

花后外源 α -酮戊二酸对小麦光合特性、籽粒灌浆及产量的影响

李美玲,梁振宇,张海燕,杨越,贺大海,罗婷,
叶勇,黄秀兰,杨洪坤,杨世民,樊高琼

(四川农业大学农学院农业农村部西南作物生理生态与耕作重点实验室,四川成都 611130)

摘要:为明确花后外源 α -酮戊二酸(α -KG)对小麦旗叶光合及籽粒灌浆特性的影响,以千粒重差异较大的品种蜀麦830和蜀麦1868为材料,设置0.50、0.75和1.00 g·L⁻¹3个 α -KG喷施浓度(于开花第0天和花后第15天喷施),以不喷施 α -KG为对照(CK),分析不同处理下小麦旗叶叶绿素含量、光合参数、籽粒灌浆参数及产量的差异。结果表明,与CK相比, α -KG处理均能提高小麦光合作用,促进籽粒灌浆,从而增加小麦粒重,其中0.75 g·L⁻¹ α -KG处理效果最佳。0.75 g·L⁻¹ α -KG处理下,蜀麦830和蜀麦1868花后21 d的叶绿素含量和花后20 d的净光合速率较CK均显著提高,其中叶绿素含量增幅分别为12.0%和9.6%,净光合速率增幅分别为11.1%和6.6%;灌浆活跃期、平均灌浆速率、最大理论千粒重较CK均显著增加,蜀麦830的3个参数增幅分别为3.8%、4.6%和7.9%,蜀麦1868的增幅分别为1.6%、4.9%和4.9%。0.75 g·L⁻¹ α -KG处理下蜀麦830和蜀麦1868的千粒重较CK分别增加3.8%和3.4%,产量分别增加了6.2%和7.9%,均与CK差异显著。由此可见,花后喷施外源 α -KG能通过增加小麦叶绿素含量促进光合作用和籽粒灌浆,最终增加粒重和产量。

关键词:小麦; α -酮戊二酸;花后喷施;光合特性;籽粒灌浆;千粒重;产量

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)10-1394-09

Effects of Exogenous α -Ketoglutaric Acid Spraying after Anthesis on Photosynthetic Characteristics, Grain Filling and Yield of Wheat

LI Meiling, LIANG Zhenyu, ZHANG Haiyan, YANG Yue, HE Dahai, LUO Ting,
YE Yong, HUANG Xiulan, YANG Hongkun, YANG Shimin, FAN Gaoqiong

(Agricultural College of Sichuan Agricultural University, Southwest Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Cultivation, Ministry of Agriculture and Rural Areas, Chengdu, Sichuan 611130, China)

Abstract: To clarify the influence of exogenous alpha-ketoglutaric acid (α -KG) spraying after anthesis on the photosynthesis of wheat flag leaves and the characteristics of grain filling, Shumai 830 and Shumai 1868, with significant differences in thousand-grain weight, were selected as materials. Using no spraying as the control (CK), 0.50, 0.75, and 1.00 g·L⁻¹ concentrations of α -KG spraying at 0 d and 15 d after anthesis were set up. The differences in chlorophyll content and photosynthetic parameters of flag leaves, grain-filling parameters, and yield under different treatments were compared. The results indicated that compared with the CK, the α -KG treatment enhanced wheat photosynthesis and promoted grain filling, thereby increasing the grain weight of wheat. Among them, the treatment of 0.75 g·L⁻¹ α -KG showed the best effects. Under the treatment with 0.75 g·L⁻¹ of α -KG, the chlorophyll content at 21 d after anthesis and the net photosynthetic rate at 20 d after anthesis of Shumai 830 and Shumai 1868 were significantly higher than those of the CK, with an increase rate of 12.0% and

9.6% for chlorophyll content, and 11.1% and 6.6% for net photosynthetic rate, respectively. And the active grain-filling period, average grain-filling rate, and maximum theoretical thousand-grain weight of Shumai 830 and Shumai 1868 were significantly higher than those of the CK, with an increase rate of 3.8%, 4.6%, and 7.9% for Shumai 830, and 1.6%, 4.9%, and 4.9% for Shumai 1868. After the treatment with $0.75 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ of α -KG, the thousand-grain weight of Shumai 830 and Shumai 1868 was increased by 3.8% and 2.7%, respectively, compared with CK, and the yield was increased by 6.2% and 7.9%, respectively, all showing significant difference from the CK. Thus, exogenous α -KG spraying after anthesis can promote photosynthesis and grain filling by increasing the chlorophyll content of wheat, and ultimately increase grain weight and yield.

Keywords: Wheat; α -ketoglutarate acid; Spraying after anthesis; Photosynthetic characters; Grain filling; 1 000-grain weight; Yield

小麦 (*Triticum aestivum*) 作为中国三大粮食作物之一,在保障国家粮食安全和促进经济发展中发挥重要作用。近年来,中国小麦产量增加主要是单产的提高^[1]。小麦产量由有效穗数、穗粒数和千粒重构成,其中有效穗数和穗粒数的日趋稳定表明提高小麦千粒重对增产非常关键^[2]。研究发现,籽粒灌浆对粒重至关重要,灌浆速率慢和灌浆质量低是限制小麦粒重和产量提高的主要因素^[3]。籽粒灌浆的碳水化合物来自花前储存在营养器官中的非结构性碳水化合物的再利用,以及花后新生成的同化物^[4],小麦籽粒干物质约有 60% 来自花后光合作用,茎、叶等通过光合作用形成同化物并运输到籽粒,为灌浆提供原料^[5-6]。因此,在当前栽培条件下,促进花后光合产物的积累对小麦高产具有重要意义。

α -酮戊二酸 (α -ketoglutaric acid, α -KG) 是一种含有 5 个碳原子的短链羧酸,作为三羧酸 (TCA) 循环的中间产物,可参与抗氧化防御、能量供给、氨基酸代谢、信号系统的调节和基因修饰等生物代谢过程^[7]。研究发现, α -KG 不仅可作为动物和人体的营养强化剂^[8-10],也可作为叶面肥应用于植物栽培中^[11-13]。 α -KG 可以改善植物的光合作用,如促进叶绿素的合成,提高作物叶片的净光合速率 (P_n),从而影响叶绿素荧光参数^[14]。在具有产氧性光合作用能力的大型单细胞原核生物蓝藻上研究发现,培养基中添加 α -KG 可提高捕光色素浓度、放氧复合体的活性及 Rubisco 酶的活性,促进蓝藻光合作用,从而增加总碳水化合物和可溶性蛋白的含量^[15]。此外, α -KG 是植物碳氮代谢的重要桥梁,能综合反映植物细胞碳氮代谢状态,协调碳氮两大代谢系统^[16]。然而,当前有关 α -KG 的研究主要集中在

