

九份不同类型小麦品种的品质特性解析

朱文琰¹, 张玉珍¹, 钟涛¹, 唐改娟², 张立强³,
陈静³, 孙凤丽¹, 奚亚军¹, 张超¹

(1. 西北农林科技大学农学院/作物抗逆与高效生产全国重点实验室, 陕西杨凌 712100;
2. 陕西省杂交油菜研究中心, 陕西杨凌 712100; 3. 宝鸡市陇县种子工作站, 陕西宝鸡 721000)

摘要:为探究不同类型小麦品种品质特性形成机制,以近几年审定的黄淮海主产麦区的强筋小麦伟隆169、紫色小麦稷麦8号和中筋小麦西农100等9个品种及国家小麦区试对照品种周麦36为供试材料,分析籽粒营养品质、加工品质、高分子量谷蛋白亚基组成及品质形成相关基因之间的差异。结果表明,伟隆169的谷醇比值最大(1.84),西农112的谷蛋白大聚体含量最高(11.51%),西农136的总淀粉含量最高(80.69%),西农106的直链淀粉含量最高(39.55%),西农100的支链淀粉含量最高(43.18%),所测中筋小麦品种(除稷麦8号外)的B型淀粉含量均高于87.64%。西农112的蛋白质面积百分比、节点数、节点密度等指标均显著高于伟隆169($P < 0.05$),稷麦8号的总巯基和二硫键含量最高($20.01 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, $7.24 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$),西农109、西农136的损耗正切值最小。除西农100、西农109、西农112外,其他品种在*Glu-A1*、*Glu-B1*、*Glu-D1*位点上均检测到优质亚基;供试小麦品种的优质基因的等位变异数目为6~10。综上所述,不同类型小麦品种的品质特性差异显著;西农100等中筋小麦品种在所测的营养品质和加工品质指标表现突出;强筋小麦品种伟隆169和紫色小麦品种稷麦8号均含有优质亚基组合(Ax1、Bx7+By8、Dx5+Dy10),所测优异等位变异数目最多,品质遗传变异丰富。

关键词: 小麦; 营养品质; 加工品质; 优质强筋; 遗传基础

中图分类号: S512.1; S330

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2025)10-1351-12

Analysis of Quality Characteristics of Nine Wheat Varieties with Different Types

ZHU Wenyan¹, ZHANG Yuzhen¹, ZHONG Tao¹, TANG Gaijuan², ZHANG Liqiang³,
CHEN Jing³, SUN Fengli¹, XI Yajun¹, ZHANG Chao¹

(1. College of Agronomy, Northwest A&F University/State Key Laboratory for Crop Stress Resistance and High-Efficiency Production, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Hybrid Rapeseed Research Center of Shaanxi Province, Yangling, Shaanxi, 712100, China; 3. Long County Seed Management Station, Baoji, Shaanxi 721000, China)

Abstract: To investigate the mechanisms underlying the formation of quality traits in different wheat types, this study utilized nine wheat varieties recently approved for cultivation in the Huang-Huai-Hai wheat-growing region. These included a strong-gluten wheat cultivar Weilong 169, a purple wheat cultivar Jimai 8, a medium-gluten wheat cultivar Xinong 100, along with the national standard control variety Zhoumai 36. Grain nutritional quality, processing quality, high-molecular-weight glutenin subunit (HMW-GS) composition, and quality-related gene differences were analyzed. The results showed that Weilong 169 exhibited the highest gliadin-to-glutenin ratio (1.84), while Xinong 112 had the highest glutenin macropolymer (GMP) content (11.51%). Among the varieties, Xinong 136 displayed the highest total starch content (80.69%); Xinong 106 had the highest amylose content (39.55%),

收稿日期: 2024-10-08

修回日期: 2024-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(32370400); 杨凌示范区青年育种专家培育支持计划项目(2022)

第一作者 E-mail: 18306536728@163.com (朱文琰)

通讯作者 E-mail: ahzc2009@163.com (张超)

and Xinong 100 had the highest amylopectin content (43.18%). All medium-gluten wheat varieties (except Jimai 8) exhibited B-type starch content above 87.64%. Protein percentage area, junction count, and junction density in Xinong 112 were significantly higher than those in Weilong 169 ($P < 0.05$). Jimai 8 showed the highest total sulfhydryl and disulfide bond contents ($20.01 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ and $7.24 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively). Furthermore, Xinong 109 and Xinong 136 had the lowest loss tangent values. For HMW-GS, high-quality subunits were detected at the *Glu-A1*, *Glu-B1* and *Glu-D1* loci in all varieties except Xinong 100, Xinong 109 and Xinong 112. The number of superior allelic variations among the tested varieties ranged from six to ten. In conclusion, significant differences in quality traits were observed among the wheat varieties. Medium-gluten wheat varieties, such as Xinong 100, demonstrated superior performance across various nutritional and processing quality indicators. Strong-gluten wheat (Weilong 169) and purple wheat (Jimai 8) possessed high-quality subunit combinations (Ax1, Bx7+By8, Dx5+Dy10) and the largest number of superior allelic variations, reflecting rich genetic diversity in quality-related traits.

Keywords: Wheat; Nutritional quality; Processing quality; High-quality strong gluten; Genetic basis

小麦 (*Triticum aestivum* L.) 是世界三大粮食作物之一, 具有丰富的营养价值^[1]。中国对小麦品质研究相比美国、加拿大、澳大利亚及欧洲等主要小麦出口国较晚^[2]; 国产小麦品质难以满足市场的需求, 优质小麦原料仍需要大量进口, 小麦品质改良与产量提升仍是中国小麦生产的重要任务^[3]。小麦品质可以分为营养品质和加工品质, 营养品质包含蛋白质、淀粉、糖类、脂类、矿物质等物质的含量^[4]; 加工品质指小麦籽粒和面粉对制粉和不同面食制品的适合性, 主要受面粉蛋白质和淀粉及其组分含量的影响^[5-6]。蛋白质和淀粉是小麦籽粒的重要组成, 蛋白质及其组分含量影响小麦的营养品质和加工品质, 如清蛋白和球蛋白含有丰富的氨基酸种类, 醇溶蛋白与谷蛋白可形成面筋结构影响面团流变学特性^[7-9]; 淀粉及其组分含量显著影响小麦加工品质, 如直链淀粉含量与面条的质构特性有显著相关性^[10-11]。淀粉理化性质包括粒度分布和糊化特性, 其中淀粉粒度分布影响面团的稳定性, 糊化特性是反映淀粉品质的重要指标^[12-13]。面团结构特性与二硫键、面筋结构稳定性有关, 面筋蛋白通过二硫键 (-S-S-) 交联形成面筋网络结构, 对面制品产生影响^[14]。面筋微观结构中的孔隙度参数可以反映面筋网络孔洞的均一性, 与面团稳定时间呈负相关^[15]。面团流变学特性直接影响面制品加工特性, 被作为品质育种的重要指标^[16]。

目前, 针对小麦品质相关基因的检测已有很多研究, 如 Rasheed 等^[17] 开发了小麦适应性、产量、品质及胁迫抗性相关基因的 KASP (kompeti-

tive allele specific PCR) 分子标记。国内已有多人利用 KASP 分子标记对大量小麦品种进行品质相关基因的检测^[18-20]。包括小麦-黑麦易位系基因 *IB·1R*, 硬度基因 *Pina*、*Pinb*, 谷蛋白亚基基因 *Glu-Ax1*、*Glu-Bx7*、*Glu-By8*、*Glu-Bx7^{OE}*、*Glu-Dx5*、*Glu-Dy10*、*Glu-B3g*, 与色泽相关的多酚氧化酶基因 (*PPO*)、过氧化物酶基因 (*POD*)、八氢番茄红素合成酶基因 (*PSY*)、 ζ -胡萝卜素脱氢酶基因 (*ZDS*)、八氢番茄红素脱氢酶基因 (*PDS*)、番茄红素基因 (*LCY*) 等^[21-25]。上述基因对面筋质量、出粉率、面制品颜色等品质指标有重要影响。但聚合优异等位变异的品种检出率较低^[19-20]。了解现有小麦品质遗传特性对品质改良具有重要意义。

因此, 本研究选用最新审定的国审和省审不同品质类型的小麦品种, 从生理、形态和遗传角度分析其品质特性, 揭示优质小麦的品质形成机制, 以为小麦品质改良提供参考。

1 材料与方 法

1.1 材料与种植

本试验所用材料由农业农村部西北地区小麦生物学与遗传育种重点实验室提供, 具体品种信息如表 1 所示。

试验材料于 2022—2023 年在陕西省杨凌示范区杜寨试验田种植, 采用随机区组设计, 机播, 行长 2 m, 行距 0.25 m, 小区面积 15 m², 3 次重复, 常规田间栽培管理。小麦成熟期收获籽粒, 储藏两个月完成后熟后进行品质测定。

