

国审 4 个漯麦品种重要性状功能基因 KASP 检测与分析

曹燕燕¹ 李雷雷¹ 葛昌斌¹ 黄杰¹ 周璐琪² 王君¹ 杨森要¹ 廖平安¹

(¹漯河市农业科学院, 462300, 河南漯河; ²河南大成种业有限公司, 450000, 河南郑州)

摘要 利用 KASP 标记对 4 个国审小麦品种 (漯麦 163、漯麦 47、漯麦 49 和漯麦 36) 的重要性状 (包括光周期、粒重、品质、穗发芽、抗旱抗病等) 功能基因的组成进行分子检测。结果表明, 4 个小麦品种均含有矮秆基因 *Rht-D1b*、熟期株高相关等位变异 *TaPRR73-A1* 和 *TaPRR73-B1*、光周期敏感等位基因 *Ppd-A1b* 和光周期迟钝等位基因 *Ppd-D1a*、高千粒重等位变异 *TaGS5-Ala*、高粒数优异变异基因 *Hap-7A-3*、优质亚基基因 *Ax1/Ax2**、高脂肪氧化酶活性等位变异 *Lox-B1a*、抗穗发芽基因 *Rio Blanco type* 和 *TaSdr-B1a*、木质素含量高的优异等位基因 *COMT-3Ba*, 均占比 100%。硬质基因型 *Pinb-D1b*、高分子量麦谷蛋白亚基 (5+10)、抗条锈病基因 *Yr78* 和抗叶锈病基因 *Lr16* 在 4 个品种中的利用程度较高。未检出高千粒重等位基因 *Hap-A*、穗粒数优异等位变异基因 *TaMoc-7A*、籽粒硬度基因 *Pina-D1b/Null*、*Pinb-B2b*、抗旱基因 *1-fehw3*、抗白粉病基因 *Pm21*、抗叶锈病基因 *Lr46* 和 *Lr48*。该研究明确了 4 个漯麦品种的重要性状功能基因, 为品种有效利用提供了重要的参考依据。

关键词 小麦; 功能基因; KASP 检测; 分析

小麦是我国重要的粮食作物, 为人们提供必需的蛋白质和热量, 小麦的高产稳产是保障国家粮食安全的重要支撑。随着人们对粮食数量以及品质要求的提高, 选育和推广高产稳产、优质、多抗的小麦品种是育种的重要内容和主要目标。

漯麦 163、漯麦 47、漯麦 49 和漯麦 36 是漯河市农业科学院小麦研究所自选省审品种漯麦 6010 为亲本, 利用常规育种法和系谱法选育出的 4 个国审小麦新品种。漯麦 163 以漯麦 6010 为母本, 以引进的美国优质材料弗罗里达为父本, 2018 年通过湖北省农作物品种审定委员会审定 (鄂审麦 2018006), 2020 年通过国家农作物品种审定委员会审定 (国审麦 20200043); 漯麦 49 以漯麦 6010 为母本, 以抗赤霉优质品种郑麦 9023 为父本, 2022 年通过国家农作物品种审定委员会审定 (国审麦 20220076); 以漯麦 36 以优质品种郑麦 7698 为母本, 漯麦 6010 为父本, 2022 年通过国家农作物品种审定委员会审定 (国审麦 20220126); 漯麦 47 以漯麦 6010 为母本, 以抗病资源一粒葡为父本, 2021 年通过湖北省农作物品种审定委员会审定 (鄂审麦 20210007), 2023 年通过国家农作物品种审定委员会审定 (国审麦 20230075)。漯麦 6010 聚合了骨干亲本阿夫、洛夫林、丰产 3 号、

豫麦 2 号、碧蚂 6 号、繁 6 和地方品种济源小佛手、原阳 1 号等亲本的基因, 是一个遗传基础比较丰富的小麦品种^[1], 中感赤霉病, 经系谱分析抗原来自于阿夫^[2]; 含优质高分子量麦谷蛋白 7+9/5+10 亚基^[3], 品质检测达到中强筋标准; 对光的反应属于弱光钝感型品种^[4]。以上 4 个国审品种聚合了亲本的优异基因, 在生产上表现出丰产稳产、抗寒抗倒、优质广适等优良特性。

传统的常规育种技术主要是对小麦主要目标性状进行选择, 以达到聚合目标性状优异等位基因, 进而选育出符合育种目标的品种^[5], 该育种方式是当前大部分科研单位在小麦品种选育中使用的主要手段, 但这种育种手段依赖于个人经验, 将所用育种材料进行随机结合, 通过后代材料表型来选择, 易受到育种家的经验和环境条件的影响, 导致新品种的选育效率较低、育种周期长、对表型的选择比较单一, 同时对选育出的新品种携带的重要性状的功能基因也不清楚, 准确率较低, 因此缩短育种年限、加快育种进程、提高育种目标已成为目前小麦新品种选育的客观要求。

近年来, 随着分子生物学技术的发展, 现代育种技术已经从传统经验育种向精准育种转变, 通过提高与育种目标相关功能基因优异等位变异

作者简介: 曹燕燕, 主要从事小麦新品种选育和栽培技术研究, E-mail: caoyan314@126.com

葛昌斌为通信作者, 主要从事小麦新品种选育与应用研究, E-mail: gcb78@163.com; 廖平安为共同通信作者, 主要从事小麦新品种选育与应用研究, E-mail: liaopingan@126.com

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系 (CARS-03); 河南省农业良种联合攻关—高产多抗优质小麦新品种选育与应用 (2022010101)

收稿日期: 2024-03-20; 修回日期: 2024-07-22; 网络出版日期: 2024-07-29

的占比来提高育种的精准度，缩短育种周期，弥补传统育种中材料鉴定的不足。而由英国政府化学家实验室（LGC）基于竞争性等位基因特异性 PCR（kompetitive allele-specific PCR）原理开发的 KASP 高通量 SNP 检测技术^[6]具有灵活、便宜、检测速度快和高通量等优点^[7]，可对大多数作物基因组 DNA 中的 SNP 和特定位点上的 Indel 进行精准双等位基因判断^[6,8]。目前，多个小麦农艺性状、品质和抗逆抗病等相关基因等位变异的 KASP 功能标记已开发出来并得到应用^[9-12]。前期工作中，我们利用常规育种手段培育了 4 个综合性状优良的小麦品种，但对这些品种携带的重要性状的基因功能尚不清楚，为提高以后小麦育种过程中亲本材料选择的目的性和准确性，以及育成品系中优异等位基因的比例，本研究利用 40 个 KASP 分子标记对 4 个国审小麦新品种株高、光周期、粒重、品质、穗发芽、抗旱抗病等方面进行分子检测，明确其含有的优良基因，为进一步提高育种效率和分子标记辅助选择育种提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

4 份供试小麦材料均来自漯河市农业科学院，并已通过国家农作物品种审定委员会审定，分别为漯麦 163、漯麦 47、漯麦 49 和漯麦 36。供试材料审定年份和系谱信息见表 1。

1.2 DNA 提取

每份试验材料挑选饱满、无破损的 10 粒种子置于培养皿中，室温保湿培养，萌发 7 d 后取幼苗叶片，采用 CTAB 法提取基因组 DNA^[13]。

1.3 KASP 标记检测

委托中国农业科学院作物科学研究所何中虎

表 1 参试品种名称、育成年份及系谱

Table 1 Names, year of release and pedigree of wheat cultivars tested

品种 Cultivar	育成年份 Year of release	系谱 Pedigree
漯麦 163 Luomai 163	2018 鄂审/2020 国审	漯麦 6010/弗罗里达
漯麦 36 Luomai 36	2022 国审	郑麦 7698/漯麦 6010
漯麦 49 Luomai 49	2022 国审	漯麦 6010/郑麦 9023
漯麦 47 Luomai 47	2021 鄂审/2023 国审	漯麦 6010/一粒葡

