

网络出版时间:2025-09-26

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20250925.1537.004

碳基掺混肥及施用模式对稻茬小麦产量形成、 氮效率和经济效益的影响

马泉^{1,2}, 赵银博¹, 崔连瑞¹, 程喜洋¹, 许珂¹, 张永涛³, 徐莎莎⁴, 朱敏^{1,2},
丁锦峰^{1,2}, 李春燕^{1,2}, 朱新开^{1,2}, 郭文善^{1,2}

(1. 扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室/扬州大学小麦研究中心, 江苏扬州 225009; 2. 粮食作物现代产业技术协同创新中心, 江苏扬州 225009; 3. 江苏诺丽惠农农业科技有限公司, 江苏南京 221001; 4. 扬州市气象局, 江苏扬州 225000)

摘要:为明确新型碳基掺混肥对稻茬小麦产量、氮效率的调控效应,以 F₁ (24-12-8)、F₂ (24-10-10)、F₃ (18-10-7) 和 F₄ (15-10-10) 4 种碳基掺混肥为材料,在肥料成本相近条件下,分别设置碳基掺混肥一次性基施 (M₁)、两次分施 (M₂)、两次分施条件下基肥补施尿素 (M₃) 或追肥补施尿素 (M₄) 4 种施肥模式,以尿素常规 4 次分施为对照 (CK),研究不同处理对小麦群体结构、叶片衰老、产量构成、氮效率和经济效益的影响。结果表明,4 种碳基掺混肥在 M₁ 模式下,成熟期穗数和茎蘖成穗率最低,且乳熟期叶面指数 (LAI) 和旗叶 SPAD 值与开花期相比降幅最大;与 CK 相比,减产 7.96%~12.91%,氮肥表观利用率降低 0.93~3.52 个百分点,经济效益降低 2 012.49~3 070.72 元·hm⁻²。与 M₁ 模式相比,M₂、M₃ 和 M₄ 模式可促进穗数、穗粒数和千粒重提升,产量分别平均提高 12.60%、19.20% 和 16.46%;M₃ 模式更有利于促进小麦前期分蘖发生和干物质积累,生育后期可维持较高的群体 LAI 和旗叶 SPAD 值,增加成熟期干物质积累量和氮素积累量,产量和氮肥表观利用率分别较 CK 提升 2.23%~12.19% 和 3.62~12.48 个百分点。对经济效益进行分析,M₃ 模式产值最高,且节省 2 次追肥人工投入,与 CK 相比 F₁、F₂ 和 F₃ 均实现净效益提升,其中 F₂ 的净效益最高,较 CK 提升 1 399.65 元·hm⁻²。不同肥料比较,F₃ 和 F₄ 的氮肥表观利用率较高,但产量和经济效益均较低;与其他肥料相比,在 M₂、M₃ 和 M₄ 模式下 F₂ 的产量和效益均更高。综上,碳基掺混肥 F₂ 在两次分施条件下,基肥补施尿素的施肥方式可协同提升小麦产量、经济效益和氮肥表观利用率,是促进稻茬小麦高效的施肥方式。

关键词: 碳基掺混肥; 小麦; 产量; 氮效率; 效益

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2025)10-1372-12

Effects of Carbon-Based Blended Fertilizers and Application Patterns on Yield Formation, Nitrogen Use Efficiency and Economic Benefit of Wheat Following Rice Stubble

MA Quan^{1,2}, ZHAO Yinbo¹, CUI Lianrui¹, CHENG Xiyang¹, XU Ke¹, ZHANG Yongtao³,
XU Shasha⁴, ZHU Min^{1,2}, DING Jinfeng^{1,2}, LI Chunyan^{1,2}, ZHU Xinkai^{1,2}, GUO Wenshan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province/Wheat Research Center, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China; 2. Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China; 3. Jiangsu Nuoni Huinong Agricultural Technology Co. Ltd., Nanjing, Jiangsu 210001, China; 4. Yangzhou Meteorological Bureau, Yangzhou, Jiangsu 225000, China)

Abstract: In order to clarify the effect of the new carbon-based blended fertilizer (CBF) on wheat following rice stubble, using F₁ (24-12-8), F₂ (24-10-10), F₃ (18-10-7) and F₄ (15-10-10) as materials,

收稿日期: 2024-10-27

修回日期: 2024-11-30

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (32472226); 江苏省高等学校基础科学 (自然科学) 研究面上项目 (24KJB210022); 国家资助博士后研究人员计划项目 (GZC20232211); 江苏高校优势学科建设工程项目; 扬州大学大学生创新创业训练计划项目 (XCX20240697)

第一作者 E-mail: qma@yzu.edu.cn (马泉); 15639076351@163.com (赵银博)

通讯作者 E-mail: xkzhu@yzu.edu.cn (朱新开); guows@yzu.edu.cn (郭文善)

four application patterns were designed under similar fertilizer cost conditions: CBF applied once pre-sowing (M_1), CBF applied twice (M_2), and CBF applied twice along with urea supplemented pre-sowing (M_3) or at jointing stage (M_4). Using urea four times application as control (CK), the effects of different treatments on wheat population structure, leaf senescence, yield component, nitrogen efficiency, and economic benefit were studied. The results showed that M_1 had the lowest spike number at maturity stage and the percentage of ear bearing tiller, as well as the largest decrease of LAI and SPAD value at milking stage, resulting in a decrease rate in yield of 7.96%–12.91%, a decrease in apparent nitrogen use efficiency of 0.93–3.52 percentage points, and a decrease in net benefit of 2 012.49–3 070.72 yuan \cdot hm⁻² compared with CK. Compared with M_1 , M_2 , M_3 and M_4 promoted spike number, kernel number per spike and 1 000-grain weight, and increased grain yield by 12.60%, 19.20% and 16.46%, respectively. M_3 was more conducive to improving tillering and matter accumulation at the early stage of wheat, promoting seedling strength, maintaining higher population LAI and flag leaf SPAD value, and increasing dry matter and nitrogen accumulation at maturity stage, which increased yield and apparent nitrogen use efficiency by 2.23%–12.19% and 3.62–12.48 percentage points compared with CK, respectively. From the perspective of economic benefit, M_3 achieved the highest output value and saved twice labor input of topdressing, and thus improved net benefit, compared with CK in F_1 , F_2 and F_3 , which achieved the highest net benefit in F_2 , with an increase of 1 399.65 yuan \cdot hm⁻² compared with CK. In different fertilizer formulations, F_3 and F_4 increased apparent nitrogen use efficiency but failed to reach the expected yield and benefits under the similar fertilizer costs. F_2 showed higher yield and benefits in M_2 , M_3 , and M_4 compared with other formula fertilizers. In summary, among different formulations of CBF, F_2 applied twice along with urea supplement pre-sowing is the most beneficial fertilizer method to synergistically improve wheat yield, economic benefit and apparent nitrogen use efficiency, which can promote the high-yield and high-efficiency cultivation of wheat following rice stubble.

