

# 生育中后期氮磷管理对小麦籽粒淀粉和蛋白质合成积累的影响

赵宇浩<sup>1,2</sup>, 靳海洋<sup>2</sup>, 王家瑞<sup>2</sup>, 葛胜修<sup>3</sup>, 苏亚中<sup>4</sup>, 赵国建<sup>4</sup>,  
郑飞<sup>2</sup>, 何宁<sup>2</sup>, 程红建<sup>2</sup>, 李向东<sup>2</sup>, 邵云<sup>1</sup>

(1. 河南师范大学生命科学学院, 河南新乡 453007; 2. 河南省农业科学院小麦研究所, 河南省小麦产量—品质协同提升工程研究中心, 河南郑州 450002; 3. 陈克明食品股份有限公司, 湖南长沙 410000; 4. 开封市农林科学研究院, 河南开封 475000)

**摘要:**为探明生育中后期氮磷管理对小麦籽粒淀粉和蛋白质合成积累的影响, 以中强筋小麦品种郑麦1860为材料, 通过2个试验点(开封龙亭和周口郸城)的单因素完全随机试验, 在土壤施肥量一致的条件设置拔节期追氮(CK)、拔节期开花期二次追施尿素处理(Nt)、开花后喷施尿素处理(Nu)、开花后喷施磷酸二氢钾处理(P)、拔节期开花期二次追施尿素+开花后喷施磷酸二氢钾处理(NtP)、开花后喷施尿素+磷酸二氢钾处理(NuP)等6个不同氮磷管理处理, 分析了不同氮磷管理处理下小麦籽粒可溶性糖含量、淀粉合成酶活性、淀粉含量和氨基酸含量、氮代谢相关酶活性、蛋白质含量、成熟期干物质、籽粒产量及其构成的差异。结果表明, 与CK相比, 开花后喷施尿素或磷酸二氢钾可显著提高两个试验点小麦籽粒可溶性糖含量, NuP处理的效果更大, 增幅达到16.91~37.63个百分点; Nt处理仅提高了周口郸城试验点小麦籽粒淀粉合成酶活性, P处理均显著提高两个试验点小麦籽粒结合态淀粉合成酶和可溶性淀粉合成酶活性, NuP处理的效果更大, 提高幅度为18.34%~32.24%; Nt处理对淀粉含量无显著影响, 但NtP处理显著提高两个试验点小麦籽粒淀粉含量, NuP处理仅提高了开封龙亭试验点小麦籽粒淀粉含量; Nu处理仅提高了周口郸城试验点小麦籽粒氨基酸含量, NuP处理均显著提高两个试验点小麦籽粒氨基酸含量; NuP处理均显著提高两个试验点小麦籽粒谷氨酰胺合成酶和谷氨酸合成酶活性, Nt处理对蛋白质含量无显著影响, 但NtP处理显著提高周口郸城试验点小麦籽粒蛋白质含量, NuP处理均显著提高两个试验点小麦籽粒蛋白质含量, 在成熟期提高幅度为3.35~3.68个百分点。NtP和NuP处理均显著提高两个试验点小麦籽粒产量, 提高幅度为8.12%~11.51%。综上, 拔节期开花期二次追施尿素+开花后喷施磷酸二氢钾、开花后喷施尿素和磷酸二氢钾均能够促进小麦籽粒淀粉和蛋白质合成积累和增加产量。

**关键词:** 小麦; 生育中后期; 氮磷管理; 蛋白质合成; 淀粉合成; 产量

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2025)11-1528-11

## Effects of Nitrogen and Phosphorus Management at Middle and Late Growth Stages on Synthesis and Accumulation of Starch and Protein in Wheat Grains

ZHAO Yuhao<sup>1,2</sup>, JIN Haiyang<sup>2</sup>, WANG Jiarui<sup>2</sup>, GE Shengxiu<sup>3</sup>, SU Yazhong<sup>4</sup>, ZHAO Guojian<sup>4</sup>,  
ZHENG Fei<sup>2</sup>, HE Ning<sup>2</sup>, CHENG Hongjian<sup>2</sup>, LI Xiangdong<sup>2</sup>, SHAO Yun<sup>1</sup>

(1. College of Life Sciences, Henan Normal University, Xixiang, Henan 453007, China; 2. Wheat Research Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences, Henan Engineering Research Center for Synergistic Improvement of Wheat Yield-Quality, Zhengzhou, Henan 450002, China; 3. Chen Keming Food Co., Ltd, Changsha, Hunan 410000, China; 4. Kaifeng Research Institute of Agricultural and Forestry Sciences, Kaifeng, Henan 475000, China)

**Abstract:** To investigate the effects of nitrogen and phosphorus management during mid-late growth stages on starch and protein synthesis and accumulation in wheat grains, a study was conducted using

收稿日期: 2024-11-07 修回日期: 2024-12-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2300800); 河南省重大科技专项(231100110200); 河南省现代农业产业技术体系建设专项(HARS-22-01-G5); 河南省农业科学院自主创新项目(2024ZC002); 河南省农业科学院科技创新团队项目

第一作者 E-mail: 1617995298@qq.com(赵宇浩); jinhaiyang321@163.com(靳海洋)

通讯作者 E-mail: shaoyun73@126.com(邵云); hnlxd@126.com(李向东)

the medium-strong gluten wheat cultivar Zhengmai 1860. Two single-factor completely randomized experiments were implemented across two locations (Kaifeng Longting and Zhoukou Dancheng) with consistent soil fertilization rates. Six nitrogen-phosphorus management treatments were established: CK (control): topdressing urea at jointing stage; Nt: twice topdressing urea at jointing and flowering stages; Nu: post-flowering spraying urea; P: post-flowering spraying  $K_2HPO_4$ ; NtP: twice topdressing urea at jointing and flowering stages + post-flowering spraying  $K_2HPO_4$ ; NuP: post-flowering spraying urea and  $K_2HPO_4$ . The study analyzed differences in grain soluble sugar content, starch synthase activity, starch content, amino acid content, nitrogen metabolism-related enzyme activity, protein content, dry matter accumulation at maturity, grain yield, and yield components under these treatments. The results showed that compared with CK, post-flowering urea or  $K_2HPO_4$  spraying significantly increased grain soluble sugar content at both sites. Notably, the NuP treatment demonstrated a more substantial effect, registering an increase of 16.91 to 37.63 percentage points; Nt enhanced starch synthase activity only at Zhoukou Dancheng, while P significantly increased both bound and soluble starch synthase activities at both sites, with NuP exhibiting superior effects (18.34%—32.24% increase); Nt had no significant effect on starch content, but NtP significantly increased starch content at both sites. NuP improved starch content only at Kaifeng Longting; Nu increased amino acid content only at Zhoukou Dancheng, whereas NuP enhanced it significantly at both sites; NuP significantly boosted glutamine synthetase and glutamate synthase activities at both sites. Nt showed no effect on protein content, but NtP increased protein content at Zhoukou Dancheng, and the NuP treatment significantly increased the protein content in wheat grains at both experimental sites. During the maturity stage, the increase ranged from 3.35 to 3.68 percentage points; Both NtP and NuP significantly increased grain yield at both sites (8.12%—11.51%); In conclusion, combined treatments of twice topdressing urea at jointing and flowering stages with post-flowering  $K_2HPO_4$  spraying (NtP) or post-flowering co-application of urea and  $K_2HPO_4$  (NuP) effectively promoted starch and protein synthesis/accumulation and enhanced yield in wheat grains.