研究员课题组进行供试材料的 KASP 标记检测工作。KASP 反应体系、反应程序、基因引物等均参考文献^[14]。利用 40 个 KASP 功能标记分析供试材料适应性、产量、品质以及抗逆抗病性等相关性状。其中适应性相关性状基因包括 3 个株高基因（*Rht-B1*、*Rht-D1* 和 *Rht8*）、2 个花期与株高基因（*TaPRR73-A1*、*TaPRR73-B1*）、3 个光周期基因（*Ppd-A1*、*Ppd-B1*、*Ppd-D1*）和 1 个芒基因（*AWN*），4 个性状共 9 个基因的基因型；产量相关性状基因包括 4 个粒重基因（*Sus1-7A*、*TaGASR7-A1*、*TaSus2-2A*、*TaGS5*）、2 个粒数基因（*TEF-7A*、*TaMoc-7A*），2 个性状 6 个基因的基因型；13 个品质相关性状基因包括 HMW-GS 基因标记（*Glu-A1*、*Glu-D1*）、籽粒硬度基因（*Pina-D1*、*Pinb-D1*、*Pinb2-V*）、籽粒蛋白质基因（*Gpc*、*NAM-6A*）、籽粒黄色素含量相关的基因（*Psy-D1*、*Zds-A1*、*TaPds-B1*）、过氧化物酶基因（*Pod-A1*）、脂肪氧化酶基因（*Lox-B1*）和可溶性糖含量基因（*SST-4D*）；12 个抗逆抗病相关性状基因包括抗旱基因（*TaDreb-B1*、*1-fehw3*）、抗穗发芽基因（*TaPHS1*、*Sdr-B1*）、木质素含量基因（*COMT-3B*）、抗白粉病基因（*Pm21*）、抗赤霉病基因（*Fhb1*）、抗条锈病基因（*Yr78*）和抗叶锈病基因（*Lr46*、2 个 *Lr16*、*Lr48*）。基因名称和相应基因标记名称见表 2。

表 2 相关基因及标记详细信息
Table 2 Details of related genes and markers

类型 Type	性状 Characteristic	遗传效应 Genetic effect	基因 Gene	标记 Marker	等位变异 Allelic variation	表型 Phenotype
适应性相关性状 Adaptive-related trait	株高	主效	<i>Rht-B1</i>	<i>Rht-B1_SNP</i>	<i>Rht-B1a</i> <i>Rht-B1b</i>	野生型 矮秆型
	株高	主效	<i>Rht-D1</i>	<i>Rht-D1_SNP</i>	<i>Rht-D1a</i> <i>Rht-D1b</i>	野生型 矮秆型
	株高	主效	<i>Rht8</i>	<i>Rht8</i>	<i>Rht8+</i> <i>Rht8-</i>	含矮秆基因 不含矮秆基因
	株高、熟期	微效	<i>TaPRR73-A1</i>	<i>PRR73A1-9IND</i>	<i>Hap-I</i> <i>Hap-II</i>	晚熟，矮 早熟，高
	株高、熟期	微效	<i>TaPRR73-B1</i>	<i>PRR73B1-4558</i>	<i>Hap-I</i> <i>Hap-II</i>	早熟，高 晚熟，矮

续表 2 Table 2 (continued)

类型 Type	性状 Characteristic	遗传效应 Genetic effect	基因 Gene	标记 Marker	等位变异 Allelic variation	表型 Phenotype
产量相关性状 Yield-related trait	光周期	主效	<i>Ppd-A1</i>	<i>GS105-1117_InDel</i>	<i>Ppd-A1a</i> <i>Ppd-A1b</i>	光周期迟钝 光周期敏感
	光周期	主效	<i>Ppd-B1</i>	<i>TaPpdBJ001</i>	<i>Ppd-B1a</i> <i>Ppd-B1b</i>	光周期迟钝 光周期敏感
	光周期	主效	<i>Ppd-D1</i>	<i>TaPpdDJ001</i>	<i>Ppd-D1a</i> <i>Ppd-D1b</i>	光周期迟钝 光周期敏感
	芒	主效	<i>AWN</i>	<i>Absence</i> <i>Presence</i>	<i>AWN+</i> <i>AWN-</i>	有芒 无芒
	千粒重	微效	<i>Sus1-7A</i>	<i>Sus1-7A-1185_SNP</i>	<i>Hap-I</i> <i>Hap-II</i>	低千粒重 高千粒重
	千粒重	微效	<i>TaGASR7-A1</i>	<i>TaGASR</i>	<i>H1C</i> <i>H1G</i>	高千粒重 低千粒重
	千粒重	微效	<i>TaSus2-2A</i>	<i>Sus2-2A-20SNP</i>	<i>Hap-A</i> <i>Hap-G</i>	高千粒重 低千粒重
	粒重	微效	<i>TaGS5</i>	<i>GS5_SNP</i>	<i>TaGS5-Ala</i> <i>TaGS5-Alb</i>	大粒，粒重高 小粒，粒重低
	穗粒数	微效	<i>TEF-7A</i>	<i>TEF7A-1-bp_IND</i>	<i>Hap-7A-3</i> <i>Hap-7A-1/2</i>	粒数较多 粒数较少
	穗粒数	微效	<i>TaMoc-7A</i>	<i>TaMoc-7A_2433</i>	<i>Hap-H</i> <i>Hap-L</i>	粒数较多 粒数较少
	籽粒硬度	主效	<i>Pina-D1</i>	<i>Pina-D1</i>	<i>Pina-D1a</i> <i>Pina-D1b/Null</i>	软质 硬质
	籽粒硬度	主效	<i>Pinb-D1</i>	<i>Pinb-D1</i>	<i>Pinb-D1a</i> <i>Pinb-D1b</i>	软质 硬质
	籽粒硬度	微效	<i>Pinb2-V</i>	<i>Pinb2-Bv2</i>	<i>Pinb-B2a</i> <i>Pinb-B2b</i>	软质 硬质
	面筋强度	主效	<i>Glu-D1</i>	<i>Glu-D1_SNP</i>	<i>2+12</i> <i>5+10</i>	弱筋 强筋
品质相关性状 Quality-related trait	面筋强度	主效	<i>Glu-A1</i>	<i>Glu-A1-I3</i>	<i>AxNull</i> <i>Ax1/Ax2*</i>	弱筋 强筋
	籽粒蛋白质含量	微效	<i>Gpc</i>	<i>GPC_DUC</i>	<i>Gpc-B1-</i> <i>Gpc-B1+</i>	含量正常 含量增加
	籽粒蛋白质含量	微效	<i>NAM-6A</i>	<i>NAM-6A_SNP1</i>	<i>T/A1c/A1d</i> <i>G/A1a/A1b</i>	含量正常 含量增加
	黄色素含量	主效	<i>Psy-D1</i>	<i>Psy1Da-g</i>	<i>Psy-D1a</i> <i>Psy-D1g</i>	含量低 含量高
	黄色素含量	微效	<i>Zds-A1</i>	<i>ZDS-A1_SNP</i>	<i>Zds-A1a</i> <i>Zds-A1b</i>	含量高 含量低
	黄色素含量	微效	<i>TaPds-B1</i>	<i>PDS-B1_SNP</i>	<i>TaPds-B1a</i> <i>TaPds-B1b</i>	含量高 含量低
	过氧化物酶表达量	微效	<i>Pod-A1</i>	<i>Pod-A1</i>	<i>TaPod-A1a</i> <i>TaPod-A1b</i>	酶含量低 酶含量高
	脂肪氧化酶表达量	主效	<i>Lox-B1</i>	<i>Lox-B1</i>	<i>Lox-B1b</i> <i>Lox-B1a</i>	酶含量低 酶含量高
	可溶性糖含量	微效	<i>SST-4D</i>	<i>SST-4D-1093</i>	<i>TaSST-D1a</i> <i>TaSST-D1b</i>	糖含量高 糖含量低
	抗旱	主效	<i>TaDreb-B1</i>	<i>TaDreb_SNP</i>	<i>TaDreb-B1a</i> <i>TaDreb-B1b</i>	抗旱 不抗旱
	抗旱	主效	<i>l-fehw3</i>	<i>l-FEH-6B</i>	<i>Kauz type</i> <i>Westonia type</i>	不抗旱 抗旱
	穗发芽	主效	<i>TaPHS1</i>	<i>PHS1-646</i>	<i>NW97S186 type</i> <i>Rio Blanco type</i>	感穗发芽 抗穗发芽
	穗发芽	微效	<i>Sdr-B1</i>	<i>Sdr-B1</i>	<i>TaSdr-B1b</i> <i>TaSdr-B1a</i>	感穗发芽 抗穗发芽

