

网络出版时间:2025-12-09

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20251208.1623.002

263 份黄淮南片麦区小麦新品种(系)粒重相关基因的等位变异鉴定

王羽¹, 郭昱潇¹, 孙天一¹, 郭鑫鑫¹, 林鹏威¹, 陈怡萱¹,

郭瑞¹, 李怡姿¹, 陈杰², 张亚婕³, 郑宏远¹

(1. 河南农业大学农学院, 河南郑州 450046; 2. 河南省驻马店市农业科学院小麦研究所, 河南驻马店 463000;

3. 河南省科学技术情报中心, 河南郑州 450003)

摘要:千粒重是现代小麦育种中遗传改良取得显著进展的关键产量构成因素之一, 深入研究控制小麦粒重的重要基因及其功能至关重要。本研究利用 5 个控制小麦粒重的相关基因 *TaSus2-2B*、*TaGW8-B1*、*TaCwi-A1*、*TaGS-D1* 和 *TaGW2-6A* 的分子标记对 2023—2024 年度参加国家黄淮南片麦区试验的 263 份小麦新品种(系)进行检测。在 263 份小麦品种(系)中, 各粒重相关基因均以组合形式存在, 5 个基因的优异单倍型共有 9 种组合类型, 分别为 *TaGW8-B1a* + *TaGW2-6A-A*、*TaSus2-2Ba* + *TaGW8-B1a* + *TaGW2-6A-A*、*TaGW8-B1a* + *TaGS-D1a* + *TaCwi-A1a*、*TaGW8-B1a* + *TaGS-D1a* + *TaGW2-6A-A*、*TaGW8-B1a* + *TaCwi-A1a* + *TaGW2-6A-A*、*TaSus2-2Ba* + *TaGW8-B1a* + *TaGS-D1a* + *TaGW2-6A-A*、*TaGW8-B1a* + *TaGS-D1a* + *TaCwi-A1a* + *TaGW2-6A-A*、*TaSus2-2Ba* + *TaGW8-B1a* + *TaCwi-A1a* + *TaGW2-6A-A*、*TaSus2-2Ba* + *TaGW8-B1a* + *TaGS-D1a* + *TaCwi-A1a* + *TaGW2-6A-A*。其中, *TaSus2-2Ba* + *TaGW8-B1a* + *TaGW2-6A-A* 组合分布频率最低, 为 1.90%; *TaGW8-B1a* + *TaGS-D1a* + *TaCwi-A1a* + *TaGW2-6A-A* 组合分布频率最高, 为 31.56%。进一步对 2023 年度种植在郑州和驻马店、2024 年度种植在新乡的 3 个环境下各品种(系)籽粒性状进行考察和分析发现, 在这 9 种基因组合类型中, *TaGW8-B1a* + *TaGW2-6A-A* 类型对提高小麦粒重的效应较低, 而聚合 5 个粒重优异基因的组合类型 *TaSus2-2Ba* + *TaGW8-B1a* + *TaGS-D1a* + *TaCwi-A1a* + *TaGW2-6A-A* 对小麦粒重的提升效应较高。这说明增加粒重优异基因(单倍型)数量能有效提高黄淮麦区小麦品种的粒重。

关键词:小麦; 粒重; 分子标记; 育种; 黄淮南片麦区

中图分类号: S512.1; S330

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2026)02-0174-13

Identification of Allelic Variations of Grain Weight-Related Genes in 263 New Wheat Varieties(Lines) in the Southern Area of the Huanghuai Wheat Region

WANG Yu¹, GUO Yuxiao¹, SUN Tianyi¹, GUO Xinxin¹, LIN Pengwei¹, CHEN Yixuan¹,

GUO Rui¹, LI Yizi¹, CHEN Jie², ZHANG Yajie³, ZHENG Hongyuan¹

(1. College of Agronomy, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450046, China;

2. Wheat Research Institute, Zhumadian Agricultural Academy of Sciences, Zhumadian, Henan 463000, China;

3. The Scientific and Technological Information Center of Henan, Zhengzhou, Henan 450003, China)

Abstract: Thousand-kernel weight is one of the key yield components in modern wheat breeding where significant progress has been made through genetic improvement. It is crucial to conduct in-depth research on the important genes controlling wheat kernel weight and their functions. In this study, molecular markers for five genes related to wheat kernel weight (*TaSus2-2B*, *TaGW8-B1*, *TaCwi-A1*, *TaGS-D1*, and *TaGW2-6A*) were used to test 263 new wheat varieties(lines) collected from the 2023–2024 national trials in the Huanghuai wheat region. Among these varieties (lines), all kernel

收稿日期: 2025-07-21

修回日期: 2025-12-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFF1000203); 驻马店市重点研发专项(ZMDSZDYF2024008)

第一作者 E-mail: wy1364669178@163.com(王羽)

通讯作者 E-mail: zhenghongyuan@henau.edu.cn(郑宏远); 465460728@qq.com(陈杰)

weight-related genes existed in combinations. There were nine types of combinations for the five prior haplotypes, specifically: *TaGW8-B1a* + *TaGW2-6A-A*, *TaSus2-2Ba* + *TaGW8-B1a* + *TaGW2-6A-A*, *TaGW8-B1a* + *TaGS-D1a* + *TaCwi-A1a*, *TaGW8-B1a* + *TaGS-D1a* + *TaGW2-6A-A*, *TaGW8-B1a* + *TaCwi-A1a* + *TaGW2-6A-A*, *TaSus2-2Ba* + *TaGW8-B1a* + *TaGS-D1a* + *TaGW2-6A-A*, *TaGW8-B1a* + *TaGS-D1a* + *TaCwi-A1a* + *TaGW2-6A-A*, *TaSus2-2Ba* + *TaGW8-B1a* + *TaCwi-A1a* + *TaGW2-6A-A*, and *TaSus2-2Ba* + *TaGW8-B1a* + *TaGS-D1a* + *TaCwi-A1a* + *TaGW2-6A-A*. Among these combinations, the *TaSus2-2Ba* + *TaGW8-B1a* + *TaGW2-6A-A* combination had the lowest frequency at 1.90%, while the *TaGW8-B1a* + *TaGS-D1a* + *TaCwi-A1a* + *TaGW2-6A-A* combination had the highest frequency at 31.56%. Further evaluation and analysis of kernel traits in 2023 in Zhengzhou and Zhumadian and in 2024 in Xinxiang revealed that among these nine gene combination types, the *TaGW8-B1a* + *TaGW2-6A-A* combination exhibited a relatively weak effect on increasing wheat kernel weight, whereas the combination type with five pyramided superior kernel weight-related alleles (*TaSus2-2Ba* + *TaGW8-B1a* + *TaGS-D1a* + *TaCwi-A1a* + *TaGW2-6A-A*) showed a relatively strong effect on improving wheat kernel weight. The results of this study indicated that increasing the number of superior kernel weight-related genes (haplotypes) could effectively enhance the kernel weight of wheat varieties in the Huanghuai wheat region.

Keywords: Wheat; Grain weight; Molecular marker; Breeding; Southern area of the Huanghuai wheat region

小麦 (*Triticum aestivum*, $2n = 6x = 42$) 是世界上最重要的粮食作物之一^[1], 全球约有 40% 的人口依赖小麦及其制品来满足日常所需的热量摄入。中国是世界第一小麦生产和消费大国, 小麦常年种植面积占粮食作物总面积的 22% 左右, 产量占粮食总产量的 20% 以上。黄淮南片麦区作为中国小麦生产核心区域, 其涵盖河南省大部分平原灌区 (除信阳市和南阳市南部部分地区外)、陕西省关中平原灌区以及江苏省淮北地区和安徽省沿淮及淮北地区, 常年小麦种植面积约占全国 30%, 对保障国家粮食安全具有战略意义。尽管现阶段小麦产量提升较快, 但是近年来随着国际局势日趋严峻、极端天气等问题的出现, 小麦生产仍面临巨大挑战^[2]。因此, 培育高产小麦品种对保障中国粮食安全非常重要。

小麦产量三要素由穗数、穗粒数和千粒重组成^[3], 其中千粒重主要由籽粒大小以及灌浆饱满度控制, 是现代小麦育种中遗传改良最为显著的产量性状^[4]。近年来, 针对控制小麦粒重基因的克隆已取得了诸多进展, 相关基因的优异单倍型也在分子育种中广泛应用^[5-6]。蔗糖合酶 (sucrose synthase, SUS) 基因是一种能在淀粉合成过程中起重要作用的关键基因^[7]。Jiang 等^[8]对小麦 II 型蔗糖合酶基因 *TaSus2* 进行分析, 将其定位于染色体 2A、2B 和 2D 上, 仅在 *TaSus2-2B* 基因中检测到 3 个单核苷酸多态性, 形成两个单倍

