中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture

基于文献分析的氮肥用量对小麦玉米轮作体系硝态氮淋溶的影响

肖广敏，茹淑华，孙世友，赵欧亚，侯利敏，王　策，王　凌，刘　蕾，张国印

Impact of nitrogen application on nitrate nitrogen leaching in winter wheat and summer maize rotation system based on a literature analysis

XIAO Guangmin, RU Shuhua, SUN Shiyou, ZHAO Ouya, HOU Limin, WANG Ce, WANG Ling, LIU Lei, and ZHANG Guoyin

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12357/cjea.20210426

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

施氮量对潮土区冬小麦-夏玉米轮作农田氮磷淋溶的影响

Effects of nitrogen application on nitrogen and phosphorus leaching in fluvo-aquic soil on a winter wheat-summer maize rotation farmland

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 29-37

华北平原氮肥周年深施对冬小麦-夏玉米轮作体系土壤氨挥发的影响

The effects of deep application of nitrogen fertilization on ammonia volatilization in a winter wheat/summer maize rotation system in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(12): 1880-1889

滴灌水肥一体化条件下施氮量对夏玉米氮素吸收利用及土壤硝态氮含量的影响

Effects of nitrogen application rate on nitrogen absorption and utilization in summer maize and soil NO_3^--N content under drip fertigation

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(5): 668-676

华北潮土冬小麦-夏玉米轮作包气带氮素淋溶机制

Mechanism of nitrogen leaching in fluvo-aquic soil and deep vadose zone in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 53-65

华北平原农田裂缝对硝态氮淋溶的影响

The effects of farmland cracks on nitrate leaching in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 76-84

地下水位波动对不同施氮量农田土壤硝态氮运移影响

Effects of groundwater fluctuation on nitrate nitrogen transport after nitrogen application in cropland soil

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 154-162

关注微信公众号，获得更多资讯信息

中国生态农业学报(中英文) 2022 年 1 月 第 30 卷 第 1 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jan. 2022, 30(1): 116−125

DOI: 10.12357/cjea.20210426

肖广敏, 茹淑华, 孙世友, 赵欧亚, 侯利敏, 王策, 王凌, 刘蕾, 张国印. 基于文献分析的氮肥用量对小麦玉米轮作体系硝态氮淋溶的影响[J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2022, 30(1): 116−125

XIAO G M, RU S H, SUN S Y, ZHAO O Y, HOU L M, WANG C, WANG L, LIU L, ZHANG G Y. Impact of nitrogen application on nitrate nitrogen leaching in winter wheat and summer maize rotation system based on a literature analysis[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(1): 116−125

基于文献分析的氮肥用量对小麦玉米轮作体系硝态氮淋溶的影响*

肖广敏, 茹淑华, 孙世友**, 赵欧亚, 侯利敏, 王 策, 王 凌, 刘 蕾, 张国印

(河北省农林科学院农业资源环境研究所/河北省肥料技术创新中心 石家庄 050051)

摘 要: 氮淋溶是氮素损失的主要途径之一, 土壤硝态氮通过淋溶进入水体会造成人体中毒和水体富营养化, 对人体健康和生态环境产生严重危害。为探明我国冬小麦-夏玉米轮作体系化肥施氮量、作物种类和监测方法等因素对硝态氮淋溶量的影响, 利用中国知网期刊全文数据库 (CNKI) 和 Web of Science 核心合集英文数据库 (WoS), 收集 1980—2020 年冬小麦-夏玉米轮作体系硝态氮淋溶领域的相关文献, 采用回归方程和 *T* 检验等统计学方法分析不同施氮水平、作物种类和监测方法对冬小麦-夏玉米轮作体系硝态氮淋溶的影响。结果表明, 随着化肥施氮量的增加, 小麦季和玉米季硝态氮淋溶量均呈指数增长趋势。小麦季和玉米季平均施氮量差异不显著, 但小麦季硝态氮淋溶量和淋溶率显著低于玉米季 ($P<0.01$)。在施氮量接近的条件下, 采用渗漏计法和溶液提取器法测得的硝态氮淋溶量和淋溶率没有显著差异, 两种方法均可作为监测硝态氮淋溶的可靠方法在田间应用。回归方程对施氮量和硝态氮淋溶量的拟合在施氮量低于 300 kg·hm^{-2} 时较好, 随着施氮量的增加拟合精确度降低。玉米季硝态氮淋溶风险大于小麦季, 冬小麦-夏玉米轮作体系中玉米季的硝态氮淋溶现象需要引起重视。

关键词: 冬小麦-夏玉米轮作; 硝态氮淋溶; 施氮量; 渗漏计; 溶液提取器

中图分类号: S158 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Impact of nitrogen application on nitrate nitrogen leaching in winter wheat and summer maize rotation system based on a literature analysis*

XIAO Guangmin, RU Shuhua, SUN Shiyou**, ZHAO Ouya, HOU Limin, WANG Ce, WANG Ling, LIU Lei, ZHANG Guoyin

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences / Hebei Fertilizer Technology Innovation Center, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: Nitrogen (N) leaching is one of the main routes of N loss in farmlands. The entry of nitrate N into water can cause human poisoning and water eutrophication, resulting in serious damage to human health and ecological environments. This study was carried out to explore the effects of different N fertilization rates, crop types, and monitoring methods on nitrate N leaching in the winter

* 国家重点研发计划项目 (2017YFD0800600)、河北省重点研发计划 (20323601D) 和河北省农林科学院创新工程 (2019-1-3) 资助

** 通信作者: 孙世友, 主要研究方向为农业环境污染控制。E-mail: sunshiyou@126.com
肖广敏, 主要研究方向为农业面源污染控制。E-mail: xgm8945491@163.com

收稿日期: 2021-07-05 接受日期: 2021-08-17

* This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFD0800600), the Key Research and Development Program of Hebei Province (20323601D) and the Innovation Program of Hebei Academy of Agriculture and Forestry Science (2019-1-3).

** Corresponding author, E-mail: sunshiyou@126.com

Received Jul. 5, 2021; accepted Aug. 17, 2021

wheat and summer maize rotation system, which is the main cropping system used in China. To this end, the China National Knowledge Infrastructure (CNKI) database and Web of Science (WoS) Core Collection database were used to collect publications on nitrate N leaching in winter wheat and summer maize rotation systems from 1980 to 2020. Data from these papers on the effects of N application rates, crop types, and monitoring methods on nitrate N leaching from winter wheat and summer maize rotation systems were then analyzed using regression and *T* tests. It was found that an increase in the N fertilization rate exponentially increased the nitrate N leaching amount in this cropping system. The fitted equations for the relationship between nitrate N leaching amount and N fertilization rate in the winter wheat and summer maize seasons were $y = 0.4633e^{0.0109x}$ and $y = 1.1011e^{0.0103x}$, respectively. Although there was no significant difference between the N fertilization rates in the winter wheat (218 kg·hm^{-2}) and summer maize seasons (190 kg·hm^{-2}), the nitrate N leaching amount (8.8 kg·hm^{-2}) and rate (3.5%) in the winter wheat season was lower than those (amount: 13.9 kg·hm^{-2}; rate: 6.4%) in the summer maize season. In both the winter wheat and summer maize seasons, there was a significant exponential correlation between the N fertilization rate and nitrate N leaching amount, as measured using two different methods — lysimeter and solution collection, resulted in fitted equations of $y = 0.2448e^{0.0143x}$ and $y = 0.6108e^{0.0098x}$ in the winter wheat season, respectively, and $y = 1.0284e^{0.0102x}$ and $y = 0.972e^{0.011x}$ in the summer maize season, respectively. Thus, both methods can be used to measure nitrate N leaching reliably. The fitting accuracy of the regression equation for the N application rate and nitrate N leaching amount was better when the N application rate was less than 300 kg·hm^{-2}, but the accuracy decreased with a further increase in the N application rate. In conclusion, because more nitrate N leaching occurs in the summer maize season than in the winter wheat season, the leaching problem in the summer maize season necessitates greater attention.

