

追氮量和种植密度对弱筋小麦品质与产量的影响

周文银¹,李文阳¹,李浩杰¹,张士雅¹,雍玉东¹,刘阳¹,肖龙飞¹,郑成岩²,闫素辉¹

(1. 安徽科技学院农学院,安徽凤阳 233100; 2. 中国农业科学院作物科学研究所/农业农村部作物生理生态重点实验室,北京 100081)

摘要:为明确追氮量和种植密度对弱筋小麦品质与产量的影响,以弱筋小麦品种扬麦 15 为材料,设置 4 个追氮水平(37.8、43.2、48.6 和 54.0 kg·hm⁻²,分别用 N1、N2、N3 和 N4 表示)和 3 个密度水平(180 万、240 万和 300 万株·hm⁻²,分别用 D1、D2 和 D3 表示),比较了不同追氮量和种植密度条件下小麦淀粉粒度分布、糊化特性、蛋白质及其组分含量、籽粒蔗糖合酶(SS)和腺苷二磷酸化酶(ADGPase)活性及产量的差异。结果表明,随追氮量的减少,小麦籽粒 B 型(≤10 μm)淀粉粒体积、表面积百分比均呈先升后降趋势,A 型(>10 μm)淀粉粒体积百分比、表面积百分比均呈先降后升趋势。减施追氮量后小麦湿面筋含量、蛋白质含量、沉降值以及清蛋白、球蛋白、谷蛋白和醇溶蛋白含量均呈下降趋势,淀粉含量整体呈上升趋势。小麦籽粒 SS 活性、ADGPase 活性、产量及淀粉峰值黏度、最终黏度等随追氮量的减少均呈先升后降趋势,且均在 N3 条件下最高。随种植密度的增加,B 型淀粉粒体积、表面积百分比呈上升的趋势,A 型淀粉粒体积、表面积百分比呈下降的趋势,淀粉峰值黏度、低谷黏度、最终黏度等呈增加趋势,清蛋白、球蛋白、谷蛋白、醇溶蛋白含量呈先降后升的趋势,各蛋白组分含量均在 D3 水平下最高。增密降低了湿面筋含量、蛋白质含量和沉降值,但增加了籽粒淀粉含量、SS 活性和 ADGPase 活性,进而促进产量提升。在本试验条件下,适量追氮和增密主要增加了 B 型淀粉粒占比、淀粉黏度参数、SS 活性、ADGPase 活性,提高了弱筋小麦籽粒产量和加工品质。

关键词:弱筋小麦;追氮量;种植密度;品质;产量

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)04-0492-10

Effects of Nitrogen Topdressing and Planting Density on Starch Granule Distribution and Pasting Properties of Weak Gluten Wheat

ZHOU Wenyin¹, LI Wenyang¹, LI Haojie¹, ZHANG Shiya¹, YONG Yudong¹,
LIU Yang¹, XIAO Longfei¹, ZHENG Chengyan², YAN Suhui¹

(1. College of Agronomy, Anhui Science and Technology University, Fengyang, Anhui 233100, China;

2. Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to determine the optimum nitrogen topdressing amount and planting density for improving the starch quality and yield of weak gluten wheat, a weak gluten wheat variety Yangmai 15 was used as material, with four nitrogen topdressing levels(37.8, 43.2, 48.6, and 54.0 kg·hm⁻², namely N1, N2, N3, and N4) and three density levels(1.8×10⁶, 2.4×10⁶, and 3.0×10⁶ plants·hm⁻², namely D1, D2, and D3). The effects of different nitrogen topdressing amounts and planting density on starch particle size distribution, gelatinization characteristics, protein components, grain enzyme activity and yield of wheat were characterized. The results showed that with the decreasing ni-

收稿日期:2024-01-15 修回日期:2024-03-15

基金项目:国家重点研发计划(2022YFD2300801-02);安徽省高校协同创新项目(GXXT-2021-089);安徽省现代农业产业技术体系建设专项(小麦);安徽省科技特派员项目(2023tpt035)

第一作者 E-mail:1992118972@qq.com(周文银)

通讯作者 E-mail:yansh@ahstu.edu.cn(闫素辉);zhengchengyan@caas.cn(郑成岩)

trogen topdressing, the volume and surface area percentage of B-type ($\leq 10 \mu\text{m}$) starch granules in wheat grains increased first and then decreased, the volume and surface area percentage of A-type ($> 10 \mu\text{m}$) starch granules decreased first and then increased. After reducing the amount of topdressing nitrogen, the contents of wet gluten and protein, sedimentation value, albumin, globulin, glutenin, and gliadin content of wheat showed a downward trend, and the starch content showed an overall upward trend. The viscosity parameters such as SS activity, ADGPase activity, grain yield, starch peak viscosity and final viscosity of wheat increased first and then decreased, and the viscosity parameters such as SS activity, ADGPase activity, grain yield, and peak viscosity at N3 level were the highest. With the increase of planting density, the volume and surface area percentage of B-type starch granules showed an upward trend, and the volume and surface area percentage of A-type starch granules showed a downward trend. After increasing the planting density, the contents of albumin, globulin, glutenin, and gliadin initially decreased and then increased, and the highest content of each protein component was at D3 level. The viscosity parameters such as peak viscosity, trough viscosity, and final viscosity of wheat starch increased with the increase of density. Increasing planting density reduced wet gluten content, protein content, and sedimentation value, but increased grain starch content, SS activity, and ADGPase activity, thereby promoting grain yield. Under the conditions of this experiment, proper nitrogen supplementation and densification could improve grain yield and processing quality of wheat gluten wheat by increasing the proportion of B-type starch gains, starch viscosity parameters, SS activity and ADGPase activity.

