麦类作物学报　2025,45(12):1628－1638
Journal of Triticeae Crops　　doi: 10.7606/j.issn.1009-1041.2025.12.06

网络出版时间:2025-10-17
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20251016.1124.012

河南省冬小麦品种(系)主要品质相关基因的分布

裴栋栋[1,2],张弯弯[2],王永霞[2],任 伟[2],董海滨[2],齐学礼[2],许为钢[1,2]

(1.河南农业大学农学院,河南郑州 450046;2.河南省作物分子育种研究院/
河南省小麦种质资源与遗传改良重点实验室/神农种业实验室,河南郑州 450002)

摘　要:为给小麦品质遗传改良提供参考,利用17个特异性分子标记对近10年河南省选育的小麦品种(系)中的HMW-GS、LMW-GS、面粉色泽和1BL/1RS易位等主要品质性状相关基因进行了分析。结果表明:(1)供试品种(系)中,HMW-GS存在9种等位基因变异和19种基因组合,其中*Glu-A1*、*Glu-B1*和*Glu-D1*位点的主要基因分别为*Ax1*(80.20%)、*By8*(44.42%)和*Dx2*+*Dy12*(69.54%);主要组合为*Ax1*/*Bx7*+*By9*/*Dx2*+*Dy12*(29.44%)和*Ax1*/*Bx7*+*By8*/*Dx2*+*Dy12*(23.60%)。(2)LMW-GS存在8种等位基因变异和12种基因组合,*Glu-A3*位点和*Glu-B3*位点的主要基因为*Glu-A3c*(53.30%)和*Glu-B3d*(23.35%);主要组合为*Glu-A3c*/*Glu-B3d*(14.47%)。(3)面粉色泽相关基因中以高PPO活性基因*Ppo-A1a*(63.45%)和高黄色素含量基因*Psy-A1a*(73.60%)为主。(4)1BL/1RS易位品种(系)占比较高,频率为71.07%。综合来看,河南省小麦品种(系)的品质相关基因具有丰富的多样性,不同基因组合出现频率差异明显,建议在小麦品质育种中,根据改良目标选择亚基效应具有优势互补的基因进行聚合,同时加强*Ppo-A1b*和*Psy-A1b*的选择和应用。

关键词:小麦;高分子量麦谷蛋白;低分子量麦谷蛋白;面粉色泽;1BL/1RS易位

中图分类号:S512.1;S330　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1009-1041(2025)12-1628-11

Distribution of Major Quality Related Genes in Winter Wheat Varieties(Lines) in Henan Province

PEI Dongdong[1,2], ZHANG Wanwan[2], WANG Yongxia[2], REN Wei[2], DONG Haibin[2], QI Xueli[2], XU Weigang[1,2]

(1. College of Agronomy, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450046, China; 2. Henan Academy of Crops Molecular Breeding/Key Laboratory for Wheat Germplasm Resources and Genetic Improvement in Henan Province/The Shennong Lboratory, Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract: In order to provide a reference for the genetic improvement of wheat quality, 17 specific molecular markers were used to analyze the main quality-related genes such as HMW-GS, LMW-GS, flour color and 1BL/1RS translocation in the wheat varieties(lines) selected in Henan Province in the past 10 years. The results showed that: (1) A total of 9 allele variants and 19 gene combinations were detected in HMW-GS, among which the majority genes at *Glu-A1*, *Glu-B1* and *Glu-D1* are *Ax1*(80.20%), *By8*(44.42%) and *Dx2*+*Dy12*(69.54%), respectively. The main combinations were *Ax1*/*Bx7*+*By9*/*Dx2*+*Dy12*(29.44%) and *Ax1*/*Bx7*+*By8*/*Dx2*+*Dy12*(23.60%). (2) A total of 8 allele variants and 12 gene combinations were detected in LMW-GS, and the majority genes at *Glu-A3* and *Glu-B3* are *Glu-A3c* (53.30%) and *Glu-B3d* (23.35%). The main combination is *Glu-A3c*/*Glu-B3d* (14.47%). (3) Among the genes related to flour color, *Ppo-A1a* (63.45%) and *Psy-*

收稿日期:2025-03-21　　修回日期:2025-04-30
基金项目:国家小麦产业技术体系专项(CARS-03-7);河南省农业科学院自主创新基金项目(2024ZC021,2024CZ020);农业生物种质资源挖掘与创新利用重点专项(2021YFD1200600)
第一作者 E-mail:2670554037@qq.com(裴栋栋)
通讯作者 E-mail:xuwg1958@163.com(许为钢)

A1a (73.60%) are the main genes with high yellow pigment content. (4) The proportion of 1BL/1RS translocation varieties(lines) is high, and the frequency is 71.07%. In conclusion, the quality-related genes of wheat varieties(lines) in Henan Province have rich diversity, the frequency of different gene combinations is very different. It is suggested that in wheat quality breeding, genes with complementary subunit effects should be selected according to the improvement goal for polymerization, and the selection and application of *Ppo-A1b* and *Psy-A1b* should be strengthened.

Keywords: Wheat; HMW-GS; LMW-GS; Flour color; 1BL/1RS translocation

小麦是中国主要的粮食作物之一，随着生活水平的提高，人们对小麦品质的要求越来越高，多样化优质专用小麦需求日益增大[1]。影响小麦食用和加工品质的因素有很多，如蛋白质含量、面筋强度、淀粉特性、面粉色泽及 1BL/1RS 易位等[2-6]。研究表明，高分子量麦谷蛋白亚基（HMW-GS）和低分子量麦谷蛋白亚基（LMW-GS）决定面筋的强度和弹性[7]；HMW-GS 的*Glu-A1* 位点中亚基 1 和 2* 对面包、面条加工品质具有正向效应[8-9]；*Glu-B1* 位点的不同亚基对面包体积的影响表现为 13＋16＞17＋18＞7＋8＞7＋9[10]，对面条品质影响表现为 17＋18≥7＋9≥7＋8≥20≥6＋8[11]，对饼干品质的影响表现为 7＋9＞17＋18＞7＋8[12]；*Glu-D1* 位点不同亚基对面团形成时间的效应表现为 5＋10＞2＋11＝10＞2＋12＝11＞2＋10[8]，对面条品质的效应表现为 5＋10＞2≥2＋12[11]，对饼干品质的效应表现为 2＋12＞5＋10[13]。不同 LMW-GS 对面筋强度及面团流变学特性和加工品质的贡献率存在显著差异[14]。*Glu-3* 位点对面筋强度的贡献表现为*Glu-A3c* ＞*Glu-A3b* 、*Glu-A3e* 、*Glu-A3d* ＞*Glu-A3a* ，*Glu-B3d* ＞*Glu-B3h* ＞*Glu-B3j* 、*Glu-B3e* ＞*Glu-B3i* 、*Glu-B3f* ＞*Glu-B3g* [15]；对面团延伸性的贡献表现为*Glu-A3c* ＞*Glu-A3d* ＞*Glu-A3f* ＞*Glu-A3b* ＞*Glu-A3e* ，*Glu-B3i* ＞*Glu-B3b* ＞*Glu-B3a* ＞*Glu-B3f* ＞*Glu-B3g* ＞*Glu-B3h* ＞*Glu-B3c* ＞*Glu-B3d* [14]；*Glu-D3* 位点的基因之间对品质性状的影响差异较小[15]。此外，1BL/1RS 易位使小麦粉面筋质量下降，从而导致加工品质变劣[16]。中国传统面制食品面条、馒头、包子等对面粉的白度有较高的要求，黄色素（YP）含量和多酚氧化酶（PPO）活性是影响面粉及面制品色泽及其稳定性的主要因素[17]。高 YP 含量不利于面制品的外观，但其拥有较高的营养价值；PPO 活性是面粉和面制品存放期间褐化的主要原因[18]。