Keywords: Winter wheat-summer maize rotation; Nitrate nitrogen leaching; Nitrogen fertilization rate; Lysimete; Solution collection

在农业生产中肥料的施用在农作物生长过程中具有不可替代的作用[1]。氮肥是农作物生长过程中的主要氮素来源, 在作物产量和品质的提升中起着关键作用, 合理施用氮肥是获得较高产量的关键[2]。但在我国农业生产中往往存在严重的过量施肥现象。自 20 世纪 80 年代改革开放以来我国氮肥投入快速增长。根据《2020 年中国统计年鉴》, 自 1980 年至 2019 年我国氮肥使用量从 934.2 万 t 增加到 1930.2 万 t, 增长了 106.6%。全国耕地平均氮肥施用量为 240 kg·hm^{-2}, 单位种植面积施氮量远高于非洲和欧美等地区, 是全球氮高投入地区之一[3]。有学者分析了国内^{15}N 示踪试验资料, 认为我国现有农田管理水平的氮肥有效率在 50%~60%, 损失率在 40%~50%[4]。氮肥施入农田生态系统除了可以被农作物吸收利用外, 还能够以土壤残留、氨挥发、淋溶和硝化-反硝化等多种途径损失到环境中[5]。氮的淋溶损失是指土壤中的氮素在水分投入 (灌溉、降水) 之后随土壤水分运动向下直至进入到作物根区无法到达的区域, 最终不能被作物吸收所导致的损失[6]。由于硝态氮离子自身带有负电荷, 在土壤中会与带有同样电荷的土壤胶体互相排斥, 所以氮素主要以硝态氮的形式发生淋溶[7]。研究发现中国地下水中超过 50% 的氮来自农田氮素淋溶[8], 氮素通过淋溶进入自然界水循环会造成水体富营养化[9], 硝酸盐在水体中也会通过反硝化作用释放出 N_2O, 成为重要的温室气体间接排放源[10]。

为了降低氮素淋溶导致的水污染问题, 欧盟制定硝酸盐法案 (Nitrate Directive) 和水法案 (Water Framework Directive), 通过规范农田水氮施用量和施用方式提高水氮利用效率, 减少氮淋溶[11]。目前针对硝酸盐淋溶开展了大量研究, 结果表明氮素淋溶量与氮素施用量之间存在正相关关系, 随着施氮量增加硝态氮淋溶量也显著增加[12-13]。研究发现华北地区冬小麦 (*Triticum aestivum*) 的氮素施用量如果保持在 90~170 kg(N)·hm^{-2}的范围内硝酸盐淋溶损失极低, 当施氮肥量达 240 kg(N)·hm^{-2} 时, 硝酸盐向深层土壤积累并进入地下水系统的风险会大大增加[14]。水分在土壤剖面中的垂直移动是氮素淋溶的重要影响因素, 硝酸盐淋失量与水分投入呈正相关关系[15]。在我国北方由于玉米 (*Zea mays*) 生长处于夏季多雨期且生长时间较短, 集中的降雨、灌溉极大地增加了氮素淋溶的风险[16]。小麦、玉米是我国重要的粮食作物, 2019 年小麦和玉米的播种面积分别为 2.37×10^7 hm^2 和 4.13×10^7 hm^2, 占粮食播种面积的 20.4% 和 35.6%, 冬小麦-夏玉米轮作是我国北方最常见的种植制度, 针对北方冬小麦-夏玉米轮作体系开展氮淋溶研究具有重要意义。目前, 针对冬小麦、夏玉米氮淋溶的文献分析研究在筛选数据时大量采用间接计算方法得到的氮淋溶数据, 由于间接计算数据存在较大误差, 不能较好地定量施氮量对硝态氮淋溶量的影响[17]。为了明确冬小麦-夏玉米轮作体系氮肥施用量与硝态氮淋溶的关系及不同监测方法对氮素淋溶量的影响, 本研究收集了 1980 年以来中国北方地区冬小麦-夏玉米轮作体系的氮淋溶田间试验, 对相关数据进行了收集、录入和整合分析, 研究化肥施氮量对硝态氮淋溶量的影响, 并对不同硝态氮淋溶

测定方法进行比较分析, 为冬小麦-夏玉米轮作体系氮肥合理施用和减少硝态氮淋溶损失提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 文献收集

本研究通过对中国知网数据库 (CNKI) 和 Web of Science 核心合集英文数据库 (WoS) 1980 年以来公开发表的有关冬小麦-夏玉米轮作体系硝态氮淋溶的文献进行检索并从中获取施氮量、硝态氮淋溶量和氮淋溶采集方法等相关数据。采用的文献主要来源为数据库收录的期刊上发表的文献以及硕博学位论文。中国知网通过主题词“冬小麦”“夏玉米”“氮淋溶”“硝态氮淋溶”进行检索, WoS 通过主题词“winter wheat” “summer maize” “nitrogen leaching” “ nitrate nitrogen leaching”进行检索。从检索出的文献中进行筛选, 从中提取本研究所需要的数据。本研究所筛选文献和数据点应满足以下条件: 1) 试验为田间试验; 2) 种植制度为冬小麦-夏玉米轮作; 3) 测定氮淋溶所用方法为渗漏计法或溶液提取器法, 其他方法不在本次研究范围之内; 4) 田间试验所用肥料为化学氮肥, 排除施用有机肥和缓控释肥等其他类型肥料的数据; 5) 只选取农民常规农田管理措施处理的数据, 排除特殊处理 (例如滴灌喷灌、深耕、垄作覆膜等农田管理措施); 6) 试验设置 3 个或 3 个以上重复。

经过筛选本研究共收集和使用文献 22 篇 (中文 20 篇, 英文 2 篇), 收集到冬小麦硝态氮淋溶数据 52 个、夏玉米硝态氮淋溶数据 65 个, 其中采用渗漏计测定硝态氮的文献有 13 篇, 采用溶液提取器测定硝态氮的文献有 9 篇。硝态氮淋溶观测数据共 117 个, 其中采用渗漏计测定硝态氮淋溶量的观测数据为 64 个, 采用溶液提取器测定硝态氮淋溶量的观测数据为 53 个。根据冬小麦-夏玉米轮作体系推荐施氮量将数据分为两组, 即施氮量≤200 kg·hm^{-2} 和施氮量>200 kg·hm^{-2}[5]。

