

王寅, 刘书雅, 卫星, 等. 控释尿素与普通尿素配施对弱筋小麦白湖麦1号花后碳代谢、产量和品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(6): 1116-1123.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.06.008

控释尿素与普通尿素配施对弱筋小麦白湖麦1号花后碳代谢、产量和品质的影响

王寅¹, 刘书雅¹, 卫星¹, 马飞¹, 卓大龙², 王德好², 车钊¹

(1. 安徽农业大学农学院, 安徽合肥 230036; 2. 安徽省白湖种子有限公司, 安徽合肥 231508)

摘要: 为探究控释尿素与普通尿素配施对弱筋小麦花后碳代谢和产量的影响, 本研究采用释放期 60 d 控释尿素(CU_{60d})、释放期 150 d 控释尿素(CU_{150d})和普通尿素, 在施氮量 180 kg/hm²的情况下, 设置 6 个施肥模式: N0 (不施氮肥)、CK[常规施肥, 基肥: 分蘖肥: 拔节肥=4:3:3(重量比)]、M1(40%普通尿素基施+30%CU_{60d}基施+30%普通尿素拔节期追施)、M2(40%普通尿素基施+40%CU_{60d}基施+20%普通尿素拔节期追施)、M3(40%普通尿素基施+30%CU_{60d}+30%CU_{150d}一次性基施)、M4(在M3基础上控释尿素种肥线状同播), 分析不同施肥模式对小麦花后碳代谢相关酶活性、碳代谢中间产物(蔗糖等)、小麦产量及品质的影响。结果表明, 控释尿素与普通尿素配施显著影响小麦花后 7 d、14 d 碳代谢, 其中 M2 处理能显著提高小麦花后旗叶、籽粒的蔗糖代谢关键酶和淀粉合成关键酶活性, 其蔗糖和籽粒淀粉含量在花后 7 d、14 d 较 CK 有显著提高。M2 处理产量较 CK 显著提高, 其余控释尿素与普通尿素配施处理产量和 CK 之间无显著差异; M4 处理穗数显著低于 CK, 其余控释尿素与普通尿素配施处理之间无显著差异; M2 处理穗粒数较 CK 显著提高, 其余控释尿素与普通尿素配施处理和 CK 之间无显著差异; 与 CK 相比, 各控释尿素与普通尿素配施处理均显著提高了千粒重。在 180 kg/hm²施氮水平下, 各施氮模式下面粉主要品质均达到国家弱筋小麦标准, 40%CU_{60d}基施+40%普通尿素基施+20%普通尿素拔节期追施可作为弱筋小麦控释尿素与普通尿素配施的轻简化施肥模式。

关键词: 控释尿素; 弱筋小麦; 碳代谢; 产量

中图分类号: S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2025)06-1116-08

Effects of regular urea combined with controlled-release urea on carbon metabolism after anthesis, yield and quality of weak-gluten wheat Baihu-mai No.1

WANG Yin¹, LIU Shuya¹, WEI Xing¹, MA Fei¹, ZHUO Dalong², WANG Dehao², CHE Zhao¹

(1. College of Agronomy, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. Anhui Baihu Seed Company, Hefei 231508, China)

Abstract: To investigate the effects of combining controlled-release urea (CRU) with regular urea on post-anthesis carbon metabolism and yield of weak-gluten wheat, this study employed 60-day release CRU (CU_{60d}), 150-day release

CRU (CU_{150d}) and regular urea under a nitrogen application rate of 180 kg/hm². Six fertilization treatments were designed, including N0 (no nitrogen application), CK (conventional fertilization, the mass ratio of basal fertilizer-tillering fertilizer-jointing fertilizer was 4:3:3), M1 (40% regular urea as basal fertilizer + 30% CU_{60d} as basal fertilizer + 30% regular urea topdressed at the joint-

收稿日期: 2024-08-30

基金项目: 安徽省现代农业产业技术体系建设专项(3400002224-26000100009); 企业横向合作项目(XKJ23501)

作者简介: 王寅(1998-), 男, 江苏扬州人, 硕士研究生, 研究方向为耕作与农业生态系统。(E-mail) winagain@stu.ahau.edu.cn

通讯作者: 车钊, (E-mail) cz17@ahau.edu.cn

ing stage), M2 (40% regular urea as basal fertilizer + 40% CU_{60d} as basal fertilizer + 20% regular urea topdressed at the jointing stage), M3 (40% regular urea as basal fertilizer + 30% CU_{60d} + 30% CU_{150d} as a single basal application), and M4 (M3 with CRU banded along the seed row). The influence of different modes on carbon metabolism enzyme activities, carbon metabolism intermediates (such as sucrose), yield and grain quality were analyzed. The results indicated that different CRU fertilization modes significantly influenced carbon metabolism 7 days and 14 days after anthesis in wheat. Among them, the M2 treatment significantly enhanced the activities of key enzymes involved in sucrose metabolism and starch synthesis in flag leaves and grains. Compared to CK, sucrose content and starch content under M2 treatment increased significantly 7 days and 14 days after anthesis. Grain yield under M2 treatment was significantly higher than CK, whereas no significant differences were observed among CK and the other CRU treatments. The number of spikes under M4 treatment was significantly lower than CK, but no significant differences were observed among the other treatments. The number of grains per spike under M2 treatment increased significantly compared to CK, while no differences were observed among the other treatments. All CRU treatments improved the 1 000-grain weight significantly compared to CK. At a nitrogen application rate of 180 kg/hm², all fertilization modes resulted in flour quality parameters that met the national standards for weak-gluten wheat. These findings suggest that the mode of applying 40% CU_{60d} as basal fertilizer and 40% regular urea as basal fertilizer, combined with 20% regular urea topdressed at the jointing stage constitutes an optimal and simplified fertilization strategy for soft wheat production.

