

网络出版时间:2026-04-09

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260408.1444.004

化学氮肥减施优化对砂姜黑土麦田土壤氮平衡的影响

潘秀燕¹,王春兰²,张歆玥²,丁静丽²,任志杰²,许纪东¹,郑念¹,王辉¹,刘高远²

(1. 遂平县农业科学研究所,河南驻马店 463100; 2. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所,河南郑州 450002)

摘要:为明确不同比例氮肥优化减施下砂姜黑土麦田土壤氮平衡特征,以小麦为研究对象,设置无氮(NN)、常规施氮(CN)、化学氮肥减施10%和20%(R1N、R2N)以及有机肥替代20%和30%化学氮肥(R2NM、R3NM)6个处理,通过2022—2023年和2023—2024年连续两季小麦田间试验,分析小麦产量、氮素表观利用率和0~100 cm土层无机氮(N_{min})残留的变化,并对麦田土壤氮平衡进行了系统评价。结果表明,与CN处理相比,不同年份R1N处理小麦产量均无显著变化,而2023—2024年R2N处理产量显著降低8.36%;2022—2023年R2NM和R3NM处理产量与CN处理差异不显著,而2023—2024年分别显著提高7.56%和6.74%。与CN处理相比,不同年份R1N和R2N处理氮素表观利用率均无显著变化,而R2NM和R3NM处理均显著提高,其中2022—2023年分别增加8.8和7.0个百分点,2023—2024年分别增加11.7和9.1个百分点。在土层 N_{min} 残留方面,与CN处理相比,不同年份R1N和R2N处理均无显著变化,而R2NM和R3NM处理均显著提高了0~20 cm土层 N_{min} 残留量,并在2023—2024年显著提高了20~40 cm土层 N_{min} 残留量;不同处理(除NN外)在40~100 cm土层 N_{min} 残留量之间均无显著差异。基于连续两季麦田土壤氮平衡评价结果,R2NM和R3NM处理氮素表观利用率较CK处理分别显著提高10.2和8.0个百分点,氮素表观损失率显著降低15.9和15.1个百分点,但氮素表观残留率无显著变化。本研究条件下,有机肥替代20%或30%化学氮肥能够在实现小麦稳产增产的基础上,提高砂姜黑土麦田氮素表观利用率并降低氮素表观损失率,对维持和改善土壤氮平衡具有积极作用。

关键词:氮肥优化;有机肥替代;土壤氮平衡;砂姜黑土;小麦

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2026)05-0667-09

Effect of Optimized Nitrogen Reduction Strategies on Soil Nitrogen Balance in Wheat Fields of Lime Concretion Black Soil

PAN Xiuyan¹, WANG Chunlan², ZHANG Xinyue², DING Jingli², REN Zhijie²,
XU Jidong¹, ZHENG Nian¹, WANG Hui¹, LIU Gaoyuan²

(1. Suiping County Institute of Agricultural Sciences, Zhumadian, Henan 463100, China; 2. Institute of Plant Nutrition and Resource Environment, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract: To clarify the characteristics of soil nitrogen balance in wheat fields of lime concretion black soil under different optimized nitrogen reduction strategies, a two-season field experiment was conducted during 2022—2023 and 2023—2024 using wheat as the test crop. Six treatments were established, including no nitrogen application(NN), conventional nitrogen application(CN), 10% and 20% reductions in chemical nitrogen fertilizer(R1N and R2N), and substitution of 20% and 30% of chemical nitrogen fertilizer with organic manure(R2NM and R3NM). Wheat yield, apparent nitrogen use efficiency, and residual mineral nitrogen(N_{min}) in the 0—100 cm soil layers were analyzed, and soil ni-

收稿日期:2025-12-10

修回日期:2026-01-16

基金项目:河南省农业科学院基本科研业务费专项(2026ZC036、2026BX35、2026BX40);2024年河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所开放课题

第一作者 E-mail:spnkzxd@126.com(潘秀燕)

通讯作者 E-mail:liugaoyuan678@163.com(刘高远)

trogen balance in the wheat field was systematically evaluated. The results showed that, compared with CN, grain yield under R1N did not differ significantly in either year, whereas yield under R2N decreased significantly by 8.36% in 2023–2024. Compared with CN, grain yields under R2NM and R3NM were not significantly different in 2022–2023, but increased significantly by 7.56% and 6.74% in 2023–2024, respectively. Apparent nitrogen use efficiency did not differ significantly between R1N or R2N and CN in either year, whereas it increased significantly under R2NM and R3NM, with increases of 8.8 and 7.0 percentage points in 2022–2023 and 11.7 and 9.1 percentage points in 2023–2024, respectively. In terms of residual soil $N_{\min}$, no significant differences were observed between R1N or R2N and CN in either year, whereas R2NM and R3NM significantly increased $N_{\min}$ residue in the 0–20 cm soil layer in both years and in the 20–40 cm soil layer in 2023–2024. No significant differences were found among fertilized treatments except NN in the 40–100 cm soil layer. Based on the two-season soil nitrogen balance analysis, R2NM and R3NM significantly increased apparent nitrogen use efficiency by 10.2 and 8.0 percentage points, respectively, and significantly reduced apparent nitrogen loss rate by 15.9 and 15.1 percentage points compared with CN, respectively, but had no significant effect on apparent nitrogen residual rate. In this study, substituting 20% or 30% of chemical nitrogen fertilizer with organic manure can maintain or increase wheat yield, improve apparent nitrogen use efficiency, reduce apparent nitrogen loss rate, and thus contribute positively to maintaining and improving soil nitrogen balance in wheat fields of lime concretion black soil.