Keywords: Carbon-based blended fertilizer; Wheat; Yield; Nitrogen use efficiency; Benefit

小麦是中国重要的口粮作物之一,推动其高产高效生产对于保障国家粮食安全具有重要意义^[1]。传统小麦生产中,化肥的过度投入不仅导致土壤退化、水体富营养化、温室气体排放等环境问题日益加剧^[2-3],还降低肥料利用率,加大劳动力投入,增加生产成本,加剧资源浪费,严重制约小麦种植的效益提升和农民的生产积极性^[4-5]。如何协同提高经济效益与生态效益、资源利用率与劳动生产率成为当前小麦产业发展亟待解决的问题。前人研究指出,传统氮肥利用率低的原因在于肥料的用量、施用方式及其自身存在的结构性问题^[6-7]。如常规尿素遇水易溶解,施用到土壤中在脲酶等的作用下短时间内即被转化为铵态氮和硝态氮,而作物在施肥初期通常尚未达到生长旺盛期,对于氮素养分的需求量较低,大量氮素无法被作物及时吸收利用,作物生育期内养分供应不平衡不仅导致土壤内氮素淋溶风险加大,同时伴随着大量的 N₂O 排放和 NH₃ 挥发^[5,8]。根据

小麦的需氮规律,合理调控氮肥投入是提高氮效率、优化小麦群体结构、促进产量提升的重要途径之一。

近年来,为克服传统氮肥肥效期短、利用率低等弊端,众多学者开展了缓控释肥^[9]、水溶肥^[10]、微生物肥^[11]和碳基肥^[12]等多种新型肥料の開発,并且在平衡施肥^[13]、精确定量施肥^[14]、测土配方施肥^[15]、水肥耦合技术^[16]等施肥技术方面进行了诸多探索,为作物种植减少氮素损失、促进增产增效起到了重要的推动作用。其中碳基肥因其保肥增效、固碳减排和土壤改良等众多优点受到关注。骆晓声等^[17]对小麦-玉米轮作系统研究发现,施用碳基肥有利于提高农田养分含量,改善土壤微生物活性,促进产量提升;康日峰等^[18]研究表明,增施碳基肥可促进小麦干物质积累和氮素吸收,协同提高产量和氮肥利用率。乔志刚等^[19]研究指出,碳基肥由于生物碳具有较大的比表面积、发达的孔隙结构、较高的阳离子交换量,

可通过增强对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸附, 提高对土壤养分的固持能力, 从而减少氮素损失, 增加土壤养分含量, 促进水稻产量提升。江苏诺丽惠农农业科技有限公司在常规碳基肥的基础上, 通过添加矿源腐殖酸、改性生物碳和植物源有机碳等多种碳源制备的新型碳基掺混肥, 具有良好的活化土壤微生物、改良土壤性状和固持土壤养分等潜力^[20-21]。

小麦生育周期较长, 且对养分的需求存在周期性动态变化, 碳基掺混肥在减次施用的条件下养分供应是否匹配小麦生育期养分需求、能否实现小麦生产增产增效的目标尚未得到证实。此外, 由于其制备工艺和原料成本等因素限制, 碳基掺混肥生产成本较高, 在小麦大田种植下的经济可行性尚有待明确。为此, 本研究以 4 种碳基掺混肥为材料, 在控制相近肥料成本用量条件下, 结合普通尿素设计不同碳基掺混肥施用模式, 分析其对小麦群体、产量、氮肥利用率和经济效益等的效应, 以筛选碳基掺混肥合理施用方式, 为推动小麦节肥增效生产提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验点概况与供试材料

试验于 2023 年 11 月—2024 年 5 月在江苏省扬州市江都区宜陵镇大陈村试验基地(32°、45°N, 119°、67°E)进行。土壤类型为砂壤土, 播种前耕层(0~20 cm)土壤 pH 为 7.89, 有机质和全氮

含量分别为 19.33 和 1.20 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮、速效磷和速效钾含量分别为 101.12、22.88 和 81.78 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。前茬作物为水稻, 秸秆全量还田。供试小麦品种为扬麦 39。供试肥料为 4 种碳基掺混肥(CBF), 分别为 F_1 (N-P₂O₅-K₂O=24-12-8)、 F_2 (N-P₂O₅-K₂O=24-10-10)、 F_3 (N-P₂O₅-K₂O=18-10-7)和 F_4 (N-P₂O₅-K₂O=15-10-10), 均由江苏诺丽惠农农业科技有限公司提供。常规尿素(46% N)由市场购入。

1.2 试验设计

试验采用二因素裂区设计: 施肥种类($\text{F}_1 \sim \text{F}_4$)为主区, 控制不同施肥种类单位面积施用肥料成本相近, 其中 F_1 施氮量 240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, F_2 施氮量 240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, F_3 施氮量 210 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, F_4 施氮量 180 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 以施用模式为裂区, 设碳基掺混肥一次性基施(M_1)、碳基掺混肥两次分施(M_2 基施+拔节期追施)、碳基掺混肥两次分施条件下基肥补施尿素(M_3)或追肥补施尿素(M_4)共 4 个模式(表 1); 以尿素常规 4 次施用为对照(CK, 施 N 量 240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 氮、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)肥用量比例为 24-10-10, 磷、钾肥全量基施。试验另设 4 个与碳基掺混肥磷、钾用量一致的不施氮空白对照, 以计算氮效率。试验小区面积 40.5 m^2 (2.7 m × 15.0 m), 随机排列, 重复 3 次。2023 年 11 月 6 日播种, 2024 年 5 月 29 日收获, 采用机器条播, 行距为 27 cm, 播种量为 180 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。田间管理按当地高产大田进行。

表 1 不同施肥模式

Table 1 Different fertilization patterns

模式 Pattern	施肥设计 Fertilization design
CK	尿素, 基肥: 分蘖肥: 拔节肥: 孕穗肥 = 50%: 10%: 20%: 20% Urea, basal: tillering: booting: jointing = 50%: 10%: 20%: 20%
M_1	CBF 100% 一次性基施 100% CBF applied once pre-sowing
M_2	CBF 60% 基施 + 40% 拔节期追施 60% CBF applied pre-sowing + 40% CBF applied at jointing stage
M_3	CBF 60% 基施 + 40% 拔节期追施, 基肥补 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 尿素 60% CBF applied pre-sowing + 40% CBF applied at jointing stage, 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ urea supplemented pre-sowing
M_4	CBF 60% 基施 + 40% 拔节期追施, 追肥补 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 尿素 60% CBF applied pre-sowing + 40% CBF applied at jointing stage, 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ urea supplemented at jointing stage

CBF: 碳基掺混肥。CBF: Carbon-based blended fertilizer.

1.3 测定项目与方法

1.3.1 茎蘖数和干物质积累量检测

分别于小麦越冬期、拔节期、孕穗期、开花期和成熟期在每小区取样 20 株, 调查茎蘖数; 将植

株样品分器官在 105 °C 烘箱内杀青 1 h, 80 °C 烘干至恒重, 计算干物质积累量。

1.3.2 叶面积指数(LAI)和旗叶 SPAD 值测定

分别于小麦开花期和乳熟期, 在每小区取样

20 株,将叶片取下后调查叶面积。在田间采用 SPAD502 叶绿素仪(Konica Minolta,日本)测定旗叶 SPAD 值,重复 5 次。

1.3.3 籽粒产量及其构成因素测定

于小麦成熟期,每处理选具代表性样点连续取 50 穗,测穗粒数;选取 3 个有代表性的 1.08 m²(4 个 1 m 行长)样方,测定穗数;人工收割脱粒、晾晒后称重,计算产量。在收获的籽粒中人工测定千粒重,重复 3 次。测量籽粒含水率并以标准含水率(13%)折算小麦籽粒产量和千粒重。

1.3.4 氮素积累量及氮效率测定

取 1.3.1 部分中成熟期烘干的植株样品,采用高速粉碎机粉碎,采用 H₂SO₄-H₂O₂ 靛酚蓝比色法测定各器官的氮含量,植株氮素积累量为各器官氮含量与干物质积累量乘积之和,计算氮肥表观利用率(NAE)^[22],

$$NAE = (\text{施氮区吸氮量} - \text{无氮区吸氮量}) / \text{施氮量} \times 100\%$$

1.4 数据分析

小麦经济效益分析参照丁锦峰等^[23]方法,公式如下:

$$\text{小麦总产值} = \text{籽粒产量} \times \text{小麦单价};$$

$$\text{净效益} = \text{小麦总产值} - \text{氮肥成本} - \text{追肥人工成本} - \text{其余成本投入}。$$

其中,小麦单价按照江苏 2024 年上半年平均价格计算,为 2 425 元 · t⁻¹;肥料价格按照市场价计算,其中尿素为 2 500 元 · t⁻¹,F₁、F₂ 为 3 400 元 · t⁻¹,F₃、F₄ 为 3 000 元 · t⁻¹。追肥人工成本为每次 150 元 · hm⁻²,其余成本投入主要包含机械作业费、农药、种子、追肥外人工投入等,共计 4 765 元 · hm⁻²。

