

DOI: 10.5846/stxb201804140860

耿润哲, 梁璇静, 殷培红, 王萌, 周丽丽. 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.

Geng R Z, Liang X J, Yin P H, Wang M, Zhou L L. A review: multi-objective collaborative optimization of best management practices for non-point sources pollution control. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(8): 2667-2675.

## 面源污染最佳管理措施多目标协同优化配置研究进展

耿润哲, 梁璇静, 殷培红\*, 王萌, 周丽丽

生态环境部环境与经济政策研究中心, 北京 100029

**摘要:** 随着点源污染逐渐得到有效控制, 面源污染逐渐成为我国多数地区影响水环境质量安全的主要因素。推广实施最佳管理措施(Best Management Practices, BMPs)被认为是控制面源污染的有效途径。受到区域种植制度、耕作方式、政策以及经济成本等因素的影响, 导致流域尺度配置 BMPs 存在一定的困难, 特别是随着流域空间尺度的变化, 会进一步加大 BMPs 配置难度, 使得 BMPs 的配置工作变为了一项多目标决策优化问题, 即如何在有限的成本投入下, 实现水环境质量改善的目标。需要在不同空间尺度下对流域 BMPs 进行多目标协同优化配置。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 多目标协同优化配置研究进行了综述。结果表明: 1) 包含地块尺度和流域尺度的多尺度模型耦合系统的构建, 将是实现关键源区精准识别的有效途径; 2) BMPs 削减效率对水质改善响应的滞后性、不确定性、时空异质性、污染物形态转换风险等均是今后 BMPs 削减效率评估中需要重点解决的关键问题; 3) 建立流域污染物负荷削减量与水质改善之间的非线性响应关系, 并以此为基础将 BMPs 组合数据库、成本数据库以及基于进化算法的优化配置方案进行耦合, 进而构建多目标决策支持系统, 以获取 BMPs 空间优化配置方案以及多目标成本-效益最优曲线。

**关键词:** 面源污染; 最佳管理措施; 多目标优化; 流域管理

### A review: multi-objective collaborative optimization of best management practices for non-point sources pollution control

GENG Runzhe, LIANG Xuanjing, YIN Peihong\*, WANG Meng, ZHOU Lili

Policy Research Center for Environment and Economy, Ministry of Ecology and Environment Protection, P.R. China, Beijing 100029, China

**Abstract:** With point source pollution gradually being controlled, non-point source pollution has become a threat for water quality in most regions of China. Best management practices (BMPs) have been regarded as the most effective way to control non-point source pollution. However, the effectiveness of regional cropping systems, cultivation methods, policies, and economic costs lead to difficulties in BMP allocation at the watershed scale. In particular, the difficulties further increase with the changes at spatial scale. As a result, the allocation of BMPs has been moved to a multi-objective decision optimization program, to achieve water quality improvement targets under limited inputs. Therefore, there is a need for multi-objective collaborative optimization of BMPs at different spatial scales. Herein, we reviewed the current research pertaining to multi-objective collaborative optimization of BMPs for non-point source pollution with respect to three aspects: identify the critical source areas (CSAs) of non-point source pollution, assessment of BMPs cutting efficiency, and imitate multi-objective collaborative optimization of BMPs. The results indicate that: i) building multi-scale model coupling system, including land scale and watershed scale, would be the most efficient way to accurately identify CSAs; ii) reducing time lag, uncertainty, and spatial and temporal heterogeneity as well as the risk of pollution to improve water quality will be

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41601551); 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); 环保部第三批城环总规试点项目(YGCC-GQY-201418)

收稿日期: 2018-04-14; 网络出版日期: 2019-01-18

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yinpeihong@sina.com

<http://www.ecologica.cn>

the key to the cutting efficiency of BMPs; iii) building a nonlinear response relation between watershed pollutant reduction and water quality improvement is essential. The BMP database, cost database, and scientific allocation schemes based on evolutionary algorithm (EA) can be combined to build a multi-scale decision supporting system. The allocation scheme of BMPs and the optimum curve of multi-scale cost-effectiveness can then be acquired.

**Key Words:** non-point source pollution; best management practice; multi-objective collaborative optimization; watershed management

近年来,我国水环境质量稳中有升,全国平均水质指数为 5.66,同比改善 8.4%,总磷等营养物质已经逐步取代化学需氧量等成为导致水环境质量下降的首要污染物,面源污染则是多数地区流域水质下降的重要影响因素<sup>[1-2]</sup>。由于面源污染发生具有随机性,来源和传输过程具有间歇性和不确定性,使得面源污染的输出受到自然地理、农业管理方式差异的影响较为显著,空间变异性强,对其进行监测和治理相对比较困难<sup>[3-6]</sup>。推广实施“最佳管理措施”(Best Management Practices, BMPs)是进行农业面源污染源控制的有效手段。

BMPs 主要有工程型和非工程型两大类<sup>[7]</sup>。据美国农业部的 BMPs 数据库结果显示,仅农业面源污染治理措施的 BMPs 类型就达 200 种以上。目前,在 BMPs 的实践应用方面,受限于关键源区识别方法的尺度适用性、BMPs 配置方案操作难易程度、BMPs 对污染物负荷削减效率对水质改善的滞后性以及区域自然地理特征差异导致的 BMPs 效果的不确定性等因素影响,导致 BMPs 配置方案的成本效益比较低,可操作性较差。因此,针对流域面源污染控制措施 BMPs 配置方面的诸多难点,如何通过对 BMPs 的削减效率及其对流域整体水环境质量改善的效果进行有效评估,并在此基础上借助 GIS 空间分析手段,从流域整体对 BMPs 进行多目标协同优化配置分析,对于实现流域面源污染控制具有重要的意义。

