

## 小麦近等基因系高分子量谷蛋白亚基对品质的影响

代俊利<sup>1,2</sup> 李保云<sup>2</sup> 姚大年<sup>1\*</sup>

(1. 安徽农业大学 农学院, 合肥 230036;

2. 中国农业大学 农学与生物技术学院/北京市作物遗传改良重点实验室/

农业部作物基因组学与遗传改良重点开放实验室/教育部作物杂种优势研究与利用重点实验室, 北京 100193)

**摘要** 本研究以京 411 为背景的含有不同小麦高分子量谷蛋白亚基(HMW-GS)的小麦近等基因系为材料,通过 1 年 3 点试验,研究了 HMW-GS 与小麦 SDS-沉降值、揉混特性的关系。结果表明:1)Glu-D1,Glu-B1,Glu-A1 位点对沉降值和揉混特性的影响顺序为 Glu-D1>Glu-B1>Glu-A1。2)各个位点对沉降值的贡献表现为,在 Glu-A1 上, N=1;在 Glu-B1 上 7+8-17+18;在 Glu-D1 上,5+10>2+12。3)各个位点对揉混特性的影响表现为,在 Glu-A1 位点上,N>1;当 Glu-B1 位点为 17+18 亚基,Glu-D1 位点为 2+12 亚基时,但 N 亚基与 1 亚基的揉混特性没显著性差异,但是当 Glu-B1 位点为 7+8 亚基,Glu-D1 位点为 2+12 亚基时,N 亚基的揉混特性明显优于 1 亚基;当 Glu-A1 亚基都为 1,Glu-D1 亚基都为 2+12 时,Glu-B1 位点上 7+8 亚基与 17+18 的揉混特性无显著差异,但当 Glu-A1 亚基都为 N,Glu-D1 亚基都为 2+12 时,Glu-B1 位点上 7+8 亚基的揉混特性优于 17+18 亚基;在 Glu-D1 上,5+10>2+12。4)组合为 N,7+8,5+10 的小麦无论是在耐柔性上还是在面筋强度上都是最好的。研究还发现,Glu-D1 位点对谷蛋白含量及揉混仪参数的加性效应最大。

**关键词** 小麦; 近等基因系; 高分子量谷蛋白亚基; SDS 沉降值; 揉混特性

**中图分类号** Q 946.1; S 512.1

**文章编号** 1007-4333(2013)04-0013-07

**文献标志码** A

## Influence of high molecular weight glutenin subunits near-isogenic lines on wheat quality

DAI Jun-li<sup>1,2</sup>, LI Bao-yun<sup>2</sup>, YAO Da-nian<sup>1\*</sup>

(1. College of Agronomy, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;

2. College of Agronomy and Biotechnology/Key Laboratory of Crop Genetic Improvement of Beijing Municipality/Key Open Laboratory of Crop Genomics and Genetic Improvement of Ministry of Agriculture/Key Laboratory of research and utilization of Heterosis in crops of Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract** The effects of high molecular weight glutenin subunits(HMW-GS) on SDS-sedimentation value and kneading mixing properties were evaluated in this paper. A set of Beijing 411 Near-isogenic lines with different wheat high molecular weight glutenin subunit(HMW-GS) gene were used through the one year experiment at three locations. The results showed that: 1) Different HMW-GS loci for SDS- sedimentation value and kneading mixing properties was ranked as Glu-D1>Glu-B1>Glu-A1. 2) Effects of HMW-GS on SDS-sedimentation value followed the following order: Glu-A1, N=1;Glu-B1,7+8>17+18; Glu-D1,5+10>2+12. 3) The importance of HMW-GS effect on kneading mixing properties was:When it is 17+18 on Glu-B1 and 2+12 on Glu-D1, the effects of N and 1 on Glu-A1 locus is not significant;But when it is N on 7+8 Glu-B1 and 2+12 on Glu-D1,N is superior to the 1 subunit significantly on the the kneading characteristic. When it is 1 on Glu-A1 and 2+12 on Glu-D1, the effect of 7+8 and 1 on Glu-A1 locus was not significant. But when it is N on Glu-A1 and 2+12 on Glu-D1, the effect of 7+8 is superior to the 17+18 subunit

