

DOI: 10.5846/stxb202103100655

李思思, 张亮, 刘宏斌, 冯青郁, 庄艳华, 李文超, 杜耘, 杜新忠. 基于径流路径的分布式面源污染模型研发与应用进展. 生态学报, 2022, 42(6): 2477-2488.

Li S S, Zhang L, Liu H B, Feng Q Y, Zhuang Y H, Li W C, Du Y, Du X Z. Progress on the development and application of a runoff pathway-based Spatially and Temporally distributed Model for Non-Point Source pollution. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(6): 2477-2488.

基于径流路径的分布式面源污染模型研发与应用进展

李思思^{1,*}, 张 亮¹, 刘宏斌², 冯青郁³, 庄艳华¹, 李文超⁴, 杜 耘¹, 杜新忠²

1 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 湖北省面源污染防治工程技术研究中心, 武汉 430071

2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部面源污染控制重点实验室, 北京 100081

3 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

4 河北农业大学资源与环境科学学院, 保定 071001

摘要: 精准刻画地表径流的路径及其所携带的面源污染物随径流的输移过程是准确估算面源污染入水体量、污染关键源区辨识和高效防控的关键, 在我国以小农户种植为主、景观特征复杂的地理条件下尤为重要。鉴于目前常用的面源污染模型大都起源于国外, 往往对径流路径的空间差异性 & 污染物陆面输移过程进行概化, 介绍了一个基于径流路径的分布式面源污染模型 (STEM-NPS) 及其研发与应用进展。阐述了该模型的研发背景、模型原理和结构, 说明了 STEM-NPS 模型对地表径流汇流及其所携带的污染物输移过程的精细化表达方法; 介绍了该模型在不同地理环境及尺度的应用进展, 展示了其在地块尺度的面源污染关键源区辨识, 关键过程和关键影响因素解析及面源污染监管决策支持等方面的功能; 探讨了 STEM-NPS 模型与其他常用模型的异同, 并结合生态学研究需求和面源污染精准防控的需求, 提出模型的应用前景及进一步发展的方向。

关键词: 氮磷; 径流路径; 关键源区; 面源污染; 最佳管理措施

Progress on the development and application of a runoff pathway-based Spatially and Temporally distributed Model for Non-Point Source pollution

LI Sisi^{1,*}, ZHANG Liang¹, LIU Hongbin², FENG Qingyu³, ZHUANG Yanhua¹, LI Wenchao⁴, DU Yun¹, DU Xinzhong²

1 Hubei Provincial Engineering Research Center of Non-Point Source Pollution Control, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China

2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

3 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100085, China

4 College of Resources & Environment Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China

Abstract: Non-point source pollution models are useful tools to simulate pollution loads entering water bodies, identify critical source areas and assess best management practices. The accuracy and the reliability of the above information generated by models is highly determined by how a model delineates surface runoff pathways and how it simulates pollutant transport processes along the runoff pathways, which is especially important in complex watersheds with fragment landscapes. Agriculture in China is characterized with small and various types of fields in limited areas, which means fragment landscapes are common. Currently, widely used non-point source models are most developed in western countries, which usually ignore the heterogeneity of fine-scale runoff pathways and simulate terrestrial pollutant transport within a sub-

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) (XDA2304040303)

收稿日期: 2021-03-10; 网络出版日期: 2021-11-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lisisi@apm.ac.cn

watershed by a lumped approach. This paper presented a Spatially and Temporally distributed Model for Non-Point Source pollution (STEM-NPS) that simulates pollutant transport processes based on fine-scale runoff pathways. First, the background, development process and model theory of STEM-NPS was described. STEM-NPS was first published in international journals in 2017 while the development and modifications continue till right now. The model simulates runoff, nutrient loads and water quality on a grid cell basis and a daily time step. The hydrological module of STEM-NPS is the Distributed Hydrological Model for Watershed Mangement (DHM-WM) which delineates runoff pathways, simulate surface, subsurface and base flow and calculates runoff travel time along pathways. DHM-WM has two water balance routines: local routine is for watersheds dominated by infiltration-excess runoff while global routine is for watersheds with both infiltration-excess and saturation-excess runoff. The pollutant transport module of STEM-NPS simulates nutrient loads generated from source areas and loads entering water bodies with zero-order mobilization and first-order delivery functions respectively. Then, model application cases in different geographic regions and scales were presented. One case was in a plateau watershed in Yunnan province and the other case was in a plain county in Henan province. The application cases showed the model functions in tracking fine-scale runoff pathways, identifying fine-scale critical source areas, analyzing key processes and driving factors of pollutant losses, as well as how the model was used in an on-line support-decision system of non-point source pollution monitoring and control. After that, STEM-NPS was compared with some commonly used models such as SWAT, APEX, HSPF, AnnAGNPS, L-THIA, STEPL-WEB, CADA-ECM and SPARROW, specifically for their functions in identifying critical source areas and assessing best management practices (BMPs). Based on the comparison, application perspectives of STEM-NPS in ecology were proposed, such as assessing the impact of hydrologic connectivity on nutrient transport and analyzing social-economic development impact on water environment. Although with advantage in supporting fine-scale non-point source pollution control, the STEM-NPS model still needs further modifications, such as representing nutrient legacy effect in the nutrient transport module and developing a user-friendly BMP assessment module.

Key Words: nitrogen and phosphorus; runoff pathway; critical source area; non-point source pollution; best management practices

为有效防治农业面源污染,国家相继制定出台了《水污染防治行动计划》《关于打好农业面源污染防治攻坚战的意见》等政策和规划文件。在面源污染防治工作取得了长足进步和明显成效的同时,还面临着科技支撑有限和系统性治理不足等问题^[1]。目前,农田源头减量增效、坡耕地径流拦截、生态沟塘和人工湿地、畜禽粪污处理和利用等单项污染防治技术已日趋成熟,而支撑区域或流域层面的系统性、集成性综合防治技术才刚刚起步。经过一批典型小流域农业面源污染综合治理示范工程建设的探索实践,2020年农业农村部发布了针对平原水网区、丘陵山区和云贵高原三种地理区域特色的面源污染综合防控技术规范^[2-4]。2021年的中央一号文件提出:在长江经济带、黄河流域建设一批农业面源污染综合治理示范县。流域或区域面源污染综合防治的国家需求,对面源污染模型的功能提出了更高要求。

