

小麦耐热分子标记 Xwmc44 的鉴定及分析

刘子会¹, 刘畅², 彭义峰³, 李国良¹, 张华宁¹, 张红梅¹, 段硕楠¹, 郭秀林¹

(¹河北省农林科学院遗传生理研究所/河北省植物转基因中心重点实验室, 石家庄 050051;

²南京农业大学植物保护学院, 南京 210095; ³石家庄市农林科学研究院, 石家庄 050000)

摘要: 耐热育种是我国小麦育种的一个重要目标。寻找与目标性状关联的分子标记, 可克服常规育种的盲目性, 提高分子标记辅助选择育种的准确性。本研究对 169 份小麦品种(系)的千粒重、籽粒长度、籽粒宽度、籽粒表面积和籽粒周长 5 个籽粒相关性状的耐热指数进行鉴定, 通过简单关联分析获得耐热相关分子标记 Xwmc44。聚丙烯酰胺凝胶电泳分析表明: Xwmc44 具有 I、II、III 3 个等位变异类型。I 型等位变异与千粒重、籽粒宽度、籽粒表面积和籽粒周长 4 个籽粒性状的热感指数显著正相关 ($P < 0.05$), I 型等位变异小麦品种(系)的热感指数平均值大于 1; II 型等位变异与千粒重热感指数极显著负相关 ($P < 0.01$), 与籽粒宽度和籽粒周长 2 个籽粒性状的热感指数显著负相关 ($P < 0.05$), II 型小麦品种(系)的耐热指数平均值小于 1, 为优良等位变异; III 型等位变异与小麦籽粒性状热感指数都不相关。研究结果表明: Xwmc44 与小麦耐热性密切相关, 其中 II 型等位变异是耐热优良等位变异。这为小麦耐热分子育种提供了参考信息。

关键词: 小麦; 等位变异; 分子标记; 耐热性

Identification and Analysis of Heat-tolerant Molecular Marker Xwmc44 in Wheat

LIU Zi-hui¹, LIU Chang², PENG Yi-feng³, LI Guo-liang¹, ZHANG Hua-ning¹,
ZHANG Hong-mei¹, DUAN Shuo-nan¹, GUO Xiu-lin¹

(¹ Institute of Genetics and Physiology, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences/ Key Laboratory of Plant Genetic Engineering Center of Hebei Province, Shijiazhuang 050051; ² College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095; ³ Shijiazhuang Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050000)

Abstract: High temperature at reproductive stage destabilizes grain yield and quality especially in warm climate wheat production region. Breeding for heat-tolerant wheat varieties is an important target of wheat breeding in China, while identification of the molecular markers associated with the heat tolerant traits can accelerate this process. The heat-tolerant indexes of five kernel traits including thousand kernel weight, kernel length and kernel width, kernel surface area and kernel circumference were investigated by taking use of 169 wheat varieties (lines), and genotyping with SSR marker Xwmc44 identified three allelic variants I, II and III. A significant positive correlation between variant I and heat-tolerant indexes of four kernel traits (thousand kernel weight, kernel width, kernel surface area and kernel circumference) was observed. The average values of heat-tolerant indexes of kernel traits in wheat varieties (lines) with I allelic variation was greater than 1. The wheat varieties with variant II was negatively correlated with the heat tolerance index of thousand kernel weight ($P < 0.01$), and negatively correlated with the heat-tolerance index of two kernel traits including kernel width and kernel circumference ($P < 0.05$). The average value of heat-tolerance indexes of kernel traits in wheat varieties

收稿日期: 2020-04-09 修回日期: 2020-04-27 网络出版日期: 2020-05-20

URL: <http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20200409002>

第一作者主要从事作物抗逆遗传生理机制的研究, E-mail: liuzihui1978@163.com

通信作者: 郭秀林, 主要从事作物分子遗传机制的研究, E-mail: myhf2002@163.com

基金项目: 河北省现代农业创新工程 (494-0402-YBN-S2XB, 494-0402-YBN-CTGQ); 河北省重点研发计划项目 (20326309D)

Foundation projects: Technological Innovation Project of Modern Agriculture of Hebei Province (494-0402-YBN-S2XB, 494-0402-YBN-CTGQ), The Key Research and Development Program of Hebei Province (20326309D)

(lines) with II allelic variation was less than 1. No detectable association was observed in variant III with the heat-tolerance indexes. These results showed that Xwmc44 was related to heat tolerance of wheat, and II allelic variation was a superior allele for heat tolerance of wheat. This will provide more information for heat-tolerant wheat breeding with molecular markers.