随着现代生物技术的快速发展，国内外已开发出多种鉴定上述基因等位变异的功能标记[19-24]，利用这些标记可以快速检测品质相关基因组成。杨梦晨等[25]利用特异 STS 分子标记对 311 份小麦地方品种的优质麦谷蛋白基因*Ax2* *、*Bx7*^{oe} 、*By8*、*Glu-A3d* 及*Glu-B3g* 进行鉴定和分析，明确了各位点等位基因的变异类型及频率分布情况。陈泠等[26]利用与面粉及面制品色泽相关分子标记 YP7A、YP7B-1、YP7B-2、PPO18、PPO16、PPO29 以及 IB/1R 易位系分子标记对 277 份小麦品种（系）进行了检测，探讨了国内小麦主产省间相关等位基因变异特点。河南省是中国小麦生产大省，种植面积、总产及商品量在全国均居首位，在中国粮食生产中占有重要地位。前人对河南小麦品种（系）的品质相关基因进行过研究，但多数集中在 HMW-GS、面粉色泽和 1BL/1RS 易位等方面[27]，有关近 20 年来选育品种（系）的 HMW-GS、LMW-GS、面粉色泽和 1BL/1RS 易位等品质相关基因的综合分析研究较少。本研究拟利用 17 个关于 HMW-GS、LMW-GS、PPO 活性、YP 含量以及 1BL/1RS 易位的特异性分子标记，对收集的 394 份河南小麦品种（系）进行检测，旨在明确河南省小麦品质相关基因组成、分布，以期为该区域小麦品质育种和优质亲本选择提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验材料

供试材料共 394 份，其中品种有 256 份（2015 年之前审定品种 17 份，2015—2022 年审定品种 239 份），高代品系有 138 份（2015 年之前的高代品系 18 份，2015—2022 年的高代品系 120 份）。所有材料均由河南省作物分子育种研究院小麦分子育种团队提供。

1.2 DNA 提取

在小麦越冬期，参照 CTAB 法[28]提取植株叶片的 DNA。用核酸浓度检测仪检测其浓度，稀释至 40～60 ng·μL^{-1}，4 ℃冰箱保存备用。

1.3 品质相关基因检测

参照已有研究和预试验结果，选取品质相关标记或基因，引物具体信息见表 1。PCR 反应体系为 10 μL：DNA 模板 1.5 μL，2×Tap plus MasterMix 预混液 5 μL，上、下游引物各 0.2 μL，ddH_2O 补至 10 μL。扩增程序同相应文献。PCR 产物用 1.5%琼脂糖凝胶电泳分离，利用凝胶成像系统拍照分析。所用引物均由上海生工生物技术有限公司合成。

2 结果与分析

394 份品种（系）的 1BL/1RS 易位、HMW-GS、LMW-GS、PPO 活性、YP 含量相关基因的检测结果如表 2 所示。

2.1 1BL/1RS 易位及 HMW-GS 和 LMW-GS 相关基因的分布

394 份品种（系）中，280 份品种（系）可以扩增出 1 598 bp 的特征带，为 1BL/1RS 易位系，频率为 71.07%；114 份品种（系）无扩增产物，为非 1BL/1RS 易位系，频率为 28.93%。部分检测结果如图 1 所示。

HMW-GS 相关基因检测结果（表 2 和图 2）

表 1 用于 PCR 检测的引物及相关信息

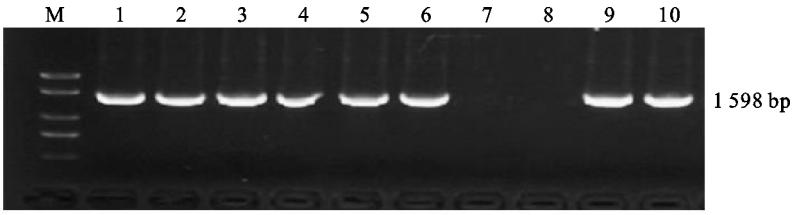
Table 1 PCR primers and their related information

标记（基因）Maker(gene)	序列 Sequence (5′→3′)	退火温度 Annealing temperature/℃	片段大小 Fragment size/bp	参考文献 Reference
UMN19 (*Ax1/Ax2**)	F:CACGACGTTGTAAAACGACCGAGACAATATGAGCAGC R:CTGCCATGGAGAAGTTGGA	60	344/362	[19]
AxNull	F:ACGTTCCCCTACAGGTACTA R:TATCACTGGCTAGCCGACAA	64	920	[20]
MAR (*Bx7/Bx7^{OE}/Bx20*)	F:CCTCAGCATGCAAACATGCAGC R:CTGAAACCTTTGGCCAGTCATGTC	58	520/563/800	[21]
ZSBy8F5/R5 (*By8*)	F:TTAGCGCTAAGTGCCGTCT R:TTGTCCTATTTGCTGCCCTT	62	527	[21]
ZSBy9F1/R3 (*By9*)	F:TTCTCTGCATCAGTCAGGA R:AGAGAAGCTGTGTAATGCC	59	662/707	[21]
Xrj2 (*Dx5+Dy10/Dx2+Dy12*)	F:CTCGCTCGACGGTGTTGAA R:CCTTTGGCCCAGATAAAGTG	59	428/1 028	[22]
LA1F/SA1R (*Glu-A3a*)	F:AAACAGAATTATTAAAGCCGG R:GGTTGTTGTTGTTGCAGCA	50	529	[21]
LA3F/SA2R (*Glu-A3b*)	F:TTCAGATGCAGCCAAACAA R:GCTGTGCTTGGATGATACTCTA	52	894	[21]
LA1F/SA3R (*Glu-A3a/c*)	F:AAACAGAATTATTAAAGCCGG R:GTGGCTGTTGTGAAAACGA	55	573	[21]
LA3F/SA4R (*Glu-A3d*)	F:TTCAGATGCAGCCAAACAA R:TGGGGTTGGGAGACACATA	55	967	[21]
LA1F/SA6R (*GIu-A3f*)	F:AAACAGAATTATTAAAGCCGG R:GCTGCTGCTGCTGTGTAAA	50	552	[21]
SB4F/SB4R (*GIu-B3d*)	F:CACCATGAAGACCTTCCTCA R:GTTGTTGCAGTAGAACTGGA	55	662	[21]
SB6F/SB6R (*Glu-B3f/g*)	F:TATAGCTAGTGCAACCTACCAT R:CAACTACTCTGCCACAACG	55	812	[21]
SB7F/SB7R (*Glu-B3g*)	F:CCAAGAAATACTAGTTAACACTAGTC R:GTTGGGGTTGGGAAACA	50	853	[21]
H20(1BL/1RS)	F:GGAGACATCATGAAACATTTG R:CTGTTGTTGGGCAGAAAG	60	1 598	[21]
PPO18 (*Ppo-A1a/Ppo-A1b*)	F:AACTGCTGGCTCTTCTTCCCA R:AAGAAGTTGCCCATGTCCGC	65	685/876	[21]
YP7A (*Psy-A1a/Psy-A1b*)	F:GGACCTTGCTGATGACCGAG R:TGACGGCTGAAGTGAGAATGA	65	194/231	[21]

