

国家十一五“沿湖地区农业面源污染综合防控与治理技术研究”项目资助

农业面源污染 综合防控技术研究进展

刘宝存 赵同科 主编

中国农业科学技术出版社

国家十一五“沿湖地区农业面源污染综合防控与治理技术研究”项目资助

农业面源污染 综合防控技术研究进展

刘宝存 赵同科 主编



中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

农业面源污染综合防控技术研究进展 / 刘宝存, 赵同科主编
北京: 中国农业科学技术出版社, 2010. 6
ISBN 978 - 7 - 5116 - 0160 - 5

I. ①农… II. ①刘…②赵… III. ①农业污染源 - 非点
污染源 - 污染防治 - 国际学术会议 - 文集 IV. ①X501 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 069977 号

责任编辑 鲁卫泉
责任校对 贾晓红

出版者 中国农业科学技术出版社
北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081
电 话 (010) 82106636 (编辑室) (010) 82109704 (发行部)
(010) 82109703 (读者服务部)
传 真 (010) 82106636
网 址 <http://www.castp.cn>
经 销 者 新华书店北京发行所
印 刷 者 北京华忠兴业印刷有限公司
开 本 880 mm × 1 230 mm 1/16
印 张 30
字 数 830 千字
版 次 2010 年 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷
定 价 70.00 元

《农业面源污染综合防控技术研究进展》

编 委 会

主 编 刘宝存 赵同科

副 主 编 张有山 李 鹏 安志装 张成军

编 委 (以姓氏笔画为序)

马友华 王玉峰 王慎强 刘宝存

刘 强 安志装 李 彦 李 鹏

邹国元 张有山 张成军 张国印

赵同科 洪丽芳 彭春瑞 谢德体

熊桂云

序 (一)

由于人们对自然界认知的限制等因素,随着工业化进程的不断加快,全球环境问题日益突出。点源污染和面源污染交织在一起,大气、土壤和水环境污染相互渗透,使得不堪负重的地球雪上加霜,在点源污染得到一定控制之后,面源污染又日益突显。

面对不断恶化的环境问题,世界各国有识之士都在大声疾呼保护环境、拯救地球。长期以来、特别是十多年来,党中央、国务院高度重视环境保护工作,制定了一系列的重大方针、政策,采取了许多有力措施,大力推进污染防治和生态保护工作,并取得了积极进展,面源污染防治工作也开始提上议事日程。

可喜的是,以北京市农林科学院为代表的科学家群体清醒认识到治理面源污染、特别是农业面源污染的重要性,较早期地开展研究、积累技术、探索方法,并在原国家环保总局和北京市环保局的支持下,在本世纪初就建立起“中国北方有效控制农业面源污染示范区”。示范区的建设遵循科学研究、技术开发、技术集成、示范推广应用等思路和方法,研究开发出一整套适合于我国北方地区农业面源污染控制的技术体系,为农业面源污染综合防控提供了范例。正是由于这些研究水平的不断提升和技术方法的不断完善引起了政府的高度重视和有关部门的大力支持,国家“十一五”重大项目“沿湖地区农业面源污染防控与综合治理技术研究”才得以顺利立项和实施。此举利国利民、可喜可贺!

作为一名老生态工作者,从这一项目的立题开始,我就跟踪、关注他们的研究工作。他们迎难而上的工作精神,求真务实的科学态度,给我留下了深刻印象。

欣闻近期他们将把近些年在农业环保领域的研究成果编辑出著,感到由衷高兴,对他们取得的成果、成绩表示祝贺!多年来,这些专家、学者和相关人员默默无闻、甘于奉献,用他们的智慧、汗水和心血浇灌着生态之花,冲刷着土壤之污,期盼着江河之净,在此对他们在这一领域取得的阶段性成果表示恭贺,对他们为“三农”工作做出的特殊贡献表示衷心地感谢!

我国是一个发展中大国,人口基数大,资源相对匮乏,生态环境容量有限,这是我们面对的基本国情。在今后一个较长的时期内,我国人口资源环境的压力将继续并存,而且随着经济社会的进一步发展将不断加大。全面落实科学发展观要求,实现我国社会经济环境的全面、协调、可持续发展面临的任务还十分艰巨,还有很长的路要走。我们坚信,有党中央的英明领导、有各级党委政府的大力支持、有广大科技工作者的不懈努力和广大人民群众积极参与,我国的环保事业就充满希望,重现青山、绿水、蓝天的目标就一定能够实现。

原国家环境保护部副部长

祝光耀

二零一零年五月

序 (二)

20 世纪 20 年代以来,世界性生态环境污染开始威胁人类安全,不仅表现在温室效应、臭氧层破坏和酸雨等方面,还表现在大气、水体、食物、土壤污染等方面。生态环境污染源主要来自工业生产排放的废弃物、城乡生活带来的生活垃圾和污水、种植业过度使用的化肥和农药以及养殖业排放的畜禽粪便等。据世界卫生组织和联合国环境规划署的报告:全世界城市居民中有 4/5 生活在受污染的大气环境中,并饮用不符合卫生要求的水。全世界有 18 亿人饮用过受污染的水,每年有 30% 的人因环境污染而患病。