Keywords: Weak gluten wheat; Nitrogen topdressing amount; Planting density; Quality; Yield

小麦作为中国主要口粮作物之一,对保障国家粮食安全具有重要作用^[1]。长江中下游地区是弱筋小麦的核心产区,该地区热、光、水资源丰富,有利于弱筋小麦品质的形成^[2]。弱筋小麦籽粒蛋白质含量低,硬度较小,是制饼干、蛋糕等蓬松口感西点的基础原料^[3-4]。小麦品质可分为营养品质和加工品质^[5]。蛋白质及其蛋白组分含量是衡量营养品质的重要标准^[6]。淀粉是小麦籽粒中最主要的部分,约占籽粒干重的 65%~70%^[7]。小麦籽粒胚乳中的淀粉是以大小淀粉粒形式存在,而淀粉粒大小、结构、分布等差异会影响小麦淀粉特性,从而影响小麦籽粒品质^[8-9]。根据小麦淀粉粒的大小分为 A 型淀粉粒和 B 型淀粉粒,其中 B 型淀粉粒体积小、表面积大,能结合较多蛋白质、水分和脂类,且具有较高的糊化温度,可改善食品烘焙特性并提高食品的口感^[10]。

适时追施氮肥和增加种植密度可提高小麦产量,同时改善籽粒品质^[11]。研究表明,保证弱筋小麦宁麦 18 高产优质的最佳施氮量为 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,种植密度为 $240 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[12]。当施氮量为 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、种植密度为 $300 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,小麦产量可达到 $11\,032.72 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[13]。不合理或过多施用氮肥不仅使小麦产

量得不到提高,还会降低氮肥利用效率,增加生产成本^[14]。目前针对氮肥、种植密度对弱筋小麦产量和品质效应的研究多侧重于单因素分析,缺乏二者互作效应的探讨。一些弱筋小麦研究的施氮量设置主要在 $180 \sim 360 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 范围内,且认为 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右的施氮量对弱筋小麦的产量和品质最佳^[3,15]。基于此,本研究以弱筋小麦扬麦 15 为试验材料,在基施氮量为 $126 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 条件下设置不同追氮量和种植密度,探讨追氮量、种植密度及二者间互作对弱筋小麦产量和品质的影响,明确扬麦 15 产量和品质协同提高的追氮量和种植密度的最佳组合,以期为沿淮地区弱筋小麦的高产栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2022 年 10 月—2023 年 5 月在安徽科技学院种植基地 (117.56°E , 32.88°N) 进行。试验材料为弱筋小麦品种扬麦 15。试验地为黏壤土,前茬为玉米,0~20 cm 土壤有机质含量 $16.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮、速效磷和速效钾含量分别为 72.75 、 17.45 和 $96.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。氮肥、磷肥和钾肥分别为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙

(含 P 12%)、氯化钾(含 K 60%)。磷肥(P_2O_5)和钾肥(K_2O)全部底施,施用量均为 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;所有处理基施氮量均为 $126 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,在拔节期追施氮肥。

试验采用二因素随机区组设计,其中追氮量设置 $37.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N1)、 $43.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N2)、 $48.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N3)和 $54.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N4)共 4 个水平,种植密度设 180 万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ (D1)、240 万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ (D2)和 300 万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ (D3)共 3 个水平。共计 12 个处理,3 次重复,小区面积为 9 m^2 ($3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$),行距 0.25 m。小麦于 2022 年 10 月 28 日播种,2023 年 5 月 25 日收获,田间其他管理同常规大田。

1.2 测定方法及项目

1.2.1 小麦籽粒淀粉提取与粒径分析

小麦籽粒淀粉提取参考蔡瑞国等^[16]方法,于小麦成熟收获后称 3 g 籽粒于离心管(50 mL)中,用蒸馏水浸泡 1 d,剥去种皮,去胚并研磨过滤 3~4 次(200 目筛布),离心倒去上清液。将提取好的淀粉用 BT-9300SE(美国百特)激光粒度分布仪进行粒径分析。

1.2.2 糊化参数测定

将后熟过的籽粒用磨粉机磨成面粉,称取 3 g 放入铝盒中,加入 25 mL 蒸馏水,用快速黏度分析仪进行分析,每处理重复 3 次。

1.2.3 籽粒蛋白质组分的测定

于 0.1 g 小麦面粉中加入 5 mL 提取液,震荡 10 min 后在 $4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 5 min,将上清液倒入 25 mL 容量瓶,重复 3 次后定容。取 5 mL 定容后溶液与 5 mL 双缩脲试剂混匀,于 40°C 水浴 20 min 后用分光光度计比色,测定清蛋白、球蛋白、谷蛋白和醇溶蛋白含量。

1.2.4 籽粒蔗糖合酶(SS)和腺苷二磷酸化酶(ADGPase)活性的测定

采用试剂盒检测(北京索莱宝科技有限公司提供)小麦籽粒中 SS 和 ADGPase 活性。按照试剂盒说明,将处理好的样品用紫外分光光度计测定吸光度,计算 SS 和 ADGPase 活性。

1.2.5 产量及其构成因素的测定

在小麦灌浆中前期各小区选取 0.5 m^2 长势均匀区域用于调查穗数,成熟后随机选 30 个穗调查穗粒数。收割样区的所有麦穗,脱粒晒干后装袋称重测定实际产量,并随机数取 1 000 粒测定千粒重。

1.2.6 籽粒品质性状的测定

将成熟期收获小麦放入冷藏室完成生理后熟,使用 DA7200 近红外品质分析仪(瑞典波通公司),测定小麦籽粒蛋白质含量等指标。

1.3 数据分析

用 Excel 2019、DPS 7.05 软件进行数据汇总和方差分析,用 Origin 2024 制图。

2 结果与分析

2.1 追氮量和种植密度对小麦淀粉粒体积、表面积分布、数量分布的影响

追氮量和种植密度及二者互作均对小麦体积、表面积分布、淀粉粒数量分布均有极显著影响(表 1~表 3)。不同处理下 B 型淀粉粒体积、表面积百分比分别为 $31.91\% \sim 39.15\%$ 和 $77.17\% \sim 82.44\%$,A 型淀粉粒体积、表面积百分比分别为 $68.09\% \sim 60.85\%$ 和 $17.56\% \sim 22.83\%$,可见 A 型淀粉粒体积百分比大,B 型淀粉粒表面积百分比大。同一密度水平下,B 型淀粉粒体积和表面积百分比随着追氮量的降低呈先升后降的趋势,A 型淀粉粒体积和表面积百分比呈先降后升的趋势,说明较低的追氮量可促进 A 型淀粉粒生长。同一追氮水平下,B 型淀粉粒体积和表面积百分比随着种植密度的增加呈上升趋势,而 A 型淀粉粒体积和表面积百分比呈下降趋势,这表明增密有利于 B 型淀粉粒生长。在 B 型淀粉粒中,追氮量和种植密度对 $2.8 \sim 10 \mu\text{m}$ 粒径淀粉粒组影响大;在 A 型淀粉粒中,追氮量和种植密度对 $10 \sim 22 \mu\text{m}$ 粒径淀粉粒组影响大。小麦籽粒 B 型淀粉粒数目、A 型淀粉粒数目分别占总数目的 $99.85\% \sim 99.89\%$ 和 $0.11\% \sim 0.15\%$,可见 B 型淀粉粒的贡献率大于 A 型淀粉粒,即小麦淀粉粒数目分布主要由 B 型淀粉粒构成,且以 $0.1 \sim 2.8 \mu\text{m}$ 的淀粉粒较多。

