

常利芳, 乔彦玮, 郭慧娟, 等. 小偃麦衍生系抗旱基因功能分子标记检测及效应分析[J]. 山西农业科学, 2026, 54(1):70-80.
CHANG L F, QIAO Y W, GUO H J, et al. Detection and effect analysis of functional molecular markers of drought-resistant genes in wheat-*Thinopyrum intermedium* introgression lines[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2026, 54(1):70-80.
doi:10.26942/j.cnki.issn.1002-2481.2026.01.08

小偃麦衍生系抗旱基因功能分子标记检测及效应分析

常利芳, 乔彦玮, 郭慧娟, 乔麟轶, 张树伟, 陈芳, 李欣, 畅志坚, 张晓军

(山西农业大学农学院, 山西太原 030031)

摘要:为进一步明确小偃麦衍生系抗旱等位基因组成, 采用5个小麦抗旱基因 *TaNRX-B1*、*TaDreb-B1*、*TaPYL1-1B*、*TaBADH-A1* 和 *TaDRO-5B* 的功能分子标记检测了175份小偃麦衍生系, 并结合萌发期13个抗旱指标的抗旱系数和综合评价D值, 分析了各等位基因的抗旱效应。结果显示, 5个抗旱等位基因在小偃麦衍生系中的频率总体偏低, 其中, *TaDreb-B1a* 的频率最高, 为38.86%; *TaDRO-5B* 基因的 *Hap-5B-I* 的频率最低, 为5.14%。在117份中等以上抗旱性衍生系中, 2份携带4个抗旱等位基因的衍生系 CH6310 (*TaDreb-B1a*/*TaBADH-A1b*/*TaPYL1-1B^{In-442}*/*Hap-5B-I*) 和 CH1539 (*TaNRX-B1a*/*TaDreb-B1a*/*TaBADH-A1b*/*Hap-5B-I*) 均为强抗旱种质; 13份强抗旱衍生系未检测到任何抗旱等位基因, 可能存在未知的抗旱相关基因。携带抗旱等位基因 *TaDreb-B1a*、*TaPYL1-1B^{In-442}* 和 *Hap-5B-I* 种质的多数指标抗旱系数均值高于携带其干旱敏感等位基因的衍生系, 且抗旱等位基因与多个指标抗旱系数呈显著正相关, 抗旱效应较高。因此, 抗旱基因 *TaDreb-B1*、*TaPYL1-1B* 和 *TaDRO-5B* 的功能标记能够有效用于小偃麦衍生系抗旱基因型检测及分子标记辅助选择育种。

关键词: 小偃麦衍生系; 抗旱基因; 功能分子标记; 等位基因; 抗旱系数

中图分类号: S512.9 文献标识码: A 文章编号: 1002-2481(2026)01-0070-11

Detection and Effect Analysis of Functional Molecular Markers of Drought-Resistant Genes in Wheat-*Thinopyrum intermedium* Introgression Lines

CHANG Lifang, QIAO Yanwei, GUO Huijuan, QIAO Linyi, ZHANG Shuwei,

CHEN Fang, LI Xin, CHANG Zhijian, ZHANG Xiaojun

(College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China)

Abstract: In order to further clarify the favor alleles of drought-resistant gene composition in the wheat-*Thinopyrum intermedium* introgression lines, in this study, the functional molecular markers of 5 wheat drought resistant genes, including *TaNRX-B1*, *TaDreb-B1*, *TaPYL1-1B*, *TaBADH-A1*, and *TaDRO-5B*, were used to detect 175 wheat-*Thinopyrum intermedium* introgression lines. The drought resistance effect of each allele was analyzed by combining the drought resistance coefficients of 13 drought-resistant indicators and the comprehensive evaluation D value at the germination stage. The results showed that the frequency of the 5 drought-resistant alleles was generally low in the introgression lines, among which *TaDreb-B1a* had the highest proportion(38.86%) and *Hap-5B-I* allele of *TaDRO-5B* gene had the lowest proportion(5.14%). Among the 117 lines with moderate or above drought resistance, CH6310(*TaDreb-B1a*/*TaBADH-A1b*/*TaPYL1-1B^{In-442}*/*Hap-5B-I*) and CH1539(*TaNRX-B1a*/*TaDreb-B1a*/*TaBADH-A1b*/*Hap-5B-I*), carrying 4 drought-resistant alleles, were highly drought-resistant lines. As the five drought-resistant alleles were not detected in the 13 highly drought-resistant lines, there might be new unknown drought-resistant genes. The average drought resistance coefficients of most indicators of introgression lines carrying drought-resistant alleles *TaDreb-B1a*, *TaPYL1-1B^{In-442}* and *Hap-5B-I* were higher than those of introgression lines carrying their drought-sensitive alleles. The drought-resistant alleles were significantly positively correlated with the

收稿日期: 2025-03-24

基金项目: 山西省基础研究计划(202403021211048); 农业农村部政府购买服务项目(19230606)

作者简介: 常利芳, 副研究员, 博士, 主要从事小麦种质评价与分子育种研究, E-mail: changlifang@sxau.edu.cn

通信作者: 张晓军, 研究员, 主要从事小麦遗传育种研究, E-mail: zxjemail@163.com

drought resistance coefficients of multiple indicators, and the drought resistance effect was higher. Therefore, the functional molecular markers of drought-resistant genes such as *TaDreb-B1*, *TaPYL1-1B* and *TaDRO-5B* could be effectively used for drought-resistant genotype detection and molecular marker-assisted selection breeding in wheat-*Thinopyrum intermedium* introgression lines.

Keywords: wheat-*Thinopyrum intermedium* introgression line; drought resistant gene; functional molecular marker; alleles; drought resistance coefficient

干旱是影响小麦产量和品质的重要因素之一,加强抗旱性品种选育是促进小麦持续高产稳产和保障国家粮食安全的有效途径^[1]。研究表明,小麦在不同生育时期受到干旱胁迫时,会引发农艺性状、生理、细胞、生化等多方面的响应变化。抗旱性是受多基因协同调控且易受环境影响的复杂数量性状^[2-3]。随着小麦参考基因组信息的日趋完善,以及表型与基因型鉴定技术的快速发展,小麦优异基因资源发掘和分子标记开发效率大幅提升。目前,利用与抗旱性相关的农艺性状、生理生化指标已经鉴定出多个与小麦抗旱性有关的数量性状位点(Quantitative trait loci, QTL)和关键基因,并基于这些基因的启动子或编码区序列变异开发了不同类型的分子标记^[4-6],进而为分子标记辅助选择育种提供了更丰富的工具与选择。

