

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2026.51059

氮肥减量与追施方式对小麦产量和氮肥利用效率及麦田 N_2O 排放的影响

石 吕¹ 石晓旭¹ 韩 笑¹ 单海勇¹ 刘旭杰¹ 张 晋¹ 严旖旎¹
李 赢¹ 刘海翠¹ 魏亚凤¹ 杨美英¹ 薛亚光^{1,*} 刘 建¹ 张祖建^{2,*}

¹ 江苏沿江地区农业科学研究所 / 南通市循环农业重点实验室, 江苏南通 226012; ² 扬州大学农学院 / 江苏省作物遗传生理重点实验室 / 江苏省作物栽培生理重点实验室 / 江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心, 江苏扬州 225009

摘 要: 为探究稻茬小麦深施肥“一基一追”机艺融合技术的增产增效减排机制, 2021—2024 年在长江下游南通稻茬麦区开展大田试验。试验采用缓释掺混肥料(SRF, $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=26:12:12$)和普通尿素(U, 46%N), 结合自主研发的 2BFGK-12(6)260 全秸秆茬地洁区旋耕智能施肥播种机和 3ZF-4(200)中耕追肥机, 设置 7 种施肥模式(30 cm+15 cm 宽窄行种植): 以尿素 4 次分施($\text{N } 240 \text{ kg hm}^{-2}$, 基肥: 分蘖肥: 拔节肥: 孕穗肥=5:1:2:2, 窄行基施, 追肥全田撒施)为对照(CK); 减氮 15% ($\text{N } 204 \text{ kg hm}^{-2}$)条件下设置 6 种处理: M_1 (100%SRF 窄行基施); M_2 (60% SRF 窄行基施+40% U 拔节期窄行撒施); M_3 (60% SRF 窄行基施+40%U 返青期宽行条施); M_4 (60% SRF 窄行基施+40% SRF 返青期窄行撒施); M_5 (60% SRF 窄行基施+40% SRF 返青期宽行条施); M_{4+5} (60% SRF 窄行基施+20% SRF 返青期宽行条施+20% SRF 返青期窄行撒施)。研究比较不同施肥模式对小麦产量效益、根系形态生理、氮素利用效率及 N_2O 排放的影响。结果表明, 与 CK 相比, $\text{M}_2\sim\text{M}_5$ 处理提高了小麦产量(4.0%~19.0%)和经济效益(13.7%~35.7%), 其中 M_4 和 M_5 处理表现最优, 分别增产 14.1%和 19.0%, 经济效益提升 34.5%和 35.7%。这些处理明显改善根系特性(根干重密度增加 9.7%~111.8%, 根系活力和氧化力分别提高 6.8%~52.0%和 4.2%~44.2%), 降低 N_2O 累积排放量 22.6%~34.5%, 提高 0~20 cm 土层硝态氮含量 11.2%~40.0%。在氮素利用方面, $\text{M}_2\sim\text{M}_5$ 处理均提高了籽粒氮素积累量、花后氮素积累量及其对籽粒氮素的贡献率, 氮肥利用效率指标(包括偏生产力、农学效率和表观利用率)分别显著提升了 22.4%~40.0%、29.7%~74.3%和 9.41~18.77 个百分点。值得注意的是, M_4 和 M_5 处理表现出最优的综合效益: N_2O 累积排放量降幅最大(分别达 27.0%和 34.5%), 氮肥表观利用率 2 季均维持在 43.0%以上(均值分别为 43.5%和 46.8%), 同时在生育后期保持较高的根系活性和耕层无机氮含量。相比之下, M_1 处理虽然实现了最大的 N_2O 减排效果(降幅 35.9%), 但导致减产 10.4%和经济效益下降 10.8%, 且氮肥利用效率呈现不稳定的年际变化特征。而优化处理 M_{4+5} 进一步改善了根系形态生理特性, 并提高氮肥表观利用率和籽粒氮素积累量。综上, 减氮 15%条件下($\text{N } 204 \text{ kg hm}^{-2}$), 缓混肥 2 次施用处理(M_4 和 M_5)能实现产量、经济效益、氮肥利用效率和 N_2O 减排的协同提高, 并以追肥深施处理(M_5)效应更强。本研究为稻茬小麦缓混肥减氮优化高效应用提供重要理论依据。

关键词: 条带耕作; 氮肥减量; 追肥方式; 产量; 氮肥利用; N_2O 排放

本研究由南通市社会民生项目(MSZ2023068), 江苏省“碳达峰碳中和科技创新专项资金”项目(BE2022425)和江苏省科技项目(BE2020388)资助。

This study was supported by the Nantong City Social Livelihood Project (MSZ2023068), the Special Funds for Scientific and Technological Innovation of Jiangsu Province, China (BE2022425), and the Jiangsu Provincial Science and Technology Project (BE2020388).

* 通信作者(Corresponding authors): 薛亚光, E-mail: 171240816@qq.com; 张祖建, E-mail: zzj@yzu.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: 840241001@qq.com

Received (收稿日期): 2025-06-13; Accepted (接受日期): 2025-09-10; Published online (网络出版日期): 2025-09-24.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20250924.1444.012>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Effects of nitrogen fertilizer reduction and topdressing methods on wheat yield, nitrogen use efficiency, and N₂O emissions in wheat fields

Shi Lyu¹, Shi Xiao-Xu¹, Han Xiao¹, Shan Hai-Yong¹, Liu Xu-Jie¹, Zhang Jin¹, Yan Yi-Ni¹, Li Ying¹, Liu Hai-Cui¹, Wei Ya-Feng¹, Yang Mei-Ying¹, Xue Ya-Guang^{1,*}, Liu Jian¹, and Zhang Zu-Jian^{2,*}

¹ Jiangsu Yanjiang Institute of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Recycling Agriculture of Nantong City, Nantong 226012, Jiangsu, China;

² College of Agriculture, Yangzhou University / Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology / Jiangsu Key Laboratory of Crop Cultivation and Physiology / Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou 225009, Jiangsu, China

Abstract: To elucidate the mechanisms underlying yield enhancement, efficiency improvement, and emission mitigation in rice-stubble wheat under the integrated “one basal plus one topdressing” mechanized deep fertilization strategy, a field experiment was conducted from 2021 to 2024 within a rice–wheat rotation system in Nantong, located in the lower Yangtze River Basin. The study employed a slow-release blended fertilizer (SRF, N : P₂O₅ : K₂O = 26 : 12 : 12) and conventional urea (U, 46% N), utilizing two self-developed machines: the 2BFGK-12(6)260 full-straw-stubble field clean-zone rotary-till intelligent fertilizer applicator and seeder, and the 3ZF-4(200) cultivator-topdresser. Seven fertilization regimes were established under a 30 cm + 15 cm wide–narrow row planting system. The control (CK) received four split applications of urea (N 240 kg hm⁻²; basal : tillering : jointing : booting = 5 : 1 : 2 : 2, with basal application in narrow rows and topdressing broadcast across the field). Six reduced-N treatments (N 204 kg hm⁻², a 15% reduction) were applied: M₁ (100% SRF, narrow-row basal); M₂ (60% SRF, narrow-row basal + 40% U, narrow-row broadcast at jointing); M₃ (60% SRF, narrow-row basal + 40% U, wide-row banding at regreening); M₄ (60% SRF, narrow-row basal + 40% SRF, narrow-row broadcast at regreening); M₅ (60% SRF, narrow-row basal + 40% SRF, wide-row banding at regreening); and M₄₊₅ (60% SRF, narrow-row basal + 20% SRF, wide-row banding + 20% SRF, narrow-row broadcast at regreening). The effects of these fertilization regimes on wheat yield performance, economic benefit, root morphological and physiological traits, nitrogen use efficiency (NUE), and N₂O emissions were systematically evaluated. Compared with CK, treatments M₂–M₅ increased wheat yield by 4.0%–19.0% and economic returns by 13.7%–35.7%, with M₄ and M₅ showing optimal performance (yield increases of 14.1% and 19.0%; economic gains of 34.5% and 35.7%, respectively). These treatments significantly improved root traits, with root weight density increasing by 9.7%–111.8% and enhancements in root activity and oxidation capacity of 6.8%–52.0% and 4.2%–44.2%, respectively. Cumulative N₂O emissions were reduced by 22.6%–34.5%, and soil NO₃⁻-N content in the 0–20 cm layer increased by 11.2%–40.0%. In terms of nitrogen utilization, M₂–M₅ treatments promoted grain N accumulation, post-anthesis N uptake, and its contribution to grain N content. Indicators of nitrogen use efficiency—including partial factor productivity, agronomic efficiency, and apparent recovery efficiency—increased significantly by 22.4%–40.0%, 29.7%–74.3%, and 9.41–18.77 percentage points, respectively. Notably, M₄ and M₅ achieved the most comprehensive benefits, with the greatest reductions in cumulative N₂O emissions (27.0% and 34.5%) and consistently high apparent N recovery efficiency across two growing seasons (mean values of 43.5% and 46.8%), along with sustained root activity and topsoil inorganic N content during late growth stages. In contrast, M₁ achieved the highest N₂O mitigation (35.9%) but resulted in a 10.4% yield loss and 10.8% reduction in economic benefit, with unstable interannual variation in NUE. The optimized M₄₊₅ treatment further enhanced root morphological and physiological traits while improving apparent N recovery efficiency and grain N accumulation. In summary, under a 15% nitrogen reduction (N 204 kg hm⁻²), split-application treatments using slow-release blended fertilizer (M₄ and M₅) achieved synergistic improvements in yield, economic return, nitrogen use efficiency, and N₂O emission reduction, with the deep banding topdressing strategy (M₅) delivering the most pronounced benefits. These findings provide strong theoretical support for the optimized and efficient use of slow-release fertilizers in nitrogen-reduced rice–wheat rotation systems.

Keywords: strip tillage; nitrogen reduction; topdressing method; yield; nitrogen utilization; N₂O emission

小麦作为我国主要粮食作物, 其高产长期依赖尿素等传统氮肥^[1-2], 但短期内土壤氮素激增也加剧了反硝化、氨挥发及淋溶等损失风险^[3-4]。研究表明, 频繁施肥易造成氮肥过量^[5], 而单纯减氮虽可降低损失, 却易导致减产^[6]。为此, 我国先后出台《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》、《到 2025 年化肥减量化行动方案》和《2030 年前碳达峰行动方案》, 推动化肥减量增效。其中, “农业农村减排固碳十大技术模式”强调通过优化施肥方式等降低

N₂O 排放, 而《关于加快农业发展全面绿色转型促进乡村生态振兴的指导意见》进一步提出, 到 2030 年三大粮食作物化肥利用率要达到 43%以上。因此, 集成创新施肥技术、产品和装备, 调整施肥策略, 对实现小麦绿色高产高效发展至关重要。

缓/控释氮肥作为一种新型长效肥料, 在省工降本、提高作物产量和氮素利用效率方面表现出显著优势^[1,7-8], 同时可有效缓解土壤无机氮短时过量积累和流失问题^[9]。然而, 其养分释放特性与小麦

需氮规律的匹配性仍需优化^[7],且生产成本较高制约了推广应用^[8]。研究表明,传统施肥方式如尿素分施与缓释肥一次施用,难以在不同环境下实现小麦稳产高产与氮素高效利用的统一^[10]。基于小麦“一基一追”施肥原则^[9],已有研究探索了多种缓/控释氮肥施用模式,主要包括常规/缓混肥基追组合^[11-13]、缓/控释氮肥分次施用^[1,7,10]、控释与普通尿素配施^[8,14]等,这些模式通过调控氮素释放动态,实现了与小麦需氮规律的同步,在增产增效的同时降低了氮素损失(淋溶和 N_2O 排放),并促进了土壤氮循环微生物群落的发展。进一步研究发现,缓混肥分 2 次施用可在减氮 15% ($\text{N } 229.5 \text{ kg hm}^{-2}$) 条件下维持稳产并提高氮效率^[12-13]。控释与普通尿素配施减氮 20% ($\text{N } 180 \text{ kg hm}^{-2}$) 分 2 次施用可显著提升氮肥回收效率而不影响产量和收益^[8]。值得注意的是,以上研究多采用追肥撒施方式。有研究发现,返青期行间中耕(5~6 cm)可促进小麦根系纵深发育,增加后期次生根数量^[15],提高分蘖成穗率和花后光合效率,进而改善穗部性状,是干旱区小麦高产的有效措施^[16-17]。

针对小麦追肥深施农艺与农机紧密结合不足的实践短板,冯慧敏等^[18]研究表明,基于(10+20) cm 宽窄行配置,返青期采用对行深施追肥机在宽行中深施(10 cm)追肥,较等行距表层撒施可减少氮肥用量 25 kg hm^{-2} ,同时增产 486.5 kg hm^{-2} 。孙晓然等^[19]进一步发现,拔节期 10 cm 深施能有效延缓旗叶衰老,获得最佳增产效果。综合来看,“缓释氮肥+中耕断根+肥料深施”的协同施肥模式对实现高产高效、减少环境污染以及节约农业劳动力的小麦轻简化可持续生产具有一定的可行性。针对传统氮肥多次追施导致的高人力投入和低效益问题,结合小麦追肥深施装备缺乏的现状,本研究基于自主研发的宽窄行耕播机及配套中耕追肥机具,采用缓混肥替代常规氮肥,开展稻茬小麦“一基一追”氮肥减量深施技术研究,以探索氮肥高效利用与温室气体减排的协同机制。在江苏沿江稻茬麦区开展为期 3 年的田间试验,以常规追肥撒施尿素为对照,系统比较了缓混肥基施(苗带条施)与返青期/拔节期追施缓混肥或尿素(苗带撒施或空幅条施)对小麦产量效益、 N_2O 排放、根系特征、氮素积累转运、氮肥利用效率及土壤无机氮含量的影响,旨在为稻茬小麦绿色高效生产提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2021 年 11 月至 2024 年 6 月小麦生长季,在江苏沿江地区农业科学研究所薛窑基地($32^{\circ}07'\text{N}$ 、 $120^{\circ}37'\text{E}$)进行。试验点属北亚热带湿润性气候区,季风影响明显、四季分明、气候温和、光照充足、雨水充沛且无霜期长。年平均气温在 15°C 左右,年平均日照时数达 2000~2200 h,年平均降水量 1000~1100 mm,且雨热同季,夏季雨量约占全年雨量的 40%~50%。常年雨日平均 120 d 左右,6 月至 7 月常有一段梅雨。3 年试验开始时试验点耕层(0~20 cm)土壤基本理化性质见表 1,小麦生育期内的气温和降水情况见图 1。