**Keywords:** Wheat; Middle and late growth period Nitrogen and phosphorus; Protein synthesis; Starch synthesis; Yield

淀粉和蛋白质是小麦籽粒的主要成分,淀粉含量约占籽粒干重的 70% 左右,蛋白质含量约占籽粒干重的 10% 左右。小麦籽粒淀粉含量与千粒重、籽粒容重均呈显著正相关,淀粉含量的积累速度决定了小麦粒重增加的快慢<sup>[1]</sup>。小麦淀粉含量影响着制品加工,淀粉合成过程中的酶活性决定籽粒干物质积累量<sup>[2]</sup>;籽粒蛋白质含量与小麦籽粒灌浆速率、千粒重和湿面筋含量均呈显著正相关<sup>[3]</sup>,提高蛋白质含量有利于改善小麦粉面筋特性<sup>[4]</sup>。

施氮是调节小麦生长发育、干物质积累、氮素转化、产量和品质形成的主要措施之一。研究表明,通过氮肥后移可提高小麦籽粒蛋白质和湿面筋含量<sup>[5]</sup>;开花期追施氮肥后小麦蛋白质和湿面筋含量均增加,小麦籽粒品质得到改善,但直链淀粉含量下降<sup>[6]</sup>;生育后期叶面喷施氮肥能显著促

进小麦旗叶光合作用<sup>[7]</sup>,喷施尿素可增进籽粒内氮素的转化与积累<sup>[8]</sup>,提高谷氨酰胺合成酶活性<sup>[9]</sup>,在提高小麦籽粒蛋白质含量同时优化蛋白质组成<sup>[10]</sup>,从而有利于小麦营养和加工品质的改善。喷施磷酸二氢钾也可提高小麦籽粒淀粉和蛋白质含量<sup>[11]</sup>,显著提升面筋质量,改善面粉加工品质<sup>[12]</sup>。虽然前人就小麦生育后期氮肥追施、氮磷叶面喷施对小麦籽粒品质形成的影响进行了研究,但有关生育后期氮磷综合管理对小麦籽粒淀粉和蛋白质积累的影响目前尚未见报道。本研究在 2 个试验点设置生育后期不同氮磷管理处理,测定不同生育阶段小麦籽粒可溶性糖含量、淀粉合成酶活性、淀粉含量和氨基酸含量、氮代谢相关酶活性和蛋白质含量,分析生育中后期不同氮磷管理条件下小麦籽粒淀粉和蛋白质合成积累规律,以期为小麦优质丰产管理技术的创新提供理

论和技术支撑。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试验地概况

田间试验于 2022 年 10 月至 2023 年 6 月在河南省开封市龙亭区(34°46'N, 114°15'E)和周口市郸城县(33°41'N, 115°7'E)同步进行。开封龙亭试验点土壤类型为潮土, 试验前 0~20 cm 土壤有机碳、全氮和全磷含量分别为 9.34、1.11 和 1.41 g·kg<sup>-1</sup>, pH 值 8.06; 周口郸城试验点土壤类型为砂姜黑土, 试验前 0~20 cm 土壤有机碳、全氮和全磷含量分别为 12.29、1.52 和 0.77 g·kg<sup>-1</sup>, pH 值 8.10。

### 1.2 试验设计

试验采用单因素完全随机设计, 设置对照(CK)、拔节期开花期二次追施尿素(Nt)、开花后喷施尿素(Nu)、开花后喷施磷酸二氢钾(P)、拔节期开花期二次追施尿素+开花后喷施磷酸二氢钾(NtP)及开花后喷施尿素+磷酸二氢钾(NuP)6 个处理, 每个处理 3 次重复。所有处理土壤施肥量保持一致, 氮磷钾肥土壤施用量分别为 N 225 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 120 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 90 kg·hm<sup>-2</sup>; 土施磷钾肥全基施, 土施氮肥基施 50%, CK、Nu、P 和 NuP 处理于拔节期追施 50%, Nt 和 NtP 处理于拔节期和开花期分别追施 30% 和 20%。开封龙亭试验点和周口郸城试验点分别于 2023 年 3 月 19 日和 2023 年 3 月 20 日进行拔节期追肥, 分别于 2023 年 4 月 18 日和 2023 年 4 月 22 日进行开花期追肥。氮肥使用尿素(N 46%)、磷肥使用过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 16%)、钾肥使用氯化钾(K<sub>2</sub>O 60%)。Nu 和 NuP 处理的尿素喷施浓度均为 1.5%<sup>[13]</sup>, P、NtP 和 NuP 处理的磷酸二氢钾溶液喷施浓度均为 0.4%<sup>[14]</sup>, 喷施量均为 525 kg·hm<sup>-2</sup><sup>[15]</sup>, 于花后 7 d 喷施<sup>[16]</sup>。

供试小麦采用河南省农业科学院小麦研究所选育的中强筋品种郑麦 1860, 开封龙亭试验点和周口郸城试验点分别于 2022 年 10 月 19 日和 2022 年 10 月 29 日机械条播, 行距 20 cm, 小区面积 48 m<sup>2</sup>, 播种量 360 kg·hm<sup>-2</sup>, 其他田间管理按当地常规管理方式进行。

### 1.3 测定指标与方法

于开花期每个小区挂牌标记同一天开花的麦穗 60 个, 于灌浆中期(开封龙亭 5 月 9 日, 周口郸城 5 月 10 日)、后期(开封龙亭 5 月 19 日, 周口郸

城 5 月 20 日)每个小区各取完整麦穗 20 个, 其中 10 个麦穗装入信封 70 °C 烘干, 粉碎机磨碎过 40 目筛, 用于测定籽粒可溶性糖、淀粉、氨基酸、蛋白质含量; 其余 10 个穗用锡纸包裹放入液氮速冻保存至 -80 °C 冰箱, 用于测定淀粉合成和氮代谢相关酶活性。收获期(开封龙亭 5 月 29 日, 周口郸城 5 月 30 日)每个小区各取完整麦穗 10 个, 装入信封 70 °C 烘干, 用于测定籽粒可溶性糖、淀粉、氨基酸、蛋白质含量。

#### 1.3.1 可溶性糖含量测定

称取籽粒粉碎样品 0.1 g, 参照李合生主编《植物生理生化实验原理和技术》<sup>[17]</sup>, 采用蒽酮比色法进行测定。

#### 1.3.2 淀粉合成相关酶活性测定

称取籽粒鲜样 0.2 g 倒入研钵, 加 5 mL 提取缓冲液, 冰浴研磨成匀浆, 平均转入 2 个 2 mL 离心管, 4 °C 下 10 000 r·min<sup>-1</sup> 离心 15 min, 其中 1 管弃去上清, 沉淀物经 1.8 mL 提取缓冲液悬浮后测定结合态淀粉合成酶(GBSS)活性, 另 1 管取上清液测定可溶性淀粉合成酶(SSS)活性。反应液配置参照王昌洪<sup>[18]</sup>的方法, 酶活性测定参照王晨阳<sup>[19]</sup>的方法。

#### 1.3.3 淀粉含量测定

称取籽粒粉碎样品 0.1 g, 采用双波长法测定直链淀粉和支链淀粉含量, 具体操作参照何洁等的方法<sup>[20]</sup>, 淀粉含量取直链淀粉和支链淀粉含量之和。

