

氮肥减施和秸秆还田对土壤固定态铵含量的影响

李明嵘^{1,2}, 马雪松², 周 锋², 陈智文^{1*}, 何红波^{2*}, 滕泽宇¹

(1. 吉林师范大学, 吉林 四平 136000; 2. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘 要:【目的】固定态铵作为土壤氮素的暂存库, 其含量的变化能够影响土壤的保氮供氮功能, 而深入探究氮肥减施对土壤固定态铵的影响及其对秸秆还田的响应, 可为优化农田氮肥管理提供理论依据。【方法】依托位于中国东北黑土区玉米种植系统连续 9 年全量玉米秸秆覆盖归还的保护性耕作试验平台, 通过设置玉米秸秆不还田 (S0)、秸秆还田量 33% (S33) 和秸秆全量覆盖还田 (S100) 3 个秸秆还田量处理, 以及 240 kg hm⁻² (N240)、190 kg hm⁻² (N190)、135 kg hm⁻² (N135)、0 kg hm⁻² (N0) 4 个氮素施水平, 研究氮素减施 3 年后土壤固定态铵总量的变化以及不同秸秆还田量对固定态铵的影响。【结果】秸秆不还田时, 土壤固定态铵总量随施氮量降低而逐渐下降, 且在不施氮肥处理 (N0) 时显著低于施氮肥处理; 在 S33N190 时土壤—作物系统出现氮素缺乏, 并且随施氮量的下降土壤固定态铵降低量与氮素缺乏量之间具有显著的正相关关系。在所有氮肥水平, 秸秆还田尤其是全量秸秆还田均有利于缓解固定态铵的释放, 但在 N135 处理时秸秆效应较弱。整体上, 与对照相比, S100N190 处理土壤固定态铵的降低量最小。另外, 秸秆还田降低了施肥处理土壤硝态氮含量。【结论】在氮肥减施条件下, 土壤固定态铵可以释放供氮, 氮肥减施 20% 配合免耕全量秸秆覆盖还田可在保持土壤固定态铵库相对稳定的基础上, 维持土壤-作物系统的氮素平衡。

关 键 词: 秸秆还田; 氮肥减施; 固定态铵; 氮素供应

中图分类号: S154.34 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2023)03-0654-08

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2022030905

李明嵘, 马雪松, 周 锋, 陈智文, 何红波, 滕泽宇. 氮肥减施和秸秆还田对土壤固定态铵含量的影响 [J]. 土壤通报, 2023, 54(3): 654 – 661

LI Ming-rong, MA Xue-song, ZHOU Feng, CHEN Zhi-wen, HE Hong-bo, TENG Ze-yu. Effects of Fertilizer Nitrogen Reduction and Crop Residue Return on Soil Fixed Ammonium Content[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(3): 654 – 661

【研究意义】氮 (N) 素是作物生长必需的三大元素之一, 对保障东北黑土区粮食稳产高产至关重要。然而在集约化耕作管理中, 过量 N 肥施用造成土壤 N 素供应与作物需 N 之间不同步, 导致土壤中存在过量的矿质态 N, 进而引起 N 素损失并降低肥料 N 素利用率^[1-2], 影响区域农业生产和生态环境的可持续发展^[3]。因此, 减少 N 素施用是实现提高肥料利用率、农业节支增收和减少环境污染的重要措施。研究表明, 东北农田土壤中存在的矿质铵态 N 可被 2:1 型粘土矿物晶格固定转化为固定态铵而保留在土壤中, 降低 N 素损失的风险, 且这部分 N 素能够被矿物释放出来供应后期作物需 N^[4-6]。因此, 固定态铵的形成和释放过程能够影响农田土壤的保 N 供 N 功能, 是控制土壤-植物系统 N 素循环的重要过程。推广以免耕秸秆原位归还为核心的保护性耕作技术是提升东北黑土区土壤肥力和保障农业可持续发展

的重要举措^[7-8]。秸秆归还通过提供可利用性碳源影响土壤中矿质态 N 转化的生物和非生物过程^[9], 同时调控土壤供 N 与作物需 N 之间的同步性^[10], 进一步降低 N 素损失。因此, 探究减肥条件下固定态铵含量的变化及其对秸秆还田的响应机理对优化土壤 N 素管理以及提高 N 素利用率具有重要意义。【前人研究进展】固定态铵是东北黑土区土壤 N 库的重要组成部分, 松辽平原玉米带耕层黑土固定态铵含量为 60.2 ~ 210 mg kg⁻¹ ^[11], 在作物生长期内固定态铵释放出的 N 占作物总 N 素吸收量的一半以上^[12]。因此, 作为土壤 N 素潜在的储存库^[13-14], 固定态铵的储存和释放对 N 素的利用效率起着至关重要的作用, 影响着土壤 N 的供应和作物对 N 的吸收。增加 NH₄⁺ 在土壤中的固定是建立 N 素暂存库的一种途径, 对于作物生长期 N 素供应, 提高作物产量, 减少 N 损失具有重要的调节作用^[15]。固定态铵在作物生长期

收稿日期: 2022-03-10; 修订日期: 2022-05-08

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA28010301, XDA28080105) 和国家自然科学基金项目 (42177324) 资助

