



减量施氮和秸秆还田实现麦玉轮作系统氮平衡

邹亮^{1,2}, 谢心雨^{1,2}, 黄禹铭^{1,2}, 白金泽^{1,2}, 白雨欣^{1,2},
宋鉴恒^{1,2}, 王晨瑜^{1,2}, 王兴^{1,2}, 任广鑫^{1,2}, 冯永忠^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 农学院, 陕西杨凌 712100; 2. 陕西省循环农业工程技术研究中心, 陕西咸阳 712100)

摘要 基于 2018—2020 年关中平原田间长期定位试验, 设传统施氮不还田(N₁S₀)、传统施氮还田(N₁S)、减量施氮不还田(N_{0.7}S₀)和减量施氮还田(N_{0.7}S)4 种处理, 评估 2018—2020 连续两年的小麦玉米生长季秸秆还田和减量施氮对种植系统氮平衡和作物生产力的影响。结果表明, 与秸秆不还田(S₀)相比, 秸秆还田(S)显著增加周年籽粒产量、周年 NH₃ 挥发和周年 N₂O 排放, 分别为 7.31%~8.01%、30.76%~40.74% 和 62.45%~73.96%; 在秸秆还田的条件下, 与传统施氮(N)相比, 减量施氮(N_{0.7})显著降低周年 NH₃ 挥发 17.71%~22.36%; 与其他处理相比, N_{0.7}S 的 0~200 cm 土壤硝态氮淋失量最低; N₁S₀、N₁S、N_{0.7}S₀ 和 N_{0.7}S 的氮平衡值分别为 67.7~84.3、135.8~152.9、-2~11.8 和 53.6~73.1 kg/hm², 在不同管理措施下, N_{0.7}S₀ 虽然氮平衡值最低, 但其氮平衡值在 2019—2020 生长季为 -2 kg/hm², 存在一定的亏缺风险。综合作物产量、氮损失和氮平衡, N_{0.7}S 可以在维持籽粒产量的同时, 最大限度降低土壤气态氮、硝态氮淋溶和作物系统氮平衡值, 是一种可以兼顾作物产量、环境友好和可持续生产的土壤管理方法。

关键词 减量施氮; 秸秆还田; 麦玉轮作; 氮平衡

氮(N)是作物生长不可或缺的营养物质, 也是农田生态循环系统中的关键一环, 在农业可持续发展过程中至关重要^[1-2]。过去为了追求产量, 化肥的使用一直逐年增加。但如果氮肥投入量超过了最佳施氮量, 不仅作物难以增产, 还会导致过量的氮肥损失到土壤、大气和水中, 造成严重的环境问题^[3-5]。目前关中平原农业生产化肥污染仍十分严重, 为了迎接国家“十五五”发展战略, 应对绿色可持续农业生产的挑战, 解决氮肥过量问题尤为重要。通过优化农田管理措施调控生态系统氮素循环过程, 是维持农田氮素平衡的有效途径^[6], 可为农业氮素资源高效利用及农业可持续发展提供科学依据与实践指导。

氮平衡通过量化氮素的输入、输出和盈余对农田土壤健康进行评估。秸秆还田(S)可以有效调控农田生态系统氮素的输入和输出, 从而影响氮平衡。研究表明, 秸秆还田可以提高土壤氮储量^[7], 这可能是由于秸秆能提高土壤的 C:N 比^[8-9], 从而促进固氮过程中的微生物合成代谢,

形成更加稳定的有机氮^[10-11]。有 Meta 分析和田间试验指出, 秸秆还田能增加作物的氮吸收和产量并且减少氮淋溶和径流的损失^[12]。但是, 秸秆还田会刺激农田 N₂O 和 NH₃ 的排放, 由于对 NH₃ 损失的刺激高于其他氮损失途径减少量的总和, 在全球尺度上秸秆还田增加了农田净氮损失^[13]。然而, 目前的研究多集中于秸秆还田对氮素输入或氮素输出的影响, 针对秸秆还田对农田土壤氮素平衡的研究仍需补充。

减量施氮可有效降低过量施肥农田的氮肥损失, 减少农业面源污染^[1,14]。一项 Meta 分析指出, 在过量施肥地区降低 33.3% 的施肥量能够在保证农作物生产的前提下, 显著降低 29.6%~32.5% 的温室气体(GHGs)排放^[15]。有研究指出, 与常规施氮和过量施氮相比, 降低施氮量显著降低了中国小麦、玉米和水稻的 NH₃ 挥发和单位产量的氮损失^[16]。因此评估农田氮平衡对减量施氮的响应, 对农业资源的高效利用和环境保护提出补偿策略具有重要意义。

收稿日期: 2025-04-12 修回日期: 2025-05-29

基金项目: 国家自然科学基金(31971859)。

第一作者: 邹亮, 男, 硕士研究生, 从事土壤培肥与温室气体减排研究。E-mail: zll3259275737@nwfufu.edu.cn

通信作者: 冯永忠, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业区域发展与规划设计研究。E-mail: fengyz@nwsuaf.edu.cn

关中平原是陕西省乃至全国重要的粮食生产基地^[17], 秸秆资源丰富, 但普遍存在秸秆焚烧问题^[18]。集约种植模式缺乏秸秆保留或掺入, 从而导致了化肥效果不佳^[19], 为了追求高产和降低成本, 关中地区过量施用化肥现象普遍存在^[20]。秸秆清除和化肥的过度使用则会导致严重的环境问题^[21]。探索秸秆还田配合减氮施肥的利用模式, 在保证粮食产量的同时, 提高氮肥利用效率是当前农业科学研究的重点内容之一。目前, 对关中平原地区秸秆还田和减施氮肥对一年两熟制麦玉轮作农田生态系统氮平衡的研究鲜有报道。本试验于关中平原一年两熟麦玉轮作农田设置田间定位试验, 定量分析秸秆还田耦合减量施氮对麦玉轮作农田生态系统氮素流向和氮平衡的影响, 以明确该地区田间秸秆还田情况下的最佳氮肥施用量, 为农田生产系统的可持续发展提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验位于中国陕西省杨凌西北农林科技大学曹新庄试验站(34°18'N, 108°05'E)。该地区海拔 435~563 m, 以麦玉轮作模式为主, 属温带大陆性季风气候, 年均气温 12.9 °C, 年均降水量 649.5 mm, 日照时数 2 017.2~2 346.9 h, 无霜期 213 d。根据中国土壤系统分类, 土壤质地为粉砂质黏壤土, 土壤类型为土娄土。试验前(2018年)测定 0~20 cm 土层的土壤有机碳为 7.79 g/kg, 全氮为 0.41 g/kg, 全磷为 0.53 g/kg, 有效磷为 11.45 mg/kg, 有效钾为 163.23 mg/kg。

