

我国部分审定小麦品种的品质性状及基因型分析

权威¹, 马锦绣¹, 华正蓉², 左静红¹, 王伟伟¹, 王俊稳¹, 张立平¹, 庞斌双¹, 赵昌平¹(¹北京市农林科学院杂交小麦研究所/杂交小麦分子遗传北京市重点实验室, 北京 100097; ²北京农学院植物科学技术学院, 北京 102206)

摘要: 为了解我国小麦品种的品质相关基因分布及品质性状表现, 本文针对近年来我国审定的 530 份小麦品种, 进行容重、粗蛋白质含量、湿面筋含量、吸水率和稳定时间等性状的分析, 同时利用 13 个品质相关的 KASP 标记检测基因型, 明晰不同的品质种植区域内的审定品种优异品质基因等位变异的分布及聚合情况。检测的优异品质基因等位变异在不同区域间的分布不均衡, 其中 *IBL/IRS* (-)、*1Ax 1/1Ax 2**、*Pinb-D1b* 和 *Pinb-B2b* 优异等位变异在品质区域间分布频率呈显著性差异, 而 *1Bx17+1By18*、*TaPsy-D1a* 和 *TaPod-A1b* 等优异等位变异的分布在区域间无差异; 同时进行多个优异等位变异聚合情况分析发现: 5 个面筋质量相关基因中筛选出同时含有 *IB/IR* (-)、*1Ax 1/1Ax 2**、*IDx5+IDy10*、*glu-B3g*+ 4 个优异等位变异的材料 12 份材料; 3 个籽粒硬度相关基因中未检测到同时含有 *Pina-D1b*、*Pinb-D1b* 和 *Pinb-B2b* 的材料, 检测到含有 *Pina-D1b+Pinb-B2b* 组合的材料 16 份, 含有 *Pinb-D1b+Pinb-B2b* 组合的材料 88 份。5 个籽粒颜色相关基因中同时聚合 5 个优异等位变异的材料 10 份。检测的 13 个品质相关基因 KASP 标记中, 未发现聚合 11 个以上优异等位变异基因的材料, 聚合 10 个优异等位变异基因的材料有 4 份, 聚合 9 个优异等位变异的材料有 16 份。品质分析结果显示: 不同区域间品质指标值也存在区域性的差异, 且稳定时间与蛋白质含量和湿面筋含量指标不协调。面筋品质相关基因优异等位变异 *IBL/IRS* (-)、*1Ax1/1Ax2**和 *IDx5+IDy10* 在强筋, 中强筋和中筋品种间的分布频率呈极显著差异, 且与品质表现呈极显著正相关。

关键词: 小麦; 品质相关基因; 品质性状; KASP 标记

Quality Analysis in a Collection of Wheat Varieties Approved in China

QUAN Wei¹, MA Jin-xiu¹, HUA Zheng-rong², ZUO Jing-hong¹, WANG Wei-wei¹, WANG Jun-wen¹, ZHANG Li-ping¹, PANG Bin-shuang¹, ZHAO Chang-ping¹(¹Research Institute of Hybrid Wheat, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences / Beijing Municipal Key Laboratory of Molecular Genetics of Hybrid Wheat, Beijing 100097; ²College of Plant Science and Technology, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206)

Abstract: In order to clarify the situation of the quality-related genes and corresponding traits of Chinese wheat varieties, 530 wheat varieties released in China in the recent years were analyzed for volume weight, crude protein content, wet gluten content, water absorption and stability time. This collection was genotyped with 13 quality related KASP markers, enabling deciphering the distribution and pyramiding of favorable alleles in wheat-planting areas. The frequency of favorable alleles among different regions was unevenly distributed. The frequencies of *IBL/IRS* (-), *1Ax 1/1Ax 2**, *Pinb-D1b* and *Pinb-B2b* were significantly different among different regions, while no difference on the frequency of *1Bx17+1By18*, *TaPsy-D1a* and *TaPod-A1b* among different regions was observed. Twelve genotypes containing four elite alleles of *IB/IR* (-), *1Ax 1/1Ax 2**, *IDx5+IDy10* and *glu-B3g*+ at five gluten quality related loci were identified. For three grain hardness genes, the elite alleles combination (*Pina-D1b* + *Pinb-D1b* + *Pinb-B2b*) was not detected, while the combinations of either *Pina-D1b* + *Pinb-B2b* or *Pinb-D1b* + *Pinb-B2b* were found in 16 and 88 samples, respectively. Ten samples were found containing favorable allelic variants of five color related genes. Four genotypes simultaneously containing 10 favorable alleles were obtained, and 16 varieties with 9 favorable allelic variants were found. The results of quality analysis showed that there were regional differences in quality traits, and the stability time was inconsistent with protein content and wet gluten content. The frequency of elite alleles at gluten quality related genes, such as *IBL/IRS* (-), *1Ax1/1Ax2** and *IDx5+IDy10*, was significantly different in the wheat varieties with strong gluten, medium strong gluten and medium gluten, and the allele frequency was positively correlated with the quality.

收稿日期: 2022-10-31

修回日期:

网络出版日期:

URL:

第一作者研究方向为杂交小麦遗传育种, E-mail: quanwei360@sina.com

通信作者: 赵昌平, 研究方向为小麦杂种优势利用, E-mail: cp_zhao@vip.sohu.com; 庞斌双, 研究方向为小麦分子育种, E-mail: 1492196201@qq.com

基金项目: 北京市农林科学院科技创新能力建设专项 (KJCX20200115; KJCX20200304); 国家重点研发计划项目 (2016YFD0102000)

Foundation Projects: Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences Sci-Tech Innovation Capacity Building Program (KJCX20200115;

Key words: Wheat; Quality related genes; Quality Traits; KASP marker

我国是世界上最大的小麦生产国和消费国,小麦是我国第二大口粮作物^[1],其生产对保障国家粮食安全具有重要意义。在过去的 30 年间中国小麦生产取得了巨大的成绩,保证了国家口粮安全。随着时代的发展,育种目标经历了几个阶段的变革,从高产育种为主,到高产抗病育种,再到品质育种、抗逆育种等^[2-4]。目前,高产育种取得了可喜的成绩,我国小麦产量逐年提高,根据中国农业农村部数据显示,2021 年中国小麦产量为 13425 万吨,同比上升 2.0%;2020 年中国小麦单位面积产量为 5742 公斤/公顷,同比上升 2.2%^[5]。同时随着人民生活水平的不断提高,对小麦品质的要求也随之增高,多样化食品类型的优质专用小麦需求增大,目前优质专用小麦尚不能完全满足市场需求,我国小麦进口量逐年提升,从 2010 年 121 万吨上涨至 2021 年 971 万吨。进口小麦以高筋小麦和低筋小麦为主,对国内小麦供应起到调节作用^[6]。从粮食安全角度来讲,我国小麦产量能够满足国内供给,数量上是安全的,但是对于特定质量的需求外溢,在质量安全方面威胁着我国小麦的粮食安全,因此以需求为导向引领小麦种业发展的方向,小麦的品质育种,愈加受到重视。

分子标记辅助选择在育种中发挥着重要的作用,可以快速准确了解资源的基因型,提高种质资源精准鉴定,从而指导组合的选配、后代的筛选、鉴定等。对品质育种的分子标记辅助来说,早期的优异等位基因的筛选至关重要^[7],随着 KASP SNP 标记的不断丰富和完善,以其快速、高效、低成本等优点成为检测小麦品种的相关基因组成的高效技术手段,可为小麦资源的利用提供有力参考。目前,很多学者已开展了利用 KASP 技术的 SNP 标记鉴定工作^[8-12]。

目前,品质相关基因的检测主要集中在籽粒硬度,制品颜色及谷蛋白亚基等。籽粒硬度是小麦品质育种及研究中的重要参数,是小麦分类、分级和定价的重要评价指标。在面粉加工过程中,籽粒硬度不仅影响磨粉能耗、润麦加水量、出粉率,而且是决定面粉颗粒大小、面粉粒度分布、破损淀粉数量及淀粉破损程度等的关键因素^[13]。Friabilin 蛋白能够软化小麦胚乳,易与淀粉颗粒表面相互作用,且蛋白表达量与籽粒硬度呈显著负相关^[14],该基因的分子检测对品质育种的指导意义很大^[15]。

我国传统面制食品馒头、包子、面条,对面粉的白度有较高的要求。面粉及面制品颜色成为小麦品质评价的重要指标。其受黄色素 (Yellow pigment, YP)、多酚氧化酶 (polyphenol oxidase, PPO) 及过氧化物酶 (peroxidase, POD) 影响较大^[16-19]。小麦籽粒或面粉内的 YP 含量受到 YP 生物合成过程中的关键酶决定,如八氢番茄红素合成酶 (Phytoene Synthase, PSY)、 ζ -胡萝卜素脱氢酶 (ζ -carotene desaturase, ZDS) 和八氢番茄红素脱氢酶 (Phytoene desaturase, PDS) 等^[20-21]。同时籽粒中过氧化物酶 (peroxidase, POD) 对小麦面粉及其面制品的色泽具有增白作用^[22]。

对于小麦的食用品质,面筋的强度和质量是面粉食用用途的决定因素。众所周知,高分子量麦谷蛋白亚基中的 1 和 2*, 5+10 等亚基对面筋强度和烘烤品质有正向作用^[23-24],低分子量麦谷蛋白亚基的 *Glu-B3g* 对面筋的强度有正向作用^[25],而 1B/1R 易位品种的面筋质量差,加工品质劣^[26-27]等。因此小麦的面筋强度和质量也是小麦品质评价中的重要指标,传统的检测方法实验操作复杂,费时费力,而利用基于 KASP 技术的 SNP 标记技术可以快速检测小麦品种的相关基因型。

目前我国已培育出了大批的小麦新品种,在各个主产麦区发挥着重要作用。本文收集 530 份 2010-2021 年间国内审定的小麦品种,利用基于 KASP 技术的 SNP 功能型标记分析不同区域内小麦品种的品质相关基因 (包括籽粒硬度、面粉颜色、高、低分子量麦谷蛋白亚基、1B/1R 易位系) 的分布频率,了解品种中品质基因的聚合情况,同时分析区域间小麦品种的容重、粗蛋白质含量、湿面筋含量和稳定时间等性状的差异,

以期为优质小麦分子标记辅助育种提供理论依据，为资源的高效合理利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试小麦品种为近年来国内审定的不同区域小麦品种，其中包括国家审定品种和省市级审定品种，共计 530 份。由北京市农林科学院杂交小麦研究所种质资源库保存。扬麦 158、矮抗 58、小偃 6、豫麦 34、西农 979 和 PH82-2 为对照品种。依据《中国小麦品质区划方案（试行）》（2001）中的三个大区将供试材料分为 I 区（北方强筋、中筋冬麦区）品种 306 份；II 区（南方中筋、弱筋冬麦区）品种 134 份；III 区（中筋、强筋春麦区）品种 90 份，详见表 1~3。本文所用的品质相关数据来源于品种审定农业部农产品质量监督检验测试中心测试结果在线公布。

表 1 供试 312 份 I 区小麦品种名称及审定编号

Table 1 Variety name and approval No. of the 213 teted wheat materials in I region