BMPs 的多目标协同优化配置是解决这类问题的有效途径,该项研究最早出现于 1980 年代,但当时的研究处于初期探索阶段<sup>[8-9]</sup>。随着计算机科学技术的快速发展,对大样本量数据计算的能力得到显著提升,到 2000 年左右以美国学者为代表的 BMPs 优化配置研究逐渐丰富起来,成为在流域尺度开展 BMPs 配置方案研究的重要方法<sup>[10-13]</sup>。研究表明,要实现流域 BMPs 的多目标优化配置,需要从以下 3 个方面来开展相关研究:(1) 面源污染关键源区识别(Critical Source Areas, CSAs)、(2) BMPs 削减效率评估、(3) 空间优化配置模拟。下面,将分别对这 3 方面内容的研究进展加以论述。

## 1 BMPs 多目标优化配置

### 1.1 面源污染关键源区识别

研究表明面源污染物产生及运移过程会受到流域内不同景观、管理措施以及特定点位自然地理条件的强烈影响,其污染负荷有着很大的差别<sup>[14]</sup>。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通常达到了 80%左右,且而且污染负荷在空间上通常呈正态分布或对数正态分布<sup>[15]</sup>。这些污染负荷较高的区域通常被称为面源污染关键源区(Critical Source Areas, CSAs)<sup>[16]</sup>。目前针对面源污染特征分析的关键源区识别研究主要集中 2 个方面:一是在流域尺度上利用模型对面源污染的时空分布特征规律进行表征,二是针对某一田间小尺度流域进行深入的实地监测研究<sup>[17-18]</sup>。这些研究虽然在一定程度推进了流域面源污染研究的进展且对流域面源污染控制具有指导意义,但是这些研究的共同特点是以污染负荷量或评价指数高低作为关键源区的评判标准,缺少不同尺度污染源和迁移因子之间的联系,使得流域面源污染管理和控制往往缺乏对田间地块尺度污染物的产生规律和影响因素的表征,导致基于关键源区识别的面源污染控制通常不能达到预期的效果<sup>[19]</sup>。

随着对面源污染发生机理认识的深化,多数研究均表明流域水文模型和 GIS 技术的联合使用能够在 CSAs 识别、量化以及相应措施的选取方面发挥重要的作用<sup>[17-20]</sup>。根据实施的难易程度及适用的尺度,关键

源区识别方法主要有风险评价及模型模拟两大类<sup>[21]</sup>。

风险评价方法主要以量化面源污染负荷的发生风险为基础,通过对污染物产生与运移同时发生的概率进行估算,进而在污染物流失风险分级的基础上,识别 BMPs 配置的目标区域(关键源区)<sup>[22]</sup>。目前应用较多的风险评价方法有磷指数法(phosphorus index, PI)及其相应的衍生模型,美国学者 Lemunyon(1993)等在综合考虑影响流域内面源污染产生及传输的多个因子及其相互作用对磷流失的影响后构建而成。由于其可以根据研究区的特征对因子进行修正,具有很大的可扩展性,目前在世界各国磷流失的风险评价方面得到广泛应用与改进<sup>[23-24]</sup>。PI 既可以识别磷流失的潜在风险也可以定量估算磷的实际流失量,不使用复杂的数学模型,操作使用方便,具有很强的灵活性<sup>[25]</sup>。但由于大尺度流域内磷污染的来源、传输及迁移转化过程非常复杂,对其进行概率量化评估非常困难,因此 PI 法还主要应用于地块尺度,大尺度流域 PI 体系的构建还有待加强<sup>[26]</sup>,同时由于风险评价法是基于对污染风险区污染物流失风险高低的定性分析,而流域面源污染的控制以及 BMPs 的配置需要有量化的风险指标为基础,因此如何将定性的风险分析指标进行量化也成为了限制风险评估法在流域综合管理体系中进行应用的重要限制性因素<sup>[27-28]</sup>。

模型模拟方法主要通过将地理信息数据(DEM)、土壤属性数据、土地利用数据等进行耦合,能够对流域内面源污染发生及迁移具有重要驱动作用的复杂的水文及污染物输移过程进行较好的表征,多用于从田间地块尺度到流域尺度范围研究区面源污染负荷的估算、关键源区识别及不同 BMPs 的长期效果评价,是 BMPs 优化配置的第一个重要前提<sup>[27, 29-31]</sup>。目前应用广泛的机理模型主要有 ANSWERS、SWAT、AnnAGNPS 和 HSPF 等<sup>[32-35]</sup>。值得注意的是,随着研究尺度的提升,流域水文过程和土壤侵蚀过程往往被简化或均一化,导致对小尺度产污单元的污染特征考虑不够充分<sup>[5]</sup>,因此,小尺度面源污染模型的引入就显得非常必要,IFSM 模型是一个综合性的田间地块尺度模型,它能够对长时期内地块尺度的工程型和管理型 BMPs 措施的环境和经济效益进行评估。能够对作物生长、动物生长以及营养物质平衡(仅包括动物饲料和化肥的输入,输出仅包括动物产品和农作物产品 P、N、K)等进行预测。保持地块尺度上营养物质的平衡是防止营养物质富集的关键因素。同时 IFSM 还能够对典型地块外的土壤侵蚀以及地表径流中 P 的流失进行预测,是一种较好的田间地块尺度面源污染特征识别机 BMPs 模拟工具<sup>[36-37]</sup>。