植物抗逆性方面,如温度胁迫^[17]、干旱胁迫^[18-20]、铵胁迫^[21]等环境条件下的调控机制,但有关喷施 α -KG 对小麦籽粒灌浆影响的研究较少。因此,本研究以千粒重存在显著差异的两个小麦品种为材料,设置不同浓度的花后叶面喷施 α -KG 处理,探究其对小麦旗叶叶绿素含量、光合特性和籽粒灌浆特性及产量的影响,明确其最适施用浓度及作用机理,以为小麦高产栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2023—2024 年在四川省成都市大邑县现代粮食产业园区 ($30^{\circ}58'N, 103^{\circ}53'E$) 进行,浅丘地区,属亚热带湿润季风气候区,小麦生长季降水量 382.6 mm,日均气温 $13.7^{\circ}C$ (见图 1)。试验地前茬作物为水稻,0~20 cm 耕层土壤 pH 值为 7.42,有机质含量 $50.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量 $2.19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷含量 $0.37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾含量 $11.48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮含量 $186.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $12.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $162.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

大田试验采用二因素裂区设计。主区为千粒重存在显著差异的两个小麦品种:蜀麦 830 (千粒重平均 50.00 g) 和蜀麦 1868 (千粒重平均 42.29 g)。副区为花后喷施 α -KG 浓度,设 0.50 、 0.75 和 $1.00 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 3 个水平,分别用 α -KG_{0.50}、 α -KG_{0.75}、 α -KG_{1.00} 表示,以不喷施为对照 (CK)。每个处理重复 3 次。在花后第 0 天和第 15 天对小麦喷施 α -KG,每小区喷施量为 540 mL。小区面积 12 m^2 ($3 \text{ m} \times 4 \text{ m}$),小麦于 2023 年 11 月 1 日

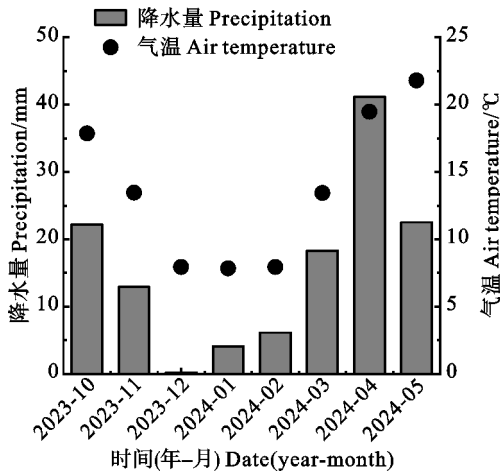


图 1 小麦生育时期气温及降水量变化

Fig. 1 Variations of air temperature and precipitation during the wheat growth period

播种,行距 0.2 m,穴距 0.1 m,基本苗 2.55×10^6 株 \cdot hm^{-2} 。试验总施氮量为 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,基施复合肥(N:P:K=15%:15%:15%) $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,追施肥料为尿素(N 46.0%),分别在苗期(二叶一心期)和拔节期追肥,氮肥基追比为 2:1:1,施肥方式为撒施,其他管理措施同当地大田生产。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 小麦旗叶叶绿素含量测定

于小麦开花期挂牌标记同一日开花的麦穗,分别于花后 7、14、21、28、35 d 选取 10 片旗叶,采用分光光度法测定旗叶叶绿素含量^[22]。(蜀麦 830 在开花后第 35 天叶片已干枯,未取到测定叶绿素的样品)

1.3.2 小麦旗叶光合特性测定

于小麦花后 20 d,在晴天上午 9:00—11:00 用 Li-6800 便携式光合仪(LI-COR,美国)测定旗叶净光合速率(P_n)、细胞间 CO_2 浓度(C_i)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r),每个处理选取已标记的 9 株小麦植株进行测定。测定时光源为内置光源,设定光量子密度(PAR) $1\ 000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, CO_2 浓度 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

1.3.3 小麦籽粒灌浆特性测定

每个小区分别于花后 7、14、21、28、35 d 取上述标记的麦穗 10 个。将麦穗中部籽粒剥出,先 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 杀青后,再 $75 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干后称重并计算千粒重。采用 Logistic 模型,以花后天数 t 为自变量,千粒重 W 为因变量,对小麦籽粒灌浆过程进行拟合,对 t 一阶求导得到籽粒灌浆速率 R ,并计算出籽粒灌浆特征参数^[23],计算公式如下:

$$W = \frac{k}{1 + B e^{-At}}$$

$$R = \frac{kBA e^{-At}}{(1 + B e^{-At})^2}$$

式中, W 为各个时期小麦籽粒的千粒重, k 为理论最大千粒重, t 为开花后天数, B 为籽粒累积初始值参数, A 为灌浆速率。

灌浆活跃期(D)为 W 达到最大千粒重 k 的 5% 至 95% 所经历的时间,其计算公式为 $D = \frac{\ln B + 2.19722}{A}$ 。平均灌浆速率(R_{ave})为最大千粒重 k 除以 W 达到最大千粒重 K 的 99% 所经历的时间,其计算公式为 $R_{ave} = \frac{kA}{\ln B + 4.59512}$ 。对灌浆速率公式求导并使其为 0,可求得最大灌浆速率

对应的时间(T_{max}), $T_{max} = \frac{\ln B}{A}$ 。将 T_{max} 带入灌浆速率公式,可得到最大灌浆速率(R_{max}), $R_{max} = \frac{kA}{4}$ 。