表 2　品质相关基因检测结果

Table 2　Statistical result of the quality-related genes

基因位点 Gene locus	基因 Gene	代表品种(系) Representative variety(line)	材料数目 Number	频率 Frequency/%
Glu-A1	*Ax1*	郑麦 1835,郑麦 1923,郑麦 1926 Zhengmai 1835,Zhengmai 1923,Zhengmai 1926	316	80.20
	*Ax2**	漯麦 49,漯麦 50,丰德存麦 20 号 Luomai 49,Luomai 50,Fengdecunmai 20	42	10.66
	AxNull	周麦 21,郑麦 819,洛麦 53 Zhoumai 21,Zhengmai 819,Luomai 53	36	9.14
Glu-B1	*Bx7*	周麦 36,郑麦 136,囤麦 127 Zhoumai 36,Zhengmai 136,Tunmai 127	377	95.69
	Bx20	商麦 167,天民 184,天民 118 Shangmai 167,Tianmin 184,Tianmin 118	17	4.30
	By8	新麦 45,周麦 36,周麦 48 Xinmai 45,Zhoumai 36,Zhoumai 48	175	44.42
	By9	百农 207,泛麦 8 号,郑麦 9134 Bainong 207,Fanmai 8,Zhengmai 9134	210	53.30
	Bx7 +By8	囤麦 127,郑麦 1860,郑麦 0989 Tunmai 127,Zhengmai 1860,Zhengmai 0989	167	42.39
	Bx7 +By9	郑麦 2008,郑麦 1906,郑麦 1926 Zhengmai 2008,Zhengmai 1906,Zhengmai 1926	210	53.30
	Bx20 +By8	春丰 0017,丹麦 118,商麦 167 Chunfeng 0017,Danmai 118,Shangmai 167	8	2.03
Glu-D1	*Dx5 +Dy10*	郑麦 1923,郑麦 9188,驻麦 588 Zhengmai 1923,Zhengmai 9188,Zhumai 588	120	30.46
	Dx2 +Dy12	郑麦 2001,郑麦 818,郑麦 158 Zhengmai 2001,Zhengmai 818,Zhengmai 158	274	69.54
Glu-A3	*Glu-A3a*	郑麦 2008,郑麦 369,郑麦 817 Zhengmai 2008,Zhengmai 369,Zhengmai 817	14	3.55
	Glu-A3b +Glu-A3c	郑麦 1906,郑科 137,春晓 186 Zhengmai 1906,Zhengke 137,Chunxiao 186	13	3.30
	Glu-A3b +Glu-A3f	太学 12 选 Taixue12xuan	1	0.25
	Glu-A3c	豫农 906,新麦 65,豫农 901 Yunong 906,Xinmai 65,Yunong 901	175	44.42
	Glu-A3c +Glu-A3d	漯麦 82,平安 518,枣乡 158 Luomai 82,Pingan 518,Zaoxiang 158	21	5.33
	Glu-A3c +Glu-A3f	郑麦 1833 Zhengmai 1833	1	0.25
	Glu-A3d	周麦 36,郑麦 004,郑麦 1926 Zhoumai 36,Zhengmai 004,Zhengmai 1926	161	40.86
	Glu-A3f	农旱 101,天民 185,信麦 69 Nonghan 101,Tianmin 185,Xinmai 69	4	1.02
Glu-B3	*Glu-B3d*	万丰 269,郑麦 863,新麦 22 Wanfeng 269,Xinmai 863,Xinmai 22	92	23.35
	Glu-B3f	洛旱 30,郑麦 5288,百农 607 Luohan 30,Zhengmai 5288,Bainong 607	18	4.57
	Glu-B3g	怀川 101,泛麦 65 Huaichuan 101,Fanmai 65	2	0.51
PPO-A1	*Ppo-A1a*	郑麦 5288,郑麦 005,周麦 36 Zhengmai 5288,Zhengmai 005,Zhoumai 36	250	63.45
	Ppo-A1b	郑麦 1860,郑麦 6687,周麦 48 Zhengmai 1860,Zhengmai 6687,Zhoumai 48	119	30.20
Psy-A1	*Psy-A1a*	周麦 48,郑麦 136,郑麦 1905 Zhoumai 48,Zhengmai 136,Zhengmai 1905	290	73.60
	Psy-A1b	郑麦 925,新麦 38,郑麦 7698 Zhengmai 925,Xinmai 38,Zhengmai 7698	104	26.40
1BL/1RS 易位 1BL/1RS translocation	1BL/1RS 易位系 1BL/1RS translocation	周麦 36,新麦 38,郑麦 1860 Zhoumai 36,Xinmai 38,Zhengmai 1860	280	71.07
	非 1BL/1RS 易位系 Non 1BL/1RS translocation	郑麦 9189,郑麦 158,郑麦 6694 Zhengmai 9189,Zhengmai 158,Zhengmai 6694	114	28.93



M:DL2000;1～10：依次为周麦 36、百农 307、郑麦 1860、郑麦 136、周麦 48、豫农 78、新麦 26、万丰 269、郑麦 9188、百农 207。下同。

M：DL2000；1—10：Zhoumai 36，Bainong 307，Zhengmai 1860，Zhengmai 136，Zhoumai 48，Yunong 78，Xinmai 26，Wanfeng 269，Zhengmai 9188，Bainong 207.

图 1 1BL/1RS 易位系部分材料检测结果

Fig. 1 Detection results of some materials with the 1BL/1RS translocation

显示，在*Glu-A1* 位点检测到*Ax1*、*Ax2**和*AxNull* 共 3 个基因，其中 316 份品种（系）含有*Ax1*，频率为 80.20%；42 份品种（系）含有*Ax2**，频率为 10.65%；36 份品种（系）含有*AxNull*，频率为 9.14%。在*Glu-B1* 位点检测到*Bx7*、*Bx20*、*By8* 和 *By9* 共 4 个基因，377 份品种（系）含有*Bx7*，频率为 95.69%；17 个品种（系）含有*Bx20*，频率为 4.31%；175 份品种（系）含有*By8*，频率为 44.42%；210 份品种（系）含有*By9*，频率为 53.30%；未检测到含有$Bx7^{OE}$ 的品种（系）；同时含有*Bx7* 和*By8* 的品种（品系）有 167 份，频率为 42.39%。在*Glu-D1* 位点检测到*Dx2*＋*Dy12* 和*Dx5*＋*Dy10* 两种类型，274 份品种（系）为*Dx2*＋*Dy12*，频率为 69.54%；120 份品种（系）为*Dx5*＋*Dy10*，频率为 30.46%。

在 394 份供试材料中，共鉴定出 19 种 HMW-GS 组合类型，其分布频率见表 3。*Ax1/Bx7*＋*By9/Dx2*＋*Dy12* 和*Ax1/Bx7*＋*By8/Dx2*＋*Dy12* 组合类型出现的频率较高，分别占供试材料的 29.44% 和 23.60%；其次为*Ax1/Bx7*＋*By9/Dx5*＋*Dy10* 和*Ax1/Bx7*＋*By8/Dx5*＋*Dy10*，分别占 14.47% 和 9.39%；其余组合类型出现的频率较低，其中*Ax1/Bx20*＋*By8/Dx5*＋*Dy10*、*Ax2*/Bx20/Dx2*＋*Dy12* 和*AxNull/Bx20/Dx5*＋*Dy10* 三种组合类型均各有 1 份材料，占比均为 0.25%。

表 3 供试材料 HMW-GS 组合类型及其分布频率

Table 3 HMW-GS combinations and the frequency of wheat varieties(lines)