表 1 供试小麦品种信息

Table 1 Information of the tested wheat varieties

供试材料 Tested material	审定编号 Approval number	品质类型 Quality type	备注 Note
周麦 36 Zhoumai 36	国审 20180042 National approval 20180042	强筋 Strong gluten	对照品种 Control variety
稷麦 8 号 Jimai 8	陕审 20230026 Shaanxi approval 20230026	中筋 Medium gluten	紫色小麦 Purple wheat
伟隆 169 Weilong 169	国审 20200064 National approval 20200064	强筋 Strong gluten	
西农 100 Xinong 100	国审 20200076 National approval 20200076	中筋 Medium gluten	
西农 106 Xinong 106	陕审 2020001 Shaanxi approval 2020001	中筋 Medium gluten	
西农 109 Xinong 109	陕审 2018010 Shaanxi approval 2018010 豫引种 2018-031 Henan introduction 2018-031 皖审 20210011 Anhui approval 20210011	中筋 Medium gluten	
西农 112 Xinong 112	国审 20230116 National approval 20230116	中筋 Medium gluten	
西农 115 Xinong 115	国审 20230117 National approval 20230117	中筋 Medium gluten	
西农 119 Xinong 119	陕审 20220014 Shaanxi approval 20220014	中筋 Medium gluten	
西农 136 Xinong 136	陕审 20220004 Shaanxi approval 20220004	中筋 medium gluten	

品质类型参照《农作物品种—小麦审定标准(国家级)2017年》。

Wheat quality types refer to “Approval Standards for Crop Varieties-Wheat(National Level) 2017”.

1.2 测定指标与方法

1.2.1 小麦营养品质检测

蛋白质及其组分含量检测:称取 2 g 小麦籽粒,用研钵磨碎,过 100 目筛,置于 4 °C 冰箱保存待用。参照王磊磊等^[26]的方法提取蛋白质及其组分,用全自动定氮仪(KjeltecT, Foss, Denmark)测定氮含量,蛋白质及其组分含量用对应的氮含量乘以 6.5 获得。谷蛋白大聚体(glutenin macropolymer, GMP)的含量检测参照张平平等^[27]的方法。重复 3 次。

淀粉及其组分含量的检测:取 1~2 粒种子,用研钵磨碎,称取 0.03 g,用淀粉含量检测试剂盒(索莱宝生物)参照说明测定总淀粉含量;使用全自动直链淀粉检测仪(Futura 3, Italy)测定直链淀粉含量;支链淀粉含量为总淀粉含量与直链淀粉含量的差值。重复 3 次。

1.2.2 小麦加工品质检测

小麦淀粉的提取、淀粉颗粒观察、粒径和糊化特性检测参照 Bhat 和 Riar^[28]的方法。淀粉颗粒形态使用台式扫描电子显微镜观察(SEM, model TM4000 Plus, Japan),淀粉的粒径使用激光粒度分析仪(Microtrac SYNC, USA)检测。淀粉的糊化特性使用快速粘度分析仪(RVA 4500, Australia)检测。重复 3 次。

面筋蛋白微观结构观察与分析参照 Guo 等^[29]的方法,使用激光共聚焦显微镜(IX83-FV1200, Olympus, Japan)进行观察。

面筋的制备参照徐小青的方法^[30]。巯基含量和二硫键含量的测定参照 Li 等^[31]的方法。重

复 3 次。

面团流变学特性参照 Guo 等^[32]的方法,使用旋转流变仪(DHR-1, Waters, USA)检测,重复 3 次。

利用十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳(SDS-PAGE)对 HMW-GS 的组成进行分析, HMW-GS 的提取参照张俊杰^[33]的方法。选用的对照品种为中国春(Null, 7+8, 2+12)、烟农 19(1, 17+18, 5+10)、小偃 6 号(1, 14+15, 2+12)、矮抗 58(1, 7+8, 4+12)。重复 3 次。

1.2.3 品质相关基因的检测

取 10 粒饱满的种子置于带有湿润滤纸的培养皿中培养,至两叶一心期,取幼嫩叶片采用 CTAB 法提取基因组 DNA。DNA 质检参照刘霞等^[20]的方法,使用 NanoDrop ND1000(USA)检测 DNA 浓度。DNA 样品委托北京嘉程生物科技有限公司进行 KASP 标记检测,引物设计参考 Rasheed 等^[17]的方法,基因及相关信息见表 2。重复 3 次。

1.3 数据统计与分析

采用 SPSS 26.0 进行数据分析,用 LSD 和 Duncan 法进行方差分析和多重比较,利用 PowerPoint 2010、Excel 进行数据可视化。

2 结果与分析

2.1 籽粒营养品质特性分析

2.1.1 蛋白质及其组分含量分析

不同类型小麦品种间蛋白质及其组分含量存在显著差异($P < 0.05$)。清蛋白含量为 2.99%~4.16%,其中伟隆 169 最低,周麦 36

最高, 稷麦 8 号显著高于伟隆 169 和其他中筋品种。球蛋白含量为 1.52%~2.05%, 西农 106 和周麦 36 显著高于其他品种, 西农 100 最低。醇溶蛋白含量为 3.35%~4.88%, 西农 100 最高, 显著高于周麦 36 和其他品种, 西农 115 最低。谷蛋白含量为 4.64%~6.42%, 周麦 36 最高, 西农 100 最低。总蛋白质含量为 14.17%~19.40%, 周麦 36 最高, 西农 115 最低, 西农 109 显著高于伟隆 169 和其他中筋品种。谷醇比为

0.95%~1.84%, 伟隆 169 最高, 西农 100 最低。GMP 含量为 6.46%~11.51%, 西农 112 最高, 西农 100 最低(表 3)。综上, 强筋小麦品种伟隆 169 的清蛋白和球蛋白含量显著低于中筋品种, 谷醇比显著高于中筋品种; 西农 109 的醇溶蛋白和谷蛋白含量高于其他中筋品种和紫色小麦品种稷麦 8 号; 稷麦 8 号和西农 100、西农 112、西农 109 等中筋品种的总蛋白含量高于强筋小麦品种伟隆 169。

表 2 品质相关基因 KASP 标记
Table 2 KASP markers relative to the quality related genes

性状 Trait	基因 Gene	引物名称 Primer	FAM(Call)	HEX(Call)	FAM 基因型 FAM genotype	HEX 基因型 HEX genotype	优异等位变异 Superior allelic variation
小麦-黑麦易位系 Wheat rye translocation line	<i>1B·1R</i>	1RS;1BL_6110	G	A	<i>1BL·1BS</i>	<i>1BL·1RS</i>	<i>1BL·1BS</i>
谷蛋白亚基 Glutenin subunit	<i>Glu-A1</i>	gluA1.1_1883	A	G	<i>1/2*</i>	<i>null</i>	<i>1/2*</i>
	<i>Glu-B1</i>	gluB1	G	C	<i>Non 7^{OE}</i>	<i>Glu-Bx7^{OE}</i>	<i>Glu-Bx7^{OE}</i>
	<i>Glu-B1</i>	By18_1976	A	G	<i>17+18</i>	<i>non 17+18</i>	<i>17+18</i>
	<i>Glu-D1</i>	GluD1_4777	T	G	<i>2+12</i>	<i>5+10</i>	<i>5+10</i>
色泽 Colour and lustre	<i>Glu-B3</i>	Glu-B3g_SNP	G	A	<i>NON Glu-B3g</i>	<i>Glu-B3g</i>	<i>Glu-B3g</i>
	<i>TaPpo-D1</i>	Ppo-D1	G	C	<i>TaPpo-D1b</i>	<i>TaPpo-D1a</i>	<i>TaPpo-D1a</i>
	<i>Ppo-A1</i>	PpoA1	T	A	<i>TaPpo-A1a</i>	<i>TaPpo-A1b</i>	<i>TaPpo-A1b</i>
	<i>TaPod-A1</i>	TaPod-A1	G	A	<i>TaPod-A1a</i>	<i>TaPod-A1b</i>	<i>TaPod-A1b</i>
	<i>TaPsy-D1</i>	PsylDa-g	G	A	<i>TaPsy-D1a</i>	<i>TaPsy-D1b</i>	<i>TaPsy-D1a</i>
	<i>TaPsy-A1</i>	PsyA1	C	A	<i>TaPsy-A1b</i>	<i>TaPsy-A1a</i>	<i>TaPsy-A1b</i>
	<i>TaZds-A1</i>	Zds-A1	G	C	<i>TaZds-A1a</i>	<i>TaZds-A1b</i>	<i>TaZds-A1a</i>
	<i>TaPds-B1</i>	TaPds-B1	C	G	<i>TaPds-B1b</i>	<i>TaPds-B1a</i>	<i>TaPds-B1b</i>
	<i>TaLcy-B1</i>	TaLcyB1	C	G	<i>TaLcy-B1a</i>	<i>TaLcy-B1b</i>	<i>TaLcy-B1b</i>
硬度 Hardness	<i>Pinb-D1</i>	Pinb-D1_INS	C	T	<i>Pina-D1a (soft)</i>	<i>Pinb-D1b (hard)</i>	<i>Pinb-D1b</i>
	<i>Pina-D1</i>	Pina-D1_INS	A	G	<i>Pina-D1a (soft)</i>	<i>Pina-D1b (hard)</i>	<i>Pina-D1b</i>
	<i>Pinb2-V2</i>	Pinb2-Bv2	G	C	<i>Pinb-B2a</i>	<i>Pinb-B2b</i>	<i>Pinb-B2b</i>

FAM 是羧基荧光素 (carboxyfluorescein); HEX 是六氯荧光素 (hexachlorofluorescein); 二者是与荧光检测仪器兼容的不同荧光基团。

FAM is carboxyfluorescein; HEX is hexachlorofluorescein; The two are different fluorescent groups compatible with fluorescence detection instruments.

