

doi: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20210104

· 绿色发展 ·

# 农业面源污染研究方法与控制技术研究进展\*

王一格, 王海燕\*, 郑永林, 孙向阳

(北京林业大学林学院, 北京 100083)

**摘要** [目的] 农业面源污染已成为全球亟待解决的环境问题。针对目前研究争论和探讨的热点, 文章对国内外农业面源污染的研究方法及进展、评价体系及控制技术进行了分析和提炼, 以期为我国绿色农业发展中的面源污染防治提供依据。[方法] 文章通过查询知网和Web of Science, 对国内外农业面源污染研究方法和防控技术进行了分析总结。[结果] 耕地、果园面积大幅度增长, 农村地区畜禽养殖业的迅速发展和城镇生活排污是造成农业面源污染的主要因素。目前国内外的研究热点主要集中在模型模拟技术的适用与拓展、最佳管理模式和应用GIS技术进行面源污染评价。随着面源污染研究的不断发展, 植物篱、地埂和生态沟渠等污染控制技术常用于农田面源污染防治; 景观绿地建设、旋流分离器和生态湿地系统等则更广泛地应用于大规模治理。新型控制技术的提出使农业面源污染防治技术更加现代化、高效化。[结论] 未来研究中可结合“4R”防控理论, 基于长期定点监测的数据建立模型、利用GIS技术进行流域面源污染模拟以了解区域内的面源污染情况, 识别当地面源污染源头区域, 提供因地制宜的面源污染治理方案。

**关键词** 农业 农业面源污染 面源污染物 防控模式 污染防治

**中图分类号**: S143.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9121[2021]01-0025-09

## 0 引言

随着我国经济的发展, 点源污染已得到充分有效的治理, 而面源污染治理却一直进展缓慢。面源污染, 即非点源污染(non-point source pollution), 是相对于排污点集中、排污途径明确的点源污染而言的区域环境问题。面源污染具有分布随机、污染源复杂、对土壤肥力破坏性大、对水源造成污染后防治较难等特点<sup>[1]</sup>, 其中农业面源污染是其最主要的成分, 其污染物具有广域分散性、相对微量且运输途径的多样无序性, 使得农业面源污染成为环境污染治理的一大难点, 严重影响到我国的水体环境, 制约了我国农业的绿色发展。在绝大多数污染严重的地区, 农业面源污染主要由耕地、果园面积的大幅度增长, 畜禽养殖业的迅速发展和城镇建设快速扩展造成<sup>[2-5]</sup>。随着21世纪以来农业的迅速发展, 我国主要湖泊、河流水源污染加重, 大部分面临着富营养化的危险<sup>[6-9]</sup>。国外也同样面临着因化肥大量投入和现代农业强度增长所导致的农业面源污染问题<sup>[10-11]</sup>。

## 1 农业面源污染研究方法及进展

### 1.1 农业面源污染研究方法

一般而言, 面源污染研究普遍基于长期定点观测或小区试验进行数据讨论, 但结论往往具有一定的区域性与不确定性。相比而言, 建立模型将使面源污染的区域研究更为有效直接, 并且可以进行时空上的模拟, 通过小流域样本推测整个流域的污染状况, 估算面源污染负荷等信息, 更加客观科学地得出面源污染的影响情况和治理方案。国内外对农业面源污染研究方法多倾向于3种。

收稿日期: 2020-02-12

作者简介: 王一格(1996—), 女, 辽宁沈阳人, 硕士生。研究方向: 面源污染防治

※通讯作者: 王海燕(1972—), 女, 湖北浠水人, 博士、副教授。研究方向: 土壤环境化学。Email: haiyanwang72@aliyun.com

\*资助项目: 国家十三五重点研发计划课题“三峡库区面源污染景观生态防治技术集成与示范”(2017YFC0505306)

(1) 模型模拟面源污染。目前应用较多且较为成熟的模型有SWAT (Soil and Water Assessment Tool)、AGNPS (Agricultural Non-point Source) 和 HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran)<sup>[12]</sup>, 应用物理过程模型进行定量化分析。其中, SWAT由美国农业部基于SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) 开发得到, 是目前应用最为广泛的流域污染负荷计算模型, 通过将研究区的气候、水分、作物生长、肥料施用量、农药施用量和土地利用类型等数据导入模型进行分析, 具有模拟精确、应用性强的优点。在SWAT模型中, 流域水文模拟分为陆相水文循环和水相水文循环两个阶段, 模拟污染物迁移和水土流失。

(2) BMPs框架体系。BMPs (Best Management Practices) 指在污染物进入水体前, 通过各种经济高效、工艺简单、满足生态环境要求、适应污染特性的措施使其得到有效的控制<sup>[13]</sup>。孙平等<sup>[14]</sup>在三峡库区从源头控制、迁移途径阻截和末端治理3个BMPs出发, 提出了耕作保护方案、种植植物篱、化肥农药的合理施用、缓冲带、植被过滤带、人工湿地、前置库和畜禽养殖污染防控八个管理措施来防控面源污染。