Key words: wheat (*Triticum aestivum* L.); allelic variation; molecular marker; heat tolerance

小麦是我国第二大粮食作物,其丰产稳产对我国的粮食安全具有重要作用。但是,随着全球气候变暖,小麦生育后期面临着越来越严重的高温威胁。政府间气候变化专门委员会(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)资料表明:过去50年中气温以每10年0.13℃的速度在升高,而且未来气温升高将会以更高的加速度递增^[1]。小麦生育期平均气温每升高1℃,小麦产量就会降低4%^[2-3]。因此,培育耐高温小麦品种是当前和今后小麦育种工作面临的一个重要课题。

分子标记辅助选择育种可克服育种的盲目性,提高育种效率。然而前期分子标记的建立是关键。小麦耐热性是较复杂的数量遗传性状,建立合理的小麦耐热评价指标是获得小麦耐热分子标记的前提。研究发现,耐热性不同的小麦品种在细胞膜的热稳定性、冠层温度、叶绿素含量和活性氧清除相关酶类等生理指标方面存在显著差异,这些可以作为评价小麦耐热性的间接指标^[4]。这些不受季节影响,鉴定指标快速准确,以此为评价指标发展了一些小麦耐热分子标记。这些分子标记在鉴定小麦耐热机理研究中具有一定参考价值,但由于没有与产量等经济指标结合,在育种中的应用受到一定局限。小麦在灌浆期遭遇高温,籽粒性状和产量变化最为明显。因此,高温胁迫下千粒重变化被认为是评价小麦耐热性的一个较好经济性状指标^[5-7]。陈希勇等^[8]认为可以采用千粒重或穗粒重热感指数和几何平均产量2个指标相结合来鉴定和评价小麦品种的耐热性,这样可避免仅针对热感指数进行正向选择而遗失具有较高产量潜力和较高耐热性基因型的可能性。鉴于此,本实验室前期以169份黄淮海区小麦品种(系)为试验材料,对2015-2016年度下千粒重、籽粒长度、籽粒宽度、籽粒表面积和籽粒周长进行了测定,并计算了籽粒性状的热感指数,利用单位点关联分析方法,从48对多态性SSR分子标记中筛选获得与小麦籽粒性状热感指数关联的分子标记(数据未发表)。本研究选择与小麦籽粒性状热感指数关联度高的分子标记Xwmc44为研究对象,重点分析该分子标记的等位基因变异类型及分布频率,评价各等位变异类型间籽粒性状热感指数的差

异,发现优良的耐热等位变异类型,以期小麦耐热分子标记辅助选择育种提供参考信息。

1 材料与方法

1.1 材料

169份供试材料(详见<http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20200409002>,附表1)主要来源于我国的河北、河南、山东、山西、江苏等小麦主产区。供试小麦品种(系)于2015-2016年的小麦生长季种植于河北省农林科学院大河科技园区(石家庄,38°05'N,114°44'E)。试验材料顺序排列,人工点播,行长5m,行距30cm,株距5cm。热处理和正常处理的材料各重复种植3次。田间管理方法同常规标准试验田。

1.2 分子标记检测

于小麦返青期采集幼嫩叶片,采用CATB法^[9]提取小麦基因组DNA。Xwmc44引物来自Grain Genes 2.0(<http://wheat.pw.usda.gov/>)。

正向引物:5'-GGTCTTCTGGGCTTTGATCCTG-3';反向引物:5'-TGTTGCTAGGGACCCGTA GTGG-3'。引物由华大科技有限公司合成。PCR扩增根据文献中描述的方法完成^[10],PCR扩增体系为:2X Flash hot Start Master Mix(Dye)5μL、引物终浓度为1μmol/L、40~60ng模板DNA,用ddH₂O补至10μL。反应程序:94℃预变性3min;94℃变性20s,60℃退火30s,72℃延伸45s,35个循环,72℃延伸10min。扩增产物用8%的聚丙烯酰胺凝胶电泳检测,银染,显色,拍照,统计等位变异类型。

1.3 热处理和籽粒性状数据的调查

于小麦开花后(5月10-30日)进行覆棚增温处理,同时记录棚内温度;田间自然生长的小麦为对照。覆棚期间,高温处理比正常环境的温度平均高2.3℃,棚内热处理日最高温度平均值为29.8℃,棚外正常处理日最高温度平均值为27.5℃。

供试小麦材料成熟收获后晾干脱粒,利用自动考种仪,测定小麦的千粒重、籽粒长度、籽粒宽度、籽粒表面积和籽粒周长。

1.4 热感指数的计算和数据处理

热感指数的计算参照文献[8],其计算公式为

$S = (1 - Y_h/Y_p) / H$, 其中, Y_h 为某一品种在热胁迫环境下的平均籽粒性状值(千粒重、籽粒长度、宽度等), Y_p 为该品种在非胁迫环境下的籽粒性状值; $H = 1 - \bar{Y}_h / \bar{Y}_p$ (H 为环境胁迫强度, \bar{Y}_h 为全部参试品种 Y_h 的平均值, \bar{Y}_p 为全部参试品种 Y_p 的平均值)。

数据分析由 SPSS 13.0 和 Excel 完成。对不同等位变异的籽粒热感指数数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA); 利用 Pearson 相关分析模型^[11] 评估 Xwmc44 标记每个等位变异与籽粒性状热感指数值的相关性。

2 结果与分析

2.1 供试小麦品种(系)耐热相关指标的变异分析

从表 1 可以看出, 千粒重热感指数的范围为 $-0.37 \sim 3.22$, 变异系数最小, 为 0.48%; 籽粒长度的热感指数的范围为 $-4.87 \sim 9.70$, 且变异系数最大, 为 2.29%。前人把热感指数大于 1 的小麦定义为热敏感品种, 而把热感指数小于 1 的小麦定义为耐热小麦品种^[8]。由此可以看出, 本研究中的供试小麦品种(系)耐热性差异较大。