1.2 供试材料

3 年小麦供试品种均为“扬麦 29”。供试缓释肥为缓释掺混肥料(slow release fertilizer, SRF, $\text{N} : \text{P}_2\text{O}_5 : \text{K}_2\text{O} = 26 : 12 : 12$),控释氮 $\geq 13\%$,缓释期 90~120 d,由汉枫农业科技(泰州)有限公司提供;常规肥料包含普通尿素(urea, U, 46% N)、过磷酸钙($12\% \text{P}_2\text{O}_5$)、氯化钾($60\% \text{K}_2\text{O}$),均于当地市场购买。

1.3 试验设计

试验一:2021—2023 年,试验采用单因素随机区组设计,共设 7 个氮肥处理(表 2),每个处理重复 3 次,每小区面积 40 m^2 ($5 \text{ m} \times 8 \text{ m}$)。前茬水稻秸秆截断(8~12 cm)全量还田,还田量为 $1.0 \times 10^4 \text{ kg hm}^{-2}$ 。采用团队自主研发 2BFGK-12(6)260 全秸秆茬地洁区旋耕智能施肥播种机(Q/320585 XSN 06-2020),一次性完成洁茬、旋耕、施肥、播种、镇压和开沟 6 道工序,实现 30 cm+15 cm 宽窄行种植,窄行(苗带)洁茬条播 2 行小麦,宽行(空幅带)留茬免耕,窄行稻秸和根茬覆盖于宽行(图 2)^[20]。所有处理基肥于播种时在窄行中位 8~10 cm 处条施(图 2)。CK 追肥为人工全田撒施, M_2 、 M_4 追肥为人工窄行撒施, M_3 、 M_5 追肥采用 3ZF-4(200)中耕追肥机(Q/320585 XSN 10-2021)在宽行中位 8~10 cm 处条施(图 2)。CK 处理纯氮用量为 240 kg hm^{-2} , M_1 ~ M_5 处理纯氮用量均为 204 kg hm^{-2} (在 CK 处理基础上减氮 15%)。所有处理磷钾肥用量均为 94.15 kg hm^{-2} ,除缓释掺混肥中所含磷、钾外,不足部分采用过磷酸钙和氯化钾全部基施补至同一水平。分蘖肥于 4 叶期施用,返青肥于 2 月下旬施用,拔节肥于倒三叶期(叶龄余数 2.5)施用,孕穗肥于倒一叶期(叶龄余数 1.2~0.8)

表 1 3 个生长季试验开始时土壤特性
Table 1 Soil characteristics at the beginning of the three growing season experiments

生长季 Growing season	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline nitrogen (mg kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium (mg kg ⁻¹)	pH
2021–2022	22.62	1.11	114.84	34.99	86.67	7.62
2022–2023	24.45	1.16	128.81	57.94	91.67	7.86
2023–2024	24.51	1.20	123.50	45.52	101.71	7.76

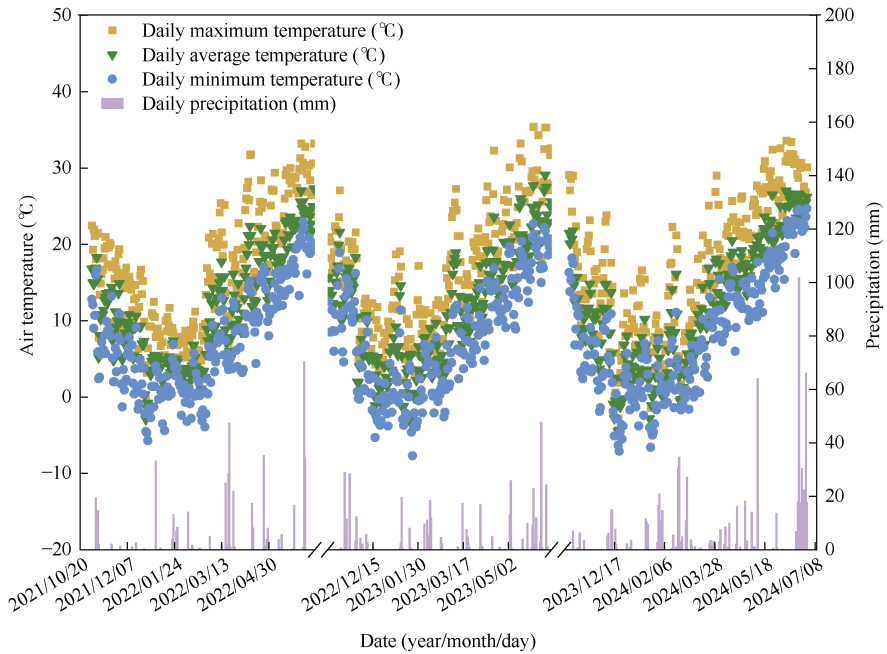


图 1 2021–2024 年小麦生长季日均、日最高、日最低气温和日降雨量
Fig. 1 Daily average, maximum and minimum air temperature, and daily precipitation during the wheat growing seasons from 2021 to 2024

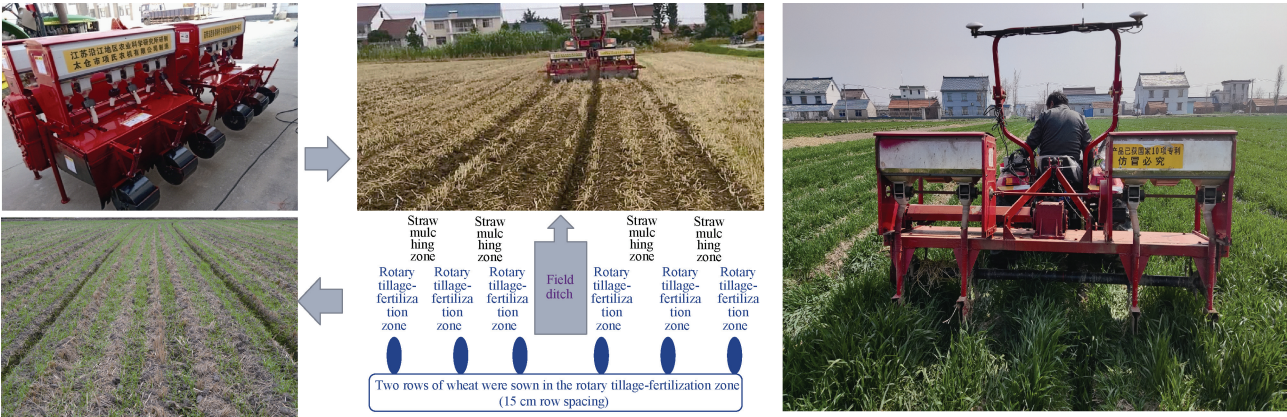


图 2 2BFGK-12(6)260 全秸秆茬地洁区旋耕智能施肥播种机(左)和 3ZF-4(200)中耕追肥机(右)
Fig. 2 2BFGK-12(6)260 full-straw-stubble field clean-zone rotary-till intelligent fertilizer applicator and seeder (left) and 3ZF-4(200) cultivator-topdresser (right)

施用。2 季试验分别于 2021 年 11 月 12 日和 2022 年 11 月 12 日播种, 播种量均为 202.5 kg hm⁻², 收获日期分别为 2022 年 6 月 3 日和 2023 年 6 月 4 日。其他管理同当地大田栽培。

试验二: 2023—2024 年, 试验采用单因素随机

区组设计, 在前 2 年试验筛选出的相对高产增效减排处理(M₄、M₅)的基础上, 增加优化处理 M₄₊₅, 具体运筹方式见表 2。试验于 2023 年 11 月 13 日播种, 播种量为 210.0 kg hm⁻², 收获日期为 2024 年 6 月 3 日。其他操作及管理同试验一和当地大田栽培。

表 2 氮肥运筹和施用方案
Table 2 Nitrogen fertilizer management and application scheme

年份 Year	模式 Pattern	施肥方式 Fertilization methods	施氮量 Nitrogen application rate (kg hm ⁻²)	追肥方式 Topdressing way	施氮量 Nitrogen application rate (kg hm ⁻²)				
					播种期 Seeding stage	分蘖期 Tillering stage	返青期 Regreening stage	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage
2021– 2023	0N	—	0	—	—	—	—	—	—
	CK	100% U	240	全田撒施 Whole field spreading	120.0 U	24.0 U	—	48.0 U	48.0 U
	M ₁	100% SRF	204	—	204.0 SRF	—	—	—	—
	M ₂	60% SRF+40% U	204	窄行撒施 Narrow row spreading	122.4 SRF	—	—	81.6 U	—
	M ₃	60% SRF+40% U	204	宽行条施 Wide row striping	122.4 SRF	—	81.6 U	—	—
	M ₄	60% SRF+40% SRF	204	窄行撒施 Narrow row spreading	122.4 SRF	—	81.6 SRF	—	—
	M ₅	60% SRF+40% SRF	204	宽行条施 Wide row striping	122.4 SRF	—	81.6 SRF	—	—
2023– 2024	0N	—	0	—	—	—	—	—	—
	M ₄	60% SRF+40% SRF	204	窄行撒施 Narrow row spreading	122.4 SRF	—	81.6 SRF	—	—
	M ₅	60% SRF+40% SRF	204	宽行条施 Wide row striping	122.4 SRF	—	81.6 SRF	—	—
	M ₄₊₅	60% SRF+40% SRF	204	1/2 窄行撒施, 1/2 宽行条施 Spreading half in narrow row, striping half in wide row	122.4 SRF	—	81.6 SRF	—	—

SRF: 缓释掺混肥料; U: 尿素。SRF: slow-release fertilizer; U: urea.

1.4 样品采集与指标分析

1.4.1 N₂O 采集与测定 采用静态箱-气相色谱法测定 N₂O 排放。采样箱(购自中国水稻研究所)由 PVC 材料制成, 箱体高度随作物增长而增加(拔节前 0.5 m、拔节后 1.0 m), 箱身包有海绵和铝箔纸, 用于隔热、减少传导与反射光。箱内顶部装有 12V 小风扇以充分混匀气体, 样品采集时在底座凹槽内加水密封。采样时间为上午 08:00—10:00, 使用取气仪(购自中国水稻研究所)和 0.1 L 单阀铝箔采样袋(购自上海会彬仪器有限公司)在静态箱放置后的第 0、10、20、30 分钟自动进行样品采集, 并记录对应时刻箱内温度。采气袋带回实验室通过气相色谱仪(Agilent 7890A GC, 美国)测定样品 N₂O 浓度。样品采集频率不等, 施肥后每隔 2 d 采集 1 次, 直至气体排放稳定, 之后每隔 10 d 采样 1 次, 降雨后适当加测。

N₂O 排放通量(flux, F)和 N₂O 累积排放量(cumulative emission, CE), 计算公式为^[21]:

$$F = \rho \times h \times (dc/dt) \times [273 / (273 + T)]$$

(1)

式中, F 为 N₂O 排放通量($\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$), ρ 为标准状态下气体密度(kg m^{-3}), h 为采集箱净高度(m), dc/dt 为单位时间内采样箱内气体的浓度变化率($\mu\text{L m}^{-3} \text{h}^{-1}$), 273 为标准状态下的气温(K), T 为采样箱内平均温度($^{\circ}\text{C}$)。

$$CE = \sum_{i=1}^n \frac{F_{i+1} + F_i}{2} \times (d_{i+1} - d_i) \times 24 \times 0.01$$

(2)

式中, CE 为 N₂O 累积排放量(kg hm^{-2}), F 为 N₂O 排放通量($\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$), i 为采样次数, $d_{i+1}-d_i$ 为相邻 2 次采样间隔天数(d)。

单位产量的 N₂O 排放强度^[22] (yield-scaled N₂O emission intensity, I)和 N₂O 排放系数^[23] (emission factor, EF), 计算公式为:

$$I = F / Y$$

(3)

$$EF = (CE_N - CE_0) / N \times 100$$

(4)

式中, I 为单位产量 N₂O 排放强度(kg t^{-1}), F 为 N₂O 排放总量(kg hm^{-2}), Y 表示小麦产量(t hm^{-2}), EF 为 N₂O 排放系数(%), CE_N 及 CE_0 分别为施肥及不施肥处理下 N₂O 累积排放量(kg hm^{-2}), N 为施氮量