#### 1.3.4 氨基酸含量测定

称取籽粒粉碎样品 0.1 g, 参考李合生主编《植物生理生化实验原理和技术》<sup>[17]</sup>, 采用茚三酮显色法测定氨基酸含量。

#### 1.3.5 氮代谢相关酶活性测定

称取籽粒鲜样 0.5 g 倒入研钵, 加 5 mL 提取缓冲液, 冰浴研磨成匀浆, 平均转入 2 个 2 mL 离心管。4 °C 下 12 000 r·min<sup>-1</sup> 离心 15 min, 取上清液测定谷氨酰胺合成酶(GS)和谷氨酸合成酶(GOGAT)活性。提取缓冲液配置和 GS 活性测定参考熊丹<sup>[21]</sup>的方法, GOGAT 活性测定参考王学奎<sup>[22]</sup>主编的《植物生理生化实验原理与技术》的方法。

#### 1.3.6 蛋白质含量测定

采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 法消煮分解后无损定容至 100 mL<sup>[23]</sup>, 采用连续流动分析仪分析消煮液中的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量, 测定结果乘 5.7 即为总蛋白

含量。

### 1.3.7 成熟期干物质积累量、产量及其构成因素测定

在小麦成熟期,各小区取 33 cm 单行植株,在茎基部剪去根系,将地上部分为籽粒和营养器官两部分,置于牛皮纸袋中 105 °C 杀青 30 min,75 °C 烘干后称量干物质重。调查 1 m 双行穗数并计算每公顷穗数,随机取 20 穗调查穗粒数,全小区收获脱粒晒干称重,计算每公顷籽粒产量,取籽粒样品测定千粒重。

### 1.4 数据分析

采用 Excel 2016 和 SPSS 26.0 软件对数据进行统计分析。采用单因素 (one-way ANOVA) 和 Duncan 法进行方差分析和多重比较 ( $\alpha = 0.05$ )。利用 Origin 2024 软件进行图表制作。

## 2 结果与分析

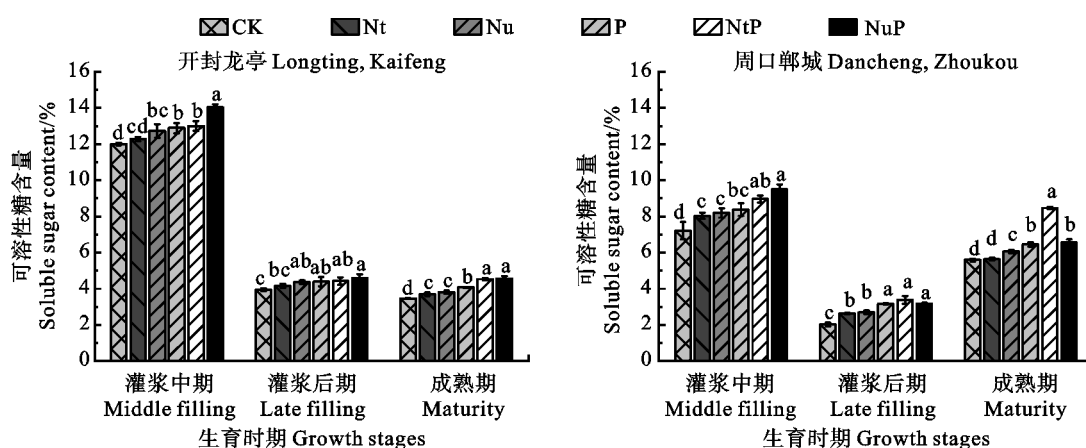
### 2.1 不同处理下小麦籽粒可溶性糖含量的差异

在灌浆中期、灌浆后期和成熟期,与 CK 相比,Nu、P、NtP 和 NuP 处理下小麦的籽粒可溶性糖含量在两个试验点均显著增加,Nt 处理的籽粒可溶性糖含量虽然不同程度提高,但开封龙亭的灌浆中期和晚期、周口郸城的成熟期变化不显著(图 1)。在三个时期两个试验点 P、NtP 和 NuP

处理的可溶性糖含量相对较高,其中灌浆中期均以 NuP 处理最高,其中在开封龙亭与其他处理差异均显著,在周口郸城除 NtP 处理外与其他处理差异也均显著;在灌浆后期这三个处理间差异不显著;成熟期在开封龙亭 NtP 和 NuP 处理差异不显著,但显著高于其他处理,在周口郸城 NtP 处理显著高于其他处理。这说明在小麦拔节期和开花期二次追氮、开花期喷施尿素或磷酸二氢钾均有助于小麦籽粒糖分累积,且以开花期氮磷配施效果最佳。

### 2.2 不同处理下小麦籽粒结合态淀粉合成酶 (GBSS) 和可溶性淀粉合成酶 (SSS) 活性的差异

在灌浆中期,与 CK 相比,Nu、P、NtP、NuP 处理下小麦籽粒 GBSS 和 SSS 活性在两个试验点均显著增加,Nt 处理的 GBSS 活性仅周口郸城显著增加,SSS 活性在两个试验点均显著增加。在灌浆后期,P、NtP 和 NuP 处理的两种酶活性在两个试验点较 CK 均显著增加,其他处理对两种酶活性也有一定的正向效应,但相对较弱。总体来看,在两个试验点 NuP 和 NtP 处理对两种酶活性在两个时期的增加效果均较高,且差异较小(图 2 和图 3)。由此可见,在小麦拔节期和开花期二次追氮、开花期喷施尿素或磷酸二氢钾均可提高小麦籽粒淀粉合成酶活性。



CK: 对照; Nt: 拔节期开花期二次追施尿素; Nu: 开花后喷施尿素; P: 开花后喷施磷酸二氢钾; NtP: 拔节期开花期二次追施尿素 + 开花后喷施磷酸二氢钾; NuP: 开花后喷施尿素 + 磷酸二氢钾。图柱上不同小写字母表示同一时期不同处理间差异达显著水平 ( $P < 0.05$ )。下图同。

CK: Control; Nt: Twice topdressing urea at jointing and flowering stage; Nu: Post-flowering spraying urea; P: Post-flowering spraying  $K_2HPO_4$ ; NtP: Twice topdressing urea at jointing and flowering stage + post-flowering spraying  $K_2HPO_4$ ; NuP: Post-flowering spraying urea and  $K_2HPO_4$ . Different letters on the columns indicate significant difference among treatments at the same stages ( $P < 0.05$ ). The same in the following figures.

图 1 生育中后期氮磷管理对小麦籽粒可溶性糖含量的影响

Fig. 1 Effect of nitrogen and phosphorus management at middle and late growth stages on soluble sugar content of wheat grains