表 1 小麦籽粒性状热感指数的变异分析

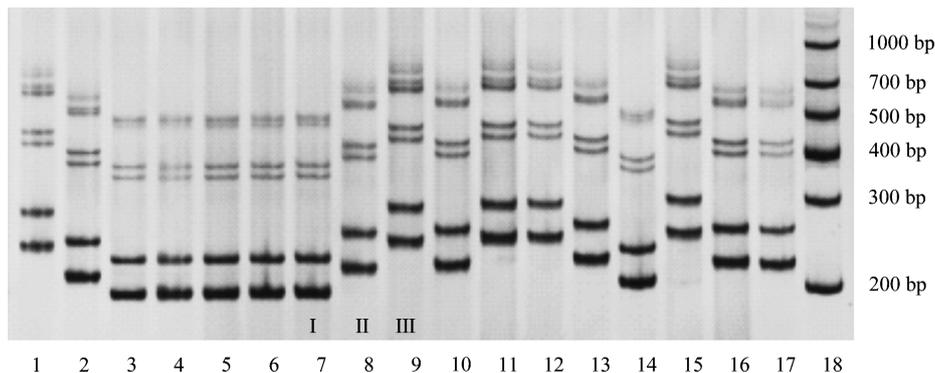
Table 1 Variation analysis of heat-tolerance index of wheat kernel traits

性状 Traits	最小值 Mix.	最大值 Max.	变异系数 (%) CV
千粒重热感指数 HI-TKW	-0.37	3.22	0.48
籽粒长度热感指数 HI-KL	-4.87	9.70	2.29
籽粒宽度热感指数 HI-KW	-0.70	3.17	0.82
籽粒表面积热感指数 HI-KS	-1.30	3.67	0.92
籽粒周长热感指数 HI-KC	-2.15	4.51	1.10

HI-TKW: Heat index-thousand kernel weight, HI-KL: Heat index-kernel length, HI-KW: Heat index-kernel width, HI-KS: Heat index-kernel surface area, HI-KC: Heat index-kernel circumference. The same as below

2.2 小麦 Xwmc44 分子标记等位变异及分布频率

对 169 个小麦品种(系)的聚丙烯酰胺电泳分析, 结果显示: Xwmc44 可扩增出 I、II、III 3 个类型的等位变异(图 1)。其中 42 个品种显示 I 型扩增片段, 占总测试材料的 24.9%, 75 个品种显示 II 型扩增片段, 出现频率为 44.4%, 52 个品种显示 III 型扩增片段, 占总材料的 30.8%。各品种(系)等位变异类型见表 2。



1: 邯 02-6018; 2: 邯 6228; 3: 邯 8062; 4: 邯 05-4860; 5: 邯农 351; 6: 大粒 10-1; 7: 大粒 110-4; 8: 大粒 178-1; 9: 大粒 201-1; 10: 大粒 313; 11: 大粒 103; 12: 大粒 183; 13: 大粒 405-2; 14: 大粒 427; 15: F5-11-2; 16: 大粒 39 矮; 17: E42-03-5-3-1-2
1: Han02-6018, 2: Han6228, 3: Han8062, 4: Han05-4860, 5: Hannong351, 6: Dali10-1, 7: Dali110-4, 8: Dali178-1, 9: Dali201-1, 10: Dali313, 11: Dali103, 12: Dali183, 13: Dali405-2, 14: Dali427, 15: F5-11-2, 16: Dali39ai, 17: E42-03-5-3-1-2, 18: Marker

图 1 分子标记 Xwmc44 扩增出的片段类型

Fig. 1 PCR fragments amplified with the marker Xwmc44

表 2 供试小麦品种(系)等位变异类型

Table 2 Allelic variations of wheat varieties (lines)

品种(系) Variety	等位变异类型 Allelic type	品种(系) Variety	等位变异类型 Allelic type	品种(系) Variety	等位变异类型 Allelic type
石新 733 Shixin733	III	烟优 361 YanYou361	I	大粒 10-1 Dali10-1	I
冀 5265 Ji5265	III	邯 02-6018 Han02-6018	III	大粒 110-4 Dali110-4	I
陕麦 509 Shanmai509	II	邯 6228 Han6228	II	大粒 178-1 Dali178-1	II
金禾 748 Jinhe748	II	邯 8062 Han8062	I	大粒 201-1 Dali201-1	III
金禾 9123 Jinhe9123	II	邯 05-4860 Han05-4860	I	大粒 313 Dali313	II

表 2 (续)