续表 2 Table 2 (continued)

类型 Type	性状 Characteristic	遗传效应 Genetic effect	基因 Gene	标记 Marker	等位变异 Allelic variation	表型 Phenotype
	木质素含量	微效	<i>COMT-3B</i>	<i>COMT3B_882_SNP</i>	<i>COMT-3Ba</i> <i>COMT-3Bb</i>	木质素含量高 木质素含量低
	抗白粉病	主效	<i>Pm21</i>	<i>Pm21_SNP</i>	<i>Pm21-</i> <i>Pm21+</i>	感病 抗病
	抗赤霉病	主效	<i>Fhb1</i>	<i>Fhb1_KSU</i>	<i>Fhb1-</i> <i>Fhb1+</i>	感病 抗病
	抗条锈病	微效	<i>Yr78</i>	<i>IWA7257</i>	<i>Yr78-</i> <i>Yr78+</i>	感病 抗病
	抗叶锈病	微效	<i>Lr46</i>	<i>Lr46_JF2-2A</i>	<i>Lr46-</i> <i>Lr46+</i>	感病 抗病
	抗叶锈病	微效	<i>Lr16</i>	<i>kwm847</i>	<i>Lr16-</i> <i>Lr16+</i>	感病 抗病
	抗叶锈病	微效	<i>Lr16</i>	<i>kwm849</i>	<i>Lr16-</i> <i>Lr16+</i>	感病 抗病
	抗叶锈病	微效	<i>Lr48</i>	<i>IWB70147</i>	<i>Lr48-</i> <i>Lr48+</i>	感病 抗病

“+”表示含有该基因；“-”表示不含有该基因，下同。
“+” means containing the gene, “-” means no containing the gene, the same below.

2 结果与分析

2.1 KASP 标记检测效果

利用 40 个与株高、光周期、产量、品质和抗性等性状相关的 KASP 标记对 4 个国审小麦品种进行了检测，部分标记的检测结果如图 1。KASP 标

记检测后可以有效地将品种划分为 2 类，本文列举了有代表性的 3 个基因 KASP 标记检测后聚类分析，分别是与株高有关的 *Rht-D1* 和 *Rht8* 基因，以及与品质有关的 *Glu-D1* 基因。

该结果也表明，本研究检测的所有 KASP 标记检测技术可以有效地对上述基因进行分型。

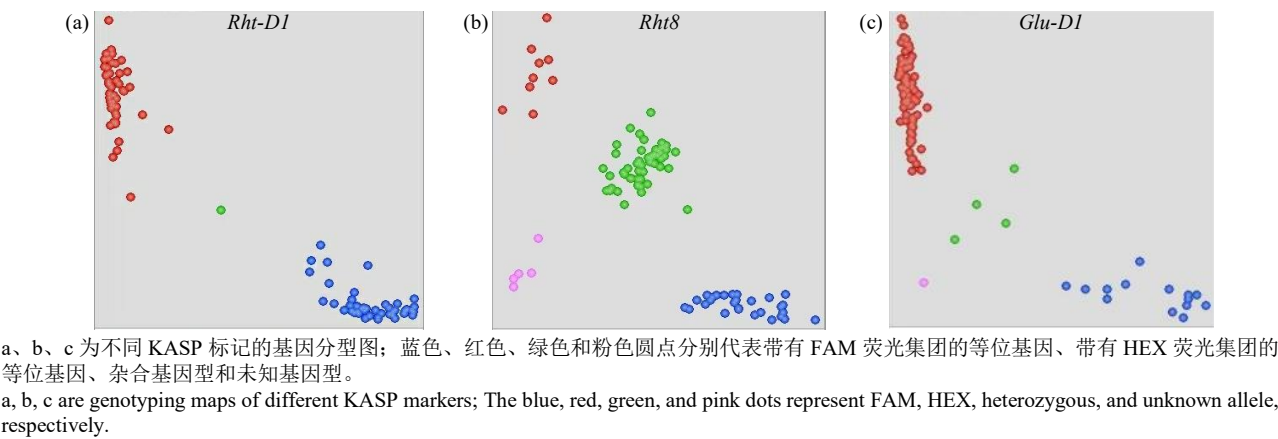


图 1 部分功能标记 KASP 分析的品种聚类图
Fig.1 Cluster diagram of varieties by KASP analysis of some functional markers

2.2 适应性相关基因的 KASP 检测结果

为了解 4 个品种的广适性，检测了适应性相关性状基因，标记的基因分型结果见表 3。在株高相关基因检测中，主要对主效株高基因 *Rht-B1*、*Rht-D1* 和 *Rht8* 进行 KASP 标记检测，结果显示 4 个品种均含有矮秆等位变异 *Rht-D1b* 以及野生型基因 *Rht-B1a*，占比 100%；而漯麦 36 同时含有 2 个矮秆基因（*Rht-D1b* 和 *Rht8*），说明 *Rht-D1b* 是本

课题组系列小麦品种的主要矮秆基因。检测了 2 个与熟期、株高相关的 KASP 标记，4 个品种均含有相同的等位变异 *TaPRR73-A1* 和 *TaPRR73-B1*。光周期与小麦适应性紧密相连，在光周期基因的 KASP 标记检测中，4 个品种均含有对光周期敏感的等位基因 *Ppd-A1b* 和对光周期迟钝的等位基因 *Ppd-D1a*，漯麦 163 含对光周期迟钝的等位基因 *Ppd-B1a*，其他 3 个品种含对光周期敏感的等位基

