

# 不同类型尿素配施对小麦花后氮代谢和产量的影响

凤晓岗<sup>1</sup>, 马飞<sup>1</sup>, 王浩<sup>1</sup>, 卓大龙<sup>2</sup>, 杨兵<sup>2</sup>, 宋贺<sup>1</sup>, 王德好<sup>2</sup>, 车钊<sup>1</sup>

(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:**为探究不同类型控释尿素运筹对小麦氮代谢及产量的影响,以释放期 60 d 控释尿素(SCU)、释放期 150 d 控释尿素(LCU)和普通尿素(U)为氮肥,设置不施氮肥(N<sub>0</sub>)、常规施用 U(基肥:分蘖肥:拔节肥=4:3:3, CK)、40% U 基肥+30% SCU 基肥+30% U 拔节肥(F<sub>1</sub>)、40% U 基肥+40% SCU 基肥+20% U 拔节肥(F<sub>2</sub>)、40% U+30% SCU+30% LCU 均基施(Y<sub>1</sub>)、40% U+40% SCU+20% LCU 均基施(Y<sub>2</sub>)共 6 个处理,除 N<sub>0</sub> 外,其他处理总施氮量一致,研究不同类型尿素运筹对土壤无机氮含量、小麦旗叶和籽粒硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶(GS)、谷草转氨酶(GOT)和谷丙转氨酶(GPT)活性、游离氨基酸和可溶性蛋白含量、小麦氮素积累量、产量和氮肥利用率的影响。结果表明,与 CK 相比,灌浆期 F<sub>2</sub> 处理的土壤硝态氮和铵态氮含量分别提高了 10.67% 和 4.69%;旗叶和籽粒 NR、GS、GOT、GPT 活性均显著提高(P<0.05),增幅 3.46%~16.55%;游离氨基酸和可溶性蛋白含量提高了 9.95%~25.03%。F<sub>2</sub> 处理产量较 CK 显著提高,增幅 4.81%。Y<sub>1</sub>、Y<sub>2</sub> 处理较 CK 显著减产,产量降幅分别为 7.59% 和 4.79%。从产量构成来看,控释肥施用处理显著降低有效穗数;F<sub>2</sub> 处理通过增加千粒重提高了产量;F<sub>1</sub> 和 F<sub>2</sub> 处理显著提高了氮肥利用率,其中 F<sub>2</sub> 处理氮肥利用率较 CK 提高了 10.23 个百分点。综合考虑小麦氮代谢水平、产量和氮肥利用率,40% 普通尿素和 40% 释放期 60 d 控释尿素基肥+拔节期追施 20% 的普通尿素可作为江淮地区稻茬小麦增产增效的最佳施肥方式。

**关键词:** 控释尿素;稻茬小麦;氮代谢;产量

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)05-0652-10

## Effects of Different Types of Urea Combined Application on Nitrogen Metabolism and Yield in Wheat after Anthesis

FENG Xiaogang<sup>1</sup>, MA Fei<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>, ZHUO Dalong<sup>2</sup>,  
YANG Bing<sup>2</sup>, SONG He<sup>1</sup>, WANG Dehao<sup>2</sup>, CHE Zhao<sup>1</sup>

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

**Abstract:** In order to investigate the effects of different control released urea on nitrogen metabolism and yield of wheat, 60 days of control released urea (SCU) and 150 days of control released urea (LCU) and normal urea (U) were used as nitrogen fertilizers. Six treatments were set up: no nitrogen fertilizer (N<sub>0</sub>), regular fertilization (basal:tiller:jointing fertilizer=4:3:3, CK), 40% U basal fertilizer+30% SCU basal fertilizer+30% U jointing fertilizer (F<sub>1</sub>), 40% U basal fertilizer+40% SCU basal fertilizer+20% U jointing fertilizer (F<sub>2</sub>), 40% U+30% SCU+30% LCU as basal fertilizer (Y<sub>1</sub>), 40% U+40% SCU+20% LCU as basal fertilizer (Y<sub>2</sub>). Nitrogen application was consistent for all treatments except for N<sub>0</sub>. The aim of this study was to investigate the impact of different types of urea combined application on soil inorganic nitrogen content, as well as on the activities of wheat flag leaf and grain nitrate reductase (NR), glutamine synthetase (GS), glutamine aminotransferase (GOT),

收稿日期:2024-02-27 修回日期:2024-04-30

基金项目:稻-麦(油)周年丰产优质品种筛选与资源高效利用技术途径研究(2022YFD2301401);白湖麦 1 号产量与品质双提升轻简化施肥技术研发项目(XKJ23501);安徽省现代农业产业技术体系建设专项(340000222426000100009)

第一作者 E-mail:FXG18355326162@163.com(凤晓岗)

通讯作者 E-mail:c217@ahau.edu.cn(车钊);wdh269@qq.com(王德好)

and glutamine transaminase(GPT), free amino acids, soluble protein content, wheat nitrogen accumulation, yield, and nitrogen use efficiency. The results showed that compared with CK, the soil  $\text{NO}_3^-$ -N and  $\text{NH}_4^+$ -N contents during the filling period of  $\text{F}_2$  treatment were increased by 10.67% and 4.69%, respectively; flag leaf and grain NR, GS, GOT, and GPT activities were significantly increased by 3.46%–16.55%, and free amino acid and soluble protein contents were increased by 9.95%–25.03%. The yield of the  $\text{F}_2$  treatment was found to be significantly higher than that of CK ( $P < 0.05$ ), with an increase rate of 4.81%. In contrast, the  $\text{Y}_1$  and  $\text{Y}_2$  treatments were observed to have a significant negative impact on yield, with reduction rates of 7.59% and 4.79%, respectively, compared to CK. From the perspective of yield components, the control released fertilizer treatment resulted in a significant reduction in the number of effective spikes. The  $\text{F}_2$  treatment led to an improvement in yield, with an increase in thousand-grain weight. Furthermore, the  $\text{F}_1$  and  $\text{F}_2$  treatments demonstrated a notable enhancement in nitrogen use efficiency, with the  $\text{F}_2$  treatment exhibiting a 10.23 percentage point increase compared to CK. Under the conditions of this experiment, the best fertilization method to increase the yield and nitrogen use efficiency of wheat following rice stubble in the Jianghuai region is to apply 40% of normal urea and 40% of control released urea basally for 60 days during the release period, and 20% of normal urea retrospectively during the nodulation period, considering the level of N metabolism and nitrogen use efficiency of wheat.

