环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第44卷 第1期
2023年1月15日

目 次

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第44卷第1期 2023年1月
Vol.44, No.1 Jan., 2023

缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响

侯朋福[1,2], 薛利祥[1], 袁文胜[3], 曹帅[1,2], 刘颖多[1], 薛利红[1,2*], 杨林章[1,2]

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室, 南京 210014; 2. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 3. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘要: 黏性土壤严重影响土壤水肥运移. 采取适宜的农艺措施优化土壤无机氮分布, 减少该类型土壤的氮素损失是农业绿色可持续发展的关键. 为明确缓控释肥种肥深施对黏性土壤麦田氮素损失的影响, 选择常规化肥(CN)和缓控释肥(RCU)这 2 种类型肥料, 采用撒播撒施(B)和机械化条播深施(D), 研究了缓控释肥种肥深施对黏性土壤小麦产量、季节麦田氮素径流流失、氨挥发和N_2O排放的影响; 并分析了其耕层土壤的无机氮时空分布特征. 结果表明, 相同肥料类型下, D 处理的小麦产量显著高于 B 处理; 而相同施肥方式下, RCU 处理的产量显著高于 CN 处理. D-RCU 处理的小麦产量最高, 达 6.97 t·hm^{-2}. 季节径流和氨挥发氮损失量高于N_2O形态的氮损失, 且不同损失途径对肥料类型和施肥方式的响应不同. 肥料类型和径流发生时间是麦田径流氮素流失的主要影响因素. 受监测年份降雨年型分配影响, RCU 处理的季节径流氮素流失量(20.35 kg·hm^{-2})较 CN 处理(10.49 kg·hm^{-2})显著增加. 生育后期是麦田氨挥发损失的主要时期, 并受施肥方式和肥料类型共同影响. B-CN 处理的季节氨挥发损失量最高(18.15 kg·hm^{-2}), 并显著高于其它处理(7.31 ~ 8.38 kg·hm^{-2}). 此外, D-RCU 处理(2.41 kg·hm^{-2})较 B-CN 处理(4.02 kg·hm^{-2})有降低N_2O排放的潜力. 结果同时表明, 试验土壤无机氮的径向移动高于垂直移动; 缓控释肥条播深施有利于优化土壤无机氮的时空分布, 是小麦产量增加和麦田氮素损失控制的主要原因. 结果说明, 缓控释肥是黏性土壤麦田增产减排的适宜替代肥料; 采用缓控释肥料条播深施能够通过优化土壤的无机氮时空分布, 增加小麦产量, 减少麦田氨挥发和N_2O损失, 但其对非肥期径流氮素流失的增加效应值得关注.

关键词: 黏性土壤; 小麦; 缓控释肥; 深施肥; 氮损失; 土壤无机氮

中图分类号: X144 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2023)01-0473-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202203255

Effect of Deep Fertilization with Slow/Controlled Release Fertilizer on N Fate in Clayey Soil Wheat Field

HOU Peng-fu[1,2], XUE Li-xiang[1], YUAN Wen-sheng[3], CAO Shuai[1,2], LIU Ying-duo[1], XUE Li-hong[1,2*], YANG Lin-zhang[1,2]

(1. Key Laboratory of Agro-Environment in Downstream of Yangtze Plain of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: Clayey soil seriously affects water-holding capacity and nutrient movement. Adopting appropriate agronomic measures to optimize the distribution of soil inorganic nitrogen (SIN) and reduce the nitrogen (N) loss in this soil is the key to agricultural sustainable development. To clarify the effect of deep fertilization of slow/controlled release fertilizer with sowing on N loss in a clayey soil wheat field, two types of fertilizers, conventional fertilizer (CN) and slow/controlled release fertilizer (RCU), were selected in this study. Here, we evaluated the effects of these two fertilizer types on wheat yield, seasonal N runoff loss, ammonia volatilization, and N_2O emissions in wheat fields in two typical fertilization modes (manual surface sowing and spreading (B) and belowground fertilization of slow/controlled release urea with mechanized strip sowing (D)). The temporal and spatial distribution characteristics of SIN in topsoil were also analyzed. The results showed that under the same fertilizer type, the wheat yield of D treatment was significantly higher than that of B treatment, whereas the yield of RCU was notably higher than that of CN under the same fertilization mode. D-RCU achieved the highest yield of 6.97 t·hm^{-2}. The seasonal N losses from runoff and ammonia volatilization were higher than that from N_2O emissions, and the responses of different N loss pathways to fertilizer types and fertilization methods were diverse. Fertilizer type and runoff occurrence time were the main influencing factors of N runoff loss, and N runoff loss of the RCU treatment was higher in the non-fertilization period. Unfortunately, affected by annual rainfall pattern, the seasonal N runoff loss of the RCU treatment (20.35 kg·hm^{-2}) was significantly higher than that of the CN treatment (10.49 kg·hm^{-2}). The late growth period was the main phase of ammonia volatilization, and the later period was jointly affected by fertilization modes and fertilizer types. The B-CN treatment induced the highest seasonal ammonia volatilization (18.15 kg·hm^{-2}), which was significantly higher than that of the other treatments (7.31-8.38 kg·hm^{-2}). Additionally, the D-RCU treatment (2.41 kg·hm^{-2}) tended to reduce the N_2O emissions in comparison to that in the B-CN treatment (4.02 kg·hm^{-2}). The results also indicated that the horizontal movement of SIN was higher than the vertical movement. Deep fertilization of RCU was conducive to optimizing the spatial and temporal distribution of SIN, which was the main reason for the increase in wheat yield and the control of N loss from wheat fields. These results suggest that RCU is a suitable alternative fertilizer for increasing yield and reducing N loss in clayey soil wheat fields; D-RCU can increase the wheat yield and reduce ammonia volatilization and N_2O emissions in wheat fields by optimizing the spatial and temporal distribution of SIN, and its increasing effect on N runoff loss in the non-fertilization period deserves attention.