1 模型研发背景和过程

精准高效的面源污染综合防治,需科学评估污染物的入水体量、识别污染流失的关键源区、关键过程和影响因素^[5]。管理者和科研人员通过污染调查、长期监测、指标评价、模型模拟等不同方法,对流域和区域进行了面源污染评估与防控对策探讨^[6-9]。然而,面源污染的径流路径和输移过程具有复杂性和不确定性,增加了面源污染入水体量估算及防控措施落地实施的难度。由于植被、沟塘、湿地、河流等过渡景观的面源污染截留能力不同,不同的径流路径对面源污染入水体量有重要影响(图1)。

我国第一次污染源普查,形成了较为完善的农业面源污染源头发生量核算方法,但源头发生量有多少进入了受纳水体并不清楚。到第二次污染源普查,开始使用入河系数来刻画源头发生量进入受纳水体的比率,

并分区、分尺度建立入河系数与地表径流因子、降雨驱动因子、地形驱动因子、地下蓄渗因子和植物截留因子“五大因子”的关系^[10]。国际上多采用模型模拟来表达面源污染的输移过程。常用面源污染模型,如 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)^[11]、SWIM (Soil and Water Integrated Model)^[12]、HSPF (Hydrological Simulation Program: Fortran)^[13]等往往对污染物的陆面输移过程进行概化,即:以子流域内的平均截留速率和平均坡面汇流时间模拟污染物在植被、土壤、地下水中的截留和转化,计算子流域的污染输出负荷。这种集总式模拟方法难以体现子流域内部径流路径的差异性,对国外大农户种植为主、景观一致性较高的区域影响较小,但对我国分田到户背景下小农户种植为主、景观破碎的区域影响较大。因此,精准刻画径流路径及污染物陆面输移过程的空间差异性,是准确评估面源污染水环境风险的基础,在景观破碎或水网复杂的区域尤为重要,对面源污染防治的整体工程布局和单体工程设计具有重要意义。

本文介绍一个基于径流路径的时空分布式面源污染模型 (Spatially and Temporarily distributed Model for Non-Point Source pollution, STEM-NPS)。该模型于 2017 年初步研发完成^[14],并在国际期刊上发表^[15-17]。在随后的模型应用中,对模拟对象进行了扩展,从仅仅模拟磷素扩展到可模拟氮素和磷素。下文将从模型原理与结构组成、应用进展、应用前景与发展方向三方面对 STEM-NPS 模型展开介绍。

2 模型原理与结构组成

2.1 模型结构框架

STEM-NPS 模型是一个应用级的时空分布式面源污染模型,用最简单的过程和最少的参数实现面源污染流失过程模拟^[17]。模型以栅格为基本模拟单元,主要包括一个水文模块和一个污染物输移模块。其中,水文模块也是一个可单独使用的时空分布式水文模型 (Distributed Hydrological Model for Watershed Mangement, DHM-WM)^[15-16],实现各栅格地块的径流模拟、径流路径识别及汇流时间计算;污染物输移模块计算各栅格地块的面源污染源头发生量、输移过程截留量及最终的入水体量。此外,针对水田灌溉排水和淹水期污染物输移的特殊性,还研发了水田模块^[14]。

2.2 水文模块

水文是面源污染发生发展的驱动力,不同气象地理环境下,地表径流的产生机制存在差异^[18]。STEM-NPS 模型的水文模块提供两种水量平衡模式(图 2):局部水量平衡模式,适合于壤中侧向流不重要,以超渗产流为主的地区;全局水量平衡模式,适合于壤中侧向流重要,兼具超渗和蓄满两种产流模式的地区。模块依据水量平衡计算土壤水分含量;采用长期连续 NRCS 曲线数法^[19]计算超渗产流;依据 TOPMODEL 模型理论^[20]计算壤中水位的空间分布,当水位升高到地表时计算超渗产流(降雨日)或壤中回流(无雨日)。

水文模块提供单流向 D8 算法和多流向 MFD 算法跟踪各栅格地块的上下游流向关系,识别径流路径。在汇流时间的计算上,结合稳定态动力波方程和曼宁方程计算坡面汇流时间^[21],结合连续性方程和曼宁方程计算河道内汇流时间^[22]。

2.3 污染物输移模块

污染物输移模块模拟面源污染物随地表径流从陆面到水体的储存-搬运-输移过程(图 3)。栅格地块的

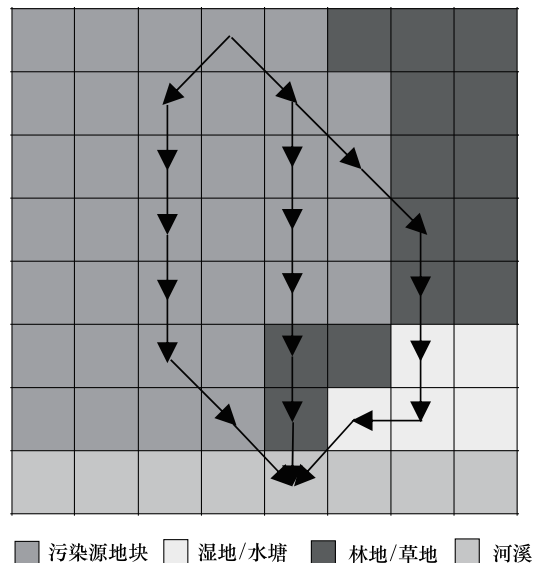


图 1 径流路径对面源污染输移过程的影响示意图

Fig.1 Diagram of runoff pathway effect on pollutant transport

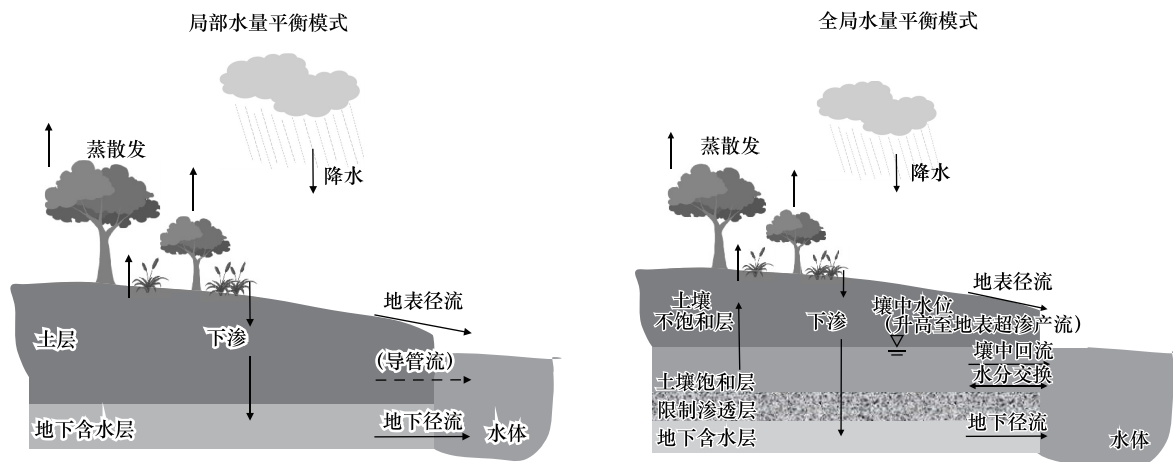


图2 水文模块的局部水量平衡模式和全局水量平衡模式示意图

Fig.2 Diagram of the local water balance routine and the global water balance routine in STEM-NPS hydrological module