**Keywords:** Control released urea; Wheat following rice stubble; Nitrogen metabolism; Yield

小麦是中国主要的粮食作物,约 40% 人口以小麦为主食<sup>[1]</sup>。稻茬麦是中国长江中下游地区主要的冬季作物之一,其播种面积占中国小麦总播种面积的 20% 左右<sup>[2-3]</sup>。稻茬麦区由于降水量大,小麦的氮肥利用率和产量较低,为了提高小麦的氮肥利用率和产量,该区常采用分次施氮的生产模式,但分次施肥劳动投入较大,不能满足轻简化生产的要求<sup>[4-5]</sup>。提高稻茬麦单产水平和氮肥利用率、减少劳动强度是该区小麦生产亟待解决的问题之一。氮代谢与小麦产量和氮肥利用率密切相关<sup>[6]</sup>。尿素是中国使用最普遍的氮肥种类,但其存在释放期短、易损失等缺点<sup>[7]</sup>。控释尿素的氮释放时间与速度可以控制,合理施用可使其养分供给与作物的需肥规律同步,从而减少氮肥投入量与施肥次数,提高氮肥利用率<sup>[8-9]</sup>。因此,研究不同类型尿素运筹对稻茬小麦氮代谢和产量的影响对农业可持续发展具有重要意义。

氮肥中的无机氮需要经过硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶(GS)、谷草转氨酶(GOT)和谷丙转氨酶(GPT)等氮代谢关键酶同化为有机物被作物利用,土壤无机氮浓度和氮代谢酶活性密切相关<sup>[10-12]</sup>。研究表明,与普通尿素相比,施用控释尿素可以显著提高土壤无机氮浓度,促进氮代谢酶活性,提高作物氮素利用率和产量<sup>[13-14]</sup>。控释尿素释放期、施用方式与环境条件关系密切。有

研究发现,相比普通尿素分次施用,释放期 90 d 的控释尿素与普通尿素混配一次性基施可以显著提高小麦返青期至开花期的土壤硝态氮含量,提高小麦的产量和氮肥利用率<sup>[15]</sup>。也有研究表明,相比控释尿素一次性基施和普通尿素分次施用,释放期 90~120 d 控释尿素基施和返青期追施普通尿素可以提高小麦茎秆充实度和抗折力,降低倒伏系数,实现小麦增产<sup>[16]</sup>;基施控释尿素和追施普通尿素可以提高小麦叶片光合性能,增加氮素积累量,从而提高产量和氮素利用效率,但释放期 60 d 控释尿素与普通尿素混配一次性基施会导致产量和氮素利用率降低<sup>[17]</sup>。上述关于不同类型尿素运筹对小麦产量的效应不尽相同,对氮代谢生理机制的效应研究缺乏。

江淮地区是中国重要的稻茬麦种植地区,该地区存在施氮量大、施肥次数多和氮肥利用率低等问题<sup>[4,18]</sup>。本研究拟在大田研究不同类型尿素运筹对小麦产量、氮肥利用率和灌浆期旗叶与籽粒氮代谢相关指标的影响,以期为江淮地区稻茬小麦氮肥的高效利用和高产栽培提供科学依据。

## 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,该地气候温和,

年平均气温 15.8 °C, 年均降水量 1 188 mm, 无霜期 238 d, 试验地前茬作物为水稻。试验前 0~20 cm 土壤硝态氮含量 17.25 mg·kg<sup>-1</sup>, 铵态氮含量 9.92 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效磷含量 8.93 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效钾含量 66.52 mg·kg<sup>-1</sup>, pH5.97。

## 1.2 试验材料与设计

供试小麦品种为白湖麦 1 号, 由安徽省白湖种子有限公司提供。供试氮肥为本课题组自制的包膜短期控释尿素(释放期 60 d, 含氮量 44%, SCU)、包膜长期控释尿素(释放期 150 d, 含氮量 42%, LCU)和购自中盐安徽红四方肥业股份有限公司的普通尿素(含氮量 46%, U)。试验采用单因素随机区组设计, 设置 40%U 基肥+30% SCU 基肥+30%U 拔节肥(F<sub>1</sub>)、40%U 基肥+40% SCU 基肥+20% U 拔节肥(F<sub>2</sub>)、40%U+30% SCU+30% LCU 均基施(Y<sub>1</sub>)、40%U+40% SCU+20% LCU 均基施(Y<sub>2</sub>)、常规施用 U(基肥:分蘖肥:拔节肥=4:3:3, CK)和不施氮处理(N<sub>0</sub>)共 6 个处理, 每个处理 3 次重复。小区面积 15 m<sup>2</sup>(2.5 m×6 m), 小区间留 0.5 m 过道。各处理施氮量均为 225 kg·hm<sup>-2</sup>(N<sub>0</sub> 除外), 所有处理基施 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 135 kg·hm<sup>-2</sup>, 磷、钾肥分别为过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)和氯化钾(K<sub>2</sub>O 60%)。基肥在小区整地时均匀施入耕作层, 分蘖肥于 2023 年 1 月 12 日施入, 拔节肥于 2023 年 3 月 14 日施入。小麦播种量为 150 kg·hm<sup>-2</sup>, 人工开沟条播, 行距 25 cm, 于 2022 年 11 月 5 日播种, 2023 年 5 月 29 日收获。其余田间管理措施与当地大田相同。

## 1.3 测定项目与方法

### 1.3.1 样品采集

于开花期选取长势一致的植株进行标记, 在开花后 7、14、21、28 和 35 d 每个小区每次取 40 株单茎, 20 株保存至 -80 °C 冰箱中用于测定氮代谢相关活性物质, 20 株用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮后用全自动流动分析仪(AA3 型, 德国)测定叶片与籽粒氮含量。

### 1.3.2 小麦产量及其构成因素的测定

成熟期每个小区用正方形取样框(1 m×1 m)选取长势均匀的 1 m<sup>2</sup> 区域调查穗数, 从中随机选取 30 株小麦测定穗粒数; 收获、晒干后测定实际产量(13%含水量)和千粒重。重复 3 次。

### 1.3.3 氮代谢相关酶活性及物质测定

旗叶和籽粒中硝酸还原酶(NR)和谷氨酰胺

合成酶(GS)活性参考董召娣等<sup>[19]</sup>的方法测定; 谷草转氨酶(GOT)和谷丙转氨酶(GPT)活性参考吴良欢等<sup>[20]</sup>的方法测定; 游离氨基酸和可溶性蛋白含量分别采用茚三酮显色法和考马斯亮蓝 G-250 比色法测定<sup>[10]</sup>。

### 1.3.4 土壤无机氮测定

于小麦分蘖期、越冬期、返青期、拔节期、孕穗期、开花期和花后 7、14、21、28、35 d 利用土壤取样器(STEPS, 德国)采集 0~20 cm 土层的土壤样品, 混匀后过 2 mm 筛; 取 5 g 筛下土, 加入 50 mL、1 mol·L<sup>-1</sup> 的 KCl 溶液振荡 40 min, 滤纸过滤后得到浸提液; 用化学分析仪(Clever Chem 380, 德国)测定土壤硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)和铵态氮含量(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)。

### 1.3.5 氮素利用相关指标测定和计算

开花期和成熟期每个小区取 10 株小麦单茎, 将植株分成叶片、茎、穗轴+颖壳和籽粒后烘干、称重、粉碎, 用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮后用全自动流动分析仪(AA3 型, 德国)测定氮含量。

氮素积累量=氮含量×干重;