采用 Excel 2010 进行数据整理和绘图,采用 DPS 7.05 进行统计分析 with 差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 小麦茎蘖动态变化

由表 2 可知,小麦茎蘖数随生育进程推移整体呈先增加后下降的趋势,在拔节期达到峰值。不同施用模式间比较,M₁ 模式在越冬和拔节期茎蘖数最高,但在孕穗后降幅较大,成熟期穗数最低,较 M₃ 模式平均下降 9.48%,在 F₁、F₂ 和 F₃ 条件下,二者差异均达显著水平(P<0.05);M₁ 模

表 2 不同碳基掺混肥及施用模式对小麦茎蘖动态的影响

Table 2 Effects of different carbon-based blended fertilizers and application patterns on dynamics of wheat stem and tiller number

肥料 Fertilizer	模式 Pattern	茎蘖数 Stem and tiller number/(×10 ⁴ · hm ⁻²)					成穗率 Percentage of ear bearing tiller/%
		越冬期 Over-wintering	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	开花期 Anthesis	成熟期 Maturity	
CK		524.69abc	823.15ef	622.22bc	446.91a-d	404.01b-e	49.08
F ₁	M ₁	565.43ab	965.74ab	628.40abc	438.27cd	392.59cde	40.65
	M ₂	516.05bc	867.59c-f	639.51abc	456.79a-d	413.58a-e	47.67
	M ₃	534.57abc	943.52abc	674.07a	486.42a	441.67a	46.81
	M ₄	520.99abc	868.52c-f	641.98abc	462.96a-d	425.00abc	48.93
F ₂	M ₁	576.54a	1 000.00a	632.10abc	439.51cd	400.62cde	40.06
	M ₂	516.05bc	856.48def	638.27abc	462.96a-d	421.30a-d	49.19
	M ₃	528.40abc	945.37abc	662.96ab	483.95ab	435.80ab	46.10
	M ₄	512.35bc	853.70def	644.44abc	465.43a-d	422.22abc	49.46
F ₃	M ₁	540.74abc	937.04abc	609.88c	432.10cd	387.35de	41.34
	M ₂	497.53c	813.89ef	617.28bc	444.44bcd	400.93cde	49.26
	M ₃	518.52abc	920.37bcd	646.91abc	469.14abc	437.96a	47.59
	M ₄	503.70c	810.19ef	620.99bc	450.62a-d	409.26a-e	50.51
F ₄	M ₁	535.80abc	878.70cde	603.70c	427.16d	386.73e	44.01
	M ₂	488.89c	812.04ef	618.52bc	446.91a-d	401.54cde	49.45
	M ₃	514.81bc	863.89c-f	634.57abc	459.26a-d	416.67a-e	48.23
	M ₄	492.59c	786.11f	618.52bc	448.15a-d	403.40b-e	51.32

同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Different lowercase letters following data within the same columns indicate significant differences among different treatments(P<0.05). The same in tables 3 and 4.

式的茎蘖成穗率也最低,与CK相比平均下降7.57个百分点。 M_3 模式的孕穗期和开花期茎蘖数、成熟期穗数均最高,与 M_2 模式相比,成熟期穗数平均增幅为5.81%。 M_4 模式在拔节前茎蘖数低于 M_3 模式,但由于拔节期补施尿素,孕穗后无效分蘖死亡减少,成熟期穗数与 M_3 模式差异不显著,且茎蘖成穗率较 M_3 模式有所提升,平均增幅为2.87个百分点。在相近肥料成本用量下, F_1 和 F_2 在相同施用模式下,不同生育时期的茎蘖数高于 F_3 和 F_4 ,以 F_4 最低。

2.2 小麦干物质积累动态变化

由表3可知,小麦干物质积累量随生育进程推移整体呈持续增加的趋势。不同模式间比较, M_1 模式在越冬期和拔节期干物质积累量最高,且在4种肥料中均显著高于 M_2 和 M_4 模式($P < 0.05$),但在孕穗后积累速率逐渐下降;成熟期和花后干物质积累量均最低,较CK平均降低9.62%和7.07%,与 M_3 模式相比降幅达16.01%和13.24%。 M_3 模式各生育期干物质积累量均高于 M_2 ; M_4 模式孕穗至成熟期干物质积累量高于 M_2 模式。成熟期各施肥模式干物质积累量表现为 $M_3 > M_4 > M_2 > M_1$,其中 M_3 和 M_4 模式较 M_2 模式平均增加7.32%和4.13%,较CK分别增加7.73%和4.52%。各施肥模式花后干物质

积累量表现为 $M_4 > M_3 > M_2 > M_1$,其中 M_4 与 M_3 模式差异不显著,但二者均显著高于 M_1 模式。在相同施肥模式下,各肥料成熟期干物质积累量表现为 $F_2 > F_1 > F_3 > F_4$,其中 F_2 干物质积累量在 M_3 和 M_4 模式下显著高于 F_1 、 F_3 和 F_4 。

2.3 小麦花后叶面积指数(LAI)变化

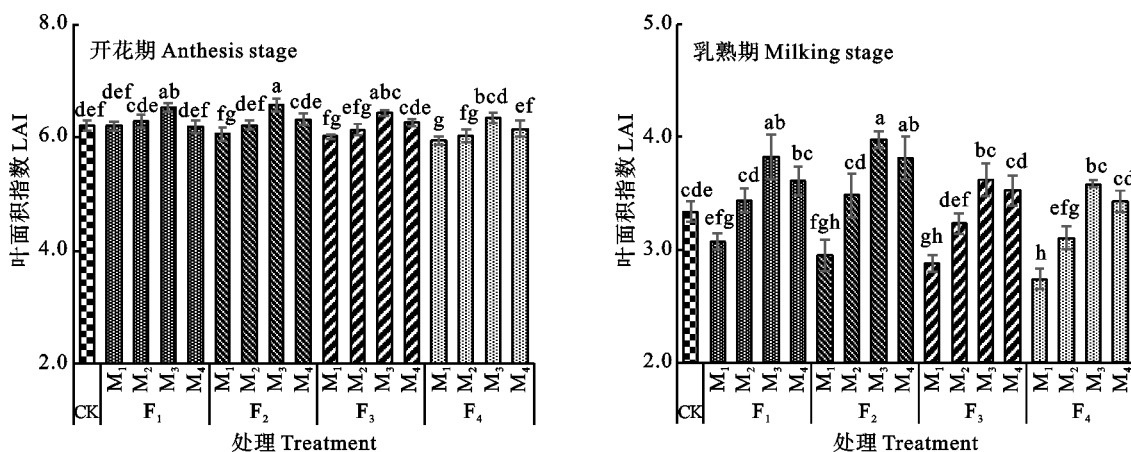
小麦花后LAI在不同施用模式间存在显著差异($P < 0.05$), M_3 模式开花期和乳熟期LAI均最高,其中在开花期较 M_1 、 M_2 和 M_4 模式分别平均提升6.88%、4.99%和3.89%,较CK平均提升4.21%;在乳熟期与 M_1 、 M_2 和 M_4 模式相比分别平均提升28.93%、13.21%和4.40%,较CK平均提升12.30%(图1)。 M_1 和 M_2 模式在乳熟期的LAI显著低于 M_3 和 M_4 模式,其中 M_1 模式与 M_3 和 M_4 模式相比开花期LAI平均分别降低6.42%和2.78%,乳熟期LAI平均分别降低22.35%和18.97%; M_2 模式与 M_3 和 M_4 模式相比,开花期LAI平均分别降低4.75%和1.04%,乳熟期LAI平均分别降低11.65%和7.76%;在乳熟期, M_4 模式LAI低于 M_3 模式,但在4种肥料中差异均未达显著水平。在 M_3 和 M_4 模式下,4种肥料乳熟期的LAI表现为 $F_2 > F_1 > F_3 > F_4$,且 F_2 显著高于 F_3 和 F_4 。

