

小麦面粉和鲜面片色泽及相关基因组成分析

袁博¹ 张晓² 方正武¹ 李曼² 寿路路²
汪尊杰² 江伟² 肖龙飞² 高德荣^{2,3}

(¹长江大学农学院, 434025, 湖北荆州; ²江苏里下河地区农业科学研究所/农业农村部长江中下游小麦生物学与遗传育种重点实验室, 225007, 江苏扬州; ³扬州大学农学院/江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心, 225009, 江苏扬州)

摘要 小麦面粉及面制品白度是影响小麦商品品质的重要指标, 以 94 份小麦品种为试验材料, 研究不同品种小麦面粉及面制品白度的差异及其影响因素。结果表明, 小麦品种间白度差异显著, 但同一材料的面粉和鲜面片色泽相关性分析表现一致; 面粉白度与籽粒硬度、籽粒蛋白质含量、湿面筋含量、面团形成时间和稳定时间呈极显著负相关, 与低谷黏度、最终黏度和回生值呈显著负相关, 与面筋指数、稀懈值和糊化温度正相关; 籽粒硬度、籽粒蛋白质含量、沉降值、糊化温度和稀懈值可解释面粉白度 80.9% 的变异, 面筋指数、沉降值、糊化温度和稀懈值对面粉白度产生显著正向影响, 籽粒蛋白质含量和籽粒硬度对面粉白度产生显著负向影响。面粉白度与硬度的负相关性最强 ($r=-0.83$), 硬度是影响小麦白度色泽的关键因素, 软质小麦的面粉和鲜面片白度色泽整体高于硬质小麦。品质相关基因的变异位点 *Pinb-D1b*、*Pina-D1b*、*Ppo-A1b*、*Ppo-D1a*、*TaPod-A1b*、*Lox-B1a*、*Psy-A1b*、*Psy-B1a/b*、*Psy-D1a*、*TaPds-B1b*、*TaZds-A1a* 和 *TaLyc-B1b* 分布频率分别为 54.7%、2.2%、21.3%、3.9%、8.0%、0.0%、0.0%、98.9%、96.6%、78.5%、5.3% 和 53.8%。筛选出扬麦 15、扬麦 25、川麦 93、绵麦 902 和扬麦 45 等 13 个高白度软质小麦品种, 以及周麦 36、淮麦 33、扬辐麦 15 和宁麦 218 等高白度硬质小麦品种。高白度软质小麦品种白度均高于硬质小麦, 且其优异色泽基因等位变异的比率高于整体材料。通过加强优良亲本的同时注重色泽优异基因的聚合和相关表型的筛选, 可逐步改良小麦品种的白度色泽。

关键词 小麦; 白度; 色泽; 面粉品质; KASP 标记

面粉白度是小麦磨粉品质的主要指标, 也是衡量面粉加工精度和分级的重要指标^[1], 国内外市场对品质色泽的稳定性要求逐步提高, 选育高白度小麦品种对小麦色泽品质改良具有重要意义。前人大部分研究表明面粉白度与面粉吸水率、出粉率、籽粒硬度^[2-4]、蛋白质含量^[5-7]和粉质参数呈负相关, 与沉降值呈正相关^[8-9]; 而部分研究^[10-11]则表明面粉白度与蛋白质含量相关性极小。其中籽粒硬度遗传力较高, 由位于 5DS 染色体短臂的籽粒硬度主效基因 (*Puroindoline*, *Pin*) *Pina* 和 *Pinb* 共同控制^[12], 当 *Pina* 和 *Pinb* 同为野生型 (*Pina-D1a* 或 *Pinb-D1a*) 时籽粒为软质, 任何 1 个基因发生突变或缺失时籽粒变硬^[13-15], *Pinb-2v* 是 *Pinb* 高度同源基因, 微效调节籽粒硬度。小麦籽粒多酚氧化酶 (polyphenol oxidase, PPO) 活性与面制品加工和贮存过程中的色泽褐变关系密切^[16], 黄色素含量也是影响面粉色

泽的关键因素之一^[17], 调控黄色素的主要成分类胡萝卜素相关基因包括八氢番茄红素合成酶基因 (*Psy*)、八氢番茄红素脱氢酶基因 (*Pds*)、番茄红素-β-环化酶基因 (*Lyc*) 以及胡萝卜素脱氢酶基因 (*Zds*)^[18]。过氧化物酶基因 (*Pod*) 和脂肪氧化酶基因 (*Lox*) 则是小麦籽粒与色素降解有关的氧化酶基因^[19]。其中相关主效基因 *Psy-A1* 和 *Psy-B1* 分别位于 7A 和 7B 染色体上^[20], *Zds-D1* 和 *Zds-A1* 分别位于 2D 和 2A 染色体上^[21], *TaPod-A1* 和 *TaPod-D1* 分别位于 3AL 和 7DS 染色体上^[22-23], *TaLox-B1* 位于 4BS 染色体上^[24], *Ppo-A1* 和 *Ppo-D1* 位于染色体 2AL 和 2DL 上^[25], Rasheed 等^[26]开发的 KASP (kompetitive allele-specific PCR) 标记可高通量检测以上基因功能标记。

前人^[27-29]有关面粉色泽的研究多采用同一麦区材料, 面粉色泽相关指标的研究结论有所差异,

作者简介: 袁博, 主要从事小麦品质育种研究, E-mail: 1176408889@qq.com

高德荣为通信作者, 研究方向为小麦品质遗传育种, E-mail: gdr@wheat.org.cn; 张晓为共同通信作者, 研究方向为小麦品质遗传育种, E-mail: zhangxiao820218@163.com

基金项目: 国家自然科学基金 (32071999); 江苏省重点研发计划项目 (BE2021335); 国家农业生物育种重大项目课题任务 (2023ZD0402504); 江苏里下河地区农业科学研究所科技发展专项 [SJ (22) 203]

收稿日期: 2024-12-09; 修回日期: 2025-01-17; 网络出版日期: 2025-04-09

对色泽品质指标、相关分子标记检测及相关性的系统研究较少^[30]。以来源于不同麦区的小麦为材料,研究影响面粉和鲜面片色泽稳定性的关键因素,筛选色泽优异小麦品种成为关键^[31-32]。本研究以 94 份不同麦区和品质类型的小麦品种为材料,研究面粉色泽与其他品质指标的相关性,以及鲜面片不同储藏时间的色泽变化;检测 10 个色泽相关和 3 个硬度相关基因的变异位点,探明小麦面粉和鲜面片色泽的关键影响指标,筛选色泽优良品种,以期小麦面粉色泽改良提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为扬麦 25、川麦 104、宁麦 29、龙麦 35、镇麦 16、中麦 895、山农 28 和烟农 999 等 94 份小麦品种,包含长江中下游麦区、长江上游麦区、黄淮冬麦区、北部冬麦区和东北春麦区的不同品质类型小麦品种,由相关育种科研单位共同提供。

1.2 试验方法

1.2.1 面粉制备 采用 MLU-202 型磨粉机(Buhler, 瑞典),参照 AACC26-20 方法,分别使用软麦筛网和硬麦筛网磨制面粉。

1.2.2 鲜面片制作 取 50 g 小麦粉(相对湿度 14%),加入小麦粉质量 28%~32%的蒸馏水,用针式和面机搅拌 5 min,团成面团(相对湿度 36%);使用专用面条机在压辊处经 3 次折叠压片成型(间距 4 mm);于醒发箱(20 °C,相对湿度 60%)醒发 30 min 后经 4 次压制为厚度 2.5 mm 的面片;保存于开口自封袋(25 °C)。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 面粉色泽和鲜面片色泽 采用 CR-700R 型色泽测定仪(北京科美瑞达仪器设备有限公司)测定不同粉路及统粉的白度(whiteness, WI)和其余色泽指标(L^* :亮度、 a^* :红绿色度和 b^* :黄蓝色度),本试验同一样品在 CR-700R 型色泽测定仪白度测定值为 70 时,WSB-IV 型白度仪(杭州麦哲仪器有限公司)测定结果为 80,因此供试面粉中白度大于 70 即表示基本满足市场要求。测定鲜面片保持 0、2、4 和 24 h 的白度和其余色泽指标,每份样品正反面各选择 3 点重复,结果取 6 点平均值。

1.3.2 品质指标 采用 DA7200 近红外分析仪(Perten, 瑞典),参照 AACC No.39-10 方法测定

籽粒蛋白质含量;采用 JYBD 100×40 小麦硬度指数测定仪(无锡穗邦科技有限公司),参照《小麦硬度测定 硬度指数法》(GB/T 21304-2007)^[33]测定籽粒硬度指数;采用千粒重测定板测定千粒重;采用 SDS 沉降仪(Brabender, 德国),参照《粮油检验 小麦沉淀指数测定 SDS 法》(GB/T 15685-2011)^[34]测定沉降值;采用 RVA-Super3 型快速黏度仪(Perten, 澳大利亚),参照《小麦、黑麦及其粉类和淀粉糊化特性测定 快速粘度仪法》(GB/T 24853-2010)^[35]测定淀粉糊化特性;采用 810104 型电子型粉质仪(Brabender, 德国),参照 AACC54-21 方法测定粉质仪参数;采用 2200 型面筋洗涤仪(Perten, 瑞典),参照《小麦和小麦粉 面筋含量 第 2 部分:仪器法测定湿面筋》(GB/T 5506.2-2008)^[36]测定湿面筋含量;采用 WSF 型小麦粉加工精度测定仪(无锡穗邦科技有限公司)测定麸星含量。

