

网络出版时间: 2025-12-18

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1359.s.20251217.1730.007>

灌浆期喷施亚精胺对小麦籽粒淀粉组成及糊化特性的影响

任琼芝¹, 李玉娟³, 葛茜², 温嘉璐³, 张万春², 刘杨³

(1. 汉中市农产品质量安全监测检验中心, 陕西汉中 723000; 2. 汉中市农业技术推广与培训中心, 陕西汉中 723000;

3. 西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100)

摘要:为探讨亚精胺对小麦籽粒淀粉组成及糊化特性的影响,以小麦品种西农 538 和兰考矮早 8 为试验材料,在灌浆期喷施 0.25、0.75 和 1.00 mmol · L⁻¹ 浓度亚精胺,测定和分析了小麦籽粒淀粉组成、粒度分布、糊化特性等指标。结果表明,与喷施清水对照相比,喷施 0.25 和 0.75 mmol · L⁻¹ 亚精胺显著提高了两个品种的千粒重和产量。喷施亚精胺后西农 538 和兰考矮早 8 的直链淀粉含量分别降低和提高,淀粉直支比随喷施浓度的提高则分别表现为下降和先升后降的趋势。总体上,喷施亚精胺减少了两个品种的 A 型淀粉粒数量和体积,增加了 B 型淀粉粒数量和体积。高浓度(1 mmol · L⁻¹)亚精胺对西农 538 的峰值黏度、最终黏度、衰减值均产生负效应,但提升了兰考矮早 8 的这 3 个指标。而 0.75 mmol · L⁻¹ 亚精胺提高了兰考矮早 8 峰值黏度、最低黏度、衰减值、最终黏度和回升值,增加了西农 538 衰减值、回升值、峰值时间和糊化温度。综合来看,在本试验条件下,喷施 0.75 mmol · L⁻¹ 亚精胺显著提升小麦千粒重及产量,并通过影响小麦直链淀粉含量、直/支比和 B 型淀粉粒组成,提高小麦籽粒淀粉的峰值黏度和衰减值,从而提升小麦的糊化特性,最终改善小麦淀粉品质,在小麦生产上是比较适宜的喷施浓度。

关键词:亚精胺;小麦;淀粉;品质

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2026)04-0493-07

Effect of Spermidine Foliar Application at Grain Filling Stage on Starch Composition and Pasting Properties of Wheat Grain

REN Qiongzhi¹, LI Yujuan³, GE Xi², WEN Jialu³, ZHANG Wanchun², LIU Yang³

(1. Hanzhong Agricultural products Quality and Safety monitoring and inspection center, Hanzhong, Shaanxi, 723000, China;

2. Hanzhong Agricultural Technology Extension and Training Center, Hanzhong, Shaanxi, 723000, China;

3. Agronomy College, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi, 712100, China)

Abstract: To investigate the effects of spermidine on the starch composition and gelatinization characteristics of wheat grains, using the wheat varieties Xinong 538 and Lankaoizao 8 as experimental materials, four spermidine spray concentrations (0.25, 0.75 and 1 mmol · L⁻¹) were set up at grain-filling stage. The indicators of starch composition, granule size distribution, and gelatinization characteristics of wheat grains were determined and analyzed. The results showed that compared with spraying clear water CK, spraying 0.25 and 0.75 mmol · L⁻¹ spermidine significantly increased the 1 000-grain weight and yield of the two varieties. After the application of spermidine, the amylose content of Xinong 538 and Lankaoizao 8 decreased and increased, respectively. The amylopectin ratio showed a decreasing trend and a downward increase followed by a decrease with the increase of the application concentration. Overall, spermidine spraying reduced the quantity and volume of A type starch granules in both varieties and increased the quantity and volume of B type starch granules. High concen-

收稿日期: 2025-06-17

修回日期: 2025-07-25

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2024NC-ZDCYL-01-12)

第一作者 E-mail: 756987803@qq.com (任琼芝)

通讯作者 E-mail: liuyang0328@126.com (刘杨); 351561660@qq.com (张万春)

tration($1\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) of spermidine reduced, increased and decreased the peak viscosity, final viscosity, and breakdown of Xinong 538 and Lankaoizao 8, respectively. $0.75\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ spermidine increased the peak viscosity, trough viscosity, breakdown, final viscosity, and setback of Lankaoizao 8, while increased the breakdown, setback, peak time, and pasting temperature of Xinong 538. Overall, under the conditions of this experiment, the application of $0.75\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ arginine spray significantly increased the 1 000-grain weight and yield of wheat, and by influencing the amylose content, amylose/amylopectin ratio and type B starch particle composition of wheat, increased the peak viscosity and breakdown of wheat grain starch, thereby enhancing the gelatinization characteristics of wheat and ultimately improving the quality of wheat starch. It is a relatively suitable spraying concentration in wheat production.

