

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.21259

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

马 泉¹, 蒋文月^{1#}, 张新钵¹, 李福建¹, 李天兵², 李春燕¹,
丁锦峰¹, 朱 敏¹, 郭文善¹, 朱新开^{1, 3*}

(1. 江苏省作物遗传生理重点实验室 / 江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心 / 扬州大学小麦研究中心, 江苏 扬州 225009; 2. 汉枫缓释肥料(江苏)有限公司, 江苏 姜堰 225510;
3. 教育部农业与农产品安全国际合作联合实验室, 江苏 扬州 225009)

摘要: 为探究缓释肥对强筋小麦产量和品质的调控效应及机制, 明确缓释肥在强筋小麦上的科学合理施用技术, 以强筋小麦品种农麦 88 为试验材料, 以硫包膜缓释肥 (SCU, N-P₂O₅-K₂O=26-12-12) 和尿素 (U, N 46.3%) 为供试氮肥, 设计 6 个施肥模式: 尿素 4 次分施对照 (CK); 100%N-SCU 基施 (M1); 60%N-SCU 基施 +40%N-U 拔节期追施 (M2); 60%N-SCU 基施 +40%N-SCU 返青期追施 (M3); M2 模式减氮 15% (M4); M3 模式减氮 15% (M5)。分析不同施肥模式下强筋小麦氮素积累转运、氮效率、产量和品质指标的差异。结果表明, 和 CK 相比, M3 模式花后氮素转运量和转运率呈下降趋势, 但差异未达显著水平, 花后氮素积累及其对籽粒的贡献率显著提高, 促使成熟期地上部和籽粒氮素积累量显著增加, 氮肥表观利用率和农学利用率分别提升 8.56% 和 10.72%; 氮素的合理供应协调穗数和千粒重共同提升, 产量增幅达 7.01%。CK 和 M3 模式的籽粒蛋白质含量、湿面筋含量、面团形成时间、稳定时间和最大拉伸阻力等品质指标差异未达显著水平, 但较 M1 模式均显著提升。和 M3 模式相比, M1 模式显著降低了籽粒氮素积累量、氮肥表观利用率和籽粒产量, 且不利于强筋小麦的品质形成。M5 模式在减氮 15% 条件下氮肥表观利用率较 CK 显著提高, 同时增产 2.44%; 蛋白质含量、湿面筋含量、面团形成时间、稳定时间等品质指标较 CK 显著下降, 但与 M1 模式相比表现出一定优势。本试验条件下, 硫包膜缓释肥不同施用方式对小麦的氮素吸收利用、产量和品质有显著的调控效应, 其中硫包膜缓释肥 60%N 基施 +40%N 返青期追施的模式, 最有利于强筋小麦产量、氮效率和品质的协同提升, 且有较好的减氮增效潜力, 是高产高效优质的施肥模式。

关键词: 硫包膜缓释肥; 强筋小麦; 氮素积累转运; 产量; 品质

小麦是我国主要的粮食作物之一, 实现小麦高产优质生产在保障国家粮食安全中起着重要作用^[1]。施用氮肥是提高小麦产量及品质的主要措施, 氮肥用量和运筹对调节小麦群体结构、促进物质积累和提高产量具有重要作用^[2]。根据小麦的

需氮规律, 通过合理施氮调控土壤氮素供应可以促进小麦植株对氮素的吸收和积累, 提高营养器官氮素向籽粒的转运, 并显著提高氮素利用效率, 是保证小麦籽粒氮素积累和提高产量的重要栽培措施^[3-4]。小麦籽粒蛋白质含量和产量既受花前贮存的碳、氮物质调控, 又受开花后植株的氮积累转运能力和光合生产能力的影 响^[5-6]。小麦开花至成熟是氮素吸收和分配的关键时期, 开花后营养器官的氮素转运是籽粒氮素积累和籽粒蛋白质形成的主要贡献因子^[7], 对小麦籽粒的蛋白质质量和加工品质等均有明显的调控作用^[8-9]。因此, 协调小麦生育期氮素供应, 是促进小麦氮素积累转运, 保障小麦高产优质生产的重要途径。但在实际生产中, 常规氮肥不合理的施用往往导致氮素难以被作物高效

收稿日期: 2021-04-25; 录用日期: 2021-06-18

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0200500); 江苏省现代农业 (小麦) 产业技术体系 (JATS [2022] 502); 江苏高校优势学科建设工程; 江苏省和扬州大学优秀科技创新团队; 扬州大学研究生科研创新计划项目 (XKYCX20_020)。

作者简介: 马泉 (1995-), 博士研究生, 研究方向为小麦养分高效利用机理与高产栽培生理, E-mail: mq_agriculture@163.com; 蒋文月 (1997-), 硕士研究生, 研究方向为小麦肥料高效利用技术, E-mail: 1462772853@qq.com。马泉和蒋文月同为第一作者。

通讯作者: 朱新开, E-mail: xkzhu@yzu.edu.cn。

利用, 易通过氨挥发、径流、淋溶和反硝化作用等多种方式损失^[10-12], 不仅导致资源浪费和肥料利用率下降, 还造成土壤酸化、水体富营养化和温室气体排放加剧等严重的环境污染问题^[13]。