编号 No.	品种名称 Variety name	审定编号 approval No.	编号 No.	品种名称 Variety name	审定编号 approval No.	编号 No.	品种名称 Variety name	审定编号 approval No.
1	百旱 207	豫审麦 2017025	103	科农 2009	冀审麦 2015004	205	西农 585	国审麦 20170014
2	百农 201	豫审麦 2017019	104	科农 2011	冀审麦 2016003	206	西农 658	陕审麦 2014008
3	百农 207	国审麦 2013010	105	科伟 11	冀审麦 2016028	207	西农 668	陕审麦 2015001
4	百农 418	豫审麦 2015014	106	科遗 5214	京审麦 2011001	208	西农 688	陕审麦 2011005
5	百农 4199	豫审麦 2017003	107	垦星 5 号	国审麦 20200031	209	西农 805	陕审麦 2015018
6	宝科 8 号	豫审麦 2011033	108	兰考 198	豫审麦 2011023	210	西农 822	陕审麦 2011001
7	保麦 10 号	国审麦 2010014	109	华伟 307	国审麦 20200025	211	西农 938	陕审麦 2013001
8	保麦 6 号	国审麦 2016010	110	立丰 852	豫审麦 2017018	212	先麦 12 号	豫审麦 2014029
9	博农 6 号	国审麦 2014008	111	辽春 24 号	辽审麦 201236	213	先麦 8 号	豫审麦 2011027
10	沧麦 14	冀审麦 2016023	112	辽春 26	辽审麦 2013001	214	小偃 58	陕审麦 2015014
11	沧麦 6005	国审麦 2010013	113	品育 8155	国审麦 20190044	215	小偃 60	冀审麦 2016030
12	春丰 0017	豫审麦 2016001	114	轮选 103	冀审麦 2015001	216	新科麦 168	豫审麦 2017015
13	存麦 11	豫审麦 2015012	115	轮选 167	京审麦 2014005	217	新麦 23	国审麦 2013016
14	存麦 8 号	国审麦 2014005	116	轮选 169	国审麦 2014017	218	新麦 35	国审麦 20210019
15	德研 16	国审麦 20170006	117	轮选 266	京津冀审麦 20180001	219	鑫麦 296	鲁农审 2013046
16	德研 8 号	国审麦 2016007	118	轮选 526	京审麦 2011002	220	信麦 69	豫审麦 2015022
17	东麦 10	冀审麦 2016022	119	轮选 99	国审麦 2016017	221	信麦 9 号	豫审麦 2014012
18	泛麦 7030	豫审麦 2015007	120	洛早 17	豫审麦 2015026	222	邢麦 13 号	国审麦 2016021
19	泛麦 803	豫审麦 2015013	121	洛早 19	豫审麦 2017024	223	兴民 118	陕审麦 2014003
20	泛育麦 17	国审麦 20190009	122	洛麦 24	豫审麦 2011005	224	兴民 218	陕审麦 2011003
21	存麦 16	国审麦 20190007	123	洛麦 26	豫审麦 2014018	225	宿 553	国审麦 2011006
22	丰德存麦 5	国审麦 2014003	124	洛麦 28	豫审麦 2015005	226	许科 129	国审麦 2016011
23	藁优 2018	冀审麦 2008007	125	洛麦 29	国审麦 2016009	227	许科 718	豫审麦 2012001
24	藁优 5218	冀审麦 2015005	126	洛麦 31	豫审麦 2017009	228	许麦 2 号	豫审麦 2017020
25	藁优 5766	冀审麦 2014002	127	漯麦 18	国审麦 2012011	229	许农 7 号	豫审麦 2012007
26	冠麦 1 号	国审麦 2016008	128	农大 1108	豫审麦 2012004	230	许科 918	国审麦 20190020
27	邯 1412	冀审麦 2016001	129	农大 212	冀审麦 2013011	231	亚麦 1 号	豫审麦 2015020
28	邯麦 14	冀审麦 2011004	130	农大 3432	冀审麦 2012008	232	烟农 836	鲁农审 2010073
29	邯麦 15	冀审麦 2016004	131	农大 3494	京审麦 2011004	233	阎麦 2037	陕审麦 2015007
30	邯麦 16	国审麦 2014010	132	农大 399	冀审麦 2012004	234	偃毫 197	豫审麦 2014031
31	邯麦 17	冀审麦 2016002	133	农大 4123	京审麦 2015001	235	偃毫 330	豫审麦 2015027
32	邯麦 18	冀审麦 2016005	134	农大 5181	京审麦 2014001	236	偃丰 21	豫审麦 2014009
33	邯农 1 号	冀审麦 2013006	135	农大 5363	京审麦 2013002	237	偃高 006	豫审麦 2011026
34	邯农 7131	冀审麦 2016021	136	平安 11 号	豫审麦 2015010	238	偃高 21	豫审麦 2014010
35	旱丰 902	陕审麦 2012011	137	平安 8 号	豫审麦 2011020	239	阳光 10	鲁农审 2013049

36	航麦 247	国审麦 2016029	138	平安 9 号	豫审麦 2014005	240	阳光 818	国审麦 2014012
37	航麦 901	京审麦 2012002	139	平麦 02-16	豫审麦 2011031	241	亿麦 6 号	豫审麦 2011021
38	洛旱 22	国审麦 20180058	140	齐麦 2 号	国审麦 20170017	242	婴泊 700	冀审麦 2012001
39	河农 5290	冀审麦 2011003	141	秦麦 618	陕审麦 2013009	243	豫教 5 号	豫审麦 2011002
40	河农 6119	冀审麦 2016007	142	秦农 578	陕审麦 2013002	244	豫教 6 号	国审麦 2016016
41	河农 6331	冀审麦 2016020	143	泉麦 29	国审麦 20190017	245	豫教黑 1 号	豫审麦 2011014
42	河农 7069	冀审麦 2013005	144	群喜麦 4 号	豫审麦 2011003	246	豫农 186	豫审麦 2017002
43	荷麦 18	鲁农审 2012049	145	润麦 2 号	晋审麦 2016005	247	豫农 4023	豫审麦 2011029
44	鹤麦 2 号	豫审麦 2011010	146	赛德麦 5 号	国审麦 20190035	248	豫农 78	豫审麦 2017026
45	鹤麦 801	豫审麦 2014014	147	山农 20	国审麦 2011012	249	豫农 98	豫审麦 2015024
46	衡 0816	冀审麦 2013010	148	山农 21	鲁农审 2010071	250	豫信 11	豫审麦 2017022
47	衡 136	冀审麦 2009015	149	山农 22 号	国审麦 2011013	251	远大 1 号	冀审麦 2016029
48	衡 4444	冀审麦 2012002	150	山农 24 号	鲁农审 2013047	252	运早 115	国审麦 2014014
49	衡 6632	冀审麦 2013009	151	山农 25	国审麦 20180060	253	长 4853	晋审麦 2013003
50	衡 S29	冀审麦 2015002	152	山农 26	国审麦 2014013	254	长 5553	国审麦 20190047
51	衡科 6021	冀审麦 2016018	153	山农 29 号	国审麦 2016024	255	长 6794	国审麦 20180071
52	衡杂 102	冀审麦 2015007	154	山农 30 号	国审麦 20170019	256	长 6878	国审麦 2003019
53	华育 989	冀审麦 2016024	155	陕垦 224	陕审麦 2014011	257	长 8744	晋审麦 2011003
54	滑育麦 1 号	豫审麦 2017012	156	商麦 156	豫审麦 2015011	258	长丰 2112	陕审麦 2012009
55	怀川 358	陕审麦 2014009	157	商麦 1619	陕审麦 2014013	259	长航一号	陕审麦 2014012
56	怀川 916	豫审麦 2011024	158	商麦 1 号	豫审麦 2014032	260	长麦 251	晋审麦 2011001
57	怀川 919	豫审麦 2015006	159	沈免 2137	国审麦 2014019	261	长麦 6135	晋审麦 2008009
58	机麦 211	国审麦 20210034	160	沈太 2 号	国审麦 2012013	262	郑麦 0943	豫审麦 2014025
59	济麦 20	国审麦 2004011	161	圣源 619	国审麦 2016015	263	郑麦 101	国审麦 2013014
60	济麦 22	鲁农审 2006050	162	石麦 26	国审麦 20180052	264	郑麦 113	豫审麦 2015016
61	济麦 229	鲁农审 2016007	163	石麦 12	冀审麦 2004004	265	郑麦 119	豫审麦 2014030
62	济麦 44	国审麦 20210089	164	石麦 13	冀审麦 2004011	266	郑麦 132	国审麦 20210025
63	济糯 1 号	豫审麦 2011015	165	石 4366	冀审麦 2015003	267	郑麦 314	豫审麦 2014013
64	济研麦 7 号	豫审麦 2017021	166	石麦 22 号	国审麦 2011014	268	郑麦 3596	豫审麦 2014002
65	冀麦 120	冀审麦 2016019	167	石农 086	冀审麦 2014001	269	郑麦 379	豫审麦 2012009
66	冀麦 325	国审麦 2016023	168	石农 956	冀审麦 2016016	270	郑麦 583	豫审麦 2012003
67	冀麦 418	国审麦 2016026	169	石新 633	冀审麦 2013001	271	郑麦 7698	豫审麦 2011008
68	冀麦 518	冀审麦 2013007	170	世纪 281	豫审麦 2015028	272	郑品麦 8 号	国审麦 2016014
69	冀麦 585	冀审麦 2013004	171	舜麦 1718	国审麦 2011009	273	郑育 8 号	豫审麦 2014008
70	冀麦 867	冀审麦 2016006	172	遂选 101	豫审麦 2015004	274	致胜 5 号	陕审麦 2015011
71	冀糯 200	冀审麦 2011002	173	太 412	晋审麦 20170010	275	中焦 3 号	豫审麦 2012016
72	捷麦 19	冀审麦 2015009	174	太春 3473	晋审麦 2014005	276	中麦 1062	津审麦 2017001
73	金地 828	豫审麦 2014006	175	太学 12 号	豫审麦 2011030	277	中麦 113	京审麦 2013001
74	金麦 1 号	陕审麦 2014006	176	太学 7 号	豫审麦 2011019	278	中麦 1197	京审麦 2014004
75	金麦 26 号	津审麦 2010006	177	泰禾 882	豫审麦 2015015	279	中麦 14	京审麦 2012001
76	津麦 3118	津审麦 2015002	178	泰禾麦 1 号	豫审麦 2015001	280	中麦 155	冀审麦 2012005
77	津农 6 号	津审麦 2010004	179	泰科麦 33	国审麦 20180056	281	中麦 170	陕审麦 2014005
78	津农 7 号	国审麦 2014018	180	泰禾麦 2 号	国审麦 20190018	282	中麦 175	国审麦 2008016
79	津强 8 号	津审麦 2015004	181	泰麦 98	陕审麦 2012002	283	中麦 349	晋审麦 2009001
80	津强 9 号	津审麦 2015003	182	泰山 27	鲁农审 2012050	284	中麦 36	国审麦 20180064
81	晋春 17 号	晋审麦 20170016	183	天禾 3 号	豫审麦 2012010	285	中麦 533	京审麦 2010004
82	晋麦 100 号	晋审麦 2016003	184	天民 184	豫审麦 2017017	286	中麦 578	豫审麦 20210059
83	晋麦 102 号	晋审麦 20170006	185	天糯 158	豫审麦 2011016	287	中麦 629	津审麦 2012001
84	晋麦 89 号	晋审麦 2011002	186	铁麦 3 号	辽审麦 2013003	288	中麦 816	国审麦 2013021
85	晋麦 90 号	晋审麦 2011004	187	铜麦 6 号	陕审麦 2012010	289	中麦 875	豫审麦 2014027
86	晋麦 91 号	晋审麦 2011005	188	囤麦 127	豫审麦 2017011	290	中麦 895	国审麦 2012010
87	晋麦 92 号	国审麦 2012012	189	囤麦 128	豫审麦 2017016	291	中麦 8 号	津审麦 2010002
88	晋麦 93 号	晋审麦 2013004	190	囤麦 378	京审麦 2013004	292	中麦 996	津审麦 2013001
89	晋麦 95 号	晋审麦 2014002	191	宛 1643	豫审麦 2015025	293	中新 78	豫审麦 2012008
90	晋麦 96 号	晋审麦 2014003	192	宛麦 19	豫审麦 2011007	294	中育 1123	国审麦 2016019
91	晋麦 99 号	晋审麦 2015001	193	宛麦 969	豫审麦 2015023	295	中育 1220	豫审麦 2017007
92	晋太 182	晋审麦 2013002	194	万丰 269	豫审麦 20200012	296	中育 9307	豫审麦 2014007

93	京花 10 号	京审麦 2011005	195	沃德麦 365	国审麦 20170011	297	中原 6 号	国审麦 2011002
94	京花 11 号	京审麦 2014002	196	西高三号	陕审麦 2013010	298	众麦 7 号	豫审麦 2015019
95	九麦 2 号	陕审麦 2010002	197	西农 1018	陕审麦 2013007	299	中信麦 28	国审麦 20180059
96	九麦 4 号	陕审麦 2012004	198	西农 165	陕审麦 2013003	300	中信麦 68	国审麦 20190046
97	俊达 104	豫审麦 2015002	199	西农 219	国审麦 2013020	301	中信麦 78	国审麦 20180062
98	俊达 106	豫审麦 2015008	200	西农 223	陕审麦 2012005	302	周麦 25 号	豫审麦 2011018
99	俊达 129	国审麦 20170016	201	西农 318	陕审麦 2013013	303	周麦 26	国审麦 2012006
100	浚麦 K8 号	豫审麦 2012002	202	西农 511	国审麦 20180040	304	周麦 27 号	国审麦 2011003
101	金禾 9123	国审麦 2008012	203	西农 529	陕审麦 2013011	305	周麦 28	国审麦 2013009
102	科农 1006	冀审麦 2013003	204	西农 583	陕审麦 2013004	306	周麦 36	国审麦 20180042

表 2 供试 134 份Ⅱ区小麦品种列表

Table 2 Variety name and approval No. of the 136 tested wheat materials in II region