2.2 追氮量和种植密度对小麦淀粉黏度的影响

追氮量和种植密度对小麦淀粉峰值黏度、低谷黏度、最终黏度均有显著影响,二者互作效应不明显(表 4)。同一密度水平下,峰值黏度、低谷黏度等黏度参数随着追氮量的降低呈先升后降趋势,均表现为 $N3 > N4 > N2 > N1$ 。同一追氮水平下,峰值黏度、低谷黏度等参数随着种植密度增加有显著上升趋势。其中 D3N3 处理下峰值黏度等参数均达到最高,说明合理追氮和种植密植能改善小麦淀粉糊化特性。

表 1 不同追氮量和种植密度处理下小麦淀粉粒体积的分布

Table 1 Volume distribution of wheat starch granules under different nitrogen topdressing and planting density treatments %

种植密度 Planting density	追氮量 Nitrogen topdressing	淀粉粒粒径 Diameter of starch granule					
		0.1~2.8 μm	2.8~10 μm	≤10 μm	>10 μm	10~22 μm	>22 μm
D1	N4	10.56±0.07f	21.88±0.06j	32.45±0.11g	67.55±0.11b	40.42±0.12a	27.13±0.10c
	N3	10.99±0.04d	23.67±0.09g	34.66±0.12e	65.34±0.12d	38.89±0.06c	26.45±0.13e
	N2	10.74±0.05e	23.99±0.06f	34.73±0.11e	65.27±0.11d	38.44±0.03d	26.83±0.08d
	N1	10.06±0.10g	21.85±0.14j	31.91±0.24h	68.09±0.24a	40.56±0.14a	27.53±0.38b
D2	N4	11.12±0.06c	23.38±0.11h	34.50±0.13e	65.50±0.13d	37.33±0.05f	28.17±0.09a
	N3	10.99±0.11d	24.22±0.05e	35.21±0.13d	64.79±0.13e	37.33±0.11f	27.46±0.06b
	N2	11.38±0.07b	25.19±0.07d	36.57±0.14c	63.43±0.14f	37.37±0.05ef	26.07±0.09f
	N1	11.20±0.03c	24.04±0.06ef	35.25±0.08d	64.75±0.08e	37.63±0.01e	27.13±0.09c
D3	N4	11.19±0.04c	22.81±0.09i	34.00±0.11f	66.00±0.11c	39.58±0.04b	26.43±0.08e
	N3	12.34±0.07a	26.81±0.30a	39.15±0.37a	60.85±0.37h	34.77±0.32h	26.08±0.07f
	N2	12.46±0.05a	25.76±0.06b	38.22±0.12b	61.78±0.12g	35.30±0.04g	26.48±0.11e
	N1	11.35±0.01b	25.45±0.13c	36.80±0.12c	63.20±0.12f	38.32±0.15d	24.88±0.19g
F 值 F value	D	802.08**	1 034.81**	1 225.19**	1 225.43**	939.08**	197.84**
	N	169.56**	647.31**	534.38**	534.49**	471.85**	43.73**
	D×N	72.99**	116.04**	107.10**	107.12**	166.25**	64.49**

D:种植密度;N:氮肥;N×D:氮密互作。同列数值后的不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。*:P<0.05; **:P<0.01。下表同。

D:Planting density; N: Nitrogen fertilizer; N×D: Nitrogen-density interaction. Different lowercase letters after the values in the same columns indicate significant differences among the treatments at 0.05 level. *: P<0.05; **: P<0.01. The same in tables 2-7.

表 2 不同追氮量和种植密度处理下小麦淀粉粒表面积分布

Table 2 Surface area distribution of wheat starch granules under different nitrogen topdressing and planting density treatments %

种植密度 Planting density	追氮量 Nitrogen topdressing	淀粉粒粒径 Diameter of starch granule					
		0.1~2.8 μm	2.8~10 μm	≤10 μm	>10 μm	10~22 μm	>22 μm
D1	N4	52.01±0.08bc	27.60±0.11e	79.61±0.12e	20.39±0.12e	14.45±0.15d	5.94±0.05c
	N3	52.10±0.07bc	28.33±0.04bc	80.43±0.03c	19.57±0.03g	14.36±0.06d	5.22±0.03gh
	N2	52.25±0.16b	28.37±0.04b	80.62±0.12c	19.38±0.12g	13.93±0.08e	5.45±0.04f
	N1	51.95±0.02c	27.93±0.03d	79.88±0.05d	20.12±0.05f	14.34±0.02d	5.78±0.03de
D2	N4	50.77±0.06f	26.74±0.02h	77.51±0.06h	22.49±0.06b	16.36±0.04a	6.13±0.04b
	N3	51.59±0.27d	28.18±0.12c	79.77±0.15de	20.23±0.15ef	14.33±0.11d	5.89±0.05c
	N2	51.06±0.16e	27.99±0.05d	79.05±0.11fg	20.95±0.11cd	15.06±0.07c	5.89±0.04cd
	N1	50.83±0.16ef	26.33±0.04g	77.17±0.18i	22.83±0.18a	16.51±0.05a	6.32±0.13a
D3	N4	51.85±0.04cd	27.06±0.04a	78.91±0.08g	21.09±0.08c	15.34±0.05b	5.75±0.03e
	N3	53.51±0.09a	28.93±0.17b	82.44±0.22a	17.56±0.22i	12.40±0.19g	5.17±0.04h
	N2	53.67±0.09a	28.41±0.03f	82.08±0.07b	17.92±0.07h	12.63±0.02f	5.29±0.04g
	N1	51.88±0.09c	27.40±0.10i	79.28±0.09f	20.72±0.09d	15.01±0.04c	5.71±0.05e
F 值 F value	D	342.77**	214.13**	907.84**	916.74**	897.37**	265.22**
	N	81.26**	478.58**	638.48**	644.74**	674.61**	152.34**
	D×N	29.71**	45.00**	83.80**	84.62**	155.37**	7.99**

表 3 不同追氮量和种植密度处理下小麦淀粉粒数量的分布

Table 3 Number distribution of wheat starch granules under different nitrogen topdressing and planting density treatments %

