

# 农业面源污染治理的技术与政策研究进展

王萌, 周丽丽, 耿润哲

(生态环境部环境与经济政策研究中心, 北京 100029)

**【摘要】**随着固定源污染治理的成效日益显现, 农业生产活动所导致的农业面源污染已成为水环境质量改善的主要影响因素。国内外经过近40年的研究, 在农业面源污染治理方面积累了丰富的经验做法。本文通过从农业面源污染负荷核算与关键源区识别、农业面源污染治理措施评估以及监督指导农业面源污染治理政策三个方面对国内外相关研究进展进行综述, 以期为该领域未来学科发展提供一定的思路和借鉴。主要建议如下: (1) 编制我国监督指导农业面源污染治理技术路线图; (2) 开展农业面源污染监测网络优化研究; (3) 开展农业面源污染评估技术体系研究; (4) 开展构建“萝卜+大棒”的治理政策体系研究。

**【关键词】**农业面源污染; 水文模型; 监测网络; 政策措施

中图分类号: X21 文献标识码: A 文章编号: 1673-288X(2020)01-0098-06 DOI: 10.19758/j.cnki.issn1673-288x.202001098

农业面源污染(Diffuse Pollution, DP)也称非点源污染(Non-point Source Pollution, NPS)是指在农业生产活动中, 由于农药和肥料(包括化肥和粪肥)的使用、畜禽粪便的不合规排放以及分散式农村生活所产生的氮、磷等营养物质, 在降雨和地形坡度的共同驱动下, 以地表或地下径流(含壤中流、侧渗流)以及土壤为载体, 进入到邻近受纳水体的一种污染形式。近年来, 随着对固定源污染控制的规范化程度和治理成效不断提升, 农业面源污染已经成为世界许多国家和地区流域水生态环境受损的主要影响因素<sup>[1-6]</sup>。

自20世纪70年代起, 欧美等发达国家和地区就对农业面源污染治理的技术和政策开展了大量研究工作。在农业面源污染政策方面, 美国实施的CEAP项目中的最佳管理措施(Best Management Practices, BMPs)计划, 1972年美国颁布的《清洁水法》第208条中规定了全域污水处理计划<sup>[7]</sup>。欧盟1980年颁布的《饮用水法令》、2000年颁布的《水框架指令》<sup>[8]</sup>以及德国1996年1月开始实施的《德国肥料条例》<sup>[9]</sup>都对如何开展农业面源污染治理工作提出了具体的要求。农业面源污染治理技术主要包括监测技术<sup>[10]</sup>、负荷量核算<sup>[11]</sup>、风险源模拟与识别<sup>[12-13]</sup>、治理措施效果评估技术<sup>[14-15]</sup>以及污染治理技术<sup>[16]</sup>。

国内外经过近40年的研究, 在农业面源污染治理方面积累了丰富的实践经验和关键科学技术, 这些对我国农业面源污染的治理工作起到了很好的参照作用。本文将结合我国农业面源污染防治现状和未来管理的实际需求, 从农业面源污染治理的技术与政策两个方面进行

论述, 以期为该领域学科未来的发展方向以及管理实践提供一定的启示。

## 1 监督指导农业面源污染治理的总体考虑

研究表明, 要实现农业面源污染的有效治理, 需要采取适当的技术手段对农业面源污染的发生机理和传输过程进行科学分析评估, 找到农业面源污染的关键源区, 采用适当的工程型或非工程型治理措施, 并辅以必要的强制监管和经济激励政策, 才能达到水生态环境保护的目标质量要求。核心环节包括: (1) 农业面源污染负荷估算; (2) 农业面源污染对水环境质量影响的必要监测; (3) 农业面源污染关键源区识别(Critical Source Areas, CSAs); (4) 农业面源污染治理措施效果预评估与筛选; (5) 农业面源污染治理措施空间优化配置与成本效益分析; (6) 将筛选及评估出的治理措施通过工程或非工程模式落地实施; (7) 农业面源污染治理的政策与激励机制。总体来讲, 前五个方面属于技术环节, 后两个方面则属于政策保障环节。

