

网络出版时间: 2026-03-18

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1359.s.20260316.1944.013>

超强筋小麦品质提升初探: 基于面筋与淀粉 相互作用筛选重组自交系后代

郭雷^{1,2}, 陈怡菲^{1,2}, 晏帅^{1,2}, 刘秀坤¹, 李丹萍¹, 张文佳¹, 宋瑜龙²,
段小艳¹, 王灿国¹, 刘建军¹, 李豪圣¹, 高欣¹, 曹新有¹

(1. 山东省农业科学院作物研究所/小麦玉米国家工程研究中心/小麦育种全国重点实验室/农业农村部黄淮北部小麦生物学与遗传育种重点实验室/山东省小麦技术创新中心, 山东济南 250100; 2. 西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了探究将面筋与淀粉相互作用分析应用于超强筋小麦育种实践的可行性, 以济麦 44 和济麦 229 及其 20 个 F_7 重组自交系(RILs)为材料, 测定了面团的粉质特性, 筛选出 3 个稳定时间较长(H 组)和 3 个稳定时间较短(L 组)的 RILs, 研究其面筋蛋白的数量和质量、淀粉的粒度分布及面筋与淀粉相互作用。结果表明, H 组的面团形成时间和稳定时间显著高于亲本和 L 组, 这归因于其更紧密的网络结构、较高的 B 型淀粉粒占比和较强的面筋与淀粉相互作用。相关性分析结果表明, 面团形成时间和稳定时间与面筋指数、蛋白质节点数、蛋白质长度、B 型淀粉粒占比、B 型淀粉粒与 A 型淀粉粒的数目比、B/孔隙度和 B/A/孔隙度均呈显著正相关, 与孔隙度、A 型淀粉粒占比和 A/孔隙度均呈显著负相关。综上, 与济麦 44 和济麦 229 相比, H 组的面筋蛋白网络结构、B 型淀粉粒占比和面筋与淀粉相互作用明显提高; 仅需少量面粉就能完成面筋与淀粉相互作用相关参数测定, 可以用于小麦育种早代的面团品质评估。

关键词: 小麦品质; B 型淀粉粒; 面筋蛋白微观结构; 面筋与淀粉相互作用

中图分类号: S512.1; S330

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2026)04-0464-09

Study on Quality Improvement of Super-Gluten Wheat: Selection of Recombinant Inbred Lines Based on Gluten-Starch Interaction

GUO Lei^{1,2}, CHEN Yifei^{1,2}, YAN Shuai^{1,2}, LIU Xiukun¹, LI Danping¹, ZHANG Wenjia¹, SONG Yulong²,
DUAN Xiaoyan¹, WANG Canguo¹, LIU Jianjun¹, LI Haosheng¹, GAO Xin¹, CAO Xinyou¹

(1. Crop Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Research Center of Wheat and Maize/State Key Laboratory of Wheat Improvement/Key Laboratory of Wheat Biology and Genetic Improvement in North Yellow & Huai River Valley/Shandong Provincial Technology Innovation Center for Wheat, Jinan, Shandong 250100, China; 2. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to explore the feasibility of applying the gluten-starch interaction to breed super-gluten wheat variety, 20 F_7 recombinant inbred lines(RILs) derived from a cross between Jimai 44 and Jimai 229 and their parents were used as materials, and the farinograph properties of dough were measured. Three RILs with the longer stability time(Group H) and 3 RILs with the shorter stability time(Group L) were selected for further investigating the gluten protein quantity and quality, starch size distribution and gluten-starch interaction. The results showed that the Group H exhibited higher dough development time and stability time than those of their parents, which can be attributed to their tighter gluten network, higher B-type starch granule proportion and stronger gluten-starch inter-

收稿日期: 2025-05-09

修回日期: 2025-06-18

基金项目: 国家农业科技重大专项(NK20220601); 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-03-06); 山东省泰山学者工程项目(tspd20221108, tstp20240843); 济南市“新高校 20 条”资助项目(202228067); 山东省农业科学院农业科技创新工程项目(CXGC2025F01, CXGC2025E01)

第一作者 E-mail: leiguo@nwsuaf.edu.cn(郭雷)

通讯作者 E-mail: caoxinyou@126.com(曹新有); bestgaixin@126.com(高欣)

action. Correlation analysis showed that dough development time and stability time had significantly positive correlation with gluten index, protein junctions, protein length, B-type starch granule proportion, the ratio of B-type starch granules to A-type starch granules(B/A), B/lacunarity, and B/A/lacunarity, yet significantly negative correlation with lacunarity, A-type starch proportion and A/lacunarity. In summary, compared with Jimai 44 and Jimai 229, the gluten network structure, B-type starch granule proportion, and gluten-starch interaction of Group H were significantly improved. Parameters related to gluten-starch interaction determined using micro-scale flour samples can be used to assess the dough quality at an early generation in wheat breeding.

Keywords: Wheat quality; B-type starch granules; Micro-structure of gluten; Gluten-starch interaction

小麦是世界上最重要的粮食作物之一,是制作面包、馒头、面条等食品的重要原料^[1]。随着人民生活水平的提高,人们对小麦及面制品的品质提出了更高的要求,培育高产优质专用的小麦新品种已成为当前小麦育种的重要方向^[2]。小麦的品质特性可以通过面粉的粉质指标预测,稳定时间是衡量面团加工特性的重要指标,稳定时间长、面团强度高的小麦适宜制作面包^[3]。新麦 26、师乐 02-1、济麦 44 和济麦 229 凭借其优异的面包加工品质在首届黄淮麦区优质强筋小麦品种质量鉴评会上被鉴评为超强筋小麦品种。然而,中国超强筋小麦品种的占比较少,无法满足市场需求,培育更多优质超强筋小麦品种是中国小麦品质育种的重要目标之一。