作者简介: 李明嵘 (1993-), 男, 甘肃天水人, 硕士, 主要从事土壤养分转化微生物过程及其调控研究。E-mail: Lijx109@126.com

*通讯作者: E-mail: sdczw4489@163.com; E-mail: hehongbo@iae.ac.cn

的固定与释放会影响土壤供 N 状况。有研究表明, 固定态铵量与施 N 量呈正相关关系^[16], N 素的施入会增加土壤溶液中的 NH_4^+ 的浓度, 进而增强黏土矿物对 NH_4^+ 的固定。也有报道, 冬小麦在常规 N 肥用量减少 20% 后对土壤 N 素依赖性增强, N 素的部分生产力显著提高, 并且这一过程减少了土壤 N_2O 的流失^[17-18]。秸秆还田是提升农田土壤肥力的有效手段, 在提高土壤有机质^[19], 改善土壤结构^[20], 提高作物产量等方面具有重要的作用^[20]。同时秸秆还田与 N 素的合理配施可以降低土壤容重, 提高土壤通透性^[21], 促进作物生长和 N 素的吸收。有研究表明, 秸秆还田通过提高土壤有机质总量、增加土壤微生物和有机质对 NH_4^+ 的固持和吸附, 与粘土矿物对铵的固定形成有力的竞争, 阻止 NH_4^+ 进入矿物晶层被固定^[22-23], 并促进固定态铵的释放^[24, 25]; 秸秆还田后带入的大量 K^+ 离子可与 NH_4^+ 竞争矿物吸附位点, 从而降低土壤晶格对 NH_4^+ 的固定^[24, 26]。然而也有研究指出, 秸秆还田可以调控固定态铵的释放和固定, 促进 N 素向固定态铵库的转化, 提高土壤对铵的固定^[27]。有机与无机肥配施较单施化肥能提高固定态铵量, 而且在秸秆还田条件下配施 N 肥能够有效缓解作物与微生物的“争 N”现象^[28-29]。【本研究切入点】进一步明确土壤固定态铵在不同土壤肥力条件下发挥的作用及其对秸秆还田的响应, 可以提高我们对固定态铵作为 N 素暂存库调控土壤 N 素保持和供应的认识。【拟解决的问题】本试验以东北黑土区不同量秸秆还田条件下玉米种植系统为研究对象, 探讨土壤固定态铵对 N 肥减施的响应, 以及在 N 肥减施条件下秸秆还田对土壤固定态铵的影响, 以期为东北黑土区玉米的稳产高产、养分资源优化管理和可持续发展提供理论依据和技术指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验样地为 2007 年建立的吉林省四平市梨树县高家村中国科学院沈阳应用生态研究所保护性耕作研发基地 ($43^\circ 19' \text{N}$, $124^\circ 14' \text{E}$), 为温带季风气候, 年降水量为 614 mm, 主要集中在 7、8 月, 月均最低温为 1 月的 -13.5°C , 月均最高气温为 7 月的 23.7°C , 年均温 6.7°C 。试验区土壤类型为黑土, 质地为壤质黏土, pH 为 6.8。

1.2 试验设计

试验样地在 2007~2016 年经过 9 年免耕秸秆全

量覆盖还田 (7500 kg hm^{-2}) 后于 2016 年春季设置了秸秆不同还田量和 N 肥减施试验, 采用裂区试验设计, 主处理为玉米秸秆不还田 (S0)、秸秆还田量 33% (S33) 和秸秆全量覆盖还田 (S100) 3 个秸秆还田量处理, 副处理为施 N 240 kg hm^{-2} (N240), (当地常规施 N 量)、 190 kg hm^{-2} (N190)、 135 kg hm^{-2} (N135)、 0 kg hm^{-2} (N0) 4 个 N 肥处理, 每个处理 4 次重复, 种植作物为玉米, 每年 4~5 月进行播种, 同时不同 N 肥 (尿素) 用量做底肥一次性施入, 磷肥 (P_2O_5) 和钾肥 (K_2O) 用量均为 110 kg hm^{-2} , 玉米生长期间无其他扰动, 每年 10 月左右收获。

1.3 样品采集与处理

于 2018 年收获季节采集 0~20 cm 土壤样品。每个小区按照 5 点采样法采集并混匀, 用自封袋带回实验室, 剔除石砾、细根及其他生物残体后过 2 mm 筛, 一部分新鲜土壤保存在 4°C 用于铵态 N (NH_4^+-N) 和硝态 N (NO_3^--N) 的提取和测定, 剩余土壤样品风干后用于土壤总 N 和固定态铵的测定。采集各处理玉米的茎、叶、籽粒和玉米芯, 烘干称重后用粉碎机进行粉碎过筛, 测定植株各部位 N 含量。

1.4 测定方法

土壤和植物样品的总 N 用元素分析仪 (vario MACRO cube, Emelentar Analyse nsysteme GmbH, Germany) 测定。

铵态 N 和硝态 N 含量测定: 称取 10 g 鲜土用 2 mol L^{-1} KCl 溶液浸提, 使用 Auto Analyzer 3 流动分析仪测定土壤铵态 N、硝态 N 含量。