Keywords: Spermidine; Wheat; Starch; Quality

小麦作为主要的粮食作物之一,其产量高低和品质优劣关系人类生存和健康^[1]。淀粉是小麦籽粒的重要组成部分,约占籽粒干重的65%~75%,其含量和特性显著影响小麦的产量和品质^[2]。糊化特性是衡量淀粉品质的重要指标,对其加工品质有直接影响,如较低的回升值可以降低面包老化速度,降低衰减可增强面包烘烤过程中的稳定性,高峰值黏度及衰减面粉的面条品质较好^[3]。小麦面粉品质与籽粒淀粉含量、结构及其组成也密切相关。小麦籽粒中直链淀粉可通过氢键和疏水作用影响面筋蛋白之间的交联,因而较高直链淀粉含量会削弱面筋网络的强度和稳定性,使馒头或面条口感变差^[4-5]。而支链淀粉含量的增加可以提高淀粉的膨胀势,使面条质地松软^[6]。小麦籽粒中存在A型和B型两类淀粉粒,二者的物理化学性质有差别。与A型淀粉粒相比,B型淀粉粒体积较小,比表面积大,能够有效填充到面筋网络和A型淀粉粒孔隙中,从而提高面筋网络稳定性^[7],增强面团的抗伸性和硬度^[8-9]。因此,通过遗传育种、栽培等措施调控小麦淀粉组成及其理化性质对改善小麦籽粒品质有重要意义。

亚精胺是一类广泛存在于动植物体内,具有强烈生理活性的低分子质量脂肪族含氮碱,其显著影响作物的生长发育及抗逆性^[10]。亚精胺能够促进植物种子萌发及幼苗的生长,同时亚精胺浸种可提高水稻的千粒重、有效穴数、穗粒数,促进产量增加^[11]。外源亚精胺能促进小麦籽粒灌浆,提高抗氧化能力,增强小麦对高温胁迫的抵抗能力^[12-13]。此外,亚精胺能够缓解穗叶过氧化状态,优化源-库器官中糖和淀粉代谢,提高重度干旱胁迫下小麦的穗粒数^[14-15]。施用亚精胺可显著

增加干旱胁迫下小麦籽粒中直链淀粉和支链淀粉含量^[16]。施用外源亚精胺后小麦籽粒中B型淀粉增加,进而改善食物的口感^[17-18]。但是,关于外源亚精胺对小麦淀粉组成、糊化特性的影响,目前尚不清晰。

本研究拟用两个穗型不同的小麦品种西农538和大穗兰考矮早8为试验材料,在小麦籽粒灌浆期喷施不同浓度的亚精胺,探究外源亚精胺对小麦淀粉组成、粒度分布以及淀粉糊化特性的影响,筛选最适宜的亚精胺喷施浓度,为合理应用外源亚精胺改善小麦产量和品质提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于2019年10月—2020年7月在西北农林科技大学斗口农作物试验示范站($108^{\circ}52'E, 34^{\circ}36'N$)进行。该试验区海拔427.4 m,年降水量为548.6 mm,年蒸发量为427.8 mm,年平均气温 13.2°C 。播前试验地0~20 cm土层土壤有机质、全氮、速效氮、速效磷、速效钾含量分别为 $15.98\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.46\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $25.43\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $21.48\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $246.33\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH值为8.02。

供试品种为西农538和兰考矮早8。小麦于2019年10月12日播种,2020年6月1日收获。供试肥料为住商复合肥,总养分 $\geq 49\%$ (纯N $\geq 24\%$, $\text{P}_2\text{O}_5 \geq 15\%$, $\text{K}_2\text{O} \geq 10\%$),施用量为 $750\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其他措施同当地常规栽培。

试验设置0.25、0.75和 $1.00\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 3个亚精胺喷施浓度,分别用SPD1、SPD2和SPD3表示,以喷施等量清水为对照(CK)。亚精胺购于