缓释肥由于具有省时省工、养分长效释放, 且与作物吸收同步等特点, 成为现代农业减少施肥劳动力投入、提高肥料利用率和提升作物增产潜力的重要途径之一^[14]。与普通尿素相比, 缓释肥一方面能减少氮素淋失, 改善土壤供氮能力, 提高氮素利用率; 另一方面氮素供应易符合作物需肥规律, 能协调群体结构, 促进物质积累, 从而增加作物产量和氮素积累^[15-16]。冬小麦受生育期长度和养分需求特性的限制, 一次性施用缓释肥的实际效果目前还存在较大争议, 缓释肥一次基施难以保证小麦全生育期的氮素养分供应, 限制了小麦的增产潜力^[17-18]。当前市场上推广的缓释肥养分控释期多为 30 ~ 180 d, 控释期较短的缓释肥养分释放难以满足小麦生长需求, 而 180 d 以上控释期的缓释肥存在肥效不稳定和养分释放速率与小麦养分需求不匹配等局限性。根据我们前期的研究结果, 控释期为 90 ~ 120 d 的缓释肥全量或与尿素掺混两次施用, 是目前农业条件下冬小麦高产高效生产的缓释肥合理施用模式^[19-20]。但相关研究主要集中在缓释肥两次施用对小麦群体动态、物质积累和产量等方面的影响, 尚未分析缓释肥两次施用对强筋小麦氮素积累转运和品质的调控效应。本试验以硫包膜缓释肥和普通尿素为材料, 根据节本、省工、增产、增效和提质等目标设计不同的施肥模式, 研究不同施肥模式下强筋小麦的氮素积累转运、产量和蛋白质品质和加工品质等方面的差异, 探讨硫包膜缓释肥在强筋小麦上增产增效优质的施肥模式及其

调控机制, 为硫包膜缓释肥在强筋小麦高产高效优质生产中的合理应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况与供试材料

田间试验于 2019 年 11 月 ~ 2020 年 5 月在江苏省海安县周宝进家庭农场 (32°40' N, 120°33' E) 进行。试验地土壤质地为砂壤土, 耕层 (0 ~ 20 cm) 土壤有机质含量 32.32 g · kg⁻¹, 全氮含量 1.45 g · kg⁻¹, 碱解氮含量 116.34 mg · kg⁻¹, 有效磷含量 23.63 mg · kg⁻¹, 速效钾含量 133.76 mg · kg⁻¹。前茬为水稻, 秸秆全量还田。供试小麦品种为强筋小麦农麦 88, 属春性中熟品种。供试氮肥分别为硫包膜缓释肥 (SCU, N-P₂O₅-K₂O=26-12-12, 养分控释期为 3 ~ 4 个月, 汉枫缓释肥料 [江苏] 有限公司生产) 和普通尿素 (U, N 46.3%, 市场购买)。试验配施的磷、钾肥分别为过磷酸钙 (P₂O₅ 12%) 和氯化钾 (K₂O 60%), 市场购买。

1.2 试验设计

采用单因素设计, 以硫包膜缓释肥 (SCU) 和尿素 (U) 共设计 6 个施肥模式, 模式设计及施肥方案详见表 1。另设不施氮空白用以计算氮效率。CK 和 M1 ~ M3 模式中氮用量为 270 kg · hm⁻², M4 和 M5 模式氮用量 229.5 kg · hm⁻²。各模式下磷 (P₂O₅)、钾 (K₂O) 肥用量均为 124.6 kg · hm⁻², 除硫包膜缓释肥中所含磷、钾外, 不足部分采用过磷酸钙和氯化钾补至同一水平, 全部基施。2019 年 11 月 2 日播种, 机条播, 行距 25 cm, 播种量统一为 150 kg · hm⁻², 基本苗为 240 × 10⁴ 株 · hm⁻², 生育期田间管理按当地高产大田进行, 每个处理面积 1000 m²。

表 1 施肥模式设计及氮肥用量

模式	肥料类型及施肥设计	氮肥施用时期及氮用量 (kg · hm ⁻²)				
		播种	分蘖	返青	拔节	孕穗
空白	不施 N					
CK	100% N-U, 基肥、分蘖肥、拔节肥、孕穗肥分别占 50%、10%、20%、20%	135.0	27.0		54.0	54.0
M1	100%N-SCU 基施	270.0				
M2	60%N-SCU 基施 + 40%N-U 拔节期追施	162.0			108.0	
M3	60%N-SCU 基施 + 40%N-SCU 返青期追施	162.0		108.0		
M4	在 M2 模式减氮 15%	137.7			91.8	
M5	在 M3 模式减氮 15%	137.7		91.8		

1.3 测定项目与方法

1.3.1 产量及其构成

小麦成熟期每个处理连续取 50 穗，计数每穗粒数；选取 3 个长势均匀的 1 m^2 样方，计数穗数并人工收割脱粒，自然晾晒后称重计产；在测产的籽粒中计数测定千粒重，以含水率 13% 折算小麦产量和千粒重。

1.3.2 氮素积累和转运

小麦开花期和成熟期每个处理分别取代表性植株 20 株，分器官置于烘箱 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 杀青 1 h， $80\text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒重，测定干物质积累量；采用凯氏定氮法测定各器官氮含量，并计算植株地上部氮素积累转运相关指标^[21]以及氮效率相关指标^[22]。

花后氮素转运量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) = 开花期营养器官氮素积累量 - 成熟期营养器官氮素积累量

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

花后转运氮贡献率 (%) = 花后氮素转运量 / 成熟期籽粒氮素积累量 $\times 100$

花后氮素积累量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) = 成熟期植株氮素积累量 - 开花期植株氮素积累量

花后积累氮贡献率 (%) = 花后植株氮素积累量 / 成熟期籽粒氮素积累量 $\times 100$

氮肥表观利用率 (%) = (施氮区地上部氮积累量 - 不施氮区地上部氮积累量) / 施氮量 $\times 100$

氮肥农学利用率 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) = (施氮区产量 - 不施氮区产量) / 施氮量

氮肥生理利用率 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) = (施氮区产量 - 不施氮区产量) / (施氮区地上部氮积累量 - 不施氮区地上部氮积累量)