1.2 试验设计

本试验于 2018—2020 年进行, 种植模式为一年两熟制麦玉轮作。采取二因素裂区试验设计, 因素一为施氮量, 包括玉米/小麦播种前的 2 种氮肥施用量: 225/180 kg/hm² (N₁) 和 157.5/126 kg/hm² (N_{0.7}); 因素二指 2 种秸秆管理方法: 在下一季作物播种前, 人工清除前茬作物的所有秸秆后进行旋耕, 耕层深度约为 8~12 cm (S₀); 在下一季作物播种前, 将前一季作物的秸秆切碎, 然后通过旋耕使其就地掺入土壤 8~12 cm 深处 (S)。得到 4 种处理施氮不还田 (N₁S₀)、施氮还田 (N₁S)、减量施氮不还田 (N_{0.7}S₀) 和减量施氮还田 (N_{0.7}S), 每个处理重复 3 次。在所有处理中, 玉米品种为‘鑫玉 18 号’, 小麦种子为‘西农

889’; 小麦和玉米的行距分别为 20 cm 和 60 cm, 播种量分别为 210 kg/hm² 和 30 kg/hm²。冬小麦和夏玉米分别于 10 月中旬和 6 月中旬播种, 并于 6 月初和 10 月初收获。玉米/小麦播种前, 所有地块施用一次磷肥, 磷肥含量分别为 140/90 kg/hm² P₂O₅。田间的病虫害和杂草按照农场的防治措施进行统一防治。

1.3 测试方法

1.3.1 作物产量、生物量和吸氮量 在作物成熟季, 从每个小区中心随机选取两排 1 m 长的玉米植株或选取 3 个 1 m² 大小地块内小麦植株, 用于检测产量和地上部生物量。将作物植株烘干后研磨, 使用凯氏定氮法检测籽粒和地上部的氮含量。收获指数 (HI) 为籽粒产量和地上生物总量 (籽粒产量+地上部生物量) 之比, 氮收获指数 (NHI) 为籽粒氮吸收量和地上部总吸氮量 (籽粒吸氮量+地上部吸氮量) 之比。

1.3.2 氮沉积测量 有关降雨和降尘的数据和样本来自杨凌气象局。用 AA3 全自动流动分析仪 (0.001AUFS, Auto Analyzer 3, Germany) 连续流动分析仪测定降雨中无机氮的浓度。采用凯氏定氮法测定降尘中总氮。浓度氮沉积值用公式 (1) 计算^[22]。

$$Nd = Pr \times \frac{0.77 \times \rho Nr1 + 0.23 \times \rho Nr2}{100} + Pd \times \rho Nd \quad (1)$$

式中, Nd 为 N 沉降通量 (kg/hm²), Pr 为降水量 (mm), Pd 为降尘量 (kg/hm²), $\rho Nr1$ 为雨水样品中 NH_4^+ 的浓度 (mg/L), $\rho Nr2$ 为雨水样品中 NO_3^- 的浓度 (mg/L), ρNd 为降尘样品中全氮的浓度 (g/kg), 0.77 为 NH_4^+ 中氮浓度, 0.23 为 NO_3^- 中氮浓度, 100 是单位换算系数。

1.3.3 NH_3 的挥发和 N_2O 的排放 NH_3 的挥发通量通过连续通风室法测定。在试验地垂直安装 3 根聚氯乙烯 (PVC) 硬塑料管 (内径 15 cm, 高 15 cm), 管腔埋入土壤 5 cm 深。在硬质 PVC 管中放置两块浸润甘油磷酸盐溶液的海绵 (每块海绵厚 2 cm, 直径 16 cm), 一块置于下部用于吸收 NH_3 , 一块与管道顶部齐平用于隔绝空气中的 NH_3 。在施肥后的第 1 周, 每天采集 1 次样, 接下来的两周, 每隔 2~7 d 采集 1 次样品, 直到无法监测到 NH_3 挥发为止, NH_3 的挥发通量通过公式 (2)(3) 计算^[23]:

$$F = \frac{C \times V}{T \times S} \quad (2)$$

$$A = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(F_i + F_{i+1})}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \right] \times 24 \times 10^{-2} \quad (3)$$

式中, F 为 NH_3 挥发通量 [$\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]; C 为流动分析测量的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度 (mg/L); V 是提取体积 (L); T 是累积时间 (h); S 是 PVC 管横截面积 (m^2); i 代表第 i 次取样; $t_{i+1} - t_i$ 是相邻两次取样的时间间隔。

N_2O 的排放通量通过静态箱式气相色谱法测定。静态箱(规格为 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$)由隔热钢制成,采样时间为上午 9:00—11:00,在施氮后每 2 d 采集 1 次,10 d 后每周采集 1 次,降雨后连续加测,直到 N_2O 排放速率恢复稳定。 N_2O 浓度通过气相色谱法(Agilent 7890B, America, 安捷伦科技公司)测定。

N_2O 排放通量和累积排放通量按照公式(4)(5)计算^[24]:

$$F = \rho \times h \times \frac{dc}{dt} \times \frac{273}{273 + T} \quad (4)$$

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{F_i + F_{i+1}}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \quad (5)$$

式中, F 为 N_2O 排放通量 [$\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]; ρ 等于 22.4, 为标准状况下气体密度 (mg/m^3); h 为静态箱高 (m); dc/dt 为静态箱中温室气体浓度的变化速率(采用线性拟合, R^2 检测拟合度), T 为气室采样期间温度 ($^\circ\text{C}$); A 为 N_2O 累积排放量 (kg/hm^2); i 代表第 i 次取样; $t_{i+1} - t_i$ 是相邻两次取样的时间间隔。

1.3.4 NO_3^- 浓度的测量 在作物收获季采用五点取样法,从 0 cm 到 200 cm 每隔 20 cm 用钻采集土壤样本,混合后装入密封袋中。然后,将部分土样过 2 mm 的筛子,置于 $-80 \text{ }^\circ\text{C}$ 的冷冻冰箱中保存,测定时使用 AA3 全自动流动分析仪测定 NO_3^- 的浓度。

1.3.5 氮平衡 氮输入、氮输出和氮平衡使用以下公式计算(单位均为 kg/hm^2)^[25]:

氮投入 = 氮肥施用量 + 氮沉降量 + 秸秆氮还田量 + 种子含氮量

氮输出 = 作物氮移出量 + 氮淋失量 + NH_3 挥发量 + N_2O 排放量

氮平衡 = 氮投入 - 氮输出

1.4 数据分析

Microsoft Excel 2019 和 IBM SPSS 25 用于

对数据进行分类、计算和方差分析。不同处理之间采用 LSD 法进行多重比较,显著水平为 0.05。采用 Origin 2024 进行数据的可视化。

2 结果与分析

2.1 减量施氮和秸秆还田对作物产量及作物氮素吸收的影响

在 N_1S_0 、 N_1S 、 $\text{N}_{0.7}\text{S}_0$ 和 $\text{N}_{0.7}\text{S}$ 处理下,两年内的年均周年籽粒产量分别为 14 289.79 kg/hm^2 、15 333.81 kg/hm^2 、13 618.43 kg/hm^2 和 14 708.61 kg/hm^2 。与 S_0 相比, S 显著增加了平均周年籽粒产量 7.31%~8.01%;与 N_1 相比, $\text{N}_{0.7}\text{S}_0$ 较 N_1S_0 显著降低了平均周年籽粒产量 4.70%,但 $\text{N}_{0.7}\text{S}$ 与 N_1S 之间差异不显著。两年内,地上生物量与籽粒产量呈现相似趋势,但玉米季 S 处理下的地上部生物量较前一年明显增加(图 1)。 $\text{N}_{0.7}$ 较 N 和 S_0 较 S 分别显著降低周年籽粒吸氮量 10.94%~11.77% 和 17.58%~16.81%。两年内的地上部吸氮量与籽粒吸氮量趋势相似,但 2020 年玉米季 S 处理下的地上部吸氮量较 2019 年玉米季明显增加(图 1)。

与 S_0 相比, S 在 2018—2019 生长季显著增加 HI 0.78%~1.87%,但在 2019—2020 生长季显著降低 HI 4.34%~4.98%。与 N_1 相比, $\text{N}_{0.7}$ 在 2018—2019 生长季显著增加 HI 1.05%~2.14%,在 2019—2020 生长季差异不显著(表 1)。

2.2 减量施氮和秸秆还田对气态氮损失的影响

在 2018—2020 两个生长季氮周年累积挥发量趋势相同,分别为 10.08~17.17 kg/hm^2 和 11.88~18.71 kg/hm^2 。与 S_0 相比, S 显著增加了周年平均氮累积挥发量 30.76%~40.74%。与 N_1 相比, $\text{N}_{0.7}\text{S}_0$ 和 N_1S_0 之间差异不显著;但受玉米季的影响, $\text{N}_{0.7}\text{S}$ 较 N_1S 显著降低了氮周年累积挥发量 17.76%~22.36%(图 2)。

在 2018~2020 两个生长季 N_2O 周年累积排放通量的趋势相同(图 3),分别为 2.52~4.22 kg/hm^2 和 3.0~8.85 kg/hm^2 ; S 较 S_0 显著增加 N_2O 排放通量 62.45%~73.96%, N 较 $\text{N}_{0.7}$ 显著增加 34.16%~43.67%。2019~2020 生长季的 N_2O 累积排放量较 2018~2019 生长季明显增加。两年平均 N_2O 累积排放量显著性增趋势为 $\text{N}_1\text{S} > \text{N}_{0.7}\text{S} > \text{N}_1\text{S}_0 > \text{N}_{0.7}\text{S}_0$ ($P < 0.05$)。

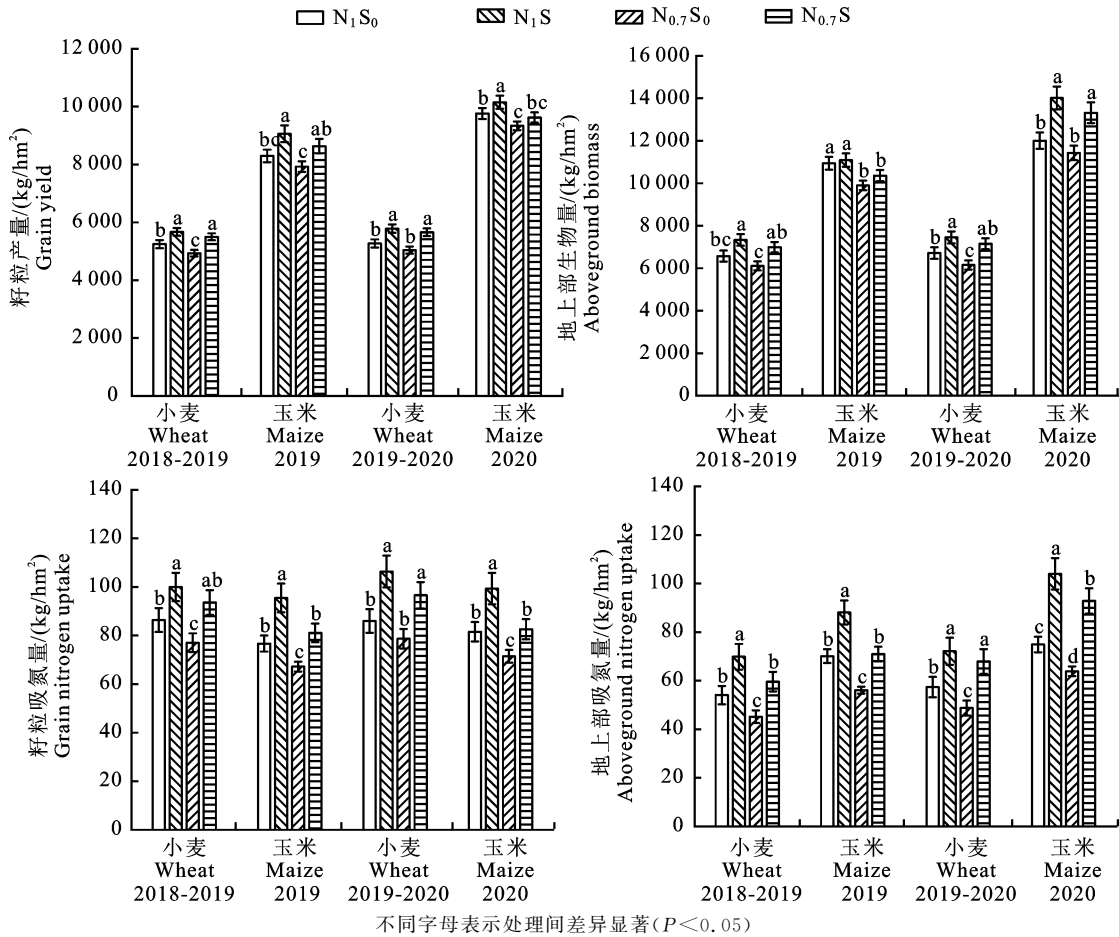


图 1 不同处理对麦玉轮作各作物指标的影响

Fig. 1 Effect of different treatments on various crop indicators of wheat-maize rotations

