

陈真真,周国勤,申冠宇,等. 豫南小麦品种(系)重要功能基因的 KASP 检测与应用[J]. 江苏农业科学,2024,52(18):128-137.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.18.017

豫南小麦品种(系)重要功能基因的 KASP 检测与应用

陈真真,周国勤,申冠宇,蔡晨阳,陈俊

(信阳市农业科学院,河南信阳 464000)

摘要:为了解豫南地区小麦品种(品系)重要性状功能基因组成,利用 KASP 标记技术对 33 份小麦品种(品系)光周期、株高、粒重、穗粒数、生物量、谷蛋白亚基、籽粒蛋白相关基因、多酚氧化酶活性、黄色素含量、抗逆等相关功能基因进行检测。结果表明:在光周期 *Ppd-D1* 基因上 33 份材料均表现出光周期不敏感型;在 *Vrn-A1*、*Vrn-5A* 基因上 33 份材料均表现出冬性品种,32 份材料在 *Vrn-D1* 基因上表现出春性品种,16 份材料检测出矮秆基因 *Rht-D1b*。产量性状相关基因中 *TaGS5-A1*、*TaGW2-6B*、*TaTGW-7A*、*TaGS-D1*、*TaSus2-2B*、*TaTGW6-A1*、*Sus1-7A*、*TaCWI-A1* 和 *TaGS2-A1* 高千粒重优异等位变异分布比率分别为 3.03%、36.36%、93.94%、18.18%、42.42%、3.03%、100%、54.55% 和 81.82%。高小穗数基因 *TaMoc-A1* 优异等位变异分布比率为 3.03%;高单株生物量 *TaGS2-B1* 的优异等位变异分布比率为 48.48%。籽粒品质相关基因中低分子量麦谷蛋白亚基 *Glu-A3d*、*Glu-B3g*、*Glu-B3e*、*Glu-A3b* 的分布比率分别为 3.03%、75.76%、100% 和 96.97%;*Glu-A1* 的弱筋等位变异 *null* 分布比率为 48.48%;小麦籽粒蛋白相关基因的 *NAM-A1b*、*A1d* 分型和 *NAM-A1a*、*A1b* 分型分布比率分别为 93.94% 和 78.79%。面粉品质相关基因中八氢番茄红素脱氢酶基因 *Pds-B1*、八氢番茄红素合成酶基因 *PsyB1c* 和 *PsyA1b* 的优异等位变异低黄色素含量的分布比率分别为 42.42%、100% 和 100%;多酚氧化酶基因 *TaPpoA1* 优异等位变异 *TaPpo-A1b* 酶基因低含量的分布比率为 30.3%;面团强度 *ALPb7A* 优异等位变异 *ALPb7Aa* 高面团强度的分布比率为 45.45%。抗穗发芽基因中 *Vp-B1* 和 *TaSdr-B1* 的优异等位变异抗穗发芽所占的比例为 100% 和 60.61%;抗旱 *Dreb-B1* 和 *Ifeh3* 基因的优异等位变异分布比率分别为 69.70% 和 90.90%;高茎秆木质素含量优异等位变异 *COMT3Ba* 分布比率分别为 100%。本研究明确了豫南地区小麦品种(品系)的重要功能,为生产布局和品种参试提供了理论依据。

关键词:豫南;小麦;功能基因;KASP 检测;应用

中图分类号:S512.103;S330 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)18-0128-10

小麦(*Triticum aestivum* L.)是三大粮食作物之一,是种植面积最大和分布最广的粮食作物。根据国家统计局官方发布,我国 2022 年小麦播种面积约 2 351.85 万 hm^2 , 占全国粮食播种总面积(11 833.2 万 hm^2)的 1/5 左右,小麦播种面积约占全球小麦播种面积的 11%。因此,小麦生产安全对国家粮食安全和世界粮食安全都有着重要的影响。豫南地区的土壤、气候生态条件等非常有利于小麦的生产,为河南省粮食生产核心区。南方的品种在该区域产量潜力有限,锈病重;北方的小麦品种在

该区域不耐渍害,赤霉病重,不抗穗发芽,晚熟。现在豫南地区生产上应用的品种主要是以江苏、四川、信麦系列品种为主。豫南地区主推小麦品种的重要性状功能基因研究对长江中下游小麦种质资源创新和生产上的推广应用具有非常重要的作用。

近年来,随着小麦全基因组测序的完成和高通量测序技术的发展,基于小麦基因组开发的 SNP (single nucleotide polymorphism) 和 InDels (insertion-deletion) 等标记被广泛用于关联分析、基因定位和遗传图谱的构建等方面的研究,为小麦多基因聚合育种和分子标记辅助选择奠定了基础^[1-2]。竞争性等位基因特异性 PCR (kompetitiveallele-specific PCR, KASP) 技术是一种高通量的 SNP 分型技术,其是由英国 LGC 公司开发的,其具有对样品的基因组 DNA 进行 SNP 分型和鉴定多个性状的功能^[3]。KASP 技术与 SSR、KFLP 等传统分子标记相比更灵活、更经济、更准确,而且其更加适合大样本检测,其在筛选植物优良抗逆基因、优良的适应性

收稿日期:2024-03-19

基金项目:河南省“揭榜挂帅”技术攻关专项(编号:21110110800);

国家小麦产业技术体系建设专项(编号:CARS-03-01A);河南省小麦产业技术体系项目。

作者简介:陈真真(1990—),女,河南驻马店人,硕士,助理研究员,主要从事小麦遗传育种研究,E-mail:396939159@qq.com;周国勤,副研究员,主要从事小麦遗传育种与栽培工作研究,E-mail:zhouguoqin74@126.com。

基因、品质基因以及筛选优良的种质材料等方面具有重要的价值^[4-8]。

近年来,基于 KASP 标记技术对各种作物种质资源基因分型或作物辅助育种的研究越来越多。闫金龙等对晋东南小麦品种(系)部分抗病基因的 KASP 标记检测,明确了晋东南地区小麦品种(系)中抗病基因分布^[9];权有娟等利用 KASP 标记检测青海和西藏小麦品种中光周期基因分布,明确了青海和西藏小麦品种中光周期基因的分布情况^[10];王志伟等对云南小麦品种(系)抗逆性相关基因的 KASP 标记进行检测,明确了云南小麦品种中抗旱和抗穗发芽等抗逆性状相关基因的组成分布;高振贤等对河北省小麦重要农艺性状的 KASP 标记检测,明确了河北小麦重要农艺性状的优异等位变异^[12];王君婵等对扬麦系列品种(系)重要性状功能基因的 KASP 进行检测,明确了扬麦系列品种(系)部分重要性状功能基因的组成^[5];杜莹莹等对江苏淮北小麦品种(系)重要性状功能基因的 KASP 检测,明确了淮北麦区育成品种(系)的优异等位变异组合^[13]。

本研究对豫南地区大面积推广的小麦品种以及信阳市农业科学院育成的品种和高代稳定品系进行了 KASP 标记选择,以期明确光周期、株高、粒重、穗粒数、生物量、谷蛋白亚基、籽粒蛋白相关基因、多酚氧化酶活性、黄色素含量、抗逆等相关功能基因等性状相关基因的组成,为准确评价推广品种和育成材料的利用价值提供参考,为生产布局和品种参试提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为 33 份,其中 8 份是信阳市农业科学院育成的品种和高代稳定品系,有 25 份是在豫南地区种植面积较大的品种于 2023—2024 年度种植于信阳市农业科学院陆庙基地。

1.2 KASP 检测

1.2.1 DNA 提取 首先用 DNA 提取试剂盒提取 DNA,整个过程在 Douglas Scientific Array Tape 平台上完成,先用紫外分光光度计检测 DNA 的含量及纯度,然后根据小麦基因组大小,利用 Tecan 液体自动化工作站进行 DNA 的稀释。

