

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2015.01648

1BL/1RS 易位对小麦贮藏蛋白组分含量和面团流变学特性的影响

赵德辉¹ 阎俊² 黄玉莲³ 夏先春¹ 张艳¹ 田宇兵¹ 何中虎^{1,4}
张勇^{1,*}

¹ 中国农业科学院作物科学研究所 / 国家小麦改良中心, 北京 100081; ² 中国农业科学院棉花研究所, 河南安阳 455000; ³ 河南省焦作市修武县植保植检站, 河南焦作 454350; ⁴ 国际玉米小麦改良中心(CIMMYT)中国办事处, 北京 100081

摘要: 利用 1BL/1RS 易位系后代研究 1BL/1RS 易位对贮藏蛋白组分含量和面团流变学特性的影响有助于指导小麦品质改良工作。选用师棠 02-1/周麦 16 组合 14 份 F₆ 品系, 于 2012—2013 年度分别种植在河南安阳和焦作, 采用反相超高效液相色谱(RP-UPLC)和凝胶排阻超高效液相色谱(SE-UPLC)方法分析贮藏蛋白组分含量, 并研究它们与面团流变学特性的关系。结果表明, 拉伸仪延展性和最大抗延阻力、不溶性谷蛋白聚合体含量和谷蛋白、醇溶蛋白等贮藏蛋白组分含量及其比例均受 1BL/1RS 易位有无类别和类内品系效应的显著影响, 以类内品系效应较大; 拉伸仪拉伸面积、谷蛋白含量及醇溶蛋白与谷蛋白含量比值的类内品系效应显著且较大。易位系和非易位系的贮藏蛋白组分含量和面团流变学特性的相关系数达显著水平, 在易位系中, 不溶性谷蛋白聚合体含量和拉伸面积($r = 0.92, P < 0.001$)、延展性($r = 0.92, P < 0.001$)、最大抗延阻力($r = 0.80, P < 0.01$)呈显著正相关, 面团流变学特性较好的品系不溶性谷蛋白聚合体含量均较高; 在非易位系中, 醇溶蛋白与谷蛋白含量比值和拉伸面积($r = -0.91, P < 0.001$)、最大抗延阻力($r = -0.88, P < 0.001$)呈显著负相关, 面团流变学特性较好的品系醇溶蛋白与谷蛋白含量比值均较低。上述信息对以不溶性谷蛋白聚合体含量和醇溶蛋白与谷蛋白含量比值为指标改良 1BL/1RS 易位系的面筋品质有重要意义。

关键词: 普通小麦; 1BL/1RS 易位; 面团流变学特性; 贮藏蛋白组分

Effect of 1BL/1RS Translocation on Gluten Protein Fraction Quantities and Dough Rheological Properties

ZHAO De-Hui¹, YAN Jun², HUANG Yu-Lian³, XIA Xian-Chun¹, ZHANG Yan¹, TIAN Yu-Bing¹, HE Zhong-Hu^{1,4}, and ZHANG Yong^{1,*}

¹ Institute of Crop Science / National Wheat Improvement Center, Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAAS), Beijing 100081, China; ² Cotton Research Institute, CAAS, Anyang 455000, China; ³ Plant Protection and Quarantine Station, Jiaozuo 454350, China; ⁴ CIMMYT-China Office, c/o CAAS, Beijing 100081, China

Abstract: Understanding the effect of gluten protein fractions on major dough rheological quality traits among 1BL/1RS and non-1BL/1RS lines will facilitate quality improvement in wheat. Fourteen advanced facultative wheat lines derived from leading cultivars Shiluan 02-1 without 1BL/1RS and Zhoumai 16 with 1BL/1RS were grown in Anyang and Jiaozuo in Henan province in the 2012–2013 growing season. The gluten protein fractions were quantified with reversed-phase ultra-performance liquid chromatography (RP-UPLC) and size-exclusion ultra-performance liquid chromatography (SE-UPLC), and their correlations with dough rheological properties were determined. The results showed that Extensograph extensibility and maximum resistance, content of unextractable glutenin polymeric protein, quantity of gluten protein fractions and their ratios received significant influence from the presence of 1BL/1RS translocation and the line within group, whereas Extensograph extension area, content of glutenin and the ratio of gliadin-to-glutenin were predominantly affected by the line within group. Significant correlations were observed between gluten protein fraction quantities and dough rheological parameters in the 1BL/1RS and non-1BL/1RS lines. The 1BL/1RS lines with good dough rheological quality exhibited high content of unextractable glutenin polymeric proteins,

本研究由国家自然科学基金项目(31371623), 中国农业科学院作物科学研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项, 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2012AA101105)和中国农业科学院创新工程项目资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 张勇, E-mail: zhangyong05@caas.cn, Tel: 010-82108745

第一作者联系方式: E-mail: zhaodehuizdh@163.com

Received(收稿日期): 2015-04-23; Accepted(接受日期): 2015-07-20; Published online(网络出版日期): 2015-08-05.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20150805.0926.018.html>

1BL/1RS lines with good dough rheological quality exhibited high content of unextractable glutenin polymeric proteins, which was significantly and positively correlated with Extensograph extension area ($r = 0.92, P < 0.001$), extensibility ($r = 0.92, P < 0.001$) and maximum resistance ($r = 0.80, P < 0.01$). The non-1BL/1RS lines with good dough rheological quality showed low ratio of gliadin-to-glutenin, which was significantly and negatively correlated with Extensograph extension area ($r = -0.91, P < 0.001$) and maximum resistance ($r = -0.88, P < 0.001$). These results may guide genotypic selection in early generations to improve the dough rheological properties when 1BL/1RS is used in breeding program.

