究发现，城市面源污染主要以 SS(悬浮物)、COD、TN(总氮)、TP(总磷)污染物为主，具有一定的地域(交通区污染严重)和时间特征(降雨初期，径流污染物浓度高)，其影响因素包括降水强度、降水量、降水历时、

大气污染情况和地表清扫状况等(Vaze et al., 2002; 任玉芬等, 2005; 韩冰等, 2005; 边博等, 2009)。国内外的学者通过对污染物的来源进行控制来防治城市面源污染。合流制管道溢流(combined sewer overflow, CSO)是城市面源污染的主要来源, 李平等(2014)研究表明, 应用生物滞留设施可以削减降雨条件下城市径流中的重金属、氮、磷、细菌和病毒等污染物。刘燕等(2008)将植草沟技术运用到城市面源污染防治中, 发现其能够控制和削减受纳水体的径流污染负荷。龙剑波等(2013)从宏观角度提出防控城市面源污染宜与城市规划相结合, 只有将两者有机结合起来, 才能够更好地控制城市面源污染。

三、面源污染的形成机制

掌握面源污染的形成机制是开展面源污染模型化、防控化和管理研究的基础(李强坤等, 2008、2009; 洪华生等, 2008)。面源污染的形成是一个连续变化的动态过程, 根据Steve等(2005)构建的生态环境演变分析框架, 可以从驱动力的角度来分析面源污染的形成机制, 分为直接驱动力和间接驱动力。直接驱动力主要是指气候、土地覆盖变化等生物、化学等自然方面产生的影响; 间接驱动力主要是指人为主导的驱动力, 包括经济、人口、社会等状况(梁流涛等, 2010)。魏欣(2014)同样提出了农业面源污染的形成既有社会经济因素, 又有自然环境因素。吴罗发(2011)通过对江西省鄱阳湖区农业面源污染的形成机制研究发现, 除了经济发展水平与农业面源污染呈正相关外, 产业结构、经济规模和劳动力转移与其呈负相关关系。梁流涛等(2010)利用全国各省 16 年(1990~2006 年)的数据, 分析了我国农业面源污染的影响因素, 指出经济发展对农业面源污染的形成机制存在显著影响, 不断加大的农业生态系统生产的集约程度, 会加快农业面源污染; 粗放型、掠夺式的农业生产方式会促使农业面源污染的形成并且加快这个进程(冯孝杰, 2005)。除了受到社会经济机制的间接驱动外, 面源污染的形成同时也离不开直接驱动力的驱动, 即径流、侵蚀、渗透等自然过程。在农业生产生活过程中, 氮、磷、杀虫剂等化学品会积聚在土壤中, 这些物质通过自然过程中的迁移、转化和扩散, 引起农业面源污染, 因此在面源污染物的直接驱动力中根据污染源进一步分为氮污染机制、磷污染机制、硝酸盐污染机制和杀虫剂污染机制。杨志敏等(2009)对重庆农业面源污染影响因子分析发现, 重庆主要的污染物是氮和磷, 主要的污染源是化肥施用和畜禽养殖。

此外, 面源污染从形成过程的角度可以分为三个过程, 即降雨径流、土壤侵蚀、污染物迁移转化。首先, 面源污染物迁移转化的载体包括降雨形成的径流, 污染物通过降雨形成的径流进入受纳水体, 进而形成面源污染, 一次降雨产生的径流量是开展面源污染负荷估算的前提条件, 但是并不是每次的降雨都能产生地表径流, 从而带来面源污染, 因此学者们认为应该从水文学和水动力学角度, 对降雨的产流条件的空间差异性进行研究(邹桂红, 2007)。其次, 面源污染发生的主要形式是土壤侵蚀, 其携带的泥沙是面源污染的产物, 且泥沙会吸附氮、磷, 进入水体后形成非点源污染。据统计, 我国每年流失的表土达到了 5×10^9 t, 且数百万吨的污染物通过流失的表土进入地表水体, 造成严重的水体污染(张中杰, 2007)。早在 20 世纪 60 年代后期, 就有学者开始从面源污染的角度研究土壤侵蚀, 对最开始的通用土壤流失方程(universal soil loss equation, USLE)