1.3.3 品质指标

籽粒收获后采用 HGT01000 型容重仪测定籽粒容重；采用 JYDB100X40 硬度仪测定籽粒的硬度；采用 Quadrumat Junior 磨粉机磨粉并计算出粉率；采用凯氏定氮法测定籽粒全氮含量，按系数 5.7 折算蛋白质含量；采用 JJJM54S 型面筋测定仪测定籽粒湿面筋含量；采用 SDS 常量法测定籽粒沉降值；采用 Farino Graph-E 型粉质仪测定面团粉质指标；采用 Brabender 86003302 型拉伸仪测定小麦拉伸特性。

1.4 数据处理与统计分析

采用 Excel 2010 进行数据整理和绘图；采用 DPS 7.05 进行统计分析，检验处理间的差异显著性 ($P < 0.05$)；采用 Origin 2021 进行相关性检验并作图。

2 结果与分析

2.1 缓释肥不同施肥模式下小麦产量差异分析

由表 2 可以看出，施肥模式对小麦产量及构成均有显著或极显著的影响，以 M3 模式增产幅度最大。不同模式比较，M1 模式下产量最低，与 CK 相比降幅达 7.10%；M2 和 M3 模式采用两次施肥方式，与 CK 相比均实现增产，增幅分别为 3.22% 和 7.01%；在 2 个减氮模式中，M4 模式较 CK 减产 3.15%，M5 模式增产 2.44%。与 CK 相比，M2、M3 和 M5 模式均提高了小麦穗数，但差异未达显著水平；M1 模式下小麦穗数和千粒重均最低，但每穗粒数最高；与 CK 相比，M3 模式在穗数和千粒重方面表现优势，且每穗粒数无显著差异；2 个减氮处理 M4 和 M5 模式下穗数和千粒重均高于 M1 模式，但每穗粒数最低，与 M1 模式差异显著。

表 2 缓释肥施肥模式对小麦籽粒产量的影响

模式	穗数 ($\times 10^4$ 个 $\cdot \text{hm}^{-2}$)	每穗粒数	千粒重 (g)	产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	较 CK 增产率 (%)
CK	411.67ab	41.04ab	48.13b	7866.53bc	—
M1	378.67b	42.54a	46.60d	7307.90d	-7.10
M2	425.67ab	41.84ab	48.23b	8120.14ab	3.22
M3	442.00a	41.42ab	49.64a	8417.73a	7.01
M4	413.00ab	40.16b	47.08c	7618.74cd	-3.15
M5	423.33ab	40.02b	48.39b	8058.09b	2.44
F 值	2.20*	2.30*	110.38**	13.09**	—

注：同列数据后的不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。ns 表示在 0.05 水平下不显著；* 表示 $P < 0.05$ ；** 表示 $P < 0.01$ 。下同。

相关分析表明, 穗数和千粒重与产量均呈极显著正相关关系, 每穗粒数与产量呈负相关关系, 但未达显著水平 (表 3)。通径分析表明, 本试验条件下, 穗数、每穗粒数和千粒重对产量的直接通

径系数分别为 0.552、0.090 和 0.491, 间接通径系数分别为 0.405、-0.314 和 0.483, 表明在不同施肥模式下, 穗数和千粒重是产量形成的主要贡献因子。

表 3 缓释肥不同施肥模式下小麦产量及其构成因素的通径分析

产量构成	与产量相关系数	直接通径系数	间接通径系数			
			穗数	每穗粒数	千粒重	合计
穗数	0.957**	0.552	—	-0.038	0.443	0.405
每穗粒数	-0.223**	0.090	-0.230	—	-0.084	-0.314
千粒重	0.973**	0.491	0.498	-0.015	—	0.483

2.2 缓释肥不同施肥模式下小麦氮素积累和转运差异分析

由图 1 可以看出, M2 和 M3 模式成熟期地上部氮素积累量显著高于 CK, 增幅分别为 7.03% 和 10.62%; M1 模式成熟期地上部氮素积累量和 CK 相

比降低了 3.10%, 但差异不显著; 2 个减氮处理 M4 和 M5 模式的成熟期地上部氮素积累量与 CK 也无显著差异。M2 和 M3 模式的籽粒氮素积累量呈最高水平, 并显著高于其它模式; CK、M1、M4、M5 模式之间籽粒氮素积累量无显著差异。