## 2 农业面源污染治理的技术

### 2.1 农业面源污染的负荷核算与关键源区识别

开展农业面源污染治理工作首先要明确治理的对象, 需要以流域为单元进行农业面源污染负荷核算与关键源区识别(Critical Source Areas, CSAs)。负荷核算的目的是为了摸清流域内各类污染源对水环境质量的影响程度, 关键源区识别的目的则是为了准确地找到对水环境质量影响最大的污染源空间分布特征<sup>[17]</sup>。研究表明,

**基金项目:**第二次全国污染源普查项目“农业源污染物入水体负荷核算方法及系数体系构建”(2110399);国家自然科学基金青年科学基金项目(41601551);生态环境部部门项目“农村环境保护体制机制与配套政策研究”(2110399);生态环境部部门项目“国家环境监测网络建设与运行”(2111101)

**作者简介:**王萌, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为流域与农村面源污染  
**通讯作者:**耿润哲, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为流域与农村面源污染

农业面源污染的产生及运移过程会受到自然地理条件的强烈影响, 同一流域内, 不同区域的污染负荷也存在很大差别<sup>[18]</sup>。通常情况下, 只占流域总面积 10%~20% 的区域, 对流域面源污染负荷的贡献量往往能够达到 80% 左右<sup>[19]</sup>, 这些污染负荷较高的区域通常被称为关键源区<sup>[20]</sup>。当前在农业面源污染负荷核算与关键源区识别方面所采用的技术方法主要由实地监测和模型模拟两大类, 其中模型模拟又按照所采用模型复杂程度的不同, 可划分为经验模型与机理模型<sup>[21]</sup>。

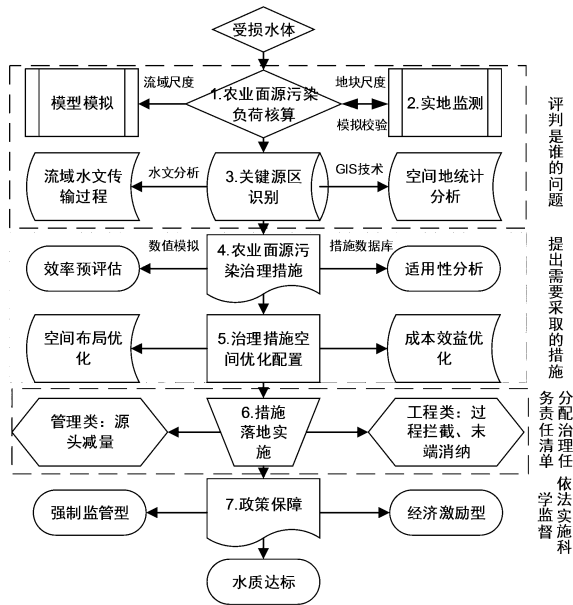


图 1 监督指导农业面源污染治理流程图

实地监测是最能够表征农业面源污染物对水环境影响程度的一种评价方法, 目前国内外许多研究者也将其作为首选方案开展研究工作。例如美国所采取的对照流域监测方案 (Paired Watershed)<sup>[22]</sup>, 通过选择两个自然地理条件、水文气象特征以及农业生产活动相似的流域, 同时段开展监测工作, 以核算农业面源污染的负荷量。我国则主要以小流域为单元开展农业面源污染监测工作(表 1), 例如北京密云水库上游蛇鱼川小流域就通过构建溢流堰、流域入口/出口设置监测点位, 开展流域水土流失过程以及农业面源污染的影响监测<sup>[23]</sup>。这些监测手段在一定程度上有效地促进了人们对农业面源污染发生机理及其对水环境质量影响的认识。但是, 由于农业面源污染发生过程中涉及较为复杂的环境过程和营养物质地球物理化学转化过程, 特别是在我国当前人为活动较为密集地区, 随着空间尺度的扩大, 还会受到入河排污口以及固定源污染物排污口的影响, 单纯采用监测手段可能难以有效剥离这些非农业活动所带来的影响。因此, 监测技术在大尺度流域内使用时还需要同时辅以多年高分辨率的空间和时间数据, 以及长时间序列