研究表明,硫氧还蛋白(Trx)^[7]、脱落酸受体^[8]、脱水反应元件结合蛋白(DREB)^[9-10]、甜菜碱醛脱氢酶(BADH)^[11-12]等均在植物生长发育和抵御逆境胁迫中发挥着极其重要的作用,根据这些蛋白相关基因开发的分子标记可用于种质资源的抗旱性鉴定。张帆等^[7]在普通小麦5B染色体短臂上克隆了1个硫氧还蛋白超家族新基因*TaNrx*,并基于该基因序列开发了显性互补STS标记,并能够用于检测抗旱等位基因*TaNrx-B1a*和干旱敏感等位基因*TaNrx-B1b*。MAO等^[8]研究发现,脱落酸受体基因*TaPYL1-1B*启动子区插入20 bp的*TaPYL1-1B^{In-442}*等位基因,在保持高产的同时还增强了小麦的耐旱性,其分子标记*InDel-442_genotyping*可用于检测小麦种质的抗旱类型。WEI等^[10]根据*TaDreb-B1*基因770 bp处的SNP(A/C)设计开发的分子标记*TaDreb-B1*能够检测抗旱型等位基因*TaDreb-B1a*和干旱敏感型等位基因*TaDreb-B1b*。YU等^[12]基于*TaBADH-A1*基因第3内含子254 bp的序列开发了分子标记6AM,利用该标记检测了121份小麦品种,发现含*TaBADH-A1b*的材料相对发芽率和耐旱性均高于含*TaBADH-A1a*的材料。张维军等^[13]通过同

源克隆获得了小麦根系发育相关的*TaDRO-5A*、*TaDRO-5B*和*TaDRO-5D*基因,其中,基于与株高和千粒质量关系紧密的*TaDRO-5B*基因开发的分子标记*TaDRO-5B-InDel*能够用于检测深根抗旱单倍型*Hap-5B-I*和浅根干旱敏感单倍型*Hap-5B-II*。目前,*TaNrx-B1*、*TaDreb-B1*基因的分子标记已被应用于小麦育种材料的抗旱基因检测研究^[14-20],而*TaBADH-A1*、*TaPYL1-1B*、*TaDRO-5B*基因的分子标记仅开发者进行过初步验证,在不同材料群体中应用较少。

CHANG等^[21]将中间偃麦草(*Elytrigia intermedium*)和长穗偃麦草(*Elytrigia elongata*)片段转移到普通小麦,创制了一批染色体数目为42条的小偃麦高代衍生系;SHENG等^[22]、张晓军等^[23]、张潇文等^[24]和常利芳等^[25]从这些衍生系中鉴定出抗病、耐盐及综合性状表现优异的衍生系材料。常利芳等^[26]对其中175份小偃麦衍生系进行了萌发期和成株期抗旱性鉴定及综合评价,鉴定出萌发期极强抗旱型材料23份、强抗旱型材料29份、中等抗旱型材料65份,还有29份弱抗旱型材料和29份干旱敏感型材料。为了进一步明确小偃麦衍生系的抗旱等位基因组成,本研究选用5个抗旱基因*TaNrx-B1*、*TaDreb-B1*、*TaBADH-A1*、*TaPYL1-1B*和*TaDRO-5B*的功能分子标记对175份小偃麦衍生系进行检测,分析其抗旱基因组成,并结合萌发期抗旱性各项指标的抗旱系数及综合评价D值,评价相关等位基因的抗旱效应,旨在为小麦抗旱育种亲本利用和分子标记辅助选择育种提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试材料为183个小麦品种(系)材料,包括175份小偃麦衍生系^[26]和8个对照品种。对照品种包括晋麦47、运旱618、长6878、辽春10号、中国春、绵麦37、川麦104和周麦22,其中,长6878和晋麦47均为国家旱地小麦区试对照品种。以上材料

均由山西省作物遗传与分子改良重点实验室保存。

1.2 试验方法

5 个抗旱性相关基因(*TaNRX-B1*、*TaDreb-B1*、*TaBADH-A1*、*TaPYL1-1B*和 *TaDRO-5B*)的分子标记信息见表 1。引物由生工生物工程(上海)股份有限公司合成。

采用改良的 CTAB 法提取供试材料幼苗叶片

的基因组 DNA,测定浓度后备用。参考对应文献中分子标记的 PCR 反应体系和扩增程序(表 1)进行 PCR 扩增。分子标记 *TaNRX-B1a1*、*TaNRX-B1b1*、*TaDreb-B1* 的 PCR 扩增产物采用 1.5% 琼脂糖凝胶电泳检测,分析标记 6AM、*TaDRO-5B-InDel*、*InDel-442_genotyping* 的 PCR 扩增产物采用 8% 的聚丙烯酰胺凝胶电泳检测。

表 1 抗旱基因的分子标记相关信息

Tab.1 Related information of molecular markers for 5 drought resistant genes

基因 Gene	分子标记 Molecular marker	引物序列(5'—3') Primer sequence(5'—3')	等位变异类型(长度/bp) Allelic variation type (fragment length)	退火温度/℃ Annealing temperature	参考文献 Reference
<i>TaNRX-B1</i>	<i>TaNRX-B1a1</i>	CATGGCTCTTCTGTGCG CTGAATCGCTATGGAAAG	<i>TaNRX-B1a</i> (841)	52	[7]
	<i>TaNRX-B1b1</i>	TCTCCCGCACTGTGCCTG CTGAATCGCTATGGAAAG	<i>TaNRX-B1b</i> (870)	56	
<i>TaPYL1-1B</i>	<i>InDel-442_genotyping</i>	CGAAGAATTGGTGAATCATGTACTAC TAAAAAATAGAAGAGCATCTCCTAAAAAG	<i>TaPYL1-1B</i> ^{In442} (209) <i>TaPYL1-1B</i> ^{Del442} (189)	62	[8]
<i>TaDreb-B1</i>	<i>TaDreb-B1</i>	ATATGGATTGCCCTTGATGCA TTGTGCTCCTCATGGGTACTT	<i>TaDreb-B1a</i> (616+X) <i>TaDreb-B1b</i> (616)	56	[10]
<i>TaBADH-A1</i>	6AM	CGCAAGTCAATGGGCTGTGTAT CAAGACAGGAGGGGAATGGGAAAT	<i>BADH-A1a</i> (828) <i>BADH-A1b</i> (574)	62	[12]
<i>TaDRO-5B</i>	<i>TaDRO-5B-InDel</i>	ATACGGGGGAGATTTTCTTGAGG GACCGAGAGAGAGTGCGAGAGAT	<i>Hap-5B-I</i> (357) <i>Hap-5B-II</i> (395)	62	[13]

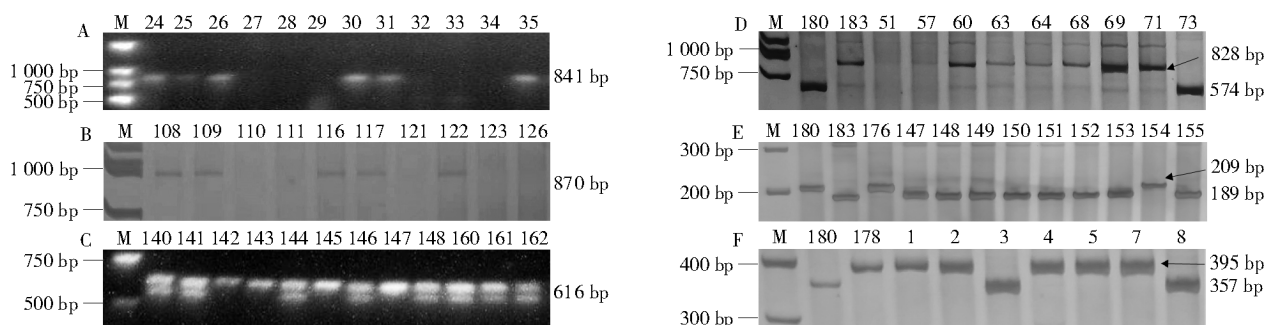
1.3 数据统计分析

利用 Excel 2011 和 SPSS 21.0 软件进行数据处理、*t* 测验和相关性分析。参考张海萍等^[27]的分析方法将携带抗旱等位基因的材料赋值为“1”,不含抗旱等位基因的材料赋值为“0”,并对各指标的抗旱系数进行相关性分析,评估各抗旱等位基因与抗旱系数之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 小偃麦衍生系抗旱基因分子标记检测