我国正处于工业化、城市化高速发展进程中,资源消耗和环境污染问题都位居全球突出位置,形势严峻。据环保部第一次全国污染源普查结果(2010 年),用 COD(化学需氧量)排放量衡量生态环境污染源的比重,在我国污染总量中,农业、工业、生活大约各占 1/3。我国每创造 1 亿元 GDP 就要排放 28.8 万 t 废水,80% 以上的生活污水未经处理直接排入河道,七大江河水系中劣 V 类水质占 41%,3.6 亿农村人口喝不到安全的水,城市河段 90% 以上遭受严重污染;同时,我国的 1/3 城市人口还呼吸着严重污染的空气,有 1/3 的国土被酸雨侵蚀。

作为生态环境的重要组成部分,农业领域的面源污染问题长期以来没有得到足够的重视,但近年来,随着农村经济社会的快速发展,一些地区农村生态环境也逐年恶化,农业面源污染逐步加重,必须引起高度关注。从 2000 年开始,我国年使用化肥都在 4 000 万 t 以上,平均 400 kg/hm² 以上,而化肥利用率普遍较低,如氮肥利用率仅为 30% ~ 35%、磷肥利用率才为 10% ~ 20%;年使用农药至少 1 200 万 t,平均 14 kg/hm² 以上,是发达国家的 1 倍多,除 30% ~ 40% 被作物吸收外,其余大部分都进入了大气、水体、土壤及农产品中;农膜年残留量高达 35 万 t,残膜率达 42%,有近一半的农膜残留在土壤中;规模化养殖业发展快,有机废气物处理利用率低;农村生活垃圾、污水无处理排放,严重污染水体;年产约 7 亿 t 秸秆,约有 2/3 被随意焚烧或变成有机污染物。农业生产污染源的增加、污染物增多,污染范围扩大、程度加深,已经直接影响了农业产量、农产品质量和农业可持续发展,成为制约社会主义新农村建设和我国生态文明建设的重要因素。

为治理农业面源污染,20 世纪 60 年代起,国际上从湖泊富营养化成因研究着手,开始对面源污染防治进行研究;70 年代,开始从面源污染调查、面源污染与水质、面源污染负荷定量分析及控制与管理对策等方面进行系统研究,并建立了一系列面源污染模型,为决策者提供科学、有效、经济的依据。在面源污染治理方面,发达国家积极采取污染源源头控制技术,在减少工业生产废弃物、生活污水、化肥和农药等农用品的投入等方面都制定了具体的措施,对面源污染的防控起到了较好的效果。例如英国在全国硝酸盐脆弱区设置了禁止施肥的封闭期。美国亚利加州和亚利桑那州以立法形式保护地下水,对氮肥和杀虫剂等有机污染物的使用规定极为严格。欧盟对农药产品生产和使用有着严格的规定,以减少农药过量造成的污染。在面源污染过程控制方面,发达国家广泛采用生态工程措施控制面源污染,并取得良好效果。如澳大利亚新南威尔士州采取生态工程技术治理农业面源污染,修复污染土壤,建立流域污染控制示范工程等。此外,欧美发达国家大力发展替代性环保农业投入品,政府从财政、金融、税收等方面大力扶持发展农家肥、有机肥、生物肥、

生物农药等高效新型环保农业投入品和先进实用技术，环保农资的使用量已达 50% 以上，很好地促进了农业面源污染的有效防治。

我国一直高度重视面源污染防治科技工作，尤其注重降低农业源污染物排放相关技术的研究与应用。特别是“十一五”以来，在原有投入基础上进一步加大投入力度，在国家科技支撑计划、“863”计划中设立了沿湖地区农业面源污染防控与综合治理、高效施肥、农村饮水安全、畜禽健康养殖、规模化沼气工程、农林固碳减排、生物肥料与生物农药创制、高效施药技术与机械、农村废弃物综合利用等相关项目，重点开展土壤氮磷养分流失控制、农药绿色替代与精准减量化、农业面源污染生态阻控、畜禽粪便资源化利用和无害化处理、农村污水治理和垃圾无害化处理、秸秆综合利用等共性关键技术研究，并进行区域特色的污染防控、农业废弃物无害化与资源化等技术集成示范，在典型区域建立核心试验区，进行大面积技术示范与辐射。

通过上述项目的实施，我国已经初步建立了一支产学研紧密结合、致力于农业面源污染防控的研发队伍，建成了一批示范性好、技术针对性强的基地，积累了较丰富的研究和实践经验，为近年来我国农业面源污染防控提供了有效的科技支撑。在水体污染方面，初步建立了农村面源污染源头控制技术系统，形成了以缓/控释肥为核心的环境友好施肥技术体系，使农田氮磷向环境的排放量减少 50% 以上。在土壤修复技术方面，在酸性土壤改良，偏碱性土壤调控提高氮肥利用率，减少氮淋径流与淋溶等方面取得了初步成果。畜禽养殖采取以沼气为核心的“果—草—畜”、“猪—沼—果”、北方“四位一体”和“猪—渔”等生态处理模式，使我国养殖污水处理技术迈上一个新台阶。

