植物遗传资源学报 2021，22（6）：1635-1643
Journal of Plant Genetic Resources DOI：10.13430/j.cnki.jpgr.20210415001

小麦籽粒性状热感指数相关分子标记的鉴定及分析

邵雪飞[1]，李国良[2]，杨　阳[2]，付　才[2]，李孟军[3]，赵　敏[1]，刘子会[2]
（[1]河北工程大学园林与生态工程学院，邯郸 056000；[2]河北省农林科学院生物技术与食品科学研究所/
河北省植物转基因中心重点实验室，石家庄 050051；[3]石家庄市农林科学研究院，石家庄 050000）

摘要：小麦耐热性是多基因控制的复杂数量性状，通过关联耐热性状获得耐热分子标记，利用该标记辅助选择育种可提高育种的准确性，加快小麦耐热育种进程。本研究对 187 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 个籽粒相关性状的热感指数进行关联分析，鉴定出 2 个耐热相关分子标记 Xwmc622、Xwmc707。聚丙烯酰胺凝胶电泳分析表明，Xwmc622、Xwmc707 各自具有Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 3 个等位变异类型。Xwmc622 的Ⅰ型等位位点与千粒重热感指数、籽粒宽度热感指数和籽粒周长热感指数呈极显著负相关关系，同时Ⅰ型等位位点与籽粒长度热感指数和籽粒表面积热感指数呈显著负相关关系，Ⅰ型小麦品种（系）的热感指数平均值小于 1；Ⅱ型等位位点与千粒重热感指数呈极显著正相关关系，与籽粒长度热感指数、籽粒表面积热感指数、籽粒周长热感指数呈显著正相关关系，Ⅱ型等位变异小麦品种（系）的热感指数平均值大于 1；Ⅲ型等位变异与小麦籽粒性状热感指数相关性不显著。Xwmc707 的Ⅰ型等位变异与小麦籽粒性状热感指数相关性不显著；Ⅱ型等位位点与千粒重热感指数呈显著负相关关系，Ⅱ型小麦品种（系）的热感指数平均值小于 1；类型Ⅲ与小麦材料的千粒重热感指数、籽粒长度热感指数、籽粒周长热感指数呈显著正相关，Ⅲ型等位位点小麦品种（系）的热感指数平均值大于 1。研究结果表明：Xwmc622 的Ⅰ型等位位点为耐热优良等位变异；Xwmc707 的Ⅱ型等位位点为优良等位变异。这为小麦耐热分子标记辅助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 Molecular Marker Related to Heat Sensitivity Indexes of Grain Traits in Wheat

SHAO Xue-fei[1], LI Guo-liang[2], YANG Yang[2], FU Cai[2], LI Meng-jun[3], ZHAO Min[1], LIU Zi-hui[2]
（[1]*College of Landscape architecture and Ecological Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056000*;
[2]*Institute of Biotechnology and Food Science, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences/*
Key Laboratory of Plant Genetic Engineering Center of Hebei Province, Shijiazhuang 050051;
[3]*Shijiazhuang Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050000*）

Abstract: Heat tolerance of wheat is a complex quantitative trait controlled by multiple genes. Molecular markers related to heat tolerance can be acquired by correlation analysis. With these tolerant markers, the accuracy of molecular marker-assisted selection breeding may be improved, and the process of breeding for heat tolerant wheat may be accelerated. In this study, heat sensitivity indexes (HI) of five grain traits, including 1000-kernel weight, kernel length, kernel width, kernel surface area, and kernel circumference were identified in 187 wheat varieties (lines). Molecular markers Xwmc622 and Xwmc707 related to heat sensitivity indexes were obtained

收稿日期：2021-04-15　　**修回日期：**2021-07-10　　**网络出版日期：**2021-09-09
URL：http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20210415001
第一作者主要从事小麦抗逆分子标记的开发，E-mail：1025053784@qq.com
通信作者：刘子会，主要从事作物抗逆分子生物学研究，E-mail：liuzihui1978@163.com
赵敏，主要从事植物抗逆生理方面的教学与科研工作，E-mail：917264236@qq.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（21326322D）；石家庄市科学技术研究与发展规划（191490332A）
Foundation projects: Technological Innovation Project of Modern Agriculture of Hebei Province (494-0402-YBN-S2XB, 494-0402-YBN-CTGQ), Key Research and Development Plan Project of Hebei Province (21326322D), Science and Technology Research and Development Programme of Shijiazhuang (191490332A)

by simple correlation analysis. Polyacrylamide gel electrophoresis analysis showed that Xwmc622 and Xwmc707 each had three allelic types: Ⅰ, Ⅱ and Ⅲ. Type Ⅰ allelic loci of Xwmc622 were extremely significantly negatively correlated with HI of 1000-kernel weight, of kernel width, and of kernel circumference, and significantly negatively correlated with HI of kernel length and of kernel surface area. The average values of HI in wheat varieties (lines) with type Ⅰ allelic variation were less than 1. Type Ⅱ allelic loci of Xwmc622 were extremely significantly positively correlated with HI of 1000-kernel weight, and significantly positively correlated with HI of kernel length, of kernel surface area, and of kernel circumference. The average values of HI in wheat varieties (lines) with type Ⅱ allelic variation were greater than 1. Type Ⅲ allelic loci of Xwmc622 were not significantly correlated with HI of grain traits. Type Ⅰ allelic loci of Xwmc707 were not significantly correlated with HI of wheat grain traits. Type Ⅱ allelic loci of Xwmc707 were significantly negatively correlated with HI of 1000-kernel. The average values of HI in wheat varieties (lines) with type Ⅱ allelic variation were less than 1. Type Ⅲ allelic loci of Xwmc707 were significantly positively correlated with HI of 1000-kernel weight, of kernel length, and of kernel circumference. The average values of HI of the grain traits in wheat varieties (lines) with type Ⅲ allelic variation were higher than 1. The results showed that allele Ⅰ of Xwmc622 and allele Ⅱ of Xwmc707 were superior alleles of wheat heat tolerance, which provided reference information for molecular marker-assisted breeding for wheat heat resistance.