1.2.2 PCR 体系配制 在 Nexar 工作站上将 DNA 工作液、PCR mix 及引物加入到 384 PCR 反应 Array

Tape 中,PCR 总反应体系 1.622 μL ,DNA 0.8 μL , $2 \times \text{KSP Master Mix}$ 0.8 μL ,KASP Assay mix 0.022 μL 。

1.2.3 PCR 扩增 在 Soellex 水浴中完成 PCR 反应,PCR 反应程序见表 1。

表 1 KASP PCR 反应程序

KASP PCR 反应程序			
第一阶梯			
步骤	温度(°C)	时间	循环数(个)
1	95	15 min	1
2	95	20 s	10
	65 ~ 55 *	1 min	
3	95	20 s	30
	55	1 min	
第二阶梯			
步骤	温度(°C)	时间	循环数(个)
1	95	5 min	1
2	95	20 s	5
	55	1 min	

注: * 表示每隔 1 个循环降低 1 °C。

1.2.4 荧光信号读取 在 Araya 上进行荧光强度的扫描检测,在相应软件中分析和读取数据。

2 结果与分析

2.1 适应性相关基因的 KASP 检测结果

为了了解豫南地区小麦品种的广泛适应性特点,检测了 *TaELF3-D1-1* 和 *Vrn-A1* 等花期相关基因、*Ppd-A1*、*Ppd-D1* 和 *Ppd-B1* 等光周期相关基因、*Vrn-A1* 和 *Vrn-D3* 等春化相关基因、*Vrn-A1*、*Vrn-5A* 和 *Vrn-D1* 等冬春性相关基因、*Rht-D* 株高相关基因的的基因型,KASP 标记检测结果(表 2)显示:32 份小麦品种的 *TaELF3-D1-1* 基因均表现出开花晚型,13 份小麦品种的 *Vrn-A1* 表现出开花早;光周期 *Ppd-A1* 基因有 32 份材料表现出光周期不敏感,只有绵麦 902 表现出光周期敏感;在光周期 *Ppd-D1* 基因上 33 份材料均表现出光周期不敏感;在光周期 *Ppd-B1* 基因上 32 份材料均表现出光周期不敏感;*Vrn-A1* 和 *Vrn-5A* 基因 33 份材料均表现出冬性品种,32 份材料在 *Vrn-D1* 上表现出春性品种,16 份材料检测出矮秆基因 *Rht-D1b*。

2.2 产量相关基因的 KASP 检测结果

12 个与粒重有关的基因 *TaGS5-A1*、*TaCWI-5D*、

表 2 小麦适应性相关基因的 KASP 检测结果

材料	KASP 检测结果										
	TaELF3-D1-I	Vrn-A1	Vrn-A1	Vrn-A1/b	Vrn-5A	Vrn-D1	Vrn-D3	Ppd-A1	Ppd-D1	Ppd-B1	Rht-D1
信麦 185	Rialto	Vrn-A1	Claire type	Vrn-A1/b	Vrn-5A	Vrn-D1a	2174	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1a
信麦 188	Rialto	Vrn-A1	Claire type	ZH	Vrn-5A	Vrn-D1a	Jagger	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1b
信麦 198	Rialto	Vrn-A1	Claire type	ZH	Vrn-5A	Vrn-D1a	Jagger	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1b
信麦 186	Rialto	Vrn-A1	Claire type	ZH	Vrn-5A	Vrn-D1a	2174	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1a
信麦 199	Rialto	Vrn-A1	Hereward type	ZH	Vrn-5A	Vrn-D1a	2174	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1b
信麦 175	Rialto	Vrn-A1	Hereward type	ZH	Vrn-5A	ZH	2174	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1a
绵麦 51	Rialto	Vrn-A1	ZH	ZH	Vrn-5A	Vrn-D1a	2174	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1b
绵麦 902	Rialto	Vrn-A1	Claire type	ZH	Vrn-5A	Vrn-D1a	2174	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1a
扬麦 30	Rialto	Vrn-A1	ZH	ZH	Vrn-5A	Vrn-D1a	2174	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1b
扬麦 13	Rialto	Vrn-A1	Hereward type	Vrn-A1/b	Vrn-5A	Vrn-D1a	2174	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1a
扬麦 22	Rialto	Vrn-A1	Hereward type	ZH	Vrn-5A	Vrn-D1a	ZH	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1b
扬麦 24	Spark	Vrn-A1	Claire type	Vrn-A1/b	Vrn-5A	Vrn-D1a	Jagger	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1b
百农 207	Rialto	Vrn-A1	ZH	ZH	Vrn-5A	Vrn-D1a	2174	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	ZH
宁麦 24	Rialto	Vrn-A1	Claire type	ZH	Vrn-5A	Vrn-D1a	2174	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1b
矮抗 58	Rialto	Vrn-A1	Hereward type	ZH	Vrn-5A	Vrn-D1a	2174	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1a
川麦 107	Rialto	Vrn-A1	Claire type	ZH	Vrn-5A	Vrn-D1a	Jagger	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	ZH
扬麦 21	Rialto	Vrn-A1	Hereward type	ZH	Vrn-5A	Vrn-D1a	ZH	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1a
绵麦 112	Rialto	Vrn-A1	Claire type	ZH	Vrn-5A	Vrn-D1a	2174	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1b
扬麦 15	Rialto	Vrn-A1	Claire type	Vrn-A1/b	Vrn-5A	Vrn-D1a	2174	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1b	Rht-D1b
郑麦 113	Rialto	Vrn-A1	Hereward type	ZH	Vrn-5A	Vrn-D1a	2174	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1a
泛 8	Rialto	Vrn-A1	Hereward type	ZH	Vrn-5A	Vrn-D1a	Jagger	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1b
信麦 136	Rialto	Vrn-A1	Claire type	ZH	Vrn-5A	Vrn-D1a	Jagger	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1b
郑麦 103	Rialto	Vrn-A1	Hereward type	ZH	Vrn-5A	Vrn-D1a	ZH	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1a
西农 979	Rialto	Vrn-A1	Hereward type	ZH	Vrn-5A	Vrn-D1a	2174	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1b
扬麦 158	Rialto	Vrn-A1	Hereward type	ZH	Vrn-5A	Vrn-D1a	Jagger	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1b
宁麦 9 号	Rialto	Vrn-A1	Hereward type	ZH	Vrn-5A	Vrn-D1a	2174	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1b
扬麦 20	Rialto	Vrn-A1	Hereward type	ZH	Vrn-5A	Vrn-D1a	ZH	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1b
宁麦 13	Rialto	Vrn-A1	Hereward type	ZH	Vrn-5A	Vrn-D1a	ZH	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	ZH
丰抗 38	Rialto	Vrn-A1	ZH	Vrn-A1/b	Vrn-5A	Vrn-D1a	2174	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1a
豫麦 18	Rialto	Vrn-A1	ZH	Vrn-A1/b	Vrn-5A	Vrn-D1a	2174	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1a
信麦 1168	Rialto	Vrn-A1	Claire type	Vrn-A1/b	Vrn-5A	Vrn-D1a	ZH	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1a
扬麦 33	Rialto	Vrn-A1	Claire type	Vrn-A1/b	Vrn-5A	Vrn-D1a	2174	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1b
刑科麦 49	Rialto	Vrn-A1	Hereward type	ZH	Vrn-5A	Vrn-D1a	2174	Ppd-A1a	Ppd-D1a	Ppd-B1a	Rht-D1a