1.2 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 进行回归方程的拟合与作图, 运用 SPSS 20 进行回归分析和 T 检验。

2 结果与分析

2.1 不同施氮量对冬小麦硝态氮淋溶的影响

冬小麦施氮量、硝态氮淋溶量和硝态氮淋溶率的分布如图 1 所示。冬小麦季 (样本数 n=52) 化肥施氮量范围为 0~400 kg·hm^{-2}, 平均施氮量为 (218±102) kg·hm^{-2}, 硝态氮淋溶量为 0.4~32.0 kg·hm^{-2}, 平均硝态氮淋溶量为 (8.8±7.9) kg·hm^{-2}; 硝态氮淋溶率为 0.4%~8.0%, 平均为 (3.5±2.1)%。施氮量≤200 kg·hm^{-2} 处理 (n=28) 平均施氮量为 (151±44) kg·hm^{-2}, 硝态氮淋溶量为 (3.8±3.5) kg·hm^{-2}, 硝态氮淋溶率为 (2.5±1.7)%。施氮量>200 kg·hm^{-2} 的处理 (n=24) 平均施氮量为 (309±57) kg·hm^{-2}, 硝态氮淋溶量为 (14.5±7.9) kg·hm^{-2}, 硝态氮淋溶率为 (4.5±2.0)%。冬小麦施氮量与硝态氮淋溶量的关系如图 2 所示。对冬小麦季化肥施氮量与相应的硝态氮淋溶量用数学模型进行拟合, 发现二者符合指数正相关关系 (拟合方程为 y=0.4633e$^{0.0109x}$), 且二者的相关性达显著水平 (P<0.01)。从拟合方程推算出, 当施氮量达到 200 kg·hm^{-2} 时小麦季硝态氮淋溶量为 4.1 kg·hm^{-2}, 硝态氮淋溶率为 2.1%, 当施氮量达 400 kg·hm^{-2} 时小麦季硝态氮淋溶量为 36.3 kg·hm^{-2}, 硝态氮淋溶率为 9.1%。当施氮量从 0 kg·hm^{-2} 增加到 200 kg·hm^{-2}, 硝态氮投入量增加 200 kg·hm^{-2} 其淋溶量仅增加 3.6 kg·hm^{-2}; 而当施氮量从 200 kg·hm^{-2} 增加到 400 kg·hm^{-2}, 硝态氮投入量增加 200 kg·hm^{-2} 其淋溶量增加了 32.2 kg·hm^{-2}。当冬小

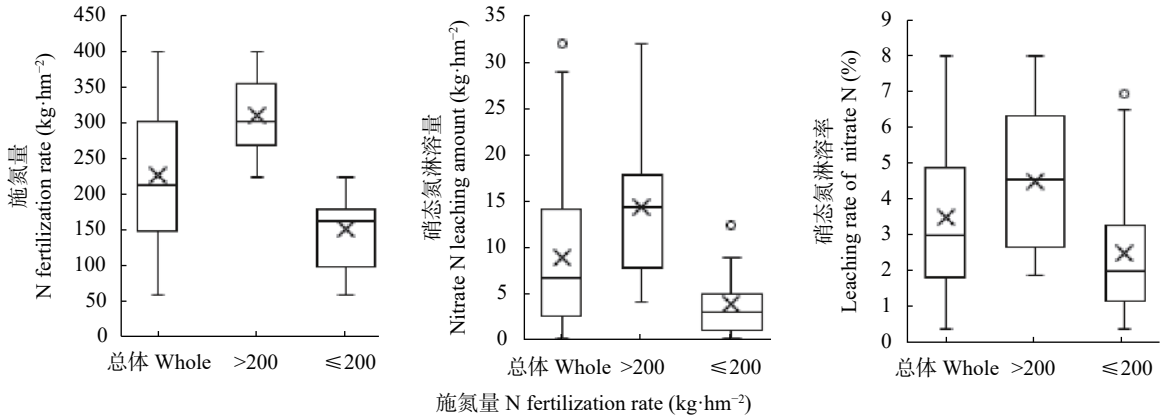

图 1 冬小麦季施氮量、硝态氮淋溶量和硝态氮淋溶率

Fig. 1 Nitrogen fertilization rate, nitrate N leaching amount and leaching rate of nitrate N in winter wheat season

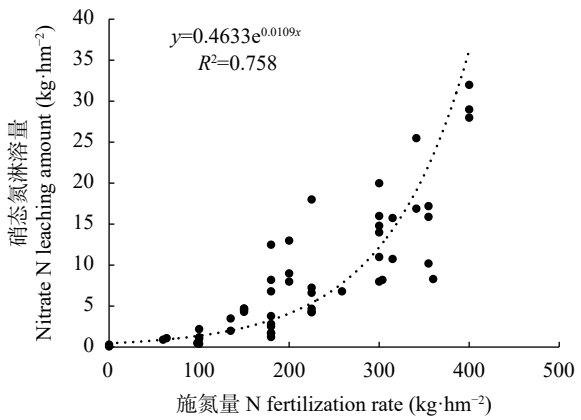

图 2　冬小麦施氮量与硝态氮淋溶量的关系

Fig. 2　Relationship between nitrate N leaching amount and N fertilization rate in winter wheat season

麦施氮量为 0~200 kg·hm^{-2}, 硝态氮淋溶量随化肥施氮量的增加而缓慢增加, 施氮量超过 200 kg·hm^{-2} 后, 硝态氮淋溶量随化肥施氮量的增加而迅速增加。

2.2　不同施氮量对夏玉米硝态氮淋溶的影响

夏玉米施氮量、硝态氮淋溶量和硝态氮淋溶率分布如图 3 所示。玉米季 (样本数 n=65) 化肥施氮量范围为 0~525 kg·hm^{-2}, 平均施氮量为 (190±110) kg·hm^{-2}; 施氮肥处理硝态氮淋溶量范围为 0.9~57.6 kg·hm^{-2}, 平均硝态氮淋溶量为 (13.9±12.3) kg·hm^{-2}; 硝态氮淋溶率范围为 0.3%~13.2%, 平均为 (6.4±3.2)%。施氮量≤200 kg·hm^{-2} 处理 (n=37) 平均施氮量为 (118±62) kg·hm^{-2}, 平均硝态氮淋溶量为 (6.5±5.2) kg·hm^{-2}, 平均占化肥施氮量比例为 (4.9±2.9)%。施氮量>200 kg·hm^{-2} 处理 (n=28) 平均施氮量为 (283±84) kg·hm^{-2}, 平均硝态氮淋溶量为 (23.4±11.9) kg·hm^{-2}, 平均占化肥施氮量比例为 (8.1±2.6)%。玉米施氮量与硝态氮淋溶量的关系如图 4 所示。玉米季施氮量和硝态氮淋溶量关系与小麦季具有相同的变化趋势, 对夏玉米季化肥施氮量与相应的硝态氮淋溶量用数学模型进行拟合, 发现二者符合指数正相关关系 (拟合方程为 y=1.1011e$^{0.0103x}$), 且二者的相关性达显著水平 (P<0.01)。从拟合方程推算出, 当施氮量达 200 kg·hm^{-2} 时玉米季硝态氮淋溶量为 8.6 kg·hm^{-2}, 硝态氮淋溶率为 4.3%; 当施氮量达 400 kg·hm^{-2} 时玉米季硝态氮淋溶量为 67.8 kg·hm^{-2}, 硝态氮淋溶率为 17.0%。当施氮量从 0 kg·hm^{-2} 增加到 200 kg·hm^{-2}, 硝态氮投入量增加 200 kg·hm^{-2}, 其淋溶量仅增加 7.5 kg·hm^{-2}; 而当施氮量从 200 kg·hm^{-2} 增加到 400 kg·hm^{-2}, 硝态氮投入量增加 200 kg·hm^{-2}, 其淋溶量增加了 59.2 kg·hm^{-2}。当玉米施氮量为 0~200 kg·hm^{-2}, 硝态氮淋溶量随化肥施氮量的增加而缓慢增加, 玉米季施氮量超过 200 kg·hm^{-2} 后, 硝态氮淋溶量随化肥施氮量的增加而迅速增加。