Key words: clayey soil; wheat; slow/controlled release fertilizer; deep fertilization; nitrogen loss; soil inorganic nitrogen

收稿日期: 2022-03-28; **修订日期**: 2022-04-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1700803); 江苏省农业科技自主创新项目(CX(19)1007)

作者简介: 侯朋福(1986 ~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农田养分管理与氮磷损失控制, E-mail: pengfuhou100smby@163.com

* 通信作者, E-mail: njxuelihong@gmail.com

小麦是我国重要的粮食作物,维持单位面积小麦产量对保证国家口粮安全具有重要作用,尤其在当前人口红利政策刺激和人口增加背景下[1,2]. 除优良品种选育,化肥尤其是氮肥施用在稳定粮食产量方面发挥了重要作用[3,4]. 然而,由于作物养分吸收特性、肥料释放特性和水分管理的特殊性等因素叠加影响,氮肥的当季利用率一般不足 50%,其余大部分通过径流、渗漏、氨挥发和反硝化损失等进入水体或大气环境,引发系列环境问题[5~7]. 因此,采取适宜的农艺措施,如新型肥料替代和施肥方式改变等[8,9],在保证作物单产的同时减少农田氮素损失对保障国家粮食安全和改善生态环境具有重要意义.

近年来,随着研究技术和制备工艺的进步,缓控释肥料的研发取得了长足进步[10,11]. 由于该类型肥料通过材料包涂改变了氮素释放动力学参数,能够实现肥料养分的控制和延迟释放,因此具有广泛的应用前景[12~14]. 郝胜磊等[15]和 Zhu 等[16]均通过荟萃分析证实了缓控释肥料有利于提高三大粮食作物的产量和氮素吸收利用率. 这说明,缓控释肥是提高小麦产量和氮素利用率,减少氮素环境损失的有效替代肥料. 值得一提的是,赵明等[17]提出新时期作物生产需要从生产系统的整体性出发,协同优化气候-土壤-作物之间的关系,实现作物生产的可持续发展. 而缓控释肥料的养分释放也和土壤水热条件等密切相关[18,19]. 因此,不同类型作物和土壤的缓控释肥稳产减排效果不能一概而论.

土壤质地显著影响水肥运移,是土壤重要的物理特性之一,也是土系划分的重要指标[20~22]. 我国大部分地区都存在黏性土壤. 由于该类型土壤黏性强且耕作阻力大,往往存在适耕条件差(湿烂田)的问题,特别是在南方雨水充沛地区旱季作物种植季节[23,24]. 同时,由于该类型土壤水肥运移能力弱,肥料养分的释放运移(空间分布)必然不同于其他类型土壤,并深刻影响氮素损失[25~27]. 以太湖地区黏性土壤稻麦农田为例,由于水稻收获至小麦播种的茬口期短,且常遇降水,农户撒播撒施已经成为常态,这对氮素损失的影响有多大? 改速效氮肥为缓控释肥是否会由于肥料的缓慢释放,克服黏性土壤弱水肥运移能力的限制,通过优化土壤的无机氮时空分布,增加氮素减排空间,特别是在肥料深施条件下? 为此,本研究选择太湖地区长期稻麦轮作黏性土壤(具有典型犁底层结构),在适种年份研究了缓控释肥机械化种肥深施对麦田氮素损失的影响,并分析了其耕层土壤的无机氮时空分布特征,以期为南方地区典型黏土旱地作物的高产高效栽培和氮素损失控制提供理论支撑和技术参考.

1 材料与方法

1.1 试验设计

本试验于 2018 ~ 2019 年在南京市江宁区汤山街道阜庄村进行. 供试小麦品种为扬麦 28 号,播种量 375 kg·hm^{-2}. 试验于 2018 年 11 月 29 日播种,2019 年 5 月 31 日收获. 试验田为长期水旱轮作水稻土,土壤类型为马肝土,其黏粒、粉粒和砂粒的比例为 39.34%、29.18% 和 31.48%,为典型黏性土壤(国际制). 耕作层土壤理化性质为:pH 5.93; ω(有机碳) 16.87 g·kg^{-1}; ω(全氮) 1.95 g·kg^{-1}; ω(有效磷) 6.87 mg·kg^{-1}; ω(速效钾) 83.78 mg·kg^{-1}.

试验选择常规化肥(CN)和缓控释肥(RCU)这 2 种类型肥料,每种肥料采用人工撒播撒施(B)和机条播正位深施(D)这 2 种播种施肥方式,共 4 个处理. 所有处理氮(N)、磷(P_2O_5)和钾(K_2O)肥用量均相同,分别为 240、96 和 96 kg·hm^{-2}. 磷、钾肥分别选择过磷酸钙和氯化钾于整地前一次性基施. 常规化肥处理的氮肥采用普通商品尿素,分基肥(40%)、越冬肥(30%)和拔节孕穗肥(30%)3 次施用. 常规化肥撒播撒施处理(B-CN)的基肥为人工撒施; 条播深施处理(D-CN)采用农业农村部南京农业机械化研究所新研的小麦旋耕条播正位深施肥开沟一体化机器进行机条播深施(播种深度 3 cm,施肥深度 8 cm). 人工追施越冬肥和拔节孕穗肥. 缓控释肥处理的氮肥采用 3 个月树脂包膜尿素,一次性人工撒施(B-RCU)或条播深施(D-RCU). 此外,撒播撒施处理播种施肥后采用小型旋耕机进行旋耕盖土,并按条播深施机器等规格开丰产沟. 为便于机器作业,试验采用条区顺序排列,小区面积 300 m^2(10 m×30 m),并将每个小区单独划分为 3 个独立样区用于采样分析. 由于试验地区降水丰富、地下水位高,田间水分管理以雨养灌溉为主,不进行主动灌溉; 病虫草害防治同当地常规管理.

1.2 采样和测定方法

径流样品采集测定:于降水径流发生后记录径流体积,并采集径流水样带回实验室过滤后用 SKALAR 流动分析仪测定水样的氮素浓度(mg·L^{-1}). 按径流体积计算单次氮素径流流失量,并加和折算季节氮素径流流失量(kg·hm^{-2}).

氨挥发测定:采用密闭室间歇通气法,分别于每天 06:00 ~ 08:00 和 13:00 ~ 15:00 进行 2 个时间段 4 h 的连续抽气测定, 2% H_3BO_3 指示剂变色后更换指示剂并带回使用 0.01 mol·L^{-1} 的 H_2SO_4 滴定后,折算区间氨挥发损失量(kg·hm^{-2}). 田间气体采

集换气高度设定为 2 m,密闭室直径和条播行间距相同(25 cm),高度为 30 cm.

N_2O采集测定：使用静态暗箱法进行田间温室气体样品的采集,采集频次为 10 ~ 15 d,施肥后 7 d 内加密采集. 为增加样品代表性,按条播处理行间距(25 cm)2 行宽度将采集箱长和宽均设置为 50 cm,完整覆盖 2 行植株和土壤空间,并预埋同规格带有水槽的底座用于水封处理. 此外,生育后期在生育前期 50 cm 采集箱高度基础上增加 50 cm 高的加高箱进行气体样品采集. 每小区每次采集 4 组气体样品,时间间隔为 10 min,样品采集后带回实验室采用 Agilent 7980 进行N_2O浓度测定后折算N_2O排放通量[$\mu g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$],并计算季节 N_2O 排放量($kg \cdot hm^{-2}$).

