

汪晓璐, 王灿国, 韩冉, 等. 提高小麦面团特性的外源染色体及其特异分子标记开发[J]. 山西农业科学, 2025, 53(2): 83-91.
WANG X L, WANG C U, HAN R, et al. Development of alien chromosome for improving the characteristics of wheat dough and its specific molecular marker[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(2): 83-91.

doi:10.3969/j.issn.1002-2481.2025.02.11

提高小麦面团特性的外源染色体及其特异分子标记开发

汪晓璐, 王灿国, 韩冉, 刘爱峰, 李豪圣, 曹新有, 赵振东, 刘建军, 刘成

(山东省农业科学院作物研究所/小麦玉米国家工程研究中心/小麦育种全国重点实验室/
农业农村部黄淮海北部小麦生物学与遗传育种重点实验室/山东省小麦技术创新中心, 山东 济南 250100)

摘要:为鉴定小麦近缘物种染色体系的面团特性,以中国春为对照,测定济麦22、济麦262以及19份中国春-近缘物种染色体附加系和易位系的面团形成时间、稳定时间和粉质质量指数,利用87对第1同源群的PLUG引物对中国春-两芒山羊草1U^b#1附加系及中国春进行分子标记筛选。结果表明,中国春-两芒山羊草1U^b#1附加系、中国春-卵穗山羊草1M^e#1附加系、中国春-粗穗披碱草1Sⁱ附加系等材料的面团形成时间显著长于中国春;中国春-两芒山羊草1U^b#1附加系、中国春-卵穗山羊草1M^e#1附加系、中国春-粗穗披碱草1H^s附加系等材料的稳定时间显著长于中国春;中国春-两芒山羊草1U^b#1附加系、中国春-卵穗山羊草1M^e#1附加系、中国春-希尔斯山羊草1Sⁱ#1附加系等材料的粉质质量指数显著高于中国春,其中,中国春-两芒山羊草1U^b#1附加系的面团形成时间、稳定时间和粉质质量指数最高,分别为8.10、10.73 min和159.7。引物TANC1089和TANC1142仅可以在中国春-两芒山羊草1U^b#1附加系中扩增出长度分别为500 bp和750 bp的特异片段。综上所述,中国春-两芒山羊草1U^b#1染色体导入小麦可显著提高小麦加工品质,建立的中国春-两芒山羊草1U^b#1染色体分子标记TANC1089和TANC1142可用于小麦研究中两芒山羊草1U^b#1染色体的追踪和鉴定。

关键词:小麦近缘物种;面团特性;两芒山羊草;分子标记;染色质追踪

中图分类号: S512.1; S331 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-2481(2025)02-0083-09

Development of Alien Chromosome for Improving the Characteristics of Wheat Dough and Its Specific Molecular Marker

WANG Xiaolu, WANG Canguo, HAN Ran, LIU Aifeng, LI Haosheng,
CAO Xinyou, ZHAO Zhendong, LIU Jianjun, LIU Cheng

(Crop Research Institute Shandong Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Research Center for Wheat and Maize/National Key Laboratory of Wheat Breeding/Ministry of Agriculture and Rural Affairs
Key Laboratory of Wheat Biology and Genetic Improvement in the North Huang-Huai River
Valley/Shandong Wheat Technology Innovation Center, Ji'nan 250100, China)

Abstract: In order to identify the dough characteristics of the wheat related species chromosome lines, in this study, using Chinese Spring(CS) as the control, the dough formation time, stability time, and farinograph quality index of Jimai 22, Jimai 262, and 19 CS related species chromosome additions and translocation lines were measured, and 87 pairs of PLUG primers from the first homologous group were used to conduct molecular marker screening of the CS-*Aegilops biuncialis* 1U^b#1 addition line and CS. The results showed that the dough formation time of the materials such as CS-*Aegilops biuncialis* 1U^b#1 addition line, CS-*Ae. geniculata* 1M^e#1 addition line, and CS-*Elymus trachycaulus* 1Sⁱ addition line was significantly longer

收稿日期: 2024-11-04

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2021QC198); 山东省重点研发计划(2021LZGC025, 2022LZG002-4); 山东省小麦产业技术体系(SDAIT-01-01); 济南市“新高校20条”(202228067)

作者简介: 汪晓璐, 助理研究员, 博士, 主要从事小麦远缘杂交及分子遗传育种研究, E-mail: xiaoluwang1989@hotmail.com

通信作者: 刘成, 研究员, 博士, 主要从事小麦远缘杂交及分子遗传育种研究, E-mail: lch6688407@163.com

than that of CS. The stability time of the materials such as the CS-*Ae. biuncialis* 1U^{bi}#1 addition line, CS-*Ae. geniculata* 1M^g#1 addition line, and CS-*E. trachycaulus* 1H^s addition line was significantly longer than that of CS. The farinograph quality index of the materials such as CS-*Ae. biuncialis* 1U^{bi}#1 addition line, CS-*Ae. geniculata* 1M^g#1 addition line, and CS-*Ae. searsii* 1S^s#1 addition line was significantly higher than that of CS. Among them, the dough formation time, stability time, and farinograph quality index of CS-*Ae. biuncialis* 1U^{bi}#1 addition line were the highest, at 8.1 min, 10.73 min, and 159.7, respectively. The primers TANC1089 and TANC1142 could amplify specific fragments of 500 bp and 750 bp in the CS-*Ae. biuncialis* 1U^{bi}#1 addition line alone. In conclusion, introduction of the CS-*Ae. biuncialis* 1U^{bi}#1 chromosome into wheat could significantly improve the processing quality of wheat, and the established molecular markers TANC1089 and TANC1142 for the CS-*Ae. biuncialis* 1U^{bi}#1 chromosome could be used for 1U^{bi}#1 chromatin tracking and identification of *Ae. biuncialis* in wheat research.

