

流域面源污染研究进展与展望

吴一平, 宋燕妮, 张广创, 周彤, 刘雯丹, 孙长顺, 薛旭东, 刘曙光, 陈骥, 田原

引用本文:

吴一平, 宋燕妮, 张广创, 周彤, 刘雯丹, 孙长顺, 薛旭东, 刘曙光, 陈骥, 田原. 流域面源污染研究进展与展望[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(4): 711–720.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2024-0180>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

发展环水有机农业控制农业面源污染的政策与建议

王磊, 席运官, 肖兴基, 高吉喜

农业环境科学学报. 2017, 36(8): 1590–1594 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0340>

小流域面源污染风险评估研究——基于多分类有序离散选择模型

陶双骏, 邵光成, 苏江霖, 李育飞, 张新宇, 张邵华

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1293–1299 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0047>

“产业治污”模式削减丘陵区农业面源氮排放

刘广龙, 李涛, 薛利红, 樊丹, 戴志刚, 甘晓东, 张凯, 周宇翔, 胡荣桂

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 1963–1970 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0369>

养殖业污染防治技术研究态势的文献计量分析

李红娜, 姜凯阳, 徐海圣, 常志州, 吴华山, 朱昌雄

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1314–1325 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1378>

中国硝酸盐脆弱区划分与面源污染阻控

马林, 卢洁, 赵浩, 柏兆海, 胡春胜

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2387–2391 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1369>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

吴一平, 宋燕妮, 张广创, 等. 流域面源污染研究进展与展望[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(4): 711–720.

WU Y P, SONG Y N, ZHANG G C, et al. Progress and prospect of research on watershed nonpoint source pollution [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(4): 711–720.



开放科学 OSID

流域面源污染研究进展与展望

吴一平¹, 宋燕妮^{1,2}, 张广创¹, 周彤¹, 刘雯丹¹, 孙长顺³, 薛旭东⁴, 刘曙光⁵, 陈骥⁶, 田原⁷

(1. 西安交通大学全球环境变化研究院, 西安 710049; 2. 华陆工程科技有限责任公司, 西安 710054; 3. 陕西省环境科学研究院, 西安 710061; 4. 陕西省环境调查评估中心, 西安 710054; 5. 中南林业科技大学南方林业与生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004; 6. 香港大学土木工程系, 香港 999077; 7. 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要: 面源污染已成为影响流域水环境和水安全的重要来源, 是当前国内外学者关注的热点之一, 同时也是最具挑战性的研究领域之一。科学高效地治理面源污染问题已经纳入国家战略计划。因此, 在新形势和政策背景下如何推进面源污染研究工作, 以保障流域水环境可持续发展已成为紧迫任务。本文较为全面地回顾和总结了我国面源污染研究现状, 归纳了主要研究方法和典型治理措施, 并基于研究中存在的主要问题, 结合我国水污染治理现状给出相应建议, 指出未来发展趋势。本文可为面源污染的全过程监管、评估及治理提供重要参考, 有助于完善我国水污染治理体系。

关键词: 流域水文; 面源污染; 模型模拟; 污染控制; 发展趋势

中图分类号: X52 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2024)04-0711-10 doi:10.11654/jaes.2024-0180

Progress and prospect of research on watershed nonpoint source pollution

WU Yiping¹, SONG Yanni^{1,2}, ZHANG Guangchuang¹, ZHOU Tong¹, LIU Wendan¹, SUN Changshun³, XUE Xudong⁴, LIU Shuguang⁵, CHEN Ji⁶, TIAN Yuan⁷

(1. Institute of Global Environmental Change, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Hualu Engineering and Technology Co., LTD., Xi'an 710054, China; 3. Shaanxi Provincial Academy of Environmental Science, Xi'an 710061, China; 4. Shaanxi Environmental Investigation and Assessment Center, Xi'an 710054, China; 5. National Engineering Laboratory for Applied Technology of Forestry and Ecology in South China, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 6. Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China; 7. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Nonpoint source pollution (NPS) has emerged as a significant factor affecting securities of water resource and water environment, and thus NPS studies attracted much attention and concerns domestically and internationally. That is why it becomes one of the most challenging research fields in earth and environment science. The scientific and efficient management of NPS has been incorporated into national strategic plans. To ensure the sustainability of the water environment, therefore, promoting NPS research and control under the new circumstances and policies has become an urgent task. This study comprehensively reviews and summarizes the current status of NPS research, outlining primary methods and typical remediation measures. In light of the major issues identified in this study and the current situation of water pollution control in China, corresponding recommendations are provided, along with some constructive suggestions. This study can be valuable and informative for the comprehensive supervision, assessment, and management of NPS, contributing to the enhancement of China's water pollution control systems.

Keywords: watershed hydrology; nonpoint source pollution; model simulation; pollution control; future trends

收稿日期: 2024-02-27 录用日期: 2023-03-26

作者简介: 吴一平 (1979—), 男, 陕西大荔人, 博士, 教授, 主要研究方向为生态水文。E-mail: rocky.ypwu@gmail.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42271025); 陕西省科技创新团队项目 (2021TD-52)

Project supported: National Natural Science Foundation of China (42271025); Program for Scientific and Technical Innovation Project Team of Shaanxi Province (2021TD-52)

水污染是我国在生态环境保护领域所面临的复杂且最具挑战性的问题之一,严重威胁我国水资源安全^[1]。多年来,水体污染从最初单一的污染源逐渐过渡为多样化污染。然而,关键的指标如化学需氧量(COD)、氮和磷等仍未得到完全控制。此外,重金属、持久性有机污染物以及新污染物也逐渐显现,这些进一步增加了水污染治理的难度。

水污染的主要来源可分为点源污染和面源污染。随着社会经济水平的提高,城市工业废水和城镇生活污水等点源污染得到了有效控制^[2]。相较于点源污染,面源污染具有随机性、扩散性、滞后性等特点^[3],以广域、分散和微量的形式进入地表及地下水体^[4],尤其是农用化肥的持续投入使土壤中养分累积,水土流失过程造成氮磷流失,导致农业面源污染贡献逐渐升高。因此,农业面源逐渐成为水体富营养化的主要因素^[5]。

流域面源污染研究主要集中在农业和城市两个方面^[6]。我国农业面源污染是水环境污染和水生态遭到威胁的重要原因之一^[7],因而备受国家和社会的关注。习近平总书记在2020年12月召开的中央农村工作会议中明确指出,要加强农村生态文明建设,保持战略定力,以钉钉子精神推进农业面源污染防治;2015年出台的《水污染防治行动计划》是保障我国水安全的重要行动计划^[8],计划中指出制定实施全国农业面源综合防治的方案,力争全国水环境质量总体改善^[9]。第二次全国污染源普查结果表明,农业面源污染对水体污染的贡献比例很高,2017年农业源排放