表 1 不同处理下麦玉轮作各生长季收获指数和氮收获指数

Table 1 Harvest index and nitrogen harvest index for each growing season of wheat and maize rotation under different treatments

指标 Index	年份 Year	作物种类 Crop species	处理 Treatment			
			N_1S_0	N_1S	$N_{0.7}S_0$	$N_{0.7}S$
HI/%	2018—2019	小麦 Wheat	44.40(0.32) ab	43.61(0.33) c	44.67(0.29) a	44.04(0.32) bc
		玉米 Maize	43.14(0.04) d	44.97(0.08) b	44.47(0.01) c	45.46(0.09) a
		平均 Annual	43.62 c	44.43 b	44.55 b	44.60 a
	2019—2020	小麦 Wheat	43.98(0.34) b	43.71(0.32) b	45.02(0.27) a	44.16(0.31) b
		玉米 Maize	44.86(0.31) a	42.02(0.40) b	44.96(0.34) a	41.96(0.44) b
		平均 Annual	44.55 a	42.62 b	44.99 a	42.75 b
NHI/%	2018—2019	小麦 Wheat	61.51(0.31) b	58.88(0.43) c	63.03(0.19) a	61.11(0.31) b
		玉米 Maize	52.23(0.06) c	52.00(0.13) d	54.50(0.12) a	53.33(0.11) b
		平均 Annual	56.77 c	55.31 d	58.75 a	57.23 b
	2019—2020	小麦 Wheat	59.99(0.40) b	59.61(0.38) b	61.75(0.27) a	58.72(0.45) c
		玉米 Maize	52.11(0.14) b	48.84(0.08) c	52.78(0.13) a	47.08(0.14) d
		平均 Annual	55.88 b	53.87 c	57.13 a	52.71 d

注:表中数值代表平均值(标准差)。不同字母表示处理间均值差异显著(ANOVA, $P < 0.05$)。

Note: values in the table represent the mean (standard deviation). Different letters indicate significant differences among treatment means (ANOVA, $P < 0.05$).

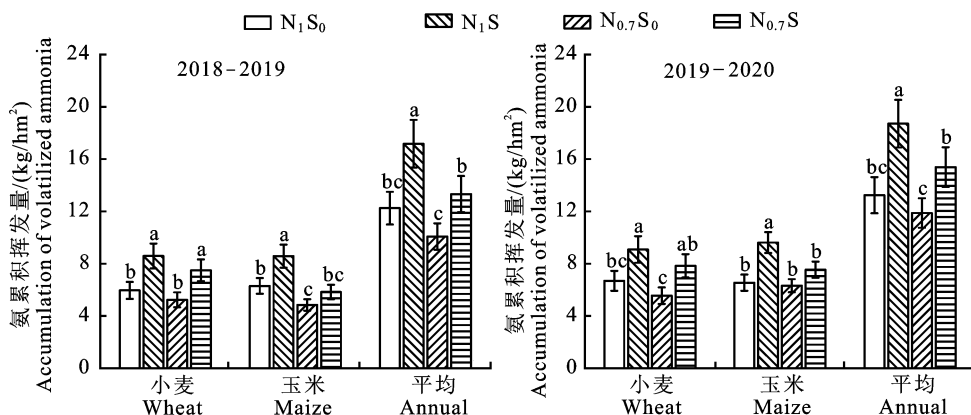
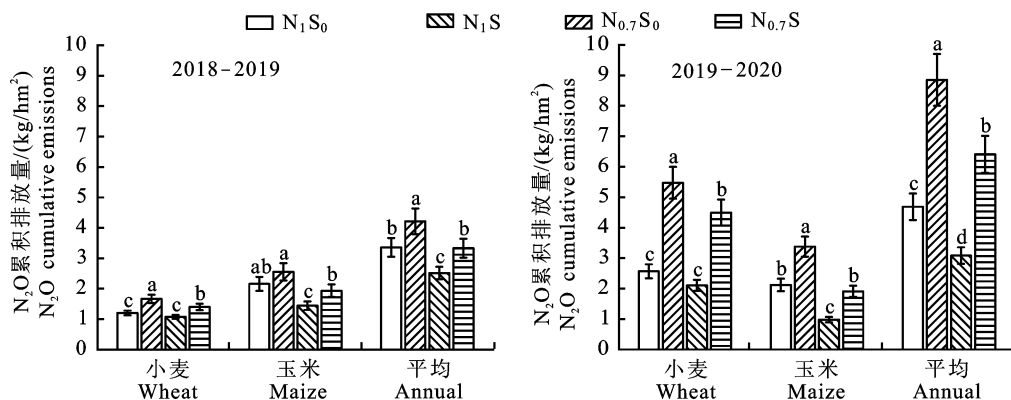


图2 不同处理下麦玉轮作各生长季氨挥发累积排放量

Fig. 2 Accumulation of volatilized ammonia from wheat-maize rotations under different treatments for each growing season

图3 不同处理下麦玉轮作各生长季 N₂O 排放累积量Fig. 3 Cumulative N₂O emissions of wheat-maize rotations across growing seasons under different treatments

2.3 减量施氮和秸秆还田对土壤 NO₃⁻ 淋溶的影响

图4结果表明,T1和T2的NO₃⁻土壤剖面变化趋势相似,除T1的N_{0.7}S的NO₃⁻浓度峰值处于140 cm处(12.56 mg/kg)外,T1和T2的各个处理NO₃⁻浓度峰值均于160 cm处(17.19~31.72 mg/kg)。在T3和T4,N_{0.7}S的NO₃⁻浓度峰值均处于160 cm处(19.29和21.72 mg/kg),而其他处理的NO₃⁻浓度峰值(除T3的N_{0.7}S₀)均处于180 cm处(29.16~41.88 mg/kg)。

N₁S₀、N₁S、N_{0.7}S₀和N_{0.7}S在4个成熟期的0~100 cm土层硝态氮累积变化量差异均不显著;除了N₁S和N_{0.7}S₀在T2~T4时期差异不显著外,其余采样时间的0~100 cm土层硝态氮累积量均表现为N₁S₀ > N₁S > N_{0.7}S₀ > N_{0.7}S (P < 0.05)。100~200 cm土层硝态氮累积量处