然而,尽管模型模拟法在 CSAs 识别及 BMPs 模拟方面具有诸多优势和较高的认可度,但是其在 CSAs 识别和目标措施评估的实际应用方面还存在以下几点不足:(1)空间数据信息的不匹配性;(2)流域边界与行政边界(实际实施)之间尺度存在断层;(3)面源污染物流失量空间传输的非线性所导致的 CSAs 识别结果的尺度差异性等,这些因素会使得流域内 CSAs 的面积和位置发生变化,为后期 BMPs 的优化配置带来一定的不确定性。

## 1.2 BMPs 削减效率评估

BMPs 控制效率的评估是决定措施是否适用的关键步骤,同时也是进行流域 BMPs 多目标优化配置的第二个重要前提,全面考察目标配置方案所包含的 BMPs 及其组合措施的环境效应及成本-效益情况需要采用一系列的评估方法。常用的 BMPs 削减效率评估方法主要有实地监测、风险评价、模型模拟和养分平衡 4 种<sup>[38]</sup>。按照实现的原理可归结为实地监测和模型模拟 2 大类。小尺度流域或试验地块的现有研究成果多采用实地监测的方法对单体措施的效率进行评估,大尺度流域内 BMPs 组合削减效率评估则多通过经验和机理模型模拟来实现<sup>[39-40]</sup>。

在研究区位置、水文、气象以及下垫面条件等自然地理因素的影响下,不同实施规模及基质材料的最佳管理措施(BMPs)效率的研究结果差异明显<sup>[41-42]</sup>。究原因可归结以下三点:(1)BMPs 措施污染削减效率发挥的滞后性的影响,使得所监测到的措施削减效率与实际削减效率出现较大的差异<sup>[43]</sup>;(2)不同的自然地理因素导致 BMPs 效率发挥的不确定性,如下垫面基质的差异对入渗沟、植草水道等以下渗为主要削减机制 BMPs 效果的发挥所产生的不同影响<sup>[19]</sup>;(3)BMPs 的实施规模以及当地特有的农业生产活动导致的污染物的入流量差异的影响,如种植制度、耕作方式等<sup>[44]</sup>。

因此,实现 BMPs 效率的准确评估,需要考虑多方面因素所带来的措施效率不确定性的影响。孟凡德等(2013)对实地监测、养分平衡、风险评估及模型模拟这四种方法所具有的其优缺点和适用的条件进行了总结(表1)<sup>[45]</sup>。结果表明:(1)实地监测法可通过对目标水体中污染物浓度和负荷数据进行长期连续监测,以实现 BMPs 削减措施效率的有效表征,在此基础上进一步实现 BMPs 对流域水质和生态功能的实际改善效果的有效评估。但受限于成本投入、污染源分布离散化、流失以及传输途径的时空异质性等因素,实地监测法很难在大尺度流域得到应用,而多适用于小尺度区域,在大尺度区域评估时需采用替代的评估方法。养分平衡分析法是以氮磷等营养元素在地块或流域尺度的输入输出平衡状况作为评价标准,对营养元素在“源”和“汇”之间传输变化对于面源污染产生的影响进行评估。(2)养分平衡法具有简便、易用且所需时间短等特点,同时还可有效规避措施效率的滞后性对评估效果的影响,但对影响污染物削减的传输过程变化考虑较少,无法对以传输机制控制为主的 BMPs 进行较好的表征。(3)风险评估法通过调整源因子、运移因子类型及参数,可模拟源控制及传输过程控制为主的 BMPs 的实施效果。该方法很难对以种植活动和饲养活动等为控制目标的措施效率的年际间变化情况进行有效表征<sup>[21,46]</sup>,并且在缺乏实地监测数据支持的情况下,无法很好的反映污染物传输过程对面源污染的影响,且 BMPs 的削减效率易被模型结构和参数的不确定性影响<sup>[47]</sup>。风险评估法进行 BMPs 效率评估时最主要的缺陷还在于其评估结果只是污染物流失的潜在风险值,并不是实际的磷流失量,而如何将定性的评估结果进行量化,以使其满足 BMPs 优化配置的模拟要求目前来看还鲜见相关研究报道<sup>[48]</sup>。另外,在源因子以及迁移因子的权重确定、评估结果的风险等级划分环节还缺乏统一的标准,说专家打分主观性影响较大,使得风险评估法对 BMPs 削减效率评估的计算结果可信度通常不高<sup>[49]</sup>。(4)模型模拟方法可以对不同空间尺度下 BMPs 源头控制、时间效应、传输路径控制等环节进行表征,精度较高,但是对数据的连续性和可靠性、操作人员的专业水平等要求较高,同时由于模型设计成百上千的参数,在使用过程中如校验不当,还会导致“异参同效”现象的出现,对精准评估 BMPs 的削减效率产生干扰。

不同评估方法对于 BMPs 效率的评估都有其各自的优点和局限性,因此其适用性也存在较大差异。如何有效的将各种方法整合在一起进行综合评估已成为近年来相关研究的热点。大量已有研究表明,方法集成过程中的实地监测工作不可或缺。在此基础上,研究者可根据各自的研究目的将不同评估方法进行组合,才可达预期 BMPs 评估目标。例如,Brown 等以 NCYCLE(氮循环模型)模拟结果为数据来源,进行了场域平衡估算,最终通过编程设计出了一种施肥决策支持系统(NGAUGE)<sup>[50]</sup>。Oenema 等为考察源削减对河流水质的影响,首先利用营养平衡模型(MINAS)估算了小尺度研究区营养盐的盈余,接着将这一数据带入到河流水质模型中,进而预测了不同施肥方式对河道内生态系统的影响<sup>[51]</sup>。