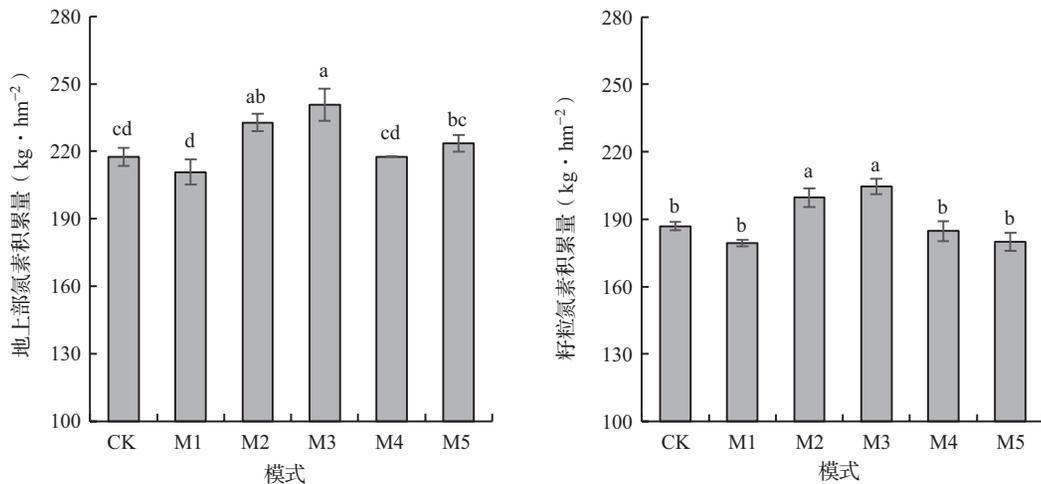


图 1 缓释肥施肥模式对小麦成熟期植株地上部和籽粒氮素积累量的影响

注: 柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

CK 花后氮素转运量和转运率均最高, 但与 M1、M2 和 M3 模式差异未达显著。M2 和 M3 模式花后氮素积累量显著高于 CK 和 M1 模式, 并显著提高花后氮素累积对籽粒的贡献率, 其中 M3 模式贡献率最高, 为 33.49%。2 个减氮处理 M4 和 M5 模式的花后氮素转运量及其对籽粒的贡献率 (M4 与 CK 差异未达到显著水平外) 显著低于 CK, 花后氮素积累量与对应的未减氮模式相比呈下降趋势, 但显著高于 CK, 对籽粒的贡献率也显著提高 (表 4)。

2.3 缓释肥不同施肥模式下小麦氮效率差异分析

不同施肥模式极显著地影响小麦氮肥表观利用率 (表 5), 其中 M1 模式氮肥表观利用率最低, 但与 CK 无显著差异; M2 和 M3 模式氮肥表观利用率显著高于 CK 和 M1 模式, 与 CK 相比分别增加 5.67 和 8.56 个百分点; 减氮 15% 条件下 M4 和 M5 模式氮肥表观利用率和对应的未减氮模式相比均呈上升趋势, 但差异未达显著水平, 与 CK 相比分别增加 8.15 和 10.74 个百分点, 差异均达显著水平。M1 模式的氮肥农学利用率和生理利用率均最

表 4 缓释肥施肥模式对小麦氮素积累及转运特征的影响

模式	花后氮素转运量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	花后氮素转运率 (%)	花后转运氮贡献率 (%)	花后氮素积累量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	花后积累氮贡献率 (%)
CK	143.32a	82.37a	76.69a	43.59c	23.31d
M1	139.27a	81.58a	77.66a	40.06c	22.34d
M2	141.96a	81.03a	71.08b	57.71b	28.92c
M3	136.01ab	79.02a	66.51cd	68.61a	33.49ab
M4	129.49b	79.79a	70.11bc	55.28b	29.89bc
M5	117.66c	72.98b	65.38d	62.36ab	34.62a
F 值	20.14**	9.94**	17.81**	16.01**	17.81**

表 5 缓释肥施肥模式对小麦氮效率的影响

模式	氮肥表观利用率 (%)	氮肥农学利用率 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	氮肥生理利用率 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK	46.00c	8.76ab	19.07a
M1	43.50c	6.69b	15.40c
M2	51.67b	9.70a	18.79a
M3	54.56ab	10.80a	19.82a
M4	54.16ab	9.23ab	17.04b
M5	56.74a	11.14a	19.66a
F 值	16.74**	4.48*	13.52**

低, 但与 CK 差异未达显著水平; M2、M3 和 M5 模式的氮肥农学利用率和生理利用率均显著高于 M1 模式; M4 模式氮肥农学利用率表现出高于 CK 的趋势, 但氮肥生理利用率显著低于 CK。

2.4 缓释肥不同施肥模式下小麦品质指标差异分析

施肥模式对所有测定的品质指标的影响均达显著或极显著水平(表 6)。在蛋白质质量方面, CK 的蛋白质含量和湿面筋含量均最高, 但与 M3 模式无显著差异; M1 模式下蛋白质含量、湿面筋含量和沉降值均呈最低水平; 减氮处理 M5 模式的蛋白质含量、湿面筋含量和沉降值均低于 CK, 但显著高于 M1 模式。在加工品质指标方面, CK 和 M3 模式下的吸水率(除 CK 小于 M2 外)、面团形成时间、稳定时间、拉伸面积、延展性和最大拉伸阻力均呈最高水平, 且相互之间无显著差异; M2 模式面团形成时间、稳定时间和拉伸面积与 M3 模式无显著差异, 但延展性和最大拉伸阻力显著低于 M3 模式; M1 模式除拉伸面积和弱化度外, 其余各项加工品质指标均表现出最低水平。在磨粉品质方面, 与 M1 模式相比, CK 与 M3 模式降低了小麦容重和硬

度, 但显著提高了小麦出粉率; M4 和 M5 模式与对应未减氮模式相比硬度呈上升趋势, 但容重和出粉率呈下降趋势, 且出粉率差异显著。

小麦品质指标的相关性分析表明, 蛋白质含量与 8 项指标(湿面筋含量、沉降值、面团形成时间、稳定时间、延展性、最大拉伸阻力、弱化度和硬度)呈显著或极显著相关关系(图 2); 湿面筋含量与 10 项指标(蛋白质含量、沉降值、吸水率、面团形成时间、稳定时间、延展性、最大拉伸阻力、弱化度、硬度和出粉率)呈显著或极显著相关关系; 面团稳定时间与 10 项指标(蛋白质含量、湿面筋含量、沉降值、吸水率、面团形成时间、拉伸面积、延展性、最大拉伸阻力、弱化度和硬度)呈显著或极显著相关关系; 所有品质指标中, 只有容重与蛋白质含量、湿面筋含量和面团稳定时间无显著相关性, 且变异系数(1.07%)较小, 受施肥模式的调控较弱。以上表明, 蛋白质含量、湿面筋含量和面团稳定时间作为强筋小麦的主要品质指标, 可以作为衡量缓释肥施肥模式下小麦品质的综合评价指标。