编号 No.	品种名称 Variety name	审定编号 approval No.	编号 No.	品种名称 Variety name	审定编号 approval No.	编号 No.	品种名称 Variety name	审定编号 approval No.
1	安麦 8 号	黔审麦 2015001	46	淮麦 32	苏审麦 201207	91	陕麦 139	皖麦 2011006
2	安农 0711	皖麦 2014002	47	淮麦 33	国审麦 2014001	92	蜀麦 126	川审麦 2016004
3	安农 1124	国审麦 20180004	48	淮麦 35	国审麦 2013011	93	蜀麦 51	川审麦 2013005
4	保麦 1 号	苏审麦 201006	49	淮麦 43	皖审麦 20200008	94	蜀麦 830	川审麦 2017001
5	保麦 2 号	苏审麦 201205	50	徽研 56	国审麦 20210064	95	蜀麦 969	川审麦 2013009
6	保麦 5 号	苏审麦 2014003	51	吉麦 1 号	黔审麦 2013001	96	苏科麦 1 号	苏审麦 201204
7	昌麦 29	川审麦 2011003	52	江麦 816	苏审麦 201306	97	苏麦 10 号	皖麦 2016014
8	昌麦 32	川审麦 2015016	53	江麦 919	苏审麦 201308	98	苏麦 8 号	苏审麦 201302
9	川辐 7 号	川审麦 2015008	54	靖麦 15 号	滇审麦 2011008	99	苏麦 9 号	皖麦 2013003
10	川辐 8 号	川审麦 2015003	55	靖麦 16 号	滇审麦 2011009	100	天民 198	国审麦 2014009
11	川麦 104	国审麦 2012002	56	靖麦 18 号	滇审麦 2013002	101	天益科麦 5 号	国审麦 2017003
12	川麦 1131	川审麦 2015011	57	科成麦 4 号	川审麦 2015005	102	皖科 06290	皖麦 2011011
13	川麦 1247	川审麦 2015010	58	昆麦 4 号	滇特审麦 2011001	103	皖垦麦 076	皖麦 2011012
14	川麦 1826	川审麦 2016005	59	乐麦 608	皖审麦 2016013	104	皖垦麦 1 号	皖麦 2011003
15	川麦 60	国审麦 2011001	60	连麦 6 号	苏审麦 201208	105	皖麦 606	皖麦 2013004
16	川麦 602	川审麦 20170006	61	连麦 7 号	苏审麦 2014005	106	皖农垦 0901	皖麦 2014001
17	川麦 61	川审麦 2012002	62	良麦 4 号	川审麦 2007010	107	未来 0818	皖麦 2013002
18	川麦 63	川审麦 2013010	63	临麦 15	滇审麦 2011001	108	涡麦 9 号	皖麦 2015003
19	川麦 65	川审麦 2013004	64	龙科 1109	皖麦 2016001	109	西科麦 10 号	川审麦 2015002
20	川麦 68	川审麦 2015001	65	鲁原 502	国审麦 2011016	110	西科麦 7 号	川审麦 2012006
21	川麦 69	川审麦 2015015	66	轮选 22	皖麦 2011014	111	西科麦 9	川审麦 2014011
22	川麦 81	川审麦 2015006	67	漯麦 6010	鄂审麦 2013001	112	襄麦 35	鄂审麦 2015001
23	川麦 82	川审麦 20170007	68	绵麦 1403	川审麦 2007001	113	徐麦 32	苏审麦 201206
24	川麦 92	川审麦 2015004	69	绵麦 1618	川审麦 2013001	114	徐麦 35	国审麦 20170007
25	川农 29	川审麦 2015009	70	绵麦 285	川审麦 2015007	115	扬辐麦 5 号	皖审麦 2011013
26	川农 32	川审麦 20170002	71	绵麦 312	川审麦 20170003	116	扬富麦 101	苏审麦 2014001
27	川双麦 1 号	川审麦 2013007	72	绵杂麦 168	国审麦 2007003	117	扬麦 20	国审麦 2010002
28	德麦 8 号	滇审麦 2015003	73	明麦 2 号	苏审麦 201105	118	扬麦 21	苏审麦 201102
29	鄂麦 27	鄂审麦 2010003	74	南麦 302	川审麦 2012005	119	扬麦 29	苏审麦 20180004
30	鄂麦 580	鄂小麦 2012001	75	南麦 618	川审麦 2013003	120	扬糯麦 1 号	苏审麦 201003
31	阜麦 8 号	皖麦 2011008	76	南麦 991	川审麦 2015013	121	宜麦二号	滇审麦 2011002
32	谷神 6 号	皖麦 2011005	77	宁麦 19	苏审麦 201201	122	宜麦三号	滇审麦 2011004
33	光明麦 1 号	沪审麦 2013001	78	宁麦 20	苏审麦 201202	123	渝麦 15 号	渝审麦 2013001
34	光明麦 2 号	沪审麦 2013002	79	宁麦 21	苏审麦 201303	124	云麦 60	滇审麦 2011005
35	光明麦 3 号	沪审麦 2015001	80	宁麦 22	国审麦 2013003	125	云麦 63	滇审麦 2011007
36	贵农麦 30 号	黔审麦 2015002	81	宁麦 23	国审麦 2013005	126	云麦 64	滇审麦 2012002
37	国豪麦 15	川审麦 2011002	82	宁麦 24	皖麦 2015009	127	云麦 66	滇审麦 2013004
38	国豪麦 18 号	黔审麦 2011001	83	糯麦 1 号	渝审麦 2010003	128	云麦 67	滇审麦 2013005
39	红皖 88	皖麦 2011002	84	迁麦 2 号	苏审麦 201005	129	云麦 68	滇审麦 2014001
40	华麦 2566	鄂审麦 2010001	85	黔兴麦 1 号	黔审麦 2014003	130	镇麦 10 号	苏审麦 201301
41	华麦 6 号	苏审麦 201304	86	苏麦 188	国审麦 2012005	131	镇麦 9 号	苏审麦 201001

42	华麦 7 号	苏审麦 2014002	87	荣春南麦 1	川审麦 2014007	132	中科麦 138	川审麦 2014002
43	淮核 12013	皖审麦 2017011	88	瑞华 520	国审麦 2014006	133	中科麦 47	川审麦 2014008
44	淮麦 30	苏审麦 201007	89	瑞华麦 520	苏审麦 2014006	134	中研麦 1 号	苏审麦 201104
45	淮麦 31	苏审麦 201103	90	瑞华麦 523	苏审麦 2014007			

表 3 供试 90 份Ⅲ区小麦品种列表

Table 3 Variety name and approval No. Of the 90 tested wheat materials

编号 No.	品种名称 Variety name	审定编号 approval No.	编号 No.	品种名称 Variety name	审定编号 approval No.	编号 No.	品种名称 Variety name	审定编号 approval No.
1	北麦 9 号	国审麦 2011019	31	龙春 3 号	黑审麦 2015001	61	天选 51 号	甘审麦 2012008
2	赤麦 7 号	国审麦 2010017	32	龙辐麦 19	黑审麦 2011001	62	天选 54 号	甘审麦 2015012
3	定丰 16 号	甘审麦 2011002	33	龙辐麦 20	黑审麦 2012003	63	武春 7 号	甘审麦 2010005
4	定丰 17 号	甘审麦 2014001	34	龙麦 37	黑审麦 2014002	64	武春 8 号	甘审麦 2012003
5	定西 41 号	甘审麦 2010004	35	龙麦 39	黑审麦 2015003	65	武都 17 号	甘审麦 2013009
6	环冬 4 号	甘审麦 2010010	36	陇春 26 号	甘审麦 2010006	66	西平 1 号	甘审麦 2015006
7	静麦 3 号	甘审麦 2011003	37	陇春 28 号	甘审麦 2011001	67	新春 33 号	新审麦 201001
8	静麦 4 号	甘审麦 2015010	38	陇春 30 号	甘审麦 2013004	68	新春 34 号	新审麦 201101
9	静麦 5 号	甘审麦 2016013	39	陇春 32 号	甘审麦 2014002	69	新春 35 号	新审麦 201102
10	克春 10	黑审麦 2015004	40	陇鉴 101	甘审麦 2011006	70	新春 37 号	新审麦 201201
11	克春 1 号	黑审麦 2010001	41	陇鉴 103	甘审麦 2013006	71	新春 38 号	新审麦 201202
12	克春 3 号	黑审麦 2011003	42	陇鉴 107	甘审麦 2016011	72	新春 39 号	新审麦 201203
13	克春 5 号	黑审麦 2012001	43	陇鉴 108	甘审麦 2015009	73	新春 41 号	新审麦 201302
14	拉 07-0145	蒙审麦 2014001	44	陇育 3 号	甘审麦 2010017	74	新春 42 号	新审麦 201401
15	拉 2577	蒙审麦 2010001	45	陇育 4 号	甘审麦 2011005	75	新冬 35 号	新审麦 201104
16	兰航选 01	甘审麦 2012005	46	陇育 5 号	甘审麦 2012012	76	新冬 36 号	新审麦 201105
17	兰航选 122	甘审麦 20170013	47	宁春 50 号	宁审麦 2010001	77	新冬 37 号	新审麦 201106
18	兰天 131	甘审麦 20170014	48	宁春 51 号	宁审麦 2010002	78	新冬 38 号	新审麦 201107
19	兰天 26 号	甘审麦 2010007	49	宁冬 16 号	宁审麦 2015003	79	新冬 39 号	新审麦 201204
20	兰天 27 号	甘审麦 2010008	50	宁冬 17 号	宁审麦 20160002	80	新冬 41 号	新审麦 201303
21	兰天 28 号	甘审麦 2011007	51	宁麦 9 号	甘审麦 2010012	81	新冬 42 号	新审麦 201304
22	兰天 30 号	甘审麦 2013007	52	平凉 45 号	甘审麦 2010013	82	新冬 43 号	新审麦 201305
23	兰天 31 号	甘审麦 2013008	53	普冰 151	甘审麦 2016008	83	新冬 45 号	新审麦 201403
24	兰天 34 号	甘审麦 2015008	54	青麦 1 号	青审麦 2012001	84	新冬 46 号	新审麦 201404
25	兰天 35 号	甘审麦 2016014	55	青麦 2 号	青审麦 2013001	85	新冬 47 号	新审麦 201405
26	临麦 34 号	甘审麦 2010002	56	青麦 3 号	青审麦 2013002	86	新冬 61 号	新审麦 201607
27	临麦 36 号	甘审麦 2014003	57	青麦 4 号	青审麦 2015001	87	永良 15 号	宁审麦 2010
28	临农 9555	甘审麦 2010011	58	天选 46 号	甘审麦 2010014	88	张冬 30 号	甘审麦 2012009
29	龙春 1 号	黑审麦 2014001	59	天选 49 号	甘审麦 2011011	89	中植 6 号	甘审麦 2016010
30	龙春 2 号	黑审麦 2015002	60	天选 50 号	甘审麦 2012007	90	庄浪 12 号	甘审麦 2015011

1.2 方法

1.2.1 小麦基因组 DNA 提取

每份材料取 30 粒种子，水培发芽 15d 后，取幼嫩的叶片组织，采用 CTAB 法提取基因组 DNA，利用紫外分光光度计测定 DNA 质量和浓度，并用 ddH₂O 将 DNA 溶液稀释至 100 ng/μL 的工作液，于 - 20℃ 冰箱中储存备用。

1.2.2 KASP SNP 标记检测

选用 13 个与品质相关的 KASP SNP 标记进行基因分型检测，标记分别为小麦黑麦 1B/1R 易位系基因 1 个、高分子量麦谷蛋白亚基基因 3 个、低分子量麦谷蛋白亚基 1 个、籽粒硬度相关基因 3 个，籽粒或面粉颜色相关基因 5 个，标记详情见表 4，标记的引物序列详见表 5。KASP 标记引物的设计和检测参考 Rasheed 等方法^[28]。

表 4 供试小麦品质相关 KASP 标记列表

Table 4 The List of KASP markers related to quality in wheat

性状 Traits	基因 Gene	优异等位变异 Superior allelic variation	类型 Effect
小麦-黑麦易位系 Rye translocation line	<i>IBL-1RS</i>	<i>IBL/1RS</i> (-)	Major effect
谷蛋白亚基 Glutenin subunits	<i>Glu-A1</i>	<i>Glu-Ax1, Ax2*</i>	Major effect
	<i>Glu-B1</i>	<i>1Bx17+1By18</i>	Major effect
	<i>Glu-D1</i>	<i>1Dx5+1Dy10</i>	Major effect
	<i>Glu-B3</i>	<i>Glu-B3g</i>	Minor effect
籽粒硬度 Kernel hardness	<i>Pina-D1</i>	<i>Pina-D1b</i>	Major effect
	<i>Pinb-D1</i>	<i>Pinb-D1b</i>	Major effect
	<i>Pinb2-V2</i>	<i>Pinb2-B2b</i>	Major effect
色泽 Color	<i>Pod-A1</i>	<i>TaPod-A1b</i>	Minor effect
	<i>Ppo-D1</i>	<i>Ppo-D1a</i>	Major effect
	<i>Zds-A1</i>	<i>Ta Zds-A1a</i>	Minor effect
	<i>Pds-B1</i>	<i>TaPds-B1b</i>	Minor effect
	<i>Psy-D1</i>	<i>Psy-D1a</i>	Major effect