型 *TaSus2-2Ba* 和 *TaSus2-2Bb*。进一步关联分析表明, 不同单倍型间千粒重差异显著, 其中 *TaSus2-2Ba* 的平均千粒重比 *TaSus2-2Bb* 高 4.26 g, 即 *TaSus2-2Ba* 对千粒重有显著的正向效应, 是提高籽粒产量的优异等位基因型。此外, *GW8* 是一个能够调控作物籽粒发育的转录因子^[9]。Yan 等^[10]在普通小麦 7B 染色体上克隆到 *TaGW8-B1* 基因, 并利用全基因组关联分析证明 *TaGW8* 基因与小麦籽粒大小相关。进一步研究发现 *TaGW8-B1* 基因第一个内含子中有一个长度为 276 bp 转座子, 基于该差异开发共显性分子标记 *TaGW8-7B*。有转座子插入的基因命名为 *TaGW8-B1b*, 没有转座子插入的基因命名为 *TaGW8-B1a*。将两种单倍型与产量关联分析, 携带 *TaGW8-B1a* 的品种产量显著高于携带 *TaGW8-B1b* 的品种。而细胞壁转化酶 (cell wall invertase, CWI) 能够催化光合产物蔗糖分解为葡萄糖和果糖, 促进籽粒灌浆, 进而影响水稻和玉米的产量^[11-13]。Ma 等^[14]利用水稻中细胞壁转化酶基因 *CWI* 的相关信息, 克隆了普通小麦 2A 染色体上细胞壁转化酶基因 *TaCwi-A1*, 并针对该基因位点上的两个等位变异开发了显性互补标记 *CWI22* 和 *CWI21*。目前已有多项研究表明, 相较于 *TaCwi-A1b*, *TaCwi-A1a* 为控制高粒重的优异等位变异类型^[15-17]。另外, *OsGS3* 基因在控制水稻粒重和粒长方面起主要作用^[18]。Zhang 等在普通小麦 7DS 染色体上

克隆了水稻*OsGS3*的直系同源基因*TaGS-D1*,针对该基因位点开发了共显性功能标记*GS7D*,且通过农艺性状分析发现,携带*TaGS-D1*基因的等位变异类型*TaGS-D1a*的小麦品种产量显著高于携带等位变异类型*TaGS-D1b*的品种^[19-22]。Su等^[23]首次在小麦中克隆了*OsGW2*的同源基因*TaGW2*,在*TaGW2-6A*启动子区发现两个连锁 SNP(−593A/G 和 −739G/A),形成*TaGW2-6A-A*(−593A/−739G)和*TaGW2-6A-G*(−593G/−739A)两种单倍型,通过对 265 个中国小麦品种的关联分析,*TaGW2-6A-A*可显著增加千粒重,属于优异单倍型。Yang 等在小麦品种兰考大粒中发现*TaGW2-6A*的功能缺失优异等位突变^[24-25]。目前已明确*TaSus2-2B*、*TaGW8-B1*、*TaGS-D1*、*TaCwi-A1*和*TaGW2*为调控小麦粒重的关键基因,其优异单倍型(*TaSus2-2Ba*、*TaGW8-B1a*、*TaGS-D1a*、*TaCwi-A1a*和*TaGW2-6A-A*)在高产育种中效应显著。

本研究聚焦黄淮南片麦区参试的小麦新品种(系),解析控制小麦千粒重的 5 个重要基因等位变异的分布规律,为高粒重品种选育提供分子标记选择策略,推动该区域小麦高产精准育种的遗传资源优化与理论创新。

1 材料与amp;方法

1.1 供试材料

本试验所用材料为参加 2023—2024 年度国家黄淮南片麦区品种审定试验的豫州 601、西农 303、岱麦 519 等 263 份小麦新品种(系)(表 2),分别于 2023 年在郑州和驻马店、2024 年在新乡等地种植。

1.2 基因组 DNA 提取及分子标记检测

试验材料的基因组 DNA 提取参照陈杰等^[26]

和郑楠楠等^[27]的方法。选用*TaSus2-1*、*TaSus2-2*、*TaGW8-7B*、*GS7D*、*CWI22*和*CWI21*标记(表 1)分别对所有材料 DNA 进行 PCR 扩增。反应体系总体积 20.0 μL: Mix 10.0 μL, DNA 模板 1.0 μL,上下游引物各 0.4 μL, ddH₂O 8.2 μL。利用 1.5%~2.0%琼脂糖凝胶电泳检测 PCR 产物,使用中国北京君意东方电泳设备有限公司(型号: 590 nm)凝胶成像系统拍照保存。

采用 KASP 技术对供试材料的基因组 DNA 进行*GW2-6A*标记检测, KASP 反应体系总体积 10.0 μL: HiGen2×探针预混液 5.0 μL, SNP 引物预混液 0.1 μL, DNA 模板 4.0~50.0 ng, ddH₂O 补充至 10.0 μL。在罗氏 LightCycler 480 实时荧光定量 PCR 系统上,采用 KASP 分析平台,通过两个等位基因特异性反向引物的竞争性结合,实现对双等位基因 SNP 的分型;依据不同荧光基团标记引物产生的相对荧光单位值(RFU)差异判定样本的基因型(表 1)。

1.3 籽粒相关性状分析

本研究用万深 SC-G 型自动考种分析系统,对参试小麦品种(系)成熟籽粒的长、宽及千粒重等性状进行考察。

2 结果与分析

2.1 黄淮南片麦区 5 个主要粒重基因的分子标记检测结果

2.1.1 *TaSus2-2B*等位基因检测结果

利用*TaSus2-1*和*TaSus2-2*标记对 263 份供试材料进行检测,结果(图 1,表 2 和表 3)显示,皖科 800、周麦 49 号、华麦 2100 等 94 份材料可以扩增出 423 bp 的产物,为*TaSus2-2Ba*优异等位基因,占材料总份数的 35.74%;豫州 601、淮麦 2118 和西

表 1 本研究所用小麦粒重相关基因功能标记
Table 1 Functional markers of wheat kernel weight-related genes used in this study

基因 Gene	等位变异 Targeted allele	标记名称 Marker	引物序列 Primer sequence (5′-3′)		扩增片段 Size/bp
			F	R	
<i>TaSus2-2B</i>	<i>TaSus2-2Ba</i>	<i>TaSus2-1</i>	TAAGCGATGAATTATGGC	GGTGTCTCTGAGCTTCTGG	423
	<i>TaSus2-2Bb</i>	<i>TaSus2-2</i>	CTATAGTATGAGCTGGATCAATGGC	GGTGTCTCTGAGCTTCTGA	381
<i>TaGW8-B1</i>	<i>TaGW8-B1a/TaGW8-B1b</i>	<i>TaGW8-7B</i>	CGCTCATCCATTCTTCATCG	GCTATATGGGTTGGTGTCCG	1 097/1 373
<i>TaGS-D1</i>	<i>TaGS-D1a/TaGS-D1b</i>	<i>GS7D</i>	AACTTAGGGAGCGAAAACAA	CACCAAGACTGGAGATGAAA	566/522
<i>TaCwi-A1</i>	<i>TaCwi-A1a</i>	<i>CWI22</i>	GGTGATGAGTTTCATGGTTAAT	AGAAGCCCAACATTAAATCAAC	402
	<i>TaCwi-A1b</i>	<i>CWI21</i>	GTGGTGATGAGTTTCATGGTTAAG	AGAAGCCCAACATTAAATCAAC	404
<i>TaGW2-6A</i>	<i>TaGW2-6A-A</i>	<i>GW2-6A-A</i>	GAAGGTGACCAAGTTTCATGCTGG TCGATGAGATCCCGTACAA	CGAGCTAGGGTTTGTTCGCGAGC	SNP:A
	<i>TaGW2-6A-G</i>	<i>GW2-6A-G</i>	GAAGGTGCGAGTCAACGGATT GGTCGATGAGATCCCGTACAG	CGAGCTAGGGTTTGTTCGCGAGC	SNP:G

TaSus2-2Ba、*TaGW8-B1a*、*TaGS-D1a*、*TaCwi-A1a*和*TaGW2-6A-A*为优异单倍型。
TaSus2-2Ba、*TaGW8-B1a*、*TaGS-D1a*、*TaCwi-A1a* and *TaGW2-6A-A* are superior haplotypes.

