

# 不同来源小麦种质高分子质量谷蛋白亚基多样性及其与加工品质的关系

张自阳 姜小苓 王智煜 朱启迪 刘明久 茹振钢

(河南科技学院 河南省现代生物育种协同创新中心 河南省高校作物分子育种重点开放实验室 河南 新乡 453003)

**摘要:**为了明确小麦高分子质量谷蛋白亚基(HMW-GS)与加工品质的关系,以来源于国内外不同种植区的148个小麦种质为材料,研究小麦HMW-GS的多样性及其与小麦粉和馒头加工品质的关系。结果表明,参试材料在*Glu-A1*、*Glu-B1*、*Glu-D1*3个位点分别检测到3、7、7种不同的亚基类型,1、7+9、2+12亚基在各自位点上出现的频率均最高,分别为56.8%、47.3%、45.9%;亚基组合类型共有35种,其中(1/7+9/2+12)、(1/7+8/5+10)、(N/7+9/2+12)、(1/7+9/5+10)组合出现频率较高;不同来源小麦种质的HMW-GS组成存在一定差异,国外引进种质和黄淮冬麦区种质的亚基类型较丰富,且优质亚基出现的频率较高;1、2\*、7+8、17+18、5+10亚基对面筋强度具有明显的正向效应,2\*、17+18、2+10亚基对馒头的硬度和咀嚼性具有重要影响,携带(1/14+15/2+12)、(1/7+9/5+10)、(N/7+8/2+12)亚基组合种质馒头的加工品质较好。

**关键词:**小麦;高分子质量谷蛋白亚基;馒头;品质

中图分类号:S512.1 文献标识码:A 文章编号:1000-7091(2019)03-0075-07

doi:10.7668/hbnxb.201751750



## Genetic Diversity of HMW-GS and Its Relationship with Quality of Wheat Germplasms from Different Regions

ZHANG Ziyang, JIANG Xiaoling, WANG Zhiyu, ZHU Qidi, LIU Mingjiu, RU Zhengang

(Henan Institute of Science and Technology, Collaborative Innovation Center of Modern Biological Breeding of Henan Province, Key Discipline Open Laboratory on Crop Molecular Breeding of Henan Province, Xinxiang 453003, China)

**Abstract:** In order to clarify the relationship between high molecular weight glutenin subunit (HMW-GS) and wheat processing quality, 148 wheat germplasms from different regions of the world were used to study the genetic diversity of high molecular weight glutenin subunits (HMW-GS) and its relationship with the quality of flour and steamed bread. Results showed that the tested materials had abundant polymorphisms at the three gene loci of *Glu-A1*, *Glu-B1* and *Glu-D1*, of which three, seven and seven types of subunits were detected, respectively. The highest frequency of allele was 1, 7+9 and 2+12 at each of the three loci, which accounted for 56.8%, 47.3% and 45.9%, respectively. A total of 35 HMW-GS combinations were identified in the tested materials, among which the combinations of (1/7+9/2+12), (1/7+8/5+10), (N/7+9/2+12) and (1/7+9/5+10) had higher frequencies. The compositions of HMW-GS were different in wheat varieties (lines) from different regions. Moreover, the most abundant type of subunit and the highest frequency of high-quality subunit were found in germplasms from aboard and Huanghuai winter wheat region. Furthermore, subunits 1, 2\*, 7+8, 17+18 and 5+10 had positive effects on gluten strength, while subunits 2\*, 17+18 and 2+10 had important influence on hardness and chewiness of steamed bread. The genotypes with combination forms of (1/14+15/2+12), (1/7+9/5+10) or (N/7+8/2+12) had good processing quality of steamed bread.