Keywords: Common wheat (*Triticum aestivum* L.); 1BL/1RS translocation; Dough rheological property; Gluten protein fractions

提高产量一直是我国小麦育种的主要目标,但加工品质越来越受到面粉加工企业和消费者的关注。近 10 年来,虽然小麦品质育种取得了显著进展,主产麦区分别育成师栾 02-1 和郑麦 366 等一批优质强筋品种,但生产上大部分主栽品种的加工品质依然较差。如何在继续提高产量潜力的同时,进一步改良加工品质,实现产量和品质的协同改良是我国小麦育种的重要课题^[1]。

影响小麦加工品质的主要因素包括蛋白质含量和质量、籽粒硬度、淀粉品质和色泽等,具体要求与食品种类和加工方式有关,其中蛋白质质量是加工品质改良的关键因素^[1-2],它主要受贮藏蛋白组成与组分含量的影响^[3-4]。谷蛋白和醇溶蛋白是贮藏蛋白的主要组成部分,是决定蛋白质质量的主要因素,谷蛋白赋予面筋弹性,醇溶蛋白赋予面筋延展性,良好的弹性和延展性是制作优质面食的基础^[5-6]。谷蛋白可分为高分子量(HMW-GS)和低分子量亚基(LMW-GS)^[7],醇溶蛋白可分为 α 、 β 、 γ 和 ω 四种,其组成均由基因型决定^[8-11]。贮藏蛋白等位基因变异的加性和上位性效应对加工品质有重要作用^[4,12],其中 *Glu-B1f* (17+18)、*Glu-D1d* (5+10)、*Glu-A3d* 和 *Glu-B3d* 等谷蛋白亚基组合对面筋品质有较大正向效应,而 *Glu-B1e* (20)、*Glu-D1c* (2+12)、*Glu-A3a*、*Glu-B3j* (1BL/1RS 易位系)等谷蛋白亚基组合对面筋品质的负向作用明显^[13-14]。除谷蛋白亚基组成外,谷蛋白和醇溶蛋白各组分的含量及其比例也显著影响面筋品质^[4,15-18]。不溶性谷蛋白聚合体含量与面团最大抗延阻力呈显著正相关,低分子量谷蛋白亚基含量可解释面团最大抗延阻力变异的 83.3%,醇溶蛋白与谷蛋白含量比值与面筋品质呈显著负相关^[19-21]。

1BL/1RS 易位在提高小麦抗病性、丰产性和稳产性方面发挥了重要作用。我国以引进的易位系洛夫林 10 号等为主要抗源,分别育成了丰抗 8 号、冀麦 26、鲁麦 1 号、豫麦 7 号等一批主栽品种,之后育成的主栽品种中易位系的比例也较高,北部和黄淮冬麦区分别为 59%和 42%^[22-23]。石 4185 和周麦 16 等 1BL/1RS 易位品种由于综合农艺性状好,目前

仍是黄淮麦区的主要亲本^[24-25]。因此,1BL/1RS 易位在我国黄淮麦区的遗传改良中还将发挥重要作用^[23-24]。由于黑麦碱(secalin)替代了小麦 1BS 上的低分子量谷蛋白和醇溶蛋白,1BL/1RS 易位使低分子量谷蛋白亚基和不溶性谷蛋白聚合体含量显著降低,致使面筋品质变差、面团发黏、食品加工品质显著变劣^[25-27]。但到目前为止,在其他高低分子量谷蛋白亚基位点一致的背景下,1BL/1RS 易位后代面筋品质和贮藏蛋白组分含量是否存在显著差异以及二者间的相互关系尚不清楚。为此,本研究分析贮藏蛋白组分含量和面团流变学特性的关系,及面团流变学特性差异较大易位品系间和非易位品系间的贮藏蛋白组分含量,目的是进一步明确制约易位系品质改良的关键因子,为 1BL/1RS 易位小麦的品质改良提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选用黄淮北片优质强筋品种师栾02-1 (非1BL/1RS 易位品种)和黄淮南片主栽品种周麦16 (1BL/1RS 易位品种)的 F₆品系14份,包括5份1BL/1RS 易位系和9份非1BL/1RS 易位系。于2012—2013年度分别在河南安阳和焦作种植这14个品系及其亲本师栾02-1,采用随机区组试验设计,2次重复,小区面积 4.8 m²,6行区,行长4 m,行距0.2 m,按当地常规进行田间管理。

1.2 品质性状测定

采用单籽粒谷物特性测试仪(SKCS 4100 Perten Instruments AB, Sweden)测定籽粒硬度,用近红外分析仪(Foss 1241, Sweden)测定蛋白质含量(14%湿基)和水分。根据籽粒硬度分级,将水分含量调至 16.0%,用 Buhler 试验磨(MLU 220, Uzvil, Switzerland)按 AACC 26-21A 方法制粉,出粉率 70%左右。分别按 AACC 54-21 和 54-10 方法测定粉质仪和拉伸仪参数(Brabender, Germany)。采用降落数值仪(Falling Number 1900, Perten, Sweden),按 56-81B 方法测定降落值,所有样品籽粒饱满,没有穗发芽。

1.3 谷蛋白亚基组成分析

参照 Gupta 和 Macritchie^[28]的方法, 结合超高效液相色谱分离分析体系和 3730 DNA 测序仪分析高低分子量谷蛋白亚基位点基因组成。师栾 02-1 的谷蛋白亚基组成为 *Glu-A1b* (1)、*Glu-B1c* (7+9)、*Glu-D1d* (5+10)、*Glu-A3g*、*Glu-B3g* 和 *Glu-D3d* 类型, 周麦 16 的谷蛋白亚基组成为 *Glu-A1a* (0)、*Glu-B1c* (7+9)、*Glu-D1c* (2+12)、*Glu-A3c*、*Glu-B3j* 和 *Glu-D3d* 类型。14 份材料的高分子量谷蛋白亚基组成均为 *Glu-A1b* (1)、*Glu-B1c* (7+9) 和 *Glu-D1d* (5+10) 类型, 低分子量谷蛋白亚基均为 *Glu-A3g* 和 *Glu-D3d* 类型, 排除了其他高低分子量谷蛋白亚基位点对本研究结果的影响。

1.4 贮藏蛋白组分含量分析

谷蛋白和醇溶蛋白提取及洗脱条件和量化分析参考 Yu 等^[29]和 Yan 等^[30]的方法, 采用反相超高效液相色谱法(RP-UPLC)测定贮藏蛋白各组分含量, 采用凝胶排阻超高效液相色谱法(SE-UPLC)测定不溶性谷蛋白聚合体含量。

1.5 统计分析

用 SAS 9.0 统计分析软件(Statistical Analysis System, 2003)进行基本统计量、方差和相关分析。方差分析时, 将 1BL/1RS 易位有无类别和地点看作固定效应, 类内品系看作随机效应。