固定态铵的测定: 采用 Silva-Bremner 法, 称取 2 g 过 100 目的风干土到高型烧杯中, 加入 40 ml KBr, 盖好摇匀后静置 2 h 以去除土壤中的可交换 NH_4^+ 和有机 N。然后加入 120 ml 蒸馏水, 并在电热板上加热煮沸 5 min, 静置过夜。第二天弃去上清液, 用 0.5 mol L^{-1} KCl 将土壤洗入 100 ml 离心管中, 摇匀, 离心 10 min (1100 r min^{-1})。弃上清液, 再加入 0.5 mol L^{-1} KCl 摇匀, 离心, 以上过程共重复 3 次。之后加入 5 mol L^{-1} HF - 1 mol L^{-1} HCl 混合酸 40 ml, 振荡 24 h 以释放矿物固定的 NH_4^+ , 最后用凯氏法蒸馏定 N, 标准酸滴定, 测定的 N 含量即为固定态铵含量, 根据固定态铵含量和土壤容重计算 0~20 cm 土壤固定态铵总量。

N 素输入输出相对变化量的计算公式:

地上部吸 N 量 (kg hm^{-2}) = 籽粒产量 (t hm^{-2}) × 籽粒 N 含量 (g kg^{-1}) + 秸秆产量 (t hm^{-2}) × 秸秆 N 含量 (g kg^{-1})

N 素输入与输出相对变化量 (kg hm^{-2}) = (总输入 N 素量) (kg hm^{-2}) - 地上部作物 N 素吸收量 (kg hm^{-2})

1.5 统计分析

所有数据采用 Excel 2016 和 IBM SPSS 25.0 进行双因素方差分析, 检验施肥和秸秆还田对土壤固定态铵、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、玉米产量和 N 素吸收的影响, 有交互作用时进一步做简单效应分析。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田和 N 肥减施对玉米 N 素吸收量和 N 素输入输出相对变化量的影响

双因素方差分析表明, 玉米植株地上部 2016 ~ 2018 年累积玉米 N 素吸收量受 N 肥减施的影响, 而不受秸秆还田量及其与 N 肥减施交互作用的影响 (图 1a), 与 N240 处理玉米 N 素吸收量 (705 kg hm^{-2}) 相比, 当无 N 肥施用时, 玉米平均 N 素吸收量为 452 kg hm^{-2} , 降幅为 36.2% ($P < 0.05$)。根据 N 素输入与输出的累积变化量 (图 1b) 发现, 在施 N 量为 240 kg hm^{-2} 时, 秸秆全量覆盖还田时 N 素盈余量为 278 kg hm^{-2} , 在秸秆不还田时 N 素盈余量为 117 kg hm^{-2} 。从 S33N190 处理开始出现 N 供应不

足, 并且, 随着施 N 量的降低 N 素缺乏量加剧, 在 S0N0 时 N 素缺乏量 (342 kg hm^{-2}) 达到最大。

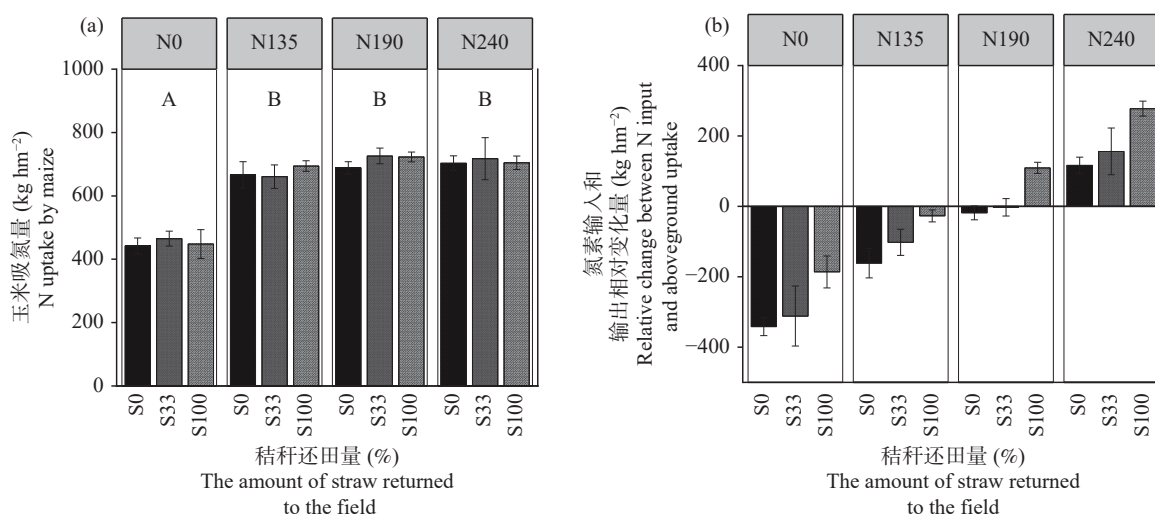
2.2 秸秆还田和 N 肥减施对土壤全 N、铵态 N 和硝态 N 的影响

双因素方差分析表明, 秸秆还田和 N 肥减施及其两者的交互作用对土壤全 N 和铵态 N 含量没有显著影响 (图 2a,b), 但却显著影响了硝态 N 含量的变化 (图 2c)。整体上, 硝态 N 含量随施 N 量的降低逐渐下降, 在无肥处理时维持在较低水平 ($P < 0.05$)。在 N240 处理下, 秸秆全量覆盖还田时硝态 N 含量为 18 mg kg^{-1} , 与 S100 相比, S33 处理硝态 N 含量无显著变化, 但当秸秆不还田时, 硝态 N 含量显著提高 50% ($P < 0.05$)。当施 N 量降低到 190 kg hm^{-2} 时, 与 S100 处理硝态 N 含量 (17 mg kg^{-1}) 相比, S33 和 S0 硝态 N 含量分别显著提高 29.2% 和 39.3% ($P < 0.05$); 当施 N 量进一步降低到 135 kg hm^{-2} 和 0 时, S0、S33 和 S100 硝态 N 含量无显著变化。