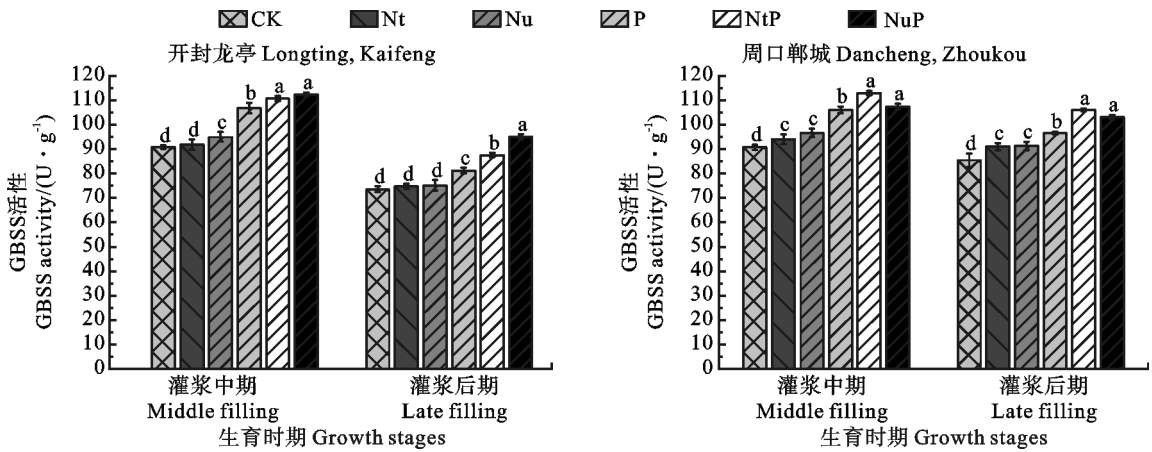


图 2 生育中后期氮磷管理对小麦籽粒结合态淀粉合成酶(GBSS)活性的影响  
 Fig. 2 Effect of nitrogen and phosphorus management at middle and late growth stages on the activity of grain-bound starch synthase(GBSS) in wheat grains

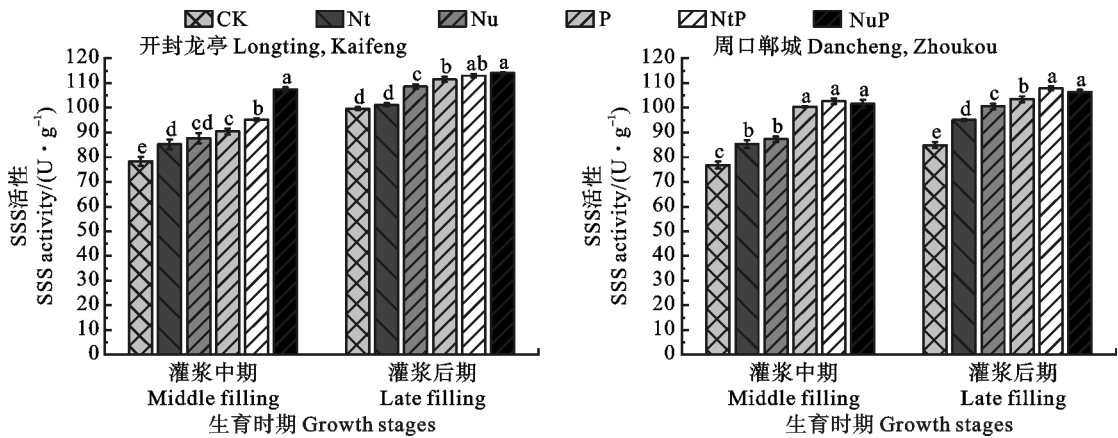


图 3 生育中后期氮磷管理对小麦籽粒可溶性淀粉合成酶(SSS)活性的影响  
 Fig. 3 Effect of nitrogen and phosphorus management at middle and late growth stages on soluble starch synthase(SSS) activity in wheat grains

2.3 不同处理下小麦籽粒淀粉含量的差异

从图 4 可以看出,在灌浆中期、灌浆后期和成熟期,Nt、Nu、P、NtP 和 NuP 处理的小麦籽粒淀粉含量在两个试验点均高于 CK。其中,在开封龙亭,NuP 处理与 CK 差异在三个时期均最大,且达到显著水平,增幅分别为 46.31、32.84 和 10.55 个

百分点;在周口郸城,在灌浆中期 NuP 处理与 CK 差异最大,增幅达到 44.85 个百分点,而在灌浆后期和成熟期均以 NtP 处理与 CK 差异最显著,增幅分别为 19.76 和 9.51 个百分点。总体来看,三个时期中 NtP 和 NuP 处理对小麦籽粒淀粉累积的促进效应最明显。

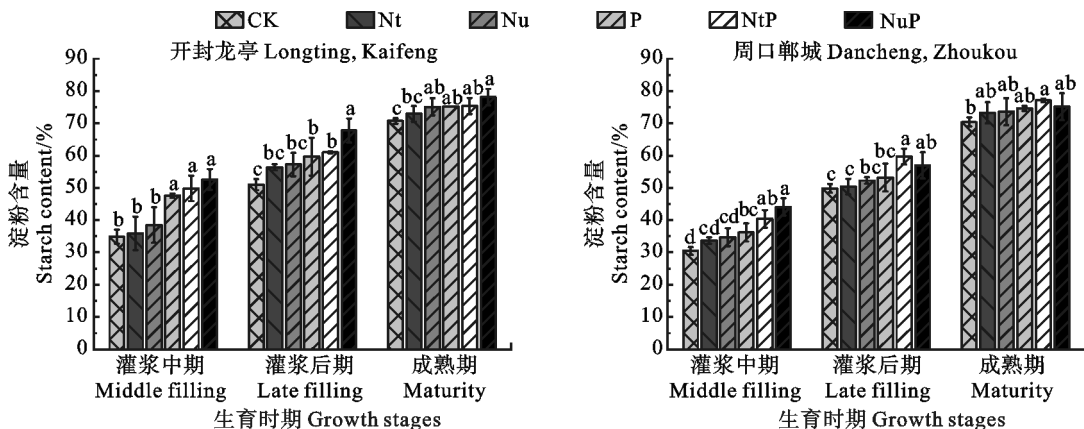


图 4 生育中后期氮磷管理对小麦籽粒淀粉含量的影响

Fig. 4 Effect of nitrogen and phosphorus management at middle and late growth stages on starch content of wheat grains

### 2.4 不同处理下小麦籽粒氨基酸含量的差异

在灌浆中期、灌浆后期和成熟期, NtP 和 NuP 处理的小麦籽粒氨基酸含量在两个试验点均显著高于 CK(图 5)。其中,在开封龙亭,灌浆中期 NtP 处理与 CK 差异最大,增幅为 82.50%,而在灌浆后期和成熟期均以 NuP 处理与 CK 差异最显著,增幅分别为 90.71%和 20.16%;在周口郸城, NtP 处理与 CK 差异在三个时期均最大,增幅分别为 32.94%、135.68%和 32.13%。这些结果表明,小麦拔节期和开花期二次追氮、开花期喷施尿素和磷酸二氢钾对小麦籽粒氨基酸积累具有正向调控作用。

### 2.5 不同处理下小麦籽粒谷氨酰胺合成酶(GS)和谷氨酸合成酶(GOGAT)活性的差异

在灌浆中期,与 CK 相比, NtP、NuP 处理下小麦籽粒 GS 和 GOGAT 活性在两个试验点均显著增加, P 处理的 GS 活性仅周口郸城显著增加, GOGAT 活性在两个试点均显著增加(图 6 和图

7)。在灌浆后期, NuP 处理的 GS 活性在两个试验点较 CK 均显著增加, NtP 处理的 GS 活性仅周口郸城显著增加; Nt、Nu、P、NtP 和 NuP 处理的 GOGAT 活性在两个试验点均显著增加。总体来看,在小麦拔节期和开花期二次追氮、开花期喷施尿素或磷酸二氢钾均能提高籽粒 GOGAT 活性,喷施尿素和磷酸二氢钾能够有效提高 GS 活性。