利用 *TaNRX-B1*、*TaDreb-B1*、*TaBADH-A1*、*TaPYL1-1B*、*TaDRO-5B* 基因的分子标记分别对 175 份小偃麦衍生系进行了检测,结果如图 1、表 2 所示。



A~F 分别表示 *TaNRX-B1a1*(A)、*TaNRX-B1b1*(B)、*TaDreb-B1*(C)、*TaBADH-A1*(D)、*TaPYL1-1B*(E)、*TaDRO-5B*(F) 的鉴定结果;M:DNA 分子标记;图片上数字为小偃麦衍生系在表 2 中的编号

A~F showed the identification results of *TaNRX-B1a1*(A), *TaNRX-B1b1*(B), *TaDreb-B1*(C), *TaBADH-A1*(D), *TaPYL1-1B*(E), and *TaDRO-5B*(F), respectively; M. DNA marker; the numbers above the figures corresponded to the serial numbers of wheat-*Thinopyrum intermedium* introgression lines listed in Tab.2

图 1 部分小偃麦衍生系中抗旱等位基因类型鉴定

Fig.1 Type identification of drought-resistant alleles in some wheat-*Thinopyrum intermedium* introgression lines

图1、表2结果表明,62份种质扩增出 *TaNRX-B1a1* 抗旱等位基因的特异性片段(841 bp),占比为35.43%;68份种质扩增产物为抗旱等位基因 *TaDreb-B1a* 的特异性条带(616 bp+x),占比为38.86%;60份种质扩增出抗旱性等位基因 *TaBADH-A1b* 的特异性片段(574 bp),占比为34.28%;16份种质扩增出抗旱等位基因 *TaPYL1-*

1B^{In-442} 的特异性片段(209 bp),占比为9.14%;9份种质扩增出深根抗旱等位基因 *Hap-5B-I* 的特异性片段(357 bp),占比为5.14%。另有37份衍生系未检测到这5个抗旱基因的等位基因,占比21.14%。综上,175份小偃麦衍生系中抗旱等位基因 *TaDreb-B1a* 的分布频率最高,为38.86%,*Hap-5B-I* 的分布频率最低,为5.14%。

表2 183份小麦品种(系)中5个抗旱等位基因的组成

Tab.2 Composition of 5 drought-resistant alleles in 183 wheat varieties (lines)

编号 Number	品系名称 Line	携带的抗旱等位基因 Drought-resistant allele	抗旱等级 Grade of drought resistance	编号 Number	品系名称 Line	携带的抗旱等位基因 Drought-resistant allele	抗旱等级 Grade of drought resistance
1	CH223		1级	33	CH16116	<i>TaDreb-B1a</i>	3级
2	CH6002	<i>TaDreb-B1a</i>	1级	34	CH16118	<i>TaBADH-A1b</i>	3级
3	CH6310	<i>TaDreb-B1a</i> 、 <i>TaPYL1-1B^{In442}</i> 、 <i>Hap-5B-I</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i>	2级	35	CH1623	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i>	5级
4	CH9301	<i>TaPYL1-1B^{In442}</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i>	3级	36	CH1625	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i>	3级
5	CH9763	<i>TaDreb-B1a</i> 、 <i>TaPYL1-1B^{In442}</i>	2级	37	CH1640	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i>	3级
6	CH0977		2级	38	CH1646	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaDreb-B1a</i>	5级
7	CH0330	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i>	2级	39	CH1679		3级
8	CH0329	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>Hap-5B-I</i>	1级	40	CH1681	<i>TaDreb-B1a</i>	3级
9	CH-1	<i>TaBADH-A1b</i>	1级	41	CH1696	<i>TaNRX-B1a</i>	5级
10	CH3286	<i>Hap-5B-I</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i>	5级	42	CH1698	<i>TaBADH-A1b</i>	4级
11	CH4151		5级	43	CH16100	<i>TaDreb-B1a</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i>	3级
12	CH0981	<i>TaDreb-B1a</i>	3级	44	CH16102	<i>TaNRX-B1a</i>	4级
13	CH0982	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i>	3级	45	CH16108	<i>TaNRX-B1a</i>	5级
14	CH0983	<i>TaDreb-B1a</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i>	1级	46	CH16110		3级
15	CH0984	<i>TaBADH-A1b</i>	1级	47	CH16340	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaDreb-B1a</i>	3级
16	CH0985		3级	48	CH1711	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i>	5级
17	CH0987	<i>Hap-5B-I</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i> 、	3级	49	CH16342	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i>	5级
18	CH9767	<i>Hap-5B-I</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i> 、	1级	50	CH16343	<i>TaNRX-B1a</i>	5级
19	CH006	<i>TaDreb-B1a</i>	1级	51	CH16344		3级
20	CH122		1级	52	CH1735	<i>TaDreb-B1a</i>	5级
21	CH1363	<i>TaDreb-B1a</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i>	4级	53	CH16346	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i>	4级
22	CH1521	<i>TaDreb-B1a</i>	1级	54	CH16347	<i>TaNRX-B1a</i>	3级
23	CH1529	<i>TaDreb-B1a</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i>	4级	55	CH16348	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i>	3级
24	CH1556	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaDreb-B1a</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i> 、	4级	56	CH16349	<i>TaNRX-B1a</i>	3级
25	CH1558	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i>	3级	57	CH1739	<i>TaNRX-B1a</i>	3级
26	CH16484	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaPYL1-1B^{In442}</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i>	3级	58	CH1762	<i>TaPYL1-1B^{In442}</i>	4级
27	CH1675	<i>TaDreb-B1a</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i>	4级	59	CH16352	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaDreb-B1a</i> 、 <i>TaPYL1-1B^{In442}</i>	3级
28	CH1677		4级	60	CH16353	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaPYL1-1B^{In442}</i>	3级
29	CH1686	<i>TaDreb-B1a</i>	3级	61	CH16354	<i>TaBADH-A1b</i>	3级
30	CH16104	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i>	5级	62	CH16355	<i>TaPYL1-1B^{In442}</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i>	3级
31	CH16106	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i>	3级	63	CH1758	<i>TaPYL1-1B^{In442}</i>	3级
32	CH16112	<i>TaDreb-B1a</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i>	3级	64	CH16357		5级
				65	CH16358		5级
				66	CH16359	<i>TaPYL1-1B^{In442}</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i>	4级

续表 2 183 份小麦品种(系)中 5 个抗旱等位基因的组成

Tab.2(Continued) Composition of 5 drought-resistant alleles in 175 wheat-*Thinopyrum intermedium* introgression lines