农 303 等 169 份材料可以扩增出 381 bp 的条带,为 *TaSus2-2Bb* 等位基因,占材料总份数的 64.26%。以上数据表明控制低千粒重的等位基因 *TaSus2-2Bb* 所占比例大。

2.1.2 *TaGW8-B1* 等位基因检测结果

利用 *TaGW8-7B* 标记对 263 份供试材料的检测结果(图 2,表 2 和表 3)显示,豫农 612、泛育麦 40、阜麦 1508 等 263 份材料均扩增出 1 097 bp 的产物,属于 *TaGW8-B1a* 优异单倍型,分布频率为 100%。这表明 263 份材料全部为 *TaGW8-B1a* 优异单倍型。

2.1.3 *TaGS-D1* 等位基因检测结果

在 *TaGS-D1* 位点,采用 *GS7D* 标记对 263 份供试材料进行检测,结果(图 3,表 2 和表 3)显示,周麦 36 号、淮核 21126、岱麦 519 等 210 份材料可以扩增出 562 bp 的条带,为 *TaGS-D1a* 优异单倍型,所占比例为 79.85%,在被检测材料中分布频率较高;豫州 601、皖科 800、存麦 38 等 53 份材料可以扩增出 522 bp 的条带,为 *TaGS-D1b* 等位基因,所占比例为 20.15%。

2.1.4 *TaCwi-A1* 等位基因检测结果

利用 *CWI22* 和 *CWI21* 标记对 263 份供试材料进行 *TaCwi-A1* 位点检测,结果(图 4,表 2 和表 3)显示,淮麦 2118、周麦 36 号、华麦 2100 等 164 份

材料可以扩增出 402 bp 的条带,属于 *TaCwi-A1a* 优异单倍型,分布频率为 62.36%;豫州 601、驻麦 599、豫农 612 等 99 份材料可以扩增出 404 bp 条带,属于 *TaCwi-A1b* 等位基因,分布频率为 37.64%。说明控制高千粒重的优异等位基因型 *TaCwi-A1a* 在检测材料中分布频率较高。

2.1.5 *TaGW2-6A* 等位基因检测结果

针对 *TaGW2-6A* 位点利用 KASP 标记进行基因分型,不同单倍型产生不同的荧光信号,两种基因型可明确区分: *TaGW2-6A-A* 单倍型呈橙色荧光信号(图 5 右下角),频率分布为 97.0%(表 2); *TaGW2-6A-G* 单倍型为蓝色荧光信号(图 5 左上角),频率分布为 3.0%(表 2);控制高千粒重的优异等位基因型 *TaGW2-6A-A* 在检测材料中分布频率较高。

2.2 263 份材料不同基因型组合的分布

在黄淮南片麦区 263 份参试材料中,没有某一粒重基因单独存在的类型,各粒重基因均以组合形式存在,5 个粒重优异基因的组合类型共有 9 种(表 3),分别为 *TaGW8-B1a + TaGW2-6A-A*、*TaSus2-2Ba + TaGW8-B1a + TaGW2-6A-A*、*TaGW8-B1a + TaGS-D1a + TaCwi-A1a*、*TaGW8-B1a + TaCwi-A1a + TaGW2-6A-A*、*TaGW8-B1a +*

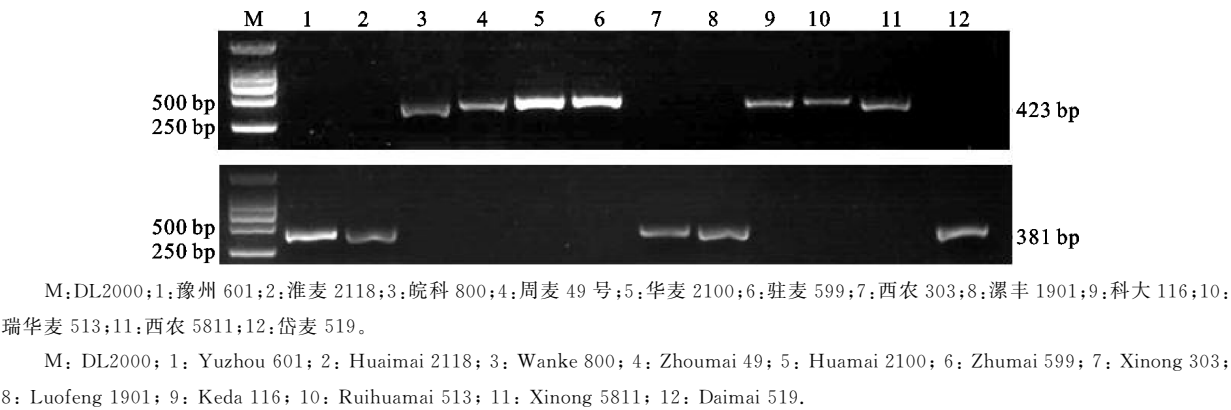


图 1 *TaSus2-1/TaSus2-2* 标记对部分材料的检测结果

Fig. 1 Detection results of the marker *TaSus2-1/TaSus2-2* in some of the tested materials

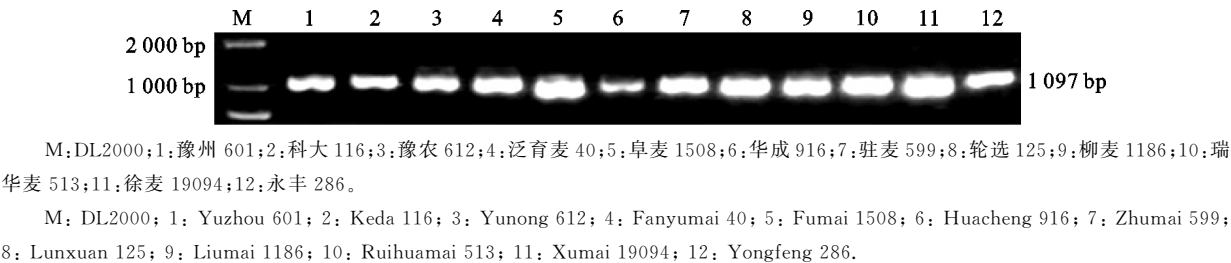
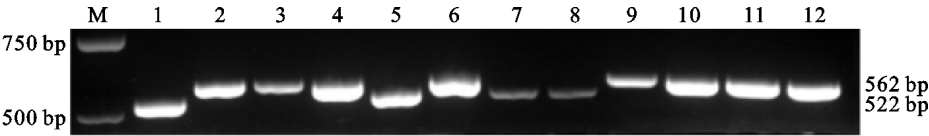


图 2 *TaGW8-7B* 标记对部分材料的检测结果

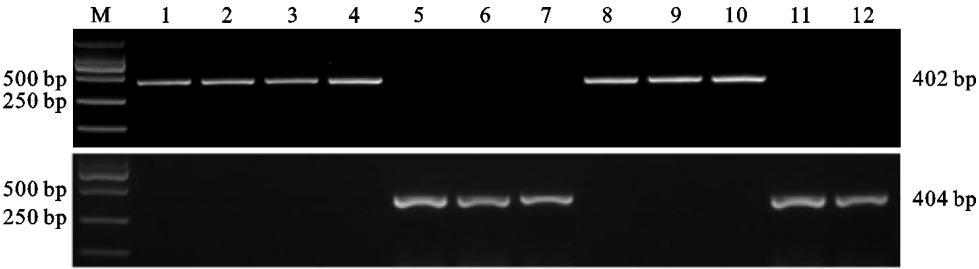
Fig. 2 Detection results of marker *TaGW8-7B* in some of the tested materials



M:DL2000;1:豫州 601;2:周麦 36 号;3:淮核 21126;4:岱麦 519;5:皖科 800;6:豫农 612;7:存麦 38;8:驻麦 599;9:泛育麦 40;10:柳麦 1186;11:徐麦 19094;12:永丰 286。
M:DL2000; 1: Yuzhou 601; 2: Zhoumai 36; 3: Huaihe 21126; 4: Daimai 519; 5: Wanke 800; 6: Yunong 612; 7: Cunmai 38; 8: Zhumai 599; 9: Fanyumai 40; 10: Liumai 1186; 11: Xumai 19094; 12: Yongfeng 286.

图 3 *GS7D* 标记在部分供试材料中的检测结果

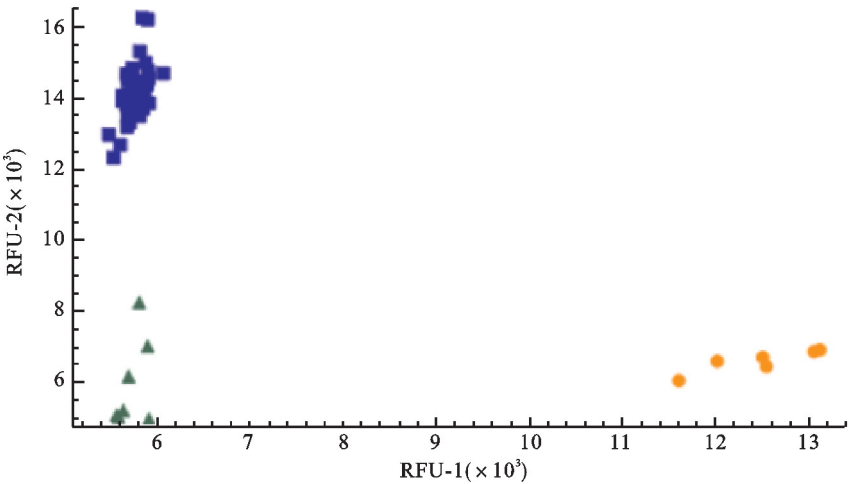
Fig. 3 Detection results of marker *GS7D* in some of the tested materials



M:DL2000;1:淮麦 2118;2:周麦 36 号;3:华麦 2100;4:西农 303;5:豫州 601;6:驻麦 599;7:豫农 612;8:漯丰 1901;9:瑞华麦 513;10:西农 5811;11:阜麦 1508;12:徐麦 19094。
M: DL2000; 1: Huaimai 2118; 2: Zhoumai 36; 3: Huamai 2100; 4: Xinong 303; 5: Yuzhou 601; 6: Zhumai 599; 7: Yunong 612; 8: Luofeng 1901; 9: Ruihuamai 513; 10: Xinong 5811; 11: Fumai 1508; 12: Xumai 19094.