表 3 籽粒蛋白质及其组分含量分析
Table 3 Analysis of grain protein and its component content

品种 Variety	清蛋白含量 Albumin content/%	球蛋白含量 Globulin content/%	醇溶蛋白含量 Gliadin content/%	谷蛋白含量 Glutenin content/%	总蛋白含量 Protein content/%	谷醇比 Ratio of glutenin to gliadin	GMP 含量 GMP content/%
周麦 36 Zhoumai 36	4.16±0.01a	2.05±0.05a	4.31±0.11c	6.42±0.02a	19.40±0.06a	1.49±0.04c	9.25±0.42b
伟隆 169 Weilong 169	2.99±0.01g	1.63±0.02f	3.37±0.02f	6.19±0.02b	16.10±0.12e	1.84±0.00a	8.06±0.40bcd
西农 109 Xinong 109	3.82±0.02c	2.03±0.07a	4.78±0.01b	5.69±0.04d	17.47±0.09b	1.19±0.01g	8.44±2.55bc
稷麦 8 号 Jimai 8	4.15±0.10a	1.71±0.02de	4.73±0.01b	4.91±0.01f	17.21±0.09c	1.04±0.00h	7.50±0.50bcd
西农 100 Xinong 100	3.23±0.00e	1.52±0.08g	4.88±0.07a	4.64±0.03h	16.25±0.20e	0.95±0.01i	6.46±0.72d
西农 106 Xinong 106	4.03±0.01b	2.05±0.05a	3.82±0.03e	4.84±0.01fg	16.58±0.06d	1.27±0.01f	8.31±1.58bcd
西农 112 Xinong 112	3.43±0.02d	1.85±0.03c	3.80±0.06e	5.95±0.07c	16.11±0.07e	1.57±0.04b	11.51±1.21a
西农 115 Xinong 115	3.47±0.01d	1.66±0.02ef	3.35±0.07f	4.77±0.03g	14.17±0.04g	1.42±0.04d	8.81±0.53b
西农 119 Xinong 119	3.11±0.10f	1.75±0.01d	3.97±0.04d	5.48±0.07e	15.43±0.19f	1.38±0.00e	6.70±0.59cd
西农 136 Xinong 136	3.78±0.08c	1.94±0.02b	3.92±0.02d	4.80±0.08g	16.60±0.17d	1.23±0.01g	6.85±1.03cd

同列数据后不同字母表示品种间差异在 0.05 水平显著。下同。

Different letters following data in the same columns indicate significant difference among varieties at 0.05 level. The same in tables 4-7.

2.1.2 淀粉及其组分含量分析

不同类型小麦品种籽粒淀粉及其组分含量存在显著差异($P < 0.05$)。淀粉含量的变化范围为 77.26%~80.69%, 西农 136 最高, 周麦 36 显著低于其他供试品种。直链淀粉含量的变化范围为 35.50%~39.55%, 西农 106 最高, 西农 100 最低, 西农 106、西农 112、西农 119、西农 136 等中筋品种的直链淀粉含量显著高于伟隆 169。支链淀粉含量的变化范围为 40.14%~43.18%, 西农 100 的最高, 周麦 36 的最低, 稷麦 8 号、西农 100、

西农 136 等品种的支链淀粉含量显著高于伟隆 169。直支比的变化范围为 0.82~0.98, 西农 100 最低, 西农 106 最高(表 4)。结果表明, 强筋小麦伟隆 169 与部分中筋小麦品种的淀粉指标间存在显著差异; 稷麦 8 号和西农 106、西农 115、西农 119、西农 136 的淀粉含量显著高于伟隆 169, 西农 106、西农 112、西农 115、西农 119、西农 136 的直链淀粉含量较高, 稷麦 8 号和西农 100、西农 136 的支链淀粉含量较高, 西农 106、西农 112、西农 115、西农 119 的直支比较高。

表 4 籽粒淀粉及其组分含量分析

Table 4 Analysis of grain starch and its component content

品种 Variety	淀粉含量 Starch content/%	直链淀粉含量 Amylose content/%	支链淀粉含量 Amylopectin content/%	直支比 Ratio of amylose to amylopectin
周麦 36 Zhoumai 36	77.26±0.20e	37.12±0.22d	40.14±0.04f	0.92±0.01b
伟隆 169 Weilong 169	78.69±0.03d	36.96±0.37d	41.73±0.40cd	0.89±0.02c
西农 109 Xinong 109	78.90±0.22cd	36.78±0.61d	42.12±0.82bc	0.87±0.03cd
稷麦 8 号 Jimai 8	79.63±0.21bc	36.62±0.29d	43.01±0.08a	0.85±0.01d
西农 100 Xinong 100	78.68±0.16d	35.50±0.33e	43.18±0.48a	0.82±0.02e
西农 106 Xinong 106	79.95±0.09b	39.55±0.49a	40.40±0.55ef	0.98±0.03a
西农 112 Xinong 112	79.37±0.25bcd	38.81±0.06b	40.56±0.19ef	0.96±0.00a
西农 115 Xinong 115	80.07±0.38ab	38.97±0.12ab	41.10±0.49de	0.95±0.01ab
西农 119 Xinong 119	79.88±0.25b	39.00±0.18ab	40.89±0.43ef	0.95±0.01ab
西农 136 Xinong 136	80.69±0.34a	37.86±0.42c	42.83±0.16ab	0.88±0.01c

2.2 小麦加工品质特性分析

2.2.1 淀粉理化性质分析

2.2.1.1 淀粉粒径分析

从扫描电子显微镜图像(图 1)可以看出, 小麦品种间的淀粉粒形态均没有明显差异。通过激光粒度分析仪进行定量分析, 发现 B 型淀粉粒占比变化范围为 87.51%(稷麦 8 号)~96.75%(西农 136), A 型淀粉粒占比则与之相反。B/A 的变化范围为 7.01%~33.59%, 品种之间差异显著($P < 0.05$), 西农 136 最高, 稷麦 8 号最低。D(4, 3)的变化范围为 16.04%~26.60%, 西农 109 最高, 西农 136 最低(表 5)。这些结果表明, 除紫色小麦稷麦 8 号外, 其他中筋品种的 B 型淀粉粒占比均显著高于伟隆 169, 稷麦 8 号的 B 型淀粉粒占比和 B/A 低于周麦 36 和其他中筋小麦品种; 西农 109 的 B 型淀粉粒占比、B/A 和体积比平均值较高, 而 A 型淀粉粒占比较低。