Key words: controlled-release urea; weak-gluten wheat; carbon metabolism; yield

小麦是中国重要的口粮作物之一,中国小麦年产量连续稳定在 1.3×10^8 t 以上,小麦平均单产达到 5 781 kg/hm²^[1]。随着生活水平的提高,人们对于优质弱筋面粉的需求日益增加^[2]。江淮地区是中国重要的弱筋小麦生产区,但由于该地区降雨量大,地下水位高,氮素易流失,小麦单产较低。为提高小麦单产水平,该区常增加施氮量和施肥次数,但施氮量过多易导致籽粒蛋白质含量增加,面粉弱筋品质不达标^[3]。如何施氮保证弱筋小麦产量和品质协同提高,是该区弱筋小麦种植亟待解决的问题。与普通尿素相比,控释尿素由于其特殊的养分释放机制,能有效提高氮素利用率、减少氮素淋失,降低劳动投入^[4]。因此,研究适合弱筋小麦生产的控释尿素施用模式对提高中国弱筋小麦产量和轻简化栽培具有重要意义。

普通尿素和控释尿素合理配施可以提高中强筋小麦产量及其蛋白质含量^[5-7]。有研究表明,与传统施肥相比,70%控释尿素与 30%普通尿素一次性基施能显著提高小麦穗数和产量^[8]。也有研究表明,50%控释尿素与 50%普通尿素配施更有利于提高小麦产量^[9]。杨金宇等^[10]的研究结果表明,拔节期追施普通尿素相较于一次性基施更能保证小麦较高的有效穗数和千粒重,有利于提高产量。由此可见,在控释尿素与普通尿素配施的施肥模式中,不同的配施比例、不同的施肥方式对小麦产量的

影响仍有较大的争议,需要进一步研究。碳代谢是作物淀粉形成的重要过程^[11],能直接影响弱筋小麦面粉产量和品质。已有研究表明,配施控释尿素能在同等施氮水平下有效调节碳氮代谢中的碳流,提高水稻和玉米的产量和品质^[12-14]。但是,当前关于配施控释尿素对弱筋小麦产量品质协同提升的生理机制的研究较少。

因此,本研究拟于安徽省庐江县白湖农场进行试验,设计控释尿素和普通尿素配施的不同施氮模式,系统分析不同施氮模式对弱筋小麦花后叶绿素相对含量(SPAD 值)、与蔗糖合成和籽粒淀粉合成相关的关键酶活性、蔗糖和籽粒淀粉积累、小麦产量和品质的影响,以期对江淮地区弱筋小麦轻简化施肥和高效栽培的合理应用提供技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于 2022-2023 年在安徽省合肥市庐江县白湖农场(31°24'N, 117°46'E)进行,试验地前茬作物为水稻。试验前 0~20 cm 土壤理化性质分别如下:pH 5.79,硝态氮含量 28.90 mg/kg,铵态氮含量 22.03 mg/kg,速效钾含量 103.00 mg/kg,速效磷含量 18.90 mg/kg。

1.2 试验材料与试验设计

供试品种为白湖麦 1 号。供试肥料为中盐安徽

红四方股份有限公司提供的普通速效尿素(含氮量 46%)、过磷酸钙(P_2O_5 含量 12%)、氯化钾(K_2O 含量 60%)、实验室自制的 CU_{60d} (释放期为 60 d 的控释尿素,含氮量 44%)和 CU_{150d} (释放期为 150 d 的控释尿素,含氮量 42%)。试验设置如下:常规施肥处理(CK),基肥:分蘖肥:拔节肥=4:3:3(重量比),氮肥来源为普通速效尿素;N0,不施氮肥;M1,40%普通尿素基施+30% CU_{60d} 基施+30%普通尿素拔节期追施;M2,40%普通尿素基施+40% CU_{60d} 基施+20%普通尿素拔节期追施;M3,40%普通尿素基施+30% CU_{60d} +30% CU_{150d} 一次性基施;M4,在 M3 的基础上,将控释尿素与普通尿素掺混后,集中施于播种沟中间,种子与肥料隔离深施(深 15 cm),形成线状排列。采用单因素随机区组设计,每个处理 3 次重复。各小区面积 15 m^2 (2.5 m \times 6.0 m)。不同施肥模式施氮量均为 180 kg/hm 2 (N0 处理除外),所有处理施磷量均为 90 kg/hm 2 ,施钾量均为 135 kg/hm 2 ,尿素、控释尿素与磷肥、钾肥均作为基肥在小区整地时均匀施入耕作层,于 2022 年 11 月 5 日人工开沟条播,行距 25 cm,基本苗为 1 hm 2 2.7×10^6 株。分蘖肥于 2023 年 1 月 12 日施入,拔节肥于 3 月 14 日施入。5 月 29 日收获。其余田间管理措施与大田栽培相同。