(3) 基于GIS进行面源污染评价。通过收集流域基础地理信息数据建立数据库, 利用GIS对农业面源污染进行空间数字分析, 探讨其地理空间分布格局。基于GIS对农业面源污染进行分析, 可直观地反映各地农业面源污染的时空动态变化情况<sup>[15]</sup>; 利用GIS空间叠加分析法, 可从空间分布格局的角度对典型区域进行深入的比较分析<sup>[16]</sup>。

## 1.2 国内外面源污染研究进展

在20世纪80年代前, 大量投入农业生产的农药化肥引发了日益严重的农业面源污染问题<sup>[17]</sup>。自20世纪80年代末以来, 发达国家对农业面源污染的研究得到重视, 丰富的经验积累使人们对面源污染的认识愈发明确(表1)。1989年开始应用计算机模型对农业面源污染进行评估; 1992年出版的《Standard Methods of Examination of Water and Wastewater》为后来农业面源污染研究提供了重要参考<sup>[52]</sup>; 1994年GIS技术与计算机建模相结合的方法被应用于研究农业面源污染; 同时农业径流中的磷流失的提出, 将解决农业面源污染从概念研究转变为污染源产生分析与污染源治理; 随后逐渐向污染源的产生原因与治理方案演变。在2000年水文调控研究被应用于面源污染特征分析; 5年后开始普及应用数学模型模拟农业面源污染区以提出治理方法, 意味着数学建模已被广泛应用于面源污染研究中。2007年起至今SWAT模型与BMPs技术盛行, 大量学者对其在面源污染上的应用进行了归纳、总结与应用。

近年来我国学者对于面源污染防控的研究越来越精进(表2)。Ongley等<sup>[64]</sup>于2010年研究发现国外面

表1 国外对面源污染的研究进展

研究方法	研究区	研究方向	文献来源
AGNPS模型	明尼苏达州	流域径流水质的测定	18
	金士顿	河岸缓冲系统中对NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 控制去除	19
		编写《Standard Methods of Examination of Water and Wastewater》	20
GIS技术与AGNPS模型	爱荷华州南部	评估泥沙污染减少方案的有效性	21
	美洲	建立经济和无害环境的磷管理制度, 分析产生源	22
	美洲	美国农业面源污染主要来自农田过量施肥和禽畜养殖过量	23
水文调控模型	宾夕法尼亚	对农业径流磷流失进行空间变化评价	24
连通性模拟技术		预测农田向地表水扩散养分损失风险的空间分布	25
SWAT模型		归纳SWAT模型在农业面源污染研究中的应用	26
SWAT模型	坎农斯维尔	模拟磷在水中的淋失	27
BMPs技术		对最佳管理措施进行总结与归纳	28
	美洲	研究磷的物理、生物化学循环	29
	欧洲和北美洲	评价硝酸盐时间滞后的影响	30
马尔科夫链蒙特卡罗方法	北卡罗来纳州	开发的贝叶斯推理分析方法将帮助决策者和水管管理者确定潜在的污染源区域	31

源污染研究方法对我国农业面源污染的现状不适用,从而提出了一套适合我国的面源污染评价体系;基于前者提出的体系,我国学者不断提出适合我国面源污染情况的理论研究,并不断有学者基于SWAT模型、模糊二层多目标规划模型(EC-IFBLMOP模型)、BMPs技术等,分析我国面源污染产生的根本原因并进行控制预防方案模拟。

表 2 国内对面源污染的研究进展

研究方法	研究区	研究方向	文献来源
模型建立		提出适合中国的面源污染评价体系	32
		构造适合中国面源污染情况的模型	33
3R理论		提出基于中国经济发展模式的农业面源污染控制性理论	8
4R模型		完善3R理论	34-38
SWAT模型		模拟对减少中国农业面源污染的最有效的管理实践方案	39
最小累计阻力模型	三峡库区	使用最小累计阻力模型(Minimal Cumulative Resistance, MCR)进行库区耕地面源污染源-汇风险格局识别	40
SBM-DEA模型	三峡库区	采用非径向、非角度的SBM-DEA模型,结合方向性距离函数,考察了2003-2015年重庆三峡库区农业生态环境效率,引入影子价格测算了各区(县)农业面源污染的边际减排成本	41
EC-IFBLMOP模型	密云水库	分析小流域农业面源污染管理的最佳管理模式	42
SWAT模型		运用SWAT模型进行土壤点源污染模拟分析	43
GIS系统	九龙江流域	分析景观格局变化与面源污染负荷之间的相关性	44
模型建立	江苏	探讨了农业土地使用权(ALURs)转让对农业面源污染的影响	45
泥沙输移分布模型		构建了集传统的修正通用土壤流失方程(RUSLE)、泥沙输移比、土壤磷含量等因子为一体的泥沙输移分布模型SEDD(Sediment Delivery Distributed Model)	46
DPeRS面源污染估算模型	海河流域	以MODIS遥感数据为驱动,采用以遥感像元为基本模拟单元的DPeRS(Diffuse Pollution Estimation with Remote Sensing)面源污染负荷估算模型	47
BMPs		从面源污染关键源区识别、BMPs削减效率评估以及BMPs多目标协同优化模拟3个方面对面源污染BMPs多目标协同进行优化配置	48
生态工程综合治理系统	开慧河流域	建立以生态湿地为主的小流域面源污染生态工程综合治理系统,重点探讨其对水体氮磷污染物的去除效果	49
面源污染估算模型	郑州	建立了田间农业面源污染负荷的估算模型,计算不同灌溉量和施肥量的农业面源污染负荷	50
SWAT模型		基于改进的SWAT模型,模拟了不同降雨条件下农田氮磷源负荷的迁移规律	51
GIS系统	长江流域	利用改进后的输出系数和养分流失经验模型,基于GIS对长江上游面源污染进行时空模拟	52