2.3 秸秆还田和 N 肥减施对土壤固定态铵数量的影响

与试验初期 (2016 年) 秸秆全量覆盖还田和常规施肥 (S100N240) 0 ~ 20 cm 土壤固定态铵总量 (442 kg hm^{-2}) 相比, 2018 年 S100N240 固定态铵量 (459 kg hm^{-2}) 没有显著差异, 并且在此情况下固定态铵占全 N 的比重在 10% 左右。

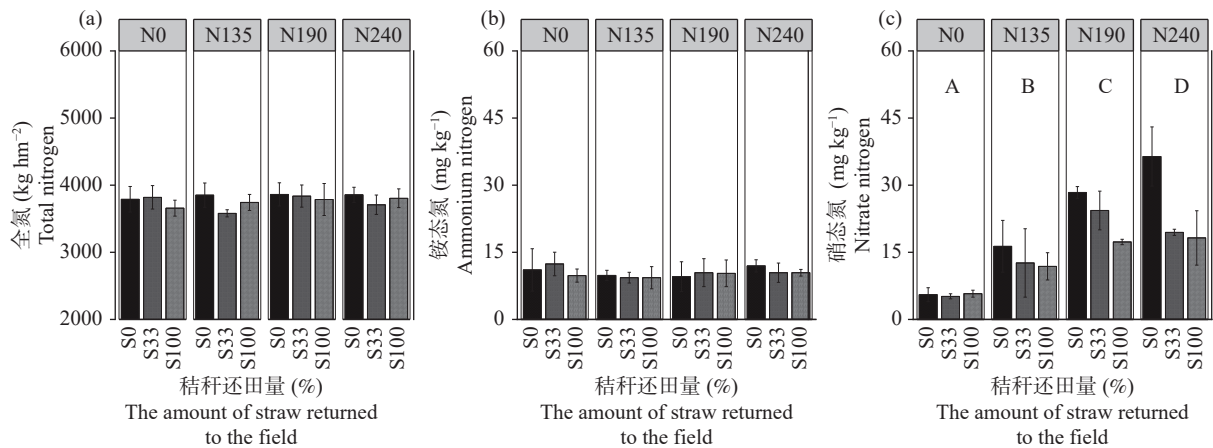
双因素方差分析表明, 整体上, 0 ~ 20 cm 土壤



注: S0: 秸秆不还田, S33: 秸秆还田量 33%; S100: 秸秆全量覆盖还田; N0: 施氮量为 0, N135: 施氮量为 135 kg hm^{-2} , N190: 施氮量为 190 kg hm^{-2} , N240: 施氮量为 240 kg hm^{-2} 。不同大写字母代表不考虑秸秆处理情况下, 不同 N 肥处理间差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写字母代表在同一 N 肥处理下, 不同秸秆还田量之间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 2016 ~ 2018 年玉米植株地上部累积 N 素吸收量变化 (a) 和 N 素输入与输出的相对变化量 (b)

Fig.1 Changes of uptake of N by maize aboveground (a), the relative change between N input and aboveground uptake (b) from 2016 to 2018



注:S0: 秸秆不还田, S33: 秸秆还田量 33%; S100: 秸秆全量覆盖还田; N0: 施氮量为 0, N135: 施氮量为 135 kg hm⁻², N190: 施氮量为 190 kg hm⁻², N240: 施氮量为 240 kg hm⁻²。不同大写字母代表不考虑秸秆处理情况下, 不同 N 肥处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 2018 年土壤全 N (a)、NH₄⁺-N (b) 与 NO₃⁻-N (c) 含量的变化
Fig.2 Changes of total soil N (a), NH₄⁺-N (b) and NO₃⁻-N (c) in 2018

固定态铵量主要受秸秆还田主效应而非 N 肥减施主效应的影响 (表 1), 在不考虑 N 肥处理的情况下, 在 S100 处理时土壤固定态铵平均总量达到 447.6 kg hm⁻², 随着秸秆还田量的降低, 土壤固定态铵平均总量显著降低 4.5% ~ 7.7% ($P < 0.05$)。具体地, 对于 N 肥减施的影响, 发现在秸秆不还田时, 随着施 N 量的降低, 固定态铵量逐渐下降并在 N0 处理时显著低于施肥处理 ($P < 0.05$); 而在还田量 33% 和全量秸秆覆盖还田时, N 肥减施对固定态铵量无显著影响。对于秸秆还田的影响, 发现在施 N 量为 240 kg hm⁻² 时, S100 处理土壤固定态铵量为 459 kg hm⁻², 随着秸秆还田量的降低固定态铵量逐渐下降, 在 S0 处理时土壤固定态铵量降低 6.9% ($P < 0.05$); 当施 N 量降为 190 kg hm⁻² 时, S100 处理固定态铵量与常规施肥相同秸秆还田量处理相比降低 4.8% ($P < 0.05$), 并且秸秆还田处理对土壤固定态铵的影响与 N240 处理下表现相似, S0 处理土壤固定态铵比 S100 降低 7.0% ($P < 0.05$); 当施 N 量为 135 kg hm⁻² 时, 随着秸秆还田量的降低, 固定态铵量呈降低趋势, 但差异并不显著; 当施肥量为 0 时, S100 固定态铵量为 443 kg hm⁻², 但在秸秆不还田时, 固定态铵量显著降低 11% ($P < 0.05$)。