(kg hm⁻²)。

1.4.2 根系形态、生理特征测定 分别于小麦孕穗期(4月6日)、开花期(4月15日)和灌浆期(5月8日)。选取3个小麦植株长势均匀样点,使用钻头直径为10 cm、长100 cm的根钻采集0~20 cm土层根样。每个样点取5钻,钻的中心分别在种植行上(图3中位点1)、行间距1/2处(图3中位点4、5)和行边缘(钻与种植行相切,图3中位点2、3),5钻混合作为一个样品。样品于70目网袋中充分浸泡0.5 h后,先用流水缓慢冲洗,然后用农用压缩喷雾器冲洗干净,并用镊子去除杂质和杂根,再将根系在80℃下烘至恒重,称取根系生物量。由式(5)计算根干重密度(root weight density, RWD)。

$$RWD = M/V \quad (5)$$

式中, RWD 为根干重密度(g cm⁻³), M 为根系干重(g), V 为取样土层体积(cm³), 土体体积由式(6)确定:

$$V = \pi r^2 h \quad (6)$$

式中, r 为钻头半径($r = 3.25$ cm), h 为取样深度($h = 20$ cm)。

此外,参照根系形态分析取样法采集孕穗期、开花期和灌浆期0~20 cm土层根样,清洗干净后,从各处理取根尖部位样品,采用氯化三苯基四氮唑(2,3,5-triphenyltetrazolium chloride, TTC)还原法和 α -萘胺氧化法分别测定根系活力(root activity)和根系氧化力(root oxidation activity)^[24]。

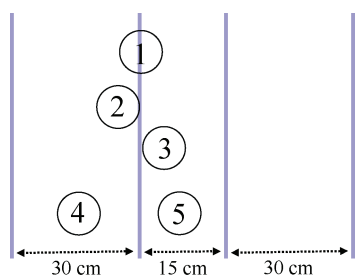


图3 根钻法取样位点

Fig. 3 Sampling positions for root coring

1.4.3 土壤矿质氮 于小麦收获后,每小区选取3个采样点,每个采样点分别采集宽行和窄行不同土层(0~20、20~40、40~60 cm)土壤样品,相同土层宽窄行土样充分混匀后过2 mm筛,低温保存,用2 mol L⁻¹的氯化钾浸提新鲜土样的矿质氮(NO₃⁻-N和NH₄⁺-N),并用Skalar连续流动分析仪测定。矿质氮含量为NO₃⁻-N含量和NH₄⁺-N含量之和。

1.4.4 植株氮素积累和转运 小麦收获期各小区

均随机选取3个0.9 m²样方,于根茎结合处剪掉小麦根系,将地上部分为茎鞘、叶片、穗轴(包括颖壳)和籽粒4部分,105℃杀青30 min后,80℃恒温烘干称重、粉碎、研磨、过筛,采用H₂SO₄-H₂O₂消煮,凯氏定氮仪(Kjeltec 8400, 丹麦)测定植株各器官全氮含量,并计算氮素积累量、转运量和氮效率相关指标^[25-26]。

植株氮素积累量(kg hm⁻²) = 植株干重×含氮率(7)

花后氮素转运量(kg hm⁻²) = 开花期营养器官氮素积累量 - 成熟期营养器官氮素积累量 (8)

花后氮素转运率(%) = 花后氮素转运量/开花期植株氮素积累量×100 (9)

花后转运氮素对籽粒氮素贡献率(%) = 花后氮素转运量/成熟期籽粒氮素积累量×100 (10)

花后氮素积累量(kg hm⁻²) = 成熟期植株氮素积累量 - 开花期植株氮素积累量 (11)

花后积累氮素对籽粒氮素贡献率(%) = 花后植株氮素积累量/成熟期籽粒氮素积累量×100 (12)

氮肥偏生产力(kg kg⁻¹) = 施氮处理籽粒产量/施氮量 (13)

氮肥农学效率(kg kg⁻¹) = (施氮处理籽粒产量 - 不施氮处理籽粒产量)/施氮量 (14)

氮肥表观利用率(%) = (施氮处理作物氮素积累量 - 不施氮处理作物氮素积累量)/施氮量×100 (15)

1.4.5 产量及其构成与经济效益 于成熟期每个处理随机取50~70穗,测定每穗粒数;在每个处理内选取3个不受采样干扰的具有代表性的0.9 m²样方,调查穗数并人工收获,经脱粒和自然晾晒后称重测产并测定籽粒含水率;从测产的籽粒中计数1000粒测定千粒重,重复3次,籽粒产量和千粒重统一按标准含水量(13%)进行折算。

小麦产值(output value, O)和净收益(net income, NI),计算公式为:

$$O = P \times Y \quad (16)$$

$$NI = O - I \quad (17)$$

式中, O 为产值(元 hm⁻²); P 为小麦籽粒收购价(元 kg⁻¹); Y 为小麦籽粒产量(kg hm⁻²); NI 为净收益(元 hm⁻²); I (input value)为总投入(元 hm⁻²),包括种子、肥料、农药、机械和人工成本。

2021—2022、2022—2023和2023—2024年当地小麦籽粒收购价分别为2.50、2.40和2.40元 kg⁻¹,种子单价为3.60、3.40和3.40元 kg⁻¹。肥料和农药等价格参照当地市场价,尿素2.60元 kg⁻¹,过磷酸

钙 2.25 元 kg^{-1} , 氯化钾 3.80 元 kg^{-1} , 缓释掺混肥 4.25 元 kg^{-1} 。杀菌剂、杀虫剂 375.00 元 hm^{-2} , 除草剂 225.00 元 hm^{-2} 。其他成本包括: 机械耕播 1200.00 元 hm^{-2} , 机械追肥 900.00 元 hm^{-2} , 机械收获 900.00 元 hm^{-2} ; 人工打药和化除 750.00 元 hm^{-2} , 人工撒施肥料单次 150.00 元 hm^{-2} 。

1.5 统计分析

采用 Microsoft excel 2016 进行数据处理、利用 Origin 2024 软件作图, 使用 SPSS 20.0 软件进行统计分析, 采用 LSD (least significant different)法进行多重比较, 差异显著性水平为 5%。

2 结果与分析

2.1 不同追肥模式下小麦产量、产值和净收益

2021—2023 年 2 季试验结果表明, 不同追肥模

式对小麦产量及其构成因素具有显著影响(表 3)。与 CK 处理相比, M_1 处理 2 季平均减产 10.4%, M_2 、 M_3 、 M_4 和 M_5 处理分别增产 4.0%、11.4%、14.1%和 19.0%, 且 M_1 、 M_3 、 M_4 和 M_5 处理的增产或减产效应在 2 季均达到显著水平。从产量构成因素分析, 与 CK 处理相比, M_1 处理的穗数、每穗粒数和千粒重均有所降低; M_2 处理均无显著变化; M_3 、 M_4 和 M_5 处理的穗数、每穗粒数和千粒重均有不同程度提高, 其中 M_5 处理的增幅最为显著, 2 季穗数、每穗粒数和千粒重平均增幅分别为 9.3%、12.5%和 5.5%。“一基一追”处理(M_2 ~ M_5)间比较发现, M_4 、 M_5 处理增产效应强于 M_2 、 M_3 处理, 且 M_5 处理产量、穗数和千粒重均显著高于 M_2 、 M_3 处理, M_4 处理仅产量、穗数显著高于 M_2 处理。2023—2024 年试验中, M_{4+5} 处理较 M_4 和 M_5 处理产量平均提高 3.1%, 但差异未达显著水平。

表 3 不同追肥模式下小麦产量及其构成因素
Table 3 Grain yield and yield components of wheat under different topdressing modes

年份 Year	处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield (kg hm ⁻²)	增产率 Yield-increasing rate (%)	穗数 Spike number per area (×10 ⁴ hm ⁻²)	每穗粒数 Kernel number per spike	千粒重 1000-kernel weight (g)
2021–2022	0N	4363.46 f	−38.9	336.31 e	29.75 d	47.88 a
	CK	7139.50 d	—	517.06 cd	32.65 bcd	44.35 cd
	M ₁	6394.98 e	−10.4	499.28 d	30.92 cd	43.64 d
	M ₂	7468.18 c	4.6	518.54 cd	33.76 abc	44.38 cd
	M ₃	8011.79 b	12.2	537.80 bc	34.12 ab	44.62 c
	M ₄	8183.66 b	14.6	552.62 ab	34.65 ab	45.84 b
	M ₅	8551.82 a	19.8	570.40 a	36.16 a	46.42 b
2022–2023	0N	4260.27 e	−40.1	312.61 e	28.29 c	49.57 a
	CK	7109.67 c	—	499.28 cd	31.37 bc	46.12 cd
	M ₁	6369.76 d	−10.4	484.47 d	29.92 bc	44.72 d
	M ₂	7356.39 c	3.5	493.36 d	32.51 ab	46.47 cd
	M ₃	7864.09 b	10.6	512.62 bc	33.72 ab	46.83 c
	M ₄	8076.93 ab	13.6	522.99 b	33.57 ab	47.37 bc
	M ₅	8405.74 a	18.2	540.77 a	35.84 a	49.01 ab
<i>F</i> -value	年份 Year (Y)	2.54 ^{NS}	—	49.44 ^{**}	3.17 ^{NS}	53.00 ^{**}
	处理 Treatment (T)	317.09 ^{**}	—	299.72 ^{**}	10.94 ^{**}	21.65 ^{**}
	Y × T	0.10 ^{NS}	—	0.40 ^{NS}	0.09 ^{NS}	0.54 ^{NS}
2023–2024	0N	5233.29 b	−38.7	310.68 b	28.61 c	47.34 a
	M ₄	8174.31 a	−4.3	524.64 a	34.10 b	46.39 a
	M ₅	8381.01 a	−1.9	532.33 a	34.64 ab	47.11 a
	M ₄₊₅	8541.02 a	—	546.18 a	35.98 a	47.48 a
<i>F</i> -value	处理 Treatment (T)	78.35 ^{**}	—	138.67 ^{**}	68.29 ^{**}	1.68 ^{NS}

处理同表 2。同列数据后的不同小写字母表示同一年度处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著。^{NS}, *和**分别表示差异不显著($P \geq 0.05$), 在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平显著。

Treatments are the same as those given in Table 2. Different lowercase letters following the values in the same column and year indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$. ^{NS}, * and ** indicate no significant differences ($P \geq 0.05$), and significant differences at the $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

2021—2023 年 2 季小麦试验结果表明, 不同追肥模式的产值变化与产量趋势一致(表 4)。与 CK 处理相比, M₁、M₂ 和 M₄ 处理的投入降低(7.3%~10.0%), 其中 M₁ 处理降本幅度最大, 2 季平均降低 10.0%, M₄ 处理次之, 降幅为 8.2%, M₂ 处理降幅最小(7.3%); M₃ 和 M₅ 处理的投入则相反, 2 季平均增幅分别为 1.7%和 0.8%。净收益分析显示, 与产值趋势一致, 相较 CK 处理, “一基一追”处理(M₂~M₅)表现出增效作用, 其中 M₄ (34.5%)和 M₅ (35.7%)处理的净收益增加率超过 34.0% (两者间不显著), M₂ (13.7%)和 M₃ (21.5%)处理的净收益增加率超过 13.0% (两者间不显著), 且年度间表现稳定; 相比之下, 一次性基施处理(M₁)的净收益显著降低(10.8%)。产投比分析表明, 相较 CK 处理, “一基一

追”处理(M₂~M₅)显著提高了产投比, 并表现为 M₄、M₅ 处理(M₄> M₅)显著高于 M₂、M₃ 处理; 一次性基施处理(M₁)则对产投比无显著影响。2023—2024 年数据显示, 相较 M₄、M₅ 处理, M₄₊₅ 处理虽产值有增加趋势, 但由于投入成本有所上升, 其净收益和产投比无显著变化。

2.2 不同追肥模式下小麦根系形态、生理特征

不同追肥模式影响小麦 0~20 cm 土层的根系特性(图 4)。因前 2 季根系特征趋势一致, 以第 2 季数据做具体分析。相较于 CK 处理, “一基一追”处理(M₂~M₅)明显改善根系指标: 根干重密度在孕穗期增幅达 18.4%~111.8%, 开花期 14.5%~90.4%, 灌浆期 9.7%~92.7%, 根系活力相应增加 8.6%~52.0%、6.8%~41.0%和 8.4%~42.7%, 根系氧化力提升 6.2%~

表 4 不同追肥模式下小麦产值和净收益
Table 4 Output value and net income of wheat under different topdressing modes

年份 Year	处理 Treatment	产值 Output value (Yuan hm ⁻²)	投入 Input value (Yuan hm ⁻²)	投入减少率 Input reduction rate (%)	净收益 Net income (Yuan hm ⁻²)	净收益增加率 Net income growth rate (%)	产投比 Output/input value
2021—2022	0N	10,908.66 f	6540.60	21.6	4368.06 e	-54.0	1.67 e
	CK	17,848.74 d	8347.12	—	9501.62 c	—	2.14 d
	M ₁	15,987.45 e	7513.62	10.0	8473.83 d	-10.8	2.13 d
	M ₂	18,670.44 c	7735.63	7.3	10,934.82 b	15.1	2.41 c
	M ₃	20,029.48 b	8485.63	-1.7	11,543.85 b	21.5	2.36 c
	M ₄	20,459.15 b	7663.62	8.2	12,795.53 a	34.7	2.67 a
	M ₅	21,379.56 a	8413.62	-0.8	12,965.94 a	36.5	2.54 b
2022—2023	0N	10,224.66 e	6500.10	21.7	3724.56 e	-57.5	1.57 e
	CK	17,063.20 c	8306.62	—	8756.59 c	—	2.05 d
	M ₁	15,287.43 d	7473.12	10.0	7814.31 d	-10.8	2.05 d
	M ₂	17,655.34 c	7695.13	7.4	9960.21 b	13.7	2.29 c
	M ₃	18,873.81 b	8445.13	-1.7	10,428.68 b	19.1	2.23 c
	M ₄	19,384.63 ab	7623.12	8.2	11,761.52 a	34.3	2.54 a
	M ₅	20,173.77 a	8373.12	-0.8	11,800.66 a	34.8	2.41 b
F-value	年份 Year (Y)	41.26**	—	—	37.82**	—	35.13**
	处理 Treatment (T)	317.86**	—	—	222.88**	—	172.53**
	Y × T	0.32 ^{NS}	—	—	0.32 ^{NS}	—	0.22 ^{NS}
2023—2024	0N	12,559.89 b	6525.60	23.7	6034.29 b	-49.5	1.92 b
	M ₄	19,618.35 a	7648.62	10.5	11,969.74 a	0.2	2.56 a
	M ₅	20,114.41 a	8398.62	1.8	11,715.80 a	-2.0	2.39 a
	M ₄₊₅	20,498.46 a	8548.62	—	11,949.84 a	—	2.40 a
F-value	处理 Treatment (T)	78.35**	—	—	47.00**	—	25.81**