Keywords: Nitrogen reduction; Organic manure substitution; Soil nitrogen balance; Lime concretion black soil; Wheat

小麦是中国主要粮食作物之一,其种植面积及产量均居世界前列。合理施用氮肥是满足作物氮素需求、实现粮食作物高产稳产的重要措施。据报道,氮肥对小麦、玉米等粮食作物产量的贡献率高达50%^[1]。然而,中国粮食作物当季氮素利用率为30%~50%^[2],且随着施氮量的增加而逐渐降低,未利用的大部分氮素通过淋溶、氨挥发、径流等多种途径进入环境,不仅造成氮肥资源浪费,而且严重污染环境。在耕地数量不减少、耕地质量不降低、地下水不超采以及化肥、农药使用量零增长、农业废弃物资源化利用(“三不两零一全”)目标背景下,优化氮肥施用和以有机肥替代部分化学氮肥已成为实现氮肥减施增效的重要技术途径。其核心在于依据土壤供肥能力与作物需氮规律,确定合理施氮量或有机肥替代比例,从而提高氮素利用效率、减少氮素损失并改善农田生态环境^[3]。但受土壤类型、土壤基础肥力、气候条件、作物种类等因素的影响,同一氮肥优化减施措施下土壤氮素利用特征存在很大差异,因此针对性地开展不同化学氮肥减施措施对土壤氮平衡特征评价具有重要意义。

已有研究表明,氮肥优化减施及有机肥替代均能够提高作物氮素利用效率、氮素农学效率及

降低农田硝态氮淋溶风险^[4-7]。同时,有机肥替代部分化学氮肥还能够提升土壤有机质含量^[8-9]、增加耕层无机氮累积并提高作物产量^[10-11]。然而,由于土壤类型、土壤基础肥力、气候条件、作物种类等因素存在差异,不同区域在相同减氮措施下的氮素利用效果并不一致。Duan等^[12]研究发现,在红壤土试验区施用有机肥替代70%化学氮肥显著提高了小麦、玉米氮肥利用效率,而在潮土、褐土、壤土试验区并未观察到类似结果;蔡媛媛等^[13]报道,在轻壤质潮土区和潮土区施用有机肥替代50%和100%化学氮肥均未显著提高小麦氮肥利用效率;张奇茹等^[14]认为,在石灰性褐土区,有机肥替代40%~70%化学氮肥处理下土壤硝态氮残留量降低了9.6%~23.0%。此外,氮肥减施和有机肥替代还会通过改变土壤养分状况和微生物活动进一步影响农田温室气体排放。已有研究表明,氮肥优化减施能够显著降低土壤 N_2O 排放量^[15-16],有机肥替代部分化学氮肥能够显著提高土壤 CO_2 排放量^[15,17]。然而,在不同土壤类型区,氮肥优化减施对土壤 CO_2 排放的影响仍存在差异。范靖尉等^[18]发现氮肥优化减施显著降低了潮褐土麦田土壤 CO_2 排放量,而Wang等^[19]在轻质潮褐土麦田并未观察到此现象。有

机肥替代部分化学氮肥对土壤 N₂O 排放的影响结果也不一致,LÜ 等^[20]在西北地区壤土麦田有机肥替代 50% 化学氮肥降低了土壤 N₂O 排放量,而 Zhou 等^[21]在西南地区紫色土麦田却得到了相反的结果。因此,在不同土壤类型下系统评估氮肥减施措施下土壤氮素利用及氮平衡特征具有重要意义。

砂姜黑土是河南南部地区重要的耕作土壤类型,占该省耕地面积的 14%,具有质地粘重、易板结、耕层浅薄等特性,此类土壤存在缺磷少氮的现状,相关麦田属于典型的中低产田,但也是小麦增产的重要潜力区^[22]。近年来,为提高该地区小麦产量,麦田氮肥施用量显著增加,且以化肥为主。据报道,该地区砂姜黑土麦田单季氮肥施用量已高达 250 kg·hm⁻²^[23],由此带来的资源浪费和生态环境风险日益突出。针对砂姜黑土麦田化学氮肥过量施用问题,已有研究通过氮肥优化减施及有机肥替代部分化学氮肥提高了小麦氮素利用效率,改善了土壤性质并提升了小麦产量和品质^[24-26]。但针对不同减氮措施下该类土壤氮平衡特征的系统研究仍相对缺乏。基于此,本试验以河南南部砂姜黑土麦田为研究对象,通过连续 2 年的田间试验,系统分析化学氮肥减施及有机肥替代部分化学氮肥条件下小麦产量、氮素表观利用率以及 0~100 cm 土层氮素表观残留特征,并对土壤氮平衡进行综合评价,以期对砂姜黑土麦田氮肥管理优化和区域农业绿色发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2022—2023 年和 2023—2024 年在河南省驻马店市遂平县农业科学研究所(113°37'E, 33°15'N)开展。该地区属暖温带大陆性季风气候区,年均气温 14.9℃,年均降水量 972 mm,年均蒸发量 1 574 mm,无霜期 220 d。土壤类型为砂姜黑土,0~50 cm 土质为黏壤土及壤质黏土,耕层质地黏重且适耕期较短。试验前,耕层土壤性质如下:容重 1.44 g·cm⁻³、有机碳含量 7.9 g·kg⁻¹、全氮含量 0.13 g·kg⁻¹、碱解氮含量 66.9 mg·kg⁻¹、速效磷含量 19.7 mg·kg⁻¹、速效钾含量 152.7 mg·kg⁻¹、pH 值 6.7。2022—2023 年和 2023—2024 年小麦生育期内平均气温及降水量变化见图 1。