表 3 适应性相关基因的 KASP 检测结果
Table 3 KASP test results of adaptability related genes

基因 Gene	等位变异 Allelic variation	表型 Phenotype	漯麦 163 Luomai 163	漯麦 47 Luomai 47	漯麦 49 Luomai 49	漯麦 36 Luomai 36
<i>Rht-B1</i>	<i>Rht-B1a</i>	野生型	<i>Rht-B1a</i>	<i>Rht-B1a</i>	<i>Rht-B1a</i>	<i>Rht-B1a</i>
	<i>Rht-B1b</i>	矮秆型				
<i>Rht-D1</i>	<i>Rht-D1a</i>	野生型	<i>Rht-D1b</i>	<i>Rht-D1b</i>	<i>Rht-D1b</i>	<i>Rht-D1b</i>
	<i>Rht-D1b</i>	矮秆型				
<i>Rht8</i>	<i>Rht8+</i>	含矮秆基因	<i>Rht8-</i>	<i>Rht8-</i>	<i>Rht8-</i>	<i>Rht8+</i>
	<i>Rht8-</i>	不含矮秆基因				
<i>TaPRR73-A1</i>	<i>Hap-I</i>	晚熟, 矮	<i>Hap-II</i>	<i>Hap-II</i>	<i>Hap-II</i>	<i>Hap-II</i>
	<i>Hap-II</i>	早熟, 高				
<i>TaPRR73-B1</i>	<i>Hap-I</i>	早熟, 高	<i>Hap-II</i>	<i>Hap-II</i>	<i>Hap-II</i>	<i>Hap-II</i>
	<i>Hap-II</i>	晚熟, 矮				
<i>Ppd-A1</i>	<i>Ppd-A1a</i>	光周期迟钝	<i>Ppd-A1b</i>	<i>Ppd-A1b</i>	<i>Ppd-A1b</i>	<i>Ppd-A1b</i>
	<i>Ppd-A1b</i>	光周期敏感				
<i>Ppd-B1</i>	<i>Ppd-B1a</i>	光周期迟钝	<i>Ppd-B1a</i>	<i>Ppd-B1b</i>	<i>Ppd-B1b</i>	<i>Ppd-B1b</i>
	<i>Ppd-B1b</i>	光周期敏感				
<i>Ppd-D1</i>	<i>Ppd-D1a</i>	光周期迟钝	<i>Ppd-D1a</i>	<i>Ppd-D1a</i>	<i>Ppd-D1a</i>	<i>Ppd-D1a</i>
	<i>Ppd-D1b</i>	光周期敏感				
<i>AWN</i>	<i>AWN+</i>	有芒	<i>AWN+</i>	<i>AWN+</i>	<i>AWN+</i>	<i>AWN+</i>
	<i>AWN-</i>	无芒				

因 *Ppd-B1b*。

2.3 产量相关基因的 KASP 检测结果

千粒重、籽粒大小以及穗粒数是影响小麦产量的重要性状, 利用 6 个基因标记检测 4 个品种千粒重、穗粒数相关的基因位点, 结果见表 4。高千粒重等位基因 *TaGS5-Ala*、*Hap-II*、*H1C* 分别占比 100%、25%和 25%。4 个供试品种中, 漯麦 36 同

时含有 *TaGS5-Ala*、*Hap-II* 和 *H1C* 这 3 个高千粒重等位基因, 漯麦 163、漯麦 47 和漯麦 49 均只含有 1 个高千粒重等位基因 *TaGS5-Ala*。*TEF-7A* 和 *TaMoc-7A* 是穗粒数的 KASP 标记, 4 个品种均含有 *Hap-7A-3* 优异等位基因, 优异等位变异占比 100%。在供试材料中没有检测到高千粒重等位基因 *Hap-A* 和穗粒数优异等位变异基因 *TaMoc-7A*。

表 4 粒重相关基因的 KASP 检测结果
Table 4 KASP test results of grain weight related genes

基因 Gene	等位变异 Allelic variation	表型 Phenotype	漯麦 163 Luomai 163	漯麦 47 Luomai 47	漯麦 49 Luomai 49	漯麦 36 Luomai 36
<i>Sus1-7A</i>	<i>Hap-I</i>	低千粒重	<i>Hap-I</i>	<i>Hap-I</i>	<i>Hap-I</i>	<i>Hap-II</i>
	<i>Hap-II</i>	高千粒重				
<i>TaGASR7-A1</i>	<i>H1C</i>	高千粒重	<i>H1G</i>	<i>H1G</i>	<i>H1G</i>	<i>H1C</i>
	<i>H1G</i>	低千粒重				
<i>TaSus2-2A</i>	<i>Hap-A</i>	高千粒重	<i>Hap-G</i>	<i>Hap-G</i>	<i>Hap-G</i>	<i>Hap-G</i>
	<i>Hap-G</i>	低千粒重				
<i>TaGS5</i>	<i>TaGS5-Ala</i>	大粒, 粒重高	<i>TaGS5-Ala</i>	<i>TaGS5-Ala</i>	<i>TaGS5-Ala</i>	<i>TaGS5-Ala</i>
	<i>TaGS5-Alb</i>	小粒, 粒重低				
<i>TEF-7A</i>	<i>Hap-7A-3</i>	粒数较多	<i>Hap-7A-3</i>	<i>Hap-7A-3</i>	<i>Hap-7A-3</i>	<i>Hap-7A-3</i>
	<i>Hap-7A-1/2</i>	粒数较少				
<i>TaMoc-7A</i>	<i>Hap-H</i>	粒数较多	<i>Hap-L</i>	<i>Hap-L</i>	<i>Hap-L</i>	<i>Hap-L</i>
	<i>Hap-L</i>	粒数较少				

2.4 品质相关基因的 KASP 检测结果

检测了 13 个与品质相关的 KASP 标记 (表 5)。利用与籽粒硬度基因 *Pina-D1*、*Pinb-D1* 和 *Pinb2-V* 相关的 3 个 KASP 标记分别检测 4 个品种。在 *Pinb-D1* 位点, 突变型 *Pinb-D1b* 较野生型

Pinb-D1a 具有更高的籽粒硬度, 4 个品种检测结果显示, *Pinb-D1b* 基因型占比 75%, 漯麦 36 为 *Pinb-D1a* 软质型。在 *Pina-D1* 和 *Pinb2-V* 位点未检测出 *Pina-D1b/Null*、*Pinb-B2b* 硬度基因突变类型, 4 个品种全部表现为 *Pina-D1a*、*Pinb-B2a* 软质型。2 个

主效控制籽粒硬度的优势等位基因 *Pina-D1b/Null* 和 *Pinb-D1b*, *Pinb-D1b* 所占的比例高。*Glu-D1* *SNP* 和 *Glu-A1-13* 是高分子量麦谷蛋白亚基 (5+10) 和 *Ax1/Ax2** 的标记, 4 个品种在 *Glu-A1* 位点均为优质亚基基因, 即 *Ax1/Ax2**, 占比 100%。在 *Glu-D1* 位点, 漂麦 163 和漂麦 36 检测出优质亚基 *Dx5+Dy10* (5+10) 基因, 占比 50%, 漂麦 47 和漂麦 49 含 2+12 亚基。4 个品种中, 漂麦 163 和漂麦 36 含有 2 个位点的优质亚基基因 (5+10)+*Ax1/Ax2**, 漂麦 47 和漂麦 49 含 1 个位点的优质亚基基因 *Ax1/Ax2**。检测蛋白合成相关基因 *GPC*、*NAM-6A*, 结果显示漂麦 163 含 *Gpc-B1* 基因而籽粒蛋白质含量增加, 其他 3 个品种籽粒蛋白质含量正常。KASP 标记检测了 6 个与面粉色泽有关的基因, 4 个品种

均含有高黄色素含量基因 *Psy-D1g* 和 *Zds-A1a*, 漂麦 163、漂麦 47 和漂麦 36 均含有高黄色素含量的基因 *TaPds-B1a*, 漂麦 49 含低黄色素含量的基因 *TaPds-B1b*。*Ppo-A1* 和 *Lox-B1* 分别是过氧化物酶基因和脂肪氧化酶基因, 与面粉色泽有关, 低过氧化物酶活性等位变异 *TaPod-A1a* 和高脂肪氧化酶活性等位变异 *Lox-B1a* 是有利的等位基因。通过 KASP 标记检测, 4 个品种均含高脂肪氧化酶活性等位变异 *Lox-B1a*, 占比 100%, 漂麦 163、漂麦 47 和漂麦 49 含低过氧化物酶活性优异等位变异基因 *TaPod-A1a*, 占比 75%。漂麦 163、漂麦 47 和漂麦 49 含 2 个优异等位变异基因 *Lox-B1a* 和 *TaPod-A1a*。漂麦 36 籽粒中含有高可溶性糖基因 *TaSST-D1a*, 其他 3 个品种籽粒中可溶性糖含量正常。