STEM-NPS: 基于径流路径的分布式面源污染模型 runoff pathway-based Spatially and Temporally distributed Model for Non-Point Source pollution

污染物地表储量由污染物的土壤背景值,及土地利用方式下的投入量和产出量共同决定。污染物随地表径流的搬运过程,和 L-THIA (Long-term Hydrological Impact Assessment)^[23]、STEPL (Spreadsheet Tool for the Estimation of Pollutant Load)^[24]等经验模型一样采用平均浓度和径流量的乘积模拟,在本文中称为零级动力学搬运。污染物随地表径流的输移过程,和 SWAT^[11]、SPARROW (Spatially Referenced Regressions On Watershed attributes)^[25]等常用模型一样,采用一级动力学公式模拟。

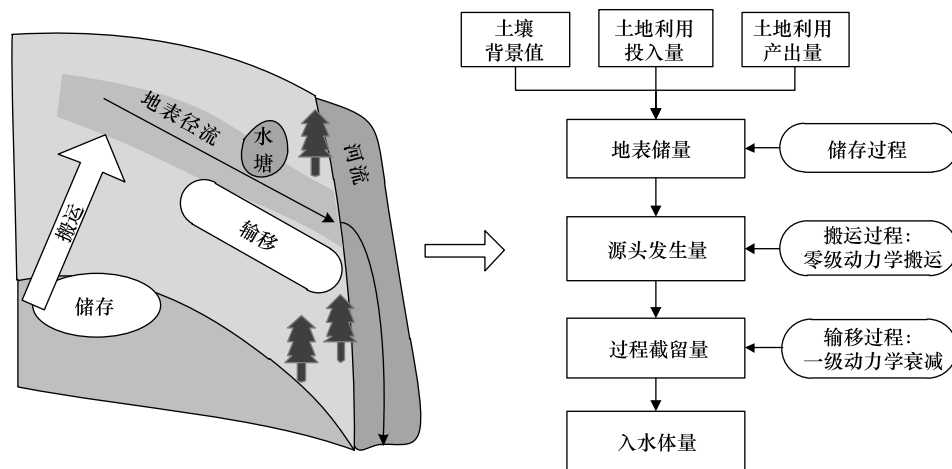


图3 STEM-NPS 模型的污染物储存-搬运-输移过程示意图

Fig.3 Diagram of the pollutant storage-mobilization-delivery processes simulated in STEM-NPS

STEM-NPS 模型对污染物地下径流输移过程进行了简化:磷素以用户设定的磷浓度来模拟随基流的输出负荷;氮素的模拟方法与 SWAT 模型相似,地下含水层的氮素浓度是当日淋溶水和前一天地下含水层的混合,并随时间呈指数衰减。

3 模型功能与应用进展

3.1 模型应用进展概述

STEM-NPS 模型先后在高原流域(云南省凤羽河流域,面积 217 km²)^[17]和平原县域(河南省南乐县,面积

623 km²)^[26] 两个不同地理环境及尺度的区域进行了成功应用,模拟了河流水量水质时间序列;计算了各栅格地块的面源污染源头发生量和入水体量;辨识了面源污染的关键时期和关键源区;解析了污染流失关键过程和驱动因素,从而提出针对性的防控建议。下文将以凤羽河流域为典型应用案例,说明模型的应用方法和特色功能;并以南乐县为例,说明模型在区域面源污染监管方面的业务化运行方法。

此外,STEM-NPS 模型正在长江流域进行应用实验。针对栅格模型在大型流域应用的运算效率问题,通过入河系数在栅格地块和子流域尺度的转换,使模型以子流域为计算单元提升了运算效率,仍能体现不同子流域径流路径差异性对污染物入水体量的影响。

3.2 典型应用案例——云南省凤羽河流域

凤羽河流域降水量充足,地形起伏大。土壤类型多样,山地丘陵区土壤透水性良好,以蓄满产流为主;中部平原和北部出口附近土壤透水性较差,以超渗产流为主。因此模型应用时,水文模块采用全局水量平衡模式;且流域水田面积较大,启用了水田模块^[17]。

STEM-NPS 模型能精准刻画栅格地块在陆面和河道内的径流路径,表征径流路径的差异性对面源污染入水体量的影响(图4)。源头发生量相似的地块入水体量差异大,反映了坡面径流路径长短、路径上的土地利用类型、植被覆盖和土壤透水性的差异性。

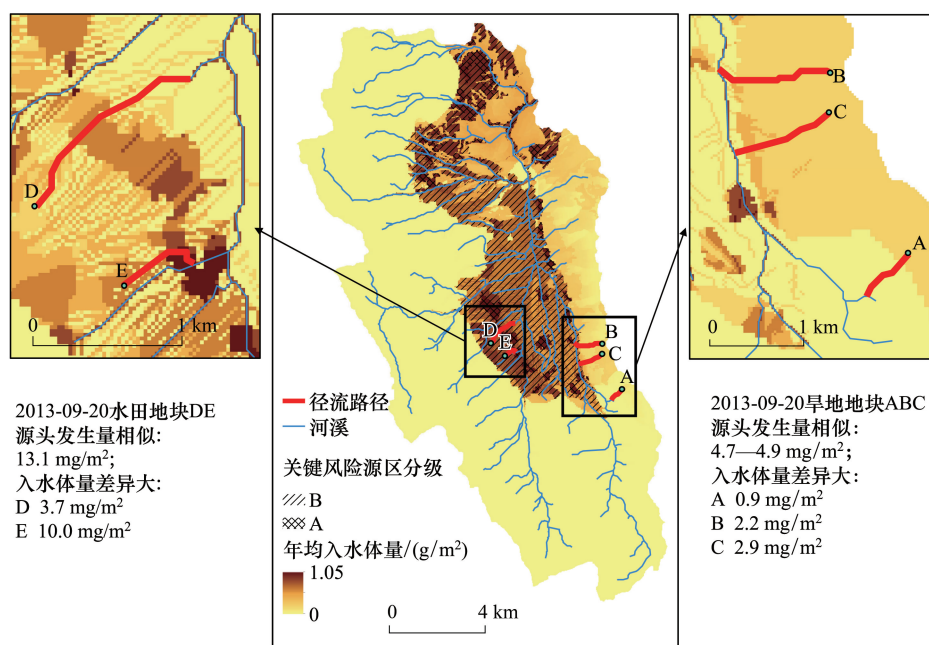


图4 云南省凤羽河流域面源污染入水体量、关键源区模拟结果及 STEM-NPS 对径流路径影响的刻画

Fig.4 STEM-NPS simulated phosphorus loads entering water bodies, critical source areas and the representation of fine-scale runoff pathway impacts in Fengyu watershed, Yunnan