小麦主要由蛋白质和淀粉组成,由醇溶蛋白和麦谷蛋白形成的面筋是面团的“骨架”,赋予小麦面团独特的粘弹性和加工特性^[4]。麦谷蛋白中的高分子量麦谷蛋白亚基(HMW-GS)是决定面筋强度和面团稳定性的关键因素,超强筋小麦品种新麦 26、师乐 02-1、济麦 44 和济麦 229 均携带优质亚基 Ax1 和 Dx5 + Dy10^[5-6]。研究发现,蛋白质和湿面筋含量高、面筋指数大的面团稳定时间长,面包烘焙性能好^[7-8]。面筋蛋白的微观结构也是影响面团稳定时间的重要因素,面筋网络紧密且均匀的面团稳定时间较长;蛋白质面积百分比、蛋白质长度、节点数、孔隙度等参数可以量化面团的微观结构^[9]。这些参数与面团的品质特性显著相关,可以用来预测面团的品质特性^[10-11]。小麦淀粉以淀粉粒形式存在于胚乳中,由直径大于 10 μm 的 A 型和小于 10 μm 的 B 型淀粉粒组成^[12]。A 型淀粉粒呈圆盘状或椭球状,B 型淀粉粒呈不规则形、球形或多边形^[13-14]。通过物理沉降法或低速离心法分离的 A 型淀粉粒的淀粉含

量和直链淀粉含量较高,而 B 型淀粉粒的蛋白质、脂质和损伤淀粉含量较高^[15]。与 B 型淀粉粒相比,A 型淀粉粒的粘度(包括峰值粘度、低谷粘度、最终粘度等)、相对结晶度和糊化焓较高^[16-17]。A 型和 B 型淀粉粒不同的理化特性导致其在总淀粉粒中的占比成为影响面团强度和面制品品质的关键参数^[18-19]。研究表明,新麦 26、济麦 44 和济麦 229 的 B 型淀粉粒占比均较高^[5,20];A 型淀粉粒会阻碍面筋网络的形成,提高 A 型淀粉粒的比例会降低面团的稳定性,而 B 型淀粉粒可以促进谷蛋白聚合体的形成,优化面团中的水分分布,提高面团的稳定性^[20-23]。为了定量表征面筋与淀粉之间的相互作用,Gao 等^[20]和 Yu 等^[21]用 A 型淀粉粒占比、B 型淀粉粒占比以及 B 型淀粉粒与 A 型淀粉粒的数目比(B/A)表征淀粉的粒度分布,用孔隙度表征面筋网络的均匀程度,建立了面筋与淀粉相互作用参数:B/孔隙度、A/孔隙度和 B/A/孔隙度,并发现 B/孔隙度和 B/A/孔隙度与面团稳定时间呈显著正相关^[20-21]。

小麦的品质主要由面筋和淀粉特性决定,提升小麦品种的品质特性可以通过提高面筋的强度、优化淀粉的粒度分布、加强面筋与淀粉相互作用等途径实现。在育种过程中,对面筋强度,尤其是对优质 HMW-GS 的选择已成为提高小麦品种品质特性的重要策略,而淀粉粒度分布和面筋与淀粉相互作用参数能否用于杂交后代的筛选还有待进一步研究。因此,本试验以济麦 44 和济麦 229 及其 F_7 代重组自交系为材料,测定面团的粉质特性,筛选出 3 个稳定时间较长的株系(H 组)和 3 个稳定时间较短的株系(L 组),研究面筋蛋白的数量和质量、淀粉的粒度分布及面筋与淀粉相互作用,并分析不同参数之间的关系,以期为优质超强筋小麦新品种的选育提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以济麦44和济麦229及其20个F₇代重组自交系(RILs)为材料,筛选出稳定时间较长的3个株系(H组,分别命名为H1、H2和H3)和稳定时间较短的3个株系(L组,分别命名L1、L2和L3)。试验材料于2023—2024年度种植于山东省农业科学院济南市历城区试验站(36°42'N, 117°05'E)。收获晾干并后熟3个月后,加入蒸馏水使籽粒含水量达到16%,充分摇匀后静置24 h,使用小型试验磨(布拉本德,德国)磨粉,面粉保存于4℃冰箱备用。

1.2 试验方法

1.2.1 面粉粉质特性测定

参考GB/T 14614-2019使用粉质仪(Farino-graph-AT, 布拉本德, 德国)测定面粉的粉质特性,指标包括吸水率、形成时间、稳定时间、弱化度和粉质质量指数,重复两次。

1.2.2 蛋白质含量、湿面筋含量和面筋指数测定

采用近红外分析仪(InfratecTM 1241, 福斯, 丹麦)测定面粉的蛋白质含量;采用面筋仪(GM2200, 波通, 瑞典)测定面团湿面筋含量和面筋指数。重复两次。

1.2.3 面筋蛋白微观结构分析

参考Yu等^[21]的方法使用激光共聚焦显微镜(IX83-FV1200, 奥林巴斯, 日本)观察并使用AngioTool64软件(版本0.6a, 国家癌症研究中心, 美国)定量分析面筋蛋白的微观结构。将2 g面粉与适量(面粉质量×吸水率)0.01 M罗丹明B溶液混和形成面团,用保鲜膜覆盖静置10 min后制片,每个样品制备两个装片,将装片倒置于显微镜载物台上,选择20×物镜,每个装片随机选择3个不同的清晰视野后放大3倍拍照,图片大小为211.55 μm×211.55 μm。使用AngioTool64软件定量分析面筋蛋白网络,使用蛋白质面积百分比、蛋白质节点数、蛋白质长度、孔隙度等指标定量表征面筋蛋白的网络结构。

1.2.4 淀粉形态结构观察和粒度分布计算

参考Liu等^[24]的方法,使用手洗法分离面筋和淀粉,淀粉悬液过100目和200目筛后加入3倍体积的无水乙醇除杂两次,淀粉在40℃烘箱中干燥24 h,用研钵研磨后过200目筛。使用导电胶将淀粉粉末粘在样品台上,喷金处理后使用钨