的水文、水质同步监测数据, 致使监测的成本较高, 难以实施。此外, 农业面源污染过程具有典型的“零存整取”属性, 即很多情况下, 农业面源污染对水环境的影响并非在一次降雨事件中完成, 而是具有较强的滞后期, 滞后的时间从几个月至上百年不等<sup>[24]</sup>, 这就使得基于监测技术对农业面源污染负荷量进行核算的方法具有较大的局限性。

表 1 小流域面源污染监测指标

指标类	指标组	指标	监测方法
自然环境指标类	地貌指标组	坡度、坡长	调查法、3S 法
	气象指标组	气温、降雨量、蒸发量、太阳辐射、大风日、风速、日照	地面观测法、资料分析法
	土壤指标组	土壤类型、土壤质地与组成、有效土壤厚度、土壤有机质及养分含量、pH 值、渗透速率、总磷、总氮等	调查监测法、地面观测法、资料分析法
	植被指标组	植被类型、覆盖度	3S 法
	水文指标组	径流深、输沙量、泥沙含量、总磷、有效磷、氨氮、总氮、化学需氧量、pH 值等	采样监测法
社会经济因子指标类	社会指标组	人口、耕地、林地、草地、城镇用地等土地利用类型面积、畜禽养殖量、化肥使用量及种类、农药使用量及种类	调查监测法、3S 法、资料分析法

相比实地监测而言, 模型模拟作为开展农业面源污染负荷核算与关键源区识别的重要手段, 适用范围则更加广泛。经验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, 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, 会产生较大的误差。机理模型则通过将气象、地形、植物生长、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, 但是对输入数据质量和操作人员水平要求较高, 在实际管理中的应用受到了一定的影响(表 2)。经验类模型如输出系数模型 (Export Coefficient Model, ECM)<sup>[25]</sup>、磷指数法 (Phosphorus Index, PI)<sup>[26-27]</sup>。机理类模型如 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)<sup>[28]</sup>、AnnAGNPS (Annualized Agricultural

Non-Point Source Pollution)<sup>[29]</sup>、SUSTAIN (System for Urban Stormwater Treatment and Analysis Integration)<sup>[30]</sup>、HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran)<sup>[31]</sup> 等在关键源区识别过程中得到了广泛应用。

表2 BMPs 评估工作相关研究进展<sup>[33]</sup>

模型	类别	空间尺度	模拟的时间尺度	适用区域	优势	局限性
输出系数模型	经验型	流域尺度	年	农业流域	所需数据资料少, 计算简便	不考虑污染物运移过程, 小尺度区域模拟精度不高
PI	概念化	地块或子流域尺度	年	农业流域	操作简便, 所需数据资料少	模拟结果无量纲, 是对农业面源污染发生风险的相对表征
AGNPS	机制型	子流域	日	农业流域	可对不同子流域的土壤侵蚀空间分布及其对水质的影响进行模拟, 且计算速度较快	模拟基本单元为无限细分的子流域, 做精细化模拟过程中与实际情况不符
HSPF	机制型	子流域或流域尺度	日	农业流域和城市区域	对径流的模拟效果较好且	实测基础数据要求较高, 且无法将中国本地化的土壤属性和土地利用属性参数进行输入
SWAT	机制型	地块至流域尺度	日	农业流域	考虑了汇流和泥沙汇合过程; 结合 GIS 开发了水土保持模块; 易于使用	对于农业面源污染物在河道传输过程模拟不足

以上这些模型技术均为国外研究人员所建立, 一些模型参数在我国的适用性还不高, 比如 SCS-CN 径流曲线数模型中, 采用了 CN 来综合反映土地利用、坡度、土壤类型以及前期土壤湿度等参数对径流产生过程的影响, 但 CN 值表中反映的是美国的地域特征。同样地, 还有 SWAT 模型中关于土壤侵蚀的模拟模块中采用了 USLE 方程, 其中坡度参数是美国农业部在平均坡度为 5% 的实验地块中的监测结果, 而我国大多数地区地形坡度起伏较大, 与美国连片农场式的农业生产方式有很大差别, 直接使用该模型测算会产生较大误差<sup>[32]</sup>。因此, 在未来研究中, 如何构建适用于我国本地化特征的农业面源污染分析模型将是研究工作的重点。