理间累积表现趋势与0~100 cm土层类似,但累积量有所增加(图5)。

2.4 减量施氮和秸秆还田对农田土壤氮平衡的影响

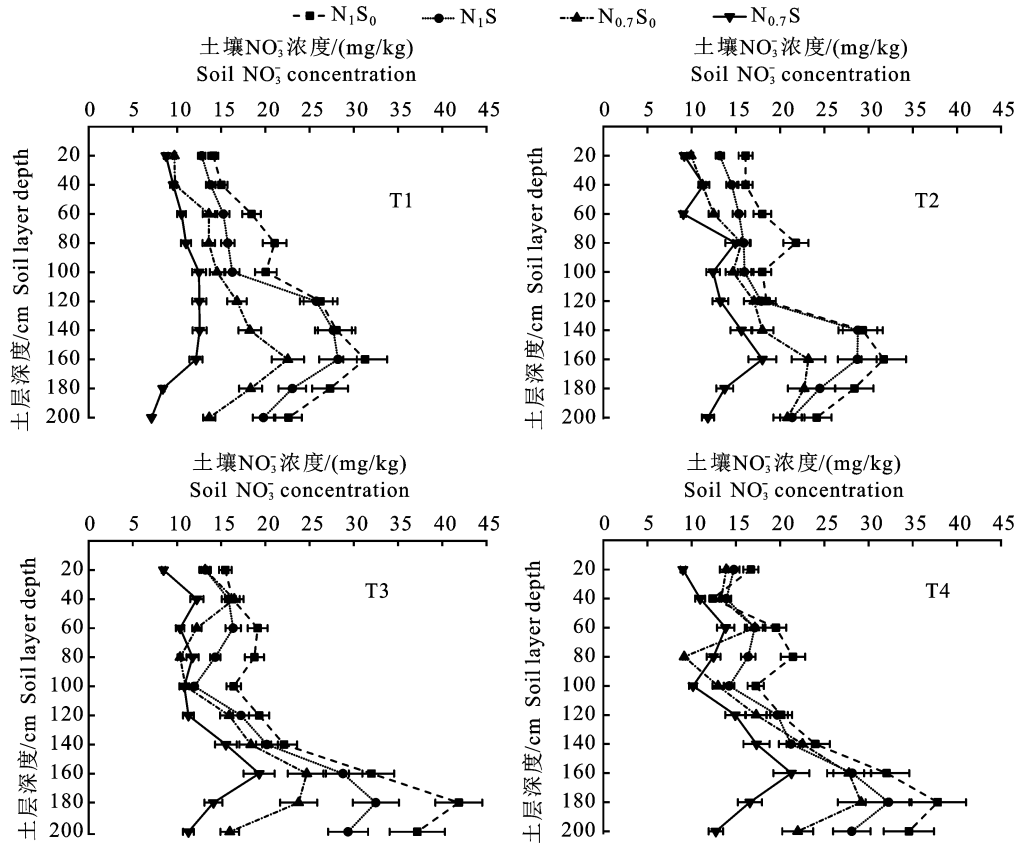
为了有效量化分析不同处理的土壤氮平衡差异,对处理外的氮素输入因子进行了量化,即周年施氮量为405(N₁)和283.5(N_{0.7})kg/hm²。大气氮沉降量为18.9 kg/hm²,占总氮输入量的3.5%~6.9%。小麦和玉米种子的氮输入量分别为2.8和0.7 kg/hm²,约仅为总氮输入量的1%(图6)。

2018-2020两个生长季的作物氮移除和NH₃挥发在年际间差异不显著(P < 0.05),但N₂O排放和100~200 cm NO₃⁻淋溶氮素损失随时间显著增加(图3、图5)。在氮素目标性输出中,NHI表现为N_{0.7}S₀ > N₁S₀ > N_{0.7}S > N₁S (P < 0.05)。N₁比N_{0.7}增加了17.17%氮损失,

S 比 S_0 减少了 21.45 % 氮损失(图 6)。

N_1S_0 、 N_1S 、 $N_{0.7}S_0$ 和 $N_{0.7}S$ 处理的氮平衡值分别约为 67.7~84.3、135.8~152.9、-2~11.8

和 53.6~73.1 kg/hm^2 ; S 增加了氮平衡, 但 $N_{0.7}$ 降低了氮平衡。



T1. 2018—2019 冬小麦成熟期; T2. 2019 夏玉米成熟期; T3. 2019—2020 冬小麦成熟期; T4. 2020 夏玉米成熟期; 下同

T1. Maturity period of winter wheat in the 2018—2019; T2. Maturity period of summer maize in 2019; T3. Maturity period of winter wheat in the 2019—2020; T4. Maturity period of summer maize in 2020; the same below

图 4 不同处理下冬小麦—夏玉米成熟期 0~200 cm 土层土壤硝态氮浓度

Fig. 4 Soil nitrate nitrogen concentration in the 0—200 cm soil layer at the maturity stage of winter wheat-summer maize rotation under different treatments

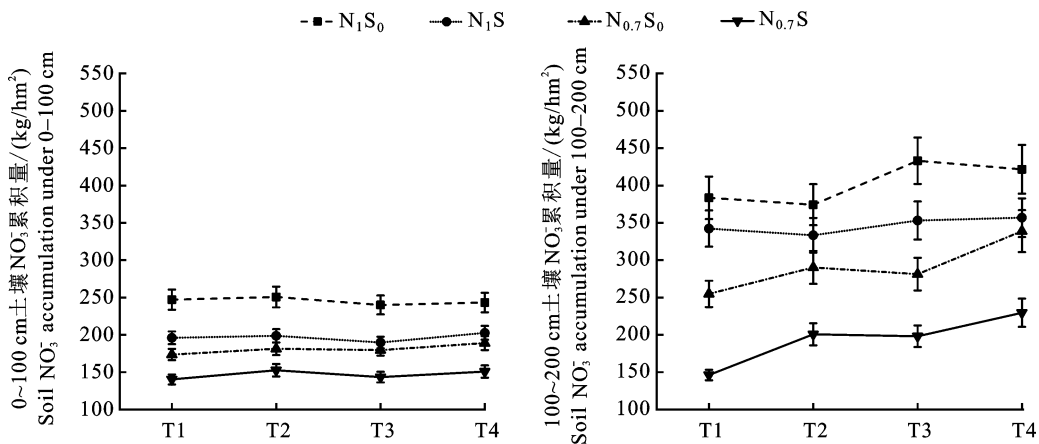


图 5 冬小麦和夏玉米成熟期 0~100 cm、100~200 cm 土层硝态氮累积变化

Fig. 5 Changes in nitrate nitrogen accumulation in 0—100 cm and 100—200 cm soil layers during maturity period of winter wheat and summer maize