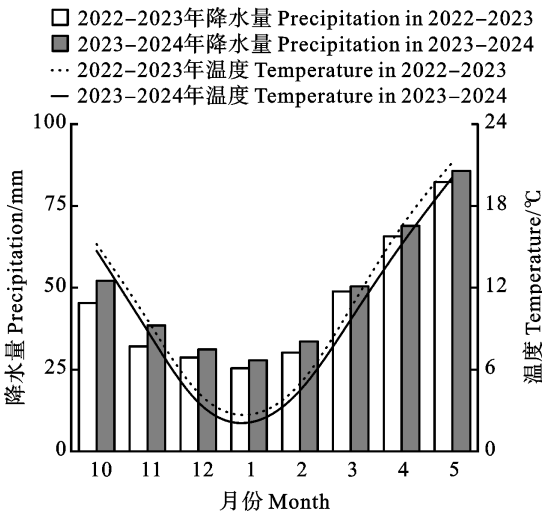


图 1 2022—2023 年和 2023—2024 年小麦生育期内平均气温和降水量的变化

Fig. 1 Changes in average temperature and precipitation during the wheat growing period of 2022—2023 and 2023—2024

1.2 试验设计

试验设 6 个处理,分别为无氮处理(NN)、常规施氮处理(CN)、化学氮肥减施 10% 和 20% 处理(R1N、R2N),以及有机肥替代 20% 和 30% 化学氮肥处理(R2NM、R3NM),每处理 3 次重复,小区面积为 30 m²(5 m×6 m),采用完全随机设计。供试化肥种类分别为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%)和氯化钾(含 K₂O 60%);有机肥为猪粪(干基),其有机碳、全氮、全磷和全钾含量分别为 31.9%、1.9%、0.7% 和 0.6%。R2NM 和 R3NM 处理有机肥替代化学氮肥比例参考申长卫等^[27]的方法设置。NN、CN、R1N 和 R2N 处理施氮量分别为 0、225.0、202.5 和 180.0 kg·hm⁻²,其中 70% 氮肥及全部磷钾肥基施,剩余 30% 氮肥于拔节期追施;磷钾肥用量一致,均为 P₂O₅ 100 kg·hm⁻² 和 K₂O 60 kg·hm⁻²。R2NM 和 R3NM 处理化学氮肥用量分别为 180.0 和 157.5 kg·hm⁻²,其余化学氮肥采用有机肥替代,折合用量分别为 2 500 和 3 600 kg·hm⁻²,并按等量养分原则扣除相应磷钾肥投入量。有机肥于播前均匀撒施后旋耕翻入土壤,化肥施用方式与 CN 处理一致。供试小麦品种为郑麦 1860,播量 180 kg·hm⁻²,行距 20 cm。镇压、灌水、病虫草害防控等其他管理措施均与当地农户一致。

1.3 样品采集与分析

1.3.1 植株样品采集与测定

在小麦成熟期,人工收割各小区3行植株样(约 3.6 m^2),脱粒、晒干,之后计算籽粒及秸秆产量。同时,选择长势均匀的小麦行,人工收取33 cm双行进行考种,调查单位面积穗数、穗粒数及千粒重。选取考种后的籽粒和秸秆,于 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 杀青30 min, $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重,粉碎并过 0.5 mm 筛。采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 法消煮样品,利用凯氏定氮法分析测定植株样品中氮含量,计算小麦籽粒、秸秆及植株吸氮量。

1.3.2 土壤样品采集与测定

在小麦收获期,采用“五点式”取样法,用直径3 cm土钻采集各小区 $0\sim 20$ 、 $20\sim 40$ 、 $40\sim 60$ 、 $60\sim 80$ 和 $80\sim 100\text{ cm}$ 土层样品。采集后的土样一部分过 2 mm 筛,用于测定无机氮($\text{N}_{\min}$,包括 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$)含量;另一部分用于测定容重及含水率。采用KCl溶液浸提-流动分析法,测定土样中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量,二者之和即为 $\text{N}_{\min}$ 含量。采用烘干法测定土壤容重与含水率。

土壤氮平衡分析指标包括植株吸氮量、氮素表观利用率、土壤 $\text{N}_{\min}$ 残留量、矿化氮量、氮素表观残留率、氮素表观损失量和氮素表观损失率,计算方法参考杨宪龙等^[28]的文献,具体如下:

植株吸氮量=籽粒干物质量 $\times$ 籽粒氮含量+秸秆干物质量 $\times$ 秸秆氮含量;

氮素表观利用率=[(施氮区植株吸氮量-不施氮区植株吸氮量)/施氮量] $\times 100\%$;

土壤 $\text{N}_{\min}$ 残留量=土层厚度 $\times$ 土壤容重 $\times$ 土壤 $\text{N}_{\min}$ 含量/10;

矿化氮量=对照区植株吸氮量+对照区收获后土壤 $\text{N}_{\min}$ 残留量-对照区播前土壤 $\text{N}_{\min}$ 残留量-灌溉和大气沉降带入氮量;

氮素表观损失量=氮素总输入-植株吸氮量-收获后土壤 $\text{N}_{\min}$ 残留量;

氮肥表观残留率=[(施氮区收获后土壤 $\text{N}_{\min}$ 残留量-对照区收获后土壤 $\text{N}_{\min}$ 残留量)/施氮量] $\times 100\%$;