1.3.3 KASP 标记检测 于温室发苗培养取新鲜叶片,委托华智生物技术有限公司进行 KASP 标记检测:将叶片置于 2.0 mL 离心管中使用液氮速冻,采用 CTAB 法^[37]提取植物基因组 DNA。参考 Rasheed 等^[26]的方法对硬度和色泽相关基因的 KASP 标记进行检测。用 Nexar 系统(LGC, 英国)进行 KASP 标记的验证和检测。用 Nexar 进行 PCR 扩增体系的自动组装 PCR 扩增,用 Soellex(LGC, 英国)进行 PCR 扩增,扩增条件:94 °C 15 min; 94 °C 20 s, 65 °C~57 °C(每个循环退火温度降低 0.8 °C) 60 s, 10 个循环; 94 °C 20 s, 57 °C 60 s, 30 个循环。PCR 反应完成后用 Araya(LGC, 英国)进行反应体系荧光信号扫描;然后用 Intellics(LGC, 英国)进行基因型分型和数据分析。

1.4 数据处理

采用 Excel 2021 进行数据整理,用 SPSS 27.01 进行数据分析,用 Origin 2021 作图。

2 结果与分析

2.1 小麦面粉和鲜面片色泽差异分析

94 份小麦品种的面粉白度分布范围较大,变幅为 56.4~74.7(图 1),11 份材料的硬度基因未检出(表 1)。77 份小麦品种的面粉白度在[60,70),占供试材料的 81.9%;白度 > 70 的品种占比 13.8%,均为软质小麦;白度在[65,70)的品种占比

35.1%，包含 21 个软麦和 7 个硬麦；白度在[60,65) 的品种占比 46.8%，包括 38 个硬麦；白度 < 60 的品种占比 4.3%，均为硬质小麦。鲜面片保持 0、2、4 和 24 h 时白度变幅分别在 16.8~42.6、15.5~39.1、12.7~35.4 和 13.0~36.9，较面粉白度大幅降低。面粉白度 > 70 的有 13 份品种，占比 12.8%，

分别为扬麦 15、扬麦 20、扬麦 25、扬麦 13、扬麦 42、扬麦 45、华麦 14 号、宁麦资 518、川麦 104、泛麦 8 号、绵麦 902、川麦 42 和川麦 93，均为软质小麦，可作为高白度小麦新品种培育的优良亲本。4 份小麦品种的面粉白度 < 60，最低为 56.4（表 2）。

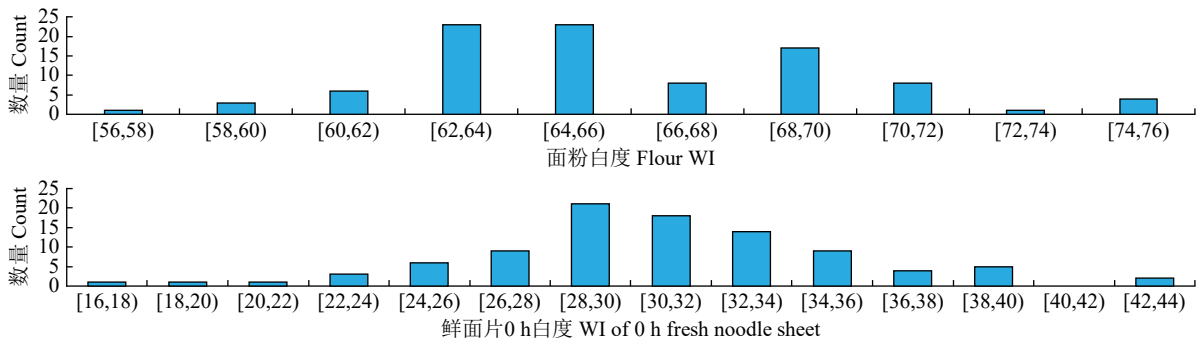


图 1 94 份小麦材料的面粉和鲜面片白度
Fig.1 WI of flour and fresh noodle sheet of 94 wheat materials

表 1 94 份小麦材料的面粉白度分布

面粉白度 Flour WI	品种数 Number of varieties	占比 Percentage (%)	硬质类型 Hardness type	粒色 Grain color
(0,60)	4	4.3	硬质	2 白 2 红
[60,65)	44	46.8	38 份硬质	9 白 35 红
[65,70)	33	35.1	21 份软质, 7 份硬质	6 白 27 红
[70,75)	13	13.8	软质	2 白 11 红

根据面粉和鲜面片 0、2、4 和 24 h 的白度和亮度 L^* 值对 94 份小麦资源进行聚类分析，结果（图 2）表明，类群 I 包含 8 份样品，分别为川麦 93、扬麦 20、川麦 104、川麦 42、绵麦 902、泛麦 8 号、烟农 1212 和扬麦 45；面粉白度平均值 72.6，变幅 69.6~74.7， L^* 平均值 92.0，变幅 91.1~92.5；鲜面片 0、2、4 和 24 h 白度平均值分别为 37.4、34.4、31.4 和 30.8，变幅分别为 34.1~42.2、29.7~39.1、27.4~

表 2 94 份小麦材料的面粉和鲜面片色泽

Table 2 Color of flour and fresh noodle sheet of 94 wheat materials

编号 Code	品种 Variety	面粉 Flour				鲜面片 Fresh noodle sheet															
		WI	L^*	a^*	b^*	WI				L^*				a^*				b^*			
						0 h	2 h	4 h	24 h	0 h	2 h	4 h	24 h	0 h	2 h	4 h	24 h	0 h	2 h	4 h	24 h
1	扬麦 25	70.2	90.4	0.6	6.7	32.3	27.5	23.8	23.1	78.8	74.8	73.4	66.6	1.7	1.9	2.2	2.3	16.2	17.6	17.8	16.0
2	扬麦 27	69.1	91.5	0.5	7.2	31.8	26.6	23.6	17.9	78.2	75.5	74.0	68.6	1.7	2.3	2.2	2.5	17.4	18.8	18.6	17.1
3	扬麦 28	64.7	90.3	0.5	8.4	32.7	23.8	20.8	15.0	79.0	74.9	73.8	67.3	2.2	2.6	2.6	3.0	18.5	19.9	20.2	19.5
4	扬麦 29	62.7	89.7	0.6	8.9	29.6	23.8	20.7	14.5	79.0	74.9	73.8	65.6	2.0	2.4	2.5	2.4	18.5	19.9	20.3	17.8
5	扬麦 30	68.9	91.2	0.4	7.2	29.7	25.3	23.6	18.9	78.6	75.8	74.8	68.8	1.9	2.1	2.2	2.7	17.2	19.2	19.5	18.4
6	扬麦 31	69.2	91.0	0.4	7.0	33.0	26.3	24.0	19.4	77.8	75.2	72.6	67.3	1.6	1.8	2.0	2.5	17.1	18.6	18.9	17.6
7	扬麦 33	69.0	90.7	0.5	6.9	30.3	24.7	22.4	18.6	79.1	75.4	73.9	68.3	1.9	2.1	2.3	2.9	17.5	19.2	19.3	18.5
8	扬麦 34	68.2	90.8	0.4	7.2	32.6	28.1	25.6	22.7	80.0	77.0	75.3	70.9	1.7	2.0	2.2	2.6	17.1	18.4	18.8	17.3
9	扬麦 35	61.8	89.8	0.7	9.3	26.9	21.5	19.9	15.2	79.9	76.5	74.4	66.0	2.1	2.6	2.7	2.6	19.3	20.4	21.1	18.9
10	扬麦 36	67.2	90.7	0.5	7.6	42.6	30.2	25.2	18.8	81.0	78.0	76.6	67.8	1.8	2.0	2.3	2.3	14.8	17.9	19.0	18.1
11	扬麦 37	59.8	89.6	0.6	9.9	27.2	16.3	13.7	13.0	76.6	73.6	71.7	63.0	2.5	2.8	2.9	3.3	20.6	23.0	23.5	22.2
12	扬麦 39	60.5	89.4	0.7	9.6	25.8	27.1	22.4	16.0	80.9	76.7	74.6	65.5	2.1	2.4	2.7	2.8	19.3	20.8	20.4	19.3
13	扬糯麦 2 号	64.4	90.3	0.6	8.5	28.1	23.5	26.1	21.2	80.0	79.6	75.8	66.3	2.0	2.3	2.7	2.8	15.5	19.3	18.9	18.2
14	宁麦 29	67.5	90.8	0.6	7.5	25.1	19.1	19.4	18.3	76.0	73.0	71.3	62.5	2.3	2.6	2.9	3.2	18.0	19.8	20.5	17.6
15	宁麦 33	66.1	90.6	0.4	8.0	26.9	21.6	19.8	17.2	78.0	74.2	72.9	64.9	2.1	2.5	2.6	2.6	17.7	20.6	21.0	18.3
16	宁麦 34	63.1	89.7	0.5	8.8	30.4	24.5	20.6	17.7	79.3	74.3	71.2	64.2	1.8	2.0	2.2	2.5	17.6	19.2	19.8	17.4
17	镇麦 16	63.1	89.7	0.5	8.8	34.1	24.0	20.7	19.2	80.6	75.5	72.9	66.4	1.7	2.2	2.2	2.3	17.5	19.3	19.9	18.0
18	镇麦 18	63.5	90.1	0.6	8.8	34.4	24.7	20.1	17.9	79.9	76.3	72.4	65.2	1.9	2.2	2.4	2.4	17.5	19.3	20.0	18.2

续表2 Table 2 (continued)