Key words: wheat; allelic variation; molecular markers; heat tolerance

小麦是全球广泛种植的谷物之一,是我国第三大粮食作物。小麦适应性可塑性使其在对高温条件的反应中表现出一些表型变化的能力。尽管存在适应性可塑性,但极端热胁迫对小麦产量的威胁越来越大[1]。最近研究发现,全球气温以每 10 年 0.18 ℃的速度上升,气温每增加 1 ℃,小麦产量估计就会下降 6%[2]。在我国的小麦主产区(如黄、淮海等地区),灌浆期 32 ℃以上高温天气时有发生,通常使小麦减产 10%~20%[3-4]。因此,培育耐热小麦品种,提高小麦产量,保障粮食安全,仍是我国小麦育种的首要目标[5]。

SSR 标记拥有共显性、基因座特异性和高多态性的优势,因此被用于评估群体内的遗传变异。与 SNPs 相比,SSRs 更受欢迎,因为它们具有多等位基因的特性。小麦耐热性是多基因控制的复杂数量性状[6],SSR 标记在小麦中能检测出很高的多态性,可在小麦耐热分子标记辅助育种中广泛应用。目前,小麦耐热性表型的选择多基于相关性状的间接选择,小麦耐热性状评价指标是获得耐热分子标记的有效手段。常用的评价指标有热感指数[7]、产量指数[8]、细胞膜的热稳定性[4]、冠层温度衰减[9]、灌浆速率[10]等。Yang 等[11]测定 Ventnor 和 Karl92 及其后代不同温度下灌浆期持续时间,以灌浆持续期作为评价小麦耐热性的标准,获得 Xgwm11 和 Xgwm293 两个相关耐热标记。陈冬梅等[12]对灌浆期小麦施以热胁迫处理,根据千粒重热感指数和产量热感指数对参试小麦品种的耐热性进行了综合评价,筛选出 26 份稳定抗热性材料。许东旭等[13]利用同样的方法,依据热感总指数从 20 份小麦品种中筛选出 5 份高抗热型资源。耿晓丽等[4]对我国北方冬麦区和黄淮北片主推的 53 个小麦品种(系)生理指标的分析,并结合细胞膜热稳定法来鉴定品种(系)的耐热性,得到苗期耐热性好的品种(系),表明可参考间接生理指标筛选耐热品种(系)。借助这些指标开发相关分子标记可有效提高小麦的耐热鉴定和育种效率。本研究以我国河北、河南等小麦主产区共 187 份小麦材料为研究对象,测定了小麦籽粒长度、籽粒宽度、籽粒周长、籽粒表面积、千粒重,计算供试小麦籽粒性状热感指数,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 Xwmc622 和 Xwmc707 为研究对象,重点分析了 Xwmc622 和 Xwmc707 两个分子标记的等位基因变异类型及分布频率,评价了各等位变异类型间籽粒性状热感指数的差异,确定优良的耐热等位变异类型。研究结果丰富了小麦耐热分子标记资源,为小麦耐热性鉴定以及耐热分子标记辅助育种提供有效信息。

1 材料与方法

1.1 小麦品种及其田间种植

187 份供试材料主要来源于我国的河北、河南、山东、江苏等小麦主产区。小麦种子由河北省

农林科学院生物技术与食品科学研究所收集提供，所有供试小麦品种均于2015年、2016年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5 m，行距30 cm，株距5 cm。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

于小麦返青期采集第二叶片，采用CTAB[14-15]法提取小麦基因组DNA。Xwmc622引物、Xwmc707引物来自GrainGenes2.0（http://wheat.pw.usda.gov/）。引物序列如下：Xwmc622-F：5′-CAGGAAGAAGAGCTCCGAGAAA-3′，Xwmc622-R：3′-CTTGCTAACCCGCGCC-5′；Xwmc707-F：5′-GCTAGCTGACACTTTTCCTTTG-3′，Xwmc707-R：3′-TCAGTTTCCCACTCACTTCTTT-5′。

引物由华大科技公司合成，PCR扩增根据刘永伟等[16]、刘子会等[17]中描述的方法完成。PCR扩增体系为2×Flash Hot Start Master Mix（Dye）5 μL、引物终浓度为1 μmol/L、40~60 ng模板DNA，用ddH_2O补至10 μL。PCR反应程序：94 ℃预变性2 min；94 ℃变性30 s，58 ℃（Xwmc622）/52 ℃（Xwmc707）退火30 s，72 ℃延伸20 s，35个循环；72 ℃充分延伸3 min。使用8%的聚丙烯酰胺凝胶电泳，银染、显色，检测扩增产物，拍照。统计等位基因类型。

1.3　热处理和籽粒性状数据的测定

于小麦开花期（5月10-30日）人工覆棚热处理，同时记录棚温；设同期田间自然生长小麦对照组。供试小麦材料成熟收获后晾干脱粒，利用谷物籽粒分析仪，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，3次重复。

1.4　热感指数的计算和数据处理

热感指数的计算参照陈希勇等[18]，其计算公式为HI=（1–Yh/Yp）/H，其中，Yh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），Yp为该品种在非胁迫环境下的籽粒性状值；H为环境胁迫强度，H=1– $\overline{Y}_h$/ $\overline{Y}_p$（$\overline{Y}_h$为全部参试品种Yh的平均值，$\overline{Y}_p$为全部参试品种Yp的平均值）。

数据分析使用SPSS 17.0和Excel软件完成。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；利用Pearson相关分析模型[19]评估Xwmc622标记、Xwmc707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　供试小麦品种耐热相关指标的变异分析

本研究调查了千粒重的热感指数、籽粒长度热感指数、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。千粒重热感指数的范围为–2.60~3.23，变异系数最小，为0.581%；籽粒长度的热感指数的范围为–5.32~10.58，且变异系数最大，为2.370%（表1）。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[19]。由此可以看出，本研究中的供试小麦品种耐热性差异较大。