**Key words:** Wheat; HMW-GS; Steamed bread; Quality

收稿日期:2019-01-03

基金项目:科技部创新方法专项(2018IM030100);河南省科技攻关计划项目(152102110085);河南科技学院高层次人才科研启动项目(2015002)

作者简介:张自阳(1984-),男,河南舞钢人,实验师,硕士,主要从事小麦品质育种研究。

通讯作者:刘明久(1966-),男,河南获嘉人,教授,主要从事小麦抗逆育种研究。

茹振钢(1958-),男,河南沁阳人,教授,主要从事小麦育种研究。

贮藏蛋白是影响小麦加工品质的主要因素,由谷蛋白和醇溶蛋白组成,两者约占小麦籽粒蛋白质的80%。其中,醇溶蛋白是多肽链单体蛋白质,主要决定面团的黏着性和延展性;谷蛋白由高分子质量谷蛋白亚基(High molecular weight glutenin subunit, HMW-GS)和低分子质量谷蛋白亚基(Low molecular weight glutenin subunit, LMW-GS)组成,决定面团的弹性<sup>[1-3]</sup>。HMW-GS由位于小麦第一同源染色体长臂的*Glu-A1*、*Glu-B1*、*Glu-D1*位点控制,对小麦烘烤品质具有重要影响,特定亚基还可明显改善小麦品质<sup>[4]</sup>。Payne等<sup>[5]</sup>建立了HMW-GS的*Glu-I*评分,可解释英国小麦品质变异的47%~60%,被国内外研究者广泛研究。不同亚基对小麦品质的影响不同,一般携带5+10亚基的小麦具有较好的面包品质,7+8和14+15等亚基对烘烤品质也有正向效应<sup>[6]</sup>,N和2+12亚基则与较差的烘烤品质相关<sup>[1]</sup>。多数研究认为,*Glu-A1*编码的1、2\*亚基,*Glu-B1*编码的7+8、17+18、13+16亚基以及*Glu-D1*编码的5+10亚基对烘烤品质的影响较大<sup>[5,7]</sup>。另外, HMW-GS的数量也影响小麦品质<sup>[8]</sup>。相关专家认为,缺乏优质HMW-GS是目前导致我国小麦品种品质较差的主要原因之一,引入优质亚基是进一步改良我国小麦品质的一条重要途径<sup>[9-11]</sup>。小麦品种的HMW-GS组成仅取决于遗传因素,不受环境影响<sup>[12]</sup>,研究HMW-GS组成已成为小麦品质改良育种的重要依据。迄今,研究者对小麦HMW-GS的组成进行了较多研究,但有关HMW-GS与小麦品质尤其馒头加工品质关系的研究非常少<sup>[13]</sup>。范玉顶等<sup>[13]</sup>以黄淮麦区的114个小麦种质为材料研究HMW-GS与北方手工馒头加工品质的关系发现,N和2+12亚基对各品质指标的作用均好或较好,没有明显缺点,是适合制作优质手工馒头的亚基;(1,7+8,2+12)和(N,7+8,2+12)组合适于制作优质手工馒头,但选取的材料存在一定的局限性。为此,选用来源于国内外5个不同种植区的148个小麦种质,分析其HMW-GS多样性及其与小麦粉和馒头加工品质的关系,旨在进一步发掘优质小麦种质,明确HMW-GS与小麦加工品质的关系,进而为小麦品质改良育种提供理论和材料基础。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料及种植

试验材料为148个小麦种质,其中,国外引进种质8个、北方冬麦区种质12个、黄淮冬麦区种质83个、长江中下游冬麦区种质27个、西南冬麦区种质

18个。参试材料于2015-2016年种植于河南科技学院试验基地(河南省辉县市),每份材料种植2行,行距25 cm,行长4 m,每行播种80粒,田间管理同一般大田。成熟后,分行收获,脱粒,晾晒,室温储藏备用。

### 1.2 试验方法

1.2.1 HMW-GS组成分析及命名 HMW-GS的组成分析参照张玲丽等<sup>[14]</sup>的分析方法。HMW-GS的命名根据Payne等<sup>[5,15]</sup>的方法进行,对照品种为中国春(N/7+8/2+12)、Neepawa(2\*/7+9/5+10)和Marquis(1/7+9/5+10)。

1.2.2 面粉品质测定 利用实验磨粉机(LRMM8040-3-D,江苏无锡锡粮机械制造有限公司)磨粉,出粉率65%左右。利用数显白度仪(SBDY-1,上海悦丰仪器仪表有限公司)测定面粉白度;利用全自动凯氏定氮仪(UDK159,意大利VELP公司)测定面粉含氮量;利用粉质仪(810101,德国Brabender公司)测定面团粉质特性,方法参照GB/T 14614-06;利用面筋仪(2200,瑞典Perten公司)测定湿面筋含量,方法参照SB/T 10249-95。