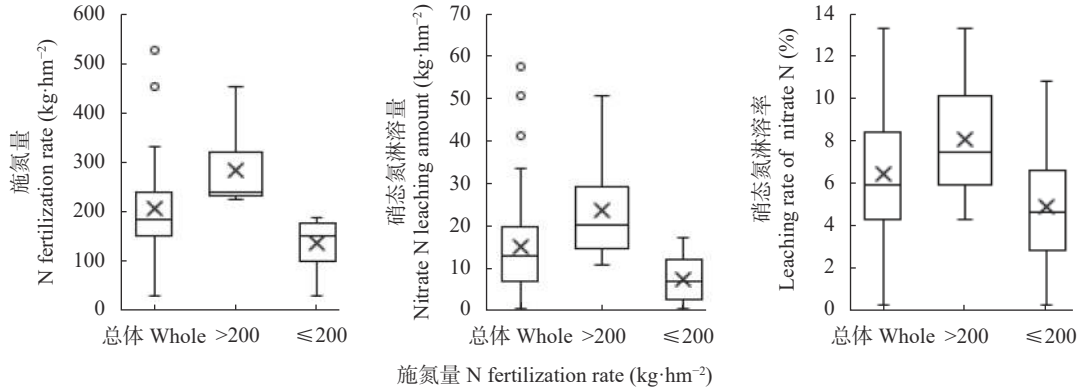

图 3　夏玉米施氮量、硝态氮淋溶量和硝态氮淋溶率

Fig. 3　Nitrogen fertilization rate, nitrate N leaching amount and leaching rate in summer maize season

2.3　不同监测方法对冬小麦夏玉米硝态氮淋溶的影响

小麦季渗漏计法的化肥施氮量和硝态氮淋溶量较溶液提取器法分布更为集中, 硝态氮淋溶率分布接近, 其平均施氮量、硝态氮淋溶量和淋溶率均低于溶液提取器法 (图 5)。小麦季渗漏计法的平均施氮量为 (184±77) kg·hm^{-2}, 测得的硝态氮淋溶量为 (5.7±5.0) kg·hm^{-2}, 硝态氮淋溶率为 (2.9±2.0)%; 溶液提取器法平均施氮量为 (242±112) kg·hm^{-2}, 测得的硝态氮淋溶量为 (10.9±9.0) kg·hm^{-2}, 硝态氮淋溶率为 (3.8±2.1)%。渗漏计法比溶液提取器法平均施氮量、硝态氮淋溶量和淋溶率分别低 24.0%、47.7% 和 23.7%。对小麦季渗漏计法和溶液提取器法的化肥施氮量和硝态氮淋溶量进行拟合 (图 6), 发现两种方法测得的硝态氮淋溶量均随着化肥施氮量的增加显著增加, 两种方法测得的硝态氮淋溶量与化肥施氮量之间呈显著指数相关关系 (渗漏计法: y=0.2448e$^{0.0143x}$,

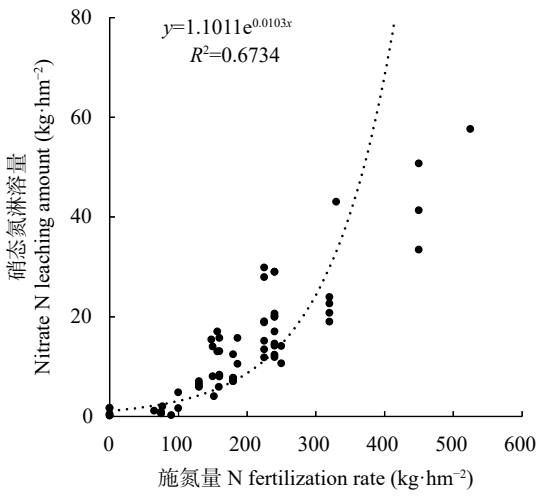

图 4 夏玉米季施氮量与硝态氮淋溶量的关系

Fig. 4 Relationship between nitrate N leaching amount and N fertilization rate in summer maize season

$P<0.01$; 溶液提取器法: $y=0.6108e^{0.0098x}$, $P<0.01$)。从拟合方程推算出, 当施氮量达 200 kg·hm^{-2} 时, 小麦季采用渗漏计法和溶液提取器法硝态氮淋溶量均为 4.3 kg·hm^{-2}, 硝态氮淋溶率为 2.2%; 当施氮量达 400 kg·hm^{-2} 时, 小麦季硝态氮淋溶量分别为 74.6 kg·hm^{-2} 和 30.8 kg·hm^{-2}, 硝态氮淋溶率分别为 18.7% 和 7.7%。当施氮量从 0 kg·hm^{-2} 增加到 200 kg·hm^{-2}, 硝态氮投入量增加 200 kg·hm^{-2}, 渗漏计法和溶液提取器法硝态氮淋溶量分别增加 4.1 kg·hm^{-2} 和 3.7 kg·hm^{-2}; 而当施氮量从 200 kg·hm^{-2} 增加到 400 kg·hm^{-2}, 硝态氮投入量增加 200 kg·hm^{-2}, 硝态氮淋溶量分别增加 70.3 kg·hm^{-2} 和 26.5 kg·hm^{-2}。在施氮量低于 200 kg·hm^{-2} 情况下, 两种方法测得的硝态氮淋溶量结果接近; 但是随着施氮量的增高, 渗漏计法测得的硝态氮淋溶量增长速度更快。