1. 2. 3 数据统计分析

利用 Excel 2010 和 SAS 软件进行数据处理和统计分析。

表 5 引物序列详情列表

基因 Gene	引物名称 Primer name	FAM 引物 (5'→3') FAM primer (5'→3')	VIC 引物 (5'→3') VIC primer (5'→3')	共同反向引物 (5'→3') Common primer (5'→3')	FAM Call	VIC Call	FAM Genotype	VIC Genotype
<i>1B-1R</i>	<i>1RS:1BL_6110</i>	GAAGGTGACCAAGTTCATGCTGGAGCAGGT CCAGATCGCG	GAAGGTCGGAGTCAACGGATTTCGGAGCAG GTCCAGATCGCA	GAAGCTCCGGTAGATGGAGGCTA	G	A	1BL·1BS	1BL·1RS
<i>Glu-A1</i>	<i>gluA1.1_1883</i>	GAAGGTGACCAAGTTCATGCTAAGTGTAAC TCTCCGCAACA	GAAGGTCGGAGTCAACGGATTAAGTGTA CTTCTCCGCAACG	GGCCTGGATAGTATGAAACC	A	G	1/2*	null
<i>Glu-B1</i>	<i>By18_1976</i>	AGTCAGGACAAGGGCAACAATCAGA	AGTCAGGACAAGGGCAACAATCAGG	ATTGCTGCCCTTGCTTAGTTGGTG	A	G	17+18	non 17+18
<i>Glu-D1</i>	<i>GluD1_4777</i>	GAAGGTGACCAAGTTCATGCTCGCTAATCCT GCGAGCAACAAAT	GAAGGTCGGAGTCAACGGATTGCTAATCC TGCAGCAACAAAG	AGCCAAGGGCATGTTCTATGTCGA A	T	G	2+12	5+10
<i>Glu-B3</i>	<i>Glu-B3g_SNP</i>	GAAGGTGACCAAGTTCATGCTCTGTTGGGGT TGGGAAACG	GAAGGTCGGAGTCAACGGATTCTGTTGGG GTTGGGAAACA	AGCAGCAGCAACCGCAAC	G	A	non Glu-B3g	Glu-B3g
<i>TaPpo-D1</i>	<i>Ppo-D1</i>	GAAGGTGACCAAGTTCATGCTAAGAGACCA GCAGATCGATG	GAAGGTCGGAGTCAACGGATTAAGAGACC AGCAGATCGATC	TACTGGCCTGGCGGTACATGAT	G	C	TaPpo-D1b	TaPpo-D1a
<i>TaPod-A1</i>	<i>TaPod-A1</i>	GAAGGTGACCAAGTTCATGCTTTCGACGACC GGCTCTTCCCG	GAAGGTCGGAGTCAACGGATTTTCGACGA CCGGCTCTTCCCA	AAGGAAGTCCGGGCTCATGGTGGG GTCA	G	A	TaPod-Ala	TaPod-A1b
<i>TaPsy-D1</i>	<i>Psy1Da-g</i>	GAAGGTGACCAAGTTCATGCTAAAGTTCTTG TACCTCGCCTTCTTG	GAAGGTCGGAGTCAACGGATTCAAAGTTC TTGTACCTCGCCTTCTTA	TATGCCAGCCCTTCAAGGACATGA T	G	A	TaPsy-D1a	TaPsy-D1b
<i>TaZds-A1</i>	<i>Zds-A1</i>	GAAGGTGACCAAGTTCATGCTCCATGCACCT GGACCTAATAG	GAAGGTCGGAGTCAACGGATTCCATGCAC TTGGACCTAATAC	AAGCCGACGCGGATTTTGAA	G	C	TaZds-A1a	TaZds-A1b
<i>TaPds-B1</i>	<i>TaPds-B1</i>	GAAGGTGACCAAGTTCATGCTCATATTGCAA TCTCTATGAGGCTAC	GAAGGTCGGAGTCAACGGATTCATATTGC AATCTCTATGAGGCTAG	GGCAGAAATGTATTAGCAAACAAA ACC	C	G	TaPds-B1b	TaPds-B1a
<i>Pinb-D1</i>	<i>Pinb-D1_INS</i>	GAAGGTGACCAAGTTCATGCTCTCATGCTCA CAGCCGCC	GAAGGTCGGAGTCAACGGATTCCTCATGC TCACAGCCGCT	GTCACCTGGCCCACAAAATG	C	T	Wild type (soft)	null (hard)
<i>Pina-D1</i>	<i>Pina-D1_INS</i>	GAAGGTGACCAAGTTCATGCTAACTGCCAA CAACTTCGCTA	GAAGGTCGGAGTCAACGGATTTTGTCTAG TACCCCGCTCTG	ATGAAGGCCCTCTTCCTCATAGG	A	G	Wild type (soft)	Mutant (hard)
<i>Pinb2-V2</i>	<i>Pinb2-Bv2</i>	GAAGGTGACCAAGTTCATGCTGCACCTAGC AATAAATAAACGGGAG	GAAGGTCGGAGTCAACGGATTAGAAAAA AGCCATTAATAAACGGGAC	TGTTTTGGTGGTGGTGAAGATGA	G	C	Pinb-B2a	Pinb-B2b

Table 5 The list of primers information

2 结果与分析

2.1 不同品质性状相关基因的分布频率

2.1.1 小麦 1B/1R 易位系及高、低分子量麦谷蛋白亚基的分布频率

对 530 份不同区域小麦品种进行 1B/1R 易位系检测，优异等位变异为 *1BL/1RS* (-)，即不含有该变异的材料，经测定发现，优异等位变异总的分布频率为 59.29%，但经过分区域分析发现，不同区域间分布不均衡，且分布频率间存在极显著性差异。北方强筋、中筋冬麦区的优异等位变异分布频率为 51.19%，南方中筋、弱筋冬麦区的优异等位变异分布频率为 66.41%，中筋、强筋春麦区的优异等位变异分布频率为 76.83%。

表 6 品质性状相关基因优异等位变异在不同区域分布频率

Table 6 Frequencies of Superior allelic variation related to quality traits in different regions

性状 Traits	基因 Gene	优异等位变异 Superior allelic variation	I 区	II 区	III 区	合计 Total
小麦-黑麦易位系 Rye translocation line	<i>1BL/1RS</i>	<i>1BL/1RS</i> (-)	51.19%**	66.41%**	76.83%**	59.29%
谷蛋白亚基 Glutenin subunits	<i>Glu-A1</i>	<i>Ax1/Ax2*</i>	55.59%**	65.67%**	79.52%**	62.00%
	<i>Glu-B1</i>	<i>1Bx17+1By18</i>	4.25%	5.93%	3.33%	4.52%
	<i>Glu-D1</i>	<i>1Dx5+1Dy10</i>	27.27%*	37.40%*	23.53%*	29.20%
	<i>Glu-B3g</i>	<i>Glu-B3g+</i>	54.93%*	53.38%*	40.23%*	52.10%
籽粒硬度 Kernel hardness	<i>Pina-D1</i>	<i>Pina-D1b</i>	6.49%	9.09%	7.95%	7.39%
	<i>Pinb-D1</i>	<i>Pinb-D1b</i>	67.58%**	44.88%**	58.11%**	60.32%
	<i>Pinb2-V2</i>	<i>Pinb-B2b</i>	27.18%**	37.40%**	17.98%**	28.17%
色泽 Color	<i>Pod-A1</i>	<i>TaPod-A1b</i>	31.07%	20.15%	31.46%	28.38%
	<i>Ppo-D1</i>	<i>TaPpo-D1a</i>	66.13%	60.00%	71.11%	65.42%
	<i>Zds-A1</i>	<i>TaZds-A1a</i>	68.18%**	79.55%	79.55%	72.92%
	<i>Pds-B1</i>	<i>TaPds-B1b</i>	16.05%	31.50%**	17.24%	20.08%
	<i>Psy-D1</i>	<i>TaPsy-D1a</i>	90.43%	93.75%	94.25%	91.89%

注：*表示区域间在 0.05 水平差异显著；**表示区域间在 0.01 水平差异显著。

Note: * indicates significant difference between regions at 0.05 level; ** indicates significant difference between regions at 0.01 level.

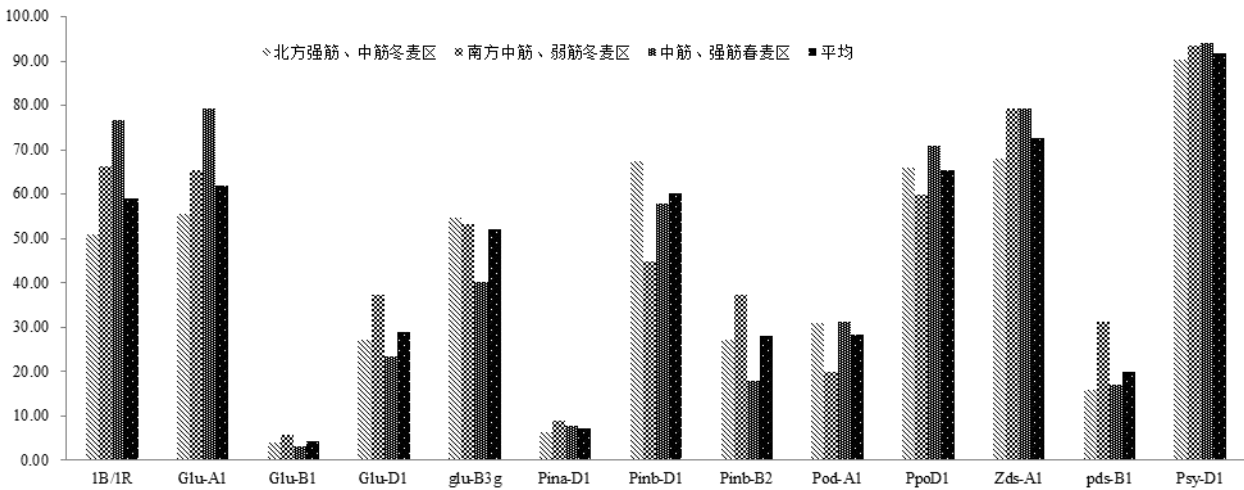


图 1 不同区域间小麦品质相关基因优异等位变异分布频率图

Fig 1 Frequencies of Superior allelic variation related to quality traits in different regions

本试验中共检测 3 个高分子量麦谷蛋白亚基，分别位于 A、B、D 染色体上，*Glu-A1* 位点的优异基因为 *1Ax1* 和 *1Ax2**，北方强筋、中筋冬麦区含有该基因的材料 169 份，频率为 55.59%，南方中筋、弱筋冬麦区含有该基因的品种 88 份，频率为 65.67%，中筋、强筋春麦区该基因的品种 66 份，频率为 79.52%，三个区

域间该基因的分布频率间呈极显著差异。*Glu-D1* 位点的两组基因分别为 *1Dx5+1Dy10* 和 *1Dx2+1Dy12*, *1Dx5+1Dy10* 为优异强筋基因, 其中北方强筋、中筋冬麦区的品种中含有该基因对的材料 84 份, 频率仅为 27.27%。南方中筋、弱筋冬麦区 49 份, 中筋、强筋春麦区 20 份, 参试的材料中累计分布频率为 29.20%, 即 524 个有效数据中, 仅有 153 份品种含有 *1Dx5+1Dy10* 亚基对。区域间的 *1Dx5+1Dy10* 亚基分布频率呈现显著性差异。*1Dx17+1Dy18* 被认为是对面筋质量正相关基因, 在参试品种中的分布情况如下, 在北方强筋、中筋冬麦区的 312 份资源中有 13 份品种含有该亚基对, 南方中筋、弱筋冬麦区有 8 份材料, 中筋、强筋春麦区有 3 份, 总计仅 24 份材料, 总频率为 4.52%, 在北方强筋、中筋冬麦区, 南方中筋、弱筋冬麦区及北方强筋、中筋冬麦区的分布频率分别为 4.60%、5.93%和 3.33%。我国品种中该亚基含量相对较少。面筋质量相关的低分子量麦谷蛋白亚基检测 1 个基因位点, *Glu-B3g* 基因检测得出, 优异等位变异 *Glu-B3g+* 在北方强筋、中筋冬麦区和南方中筋、弱筋冬麦区的分布频率相近, 中筋、强筋春麦区分布频率略低, 总频率为 52.10%。

上述基因主要影响小麦面粉的面筋强度和品质, *1Bx17+1By18* 亚基在检测中分布频率较低, 综合分析显示聚合四个以上优异等位变异的材料共 12 份, 其中中筋、强筋春麦区的材料 7 份。聚合 *1BL/1RS* (-), *1Ax1/1Ax2**, *1Dx5+1Dy10* 三个优异等位变异的材料共 65 份。