编号 Number	品系名称 Line	携带的抗旱等位基因 Drought-resistant allele	抗旱等级 Grade of drought resistance	编号 Number	品系名称 Line	携带的抗旱等位基因 Drought-resistant allele	抗旱等级 Grade of drought resistance
67	CH1715	<i>TaBADH-A1b</i>	4 级	110	CH16406	<i>TaNRX-B1a, TaDreb-B1a</i>	3 级
68	CH16362	<i>TaNRX-B1a, TaDreb-B1a</i>	3 级	111	CH16407	<i>TaNRX-B1a</i>	3 级
69	CH1742	<i>TaNRX-B1a, TaDreb-B1a</i>	5 级	112	CH16409	<i>TaNRX-B1a</i>	2 级
70	CH16364	<i>TaDreb-B1a</i>	5 级	113	CH16410	<i>TaNRX-B1a</i>	4 级
71	CH1745	<i>TaNRX-B1a</i>	5 级	114	CH16413	<i>TaNRX-B1a</i>	3 级
72	CH16368	<i>TaBADH-A1b</i>	5 级	115	CH16415	<i>TaNRX-B1a, TaPYL1-1B^{In442}</i>	1 级
73	CH16369	<i>TaBADH-A1b</i>	5 级	116	CH16416	<i>TaPYL1-1B^{In442}</i>	2 级
74	CH16370	<i>TaBADH-A1b</i>	3 级	117	CH16418		3 级
75	CH16371	<i>TaBADH-A1b</i>	3 级	118	CH16419		2 级
76	CH16372	<i>TaBADH-A1b</i>	3 级	119	CH16420		1 级
77	CH16373	<i>TaPYL1-1B^{In442}</i>	3 级	120	CH1729		2 级
78	CH16374		4 级	121	CH16422		2 级
79	CH16375		3 级	122	CH16423		4 级
80	CH16376	<i>Hap-5B-I</i>	3 级	123	CH16424	<i>TaPYL1-1B^{In442}</i>	3 级
81	CH16377	<i>TaBADH-A1b</i>	4 级	124	CH16425	<i>TaDreb-B1a, TaPYL1-1B^{In442}</i>	3 级
82	CH16378		3 级	125	CH16426	<i>TaDreb-B1a, Hap-5B-I</i>	1 级
83	CH16379		1 级	126	CH16432	<i>TaDreb-B1a</i>	2 级
84	CH16380	<i>TaNRX-B1a, TaDreb-B1a</i>	4 级	127	CH16433	<i>TaNRX-B1a, TaDreb-B1a</i>	2 级
85	CH16381	<i>TaNRX-B1a, TaDreb-B1a, TaBADH-A1b</i>	2 级	128	CH16434	<i>TaNRX-B1a, TaDreb-B1a</i>	2 级
86	CH16382		3 级	129	CH16435	<i>TaNRX-B1a</i>	2 级
87	CH16383	<i>TaBADH-A1b</i>	2 级	130	CH16436	<i>TaNRX-B1a</i>	2 级
88	CH16384	<i>TaBADH-A1b</i>	4 级	131	CH16437	<i>TaNRX-B1a</i>	2 级
89	CH16385		3 级	132	CH16438	<i>TaNRX-B1a, TaBADH-A1b</i>	2 级
90	CH16386		5 级	133	CH1768	<i>TaNRX-B1a, TaBADH-A1b</i>	2 级
91	CH16387		4 级	134	CH16441	<i>TaBADH-A1b</i>	4 级
92	CH1755	<i>TaDreb-B1a, TaBADH-A1b</i>	3 级	135	CH16442	<i>TaDreb-B1a, TaBADH-A1b</i>	3 级
93	CH16389	<i>TaBADH-A1b</i>	4 级	136	CH16443	<i>TaDreb-B1a</i>	4 级
94	CH16390	<i>TaDreb-B1a, TaBADH-A1b</i>	3 级	137	CH16444	<i>TaDreb-B1a</i>	4 级
95	CH1723	<i>TaBADH-A1b</i>	5 级	138	CH16445	<i>TaDreb-B1a</i>	3 级
96	CH16392		5 级	139	CH16446	<i>TaDreb-B1a</i>	3 级
97	CH1766	<i>Hap-5B-I</i>	3 级	140	CH1750	<i>TaDreb-B1a</i>	4 级
98	CH16394	<i>TaDreb-B1a, TaBADH-A1b</i>	3 级	141	CH1770	<i>TaNRX-B1a, TaDreb-B1a</i>	3 级
99	CH16395	<i>TaBADH-A1b</i>	4 级	142	CH16449	<i>TaNRX-B1a</i>	3 级
100	CH16396	<i>TaDreb-B1a, TaBADH-A1b</i>	3 级	143	CH1361		4 级
101	CH16397	<i>TaBADH-A1b</i>	3 级	144	CH1346	<i>TaNRX-B1a, TaDreb-B1a</i>	4 级
102	CH16398	<i>TaDreb-B1a, TaBADH-A1b</i>	2 级	145	CH1349		3 级
103	CH16399	<i>TaDreb-B1a, TaBADH-A1b</i>	1 级	146	CH1352	<i>TaDreb-B1a</i>	5 级
104	CH16400	<i>TaBADH-A1b</i>	1 级	147	CH1355		3 级
105	CH1726	<i>TaDreb-B1a, TaBADH-A1b</i>	3 级	148	CH15132	<i>TaNRX-B1a, TaDreb-B1a</i>	3 级
106	CH16402	<i>TaDreb-B1a</i>	5 级	149	CH1532		2 级
107	CH16403	<i>TaDreb-B1a, TaBADH-A1b</i>	2 级	150	CH262		2 级
108	CH16404	<i>TaDreb-B1a</i>	3 级	151	CH7034		2 级
109	CH16405	<i>TaDreb-B1a</i>	1 级	152	CH1302	<i>TaNRX-B1a, TaDreb-B1a</i>	2 级
				153	CH1343H	<i>TaNRX-B1a, TaDreb-B1a</i>	3 级

续表2 183份小麦品种(系)中5个抗旱等位基因的组成

Tab.2(Continued) Composition of 5 drought-resistant alleles in 175 wheat-*Thinopyrum intermedium* introgression lines

编号 Number	品系名称 Line	携带的抗旱等位基因 Drought-resistant allele	抗旱等级 Grade of drought resistance	编号 Number	品系名称 Line	携带的抗旱等位基因 Drought-resistant allele	抗旱等级 Grade of drought resistance
154	CH1343	<i>TaDreb-B1a</i> 、 <i>TaPYL1-1B^{In442}</i>	1级	168	CH16114	<i>TaDreb-B1a</i>	3级
155	CH1357		1级	169	CH1719	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaDreb-B1a</i>	2级
156	CH1362		2级	170	CH16366	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaDreb-B1a</i>	5级
157	CH1364	<i>TaDreb-B1a</i>	1级	171	CH16408	<i>TaDreb-B1a</i>	5级
158	CH1539	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaDreb-B1a</i> 、 <i>Hap-5B-I</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i>	1级	172	CH16411		3级
159	CH15145	<i>TaNRX-B1a</i>	1级	173	CH16414		5级
160	CH16430	<i>TaDreb-B1a</i>	5级	174	CH16427	<i>TaNRX-B1a</i>	1级
161	CH16431	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaDreb-B1a</i>	2级	175	CH1732	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaDreb-B1a</i>	2级
162	CH1673	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaDreb-B1a</i>	3级	176	晋麦47	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaDreb-B1a</i> 、 <i>TaPYL1-1B^{In442}</i>	3级
163	CH1683	<i>TaNRX-B1a</i>	5级	177	运早618	<i>TaNRX-B1a</i>	2级
164	CH1616	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaDreb-B1a</i>	5级	178	长6878	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaPYL1-1B^{In442}</i>	1级
165	CH1631	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaDreb-B1a</i>	4级	179	辽春10号	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaDreb-B1a</i> 、 <i>TaPYL1-1B^{In442}</i>	
166	CH1635		4级	180	中国春	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaPYL1-1B^{In442}</i> 、 <i>Hap-5B-I</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i>	
159	CH15145	<i>TaNRX-B1a</i>	1级	181	绵麦37	<i>TaDreb-B1a</i> 、 <i>TaPYL1-1B^{In442}</i> 、 <i>Hap-5B-I</i>	
160	CH16430	<i>TaDreb-B1a</i>	5级	182	川麦104	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaDreb-B1a</i> 、 <i>TaPYL1-1B^{In442}</i> 、 <i>Hap-5B-I</i> 、 <i>TaBADH-A1b</i>	
161	CH16431	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaDreb-B1a</i>	2级	183	周麦22	<i>TaNRX-B1a</i>	
162	CH1673	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaDreb-B1a</i>	3级				
163	CH1683	<i>TaNRX-B1a</i>	5级				
164	CH1616	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaDreb-B1a</i>	5级				
165	CH1631	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaDreb-B1a</i>	4级				
166	CH1635		4级				
167	CH1638	<i>TaNRX-B1a</i> 、 <i>TaDreb-B1a</i>	4级				