### 2.6 不同处理下小麦籽粒蛋白质含量的差异

在灌浆中期、灌浆后期和成熟期, Nt、Nu、P、NtP 和 NuP 处理的小麦籽粒蛋白质含量在两个试验点均高于 CK(图 8)。其中,在开封龙亭, NuP 处理与 CK 差异在三个时期均最大,且显著,增幅分别为 7.04、7.67 和 3.35 个百分点;在周口郸城, NtP 和 NuP 处理在三个时期与 CK 差异均显著,成熟期增幅分别为 4.11 和 3.68 个百分点。总体来看,三个时期中 NtP 和 NuP 处理对小麦籽粒蛋白质积累表现出最优的促进效果。

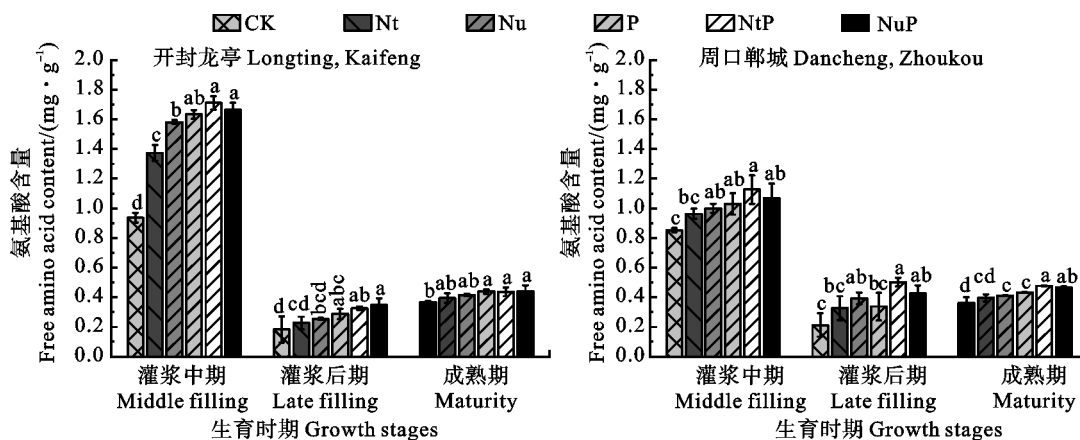


图 5 生育中后期氮磷管理对小麦籽粒氨基酸含量的影响

Fig. 5 Effect of nitrogen and phosphorus management at middle and late growth stages on amino acid content of wheat grains

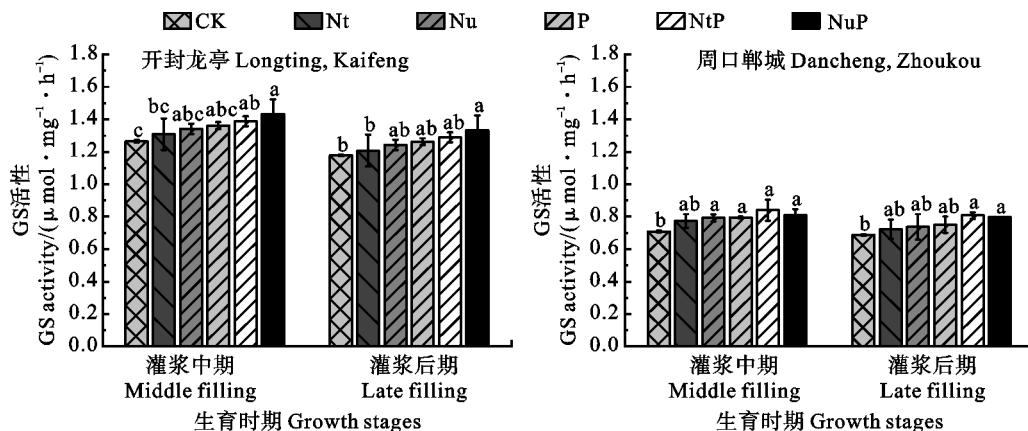


图 6 生育中后期氮磷管理对小麦籽粒谷氨酰胺合成酶(GS)活性的影响

Fig. 6 Effect of nitrogen and phosphorus management at middle and late growth stages on glutamine synthetase(GS) activity of wheat grains

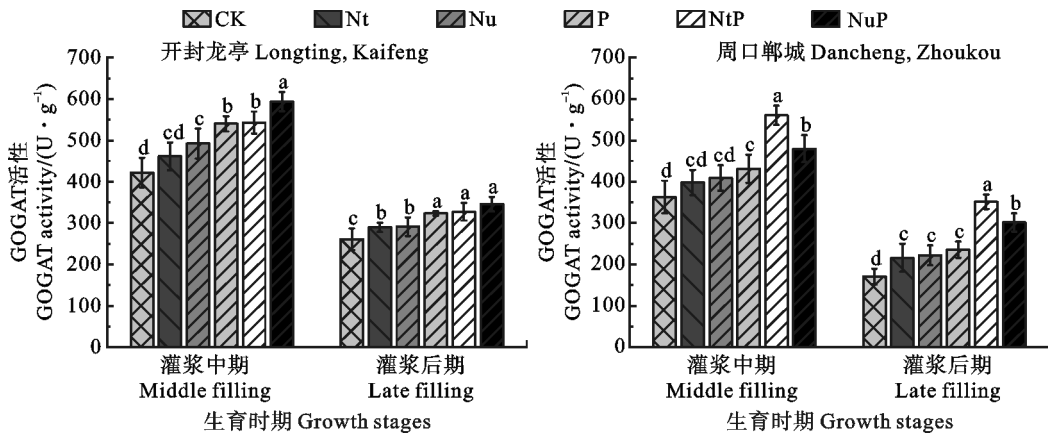


图 7 生育中后期氮磷管理对小麦籽粒谷氨酸合成酶(GOGAT)活性的影响

Fig. 7 Effect of nitrogen and phosphorus management at middle and late growth stages on glutamate synthase(GOGAT) activity in wheat grains

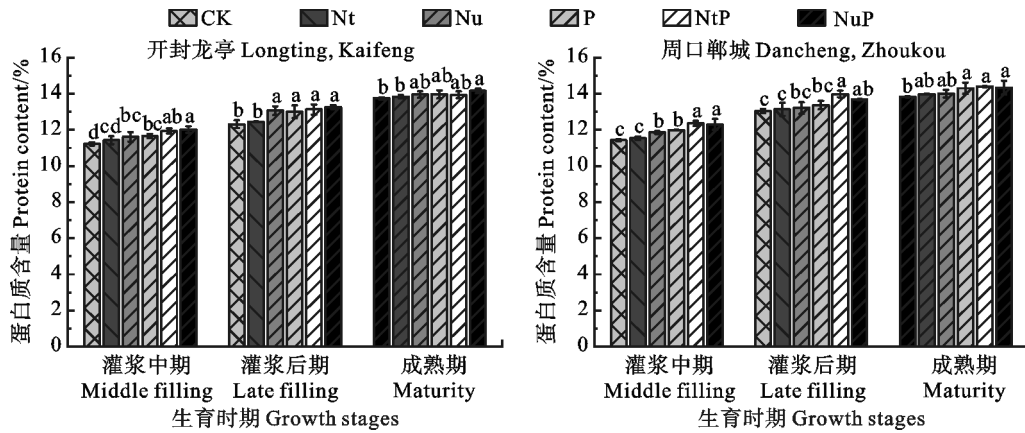


图 8 生育中后期氮磷管理对小麦籽粒蛋白质含量的影响

Fig. 8 Effect of nitrogen and phosphorus management at middle and late growth stages on protein content of wheat grains

表 1 生育中后期氮磷管理对小麦成熟期干物质积累量、籽粒产量及其构成的影响

Table 1 Effect of nitrogen and phosphorus management at mid and late growth period on dry matter accumulation and yield and its composition at maturity of wheat grains