与此同时，我们必须清醒地看到，我国生态环境恶化趋势仍未得到根本性扭转，农业生产高投入、高消耗的传统集约化生产方式仍在延续，我国粮食生产消耗了世界 25% 的化肥和 30% 的农药，但肥、药利用率不足 35%；农产品和食品污染事件仍不断发生。农业生产遭受严重损害，治理面源污染面临严峻挑战，任重道远。

展望未来，面对发展绿色农业、生态农业和循环农业，节能减排、应对气候变化，建设社会主义新农村，改善城乡环境等重大战略需求，治理面源污染任务更加紧迫，迫切需要加强科技支撑。从我国实际和国际发展经验来看，重点要做好以下工作：一是要做好面源污染源控制和土壤修复技术，将基因工程和分子生物学技术、化学工程技术、信息技术等应用到面源污染防控，最大程度提高农业废弃物资源利用率、减少农业源氮磷流失，净化生态环境；二是加快面源污染技术的产业化，将配套的资源、技术、设备、人才、政策等产业要素有效整合，形成支撑产业发展的成套技术和良好环境，加快生物农药、生物肥料、沼气工程、水体净化、安全饮水等相关产业发展；三是加快开发生物质能源，积极应对气候变化。加快大型养殖场沼气工程技术开发、油脂资源综合利用、畜禽粪便生产商品有机肥料、村镇农林剩余物直燃发电等技术研发，实现秸秆和畜禽粪便的资源化利用和农业生产节能减排，实现环境治理和资源综合利用的双重效应。

《农业面源污染综合防控技术研究进展》是业界相关专家对我国面源污染现状、技术进展作出的一个全面分析和总结评述，通过详实的数据和大量资料展现了我国面源污染防控等方面的最新研究进展，其中多数研究成果具有原创性，且实用性强，是一份参考价值很高、指导意义很强的面源污染研发报告，可为相关人员提供有益的借鉴和参考。

国家科学技术部农村科技司副司长

贾敬敦

二零一零年五月

前言

随着世界各国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,第一次全国污染源普查公报表明,农业源(不包括典型地区农村生活源)污染物排放对水环境的影响较大,其总磷排放量占总磷排放总量的 67.4%,总氮排放量占总氮排放总量的 57.2%,化学需氧量占化学需氧量排放总量的 43.7%。由此可见,开展农业面源污染的研究与治理已迫在眉睫。

北京市农林科学院与河北、黑龙江、山东、安徽、江西、湖北、云南七省农科院以及西南大学、湖南农业大学、中国科学院南京土壤研究所等 11 个单位共同承担了国家科技部“十一五”科技支撑计划项目“沿湖地区农业面源污染防治与综合治理技术研究”。围绕密云水库、官厅水库,兴凯湖、白洋淀、南四湖、巢湖、太湖、鄱阳湖、丹江口水库、三峡水库、洞庭湖和滇池等十二湖库周边及流域开展农业面源污染防控研究工作。

本项目在各承担单位的积极努力下,工作进展顺利,取得了预期成果,搭建起了一个广泛的农业面源污染防控技术的科研、推广平台。为了交流科研进展情况,提升农业面源污染防控平台的影响,吸引国内外更多优秀专家对农业环境保护工作的关注,参加项目的百余名科研骨干撰写了多篇论文,我们经过认真参阅,从中选出 70 多篇论文(摘要)编辑成此论文集。

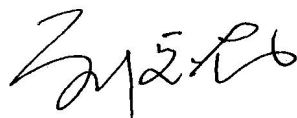
文集内容分四部分。一、综合论述与宏观管理,介绍了国内外农业面源污染的研究现状与国内治理农业面源污染取得的成效。二、研究进展,叙述了项目参加单位在 12 湖库、流域进行调查、试验的情况及研究进展。三、防控技术应用与效果,主要介绍各单位利用研究成果在不同湖库及流域防控农业面源污染的技术情况。四、摘要。

本文集汇集了我国近年来在农业面源污染研究方面取得的最新进展,反映了广大科技人员在农业面源污染防控领域研究的学术思想、工作成果和对创新技术的积极探索,有较强的理论与应用价值。但也需要指出的是,农业面源污染研究在我国还处于起步阶段,文集中有些观点、认识还需要在实践中检验和完善,还有不少问题需要继续深入研究,仅供读者参考。

在本书出版之际,我们十分感谢国家科学技术部、环境保护部及项目参加单位所在省市科委、环保局等部门,在他们的大力支持下,促进了研究项目的落实和顺利实施。原国家环境保护部副部长祝光耀、国家科学技术部农村科技司副司长贾敬敦为本书作序,在此深表谢意。

