

5.碳氮过程与可持续发展

生物滞留系统氮淋出来源解析的数值模拟研究

夏晨曦、丁伟、余淑琦、秦华鹏

北京大学

摘要：生物滞留系统作为我国海绵城市的重要组成，有助于通过源头调控降雨径流，防治洪涝灾害、面源污染等典型城市水问题。尽管生物滞留系统表现出削减径流量、减轻径流污染等效益，但不稳定的氮去除率暗含着氮（N）淋出的风险，甚至引发出流负荷高于入流负荷的“净淋出”现象。因此，生物滞留系统的氮淋出或存在多种来源，包括当场降雨径流氮素的直接淋出，近期降雨径流氮素的暂存淋出，以及系统内部遗留氮的周转淋出。然而，传统的基于 ^{15}N 标记方法局限于解析稳态运行生物滞留系统的氮淋出来源，造成氮淋出来源分布的影响因素及机制并不清楚，从而阻碍了对生物滞留系统氮去除效果的正确认识与合理优化。针对上述科学问题，本研究开发了基于过程模型的氮淋出来源解析新方法。通过开展实验收集数据，率定、验证并首次利用高丰度 ^{15}N 数据辅助验证过程模型以降低预测不确定性，耦合过程模型与氮淋出源解析模块以模拟氮淋出来源分布，并对比了基于 ^{15}N 标记方法的氮淋出源解析结果以验证基于过程模型方法的可靠性。应用基于过程模型的氮淋出来源解析新方法，预测了淹没层、降雨强度等因素对氮淋出来源分布的影响。主要研究结论如下：（1）高丰度 ^{15}N 数据可以约束参数取值并减小过程模型的预测不确定性。相较于仅利用 N 浓度数据，同时利用 N 和 ^{15}N 浓度数据校验模型参数时， Knits_2 （土壤层吸附态氮氮的硝化反应速率常数）等参数的取值范围缩小，预测总氮（TN）浓度的平均带宽、香农熵分别降低了 23%和 31%。（2）基于过程模型的氮淋出来源解析方法具有可靠性。生物滞留系统中，模拟的直接淋出（ $79.54\%\pm 5.08\%$ ）、暂存淋出（ $2.80\%\pm 1.74\%$ ）和周转淋出（ $17.66\%\pm 4.11\%$ ）与基于 ^{15}N 标记方法实测的直接淋出（83.58%）、暂存淋出（1.74%）和周转淋出（14.68%）结果相近。（3）典型因素对氮淋出来源分布的影响主要通过改变氮淋出的时滞性实现。淹没层设置可以储存当场和近期场次的降雨径流以延缓氮淋出，导致直接淋出减少了 11.96%、暂存淋出增加了 2.53%；更高的降雨强度可以缩短水力停留时间从而弱化了氮淋出的时滞性，导致直接淋出增加了 6.85%。综上所述，本研究首次应用高丰度同位素数据辅助验证模型，并开发了基于过程模型的氮淋出来源解析新方法，系统回答了“生物滞留系统氮淋出来源分布的影响因素与机理是什么？”的科学问题。本研究为同位素示踪辅助模型提供了新启示，为生物滞留系统氮淋出来源解析提供了新方法，为氮的源汇转换和淋出机制研究提供了新思路。研究结果对生物滞留系统氮淋出的科学管理，保障城市水生态环境具有指导意义。

关键词：生物滞留系统、遗留氮、氮淋出、源解析、示踪辅助