表 5 品质相关基因的 KASP 检测结果
Table 5 KASP test results of quality related genes

基因 Gene	等位变异 Allelic variation	表型 Phenotype	漂麦 163 Luomai 163	漂麦 47 Luomai 47	漂麦 49 Luomai 49	漂麦 36 Luomai 36
<i>Pina-D1</i>	<i>Pina-D1a</i> <i>Pina-D1b/Null</i>	软质 硬质	<i>Pina-D1a</i>	<i>Pina-D1a</i>	<i>Pina-D1a</i>	<i>Pina-D1a</i>
<i>Pinb-D1</i>	<i>Pinb-D1a</i> <i>Pinb-D1b</i>	软质 硬质	<i>Pinb-D1b</i>	<i>Pinb-D1b</i>	<i>Pinb-D1b</i>	<i>Pinb-D1a</i>
<i>Pinb2-V</i>	<i>Pinb-B2a</i> <i>Pinb-B2b</i>	软质 硬质	<i>Pinb-B2a</i>	<i>Pinb-B2a</i>	<i>Pinb-B2a</i>	<i>Pinb-B2a</i>
<i>Glu-D1</i>	2+12 5+10	弱筋 强筋	5+10	2+12	2+12	5+10
<i>Glu-A1</i>	<i>AxNull</i> <i>Ax1/Ax2*</i>	弱筋 强筋	<i>Ax1/Ax2*</i>	<i>Ax1/Ax2*</i>	<i>Ax1/Ax2*</i>	<i>Ax1/Ax2*</i>
<i>Gpc</i>	<i>Gpc-B1-</i> <i>Gpc-B1+</i>	籽粒蛋白质含量正常 籽粒蛋白质含量增加	<i>Gpc-B1+</i>	<i>Gpc-B1-</i>	<i>Gpc-B1-</i>	<i>Gpc-B1-</i>
<i>NAM-6A</i>	<i>A1c/A1d</i> <i>A1a/A1b</i>	籽粒蛋白质含量正常 籽粒蛋白质含量增加	<i>A1c/A1d</i>	<i>A1c/A1d</i>	<i>A1c/A1d</i>	<i>A1c/A1d</i>
<i>Psy-D1</i>	<i>Psy-D1a</i> <i>Psy-D1g</i>	黄色素含量低 黄色素含量高	<i>Psy-D1g</i>	<i>Psy-D1g</i>	<i>Psy-D1g</i>	<i>Psy-D1g</i>
<i>Zds-A1</i>	<i>Zds-A1a</i> <i>Zds-A1b</i>	黄色素含量高 黄色素含量低	<i>Zds-A1a</i>	<i>Zds-A1a</i>	<i>Zds-A1a</i>	<i>Zds-A1a</i>
<i>TaPds-B1</i>	<i>TaPds-B1a</i> <i>TaPds-B1b</i>	黄色素含量高 黄色素含量低	<i>TaPds-B1a</i>	<i>TaPds-B1a</i>	<i>TaPds-B1b</i>	<i>TaPds-B1a</i>
<i>Pod-A1</i>	<i>TaPod-A1a</i> <i>TaPod-A1b</i>	过氧化物酶含量低 过氧化物酶含量高	<i>TaPod-A1a</i>	<i>TaPod-A1a</i>	<i>TaPod-A1a</i>	<i>TaPod-A1b</i>
<i>Lox-B1</i>	<i>Lox-B1b</i> <i>Lox-B1a</i>	脂肪氧化酶含量低 脂肪氧化酶含量高	<i>Lox-B1a</i>	<i>Lox-B1a</i>	<i>Lox-B1a</i>	<i>Lox-B1a</i>
<i>SST-4D</i>	<i>TaSST-D1a</i> <i>TaSST-D1b</i>	可溶性糖含量高 可溶性糖含量低	<i>TaSST-D1b</i>	<i>TaSST-D1b</i>	<i>TaSST-D1b</i>	<i>TaSST-D1a</i>

2.5 抗逆抗病相关基因的 KASP 检测结果

由表 6 可知, *TaDreb-B1* 和 *l-fehw3* 是 2 个小麦抗旱主效基因, 漂麦 36 含抗旱基因 *TaDreb-B1a*, 其他 3 个品种均未检测到抗旱基因。*TaPHS1* 和 *Sdr-B1* 是小麦穗发芽抗性基因, 4 个品种均携带有

Rio Blanco type 和 *TaSdr-B1a* 优异等位变异基因, 均占比 100%, 这也说明常规育种手段加上综合农艺性状选择, 也能选择到多个优良基因聚合的后代材料。*COMT-3B* 是小麦木质素含量基因, 4 个品种均含有木质素含量高的优异等位基因 *COMT-3Ba*。

对 4 个品种条锈病 *Yr78* 进行 KASP 检测, 漯麦 163、漯麦 47 和漯麦 49 含 *Yr78*, 占比 75%, 漯麦 36 不含 *Yr78*。利用 *Lr46_JF2-2A*、*kwm847*、*kwm849* 和 *IWB70147* 标记对 4 个品种所含抗叶锈病基因 (*Lr16*、*Lr46*、*Lr48*) 进行检测, 结果表明漯麦 163、漯麦 47 和漯麦 49 含有 *Lr16*, 占比 75%, 4 个品种均不含 *Lr46* 和 *Lr48*。利用 *Pm21_SNP* 和 *Fhb1_KSU*

对 4 个品种所含抗白粉病基因 *Pm21* 和抗赤霉病基因 *Fhb1* 进行检测, 结果表明 4 个品种均未检测到 *Pm21*, 漯麦 47 含抗赤霉病基因 *Fhb1*, 其他 3 个小麦品种均不含 *Fhb1*。由表 5 可知, 在本试验检测抗病基因中, 漯麦 47 含 3 种抗病基因 *Yr78+Lr16+Fhb1*, 漯麦 49 含 2 种抗病基因 *Yr78+Lr16*, 漯麦 163 含 1 个抗病基因 *Yr78*, 漯麦 36 未检测到抗病

表 6 抗逆抗病相关基因的 KASP 检测结果
Table 6 KASP test results of stress and disease resistance related genes