编号 Number	组合类型 HMW-GS combination	品种（系）数量 Number of varieties(lines)	频率 Frequency/%
1	*Ax1/Bx7*＋*By8/Dx2*＋*Dx12*	93	23.60
2	*Ax1/Bx7*＋*By8/Dx5*＋*Dx10*	37	9.39
3	*Ax1/Bx7*＋*By9/Dx2*＋*Dx12*	116	29.44
4	*Ax1/Bx7*＋*By9/Dx5*＋*Dx10*	57	14.47
5	*Ax1/Bx20*＋*By8/Dx2*＋*Dx12*	4	1.02
6	*Ax1/Bx20*＋*By8/Dx5*＋*Dx10*	1	0.25
7	*Ax1/Bx20/Dx2*＋*Dx12*	4	1.02
8	*Ax1/Bx20/Dx5*＋*Dx10*	4	1.02
9	*Ax2*/Bx7*＋*By8/Dx2*＋*Dx12*	10	2.54
10	*Ax2*/Bx7*＋*By8/Dx5*＋*Dx10*	6	1.52
11	*Ax2*/Bx7*＋*By9/Dx2*＋*Dx12*	19	4.82
12	*Ax2*/Bx7*＋*By9/Dx5*＋*Dx10*	6	1.52
13	*Ax2*/Bx20/Dx2*＋*Dx12*	1	0.25
14	*AxNull/Bx7*＋*By8/Dx2*＋*Dx12*	15	3.81
15	*AxNull/Bx7*＋*By8/Dx5*＋*Dx10*	6	1.52
16	*AxNull/Bx7*＋*By9/Dx2*＋*Dx12*	10	2.54
17	*AxNull/Bx7*＋*By9/Dx5*＋*Dx10*	2	0.51
18	*AxNull/Bx20*＋*By8/Dx2*＋*Dx12*	2	0.51
19	*AxNull/Bx20/Dx5*＋*Dx10*	1	0.25
总计 Total		394	100

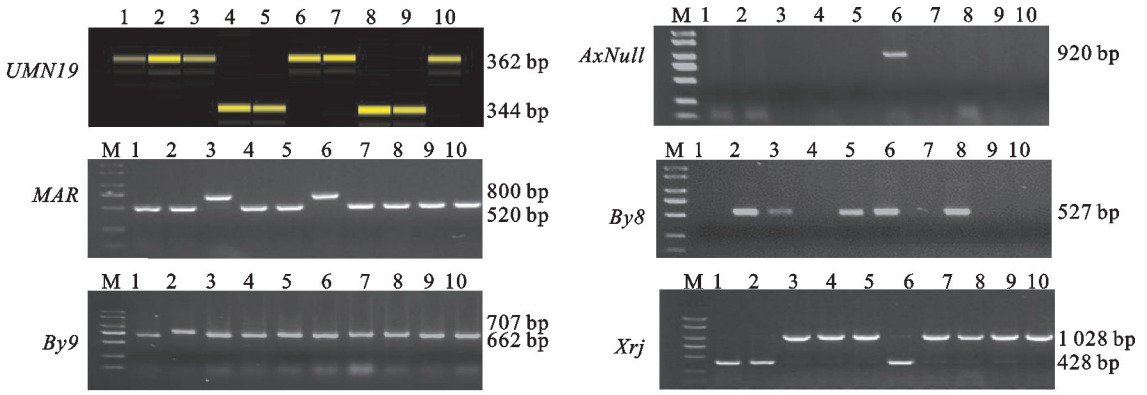


图 2　HMW-GS 相关基因部分检测结果

Fig. 2　Partial detection results of the HMW-GS genes

LMW-GS 相关基因检测结果(表 2 和图 3)表明,在*Glu-A3* 位点检测到*Glu-A3a*、*Glu-A3b*、*Glu-A3c*、*Glu-A3d*、*Glu-A3f* 共 5 个类型,其中 14 份品种(系)为*Glu-A3a*,频率为 3.55%;175 份品种(系)为*Glu-A3c*,频率为 44.42%;161 份品种(系)为*Glu-A3d*,频率为 40.86%;4 份品种(系)为*Glu-A3f*,频率为 1.02%;同时含有*Glu-A3b* 和*Glu-A3c* 的品种(系)有 13 份,频率为 3.30%;同时含有*Glu-A3b* 和*Glu-A3f* 的品种(系)有 1 份,频率为 0.25%;同时含有*Glu-A3c* 和*Glu-A3d* 的品种(系)有 21 份,频率为 5.33%;同时含有*Glu-A3c* 和*Glu-A3f* 的品种(系)有 1 份,频率为 0.25%。112 份品种(系)在*Glu-B3* 位点上检测到*Glu-B3d*、*Glu-B3g* 和*Glu-B3f* 共 3 个类型,92 份品种(系)为*Glu-B3d*,频率为 23.35%;18 份品种(系)为*Glu-B3f* 频率为 4.57%;2 份品种(系)为*Glu-B3g*,频率为 0.51%。

112 份品种(系)中同时检测到*Glu-A3* 位点和*Glu-B3* 位点基因,共鉴定出 12 种 LMW-GS 基因组合类型,其分布频率见表 4。*Glu-A3c*/*Glu-B3d* 组合类型出现的频率较高,占供试材料的 14.47%,新麦 26、豫农 906 和新麦 45 等 57 份品种(系)属于该类型;其次为*Glu-A3d*/*Glu-B3d* 组合,占 5.84%,郑麦 5135、洛麦 50 和郑麦 6694 等 23 份品种(系)属于该类型。其余组合类型出现的频率较低,其中*Glu-A3b*/*Glu-A3c*/*Glu-B3f*、*Glu-A3c*/*Glu-A3d*/*Glu-B3f*、*Glu-A3f*/*Glu-B3d* 和*Glu-A3f*/*Glu-B3f* 四种组合类型均各有 1 份材料,占比均为 0.25%。

表 4　供试材料 LMW-GS 组合类型及其分布频率

Table 4　LMW-GS combinations and the frequency of wheat variety(line)

编号 Number	LMW-GS 组合类型 LMW-GS combination	品种(系)数量 Number of varieties(lines)	频率 Frequency/%
1	*Glu-A3a*/*Glu-B3d*	7	1.78
2	*Glu-A3b*/*Glu-A3c*/*Glu-B3d*	2	0.51
3	*Glu-A3b*/*Glu-A3c*/*Glu-B3f*	1	0.25
4	*Glu-A3c*/*Glu-B3d*	57	14.47
5	*Glu-A3c*/*Glu-B3f*	6	1.52
6	*Glu-A3c*/*Glu-B3g*	2	0.51
7	*Glu-A3c*/*Glu-A3d*/*Glu-B3d*	2	0.51
8	*Glu-A3c*/*Glu-A3d*/*Glu-B3f*	1	0.25
9	*Glu-A3d*/*Glu-B3d*	23	5.84
10	*Glu-A3d*/*Glu-B3f*	9	2.28
11	*Glu-A3f*/*Glu-B3d*	1	0.25
12	*Glu-A3f*/*Glu-B3f*	1	0.25
总计 Total		112	28.43