## 2 农业面源污染防控

### 2.1 农业面源污染源头防控技术

绿色农业的发展是农业现代化的必经之路,而农业面源污染是绿色农业的主要障碍。只有从源头控制入手,并且根据面源污染的不同类型进行分类治理,才能有效控制水污染<sup>[53]</sup>。国内对于面源污染物的源头控制包括以下几方面。

(1) 农业污染源管理。指减少化肥施用、合理调节肥料中的养分比、更换新型肥料等,从而减少土壤养分积累量、提高养分利用的效率,减少养分地表径流流失。

(2) 畜禽养殖进行养管理。控制饲料中的营养成分,从而对畜禽粪便造成的污染进行削减。有研究提出,酶制剂在加入畜禽饲料后,可以提高磷消化吸收的效率,如植酸酶会降低动物对矿质元素的养分需求量<sup>[54]</sup>;在化学诱变的玉米突变体中,减少玉米籽粒中植酸磷的含量,从而提高磷的利用效率,有效降低畜禽粪肥中磷的含量<sup>[18]</sup>。

面源污染的定期监测包括在各流域上、下游设置有代表性的监测点,进行多年多季度的水质监测,分析数据以确定进一步的面源污染改善方向。

国外农田面源污染主要通过广泛推行农田的最佳养分管理 (Best Nutrient Management Practice, BNMP), 调查流域保护区域农田施肥量、施肥种类、施肥时期、施肥方式等, 提出科学管理措施与规定, 控制面源污染源头。一些欧洲国家通过制定畜禽场农田最低配置, 使畜禽场产生粪便必须与周边可蓄纳畜禽粪便的农田面积相匹配, 并且对畜禽养殖场场污水处理池容量、密封性等方面进行严格规定以控制面源污染<sup>[1]</sup>。

总体来说, 国际范围内仍然缺少广泛通用的面源污染控制技术, 而原则上都更加强调整面源污染的源头控制和因地制宜进行污染治理。

## 2.2 农业面源污染传统与新型改进控制技术

通过多年研究, 杨林章等<sup>[6]</sup>系统提出了“源头减量—过程阻断—养分再利用—水体修复”的“4R”技术体系 (表3)。其中从“过程阻断”体系出发的拦截控制技术 (如, 植草沟、植被缓冲带和植物篱等) 在农田面源污染控制方面最为普及, 具有成本低、效率高、规模小和易操作等特点。通过种植适合当地生长的植物篱作物进行田间径流的物理拦截, 达到削减泥沙与肥料中氮磷等污染物的流失作用, 是最为简单、最自然的控制技术。以上技术通过物理、化学、生物工程对污染物进行拦截或净化, 以减少水体的污染量。面源污染物的末端控制, 主要通过土壤、人工介质、植物以及微生物的共同作用, 对污水进行收集处理后排放, 是面源污染控制的最后关卡。水生高等植物在处理农田面源污染物时有较强的吸附净化能力, 因此, 通常在流域主要出口建立人工湿地系统。由于建设人工湿地与景观绿地规模大、成本较高, 常被应用于大规模的面源污染治理工程。

为了能够运用现代科技进行高效、大量的农业面源污染控制, 国内外学者以传统污染控制技术为基础进行改进, 产生了更先进绿色的新型面源污染控制技术。以人工湿地为基础技术衍生了新型曝气氧化沟、人工湿地—稳定塘等技术, 具有人工湿地优点的同时能够弥补不足, 对污染物具有更好的去除效果, 并且具有较强的抗负荷能力, 能适应一定的水力和污染负荷变化, 达到稳定过滤出水。电解化物理滤池、重力沉沙过滤池等工艺能够进行泥沙的过滤, 有效沉降径流泥沙, 并且比普通过滤池更不易堵塞。旋流分离器则作为对暴雨产生的降雨径流进行控制, 有效地减轻雨水污染。