此外,在传统 BMPs 评估的基础上,近年来美国和欧洲所建立的 BMPs 数据库也已成为 BMPs 削减效率评估的重要手段,如 20 世纪 70 年代初,美国农业部就在美国范围内开展了大量 BMPs 效率评估及检测相关的基础研究工作,其下属的自然资源保护局(NRCS)基于此构建了全球范围内的第一个 BMPs 评估数据库,该数据库中包括约 160 种农业 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。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、农业管理、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>[42]</sup>。

国内唐颖以 BMPs 适用区域特征、BMPs 径流控制功效特征和 BMPs 成本投入为三个关键标准类别,建立了适用于城市暴雨径流控制的 BMPs 的初步比选体系<sup>[52]</sup>。耿润哲等以文献资料中关于对 BMPs 削减效率研究数据为基础,结合计算机数据库技术(VBA, Visual Basic for Applications)和(SQL, Structured Query Language)和编程技术对数据库进行整合分析,构建了适用北京市密云水库流域的 BMPs 削减效率评估工具箱,结合 ANOVA(方差分析)法识别影响 BMPs 削减效率的关键因子,能够对 BMPs 进行有效筛选和评估。这些研究虽都能有效的对拟实施 BMPs 进行筛选,但是在不同程度上均需要大量的实地调查或监测数据作为支

撑才能实现,同时,由于其所需的设计参数、成本维护等信息大多来自美国环保局(EPA)或美国农业部(USDA)的BMPs数据库,因此,在本地化应用及实际评估方面会受到一定的限制。

表 1 各种评估方法特点总结<sup>[45]</sup>

Table 1 Summary of assessment method features

		评估方法 Assessment methods			
		实地监测 Field monitoring	平衡理论 Nutrients balance	风险评估 Risk assessment	模型模拟 Modeling
削减效应 Reduction effectiveness	源头控制 Source control	Y	Y	Y	Y
	时间效应 Time lags	Y		Y <sup>①</sup>	Y
	传输路径控制 Path control	Y		Y	Y
尺度 Spatial scale	地块 Field	Y	Y	Y	Y
	农场 Farm	Y	Y	Y	Y
	流域 Watershed	Y	Y	Y	Y
	国家 National		Y		Y
复杂性 Complexity	单一方法 Single-method	Y	Y	Y	Y
	综合方法 Integrated approach	Y	Y <sup>②</sup>	Y <sup>②</sup>	Y
数据需求 Data requirement	地块 Field	中	低	低	中
	农场 Farm	中	低	低	中
	流域 Watershed	高	中	中	中到高 <sup>③</sup>
	国家 National	高	中	高	中到高 <sup>③</sup>
不确定性 <sup>④</sup> Uncertainty	地块 Field	低	中 <sup>⑤</sup>	低/中	中
	农场 Farm	低	中 <sup>⑤</sup>	低/中	中
	流域 Watershed	中	中 <sup>⑤</sup>	中	高
	国家 National	高	高	高	高

① 粪肥使用的时间性的重大改变有敏感性; ② 未给出多种削减措施的交互作用指标; ③ 机制模型的数据需求高于经验模型; ④ 从污染源到时间性以及传输路径控制类型之间的不确定性是增加的; ⑤ 假设可通过污染物盈余量来估算流失量。其中 Y 表示四种不同的评估方法所能够实现对应尺度下的削减效应、尺度、复杂性、数据需求、不确定性等的表征

### 1.3 BMPs 多目标优化配置模拟

流域内可能会有多种不同的 BMPs 及其空间组合方式以满足面源污染的控制管理要求,这使得基于 BMPs 及其组合的面源污染控制问题,实际可转化为多目标决策问题。多目标是指实现 BMPs 配置的成本最低、氮、磷等污染物的削减效率最高、水质改善效果最显著 3 个方面的目标,三者之间呈现非线性的动态响应关系,优化配置方案是指当以上 3 个目标达到均衡状态点(也称阈值点)的 BMPs 组合方案。BMPs 多目标优化配置方法主要包括两大类: 污染物实地监测或调查数据同最优化的数学方法相结合; 模型模拟同最优化的数学方法相结合(或者也可称之为 BMPs 组合优化综合模型,主要包括面源污染物削减模型、经济模拟模块以及一个最优化模型)。下面就这些方法在国内外的应用做简要的论述。其主要包括以下几个部分<sup>[42]</sup>: a) 有效的面源污染评估工具,通常为机制性模型,其能够对流域内特定点位不同 BMPs 及其污染物削减效率进行较好的模拟表征; b) 经济评估模型或经济评估公式,其能够有效地对不同空间位置的 BMPs 的成本进行分析; c) 最优化算法程序,其能够有效通过广泛的、非线性的以及非连续性的解空间的寻优运算来解决流域面源污染的最优化求解问题<sup>[53]</sup>。基于遗传算法衍生的多目标进化算法能够有效解决多种目标的决策优化问题,同时还能够获取全局性的帕累托最优解。以次方法为优化方法,可以为流域面源污染最佳管理措施的成本-效益最优化决策提供理论和数据支持。