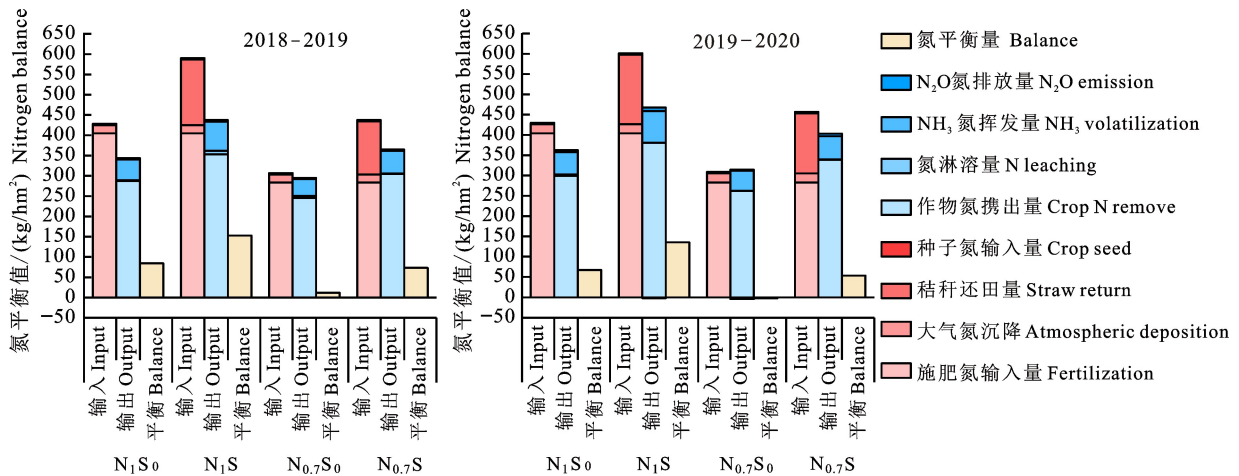


图 6 不同处理下的氮平衡分析

Fig. 6 Nitrogen balance analysis under different treatments

3 讨论

3.1 作物生产力对秸秆还田和减氮施肥的响应

合理的减量施氮和秸秆还田被认为是实现农业可持续发展的农业管理措施之一^[15]。本研究结果发现,秸秆还田和施氮处理对小麦产量没有显著的交互作用($P > 0.05$),这可能是由于秸秆还田时,秸秆自身的氮素对减量施氮处理减少的氮素进行了补充,导致氮肥处理间氮素差异不能处于主导地位。与 S_0 处理相比,S显著提高了麦玉农田系统籽粒产量、地上生物量、籽粒氮吸收量、地上部吸氮量,该结果与前人的研究结果一致^[13,26-27];这可能是因为秸秆还田将大部分养分返还到土壤中,增加了植物可以吸收利用的养分^[28],并且秸秆掺入土壤后增加了大量有机质,改善土壤物理、化学和生物参数,从而改善了土壤健康状况^[29],大大减少了肥料氮的损失^[30]。两年间HI差异可能是由于第二年玉米季的地上部生物量增多造成的。另外,秸秆还田和减量施氮处理对NHI的影响交互作用显著($P < 0.05$); $N_{0.7}$ 并没有显著减少产量,并且显著增加了NHI,这主要归功于冬小麦季的籽粒吸氮量没有显著减少;相反,秸秆还田降低了NHI,这是因为与籽粒吸氮量相比,秸秆还田更多的增加了地上部氮的吸收。总的来看,S可以显著提高作物产量和对氮素的吸收,而 $N_{0.7}$ 可以在维持产量的同时,提升作物的氮素利用效率,为作物氮素吸收和生长提供足够的养分条件。

3.2 氮损失对秸秆还田和减氮施肥的响应

NH_3 的挥发是旱地耕作中氮损失的方法之

一,会降低作物对氮肥的利用效率并产生温室气体^[31]。本研究发现,S会显著增加 NH_3 挥发,这可能是由于秸秆腐烂增加了可利用氮,从而刺激了微生物的氨氧化作用。另外,本研究发现在 S_0 的条件下 $N_{0.7}$ 并不能显著减少 NH_3 挥发,但在S条件下可以显著减少 NH_3 挥发,这可能是因为 NH_4^+ 是造成 NH_3 排放的一个重要因子^[23],而秸秆还田可以提高土壤 NH_4^+ 的含量^[32],从而增加 NH_3 的排放,但是氮肥的施用量也是影响 NH_4^+ 含量的一个重要因素^[14],因此形成了 $N_{0.7}S$ 可以有效减少由秸秆还田造成的额外排放的现象。

与前人研究结果相似的是^[31,33-34],本研究发现在S可以显著增加 N_2O 的排放,而 $N_{0.7}$ 可以显著降低 N_2O 的排放,并且S和 $N_{0.7}$ 都可以有效降低 NO_3^- 的淋溶。这可能是因为S可以促进植物对氮的吸收和土壤对氮肥的固定^[35];而 $N_{0.7}$ 更少的氮投入直接减少了产生 NO_3^- 的底物^[36], NO_3^- 是硝化反硝化作用重要的中间产物,是 N_2O 排放和 NH_3 挥发的重要调控因子^[37],本研究认为耕层 NO_3^- 的减少可能也是S和 $N_{0.7}$ 调控 N_2O 减排的重要途径之一^[38]。此外,第二个生长季 N_2O 排放有所增高,这有可能是因为降雨分布导致土壤水分入渗强度不同,最终导致两个生长季之间的 N_2O 排放不同。100~200 cm土层的 NO_3^- 浓度随时间不断增加,这可能是由于受降雨量分布的影响,不同时期土壤径流和渗透存在差异造成的。