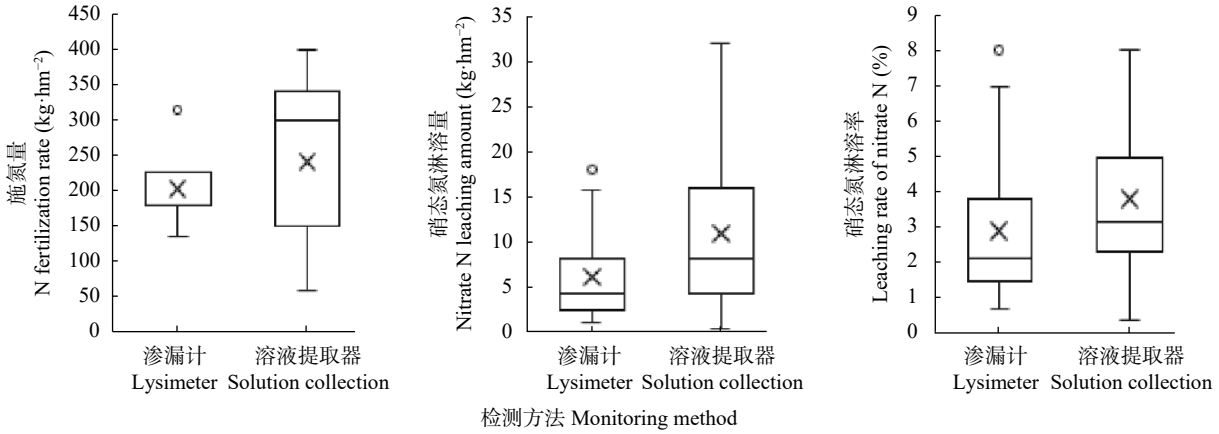

图 5 不同监测方法的冬小麦施氮量、硝态氮淋溶量和硝态氮淋溶率

Fig. 5 Nitrogen fertilization rate, nitrate N leaching amount and leaching rate under determined with different methods in winter wheat season

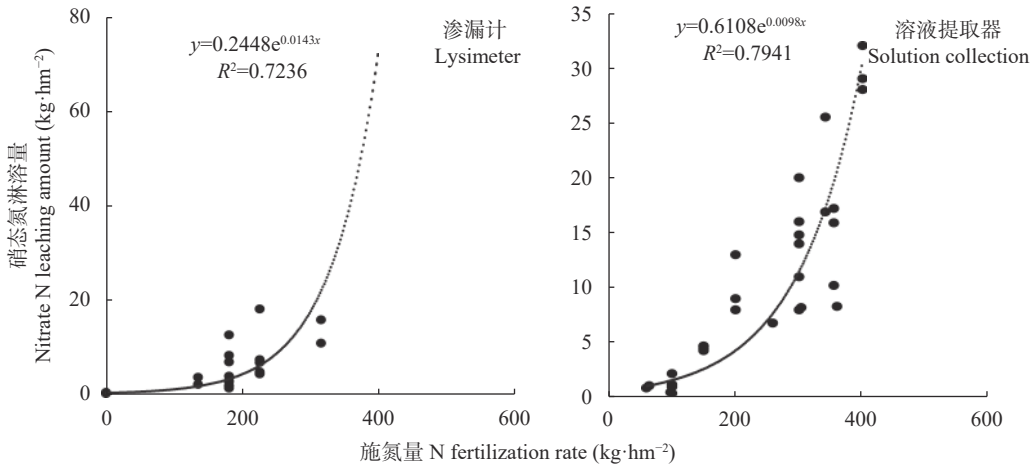

图 6 冬小麦不同监测方法施氮量与硝态氮淋溶量的关系

Fig. 6 Relationship between nitrate N leaching amount determined with different methods and N fertilization rate in winter wheat season

玉米季两种方法的化肥施氮量、硝态氮淋溶量和淋溶率分布接近, 渗漏计法平均施氮量、硝态氮淋溶量和淋溶率均高于溶液提取器法 (图 7)。玉米季渗漏计法的平均施氮量为 (212±120) kg·hm^{-2}, 测得的硝态氮淋溶量为 (17.0±12.7) kg·hm^{-2}, 硝态氮淋溶率为 (6.8±2.8)%; 溶液提取器法平均施氮量为 (146±82) kg·hm^{-2}, 测得的硝态氮淋溶量为 (8.9±7.6) kg·hm^{-2}, 硝态氮淋溶率为 (4.9±3.2)%。渗漏计法的施氮量、硝态氮淋溶量和淋溶率分别比溶液提取器法高 45.2%、91.0% 和 38.8%。对两种方法测得的玉米季化肥施氮量和硝态氮淋溶量进行拟合 (图 8) 发现, 硝态氮淋溶量与化肥施氮量之间呈指数相关关系 (渗漏计法: y=1.0284e$^{0.0102x}$, P<0.01; 溶液提取器法: y=0.972e$^{0.011x}$, P<0.01)。从拟合方程推算出, 当施氮量达 200 kg·hm^{-2} 时玉米季采用渗漏计法和溶液提取器法硝态氮淋溶量分别为 7.9 kg·hm^{-2} 和 8.8 kg·hm^{-2}, 硝态氮淋溶率分别为 4.0% 和 4.4%。当施氮量达 400 kg·hm^{-2} 时, 玉米季硝态氮淋溶量分别为 60.6 kg·hm^{-2} 和 79.2 kg·hm^{-2}, 硝态氮淋溶率分别为 15.2% 和 19.8%。当施氮量从 0 kg·hm^{-2} 增加到 200 kg·hm^{-2}, 硝态氮投入量增加 200 kg·hm^{-2}, 渗漏计法和溶液提取器法硝态氮淋溶量分别增加 6.9 kg·hm^{-2} 和 7.8 kg·hm^{-2}; 而当施氮量从 200 kg·hm^{-2} 增加到 400 kg·hm^{-2}, 硝态氮投入量增加 200 kg·hm^{-2}, 硝态氮淋溶量分别增加 52.7 kg·hm^{-2} 和 70.4 kg·hm^{-2}。当施氮量低于 200 kg·hm^{-2} 时, 采用 2 种方法测得的硝态氮淋溶量差异不大, 但是随着施氮量的增高, 溶液提取器法测得的硝态氮淋溶量增长速度更快。

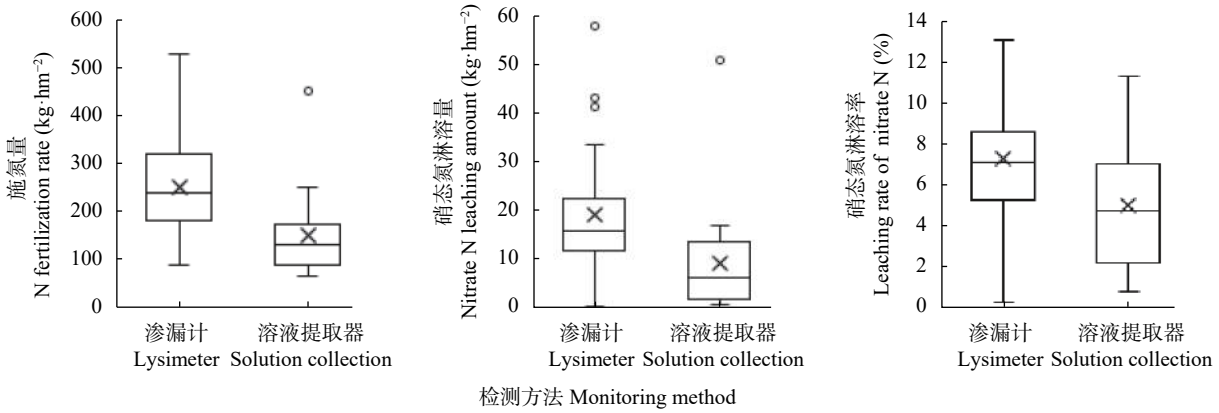

图 7　不同监测方法夏玉米季施氮量、硝态氮淋溶量和硝态氮淋溶率

Fig. 7　Nitrogen fertilization rate, nitrate N leaching amount and leaching rate determined with different methods in summer maize season