目前关于 BMPs 的多目标优化配置研究多以美国学者和我国学者所建立的“水文模型+最优化方法”为主,通过将 SWAT 模型与最优化的数学方法进行耦合来解决农业流域内 BMPs 的优化配置问题<sup>[6, 52, 54-58]</sup>。在欧洲则多以考虑污染物输出的流域决策支持系统构建作为实现 BMPs 优化配置的主要手段。如: Elbe-DSS<sup>[59]</sup>, MULINO DSS<sup>[60]</sup>, FLUMAGIS DSS<sup>[61]</sup>, SEAMLESS-IF<sup>[62]</sup>等,以上这些决策支持系统均能够在不同的空

间尺度下对多种农业管理措施进行评估。然而,其对实地监测数据和社会经济数据的要求较高且通常需要操作人员具有较高的专业技能以实现不同空间尺度的转换及特定环境条件下的评估。目前多数决策支持系统均是在区域尺度或大流域尺度来进行研究工作,对于中小尺度的 BMPs 空间优化配置问题的解决能力不足,并且这类方法通常通过对单体措施的整体性能进行均一化并赋予权重来作为 BMPs 评估的多重准则<sup>[60]</sup>。较为明确的多目标决策进化优选过程在以上研究中并未很好的体现。

对美国学者所建立的 SWAT-GA 理论体系进行分析发现,还具有可进一步优化完善的空间。如 Gitau 等和 Veith 等的研究并没有解决多目标决策问题,且未提供最优化方案的成本-效益曲线<sup>[13, 63, 64]</sup>。相比较而言,Bekele 等的研究虽然有关于成本-效益曲线的相关描述,但是仅仅是针对于 BMPs 成本与泥沙负荷量之间的关系,因此其在 BMPs 的类型选择方面就具有较大的局限性<sup>[65]</sup>。Arabi 等的研究中虽然提供了不同污染物削减效率及其 BMPs 成本之间的成本-效益曲线,但是其环境目标是以污染物的加权负荷量来表示的,因此在其研究中并未对不同营养物质的削减效率进行较为明确的表示<sup>[54]</sup>。Rabotyagov 等的研究工作与之前几位学者的工作之间体现了较大的不同,其以三个决策标准的最小化为基础,对不同营养物质的成本-效益进行评估<sup>[66]</sup>。然而,以上所有研究的局限性就在于,每进行一次优化求解过程就需要对 SWAT 模型进行一次运行,需要耗费大量的时间。Maringanti 等提出了一套新的决策支持方案,其通过 BMPs 数据库的构建来代替 SWAT 模型动态评估与优化算法之间的关系,其数据库可以实现 BMPs 削减效率的实时评估以及 BMPs 成本数据的评估,这使得 BMPs 优化配置研究工作的运行时间大大降低<sup>[7]</sup>。但是其研究中仅仅是针对了单一的耕地 BMP 类型中的 3 种 BMPs 及其组合进行评估,因此,其并未对该方法在不同的土壤类型、耕地类型以及畜禽养殖条件下的适用性进行测试。

通过对以上案例进行分析发现,目前 BMPs 的多目标优化配置多以“水文模型-优化算法”相耦合的方式分别对单一地块或流域尺度内的 BMPs 配置方案进行优化,未对内地块尺度和流域尺度间污染物分布特征和 BMPs 配置方案的累积效应进行系统考虑。但污染物在流域内不同等级河道间运移过程并不是简单的线性累加,而是随着支流向主河道转换的聚合过程,呈现非线性的阈值响应关系<sup>[67]</sup>。同时,BMPs 措施功效的发挥还会受到时间尺度变化影响,存在一定滞后效应。导致流域尺度的 BMPs 优化配置方案在地块尺度的适用性低,而地块尺度方案对流域整体污染控制功效的表征不够准确的问题。因此,在未来的研究中需要从流域整体角度统筹考虑面源污染配置方案的优化技术流程及方案设计。

## 2 研究展望

以流域水环境质量改善为核心,开展面源污染的防治工作已成为成为国内外面源污染控制措施研究关注的热点和难点。BMPs 作为一种有效的面源污染控制手段,如何从流域整体的角度对面源污染的传输迁移转化等各个阶段配置 BMPs,并克服自然地理、空间尺度、人类活动等因素对 BMPs 配置方案的污染物削减效率和成本投入产生的不确定性影响,实现在有限资金条件下 BMPs 的合理、高效配置,达到流域水环境整体改善的多目标优化,对实现流域水环境质量改善具有重要的现实和理论意义。

(1) 流域面源污染关键源区的精准识别是实现 BMPs 多目标优化配置的第一个重要前提。在今后的研究中需要整合各种方法的优点,根据研究区特征建立易于操作的综合评价体系,统筹辨析流域与田间地块两个尺度的污染物分布特征,考虑不同空间尺度下源因子、迁移过程、流域水环境、控制措施可行性等多种因素的影响,选择合适的评估模型进行耦合,以克服单一识别方法难以满足不同区域、不同尺度的 CSAs 精准识别的不足。

(2) BMPs 削减效率的准确评估是实现流域 BMPs 多目标优化配置第二个重要前提。而 BMPs 实施后污染物削减效率与水环境质量改善之间响应的滞后性、模型不确定性、时空尺度异质性、污染物形态的转换风险等均是今后 BMPs 削减效率评估中需要重点解决的关键问题。以小尺度区域实地监测数据为基础,采用“嵌套式流域”的构建思路对模型模拟结果进行验证将会是今后多尺度区域 BMPs 削减效率有效评估研究的发展