种植密度 Planting density	追氮量 Nitrogen topdressing	淀粉粒粒径 Diameter of starch granule					
		0.1~2.8 μm	2.8~10 μm	≤10 μm	>10 μm	10~22 μm	>22 μm
D1	N4	97.51±0.01cde	2.36±0.01bc	99.87±0.00bc	0.13±0.00a	0.12±0.00b	0.01±0.00c
	N3	97.52±0.03cd	2.36±0.03bc	99.87±0.00abc	0.13±0.00b	0.12±0.00b	0.01±0.00c
	N2	97.58±0.02b	2.30±0.02de	99.88±0.00ab	0.12±0.00b	0.11±0.00c	0.01±0.00c
	N1	97.51±0.01cde	2.36±0.01bc	99.87±0.00bc	0.13±0.00b	0.12±0.00b	0.01±0.00c
D2	N4	97.46±0.00f	2.40±0.00ab	99.86±0.00cd	0.14±0.00c	0.13±0.00a	0.01±0.00bc
	N3	97.54±0.02c	2.35±0.02bc	99.89±0.00a	0.11±0.00c	0.10±0.00d	0.01±0.00c
	N2	97.48±0.01ef	2.41±0.01a	99.89±0.00a	0.11±0.00c	0.10±0.00d	0.01±0.00c
	N1	97.61±0.01b	2.26±0.01e	99.87±0.00bc	0.13±0.00c	0.12±0.00b	0.01±0.00c
D3	N4	97.49±0.06def	2.36±0.06bc	99.85±0.00d	0.15±0.00d	0.13±0.00a	0.02±0.00a
	N3	97.59±0.02b	2.29±0.02de	99.88±0.00ab	0.12±0.00d	0.11±0.00c	0.01±0.00c
	N2	97.71±0.01a	2.15±0.01f	99.86±0.00cd	0.14±0.00e	0.12±0.00b	0.02±0.00a
	N1	97.53±0.03c	2.33±0.02cd	99.86±0.00bcd	0.14±0.00e	0.12±0.00b	0.02±0.00ab
F 值 F value	D	25.45**	25.83**	6.41**	125.97**	36.35**	29.86**
	N	30.00**	14.61**	8.01**	157.50**	100.13**	6.11**
	D×N	27.68**	21.00**	2.08**	40.89**	21.68**	4.02**

表 4 不同追氮量和种植密度处理下小麦黏度参数的差异

Table 4 Differences of wheat viscosity parameters under different nitrogen topdressing and planting density treatments cp

种植密度 Planting density	追氮量 Nitrogen topdressing	峰值黏度 Peak viscosity	低谷黏度 Trough Viscosity	最终黏度 Final viscosity	稀懈值 Breakdown viscosity	回升值 Setback viscosity
D1	N4	1 051.67±58.12ab	738.67±26.96ab	1 377.33±68.84b	313.00±32.57abc	638.67±46.35a
	N3	1 104.33±41.71ab	759.33±54.79ab	1 499.00±46.68ab	345.00±23.42a	739.67±32.25a
	N2	854.33±10.78cd	631.67±3.40cd	1 187.33±63.73c	222.67±8.18bc	555.67±60.68a
	N1	812.33±47.93d	608.67±36.01d	1 161.33±35.52c	203.67±11.95c	552.67±31.05a
D2	N4	1 080.33±111.89ab	751.00±13.49ab	1 433.33±70.38ab	329.33±102.58ab	682.33±69.54a
	N3	1 121.67±43.44ab	761.67±13.72ab	1 518.33±193.67ab	360.00±54.94a	756.67±186.83a
	N2	1 039.67±81.18ab	741.67±8.01ab	1 442.33±26.55ab	298.00±73.82abc	700.67±29.96a
	N1	976.33±60.64bc	694.67±19.19bc	1 363.67±73.86b	281.67±41.80abc	669.00±55.14a
D3	N4	1 093.33±47.13ab	779.00±72.45ab	1 508.00±80.51ab	314.33±46.20abc	729.00±142.89a
	N3	1 148.33±181.74a	789.33±105.53a	1 548.67±99.50a	359.00±109.11a	759.33±159.85a
	N2	1 052.67±17.15ab	760.33±17.82ab	1 479.33±67.93ab	292.33±28.94abc	719.00±69.34a
	N1	989.33±14.64bc	721.67±7.93ab	1 404.67±64.58ab	267.67±22.22abc	683.00±72.17a
F 值 F value	D	5.83**	7.65**	10.59**	1.43	2.42
	N	9.04**	6.84**	7.68**	3.91*	1.63
	D×N	0.93	1.08	1.29	0.25	0.28

2.3 追氮量和种植密度对小麦籽粒 SS 和 ADGPase 活性的影响

追氮量和种植密度均对小麦籽粒 SS 和 ADGPase 活性均有显著影响(图 1),追氮量与种植密度的互作用在 SS 活性上表现显著。同一密度水平下,小麦籽粒 SS 和 ADGPase 活性均随

着追氮量的降低呈先升后降趋势,且均在 N3 处理下最高。同一追氮水平下,小麦籽粒 SS 和 ADGPase 活性随着密度的增加均呈上升趋势。其中 D3N3 处理下籽粒 SS 和 ADGPase 活性均最高,可见适量追氮和种植密植有利于提高小麦籽粒淀粉合成的相关酶活性。

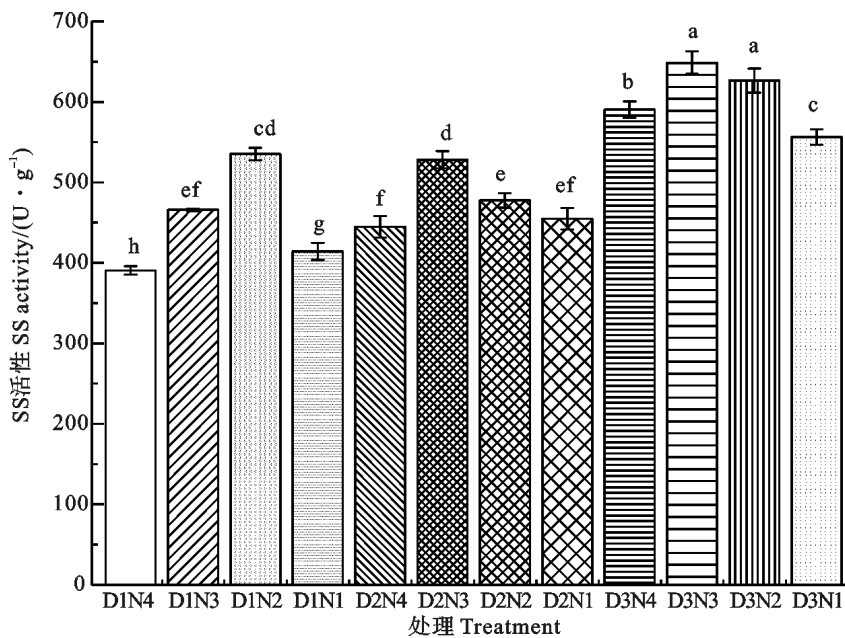


图 1 不同追氮量和种植密度处理下小麦籽粒 SS 活性

Fig. 1 SS activity in wheat grain under different nitrogen topdressing and planting density treatments