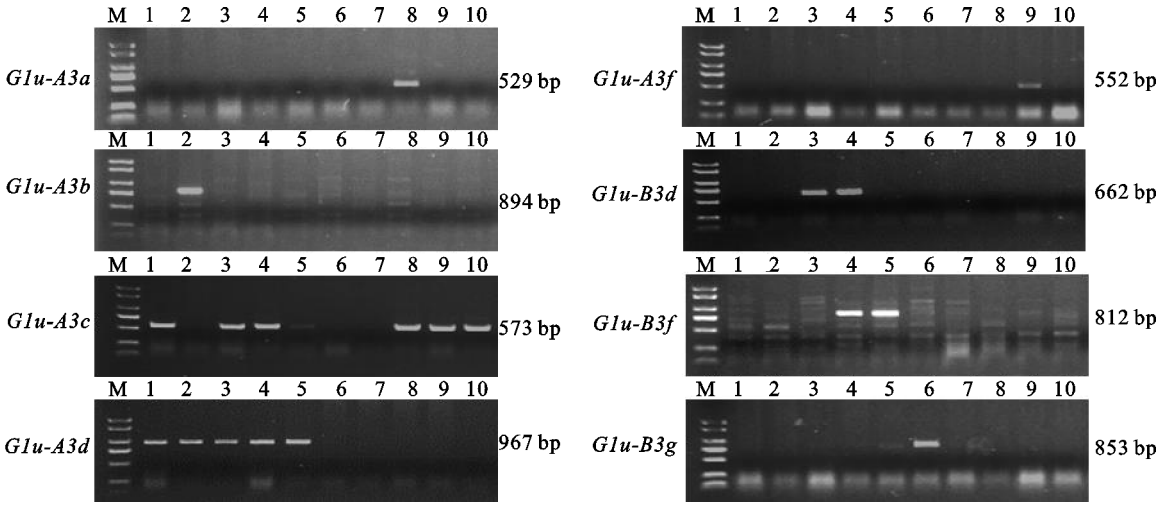


图 3 LMW-GS 相关基因部分检测结果

Fig. 3 Partial detection results of LMW-GS genes

2.2 色泽相关基因的分布

由表 2 和图 4 可知，394 份供试品种(系)中，290 份品种(系)中含有高黄色素基因*Psy-A1a*，频率为 73.60%；104 份品种(系)中含有低黄色素基因*Psy-A1b*，频率为 26.40%。250 份品种(系)中含有高 PPO 活性基因*Ppo-A1a*，占比 63.45%；119 份品种(系)含有低 PPO 活性基因*Ppo-A1b*，占比 30.20%；25 份品种(系)没有扩增到共显性标记 PPO18 的特征带。

郑麦 1860、冠麦 2 号、郑麦 1906 等 45 份供试品种(系)聚合有*Psy-A1b/Ppo-A1b* 基因，其中粮源 22、郑麦 818、周麦 21 号等 19 个品种(系)为非 1BL/1RS 易位系；新麦 65、郑麦 136、郑麦 2008 等 74 份供试品种(系)聚合有*Psy-A1a/Ppo-A1b* 基因，其中新麦 65、郑麦 132、郑麦 158 等 39 个品种(系)为非 1BL/1RS 易位系。这些品种(系)可作为黄淮麦区小麦面粉色泽改良的亲本。

2.3 河南省主栽小麦品种品质相关基因分布

394 份供试品种(系)中，共有 17 个品种 2023 年在河南省种植面积达 750 万 hm^2 以上(表 5)，为该区域主栽品种，对这 17 个品种进行品质基因分析发现，郑麦 1860 等 10 个品种为 1BL/1RS 易位系，中麦 578 等 7 个品种为非 1BL/1RS 易位系。

17 个品种中，HMW-GS 的*Glu-A1* 位点上有*Ax1*、*Ax2** 和*AxNull* 三种类型，周麦 36、郑麦 1860 和囤麦 257 为*AxNull*，其余 14 个品种为*Ax1* 或*Ax2**；*Glu-B1* 位点上只有*Bx7*+*By8* 和*Bx7*+*By9* 两种类型，9 个品种为*Bx7*+*By8*，8 个品种为*Bx7*+*By9*；*Glu-D1* 位点上有*Dx5*+*Dy10* 和*Dx2*+*Dy12* 两种类型，8 个品种为*Dx5*+*Dy10*，9 个品种为*Dx2*+*Dy12*；组合*Ax1/Bx7*+*By8/Dx5*+*Dy10* 出现频次最高，有新麦 26 等 4 个品种。

17 个品种中，LMW-GS 的*Glu-A3* 位点上有*Glu-A3a*、*Glu-A3c* 和*Glu-A3d* 三种类型，9 个品种为*Glu-A3c*，7 个品种为*Glu-A3d*，*Glu-A3a* 只在 1 个品种中检测到；*Glu-B3* 位点上有*Glu-B3d* 和*Glu-B3f* 两种类型，6 个品种为*Glu-B3d*，1 个品种为*Glu-B3f*；百农 207 等 6 个品种同时含有*Glu-A3c* 和*Glu-B3d*，百农 607 同时含有*Glu-A3c* 和*Glu-B3f*。

11 个品种含有低 PPO 活性基因*Ppo-A1b*，7 个品种含有低黄色素含量基因*Psy-A1b*；郑麦 1860 等 5 个品种同时含有*Ppo-A1b* 和*Psy-A1b*。