表 6 缓释肥施肥模式对小麦品质指标的影响

模式	蛋白质质量			加工品质						磨粉品质			
	蛋白质含量 (%)	湿面筋含量 (%)	沉降值 (mL)	吸水率 (%)	形成时间 (min)	稳定时间 (min)	拉伸面积 (cm ²)	延展性 (mm)	最大拉伸阻力 (BU)	弱化度 (FU)	容重 (g · L ⁻¹)	硬度 (%)	出粉率 (%)
CK	15.54a	40.92a	43.11a	67.35a	3.30a	17.25a	148.50a	439.00a	714.50a	60.50bc	789.50b	75.25c	69.31ab
M1	13.88d	35.51d	37.10d	66.20b	2.25c	13.90d	140.50bc	378.00c	588.50c	70.00a	798.50a	76.35a	68.66c
M2	14.76bc	39.38b	40.05c	67.45a	2.50bc	15.50bc	142.00bc	398.00b	656.00b	59.00c	792.00b	75.30bc	69.63a
M3	15.12ab	40.59ab	41.63b	67.60a	3.00ab	16.75ab	145.50ab	430.00a	708.00a	57.00c	782.50c	74.75c	69.59a
M4	14.21cd	36.67d	38.89c	66.95ab	2.50bc	14.10cd	135.00cd	396.00b	592.00c	71.50a	788.50b	75.95ab	68.63c
M5	14.59bc	38.13c	38.79c	66.35b	2.40bc	14.15cd	138.00d	406.50b	607.00c	67.50ab	774.00d	75.95ab	68.84bc
F 值	13.11**	37.82**	30.07**	5.99*	5.65*	12.33**	11.36**	32.99**	31.09**	7.43*	47.13**	9.84**	8.97**

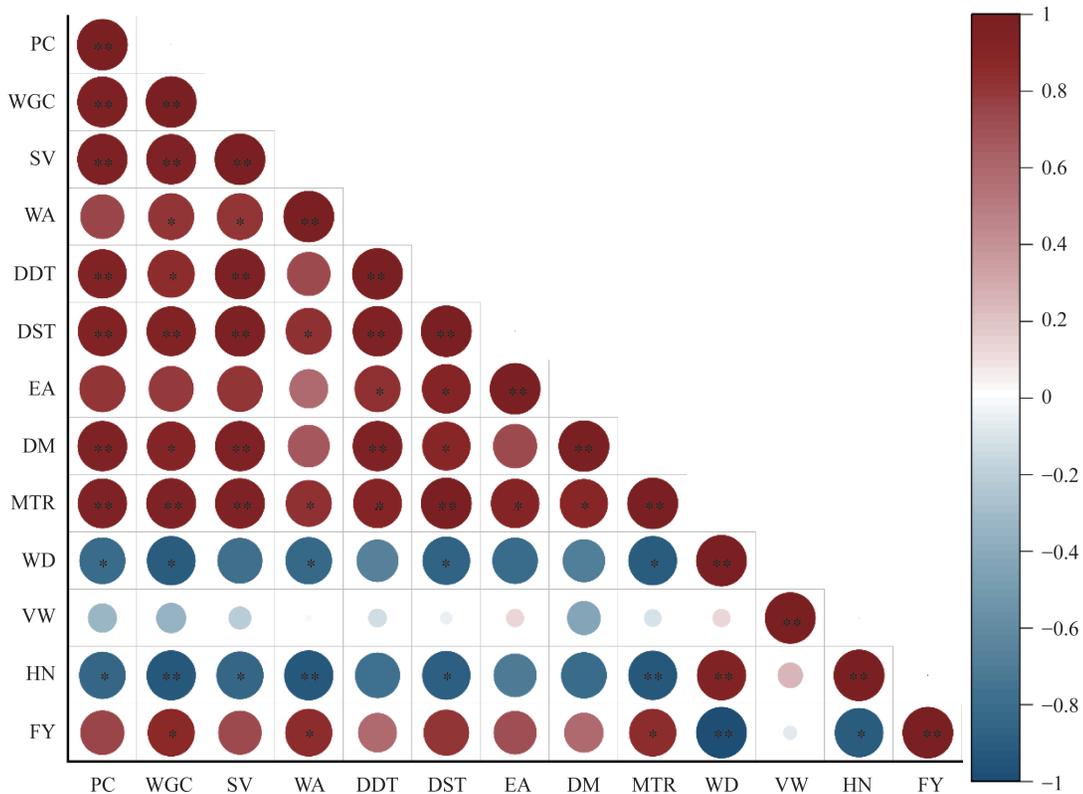


图 2 缓释肥不同施肥模式下小麦品质指标的相关性分析

注: PC: 蛋白质含量; WGC: 湿面筋含量; SV: 沉降值; WA: 吸水率; DDT: 面团形成时间; DST: 面团稳定时间; EA: 拉伸面积; DM: 延展性; MTR: 最大拉伸阻力; WD: 弱化度; VW: 容重; HN: 硬度; FY: 出粉率。圆圈大小和颜色深浅代表相关性水平, * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$ 。

3 讨论

3.1 缓释肥施肥模式对强筋小麦氮素积累转运的调控

在小麦生长发育过程中, 适量施氮是实现高产高效的重要保障, 合理的氮肥运筹有利于协调小麦

各时期的氮素吸收, 增加小麦的氮素积累和籽粒产量^[23]。李欣欣等^[24]指出, 施氮可增强小麦的吸氮强度, 增加植株氮素转运量, 但氮素转运效率以及转运氮素对籽粒氮的贡献率随施氮量的增加呈下降的趋势, 且氮肥利用率随施氮量增加而递减。花后营养器官氮素的转移对籽粒产量和蛋白质含量有显