可将灌浆过程分为 3 个阶段,分别为渐进增长期、快速增长期和缓慢增长期,其持续时间(Δt_1 、 Δt_2 、 Δt_3)、干物质积累量(K_1 、 K_2 、 K_3)和平均籽粒灌浆速率(R_1 、 R_2 、 R_3)计算如下:

$$\Delta t_1 = \frac{\ln B - \ln(2 + \sqrt{3})}{A}$$

$$\Delta t_2 = \frac{\ln B + \ln(2 + \sqrt{3})}{A} - \frac{\ln B - \ln(2 + \sqrt{3})}{A}$$

$$\Delta t_3 = \frac{\ln B + 4.59512}{A} - \frac{\ln B + \ln(2 + \sqrt{3})}{A}$$

$$K_1 = \frac{k}{1 + B e^{-At_1}}$$

$$K_2 = \frac{k}{1 + B e^{-At_2}} - \frac{k}{1 + B e^{-At_1}}$$

$$K_3 = \frac{k}{1 + B e^{-At_3}} - \frac{k}{1 + B e^{-At_2}}$$

$$R_1 = \frac{K_1}{\Delta t_1}$$

$$R_2 = \frac{K_2}{\Delta t_2}$$

$$R_3 = \frac{K_3}{\Delta t_3}$$

1.3.4 小麦籽粒产量及其构成因素的测定

在成熟期每小区收获 1 m^2 小麦植株,脱粒、晒干称重后计算产量,并测定千粒重。用谷物水

分测定仪测定籽粒含水量,按 13.0%标准水分含量折算产量和千粒重。计算公式:实际质量=测定质量 $\times(1-\text{籽粒实测含水率})/(1-13\%)$ 。每小区选取具代表性的 4 m \times 2 行区域调查有效穗数,并随机选取 30 穗脱粒后测定穗粒数。

1.4 数据分析

采用 Excel 2019 进行数据处理,使用 SPSS 23.0 进行方差分析,采用新复极差法(SSR)进行显著性检验,用 Origin 2024 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 α -KG 对小麦旗叶叶绿素含量的影响

蜀麦 830 和蜀麦 1868 花后旗叶叶绿素含量随 α -KG 施用量的增加均呈先升后降趋势,其中 α -KG_{0.75} 处理的叶绿素含量均最大(图 2)。两个品种叶绿素含量随花后生育时期的推进均呈先升后降趋势,但不同品种到达最大值的时间不同,蜀麦 830 为花后 14 d,而蜀麦 1868 为花后 21 d。与 CK 相比, α -KG_{0.75} 处理下蜀麦 830 在花后 14 d 和 21 d 的叶绿素含量显著提高(11.0%和 12.0%);蜀麦 1868 在花后 21 d、28 d 和 35 d 的叶绿素含量也显著提高(9.6%、69.6%和 63.0%)。此外, α -KG 处理显著减缓了蜀麦 1868 在花后 21~35 d 的叶绿素下降幅度,但对蜀麦 830 影响较小。

2.2 α -KG 对小麦光合特性的影响

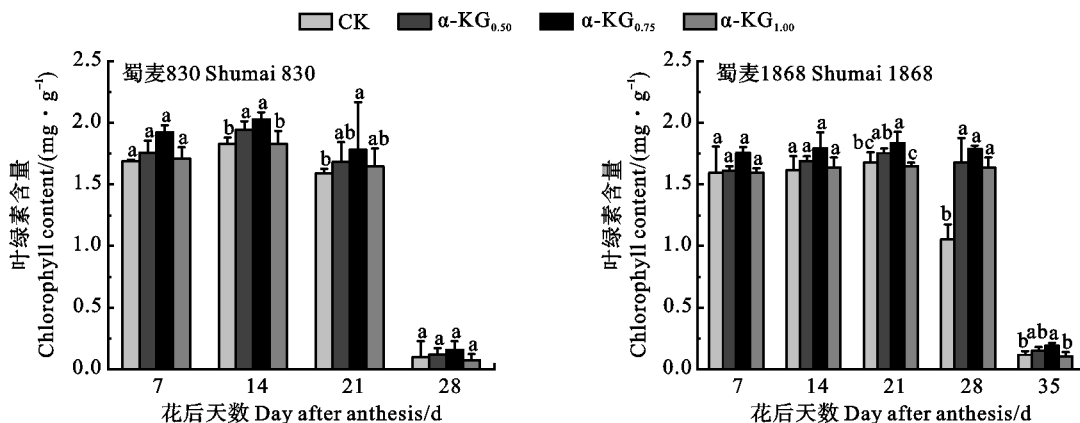
总体来看,蜀麦 1868 在花后 20 d 的 P_n 、 G_s 和 T_r 均高于蜀麦 830,而 C_i 与蜀麦 830 差异不大(图 3)。花后喷施不同浓度的 α -KG 显著影响小麦旗叶的光合特性。随着 α -KG 处理浓度的增

加,蜀麦 830 和蜀麦 1868 旗叶 P_n 均表现为先升高后降低的趋势,其中 α -KG_{0.75} 处理下蜀麦 830 和蜀麦 1868 旗叶 P_n 较 CK 分别显著提高了 11.1%和 6.6%。蜀麦 830 和蜀麦 1868 的 C_i 在 α -KG 处理下表现不同,蜀麦 830 的 C_i 较 CK 降低了 1.0%~4.0%,而蜀麦 1868 的 C_i 提高了 2.4%~2.8%,但两个品种 α -KG_{0.75} 处理的 C_i 均最低。蜀麦 830 的 G_s 虽然在 α -KG 处理下提高了 1.3%~7.2%,但与 CK 间不存在显著差异,而蜀麦 1868 的 G_s 在 α -KG_{0.50}、 α -KG_{0.75} 和 α -KG_{1.00} 处理下较 CK 分别显著提高了 40.0%、40.2%和 36.3%。与 CK 相比, α -KG 处理下蜀麦 830(除 α -KG_{0.75} 外)和蜀麦 1868 的 T_r 均显著提高, α -KG_{0.50} 和 α -KG_{1.00} 处理下蜀麦 830 的 T_r 分别显著提高了 36.1%和 22.4%, α -KG_{0.50}、 α -KG_{0.75}、 α -KG_{0.70} 处理下蜀麦 1868 的 T_r 分别极显著提高了 56.5%、48.3%和 53.1%。