注: Rialto 和 Hereward type 为开花晚型; Spark 为开花早型; Vrn-A1 和 Vrn-5A 为冬性; Claire type 为开花早; Vrn-A1a 为春化时间短; Vrn-A1b 为春化时间长; Vrn-D1a 为春性; Jagger 为长春化; 2174 为短春化; Ppd-A1a、Ppd-D1a 和 Ppd-B1a 为光周期不敏感; Pdb-A1b、Ppd-B1b 为光周期敏感; Rht-D1a 为高秆型, Rht-D1b 为矮秆型; ZH 表示杂合型。

TaGW2-6B、*TaTGW-7A*、*TaGS-D1*、*TaSus2-2B*、*TaTGW6-A1*、*Sus1-7A*、*Sus2-2A*、*TaCWI-A1*、*TaSus*、*TaGS2-A1*, 1 个与小穗数 *TaMoc* 有关的基因, 1 个与单株生物量 *TaGS2-B1* 有关的基因 KASP 标记检测结果 (表 3) 表明: 1 份小麦品种 (系) 含有 *TaGS5-A1* 的高千粒重优异等位变异 *TaGS5-A1a*; 33 份小麦品种 (系) 均未含有 *TaCWI-5D* 的粒重有利等位基因单倍型; 含有 *TaGW2-6B* 的高粒重单倍型 *Hap-3* 优异等位变异的小麦品种 (系) 有 12 份, 优异等位基因所占的比例为 36.36%; 含有 *TaTGW-7A* 的高千粒重优异等位变异 *TaTGW-7Aa* 小麦品种 (系) 31 份, 优异等位基因所占的比例为 93.94%; 含有 *TaGS-D1* 高千粒重优异等位变异 *TaGS-D1a* 小麦品种 (系) 6 份, 优异等位基因所占的比例为 18.18%; 含有 *TaSus2-2B* 高粒重单倍型 *Hap-H* 小麦品种 (系) 14 份, 优异等位基因所占的比例为 42.42%; 含有 *TaTGW6-A1* 的高粒重优异等位变异 *TaTGW6-A1a* 小麦品种 (系) 1 份, 优异等位基因所占的比例为 3.03%; 含有 *Sus1-7A* 的高粒重单倍型 *Hap-4/Hap-2* 小麦品种 (系) 33 份; 优异等位基因所占的比例为 100%; 33 份小麦品种 (系) 均未含有高千粒重单倍型; 含有 *TaCWI-A1* 的高千粒重优异等位变异 *TaCwi-A1a* 的小麦品种 (系) 18 份, 优异等位基因所占的比例为 54.55%; 33 份小麦品种 (系) 均未含有 *TaSus1-7B* 的高千粒重单倍型; 含有 *TaGS2-A1* 的高千粒重优异等位变异 *TaGS2-A1a* 小麦品种 (系) 27 份, 优异等位基因所占的比例为 81.82%; 含有 *TaMoc-A1* 高小穗数优异单倍型 *Hap-H* 小麦品种 (系) 1 份, 优异等位基因所占的比例为 3.03%; 含有 *TaGS2-B1* 的高单株生物量的优异等位变异 *TaGS2B1a* 小麦品种 (系) 16 份, 优异等位基因所占的比例为 48.48%; 试验结果表明这 33 份小麦品种 (系) 基本上都含有 3 个以上的优异基因, 进一步分析发现信麦 185、信麦 188、信麦 198、信麦 186 和豫麦 18 这 5 份小麦品种 (系) 中都含有 6 个与产量相关的优异基因。

2.3 籽粒品质相关基因的 KASP 检测结果

供试材料中 *Glu-A3d* 低分子量麦谷蛋白亚基位点优质亚基的分布比例为 3.03% (表 4); *Glu-A3g* 低分子量麦谷蛋白亚基在 33 份材料中都没有检测到, 含有 *Glu-A1* 的弱筋等位变异 *null* 小麦品种 (系) 16 份, 优异等位基因所占的比例为 48.48%; 含有 *Glu-B3g* 低分子量麦谷蛋白亚基小

麦品种 (系) 25 份, 分布比例为 75.76%; 33 份小麦品种 (系) 含有 *Glu-B3e* 低分子量麦谷蛋白亚基, 分布比例为 100%; *Glu-B3fg* 低分子量麦谷蛋白亚基在 33 份材料中都没有检测到; *GCP--* 高蛋白质含量在 33 份材料中都没有检测到; 32 份小麦品种 (系) 含有 *Glu-A3b* 低分子量麦谷蛋白亚基低分子量麦谷蛋白亚基, 分布比例为 96.97%; 31 份小麦品种 (系) 含有 *NAM-A1* 的小麦籽粒蛋白相关基因的 *NAM-A1b*、*A1d* 分型, 分布比例为 93.94%; 26 份小麦品种 (系) 含有 *NAM-A1* 的小麦籽粒蛋白相关基因的 *NAM-A1a*、*A1b* 分型, 分布比例为 78.79%; *R-B1b* 为红粒基因在 33 份小麦品种 (系) 都有检测到, 分布比例为 100%; 进一步分析发现: 信麦 188、信麦 198、绵麦 51、绵麦 902、扬麦 13、扬麦 22、绵麦 112、泛 8、信麦 136、扬麦 158、宁麦 9 号、扬麦 20、信麦 1168 均含有 *Glu-A1* 的弱筋等位变异 *null*, *Glu-B3g* 低分子量麦谷蛋白亚基, *Glu-B3e* 低分子量麦谷蛋白亚基, *Glu-A3b* 低分子量麦谷蛋白亚基。

2.4 面粉品质相关基因的 KASP 检测结果

从表 5 可以看出, 八氢番茄红素脱氢酶 *Pds-B1* 优异等位变异 *Pds-B1b* 低黄色素含量的分布比例为 42.42%; 八氢番茄红素合成酶 *PsyB1c* 优异等位变异 *PsyB1a* 低黄色素含量的分布比例为 100%; 八氢番茄红素合成酶 *PsyA1b* 优异等位变异 *PsyA1b* 低黄色素含量的分布比例为 100%; 多酚氧化酶 *TaPpoA1* 优异等位变异 *TaPpo-A1b* 酶低含量的分布比例为 30.3%; 多酚氧化酶 *TaPpo-A2* 优异等位变异 *TaPpo-A2b* 酶低含量的分布比例为 0; 面团强度 *ALPb7A* 的优异等位变异 *ALPb7Aa* 高面团强度的分布比例为 45.45%; 面粉品质优异等位变异组合 *Pds-B1b + PsyB1a + PsyA1b + TaPpo-A1b + ALPb7Aa*, 品种 (品系) 有信麦 188、信麦 198、信麦 1168、扬麦 33 等, 占比 12.12%。

2.5 抗逆性相关基因的 KASP 检测结果

从表 6 可以看出, 在供试材料中没有检测到抗秆锈病基因 *Sr36* 的优异等位基因变异 *Sr36+*; 没有检测到抗叶锈病 *Lr34* 的优异等位基因变异 *Lr34+*; 抗穗发芽的基因中, *TaMFT-A1* 的优异等位变异分布比例为 0; *Vp-B1* 的优异等位变异抗穗发芽 *Vp-B1c* 的分布比例为 100%; 含有 *TaSdr-B1* 的优异等位变异抗穗发芽 *TaSdr-B1a* 小麦品种 (品系) 20 份, 优异等位基因所占的比例为 60.61%; 所以有信麦 188、信麦 198、信麦 1168、绵麦 51、绵麦 902、扬麦