Solarbio 公司(北京索莱宝科技有限公司)。在小麦开花后 5 d 进行叶面喷施,连喷 3 d,均于傍晚 17:00—18:00 进行,每次喷施量 $0.5\text{ L}\cdot\text{m}^{-2}$ 。喷施前溶液中加入 0.01%的(V/V)Tween-20,以增强溶液在叶片上的附着性。试验采用随机区组设计,每个处理重复 3 次,共计 24 个小区,小区面积为 4 m^2 。成熟期收获全部小麦,小麦脱粒、晾晒后放置 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 通风干燥处贮藏,用于后续指标测定。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 小麦粒重及产量测定

在成熟期,每小区收获 1 m^2 地块的小麦植株,将籽粒进行脱粒烘干,测定千粒重和实际产量。将小麦籽粒磨成面粉后过 100 目筛子,得到的面粉供后续指标测定。

1.2.2 淀粉含量测定

使用双波长法测定小麦直链淀粉和支链淀粉含量^[5]。使用仪器为紫外可见分光光度计(UV-2600A,美国尤尼柯)。支链淀粉含量测定的双波长为 554 和 754 nm,直链淀粉含量测定的波长为 480 和 631 nm。

1.2.3 淀粉粒度分布

按照李玉娟等^[19]方法提取小麦淀粉,使用激光粒度仪(Microtrac S3500 SI, Microtrac Inc. USA)测定淀粉粒的大小。

1.2.4 淀粉糊化特性

使用快速黏度仪(RVA4500, Perten, Sweden)测定小麦粉的糊化特性。设置含水量为

14%,称取 3 g 面粉到仪器的铝盒中,加水至铝盒三分之二处,用螺旋桨叶混匀。混匀后放入分析位置并固定,压下塔帽,开始分析。测定时间为 14 min。

1.3 数据分析

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据处理、SPSS 26.0 进行试验数据方差分析,采用 LSD 法比较处理间在 0.05 水平上的差异显著性。

2 结果分析

2.1 灌浆期喷施亚精胺对小麦产量的影响

灌浆期喷施亚精胺对小麦穗数和穗粒数均无显著影响,但显著影响千粒重、产量(表 1)。随着亚精胺喷施浓度的提高,两个品种(西农 538、兰考矮早 8)的千粒重和产量呈先增后减趋势,除兰考矮早 8 的 SPD3 处理千粒重显著低于 CK 外,SPD1~SPD3 处理下两个品种的千粒重和产量均显著高于 CK,且以 SPD2 处理最高,说明灌浆期喷施亚精胺可通过增加粒重提高小麦籽粒产量,其中以 $0.75\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度效果最佳。

2.2 灌浆期喷施亚精胺对小麦籽粒淀粉组成的影响

2.2.1 对小麦直链淀粉含量的影响

外源亚精胺显著影响小麦直链淀粉含量,但在两个品种上表现不同(图 1)。与 CK 相比,SPD1、SPD2、SPD3 处理下西农 538 的直链淀粉含量均显著降低,但 SPD1、SPD2、SPD3 处理间差

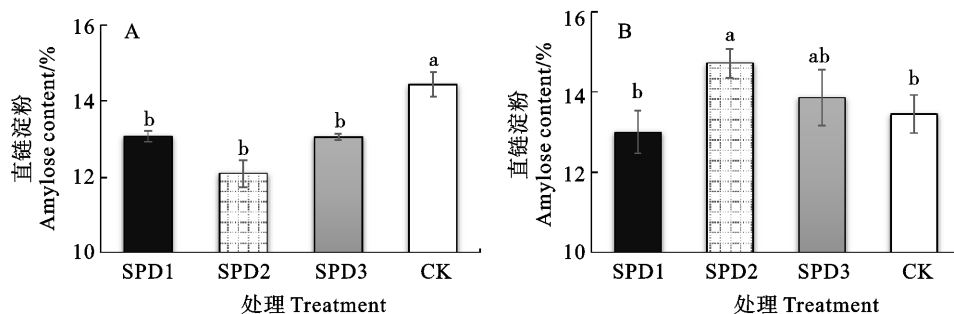
表 1 不同亚精胺处理下小麦产量及其构成因素的差异

Table 1 Difference of wheat yield and its components under different spermidine treatments