土壤样品采集和测定：小麦 3 次施肥后的第 1 d 和第 7 d,其它时间每 10 ~ 15 d 采集一次耕层土壤样品,用于土壤无机氮含量测定. 为明确其时空变化,种肥深施处理以施肥点为中心,按照径向距离 2、5 和 10 cm 采集土壤样品,每个径向点按播种施肥深度采集 0 ~ 3、3 ~ 8、8 ~ 13 和 13 ~ 20 cm 土壤样品. 撒播撒施处理以任意点为中心进行相同操作. 样品采集后经过 2 $mol \cdot L^{-1}$ 的 KCl 浸提,振荡后过滤,连续流动分析仪测定铵态氮和硝态氮含量,并求和计算无机氮含量.

成熟期小麦产量：于小麦生理成熟期,每小区在非样品采集区随机选择长势一致的 3 个割方区(每个 1 m^2)收割小麦实产样品,晾晒后脱粒测定小麦实产和籽粒含水量,并按标准含水量(13.5%)折算小麦单产.

1.3　统计分析方法

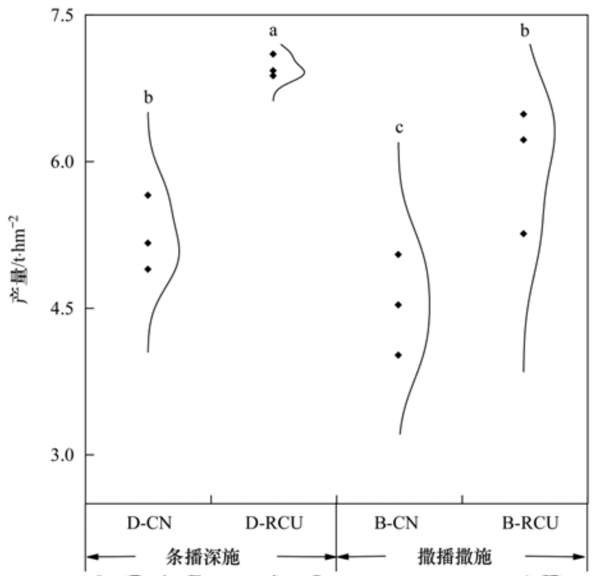
需要说明的是,由于本试验聚焦缓控释肥条播深施的效果分析和原因解析,因此田间N_2O排放和土壤无机氮时空分布特征仅选择常规化肥撒播撒施(对照)和缓控释肥条播深施 2 处理进行采集分析,其它指标对所有处理进行样品采集分析.

采用 Microsoft Excel 2010 建立数据库,分别用 SPSS 23.0 和 OriginPro 2021 进行数据统计分析和作图. 采用独立 *T* 检验和 Duncan 法进行处理间差异分析,并计算不同处理指标的平均值和标准误.

2　结果与分析

2.1　缓控释肥种肥深施对小麦产量的影响

不同类型肥料和施肥方式对小麦产量影响的结果列于图 1. 结果表明,不同类型肥料和施肥方式均显著影响小麦产量($P < 0.05$). 相同肥料类型下,条播深施处理(D)的小麦产量显著高于撒播撒施处理(B),D-CN 和 D-RCU 处理的小麦产量分别较 B-CN 和 B-RCU 处理增加 15.45% 和 16.36%. 此外,相同施肥方式下,缓控释肥处理(RCU)的小麦产量显著高于常规化肥处理(CN),D-RCU 和 B-RCU 处理的小麦产量分别较 D-CN 和 B-CN 处理增加 33.27% 和 32.23%. 所有处理比较结果表明,缓控释肥条播深施处理(D-RCU)的小麦产量最高(6.97 $t \cdot hm^{-2}$),处理间表现为：D-RCU > B-RCU 和 D-CN > B-CN.



不同小写字母表示小麦产量的差异显著性($P < 0.05$)

图 1　不同类型肥料和施肥方式对小麦产量的影响

Fig. 1　Wheat yield as affected by different fertilizer types and fertilization modes