收稿日期: 2013-02-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31071404)

第一作者: 代俊利, 硕士研究生, E-mail: daijunli\_2009@163.com

通讯作者: 姚大年, 教授, 博士, 主要从事小麦育种及种子科学研究, E-mail: dnyao@163.com

significantly on the the kneading characteristic. Glu-D1, 5 + 10 > 2 + 12. 4) The line of N, 7 + 8, 5 + 10 was not only associated with the best crumpling resistance but also the best gluten strength. This study also suggested that Glu-D1 loci had the largest additive effect on glutenin content and Mixograph parameters.

**Key words** wheat; near-isogenic lines; HMW-GS; SDS-sedimentation value; kneading mixing properties

小麦是人类最重要的粮食作物之一,是我国三大粮食作物之一,小麦面粉因面筋的存在而具有广泛的加工适应性。随着经济的发展和人们生活水平的提高,对小麦特别是优质小麦的需求不断增长,并对小麦面粉的品质提出了更高的要求。因此,在基本解决人民温饱及粮食生产连年丰收的情况下,为适应我国国民经济及人民生活水平的提高,选育优质小麦已显得十分重要<sup>[1]</sup>。小麦品质改良作为小麦育种的一项重要内容,自从 Panye 等<sup>[2]</sup>首次报道了 HMW-GS 和沉降值的关系之后,各国科学家用各种方法寻找和分析不同亚基(或亚基对)及其控制因素与小麦品质(特别是食品加工品质)及一些间接品质参数(如 SDS 沉降值)间的关系。我国的小麦育种思路也越来越重视高分子量谷蛋白亚基的选择。

小麦面粉品质变异大多是由面筋蛋白含量和组成的变化引起的。小麦籽粒蛋白质主要由醇溶蛋白和麦谷蛋白组成,两者合称为面筋蛋白。醇溶蛋白使面团具有延展性,而麦谷蛋白则使面团具有弹性和强度,醇溶蛋白和麦谷蛋白的含量和组成特点在很大程度上决定了小麦的品质特点<sup>[1]</sup>。Payne 等<sup>[2]</sup>通过对单个 HMW-GS 和制粉品质(以 SDS)沉降值为指标)关系的研究,建立了 HMW-GS 对烘烤品质的 Glu-1 评分,可以解释英国小麦品质变异的 47%~60%。并提出面包烘烤品质可以通过某一特定品种中等位基因的评分相加所得值来预测。虽然小麦谷蛋白的数量与加工品质有关<sup>[3]</sup>,但 Payne 等<sup>[2]</sup>认为 HMW-GS 的组成特点对加工品质的影响更大。小麦品质性状与谷蛋白、醇溶蛋白的比值显著相关,随麦谷蛋白含量的增加,面筋含量、沉降值、稳定时间等都显著增加,加工特性变好。HMW-GS 对小麦加工品质具有重要的作用。Payne 等<sup>[2]</sup>认为 Glu-D1 位点在很大程度上决定着小麦面粉的烘烤特性。

前人虽已对 HMW-GS 与小麦品质性状的关系进行了大量的研究<sup>[3-7]</sup>,但由于小麦蛋白属于多基因复杂遗传,除了主基因外,影响小麦蛋白质的微效基因广泛存在于各种小麦品种中,除了 HMW-GS 的类型和组成对小麦品质具有重大作用外,低分子量