氮肥利用率=(施氮处理植株氮素积累量-不施氮处理植株氮素积累量)/施氮量×100%。

## 1.4 数据分析及处理

使用 Excel 2019 对试验数据进行整理及制图, 使用 SPSS 24.0 进行单因素方差分析和相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同类型尿素运筹对小麦产量及其构成因素和氮肥利用率的影响

由表 1 可知, F<sub>2</sub> 处理产量最高, 相较 CK 显著提高(P<0.05), 增幅 4.81%, F<sub>1</sub> 处理产量较 CK 和 F<sub>2</sub> 处理无显著差异; Y<sub>1</sub> 和 Y<sub>2</sub> 处理产量显著低于 F<sub>1</sub> 和 F<sub>2</sub> 处理, 且 Y<sub>1</sub> 和 Y<sub>2</sub> 处理间没有显著差异。从产量构成因素看, 相较于 CK, 各施用控释肥处理的小麦穗数均显著降低, 降幅为 4.26%~15.34%, 但 F<sub>1</sub> 和 F<sub>2</sub> 处理的穗数显著高于 Y<sub>1</sub> 和 Y<sub>2</sub> 处理; 各施氮处理间的穗粒数均无显著差异; 与 CK 相比, 施用控释肥处理的千粒重均显著提高, F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>、Y<sub>1</sub> 和 Y<sub>2</sub> 处理分别提高了 3.47%、6.74%、16.71% 和 15.35%, Y<sub>1</sub> 和 Y<sub>2</sub> 处理的千粒重显著高于其他处理, 但二者间无显著差异。相较于 CK, F<sub>1</sub> 和 F<sub>2</sub> 处理显著提高了氮肥利用率, F<sub>2</sub> 处理增幅最高, 提高了 10.23 个百分点, Y<sub>1</sub> 和 Y<sub>2</sub> 处理显著降低了氮肥利用率。

表 1 不同类型尿素配施下小麦产量及其构成因素和氮肥利用率

Table 1 Yield and its components and nitrogen use efficiency of wheat under different types of urea combined application

处理 Treatment	穗数 Panicle number/ ( $\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	穗粒数 Kernels per spike	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Yield/( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	氮肥利用率 Nitrogen use efficiency/%
N <sub>0</sub>	293.33d	32.05b	43.98a	3 270.17d	
CK	484.67a	45.51a	33.10d	6 349.93b	47.77c
F <sub>1</sub>	464.00b	46.67a	34.25c	6 547.83ab	53.90b
F <sub>2</sub>	454.67b	46.28a	35.33c	6 655.40a	58.00a
Y <sub>1</sub>	410.33c	46.01a	38.65b	5 867.88c	41.49d
Y <sub>2</sub>	416.33c	46.29a	38.18b	6 045.81c	41.90d

同列数据后不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

Different letters following data in the same columns indicate significant differences among different treatments at 0.05 level. The same in tables 2 and 3.

2.2 不同类型尿素运筹对土壤无机氮含量的影响

由表 2 和表 3 可知,各施肥处理的土壤无机氮含量变化趋势一致,均在施肥后出现峰值。N<sub>0</sub>、CK、F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>、Y<sub>1</sub>、Y<sub>2</sub> 全生育时期土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 平均含量分别为 15.73、29.26、28.63、31.14、32.74 和 35.15 mg · kg<sup>-1</sup>;与 CK 相比,F<sub>2</sub>、Y<sub>1</sub> 和 Y<sub>2</sub> 处理能显著提高全生育时期 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 平均含量(P<0.05)。N<sub>0</sub>、CK、F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>、Y<sub>1</sub>、Y<sub>2</sub> 处理灌浆期土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 平均含量分别为 8.46、10.40、11.08、11.51、9.36 和 9.46 mg · kg<sup>-1</sup>,其中 F<sub>2</sub>

处理土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 平均含量显著高于其他处理,CK 与 F<sub>1</sub> 处理间无显著差异,Y<sub>1</sub> 与 Y<sub>2</sub> 处理间无显著差异。N<sub>0</sub>、CK、F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>、Y<sub>1</sub>、Y<sub>2</sub> 处理的全生育时期土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 平均含量分别为 6.99、11.57、11.20、11.32、11.12 和 11.50 mg · kg<sup>-1</sup>,各施氮处理间无显著差异;N<sub>0</sub>、CK、F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>、Y<sub>1</sub>、Y<sub>2</sub> 处理灌浆期土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 平均含量分别为 5.58、6.61、6.76、6.92、6.05 和 6.23 mg · kg<sup>-1</sup>,其中 F<sub>1</sub> 和 F<sub>2</sub> 处理的灌浆期土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 平均含量显著高于 Y<sub>1</sub>、Y<sub>2</sub> 处理。

表 2 不同类型尿素运筹下土壤硝态氮含量

Table 2 Soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N under different types of urea combined application

mg · kg<sup>-1</sup>

处理 Treatment	分蘖期 Tillering stage	越冬期 Wintering stage	返青期 Reviving stage	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	开花期 Anthesis stage	花后天数 Days after anthesis/d				
							7	14	21	28	35
N <sub>0</sub>	31.68f	27.37e	24.64d	22.60e	15.98e	13.17d	13.03c	8.30d	6.53c	5.24b	4.48d
CK	63.93e	67.01c	38.69b	34.58c	55.26a	16.25bc	14.77ab	12.55a	8.20b	5.43ab	5.18bc
F <sub>1</sub>	76.69d	56.92d	37.93b	23.85e	53.01a	18.12ab	14.41b	13.58a	8.09b	6.61a	5.69ab
F <sub>2</sub>	90.63c	67.82c	35.97c	29.05d	50.01b	19.69a	15.80a	13.76a	7.98b	5.96ab	5.90a
Y <sub>1</sub>	101.53b	84.04b	40.46a	49.73a	28.21c	15.21cd	12.82c	9.58bc	8.67a	4.96b	4.92cd
Y <sub>2</sub>	123.69a	104.26a	41.03a	41.91b	18.99d	14.61cd	12.52c	10.68b	8.11b	5.96ab	4.91cd

表 3 不同类型尿素运筹下土壤铵态氮含量

Table 3 Soil NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N under different types of urea combined application

mg · kg<sup>-1</sup>

处理 Treatment	分蘖期 Tillering stage	越冬期 Wintering stage	返青期 Reviving stage	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	开花期 Anthesis stage	花后天数 Days after anthesis/d				
							7	14	21	28	35
N <sub>0</sub>	10.46e	9.19b	8.09d	7.86d	7.78e	6.96c	5.72c	5.55b	5.40b	5.08b	4.76a
CK	24.31d	20.87a	12.75a	11.13a	18.62c	8.97a	8.24a	6.06ab	5.21b	5.79ab	5.37a
F <sub>1</sub>	26.82c	19.33a	8.36d	7.89d	20.23b	9.01a	8.32a	6.31a	5.95a	5.66ab	5.30a
F <sub>2</sub>	25.43cd	18.54a	8.16d	8.11d	22.68a	9.28a	8.88a	6.22a	6.01a	5.85a	5.29a
Y <sub>1</sub>	32.92b	19.53a	11.79b	8.73c	13.04d	7.73b	6.55b	6.33a	5.43b	5.30ab	4.95a
Y <sub>2</sub>	35.10a	20.18a	10.61c	9.90b	13.37d	7.92b	7.04b	6.15ab	5.63ab	5.84a	4.82a