Keywords: wheat related species; characteristics of dough; *Aegilops biuncialis*; molecular markers; chromatin tracking

小麦是全世界主要的粮食作物之一,也是我国北方人民的主要口粮。小麦品质是一个比较复杂的数量性状,不同因子对其影响程度不同^[1-4]。小麦加工品质主要受面粉和面团特征的影响,面团稳定时间表示面团的耐搅性和面筋筋力^[5],面团稳定时间越长,说明小麦的韧性越好,加工品质越好,面粉的评分越高。面团的形成时间和粉质质量指数也能很好地反映小麦的物理品质,对食品品质有重要影响^[6-8]。赵振东等^[9]对34份小麦品种进行品质测定,结果显示,面团形成时间平均为3.0 min,稳定时间平均为5.2 min。孙辉等^[10]测定小麦面团稳定时间,发现谷蛋白大聚合体影响面粉的烘焙品质。张树华等^[11]研究表明,麦谷蛋白含量与面团稳定时间呈极显著正相关。曹莉等^[12]研究发现,黄淮冬麦面团稳定时间平均为3.8 min。种植在不同地域优质小麦的面团稳定时间等指标往往并不稳定,且传统培育优质强筋小麦的办法,需要对每代育种材料进行检测,不仅耗时长还效率低,给优质小麦育种和应用带来了很大挑战^[13-14]。

小麦近缘物种有丰富的遗传资源,对其优质基因进行筛选和鉴定对小麦品质改良具有重要意义。两芒山羊草(*Aegilops biuncialis*, 2n=4x=28, 基因组 UUMM)、希尔斯山羊草(*Ae. searsii* Feldman & Kislev ex Hammer, 2n=2x=14, 基因组 S^sS^s)、沙融山羊草(*Ae. sharonensis* Eig., 2n=2x=14, 基因组 S^{sh}S^{sh})等是小麦的野生近缘种,具有抗病、抗旱、耐盐、加工品质好等特点^[15-17]。夏晴等^[18]研究发现,中国春-两芒山羊草 2M^b 二体附加系与亲本相比高抗白粉病。汪晓璐等^[19]研究发现,希尔斯山羊草 4S^s#1、粗穗披碱草 5H^c、纤毛披碱草 3S^c、7S^c、5Y^c 和 7Y^c、簇毛麦 2V#3、大麦 4H、帝国黑麦 4R、长穗偃麦草 3E、5E 和 6E 染色体导入小麦可使

穗长显著变长;纤毛披碱草 5Y^c 染色体导入使小麦旗叶长度显著变小;纤毛披碱草 7S^c 和 7Y^c 染色体导入可使小麦千粒质量显著增加;两芒山羊草 2M^b#1 染色体的导入显著降低小麦的株高、分蘖数、小穗数和千粒质量。王海燕等^[20]的研究表明,簇毛麦 T4V#4S·4DL 染色体导入小麦后降低了其千粒质量。郭军等^[21]在小麦中导入长穗偃麦草的 1E^c 染色体,发现穗长明显增长,但是旗叶长和宽显著减少。然而,这些物种染色质导入小麦是否影响小麦品质未见报道。

在目的基因向小麦转移的过程中,对被转移的基因及其外源染色体或者染色体片段进行追踪,可以提高选择的准确性,因此,开发可以检测外源染色体的特异分子标记,不仅可以缩短育种周期,还可以提高育种的效率。LIU 等^[22]筛选小麦 EST-STS (Expressed sequences tags-Sequence tagged sites) 引物,获得了 20 个希尔斯山羊草 3S^s 染色体特异标记,其中,2 个标记用于鉴定希尔斯山羊草 3S^s 染色体的整臂易位系,结合抗病性鉴定,将抗秆锈病基因定位在 3S^sS 染色体上。GONG 等^[23]筛选小麦 EST-STS、PLUG (PCR-based landmark unique gene)、COS (Conserved ortholog sets) 引物等,建立了 42 个单芒山羊草染色体特异标记。曹亚萍等^[24]根据水稻和小麦的 EST 序列,合成了 240 对 STS 引物,开发了 34 个可以追踪簇毛麦 1V-7V 染色体的分子标记。

为了筛选含有能提高小麦品质的优异基因源,并开发特异的分子标记,本试验利用粉质仪对 19 份小麦-近缘物种附加系和易位系的面团形成时间、稳定时间和粉质质量指数进行测定,并利用 PLUG 引物对筛选出的优异材料进行特异分子标记的开发,旨在为优质小麦品种的培育提供分子

基础。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试材料包括 24 份小麦-近缘物种染色体系和 3 份普通小麦材料,具体见表 1。其中,中国春由电子科技大学杨足君教授提供;济麦 22 和济麦 262 由山东省农业科学院作物研究所自育并保存;其余材料由美国堪萨斯州立大学小麦遗传与基因资源中心(WGGRC, Wheat Genetic and Genomic Resources Center)的 Gill BS 教授提供。

表 1 试验材料
Tab.1 Experimental material

序号 Number	编号 Accession number	材料 Material	染色体 条数 Chromosome number
1	CS	中国春	42
2	JM22	济麦 22	42
3	JM262	济麦 262	42
4	TA5615	中国春-簇毛麦 1DS·1VL 罗伯逊易位系	42
5	TA3580	中国春-希尔斯山羊草 1S ^a #1 附加系	44
6	TA7713	中国春-沙融山羊草 4S ^{sh} #3 附加系	44
7	TA7689	中国春-拟斯卑尔托山羊草 1S ^e #3 附加系	44
8	TA7594	中国春-易变山羊草 1S ^v #1 附加系	44
9	TA7598	中国春-易变山羊草 5S ^v #1 附加系	44
10	TA7614	中国春-易变山羊草 1U ^v #1 附加系	44
11	TA7706	中国春-纤毛披碱草 3S ^f 附加系	44
12	TA7707	中国春-纤毛披碱草 7S ^f 附加系	44
13	TA7708	中国春-纤毛披碱草 5Y ^f 附加系	44
14	TA7663	中国春-卵穗山羊草 2U ^o #1 附加系	44
15	TA7665	中国春-卵穗山羊草 5U ^o #1 附加系	44
16	TA7655	中国春-卵穗山羊草 1M ^o #1 附加系	44
17	TA7662	中国春-卵穗山羊草 1U ^o #1 附加系	44
18	TA7552	中国春-粗穗披碱草 1H ^r 附加系	44
19	TA7556	中国春-粗穗披碱草 1S ^r 附加系	44
20	TA7553	中国春-粗穗披碱草 1H ^s 端体附加系	42+2t
21	TA7554	中国春-粗穗披碱草 1H ^l 端体附加系	42+2t
22	TA7577	中国春-粗穗披碱草 1S ^l 端体附加系	42+2t
23	TA7725	中国春-两芒山羊草 1U ^{bi} #1 附加系	44
24	TA7729	中国春-两芒山羊草 5U ^{bi} #1 附加系	44
25	TA7733	中国春-两芒山羊草 2M ^{bi} #1 附加系	44
26	TA7734	中国春-两芒山羊草 3M ^{bi} #1 附加系	44
27	TA7735	中国春-两芒山羊草 4M ^{bi} #1 单体附加系	43

注:t表示端粒。

Note:t indicated telomere.