表1　小麦籽粒性状热感指数变异分析

Table 1　Variation analysis of heat sensitivity index of wheat kernel traits

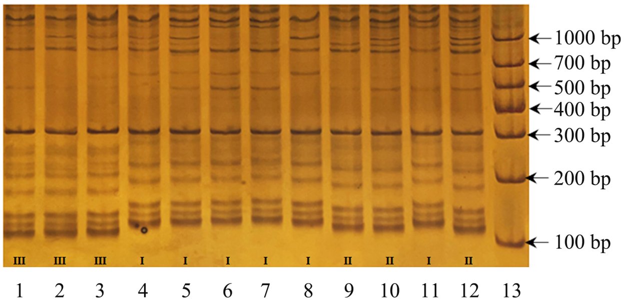
性状 Trait	最小值 Min.	最大值 Max.	变异系数（%）*CV*
千粒重热感指数 HI-TKW	–2.60	3.23	0.581
籽粒长度热感指数 HI-KL	–5.32	10.58	2.370
籽粒宽度热感指数 HI-KW	–0.67	2.78	0.778
籽粒表面积热感指数 HI-KS	–1.24	3.50	0.859
籽粒周长热感指数 HI-KC	–2.12	4.44	1.040

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

2.2　小麦Xwmc622、Xwmc707分子标记等位变异及分布频率

对187个小麦品种（系）的聚丙烯酰胺电泳分析，结果显示，Xwmc622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22.5%，81个品种显示Ⅱ型扩增片段，出现频率为43.3%，64个品种显示Ⅲ型扩增片段，占总材料的34.2%。各品种等位变异类型见表2。

对187个小麦品种（系）的聚丙烯酰胺电泳分析，结果显示，Xwmc707可扩增出Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 3个类型的等位变异（图2）。其中23个品种显示Ⅰ型扩增片段，占总测试材料的12.3%，115个品种显示Ⅱ型扩增片段，出现频率为61.5%，49个品种显示Ⅲ型扩增片段，占总材料的26.2%。各品种等位变异类型见表2。

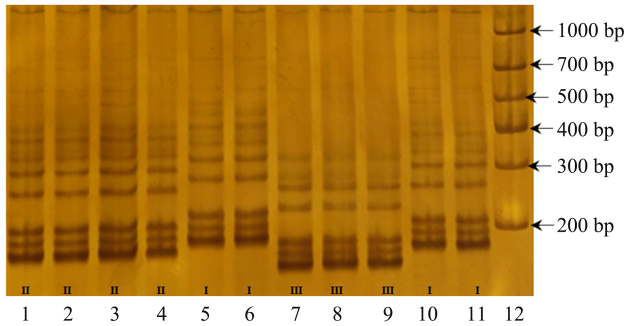


1：周麦 27；2：RS804；3：金丰 9259；4：苏麦 3 号；5：中国春；6：衡 5011；7：天糯 1398；8：金禾 12-070；9：曹 668；10：石 H092-324；11：衡 08 观 29；12：金丰 10-183；13：Marker。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ：条带类型，下同

1：Zhou Mai 27，2：RS804，3：Jinfeng 9259，4：Sumai No. 3，5：Chinese Spring，6：Heng 5011，7：Tiannuo 1398，8：Jinhe 12-070，9：Cao 668，10：Shi H092-324，11：Heng 08 Guan 29，12：Jinfeng 10-183，13：Marker. Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ：Stripe type，the same as below

图 1 分子标记 Xwmc622 扩增出的片段类型

Fig.1 PCR fragments amplified with marker Xwmc622



1：济宁 18；2：RS804；3：石 H092-324；4：衡 08 观 29；5：中国春；6：石 10-4332；7：曹 668；8：邯 6172（邯 95-6172）；9：河农 9311；10：衡 5011；11：SH299；12：Marker

1：Jining 18，2：RS804，3：Shi H092-324，4：Heng 08 Guan 29，5：Chinese Spring，6：Shi 10-4332，7：Cao 668，8：Han 6172（Han 95-6172），9：Henong 9311，10：Heng 5011，11：SH299，12：Marker