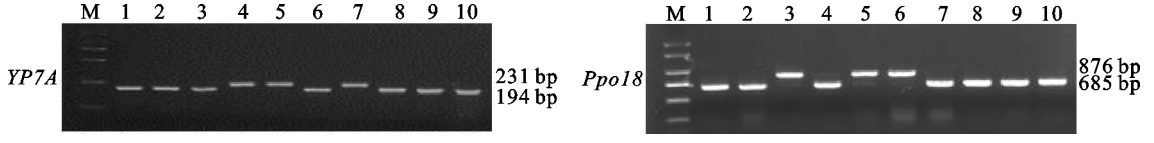


图 4 色泽相关基因部分检测结果

Fig. 4 Detection results of some color-related genes

表 5　17 个河南主栽品种优质基因聚合情况

Table 5　Aggregation of high-quality genes of 17 cultivars in Henan Province

品种 Cultivar	HMW-GS	LMW-GS	1BL/1RS	*Ppo-A1*	*Psy-A1*
郑麦 1860 Zhengmai 1860	*AxNull/Bx7+By8/Dx5+Dy10*	*Glu-A3c*	1BL/1RS	*Ppo-A1b*	*Psy-A1b*
郑麦 136 Zhengmai 136	*Ax1/Bx7+By8/Dx2+Dy12*	*Glu-A3d*	1BL/1RS	*Ppo-A1b*	*Psy-A1a*
周麦 36 Zhoumai 36	*AxNull/Bx7+By8/Dx2+Dy12*	*Glu-A3d*	1BL/1RS	*Ppo-A1a*	*Psy-A1b*
中麦 578 Zhongmai 578	*Ax1/Bx7+By9/Dx5+Dy10*	*Glu-A3a*	Non-1BL/1RS	*Ppo-A1b*	*Psy-A1a*
冠麦 2 号 Guanmai 2	*Ax1/Bx7+By9/Dx2+Dy12*	*Glu-A3c/Glu-A3d*	Non-1BL/1RS	*Ppo-A1b*	*Psy-A1b*
丰德存麦 20 Fengdecunmai 20	*Ax2*/Bx7+By9/Dx2+Dy12*	*Glu-A3d*	1BL/1RS	*Ppo-A1a*	*Psy-A1a*
百农 207 Bainong 207	*Ax1/Bx7+By9/Dx2+Dy12*	*Glu-A3c/Glu-B3d*	1BL/1RS	*Ppo-A1a*	*Psy-A1a*
新麦 45 Xinmai 45	*Ax1/Bx7+By8/Dx5+Dy10*	*Glu-A3c/Glu-B3d*	Non-1BL/1RS	*Ppo-A1b*	*Psy-A1a*
百农 307 Bainong 307	*Ax1/Bx7+By9/Dx2+Dy12*	*Glu-A3d*	1BL/1RS	*PpoA1a*	*Psy-A1a*
囤麦 257 Tunmai 257	*AxNull/Bx7+By9/Dx2+Dy12*	*Glu-A3d*	Non-1BL/1RS	*Ppo-A1b*	*Psy-A1a*
郑麦 9188 Zhengmai 9188	*Ax1/Bx7+By9/Dx5+Dy10*	—	1BL/1RS	*Ppo-A1b*	*Psy-A1b*
泛麦 8 号 Fanmai 8	*Ax1/Bx7+By9/Dx5+Dy10*	*Glu-A3c/Glu-B3d*	1BL/1RS	*Ppo-A1b*	*Psy-A1b*
赛德麦 8 号 Saidemai 8	*Ax1/Bx7+By8/Dx5+Dy10*	*Glu-A3c /Glu-B3d*	Non-1BL/1RS	*Ppo-A1b*	*Psy-A1a*
伟隆 169 Weilong 169	*Ax1/Bx7+By8/Dx5+Dy10*	*Glu-A3c/Glu-B3d*	Non-1BL/1RS	*Ppo-A1a*	*Psy-A1b*
新麦 26 Xinmai 26	*Ax1/Bx7+By8/Dx5+Dy10*	*Glu-A3c/Glu-B3d*	Non-1BL/1RS	*Ppo-A1b*	*Psy-A1b*
百农 607 Bainong 607	*Ax1/Bx7+By8/Dx2+Dy12*	*Glu-A3c/Glu-B3f*	1BL/1RS	*Ppo-A1b*	*Psy-A1a*
囤麦 127 Tunmai 127	*Ax1/Bx7+By8/Dx2+Dy12*	*Glu-A3d*	1BL/1RS	*Ppo-A1a*	*Psy-A1a*

3　讨论

高分子量麦谷蛋白亚基(HMW-GS)对小麦加工品质具有重要作用,前人对黄淮南片小麦品种(系)的 HMW-GS 组成已有较多研究,2005 年之前的黄淮冬麦区大面积推广品种以含有*Ax-Null*(53.0%)、*Bx7+By8*(62.0%)、*Dx2+Dy12*(84.9%)为主,主要组合是*AxNull/Bx7+By8/Dx2+Dy12*(36.0%)和*Ax1/Bx7+By8/Dx2+Dy12*(18.2%)[29]。2003—2015 年,黄淮南片小麦品种(系)的 HMW-GS 基因以*Ax1*(73.45%)、*Bx7+By9*(59.89%)、*Dx2+Dy12*(50.85%)为主,主要组合是*Ax1/Bx7+By9/Dx2+Dy12*(24.86%)和*Ax1/Bx7+By9/Dx5+Dy10*(21.47%)[30]。本研究对 2015 年之后的河南省冬小麦品种(系)检测,发现优势基因类型为*Ax1*(80.20%)、*By8*(44.42%)和*Dx2+Dy12*(69.54%),与谢科军等[30]、王丽等[31]、刘春雷等[27]的研究结果一致,但比例不同。*Ax1* 和*Dx2+Dy12* 检出率大幅上升,*Bx7+By9* 检出率下降;主要组合类型发生改变,现以*Ax1/Bx7+By9/Dx2+Dy12*(29.44%)和*Ax1/Bx7+By8/Dx2+Dy12*(23.60%)为主。*Ax1/Bx7+By8/Dx2+Dy12* 频率从 3.95% 升至 23.60%,*Ax1/Bx7+By9/Dx5+Dy10*(14.47%)和*Ax1/Bx7+By8/Dx5+Dy10*(9.39%)频率略有下降,原因可能是由于*Bx7+By8* 和*Dx5+Dy10* 对面筋强度和含量均有良好的品质效应,*Dx2+Dy12* 对面筋含量的增效作用大于*Dx5+Dy10*,且对面筋强度的综合效应也相对较好[32],故在河南小麦品质育种中,人们更侧重于优质基因*By8* 的应用和选择。本研

究还发现，标记 MAR 能同时区分*Bx7*、*Bx7*^{OE} 和 *Bx20* 基因，可准确鉴定*Bx7* 和*Bx7*^{OE}，但对稀有基因鉴定效果欠佳，例如郑麦 9405 用 MAR 检测为 *Bx20*，但前期研究结果显示其为*Bx14*＋*By15*[33]，建议使用 MAR 时，对检测结果为*Bx20* 的材料使用稀有基因特异性标记或经典方法 SDS-PAGE 进行进行详细区分。

低分子量麦谷蛋白亚基（LMW-GS）约占麦谷蛋白的 60%，对面团粘性、强度及面筋拉伸阻力与延展性有重要影响[34]。本研究显示，河南小麦品种（系）中，*Glu-A3* 位点以*Glu-A3c* 和*Glu-A3d* 为主，频率分别为 53.30% 和 46.19%；*GluA3a* 、*Glu-A3b* 和*Glu-A3f* 的频率较低，分别为 3.55%、3.55% 和 1.52%。*Glu-B3* 位点以*Glu-B3d* 为主，频率为 23.35%；*Glu-B3f* 和*Glu-B3g* 的频率较低，分别为 4.57% 和 0.51%。该结果与陈蕴文等[35]在黄淮南部麦区对*Glu-B3* 位点*Glu-B3d*（23.0%）、*Glu-B3g*（7.30%）和*Glu-B3f*（5.90%）的检出结果基本一致。已有研究表明，*Glu-A3c* 、*Glu-A3b* 对面筋强度的影响显著高于*Glu-A3e*[15]；*Glu-B3g* 、*Glu-B3d* 对淀粉稳定性、面包体积、面条评分等特性有正向效应[36]，说明含*Glu-A3b* 、*Glu-A3d* 、*Glu-B3b* 和*Glu-B3d* 基因的材料品质更优。本研究中，含*Glu-A3c*/*Glu-B3d* 的品种（系）有 57 份，含*Glu-A3d*/*Glu-B3d* 的品种（系）仅有 23 份，其余组合类型出现的频率都极低，原因可能是由于之前河南小麦品种的选育多注重优质 HMW-GS 的改进，未注意 LMW-GS 的影响，故 LMW-GS 育种遗传基础狭窄。

面粉及其制品颜色是小麦品质评价的关键因素。小麦籽粒中低 PPO 活性能有效防止面粉及面制品在加工和贮存时褐变[18]。本研究检测了 394 份河南冬小麦品种（系），发现含低 PPO 活性基因*Ppo-A1b* 的品种（系）占比 30.20%，低于昝香存等[33]对河南冬小麦品种（系）低 PPO 活性（34.3%）的结果，原因可能是由于供试材料来源及构成不同。中国传统面条、馒头、饺子等面食要求小麦粉亮白，营养强化类面制品则需要高黄色素含量小麦[17]。利用*YP7A* 检测供试材料中 *Psy-A1* 基因的等位变异，发现含高黄色素基因 *Psy-A1a* 和低黄色素基因*Psy-A1b* 的品种（系）分别占 73.60%、26.40%，与课题组前期[33]及陈宏等[37]的研究结果基本一致，均是*Psy-A1a* 分布频率远高于*Psy-A1b* 。1BL/1RS 易位系小麦品种因适应性好、抗逆性强、耐后期高温、高产稳产等优点[21]，常作优异亲本被广泛利用。朱保磊等[38]发现，100 份黄淮南片不同品质小麦品种中，1BL/1RS 易位系材料占比 69.00%。本研究检测了 394 份河南冬小麦品种（系），其中 280 份为 1BL/1RS 易位系，频率为 71.07%，略高于前人结果[33,38]，可能与本研究选材及河南小麦品种（系）选育中较多使用该易位系作亲本有关。1BL/1RS 易位会显著降低面筋强度，使面团发粘，导致小麦加工品质变劣[39]，因此在品质育种目标下，无该片段被视为优异等位变异。