方向。

(3) 将 BMPs 数据库、成本数据库以及基于进化算法的优化配置方案模拟模块进行耦合,进而构建有效界面友好化的决策支持系统,以确定 BMPs 空间优化配置方案及成本-效益最优曲线,对于流域面源污染控制管理具有非常重要的意义。但是由于受尺度效应的影响,在河流生态系统恢复、重建过程中,水环境变化对人为干预的响应几乎均为非线性的(阈值效应)<sup>[68-69]</sup>响应关系,所以流域污染负荷的持续削减并不意味着河流环境质量一定会持续改善<sup>[70]</sup>。因此,在未来的 BMPs 配置研究中,建立流域污染负荷削减比例与水质改善之间的非线性响应关系,对提高空间配置方案的实施效果评估准确性是十分必要的。

#### 参考文献(References):

- [1] Rissman A R, Carpenter S R. Progress on nonpoint pollution: barriers & opportunities. *Daedalus*, 2015, 144(3): 35-47.
- [2] 中华人民共和国环境保护部. 2016 中国环境状况公报. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2017.
- [3] 贺缠生,傅伯杰,陈利顶. 非点源污染的管理及控制. *环境科学*, 1998, 19(5): 87-91, 96-96.
- [4] 王晓燕,王一响,王晓峰,王振刚,汪清平,胡秋菊,蔡新广. 密云水库小流域土地利用方式与氮磷流失规律. *环境科学研究*, 2003, 16(1): 30-33.
- [5] Rao N S, Easton Z M, Schneiderman E M, Zion M S, Lee D R, Steenhuis T S. Modeling watershed-scale effectiveness of agricultural best management practices to reduce phosphorus loading. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(3): 1385-1395.
- [6] Shen Z Y, Chen L, Xu L. A topography analysis incorporated optimization method for the selection and placement of best management practices. *PLoS One*, 2013, 8(1): e54520.
- [7] Maringanti C, Chaubey I, Popp J. Development of a multiobjective optimization tool for the selection and placement of best management practices for nonpoint source pollution control. *Water Resources Research*, 2009, 45(6): W06406.
- [8] 吴辉,刘永波,朱阿兴,杨典华,刘军志. 流域最佳管理措施空间配置优化研究进展. *地理科学进展*, 2013, 32(4): 570-579.
- [9] Williams J R, Hann R W. *Optimal Operation of Large Agricultural Watersheds with Water Quality Restraints*. Texas: Texas Water Resources Institute, 1978.
- [10] Deb K, Kalyanmoy D. *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [11] Muleta M K, Nicklow J W. Evolutionary algorithms for multiobjective evaluation of watershed management decisions. *Journal of Hydroinformatics*, 2002, 4(2): 83-97.
- [12] Kasat R B, Gupta S K. Multi-objective optimization of an industrial fluidized-bed catalytic cracking unit ( FCCU) using genetic algorithm ( GA) with the jumping genes operator. *Computers & Chemical Engineering*, 2003, 27(12): 1785-1800.
- [13] Veith T L, Wolfe M L, Heatwole C D. Optimization procedure for cost effective BMP placement at a watershed scale. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2003, 39(6): 1331-1343.
- [14] 欧洋,王晓燕. 景观对河流生态系统的影响. *生态学报*, 2010, 30(23): 6624-6634.
- [15] Diebel M W, Maxted J T, Nowak P J, Zanden M J V. Landscape planning for agricultural nonpoint source pollution reduction I: a geographical allocation framework. *Environmental Management*, 2008, 42(5): 789-802.
- [16] Maguire R O, Rubæk G H, Haggard B E, Foy B H. Critical evaluation of the implementation of mitigation options for phosphorus from field to catchment scales. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(5): 1989-1997.
- [17] White M J, Storm D E, Busted P R, Stoodley S H, Phillips S J. Evaluating nonpoint source critical source area contributions at the watershed scale. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(4): 1654-1663.
- [18] Panagopoulos Y, Makropoulos C, Mimikou M. Decision support for diffuse pollution management. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 30: 57-70.
- [19] Lee J G, Selvakumar A, Alvi K, Riverson J, Zhen J X, Shoemaker L, Lai F H. A watershed-scale design optimization model for stormwater best management practices. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 37: 6-18.
- [20] Ketterings Q M, Cela S, Collick A S, Crittenden S J, Czymbek K J. Restructuring the P index to better address P management in New York. *Journal of Environmental Quality*, 2017, 46(6): 1372-1379.
- [21] Doody D G, Archbold M, Foy R H, Flynn R. Approaches to the implementation of the Water framework directive: targeting mitigation measures at critical source areas of diffuse phosphorus in Irish catchments. *Journal of Environmental Management*, 2012, 93(1): 225-234.
- [22] Sharpley A N, Weld J L, Beegle D B, Mullins G. Development of phosphorus indices for nutrient management planning strategies in the United States. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2003, 58(3): 137-152.