谷蛋白亚基和醇溶蛋白组成或组分群,单聚体蛋白(醇溶蛋白)和多聚体蛋白(谷蛋白)的比例。谷蛋白多聚体分子的大小及分布、HMW-GS 和 LMW-GS 的数量及其比例都对小麦的品质有不同程度的影响。因此往往由于研究材料的遗传背景不同和评价所用的指标不同,导致对基因数目和基因效应的估计有所差异。大部分学者采用不同品种为依据来分析各个亚基与小麦品质的相关性,由于不同品种存在大量编码不同亚基的等位基因,无法排除遗传背景的干扰。一般认为小麦品质是籽粒特性的综合反映,单纯考虑一个方面,而忽视其他方面是片面的。因此为了能够准确地得到谷蛋白亚基对品质的影响,首先应获得特殊的遗传资料。用近等基因系或有共同遗传背景的杂种分离群体进行研究是有效的方案,本研究通过回交转育创建了几套不同高分子量谷蛋白亚基的近等基因系群。近等基因系间只含有一个 HMW-GS 差异,可排除遗传背景的干扰,使单个基因效应得以充分表达,进而可了解单个亚基对品质的影响<sup>[8]</sup>。用近等基因系研究基因的功能可以在最大程度上消除遗传背景不同的影响,把不同的 HMW-GS 导入相同的遗传背景下行研究。所以在研究小麦面粉中不同成分对加工品质指标的遗传学效应时利用近等基因系是非常有利的<sup>[9]</sup>。

本研究采用近等基因系为试材,通过分析谷蛋白亚基对沉降值和面团的揉混特性的影响,旨在探索将影响品质变化的因素减少到最低程度的情况下,了解 HMW-GS 对小麦品质的贡献。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料的种植

试验材料(表 1)以 7 个品质性状存在差异的小麦品种为亲本进行杂交,得到的杂交后代选取具有目标条带的继续与亲本回交。共 7 次回交之后,自交一次,得到 44 个近等基因系材料,于 2011 年种植于北京中国农业大学上庄实验站、安徽合肥安徽农业大学试验田和河南郑州河南农业大学试验田。每地点设 2 个重复。材料成熟收获后脱粒晒干,用药熏半个月,防止贮藏害虫。

表1 亲本材料的HMW-GS组成

Table 1 Composition at HMW-GS of parent material

亲本 Parents	Glu-A1	Glu-B1	Glu-D1
Eradu	1	17+18	2+12
Jagger	1	17+18	5+10
陕优 225	1	14+15	2+12
Custer	null	7+9	5+10
Karl	1	7+9	5+10
8901	1	7+8	5+10
京 411	null	7+8	2+12

## 1.2 高分子量谷蛋白亚基检测

HMW-GS的提取采用哈密斯等<sup>[10]</sup>的方法。HMW-GS的分析采用SDS-PAGE方法,胶片染色采用考马斯亮蓝染色法。

## 1.3 SDS沉降值的测定

### 1.3.1 磨粉

磨粉前去除杂质,根据种子中的水分进行润麦,放置24 h后采用德国Brabender公司生产的SDS专用磨粉,过100目筛。出粉率在60%左右。

### 1.3.2 面粉水分的测定

按照GB-5497测定水分,通过公式需测面粉质量=面粉湿度×(1-14%)/(1-面粉湿度),使测定面粉中的干面粉含量与湿度为14%的面粉中的干面粉含量一致。

### 1.3.3 SDS沉降值的测定

参照马传喜等<sup>[1]</sup>方法进行,即用2.0 g面粉,记录5 min沉降体积。具体步骤如下:1)按照计算出来的面粉质量称取面粉,放入35 mL具塞量筒中;2)加入质量分数为 $10 \times 10^{-6}$ 的溴酚蓝溶液16.7 mL于量筒中,并将量筒上下摇动12次,将面粉与

溴酚蓝溶液混合均匀,将量筒放到沉降值测定仪上摇匀5 min;3)取下量筒,再加16.7 mL 1:50乳酸-SDS混合溶液后,再把量筒放在沉降值测定仪上,摇匀5 min;4)取下量筒,立即将其竖立在水平的桌面上,静置5 min后,准确读出量筒内沉降的体积。

## 1.4 面团揉混特性测定

采用美国NationalMFG. co揉混仪,具体步骤如下:1)取35 g面粉倒入洁净的和面钵里,将面钵放到揉混仪上,放下搅拌器进入到工作位置;2)开动记录纸,把记录笔放到纸上。当笔运行到垂直标线以前0.25~0.50 min,即向钵中加入17 mL蒸馏水;3)当笔达到垂直线时,开动搅拌器运转,运转8 min。