目前我国农业面源污染的治理上仍处于少数农户自行选择面源污染控制技术; 而现阶段能够大规模、高效率、低成本的面源污染控制技术少之又少<sup>[75]</sup>。高额的畜禽养殖场污水处理费用造成农户无力承担, 导致仍有大量畜禽粪便未经处理进行排放。迅速增长的农耕田化肥滥用滥施严重<sup>[7, 76-77]</sup>。近年来, 随着地方政府提出贯彻的“河长”“湖长”等政策, 各个流域对污染治理越来越重视, 但是仍然没有一套体系进行科学的面源污染控制。针对我国面源污染情况, 首先需要制订一套完整的农业面源污染评价制度, 对农业面源污染进行等级评定划分; 其次通过建立模型等技术对不同等级的面源污染提出相应的治理方案; 然后进行因地制宜的环境勘察, 确定当地面源污染等级, 进行技术选择。另一方面可通过全面落实农户种植适合当地水土环境的植物篱或梯田地埂, 进行“以小制大”的管理方式, 从而达到高效、低耗的大规模治理。

而国外通过养分最优管理、农业管理模式变更有机综合化、水土防护带建设等措施进行面源污染防治控制。主要优点体现在通过低费用、高效率的措施有效减少农田和附近水域的氮磷地表径流和养分淋溶, 提高肥料利用率, 减少过量营养造成的污染<sup>[7]</sup>。

## 3 问题与展望

我国农业秉持绿色农业快速发展, 但由于农业造成的水源污染和流域富营养化的程度远超过欧美发达国家, 治理难度相对较大。农业面源污染的加重可以视作4个方面: 传统农耕方式被现代化学技术替代; 河流附近农业经营方式的转变; 小型农业的聚集性高速发展; 农业产污排污制度环境的缺漏。而面源污染的治理以及治理方法的选择涉及到农民收入和文化水平、农村基础设施以及国家农业政策等问题。

表 3 农业面源污染控制技术

技术体系	技术名称	治理方向	对污染物过滤情况	特点	来源
过程拦截技术	植草沟	田间地表降雨径流	对 SS(suspended solids)、COD(chemical oxygen demand)削减率 90%;对氮、磷削减率超过 80%	低成本、高效率,对降雨造成的田间径流具有很高的污染削减作用	55~56
	植物篱	拦截径流和泥沙、过滤氮磷及污染物	对泥沙阻拦率在 60%~80%;禾本科植物对泥沙、氮磷等污染物的拦截效果最为明显,其次是草本科	能同时有效防治水土流失与面源污染,并且易实施、成本低	57~58
	渗滤沟	农业污水的缓冲过滤	稳定的渗滤沟系统的总氮去除率达 80%以上,总磷去除率达 90%以上;对渗滤沟进行生物改进后更可提高总氮去除率	高效率、低成本、易建设	59~60
	植被缓冲带	田间径流中的农业面源污染物	悬浮物及磷素相比于氮更加容易被缓冲带拦截;植被缓冲带在对上方来水流量较低时拦截效果最优	低成本、易建设,对泥沙、氮、磷、农药、微量元素等污染物有良好的拦截效果	61~65
末端治理技术	人工湿地	农业污水的修复	对水体总氮、总磷去除率分别为 64.3%与 69.7%;对畜禽养殖污水去除率均在 80%以上	低成本、易管理	66
	景观绿地	农业污水的回收再利用	利用植物根系的吸附、拦截、吸收和降解去除污染物	绿色环保,但处理周期较长,效率较低	67
	物理过滤池	对河流泥沙过滤沉降	可以清除 70%以上的泥沙,对 COD、氮、磷的过滤效率较高	占地面积小、对泥沙沉降效率高、高耗资	68~69
新型改进技术	氧化沟	农业污水与生活污水处理	对氮、磷削减率超过 83%	流程短、效率高	70
	人工湿地-稳定塘	农业污水的回收再利用	对氮、磷去除率能达到 70%以上	具有较好的抗污染负荷能力、性能相对稳定	71
	重力泥沙过滤池	农业径流泥沙的过滤	在沉淀池长 25 m 的下泥沙总处理效率可达 50%以上	投资较少、效率高	72
	旋流分离器	农田雨水径流的净化	进水压力为 0.04 Mpa 时,效率最高可达 80%;对 SS 的去除率可达 75%	有效控制暴雨污染、快速去除部分 COD、氮和磷,高耗资	73~74

如何治理我国的面源污染问题,减轻各大流域水源污染富营养严重的现象,仍是目前研究争论和探讨的热点,未来研究应从以下几点着手。

(1) 制定面源污染评价分级、控制措施和技术标准。构建科学精准的面源污染评价体系,依照不同污染源、污染程度进行面源污染等级评定;列出不同污染源和污染物可实施的面源污染控制技术清单;规定面源污染控制技术的标准执行流程。