(Wischmeier et al., 1978)不断修正和扩展,形成了一种基于物理过程的 WEPP (water erosion prediction project) 模型(Foster, 1995)。我国学者在结合实地监测数据的基础上,在 USLE 模型基础上提出了经验型区域性土壤侵蚀模型。最后,污染物迁移转化过程即面源污染物在降雨、灌溉等外营力作用下,从土壤圈向其他圈层扩散的过程(径流和渗透过程),最终形成面源污染(李玉庆等, 2012; 赵强等, 2015)。

第二节 面源污染中氮、磷污染研究

氮、磷已成为面源污染中重要的污染源,其贡献率分别达到了 57%和 67%,且水体中 83%的氮、磷来自农业面源污染。在我国,有 25 个湖泊水体中全氮均富营养化,氮、磷富营养化已经成为水污染的核心问题(余红兵, 2012)。氮负荷和磷负荷不仅在我国成为水体污染的主要原因,一些发达国家也存在这种现象。Boers(1996)在 20 世纪 90 年代后期指出,荷兰水体污染中受农田氮、磷负荷影响分别达到 60%和 40%~50%;同时期,Kronvang 等(1996)研究也表明,丹麦有 270 条河流受到了面源污染,其中氮、磷负荷分别达到了 94%和 52%;Daniel(1998)同样认为水体污染物的主要来源之一是农业面源污染,且氮、磷负荷占水环境污染总量的 57%和 64%。因此,开展对面源污染中的氮、磷污染物的研究,对防治水体污染有重要的现实意义。

一、面源污染中氮素流失特征及防控

氮是动植物所必需的基本元素,同时也是农业生产中最重要的营养限制因子。氮素可以通过生物固氮、大气沉降、作物残渣还田、化肥施用、灌溉等途径进入农业生态系统,然后再通过反硝化、氨挥发回到大气,地表径流、淋溶回到水体中。农田生态系统中,大量的氮素进入水体,会引起水体氮富营养化和硝酸盐含量超标。黄东风等(2009)研究表明,在多年种植的蔬菜地土壤中,氮素主要以硝态氮的形式累积,由于硝态氮不容易被土壤胶体吸附,随水容易进入地下水(张国梁等, 1998),造成菜地附近地下水中的硝酸盐污染。据统计,我国每年施用的氮肥超过了 $2 \times 10^8 \text{ t}$,但是损失的氮素就高达 $9 \times 10^6 \text{ t}$,大部分进入水环境,影响水体水质(侯彦林等, 2008)。朱波等(2006)对川中丘陵区农田生态系统氮的研究发现,小流域系统中每年农田氮素盈余达到 66.8 kg/hm^2 ,氮素急剧损失,并已导致小流域农业氮面源污染,施肥特别是氮肥对水体的负面影响日趋加大。

面源污染中的氮素流失途径主要包括地表径流损失、淋溶损失、氨挥发和土壤侵蚀损失(詹议, 2012; 蒋锐, 2012)。首先是氮的径流损失。在降雨条件下产生径流,土壤中的氮素以溶解态和颗粒态形式随着地表径流流出农田生态系统,进入受纳水体中(梁新强等, 2005; 徐爱国等, 2010; 王小燕等, 2011)。第二是淋溶损失。氮素在农田土壤中淋失的形态主要以硝态氮为主,而硝态氮的淋失又是造成水体硝酸盐污染的主要原因(蒋锐, 2012)。施入土壤中的氮素在微生物的硝化作用下,形成土壤胶体不易吸附的硝态氮,随土壤溶液进入地下水,特别是当农田系统中的氮存在盈余的时候,最容易发生氮素淋溶现象。高懋芳(2011)通过对小清河流域农业面源氮素模拟研究表明,该流域农田种植和畜禽养殖会有大量的氮素盈余,农业氮素面源污染比较严重,农田淋溶损失氮素