表3 小麦产量相关基因的KASP检测结果

材料	KASP 检测结果													
	TaGS2-B1	TaGS3-A1	TaCW1-5D	TaCW2-6B	TaCW2-6B	TaGS-D1	TaSus2-2B	TaTCW6-A1	Sus1-7A	Sus22A	TaCwi-A1	TaSus-7B	TaGS2-A1	TaMoc-A1
信麦 185	T-B1a	T-A1b	Hap-5D-G	others	others	T-D1b	ZH	T6-A1b	Hap-4/Hap-2	Hap-G	T-A1a	Hap-C	T-A1a	Hap-L
信麦 188	T-B1a	T-A1b	Hap-5D-G	ZH	others	T-D1b	ZH	T6-A1b	Hap-4/Hap-2	Hap-G	T-A1a	Hap-C	T-A1a	Hap-L
信麦 198	T-B1a	T-A1b	Hap-5D-G	others	others	T-D1b	ZH	T6-A1b	Hap-4/Hap-2	Hap-G	T-A1a	Hap-C	T-A1a	Hap-L
信麦 186	T-B1a	T-A1b	Hap-5D-G	ZH	others	T-D1b	ZH	T6-A1b	Hap-4/Hap-2	Hap-G	ZH	Hap-C	T-A1a	Hap-L
信麦 199	T-B1a	T-A1b	Hap-5D-G	others	others	T-D1b	ZH	T6-A1b	Hap-4/Hap-2	Hap-G	T-A1a	Hap-C	T-A1a	Hap-L
信麦 175	T-B1b	T-A1b	Hap-5D-G	others	others	T-D1b	Hap-H	T6-A1b	Hap-4/Hap-2	Hap-G	T-A1a	Hap-C	T-A1a	Hap-L
锦麦 51	ZH	T-A1b	Hap-5D-G	Hap-2	others	T-D1b	Hap-H	T6-A1b	Hap-4/Hap-2	Hap-G	T-A1a	Hap-C	ZH	Hap-L
锦麦 902	T-B1b	T-A1b	Hap-5D-G	others	others	T-D1a	Hap-H	T6-A1b	Hap-4/Hap-2	Hap-G	ZH	Hap-C	T-A1a	Hap-L
扬麦 30	T-B1b	T-A1b	Hap-5D-G	others	others	T-D1b	ZH	T6-A1b	Hap-4/Hap-2	Hap-G	ZH	Hap-C	T-A1b	Hap-L
扬麦 13	T-B1a	T-A1b	Hap-5D-G	others	others	T-D1a	ZH	T6-A1b	Hap-4/Hap-2	Hap-G	ZH	Hap-C	T-A1a	Hap-L
扬麦 22	T-B1a	T-A1b	Hap-5D-G	others	others	T-D1b	Hap-H	T6-A1b	Hap-4/Hap-2	Hap-G	ZH	Hap-C	T-A1a	Hap-L
扬麦 24	T-B1b	T-A1b	Hap-5D-G	others	others	T-D1b	Hap-H	T6-A1b	Hap-4/Hap-2	Hap-G	T-A1a	Hap-C	T-A1b	Hap-L
百农 207	T-B1b	T-A1b	Hap-5D-G	others	others	T-D1b	ZH	ZH	Hap-4/Hap-2	Hap-G	T-A1a	Hap-C	T-A1a	Hap-L
宁麦 24	T-B1b	T-A1b	Hap-5D-G	others	others	T-D1b	ZH	T6-A1b	Hap-4/Hap-2	Hap-G	ZH	Hap-C	T-A1a	Hap-L
皖抗 58	T-B1b	T-A1b	Hap-5D-G	others	others	T-D1b	ZH	T6-A1b	Hap-4/Hap-2	Hap-G	ZH	Hap-C	T-A1a	Hap-L
川麦 107	T-B1b	T-A1b	Hap-5D-G	others	others	T-D1b	Hap-H	ZH	Hap-4/Hap-2	Hap-G	ZH	Hap-C	T-A1a	Hap-H
扬麦 21	T-B1a	T-A1b	Hap-5D-G	others	others	T-D1b	ZH	T6-A1b	Hap-4/Hap-2	Hap-G	T-A1a	Hap-C	ZH	Hap-L
扬麦 112	T-B1b	T-A1b	Hap-5D-G	Hap-2	others	T-D1b	Hap-H	T6-A1b	Hap-4/Hap-2	Hap-G	T-A1a	Hap-C	T-A1a	Hap-L
扬麦 15	T-B1b	T-A1b	Hap-5D-G	others	others	T-D1b	ZH	T6-A1b	Hap-4/Hap-2	Hap-G	T-A1a	Hap-C	T-A1b	Hap-L
郑麦 113	ZH	T-A1b	Hap-5D-G	others	others	T-D1a	ZH	T6-A1a	Hap-4/Hap-2	Hap-G	ZH	Hap-C	T-A1a	Hap-L
郑麦 136	T-B1a	T-A1b	Hap-5D-G	others	others	T-D1b	ZH	T6-A1b	Hap-4/Hap-2	Hap-G	T-A1a	Hap-C	T-A1a	Hap-L
郑麦 103	T-B1a	T-A1b	Hap-5D-G	others	others	T-D1b	ZH	T6-A1b	Hap-4/Hap-2	Hap-G	T-A1a	Hap-C	T-A1a	Hap-L
西农 979	T-B1a	T-A1b	Hap-5D-G	others	others	T-D1b	ZH	T6-A1b	Hap-4/Hap-2	Hap-G	ZH	Hap-C	T-A1a	Hap-L
扬麦 158	T-B1a	T-A1b	Hap-5D-G	others	others	T-D1b	Hap-H	T6-A1b	Hap-4/Hap-2	Hap-G	ZH	Hap-C	T-A1a	Hap-L
宁麦 9号	ZH	T-A1b	Hap-5D-G	others	others	T-D1b	Hap-H	T6-A1b	Hap-4/Hap-2	Hap-G	T-A1a	Hap-C	T-A1a	Hap-L
扬麦 20	ZH	T-A1b	Hap-5D-G	others	others	T-D1b	ZH	T6-A1b	Hap-4/Hap-2	Hap-G	ZH	Hap-C	T-A1a	Hap-L
扬麦 20	ZH	T-A1b	Hap-5D-G	others	others	T-D1b	Hap-H	T6-A1b	Hap-4/Hap-2	Hap-G	ZH	Hap-C	T-A1a	Hap-L
宁麦 13	T-B1a	T-A1b	Hap-5D-G	others	others	T-D1b	ZH	T6-A1b	Hap-4/Hap-2	Hap-G	ZH	Hap-C	T-A1a	Hap-L
丰抗 38	T-B1a	ZH	Hap-5D-G	others	others	T-D1a	ZH	ZH	Hap-4/Hap-2	Hap-G	T-A1a	Hap-C	T-A1a	Hap-L
豫麦 18	T-B1a	ZH	Hap-5D-G	others	others	T-D1b	Hap-H	ZH	Hap-4/Hap-2	Hap-G	T-A1a	Hap-C	T-A1a	Hap-L
信麦 1168	T-B1b	ZH	Hap-5D-G	others	others	T-D1a	ZH	ZH	Hap-4/Hap-2	Hap-G	T-A1a	Hap-C	T-A1a	Hap-L
扬麦 33	T-B1b	T-A1b	Hap-5D-G	others	others	T-D1b	Hap-H	ZH	Hap-4/Hap-2	Hap-G	ZH	Hap-C	T-A1a	Hap-L
郑科麦 49	T-B1b	T-A1a	Hap-5D-G	others	others	T-D1a	ZH	ZH	Hap-4/Hap-2	Hap-G	T-A1a	Hap-C	T-A1a	Hap-L

注: TaGS2-B1a 高单株生物量; TaGS2-B1b 为低单株生物量; TaGS5-A1a, Hap-2, TaTCW6-A1a, Hap-4, Hap-2, TaCwi-A1a 和 TaGS2-A1a 为高千粒重; TaGS5-A1b, others, TaTCW6-7Ab, TaGS-D1b, TaTCW6-A1b, Hap-G, Hap-C, TaGS2-A1b 为低千粒重; Hap-5D-C 粒重非有利等位基因; Hap-H 为高小穗数; Hap-L 为低小穗数; ZH 表示杂合型。