1.2.3 馒头制作及质构特性分析 馒头制作参照姜小苓等<sup>[16]</sup>的方法进行,蒸好的馒头盖上干纱布冷却40 min,利用质构仪(TMS-PRO,美国FTC仪器公司)对馒头质构特性进行分析测定,方法参照付蕾等<sup>[17]</sup>的方法。具体操作步骤为:将馒头纵切成厚度约25 mm的均匀薄片,利用75 mm圆盘挤压探头进行TPA压缩模式测试。测前速度50 mm/s,测试速度30 mm/s,测后速度50 mm/s,起始力0.8 N,形变量30%,测试指标主要为硬度和咀嚼性。

### 1.3 数据统计分析

利用SAS V8数据处理软件和Excel 2007进行数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 148份小麦种质HMW-GS的组成分析

由表1可知,在148个小麦种质的*Glu-I*位点共检测到17种HMW-GS类型。其中,*Glu-A1*位点有3种类型,分别为1、N、2\*,1亚基出现频率最高(56.8%),其次为N亚基(39.2%);*Glu-B1*位点检测到7种亚基类型,分别为7+9、7+8、14+15、17+18、13+16、7、6+8,7+9亚基出现频率最高(47.3%),其次为7+8亚基(33.8%),13+16、7、6+8亚基出现频率较低,分别为2.0%、1.4%、0.7%;*Glu-D1*位点检测到7种亚基类型,分别为2+12、5+10、5+12、2+10、4+12、2+11、2.2+12,2+12

表 1 148 个小麦种质 *Glu-A1*、*Glu-B1*、*Glu-D1* 位点的 HMW-GS 及其出现频率

Tab. 1 Frequency of HMW-GS at *Glu-A1* *Glu-B1* and *Glu-D1* loci in 148 wheat germplasms

位点 Locus	亚基 Subunit	材料数 Materials number	频率/% Frequency
<i>Glu-A1</i>	1	84	56.8
	N	58	39.2
	2*	6	4.0
<i>Glu-B1</i>	7+9	70	47.3
	7+8	50	33.8
	14+15	16	10.8
	17+18	6	4.0
	13+16	3	2.0
	7	2	1.4
<i>Glu-D1</i>	6+8	1	0.7
	2+12	68	45.9
	5+10	64	43.2
	5+12	8	5.4
	2+10	4	2.7
	4+12	2	1.4
	2+11	1	0.7
	2.2+12	1	0.7

亚基出现频率最高(45.9%),其次为 5+10 亚基(43.2%)。4+12、2+11、2.2+12 亚基出现频率较低,分别为 1.4%、0.7%、0.7%。

由表 2 可知,在 148 个小麦种质中共检测到 35 种 HMW-GS 组合,其中(1/7+9/2+12)组合出现频率最高(13.4%)、(1/7+8/5+10)、(N/7+9/2+12)、(1/7+9/5+10)、(1/7+8/2+12)组合依次次之,出现频率分别为 12.1%、12.1%、10.0%、8.0%、(N/7+9/5+10)、(N/7+8/2+12)、(N/14+15/5+10)、(N/7+8/5+10)、(1/14+15/2+12)、(2\*/7+9/5+10)、(1/7+9/5+12)、(2\*/14+15/5+10)、(1/7+8/5+12)、(1/17+18/5+10)、(1/17+18/2+12)组合出现频率较低;而剩余 19 种稀有亚基组合类型均仅在 1 份材料中检测到,出现频率均为 0.7%。

## 2.2 不同来源小麦种质 HMW-GS 的组成分析

由表 3 可知,不同来源小麦种质的 HMW-GS 组成存在一定差异。在 *Glu-A1* 位点,大多数小麦种质中检测到 1 或 N 亚基,仅有少数小麦种质检测到 2\* 亚基。其中, N 亚基在国外、西南冬麦区小麦种质中