基于 S100N240 处理土壤固定态铵量, 我们计算了 N 肥减施下各处理土壤固定态铵的相对变化量 (表 2), 整体上, 随着施 N 量的降低, 固定态铵的降低量逐渐增加。并且, 在相同 N 肥处理下, 随着秸秆还田量由 100% 减少到 0, 土壤固定态铵的降低量也逐渐增加。综合来看, S100N190 处理土壤固

表 1 各处理土壤(0 ~ 20 cm)固定态铵量(kg hm⁻²)
Table 1 The stocks (kg hm⁻²) of fixed ammonium in soil (0 - 20 cm)

处理 Treatment	S0	S33	S100
N0	393.79 ± 16.26 Aa	424.41 ± 21.56 Aa	443.14 ± 10.45 Ab
N135	409.93 ± 25.99 Ba	428.79 ± 15.93 Aa	435.13 ± 28.57 Aa
N190	419.54 ± 11.75 Ba	429.66 ± 13.05 Aa	452.45 ± 14.63 Ab
N240	427.35 ± 14.69 Ba	429.74 ± 14.94 Aa	459.66 ± 29.95 Ab

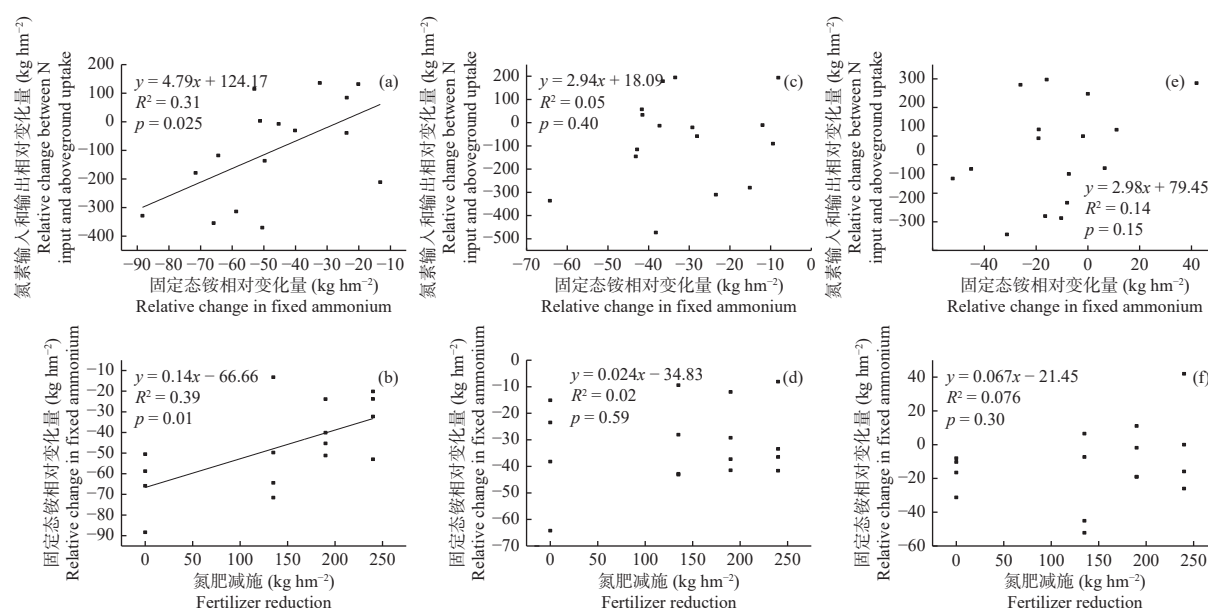
注: 不同大写字母代表同一秸秆还田下 N 肥处理间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母代表在同一 N 肥处理下, 不同秸秆还田量之间差异显著 ($P < 0.05$)

表 2 固定态铵相对变化量(kg hm⁻²)
Table 2 Changes of fixed ammonium amounts (kg hm⁻²)

处理 Treatment	S0	S33	S100
N0	-65.87	-35.25	-30.14
N135	-49.73	-30.87	-24.53
N190	-40.12	-30.00	-7.21
N240	-32.31	-17.32	0

注: 对照为常规施肥和全量秸秆还田处理 (S100N240)。

定态铵的相对变化量最小。
2.4 土壤固定态铵与施肥量、铵态 N 和硝态 N 的关系
线性回归分析表明, 在无秸秆覆盖还田时, N 素输入和输出相对变化量与固定态铵的相对变化量之间存在显著的正相关关系 ($P < 0.05$), 并且, 土壤固定态铵相对变化量与 N 肥减施量之间也存在显著的相关关系 ($P < 0.05$), 即随着施 N 量的降低土壤固定态铵的降低量逐渐增加, 在秸秆不还田和秸秆还田 33% 时, N 素的输入输出相对变化量与固定态铵的相对变化量, 固定态铵的相对变化量和 N 肥减施之家不存在相关关系 (图 3)。