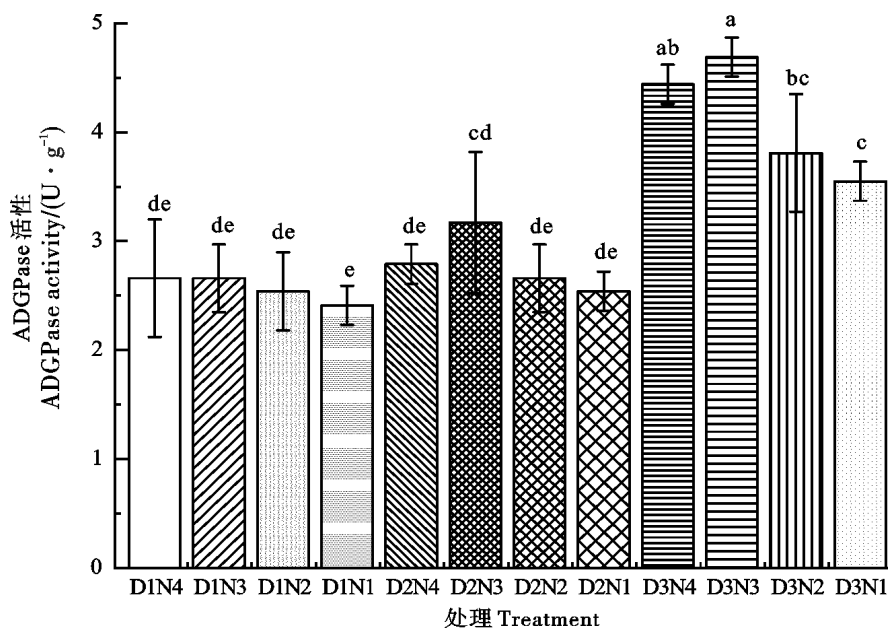


图 2 不同追氮量和种植密度处理下小麦籽粒的 ADGPase 活性

Fig. 2 ADGPase activity in wheat grain under different nitrogen topdressing and planting density treatments

2.4 追氮量和种植密度对小麦籽粒蛋白质组分含量的影响

追氮量和密度均对小麦籽粒清蛋白、球蛋白、谷蛋白、醇溶蛋白含量及谷醇比均有显著影响,二者互作效应在各指标上均不显著(表 5)。同一密度水平下,籽粒清蛋白、球蛋白、谷蛋白、醇溶蛋白含量随着追氮量降低均呈下降趋势,谷醇比呈先升后降趋势;N3、N2、N1 条件下蛋白质组分

含量较 N4 均显著降低,但 N3 与 N2 水平间谷蛋白和醇溶蛋白含量差异不显著。同一追氮水平下,籽粒清蛋白、球蛋白、谷蛋白、醇溶蛋白、谷醇比随着密度的增加均呈先降后升趋势;与 D1 相比,D2、D3 条件下球蛋白、谷蛋白、醇溶蛋白含量差异显著,D3 处理下的清蛋白含量差异不显著。这说明适宜增密会改善小麦籽粒营养品质。

2.5 追氮量和种植密度对小麦产量及其构成要素的影响

施氮量和种植密度对小麦产量及其构成要素均有显著影响(表 6)。同一密度水平下,穗数随着追氮量的降低而下降,穗粒数和千粒重呈先升后降趋势,而产量在 D1 条件下呈降低趋势,在

D2、D3 条件下呈先增后降趋势,且均在 N3 条件下产量最高。同一追氮水平下,穗数、产量随着密度水平增加呈上升趋势,穗粒数呈下降趋势。在所有处理中,D3N3 处理产量最高,其穗数、穗数和千粒重均处于较高水平。可见适宜的追氮量和增密能协调小麦产量构成,进而提高籽粒产量。

表 5 不同追氮量和种植密度处理下小麦籽粒蛋白组分含量的差异

Table 5 Differences of protein components in wheat grain under different nitrogen topdressing and planting density treatments %

种植密度 Planting density	追氮量 Nitrogen topdressing	清蛋白 Albumin	球蛋白 Globulin	醇溶蛋白 Gliadin	谷蛋白 Glutenin	谷醇比 Glutenin/gliadin
D1	N4	1.24±0.05ab	1.42±0.09ab	3.54±0.08a	5.26±0.04b	1.49±0.02b
	N3	1.21±0.09abcd	1.29±0.02cde	3.06±0.01cdef	5.17±0.10bc	1.69±0.04a
	N2	1.18±0.03bcde	1.26±0.00cdef	3.16±0.02bc	5.13±0.00cd	1.62±0.01a
	N1	1.16±0.03cde	1.20±0.04ef	3.11±0.06cde	5.04±0.02d	1.62±0.04a
D2	N4	1.23±0.04abc	1.31±0.07cd	3.14±0.17cd	4.71±0.07e	1.50±0.06b
	N3	1.14±0.09def	1.27±0.01cdef	2.99±0.12def	4.54±0.05f	1.52±0.07b
	N2	1.13±0.05ef	1.18±0.08f	2.97±0.09ef	4.45±0.07f	1.50±0.06b
	N1	1.07±0.05f	1.18±0.01f	2.91±0.07f	4.31±0.09g	1.48±0.05b
D3	N4	1.26±0.12a	1.47±0.06a	3.60±0.05a	5.51±0.06a	1.53±0.04b
	N3	1.25±0.04ab	1.34±0.05c	3.32±0.00b	5.47±0.07a	1.65±0.02a
	N2	1.21±0.04abcd	1.33±0.01bc	3.32±0.02b	5.43±0.05a	1.63±0.01a
	N1	1.19±0.06abcde	1.22±0.09def	3.12±0.02cde	5.22±0.01bc	1.67±0.01a
F 值 F value	D	10.84**	13.62**	37.84**	459.47**	18.31**
	N	8.86**	19.00**	26.56**	25.38**	7.60**
	D×N	0.60	1.46	2.16	1.25	2.31

表 6 不同追氮量和种植密度处理下小麦产量及其构成因素的差异

Table 6 Differences of wheat yield and its components under different nitrogen topdressing and planting density treatments