灯丝扫描电镜(JSM-6360LV, 日本电子株式会社, 日本)在600×下观察淀粉颗粒的形态结构,每个样品选择5个清晰的视野拍照。参考Gao等^[25]的方法,使用ImageJ软件(国立卫生研究院, 美国)标记每张照片中形态完整的淀粉颗粒,并根据比例尺计算其直径,统计A型淀粉粒数目占比(AS)、B型淀粉粒数目占比(BS)并计算B型淀粉粒与A型淀粉粒的数目比(B/A)。

1.2.5 面筋与淀粉相互作用定量分析

参考Gao等^[20]的方法,计算B/孔隙度、A/孔隙度和B/A/孔隙度,用来表征面筋与淀粉之间的相互作用。

1.3 数据处理

使用SPSS 19.0进行数据分析,使用单样本K-S检验20个RILs的粉质参数是否符合正态分布,采用单因素方差分析和最小显著差异法评估样品间的差异显著性,使用*t*测验评估L组和H组之间的差异显著性。使用Origin 2021进行相关性分析和主成分分析并绘图。

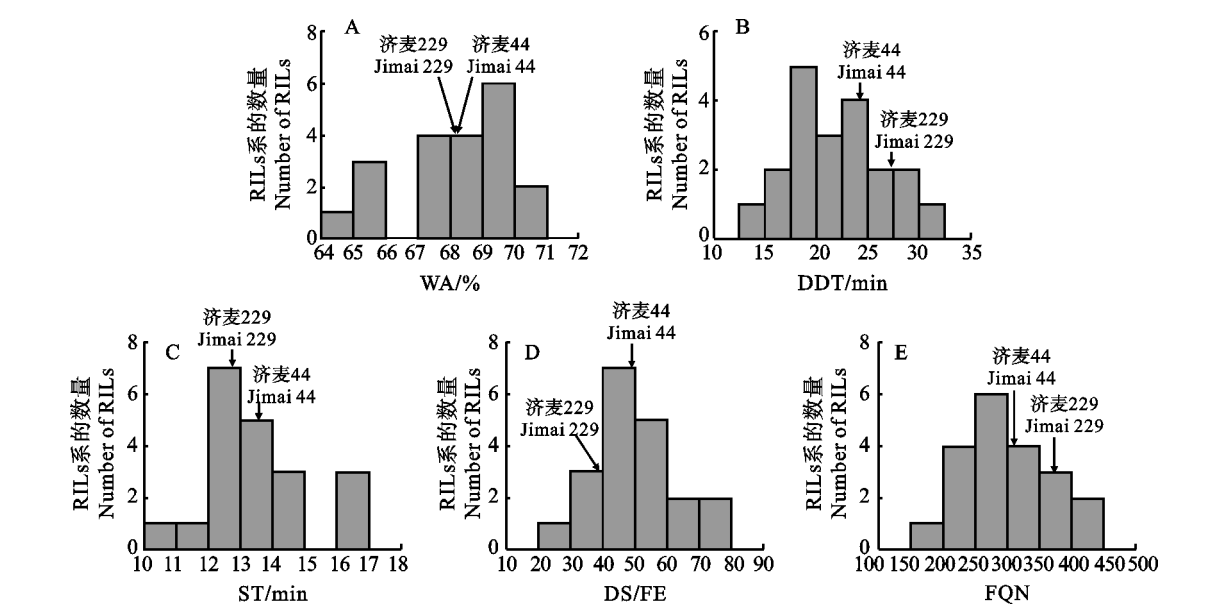
2 结果与分析

2.1 粉质特性分析

由图1可知,济麦44和济麦229的吸水率、形成时间、稳定时间和粉质质量指数均较高,说明这两个小麦品种具有优良的品质特性。20个RILs的吸水率、形成时间、稳定时间、弱化度和粉质质量指数的范围分别为64.75%~70.75%、13.51~32.30 min、10.84~16.10 min、26.5~75.5 FE和194~438,总体上呈现正态分布。L组的形成时间、稳定时间和粉质质量指数显著低于H组($P<0.05$),说明L组株系的面团强度较弱,H组株系的面团强度较强。L组株系的弱化度显著高于H组,这与已报道的“弱化度与面团强度呈负相关”^[26-27]的结论一致。两组株系的吸水率没有显著差异。

2.2 蛋白质数量和质量分析

济麦44的蛋白质含量和湿面筋含量显著高于济麦229,而后者面筋指数显著高于前者(表2)。二者间稳定时间没有显著差异(表1),推测是因为济麦44较高的蛋白质数量弥补了其蛋白质质量的相对不足,而济麦229较高的蛋白质质量弥补了其蛋白质数量的相对不足。L组株系的面筋指数显著低于H组,与H组的蛋白质含量和湿面筋含量没有显著差异。以上研究结果说明



WA:吸水率;DDT:形成时间;ST:稳定时间;DS:强化度;FQN:粉质质量指数。下同。

WA: Water absorption; DDT: Dough development time; ST: Stability time; DS: Degree of softening; FQN: Farinograph quality number. The same below.