品种(系) Variety	等位变异类型 Allelic type	品种(系) Variety	等位变异类型 Allelic type	品种(系) Variety	等位变异类型 Allelic type
金禾 4857 Jinhe4857	II	邯农 351 Hannong351	I	大粒 148-2 Dali148-2	II
金丰 6164 Jinfeng6164	III	衡 04-4358 Heng04-4358	I	大粒 103 Dali103	III
金禾 0459 Jinhe0459	II	衡 05-4444 Heng05-4444	I	大粒 183 Dali183	III
金丰 5032 Jinfeng5032	II	衡 06 观 522 Heng06guan522	III	大粒 405-2 Dali405-2	II
金丰 7183 Jinfeng7183	II	衡 4399 Heng4399	I	大粒 427 Dali427	I
金禾 96023 Jinhe96023	II	衡 7228 Heng7228	I	F5-11-2	III
金禾 7178 Jinhe7178	II	衡 0628 Heng0628	I	大粒 39 矮 Dali39ai	II
金禾 8211 Jinhe8211	III	衡 05 观 216 Heng05guan216	I	E42-03-5-3-1-2	II
金禾 9237 Jinhe9237	II	衡 5362 Heng5362	I	I31-03-3-1-3-2	II
金丰 4208 Jinfeng4208	II	邢麦 7 号 Xingmai7	I	京冬 8 号 BC4S2-4-11-1 Jingdong8BC4S2-4-11-1	I
金丰 9229 Jinfeng9229	II	邢麦 6 号 Xingmai6	I	京冬 8 号 BC4S2-5-1-2 Jingdong8BC4S2-5-1-2	II
金禾 10-140 Jinhe10-140	III	石家庄 8 号 Shijiazhuang8	II	农大 3197BC3S2-1-3-2 Nongda3197BC3S2-1-3-2	II
金禾 8431 Jinhe8431	II	石优 17 Shiyou17	I	中麦 9 号 Zhongmai9	II
金禾 8515 Jinhe8515	II	石麦 19 Shimai19	I	石 B08-5341 ShiB08-5341	III
金禾 10-158 Jinhe10-158	III	石麦 18 Shimai18	II	YB66180	II
金禾 12-089 Jinhe12-089	II	石 06U-4532 Shi06U-4532	I	山农 055849 Shannong055849	III
金禾 12-389 Jinhe12-389	II	石新 828 Shixin828	II	05CA349	II
金禾 12-110 Jinhe12-110	III	衡 8966 Heng8966	II	山农 055843 Shannong055843	I
金禾 12-155 Jinhe12-155	II	科农 9204 Kenong9204	III	邯 05-5093 Han05-5093	I
8901BC5S3-3-9-4	III	科农 213 Kenong213	III	冀麦 585 Jimai585	I
8901BC5S4-1-3-2	I	科农 199 Kenong199	III	石 06-6136 Shi06-6136	II
8901BC5S4-1-6-4	III	科农 1093 Kenong1093	III	石 H083-366 ShiH083-366	I
02P067	III	科农 3106 Kenong3106	II	藁优 5766 Gaoyou5766	III
92R137-1-1	II	冀丰 717 Jifeng717	III	羲优 608 Xiyou608	III
NAU28	III	冀麦 185 Jimai185	I	新麦 10 号 Xinmai10	I
南农 09P16 Nannong09P16	II	冀麦 518 Jimai518	III	藁优 1804 Gaoyou1804	III
NAU617	III	冀资 6 号 Jizi6	III	藁优 5218 Gaoyou5218	III
CP02-63-13-1	II	师栾 09-1 Shiluan09-1	I	08CA101	II
CP20-39-11-1	II	冀师 02-1 Jishi02-1	III	石新 618 Shixin618	I
Cp02-8-5-6-2-1	I	金麦 1 号 Jinmai1	II	航麦 2 号 Hangmai2	I
Cp20-38-4-3-2	I	金麦 3 号 Jimai3	II	邯 07-8069 Han07-8069	III
Cp93-8-11-2	II	河农 4198 Henong4198	II	藁麦 9236 Gaomai9236	III
CP03-28-1-1	II	河农 58-3 Henong58-3	III	邯 08-6012 Han08-6012	I
CP03-10-41-1	III	河农 829 Henong829	II	冀麦 379 Jimai379	II
CP03-28-1-1-1-4-1	II	河农 9206 Henong9206	III	河农 9093 Henong9093	II
CH6002	III	沧麦 119 Cangmai119	III	万丰 366 Wanfeng366	II
连 76005 Lian76005	II	沧 071 Cang071	III	石栾 10-2 Shiluan10-2	II
连 05152 Lian05152	I	沧麦 08-113 Cangmai08-113	III	石 H09-7075 ShiH09-7075	II

表 2 (续)