品种 Cultivar	处理 Treatment	穗数 Spike number/ ($\times 10^4\cdot\text{hm}^{-2}$)	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Grain yield/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)
西农 538 Xinong 538	CK	598.00a	29.20a	36.10c	6.30c
	SPD1	598.34a	28.90a	38.06a	6.58ab
	SPD2	599.15a	29.14a	38.18a	6.66a
	SPD3	602.12a	29.13a	37.43b	6.57b
兰考矮早 8 Lankaoaizao 8	CK	310.54a	39.47a	49.42b	6.06b
	SPD1	311.03a	39.27a	50.92a	6.22a
	SPD2	308.65a	40.03a	51.37a	6.35a
	SPD3	313.21a	39.67a	48.35c	6.01b

CK、SPD1、SPD2 和 SPD3 分别代表 0、0.25、0.75 和 $1.00\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 亚精胺喷施处理。同一品种同列数值后不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平上差异显著。下表同。

CK, SPD1, SPD2, and SPD3 represent the four spraying treatments with spermidine concentrations of 0, 0.25, 0.75, and $1.00\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. Different letters following values of same variety within the same columns indicate significant differences among different treatments at 0.05 level. The same in tables 2—4.



A: 西农 538; B: 兰考矮早 8。图柱上不同字母表示处理之间在 0.05 水平上差异显著。下图同。

A: Xinong 538; B: Lankaoizao 8. Different letters above the columns indicate significant differences among different treatments at 0.05 level. The same in figures 2 and 3.

图 1 不同亚精胺处理下小麦籽粒直链淀粉含量的差异

Fig. 1 Difference of amylose content in wheat grain under different spermidine treatments

异不显著。而兰考矮早 8 的直链淀粉含量随着亚精胺浓度的升高呈先升后降趋势,其中 SPD2 处理最高,与 CK 和 SPD1 处理间差异显著,与 SPD3 处理差异不显著。这表明小麦直链淀粉含量对灌浆期喷施亚精胺的响应与其浓度和小麦品种密切相关。

2.2.2 对小麦支链淀粉含量的影响

灌浆期喷施亚精胺对西农 538 的支链淀粉含量无显著影响,但对兰考矮早 8 的支链淀粉含量影响显著(图 2)。与 CK 相比,SPD1、SPD2、SPD3 处理下兰考矮早 8 的籽粒支链淀粉含量均显著降低,其中 SPD1 处理的降幅最大。

2.2.3 对小麦直/支比的影响

不同小麦品种的直/支比对灌浆期喷施亚精胺的响应不同(图 3)。与 CK 相比,SPD1、SPD2 和 SPD3 处理下西农 538 的直/支比均显著降低,降幅分别为 6.40%、15.01%和 10.62%。而兰考矮早 8 的直/支比在 SPD1、SPD2 和 SPD3 处理下较 CK 均显著升高,增幅分别为 6.32%、16.14%和 13.04%。

2.3 灌浆期喷施亚精胺对小麦淀粉粒度分布的影响

2.3.1 对小麦淀粉粒数目占比的影响

与 CK 相比,灌浆期喷施亚精胺后两个品种

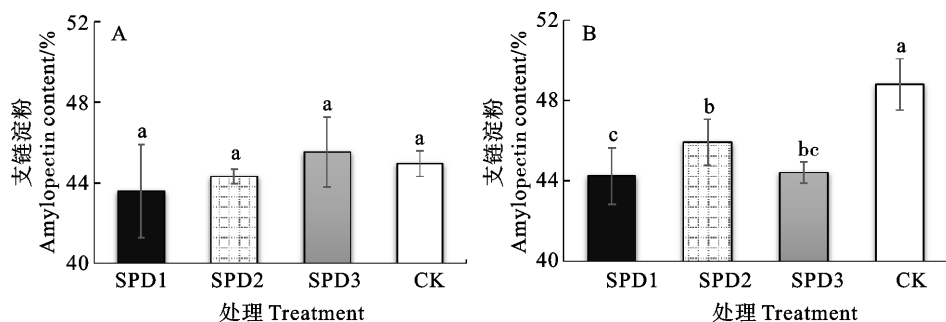


图 2 不同亚精胺处理下小麦籽粒支链淀粉含量的差异

Fig. 2 Difference of amylopectin content in wheat grain under different spermidine treatments