基于面源污染入水体量的空间分布模拟结果,STEM-NPS 模型能精细识别关键源区(图4)和面源污染发生发展的关键过程(表1)。A 级关键源区(面源污染入水体量大于流域平均值 2 个标准差的区域)主要是村镇及土壤透水性较差的果园、旱地和水田,年均地表径流深高达 586.4 mm,为面源污染流失提供了充足的搬运力。因此,搬运过程是污染物流失的关键过程,防治应着力减少地表径流的产生。而 B 级关键源区(面源污染入水体量大于流域平均值 1 个标准差的区域)则主要是水田,年均地表径流量明显小于 A 级,但年均入河系数 0.91,高于 A 级关键源区。说明输移过程是其污染物流失的关键过程,防治措施应加强径流路径上的拦蓄和截留。

表 1 STEM-NPS 识别的云南省凤羽河流域关键源区、关键过程和影响因素表

Table 1 STEM-NPS identified critical source areas, key processes and factors in Fengyu watershed, Yunnan

关键源区分级 Critical source area classes	年均单位面积 磷流失率 Annual phosphorus loss rate/(kg/km ²)	年均地表径流深 Annual runoff detph/mm	年均入河系数 Annual export ratio	面积占比 Percentage of contributing area/%	负荷占比 Percentage of phosphorus loss/%
A 级关键源区 CSA A	514.7	586.4	0.85	3.4	25.2
B 级关键源区 CSA B	243.1	331.2	0.91	17.1	55.3

入河系数是指入水体量与源头发生量的比值;CSA A: A 级关键源区 Critical source area class A;CSA B: B 级关键源区 Critical source area class B.

3.3 模型业务化运行实例——河南省南乐县

STEM-NPS 模型具有自主知识产权,并且可打包成可执行文件,在面源污染智能管理平台中进行业务化运行。在河南省南乐县的应用中,STEM-NPS 模型部署在“南乐县面源污染监测预警服务平台”(图 5)的模拟分析服务器上,分析物联网传回的气象、水文、水质等各类野外监测站点的数据,率定相关模型参数,并对全县域的面源污染入水体量进行模拟(图 5 中),基于模拟结果实现关键源区、关键时期辨识(图 5 右)和污染来源解析(图 5 左),为分区分类制定针对性的污染防治措施及应急管理提供决策支持^[26]。

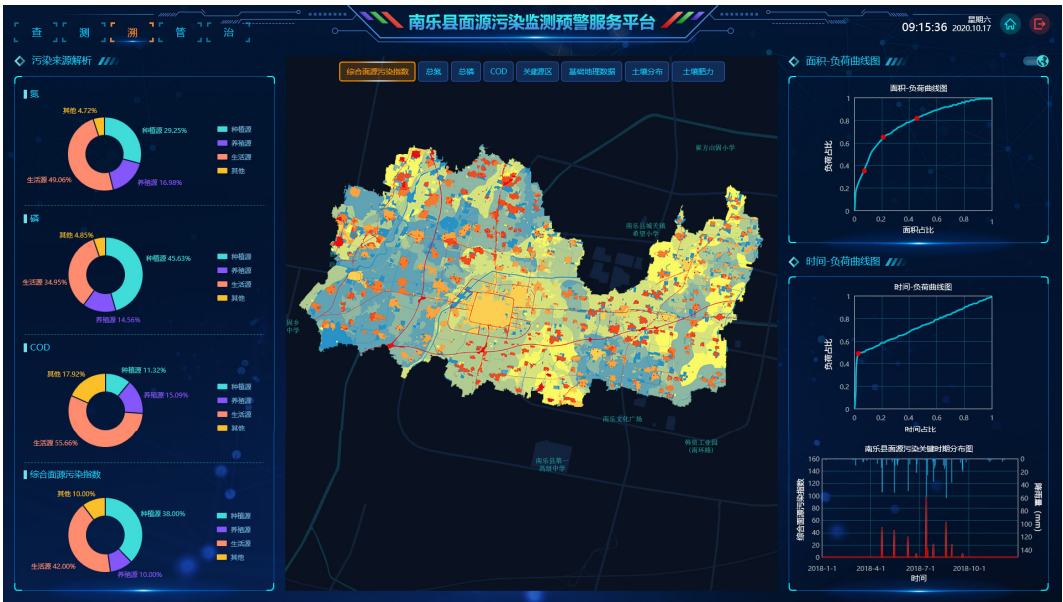


图 5 南乐县面源污染监测预警服务平台中 STEM-NPS 模型的应用功能示意图

Fig.5 STEM-NPS applied in the non-point source pollution monitoring and assessment system in Nanle county, Henan

4 模型应用前景与发展方向

4.1 模型比较:服务于面源污染精准防治的功能和应用前景

STEM-NPS 模型发表后,得到了国际同行的关注。美国普渡大学的 Liu 等^[27]比较了该模型与 SWAT、L-THIA 等在一个农业小流域的应用效果;加拿大农业部门和环境部门的研究者 Habibiandehkordi 等^[28]也比较了该模型与改进的输出系数模型 CADA-ECM、AnnAGNPS 等在识别关键源区上的功能。本文参考上述两文,对 STEM-NPS 模型与常用面源污染模型的异同点进行总结(表 2)。CADA-ECM、L-THIA、STEPL-WEB、SPARROW 是经验模型;SWAT、AnnAGNPS、HSPF、SWIM、APEX 等属机理过程模型;而 STEM-NPS 模型是介于经验模型和机理过程模型之间的混合模型。其中机理过程模型功能最完备。