种植密度 Planting density	追氮量 Nitrogen topdressing	穗数 Spike number/(×10 ⁴ ·hm ⁻²)	穗粒数 Spike grain number	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)
D1	N4	522.67±13.20f	51.53±1.83a	43.96±1.43ac	9 173.87±431.87efg
	N3	518.67±26.40fg	51.03±4.24ab	44.42±1.14ab	8 622.93±163.67fgh
	N2	516.00±21.42fg	50.47±2.31ab	43.76±1.18bcd	8 396.53±129.65gh
	N1	496.00±40.92fg	50.73±3.16ab	42.37±0.46cd	7 912.67±601.34h
D2	N4	600.00±14.24ef	44.63±0.52cd	45.13±0.37ab	9 726.93±269.40cde
	N3	569.33±16.76def	46.90±0.99bcd	45.83±0.98a	10 188.93±374.50bc
	N2	556.00±17.28cde	51.17±0.87a	41.88±1.26d	9 324.80±494.63def
	N1	553.33±14.73bcd	47.70±1.16abcd	43.24±0.15bcd	8 113.20±362.50h
D3	N4	657.33±23.17bc	43.77±0.31d	43.97±0.64abc	9 992.67±235.33bcd
	N3	628.00±8.64ab	48.53±1.80abc	45.00±1.47ab	11 372.40±330.32a
	N2	622.67±26.40ab	45.67±1.82cd	44.57±0.59ab	10 549.47±502.51b
	N1	598.67±9.43a	45.57±0.59cd	44.09±0.7abc	9 379.73±316.44def
F 值 F value	D	57.65**	12.84**	1.43	44.45**
	N	4.50*	1.77	5.26*	18.65**
	D×N	0.40	1.89	2.35	2.91**

2.6 追氮量和种植密度对小麦籽粒品质性状的影响

施氮量和种植密度对小麦湿面筋含量、蛋白质含量、沉降值及淀粉含量均有显著影响(表 7)。同一密度水平下,湿面筋含量、蛋白质含量、沉降值均随着追氮量降低均呈下降趋势,而淀粉含量呈上升趋势。同一追氮水平下,小麦湿面筋含量、

蛋白质含量、沉降值随着密度的增加均呈下降趋势。依据弱筋小麦国家标准,优质小麦蛋白质含量 $<12.5\%$,湿面筋含量 $<26\%$ 。按此标准,N4 处理下小麦品质均不合格。在其他追氮水平下,除 D1N3 处理外,其余处理的蛋白质和湿面筋含量均符合弱筋小麦标准。结合表 6 的产量数据,在 D3N3 处理下小麦高产和优质均能协同实现。

表 7 不同追氮量和种植密度处理下小麦籽粒品质性状的差异

Table 7 Differences of wheat grain quality traits under different nitrogen topdressing and planting density treatments

种植密度 Planting density	追氮量 Nitrogen topdressing	湿面筋 Wet gluten content/%	蛋白质 Protein content/%	沉降值 Sedimentation value/mL	淀粉 Wet gluten content/%
D1	N4	27.43±1.11a	13.40±0.29a	29.73±0.85a	66.77±0.19e
	N3	26.23±0.42b	12.53±0.21bc	28.77±0.42ab	67.20±0.37de
	N2	25.43±0.21bc	12.03±0.37cd	27.93±0.60b	67.47±0.82cde
	N1	24.70±1.07cde	11.13±0.21efg	24.77±0.59cde	67.70±0.43bcd
D2	N4	26.50±0.86ab	13.17±0.29ab	28.90±0.78ab	67.80±0.08bcd
	N3	26.17±0.33b	12.17±0.61cd	25.47±1.08c	67.67±0.05bcd
	N2	24.77±0.25cde	11.53±0.21def	24.77±0.66cde	67.83±0.45abcd
	N1	24.07±0.17e	10.77±0.48fg	24.43±1.23cde	68.13±0.33abc
D3	N4	25.33±0.26bcd	12.77±0.37abc	25.23±0.57cd	68.03±0.33abc
	N3	24.90±0.14cde	12.17±0.52cd	24.40±0.83cde	68.17±0.41abc
	N2	24.20±0.41de	11.63±0.12de	23.57±1.19de	68.33±0.42ab
	N1	23.83±0.17e	10.67±0.26g	23.27±0.82e	68.57±0.17a
F 值 F value	D	11.90**	3.52*	38.93**	15.42**
	N	18.09**	39.38**	21.76**	3.16*
	D×N	0.66	0.18	2.92*	0.38

3 讨论

3.1 追氮量和种植密度对小麦淀粉粒度分布的影响

淀粉主要以大小淀粉粒形式存在于小麦胚乳中,其中 A、B 型淀粉粒分布易受基因型、环境及栽培措施的影响^[17-18]。研究发现,增施氮肥会降低 B 型淀粉粒数目、体积和表面积百分比,促进 A 型淀粉粒的生长,数目分布主要以 B 型淀粉粒为主^[19]。A 型淀粉粒体积、表面积和数目分布百分比随种植密度增加均呈上升趋势^[20]。本研究发现,种植密度和追氮量对小麦淀粉数量分布有显著影响,且在数量分布中以 B 型淀粉粒为主。但减施追氮量后,B 型淀粉粒体积、表面积比例呈先升后降趋势,而增密后 B 型淀粉粒体积、表面积比例增加。这与前人^[19]研究结果不一致,可能因种植密度较适宜,促进 B 型淀粉粒生长。同时,不同处理下 A 型淀粉粒体积占比大,B 型淀粉粒表面积和数量分布占比大。因此,适宜的追

氮量和增加种植密度有利于小麦 B 型淀粉粒产生与生长,增大了 B 型淀粉粒表面积,促进了淀粉粒的生长发育。

3.2 追氮量和种植密度对小麦淀粉糊化特性的影响

糊化特性是评价小麦加工品质的重要指标,与面制品的品质显著相关^[21]。糊化参数受种植密度和氮肥等栽培措施的影响,其中氮肥和种植密度栽培措施能够调控小麦面粉的黏度,对改善淀粉品质起着关键作用^[22]。在本研究中,追氮量和种植密度对淀粉黏度参数影响显著,低谷黏度、峰值黏度等参数随追氮量的降低均呈先升后降趋势,而小麦峰值黏度、低谷黏度等参数均随种植密度的增加呈上升趋势。其中在 D3N3 处理下小麦糊化特性最佳,因此适宜的追氮量和种植密度能够提高淀粉黏度参数。

3.3 追氮量和种植密度对小麦产量性状及籽粒品质的影响

适宜的氮肥和密度对小麦籽粒产量和品质提

高有显著的调控作用^[23-24]。氮肥和密度不仅能调控产量构成要素,同时也是实现作物高产重要的栽培措施^[25]。研究发现,增施氮肥能显著提高小麦穗数、穗粒数、千粒重及产量^[26]。增加种植密度小麦穗数和产量均呈上升趋势,穗粒数显著下降^[27]。本研究中,小麦穗数、千粒重及产量均随种植密度增加而上升,但穗粒数显著减少,与前人^[27]研究结果一致。降低追氮量,小麦穗数显著下降,千粒重及产量均呈先升后降,与前人研究结果不同。这可能由于植株后期氮肥供应不足,造成植株生长缓慢,光合作用减弱,导致粒重减少,进而影响籽粒产量。因此适宜的追氮量和种植密度可促进小麦根系发育和代谢活动,提高光合作用效率和养分吸收能力,同时协调产量构成三要素,从而提高籽粒产量。