(2) 大规模面源污染控制的工程技术选择。未来对农业面源污染控制技术应进行甄别,对 1 项治理计划进行技术选择时,应秉持着绿色农业的起点思路,同时考虑农业环境的承载能力选择适合我国面源污染治理的高效、低耗且易建设的工程技术。

(3) 实行因地制宜的面源污染控制策略。进行长期定点监测,了解流域内面源污染的时空分布特征后,建立模型结合 GIS 技术进行流域面源污染模拟,识别当地面源污染源头区域,结合“4R”技术治理,提出因地制宜的治理技术方案,以改善当地面源污染现状。

(4) 提高资源利用效率。通过进行肥料改革,应用新型农耕技术,实施化肥零增长、畜禽废弃物的无害化处理、农业废水的合理分解利用,减轻由于效率低下、资源环境损耗所造成的绿色农业发展缓慢问题。

(5) 地下水污染对面源污染的影响。应注重研究地下水污染与面源污染的关系,尤其在农田渗透导致的氮磷淋失对地下水的影响。

(6) 提高公众意识。目前我国对农业面源污染知识的普及度不高。

面源污染防治仍是21世纪中国农业绿色发展的难题,需要吸收国外领先技术和治理经验,提出更适合我国各地区的政策,加快建设以绿色农业发展为导向的农业污染治理机制,保证我国经济的可持续发展。

## 参考文献

- [1] 李秀芬,朱金兆,顾晓君,等.农业面源污染现状与防治进展.中国人口·资源与环境,2010,20(4):81-84.
- [2] He P, Wang J Y. The current, difficulty and challenge in studies of control and management of non-point source pollution. *Agro-environment protection*, 1999, 18(5): 234-237.
- [3] Michalak A M, Anderson E J, Beletsky D, et al. Record-setting algal bloom in Lake Erie caused by agricultural and meteorological trends consistent with expected future conditions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(16): 6448-6452.
- [4] Vighi M, Chiaudani G. Eutrophication in Europe, the role of agricultural activities. In: Hodgson E. *Reviews of Environmental Toxicology*. Amsterdam: Elsevier, 1987: 213-257.
- [5] 丘雯文,钟涨宝,李兆亮,等.中国农业面源污染排放格局的时空特征.中国农业资源与区划,2019,40(1):26-34.
- [6] 吴永红,胡正义,杨林章.农业面源污染控制工程的“减源-拦截-修复”(3R)理论与实践.农业工程学报,2011,27(5):1-6.
- [7] 刘光德,李其林,黄昀.三峡库区面源污染现状与对策研究.长江流域资源与环境,2003(5):462-466.
- [8] 郑田甜,赵祖军,赵筱青,等.云南星云湖水水质变化及其人文因素驱动力分析.湖泊科学,2018,30(1):79-90.
- [9] 谢经朝,赵秀兰,何丙辉,等.汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析.环境科学,2019,40(4):1760-1769.
- [10] Borgvang S A, Tjomsland T. Nutrient supply to the Norwegian coastal areas(1999) calculated by the model TEOTIL. NIVA-report, 2001: nr.4343-2001.
- [11] 张维理,冀宏杰, Kolbe H., 等.中国农业面源污染形势估计及控制对策II.欧美国家农业面源污染状况及控制.中国农业科学,2004(7):1018-1025.
- [12] 袁一斌,毛萍,管晓辉,等.农业非点源污染SWAT模型研究态势及研究前沿知识图谱.应用与环境生物学报,2018,24(5):1050-1057.
- [13] 仓恒瑾,许炼峰,李志安,等.农业非点源污染控制中的最佳管理措施及其发展趋势.生态科学,2005(2):173-177.
- [14] 孙平,周源伟,华新,等.三峡库区面源污染防治BMPs框架体系研究.水生态学杂志,2017,38(1):54-60.
- [15] 叶延琼,章家恩,李逸勉,等.基于GIS的广东省农业面源污染的时空分异研究.农业环境科学学报,2013,32(2):369-377.
- [16] 温兆飞,吴胜军,陈吉龙,等.三峡库区农田面源污染典型区域制图及其研究现状评价.长江流域资源与环境,2014,23(12):1684-1692.
- [17] 曹文杰,赵瑞莹.国际农业面源污染研究演进与前沿——基于CiteSpace的量化分析.干旱区资源与环境,2019,33(7):1-9.
- [18] Young R A, Onstad C A, Bosch D, et al. AGNPS: A nonpoint source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *Journal of Soil & Water Conservation*, 1989, 44(2): 168-173.
- [19] Ambus P, Lowrance R. Comparison of denitrification in two riparian soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55(47): 553-560.
- [20] Greenberg A, Clesceri L, Eaton A. *Standard methods of examination of water and waste water(18th Ed)*. New York: American Public Health Association, 1992.
- [21] Tim US, Jolly R. Evaluating agricultural non-point source pollution using integrated geographic information systems and hydrologic/water quality model. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23(1): 25-35.
- [22] Carpenter S R, Caraco N F, Correll DL, et al. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 1998, 8(3): 559-568.
- [23] Gburek W J, Sharpley A N, Heathwaite L, et al. Phosphorus management at the watershed scale: A modification of the phosphorus index. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1): 130-144.
- [24] Heathwaite A L, Quinn P F, Hewett C. Modeling and managing critical source areas of diffuse pollution from agricultural land using flow connectivity simulation. *Journal of Hydrology*, 2005, 304(1): 446-461.
- [25] Gassman P W, Reyes M R, Green C H, et al. The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(4): 1211-1250.
- [26] Moriasi D N, Arnold J G, Liew M W V, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 885-900.
- [27] James E, Kleinman P, Veith T, et al. Phosphorus contributions from pastured dairy cattle to streams of the Cannonsville Watershed, New York. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2007, 62(1): 40-47.