氮肥表观损失率= 100% -氮肥表观利用率-氮肥表观残留率

1.4 数据处理与统计分析

通过Excel 2013进行处理数据,利用SPSS

21.0进行统计分析,采用单因素方差分析及Duncan进行多重比较($P<0.05$)。采用Origin-Pro 2017进行制图。

2 结果与分析

2.1 化学氮肥优化减施对小麦产量及其构成因素的影响

与CN处理相比,R1N和R2N处理在两年度均表现为减产趋势,其中2023—2024年度R2N处理产量显著下降 8.36% ;R2NM和R3NM处理在两年度均表现为增产趋势,且在2023—2024年度分别较CN处理显著提高 7.56% 和 6.74% (表1)。从产量构成因素看,与CN处理相比,2023—2024年度R2N处理单位面积穗数显著降低 19.8% ,而R2NM和R3NM处理分别显著增加 13.6% 和 14.9% 。相比之下,同一年度不同施氮处理(除NN外)间穗粒数和千粒重差异均未达到显著水平,说明单位面积穗数可能是导致产量差异的主要因素。

2.2 化学氮肥优化减施对氮素表观利用率的影响

在仅施用化学氮肥条件(CN、R1N、R2N处理)下,两年度氮素表观利用率均随施氮量降低而增加,但R1N、R2N与CN处理间差异均未达显著水平(表2)。与CN处理相比,R2NM和R3NM处理均显著提高了氮素表观利用率,2022—2023年度分别提高 8.8 和 7.0 个百分点,2023—2024年度分别提高 11.7 和 9.1 个百分点。从植株吸氮量看,与CN处理相比,2022—2023年度R2NM和R3NM处理籽粒吸氮量分别增加 10.1% 和 8.0% ,2023—2024年度分别增加 13.3% 和 10.8% 。这说明有机肥替代部分化学氮肥能够促进小麦对氮素的吸收和向籽粒的分配。R2NM和R3NM处理可能通过提高籽粒吸氮量,进而增加植株总吸氮量,并最终提升氮素表观利用率。

2.3 化学氮肥优化减施对土壤 $\text{N}_{\min}$ 残留量的影响

由图2可知,不同处理下 $0\sim 100\text{ cm}$ 土层土壤 $\text{N}_{\min}$ 残留量随土层加深总体递减,其中 $0\sim 40\text{ cm}$ 土层变化较为明显,而 $40\sim 100\text{ cm}$ 土层变化相对较小。在 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层中,与CN处理相比,不同年份R1N和R2N处理土壤 $\text{N}_{\min}$ 残留量均无显著变化;而R2NM和R3NM处理均显著增加,在2022—2023年度分别增加 21.0% 和 27.9% ,

表 1 不同处理对小麦产量与产量构成因素的影响

Table 1 Effects of different treatments on wheat yield and its components

年份 Year	处理 Treatment	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	单位面积穗数 Spike number/(Spikes·m ⁻²)	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1 000-grain weight/g
2022—2023	NN	6 041±165c	519±16d	35.8±4.2a	48.8±0.8b
	CN	9 038±227ab	1135±47bc	40.5±6.3a	52.2±2.2a
	R1N	8 831±294b	1064±42c	38.8±5.8a	53.0±1.8a
	R2N	8 496±301b	1059±58c	37.9±8.4a	53.2±1.3a
	R2NM	9 543±138a	1327±65a	42.2±9.7a	54.0±2.0a
	R3NM	9 414±219a	1225±41ab	39.6±7.5a	53.4±0.9a
2023—2024	NN	6 326±146d	550±34d	36.8±5.4a	49.0±0.5b
	CN	9 452±243b	1242±71b	39.9±7.7a	52.7±1.9a
	R1N	9 119±308bc	1124±86bc	41.6±6.9a	53.4±1.5a
	R2N	8 662±210c	996±60c	37.5±4.8a	53.8±0.9a
	R2NM	10 166±279a	1411±88a	40.1±6.5a	54.2±2.3a
	R3NM	10 089±224a	1427±63a	38.7±8.4a	53.6±1.6a

同一列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Different letters in the same column indicate significant differences between treatments($P<0.05$). The same in tables 2 and 3.

表 2 不同处理对氮素表观利用率的影响

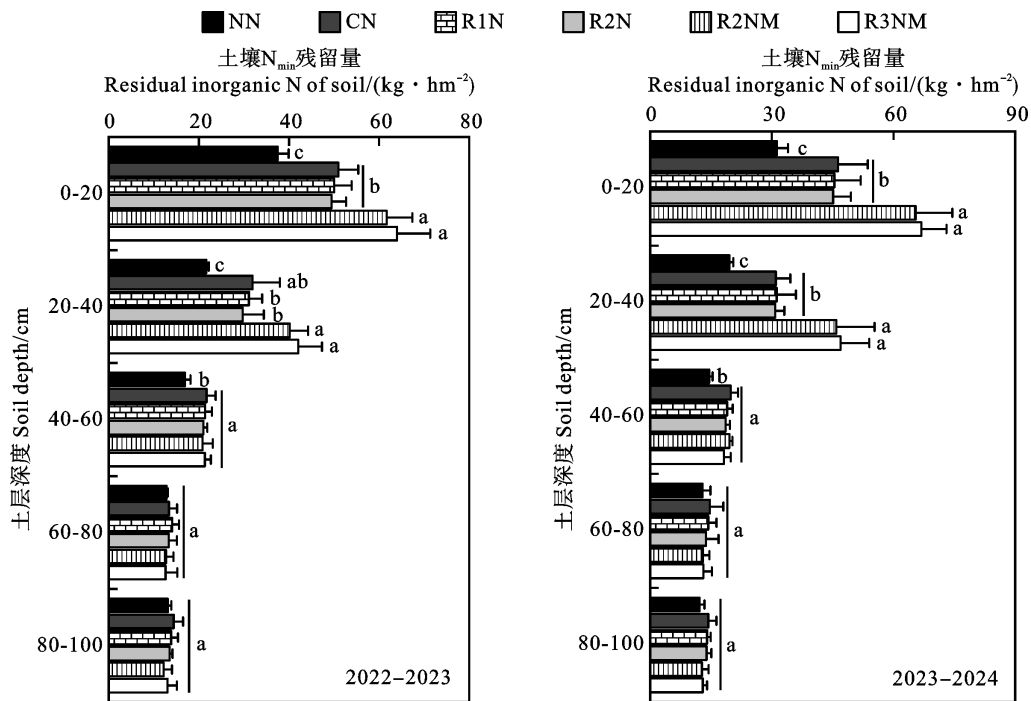
Table 2 Effects of different treatments on apparent nitrogen use efficiency