的COD、总氮(TN)、和总磷(TP)分别为1 067.13万、141.49万t和21.20万t,占水污染物排放总量的49.8%、46.5%和67.2%^[10]。在过去的几十年里,受到畜禽养殖量、农业人口数量和农业肥料使用量增加等因素的影响,1978—2017年间,全国省级地区COD、TN和TP的污染负荷分别增加了91.0%、196.2%和244.1%,其中污染物负荷量较高的省份主要包括山东、广东、四川、河南^[11]。杨林章等^[12]基于农村面源污染治理的“4R”理论(源头减量-过程阻断-养分再利用-生态修复)对江苏省太湖地区直湖港小流域开展了系统设计和工程化应用,研究发现陆域产生的面源污染最终汇入太湖。2017年发布的《中国生态环境状况公报》显示,全国农业用水量占全社会用水总量的62.4%,但农业领域的化肥利用率只有37.8%,农药利用率为38.8%,这导致了农业面源污染问题持续存在^[12]。因此,深刻梳理流域面源污染情况对于水污染防治工作具有至关重要的意义。

在了解流域面源污染产汇流过程(图1)的基础上,学者们开展了大量研究,包括面源污染迁移机制^[13-14]、负荷核算^[11]、监测技术^[15]、截留技术及防控工程建设^[12,16-17]等方面。这些基础研究、技术应用及工程措施在一定程度上有助于减少面源负荷,但面源污染影响因素的多样性决定了防治工作的艰巨、复杂且周期长。本文着重分析现有研究中存在的问题,并提出了相关对策建议和未来发展方向,以期对流域面源污染综合治理及水环境可持续发展提供科学参考。

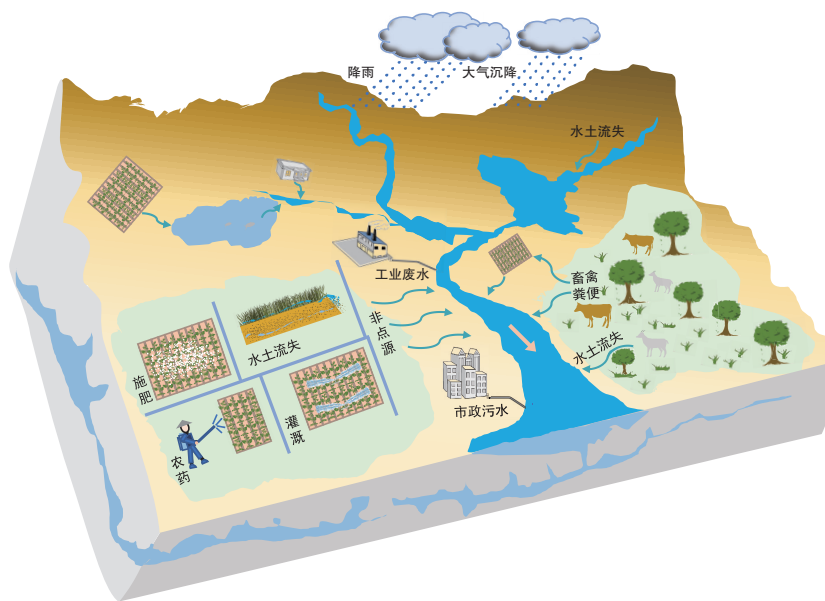


图1 流域面源污染的来源

Figure 1 Sources of nonpoint source pollution in a river basin

1 面源污染研究进展

1.1 面源污染研究概况

国外从20世纪60年代开始研究面源污染^[18],而我国对其研究起步较晚,20世纪80年代从调查滇池、太湖和巢湖等湖泊的富营养化水平开始面源污染的探索^[19]。早期对土壤养分流失和一些化学物质在土壤中的迁移转化过程及机制研究较多,为开展面源污染研究奠定了必要基础^[20]。目前开展的面源污染研究内容主要包括4个方面:(1)基础研究,包括面源污染的发生机理和传输过程、污染负荷量估算、关键源区的识别、容纳水体环境容量和水污染预测预报。掌握面源污染形成的机理和变化规律是进行模拟和定量研究的基础,也是控制和治理面源污染的关键。机理研究包括污染物在土壤圈中的行为及污染物受降水或灌溉驱动从土壤向水体扩散和传输的过程^[21-22]。面源污染负荷估算是流域水环境治理的重要基础工作,而利用数学统计法和模型来模拟估算面源污染负荷是对面源污染规律进行评价研究的基本方法,也是面源污染研究的核心内容^[23-24]。而且,所开发的模型可用于评估和预测各种农业管理措施对径流、负荷及水质的影响,进而为面源污染治理提供依据。(2)技术应用,包括面源污染的监测及防治等。对面源污染状况进行实时监测可为面源污染治理提供科学的信息支撑。利用遥感与GIS融合,建立面向污染风险评估的空间分析模型以及动态监测信息系统,为污染控制提供了必要的技术支持和决策依据^[25-26]。在面源污染防治工程方面,需要综合考虑源头减量、传输过程的阻断与拦截、养分的回收利用以及污染水体的生态修复与治理等4个关键环节,针对每个环节采取相应的技术措施^[27]。(3)对落地措施的评估,包括面源污染治理措施效果评估、空间优化配置、成本效益分析以及风险评估。在“一控两减三基本”目标的指导下,政府已出台了一系列政策措施,因此有必要全面评估这些政策行动的实施效果。(4)建立完善的政策、经济和法律保障体系。面源污染治理既是技术问题,也是经济问题^[28]。然而,当前面源污染相关统计数据分散,调查、监测和评估等技术规范尚不够充分^[29-30]。此外,污染治理设施的建设、验收和运维等规范管理工作还需要加强^[31]。因此,建立完善的政策、经济和法律保障体系对于推进面源污染治理至关重要。

1.2 面源污染研究方法

通过总结40多年来国内面源污染方面的研究,

将研究方法大致概括为3大类:

(1)试验监测法。王洪媛等^[32]利用田间原位监测法,系统分析了中国北方主要农区285个监测点的4种主要种植模式下农田氮磷淋溶特征与时空规律。王立萍等^[33]采用野外试验法,取样分析了不同土地利用类型面源污染的特点,并通过划定径流小区研究不同土地利用类型在降雨过程中污染物的流失规律。高月香等^[34]采用稳定同位素技术和IsoSource模型,利用 $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ 比值、同位素比值等方法,解析北澄子河流域硝态氮污染来源。胡钰等^[35]利用水质、土壤监测技术及 ^{15}N 稳定同位素示踪技术,对阿什流域种植业土壤氮特征及来源进行了解析;杨育红等^[36]将 ^{137}Cs 核素示踪和定位监测结合,发现黑土区面源污染的输出与水土流失密切相关。传统的一些监测和示踪法虽然可以对某些流域的污染问题进行研究,但地球化学或单一稳定性同位素技术无法定量识别流域水体中农业面源污染物的来源与负荷。Yu等^[37]运用环境放射性核素示踪和单体化合物稳定性同位素泥沙指纹技术,对中国北方典型集约化农业小流域中由侵蚀引起的泥沙、TN和TP等不同来源的排放负荷进行了深入的量化分析,并提出了针对性的水土保持措施和土地管理实践方案。任天志等^[38]建立了全国农田面源污染核算方法和农田面源污染监测平台,识别了农田氮磷面源污染的现状和重点区域,集成了农田氮磷减排技术模式并得到大面积应用。