2.2 小偃麦衍生系的抗旱等位基因分布 分布如表3所示。
不同抗旱等级小偃麦衍生系的抗旱等位基因

表3 不同抗旱等级小偃麦衍生系的抗旱等位基因分布

Tab.3 Distribution of drought-resistant alleles in wheat-*Thinopyrum intermedium* introgression lines with different drought resistance grades.

携带抗旱等位基因个数 Number of drought-resistant alleles	衍生系个数 Number of lines	1级 Grade 1	2级 Grade 2	3级 Grade 3	4级 Grade 4	5级 Grade 5
0	37	5	8	12	6	6
1	69	10	7	25	13	14
2	63	7	12	26	9	9
3	4	0	1	2	1	0
4	2	1	1	0	0	0
合计 Total	175	23	29	65	29	29

注:抗旱性1、2、3级表示中等以上抗旱;抗旱性4、5级表示干旱敏感。
Note: Drought resistance levels 1, 2, and 3 indicated moderate or higher drought resistance; levels 4 and 5 indicated drought sensitivity.

结合前期常利芳等^[26]萌发期抗旱性分级结果,从表3可以看出,117份中等以上抗旱性衍生系中,42份携带1个抗旱等位基因,45份携带2个抗旱等位基因,3份检测到3个优异抗旱等位基因。含有3个抗旱优异等位基因的种质为CH16484(含有*TaNRX-B1a*、*TaBADH-A1b*、*TaPYL1-*

$1B^{In442}$)、CH16352(含有 $TaNRX-B1a$ 、 $TaDreb-B1a$ 、 $TaPYL1-1B^{In442}$)、CH16381(含有 $TaNRX-B1a$ 、 $TaDreb-B1a$ 、 $TaBADH-A1b$)，其中，CH16484、CH16352 抗旱性为 3 级，属于中度抗旱种质，CH16381 为 2 级抗旱性，属于强抗旱种质。2 份种质携带 4 个优异抗旱等位基因，分别为 CH6310(含有 $TaDreb-B1a$ 、 $TaBADH-A1b$ 、 $TaPYL1-1B^{In-442}$ 、 $Hap-5B-I$)和 CH1539(含有 $TaNRX-B1a$ 、 $TaDreb-B1a$ 、 $TaBADH-A1b$ 、 $Hap-5B-I$)，其抗旱性分别为 2 级和 1 级，均为强抗旱种质。37 份未检测到任何抗旱等位基因的材料中，包括 1 级极强抗旱种质 5 份，2 级强抗旱种质 8 份，12 份 3 级中度抗旱种质，推测其中可能存在新的未知的抗旱基因。

从表 3 可以看出，含有 3 个抗旱优异等位基因的 4 份衍生系中，3 个材料表现出中等以上抗旱性，仅 1 份材料表现为干旱敏感型，但含有 4 个抗旱优异等位基因的 2 个衍生系均为强抗旱种质，不存在干旱敏感类型。说明随着携带抗旱等位基因数量的增加，衍生系的抗旱性也随之增强，多个抗旱等位基因的聚合增加了材料的抗旱性。

2.3 不同等位基因抗旱效应分析

基于前期常利芳等^[26]小偃麦衍生系萌发期抗旱性鉴定结果，选用萌发期 13 个指标的抗旱系数及综合评价 D 值数据，进一步分析不同抗旱等位基因的抗旱效应，其结果如表 4 所示。

表 4 不同抗旱等位基因的抗旱系数平均值比较

Tab.4 Comparison of the mean value of drought resistance coefficients of different drought-resistant alleles

抗旱指标 Indicators of drought resistance	$TaNRX-B1$		$TaDreb-B1$		$TaBADH-A1$		$TaPYL1-1B$		$TaDRO-5B$	
	$TaNRX-B1b$	$TaNRX-B1a$	$TaDreb-B1b$	$TaDreb-B1a$	$TaBADH-A1a$	$TaBADH-A1b$	$TaPYL1-1B^{Del442}$	$TaPYL1-1B^{In442}$	$Hap-5B-II$	$Hap-5B-I$
萌发期 D 值 Germination D-value	0.541 4	0.526 7	0.531 0	0.537 3	0.536 4	0.528 3	0.531 0	0.557 4	0.529 9b	0.599 8a
发芽势/% Germination potential	0.769 6	0.740 3	0.753 1	0.764 1	0.770 9	0.724 9	0.756 3	0.768 1	0.756 0	0.781 7
发芽率/% Germination rate	0.976 7	0.979 7	0.976 5	0.976 0	0.976 7	0.974 5	0.977 4	0.966 2	0.976 7	0.969 0
发芽指数 Germination index	0.693 9	0.692 5	0.700 4	0.679 7	0.698 4	0.677 6	0.692 6	0.690 6	0.692 0	0.700 1
根长/cm Root length	0.534 4	0.554 7	0.538 3	0.550 1	0.550 0	0.526 8	0.539 6	0.575 9	0.542 0	0.559 4
胚根数/条 Root number	1.007 2	0.995 5	1.015 9	1.004 5	1.003 6	1.025 8	1.006 0b	1.066 0a	1.009 6	1.046 8
苗高/cm Shoot height	0.527 3	0.546 9	0.521 2b	0.552 5a	0.545 3a	0.509 8b	0.533 8	0.529 7	0.533 6	0.529 2
胚芽鞘长/cm Coleoptile length	1.027 2	1.055 6	1.040 7	1.043 9	1.046 6	1.038 1	1.041 8	1.043 5	1.041 2	1.054 9
叶鲜质量/(g/株) Leave fresh weight	0.408 0	0.415 7	0.410 7	0.421 8	0.414 9	0.414 3	0.414 7	0.418 0	0.414 2	0.429 8
根鲜质量/(g/株) Root fresh weight	0.417 5	0.415 1	0.412 1	0.424 3	0.421 4	0.412 4	0.415 2	0.433 4	0.413 7b	0.474 5a
叶干质量/(g/株) Leave dry weight	0.614 9	0.637 5	0.631 2	0.634 6	0.641 9	0.613 0	0.629 9	0.658 1	0.633 3	0.618 3
根干质量/(g/株) Root dry weight	0.717 4	0.695 8	0.698 7	0.712 5	0.707 8	0.699 3	0.699 8	0.746 5	0.698 8b	0.800 6a
鲜根冠比 Rresh root/shoot ratio	1.033 2	1.008 4	1.014 4	1.015 8	1.026 3	1.004 6	1.012 3	1.041 3	1.009 9	1.106 8
干根冠比 Dry root/shoot ratio	1.181 4a	1.110 5b	1.127 8	1.143 0	1.120 2	1.165 9	1.131 3	1.157 6	1.124 2b	1.309 2a
材料个数 Number of materials	62	80	68	107	107	60	16	159	9	166

注：不同小写字母表示同一基因的 2 种等位基因间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicated significant differences between the two alleles of the same gene ($P < 0.05$).