处理同表 2。同列数据后的不同小写字母表示同一年度处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著。^{NS}, *和**分别表示差异不显著($P \geq 0.05$), 在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平显著。
Treatments are the same as those given in Table 2. Different lowercase letters following the values in the same column and year indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$. ^{NS}, * and ** indicate no significant differences ($P \geq 0.05$), and significant differences at the $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

37.9%、6.0%~42.9%和 4.2%~44.2%, 其中 M_4 和 M_5 处理各生育期根系指标均显著高于 CK 处理和 M_2 处理, 且 M_5 处理在孕穗期和开花期均显著高于 M_4 和 M_3 处理, M_3 处理则各生育期根系指标均显著高于 M_2 处理(除灌浆期根系活力)。而 M_1 处理相比 CK 处理则显著降低了根干重密度和孕穗期根系氧化力。同时发现, 随着生育期的推进, 尤其在灌浆期, 相较于尿素追肥处理(M_2 、 M_3), 缓混肥追肥处理(M_4 、 M_5)的根干重密度与生理特性仍能保持较高的水平, 尤以追肥深施处理(M_5)显著。2023—2024 季试验表

明, M_{4+5} 处理较 M_4 和 M_5 处理进一步优化了根系特性, 根干重密度、根系活力、根系氧化力不同生育期平均增幅分别为 22.2%、33.4%、20.5%和 3.9%、11.3%、7.9%, 且与 M_4 处理间差异显著。

2.3 不同追肥模式下小麦生育期 N_2O 排放

不同追肥模式下 N_2O 排放通量的季节性变化结果表明, N_2O 排放主要集中于小麦越冬期之前, 在氮肥施用后 2~8 d 以及降雨事件后, N_2O 排放通量均出现了明显的高峰, 并且缓混肥和肥料深施一定程度上使 N_2O 排放通量峰值延缓了 2~6 d 出现(图 5)。

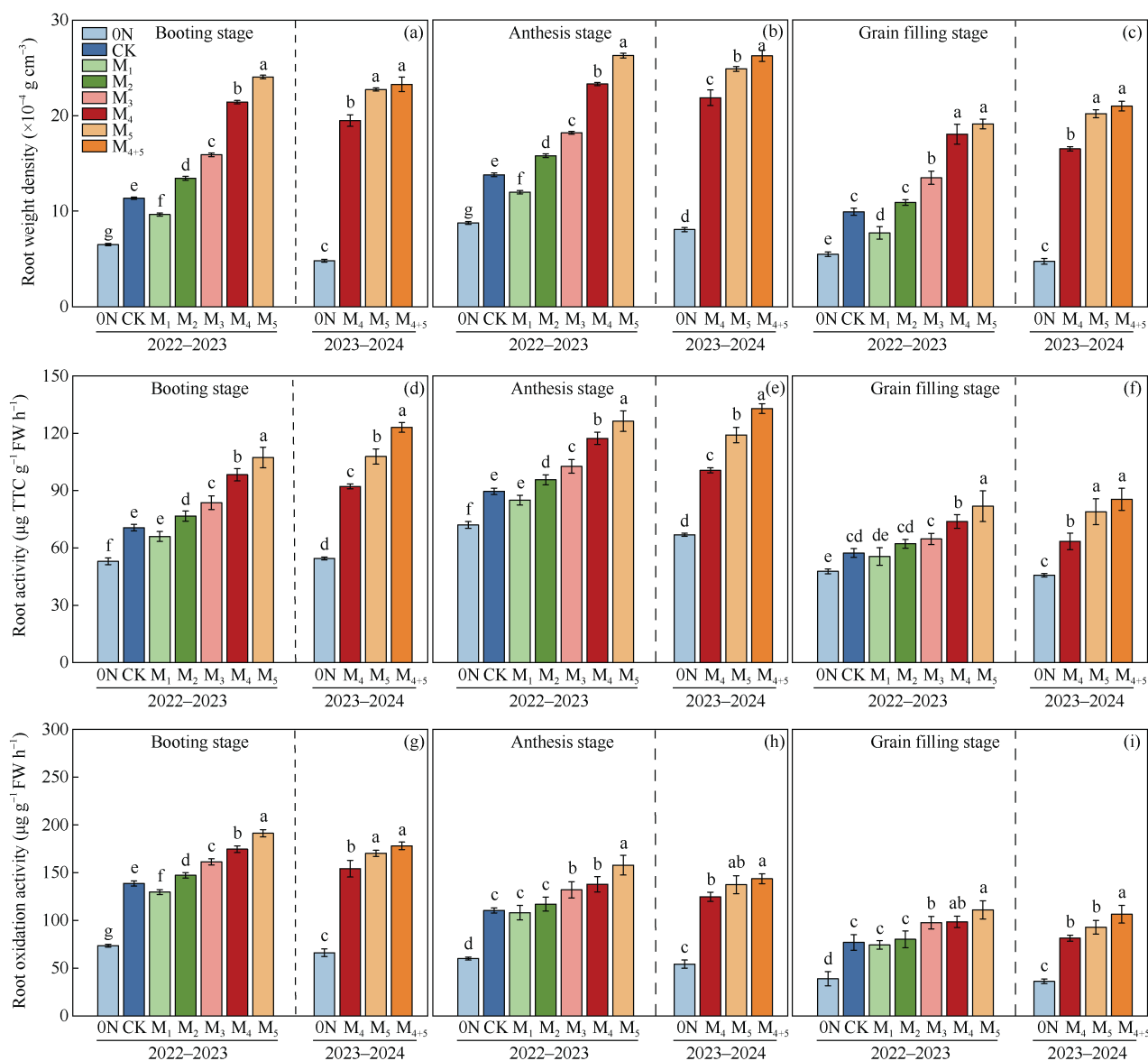
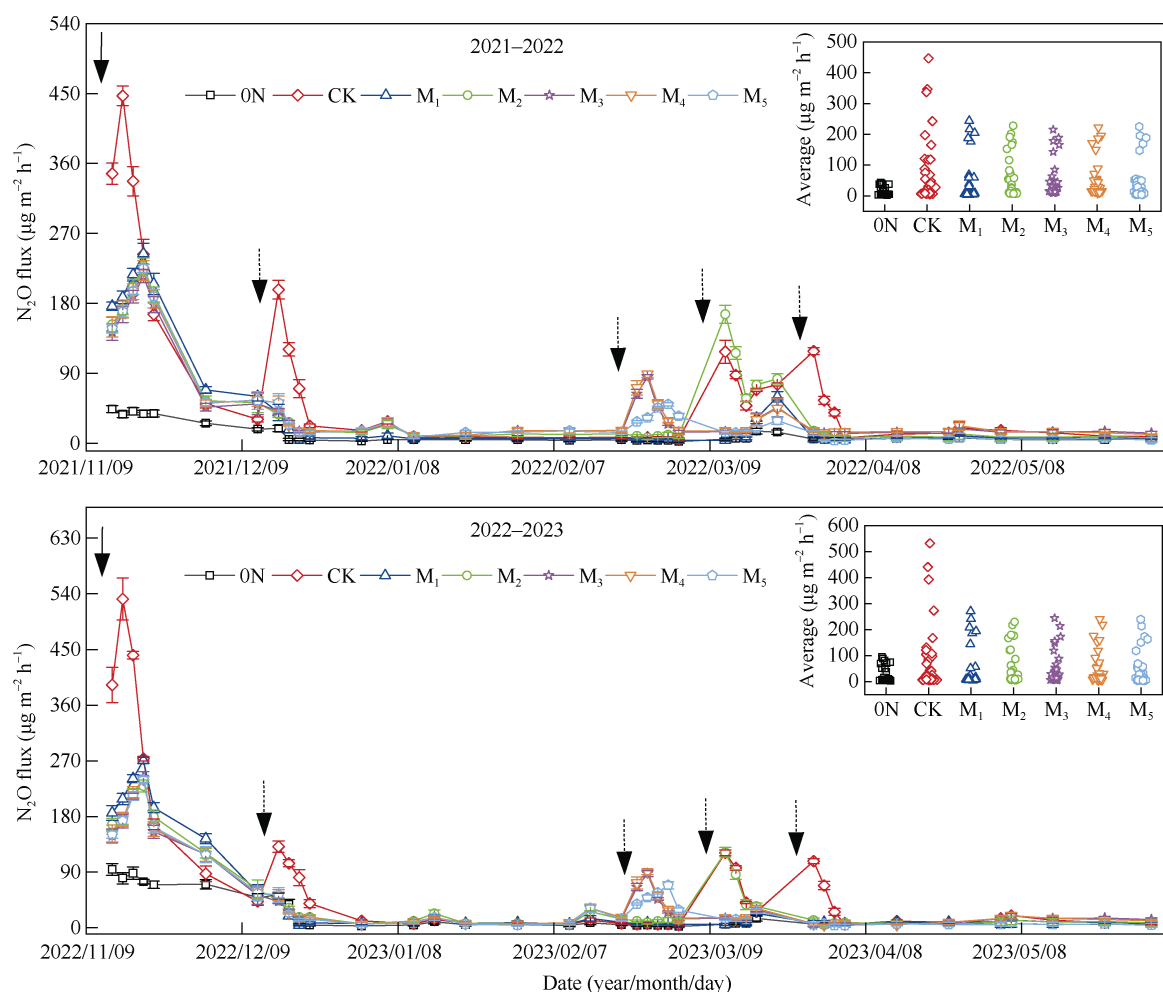


图 4 不同追肥模式下小麦根干重密度(a、b、c)、根系活力(d、e、f)和根系氧化力(g、h、i)差异

Fig. 4 Differences in root weight density (a, b, c), root activity (d, e, f), and root oxidation activity (g, h, i) of wheat under different topdressing modes

处理同表 2。不同小写字母表示同一年度处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著。TTC: 氯化三苯基四氮唑。

Treatments are the same as those given in Table 2. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments within the same year at $P < 0.05$. TTC: 2,3,5-triphenyltetrazolium chloride.

图 5 不同追肥模式下 N_2O 排放通量动态Fig. 5 Dynamics of N_2O emission flux under different topdressing modes

处理同表 2。实线和虚线箭头分别表示基肥施用和追肥施用。

Treatments are the same as those given in Table 2. The solid and dashed arrows indicate the basal fertilization and topdressing, respectively.

在 2 个小麦生长季中, 0N、CK、 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 和 M_5 处理 2 季小麦 N_2O 平均排放通量分别为 15.58、74.63、39.94、47.09、43.86、45.78 和 41.89 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 。基肥施用后的 N_2O 排放通量峰值高于追肥施用后的峰值。CK 处理基肥施用后的最高 N_2O 排放通量峰值在 2021—2022 和 2022—2023 分别为 447.02 和 531.63 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 和 M_5 处理的 N_2O 排放通量峰值显著低于 CK 处理, 分别平均降低了 47.2%、52.9%、53.0%、52.6% 和 52.3%。追肥施用后, CK 处理的 N_2O 排放通量峰值增加到 107.70~197.57 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, 相比之下, M_2 处理的 N_2O 排放通量峰值相对较低, 范围为 122.06~165.91 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, M_3 、 M_4 和 M_5 处理的 N_2O 排放通量峰值明显降低, 范围分别为 85.30~87.67、88.70~90.47 和 49.90~68.75 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 。

不同追肥方式显著影响小麦 N_2O 累积排放量、 N_2O 排放系数和 N_2O 排放强度(图 6)。相比 CK 处理, 2021—2023 两季, M_1 和 M_5 处理均显著降低 N_2O 累积排放量(均值分别为 35.9% 和 34.5%)及排放因子(均值分别为 40.6% 和 39.0%); M_2 、 M_3 、 M_4 处理的 N_2O 累积排放量和 N_2O 排放系数 2 季平均降幅分别为 22.6%、30.0%、27.0% 和 19.8%、31.7%、26.9%, 且均达显著差异水平。“一基一追”处理(M_2 ~ M_5)间比较发现, M_2 处理 N_2O 累积排放量和 N_2O 排放系数均显著高于 M_3 ~ M_5 处理(除 2022—2023 季 M_2 与 M_4 处理间不显著外), M_3 和 M_4 处理间则无显著差异。相比 CK 处理, 单位产量 N_2O 排放强度表现为 M_3 、 M_4 、 M_5 处理相对较低, 2 季平均降幅分别为 37.2%、36.0%、45.0%, M_1 、 M_2 则降幅相对较小, 2 季降幅范围为 23.8%~33.0%, 其中, M_3 ~ M_5 处理显著低于 M_2 处理。

