

Field monitoring and simulation of nitrogen and phosphorus loss in agricultural non-point source pollution

Fenggao Xia

Ecological Environment Monitoring Station of Yunnan Provincial Department of Ecology and Environment, Zhaotong, Yunnan, 657000, China

Abstract

As one of the countries with the largest agricultural production scale and the highest fertilizer intensity in the world, coupled with the highly intensive development of agriculture, the accumulation and loss of nitrogen and phosphorus nutrients in the farmland system have become increasingly prominent. This paper first reviews the nitrogen and phosphorus loss in agricultural non-point source pollution at the conceptual level, then focuses on the practical approaches and experiences of nitrogen and phosphorus field monitoring in typical agricultural areas in China. Next, it explores several simulation strategies and parameterization points suitable for China's context from the perspective of model simulation. Finally, it proposes several ideas for the collaborative application of monitoring and simulation. The entire paper aims to provide ecological environment monitoring engineers with a set of operational paths and conceptual frameworks for the study of nitrogen and phosphorus loss in agricultural non-point sources in China.

Keywords

agriculture; non-point source pollution; nitrogen; phosphorus; loss; field monitoring; simulation

农业面源污染中氮、磷流失的田间监测与模拟

夏凤高

云南省生态环境厅驻昭通市生态环境监测站, 中国 · 云南昭通 657000

摘要

中国作为世界上农业生产规模最大、化肥使用强度最高的国家之一, 加之农业高度集约化发展, 氮、磷养分在农田系统中的累积与流失问题愈发突出。本文首先在概念层面对农业面源污染中的氮、磷流失进行梳理, 随后重点讨论在我国典型农区开展氮、磷田间监测的实际做法与经验, 接着从模型模拟层面探讨适合我国情境的几类仿真策略及参数化要点, 最后提出监测与模拟在协同应用上的若干思路。全篇旨在为生态环境监测工程人员提供一套在我国农业面源氮、磷流失研究中的可操作路径与思路框架。

关键词

农业; 面源污染; 氮; 磷; 流失; 田间监测; 模拟

1 引言

与农业集约化程度更高的欧美等发达国家相比, 我国农业生产中存在着化肥施用量大、利用率低已然成为事实。过量的化肥施用会导致土壤酸化、板结, 降低作物肥料利用率, 从而加重农田面源污染, 威胁农业增收和农产品安全, 制约我国农业可持续发展。有鉴于此, 文章基于研究与实践基础上针对农业面源污染中氮、磷流失的田间监测与模拟展开探讨, 以供参考。

2 农业面源污染中氮、磷流失概述

在我国农业体系中, 氮、磷流失是指施入土壤中的氮

素(如硝态氮、铵态氮、有机氮)与磷素(如可溶性磷、胶体态磷)在降雨、灌溉、表层径流、渗漏、土壤侵蚀与地下水迁移等作用下, 从农田系统失逸至下游水体或地下水系统的过程。如图 1 所示。其机制涵盖氮的硝化/反硝化、生物固氮、挥发损失、根系吸收竞争、吸附-解吸动力学, 以及磷的颗粒结合、胶体搬运、溶解扩散等相互作用。在我国典型农区观测表明, 氮素在南方以地表径流为主流失形式, 在北方干旱或半干旱区则以淋溶为主; 而磷素主要依附于土壤颗粒随径流输移, 其流失多出现在耕地坡面或侵蚀敏感区域。这种流失不仅使土壤养分利用率下降、肥料效率降低, 还在受纳水体造成富营养化风险、蓝藻暴发、水质恶化等生态危害^[1]。

【作者简介】夏凤高(1984-), 中国云南昭通人, 硕士, 高级工程师, 从事环境监测研究。



图 1 农业体系中氮、磷流失示意图

3 农业面源污染中氮、磷流失的田间监测

3.1 监测区与监测单元选取原则与布局

要在我国各地开展氮、磷流失监测，首要问题是合理选取监测区与监测单元。实践中通常依据功能叠加性、单元独立性和类型多样性原则进行布局。功能叠加性要求监测区域应覆盖化肥减量重点县、畜牧大县以及生态功能区；单元独立性强调监测小区应选择自然边界清晰、汇水单元明确、边界封闭的流域或坡耕地单元；类型多样性则要求监测点覆盖水田、旱地、经济作物、蔬菜、园地等多种种植模式。在布局时，应充分考虑地形起伏、坡度方向、土壤类型、田块坡面长度、灌溉条件等因素，通过 DEM、土地利用图、排水系网等空间数据辅助选址。监测区内部应进一步设置若干监测小区或实验单元，每个单元设立多个重复处理，以控制变异性影响。一般每个处理至少三重，确保统计显著性。监测单元大小应兼顾代表性与操作可行性，如典型坡耕地监测小区可能设置为几百至千平方米级别^[2]。布点时还需兼顾下游汇流节点与出流断面，以便连通小尺度监测与流域尺度监测。监测网应涵盖降雨径流、土壤淋溶、地下水迁移、水体出流等复合通道。