从表4可以看出,5个抗旱等位基因与非抗旱等位基因的各指标抗旱系数平均值之间差异表现各不相同,差异显著性也各不相同。携带等位基因 *TaNRX-B1a* 的衍生系,其发芽率、根长、苗高、胚芽鞘长、叶鲜质量和叶干质量的抗旱系数平均值均大于携带 *TaNRX-B1b* 的衍生系,但差异不显著;携带 *TaNRX-B1a* 的衍生系的其余8个指标的抗旱系数平均值均小于携带 *TaNRX-B1b* 的衍生系,其中,二者的干根冠比抗旱系数均值差异显著 ($P<0.05$)。携带 *TaBADH-A1b* 的衍生系,其胚根数、干根冠比和苗高的抗旱系数均值大于携带 *TaBADH-A1a* 的衍生系,但差异不显著。其余11个指标的抗旱系数均值均是携带 *TaBADH-A1a* 的衍生系大于携带 *TaBADH-A1b* 的衍生系,且二者苗高抗旱系数均值差异显著 ($P<0.05$)。携带抗旱等位基因 *TaDreb-B1a* 的萌发期D值、发芽势、根长、苗高、胚芽鞘长、叶鲜质量、根鲜质量、叶干质量、根干质量、鲜根冠比和干根冠比的抗旱系数均值均大于携带 *TaDreb-B1b* 的衍生系,且携带 *TaDreb-B1a* 与携带 *TaDreb-B1b* 的衍生系的苗高抗旱系数均值差异显著 ($P<0.05$);携带 *TaPYL1-1B^{In-442}* 的衍生系,在除了发芽率、发芽指数、苗高外的11个指标的抗旱系数均值均大于携

带 *TaPYL1-1B^{Del-442}* 的衍生系,二者间仅胚根数抗旱系数均值表现显著差异 ($P<0.05$)。携带抗旱等位基因 *Hap-5B-I* 的衍生系萌发期D值、发芽势、发芽指数、根长、胚根数、胚芽鞘长、叶鲜质量、根鲜质量、根干质量、干根冠比、鲜根冠比等11个指标抗旱系数均值均大于携带 *Hap-5B-II* 的材料,且二者之间萌发期D值、根鲜质量、根干质量和干根冠比抗旱系数均值均差异显著 ($P<0.05$)。

相关性分析结果表明(表5),*TaNRX-B1a* 与干根冠比呈显著负相关 ($P<0.05$),相关系数为0.174。*TaDreb-B1a* 与苗高呈显著正相关 ($P<0.05$), $r=0.170$ 。*TaBADH-A1b* 与苗高呈显著负相关 ($P<0.05$), $r=0.189$ 。*TaPYL1-1B^{In-442}* 与胚根数呈极显著正相关 ($P<0.01$), $r=0.198$ 。*TaDRO-5B* 基因的等位基因 *Hap-5B-I* 与萌发期D值、根鲜质量、根干质量和干根冠比均呈显著正相关 ($P<0.05$)。

综上,*TaDreb-B1*、*TaPYL1-1B*、*TaDRO-5B* 基因的抗旱等位基因与各指标的抗旱系数一致性较好,且与多个抗旱指标显著相关,抗旱效应较高,其分子标记能够用于小麦抗旱性材料的辅助筛选。

表5 抗旱等位基因与各指标抗旱系数的相关性分析

Tab.5 Correlation analysis between drought-resistant alleles and drought resistance coefficients of various indicators

抗旱指标 Indicators of drought resistance	<i>TaNRX-B1a</i>	<i>TaDreb-B1a</i>	<i>TaBADH-A1b</i>	<i>TaPYL1-1B^{In-442}</i>	<i>Hap-5B-I</i>
萌发期D值 Germination D-value	-0.079	0.033	-0.042	0.083	0.169*
发芽势 Germination potential	-0.063	0.024	-0.097	0.015	0.025
发芽率 Germination rate	0.044	-0.007	-0.031	-0.091	-0.048
发芽指数 Germination index	-0.008	-0.124	-0.124	-0.007	0.022
根长 Root length	0.109	0.058	-0.112	0.106	0.039
胚根数 Root number	-0.071	-0.064	0.123	0.198**	0.094
苗高 Shoot height	0.108	0.170*	-0.189*	-0.013	-0.011
胚芽鞘长 Coleoptile length	0.160	0.018	-0.046	0.006	0.035
叶鲜质量 Leave fresh weight	0.063	0.085	-0.004	0.015	0.055
根鲜质量 Root fresh weight	-0.017	0.084	-0.061	0.074	0.190*
叶干质量 Leave dry weight	0.093	0.014	-0.114	0.067	-0.027
根干质量 Root dry weight	-0.076	0.048	-0.028	0.096	0.160*
鲜根冠比 Rresh root/shoot ratio	-0.076	0.004	-0.068	0.053	0.137
干根冠比 Dry root/shoot ratio	-0.174*	0.033	0.099	0.034	0.185*

注:**表示在0.01水平下极显著相关;*表示在0.05水平下显著相关。

Note: ** indicated extremely significant correlation at the 0.01 level; * indicated significant correlation at the 0.05 level.

3 结论与讨论

本研究用 5 个抗旱基因(*TaNRX-B1*、*TaDreb-B1*、*TaPYL1-1B*、*TaDRO-5B*、*TaBADH-A1*) 的 6 对分子标记检测了 175 份小偃麦衍生系,明确了其抗旱等位基因组成,发现 5 个抗旱优异等位基因在供试材料中频率总体偏低,但携带多个抗旱等位基因的种质表现出较强的抗旱性,其中,13 份强抗旱种质中未检测到这 5 个抗旱等位基因,推测可能含有其他未知的抗旱基因。此外,*TaDreb-B1*、*TaPYL1-1B* 和 *TaDRO-5B* 抗旱等位基因的多个指标抗旱系数均值高于其干旱敏感等位基因,且与多个指标抗旱系数呈显著正相关,抗旱效应值较高,可有效用于小麦种质资源的抗旱性分子标记辅助检测。