## 2.2 农业面源污染治理措施评估

实施最佳管理措施被认为是进行农业面源污染治理的最有效途径。最佳管理措施是指为了防止或减少农业面源污染, 从而达到水质目标而采用的方法、措施及措施的组合<sup>[34]</sup>。根据美国农业部的定义, 最佳管理措施可分为工程型和非工程型两类, 美国农业部的最佳管理措施数据库结果显示, 仅农业面源污染治理措施可细分至 18 个不同的类别, 总量达到 200 种以上。工程型措施主要通过特定点位开展工程措施建设, 如植被缓冲带、人工湿地等, 侧重于对农业面源污染物传输过程的拦截和接纳水体的治理; 非工程型措施则包括化肥减量、残茬覆盖等, 侧重于农业投入品的源头减量。

与固定源污染治理不同, 受降雨强度、坡度地形以及土地利用的影响, 面源污染具有很强的时空差异性,

决定了面源污染治理不能采用与固定源相同的标准化治理模式, 而是要因地制宜采取适当的治理措施。这就需要对治理措施进行预评估以筛选正确的治理措施。此外, 实施之后还要对措施进行后评估, 以便于及时矫正治理措施存在的偏差与不确定性。当前较为常见的最佳管理措施评估方法有实地监测、机理模型模拟以及最佳管理措施数据库。如 20 世纪 90 年代初期, 美国怀特水务工程公司 (Wright Water Engineers, inc.) 就在美国农业部自然资源保护局等单位的资助下开展了最佳管理措施评估数据库的构建, 目前已经建成了全球范围内的第一个最佳管理措施评估数据库。该数据库中包括约 160 种农业 BMPs 和 150 种城市 BMPs, 且免费对外开放。用户可通过检索该数据库来获取拟实施的各项措施对目标污染物的潜在削减效率以及实施所需的成本数据, 为 BMPs 的实地配置工作提供决策分析依据<sup>[35]</sup>。在欧洲, 自 2005 年起有超过 30 个国家共同发起了名为 “Cost action 869” 地表水和地下水中营养物质削减措施评估计划, 构建了包括养分管理、农田管理、化肥施用管理等八类措施在内的 BMPs 成本—效益评估数据库, 可对欧洲地区用户提供便捷高效的 BMPs 配置决策依据<sup>[36]</sup>。我国在最佳管理措施数据库的构建领域也开展了一些研究, 如密云水库流域最佳管理措施评估工具箱, 就通过对 200 余篇相关研究成果中关于最佳管理措施评估效率的内容进行收集, 构建基于统计模型的评估方案。用户只需要输入目标区域的坡度和土壤属性即可对某项最佳管理措施实施后可能产生的污染物削减效率进行评

估<sup>[37]</sup>。以上这些研究成果对开展最佳管理措施的评估工作提供了极大的便利,但是只能针对单一类型的最佳管理措施进行评估,而单一措施普遍存在“保一损一”现象,如与传统耕作相比,少耕法或免耕法虽然能够减少地表径流中的氮负荷,但是会增加硝酸盐氮淋溶量。另一方面,等高耕作地表径流中硝酸盐氮、氨氮、磷酸盐浓度均高于传统耕作地表径流氮、磷浓度<sup>[38]</sup>。因此,对农业面源污染最佳管理措施的评估必将从单一措施的评估向多种措施组合评估发展,污染防治措施的综合建设及优化组合是减少农业面源污染和改善流域水环境质量的有效途径。

### 2.3 监督指导农业面源污染治理政策

随着农业面源污染治理技术日趋成熟,未来实现有效治理更多的是政策、体制以及经济问题。这就需要在已有理论研究基础上,制订具体的政策措施,并逐步付诸实践,以达到预期目标。当前我国关于农业面源污染治理的政策研究还处于起步阶段,目前只在一些部门和地方的行动方案中有所提及,如原农业部(现农业农村部)印发《关于打好农业面源污染防治攻坚战的意见》(农科教发〔2015〕1号),更多地侧重于如何针对农田系统、畜禽养殖等进行污染防治,并未将污染治理与实现流域水生态环境的持续改善有效地衔接。