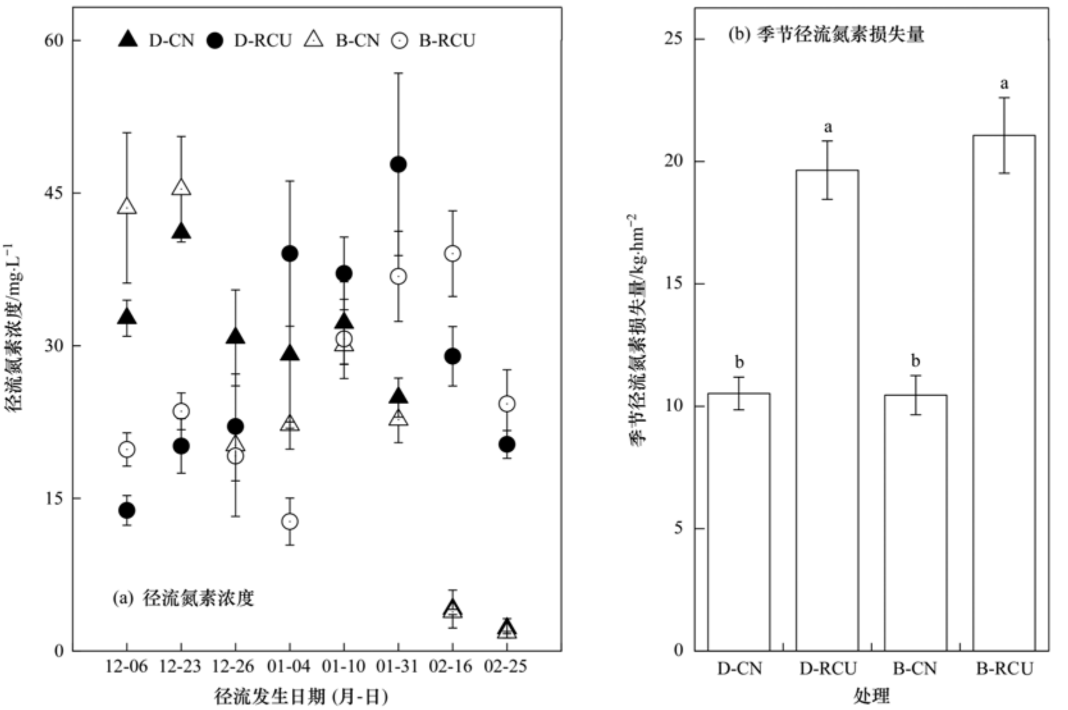
2.2　缓控释肥种肥深施对麦田 N 素损失的影响

2.2.1　径流流失

图 2 为不同类型肥料、施肥方式下麦田径流氮素浓度和季节流失量的结果. 结果表明,试验年份共发生 8 次径流事件,且主要集中在小麦生育前期. 不同发生时间处理间的径流氮素浓度表现不一致. 施肥后短时间内(肥期)常规化肥(CN)处理的径流氮素浓度较高,且撒施处理(B)的氮素浓度高于深施处理(D). 缓控释肥处理(RCU)的非肥期径流氮素浓度较高,且深施处理(D)的氮素浓度高于撒施处理(B). 从季节径流氮素流失量比较结果来看,缓控释肥处理(RCU)的径流氮素流失量(20.35 $kg \cdot hm^{-2}$)显著高于常规化肥处理(10.49 $kg \cdot hm^{-2}$),相同肥料类型下 2 种施肥方式的季节径流氮素流失量无显著差异. 结果说明,肥料类型是影响麦田径流氮素流失的主要控制因子,径流氮素流失和发生时间密切相关.

2.2.2　氨挥发损失

对麦田氨挥发损失的动态监测结果分析表明,



不同小写字母表示季节径流氮素损失量的差异显著性($P<0.05$)

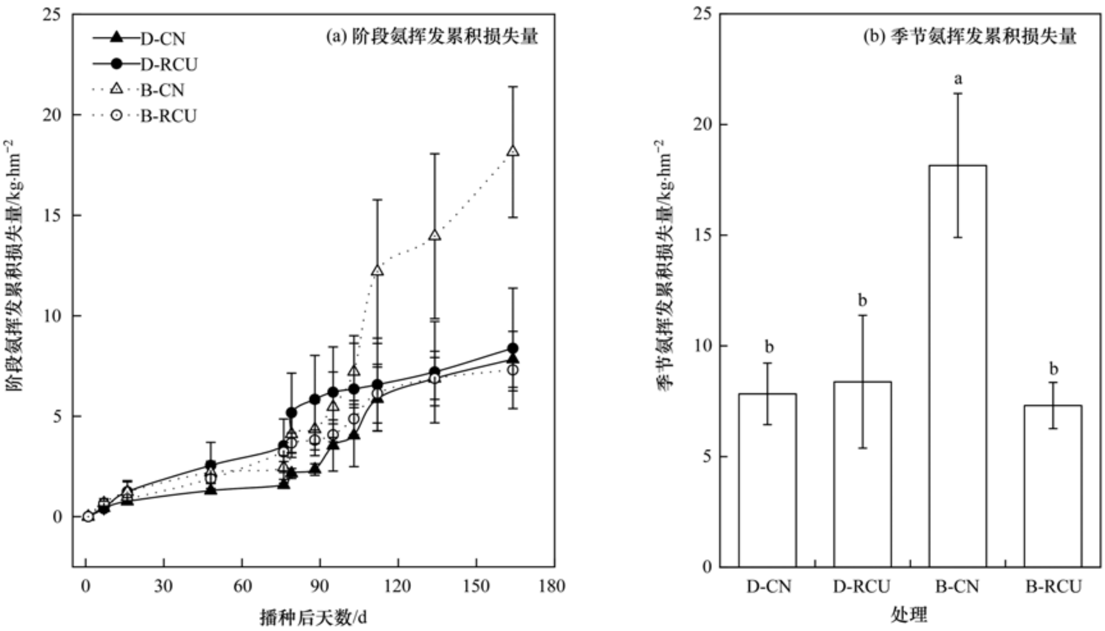
图2 不同类型肥料和施肥方式对麦田氮素径流损失的影响

Fig. 2 N runoff loss in wheat fields as affected by different fertilizer types and fertilization modes

不同处理下麦田氨挥发损失表现为明显的阶段特征,生育后期的氨挥发损失明显高于生育前期(图3). 常规化肥撒施处理生育后期的氨挥发通量明显高于其他处理. 季节损失量比较结果表明,同一施肥处理下,条播深施处理(D)的2种类型肥料的氨挥发损失量无显著差异; 但撒播撒施(B)处理的2种肥料类型间差异显著($P<0.05$),常规化肥撒施处理(B-CN)的季节氨挥发损失量最高(18.15 $kg\cdot hm^{-2}$),并显著高于其他处理(7.31 ~ 8.38 $kg\cdot hm^{-2}$).

2.2.3 N_2O排放

图4结果表明,2种施肥方式下生育前期的麦田N_2O排放通量明显高于后期,特别是常规化肥处理. 2种施肥处理下播种-返青阶段的N_2O排放量占



不同小写字母表示季节氨挥发累积损失量的差异显著性($P<0.05$)

图3 不同类型肥料和施肥方式对麦田氨挥发损失的影响

Fig. 3 Ammonia volatilization in wheat fields as affected by different fertilizer types and fertilization modes

比较高，分别为 78.61%（B-CN）和 61.41%（D-RCU）（表 1）. 此外，2 种施肥处理下N_2O排放通量差异主要集中在生育前期；该阶段常规化肥撒施处理（B-CN）的N_2O排放通量和累积排放量明显高于缓控释肥条播深施处理（D-RCU）. N_2O排放量比较结果表明，尽管 2 种施肥处理下季节N_2O排放量无显著差异，但 B-CN 处理的季节N_2O排放量（4.02 $kg \cdot hm^{-2}$）明显高于 D-RCU 处理（2.41 $kg \cdot hm^{-2}$）.