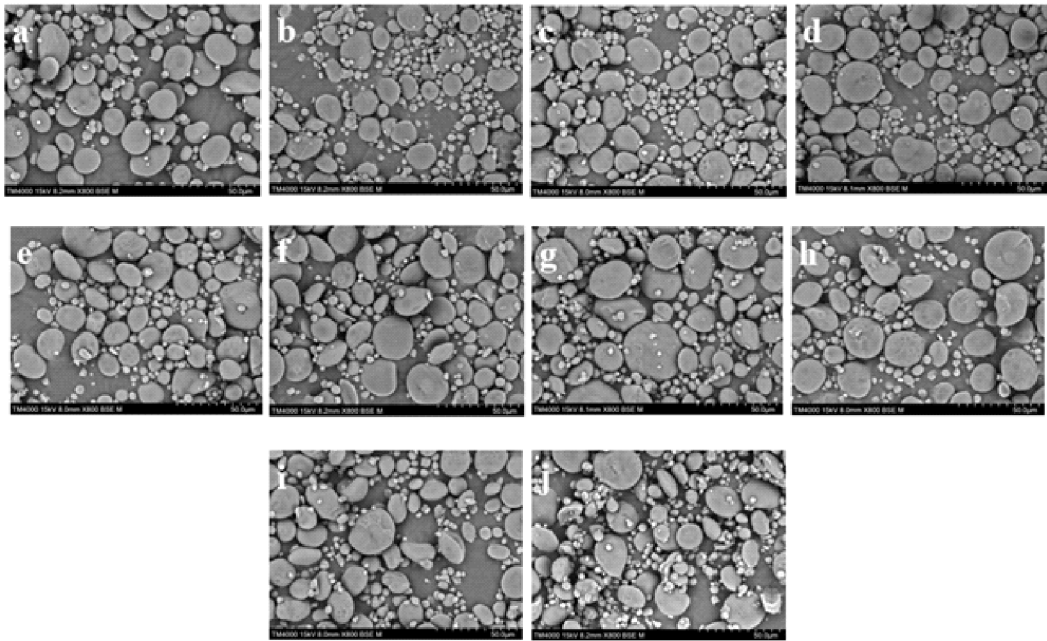
2.2.1.2 淀粉糊化特性分析

由表 6 可知, 不同类型小麦品种的淀粉糊化特性存在显著差异($P < 0.05$), 峰值粘度的变化

范围为 5 116.5 cP(稷麦 8 号)~6 441.5 cP(伟隆 169)。低谷黏度的变化范围为 1 750 cP(西农 136)~2 242 cP(稷麦 8 号)。稀懈值的变化范围为 2 874.5 cP(稷麦 8 号)~4 372.5 cP(伟隆 169)。最终黏度的变化范围为 3 319.5 cP(西农 136)~4 773.5 cP(西农 115)。回生值的变化范围为 1 569.5 cP(西农 136)~2 649.5 cP(西农 115)。峰值时间的变化范围为 4.45 min(西农 119)~5.07 min(稷麦 8 号)。糊化温度的变化范围为 70.88 °C(西农 106)~73.05 °C(伟隆 169 和西农 136)。以上结果表明, 强筋小麦伟隆 169 的峰值黏度和稀懈值大于中筋品种, 低谷黏度、最终黏度、回生值显著高于中筋品种西农 109, 伟隆 169、西农 136 和西农 109 的糊化温度较高, 紫色小麦稷麦 8 号的低谷黏度和峰值时间高于其他参试品种。

2.2.2 面团微观网络结构分析

利用激光共聚焦显微镜对面团微观网络结构进行观察, 西农 109、西农 112、西农 136 的面筋网络相对比较均匀, 结构较致密, 西农 100、西农 119 的面筋网络相对不均匀, 结构比较稀疏(图 2)。通过



a~j 依次为小麦品种周麦 36、伟隆 169、西农 109、稷麦 8 号、西农 100、西农 106、西农 109、西农 112、西农 115、西农 119、西农 136。
 a~j: Wheat varieties of Zhoumai 36, Weilong 169, Xinong 109, Jimai 8, Xinong 100, Xinong 106, Xinong 109, Xinong 112, Xinong 115, Xinong 119, and Xinong 136, respectively.

图 1 淀粉扫描电镜图像
 Fig. 1 Images of starch captured by scanning electron microscopy

表 5 小麦品种淀粉粒占比及粒径分析
 Table 5 Analysis of starch granule type and particle ratio of wheat varieties

品种 Variety	占比 Ratio			D(4,3)/ μm
	B 型淀粉粒 B-type granule	A 型淀粉粒 A-type granule	B/A	
周麦 36 Zhoumai 36	93.83 \pm 0.29a	6.17 \pm 0.29b	15.23 \pm 0.77cde	20.11 \pm 0.13cd
伟隆 169 Weilong 169	87.64 \pm 7.21b	12.36 \pm 7.21a	8.85 \pm 4.64e	21.86 \pm 0.27bc
西农 109 Xinong 109	96.36 \pm 1.24a	3.64 \pm 1.24b	28.42 \pm 8.81ab	26.60 \pm 1.53a
稷麦 8 号 Jimai 8	87.51 \pm 0.29b	12.49 \pm 0.29a	7.01 \pm 0.18e	24.28 \pm 6.63abc
西农 100 Xinong 100	92.08 \pm 2.00a	7.92 \pm 2.00b	12.27 \pm 3.84de	26.19 \pm 0.47ab
西农 106 Xinong 106	94.28 \pm 0.02a	5.72 \pm 0.20b	16.48 \pm 0.05bcde	21.50 \pm 1.99c
西农 112 Xinong 112	95.97 \pm 1.02a	4.03 \pm 1.02b	24.78 \pm 5.73abc	20.61 \pm 3.10cd
西农 115 Xinong 115	94.92 \pm 0.09a	5.08 \pm 0.09b	18.70 \pm 0.34bcde	19.92 \pm 0.05cd
西农 119 Xinong 119	95.51 \pm 0.68a	4.49 \pm 0.68b	21.63 \pm 3.74bcd	20.30 \pm 0.19cd
西农 136 Xinong 136	96.75 \pm 1.19a	3.25 \pm 1.19b	33.59 \pm 15.70a	16.04 \pm 1.74d

B/A: B 型淀粉粒与 A 型淀粉粒比值; D(4,3)指淀粉粒的体积 4 次矩平均粒径。

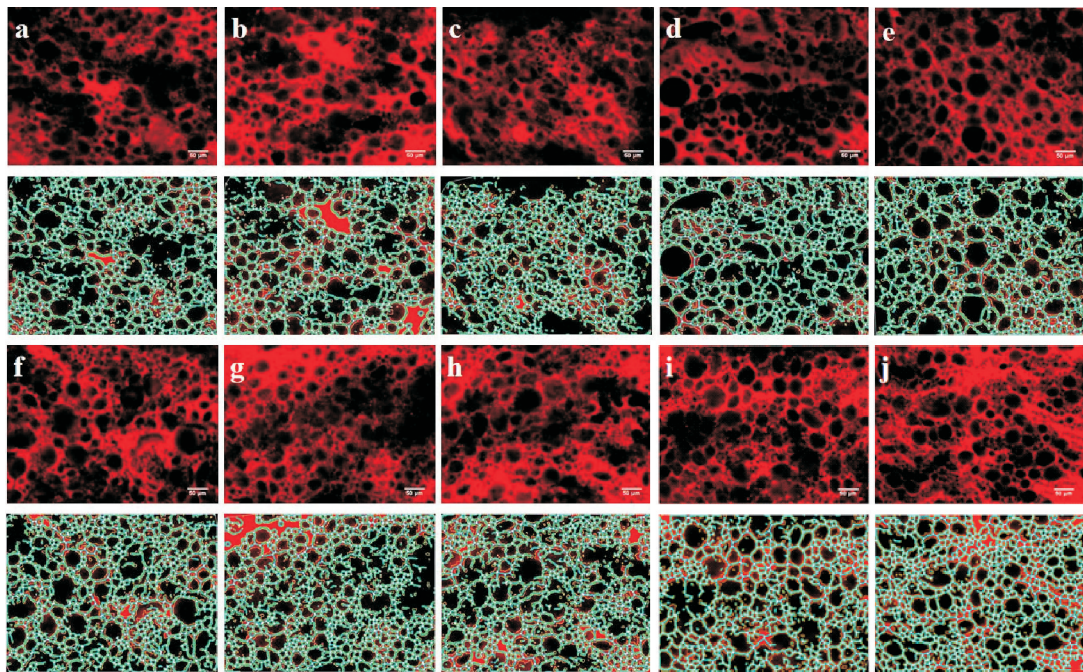
B/A: Ratio of B-type granule to A-type granule; D(4,3) refers to the average particle size of the fourth moment of the particle's volume.

Angio Tool 软件进行定量分析,供试小麦品种的蛋白质面筋百分比的变化范围为 38.67%~47.18%,稷麦 8 号最高,周麦 36 最低。节点数的变化范围为 $6.34 \times 10^2 \sim 8.78 \times 10^2$,节点密度的变化范围为 $3.25 \times 10^{-3} \sim 4.5 \times 10^{-3}$,蛋白质总长度的变化范围为 $13.99 \times 10^3 \sim 16.28 \times 10^3 \mu\text{m}$,西农 100 的节点数、节点密度和蛋白质总长度最大,伟隆 169 的节点数、节点密度和蛋白质总长度最小。终点数的变化范围为 $2.03 \times 10^2 \sim 3.49 \times 10^2$,西

农 109 最高,稷麦 8 号最低。孔隙度的变化范围为 $4.5 \times 10^{-2} \sim 7.79 \times 10^{-2}$,周麦 36 最大,稷麦 8 号最小(表 7)。这些结果表明,与对照品种周麦 36 比较,紫色小麦品种稷麦 8 号的蛋白质面筋百分比、终点数和孔隙度存在显著差异,孔隙度显著降低,面团微观网络结构更为均匀;西农 112 的蛋白质面积百分比、节点数、节点密度均显著高于强筋小麦伟隆 169;稷麦 8 号和西农 112 较其他品种具有较为致密的网络结构。