达到 $2.38 \times 10^4 \text{ t}$ 。第三是氨挥发损失。铵态氮水解产物氨极易进入土壤空气, 约有 90% 扩散到大气中, 加剧大气污染程度; 进入大气中的氨又会通过大气氮沉降重新回到地貌, 造成土壤和水体生态问题(苏成国等, 2003)。农田氨挥发主要是受到土壤、气候以及氮肥种类、施用方式等影响(杨杉等, 2014)。第四是土壤侵蚀。土壤侵蚀是面源污染中氮素流失的重要途径, 它在水或者风的作用下, 使地表土壤发生迁移和运动, 从而带走了氮素。据统计, 农田土壤侵蚀占全球侵蚀土壤的 50%~75%, 如果农田侵蚀的土壤按 $3 \times 10^8 \text{ t}$ 计算, 土壤中平均含氮量按 0.15% 估计, 那么通过农田土壤侵蚀带走的氮素高达 $4.5 \times 10^5 \text{ t}$ 。影响农田系统中氮素流失的因素主要包括降雨和灌溉、土壤特性、耕作方式、施肥等(陶春等, 2010)。

对于面源污染中氮流失的防控, 应该因地制宜地从减少污染源和控制污染物转移途径进行有效的控制。首先, 从田间养分管理角度出发, 全面推行平和施肥技术, 即有机、无机肥配施和氮、磷、钾配施技术, 因为氮肥配施磷肥可以有效降低 18%~72% 的土壤硝态氮含量(樊军等, 2000; 袁新民, 2000); 同时有机肥配施氮肥, 特别是硝酸钾肥料, 可以有效抑制硝态氮的淋失(郭胜利等, 2000), 减少因氮流失造成的地下水污染。就施肥方式而言, 穴施和深施可以有效降低径流中氮的流失量; 同时在灌溉水量方面, 宜适量, 因为灌溉水量减少明显降低了菜地土壤中硝态氮的淋失(于红梅等, 2005; 梁新强等, 2006); 进一步开发生物固氮技术, 通过种植豆科植物固氮, 减少氮素流失(盛下放等, 2000)。可以适当施用聚丙烯酸钠(PAA)3,4-二甲基吡啶磷酸盐(DMPP)等化学添加剂来降低土壤中的氮素淋失量, 同时缓解土壤中铵态氮向硝态氮转化, 减轻水体的氮污染(杜建军等, 2007; 俞巧钢等, 2014)。此外, 在农田作物的间歇期, 种植填闲作物可以有效吸收土壤中存留的氮素, 减少硝态氮在土壤中累积和淋失(黄东风等, 2009)。其次, 从污染物流失的途径出发, 通过拦截等技术手段减轻氮素的流失: “汇—源”景观组合和生态草带拦截技术可以有效地吸收和拦截农田地表径流和地下径流中的氮养分, 实现在途径中有效减少氮流失。张刚等(2007)利用稻季缓冲带拦截了田面水中 32%~51% 的总氮量, 许平开等(2012)利用植物篱对雷竹林氮的拦截率达到了 57.7%~61.0%, 这不仅减少了面源污染中氮的流失, 而且还节约了成本和时间。植被缓冲带是控制面源污染的新型生态工程技术, 王华玲等(2010)在坡耕地处设置了四种植被缓冲带, 通过拦截试验表明, 缓冲带对铵态氮的拦截率为 48%~95%, 其中平衡施肥结合紫穗槐的拦截效果最佳; 同时, 申小波等(2014)研究表明, 茎秆密集的草本植被过滤带能有效地拦截总氮, 对农田面源污染具有较好的防治效果; 修建沼气池、人工湿地等低成本的治理技术也可以有效控制氮流失, 其中通过人工湿地可以去除 60% 的总氮(张中杰, 2007)。