基因 Gene	等位变异 Allelic variation	表型 Phenotype	漯麦 163 Luomai 163	漯麦 47 Luomai 47	漯麦 49 Luomai 49	漯麦 36 Luomai 36
<i>TaDreb-B1</i>	<i>TaDreb-B1a</i> <i>TaDreb-B1b</i>	抗旱 不抗旱	<i>TaDreb-B1b</i>	<i>TaDreb-B1b</i>	<i>TaDreb-B1b</i>	<i>TaDreb-B1a</i>
<i>l-fehw3</i>	<i>Kauz type</i> <i>Westonia type</i>	不抗旱 抗旱	<i>Kauz type</i>	<i>Kauz type</i>	<i>Kauz type</i>	<i>Kauz type</i>
<i>TaPHS1</i>	<i>NW97SI86 type</i> <i>Rio Blanco type</i>	感穗发芽 抗穗发芽	<i>Rio Blanco type</i>	<i>Rio Blanco type</i>	<i>Rio Blanco type</i>	<i>Rio Blanco type</i>
<i>Sdr-B1</i>	<i>TaSdr-B1b</i> <i>TaSdr-B1a</i>	感穗发芽 抗穗发芽	<i>TaSdr-B1a</i>	<i>TaSdr-B1a</i>	<i>TaSdr-B1a</i>	<i>TaSdr-B1a</i>
<i>COMT-3B</i>	<i>COMT-3Ba</i> <i>COMT-3Bb</i>	木质素含量高 木质素含量低	<i>COMT-3Ba</i>	<i>COMT-3Ba</i>	<i>COMT-3Ba</i>	<i>COMT-3Ba</i>
<i>Pm21</i>	<i>Pm21-</i> <i>Pm21+</i>	感病 抗病	<i>Pm21-</i>	<i>Pm21-</i>	<i>Pm21-</i>	<i>Pm21-</i>
<i>Fhb1</i>	<i>Fhb1-</i> <i>Fhb1+</i>	感病 抗病	<i>Fhb1-</i>	<i>Fhb1+</i>	<i>Fhb1-</i>	<i>Fhb1-</i>
<i>Yr78</i>	<i>Yr78-</i> <i>Yr78+</i>	感病 抗病	<i>Yr78+</i>	<i>Yr78+</i>	<i>Yr78+</i>	<i>Yr78-</i>
<i>Lr46</i>	<i>Lr46-</i> <i>Lr46+</i>	感病 抗病	<i>Lr46-</i>	<i>Lr46-</i>	<i>Lr46-</i>	<i>Lr46-</i>
<i>Lr16/kwm847</i>	<i>Lr16-</i> <i>Lr16+</i>	感病 抗病	N	<i>Lr16+</i>	<i>Lr16+</i>	<i>Lr16-</i>
<i>Lr16/kwm849</i>	<i>Lr16-</i> <i>Lr16+</i>	感病 抗病	N	<i>Lr16+</i>	<i>Lr16+</i>	<i>Lr16-</i>
<i>Lr48</i>	<i>Lr48-</i> <i>Lr48+</i>	感病 抗病	<i>Lr48-</i>	<i>Lr48-</i>	<i>Lr48-</i>	<i>Lr48-</i>

N 表示检测无信号。
N indicates that the signal is not detected.

基因。

3 讨论

小麦品种的改良是一个漫长而复杂的过程, 小麦常规育种因操作简单、性状选择综合全面等优势, 仍是现阶段小麦品种改良采用的主要手段, 但随着高通量测序技术的发展, 高通量的 KASP 检测技术逐渐被育种家采用, 在分子育种中发挥着很大的作用。本研究对常规育种手段育成的 4 个新品种进行了 KASP 标记选择, 明确了其在适应性、产量、品质以及抗逆抗病等方面性状相关基因的组成, 为以后育种方向以及亲本利用提供了依据, 也可显著提高小麦育种效率。

株高对小麦产量影响较大, 株高的降低有助于提高小麦的抗倒性和收获指数。控制小麦株高的矮秆基因很多, 但在生产上广泛应用的主要有 3 个基因, 分别是来源于农林 10 号的 *Rht-B1b*、*Rht-D1b*^[15] 以及来源于赤小麦的 *Rht8*^[16], 这 3 个矮秆基因的降秆效应应具有累加效应, 同时含有 2 个及以上矮秆基因的材料比只含其中 1 个的材料株高更低^[17]。本研究中漯麦 36 同时含有 2 个矮秆基因 *Rht-D1b* 和 *Rht8*, 其他 3 个品种含有 1 个矮秆等位变异 *Rht-D1b*, 与 4 个品种的田间株高表现一致, 漯麦 36 株高较矮, 漯麦 163、漯麦 47 和漯麦 49 株高较高。4 个品种中 *Rht-D1b* 的分布频率为 100%, 也初步证实了 *Rht-D1b* 在中国黄淮麦区小麦品种的分布频率

较高这一结论，与前人^[17]研究结果一致。张中州等^[18]对漯河地区小麦高产品种（系）株高进行 KASP 标记检测，发现 *Rht-D1b* 是漯河农业科学院系列品种（系）主要矮秆基因，与本研究结果一致，在未来矮秆育种过程中，应对 *Rht-B1b* 矮秆基因提高重视。光周期基因 *Ppd-1* 是决定小麦抽穗期和开花期的关键基因。Seki 等^[19]对世界各国的小麦品种光周期基因 *Ppd-B1* 和 *Ppd-A1* 等位基因分布和功能进行研究，发现供试材料以光周期敏感型 *Ppd-B1b* 和 *Ppd-A1b* 为主。本研究中 4 个小麦品种以光周期敏感型 *Ppd-B1b* 和 *Ppd-A1b* 为主，与上述研究^[19]结果一致。

千粒重是受多个微效基因控制的数量性状，在常规育种表型选择中有一定难度。*TaSus2-2A*、*Sus1-7A*、*TEF-7A*、*TaMoc-7A* 等产量相关基因对小麦千粒重、穗粒数等性状均具有调控作用，对小麦产量的高低有直接影响^[20]。本研究中，漯麦 36 同时含有 3 个高千粒重等位基因，其他 3 个品种只含有 1 个，与 4 个品种田间实际千粒重有所偏颇，田间试验中漯麦 163、漯麦 47 和漯麦 49 的千粒重高于漯麦 36，试验结果与王志伟等^[21]对云南 42 份小麦品种（系）进行粒重相关功能基因 KASP 检测结果类似，这也说明了千粒重是由多基因位点控制的，品种实际千粒重表现是多种基因以及田间生长环境共同作用的结果，品种产量性状评价需兼顾表型和基因型。

小麦籽粒硬度对出粉率、面粉颗粒大小和面制品加工品质影响很大，是重要的小麦品质性状之一^[22]，确定小麦籽粒硬度基因 *Pina*、*Pinb* 和 *Pinb2* 的等位变异基因分布特点，对后期小麦品质改良具有重要意义。刘红美等^[23]发现黄淮麦区小麦核心种质硬质麦主要由 *Pinb-D1b* 基因型组成；袁谦等^[24]对漯麦 18 品质相关基因进行 KASP 标记检测，结果发现漯麦 18 含有 1 个硬质等位基因型 *Pinb-D1b* 和软质等位基因型 *Pina-D1a*、*Pinb-B2a*。本研究中，3 个品种含 *Pinb-D1b* 硬质基因型，占比 75%，漯麦 36 为 *Pinb-D1a* 软质型。在 *Pina-D1* 和 *Pinb2-V* 位点 4 个品种全部表现为 *Pina-D1a*、*Pinb-B2a* 软质型，与前人^[24]研究结果一致。高分子量麦谷蛋白亚基（HMW-GS）主要影响小麦面筋的强度，在 HMW-GS 中，*Glu-A1* 编码的 *Ax1/Ax2** 亚基与 *Glu-D1* 编码的 *1Dx5+1Dy10(5+10)* 亚基对面包品质起着正向调控作用^[25]，是黄淮麦区主要的优质亚基来源。