编号 Code	品种 Variety	面粉 Flour				鲜面片 Fresh noodle sheet															
		WI	L^*	a^*	b^*	WI				L^*				a^*				b^*			
						0 h	2 h	4 h	24 h	0 h	2 h	4 h	24 h	0 h	2 h	4 h	24 h	0 h	2 h	4 h	24 h
19	扬辐麦 13	63.3	90.0	0.5	8.8	30.0	23.9	20.4	19.0	79.9	76.3	73.5	67.1	1.7	1.8	1.9	2.1	18.3	19.6	19.9	18.3
20	扬辐麦 15	65.8	90.2	0.6	7.9	28.9	25.0	21.6	18.8	79.1	74.8	72.3	65.0	1.9	2.3	2.3	2.4	16.8	19.0	19.1	17.3
21	扬辐麦 16	63.4	89.7	0.6	8.6	31.4	25.6	21.0	20.3	79.3	75.6	73.3	69.6	2.2	2.3	2.4	2.6	18.4	18.9	19.5	19.1
22	盐麦 1 号	64.6	89.7	0.6	8.2	39.0	25.8	24.4	19.1	79.2	73.0	73.0	67.8	1.8	2.2	2.3	2.8	16.9	18.9	19.7	18.5
23	盐麦 2 号	64.0	89.7	0.6	8.4	38.5	25.4	21.9	20.1	79.0	73.0	71.3	67.8	1.8	2.1	2.4	2.7	16.6	18.8	19.4	18.0
24	苏麦 0588	64.0	90.2	0.6	8.6	29.8	22.3	20.5	19.1	79.1	73.4	72.6	68.5	2.1	2.4	2.3	2.7	17.6	19.9	20.3	18.8
25	苏麦 198	64.1	90.5	0.7	8.7	30.8	22.8	20.2	18.1	79.1	74.0	72.6	68.3	2.1	2.5	2.8	3.1	17.5	19.7	20.4	19.1
26	苏麦 288	65.5	90.1	0.5	8.0	31.6	26.2	22.9	22.5	77.2	75.0	71.5	66.7	1.6	1.7	1.9	2.2	16.9	18.3	18.3	16.3
27	华麦 10 号	63.0	90.5	0.5	9.1	29.5	22.7	19.7	20.0	79.1	75.2	73.3	70.2	1.5	1.8	2.1	1.8	18.5	20.2	20.9	18.4
28	华麦 11 号	63.9	90.2	0.8	8.7	28.6	—	19.8	17.4	78.9	73.1	71.2	65.3	1.9	2.0	2.3	2.3	18.0	18.8	19.2	17.9
29	华麦 12 号	68.9	90.9	0.5	7.0	32.9	—	20.6	20.5	79.3	73.8	71.5	64.3	1.9	2.2	2.5	2.8	18.1	18.5	19.4	17.1
30	华麦 13 号	67.2	90.5	0.6	7.5	33.5	—	17.5	16.9	78.8	72.9	71.4	65.0	2.4	2.7	2.9	3.6	14.8	18.5	19.6	18.5
31	华麦 14 号	71.1	92.1	0.5	6.7	35.1	—	23.4	21.8	78.1	74.1	72.4	68.1	1.7	1.7	1.9	2.3	15.9	17.7	18.4	17.2
32	华麦 15 号	69.2	91.6	0.5	7.2	29.5	—	18.1	18.1	75.9	73.5	71.3	66.0	2.1	2.2	2.7	3.2	18.4	19.3	20.1	18.5
33	农麦 156	63.5	89.7	0.6	8.6	27.7	—	19.5	19.6	76.5	73.5	70.7	68.2	2.3	2.4	2.5	2.8	18.5	19.2	19.1	18.3
34	农麦 179	63.4	89.8	0.7	8.7	30.5	24.5	21.3	19.6	77.5	74.2	71.6	65.8	2.2	2.7	2.5	2.5	18.4	19.7	18.9	17.8
35	农麦 180	67.5	90.5	0.6	7.4	37.9	27.1	23.3	20.0	79.4	74.8	72.6	65.6	2.1	2.3	2.5	2.8	17.2	19.5	17.8	17.7
36	农麦 99	63.4	89.3	0.6	8.5	37.8	27.3	22.1	18.9	78.3	73.0	70.5	64.0	1.9	2.4	2.5	2.6	17.2	18.8	18.3	17.4
37	润扬麦 1 号	69.8	91.1	0.4	6.8	34.4	30.0	25.5	23.2	77.3	73.9	71.9	67.6	1.9	2.0	2.3	2.5	16.2	17.1	17.0	16.5
38	苏研麦 017	64.8	90.0	0.6	8.2	29.3	22.9	20.7	18.4	79.5	74.7	72.7	69.1	1.9	2.2	2.4	2.7	18.5	20.0	19.9	19.1
39	扬江麦 586	64.9	90.3	0.6	8.3	28.7	26.0	20.6	18.3	77.8	74.2	72.4	69.2	1.9	2.1	2.3	2.7	17.9	18.8	19.2	18.6
40	瑞华麦 590	64.0	90.0	0.6	8.5	27.6	24.6	20.4	19.0	78.4	73.7	70.8	65.1	1.9	2.1	2.4	2.3	17.8	19.5	19.5	17.7
41	瑞华麦 598	64.3	89.5	0.7	8.2	31.2	25.0	23.0	19.3	78.9	74.1	71.6	64.4	2.0	2.6	2.6	2.9	15.9	18.4	18.8	18.1
42	中垦麦 212	61.2	88.5	0.7	8.9	24.3	21.0	17.7	16.6	74.9	70.3	67.9	62.7	2.7	3.2	3.3	3.3	19.1	19.7	19.4	17.7
43	中垦麦 616	69.5	91.1	0.5	6.9	30.9	28.4	26.1	25.2	77.9	76.1	73.3	70.2	1.8	2.0	2.4	2.4	17.4	17.2	17.2	16.7
44	泰麦 6 号	59.1	87.9	0.7	9.5	25.8	17.9	16.4	15.0	74.4	68.7	66.9	61.5	2.5	2.9	2.9	3.1	18.9	20.2	20.2	18.2
45	泰麦 901	63.1	88.7	0.5	8.3	31.9	24.2	22.4	20.1	77.0	72.3	70.2	65.3	1.9	2.3	2.3	2.3	17.4	18.4	18.7	17.1
46	宁麦资 166	63.0	89.3	0.6	8.6	27.8	23.7	22.4	18.8	78.7	73.1	71.1	64.6	1.9	2.2	2.3	2.5	17.3	19.0	19.4	17.6
47	宁麦资 518	71.6	91.4	0.4	6.3	36.6	30.4	27.0	24.9	80.6	75.9	74.3	69.7	1.5	1.9	2.1	2.4	13.4	17.1	17.6	16.9
48	宁麦资 958	65.8	90.1	0.6	7.9	28.1	26.0	23.0	21.0	79.5	73.6	71.6	65.2	1.9	2.1	2.4	2.3	16.5	18.3	16.9	16.7
49	宁麦资 666	69.6	91.0	0.4	6.8	32.8	31.5	27.2	25.2	78.8	76.5	75.2	69.8	1.7	2.0	2.0	2.0	16.5	17.4	17.5	18.5
50	宁麦资 999	63.9	89.2	0.8	8.2	27.8	29.4	23.0	15.6	78.3	73.3	71.7	61.1	2.4	2.6	2.6	2.9	16.8	18.4	19.3	18.5
51	宁麦资 218	65.6	90.4	0.6	8.1	29.8	26.5	24.4	18.8	79.7	76.0	73.5	66.1	1.9	2.2	2.4	2.8	15.7	17.3	18.6	18.8
52	明麦 13	63.4	89.5	0.7	8.5	26.2	24.8	21.6	17.7	79.9	75.9	73.7	68.2	2.1	2.3	2.4	3.0	19.5	20.2	20.3	20.3
53	明麦 133	65.6	90.1	0.6	8.0	32.2	26.8	24.7	21.2	77.6	75.2	73.6	68.0	2.1	2.3	2.4	2.8	17.3	18.2	18.3	18.0
54	隆麦 30	69.2	91.2	0.6	7.0	32.9	26.8	23.3	23.1	78.4	75.7	74.2	65.8	1.9	2.2	2.4	3.0	18.3	17.7	18.3	18.3
55	隆麦 39	69.3	91.5	0.5	7.2	33.1	25.1	26.8	17.0	78.7	73.2	75.6	70.3	1.7	2.3	2.0	2.3	17.2	18.5	18.6	19.3
56	江丰麦 1 号	68.0	90.5	0.6	7.2	31.9	24.5	26.8	22.9	77.8	72.0	74.5	69.8	1.9	2.4	2.1	3.1	16.3	18.8	18.2	19.2
57	宁丰麦 1 号	64.2	89.4	0.6	8.2	32.6	23.7	21.1	15.0	77.0	72.8	70.9	66.5	2.2	2.5	2.7	3.1	17.8	18.4	18.5	19.4
58	宁红麦 1119	69.6	91.0	0.4	6.8	29.6	26.5	23.1	22.2	76.2	75.1	72.9	67.5	1.9	1.9	2.4	3.7	17.0	18.2	18.4	19.6
59	扬麦 40	66.0	90.1	0.6	7.8	30.5	25.4	23.0	20.6	76.9	74.0	72.1	65.7	2.0	2.3	2.3	3.0	17.4	18.0	18.5	17.9
60	扬麦 41	63.4	89.2	0.7	8.4	31.4	25.5	21.5	18.4	77.3	73.8	71.7	63.2	2.3	2.5	2.5	2.5	13.8	19.6	19.5	18.0
61	扬麦 42	70.9	91.5	0.4	6.6	34.7	29.1	28.0	24.1	78.2	75.8	74.2	68.3	1.6	1.7	1.8	1.9	16.8	17.7	17.5	15.8
62	扬麦 43	62.8	89.8	0.7	8.9	29.8	22.8	20.8	21.8	78.8	75.3	73.7	68.1	1.8	2.2	2.3	2.3	19.3	20.3	20.3	19.8
63	扬麦 45	71.1	91.8	0.3	6.6	34.1	32.1	30.1	29.3	81.0	78.6	77.1	73.5	1.1	1.0	1.0	1.8	16.0	17.1	17.0	18.8
64	扬麦 46	63.6	89.5	0.7	8.5	25.7	22.9	20.9	20.4	78.2	74.1	72.7	66.2	2.0	2.3	2.3	2.6	17.7	19.3	19.4	18.4
65	扬麦 44	69.8	91.3	0.3	6.9	31.7	28.2	25.6	20.6	79.0	75.4	73.8	64.5	1.6	1.9	1.9	1.9	16.5	17.5	17.3	16.1
66	扬麦 23	64.4	89.7	0.7	8.3	23.2	18.3	18.6	19.5	74.4	72.1	72.2	65.4	2.3	2.6	2.6	2.6	18.2	20.8	20.4	19.6
67	山农 28 号	64.4	90.9	0.6	8.8	20.6	25.9	23.5	23.2	68.3	76.1	74.5	68.6	1.4	1.1	1.3	1.2	18.5	18.6	19.4	17.9
68	烟农 999	68.1	92.2	0.3	7.9	27.5	22.7	21.8	24.7	80.1	78.0	76.8	72.1	1.0	1.0	1.1	0.6	20.0	20.9	21.1	20.3