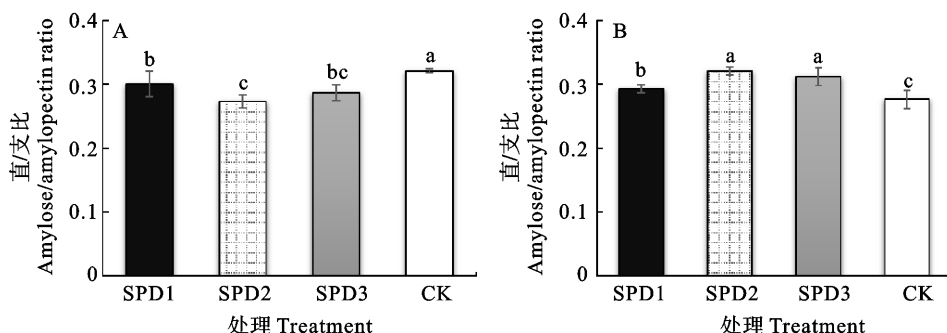


图 3 不同亚精胺处理下小麦籽粒淀粉直/支比的差异

Fig. 3 Difference of amylose/amylopectin ratio in wheat grain under different spermidine treatments

的 A 型淀粉粒数目占比不同程度降低,B 型淀粉粒数目占比提高,A/B 数目比例下降(表 2)。其中,SPD1 和 SPD3 处理下西农 538 的 3 个指标变化均显著,SPD2 处理下变化不显著;兰考矮早 8 的 3 个指标则在 SPD1、SPD2、SPD3 处理下变化均显著。这说明灌浆期喷施亚精胺可调节小麦淀粉粒数。

2.3.2 对小麦不同淀粉粒体积占比的影响

灌浆期喷施亚精胺对两个品种不同淀粉粒体积占比的影响不同(表 3)。与 CK 相比,SPD1、SPD2 处理均显著降低西农 538 的 A 型淀粉粒体积占比,显著增 B 型淀粉粒体积占比,从而使 A/B 体积比下降,而 SPD3 处理对此 3 个指标的影响均不显著;兰考矮早 8 的 A 型淀粉粒体积占比在不同处理间差异不显著,B 型淀粉粒体积占比和 A/B 体积比在 SPD1 处理下较 CK 变化不显著,在 SPD2 和 SPD3 处理下 B 型淀粉粒体积占比分别显著下降和提高,而 A/B 体积比分别显著升高和降低。这说明灌浆期喷施亚精胺对小麦淀粉粒体积占比的影响与品种和喷施浓度有关。

2.4 外源亚精胺对小麦面粉糊化特性的影响

与 CK 相比,SPD1 和 SPD2 处理显著降低西农 538 小麦面粉的最低黏度,增加糊化温度,而 SPD3 处理显著降低了峰值黏度、最低黏度、最终黏度、衰减值、回升值、峰值黏度时间和糊化温度(表 4)。喷施亚精胺总体上不同程度地提高了兰考矮早 8 峰值黏度、最低黏度、最终黏度、衰减值、回升值和糊化温度,其中 SPD2 和 SPD3 处理效果较明显,而喷施亚精胺对峰值时间影响不明显。由此说明,灌浆期喷施亚精胺对小麦淀粉糊化特性有一定的调节作用,且在不同品种的表现有差异。

表 2 不同亚精胺处理下小麦淀粉粒数目占比的差异
Table 2 Difference of wheat starch granule number ratio under different spermidine treatments

品种 Cultivar	处理 Treatment	淀粉粒数目占比 Starch granule number ratio		A/B
		A 型 Type A/%	B 型 Type B/%	
西农 538 Xinong 538	CK	56.79a	43.21b	1.31a
	SPD1	49.51b	50.49a	0.98b
	SPD2	56.05a	43.95b	1.28a
	SPD3	47.85b	52.15a	0.92b
兰考矮早 8 Lankaoaizao 8	CK	54.62a	45.38b	1.21a
	SPD1	44.82b	55.18a	0.82b
	SPD2	46.16b	53.84a	0.86b
	SPD3	47.89b	52.11a	0.92b

表 3 不同亚精胺处理下小麦淀粉粒体积占比的差异
Table 3 Difference of wheat starch granule volume ratio under different spermidine treatments