### 2.3 不同类型尿素运筹对小麦花后旗叶和籽粒氮代谢酶活性的影响

随着灌浆期推移,旗叶和籽粒中 NR、GS、GOT 和 GPT 的活性均呈现下降趋势(图 1)。由图 1A 可知,与 CK 比较, $F_1$  和  $F_2$  处理旗叶 NR 活性在花后 7、14 和 35 d 均显著提高( $P < 0.05$ ),平均增幅分别为 5.39% 和 8.82%; $Y_1$  和  $Y_2$  处理显著降低,降幅分别为 4.70% 和 2.89%。由图 1B 可知,相较于 CK, $F_1$  和  $F_2$  处理籽粒 NR 活性在花后 7 d 均提高, $F_2$  处理提高显著,增幅 14.62%; $Y_1$  处理显著降低,降幅 11.81%, $F_1$  和  $Y_2$  处理与 CK 间无显著差异。

由图 1C 可知,与 CK 比较, $F_2$  处理旗叶 GS 活性在花后 7、14 和 21 d 显著提高, $F_1$  处理在花后 14 d 显著提高, $F_1$  和  $F_2$  处理花后平均 GS 活性显著提高,增幅分别为 2.15% 和 7.30%; $Y_1$  和  $Y_2$  处理显著降低,降幅分别为 3.49% 和 3.53%。由图 1D 可知,相较于 CK, $F_2$  处理籽粒 GS 活性在花后 7、14、28 和 35 d 显著提高, $F_1$  处理在花后 7 和 14 d 显著提高, $Y_1$  和  $Y_2$  处理在花后 35 d 显著提高; $F_1$  和  $F_2$  处理花后籽粒平均 GS 活性显著提高,增幅分别为 6.72% 和 9.94%, $Y_1$  和  $Y_2$  处理与 CK 间无显著差异。

由图 1E 可知,相较于 CK, $F_2$  处理旗叶 GOT 活性在花后 7 d 显著提高, $Y_2$  处理在花后 35 d 显著提高; $F_2$  处理花后旗叶平均 GOT 活性显著提高,增幅 3.46%,而  $Y_1$  处理显著降低,降幅 2.71%, $F_1$  和  $Y_2$  处理与 CK 间无显著差异。由图 1F 可知,相较于 CK,除花后 28 d 外,其余时期  $F_1$  和  $F_2$  处理籽粒 GOT 活性均显著提高; $F_1$ 、 $F_2$  和  $Y_1$  处理花后籽粒平均 GOT 活性显著提高,增幅分别为 10.28%、16.55% 和 6.61%, $Y_2$  处理与 CK 间无显著差异。

由图 1G 可知,相较于 CK, $F_1$  处理旗叶 GPT 活性在花后 21、28 和 35 d 显著提高, $F_2$  处理在花后 21 和 28 d 显著提高; $F_1$  和  $F_2$  处理旗叶平均 GPT 活性显著提高,增幅分别为 3.91% 和 7.02%, $Y_1$  处理显著降低,降幅 8.75%, $Y_2$  处理与 CK 间无显著差异。由图 1H 可知,相较于 CK, $F_2$  处理籽粒 GPT 活性在花后 14 和 35 d 显著提高, $F_1$  处理在花后 35 d 显著提高; $F_1$ 、 $F_2$  和  $Y_1$  处理籽粒平均 GPT 活性显著提高,增幅分别为 5.79%、7.63% 和 2.29%, $Y_2$  处理与 CK 间无显著差异。

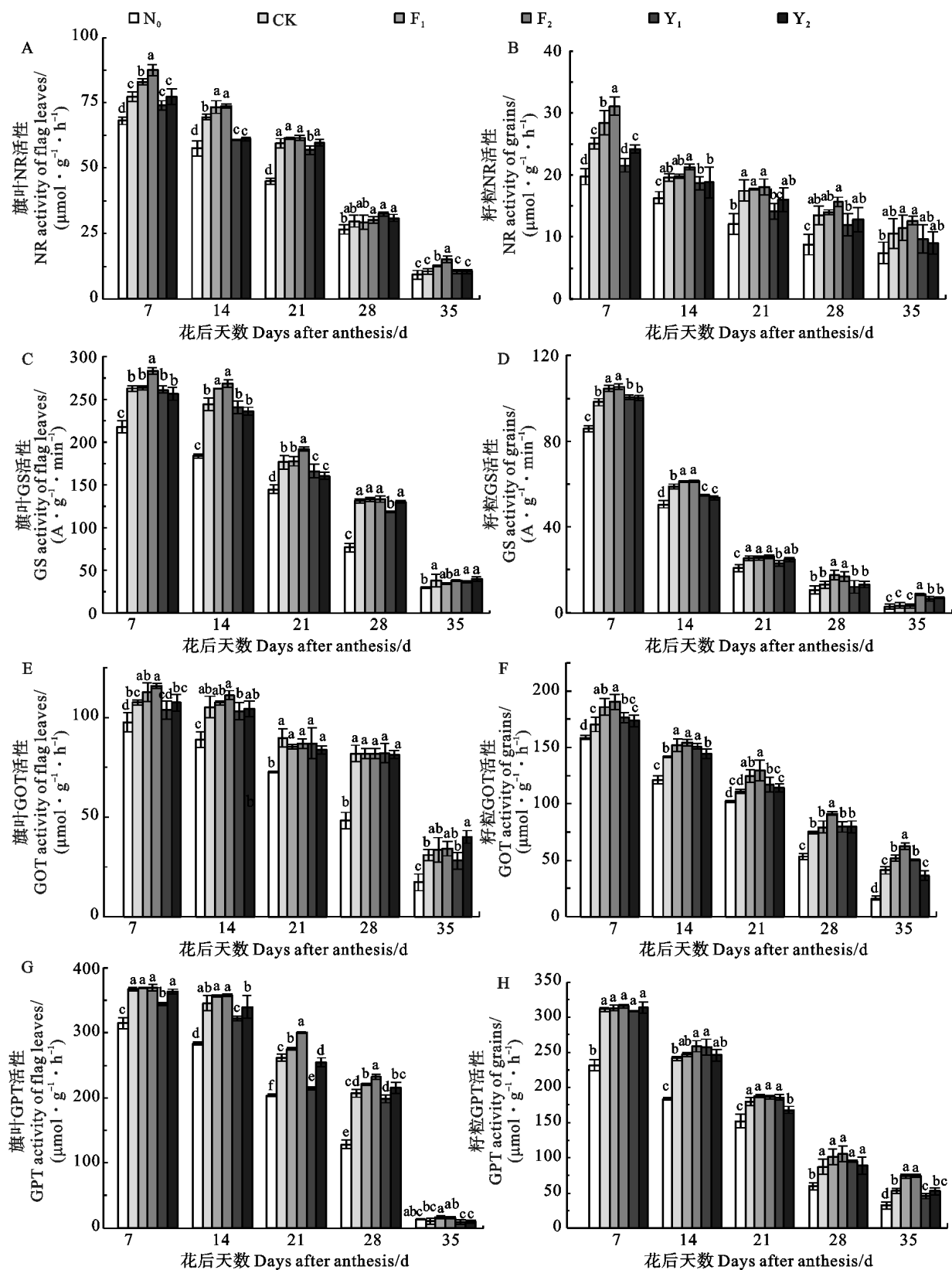
### 2.4 不同类型尿素运筹对小麦花后旗叶和籽粒游离氨基酸和可溶性蛋白含量的影响