图 2 分子标记 Xwmc707 扩增出的片段类型

Fig.2 PCR fragments amplified with marker Xwmc707

表 2 供试小麦品种（系）等位变异类型

Table 2 Allelic variations of wheat varieties（lines）

名称 Name	等位变异类型 Allelic variation type Xwmc 622	Xwmc 707	名称 Name	等位变异类型 Allelic variation type Xwmc 622	Xwmc 707	名称 Name	等位变异类型 Allelic variation type Xwmc 622	Xwmc 707
石新 733 Shixin733	Ⅰ	Ⅲ	金禾 12-155 Jinhe12-155	Ⅲ	Ⅲ	大粒 405-2 Dali405-2	Ⅲ	Ⅱ
冀 5265 Ji5265	Ⅲ	Ⅱ	8901BC5S3-1-3-6	Ⅱ	Ⅲ	大粒 427 Dali427	Ⅲ	Ⅱ
陕麦 509 Shanmai509	Ⅰ	Ⅱ	8901BC5S3-3-9-4	Ⅱ	Ⅱ	F5-11-2	Ⅱ	Ⅱ
金禾 748 Jinhe748	Ⅲ	Ⅱ	8901BC5S4-1-3-2	Ⅲ	Ⅱ	E42-03-5-3-1-2	Ⅰ	Ⅱ
金禾 9123 Jinhe9123	Ⅲ	Ⅱ	8901BC5S4-1-6-4	Ⅱ	Ⅲ	I31-03-3-1-3-2	Ⅲ	Ⅱ
金禾 4857 Jinhe4857	Ⅲ	Ⅱ	陕优 225BC4S3-3-8-1 Shanyou225BC4S3-3-8-1	Ⅲ	Ⅱ	京冬 8 号 BC4S2-4-11-1 Jingdong8haoBC4S2-4-11-1	Ⅱ	Ⅱ
金丰 6164 Jinfeng6164	Ⅲ	Ⅰ						
金禾 0459 Jinhe0459	Ⅲ	Ⅱ	02P067	Ⅱ	Ⅰ	京冬 8 号 BC4S2-5-1-2 Jingdong8haoBC4S2-5-1-2	Ⅱ	Ⅱ
金丰 5032 Jinfeng5032	Ⅱ	Ⅱ	92R137-1-1	Ⅱ	Ⅲ			
金丰 7183 Jinfeng7183	Ⅲ	Ⅱ	NAU28	Ⅰ	Ⅰ	农大 3197BC3S2-1-3-2 Nongda3197BC3S2-1-3-2	Ⅲ	Ⅱ
金禾 96023 Jinhe96023	Ⅲ	Ⅱ	南农 09P16 Nannong09P16	Ⅱ	Ⅲ			
金禾 7178 Jinhe7178	Ⅲ	Ⅱ	NAU617	Ⅱ	Ⅱ	中麦 9 号 Zhongmai9hao	Ⅱ	Ⅱ
金禾 8211 Jinhe8211	Ⅲ	Ⅱ	CP02-63-13-1	Ⅱ	Ⅱ	石 B08-5341 ShiB08-5341	Ⅰ	Ⅱ
金禾 9237 Jinhe9237	Ⅰ	Ⅲ	CP20-39-11-1	Ⅰ	Ⅱ	YB66180	Ⅰ	Ⅰ
金丰 4208 Jinfeng4208	Ⅰ	Ⅱ	Cp02-8-5-6-2-1	Ⅱ	Ⅱ	山农 055849 Shannong055849	Ⅱ	Ⅱ
金丰 9229 Jinfeng9229	Ⅰ	Ⅱ	Cp20-38-4-3-2	Ⅰ	Ⅱ	05CA349	Ⅲ	Ⅰ
金禾 10-140 Jinhe10-140	Ⅰ	Ⅱ	大粒 10-1 Dali10-1	Ⅲ	Ⅱ	山农 055843（山农 22） Shannong055843（Shannong22）	Ⅰ	Ⅱ
金禾 8431 Jinhe8431	Ⅲ	Ⅱ	大粒 178-1 Dali178-1	Ⅰ	Ⅱ			
金禾 8515 Jinhe8515	Ⅲ	Ⅱ	大粒 201-1 Dali201-1	Ⅰ	Ⅰ	邯 05-5093 Han05-5093	Ⅱ	Ⅲ
金禾 10-158 Jinhe10-158	Ⅲ	Ⅱ	大粒 313 Dali313	Ⅰ	Ⅱ	冀麦 585 Jimai585	Ⅲ	Ⅱ
金禾 12-089 Jinhe12-089	Ⅲ	Ⅱ	藁丰 4087 Gaofeng4087	Ⅱ	Ⅱ	石 06-6136（石麦 22） Shi06-6136（Shimai22）	Ⅲ	Ⅱ
金禾 12-389 Jinhe12-389	Ⅲ	Ⅱ	大粒 103 Dali103	Ⅲ	Ⅱ			
金禾 12-110 Jinhe12-110	Ⅲ	Ⅱ	大粒 183 Dali183	Ⅰ	Ⅰ	衡 08 观 29 Heng08Guan29	Ⅰ	Ⅱ