续表 2 Table 2 (continued)

编号 Code	品种 Variety	面粉 Flour				鲜面片 Fresh noodle sheet															
		WI	L^*	a^*	b^*	WI				L^*				a^*				b^*			
						0 h	2 h	4 h	24 h	0 h	2 h	4 h	24 h	0 h	2 h	4 h	24 h	0 h	2 h	4 h	24 h
69	烟农 1212	69.6	91.8	0.3	7.2	34.9	29.7	27.4	30.0	81.5	78.9	77.7	73.5	0.9	0.9	1.0	1.0	14.2	18.0	16.9	16.3
70	泛麦 8 号	74.0	92.1	0.4	5.7	37.9	34.4	32.1	28.3	80.9	78.1	76.8	71.3	1.1	1.3	1.3	1.4	15.7	16.4	16.4	14.2
71	周麦 36 号	67.0	91.2	0.5	7.9	33.0	27.2	23.7	25.3	79.6	76.4	75.4	71.1	1.2	1.1	1.2	1.3	17.4	19.0	19.4	18.8
72	百农 207	64.5	90.4	0.5	8.5	32.7	27.1	27.5	27.5	79.9	77.8	76.6	71.4	1.1	1.0	1.1	0.9	18.1	18.8	18.5	17.0
73	绵麦 902	74.0	92.5	0.3	5.9	39.5	33.4	30.3	29.8	81.6	78.9	77.3	72.9	1.1	1.2	1.4	1.7	13.8	16.3	16.4	15.9
74	师栾 02-1	64.3	89.9	0.6	8.4	29.1	21.4	19.2	19.4	77.1	73.9	72.4	67.6	1.6	1.8	1.9	1.8	18.8	20.0	20.5	17.2
75	衡观 35	59.7	89.6	0.5	10.0	19.4	15.5	14.4	17.5	76.9	74.3	73.6	65.6	1.9	2.0	1.9	0.9	22.4	23.3	23.2	20.1
76	鲁原 502	61.4	90.2	0.6	9.6	25.6	19.8	17.4	19.8	77.4	74.4	73.3	65.9	1.4	1.6	1.5	1.6	21.1	21.6	22.2	18.9
77	济麦 22	62.5	90.6	0.4	9.4	29.4	27.4	25.5	28.5	81.4	77.8	77.4	73.2	1.0	0.8	0.8	1.3	18.8	19.2	19.2	18.1
78	西农 979	62.9	90.4	0.5	9.1	28.6	22.3	19.3	22.9	79.5	76.7	75.8	70.6	1.2	1.2	1.3	1.0	20.8	21.7	21.8	20.0
79	郑麦 379	56.4	89.7	0.4	11.4	16.8	15.5	12.7	21.8	79.1	77.5	75.7	72.2	1.3	1.4	1.5	0.9	23.2	23.2	24.8	23.8
80	郑麦 136	60.0	90.4	0.4	10.2	23.8	20.9	16.8	24.9	80.1	77.4	76.3	74.4	1.0	1.0	1.1	0.6	22.6	22.6	23.4	23.9
81	百农 4199	65.7	90.5	0.3	8.1	28.4	23.9	22.2	25.1	78.6	76.5	75.1	70.8	1.2	1.1	1.3	1.4	19.7	20.0	20.5	18.5
82	川麦 104	73.0	91.9	0.2	6.0	38.3	35.7	33.5	31.7	80.9	78.6	77.0	74.3	1.1	1.2	1.0	1.8	14.8	15.7	15.9	15.2
83	川麦 42	74.1	92.1	0.2	5.6	38.4	33.5	31.6	32.1	82.8	78.0	77.1	72.8	1.1	1.2	1.1	2.1	13.2	15.9	15.9	15.5
84	川麦 93	74.7	92.5	0.2	5.6	42.2	39.1	35.4	36.9	81.9	80.0	77.8	77.6	1.0	0.5	0.5	1.0	14.1	14.2	15.4	14.6
85	龙麦 35	65.4	89.7	0.6	7.9	31.7	28.7	27.0	30.5	78.9	76.2	74.4	74.7	1.5	1.9	1.8	1.9	17.0	17.9	17.8	17.6
86	淮麦 33	65.9	90.2	0.4	7.9	31.2	27.1	25.8	23.9	79.5	77.0	74.6	68.3	0.9	0.9	1.0	1.5	18.2	18.5	18.9	21.2
87	扬麦 13	70.6	91.4	0.3	6.6	29.9	27.4	24.1	22.3	77.3	75.2	73.0	65.7	1.8	2.0	2.4	2.6	17.7	18.3	18.3	18.5
88	扬麦 15	70.2	91.3	0.3	6.7	33.4	30.5	28.6	22.1	78.9	78.2	76.6	70.5	1.9	1.6	1.7	2.2	17.4	17.5	17.6	18.9
89	扬麦 16	63.8	89.3	0.6	8.3	31.9	25.1	22.5	18.2	79.6	75.4	74.0	67.7	2.0	2.1	2.2	2.7	17.2	19.4	19.6	20.3
90	扬麦 20	70.5	91.1	0.4	6.5	34.1	37.0	30.5	28.7	78.7	80.9	76.6	70.9	1.1	1.1	1.2	0.8	16.4	15.8	16.2	17.0
91	农麦 88	62.5	88.7	0.5	8.6	28.7	20.9	19.5	13.5	77.9	73.3	71.1	63.7	1.9	2.3	2.3	2.8	18.3	20.3	20.7	20.3
92	中麦 175	67.7	90.5	0.3	7.3	34.5	31.0	29.2	22.4	78.9	76.1	74.5	66.8	1.4	1.8	1.8	1.9	16.2	16.7	16.8	17.5
93	中麦 578	62.8	89.7	0.4	8.8	23.3	18.8	16.7	13.3	78.5	74.1	72.3	64.4	1.7	1.8	2.1	2.5	20.5	21.3	22.3	21.5
94	中麦 895	60.9	89.6	0.4	9.6	29.5	24.8	23.6	19.3	80.9	76.3	75.6	67.3	1.3	1.5	1.5	1.8	18.5	19.4	19.8	19.3

35.4 和 28.3~36.9, L^* 平均值分别为 81.2、79.0、77.2 和 73.3, 变幅分别为 78.7~82.8、78.0~80.9、76.6~77.8 和 70.9~77.6。类群II包含 74 份样品, 面粉白度平均值 65.8, 变幅 60.0~71.6。类群III包含 1 份样品, 面粉白度 64.4。类群IV包含 11 份样品, 面粉白度平均值 61.5, 变幅 56.4~67.5。

面粉与鲜面片色泽的相关性分析中(图 3), 面粉白度和 L^* 值与鲜面片白度和 L^* 值均呈显著正相关, 与面粉的 a^* 值、 b^* 值和鲜面片的 a^* 值、 b^* 值呈显著负相关, 这表明鲜面片与面粉色泽指标相关性表现一致, 且放置不同时间的鲜面片色泽指标相关性表现一致。

2.2 小麦面粉和鲜面片色泽与理化品质分析

由图 3 可知, 94 份不同品质类型小麦品种的面粉白度(CR-700R)平均值为 65.9, 变幅为 56.4~74.7, 变异系数为 5.6%; L^* 值平均值为 90.4, 变幅为 87.9~92.5, 变异系数为 1.0%; L^* 值较面粉白度分布集中, 面粉白度变异幅度较大, 表明面粉