表 2 不同模型的原理及其在面源污染精准防治决策支持方面的功能比较

模型名称 Model names	功能概述 General functions	最小尺度 Simulating scales	模型原理 Approaches to simulate hydrology and pollutants	关键源区识别 Capability of critical source area identification	管理措施评价 Capability of best management practice assessment	参考文献 References
基于径流路径的分布式面源污染模型 (STEM-NPS)	1. 径流组分、氮磷面源污染源头发生量-入水体量模拟、水质模拟 2. 栅格尺度径流输移路径、关键源区识别	时间: 日 空间: 栅格地块	1. 污染物: 基于土壤本底含量-土地利用盈余量确定次降雨平均浓度; 基于该浓度和地表径流深计算源头发生产量; 基于径流路径和一级动力学方程计算入水体量。 2. 水文: DHM-WM 模型。产流过程: 改进的 NRCS 曲线数法模拟超渗产流, 结合 TOPMODEL 模拟蓄满产流。汇流过程: 基于径流路径的分布式坡面-河道汇流演算。	栅格尺度的关键源区识别。体现土壤、土地利用、地表产流、汇流过程水文连通性及地类截留效率的空间差异性。	无管理措施评价模块, 可通过调整模型参数实现部分管理措施评价。	[14—17]
基于产汇流区的输出系数模型 (CADA-ECM)	1. 氮磷面源污染入水体量模拟 2. 栅格尺度的关键源区识别	时间: 年 空间: 栅格地块	1. 污染物: 在传统输出系数模型基础上, 引入产流可能性、截留可能性因子修正坡面产污和汇流截留对输出系数空间异质性的影响。 2. 无水文模块。	栅格尺度的关键源区识别。体现土地利用、蓄满产流、汇流过程植被截留的差异性。	无	[28—29]
流域水土评价模型 (SWAT)	1. 径流组分、泥沙、水质 (不同形态氮磷、杀虫剂、重金属等) 模拟 2. 子流域尺度关键源区识别 3. 管理措施评价	时间: 日 空间: 子流域	1. 污染物: 源头土层中各形态转化、陆面输移过程基于一级动力学方程计算子流域内平均截留和去除; 河道内过程模拟硝化、反硝化、沉降、吸附、解吸、矿化等详细污染物迁移转化。 2. 水文: 产流过程 NRCS 曲线数或 Green Ampt 方法模拟超渗产流。汇流过程: 陆面汇流子流域集总式模拟, 河道内过程模拟。 1. 污染物: 各子流域源头土层中的形态转化; 陆面迁移采用基于动态平衡的营养溶解迁移速率; 河道内过程则为一级动力学方程。 2. 水文: 产流过程 NRCS 曲线数或 Green Ampt 方法模拟超渗产流; 汇流过程采用马斯京根等方法计算, 并包含河漫滩的径流、泥沙和养分的迁移。	子流域尺度的关键源区识别。体现土壤、土地利用、农事管理、河道内过程的空间差异性。	已有部分常用的优化管理措施模块; 其他措施可通过调整模型参数评价。	[11]
农业政策环境评价模型 (APEX)	1. 径流、泥沙、水质、杀虫剂等 2. 子流域尺度关键区识别 3. 管理措施评价; 4. 成本收益核算模块	时间: 日或次降雨 空间: 子流域	1. 污染物: 各子流域源头土层中的形态转化; 陆面迁移采用基于动态平衡的营养溶解迁移速率; 河道内过程则为一级动力学方程。 2. 水文: 产流过程 NRCS 曲线数或 Green Ampt 方法模拟超渗产流; 汇流过程采用马斯京根等方法计算, 并包含河漫滩的径流、泥沙和养分的迁移。	子流域尺度识别关键去, 并能够体现气象、土壤、土地利用、农事管理和河道内过程的空间差异性。	包含详细的管理措施模拟模块, 可以模拟结构型和非结构性措施的效果。	[30]
农业面源污染模型 (AnnAGNPS)	1. 径流组分、泥沙、水质 (不同形态氮磷、杀虫剂) 模拟 2. 地类单元尺度关键源区识别 3. 管理措施评价	时间: 日 空间: 子流域	1. 污染物: 依据 NRCS 土壤数据库和作物信息确定地类单元排放量; 河道内过程模拟氮磷、杀虫剂、有机碳的迁移转化。 2. 水文: 产流过程 NRCS 曲线数法模拟超渗产流。汇流过程: 地类单元之间至河流逐步汇流计算。	地类单元的关键源区识别。体现土壤、土地利用、农事管理、河道内过程的空间差异性。	可评估农田管理措施	[31—32]
基于 Fortran 的水文模型 (HSPF)	1. 径流组分、水质指标 (不同形态氮磷、杀虫剂) 模拟 2. 地类单元尺度关键源区识别 3. 管理措施评价	时间: 小时 空间: 子流域	1. 污染物: 分透水和不透水子流域模拟不同形态氮磷迁移转化; 氮/磷示踪土层溶质运移; 河道内硝化、反硝化、矿化、沉降等过程模拟。 2. 水文: 产流过程斯坦福水文模型模拟超渗产流。汇流过程: 河道单元集总式汇流计算, 出流是入流总量与河道容量的关系函数。	子流域的关键源区识别。体现土壤、透水/不透水面、河道内过程的空间差异性。	可评估营养物和杀虫剂相关的管理措施。	[13, 32]

续表

模型名称 Model names	功能概述 General functions	最小尺度 Simulating scales	模型原理 Approaches to simulate hydrology and pollutants	关键源区识别 Capability of critical source area identification	管理措施评价 Capability of best management practice assessment	参考文献 References
水土综合模型 (SWIM)	1. 径流组分、水质指标(不同形态氮磷、藻、植被)模拟 2. 子流域尺度关键源区识别 3. 管理措施评价	时间:日 空间:子流域	1. 污染物:源头土层模拟水-土-植被相互作用下各形态转化;陆面输移过程基于一级动力学方程计算子流域内平均截留和去除;河道内迁移转化模拟硝化、反硝化、沉降、矿化等过程。 2. 水文:产流过程 NRCS 曲线数或 Green Ampt 方法模拟超渗产流。汇流过程:陆面汇流子流域集总式模拟,河道内过程模拟。 1. 污染物:经验公式模拟污染负荷量,次降雨平均浓度与径流量相乘;无陆面或河道内输移过程模拟。 2. 水文:产流过程 NRCS 曲线数法模拟超渗产流;无汇流模块。	子流域尺度的关键源区识别。体现土壤、土地利用、气象、植被及河道内过程的差异性。	具有相关管理措施模块;水库管理、调水-灌溉管理、点源和肥料管理、轮作等	[12]
长期水文影响评价 模型(L-THIA)	1. 地表径流、面源污染负荷(不同形态氮磷、有机质、重金属)模拟 2. 管理措施、低影响开发评价	时间:年 空间:集总式(土地利用)	1. 污染物:经验公式模拟污染负荷量,平均浓度与径流量相乘;体现养殖动物类型和权重、生活污水处理设施有效性和非法排放的影响。 2. 水文:产流过程 NRCS 曲线数法模拟超渗产流。	不能识别关键源区,可基于土地利用进行污染源解析。	具有相关管理措施模块;常见优化管理措施及低影响开发措施;含成本-效益分析。	[23, 27]
网络版污染负荷估算模型 (STEPL-WEB)	1. 径流组分、面源污染负荷(氮磷、泥沙等)模拟。 2. 管理措施评价	时间:年 空间:集总式(土地利用)	1. 污染物:经验公式模拟污染负荷量,平均浓度与径流量相乘;体现养殖动物类型和权重、生活污水处理设施有效性和非法排放的影响。 2. 水文:产流过程 NRCS 曲线数法模拟超渗产流。	不能识别关键源区,可基于土地利用进行污染源解析。	评估相关管理措施的污染去除率,进行成本-效益分析。	[24, 27]
流域空间统计模型 (SPARROW)	1. 建立河流水质与流域属性的回归关系,实现污染源、输移过程及影响因素解析。	时间:年 空间:流域(河段汇水区)	1. 污染物:建立河流氮磷通量与点源、面源、上游通量及流域属性之间的空间回归关系;面源污染考虑陆面和河道内输移截留。 2. 水文:无水文模块	流域/子流域尺度关键源区识别。体现用于回归的流域属性差异性。	评估沟渠、水塘、河流等景观的污染物去除率。	[25, 33]

