

农业面源污染评价方法与模型研究进展

张梦秋

昆明学院农学与生命科学学院

DOI:10.32629/as.v9i3.3767

[摘要] 面源污染(Non-point Source Pollution,NPS),又称非点源污染,已成为全球范围内导致水体质量恶化和生态系统退化的主要因素。与易于识别和控制的点源污染不同,面源污染具有来源分散、成因复杂、时空变异性强和监测困难等特点。已成为我国流域水环境质量改善的核心瓶颈,精准评价是实施有效防控的前提。本文系统梳理了农业面源污染评价的主流方法与核心模型,将评价方法分为单因子指数法、等标污染负荷法、输出系数法与多元统计法四大类,对比其原理、适用场景与优缺点;将评价模型按结构特征划分为经验统计模型、机理过程模型与概念性模型,重点剖析SWAT、APEX、GWLF等典型模型的核心功能、参数需求与应用进展。最后从方法耦合、模型优化、数据融合三个维度提出未来研究方向,为小流域农业面源污染精准评价与综合治理提供理论支撑与技术参考。

[关键词] 农业面源污染; 评价方法; 污染模型; 负荷核算

中图分类号: DF413.1 **文献标识码:** A

Research progress on evaluation methods and models for agricultural non-point source pollution

Mengqiu Zhang

College of Agriculture and Life Sciences, Kunming University

[Abstract] Non point source pollution (NPS), also known as non-point source pollution, has become the main factor causing water quality deterioration and ecosystem degradation worldwide. Unlike easily identifiable and controllable point source pollution, non-point source pollution has the characteristics of dispersed sources, complex causes, strong spatiotemporal variability, and difficult monitoring. It has become the core bottleneck for improving the water environment quality in China's river basins, and accurate evaluation is a prerequisite for implementing effective prevention and control. This article systematically reviews the mainstream methods and core models for evaluating agricultural non-point source pollution. The evaluation methods are divided into four categories: single factor index method, equal standard pollution load method, output coefficient method, and multivariate statistical method. The principles, applicable scenarios, and advantages and disadvantages of these methods are compared; Divide the evaluation models into empirical statistical models, mechanistic process models, and conceptual models based on their structural characteristics, with a focus on analyzing the core functions, parameter requirements, and application progress of typical models such as SWAT, APEX, and GWLF. Finally, future research directions are proposed from three dimensions: method coupling, model optimization, and data fusion, providing theoretical support and technical references for accurate evaluation and comprehensive management of agricultural non-point source pollution in small watersheds.

[Key words] Agricultural non-point source pollution; Evaluation method; Pollution model; Load accounting

随着点源污染得到有效管控,农业面源污染已成为流域水体氮、磷超标与富营养化的主要诱因^[1]。据统计,我国农业面源污染贡献了总氮(TN)排放的57%以上、总磷(TP)排放的60%以上^[2]。农业面源污染源于农田施肥、畜禽养殖、农村生活等多个分散源,受气候、地形、土壤、农业管理措施等多重因素影

响,其污染过程复杂且时空异质性显著,传统的点源污染评价方法难以适用。精准的污染评价是识别污染来源、量化污染负荷、制定防控策略的核心基础,主要涵盖“负荷核算、源解析、风险评估”三大核心目标。

目前,农业面源污染评价已形成“方法—模型”双体系支撑

的格局:评价方法以简洁高效的统计核算为主,适用于快速负荷估算与源优先级排序;评价模型以过程模拟为核心,能够刻画污染产生、迁移、转化的完整路径,适用于精细化情景模拟与治理措施优化^[3]。本文聚焦农业面源污染评价的“方法+模型”核心模块,系统梳理主流技术的原理、流程与应用特征,分析现有技术的局限性,为农业面源污染评价的标准化、精准化提供科学依据。

1 农业面源污染的主要评价方法

农业面源污染评价方法主要解决“污染有多少、主要污染源、污染风险有多高”三个核心问题,根据评价目标与数据需求,可分为单因子指数法、等标污染负荷法、输出系数法与多元统计法四大类。其中:单因子指数法与等标污染负荷法是源解析与污染物优先级排序的经典方法,二者均基于污染物等效性原理,将不同类型污染物置于同一评价尺度^[4]。

1.1 单因子指数法

该方法通过计算单一污染物的污染指数,反映其对环境的影响程度,核心公式为:

$$P_i = \frac{C_i}{C_{0i}}$$

其中, P_i 为第*i*种污染物的单因子污染指数, C_i 为污染物的实际排放量或浓度, C_{0i} 为污染物的评价标准值。当 $P_i > 1$ 时,表明该污染物超过评价标准,存在污染风险。单因子指数法的核心优势是计算简便、物理意义明确,适用于单一污染物的污染程度评价,尤其在畜禽养殖污染评价中应用广泛。