品种 Cultivar	处理 Treatment	淀粉粒体积占比 Starch granule volume ratio		A/B
		A 型 Type A/%	B 型 Type B/%	
西农 538 Xinong 538	CK	98.19a	2.04c	48.15a
	SPD1	97.24b	2.82a	36.12b
	SPD2	97.96a	2.12c	49.85a
	SPD3	97.32b	2.56b	38.06b
兰考矮早 8 Lankaoaizao 8	CK	96.89a	2.82b	34.66b
	SPD1	97.14a	2.77b	35.13b
	SPD2	97.68a	2.34c	42.48a
	SPD3	96.88a	3.39a	28.59c

表 4 外源亚精胺对小麦淀粉糊化特性的影响
Table 4 Effects of exogenous spermidine on pasting properties of wheat starch

品种 Variety	处理 Treatment	峰值黏度 Peak viscosity/cP	最低黏度 Trough viscosity/cP	衰减值 Breakdown/cP	最终黏度 Final viscosity/cP	回生值 Setback/cP	峰值时间 Peak time/min	糊化温度 Pasting temperature/℃
西农 538 Xinong 538	CK	1 168.33a	682.33a	486.00b	1 316.67a	634.33b	5.91b	89.10b
	SPD1	1 147.67a	657.67b	491.00ab	1 344.00a	686.00a	5.98ab	91.72a
	SPD2	1 171.33a	650.67b	520.67a	1 329.00a	678.33a	6.02a	92.37a
	SPD3	709.67b	268.00c	441.67c	635.33b	367.33c	5.51c	89.97b
兰考矮早 8 Lankaoaizao 8	CK	617.50b	212.00c	405.50c	508.00c	296.00c	5.47a	88.40b
	SPD1	650.50b	244.00b	406.50c	576.50b	332.50b	5.50a	90.88a
	SPD2	765.50a	331.50a	434.00b	743.00a	411.50a	5.47a	88.83b
	SPD3	768.50a	314.00a	454.50a	735.00a	421.00a	5.47a	88.38b

3 讨论

多胺类物质与植物生长发育、抵御环境胁迫等生理过程相关。在本研究中,灌浆期喷施亚精胺可通过增加千粒重提高两个小麦品种的产量,其中 $0.75 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度效果最好。这可能是由于亚精胺提高了小麦籽粒淀粉合成酶的活性,促进淀粉合成和积累,进而增加粒重^[20-21]。

小麦籽粒中淀粉约占籽粒干重的 $65\% \sim 75\%$,对小麦粉的加工和面团品质具有重要作用。小麦籽粒中的淀粉含量及其组成显著影响小麦粉的加工利用。在本研究中,在 SPD2 处理下兰考矮早 8 直链淀粉含量显著增加,这与前人研究保持一致^[16]。但西农 538 直链淀粉含量和直/支比在 SPD2 处理下均显著降低。直链淀粉含量较低或中等且直/支比较低的小麦粉制成的面条品质较好^[22]。因此,根据本研究结果,灌浆期喷施 $0.75 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 亚精胺可通过降低直链淀粉含量和直/支比改善西农 538 的面条品质。而提高兰考矮早 8 籽粒直链淀粉含量和直/支,则会有利于改善该品种在意大利面等低 GI(血糖生成指数)食品的加工品质,因为较高的直链淀粉会降低淀粉消化率和增加抗性淀粉,这对解决肥胖人群减少每日能量摄入有益^[23]。

小麦 A 型淀粉粒在花后 4 d 开始形成,B 型淀粉粒则在花后 10~12 d 开始形成^[24]。在本研究中,喷施 0.25 和 $1.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 亚精胺条件下西农 538 的 A 型淀粉颗粒数目占比和 A/B 比降低,增加 B 型淀粉粒数目占比和体积占比;喷施 0.25 、 0.75 和 $1.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 亚精胺条件下兰考矮早 8 的 B 型淀粉粒数目占比较 CK 均显著增加,A 型淀粉粒则表现为相反趋势。这与前人对 B 型淀粉粒的研究结果一致^[17]。适当增加 B 型淀粉粒占比能够优化面团网络结构,改善面团的加工品质^[25]。因此,喷施适当浓度的亚精胺可改善小麦面团结构。糊化特性是反映小麦品质的重要指标,与小麦粉的加工利用息息相关。在本研究中,喷施 0.25 和 $0.75 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 亚精胺条件下西农 538 衰减值增加,峰值黏度则无显著变化;喷施 0.75 和 $1.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 亚精胺则增加西农 538 的峰值黏度和衰减值。峰值黏度较高的小麦粉制作的面条品质较好,面条的食味、弹性等也与峰值黏度呈正相关;同时较高的衰减值也可以改善面条、馒头等面制品的品质^[9]。因此,喷施