二、面源污染中磷素流失特征及防控

磷是植物生长的必需元素之一, 但是过量的磷会导致水体富营养化, 从而引发大规模的水化和赤潮, 这已成为我国湖泊和沿海地区突出的环境问题(刘佳等, 2008; 钟诗群等, 2014)。水体富营养化的主要限制因子包括磷素, 而该现象的发生与土壤当季农田磷盐分的流失有密切关系(Daniel et al., 1998)。据统计, 世界上 80% 的湖泊是磷控制型, 对于我国来说, 也有 65% 的湖泊属于磷控制型(Li, 2008)。马骞等(2011)以鲁中区南山

地丘陵区坡耕地为研究对象,研究表明在径流初期,地表径流中溶解态磷浓度与径流量及原表土速效养分含量具有较高的相关程度。土壤固磷能力强,但是菜地对磷素需求较少,盈余的磷会通过地表径流和淋溶的方式进入受纳水体,引发水体富营养化等面源污染(Ju et al., 2007)。在面源污染中,滇池周边的土壤含磷总量是我国农业土壤的高量值的 7.5 倍,成为滇池磷污染的重要来源之一(贝荣塔等, 2010)。

农田系统中,磷素主要通过径流、渗漏等方式流失,其主要形态包括溶解态磷和颗粒结合态磷,其中颗粒态磷的流失占总磷的 62%~83%(孙海栓等, 2012),且两种形态磷的比值决定了有效磷的数量和富营养化的潜能(黄红艳等, 2010; 张旭, 2011)。面源污染中的磷主要通过径流和地下淋溶损失,其中地表径流是土壤中磷素流失的主要途径。已有研究表明,表层土壤中含磷量与地表径流中的磷浓度有正相关关系(Sharpley et al., 1994)。此外,气候因子(降水量、降水时间、降水强度)、土地利用方式、施肥状况等因素均会影响面源污染中磷流失的程度。杨丽霞等(2007, 2010)通过研究不同施磷水平对太湖流域典型的蔬菜地磷素形态及流失量的影响,表明施肥对径流中的总磷、颗粒态磷及生物有效磷有显著的相关关系。高扬等(2006)研究发现,紫色土坡地中有两种径流模式(地表径流和壤中流),持续性大雨会使土壤中的磷析出,导致水体富营养化,壤中流的径流动态过程受到降水强度和表面作物覆盖度的影响。土壤中,有机磷不易被土壤颗粒固定,易流失,施用有机肥会增加有机磷的迁移,从而增加地表径流中磷的含量(徐楠等, 2012)。磷素的另一种流失方式是地下淋溶损失,在土壤中的磷达到吸附饱和的时候,才会发生强烈的淋溶损失(单艳红等, 2004),主要包括渗透流(通过土壤基质流的地下淋溶渗滤)和优势流(通过土壤优先即土壤中大孔隙到达地下水系统)两种途径,其影响因素主要有土壤结构、土壤水分含量和溶质的施加速率等(崔力拓等, 2006)。当土壤中的 Olsen-P 浓度超过 60 mg/kg 的时候,土壤中的磷就会通过优势流等方式从亚表层径流损失(Sharply, 2003);土壤中的蚯蚓会增加土壤孔隙,加快磷从土壤中的大孔隙流到地下水系统(McDowell et al., 2001);土壤中优势流的影响深度可到达地面以下 90cm(杨学云等, 2004)。