Glu-A1 位点的 *Ax2** 亚基是稀有的优质亚基，在中国普通小麦品种中分布较少且其对品质的影响很大^[26]。高耸^[3]研究发现，漯麦 6010 含 1/7+9/5+10 亚基，郑麦 7698 含 1/7+9/5+10 亚基，郑麦 9023 含 1/7+8/2+12 亚基，漯麦 163 含 Null/7+9/5+10 亚基，本研究结果表明，漯麦 163（漯麦 6010/佛罗里达）含 1/5+10 亚基，优质基因来源于母本漯麦 6010；漯麦 36（郑麦 7698/漯麦 6010）含 1/5+10 亚基，优质基因来源母本郑麦 7698 和父本漯麦 6010；漯麦 49（漯麦 6010/郑麦 9023）含 2+12 亚基，2+12 亚基基因来自父本郑麦 9023；漯麦 47（漯麦 6010/一粒葡）含 2+12 亚基，基因来源有待进一步检测确定。4 个品种在 *Glu-A1* 位点均为优质亚基基因，即 *Ax1/Ax2**，占比 100%。漯麦 163 和漯麦 36 这 2 个品种检测出优质亚基 *Dx5+Dy10*（5+10）基因，占比 50%，与漯麦 163、漯麦 36 检测为中强筋小麦品种结果相符。高分子量麦谷蛋白基因检测结果说明，漯麦系列小麦品种在麦谷蛋白基因改良上还有很大上升空间。

小麦籽粒中蛋白质含量占 8%~20%，小麦面粉及面筋中蛋白质含量与面团的流变学特性和面包加工品质关系密切^[27]。籽粒中蛋白质含量的高低也影响小麦面粉及制品的色泽，蛋白质含量低的面粉及制品的色泽较白。胡瑞波^[28]研究发现，蛋白质含量和出粉率与面粉亮度和面粉黄度呈显著正相关。单宝雪等^[29]研究发现，蛋白质是小麦籽粒中主要的含氮成分，影响小麦氮素吸收与积累的土壤、气候等因素也是影响小麦籽粒蛋白质含量的主要环境因素。樊继伟等^[30]对黄淮麦区 42 个小麦品种进行氮素利用效率研究发现，漯麦 163 属于低氮高效型品种。本研究中，漯麦 163 含高蛋白质含量基因 *Gpc-B1*，其他 3 个品种籽粒蛋白质含量正常，与漯麦 163 对氮的高效利用有直接关系。小麦籽粒黄色素含量影响面粉颜色，类胡萝卜素是黄色素的主要成分，控制类胡萝卜素合成的基因有八氢番茄红素合成酶基因（*Psy*）、八氢番茄红素脱氢酶基因（*Pds*）及胡萝卜素脱氢酶基因（*Zds*）等^[31]。本研究中漯麦 163、漯麦 47 和漯麦 36 均含有高黄色素含量的基因，其营养价值更加突出，可以用于营养健康功能性小麦育种，而漯麦 49 含低黄色素含量基因 *TaPds-B1b*，其面粉色泽会更加白亮，加工品质更优，可以用于优质馒头和面条色泽的改良。

穗发芽严重影响小麦的品质与产量，本研究中

4 个品种聚合了 1 个主效穗发芽基因 *TaPHS1* 和 1 个微效穗发芽抗性基因 *Sdr-B1*, 均抗穗发芽, 与王震等^[32]在对 137 个小麦品种进行穗发芽抗性鉴定中结果表明漯麦 163 中抗穗发芽结果相符, 4 个品种可作为抗穗发芽的重要亲本来源。木质素是构成小麦茎秆的重要结构性碳水化合物, 填充于纤维素构成的骨架之中, 增强茎秆的硬度和支撑强度, 木质素含量将会对茎秆强度有直接影响, 从而影响到作物的抗倒伏能力。贺洁等^[33]将 72 份小麦材料显微结构的综合因子得分和木质素、纤维素含量作为 3 种变量类型进行的聚类分析, 漯麦 163 和漯麦 47 等 18 份小麦材料为 I 类, 在茎秆显微结构和生化指标方面表现突出。本研究中 4 个品种均含有木质素含量高的优异等位基因 *COMT-3Ba*, 与前人^[33]研究结果一致, 表明在以后抗倒伏小麦育种中, 4 个品种可作为强秆育种的重要种质资源。

小麦叶锈病、条锈病、白粉病以及赤霉病是小麦生产中的主要病害^[11], 严重影响小麦高产稳产。本研究中 *Lr46*、*Lr48* 和 *Pm21* 在 4 个小麦品种中并未检出。*Yr78* 为条锈病成株期抗病基因, 携带上述基因的植株一般会在生长中后期随着自身生育期的推移逐渐表现抗性。张一博^[34]对 188 份小麦高代系材料或品种结合 13 个条锈病主效抗病基因进行抗病基因分子标记检测, 研究发现漯麦 163、漯麦 49、漯麦 47 均含 *Yr78*。本研究与其研究结果相同, 表明 *Yr78* 是漯麦系列小麦抗条锈病的主要基因之一。近年受全球气候变化和各种耕作制度的影响, 赤霉病发病区域逐渐蔓延至黄淮海区等, *Fhb1* 为主效抗赤霉病基因, 是目前发现抗性最稳定、效应最大的抗赤霉病基因^[35], 本研究中 *Fhb1* 基因应用率低, 4 个品种中只有漯麦 47 含有 *Fhb1* 基因, 与于士男^[36]对小麦种质漯麦 47 抗赤霉病分子检测结果一致。漯麦 163 虽未检测到 *Fhb1* 基因, 但田间表现出较好的赤霉病抗性。漯麦 49 检测出含有 *Fhb2* 基因在田间表现出较好的赤霉病抗性, 赤霉病抗性达到中抗水平。但近年来黄淮海区赤霉病有加重的趋势, 今后在小麦抗病育种中应重视赤霉病抗病材料的选育工作和抗赤霉病基因 *Fhb1* 的应用, 提升本地区小麦赤霉病抗性。对 4 个小麦品种的抗病性综合分析, 没有对条锈病、赤霉病、白粉病等病害均抗的小麦品种, 抗病种质运用不够丰富, 抗病基因来源单一造成这一现象的主要原因, 今后要注重抗病材料的选育。

4 结论

漯麦 163、漯麦 47 和漯麦 49 含 1 个矮秆等位变异 *Rht-D1b*, 株高较高, 但 3 个品种因含有木质素含量高的优异等位基因 *COMT-3Ba*, 田间表现为抗倒性强, 高而不倒。本研究也为漯河农业科学院创新了育种思路, 利用优异等位基因 *COMT-3Ba* 适当增加小麦株高提高产量的强秆育种策略。

4 个小麦品种均含有抗穗发芽基因 *Rio Blanco type* 和 *TaSdr-B1a*, 均占比 100%, 可作为抗穗发芽重要亲本资源。漯麦 163 和漯麦 36 检测出优质亚基 *Ax1/Ax2** 和 *Dx5+Dy10* (5+10) 基因, 可作为优质小麦育种的亲本资源, 2 个小麦品种优质基因均来源亲本漯麦 6010, 说明作为漯麦重要的亲本资源, 漯麦 6010 有较高的遗传力。