- [28] Meals D W, Dressing S A, Davenport T E. Lag time in water quality response to best management practices: A review. *Journal of Environment Quality*, 2010, 39(1): 85.
- [29] Sharpley A, Jarvie H P, Buda A, et al. Phosphorus legacy: Overcoming the effects of past management practices to mitigate future water quality impairment. *Journal of Environment Quality*, 2013, 42(5): 1308.
- [30] Vero S E, Basu N B, Van MK, et al. The environmental status and implications of the nitrate time lag in Europe and North America. *Hydrogeology Journal*, 2018, 26(1): 7-22.
- [31] Ayub R, Messier K P, Serre M L, et al. Non-point source evaluation of groundwater nitrate contamination from agriculture under geologic uncertainty. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2019: 1-18.
- [32] Ongley E D, Zhang X, Yu T. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China. *Environmental Pollution*, 2009, 158(5): 1159.
- [33] Shen Z, Liao Q, Hong Q, et al. An overview of research on agricultural non-point source pollution modelling in China. *Separation and Purification Technology*, 2011, 84(2): 101-111.
- [34] 杨林章, 施卫明, 薛利红, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——总体思路与“4R”治理技术. *农业环境科学学报*, 2013, 32(1): 1-8.
- [35] 薛利红, 杨林章, 施卫明, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——源头减量技术. *农业环境科学学报*, 2013, 32(5): 881-888.
- [36] 施卫明, 薛利红, 王建国, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——生态拦截技术. *农业环境科学学报*, 2013, 32(9): 1697-1704.
- [37] 常志州, 黄红英, 靳红梅, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——氮磷养分循环利用技术. *农业环境科学学报*, 2013, 32(10): 1901-1907.
- [38] 刘福兴, 宋祥甫, 邹国燕, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——水环境生态修复技术. *农业环境科学学报*, 2013, 32(11): 2105-2111.
- [39] Liu R, Zhang P, Wang X, et al. Cost-effectiveness and cost-benefit analysis of BMPs in controlling agricultural nonpoint source pollution in China based on the SWAT model. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186(12): 9011-9022.
- [40] 王金亮, 谢德体, 邵景安, 等. 基于最小累积阻力模型的三峡库区耕地面源污染源-汇风险识别. *农业工程学报*, 2016, 32(16): 206-215.
- [41] 李南浩, 肖新成, 曹国勇, 等. 面源污染下三峡库区农业生态环境效率及影子价格测算. *农业工程学报*, 2017, 33(11): 203-210.
- [42] Cai Y, Rong Q, Yang Z, et al. An export coefficient based inexact fuzzy bi-level multi-objective programming model for the management of agricultural nonpoint source pollution under uncertainty. *Journal of Hydrology*, 2018, 557: 713-725.
- [43] Wang M, Cheng W, Yu B, et al. Temporal-spatial distribution of non-point source pollution in a drinking water source reservoir watershed based on SWAT. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2015, 368: 448-453.
- [44] Zhang X, Zhou L, Liu Y. Modeling land use changes and their impacts on non-point source pollution in a southeast China coastal watershed. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(8): 1593.
- [45] Lu H, Xie H. Impact of changes in labor resources and transfers of land use rights on agricultural non-point source pollution in Jiangsu Province, China. *Journal of Environmental Management*, 2018, 207: 134-140.
- [46] 王赵飞, 林晨, 许金朵, 等. 巢湖流域非点源颗粒态磷负荷的空间差异及关键影响因子研究. *农业环境科学学报*, 2019, 38(3): 659-670.
- [47] 冯爱萍, 吴传庆, 王雪蕾, 等. 海河流域氮磷面源污染空间特征遥感解析. *中国环境科学*, 2019, 39(7): 2999-3008.
- [48] 耿润哲, 梁璇静, 殷培红, 等. 面源污染最佳管理措施多目标协同优化配置研究进展. *生态学报*, 2019, 39(8): 2667-2675.
- [49] 蒋倩文, 刘锋, 彭英湘, 等. 生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应. *环境科学*, 2019, 40(5): 2194-2201.
- [50] Wang H, He P, Shen C, et al. Effect of irrigation amount and fertilization on agriculture non-point source pollution in the paddy field. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(10): 10363-10373.
- [51] Chen Y. Numerical simulation of the change law of agricultural non-point source pollution based on improved SWAT model. *Revista de la Facultad de Agronomia de la Universidad del Zulia*, 2019, 36(6): 1965-1975.
- [52] Ding X, Liu L. Long-term effects of anthropogenic factors on nonpoint source pollution in the upper reaches of the Yangtze River. *Sustainability*, 2019, 11(8): 2246.
- [53] 全为民, 严力蛟. 农业面源污染对水体富营养化的影响及其防治措施. *生态学报*, 2002(3): 291-299.
- [54] Ertl D S, Young K A, Raboy V. Plant genetic approaches to phosphorus management in agricultural production. *Journal of Environment Quality*, 1998, 27(1): 299-304.
- [55] 戈鑫, 杨云安, 管运涛, 等. 植草沟对苏南地区面源污染控制的案例研究. *中国给水排水*, 2018, 34(19): 134-138.
- [56] 王健, 尹炜, 叶闯, 等. 植草沟技术在面源污染控制中的研究进展. *环境科学与技术*, 2011, 34(5): 90-94.