品种(系) Variety	等位变异类型 Allelic type	品种(系) Variety	等位变异类型 Allelic type	品种(系) Variety	等位变异类型 Allelic type
豫麦 34 Yumai34	I	轮选 805 Lunxuan805	II	曹 166 Cao166	I
周麦 25 Zhoumai25	II	轮选 927 Luanxuan927	II	泰农 2987 Tainong2987	I
周麦 26 Zhoumai26	II	轮选 926 Luanxuan926	II	晋太 170 Jintai170	III
周麦 27 Zhoumai27	II	陕优 225 Shanyou225	I	临优 2018 Linyou2018	III
周麦 28 Zhoumai28	II	小偃 81 Xiaoyan81	III	邯 10-5223 Han10-5223	II
漯 6099 Luo6099	II	育丰 15 Yufeng15	I	CA0996	II
百农 AK58 BainongAK58	II	08CA307	II	师栾 02-1 Shiluan02-1	III
百农 4330 Bainong4330	II	D08-6	II	天华 588 Tianhua588	III
935031	III	SH299	III	衡 09-4061 Heng09-4061	I
济南 16 号 Jinan16	III	嘉科 921 Jiake921	I	石 10-4393 Shi10-4393	II
山农 1455 Shannong1455	III	节优 11 Jieyou11	II	冀麦 516 Jimai516	III
良星 66 Liangxing66	II	众信 6011 Zhongxin6011	II	邯农 7912 Hannong7912	I
济宁 18 Jining18	II	DH155	II	嘉科 998 Jiake998	II
山农 14 号 Shannong14	III				

2.3 Xwmc44 与粒重性状热感指数的关联分析

对 Xwmc44 分子标记扩增出的 3 种带型材料与籽粒性状的热感指数进行关联分析(表 3), 结果显示: I 型等位变异与千粒重热感指数、籽粒宽度热感指数、籽粒表面积热感指数和籽粒周长热感指数呈显著正相关的关系 ($P < 0.05$), II 型等位变异位点与千粒重热感指数显示了极显著负相关关系 ($P < 0.01$); 同时 II 型等位变异位点与籽粒宽度热

感指数、籽粒周长热感指数表现显著的负相关关系 ($P < 0.05$)。类型 III 的小麦材料与籽粒性状的热感指数都不相关。热感指数越大, 代表着品种的耐热性越差, 热感指数越小, 则品种的耐热性越强。因此, Xwmc44 分子标记的 3 个等位变异位点中, 具有 I 型等位变异的材料具有不耐热的属性, 而具有 II 型等位位点的材料是优良的等位变异, 具有该类型的材料可能耐热能力更强。

表 3 Xwmc44 等位变异类型与籽粒性状热感指数的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between Xwmc44 allelic variations and heat-tolerance index of kernel traits

等位变异类型 Allelic type	千粒重 热感指数 HI-TKW	籽粒长度 热感指数 HI-KL	籽粒宽度 热感指数 HI-KW	籽粒表面积 热感指数 HI-KS	籽粒周长 热感指数 HI-KC
I	0.161*	0.131	0.169*	0.170*	0.158*
II	-0.203**	-0.130	-0.162*	-0.148	-0.155*
III	0.067	0.017	0.017	0.000	0.019

* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关

* and ** indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 levels, respectively

2.4 Xwmc44 分子标记等位变异的性状值

对分别扩增出 Xwmc44 标记的 I、II、III 等位变异位点的材料分类, 分析了具有不同等位变异类型材料的千粒重热感指数、籽粒长度热感指数、籽粒宽度热感指数、籽粒周长和籽粒表面积热感指数间的差异(表 4)。结果显示: 具有 I 型等位变异的小麦品种(系)的籽粒性状热感指数平均值都大于 1; 具有 II 型等位变异的小麦品种(系)的籽粒性状热感指数平均值都小于 1; 具有 III 型等位变

异的小麦品种(系)的籽粒各性状热感指数平均值都近似于 1。具有类型 I 等位位点的材料, 其千粒重热感指数、籽粒宽度热感指数、籽粒周长热感指数、籽粒表面积热感指数与具有类型 II 的小麦材料间的这些性状热感指数值差异显著, 具有 III 型等位变异的材料与具有 I、II 型等位变异的材料之间的所有籽粒性状热感指数差异都不显著。而籽粒长度热感指数数值在 3 个带型材料之间均无显著差异。

表4 Xwmc44等位变异的籽粒热感指数值分析

Table 4 Analysis of heat-tolerance index of kernel traits by Xwmc44 allelic variations

等位变异类型 Allelic type	千粒重热 感指数 HI-TKW	籽粒长度 热感指数 HI-KL	籽粒宽度 热感指数 HI-KW	籽粒表面积 热感指数 HI-KS	籽粒周长 热感指数 HI-KC
I	1.13 ± 0.37b	1.46 ± 2.31a	1.24 ± 0.74b	1.27 ± 0.81b	1.29 ± 0.99b
II	0.89 ± 0.49a	0.61 ± 2.20a	0.85 ± 0.82a	0.85 ± 0.90a	0.80 ± 1.09a
III	1.05 ± 0.52ab	1.00 ± 2.35a	1.02 ± 0.86ab	1.00 ± 0.98ab	1.02 ± 1.15ab

不同字母表示同一列内 0.05 水平下差异显著 (LSD 方法)

Different letters are significantly different at $P < 0.05$ levels in the same line (LSD method)