在五个月内完成本文集的征文、编审和出版工作,时间很紧,限于编者水平,尽管我们做了很大努力,仍感到尚有诸多不尽如人意之处,文集中缺点、错误在所难免,敬请读者批评指正。

北京市农林科学院
植物营养与资源研究所所长



二零一零年三月

目 录

第一部分 综合论述与宏观管理

农业面源污染的现状与研究进展 刘宝存 安志装 邹国元等 (3)

农田土壤农药残留污染研究现状 尹可锁 张雪燕 吴文伟等 (15)

我国粮食安全与环境安全的初步研究 詹贤达 王 奇 (23)

农作物秸秆能源利用现状 刘新春 刘研萍 李秀金等 (30)

白洋淀水污染防治对策及治理技术探讨 王玉英 胡春胜 李晓欣 (39)

丹江口水库水环境及其与农业面源污染的关系 艾 鹰 毕永红 胡征宇等 (46)

滇池流域农田土壤有机氯农药残留特征 尹可锁 吴文伟 张雪燕等 (54)

黑龙江省农业面源污染现状及控制措施分析 王玉峰 陈雪丽 张 磊 (64)

丹江口库区坡耕地氮磷流失规律及其影响因素的初步研究 刘冬碧 巴瑞先 熊桂云等 (70)

红壤坡面氮素随地表径流迁移及过程模拟初步研究 王 辉 卢 霞 姚帮松等 (76)

磺酰脲类除草剂残留的微生物降解研究 谢 明 李 丽 张艳军等 (83)

基于 ArcSWAT 模型对鄱阳湖流域农业面源污染分析的初探 吴 劼 郭 焱 (87)

基于 SWAT 模型的面源污染模拟研究 陈康宁 辛景峰 (96)

基于遥感技术的农业面源污染信息提取技术研究 李 琳 辛景峰 (102)

玫瑰西花蓟马空间分布及聚集成因 何成兴 郭志祥 尹可锁等 (108)

南四湖微山岛乡农村生活污水及农业废弃物现状与处理对策 王艳芹 李 彦 刘 英等 (113)

微山岛农业面源污染的现状分析 张英鹏 李 彦 孙 明等 (121)

浙川县丹江口库区水文模型参数化及模拟研究 宋 轩 魏 冲 沈阿林等 (127)

兴凯湖流域农业面源污染现状分析及对策 彭欣然 康 爽 张 颖等 (140)

第二部分 研究进展

Soil organic carbon dynamics in profiles of paddy soils along a
rice-cultivation chronosequence En Ci Linzhang Yang Jie Zhu et al (149)

保护性耕作及控释肥对水稻油菜生长及产量的影响 王允青 郭熙盛 王静等 (162)

保护性耕作与平衡施肥对巢湖流域稻田氮素径流损失的影响研究 王 静 郭熙盛
王允青等 (167)

不同施肥方式对微山岛小麦产量、肥料利用率以及农艺效益的影响 张英鹏 李 彦
刘兆辉等 (176)

不同有机肥施用量对土壤和玉米锌含量的影响	茹淑华	张国印	孙世友等	(201)
丹江口库区坡耕地不同植物篱的土壤肥力效应	姚桂枝	刘章勇	朱宇航	(208)
堆肥和有机-无机复混肥肥效研究	李吉进	邹国元	刘宝存等	(214)
洞庭湖区湖垸旱地减氮控磷措施对棉花产量和肥料利用率的影响	李裕元	潘春翔等		(222)
钝化剂和好氧发酵对猪粪重金属活性变化的影响	刘洪涛	雷梅	郑国砥等	(229)
高分子水土保持剂对沿湖低肥力土壤玉米生长的影响	李鹏	安志装	赵同科等	(231)
海藻提取物对不同藻类生长的影响研究	王立刚	王迎春	李少朋等	(240)
减量施肥对水稻生长及氮素利用率的影响	王道中	郭熙盛	张成军等	(246)
接种下的蔬菜废物厌氧消化性能	刘研萍	刘新春	毛菁菁等	(251)
秸秆厌氧消化过程中的预处理技术研究	刘新春	刘研萍	李秀金等	(260)
南四湖区稻麦轮作施肥对作物生长的影响	孙泽强	董晓霞	王学君等	(267)
三峡库区小流域不同坡度下地表径流氮素流失研究	李东	樊燕	季轶群等	(275)
生活污水有机污染物降解菌株筛选研究	魏晓辰	章睿	李艳菊等	(281)
水肥耦合减少白洋淀地区小麦-玉米种植体系中氮淋失效果研究	王凌	张国印等		(288)
养分管理对生菜生物量与硝酸盐含量的影响	夏体渊	年耀萍	张彩仙等	(294)