表 4 小麦籽粒品质相关基因的 KASP 检测结果

KASP 检测结果

材料	Glu - A3d		Glu - A3g		GluAI	Glu - B3g		Glu - B3e		Glu - B3f		GCCP	Glu - A3b		NAM - 6A		NAM - 6A		TamybR - BI
	None	Glu - A3d	None	Glu - A3g	null	ZH	None	Glu - B3e	Glu - B3e	None	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	ZH	NAM - 6A	NAM - 6A	TamybR - BI	
信麦 185	None	Glu - A3d	None	Glu - A3g	null	ZH	None	Glu - B3e	Glu - B3e	None	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	ZH	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1b	
信麦 188	None	Glu - A3d	None	Glu - A3g	null	Glu - B3g	Glu - B3e	ZH	Glu - B3e	ZH	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1b	
信麦 198	None	Glu - A3d	None	Glu - A3g	null	Glu - B3g	Glu - B3e	ZH	Glu - B3e	ZH	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1b	
信麦 186	None	Glu - A3d	None	Glu - A3g	1, 2*	Glu - B3g	Glu - B3e	None	Glu - B3e	None	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1b	
信麦 199	ZH	Glu - A3d	None	Glu - A3g	1, 2*	ZH	Glu - B3e	None	Glu - B3e	None	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1b	
信麦 175	Glu - A3d	Glu - A3d	None	Glu - A3g	1, 2*	Glu - B3g	Glu - B3e	None	Glu - B3e	None	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1b	
绅麦 51	—	Glu - A3d	None	Glu - A3g	null	Glu - B3g	Glu - B3e	ZH	Glu - B3e	ZH	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	—	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1b	
绅麦 902	None	Glu - A3d	None	Glu - A3g	null	ZH	None	Glu - B3e	Glu - B3e	None	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1b	
扬麦 30	None	Glu - A3d	None	Glu - A3g	1, 2*	Glu - B3g	Glu - B3e	ZH	Glu - B3e	ZH	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1b	
扬麦 13	None	Glu - A3d	None	Glu - A3g	null	Glu - B3g	Glu - B3e	ZH	Glu - B3e	ZH	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1b	
扬麦 22	None	Glu - A3d	None	Glu - A3g	null	Glu - B3g	Glu - B3e	ZH	Glu - B3e	ZH	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1b	
扬麦 24	None	Glu - A3d	None	Glu - A3g	1, 2*	Glu - B3g	Glu - B3e	ZH	Glu - B3e	ZH	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1b	
百农 207	None	Glu - A3d	None	Glu - A3g	1, 2*	Glu - B3g	Glu - B3e	ZH	Glu - B3e	ZH	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1b	
宁麦 24	None	Glu - A3d	None	Glu - A3g	1, 2*	Glu - B3g	Glu - B3e	ZH	Glu - B3e	ZH	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1b	
矮抗 58	ZH	Glu - A3d	None	Glu - A3g	1, 2*	Glu - B3g	Glu - B3e	None	Glu - B3e	None	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	—	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1a	
川麦 107	None	Glu - A3d	None	Glu - A3g	1, 2*	Glu - B3g	Glu - B3e	ZH	Glu - B3e	ZH	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	ZH	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1b	
扬麦 21	None	Glu - A3d	None	Glu - A3g	1, 2*	Glu - B3g	Glu - B3e	ZH	Glu - B3e	ZH	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1b	
绅麦 112	None	Glu - A3d	None	Glu - A3g	null	Glu - B3g	Glu - B3e	None	Glu - B3e	None	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1b	
扬麦 15	ZH	Glu - A3d	None	Glu - A3g	1, 2*	Glu - B3g	Glu - B3e	ZH	Glu - B3e	ZH	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	ZH	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1b	
郑麦 113	ZH	Glu - A3d	None	Glu - A3g	1, 2*	Glu - B3g	Glu - B3e	None	Glu - B3e	None	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	ZH	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1a	
泛 8	None	Glu - A3d	None	Glu - A3g	null	Glu - B3g	Glu - B3e	ZH	Glu - B3e	ZH	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1a	
信麦 136	None	Glu - A3d	None	Glu - A3g	null	Glu - B3g	Glu - B3e	ZH	Glu - B3e	ZH	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1b	
郑麦 103	ZH	Glu - A3d	None	Glu - A3g	1, 2*	Glu - B3g	Glu - B3e	None	Glu - B3e	None	Glu - B3f	GCCP	ZH	NAM - A1b, A1d	ZH	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1a	
西农 979	None	Glu - A3d	None	Glu - A3g	1, 2*	None	Glu - B3g	Glu - B3e	Glu - B3e	None	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1a	
扬麦 158	None	Glu - A3d	None	Glu - A3g	null	Glu - B3g	Glu - B3e	ZH	Glu - B3e	ZH	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1b	
宁麦 9 号	ZH	Glu - A3d	None	Glu - A3g	null	Glu - B3g	Glu - B3e	ZH	Glu - B3e	ZH	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1b	
扬麦 20	None	Glu - A3d	None	Glu - A3g	null	Glu - B3g	Glu - B3e	ZH	Glu - B3e	ZH	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1b	
宁麦 13	—	Glu - A3d	None	Glu - A3g	null	ZH	Glu - B3e	ZH	Glu - B3e	ZH	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1b	
丰抗 38	None	Glu - A3d	None	Glu - A3g	1, 2*	ZH	None	Glu - B3e	Glu - B3e	None	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1a	
豫麦 18	None	Glu - A3d	None	Glu - A3g	1, 2*	ZH	Glu - B3e	None	Glu - B3e	None	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1a	
信麦 1168	None	Glu - A3d	None	Glu - A3g	null	Glu - B3g	Glu - B3e	ZH	Glu - B3e	ZH	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1b	
扬麦 33	None	Glu - A3d	None	Glu - A3g	null	ZH	Glu - B3e	ZH	Glu - B3e	ZH	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1b	
刑科麦 49	None	Glu - A3d	None	Glu - A3g	1, 2*	Glu - B3g	Glu - B3e	None	Glu - B3e	None	Glu - B3f	GCCP	Glu - A3b	NAM - A1b, A1d	NAM - A1a, A1b	NAM - 6A	NAM - 6A	R - B1a	

注: Glu - A3d、Glu - B3g、Glu - B3e、Glu - A3b 为低分子量麦谷蛋白亚基, None Glu - A3d、None Glu - A3g、None Glu - B3f 和 None Glu - B3g 为非低分子量麦谷蛋白亚基; null 为弱筋; 1, 2* 为强筋; GCCP 正常蛋白质含量; NAM - A1a, A1c 为小麦籽粒蛋白相关基因 AI, A1c 分型; NAM - A1a, A1b 为小麦籽粒蛋白相关基因 AI, A1b 分型; NAM - A1a, A1b 为小麦籽粒蛋白相关基因 AI, A1b 分型; R_B1a 为红粒; R_B1b 为白粒; ZH 表示杂合型; — 表示没检测出来。