STEM-NPS: 基于径流路径的分布式面源污染模型 Runoff pathway-based spatially and temporally distributed model for non-point source pollution; DHM-WM: 服务于流域管理的分布式水文模型 Distributed hydrological model for watershed management; NRCS: 美国自然资源服务中心 Natural resources conservation service; TOPMODEL: 以地形指数为基础的分布式流域水文模型; CADA ECM: 基于产汇流区的输出系数模型 Contributing area and dispersal area-export coefficient model; SWAT: 流域水土评价模型 Soil and water assessment tool; APEX: 农业政策环境影响评价模型 Agricultural policy/environmental extender model; AnnAGNPS: 农业面源污染模型 Annualized agricultural non-point source pollution model; HSPF: 基于 Fortran 的水文模型 Hydrological simulation program-fortran; SWIM: 水土综合模型 Soil and water integrated model; L-THIA: 长期水文影响评价模型 Long-term hydrological impact assessment; STEPL-WEB: 网络版污染负荷估算模型 Spreadsheet tool for the estimation of pollutant load web version; SPARROW: 流域空间统计模型 Spatially referenced regressions on watershed attributes

关键源区识别的精度和有效性,对指导污染防治工程的整体布局具有重要意义^[34-35]。L-THIA 和 STEPL-WEB 能基于土地利用进行污染源解析,对区域景观规划具有指导意义^[36]。SWAT 等机理过程模型识别关键源区的精度取决于最小模拟单元(通常为子流域),能体现土壤、土地利用、农事管理、气象及河道内水文水动力过程的差异性,有效指导子流域之间的防控措施布置^[37-39],但难以直接体现径流路径的空间差异性。CADA-ECM 和 STEM-NPS 可辨识栅格尺度的关键源区,便于地块尺度的污染防治措施落地实施^[40];除反映土地利用等的影响外,还能体现径流路径的空间差异性,在景观或水网复杂的区域具有重要意义。

在管理措施评价方面,SWAT、SWIM、STEPL-WEB 模型能评估田间农艺管理、过程拦截等措施的效果并为其空间优化配置提供指导^[41-43]。CADA-ECM 和 STEM-NPS 模型则不具有管理措施评价模块,但 STEM-NPS 模型可通过调整模型参数实现诸如化肥减量、植被缓冲带设置等管理措施的评价。

4.2 STEM-NPS 模型在生态学中的应用前景

当代生态学进入了生态系统科学的新阶段,极大促进了生物学、地理学及环境科学研究的大融合,使生态学不断吸收新方法和新技术^[44]。STEM-NPS 模型可以为当代生态学研究的部分方向提供定量研究工具。

(1) 助力景观格局与生态过程关系的定量研究

景观生态学研究景观格局与生态过程的关系,陈利顶等提出了“源”“汇”景观理论并探讨了其在水土流失、面源污染领域的意义^[45]。对于水土流失和面源污染流失过程而言,“源”“汇”景观具有明确的上下游关系;“源”景观产生的径流和营养物是否能被“汇”景观截留消纳,取决于两者之间的水文连通性^[46]。STEM-NPS 模型基于径流路径计算的汇流时间,可用作“源”“汇”景观水文连通性定量评价的指标,相较于“源”“汇”之间的距离等指标,生态过程含义更直接。基于 STEM-NPS 模拟的面源污染源头发生量和入水体量,还可进一步探讨水文连通性与面源污染流失尺度效应的关系。

(2) 助力人-地耦合系统模拟及绿色可持续发展研究

全球气候变化和人(社会)-地(生态)系统相互作用,是可持续发展研究的两大挑战;注重人-地耦合系统模拟,评估人类活动与自然环境的相互作用,成为探讨绿色可持续发展路径的重要方式^[47-48]。和常用面源污染模型一样,STEM-NPS 模型通过改变气象输入数据能评估气候变化对区域水资源水环境的影响。此外,模型对污染物地表储存过程的表达,涉及不同土地利用的污染物投入量和产出量统计计算,能够反映肥料用量、作物产量、人口、畜禽养殖等社会经济发展相关指标的影响,在助力人-地耦合系统模拟和绿色可持续发展模式研究方面具有良好的应用前景。

4.3 STEM-NPS 模型的发展和改进方向

(1) 污染物输移过程模拟考虑污染截留速率的动态变化及遗留效应

一般而言,沟塘、植被缓冲带、湖库、河流等地表景观对氮磷具有截留作用;但在一定的水力和环境条件下,前期截留的氮磷将再次随径流输出到下游水体,称为遗留效应,对模型模拟方法和污染防治手段提出了新的要求^[49-50]。目前,STEM-NPS 模型的截留速率在时间上是固定不变的。因此,有必要基于氮磷迁移转化机理过程的相关研究成果,建立截留速率与温度、植被覆盖、水文水动力等环境条件的关系,以反映截留速率随时间的动态变化和氮磷遗留效应。