图 4 *CWI22/CWI21* 标记在部分供试材料中的检测结果

Fig. 4 Detection results of marker *CWI22/CWI21* in some of the tested materials



橙色荧光信号为 *TaGW2-6A-A*; 蓝色荧光信号为 *TaGW2-6A-G*; 绿色荧光信号为阴性对照。
Orange fluorescent signal is *TaGW2-6A-A*; Blue fluorescent signal is *TaGW2-6A-G*; Green fluorescent signal is negative control.

图 5 单倍型 *TaGW2-6A-A/TaGW2-6A-G* 在部分材料中的检测结果

Fig. 5 Detection results of haplotype *TaGW2-6A-A/TaGW2-6A-G* in some materials

TaGS-D1a + *TaGW2-6A-A*、*TaSus-2-2Ba* + *TaGW8-B1a* + *TaCwi-A1a* + *TaGW2-6A-A*、*TaSus-2-2Ba* + *TaGW8-B1a* + *TaGS-D1a* + *TaGW2-6A-A*、*TaGW8-B1a* + *TaGS-D1a* + *TaCwi-A1a* + *TaGW2-6A-A*、*TaSus-2-2Ba* + *TaGW8-B1a* + *TaGS-D1a* + *TaCwi-A1a* + *TaGW2-6A-A*。其中, 聚合 2 个粒重优异基因 *TaGW8-B1a* + *TaGW2-6A-A* 组

合的有 11 份材料, 占全部材料的 4.18%。聚合 3 个粒重优异基因组合类型有 4 种, *TaSus-2-2Ba* + *TaGW8-B1a* + *TaGW2-6A-A* 组合有 5 份材料, 占全部材料的 1.90%; *TaGW8-B1a* + *TaGS-D1a* + *TaCwi-A1a* 组合有 8 份材料, 占全部材料的 3.04%; *TaGW8-B1a* + *TaCwi-A1a* + *TaGW2-6A-A* 组合

表 2 263 份材料单倍型检测结果
Table 2 Detection results of the haplotypes in 263 materials

编号 Number	材料 Material	基因型 Genotype				材料 Material	基因型 Genotype			
		TaSus2-2B	TaCwI-A1	TaGS-D1	TaGW2-6A		TaSus2-2B	TaCwI-A1	TaGS-D1	TaGW2-6A
1	艾麦 519 Aimai 519	b	a	a	a	天益科麦 11 Tianyikemai 11	b	a	a	a
2	安科 1703 Anke 1703	b	a	b	a	天益科麦 15 Tianyikemai 15	b	a	a	b
3	安科 1701 Anke 1701	b	a	a	a	天益科麦 18 Tianyikemai 18	b	a	b	a
4	安科 1907 Anke 1907	b	a	a	a	皖科 421 Wanke 421	a	a	a	b
5	安科 2006 Anke 2006	b	a	a	a	皖科 800 Wanke 800	a	a	a	b
6	安科 2105 Anke 2105	b	a	b	a	涡麦 179 Womai 179	b	a	a	a
7	安科 2203 Anke 2203	b	a	a	a	涡麦 44 Womai 44	a	a	a	a
8	安农 1928 Annong 1928	a	a	b	a	涡育 16 Woyu 16	a	a	a	a
9	安农 859 Annong 859	b	a	b	a	武农 159 Wunong 159	a	a	b	a
10	百农成竹 21 Bainongchengzhu 21	b	a	b	a	XM1186	a	a	a	b
11	百农滑润 175 Bainonghuanun 175	b	a	a	b	西纯 258 Xichun 258	b	a	b	a
12	保丰 1803 Baofeng 1803	b	a	b	a	西纯 29 Xichun 29	b	a	a	a
13	保丰 1903 Baofeng 1903	b	a	a	a	西麦 A1 Ximai A1	a	a	a	a
14	保丰 216 Baofeng 216	a	a	a	a	西农 1152 Xinong 1152	b	a	a	a
15	保丰 225 Baofeng 225	b	a	b	a	西农 1155 Xinong 1155	b	a	a	a
16	保麦 1633 Baomai 1633	b	a	a	b	西农 1156 Xinong 1156	b	a	b	a
17	19CA97	b	a	a	a	西农 12 Xinong 12	a	a	a	b
18	21CA96	b	a	b	a	西农 1522 Xinong 1522	b	a	a	a
19	春晓 112 Chunxiao 112	b	a	a	a	西农 156 Xinong 156	b	a	b	a
20	存麦 255 Cunmai 255	b	a	a	a	西农 161 Xinong 161	a	a	b	a
21	存麦 29 Cunmai 29	a	a	b	a	西农 1668 Xinong 1668	b	a	a	a
22	存麦 38 Cunmai 38	a	a	b	a	西农 1871 Xinong 1871	b	a	a	a
23	岱麦 519 Daimai 519	b	a	a	a	西农 2562 Xinong 2562	a	a	a	a
24	德宏福 199 Dehongfu 199	b	a	a	a	西农 303 Xinong 303	b	a	a	a
25	德宏福麦 21 Dehongfumai 21	b	a	a	a	西农 3763 Xinong 3763	b	a	b	a
26	德宏福麦 22 Dehongfumai 22	b	a	a	b	西农 5189 Xinong 5189	b	a	a	a
27	德研 1658 Deyan 1658	b	a	a	a	西农 5195 Xinong 5195	a	a	b	a
28	泛育麦 32 Fanyumai 32	a	a	a	a	西农 5199 Xinong 5199	b	a	a	a
29	泛育麦 40 Fanyumai 40	b	a	a	b	西农 579 Xinong 579	b	a	a	a
30	丰工 40 Fenggong 40	b	a	b	a	西农 5811 Xinong 5811	a	a	a	a
31	丰工 41 Fenggong 41	b	a	a	a	西农 586 Xinong 586	b	a	b	a
32	福麦 505 Fumai 505	b	a	a	a	西农 609 Xinong 609	b	a	b	a

(续表 2 Continued table 2)

编号 Number	材料 Material	基因型 Genotype				编号 Number	材料 Material	基因型 Genotype			
		TaSus2-2B	TaGW8-B1	TaCwi-A1	TaGS-D1			TaSus2-2B	TaGW8-B1	TaCwi-A1	TaGS-D1
33	阜麦 1008 Fumai 1008	b	a	a	a	165	西农 612 Xinong 612	b	a	a	a
34	阜麦 1508 Fumai 1508	b	a	b	a	166	西农 633 Xinong 633	b	a	b	a
35	阜麦 16 Fumai 16	a	a	a	b	167	西农 635 Xinong 635	b	a	a	a
36	阜麦 1699 Fumai 1699	b	a	b	a	168	西农 809 Xinong 809	a	a	a	a
37	冠麦 12 Guanmai 12	a	a	b	a	169	西农 816 Xinong 816	a	a	a	a
38	冠麦 13 Guanmai 13	b	a	a	a	170	西农 819 Xinong 819	b	a	b	a
39	HG2101	b	a	a	b	171	西农 839 Xinong 839	b	a	b	a
40	恒进麦 20 号 Hengjinmai 20	b	a	a	a	172	西农 862 Xinong 862	b	a	b	a
41	弘麦 211 Hongmai 211	b	a	a	a	173	西农 867 Xinong 867	b	a	a	a
42	华成 138 Huacheng 138	a	a	b	a	174	西农 9112 Xinong 9112	b	a	a	a
43	华成 9137 Huacheng 9137	a	a	b	b	175	西农 9198 Xinong 9198	a	a	a	b
44	华成 916 Huacheng 916	b	a	b	b	176	西农 926 Xinong 926	b	a	b	a
45	华成 9169 Huacheng 9169	a	a	a	b	177	西农 963 Xinong 963	b	a	a	a
46	华冠 301 Huaguan 301	b	a	a	a	178	现麦 686 Xianmai 686	b	a	a	a
47	华光 8 号 Huaguang 8	b	a	a	a	179	协作 1 号 Xiezuo 1	a	a	a	a
48	华麦 2003 Huamai 2003	b	a	b	a	180	新丰 88 Xinfeng 88	a	a	a	a
49	华麦 2100 Huamai 2100	a	a	a	a	181	新科麦 176 Xinkemai 176	a	a	a	a
50	淮丰 36 Huafeng 36	b	a	a	a	182	新科麦 186 Xinkemai 186	a	a	a	a
51	淮核 21126 Huahe 21126	a	a	b	a	183	新科麦 195 Xinkemai 195	b	a	a	a
52	淮核 22220 Huahe 22220	b	a	b	a	184	新麦 65 Xinmai 65	b	a	a	a
53	淮麦 16659 Huaimai 16659	b	a	b	a	185	新麦 66 Xinmai 66	b	a	a	b
54	淮麦 2118 Huaimai 2118	b	a	a	a	186	新麦 72 Xinmai 72	b	a	a	a
55	淮麦 404 Huaimai 404	b	a	b	a	187	新麦 78 Xinmai 78	b	a	a	b
56	济麦 220014 Jimai 220014	b	a	a	a	188	新麦 85 Xinmai 85	a	a	a	a
57	稷麦 337 Jimai 337	b	a	b	b	189	新农 9866 Xinnong 9866	a	a	a	a
58	九圣禾 169 Jiushenghe 169	b	a	b	a	190	新世纪 2 号 Xinsheji 2	a	a	a	a
59	巨良 1208 Juliang 1208	a	a	a	a	191	新世纪 9 号 Xinsheji 9	a	a	a	a
60	科大 116 Keda 116	a	a	b	a	192	信粮 16 号 Xinliang 16	b	a	a	a
61	科聚金 6 号 Kejulin 6	b	a	a	a	193	信粮 18 号 Xinliang 18	b	a	a	a
62	科麦 1609 Kemai 1609	b	a	a	a	194	徐麦 17106 Xumai 17106	b	a	a	a
63	LS01897	b	a	a	a	195	徐麦 18197 Xumai 18197	b	a	a	a
64	连麦 1901 Lianmai 1901	b	a	a	a	196	徐麦 19094 Xumai 19094	a	a	b	a
65	连麦 221 Lianmai 221	b	a	b	a	197	徐麦 21230 Xumai 21230	a	a	a	a