(2)数学统计法。李怀恩^[39]利用平均浓度法对黑河流域非点源污染负荷进行了估算。洪小康等^[40]根据汉江武侯水文站的降雨监测资料建立水质水量相关关系,估算了降雨径流污染年负荷。蔡明等^[41]采用改进的输出系数法对渭河流域TN负荷量进行了估算,该方法考虑了降雨因素影响和污染物在迁移过程中的损失。陈友媛等^[42]提出了一种简易的污染负荷划分的水文估算方法,并在小清河流域得到了验证。张亚丽等^[43]依据土地利用和实测污染物负荷资料,提出了土地利用关系法,并在渭河支流黑河流域得到了应用。总体上,数学统计法具有结构简单、应用方便的特点,适宜在资料短缺条件下评估和预测土地利用变化后的非点源污染负荷。但数学统计法将一部分点源归为非点源形式,可能会高估非点源污染的贡献^[6]。Wu等^[44]提出了考虑降雨侵蚀因子的修正输出系数法,并用该方法对黄土高原沟壑区延河流域水土流失引起的非点源氮磷负荷进行估算,结果表明此方法能更准确地反映非点源污染的年际变化。周睿

等^[45]提出将一维水质模型与改进的输出系数法相结合并将其应用于潮河下游流域,与传统的水文分割法相比,此方法具有良好的模拟精度,同时避免了水文分割法无法较好地模拟枯水期非点源污染负荷的弊端。

(3)数学模拟法。此研究手段在我国经历了漫长的历程,由最初的经验统计模型转向机理模型,对模型的使用也由最初的照搬模式转为修正模式。早期的经验统计模型如李家科等^[46-47]针对非点源污染形成过程复杂、基础资料不完备的特点,将支持向量机SVM应用于渭河流域华县站非点源TN污染负荷量预测,SVM能在有限样本情况下将学习问题转化为二次规划问题来获得全局最优解,有效克服了神经网络易陷于局部极小值的缺点;建立了对资料要求较少、精确度较高的非点源污染负荷多变量灰色神经网络预测模型,包括GM(1,N)模型、残差序列 $\{l(0)(k)\}$ 的BP、RBF网络模型和灰色人工神经网络模型,为有限资料条件下非点源污染负荷的预测提供支持。计算机技术发展下的人工神经网络(ANN)模型、长短期记忆人工神经网络(LSTM)、BP神经网络、线性规划函数模型等也属于经验统计模型,它们运用于水环境污染负荷领域的最大特点是能根据某种关系预测未来水污染情况。Li等^[48]利用建立的LSTM-BP模型对周河流域日污染负荷时间序列进行模拟,虽然模型模拟的污染负荷在不同水文时段和降水强度下变化较大,但能够准确跟踪污染负荷的时间变化趋势。Chen等^[49]利用ANN将径流-污染物关系从完整数据事件扩展到其他数据稀缺事件,使用插值法来解决模拟偏差问题,其在三峡水库的案例研究表明ANN在非点源污染模拟中表现良好,特别是对于小降雨事件下磷的预测比氮更加精确。经验统计模型通常不考虑农业面源污染物入河过程中所涉及的物理、化学及生物反应过程,可以简单估算污染物负荷。该模型对下垫面条件稳定的流域具有较好的适用性,但下垫面变化和人为活动干扰强烈的地区该模型应用就受到了较大限制。具有物理机制的过程模型应时而生,并得到了蓬勃发展^[50-54]。这类模型主要是引进国外典型的模型进行模块修改或者耦合,但由于我国南北方气候、地理条件的差异,机理模型的发展经历了漫长的过程。早期的土壤流失方程模型(USLE)不考虑溶质运移的机制和动力学特征,对数据要求较低,有较强的实用性和准确性,但通用性有限,不能描述土壤侵蚀的物理过程^[55]。早期的输出系数模型假设每种土地利用类型的输出系数相同,忽略了降水、地形、植

被缓冲带的空间异质性的影响。Johnes等^[56]在实际应用中考虑牲畜、人口、植物固氮、大气氮沉降等因素,提出了改进的输出系数模型,增强了模型可靠性;陆建忠等^[57]给出了降雨与地形特征对流域农业源污染损失系数的确定方法,使改进后的输出系数模型更符合农业源污染物运动机理,并利用改进的模型估算了鄱阳湖流域农业面源污染。Wang等^[58]提出适用于大尺度无资料地区的动态系数模型(DECM),通过建立降雨和下垫面(土壤、坡度、土地利用等)与输出系数的关系,并将空间数据细化到非点源污染响应单元(NPRUs),在三峡库区取得了较好的模拟效果。

目前模型与3S技术耦合研究成为发展趋势。王晓燕等^[59]利用SWAT模型与GIS技术研究密云水库的面源污染问题,建立了一套适用于流域SWAT模型研究的面源污染信息库;高银超^[60]运用AnnAGNPS模型模拟三峡库区小江流域径流量、泥沙及营养物质负荷量,并识别了关键源区;赵雪松^[61]引入MULSE模型对AnnAGNPS模型土壤侵蚀模块进行改进,并将该模型运用于区域农业面源污染模拟研究中,在模拟农业面源污染时精度明显提高,相对误差减少10%以上;欧阳威等^[62]将SWAT和InVEST模型联合使用,量化了挠力河流域农业面源污染,分析了氮磷负荷及生境质量对时空变化的响应。总体来看,中国面源污染研究起步较晚,长系列的监测数据较少;虽然数学模型应用较多,但其对数据的广度和精度依赖性较强,且空间异质性考虑不够,难以在大尺度范围获得理想效果。未来需加强面源污染监测,夯实数据保障;改进开发形成大尺度、多过程、多要素的机理模型,为水环境研究与污染防治提供更加有力、有效的方法和工具。

1.3 面源污染控制措施

随着国家和地方层面对面源污染的重视和支持,研究手段也由单一型转向复合型,目前的污染防治思路体现为全过程综合协同治理。面源污染防治技术体系可分为3类:(1)源头削减。这主要通过土壤改良、施肥优化、水肥管理、农业生态及水土保持技术减少化肥投入量,从而减缓土壤侵蚀程度。Wang等^[63]利用铝改性黏土和镧改性膨润土对广西典型小流域土壤进行改良,研究发现铝改性黏土和镧改性膨润土对农田径流中溶解性无机磷的去除率分别达到93.6%和93.9%,表明该方法是一种有效的农业面源污染控制技术;褚军等^[64]发现生物炭可以改善土壤结构,增强土壤持水能力,调控土壤中的氮磷组分迁移,从而降低淋溶流失,有效降低农业面源污染负荷;李