2.1.2 籽粒硬度相关基因的分布

本实验共检测三个籽粒硬度相关基因的 SNP 标记, 分别为 2 个籽粒硬度主效基因 *Pina-D1*、*Pinb-D1* 和 1 个微效基因 *Pinb2-V2*, 其野生型的等位变异 *Pina-D1a*、*Pinb-D1a* 和 *Pinb2-B2a* 为软质小麦基因型, 优异等位变异硬质的基因型分别为 *Pina-D1b*、*Pinb-D1b* 和 *Pinb2-B2b*, 其中 *Pinb-D1b* 总的分布频率在三个优异等位变异间分布最高, 为 60.32%, 且不同的区域间分布频率呈极显著差异, 其中北方强筋、中筋冬麦区的分布频率最高为 67.58%, 其次为中筋、强筋春麦区 58.11%。*Pina-D1b* 基因的总分布频率仅为 7.39%, 且区域间分布无明显差异, *Pinb-B2b* 基因的总分布频率为 28.17%, 区域间分布呈极显著性差异, 表现为南方中筋、弱筋冬麦区最高 37.40%, 其次为北方强筋、中筋冬麦区频率为 27.18%。经检测发现 *Pina-D1a/Pinb-D1b/Pinb2-B2b* 组合基因型材料有 88 份, 占检测材料的 16.2%, *Pina-D1a/Pinb-D1b/Pinb2-B2a* 组合基因型材料有 203 份占检测材料的 37.7%, *Pina-D1b/Pinb-D1a/Pinb2-B2b* 组合基因型材料 16 份, 占 3%, *Pina-D1b/Pinb-D1a/Pinb2-B2a* 组合基因型材料 23 份, 占 4.3%, 未检测到 *Pina-D1b/Pinb-D1b/Pinb2-B2b* 和 *Pina-D1b/Pinb-D1b/Pinb2-B2a* 组合基因型材料。

2.1.4 籽粒颜色相关标记在不同区域间的分布比较

面粉及其制品的颜色是决定小麦品质的重要指标, 对面条、馒头等面制品品质有重要影响。其颜色受黄色素和多酚氧化酶等影响较大。本试验检测 3 个与黄色素相关的基因, 分别为与黄色素合成相关的八氢番茄红素合酶 (*Phytoene Synthase*, *PSY*) 基因 *TaPsy-D1*、 ζ -胡萝卜素脱氢酶 (ζ -*carotene desaturase*, *ZDS*) 基因 *TaZds-A1* 和八氢番茄红素脱氢酶 (*Phytoene desaturase*, *PDS*) 基因 *TaPds-B1*。1 个控制小麦多酚氧化酶活性的关键基因 (*polyphenol oxidase*, *PPO*) *TaPpo-D1*, 1 个过氧化物酶 (*Peroxidase*, *POD*) 活性基因 *TaPod-A1*。低黄色素含量和酶低活性表达为这些基因的优异等位变异, 检测出的 *TaPpo-D1a* 基因型为小麦多酚氧化酶活性低类型, 该基因型的总体分布频率为 65.42%, 中筋、强筋春麦区的材料分布频率最高为 71.11%, 南方中筋、弱筋冬麦区为三个区域中最低分布为 60.00%; *TaPod-A1b* 基因型为小麦过氧化物酶活性低类型, 该基因检测的总体分布频率为 28.38%, 南方中筋、弱筋冬麦区分布频率为 20.15%, 低于其他两

个区域，分别为 31.07%和 31.46%。小麦黄色素相关基因中 *TaPsy-D1a* 和 *TaZds-A1a* 两个低黄色素基因型的总体分布频率较高，分别为 91.89%和 72.92%，*TaPsy-D1a* 在区域间的分布频率无显著性差异，而 *TaZds-A1a* 在南方中筋、弱筋冬麦区和中筋、强筋春麦区的分布频率显著高于北方强筋、中筋冬麦区的品种。*TaPds-B1* 的优异等位变异 *TaPds-B1b* 总体分布频率明显低于前两个基因的分布频率，仅为 20.08%，且南方中筋、弱筋冬麦区的分布频率明显高于其他两个区域的频率，达到 31.50%，其余两个区域分别为 16.05%和 17.24%。

2. 1. 5 品质相关 SNP 标记组合的分布频率

结果统计发现：聚合 5 个颜色相关优异等位基因型的供试材料有 10 份，其中 9 份来自北方强筋、中筋冬麦区的品种；聚合 4 个优异等位变异基因型的材料有两种组合类型，分别为：*TaPpo-D1a/TaPsy-D1a/TaPod-A1b/TaZds-A1a*（61 份）和 *TaPpo-D1a/TaPsy-D1a/TaZds-A1a/ TaPds-B1b*（48 份），其中北方强筋、中筋冬麦区的品种 60 个，南方中筋、弱筋冬麦区的品种 24 个，中筋、强筋春麦区的品种 25 个；聚合 3 个以上优异等位变异基因型的材料共 236 份，为供试材料的 43.87%。其中北方强筋、中筋冬麦区的品种 135 份，占该区材料的 43.27%，南方中筋、弱筋冬麦区的品种 53 个，占该区材料的 39.26%，中筋、强筋春麦区的品种 47 个，占该区材料的 52.22%。

2. 2 不同区域间小麦品种品质性状分析

通过历年区域试验审定后的小麦品种特征特性信息的公布数据，统计籽粒容重，粗蛋白含量，湿面筋含量，吸水率，沉降值和稳定时间。不同区域间的统计值详见表 7、8。

表 7 不同区域小麦品种的品质性状

Table 7 Quality characters of wheat varieties in different regions

Region	统计值 Statistic	容重 Grain/g/L	粗蛋白质含量 Crude protein content/%	湿面筋含量 Wet gluten content/%	吸水率 Water absorption/%	沉降值 Sedimenta- tion value/mL	稳定时间 Stability time/min
I	最大值 Max	849.00	18.72	42.50	77.10	84.00	37.00
	最小值 Min	740.00	9.77	24.40	50.80	16.15	1.00
	均值 Avergae	796.85	14.63	31.55	59.36	43.18	5.25
	CV/%	2.33	7.68	9.13	6.24	39.85	97.34
II	最大值 Max	855.00	17.72	35.10	73.00	60.50	32.0
	最小值 Min	727.50	8.50	16.10	50.40	13.20	0.80
	均值 Avergae	794.50	13.30	27.58	57.93	32.01	4.76
	CV/%	3.12	10.76	14.95	8.69	30.24	89.89
III	最大值 Max	848.00	19.94	37.10	66.50	66.40	41.8
	最小值 Min	738.00	10.88	3.00	54.40	0.58	1.00
	均值 Avergae	794.43	14.63	28.60	61.31	33.38	7.05
	CV/%	2.73	10.33	26.57	4.64	31.77	118.95

表 8 不同区域小麦品种品质类型分布数量

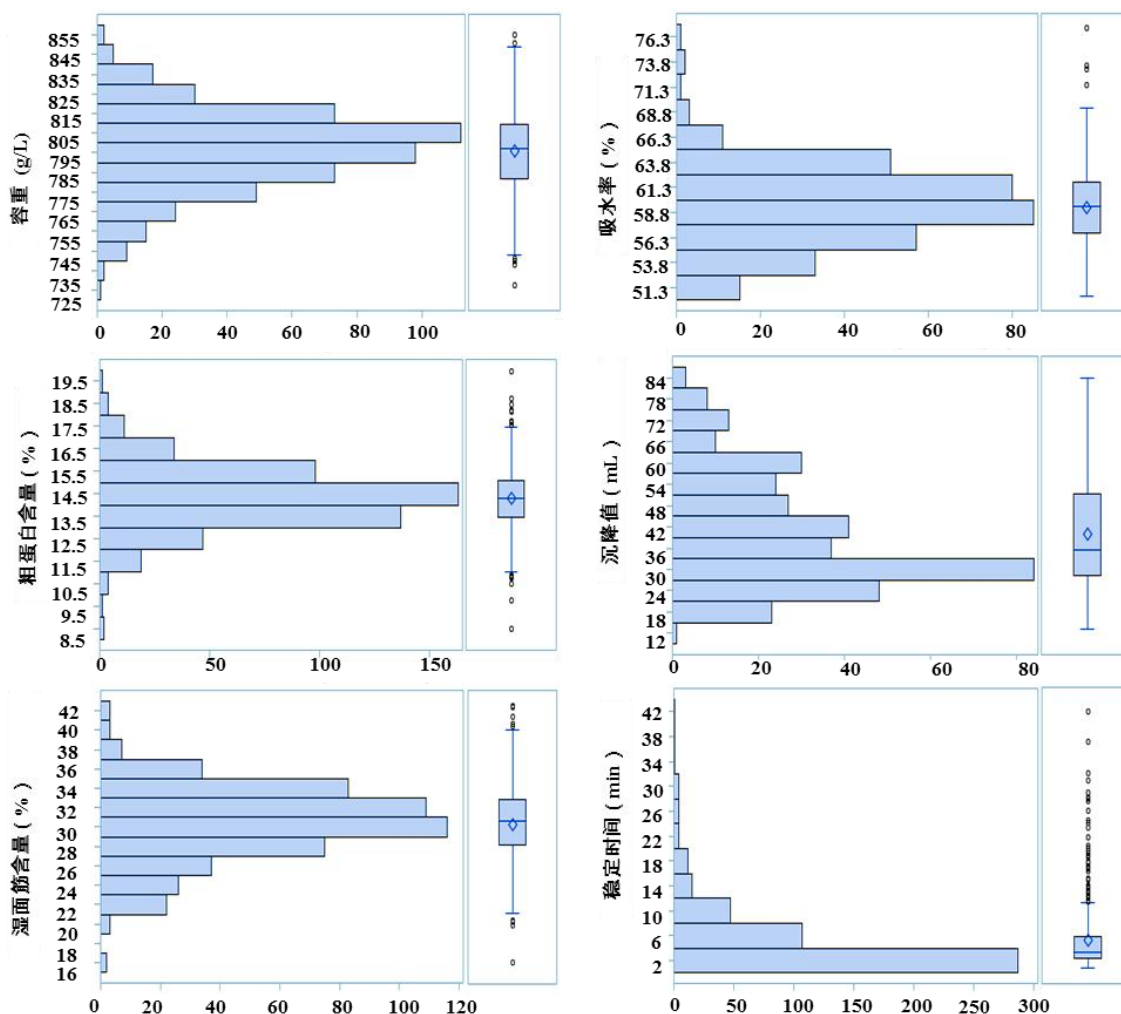
Table 8 The number of wheat varieties with quality type in different regions

品质指标 Quality Index	品质类型 Quality type	标准值* Standard values	I 区 I Region		II 区 II Region		III 区 III Region		合计 Total	
			数量 No.	比率 ratio (%)	数量 No.	比率 ratio (%)	数量 No.	比率 ratio (%)	数量 No.	比率 ratio (%)
容重 Volume Weight	强筋 Strong Gluten	≥800	145	48.82	62	61.39	32	39.51	239	49.90
	中强筋 Between Medium and Strong Gluten	≥770, <800	133	44.78	19	18.81	38	46.91	190	39.67

统计量 Total	中筋 Medium Gluten	≥750, <770	18	6.06	13	12.87	8	9.88	39	8.14
	弱筋 Weak Gluten	<750	1	0.34	7	6.93	3	3.70	11	2.30
	-	-	297	-	101	-	81	-	479	-
粗蛋白 Crude Protein	强筋 Strong Gluten	≥14.0	216	71.52	43	32.33	52	60.47	311	59.69
	中强筋、中筋 Medium and Strong Gluten, Medium Gluten	≥13.0, <14.0	75	24.83	36	27.07	26	30.23	137	26.30
	弱筋 Weak Gluten	<13.0	11	3.64	54	40.60	8	9.30	73	14.01
统计量 Total	-	-	302	-	133	-	86	-	521	-
湿面筋 Wet Gluten	强筋 Strong Gluten	≥30.5	195	64.78	35	26.32	39	45.35	269	51.73
	中强筋 Between Medium and Strong Gluten	≥28.5, <30.5	63	20.93	22	16.54	16	18.60	101	19.42
	中筋 Medium Gluten	≥28.0, <28.5	14	4.65	11	8.27	2	2.33	27	5.19
	弱筋 Weak Gluten	<28.0	29	9.63	65	48.87	29	33.72	123	23.65
统计量 Total	-	-	301	-	133	-	86	-	520	-
吸水率 Water Absorption	强筋 Strong Gluten	≥60	112	43.92	9	7.32	13	22.03	134	30.66
	中强筋 Between Medium and Strong Gluten	≥58, <60	54	21.18	8	6.50	5	8.47	67	15.33
	中筋 Medium Gluten	≥55, <58	62	24.31	59	47.97	19	32.20	140	32.04
	弱筋 Weak Gluten	<55	27	10.59	47	38.21	22	37.29	96	21.97
统计量 Total	-	-	255	-	123	-	59	-	437	-
稳定时间 Stability Time	强筋 Strong Gluten	≥10.0	42	13.95	9	7.32	13	22.03	64	13.25
	中强筋 Between Medium and Strong Gluten	≥7.0, <10.0	28	9.30	8	6.50	5	8.47	41	8.49
	中筋 Medium Gluten	≥3.0, <7.0	100	33.22	59	47.97	19	32.20	178	36.85
	弱筋 Weak Gluten	<3.0	131	43.52	47	38.21	22	37.29	200	41.41
统计量 Total	-	-	301	-	123	-	59	-	483	-