年份 Year	处理 Treatment	吸氮量 N uptake/(kg·hm ⁻²)			氮素表观利用率 Apparent N use efficiency/%
		籽粒 Grain	秸秆 Straw	植株 Plant	
2022—2023	NN	113.6±4.6c	32.3±0.9b	145.9±5.7c	/
	CN	172.1±5.1b	46.8±2.1a	218.9±7.4b	32.4±1.7c
	R1N	168.2±4.4b	46.0±1.8a	214.2±6.3b	33.7±3.2c
	R2N	163.4±6.9b	45.7±1.6a	209.0±9.9b	35.1±2.7bc
	R2NM	189.4±6.3a	49.3±2.4a	238.7±9.7a	41.2±3.8a
	R3NM	185.9±5.8a	48.6±2.0a	234.5±7.2a	39.4±2.4ab
2023—2024	NN	118.5±3.9c	33.4±1.1b	151.9±6.1c	/
	CN	181.3±5.7b	48.7±3.4a	230.0±7.5b	34.7±2.1b
	R1N	176.4±5.6b	47.9±2.0a	224.3±9.1b	35.8±1.5b
	R2N	171.1±6.2b	47.4±1.3a	218.5±8.7b	37.0±2.3b
	R2NM	205.5±7.0a	50.9±2.7a	256.4±8.4a	46.4±3.2a
	R3NM	200.8±5.4a	49.7±3.1a	250.5±7.8a	43.8±2.9a

2023—2024 年度分别增加 41.3%和 47.3%。在 20~40 cm 土层中,2022—2023 年度除 NN 处理外,其余施肥处理间差异均不显著;2023—2024 年度 R2NM 和 R3NM 处理土壤 N_{min} 残留量分别较 CN 处理显著增加 48.0%和 50.5%。在 40~100 cm 土层中,各施肥处理(除 NN 外)在 40~60、60~80 和 80~100 cm 土层的 N_{min} 残留量与 CN 处理均无显著差异。总体来看,化学氮肥减施对土壤 N_{min} 残留量影响较小,而有机肥替代部分化学氮肥显著提高了表层和浅层土壤 N_{min} 残留量,但未明显增加深层土壤 N_{min} 残留量。

2.4 化学氮肥优化减施对土壤氮平衡的影响

由表 3 可知,以 0~100 cm 土层为作物根系主要吸收区域,将基础土样起始 N_{min} 含量、两季平均肥料氮和两季平均矿化氮量作为氮输入项,将两季平均植株吸氮量、土壤 N_{min} 残留量和表观损失量作为氮输出项,对土壤氮平衡进行分析发现,仅施用化学氮肥处理对土壤氮平衡参数影响较小。CN、R1N 和 R2N 处理的氮素表观利用率、表观残留率和表观损失率分别为 33.6%~36.1%、14.7%~15.8%和 48.1%~51.7%,处理间差异均未达到显著水平。与 CN 处理相比,有机肥替



柱子上不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。
Different letters beside the columns indicate significant differences among treatments($P<0.05$).

图 2 不同处理对 0~100 cm 土层 N_{min} 残留量的影响
Fig. 2 Effects of different treatments on residual soil N_{min} in the 0–100 cm soil layers

表 3 不同处理对土壤氮平衡的影响

Table 3 Effects of different treatments on soil nitrogen balance

土壤氮收支 Soil nitrogen input and output	处理 Treatment					
	NN	CN	R1N	R2N	R2NM	R3NM
肥料氮含量 Fertilizer N content/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	0	225.0	202.5	180.0	225.0	225.0
起始 N_{min} 含量 Initial N_{min} content/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	133.6	132.7	134.9	130.0	131.4	132.2
矿化氮量 Mineralized N content/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	111.4	111.4	111.4	111.4	111.4	111.4
植株吸氮量 Plant uptake N content/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	148.9±5.8c	224.5±7.4b	219.3±7.8b	213.8±9.4b	247.6±9.1a	242.5±7.5a
土壤 N_{min} 残留量 Residual N_{min} of soil/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	96.1±9.4b	129.2±22.7a	127.1±15.0a	124.5±18.6a	142.0±20.5a	145.2±21.9a
氮素表观损失量 Apparent loss N content/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)		115.4±9.2a	102.4±7.4a	83.1±6.3a	68.2±7.6b	70.6±5.0b
氮素表观利用率 Apparent N use efficiency/%		33.6±1.8c	34.8±2.2c	36.1±2.6bc	43.8±3.5a	41.6±2.8ab
氮素表观残留率 Apparent N residual efficiency rate/%		14.7±4.2a	15.3±2.7a	15.8±3.1a	20.4±5.0a	21.8±4.9a
氮素表观损失率 Apparent N loss rate/%		51.7±8.7a	49.9±6.6a	48.1±7.2a	35.8±4.1b	36.6±3.4b