(续表 2 Continued table 2)

编号 Number	材料 Material	基因型 Genotype				编号 Number	材料 Material	基因型 Genotype			
		TaSus2-2B	TaGW8-B1	TaCwi-A1	TaGS-D1			TaSus2-2B	TaGW8-B1	TaCwi-A1	TaGS-D1
66	联丰 1503 Lianfeng 1503	b	a	a	a	198	许科 108 Xuke 108	b	a	b	a
67	良丰 46 Liangfeng 46	b	a	a	a	199	许科 13 Xuke 13	b	a	b	a
68	良科 6 号 Liangke 6	a	a	a	a	200	许科 16 Xuke 16	a	a	a	a
69	良科珍珠 15 Liangkezhenzhu 15	b	a	a	a	201	许麦 2198 Xumai 2198	a	a	a	a
70	柳麦 1186 Liumai 1186	b	a	a	a	202	许研 6 号 Xuyan 6	a	a	a	b
71	柳麦 521 Liumai 521	b	a	a	a	203	yx2021	b	a	a	a
72	柳麦 526 Liumai 526	b	a	a	a	204	炎麦 369 Yanmai 369	a	a	a	a
73	垄皇 1 号 Longhuang 1	b	a	a	b	205	偃亳 369 Yanbo 369	b	a	b	a
74	轮选 125 Lunxuan 125	b	a	a	a	206	偃高 160 Yangao 160	a	a	a	a
75	轮选 136 Lunxuan 136	a	a	a	a	207	偃高 167 Yangao 167	a	a	a	b
76	轮选 142 Lunxuan 142	b	a	b	a	208	偃高 41 Yangao 41	a	a	a	b
77	轮选 147 Lunxuan 147	b	a	b	a	209	英强 1 号 Yingqiang 1	a	a	b	a
78	轮选 148 Lunxuan 148	a	a	a	a	210	永丰 206 Yongfeng 206	a	a	b	b
79	轮选 2116 Lunxuan 2116	b	a	b	a	211	永丰 286 Yongfeng 286	a	a	b	a
80	轮选 369 Lunxuan 369	a	a	a	a	212	永丰 308 Yongfeng 308	a	a	b	b
81	洛麦 56 Luomai 56	b	a	a	b	213	永民麦 2 号 Yongminmai 2	b	a	b	a
82	洛麦 66 Luomai 66	a	a	b	a	214	豫农 612 Yunong 612	b	a	b	a
83	漯丰 1901 Luofeng 1901	b	a	a	a	215	豫农 821 Yunong 821	b	a	b	a
84	漯丰 1906 Luofeng 1906	b	a	b	a	216	豫农 905 Yunong 905	a	a	b	a
85	漯丰 2101 Luofeng 2101	b	a	a	a	217	豫农 907 Yunong 907	b	a	a	b
86	漯丰 7011 Luofeng 7011	b	a	b	a	218	豫农 923 Yunong 923	b	a	a	a
87	漯麦 109 Luomai 109	b	a	b	b	219	豫农 937 Yunong 937	b	a	a	a
88	漯麦 117 Luomai 117	a	a	b	a	220	豫农 938 Yunong 938	a	a	a	a
89	漯麦 69 Luomai 69	b	a	a	a	221	豫同 120 Yutong 120	b	a	a	a
90	漯麦 70 Luomai 70	b	a	b	a	222	豫同 123 Yutong 123	a	a	a	a
91	漯麦 71 Luomai 71	b	a	a	b	223	豫州 601 Yuzhou 601	b	a	b	b
92	漯研 201 Luoyan 201	b	a	a	a	224	郑大 181 Zhengda 181	a	a	b	a
93	m151	a	a	a	b	225	郑大 201 Zhengda 201	a	a	b	a
94	民研 186 Minyan 186	b	a	b	b	226	郑麦 163 Zhengmai 163	b	a	b	a
95	农大 185 Nongda 185	a	a	a	b	227	郑麦 181 Zhengmai 181	b	a	b	b
96	农大 759 Nongda 759	a	a	a	b	228	郑麦 1906 Zhengmai 1906	a	a	b	a
97	农科 1132 Nongke 1132	b	a	a	a	229	郑麦 1921 Zhengmai 1921	a	a	b	a
98	农信 188 Nongxin 188	a	a	a	b	230	郑麦 1926 Zhengmai 1926	b	a	b	a
99	农信 699 Nongxin 699	a	a	a	a	231	郑麦 201 Zhengmai 201	b	a	a	a

(续表 2 Continued table 2)

编号 Number	材料 Material	基因型 Genotype				编号 Number	材料 Material	基因型 Genotype			
		TaSus2-2B	TaCwi-1a	TaGS-D1a	TaGW2-6A			TaSus2-2B	TaCwi-1a	TaGS-D1a	TaGW2-6A
100	21P46	b	a	a	a	232	郑麦 216 Zhengmai 216	b	a	a	a
101	平安 12 号 Pingan 12	b	a	a	a	233	郑麦 226 Zhengmai 226	b	a	b	a
102	平安 16 号 Pingan 16	b	a	a	a	234	郑麦 23 Zhengmai 23	a	a	b	a
103	平安 18 Pingan 18	b	a	b	a	235	郑麦 27 Zhengmai 27	a	a	a	a
104	平安 20 Pingan 20	b	a	b	a	236	郑麦 33 Zhengmai 33	a	a	b	a
105	平安 25 Pingan 25	b	a	a	a	237	郑麦 6166 Zhengmai 6166	a	a	b	a
106	濮麦 126 Puma1 126	a	a	a	a	238	郑麦 916 Zhengmai 916	b	a	b	a
107	濮麦 186 Puma1 186	a	a	b	a	239	郑麦 917 Zhengmai 917	b	a	b	a
108	濮麦 196 Puma1 196	b	a	b	a	240	郑麦 918 Zhengmai 918	a	a	b	a
109	濮兴 26 号 Puxing 26	b	a	a	a	241	职院 171 Zhiyuan 171	b	a	a	a
110	濮兴 35 号 Puxing 35	b	a	a	a	242	中金 795 Zhongjin 795	b	a	b	a
111	濮兴 40 号 Puxing 40	b	a	a	a	243	中麦 236 Zhongmai 236	a	a	b	a
112	普冰 30538 Pubing 30538	b	a	b	a	244	中麦 255 Zhongmai 255	a	a	a	a
113	普冰 56 Pubing 56	b	a	b	a	245	中麦 6301 Zhongmai 6301	a	a	b	a
114	普冰资 4696 Pubingzi 4696	a	a	b	a	246	中麦 6321 Zhongmai 6321	b	a	b	a
115	泉麦 39 Quanmai 39	a	a	b	a	247	中偃 268 Zhongyan 268	a	a	b	a
116	瑞华 501 Ruihua 501	b	a	a	b	248	中偃 270 Zhongyan 270	b	a	b	a
117	瑞华麦 236 Ruihuamai 236	b	a	b	a	249	中育 049 Zhongyu 049	b	a	b	a
118	瑞华麦 513 Ruihuamai 513	a	a	a	b	250	中育 130 Zhongyu 130	b	a	b	a
119	SN1463	a	a	a	a	251	中原 26 Zhongyuan 26	a	a	a	a
120	山农 1695 Shannong 1695	b	a	a	a	252	中原国科 20 Zhongyanguoke 20	a	a	a	a
121	商麦 185 Shangmai 185	b	a	a	a	253	中植麦 16 Zhongzhimai 16	a	a	b	a
122	商麦 187 Shangmai 187	b	a	a	b	254	中植麦 22 Zhongzhimai 22	a	a	a	a
123	商麦 198 Shangmai 198	b	a	a	b	255	中植麦 23 Zhongzhimai 23	a	a	b	a
124	商麦 206 Shangmai 206	b	a	a	b	256	周麦 36 号 Zhoumai 36	b	a	a	a
125	商麦 207 Shangmai 207	b	a	b	a	257	周麦 49 号 Zhoumai 49	a	a	b	a
126	盛麦源 7195 Shengmai yuan 7195	b	a	a	a	258	周麦 52 号 Zhoumai 52	a	a	b	a
127	盛麦源 789 Shengmai yuan 789	b	a	a	b	259	周麦 54 号 Zhoumai 54	a	a	b	a
128	盛麦源 928 Shengmai yuan 928	b	a	a	b	260	驻麦 548 Zhumai 548	a	a	a	a
129	石 6186 Shi 6186	b	a	a	a	261	驻麦 559 Zhumai 559	a	a	a	a
130	顺麦 17 Shunmai 17	b	a	a	a	262	驻麦 569 Zhumai 569	b	a	b	a
131	宿 078 Su 078	b	a	a	b	263	驻麦 599 Zhumai 599	a	a	b	a
132	天宁 138 Tianning 138	b	a	a	a						