2.3 α -KG 对小麦籽粒灌浆特性的影响

2.3.1 α -KG 对小麦籽粒灌浆进程的影响

小麦的籽粒灌浆过程呈典型的“S 形”变化(图 4)。蜀麦 830 在每个取样时期的千粒重均高于蜀麦 1868, α -KG 处理下蜀麦 830 和蜀麦 1868 在开花 28 d 后的千粒重均高于 CK,尤其以花后 35 d 时 α -KG_{0.75} 处理的效果最为显著,两个品种千粒重均高于 CK。籽粒灌浆速率为单峰曲线,蜀麦 830 在每个取样时期的籽粒灌浆速率均显著高于蜀麦 1868,但都在花后 21 d 左右达到峰值。蜀麦 830 和蜀麦 1868 在 α -KG 处理下花后 21~35 d 的籽粒灌浆速率较 CK 均有所提高。花后

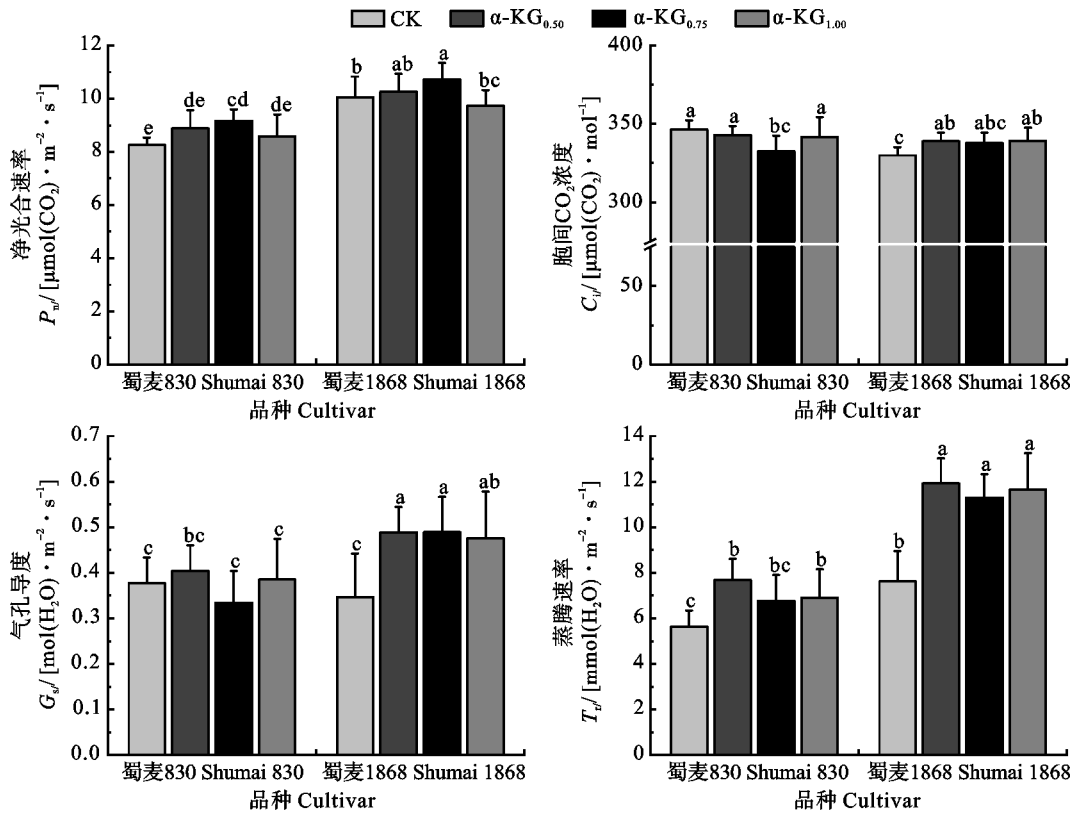


图中数值为平均值 \pm 标准差($n=3$);相同天数误差线上方小写字母表示处理间存在显著差异($P<0.05$)。

Values in the figures are mean \pm SD($n=3$); Different lowercase letters above the error bars in same day indicate significant differences among treatments($P<0.05$).

图 2 α -KG 对小麦旗叶叶绿素含量的影响

Fig. 2 Effect of α -KG on chlorophyll content in flag leaves of wheat



图柱上不同字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

Different letters above columns mean significant differences among different treatments ($P < 0.05$).

图 3 α -KG 对小麦旗叶光合特性的影响

Fig. 3 Effect of α -KG on the photosynthesis characteristics of wheat flag leaves