如图 2A 所示,旗叶中游离氨基酸含量随着花后灌浆的进行呈先上升后下降的趋势,相较于 CK, $F_2$  处理旗叶游离氨基酸含量在花后 14~28 d 显著提高, $F_1$  处理在花后 14 d 显著提高; $F_2$  处理旗叶平均游离氨基酸含量显著提高,增幅 25.03%, $Y_1$  和  $Y_2$  处理显著降低,降幅分别为 17.86% 和 6.88%, $F_1$  处理与 CK 间无显著差异。由图 2B 可知,籽粒游离氨基酸含量随着花后灌浆的进行不断下降,相较于 CK,除花后 14 d 外, $F_2$  处理籽粒游离氨基酸含量显著提高, $F_1$  处理在花后 7 d 和 35 d 显著提高; $F_1$  和  $F_2$  处理籽粒平均游离氨基酸含量显著提高,增幅分别为 5.51% 和 17.99%,而  $Y_1$  和  $Y_2$  处理显著降低,降幅分别为 10.40% 和 6.45%。

由图 2C 可知,旗叶可溶性蛋白含量随着花后灌浆的进行不断下降。相较于 CK, $F_2$  处理旗叶可溶性蛋白含量在花后 7~35 d 显著提高, $F_1$  处理在花后 7、14 和 28 d 显著提高, $Y_1$  处理在花后 28 d 显著提高, $Y_2$  处理在花后 21~35 d 显著提高; $F_1$ 、 $F_2$  和  $Y_2$  处理旗叶平均可溶性蛋白含量显著提高,增幅分别为 5.32%、9.95% 和 2.39%, $Y_1$  处理显著降低,降幅 1.73%。由图 2D 可知,籽粒可溶性蛋白含量在花后 7~14 d 迅速上升,随后在 14~21 d 缓慢下降,21 d 后迅速下降;相较于 CK,除花后 28 d 外, $F_2$  处理籽粒可溶性蛋白含量显著提高, $F_1$  处理在花后 7~28 d 显著提高; $F_1$  和  $F_2$  处理籽粒平均可溶性蛋白含量显著提高,增幅分别为 8.00% 和 14.80%,而  $Y_1$  和  $Y_2$  处理显著降低,降幅分别为 17.94% 和 9.47%。

### 2.5 不同类型尿素运筹对小麦花后叶片和籽粒氮累积量的影响

由图 3A 和 3C 可知,小麦花后叶片中氮含量和氮累积量随着灌浆期的进行不断下降,相较于 CK, $F_1$  和  $F_2$  处理叶片中氮含量在花后 7~21 d 均显著提高; $F_1$  和  $F_2$  处理叶片平均氮含量显著提高,增幅分别为 6.28% 和 7.39%, $Y_1$  和  $Y_2$  处理显著降低,降幅分别为 13.67% 和 3.23%; $F_2$  处理叶片平均氮累积量在花后 7~35 d 显著提高, $F_1$  处理在花后 7~21 d 和 35 d 显著提高; $F_1$  和  $F_2$  处理叶片平均氮累积量显著高于 CK,增幅分别为 13.67% 和 16.08%, $Y_1$  和  $Y_2$  处理显著降低,降幅分别为 21.96% 和 10.47%。由图 3B 可知,



相同时期柱形图上小写字母不同表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。下同

Different letters above the bars in same time indicate significant differences among different treatments at 0.05 level. The same in figures 2 and 3.

图 1 不同类型尿素配施下小麦花后旗叶和籽粒氮代谢酶活性

Fig. 1 Nitrogen metabolism enzyme activities in flag leaves and grains of wheat after anthesis under different types of urea combined application