表 2 148 个小麦种质的 HMW-GS 组合及其出现频率

Tab. 2 HMW-GS combination and its frequency in 148 wheat germplasms

亚基组合 Subunit combination	材料数 Materials number	频率/% Frequency	亚基组合 Subunit combination	材料数 Materials number	频率/% Frequency
1/7+9/2+12	20	13.4	N/7+8/5+12	1	0.7
1/7+8/5+10	18	12.1	N/7+8/2+11	1	0.7
N/7+9/2+12	18	12.1	N/7+8/2+10	1	0.7
1/7+9/5+10	15	10.0	N/7+8/2.2+12	1	0.7
1/7+8/2+12	12	8.0	N/7/5+10	1	0.7
N/7+9/5+10	8	5.3	N/6+8/2+10	1	0.7
N/7+8/2+12	8	5.3	N/17+18/5+10	1	0.7
N/14+15/5+10	6	4.1	N/13+16/5+10	1	0.7
N/7+8/5+10	5	3.4	N/13+16/2+12	1	0.7
1/14+15/2+12	5	3.4	2*/17+18/5+10	1	0.7
2*/7+9/5+10	3	2.0	N/14+15/5+12	1	0.7
1/7+9/5+12	3	2.0	N/14+15/2+12	1	0.7
2*/14+15/5+10	2	1.4	1/7+9/4+12	1	0.7
1/7+8/5+12	2	1.4	1/7+8/4+12	1	0.7
1/17+18/5+10	2	1.4	1/7/2+12	1	0.7
1/17+18/2+12	2	1.4	1/2+10/14+15	1	0.7
N/7+9/5+12	1	0.7	1/13+16/5+10	1	0.7
N/7+9/2+10	1	0.7			

出现频率较高,分别为 62.5%、66.6%;而 1 亚基在黄淮冬麦区、长江中下游冬麦区出现频率较高,分别为 65.1%、70.4%。在 *Glu-B1* 位点,多数国内小麦种质检测到 7+9 或 7+8 亚基,而多数国外小麦种质具有 7+9 或 17+18 亚基。同时,国外小麦种质在 *Glu-B1* 位点出现亚基类型最丰富,具有 7+9、

7+8、17+18、13+16、7.6+8 等 6 种亚基类型;黄淮冬麦区小麦种质在 *Glu-B1* 位点的亚基类型也很丰富,具有 7+9、7+8、14+15、17+18、13+16、7 等 6 种类型;而北方冬麦区、长江中下游冬麦区和西南冬麦区小麦种质在 *Glu-B1* 位点检测到的亚基类型较少。在 *Glu-D1* 位点,多数小麦种质具有 2+12 或

5 + 10 亚基。其中 50.0% 国外小麦种质携带 5 + 10 亚基 25.0% 携带 2 + 12 亚基 携带 2 + 10、2 + 11 亚基的小麦种质分别占 12.5%; 黄淮冬麦区小麦种质中 2 + 12、5 + 10 亚基出现频率较高, 分别为 44.6% 43.4% 其次为 5 + 12、4 + 12 亚基, 出现频率分别为 7.2% 2.4% 而 2 + 10、2. 2 + 12 亚基出

现频率最低, 均为 1.2%; 长江中下游冬麦区、西南冬麦区, 分别有 92.6% 88.9% 的小麦种质携带 2 + 12 或 5 + 10 亚基 5 + 12、2 + 10 亚基出现频率均最低, 且仅在 1 份材料中出现; 北方冬麦区小麦种质中仅检测到 2 + 12、5 + 10 亚基, 出现频率分别为 83.3% 16.7%。

表 3 不同来源小麦种质 *Glu-A1*、*Glu-B1*、*Glu-D1* 位点的 HMW-GS 及其出现频率

Tab. 3 HMW-GS and its frequency at *Glu-A1* *Glu-B1* and *Glu-D1* loci in wheat germplasm from different regions