得到的揉混曲线图测量中线峰值时间(MPT),曲线上升与曲线下降的夹角和衰落角。其中MPT代表面团形成所需时间,面团和面时间越长耐柔性越好,曲线峰值上升和下降的夹角代表面团的面筋强度,夹角越大面筋强度越大,衰落角代表面团的耐柔性,角度越小面筋强度越强。

## 1.5 数据统计及分析

用Excel软件对不同近等基因系在3个不同地点的加工品质数据进行单因素方差分析。并对只有单个谷蛋白亚基位点有差异的品种进行单因素方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同近等基因系在3个地点的加工品质数据的分析

从表2可以看出在北京、安徽和河南3个地点的不同近等基因系品种的SDS沉降值和揉混特性上均达到差异极显著水平。这是由于小麦籽粒品质虽然主要由基因决定,但同时还要受环境的影响。3个重复间差异极显著可能是基因型、环境及其互作皆影响品质性状的表现。

表2 北京,安徽,河南3个地点不同近等基因系的小麦品质的F测验

Table 2 F-test on the processing quality of wheat of different near-isogenic lines in Beijing, Anhui and Henan

地点 Places	F测验值 F-test			
	SDS沉降值 SDS-sedimentation value	MPT	上升角与下降角的夹角 Angle	衰落角 Angle
北京,安徽,河南	6.29**	10.65**	12.42**	6.76**

注:\*和\*\*表示显著或极显著。下表同。

Note:\* and \*\* mean significant differences at  $P=0.05$  and  $0.01$ , respectively. The same as below.

## 2.2 单个位点谷蛋白亚基对沉降值和揉混特性的影响

对所用材料的 SDS 沉降值和揉混参数进行 F 测验(表 3、4),可见 Glu-A1 位点的变异对沉降值大

小的变化影响较小,而 Glu-D1 亚基的变化对沉降值的影响最大,沉降值和揉混特性均达到极显著水平。而 Glu-A1 位点的变异没对小麦加工品质产生显著影响。也就是说 HMW-GS 位点对 SDS 沉降值

表 3 单个位点高分子量谷蛋白亚基对 SDS 沉降值和揉混特性的影响的 F 测验

Table 3 F-test on the effect of single locus HMW-GS on SDS-sedimentation value and kneading mixed instrument parameters

亚基组成 Unit component	F 测验值 F-test				效应比较 Effect comparison			
	SDS 沉降值	上升曲线与下降曲线的夹角 MPT	上升曲线与下降曲线的夹角 Angle	衰落角 Angle	SDS 沉降值	上升曲线与下降曲线的夹角 MPT	上升曲线与下降曲线的夹角 Angle	衰落角 Angle
	value				value			
N,7+8,5+10	12.173**	39.960**	13.675**	13.205**	5+10>	5+10<	5+10>	5+10>
N,7+8,2+12					2+12	2+12	2+12	2+12
N,17+18,2+12	2.347	15.375**	15.497**	8.117**	7+8=	7+8<	7+8>	7+8<
N,7+8,2+12					17+18	17+18	17+18<N	17+18
1,17+18,2+12	2.338	2.999*	1.479	0.812	7+8=	7+8<	7+8=	7+8=
1,7+8,2+12					17+18	17+18	17+18	17+18
1,17+18,2+12	2.833	1.857	2.833	2.177	1=N	1=N	1=N	1=N
N,17+18,2+12								
1,7+8,2+12	2.398	13.429**	8.007**	5.089**	N=1	N>1	N>1	N<1
N,7+8,2+12								

表 4 单个位点 HMW-GS 对 SDS 沉降值和揉混仪参数的影响

Table 4 Effect of single locus HMW-GS on SDS-sedimentation value and kneading mixed instrument parameters with the letter representation

谷蛋白亚基位点 Unit component			SDS 沉降值 SDS-sedimentation	MPT	上升曲线与下降 曲线的夹角 Angle	衰落角 Angle
Glu-A1	Glu-B1	Glu-D1	value			
N	7+8	5+10	29.1 a	3.08 a	138.0 a	15.7 a
N	7+8	2+12	26.6 b	2.08 b	126.7 b	18.2 b
N	17+18	2+12	26.3 b	1.90 c	122.8 c	24.5 c
1	17+18	2+12	26.4 b	2.31 c	127.4 c	22.1 c
1	7+8	2+12	26.5 b	2.12 c	125.9 d	23.5 d

注:每列数字上标相同字母表示在 0.05 水平上无显著差异。

Note: Value followed by the same letters in each column are not significantly different at 0.05 level from each other according to Tukey test.