试验点 Test point	处理 Treatment	成熟期干物质质量 Dry matter weight at maturity/ (kg · hm <sup>-2</sup> )	穗数 Spike number/ (×10 <sup>4</sup> · hm <sup>-2</sup> )	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Grain yield/ (kg · hm <sup>-2</sup> )
开封龙亭 Longting, Kaifeng	CK	15 737.22±301.51b	528.92±11.40a	34.96±0.16b	43.15±1.71b	8 546.22±113.75c
	Nt	16 135.19±298.17b	536.25±17.04a	35.22±0.11ab	44.72±0.42ab	8 576.82±94.93c
	Nu	16 640.24±527.83b	528.92±14.15a	35.07±0.22ab	46.53±1.87ab	8 646.58±107.99c
	P	17 538.21±406.04a	528.37±11.51a	35.34±0.11ab	48.02±1.95a	9 080.8±147.06b
	NtP	18 129.11±446.53a	533.50±13.61a	35.09±0.22ab	48.95±2.18a	9 317.28±126.48ab
	NuP	18 009.42±182.16a	530.93±19.74a	35.40±0.29a	49.17±1.44a	9 405.42±159.99a
周口郸城 Dancheng, Zhoukou	CK	15 738.23±824.66c	511.00±17.00a	34.94±0.57a	49.06±0.18c	8 521.09±165.81c
	Nt	15 858.93±794.41c	516.13±19.29a	34.97±0.30a	49.12±0.51c	8 569.62±142.05c
	Nu	16 255.39±507.13c	508.67±16.44a	35.01±0.05a	49.13±0.44c	8 629.20±206.03c
	P	17 478.11±167.05b	503.53±17.69a	34.95±0.05a	49.59±0.84bc	8 839.17±115.37bc
	NtP	18 587.19±265.01a	505.40±17.10a	35.03±0.12a	51.54±0.63a	9 501.95±186.57a
	NuP	18 201.33±155.96ab	506.10±15.25a	35.07±0.08a	50.21±0.36b	9 212.72±190.71ab

## 2.7 不同处理下小麦成熟期干物质积累量和籽粒产量的差异

与 CK 相比, NtP、NuP 处理下小麦成熟期干物质积累量和籽粒产量在两个试验点均显著增加, 籽粒产量增幅为 8.12%~11.51%, NuP 处理显著增加开封龙亭试验点穗粒数, NtP 和 NuP 处理均显著增加两个试验点的千粒重(表 1)。P 处理的籽粒产量和千粒重仅在开封龙亭试验点显著增加, 其他处理与 CK 相比差异均未达显著水平。

## 3 讨论

### 3.1 生育中后期氮磷管理对小麦籽粒淀粉合成积累的影响

可溶性糖是小麦籽粒进入灌浆期合成淀粉的底物<sup>[24]</sup>。随着灌浆进程的推进, 小麦籽粒可溶性糖含量均呈下降趋势<sup>[25]</sup>。本研究中, 周口郸城试验点小麦成熟期籽粒可溶性糖含量高于灌浆后期, 这可能与 2023 年小麦收获期该试验点连续降雨天气导致籽粒穗上萌动有关。任江萍等<sup>[26]</sup>和张钟等<sup>[27]</sup>均研究认为, 小麦穗发芽可导致籽粒淀粉等有机物质发生转化, 使可溶性糖含量升高。淀粉合成酶是催化淀粉合成的重要酶, 小麦籽粒中淀粉合成酶活性的变化与籽粒利用或合成淀粉的能力密切相关<sup>[28]</sup>。可溶性淀粉合成酶是控制淀粉积累的关键酶<sup>[29]</sup>, 小麦灌浆后期可溶性淀粉合成酶(SSS)活性高于结合态淀粉合成酶活性(GBSS)且支链淀粉的积累在灌浆后期比较活跃<sup>[30]</sup>。也有学者提出, 小麦籽粒灌浆中后期的 GBSS 活性高低对淀粉总积累量的作用大于前期<sup>[31]</sup>。本研究结果显示, 小麦 SSS 活性呈上升趋势, GBSS 活性呈下降趋势, 说明在籽粒灌浆过程的不同时期, SSS 和 GBSS 活性此消彼长共同协调淀粉的合成进程。淀粉是成熟小麦籽粒中含量最多的碳水化合物。开花后喷施尿素一定程度上促进淀粉合成积累<sup>[32]</sup>, 增加小麦籽粒淀粉含量<sup>[33]</sup>, 加强淀粉与蛋白质的相互作用<sup>[34]</sup>, 提高面团品质<sup>[35]</sup>。小麦开花后喷施磷酸二氢钾也能显著促进同化物向籽粒转运<sup>[36]</sup>, 影响淀粉合成积累, 增加籽粒中淀粉含量<sup>[37]</sup>。本试验结果进一步验证了开花后喷施尿素和磷酸二氢钾对小麦淀粉合成积累的促进效应。淀粉合成是一复杂的生理生化过程, 除上述因素对其影响外, 还涉及到激素的调控等, 有待进一步研究。

### 3.2 生育中后期氮磷管理对蛋白质合成积累和籽粒产量的影响

研究表明, 小麦籽粒发育过程中, 氨基酸总量的变化趋势与蛋白质含量的变化相似<sup>[38]</sup>, 氨基酸含量与蛋白质含量呈显著负相关<sup>[39]</sup>, 说明生育中后期的氨基酸积极参与蛋白质的合成。王月福等<sup>[40]</sup>和徐寿军等<sup>[41]</sup>发现, 小麦籽粒氨基酸含量和蛋白质含量均呈先升高后降低的趋势。本研究中, 籽粒氨基酸含量在灌浆期先增加后降低再稍微升高的趋势, 与前人研究结果基本一致。谷氨酰胺合成酶(GS)和谷氨酸合成酶是调节氮代谢过程的关键酶<sup>[42]</sup>。小麦氮代谢酶的活性随籽粒灌浆而降低<sup>[43]</sup>。也有研究认为, 在小麦生育后期, 随着功能叶片的衰老, 叶片中 GS 活性明显降低, 叶片中氮利用效率显著下降, 于是更多的氮向籽粒运转, 提高了籽粒中 GS 活性, 小麦籽粒中 GS 活性在后期大幅度增加<sup>[44]</sup>, 与本试验结果不尽相同, 可能与品种差异有关。生育中后期不同形式的氮磷管理对小麦籽粒蛋白质含量有较大影响。前人报道, 从半仁至乳熟末期是提高小麦籽粒蛋白质含量的喷肥适期<sup>[45]</sup>, 喷施尿素配合磷酸二氢钾可增加籽粒蛋白质含量<sup>[46]</sup>, 改善面团品质<sup>[35]</sup>。在小麦生育后期喷施叶面肥可提高千粒重<sup>[47]</sup>和产量<sup>[11]</sup>。杨红梅等<sup>[10]</sup>和屈磊等<sup>[12]</sup>研究发现, 灌浆期喷施尿素和磷酸二氢钾处理下小麦植株氮素积累量最高, 其氮素收获指数和籽粒蛋白质含量均得到提高。本研究中, 在开封龙亭试验点, 开花后喷施尿素和磷酸二氢钾处理显著提高了成熟期小麦穗粒数, 可能因为延长了部分小麦小花的发育时间, 减少了小花退化, 增加了穗粒数<sup>[48]</sup>。开花后喷施尿素和磷酸二氢钾处理有效促进了蛋白质合成积累同时提高了籽粒产量, 而拔节期开花期二次追施尿素+开花后喷施磷酸二氢钾处理则最显著提高了周口郸城试验点的蛋白质含量、千粒重和籽粒产量, 这可能因为两个试验点的土壤肥力不同。