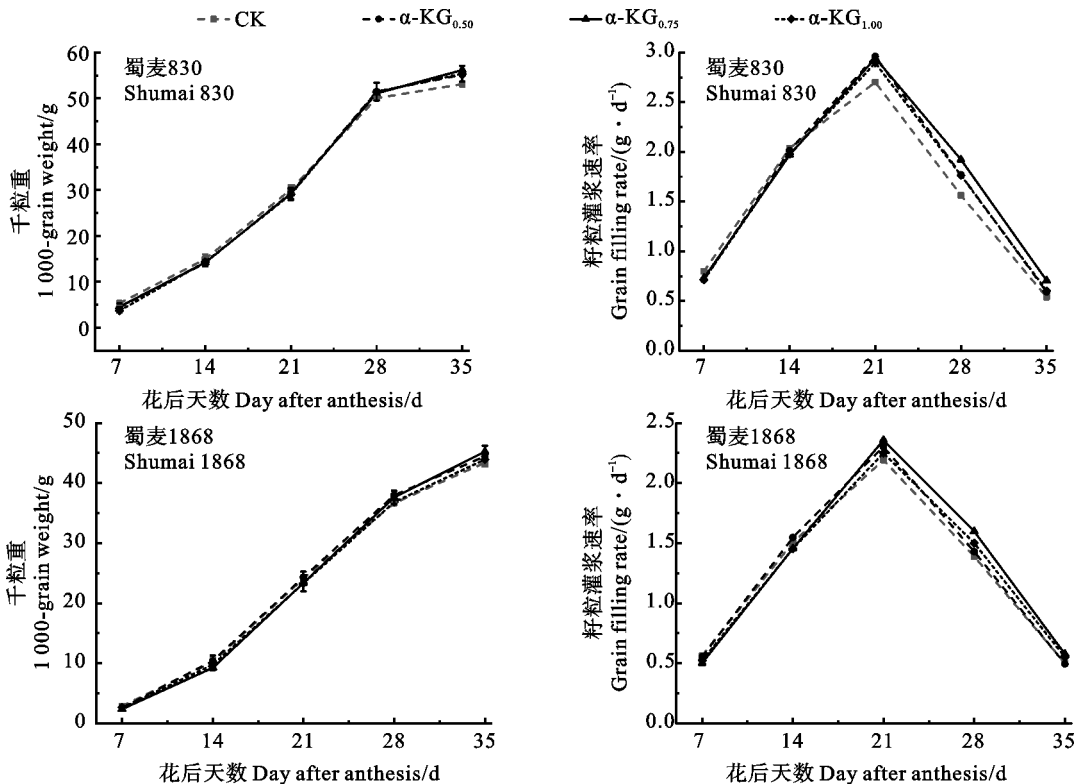


图 4 α -KG 对小麦千粒重及灌浆速率的影响

Fig. 4 Effects of α -KG on 1 000-grain weight and grain filling rate of wheat

28 d 时 α -KG_{0.75} 处理下蜀麦 830 和蜀麦 1868 的籽粒灌浆速率分别提高了 23.0% 和 15.0%。

2.3.2 α -KG 对小麦籽粒灌浆特征参数的影响

对小麦籽粒灌浆过程进行拟合,其灌浆特征参数如表 1。与 CK 相比, α -KG 处理下两个品种 k 、 R_{ave} 、 R_{max} 和 T_{max} 均增加,且随 α -KG 浓度的增加呈先升后降趋势,均在 α -KG_{0.75} 处理下最大。其中 α -KG_{0.75} 处理下蜀麦 830 k 、 R_{ave} 、 R_{max} 和 T_{max} 与 CK 差异显著。 α -KG 处理下蜀麦 830 和

蜀麦 1868 籽粒在渐进增长期、快速增长期和缓慢增长期阶段的干物质积累量较 CK 均有所提高,且随着 α -KG 浓度提高,均表现为先升高后降低趋势。 α -KG_{0.75} 处理下,蜀麦 830 籽粒的干物质积累量在 3 个阶段分别提高了 8.1%、7.9% 和 7.9%,蜀麦 1868 籽粒的干物质积累量在 3 个阶段分别提高了 5.0%、4.9% 和 4.9%。上述结果表明, α -KG 处理能改善籽粒灌浆特性,促进干物质积累。

表 1 α -KG 对小麦籽粒灌浆动态参数的影响

Table 1 Effects of α -KG on dynamic parameters of wheat grain filling

品种 Cultivar (C)	处理 Treatment (B)	k/g	D/d	$R_{ave}/$ ($g \cdot d^{-1}$)	$R_{max}/$ ($g \cdot d^{-1}$)	T_{max}/d	$\Delta t_1/d$	$\Delta t_2/d$	$\Delta t_3/d$	$R_1/$ ($g \cdot d^{-1}$)	$R_2/$ ($g \cdot d^{-1}$)	$R_3/$ ($g \cdot d^{-1}$)	$K_1/$ ($g \cdot d^{-1}$)	$K_2/$ ($g \cdot d^{-1}$)	$K_3/$ ($g \cdot d^{-1}$)
蜀麦 830 Shumai 830	CK	57.35± 0.68b	31.24± 0.26a	1.31± 0.02b	2.75± 0.10b	19.76± 0.46c	12.87± 0.61c	13.76± 0.34a	17.13± 0.43a	1.17± 0.04a	2.41± 0.09b	0.67± 0.02b	15.05± 0.19c	33.11± 0.39c	11.55± 0.14c
	α -KG _{0.50}	59.63± 0.40ab	31.47± 0.72a	1.37± 0.04a	2.97± 0.14a	20.42± 0.23b	13.80± 0.20b	13.24± 0.63a	16.48± 0.78a	1.14± 0.02a	2.60± 0.12a	0.73± 0.03a	15.67± 0.10b	34.43± 0.23b	12.01± 0.08b
	α -KG _{0.75}	61.87± 0.57a	32.44± 0.30a	1.37± 0.02a	2.94± 0.06a	20.89± 0.24ab	13.97± 0.24ab	13.85± 0.17a	17.23± 0.22a	1.16± 0.01a	2.58± 0.05a	0.72± 0.01a	16.27± 0.15a	35.72± 0.33a	12.46± 0.11a
	α -KG _{1.00}	59.07± 1.48b	31.67± 0.41a	1.35± 0.02ab	2.90± 0.09a	20.48± 0.34b	13.78± 0.41b	13.41± 0.34a	16.70± 0.43a	1.13± 0.02a	2.54± 0.08a	0.71± 0.02a	15.52± 0.40b	34.10± 0.85b	11.89± 0.30b
蜀麦 1868 Shumai 1868	CK	46.02± 0.92c	32.13± 0.45a	1.03± 0.01d	2.19± 0.05c	20.60± 0.22b	13.69± 0.34b	13.82± 0.50a	17.20± 0.62a	0.88± 0.03b	1.92± 0.05c	0.54± 0.01c	12.09± 0.24e	26.57± 0.53e	9.27± 0.18e
	α -KG _{0.50}	47.06± 0.51c	31.84± 0.31a	1.07± 0.01cd	2.31± 0.06c	20.62± 0.46b	13.90± 0.55ab	13.45± 0.18a	16.74± 0.23a	0.89± 0.03b	2.02± 0.05c	0.57± 0.01c	12.37± 0.14de	27.17± 0.29de	9.47± 0.10de
	α -KG _{0.75}	48.28± 1.48c	32.63± 0.43a	1.08± 0.02c	2.36± 0.06c	21.39± 0.21a	14.66± 0.12a	13.47± 0.28a	16.76± 0.35a	0.87± 0.02b	2.07± 0.05c	0.58± 0.01c	12.70± 0.39d	27.87± 0.86d	9.72± 0.30d
	α -KG _{1.00}	46.90± 0.51c	32.55± 0.83a	1.04± 0.02cd	2.25± 0.08c	21.09± 0.57ab	14.22± 0.58ab	13.74± 0.60a	17.11± 0.74a	0.87± 0.03b	1.97± 0.07c	0.55± 0.02c	12.34± 0.14de	27.08± 0.30de	9.44± 0.10de
F 值 F value	品种 C	494.40 **	2.70	8209.09 **	693.29 **	5.12	6.09	0.07	0.07	490.91 **	693.25 **	693.25 **	472.77 **	494.40 **	494.40 **
	处理 B	15.22 **	6.62 **	5.87 *	4.80 *	10.82 **	6.92 **	1.30	1.30	1.35	4.80 *	4.80 *	15.40 **	15.22 **	15.22 **
	C×B	1.73	1.23	0.27	0.51	1.16	0.94	0.88	0.88	1.40	0.51	0.51	1.72	1.73	1.73

* : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$ 。同列数据后不同字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下表同。

* : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$ 。Different letters following data in same columns mean significant different among different treatments ($P < 0.05$). The same in table 2.