图 1 20 个 RILs 的粉质特性分布

Fig. 1 Distribution of farinograph properties of 20 RILs

表 1 6 个 RILs 及其亲本的粉质特性						
Table 1 Farinograph properties of 6 RILs and their parents						
组别 Group	品种(系) Variety(line)	WA/%	DDT/min	ST/min	DS/FE	FQN
亲本 Parent	济麦 44 Jimai 44	68.20±0.10ab	24.12±0.06e	13.54±0.32b	49.00±2.00c	309.00±4.00c
	济麦 229 Jimai 229	68.15±0.15ab	27.35±0.15c	12.75±0.1bc	39.00±1.00d	370.00±6.00b
	平均值 Average	68.18	25.74	13.15	44.00	339.50
L 组 Group L	L1	69.50±1.50a	15.27±0.49g	10.84±0.22e	75.50±1.50a	208.00±3.00d
	L2	67.05±0.25bc	18.70±0.12f	12.10±0.15cd	58.00±1.00b	204.00±3.00d
	L3	69.00±0.2ab	13.51±0.27h	11.23±0.38de	72.50±2.50a	194.00±5.00d
	平均值 Average	68.52	15.83	11.39	68.67	202.00
H 组 Group H	H1	65.85±0.65c	29.94±0.14b	16.10±0.15a	26.50±0.50f	438.50±6.50a
	H2	69.10±0.10ab	32.30±0.48a	16.01±0.47a	33.00±1.00e	436.50±4.50a
	H3	68.55±0.05ab	26.39±0.06d	16.07±0.24a	36.00±1.00de	359.00±3.00b
	平均值 Average	67.83	29.54*	16.06*	31.83	411.33*

同列数据后不同字母表示不同品种(系)间差异显著($P<0.05$);*:L组与H组间差异显著($P<0.05$)。下同。

Values followed by different letters in the same column significant difference among samples ($P<0.05$). *: Significant difference between Group L and Group H($P<0.05$). The same in tables 2 and 3.

对于 L 和 H 这两组材料,蛋白质质量的差异是导致其粉质特性差异的主要因素。

面筋蛋白微观结构分析结果(表 2)表明,济麦 44 和济麦 229 具有紧密且均匀的网络结构, L 组株系的面筋网络中有较大的孔洞、均匀性较差,而 H 组株系的面筋网络的紧密程度与亲本相当或强于亲本(图 2)。济麦 44 与济麦 229 的

蛋白质面积百分比、蛋白质节点数、蛋白质长度和孔隙度没有显著差异,这可能是其稳定时间没有显著差异的另一个原因。H 组株系的蛋白质面积百分比、蛋白质节点数和蛋白质长度显著高于 L 组,孔隙度显著低于 L 组,这与 H 组具有较长的稳定时间和较高的面筋指数的结果一致。

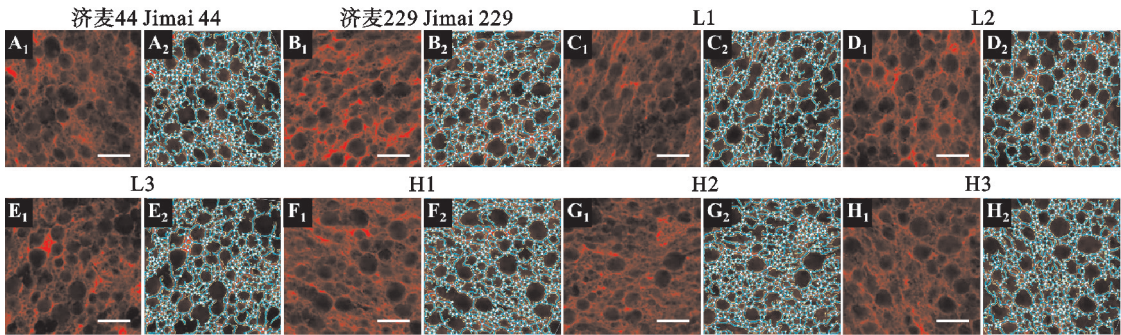
表 2 6 个 RILs 及其亲本的蛋白特性

Table 2 Protein quantity, quality and micro-structure of 6 RILs and their parents

组别 Group	品种(系) Variety(line)	PC/%	WG/%	GI/%	PPA/%	PJ	PL/(×10 ⁴ μm)	La/(×10 ⁻²)
亲本 Parents	济麦 44 Jimai 44	15.18±0.01d	34.65±0.25c	88.64±0.95c	42.23±1.59bc	619.00±20.77b	1.57±0.04ab	7.48±0.16bc
	济麦 229 Jimai 229	14.24±0.02e	31.05±0.35d	96.14±0.41a	41.05±0.93c	629.60±12.06b	1.55±0.07ab	7.19±0.19c
	平均值 Average	14.71	32.85	92.39	41.64	624.30	1.56	7.34
L 组 Group L	L1	15.63±0.01bc	40.55±0.35a	76.66±0.5d	42.12±0.90bc	559.40±18.08c	1.49±0.05c	8.38±0.22a
	L2	15.49±0.07c	34.80±0c	75.61±0.52d	41.34±0.43c	620.20±30.98b	1.56±0.04ab	7.80±0.38b
	L3	15.68±0.08b	41.95±1.45a	71.47±0.21e	41.61±0.74c	605.80±15.84b	1.55±0.04ab	7.79±0.22b
	平均值 Average	15.60	39.10	74.58	41.69	595.13	1.53	7.99 [*]
H 组 Group H	H1	14.10±0.03e	30.00±0.10d	97.41±0.64a	43.58±1.17ab	664.60±26.07a	1.63±0.06ab	7.20±0.21c
	H2	16.18±0.09a	38.3±0.10b	89.29±0.81c	44.32±1.97a	690.60±20.65a	1.68±0.06a	6.79±0.22d
	H3	15.15±0d	33.65±0.05c	91.57±0.51b	43.54±1.29ab	677.20±26.10a	1.66±0.07a	7.36±0.29c
	平均值 Average	15.14	33.98	92.76 [*]	43.81 [*]	677.47 [*]	1.66 [*]	7.12

PC:蛋白质含量;WG:湿面筋含量;GI:面筋指数;PPA:蛋白质面积百分比;PJ:蛋白质节点数;PL:蛋白质长度;La:孔隙度。下同

PC: Protein; WG: Wet gluten; GI: Gluten index; PPA: Protein percentage area; PJ: Protein junctions; PL: Protein length; La: Lacunarity. The same below.