1.2 等标污染负荷法

等标污染负荷法是在单因子指数法基础上的拓展,通过引入“等标体积”概念,量化不同污染源、不同污染物的相对贡献度,是目前农业面源污染源解析的主流方法。核心公式为:

$$M_e = \frac{D_e}{c_{0e}} \times 10^{-6}$$

$$R_e = \frac{M_e}{\sum M_e} \times 100\%$$

其中, M_e 为第*e*类污染物或污染源的等标污染负荷(m^3/a), D_e 为污染物排放量(t/a), c_{0e} 为评价标准值(mg/L), R_e 为某污染物或污染源的等标负荷占比。该方法的核心优势是能够实现“污染物—污染源”双维度的优先级排序,适用于小流域农业面源污染的综合评价。

1.3 输出系数法

输出系数法是农业面源污染负荷核算的经典统计方法,适用于缺乏监测数据的小流域,核心原理是基于不同土地利用类型、畜禽养殖类型、农村人口的污染物输出系数,结合其数量或面积,计算污染负荷。核心公式为:

$$L = \sum_{i=1}^n E_i \times A_i + \sum_{j=1}^m F_j \times N_j + \sum_{k=1}^p G_k \times P_k$$

其中, L 为流域农业面源污染总负荷(t/a), E_i 为第*i*种土地利用类型的污染物输出系数($t/(hm^2 \cdot a)$), A_i 为第*i*种土地利用类

型的面积(hm^2), F_j 为第*j*种畜禽的污染物输出系数(头), N_j 为第*j*种畜禽的数量(头), G_k 为农村人口的污染物输出系数(人), P_k 为农村人口数量(人)。输出系数法的核心优势是数据需求低、计算简便、适用于大尺度流域的快速负荷估算,尤其在畜禽养殖污染负荷核算中,可通过猪当量换算实现不同畜禽类型的统一核算。

1.4 多元统计分析方法

多元统计分析方法主要用于农业面源污染的“源识别”与“驱动因子分析”,适用于监测数据较为丰富的流域,核心包括主成分分析(PCA)、因子分析(FA)、聚类分析(CA)等方法。主成分分析与因子分析的核心原理是通过降维,将多个相关性较高的监测指标转化为少数几个主成分或公因子,根据公因子的载荷矩阵识别污染来源。聚类分析则通过对监测站点或流域单元的污染特征进行分类,识别污染高风险区域。多元统计分析方法的优势是能够基于监测数据客观识别污染来源与驱动因子,避免主观判断的偏差;局限性在于对监测数据的数量与质量要求较高,且难以量化各污染源的具体负荷贡献度,通常作为其他评价方法的补充。

表1 主流评价方法对比分析

评价方法	核心优势	主要局限性	适用场景
单因子指数法	计算简便、物理意义明确	无法综合评价多污染物协同效应	单一污染物污染程度评价、畜禽养殖污染风险筛查
等标污染负荷法	实现“污染物—污染源”双维度排序	未考虑污染物迁移衰减、评价标准影响大	小流域农业面源污染源解析、污染物优先级排序
输出系数法	数据需求低、计算高效、适用于大尺度	输出系数地域特异性强、精度依赖系数校正	缺乏监测数据的小流域负荷核算、畜禽养殖猪当量换算
多元统计法	客观识别污染来源与驱动因子	对监测数据要求高、无法量化负荷贡献	监测数据丰富的流域源识别、驱动因子分析

2 农业面源污染评价模型的研究进展

农业面源污染评价模型主要解决污染如何产生、如何迁移转化,不同情景下污染负荷如何变化三个核心问题,根据模型的结构特征与模拟机理,可分为经验统计模型、机理过程模型与概念性模型三大类,各类模型的复杂度、数据需求与适用尺度差异显著。

2.1 经验统计模型

经验统计模型基于“输入—输出”的统计关系,通过拟合监测数据建立污染物负荷与影响因素之间的数学方程,不考虑污染的物理、化学、生物迁移转化过程,适用于快速情景模拟与负荷预测。L-THIA (Long-term Hydrological Impact Assessment) 模型是基于SCS-CN径流方程的经验模型,核心通过计算地表径流量,结合不同土地利用类型的污染物冲刷系数,估算面源污染负荷^[5]。该模型数据需求低,仅需降水数据、土地利用数据、土壤数据,适用于长期面源污染负荷的时空变化模拟。

2.2 机理过程模型

机理过程模型基于物理、化学、生物原理等,完整刻画农业面源污染“产生—迁移—转化—归宿”的全过程^[6],模拟精度高,

适用于精细化源解析、关键源区识别与治理措施优化,是目前农业面源污染评价的主流模型。

2.2.1 SWAT模型

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是美国农业部开发的半分布式机理模型^[7],以日为时间步长,能够模拟流域内的水文过程、土壤侵蚀、农业面源污染迁移转化等过程,是全球应用最广泛的农业面源污染评价模型。

(1)核心结构: SWAT模型由气象子模型、水文子模型、土壤侵蚀子模型、水质子模型、作物生长子模型等多个子模型组成。其中,水文子模型采用土壤水分平衡法,模拟降水、蒸发、下渗、地表径流、壤中流、地下径流等过程;水质子模型模拟化肥、农药的施用、降解、流失,以及氮、磷在土壤—水体中的迁移转化过程。(2)参数需求: SWAT模型的核心参数包括地形参数(DEM)、土壤参数、土地利用参数、气象参数、农业管理参数。