代部分化学氮肥处理显著改善了土壤氮平衡特征;R2NM 和 R3NM 处理的氮素表观利用率分别提高 10.2 和 8.0 个百分点,氮素表观损失率分别降低 15.9 和 15.1 个百分点,差异均达到显著水平;但其氮素表观残留率虽有所增加,均未达到显

著水平。从氮素收支构成看,R2NM 和 R3NM 处理显著提高了植株吸氮量,分别达到 247.6 和 242.5 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,同时氮素表观损失量分别降至 68.2 和 70.6 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,明显低于 CN 处理的 115.4 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,说明有机肥替代部分化学氮肥

能够促进氮素被作物吸收利用,并减少土壤-作物系统中的氮素损失。

3 讨论

产量及其构成因素是评价氮肥优化减施措施农学效应的核心指标。本研究表明,在河南南部砂姜黑土麦田条件下,化学氮肥减施 10% 对小麦产量和单位面积穗数均无显著影响,而减施 20% 则在第 2 季显著降低小麦产量和单位面积穗数,说明在该区域当前施肥基础上,短期内化学氮肥减施 10% 具有一定可行性,但减施 20% 可能已超出土壤-作物系统的适宜调控范围,从而对小麦稳产产生不利影响。这一结果与孙克刚等^[29]和贾可等^[30]在该区域的研究结果基本一致。与化学氮肥减施处理不同,有机肥替代 20% 或 30% 化学氮肥均表现出稳定增产效应,且在第 2 季增产达到显著水平,表明有机无机配施较单一化肥减施更有利于维持和提升砂姜黑土麦田小麦生产力。进一步分析产量构成因素发现,单位面积穗数是不同处理间产量差异形成的主要贡献因素。化学氮肥减施降低了单位面积穗数,而有机肥替代处理显著增加了单位面积穗数,这可能与有机肥改善土壤理化性质和根际生态环境有关,如促进土壤团聚体形成^[31]、增强土壤对养分和水分的固持能力^[32]以及提高土壤微生物丰富度和功能多样性^[33],从而为小麦分蘖发生与成穗提供了更有利的土壤环境。

土壤氮平衡是衡量农田氮素利用效率及其生态环境效应的重要指标。已有研究表明,在氮肥过量施用条件下,适度减施氮肥有助于提高氮素利用效率^[4]。但本研究发现,在常规施氮及减施 10%、20% 的化学氮肥处理中,氮素表观利用率虽随施氮量降低而呈上升趋势,但处理间差异均未达到显著水平。这可能与本研究中常规施氮水平已接近该区域砂姜黑土麦田的适宜施氮范围^[34]有关,进一步单纯减少化学氮肥投入,对提高氮素利用效率的促进作用有限。相比之下,有机肥替代 20% 或 30% 化学氮肥均显著提高了氮素表观利用率,且以替代 20% 处理效果更优,这与申长卫等^[27]的研究结果一致。其原因可能是有机肥施用改善了土壤结构和养分供应特征,增强了微生物活性和根系吸收能力,从而促进作物对土壤氮素的吸收利用。本研究还发现,有机肥替代 20% 或 30% 化学氮肥显著提高了 0~20 cm 土层

$N_{\min}$ 残留量,并在第 2 年显著增加了 20~40 cm 土层 $N_{\min}$ 残留量,同时 0~100 cm 土层氮素表观残留率呈增加趋势,这与刘亦丹等^[35]和 Guenet 等^[36]的研究结果相似,表明有机肥投入可能通过增强耕层土壤养分固持能力和促进土壤微生物介导的有机氮矿化过程,提高表层土壤无机氮积累。在 40~60、60~80 和 80~100 cm 土层中,各施氮处理间土壤 $N_{\min}$ 残留量均无显著差异,说明不同施氮措施对深层土壤无机氮累积影响较小,短期内未表现出明显的深层淋失风险。这可能与砂姜黑土质地黏重、孔隙结构紧密、通透性较差等特征有关^[37],其对硝态氮向深层迁移具有一定阻滞作用。从氮素损失角度看,与 CN 处理相比,有机肥替代 20% 和 30% 化学氮肥处理分别使氮素表观损失率降低 15.9 和 15.1 个百分点,且差异均达到显著水平,说明有机肥替代部分化学氮肥能够有效降低氮素损失风险,这与杨晓梅等^[38]的研究结论一致。其原因可能是有机肥不仅促进了土壤微生物对氮素的暂时固定,且其养分释放过程相对缓慢,从而降低了氮素损失。综合来看,在河南南部砂姜黑土麦田中,有机肥替代部分化学氮肥较单纯化学氮肥减施更有利于兼顾小麦增产、氮素高效利用和土壤氮平衡改善。

4 结论

在河南南部砂姜黑土区连续 2 季小麦大田试验条件下,与常规施氮($225 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$)相比,化学氮肥减施 10% 对小麦产量无显著影响,而减施 20% 在第 2 季显著降低小麦产量,有机肥替代 20% 或 30% 化学氮肥均能够提高小麦产量,其中单位面积穗数增加是其增产的主要贡献因素。仅施用化学氮肥条件下,各处理氮素表观利用率、表观残留率和表观损失率变化幅度较小;而有机肥替代 20% 或 30% 化学氮肥能够显著提高氮素表观利用率并降低氮素表观损失率,对氮素表观残留率无显著影响。总体而言,有机肥替代 20% 或 30% 化学氮肥在实现小麦稳产增产的同时,有利于提高砂姜黑土麦田氮素利用效率、降低氮素损失风险,并对维持和改善土壤氮平衡具有积极作用。

参考文献:

- [1] DOBERMANN A, CASSMAN K G. Plant nutrient management for enhanced productivity in intensive grain production systems of the United States and Asia [J]. *Plant and Soil*, 2002, 247(1): 153.