2 结果与分析

2.1 品质性状基本统计量分析

所有测定性状均受品系和地点的共同影响, 但品系间变异大于地点间变异, 其中拉伸仪拉伸面积、延展性和最大抗延阻力、醇溶蛋白和贮藏蛋白含量、醇溶蛋白与 x-型和 y-型高分子量谷蛋白亚基含量比值的变异范围均较大(表 1)。

2.2 1BL/1RS 易位对面团流变学特性和贮藏蛋白组分含量的影响

x-型和 y-型高分子量谷蛋白亚基含量及其总含量、 α/β 和 γ 醇溶蛋白及醇溶蛋白总含量、贮藏蛋白含量、高分子量与低分子量谷蛋白亚基含量比值均受易位有无、类内品系和地点效应的显著影响, 其中 x-型和 y-型高分子量谷蛋白亚基含量及其总含量、贮藏蛋白含量还受易位有无和地点互作效应的显著影响(方差分析表略)。上述所有性状的类内品系效应均较大, 其次为易位有无和地点效应。延展性、不溶性谷蛋白聚合体含量、 ω 醇溶蛋白含量受易位有

无和类内品系效应的显著影响, 以类内品系效应较大。粉质仪稳定时间、低分子量谷蛋白亚基含量、谷蛋白含量、醇溶蛋白与 x-型和 y-型高分子量谷蛋白亚基含量及其总含量比值均受类内品系效应、地点及易位有无和地点互作效应的显著影响, 其中类内品系效应较大。拉伸面积受类内品系效应的显著影响。x-型与 y-型高分子量谷蛋白亚基含量比值、醇溶蛋白与谷蛋白含量比值主要受类内品系和地点效应的显著影响, 以类内品系效应较大。蛋白质含量、吸水率、形成时间、可溶性谷蛋白含量受易位有无、类内品系、地点及其互作效应影响均不显著或相对较小。可以看出, 除醇溶蛋白与低分子量谷蛋白亚基含量比值主要受易位有无类别效应的显著影响外, 稳定时间、拉伸面积、延展性和最大抗延阻力、不溶性谷蛋白聚合体和谷蛋白等大部分贮藏蛋白组分含量及其比值主要受类内品系效应的显著影响。

比较 1BL/1RS 易位有无的两组品系, 1BL/1RS 易位系的不溶性谷蛋白聚合体含量、x-型和 y-型高分子量谷蛋白亚基含量及其总含量、 ω 和 α/β 及 γ 醇溶蛋白含量及其总含量、贮藏蛋白含量、高分子量与低分子量谷蛋白亚基含量比值、醇溶蛋白与低分子量谷蛋白亚基含量比值均显著高于非易位系(表 2), 但其延展性显著低于非易位系, 稳定时间、拉伸面积、低分子量谷蛋白亚基含量等 13 个性状间差异不显著(数据未列出)。

在易位系中, 面团流变学特性较好的品系 13CA37、13CA38 的不溶性谷蛋白聚合体含量均较高, 而面团流变学特性较差的品系 13CA39 的不溶性谷蛋白聚合体含量显著低于上述品系; 非易位系中, 面团流变学特性较好的品系 13CA49、13CA50 的醇溶蛋白与谷蛋白含量比值均较低, 而面团流变学特性较差的品系 13CA47 的醇溶蛋白与谷蛋白含量比值显著高于上述品系(表 3 和表 4)。此外, 与师栾 02-1 相比, 所有品系的稳定时间、拉伸面积、最大抗延阻力和不溶性谷蛋白聚合体含量、 α/β 和 γ 醇溶蛋白含量、x-型与 y-型高分子量谷蛋白亚基含量比值均较低, 但 ω 醇溶蛋白含量偏高, 这可能与父本周麦 16 的影响有关。

2.3 面团流变学特性与贮藏蛋白组分含量相关性分析

在易位系中, 不溶性谷蛋白聚合体含量和拉伸面积、延展性与最大抗延阻力呈显著正相关, ω 醇溶

表 1 面团流变学特性和贮藏蛋白组分含量平均值、标准差及变异范围

Table 1 Means, standard deviation and range on dough rheological quality parameters and gluten protein fraction quantities

参数 Parameter	平均值 Mean	标准差 SD	变异范围 Range		
			总 Total	品系间 Among lines	地点间 Between locations
蛋白质含量 Protein content (%)	13.1	0.3	12.5–14.6	12.8–13.5	13.1–13.2
吸水率 Farinograph water absorption (%)	58.4	1.9	54.9–62.4	57.0–59.9	57.1–59.6
形成时间 Farinograph development time (min)	4.1	1.2	1.5–6.6	3.0–5.1	4.0–4.1
稳定时间 Farinograph stability time (min)	7.1	1.6	4.0–13.2	5.4–9.9	6.8–7.4
拉伸面积 Extensograph extension area (cm ²)	117	16.9	62–148	79–133	115–118
延展性 Extensograph extensibility (mm)	200	13.3	160–218	167–211	198–201
最大抗延阻力 Extensograph maximum resistance (BU)	452	64.8	301–566	364–507	446–454
不溶性谷蛋白聚合体含量 UPP content	41.2	2.3	35.9–45.6	37.1–44.0	40.8–41.6
x-型高分子量谷蛋白亚基含量 x-HMW content	3.3	1.1	1.4–5.6	2.1–4.4	3.0–3.6
y-型高分子量谷蛋白亚基含量 y-HMW content	1.7	0.5	0.7–2.8	1.2–2.3	1.5–1.9
高分子量谷蛋白亚基含量 HMW-GS content	5.1	1.5	2.6–8.5	3.2–6.7	4.4–5.5
低分子量谷蛋白亚基含量 LMW-GS content	12.0	3.1	6.1–18.5	6.6–16.3	11.1–12.8
谷蛋白含量 Glu content	17.1	4.5	9.2–26.5	11.2–22.8	15.5–18.4
ω醇溶蛋白含量 ωGli content	13.6	2.8	10.5–22.9	11.7–21.9	13.5–13.6
α/β醇溶蛋白含量 α/βGli content	35.6	2.5	31.0–41.5	32.9–39.9	34.5–36.7
γ醇溶蛋白含量 γGli content	22.0	1.4	19.6–26.5	20.0–24.4	21.3–22.5
醇溶蛋白含量 Gli content	71.5	5.6	64.3–90.3	66.4–84.0	69.4–72.8
贮藏蛋白含量 Gluten protein content	88.4	7.2	76.1–104.9	78.8–100.2	84.6–91.2
高分子量/低分子量谷蛋白亚基 HMW/LMW	0.43	0.09	0.28–0.72	0.36–0.69	0.41–0.44
醇溶蛋白/高分子量谷蛋白亚基 Gli/HMW	15.4	4.1	8.1–27.7	10.8–21.3	14.7–16.4
醇溶蛋白/低分子量谷蛋白亚基 Gli/LMW	6.5	2.4	3.7–14.5	4.3–12.9	6.4–6.8
醇溶蛋白/x-型高分子量谷蛋白亚基 Gli/x-HMW	23.5	6.7	12.0–43.2	16.0–33.2	22.6–24.9
醇溶蛋白/y-型高分子量谷蛋白亚基 Gli/y-HMW	45.3	11.4	24.6–77.2	33.9–60.4	41.9–49.9
x-型/y-型高分子量谷蛋白亚基 x-/y-HMW	1.96	0.2	1.0–2.3	1.6–2.1	1.9–2.0
醇溶蛋白/谷蛋白 Gli/Glu	4.2	0.6	3.0–6.1	3.6–4.9	3.8–4.4