表 2（续）

名称 Name	等位变异类型 Allelic variation type		名称 Name	等位变异类型 Allelic variation type		名称 Name	等位变异类型 Allelic variation type	
	Xwmc 622	Xwmc 707		Xwmc 622	Xwmc 707		Xwmc 622	Xwmc 707
Cp93-8-11-2	Ⅲ	Ⅱ	藁优 5218 Gaoyou5218	Ⅱ	Ⅲ	河农 9206 Henong9206	Ⅱ	Ⅱ
CP03-28-1-1	Ⅰ	Ⅱ	石新 618 Shixin618	Ⅱ	Ⅰ	沧麦 119 Cangmai119	Ⅱ	Ⅱ
CP03-10-41-1	Ⅰ	Ⅱ	航麦 2 号 Hangmai2hao	Ⅱ	Ⅲ	沧 071 Cang071	Ⅱ	Ⅱ
CP03-28-1-1-1-1-4-1	Ⅰ	Ⅱ	邯 07-8069 Han07-8069	Ⅱ	Ⅱ	沧麦 08-113 Cangmai08-113	Ⅱ	Ⅱ
CH6002	Ⅰ	Ⅱ	藁麦 9236 Gaomai9236	Ⅲ	Ⅱ	轮选 805 Lunxuan805	Ⅰ	Ⅰ
连 76005 Lian76005	Ⅰ	Ⅲ	邯 08-6012 Han08-6012	Ⅱ	Ⅱ	轮选 927 Lunxuan927	Ⅲ	Ⅱ
连 05152 Lian05152	Ⅰ	Ⅲ	冀麦 379 Jimai379	Ⅱ	Ⅱ	轮选 926 Lunxuan926	Ⅲ	Ⅱ
豫麦 34 Yumai34	Ⅲ	Ⅱ	河农 9093 Henong9093	Ⅱ	Ⅲ	陕优 225 Shanyou225	Ⅲ	Ⅱ
周麦 25 Zhoumai25	Ⅰ	Ⅲ	万丰 366 Wanfeng366	Ⅲ	Ⅱ	小偃 81 Xiaoyan81	Ⅰ	Ⅲ
周麦 26 Zhoumai26	Ⅰ	Ⅰ	石栾 10-2 Shiluan10-2	Ⅱ	Ⅰ	育丰 15 Yufeng15	Ⅰ	Ⅲ
周麦 27 Zhoumai27	Ⅲ	Ⅰ	石 H09-7075 ShiH09-7075	Ⅲ	Ⅱ	08CA307	Ⅰ	Ⅱ
周麦 28 Zhoumai28	Ⅱ	Ⅰ	曹 166 Cao166	Ⅱ	Ⅲ	D08-6	Ⅰ	Ⅰ
漯 6099 Luo6099	Ⅱ	Ⅲ	泰农 2987 Tainong2987	Ⅱ	Ⅱ	SH299	Ⅰ	Ⅰ
百农 AK58 BainongAK58	Ⅱ	Ⅲ	晋太 170 Jintai170	Ⅱ	Ⅱ	嘉科 921 Jiake921	Ⅲ	Ⅱ
百农 4330 Bainong4330	Ⅱ	Ⅱ	临优 2018 Linyou2018	Ⅱ	Ⅲ	节优 11 Jieyou11	Ⅰ	Ⅱ
济麦 19 Jimai19	Ⅰ	Ⅲ	邯 10-5223 Han10-5223	Ⅱ	Ⅱ	众信 6011 Zhongxin6011	Ⅲ	Ⅱ
济南 16 Jinan16	Ⅱ	Ⅱ	CA0996	Ⅱ	Ⅱ	DH155	Ⅰ	Ⅰ
山农 1455 Shannong1455	Ⅱ	Ⅲ	师栾 02-1 Shiluan02-1	Ⅱ	Ⅲ	石 10-4393 Shi10-4393	Ⅱ	Ⅰ
良星 66 Liangxing66	Ⅱ	Ⅰ	天华 588 Tianhua588	Ⅱ	Ⅰ	邯农 7912 Hannong7912	Ⅱ	Ⅲ
济宁 18 Jining18	Ⅱ	Ⅱ	衡 09-4061 Heng09-4061	Ⅱ	Ⅱ	嘉科 998 Jiake998	Ⅱ	Ⅱ
山农 14 Shannong14	Ⅲ	Ⅲ	石麦 19 Shimai19	Ⅱ	Ⅱ	D9418	Ⅱ	Ⅱ
烟优 361 Yanyou361	Ⅲ	Ⅱ	石麦 18 Shimai18	Ⅲ	Ⅱ	衡杂 155 Hengza155	Ⅲ	Ⅱ
邯 02-6018 Han02-6018	Ⅱ	Ⅱ	石 06U-4532 Shi06U-4532	Ⅱ	Ⅱ	中麦 863 Zhongmai863	Ⅲ	Ⅱ
邯 6228 Han6228	Ⅲ	Ⅱ	石新 828 Shixin828	Ⅱ	Ⅲ	河农 5274 Henong5274	Ⅱ	Ⅱ
邯 8062 Han8062	Ⅱ	Ⅲ	衡 8966 Heng8966	Ⅱ	Ⅲ	东麦一号 Dongmailhao	Ⅱ	Ⅲ
邯 05-4860 Han05-4860	Ⅱ	Ⅲ	科农 9204 Kenong9204	Ⅲ	Ⅱ	衡 1132 Heng1132	Ⅱ	Ⅱ
邯农 351 Hannong351	Ⅱ	Ⅲ	科农 213 Kenong213	Ⅱ	Ⅱ	藁麦 1622 Gaomai1622	Ⅰ	Ⅰ
衡 04-4358 Heng04-4358	Ⅱ	Ⅲ	科农 199 Kenong199	Ⅲ	Ⅲ	中种麦 16 Zhongzhongmai16	Ⅰ	Ⅱ
衡 05-4444 Heng05-4444	Ⅲ	Ⅱ	科农 1093 Kenong1093	Ⅲ	Ⅲ	河农 222 Henong222	Ⅰ	Ⅱ
衡 06 观 522 Heng06guan522	Ⅱ	Ⅲ	科农 3106 Kenong3106	Ⅲ	Ⅱ	金麦 6188 Jinmai6188	Ⅱ	Ⅲ
衡 7228 Heng7228	Ⅱ	Ⅱ	冀丰 717 Jifeng717	Ⅱ	Ⅲ	邯农 1412 Hannong1412	Ⅰ	Ⅰ
衡 0628 Heng0628	Ⅱ	Ⅲ	冀麦 185 Jimai185	Ⅲ	Ⅱ	万丰 829 Wanfeng829	Ⅰ	Ⅱ
衡 05 观 216 Heng05guan216	Ⅱ	Ⅱ	冀麦 518 Jimai518	Ⅲ	Ⅱ	科农 2011 Kenong2011	Ⅰ	Ⅱ
衡 5362 Heng5362	Ⅱ	Ⅱ	冀资 6 号 Jizi6hao	Ⅲ	Ⅲ	08CA101	Ⅱ	Ⅱ
邢麦 7 号 Xingmai7hao	Ⅲ	Ⅱ	师栾 09-1 Shiluan09-1	Ⅱ	Ⅲ	新麦 0208 Xinmai0208	Ⅲ	Ⅱ
邢麦 6 号 Xingmai6hao	Ⅱ	Ⅲ	冀师 02-1 Jishi02-1	Ⅱ	Ⅱ	山农 0911 Shannong0911	Ⅲ	Ⅲ
石家庄 8 号 Shijiazhuang8hao	Ⅲ	Ⅱ	金麦 1 号 Jinmai1hao	Ⅲ	Ⅲ	石 B07-4056 Shi B07-4056	Ⅲ	Ⅲ
石优 17 Shiyou17	Ⅲ	Ⅲ	金麦 3 号 Jinmai3hao	Ⅱ	Ⅱ	LS6045	Ⅱ	Ⅰ
石 H083-366 ShiH083-366	Ⅲ	Ⅱ	河农 4198 Henong4198	Ⅲ	Ⅱ	良星 99 Liangxing99	Ⅱ	Ⅰ
羲优 608 Xiyou608	Ⅲ	Ⅱ	河农 58-3 Henong58-3	Ⅰ	Ⅱ	烟 99102 Yan99102	Ⅱ	Ⅲ
新麦 10 号 Xinmai10hao	Ⅱ	Ⅲ	河农 829 Henong829	Ⅲ	Ⅱ	衡 4399 Heng4399	Ⅱ	Ⅲ
藁优 1804 Gaoyou1804	Ⅱ	Ⅲ						