位点 Locus	亚基 Subunit	国外引进材料 Materials imported from aboard		北方冬麦区材料 Materials from northern winter wheat region		黄淮冬麦区材料 Materials from Huanghuai winter wheat region		长江中下游冬麦区材料 Materials from middle and lower Yangtze valleys winter wheat region		西南冬麦区材料 Materials from southwest winter wheat region	
		数量 Number	频率/% Frequency	数量 Number	频率/% Frequency	数量 Number	频率/% Frequency	数量 Number	频率/% Frequency	数量 Number	频率/% Frequency
<i>Glu-A1</i>	1	2	25.0	6	50.0	54	65.1	19	70.4	3	16.7
	N	5	62.5	6	50.0	28	33.7	7	25.9	12	66.6
	2*	1	12.5	-	-	1	1.2	1	3.7	3	16.7
<i>Glu-B1</i>	7 + 9	2	25.0	6	50.0	37	44.6	17	63.0	8	44.4
	7 + 8	1	12.5	5	41.7	30	36.1	8	29.6	6	33.3
	14 + 15	-	-	-	-	11	13.3	2	7.4	3	16.7
	17 + 18	2	25.0	-	-	3	3.6	-	-	1	5.6
	13 + 16	1	12.5	1	8.3	1	1.2	-	-	-	-
	7	1	12.5	-	-	1	1.2	-	-	-	-
<i>Glu-D1</i>	6 + 8	1	12.5	-	-	-	-	-	-	-	-
	2 + 12	2	25.0	10	83.3	37	44.6	12	44.4	7	38.8
	5 + 10	4	50.0	2	16.7	36	43.4	13	48.2	9	50.0
	5 + 12	-	-	-	-	6	7.2	1	3.7	1	5.6
	2 + 10	1	12.5	-	-	1	1.2	1	3.7	1	5.6
	4 + 12	-	-	-	-	2	2.4	-	-	-	-
	2 + 11	1	12.5	-	-	-	-	-	-	-	-
2. 2 + 12	-	-	-	-	1	1.2	-	-	-	-	

### 2.3 不同 HMW-GS 与小麦粉及馒头加工品质的关系

选用面粉白度、蛋白质含量、湿面筋含量、吸水率、稳定时间、粉质质量指数、馒头硬度和咀嚼性等 9 个重要品质指标研究 HMW-GS 与小麦粉及馒头加工品质的关系。其中, 硬度和咀嚼性是衡量馒头质构特性的 2 个重要指标, 两者值越小, 表明面制品越柔软、适口性越好。在检测到的 17 种亚基类型中, 选取 11 种主要亚基类型( 出现的材料数大于 4) 进行分析( 表 4) 发现, HMW-GS 对面粉白度、湿面筋含量、吸水率、稳定时间、粉质质量指数及馒头的咀嚼性等品质指标均具有显著影响。其中, 在 *Glu-A1* 位点, 携带 N 亚基小麦种质的面粉白度最高; 在 *Glu-B1* 位点, 携带 14 + 15 亚基小麦种质的面粉白度和湿面筋含量均最高, 但面团稳定时间较短, 携带 17 + 18 亚基小麦种质的面团稳定时间最长, 且馒头的硬度和咀嚼性均最好; 在 *Glu-D1* 位点, 携带

2 + 10 亚基的小麦种质表现出较好的馒头质构特性, 携带 5 + 10 亚基的小麦种质具有最长的面团稳定时间, 携带 5 + 12 亚基小麦种质的面粉白度最高。进一步比较发现, 携带相同 HMW-GS 材料的品质指标间也存在一定差异。

### 2.4 HMW-GS 组合与小麦粉及馒头加工品质的关系

选取 10 个代表性 HMW-GS 组合( 材料数大于 5) , 分析不同亚基组合与小麦粉及馒头加工品质的关系。由表 5 可知, 不同 HMW-GS 组合对小麦种质品质指标均存在显著影响。其中, 携带( 1/7 + 8/2 + 12) 、( 1/7 + 8/5 + 10) 、( N/7 + 9/5 + 10) 亚基组合的小麦种质具有较高的蛋白质和湿面筋含量, 且面团稳定时间长, 说明面团筋力较强; 携带( N/14 + 15/5 + 10) 、( N/7 + 9/5 + 10) 亚基组合小麦种质的面粉白度较高; 携带( 1/14 + 15/2 + 12) 、( 1/7 + 9/5 + 10) 、( N/7 + 8/2 + 12) 亚基组合小麦种质馒头的硬度和咀嚼性较