著的调控效应^[25]。氮肥适度后移,有利于增加植株开花期和成熟期氮含量、花后氮素转运量和花后氮素积累量,促进营养器官氮素向籽粒的转运和花后积累氮素对籽粒氮素的贡献,提高氮肥的吸收与利用^[9]。与单施尿素相比,施用缓释尿素可协调作物生育后期氮素供应,增加植株地上部氮素积累量和籽粒氮素积累量^[14]。缓释肥两次施用,通过氮素适当后移,促进了小麦花后氮素积累和转运,从而提高成熟期氮素积累和氮素收获指数^[20]。本研究中,基施缓释肥+追施缓释肥或尿素的两次施肥模式与对照相比,由于花后氮素供应充足,促进了强筋小麦花后氮素积累,显著提高了花后累积氮素对籽粒的贡献率,成熟期地上部和籽粒氮素积累量也显著提升;花后氮素转运量和转运率较对照呈降低的趋势,但差异未达显著水平。2个减氮15%的模式(M4和M5)与未减氮模式相比,地上部氮素积累量和籽粒氮素积累量呈下降趋势,但与对照无显著差异。缓释肥一次基施模式与基施缓释肥+追施缓释肥或尿素的两次施肥模式相比,花后氮素转运量和转运率无显著差异,但由于后期氮素供应不足,花后氮素积累量显著下降,花后累积氮素对籽粒的贡献率显著下降,仅为22.34%。

氮肥表观利用率和农学利用率是反映作物对土壤中肥料吸收与利用效应的重要指标,氮肥用量及运筹对肥料利用率均有显著影响^[14]。缓释肥由于氮素缓慢释放,大大减少了土壤中的氨挥发和氮素淋溶损失,保证了作物生育期内的土壤氮素供应,从而促进了作物对氮素的吸收利用^[26]。冯爱青等^[27]研究认为,与普通尿素相比,包膜尿素一方面增加了土壤无机氮含量,减少了氮素损失,另一方面提高了土壤酶活性,改善土壤生物化学环境,促进了小麦的养分吸收能力,从而实现产量和肥料利用率的提升。本研究表明,基施缓释肥+追施缓释肥或尿素的两次施肥模式,氮肥表观利用率和农学利用率均显著高于对照和缓释肥一次基施模式,表明2次施肥模式有利于协调小麦生育前后期的氮素供应,在保障花后氮素转运的同时促进花后氮素积累,有利于延缓小麦后期衰老,提高籽粒产量、籽粒氮素积累和氮肥利用率^[28-29]。

3.2 缓释肥施肥模式对强筋小麦产量和品质的调控

氮肥的合理供应是协调单位面积穗数、每穗粒数和粒重之间关系,实现增产增收的重要途径。小

麦生育前期,充足的氮素有利于形成壮苗,促进分蘖发生;小麦拔节期,氮素供应促进分蘖成穗,提高小穗分化强度,增加穗粒数;小麦生育中后期,维持一定的氮素水平有利于延缓植株衰老,增加光合产物积累,促进粒重增长^[3]。马富亮等^[30]认为,包膜尿素基施和普通尿素相比,能有效控制氮素释放,促进小麦生长发育,同时单位面积穗数、每穗粒数和千粒重均有不同程度地提升。也有研究指出,缓释氮肥与尿素掺混两次施用,有利于氮素释放后移,满足小麦生育中后期氮素需求,促进小麦的氮素吸收和积累,显著提高小麦成穗数,较尿素分施可增产10%以上^[14]。本研究表明,穗数和粒重与产量均极显著相关,是籽粒产量的主要贡献因子。缓释肥一次基施不利于穗数和千粒重的形成,导致产量显著低于对照;缓释肥两次施用模式通过增加穗数和千粒重获得增产,较对照增产7.01%。缓释肥一次基施在前期养分供应充足,但生育中后期存在养分缺乏情况,影响分蘖成穗和后期籽粒灌浆,而缓释肥两次施用有利于协调生育后期氮素需求矛盾,实现穗数和粒重的协同提升,证实了前人^[19-20]的研究结论。本研究还表明,2个减氮模式的产量和对照无显著差异,均实现基本稳产,其中减氮15%条件下缓释肥采用基施60%N+返青期追施40%N的模式有明显的减氮增效优势,其生态效应可能更加明显,也是生产中可以采用的一种施肥模式。

小麦生育期内的氮素供应不仅影响籽粒产量的形成,对小麦蛋白质质量和加工品质均有显著的调控效应^[8]。高振贤等^[31]研究指出,籽粒氮素含量是决定蛋白质产量的物质基础,氮素供应不足,会延长营养物质在植株内部运转的时间,造成蛋白质含量下降。追氮比例和追氮时期是调控籽粒氮素浓度,影响强筋小麦蛋白质含量和湿面筋含量的重要途径^[9]。朱新开等^[32]认为,适当增加氮肥用量和氮肥后移可明显改善不同类型专用小麦的加工品质,提高其面团形成时间和稳定时间,降低弱化度。杨兵兵等^[33]研究认为,在施氮0~300 kg·hm⁻²范围内,小麦面粉面团的形成时间和稳定时间随施氮量减少呈下降趋势;而聂胜委等^[34]认为,氮肥减量10%~20%施用,小麦湿面筋含量、面团形成时间和稳定时间等指标略有下降,但对品质影响较小;减氮30%后,各项品质指标显著下降。本研究结果表明,对照处理由于孕穗期追施尿