a 代表TaSus2-2Ba, TaGW8-B1a, TaGS-D1a和TaGW2-6A-A; b 代表TaSus2-2Bb, TaGW8-B1b, TaGS-D1b, TaCwi-1Ib和TaGW2-6A-G.
a means TaSus2-2Ba, TaGW8-B1a, TaGS-D1a, TaCwi-1Ia, or TaGW2-6A-A; b means TaSus2-2Bb, TaGW8-B1b, TaGS-D1b, TaCwi-1Ib, or TaGW2-6A-G.

表 3 粒重基因优异单倍型组合及其对应的参试材料

Table 3 Superior haplotype profiles of grain weight genes and the corresponding wheat materials

粒重基因组合 Combination of the grain weight genes	数量(占比) Number (Percentage)	材料名称 Name of materials
<i>TaGW8-B1a + TaGW2-6A-A</i>	11(4.18%)	华成 916、稷麦 337、漯麦 109、民研 186、普冰 30538、普冰 56、豫州 601、郑麦 181、郑麦 226、中麦 6321、中育 130
<i>TaSus2-2Ba + TaGW8-B1a + TaGW2-6A-A</i>	5(1.90%)	存麦 38、华成 9137、驻麦 599、永丰 206、永丰 308
<i>TaGW8-B1a + TaGS-D1a + TaCwi-A1a</i>	8(3.04%)	百农滑润 175、保麦 1633、德宏福麦 22、泛育麦 40、LS01897、垄皇 1 号、新麦 66、新麦 78
<i>TaGW8-B1a + TaCwi-A1a + TaGW2-6A-A</i>	17(6.46%)	19CA97、21CA96、丰工 40、HG2101、洛麦 56、漯麦 71、瑞华 501、商麦 187、商麦 198、商麦 206、盛麦源 789、盛麦源 928、宿 078、天益科麦 15、西纯 258、新麦 72、豫农 907
<i>TaGW8-B1a + TaGS-D1a + TaGW2-6A-A</i>	50(19.01%)	安科 1703、安科 2105、安农 859、百农成竹 21、保丰 1803、保丰 225、阜麦 1508、阜麦 1699、华麦 2003、淮核 22220、淮麦 16659、淮麦 404、九圣禾 169、连麦 221、轮选 142、轮选 147、轮选 2116、漯丰 1906、漯丰 7011、漯麦 70、平安 18、平安 20、濮麦 196、瑞华麦 236、商麦 207、天益科麦 18、西农 1156、西农 156、西农 3763、西农 586、西农 609、西农 633、西农 819、西农 839、西农 862、西农 926、许科 108、许科 13、偃毫 369、永民麦 2 号、豫农 612、豫农 821、郑麦 163、郑麦 1926、郑麦 916、郑麦 917、中金 795、中偃 270、中育 049、驻麦 569
<i>TaSus2-2Ba + TaGW8-B1a + TaCwi-A1a + TaGW2-6A-A</i>	20(7.60%)	阜麦 16、华成 9169、m151、农大 185、农大 759、农信 188、普冰资 4696、瑞华麦 513、皖科 421、皖科 800、XM1186、西农 12、西农 809、西农 816、西农 9198、许研 6 号、偃高 167、偃高 41、中原国科 20、驻麦 559
<i>TaSus2-2Ba + TaGW8-B1a + TaGS-D1a + TaGW2-6A-A</i>	33(12.55%)	安农 1928、存麦 29、冠麦 12、华成 138、淮核 21126、科大 116、洛麦 66、漯麦 117、濮麦 186、泉麦 39、武农 159、西农 161、西农 5195、徐麦 19094、英强 1 号、永丰 286、豫农 905、郑大 181、郑大 201、郑麦 1906、郑麦 1921、郑麦 23、郑麦 33、郑麦 6166、郑麦 918、中麦 236、中麦 6301、中偃 268、中植麦 16、中植麦 23、周麦 49 号、周麦 52 号、周麦 54 号
<i>TaGW8-B1a + TaGS-D1a + TaCwi-A1a + TaGW2-6A-A</i>	83(31.56%)	艾麦 519、安科 1901、安科 1907、安科 2006、安科 2203、保丰 1903、春晓 112、存麦 255、岱麦 519、德宏福 199、德宏福麦 21、德研 1658、丰工 41、福麦 505、阜麦 1008、冠麦 13、恒进麦 20 号、弘麦 211、华冠 301、华光 8 号、淮丰 36、淮麦 2118、济麦 220014、科聚金 6 号、科麦 1609、连麦 1901、联丰 1503、良丰 46、良科珍珠 15、柳麦 1186、柳麦 521、柳麦 526、轮选 125、漯丰 1901、漯丰 2101、漯麦 69、漯研 201、农科 1132、21P46、平安 12 号、平安 16 号、平安 25、濮兴 26 号、濮兴 35 号、濮兴 40 号、山农 1695、商麦 185、盛麦源 7195、石 6186、顺麦 17、天宁 138、天益科麦 11、渦麦 179、西纯 29、西农 1152、西农 1155、西农 1522、西农 1668、西农 1871、西农 303、西农 5189、西农 5199、西农 579、西农 612、西农 635、西农 867、西农 9112、西农 963、现麦 686、新科麦 195、新麦 65、信粮 16 号、信粮 18 号、徐麦 17106、徐麦 18197、yx2021、豫农 923、豫农 937、豫同 120、郑麦 201、郑麦 216、职院 171、周麦 36 号
<i>TaSus2-2Ba + TaGW8-B1a + TaGS-D1a + TaCwi-A1a + TaGW2-6A-A</i>	36(13.69%)	保丰 216、泛育麦 32、华麦 2100、巨良 1208、良科 6 号、轮选 136、轮选 148、轮选 369、农信 699、濮麦 126、SN1463、渦麦 44、渦育 16、西麦 A1、西农 2562、西农 5811、协作 1 号、新丰 88、新科麦 176、新科麦 186、新麦 85、新农 9866、新世纪 2 号、新世纪 9 号、徐麦 21230、许科 16、许麦 2198、炎麦 369、偃高 160、豫农 938、豫同 123、郑麦 27、中麦 255、中原 26、中植麦 22、驻麦 548

有 17 份材料,占全部材料的 6.46%;*TaGW8-B1a + TaGS-D1a + TaGW2-6A-A* 组合有 50 份材料,占全部材料的 19.01%。聚合 4 个粒重优异基因组合类型有 3 种,*TaSus2-2Ba + TaGW8-B1a + TaCwi-A1a + TaGW2-6A-A* 组合有 20 份材料,占全部材料的 7.60%;*TaSus2-2Ba + TaGW8-B1a + TaGS-D1a + TaGW2-6A-A* 组合有 33 份材料,占全部材料的 12.55%;*TaGW8-B1a + TaCwi-A1a + TaGS-D1a + TaGW2-6A-A* 组合有 83 份材料,占全部材料的 31.56%。聚合 5 个粒重优异基因组合类型*TaSus2-2Ba + TaGW8-B1a + TaGS-D1a + TaCwi-A1a + TaGW2-6A-A* 的材料有 36 份,占全部材料的 13.69%。