第三部分 防控技术应用与效果

Effects of multispecies phytoremediation on the fate of Phenanthrene

and pyrene in soils	Shiqiang Wei	Shengwang Pan	(305)
白洋淀蝗区防治蝗虫替代药剂的研究	李耀发	高占林	党志红等 (318)
巢湖设施番茄防治蚜虫药剂筛选及施药技术研究	顾江涛	章东方	张海珊等 (323)
丹江口库区橘园施肥技术与氮磷流失关系研究	毕磊	谭启玲	胡承孝等 (326)
稻草基生态护坡板及其拦截污染物效率的实验研究	颜蓉	姬红利	吴永红等 (333)
滇池周边不同品种玫瑰养分管理与农业面源污染防控研究	付利波	苏帆	陈华等 (340)
红壤坡耕地花生不同耕种模式截流保肥效果研究	邱才飞	钱银飞	邵彩虹等 (346)
化肥控失技术控制湖泊面源污染应用效果研究	吴林	邱冠男	余立祥等 (351)
环洞庭湖双季稻区农药减量使用效果研究	刘雪源	彭孟军	李忠良等 (356)
秸秆覆盖与平衡施肥对巢湖流域农田氮素流失的影响研究	王静	郭熙盛	王允青等 (365)
康乃馨三个品种氮、磷减施技术研究初探	付利波	苏帆	尹梅等 (371)
控释尿素在丹江口库区小麦和水稻的施用效果研究	刘毅	陶勇	万开元等 (379)
山地“鸡茶共生”高效生态农业模式研究与示范	董文忠	戴正华	李涛等 (385)
生态沟渠及其拦截面源污染物的探讨	胡宏祥	严平	黄界颖等 (389)
施用土壤改良剂对磷素流失的影响研究	姬红利	颜蓉	李运东等 (395)
蔬菜定植肥在春甘蓝上应用效果	何传龙	马友华	朱宏斌等 (403)
蔬菜废物特性与厌氧消化适宜性分析	刘新春	刘研萍	李秀金等 (408)
双季稻田连续减氮磷的径流损失与产量效应	石丽红	纪雄辉	彭华等 (415)
双季稻田氮磷减量施肥与种植制度优化研究	段然	白玲玉	李莲芳等 (423)
微生物菌剂在秸秆沼气中的应用研究	袁长波	刘英	刘兆辉等 (430)
玉米新品种堰玉 18 环境友好型栽培技术初探	叶青松	肖能武	赵正海等 (435)
猪粪堆肥过程中调理剂配比与养分变化	李帆	朱宏斌	蒋光月等 (441)

玉米新品种堰玉 18 环境友好型栽培技术初探	叶青松	肖能武	赵正海等 (435)
猪粪堆肥过程中调理剂配比与养分变化	李 帆	朱宏斌	蒋光月等 (441)
猪粪型有机肥研制及其应用效果研究	谢桂先	荣湘民	刘 强等 (447)

第四部分 摘要

植物源叶面肥对大葱产量和养分利用的影响	张玉凤	董 亮	李 彦等 (457)
DM-15 电子灭蛾灯对水稻害虫的诱杀作用	张 舒	熊桂云	杨立军等 (458)
淹水培养与盆栽条件下有机无机氮源的转化与残留	彭佩钦	仇少君	刘 强等 (459)
蔬菜废物单相半连续式厌氧消化性能研究	毛菁菁	刘新春	李秀金等 (460)
烧碱浓度和温度对秸秆厌氧消化预处理效果的影响	刘研萍	刘新春	王小韦等 (461)
南四湖农业面源污染现状及控制措施	路 凤	刘 静	杨延钊等 (462)
等 N 条件下紫云英与化肥合理配施对水稻养分吸收及产量的影响	徐昌旭	谢志坚等	(463)

第一部分

综合论述与宏观管理

农业面源污染的现状与研究进展

刘宝存 安志装 邹国元 赵同科 马茂亭
(北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京, 100097)

摘 要: 世界上很多国家和地区的研究结果表明, 随着点源污染逐步得到有效治理和控制, 面源污染逐渐成为导致水环境恶化的主要原因, 而农业面源污染在其中占有最大份额。本文综述了国内外农业面源污染的研究现状, 揭示农业面源污染从基础到防控以及综合治理技术研究进展, 提出农业面源污染的区域性、综合性污染问题, 并针对其采取相应的政策管理、监测与评价、综合防治技术等。

关键词: 农业面源污染 现状 研究进展 防控

面源污染 (Non-point Source Pollution, NPS) 是一个区域环境问题, 是相对于点源污染而言的一种水环境污染类型, 降雨动能冲击及地表径流冲刷条件下, 大气、地面和土壤中的溶解性或固体污染物质 (如大气悬浮物、生活垃圾、土壤颗粒、农田土壤中的化肥、农药、重金属及其他有毒、有害物质等) 以广域、分散、微量的形式进入地表或地下水体, 导致受纳水体 (河流、湖泊、水库、海湾等) 水质恶化的过程。农业面源污染是由区域农业生产活动中产生的氮、磷、农药及其他有机无机污染物质如化学投入品、畜禽养殖粪便、污水等通过地表径流、排水和地下渗漏等途径从农业生态系统向水体迁移扩散的过程。由于农业活动的普遍性和广泛性, 农业面源污染具有发生的随机性、影响的滞后性、影响因素的复杂性、输送途径的广泛性等特征, 并受农业集约化强度的制约, 是环境污染的主要类型, 成为土壤、大气污染和农产品质量下降, 特别是水体水质污染的主要影响因素。随着工业化、城镇化和新农村建设进程的加快, 社会经济发展与资源环境之间的矛盾日益突出, 农业面源污染对环境的压力持续加大, 已成为影响和制约现代化建设全局的一个关键问题。为了有效防控农业面源污染, 国内外在农业面源污染基础研究、防控技术研发及管理措施探索等方面开展了大量工作。