表 6 小麦淀粉糊化特性
Table 6 Starch gelatinization characteristics of wheat

品种 Variety	峰值黏度 Peak viscosity/cP	低谷黏度 Tough viscosity/cP	稀懈值 Breakdown viscosity/cP	最终黏度 Final viscosity/cP	回生值 Setback viscosity/cP	峰值时间 Pasting time/min	糊化温度 Pasting temperature/℃
周麦 36 Zhoumai 36	6 038.0±4c	1 807.5±92.5f	4 230.5±88.5b	3 557.5±66.5ef	1 750.0±159de	4.47±0.07f	72.63±0.03ab
伟隆 169 Weilong 169	6 441.5±7.5a	2 069.0±12.0bc	4 372.5±4.5a	4 442.5±28.5ab	2 373.5±16.5ab	4.60±0.00de	73.05±0.50a
西农 109 Xinong 109	6 127.0±10.0b	1 861.0±78.0ef	4 266.0±88.0ab	3 671.0±255.0def	1 810.0±333.0de	4.54±0.07ef	73.03±0.43a
稷麦 8 号 Jimai 8	5 116.5±2.5g	2 242.0±74.0a	2 874.5±76.5g	4 198.0±103.0bc	1 956.0±29.0cde	5.07±0.07a	71.35±0.40de
西农 100 Xinong 100	5 497.5±33.5e	1 947.0±4.0de	3 550.5±37.5d	3 971.0±355.0cd	2 024.0±351.0bcd	4.64±0.04cd	72.20±0.45bc
西农 106 Xinong 106	5 441.0±80.0e	2 002.5±47.5cd	3 510.5±55.5d	3 908.0±10.0cde	1 874.0±89.0de	4.62±0.02cde	70.88±0.03e
西农 112 Xinong 112	5 292.5±49.5f	2 033.5±66.5bcd	3 259.0±116.0e	4 671.0±132.0a	2 637.5±65.5a	4.83±0.10b	72.20±0.45bc
西农 115 Xinong 115	5 186.0±50.0g	2 124.0±39.0b	3 062.0±89.0f	4 773.5±490.5a	2 649.5±451.5a	4.70±0.03c	72.63±0.08ab
西农 119 Xinong 119	5 672.0±22.0d	2 112.5±2.5bc	3 514.5±64.5d	4 389.5±44.5ab	2 302.0±17.0abc	4.45±0.02f	71.86±0.01cd
西农 136 Xinong 136	5 470.0±92.0e	1 750.0±104.0f	3 720.0±12.0c	3 319.5±136.5f	1 569.5±32.5e	4.57±0.04de	73.05±0.45a



a-j 分别为周麦 36、伟隆 169、西农 109、稷麦 8 号、西农 100、西农 106、西农 109、西农 112、西农 115、西农 119、西农 136 的面团微观网络图像;第二、四和六列为对应品种 AngioTool 软件处理后的图像,其中蛋白交联点、蛋白骨架和蛋白质的轮廓/区域分别用白色、蓝色和黄色显示

a-j represent the dough micro network images Zhoumai 36, Weilong 169, Xinong 109, Jimai 8, Xinong 100, Xinong 106, Xinong 109, Xinong 112, Xinong 115, Xinong 119, and Xinong 136, respectively. The second, fourth, and sixth columns show the image processed by AngioTool software for the corresponding variety, where protein junctions, protein skeleton, and protein areas/regions are displayed in white, blue, and yellow.

图 2 面筋微观网络结构图像
Fig. 2 Image of gluten microscopic network structure

2.2.3 面筋蛋白巯基、二硫键含量分析

不同类型小麦品种的巯基和二硫键含量差异显著($P < 0.05$),总巯基含量变化范围为 $4.84 \sim 20.01 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$,西农 115 最低,稷麦 8 号最高。游离巯基含量的变化范围为 $3.94 \sim 6.87 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$,西农 100 最高,西农 119 最低。二硫键含量的变化范围为 $0.44 \sim 7.24 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$,稷麦 8 号

最高,西农 115 最低(表 7)。结果表明,强筋小麦品种伟隆 169 的游离巯基含量高于中筋小麦品种西农 109,西农 100 的总巯基和二硫键含量显著高于伟隆 169,总巯基含量和游离巯基含量显著高于对照周麦 36;紫色小麦品种稷麦 8 号的总巯基含量和二硫键含量显著高于伟隆 169、西农 109 和周麦 36。

表 7 小麦面筋结构特性及蛋白巯基和二硫键含量

Table 7 Gluten structural characteristics, protein thiol and disulfide bond content of wheat

品种 Variety	面筋结构 Gluten structure						面筋蛋白巯基、二硫键含量 Gluten protein thiol and disulfide bond content/($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$)		
	蛋白质 面筋百分比 Gluten percentage area/%	节点数 Gluten junctions/ ($\times 10^2$)	节点密度 Junction density/ ($\times 10^{-2}$)	蛋白质总长度 Total gluten length/ ($\times 10^2 \mu\text{m}$)	终点数 Gluten end points/ ($\times 10^2$)	孔隙度 Lacunarity/ ($\times 10^{-2}$)	总巯基 Total sulfhydryl	游离巯基 Free sulfhydryl	二硫键 Disulfide bonds
周麦 36 Zhoumai 36	38.67 \pm 5.74b	6.76 \pm 1.77ab	3.46 \pm 0.90ab	14.10 \pm 2.41a	3.20 \pm 0.40abc	7.79 \pm 3.30a	14.56 \pm 0.36c	5.91 \pm 0.22b	4.32 \pm 0.15b
伟隆 169 Weilong 169	39.95 \pm 2.47b	6.34 \pm 0.32b	3.25 \pm 0.16b	13.99 \pm 0.70a	3.22 \pm 0.40abc	6.76 \pm 0.80ab	9.18 \pm 1.93de	6.67 \pm 0.51a	1.25 \pm 1.19de
西农 109 Xinong 109	40.02 \pm 1.39b	6.90 \pm 1.45ab	3.55 \pm 0.74ab	14.28 \pm 1.25a	3.49 \pm 0.13a	6.98 \pm 0.68ab	7.76 \pm 0.42ef	4.24 \pm 0.06cd	1.76 \pm 0.22de
稷麦 8 号 Jimai 8	47.18 \pm 0.71a	8.13 \pm 0.70ab	4.16 \pm 0.36ab	16.18 \pm 0.73a	2.03 \pm 0.01e	4.50 \pm 0.24b	20.01 \pm 1.96a	5.53 \pm 0.71c	7.24 \pm 1.30a
西农 100 Xinong 100	43.91 \pm 2.79ab	8.78 \pm 1.40a	4.50 \pm 0.71a	16.28 \pm 1.67a	2.45 \pm 0.09de	5.49 \pm 1.31ab	16.76 \pm 0.64b	6.87 \pm 0.46a	4.95 \pm 0.54b
西农 106 Xinong 106	39.69 \pm 4.76b	7.04 \pm 1.55ab	3.60 \pm 0.80ab	14.48 \pm 2.01a	2.72 \pm 0.78bcde	7.74 \pm 2.63a	10.69 \pm 0.83de	4.72 \pm 0.10c	2.99 \pm 0.40c
西农 112 Xinong 112	46.16 \pm 2.27a	8.67 \pm 0.47a	4.44 \pm 0.24a	16.24 \pm 0.30a	2.83 \pm 0.17abcd	5.22 \pm 0.32ab	5.35 \pm 0.64gh	4.29 \pm 0.11cd	0.53 \pm 0.36e
西农 115 Xinong 115	44.78 \pm 1.93ab	8.03 \pm 0.32ab	4.12 \pm 0.15ab	15.72 \pm 0.46a	3.28 \pm 0.19abc	5.72 \pm 0.88ab	4.84 \pm 0.79i	3.95 \pm 0.34d	0.44 \pm 0.36e
西农 119 Xinong 119	42.49 \pm 1.21ab	7.58 \pm 0.63ab	3.88 \pm 0.32ab	15.10 \pm 0.62a	3.31 \pm 0.07ab	6.00 \pm 0.58ab	6.63 \pm 1.55fg	3.94 \pm 0.30d	1.34 \pm 0.83de
西农 136 Xinong 136	44.76 \pm 4.54ab	8.14 \pm 1.54ab	4.18 \pm 0.78ab	15.81 \pm 1.85a	2.58 \pm 0.64cde	5.70 \pm 1.69ab	6.34 \pm 0.64fgh	4.00 \pm 0.14d	1.17 \pm 0.39de

2.2.4 面团流变学特性分析

利用旋转流变仪对面团进行动态流变的频率扫描,西农 115、西农 112、周麦 36 的 G' 和 G'' 值较小,西农 109、西农 100 的 G' 和 G'' 值较大(图 3A 和 B),西农 109、西农 136、伟隆 169 的损耗正切角($\tan\delta$)值较小,稷麦 8 号和西农 112 的 $\tan\delta$ 值较大(图 3C)。以上结果说明,强筋品种伟隆 169、中筋品种西农 109 和西农 136 的面团粘弹性优于其他中筋品种,并且中筋品种西农 136 的粘弹性最好,优于强筋品种伟隆 169;紫色小麦品种稷麦 8 号和西农 112、西农 115 等中筋小麦品种与对照品种周麦 36 相比,粘弹性较差。

2.3 HMW-GS 组成分析

SDS-PAGE 结果(图 4)显示,供试小麦品种含有的 HMW-GS 具有差异性。在 $Glu-A1$ 位点上,周麦 36、伟隆 169、稷麦 8 号、西农 115、西农 119 含有亚基 $Ax1$,西农 109、西农 100、西农 106、西农 112、西农 136 的亚基为 Null。在 $Glu-B1$ 位点上,周麦 36、伟隆 169、稷麦 8 号、西农 136 含有亚基 $Bx7+By8$,西农 109、西农 100、西农 106、西农 112、西农 115、西农 119 含有亚基 $Bx7+By9$ 。在 $Glu-D1$ 位点上,伟隆 169、稷麦 8 号、西农 115 含有亚基 $Dx5+Dy10$,西农 109、西农 100、西农 112、西农 119、西农 136 含有亚基 $Dx2+Dy12$ 。结果表明,强筋品种伟隆 169 和紫色小麦稷麦 8