美国和欧盟等发达国家和地区开展了一些尝试性研究,尤其是美国在农业面源污染治理政策体系研究方面的进展较为突出。自20世纪70年代起,美国就开展了关于农业面源污染治理相关的立法研究,如1977年《清洁水法(修订案)》中增加了农村清洁水计划,通过实施最佳管理措施以控制土壤侵蚀,减少农业面源污染。随着《清洁水法(修订案)》中对TMDL计划相关要求的出台,美国逐渐建立起了国家负责监督、评估、资金和技术支持,各州政府负责组织协调实施的农业面源污染治理机制,同时还建立了“源头目标约束—全要素治理要求—监管手段—治理机制—末端治理要求”等全过程监管的法规、政策以及保障体系。例如美国加州《灌溉土地管制计划》中规定了对农业面源污染排放的监测和监管、向农民提供技术服务以及协助农民配合相关监管工作三个主要目标。还将全州划分为9个区域,分别设置区域水质控制委员会,根据区域本底状况制定标准、发布废水排放要求,采取适当的执法行动,形成各自的农业管理方案。

农业面源污染监管对象是农民的特点决定了采用强制监管政策很难达到预期效果,必须辅以有效的经济激励政策。如生产税、环境税/补贴、政府资助以及水质交易等手段。以水质交易为例,与传统的企业之间、区域之间开展的排污权交易不同,以美国为代表的水质交易体系是通过将政府、企业以及流域内附近农场主进行利益捆绑的一种多元参与的环境激励机制。水质交易的

理论基础最早由经济学家Dales和De Lucia提出<sup>[39-40]</sup>。首次将其应用于水污染治理是在20世纪80年代,在美国威斯康星州的Fox河流域开展了水质交易的首次试点。随着TMDL计划在各州层面的广泛实施,自2000年起,各州分别就水质交易(包括点源与点源以及点源与面源)计划开展了大量的研究。截至2015年底已经有36个州共52个流域开展了水质交易计划研究,其中关于点源—面源污染之间的交易研究共24例,有20例研究是针对氮、磷等养分的交易研究,取得了较好的水质改善效益<sup>[41-42]</sup>。现阶段,我国在农业面源污染治理的政策体系研究方面才刚刚起步,强制监管措施、经济激励机制均比较缺乏,而国外的经验又不能拿来就用,因此,未来农业面源污染治理的体制机制和政策体系研究将是重点领域。

### 3 结论和建议

(1)当前我国水环境质量改善的突破点已从固定源污染治理转至农业面源污染治理。因此,要在科学评估面源污染监测体系的基础上,结合生态环境部环境监管工作的实际需要,建立监督指导农业面源污染治理体系的路线图,明确治理的目标(含短期、中期、长期)、任务(含监测点位的完善、指标标准的细化、重点治理技术研发等)、对策(治理的体制机制、政策措施以及激励机制)。

(2)当前在小尺度区域内农业面源污染负荷核算与关键源区识别的研究已日趋成熟。构建强大的监测网络体系将是未来研究工作的重点。要立足于现有全国地表水环境监测网络,针对面源污染特点,综合考虑监测的最优空间尺度,确定监测频率及监测点位布设模式。设置单一流域对比监测、流域上下游监测、相邻流域同步监测、对照小流域监测、水质变化趋势监测、水土协同过程监测及地块边缘监测等不同的监测点位布局模式,为精准分析农业面源污染变化趋势、污染源识别以及污染控制措施效果的响应情况提供数据支撑。

(3)要开展适用于我国国情的农业面源污染评估技术体系研究,包括农业面源污染治理措施的设计、建设以及运行标准。要构建参数本地化的模型模拟系统,并通过试点示范研究,将模型评估技术纳入面源污染环境纠纷事件调处工作中。以美国的磷指数模型为例,目前就已经在47个州作为农业面源污染风险源评估工具得到应用。

(4)我国农业面源污染管理和控制政策措施相对分散,没有形成系统的体系。要加快构建以经济激励为主,强制监管为辅的政策措施体系。在实际操作中,针对面源污染较重的地区,在短期内可采用命令控制型政策加强管制,待面源污染恶化趋势得以有效控制以后,则通过建立基于“阶梯价格”的化肥消费税、农药使用