1.3 测定项目与测定方法

1.3.1 产量及其构成因素的测定 在成熟期随机选取长势均匀的 1 m^2 小麦,调查穗数,重复 3 次。随机选取 30 株小麦测定穗粒数。每个小区用正方形取样框(1 m \times 1 m)选取 3 m^2 小麦,收获、晒干、脱粒,测定实际产量,并从中随机取 1 000 粒称重作为千粒重,重复 3 次。

1.3.2 小麦面粉品质的测定 用 CleverChem 全自动间断化学分析仪测定籽粒含氮量,再乘以换算系数 5.7 即为蛋白质含量;湿面筋含量、沉淀值采用 Perten DA 7200 近红外品质分析仪测定;面团形成时间、面团稳定时间使用 Brabender(810114)粉质仪测定。

1.3.3 小麦旗叶 SPAD 值的测定 在小麦花后 35 d 内,每隔 7 d,选取 10 株标记植株,用 SPAD-502 叶绿素仪测量小麦叶尖、叶中和叶根 SPAD 值,取其平均值作为整片叶片的 SPAD 值。

1.3.4 旗叶和籽粒碳代谢及关键酶活性的测定 于开花期选取同一天开花、长势一致的单茎挂牌标

记,各处理在开花后每 7 d 取 1 次标记植株样本的 15 株单茎,共取样 6 次。将样品分为 2 部分:一部分籽粒在 105 $^{\circ}C$ 杀青后,于 85 $^{\circ}C$ 烘干,用于籽粒品质测定,另一部分放入 -80 $^{\circ}C$ 的超低温冰箱储存,用以测定蔗糖代谢与淀粉合成关键酶活性。蔗糖合成酶(SS)、腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶(AGPase)活性测定参照 Doehlert 等^[15]的方法;蔗糖磷酸合成酶(SPS)活性的测定参照间苯二酚法^[16],略做改动;可溶性淀粉合成酶(SSS)、淀粉粒结合态淀粉合成酶(GBSS)活性根据吕冰等^[17]的方法进行测定;淀粉分支酶(SBE)活性根据 Nakamura 等^[18]的方法进行测定;蔗糖含量采用间苯二酚法^[19]测定;淀粉含量采用蒽酮比色法^[20]测定。

1.4 数据处理与分析

使用 Microsoft Excel 2019、Origin 2024b、SPSS 27.0 进行试验数据整理、作图和分析。

2 结果与分析

2.1 控释尿素与普通尿素配施对弱筋小麦产量及其构成因素的影响

由表 1 可知,不同施肥模式中,M2 处理产量最高,相较于常规施肥(CK)显著提高了 5.65%,且显著高于 M3、M4 处理,与 M1 处理差异不显著,M1、M3、M4 处理与 CK 均无显著差异。从产量构成因素看,与 CK 相比,M4 处理有效穗数显著降低,其余控释尿素与普通尿素配施处理之间均无显著差异;在穗粒数上,M2 处理分别较 CK、M3、M4 处理显著提高,但与 M1 处理无显著差异;在千粒重上,各控释尿素与普通尿素配施处理均高于 CK 且差异显著,M2 处理与 M4 处理有显著差异,其余控释尿素与普通尿素配施处理之间无显著差异。综合来看,与 CK 相比,M2 处理主要提高了穗粒数和千粒重从而使产量得到提高。

2.2 控释尿素与普通尿素配施对小麦花后旗叶 SPAD 值的影响

由图 1 可知,不同施肥模式下小麦叶片 SPAD 值变化趋势基本一致,均随花后灌浆的推进呈下降趋势。各施肥模式的 SPAD 值花后 0~14 d 稳定在较高的水平,花后 14~21 d 缓慢下降,花后 21~35 d 快速下降。其中,M2 处理旗叶 SPAD 值在花后 35 d 内最高,在花后 7 d、14 d 较其余施肥模式有显著提高;M1 处理旗叶 SPAD 值在花后 35 d 内仅次于 M2

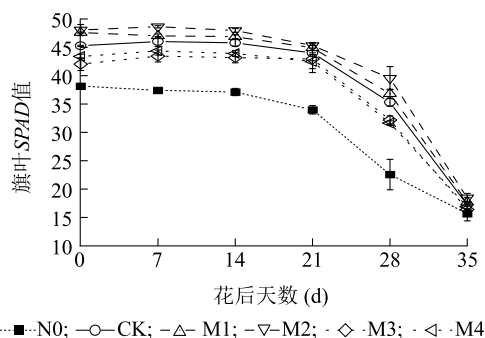
处理,在花后0 d、14 d较CK、M3和M4处理有显著提高;M3和M4处理的旗叶SPAD值均低于CK,在花后0 d、7 d、14 d和28 d比其余控释尿素与普通尿素配施处理显著降低,M3和M4处理在花后0 d有显著差异,其余时间无显著差异。

表1 控释尿素与普通尿素配施对小麦籽粒产量及其构成因素的影响

Table 1 Effects of combined application of controlled-release urea and regular urea on wheat grain yield and its components