2.4 α -KG 对小麦产量及其构成因素的影响

由表 2 可知,花后喷施不同浓度的 α -KG 对小麦产量及构成因素有一定影响。与 CK 相比, α -KG 处理下蜀麦 830 和蜀麦 1868 有效穗数无显著变化,但穗粒数、千粒重和产量均增加,其中, α -KG_{0.75} 处理增加显著,蜀麦 830 的穗粒数、千粒重和产量分别提高了 6.1%、3.8% 和 6.2%,蜀麦 1868 分别提高了 5.1%、3.4% 和 7.9%。

3 讨论

3.1 α -KG 对小麦旗叶叶绿素含量及光合特性的影响

光合作用对作物生长发育和产量形成至关重要。旗叶是小麦生长后期的功能叶片,小麦籽粒

20% 以上的干物质来自旗叶的光合作用。叶绿素含量被认为是作物生长发育状况和光合能力的指示器,小麦生长后期,旗叶的叶绿素含量和净光合速率反映了小麦的源活性,与粒重和产量均呈显著正相关^[2,24-26]。叶绿素的合成与植物体内多种代谢途径相关,谷氨酸(Glu)在谷氨酰-tRNA 合成酶催化下变成 L-谷氨酰-tRNA,被普遍认为是叶绿素合成的起点^[24,27]。在水稻、大豆上的研究发现, α -KG 在植物体内的积累促进其向 Glu 的转化,提高植株氮含量、叶绿素含量和净光合速率^[14,28,29]。本研究中, α -KG 喷施后,小麦旗叶叶绿素含量提高,这与前人的研究结果基本一致^[30],可能是 α -KG 被吸收后转化为 Glu,叶绿素合成的原料增加,也可能是 α -KG 促进小麦的生

表 2 α -KG 对小麦产量及产量构成的影响

Table 2 Effects of α -KG on yield and its components of wheat

品种 Cultivar(C)	处理 Treatment(B)	有效穗 Effective spikes/ ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 Thousand- grain weight/g	产量 Yield/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
蜀麦 830 Shumai 830	CK	290.4 \pm 4.7b	39.6 \pm 0.9b	55.7 \pm 0.5bc	5 800.6 \pm 212.4b
	α -KG _{0.50}	292.7 \pm 11.9b	41.5 \pm 0.6a	56.0 \pm 0.1b	5 969.1 \pm 104.3ab
	α -KG _{0.75}	291.9 \pm 16.2b	42.0 \pm 0.4a	57.8 \pm 0.2a	6 158.9 \pm 100.2a
	α -KG _{1.00}	291.5 \pm 11.7b	39.3 \pm 0.8b	55.2 \pm 0.7c	5 907.1 \pm 69.2ab
蜀麦 1868 Shumai 1868	CK	380.2 \pm 13.3a	38.9 \pm 0.7b	41.1 \pm 0.2e	5 372.7 \pm 147.6c
	α -KG _{0.50}	385.8 \pm 6.9a	39.2 \pm 0.8b	41.4 \pm 0.7e	5 473.6 \pm 141.2c
	α -KG _{0.75}	384.6 \pm 14.7a	40.9 \pm 1.3a	42.5 \pm 0.8d	5 795.4 \pm 71.3b
	α -KG _{1.00}	386.3 \pm 16.5a	38.9 \pm 0.1b	41.0 \pm 0.4e	5 361.5 \pm 161.8c
F 值 F value	品种 C	338.14**	6.29	2470.23**	30.72*
	处理 B	0.16	17.60**	35.16**	11.55**
	C \times B	0.05	2.92	2.36	0.60

理代谢过程,有利于叶绿素的合成,有待进一步探究。前人研究结果中, α -KG 处理能显著提高作物的 P_n ,显著降低 C_i ,使 G_s 和 T_r 表现为不同程度的降低^[21,28,29]。本研究中 α -KG_{0.75} 处理后蜀麦 830 和蜀麦 1868 的 P_n 、 G_s 和 T_r 不同程度地提高,蜀麦 830 的 C_i 显著降低,蜀麦 1868 的 C_i 提高,蜀麦 830 和蜀麦 1868 各项光合特征参数及 C_i 的变化不同可能是品种差异引起的, G_s 和 T_r 变化趋势与前人研究结果不同,这可能与作物种类有关。

3.2 α -KG 对小麦籽粒灌浆特性及产量的影响

小麦的粒重由籽粒灌浆速率和灌浆持续时间共同决定^[31-34]。小麦籽粒灌浆受多种因素的影响,其中灌浆速率反映小麦的库活性,主要受基因型控制,而灌浆持续时间与当地气候和耕作栽培方式关系密切^[35-37]。吴晓丽等^[38]对四川盆地小麦的籽粒灌浆特性研究发现,所有灌浆参数均受基因型和环境的影响,且环境的影响大于基因型。在本研究中,蜀麦 830 的 R_{ave} 、 R_{max} 都极显著高于蜀麦 1868,这与前人研究提出的灌浆速率受基因型控制结论基本一致^[39]。 α -KG 处理后两个品种的 R_{ave} 和 R_{max} 均显著提高, R_{max} 出现时间延后,进而 k 增大,这表明合理的耕作栽培措施可促进籽粒灌浆,从而提高小麦粒重。同时也有研究认为,灌浆参数受到环境和基因型互作的影响^[34,38],然而在本研究中 α -KG 处理和品种之间的互作效应不显著,可能与试验品种和所处地区有关。小麦籽粒干物质在渐进增长期、快速增长期和缓慢增长期的积累不同,但各阶段籽粒干物