的贡献大小为 Glu-D1>Glu-B1>Glu-A1。

## 2.3 各亚基对沉降值和揉混特性的影响

### 2.3.1 N 和 1 亚基对沉降值和揉混特性的影响

在以京 411 为背景的近等基因系中,当 Glu-B1 位点为 7+8 亚基,Glu-D1 位点为 2+12 亚基时,Glu-A1 位点 1 亚基和 N 亚基的 SDS-沉降值没有显

著差异,说明 1 和 N 亚对 SDS 沉降值的贡献相同,即:1=N。但 N 亚基的稳定性和面筋强度都比 1 亚基的好(图 1)。但是当 Glu-B1 位点为 17+18 亚基,Glu-D1 位点为 2+12 亚基时,1 和 N 亚对 SDS 沉降值的贡献相同,但 N 亚基的稳定性和面筋强度和比 1 亚基好(图 2)。

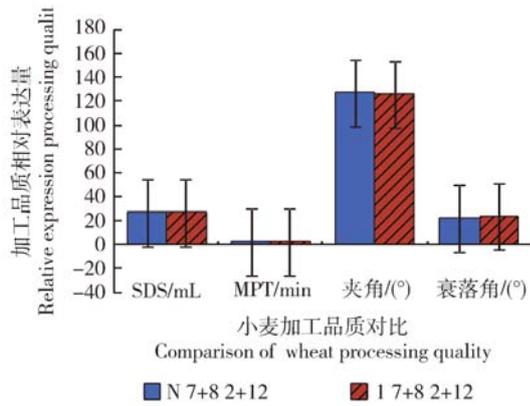


图 1 N,7+8,2+12 和 1,7+8,2+12 沉降值和揉混特性的比较

Fig. 1 Comparison on the SDS-sedimentation value and mixing characteristics of N,7+8,2+12 and 1,7+8,2+12

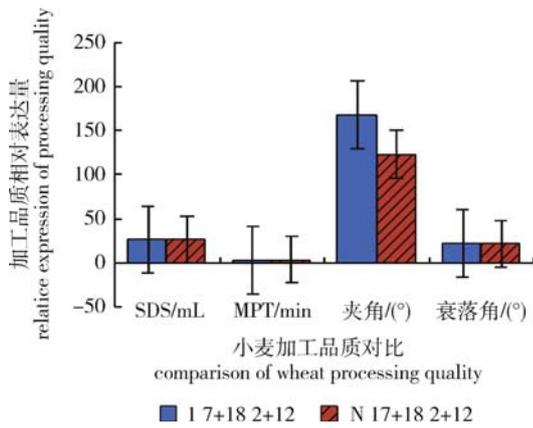


图 2 1,17+18,2+12 和 N,17+18,2+12 沉降值和揉混特性的比较

Fig. 2 Comparison on the SDS-sedimentation value and mixing characteristics of 1,17+18,2+12 and N,17+18,2+12

2.3.2 7+8 和 17+18 亚基对沉降值和揉混特性的影响

对 Glu-B1 单个位点上 7+8 亚基和 17+18 亚基对沉降值和揉混特性的影响进行分析,当 Glu-A1 亚基都为 N,Glu-D1 亚基都为 2+12 时,Glu-B1 位点上 7+8 亚基与 17+18 的沉降值无显著差异,但对沉降值的贡献相同。但揉混特性有显著差异,且 7+8 亚基的揉混特性优于 17+18 亚基(图 3)。但当 Glu-A1 亚基都为 1,Glu-D1 亚基都为 2+12 时,Glu-B1 位点上 7+8 亚基与 17+18 沉降值和揉混