堃等^[65]在巢湖周围的水稻和玉米地进行田块尺度的实验,研究施用不同复合肥对农田氮磷径流流失与淋溶流失的影响,发现施用减量20%的控释复合肥,水稻地的TN和TP流失量分别减少60.0%和63.0%,玉米地相应减少27.8%和34.0%,表明施用控释复合肥能有效控制农业面源污染;Xia等^[66]发现通过源头控制技术,农业径流中氮和磷的浓度显著降低,但仍然难以达到安全排放浓度,农业径流的完全处理仍需要额外手段。(2)过程控制。这是增加陆域停留时间并通过截留控制污染物流入水体的关键技术。申丽娟等^[67]以“水、土、热、气、肥”为主线,在三峡库区建立了农业面源污染控制系统并提出多重拦截与消纳污染的技术体系,同时以王家沟小流域为例进行了实证研究和集成示范;孙彭成等^[68]通过模拟降雨试验研究黄土高原地区不同长度柳枝稷植被过滤带对降雨径流侵蚀污染物拦截效果,发现过滤带能高效拦截水沙和面源污染物,并能够变污为肥,使水土资源得到有效利用;李怀恩等^[69]在陕西小华山水库岸坡地测定了植被过滤带对地表径流中污染物的净化效果,结果表明植被过滤带对地表径流中TN、TP和COD浓度的削减率分别达到46.1%、73.3%和60.5%,负荷削减率分别达到69.9%、85.1%和77.9%。(3)末端治理。这是针对污染物进入下游受纳水体后的治理措施,主要包括人工湿地、生态浮床等,常用于去除或减少氮、磷污染物。蒋倩文等^[70]在典型农业型开慧河流域建立了以生态湿地为主的面源污染治理系统,研究结果表明景观型生态湿地净化工程对末端水体TN和TP的去除率分别在25%和10%以上;Cai等^[71]在鄱阳湖流域建立池塘湿地,采用清淤底泥、选择适宜的湿地植物、控制水力滞留时间和控制水田湿地面积比等方法对农业面源污染进行控制,结果表明稻田排水中的TN和TP的去除率分别达到8.6%和22.9%。

为了提高面源污染防治效果,3种治理技术的有效衔接和优化组合已成为必然之路。杨林章等^[72]总结了面源污染治理“4R”技术体系,即源头减量(Reduce)、过程阻断(Retain)、养分再利用(Reuse)和生态修复(Restore),并在直湖港小流域建立9个小示范工程,有效提高了污染物中的氮磷养分多级阻控和循环利用,成功将稻田由污染源变成污染物的消纳汇,为其他地区污染治理提供了良好借鉴。Xue等^[72]也应用上述“4R”技术进行面源污染控制实验,研究区为江苏省镇江市姚桥县上社河流域1.5 km²水稻和小麦地,采用肥料管理、生态沟渠和生态池塘净化、富营养

化河流中氮回收、水利工程修复等方式,结果表明河道水质明显改善,其中TN、铵态氮(NH₄⁺-N)、TP和COD的浓度分别下降28.9%、30.4%、21.9%和35.5%。Zhang等^[73]提出的三峡库区农业面源污染源头和过程控制一体化治理理念,集成了水肥高效利用、水文波动带的生态工程拦截、氮磷生物封存和农业废物回收模式等技术,使农业面源污染综合去除率超过89%。针对云贵高原典型湖泊流域,刘宏斌等^[74]创建了农业面源污染监测方法,突破污染控制与资源利用结合的关键技术,建立了流域农业面源污染分区协同防控理论,提出两点变频式流域农业面源污染技术。滇池水污染问题一直都是国家和地方政府关注的焦点,很多研究表明农田径流是富营养化的重要来源,段昌群等^[75]根据滇池流域内大面积农田的地形、作物布局、灌排系统和面源污染物输移特点,将连片农田划分成不同的子汇水区,以子汇水区为控制单元分别研发集水控蚀、节水减肥及蓄废削污等面源污染控制技术,分别实现各子汇区内农田面源污染物源头削减和输出过程阻断、拦截,从而降低连片农田面源污染负荷输出强度,实现构建连片农田污染减负的目标。黄土高原作为典型的生态脆弱区,严重的水土流失及伴随的氮磷流失引发了黄河流域面源污染问题^[76],污染在时间上呈现一定季节性特征,污染负荷多集中在夏、秋两季,与流域降雨季节基本一致^[77],同时由于土壤肥力不足,农业增产主要依赖施肥^[78],这就使得农业面源污染负荷增加,导致水土流失型水污染问题。吴磊等^[79]剖析和总结了黄土高原地区基本概况和该地区水土流失型面源污染研究进展,提出了建设植被过滤带、河岸缓冲带,发展绿色农业等的污染治理建议。依托科技部重点专项,熊炜等^[80]建立了东北粮食主产区农业面源污染综合防治集成技术示范区和集面源污染防治与农业观光休闲旅游为一体的示范工程,并研发了微生物强化原位消减控制技术、集“控源+截留+消纳”于一体的丘陵小流域面源污染综合防控技术,为控制面源污染提供了良好的样板和借鉴。

2 农业面源污染研究存在的问题

(1)中小型流域研究缺乏系统数据库,污染物负荷量化精度不高。

当前我国中小型流域水文水质监测工作不够深入,导致关键基础数据较为缺乏。虽然重点河流监测点均有布设,但是监测频率普遍偏低、样品测试误差较大;另外,还缺少水文水质同步监测数据,使得负荷

量估算精度较低。由于数据问题,简单经验系数或模型模拟估算难以准确评估污染负荷、污染程度,也难以彻底摸清污染来源,这是因为简单的经验估算往往将污染来源扩大化或者混乱化。比如我国大部分农村未建设成套的明渠或者管网,受下垫面和产汇流异质性共同影响,农田、农村生活、养殖型的污染物大多在降雨径流或水土流失驱动下迁移到水体,具有较大的随机性、扩散性及滞后性,导致污染物排放量并不完全等于入河量,如果它分布在非动力传输渠道,则并非必然会影响水体^[81]。因此,入河或入湖库的输出系数法弊端明显,难以准确反映污染物负荷。

(2)缺乏多学科交叉研究,系统性的全过程治理不足。

当前研究大多只立足农业、土壤或者水环境单一视角研究农业面源污染问题,缺乏多学科知识交融,全过程的研究衔接不上,只能解决局部环境问题,甚至会出现内部负反馈效应,间接增加水污染治理工作的难度。面源污染措施方面,虽然有很多典型的成功案例,但是小范围、小规模、单项污染防治技术示范多,支撑区域或流域层面的系统性、集成性示范工程少,在管理、运行、维护等方面缺少必要的资金支持,长效运行机制缺失,难以长期发挥作用。由于污染物从“土相”到“水相”的迁移路径较长,且受土壤侵蚀、灌溉和降雨强度的影响,工程或非工程措施成本投入较高、试验时间长,在流域尺度上进行技术创新有较大挑战性。