- [57] 王曦曦,郭飞宏,张继彪,等.新型改进型毛细管渗滤沟处理生活污水.环境化学,2011,30(3):721-722.
- [58] 张雪莲,赵永志,廖洪,等.植物篱及过滤带防治水土流失与面源污染的研究进展.草业科学,2019,36(3):677-691.
- [59] 孔刚,许昭怡,王勇,等.地下土壤渗滤沟的工艺构造对氮磷去除的影响.环境科学与技术,2006(2):7-8,11,115.
- [60] 曾远,李森,叶海.渗滤沟处理屋顶散排径流的试验研究.中国给水排水,2014,30(13):119-122.
- [61] 高军,尤迎华,谈晓珊,等.植被过滤带阻控径流污染的机制及研究进展.环境科学与技术,2019,42(9):91-97.
- [62] Peak S, Gil K. Correlation analysis of factors affecting removal efficiency in vegetative filter strips. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(1): 38.
- [63] 付婧,王云琦,马超,等.植被缓冲带对农业面源污染物的削减效益研究进展.水土保持学报,2019,33(2):1-8.
- [64] 余冬立,阿力木·阿布来提,陈倩,等.不同入流条件下植被过滤带对坡面径流氮、磷的拦截效果.应用生态学报,2018,29(10):3425-3432.
- [65] 庾从蓉,段佩怡.植被过滤带的污染物去除效率研究进展.水资源保护,2018,34(2):68-74.
- [66] 朱金格,张晓姣,刘鑫,等.生态沟——湿地系统对农田排水氮磷的去除效应.农业环境科学学报,2019,38(2):405-411.
- [67] Li D, Zheng B, Chu Z, et al. Seasonal variations of performance and operation in field-scale storing multipond constructed wetlands for nonpoint source pollution mitigation in a plateau lake basin. Bioresource Technology, 2019, 280(79): 295-302.
- [68] 何建村.河水滴灌重力沉沙过滤池的设计、施工及运行管理.节水灌溉,2014(9):87-90.
- [69] 戚印鑫.河水滴灌重力沉沙过滤池对河水泥沙处理效果的试验研究.中国农村水利水电,2014(4):15-17,24.
- [70] 师晓春,马盼.纵轴曝气氧化沟在城镇污水处理中的应用.环境保护与循环经济,2017,37(11):22-25.
- [71] 李丽,王全金.人工湿地-稳定塘组合系统对污染物的去除效果.工业水处理,2016,36(7):22-25.
- [72] 刘亚丽,赵涛,戚印鑫,等.河水滴灌重力沉沙过滤池物理试验研究.人民黄河,2018,40(5):148-152.
- [73] 刘楠楠,迟杰,褚一威,等.高效旋流分离—生态砾间接触氧化联合装置处理初期雨水径流应用研究.环境污染与防治,2019,41(9):1043-1049.
- [74] 夏瑜,何绪文,徐恒,等.典型电脱盐废水预处理技术及其应用.化工环保,2020,40(1):1-6.
- [75] 韦薇,张银龙.基于“源—汇”景观调控理论的水源地面源污染控制途径——以天津市蓟县于桥水库水源地保护规划为例.中国园林,2011(2):71-77.
- [76] 李海鹏,张俊飏.中国农业面源污染的区域分异研究.中国农业资源与区划,2009,30(2):8-12.
- [77] 赵永宏,邓祥征,战金艳,等.我国农业面源污染的现状与控制技术研究.安徽农业科学,2010,38(5):2548-2552.