表 1　缓控释肥条播深施对麦田N_2O排放量的影响/$kg \cdot hm^{-2}$

Table 1　N_2O emissions from wheat fields as affected by deep fertilization of slow/controlled release urea with mechanized strip sowing/$kg \cdot hm^{-2}$

处理	播种-返青	返青-抽穗	抽穗-成熟	全生育期
B-CN	3.16	0.67	0.19	4.02
D-RCU	1.48	0.76	0.17	2.41

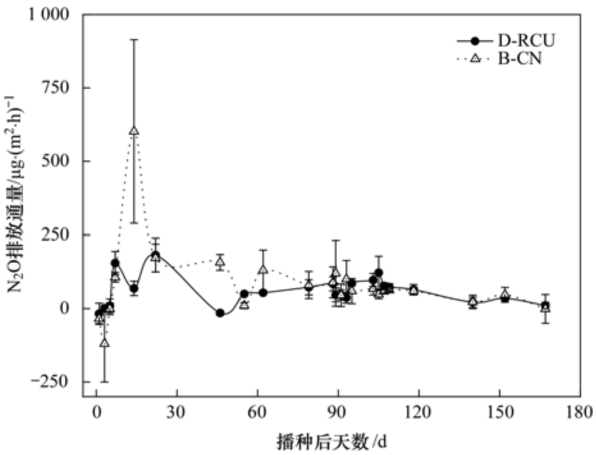
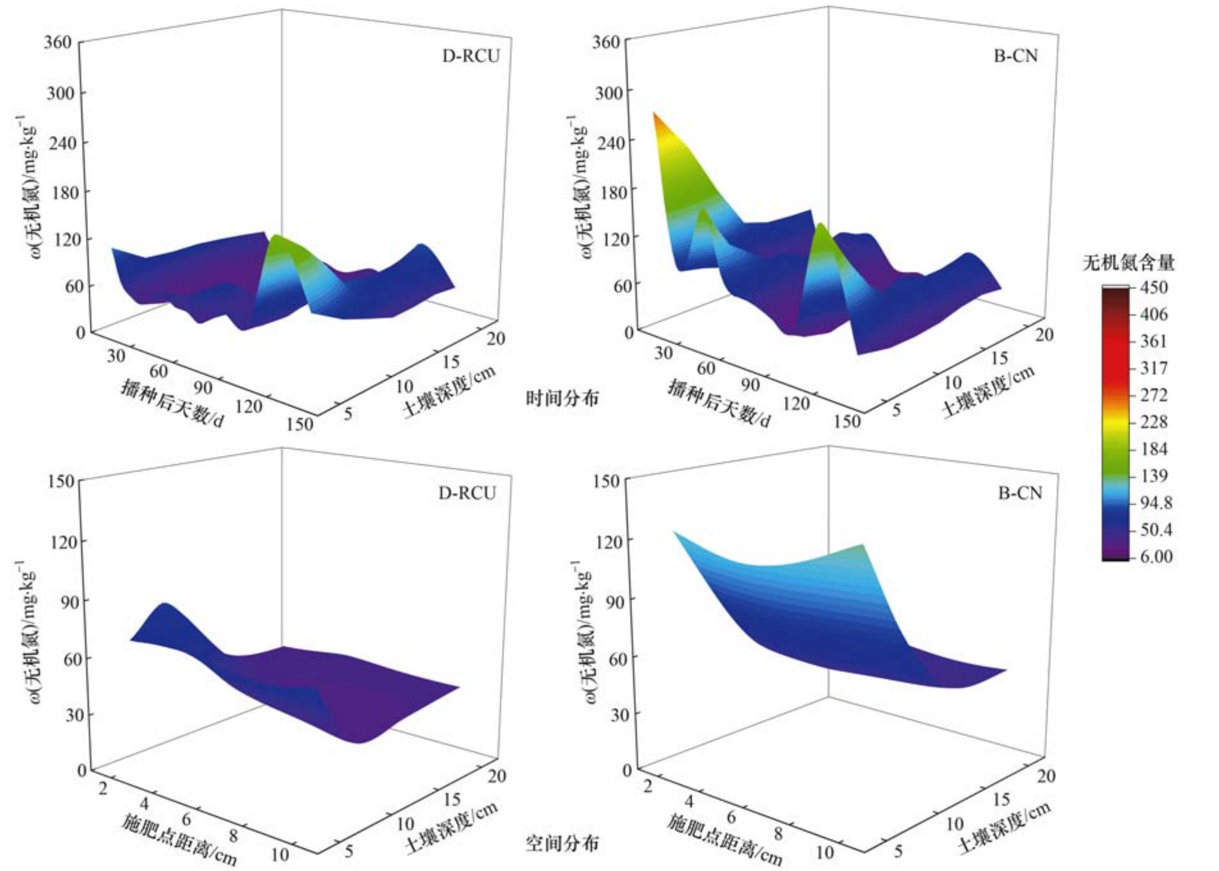


图 4　缓控释肥条播深施对麦田N_2O排放通量的影响

Fig. 4　N_2O emitting rate from wheat fields as affected by deep fertilization of slow/controlled release urea with mechanized strip sowing

2.3　缓控释肥种肥深施对土壤无机氮时空分布的影响

常规化肥撒播撒施处理（B-CN）和缓控释肥条播深施处理（D-RCU）的土壤无机氮时空分布特征如图 5 所示. 结果表明，B-CN 处理的土壤无机氮含量整体高于 D-RCU 处理，2 种施肥处理的时空变化明显不同. 常规化肥处理的表层土壤无机氮含量较高，并随耕层深度增加而降低；且表现出明显时间阶段特征，3 次施肥后的土壤无机氮含量明显增加. 而缓控释肥深施处理的土壤无机氮含量随施肥点距



色柱为土壤无机氮含量对应数值的颜色映射（无量纲）

图 5　缓控释肥条播深施对麦田土壤无机氮时空分布的影响

Fig. 5　Temporal and spatial distribution characteristics of soil inorganic N in wheat fields as affected by deep fertilization of slow/controlled release urea with mechanized strip sowing

离的延长而降低,且随生育期延长的变化较平缓,生育后期的土壤无机氮含量整体高于前期. 此外,2 种施肥处理的土壤无机氮径向移动(随施肥点距离的无机氮含量变化)均明显高于垂直移动(不同深度土壤无机氮含量变化).

3 讨论

稳定基本苗的同时保证群体花后光合生产是小麦安全生产的关键[28,29]. 赵凌天等[30]的研究指出,小麦机械化耕播有利于提高小麦出苗率,通过培育健壮群体,增加群体穗数和总粒数提高小麦产量. 本研究也发现,2 种肥料类型下,条播深施处理的黏性土壤小麦产量均显著高于撒播撒施处理(图 1). 此外,本研究还发现,相同施肥方式下,缓控释肥 RCU 处理的小麦产量显著高于常规化肥 CN 处理,缓控释肥条播深施处理(D-RCU)的小麦产量最高(6.97 $t\cdot hm^{-2}$). 基于荟萃分析,郝胜磊等[15]和 Zhu 等[16]的研究也证实了缓控释肥施用有利于提高小麦产量. 这可能与缓控释肥料的养分控制和延迟释放有关[10,11]. 对常规化肥撒播撒施处理(B-CN)和缓控释肥条播深施处理(D-RCU)的土壤无机氮时空分布特征分析发现,缓控释肥的缓效释放特征明显(图 5). 与 B-CN 处理相比,D-RCU 处理的土壤无机氮含量随施肥点(根侧)距离的延长而降低,且生育期内变化较平缓,生育后期的土壤无机氮含量整体高于前期. 这有利于协调作物土层根系养分吸收和前后期养分供应,提高小麦产量.