表3 不同配方碳基掺混肥及施用模式对小麦干物质积累(DMA)动态的影响

Table 3 Effects of different carbon-based blended fertilizers and application patterns on dynamics of wheat dry matter accumulation(DMA)

肥料 Fertilizer	模式 Pattern	越冬期 Over-wintering	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	开花期 Anthesis	成熟期 Maturity	花后 Post-anthesis
CK		233.38f-i	2 480.30de	7 311.11hi	10 855.87def	16 267.96efg	5 412.10c-g
F_1	M_1	269.85ab	2 907.29ab	7 697.84fg	9 645.70gh	14 755.40ijk	5 109.70fgh
	M_2	237.38e-h	2 526.60de	7 290.37hi	11 004.07cde	16 578.78def	5 574.70b-g
	M_3	264.76abc	2 699.87bcd	8 442.78b	11 723.45bc	17 521.80bc	5 798.35a-d
	M_4	238.52efg	2 511.72de	7 735.80efg	11 262.85bcd	17 176.16cd	5 913.32abc
F_2	M_1	268.36abc	3 093.02a	7 996.05de	10 169.66fg	15 203.03hij	5 033.36gh
	M_2	242.43d-g	2 550.37de	7 866.70def	11 405.99bcd	17 294.63bcd	5 888.65abc
	M_3	277.91a	2 818.29bc	8 933.43a	12 758.79a	18 880.27a	6 121.48ab
	M_4	239.45efg	2 543.34de	8 297.22bc	11 902.17b	18 054.64b	6 152.48a
F_3	M_1	262.91abc	2 725.06bcd	7 211.79hi	9 401.82h	14 576.59jk	5 174.77e-h
	M_2	228.83ghi	2 363.20e	7 222.22hi	10 418.78ef	15 895.11fgh	5 476.33c-g
	M_3	259.34a-d	2 666.84bcd	8 037.90cd	11 292.33bcd	16 959.68cde	5 667.34a-e
	M_4	227.58ghi	2 374.95e	7 482.90gh	10 853.46def	16 579.09def	5 725.64a-e
F_4	M_1	249.69c-f	2 590.78cde	7 168.98i	9 475.27h	14 275.69k	4 800.42h
	M_2	215.71i	2 097.76f	7 298.52hi	10 249.96fg	15 543.34ghi	5 293.37d-h
	M_3	253.26b-e	2 571.41cde	8 074.88cd	11 120.50cde	16 743.33cde	5 622.83a-f
	M_4	219.77hi	2 120.48f	7 422.22hi	10 433.11ef	16 200.75efg	5 767.64a-d

kg · hm⁻²



图柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Different lowercase letters above the columns indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$). The same in figures 2 and 3.

图 1 不同碳基掺混肥及施用模式对小麦叶面积指数(LAI)的影响

Fig. 1 Effects of different carbon-based blended fertilizers and application patterns on leaf area index(LAI) of wheat

2.4 小麦花后旗叶 SPAD 值变化

相同肥料处理小麦旗叶 SPAD 值在不同施肥模式间存在显著差异 ($P < 0.05$), 在开花期和乳熟期均呈 $M_4 > M_3 > M_2 > M_1$ 的趋势(图 2), 其中 M_1 模式开花期和乳熟期 SPAD 值较 M_4 模式平均降低 4.36% 和 18.92%, M_2 较 M_4 模式平均降低 3.12% 和 9.66%; 相同肥料中, M_1 和 M_2 模

式乳熟期 SPAD 值均显著低于 M_3 和 M_4 模式。在乳熟期, CK 与 M_3 和 M_4 模式相比 SPAD 值显著降低, 平均下降 8.64% 和 10.90%。在 4 种肥料中, F_1 和 F_2 乳熟期的 SPAD 值高于 F_3 和 F_4 ; 其中在 M_3 和 M_4 模式下, F_2 乳熟期的 SPAD 值最高, 较 CK 分别提高 14.21% 和 17.60%, 与 F_1 差异不显著, 但二者均显著高于 F_4 。

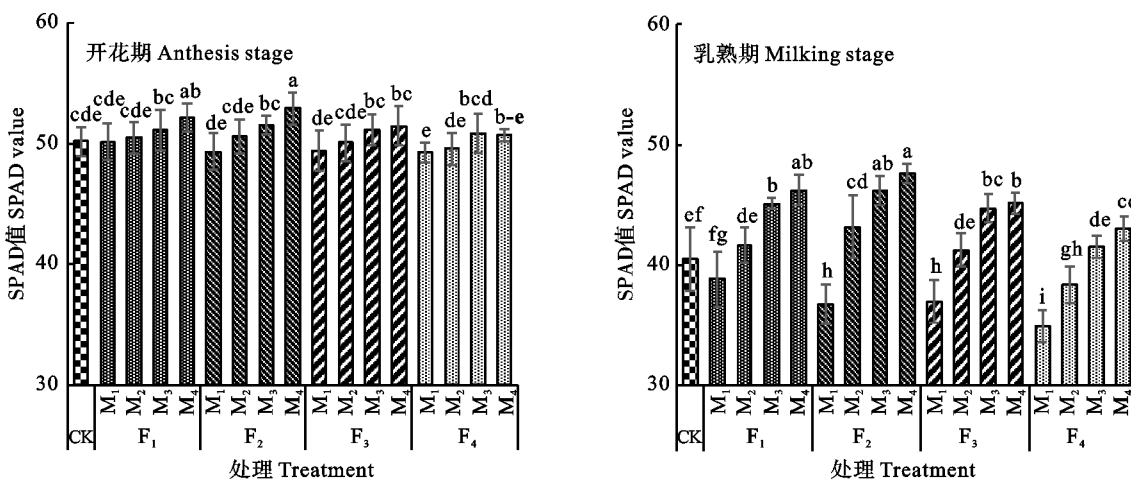


图 2 不同碳基掺混肥及施用模式对旗叶 SPAD 值的影响

Fig. 2 Effects of different carbon-based blended fertilizers and application patterns on SPAD value of flag leaves

2.5 小麦产量及其构成因素分析

由表 4 可知, 碳基掺混肥类型和施用模式显著影响小麦产量及其构成 ($P < 0.05$)。在 M_2 、 M_3 和 M_4 模式下, F_2 的产量均最高, 其次为 F_1 ; 其中 $F_2 M_3$ 处理的产量最高, 达 $8\ 836.19\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较 CK 增产 12.19%; 在 M_2 、 M_3 和 M_4 模式下 F_3 和 F_4 的产量均低于 F_2 和 F_1 。4 种施用

模式在 4 种肥料中的产量均表现为 $M_3 > M_4 > M_2 > M_1$, 其中 M_1 模式下, 4 种肥料的产量均显著低于 CK, 降幅平均达 10.04% (7.96% ~ 12.91%)。在 M_2 模式下, F_1 和 F_2 的产量较 CK 增加 4.37% 和 6.77%, F_3 和 F_4 的产量较 CK 下降 0.87% 和 5.14%。 M_3 和 M_4 模式的产量在 4 种肥料条件下均高于 CK, 平均增幅分别达 7.20%