税以及流域水质交易等激励措施和劝说教育政策, 鼓励更多的涉益者参与到面源污染的全过程控制环节中来。

### 参考文献:

- [1] FENG F, EASTER K W, BREZONIK P L. Point - Nonpoint Source Water Quality Trading: A Case Study In The Minnesota River Basin [J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2005, 41(3): 645-657.
- [2] MCELROY A. Loading functions for assessment of water pollution from nonpoint sources [J]. Vol. 1. 1976: US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, [Office of Air, Land, and Water Use].
- [3] BUREAU W L F. Nonpoint source and water pollution abatement and soil conservation programs. Informational Paper, 2007. 66.
- [4] DOWD B M, PRESS D, LOS HUERTOS M. Agricultural nonpoint source water pollution policy: The case of California's Central Coast [J]. Agriculture, ecosystems & environment, 2008, 128(3): 151-161.
- [5] 章茹. 流域综合管理之面源污染控制措施(BMPs)研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2008.
- [6] 王晓燕, 阎恩松, 欧洋. 基于物质流分析的密云水库上游流域磷循环特征[J]. 环境科学学报, 2009(7): 1549-1560.
- [7] LAW P. Federal water pollution control act amendments of 1972. Public Law, 1972, 92(500): 500.
- [8] KALLIS G, BUTLER D. The EU water framework directive: measures and implications [J]. Water policy, 2001, 3(2): 125-142.
- [9] 高超, 张桃林. 欧洲国家控制农业养分污染水环境的管理措施[J]. 农村生态环境, 1999(2): 51-54.
- [10] COLLINS A L, MCGONIGLE D F. Monitoring and modelling diffuse pollution from agriculture for policy support: UK and European experience [J]. Environmental Science & Policy, 2008, 11(2): 97-101.
- [11] WARD A, SHARPLEY A N, MILLER K, et al. An assessment of in-field nutrient best management practices for agricultural crop systems with subsurface drainage [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 73(1): 5A-10A.
- [12] GBUREK W J, SHARPLEY A N, PIONKE H B. Identification of critical source areas for phosphorus export from agricultural catchments. 1996.
- [13] PIONKE H B, GBUREK W J, SHARPLEY A N. Critical source area controls on water quality in an agricultural watershed located in the Chesapeake Basin [J]. Ecological Engineering, 2000, 14(4): 325-335.
- [14] PANAGOPOULOS Y, MAKROPOULOS C, MIMIKOU M. Reducing surface water pollution through the assessment of the cost-effectiveness of BMPs at different spatial scales [J]. Journal of environmental management, 2011, 92(10): 2823-2835.
- [15] LENHART C F, WILSON B N, GORDON B. Factors impacting the variability of effectiveness of agricultural best management practices (BMPs) in Minnesota. in 2016 10th International Drainage Symposium Conference, 6-9 September 2016, Minneapolis, Minnesota. 2016. American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- [16] 杨林章, 冯彦房, 施卫明, 等. 我国农业面源污染治理技术研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 96-101.
- [17] SHARPLEY A N, KLEINMAN P, MCDOWELL R, et al. Modeling phosphorus transport in agricultural watersheds: Processes and possibilities [J]. Journal of soil and water conservation, 2002, 57(6): 425-439.
- [18] 欧洋, 王晓燕. 景观对河流生态系统的影响[J]. 生态学报, 2010(23): 6624-6634.
- [19] DIEBEL M W, MAXTED J T, NOWAK P J, et al. Landscape planning for agricultural nonpoint source pollution reduction I: a geographical allocation framework [J]. Environmental management, 2008, 42(5): 789-802.
- [20] MAGUIRE R O, RUBAEK C H, HAGGARD B E, et al. Critical evaluation of the implementation of mitigation options for phosphorus from field to catchment scales [J]. J Environ Qual, 2009, 38(5): 1989-97.