1.2 小麦加工品质的测定

利用德国 Bulher 公司的 MLU-22 型自动实验磨粉机磨粉,具体方法参照张晓等^[25]。利用德国 Brabender 公司的 810152 电子型粉质仪测定济麦 22、济麦 262、中国春(对照)和 19 份小麦-近缘物种染色体系的面团形成时间、稳定时间和粉质质量指数。

1.3 分子标记开发

选取品质好的小麦-近缘物种染色体系进行分子标记的开发。利用天根快捷型植物 DNA 提取试剂盒提取供试材料幼苗叶片的基因组 DNA,具体方法参考 LIU 等^[26]。利用第一同源群和第二同源群的 87 对引物对材料 DNA 进行扩增,引物序列参照 ISHIKAWA 等^[27],引物由北京擎科生物科技股份有限公司合成。

PCR 反应体系:DNA (25 ng/ μ L) 1.0 μ L, 2 \times PCR mix 15 μ L, 上、下游引物 (10 μ mol/L) 各 0.5 μ L, 用无菌双蒸馏水补充至 30 μ L。PCR 反应扩增程序为:94 $^{\circ}$ C 预变性 5 min; 94 $^{\circ}$ C 变性 45 s, 55 $^{\circ}$ C 退火 30 s, 72 $^{\circ}$ C 延伸 2 min, 35 个循环;最后 72 $^{\circ}$ C 延伸 10 min。

PCR 扩增结束后,用 *Taq* I 和 *Hae* III 内切酶酶切 (Thermo Scientific 公司),酶切反应体系:内切酶 0.2 μ L, 快速酶切缓冲液 1 μ L, 无菌双蒸馏水补充反应体系至 5 μ L, *Taq* I 反应温度为 65 $^{\circ}$ C, *Hae* III 反应温度为 37 $^{\circ}$ C, 反应时间 15 min。酶切产物在 1.5% 的琼脂糖凝胶中电泳,电泳后凝胶在紫外凝胶成像仪 GDS-Gel Dol 2000 下扫描。

1.4 数据处理

利用 Excel 2010 对数据进行整理, SPSS Statistics 17.0 进行方差分析。

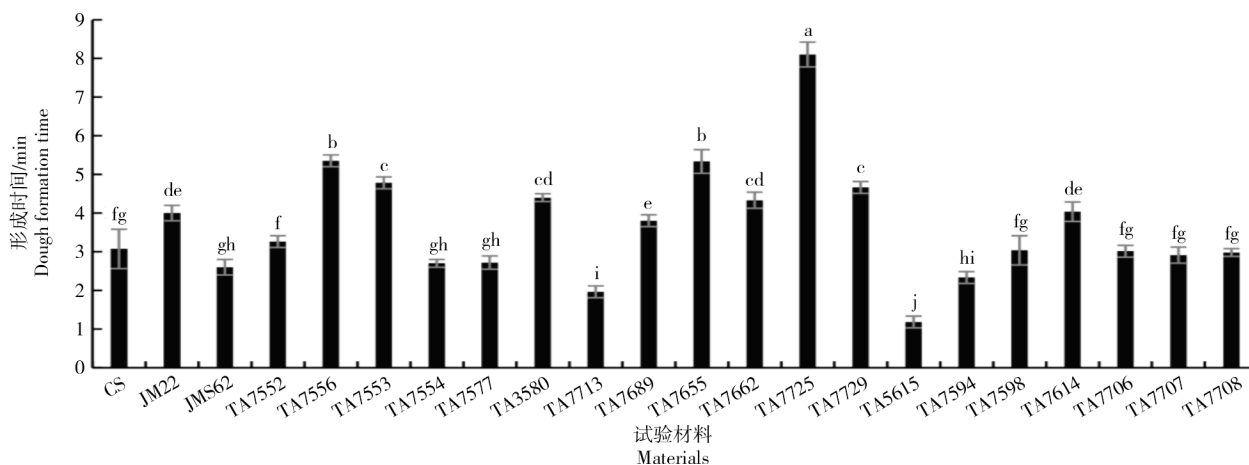
2 结果与分析

2.1 面团形成时间分析

面团形成时间测定结果显示(图 1),与中国春相比,中国春-两芒山羊草 1U^{bi}#1 附加系、中国春-卵穗山羊草 1M^o#1 附加系、中国春-粗穗披碱草 1S^r附加系、中国春-粗穗披碱草 1H^s附加系和中国春-两芒山羊草 5U^{bi}#1 附加系、中国春-希尔斯山羊草 1S^e#1 附加系和中国春-卵穗山羊草 1U^o#1 附加系的面团形成时间显著长于中国春 ($P < 0.05$),而中国春-簇毛麦 1DS·1VL 罗伯逊易位系、中国春-沙融山羊草 4S^{sh}#3 附加系的面团形

成时间显著低于对照($P < 0.05$),其他材料与对照间无显著差异。其中,中国春-两芒山羊草 1U^{bi}#1 附加系的形成时间最长,为 8.1 min,表明两芒山

羊草 1U^{bi}#1 的导入能够增加小麦的面团形成时间。



不同小写字母表示不同材料在 0.05 水平上差异显著。下图同

Difference lowercase letters indicated significant difference between different materials at the level of 0.05. The same as below