(2.23%~12.19%)和4.72%(1.09%~9.93%)。分析产量构成可以发现,在相同肥料下,M₃模式的穗数和千粒重与M₄模式均无显著差异,但较M₁与M₂模式显著增加;其中M₃模式较CK在4种肥料条件下的穗数和穗粒数平均增幅分别达7.18%和5.47%。在M₃模式下,F₂的穗粒数显著高于F₁、F₃和F₄,千粒重显著高于F₃和F₄。

2.6 经济效益评价

由表5可知,M₁和M₂模式下,4种肥料成本较CK提高了854.11~1 054.11元·hm⁻²,分别节省追肥人工投入450和300元·hm⁻²,其中M₁模式的净效益较CK降低2 012.49~3 070.72元·hm⁻²;M₂模式下,F₁和F₂的净效益较CK提升280.98和739.53元·hm⁻²,但由于产值提升不足,F₃和F₄的净效益较CK分别下降820.82和1 735.33元·hm⁻²。M₃和M₄模式成本与M₂模式相比提升375元·hm⁻²,其中,M₃模式净效益较M₂模式提高141.79~1 187.77元·hm⁻²,M₄模式净效益较M₂模式提高-337.67~814.52元·hm⁻²,仅在F₁条件下未能实现效益提升。在4种肥料下,M₃模式的净效益高于其它模式,其净效益在F₂下最高,较CK提升1 399.65元·hm⁻²,其次为F₁和F₃条件下,分别提升422.77

和366.95元·hm⁻²,F₄和CK相比净效益下降702.40元·hm⁻²。

2.7 小麦氮素积累量及氮肥表现利用率分析

在相同肥料中,小麦成熟期氮素积累量均表现为M₃>M₄>M₂>M₁(图3)。M₃和M₄模式的氮素积累量显著高于CK,平均增幅分别达17.77%和13.87%;M₂模式在F₁和F₂条件下显著高于CK,但在F₄条件下显著低于CK,降幅达5.25%;M₁模式下4种肥料的氮素积累量均显著低于CK,平均降幅达11.34%。在相同施肥模式下,F₂的氮素积累量高于其他肥料,其中在M₃模式下较F₁、F₃和F₄分别提升了6.63%、7.45%和10.50%,与CK相比提升24.84%。

在相同肥料中,各施肥模式下的氮肥表现利用率均表现为M₂>M₃>M₄>M₁(图3)。不同肥料中,M₂模式的氮肥表现利用率较CK平均提升9.86个百分点;由于M₃和M₄模式额外补施尿素,其氮肥表现利用率较M₂模式不同程度降低,但仍较CK平均提升7.28和4.76个百分点;M₁模式氮肥表现利用率均低于CK,平均下降2.17个百分点。在相同施肥模式下,F₂的氮肥表现利用率高于F₁,但仅在M₄模式下差异显著,且均明显低于F₃和F₄,主要是由于F₃和F₄的含氮量较低导致。

表4 不同配方碳基掺混肥及施用模式对小麦产量及其构成的影响

Table 4 Effects of different carbon-based blended fertilizers and application patterns on wheat yield and yield components

肥料 Fertilizer	模式 Pattern	穗数 Spike number/ (×10 ⁴ ·hm ⁻²)	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)	较CK增产率 Increase rate to CK/%
	CK	404.01b-e	35.65ef	55.68ab	7 875.87d	—
F ₁	M ₁	392.59cde	36.12c-f	53.51f	7 212.62fg	-8.42
	M ₂	413.58a-e	37.54bcd	54.04def	8 220.24cd	4.37
	M ₃	441.67a	37.47bcd	55.24abc	8 433.35abc	7.08
	M ₄	425.00abc	37.72bcd	54.45c-f	8 235.63cd	4.57
F ₂	M ₁	400.62cde	37.12b-e	54.92bcd	7 019.31g	-10.88
	M ₂	421.30a-d	37.86abc	55.61ab	8 409.33bc	6.77
	M ₃	435.80ab	39.38a	56.12a	8 836.19a	12.19
	M ₄	422.22abc	37.98ab	56.12a	8 657.63ab	9.93
F ₃	M ₁	387.35de	36.12c-f	53.52f	7 248.78fg	-7.96
	M ₂	400.93cde	36.29b-f	53.74ef	7 807.12de	-0.87
	M ₃	437.96a	37.47bcd	54.77b-e	8 451.57abc	7.31
	M ₄	409.26a-e	36.72b-e	54.86bcd	8 136.01cd	3.30
F ₄	M ₁	386.73e	34.78f	53.65f	6 858.71g	-12.91
	M ₂	401.54cde	34.86f	53.79ef	7 471.25ef	-5.14
	M ₃	416.67a-e	36.07def	54.84bcd	8 051.83cd	2.23
	M ₄	403.40b-e	36.31b-f	54.77b-e	7 961.77d	1.09

表 5 不同碳基掺混肥及施用模式对小麦经济效益的影响

Table 5 Wheat economic benefits under different carbon-based blended fertilizers and application patterns

		yuan · hm ⁻²					
肥料 Fertilizer	模式 Pattern	产值 Output	肥料成本 Fertilizer cost	追肥人工投入 Topdressing labor cost	其余成本投入 Other cost	净效益 Net benefit	效益增量 Benefit increase
CK		19 098.99	2 545.89	450.00	4 765.00	11 338.10	—
F ₁	M ₁	17 490.61	3 400.00	0.00	4 765.00	9 325.61	-2 012.49
	M ₂	19 934.08	3 400.00	150.00	4 765.00	11 619.08	280.98
	M ₃	20 450.87	3 775.00	150.00	4 765.00	11 760.87	422.77
	M ₄	19 971.41	3 775.00	150.00	4 765.00	11 281.41	-56.69
F ₂	M ₁	17 021.84	3 400.00	0.00	4 765.00	8 856.84	-2 481.26
	M ₂	20 392.63	3 400.00	150.00	4 765.00	12 077.63	739.53
	M ₃	21 427.75	3 775.00	150.00	4 765.00	12 737.75	1 399.65
	M ₄	20 994.76	3 775.00	150.00	4 765.00	12 304.76	966.66
F ₃	M ₁	17 578.29	3 500.00	0.00	4 765.00	9 313.29	-2 024.81
	M ₂	18 932.28	3 500.00	150.00	4 765.00	10 517.28	-820.82
	M ₃	20 495.05	3 875.00	150.00	4 765.00	11 705.05	366.95
	M ₄	19 729.82	3 875.00	150.00	4 765.00	10 939.82	-398.28
F ₄	M ₁	16 632.37	3 600.00	0.00	4 765.00	8 267.37	-3 070.72
	M ₂	18 117.77	3 600.00	150.00	4 765.00	9 602.77	-1 735.33
	M ₃	19 525.70	3 975.00	150.00	4 765.00	10 635.70	-702.40
	M ₄	19 307.29	3 975.00	150.00	4 765.00	10 417.29	-920.80