## 4 结论

拔节期开花期二次追施尿素+开花后喷施磷酸二氢钾、开花后喷施尿素和磷酸二氢钾可提高小麦籽粒结合态淀粉合成酶和可溶性淀粉合成酶活性, 促进籽粒淀粉合成积累, 同时增加谷氨酰胺合成酶和谷氨酸合成酶活性, 促进籽粒蛋白质合成积累, 且能够提高小麦千粒重和产量。

## 参考文献:

- [1]刘大同,蒋正宁,张晓,等.小麦不同灌浆速率品种籽粒淀粉合成与积累研究[J].植物生理学报,2021,57(3):703.  
LIU D T,JIANG Z N,ZHANG X,et al. Studies on starch biosynthesis and accumulation in wheat varieties with different grain-filling rates [J]. *Plant Physiology Journal*,2021,57(3):703.
- [2]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):1005.  
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):1005.
- [3]苏珮,蒋纪芸.小麦籽粒蛋白质积累规律的初步研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),1992,20(3):59.  
SU P,JIANG J Y. A preliminary study of accumulation laws of wheat grain protein [J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry*,1992,20(3):59.
- [4]杨路加,孙丽华,柏禄乾.小麦中粗蛋白质含量和湿面筋含量相关性[J].粮油仓储科技通讯,2014,30(4):50.  
YANG L J,SUN L H,BAO L Q. Correlation between crude protein content and wet gluten content in wheat [J]. *Grain and Oil Storage and Technology Communication*,2014,30(4):50.
- [5]王慧,张晓,朱冬梅,等.氮肥运筹对晚播强筋小麦产量及品质的效应[J].麦类作物学报,2024,44(10):1294.  
WANG H,ZHANG X,ZHU D M,et al. Effect of nitrogen management on grain yield and quality of late-sowing strong gluten wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2024,44(10):1294.
- [6]杨扎根,王姣爱,裴雪霞,等.不同追氮时期对两种筋型小麦产量和品质的影响[J].中国土壤与肥料,2008(3):32.  
YANG Z G,WANG J A,PEI X X,et al. The effect of N top-dressing stage on the yield and quality of genotypes with different gluten content [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*,2008(3):32.
- [7]LÜ X K,LIU Y,LI N,et al. Foliar applications of various nitrogen (N) forms to winter wheat affect grain protein accumulation and quality via N metabolism and remobilization [J]. *The Crop Journal*,2022,10(4):1165.
- [8]毛凤梧,赵会杰,段藏禄.追氮时期对优质小麦产量和品质的影响[J].河南农业科学,2001,30(11):19.  
MAO F W,ZHAO H J,DUAN Z L. Effect of nitrogen top-dressing period on yield and quality of high quality wheat [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*,2001,30(11):19.
- [9]张钧浩,付博阳,吴伟,等.不同时期叶面追氮对小麦产量、蛋白质含量及氮素吸收利用的影响[J].河北农业大学学报,2022,45(4):1.  
ZHANG J H,FU B Y,WU W,et al. Effects of foliar nitrogen topdressing timing on grain yield,protein content and nitrogen utilization of wheat [J]. *Journal of Hebei Agricultural University*,2022,45(4):1.
- [10]杨红梅,张跃强,史应武,等.不同类型叶面肥喷施对冬小麦籽粒产量和品质的影响[J].新疆农业科学,2023,60(9):2182.  
YANG H M,ZHANG Y Q,SHI Y W,et al. Effects of different types of foliar fertilizers on grain yield and quality of winter wheat [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*,2023,60(9):2182.
- [11]裴雪霞,王姣爱,党建友,等.后期喷肥对强筋小麦临汾138产量和品质的影响[J].麦类作物学报,2005,25(6):148.  
PEI X X,WANG J A,DANG J Y,et al. Effect of spraying fertilizers on yield and quality of high gluten wheat: Linfen 138 [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2005,25(6):148.
- [12]屈磊,程敦公,赵楠,等.灌浆期喷施叶面肥对优质强筋小麦产量和品质的调控[J].山东农业科学,2022,54(1):68.  
QU L,CHENG D G,ZHAO N,et al. Influence of foliar fertilizer application at grain filling stage on yield and quality of wheat with good quality and strong gluten [J]. *Shandong Agricultural Sciences*,2022,54(1):68.
- [13]曹彩云,李伟,党红凯,等.8种叶面喷剂对小麦产量及籽粒灌浆特性的影响[J].河北农业科学,2015,19(1):6.  
CAO C Y,LI W,DANG H K,et al. Effects of 8 kinds of foliar sprays on wheat yield and grain filling characteristics [J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*,2015,19(1):6.
- [14]岳虎锋.小麦喷施磷酸二氢钾增产技术[J].农业与技术,2015,35(20):25.  
YUE H F. Technology of increasing yield by spraying potassium dihydrogen phosphate on wheat [J]. *Agriculture and Technology*,2015,35(20):25.
- [15]李珂,王小琳,谢先进,等.豫北潮土区冬小麦科学施肥技术[J].河南农业,2024(15):21.  
LI K,WANG X L,XIE X J,et al. Scientific fertilization techniques for winter wheat in tidal soil area of northern Henan Province [J]. *Agriculture of Henan*,2024(15):21.
- [16]丁云杰,侯立霞,魏斌斌,等.灌浆期喷施磷酸二氢钾对冬小麦灌浆特性及产量的影响[J].现代农业科技,2024(17):24.  
DING Y J,HOU L X,WEI B B,et al. Effect of spraying monocalcium phosphate during the grain-filling period on the grain-filling characteristics and yield of winter wheat [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*,2024(17):24.
- [17]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.  
LI H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [18]王昌洪.延绿小麦灌浆后期籽粒蛋白质和淀粉合成关键酶活性分析[D].雅安:四川农业大学,2012.  
WANG C H. Analysis of protein and activities of key enzymes in starch synthesis in late grain filling stage of Yan-chang wheat [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2012.
- [19]王晨阳.花后高温和干旱对小麦籽粒淀粉合成、加工品质及产量的影响[D].郑州:河南农业大学,2005.  
WANG C Y. Effects of high temperature and drought after