参考文献

- [1] 葛昌斌, 黄杰, 王君, 等. ‘漯麦 6010’ 及其衍生系赤霉病抗性和品质性状评价. 天津农业科学, 2021, 27(10): 47-52, 56.
- [2] 黄杰, 乔冀良, 张振永, 等. 河南省小麦品种对赤霉病的抗性分析. 安徽农业科学, 2017, 45(8): 31, 52.
- [3] 高笋. 小麦品种 HMW-GS 组成及其与品质性状的相关分析. 武汉: 华中农业大学, 2020.
- [4] 李刘龙, 李秀, 王小燕. 灌浆期遮光对不同小麦品种产量的影响. 河南农业科学, 2020, 49(5): 31-39.
- [5] 宋晓朋, 孔子明. 107 份小麦育种亲本重要农艺性状基因的 KASP 检测. 种子, 2023, 42(9): 132-136, 147.
- [6] Semagn K, Babu R, Hearne S, et al. Single nucleotide polymorphism genotyping using Kompetitive Allele Specific PCR (KASP): overview of the technology and its application in crop improvement. Molecular Breeding, 2014, 33(1): 1-14.
- [7] 杨青青, 唐家琪, 张昌泉, 等. KASP 标记技术在主要农作物中的应用及展. 生物技术通报, 2022, 38(4): 58-71.
- [8] Trick M, Adamskin 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. BMC Plant Biology, 2012, 12(14): 1-17.
- [9] 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. 江苏农业学报, 2019, 35(6): 1271-1283.
- [10] 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.
- [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. 作物杂志, 2020(1): 187-193.
- [12] 李玮, 孔淑鑫, 宋国琦, 等. 31 份小麦材料中抗旱基因的 KASP 检测. 麦类作物学报, 2023, 43(10): 1241-1247.
- [13] Rogers S O, Bendich A J. Extraction of DNA from milligram amounts of fresh, herbarium and mummified plant tissues. Plant Molecular Biology, 1985, 5(2): 69-76.
- [14] Rasheed A, Wen W, Gao F, et al. Development and validation of KASP assays for genes underpinning key economic traits in bread wheat. Theoretical and Applied Genetics, 2016, 129(10): 1843-1860.
- [15] Gale M D, Marshall G A, Gale M D, et al. The chromosomal

- location of *Gail* and *Rht1*, genes for Gibberellin insensitivity and semi-dwarfism, in a derivative of Norin 10 wheat. *Heredity*, 1976, 37: 283-289.
- [16] Korzu N V, Rder M S, Ganai M W, et al. Genetic analysis of the dwarfing gene (*Rht8*) in wheat. Part I. Molecular mapping of *Rht8* on the short arm of chromosome 2D of bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Theoretical and Applied Genetics*, 1998, 96(8): 1104-1109.
- [17] 张德强, 宋晓朋, 冯洁, 等. 黄淮麦区小麦品种矮秆基因 *Rht-B1b*、*Rht-D1b* 和 *Rht8* 的检测及其对农艺性状的影响. 麦类作物学报, 2016, 36(8): 975-981.
- [18] 张中州, 望俊森, 鲁进恒, 等. 漯河地区小麦高产品种 (系) 农艺性状的 KASP 标记检测. 江苏农业科学, 2024, 52(1): 34-40.
- [19] Seki M, Chono M, Nishimura T, et al. Distribution of photoperiod-insensitive allele *Ppd-A1a* and its effect on heading time in Japanese wheat cultivars. *Breeding Science*, 2013, 63(3): 309-316.
- [20] Jiang Q, Hou J, Hao C, et al. The wheat (*T.aestivum*) sucrose synthase 2 gene (*TaSus2*) active in endosperm development is associated with yield traits. *Functional & Integrative Genomics*, 2011, 11(1): 49-61.
- [21] 王志伟, 王志龙, 乔祥梅, 等. 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.
- [22] 徐晶晶. 青海省育成小麦品种 (系) 资源的分子评价. 西宁: 青海大学, 2017.
- [23] 刘红美, 祝梓博, 田秋珍, 等. 中国黄淮麦区小麦籽粒硬度 Puroindoline 基因等位变异检测. 分子植物育种, 2016, 14 (10): 2700-2715.
- [24] 袁谦, 张锋, 张中州, 等. 国审小麦品种漯麦 18 重要功能基因的 KASP 标记检测. 江苏农业科学, 2021, 49(24): 56-59.
- [25] 张剑, 马冬云, 张艳苹, 等. 小麦 HMW-GS 对面粉及馒头品质的影响. 食品与发酵工业, 2015, 41(1): 74-79.
- [26] 权威, 马锦绣, 庞斌双, 等. 外引小麦种质资源 HMW-GS 组成及品质评价. 植物遗传资源学报, 2020, 21(5): 1124-1134.
- [27] 何中虎, 夏先春, 陈新民, 等. 中国小麦育种进展与展望. 作物学报, 2011, 37(2): 202-215.
- [28] 胡瑞波. 小麦面粉与面条色泽的影响因素及其稳定性分析. 泰安: 山东农业大学, 2004.
- [29] 单宝雪, 刘秀坤, 肖延军, 等. 济麦 44/济麦 229 重组自交系群体籽粒蛋白质含量 QTL 分析. 山东农业科学, 2024, 56(1): 1-9.
- [30] 樊继伟, 王康君, 张广旭, 等. 黄淮麦区不同小麦品种氮素利用差异分析. 江苏农业科学, 2022, 50(4): 43-51.
- [31] 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. 麦类作物学报, 2023, 43(3): 279-287.
- [32] 王震, 李金秀, 张彬, 等. 不同生态区小麦品种的穗发芽抗性评价. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4161-4170.
- [33] 贺洁, 孙少光, 葛昌斌, 等. 不同小麦品种 (系) 茎秆显微结构、生化组分与茎秆强度的关系. 华北农学报, 2022, 37(1): 68-76.
- [34] 张一博. 中国冬小麦主产区候选品种条锈病抗病性评价与基因检测. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [35] 刘易科, 佟汉文, 朱展望, 等. 小麦赤霉病抗性改良研究进展. 麦类作物学报, 2016, 36(1): 51-57.
- [36] 于士男. 258 份小麦种质的赤霉病、条锈病抗性与主要品质性状研究. 郑州: 河南农业大学, 2023.

KASP Detection and Analysis of Functional Genes of Important Traits in Four National-Approved Luomai Varieties

Cao Yanyan¹, Li Leilei¹, Ge Changbin¹, Huang Jie¹,
Zhou Luqi², Wang Jun¹, Yang Senyao¹, Liao Ping'an¹

(¹Luohe Academy of Agricultural Sciences, Luohe 462300, Henan, China;

²Henan Dacheng Seed Industry Co., Ltd., Zhengzhou 450000, Henan, China)

Abstract Four national-approved wheat varieties (Luomai 163, Luomai 47, Luomai 49, and Luomai 36) were examined for the presence of key functional genes, such as photoperiod, grain weight, quality, spike sprouting, drought and disease resistance by using KASP marker detection. The results showed that, the four wheat varieties contained dwarfing gene *Rht-D1b*, allelic variants *TaPRR73-A1* and *TaPRR73-B1* related to plant height at maturity, photoperiod sensitive allele *Ppd-A1b*, photoperiod insensitive allele *Ppd-D1a*, high 1000-grain weight allele *TaGS5-Ala*, high grain number excellent variant *Hap-7A-3*, high quality subunit gene *Ax1/Ax2** related to quality, high lipoxxygenase activity allele *Lox-B1a*, anti-sprouting gene *Rio Blanco type* and *TaSdr-B1a*, and high lignin content excellent allele *COMT-3Ba*, all accounting for 100%. The utilization of hard genotype *Pinb-D1b*, high molecular weight glutenin subunit (5+10), stripe rust resistance gene *Yr78* and leaf rust resistance gene *Lr16* were higher in the four cultivars. High 1000-grain weight allele *Hap-A*, good allele variant of grain number per spike *TaMoc-7A*, grain hardness gene *Pina-D1b/Null*, *Pinb-B2b*, drought resistance gene *1-fehw3*, powdery mildew resistance gene *Pm21*, and leaf rust resistance gene *Lr46* and *Lr48* were not detected. The findings of four significant characteristic functional genes of wheat varieties offered crucial reference information for the practical use of upcoming varieties.

Key words Wheat; Functional gene; KASP detection; Analysis