3 讨论

在温室效应的影响下,全球气候高温频发,而小麦产量受影响最为显著。因此,对于小麦的耐热性研究就愈发迫切。小麦的耐热是个由多基因控制的复杂数量性状,不同时期耐热机制不同,基因表达不同,鉴定指标不同,其分子标记也就复杂多样。冠层温度被认为是一个耐热鉴定指标。Pinto 等^[12]利用‘Seri/Babax’重组自交系群体鉴定出 3B 染色体上冠层温度相关的分子标记 wPt-1804; Mason 等^[13]发现 cfd49 分子标记与穗温差表型相关。位于 7B 染色体上的 Xgwm1025 和 Xgwm745 也被证明与小麦冠层温差有密切关系^[14]。也有研究人员把类囊体膜的伤害(TMD)和 SPAD 叶绿素含量(SCC)作为高温耐受的指示剂,分析获得位于 6A 染色体上由 Xbarc113 和 AGCTCG347 侧翼标记的 QTL^[15]。然而,实际上小麦多在灌浆期遭遇高温,该时期获得的分子标记在育种过程中可能更有应用价值。Kolluru 等^[16]报道 2A 染色体上的 Xgwm356 和 3A 染色体上的 Xgwm5 与热胁迫后的持绿性状密切相关。Yang 等^[17]利用‘Ventnor/Karl 92’重组自交系获得了 2 个与灌浆持续期有关的耐热标记 Xgwm11 和 Xgwm293。Mason 等^[13]报道的 cfd49 标记同时与穗温差表型和单粒重耐热指数表型变化关系密切。Paliwal 等^[14]发现 2B 染色体长臂上 Xgwm935~Xgwm1273 间的 QTL 与千粒重热敏感指数表型变异和灌浆持续期热敏感指数密切相关。上述分子标记与耐热关系密切,遗传距离较近,有望应用于分子辅助育种。

对已鉴定的耐热分子标记分析发现:某些染色体特定区域与小麦耐热性相关。小麦 1B 染色体上 gwm-wPt3645 区间内小麦耐热分子标记分布密集,已鉴定出与千粒重热敏感指数、灌浆持续期、叶绿素含量等关联的 10 个分子标记^[18]。分子标记 Xwmc44 即位于 1BL 染色体。在以往,小麦抗

条锈基因的遗传研究中发现,分子标记 Xwmc44 还与多个小麦抗条锈基因紧密连锁^[19-21]。本研究中则进一步显示 Xwmc44 与籽粒性状的热感指数密切相关。这些结果表明:Xwmc44 所处的 1BL 染色体可能含有多个与抗性相关的基因,在生物和非生物胁迫中可能都发挥着重要的作用。本研究显示 Xwmc44 具有 I、II、III 3 个等位变异。I 型等位变异与籽粒性状的耐热指数显著正相关,I 型小麦品种(系)的耐热指数的平均值大于 1;II 型等位变异与籽粒性状的耐热指数显著负相关,II 型小麦品种(系)的耐热指数的平均值小于 1;III 型等位变异与小麦籽粒性状热感指数不相关。通常热感指数小于 1 的品种为耐热品种,热感指数大于 1 的品种为热敏感品种^[8]。因此,Xwmc44 的 II 型等位基因为优良等位变异,可用于亲本选配以及分子标记辅助选择的小麦耐热育种过程中。

参考文献

- [1] IPCC. In Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- [2] McDonald G K, Suttan B G, Ellison F W. The effect of time of sowing on the grain yield of irrigated wheat in the Namoi Valley, New South Wales. Australian Journal of Agricultural Research, 1983, 34: 229-240
- [3] David B L, Wolfram S, Justin C R. Climate trends and global crop production since 1980. Science, 2011, 333 (6042): 616-620
- [4] 陈芳,郑炜君,李盼松,于太飞,刘生祥,陈明,李连城,徐兆师,马有志. 小麦耐热性鉴定方法及热胁迫应答机理研究进展. 植物遗传资源学报, 2013, 14(6): 1213-1220
Chen F, Zheng W J, Li P S, Yu T F, Liu S X, Chen M, Li L C, Xu Z S, Ma Y Z. Progress of evaluating techniques and potential mechanism on heat tolerance in wheat. Journal of Plant Genetic Resources, 2013, 14(6): 1213-1220
- [5] 许为钢,胡琳,盖钧镒. 小麦耐热性研究. 华北农学报, 1999, 14(2): 20-24
Xu W G, Hu L, Gai J Y. A study on heat tolerance of wheat cultivars. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1999, 14(2):