小 适合制作优质馒头; 携带 (N/14 + 15/5 + 10)、 的面团筋力明显较差。另外 携带相同 HMW-GS 组成 (N/7 + 9/2 + 12)、(1/7 + 9/2 + 12) 亚基组合小麦种质 材料的品质指标间也存在差异。

表 4 不同 HMW-GS 与小麦粉及馒头加工品质的关系

Tab. 4 Relationship between different HMW-GS and quality of flour and steamed bread

位点 Locus	亚基 Subunit	白度 Whiteness	蛋白质 含量/% Protein content	湿面筋 含量/% Wet gluten content	面团粉质参数 Farinographical properties of dough			馒头质构参数 Texture properties of steamed bread	
					吸水率/% Water absorption	稳定时间/min Stability time	粉质质量指数 Farinograph quality number	硬度/N Hardness	咀嚼性/mJ Chewiness
<i>Glu-A1</i>	1	72.9 ± 2.99bc	12.7 ± 0.84abc	30.5 ± 3.53abcd	61.8 ± 4.26a	9.3 ± 7.00ab	117.7 ± 73.55ab	33.5 ± 5.74a	147.6 ± 20.76ab
	N	74.8 ± 3.82ab	12.7 ± 0.82abcd	30.7 ± 3.45abc	59.4 ± 5.08bc	6.7 ± 5.80abc	81.4 ± 55.60abc	34.9 ± 6.57a	152.1 ± 24.52a
	2*	71.1 ± 3.78c	12.8 ± 0.52a	28.0 ± 2.53de	63.0 ± 6.27a	11.1 ± 9.79a	108.0 ± 54.18ab	30.2 ± 3.44a	130.1 ± 13.66b
<i>Glu-B1</i>	7 + 8	73.4 ± 3.23abc	12.8 ± 0.71a	30.2 ± 3.42abcde	60.9 ± 5.14abc	10.3 ± 7.80ab	121.2 ± 75.46a	33.8 ± 6.95a	148.4 ± 21.83ab
	7 + 9	73.4 ± 3.29abc	12.7 ± 0.92abc	30.8 ± 3.59ab	60.9 ± 4.46abc	7.7 ± 6.12abc	98.9 ± 64.02abc	33.8 ± 6.00a	148.9 ± 23.85ab
	14 + 15	75.3 ± 4.21a	12.5 ± 0.78bcd	31.3 ± 2.70ab	61.2 ± 5.71abc	3.9 ± 3.97bc	56.6 ± 46.02bc	34.5 ± 5.34a	144.7 ± 22.47ab
	17 + 18	74.4 ± 3.99ab	12.5 ± 0.89abcd	26.8 ± 3.03e	59.4 ± 5.51bc	10.6 ± 6.30a	110.9 ± 59.4ab	32.5 ± 0.80a	142.3 ± 4.70b
<i>Glu-D1</i>	2 + 10	72.5 ± 4.35bc	12.0 ± 0.58bd	32.0 ± 1.48a	61.6 ± 5.56ab	4.6 ± 1.48bc	61.6 ± 14.87bc	30.5 ± 5.03a	134.6 ± 26.45b
	2 + 12	73.4 ± 3.15abc	12.8 ± 0.78ab	31.7 ± 3.15a	61.6 ± 4.32ab	7.3 ± 6.68abc	91.6 ± 59.46abc	33.1 ± 6.39a	146.8 ± 22.10ab
	5 + 10	73.5 ± 3.72abc	12.7 ± 0.85abcd	29.1 ± 3.55bcde	60.4 ± 5.2abc	9.9 ± 7.24ab	122.6 ± 78.59a	34.3 ± 5.76a	149.2 ± 22.45ab
	5 + 12	75.6 ± 3.53a	12.5 ± 0.99bcd	31.1 ± 3.11ab	58.0 ± 4.24bc	6.0 ± 2.92bc	73.1 ± 30.83bc	34.2 ± 4.72a	148.0 ± 19.97ab

注: 同列数据后的不同字母表示差异达 5% 显著水平。表 5 同。

Note: Values with different letters in the same column mean significantly difference at 5% level. The same as Tab. 5.