2.3 Xwmc622、Xwmc707与籽粒性状热感指数的关联分析

对Xwmc622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，结果显示，Ⅰ型等位位点与千粒重热感指数、籽粒宽度热感指数和籽粒周长热感指数的相关系数分别为–0.219、–0.204、–0.211，呈极显著负相关关系，同时Ⅰ型等位位点与籽粒长度热感指数和籽粒表面积热感指数的相关系数分别为–0.152、–0.176，呈显著负相关关系，这说明等位类型Ⅰ为优良等位变异；Ⅱ型等位位点与千粒重热感指数的相关系数为0.212，呈极显著正相关关系，同时，Ⅱ型等位位点与籽粒长度热感指数、籽粒表面积热感指数、籽粒周长热感指数的相关系数分别为0.146、0.161、0.163，呈显著正相关关系，Ⅱ型等位位点的小麦材料多为热敏材料；Ⅲ型等位位点千粒重热感指数、籽粒长度热感指数、籽粒宽度热感指数、籽粒表面积热感指数和籽粒周长热感指数相关性不显著（表3）。

表3 Xwmc622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 Xwmc622 allelic variations and heat-sensitivity 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	–0.219**	–0.152*	–0.204**	–0.176*	–0.211**
Ⅱ	0.212**	0.146*	0.126	0.161*	0.163*
Ⅲ	–0.025	–0.017	0.050	–0.010	0.019

* 和 ** 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上显著相关，下同

* and** indicate significant correlation at $P< 0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively, the same as below

对Xwmc707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，结果显示，Ⅰ型的等位位点与千粒重热感指数、籽粒长度热感指数、籽粒宽度热感指数、籽粒表面积热感指数和籽粒周长热感指数相关性不显著；Ⅱ型等位位点与千粒重热感指数的相关系数为–0.148，呈显著负相关关系，这表明类型Ⅱ为优良等位变异；Ⅲ型等位位点与千粒重热感指数、籽粒长度热感指数、籽粒周长热感指数的相关系数分别为0.149、0.150、0.169，呈显著正相关，Ⅲ型等位位点的小麦材料多为热敏材料（表4）。

表4 Xwmc707等位变异类型与籽粒性状热感指数的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between Xwmc707 allelic variations and heat-sensitivity 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	0.019	–0.004	–0.032	0.001	–0.043
Ⅱ	–0.148*	–0.134	–0.073	–0.098	–0.125
Ⅲ	0.149*	0.150*	0.103	0.107	0.169*

2.4 Xwmc622、Xwmc707分子标记等位变异的性状值

对分别扩增出Xwmc622标记的类型Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ等位位点的材料分类，分析了具有不同等位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、籽粒周长热感指数和籽粒表面积热感指数间的差异。结果显示，类型Ⅱ等位变异的小麦品种（系）的籽粒性状热感指数平均值都高于1；Ⅰ类型等位变异的小麦品种（系）的籽粒性状热感指数平均值都低于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Ⅰ型等位位点的小麦材料的籽粒各性状热感指数与具有Ⅱ型小麦材料间的籽粒热感指数值差异显著，类型Ⅲ等位变异的材料与Ⅱ型等位变异的材料之间的所有籽粒性状热感指数差异不显著，与具有Ⅰ型等位变异的材料在籽粒宽度热感指数、籽粒周长热感指数这2个性状热感指数值差异显著，在千粒重热感指数、籽粒长度热感指数、籽粒表面积热感指数这3个性状值热感指数间差异不显著（表5）。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，Xwmc622分子标记的3个等位位点中，Ⅱ类型等位变异的小麦材料多为热敏材料，Ⅰ型等位位点为优良的等位变异，具有该类型的材料可能耐热能力更强。

表 5　Xwmc622 等位变异的籽粒热感指数值分析

Table 5　Analysis of heat-sensitivity index of kernel traits by Xwmc622 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	0.81 ± 0.74b	0.24 ± 2.12b	0.71 ± 0.62b	0.71 ± 0.75b	0.58 ± 0.93b
Ⅱ	1.17 ± 0.51a	1.30 ± 2.27a	1.10 ± 0.77a	1.15 ± 0.84a	1.17 ± 0.97a
Ⅲ	1.01 ± 0.44ab	1.05 ± 0.79ab	1.05 ± 0.79a	0.97 ± 0.93ab	1.00 ± 1.10a

不同字母表示同一列内 0.05 水平下差异显著（LSD 方法）；± 前后数值表示平均值 ± 标准差，下同

Different letters indicate significant differences at 0.05 level in the same column（LSD method）, the values before and after ± represent mean and standard deviation, the same as below

根据 Xwmc707 扩增带型对小麦材料分类，对不同类型的小麦材料 5 个籽粒性状热感指数进行方差分析，结果显示，Ⅰ型等位位点的材料与Ⅱ型、Ⅲ型 2 个等位位点材料的籽粒性状值热感指数差异均不显著，Ⅱ型与Ⅲ型之间籽粒性状热感指数的千粒重热感指数、籽粒长度热感指数、籽粒周长热感指数差异显著（表 6）。因此，Xwmc707 分子标记的 3 个等位位点中，Ⅱ型等位变异的小麦材料多为耐热材料，Ⅲ类型等位变异的小麦材料多为热敏材料。

表 6　Xwmc707 等位变异的籽粒热感指数值分析

Table 6　Analysis of heat-sensitivity index of kernel traits by Xwmc707 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	1.06 ± 0.57ab	0.91 ± 2.33ab	0.95 ± 0.85a	1.01 ± 0.99a	0.87 ± 1.04ab
Ⅱ	0.96 ± 0.61b	0.68 ± 2.56b	0.97 ± 0.78a	0.94 ± 0.87a	0.89 ± 1.08b
Ⅲ	1.17 ± 0.44a	1.54 ± 2.05a	1.15 ± 0.73a	1.16 ± 0.83a	1.29 ± 0.91a