- 20-24
- [6] 李召锋, 张东海, 王竹琼, 张锦宏, 杨茂深, 李卫华. 新疆春小麦品种耐热性评价. 麦类作物学报, 2017, 37(11): 1497-1502
Li Z F, Zhang D H, Wang Z Q, Zhang J H, Yang M S, Li W H. Analysis and evaluation the heat resistance of spring wheat cultivars in Xinjiang. Journal of Triticeae Crops, 2017, 37(11): 1497-1502
- [7] 姜丽娜, 杨娜娜, 方保停, 李向东, 李春喜. 不同小麦品种对灌浆期高温的响应差异. 麦类作物学报, 2018, 38(11): 1365-1373
Jiang L N, Yang N N, Fang B T, Li X D, Li C X. Responses of different wheat cultivars to high temperature during grain filling. Journal of Triticeae Crops, 2018, 38(11): 1365-1373
- [8] 陈希勇, 孙其信, 孙长征. 春小麦耐热性表现及其评价. 中国农业大学学报, 2000, 5(1): 43-49
Chen X Y, Sun Q X, Sun C Z. Performance and evaluation of spring wheat heat tolerance. Journal of China Agricultural University, 2000, 5(1): 43-49
- [9] Gale K R, Ma W, Zhang W, Rampling L, Hill A S, Appels R, Morris P, Morrell M. Simple high-throughput DNA markers for genotyping in wheat/Mildura, Australia: 10th Australian Wheat Breeding Assembly Proceedings, 2001: 26-31
- [10] 刘永伟, 周硕, 王雪征, 孙果忠, 董福双, 柴建芳, 李春杰, 赵和, 王海波. 小麦粒重相关分子标记 Xgwm46 等位变异的鉴定与评价. 麦类作物学报, 2017, 7(1): 7-15
Liu Y W, Zhou S, Wang X Z, Sun G Z, Dong F S, Chai J F, Li C J, Zhao H, Wang H B. Identification and evaluation of molecular marker Xgwm46 allelic variations associated with kernel weight in wheat. Journal of Triticeae Crops, 2017, 7(1): 7-15
- [11] 张海萍, 常成, 游光霞, 张秀英, 闫长生, 肖世和, 司红起, 卢杰, 马传喜. 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. 作物学报, 2010, 36(10): 1649-1656
Zhang H P, Chang C, You G X, Zhang X Y, Yan C S, Xiao S H, Si H Q, Lu J, Ma C X. Identification of molecular markers associated with seed dormancy in mini core collections of Chinese wheat and land races. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(10): 1649-1656
- [12] Pinto R S, Matthew P R, Mathews K L, McIntyre C L, Olivares-Villegas J J, Chapman S C. Heat and drought adaptive QTL in a wheat population designed to minimize confounding agronomic effects. Theoretical Applied Genetics, 2010, 121: 1001-1021
- [13] Mason R E, Mondal S, Beecher F W, Hays D B. Genetic loci linking improved heat tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) to lower leaf and spike temperatures under controlled conditions. Euphytica, 2011, 180: 181-194
- [14] Paliwal R, Röder M S, Kumar U, Srivastava J P, Joshi A K. QTL mapping of terminal heat tolerance in hexaploid wheat (*T. aestivum* L.). Theoretical and Applied Genetics, 2012, 125: 561-575
- [15] Talukder S K, Babar M A, Vijayalakshmi K, Poland J, Prasad P V V, Bowden R, Fritz A. Mapping QTL for the traits associated with heat tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.). BioMed Central Genetics, 2014, 15: 97
- [16] Kolluru V, Allan K F, Gary M, Bai G H, Pandravada S, Gill B S. Modeling and mapping QTL for senescence-related traits in winter wheat under high temperature. Molecular Breeding, 2010, 26: 163-175
- [17] Yang J, Sears R G, Gill B S, Paulsen G M. Quantitative and molecular characterization of heat tolerance in hexaploid wheat. Euphytica, 2002, 26: 275-282
- [18] 刘子会, 李国良, 张华宁, 张红梅, 张艳敏, 郭秀林, 柳斌辉. 小麦耐热性状鉴定及相关性状 QTL 研究进展. 中国农学通报, 2016, 32(21): 51-57
Liu Z H, Li G L, Zhang H N, Zhang H M, Zhang Y M, Guo X L, Liu B H. Identification of heat resistance traits and related QTL in wheat (*Triticum aestivum* L.). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(21): 51-57
- [19] Liu F H, Niu Y C, Deng H, Tan G J. Mapping of a major stripe rust resistance gene in Chinese native wheat variety chike using microsatellite markers. Journal of Genetics and Genomics, 2007, 34(12): 1123-1130
- [20] 李强, 贺苗苗, 董海丽, 姚强, 井金学, 王保通. 小麦品种贵农 22 抗条锈基因的遗传分析及分子标记. 植物病理学报, 2011, 41(5): 495-501
Li Q, He M M, Dong H L, Yao Q, Jing J X, Wang B T. Genetic analysis and molecular mapping for stripe rust resistance gene (s) in wheat cultivar Guinong22. Acta Phytopathologica Sinica, 2011, 41(5): 495-501
- [21] 陈洁, 胡茂林, 张亮, 王睿, 李强, 周祥椿, 井金学. 小麦持久抗病品种 N. Strampelli 的抗条锈病基因分析和微卫星标记. 植物病理学报, 2010, 40(4): 388-394
Chen J, Hu M L, Zhang L, Wang R, Li Q, Zhou X C, Jing J X. Genetic analysis and molecular mapping of tripe rust resistance gene in durable wheat variety N. Strampelli. Acta Phytopathologica Sinica, 2010, 40(4): 388-394

附表 1 供试小麦品种的来源

Supplementary table 1 The origin of wheat varieties(lines)