注:(a)代表无秸秆还田(S0)时固定态铵相对变化量与N素输入和输出相对变化量之间的线性回归关系,(b)代表无秸秆还田(S0)时固定态铵相对变化量与N肥减施之间的线性回归关系;(c)代表秸秆还田33%(S33)时固定态铵相对变化量与N素输入和输出相对变化量之间的线性回归关系,(d)代表秸秆还田33%(S33)时固定态铵相对变化量与N肥减施之间的线性回归关系;(e)代表秸秆全量覆盖还田(S100)时固定态铵相对变化量与N素输入和输出相对变化量之间的线性回归关系,(f)代表秸秆全量覆盖还田(S100)时固定态铵相对变化量与N肥减施之间的线性回归关系。

图3 固定态铵相对变化量与N素输入和输出相对变化量以及施N量之间的相关关系
Fig.3 Correlation between relative change of fixed ammonium with nitrogen input and output

3 讨论

本研究通过9年的秸秆全量覆盖秸秆还田和常规施肥(S100N240)之后,0~20 cm土壤固定态铵总量达到442 kg hm⁻²,占土壤总N库的10.1%,固定态铵作为N素的临时储存库,对于维持土壤-作物系统N素供应具有重要作用^[22]。经过N肥减施3个生长季之后,土壤铵态N含量没有显著变化,土壤的供N能力保持稳定,但在土壤-作物系统中,不同施N量和秸秆还田量处理土壤无机N素之间的转化是不同的。

在常规施肥和秸秆不还田(S0N240)处理下,土壤-作物系统N素总输入量比输出量高228 kg hm⁻²,这说明在常规施肥条件下N素供应处于盈余状态。Ju等^[27]研究表明施N量超过作物生长所需的N,会增加硝态N的积累。这与我们的结果相一致,即土壤铵态N含量维持稳定,但土壤硝态N含量在常规施肥下却维持较高的水平(图2c)。因此,在这一条件下,固定态铵的释放除满足作物生长对N素的需求外,多余的铵态N可能会通过硝化作用转化为硝态N,从而潜在增加土壤N素的淋失风险。施N量降为190 kg N hm⁻²时,在无秸秆还田情况下,土壤-作物系统出现轻度N缺乏,在此情况下固定态

铵的降低量大于N素缺乏量,并且,随着施N量的降低,相关性分析表明固定态铵的降低量与土壤-作物系统N素缺乏量之间存在显著的正相关关系(图3),说明固定态铵的释放可以补偿N素缺乏,供给作物生长对N素的需求,这与李俊杰等^[30]对小麦各生育期N素形态调控的研究结果相似。但是在S0N135处理,尤其是在S0N0处理玉米产量降低的情况下,固定态铵的降低量小于土壤-作物系统的N缺乏量(图1b,表2),这说明固定态铵的释放可能存在一定的阈值,且在缺N条件下仅仅依靠土壤固定态铵的释放并不能满足作物对N素的需求,从而影响作物产量^[31]。土壤供N过程不仅仅涉及到固定态铵的释放,同时还包含有机N的矿化供应。在本试验地, Ma等^[32]的研究发现,随着施N量的降低,微生物残体N降解供N,结合本研究固定态铵的变化,说明在N素缺乏情况下固定态铵的释放和土壤有机N的矿化共同对N素供应的维持起重要作用。另外,我们发现随着施N量的降低,土壤硝态N的含量逐渐下降,并且在N0处理时维持在较低水平,这说明土壤的硝化作用强度降低,有利于降低N素的淋失风险,使N素保留在土壤-作物系统中。

在常规施肥(N240)下,与秸秆不还田相比,秸秆的输入尤其是秸秆全量覆盖还田显著增加了土

壤固定态铵的含量,说明秸秆还田能够促进黏土矿物对土壤铵态 N 的固定,有利于土壤 N 素的保持^[33]。这可能与秸秆还田改善了土壤理化性质,从而提升了土壤对 NH_4^+ 的固定有关^[34]。研究表明,秸秆还田有利于促进肥料 N 素向土壤有机 N 和固定态铵库的转化^[35],在本试验地微生物残体 N 的研究中,N240 处理下秸秆还田对微生物残体 N 的促进作用并未达到显著水平^[36],在秸秆不还田处理时,N 肥减施显著降低了固定态铵量,这说明 N 素可能更多地以固定态铵的形式暂时储存在土壤中,因为相比于微生物对矿质 N 素的固持过程,黏土矿物对 NH_4^+ 的固定可能更迅速,更有利于 N 素盈余条件下土壤对 N 素的保持,前人的研究也发现加入的肥料 N 可以在短时间内被矿物固定^[34,37]。

施 N 量降为 190 kg hm^{-2} 时,土壤—作物系统的轻度 N 缺乏随着秸秆覆盖还田量的增加被抵消,并且土壤固定态铵的降低量在全量秸秆还田时与对照 (S100N240) 相比差异最小,这表明在 N 肥减施 20% 的情况下,全量秸秆还田可以维持土壤—作物系统 N 素的相对平衡,保持土壤固定态铵库的稳定和作物对 N 素的需求。随着施 N 量的降低,在 N 素缺乏条件下秸秆还田缓解了固定态铵的降低量,这说明作为一种有机肥,秸秆 N 对土壤 N 素的补充可以缓解土壤—作物系统 N 素的缺乏^[32],Shindo 和 Nishio^[38] 研究发现小麦秸秆中约 10% 的有机 N 可转化为微生物量,并且土壤中来源于小麦秸秆的无机 N 约为 $1.93 \sim 2.37 \text{ mg kg}^{-1}$ 。并且,在 N 素缺乏情况下,秸秆输入后碳有效性的增加可以增强异养微生物的活性,提高其对无机 N 素的需求,从而促进无机 N 向有机 N 的转化^[33],因此,与无秸秆还田相比,尽管秸秆还田并没有影响土壤铵态 N 含量但却抑制了土壤硝化作用,降低了所有施肥处理土壤硝态 N 的含量,进一步提高了土壤 N 素的保留效率,从而降低土壤潜在的 N 淋失风险^[6]。