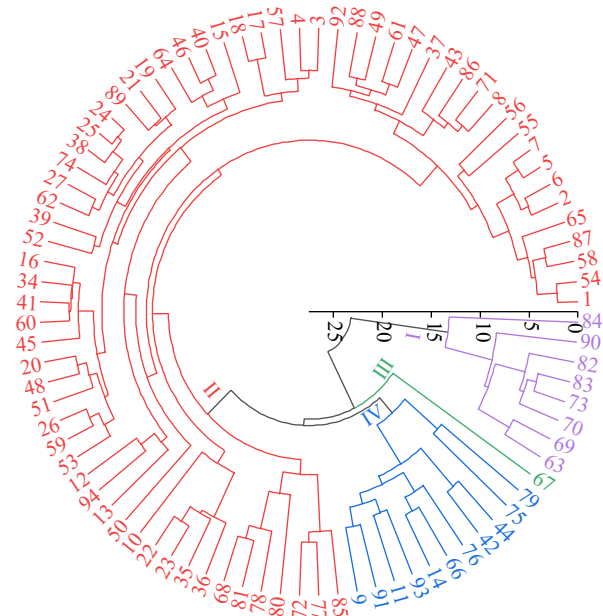
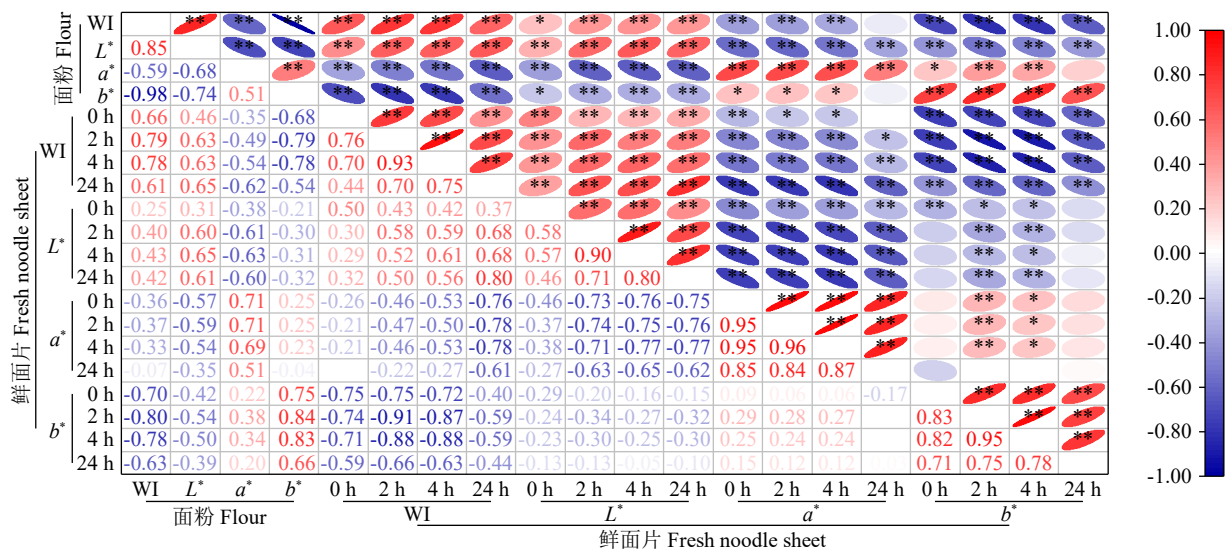


图 2 94 份小麦材料面粉和鲜面片的白度及亮度聚类分析
Fig.2 Cluster analysis of WI and brightness of flour and fresh noodle sheet of 94 wheat materials

白度更能反映试验样品差异。



“*”和“**”分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平显著相关。
 “*” and “**” indicate significant correlation at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively.

图 3 94 份小麦材料面粉和鲜面片色泽的相关性分析

Fig.3 Correlation between flour and fresh noodle sheet color of 94 wheat materials

籽粒蛋白质含量最大的为师乐 02-1 (18.0%)，最小的为川麦 104 (9.4%)；千粒重最大的为宁麦资 999 (63.6 g)，最小的为明麦 13 (36.6 g)；籽粒硬度最大的为农麦 156 (74.7)，最小的为扬麦 25 (49.4)；湿面筋含量最大的为中麦 895 (42.9%)，最小的为扬麦 37 (18.0%)；沉降值最大的为百农 4199 (80.5 mL)，最小的为郑麦 379 (38.0 mL)。

粉质质量指数的变异系数 (131.4%) 在所有理化品质指标分析中最大，其次为稳定时间和面团形成时间；试验品种的面团稳定时间平均值为 7.3 min，变幅为 0.9~37.8 min，变异系数为 88.8%；面团形成时间平均值为 2.7 min，变幅为 1.2~16.2 min，变异系数为 83.8%；表明粉质仪参数对试验样品的分布差异影响较大。淀粉糊化特性指标中低谷黏度的变异系数最大，低谷黏度的平均值为 1380.6 cP，变幅为 43.5~1891.0 cP，变异系数为 28.2% (表 3)。每份小麦的品质指标详见网络增强出版附加材料附表 1。

2.3 小麦面粉色泽与品质指标的相关性和逐步回归分析

如图 4 所示，在 94 份小麦材料中，白度与 L^* 值呈极显著正相关，与 a^* 值和 b^* 值呈极显著负相关； L^* 值也与 a^* 值和 b^* 值呈极显著负相关； a^* 值与 b^* 值则呈极显著正相关。在 94 份小麦材料中，白度与稀懈值和糊化温度呈极显著正相关，与面筋指数显著正相关；与籽粒蛋白质含量、籽粒硬度、湿面筋含量、面团形成时间和稳定时间呈极

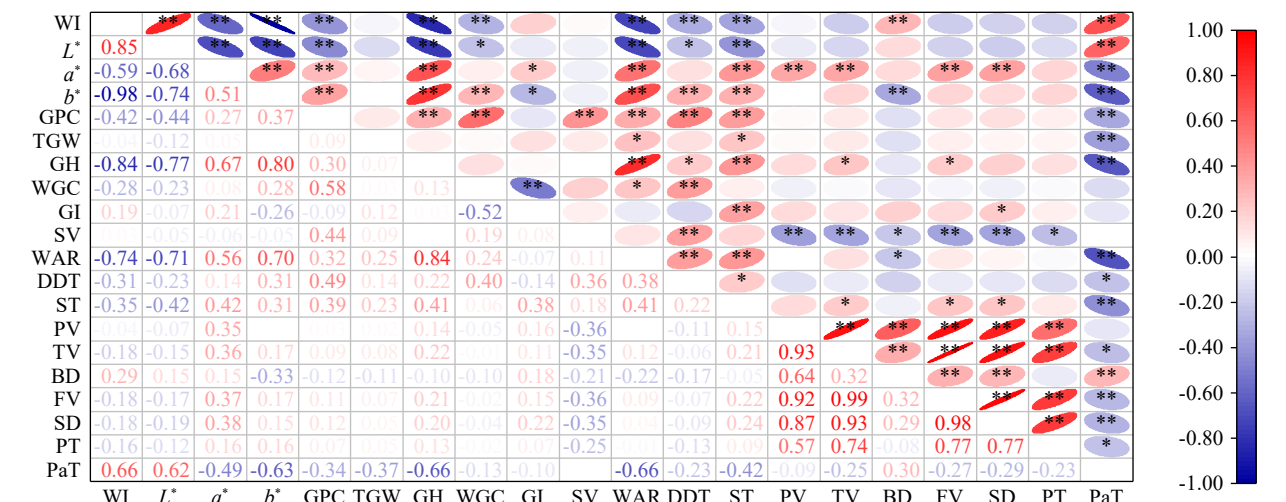
表 3 94 份小麦材料的面粉色泽与品质指标
 Table 3 Flour color and quality indexes of 94 wheat materials

指标 Index	平均值 Average	变幅 Range	变异系数 CV (%)
面粉白度 Flour WI	65.9	56.4~74.7	5.6
L^*	90.4	87.9~92.5	1.0
a^*	0.5	0.2~0.8	25.4
b^*	8.0	5.6~11.4	13.6
籽粒蛋白质含量 Grain protein content (%)	13.3	9.4~18.0	9.7
千粒重 1000-grain weight (g)	48.7	36.6~63.6	11.1
籽粒硬度 Grain hardness	64.9	49.4~74.7	10.7
面粉麸星含量 Flour gluten content (%)	2.3	0.9~5.9	35.1
湿面筋含量 Wet gluten content (%)	29.9	18.0~42.9	14.5
面筋指数 Gluten index (%)	88.5	49.3~100.0	14.5
沉降值 Sedimentation value (mL)	55.0	38.0~80.5	16.0
吸水率 Water absorption rate (%)	61.4	52.8~72.6	6.6
面团形成时间 Dough development time (min)	2.7	1.2~16.2	83.8
稳定时间 Stability time (min)	7.3	0.9~37.8	88.8
弱化度 Softness (BU)	63.0	-20.0~189.0	64.6
粉质质量指数 Farinograph quality index	93.0	17.0~600.0	131.4
峰值黏度 Peak viscosity (cP)	2335.0	722.0~3010.0	20.5
低谷黏度 Trough viscosity (cP)	1380.6	43.5~1891.0	28.2
稀懈值 Breakdown (cP)	954.0	503.0~1342.0	18.9
最终黏度 Final viscosity (cP)	2635.0	301.0~3395.0	24.4
回生值 Setback (cP)	1255.0	258.0~1586.0	21.0
峰值时间 Peak time (min)	5.9	3.5~6.4	6.3
糊化温度 Pasting temperature (°C)	62.5	60.3~64.9	1.6

显著负相关，与硬度的负相关性最强 ($r=-0.83$)；与低谷黏度、最终黏度和回生值呈显著负相关。 L^*

值与糊化温度呈极显著正相关；与籽粒蛋白质含量、籽粒硬度、湿面筋含量、吸水率、面团形成时间和稳定时间呈显著负相关。*a**值则与籽粒蛋白质含量、籽粒硬度、吸水率、稳定时间、峰值黏度、低谷黏度、最终黏度和回生值呈极显著正相关，与

面筋指数和峰值时间呈显著正相关；而与糊化温度呈极显著负相关。*b**值则与籽粒蛋白质含量、籽粒硬度、湿面筋含量、吸水率、面团形成时间和稳定时间呈极显著正相关，和低谷黏度呈显著正相关；而与面筋指数、稀懈值和糊化温度呈极显著



GPC: 籽粒蛋白质含量; TGW: 千粒重; GH: 籽粒硬度; WGC: 湿面筋含量; GI: 面筋指数; SV: 沉降值; WAR: 吸水率; DDT: 面团形成时间; ST: 稳定时间; PV: 峰值黏度; TV: 低谷黏度; BD: 稀懈值; FV: 最终黏度; SD: 回生值; PT: 峰值时间; PaT: 糊化温度。

GPC: grain protein content; TGW: 1000-grain weight; GH: grain hardness; WGC: wet gluten content; GI: gluten index; SV: sedimentation value; WAR: water absorption rate; DDT: dough development time; ST: stability time; PV: peak viscosity; TV: trough viscosity; BD: breakdown; FV: final viscosity; SD: setback; PT: peak time; PaT: pasting temperature.