本研究同时发现,常规化肥撒播撒施和缓控释肥深施处理的土壤无机氮含量径向移动(随施肥点距离的无机氮含量变化)均明显高于垂直移动(不同深度土壤无机氮含量变化). 这可能和本研究的土壤类型有关. 本研究选择我国大部分地区普遍存在的黏性土壤作为研究体系,而该类型土壤普遍存在土壤水肥运移能力弱的特点[20,25]. 黄耀华等[26]对不同质地紫色土的研究发现,壤质黏土的水肥运移能力弱于黏壤土弱于砂质壤土,且受土壤胶体对铵态氮吸附影响,土壤无机氮的径向移动更明显. 结果说明,由于黏性土壤的水肥运移能力较差,根据作物根系分布特征进行耕深施肥有利于进一步促进作物的养分吸收利用,提高产量.

不同处理的氮素损失监测结果表明,肥料类型是麦田径流氮素损失的主要影响因素,深施并未减少不同类型肥料的氮素径流损失. 这可能和旱地农田产流机制和试验区土壤类型、水分管理方式有关[31]. 本试验所在的太湖地区降水丰富且地下水位较高,旱地水分管理以排水降渍为主. 此外,如前述分析,试验区土壤为水旱轮作黏性土壤,具有典型犁底层结构,且土壤的径向移动高于垂直移动. 据此,在以超渗产流为主的旱地径流产流过程中,降水下渗至犁底层后即迅速裹挟耕层养分流失[31],施肥深度可能不是影响径流氮素损失的主要因素. 研究还发现,麦田径流损失表现出明显的时间特征(图 2). 如施肥后短期内(肥期)发生径流,常规化肥 CN 处理的径流氮素损失较高,而缓控释肥 RCU 处理的非肥期径流氮素损失较高. 与缓控释肥的缓慢释放相比,常规化肥的短期暴发释放可能会加速施肥后短期内的农田氮素径流损失[32~34]. 土壤无机氮时空分布特征结果也表明,常规化肥处理在 3 次施肥后的土壤无机氮含量迅速增加,增加该时期的流失风险. 这说明,肥料类型(养分释放速率)和径流发生时间是影响黏性土壤麦田径流氮素损失的主要因素,不同类型肥料对麦田氮素径流损失的控制效果和降水年型密切相关,不能一概而论[35,36].

对气态氨挥发损失结果分析发现,麦田生育后期的氨挥发损失明显高于生育前期,是氨挥发损失的主要阶段(图 3). 这可能和季节温度的变化有关[37]. 氨挥发损失是受温度影响的物理过程,作为越冬作物,小麦生育前期温度较低不利于氨挥发,而后期温度的增加可能会促进氨挥发损失,尽管该时期植被郁闭度较高[38,39]. 研究还发现,常规化肥撒施处理(B-CN)的季节氨挥发损失量显著高于其他处理. 不同处理下作物群体和肥料养分的吸附释放差异可能是主要原因. 一方面,缓控释肥的缓效释放特点[10,11]和较低的土壤无机氮含量(图 5)有利于降低氨挥发损失风险. 同时,条播深施处理的作物产量较高,群体较大,这会通过增加生育后期的植被郁闭度和养分吸收能力减少氨挥发损失风险[25,40]. 此外,深施下表下层较黏的质地使土壤胶体对铵态氮吸附能力的增强也可能是氨挥发损失降低的原因[22,26].

麦田N_2O监测结果表明,受肥料养分释放和土壤无机氮时空变化影响,缓控释肥条播深施有降低N_2O排放的趋势(图 4 和表 1). 如前所述,深施下表下层较黏的土壤质地可能会增强其对铵态氮的吸附能力[22,26]. 而缓控释肥料的缓效释放会进一步降低土壤铵态氮底物浓度[11]. 这有利于减少土壤中可自由移动的铵态氮含量,降低硝化产生的硝态氮含量,减少N_2O损失[27]. 值得注意的是,2 种施肥方式下生育前期的麦田N_2O排放通量明显高于后期. 这可能和试验年份的降水分布有关[41]. 径流监测结果发现,试验年份降水主要分布在生育前期(图 2). 而彭毅等[42]的研究发现,播种施肥后的降水增加了土壤

湿度，并通过刺激旱地肥料氮素转化，促进N_2O排放.这也说明，降水引起的土壤含水量增加可能有利于提高土壤氮素的可利用性，但也有增加N_2O排放的风险，尤其在生育前期作物养分吸收能力较弱的条件下[43～45].需要指出的是，尽管本研究通过田间试验明确了缓控释肥条播深施的增产减排效果，但研究也发现，缓控释肥条播深施由于肥料的缓慢释放改变了土壤无机氮的时空分布特征.因此，该方式下是否存在肥料减施空间，土壤无机氮时空分布和氮素损失动态过程的定量关系等值得在今后的研究中关注.

4　结论

（1）黏性土壤无机氮的径向移动高于垂直移动；缓控释肥条播深施优化了土壤无机氮的时空分布特征，有利于增加小麦产量，减少麦田氨挥发和N_2O损失.

（2）肥料类型是影响麦田径流氮素流失的主要控制因子，不同类型肥料的径流氮素流失和发生时间密切相关，不能一概而论.

参考文献：

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京：中国统计出版社，2021.

[2] 张义博. 新时期中国粮食安全形势与政策建议[J]. 宏观经济研究，2020，(3)：57-66，81.

[3] 喻朝庆. 水-氮耦合机制下的中国粮食与环境安全[J]. 中国科学：地球科学，2019，**49**(12)：2018-2036.
Yu C Q. The coupled effects of water and nitrogen on China's food and environmental securities[J]. Scientia Sinica Terrae，2019，**49**(12)：2018-2036.

[4] 巨晓棠，张翀. 论合理施氮的原则和指标[J]. 土壤学报，2021，**58**(1)：1-13.
Ju X T，Zhang C. The principles and indicators of rational N fertilization[J]. Acta Pedologica Sinica，2021，**58**(1)：1-13.