- [23] Heckrath G, Bechmann M, Ekholm P, Ulén B, Djodjic F, Andersen H E. Review of indexing tools for identifying high risk areas of phosphorus loss in Nordic catchments. *Journal of Hydrology*, 2008, 349( 1/2): 68–87.
- [24] Hewett C J M, Quinn P F, Heathwaite A L, Doyle A, Burke S, Whitehead P G, Lerner D N. A multi-scale framework for strategic management of diffuse pollution. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24( 1): 74–85.
- [25] 李娜, 郭怀成. 农业非点源磷流失潜在风险评价——磷指数法研究进展. *地理科学进展*, 2010, 29( 11): 1360–1367.
- [26] Woznicki S A, Nejadhashemi A P. Spatial and temporal variabilities of sediment delivery ratio. *Water Resources Management*, 2013, 27( 7): 2483–2499.
- [27] Ghebremichael L T, Veith T L, Watzin M C. Determination of critical source areas for phosphorus loss: lake champlain basin, vermont. *Transactions of the ASABE*, 2010, 53( 5): 1595–1604.
- [28] Jordan-Meille L, Rubæk G H, Ehler P A I, Genot V, Hofman G, Goulding K, Recknagel J, Provolò G, Barraclough P. An overview of fertilizer-P recommendations in Europe: soil testing, calibration and fertilizer recommendations. *Soil Use and Management*, 2012, 28( 4): 419–435.
- [29] Besalatpour A, Hajabbasi M A, Ayoubi S, Jalalian A. Identification and prioritization of critical sub-basins in a highly mountainous watershed using SWAT model. *Eurasian Journal of Soil Science*, 2012, 1: 58–63.
- [30] Zema D A, Bingner R L, Denisi P, Govers G, Licciardello F, Zimbone S M. Evaluation of runoff, peak flow and sediment yield for events simulated by the AnnAGNPS model in a Belgian agricultural watershed. *Land Degradation & Development*, 2012, 23( 3): 205–215.
- [31] Wu L, Long T Y, Cooper W J. Simulation of spatial and temporal distribution on dissolved non-point source nitrogen and phosphorus load in Jialing River Watershed, China. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 65( 6): 1795–1806.
- [32] Valcu A, Rabotyagov S S, Kling C L. Flexible practice-based approaches for controlling multiple agricultural nonpoint-source water pollution// *Proceedings of 2013 Annual Meeting*. Washington: Agricultural and Applied Economics Association, 2013.
- [33] 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. *Ecological Engineering*, 2000, 14( 4): 325–335.
- [34] Qiu Z, Hall C, Drewes D, Messinger G. Hydrologically sensitive areas, land use controls, and protection of healthy watersheds. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2014, 140( 7): 04014011.
- [35] Weld J L, Sharpley A N, Beegle D B, Gburek W J. Identifying critical sources of phosphorus export from agricultural watersheds. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, 59( 1): 29–38.
- [36] Ghebremichael L T, Cerosaletti P E, Veith T L, Rotz C A, Hamlett J M, Gburek W J. Economic and phosphorus-related effects of precision feeding and forage management at a farm scale. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90( 8): 3700–3715.
- [37] Ghebremichael L T, Veith T L, Hamlett J M. Integrated watershed-and farm-scale modeling framework for targeting critical source areas while maintaining farm economic viability. *Journal of Environmental Management*, 2013, 114: 381–394.
- [38] Cherry K A, Shepherd M, Withers P J A, Mooney S J. Assessing the effectiveness of actions to mitigate nutrient loss from agriculture: a review of methods. *Science of the Total Environment*, 2008, 406( 1/2): 1–23.
- [39] Liu Y B, Yang W H, Qin C Z, Zhu A X. A review and discussion on modeling and assessing agricultural best management practices under global climate change. *Journal of Sustainable Development*, 2016, 9( 1). doi: 10.5539/jsd.v9n1p245.
- [40] Haas M B, Guse B, Fohrer N. Assessing the impacts of best management practices on nitrate pollution in an agricultural dominated lowland catchment considering environmental protection versus economic development. *Journal of Environmental Management*, 2017, 196: 347–364.
- [41] Wainger L A, Van Houtven G, Loomis R, Messer J, Beach R, Deerrhake M. Tradeoffs among ecosystem services, performance certainty, and cost-efficiency in implementation of the chesapeake bay total maximum daily load. *Agricultural and Resource Economics Review*, 2013, 42( 1): 196–224.
- [42] Panagopoulos Y, Makropoulos C, Mimikou M. Reducing surface water pollution through the assessment of the cost-effectiveness of BMPs at different spatial scales. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92( 10): 2823–2835.
- [43] Meals D W, Dressing S A, Davenport T E. Lag time in water quality response to best management practices: a review. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39( 1): 85–96.
- [44] Tatum V L, Jackson C R, McBroom M W, Baillie B R, Schilling E B, Wigley T B. Effectiveness of forestry best management practices ( BMPs) for reducing the risk of forest herbicide use to aquatic organisms in streams. *Forest Ecology and Management*, 2017, 404: 258–268.
- [45] 孟凡德, 耿润哲, 欧洋, 王晓燕. 最佳管理措施评估方法研究进展. *生态学报*, 2013, 33( 5): 1357–1366.
- [46] Heathwaite A L, Quinn P F, Hewett C J M. Modelling and managing critical source areas of diffuse pollution from agricultural land using flow connectivity simulation. *Journal of Hydrology*, 2005, 304( 1/4): 446–461.
- [47] Andersen H E, Kronvang B. Modifying and evaluating a P index for denmark. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2006, 174( 1/4): 341–353.
- [48] Grimaldi S, Angeluccetti I, Coviello V, Vezza P. Cost-effectiveness of soil and water conservation measures on the catchment sediment budget—the