过量施用氮可能会导致小麦植株过度生长,降低淀粉含量和品质。而适量施用氮肥可以显著提高小麦的湿面筋含量、蛋白质含量及沉降值,对改善小麦的品质和产量具有积极的作用^[28]。小麦籽粒蛋白质含量、湿面筋含量随着种植密度增加显著提高,但密度对湿面筋、蛋白质含量无显著影响^[29]。研究发现,氮肥对小麦籽粒蛋白质含量和蛋白质组分影响显著,中、强筋小麦籽粒蛋白质组分均随施氮量增加均显著增加^[30]。在本研究中,追氮量和种植密度对蛋白各组分含量影响显著,籽粒清蛋白、球蛋白等蛋白组分含量均随着追氮量的降低而降低,而随种植密度增加呈先降后升趋势,以 D3N4 处理下各蛋白组分含量均最高。这说明追氮量和种植密度与小麦加工品质存在密切关系,适宜的氮密组合可提高蛋白组分含量。减施追氮量和增加种植密度后小麦湿面筋含量、蛋白质含量及沉降值均显著降低,有利于改善弱筋小麦籽粒品质;追氮量和密度对其影响显著,与前人研究结果不同,可能因品种、设置的密度不同所导致的差异。

适量的氮肥可以增强淀粉相关酶的活性,促进蔗糖到淀粉的转化,提高籽粒淀粉的合成能力^[31]。SS 和 ADGPase 在淀粉合成过程中起重要作用,并与籽粒淀粉粒度分布的形成密切相关^[32]。本研究下 D3N3 处理小麦籽粒 SS 活性、ADGPase 活性、淀粉含量均达最高,且蛋白质含量、湿面筋含量均达到弱筋小麦标准含量。这表明,适宜的施氮量和种植密度能提高弱筋小麦籽粒 SS 和 ADGPase 活性,增加 B 型淀粉粒体积、

表面积占比,改善淀粉粒度分布和加工品质,提高其淀粉含量,增加籽粒产量。

4 结论

适宜的施氮量和种植密度可增加小麦籽粒 B 型淀粉粒表面积和数量分布的占比,降低 A 型淀粉粒体积分布占比,提高小麦淀粉最终黏度等参数提高小麦籽粒 SS 活性、ADGPase 活性及籽粒产量。追氮量 $48.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、种植密度为 $300 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,小麦淀粉糊化特性、蛋白组分、SS 活性、ADGPase 活性、籽粒产量表现较佳,为沿淮地区弱筋小麦优质高产推荐栽培措施。

参考文献:

- [1] 孙 梦,冯昊翔,张晓燕,等. 不同土壤肥力下施氮量对小麦产量和品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(7): 826.
SUN M, FENG H X, ZHANG X Y, et al. Effects of nitrogen rates on wheat yield and quality under different soil fertility regimes [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(7): 826.
- [2] 刘 丰,蒋佳丽,周 琴,等. 美国软麦籽粒品质变化趋势及对我国弱筋小麦标准达标度分析[J]. 中国农业科学, 2022, 55(19): 3723.
LIU F, JIANG J L, ZHOU Q, et al. Analysis of American soft wheat grain quality and its suitability evaluation according to Chinese weak gluten wheat standard [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(19): 3723.
- [3] 张子豪,李想成,吴昊天,等. 氮肥运筹对弱筋小麦产量、品质及氮素利用的影响[J]. 华北农学报, 2022, 37(S1): 214.
ZHANG Z H, LI X C, WU H T, et al. Effects of nitrogen fertilizer management on yield, quality and nitrogen utilization of weak gluten wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2022, 37(S1): 214.
- [4] MA M, LI Y, XUE C, et al. Current situation and key parameters for improving wheat quality in China [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 638525.
- [5] PETERSON C J, GRAYBOSCH R A, SHEITON D R, et al. Baking quality of hard winter wheat: Response of cultivars to environment in the great plains [J]. *Euphytica*, 1998, 100(1/3): 157.
- [6] 王月福,于振文,李尚霞,等. 施氮量对小麦籽粒蛋白质组分含量及加工品质的影响[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1071.
WANG Y F, YU Z W, LI S X, et al. Effects of nitrogen application amount on content of protein components and processing quality of wheat grain [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(9): 1071.
- [7] 戴忠民,尹燕桦,郑世英,等. 不同供水条件对小麦强、弱筋籽粒中淀粉粒度分布的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(12): 6534.
DAI Z M, YIN Y P, ZHENG S Y, et al. Effect of water regime on starch granule size distribution in superior and inferior grains of wheat [J]. *Acta Ecologica Sinica*. 2009, 29(12): 6534.
- [8] ZHANG Y, GUO Q, FENG N, et al. Characterization of A- and B-type starch granules in Chinese wheat cultivars [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(10): 2203.
- [9] 吴东明,韩雅楠,马宏亮,等. 氮肥后移对中、弱筋小麦籽粒淀粉合成及其糊化特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(5): 186.
WU D M, HAN Y N, MA H L, et al. Effects of postponing nitrogen fertilizer application on starch formation of medium and weak gluten wheat grains and its impacts on gelatinization