[5] 杨林章. 我国农田面源污染治理的思路与技术[J]. 民主与科学，2018，(5)：16-18.

[6] Zhang C，Ju X T，Powlson D，*et al*. Nitrogen surplus benchmarks for controlling N pollution in the main cropping systems of China[J]. Environmental Science & Technology，2019，**53**(12)：6678-6687.

[7] Yan X Y，Xia L L，Ti C. Temporal and spatial variations in nitrogen use efficiency of crop production in China[J]. Environmental Pollution，2022，**293**，doi：10.1016/j.envpol.2021.118496.

[8] 刘兆辉，吴小宾，谭德水，等. 一次性施肥在我国主要粮食作物中的应用与环境效应[J]. 中国农业科学，2018，**51**(20)：3827-3839.
Liu Z H，Wu X B，Tan D S，*et al*. Application and environmental effects of one-off fertilization technique in major cereal crops in China[J]. Scientia Agricultura Sinica，2018，**51**(20)：3827-3839.

[9] 唐汉，王金武，徐常塑，等. 化肥减施增效关键技术研究进展分析[J]. 农业机械学报，2019，**50**(4)：1-19.
Tang H，Wang J W，Xu C S，*et al*. Research progress analysis on key technology of chemical fertilizer reduction and efficiency increase[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，**50**(4)：1-19.

[10] Fu J J，Wang C Y，Chen X X，*et al*. Classification research and types of slow controlled release fertilizers (SRFs) used - a review[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis，2018，**49**(17)：2219-2230.

[11] Azeem B，KuShaari K，Man Z B，*et al*. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer[J]. Journal of Controlled Release，2014，**181**：11-21.

[12] 刘虹丹，刘文成，顾颖慧，等. 缓释肥配比与密度互作对冬小麦产量及品质的影响[J]. 麦类作物学报，2021，**41**(11)：1374-1382.
Liu H D，Liu W C，Gu Y H，*et al*. Effect of interaction of slow-release fertilizer and planting density on yield and quality of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops，2021，**41**(11)：1374-1382.

[13] Zheng W K，Zhang M，Liu Z G，*et al*. Combining controlled-release urea and normal urea to improve the nitrogen use efficiency and yield under wheat-maize double cropping system[J]. Field Crops Research，2016，**197**：52-62.

[14] 侯朋福，薛利祥，俞映倞，等. 缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果[J]. 环境科学，2017，**38**(12)：5326-5332.
Hou P F，Xue L X，Yu Y L，*et al*. Control effect of side deep fertilization with slow-release fertilizer on ammonia volatilization from paddy fields[J]. Environmental Science，2017，**38**(12)：5326-5332.

[15] 郝胜磊，蔡廷瑶，冯小杰，等. 新型肥料对全球三大粮食作物产量和土壤生物学活性影响的 Meta 分析[J]. 植物营养与肥料学报，2021，**27**(9)：1496-1505.
Hao S L，Cai T Y，Feng X J，*et al*. Effects of new fertilizers on the yield and soil biological activity of three major food crops：A global meta-analysis[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2021，**27**(9)：1496-1505.

[16] Zhu S H，Liu L Y，Xu Y，*et al*. Application of controlled release urea improved grain yield and nitrogen use efficiency：A meta-analysis[J]. PLoS One，2020，**15**(10)，doi：10.1371/journal.pone.0241481.

[17] 赵明，周宝元，马玮，等. 粮食作物生产系统定量调控理论与技术模式[J]. 作物学报，2019，**45**(4)：485-498.
Zhao M，Zhou B Y，Ma W，*et al*. Theoretical and technical models of quantitative regulation in food crop production system[J]. Acta Agronomica Sinica，2019，**45**(4)：485-498.

[18] Chen D D，Zhao G Z，Bai T，*et al*. Preparation and nutrient release mechanism of a polymer as slow-release compound fertilizer[J]. Journal of the Chemical Society of Pakistan，2014，**36**(4)：647-653.

[19] Ransom C J，Jolley V D，Blair T A，*et al*. Nitrogen release rates from slow- and controlled-release fertilizers influenced by placement and temperature[J]. PloS one，2020，**15**(6)，doi：10.1371/journal.pone.0234544.

[20] Wang J J，Huang Y F，Long H Y，*et al*. Simulations of water movement and solute transport through different soil texture configurations under negative-pressure irrigation[J]. Hydrological Processes，2017，**31**(14)：2599-2612.

[21] 张甘霖，王秋兵，张凤荣，等. 中国土壤系统分类土族和土系划分标准[J]. 土壤学报，2013，**50**(4)：826-834.
Zhang G L，Wang Q B，Zhang F R，*et al*. Criteria for establishment of soil family and soil series in Chinese soil taxonomy[J]. Acta Pedologica Sinica，2013，**50**(4)：826-834.

[22] 吴克宁，赵瑞．土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]．土壤学报，2019，**56**(1)：227-241.
Wu K N, Zhao R. Soil texture classification and its application in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, **56**(1): 227-241.

[23] 张晓山．黏土地稻麦秸秆机械化还田技术[J]．农业装备技术，2021，**47**(3)：25-26，28.

[24] 张会娟，顾峰玮，吴峰，等．江苏省稻茬麦机械化播种概况与发展[J]．中国农机化学报，2021，**42**(11)：186-192.
Zhang H J, Gu F W, Wu F, *et al*. General situation and development on mechanized sowing of wheat after rice in Jiangsu Province[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, **42**(11): 186-192.

[25] 马尚宇，侯君佑，王艳艳，等．稻麦轮作系统无机氮肥高效利用研究进展[J]．土壤通报，2021，**52**(6)：1496-1504.
Ma S Y, Hou J Y, Wang Y Y, *et al*. Research progress on efficient utilization of inorganic nitrogen in rice and wheat rotation system[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, **52**(6): 1496-1504.

[26] 黄耀华，王侃，杨剑虹．滴灌施肥条件下土壤水分和速效氮迁移分布规律[J]．水土保持学报，2014，**28**(5)：87-94，301.
Huang Y H, Wang K, Yang J H. Distribution of soil water and available nitrogen in purple soil under drip fertilization[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, **28**(5): 87-94, 301.

[27] 陈效民，吴华山，孙静红．太湖地区农田土壤中铵态氮和硝态氮的时空变异[J]．环境科学，2006，**27**(6)：1217-1222.
Chen X M, Wu H S, Sun J H. Time-spatial variability of ammonium and nitrate in farmland soil of Taihu Lake region[J]. Environmental Science, 2006, **27**(6): 1217-1222.