贮藏蛋白组分含量换算为 1×10^6 AU mg^{-1} 面粉, 表示为 AU。

Gluten protein fraction quantity is shown as 1×10^6 absorbance units of UPLC, corresponding to 1 mg of flour, and abbreviated as AU.

表 2 1BL/1RS 易位有无类别间存在显著差异的面团流变学特性和贮藏蛋白组分含量比较

Table 2 Comparison of dough rheological quality parameters and gluten protein fraction quantities with significant difference between groups with or without 1BL/1RS translocation

参数 Parameter	1BL/1RS 易位系 1BL/1RS line	非 1BL/1RS 易位系 Non-1BL/1RS line
延展性 Extensograph extensibility (mm)	195.0 b	202.0 a
不溶性谷蛋白聚合体含量 UPP content	41.7 a	41.0 b
x-型高分子量谷蛋白亚基含量 x-HMW content	3.96 a	2.98 b
y-型高分子量谷蛋白亚基含量 y-HMW content	1.98 a	1.55 b
高分子量谷蛋白亚基含量 HMW-GS content	5.96 a	4.58 b
ω醇溶蛋白含量 ωGli content	16.2 a	12.2 b
α/β醇溶蛋白含量 α/βGli content	37.0 a	35.1 b
γ醇溶蛋白含量 γGli content	22.9 a	21.5 b
醇溶蛋白含量 Gli content	76.2 a	68.9 b
贮藏蛋白含量 Gluten protein content	93.9 a	85.4 b
高分子量/低分子量谷蛋白亚基 HMW/LMW	0.52 a	0.38 b
醇溶蛋白/低分子量谷蛋白亚基 Gli/LMW	7.32 a	5.96 b

贮藏蛋白组分含量换算为 1×10^6 AU mg^{-1} 面粉, 表示为 AU。数值后标以不同字母表示 1BL/1RS 易位有无类别间差异达 0.05 显著水平。

Gluten protein fraction quantity is shown as 1×10^6 absorbance units of UPLC, corresponding to 1 mg of flour, and abbreviated as AU. Values followed by different letters are significantly different at the 0.05 probability level between groups with or without 1BL/1RS translocation.

表3 易位系和非易位系的面团流变学特性多重比较
Table 3 Comparison of dough rheological quality parameters among 1BL/1RS or non-1BL/1RS translocation lines

品系 Line	ST	EA	Ext	R _{max}
1BL/1RS 易位系 1BL/1RS lines				
13CA37	6.9 b	133.0 a	207.0 a	507.0 a
13CA38	8.6 a	131.0 a	205.0 a	500.3 a
13CA39	5.4 c	78.8 b	167.3 c	364.0 b
13CA40	7.0 b	123.5 a	190.5 b	507.3 a
13CA42	7.9 ab	129.8 a	207.3 a	486.5 a
非 1BL/1RS 易位系 Non-1BL/1RS lines				
13CA41	6.8 b	113.3 ab	204.3 ab	424.5 b
13CA43	6.0 b	114.3 ab	203.3 ab	426.0 b
13CA44	5.7 b	118.8 ab	211.3 a	426.5 b
13CA45	6.5 b	114.3 ab	208.3 ab	419.3 b
13CA46	7.5 b	114.0 ab	208.3 ab	421.0 b
13CA47	6.7 b	104.3 b	196.3 bc	413.3 b
13CA48	7.3 b	115.0 ab	188.5 c	476.0 a
13CA49	9.9 a	125.8 a	199.0 abc	486.3 a
13CA50	6.8 b	123.3 ab	202.5 ab	474.0 a
亲本 Parent				
师栾 02-1 Shiluan 02-1	18.1	163.0	199.4	650.4

ST: 稳定时间(min); EA: 拉伸面积(cm²); Ext: 延展性(mm); R_{max}: 最大抗延阻力(BU)。数值后标以不同字母表示同一类中品系间有显著差异($P < 0.05$)。

ST: farinograph stability time; EA: extensograph extension area; Ext: extensograph extensibility; R_{max}: extensograph maximum resistance. Values followed by different letters are significantly different at the 0.05 probability level.