4 结论

在连续 9 年免耕玉米秸秆全量覆盖还田后进行 N 肥减施和不同秸秆还田量处理,结果表明,常规施肥量时,土壤—作物系统处于 N 素盈余状态,秸秆不还田处理土壤硝态 N 的积累潜在增加了 N 素的淋溶损失风险。随着施 N 量的降低,土壤固定态铵的释放可以补偿土壤—作物系统对 N 素的需求,但在

极端缺 N 条件下固定态铵的释放量并不能弥补 N 素的缺乏量。在常规施肥下,秸秆还田有利于促进铵态 N 向固定态铵的转化,抑制硝化作用,潜在降低 N 素的淋失风险;施 N 量降为 190 kg hm^{-2} 时,秸秆还田尤其在秸秆全量覆盖还田下可以维持土壤—作物系统的 N 素平衡,保持固定态铵库的稳定,并且随着施 N 量的进一步降低,秸秆还田同样有利于缓解固定态铵的显著降低。综上,在东北黑土玉米种植区,当 N 肥减施 20% 配合免耕全量秸秆覆盖还田可在保持土壤固定态铵库相对稳定的基础上,维持土壤—作物系统的 N 素平衡。关于不同秸秆还田量和 N 肥减施处理影响土壤固定态铵固定和释放的物理化学机制有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, (1): 1-6.
- [2] 腾珍珍, 鲁彩艳, 袁 磊, 等. 免耕秸秆覆盖条件下尿素来源铵态氮和硝态氮的累积与垂直运移过程[J]. 土壤通报, 2018, 49(4): 919-928.
- [3] Yu C Q, Huang X, Chen H, et al. Managing nitrogen to restore water quality in China[J]. *Nature*, 2019, 567(7749): 516-520.
- [4] Lu C Y, Zhang X D, Chen X, et al. Fixation of labeled $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and its subsequent release in black soil of Northeast China over consecutive crop cultivation[J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 106: 329-334.
- [5] Lu C Y, Chen H H, Teng Z Z, et al. Effects of N fertilization and maize straw on the dynamics of soil organic N and amino acid N derived from fertilizer N as indicated by ^{15}N labeling[J]. *Geoderma*, 2018, 321: 118-126.
- [6] Nieder R, Benbi D K, Scherer H W. Fixation and defixation of ammonium in soils: a review[J]. *Biology and fertility of Soils*, 2011, 47(1): 1-14.
- [7] 敖 曼, 张旭东, 关义新. 东北黑土保护性耕作技术的研究与实践[J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(10): 1203-1215.
- [8] Abbasi M K, Khizar A. Microbial biomass carbon and nitrogen transformations in a loam soil amended with organic-inorganic N sources and their effect on growth and N-uptake in maize[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 39: 123-132.
- [9] Cao Y S, Sun H F, Zhang J N, et al. Effects of wheat straw addition on dynamics and fate of nitrogen applied to paddy soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 178: 92-98.
- [10] Pan F F, Yu W T, Ma Q, et al. Do organic amendments improve the synchronism between soil N supply and wheat demand[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 125: 184-191.
- [11] 侯宁宁. 松辽平原玉米带黑土铵的固定和吸附特性研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2006.