编号 Number	品种 (系) Variety	来源 Origin	编号 Number	品种 (系) Variety	来源 Origin
1	石新 733	河北	86	烟优 361	山东
2	冀 5265	河北	87	邯 02-6018	河北
3	陕麦 509	陕西	88	邯 6228	河北
4	金禾 748	河北	89	邯 8062	河北
5	金禾 9123	河北	90	邯 05-4860	河北
6	金禾 4857	河北	91	邯农 351	河北
7	金丰 6164	河北	92	衡 04-4358	河北
8	金禾 0459	河北	93	衡 05-4444	河北
9	金丰 5032	河北	94	衡 06 观 522	河北
10	金丰 7183	河北	95	衡 4399	河北
11	金禾 96023	河北	96	衡 7228	河北
12	金禾 7178	河北	97	衡 0628	河北
13	金禾 8211	河北	98	衡 05 观 216	河北
14	金禾 9237	河北	99	衡 5362	河北
15	金丰 4208	河北	100	邢麦 7 号	河北
16	金丰 9229	河北	101	邢麦 6 号	河北
17	金禾 10-140	河北	102	石家庄 8 号	河北
18	金禾 8431	河北	103	石优 17	河北
19	金禾 8515	河北	104	石麦 19	河北
20	金禾 10-158	河北	105	石麦 18	河北
21	金禾 12-089	河北	106	石 06U-4532	河北
22	金禾 12-389	河北	107	石新 828	河北
23	金禾 12-110	河北	108	衡 8966	河北
24	金禾 12-155	河北	109	科农 9204	河北
25	8901BC5S3-3-9-4	河北	110	科农 213	河北
26	8901BC5S4-1-3-2	河北	111	科农 199	河北
27	8901BC5S4-1-6-4	河北	112	科农 1093	河北
28	02P067	河北	113	科农 3106	河北
29	92R137-1-1	河北	114	冀丰 717	河北
30	NAU28	江苏	115	冀麦 185	河北
31	南农 09P16	江苏	116	冀麦 518	河北
32	NAU617	江苏	117	冀资 6 号	河北
33	CP02-63-13-1	河北	118	师农 09-1	河北
34	CP20-39-11-1	河北	119	冀师 02-1	河北
35	Cp02-8-5-6-2-1	河北	120	金麦 1 号	河北
36	Cp20-38-4-3-2	河北	121	金麦 3 号	河北
37	Cp93-8-11-2	河北	122	河农 4198	河北
38	CP03-28-1-1	河北	123	河农 58-3	河北

39	CP03-10-41-1	河北	124	河农 829	河北
40	CP03-28-1-1-1-1-4-1	河北	125	河农 9206	河北
41	CH6002	河北	126	沧麦 119	河北
42	连 76005	河北	127	沧 071	河北
43	连 05152	河北	128	沧麦 08-113	河北
44	豫麦 34	河南	129	轮选 805	北京
45	周麦 25	河南	130	轮选 927	北京
46	周麦 26	河南	131	轮选 926	北京
47	周麦 27	河南	132	陕优 225	陕西
48	周麦 28	河南	133	小偃 81	陕西
49	漯 6099	河南	134	育丰 15	河北
50	百农 AK58	河南	135	08CA307	河北
51	百农 4330	河南	136	D08-6	河北
52	935031	河南	137	SH299	河北
53	济南 16 号	山东	138	嘉科 921	河北
54	山农 1455	山东	139	节优 11	河北
55	良星 66	山东	140	众信 6011	河北
56	济宁 18	山东	141	DH155	北京
57	山农 14 号	山东	142	藁优 5766	河北
58	大粒 10-1	河北	143	羲优 608	河北
59	大粒 110-4	河北	144	新麦 10 号	河北
60	大粒 178-1	河北	145	藁优 1804	河北
61	大粒 201-1	河北	146	藁优 5218	河北
62	大粒 313	河北	147	08CA101	河北
63	大粒 148-2	河北	148	石新 618	河北
64	大粒 103	河北	149	航麦 2 号	河北
65	大粒 183	河北	150	邯 07-8069	河北
66	大粒 405-2	河北	151	藁麦 9236	河北
67	大粒 427	河北	152	邯 08-6012	河北
68	F5-11-2	河北	153	冀麦 379	河北
69	大粒 39 矮	河北	154	河农 9093	河北
70	E42-03-5-3-1-2	河北	155	万丰 366	河北
71	I31-03-3-1-3-2	河北	156	石粟 10-2	河北
72	京冬 8 号 BC4S2-4-11-1	北京	157	石 H09-7075	河北
73	京冬 8 号 BC4S2-5-1-2	北京	158	曹 166	河北
74	农大 3197BC3S2-1-3-2	北京	159	泰农 2987	山东
75	中麦 9 号	北京	160	晋太 170	山西
76	石 B08-5341	河北	161	临优 2018	山西
77	YB66180	河北	162	邯 10-5223	河北
78	山农 055849	山东	163	CA0996	河北
79	05CA349	山东	164	师粟 02-1	河北
80	山农 055843	山东	165	天华 588	河北

81	邯 05-5093	河北	166	衡 09-4061	河北
82	冀麦 585	河北	167	石 10-4393	河北
83	石 06-6136	河北	168	冀麦 516	河北
84	石 H083-366	河北	169	邯农 7912	河北
85	嘉科 998	河北			