素,有利于植株中后期的氮素吸收与转运,蛋白质含量、湿面筋含量和沉降值均呈最高水平;缓释肥两次施用模式由于后期氮素供应相对也比较充足,在促进籽粒氮素积累增加的同时也改善了籽粒蛋白质质量,蛋白质含量和湿面筋含量均与对照无显著差异。缓释肥2次施用模式与对照的吸水率、面团形成时间、稳定时间、拉伸面积、延展性和最大拉伸阻力均呈最高水平且互相无显著差异,与缓释肥一次基施相比显著降低了容重和硬度,提高了出粉率,表明这2种施肥方式均有利于强筋小麦加工品质和磨粉品质的提升。缓释肥减氮15%两次施用模式的籽粒蛋白质质量和加工品质各项指标中除弱化度外,其它指标和对应的未减氮模式相比均呈下降趋势,但均优于缓释肥一次基施模式,表明缓释肥减氮15%两次施用,强筋小麦在获得稳产的同时在一定程度上能保持品质的基本稳定。赵广才等^[35]认为,强筋小麦的品质指标对氮素调节具有显著的响应,并提出在小麦品质指标检测中,为节省人力物力,应挑选相关性强的指标进行检测,如蛋白质含量、面团稳定时间等主要品质指标。本研究观点与之一致,认为在众多品质指标中,蛋白质含量、湿面筋含量、面团稳定时间与其它指标有密切的相关性,可以作为缓释肥施用模式下强筋小麦品质的综合评价指标。

4 结论

缓释肥不同运筹的氮素供应对强筋小麦的氮素积累转运、产量和品质均有显著的调控效应。(1)缓释肥一次基施由于后期氮素供应不足,粒重和产量均呈最低水平,且不利于蛋白质品质和加工品质的形成。(2)硫包膜缓释肥60%N基施+40%N返青期追施的模式,在保障花后氮素转运量和转运率的同时,增加花后氮素积累及其贡献率,促进氮效率和产量的提升,同时维持较高的籽粒蛋白质含量和湿面筋含量,且面团形成时间、稳定时间和延展性等加工品质与尿素4次分施相比均未显著下降,是强筋小麦省工、高产、高效、优质的施肥方式;且在减氮15%条件下和缓释肥一次基施相比,仍具有产量和品质的优势。(3)60%N硫包膜缓释肥基施+40%N尿素拔节期追施的模式,和尿素4次施用相比增产了3.22%,氮肥表观利用率提升了8.56%,虽然品质指标有所下降,但和全量缓释肥两次施用相比,协调了肥料成本和产量之间的

矛盾,可提高农民对肥料成本的接受程度,在生产上也有一定的推广价值。

参考文献:

- [1] 丁锦峰, 阚正荣, 朱新开, 等. 稻茬小麦高产稳产、节本增效栽培模式研究[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(5): 616-623.
- [2] 李春燕, 于倩倩, 贾晴晴, 等. 扬辐麦4号小麦不同产量群体氮素吸收利用特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1196-1203.
- [3] 郑沛, 宋付朋, 马富亮. 硫膜与树脂膜控释尿素对小麦不同生育时期土壤氮素的调控及其产量效应[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 122-127.
- [4] 石玉, 于振文, 王东, 等. 施氮量和底追比例对小麦氮素吸收转运及产量的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(12): 1860-1866.
- [5] 韩立杰, 董伟欣, 张月辰. 不同水肥处理对小麦冠层结构、产量和籽粒品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(6): 953-962.
- [6] Li W, Qiao Y Q, Du S Z, et al. Analysis on absorption, utilization and transfer efficiency of nitrogen in high-yield wheat cultivars at different sowing dates [J]. Agricultural, Science & Technology, 2016, 17(7): 1600-1606.
- [7] 张丽霞, 杨永辉, 尹钧, 等. 水肥一体化对小麦干物质和氮素积累转运及产量的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 275-282, 319.
- [8] 朱新开, 郭凯泉, 郭文善, 等. 氮肥运筹比例对稻田套播强筋小麦籽粒品质和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 7(3): 515-521.
- [9] 代新俊, 夏清, 杨珍平, 等. 氮肥后移对强筋小麦氮素积累转运及籽粒产量与品质的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 289-294.
- [10] 田玉华, 尹斌, 贺发云, 等. 太湖地区水稻季氮肥的作物回收和损失研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 55-61.
- [11] Li Q, Yang A, Wang Z, et al. Effect of a new urease inhibitor on ammonia volatilization and nitrogen utilization in wheat in north and northwest China [J]. Field Crops Research, 2015, 175: 96-105.
- [12] Shakoor A, Xu Y, 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 [J]. Plos One, 2018, 13: e0202016.
- [13] 李泽丽, 刘之广, 张民, 等. 控释尿素配施黄腐酸对小麦产量及土壤养分供应的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 959-968.
- [14] 李伟, 李絮花, 董静, 等. 冬小麦控释尿素与普通尿素的最佳配比研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 629-635.
- [15] 梁靖越, 张敬昇, 王昌全, 等. 控释尿素对小麦籽粒产量和