特性均无差异(图 4)。

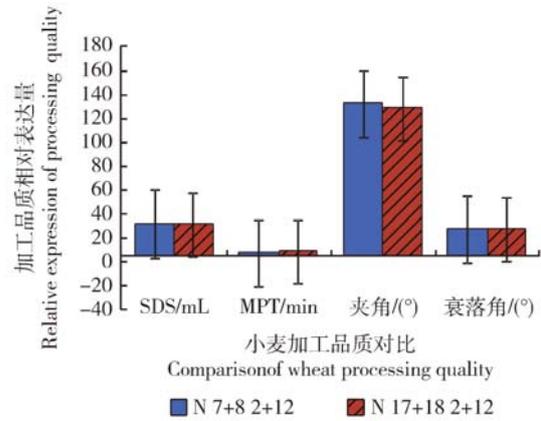


图 3 N,7+8,2+12 和 N,17+18,2+12 沉降值和揉混特性的比较

Fig. 3 Comparison on the SDS-sedimentation value and mixing characteristics of N,7+8,2+12 and N,17+18,2+12

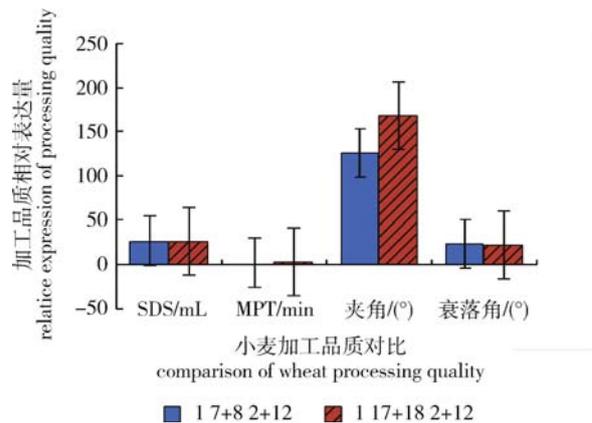


图 4 1,7+8,2+12 和 1,17+18,2+12 沉降值和揉混特性的比较

Fig. 4 Comparison on the SDS-sedimentation value and mixing characteristics of 1,7+8,2+12 and 1,17+18,2+12

2.3.3 5+10 和 2+12 亚基对沉降值和揉混特性的影响

对 Glu-D1 单个位点的 5+10 亚基和 2+12 亚基对沉降值和揉混特性的影响进行分析,当 Glu-A1 亚基都为 N,Glu-B1 位点亚基都为 7+8 时,在 Glu-D1 位点上 5+10 和 2+12 亚基对沉淀值的影响有极显著差异,且 5+10 亚基对沉降值的贡献比 2+12 大。且含有 5+10 亚基的面团稳定性和面筋强度都优于 2+12 亚基(图 5)。

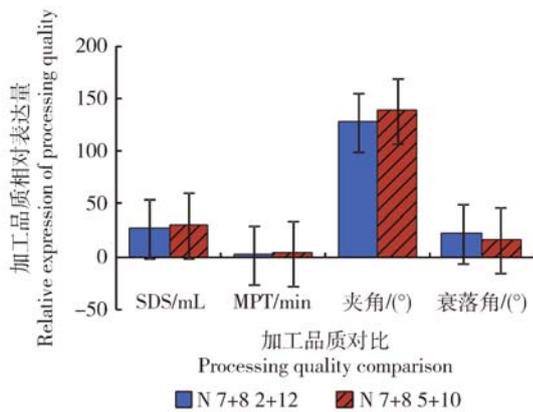


图5 N,7+8,2+12和N,7+8,5+10沉降值和揉混特性的比较

Fig. 5 Comparison on the SDS-sedimentation value and mixing characteristics of N,7+8,2+12 and N,7+8,5+10

### 3 讨论

#### 3.1 与前人研究相同或相似的结果予以证实的阐述

HMW-GS的3个位点对SDS沉降值的贡献大小为Glu-D1 > Glu-B1 > Glu-A1。这与唐建卫等2008年分析不同HMW-GS组成对其表达量、面团流变学特性和面包加工品质的影响时所得的结果一致,即Glu-D1位点对谷蛋白含量和加工品质的加性效应最大。而在Glu-B1位点,各亚基间差异不显著<sup>[11]</sup>。