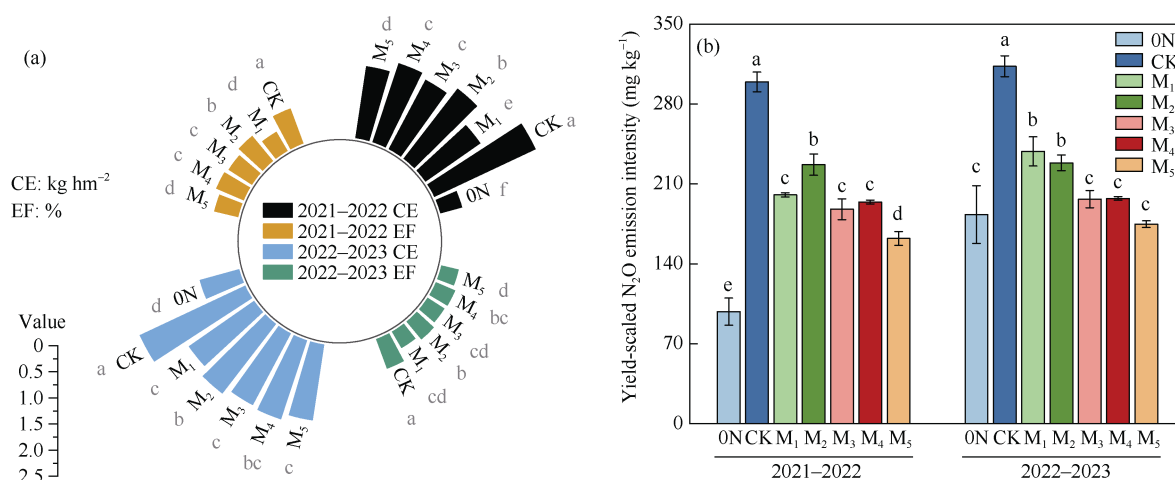


图 6 不同追肥模式下 N₂O 累积排放量、N₂O 排放系数(a)和 N₂O 排放强度(b)变化

Fig. 6 Variations in cumulative N₂O emission, N₂O emission factor (a), and N₂O emission intensity (b) under different topdressing modes

处理同表 2。不同小写字母表示同一年度同一指标处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著。CE 和 EF 分别表示 N₂O 累积排放量和 N₂O 排放系数。

Treatments are the same as those given in Table 2. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments for the same indicator and year at $P < 0.05$. CE and EF represent the cumulative N₂O emission and N₂O emission factor, respectively.

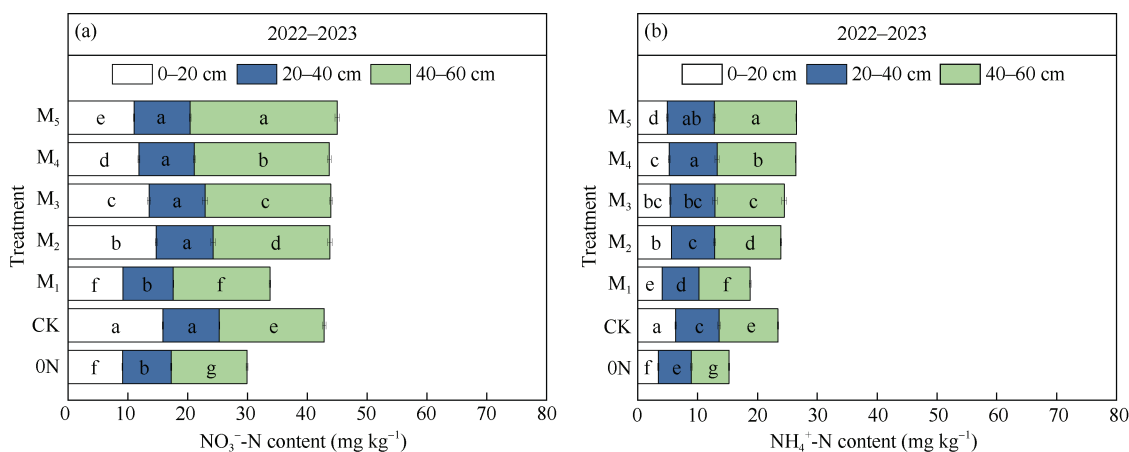
2.4 不同追肥模式下土壤硝态氮、铵态氮和矿质氮含量变化

因前 2 季土壤无机氮趋势一致, 以第 2 季数据做具体分析。从图 7 中可以看出, 2022—2023 季, 不同追肥模式相比 0N 处理均显著提高了各土层硝态氮、铵态氮和矿质氮含量(除 M₁ 处理 20~40 cm 和 40~60 cm 土层硝态氮含量无显著变化)。与 CK 处理相比, M₂、M₃、M₄ 和 M₅ 处理 0~20 cm 土层硝态氮含量分别显著提高了 11.2%、19.9%、28.6%和 40.0% (各处理间增幅呈显著差异), 20~40 cm 土层无显著变化, 40~60 cm 土层硝态氮含量则分别显著降低了 7.2%、14.6%、25.3%和 30.3% (各处理间降幅呈显著差异); M₁ 处理则显著降低了各土层硝态氮含量。不同土层

铵态氮含量和矿质氮含量与硝态氮含量变化趋势基本一致(除 20~40 cm 土层处理间铵态氮含量显著性差异有所不同)。不同追肥模式 0~20 cm 土层矿质氮含量呈现 M₅ > M₄ > M₃ > M₂ > CK > M₁; 20~40 cm 土层“一基一追”处理(M₂~M₅)与 CK 处理相比无显著变化, M₁ 处理显著降低; 40~60 cm 土层呈现与 0~20 cm 土层相反趋势, 呈现 CK > M₂ > M₃ > M₄ > M₅ > M₁。

2.5 不同追肥模式下小麦氮素积累和转运差异

不同追肥模式显著影响小麦氮素积累与转运特征(表 5)。2021—2023 年 2 季试验结果表明, 与 CK 处理相比, 开花期“一基一追”处理(M₂~M₅)营养器官氮素积累量无显著差异, M₁ 处理显著降低; 成熟期“一基一追”处理(M₂~M₅)则提高了营养器官氮素



(图 7)

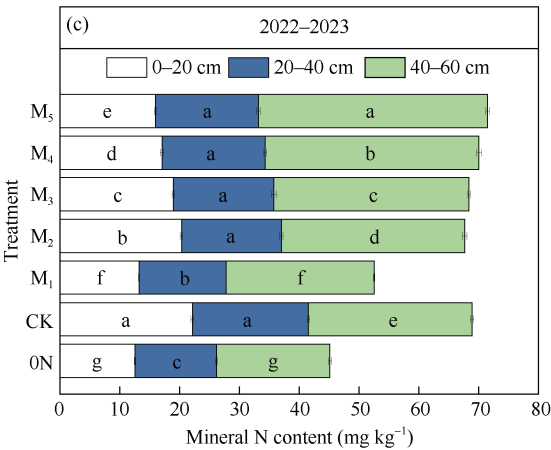


图 7 成熟期不同追肥模式下土壤硝态氮(a)、铵态氮(b)和矿质氮(c)含量变化
Fig. 7 Variations in soil nitrate (a), ammonium (b), and mineral nitrogen (c) content under different topdressing modes at the maturity stage
处理同表 2。不同小写字母表示同一土层处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著。
Treatments are the same as those given in Table 2. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments within the same soil layer at $P < 0.05$.

积累量, M_1 处理亦显著降低, 且 M_5 处理显著高于 $M_2 \sim M_4$ 处理, M_3 和 M_4 处理显著高于 M_2 处理。成熟期籽粒氮素积累量与营养器官氮素积累量处理间趋势一致, 但显著性不同, 总体呈现 M_5 处理显著高于其他处理, M_3 和 M_4 处理间无显著差异。与 CK 处理相比, M_4 和 M_5 处理显著降低了花后氮素转运量、转运率及转运贡献率, 但显著提高了花后氮素积累量及其贡献率, 且两者间无显著差异(除 2022—2023 季花后氮素转运率达显著水平), 其中两者花后氮素转运/积累贡献率分别降低/增加了 14.21 和 17.76 个百分点; M_2 和 M_3 处理花后氮素转运量无显著变化, 但花后氮素转运率及转运贡献率呈下降趋势, 花后

氮素积累量及其贡献率呈相反趋势, 其中 M_3 处理变化更明显。同时可以发现, 花后氮素转运量、转运率及转运贡献率表现为 M_2 和 M_3 处理高于 M_4 和 M_5 处理, 花后氮素积累量及其贡献率则表现为 M_4 和 M_5 处理更有优势。 M_1 处理花后氮素转运与积累相关指标则无显著变化(除 2022—2023 季花后氮素转运量显著低于 CK 处理)。2023—2024 年数据显示, M_{4+5} 处理较 M_4 、 M_5 处理显著提高了成熟期籽粒氮素积累量, 使花后氮素转运贡献率平均降低 6.05 个百分点(与 M_4 处理达显著水平), 而花后积累氮素贡献率相应平均提高 6.05 个百分点(与 M_4 处理达显著水平)。

表 5 不同追肥模式下小麦氮素积累和运转比较
Table 5 Comparison of nitrogen accumulation and translocation in wheat under different topdressing modes

年份 Year	处理 Treatment	营养器官氮素积累量 N accumulation amount in vegetative organs (kg hm ⁻²)			籽粒氮素 积累量 N accumula- tion amount in grains (kg hm ⁻²)	花后氮素 转运量 Post-anthesis N transloca- tion amount (kg hm ⁻²)	花后氮素 转运率 Post-anthesis N transloca- tion rate (%)	花后转运氮 素对籽粒氮 素贡献率 Contribution rate of post-anthesis translocated N to grain N (%)	花后氮素 积累量 Post-anthesis N accumula- tion amount (kg hm ⁻²)	花后积累氮 素对籽粒氮 素贡献率 Contribution rate of post-anthesis accumulated N to grain N (%)						
		开花期 Anthesis	成熟期 Maturity													
2021–2022	ON	75.51 c	13.34 f	78.71 e	62.17 c	82.3 ab	79.0 a	16.54 e	21.0 d							
	CK	129.72 a	22.66 d	134.50 d	107.06 a	82.5 ab	79.6 a	27.45 d	20.4 d							
	M ₁	121.44 b	20.15 e	129.65 d	101.29 ab	83.4 a	78.2 a	28.36 d	21.8 d							
	M ₂	132.65 a	24.95 c	143.31 c	107.71 a	81.2 b	75.2 ab	35.60 cd	24.8 cd							
	M ₃	132.45 a	27.23 b	150.53 b	105.22 ab	79.4 c	69.9 bc	45.31 bc	30.1 bc							
	M ₄	126.97 ab	27.83 b	153.30 ab	99.14 b	78.0 cd	64.7 cd	54.17 ab	35.3 ab							
	M ₅	128.71 a	29.28 a	159.14 a	99.43 b	77.2 d	62.5 d	59.71 a	37.5 a							

(续表 5)

年份 Year	处理 Treatment	营养器官氮素积累量 N accumulation amount in vegetative organs (kg hm ⁻²)		籽粒氮素 积累量	花后氮素 转运量	花后氮素 转运率	花后转运氮 素对籽粒氮 素贡献率	花后氮素 积累量	花后积累氮 素对籽粒氮 素贡献率
		开花期 Anthesis	成熟期 Maturity	N accumula- tion amount in grains (kg hm ⁻²)	Post-anthesis N transloca- tion amount (kg hm ⁻²)	Post-anthesis N transloca- tion rate (%)	Contribution rate of post-anthesis translocated N to grain N (%)	Post-anthesis N accumula- tion amount (kg hm ⁻²)	Contribution rate of post-anthesis accumulated N to grain N (%)
2022–2023	0N	71.99 c	12.76 f	73.05 f	59.23 e	82.2 ab	81.1 a	13.82 f	18.9 d
	CK	126.77 a	21.26 d	133.90 d	105.51 a	83.2 a	79.2 ab	28.39 de	20.8 cd
	M ₁	117.37 b	19.52 e	122.47 e	97.85 bcd	83.4 a	79.9 a	24.62 e	20.1 d
	M ₂	126.52 a	22.19 d	140.12 cd	104.33 ab	82.4 a	74.5 ab	35.79 cd	25.5 cd
	M ₃	127.67 a	24.56 c	143.65 bc	103.12 abc	80.7 b	71.8 bc	40.53 bc	28.2 bc
	M ₄	123.75 ab	27.15 b	147.18 ab	96.60 cd	78.1 c	65.7 cd	50.58 ab	34.3 ab
	M ₅	120.90 ab	28.85 a	151.47 a	92.06 d	76.1 d	60.8 d	59.41 a	39.2 a
F-value	年份 Year (Y)	13.57**	49.35**	18.94**	6.60*	1.05 ^{NS}	0.18 ^{NS}	1.07 ^{NS}	0.18 ^{NS}
	处理 Treatment (T)	146.57**	483.59**	278.00**	86.95**	47.54**	18.44**	36.94**	18.44**
	Y × T	0.28 ^{NS}	4.21**	0.62 ^{NS}	0.31 ^{NS}	1.38 ^{NS}	0.19 ^{NS}	0.19 ^{NS}	0.19 ^{NS}
2023–2024	0N	105.13 b	19.56 b	111.18 c	85.57 b	81.4 a	77.0 a	25.61 c	23.0 c
	M ₄	162.24 a	31.56 a	191.37 b	130.68 a	80.5 b	68.3 b	60.69 b	31.7 b
	M ₅	159.02 a	32.97 a	194.42 b	126.06 a	79.3 c	64.8 bc	68.36 ab	35.2 ab
	M ₄₊₅	156.84 a	34.00 a	202.97 a	122.83 a	78.3 d	60.5 c	80.14 a	39.5 a
F-value	处理 Treatment (T)	32.43**	89.75**	311.73**	25.84**	42.29**	10.84**	39.38**	10.84**