注：*参照《主要农作物品种审定标准（国家级）》2017

Note: * Refer to the Main Crop Varieties Certification Standards (National Level) 2017



注：横坐标为样品个数，纵坐标为指标值，其中每个示意图中左图为统计量，右图为均值等分布盒形图

Note: The abscissa is the number of samples, and the ordinate is the index value. In each diagram, the left is the statistic, and the right is the box diagram with equal distribution of mean

图2 供试小麦品种品质性状分布

Fig. 2 Distribution of quality characters of tested wheat varieties

2.2.1 小麦审定品种在品质区域间的容重比较

由表7统计结果显示，不同区域间容重值在848 g/L~855 g/L之间，均值794.43 g/L~796.85 g/L之间，变异系数在2.33%~3.12%之间。参照2017《主要农作物品种审定标准（国家级）》设定标准值，其中容重 ≥ 800 为强筋，容重 ≥ 770 且 < 800 为中强筋，容重 ≥ 750 且 < 770 为中筋，容重 < 750 为弱筋，统计不同区域材料的分布数量（详见表8），按不同品质类型的容重标准值的明确不同区域间小麦品种分布数量和比例（图2），统计结果显示，供试材料容重达到强筋品质标准的材料累计239份，占比49.90%，容重达到中强筋品质标准的材料190份，占39.67%，总体来看，容重达到中强筋以上标准的材料累计429份，占比达到89.57%。其中北方强筋、中筋冬麦区容重达到中强筋的材料占93.6%，占比最高，南方中筋、弱筋冬麦区容重达到中强筋标准的材料占80.2%，其中容重 < 750 的弱筋材料有7份，占该区域试验材料的6.93%；强筋、中筋春麦区容重达到中强筋的材料占86.42%，从总体数量占比来看，北方强筋、中筋冬麦区 $>$ 强筋、中筋春麦区 $>$ 南方中筋、弱筋冬麦区。

2.2.2 粗蛋白质含量

参考不同品质类型粗蛋白质标准值（其中粗蛋白质含量 $\geq 14\%$ 为强筋类型，粗蛋白质含量 $\geq 13.0\%$ ，且 $< 14.0\%$ 为中强筋和中筋品质类型，粗蛋白质含量 $< 13.0\%$ 为弱筋品质类型）对粗蛋白质含量的结果统计如下：

北方强筋、中筋冬麦区小麦品种的粗蛋白质含量平均值为 14.63%，变化范围为 9.77%~17.72%，变异系数为 7.68%，该区域 216 份供试材料的粗蛋白质含量达到强筋小麦标准，占该区域的 71.52%，75 份材料达到中强筋和中筋标准，占比 24.83%。

南方中筋、弱筋冬麦区的粗蛋白质含量的平均值为 13.30%，变化范围为 8.50%~18.72%，变异系数为 10.76%，该区域 43 份供试材料的粗蛋白质含量达到强筋小麦标准，占该区域的 32.33%，36 份材料达到中强筋和中筋标准，占比 27.07%，54 份材料为弱筋小麦标准，占 40.60%。

强筋、中筋冬麦区的粗蛋白质含量均值为 14.63%，变化范围 10.88%~19.94%，变异系数为 10.33%，该区域 52 份供试材料的粗蛋白质含量达到强筋小麦标准，占该区域的 60.47%，26 份材料达到中强筋和中筋标准，占比 30.23%，8 份材料为弱筋小麦标准，占 9.30%。

总体来看，北方强筋、中筋冬麦区的粗蛋白含量大部分达到强筋标准，南方中筋、弱筋冬麦区的粗蛋白质含量弱筋标准的材料占比高。区域间粗蛋白含量顺序为：北方强筋、中筋冬麦区 $>$ 强筋、中筋冬麦区 $>$ 南方中筋、弱筋冬麦区。

2.2.3 湿面筋含量

由表 7、8 湿面筋含量统计结果显示：北方强筋、中筋冬麦区湿面筋含量均值为 31.55%，均值水平超过强筋小麦湿面筋含量的标准，其变化范围 24.40%~42.50%，变异系数 9.13%，符合强筋标准的材料 195 份，占本区域的 64.78%，强筋、中筋春麦区湿面筋含量均值为 30.28%，接近强筋质量标准，变化范围 21.14%~37.10%，变异系数为 14.24%，达到强筋小麦湿面筋品质标准的材料 39 份，占本区域供试材料的 45.35%。此外，该区域弱筋小麦湿面筋品质的材料有 29 份，占 33.72%。南方中筋、弱筋冬麦区面筋含量均值为 27.58%，低于低筋小麦品质国家标准，其中 65 份材料，达到该区域的 48.87%。

2.2.4 吸水率

由品质统计表，比较不同区域间吸水率指标平均值可以看出：中筋、强筋春麦区的均值最高，达到 61.31%，依照表 8 吸水率的标准值，达到强筋小麦品质标准。然而吸水率最高值出现在北方强筋、中筋冬麦区，达到 77.10%，且达到强筋标准的材料占比最大，为 43.92%，但该区域的总体吸水率均值低于中筋、强筋春麦区。南方中筋、弱筋冬麦区吸水率的变化范围较大为 50.40%~73.00%，变异系数最高为 8.69%，达到强筋水平的材料仅为 7.32%。该区域内的品种资源间吸水率差异较大。且大部分材料为中筋和弱筋水平，比例占 86.28%，符合该区域的品质特点。

2.2.5 沉降值和稳定时间

由表 7 沉降值和稳定时间的变异系数较大，表明各区域内品种间的沉降值和稳定时间差异较大，尤其是稳定时间，品种之间的变异系数可以达到 118.75%。由表 8 中可以看到稳定时间的区域内不同品质标准的分布数量及比率，在北方强筋、中筋冬麦区稳定时间 ≥ 10.0 min 的材料有 42 份，该区域供试品种达到稳定时间中强筋标准材料共计 70 份，占该区域供试资源的 23.25%；在强筋、中筋春麦区达到中强筋标准的材料 18 份，占该区供试材料的 30.5%；在南方中筋、弱筋冬麦区有 17 份供试材料稳定时间达到中强筋标准，中弱筋比例达到 86.18%。三个区域累计来看稳定时间达到中强筋标准的材料供 105 份，占比 21.74%。由图 2

沉降值分布图及 347 份含有沉降值数据的材料统计显示，沉降值大于 60mL 的材料有 47 份，36mL~60mL 的材料有 124 份，占 35.53%，30mL~36mL 的材料有 64 份，低于 30mL 的材料有 114 份，占 32.66%。

2. 2. 6 小麦品质与优异等位变异 KASP 标记的关系

综合品质统计数据详见表 9，以稳定时间、粗蛋白、湿面筋和容重指标值为依据，完整数据的材料共计 462 份，按照品质指标划分标准，18 份材料上述四个指标均满足强筋小麦标准，且三个区域均有分布；79 份材料符合中强筋标准，在三个区域均有分布；9 份材料的四个指标均满足弱筋标准，仅在南方中筋、弱筋冬麦区。将其余的品种列入中筋品种群体，对不同品质类型的品种群体进行品质基因的分型统计分析（详见表 10）发现，不同品质基因的优异等位变异的分布频率对品种的品质的影响存在差异，表现在：除 *Pinb2-V2* 外，其他品质相关基因的优异等位变异分布频率均呈现强筋品种>中强筋品种>中筋品种；*IBL/IRS*（-）、*Glu-Ax1*、*Ax2**和 *IDx5+IDy10* 的分布频率在强筋，中强筋和中筋品种间呈极显著差异，且与品质表现呈极显著正相关。表明，品质相关基因的优异等位变异对小麦品质的提高有正向作用。

表 9 供试小麦品种品质类型统计表

区域 Regions	品种数量 Varieties No.	强筋 Strong Gluten		中强筋 Medium strong Gluten above		弱筋 Weak Gluten	
		数量 No.	比例 Ratio	数量 No.	比例 Ratio	数量 No.	比例 Ratio
北方强筋、中筋冬麦区（I） North strong gluten and middle gluten winter wheat areas	290	11	3.8%	56	19.3%	0	0
南方中筋、弱筋冬麦区（II） South middle gluten and weak gluten winter wheat areas	120	2	1.7%	10	8.3%	9	7.5%
强筋、中筋春麦区（III） Strong gluten and middle gluten spring wheat areas	52	5	9.6%	13	25%	0	0
合计 Total	462	18	3.9%	79	17.1%	9	1.9%

表 10 不同类型品种品质相关基因优异等位变异分布频率比较

性状 Traits	基因 Gene	优异等位变异 Superior allelic variation	强筋品种 Strong Gluten Varieties	中强筋品种 Between Medium and Strong Gluten Varieties	中筋品种 Medium Gluten Varieties
小麦-黑麦易位系 Rye translocation line	<i>IBL. IRS</i>	<i>IBL/IRS</i> （-）	81.25%**	76.40%**	51.70%**
	<i>Glu-A1</i>	<i>Glu-Ax1</i> 、 <i>Ax2*</i>	88.90%**	77.53%**	57.70%**
	<i>Glu-D1</i>	<i>IDx5+IDy10</i>	66.67%**	52.81%**	25.58%**
谷蛋白亚基 Glutenin subunits	<i>Glu-B3g</i>	<i>Glu-B3g+</i>	53.26%	44.94%	44.44%
	<i>Pina-D1</i>	<i>Pina-D1b</i>	27.80%	11.20%	7.04%
	<i>Pinb-D1</i>	<i>Pinb-D1b</i>	72.22%	64.04%	55.87%
籽粒硬度 Kernel hardness	<i>Pinb2-V2</i>	<i>Pinb-B2b</i>	38.89%	2.25%	30.02%

注：*表示区域间在 0.05 水平差异显著；**表示区域间在 0.01 水平差异显著。

Note: * indicates significant difference between regions at 0.05 level; ** indicates significant difference between regions at 0.01 level.

3 讨论

3. 1 SNP 标记的选择与应用

IBL/IRS 易位系的利用在推进我国小麦育种进程中发挥了巨大的作用^[29]，在增产抗逆的同时，也存在

一些负面问题，如含有该外源片段的材料面筋质量下降，致使小麦加工品质变劣^[27]，孔欣欣等^[30]对北部冬麦区优质小麦品种（系）面条品质相关性状分析发现 *IBL/IRS* 易位对籽粒硬度、出粉率和面筋强度有显著负向影响，对面粉 *L**值、黄色素含量、PPO 活性和淀粉特性有显著正向影响。在以品质育种为主要目标的前提下，不含有该片段被视为优异的等位变异，在亲本和后代的品质筛选中尤为重要，本实验中涉及的品种中，不同区域间的优异等位变异的分布频率间存在极显著的差异，以南方小麦品种 *IBL/IRS* 易位系检出率高，原因可能是在高产和抗病虫选育过程中，含有该易位系的材料被普遍利用。

籽粒硬度是小麦品质育种及研究中的重要参数，是小麦分类、分级和定价的重要评价指标。籽粒硬度相关的主效基因 *Pina* 和 *Pinb*，在资源鉴定中发挥重要的作用。*Pinb-D1b* 和 *Pina-D1b* 突变型为硬质型，我国小麦品种的硬质型突变主要以这两种为主，区域间分布有所差异。