利用分子标记检测携带优异抗旱等位基因的小麦种质资源,可以加速优异抗旱种质的有效利用。前人已利用上述 5 个抗旱基因的功能标记鉴定了不同类型的小麦种质,表明这些优异抗旱等位基因已经在小麦抗旱育种中得到了应用。吴晓军等^[17]对 46 份黄淮海小麦品种进行抗旱基因检测发现,抗旱基因 *TaNRX-B1a* 占比为 45.7%,*TaDreb-B1a* 占比为 95.7%。孙晓燕等^[15]对 137 份春小麦育种材料进行抗旱基因检测发现,抗旱基因 *TaNRX-B1a* 占比为 65.69%。MAO 等^[8]对 120 份小麦品种进行抗旱基因检测发现,抗旱等位基因 *TaPYL1-1B^{In-442}* 占比为 48.3%。张芳等^[28]对 83 份新疆冬小麦品种(系)的抗旱基因进行检测发现,*TaNRX-B1a* 占比为 83.1%。李玮等^[29]利用 KASP 标记对 31 份抗旱、高产小麦品种的抗旱基因进行检测发现,*TaPYL1-1B^{In-442}* 占比为 83.87%,*TaDreb-B1a* 占比为 77.42%。张维军等^[13]对中国小麦微核心种质的抗旱基因进行检测后发现,*TaDRO-5B* 基因在地方品种中以等位基因 *Hap-5B-I* (75.16%) 为主,现代育成品种中则以 *Hap-5B-II* (81.82%) 为主。本研究中,5 个抗旱优异等位基因的分布频率以 *TaDreb-B1a* 为最高,占比为 38.85%,其次依次为 *TaNRX-B1a* (占比为 35.43%)、*TaBADH-A1b* (占比为 34.28%)、*TaPYL1-1B^{In-442}* (占比为 9.14%)、*Hap-5B-I* (占比为 5.14%)。与前人对不同类型种质抗旱等位基因检测结果相比,175 份小偃麦衍生系含有优异抗旱等位基因的比例总体偏低。这可能是功能标记

开发所用材料与小偃麦衍生系遗传背景差异较大,且仅检测了 5 个抗旱基因,不足以全面解释小偃麦衍生系的抗旱性表现。此外,小偃麦衍生系可能含有新的效应更强的抗旱基因,特别是 13 份表现极强或强抗旱性的衍生系未检测到任何抗旱等位基因,有待于利用关联分析和连锁分析等方法挖掘其中未知的抗旱相关基因。

前人多采用相对发芽率作为评价小麦抗旱性的指标来判断分子标记的有效性^[14-17],而抗旱性是一个受多基因影响的复杂数量性状,仅用相对发芽率不足以全面评价材料的真实抗旱性。本研究结合小偃麦衍生系萌发期 13 个指标的抗旱系数以及综合评价 D 值,更加准确地反映了不同抗旱等位基因的效应。结果显示,携带抗旱等位基因 *TaDreb-B1a*、*TaPYL1-1B^{In-442}*、*Hap-5B-I* 的种质,其萌发期 D 值、最大根长、胚芽鞘长等多个指标的抗旱系数大于相应的携带 *TaDreb-B1b*、*TaPYL1-1B^{Del-442}*、*Hap-5B-II* 的种质;携带 *TaNRX-B1a* 的种质在发芽率、胚芽鞘长等 8 个指标的抗旱系数均值大于携带 *TaNRX-B1b* 的材料;携带 *TaBADH-A1b* 的种质仅胚根数、干根冠比的抗旱系数大于携带 *TaBADH-A1a* 的种质,其余指标则反之。以上结果表明,*TaDreb-B1*、*TaPYL1-1B*、*TaDRO-5B* 的抗旱等位基因效应较高,其标记能够有效地检测供试材料的抗旱性。本研究基于多个萌发期抗旱相关指标证明了 *TaDreb-B1*、*TaPYL1-1B*、*TaDRO-5B* 基因功能标记的有效性,为抗旱育种的标记辅助选择提供了更简单实用的分子标记。

此外,由于抗旱性是众多基因协调调控的复杂性状,加之环境影响及基因间的连锁与互作效应,仅单个或少数优异抗旱等位基因不足以全面反映种质材料抗旱性表现,聚合多个优异抗旱基因可以有效提高材料的抗旱性水平^[18-20,30]。本研究中,27 份携带 1 个抗旱等位基因的衍生系表型为干旱敏感型,但携带 3 个优异抗旱等位基因的衍生系中,CH16484、CH16352 的萌发期抗旱性为 3 级,属于中度抗旱种质,CH16381 萌发期抗旱性为 2 级,属于强抗旱种质,携带 4 个优异抗旱等位基因的 CH6310 和 CH1539 分别为 2 级和 1 级抗旱性,分别属于强和极强抗旱种质。进一步根据常利芳等^[26]成株期抗旱性鉴定结果分级发现,CH16352 成株期抗旱性为 3 级,CH16381 为 1 级,CH6310 为 2 级,CH1539 为 3 级,均表现为中等以上抗旱性,仅

CH16484表现为5级,对干旱较为敏感。这5份衍生系可以作为抗旱种质加以利用,同时也证明了多个抗旱等位基因聚合能够增加材料的抗旱性。将来可通过更多方法挖掘抗旱基因资源,开发更多的主效抗旱基因功能标记,以进一步提高抗旱小麦品种的分子标记辅助选择效率,进行多基因聚合育种,解决抗旱性育种中的实际问题。

参考文献:

- [1] 李龙,毛新国,王景一,等. 小麦抗旱性研究进展与展望[J]. 干旱地区农业研究,2023,41(3):11-20.
LI L, MAO X G, WANG J Y, et al. Progress and prospect of wheat research on drought resistance[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(3): 11-20.
- [2] BAPELA T, SHIMELIS H, TSILO T J, et al. Genetic improvement of wheat for drought tolerance: progress, challenges and opportunities[J]. Plants, 2022, 11(10): 1331.
- [3] WANG J Y, LI C N, LI L, et al. Exploitation of drought tolerance-related genes for crop improvement[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(19): 10265.
- [4] YOUNIS A, RAMZAN F, RAMZAN Y, et al. Molecular markers improve abiotic stress tolerance in crops: a review[J]. Plants, 2020, 9(10): 1374.
- [5] 高洁,王富延,宋国琦,等. 旱地小麦区试品系中抗旱高产相关基因的KASP标记检测[J]. 山西农业科学, 2024, 52(4): 9-15.
GAO J, WANG F Y, SONG G Q, et al. KASP Marker detection of genes related to drought resistance and high yield in dryland regional trial wheat lines[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2024, 52(4): 9-15.
- [6] ZHANG Y F, WANG J Y, LI Y Y, et al. Wheat TaSnRK_{2.10} phosphorylates TaERD15 and TaENO1 and confers drought tolerance when overexpressed in rice[J]. Plant Physiology, 2023, 191(2): 1344-1364.
- [7] 张帆,蒋雷,鞠丽萍,等. 一个普通小麦 Trx 超家族新基因 TaNRX 的克隆与抗旱相关标记开发[J]. 作物学报, 2014, 40(1): 29-36.
ZHANG F, JIANG L, JU L P, et al. Cloning a novel gene TaNRX of Trx superfamily and developing its molecular markers related to drought resistance in common wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(1): 29-36.
- [8] MAO H D, JIAN C, CHENG X X, et al. The wheat ABA receptor gene TaPYL1-1B contributes to drought tolerance and grain yield by increasing water-use efficiency[J]. Plant Biotechnology Journal, 2022, 20(5): 846-861.
- [9] ZHANG Y, XIA P G. The DREB transcription factor, a bio-macromolecule, responds to abiotic stress by regulating the expression of stress-related genes[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 243: 125231.
- [10] WEI B, JING R L, WANG C S, et al. Dreb1 genes in wheat (*Triticum aestivum* L.): development of functional markers and gene mapping based on SNPs[J]. Molecular Breeding, 2009, 23(1): 13-22.
- [11] 韩悦欣,伍国强,魏明,等. BADH在植物响应非生物胁迫中的作用[J]. 植物生理学报, 2022, 58(2): 254-264.
HAN Y X, WU G Q, WEI M, et al. The role of BADH in the response to abiotic stress in plants[J]. Plant Physiology Journal, 2022, 58(2): 254-264.
- [12] YU M, YU Y, GUO S H, et al. Identification of TaBADH-A1 allele for improving drought resistance and salt tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 942359.
- [13] 张维军,李甜,秦琳,等. 小麦 TaDRO 与根系形态的关联分析及在中国和全球品种中的地理分布与演变[J]. 中国农业科学, 2018, 51(10): 1813-1829.
ZHANG W J, LI T, QIN L, et al. TaDRO, a gene associated with wheat root architectures, its global distribution and evolution in breeding[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(10): 1813-1829.
- [14] 刘芳军,王宪国,桂安胜,等. 宁夏小麦 TaNrx-B1 和 TaFer-A1 基因组成及其与相对发芽率的关系[J]. 2015(11): 1506-1511.
LIU F J, WANG X G, GUI A S, et al. Composition of TaNrx-B1 and TaFer-A1 genes and the association with relative germination rate of Ningxia wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2015(11): 1506-1511.
- [15] 孙晓燕,魏旭,赵春芝,等. 春小麦育种材料抗旱性和穗发芽抗性分子标记鉴定[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(1): 36-43.
SUN X Y, WEI X, ZHAO C Z, et al. Identification of drought and PHS tolerance with molecular markers in spring wheats [J]. Journal of Triticeae Crops, 2016, 36(1): 36-43.
- [16] 吴晓军,胡喜贵,陈向东,等. 基于小麦外引种质资源的抗旱性分子标记检测及实用性评价[J]. 华北农学报, 2021, 36(3): 74-82.
WU X J, HU X G, CHEN X D, et al. Detection and practical evaluation of molecular markers associated with drought resistance based on introduced wheat germplasm resources[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2021, 36(3): 74-82.
- [17] 吴晓军,姜豪,宋林通,等. 黄淮海麦区部分小麦品种的抗旱性评价及相关分子标记的有效性验证[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(3): 270-278.
WU X J, JIANG H, SONG L T, et al. Comprehensive evaluation on drought resistance of some wheat cultivars in Huang-Huai-Hai region and validation of the related molecular markers[J]. Journal of Triticeae Crops, 2023, 43(3): 270-278.
- [18] MOHAMED E A, AHMED A A M, SCHIERENBECK M, et al. Screening spring wheat genotypes for TaDreb-B1 and Fehw3 genes under severe drought stress at the germination stage using KASP technology[J]. Genes, 2023, 14(2): 373.
- [19] REHMAN S U, ALI SHER M, SADDIQUE M A B, et al. Development and exploitation of KASP assays for genes underpinning drought tolerance among wheat cultivars from Pakistan[J]. Frontiers in Genetics, 2021, 12: 684702.
- [20] ELTAHER S, HASHEM M, AHMED A A M, et al. Effectiveness of TaDreb-B1 and 1-FEH w3 KASP markers in spring and winter wheat populations for marker-assisted selection to improve drought tolerance[J]. International Journal of

- Molecular Sciences, 2023, 24(10): 8986.
- [21] CHANG Z J, ZHANG X J, YANG Z J, et al. Characterization of a partial wheat-*Thinopyrum intermedium* amphiploid and its reaction to fungal diseases of wheat[J]. Hereditas, 2010, 147(6): 304-312.
- [22] SHENG D C, LIU M J, ZHANG X J, et al. Characterization of leaf rust resistance in a set of wheat-*Thinopyrum* amphiploid-derived hexaploid breeding lines[J]. Crop Protection, 2022, 156: 105956.
- [23] 张晓军, 肖进, 王海燕, 等. 小偃麦衍生品系的赤霉病抗性评价[J]. 作物学报, 2020, 46(1): 62-73.
ZHANG X J, XIAO J, WANG H Y, et al. Evaluation of resistance to *Fusarium* head blight in *Thinopyrum*-derived wheat lines[J]. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(1): 62-73.
- [24] 张潇文, 李世姣, 张晓军, 等. 小麦品系 CH7034 中耐盐 QTL 定位[J]. 作物学报, 2022, 48(10): 2654-2662.
ZHANG X W, LI S J, ZHANG X J, et al. QTL mapping for salt tolerance in wheat line CH7034[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(10): 2654-2662.
- [25] 常利芳, 李欣, 郭慧娟, 等. 小偃麦衍生系表型遗传多样性分析及综合评价[J]. 草业学报, 2022, 31(11): 61-74.
CHANG L F, LI X, GUO H J, et al. Genetic diversity analysis and comprehensive evaluation of octoploid *Tritipyrum*-derived wheat breeding lines based on agronomic traits[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(11): 61-74.
- [26] 常利芳, 乔彦玮, 陈芳, 等. 小偃麦衍生系萌发期和成株期抗旱性综合评价[J]. 植物遗传资源学报, 2023, 24(5): 1321-1333.
- CHANG L F, QIAO Y W, CHEN F, et al. Comprehensive evaluation on drought resistance of wheat-*Thinopyrum intermedium* introgression lines at germination and adult stages[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2023, 24(5): 1321-1333.
- [27] 张海萍, 常成, 游光霞, 等. 中国小麦微核心种质及地方品种籽粒休眠特性的分子标记鉴定[J]. 作物学报, 2010, 36(10): 1649-1656.
ZHANG H P, CHANG C, YOU G X, et al. Identification of molecular markers associated with seed dormancy in mini core collections of Chinese wheat and landraces[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(10): 1649-1656.
- [28] 张芳, 颜安, 任毅, 等. 新疆冬小麦萌发期抗旱性综合评价[J]. 植物遗传资源学报, 2019, 20(1): 100-112.
ZHANG F, YAN A, REN Y, et al. Evaluation on drought resistance of winter wheat cultivars in Xinjiang[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(1): 100-112.
- [29] 李玮, 孔淑鑫, 宋国琦, 等. 31 份小麦材料中抗旱基因的 KASP 检测[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(10): 1241-1247.
LI W, KONG S X, SONG G Q, et al. Analysis of drought resistant genes in 31 wheat breeding materials by KASP marker[J]. Journal of Triticeae Crops, 2023, 43(10): 1241-1247.
- [30] 杨锴, 程小虎, 赵杰, 等. 不同抗旱基因对小麦千粒质量的影响[J]. 华北农学报, 2023, 38(3): 69-76.
YANG K, CHENG X H, ZHAO J, et al. Effect of different drought resistance genes on thousand grains weight of wheat[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2023, 38(3): 69-76.

著作权使用声明

本刊已许可中国知网以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含中国知网著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议, 请在投稿时说明, 本刊将按作者说明处理。

《山西农业科学》编辑部