模式	有效穗数 ($\times 10^4$ 穗, 1 hm^2)	穗粒数 (粒)	千粒重 (g)	产量 (kg/hm^2)
N0	269.00c	33.03d	42.73a	2 804.60d
CK	435.33a	44.71bc	36.06d	5 358.28bc
M1	437.00a	45.97ab	38.88bc	5 561.58ab
M2	439.67a	46.95a	37.81c	5 661.02a
M3	426.33ab	44.36bc	38.91bc	5 251.98c
M4	412.67b	44.06c	39.43b	5 345.76bc

N0:不施氮肥;CK:施常规尿素 $180 \text{ kg}/\text{hm}^2$;M1:40%普通尿素+30% $\text{CU}_{60 \text{ d}}$ 基施+30%U拔节期追施;M2:40%普通尿素+40% $\text{CU}_{60 \text{ d}}$ 基施+20%普通尿素拔节期追施;M3:40%普通尿素+30% $\text{CU}_{60 \text{ d}}$ +30% $\text{CU}_{150 \text{ d}}$ 一次性基施;M4:在M3基础上控释尿素种肥线状同播。同列数据后不同小写字母表示在0.05水平具有显著差异。



N0、CK、M1、M2、M3、M4 见表1注。

图1 控释尿素与普通尿素配施对小麦花后不同时间旗叶SPAD值的影响

Fig.1 Effects of combined application of controlled-release urea and regular urea on SPAD values of post-anthesis flag leaf in wheat at different times

2.3 控释尿素与普通尿素配施对小麦花后旗叶、籽粒中蔗糖酶活性和蔗糖含量的影响

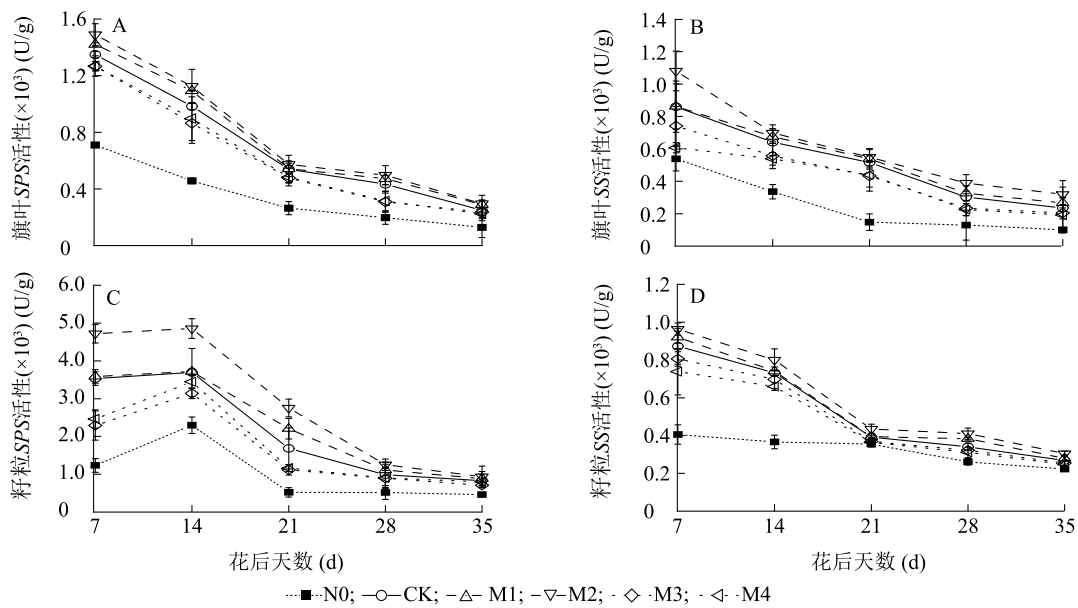
由图2A和2B可知,不同施肥模式的旗叶SPS和SS活性随花后天数的增加不断降低,两者均在花后7 d、14 d保持较高活性。在花后35 d内,M2和M1处理的旗叶SPS和SS活性均高于CK、M3和M4处理。其中,M2处理旗叶SPS和SS活性在花

后7 d显著高于CK,M1处理与CK无显著差异,而M3、M4处理的旗叶SPS和SS活性在花后14 d、28 d均显著低于M2和M1处理。由图2C可知,随着花后天数的增加,不同施肥模式籽粒SPS活性提高,在花后14 d达到最大值,随后快速下降。其中,M2处理的籽粒SPS活性在花后7 d、14 d和21 d显著高于其他施肥模式,M3和M4处理籽粒SPS活性在花后7 d、21 d均显著低于M2和M1处理。由图2D可知,不同施肥模式籽粒SS活性均在花后7 d、14 d保持较高值,随花后天数增加表现出不断下降的趋势。M2处理籽粒SS活性在花后14 d、21 d和28 d显著高于CK、M3和M4处理,M1处理在花后7 d、14 d和28 d显著高于M4处理,M4处理在花后7 d、14 d显著低于CK,而M3处理与CK无显著差异。