- anthesis on starch synthesis, processing quality and yield of wheat grain [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2005.
- [20]何洁, 闫飞燕, 黄芳, 等. 双波长法测定薯芋类农产品中直链淀粉和支链淀粉的含量[J]. 食品工业科技, 2022, 43(7): 303.
- HE J, YAN F Y, HUANG F, *et al.* Determination of amylose and amylopectin contents in yam and taros by dual-wavelength spectrophotometry [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(7): 303.
- [21]熊丹. 水稻灌浆期弱光对籽粒氨基酸积累及相关酶活性的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2012.
- XIONG D. Effects of weak light on amino acid accumulation and related enzyme activities in rice grains during grain filling stage [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2012.
- [22]王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- WANG X K. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [23]鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- LU R K. Methods of soil agrochemical analysis [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [24]李彩虹, 冯美臣, 王君杰. 冬小麦籽粒可溶性糖和淀粉含量的动态变化[J]. 农业技术与装备, 2014(24): 9.
- LI C H, FENG M C, WANG J J. Dynamic changes of soluble sugar and starch content in winter wheat grains [J]. *Agricultural Technology & Equipment*, 2014(24): 9.
- [25]张春丽, 周苏玫, 尹钧, 等. 不同筋型小麦品种籽粒可溶性糖含量和淀粉积累及播期调控效应[J]. 河南科学, 2009, 27(7): 824.
- ZHANG C L, ZHOU S M, YIN J, *et al.* Effect of sowing date on sugar content and starch accumulation in grains of tow winter wheat with different gluten [J]. *Henan Science*, 2009, 27(7): 824.
- [26]任江萍, 陈焕丽, 王振云, 等. 小麦穗发芽与籽粒内可溶性糖和 $\alpha$ -淀粉酶活性的品种差异[J]. 西北农业学报, 2007, 16(1): 22.
- REN J P, CHEN H L, WANG Z Y, *et al.* Difference of pre-harvest sprouting and soluble sugar content and  $\alpha$ -amylase activity in grains of some wheat varieties during grain developing [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2007, 16(1): 22.
- [27]张钟, 程美林, 王丽, 等. 发芽对小麦品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(1): 11.
- ZHANG Z, CHENG M L, WANG L, *et al.* Effect of germination on the quality of wheat [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2014, 29(1): 11.
- [28]李太贵, 沈波, 陈能, 等. Q酶在水稻籽粒蛋白形成中作用的研究[J]. 作物学报, 1997, 23(3): 338.
- LI T G, SHEN B, CHEN N, *et al.* Effect of Q-enzyme on the chalkiness formation of rice grain [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1997, 23(3): 338.
- [29]KEELING P L, BACON P J, HOLT D C. Elevated temperature reduces starch deposition in wheat endosperm by reducing the activity of soluble starch synthase [J]. *Planta*, 1993, 191: 342.
- [30]曹颖妮, 胡卫国, 王根平, 等. 糯性和非糯性小麦灌浆期胚乳直/支链淀粉积累及其相关酶活性研究[J]. 西北植物学报, 2010, 30(10): 1995.
- CAO Y N, HU W G, WANG G P, *et al.* Dynamic changes of starch accumulation and enzymes relating to starch biosynthesis of kernel during grain filling in waxy and non-waxy winter wheat [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2010, 30(10): 1995.
- [31]刘霞, 姜春明, 郑泽荣, 等. 藁城 8901 和山农 1391 淀粉合成酶活性和淀粉组分积累特征的比较[J]. 中国农业科学, 2005, 38(5): 897.
- LIU X, JIANG C M, ZHENG Z R, *et al.* Activities of the enzymes involved in starch synthesis and starch accumulation in grains of wheat cultivars Gaocheng 8901 and Shannong 1391 [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(5): 897.
- [32]吕晓康. 花期不同形态氮素叶面喷施对冬小麦粒重和品质形成的调控效应及机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- LÜ X K. Study on the regulation effect and mechanism of different forms of nitrogen spraying on grain weight and quality formation of winter wheat at flowering stage [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021.
- [33]LÜ X K, DING Y P, LONG M, *et al.* Effect of foliar application of various nitrogen forms on starch accumulation and grain filling of wheat (*Triticum aestivum* L.) under drought stress [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 645379.
- [34]姜东, 戴廷波, 荆奇, 等. 氮磷钾肥长期配合施用对冬小麦籽粒品质的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(4): 566.
- JIANG D, DAI T B, JING Q, *et al.* Effects of long-term combined application of N, P and K fertilizer on grain quality in winter wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(4): 566.
- [35]李少鹏. 花后叶面喷施尿素对小麦面团品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- LI S P. Effect of foliar spraying urea after anthesis on wheat dough quality [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020.
- [36]ZHANG R Q, LI C, FU K Y, *et al.* Phosphorus alters starch morphology and gene expression related to starch biosynthesis and degradation in wheat grain [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 2252.
- [37]梁子龙. 叶面喷施磷钾对小麦籽粒灌浆及生理过程的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- LIANG Z L. Effects of foliar spraying phosphorus and potassium on grain filling and physiological process of wheat [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.

- [38]赵广才. 冬小麦籽粒发育中蛋白质和氨基酸含量的变化及喷氮效应的研究[J]. 中国农业科学, 1989, 22(5): 25.  
ZHAO G C. Studies on the changes in protein and amino acid contents in developing grain and the effects of foliage nitrogen spray on winter wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1989, 22(5): 25.
- [39]张林生, 蒋纪云, 张保军. 小麦籽粒发育过程中氨基酸的变化[J]. 作物学报, 1997, 23(3): 301  
ZHANG L S, JIANG J Y, ZHANG B J. Changes of amino acids during the development of wheat grains [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1997, 23(3): 301.
- [40]王月福, 于振文, 李尚霞, 等. 不同施肥水平对不同品种小麦籽粒蛋白质和地上器官游离氨基酸含量的影响[J]. 西北植物学报, 2003, 23(3): 417.  
WANG Y F, YU Z W, LI S X, *et al.* The effects of different fertilization level on grain protein and free amino acid content of organs above ground of different wheat variety [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, 23(3): 417.
- [41]徐寿军, 张凤英, 刘志萍, 等. 播种期和氮肥用量对春大麦灌浆期籽粒蛋白质和游离氨基酸含量的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(12): 1611.  
XU S J, ZHANG F Y, LIU Z P, *et al.* Effects of sowing date and nitrogen application on grain protein content and free amino acid content during grain filling in spring barley [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(12): 1611.
- [42]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): 1098.  
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): 1098.
- [43]李金娜, 姜丽娜, 岳影, 等. 灌溉方式和施氮量对冬小麦籽粒氮代谢酶和蛋白质产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(7): 817.  
LI J N, JIANG L N, YUE Y, *et al.* Effect of irrigation modes and nitrogen application on nitrogen metabolism enzymes and protein yield in wheat grain [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(7): 817.
- [44]王小纯, 熊淑萍, 马新明, 等. 不同形态氮素对专用型小麦花后氮代谢关键酶活性及籽粒蛋白质含量的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(4): 802.  
WANG X C, XIONG S P, MA X M, *et al.* Effects of different nitrogen forms on key enzyme activity involved in nitrogen metabolism and grain protein content in speciality wheat cultivars [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4): 802.
- [45]赵广才, 常旭虹, 杨玉双, 等. 叶面喷施不同营养元素对冬小麦产量和品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(4): 689.  
ZHAO G C, CHANG X H, YANG Y S, *et al.* Grain yield and quality responding to the leaf surface spraying the different nutritive elements operation in winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31(4): 689.
- [46]冯斌, 王振武, 张虎, 等. 叶面喷施尿素及磷酸二氢钾对强筋优质小麦产量及品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2003, 31(6): 1083  
FENG B, WANG Z W, ZHANG H, *et al.* Effect of foliar application on wheat yield and quality [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2003, 31(6): 1083.
- [47]王君婵, 王慧, 李曼, 等. 不同品质类型小麦籽粒产量与品质对氮肥运筹和叶面肥的响应[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2021, 42(6): 23.  
WANG J C, WANG H, LI M, *et al.* Effect of nitrogen strategies and foliar fertilizers on yield and quality of different quality type wheat cultivars [J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2021, 42(6): 23.
- [48]朱云集, 崔金梅, 王晨阳, 等. 小麦不同生育时期施氮对穗花发育和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1325.  
ZHU Y J, CUI J M, WANG C Y, *et al.* Effects of nitrogen application at different wheat growth stages on floret development and grain yield of winter wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(11): 1325.