质积累对小麦粒重的影响表现为快速增长期 $>$ 渐进增长期 $>$ 缓慢增长期^[40-41]。 α -KG 处理后,渐进增长期籽粒灌浆速率虽然有轻微降低,但持续时间延长,而快速增长期和缓慢增长期持续时间有轻微降低,但籽粒灌浆速率显著提高,因此 α -KG 处理后 3 个阶段的籽粒干物质积累量均出现不同程度增加,原因可能是 α -KG 处理提高叶绿素含量,使叶片功能期延长,同时提高光合速率,改善籽粒灌浆特性,促进了干物质积累,最终提高小麦粒重产量。

4 结论

在小麦花后 0 d 和花后 15 d 外源喷施 α -KG 可促进小麦旗叶叶绿素的合成并减缓叶绿素的降解,提高旗叶的净光合速率,改善光合特性;延长籽粒的灌浆活跃期,增大平均灌浆速率和最大灌浆速率,从而增加小麦粒重。其中,0.75 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 α -KG 喷施浓度效果最佳。

参考文献:

[1]李义博,陶福祿.提高小麦光能利用效率机理的研究进展[J].中国农业气象,2022,43(2):94.
LI Y B,TAO F L. Research progress on the mechanism of high light use efficiency in wheat [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*,2022,43(2):94.
[2]刘庆芳,李小康,刘保华,等.冬小麦籽粒灌浆特性和旗叶光合特性对产量的影响[J].江苏农业科学,2022,50(19):61.
LIU Q F,LI X K,LIU B H,et al. Effects of grain filling characteristics and flag leaf photosynthetic characteristics on yield in winter wheat [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*,2022,50(19):61.
[3]MURCHIE E H,REYNOLDS M,SLAFER G A,et al. A

- 'wiring diagram' for source strength traits impacting wheat yield potential [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2023, 74(1):72.
- [4] LIANG W X, ZHANG Z C, WEN X X, *et al.* Effect of non-structural carbohydrate accumulation in the stem pre-anthesis on grain filling of wheat inferior grain [J]. *Field Crops Research*, 2017, 211:67.
- [5] 马尚宇, 王艳艳, 刘雅男, 等. 播期、播量和施氮量对小麦干物质积累、转运和分配及产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(3):383.
MA S Y, WANG Y Y, LIU Y N, *et al.* Effect of sowing date, planting density, and nitrogen application on dry matter accumulation, transfer, distribution, and yield of wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(3):383.
- [6] 吴云飞, 陆文艺, 段玉仁, 等. 小麦籽粒淀粉合成内在影响因素研究进展[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(8):1006.
WU Y F, LU W Y, DUAN Y R, *et al.* Research progress on internal factors affecting starch synthesis in wheat grains [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(8):1006.
- [7] LEGENDRE F, MACLEAN A, APPANNA V P, *et al.* Biochemical pathways to α -ketoglutarate, a multi-faceted metabolite [J]. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 2020, 36(8):123.
- [8] 赵静怡, 金检生, 杨丽丽, 等. 豆粕对松浦镜鲤肠黏膜能量代谢、肠道健康相关基因表达的影响及 α -酮戊二酸缓解作用[J]. 水产学报, 2023, 47(10):149.
ZHAO J Y, JIN J S, YANG L L, *et al.* Effects of soybean meal on intestinal mucosal energy metabolism, intestinal health gene expression and alleviating effect of α -ketoglutaric acid on *Cyprinus carpio* Songpu [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, 47(10):149.
- [9] 袁华根, 安东, 徐亚亚, 等. 日粮添加 α -酮戊二酸制剂对肉鸡生长性能及消化、代谢的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(16):174.
YUAN H G, AN D, XU Y Y, *et al.* Influences of dietary supplementation of α -ketoglutaric acid on growth performance, digestion and metabolism of broilers [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(16):174.
- [10] GYANWALI B, LIM Z X, SOH J, *et al.* Alpha-ketoglutarate dietary supplementation to improve health in humans [J]. *Trends in Endocrinology & Metabolism*, 2022, 33(2):140.
- [11] 张豪杰. 外源 α -酮戊二酸对植物氮素响应的生物学效应与作用机理研究 [D]. 太谷: 山西农业大学, 2023.
ZHANG H J. Biological effect and mechanism of exogenous α -ketoglutaric acid in plant response to nitrogen [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2023.
- [12] 吴婷婷, 陈佳宝, 袁虎威, 等. 叶面喷施有机碳对铁皮石斛碳水化合物代谢及 Fe、Zn 含量的影响[J]. 生态科学, 2021, 40(1):34.
WU T T, CHEN J B, YUAN H W, *et al.* Effects of foliar spraying organic carbon on carbohydrate metabolism and Fe, Zn content of *Dendrobium officinale* [J]. *Ecological Science*, 2021, 40(1):34.
- [13] 龙明军. 不同有机碳与氮源互作对作物生长的影响 [D]. 广州: 华南农业大学, 2017.
LONG M J. Effects of different nitrogen and organic carbon interaction on the growth of crops [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017.
- [14] LIU X W, HUANG Z L, FAN P S, *et al.* Zinc and α -ketoglutaric acid modulates plant growth, gas exchange attributes, chlorophyll fluorescence and Zn content in rice [J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2020, 23(1):161.
- [15] KYNSHI B L, SACHU M, SYIEM M B. Unrestricted availability of α -ketoglutarate influences biomass production in the *Cyanobacterium Nostoc muscorum* Meg 1 by impacting rates of photosynthesis, nitrogen fixation and lipid synthesis [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2022, 34(3):1370.
- [16] 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):755.
DING Y M, CHEN M Q, DING W R, *et al.* Research advances on the carbon-nitrogen metabolic interaction mechanisms in cereal crops [J]. *Plant Physiology Journal*, 2024, 60(5):755.
- [17] LEI S H, HUANG B R. Metabolic regulation of α -ketoglutarate associated with heat tolerance in perennial ryegrass [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2022, 190:170.
- [18] GAI Z J, ZHANG M M, ZHANG P F, *et al.* 2-oxoglutarate contributes to the effect of foliar nitrogen on enhancing drought tolerance during flowering and grain yield of soybean [J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1):7274.
- [19] GAI Z J, LIU J Q, CAI L J, *et al.* Foliar application of alpha-ketoglutarate plus nitrogen improves drought resistance in soybean (*Glycine max* L. Merr.) [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1):14421.
- [20] 李莹. α -酮戊二酸对干旱胁迫下小麦生理反应及产量的调节效应 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2012.
LI Y. Regulation effects of α -oxoglutarate on physiological response and yield of wheat under drought stress [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2012.
- [21] LIU X N, WU L D, SI Y J, *et al.* Regulating effect of exogenous α -ketoglutarate on ammonium assimilation in poplar [J]. *Molecules*, 2024, 29(7):1425.
- [22] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000:134-137.
LI H S. Experimental principles and techniques of plant physiology and biochemistry [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000:134-137.
- [23] 张杉, 王培营, 江晓东, 等. 不同麦类作物籽粒灌浆特性研究 [J]. 中国农学通报, 2024, 40(6):168.
ZHANG S, WANG P Y, JIANG X D, *et al.* Study on grain filling characteristics of different wheat crops [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(6):168.
- [24] 李佳佳, 于旭东, 蔡泽坪, 等. 高等植物叶绿素生物合成研究