(2) 开发管理措施评估和优化配置功能

管理措施评估和优化配置,对流域/区域面源污染防治策略筛选、整体工程布局和单体工程设计具有重要意义。STEM-NPS 模型尚不包含管理措施评估模块,但其对径流输移过程的精细刻画,使其在模拟评估植被缓冲带、人工湿地、生态沟塘等过程拦截型污染防治措施的效果方面具有先天的优势,因为这些措施的效果很大程度上取决于其上下游水文连通关系及地表径流的水力停留时间^[46, 51-52]。因此,开发管理措施评估和优化配置功能,将是 STEM-NPS 模型的重要发展方向。

(3) 应用于不同区域时应注意地理差异性及适用性

STEM-NPS 模型的水文模块已提供了局部和全局水量平衡两种模式,能适配以超渗产流为主和兼具超

渗、蓄满两种产流模式的区域;但尚不能体现闸坝、泵站、调水等人为水量调控对水文过程的影响,因此若需在强人工干扰的区域应用,还需增加人为水量调控模块。另外,模型以栅格作为基本计算单元,运行速率与模拟的流域/区域大小及栅格分辨率有关,在大型流域(大于 1000km²)应用需降低栅格分辨率或采用栅格地块-子流域的尺度转换方法。综上,作为初创模型,STEM-NPS 应用于不同地理区域的适用性还有待进一步验证;因此研发者拟逐步公布模型源代码,便于更多研究者使用,促进模型改进和发展。

5 结论

精准高效的面源污染综合防治,需科学评估污染物的入水体量,辨识关键源区、关键过程和影响因素,评估污染防治措施的效果,这对面源污染模型提出了更高要求,即:精准刻画污染源头到受纳水体之间的污染流失过程。这对我国以小农户种植为主、景观特征复杂的区域尤为重要。鉴于此,本文介绍了一个自主研发的基于径流路径的分布式面源污染模型(STEM-NPS),阐述了其基本原理和结构,介绍了其在不同地理环境和尺度的应用案例,探讨了其与其他常用模型在关键源区精准识别、管理措施评价等决策支持方面的功能差异。作为介于经验模型和机理过程模型之间的混合模型,STEM-NPS 具有结构简单、适配性强的特点;可精准刻画径流路径的空间差异性及其对污染物输移的影响,在景观生态学和绿色可持续发展等生态学研究方向上具有良好的应用前景,并且对区域面源污染综合高效防治具有重要的应用价值。但在参数科学性、区域适用性及管理措施评价功能方面,有待进一步发展。

致谢:本文介绍的 STEM-NPS 模型,其水文模块的开发过程,得到了美国普渡大学的 Bernard A. Engel 和 Margaret W. Gitau 教授的指导和帮助;模型开发和应用过程中得到了美国农业部农业研究服务中心(USDA-ARS)、中国农业部面源污染控制重点实验室和河南省南乐县地方政府提供的数据支持,对相关工作人员提供的帮助表示感谢。

参考文献(References):

- [1] 张俊,陈杰,焦春海. 生态文明视角下的农业面源污染防治对策研究. 湖北农业科学, 2019, 58(13): 159-162.
- [2] 中华人民共和国农业农村部. NY/T 3821.1—2020 农业面源污染综合防控技术规范 第1部分:平原水网区. 北京:中国农业出版社, 2020.
- [3] 中华人民共和国农业农村部. NY/T 3821.2—2020 农业面源污染综合防控技术规范 第2部分:丘陵山区. 北京:中国农业出版社, 2020.
- [4] 中华人民共和国农业农村部. NY/T 3821.3—2020 农业面源污染综合防控技术规范 第3部分:云贵高原. 北京:中国农业出版社, 2020.
- [5] Shen Z Y, Hong Q, Chu Z, Gong Y W. A framework for priority non-point source area identification and load estimation integrated with APPI and PLOAD model in Fujiang Watershed, China. Agricultural Water Management, 2011, 98(6): 977-989.
- [6] 胥爱平,朱坚,竺传松,张德政,陆志林. 洞庭湖沅江流域农业面源污染调查及防治对策——以南县三仙湖镇为例. 湖南农业科学, 2020, (2): 40-43.
- [7] 张汪寿,耿润哲,王晓燕,段淑怀,欧春霞,李世荣,南哲. 基于多准则分析的非点源污染评价和分区——以北京怀柔区北宅小流域为例. 环境科学学报, 2013, 33(1): 258-266.
- [8] 张红举,陈方. 太湖流域面源污染现状及控制途径. 水资源保护, 2010, 26(3): 87-90.
- [9] 王谦,冯爱萍,于学谦,姚延娟,王洪亮,王雪蕾. DPeRS 模型在重点流域面源污染管控单元划分中的应用——以吉林省为例. 环境与可持续发展, 2016, 41(4): 111-115.
- [10] 耿润哲,殷培红,周丽丽,王萌. 关于农业面源污染物入河系数测算技术路线与关键方法的探讨. 环境与可持续发展, 2019, 44(2): 26-30.
- [11] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, Williams J R. Soil and Water Assessment tool Theoretical Documentation Version 2009. College Station, Texas: Texas A&M University System, 2011.
- [12] Hesse C, Krysanova V, Vetter T, Reinhardt J. Comparison of several approaches representing terrestrial and in-stream nutrient retention and decomposition in watershed modelling. Ecological Modelling, 2013, 269: 70-85.
- [13] Bicknell B R, Imhoff J C, Kittle J L, Donigan A S, Johanson R C. Hydrological Simulation Program: FORTRAN(HSPF). Athens, GA: U.S. EPA, 1993.