表 5 小麦面粉品质相关基因的 KASP 检测结果

材料	KASP 检测结果					
	<i>Pds - B1</i>	<i>TaPpo - A1</i>	<i>TaPpo - A2</i>	<i>PsyB1c</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67A</i>
信麦 185	<i>Pds - B1a</i>	ZH	ZH	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	ZH
信麦 188	<i>Pds - B1b</i>	<i>TaPpo - A1b</i>	<i>TaPpo - A2a</i>	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67Aa</i>
信麦 198	<i>Pds - B1b</i>	<i>TaPpo - A1b</i>	<i>TaPpo - A2a</i>	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67Aa</i>
信麦 186	<i>Pds - B1a</i>	<i>TaPpo - A1b</i>	<i>TaPpo - A2a</i>	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67Ac</i>
信麦 199	ZH	ZH	ZH	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	ZH
信麦 175	<i>Pds - B1a</i>	<i>TaPpo - A1b</i>	<i>TaPpo - A2a</i>	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67Ac</i>
绵麦 51	ZH	ZH	ZH	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	ZH
绵麦 902	<i>Pds - B1a</i>	<i>TaPpo - A1a</i>	ZH	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67Ac</i>
扬麦 30	<i>Pds - B1b</i>	<i>TaPpo - A1a</i>	ZH	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	ZH
扬麦 13	<i>Pds - B1b</i>	<i>TaPpo - A1a</i>	ZH	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67Aa</i>
扬麦 22	<i>Pds - B1b</i>	<i>TaPpo - A1b</i>	<i>TaPpo - A2a</i>	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67Aa</i>
扬麦 24	<i>Pds - B1b</i>	<i>TaPpo - A1a</i>	ZH	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67Aa</i>
百农 207	<i>Pds - B1b</i>	<i>TaPpo - A1a</i>	<i>TaPpo - A2a</i>	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	ZH
宁麦 24	<i>Pds - B1a</i>	<i>TaPpo - A1a</i>	<i>TaPpo - A2a</i>	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67Ac</i>
矮抗 58	<i>Pds - B1a</i>	ZH	ZH	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67Ac</i>
川麦 107	<i>Pds - B1a</i>	<i>TaPpo - A1b</i>	<i>TaPpo - A2a</i>	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67Ac</i>
扬麦 21	<i>Pds - B1a</i>	<i>TaPpo - A1a</i>	<i>TaPpo - A2a</i>	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	ZH
绵麦 112	<i>Pds - B1a</i>	<i>TaPpo - A1a</i>	ZH	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67Ac</i>
扬麦 15	<i>Pds - B1b</i>	<i>TaPpo - A1a</i>	ZH	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67Aa</i>
郑麦 113	<i>Pds - B1a</i>	<i>TaPpo - A1a</i>	<i>TaPpo - A2a</i>	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67Ac</i>
泛 8	<i>Pds - B1b</i>	<i>TaPpo - A1a</i>	<i>TaPpo - A2a</i>	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67Aa</i>
信麦 136	<i>Pds - B1b</i>	<i>TaPpo - A1b</i>	<i>TaPpo - A2a</i>	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67Aa</i>
郑麦 103	<i>Pds - B1a</i>	<i>TaPpo - A1a</i>	<i>TaPpo - A2a</i>	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67Aa</i>
西农 979	<i>Pds - B1a</i>	<i>TaPpo - A1a</i>	<i>TaPpo - A2a</i>	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67Aa</i>
扬麦 158	<i>Pds - B1b</i>	<i>TaPpo - A1a</i>	ZH	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67Aa</i>
宁麦 9 号	<i>Pds - B1a</i>	<i>TaPpo - A1b</i>	<i>TaPpo - A2a</i>	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67Ac</i>
扬麦 20	<i>Pds - B1b</i>	<i>TaPpo - A1a</i>	<i>TaPpo - A2a</i>	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67Ac</i>
宁麦 13	<i>Pds - B1a</i>	<i>TaPpo - A1a</i>	<i>TaPpo - A2a</i>	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67Ac</i>
丰抗 38	<i>Pds - B1a</i>	<i>TaPpo - A1a</i>	<i>TaPpo - A2a</i>	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67Ac</i>
豫麦 18	<i>Pds - B1a</i>	<i>TaPpo - A1a</i>	ZH	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67Aa</i>
信麦 1168	<i>Pds - B1b</i>	<i>TaPpo - A1b</i>	ZH	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67Aa</i>
扬麦 33	<i>Pds - B1b</i>	<i>TaPpo - A1b</i>	<i>TaPpo - A2a</i>	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67Aa</i>
刑科麦 49	<i>Pds - B1a</i>	<i>TaPpo - A1a</i>	<i>TaPpo - A2a</i>	<i>PsyB1a</i>	<i>PsyA1b</i>	<i>ALP67Aa</i>

注:*Pds - B1a*、*PsyB1c* 和 *PsyA1a* 为高黄色素含量基因,*Pds - B1b*、*PsyB1a* 和 *PsyA1b* 为低黄色素含量基因;*TaPpo - A1a* 和 *TaPpo - A2a* 为酶高含量基因,*TaPpo - A1b* 和 *TaPpo - A2b* 为酶低含量基因;*ALP67Aa* 高面团强度基因,*ALP67Ac* 低面团强度基因;ZH 表示杂合型。

30、扬麦 22、扬麦 13、信麦 136 等 20 份小麦品种(品系)同时含有抗穗发芽的优异等位变异 *Vp - B1c* 和 *TaSdr - B1a*;23 份小麦品种(品系)含有抗旱的优异等位变异 *Dreb - B1a*,分布比例为 69.70%;30 份小麦品种(品系)含有抗旱 *Ifehw3* 优异等位变异 Westonia type,分布比例为 90.9%;信麦 188、信麦 198、信麦 186、信麦 199、信麦 175、绵麦 112、郑麦 103、西农 979、豫麦 18、信麦 1168 等 21 份小麦同时含有抗旱的优异等位变异组合 *Dreb - B1a* +

Westonia type;占比 63.64%;32 份小麦品种(品系)均表现出有芒,1 份小麦品种(品系)表现出杂合型;33 份材料均含有高茎秆木质素含量优异等位变异 *COMT3Ba*,分布比例 100%。

3 结论与讨论

3.1 适应性相关基因的分布与应用

对 33 份试验材料的适应性相关基因的 KASP 检测结果表明,*Vrn - A1*、*Vrn - D1* 和 *Vrn - D3* 等春

表 6 小麦抗逆性相关基因的 KASP 检测结果

材料	KASP 检测结果								
	<i>Sr36</i>	<i>Lr34</i>	<i>TaMFT</i>	<i>Vp1B1</i>	<i>TaSdr - B1</i>	<i>TaDreb - B1</i>	<i>1fjehw3</i>	<i>AWN</i>	<i>COMT - 3B</i>
信麦 185	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1a</i>	ZH	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
信麦 188	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1a</i>	<i>Dreb - B1a</i>	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
信麦 198	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1a</i>	<i>Dreb - B1a</i>	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
信麦 186	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1b</i>	<i>Dreb - B1a</i>	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
信麦 199	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1b</i>	<i>Dreb - B1a</i>	Westonia type	ZH	<i>COMT3Ba</i>
信麦 175	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1b</i>	<i>Dreb - B1a</i>	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
绵麦 51	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1a</i>	<i>Dreb - B1a</i>	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
绵麦 902	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1a</i>	ZH	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
扬麦 30	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1a</i>	<i>Dreb - B1a</i>	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
扬麦 13	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1a</i>	<i>Dreb - B1b</i>	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
扬麦 22	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1a</i>	<i>Dreb - B1b</i>	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
扬麦 24	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1a</i>	<i>Dreb - B1b</i>	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
百农 207	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1b</i>	<i>Dreb - B1a</i>	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Bb</i>
宁麦 24	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1a</i>	<i>Dreb - B1a</i>	Kauz type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
矮抗 58	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1b</i>	ZH	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
川麦 107	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1a</i>	ZH	Kauz type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
扬麦 21	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1a</i>	<i>Dreb - B1a</i>	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
绵麦 112	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1a</i>	<i>Dreb - B1a</i>	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
扬麦 15	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1b</i>	<i>Dreb - B1b</i>	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
郑麦 113	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1b</i>	ZH	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
泛 8	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1b</i>	<i>Dreb - B1a</i>	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
信麦 136	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1a</i>	<i>Dreb - B1a</i>	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
郑麦 103	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1b</i>	<i>Dreb - B1a</i>	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
西农 979	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1b</i>	<i>Dreb - B1a</i>	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
扬麦 158	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1a</i>	<i>Dreb - B1a</i>	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
宁麦 9 号	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1a</i>	<i>Dreb - B1a</i>	Kauz type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
扬麦 20	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1a</i>	ZH	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
宁麦 13	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1a</i>	<i>Dreb - B1a</i>	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
丰抗 38	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1b</i>	<i>Dreb - B1a</i>	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
豫麦 18	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1b</i>	<i>Dreb - B1a</i>	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
信麦 1168	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1a</i>	<i>Dreb - B1a</i>	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
扬麦 33	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1a</i>	<i>Dreb - B1a</i>	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>
刑科麦 49	<i>Sr36 -</i>	<i>Lr34 -</i>	CS - type	<i>Vp - B1c</i>	<i>TaSdr - B1b</i>	<i>Dreb - B1a</i>	Westonia type	AWN +	<i>COMT3Ba</i>