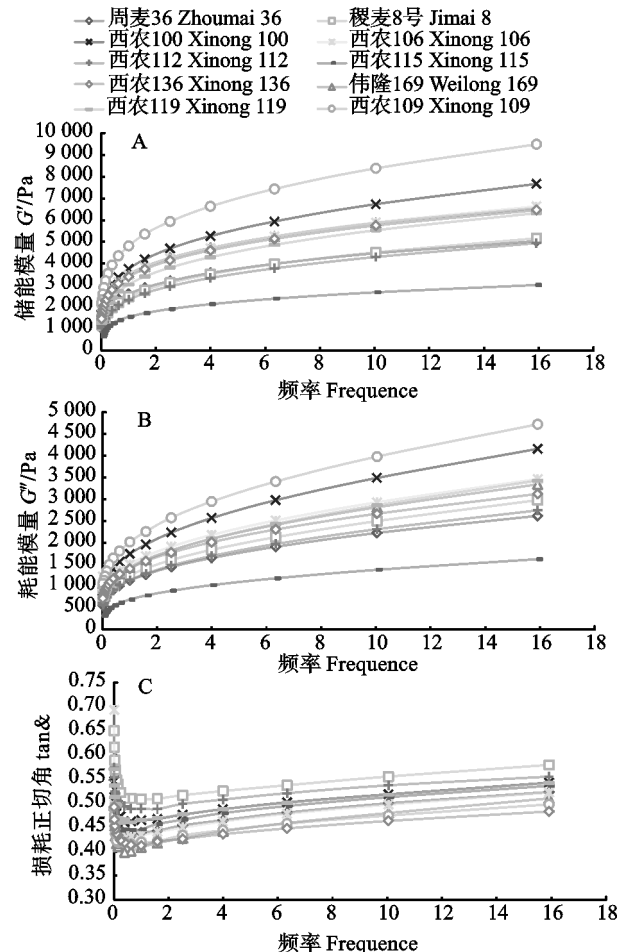
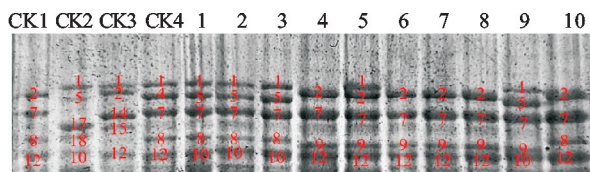


图 3 小麦面团流变学特性

Fig. 3 Rheological properties of dough of wheat



CK1~CK4 分别为中国春、烟农 19、小偃 6 号、矮抗 58; 1~10 分别为周麦 36、稷麦 8 号、伟隆 169、西农 100、西农 119、西农 106、西农 109、西农 112、西农 115、西农 136。

CK1~CK4 refer to China Spring, Yannong 19, Xiaoyan 6, and Aikang 58, respectively; 1-10 refer to Zhoumai 36, Jimai 8, Weilong 169, Xinong 100, Xinong 119, Xinong 106, Xinong 109, Xinong 112, Xinong 115, and Xinong 136, respectively.

图 4 高分子量谷蛋白亚基 SDS-PAGE 图谱
Fig. 4 SDS-PAGE map of high-molecular-weight glutenin subunits

号在 *Glu-A1*、*Glu-B1*、*Glu-D1* 位点上均含有优质亚基, 中筋品种西农 115 在 *Glu-A1*、*Glu-D1* 位点上含有优质亚基, 对照品种周麦 36 在 *Glu-A1*、

Glu-B1 位点上含有优质亚基, 中筋品种西农 119 和西农 136 只含有 1 个优质亚基, 中筋品种西农 100、西农 109 和西农 112 在三个位点上不含有优质亚基。

2.4 品质相关基因分析

利用 KASP 分子标记技术对小麦品质相关基因进行检测发现, 强筋品种伟隆 169 含有 10 个优异等位变异, 对照品种周麦 36、紫色小麦稷麦 8 号、中筋品种西农 115 分别含有 9 个优异等位变异, 西农 106、西农 112、西农 119 等中筋品种含有 8 个优异等位变异, 中筋品种西农 136 含有 7 个优异等位变异, 中筋品种西农 109、西农 100 分别含有 6 个优异等位变异(表 8)。所有品种全部含有优异低分子量谷蛋白亚基基因 *Glu-B3g* 和小麦-黑麦易位系基因 *1BL. BS*。紫色小麦品种稷麦 8 号含有 *Glu-Bx7^{OE}* 杂合、*Pina-D1b* 两个特殊的优异等位变异基因。

表 8 品质相关基因优异等位变异组合

Table 8 Excellent allelic variation combination of quality related genes

品种 Variety	优异等位变异组合 Superior allele combination	优异等位变异数目 Number of superior allele variations
周麦 36 Zhoumai 36	<i>Glu-Ax1/2*</i> 、 <i>Glu-B3g</i> heterozygous、 <i>TaPsy-A1</i> heterozygous、 <i>TaPpo-A1b</i> 、 <i>TaPod-A1</i> heterozygous、 <i>TaPpo-D1</i> heterozygous、 <i>TaPsy-D1a</i> 、 <i>1BL. BS</i> heterozygous、 <i>Pinb-D1b</i>	9
伟隆 169 Weilong 169	<i>Glu-D1(5+10)</i> 、 <i>Glu-Ax1/2*</i> 、 <i>Glu-B3g</i> heterozygous、 <i>TaPsy-A1</i> heterozygous、 <i>TaPpo-A1b</i> 、 <i>TaPsy-D1</i> heterozygous、 <i>1BL. BS</i> 、 <i>TaZds-A1a</i> 、 <i>Pinb-D1b</i> 、 <i>TaLcy-B1b</i>	10
西农 109 Xinong 109	<i>Glu-B3g</i> heterozygous、 <i>TaPpo-D1</i> heterozygous、 <i>TaPsy-D1a</i> 、 <i>1BL. BS</i> 、 <i>TaZds-A1a</i> 、 <i>Pinb-D1b</i>	6
稷麦 8 号 Jimai 8	<i>Glu-D1(5+10)</i> 、 <i>Glu-A1</i> heterozygous、 <i>Glu-B3g</i> heterozygous、 <i>Glu-Bx7^{OE}</i> heterozygous、 <i>Pina-D1b</i> 、 <i>TaPpo-D1</i> heterozygous、 <i>TaPsy-D1</i> heterozygous、 <i>1BL. BS</i> heterozygous、 <i>TaLcy-B1b</i>	9
西农 100 Xinong 100	<i>Glu-B3g</i> heterozygous、 <i>TaPpo-D1</i> heterozygous、 <i>TaPsy-D1a</i> 、 <i>1BL. BS</i> 、 <i>TaZds-A1a</i> 、 <i>Pinb-D1b</i>	6
西农 106 Xinong 106	<i>Glu-D1(5+10)</i> 、 <i>Glu-B3g</i> heterozygous、 <i>TaPpo-A1b</i> 、 <i>TaPpo-D1</i> heterozygous、 <i>TaPsy-D1</i> heterozygous、 <i>1BL. BS</i> heterozygous、 <i>Pinb-D1</i> heterozygous、 <i>TaLcy-B1b</i>	8
西农 112 Xinong 112	<i>Glu-B3g</i> heterozygous、 <i>TaPpo-D1</i> heterozygous、 <i>TaPsy-D1</i> heterozygous、 <i>1BL. BS</i> 、 <i>TaZds-A1a</i> 、 <i>Pinb-D1b</i> 、 <i>TaLcy-B1b</i> 、 <i>Pinb-B2b</i>	8
西农 115 Xinong 115	<i>Glu-D1(5+10)</i> 、 <i>Glu-Ax1/2*</i> 、 <i>Glu-B3g</i> heterozygous、 <i>TaPpo-A1b</i> 、 <i>TaPpo-D1</i> heterozygous、 <i>TaPsy-D1</i> heterozygous、 <i>1BL. BS</i> heterozygous、 <i>Pinb-D1b</i> 、 <i>TaLcy-B1b</i>	9
西农 119 Xinong 119	<i>Glu-Ax1/2*</i> 、 <i>Glu-B3g</i> heterozygous、 <i>TaPpo-A1b</i> 、 <i>TaPpo-D1</i> heterozygous、 <i>TaPsy-D1</i> heterozygous、 <i>1BL. BS</i> 、 <i>Pinb-D1b</i> 、 <i>TaLcy-B1b</i>	8
西农 136 Xinong 136	<i>Glu-B3g</i> heterozygous、 <i>TaPsy-A1</i> heterozygous、 <i>TaPpo-D1</i> heterozygous、 <i>TaPsy-D1</i> heterozygous、 <i>1BL. BS</i> 、 <i>TaZds-A1a</i> 、 <i>Pinb-D1b</i>	7