由图3可知,随着花后灌浆的进行,旗叶和籽粒的蔗糖含量均不断下降,其中除籽粒蔗糖含量在花后14 d和21 d降幅较大,其余时间降幅较小。由图3A可知,在花后35 d内,M2处理的旗叶蔗糖含量均高于其他施肥模式,尤其在花后7 d、14 d,与其余施肥模式均有显著差异,较CK分别提高了33.20%、17.58%。M1处理的旗叶蔗糖含量在花后7 d显著高于CK,但与M3、M4处理无显著差异。M4处理旗叶蔗糖含量低于其余控释尿素与普通尿素配施处理,在花后14 d、35 d显著低于CK。由图3B可知,M2处理的籽粒蔗糖含量在花后7 d和14 d显著高于CK,分别提高了4.52%、28.76%,M1处理的籽粒蔗糖含量在花后14 d较CK显著提高10.82%,M3和M4处理花后7 d籽粒蔗糖含量均显著低于CK,M3处理在花后7 d较CK显著降低7.82%,而M4处理在除花后35 d外,较CK均有显著降低。

2.4 控释尿素与普通尿素配施对小麦花后籽粒淀粉酶活性和淀粉含量的影响

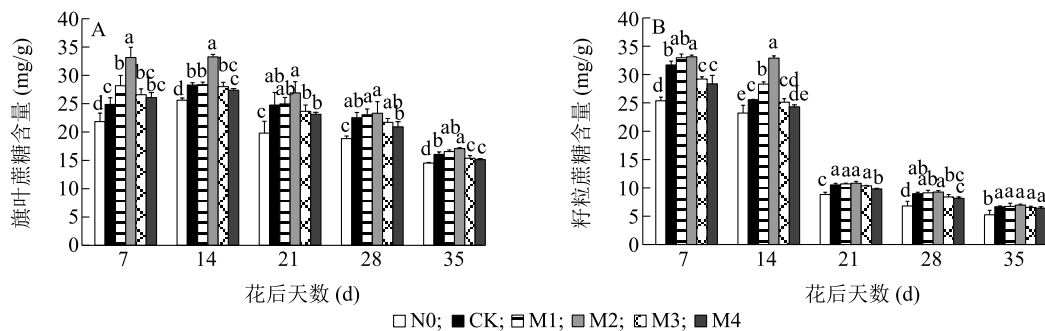
由图4可知,不同施肥模式籽粒淀粉相关酶活性基本随花后天数推移而上升,在花后28 d达到峰值然后下降。在图4A中,M2处理的腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶(AGPase)的活性在花后35 d内均为最高值且与其他施肥模式有显著差异,M1处理在花后21 d、35 d显著高于CK,而M3、M4处理的AGPase活性在花后7 d、14 d均显著低于其余控释尿素与普通尿素配施处理。在图4B中,M2处理的淀粉粒结合态淀粉合成酶(GBSS)的活性在花后21 d、28 d、35 d显著高于其他施肥模式,M1处理在花后



N0、CK、M1、M2、M3、M4 见表 1 注。

图 2 控释尿素与普通尿素配施对小麦花后旗叶和籽粒蔗糖磷酸合成酶 (SPS) 和蔗糖合成酶 (SS) 活性的影响

Fig.2 Effects of combined application of controlled-release urea and regular urea on activities of sucrose phosphate synthase (SPS) and sucrose synthase (SS) in flag leaves and grains of post-anthesis wheat



N0、CK、M1、M2、M3、M4 见表 1 注。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

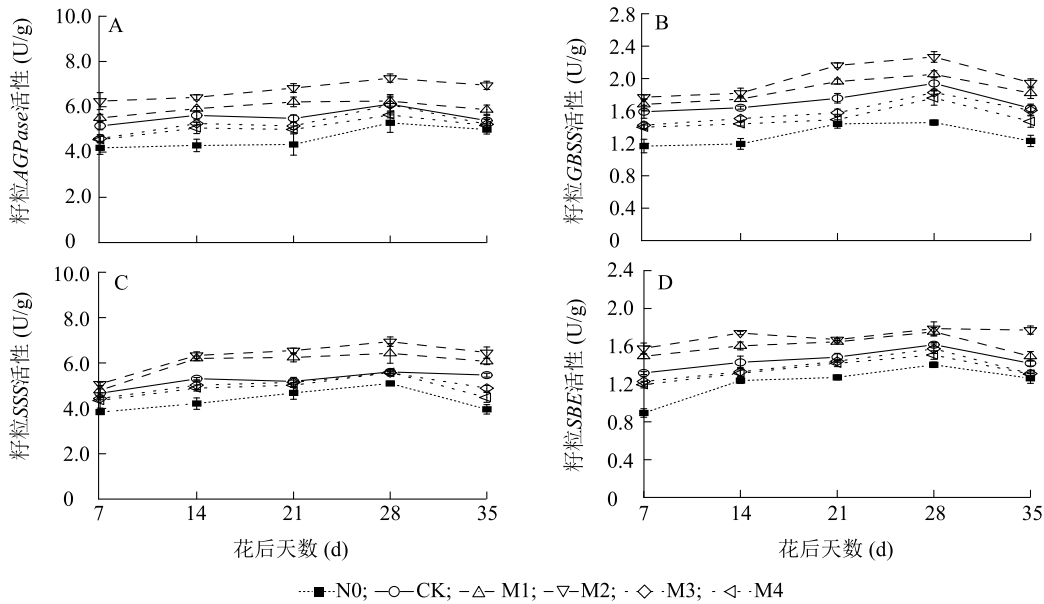
图 3 控释尿素与普通尿素配施对小麦花后旗叶和籽粒蔗糖含量的影响

Fig.3 Effects of combined application of controlled-release urea and regular urea on sucrose content in flag leaves and grains of post-anthesis wheat