3　讨论

极端热胁迫现象频发，严重影响我国的小麦产量。分子标记辅助育种是培育小麦抗热胁迫品种的快速途径，是提高我国小麦主产区产量的实用选择。SSR 标记（简单重复序列）由于其分布广、共显性、多态性高和可交叉转移的性质，被广泛用于植物的分子分析。在未来的作物育种计划中，来自基因区域的 SSR 标记是有价值的基因组资源，其目标是性状定位选择。小麦耐热性是多基因控制的复杂数量性状，与性状相关的分子标记也必定复杂多样。研究表明冠层温度[9]是一个良好的耐热鉴定指标。高温影响小麦籽粒灌浆速率，导致小麦产量下降，Barakat 等[20]利用 Ksu106（耐热）和叶科拉罗约（热敏）杂交的 F_2 群体材料揭示 12 个标记（Wmc24、Wmc168、Wmc326、Xgwm30、Xgwm456、Wmc25、Wmc44、Wmc94、Wmc161、Wmc273、Wmc327、Xgwm566）与 F_2 个体表型之间的回归分析具有高度显著性，证明 SSR 标记结合大片段分析可用于鉴定与籽粒灌浆速率相关的分子标记，作为小麦耐热性的鉴定指标。热胁迫使小麦开花期提前，Pinto 等[21]认为 Xbarc186 控制小麦开花期。Sunil 等[22]认为热胁迫影响小麦穗长，利用 WH730/*2 HD2733 回交系检测到 2A 上 Xgwm388-Xwmc407 侧翼标记间的 QTL 是热胁迫下穗长的推定新区域。上述小麦分子标记与小麦耐热性相关，有望应用于小麦耐热性分子标记辅助育种。

小麦某些染色体特定区域与耐热性相关，分子标记 Xwmc622 位于 4D 染色体。干旱条件下小麦旗叶形态的遗传剖析表明，Xwmc622 与旗叶宽度、长度、面积、长宽比等性状的遗传紧密连锁或多效性[23-24]。本研究表明 Xwmc622 与小麦籽粒性状热感指数密切关联。分子标记 Xwmc707 位于 4A 染色体。对小麦的净光合速率和抗旱性研究表明：标记 Xwmc707-4A 在 2 个季节不同水分条件下与单株生物量的胁迫敏感指数和千粒重的胁迫耐受指数稳定相关[25]。由此可以看出，Xwmc622 与 Xwmc707 的染色体附近区域可能含有多个抗逆性相关的基因，在非生物胁迫中发挥着重要作用。

本研究结果显示，Xwmc622 具有Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 3 个等位变异类型。类型Ⅰ的小麦品种（系）与籽粒性状的热感指数显著或极显著负相关，热感指数均小

于 1,携带该等位变异类型小麦品种(系)更可能为耐热品种[18];Ⅱ型等位变异与千粒重热感指数呈极显著正相关,与籽粒长度热感指数、籽粒表面积热感指数、籽粒周长热感指数呈显著正相关,热感指数的平均值大于 1,含有Ⅱ型等位变异类型小麦品种(系)可能多为热敏品种[18];Ⅲ类型与热感籽粒性状热感指数相关性不显著。分子标记 Xwmc707 同样具有Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 3 个类型等位变异。Ⅱ型等位位点与千粒重热感指数呈显著负相关关系,热感指数平均值小于 1,该等位变异类型小麦品种(系)更可能为耐热品种[18];Ⅲ型等位位点与千粒重热感指数、籽粒长度热感指数、籽粒周长热感指数呈显著正相关,耐热指数平均值大于 1,该等位变异类型小麦品种(系)大多数为热敏品种[18]。因此,Xwmc622 的类型Ⅰ等位基因与 Xwmc707 的类型Ⅱ等位基因为优良等位变异,具有该类型的小麦品种可能具有更强的耐热性;具有 Xwmc622 类型Ⅱ与 Xwmc707 类型Ⅲ的小麦可能多为热敏材料。本研究供试小麦品种(系):山农 055843(山农 22)等位变异类型为 Xwmc622 的类型Ⅰ、Xwmc707 的类型Ⅱ,同时具有 2 个分子标记的优良等位位点;而师栾 02-1 等位变异类型为 Xwmc622 的类型Ⅱ、Xwmc707 的类型Ⅲ,同时具有 2 个分子标记的热敏等位类型。仪小梅等[26]对于黄淮麦区小麦主推品种(系)干热风抗性鉴定结果显示:小麦品种山农 22 为高抗品种,而师栾 02-1 为敏感品种,这与本试验结果一致,表明 Xwmc622 与 Xwmc707 两个分子标记在小麦耐热鉴定以及育种选择上的潜在价值。因此,Xwmc622 与 Xwmc707 有望在小麦耐热品种(系)的筛选及小麦耐热分子标记育种中得到应用。

参考文献

[1] Bita C E, Gerats T. Plant tolerance to high temperature in a changing environment: scientific fundamentals and production of heat stress-tolerant crops. Frontiers in Plant Science, 2013, 4(273): 273

[2] Lipiec J, Doussan C, Nosalewicz A, Kondracka K. Effect of drought and heat stresses on plant growth and yield: a review. International Agrophysics, 2013, 27(4): 463-477

[3] 孙林海,赵振国 . 我国暖冬气候及其成因分析 . 气象,2004,30(12): 57-60
Sun L H, Zhao Z G. Analysis of warm winter climate and its causes in China. Meteorological Monthly, 2004, 30(12): 57-60