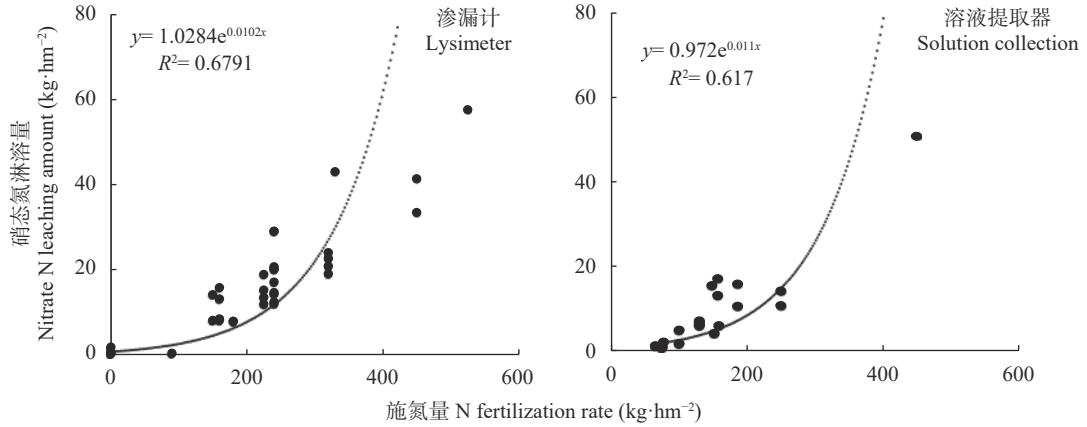

图 8　不同监测方法夏玉米施氮量与硝态氮淋溶量的关系

Fig. 8　Relationship between nitrate N leaching amount determined with different methods and N fertilization rate in summer maize season

3　讨论与结论

3.1　施氮量对硝态氮淋溶量的影响

本研究表明随着化肥施氮量的增加, 冬小麦和夏玉米的硝态氮淋溶量也随之增加, 这一研究结果与骆晓声等[18] 和李桢等[19] 随着施氮量的增加硝态氮淋溶量显著增加的研究结果一致。我们的研究结果表明冬小麦和夏玉米硝态氮淋溶量和化肥施氮量之

间存在指数关系, 当施用化肥氮维持在较低水平时硝态氮的淋溶量较低 (小麦季<200 kg·hm^{-2}、玉米季<180 kg·hm^{-2}), 而当化肥氮施用量超过这一数值后硝态氮的淋溶量会快速增长, 我们的这一研究结果与 Cui 等[20] 的研究结果一致。虽然施氮量与硝态氮淋溶量的关系与前人结果一致。但是, 本研究的冬小麦、夏玉米硝态氮淋溶量和淋溶率均显著低于他人的研究结果。王桂良[21] 的研究表明: 小麦季平均施氮量为 202 kg·hm^{-2} 时, 硝态氮淋溶量为 18.7 kg·hm^{-2}, 氮素淋溶损失率为 8.6%; 玉米季平均施氮量 210 kg·hm^{-2} 时, 硝态氮淋溶量为 47.6 kg·hm^{-2}, 氮素淋溶损失率为 20.8%。本研究表明, 小麦季平均施氮量 218 kg·hm^{-2} 时, 硝态氮淋溶量为 8.8 kg·hm^{-2}, 氮素淋溶损失率为 3.5%, 玉米季平均施氮量 190 kg·hm^{-2} 时, 硝态氮淋溶量为 13.9 kg·hm^{-2}, 氮素淋溶损失率为 6.4%, 在施氮量相差较小的情况下, 硝态氮淋溶量和硝态氮淋溶损失率均显著低于王桂良的研究。这主要是由于对文献数据筛选的标准不同, 本研究选择的硝态氮淋溶量数据全部为田间实际测量得到的数据, 王桂良[21] 的研究中选择的部分数据 (小麦季 37%, 玉米季 30%) 通过氮素平衡法计算间接得到。而 Wang 等[14] 和 Quemada 等[22] 的研究表明, 采用氮素平衡法计算得到的硝态氮淋溶量较其他方法偏高, 采用氮素平衡法得到的硝态氮淋溶数据不适合作为文献分析使用的数据。对于同种作物同种监测方法和施氮量情况下硝态氮淋溶量往往也存在差异, 这是由于硝态氮淋溶除受施氮量影响外, 还受降雨、土壤类型等自然条件的影响, 降雨较多和土壤沙粒含量较高的地区硝态氮淋溶量高于其他地区[23-24]。小麦季施氮量和硝态氮淋溶量的关系拟合效果较好; 而在玉米季当施氮量超过 300 kg·hm^{-2} 时, 由于数据点较少导致玉米季施氮量和硝态氮淋溶量的关系拟合结果与实测结果差距较大。

3.2 作物种类对硝态氮淋溶量的影响

本研究发现在冬小麦施氮量高于夏玉米的情况下, 冬小麦硝态氮淋溶量远低于夏玉米。夏玉米平均施氮量 190 kg·hm^{-2} 比冬小麦平均施氮量低 12.8%, 硝态氮淋溶量 13.9 kg·hm^{-2} 比小麦高 58.9%, 硝态氮淋溶率 6.4% 则比小麦高 82.9%。这一研究结果与牛新胜等[25] 和 Huang 等[26] 玉米季比小麦季更容易发生氮淋溶的研究结果一致。这是由于本研究的试验数据大多来自华北平原地区田间定位试验, 华北地区氮素淋溶具有明显的季节性差异[27]。这种季节性差异与土壤水分含量具有直接关系, 华北平原气候属于温带大陆性季风气候, 降雨分布不均, 其中约 80% 的降雨集中于玉米生长的 6—10 月[28]。在小麦季虽然施肥后灌水会造成土壤硝态氮含量升高, 但是由于缺乏降雨, 土壤含水量较低, 不易发生氮素淋溶[25]。玉米季生长周期较短, 频繁的强降雨事件导致土壤含水量长期处于较高的状态, 从而使土壤氮素具有较大的淋溶风险[29-30]。因此, 减少冬小麦-夏玉米轮作体系的硝态氮淋溶需重点关注玉米季的硝态氮淋溶。