14 d、21 d、28 d 和 35 d 显著高于 CK, 而 M3、M4 处理在花后 7 d、14 d、21 d 和 28 d 均显著低于其他施肥模式。在图 4C 中, M2 处理的可溶性淀粉合成酶 (SSS) 的活性在花后 35 d 内均显著高于 CK、M3 和 M4 处理。M1 处理在花后 14 d、21 d、28 d 和 35 d 显著高于 CK, 而 M3、M4 处理在花后 35 d 显著低于 CK。在图 4D 中, M2 处理的籽粒淀粉分支酶 (SBE) 活性在花后 14 d 和 35 d 均显著高于其他施肥模式, M1 处理在花后 7~35 d 均显著高于 CK, 而 M3 处理在花后 7 d、14 d、35 d 显著低于 CK, M4 处理在花后

35 d 内活性最低, 且显著低于 CK。

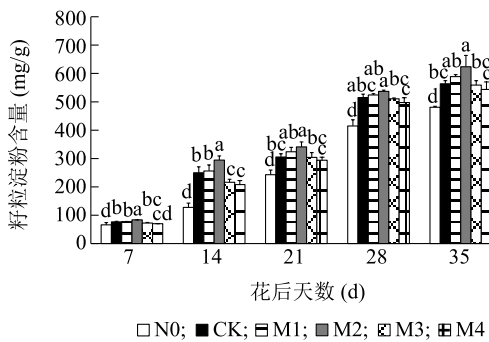
由图 5 可知, 不同施肥模式的小麦籽粒淀粉含量随着花后时间的延长均不断上升。其中, M2 处理的淀粉含量在花后 35 d 内均为最高值, 在花后 7 d、14 d、21 d 和 35 d 与 CK 有显著差异, 分别提高了 9.51%、18.06%、11.62%、10.66%, M1 处理的淀粉含量在花后 35 d 内均仅低于 M2 处理而高于 CK, 但与 CK 差异不显著。M3 和 M4 处理的的籽粒淀粉含量在花后 14 d 均显著低于 CK, 两者在花后 35 d 内也均显著低于 M2, 但两者无显著差异。



N0、CK、M1、M2、M3、M4 见表 1 注。AGPase:腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶;GBSS:淀粉粒结合态淀粉合成酶;SSS:可溶性淀粉合成酶;SBE:淀粉分支酶。

图 4 控释尿素与普通尿素配施对小麦花后籽粒淀粉相关酶活性的影响

Fig.4 Effects of combined application of controlled-release urea and regular urea on starch-related enzyme activities in post-anthesis wheat grains



N0、CK、M1、M2、M3、M4 见表 1 注。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 5 控释尿素与普通尿素配施对小麦花后籽粒淀粉含量的影响

Fig.5 Effects of combined application of controlled-release urea and regular urea on starch content in post-anthesis wheat grains

2.5 控释尿素与普通尿素配施对弱筋小麦品质的影响

由表 2 可知,不同施肥模式对小麦蛋白质含量、湿面筋含量、沉淀值、面团形成时间和面团稳定时间具有不同影响。施氮量相同的条件下,追施普通尿素模式(M1、M2 处理)下各品质性状均高于 CK,其

中 M2 和 M1 处理的蛋白质含量较 CK 分别显著提高 8.28% 和 4.47%,一次性基施模式(M3、M4 处理)的各项指标均低于 CK,其中 M4 处理各项指标在控释尿素与普通尿素配施处理中均最低,与 M2 处理差异显著,与 M3 处理蛋白质含量、湿面筋含量、面团稳定时间差异不显著。参考《小麦品种品质分类》(GB/T 17320-2013),4 种控释尿素与普通尿素配施处理小麦品质各指标均达到弱筋小麦主要品质要求。

表 2 控释尿素与普通尿素配施对弱筋小麦品质的影响

Table 2 Effects of combined application of controlled-release urea and regular urea on the quality of weak-gluten wheat

处理	蛋白质含量 (%)	湿面筋含量 (%)	沉淀值 (mL)	面团形成时间 (min)	面团稳定时间 (min)
N0	9.22e	17.73c	19.07d	1.47c	1.20c
CK	10.51e	25.78a	28.57ab	2.40ab	2.01b
M1	10.98b	25.91a	29.68ab	2.43a	2.17ab
M2	11.38a	25.92a	29.93a	2.53a	2.67a
M3	10.13d	24.97ab	27.93b	2.10b	1.95b
M4	10.10d	23.69b	23.23c	1.77c	1.77b

N0、CK、M1、M2、M3、M4 见表 1 注。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 控释尿素与普通尿素配施对小麦花后碳代谢的影响