杨林章等(2013)在吴永红等(2011)提出面源污染控制的 3R 理论(减源—拦截—修复)基础上提出了 4R 理论(减源—拦截—再利用—修复),以此来指导面源污染防控,对于面源污染中磷流失的防控也可以基于以上提出的理论。首先是源头减量(reduce),主要通过施肥管理、调整种植结构、控制养殖业及添加改良剂等方式防治,降低农田磷流失的关键在于减少田面水的排出,如采用浅水勤灌、干旱交替等田间管理。章明奎等(2007)研究表明,在粪肥中添加明矾,可以降低 79%的可溶性磷浓度,从而降低农田径流磷的浓度。肥料穴施和深施可以明显降低径流中磷的流失量,且氮磷肥配施如普钙和尿素合理配施在提高蔬菜产量的同时,又可以减少磷流失量(黄东风等, 2009)。第二是过程阻断(retain),水土保持耕作法的措施可以有效防控面源污染磷的流失;常见的有修筑梯田、设置缓冲带和边缘带保护性耕作等措施(Maxted et al., 2009)。戎静等(2011)运用生态拦截草技术研究了太湖源地区雷竹林氮、磷径流拦截效果,表明拦截草能有效地控制磷的径流迁移效果。唐佐芯等(2012)的研究也表明,在坡面设置草带,可以控制径流泥沙氮、磷的迁移,宽窄草带对全磷迁移通量的控制率均超过了 89%。第三是养分再利

用(reuse), 利用面源污染中含有氮、磷等养分资源的污染物再次进入农业生产系统, 作为植株生长发育所需的营养元素(胡雪琴等, 2015)。农业废弃物——秸秆直接还田或者间接还田, 不仅可以减少土壤侵蚀发生的程度, 而且还能够使稻麦每年减少 7%~8% 的氮、磷流失量; 此外, 畜禽粪便可以用于生产有机肥, 不仅可以提高作物的产量, 还能够缓解氮、磷流失问题(常志州等, 2013)。第四是生态修复(restore), 采用生态工程修复措施如水体修复和河岸带修复等, 恢复江河湖泊的生态结构和功能, 最终提高和强化水体自我修复和自我净化的能力(杨林章等, 2013)。刘娅琴等(2011)的研究表明, 生态浮床技术中水体植物覆盖率为 39% 时, 可以有效控制水体中浮游植物的多样性, 促进水体生态系统的良性发展。

三、面源污染中氮、磷污染负荷模拟

20 世纪 70 年代以来, 国内外学者围绕面源污染负荷模拟展开了大量的研究, 经历了经验推理性模型、定量化机理性模型、数学模型、面源污染管理模型、面源污染与 3S 技术结合的模型等研究阶段。野外实测法、输出系数法、通用土壤流失方程法、污染指数法和面源污染物理模型法是目前用于农业面源污染负荷估算和关键区识别的研究方法(李文超, 2014)。根据模型的复杂性和模拟技术可以将其分为简单性、功能性和机制性模拟负荷模型, 代表的模型分别有 FHWA 和 WMM、CREAMS 和 AGNPS、SWAT 和 HSPF 等; 由于不同的水体对面源污染的响应不同, 湖泊河流主要采用 WASP5、CE-QUAL-2E 等模型模拟, 而河口水质模拟模型主要有 CE-QUAL-W2、CE-QUAL-ICM 等(罗艺, 2010); 在定量化模型中, 按照不同形式的参数, 又可以分为集总式和分布式两种面源污染负荷模型, HSPF、CREAMS、EPIC 等属于集总式模型, GLEAMS、AGNPS、SWAT 等均属于分布式模型(李爽, 2012)。通过模型对面源污染进行模拟, 是目前面源污染研究的重要手段之一, 它可用来确定面源污染物的类型、浓度、流量负荷等(马广文等, 2011)。张薇薇等(2013)利用输出系数模型(export coefficient model, ECM)模拟了怀柔库区上游的氮、磷污染负荷, 指出了土地利用方式及产业结构等农业活动对怀柔流域氮、磷污染的影响; 杨静淑等(2009)在传统的 Johnes 输出系数模型中添加了灌溉因子, 研究了宁夏灌区氮、磷负荷情况, 表明改进的模型比传统模型更接近宁夏灌区的实际污染情况。目前, GIS 与非点源模型耦合集成的模型已经成为非点源模型的发展趋势, 包括 SWAT、ANNAGNPS、NPSM 和 LSPC 模型, 将其应用到面源污染中氮、磷负荷模拟可以有效了解污染物的空间分布规律, 还可以指导最优的管理措施来控制氮、磷污染, 但是不同区域要对模型中的参数进行调整, 提高模型模拟的准确性。SWAT 模型已经成为较为成熟的模拟流域面源污染的模型, 特别是 GIS 和 SWAT 模型耦合集成的模型。李爽等(2013)运用 SWAT 模型模拟了南四湖湖东和湖西的典型小流域的氮、磷污染情况, 发现该模型在地形起伏较大的地区能获得较高的模拟精度。胡文慧等(2013)基于 SWAT 分布式水文模型(Hu et al., 2011), 研究表明汾河灌区在 7~9 月汛期会产生至少 50% 的氮和 70% 的磷流失, 严重污染灌区的生态环境。曾远等(2006)和洪华生等(2004)均采用 AGNPS 模型分别对太湖流域和福建九龙江流域的氮、磷流失负荷进行了定量计算。王慧亮等的(2011)研究指出, LSPC 模型可以对透水和不透水地面、