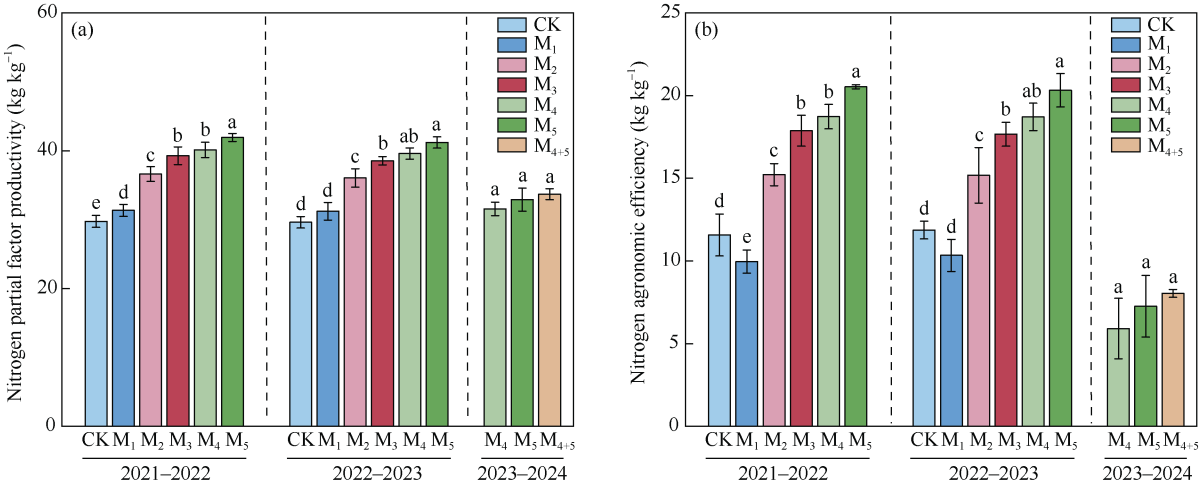
处理同表 2。同列数据后的不同小写字母表示同一年度处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著。^{NS}, *和**分别表示差异不显著($P \geq 0.05$), 在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平显著。

Treatments are the same as those given in Table 2. Different lowercase letters following the values in the same column and year indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$. ^{NS}, * and ** indicate no significant differences ($P \geq 0.05$), and significant differences at the $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

2.6 不同追肥模式下小麦氮效率比较

不同追肥模式显著影响小麦氮素利用效率指标(图 8)。2021—2023 年数据显示,“一基一追”处理(M₂~

M₅)较 CK 处理显著提高了氮肥偏生产力(22.4%~40.0%)、氮肥农学效率(29.7%~74.3%)和氮肥表观利用率(9.41~18.77 个百分点),其中 M₅ 处理显著高于



(图 8)

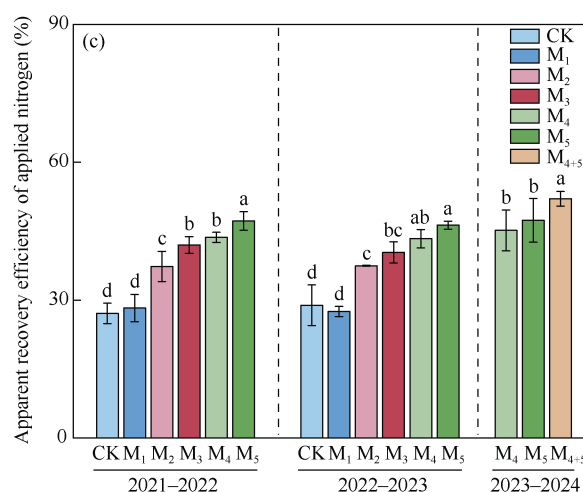


图 8 不同追肥模式下氮肥偏生产力(a)、氮肥农学效率(b)和氮肥表观利用率(c)变化

Fig. 8 Variations in nitrogen partial factor productivity (a), nitrogen agronomic efficiency (b), and apparent recovery efficiency of applied nitrogen (c) under different topdressing modes

处理同表 2。不同小写字母表示同一年度处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著。

Treatments are the same as those given in Table 2. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments within the same year at $P < 0.05$.

M₂ 和 M₃ 处理, M₃ 处理有大于 M₂ 处理趋势, 而 M₁ 处理与 CK 处理差异较小且年际间不稳定。其中 M₄ 和 M₅ 处理氮肥偏生产力、氮肥农学效率、氮肥表观利用率增加最显著, 相较 CK 处理分别提高了 34.3%、59.7%、15.52 个百分点和 40.0%、74.3%、18.77 个百分点。且 M₄ 和 M₅ 处理 2 季氮肥表观利用率均达到了 43% 以上(2 季均值分别为 43.5% 和 46.8%)。2023—2024 年试验表明, M₄、M₅ 和 M₄₊₅ 处理三者氮肥表观利用率分别为 45.2%、47.4% 和 52.1%, M₄₊₅ 处理较 M₄、M₅ 处理进一步提高了氮肥表观利用率(平均增加 5.79 个百分点)。

3 讨论

3.1 不同追肥模式对产量建成和氮素吸收利用的影响

我国农业生产面临农业劳动力短缺与作物精细化管理需求、氮肥减量与稳产高产需求的双重挑战^[27], 亟需优化氮肥品种及施用技术以实现减量增效^[12]。依据报酬递减律, 过量施肥不仅难以促进增产, 还会降低作物对养分的吸收效率, 增加养分损失风险^[28]。基于小麦氮素需求特征, 缓释肥“一基一追”施肥策略展现出显著优势。缓/控释尿素 2 次分施能有效匹配小麦生育期氮素需求动态, 特别是满足拔节后第 2 个需氮高峰, 维持生育后期较高的土壤无机氮水平和旗叶光合功能^[7,29], 显著提高植株氮素积累量, 延缓叶片衰老, 促进干物质积累和籽粒灌浆, 较常

规施肥增产 7.9%~15.1%, 氮肥利用率提升 2.19~10.33 个百分点^[7,29]。多点试验证实, 该模式通过优化氮供应可协同提升穗数和粒重, 平均增产 8.5% (最高 21.3%), 效益增收 11.5% (最高 43.5%), 氮肥农学效率提高 16.4% (最高 39.1%)^[12]。减氮 15%~20% (180.0~229.5 kg hm⁻² N) 的缓释肥 2 次施用方案在保证产量效益的同时, 可显著提高氮肥表观利用率 10.74 个百分点和氮肥农学效率 18.4%^[8,12-13]。本研究进一步表明, 减氮 15% (204 kg hm⁻² N) 条件下, 缓混肥 2 次施用处理(M₄、M₅)通过实现氮素“双峰”供应, 实现穗数、每穗粒数和粒重因素的协同提高, 增产效果最优(平均增幅 14.1%、19.0%, 表 3), 净收益平均提高 34.5% 和 35.7% (表 4), 且追肥深施(M₅)增产效应优于撒施(M₄)。相较于“缓混肥+尿素”2 次施用处理(M₂、M₃), 缓混肥 2 次施用处理(M₄、M₅)既能优化土壤无机氮分布, 减少苗期氮损失, 又可促进后期氮积累^[7,28], 有效克服了速效氮肥地表撒施导致的氮利用率低、光合性能下降和减产等问题^[30-31], 实现了减氮增效的目标, 这与前人研究结论一致^[7,12-13,29]。盛海君等^[12]和马泉等^[13]研究发现, 在减氮 15% (229.5 kg hm⁻² N) “一基一追”条件下, 拔节期追施尿素会导致粒重降低, 减产幅度达 2.9%~3.2%, 但氮肥表观利用率显著提高 8.15 个百分点, 氮肥农学效率平均增幅 10.2%。本研究中, “缓混肥+尿素”2 次施用处理(M₂、M₃)仍实现了 3.5%~12.2% 的增产效果(表 3), 净收益提高 13.7%~21.5%

(表 4)。究其原因,可能是由于本研究采用苗带集中深施缓混肥作为基肥,并在追肥阶段通过深施或苗带集中撒施尿素,使肥料在根区分布更为合理^[28],从而优化了作物地上和地下部生长,最终提高了氮肥利用效率和产量。

已有研究证实,肥料深施可通过延缓叶片衰老^[19]、增强光合性能^[30]以及优化产量构成和养分吸收^[32]等途径,在减少施肥量的同时^[18],协同提升小麦产量效益和氮肥利用率^[18-19,30,32-33]。然而,由于不同研究的施肥时期、位置和深度存在差异,肥料利用率进一步提升的潜力空间仍有待明确。此外,控释氮肥与速效氮肥配施可协同促进稻茬小麦地上部和根系生长,维持生育中后期良好的根系形态与生理活性^[31],延缓根系衰老,扩大养分吸收范围,为地上部光合作用和生长发育提供充足的无机养分^[34],最终实现高产与氮肥高效利用^[31]。本试验采用前人研究推荐的适宜施肥深度(8~10 cm)^[18-19,33],在减氮 15% (204 kg hm⁻² N)条件下,相较于 CK 处理,“一基一追”模式(M₂~M₅)因配施缓混肥,有利于根系形态(根干重密度)和生理特征(根系活力和根系氧化力)的改善(图 4),提高了成熟期植株氮素积累量,促进了花后氮素积累,提高了花后氮素积累对籽粒氮素的贡献率(表 5),并显著提升了氮肥偏生产力、氮肥农学效率及氮肥表观利用率(图 8),其中,缓混肥 2 次施用处理(M₄、M₅)效应要强于“缓混肥+尿素”2 次施用处理(M₂、M₃)。这一结果与马泉等^[13]的研究存在部分差异,后者发现减氮 15%时缓释肥 2 次施用或“缓释肥+尿素”2 次施用处理小麦成熟期地上部和籽粒氮素积累量相比对照无显著变化。差异可能源于施肥方式的差别:前人研究多采用基肥机械撒施和追肥表层撒施^[7-8,12-13,29],可能导致肥料养分分布于根系低效吸收区域^[28];而本试验采用基肥集中条施结合追肥集中条/撒施,强化了小麦根系对氮素的吸收利用。本研究还发现,相比撒施(M₂、M₄),追肥深施(M₃、M₅)可进一步促进生育后期根系生长,提高耕层根干重密度、根系活力及氧化力(图 4),从而增加成熟期植株氮素积累及花后氮素积累对籽粒氮素的贡献率(表 5),最终显著提高氮肥偏生产力、氮肥农学效率和氮肥表观利用率(图 8)和产量(表 3)。这与肥料深施时所产生的断根效应^[15-17]之间是否存在一定的联系以及肥料深施方式对小麦植株群体质量和生理特性有何影响,后续将做进一步研究。此外,缓混肥一次性基施处理(M₁)因生育后期供氮

不足,导致根系生长受限、活力及氧化力有所降低(图 4),氮素吸收量减少(表 5),最终造成 10.4%的显著减产(表 3)。虽然该模式减少了追肥用工,但由于缓混肥成本较高,净收益显著降低 10.8% (表 4)。这一结果与前人研究^[12,29]存在一定差异,可能源于不同生态区气候环境、土壤质地及施肥措施的交互影响。值得注意的是,在缓混肥二次施用模式下,追肥采用宽行条施与窄行撒施并施(M₄₊₅)较单一施用方式(M₄、M₅)进一步提升了产量水平(平均增幅 3.1%,未达显著水平,表 3),优化了根系特征(图 4),提高了成熟期籽粒氮素积累量及花后积累氮素贡献率(表 5),并使氮肥表观利用率提升 5.79 个百分点(图 8),其养分释放与高产增效机制有待深入解析,同时因其追肥成本有所增加,因而净收益与产投比无显著变化(表 4)。

3.2 不同追肥模式对 N₂O 排放特征和土壤无机氮残留的影响

小麦生育期 N₂O 排放呈现明显的阶段性特征:苗期因植株氮素吸收能力弱而排放较高,越冬期低温(< 5℃)抑制微生物活性使排放降低,返青后随植株吸收增强排放较苗期显著降低^[35-36]。研究表明,缓释氮肥类型显著影响排放特征,其中硫包膜尿素和脲醛缓释肥处理的排放峰值出现在施肥后 1 周,峰值强度较普通尿素降低;树脂包膜尿素处理的峰值则延迟至施肥后 4 周,且强度最低^[1,9]。与尿素相比,缓释肥 2 次施用可减少 N₂O 累积排放量 8.4%~18.5%,同时提高产量并降低单位产量排放量^[1,9]。本研究采用由硫包衣尿素、树脂包膜尿素和生物炭能尿素等组配的缓混肥,结合深施技术明显降低麦田 N₂O 排放通量及其峰值,并延迟排放峰值 2~6 d 出现(图 5)。在减排效果方面, M₁ 和 M₅ 处理表现最优, 2 季平均 N₂O 累积排放量分别显著降低 35.9%和 34.5%, 平均排放系数分别显著下降 40.6%和 39.0%; M₃ 和 M₄ 处理次之, 但二者差异不显著; M₂ 处理效果相对较弱, 整体减排效应表现为条施>撒施, 缓混肥>尿素。单位产量 N₂O 排放强度以 M₅ 处理降幅最大(45.0%), M₃ 和 M₄ 处理次之(36.0%~37.2%), M₁ 和 M₂ 处理降幅相对较小(23.8%~33.0%, 图 6)。以上结果说明缓混肥结合减氮减量深施技术在小麦生产中具有一定减排潜力。已有研究证实, 深施肥技术展现出显著的协同增效效应, 可实现粮食增产 13.5%、氮肥利用率提升 33.8%, 同时降低 N₂O 排放量及其排放系数分别达 16.2%和 35.8%^[37]。缓控释氮