注:*Sr36* - 不抗秆锈病;*Lr34* - 不抗锈病;*CS - type* 和 *TaSdr - B1b* 感穗发芽;*Vp - B1c* 和 *TaSdr - B1a* 抗穗发芽;*Dreb - B1a* 抗旱;*Dreb - B1b* 不抗旱;*Kauz type* 低表达;*Westonia type* 高表达;*AWN +* 有芒;*COMT3Ba* 高茎秆木质素含量;*COMT3Bb* 低茎秆木质素含量;*ZH* 表示杂合型。

化基因在 33 份小麦品种(品系)中有着较高的利用率,*Vrn - A1* 和 *Vrn - 5A* 等春性早花基因在这些材料中有着较低的利用率;信麦 185、信麦 136、信麦 1168 等检测出同时含有 *Vrn - A1* 早开花基因和 *Ppd - D1a* 光周期不敏感基因,因其生态适应性较好可以在豫南地区种植。豫南地区属于长江中下游冬麦区,作物种植制度一般为“水稻—小麦”一年两熟制,一方面豫南地区由于优质粳稻、直播稻、机

插秧稻种植面积扩大,水稻腾茬收获较晚导致小麦播种较晚,另一方面水稻收获小麦播种期间由于遭遇连阴雨天气导致小麦播期推迟,这 2 个因素导致该地区小麦增产缓慢,在生产上产量高、成熟较早、后期灌浆速度快、播期弹性大、抗逆性好的小麦品种在该区域种植面积较大。扬麦系列品种、宁麦系列品种、绵麦系列品种和信麦系列品种含有较多的早开花基因和春化基因,种植或遗传改良这些早熟

高产品种,比如信麦 1168、信麦 136、扬麦 15、扬麦 13 等品种,能更好地适应豫南地区小麦播种晚成熟早的需求。

3.2 产量相关基因的分布与应用

小麦产量的三要素是穗数、穗粒数、千粒重。千粒重对小麦产量的高低起着至关重要的作用,小麦育种中高产目标需要通过提高粒重来实现。千粒重在小麦产量三要素中是遗传比较稳定的数量性状,遗传因素、环境条件和遗传的加性都对其有影响^[14]。粒重相关的基因主要有 *TaCWI - 4A*、*TaCWI - 5D*、*TaSus1*、*TaSus2*、*TaCwi - A1*、*TaGS3 - D1*、*TaGS5 - A1*、*TaGS3 - D1*、*TaGW2*、*TGW6 - A1* 等^[15-23]。穗粒数相关的基因有 *TaMoc1 - 7A* 等^[24]。这些基因的优异等位变异在小麦产量增加上具有重要作用。本研究利用 KASP 标记对 12 个与粒重有关的基因 *TaGS5 - A1*、*TaCWI - 5D*、*TaGW2 - 6B*、*TaTGW - 7A*、*TaGS - D1*、*TaSus2 - 2B*、*TaTGW6 - A1*、*Sus1 - 7A*、*Sus2 - 2A*、*TaCWI - A1*、*TaSus1 - 7B*、*TaGS2 - A1*, 1 个与小穗数 *TaMoc - A1* 有关的基因, 1 个与单株生物量 *TaGS2 - B1* 相关的基因进行检测,试验结果表明 33 份小麦品种(系)都聚合了 3 个以上(21.4%)的优异等位基因,其中 7 份小麦品种(系)中聚合 6 个(42.9%)产量相关优异位点。这可能是育种家在育种的时候对产量三要素进行了有目的的选择,高千粒重和高小穗数的优异等位变异在品种选育过程中都被保留了下来。在以后的小麦品种选育工作中应该注意产量三要素的协同发展。

3.3 籽粒品质相关基因的分布与应用

小麦籽粒品质受多基因控制,与高分子量谷蛋白亚基、籽粒蛋白相关基因、低分子量谷蛋白亚基和蛋白质含量等有关系。高低分子量谷蛋白亚基对小麦面团弹性和延展性具有一定的影响,而其又受多基因控制,这些优异等位变异基因可以提高面粉加工品质。试验结果表明,33 份材料中 *Glu - A3d* 低分子量麦谷蛋白亚基位点优质亚基所占的比例为 3.03%;*Glu - A1* 的弱筋等位变异 *null* 分布比率为 48.48%;*Glu - B3g* 低分子量麦谷蛋白亚基分布比率为 75.76%;*Glu - B3e* 低分子量麦谷蛋白亚基分布比率为 100%;由此表明,豫南麦区主要以弱筋低分子量小麦为主,豫南麦区的育种目标也是中筋偏弱,育种目标和生产实践具有一定的切合度。含有 *Glu - A1* 的弱筋等位变异 *null* 的小麦品种比如信

麦 136、信麦 1168、扬麦 13 和扬麦 33 等可作为该麦区中筋偏弱小麦育种的重要育种材料。

3.4 面粉品质相关基因的分布与应用

面粉品质与多酚氧化酶(PPO)活性、黄色素含量、面团强度、面筋质量等高度相关。研究表明多酚氧化酶活性与面制品制作过程中褐变密切相关,多酚氧化酶活性低,面制品质量好,与其相关的基因主要有 *TaPpo - 1b*、*TaPpo - D1a*、*TaPpo - A2b*、*TaPpo - D2b*^[25]。小麦中黄色素主要由类胡萝卜素组成,黄色素含量影响面粉的颜色,八氢番茄红素脱氢酶 *Pds - B1*, 八氢番茄红素合成酶 *PsyB1c*、*PsyA1b*, 胡萝卜素脱氢酶等基因(*Zds*)控制类胡萝卜素合成^[26-27]。面团强度参数与面包烘焙体积呈正相关,也是量化面粉品质的重要指标^[28]。本研究发现信麦 188、信麦 198、信麦 1168、扬麦 33 等 4 个品种(品系)含有小麦面粉品质优异等位变异组合 *Pds - B1b + PsyB1a + PsyA1b + TaPpo - A1b + ALPb7Aa*。

3.5 抗逆性相关基因的分布与应用

小麦抗逆相关基因主要包括抗病、抗虫、抗旱、抗穗发芽、抗倒伏等。抗秆锈病基因主要有 *Sr2* 和 *Sr36*、抗条锈病基因主要有 *Yr15* 和 *Yr36*、抗旱基因主要有 *Dreb - B1* 和 *1fehw3* 等、小麦抗穗发芽相关基因主要有 *TaVp1 - B1*、*TaSdr - B1*、*TaPHS1*、*TaMFT - A1* 等^[29]。其中 *TaVp1* 的 *TaVp - 1Bb* 和 *TaVp - 1Bc* 基因型、*TaSdr - B1a* 基因型也具有较高的穗发芽抗性^[30-32]。本研究发现 20 份小麦品种(品系)同时含有抗穗发芽的优异等位变异 *Vp - B1c* 和 *TaSdr - B1a*;同时含有抗旱的优异等位变异组合 *Dreb - B1a + Westonia type* 的小麦材料占比 63.64%;33 份材料均含有高茎秆木质素含量优异等位变异 *COMT3Ba*;信麦 188、信麦 198、扬麦 13、信麦 1168、绵麦 112 等可以作为抗穗发芽、抗旱以及高茎秆木质素含量等的优质材料,在生产上应用。

参考文献:

- [1] Cavanagh C R, Chao S M, Wang S C, et al. Genome - wide comparative diversity uncovers multiple targets of selection for improvement in hexaploid wheat landraces and cultivars[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2013, 110(20): 8057 - 8062
- [2] Wang S. C, Wong D, Forrest K, et al, Characterization of polyploid wheat genomic diversity using a high - density 90 000 single nucleotide polymorphism array [J]. Plant Biotechnology Journal, 2014, 12(6): 787 - 796.