- laaba watershed case study, burkina faso. *Land Degradation & Development*, 2015, 26( 7): 737-747.
- [49] Heathwaite A L, Dils R M. Characterising phosphorus loss in surface and subsurface hydrological pathways. *Science of the Total Environment*, 2000, 251-252: 523-538.
- [50] Brown L, Scholefield D, Jewkes E C, Lockyer D R, Prado A D. NGAUGE: a decision support system to optimise N fertilisation of British grassland for economic and environmental goals. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 109( 1/2): 20-39.
- [51] Oenema O, van Liere L, Schoumans O. Effects of lowering nitrogen and phosphorus surpluses in agriculture on the quality of groundwater and surface water in the Netherlands. *Journal of Hydrology*, 2005, 304( 1/4): 289-301.
- [52] 唐颖. SUSTAIN 支持下的城市降雨径流最佳管理 BMP 规划研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [53] Makropoulos C K, Butler D. A multi-objective evolutionary programming approach to the 'object location' spatial analysis and optimisation problem within the urban water management domain. *Journal Civil Engineering and Environmental Systems*, 2005, 22( 2): 85-101.
- [54] Arabi M, Govindaraju R S, Hantush M M. Costeffective allocation of watershed management practices using a genetic algorithm. *Water Resources Research*, 2006, 42( 10): 2405-2411.
- [55] Hsieh C D, Yang W F. Optimal nonpoint source pollution control strategies for a reservoir watershed in Taiwan. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85( 4): 908-917.
- [56] Maringanti C, Chaubey I, Arabi M, Engel B. Application of a multi-objective optimization method to provide least cost alternatives for NPS pollution control. *Environmental Management*, 2011, 48( 3): 448-461.
- [57] 陈磊. 非点源污染多级优先控制区构建与最佳管理措施优选[D]. 北京: 北京师范大学, 2013
- [58] 耿润哲. 流域非点源污染及管理措施优化配置研究——以怀柔区北宅小流域为例[D]. 北京: 首都师范大学, 2012.
- [59] Lautenbach S, Berlekamp J, Graf N, Seppelt R, Matthies M. Scenario analysis and management options for sustainable river basin management: application of the Elbe DSS. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24( 1): 26-43.
- [60] Fassio A, Giupponi C, Hiederer R, Simota C. A decision support tool for simulating the effects of alternative policies affecting water resources: an application at the European scale. *Journal of Hydrology*, 2005, 304( 1/4): 462-476.
- [61] Volk M, Hirschfeld J, Dehnhardt A, Schmidt G, Bohn C, Liersch S, Gassman P W. Integrated ecological-economic modelling of water pollution abatement management options in the Upper Ems River Basin. *Ecological Economics*, 2008, 66( 1): 66-76.
- [62] Van Ittersum M K, Ewert F, Heckelet T, Wery J, Olsson J A, Andersen E, Bezlepina I, Brouwer F, Donatelli M, Flichman G, Olsson L, Rizzoli A E, van der Wal T, Wien J E, Wolf J. Integrated assessment of agricultural systems—a component-based framework for the European Union ( SEAMLESS). *Agricultural Systems*, 2008, 96( 1/3): 150-165.
- [63] Veith T L, Wolfe M L, Heatwole C D. Cost-effective BMP placement: optimization versus targeting. *Transactions of the ASAE*, 2004, 47( 5): 1585-1596.
- [64] Gburek W J, Gitau M, Jarrett A R. A tool for estimating best management practice effectiveness for phosphorus pollution control. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2005, 60( 1): 1-9.
- [65] Bekele E G, Nicklow J W. Multiobjective management of ecosystem services by integrative watershed modeling and evolutionary algorithms. *Water Resources Research*, 2005, 41( 10): W10406.
- [66] Rabotyagov S, Campbell T, Jha M, Gassman P W, Arnold J, Kurkalova L, Secchi S, Feng H L, Kling C L. Least-cost control of agricultural nutrient contributions to the Gulf of Mexico hypoxic zone. *Ecological Applications*, 2010, 20( 6): 1542-1555.
- [67] Gurnell A M, Rinaldi M, Belletti B, Bizzi S, Blamauer B, Braca G, Buijse A D, Bussetini M, Camenen B, Comiti F, Demarchi L, de Jalón D G, Túnago M G D, Grabowski R C, Gunn I D M, Habersack H, Hendriks D, Henshaw A J, Klösch M, Lastoria B, Latapie A, Marcinkowski P, Martínez-Fernández V, Mosselman E, Mountford J O, Nardi L, Okruszko T, O'Hare M T, Palma M, Percopo C, Surian N, van de Bund W, Weissteiner C, Ziliani L. A multi-scale hierarchical framework for developing understanding of river behaviour to support river management. *Aquatic Sciences*, 2016, 78( 1): 1-16.
- [68] Allan J D. Landscapes and riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2004, 35: 257-284.
- [69] Wang L Z, Robertson D M, Garrison P J. Linkages between nutrients and assemblages of macroinvertebrates and fish in wadeable streams: implication to nutrient criteria development. *Environmental Management*, 2007, 39( 2): 194-212.
- [70] Bernhardt E S, Palmer M A, Allan J D, Alexander G, Barnas K, Brooks S, Car J, Clayton S, Dahm C, Follstad-Shah J, Galat D, Gloss S, Goodwin P, Hart D, Hassett B, Jenkinson R, Katz S, Kondolf G M, Lake P S, Lave R, Meyer J L, O'Donnell T K, Pagano L, Powell B, Sudduth E. Synthesizing U.S. river restoration efforts. *Science*, 2005, 308( 5722): 636-637.