适宜浓度的亚精胺可改善小麦的面条、馒头等制品品质。

4 结论

外源喷施亚精胺提高小麦品种西农 538 和兰考矮早 8 的粒重,进而产量增加,尤其在 $0.75 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度下。亚精胺处理使西农 538 的直链淀粉和直/支比降低,而在兰考矮早 8 上表现出相反趋势。 $0.75 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度处理使两个品种的 B 型淀粉粒体积占比均增加,有利于优化面团结构;提高了两个品种的峰值黏度和衰减值。基于此,在大田中亚精胺推荐使用喷施浓度是 $0.75 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] 黄金鑫,刘百川,展晓孟,等.全生育期增温对两个济麦系列小麦品种品质的影响[J].西北农业学报,2025,34(4):606.
HUANG J X, LIU B C, ZHAN X M, et al. Effects of warming during whole growth period on quality properties of two Jimai series wheat varieties [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2025, 34(4): 606.
- [2] 杨颖聪,张俊豪,唐一哲,等.秸秆还田和施磷量对旱地小麦籽粒淀粉及其合成相关酶活性的影响[J].作物学报,2025,51(9):2467.
YANG Y C, ZHANG J H, TANG Y Z, et al. Effects of straw returning and phosphorus application rates on grain starch and the activities of starch synthesis-related enzymes in dryland wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2025, 51(9): 2467.
- [3] 高琨,刘艳香,谭斌.小麦淀粉多尺度结构与面团筋网络形成关系的研究进展[J].食品科学,2025,46(16):362.
GAO K, LIU Y X, TAN B. Research process on the relationship between multi-scale structure of wheat starch and gluten network in dough [J]. *Food Science*, 2025, 46(16): 362.
- [4] 肖龙飞,张培文,李文阳,等.沿淮地区小麦籽粒淀粉粒度分布与糊化特性分析[J].麦类作物学报,2025,45(7):932.
XIAO L F, ZHANG P W, LI W Y, et al. Analysis of starch granule size distribution and pasting properties of wheat grain in Huai River Region [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2025, 45(7): 932.
- [5] 刘一凡,刘少帅,臧瑞,等.168份小麦种质资源品质性状分析[J].中国农业科技导报,2025,27(9):44.
LIU Y F, LIU S S, ZANG R, et al. Analysis of quality traits of 168 wheat germplasm resources [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2025, 27(9): 44.
- [6] 郭宪峰,邓红成,马栋,等.不同品质类型小麦淀粉积累动态及其面包、面条加工品质研究[J].中国种业,2024(6):117.
GUO X F, DENG H C, MA D, et al. Study on the starch accumulation dynamics in wheat of different quality types and the processing quality of bread and noodles [J]. *China Seed Industry*, 2024(6): 117.