1 国外农业面源污染的现状与研究进展

随着世界各国社会经济高速发展及对工业等点源污染的控制, 面源污染问题日益突出。当今, 面源污染已成为世界范围内土壤、地表水和地下水污染的主要来源, 农业又是主要的面源污染来源。农业面源污染影响了全世界陆地面积的 30% ~ 50%, 全世界 12 亿 hm^2 不同程度退化耕地影响因素中农业面源污染约占 12%^[1,2]。2003 年, 美国环境保护署调查结果显示, 农业面源已成为美国水体 (河流、湖泊) 污染的第一大污染源, 是造成地下水污染和湿地退化的主要因素^[3]。欧洲国家农业面源污染也成为地表水氮磷富集的最主要来源, 瑞典来自农业面源的氮占流域输入总量的 60% ~ 87%^[4~6], 荷兰农业面源污染提供总氮、总磷分别占环境污染负荷的 60% 和 40% ~ 50%, 丹麦 270 条河流 94% 氮负荷、52% 磷负荷是由面源污染带来的。稻田也成为日本 Biswa 湖最大污染

源^[7,8]。最新研究结果表明,农业面源依然是发达国家地表和地下水污染物的主要来源。

1.1 农业面源污染研究进展

发达国家开始面源污染的研究始于20世纪五六十年代。20世纪50~60年代,以美国农业局为首的研究机构就开发了一些有关农业面源污染方面的经验统计模型。同期,日本、英国等一些发达国家开始关注农业面源污染研究。农业面源污染(面源污染)主要由降雨径流、土壤侵蚀、地表溶质溶出和土壤溶质渗漏4个过程形成。20世纪70年代初期至中期,是农业面源污染模型研究的大发展时期,从简单的经验统计分析提高到复杂的机理模型建立,这些模型大都以水文模型为基础,主要应用相关数学模型模拟面源污染形成过程探讨降雨-径流及污染物迁移转化关系。20世纪70年代后期特别是80年代以来,70年代中期以后,农业面源污染模型研究的重点转向如何把已有模型应用到面源污染的管理中去,并开发新的实用模型,建立了大量的新一代的面源污染负荷估算数学模型,用于面源污染发生、迁移转化和因素影响具体过程以及面源污染控制与管理措施实施经济效益分析研究。代表性的模型主要有:用于农田单元径流、侵蚀和来自农业活动化学物质运移预测的CREAMS模型(Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems)^[9];用于研究农田非饱和区和区域水和溶质运动、传输、植物吸收和化学反应模拟,由LEACHN(氮和磷的转化和运移模拟)、LEACHP(农药运移和降解模拟)和LEACHC(无机化学离子运动的模拟,如Ca、Mg、Na、氯化物、硫酸盐、钾等)3部分组成的LEACHM模型(Leaching Estimation and Chemistry Model)^[10];用于研究农田非饱和区一维垂向土壤水氮运移及饱和区二维垂向和侧向土壤水氮运移及多年土壤水动态和氮素的转化运移的DRAINMOD-N^[11]和用于有机肥料氮转化和运移的DRAINMOD-NII模型;用于模拟农田土壤-作物-大气系统中主要物理、化学和生物过程及作物系统管理措施对土壤水、营养物质和农药运移影响效果的RZWQM模型(Root Zone Water Quality Model)^[12]和用于评价土壤侵蚀对农业生产力影响,预测田间土壤水、营养物质、农药运动和它们组合管理决策对土壤流失、水质和作物产量影响,评价化肥和有机肥料应用产生的营养物质损失,气候变化对作物产量和土壤侵蚀影响的EPIC模型(Erosion/Productivity Impact Calculator)^[13]等。这些模型在美国和加拿大等国家广为应用,用于农田尺度的面源污染模拟,防控农业生产活动对水体的污染。另外,还有欧洲国家发展形成用于降雨、截留、入渗、地表径流和侵蚀过程模拟的LISEM(Limburg Soil Erosion Model)^[14]和EUROSEM(European Soil Erosion Model)模型^[15]等。