3 讨论

蛋白质和淀粉是小麦籽粒的主要组成成分, 对小麦品质具有重要影响。蛋白质及其组分含量显著影响面团的流变学特性和焙烤特性^[34]; 其中清蛋白和球蛋白含有较多的氨基酸种类, 营养价值较高^[8]。本研究发现, 西农 100 等中筋小麦品

种的清蛋白和球蛋白含量更高, 说明其具有较高的营养价值。有研究发现, GMP 对面团的粘弹性和延展性有正向作用^[35]。中筋小麦品种西农 112 和西农 115 的 GMP 含量显著高于强筋小麦品种伟隆 169, 但其面团粘弹性较伟隆 169 低, 与前人研究结果不一致, 说明可能存在其他因素影响小麦品质。石培春等^[36]研究发现, 不同品质类型小

麦品种的淀粉含量存在显著差异,强筋小麦品种的淀粉及其组分含量较低。本研究结果与其一致,伟隆 169 的淀粉及其组分含量显著低于紫色小麦品种稷麦 8 号、西农 136 等中筋小麦品种。直链淀粉含量与面团品质呈正相关^[37]。西农 106、西农 119 等中筋小麦品种直链淀粉含量较高,说明可能具有较好的面团品质。支链淀粉对面包、面条、馒头的口感等加工品质产生有利影响,可以延长产品的货架期^[38]。稷麦 8 号和西农 100 的支链淀粉含量较高,说明可能具有较好的食品加工品质。综上所述,紫色小麦品种稷麦 8 号和西农 100、西农 112、西农 115、西农 106、西农 136、西农 119 等中筋小麦品种的营养和加工品质指标较好。

淀粉理化性质、面筋结构特性、面团流变学特性共同影响小麦加工品质。Gao 等^[39]研究发现,B 型淀粉粒具有较大的表面积,容易与蛋白质结合,形成致密的蛋白网络结构,降低面团加工品质。也有研究发现,B 型淀粉粒含量与面团加工品质呈正相关^[40]。本研究与此一致,除紫色小麦稷麦 8 号外,西农 100 等其他中筋小麦品种的 B 型淀粉粒含量显著高于强筋小麦品种伟隆 169,说明较高含量的 B 型淀粉颗粒可能会对中筋小麦品种的品质产生有利影响。糊化温度越高,淀粉粒越不容易发生膨胀和破裂^[41]。本研究发现,强筋小麦品种伟隆 169 和中筋小麦品种西农 109 的糊化温度较高,推测其淀粉不容易发生糊化反应。稀懈值是淀粉的抗加热能力,与热稳定性呈负相关^[42]。低谷黏度是淀粉在高温条件下的抗剪切能力,与淀粉抗剪切能力呈负相关^[43]。强筋小麦品种伟隆 169 的稀懈值高于西农 109,并显著高于其他中筋小麦品种,说明伟隆 169 的热稳定性比西农 100 等中筋小麦品种差,紫色小麦品种稷麦 8 号的低谷黏度最大,稀懈值最小,说明其抗剪切能力弱,热稳定性较好。面筋蛋白网络结构的稳定性影响面团品质^[44]。本研究发现,中筋小麦品种西农 112 的面筋网络结构稳定性强于强筋小麦品种伟隆 169,紫色小麦品种稷麦 8 号的面筋网络结构比周麦 36 更为致密。二硫键可以通过游离巯基的氧化而形成,影响着面团结构的稳定性^[45]。本研究发现,中筋小麦品种西农 100 和紫色小麦品种稷麦 8 号的二硫键含量较高,且面筋网络结构较为稳定。面团流变学特性是评价小麦加工品质的重要指标,面团粘弹性影响其加

工品质^[16]。本研究结果表明,强筋小麦品种伟隆 169 和中筋小麦品种西农 109、西农 136 具有较强的面团粘弹性,说明其可能在某些食品加工方面表现更好。综上,强筋小麦品种伟隆 169 和紫色小麦稷麦 8 号、西农 100、西农 112、西农 109 等中筋小麦品种的加工品质指标较好。

环境条件相同时,小麦品质主要受到遗传因素的影响。研究发现,HMW-GS 的不同亚基组成对小麦品质影响不同,其中 Ax1、Bx7 + By8、Dx5 + Dy10 亚基组合对品质产生正向影响,为优质亚基组合^[46-47]。本研究结果显示,强筋小麦品种伟隆 169 和稷麦 8 号含有 Ax1、Bx7 + By8、Dx5 + Dy10 等优质亚基组合。此外,低分子量麦谷蛋白亚基的 Glu-B3g 对面筋强度有正向作用^[22]。在本研究的中筋小麦品种中均检测到低分子量谷蛋白亚基基因 *Glu-B3g*,推测其对中筋小麦品质形成有重要作用。另外,周麦 36、西农 106 的 SDS-PAGE 与 KASP 的检测结果不一致。高振贤等^[48]提出,仅用一种方法容易对 HMW-GS 组成造成漏检或误判,需要用多种检测方法提高对 HMW-GS 组成检测的准确性。这说明只用 SDS-PAGE 的方法进行检测会存在误差。权威等^[19]在对中国 530 份审定小麦品种的籽粒硬度基因检测中发现,*Pinb-D1b* 基因型的分布频率显著高于 *Pina-D1b* 基因型。本研究检测发现,只有紫色小麦品种稷麦 8 号含有 *Pina-D1b* 基因型,与其研究一致。含有优异等位变异基因数目越多的小麦品种,会对小麦品质产生更有利的影响^[18]。本研究结果显示,强筋小麦品种伟隆 169 含有 10 个优异等位变异,数目最多。紫色小麦品种稷麦 8 号含有 9 个优异等位变异,二者的营养品质和加工品质指标较突出,与前人研究相符。综上,强筋小麦品种伟隆 169 含有较多的优质亚基和优异等位变异基因,紫色小麦品种稷麦 8 号含有特殊的优异等位变异,西农 100 等其他中筋小麦品种也含有较多的优异等位变异数目,这些小麦品种可作为小麦品质改良的种质资源。

参考文献:

- [1]BRAUN H J, ATLIN G, PAYNE T. Multi-location testing as a tool to identify plant response to global climate change [M]//Climate change and crop production. Wallingford: CAB, 2010:115.
- [2]胡学旭,孙丽娟,周桂英,等. 2006—2015 年中国小麦质量年度变化[J]. 中国农业科学, 2016, 49(16): 3063.
HU X X, SUN L J, ZHOU G Y, et al. Variations of wheat