图 1 面团形成时间分析

Fig.1 The dough formation time

2.2 面团稳定时间分析

面团稳定时间测定结果显示(图 2),与中国春相比,济麦 22、中国春-两芒山羊草 1U^{bi}#1 附加系、中国春-卵穗山羊草 1M^g#1 附加系、中国春-粗穗披碱草 1H^s附加系、中国春-希尔斯山羊草 1S[#]1 附加系和中国春-两芒山羊草 5U^{bi}#1 附加系稳定时间长且差异显著($P < 0.05$),中国春-卵穗山羊草 1U^g#1 附加系稳定时间较长且差异显著($P <$

0.05);而中国春-簇毛麦 1DS·1VL 罗伯逊易位系、中国春-沙融山羊草 4S^{sh}#3 附加系、中国春-易变山羊草 1S[#]1 附加系和中国春-纤毛披碱草 7S[#]附加系稳定时间较短且差异显著($P < 0.05$),其他材料与中国春相比无明显差异。其中,中国春-两芒山羊草 1U^{bi}#1 附加系的稳定时间最长,为 10.73 min,表明两芒山羊草 1U^{bi}#1 的导入能够增加小麦的面团稳定时间。

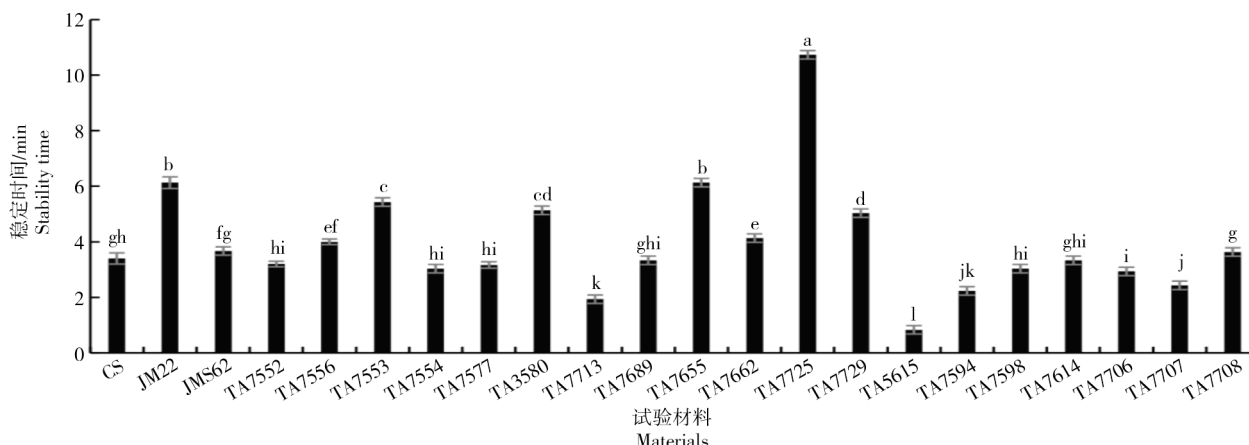


图 2 面团稳定时间分析

Fig.2 The dough stability time

2.3 粉质质量指数分析

粉质质量指数测定结果显示(图 3),与中国春

相比,济麦 22、中国春-两芒山羊草 1U^{bi}#1 附加系、中国春-卵穗山羊草 1M^g#1 附加系、中国春-粗穗

披碱草 1H^S 附加系、中国春-粗穗披碱草 1S^{#1} 附加系、中国春-希尔斯山羊草 1S^{#1} 附加系、中国春-两芒山羊草 5U^{bi}#1 附加系和中国春-易变山羊草 1U^{#1} 附加系粉质质量指数较高,且差异显著($P<0.05$);中国春-粗穗披碱草 1H^L 附加系、中国春-粗穗披碱草 1S^L 附加系、中国春-沙融山羊草 4S^{sh}#3 附加系、中国春-簇毛麦 1DS·1VL 罗伯逊易位系、中国春-易变山羊草 1S^v#1 附加系、中国春-易变山羊草 5S^v#1 附加系、中国春-纤毛披碱草 3S^c 附加系、中国春-纤毛披碱草 7S^c 附加系和中国春-纤毛披碱草 5Y^c 附加系粉质质量指数较低,且差异显著($P<0.05$),剩余材料与对照间无显著差

异。其中,中国春-两芒山羊草 1U^{bi}#1 附加系的粉质质量指数最高,为 159.7,表明两芒山羊草 1U^{bi}#1 的导入能够提高小麦的粉质质量指数。

综上,中国春-两芒山羊草 1U^{bi}#1 附加系的面团形成时间最长,为 8.1 min;其面团稳定时间最长,为 10.73 min;其粉质质量指数最高,为 159.7,与对照相比差异均显著($P<0.05$)。中国春-两芒山羊草 1U^{bi}#1 附加系的 3 个指数都高于济麦 22,它的面团稳定时间更是达到了国家强筋小麦的标准和山东省中强筋小麦的标准。因此,两芒山羊草 1U^{bi} 染色体系为小麦面粉筋性最佳外源染色体来源。