A₁、B₁、C₁、D₁、E₁、F₁、G₁ 和 H₁ 是激光共聚焦显微镜拍的原始图片,比例尺为 50 μm;A₂、B₂、C₂、D₂、E₂、F₂、G₂ 和 H₂ 是 Angio-Tool64 软件处理后的图片,白色代表蛋白节点,绿色代表蛋白骨架,红色代表蛋白区域。

A₁, B₁, C₁, D₁, E₁, F₁, G₁, and H₁ are the original images obtained using confocal laser scanning microscopy, with the scale bar of 50 μm; A₂, B₂, C₂, D₂, E₂, F₂, G₂, and H₂ are the images processed with AngioTool64 software, with junctions shown in white, protein skeleton shown in green, and protein area shown in red.

图 2 6 个 RILs 系及其亲本面筋蛋白的微观结构

Fig. 2 Micro-structure of gluten of 6 RILs and their parents

2.3 淀粉的形态结构和粒度分布

6 个 RILs 及其亲本淀粉的形态结构如图 3 所示。济麦 44 的 B 型淀粉粒数目较多,而济麦 229 的 A 型淀粉粒数目较多;与 L 组株系相比,H 组株系的 A 型淀粉粒数目较少,B 型淀粉粒数目较多。淀粉粒度分布定量分析结果(表 3)表明,济麦 44 的 B 型淀粉粒数目占比和 B/A 显著高于济麦 229,而济麦 229 的 A 型淀粉粒数目占比显著高于济麦 44;H 组的 B 型淀粉粒数目占比和 B/A 显著高于 L 组,而 A 型淀粉粒数目占比显著低于 L 组。说明淀粉粒度分布定量分析的结果与扫描电镜观察到的淀粉粒形态结构结果一致。

2.4 面筋与淀粉相互作用分析

A 型淀粉粒体积较大,在面筋网络中产生较大

的孔隙,降低面筋网络的均匀性;B 型淀粉粒体积小,可以均匀且紧密的填充在面筋网络中,提高面团的均匀性(图 2)。对面筋与淀粉相互作用的定量分析结果(表 3)表明,济麦 44 和济麦 229 的 B/孔隙度差异不大,济麦 44 的 A/孔隙度较低、B/A/孔隙度较高,这可能与济麦 44 较高的 B 型淀粉粒占比和 B/A 有关。H 组株系的 B/孔隙度和 B/A/孔隙度显著高于 L 组(表 3),这与已有报道的“这两个参数与面团稳定时间呈正相关”^[21]的结果一致。L 组株系的 A/孔隙度高于 H 组,但差异不显著,这说明 A/孔隙度不是引起 L 组和 H 组面团品质差异的主要原因。综上,推测较高的 B 型淀粉粒占比和较低的面筋网络孔隙度使 H 组株系的面筋与淀粉相互作用力较强,导致其面团稳定时间显著优于 L 组株系。

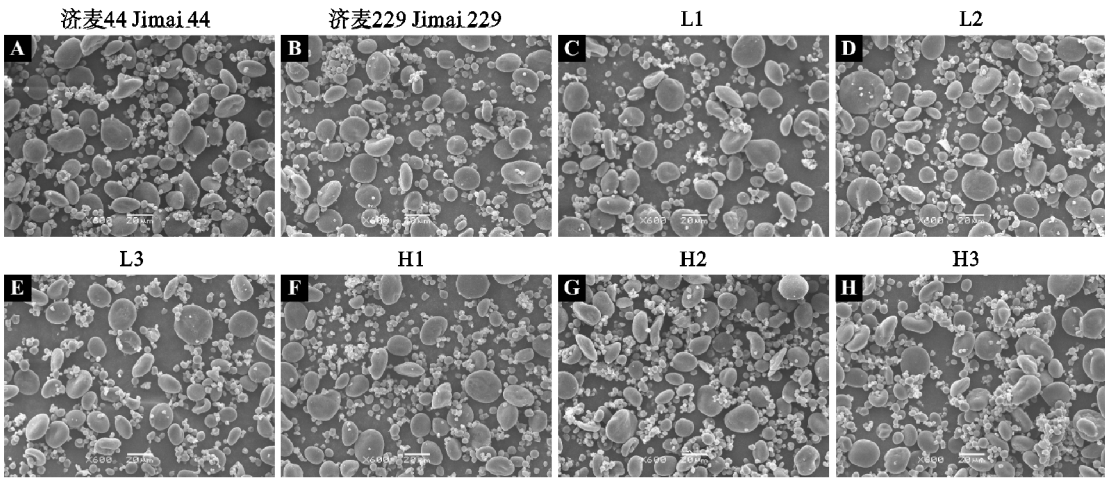


图 3 6 个 RILs 系及其亲本淀粉的形态结构

Fig. 3 Morphological structure of starch derived from the 6 RILs and their parents

表 3 6 个 RILs 系及其亲本淀粉的粒度分布

Table 3 Starch size distribution and its filling degree to gluten network of the 6 RILs and their parents

组别 Group	品种(系) Variety(line)	BS/%	AS/%	B/A	BS/La	AS/La	B/A/La
亲本 Parent	济麦 44 Jimai 44	91.82±0.69b	8.18±0.69e	11.31±0.99b	12.28	1.09	151.20
	济麦 229 Jimai 229	89.39±0.58d	10.61±0.58c	8.45±0.52cd	12.43	1.48	117.52
	平均值 Average	90.61	9.40	9.88	12.36	1.29	134.36
L 组 Group L	L1	87.92±0.23e	12.08±0.23b	7.28±0.16ef	10.49	1.44	86.87
	L2	88.84±0.69de	11.16±0.69bc	7.99±0.53de	11.39	1.43	102.44
	L3	86.36±0.71f	13.64±0.71a	6.35±0.38f	11.09	1.75	81.51
	平均值 Average	87.71	12.29 *	7.21	10.99	1.54	90.27
H 组 Group H	H1	90.48±0.5c	9.52±0.5d	9.53±0.54c	12.57	1.32	132.36
	H2	93.67±0.43a	6.34±0.43f	14.86±1.06a	13.80	0.93	218.85
	H3	91.73±0.38b	8.27±0.38e	11.12±0.55b	12.46	1.12	151.09
	平均值 Average	91.96 *	8.04	11.84 *	12.94 *	1.12	167.43 *