2.3 不同粒重基因优异单倍型组合对千粒重的影响

根据黄淮南片麦区 263 个参试材料中 5 个主

要粒重基因(*TaSus2-2B*、*TaGW8-B1*、*TaGS-D1*、*TaCwi-A1* 和 *TaGW2-6A*) 的检测结果和 3 个环境(郑州、驻马店和新乡)下参试小麦材料的平均千粒重,分析不同粒重基因优异单倍型及其组合对小麦千粒重的影响。在本研究中,各粒重基因均以组合形式存在(表 3),其中含有 2 个粒重优异基因的类型只有一种即*TaGW8-B1a + TaGW2-6A-A*,该类型对提高小麦千粒重的效应较低,在 3 个环境中郑州和新乡两地的该类型品种(系)的平均粒重分别为 41.87 和 47.53 g,均为各基因组合最低。含有 3 个粒重优异基因的组合类型共有 4 种,不同组合类型对小麦粒重的效应差别不大,其中*TaGW8-B1a + TaGS-D1a + TaGW2-6A-A* 组合的效应较低,在驻马店和新乡两地的平均粒重分别为 40.89 和 47.60 g,均为各基因组合最低粒重。

表 4 小麦粒重相关优异单倍型组合与籽粒性状的关联分析

Table 4 Associations between elite haplotype combinations and grain traits in wheat

环境 Environment	粒重优异单倍型组合 Haplotype combination with superior grain weight	千粒重 Thousand-grain weight/g
2023 年郑州 Zhengzhou 2023	<i>TaGW8-B1a</i> + <i>TaGW2-6A-A</i>	41.87
	<i>TaSus2-2Ba</i> + <i>TaGW8-B1a</i> + <i>TaGW2-6A-A</i>	42.95
	<i>TaGW8-B1a</i> + <i>TaGS-D1a</i> + <i>TaCwi-A1a</i>	42.66
	<i>TaGW8-B1a</i> + <i>TaGS-D1a</i> + <i>TaGW2-6A-A</i>	42.37
	<i>TaGW8-B1a</i> + <i>TaCwi-A1a</i> + <i>TaGW2-6A-A</i>	42.21
	<i>TaSus2-2Ba</i> + <i>TaGW8-B1a</i> + <i>TaGS-D1a</i> + <i>TaGW2-6A-A</i>	43.01
	<i>TaGW8-B1a</i> + <i>TaGS-D1a</i> + <i>TaCwi-A1a</i> + <i>TaGW2-6A-A</i>	43.06
	<i>TaSus2-2Ba</i> + <i>TaGW8-B1a</i> + <i>TaCwi-A1a</i> + <i>TaGW2-6A-A</i>	42.42
	<i>TaSus2-2Ba</i> + <i>TaGW8-B1a</i> + <i>TaGS-D1a</i> + <i>TaCwi-A1a</i> + <i>TaGW2-6A-A</i>	43.19
2023 年驻马店 Zhumadian 2023	<i>TaGW8-B1a</i> + <i>TaGW2-6A-A</i>	41.12
	<i>TaSus2-2Ba</i> + <i>TaGW8-B1a</i> + <i>TaGW2-6A-A</i>	41.05
	<i>TaGW8-B1a</i> + <i>TaGS-D1a</i> + <i>TaCwi-A1a</i>	41.44
	<i>TaGW8-B1a</i> + <i>TaGS-D1a</i> + <i>TaGW2-6A-A</i>	40.89
	<i>TaGW8-B1a</i> + <i>TaCwi-A1a</i> + <i>TaGW2-6A-A</i>	40.92
	<i>TaSus2-2Ba</i> + <i>TaGW8-B1a</i> + <i>TaGS-D1a</i> + <i>TaGW2-6A-A</i>	41.76
	<i>TaGW8-B1a</i> + <i>TaGS-D1a</i> + <i>TaCwi-A1a</i> + <i>TaGW2-6A-A</i>	41.69
	<i>TaSus2-2Ba</i> + <i>TaGW8-B1a</i> + <i>TaCwi-A1a</i> + <i>TaGW2-6A-A</i>	40.97
	<i>TaSus2-2Ba</i> + <i>TaGW8-B1a</i> + <i>TaGS-D1a</i> + <i>TaCwi-A1a</i> + <i>TaGW2-6A-A</i>	41.87
2024 年新乡 Xinxiang 2024	<i>TaGW8-B1a</i> + <i>TaGW2-6A-A</i>	47.53
	<i>TaSus2-2Ba</i> + <i>TaGW8-B1a</i> + <i>TaGW2-6A-A</i>	48.60
	<i>TaGW8-B1a</i> + <i>TaGS-D1a</i> + <i>TaCwi-A1a</i>	49.26
	<i>TaGW8-B1a</i> + <i>TaGS-D1a</i> + <i>TaGW2-6A-A</i>	47.60
	<i>TaGW8-B1a</i> + <i>TaCwi-A1a</i> + <i>TaGW2-6A-A</i>	49.92
	<i>TaSus2-2Ba</i> + <i>TaGW8-B1a</i> + <i>TaGS-D1a</i> + <i>TaGW2-6A-A</i>	49.93
	<i>TaGW8-B1a</i> + <i>TaGS-D1a</i> + <i>TaCwi-A1a</i> + <i>TaGW2-6A-A</i>	49.31
	<i>TaSus2-2Ba</i> + <i>TaGW8-B1a</i> + <i>TaCwi-A1a</i> + <i>TaGW2-6A-A</i>	49.87
	<i>TaSus2-2Ba</i> + <i>TaGW8-B1a</i> + <i>TaGS-D1a</i> + <i>TaCwi-A1a</i> + <i>TaGW2-6A-A</i>	49.85

含有 4 个粒重优异基因的类型共有 3 种,其中 *TaSus2-2Ba* + *TaGW8-B1a* + *TaGS-D1a* + *TaGW2-6A-A* 组合对小麦粒重的提升效应较高,该类型小麦品种(系)的平均粒重在驻马店和新乡两个环境下最高,分别为 41.76 和 49.93 g; *TaSus2-2Ba* + *TaGW8-B1a* + *TaCwi-A1a* + *TaGW2-6A-A* 组合的效应较低,在郑州和驻马店两地的平均粒重最低,分别为 42.42 和 40.97 g。同时聚合 5 个优异粒重基因的组合作为 *TaSus2-2Ba* + *TaGW8-B1a* + *TaGS-D1a* + *TaCwi-A1a* + *TaGW2-6A-A*,该类型对提升小麦粒重效应较强,该组合品种(系)的平均千粒重在 3 个环境中分别为 43.19、41.87 和 49.85 g,为本研究所有组合类型最高(表 4)。

3 讨论

本研究聚焦 *TaSus2-2B*、*TaGW8-B1*、*TaGS-*

D1、*TaCwi-A1* 和 *TaGW2-6A* 等 5 个小麦关键粒重基因,系统解析其优异基因聚合模式及效应。与前人研究相比,本研究将粒重相关基因的解析从 1~2 个基因扩展至 5 个基因的聚合分析。时佳等^[16]对新疆小麦的研究发现, *TaGW2-6A-A* 与 *TaCwi-A1a* 双优异单倍型聚合时粒重显著高于单一基因。陈杰等^[28]研究表明,含有 *TaGS-D1a* + *TaCwi-A1a* 等位基因组合的材料千粒重平均值最高。张芳等^[21]也指出多个优异等位基因聚合有利于提升粒重,这与本研究中发现的聚合 5 个优异粒重基因对提高小麦粒重效应较强的结果一致。同时,本研究鉴定出 9 种优异单倍型组合模式,较全靖洋等^[29]报道的组合更为丰富,为深入解析多基因互作网络提供了独特的材料基础。本结果既印证了前人研究结论,又在基因数量和组合复杂性上实现了延伸,为该麦区粒重遗传改

良提供了相应的理论支撑。

从结果来看,黄淮南片麦区参试品种(系)中含有 3 个及以上优异单倍型的比例达到 95.82%,这与该麦区长期高强度定向育种选择密切相关,育种家在实践中已逐步累积了粒重相关优异基因,与何中虎等^[30]提出的“黄淮麦区小麦育种已实现主要产量性状关键基因的初步聚合”的观点相符。但仅有 13.69%的品种(系)同时聚合 5 个优异单倍型,且多基因聚合后部分组合的粒重差异未达显著水平。这一现象反映出两方面核心问题:一是遗传背景同质化限制了增益潜力,陈杰等^[26]指出黄淮麦区品种多源于“矮抗 58”和“周麦”系列等骨干亲本,遗传基础狭窄可能掩盖了部分基因的累加效应;二是环境互作的复杂影响,本研究中部分组合在驻马店与郑州、新乡环境中表现相反,这与杨雪敏等^[31]观察到的“粒重基因效应受生态环境调控”的结果一致,不同地区水分、温度差异可能改变了基因间的互作模式,进而影响表型表达。此外,粒重作为典型多基因控制的数量性状,现有 5 个基因仅覆盖部分遗传位点,仍有未被解析的增效基因,这也导致单一基因组合的表型差异被遗传背景和环境效应稀释。

综上所述,通过明确 5 个粒重基因的聚合效应,不仅为育种家提供了这批重要育种资源的基因型信息,也为黄淮南片麦区小麦粒重遗传改良提供了理论基础和分子标记辅助选择的依据。在未来针对此类高水平育种群体的研究中,需要采用更高密度的标记,考虑与环境的互作效应,才能更精确地解析这些粒重基因的累积效应。在此基础上,以高粒重为核心育种目标,结合当地麦区生态特点开展定向遗传改良,推动适配当地环境的高粒重小麦品种培育,进而为提升小麦整体产量水平、保障区域粮食生产稳定提供有效路径。

参考文献:

[1] International Wheat Genome Sequencing Consortium (IWG-SC). Shifting the limits in wheat research and breeding using a fully annotated reference genome [J]. *Science*, 2018, 361: eaar7191.