图 4 小麦面粉色泽与品质指标的相关性分析

Fig.4 Correlation analysis of wheat flour color and quality index

负相关。

以籽粒蛋白质含量、千粒重、籽粒硬度、湿面筋含量、面筋指数、沉降值、糊化温度、峰值时间、回生值、吸水率、面团形成时间、稳定时间、峰值黏度、低谷黏度、稀懈值和最终黏度为自变量，面粉白度为因变量进行逐步回归分析，最终余下籽粒蛋白质含量、籽粒硬度、面筋指数、沉降值、糊化温度和稀懈值 6 项指标，可解释面粉白度 80.9% 的变异 ($R^2=0.809$)。公式为：面粉白度=60.759-0.530×籽粒蛋白质含量-0.370×籽粒硬度+0.047×面筋指数+0.054×沉降值+0.413×糊化温度+0.003×稀懈值 ($F=61.283, P<0.05$)，未发现显著的共线性问题，自相关性检验表明不存在自相关问题，各变量之间存在良好的关联关系，模型拟合效果较好。面筋指数、沉降值和稀懈值对面粉白度产生显著正向影响；籽粒蛋白质含量和籽粒硬度对面粉白度产生显著负向影响。

2.4 94 份小麦的 KASP 标记检测分析

检测到包含籽粒硬度基因 *Pinb-D1* 或 *Pina-D1* 任意 1 个突变型的品种共 49 份，含 *Pinb-B2b* 的品

种共 18 份，频率分别为 59.0%和 19.2%。低多酚氧化酶活性等位变异 *Ppo-A1b* 和 *Ppo-D1a*、高脂肪氧化酶活性等位变异 *Lox-B1a* 以及高过氧化物酶活性等位变异 *TaPod-A1b* 均为优异等位变异，频率分别为 21.3%、3.9%、0.0%和 8.0%。籽粒黄色素含量/类胡萝卜素合成优异基因包括 *Psy-A1b*、*Psy-B1a/b*、*Psy-D1a*、*TaPds-B1b*、*TaZds-A1a* 和 *TaLyc-B1b*，频率分别为 0.0%、98.9%、96.6%、78.5%、5.3%和 53.8% (表 4)。将相关分子标记与面粉和鲜面片的白度值相关联，结果表明，籽粒硬度基因检测为软质 (*Pinb-D1a* 或 *Pina-D1a*) 的小麦面粉和鲜面片白度整体高于硬质小麦；检测到与色素降解有关的氧化酶基因 (*Ppo-A1b*、*Ppo-D1a* 和 *TaPod-A1b*) 表现的品种面粉和鲜面片白度相对较高；检测到籽粒黄色素含量或类胡萝卜素合成有利基因 (*Psy-B1a/b*、*Psy-D1a*、*TaPds-B1b* 和 *TaLyc-B1b*) 表现的品种面粉和鲜面片白度相对较高，而检测到 *TaZds-A1a* 有利基因的品种白度略低。每份小麦的 KASP 标记检测结果详见网络增强出版附加材料附表 2。

表 4 94 份小麦材料品质及硬度相关基因等位变异的分布频率
Table 4 Distribution frequencies of alleles variation in quality and hardness of 94 wheat materials

性状 Trait	基因 Gene	等位变异 Allele	数目 Number	频率 Frequency (%)	面粉白度 Flour WI	L^*	0 h 鲜面片白度 WI of 0 h fresh noodle sheet	24 h 鲜面片白度 WI of 24 h fresh noodle sheet	N	Indet	Heterozygote
籽粒硬度 Grain hardness	<i>Pinb-D1</i>	<i>Pinb-D1b</i>	47	54.7	63.2	89.8	28.6	19.5	7	1	—
		<i>Pinb-D1a</i>	39	45.4	69.2	91.1	33.2	23.0			
	<i>Pina-D1</i>	<i>Pina-D1b</i>	2	2.2	63.7	89.7	33.1	19.9	2	—	1
		<i>Pina-D1a</i>	89	97.8	65.9	90.4	30.8	21.1			
	<i>Pinb2-V</i>	<i>Pinb-B2b</i>	18	19.2	65.7	90.4	29.2	19.9	—	—	—
		<i>Pinb-B2a</i>	76	80.9	65.9	90.4	31.2	21.2			
籽粒色泽 Grain color	<i>Ppo-A1</i>	<i>Ppo-A1b</i>	20	21.3	67.2	90.6	31.8	22.9	—	—	—
		<i>Ppo-A1a</i>	74	78.7	65.5	90.3	30.6	20.5			
	<i>Ppo-D1</i>	<i>Ppo-D1a</i>	2	3.9	71.8	91.6	34.7	28.6	1	—	42
		<i>Ppo-D1b</i>	49	96.1	64.9	90.2	30.5	20.5			
	<i>Lox-B1</i>	<i>Lox-B1a</i>	0	0.0	—	—	—	—	4	—	—
		<i>Lox-B1b</i>	90	100.0	65.8	90.4	30.7	20.9			
	<i>TaPod-A1</i>	<i>TaPod-A1b</i>	7	8.0	68.2	91.0	33.0	24.0	—	4	2
		<i>TaPod-A1a</i>	81	92.1	65.6	90.3	30.6	20.7			
	<i>Psy-A1</i>	<i>Psy-A1b</i>	0	0.0	—	—	—	—	—	1	—
		<i>Psy-A1a</i>	93	100.0	65.9	90.4	30.8	21.0			
	<i>Psy-B1</i>	<i>Psy-B1a/b</i>	93	98.9	65.9	90.4	30.8	21.0	—	—	—
		<i>Psy-B1c</i>	1	1.1	60.9	89.6	29.5	19.3			
	<i>Psy-D1/Sr25</i>	<i>Psy-D1a</i>	86	96.6	66.0	90.4	30.8	21.1	2	3	—
		<i>Sr25/Psy1Da-g</i>	3	3.4	62.6	89.5	31.9	19.4			
<i>TaPds-B1</i>	<i>TaPds-B1b</i>	73	78.5	65.9	90.4	31.0	20.9	—	1	—	
	<i>TaPds-B1a</i>	20	21.5	65.9	90.4	30.3	21.5				
<i>TaZds-A1</i>	<i>TaZds-A1a</i>	5	5.3	64.8	90.0	27.7	16.9	—	—	—	
	<i>TaZds-A1b</i>	89	94.7	65.9	90.4	31.0	21.2				
<i>TaLyc-B1</i>	<i>TaLyc-B1b</i>	50	53.8	66.6	90.6	30.9	21.7	—	1	—	
	<i>TaLyc-B1a</i>	43	46.2	65.1	90.2	30.7	20.2				

“N”表示无扩增（可能是样品无该位点或 PCR 失败）；“Indet”表示无法确认（样品有扩增，介于杂合和亲本分型之间，无法确定等位型）；“Heterozygote”表示杂合基因型。

“N”indicates no amplification (sample lacks the locus or PCR failed); “Indet”indicates indeterminate results (amplification present but ambiguous between heterozygote and parental genotypes); “Heterozygote” indicates heterozygous genotype.

统计发现白度值高的区域划分中软质小麦占比较高，因此以硬度值及相关基因为指标将 94 份材料分为硬质小麦（*Pinb-D1b* 或 *Pina-D1b*）和软质小麦（*Pinb-D1a* 或 *Pina-D1a*）。结果（表 5）表明，硬质小麦面粉 a^* 值和 b^* 值均大于软质小麦；白度和 L^* 小于软质小麦，白度差异显著。硬质小麦面粉白度在 56.4~67.0，软质小麦白度在 66.1~74.7，其中硬质小麦品种只有周麦 36（白度 67.0）大于软质小麦中白度值最低的宁麦 33（白度 66.1）。软质小麦面粉白度达市场标准的包括川麦 93、泛麦 8 号、绵麦 902、宁麦资 518、华麦 14 号和扬麦 45

等 13 份小麦品种；硬质小麦中周麦 36、淮麦 33、扬辐麦 15 和宁麦资 218 等品种白度较高。白度值大于 70 的 13 份材料中 *Psy-B1a/b* 和 *Psy-D1a* 的频率为 100.0%，*TaPds-B1b* 的频率为 84.6%，*TaLyc-B1b* 的频率为 61.5%，*Ppo-A1b* 的频率为 46.2%，*Ppo-D1a* 的频率为 16.7%，*TaPod-A1b* 的频率为 18.2%，优质基因在高白度材料分布频率比整体材料高。检测含“*Psy-B1a/b*、*Psy-D1a*、*TaPds-B1b* 或 *TaLyc-B1b*”组合的有 5 份品种，“*Ppo-A1b*、*Psy-B1a/b*、*Psy-D1a* 或 *TaPds-B1b*”组合的有 5 份品种，“*Psy-B1a/b*、*Psy-D1a* 或 *TaPds-B1b*”组合

表 5 不同硬度类型小麦的面粉品质性状
Table 5 Flour quality traits of wheat with different hardness types

小麦硬度类型 Wheat hardness type	面粉白度 Flour WI	粒色 Grain color	籽粒硬度 Grain hardness	L^*	a^*	b^*	吸水率 Water absorption rate(%)
硬质小麦	63.2	13 白, 36 红	69.6	89.8	0.6	8.8	63.8
软质小麦	69.9	5 白, 29 红	56.8	91.3	0.4	6.9	57.1