[28] 丁锦峰，黄正金，袁毅，等．稻-麦轮作下9000 $kg\cdot hm^{-2}$产量水平扬麦 20 的群体质量及花后光合特征[J]．作物学报，2015，**41**(7)：1086-1097.
Ding J F, Huang Z J, Yuan Y, *et al*. Population quality and photosynthetic characteristics after anthesis in Yangmai 20 with yield potential of 9000 $kg\cdot ha^{-1}$ in rice-wheat rotation system[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, **41**(7): 1086-1097.

[29] 杜祥备，习敏，孔令聪，等．江淮地区稻-麦周年产量差及其与资源利用关系[J]．作物学报，2021，**47**(2)：351-358.
Du X B, Xi M, Kong L C, *et al*. Yield gaps of rice-wheat double cropping and its relationship with resource utilization in Yangtze-Huaihe Rivers region[J]. Acta Agronomica Sinica, 2021, **47**(2): 351-358.

[30] 赵凌天，咸云宇，刘光明，等．不同机械化耕播模式对冬小麦幼苗质量和产量的影响[J]．农业工程学报，2021，**37**(17)：31-38.
Zhao L T, Xian Y Y, Liu G M, *et al*. Effects of different mechanized tillage and sowing modes on the seedling quality and yield of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, **37**(17): 31-38.

[31] Yan L, Xue L H, Petropoulos E, *et al*. Nutrient loss by runoff from rice-wheat rotation during the wheat season is dictated by rainfall duration[J]. Environmental Pollution, 2021, **285**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117382.

[32] 郭智，周炜，陈留根，等．氮肥运筹和少免耕对麦田氮素径流流失的影响[J]．生态环境学报，2011，**20**(8-9)：1253-1258.
Guo Z, Zhou W, Chen L G, *et al*. Effects of nitrogen fertilizer application and no tillage on nitrogen loss by surface runoff during the wheat growing season in Intensive Rice-Wheat Rotation Field[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, **20**(8-9): 1253-1258.

[33] Wang L, Zhao X, Gao J X, *et al*. Effects of fertilizer types on nitrogen and phosphorous loss from rice-wheat rotation system in the Taihu Lake region of China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, **285**, doi: 10.1016/j.agee.2019.106605.

[34] Xue L H, Yu Y L, Yang L Z. Maintaining yields and reducing nitrogen loss in rice-wheat rotation system in Taihu Lake region with proper fertilizer management[J]. Environmental Research Letters, 2014, **9**(11), doi: 10.1088/1748-9326/9/11/115010.

[35] 严磊，薛利红，侯朋福，等．太湖典型地区雨养麦田的径流发生时间特征[J]．农业环境科学学报，2020，**39**(5)：1043-1050.
Yan L, Xue L H, Hou P F, *et al*. Temporal characteristics of runoff-occurrence in rain-fed wheat fields in typical areas of the Tai-lake region, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, **39**(5): 1043-1050.

[36] Hou P F, Jiang Y, Yan L, *et al*. Effect of fertilization on nitrogen losses through surface runoffs in Chinese farmlands: A meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2021, **793**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148554.

[37] 徐昶，苗文亮，倪远之，等．长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力[J]．环境科学，2022，**43**(2)：1108-1128.
Xu C, Miao W L, Ni Y Z, *et al*. Emission characteristics, transformation mechanism, and reduction potential of ammonia emissions from a crop rotation system in Yangtze river delta[J]. Environmental Science, 2022, **43**(2): 1108-1128.

[38] 王远，闵炬，史培华，等．稻麦轮作体系两种氨挥发监测方法比较研究[J]．中国生态农业学报(中英文)，2021，**29**(12)：1990-2001.
Wang Y, Min J, Shi P H, *et al*. Comparison of two monitoring methods for ammonia volatilization based on rice-wheat rotation system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, **29**(12): 1990-2001.

[39] Smalstiene V, Pranckietiene I, Dromantiene R, *et al*. The relationship between nitrogen fertilizer forms and meteorological conditions on nitrogen transformation in the soil and loss via volatilization[J]. Zemdirbyste-Agriculture, 2019, **106**(3): 195-202.

[40] 付捷，田慧，高亚军．不同小麦品种生育期氮素效率差异的变化特征[J]．中国土壤与肥料，2014，(5)：37-42.
Fu J, Tian H, Gao Y J. Seasonal changes of the genotypic variations of wheat (*Triticum aestivum* L.) in nitrogen uptake and utilization efficiencies[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2014, (5): 37-42.

[41] 唐占明，刘杏认，张晴雯，等．对比研究生物炭和秸秆对麦玉轮作系统N_2O排放的影响[J]．环境科学，2021，**42**(3)：1569-1580.
Tang Z M, Liu X R, Zhang Q W, *et al*. Effects of biochar and straw on soil N_2O emission from a wheat maize rotation system[J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1569-1580.

[42] 彭毅，李惠通，张少维，等．秸秆还田、地膜覆盖及施氮对冬小麦田N_2O和 N_2 排放的影响[J]．环境科学，2022，**43**(3)：1668-1677.
Peng Y, Li H T, Zhang S W, *et al*. Effect of film mulching, straw retention, and nitrogen fertilization on the N_2O and N_2 emission in a winter wheat field[J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1668-1677.

[43] 李欣欣，石祖梁，王久臣，等．氮肥基追比对稻茬小麦氮素转运及利用的影响[J]．麦类作物学报，2021，**41**(1)：61-

71.
Li X X, Shi Z L, Wang J C, *et al*. Effect of nitrogen application on nitrogen translocation and utilization in winter wheat in rice-wheat rotation[J]. Journal of Triticeae Crops, 2021, **41**(1): 61-71.
[44] 但小倩, 陈招兄, 程谊, 等. 红壤氮转化对土壤水分变化的响应[J]. 浙江农林大学学报, 2021, **38**(5): 896-905.
Dan X Q, Chen Z X, Cheng Y, *et al*. Response of nitrogen transformations to moisture changing in red soil[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2021, **38**(5): 896-905.
[45] Liu S Y, Chi Q D, Cheng Y, *et al*. Importance of matching soil N transformations, crop N form preference, and climate to enhance crop yield and reducing N loss[J]. Science of the Total Environment, 2019, **657**: 1265-1273.

HUANJING KEXUE

Vol. 44 No. 1

Environmental Science (monthly)

Jan. 15, 2023

CONTENTS