本研究表明Glu-D1是5+10和2+12时有极显著差异,且5+10亚基对沉降值的贡献比2+12大。且5+10亚基的揉混特性明显优于2+12亚基。这与马小乐等通过研究HWM-GS对面粉理化特性和面团流变学特性的影响的分析结果是一致的。具有5+10亚基的品种面筋指数、沉降值以及面团流变学特性中的参数弹性、面团形成时间和面团稳定时间均高于具有2+12亚基的品种,而且差异显著( $P < 0.05$ )<sup>[12]</sup>。

#### 3.2 与前人研究结果相比较而有所创新的阐述

与以往对谷蛋白亚基的研究相比,本试验采用近等基因系为试材,在同一遗传背景下分析高分子量谷蛋白亚基及其组合的品质效应,利用不同高分子量谷蛋白亚基近等基因系在不同遗传背景条件下分析高分子量谷蛋白亚基品质效应与遗传基础的关系,研究结果有更高的可信度。

#### 3.3 与前人研究结果不一致的阐述

关于7+8和17+18亚基对小麦品质的影响,至今尚有不同的研究结论<sup>[13-17]</sup>。Payne等根据沉降值的测定结果认为17+18亚基的效应优于7+8亚基<sup>[2]</sup>,而刘丽等(2004)研究结果表明,7+8亚基和17+18对蛋白质含量和SDS沉降值两项指标影响均不显著,对揉面参数的影响达1%显著水平,且7+8亚基优于17+18<sup>[18]</sup>。在本试验中中当Glu-A1亚基都为N,Glu-D1亚基都为2+12时,Glu-B1位点上7+8亚基与17+18的沉降值无显著差异,但揉混特性有显著差异,且17+18亚基的揉混特性优于7+8亚基。研究结果的差异可能是因HMW-GS之间、HMW-GS与LMW-GS之间以及谷蛋白与醇溶蛋白之间存在互作用有关。

在Glu-A1位点,亚基Null对品质的效应最小,这一点已得到公认。张津立等<sup>[19]</sup>认为对面包体积和面条评分的效应 $1 > 2^* > \text{Null}$ 。潘志芬等的研究表明:各基因座编码的等位基因变异对小麦加工品质影响显著。在Glu-A1位点上1亚基和2、Null亚基的作用达显著水平,2与Null亚基间的差异不显著<sup>[20]</sup>。本研究表明当Glu-B1位点为7+8亚基,Glu-D1位点为2+12亚基时,Glu-A1位点1亚基和N亚基的SDS沉降值没有显著差异,但N亚基的稳定性和面筋强度都比1亚基的好。但是当Glu-B1位点为17+18亚基,Glu-D1位点为2+12亚基时,1和N亚对SDS沉降值的贡献相同,但N亚基的稳定性和面筋强度和比1亚基好。研究结果的差异,主要与研究的品质性状及所用材料群体较小有关。在本研究中,组合为N,7+8,5+10的品种沉降值最大且品质最好。马传喜等<sup>[21]</sup>在分析中国小麦的HMW-GS组成特点和遗传多样性时认为,小麦主栽品种的HMW-GS主要由N,7+9,2+12等品质较差的亚基构成,优质(烘烤品质)亚基2\*、14+15、17+18和5+10的频率明显偏低。在美国具有5+10亚基的专用品种占总品种数的97%,但在我国仅占3%,即含有这些优质亚基的品种频率低,遗传基础比较狭窄。本研究结果也从一个侧面解释了我国小麦面筋强度弱、面团流变力学特性差的原因。因此从麦谷蛋白亚基的角度看,我国小麦品质改良的目标是,发掘和引入优质亚基,逐步解决我国品种的强筋不强,弱筋不弱的局面。