3.3 不同监测方法对硝态氮淋溶量的影响

本研究中小麦季采用渗漏计法测得的硝态氮淋溶量和淋溶率显著低于溶液提取器法, 而玉米季结果相反。不同作物季渗漏计法和溶液提取器法的施氮量不同是造成这一现象的主要原因, 小麦季渗漏计法的施氮量 (184±77) kg·hm^{-2} 低于溶液提取器法施氮量 (242±112) kg·hm^{-2}, 而玉米季渗漏计法的施氮量 (212±120) kg·hm^{-2} 高于溶液提取器法施氮量 (146±82) kg·hm^{-2}。选择施氮量接近的数据进行统计时发现, 小麦季当渗漏计法施氮量为 217 kg·hm^{-2} 时, 硝态氮淋溶量和淋溶率分别为 7.7 kg·hm^{-2} 和 3.5%, 溶液提取器法施氮量为 212 kg·hm^{-2} 时, 硝态氮淋溶量和淋溶率分别为 8.0 kg·hm^{-2} 和 3.8%; 玉米季当渗漏计法施氮量为 174 kg·hm^{-2} 时, 硝态氮淋溶量和淋溶率分别为 9.8 kg·hm^{-2} 和 5.6%, 溶液提取器法施氮量为 176 kg·hm^{-2} 时, 硝态氮淋溶量和淋溶率分别为 11.8 kg·hm^{-2} 和 6.7%。小麦季和玉米季当施氮量接近时, 使用两种不同方法测得的硝态氮淋溶量和淋溶率没有显著差异。当施氮量<200 kg·hm^{-2} 时两种方法拟合方程对硝态氮淋溶量的拟合结果接近。随着施氮量的增加, 小麦季渗漏计法和玉米季溶液提取器法的拟合方程对硝态氮淋溶量的拟合结果显著高于另一种方法, 这主要是由于高施氮量的数据较少, 导致方程在对高施氮量进行拟合时存在较大误差。

在一定深度的土层安装已知面积的渗漏计, 每隔固定时间收集渗漏计中的淋溶液, 并测定淋溶液体积和淋溶液硝态氮浓度, 已知淋溶液体积和淋溶液浓度两者相乘可以计算出这段时间土壤硝态氮的淋溶量[31]。渗漏计法能直接测定土壤淋溶液的硝态氮浓度及淋溶液体积, 收集面积足够大, 土壤中的优先流问题不突出, 能够实现长期监测[32-33]。但是该方法在实际使用过程中存在边际效应[34]。在系统底部的土壤-空气边界存在表面张力会影响土壤液体的渗漏过程。当土壤处于湿润状态时产生的水压可以克服表面张力产生的影响; 但是当土壤水分含量低时, 由于张力阻碍使土壤淋溶液不易向下运动[35]。土壤溶液提取器是利用负压原理的微型土壤溶液采样器,

它是一种定点定位连续采集土壤溶液动态的仪器。用溶液提取器收集土壤淋溶液测定土壤淋溶液中的养分浓度, 然后通过间接计算得到淋溶液体积, 利用淋溶液养分浓度和体积的乘积得到养分淋溶量[36]。这一方法对原状土的扰动较小, 但是只能测定淋溶液中的硝态氮浓度, 淋溶液的体积只能通过间接估算得到。目前计算淋溶液体积主要有 3 种方法: 第一, 可以根据蒸发量、灌溉量、降雨量等通过水分平衡估算出淋溶液体积[37-38]。第二, 可以在溶液提取器埋设深度的上下 10 cm 处安装张力计, 测定该深度的土水势, 然后再根据达西定律计算得到淋溶液体积[39]; 第三, 利用土壤-水分模型根据试验区域土壤水动力学参数和水分投入量模拟得到淋溶液体积[40-41]。计算淋溶液体积所需数据量大, 淋溶液体积计算复杂, 只能根据经验模型或者软件间接估算得出; 而且溶液提取器只有在土壤含水量高的条件下, 才能顺利提取出土壤溶液[42]。由于田间氮淋溶受外界影响较大, 监测具有较大难度, 渗漏计法和溶液提取器法是目前采用较为广泛且被认可的氮淋溶监测方法。

3.4　结论

综上所述化肥氮施用量是影响冬小麦-夏玉米轮作体系硝态氮淋溶的主要因素, 硝态氮淋溶量随化肥施氮量的增加呈指数函数形式增加。当小麦季施氮量超过 200 kg·hm^{-2}、玉米季超过 180 kg·hm^{-2} 时硝态氮淋溶量会显著增加。小麦季平均施氮量为 218 kg·hm^{-2}, 玉米季平均施氮量为 190 kg·hm^{-2}, 施氮量没有显著差异, 但是小麦季硝态氮淋溶量和淋溶率分别为 8.8 kg·hm^{-2} 和 3.5%, 显著低于玉米季 (13.9 kg·hm^{-2} 和 6.4%)。玉米季比小麦季具有更大的硝态氮淋溶风险。渗漏计法和溶液提取器法监测的硝态氮淋溶量与化肥施氮量之间也存在指数函数关系, 随着化肥施氮量的增加, 两种方法监测得到的硝态氮淋溶量也显著增加。在化肥施氮量接近的情况下, 渗漏计法和溶液提取器法对硝态氮淋溶的监测效果没有显著差异, 两种方法都可以较好地应用于田间硝态氮淋溶监测。

参考文献　References

[1] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259−273
ZHU Z L, JIN J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 259−273

[2] 巨晓棠. 理论施氮量的改进及验证——兼论确定作物氮肥推荐量的方法[J]. 土壤学报, 2015, 52(2): 249−261
JU X T. Improvement and validation of theoretical N rate (TNR) — discussing the methods for N fertilizer recommendation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(2): 249−261

[3] LIU X J, ZHANG Y, HAN W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. Nature, 2013, 494(7438): 459−462

[4] 巨晓棠. 氮肥有效率的概念及意义——兼论对传统氮肥利用率的理解误区[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 921−933
JU X T. The concept and meanings of nitrogen fertilizer availability ratio — discussing misunderstanding of traditional nitrogen use efficiency[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(5): 921−933

[5] JU X T, ZHANG C. Nitrogen cycling and environmental impacts in upland agricultural soils in North China: A review[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(12): 2848−2862

[6] CANNAVO P, HARMAND J M, ZELLER B, et al. Low nitrogen use efficiency and high nitrate leaching in a highly fertilized *Coffea arabica-Inga densiflora* agroforestry system: a ^{15}N labeled fertilizer study[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2013, 95(3): 377−394

[7] ZHAO B Q, LI X Y, LIU H, et al. Results from long-term fertilizer experiments in China: The risk of groundwater pollution by nitrate[J]. NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences, 2011, 58(3/4): 177−183

[8] GUO Y J, LI G D. Nitrogen leaching and phosphorus accumulation in a perennial pasture after composted goat manure was topdressed and incorporated in the Three Gorges region[J]. Journal of Soils and Sediments, 2012, 12(5): 674−682

[9] GAO S S, XU P, ZHOU F, et al. Quantifying nitrogen leaching response to fertilizer additions in China' s cropland[J]. Environmental Pollution, 2016, 211: 241−251

[10] DEL GROSSO S J, PARTON W J, MOSIER A R, et al. DAYCENT national-scale simulations of nitrous oxide emissions from cropped soils in the United States[J]. Journal of Environmental Quality, 2006, 35(4): 1451−1460

[11] 马洪斌, 李晓欣, 胡春胜. 中国地下水硝态氮污染现状研究[J]. 土壤通报, 2012, 43(6): 1532−1536
MA H B, LI X X, HU C S. Status of nitrate nitrogen contamination of groundwater in China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(6): 1532−1536