(3)水文条件对污染物迁移影响机制研究薄弱,预测预警体系不完善。

面源污染大多以降雨、径流作为水动力条件,而现有研究在不同频次、强度、分布特征的降雨对污染物迁移影响方面还存在不足。2021年《中国气候变化蓝皮书》显示,1961—2020年中国高温、强降水等极端事件增多增强,气候风险水平趋于上升,气候变化会直接影响农业生产与管理及水文水质过程,尤其降水增强会明显加剧水土流失和农业面源压力,影响水环境质量,威胁水生生态系统。在气候环境影响下,以年、月和季节为时间尺度的面源污染研究已经难以为流域管理提供有效应对建议和措施。另外,现有的长短期气象预报和洪水预测预警能力还亟待提升,面源防控技术上也未形成全国有效的监测预警平台,这些不足会对流域污染防治规划的制定、长短期气候气象影响下水环境污染状况的掌握、水污染风险的准确评估和预警等造成影响。

(4)自上而下的面源污染治理意识薄弱,管理部

门联动性不够。

国家从战略高度对面源污染进行顶层设计,政府在近期规划中也强调生态环境保护的重要性,但基层政府对面源污染防治的重要性认知还需提升。广大农村地区宣传工作还不够深入,农民还过度依赖化肥和农药提高农作物产量,很少考虑由此产生的水污染和生态环境问题。从宏观调控来看农业与水环境相关部门并未有效联动起来,政策和规划相对独立,造成单一追求农业环境质量或水环境质量的绿色可持续性,未能实现系统保护和协同发展。

3 建议与展望

(1)理论和技术应用分离,需构建多学科交融、专业技术一体化研究体系。

面源污染研究并不是独立的,由于影响因素的多样性,且关系到社会经济可持续发展,必须建立完整、行之有效的知识体系。建议围绕水-土-作物系统,开展环境、生态、管理、经济等跨学科知识融合,形成流域治理一体化体系,统筹流域水环境与人为活动协同发展。面源污染治理工作的迫切性和有效性决定其研究工作不能停留在基础研究阶段,提出切实可行的解决措施才是最终目的,专业理论与技术分离的研究不能从根源上解决问题,所以要加强相关专业背景的人才与技术人才的横向合作交流,探索切实解决流域水污染问题的有效途径。

(2)现有模型仍存在不足,需发展适用于我国本土的面源污染过程解析模型。

现有的经验模型通常不考虑面源污染物入河过程中所涉及的物理、化学及生物反应过程,而是以建立农业面源污染物输入与输出之间的量化关系为原理开展模拟,具有操作简便、数据需求低等优点,但是对于小尺度区域内异常值和极端事件的预测效果较差^[82]。机理模型通过将气候条件、下垫面、作物生长、农业生产活动等影响农业面源污染发生的众多因素概化为模型参数,借助GIS处理平台对农业面源污染发生、传输等全过程进行模拟,具有模拟精度高、模拟结果数据连续性好等优点,但对输入数据质量要求较高;另外,现有机理模型对流域生态水文和污染物迁移过程的表征仍存不足。因此,如何构建面向空间、融入生物地球化学原理、适用于我国本土的农业面源污染过程解析模型将是未来重要的研究方向。

(3)流域监测工作依然薄弱,需构建天地一体化动态监测网络体系。

我国已形成田块尺度的监测技术规范,但现有的流域面源污染防控监控平台还相对滞后,也因自然条件的复杂性和异质性而难以具有普适性。未来要立足流域陆面-水体复合系统,结合地面和遥感技术形成农业面源污染分区模式的监测网络体系:既能实现点、线、面多尺度监测,又能协同陆面水土多要素监测,从而实现全过程综合监测,加强时效性和准确性;对于复杂作物系统或者生产要素建立野外观测站,对重点流域做到水量水质长期同步监测;面源污染防控平台实现监管一体化,实时对接和共享年、月、日、小时尺度的监测信息,支撑污染物负荷准确评估;加强气象水文和面源污染多时间尺度预报预警,实现GIS空间可视化,充分发挥模型和大数据在水污染防治和推动农业绿色发展中的作用。

(4)组合措施推广难,需加强多目标优化分析。

最佳管理措施(BMP)的多目标空间优化配置主要靠农业面源污染关键区的精准识别、负荷量削减率及成本效益分析完成。现有的模型模拟和3S技术的结合,可以从空间尺度上识别关键污染区域、明确主要污染物,但是单一的子流域尺度研究很难精细到具体的污染源,将子流域与田块尺度的污染物特征、源要素和迁移过程等统筹考虑,耦合机理模型在不同区域和多空间尺度下进行污染源解析、关键污染物追溯及高风险污染区点位识别具有重要意义。面源污染物负荷量并不等于实际水污染程度,水体最终的纳污情况要靠水环境容量表征,因此可设置不同情景措施确定流域水污染负荷削减率,建立多情景与水质质量的优化函数模型,筛选最优情景,确定合适的协同治理方案。未来面源污染BMP效果必将从单一措施向多措施组合评估发展,最终达到基于多目标优化的BMP合理高效配置,这对实现流域水环境质量整体改善和多重效益保障具有重要意义。

参考文献:

- [1] 张晓. 中国水污染趋势与治理制度[J]. 中国软科学, 2014(10): 11-24. ZHANG X. Trend of and the governance system for water pollution in China[J]. *China Soft Science*, 2014(10): 11-24.
- [2] 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[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 1-8. YANG L Z, SHI W M, XUE L H, et al. Reduce-Retain-Reuse-Restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: general countermeasures and technologies[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1): 1-8.
- [3] 王建兵, 程磊. 农业面源污染现状分析[J]. 江西农业大学学报(社会科学版), 2008(3): 35-39. WANG J B, CHENG L. Analysis of current situation of agricultural non-point source pollution[J]. *Journal of Agro-Forestry Economics and Management*, 2008(3): 35-39.
- [4] 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[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(5): 2548-2552. ZHAO Y H, DENG X Z, ZHAN J Y, et al. Study on current situation and controlling technologies of agricultural non-point source pollution in China[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(5): 2548-2552.
- [5] 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[J]. 生态学报, 2002, 22(3): 291-299. QUAN W M, YAN L J. Effects of agricultural non-point source pollution on eutrophication of water body and its control measure[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(3): 291-299.
- [6] ONGLEY E, ZHANG X, YU T, et al. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5): 1159-1168.
- [7] 朱康文. 多级网格下农业面源污染风险测度与可视化研究[D]. 重庆: 西南大学, 2022: 1-5. ZHU K W. Risk measurement and visualization of agricultural non-point source pollution based on multi-level grid[D]. Chongqing: Southwest University, 2022: 1-5.
- [8] 赵云皓, 逯元堂, 马春晖, 等. 实施《水污染防治行动计划》推动水环境产业发展: 对《水污染防治行动计划》的解读[J]. 环境保护科学, 2015, 41(3): 42-46. ZHAO Y H, LU Y T, MA C H, et al. Implementation of water pollution control action plan to promote the development of water environment industry: an interpretation of water pollution control action plan[J]. *Environmental Protection Science*, 2015, 41(3): 42-46.
- [9] 水污染防治行动计划[J]. 中国环保产业, 2015(5): 4-12. Action plan for water pollution control[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2015(5): 4-12.
- [10] 第二次全国污染源普查公报[J]. 环境保护, 2020, 48(18): 8-10. The second national pollution source census bulletin[J]. *Environmental Protection*, 2020, 48(18): 8-10.
- [11] ZOU L, LIU Y, WANG Y, et al. Assessment and analysis of agricultural non-point source pollution loads in China: 1978—2017[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 263: 110400.
- [12] 2017 中国生态环境状况公报[J]. 环境经济, 2018(11): 10-11. 2017 China ecological environment status bulletin[J]. *Environmental Economy*, 2018(11): 10-11.
- [13] 冯丽娟. 面源污染物氮磷在防护林体系中迁移转化机制研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010: 13-14. FENG L J. Study on the fate of nonpoint source pollutants—nitrogen and phosphorus in the protection forest system[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010: 13-14.
- [14] 汪庆兵. 基于面源污染控制的植物-土水氮迁移特征及其机制研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014: 25-65. WANG Q B. Study on the migration characteristics and mechanism of nitrogen in plant-soil and water interface based on non-point source pollution control[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014: 25-65.
- [15] SRINIVAS R, SINGH A P, DHADSE K, et al. An evidence based integrated watershed modelling system to assess the impact of non-point source pollution in the riverine ecosystem[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 246: 118963.
- [16] XUE L, HOU P, ZHANG Z, et al. Application of systematic strategy

- for agricultural non-point source pollution control in Yangtze River basin, China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 304: 107148.
- [17] ZHANG T, YANG Y, NI J, et al. Construction of an integrated technology system for control agricultural non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir areas[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 295: 106919.
- [18] 周早弘. 农业面源污染实证分析与政策选择[D]. 南京: 南京林业大学, 2009: 6. ZHOU Z H. Empirical analysis and policy selection on the agricultural non-point pollution[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009: 6.
- [19] 王静. 巢湖流域农业面源污染氮源解析及农艺控制技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021: 3-4. WANG J. Nitrogen source identification and agronomic control technology of agricultural non-point source pollution in the Chaohu Lake region[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021: 3-4.
- [20] 王全九, 李世清. 坡地土壤养分迁移与流失影响因素研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(12): 109-114. WANG Q J, LI S Q. Research on the effective factors of nutrient transfer and loss in the slope land[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2007, 35(12): 109-114.
- [21] 李其林, 魏朝富, 王显军, 等. 农业面源污染发生条件与污染机理[J]. 土壤通报, 2008, 39(1): 169-176. LI Q L, WEI Z F, WANG X J, et al. Mechanism and condition of agricultural non-point source pollution[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(1): 169-176.
- [22] 林明, 丁晓雯, 卢博鑫, 等. 降雨、地形对非点源污染产输影响机理综述[J]. 环境工程, 2015, 33(6): 19-23. LIN M, DING X W, LU B X, et al. Review of researches on influence mechanism of rainfall, topography on the production and transportation of non-point source pollution[J]. *Environmental Engineering*, 2015, 33(6): 19-23.
- [23] 张秋玲, 陈英旭, 俞钢钊, 等. 非点源污染模型研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1886-1890. ZHANG Q L, CHEN Y X, YU Q G, et al. A review on non-point source pollution models[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(8): 1886-1890.
- [24] 夏军, 翟晓燕, 张永勇, 等. 水环境非点源污染模型研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, 31(7): 941-952. XIA J, ZHAI X Y, ZHANG Y Y, et al. Progress in the research of water environmental nonpoint source pollution models[J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(7): 941-952.
- [25] 史志华, 张斌, 蔡崇法, 等. 汉江中下游农业面源污染动态监测信息系统的建立与初步应用[J]. 遥感学报, 2002, 6(5): 382-386. SHI Z H, ZHANG B, CAI C F, et al. The establishment and application of agricultural non-point source pollution information system in Hanjiang River watershed[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2002, 6(5): 382-386.
- [26] 雷能忠, 黄大鹏. 基于GIS的农业面源污染风险评估[J]. 中国农学通报, 2007, 23(12): 381-385. LEI N Z, HUANG D P. Research on risk assessment of agricultural non-point source pollution with GIS[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(12): 381-385.
- [27] 冯晓娜, 张刚, 王咏, 等. 农业面源污染防治措施进展研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(8): 89-93. FENG X N, ZHANG G, WANG Y, et al. Agricultural non-point source pollution prevention measures[J]. *Environmental Science and Management*, 2017, 42(8): 89-93.
- [28] 徐高源, 董红. 我国农业面源污染防治法的“PEST”分析[J]. 云南农业大学学报(社会科学), 2016, 10(1): 18-21. XU G Y, DONG H. A study on China's law of agricultural non-point source pollution control based on PEST[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Social Science)*, 2016, 10(1): 18-21.
- [29] 冷罗生. 我国面源污染控制的立法思考[J]. 环境与可持续发展, 2009, 34(2): 21-23. LENG L S. Legislative consideration of non-point source pollution control in China[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2009, 34(2): 21-23.
- [30] 殷培红, 耿润哲, 裴晓菲, 等. 以水环境质量改善为核心建立监督指导农业面源污染治理制度框架[J]. 环境与可持续发展, 2019, 44(2): 10-15. YIN P H, GENG R Z, PEI X F, et al. Taking the improvement of water environment quality as the core, establishing an institutional framework for supervising and guiding agricultural non-point source pollution control[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2019, 44(2): 10-15.
- [31] 朱兆良, 孙波, 杨林章, 等. 我国农业面源污染的控制政策和措施[J]. 科技导报, 2005, 23(4): 47-51. ZHU Z L, SUN B, YANG L Z, et al. Policy and countermeasures to control non-point pollution of agriculture in China[J]. *Science & Technology Review*, 2005, 23(4): 47-51.
- [32] 王洪媛, 李俊改, 樊秉乾, 等. 中国北方主要农区农田氮磷淋溶特征与时空规律[J]. 中国生态农业学报, 2021, 29(1): 11-18. WANG H Y, LI J G, FAN B Q, et al. Nitrogen and phosphorus leaching characteristics and temporal and spatial distribution patterns in northern China farmlands[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(1): 11-18.
- [33] 王立萍, 娄山崇, 孙秀玲, 等. 尼山水库小流域典型面源污染来源及特征分析[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(1): 26-35. WANG L P, LOU S C, SUN X L, et al. Analysis of sources and characteristics of typical non-point pollution in a small watershed of Nishan reservoir, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(1): 26-35.
- [34] 高月香, 李想, 高田田, 等. 同位素示踪解析北澄子河流域硝态氮污染贡献[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(10): 2269-2276. GAO Y X, LI X, GAO T T, et al. Isotopic tracer analysis of nitrate nitrogen pollution contribution in the Beichengzi River basin, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(10): 2269-2276.
- [35] 胡钰, 王业耀, 滕彦国, 等. 阿什河流域非点源氮污染的 $\delta^{15}\text{N}$ 源解析研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(12): 2327-2335. HU Y, WANG Y Y, TENG Y G, et al. Source apportionment of non-point source nitrogen pollution in Ashi River basin using $\delta^{15}\text{N}$ technique[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(12): 2327-2335.
- [36] 杨育红, 阎百兴, 沈波, 等. ^{137}Cs 示踪技术在黑土区农业非点源污染负荷研究中的应用[J]. 地理科学, 2010, 30(1): 124-128. YANG Y H, YAN B X, SHEN B, et al. Agricultural nonpoint source pollution loads prediction using caesium-137 tracing technique in black soil region, northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(1): 124-128.
- [37] YU H, ADU-GYAMFI J, OSHUNSANYA S O, et al. Novel sediment source fingerprinting quantifying erosion-induced total nitrogen and total phosphorus outputs from an intensive agricultural catchment, north China[J]. *International Soil and Water Conservation Research*,