肥或尿素条施技术可有效减少 22.4%~35.5%的 N_2O 排放^[38]。特别值得注意的是, 氮肥条施能有效抵消秸秆还田导致的 N_2O 增排效应^[38]。田间试验进一步证实, 缓控释肥条施(8 cm)处理较常规化肥撒施不仅提高小麦产量, 更将 N_2O 排放量从 4.02 kg hm^{-2} 降至 2.41 kg hm^{-2} , 这主要归因于其对土壤无机氮时空分布的优化调控^[39]。

土壤无机氮(占全氮 1%~2%)的供应动态直接反映肥料氮与作物吸收的匹配程度, 显著影响作物产量和氮素利用率^[7,40]。研究表明, 尿素追施后通过加速硝化-反硝化作用导致土壤无机氮骤增, 不仅加剧 N_2O 排放和氮素损失^[7,41], 其 1~2 周内转化的硝态氮还显著增加淋溶风险^[42]。相比之下, 缓释氮肥通过双重机制优化氮素供应: 一方面延缓尿素水解和 NH_4^+-N 转化, 维持 0~20 cm 耕层有效氮供应; 另一方面减少 40~60 cm 土层 NO_3^--N 含量, 有效控制淋失^[1,7,9,40]。这种时空调控使小麦生育后期土壤无机氮供应量提高, 为协调高产与环境保护提供了有效途径。本研究发现, 与 CK 处理相比, M_1 处理显著降低了成熟期各土层硝态氮含量(图 7), 控释肥一次性施用虽在拔节前能维持较高的土壤无机氮水平, 但后期因供氮不足而显著下降^[7]。“一基一追”处理($\text{M}_2\sim\text{M}_5$)成熟期 0~20 cm 土层硝态氮含量分别显著提高了 11.2%、19.9%、28.6%和 40.0%, 40~60 cm 土层硝态氮含量则分别显著降低了 7.2%、14.6%、25.3%和 30.3%, 不同土层铵态氮含量和矿质氮含量与硝态氮含量变化趋势基本一致(图 7)。说明基施缓混肥, 追肥集中撒施或条施缓混肥/尿素, 有利于固定 0~20 cm 土层矿质氮, 减少氮素向深层土壤淋失, 并且缓混肥追施($\text{M}_4\sim\text{M}_5$)效应强于尿素追施($\text{M}_2\sim\text{M}_3$), 追肥深施(M_4 、 M_5)相比撒施(M_2 、 M_3)优势更为明显(图 7)。控释肥分次施用虽然在苗期末显现土壤无机氮优势, 但其稳定的氮供应基本满足小麦需求, 并在拔节后持续释放足量氮素, 维持较高的土壤无机氮水平, 更好地满足小麦第 2 个需氮高峰期的吸收需求^[7]。更多的是, 缓混肥 2 次施用条件下追肥采用宽行条施与窄行撒施并施(M_{4+5})处理虽显示出一定增产提效(氮效率)潜力, 但缺乏对土壤无机氮残留和 N_2O 排放的系统监测数据。为全面评估该技术的应用价值, 需开展多年多点重复试验验证其稳定性。后续将重点研究优势组合(M_4 、 M_5)的矿质氮时空分布特征, 结合土壤酶活性及微生物群落结构分析, 深入解析其增产增效与减排的协同机制,

并优化基追肥条施深度配置组合。

3.3 不同追肥模式高产、增效、减排协同性及潜力分析

基于生命周期评估(life cycle assessment, LCA)的研究表明, 1998—2016 年我国农业碳排放总量增长 35%, 其中尿素贡献率约占化肥总投入 60%, 凸显优化氮素管理对降低碳足迹的关键作用^[43-44]。小麦生产碳足迹主要来源于氮肥施用(55.5%)和 N_2O 排放(25.3%), 其强度随种植规模扩大而显著降低, 这得益于大规模生产的机械化作业和精准施肥优势^[45]。本研究发现, 在稻秸全量还田条件下, 减氮 15% (204 kg hm^{-2})配施缓混肥“一基一追”模式($\text{M}_2\sim\text{M}_5$)不仅能够实现增产增效(净收益和氮肥利用效率), 还具有显著的减排效果, 其减排增效潜力优于前人提出的 $\text{N } 223 \text{ kg hm}^{-2}$ 优化方案^[46]。值得注意的是, M_4 和 M_5 处理的氮肥表观利用率 2 季均值分别达到 43.5%和 46.8%, 提前实现了 2030 年三大粮食作物化肥利用率 43%以上的政策目标。为进一步优化技术方案, 需借助 ^{15}N 示踪技术深入解析肥料氮贡献机制, 特别是明确追肥氮在损失量最大时期(拔节—开花期)的吸收利用率^[47], 以实现精准农业技术资源配置效率优化, 达成碳效率提升与碳足迹降低的协同效应。

在落实小麦单产提升目标方面, 本研究所有施肥处理 3 年试验产量均达到《江苏省主要粮油作物大面积单产提升行动实施方案(2023—2030 年)》提出的目标要求(小麦单产年均增长 1%, 2030 年平均每公顷产量达 6150 公斤左右, 较 2022 年增产 7%), 其中“一基一追”模式($\text{M}_2\sim\text{M}_5$)较对照 CK 增产 3.5%~19.8% (表 3), 尤以 M_4 (14.1%)和 M_5 (19.0%)处理增产幅度最为显著, 其净收益提升超过 34% (表 4)。在减排效果方面, M_5 处理 N_2O 累积排放量降幅最大(34.5%), M_4 (27.0%)和 M_3 (30.0%)处理次之。这一系列研究结果与众多研究^[1,9,39,48]的结论相吻合, 进一步证实了缓释氮肥分次施用(M_4 、 M_5 处理)能够通过多重机制协同降低氮素损失: 包括提升作物氮素吸收效率、维持耕层有效氮供应水平、减少养分淋溶损失以及抑制 N_2O 排放等, 从而实现增产与减排的双重效益。值得注意的是, 追肥施用缓混肥不仅能通过提高土壤酶活性、促进植株氮素吸收利用和增加表层土壤氮素残留来降低表观损失^[7,49], 还可能具有显著的长期培肥效应, 其对后茬作物生长的影响值得深入研究^[32]。需要特别指出的是, 控释肥的

实际效果受多种因素影响,包括生长季平均温度和降水等气候条件、土壤有机碳含量和 pH 值等理化性质、区域环境特征,以及控释氮肥比例和包膜材料等产品特性^[48],这些因素在实际应用中需要综合考虑。Wu 等^[37]研究发现,15~25 cm 深施肥技术通过精准调控施氮量与深度配置参数,以更低的环境代价协同提升作物产量与氮肥利用率,并实现全球年减排 23 万吨 N_2O -N 和 546 万吨 NH_3 -N,其综合效应受气候-土壤-管理系统的多元调控,实现增产与减排的协同。综上,本研究基于自主研发的深施肥装备,创新构建了基于缓混肥“一基一追”的非均匀性施肥技术体系(M_4 、 M_5 处理),采用基肥深施(8~10 cm)与追肥差异化施用(深施 8~10 cm 或苗带集中撒施)相结合的精准施肥策略,实现了产量-氮效率-环境的三重协同提升。但当前技术方案在施肥参数优化方面仍存在改进空间,特别是深度梯度和施用时期的精准配置问题。为此,后续研究将重点解析:(1)不同土层深度施肥对氮素迁移转化的影响规律;(2)关键生育期养分需求与供应的动态匹配机制;(3)水肥气热耦合对温室气体排放的调控效应。研究成果将为构建高产低碳型小麦栽培技术体系提供科学依据,助力区域小麦单产提升和农业绿色转型。

4 结论

在减氮 15% ($204 \text{ kg hm}^{-2} \text{ N}$) 的条带耕作条件下,结合缓混肥“一基一追”施肥模式可提高稻茬小麦生产效益和环境效益。其中,缓混肥 2 次施用 M_4 模式(60%基肥深施 8~10 cm+40%返青期窄行撒施)和 M_5 模式(60%基肥深施 8~10 cm+40%返青期宽行深施 8~10 cm)表现尤为突出,分别使小麦产量提高 14.1%和 19.0%,净收益增加 34.5%和 35.7%,氮肥表观利用率达到 43.5%和 46.8% (增加 15.52 和 18.77 个百分点)。同时,这 2 种模式显著降低了全生育期 N_2O 排放量(降幅分别为 27.0%和 34.5%),并提高了成熟期耕层土壤矿质氮残留量,实现了小麦生产“增产-增效-减排”的协同提升,且以追肥深施处理(M_5)效应更强。优化处理 M_{4+5} (60%基肥深施 8~10 cm+20%返青期窄行撒施+20%返青期宽行深施 8~10 cm),进一步改善根系形态生理特性,提高氮肥表观利用率和籽粒氮素积累量。

References

- [1] Ma Q, Qian Y S, Yu Q Q, et al. Controlled-release nitrogen fertilizer application mitigated N losses and modified microbial community while improving wheat yield and N use efficiency. *Agric Ecosyst Environ*, 2023, 349: 108445.
- [2] Duan J Z, Shao Y H, He L, et al. Optimizing nitrogen management to achieve high yield, high nitrogen efficiency and low nitrogen emission in winter wheat. *Sci Total Environ*, 2019, 697: 134088.
- [3] Hodge A, Robinson D, Fitter A. Are microorganisms more effective than plants at competing for nitrogen? *Trends Plant Sci*, 2000, 5: 304–308.
- [4] Selbie D R, Buckthought L E, Shepherd M A. Chapter four: the challenge of the urine patch for managing nitrogen in grazed pasture systems. *Adv Agron*, 2015, 129: 229–292.
- [5] 宁运旺, 张辉, 戴娟, 等. 江苏省小麦化肥投入现状与影响因素分析——以苏州市和盐城市为例. *江苏农业科学*, 2019, 47(15): 269–273.
Ning Y W, Zhang H, Dai J, et al. Present situation and influencing factors of wheat fertilizer input in Jiangsu province: taking Suzhou city and Yancheng city as examples. *Jiangsu Agric Sci*, 2019, 47(15): 269–273 (in Chinese with English abstract).
- [6] Liu C R, Ren D Y, Liu H R, et al. Optimizing nitrogen management diminished reactive nitrogen loss and acquired optimal net ecosystem economic benefit in a wheat-maize rotation system. *J Clean Prod*, 2022, 331: 129964.
- [7] Ma Q, Wang M Y, Zheng G L, et al. Twice-split application of controlled-release nitrogen fertilizer met the nitrogen demand of winter wheat. *Field Crops Res*, 2021, 267: 108163.
- [8] Ma Q, Tao R R, Jia W X, et al. Split application of polymer-coated urea combined with common urea improved nitrogen efficiency without sacrificing wheat yield and benefits while saving 20% nitrogen input. *Front Plant Sci*, 2024, 15: 1321900.
- [9] 马泉. 稻茬小麦缓释氮肥两次分施调控产量形成和氮效率的形态生理机制. 扬州大学博士学位论文, 江苏扬州, 2023.
Ma Q. Morphological and Physiological Mechanism of Slow-Release Nitrogen Fertilizer Twice-split Application Regulating Yield Formation and Nitrogen Efficiency in Rice Stubble Wheat. PhD Dissertation of Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu, China, 2023 (in Chinese with English abstract).
- [10] Ma Q, Tao R R, Ding Y G, et al. Can split application of slow-release fertilizer improve wheat yield, nitrogen efficiency and their stability in different ecological regions? *Agronomy*, 2022, 12: 407.
- [11] 杜同庆, 徐鹏, 李振宏. 不同时期追施缓混肥料对稻茬麦生长特征及产量的影响. *耕作与栽培*, 2023, 43(1): 60–63.
Du T Q, Xu P, Li Z H. Effects of topdressing slow-mixing fertilizer at different stages on growth characteristics and yield of wheat following rice. *Tillage Cult*, 2023, 43(1): 60–63 (in Chinese with English abstract).
- [12] 盛海君, 马泉, 蒋昕, 等. 硫包衣缓释掺混肥料施用模式对江苏不同生态区稻茬小麦产量、氮效率与经济效益的影响. *中国土壤与肥料*, 2022(10): 118–127.
Sheng H J, Ma Q, Jiang X, et al. Effects of sulfur coated blended fertilizer application patterns on yield, nitrogen efficiency and economic benefits of winter wheat following rice in different ecological regions of Jiangsu province. *Soil Fert Sci China*, 2022(10): 118–127 (in Chinese with English abstract).
- [13] 马泉, 蒋文月, 张新铎, 等. 硫包膜缓释肥运筹方式对强筋小

