

5.碳氮过程与可持续发展

稻田氮的水-土界面过程与源汇功能评估

黄微尘

北京大学城市与环境学院

摘要：水稻是我国第一大粮食作物，也是我国水肥大户，普遍认为稻田是邻近水体和大气的重要氮排放源。然而，以往研究聚焦稻田排放属性，忽视稻田作为最大人工湿地的净化和消纳功能，且未按照“田-沟-塘”单元进行系统评估，因此，稻田氮源汇功能依旧是环境地理学的科学难题。由于氮的水-土界面行为异常复杂，微观界面过程与区域环境过程相互脱节，限制了氮径流、淋溶、侧渗的宏观格局和环境效应的准确评估，阻碍了稻田氮“源转汇”定向调控的有效制定。因此，解析不同尺度氮的水-土界面过程成为稻田氮源汇功能研究的核心难点。针对这一难点，本研究综合采用联网观测、控制试验、过程模拟等多尺度手段，系统研究稻田水-土界面氮的浓度、形态和通量变化规律及其主控因素，揭示降水和灌溉驱动下氮径流、淋溶、侧渗过程及机制，发展氮的水-土界面非稳态过程模拟的新方法，改进了 WHCNS-rice 相关模块，提出稻田氮源汇功能评估和调控方法，阐明中国稻田氮源汇功能及其调控潜力，形成如下主要结论：（1）发现降水可引起土壤孔隙氮的间歇性释放和输移，这个非稳态过程贡献了中国稻田氮径流通量的 $21.0 \pm 1.9\%$ ，长江流域贡献比最高。释放输移的大小取决于降水强度和面水初始浓度，高强度降水造成面水水位的抬升和表层土壤导水能力的下降，导致场次内释放贡献随时间衰减的动态规律。该发现将稻田氮径流过程从传统的“混合推流”扩展到“释放输移”机制。（2）证实降水和灌溉驱动着稻田发生氮淋溶侧渗，通量不仅大且年际波动稳定，是氮径流通量的 1.5 倍，改变了“稻田因以氮氮为主且有犁底层所以难以发生氮淋溶侧渗”的传统认识。主要是因为淹水环境下面水水位和土壤导水能力通过影响重力势和基质势主导淋溶，而田沟高差通过影响重力势主导近田埂区侧渗。将上述两个非稳态过程引入 WHCNS-rice 模型，降低了从场次、站点到亚区尺度的模拟偏差，提高了过程模拟和区域评估能力。（3）揭示我国 75-85% 的田-沟-塘系统对于邻近水体表现为“氮源”（即田沟塘向水体的直接和间接输出大于输入），尤其是施肥期和降水灌溉事件，主要是因为不合理施肥强度、类型、灌溉制度及未发挥沟塘的生态调控功能，在“稻田是污染源还是净化器？”这个科学问题上形成了新认识。优化肥、灌、排组合措施能够在实现粮食稳产、维持土壤肥力、节省灌溉用水量的基础上，削减 80% 以上氮源并使得一半以上稻田实现对水体氮汇，而无需额外成本即可达到调控潜力的 85-87%，为回答“如何实现污染源到净化器的转换？”这一科学问题提供了新启示。本研究采用联网观测、控制试验、过程模拟多尺度综合研究手段，揭示了降水和灌溉驱动下稻田水-土界面氮释放输移和淋溶侧渗新机制，挑战了“稻田混合推流过程主导径流且难以发生氮淋溶侧渗”的传统认识，完善了稻田氮迁移转化过程模型，为稻田氮排放多尺度多维度评估提供了方法支撑；界定了我国稻田氮源汇功能及其调控路径，提出“中国一半以上稻田具备氮源转汇潜力”的新观点，为防控稻田氮流失和强化稻田人工湿地功能提供科学依据，对实现粮食安全和环境安全的协同效益具有指导意义。

关键词：水稻，氮，水-土界面过程，源汇功能，评估调控