BS: B 型淀粉粒占比; AS: A 型淀粉粒占比; B/A: B 型淀粉粒与 A 型淀粉粒数目比; BS/La: BS/孔隙度; AS/La: AS/孔隙度; B/A/La: B/A/孔隙度。

BS: Proportion of B-type starch granules; AS: Proportion of A-type starch granules; B/A: Ratio of B-type starch granules to A-type starch granules; BS/La: BS/Lacunarity; AS/La: AS/Lacunarity; B/A/La: B/A/Lacunarity. The same below.

2.5 相关性分析和主成分分析

相关性分析结果(图 4A)表明,吸水率与湿面筋含量呈显著正相关($P<0.05$),面团形成时间、稳定时间和粉质质量指数与蛋白质含量和湿面筋含量没有显著的相关性,与面筋指数、蛋白质节点数、蛋白质长度、B 型淀粉粒数目占比、B/A、BS/孔隙度及 B/A/孔隙度呈显著正相关,而与孔隙度和 A 型淀粉粒数目占比呈显著负相关。弱化度与面团形成时间、稳定时间和粉质质量指数呈负相关,与面筋指数、蛋白质节点数、蛋白质长度、B 型淀粉粒数目占比、BS/孔隙度及 BS/A/孔隙度呈显著负相关,而与孔隙度和 A 型淀粉粒数目占比呈正相关。值得注意的是,B 型淀粉粒数目占比与蛋白质面积百分比、蛋白质节点数和蛋白质长度呈正相关,而与孔隙度呈负相关,推测 B 型淀粉粒

比例是影响面筋蛋白网络结构的重要因素。

主成分分析结果(图 4B)表明,PC1 和 PC2 的贡献率分别为 70.5%和 18.1%。图中任意两个样品位置之间的距离与它们之间的差异程度成正比^[25],L 组三个株系位于 PC1 的负半轴,H 组三个株系位于 PC1 的正半轴,两组之间的距离较远,这说明 L 组和 H 组株系差异较大。对于小麦品质相关指标,彼此相近的线是正相关的,而方向相反的线是负相关^[25]。面团形成时间、稳定时间、粉质质量指数、面筋指数、蛋白质面积百分比、蛋白质节点数、蛋白质长度、B 型淀粉粒占比、B/A、B/孔隙度和 B/A/孔隙度彼此之间呈正相关,而面团形成时间和稳定时间与弱化度和孔隙度呈负相关,这与相关性分析的结果一致。

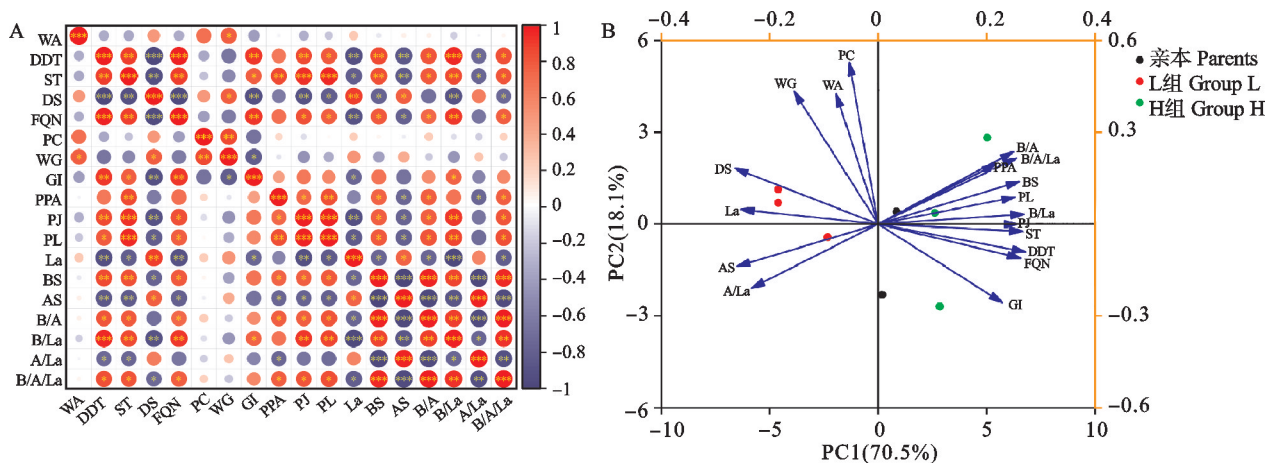


图 4 小麦品质相关参数的相关性分析(A)和主成分分析(B)

Fig. 4 Correlation analysis(A) and principal component analysis(B) of wheat quality parameters