- [2] YAN X Y, XIA L L, TI C P. Temporal and spatial variations in nitrogen use efficiency of crop production in China [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 293: 118496.
- [3] 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.
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.
- [4] YANG X L, LU Y L, DING Y, *et al.* Optimising nitrogen fertilisation: A key to improving nitrogen-use efficiency and minimising nitrate leaching losses in an intensive wheat/maize rotation (2008–2014) [J]. *Field Crops Research*, 2017, 206: 1.
- [5] HUANG S H, HE P, JIA L L, *et al.* Improving nitrogen use efficiency and reducing environmental cost with long-term nutrient expert management in a summer maize-winter wheat rotation system [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 213: 105117.
- [6] 李银坤, 郝卫平, 龚道枝, 等. 减氮配施有机肥对夏玉米、冬小麦土壤硝态氮及氮肥利用的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(2): 348.
LI Y K, HAO W P, GONG D Z, *et al.* Effects of nitrogen reduction and combined application with organic fertilizer on soil nitrate nitrogen and nitrogen fertilizer utilization efficiency in summer maize and winter wheat systems [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(2): 348.
- [7] WANG X Q, NIE J W, WANG P X, *et al.* Does the replacement of chemical fertilizer nitrogen by manure benefit water use efficiency of winter wheat-summer maize systems [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 243: 106428.
- [8] REINHART K O, SANNI WOROGO H S, RINELLA M J, *et al.* Livestock increase soil organic carbon in the northern great Plains [J]. *Rangeland Ecology & Management*, 2021, 79: 22.
- [9] DE SOUZA MEDEIROS A, DOS SANTOS T C, MAIA S M F. Effect of long-term and soil depth on soil organic carbon stocks after conversion from native vegetation to conventional tillage systems in Brazil [J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 219: 105336.
- [10] CHOUDHARY M, PANDAY S C, MEENA V S, *et al.* Long-term effects of organic manure and inorganic fertilization on sustainability and chemical soil quality indicators of soybean-wheat cropping system in the Indian mid-Himalayas [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 257: 38.
- [11] 李永华, 武雪萍, 何 刚, 等. 我国麦田有机肥替代化学氮肥的产量及经济环境效应[J]. 中国农业科学, 2020, 53(23): 4879.
LI Y H, WU X P, HE G, *et al.* Benefits of yield, environment and economy from substituting fertilizer by manure for wheat production of China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(23): 4879.
- [12] DUAN Y H, XU M G, GAO S D, *et al.* Nitrogen use efficiency in a wheat-corn cropping system from 15 years of manure and fertilizer applications [J]. *Field Crops Research*, 2014, 157: 47.
- [13] 蔡媛媛, 王瑞琪, 王丽丽, 等. 华北平原不同施氮量与施肥模式对作物产量与氮肥利用率的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 503.
CAI Y Y, WANG R Q, WANG L L, *et al.* Effects of nitrogen amount and fertilization patterns on crop yield and nitrogen use efficiency on the North China Plain [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(4): 503.
- [14] 张奇茹, 谢英荷, 李廷亮, 等. 有机肥替代化肥对旱地小麦产量和养分利用效率的影响及其经济环境效应[J]. 中国农业科学, 2020, 53(23): 4866.
ZHANG Q R, XIE Y H, LI T L, *et al.* Effects of organic fertilizers replacing chemical fertilizers on yield, nutrient use efficiency, economic and environmental benefits of dryland wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(23): 4866.
- [15] OZLU E, KUMAR S. Response of surface GHG fluxes to long-term manure and inorganic fertilizer application in corn and soybean rotation [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 817.
- [16] STEHFEST E, BOUWMAN L. N₂O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: Summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 74(3): 207.
- [17] ZHAI L M, LIU H B, ZHANG J Z, *et al.* Long-term application of organic manure and mineral fertilizer on N₂O and CO₂ emissions in a red soil from cultivated maize-wheat rotation in China [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10(11): 1748.
- [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, 37(2): 121.
FAN J (W /Y), BAI J H, REN H Y, *et al.* Effects of reducing nitrogen and biochar application on CO₂ and N₂O emissions from summer maize-winter wheat field in North China [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2016, 37(2): 121.
- [19] WANG Y Y, HU C S, MING H, *et al.* Concentration profiles of CH₄, CO₂ and N₂O in soils of a wheat-maize rotation ecosystem in North China Plain, measured weekly over a whole year [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 164: 260.
- [20] LÜ F L, SONG J S, GILTRAP D, *et al.* Crop yield and N₂O emission affected by long-term organic manure substitution fertilizer under winter wheat-summer maize cropping system [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 732: 139321.
- [21] ZHOU M H, ZHU B, BRÜGGEMANN N, *et al.* N₂O and CH₄ emissions, and NO₃⁻ leaching on a crop-yield basis from a subtropical rain-fed wheat-maize rotation in response to different types of nitrogen fertilizer [J]. *Ecosystems*, 2014, 17(2): 286.
- [22] 李成玉, 程思贤, 马海彬, 等. 豫南砂姜黑土水浇地不同产田土壤理化性状及其与作物产量的相关性[J]. 河南农业科学,