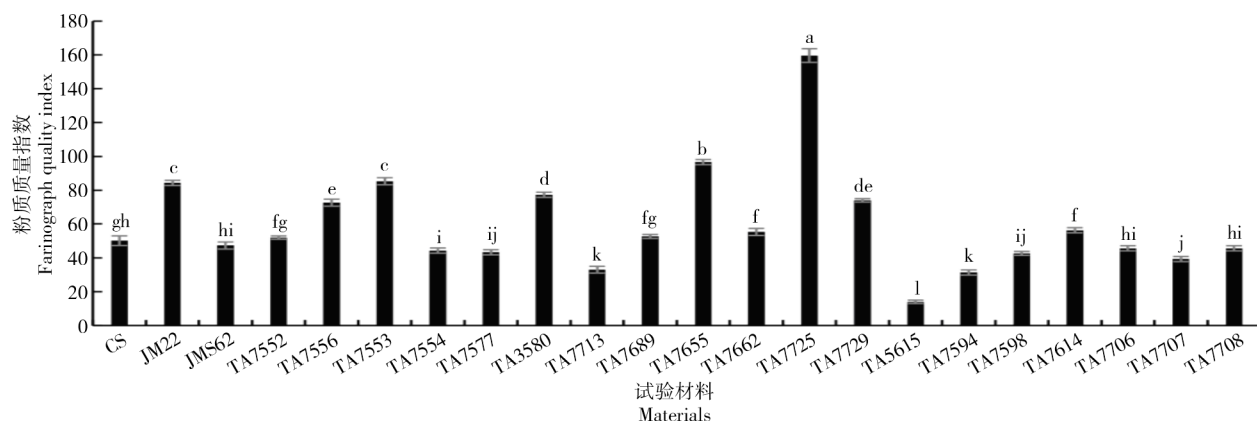


图3 粉质质量指数分析

Fig.3 The farinograph quality index

2.4 小麦-近缘染色体附加系的 PLUG 标记的引物筛选

根据所测得的所有材料的数据可知,中国春-两芒山羊草 1U^{bi}#1 附加系的小麦品种显著提高了面团形成时间、稳定时间和粉质质量指数,因此,

对其进行分子标记的筛选。以中国春为对照,对 87 对第一同源群的 PLUG 引物进行筛选,结果表明,在 87 对引物中,仅有 2 对引物(TANC1089 和 TANC1142)能在中国春-两芒山羊草 1U^{bi}#1 附加系中扩增出多态性条带(表 2、图 4)。

表 2 TNAC1089 和 TNAC1142 的引物信息

Tab.2 Primer information for TNAC1089 and TNAC1142

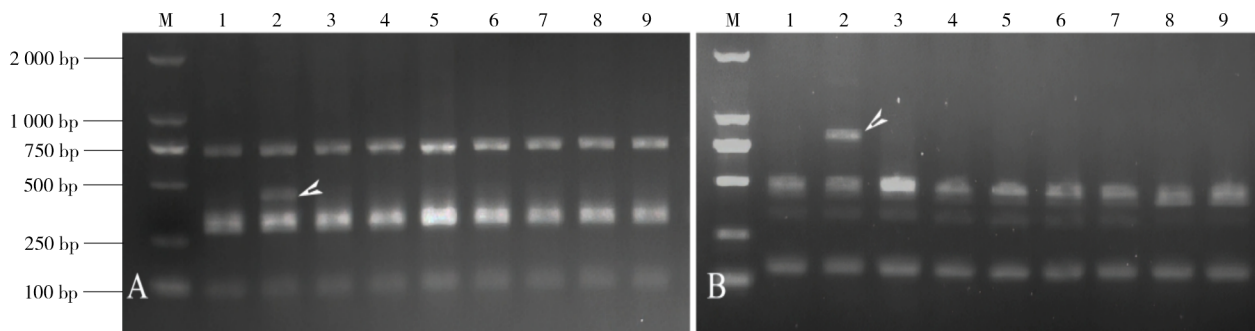
引物名称 Primer name	上/下游引物(5'-3') Upstream/downstream primer(5'-3')	染色体位置 Chromosomal location	酶切位点 Restriction site	扩增长度/bp Amplification length
TNAC1089	F:CGTATGGGAAGATCACAGACC R:TGGTTTCGCATACACATCAAA	1AL、1BL、1DL	Taq I	400
TNAC1142	F:GCCTACGAGTACATGGTTCGAG R:CAGCATCCATAACCAGGATGT	2AL、2BL、2DL	Hae III	850

为鉴定筛选的 TANC1089 和 TANC1142 引物的特异性,以中国春、中国春-两芒山羊草 1U^{bi}#1 附加系、中国春-两芒山羊草 2M^{bi}#1 附加系、中国春-两芒山羊草 3M^{bi}#1 附加系、中国春-两芒山羊草 4M^{bi}#1 单体附加系、中国春-卵穗山羊草 2U^s#1

附加系、中国春-卵穗山羊草 5U^s#1 附加系、济麦 22 和济麦 262 为模板,利用上述的 2 对引物进行 PCR 扩增。PCR 扩增结束后,分别利用限制性内切酶 Taq I 和 Hae III 对 PCR 产物进行酶切,再通过凝胶电泳可以得到不同的条带,进而分析多态

性。结果表明,这2对引物在除了中国春-两芒山羊草 1U^{bi}#1 附加系外的其他材料中均不能扩增出

特异性条带(图4),由此说明 TANC1089 和 TANC1142 为两芒山羊草 1U^{bi} 的特异分子标记。



M 表示 Marker; 1—9. 中国春、TA7725、TA7733、TA7734、TA7735、TA7663、TA7665、JM22 和 JM262; 箭头所指为特异性条带

M represented Marker; 1-9. TA7725, TA7733, TA7734, TA7735, TA7663, TA7665, JM22, and JM262, respectively; the arrow indicated the specific bands

图4 引物 TANC1089/Taq I (A) 和 TANC1142/Hae III (B) 在试验材料中的扩增结果

Fig.4 Amplification results of primer TANC1089/Taq I (A) and TANC1142/Hae III (B) in experimental materials

3 结论与讨论

目前,许多研究报道了将近缘物种的外源染色体导入小麦中能够影响小麦的品质^[15-17],但是影响小麦的加工品质的研究还鲜有报道。孙彬等^[28]研究发现,欧山羊草特异高分子谷蛋白亚基导入小麦后,提高了蛋白含量和湿面筋含量。张瑞奇等^[29]研究表明,簇毛麦 Glu-V1、Glu-V3 和 Gli-V1 贮藏蛋白位点基因导入普通小麦背景中能够显著提高总蛋白质含量和面筋质量。王丛磊等^[30]利用普通小麦-簇毛麦 T6VS·6AL 易位系,并通过分子标记,发现了此易位系对小麦面团的稳定时间有显著的正效应。羊阳等^[31]发现卵穗山羊草的 1M^s 染色体能够提高普通小麦面团的形成时间和稳定时间。本研究也表明中国春-卵穗山羊草 1M^s#1 附加系的面团形成时间和稳定时间显著长于中国春。KUMAR 等^[32]对山羊草属物种以及小麦-山羊草染色体系进行了加工品质与营养品质的研究,发现希尔斯山羊草、卵穗山羊草和高大山羊草对小麦的面包加工品质有正效应,小伞山羊草的低分子谷蛋白亚基与小麦面包加工品质相关联。董剑等^[33]对中国春-簇毛麦罗伯逊易位系 T1DS·1VL、T1DL·1VS 易位系和对照中国春的加工品质进行了研究,发现 T1DS·1VL 的 Zeleny 沉淀值、面团形成时间、稳定时间和粉质质量指数显著降低,但 T1DL·1VS 的这些性状值较对照显著提高,说明 T1DS·1VL 易位系对小麦的面团强度有显著