蛋白含量和拉伸面积、延展性与最大抗延阻力呈显著负相关, 高分子量与低分子量谷蛋白亚基含量比值和拉伸面积、延展性与最大抗延阻力呈显著负相关, 醇溶蛋白与低分子量谷蛋白亚基含量比值和拉伸面积、延展性与最大抗延阻力呈显著负相关; 但贮藏蛋白组分含量和形成时间、稳定时间相关不显著(表 5)。

在非易位系中, 醇溶蛋白含量和稳定时间、拉伸面积与最大抗延阻力呈显著负相关, 醇溶蛋白与谷蛋白含量比值与拉伸面积、最大抗延阻力呈显著负相关; 但贮藏蛋白组分含量和形成时间、延展性相关不显著(表 5)。

3 讨论

本研究以优质品种师栾 02-1 与 1BL/1RS 易位品种周麦 16 育成的高代品系为材料, 发现易位系与非易位系间的形成时间和最大抗延阻力差异不显著, 但非易位系的延展性显著好于易位系。刘建军等^[25]和 Zhang 等^[21]曾报道与此相反的试验结果, 认为非易位系的形成时间、延展性和最大抗延阻力均显著

好于易位系, 这可能与试验材料有关。本研究所用 14 份材料, 除 *Glu-B3* 位点外的高低分子量谷蛋白亚基位点背景完全一致, 而刘建军等^[25]和 Zhang 等^[21]均以小麦自然群体为研究对象。在此基础上, 我们比较了 1BL/1RS 易位系和非 1BL/1RS 易位系的贮藏蛋白组分含量, 发现易位系的 α -型和 γ -型高分子量谷蛋白亚基含量及其总含量、醇溶蛋白及其各组分含量、高分子量与低分子量谷蛋白亚基含量比值均显著高于非易位系, 这与 Graybosch 等^[26]和 Wieser 等^[27]的结果一致。

在 1BL/1RS 和非 1BL/1RS 易位系组内, 各品系间稳定时间、拉伸面积、延展性和最大抗延阻力也存在显著差异。面团流变学特性较好的易位系有 13CA37、13CA38, 其不溶性谷蛋白聚合体含量显著高于面团流变学特性较差的品系 13CA39, 且不溶性谷蛋白聚合体含量和拉伸面积($r=0.92$, $P < 0.001$)、延展性($r=0.92$, $P < 0.001$)及最大抗延阻力($r=0.80$, $P < 0.01$)均呈显著正相关。面团流变学特性较好的非易位系 13CA49、13CA50 的醇溶蛋白与谷蛋白含量比值显著低于面团流变学特性较差的品系 13CA47,

表 4 易位系和非易位系的贮藏蛋白组分含量多重比较
Table 4 Comparison of gluten protein fraction quantities among 1BL/1RS or non-1BL/1RS translocation lines

品系 Line	UPP		x-HMW		y-HMW		HMW-GS		LMW-GS		Glu		ωGli		α/βGli		γGli		Gli		GP		HMW/LMW		Gli/x-HMW		Gli/y-HMW		x-/y-HMW		Gli/Glu		
	UPP	x-HMW	y-HMW	HMW-GS	LMW-GS	Glu	ωGli	α/βGli	γGli	Gli	GP	HMW/LMW	Gli/x-HMW	Gli/y-HMW	x-/y-HMW	Gli/Glu	GP	HMW/LMW	Gli/x-HMW	Gli/y-HMW	x-/y-HMW	Gli/Glu	GP	HMW/LMW	Gli/x-HMW	Gli/y-HMW	x-/y-HMW	Gli/Glu	GP	HMW/LMW	Gli/x-HMW	Gli/y-HMW	x-/y-HMW
IBL/1RS 易位系																																	
I3CA37	44.0 a	4.4 a	2.31 a	6.7 a	13.7 a	20.4 a	15.6 bc	39.9 a	24.3 a	79.8 ab	100.2 a	0.50 bc	11.9 b	5.89 b	18.2 b	34.8 b	1.92 b	4.56 ab															
I3CA38	43.3 a	3.9 ab	1.92 ab	5.9 ab	12.6 a	18.4 a	14.5 cd	37.6 ab	22.1 b	74.2 c	92.4 bc	0.46 cd	13.7 ab	6.22 b	20.3 b	41.8 ab	2.05 ab	3.91 cd															
I3CA39	37.1 c	3.0 b	1.58 b	4.6 b	6.6 b	11.2 b	21.8 a	37.7 ab	24.4 a	84.0 a	95.0 ab	0.70 a	18.2 a	12.7 a	27.8 a	53.3 a	1.92 b	4.87 a															
I3CA40	41.2 b	4.1 ab	1.97 ab	6.1 ab	13.6 a	19.7 a	13.3 d	32.9 c	21.4 b	67.7 d	87.3 c	0.45 d	12.3 b	5.40 b	18.1 b	38.2 b	2.10 a	3.57 d															
I3CA42	42.8 a	4.4 a	2.12 a	6.5 a	12.8 a	19.3 a	15.9 b	37.0 b	22.3 b	75.3 bc	94.5 ab	0.50 b	12.9 b	6.39 b	19.0 b	39.7 b	2.10 a	4.15 bc															
非 1BL/1RS 易位系 Non-1BL/1RS lines																																	
I3CA41	41.3 bcd	3.0 bcd	1.51 bcd	4.5 bcd	11.7 bcd	16.2 bc	12.3 ab	35.8 ab	21.9 ab	70.0 ab	86.1 b	0.39 a	16.1 abc	6.22 abc	24.5 abcd	47.4 abc	1.99 abc	4.35 ab															
I3CA43	40.3 cde	3.0 bcd	1.58 bcd	4.6 bc	11.9 bcd	16.4 bc	13.3 a	34.6 abc	20.0 c	67.9 ab	84.2 bc	0.39 a	14.9 abc	5.77 bcd	22.6 bcd	43.8 abc	1.94 abc	4.22 abc															
I3CA44	40.3 cde	3.8 ab	1.81 ab	5.6 ab	14.0 ab	19.6 ab	12.1 b	36.8 a	22.7 a	71.7 a	91.1 a	0.40 a	12.9 c	5.15 cd	19.2 d	40.2 bc	2.11 ab	4.12 bc															
I3CA45	40.8 cd	2.4 d	1.22 cd	4.2 cde	11.9 bcd	16.1 bcd	11.9 b	33.0 c	21.5 ab	66.4 b	82.3 bcd	0.31 b	20.1 ab	5.59 cd	30.3 ab	59.5 a	1.96 abc	4.39 ab															
I3CA46	41.6 abc	3.3 bc	1.66 abcd	5.0 bc	13.1 b	18.1 b	12.5 ab	35.4 abc	21.5 ab	69.3 ab	87.2 ab	0.38 ab	14.3 bc	5.38 cd	21.4 bcd	42.8 abc	2.01 abc	4.35 ab															
I3CA47	38.5 e	2.6 cd	1.67 abc	4.2 cde	12.2 bc	16.5 bc	12.1 b	36.7 a	22.0 ab	70.9 a	87.0 ab	0.36 ab	16.9 abc	6.05 abcd	27.8 abc	44.2 abc	1.60 d	4.57 a															
I3CA48	43.5 a	4.4 a	2.07 a	6.5 a	16.3 a	22.8 a	12.0 b	35.3 abc	21.9 ab	69.1 ab	91.8 a	0.40 a	10.8 c	4.27 d	15.8 d	34.2 c	2.17 a	4.06 bc															
I3CA49	39.4 de	2.2 d	1.21 cd	3.4 de	9.3 cd	12.7 cd	11.7 b	33.7 bc	21.0 bc	66.4 b	78.8 d	0.38 ab	20.0 ab	7.50 ab	30.9 ab	56.5 ab	1.84 bcd	3.92 c															
I3CA50	43.2 ab	2.1 d	1.19 d	3.2 e	8.9 d	12.1 d	11.9 b	34.9 abc	21.4 ab	68.2 ab	80.0 cd	0.37 ab	21.0 a	7.75 a	33.0 a	57.9 ab	1.76 cd	4.02 bc															
亲本 Parent																																	
Shiluan 02-1	65.0	4.8	2.06	6.9	13.5	20.3	11.5	41.5	25.5	78.2	98.6	0.51	11.4	5.79	16.3	38.2	2.33	3.84															