蔗糖是植物的光合产物,也是植物体内碳运输的主要形式^[21-25]。*SPS* 和 *SS* 是控制蔗糖合成和降解的关键酶^[26],其活性变化能体现植物体内光合同化物的运转能力。郭利伟^[27]研究发现,控释尿素能提高植物叶片中 *SPS*、*SS* 活性,促进叶片内的蔗糖合成。本研究认为,M2、M1 处理能显著提高小麦花后 7 d、14 d 的 *SPS*、*SS* 活性,且旗叶和籽粒蔗糖含量也在花后 7~14 d 明显提高。M3、M4 处理的 *SPS*、*SS* 活性在花后 7 d、14 d 显著降低。有研究结果表明,氮素能影响植物 *SPS* 和 *SS* 的活性^[28-29],一次性基施模式下碳代谢酶活性的降低可能是由于该模式中的 CU_{150d} 氮素释放不足。小麦淀粉合成受籽粒蔗糖供应和淀粉合成关键酶的调控。本研究认为,与 CK 相比,M2 处理整体显著提高了籽粒淀粉含量,而 M1、M3 和 M4 处理整体上无显著差异,这可能是由于 M2 处理提高了小麦源器官对库器官同化物的供应能力,维持了较高的淀粉合成关键酶活性。此外,M3、M4 处理在花后 14 d 淀粉含量显著低于 CK,但是在后期淀粉含量与 CK 差异不显著,这可能是由于一次性基施模式增加了小麦最大灌浆速率,但推迟了最大灌浆速率出现的时间^[10]。

3.2 控释尿素与普通尿素配施对小麦产量和品质的影响

研究表明,控释尿素可以调控养分的释放速率,有利于提高小麦产量^[30],不同的控释尿素与普通尿素配施模式对小麦产量的影响可能不一致^[31]。本研究中,M2 处理能显著提高小麦产量,这与前人的研究结果^[6,32]一致。产量构成因素的协调是小麦高效增产的基础^[33],研究结果表明,控释尿素占比 60% 条件下一次性基施能增加小麦的穗粒数和千粒重^[34]。也有研究发现控释尿素能增加小麦穗数和千粒重,分次施肥效果更加显著^[6,35]。在本研究中,控释尿素与普通尿素配施与 CK(常规施肥)相比主要提高了穗粒数、千粒重,这是导致产量差异的主要原因。控释尿素与普通尿素配施显著提高了小麦千粒重,这可能是由于控释尿素在小麦生长中后期氮素供应充足,满足了小麦花后对养分的需求,有利于千粒重的增加,这与前人的研究结

果^[4,36-37]一致。但是,本研究中 CU_{150d} 一次性基施模式的穗粒数未显著提高,这与张晨阳等^[34]的研究结果不同。拔节期的氮素营养调控对小麦小花发育至关重要,能直接影响小麦穗粒数^[38]。本研究发现,M3 和 M4 处理小麦花后前中期的旗叶 *SPAD* 值较 CK 显著降低,这说明 CU_{150d} 一次性基施模式下小麦在拔节期和花后前中期出现了一定程度的氮素亏缺,影响了小花发育,使穗粒数未获得显著提升。蛋白质含量是决定弱筋小麦面粉品质的关键指标,Zhang 等^[39]研究发现控释肥掺混尿素能提高小麦蛋白质含量,且在减氮的情况下小麦产量不会明显降低。本研究在 180 kg/hm² 的施氮量下各施氮模式的弱筋小麦蛋白质含量、湿面筋含量均能达到规定标准(GB/T 17320-2013),且产量有提高或持平的表现,说明控释尿素与普通尿素配施条件下弱筋小麦面粉品质和产量能协同提升。

4 结论

普通尿素配施控释尿素能影响小麦产量和面粉品质,其中追施模式可以提高小麦花后碳代谢相关酶活性、花后光合同化物的转化效率和淀粉积累速率。本研究中,与常规施肥处理相比,40% CU_{60d} 基施+40%普通尿素基施+20%普通尿素拔节期追施的处理小麦产量最高,且面粉主要品质指标均符合国家规定的弱筋小麦品质标准,该施肥模式可作为江淮地区弱筋小麦轻简化生产的控释尿素施用模式。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [2] 姚金保, 马鸿翔, 张平平, 等. 中国弱筋小麦品质研究进展[J]. 江苏农业学报, 2009, 25(4): 919-924.
- [3] 姚金保, 马鸿翔, 姚国才, 等. 氮素对弱筋小麦宁麦 13 籽粒产量和蛋白质含量的影响[J]. 江苏农业学报, 2009, 25(3): 474-477.
- [4] 邓光亮, 屠晓, 李军, 等. 缓控释肥一次性基施对小麦产量及其形成的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(3): 87-93.
- [5] CUI P Y, CHEN Z X, NING Q Q, et al. One-time nitrogen fertilizer application using controlled-release urea ensured the yield, nitrogen use efficiencies, and profits of winter wheat[J]. Agronomy, 2022, 12(8): 1792.
- [6] 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.