- characteristics [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(5):186.
- [10] SHANG J, LI L, ZHAO B, *et al.* Comparative studies on physicochemical properties of total, A- and B-type starch from soft and hard wheat varieties [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 154:714.
- [11] 赵广才, 常旭虹, 杨玉双, 等. 基本苗数和底追肥比例对冬小麦籽粒产量和蛋白质组分的影响[J]. *核农学报*, 2008, 22(5):712.
- ZHAO G C, CHANG X H, YANG Y S, *et al.* Response of grain yield and protein to number of basic seedling and ratio of base to topdressing nitrogen in winter wheat [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2008, 22(5):712.
- [12] 姚金保, 马鸿翔, 张平平, 等. 施氮量和种植密度对弱筋小麦宁麦18籽粒产量和蛋白质含量的影响[J]. *西南农业学报*, 2017, 30(7):1507.
- YAO J B, MA H X, ZHANG P P, *et al.* Effect of nitrogen application rate and plant density on grain yield and protein contents of weak gluten wheat cultivar Ningmai 18 [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 30(7):1507.
- [13] 李浩杰, 闫素辉, 张士雅, 等. 氮密对小麦籽粒淀粉粒分布与糊化特性的互作效应[J]. *麦类作物学报*, 2024, 44(3):378.
- LI H J, YAN S H, ZHANG S Y, *et al.* Effect of nitrogen-density interaction on starch granule size distribution and pasting properties of wheat grains [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(3):378.
- [14] 单玉琳, 张国权, 罗勤贵, 等. 小麦淀粉的粒度分布、组分及糊化特性对氮硫肥的响应[J]. *麦类作物学报*, 2012, 32(1):60.
- SHAN Y L, ZHANG G Q, LUO Q G, *et al.* Effect of nitrogen and sulfur fertilizer on granule size distribution composition and pasting properties of wheat starch [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2012, 32(1):60.
- [15] 蒋进, 李小雨, 王淑荣, 等. 不同施氮量对弱筋小麦产量和品质的影响[J]. *作物研究*, 2022, 36(1):9.
- JIANG J, LI X Y, WANG S R, *et al.* Effect of nitrogen application rate on yield and grain quality of soft wheat. [J]. *Crop Research*, 2022, 36(1):9.
- [16] 蔡瑞国, 尹燕桦, 赵发茂, 等. 强筋小麦胚乳淀粉粒度分布特征及其对弱光的响应[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(5):1308.
- CAI R G, YIN Y P, ZHAO F M, *et al.* Size distribution of starch granules in strong-gluten wheat endosperm under low light environment [J]. *Scientia Agricultura Sinica Chinese*, 2008, 41(5):1308.
- [17] DAI Z, YIN Y, ZHANG M, *et al.* Distribution of starch granule size in grains of wheat grown under irrigated and rainfed conditions [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(5):795.
- [18] 谭植, 闫素辉, 刘良柏, 等. 拔节期低温对小麦穗花发育与籽粒淀粉粒分布的影响[J]. *西北农业学报*, 2021, 30(5):637.
- TAN Z, YAN S H, LIU L B, *et al.* Effect of low temperature at jointing stage on spikelet and floret development and starch granule size distribution of wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2021, 30(5):637.
- [19] 蔡文璐, 李可, 简超群, 等. 施氮量对小麦籽粒淀粉粒的效应[J]. *麦类作物学报*, 2022, 42(7):815.
- CAI W L, LI K, JIAN C Q, *et al.* Effect of nitrogen rates on the starch granule size distribution in wheat kernels [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(7):815.
- [20] 许倍铭, 冯健超, 郝紫瑞, 等. 种植密度对不同小麦品种籽粒淀粉含量及其特性的影响[J]. *麦类作物学报*, 2022, 42(9):1109.
- XU B M, FENG J C, HAO Z R, *et al.* Effect of planting density on starch content and characteristics of wheat grains [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(9):1109.
- [21] 刘霞, 李青常, 王振林, 等. 施氮水平对小麦籽粒蛋白质组分和加工品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(1):70.
- LIU X, LI Q C, WANG Z L, *et al.* Effects of nitrogen rates on grain protein components and processing quality of wheat [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(1):70.
- [22] 吴培金, 闫素辉, 邵庆勤, 等. 施氮量对弱筋小麦籽粒品质形成的影响[J]. *麦类作物学报*, 2020, 40(10):1232.
- WU P J, YAN S H, SHAO Q Q, *et al.* Effect of nitrogen rate on grain quality of weak gluten wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(10):1232.
- [23] ZHANG X, JIA H, LI T, *et al.* TaCol-B5 modifies spike architecture and enhances grain yield in wheat [J]. *Science (New York)*, 2022, 376(6589):180.
- [24] 刘慧婷, 李瑞奇, 王红光, 等. 密度和施氮量对强筋小麦藨优2018产量和抗倒性的影响[J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(12):1619.
- LIU H T, LI R Q, WANG H G, *et al.* Effect of planting density and nitrogen fertilization rate on lodging resistance and grain yield of strong gluten wheat Gaoyou 2018 [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(12):1619.
- [25] 戚云宇, 王维领, 赵凌天, 等. 缓释氮肥配施尿素对迟播小麦产量形成及氮素利用的影响[J]. *麦类作物学报*, 2022, 42(9):1117.
- XIANY Y, WANG W L, ZHAO L T, *et al.* Effect of slow release nitrogen fertilizer combined with urea on yield formation and nitrogen utilization of late sowing wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(9):1117.
- [26] 董云杰, 呼延艺洁, 王金平, 等. 优化施肥对关中灌区冬小麦产量及氮肥利用的影响[J]. *西北农业学报*, 2022, 31(3):270.
- DONG Y J, HUYYAN Y J, WANG J P, *et al.* Effect of optimized fertilization on yield and nitrogen utilization of winter wheat in Guanzhong irrigation area [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2022, 31(3):270.
- [27] 任开明, 王彝, 杨文俊, 等. 施氮对稻茬弱筋小麦生长特性、品质与产量的影响[J]. *浙江农业学报*, 2023, 35(4):769.
- REN K M, WANG B, YANC W J, *et al.* Effects of nitrogen on physiological growth, quality and yield of weak gluten wheat after rice stubble [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2023, 35(4):769.
- [28] 赵佳蓉, 马宏亮, 吴东明, 等. 遮阴时期对不同小麦品种淀粉组成结构及淀粉品质的影响[J]. *核农学报*, 2023, 37(5):1056.
- ZHAO J R, MA H L, WU D M, *et al.* Effects of shading stage on the starch component and starch quality of different wheat cultivar [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2023, 37(5):1056.
- [29] 张美微, 王晨阳, 郭天财, 等. 施氮量对冬小麦蛋白质品质和面粉色泽的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(6):1312.
- ZHANG M W, WANG C Y, GUO T C, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on protein quality and flour color of winter wheat [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(6):1312.
- [30] BALL S G, MORELL M K. From bacterial glycogen to starch: Understanding the biogenesis of the plant starch granule [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2003, 54(1):207.
- [31] 王贺正, 徐国伟, 吴金芝, 等. 不同氮素水平对豫麦49-198籽粒灌浆及淀粉合成相关酶活性的调控效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2):288.
- WANG H Z, XU G W, WU J Z, *et al.* Regulating effect of nitrogen fertilization on grain filling and activities of enzymes involved in starch synthesis of Yumai 49-198 [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(2):288.
- [32] XU Y, QIU M, LI Y Y, *et al.* Polyamines mediate the effect of post-anthesis soil drying on starch granule size distribution in wheat kernels [J]. *The Crop Journal*, 2016, 44(6):446.