3.3 氮平衡对秸秆还田和减氮施肥的响应

在农田氮素养分循环系统中,氮输入和输出

之间的不平衡可能会导致土壤氮素盈余过高或者造成亏缺^[38],而较高的土壤氮素盈余会增加氮损失的风险,土壤氮素亏缺则会降低土壤肥力,影响农田生产的长期生态可持续性^[39]。本研究发现,S会显著增加麦玉轮作农田系统中的氮盈余,这是因为S相比S₀,秸秆向农田中的氮输入增加了40.25%~43.81%,而氮素的输出仅增加25.53%~29.00%;另外,结果表明N_{0.7}比N₁减少了氮平衡,这与秸秆还田增加氮平衡的原因类似,是由于氮输入的大幅降低造成的;一项在陕西省周至县的试验于本研究结果类似^[40]。本研究发现,N_{0.7}S₀和N_{0.7}S处理的氮平衡值均低于荷兰和欧盟作物系统的氮盈余基准(每年80 kg/hm²)^[41],但N_{0.7}S₀在2019—2020生长季的氮平衡值为-2 kg/hm²,因此虽然N_{0.7}S₀处理氮平衡值最低,但存在可能造成氮素亏损的情况。N_{0.7}和S均能降低硝态氮的淋溶,总的来看,N_{0.7}S能在维持小麦籽粒产量的同时使土壤硝态氮残留和土壤表观氮平衡处于理想状态。N_{0.7}S作物氮移出高于肥料氮投入(图6),证明N_{0.7}S处理有助于作物对氮的吸收利用,作物对氮的高效利用不仅能提高农业经济效益,还能降低环境风险^[42]。此外,秸秆还田下的NH₃挥发和N₂O排放是一种不利的氮损失途径。N_{0.7}S处理能够在降低氮平衡的同时保证农田系统的氮素盈余,因此本研究认为,N_{0.7}可以有效降低由秸秆还田造成的氮盈余增高。本研究在分析麦玉轮作体系下农田氮素平衡时,有效评估了S和N_{0.7}对农田生态系统表观氮素平衡的重要作用,为农田减量施氮增产提供参考和依据。

4 结论

能显著增加籽粒产量以及地上部生物量,同时增加籽粒和地上部分吸氮量;但因为地上部吸氮量的增加多于籽粒吸氮量,导致S显著降低了NHI。N_{0.7}较N₁可以在不显著影响产量的前提下,显著提高NHI,实现更高效的氮肥利用。

N_{0.7}和S都可以显著减少0~200 cm土壤NO₃⁻的浓度,但S存在额外增加NH₃挥发和N₂O排放的风险。

N_{0.7}S不仅有助于作物对氮的吸收利用,还可以显著降低由S造成的额外NH₃挥发和N₂O排放,并且能在维持籽粒产量的同时降低氮平衡,使土壤氮平衡处于理想状态。

参考文献 Reference:

- [1] 姜海斌,张克强,邹洪涛,等. 减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响[J]. 环境科学,2021,42(11):5405-5413.
- [2] KURIYAMA K, HAYASHI K. Sustainable Agriculture and the Nitrogen Issue[M]. Economics of Sustainable Agriculture. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025: 1-10.
- [3] KAPOOR S, SOOD T, KAUR J, et al. Nitrogen Nexus: Unraveling the Threads of Loss, Efficiency, and Yield[M]. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025: 103-134.
- [4] 朱银浩,尹娟,马正虎,等. 有机肥代替氮肥对中国主要粮食产量的影响[J]. 环境科学,2025,46(1):478-488.
- [5] ELUMALAI P, GAO X, PARTHIPAN P, et al. Agrochemical pollution: a serious threat to environmental health[J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2025, 43: 100597.
- [6] 黄少辉,杨云马,侯亮,等. 基于Nufer模型的京津冀农牧系统氮素平衡状况及化学氮肥减施潜力分析[J]. 植物营养与肥料学报,2021,27(1):12-23.
- [7] LOU C, ZHANG Y, MCLAUGHLIN N, et al. Changes in soil total nitrogen induced by crop residue return: a meta-analysis[J]. *Soil & Tillage Research*, 2023, 230: 105712.
- [8] LIU X, HOU H, ZHANG Y, et al. Promotion of maize straw degradation rate by altering microbial community structure through the addition of soybean straw[J]. *Plant and Soil*, 2024, 512(1): 1005-1025.
- [9] 叶子壮,王松燕,陆潇,等. 秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响[J]. 环境科学,2024,45(4):2292-2303.
- [10] ZHANG X, REN X, CAI L. Effects of different straw incorporation amounts on soil organic carbon, microbial biomass, and enzyme activities in dry-crop farmland[J]. *Sustainability*, 2024, 16(23): 10588.
- [11] NINKUU V, LIU Z, QIN A, et al. Impact of straw returning on soil ecology and crop yield: a review[J]. *Heliyon*, 2025, 11(2): e41651-e41651.
- [12] LI Z, REICHEL R, XU Z, et al. Return of crop residues to arable land stimulates N₂O emission but mitigates NO₃⁻ leaching: a meta-analysis[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2021, 41(5): 1-17.
- [13] XIA L, LAM S, WOLF B, et al. Trade-offs between soil carbon sequestration and reactive nitrogen losses under straw return in global agroecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(12): 5919-5932.
- [14] 毛兵,曾悦,赖彩婷,等. 减氮施肥对甘蔗生物量及土壤硝态氮和铵态氮的影响[J]. 生态学杂志,2023,42(11): 2604-2612.
- [15] ZHANG J, TIAN H, SHI H, et al. Increased greenhouse gas emissions intensity of major croplands in China: implications for food security and climate change mitigation[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(11): 6116-6133.