## ADVANCES IN RESEARCH METHODS AND CONTROL TECHNOLOGIES OF AGRICULTURAL NON-POINT SOURCE POLLUTION: A REVIEW\*

Wang Yige, Wang Haiyan<sup>\*</sup>, Zheng Yonglin, Sun Xiangyang

(College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract** Agricultural non-point source pollution refers to the environmental pollution caused by nutrients such as nitrogen and phosphorus, pesticides, and other organic or inorganic pollutants through farmland surface runoff or leakage fecal pollution. It has become a hot question in global environmental issue. This research analysed and summarized the research methods and progress, evaluation system and prevention methods of agricultural non-point source pollution worldwide. The prevention and control of agricultural non-point source pollution was still a difficult problem for China's sustainable agricultural development in the 21st century. Based on foreign advanced technology and treatment experience, we put forward some suggestions for the future study which may provide a basis for practical treatment of agricultural non-point source pollution in China to ensure the sustainable development of the Chinese economy. By searching China National Knowledge Internet and Web of Science, it summarized the research methods and prevention and control technologies of agricultural non-point source pollution at domestic and abroad. The large increase of arable land and orchards, the rapid development of livestock and poultry farming, and urban sewage discharge were the main factors causing agricultural non-point source pollution. Non-point source pollution research was generally based on long-term fixed-point observations or field experiments resulting in serious



regional conclusions and uncertainties. In contrast, model establishment would make the regional study more effective and direct by performing spatial and temporal simulation, inferring the pollution situation of the entire river basin with small watershed samples, and estimating non-point source pollution load. At present, researchers focused on the application and expansion of model simulation technology, the Best Management Practices and the application of GIS technology for non-point source pollution evaluation. Plant hedgerows, ridges and ecological ditches were generally used in the prevention and control of farmland pollution; landscape green space construction, hydraulic separators, constructed wetland systems and other control technologies were more widely applied to large-scale governance. The introduction of new technology had made agricultural non-point source pollution prevention and control technology more modern and efficient. However, there is still a lack of widely used non-point source pollution control technology in the international scope. Model simulation based on long-term fixed-point monitoring data in combination with "4R" prevention and control theory and GIS technology would contribute to identifying the source area of non-point source pollution. In principle, source control and local measures are more emphasized. Therefore, after understanding the situation of non-point source pollution in the study area and identifying the local source area, we can provide a non-point source pollution control plan adapted to local conditions. With the update of new agricultural non-point source pollution control technology, non-point source pollution control will become more comprehensive and efficient. In the future, attention should be paid to the impact of agricultural non-point source pollution especially nitrogen and phosphorus leaching caused by farmland infiltration on groundwater.

**Keywords** agriculture; agricultural non-point source pollution; non-point source pollutant; prevention mode; pollution control

---

(上接第 24 页)

农业农村经济发展不仅受农民传统观念的制约,城乡二元结构、制度不完善同样是重要因素。农业宏观经济管理能够打破长期制约农业发展的条条框框,针对问题提出可行性措施,趋利避害、合理布局、科学管理。因此实现农业可持续发展的目标,要充分发挥农业经济管理的优势。针对发展现状,农业经济管理从理论层面应发挥其强有力的支撑作用。

一是健全农村经济管理体系。要实现从传统农业向现代农业的转变,首先要转变农民的观念,提高农民的知识水平,更新农民的农业管理意识,保证他们真正参与到农村经济建设和现代农业生产中。政府应加强对农业高质量发展、产业扶贫等政策的制定,引导农民发展绿色生产及熟练运用先进农业设备与技术,向农民输出先进理念,让广大农民充分认识到农业经济管理的重要性。同时对容易引起经济利益纠纷的农业资源进行明确划分,制定相应的可持续管理措施,保障农业经济管理目标的顺利实现。

二是保障农业农村发展资金。当前我国农业距离实现现代化还有很长的路要走,政府虽然出

台了一系列政策,提供了一些资金上的支持,但仍不能较好满足农业农村发展的需求。拓宽农业经济管理途径,增加融资渠道,获得更多的发展资金十分必要。如,与企业合作开展综合经营,打通农产品的销售渠道,引入更多的社会资本为农业长远发展提供保障,建立起现代化的农业经济管理体系,促进农业发展紧跟时代步伐。

农业宏观经济管理为农业农村发展提供了理论指导、制度保障及环境支持,促进了我国农业农村朝着有计划、有步骤、科学合理的方向发展。在农业农村现代化建设中除了经济管理体系的完善,融资渠道的开拓,人才的培养也十分重要,高素质的经济管理队伍同样是农业经济管理工作顺利开展的基础。《农业经济管理与可持续发展研究》一书立论明确、论证翔实,就农业经济管理理论、实践及农业可持续发展的关联因素作出深入探讨,强调了农业经济管理理论的重要性,为我国农业农村经济的健康发展提供了有益借鉴。

文/汤金丽(玉溪师范学院,副教授)