- [3] Semagn K, Babu R, Hearn S, et al. Single nucleotide polymorphism genotyping using Kompetitive Allele Specific PCR (KASP): overview of the technology and its application in crop improvement [J]. *Molecular Breeding*, 2014, 33(1): 1-14.
- [4] 赵永涛, 张 锋, 张中州, 等. 豫麦 158 及其硬质变异系重要性状基因的 KASP 标记检测[J]. *河南农业科学*, 2021, 50(10): 37-43.
- [5] 王君婵, 吴旭江, 胡文静, 等. 扬麦系列品种(系)重要性状功能基因的 KASP 检测[J]. *江苏农业学报*, 2019, 35(6): 1271-1283.
- [6] 杨子博, 顾正中, 周羊梅, 等. 江苏淮东北地区小麦品种资源籽粒硬度基因等位变异的 KASP 检测[J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(2): 153-161.
- [7] 王 伟, 王 斌, 于 亮, 等. 小麦叠氮化钠诱变群体重要功能基因的 KASP 标记检测[J]. *种子*, 2020, 39(1): 42-48.
- [8] Trick M, Adamski N M, Mugford S G, et al. Combining SNP discovery from next-generation sequencing data with bulked segregant analysis(BSA) to fine-map genes in polyploid wheat[J]. *BMC Plant Biology*, 2012, 12(14): 1-17.
- [9] 闫金龙, 张东旭, 冯丽云, 等. 晋东南小麦品种(系)部分抗病基因的 KASP 标记检测[J]. *作物杂志*, 2023(5): 49-58.
- [10] 权有娟, 袁飞敏, 刘德梅, 等. 利用 KASP 标记检测青海和西藏小麦品种中光周期基因分布[J]. *麦类作物学报*, 2019, 39(10): 1165-1172.
- [11] 王志伟, 王志龙, 乔祥梅, 等. 云南小麦品种(系)锈病和赤霉病抗性功能基因的 KASP 标记检测[J]. *作物杂志*, 2020(1): 187-193.
- [12] 高振贤, 赵彦坤, 班进福, 等. 河北省小麦重要农艺性状的 KASP 标记检测[J]. *分子植物育种*, 2021, 19(2): 518-528.
- [13] 杜莹莹, 顾正中, 周羊梅, 等. 江苏淮北小麦品种(系)重要性状功能基因的 KASP 检测[J]. *麦类作物学报*, 2023, 43(3): 279-287.
- [14] 张福彦, 范家霖, 陈晓杰, 等. 小麦粒重相关基因的遗传定位和分子标记辅助育种进展[J]. *植物遗传资源学报*, 2020, 21(3): 507-516.
- [15] Jiang Y M, Jiang Q Y, Hao C Y, 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): 131-143.
- [16] Jiang Q Y, Hou J, Hao C Y, et al. The wheat (*T. aestivum*) sucrose synthase 2 gene (*TaSus2*) active in endosperm development is associated with yield traits [J]. *Functional Intetive Genomics*, 2011, 11(1): 49-61.
- [17] Ma D Y, Yan J, He Z H, et al. Characterization of a cell wall in vertase gene *TaCwi-AI* on common wheat chromosome 2A and development of functional markers [J]. *Molecular Breeding*, 2012, 29(1): 43-52.
- [18] Zhang Y J, Liu J D, Xia X C, et al. *TaGS-DI*, an ortholog of rice *OsGS3*, is associated with grain weight and grain length in common wheat [J]. *Molecular Breeding*, 2014, 34(3): 1097-1107.
- [19] Wang S S, Zhang X F, Chen F, et al. A single-nucleotide polymorphism of *TaGS5* gene revealed its association with kernel weight in Chinese bread wheat [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 1166-1166.
- [20] Yang Z B, Bai Z Y, Li X L, et al. SNP identification and allelic-specific PCR markers development for *TaGW2*, a gene linked to wheat kernel weight [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2012, 125(5): 1057-1068.
- [21] Geng J, Li L Q, Lv Q, et al. *TaGW2-6A* allelic variation contributes to grain size possibly by regulating the expression of cytokinins and starch-related genes in wheat [J]. *Planta*, 2017, 246(6): 1153-1163.
- [22] Qin L, Hao C Y, Hou J, et al. Homologous haplotypes, expression, genetic effects and geographic distribution of the wheat yield gene *TaGW2* [J]. *BMC Plant Biology*, 2014, 14(1): 107.
- [23] Hanif M, Gao F M, Liu J D, et al. *TaTGW6-AI*, an ortholog of rice *TGW6*, is associated with grain weight and yield in bread wheat [J]. *Molecular Breeding*, 2015, 36(1): 2016.
- [24] Zhang B, Liu X, Xu W N, et al. Novel function of a putative MOC1 ortholog associated with spikelet number per spike in common wheat [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 12211-12211.
- [25] He X Y, He Z H, Zhang L P, et al. Allelic variation of polyphenol oxidase (PPO) genes located on chromosomes 2A and 2D and development of functional markers for the *PPO* genes in common wheat [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2007, 115(1): 47-58.
- [26] He X Y, He Z H, Ma W, et al. Allelic variants of phytoene synthase 1 (*Psyl*) genes in Chinese and CIMMYT wheat cultivars and development of functional markers for flour colour [J]. *Molecular Breeding*, 2009, 23(4): 553-563.
- [27] Dong H C, Ma Z Y, Xia X C, et al. Allelic variation at the *TaZds-AI* locus on wheat chromosome 2A and development of a functional marker in common wheat [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(7): 1067-1074.
- [28] Delcour J A, Joye I J, Pareyt B, et al. Wheat gluten functionality as a quality determinant in cereal-based food products [J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2012, 3(1): 469-492.
- [29] Aravindh R, Sivasamy M, Ganesamurthy K, et al. Marker assisted stacking/pyramiding of stem rust, leaf rust and powdery mildew disease resistance genes (*Sr2/Lr27/Yr30*, *Sr24/Lr24* and *Sr36/Pm6*) for durable resistance in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Electronic Journal of Plant Breeding*, 2020, 11(3): 907-915.
- [30] 黄义文, 代旭冉, 刘宏伟, 等. 小麦抗穗发芽基因挖掘及分子育种进展[J]. *麦类作物学报*, 2021, 41(2): 147-156.
- [31] Yang Y, Zhang C L, Liu S X, et al. Characterization of the rich haplotypes of *Viviparous-1A* in Chinese wheats and development of a novel sequence tagged site marker for preharvest sprouting resistance [J]. *Molecular Breeding*, 2014, 33(1): 75-88.
- [32] Zhang Y J, Miao X L, Xia X C, et al. Cloning of seed dormancy genes (*TaSdr*) associated with tolerance to preharvest sprouting in common wheat and development of a functional marker [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2014, 127(4): 855-866.