- 进展[J]. 分子植物育种, 2019, 17(18): 6013.
- LI J J, YU X D, CAI Z P, *et al.* An overview of chlorophyll biosynthesis in higher plants [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2019, 17(18): 6013.
- [25] 陈晨, 陈雪琼, 陈月珍, 等. 叶面施氮对芹菜叶绿素含量及代谢有关基因表达的影响[J]. 植物生理学报, 2023, 59(8): 1533.
- CHEN C, CHEN X Q, CHEN Y Z, *et al.* Effects of foliar application of nitrogen fertilizer on chlorophyll content and expression of metabolism-related genes in celery [J]. *Plant Physiology Journal*, 2023, 59(8): 1533.
- [26] 王蕾, 张想平, 严宗山, 等. 不同类型大麦光合特性、灌浆特征差异及源库关系比较[J]. 华北农学报, 2024, 39(3): 115.
- WANG L, ZHANG X P, YAN Z S, *et al.* Comparison of photosynthetic characteristics, grain filling characteristics and source-sink relationship among different types of barley [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2024, 39(3): 115.
- [27] 于宇璇, 刘储睿, 唐文竹. 利用蛋白质组学技术探究叶绿素含量对植物生长的影响[J]. 质谱学报, 2023, 44(4): 550.
- YU Y X, LIU C R, TANG W Z. Exploring the effect of chlorophyll content on plant growth by proteomic technology [J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2023, 44(4): 550.
- [28] CHENG S R, LI S S, LIANG Z W, *et al.* Effect of application of iron (Fe) and α -ketoglutaric acid on growth, photosynthesis, and Fe content in fragrant rice seedlings [J]. *Photosynthetica*, 2022, 60(2): 301.
- [29] GAI Z J, LIU L, ZHANG J T, *et al.* Effects of exogenous α -oxoglutarate on proline accumulation, ammonium assimilation and photosynthesis of soybean seedling (*Glycine max* (L.) Merr.) exposed to cold stress [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 17017.
- [30] 孙倩, 梁威威, 贾琳, 等. α -酮戊二酸对低水氮下冬小麦产量相关性状的影响[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(3): 672.
- SUN Q, LIANG W W, JIA L, *et al.* Effects of exogenous α -oxoglutarate on yield traits of wheat under low water potential and low nitrogen stress [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(3): 672.
- [31] 苗永杰, 阎俊, 赵德辉, 等. 黄淮麦区小麦主栽品种粒重与籽粒灌浆特性的关系[J]. 作物学报, 2018, 44(2): 261.
- MIAO Y J, YAN J, ZHAO D H, *et al.* Relationship between grain filling parameters and grain weight in leading wheat cultivars in the Huang-Huai Rivers valley [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(2): 261.
- [32] LUO J, LI Z, MO F, *et al.* Removal of superior wheat kernels promotes filling of inferior kernels by changing carbohydrate metabolism and sink strength [J]. *The Crop Journal*, 2021, 9(6): 1375.
- [33] MACNEILL G J, MEHRPOUYAN S, MINOW M A A, *et al.* Starch as a source, starch as a sink: The bifunctional role of starch in carbon allocation [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2017, 68(16): 4443.
- [34] 郭丽丽, 刘盼, 石晶晶, 等. 河北平原冬小麦籽粒灌浆特性参数分析[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(8): 74.
- GUO L G, LIU P, SHI J J, *et al.* Analysis of winter wheat grain filling characteristics in Hebei Plain [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(8): 74.
- [35] LIANG Z M, FENG J Y, LI J Y, *et al.* Grain-filling strategies of wheat of contrasting grain sizes under various planting patterns and irrigation levels [J]. *The Crop Journal*, 2024, 12(3): 897.
- [36] WU X L, LIU M, LI C S, *et al.* Source-sink relations and responses to sink-source manipulations during grain filling in wheat [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2022, 21(6): 1603.
- [37] 陈年来. 作物库源关系研究进展[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(1): 3.
- CHEN N L. Research advances on source-sink interaction of the crops [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2019, 54(1): 3.
- [38] 吴晓丽, 汤永禄, 李朝苏, 等. 四川盆地小麦籽粒的灌浆特性[J]. 作物学报, 2014, 40(2): 344.
- WU X L, TANG Y L, LI C S, *et al.* Characteristics of grain filling in wheat growing in Sichuan Basin [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(2): 344.
- [39] 周延辉, 朱新开, 郭文善, 等. 稻茬小麦中高产水平下产量及其构成因素分析[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(3): 294.
- ZHOU Y H, ZHU X K, GUO W S, *et al.* Analysis of yield and yield components of wheat after rice on medium-high yielding level [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(3): 294.
- [40] ZHANG Z, LI J, ZHENG X Y, *et al.* Ovary morphology determines ovary-to-grain transition process and final grain weight potential in wheat [J]. *European Journal of Agronomy*, 2024, 159: 127233.
- [41] 王珂, 杨娜, 席吉龙, 等. 三种数学模型模拟不同播期小麦籽粒灌浆过程的比较分析[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(11): 1405.
- WANG K, YANG N, XI J L, *et al.* Comparison of three mathematical equation for simulating the wheat grain filling process with different sowing dates [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(11): 1405.