- 2023,52(4):74.
- LI C Y, CHENG S X, MA H B, *et al.* Soil physicochemical properties of different yield fields with irrigated lime concretion black soil and correlation between them and crop yield in south Henan [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2023,52(4):74.
- [23] 吕金岭, 高燕哺, 李太魁, 等. 施氮量对砂姜黑土小麦-玉米轮作体系 N_2O 排放的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021,29(11):1846.
- LYU J L, GAO Y B, LI T K, *et al.* Effect of nitrogen fertilizer amount on N_2O emission from wheat-maize rotation system in lime concretion black soil [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021,29(11):1846.
- [24] 王道中, 花可可, 郭志彬. 长期施肥对砂姜黑土作物产量及土壤物理性质的影响[J]. 中国农业科学, 2015,48(23):4781.
- WANG D Z, HUA K K, GUO Z B. Effects of long-term fertilization on crop yield and soil physical properties in lime concretion black soil [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015,48(23):4781.
- [25] 曹承富, 孔令聪, 张存岭, 等. 施肥对砂姜黑土基础肥力及强筋小麦产量、品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008,16(5):1073.
- CAO C F, KONG L C, ZHANG C L, *et al.* Effect of fertilization on soil fertility, wheat yield and quality in Shajiang black soil [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008,16(5):1073.
- [26] 李 玮, 乔玉强, 杜世州, 等. 秸秆还田配施氮肥对冬小麦氮素吸收特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2014,34(10):1420.
- LI W, QIAO Y Q, DU S Z, *et al.* Effects of combined maize straw turnover and N application on nitrogen absorption characteristic and yield of winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014,34(10):1420.
- [27] 申长卫, 袁敬平, 李新华, 等. 有机肥氮替代 20% 化肥氮提高豫北冬小麦氮肥利用率和土壤肥力[J]. 植物营养与肥料学报, 2020,26(8):1395.
- SHEN C W, YUAN J P, LI X H, *et al.* Improving winter wheat N utilization efficiency and soil fertility through replacement of chemical N by 20% organic manure [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2020,26(8):1395.
- [28] 杨宪龙, 路永莉, 同延安, 等. 长期施氮和秸秆还田对小麦-玉米轮作体系土壤氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013,19(1):65.
- YANG X L, LU Y L, TONG Y A, *et al.* Effects of long-term N application and straw returning on N budget under wheat-maize rotation system [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013,19(1):65.
- [29] 孙克刚, 杨焕焕, 张 琨, 等. 冬小麦、夏玉米高效施肥技术研究[J]. 河南农业科学, 2017,46(10):38.
- SUN K G, YANG H H, ZHANG K, *et al.* Study on high efficient fertilization technology of winter wheat and summer maize [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2017,46(10):38.
- [30] 贾 可, 刘建玲, 沈 兵. 近 14 年北方冬小麦肥料产量效应变化及优化施肥方案[J]. 植物营养与肥料学报, 2020,26(11):2032.
- JIA K, LIU J L, SHEN B. Yield effect change of fertilizers in the past 14 years and optimized fertilization of winter wheat in north of China [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2020,26(11):2032.
- [31] WU Y J, DONG M H, WANG Y, *et al.* The mechanisms of microbial and soil carbon pool responses to soil aggregates improvement by different organic fertilizers [J]. *Journal of Environmental Management*, 2025,395:127814.
- [32] RABBI T H, JARIN J M, PREETOM M R, *et al.* Organic fertilizers as a vector of microplastics: A comprehensive review of sources, dispersion, and environmental consequences [J]. *Journal of Hazardous Materials: Plastics*, 2026,2:100022.
- [33] ZHANG S M, WEI J Y, ZHANG J L, *et al.* Combined applications of organic bran fertilizer, biochar and microbial inoculants control tobacco soil-borne diseases by recruiting beneficial rhizosphere microbes and enhancing soil quality [J]. *Biological Control*, 2026,212:105948.
- [34] 刘高远, 和爱玲, 杜 君, 等. 有机肥替代化肥对砂姜黑土区小麦-玉米轮作系统 N_2O 排放的影响[J]. 中国农业科学, 2023,56(16):3156.
- LIU G Y, HE A L, DU J, *et al.* Effect of organic fertilizer replacing chemical fertilizer on nitrous oxide emission from wheat-maize rotation system in lime concretion black soil [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023,56(16):3156.
- [35] 刘亦丹, 迟凤琴, 谷思玉, 等. 有机肥替代部分化学氮肥对春小麦产量与氮肥利用率的影响[J]. 土壤通报, 2020,51(2):442.
- LIU Y D, CHI F Q, GU S Y, *et al.* Effects of organic fertilizer substituted by mineral nitrogen fertilizer on yield of spring wheat and nitrogen fertilizer utilization efficiency [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020,51(2):442.
- [36] GUENET B, NEILL C, BARDOUX G, *et al.* Is there a linear relationship between priming effect intensity and the amount of organic matter input [J]. *Applied Soil Ecology*, 2010,46(3):436.
- [37] 查理思, 吴克宁, 李 玲, 等. 河南省砂姜黑土土属的耕作障碍因素研究[J]. 土壤通报, 2015,46(2):280.
- ZHA L S, WU K N, LI L, *et al.* The cultivation obstacle factors of lime concretion black soil genuses in Henan [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015,46(2):280.
- [38] 杨晓梅, 李桂花, 李贵春, 等. 有机无机配施比例对华北褐土冬小麦产量与氮肥利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2014(4):48.
- YANG X M, LI G H, LI G C, *et al.* Effects of combined application of chemical fertilizer with manure on yield and nitrogen use efficiency of winter wheat in cinnamon soil on North China plain [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2014(4):48.