- quality in China from 2006 to 2015 [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(16): 3063.
- [3] 姜东, 仲迎鑫, 蔡剑, 等. 小麦籽粒品质空间分布异质性及其形成机制研究进展 [J]. 南京农业大学学报, 2021, 44(6): 1013.
JIANG D, ZHONG Y X, CAI J, *et al.* Advances of spatial distribution heterogeneity of wheat grain quality and the underlying mechanisms [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2021, 44(6): 1013.
- [4] 张勇, 郝元峰, 张艳, 等. 小麦营养和健康品质研究进展 [J]. 中国农业科学, 2016, 49(22): 4284.
ZHANG Y, HAO Y F, ZHANG Y, *et al.* Progress in research on genetic improvement of nutrition and health qualities in wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(22): 4284.
- [5] 孙辉, 欧阳姝虹, 段晓亮. 中国小麦品质的现状与挑战 [J]. 粮油食品科技, 2017, 25(2): 1.
SUN H, OUYANG S H, DUAN X L. Wheat quality in China — status and challenge [J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2017, 25(2): 1.
- [6] YEGIN S, ALTINEL B, TULUK K. A novel extremophilic xylanase produced on wheat bran from *Aureobasidium pullulans* NRRL Y-2311-1: Effects on dough rheology and bread quality [J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 81: 389.
- [7] PLESSIS A, RAVEL C, BORDES J, *et al.* Association study of wheat grain protein composition reveals that gliadin and glutenin composition are trans-regulated by different chromosome regions [J]. *Journal of experimental botany*, 2013, 64: 3627.
- [8] 王瑞红, 孙小红, 王莺颖, 等. 大豆蛋白和小麦蛋白结构与功能对比研究 [J]. 粮食加工, 2016, 41(3): 32.
WANG R H, SUN X H, WANG Y Y, *et al.* Review on the difference of structure and function between soy protein and wheat protein [J]. *Grain Processing*, 2016, 41(3): 32.
- [9] FLEITAS C M, SCHIERENBECK M, GERARD S G, *et al.* How leaf rust disease and its control with fungicides affect dough properties, gluten quality and loaf volume under different N rates in wheat [J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 80: 119.
- [10] 王康君, 孙中伟, 郭明明, 等. 小麦营养品质的研究进展与展望 [J]. 农业与技术, 2020, 40(7): 7.
WANG K J, SUN Z W, GUO M M, *et al.* Research progress and prospect of wheat allelopathy [J]. *Agriculture and Technology*, 2020, 40(7): 7.
- [11] RAHIMI G, HEDAYATI S, MAZLOOMI S M. Studies on functional properties of wheat starch in the presence of *Lepidium perfoliatum* and *Alyssum homolocarpum* seed gums [J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(3): 699.
- [12] YAN H L, LU Q Y. Effect of A- and B-granules of wheat starch on Chinese noodle quality [J]. *Journal of Cereal Science*, 2020, 91: 102860.
- [13] HUANG L, TAN H, ZHANG C, *et al.* Starch biosynthesis in cereal endosperms: An updated review over the last decade [J]. *Plant Communications*, 2021, 2(5): 100237.
- [14] 赵金山, 周雨, 郭俊杰, 等. 面团组分及环境因素对面团二硫键形成的影响研究现状 [J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(1): 10.
ZHAO J J, ZHOU Y, GUO J J, *et al.* Status of research on the influence of dough composition and environmental factors on the formation of disulfide bonds in dough [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(1): 10.
- [15] 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.
- [16] 杨钊, 乔文臣, 张影全, 等. 小麦面粉蛋白质特性和面团流变学特性的关系 [J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(12): 4075.
YANG C, QIAO W C, ZHANG Y Q, *et al.* Relationship between protein properties of wheat flour and rheological properties of dough [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2020, 11(12): 4075.
- [17] RASHEED A, WEN W, GAO F, *et al.* Development and validation of KASP assays for genes underpinning key economic traits in bread wheat [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2016, 129(10): 1843.
- [18] 单子龙, 班进福, 赵彦坤, 等. 河北省小麦品质相关基因的 KASP 标记检测 [J]. 作物杂志, 2020(4): 64.
SHAN Z L, BAN J F, ZHAO Y K, *et al.* Detection of quality-related genes in the wheat varieties authorized in Hebei Province by KASP markers [J]. *Crops*, 2020(4): 64.
- [19] 权威, 马锦绣, 华正蓉, 等. 我国部分审定小麦品种的品质性状及基因型分析 [J]. 植物遗传资源学报, 2023, 24(3): 701.
QUAN W, MA J X, HUA Z R, *et al.* Quality analysis in a collection of wheat varieties approved in China [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2023, 24(3): 701.
- [20] 刘霞, 雷梦林, 王艳珍, 等. 山西小麦地方品种品质相关基因的 KASP 标记分析 [J]. 植物遗传资源学报, 2022, 23(3): 881.
LIU X, LEI M L, WANG Y Z, *et al.* Detection of quality-related genes in the wheat Landrace in Shanxi Province by KASP markers [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2022, 23(3): 881.
- [21] CHO S W, ROY S K, CHUN J B, *et al.* Overexpression of the Bx7 high molecular weight glutenin subunit on the Glu-B1 locus in a Korean wheat landrace [J]. *Plant Biotechnology Reports*, 2017, 11(2): 97.
- [22] ITO M, MARUYAMA-FUNATSUKI W, IKEDA T M, *et al.* Dough properties and bread-making quality-related characteristics of Yumehikara near-isogenic wheat lines carrying different Glu-B3 alleles [J]. *Breeding Science*, 2015, 65(3): 241.
- [23] GALLAGHER C E, MATTHEWS P D, LI F, *et al.* Gene duplication in the carotenoid biosynthetic pathway preceded evolution of the grasses [J]. *Plant Physiology*, 2004, 135(3): 1776.
- [24] CRAWFORD A C, STEFANOVA K, LAMBE W, *et al.* Functional relationships of phytoene synthase 1 alleles on chromosome 7A controlling flour colour variation in selected Australian wheat genotypes [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2011, 123(1): 95.

- [25] DONG C H, MA Z Y, ZHANG L P, *et al.* Allelic variation at the *TaZds-A1* locus on wheat chromosome 2A and development of a functional marker in common wheat [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(7): 1067.
- [26] 王磊磊. 麦稻不同粒位颖果发育差异的机制及其对氮素响应研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022.
WANG L L. Study on the mechanism of caryopsis development difference in different grain positions of wheat and rice and its response to nitrogen [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.
- [27] 张平平, 肖永贵, 刘建军, 等. SDS不溶性谷蛋白大聚体含量与和面仪参数的关系[J]. 作物学报, 2008, 34(6): 1074.
ZHANG P P, XIAO Y G, LIU J J, *et al.* Relationship between SDS-unextractable glutenin polymeric protein and mixograph parameters [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(6): 1074.
- [28] BHAT F M, RIAR C S. Effect of chemical composition, granule structure and crystalline form of pigmented rice starches on their functional characteristics [J]. *Food Chemistry*, 2019, 297: 124984.
- [29] 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.
- [30] 徐小青. 面筋蛋白对馒头品质的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2020.
XU X Q. Effect of gluten on the quality of steamed bread [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2020.
- [31] LI Y, XIE L, JIANG X, *et al.* Effect of anthocyanins on mechanical and physicochemical properties of wheat dough [J]. *Journal of Cereal Science*, 2023, 110: 103652.
- [32] GUO L, YU L, TONG J, *et al.* Addition of *Aegilops geniculata* 1Ug chromosome improves the dough rheological properties by changing the composition and micro-structure of gluten [J]. *Food Chemistry*, 2021, 358: 129850.
- [33] 张俊杰. 山羊草属异源细胞质对小麦面筋蛋白结构及淀粉理化特性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
ZHANG J J. Effects of *Aegilops* heterologous cytoplasm on wheat gluten protein structure and starch physicochemical properties [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022.
- [34] CHO S W, KANG C S, KO H S, *et al.* Influence of protein characteristics and the proportion of gluten on end-use quality in Korean wheat cultivars [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(8): 1706.
- [35] SONG L, LI L, ZHAO L, *et al.* Absence of Dx2 at *Glu-D1* locus weakens gluten quality potentially regulated by expression of nitrogen metabolism enzymes and glutenin-related genes in wheat [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(4): 1383.
- [36] 石培春, 李英枫, 韩璐, 等. 不同品质类型小麦籽粒淀粉含量积累的动态差异[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2012, 30(4): 417.
SHI P C, LI Y F, HAN L, *et al.* The dynamic accumulations of grain starch content in wheat cultivars with different qualities [J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2012, 30(4): 417.
- [37] 刘爱峰, 宋建民, 赵振东, 等. 糯小麦配粉对面团流变学特性和面包烘烤品质的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(6): 902.
LIU A F, SONG J M, ZHAO Z D, *et al.* Effects of waxy flour blending on dough rheological properties and bread-making quality of nonwaxy flour [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(6): 902.
- [38] GUO Q, HE Z, XIA X, *et al.* Effects of wheat starch granule size distribution on qualities of Chinese steamed bread and raw white noodles [J]. *Cereal Chemistry*, 2014, 91(6): 623.
- [39] 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.
- [40] ROMAN L, DE LA CAL E, GOMEZ M, *et al.* Specific ratio of A-to-B-type wheat starch granules improves the quality of gluten-free breads; Optimizing dough viscosity and Pickering stabilization [J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 82: 510.
- [41] CHANG L, YANG M, ZHAO N, *et al.* Structural, physicochemical, antioxidant and *in vitro* digestibility properties of banana flours from different banana varieties (*Musa* spp.) [J]. *Food Bioscience*, 2022, 47: 101624.
- [42] GAO L, BAI W, XIA M, *et al.* Diverse effects of nitrogen fertilizer on the structural, pasting, and thermal properties of common buckwheat starch [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 179: 542.
- [43] JIANG Y, JIANG Q, HAO C, *et al.* A yield-associated gene *TaCWI*, in wheat: Its function, selection and evolution in global breeding revealed by haplotype analysis [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2015, 128(1): 131.
- [44] 赵力焯, 宋利军, 李立群, 等. 氮代谢和贮藏蛋白生物合成对小麦面筋品质形成的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(1): 1.
ZHAO L Y, SONG L J, LI L Q, *et al.* Influence of nitrogen metabolism and storage protein biosynthesis on the formation of gluten quality in wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(1): 1.
- [45] JIA F, MA Z, WANG X, *et al.* Effect of Kansui addition on dough rheology and quality characteristics of chickpea-wheat composite flour-based noodles and the underlying mechanism [J]. *Food Chemistry*, 2019, 298: 125081.
- [46] 姜佳慧, 金蕊, 陈刘明, 等. 小麦谷蛋白大聚体研究进展[J]. 中国种业, 2022(8): 17.
JIANG J H, JIN R, CHEN L M, *et al.* Research progress of wheat glutenin macromolecules [J]. *China Seed Industry*, 2022(8): 17.
- [47] LI Y, FU J, SHEN Q, *et al.* High-molecular-weight glutenin subunits: Genetics, structures, and relation to end use qualities [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 22(1): 184.
- [48] 高振贤, 李亚青, 田国英, 等. 小麦高分子量麦谷蛋白亚基组成和检测研究进展[J]. 中国农学通报, 2018, 34(16): 35.
GAO Z X, LI Y Q, TIAN G Y, *et al.* Composition and detection of high-molecular-weight glutenin subunit in wheat; Research progress [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(16): 35.