目前，河南省小麦品种（系）仍以中筋为主，稳定时间、能量和最大拉伸阻力是制约强筋和中强筋小麦育种的关键因素[40]，结合本研究对目前河南省小麦品种（系）中主要品质基因的鉴定结果，建议在小麦品质育种中，根据改良目标选择亚基效应具有优势互补的基因进行聚合，如在进行强筋小麦品质遗传改良时，可选择 HMW-GS 和 LMW-GS 品质得分较高的亚基进行优化聚合，对于弱筋小麦品质遗传改良时选择得分较低的亚基进行优化聚合等，同时加强*Ppo-A1b* 和*Psy-A1b* 的选择和应用。

参考文献：

[1]范家霖，陈晓杰，张建伟，等. 高分子量麦谷蛋白亚基组成及其与小麦品质性状的关系分析[J]. 麦类作物学报，2021，41(5)：544.
FAN J L，CHEN X J，ZHANG J W，*et al*. Composition of high molecular weight glutenin subunits and theirs relationship with wheat quality traits [J]. *Journal of Triticeae Crops*，2021，41(5)：544.

[2]刘建军，何中虎，赵振东，等. 小麦品质性状与干白面条品质参数关系的研究[J]. 作物学报，2002，28(6)：738.
LIU J J，HE Z H，ZHAO Z D，*et al*. Investigation on relation ship between wheat quality traits and quality parameters of dry white Chinese noodles [J]. *Acta Agronomica Sinica*，2002，28(6)：738.

[3]胡新中，张国权，张正茂，等. 小麦面粉、面条色泽与蛋白质组分的关系[J]. 作物学报，2005，31(4)：515.
HU X Z，ZHANG G Q，ZHANG Z M，*et al*. Relationship between wheat flour color，noodle color and protein components [J]. *Acta Agronomica Sinica*，2005，31(4)：515.

[4]胡瑞波，田纪春，邓志英，等. 中国白盐面条色泽影响因素的研究[J]. 作物学报，2006，(9)：1338.
HU R B，TIAN J C，DENG Z Y，*et al*. Factors related to Chinese white salted noodle color [J]. *Acta Agronomica Sinica*，2006，32(9)：1338.

[5]葛秀秀，张立平，何中虎，等. 冬小麦 PPO 活性的主基因＋多

基因混合遗传分析[J]. 作物学报,2004,30(1):18.
GE X X,ZHANG L P,HE Z H,*et al*. The mixed inheritance analysis of polyphenol oxidase activities in winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*,2004,30(1):18.

[6]刘建军,何中虎,杨 金,等. 小麦品种淀粉特性变异及其与面条品质关系的研究[J]. 中国农业科学,2003,36(1):7.
LIU J J,HE Z H,YANG J,*et al*. Variation of starch properties in wheat cultivars and their relationship with dry white Chinese noodle quality [J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2003,36(1):7.

[7]陶海腾,王文亮,程安玮,等. 小麦蛋白组分及其对加工品质的影响[J]. 中国食物与营养,2011,17(3):28.
TAO H T,WANG W L,CHENG A W,*et al*. Wheat protein components and their effects on process quality [J]. *Food and Nutrition in China*,2011,17(3):28.

[8]马小乐,尚勋武,辛培尧,等. 春小麦品种高分子量谷蛋白亚基与品质的关系[J]. 麦类作物学报,2006,26(1):66.
MA X L,SHANG X W,XIN P Y,*et al*. Relationship of HMW-GS and spring wheat quality [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2006,26(1):66.

[9]裴玉贺,潘启苗,宋 琳,等. 小麦谷蛋白大聚合体与 HMW-GS 的关系[J]. 麦类作物学报,2010,30(1):61.
PEI Y H,PAN Q M,SONG L,*et al*. Relationship between glutenin macropolymer and high molecular weight gutenin subunit in wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2010,30(1):61.

[10]张津立,李硕碧. 小麦品种 HMW 谷蛋白亚基组成的数量分析[J]. 麦类作物学报,1998,18(6):24.
ZHANG J L,LI S B. Quantitative analysis of HMW glutenin subunit composition in wheat varieties [J]. *Journal of Triticeae Crops*,1998,18(6):24.

[11]相吉山,穆培源,桑 伟,等. 小麦 HMW-GS 和 LMW-GS 对新疆拉面及蛋白质品质的影响[J]. 麦类作物学报,2015,35(5):629.
XIANG J S,MU P Y,SANG W,*et al*. Effects of allelic variation in HMW and LMW-GS on processing quality of Xinjiang hand-stretched noodles and protein traits of wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015,35(5):629.

[12]TUNCIL Y E,JONDIKO T,TILLEY M,*et al*. Combination of null alleles with 7+9 allelic pair at *Glu-B1* locus on the long arm of group 1 chromosome improves wheat dough functionality for tortillas [J]. *LWT*,2016,65:683.

[13]梁铃铃. 小麦 HMW-GS 单位点系创制及品质效应初探[D]. 成都:四川农业大学,2022.
LIANG L L. Development of wheat lines solely expressing high-molecular-weight-glutenin subunits (HMW-GS) from one of the three *Glu-1* loci and preliminary study on their quality [D]. Chegndu: Sichuan Agricultural University, 2022.

[14]周国雁,陈 丹,伍少云等. 177 份小麦种质资源低分子量麦谷蛋白基因型分析[J]. 种子,2022,41(2):5.
ZHOU G Y,CHEN D,WU S Y,*et al*,Genotypes analysis of glutenin with low molecular weight in 177 wheat germplasm resources [J]. *Seed*,2022,41(2):5.

[15]胡 琳,许为钢,王根松,等. 小麦低分子量谷蛋白亚基品质效应的研究[J]. 麦类作物学报,2009,29(3):424.
HU L,XU W G,WANG G S,*et al*. Effect of low molecular weight glutenin subunits on wheat quality [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2009,29(3):424.

[16]刘建军,何中虎,R J Pena,等. 1BL/1RS 易位对小麦加工品质的影响[J]. 作物学报,2004,30(2):149.
LIU J J,HE Z H,PENA R,*et al*. Effect of 1BL/1RS translocation on grain quality and noodle quality in bread wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*,2004,30(2):149.

[17]权 威,马锦绣,华正蓉,等. 我国部分审定小麦品种的品质性状及基因型分析[J]. 植物遗传资源学报,2023,24(3):701.
QUAN W,MA J X,HUA Z R,*et al*. Quality analysis in a collection of wheat varieties approved in China [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*,2023,24(3):701.

[18]李春鑫,赵明忠,韩留鹏,等. 小麦面粉色泽相关基因在河南地方品种中的分布[J]. 麦类作物学报,2022,42(6):685.
LI C X ,ZHAO M Z,HAN L P,*et al*. Distribution of flour color related genes in Henan wheat landraces [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2022,42(6):685.

[19]LIU S X,CHAO S,ANDERSON J A. New DNA markers for high molecular weight glutenin subunits in wheat [J]. *Theoretical and Applied Genetics*,2008,118(1):177.