- 2023, 11(3):494-506.
- [38] 任天志, 刘宏斌, 范先鹏, 等. 全国农田面源污染排放系数手册[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015:3-24. REN T Z, LIU H B, FAN X P, et al. Manual of emission coefficient of non-point source pollution in farmland[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015:3-24.
- [39] 李怀恩. 估算非点源污染负荷的平均浓度法及其应用[J]. 环境科学学报, 2000, 20(4):397-400. LI H E. Mean concentration method for estimation of nonpoint source load and its application[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(4):397-400.
- [40] 洪小康, 李怀恩. 水质水量相关法在非点源污染负荷估算中的应用[J]. 西安理工大学学报, 2000, 16(4):384-386. HONG X K, LI H E. Correlation method of water quality and quantity and its application to load estimation of nonpoint source pollution[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2000, 16(4):384-386.
- [41] 蔡明, 李怀恩, 庄咏涛, 等. 改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用[J]. 水利学报, 2004(7):40-45. CAI M, LI H E, ZHUANG Y T, et al. Application of modified export coefficient method in polluting load estimation of non-point source pollution[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004(7):40-45.
- [42] 陈友媛, 惠二青, 金春姬, 等. 非点源污染负荷的水文估算方法[J]. 环境科学研究, 2003, 16(1):10-13. CHEN Y Y, HUI E Q, JIN C J, et al. A hydrological method for estimation of non-point source pollution loads and its application[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2003, 16(1):10-13.
- [43] 张亚丽, 李怀恩. 土地利用关系法在非点源污染负荷预测中的应用[J]. 中国农学通报, 2009, 25(17):270-273. ZHANG Y L, LI H E. Application of land use relation approach for nonpoint source pollution load prediction[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(17):270-273.
- [44] WU L, GAO J E, MA S Y, et al. Application of modified export coefficient method on the load estimation of non-point source nitrogen and phosphorus pollution of soil and water loss in semiarid regions[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, 22(14):10647-10660.
- [45] 周睿, 王博, 林豪栋, 等. 一维水质模型结合改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(2):505-515. ZHOU R, WANG B, LIN H D, et al. Application of 1-Dimensional water quality model combined with the improved export coefficient method in polluting load estimation of non-point source pollution[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(2):505-515.
- [46] 李家科, 李怀恩, 赵静. 支持向量机在非点源污染负荷预测中的应用[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2006, 38(6):756-760. LI J K, LI H E, ZHAO J. Application of support vector machine method in prediction of non-point source pollution load[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2006, 38(6):756-760.
- [47] 李家科, 李亚娇, 李怀恩, 等. 非点源污染负荷预测的多变量灰色神经网络模型[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(3):229-234. LI J K, LI Y J, LI H E, et al. Multi-variable grey-neural network model for non-point source pollution load prediction[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2011, 39(3):229-234.
- [48] LI L, LIU Y J, WANG K, et al. Simulation of pollution load at basin scale based on LSTM-BP spatiotemporal combination model[J]. *Water*, 2021, 13(4):516.
- [49] CHEN L, SUN C, WANG G, et al. Modeling multi-event non-point source pollution in a data-scarce catchment using ANN and entropy analysis[J]. *Entropy*, 2017, 19(6):265.
- [50] BEASLEY D, HUGGINS L F, MONKE E J, et al. ANSWERS: a model for watershed planning[J]. *Transactions of the ASAE*, 1980, 23(4):938-944.
- [51] SWEENEY D W, BOTTCHE A B, CAMPBELL K L, et al. Measured and creams-predicted nitrogen losses from tomato and corn management systems[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1985, 21(5):867-873.
- [52] GUPTA A K, RUDRA R P, GHARABAGHI B, et al. CoBAGNPS: a toolbox for simulating water and sediment control basin, WASCoB through AGNPS model[J]. *CATENA*, 2019, 179:49-65.
- [53] SHI W, HUANG M. Predictions of soil and nutrient losses using a modified SWAT model in a large hilly-gully watershed of the Chinese Loess Plateau[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2020, 9(2):291-304.
- [54] LEE D H, KIM J H, PARK M H, et al. Automatic calibration and improvements on an instream chlorophyll a simulation in the HSPF model[J]. *Ecological Modelling*, 2020, 415:108835.
- [55] MEYER L D. Evolution of the universal soil loss equation[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 1984, 39(2):99-104.
- [56] JOHNES P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modeling approach[J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 183:323-349.
- [57] 陆建忠, 陈晓玲, 肖靖靖, 等. 改进的输出系数法在农业污染源估算中的应用[J]. 华中师范大学学报:(自然科学版), 2012, 46(3):373-378. LU J Z, CHEN X L, XIAO J J, et al. Application of improved export coefficient model in estimation of agricultural source pollutant[J]. *Journal of Central China Normal University (Natural Sciences)*, 2012, 46(3):373-378.
- [58] WANG W, CHEN L, SHEN Z, et al. Dynamic export coefficient model for evaluating the effects of environmental changes on non-point source pollution[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 747:141164.
- [59] 王晓燕, 秦福来, 欧洋, 等. 基于SWAT模型的流域非点源污染模拟:以密云水库北部流域为例[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3):1098-1105. WANG X Y, QIN F L, OU Y, et al. SWAT-based simulation on non-point source pollution in the northern watershed of Miyun reservoir[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3):1098-1105.
- [60] 高银超. 基于AnnAGNPS模型的三峡库区小江流域农业面源污染负荷研究[D]. 重庆:西南大学, 2011:22-56. GAO Y C. Research on agricultural non-point source pollution load in Xiaojiang River watershed of the Three-Gorge Reservoir region based on AnnAGNPS model[D]. Chongqing:Southwest University, 2011:22-56.
- [61] 赵雪松. 基于改进的AnnAGNPS模型的区域农业面源污染模拟研究[J]. 水利技术监督, 2016, 24(4):64-67. ZHAO X S. Research on regional agricultural non-point source pollution simulation based