UPP: 不溶性谷蛋白聚合体含量; x-HMW: x-型高分子量谷蛋白亚基含量; y-HMW: y-型高分子量谷蛋白亚基含量; HMW-GS: 高分子量谷蛋白亚基含量; LMW-GS: 低分子量谷蛋白亚基含量; Glu: 谷蛋白含量; ωGli: ω醇溶蛋白含量; α/βGli: α/β醇溶蛋白含量; γGli: γ醇溶蛋白含量; Gli: 醇溶蛋白含量; GP: 醇溶蛋白含量; GP: 醇溶蛋白含量; Gli: 醇溶蛋白含量。贮藏蛋白组分含量换算为 1×10^6 AU mg^{-1} 面粉, 表示为 AU。数值后标以不同字母表示同一类中品系间有显著差异 ($P < 0.05$)。

UPP: unextractable polymeric protein; x-HMW: x type high-molecular-weight glutenin subunit; y-HMW: y type high-molecular-weight glutenin subunit; HMW-GS: high-molecular-weight glutenin subunit; LMW-GS: low-molecular-weight glutenin subunit; Glu: glutenin; ωGli: ω-gliadin; α/βGli: α/β-gliadin; γGli: γ-gliadin; GP: gluten protein. Gluten protein fraction quantity is shown as 1×10^6 absorbance units of UPLC, corresponding to 1 mg of flour, and abbreviated as AU. Values followed by different letters are significantly different at the 0.05 probability level.

且醇溶蛋白与谷蛋白含量比值和拉伸面积($r = -0.91$, $P < 0.001$)、最大抗延阻力($r = -0.88$, $P < 0.001$)均呈显著负相关。因此,即使在其他高低分子量谷蛋白亚基组成背景完全相同的情况下,易位系和非易位系中贮藏蛋白组分含量对面团流变学特性的影响也存在着差异。易位系的面团流变学特性易受不溶性谷蛋白聚合体含量的影响,而非易位系的面团流变学特性更易受醇溶蛋白与谷蛋白含量比值的影响。近年研究表明,不溶性谷蛋白聚合体含量和醇溶蛋白与谷蛋白含量比值是影响面团流变学特性的重要因素,且这2个参数的遗传力较高,基因型间遗传差异较大^[3-5,10-11],对其分析所需样品用量极少(约20 mg),自动化程度高(每天40个样品)。在今后涉及1BL/1RS易位系杂交后代的育种工作中,当面粉品质改良作为主要目标时,可以将不溶性谷蛋白聚合体含量作为易位系的早代选择指标,而将醇溶蛋白与谷蛋白

含量比值作为非易位系的早代选择指标。但育种中易位系的品质优良者极少,可能原因是贮藏蛋白组分含量的改变和不溶性谷蛋白聚合体含量偏低。前人研究表明,一方面1BL/1RS易位品种的优质高分子量谷蛋白亚基出现的频率显著低于非1BL/1RS易位品种,而劣质谷蛋白亚基出现的频率显著高于非1BL/1RS易位品种;另一方面1BL/1RS易位品种中劣质低分子量谷蛋白亚基出现的频率较高^[25,27]。

本研究表明,1BL/1RS易位系的醇溶蛋白及其所有组分含量均显著高于非易位系,这与Weiser等^[27]的结果基本一致,醇溶蛋白特别是 ω 醇溶蛋白含量对面团流变学特性的面筋强度和延展性均有显著的负面影响^[26-27]。易位和非易位类间 ω 醇溶蛋白含量对拉伸面积、延展性和最大抗延阻力的影响存在差异,易位系中 ω 醇溶蛋白含量和拉伸面积、延展性、最大抗延阻力的相关系数分别为-0.90、-0.74、-0.91,

表5 1BL/1RS和非1BL/1RS易位系贮藏蛋白组分含量与面团流变学特性相关性分析
Table 5 Correlation coefficients of gluten protein fraction quantities with dough rheological quality parameters in 1BL/1RS and non-1BL/1RS translocation lines