地理信息系统(GIS)是20世纪60年代开始迅速发展起来的地理研究新技术。90年代以来,随着大型化和实用化机理模型的建立,对地观测技术的提高,GIS栅格数据分析功能及空间分析功能的增强,面源污染模型通过动态链接库(DLLs)和GIS的二次语言开发与RS、GIS的紧密集成成为发展的主流。特别是90年代后期,一些集空间信息处理、数据库技术、数学计算、可视化表达等功能于一体的超大型流域模型被开发研制出来,大大提高了分布式参数机理模型的应用性能和精度,如空间数据的输入效率、模拟输出显示和模型运行效率等。其中比较著名的有美国国家环保局开发的集成了PLOAD(污染物负荷模型)、QUAL2E(稳态水质模型)、HSPF(模拟多种常规和有毒有机污染物质的流域水文和水质模型),能够快速评价和分析大量点源和面源污染物、河流或整个流域水质状况的BASINS模型(Better Assessment Science Integrating Point and Non-point Sources)^[16]、美国自然资源保护局和农业研究局联合开发的用于研究点源和面源污染物对地表水和地下水水质潜在影响,农业区域污染负荷定量估计,不同管理措施效果评价的AnnAGNPS模型(Annualized Agricultural Non-point Source)^[17]、Arnold等开发的可以预测不同土壤、土地利用和管理措施对流域径流、泥沙负荷、农业化学物质运移等长期影响及水资源管理者评价管理措施对水质、营养物质和杀虫剂等面源污染物影响的SWAT模型(Soil and Water Assessment Tool)^[18]等。近年来,以

数据库、模型库、知识库三库集成为主体,以方案选优为主要特征的基于GIS的面源污染管理与控制空间型决策支持系统(Spatial Decision Support System, SDSS)^[19]是RS、GIS与面源污染模型结合新的发展阶段。这些模型具有强大的功能,可用于区域性的面源污染水文、侵蚀和污染物迁移过程系统综合模拟、面源污染防控管理措施对不同季节或年际间面源污染物质负荷变化及长期水质变化影响效果的评价,实现对农业面源污染的动态监测、客观评价、有效管理和控制。

不确定性是指客观事物联系和发展的过程中无序的、或然的、模糊的、近似的属性^[20]。受面源污染本身发生机制所固有的不确定性以及分析手段、方法及工具的影响,模型模拟成为面源污染不确定性分析的一个重要部分。面源污染管理控制措施的效果以及面源污染模型研究也具有不确定性。因此,面源污染不确定性的定量分析也主要集中在模型的不确定性和参数的不确定性。对面源模型不确定性分析分为两类:参数敏感性分析和概率分析。Morris筛选法及其修正方法是参数敏感性分析较为常用的方法,常用的概率分析法包括蒙特卡罗方法、拉丁超立方抽样法、响应曲面法等,其中蒙特卡罗法最为常用。近年来,基于水文模型参数及水文预报的不确定性问题的研究在国际上得到了广泛和深入的研究^[21~25]。

1.2 农业面源污染治理技术

许多国家都积极采取污染物源头控制技术治理农业面源污染,源头污染控制的生态管理技术包括生态农业技术、土地利用技术和废弃物循环处理技术。首要措施是减少化肥和农药等农用品的投入,如欧盟通过市场调节和农村发展计划两个方面来控制肥料和农药的施用,日本在治理环琵琶湖周边农业面源污染时,实行了严于日本全国的污染物排放标准和环境影响评价标准,在畜牧业、水产业、农业施肥及田间管理等方面都制定了严格的标准。欧美发达国家从20世纪末开始发展生态友好型农业技术,鼓励农民降低农用化学品投入量,收到了显著成效。同时,美国、欧盟、加拿大、荷兰、日本等国家通过立法对施用有机肥进行了限制,取得了重要突破,通过采取减氮等配套措施使氮肥利用率达到60%,远高于我国。为了有效防控地下水硝酸盐污染,英国对全国硝酸盐脆弱性进行了分区,在脆弱性区域制定了严格的禁止施肥封闭期。

在控制农药使用量方面,欧盟通过两个方面控制农药污染:一方面通过综合评价进行产品授权,生产高效、低毒的杀虫剂产品;另一方面,通过培训传授推广操作措施,并通过检查证书与技术,促进农场主使用合适的喷洒器具,提高农药的靶标率。同时,还建立了欧盟-成员国的双重评价体系,来减少农药过量造成的污染。

欧洲、美国和日本等发达国家高度重视养殖粪便污水源头控制资源化利用技术。日本和我国台湾地区对畜禽场污水采取生物膜反应器深度处理技术,使处理废水达到回用标准,对形成标准工艺开展了大面积的推广。在农业废水再利用领域,以色列全国100%的生活污水和72%的城市污水得到回用,其中2/3用于回灌农田;美国也制定了污水处理利用标准和比较完善的技术指南,处理后的污水绝大部分农用,全国90%的州建成污水回用农业工程。