3.2 水量与水质同步监测指标与频次控制

在我国农区氮磷流失监测中，水量与水质同步观测是核心。水量监测常采用巴歇尔槽、三角堰、闸门控制断面、压力水位计或超声波流速传感器组合方式，确保流量与水位变化数据的连续性与准确性；须对监测断面进行预标定以建立水位 - 流量关系曲线。水质监测指标应包括总氮 (TN)、硝态氮 (NO_3^- -N)、氨氮 (NH_4^+ -N)、有机氮 (DON)、总磷 (TP)、溶解性无机磷 (DIP)、颗粒态磷 (PP) 等。国家监测方案中推荐以地表径流营养盐为主要监测指标。在监测频次方面，一般应设置基础定期采样（如每季或每月）与事件驱动采样（如降雨后即时高频取样）两种机制。事件驱动采样尤为重要，应覆盖降雨峰值段、水位急降段、水质浓度突增段等关键时刻，以捕捉营养盐浓度峰值。建议在降雨开始、峰值、结束后若干时间点（如降雨中期、降雨后 1h、3h、6h 等）进行密集取样，以刻画浓度 - 流量关系曲线。水质样品采集需采用体积混合法或分层法，避免瞬时偏差。样品处理当即过滤（如用 $0.45\mu\text{m}$ 滤膜）并保存（低温或酸化至 pH2）以稳定氮、

磷物种。

3.3 土壤剖面养分分布与入渗 - 淋溶监测

除径流通道之外，土壤剖面和入渗 - 淋溶路径是氮、磷在田间系统中的重要存储与迁移通道。我国多个长期试验田表明，施肥后土壤中氮、磷沿剖面深入呈指数型递减，表层土壤养分累积可构成“迁出前缘”。因此，应在每个监测小区内部设置土壤采样剖面（例如 0–20cm、20–40cm、40–60cm、60–100cm），定期（如季节或年度）测定各层的有机氮、有效氮、全氮、速效磷、全磷、铵态氮、硝态氮等。同时，设置零级入渗孔或观察井以捕获降雨入渗后的溶出液样品，监测淋溶水量与水质^[3]。常见做法是采用张拉管、墒情观测管、倾斜渗滤槽或深层张管结合重力排水的方式收集淋溶水样。淋溶样品需同样分析 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、TP、DIP 等指标。此外，应同步监测土壤孔隙水（如使用张紧式塑料管）以捕捉土壤溶液浓度。土壤水分、基质温度、湿度、孔隙度等辅助数据也应同步记录，以支持反演浓度梯度与驱动力。通过剖面测定与淋溶观测，可揭示氮、磷在田间系统的贮存 - 迁移路径及其时间演变规律，为模型中地下运输模块或淋溶模块提供必要参数。

3.4 长期连续监测与季节 / 年际变化趋势分析

氮、磷流失具有明显的季节性与年际波动特征。为量化这种趋势性和提示减排潜力，监测项目应设计为长期连续观测。我国国家农业面源监测网络即强调“同期联网、连续多年”策略。在每个监测站点或小区，应至少持续开展 3 年及以上观测，以消除短期偶然性干扰。每年度监测应保证同一降雨 - 作物生长期体系内的覆盖性与一致性，以便跨年对比。在多年数据积累基础上，应开展趋势分析：如季节性氮磷通量、浓度 - 流量曲线变化、季节养分峰值出现时点推进、年际流失量变化等。可采用非参数检验（如 Mann-Kendall 检验）或 Sen 斜率法评估趋势显著性。还可在多年观测基础上分解流失通量对应的降雨强度、径流系数、有效浓度变化等贡献率。此外，应对极端年份（如干旱年、洪涝年）重点分析其对养分流失的扰动效应。通过长期监测获得的趋势性、年际性数据，不仅是模型校准与验证的基准，也是评估管理措施、政策干预效果及时空演化态势的重要依据。

4 农业面源污染中氮、磷流失模拟

4.1 适用模型类型与尺度匹配策略

面源污染模拟模型大体可分为机理模型（如 SWAT、HSPF、AGGRO、AnnAGNPS）与非机理（经验、统计、输出系数等）模型。我国研究中常见的是 SWAT 在流域尺度的应用，以及输出系数模型和统计模型作为全国尺度快速核算工具。在我国情境下应结合尺度匹配原则：对于中小流域或典型监测区，宜采用机理模型以解析水文 - 养分耦合过程；对于省级或全国尺度快速估算，可结合输出系数模型或统计模型。尺度匹配还需考虑数据可得性：机理模型对降雨时序、土地利用、土壤参数、农业管理措施、植被生长参数要

求较高；输出系数模型则依赖系数库与土地利用覆盖面积，因此在数据薄弱区更具可操作性。具体策略可先以监测区域为“训练区”，采用机理模型校准参数，再将参数经验推广到相邻区域或更大尺度，辅之以统计模型校正偏差^[4]。此外，为减小尺度跨越误差，可采用分区-分级模型耦合方式，即在流域内部划分多个子单元，每个子单元采用局部模型模拟，再汇总输出至更高尺度。