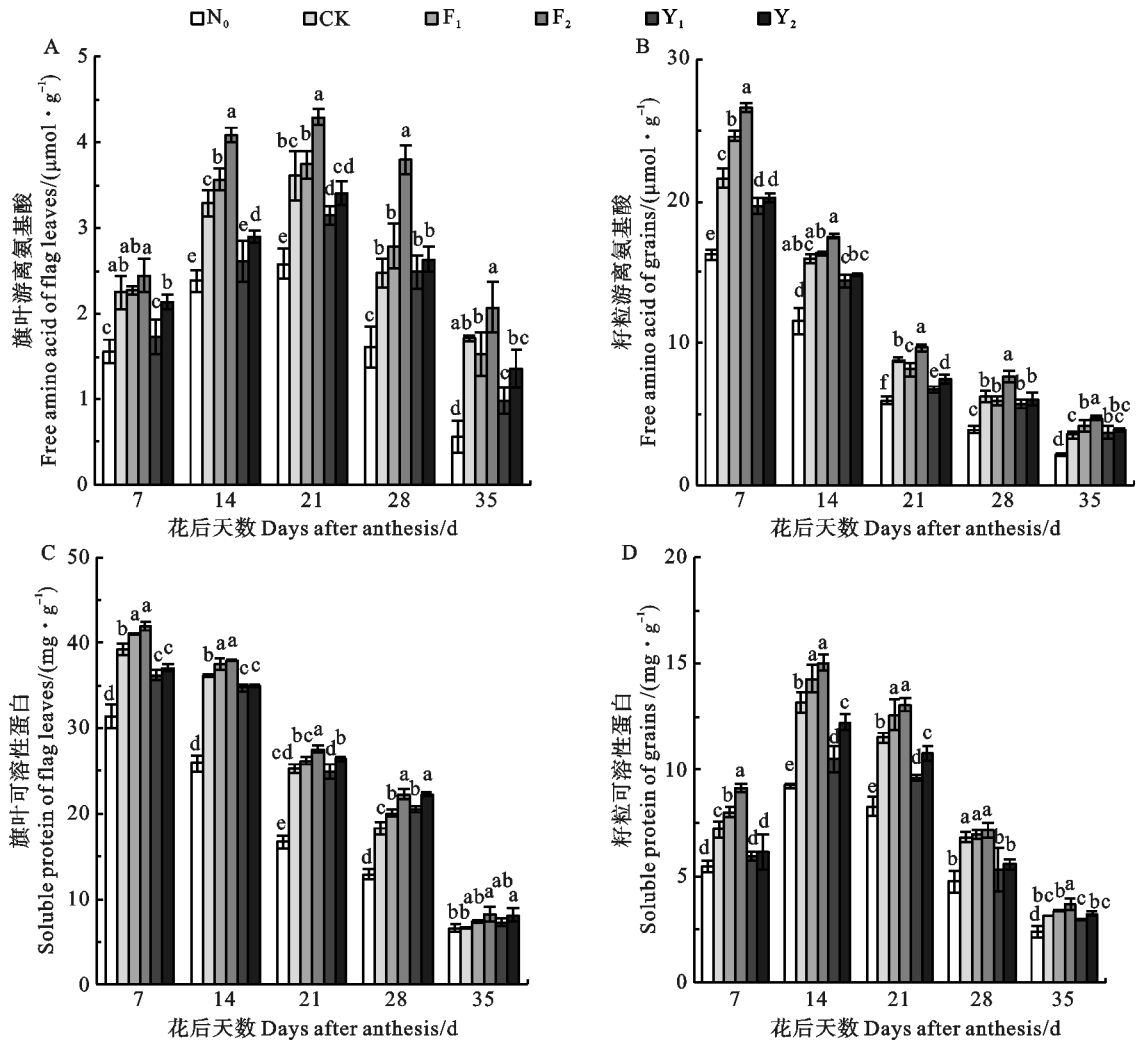


图 2 不同类型尿素配施下小麦花后旗叶和籽粒游离氨基酸和可溶性蛋白含量

Fig. 2 Contents of free amino acids and soluble proteins in flag leaves and grains of wheat after anthesis under different types of urea combined application

籽粒中氮含量随着灌浆期的进行呈先下降后上升的趋势;相较于 CK, F<sub>1</sub> 处理籽粒氮含量在花后 21~28 d 显著提高, F<sub>2</sub> 处理在花后 28~35 d 显著提高; F<sub>1</sub> 和 F<sub>2</sub> 处理籽粒平均氮含量显著提高, 涨幅分别为 3.13% 和 2.93%, 而 Y<sub>1</sub> 处理显著降低, 降幅 2.04%, Y<sub>2</sub> 处理与 CK 间无显著差异。由图 3D 可知, 籽粒中氮累积量随着灌浆期的进行呈上升趋势;相较于 CK, 除花后 14 d 外, 其他时期 F<sub>1</sub> 和 F<sub>2</sub> 处理籽粒氮累积量均显著提高; F<sub>1</sub> 和 F<sub>2</sub> 处理籽粒平均氮累积量显著提高, 增幅分别为 7.58% 和 10.53%, 而 Y<sub>1</sub> 和 Y<sub>2</sub> 处理显著降低, 降幅分别为 7.55% 和 5.28%。总体来看, F<sub>1</sub> 和 F<sub>2</sub> 处理下叶片和籽粒的氮含量和氮累积量较高, Y<sub>1</sub> 和 Y<sub>2</sub> 处理最低, 其中 F<sub>2</sub> 处理叶片和籽粒的氮含量和氮累积量均显著高于其他处理。

### 3 讨论

#### 3.1 不同类型尿素配施对小麦花后氮代谢酶活性和氮素利用率影响

氮代谢酶活性与氮素同化密切相关, NR 和 GS 是氮同化关键限速酶<sup>[21]</sup>。本研究结果表明, 与常规施肥相比, F<sub>1</sub> 和 F<sub>2</sub> 处理可以显著提高小麦旗叶与籽粒 NR 和 GS 活性, 但 Y<sub>1</sub> 和 Y<sub>2</sub> 处理 NR 和 GS 活性显著降低, 这与其他研究结果不完全一致<sup>[13]</sup>。底物浓度是影响氮代谢酶活性的关键因子<sup>[22]</sup>。有研究提出, 相较常规施肥, 施用控释尿素可以提高土壤无机氮含量<sup>[23]</sup>。本研究也发现, F<sub>2</sub> 处理可显著提高小麦全生育期土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量, F<sub>1</sub> 和 F<sub>2</sub> 处理可以提高灌浆期土壤无机氮浓度, 但 Y<sub>1</sub> 和 Y<sub>2</sub> 处理灌浆期土壤无机氮浓度

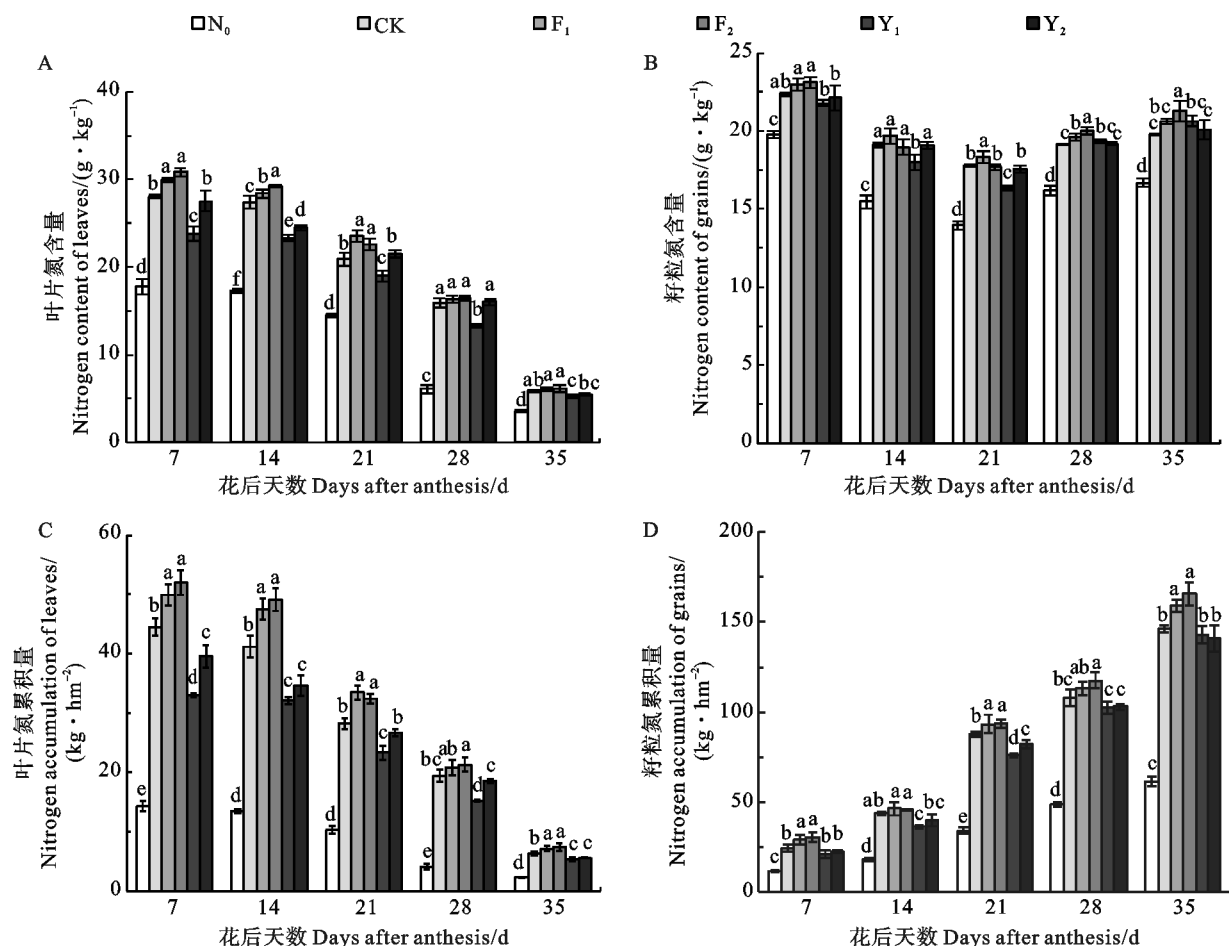


图 3 不同类型尿素运筹下小麦花后叶片和籽粒氮含量和氮积累量

Fig. 3 Effects of nitrogen content and nitrogen accumulation in wheat leaves and grains after anthesis under different types of urea combined application