王化敦等^[32]对长江中下游麦区 105 份小麦研究发现，硬质麦和混合麦中存在 *Pinb-D1b*、*Pina-D1b* 和 *Pinb-D1p* 三种变异类型，突变频率分别为 29.5%、10.5% 和 3.8%^[31]。李式昭等对 105 份 2000 年后育成的四川小麦品种检测，发现籽粒含有 *Pinb-D1b* 硬度基因的品种有 11 份，频率为 10.5%。张晶等^[33]分析 169 份陕西小麦品种（系）中的硬质麦主要由 *Pinb-D1b* 基因型组成。哈力旦·依克热木等^[34]对新疆部分小麦材料鉴定得出 *Pina-Db* 基因在新疆当地材料占 28.57%，*Pinb-D1b* 占 24.49%。杨梦晨等^[35]对贵州省小麦品种（系）中与籽粒硬度相关基因的分子检测发现 *Pina-Db* 基因 25.32%，*Pinb-D1b* 占 21.52%。李善富等^[36]对西藏小麦品种籽粒硬度遗传多样性 121 个小麦品种中，17 份为 *Pinb-D1b* 类型，占 13.93%，12 份为 *Pina-D1b* 类型，占 9.84%。王雪玲等^[37]青海小麦籽粒硬度等位变异研究了 66 份青海小麦品种籽粒硬度主效基因的等位变异。结果表明，青海小麦以硬质类型为主，比例达到 47.0%，突变类型的品种籽粒均为硬质。得出在青海硬质小麦可以通过突变类型的分子标记进行选育。本文中对 530 份国内审定小麦品种进行了 2 个籽粒硬度主效基因 *Pina-D1*、*Pinb-D1* 和 1 个微效基因 *Pinb2-V2* 的 KASP 标记检测，其优异等位变异硬质的基因型分别为 *Pina-D1b*、*Pinb-D1b* 和 *Pinb-B2b* 的总体分布频率为 7.39%、60.32% 和 28.17%，*Pinb-D1b* 类型在供试品种中分布频率最高，这与 F. Chen 和 Xia LQ 等评价我国早期小麦品种的 *Pinb-D1b* 基因型占优势的结果相同^[38-39]。*Pinb-D1* 和 *Pinb-B2* 在不同区域间的分布呈极显著差异，北方强筋、中筋冬麦区的 *Pinb-D1b* 基因型分布频率最高为 67.58%，南方中筋、弱筋冬麦区的 *Pinb-B2b* 基因型分布频率最高 37.40%，而 *Pina-D1b* 的总体分布频率较低。Martin 等^[40]研究表明，*Pinb-D1b* 类型的磨粉、面包烘焙品质以及面条和馒头的加工品质均优于 *Pina-D1b* 类型。因此，在小麦品质育种过程中可以加大该基因的导/引入利用，为籽粒硬度的提高提供有效的基因供体。

面粉及其制品颜色在小麦品质评价中具有重要的作用，不同类型面制品对颜色需求不同，营养强化类面制品需要高黄色素含量的小麦，我国传统的面条、馒头、饺子等面食则需要亮白的小麦粉，即黄色素含量低的小麦面粉。因此，在品质育种中对颜色选择至关重要，培育低 PPO 活性和低黄色素含量的小麦品种是改善面制品色泽和颜色稳定性的有效途径，籽粒颜色受多基因控制，包括黄色素合成相关基因及酶类，目前评价最多的是小麦多酚氧化酶基因（PPO），其次黄色素相关基因，据报道，过氧化物酶基因（POD）的高活性等位变异 *TaPod-A1b* 对小麦粉有增白的效果^[22]，但目前对其评价较少，本文主要鉴定了 5 个颜色相关基因，黄色素合成相关基因中 *Psy-D1* 的优异等位变异（低活性）总体分布频率最高，为 91.89%，柳娜等^[41]对 104 份甘肃小麦品种分析发现等位基因 *Psy-Ala* 分布频率为 60.58%，李春鑫等^[42]对黄淮麦区 41 份小麦品种分析发现 *Psy-Ala* 分布频率为 60.98%。本文鉴定审定品种中的分布频率明显高于二者。本文中

TaZds-A1 基因的优异等位变异 *TaZds-A1a* 总体分布频率为 72.92%，而张钰玉等^[43]对陕西 194 份小麦品种(系)检测 *TaZds-A1a* 占 43.3%。而 *TaPds-B1* 基因的优异等位变异频率总体偏低，仅为 20.08%，黄义文等^[44]通过对 40 个小麦主栽品种 PPO 活性测定发现，携带 *Ppo-D1a* 等位变异的品种为 12.18%，此结果与本文中的结果(12.34%)相近。王丽丽等^[45]对 113 份新疆小麦品种(系)中 *TaPod - A1b* 基因型小麦品种(系)占 36.3%。本文中 *TaPod-A1b* 基因型的总体分布频率为 28.38%，不同品质区域间有差异，但不显著。

3.2 供试品种基因聚合现状

无论是主效基因还是微效基因，在育种中理想目标是尽可能聚合优异基因来提高小麦品质，本文对品质相关基因的分布情况及其聚合情况进行分析：文中涉及面筋质量相关基因 5 个，分别为 *1B/1R*、*Glu-D1*、*Glu-A1*、*glu-B3g* 和 *Glu-B1*，由于 *Glu-B1* 位点携带 *1Bx17+1By18* 亚基的分布频率很低，筛选同时含有 *1B/1R* (-)、*5+10*、*1/2**、*glu-B3g*+ 4 个优异等位变异的材料 12 份材料。籽粒硬度相关基因 3 个中未检测到同时含有 *Pina-D1b*、*Pinb-D1b* 和 *Pinb-B2b* 的材料，含有 *Pina-D1b*+*Pinb-B2b* 组合的材料 16 份，含有 *Pinb-D1b*+*Pinb-B2b* 组合的材料 88 份。5 个籽粒颜色相关基因中同时聚合 5 个优异等位变异的材料 10 份，聚合 4 个优异等位变异的材料 89 份，聚合 3 个优异等位变异的材料 146 份。检测的 13 个基因 SNP 标记中，未发现聚合 11 个以上优异等位变异基因的材料，聚合 10 个优异等位变异基因的材料有 4 份，聚合 9 个优异等位变异的材料有 16 份，聚合 8 个的材料有 43 份，聚合 7 个的材料有 89 份。

3.3 不同区域间品质类型的差异

按照主要农作物品种审定标准(国家级)强筋小麦品质指标值，在粗蛋白含量、湿面筋含量和吸水率指标中达标占比中 I>III>II，容重的达标比例为 II>I>III，稳定时间达标率 III>I>II；弱筋小麦品质指标值中，在容重、粗蛋白含量、湿面筋含量和吸水率中达标占比中 II>III>I，稳定时间达标占比为 I>II>III。I 区(北方强筋、中筋冬麦区)指标值达到强筋标准的比率差异较明显，粗蛋白含量和湿面筋含量的达标率达到 71.52%和 64.78，容重和吸水率的达标率为 48.82%和 43.92%，而稳定时间的达标率仅为 13.95%，这个结果与胡学旭等^[46]对主产区小麦品质区域间的差异分析中的结论一致，均为稳定时间与蛋白质含量和湿面筋含量指标不协调，是中国小麦品种品质存在的主要问题，其实质是蛋白质质量较差。

区域间品质情况比较发现强筋和中强筋的材料在强筋、中筋春麦区分布频率最高，其次为北方强筋、中筋冬麦区，弱筋品种主要分布在南方中筋、弱筋冬麦区，说明品质类型和分布频率基本上符合品质区划布局，但是从符合强筋和弱筋的小麦品种数量看，总体分布情况还是较低，符合中强筋以上的材料占 17.1%，强筋的材料仅占 3.9%，弱筋材料则更少，仅占 1.9%。说明各个麦区对品质育种存在区域间的差异性，但是仍是中筋材料占比较大，强筋和弱筋材料偏少，我国小麦品质育种仍然有很大的发展空间。

本文中选用了籽粒硬度、面筋质量和面粉及制品颜色相关的 13 个功能型的 SNP 标记开展 KASP 检测工作，KASP 方法具备荧光法、终点法、双等位等特性，技术操作上可以实现高通量、快速高效，且分型比较好。这些 SNP 标记来源于何中虎老师课题组多年功能基因的定位、克隆的基础上开发的功能位点，已经过双亲群体或其他表型鉴定验证，可靠性好。然而，就小麦的加工品质而言，多数性状较为复杂，由多基因控制，部分基因还含有多个等位变异，其中以 *Glu-B1* 为例，其编码的高分子量麦谷蛋白亚基 *1Bx* 和 *1By* 其变异类型多样，不同组合会影响面团的流变特性和加工特性，在目前测试和验证的 KASP 标记中，*Glu-B1* 的 KASP 鉴定还不够完善，仍需通过 SDS-PAGE 或 PCR-琼脂糖胶电泳等方法进行鉴定。期待能够开发更多的 SNP 标记在育种中应用，为小麦分子标记辅助育种做出更大的贡献。

参考文献

- [1] 刘志勇, 王道文, 张爱民, 梁翰文, 吕慧颖, 邓向东, 葛毅强, 魏珣, 杨维才. 小麦育种行业创新现状与发展趋势. 植物遗传资源学报, 2018, 19(3): 430-434
- Liu Z Y, Wang D W, Zhang A M, Liang H W, Lu H Y, Deng X D, Ge Y Q, Wei X, Yang W C. Current status and perspective of wheat genomics. Genetics and Breeding Journal of Plant Genetic Resources, 2018, 19(3): 430-434
- [2] 李振声. 我国小麦育种的回顾与展望. 中国农业科技导报, 2010, 12(2): 1-4
- Li Z S. Retrospect and prospect of wheat breeding in China. Journal of Agricultural Science and Technology, 2010, 12(2): 1-4
- [3] 何中虎, 庄巧生, 程顺和, 于振文, 赵振东, 刘旭. 中国小麦产业发展与科技进步. 农学学报, 2018, 8(1): 99-106
- He Z H, Zhuang Q S, Cheng S H, Yu Z W, Zhao Z D, Liu X. Wheat production and technology improvement in China. Journal of Agriculture, 2018, 8(1): 99-106
- [4] 蒋赞, 张丽丽, 薛平, 王秀东. 我国小麦产业发展情况及国际经验借鉴. 中国农业科技导报, 2021, 23(7): 1-10
- Jiang Y, Zhang L L, Xue P, Wang X D. Development status of wheat industry in China and international experience for reference. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(7): 1-10
- [5] 国家统计局 http://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/zxfb2020/202207/t20220714_1886385.html
- The State Statistical Bureau http://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/zxfb2020/202207/t20220714_1886385.html
- [6] 孙辉, 欧阳姝虹, 段晓亮. 中国小麦品质的现状与挑战. 粮油食品科技, 2017, 25(2): 1-4
- Sun H, Ouyang S H, Duan X L. Wheat quality in China-staus and chanllenge. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2017, 25(2): 1-4
- [7] 何中虎, 晏月明, 庄巧生, 张艳, 夏先春, 张勇, 王德森, 夏兰琴, 胡英考, 蔡民华, 陈新民, 阎俊, 周阳. 中国小麦品种品质评价体系建立与分子改良技术研究. 中国农业科学, 2006, 39(6): 1091-1101
- He Z H, Yan Y M, Zhuang Q S, Zhang Y, Xia X C, Zhang Y, Wang D S, Xia L Q, Hu Y K, Cai M H, Chen X M, Yan J, Zhou Y. Establishment of quality evaluation system and utilization of molecular methods for the improvement of Chinese wheat quality. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(6): 1091-1101
- [8] 王君婵, 吴旭江, 胡文静, 张晓, 张勇, 高德荣, 别同德, 张伯桥. 扬麦系列品种(系)重要性状功能基因的 KASP 检测. 江苏农业学报, 2019, 35(6): 1271-1283
- Wang J C, Wu X J, Hu W J, Zhang X, Zhang Y, Gao D R, Bie T D, Zhang B Q. Kompetitive allele specific PCR(KASP) assays for functional genes of important trait in Yangmai series wheat cultivars(lines). Jiangsu Journal of Agricultura Sinica, 2019, 35(6): 1271-128
- [9] 杨子博, 顾正中, 周羊梅, 王安邦, 高平中, 熊正海, 刘畅, 蒋学详, 沈业松. 江苏淮地区小麦品种资源籽粒硬度基因等位变异的 KASP 检测. 麦类作物学报, 2017, 37(2): 153-161
- Yang Z B, Gu Z Z, Zhou Y M, Wang A B, Gao P Z, Xiong Z H, Liu C, Jiang X X, Shen Y S. Detection of allelic variation for grain hardness in Huaibei region of Jiangsu province by KASP makers. Journal of Cereal Science, 2017, 37(2): 153-161
- [10] 王志伟, 王志龙, 乔祥梅, 杨金华, 程家省, 程耿, 于亚雄. 云南小麦品种(系)株高和粒重相关功能基因的 KASP 标记检测. 种子, 2020, 39(3): 1-6
- Wang Z W, Wang Z L, Qiao X M, Yang J H, Cheng J S, Cheng G, Yu Y X. KASP marker detection for plant height and grain weight-related genes in Yunnan wheat varieties(lines) . Seed, 2020, 39(3): 1-6
- [11] 刘霞, 雷梦林, 王艳珍, 王宇楠, 黄蕊, 穆志新. 山西小麦地方品种品质相关基因的 KASP 标记分析. 植物遗传资源学报, 2022, 23(3): 881-894
- Liu X, Lei M L, Wang Y Z, Wang Y N, Huang R, Mu Z X. Detection of quality-related genes in the wheat landrace in Shanxi province by KASP markers . Genetics and Breeding Journal of Plant Genetic Resources, 2022, 23(3): 881-894
- [12] 权有娟, 袁飞敏, 刘德梅, 李想, 陈志国. 利用 KASP 标记检测青海和西藏小麦品种中光周期基因分布. 麦类作物学报, 2019(10): 1165-1172
- Quan Y J, Yuan F M, Liu D M, Li X, Chen Z G. Determination of photoperiod genes distribution in wheat cultivars from Qinghai and Tibet by KASP markers. Journal of Triticeae Crops, 2019(10): 1165-1172
- [13] Ma D Y, Zhang Y, Xia X C, Craig F, Morris, He Z H. Milling and Chinese raw white noodle qualities of common wheat near-isogenic lines differing in puroindoline b alleles. Journal of Cereal Science, 2009, 50: 126-130
- [14] 郭世华, 何中虎, 王洪刚, 夏兰琴, 张庆祝, 张岐军, 于亚雄. Friabilin 蛋白表达量与小麦籽粒硬度的关系. 中国农业科学, 2003, 36 (9) : 991-995
- Guo S H, He Z H, Wang H G, Xia L Q, Zhang Q Z, Zhang Q J, Yu Y X. Association between friabilin protein and grain hardness in common wheat. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36 (9): 991-995
- [15] Igrejas G, Gaborit T, Oury F X, Chiron H, Marion D, Branlard G. Genetic and environmental effects on puroindoline-a and puroindoline-b content and their relationship to technological properties in French bread wheats. Journal of Cereal Science, 2001, 34: 37-47