- [7] 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.
- [8] 韩锐锋,牛增锡,王鑫悦,等. 控释尿素和普通尿素混合基施对冬小麦氮素吸收利用和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2023,29(11):2042-2058.
- [9] 王义凡,任 宁,董向阳,等. 控释尿素与普通尿素配施对小麦产量、氮素吸收及经济效益的影响[J]. 作物杂志,2023(5):117-123.
- [10] 杨金宇,李援农,王凯瑜,等. 控释氮肥与普通尿素配施比例和方法对冬小麦灌浆特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(3):442-452.
- [11] 丁怡梦,陈慕琪,丁文锐,等. 谷类作物碳氮代谢互作机制的研究进展[J]. 植物生理学报,2024,60(5):753-761.
- [12] JIANG Z R, CHEN Q L, LIU D, et al. Application of slow-controlled release fertilizer coordinates the carbon flow in carbon-nitrogen metabolism to effect rice quality [J]. BMC Plant Biology, 2024,24(1):621.
- [13] 韦陈华. 控释氮肥对水稻产量、稻米品质和淀粉特性的影响 [D]. 扬州:扬州大学,2023.
- [14] 戴 明,冯鹏羽,郭海滨,等. 氮肥运筹对东北寒区春玉米氮素吸收、利用及淀粉合成的影响[J]. 江苏农业科学,2024,52(7):101-109.
- [15] DOEHLERT D C, KUO T M, FELKER F C. Enzymes of sucrose and hexose metabolism in developing kernels of two inbreds of maize[J]. Plant Physiology, 1988,86(4):1013-1019.
- [16] 上海植物生理研究所,上海市植物生理学会. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京:科学出版社,1999.
- [17] 吕 冰,郭志刚,梁建生. 水稻胚乳中淀粉合成相关酶活性的变化对支链淀粉精细结构的影响[J]. 中国科学(C辑:生命科学),2008,38(8):766-773.
- [18] NAKAMURA Y, YUKI K, PARK S Y, et al. Carbohydrate metabolism in the developing endosperm of rice grains[J]. Plant and Cell Physiology, 1989,30(6):833-839.
- [19] 陈 炜,李红兵,邓西平. 不同栽培模式下冬小麦灌浆过程中旗叶蔗糖代谢和籽粒淀粉积累特性[J]. 西北农业学报,2018,27(5):641-649.
- [20] 由继红,董春光,史晓昆. 小麦叶片可溶性糖含量测定方法的研究[J]. 实验室科学,2021,24(2):27-29,33.
- [21] 王江林,王志强,曾文芳,等. 钾肥喷施量对桃树光合作用、果实糖酸组分及综合品质的影响[J]. 江苏农业科学,2024,52(10):165-172.
- [22] 吴元彩,王东登,郑旭阳,等. 激素和蔗糖对番茄子叶节位侧芽萌发与生长的影响[J]. 南方农业学报,2024,55(2):509-519.
- [23] 杨 善,方 欣,张倩倩,等. 干旱对甘蔗及其近缘植物蔗糖代谢的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(18):94-100.
- [24] 韩 敏,周桂芳,王德升,等. 蔗糖对萝卜芽苗菜生长发育及营养品质的影响[J]. 江苏农业学报,2023,39(5):1225-1232.
- [25] 王亚娜,卢 闯,杨云龙,等. 柠檬蔗糖代谢关键酶基因家族鉴定及表达分析[J]. 南方农业学报,2023,54(5):1327-1340.
- [26] 张明方,李志凌. 高等植物中与蔗糖代谢相关的酶[J]. 植物生理学通讯,2002,38(3):289-295.
- [27] 郭利伟. 尿素施用方式与保水剂耦合对玉米碳氮代谢及水分利用的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2014.
- [28] LI Z Y, JIANG H, LIANG Z G, et al. Reduced application of nitrogen fertilizer affects the carbon metabolism of leaves and maintains the number of flowers in *Coreopsis tinctoria* [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2023,42(2):922-934.
- [29] ZHANG Z Q, HU Y X, TUNG S A, et al. Evaluating the effects of water-nitrogen interactions on carbon and nitrogen accumulation as well as related metabolic enzymes activity in autumn maize[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2023,23(4):5245-5256.
- [30] ZHU S H, LIU L Y, XU Y, et al. Application of controlled release urea improved grain yield and nitrogen use efficiency: a meta-analysis[J]. PLoS One, 2020,15(10):e0241481.
- [31] ZHOU X J, YANG X R, FENG S Z, et al. Optimization of controlled-release urea application based on the winter wheat yield [J]. European Journal of Agronomy, 2023,151:126987.
- [32] 辛海滨,杨绪清,徐瑞衡,等. 3种缓控释肥不同施肥模式对小麦产量及经济效益的影响[J]. 浙江农业科学,2024,65(3):505-512.
- [33] 华一帆,秦际远,王 洁,等. 播种方式与缓控释氮肥一次性基施对冬小麦干物质积累转运和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2022,28(12):2185-2200.
- [34] 张晨阳,张富仓,郭金金,等. 缓释氮肥与尿素掺施比例对冬小麦产量及氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(4):669-680.
- [35] 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[J]. Field Crops Research, 2021,267:108163.
- [36] 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? [J]. Agronomy, 2022,12(2):407.
- [37] LU H, WANG R, DUN C P, et al. Effects of controlled-release bulk blending fertilizer on wheat yield of different varieties under various soil basic fertility [J]. Environmental Pollutants and Bioavailability, 2022,34(1):273-283.
- [38] 王 祎,李青松,王宜伦,等. 施氮量对小麦穗花发育及穗粒数的影响[J]. 麦类作物学报,2014,34(5):668-673.
- [39] ZHANG G X, LIU S J, DONG Y J, et al. A nitrogen fertilizer strategy for simultaneously increasing wheat grain yield and protein content: mixed application of controlled-release urea and normal urea [J]. Field Crops Research, 2022,277:108405.

(责任编辑:陈海霞)