## 参 考 文 献

- [1] 王维, 马传喜, 冯春, 等. 小麦一些高分子量麦谷蛋白亚基对 SDS 沉降值的效应分析[J]. 安徽农业大学学报, 2006, 33(3): 289-292
- [2] Payne P I, Nightingale M A, Krattiger A F, et al. The relationship between HMW glutenin subunit composition and the bread-making quality of British-grown wheat varieties[J]. *Sci Food Agric*, 1987, 40(1): 51-56
- [3] 胡尚连, 李文雄, 曾寒冰. 小麦未熟胚离体培养的研究: 再生植株后代籽粒醇溶蛋白和谷蛋白亚基及蛋白质含量变化[J]. 作物学报, 1998, 24(4): 202-212
- [4] Khan K, Tamminga G, Lukow O. The effect of wheat flour proteins on mixing and baking-correlations with protein fractions and high molecular weight glutenin subunit composition by gel electrophoresis[J]. *Cereal Chemistry*, 1989, 66(5): 391-396
- [5] Payne P I, Corfield K G, Holt L M, et al. Correlation between the inheritance of certain high-molecular-weight subunits of glutenin and bread-making quality in progenies of six crosses of bread-wheat[J]. *Sci Food Agric*, 1981, 32: 51-60
- [6] 李学军. 小麦 HMW-GS 近等基因系的创建及亚基组合品质效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2000
- [7] 温之雨, 王秀琴, 张光荣, 等. 一组高分子量麦谷蛋白近等基因系研究[J]. 华北农学报, 2003(S1): 43-45
- [8] 杨玉双. 利用 HMW-GS 近等基因系评价不同等位变异对面包、面条加工品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2009
- [9] 孙辉. 小麦谷蛋白亚基与烘烤品质的关系及 Glu-D1 位点基因多态性分析[D]. 北京: 中国农业大学, 1994
- [10] 雷娜, 张梦琴, 张剑, 等. 小麦面筋蛋白的研究进展[J]. 技术·粮食工程, 2007(8): 111-114
- [11] 唐建卫, 刘建军, 张平平, 等. 小麦 Glu1 位点变异和 IB/IR 易位对谷蛋白亚基表达量和面包加工品质的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(4): 571-577
- [12] 马小乐, 柴守玺, 方永丰, 等. 不同蛋白亚基类型的小麦品种品质性状评价[J]. 甘肃农业大学学报, 2010, 45(4): 55-58
- [13] Payne P I, Holt L M, Lawrence G J. Detection of a novel high molecular weight subunit of glutenin in some Japanese hexaploid wheats[J]. *J Cereal Sci*, 1983, 1(1): 3-8
- [14] Lawrence G J, Mac Richie F, Wrigley C W. Dough and baking quality of wheat lines deficient in glutenin subunits controlled by Glu-A1, Glu-B1 and Glu-D1 loci[J]. *J Cereal Sci*, 1988, 7(2): 109-112
- [15] 高翔, 雷玲, 董剑, 等. 小麦高分子量谷蛋白亚基效应的比较研究[J]. 西北植物学报, 2005, 25(12): 2443-2446
- [16] 贾俊仙, 潘登魁, 潘幸来. 小麦高分子量谷蛋白亚基的遗传及其与品质关系的研究[J]. 山西农业大学学报, 2006, 26(2): 125-127
- [17] 王银萍, 李勇超, 魏燕燕, 等. 黄淮海区小麦品种高分子量谷蛋白亚基组成及遗传多样性分析[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(5): 69-73
- [18] 刘丽, 周阳, 何中虎, 等. Glu-1 和 Glu-3 等位基因变异对小麦加工品质的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(10): 959-983
- [19] 潘志芬, 邓光宾, 刘毅, 等. 小麦高分子量麦谷蛋白亚基组成及其对小麦烘烤品质的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2006, 12(2): 155-159
- [20] 张津立, 李硕碧. 小麦品种 HMW 谷蛋白亚基组成的数量分析[J]. 麦类作物学报, 1998, 18(6): 22-23
- [21] 马传喜, 吴兆苏. 我国主要冬小麦推广品种的高分子量谷蛋白亚基变异分析[J]. 安徽农业大学学报, 1993, 20(4): 298-302

责任编辑: 袁文业