- [16] Borrelli G M, Troccoli A, Fonzo N D, Fares C. Durum wheat lipoxygenase activity and other quality parameters that affect pasta color. *Cereal Chemistry*, 1999, 76(3): 335-340
- [17] Chang C, Zhang H P, Xu J, You M S, Li B Y, Liu G T. Variation in two PPO genes associated with polyphenol oxidase activity in seeds of common wheat. *Euphytica*, 2007, 154(1-2): 181-193
- [18] Roncallo P F, Cervigni G L, Jensen C, Miranda R, Carrera A D, Helguera M, Echenique V. QTL analysis of main and epistatic effects for flour color traits in durum wheat. *Euphytica*, 2012, 185: 77-92
- [19] 张立平, 阎俊, 夏先春, 何中虎, Mark W Sutherland. 普通小麦籽粒黄色素含量的 QTL 分析. *作物学报*, 2006, 32(1): 41-45
Zhang L P, Yan J, Xia X C, He Z H, Sutherland M W. QTL mapping for kernel yellow pigment content in common wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(1): 41-45
- [20] Gallagher C E, Matthews P D, Li F, Wurtzel E T. Gene duplication in the carotenoid biosynthetic pathway preceded evolution of the grasses. *Plant Physiology*, 2004, 135: 1776-1783
- [21] Crawford A C, Stefanova K, Lambe W, Mclean R, Wilson R, Barclay I, Francki M G. Functional relationships of phytoene synthase 1 alleles on chromosome 7A controlling flour color variation in selected Australian wheat genotypes. *Theoretical and Applied Genetics*, 2011, 123(1): 95-108
- [22] Hemalatha M S, Manu B T, Bhagwat S G, Leelavathi K, Prasada Rao U J S. Protein characteristics and peroxidase activities of different Indian wheat varieties and their relationship to chapati-making quality. *European Food Research and Technology*, 2007, 225(3-4): 463-471
- [23] Shewry P R, Halford N G, Tatham A S. The high molecular weight subunits of wheat glutenin and their role in determining wheat processing properties. *Advances in Food & Nutrition Research*, 2003, 45(03): 219-302
- [24] Veraverbeke W S, Delcour J A. Wheat protein composition and properties of wheat glutenin in relation to breadmaking functionality. *C R C Critical Reviews in Food Technology*, 2002, 42(3): 179-208
- [25] Maucher T, Figueroa J D C, Reule W, Peña R J. Influence of low molecular weight glutenins on viscoelastic properties of intact wheat kernels and Their relation to functional properties of wheat dough. *Cereal Chemistry*, 2009, 86(4): 372-375
- [26] Dhaliwal A S, Mares D J, Marshall D R. Measurement of dough surface stickiness associated with the 1B/1R chromosome translocation in bread wheats. *Journal of Cereal Science*, 1990, 12(2): 165-175
- [27] 刘建军, 何中虎, Pefia R J, 赵振东. 1BL/1RS 易位对小麦加工品质的影响. *作物学报*, 2004, 30: 149-153
Liu J J, He Z H, Pefia R J, Zhao Z D. The effects of 1B/1R translocation on grain quality and noodle quality of bread wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30: 149-153
- [28] Rasheed A, Wen W E, Gao F M, Zhai S N, Jin H, Liu J D, Guo Q, Zhang Y J, Dreisigacker S, Xia X C. Development and validation of KASP assays for genes underpinning key economic traits in bread wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 2016, 129(10): 1843-1860
- [32] 周阳, 何中虎, 张改生, 夏兰琴, 陈新民, 高永超, 井赵斌, 于广军. 1BL/1RS 易位系在我国小麦育种中的应用. *作物学报*, 2004, 30: 531-535
Zhou Y, He Z H, Zhang G S, Xia L Q, Chen X M, Gao Y C, Jing Z B, Yu G J. Utilization of 1BL/1RS translocation in wheat breeding in China. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30: 531-535
- [30] 孔欣欣, 张艳, 赵德辉, 夏先春, 王春平, 何中虎. 北方冬麦区新育成优质小麦品种面条品质相关性状分析. *作物学报*, 2016, 42(8): 1143-1159
Kong X X, Zhang Y, Zhao D H, Xia X C, Wang C P, He Z H. Noodle Quality evaluation of new wheat cultivars from northern China winter wheat regions. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(8): 1143-1159
- [31] 王化敦, 高春蕾, 张鹏, 张瑜, 张平平, 马鸿翔. 长江中下游麦区小麦品种籽粒硬度及 puroindoline 基因等位变异的分子检测. *麦类作物学报*, 2017, 37(4): 438-444
Wang H D, Gao C L, Zhang P, Zhang Y, Zhang P P, Ma H X. Allelic variation of puroindoline alleles in bread wheats from lower-middle reaches of the yangtze river. *Journal of Cereal Science*, 2017, 37(4): 438-444
- [32] 李式昭, 郑建敏, 伍玲, 李俊, 万洪深, 罗江陶, 刘廷辉, 杨开俊, 蒲宗君. 四川小麦品种籽粒硬度和穗发芽抗性相关基因的分子标记鉴定. *西南农业学报*, 2018, 31(04): 6-10
Li S Z, Zheng J M, Wu L, Li J, Wan H S, Luo J T, Liu T H, Yang K J, Pu Z J. Identification of grain hardness and resistance to pre-harvest sprouting in Sichuan wheat cultivars with molecular markers. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(4): 6-10
- [33] 张晶, 张晓科, 王可珍, 梁强, 付晓洁, 冯毅, 王瑞. 陕西小麦籽粒硬度及其基因型分析. *麦类作物学报*, 2011, 31(4): 666-671
Zhang J, Zhang X K, Wang K Z, Liang Q, Fu X J, Feng Y, Wang R. Distribution of grain hardness in Shaanxi wheats and puroindoline genotypes of hard wheats. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31(4): 666-671

- [34] 哈力旦·依克热木, 芦静, 周安定, 曾潮武, 曹俊梅, 梁晓东, 刘联正, 范贵强, 张新忠, 黄天荣, 高永红, 吴新元. 新疆部分小麦材料籽粒硬度基因等位变异的分子鉴定及其分布. 新疆农业科学, 2016, 53(6): 981-986
- HalidanY, Lu J, Zhou A D, Zeng C W, Cao J M, Liang X D, Liu L Z, Fan G Q, Zhang X Z, Huang T R, Gao Y H, Wu X Y. Distribution and molecular identification of kernel hardness gene alleles in part of wheat germplasms of Xinjiang. Xinjiang Agricultural Sciences, 2016, 53(6): 981-986
- [35] 杨梦晨, 晏权, 任明见, 李鲁华, 徐如宏. 贵州省小麦品种(系)中与籽粒硬度相关基因的分子检测. 山地农业生物学报, 2020, 39(5): 57-66
- Yang M C, Yan Q, Ren M J, Li L H, Xu R H. Molecular detection of genes related to grain hardness in wheat cultivars (lines) in Guizhou. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2020, 39(5): 57-66
- [36] 李善富, 李建民, 王雪玲, 魏乐, 李红琴, 刘宝龙, 张怀刚. 西藏小麦品种籽粒硬度遗传多样性. 西北农业学报, 2014, 23(8): 40-44
- Li S F, Li J M, Wang X L, Wei L, Li H Q, Liu B L, Zhang H G. Genetic variation of grain hardness of wheat cultivars in Tibet. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2014, 23(8): 40-44
- [37] 王雪玲, 李建民, 魏乐, 李红琴, 刘宝龙, 张怀刚. 青海小麦籽粒硬度等位变异研究. 麦类作物学报, 2014, 34(1): 23-27
- Wang X L, Li J M, Wei L, Li H Q, Liu B L, Zhang H G. Genetic variation of grain hardness of wheat cultivars in Qinghai province. Journal of Triticeae Crops, 2014, 34(1): 23-27
- [38] Chen F, He Z H, Xia X C, Xia L Q, Zhang X Y, Lillemo M, Morris C F. Molecular and biochemical characterization of puroindoline a and b alleles in Chinese landraces and historical cultivars. Theoretical and Applied Genetics, 2006, 112: 400-409
- [39] Xia L Q, Chen F, He Z H, Chen X M, Morris C F. Occurrence of puroindoline alleles in Chinese winter wheat. Cereal Chemistry, 2005, 82(1): 38-43
- [40] Martin J M, Froberg R C, Morris C F, Talbert L E, Giroux M J. Milling and bread baking traits associated with puroindoline sequence type in hard red spring wheat. Crop Science, 2001, 41(1): 228-234
- [41] 柳娜, 曹东, 王世红, 杨文雄. 104 份甘肃小麦品种主要品质基因的分子标记检测. 西北农业学报, 2016, 25(3): 353-360
- Liu N, Cao D, Wang S H, Yang W X. Molecular marker characterization of main quality genes in 104 Gansu wheat varieties. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2016, 25(3): 353-360
- [42] 李春鑫, 赵明忠, 韩留鹏, 高崇, 李正玲, 王艳, 咎香存, 胡琳. 黄淮麦区 41 个小麦品种(系)品质相关基因的分子检测. 河南农业科学, 2022, 51(2): 18-27
- Li C X, Zhao M Z, Han L P, Gao C, Li Z L, Wang Y, Zan X C, Hu L. Molecular detection of quality related genes of 41 wheat varieties(lines) in Huang-huai wheat region. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2022, 51(2): 18-27
- [43] 张珏玉, 张晓科, 蒋雷, 刘芳军, 王宪国, 白升升, 王晓龙. 陕西小麦黄色素含量基因 *TaZds-A1* 和 *TaZds-D1* 的组成与分布. 麦类作物学报, 2013, 33(6): 1144-1148
- Zhang J Y, Zhang X K, Jiang L, Liu F J, Wang X G, Bai S S, Wang X L. Detection of genes *TaZds-A1* and *TaZds-D1* for yellow pigment content and their distribution in Shaanxi wheat cultivars and lines. Journal of Triticeae Crops, 2013, 33(6): 1144-1148
- [44] 黄义文, 代旭冉, 刘宏伟, 杨丽, 买春艳, 于立强, 于广军, 张宏军, 李洪杰, 周阳. 小麦多酚氧化酶基因 *Ppo-A1* 和 *Ppo-D1* 位点等位变异与穗发芽抗性的关系. 作物学报, 2021, 47(11): 2080-2090
- Huang Y W, Dai X R, Liu H W, Yang L, Mai C Y, Yu L Q, Yu G J, Zhang H J, Li H J, Zhou Y. Relationship between the allelic variations at the *Ppo-A1* and *Ppo-D1* loci and pre-harvest sprouting resistance in wheat. Acta Agronomica Sinica, 2021, 47(11): 2080-2090
- [45] 王丽丽, 战帅帅, 谢磊, 王继庆, 哈尼开·马坎, 任毅, 时佳, 耿洪伟. 新疆小麦籽粒过氧化物酶(POD)活性检测及其基因等位变异检测. 新疆农业科学, 2020, 57(10): 1765-1774
- Wang L L, Zhan S S, Xie L, Wang J Q, Hanikai M, Ren Y, Shi J, Geng H W. Detection of peroxidase activity in Xinjiang wheat cultivars and allelic detection of related genes. Xinjiang Agricultural Sciences, 2020, 57(10): 1765-1774
- [46] 胡学旭, 王步军, 周桂英, 陆伟, 武力, 李静梅, 王爽, 宋敬可, 杨秀兰, 王步军. 中国主产区小麦在品质区域间的差异. 作物学报, 2009, 35(6): 1167-1172
- Hu X X, Wang B J, Zhou G Y, Lu W, Wu L, Li J M, Wang S, Song J K, Yang X L, Wang B J. Variation of wheat quality in main wheat-producing regions in China. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(6): 1167-1172