[4] 耿晓丽,张月伶,臧新山,赵月,张金波,尤明山,倪中福,姚颖垠,辛明明,彭惠茹,孙其信 . 北方冬麦区与黄淮北片优良小麦品种(系)耐热性评价 . 麦类作物学报,2016,36(2): 172-181
Geng X L, Zhang Y L, Zang X S, Zhao Y, Zhang J B, You M S, Ni Z F, Yao Y Y, Xin M M, Peng H R, Sun Q X. Evaluation of heat resistance of wheat varieties(lines)in northern winter wheat region and northern Huang-Huai area. Journal of Triticeae Crops, 2016, 36(2): 172-181

[5] 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): 1213-1220,1226
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. Research progress on identification methods of heat resistance and mechanism of response to heat stress in wheat. Journal of plant Genetic Resources, 2013, 14(6): 1213-1220, 1226

[6] Bohnert H J, Gong Q, Li P, Ma S. Unraveling abiotic stress tolerance mechanisms getting genomics going. Current Opinion in Plant Biology, 2006, 9(2): 180-188

[7] Paliwal R, Rder 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(3): 561-575

[8] 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. Evaluation of heat tolerance of spring wheat varieties in Xinjiang. Journal of Triticeae Crops, 2017, 37(11): 1497-1502

[9] Ayeneh A, Ginkel M V, Reynolds M P, Ammar K. Comparison of leaf, spike, peduncle and canopy temperature depression in wheat under heat stress. Field Crops Research, 2002, 79(2): 173-184

[10] Barakat M N, Al-Doss E, Elshafei A A, Moustafa K A. Identification of new microsatellite marker linked to the grain filling rate as indicator for heat tolerance genes in F_2 wheat population. Australian Journal of Crop Science, 2011, 5(2): 104-110

[11] Yang J, Sears R G, Gill B S, Paulsen G M. Quantitative and molecular characterization of heat tolerance in hexaploid wheat. Euphytica, 2002, 126(2): 275-282

[12] 陈冬梅,马永安,刘保华,苏玉环,王雪香 . 小麦耐热种质资源的鉴定与筛选 . 河北农业科学,2017,21(4): 64-69
Chen D M, Ma Y A, Liu B H, Su Y H, Wang X X. Identification and screening of wheat germplasm resources for heat resistance. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2017, 21(4): 64-69

[13] 许东旭,黄长志,周秋峰 . 小麦耐热型种质资源的鉴定与筛选 . 农业科技通讯,2020(1): 68-71
Xu D X, Huang C Z, Zhou Q F. Identification and screening of wheat germplasm resources of heat-resistant type. Agricultural Science and Technology Bulletin, 2020(1): 68-71

[14] Gale K R, Ma W, Zhang W, Rampling L, Hill A S, Appels R, Morris P, Morrel M. Simple high-throughput DNA markers for genotyping wheat//Ma W J. 10th Australian wheat breeders assembly proceedings. Mildura: Australian Wheat Breeders Assembly, 2001: 26-31

[15] Zhang X X, Wang L, Shou L L. Rapid extraction of genomic DNA from wheat by a modified CTAB method. Agricultural Science & Technology, 2013, 14(7): 946-949

[16] 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，2017，37（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, 37（1）: 7-15
[17] 刘子会，刘畅，彭义峰，李国良，张华宁，张红梅，段硕楠，郭秀林．小麦耐热分子标记 Xwmc44 的鉴定及分析．植物遗传资源学报，2021，22（1）：95-101
Liu Z H, Liu C, Peng Y F, Li G L, Zhang H N, Zhang H M, Duan S N, Guo X L. Identification and analysis of wheat thermostable molecular marker Xwmc44. Journal of Plant Genetic Resources, 2021, 22（1）: 95-101
[18] 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 heat resistance of spring wheat. Journal of China Agricultural University, 2000, 5（1）: 43-49
[19] 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，2010，3（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. Molecular markers identification of seed dormancy characteristics of wheat microcore germplasm and local cultivars in China. Acta Agronomica Sinica, 2010, 3（10）: 1649-1656
[20] Barakat M N. Bulked segregant analysis to detect quantitative trait loci（QTL）related to heat tolerance at grain filling rate in wheat using simple sequence repeat（SSR）markers. African Journal of Biotechnology, 2012, 11（61）: 12436-12442
[21] Pinto R S, Reynolds M P, 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 and Applied Genetics, 2010, 121（6）: 1001-1021
[22] Sunil, Krishna H, Upadhyay D, Gajghate R, Singh P K. QTL mapping for heat tolerance related traits using backcross inbred lines in wheat（*Triticum aestivum* L.）. Indian Journal of Genetics and Plant Breeding, 2020, 80（3）: 242-249
[23] Yang D L, Liu Y, Cheng H B, Chang L, Chen J J, Chai S X, Li M F. Genetic dissection of flag leaf morphology in wheat（*Triticum aestivum* L.）under diverse water regimes. BMC Genetics, 2016, 17（1）: 94
[24] Liu Y X, Tao Y, Wang Z Q, Guo Q L, Wu F K, Yang X L, Deng M, Ma J, Chen G D, Wei Y M, Zheng Y L. Identification of QTL for flag leaf length in common wheat and their pleiotropic effects. Molecular Breeding, 2018, 38（1）: 1-11
[25] Saeed I, Chen X, Bachir D G, Hu Y G. Association mapping for photosynthesis and yield traits under two moisture conditions and their drought indices in winter bread wheat（*Triticum aestivum* L.）using SSR markers. Australian Journal of Crop Science, 2017, 11（3）: 248-257
[26] 仪小梅，孙爱清，韩晓玉，张杰道，王振林，王春微，杨敏，王琳琳，尹燕枰．黄淮麦区小麦主推品种（系）干热风抗性鉴定．麦类作物学报，2015，35（2）：274-284
Yi X M, Sun A Q, Han X Y, Zhang J D, Wang Z L, Wang C W, Yang M, Wang L L, Yin Y P. Identification of dry and hot wind resistance of main wheat varieties（lines）in Huang-Huai wheat region. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35（2）: 274-284