参数 Parameter	形成时间 DT	稳定时间 ST	拉伸面积 EA	延展性 Ext	最大抗延阻力 R_{max}
1BL/1RS 易位系 1BL/1RS lines					
不溶性谷蛋白聚合体含量 UPP content	-0.19	0.50	0.92***	0.92***	0.80**
ω 醇溶蛋白含量 ω Gli content	0.10	-0.55	-0.90***	-0.74*	-0.91***
醇溶蛋白含量 ω Gli content	-0.09	-0.54	-0.63	-0.38	-0.73*
贮藏蛋白含量 GP content	0.16	-0.59	-0.18	0.07	-0.29
高分子量/低分子量谷蛋白亚基 HMW/LMW	0.24	-0.64	-0.91***	-0.76*	-0.90**
醇溶蛋白/高分子量谷蛋白亚基 Gli/HMW	-0.45	0.38	-0.31	-0.39	-0.29
醇溶蛋白/低分子量谷蛋白亚基 Gli/LMW	-0.20	-0.12	-0.78**	-0.74*	-0.75*
醇溶蛋白/x-型高分子量谷蛋白亚基 Gli/x-HMW	-0.45	0.35	-0.34	-0.40	-0.33
醇溶蛋白/y-型高分子量谷蛋白亚基 Gli/y-HMW	-0.45	0.43	-0.25	-0.35	-0.22
x-型/y-型高分子量谷蛋白亚基 x-/y-HMW	0.04	0.59	0.59	0.26	0.75*
醇溶蛋白/谷蛋白 Gli/Glu	0.13	-0.63	-0.65	-0.44	-0.69*
非1BL/1RS 易位系 Non-1BL/1RS lines					
不溶性谷蛋白聚合体含量 UPP content	-0.24	0.33	0.53*	0.01	0.52*
ω 醇溶蛋白含量 ω Gli content	-0.28	-0.53*	-0.60**	0.33	-0.70**
醇溶蛋白含量 Gli content	0.07	-0.35	-0.40	0.12	-0.42
贮藏蛋白含量 GP content	-0.31	-0.48*	-0.37	-0.05	-0.32
高分子量/低分子量谷蛋白亚基 HMW/LMW	-0.37	-0.41	-0.41	0.12	-0.45
醇溶蛋白/高分子量谷蛋白亚基 Gli/HMW	0.40	0.49*	0.28	0.11	0.22
醇溶蛋白/低分子量谷蛋白亚基 Gli/LMW	0.37	0.41	0.16	0.16	0.08
醇溶蛋白/x-型高分子量谷蛋白亚基 Gli/x-HMW	0.45	0.48*	0.29	0.08	0.24
醇溶蛋白/y-型高分子量谷蛋白亚基 Gli/y-HMW	0.32	0.49*	0.26	0.16	0.18
x-型/y-型高分子量谷蛋白亚基 x-/y-HMW	-0.44	-0.22	-0.16	0.11	-0.21
醇溶蛋白/谷蛋白 Gli/Glu	0.18	-0.44	-0.91***	0.19	-0.88***

*、**和***分别表示0.05、0.01和0.001显著水平。* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$ 。

而非易位系中其相关系数分别为-0.60、0.33、-0.70。由此可见, 易位系的面团流变学特性更易受到 ω 醇溶蛋白含量的影响。另外, 本研究中 14 份高代品系的 ω 醇溶蛋白含量均显著高于其优质亲本师栾 02-1, 但 α/β 和 γ 醇溶蛋白含量偏低, 原因有待于进一步研究。因此, 在实际育种工作中, ω 醇溶蛋白含量偏高和 α/β 及 γ 醇溶蛋白含量偏低可能是制约 1BL/1RS 易位品质改良的关键因素, 相关结论有待进一步研究证实。

本研究的局限性是样品数量偏少, 且没有测定面包加工品质, 仅从面团流变学特性等间接指标尚不能完全判断加工品质的优劣。

4 结论

1BL/1RS 易位系中面团流变学特性较好的品系的不溶性谷蛋白聚合体含量均较高, 拉伸面积、延展性和最大抗延阻力与不溶性谷蛋白聚合体含量均呈显著正相关; 而非易位系中面团流变学特性较好的品系的醇溶蛋白与谷蛋白含量比值均较低, 拉伸面积、最大抗延阻力和醇溶蛋白与谷蛋白含量比值均呈显著负相关。在今后进行易位系杂交后代的面筋品质改良工作中, 可以将不溶性谷蛋白聚合体含量作为易位系的早代选择指标, 将醇溶蛋白与谷蛋白含量比值作为非易位系的早代选择指标。