有 10 份品种,“*Psy-B1a/b*、*Psy-D1a* 或 *TaLyc-B1b*”组合有 7 份品种。优质基因组合在高白度小麦品种中高频率分布。

3 讨论

3.1 白度与硬度、蛋白质和淀粉相关品质指标

刘娜等^[11]以 71 份新疆小麦品种为材料,胡瑞波等^[38]以 16 份色泽差异较大的材料开展研究,均发现面粉白度与籽粒硬度呈极显著负相关。本研究相关分析结果与之相符,面粉白度与籽粒硬度呈极显著负相关,且负相关性最强($r=-0.83$),表明籽粒硬度是面粉白度的关键品质影响指标。硬度用于评价胚乳质地软硬程度,当胚乳细胞间充填紧密且无空气间隙时硬度高,胚乳呈半透明状态;胚乳细胞结合松散时硬度低,籽粒呈粉质状态,软质小麦多为粉质且白度较高^[14,39-40]。小麦硬度由胚乳细胞中淀粉和蛋白质的黏结作用以及淀粉间蛋白质基质的连续性共同决定,因此蛋白质和淀粉也与面粉白度相关。

姜小苓等^[9]以 216 份不同麦区的小麦品种为材料研究发现,面粉白度与籽粒蛋白含量($r=-0.36$)和面团形成时间($r=-0.207$)呈极显著负相关;而王霖等^[10]以 8 份不同白度的小麦品种为材料研究发现,面粉白度与蛋白质含量、干面筋含量、湿面筋含量和面筋指数相关性极小。本研究相关分析表明,面粉白度与籽粒蛋白质含量、湿面筋含量、面团形成时间和稳定时间等蛋白相关指标呈极显著负相关,与面筋指数显著正相关,这一结果与多数研究^[2-9]基本一致,但与部分研究^[10-11]不一致,推测是因环境及试验材料差异,且部分研究供试材料较少所致。硬质小麦蛋白质含量较高且淀粉含量低,大量蛋白质分子暴露在外,面粉颗粒度大,对光线散射多^[41],导致白度值下降。王君婵等^[42]以 10 个江苏沿淮小麦为研究材料发现,面粉白度与稀懈值和糊化温度呈极显著正相关。本研究相关分析结果与之相符,显示面粉白度与稀懈值和糊化温度呈极显著正相关,与低谷黏度、最终黏度和回生值等淀粉糊化特性参数指标呈显著负相关。淀粉糊化参数高的多为弱筋小麦^[43],弱筋小麦结合松散,白度值较高。逐步回归方程结果表明,籽粒蛋白质含量、籽粒硬度、面筋指数、沉降值、糊化温度和稀懈值可解释小麦白度 80.9% 的变异,说明白度与籽粒硬度、蛋白质和淀粉相关品质指标关系密切。

3.2 高白度小麦理想基因型及筛选运用

低多酚氧化酶活性、高脂肪氧化酶活性以及低黄色素含量是小麦品质育种的重要目标^[29]。其中,多酚氧化酶是导致面粉在存放期间发生褐化的主要原因^[44]。张立平等^[45]研究发现,多酚氧化酶基因在 2AL 和 2DL 上的主效位点对表型变异的解释率均在 25% 以上。高活性的脂肪氧化酶和高活性的过氧化物酶对面粉具有增白效果^[27]。本研究结果显示,*Ppo-Alb* 基因型占比 21.3%,*Ppo-D1a* 基因型仅占比 3.9%,未检测到 *Lox-B1a* 基因型,*TaPod-Alb* 基因型占比 8.0%。小麦籽粒黄色素含量主要受主效基因 *Psy-A1* 和 *Psy-B1* 调控^[20]。本研究中未检测到 *Psy-Alb* 基因型,*Psy-B1a/b*、*Psy-D1a* 和 *TaPds-B1b* 基因型的比例较高。目前,国内品种尤其是长江中下游麦区品种,缺乏 *Ppo-Alb*、*Ppo-D1a*、*Lox-B1a* 和 *TaPod-Alb* 等氧化酶优异基因型,以及 *Psy-Alb* 和 *TaZds-A1a* 等黄色素优异基因型,育种家应予以重视。

如前文所述,面粉白度与籽粒硬度呈极显著负相关。本研究中,软质小麦白度(69.9)整体高于硬质小麦(63.2),因此,硬质小麦白度和色泽改良是一大难题^[46]。不过,考虑到供试材料来源广泛,不同地域环境下的种植结果可能存在差异。本研究筛选出周麦 36、淮麦 33、扬辐麦 15 和宁麦资 218 等白度较好的硬质小麦品种。其中,周麦 36 的蛋白质含量、湿面筋含量和沉降值较高,且其面粉白度略高于软质小麦宁麦 33,这可能是由于周麦 36 聚集了 *Ppo-Alb*、*TaPod-Alb*、*Psy-B1a/b* 和 *Psy-D1a* 等优异等位变异。对于高白度硬质小麦,其硬度基因多为 *Pinb-D1b* 或 *Pina-D1b* 基因型,应聚合 *Ppo-Alb*、*Ppo-D1a*、*Lox-B1a* 和 *TaPod-Alb* 等氧化酶变异基因型,以及籽粒黄色素含量或类胡萝卜素合成优异基因型^[47]。同时,加大育种材料相关酶活性和色素等表型的筛选力度,结合现代新型生物技术,配套相应的栽培措施,全方位加强面粉白度及稳定性的改良。此外,本研究还筛选出了川麦 93、绵麦 902、泛麦 8 号、宁麦资 518、华麦 14 号和扬麦 45 等 13 个高白度软质小麦品种,其白度均高于硬质小麦,且优异色泽基因等位变异的比率高于整体材料,可作为色泽改良的优异亲本。后续小麦品种改良工作中,应加强优良亲本的利用,注重色泽优异基因的聚合,并强化相关表型的筛选,以逐步提升小麦品种的白度与色泽品质。

4 结论

面粉白度与籽粒蛋白质含量、籽粒硬度、湿面筋含量、面团形成时间及稳定时间呈极显著负相关；与低谷黏度、最终黏度和回生值呈显著负相关；与亮度 L^* 值、稀懈值和糊化温度呈极显著正相关。籽粒蛋白质含量、籽粒硬度、面筋指数、沉降值、糊化温度和稀懈值可解释面粉白度 80.9% 的变异。品质基因变异位点 *Pinb-D1b*、*Pina-D1b*、*Ppo-A1b*、*Ppo-D1a*、*TaPod-A1b*、*Lox-B1a*、*Psy-A1b*、*Psy-B1a/b*、*Psy-D1a*、*TaPds-B1b*、*TaZds-A1a* 和 *TaLyc-B1b* 的分布频率分别为 54.7%、2.2%、21.3%、3.9%、8.0%、0.0%、0.0%、98.9%、96.6%、78.5%、5.3% 和 53.8%，同一基因的不同变异类型会导致小麦色泽存在差异。筛选出扬麦 15、扬麦 25、川麦 93、绵麦 902 和扬麦 45 等 13 个高白度软质小麦品种，以及周麦 36、淮麦 33、扬辐麦 15 和宁麦 218 等白度较高的硬质小麦品种。