- [16] ABDO A, DENG Y, SUN D, *et al.* Maintaining higher grain production with less reactive nitrogen losses in China: A meta-analysis study[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 322: 166018.
- [17] 白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 等. 秸秆还田配施生物炭对关中原夏玉米产量和土壤 N_2O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2022, 43(8): 4379-4386.
- [18] LIU X, LIU J, LIU Z. Developing a model of propagating the straw burning prohibition policy in Chinese rural communities and exploring its countermeasures[J]. *Energy Reports*, 2024, 11: 2556-2564.
- [19] 胡明明, 丁 峰, 彭志芸, 等. 多元化种植模式下秸秆还田配合水氮管理对水稻产量形成与氮素吸收利用的影响[J]. *作物学报*, 2024, 50(5): 1236-1252.
- [20] 李海强, 祁 帅, 李改民, 等. 关中土区冬小麦-夏玉米体系磷肥减施增效技术研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(2): 300-307.
- [21] WU Y, XI X, TANG X, *et al.* Policy distortions, farm size, and the overuse of agricultural chemicals in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(27): 7010-7015.
- [22] WEN Z, WANG R, LI Q, *et al.* Spatiotemporal variations of nitrogen and phosphorus deposition across China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 830: 154740.
- [23] BAI J, CHEN D, ZHANG Z, *et al.* Minimizing environment footprint through half-plastic film mulch and straw incorporation in maize-based system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 367: 108957.
- [24] WANG W, YANG M, SHEN P, *et al.* Conservation tillage reduces nitrous oxide emissions by regulating functional genes for ammonia oxidation and denitrification in a winter wheat ecosystem[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 194: 104347.
- [25] 杨 康, 吴坤燕, 孙 瑞, 等. 有机肥部分替代化肥对华北小麦-玉米农田氮素损失及氮平衡的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2025, 33(3): 484-497.
- [26] SHARMA S, SINGH P, CHOUDHARY O, *et al.* Nitrogen and rice straw incorporation impact nitrogen use efficiency, soil nitrogen pools and enzyme activity in rice-wheat system in north-western India[J]. *Field Crops Research*, 2021, 266: 108131.
- [27] HUANG T, YANG N, LU C, *et al.* Soil organic carbon, total nitrogen, available nutrients, and yield under different straw returning methods[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 214: 105171.
- [28] 宋佳杰, 徐郁阳, 白金泽, 等. 秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响[J]. *环境科学*, 2022, 43(9): 4839-4847.
- [29] JING Z, ZHANG S, SUN Z, *et al.* Straw incorporation and nitrogen fertilization enhance soil organic carbon sequestration by promoting aggregate stability and iron oxide transformation[J]. *Agronomy*, 2025, 15(4): 871.
- [30] LIU L, CHENG M, JIN J, *et al.* Effects of different nitrogen applications and straw return depth on straw microbial and carbon and nitrogen cycles in paddy fields in the cool zone[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 6424.
- [31] SUN G, ZHANG Z, XIONG S, *et al.* Mitigating greenhouse gas emissions and ammonia volatilization from cotton fields by integrating cover crops with reduced use of nitrogen fertilizer[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 332: 107946.
- [32] LI H, WANG L, PENG Y, *et al.* Film mulching, residue retention and N fertilization affect ammonia volatilization through soil labile N and C pools[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 308: 107272.
- [33] XU C, HAN X, ZHUGE Y, *et al.* Crop straw incorporation alleviates overall fertilizer-N losses and mitigates N_2O emissions per unit applied N from intensively farmed soils: an in situ ^{15}N tracing study[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 764: 142884.
- [34] BAI J, SONG J, CHEN D, *et al.* Biochar combined with N fertilization and straw return in wheat-maize agroecosystem: key practices to enhance crop yields and minimize carbon and nitrogen footprints[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 347: 108366.
- [35] YANG S, WANG Y, LIU R, *et al.* Effects of straw application on nitrate leaching in fields in the Yellow River irrigation zone of Ningxia, China[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 954.
- [36] LOZIER T, MACRAE M, BRUNKE R, *et al.* Release of phosphorus from crop residue and cover crops over the non-growing season in a cool temperate region[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 189: 39-51.
- [37] ZHANG Z, LI X, XIONG S, *et al.* *Orychopragmus violaceus* as a winter cover crop is more conducive to agricultural sustainability than *Vicia villosa* in cotton-fallow systems[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2022, 68(11): 1487-1500.
- [38] SENBAYRAM M, WELL R, BOL R, *et al.* Interaction of straw amendment and soil NO_3^- content controls fungal denitrification and denitrification product stoichiometry in a sandy soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 126: 204-212.
- [39] REN Y, DUAN Y, LUO J, *et al.* Soil nitrogen deficiency drives compensatory assembly of nitrogen-cycling functions in the rhizosphere microbiome[J]. *Plant and Soil*, 2024, 502(1-2): 623-637.
- [40] 王新媛, 赵思达, 郑险峰, 等. 秸秆还田和氮肥用量对冬小麦产量和氮素利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(23): 5043-5053.
- [41] OENE O, BRENTROP F, LAMMEL J, *et al.* Nitrogen Use Efficiency (NUE)-an Indicator for the Utilization of Nitrogen in Agriculture and Food Systems Prepared by the EU Nitrogen Expert Panel[M]. Wageningen: Wageningen

University, 2015, 1-32.

[42] GU B, ZHANG X, LAM S K, *et al.* Cost-effective mitiga-

tion of nitrogen pollution from global croplands [J].

Nature, 2023, 613(7942):77-84.

Nitrogen Balance in Wheat and Maize Rotation System Under Reduced Nitrogen Application and Straw Returning to Field

ZOU Liang^{1,2}, XIE Xinyu^{1,2}, HUANG Yumin^{1,2}, BAI Jinze^{1,2}, BAI Yuxin^{1,2},
SONG Jianheng^{1,2}, WANG Chenyu^{1,2}, WANG Xing^{1,2},
REN Guangxin^{1,2} and FENG Yongzhong^{1,2}

(1. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China; 2. Shaanxi Recycling Agriculture Engineering and Technology Research Center, Yangling Shaanxi 712100, China)

Abstract Based on a long-term in situ experiment conducted on the Guanzhong Plain from 2018–2020, four treatments were set up: traditional nitrogen application without straw returning to the field (N_1S_0), reduced nitrogen application with straw returning to the field (N_1S), reduced nitrogen application without straw returning to the field ($N_{0.7}S_0$), and reduced nitrogen application with straw returning to the field ($N_{0.7}S$). The effects of straw returning and reduced nitrogen application on the soil nitrogen balance and crop productivity in the wheat-maize growing season were investigated for two consecutive years from 2018 to 2020. The results showed that straw returning (S) significantly increased annual seed yield, annual NH_3 volatilization and annual N_2O emission by 7.31%–8.01%, 30.76%–40.74% and 62.45%–73.96%, respectively, compared with no straw returning to the field (S_0); Traditional N application (N_1) significantly reduced annual NH_3 volatilization by 17.71%–22.36% compared with N_1S . The loss of nitrate-nitrogen from the 0–200 cm soil layer was lowest under $N_{0.7}S$; the nitrogen balance values of N_1S_0 , N_1S , $N_{0.7}S_0$ and $N_{0.7}S$ were 67.7–84.3, 135.8–152.9, –2–11.8 and 53.6–73.1 kg/hm², respectively. In $N_{0.7}S_0$, although the nitrogen balance was the lowest, its value reached –2 kg/hm² in the 2019–2020 growing season, indicating a potential risk of nitrogen deficit. Considering crop yield, N losses and N balance, the $N_{0.7}S$ treatment minimized gaseous nitrogen emissions, nitrate-N leaching, and overall system nitrogen surplus while maintaining seed yield. Therefore, $N_{0.7}S$ represents an environmentally friendly and sustainable nitrogen management strategy for wheat-maize rotation systems.

Key words Reduced nitrogen application; Straw returning; Wheat-maize rotation; Nitrogen balance

Received 2025-04-12

Returned 2025-05-29

Foundation item The National Natural Science Foundation of China (No. 31971859).

First author ZOU Liang, male, master student. Research area: soil fertility improvement and greenhouse gas mitigation. E-mail: zl13259275737@nwafu.edu.cn

Corresponding author FENG Yongzhong, male, professor, doctoral supervisor. Research area: integrated regional agricultural development and planning. E-mail: fengyz@nwsuaf.edu.cn

(责任编辑:成敏 Responsible editor: CHENG Min)