- [7]张影全,师振强,赵 博,等.小麦粉面团形成过程水分状态及其比例变化[J].农业工程学报,2020,36(15):299.
ZHANG Y Q,SHI Z Q,ZHAO B,*et al.* Changes of water status and proportion during wheat flour dough mixing [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(15):299.
- [8]CAO X Y,TONG J Y,DING M Y,*et al.* Physicochemical properties of starch in relation to rheological properties of wheat dough(*Triticum aestivum* L.) [J]. *Food Chemistry*, 2019, 297:125000.
- [9]LI M F,LIU C,ZHENG X L,*et al.* Interaction between A-type/B-type starch granules and gluten in dough during mixing [J]. *Food Chemistry*, 2021, 358:129870.
- [10]张美微,乔江方,宋韶帅,等.干旱对夏玉米籽粒充实和生理特性的影响及其外源亚精胺调控[J].核农学报,2022,36(12):2501.
ZHANG M W,QIAO J F,SONG S S,*et al.* Effect of drought stress on grain-filling and physiological properties of summer maize and the exogenous spermidine regulation [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(12):2501.
- [11]余海兵,杨安中,熊祖煦.亚精胺浸种对水稻生长及其产量的影响[J].安徽技术师范学院学报,2002,16(4):47.
YU H B,YANG A Z,XIONG Z X. Effect of spermidine soaking seed on seedling growth and yield for rice [J]. *Journal of Anhui Technical Teachers College*, 2002, 16(4):47.
- [12]靖建国,郭 翔,俞 蓉,等.多胺对高温胁迫下小麦灌浆的影响及生理机制研究[J].种子,2020,39(7):43.
JING J G,GUO X,YU R,*et al.* Effects of polyamines on wheat grain filling under high temperature stress and its physiological mechanism [J]. *Seed*, 2020, 39(7):43.
- [13]张 凤,何恩鹏,王国元,等.外源亚精胺对生物抗逆性影响的研究进展[J].化学与生物工程,2015,32(7):1.
ZHANG F,HE E P,WANG G Y,*et al.* Research progress on effect of extrinsic spermidine on resistance of organism [J]. *Chemistry & Bioengineering*, 2015, 32(7):1.
- [14]LI J,LIANG Z M,LI Y K,*et al.* Advantageous spike-to-stem competition for assimilates contributes to the reduction in grain number loss in wheat spikes under water deficit stress [J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 292:108675.
- [15]李 娟.孕穗期干旱下多胺对小麦小花发育和穗粒数形成的调控及其生理机制[D].杨凌:西北农林科技大学,2024.
LI J. Regulation of polyamines on floret development and grain number per spike in wheat under drought at booting stage and its physiological mechanism [D]. Yangling:Northwest A&F University, 2024.
- [16]LI G G,LIANG Z M,LI Y J,*et al.* Exogenous spermidine regulates starch synthesis and the antioxidant system to promote wheat grain filling under drought stress [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2020, 42(7):110.
- [17]YANG W B,LI Y,YIN Y P,*et al.* Ethylene and spermidine in wheat grains in relation to starch content and granule size distribution under water deficit [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(10):2141.
- [18]周文银,李文阳,李浩杰,等.追氮量和种植密度对弱筋小麦品质与产量的影响[J].麦类作物学报,2025,45(4):492.
ZHOU W Y,LI W Y,LI H J,*et al.* Effects of nitrogen top-dressing and planting density on starch granule distribution and pasting properties of weak gluten wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2025, 45(4):492.
- [19]李玉娟.花后外源亚精胺喷施对小麦籽粒品质的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2021.
LI Y J. Effect of foliar application of spermidine after anthesis on the quality of wheat [D]. Yangling:Northwest A&F University, 2021.
- [20]杨婷婷,陈 娟,ABDUL Rehman,等.花后弱光对软质小麦干物质积累转运、籽粒产量和淀粉品质的影响[J].作物学报,2025,51(8):2204.
YANG T T,CHEN J,REHMAN A,*et al.* Effects of weak light post-anthesis on dry matter accumulation and translocation, grain yield, and starch quality in soft wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2025, 51(8):2204.
- [21]徐云姬,唐树鹏,简超群,等.多胺与乙烯对水稻籽粒灌浆、粒重和品质的调控作用[J].中国水稻科学,2022,36(4):327.
XU Y J,TANG S P,JIAN C Q,*et al.* Roles of polyamines and ethylene in grain filling, grain weight and quality of rice [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2022, 36(4):327.
- [22]王松刘,闫素辉,王其飞,等.施氮水平对稻茬晚播小麦籽粒淀粉含量与糊化特性的影响[J].安徽科技学院学报,2015,29(3):6.
WANG Y L,YAN S H,WANG Q F,*et al.* Effects of nitrogen rate on starch content and pasting properties in grain of late sowing wheat in rice-wheat rotation [J]. *Journal of Anhui Science and Technology University*, 2015, 29(3):6.
- [23]GIUBERTI G,ALBERTINI E,MIGGIANO G A D,*et al.* Effect of biscuits formulated with high-amylose maize flour on satiety-related sensations and food intake [J]. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 2021, 72(8):1138.
- [24]唐忠艳,陈刘明,张雯婷,等.小麦淀粉的理化特性及其对面粉加工品质的影响[J].耕作与栽培,2025(2):87.
TANG Z Y,CHEN L M,ZHANG W T,*et al.* Physicochemical properties of wheat starch and its effect on flour processing quality [J]. *Tillage and Cultivation*, 2025(2):87.
- [25]GUO L,WANG Q R,CHEN H,*et al.* Moderate addition of B-type starch granules improves the rheological properties of wheat dough [J]. *Food Research International*, 2022, 160:111748.