4.2 模型参数选取与校准 / 验证策略

模型有效性关键在于参数精度与校准策略。我国研究通常遵循“先水文再水质”的思路：先在模型中率定径流产流、汇流、土壤水文参数（如曲线数CN、土壤渗透系数、下渗参数）至基础水量模拟逼近观测水量，再在此基础上率定氮、磷通量相关参数，如氮、磷矿化速率、硝化速率、反硝化损失系数、有机氮有机磷转化率、吸附-解吸系数、土壤持磷参数等。在校准步骤中，可采取分阶段率定法：先针对基准年份进行率定，再用留出年份进行交叉验证。对于氮磷浓度与通量的拟合，可采用目标函数（如NSE、R²、偏差率、残差分析）综合评价。我国一些研究还引入AIC、BIC、扰动试验（如敏感性分析）来选择最优参数组合。验证阶段应利用不参与校准的观测年数据进行模拟-观测对比，重点检验高峰期通量、浓度-流量功能曲线、年通量总量等指标。对模拟误差明显的时段或子区，应开展误差分解分析（如降雨量误差、模型结构误差或管理措施不匹配）。此外，可利用无人值守观测点、自动在线监测仪器数据增强校验样本密度，从而提升模型参数可靠性。

4.3 浓度-流量关系模拟与波动响应机制构建

氮、磷流失过程通常表现出浓度-流量（C-Q）关系特征，即在不同流量阶段对应浓度是否“先升后降”或线性响应。在我国农业区模拟中，应谨慎考虑该响应机制：许多机理模型默认采用固定浓度-流量关系，而真实田间往往呈现动态非线性趋势。这就要求在模型中引入浓度波动响应模块，即将浓度作为水量函数（C=aQ^b或分段拟合）纳入模型结构。校准过程中可以从观测事件数据中拟合浓度-流量关系式，将其作为模拟输入约束。模型还应具备对初始浓度滞后、沉积释放、吸附-解吸再释等过程的响应机制模拟。对于高频降雨事件，可模拟高峰期浓度缓冲、稀释效应、底部淤积再悬浮等内部调节机制。在我国南北方差异显著区域，还应考虑温度、土壤氮转化速率、磷再溶出的温度敏感性等对浓度-流量响应的调节作用^[5]。通过浓度-流量耦合

模型设计，可以使仿真结果更加贴近实测浓度动态特征。

4.4 情景模拟与管理措施评估模块设计

在模拟平台上引入情景模拟功能，有助于评估不同农业管理措施（如减肥、深施、截流沟、植被缓冲带、退耕还林等）对氮、磷流失量的潜在影响。在我国背景下，常见做法是设定若干情景组（如基线方案、减肥10% / 20% / 30%、坡耕地截流带方案、有机肥替代方案等），在模型中逐项调整输入参数（如施肥速率、有机质输入、缓冲带效率、截流系数、地面退化系数等），进行“情景-模拟-比对”计算。情景模块应兼顾短期（1-3年）与中长期（5-10年）影响，输出各情景下年通量、浓度峰值、减少比例、成本效益等指标。为增强结果可靠性，应在情景模块中加入不确定性分析（如蒙特卡洛模拟、参数扰动模拟）以量化不确定范围。此外，还应设计敏感性分析子模块，评估各参数变动对流失量的敏感度，为管理措施优化提供决策依据。

5 结语

结合我国农业面源污染治理背景，氮、磷在农田系统中的流失问题需通过现场监测与模型模拟协同推进。田间监测提供真实流失量、浓度波动及养分空间分布信息；模型模拟则可扩展监测覆盖范围、检验管理措施效果、开展未来情景预测。通过合理选区、同步观测、剖面淋溶监测与长期趋势分析，可构建高质量数据体系；在模拟方面采用尺度匹配、参数校准、浓度-流量机制嵌入及情景模拟设计，则能提升模型实用性与决策支持能力。未来，应进一步加强监测网络密度、模拟参数本地化率定以及监测-模拟融合平台建设，以支撑我国农业面源污染控制的精细化管理与递进推进。

参考文献

- [1] 莫峻程,邵志伟,梁妙婷,黄燕珊,李永涛,居学海,陈澄宇.我国农田氮磷流失监测现状与在线监测标准化方法[J].江苏农业科学,2024(3).
- [2] 董欣欣.农田氮磷流失量原位监测与治理建议[J].农业科技通讯,2024(2):149-152.
- [3] 关荣浩,马保国,黄志僖,等.冀南地区农田氮磷流失模拟降雨试验研究[J].农业环境科学学报,2020,39(3):9.
- [4] 莫小玉,杨业凤,石磊,等.浦东新区水稻田氮磷养分流失情况初探[J].上海农业科技,2025(1):156-158.
- [5] 马瑛骏,万辰,张克强,等.农田排水口高度对地表径流氮磷流失的影响[J].农业工程学报,2021,37(15):7.