在污染过程控制方面,1972年美国在联邦水污染控制法(FWPC)中首次明确提出控制面源污染,倡导以土地利用方式合理化为基础的水环境保护面源污染防控“最佳管理措施(BMPs)”。生态工程技术成为国际上控制面源污染的重要技术途径,可分为源头污染控制技术和径流污染控制技术。前者主要有生态农业和生态施肥技术、水土保持技术等,后者主要有人工水塘、植被缓冲带、湿地系统等。其中,人工水塘和人工湿地被认为是控制面源污染非常有效的方法,可以有效地减缓农田地表和地下径流带来的面源污染。1991—1993年,澳大利亚新南威尔士州发生大面积的水体富营养化现象(162次水华),为了有效防控农业面源污染,在流域内采用生态工程防控技术如植被保护措施、种草植树帮助滤去地表径流污染物工程、营养物污染管理规划措施、确定水体营养物

的环境负荷和减少营养物排放量方案、建立流域污染控制示范工程等,取得了良好的效果。

末端治理的典型应用是障碍土壤的修复,重金属与农药等有机污染物是环境污染的主要类型。土壤修复技术的国际发展趋势是综合化(如化学添加剂和植物修复相结合)、原位自然化(即利用和强化土壤本身的固定和净化能力)和利用转基因生物工程技术。污染生态化学修复技术是近年来提出的一种新的修复技术,即采用污染生态化学的原理对污染土壤进行修复,使之恢复健康并达到良性发展的目的,是化学修复、植物修复和微生物修复技术的综合。在化学修复技术方面,通过农业措施如施肥(如磷肥、钙肥等)产生的竞争作用或沉淀作用影响污染物在土壤中的环境行为和生物有效性,达到减少作物中污染物含量的目的。微生物修复方面,国外对农药的微生物降解进行了很多研究,近年来,伴随着基因工程和分子生物学的发展,构建高效工程菌是当前研究的热点,将高效降解农药酶的基因构建到载体上,经转化获得工程菌,以期提高降解作用的特定蛋白或酶的表达水平和降解活性;利用菌根菌降解农药和固定重金属的研究与应用在国际上也日益受到重视。在植物修复方面,研究将有阻控重金属作用和富集重金属作用的作物品种联合种植,通过物种间间作、套作、轮作等农业种植方式,达到降低作物中重金属含量的目的。总体来看,建立重金属和农药污染农田的化学-生物联合修复技术体系,成为污染土壤综合修复的重要有效途径。

2 我国农业面源污染的现状与研究进展

随着我国经济的发展,中国水体污染问题日趋严重,20世纪70年代以后各大湖泊及重要水域水质恶化,特别是“三湖”、“三河”,这些区域点源与面源相互交织,水质污染十分严重,导致蓝藻等水质恶化现象频繁发生。因此,我国面源污染负荷研究也较早地在“三湖”、“三河”国家重点控制流域和地区开展。近年来,随着对工业等点源污染的控制,面源特别是农业面源已成为我国南北方很多湖库水源地的主要污染源,如北京密云水库、天津于桥水库、上海淀山湖、无锡太湖、安徽巢湖、云南滇池和洱海、山东南四湖等水源地面源负荷占总负荷的50%~80%。重要湖泊水质日趋恶化。2009年1月对长江、黄河、珠江、松花江、淮河、海河和辽河七大水系183条河流376个断面和太湖、滇池、巢湖等28个(座)重点湖库264个点位(断面)的水质监测结果表明^[26]:I~Ⅲ类水质断面占54%,Ⅳ、Ⅴ类占25%,劣Ⅴ类占21%;主要污染指标为氨氮、高锰酸盐指数和五日生化需氧量。水质劣于Ⅲ类的湖库数量占调查湖库总数的71.4%,其中劣Ⅴ类为32.1%,Ⅴ类为14.3%,Ⅳ类为25.0%;主要污染物指标是总氮、总磷和高锰酸盐指数。许多科研工作者对全国重点地表水系和湖库污染现状调查和研究结果表明,农业面源污染都成为这些水系的主要污染物来源,因素包括水土流失、农田(施用的化肥农药)、畜禽养殖粪便、水产养殖等。水土流失是面源污染物的载体和水体污染的主要途径,污染物流失量随着水土流失量的加大而加大,径流量成为影响农业面源污染物流失量大小的关键因素^[27]。密云水库是现阶段北京唯一的地表饮用水源地,密云水库流域来自于面源污染的负荷占水库污染总负荷百分比分别为:COD约70%、BOD约70%、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 约90%、TN约70%、TP约90%等^[28]。农田是黄河流域重要的氮、磷面源污染来源,分别占50%和64%。地势平坦太湖圩区典型村镇江苏宜兴市大浦镇农村面源氮排放负荷定量估算结果表明^[29],农田、生活污水、养殖、垃圾和非农田泥沙流失5种排放源中,农田、生活污水和养殖等农业优先控制因子负荷贡献分别为39.0%、29.5%和23.8%。面源污染物对水源污染负荷贡献份额受到景观类型的不同而有很大的差异。成熟林地、半成熟林地、灌木林地和草地等景观类型具有一定截留农业面源污染物“汇”的作用;农田、果园等景观类型具有较高面源污染流失风险的“源”景观^[30]。在以单一土地利用类型为主控制的区域中,林地和草地控制小流域的地表水水质明显优于耕地。不同土地利用方式下面源地表径流氮、磷养分流失量有很大