- 麦氮素积累转运、产量和品质的影响. 中国土壤与肥料, 2022(8): 148–157.
- Ma Q, Jiang W Y, Zhang X B, et al. Effect of sulfur coated slow-released fertilizer managements on nitrogen accumulation and translocation, yield and quality of strong gluten wheat. *Soil Fert Sci China*, 2022(8): 148–157 (in Chinese with English abstract).
- [14] Li G H, Gu R, Xu K, et al. Split application of a mixture of controlled-release and common urea for improving quality and agronomic and economic performance in wheat production. *Crop Sci*, 2021, 61: 4402–4415.
- [15] 马元喜. 小麦的根. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- Ma Y X. *The Root System of Wheat*. Beijing: China Agriculture Press, 1999 (in Chinese).
- [16] 郝伯为, 赵玉娟. 返青期断根对冬小麦光合特性与产量的影响. 湖北农业科学, 2015, 54: 795–797.
- Hao B W, Zhao Y J. Effects of reviving root-cutting on photosynthetic characteristics and yield of winter wheat. *Hubei Agric Sci*, 2015, 54: 795–797 (in Chinese with English abstract).
- [17] 封涌涛, 路国艳, 胡昌录, 等. 返青期断根对秸秆覆盖冬小麦产量及叶片光合特性的影响. 麦类作物学报, 2021, 41: 738–744.
- Feng Y T, Lu G Y, Hu C L, et al. Effect of spring root pruning on yield and flag leaf photosynthetic characteristics of winter wheat under straw mulching. *J Triticeae Crops*, 2021, 41: 738–744 (in Chinese with English abstract).
- [18] 冯慧敏, 高娜娜, 孟志军, 等. 基于自动导航的小麦精准对行深施追肥机设计与试验. 农业机械学报, 2018, 49(4): 60–67.
- Feng H M, Gao N N, Meng Z J, et al. Design and experiment of deep fertilizer applicator based on autonomous navigation for precise row-following. *Trans CSAM*, 2018, 49(4): 60–67 (in Chinese with English abstract).
- [19] 孙晓然, 孙绿, 赵长星, 等. 追肥深度对旱地小麦花后旗叶衰老特性及产量的影响. 华北农学报, 2015, 30(增刊 1): 420–424.
- Sun X R, Sun L, Zhao C X, et al. Effects of fertilization application depth on senescence characteristics of flag leaf after anthesis and yield of dry-land wheat. *Acta Agric Boreali-Sin*, 2015, 30(S1): 420–424 (in Chinese with English abstract).
- [20] 韩笑, 张晋, 石吕, 等. 稻秸行间集覆宽窄行播种技术下小麦经济效益和碳效率分析. 大麦与谷类科学, 2023, 40(2): 62–67.
- Han X, Zhang J, Shi L, et al. Analysis of the economic benefits and carbon efficiency of wheat production using the technology of centralizing rice straw to cover wide rows and sowing in narrow rows. *Barley Cereal Sci*, 2023, 40(2): 62–67 (in Chinese with English abstract).
- [21] 吕金岭, 高燕喃, 李太魁, 等. 施氮量对砂姜黑土小麦-玉米轮作体系 N₂O 排放的影响. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29: 1846–1856.
- Lyu J L, Gao Y B, Li T K, et al. Effect of nitrogen fertilizer amount on N₂O emission from wheat-maize rotation system in lime concretion black soil. *Chin J Eco-Agric*, 2021, 29: 1846–1856 (in Chinese with English abstract).
- [22] Chen H, Zhou J, Li B, et al. Yield-scaled N₂O emissions as affected by nitrification inhibitor and overdose fertilization under an intensively managed vegetable field: a three-year field study. *Atmos Environ*, 2019, 206: 247–257.
- [23] 杜嘉琪, 张紫薇, 王若飞, 等. 有机肥替代化肥与丛枝菌根真菌互作对砂姜黑土和潮土 N₂O 排放的影响. 中国农业科学, 2025, 58: 101–116.
- Du J Q, Zhang Z W, Wang R F, et al. The interactive effects of organic fertilizer substituting chemical fertilizers and arbuscular mycorrhizal fungi on soil nitrous oxide emission in Shajiang black soil and fluvo-aquic soil. *Sci Agric Sin*, 2025, 58: 101–116 (in Chinese with English abstract).
- [24] 李小方, 张志良. 植物生理学实验指导(第 5 版). 北京: 高等教育出版社, 2016.
- Li X F, Zhang Z L. *Experimental Guidance of Plant Physiology*, 5th edn. Beijing: Higher Education Press, 2016 (in Chinese).
- [25] 段文学, 于振文, 张永丽, 等. 施氮量对旱地小麦氮素吸收转运和土壤硝态氮含量的影响. 中国农业科学, 2012, 45: 3040–3048.
- Duan W X, Yu Z W, Zhang Y L, et al. Effects of nitrogen fertilizer application rate on nitrogen absorption, translocation and nitrate nitrogen content in soil of dryland wheat. *Sci Agric Sin*, 2012, 45: 3040–3048 (in Chinese with English abstract).
- [26] 丁锦峰, 徐东忆, 丁永刚, 等. 栽培模式对稻茬小麦籽粒产量、氮素吸收利用和群体质量的影响. 中国农业科学, 2023, 56: 619–634.
- Ding J F, Xu D Y, Ding Y G, et al. Effects of cultivation patterns on grain yield, nitrogen uptake and utilization, and population quality of wheat under rice-wheat rotation. *Sci Agric Sin*, 2023, 56: 619–634 (in Chinese with English abstract).
- [27] 谭德水, 刘兆辉. 一次性施肥技术实现三大粮食作物轻简化绿色生产. 中国农业科学, 2018, 51: 3823–3826.
- Tan D S, Liu Z H. One-off fertilization technology realized light-simplified and green production for the three major grain crops. *Sci Agric Sin*, 2018, 51: 3823–3826 (in Chinese with English abstract).
- [28] 王火焰, 周健民. 根区施肥——提高肥料养分利用率和减少面源污染的关键和必需措施. 土壤, 2013, 45: 785–790.
- Wang H Y, Zhou J M. Root-zone Fertilization: a key and necessary approach to improve fertilizer use efficiency and reduce non-point source pollution from the cropland. *Soils*, 2013, 45: 785–790 (in Chinese with English abstract).
- [29] 马泉, 王梦尧, 孙全, 等. 硫包膜尿素施用模式对稻茬冬小麦产量、氮肥利用率和效益的影响. 核农学报, 2021, 35: 942–952.
- Ma Q, Wang M Y, Sun Q, et al. Effects of application modes of sulfur coated urea on yield, nitrogen use efficiency and benefit of winter wheat following rice. *J Nucl Agric Sci*, 2021, 35: 942–952 (in Chinese with English abstract).
- [30] 董庆玲, 姜焕昌, 张慧, 等. 普通和控释尿素配合深施提高冬小麦花期旗叶光合性能与氮素利用效率. 植物营养与肥料学报, 2019, 25: 1134–1145.
- Dong Q L, Lou H C, Zhang H, et al. Improving photosynthetic efficiency of flag leaves at anthesis stage and nitrogen utilization of winter wheat by deep placement of common and controlled-release urea mixture. *J Plant Nutr Fert*, 2019, 25: 1134–1145 (in Chinese with English abstract).
- [31] 肖治林, 王琛, 张瑛, 等. 控释氮肥施用策略对稻茬小麦产量和氮肥吸收利用的影响. 麦类作物学报, 2024, 44: 472–484.
- Xiao Z L, Wang C, Zhang Y, et al. Effect of controlled-release nitrogen fertilizer application strategy on yield and nitrogen up-

- take and utilization of wheat following rice stubble. *J Triticeae Crops*, 2024, 44: 472–484 (in Chinese with English abstract).
- [32] 王应君, 王淑珍, 郑义. 肥料深施对小麦生育性状、养分吸收及产量的影响. *中国农学通报*, 2006, 22(9): 276–280.
Wang Y J, Wang S Z, Zheng Y. Effects of deep application of fertilizer on growth character, absorption of nutrition and yield in wheat. *Chin Agric Sci Bull*, 2006, 22(9): 276–280 (in Chinese with English abstract).
- [33] 高凤菊, 吕金岭. 尿素追肥深施对小麦产量及氮肥利用率的影响. *耕作与栽培*, 2006(1): 28.
Gao F J, Lyu J L. Effects of deep application of urea as topdressing on wheat yield and nitrogen use efficiency. *Tillage Cult*, 2006(1): 28 (in Chinese with English abstract).
- [34] 田中伟, 樊永惠, 殷美, 等. 长江中下游小麦品种根系改良特征及其与产量的关系. *作物学报*, 2015, 41: 613–622.
Tian Z W, Fan Y H, Yin M, et al. Genetic improvement of root growth and its relationship with grain yield of wheat cultivars in the middle-lower Yangtze River. *Acta Agron Sin*, 2015, 41: 613–622 (in Chinese with English abstract).
- [35] 杨兰芳, 蔡祖聪. 施氮和玉米生长对土壤氧化亚氮排放的影响. *应用生态学报*, 2005, 16: 100–104.
Yang L F, Cai Z C. Effects of N application and maize growth on N₂O emission from soil. *Chin J Appl Ecol*, 2005, 16: 100–104 (in Chinese with English abstract).
- [36] 马二登, 马静, 徐华, 等. 稻秆还田方式对麦田 N₂O 排放的影响. *土壤*, 2007, 39: 870–873.
Ma E D, Ma J, Xu H, et al. Effects of rice straw returning methods on N₂O emissions from wheat-growing season. *Soils*, 2007, 39: 870–873 (in Chinese with English abstract).
- [37] Wu P, Wu Q, Huang H, et al. Global meta-analysis and three-year field experiment shows that deep placement of fertilizer can enhance crop productivity and decrease gaseous nitrogen losses. *Field Crops Res*, 2024, 307: 109263.
- [38] 徐钰, 刘兆辉, 朱国梁, 等. 不同农业管理措施对华北地区麦田温室气体排放的影响. *中国土壤与肥料*, 2016(2): 7–13.
Xu Y, Liu Z H, Zhu G L, et al. Effects of greenhouse gas emission under different agricultural management practices in wheat field in the North China Plain. *Soil Fert Sci China*, 2016(2): 7–13 (in Chinese with English abstract).
- [39] 侯朋福, 薛利祥, 袁文胜, 等. 缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响. *环境科学*, 2023, 44: 473–481.
Hou P F, Xue L X, Yuan W S, et al. Effect of deep fertilization with slow/controlled release fertilizer on N fate in clayey soil wheat field. *Environ Sci*, 2023, 44: 473–481 (in Chinese with English abstract).
- [40] 卞文新, 马晓晓, 孙东旭, 等. 包膜氮肥一次性减量施用对冬小麦产量和氮素利用的影响. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28: 1840–1851.
Bian W X, Ma X X, Sun D X, et al. Effects of coated nitrogen fertilizer under one-time reduced application on yield and nitrogen use efficiency of winter wheat. *J Plant Nutr Fert*, 2022, 28: 1840–1851 (in Chinese with English abstract).
- [41] Shakoor A, Xu Y L, Wang Q, et al. Effects of fertilizer application schemes and soil environmental factors on nitrous oxide emission fluxes in a rice-wheat cropping system, East China. *PLoS One*, 2018, 13: e0202016.
- [42] Ju X T, Liu X J, Pan J R, et al. Fate of ¹⁵N-labeled urea under a winter wheat-summer maize rotation on the North China Plain. *Pedosphere*, 2007, 17: 52–61.
- [43] Wu H J, Macdonald G K, Galloway J N, et al. The influence of crop and chemical fertilizer combinations on greenhouse gas emissions: a partial life-cycle assessment of fertilizer production and use in China. *Resour Conserv Recycl*, 2021, 168: 105303.
- [44] 张传红, 韩露, 谢佳男, 等. 江苏省主要农作物碳足迹动态及其构成研究. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 2022, 14: 110–119.
Zhang C H, Han L, Xie J N, et al. Carbon footprint dynamics and composition assessment of major crops production in Jiangsu province. *J Nanjing Univ Inf Sci Technol (Nat Sci Edn)*, 2022, 14: 110–119 (in Chinese with English abstract).
- [45] 王兴来, 赵玉蝶, 苗淑杰, 等. 基于生命周期的江苏省稻麦周年轮作碳足迹的南北差异分析. *生态与农村环境学报*, 网络首发 [2025-02-20], <https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2024.0908>.
Wang X L, Zhao Y D, Miao S J, et al. Analysis of north-south differences in the carbon footprint of rice-wheat annual rotation in Jiangsu Province based on life cycle assessment. *J Ecol Rural Environ*, Published online [2025-02-20], <https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2024.0908> (in Chinese with English abstract).
- [46] Ma Y Z, Qiao Y F, Tang Y J, et al. Estimation of N₂O and CH₄ emissions in field study and DNDC model under optimal nitrogen level in rice-wheat rotation system. *Sci Total Environ*, 2025, 974: 179168.
- [47] 李欣欣, 石祖梁, 王久臣, 等. 稻茬冬小麦氮肥吸收、残留和损失特性. *应用生态学报*, 2020, 31: 3691–3699.
Li X X, Shi Z L, Wang J C, et al. Characteristics of uptake, residual and loss of nitrogen fertilizer in winter wheat after rice stubble. *Chin J Appl Ecol*, 2020, 31: 3691–3699 (in Chinese with English abstract).
- [48] Zhang Y J, Ren W C, Zhu K Y, et al. Substituting readily available nitrogen fertilizer with controlled-release nitrogen fertilizer improves crop yield and nitrogen uptake while mitigating environmental risks: a global meta-analysis. *Field Crops Res*, 2024, 306: 109221.
- [49] 冯爱青, 张民, 李成亮, 等. 控释氮肥对土壤酶活性与土壤养分利用的影响. *水土保持学报*, 2014, 28(3): 177–184.
Feng A Q, Zhang M, Li C L, et al. Effects of controlled release nitrogen fertilizer on soil enzyme activities and soil nutrient utilization. *J Soil Water Conserv*, 2014, 28(3): 177–184 (in Chinese with English abstract).