的负向效应,而 T1DL·1VS 易位系显著增强面筋强度。ZHAO 等^[34]对创制的小麦-簇毛麦 T1DL·1V#3S 和 T1DL·1V#3L 易位系进行品质检测结果显示,T1DL·1V#3L 易位系相对对照中国春,其形成时间和稳定时间更短,面筋强度更弱,淀粉品质指标更低。而 T1DL·1V#3S 易位系的上述指标显著优于中国春,可用于小麦品质改良。本研究也发现中国春-簇毛麦 1DS·1VL 罗伯逊易位系的面团形成时间、稳定时间和粉质质量指数都显著低于中国春。中国春-两芒山羊草 1U^{bi}#1 附加系在面团形成时间、稳定时间和粉质质量指数这 3 个指标中数值均为最高,分别为 8.1 min、10.73 min 和 159.7,并且与对照小麦相比差异显著,显著提高了小麦的加工品质。韩冉等^[35]通过在对小麦高分子谷蛋白检测中发现两芒山羊草 1U^{bi} 染色体上存在特异高分子谷蛋白亚基,说明两芒山羊草的 1U^{bi} 染色体作为优异基因能够提高小麦品质。此外,外源染色体的导入也可能对小麦的品质造成负效应。例如,苏亚蕊等^[36]发现黑麦 1RS 染色体导入小麦,会导致小麦面团粘性增大、强度降低,使得小麦的加工品质显著变劣。汪晓璐等^[19]也研究了外源染色体导入对小麦主要农艺性状的影响,如希尔斯山羊草 1S^s#1、两芒山羊草 2M^{bi}#1、粗穗披碱草 1Hⁱ 染色体的导入使株高显著降低;卵穗山羊草 1M^s#1、两芒山羊草 2M^{bi}#1、纤毛披碱草 7S^c 和 5Y^c 的导入使单穗粒数显著减少;希尔斯山羊草 1S^s#1、两芒山羊草 2M^{bi}#1、粗穗披碱草 1Hⁱ 和

纤毛披碱草 5Y^c 的导入使分蘖数和千粒质量显著降低,而纤毛披碱草 7S^c 和 7Y^c 的导入使千粒质量显著增加。因此,通过小麦远缘杂交把外源优良基因导入小麦进行育种时,需要综合考量其抗病性、丰产性^[37]和品质。

筛选能提高小麦品质的外源染色体并开发其特异分子标记,能够为优质小麦分子育种提供检测手段。染色体 C 分带和基因组原位杂交都已被应用于小麦背景中外源染色体的鉴定工作,但是 2 种试验方法较为复杂。近年来,成本低、操作简便的分子标记技术现已被广泛应用于小麦近源植物染色体特异标记建立。SCHNEIDER 等^[38]以小麦-两芒山羊草附加系等为材料筛选出 108 对 SSR (Simple sequence repeat) 引物,建立了两芒山羊草 2M^b 和 3M^b 染色体特异标记。李东海^[39]筛选了 145 对 PLUG 引物,并对小麦-多年生四倍体簇毛麦 5AS·5VL 易位系进行了鉴定。付必胜等^[40]通过流式细胞染色体分离技术和二代测序结合的方法,获得了簇毛麦 5VS 的基因组序列信息,开发了簇毛麦 5VS 染色体臂特异分子标记。刘晓明等^[41]开发了高大山羊草 1Sⁱ 染色体特异分子标记,可以应用于杂交群体的筛选、鉴定以及辅助选育籽粒 Fe 和 Zn 元素含量高的高品质小麦。GONG 等^[42]通过 SCAR (Sequence charactered amplified region) 标记开发了偃麦草 E 基因组的特异分子标记,可以用来检测小麦背景中的 E 染色体。姚彩红^[43]发现欧山羊草 1U^b 染色体中的谷蛋白亚基能够通过提高面粉的面筋强度,并从 48 对 PLUG 引物中筛选获得了 5 对 1U^b 染色体特异的 PLUG 引物。ZHOU 等^[44]筛选了 48 对小麦-两芒山羊草 1U^b 附加系上的特异 PLUG 标记,并且每对引物只能在 *Hae* III 或 *Taq* I 酶切下得到一条特异性条带。与上述研究相同,本研究通过筛选小麦第一同源群染色体的 PLUG 引物,建立了两芒山羊草 1U^{bi}#1 染色体特异标记 TANC1089 和 TANC1142,分别只能在 *Taq* I 或 *Hae* III 酶切下得到 1U^{bi} 的特异条带,为追踪小麦背景中两芒山羊草 1U^{bi} 染色质提供了检测方法。然而,目前建立的标记都是 1U^{bi} 长臂标记,后续将加强 1U^{bi} 短臂标记的筛选和建立工作。

两芒山羊草 1U^{bi}#1 染色体导入小麦可显著提高小麦加工品质。本研究建立的两芒山羊草 1U^{bi}#1 染色体分子标记 TANC1089 和 TANC1142 可用于小麦背景中两芒山羊草 1U^{bi}#1 染色质追踪

和鉴定。

参考文献:

- [1] 金善宝. 中国小麦学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 924-926.
JIN S B. Wheat science in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1996:924-926.
- [2] ZHANG Y, HE Z H, YE G Y, et al. Effect of environment and genotype on bread-making quality of spring-sown spring wheat cultivars in China[J]. Euphytica, 2004, 139(1): 75-83.
- [3] SOUZA E J, MARTIN J M, GUTTIERI M J, et al. Influence of genotype, environment, and nitrogen management on spring wheat quality[J]. Crop Science, 2004, 44(2): 425-432.
- [4] 张素瑜, 靳海洋, 崔静宇, 等. 不同生态环境对强筋小麦产量和品质的影响[J]. 河南农业科学, 2022, 51(7): 22-30.
ZHANG S Y, JIN H Y, CUI J Y, et al. Effect of different ecological environments on yield and quality of strong gluten wheat [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2022, 51(7): 22-30.
- [5] ATWELL W. Overview of flour testing[J]. Cereal Foods World, 1989, 48: 252-256.
- [6] 顾雅贤, 王建生. 面团的形成时间和稳定时间对面包制作的影响[J]. 粮油仓储科技通讯, 2005, 21(6): 46-47.
GU Y X, WANG J S. The influence of dough formation time and stability time on bread making[J]. Grain and Oil Storage Technology Newsletter, ae Crops, 2005, 21(6): 46-47.
- [7] MA W, APPELS R, BEKES F, et al. Genetic characterisation of dough rheological properties in a wheat doubled haploid population: additive genetic effects and epistatic interactions[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2005, 111(3): 410-422.
- [8] 李歆, 凌家焯, 郝希成. 粉质质量指数与其他粉质指标间相互关系的研究[J]. 粮油食品科技, 2003, 11(1): 8-10.
LI X, LING J Y, HAO X C. Studies to relate the FQN to the other wheat flour characteristics[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2003, 11(1): 8-10.
- [9] 赵振东, 刘建军, 董进英. 山东省冬小麦品种品质分析[J]. 山东农业科学, 1994, 26(5): 3-6.
ZHAO Z D, LIU J J, DONG J Y. Quality analysis of winter wheat varieties in Shandong Province[J]. Shandong Agricultural Sciences, 1994, 26(5): 3-6.
- [10] 孙辉, 姚大年, 李宝云, 等. 普通小麦谷蛋白大聚合体的含量与烘焙品质相关关系[J]. 中国粮油学报, 1998, 13(6): 15-18.
SUN H, YAO D N, LI B Y, et al. Correlation between content of glutenin macropolymer (gmp) in wheat and baking quality[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 1998, 13(6): 15-18.
- [11] 张树华, 杨学举, 张彩英. 小麦蛋白质组分含量与面团流变学性状的关系[J]. 甘肃农业大学学报, 2011, 46(2): 65-70.
ZHANG S H, YANG X J, ZHANG C Y. Relationships between protein composition content and dough rheological traits in wheat flour[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2011, 46(2): 65-70.
- [12] 曹莉, 王辉, 李学军. 黄淮冬麦区区试小麦品种(系)的品质性状分析及评价[J]. 麦类作物学报, 2001, 21(3): 68-71.
CAO L, WANG H, LI X J. Study on the quality of wheat vari-

- eties (lines) grown in the regional trial of Huang Huai winter wheat area[J]. *Acta Tritical Crops*, 2001, 21(3): 68-71.
- [13] 何中虎, 晏月明, 庄巧生, 等. 中国小麦品种品质评价体系建立与分子改良技术研究[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(6): 1091-1101.
HE Z H, YAN Y M, ZHUANG Q S, et al. Establishment of quality evaluation system and utilization of molecular methods for the improvement of Chinese wheat quality[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(6): 1091-1101.
- [14] LIU Y N, HE Z H, APPELS R, et al. Functional markers in wheat: current status and future prospects[J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2012, 125(1): 1-10.
- [15] COLMER T D, FLOWERS T J, MUNNS R. Use of wild relatives to improve salt tolerance in wheat[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2006, 57(5): 1059-1078.
- [16] DULAI S, MOLNÁR I, SZOPKÓ D, et al. Wheat-*Aegilops biuncialis* amphiploids have efficient photosynthesis and biomass production during osmotic stress[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2014, 171(7): 509-517.
- [17] RAKSZEI M, MOLNÁR I, LOVEGROVE A, et al. Addition of *Aegilops* U and M chromosomes affects protein and dietary fiber content of wholemeal wheat flour[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1529.
- [18] 夏晴, 麦艳娜, 董振杰, 等. 小麦-野生亲缘种属添加系白粉病新抗源筛选及特异分子标记鉴定[J]. *河南农业科学*, 2018, 47(6): 64-69.
XIA Q, MAI Y N, DONG Z J, et al. Identification of powdery mildew resistance resources from wheat-wild relative disomic addition lines and development of molecular markers of alien chromosome-specialty[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2018, 47(6): 64-69.
- [19] 汪晓璐, 韩冉, 宫文萍, 等. 外源染色体导入对小麦主要农艺性状的影响[J]. *植物遗传资源学报*, 2020, 21(4): 834-845.
WANG X L, HAN R, GONG W P, et al. Effects of alien chromosome on main agronomic traits of wheat[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2020, 21(4): 834-845.
- [20] 王海燕, 赵仁慧, 袁春霞, 等. 小麦-簇毛麦 T4DL·4VS 易位染色体对小麦农艺性状的影响[J]. *麦类作物学报*, 2012, 32(6): 1032-1036.
WANG H Y, ZHAO R H, YUAN C X, et al. Effects of the *Triticum aestivum*-*Haynaldia villosa* T4DL·4VS translocation chromosome on the agronomic important traits in different backgrounds[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2012, 32(6): 1032-1036.
- [21] 郭军, 卢明娇, 武智民, 等. 1Ee 染色体对小麦农艺和品质性状的影响研究[J]. *植物遗传资源学报*, 2019, 20(4): 854-860.
GUO J, LU M J, WU Z M, et al. Effects of *Thinopyrum elongatum* chromosome 1Ee on wheat agronomical and quality related traits[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20(4): 854-860.
- [22] LIU W X, JIN Y, ROUSE M, et al. Development and characterization of wheat-Ae. searsii Robertsonian translocations and a recombinant chromosome conferring resistance to stem rust[J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2011, 122(8): 1537-1545.
- [23] GONG W, LI G, ZHOU J, et al. Cytogenetic and molecular markers for detecting *Aegilops uniaristata* chromosomes in a wheat background[J]. *Genome*, 57(9): 489-497.
- [24] 曹亚萍, 曹爱忠, 王秀娥, 等. 基于 EST-PCR 的簇毛麦染色体特异分子标记筛选及应用[J]. *作物学报*, 2009, 35(1): 1-10.
CAO Y P, CAO A Z, WANG X E, et al. Screening and application of EST-based PCR markers specific to individual chromosomes of *Haynaldia villosa*[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(1): 1-10.
- [25] 张晓, 李曼, 江伟, 等. 小麦品种扬麦 16 品质及其稳定性分析[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(12): 138-141.
ZHANG X, LI M, JIANG W, et al. Quality and stability analysis of wheat variety young Mai 16[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(12): 138-141.
- [26] LIU C, LI G R, GONG W P, et al. Molecular and cytogenetic characterization of a powdery mildew-resistant wheat-*Aegilops mutica* partial amphiploid and addition line[J]. *Cytogenetic and Genome Research*, 2015, 147(2-3): 186-194.
- [27] ISHIKAWA G, NAKAMURA T, ASHIDA T, et al. Localization of anchor loci representing five hundred annotated rice genes to wheat chromosomes using PLUG markers[J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2009, 118(3): 499-514.
- [28] 孙彬. 欧山羊草谷蛋白基因向普通小麦的导入及其品质效应研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
SUN B. Study on the introduction of glutenin gene from European goat into common wheat and its quality effect[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.
- [29] 张瑞奇. 簇毛麦籽粒硬度基因和贮藏蛋白基因的染色体定位及易位系选育[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
ZHANG R Q. Chromosome location and translocation line selection of grain hardness gene and storage protein gene in tufted wheat[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.
- [30] 王从磊, 马秋香, 亓增军, 等. 普通小麦-簇毛麦 T6VS·6AL 易位染色体对小麦品质的影响[J]. *麦类作物学报*, 2009, 29(5): 787-792.
WANG C L, MA Q X, QI Z J, et al. Effects of wheat-*Haynaldia villosa* T6VS·6AL translocation on grain and flour quality of wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(5): 787-792.
- [31] 羊阳, 丁梦云, 郭雷, 等. 小麦-卵穗山羊草 1Mg 异附加系蛋白质品质形成解析[J]. *麦类作物学报*, 2020, 40(5): 547-553.
YANG Y, DING M Y, GUO L, et al. Quality formation in wheat-ae. geniculata 1Mg chromosome addition line[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(5): 547-553.
- [32] KUMAR A, KAPOOR P, CHUNDURI V, et al. Potential of *Aegilops* sp. for improvement of grain processing and nutritional quality in wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 308.
- [33] 董剑, 杨华, 赵万春, 等. 普通小麦中国春-簇毛麦易位系 T1DL·1VS 和 T1DS·1VL 的农艺和品质特性[J]. *作物学报*, 2013, 39(8): 1386-1390.