- 氮素利用率的影响[J]. 核农学报, 2018, 32(1): 157-164.
- [16] 肖强, 隗公臣, 吕东, 等. 微水溶性胶结包膜肥料氮素释放速率与预测[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(1): 108-113.
- [17] 何杰, 李冰, 王昌全, 等. 不同控释氮肥比率对土壤无机氮、微生物及小麦生长的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(3): 349-356.
- [18] Ni X, Wu Y, Wu Z, et al. A novel slow-release urea fertiliser: physical and chemical analysis of its structure and study of its release mechanism [J]. Biosystems Engineering, 2013, 115(3): 274-282.
- [19] 马泉, 唐紫妍, 王梦尧, 等. 树脂包膜缓释肥与尿素配施对稻茬冬小麦产量、氮肥利用率与效益的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(10): 1202-1210.
- [20] 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[J]. 核农学报, 2021, 35(4): 942-952.
- [21] 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[J]. 中国农业学, 2012, 45(15): 3040-3048.
- [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): 2143-2149.
- [23] 丁锦峰, 杨佳凤, 王云翠, 等. 稻茬小麦公顷产量 9000 kg 群体氮素积累、分配与利用特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 543-551.
- [24] 李欣欣, 石祖梁, 王久臣, 等. 施氮对稻茬冬小麦氮肥吸收利用及转运的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(11): 1334-1341.
- [25] 阳显斌, 张锡洲, 李廷轩, 等. 不同产量水平小麦的氮吸收利用差异[J]. 核农学报, 2010, 24(5): 1073-1079.
- [26] 关瑞, 张民, 诸葛玉平, 等. 控释氮肥一次性基施提高谷子产量和氮素利用率[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(4): 639-646.
- [27] 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[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 177-184.
- [28] Fresew B, Nigussie D, Adamu M, et al. Effect of split application of different N rates on productivity and nitrogen use efficiency of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Agriculture & Food Security, 2018, 7(1): 1-10.
- [29] Bhardwaj V, Yadav V, Chauhan B S. Effect of nitrogen application timings and varieties on growth and yield of wheat grown on raised beds [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2010, 56(2): 211-222.
- [30] 马富亮, 宋付朋, 高杨, 等. 硫膜和树脂膜控释尿素对小麦产量、品质及氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 67-72.
- [31] 高振贤, 史占良, 韩然, 等. 不同灌水模式对小麦产量、形态和生理特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(10): 1234-1240.
- [32] 朱新开, 郭文善, 周君良, 等. 氮素对不同类型专用小麦营养和加工品质调控效应[J]. 中国农业科学, 2003, 36(6): 640-645.
- [33] 杨兵兵, 闫素辉, 李文豪, 等. 施氮水平对小麦籽粒产量及品质的影响[J]. 安徽科技学院学报, 2015, 29(6): 52-55.
- [34] 聂胜委, 张巧萍, 何宁, 等. 立式旋耕方式下氮肥不同减施水平对小麦品质的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3): 442-447.
- [35] 赵广才, 常旭虹, 杨玉双, 等. 追氮量对不同品质类型小麦产量和品质的调节效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 859-865.

Effect of sulfur coated slow-released fertilizer managements on nitrogen accumulation and translocation, yield and quality of strong gluten wheat

MA Quan¹, JIANG Wen-yue^{1#}, ZHANG Xin-bo¹, LI Fu-jian¹, LI Tian-bing², LI Chun-yan¹, DING Jin-feng¹, ZHU Min¹, GUO Wen-shan¹, ZHU Xin-kai^{1, 3*} (1. Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province/Jiangsu Co-innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops/Wheat Research Center, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu 225009; 2. Hanfeng Slow-release fertilizer (Jiangsu) Co. Ltd., Jiangyan Jiangsu 225510; 3. Joint International Research Laboratory of Agriculture and Agri-Product Safety, the Ministry of Education of China, Yangzhou Jiangsu 225009)

Abstract: In order to clarify the regulation effect and mechanism of slow-released fertilizer on the yield and quality of strong gluten wheat, and to explore the scientific and reasonable application technology of slow-released fertilizer on strong gluten wheat. Taking strong gluten wheat variety “Nongmai 88” as material, using sulfur coated slow-release fertilizer (SCU, N-P₂O₅-K₂O=26-12-12) and urea (U, N 46.3%) as nitrogen fertilizers, six fertilization patterns were designed: U applied at four stages as the control (CK); 100%N-SCU applied before sowing (M1); 60%N-SCU applied before sowing, 40%N-U applied at jointing stage (M2); 60%N-SCU applied before sowing, 40%N-SCU applied at re-greening stage (M3); 15% total nitrogen reduction based on M2 (M4); 15% total nitrogen reduction based on M3 (M5). The differences of nitrogen accumulation and translocation, nitrogen efficiency, yield and quality of strong gluten wheat

under different fertilization patterns were analyzed. The results showed that, compared with CK, post-anthesis nitrogen remobilization amount and nitrogen remobilization rate of M3 showed a decreasing trend, but the difference was not significant. The post-anthesis nitrogen accumulation and its contribution to grain were significantly increased in M3 compared with those in CK, which contributed to the significant increase in shoot and grain nitrogen accumulation amount at maturity stage, and increased nitrogen apparent utilization rate and agronomic efficiency by 8.56% and 10.72%, respectively. The rational nitrogen supply in M3 promoted the increase of spikes and 1000-grain weight, and the yield increased by 7.01% compared with CK. The grain protein content, wet gluten content, dough formation time, stabilization time and maximum tensile resistance in CK and M3 showed no significant difference, but were significantly increased compared with those in M1. Compared with M3, M1 significantly decreased grain nitrogen accumulation, nitrogen apparent utilization rate and grain yield, and was not conducive to the quality formation of strong gluten wheat. Under the condition of 15% nitrogen reduction, M5 significantly improved nitrogen apparent utilization rate and increased grain yield by 2.44% compared with CK. M5 significantly decreased the grain protein content, wet gluten content, dough formation time and stability time compared with CK, but showed certain advantages in quality indexes compared with M1. In this study, different application patterns of sulfur coated slow-released fertilizer have strong regulatory effects on nitrogen uptake and utilization, yield and quality of wheat. The pattern of 60%N-SCU applied before sowing with 40%N-SCU applied at re-greening stage promoted the synergistic increase in grain yield, nitrogen efficiency and quality of strong gluten wheat, and showed potential of reducing nitrogen with efficiency increasing, which is a high-yield, high-efficiency and good-quality fertilization method.

Key words: sulfur coated slow-released fertilizer; strong gluten wheat; nitrogen accumulation and translocation; grain yield; quality