- [21] CHERRY K A, SHEPHERD M, WITHERS P J, et al. Assessing the effectiveness of actions to mitigate nutrient loss from agriculture: A review of methods [J]. Science of the Total Environment, 2008, 406(1): 1-23.
- [22] BISHOP P L, HIVELEY W D, STEDINGER J R, et al. Multivariate analysis of paired watershed data to evaluate agricultural best management practice effects on stream water phosphorus [J]. Journal of Environmental Quality, 2005, 34(3): 1087-1101.
- [23] 吴敬东, 段淑怀, 叶芝茜, 等. 蛇鱼川生态清洁小流域水生态环境监测布设研究[J]. 水土保持通报, 2009, 29(2): 70-72.
- [24] HUGHES A, CHILTON J, WILLIAMS A. Review and categorisation of nitrate transport in groundwater systems. Appendix V of Investigating the Effectiveness of NVZ Action programme Measures: Development of a strategy for England; Report for DEFRA project WT03017, 2006.
- [25] 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 modelling approach [J]. Journal of Hydrology, 1996, 183(3): 323-349.
- [26] MCDOWELL R, SHARPLEY A N, FOLMAR G. Phosphorus export from an agricultural watershed [J]. Journal of Environmental Quality, 2001, 30(5): 1587-1595.
- [27] SHARPLEY A N, KLEINMAN P J, JORDAN P, et al. Evaluating the success of phosphorus management from field to watershed [J]. Journal of environmental quality, 2009, 38(5): 1981-1988.
- [28] ARNOLD J G, SRINIVASAN R, MUTTIAH R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development [J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73-89.
- [29] QUINN P, BEVEN K, CHEVALLIER P, et al. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models [J]. Hydrological processes, 1991, 5(1): 59-79.
- [30] ELLIOTT A, TROWSDALE S. A review of models for low impact urban stormwater drainage [J]. Environmental Modelling & Software, 2007, 22(3): 394-405.
- [31] DONIGAN A S, IMHOFF J C, BICKNELL B R, et al. Application Guide for Hydrological Simulation Program; FORTRAN (HSPF). EPA-600/3-84-065 June 1984. Environmental Research Laboratory, Athens, GA. 177 p, 19 fig, 17 tab, 3 app, 20 ref. 68-01-6207. 1984.
- [32] HUANG M, GALLICHAND J, WANG Z, et al. A modification to the Soil Conservation Service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China [J]. Hydrological Processes: An International Journal, 2006, 20(3): 579-589.
- [33] 耿润哲, 王晓燕, 赵雪松, 等. 基于模型的农业非点源污染最佳管理措施效率评估研究进展[J]. 生态学报, 2014, 33(22): 6397-6408.
- [34] STRECKER E, QUIGLEY M, URBONAS B. A reassessment of the expanded EPA/ASCE National BMP Database. in AGU Fall Meeting Abstracts, 2003.
- [35] 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[J]. 生态学报, 2019, 39(8): 2667-2675.
- [36] PANAGOPOULOS Y, MAKROPOULOS C, MIMIKOU M. Reducing surface water pollution through the assessment of the cost-effectiveness of BMPs at different spatial scales [J]. J Environ Manage, 2011, 92(10): 2823-35.
- [37] GENG R Z, WANG X, SHARPLEY A N. Developing and testing a best management practices tool for estimating effectiveness of nonpoint source pollution control [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(4): 3645-3659.
- [38] 杨育红. 小流域农业面源污染及防治措施配置研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院, 2010.
- [39] JOHN D. Pollution, Property and Prices [D]. 1968, University of Toronto Press, Toronto.
- [40] DELUCIA R J. Evaluation of marketable effluent permit systems. 1974, Meta Systems, Inc., Cambridge, Mass. (USA).
- [41] PARTNERSHIP W. Building a Water Quality Trading Program: Options and Considerations. 2015.
- [42] PARTNERSHIP W. A How-To Reference for Building Point-Nonpoint Water Quality Trading Programs. 2012.