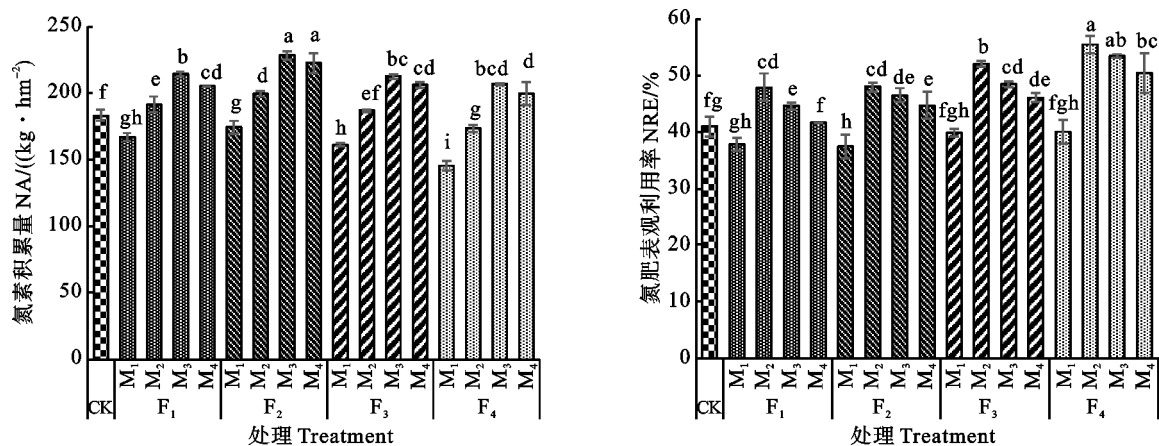


图 3 不同碳基掺混肥及施用模式对小麦成熟期氮素积累量(NA)及氮肥表观利用率(NRE)的影响

Fig. 3 Effects of different carbon-based blended fertilizers and application patterns on nitrogen accumulation(NA) of wheat at maturity stage and apparent nitrogen use efficiency(NRE)

3 讨论

3.1 不同碳基掺混肥及施用模式对小麦群体质量的效应

在小麦生长过程中,合理施氮是高产高效的重要保障,适量、适时的氮肥供应有利于满足小麦各个生育阶段植株生长的养分需求,协调群体与个体生长之间的矛盾,构建适宜的生长群体,从而实现小麦产量和氮效率的协同提升^[24-25]。骆晓声

等^[17]指出,碳基肥对土壤养分有吸持作用,能够在作物生长后期持续释放部分养分以满足植株对养分的需求,对冬小麦和玉米产量的提高有促进作用。康日峰等^[18]研究表明,施用生物碳基肥可改善土壤肥力,促进小麦地上部对氮、磷养分的吸收,从而显著提升小麦地上部干重,有利于产量提升。陈琳等^[26]研究认为,生物碳基肥可显著提高水稻成穗率和总结实粒数,并促进氮素向籽粒的运输,因而在减少施氮量的条件下仍显著提高籽

粒产量。本试验结果表明,4种碳基掺混肥在采用一次性基施的方式时,可促进小麦拔节前的分蘖发生和干物质积累,但后期养分供应不足,无效分蘖大量死亡,茎蘖成穗率和CK相比平均下降7.57个百分点,且成熟期干物质积累量也显著降低,不利于小麦产量形成。在碳基掺混肥相近成本用量下,4种碳基肥料基施60%+拔节期追施40%的施用方式下与对照相比减少两次施肥,拔节期茎蘖数和成熟期穗数、干物质积累量和花后干物质积累量均与CK无显著差异,其中F₁和F₂在成熟期和花后的干物质积累量表现出一定的优势。这可能由于碳基掺混肥中的改性生物炭和腐殖酸等物质有发达的孔隙和丰富的有机官能团,并且具有较强的离子交换和吸附能力,一方面对肥料养分有一定的吸附能力,促进养分缓慢持续释放,有利于作物生育中后期的养分需求^[18,27-28];另一方面丰富的碳源促进土壤中微生物生长,提高其在土壤中的活性,有利于促进植株根系形成和生长,同时有效增加土壤氮素有效性,提高土壤中可被作物吸收利用的养分含量,提高根系养分吸收性能,进而促进作物地上部的单茎和群体生长^[29]。程运龙等^[30]研究也认为,小麦播种和返青期两次分施碳基复合肥可促进小麦养分吸收,为地上部干物质生产提供养分保障,有效促进穗数和穗粒数同步提升,小麦增产效果显著。本试验条件下,碳基掺混肥两次分施时,基肥或拔节肥补施尿素均更有利于促进小麦穗数提升和成熟期及花后干物质积累,其中基肥补施尿素效果优于拔节期补施尿素,这可能是由于本试验田土壤肥力偏低,播种前补施一定量的尿素更有利于小麦前期发育,促进壮苗形成,从而有利于高峰苗和最终穗数提升,提高干物质积累量。不同肥料配比中,F₂的氮素供应充足,磷、钾配比平衡,更有利于促进小麦群体发育,提高成熟期穗数和干物质积累量。

3.2 不同碳基掺混肥及施用模式对小麦叶片花后衰老的效应

叶片是决定小麦产量的重要营养器官,小麦光合作用生产的物质占植株总干重的95%以上,其中开花后光合产物积累量可占籽粒干重的70%~90%^[31]。因此,延缓小麦花后叶片衰老,提高叶片光合性能是促进物质生产和产量提升的重要途径。诸多研究表明,小麦生育中后期维持充足的氮素供应有利于提高花后叶片抗氧化酶活

性,延缓叶面积和叶绿素含量的下降,提高花后光合性能,促进光合产物积累^[32-34]。生物碳基肥合理施用可调节叶片膜脂过氧化水平,提高叶片可溶性糖和脯氨酸含量,改善叶片生理活性和抗逆性,从而促进光合性能提升^[35-36]。叶绿素是绿色植物光合作用的基础物质,其含量在一定程度上反映了叶片的光合能力^[37]。在本试验条件下,碳基掺混肥一次性基施的开花期旗叶SPAD值与两次分施模式间无显著差异,但乳熟期旗叶SPAD值显著低于两次分施模式,群体LAI也表现出相同趋势,表明后期养分供应不足难以维持小麦灌浆期叶片的功能持续,导致叶片早衰,不利于小麦籽粒灌浆充实。碳基掺混肥两次分施可提高小麦花后叶片LAI、延缓旗叶SPAD值下降,可能一方面由于后期充足的氮素养分供应有利于改善叶片生理活性,避免下部叶片早衰;另一方面可能是因为多种碳源物质施用可改善土壤性状,促进土壤养分循环,并且提高根系活力,优化根系构型,提高根系对养分的吸收利用能力,进而提高植株地上部生理活性,改善叶片抗逆性,延缓植株衰老^[19,38]。本研究还发现,碳基掺混肥两次分施的同时基肥或拔节肥补施一定尿素均有利于提高小麦花后尤其是乳熟期LAI和旗叶SPAD值,这对于提高小麦灌浆期光合性能、促进物质积累具有重要作用。拔节肥补施尿素对延缓乳熟期旗叶SPAD值下降的效果优于基肥补施尿素;就群体而言,基肥补施尿素处理的乳熟期LAI高于拔节肥补施尿素处理,但二者相比于碳基掺混肥一次性基施或两次分施均明显提高乳熟期LAI和旗叶SPAD值,这可能是两种施肥模式花后和成熟期干物质积累量较高的原因。

3.3 促进稻茬小麦产量、效益和氮效率协同提升的碳基掺混肥施用策略

合理的肥料投入可协调产量构成因素之间矛盾,改善植株对养分吸收利用,促进小麦产量和氮效率协同提升。康日峰等^[18]研究表明,碳基肥较常规肥料处理小麦地上部干物质积累和氮素积累分别可提高8.27%和34.81%,但对千粒重无显著影响。程运龙等^[30]认为,施用碳基复合肥有利于在维持穗粒数和千粒重稳定的同时促进穗数提升,产量和氮肥利用率可提升6.42%和11.38个百分点。骆晓声等^[17]也认为,施用碳基肥在优化用量条件下(减氮45 kg·hm⁻²)仍可维持小麦稳产。李正东等^[39]研究也指出,生物碳基肥与常规