降低了 5.75%~10.00%，灌浆期无机氮供应不足，这可能是 Y<sub>1</sub> 和 Y<sub>2</sub> 处理花后 NR 和 GS 活性降低的原因。前人研究认为，控释肥释放速度受水分、温度和膜材等多种因素共同影响<sup>[24]</sup>，不同释放期控释肥在田间表现具有较大差异<sup>[23]</sup>，由于小麦生育期较长，降雨不规律，生育前期和后期温差大<sup>[25-26]</sup>，这可能影响了 Y<sub>1</sub> 和 Y<sub>2</sub> 处理中控释尿素的释放速率，造成后期氮素不足。研究表明，氮代谢水平和作物氮素利用率密切相关<sup>[27]</sup>。本研究也发现，相比常规施肥，F<sub>1</sub> 和 F<sub>2</sub> 处理可以显著提高小麦氮素利用率，其中 F<sub>2</sub> 处理显著高于其他处理。本研究中，相比常规施肥，F<sub>2</sub> 处理旗叶和籽粒 GOT 活性、GPT 活性、游离氨基酸和可溶性蛋白含量均显著提高。因此，在本研究条件下，F<sub>2</sub> 处理可以弥补 Y<sub>1</sub> 和 Y<sub>2</sub> 处理中控释尿素释放受环境影响和普通尿素转化快、肥效短的不足，提高小麦旗叶和籽粒的 NR、GS、GOT 和 GPT 活性，增加籽粒氮素积累量，进而提高氮肥利用率。

### 3.2 不同类型尿素配施对小麦产量的影响

前人研究表明，控释尿素可以调控养分的释放速率，合理施用可以在小麦氮素吸收关键时期提供充足的氮素，从而提高小麦产量<sup>[28]</sup>。本研究发现，相较常规施肥，F<sub>2</sub> 处理可以显著提高小麦产量，这与前人研究结果一致<sup>[15]</sup>；但控释尿素一次性施用会显著降低小麦产量。有效穗数、穗粒数和千粒重是构成小麦产量的三要素，三者协调对小麦高产至关重要<sup>[29]</sup>。本研究结果显示，施氮处理间小麦穗粒数无显著差异；相比常规施肥处理，施用控释肥处理下小麦有效穗数显著降低，特别是 Y<sub>1</sub> 和 Y<sub>2</sub> 处理，分别降低了 15.34% 和 14.10%。研究表明，拔节期是小麦需肥高峰期，此时氮肥供应和小麦穗数形成密切相关<sup>[30]</sup>。本研究中，Y<sub>1</sub> 和 Y<sub>2</sub> 处理在分蘖期可以维持较高的土壤氮素浓度，拔节期出现峰值，但氮素浓度显著低于拔节期追肥处理，这可能是有效穗数降低的原因。因此，在稻茬小麦生产中采用控释尿素一次性施肥时，

可以适量增加播种量,以免造成小麦减产。本研究认为,相比常规施肥,施用控释尿素可以显著提高小麦千粒重,这与前人研究结果相似<sup>[28]</sup>;相较于常规施肥处理,F<sub>2</sub>处理灌浆期的土壤氮素浓度显著提高,其氮代谢相关酶活性也增强,说明40%U普通尿素和40%释放期60d控释尿素基施、在拔节期追施20%的普通尿素可以协调产量构成因素之间的关系,在减少一次追肥的情况下提高千粒重,进而增加小麦产量。

## 4 结论

与常规施肥处理相比,40%U和40%SCU基施+20%U拔节期追施提高了灌浆期土壤的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量,进而增加旗叶与籽粒的NR、GS、GOT、GPT活性和游离氨基酸、可溶性蛋白含量,显著提升产量和氮肥利用率;40%U和40%SCU基施+20%U拔节期追施氮肥运筹模式可作为江淮地区稻茬小麦轻简化生产的控释尿素施用方式。

### 参考文献:

- [1]姜长云,王一杰,李俊茹. 科学把握中国式农业农村现代化的政策寓意和政策导向[J]. 南京农业大学学报(社会科学版), 2023,23(2):9.  
JIANG C Y, WANG Y J, LI J R. Scientific grasp of the policy implication and policy orientation of Chinese style agricultural and rural modernization [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2023, 23(2):9.
- [2]卢百关,杜永,李筠,等. 黄淮地区稻茬小麦超高产群体特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2015,23(1):44.  
LU B G, DU Y, LI J, et al. Population characteristics of super-high-yielding wheat under rice stubble in Huang-Huai area [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(1):44.
- [3]国家统计局; 中国统计年鉴[M]. 北京: 国家统计局出版社, 2023.  
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.
- [4]李敏,卜容燕,韩上,等. 安徽省冬小麦施肥现状与肥料利用效率[J]. 应用生态学报, 2020,31(9):3055.  
LI M, BU R Y, HAN S, et al. Current status of fertilizer application and utilization efficiency of winter wheat in Anhui Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(9):3055.
- [5]张文静,江东国,黄正来,等. 氮肥施用对稻茬小麦冠层结构及产量、品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2018,38(2):165.  
ZHANG W J, JIANG D G, HUANG Z L, et al. Effects of nitrogen fertilizer application on canopy structure traits, grain yield and quality of wheat after rice [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(2):165.
- [6]王金凤,王壮壮,谷丰序,等. 氮密调控对两个冬小麦品种碳氮代谢及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2021,54(19):4071.  
WANG J F, WANG Z Z, GU F X, et al. Effects of nitrogen fertilizer and plant density on carbon metabolism, nitrogen metabolism and grain yield of two winter wheat varieties [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(19):4071.
- [7]马仁诗,蒋丛泽,高玮,等. 不同水分条件下缓释氮肥对饲用甜高粱生长和水氮利用效率的影响[J]. 草业学报, 2023,32(10):72.  
MA R S, JIANG C Z, GAO W, et al. Effects of slow-release N fertilizer on growth and water- and N- use efficiencies of forage sweet sorghum under three different irrigation regimes [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(10):72.
- [8]肖强,刘东生,刘建斌,等. 减氮条件下配施控释尿素对冬小麦-夏玉米氮素利用及产量的影响[J]. 华北农学报, 2023,38(2):161.  
XIAO Q, LIU D S, LIU J B, et al. Effects of combined application of urea and controlled release urea on nitrogen utilization and yield of winter wheat-summer maize under nitrogen reduction conditions [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2023, 38(2):161.
- [9]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.
- [10]任开明,杨文俊,王犇,等. 施氮量对稻茬弱筋小麦籽粒氮代谢及灌浆的影响[J]. 核农学报, 2023,37(3):606.  
REN K M, YANG W J, WANG B, et al. Effect of nitrogen application rate on grain nitrogen metabolism and grain filling of weak gluten wheat after rice [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2023, 37(3):606.
- [11]WANG H L, ZHANG X C, ZHANG G P, et al. Regulation of density and fertilization on crude protein synthesis in forage maize in a semiarid rain-fed area [J]. *Agriculture-Basel*, 2023,13(3):1.
- [12]陈宇琳,吴凤英,张伟婷,等. 不同类型生物炭对芳香樟生长及光合特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2024(2):8.  
CHEN Y L, WU F Y, ZHANG W T, et al. Effects of different biochar on growth and photosynthetic characteristics of *Cinnamomum camphora* [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2024(2):8.
- [13]曹兵,黄志浩,吴广利,等. 控释掺混肥一次性减量施用对夏玉米产量、氮肥利用和叶片氮代谢酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(3):127.  
CAO B, HUANG Z H, WU G L, et al. Impact of controlled release blended fertilizer on yield, nitrogen use efficiency and leaf enzyme activity of nitrogen metabolism of summer maize under single basal reduction application [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(3):127.
- [14]任寒,朱国梁,董浩,等. 减施配方控释肥调控土壤理化性状与稳定夏玉米产量[J]. 土壤通报, 2022,53(6):1442.  
REN H, ZHU G L, DONG H, et al. Reducing application of formula controlled-release fertilizers regulates soil nitrogen levels to maintain summer maize yield [J]. *Chinese Journal*