[2] 陈佩,张为付. 气候变化视角下中国小麦生产布局演变及生产力预测[J]. 南京财经大学学报, 2023(2): 1.

CHEN P, ZHANG W F. Wheat pattern evolution and productivity prediction in China from the perspective of climate change [J]. *Journal of Nanjing University of Finance and Economics*, 2023(2): 1.

[3] HU J M, WANG X Q, ZHANG G X, et al. QTL mapping for

yield-related traits in wheat based on four RIL populations [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2020, 133(3): 917.

[4] ZHANG Y, XU W G, WANG H W, et al. Progress in genetic improvement of grain yield and related physiological traits of Chinese wheat in Henan Province [J]. *Field Crops Research*, 2016, 199: 117.

[5] LI N, XU R, LI Y H. Molecular networks of seed size control in plants [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2019, 70: 435.

[6] LIU Y C, WANG X L, HAO C Y, et al. *TaABI19* positively regulates grain development in wheat [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2023, 22(1): 41.

[7] SHEN L P, ZHANG L L, YIN C B, et al. The wheat sucrose synthase gene *TaSus1* is a determinant of grain number per spike [J]. *The Crop Journal*, 2024, 12(1): 295.

[8] 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 & Integrative Genomics*, 2011, 11(1): 49.

[9] MAO T, CHEN H F, LI X, et al. Effect of *GW8* gene editing on appearance quality of erect-panicle type (*depl*) Japonica rice [J]. *Rice Science*, 2023, 30(5): 359.

[10] YAN X F, ZHAO L, REN Y, et al. Genome-wide association study revealed that the *TaGW8* gene was associated with kernel size in Chinese bread wheat [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 2702.

[11] 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.

[12] 黄传臻. 小麦细胞壁转化酶 CWI-B1 的原核表达和抗体制备及 *TaCWI-B1* 转基因小麦研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.

HUANG C Z. Prokaryotic expression and antibody preparation of wheat cell wall invertase CWI-B1 and function analysis of *TaCWI-B1* overexpression wheat [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017.

[13] 雷钰欣, 曹子千, 李纪璇, 等. 高等植物转化酶的研究进展 [J]. 分子植物育种, 2024, 22(4): 1242.

LEI Y X, CAO Z Q, LI J X, et al. Research progress of invertase in higher plants [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2024, 22(4): 1242.

[14] MA D Y, YAN J, HE Z H, et al. Characterization of a cell wall invertase gene *TaCwi-A1* on common wheat chromosome 2A and development of functional markers [J]. *Molecular Breeding*, 2012, 29(1): 43.

[15] 相吉山, 穆培源, 桑伟, 等. 小麦粒重基因 *TaCwi-A1* 功能标记 *CWI22*、*CWI21* 的验证及应用 [J]. 中国农业科学, 2014, 47(13): 2671.

XIANG J S, MU P Y, SANG W, et al. Validation and application of function markers *CWI22* and *CWI21* of *TaCwi-A1* gene related to wheat kernel weight [J]. *Scientia Agricultura*

- ra Sinica*, 2014, 47(13): 2671.
- [16] 时佳, 白璐, 任毅, 等. 新疆小麦 *TaGW2-6A*、*TaCwi-A1*、*TaSus2-2B* 等位变异对粒重的影响及应用[J]. 分子植物育种, 2018, 16(3): 848.
- SHI J, BAI L, REN Y, *et al.* Effects and application of allelic variation of *TaGW2-6A*, *TaCwi-A1* and *TaSus2-2B* on grain weight of Xinjiang wheat [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2018, 16(3): 848.
- [17] 张福彦, 程仲杰, 陈晓杰, 等. 黄淮麦区小麦粒重基因等位变异的分子鉴定及育种应用[J]. 作物学报, 2021, 47(11): 2091.
- ZHANG F Y, CHENG Z J, CHEN X J, *et al.* Molecular identification and breeding application of allelic variation of grain weight gene in wheat from the Yellow-Huai-River valley [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(11): 2091.
- [18] 陈奕伊. 水稻 *OsGS3*、*OsGW2*、*OsGn1a* 定向聚合突变体创制及分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- CHEN Y Y. Creation and identification of *OsGS3*、*OsGW2*、*OsGn1a* combining mutants in rice cultivars [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [19] ZHANG Y J, LIU J D, XIA X C, *et al.* *TaGS-D1*, an ortholog of rice *OsGS3*, is associated with grain weight and grain length in common wheat [J]. *Molecular Breeding*, 2014, 34(3): 1097.
- [20] YANG J, ZHOU Y J, ZHANG Y E, *et al.* Cloning, characterization of *TaGS3* and identification of allelic variation associated with kernel traits in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *BMC Genetics*, 2019, 20(1): 98.
- [21] 张芳, 任毅, 严勇亮, 等. 小麦 *TaGS-D1* 与 *TaFlo2-A1* 等位变异对粒重的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(5): 533.
- ZHANG F, REN Y, YAN Y L, *et al.* Effect of allelic variations in *TaGS-D1* and *TaFlo2-A1* on thousand kernel weight of wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(5): 533.
- [22] 张芳. 小麦产量相关性状连锁分析和关联分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2020.
- ZHANG F. Linkage analysis and genome-wide association analysis of grain yield-traits in wheat [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2020.
- [23] SU Z Q, HAO C Y, WANG L F, *et al.* Identification and development of a functional marker of *TaGW2* associated with grain weight in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2011, 122(1): 211.
- [24] 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.
- [25] QIN L, ZHAO J J, LI T, *et al.* *TaGW2*, a good reflection of wheat polyploidization and evolution [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 318.
- [26] 陈杰, 赵君瑶, 宋全昊, 等. 黄淮南片麦区小麦粒重基因 *TaSus2-2B* 和 *TaGw8-B1* 等位变异的分子检测 [J]. 分子植物育种, 2024, 22(18): 5944.
- CHEN J, ZHAO J Y, SONG Q H, *et al.* Molecular detection of *TaSus2-2B* and *TaGw8-B1* genes controlling grain weight in Huanghuai southern wheat region [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2024, 22(18): 5944.
- [27] 郑楠楠. 全球 3 177 份小麦种质资源中 *Fhb1* 等位变异分析及赤霉病抗性鉴定[D]. 郑州: 河南农业大学, 2021.
- ZHENG N N. Analysis of *Fhb1* alleles and resistance to *Fusarium* head blight in 3 177 global wheat accessions [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2021.
- [28] 陈杰, 冉午玲, 陈建辉, 等. 黄淮麦区(南片)小麦粒重基因 *TaGS-D1* 和 *TaCwi-A1* 等位变异检测及效应分析[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(4): 409.
- CHEN J, RAN W L, CHEN J H, *et al.* Allelic variation detection and effect analysis of wheat grain weight genes *TaGS-D1* and *TaCwi-A1* in Huanghuai southern wheat region [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(4): 409.
- [29] 全靖洋, 李少鹏, 刘胜杰, 等. 小麦粒重基因等位变异的高通量分子检测及组合分析[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(11): 1300.
- TONG J Y, LI S P, LIU S J, *et al.* High-Throughput molecular detection and analysis of allelic variation combinations related to grain weight genes of wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(11): 1300.
- [30] 何中虎, 夏先春, 陈新民, 等. 中国小麦育种进展与展望[J]. 作物学报, 2011, 37(2): 202.
- HE Z H, JIA X C, CHEN X M, *et al.* Progress of wheat breeding in China and the future perspective [J]. *Acta Agronomiae Sinica*, 2011, 37(2): 202.
- [31] 杨雪敏, 李鲁华, 任明见, 等. 贵州小麦品种(系)粒重相关基因 *TaCwi-A1*、*TaSus2-2B* 和 *TaGW2-6A* 等位变异类型鉴定[J]. 南方农业学报, 2020, 51(9): 2071.
- YANG X M, LI L H, REN M J, *et al.* Identification and analysis of allele variation types of kernel weight related genes *TaCwi-A1*, *TaSus2-2B* and *TaGW2-6A* of Guizhou wheat varieties (lines) [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2020, 51(9): 2071.