[12] VELTHOF G L, LESSCHEN J P, WEBB J, et al. The impact of the Nitrates Directive on nitrogen emissions from agriculture in the EU-27 during 2000−2008[J]. Science of the Total Environment, 2014, 468/469: 1225−1233

[13] WANG G L, CHEN X P, CUI Z L, et al. Estimated reactive nitrogen losses for intensive maize production in China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 197: 293−300

[14] WANG Y C, YING H, YIN Y L, et al. Estimating soil nitrate leaching of nitrogen fertilizer from global meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2019, 657: 96−102

[15] WANG D, XU Z Z, ZHAO J Y, et al. Excessive nitrogen application decreases grain yield and increases nitrogen loss in a wheat-soil system[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section

B — Soil & Plant Science, 2011, 61(8): 681−692

[16] TAN D S, JIANG L H, TAN S Y, et al. An *in situ* study of inorganic nitrogen flow under different fertilization treatments on a wheat-maize rotation system surrounding Nansi Lake, China[J]. Agricultural Water Management, 2013, 123: 45−54

[17] ZHOU M H, BUTTERBACH-BAHL K. Assessment of nitrate leaching loss on a yield-scaled basis from maize and wheat cropping systems[J]. Plant and Soil, 2014, 374(1/2): 977−991

[18] 骆晓声, 寇长林, 王小非, 等. 施氮量对潮土区冬小麦-夏玉米轮作农田氮磷淋溶的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(1): 29−37
LUO X S, KOU C L, WANG X F, et al. Effects of nitrogen application on nitrogen and phosphorus leaching in fluvo-aquic soil on a winter wheat-summer maize rotation farmland[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(1): 29−37

[19] 李祯, 史海滨, 李仙岳, 等. 农田硝态氮淋溶规律对不同水氮运筹模式的响应[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 310−317
LI Z, SHI H B, LI X Y, et al. Response of the nitrate nitrogen leaching law to different water-nitrogen management patterns in farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(1): 310−317

[20] CUI Z L, WANG G L, YUE S C, et al. Closing the N-use efficiency gap to achieve food and environmental security[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(10): 5780−5787

[21] 王桂良. 中国三大粮食作物农田活性氮损失与氮肥利用率的定量分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2014
WANG G L. Quantitative analysis of reactive nitrogen losses and nitrogen use efficiency of three major grain crops in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014

[22] QUEMADA M, BARANSKI M, NOBEL-DE LANGE M N J, et al. Meta-analysis of strategies to control nitrate leaching in irrigated agricultural systems and their effects on crop yield[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 174: 1−10

[23] 王辉, 王全九, 邵明安. 降水条件下黄土坡地氮素淋溶特征的研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 61−64, 93
WANG H, WANG Q J, SHAO M A. Characteristics of nitrogen leaching from sloping land on loess plateau under rainfall conditions[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2005, 19(5): 61−64, 93

[24] ZHOU J B, XI J G, CHEN Z J, et al. Leaching and transformation of nitrogen fertilizers in soil after application of N with irrigation: a soil column method[J]. Pedosphere, 2006, 16(2): 245−252

[25] 牛新胜, 张翀, 巨晓棠. 华北潮土冬小麦-夏玉米轮作包气带氮素淋溶机制[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(1): 53−65
NIU X S, ZHANG C, JU X T. Mechanism of nitrogen leaching in fluvo-aquic soil and deep vadose zone in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(1): 53−65

[26] HUANG T, JU X T, YANG H. Nitrate leaching in a winter wheat-summer maize rotation on a calcareous soil as affected by nitrogen and straw management[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 42247

[27] HUANG P, ZHANG J B, ZHU A N, et al. Nitrate accumulation and leaching potential reduced by coupled water and nitrogen management in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. Science of the Total Environment, 2018, 610/611: 1020−1028

[28] ZHANG Y T, WANG H Y, LEI Q L, et al. Optimizing the nitrogen application rate for maize and wheat based on yield and environment on the Northern China Plain[J]. Science of the Total Environment, 2018, 618: 1173−1183

[29] CAMERON K C, DI H J, MOIR J L. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review[J]. Annals of Applied Biology, 2013, 162(2): 145−173

[30] 李虎, 王立刚, 邱建军. 基于DNDC模型的华北典型农田氮素损失分析及综合调控途径[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(4): 414−420
LI H, WANG L G, QIU J J. Nitrate loss simulated with DNDC model and control technologies in typical cropland of North China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(4): 414−420

[31] 王洪媛, 李俊改, 樊秉乾, 等. 中国北方主要农区农田氮磷淋溶特征与时空规律[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(1): 11−18
WANG H Y, LI J G, FAN B Q, et al. Nitrogen and phosphorus leaching characteristics and temporal and spatial distribution patterns in Northern China farmlands[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(1): 11−18

[32] 张亦涛, 王洪媛, 刘宏斌, 等. 基于大型渗漏池监测的褐潮土农田水、氮淋失特征[J]. 中国农业科学, 2016, 49(1): 110−119
ZHANG Y T, WANG H Y, LIU H B, et al. Characteristics of field water and nitrogen leaching in a haplic luvisol soil based on large lysimeter[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(1): 110−119

[33] 黄涛. 长期碳氮投入对土壤有机碳氮库及环境影响的机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2014
HUANG T. The effects of long-term C and N inputs on soil organic C and N pools and environments[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014

[34] CORWIN D L. Evaluation of a simple lysimeter-design modification to minimize sidewall flow[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2000, 42(1): 35−49

[35] 王攀磊, 徐胜涛, 潘艳华, 等. 农田土壤环境监测渗漏池系统的构建技术及应用[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 86−96
WANG P L, XU S T, PAN Y H, et al. Construction technology and application of lysimeter in agricultural soil environment monitoring[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(7): 86−96

[36] ZHAO X, ZHOU Y, WANG S Q, et al. Nitrogen balance in a highly fertilized rice-wheat double-cropping system in Southern China[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(3):

1068−1078

[37] MACK U D, FEGER K H, GONG Y S, et al. Soil water balance and nitrate leaching in winter wheat-summer maize double-cropping systems with different irrigation and N fertilization in the North China Plain[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2005, 168(4): 454−460

[38] GHEYSARI M, MIRLATIFI S M, HOMAEE M, et al. Nitrate leaching in a silage maize field under different irrigation and nitrogen fertilizer rates[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(6): 946−954

[39] FAN Z B, LIN S, ZHANG X M, et al. Conventional flooding irrigation causes an overuse of nitrogen fertilizer and low nitrogen use efficiency in intensively used solar greenhouse vegetable production[J]. Agricultural Water Management, 2014, 144: 11−19

[40] LONG G Q, SUN B. Nitrogen leaching under corn cultivation stabilized after four years application of pig manure to red soil in subtropical China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, 146(1): 73−80

[41] SVOBODA N, TAUBE F, WIENFORTH B, et al. Nitrogen leaching losses after biogas residue application to maize[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 130: 69−80

[42] 张敏, 田玉华, 尹斌, 等. 稻田氮素淋失测定方法的研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(3): 440−445
ZHANG M, TIAN Y H, YIN B, et al. A review of methods to determine nitrogen leaching in paddy fields[J]. Soils, 2015, 47(3): 440−445