化肥相比,在减氮 5%左右仍可显著增加小麦穗长,提高收获指数,小麦增产幅度达 20.0%~35.4%,氮肥偏生产力提升 17.9%~34.4%。在本研究中,不同碳基掺混肥一次性基施与常规尿素运筹相比穗数和千粒重均下降,相同施氮量处理 F₁ 和 F₂ 较 CK 分别减产 8.42%和 10.88%,减氮处理 F₃ 和 F₄ 分别减产 7.96%和 12.91%。4 种碳基掺混肥一次性基施均显著降低成熟期小麦氮素积累量,其中 F₃ 和 F₄ 处理在减少氮肥用量条件下氮肥表观利用率仍低于常规尿素运筹。碳基掺混肥两次分施及基肥或拔节肥补施尿素模式较一次性基施均可促进穗数和穗粒数共同提升,显著提高籽粒产量,其中碳基掺混肥两次分施条件下基肥补施尿素模式对于小麦增产效果最佳;与常规尿素运筹比较,同等施氮量下 F₁ 和 F₂ 处理分别增产 7.08%和 12.19%,减氮处理 F₃ 和 F₄ 分别增产 7.31%和 2.23%;碳基掺混肥两次分施条件下基肥补施尿素模式显著提高小麦成熟期氮素积累量,氮肥表观利用率提升 0.67~14.44 个百分点。值得注意的是,F₃ 和 F₄ 的氮肥表观利用率高于 F₁ 和 F₂,这可能主要是施氮量减少所致。

成本是制约新型肥料在生产中大面积推广的主要因素,其增产和省工带来的效益能否弥补肥料成本的增加是生产者是否愿意采用的关键^[40]。本试验条件下,不同碳基掺混肥一次性基施减少了追肥人工投入,但净效益较常规尿素运筹下降 2 012.49~3 070.72 元·hm⁻²;在肥料成本相近时,碳基掺混肥两次分施条件下基肥补施尿素模式,提高了肥料成本,但是产值提升更高,并且节省两次追肥人工投入,净效益明显增加,其中 F₂ 处理效益最大,较常规尿素运筹净效益提升 1 399.65 元·hm⁻²,有利于产量、效益和氮效率的协同提升。

4 结 论

碳基掺混肥一次性基施可减少追肥人工投入,但不利于小麦产量形成,产量平均下降 10.04%,氮肥表观利用率平均下降 2.17 个百分点,效益平均降低 2 397.32 元·hm⁻²;碳基掺混肥两次分施条件下,基肥适当补施尿素更有利于调节群体发育,提高成穗数,增加成熟期干物质和氮素积累量,延缓花后群体 LAI 和旗叶 SPAD 值下降;在肥料成本相近用量下,碳基掺混肥 24-10-10 采用基肥加拔节肥两次分施且基肥补施尿素的施用方

式有利于促进小麦产量、效益协同提升。

参考文献:

- [1] 赵俊晔,于振文.我国小麦生产现状与发展小麦生产能力的思考[J].农业现代化研究,2005,26(5):344.
ZHAO J Y, YU Z W. Production status and development of productive capacity of wheat in China [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2005, 26(5): 344.
- [2] LIU H, WANG Z, YU R, et al. Optimal nitrogen input for higher efficiency and lower environmental impacts of winter wheat production in China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 224: 1.
- [3] WANG H, ZHANG D, ZHANG Y, et al. Ammonia emissions from paddy fields are underestimated in China [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 235: 482.
- [4] 邓 垚,孔 强,郭 瑞,等.不同硫包膜缓释肥施用模式对红皮小麦产量及效益的影响[J].大麦与谷类科学,2023,40(3):29.
DENG Y, KONG Q, GUO R, et al. Effect of different fertilization patterns of sulfur coated slow-release fertilizer on yield and economic benefits of red-skinned wheat [J]. *Barley and Cereal Sciences*, 2023, 40(3): 29.
- [5] MA Q, WANG M, ZHENG G, et al. Twice-split application of controlled-release nitrogen fertilizer met the nitrogen demand of winter wheat [J]. *Field Crops Research*, 2021, 267: 108163.
- [6] 吕金岭,尤 克,何 斌,等.聚脲甲醛缓释肥减量深施对小麦和玉米产量及氮肥吸收率的影响[J].中国土壤与肥料,2024(3):96.
LV J L, YOU K, HE B, et al. Effects of deep application with reduced dosage of polyurea formaldehyde slow-release fertilizer on yield and nitrogen absorption of wheat and maize [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024(3): 96.
- [7] 王 珏,巨晓棠,张丽娟,等.华北平原小麦季氮肥挥发损失及影响因素研究[J].河北农业大学学报,2009,32(3):5.
WANG J, JU X T, ZHANG L J, et al. Ammonia volatilization of N fertilizer and influencing factors in the North China Plain [J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2009, 32(3): 5.
- [8] 孙祥鑫,李东坡,武志杰,等.持续施用缓/控释尿素条件下水田土壤 NH₃ 挥发与 N₂O 排放特征[J].应用生态学报,2016,27(6):1901.
SUN X X, LI D P, WU Z J, et al. Characteristics of ammonia volatilization and nitrous oxide emission from a paddy soil under continuous application of different slow/controlled release urea [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(6): 1901.
- [9] 宋旭燕,罗鹤松,杨 帅,等.生物炭基缓释肥的制备及其对土壤理化性质的影响[J].环境监测管理与技术,2023,35(1):48.
SONG X Y, LUO H S, YANG S, et al. Preparation of biochar based slow-release fertilizer and its effect on soil physicochemical properties [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2023, 35(1): 48.
- [10] 朱迎春,安国林,李卫华,等.海藻酸水溶肥对西瓜生长及产