2.2.2 APEX模型

APEX(Agricultural Policy/Environmental Extender)模型是在 EPIC模型基础上耦合河道汇流模块形成的机理模型^[8],核心优势是模拟单元设置灵活,适用于田块、小流域、大型农场等不同尺度,且对畜禽养殖和有机肥管理的模拟功能完善。APEX模型的畜禽养殖模块能够模拟养殖场规模、畜禽数量、粪污处理方式、有机肥施用等过程,有效核算畜禽养殖面源污染负荷。但该模块基于美国畜禽养殖方式开发,在我国应用时需结合本土养殖模式进行参数校正。

2.3概念性模型

概念性模型介于经验统计模型与机理过程模型之间,通过简化污染迁移转化的物理过程,采用“水箱模型、线性水库”等概念化结构,模拟污染负荷的时空变化,适用于中等尺度流域的水文与污染负荷耦合模拟^[9]。GWLF(Generalized Watershed Loading Function)模型是集总式概念性模型^[10],核心考虑流域内的水量循环与氮、磷营养盐的物质循环过程,基于日尺度水量平衡方程模拟地表径流,采用一维线性水库模型模拟地下水,在月尺度上提供可靠的污染负荷估算结果。GWLF模型的输入数据主要包括气温、降水、土地利用类型及面积,数据需求低于机理过程模型,适用于土地利用混合的中小尺度流域。

表2 主流评价模型对比分析

模型类型	典型模型	核心优势	主要局限性	适用尺度
经验统计模型	L-THIA	结构简单、运行高效、数据需求低	无法刻画迁移转化机理、适用范围有限	小流域快速负荷核算、长期时空变化模拟
机理过程模型	SWAT、APEX	模拟精度高、可刻画全过程、支持情景模拟	结构复杂、参数率定困难、数据需求高	小流域精细化源解析、关键源区识别、治理措施优化
概念性模型	GWLF	兼顾精度与效率、数据需求适中	过程简化、模拟精度低于机理模型	中等尺度流域水文—污染负荷耦合模拟

3 结论

农业面源污染评价是防控工作的核心前提,其方法与模型体系已形成“统计方法重效率、机理模型重精度、概念性模型兼顾二者”的格局。单因子指数法、等标污染负荷法、输出系数法等统计方法,适用于快速负荷核算与源解析,是小流域评价的基础; SWAT、APEX等机理过程模型,能够刻画污染迁移转化的全过程,适用于精细化情景模拟与治理措施优化; GWLF等概念性模型,兼顾精度与效率,适用于中等尺度流域的耦合模拟。未来,需通过方法耦合、模型本土化优化、数据融合,解决当前评价体系的主观性、适配性与数据支撑问题,构建标准化、精准化、智能化的农业面源污染评价体系,为我国流域水环境质量改善与农业绿色发展提供坚实的技术支撑。

[参考文献]

- [1]高玉国,夏云捷,徐琳,等.沉水植被的建构功能及其在我国富营养化湖泊中的退化原因和生态恢复策略[J].植物科学学报,2025,43(03):415-424.
- [2]王玉洁,赵健,侯聪宇,等.基于改进输出系数法的常州市农田面源氮流失研究[J].环境工程技术学报,2024,14(06):1665-1676.
- [3]Mei Luo, Xiaoxiao Liu, Nebiyu Legesse,等.Evaluation of Agricultural Non-point Source Pollution: a Review[J]. Water, Air, & Soil Pollution,2023,234(10).
- [4]Yan Bin, Cao Qi, Yan Shengli,等. Analysis of Spatial Distribution Characteristics of Non-Point Source Pollution in Liaoning Province[J]. Water,2023,15(16):3014.
- [5]蒋婧媛,徐姗姗,黄洪辉,等.基于L-THIA模型与3S技术的大亚湾陆域非点源总氮污染研究[J].应用海洋学报,2019,38(04):558-568.
- [6]黄国鲜,聂玉玺,张清寰,等.流域农业面源污染迁移过程与模型研究进展[J].环境工程技术学报,2023,13(4):1364-1372.
- [7]Jordan C., McGuckin S.O., Smith R. V. Increased predicted losses of phosphorus to surface waters from soils with high Olsen-P concentrations[J]. Soil Use and Management,2000,16(1).
- [8]张丽华,代俊峰,谢永雄,等.APEX模型在南方水稻灌区面源污染研究中的应用前景[J].工业安全与环保,2018,44(7):4.
- [9]朱自煜,黄宏坤,田光明,等.农业面源污染核算非机理模型研究进展[J].地理科学研究,2022,11(2):10.
- [10]李泽利,张庆强,高镨.基于GWLF模型的于桥水库入库河流水文模拟及氮磷负荷估算[J].中国环境监测,2021,37(6):127-135.

作者简介:

张梦秋(1999--),男,汉族,河南南阳人,在读硕士研究生,研究方向:资源利用。