- of Soil Science*, 2022, 53(6):1442.
- [15]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):2054  
HAN R F, NIU Y X, WANG X Y, *et al.* Effect of mixed basal application of controlled release urea and common urea on the nitrogen uptake, utilization and yield of winter wheat [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(11):2047.
- [16]马泉,钱晨诚,贾文欣,等.包膜尿素类型及施肥模式对稻茬小麦抗倒伏性能和产量的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(11):1779.  
MA Q, QIAN C C, JIA W X, *et al.* Effect of coated urea type and fertilization pattern on lodging resistance and yield of wheat following rice [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(11):1779.
- [17]薛亚光,韩笑,刘海翠,等.基施树脂包膜尿素替代追肥对冬小麦产量、氮肥利用效率及经济效益的影响[J].江苏农业科学,2022,50(14):69.  
XUE Y G, HAN X, LIU H C, *et al.* Influences of basal application of resin-coated urea instead of topdressing on yield formation, nitrogen use efficiency and economic benefits of winter wheat [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(14):69.
- [18]王彝,任开明,马尚宇,等.不同类型肥料对稻茬弱筋小麦产量与品质的影响[J].华北农学报,2023,38(4):160.  
WANG B, REN K M, MA S Y, *et al.* Effect of different types of fertilizers on yield and quality of weak gluten wheat from rice stubble [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2023, 38(4):160.
- [19]董召娣,易媛,张明伟,等.春性和半冬性小麦花后旗叶和籽粒氮代谢关键酶活性的差异[J].麦类作物学报,2015,35(8):1100.  
DONG Z D, YI Y, ZHANG M W, *et al.* Difference of activities of nitrogen metabolism enzymes in flag leaves and grain after anthesis of semi-winter and spring wheat varieties [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(8):1100.
- [20]吴良欢,蒋式洪,陶勤南.植物转氨酶(GOT和GPT)活度比色测定方法及其应用[J].土壤通报,1998(3):41.  
WU L H, JIANG S H, TAO Q N. Plant aminotransferase (GOT and GPT) determination method and its application of activity colorimetric [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1998(3):41.
- [21]BALOT F S, KAVOOSI G, KHOLDEBARIN B. Nitrate reductase, nitrite reductase, glutamine synthetase, and glutamate synthase expression and activity in response to different nitrogen sources in nitrogen-starved wheat seedlings [J]. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 2016, 63(2):220.
- [22]张露,陈书融,吴龙龙,等.减施氮肥和增氧灌溉对水稻氮代谢关键酶活性及氮素利用的影响[J].农业工程学报,2022,38(9):81.  
ZHANG L, CHEN S R, WU L L, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer reduction and oxygen-enhancing irrigation on the key enzyme activities of nitrogen metabolism and nitrogen utilization in rice [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(9):81.
- [23]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[J].植物营养与肥料学报,2022,28(10):1844.  
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]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(10):1844.
- [24]AZEEM B, KUSHAARI K, MAN Z B, *et al.* Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer [J]. *Journal of Controlled Release*, 2014, 181:16.
- [25]王彦萍,马建涛,柴雨葳,等.秸秆带状覆盖对旱地冬小麦干物质积累分配及转运的影响[J].麦类作物学报,2023,43(7):866.  
WANG Y P, MA J T, CHAI Y W, *et al.* Effects of straw strip mulching on dry matter accumulation, distribution and transportation of winter wheat in dryland [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(7):866.
- [26]陈辉林,田霄鸿,王晓峰,等.不同栽培模式对渭北旱塬区冬小麦生长期土壤水分、温度及产量的影响[J].生态学报,2010,30(09):2429.  
CHEN H L, TIAN X H, WANG X F, *et al.* Effects of different cultivation models on soil water, soil temperature and yield during the winter wheat growth in the Weibei Dry High land [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(09):2429.
- [27]杨磊,夏炎,韩自强,等.氮素调控措施对小麦植株氮素同化过程和产量的影响[J].麦类作物学报,2019,39(10):1200.  
YANG L, XIA Y, HAN Z Q, *et al.* Effect of nitrogen regulation on nitrogen assimilation and yield of wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(10):1200.
- [28]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):1209.  
MA Q, TANG Z Y, WANG M Y, *et al.* Effect of resin coated slow release fertilizer combined with urea on yield, nitrogen use efficiency and economic benefits of winter wheat following rice [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(10):1209.
- [29]李敏,罗德强,蒋明金,等.不同减氮栽培模式对杂交籼稻氮素吸收利用及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2022,28(04):607.  
LI M, LUO D Q, JIANG M J, *et al.* Effects of nitrogen-reduction cultivation models on nitrogen accumulation and yield of hybrid indica rice [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(04):607.
- [30]周吉红,毛思帅,孟范玉,等.春季灌水和追氮对北京冬小麦生长发育和产量的影响[J].麦类作物学报,2021,41(12):1554.  
ZHOU J H, MAO S S, MENG F Y, *et al.* Effect of irrigation and nitrogen topdressing in spring of wheat in Beijing suburb [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(12):1554.