References

- [1] 何中虎, 夏先春, 陈新民, 庄巧生. 中国小麦育种进展与展望. 作物学报, 2011, 37: 202-215
He Z H, Xia X C, Chen X M, Zhuang Q S. Progress of wheat breeding in China and the future perspective. *Acta Agron Sin*, 2011, 37: 202-215 (in Chinese with English abstract)
- [2] 何中虎, 晏月明, 庄巧生, 张艳, 夏先春, 张勇, 王德森, 夏兰琴, 胡英考, 蔡民华, 陈新民, 阎俊, 周阳. 中国小麦品种品质评价体系建立与分子改良技术研究. 中国农业科学, 2006, 39: 1091-1101
He Z H, Yan Y M, Zhuang Q S, Zhang Y, Xia X C, Zhang Y, Wang D S, Xia L Q, Hu Y K, Cai M H, Chen X M, Yan J, Zhou Y. Establishment of quality evaluation system and utilization of molecular methods for the improvement of Chinese wheat quality. *Sci Agric Sin*, 2006, 39: 1091-1101 (in Chinese with English abstract)
- [3] Gao L Y, Wang A L, Li X H, Dong K, Wang K, Appels R, Ma W J, Yan Y M. Wheat quality related differential expression of albumins and globulins revealed by two-dimensional difference gel electrophoresis (2-D DIGE). *J Proteol*, 2009, 73: 279-296
- [4] Zhang Y, Tang J W, Yan J, Zhang Y L, Zhang Y, Xia X C, He Z H. The gluten protein and interactions between components determine mixograph properties in an F_6 recombinant inbred line population in bread wheat. *J Cereal Sci*, 2009, 50: 219-226
- [5] Payne P I. Genetics of wheat storage protein and the effect of allelic variation on breadmaking quality. *Annu Rev Plant Physiol*, 1987, 38: 141-153
- [6] Payne P I, Nightingale M A, Krattiger A F, Holt L M. The relationship between HMW glutenin subunit composition and the bread-making quality of British-grown wheat varieties. *J Sci Food Agric*, 1987, 40: 51-65
- [7] Payne P I, Corfield K G. Subunit composition of wheat glutenin proteins: isolated by gel filtration in a dissociating medium. *Planta*, 1979, 145: 83-88
- [8] Li Q Y, Song X Y, Zhang E Y, Pei Y H, Yan Y M. Polyclonal antibodies to grain gliadins and their application in wheat quality prediction. *Cereal Res Commun*, 2008, 36: 117-124
- [9] Singh N K, Shepherd K W. Linkage mapping of genes controlling endosperm storage proteins in wheat: 1. Genes on the short arms of group 1 chromosomes. *Theor Appl Genet*, 1988, 75: 628-641
- [10] Metakovsky E V, Knežević D, Javornik B. Gliadin allele composition of Yugoslav winter wheat cultivars. *Euphytica*, 1991, 54: 285-295
- [11] Jackson E A, Morel M H, Sontag Strohm T, Branlard G, Metakovsky E V, Redaelli R. Proposal for combining the classification systems of alleles of *Gli-1* and *Glu-3* loci in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *J Genet Breed*, 1996, 50: 321-336
- [12] Park C S, Kang C S, Jeung J U, Woo S H. Influence of allelic variations in glutenin on the quality of pan bread and white salted noodles made from Korean wheat cultivars. *Theor Appl Genet*, 2011, 180: 235-250
- [13] Gianibelli M C, Larroque O R, Macritchie F, Wrigley C W. Biochemical, genetic, and molecular characterization of wheat glutenin and its component subunits. *Cereal Chem*, 2001, 78: 635-646
- [14] Zhang X F, Jin H, Zhang Y, Liu D C, Li G Y, Xia X C, He Z H, Zhang A M. Composition and functional analysis of low-molecular-weight glutenin alleles with Aroona near-isogenic lines of bread wheat. *BMC Plant Biol*, 2012, 12: 243
- [15] Rousset M, Carrillo J M, Qualset C O, Kasarda D D. Use of recombinant inbred line of wheat for study of associations of high-molecular-weight glutenin subunit alleles to quantitative traits. *Theor Appl Genet*, 1992, 83: 403-412
- [16] Kolster P, Eeuwijk F A, Gelder W M J. Additive and epistatic effects of allelic variation at the high molecular weight glutenin subunit loci in determining the bread-making quality of breeding lines of wheat. *Euphytica*, 1991, 55: 277-285
- [17] Gianibelli M C, Echaide M, Larroque O R, Carrillo J M, Dubcovsky J. Biochemical and molecular characterisation of *Glu-1* loci in Argentinean wheat cultivars. *Euphytica*, 2002, 128: 61-73
- [18] Butow B J, Ma W, Gale K R, Cornish G B, Rampling L, Larroque O, Morel M K, Békés F. Molecular discrimination of *Bx7* alleles demonstrates that a highly expressed high-molecular-weight glutenin allele has a major impact on wheat flour dough strength. *Theor Appl Genet*, 2003, 107: 1524-1532
- [19] Weegels P L, Hamer R J, Scholfield J D. Functional properties of wheat glutenin. *J Cereal Sci*, 1996, 23: 1-18
- [20] Zhang P P, He Z H, Zhang Y, Xia X C, Liu J J, Yan J, Zhang Y. Pan bread and Chinese white salted noodle qualities of Chinese winter wheat cultivars and their relationship with gluten protein fractions. *Cereal Chem*, 2007, 84: 370-378

- [21] Zhang P P, He Z H, Chen D S, Zhang Y, Larroque O R, Xia X C. Contribution of common wheat protein fractions to dough properties and quality of northern-style Chinese steamed bread. *J Cereal Sci*, 2007, 46: 1–10
- [22] 庄巧生. 中国小麦品种改良及系谱分析. 北京: 中国农业出版社, 2003
Zhuang Q S. Chinese Wheat Improvement and Pedigree Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2003 (in Chinese)
- [23] 周阳, 何中虎, 陈新民, 王德森, 张勇, 张改生. 30余年来北部冬麦区小麦品种产量改良遗传进展. 作物学报, 2007, 33: 1530–1535
Zhou Y, He Z H, Chen X M, Wang D S, Zhang Y, Zhang G S. Genetic gain of wheat breeding for yield in northern winter wheat zone over 30 years. *Acta Agron Sin*, 2007, 33: 1530–1535 (in Chinese with English abstract)
- [24] 周阳, 何中虎, 张改生, 夏兰琴, 陈新民, 高永超, 井赵斌, 于广军. 1BL/1RS 易位系在我国小麦育种中的应用. 作物学报, 2004, 30: 531–535
Zhou Y, He Z H, Zhang G S, Xia L Q, Chen X M, Gao Y C, Jing Z B, Yu G J. Utilization of 1BL/1RS translocation in wheat breeding in China. *Acta Agron Sin*, 2004, 30: 531–535 (in Chinese with English abstract)
- [25] 刘建军, 何中虎, Peña R J, 赵振东. 1BL/1RS 易位对小麦加工品质的影响. 作物学报, 2004, 30: 149–153
Liu J J, He Z H, Peña R J, Zhao Z D. Effect of 1BL/1RS translocation on grain quality and noodle quality in breed wheat. *Acta Agron Sin*, 2004, 30: 149–153 (in Chinese with English abstract)
- [26] Graybosch R A, Peterson C J, Hansen L E, Worrall D, Shelton D R, Lukaszewski A. Comparative flour quality and protein characteristics of 1BL/1RS and 1AL/1RS wheat-rye translocation lines. *J Cereal Sci*, 1993, 17: 95–106
- [27] Wieser H, Kieffer R, Lelley T. The influence of 1B/1R chromosome translocation on gluten protein composition and technological properties of bread wheat. *J Sci Food Agric*, 2000, 80: 1640–1647
- [28] Gupta R B, Macritchie F. A rapid one-step one-dimensional SDS-PAGE procedure for analysis of subunit composition of glutenin in wheat. *J Cereal Sci*, 1991, 14: 105–109
- [29] Yu Z T, Han C X, Yan X, Li X H, Jiang G L, Yan Y M. Rapid characterization of wheat low molecular weight glutenin subunits by ultraperformance liquid chromatography (UPLC). *J Agric Food Chem*, 2013, 61: 4026–4034
- [30] Yan X, Liu W, Yu Z T, Han C X, Zeller F J, Hsam S L K, Yan Y M. Rapid separation and identification of wheat HMW glutenin subunits by UPLC and comparative analysis with HPLC. *Aust J Crop Sci*, 2014, 8: 140–147