参考文献

- [1] 于海霞, 肖静, 田纪春. 小麦面粉色泽(白度)与 DArT 标记的关联分析. 作物学报, 2014, 40(12): 2198-2202.
- [2] 唐建卫, 殷贵鸿, 韩玉林, 等. 小麦面粉白度与色泽因子配合力及相关分析. 麦类作物学报, 2013, 33(5): 935-941.
- [3] 王鑫宇, 姜培彦, 任晨刚, 等. 脱脂大豆粉对小麦粉品质及馒头增白效果的影响及应用稳定性研究. 粮食与油脂, 2023, 36(11): 55-58.
- [4] 王崇崇, 王晓曦, 马森. 粒度对小麦粉及面制品品质影响的研究进展. 粮食与油脂, 2017, 30(8): 8-10.
- [5] Alyssa H, Lorenzo F, Andrea B, et al. Wheat flour granulometry determines colour perception. Food Research International, 2014, 64(10): 363-370.
- [6] Alyssa H, Lorenzo F, Andrea B, et al. Colour screening of whole meal flours and discrimination of seven Triticum subspecies. Journal of Cereal Science, 2017, 77(9): 9-16.
- [7] Khan K. Wheat (Fourth Edition). Minnesota: AACCI International Press, 2009.
- [8] 胡新中, 卢为利, 阮侦区, 等. 影响小麦面粉白度的品质指标分析. 中国农业科学, 2007, 40(6): 1142-1149.
- [9] 姜小琴, 董娜, 丁位华, 等. 小麦品种面粉白度的变异及其影响因素分析. 麦类作物学报, 2014, 34(1): 126-131.
- [10] 王霖, 郭新平, 姬广臣, 等. 小麦面粉白度配合力及其与主要品质性状的相关分析. 麦类作物学报, 2006, 26(1): 62-65.
- [11] 刘娜, 哈力旦·依克热木, 刘联正, 等. 新疆小麦品种面粉色泽(白度)的变异及其影响因素分析. 新疆农业科学, 2023, 60(10): 2426-2432.
- [12] Qamar Z U, Bansal U K, Dong C M, et al. Detection of *puroindoline* (*Pina-D1* and *Pinb-D1*) allelic variation in wheat landraces. Journal of Cereal Science, 2014, 60(3): 610-616.
- [13] 陈锋, 董中东, 程西永, 等. 小麦 *puroindoline* 及其相关基因分子遗传基础研究进展. 中国农业科学, 2010, 43(6): 1108-1116.
- [14] 陈锋, 何中虎, 陈东升, 等. 中国春小麦籽粒硬度 *puroindoline* 基因等位变异检测. 中国农业科学, 2007, 40(2): 217-224.
- [15] Irvine G N, Anderson J A. Variation in principal quality factors of durum wheat with a quality prediction test for wheat or semolina. Cereal Chemistry, 1953, 30(4): 334-342.
- [16] 肖永贵, 何心尧, 刘建军, 等. 中国冬小麦品种多酚氧化酶活性基因等位变异检测及其分布规律研究. 中国农业科学, 2008, 41(4): 954-960.
- [17] 杨芳萍, 何心尧, 何中虎, 等. 中国小麦品种黄色素含量基因等位变异分子检测及其分布规律研究. 中国农业科学, 2008, 41(10): 2923-2930.
- [18] 胡瑞波, 田纪春, 吕建华. 小麦类胡萝卜素含量的稳定性及其与黄碱面条色泽性状的相关性分析. 作物学报, 2004, 30(6): 597-601.
- [19] 张晓, 高德荣, 李曼, 等. 小麦面粉和鲜面片色泽及 *Psy-A1* 与 *Ppo-A1* 等位变异检测. 麦类作物学报, 2019, 39(4): 415-422.
- [20] He X Y, Zhang Y L, He Z H, et al. Characterization of phytoene synthase 1 gene (*Psy1*) located on common wheat chromosome 7A and development of a functional marker. Theoretical and Applied Genetics, 2008, 116(2): 213-221.
- [21] Dong C H, Ma Z Y, Xia X C, et al. Allelic variation at the *TaZds-A1* locus on wheat chromosome 2A and development of a functional marker in common wheat. Journal of Integrative Agriculture, 2012, 11(7): 1067-1074.
- [22] Wei J X, Geng H W, Zhang Y, et al. Mapping quantitative trait loci for peroxidase activity and developing gene-specific markers for *TaPod-Alon* wheat chromosome 3AL. Theoretical and Applied Genetics, 2015, 128(10): 20-67.
- [23] Geng H W, Shi J, Fuerst E P, et al. Physical mapping of peroxidase genes and development of functional markers for *Tapod-D1* on bread wheat chromosome 7D. Frontiers in Plant Science, 2019, 10(4): 523.
- [24] Geng H W, Xia X C, Zhang L P, et al. Development of functional markers for a lipoyxygenase gene *TaLox-B1* on chromosome 4BS in common wheat. Crop Science, 2012, 2(2): 568-576.
- [25] Anderson J V, Morris C F. Purification and analysis of wheat grain polyphenol oxidase (PPO) protein. Cereal Chemistry, 2003, 80(2): 135-143.
- [26] Rasheed A, Wen W E, Gao F M, et al. Development and validation of KASP assays for genes underpinning key economic traits in bread wheat. Theoretical and Applied Gene, 2016, 129(10): 1843-1860.
- [27] 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. 作物杂志, 2020(4): 64-71.
- [28] 曹燕燕, 李雷雷, 葛昌斌, 等. 国审 4 个漯麦品种重要性状功能基因 KASP 检测与分析. 作物杂志, 2024(5): 8-17.
- [29] 李春鑫, 赵明忠, 韩留鹏, 等. 小麦面粉色泽相关基因在河南地方品种中的分布. 麦类作物学报, 2022, 42(6): 685-696.
- [30] 吴豪, 黄园园, 汪辉, 等. 长江中下游地区小麦品种籽粒和面条品质分析. 中国农业科学, 2019, 52(13): 2193-2207.
- [31] 李春鑫, 赵明忠, 韩留鹏, 等. 黄淮麦区 41 个小麦品种(系)品质相关基因分子检测. 河南农业科学, 2022, 51(2): 18-27.
- [32] 韩雪, 杨丹丹, 孔欣欣, 等. 200 份小麦种质品质性状及醇溶蛋白遗传多样性分析. 作物杂志, 2024(6): 61-70.
- [33] 全国粮油标准化技术委员会. 小麦硬度测定 硬度指数法: GB/T 21304-2007. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [34] 全国粮油标准化技术委员会. 粮油检验 小麦沉淀指数测定 SDS 法: GB/T 15685-2011. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [35] 全国粮油标准化技术委员会. 小麦、黑麦及其粉类和淀粉糊化特性测定 快速粘度仪法: GB/T 24853-2010. 北京: 中国标准

- 出版社, 2010.
- [36] 全国粮油标准化技术委员会. 小麦和小麦粉 面筋含量 第 2 部分: 仪器法测定湿面筋: GB/T 5506.2-2008. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [37] Saghai-maroo M A, Soliman K M, Jorgensen R A, et al. Ribosomal DNA spacer-length polymorphisms in barley: mendelian inheritance, chromosomal location, and population dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1984, 81(24): 8014-8018.
- [38] 胡瑞波, 田纪春. 小麦主要品质性状与面粉色泽的关系. *麦类作物学报*, 2006, 26(3): 96-101.
- [39] Stenvert N L, Kingswood K. The influence of the physical structure of the protein matrix on wheat hardness. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1977, 28(11): 11-19.
- [40] 南金生, 安江红, 柴明娜, 等. 淀粉特性及其表面结合蛋白与裸燕麦籽粒硬度的关系研究. *作物学报*, 2023, 49(9): 2552-2561.
- [41] 胡新中, 张国权, 张正茂, 等. 小麦面粉、面条色泽与蛋白质组分的关系. *作物学报*, 2005, 31(4): 515-518.
- [42] 王君婵, 吴旭江, 吴迪, 等. 小麦面粉及鲜面片色泽的影响因素. *麦类作物学报*, 2020, 40(5): 560-567.
- [43] 陈建省, 田纪春, 吴澎, 等. 不同筋力面筋蛋白对小麦淀粉糊化特性的影响. *食品科学*, 2013, 34(3): 75-79.
- [44] 陈锋, 左爱辉, 崔党群. 小麦籽粒多酚氧化酶及其控制基因研究进展. *麦类作物学报*, 2011, 31(4): 780-785.
- [45] 张立平, 葛秀秀, 何中虎, 等. 普通小麦多酚氧化酶活性的 QTL 分析. *作物学报*, 2005, 31(1): 7-10.
- [46] 辛庆国, 王江春, 殷岩, 等. 高白度小麦遗传育种研究进展. *山东农业科学*, 2009, 210(2): 15-18.
- [47] 相吉山, 穆培源, 桑伟, 等. 新疆小麦 *Psy-A1*、*Ppo-A1*、*Ppo-D1*、*TaLox-B1* 等位变异对面片色泽的影响. *作物学报*, 2015, 41(1): 72-79.

Analysis of Color Traits and Related Gene Composition in Wheat Flour and Fresh Noodle Sheet

Yuan Bo¹, Zhang Xiao², Fang Zhengwu¹, Li Man², Shou Lulu²,
Wang Zunjie², Jiang Wei², Xiao Longfei², Gao Derong^{2,3}

(¹College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 434025, Hubei, China; ²Lixiahe Institute of Agriculture Sciences/Key Laboratory of Wheat Biology and Genetic Improvement for Low and Middle Yangtze Valley, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangzhou 225007, Jiangsu, China; ³College of Agriculture, Yangzhou University/Jiangsu Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou 225009, Jiangsu, China)

Abstract The whiteness (WI) of wheat flour and its products is a key indicator influencing the commercial quality of wheat. Using 94 wheat varieties as experimental materials, the differences in flour WI and its products among different varieties and their influencing factors were investigated. The results showed significant differences in WI among wheat varieties, while the correlation analysis of flour and fresh noodle sheet color from the same material showed the same performance. Flour WI was highly significantly negatively correlated with grain hardness, grain protein content, wet gluten content, dough development time, and stability time; significantly negatively correlated with trough viscosity, final viscosity, and setback value; and positively correlated with gluten index, breakdown, and pasting temperature. Grain hardness, grain protein content, sedimentation value, pasting temperature, and breakdown accounted for 80.9% of the variation in flour WI. Gluten index, sedimentation value, pasting temperature, and breakdown had significant positive effects on flour WI, while grain protein content and grain hardness exerted significant negative effects. The negative correlation between flour WI and hardness was the strongest ($r = -0.83$), indicating that hardness is the key factor affecting wheat WI and color. The WI and color of flour and fresh noodle sheets from soft wheat were generally higher than those from hard wheat. The distribution frequencies of variation loci of quality-related genes, namely *Pinb-D1b*, *Pina-D1b*, *Ppo-A1b*, *Ppo-D1a*, *TaPod-A1b*, *Lox-B1a*, *Psy-A1b*, *Psy-B1a/b*, *Psy-D1a*, *TaPds-B1b*, *TaZds-A1a*, and *TaLyc-B1b*, were 54.7%, 2.2%, 21.3%, 3.9%, 8.0%, 0.0%, 0.0%, 98.9%, 96.6%, 78.5%, 5.3%, and 53.8%, respectively. Thirteen high-WI soft wheat varieties, such as Yangmai 15, Yangmai 25, Chuanmai 93, Mianmai 902, and Yangmai 45, and high-WI hard wheat varieties, such as Zhoumai 36, Huaimai 33, Yangfumai 15, and Ningmaizi 218, were screened. The WI of high-WI soft wheat varieties was higher than that of hard wheat, and the ratio of superior color gene allelic variations in these varieties was higher than that of the overall materials. By strengthening the utilization of elite parents while emphasizing the pyramiding of superior color genes and the screening of related phenotypes, the WI and color of wheat varieties can be gradually improved.

Key words Wheat; Whiteness; Color; Flour quality; KASP marker