- 量的影响[J]. 果树学报, 2020, 37(12): 1898.
- ZHU Y C, AN G L, LI W H, *et al.* Effects of alginate water soluble fertilizer on growth and quality of watermelon [J]. *Journal of Fruit Science*, 2020, 37(12): 1898.
- [11] 王宇, 宋一凡, 张荣, 等. 土壤施用钝化剂与复合微生物肥对冬小麦镉积累的影响[J]. 中国农业科学, 2024, 57(1): 126.
- WANG Y, SONG Y F, ZHANG R, *et al.* Effects of soil application of passivating agent and compound microbial fertilizer on cadmium accumulation in winter wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(1): 126.
- [12] 熊家欢, 张义凯, 向镜, 等. 覆膜稻田施用炭基肥对水稻产量及氮素利用的影响[J]. 中国水稻科学, 2024, 38(5): 567.
- XIONG J H, ZHANG Y K, XIANG J, *et al.* Effect of biochar-based fertilizer application on rice yield and nitrogen utilization in film-mulched paddy fields [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2024, 38(5): 567.
- [13] 聂胜委, 张巧萍, 张玉亭, 等. 不同优化平衡施肥措施对冬小麦田间群体微环境的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(4): 311.
- NIE S W, ZHANG Q P, ZHANG Y T, *et al.* Effects of different optimum and balanced fertilization practices on micro-environment within winter wheat's group [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(4): 311.
- [14] PENG S, BURESH R J, HUANG J, *et al.* Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China [J]. *Field Crops Research*, 2006, 96(1): 37.
- [15] 董县中, 贺德先, 吴寅. 豫西南浅山丘陵区小麦测土配方施肥技术研究[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(5): 685.
- DONG X Z, HE D X, WU Y. Study on techniques of soil testing for formulated fertilization on wheat production in hilly areas of southwestern Henan [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(5): 685.
- [16] FAN J, LU X, GU S, *et al.* Improving nutrient and water use efficiencies using water-drip irrigation and fertilization technology in Northeast China [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 241: 106352.
- [17] 骆晓声, 寇长林, 张济世, 等. 炭基肥对麦-玉轮作农田土壤酶活性和真菌群落及作物产量的影响[J]. 环境科学, 2025(6): 12.
- LUO X S, KOU C L, ZHANG J S, *et al.* Effect of biochar-based fertilizer application on soil enzyme activity, fungal community, and crop yield in winter wheat-summer maize rotation farmland [J]. *Environmental Science*, 2025(6): 12.
- [18] 康日峰, 张乃明, 史静, 等. 生物炭基肥料对小麦生长、养分吸收及土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2014(6): 33.
- KANG R F, ZHANG N M, SHI J, *et al.* Effects of biochar-based fertilizer on soil fertility, wheat growth and nutrient absorption [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014(6): 33.
- [19] 乔志刚, 陈琳, 李恋卿, 等. 生物质炭基肥对水稻生长及氮素利用率的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(5): 175.
- QIAO Z G, CHEN L, LI L Q, *et al.* Effects of biochar fertilizer on growth and nitrogen utilizing rate of rice [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(5): 175.
- [20] 赵纪, 李航, 苏梦迪, 等. 高碳基肥减氮施用对植烟土壤总碳、总氮和真菌群落结构的影响[J]. 山东农业科学, 2024, 56(10): 93.
- ZHAO J, LI H, SU M D, *et al.* Effects of high carbon basal fertilizer combined with nitrogen reduction on total carbon, total nitrogen and fungal community structure in tobacco-planting soil [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2024, 56(10): 93.
- [21] 陈卓, 李晓龙, 方明, 等. 高碳基肥对烟稻轮作系统烟田氮肥利用率和氮效益的影响[J]. 山东农业科学, 2024, 56(7): 104.
- CHEN Z, LI X L, FANG M, *et al.* Effects of high carbon base fertilizer on nitrogen use efficiency and nitrogen benefit of tobacco field in tobacco-rice rotation system [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2024, 56(7): 104.
- [22] 赵满兴, 周建斌, 杨绒, 等. 不同施氮量对旱地不同品种冬小麦氮素累积、运输和分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(2): 143.
- ZHAO M X, ZHOU J B, YANG R, *et al.* Characteristics of nitrogen accumulation, distribution and translocation in winter wheat on dryland [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2006, 12(2): 143.
- [23] 丁锦峰, 黄正金, 成亚梅, 等. 稻茬小麦不同氮肥利用率群体间产量、品质和经济效益的差异[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(2): 251.
- DING J F, HUANG Z J, CHENG Y M, *et al.* Difference in yield, quality and economic income among wheat populations with different nitrogen utilization rate following rice [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(2): 251.
- [24] NI B, LIU M, LÜ S, *et al.* Novel slow-release multielement compound fertilizer with hygroscopicity and moisture preservation [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2010, 49(10): 4546.
- [25] 丁锦峰, 成亚梅, 黄正金, 等. 稻茬小麦不同氮效率群体花后物质生产与衰老特性差异分析[J]. 中国农业科学, 2015, 48(6): 1063.
- DING J F, CHENG Y M, HUANG Z J, *et al.* Difference analysis of post-anthesis matter production and senescence characteristics among different nitrogen efficiency populations in wheat following rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(6): 1063.
- [26] 陈琳, 乔志刚, 李恋卿, 等. 施用生物质炭基肥对水稻产量及氮素利用的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(5): 671.
- CHEN L, QIAO Z G, LI L Q, *et al.* Effects of biochar-based fertilizers on rice yield and nitrogen use efficiency [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(5): 671.
- [27] 刘玮晶, 刘焯, 高晓荔, 等. 外源生物质炭对土壤中铵态氮素滞留效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5): 962.

- LIU W J, LIU Y, GAO X L, *et al.* Effects of biomass charcoals on retention of ammonium nitrogen in soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5):962.
- [28] CALVO P, NELSON L, KLOEPPER J W. Agricultural uses of plant biostimulants [J]. *Plant and Soil*, 2014, 383(1):3.
- [29] 刘盛林, 董晓霞, 孙泽强, 等. 尿素中添加腐殖酸提升冬小麦产量和氮吸收效率[J]. 中国农学通报, 2020, 36(14):16.
- LIU S L, DONG X X, SUN Z Q, *et al.* Humic acid added in urea improves yield and nitrogen uptake of winter wheat [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(14):16.
- [30] 程运龙, 郑文魁, 高强, 等. 磺化炭基复合肥对盐化潮土小麦生长及土壤养分的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(7):32.
- CHENG Y L, ZHENG W K, GAO Q, *et al.* Effects of sulfonated carbon-based compound fertilizer on wheat growth and soil nutrients in salinized aquic soil [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(7):32.
- [31] 殷文, 柴强, 于爱忠, 等. 间作小麦秸秆还田对地膜覆盖玉米灌浆期冠层温度及光合生理特性的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(23):4764.
- YIN W, CHAI Q, YU A Z, *et al.* Effects of intercropped wheat straw retention on canopy temperature and photosynthetic physiological characteristics of intercropped maize mulched with plastic during grain filling stage [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(23):4764.
- [32] 赵海波, 林琪, 刘义国, 等. 氮磷配施对超高产小麦花后衰老特性及产量的影响[J]. 华北农学报, 2009, 24(4):158.
- ZHAO H B, LIN Q, LIU Y G, *et al.* Effect of application of phosphorus combined with nitrogen fertilizer on senescence characteristics and yield after anthesis in super-high-yielding wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2009, 24(4):158.
- [33] 王蔚华, 郭文善, 封超年, 等. 氮肥运筹对小麦花后剑叶衰老及籽粒发育的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2002, 23(4):61.
- WANG W H, GUO W S, FENG C N, *et al.* Effects of nitrogen application methods on flag leaf senescence after anthesis and grain development in wheat [J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2002, 23(4):61.
- [34] 张子旋, 王艳群, 李旭光, 等. 氮肥基追比对强筋小麦旗叶光合特性、籽粒产量和蛋白的影响[J]. 河北农业大学学报, 2023, 46(1):11.
- ZHANG Z X, WANG Y Q, LI X G, *et al.* Effects of base top-dressing ratio of nitrogen fertilizer on photosynthetic characteristics of flag leaves, grain yield and protein content of strong gluten wheat [J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2023, 46(1):11.
- [35] 张伟明, 孟军, 王嘉宇, 等. 生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(8):1445.
- ZHANG W M, MENG J, WANG J Y, *et al.* Effect of biochar on root morphological and physiological characteristics and yield in rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(8):1445.
- [36] DWIVEDI S K, BASU S, KUMAR S, *et al.* Enhanced antioxidant enzyme activities in developing anther contributes to heat stress alleviation and sustains grain yield in wheat [J]. *Functional Plant Biology*, 2019, 46(12):1090.
- [37] 谢婷婷, 赵欢, 肖厚军, 等. 炭基肥对贵州黄壤鲜食玉米光合特性、干物质积累及产量形成的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(3):61.
- XIE T T, ZHAO H, XIAO H J, *et al.* Effects of carbon fertilizer on photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and yield formation of fresh corn from yellow soil in Guizhou Province [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(3):61.
- [38] REN T, WANG H, YUAN Y, *et al.* Biochar increases tobacco yield by promoting root growth based on a three-year field application [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1):21991.
- [39] 李正东, 陶金沙, 李恋卿, 等. 生物质炭复合肥对小麦产量及温室气体排放的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(1):177.
- LI Z D, TAO J S, LI L Q, *et al.* Effects of biochar-based fertilizers on wheat yield and greenhouse gases emissions [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(1):177.
- [40] VEJAN P, KHADIRAN T, ABDULLAH R, *et al.* Controlled release fertilizer: A review on developments, applications and potential in agriculture [J]. *Journal of Controlled Release*, 2021, 339:321.