3 讨论

3.1 超强筋小麦的品质特性和育种价值

优质小麦国家标准(GB/T 17892—2024)根据小麦的面筋含量和质量以及适宜的加工用途将小麦分为强筋、中筋和低筋三种类型,其中强筋小麦根据其品质特性分为一级强筋小麦和二级强筋小麦。一级强筋小麦要求湿面筋含量 $\geq 30\%$,稳定时间 ≥ 12 min,最大拉伸阻力 ≥ 450 EU;二级强筋小麦要求湿面筋含量 $\geq 30\%$,稳定时间 ≥ 8 min,最大拉伸阻力 ≥ 350 EU。超强筋小麦品种的评选标准为湿面筋含量 $\geq 30\%$,稳定时间 ≥ 20 min,拉伸能量 ≥ 160 cm²,稳定时间分别是一级和二级强筋小麦的 1.7 倍和 2.5 倍,是评价超强筋小麦的重要指标之一。品种审定公告中,新麦 26、师麦 02-1、济麦 44 和济麦 229 湿面筋含量和面团稳定时间两年平均值的变化范围分别为 31.8%~32.8%和 15.0~27.25 min。本研究测定的济麦 44 和济麦 229 的湿面筋含量均大于 30%,但稳定时间均小于 15 min,这可能归因于种植环境对小麦品质的影响^[28]。Zhao 等^[29]发现,在 2015—2019 年收获的新麦 26 和师麦 02-1 的面团稳定时间的变化范围分别为 3.0~33.4 min 和 2.0~27.2 min,这可能因为年际和试点间环境差异较大。因此,对超强筋小麦的评价和研究需要多年多点试验,以筛选出稳定性强的优质种质。济麦 44 和谷神麦 19 的面包品质得分并列第一,新麦 26 和师麦 02-1 的面包体积显著高于强筋小麦西农 979 和济南 17^[29]。今后的研究将聚焦 RILs 的面包品质,以期补充和拓展本研究结论。超强筋

小麦面粉不仅可以制作高品质的面包,还可以作为配粉使用,加快培育超强筋小麦品种对推进小麦供给侧改革、保障国家粮食安全意义重大。

3.2 超强筋小麦品质参数的遗传规律

由济麦 44 和济麦 229 杂交产生的 20 个 RILs 的粉质参数(包括吸水率、形成时间、稳定时间、弱化度和粉质质量指数)呈现正态分布(图 1),这与杨春雨^[27]的研究结果一致。但本研究中 RILs 的形成时间、稳定时间和粉质质量指数明显较高,这可能因为亲本的品质特性及其遗传力较高^[30]。在 20 个 RILs 中,有 2 个 RILs(L1 和 L3)的稳定时间显著低于亲本,有 15 个 RILs 的稳定时间与亲本之一没有显著差异,还有 3 个 RILs(H1、H2 和 H3)的稳定时间显著高于亲本,且这 3 个 RILs 的蛋白质面积百分比和蛋白质节点数也显著高于亲本,其中 H2 的 B 型淀粉粒数目占比、B/A、B/孔隙度和 B/A/孔隙度明显高于亲本,说明 RILs 中存在超亲变异,这可能归因于优异等位基因的聚合^[30]。因此通过超强筋品种杂交培育品质更优的超强筋小麦品种是完全可以实现的。传统小麦品质指标面筋指数、粉质特性、面包品质等的测定,通常需要大量面粉,在育种的早代通常难以进行实施^[31]。B 型淀粉粒数目占比和面筋与淀粉相互作用相关参数仅需 2 g 面粉就能完成测定,可以用于在早代(如 F₄)株系面团的品质评估。在种子量足够多时测定可面筋指数、粉质参数、拉伸参数和面包品质,以保证小麦品质评价的准确性。

3.3 超强筋小麦的品质提升策略

超强筋小麦的品质特性可以通过提高蛋白质

的数量和质量、优化淀粉的粒度分布及改善面筋与淀粉相互作用3个方面实现。蛋白质数量是小麦品质优良的基础,然而蛋白质含量与产量的负相关关系很难打破^[32],因此在蛋白质数量达标(湿面筋含量 $\geq 30\%$)的情况下,要着重提高蛋白质的质量。HMW-GS是决定蛋白质质量的关键,由于济麦44和济麦229的优质HMW-GS相同^[5],因此在本研究中没有分析RILs的HMW-GS组成。在亲本选配过程中应优先选择携带优质亚基(如Dx5+Dy10)的亲本,在后代筛选过程中应首先鉴定HMW-GS的组成,保留携带优质亚基的品系,这可以通过SDS-PAGE和分子标记结合的方法完成^[33-34]。本研究发现,RILs的B型淀粉粒数目占比、B/A与面团稳定时间正相关,这与Yu等^[21]的结果一致。Guo等^[23]还发现,提高B型淀粉粒数目占比可以促进二硫键的形成,提高SDS-不溶性谷蛋白聚合体的比例,优化面团中的水分分布,进而提高面团的稳定性。因此,在育种过程中有必要选择B型淀粉粒数目占比高的材料作为亲本,并在杂交后代中持续选择这一性状。B/孔隙度和B/A/孔隙度与面团稳定时间正相关,这与Yu等^[21]的研究结果一致。这说明虽然本研究用于相关性分析的品系较少,但结果是可靠的,在杂交后代中筛选面筋与淀粉相互作用强的品系是提高超强筋小麦品质的重要策略。综上,利用超强筋小麦杂交培育品质更优的超强筋小麦品种是完全可以实现的,面筋与淀粉相互作用参数可以应用于杂交后代筛选。

参考文献:

- [1] SHEWRY P R, HEY S J. The contribution of wheat to human diet and health [J]. *Food and Energy Security*, 2015, 4(3): 178.
- [2] 何中虎, 庄巧生, 程顺和, 等. 中国小麦产业发展与科技进步 [J]. *农学学报*, 2018, 8(1): 108.
HE Z H, ZHUANG Q S, CHENG S H, *et al.* Wheat production and technology improvement in China [J]. *Journal of Agriculture*, 2018, 8(1): 108.
- [3] MACRITCHIE F. Seventy years of research into breadmaking quality [J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 70: 123.
- [4] GOESAERT H, BRIJS K, VERAVERBEKE W S, *et al.* Wheat flour constituents: how they impact bread quality, and how to impact their functionality [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2005, 16(1-3): 18.
- [5] CAO X, TONG J, DING M, *et al.* Physicochemical properties of starch in relation to rheological properties of wheat dough (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Food Chemistry*, 2019, 297: 12500.
- [6] 贾琳琳, 王永霞, 靳晓杰. 基于 SDS-PAGE 与荧光标记检测技术的黄淮麦区小麦品种(系) HMW-GS 组成分析 [J]. *河南农业科学*, 2019, 48(11): 22.
JIA L L, WANG Y X, JIN X J. HMW-GS composition analysis of wheat varieties (lines) in Huanghuai region based on SDS-PAGE and fluorescence markers [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2019, 48(11): 22.
- [7] DOBRASZCZYK B J, MORGENSTERN M P. Rheology and the breadmaking process [J]. *Journal of Cereal Science*, 2003, 38(3): 229.
- [8] SUN X, KOKSEL F, SCANLON M G, *et al.* Effects of water, salt, and mixing on the rheological properties of bread dough at large and small deformations: A review [J]. *Cereal Chemistry*, 2002, 99(4): 710.
- [9] BERNKLAU I, LUCAS L, JEKLE M, *et al.* Protein network analysis — A new approach for quantifying wheat dough microstructure [J]. *Food Research International*, 2016, 89: 815.
- [10] 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 on the quality of wheat dough after anthesis [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020.
- [11] LI S, WANG J, DING M, *et al.* The influence of night warming treatment on the micro-structure of gluten in two wheat cultivars [J]. *Food Research International*, 2019, 116: 334.
- [12] 银永安, 齐军仓, 李卫华, 等. 小麦胚乳 A、B 型淀粉粒理化特性研究 [J]. *中国农业科学*, 2010, 43(11): 2372.
YIN Y A, QI J C, LI W H, *et al.* Physico-chemical characteristics of A, B type starch granule in wheat endosperm [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(11): 2372.
- [13] LI W, SHAN Y, XIAO X, *et al.* Physicochemical properties of A- and B-starch granules isolated from hard red and soft red winter wheat [J]. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 2013, 61: 6480.
- [14] AO Z, JANE J L. Characterization and modeling of the A- and B-granule starches of wheat, triticale, and barley [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2007, 67: 48.
- [15] SHANG J, LI L, ZHAO B, LIU M, *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: 716.
- [16] ZHANG B, LI X, LIU J, *et al.* Supramolecular structure of A- and B-type granules of wheat starch [J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 31(1): 68.
- [17] SONG X, CHEN J, DENG L, *et al.* Rheological, textural, and pasting properties of A- and B-type wheat starches in relation to their molecular structures [J]. *Food Chemistry*, 2024, 460: 140810.
- [18] GUO L, CHEN H, ZHANG Y, *et al.* Starch granules and their size distribution in wheat: Biosynthesis, physicochemi-

- cal properties and their effect on flour-based food systems [J]. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 2023, 21: 4180.
- [19] 高欣, 郭雷, 单宝雪, 等. 淀粉颗粒类型及其比例在小麦品质特性形成与改良中的作用[J]. 作物学报, 2023, 49(6): 1450.
- GAO X, GUO L, SHAN B X, *et al.* Types and ratios of starch granules in grains and their roles in the formation and improvement of wheat quality properties [J]. *Acta Agromonica Sinica*, 2023, 49(6): 1450.
- [20] GAO X, TONG J, GUO L, *et al.* Influence of gluten and starch granules interactions on dough mixing properties in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 106: 105885.
- [21] YU L, GUO L, LIU Y, *et al.* Novel parameters characterizing size distribution of A and B starch granules in the gluten network: Effects on dough stability in bread wheat [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 257: 117623.
- [22] LI M, LIU C, ZHENG X, *et al.* Interaction between A-type/B-type starch granules and gluten in dough during mixing [J]. *Food Chemistry*, 2021, 358: 129870.
- [23] GUO L, WANG Q, 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.
- [24] LIU T, GAO X, LI L, *et al.* Effects of HMW-GS at *Glu-B1* locus on the polymerization of glutenin during grain development and on the secondary and micro-structures of gluten in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 72: 102.
- [25] GAO L, VAN BOCKSTAELE F, LEWILLE B, *et al.* Characterization and comparative study on structural and physicochemical properties of buckwheat starch from 12 varieties [J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 137: 108320.
- [26] SINGH N, VIRDI A S, KATYAL M, *et al.* Evaluation of heat stress through delayed sowing on physicochemical and functional characteristics of grains, whole meals and flours of India wheat [J]. *Food Chemistry*, 2021, 344: 128725.
- [27] 杨春雨. 小麦主要面团品质性状的定位分析及优质材料筛选[D]. 泰安: 山东农业大学, 2024.
- YANG C Y. QTL mapping and GWAS of wheat dough quality characters and screening of high quality materials [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2024.
- [28] STUDNICKI M, WIJATA M, SOBCZYŃSKI G, *et al.* Effect of genotype, environment and crop management on yield and quality traits in spring wheat [J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 72: 30.
- [29] ZHAO J, JIN S, ZHANG Q, *et al.* Characterization of four Chinese bread wheat varieties over five years [J]. *ACS Food Science & Technology*, 2021, 1(5): 770.
- [30] LI Z, LI X, LIU S, *et al.* Identification and validation of quantitative trait loci for seven quality-related traits in common wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2025, 138: 57.
- [31] MICHEL S, KUMMER C, GALLEE M, *et al.* Improving the baking quality of bread wheat by genomic selection in early generations [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2017, 131(2): 478.
- [32] LAIDIG F, PIEPHO H, RENTEL D, *et al.* Breeding progress, environmental variation and correlation of winter wheat yield and quality traits in German official variety trials and on-farm during 1983–2014 [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2017, 130: 223.
- [33] 张海龙, 宋鹏博, 张傲琰, 等. 57份陕西新育成小麦品种(系) HMW-GS组成及品质分析[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(12): 1579.
- ZHANG H L, SONG P B, ZHANG A Y, *et al.* HMW-GS composition and quality analysis of 57 new Shaanxi wheat varieties (lines) [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(12): 1579.
- [34] RAVEL C, FAYE A, BEN-SADOUN S, *et al.* SNP markers for early identification of high molecular weight glutenin subunits (HMW-GSs) in bread wheat [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2020, 133: 751.