- [12] 文启孝, 程励励, 陈碧云. 我国土壤中的固定态铵[J]. *土壤学报*, 2000, 37(2): 145 – 156.
- [13] 郭鹏程. 铵态氮肥在不同土壤中被粘土矿物固定的研究[J]. *沈阳农学院学报*, 1983, (2): 1 – 9.
- [14] 孙 艳, 吴守仁, 吕家珑. 壤土固定态铵容量及蓄氮供氮能力的研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2000, (3): 8 – 14.
- [15] 廖继佩, 李法云, 张杨珠, 等. 湖南稻田土壤固定态铵总量的季节变化及生物有效性[J]. *应用生态学报*, 2003, (10): 1665 – 1668.
- [16] Liu Y, Zhang B, Li C, et al. Long-term fertilization influences on clay mineral composition and ammonium adsorption in a rice paddy soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(6): 1580 – 1590.
- [17] 蒋丽萍, 李国芳, 苗中琴, 等. 不同包膜类型控释氮肥减施对冬小麦产量及氮素利用效率的影响[J]. *山东农业科学*, 2020, 52(2): 64 – 69.
- [18] 范靖尉, 白晋华, 任寰宇, 等. 减氮和施生物炭对华北夏玉米-冬小麦田土壤CO₂和N₂O排放的影响[J]. *中国农业气象*, 2016, (2): 121 – 130.
- [19] Tang Y, Wang X Z, Zhao H T, et al. Effect of Potassium and C/N Ratios on Conversion of NH₄⁺ in Soils[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(4): 539 – 544.
- [20] Pan F F, Yu W T, Ma Q, et al. Influence of ¹⁵N-labeled ammonium sulfate and straw on nitrogen retention and supply in different fertility soils[J]. *Biology and fertility of soils*, 2017, 53(3): 303 – 313.
- [21] 赵士诚, 曹彩云, 李科江, 等. 长期秸秆还田对华北潮土肥力、氮库组分及作物产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(6): 1441 – 1449.
- [22] 赵 伟, 陈雅君, 王宏燕, 等. 不同秸秆还田方式对黑土土壤氮素和物理性状的影响[J]. *玉米科学*, 2012, 20(6): 98 – 102.
- [23] 王喜艳, 窦 森, 张恒明, 等. 玉米秸秆持水深埋对辽西瘠薄耕地土壤养分及玉米产量的影响[J]. *西北农业学报*, 2014, 23(5): 76 – 81.
- [24] 王如芳, 张吉旺, 董树亭, 等. 我国玉米主产区秸秆资源利用现状及其效果[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(6): 1504 – 1510.
- [25] Gai X, Liu H, Liu J, et al. Contrasting impacts of long-term application of manure and crop straw on residual nitrate-N along the soil profile in the North China Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 2251 – 2259.
- [26] Yuan L, Chen X, Jia J, et al. Stover mulching and inhibitor application maintain crop yield and decrease fertilizer N input and losses in no-till cropping systems in Northeast China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, 312: 107360.
- [27] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 2009, 106: 3041 – 3046.
- [28] 高亚军, 黄东迈, 朱培立, 等. 稻麦轮作条件下长期不同土壤管理对氮素肥力的影响[J]. *土壤学报*, 2000, 37(4): 456 – 462.
- [29] 周江明, 徐大连, 薛才余. 稻草还田综合效益研究[J]. *中国农学通报*, 2002, 18(4): 7 – 10.
- [30] 李俊杰, 邹洪琴, 许发辉, 等. 土壤微生物量氮对小麦各生育期氮素形态的调控[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(8): 1321 – 1329.
- [31] 顾敏京, 左文刚, 严漪云, 等. 氮肥管理对秸秆全量还田双季晚稻土壤固定态铵的影响[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2017, 38(2): 69 – 74, 81.
- [32] Ma X, Zhang W, Zhang X, et al. Dynamics of microbial necromass in response to reduced fertilizer application mediated by crop residue return[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 165: 108512.
- [33] 曲瑞皎. 秸秆还田对肥料来源固定态铵在土壤中年际动态变化的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [34] Kowalenko C G, Cameron D R. Nitrogen transformations in an incubated soil as affected by combinations of moisture content and temperature and adsorption-fixation of ammonium[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1976, 56: 63 – 70.
- [35] 刘淑芳, 马 强, 徐永刚, 等. 三种典型土壤固定态铵及其释放研究初探[J]. *土壤通报*, 2018, 49(4): 882 – 888.
- [36] Kowalenko C G. Nitrogen transformations and transport over 17 months in field fallow microplots using ¹⁵N[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1978, 58: 69 – 76.
- [37] Chen B, Liu E, Tian Q, et al. Soil nitrogen dynamics and crop residues. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 34: 429 – 442.
- [38] Shindo H, Nishio T. Immobilization and remineralization of N following addition of wheat straw into soil: determination of gross N transformation rates by ¹⁵N-ammonium isotope dilution technique[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37: 425 – 432.

Effects of Fertilizer Nitrogen Reduction and Crop Residue Return on Soil Fixed Ammonium Content

LI Ming-rong^{1,2}, MA Xue-song², ZHOU Feng², CHEN Zhi-wen^{1*}, HE Hong-bo^{2*}, TENG Ze-yu¹

(1. Jilin Normal University, Siping 136000, China; 2. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: [Objective] Soil fixed ammonium (NH_4^+), as a temporary pool of nitrogen (N), the change of its content can affect the function of soil N retention and supply. The response mechanisms of soil fixed NH_4^+ and crop residue return to N fertilizer reduction should be investigated, in order to provide theoretical basis for optimizing N fertilizer management in agroecosystems. [Method] Based on the experimental platform of conservation tillage corn planting system with full crop residue return (9 years) in the black soil region of Northeast China, a fertilizer reduction experiments were set up with: 3 crop residue return treatments, 0 (S0), 33% (S33) and 100% (S100); 4 N fertilizer application rates, 240 kg hm^{-2} (N240), 190 kg hm^{-2} (N190), 135 kg hm^{-2} (N135), and 0 kg hm^{-2} (N0). [Result] When the crop residue removal, the total amount of fixed NH_4^+ gradually decreased with the decrease of N application and was significantly lower than that of the fertilization treatment in the N0 treatment. N deficiency appeared in the soil-crop system at S33N190, and the fixed NH_4^+ decreased with the decrease of N application. There was a significant positive correlation between fixed NH_4^+ reduction and N deficiency. At all N fertilizer levels, crop residue return, especially full crop residue return, was beneficial to alleviating the release of fixed NH_4^+ , but the crop residue effect was weaker under N135 treatment. Overall, the S100N190 treatment showed the smallest reduction in fixed NH_4^+ compared to the control. In addition, crop residue return reduced the nitrate N content in the fertilization treatment. [Conclusion] Under the condition of reducing N fertilizer application, fixed NH_4^+ can release and maintain N supply, reducing N fertilizer application by 20% with no-tillage and full crop residue return can maintain the N supply and balance in the soil-crop system.

Key words: Crop residue return; Fertilizer reduction; fixed NH_4^+ ; Nitrogen supply

[责任编辑: 张玉玲]