- DONG J, YANG H, ZHAO W C, et al. Agronomic traits and grain quality of Chinese spring-*Dasyphyrum villosum* translocation lines T1DL.1VS and T1DS.1VL[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(8):1386-1390.
- [34] ZHAO W C, GAO X, DONG J, et al. Stripe rust resistance and dough quality of new wheat-*Dasyphyrum villosum* translocation lines T1DL·1V#3S and T1DS·1V#3L and the location of *HMW-GS* genes[J]. Genetics and Molecular Research, 2015, 14(3):8077-8083.
- [35] 韩冉, 隋新霞, 杨洪美, 等. 小麦-近缘物种染色体系的高分子量麦谷蛋白亚基组成及白粉病抗性[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(11):1494-1501.
- HAN R, SUI X X, YANG H M, et al. High molecular weight glutenin composition and powdery mildew resistance of wheat-alien chromosome lines[J]. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(11):1494-1501.
- [36] 苏亚蕊, 李玉阁, 李锁平. 小麦-黑麦 1BL/1RS 易位系在小麦育种中的应用及改良[J]. 河南农业科学, 2006, 35(3):12-16.
- SU Y R, LI Y G, LI S P. Utilization and improvement of wheat-rye 1BL/1RS translocation lines in wheat breeding in China[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2006, 35(3):12-16.
- [37] 刘成, 韩冉, 汪晓璐, 等. 小麦远缘杂交现状、抗病基因转移及利用研究进展[J]. 中国农业科学, 2020, 53(7):1287-1308.
- LIU C, HAN R, WANG X L, et al. Research progress of wheat wild hybridization, disease resistance genes transfer and utilization[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(7):1287-1308.
- [38] SCHNEIDER A, MOLNÁR I, MOLNÁR-LÁNG M. Selection of U and M genome-specific wheat SSR markers using wheat-*Aegilops biuncialis* and wheat-*Ae. geniculata* addition lines[J]. Euphytica, 2010, 175(3):357-364.
- [39] 李东海. 小麦-多年生簇毛麦渐渗系的鉴定和新型分子标记的分离[D]. 成都:电子科技大学, 2015.
- LI D H. Identification of wheat-perennial *Haynaldia villosa* introgression line and isolation of new molecular markers[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [40] 付必胜, 孟祥如, 刘润然, 等. 簇毛麦 5VS 染色体臂特异分子标记开发与遗传效应分析[J]. 植物遗传资源学报, 2022, 23(1):195-208.
- FU B S, MENG X R, LIU R R, et al. Development of molecular markers specific to 5VS chromosome arm of *Dasyphyrum villosum* and their genetic effects in common wheat[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2022, 23(1):195-208.
- [41] 刘晓明, 张姝倩, 宫文英, 等. 高大山羊草 1S1 染色体特异分子标记的建立与应用[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(20):4937-4940.
- LIU X M, ZHANG S Q, GONG W Y, et al. Construction of 1S1 chromosome-specific molecular markers in *Aegilops longissima* and its application[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, 54(20):4937-4940.
- [42] GONG W, RAN L, LI G R, et al. Development and utilization of new sequenced characterized amplified region markers specific for E genome of *Thinopyrum*[J]. Frontiers in Biology, 2013, 8(4):451-459.
- [43] 姚彩红. 小麦-欧山羊草 1U 附加系的创制、鉴定及其对小麦加工品质的影响[D]. 成都:电子科技大学, 2014.
- YAO C H. Development and identification of A new wheat-*Aegilops biuncialis* 1U addition line and its impact on bread-making quality[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [44] ZHOU J P, YAO C H, YANG E N, et al. Characterization of a new wheat-*Aegilops biuncialis* addition line conferring quality-associated HMW glutenin subunits[J]. Genetics and Molecular Research, 2014, 13(1):660-669.