- on improved AnnAGNPS model[J]. *Technical Supervision in Water Resources*, 2016, 24(4):64-67.
- [62] 欧阳威, 鞠妍妍, 高翔, 等. 考虑面源污染的农业开发流域生态安全评价研究[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(3):1194-1200. OUYANG W, JU X Y, GAO X, et al. Ecological security assessment of agricultural development watershed considering non-point source pollution[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(3):1194-1200.
- [63] WANG J, CHEN J, JIN Z, et al. Simultaneous removal of phosphate and ammonium nitrogen from agricultural runoff by amending soil in lakeside zone of Karst area, southern China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2020, 289:106745.
- [64] 褚军, 薛建辉, 金梅娟, 等. 生物炭对农业面源污染氮、磷流失的影响研究进展[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(4):409-415. CHU J, XUE J H, JIN M J, et al. Review of researches on effects of biochar in reducing nitrogen and phosphorus losses with agricultural non-point source pollution[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(4):409-415.
- [65] 李堃, 司马小峰, 丁仁奇, 等. 控施肥对农田氮磷流失的影响研究[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(25):12466-12470. LI K, SIMA X F, DING R Q, et al. Effects of controlled release fertilizer on loss of nitrogen and phosphorus from farmland[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(25):12466-12470.
- [66] XIA Y, ZHANG M, TSANG D C, et al. Recent advances in control technologies for non-point source pollution with nitrogen and phosphorus from agricultural runoff: current practices and prospects[J]. *Applied Biological Chemistry*, 2020, 63(1):1-13.
- [67] 申丽娟, 丁恩俊, 谢德体, 等. 三峡库区农业面源污染控制技术体系研究[J]. *农机化研究*, 2012, 34(9):223-226. SHEN L J, DING E J, XIE D T, et al. Agricultural nonpoint source pollution control technical systems in the Three-Gorge Reservoir area[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2012, 34(9):223-226.
- [68] 孙彭成, 高建恩, 王显文, 等. 柳枝稷植被过滤带拦污增效试验初步研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(2):314-321. SUN P C, GAO J E, WANG X W, et al. Effectiveness of switchgrass vegetative filter strip in intercepting pollutants and promoting plant biomass[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(2):314-321.
- [69] 李怀恩, 邓娜, 杨寅群, 等. 植被过滤带对地表径流中污染物的净化效果[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(7):81-86. LI H E, DENG N, YANG Y Q, et al. Clarification efficiency of vegetative filter strips to several pollutants in surface runoff[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(7):81-86.
- [70] 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[J]. *环境科学*, 2019, 40(5):198-205. JIANG Q W, LIU F, PENG Y X, et al. Nitrogen and phosphorus removal by integrated ecological engineering treatment system in a small agricultural watershed[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(5):198-205.
- [71] CAI S, SHI H, PAN X H, et al. Integrating ecological restoration of agricultural non-point source pollution in Poyang Lake basin in China[J]. *Water*, 2017, 9(10):745.
- [72] XUE L, HOU P, ZHANG Z, et al. Application of systematic strategy for agricultural non-point source pollution control in Yangtze River basin, China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2020, 304:107148.
- [73] ZHANG T, YANG Y, NI J, et al. Construction of an integrated technology system for control agricultural non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir areas[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2020, 295:106919.
- [74] 刘宏斌, 邹国元, 范先鹏, 等. 农田面源污染监测方法与实践[M]. 北京:科学出版社, 2015. LIU H B, ZOU G Y, FAN X P, et al. Monitoring methods and practice of non-point source pollution in farmland[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [75] 段昌群, 和树庄, 刘嫦娥, 等. 滇池流域农村面源污染系统研究与防控技术集成创新及示范[Z]. 云南大学, 昆明市环境科学研究院, 2015-04-26. DUAN C Q, HE S Z, LIU C E, et al. Integrated innovation and demonstration of rural non-point source pollution system research and control technology in Dianchi basin[Z]. Yunnan University, Kunming Institute of Environmental Sciences, 2015-04-26.
- [76] 王全九, 王辉, 郭太龙, 等. 黄土坡面土壤溶质随地表径流迁移特征与数学模型[M]. 北京:科学出版社, 2010:66-123. WANG Q J, WANG H, GUO T L, et al. Characteristics and mathematical model of soil solute transport on loess slope with surface runoff[M]. Beijing: Science Press, 2010:66-123.
- [77] 韩凤翔, 郑继勇, 张兴昌, 等. 黄河6条支流流域非点源污染分布现状[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(8):75-81. HAN F P, ZHENG J Y, ZHANG X C, et al. The distribution of non-point source pollution in Yellow River catchment[J]. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*, 2006, 34(8):75-81.
- [78] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京:中国农业出版社, 1998. SHEN S M. Soil fertility in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998.
- [79] 吴磊, 马孝义. 黄土高原水土流失型非点源污染过程模拟研究进展[J]. *中国科技论文*, 2015, 10(13):1497-1506. WU L, MA X Y. Research progress in erosion-type nonpoint source pollution process simulation of the Loess Plateau[J]. *China Sciencepaper*, 2015, 10(13):1497-1506.
- [80] 熊炜, 杜会英, 徐长春, 等. 农业面源和重金属专项实施进展与主要成效[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(10):9-17. XIONG W, DU H Y, XU C C, et al. Progress in the implementation of research and development of comprehensive prevention and remediation technology for farmland contaminated by agricultural non-point source pollutants and heavy metals: a summary of the main achievements[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10):9-17.
- [81] 殷培红, 耿润哲, 裴晓菲, 等. 以水环境质量改善为核心建立监督指导农业面源污染治理制度框架[J]. *环境与可持续发展*, 2019, 44(2):10-15. YIN P H, GENG R Z, PEI X F, et al. Taking the improvement of water environment quality as the core, establishing an institutional framework for supervising and guiding agricultural non-point source pollution control[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2019, 44(2):10-15.
- [82] 王萌, 周丽丽, 耿润哲, 等. 农业面源污染治理的技术与政策研究进展[J]. *环境与可持续发展*, 2020, 45(1):100-105. WANG M, ZHOU L L, GENG R Z, et al. A review: the technology and policy design of agricultural non-point source pollution management[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2020, 45(1):100-105.

(责任编辑:李丹)