[20]LAFIANDRA D,TUCCI G F,PAVONI A,*et al*. PCR analysis of x- and y-type genes present at the complex Glu-A1 locus in durum and bread wheat [J]. *Theoretical and Applied Genetics*,1997,94(2):235.

[21]李式昭,郑建敏,伍 玲,等. 四川小麦品种高、低分子量麦谷蛋白基因和 1B/1R 易位的分子标记鉴定[J]. 麦类作物学报,2014,34(12):1619.
LI S Z,ZHENG J M,WU L,*et al*. Identification of high and low molecular weight glutenin genes and 1B/1R translocation in Sichuan wheat cultivars with molecular markers [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2014,34(12):1619.

[22]张星星,王召军,杨玉双,等. 利用 HMW-GS 全缺失突变体快速构建*Glu-1* 位点近等渗入系[J]. 作物学报,2016,42(8):1247.
ZHANG X X,WANG Z J,YANG Y S,*et al*. Rapid development of *Glu-1* locus near-isogenic introgression lines using HMW-GS deletion mutant [J]. *Acta Agronomica Sinica*,2016,42(8):1247.

[23]周 娜,马传喜,钱玉梅. 小麦多酚氧化酶概述[J]. 安徽农业科学,2009,37(17):7920.
ZHOU N,MA C X,QIAN Y M. Survey of polyphenol oxidase in wheat [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*,2009,37(17):7920.

[24]杨芳萍,刘亚男,郭 莹,等. 甘肃小麦品种(系)面制品色泽相关基因的分布规律[J]. 麦类作物学报,2015,35(8):1091.
YANG F P,LIU Y N,GUO Y,*et al*. Distribution of genes related to the colour of flour and dough in wheat cultivars of

Gansu Province [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(8): 1091.

[25]杨梦晨,崔 帅,杨雪敏,等. 311 份小麦品种(系)优质麦谷蛋白亚基组成分析[J]. 分子植物育种,2021,19(4):1169.
YANG M C, CUI S, YANG X M, *et al*. Analysis of high-quality glutenin subunit composition of 311 wheat varieties (lines) [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2021, 19(4): 1169.

[26]陈 泠,高春保,佟汉文,等. 小麦黄色素含量、多酚氧化酶活性和 1B/1R 异位相关基因的分子标记检测[J]. 湖北农业科学,2016,55(23):6050.
CHEN L, GAO C B, TONG H W, *et al*. Identification of genes associated with yellow pigment content, polyphenol oxidase activity and 1B/1R tanslocation in wheat using molecular markers [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2016, 55(23): 6050.

[27]刘春雷,杨 雪,张丽琴,等. 722 份河南省小麦新品系高分子量谷蛋白亚基多样性分析[J]. 河南农业科学,2015,44(4):46.
LIU C L, YANG X, ZHANG L Q, *et al*. Polymorphism analysis of HMW-GS in new wheat lines from Henan Province [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2015, 44(4): 46.

[28]ROGERS S O, BENDICH A J. Extraction of DNA from milligram amounts of fresh, herbarium and mummified plant tissues [J]. *Plant Molecular Biology*, 1985, 5(2): 69.

[29]张瑞奇,胡 琳,许为钢,等. 黄淮冬麦区不同时期大面积推广品种的高分子量麦谷蛋白亚基组成分析[J]. 麦类作物学报,2006,26(2):63.
ZHANG R Q, HU L, XU W G, *et al*. Composition analysis of HMW-GS in major wheat cultivars grown in Huanghuai Wheat Production Area at different periods [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2006, 26(2): 63.

[30]谢科军,朱保磊,孙家柱,等. 黄淮南片小麦高分子量谷蛋白亚基组成及其与品质的关系[J]. 麦类作物学报,2016,36(5):595.
XIE K J, ZHU B L, SUN J Z, *et al*. Composition of high molecular weight glutenin subunits of wheat varieties (lines) in Huang-Huai southern region and their relationship with quality [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(5): 595.

[31]王 丽,王正阳,牛吉山,等. 河南部分小麦育种亲本的高分子量麦谷蛋白亚基组成分析[J]. 河南农业大学学报,2012,46(2):115.
WANG L, WANG Z Y, NIU J S, *et al*. HMW-GS composition analysis of some wheat breeding parents in Henan wheat zone [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2012, 46(2): 115.

[32]胡 琳,盖钧镒,许为钢,等. 小麦不同高分子量谷蛋白亚基对面筋数量和质量的影响[J]. 麦类作物学报,2006,26(6):50.
HU L, GAI J Y, XU W G, *et al*. Effects of high molecular weight glutenin subunits on quantity and quality of wheat gluten [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2006, 26(6): 50.

[33]昝香存,常莹莹,韩留鹏,等. 冬小麦品种(系)品质相关基因的分子标记检测[J]. 麦类作物学报,2022,42(8):915.
ZAN X C, CHANG Y Y, HAN L P, *et al*. Molecular detection of quality-related genes in Chinese winter wheat cultivars [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(8): 915.

[34]张肖飞. 小麦低分子量麦谷蛋白基因的鉴定和功能分析[D]. 北京:中国农业科学院,2012.
ZHANG X F. Elucidating the composition and function of low-molecular-weight glutenin subunit genes in bread wheat [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.

[35]陈蕴文. 黄淮南片麦区小麦谷蛋白亚基多态性分析 [D]. 杨凌:西北农林科技大学,2015.
CHEN Y W. Polymorphism analysis of glutenin subunits in wheat from south yellow and Huai valley facultative wheat region in China [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.

[36]HE Z H, LIU L, XIA X C, *et al*. Composition of HMW and LMW glutenin subunits and their effects on dough properties, pan bread, and noodle quality of Chinese bread wheats [J]. *Cereal Chemistry*, 2005, 82(4): 345.

[37]陈 宏,陈 杰,赵立尚,等. 黄淮麦区小麦黄色素含量基因等位变异的分子检测[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版),2021,42(5):86.
CHEN H, CHEN J, ZHAO L S, *et al*. Molecular detection of yellow pigment genes in Huang-Huai wheat region [J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Science Edition)*, 2021, 42(5): 86.

[38]朱保磊,陈 宏,许娜丽,等. 1BL/1RS 易位系对小麦产量性状及品质性状的影响[J/OL]. 分子植物育种,2025. https://link.cnki.net/urlid/46.1068.s.20230531.1625.024.
ZHU B L, CHEN H, XU N L, *et al*. Effect of 1BL/1RS translocation on yield traits and quality characteristics in common wheat [J/OL]. *Molecular Plant Breeding*, 2025. https://link.cnki.net/urlid/46.1068.s.20230531.1625.024.

[39]张立平,何中虎,陆美琴,等. 用 Glu-B3、Gli-B1 和 SEC-1b 复合引物 PCR 检测普通小麦 1BL/1RS 易位系[J]. 中国农业科学,2003,36(12):1566.
ZHANG L P, HE Z H, LU M Q, *et al*. Identification of 1BL/1RS translocation *via* multiplex PCR markers of Glu-B3, Gli-B1 and SEC-1bin common wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(12): 1566.

[40]辛玉杰,刘继红,冯 丹,等. 2017—2021 年河南省小麦区域试验品种(系)的品质性状分析[J]. 河南农业科学,2023,52(2):31.
XIN Y J, LIU J H, FENG D, *et al*. Quality character analysis of wheat varieties (lines) in Henan regional tests from 2017 to 2021 [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2023, 52(2): 31.