- [14] 李思思. 基于陆面水文过程的流域面源污染模型开发与应用. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [15] Li S S, Gitau M, Bosch D, Engel B A, Zhang L, Du Y. Development of a soil moisture-based distributed hydrologic model for determining hydrologically based critical source areas. *Hydrological Processes*, 2017, 31(20): 3543-3557.
- [16] Li S S, Gitau M, Engel B A, Zhang L, Du Y, Wallace C, Flanagan D C. Development of a distributed hydrological model to facilitate watershed management. *Hydrological Sciences Journal*, 2017, 62(11): 1755-1771.
- [17] Li S S, Zhang L, Liu H B, Loćiciga H A, Zhai L M, Zhuang Y H, Lei Q L, Hu W L, Li W C, Feng Q, Du Y. Evaluating the risk of phosphorus loss with a distributed watershed model featuring zero-order mobilization and first-order delivery. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 563-576.
- [18] Kleinman P J A, Sharpley A N, McDowell R W, Flaten D N, Buda A R, Tao L, Bergstrom L, Zhu Q. Managing agricultural phosphorus for water quality protection: principles for progress. *Plant and Soil*, 2011, 349(1/2): 169-182.
- [19] Mishra S K, Singh V P. Long - term hydrological simulation based on the Soil Conservation Service curve number. *Hydrological Processes*, 2004, 18(7): 1291-1313.
- [20] Beven K. TOPMODEL//Singh V P, ed. *Computer Models of Watershed Hydrology*. Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publications, 1995: 627-668.
- [21] Chow V T, Maidment D R, Mays L W. *Applied Hydrology*. New York: McGraw Hill, 1988.
- [22] Melesse A M, Graham W D. Storm runoff prediction based on a spatially distributed travel time method utilizing remote sensing and GIS. *Journal of the American Water Resources Association*, 2004, 40(4): 863-879.
- [23] Liu Y Z, Ahiablame L M, Bralts V F, Engel B A. Enhancing a rainfall-runoff model to assess the impacts of BMPs and LID practices on storm runoff. *Journal of Environmental Management*, 2015, 147: 12-23.
- [24] Park Y S, Engel B A, Harbor J. A web-based model to estimate the impact of best management practices. *Water*, 2014, 6(3): 455-471.
- [25] Smith R A, Schwarz G E, Alexander R B. Regional interpretation of water-quality monitoring data. *Water Resources Research*, 1997, 33(12): 2781-2798.
- [26] Shen W Z, Zhang L, Li S S, Zhuang Y H, Liu H B, Pan J T. A framework for evaluating county-level non-point source pollution: joint use of monitoring and model assessment. *Science of the Total Environment*, 2020, 722: 137956.
- [27] Liu Y Z, Li S S, Wallace C W, Chaubey I, Flanagan D C, Theller L O, Engel B A. Comparison of computer models for estimating hydrology and water quality in an agricultural watershed. *Water Resources Management*, 2017, 31(11): 3641-3665.
- [28] Habibiandehkordi R, Reid D K, Goel P K, Biswas A. Phosphorus loss assessment tools: a review of underlying concepts and applicability in cold climates. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(4): 3794-3802.
- [29] Endreny T A, Wood E F. Watershed weighting of export coefficients to map critical phosphorous loading areas. *Journal of the American Water Resources Association*, 2003, 39(1): 165-181.
- [30] Gassman P W, Williams J R, Wang X, Saleh A, Osei E, Hauck L M, Izaurralde R C, Flowers J D. The agricultural policy/environmental extender (APEX) model: an emerging tool for landscape and watershed environmental analyses. *Transactions of the ASABE*, 2010, 53(3): 711-740.
- [31] Bingner R, Theurer F. *AnnAGNPS Technical Processes: Documentation Version 2*. Oxford, MS: Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, 2001.
- [32] Borah D K, Bera M. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: review of mathematical bases. *Transactions of the ASAE*, 2003, 46(6): 1553-1566.
- [33] Zhang W S, Pueppke S G, Li H P, Geng J W, Diao Y Q, Hyndman D W. Modeling phosphorus sources and transport in a headwater catchment with rapid agricultural expansion. *Environmental Pollution*, 2019, 255: 113273.
- [34] 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.
- [35] Osmond D L, Shober A L, Sharpley A N, Duncan E W, Hoag D L K. Increasing the effectiveness and adoption of agricultural phosphorus management strategies to minimize water quality impairment. *Journal of Environmental Quality*, 2019, 48(5): 1204-1217.
- [36] Liu Y Z, Theller L O, Pijanowski B C, Engel B A. Optimal selection and placement of green infrastructure to reduce impacts of land use change and climate change on hydrology and water quality: an application to the Trail Creek Watershed, Indiana. *Science of the Total Environment*, 2016, 553: 149-163.
- [37] Liu Y Z, Guo T, Wang R Y, Engel B A, Flanagan D C, Li S Y, Pijanowski B C, Collingsworth P D, Lee J G, Wallace C W. A SWAT-based optimization tool for obtaining cost-effective strategies for agricultural conservation practice implementation at watershed scales. *Science of the Total Environment*, 2019, 691: 685-696.
- [38] 李文超. 凤羽河流域农业面源污染负荷估算及关键区识别研究. 北京: 中国农业科学院, 2014.

- [39] 梁冬梅. 小流域面源污染特征与控制技术研究——以辽河吉林段为例. 长春: 吉林大学, 2014.
- [40] 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.
- [41] 王成帅. 锦绣川流域农村面源污染负荷模拟及最佳管理措施研究. 济南: 济南大学, 2019.
- [42] 刘康安. 基于 GIS 和 SWMM 模型的泔河流域面源污染与综合防控研究. 西安: 长安大学, 2020.
- [43] Liu G W C, Chen L, Wei G Y, Shen Z Y. New framework for optimizing best management practices at multiple scales. *Journal of Hydrology*, 2019, 578: 124133.
- [44] 于贵瑞, 王秋凤, 杨萌, 陈智. 生态学的科学概念及其演变与当代生态学学科体系之商榷. *应用生态学报*, 2021, 32(1): 1-15.
- [45] 陈利顶, 傅伯杰, 赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义. *生态学报*, 2006, 26(5): 1444-1449.
- [46] 高常军, 高晓翠, 贾朋. 水文连通性研究进展. *应用与环境生物学报*, 2017, 23(3): 586-594.
- [47] 韩逸, 赵文武, 郑博福. 推进生态文明建设, 促进区域可持续发展——中国生态文明与可持续发展 2020 年学术论坛述评. *生态学报*, 2021, 41(3): 1259-1265.
- [48] 王静, 王建永, 田涛, 张健, 程正国, 岳东霞, Cheruiyot W K, 熊友才. 创新生态科学, 建设美丽中国——2016 年第十五届中国生态学大会综述. *生态学报*, 2016, 36(22): 7492-7500.
- [49] Chen D J, Shen H, Hu M P, Wang J H, Zhang Y F, Dahlgren R A. Legacy nutrient dynamics at the watershed scale: principles, modeling, and implications. *Advances in Agronomy*, 2018, 149: 237-313.
- [50] Dupas R, Tittel J, Jordan P, Musolff A, Rode M. Non-domestic phosphorus release in rivers during low-flow: mechanisms and implications for sources identification. *Journal of Hydrology*, 2018, 560: 141-149.
- [51] Park Y S, Park J H, Jang W S, Ryu J C, Kang H, Choi J, Lim K J. Hydrologic response unit routing in SWAT to simulate effects of vegetated filter strip for South-Korean conditions based on VFSMOD. *Water*, 2011, 3(3): 819-842.
- [52] 郑楠, 周自恒, 孙德智. 水力停留时间对生态沟渠和人工湿地组合系统处理农田退水的影响研究//第九届中国城镇水务发展国际研讨会论文集. 北京: 《城镇供水》杂志社, 2014.