## A review: the technology and policy design of agricultural non-point source pollution management

WANG Meng, ZHOU Lili, GENG Runzhe

(Policy Research Center for Environment and Economy, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China)

**Abstract:** With the significant improvement of point source pollution control, the eutrophication of surface water has become

an endemic global problem. For the last 40 years, a lot of the research was conducted in U.S, EU and China and so on, which provides a great deal of valuable experience to continue carrying out this research. In this article, we review the current knowledge about the assessment of agricultural non-point source pollution load, the identification of critical source areas of non-point source pollution, the placement and effectiveness assessment of best management practices for non-point source pollution control and the policy design for non-point source pollution control in national scale. The main suggestions are as follows: (1) to compile a technical roadmap for supervision and guidance of non-point source pollution in national wide; (2) to make an in-depth research on optimizing the monitoring network of surface water for improving the basic database while coupled with the flow monitoring; (3) to make a series of research work about the parameter located in order to develop a model system for non-point source pollution control in China; (4) to pay more attention to policy research about non-point source pollution control and form a policy system with carrots and sticks.

**Keywords:** non-point source pollution; hydrological model; monitoring network; policy and practices

## 生态环境部环境与经济政策研究中心 1989-2019 年代表性文章选集目录清单

- |      |   |                |
|------|---|----------------|
| 1989 | 环境保护是关系经济和社会发展全局的大问题                      | 曲格平            |
| 1989 | 浅谈推进我国环境保护事业的国力潜能和社会综合动力——评改革给环保工作带来的强大生机 | 岩流             |
| 1992 | 资源核算及其纳入国民经济核算体系初步研究                      | 李金昌            |
| 1992 | 探索持续发展的道路——1992 持续发展青年研讨会综述               | 骆建华            |
| 1995 | 环境损失知多少                                   | 孙炳彦, 赵毅红, 王新   |
| 1995 | 燃煤污染与对策                                   | 王汉臣            |
| 1996 | 试论我国自然资源立法的几个基本问题                         | 王凤春            |
| 1996 | 环境科技是通向可持续发展的桥梁——美国制定新的环境科技发展战略           | 赵峰, 曹凤中        |
| 1997 | 层次分析法在乡镇工业污染原因分析中的应用                      | 赵毅红, 孙炳彦, 王招娣  |
| 1998 | 全球环境信息交流网络——INFOTERRA                     | 安彤             |
| 1998 | 中外清洁生产背景的比较及其对我国的启示                       | 钱智, 钱勇         |
| 1998 | 中国塑料生命周期的环境——经济综合评价                       | 周新             |
| 1999 | 中国环境保护技术政策框架及实施方式                         | 尹改             |
| 2001 | “压缩型”特征是 21 世纪环境决策的基点                     | 曹凤中, 周国梅       |
| 2001 | 奥胡斯协议及其对我国的启示                             | 程路连            |
| 2001 | 西北大海洋环保机构和专家数据库的设计                        | 朱裕栋            |
| 2001 | 中国城市环境现状及主要城市环境管理措施                       | 冯东方            |
| 2002 | 国外自然保护区的立法与管理体制                           | 朱广庆            |
| 2003 | 循环经济和工业生态效率指标体系                           | 周国梅, 彭昊, 曹凤中   |
| 2003 | 循环经济及其法律调控模式                              | 陈赛             |
| 2004 | 中国城市环境基础设施建设与运营市场化模式及其相关政策研究              | 裴晓菲, 任勇, 高彤, 等 |
| 2004 | 环境保护政策创新的切入点: 构建绿色经济制度体系                  | 吴玉萍            |
| 2006 | 从“环境换取增长”到“环境优化增长”                        | 夏光             |
| 2006 | 国际生态补偿政策对中国的借鉴意义                          | 高彤, 杨姝影        |
| 2007 | 减少我国贸易的资源环境“逆差”                           | 胡涛, 吴玉萍, 沈晓悦   |
| 2007 | 中国环境与发展的战略转型                              | 任勇, 陈刚         |
| 2007 | 我国推行环境保护金融政策的障碍与改进途径                      | 李华友, 冯东方       |
| 2008 | 海洋垃圾: 需要重视的国际环境问题                         | 王建国, 朱裕栋       |
| 2008 | 国际贸易视角下的中国碳排放责任分析                         | 李丽平, 任勇, 田春秀   |
| 2008 | 中国把环保摆上战略位置                               | 冯燕             |

(下转第 109 页)