河流和完全混合型湖泊水库三种不同性质的地表水文水质过程进行模拟,模拟的变量包括径流、沉积物、重金属和常规污染物。

第三节 面源污染评价

农业面源污染评价的主要目的是确定农业面源污染的潜在能力与表现能力,确定主要的面源污染物、主要污染源、主要污染区域、主要影响因子等。其评价内容包括污染源负荷评价(如排放量、排放系数)、污染水质评价等(付伟章,2013)。

一、面源污染评价类型

农业面源污染涉及农业生产和人们生活的方方面面,所得到的调查数据涉及的变量也是林林总总,因而具有高维空间特征。对于面源污染数据的评价,目前用得较多的是综合指数法(李录娟等,2014)、层次分析法(董守义,2015)、模糊数学法(郑艺,2015)等。综合指数法是通过建立各评价要素的指数函数模型,然后加权集成,因而权重的精确与否直接影响评价结果。层次分析法则将评价体系分成目标层、准则层和方案层,构造层次结构模型,然后通过建立两两判断矩阵,向上递推,得到评价结果。模糊数学法是基于评价的随机性和不确定性,建立模糊评价矩阵,采用不同的模糊算子进行推算。这3种方法各有优缺点。对于不确定性数据,集对分析是一种很好的评价方法。它从用、异、反等三个方面研究事物的确定性与不确定性,全面刻画两个不同事物之间的联系,其核心思想是将确定性和不确定性视为一个系统,在该系统中,确定性与不确定性相互联系、相互影响、相互制约,并在一定条件下相互转化,建立模型以统一描述模糊、随机、中介和信息不完全所导致的各种不确定性,从而把对不确定性的辩证认识转换成一个具体的数学工具。

二、面源污染评价指标体系

土壤长期淋失发生的条件是降水量(包括灌溉量)大于径流与蒸发总量之和,土壤渗透性好;土壤短期淋失发生的条件是一次降水或灌溉量过大(黄满湘等,2003)。总之,土壤湿度大于保水能力时,淋失才会发生(侯彦林等,2008)。

地貌可分为山地、丘陵和平地。山地和丘陵的土壤以水土流失的方式为主,而平地以土壤淋失流失为主(王晓燕等,2003)。按土壤水分条件,土壤可划分为水浇地(肥料淋失主要受灌溉量、灌溉次数及降水的影响)、旱地(肥料淋失受降水影响)和水田(主要受质地和肥料用量影响)。

地下水硝态氮含量的划分标准、是评价施氮影响地下水质的直接标准,也是多年施氮影响的累计结果。该指标可靠、具体,但难以反映氮素污染的发生过程,参照国内外现行标准,将肥料中氮引起的地下水硝态氮含量定义为大于 10 mg/L 为有污染,最大允许值为 50 mg/L。

土壤硝态淋失量的划分标准是评价施氮影响地下水质的间接标准,也可以认为是肥料中氮当季对地下水污染的直接威胁程度。该指标可具体反映氮污染发生的过程和数量,