表 5 不同 HMW-GS 组合与小麦粉及馒头加工品质的关系

Tab. 5 Relationship between different HMW-GS combination and quality of flour and steamed bread

亚基组合 Subunit combination	白度 Whiteness	蛋白质 含量/% Protein content	湿面筋 含量/% Wet gluten content	面团粉质参数 Farinographical parameters of dough			馒头质构参数 Texture parameters of steamed bread	
				吸水率/% Water absorption	稳定时间/min Stability time	粉质质量指数 Farinograph quality number	硬度/N Hardness	咀嚼性/mJ Chewiness
1/14 + 15/2 + 12	73.6 ± 3.64bcd	12.7 ± 0.94abc	33.0 ± 3.64a	63.5 ± 2.58a	7.3 ± 6.13abc	99.1 ± 67.21abc	31.7 ± 1.42bc	141.7 ± 10.18b
1/7 + 8/2 + 12	74.0 ± 3.5bcd	13.3 ± 0.64a	32.5 ± 3.23a	60.5 ± 4.71abc	12.7 ± 11.42a	126.4 ± 102.25a	33.9 ± 6.18abc	147.6 ± 21.34ab
1/7 + 8/5 + 10	72.0 ± 2.16d	12.7 ± 0.76abc	29.1 ± 2.97bc	62.6 ± 3.45a	11.4 ± 7.09a	153.1 ± 78.25a	33.9 ± 4.09abc	149.1 ± 17.33ab
1/7 + 9/2 + 12	71.9 ± 1.43d	12.5 ± 0.65bc	30.5 ± 2.76ab	63.2 ± 2.39a	6.5 ± 4.61abc	88.9 ± 31.66abc	34.0 ± 7.52abc	146.0 ± 28.23ab
1/7 + 9/5 + 10	73.0 ± 3.77cd	12.7 ± 1.09abc	30.0 ± 4.48ab	60.7 ± 5.24abc	9.4 ± 5.94ab	129.3 ± 88.53a	32.9 ± 5.94abc	146.2 ± 20ab
N/14 + 15/5 + 10	79.1 ± 0.97a	12.2 ± 0.66c	29.6 ± 1.71abc	55.4 ± 1.07d	2.5 ± 0.44c	34.4 ± 3.94c	42.5 ± 4.72a	156.3 ± 52.4ab
N/7 + 8/2 + 12	73.7 ± 3.14bcd	12.7 ± 0.22abc	31.4 ± 2.62a	60.7 ± 5.31ab	6.3 ± 3.15abc	87.1 ± 41.23abc	32.7 ± 8.89bc	142.4 ± 23.33b
N/7 + 8/5 + 10	74.8 ± 4.57bc	12.5 ± 0.63abc	26.6 ± 2.23c	57.3 ± 9.23cd	11.5 ± 7.48a	112.0 ± 24.55ab	40.7 ± 12.41ab	176.4 ± 41.3a
N/7 + 9/2 + 12	73.8 ± 3.39bcd	12.9 ± 0.95abc	32.3 ± 3.56a	61.1 ± 4.98ab	5.2 ± 4.02bc	74.5 ± 44.04bc	33.3 ± 4.82abc	151.3 ± 21.39ab
N/7 + 9/5 + 10	76.1 ± 2.43ab	13.0 ± 1.15ab	31.0 ± 4.51ab	58.0 ± 3.57abcd	10.7 ± 10.09a	117.2 ± 104.08ab	38.8 ± 5.43ab	165.4 ± 27.37ab

### 3 结论与讨论

在 148 个参试小麦种质中,共检测到 17 种 HMW-GS 类型,在 *Glu-A1*、*Glu-B1*、*Glu-D1* 位点分别检测到 3、7、7 种不同的亚基类型,亚基 1、7 + 9、2 + 12 在各自位点上出现的频率最高,分别达到了 56.8%、47.3%、45.9%,这与吴芳等<sup>[18]</sup>对来源于我国 17 个省(地区) 235 个小麦种质的分析结果基本一致;优质亚基 1、7 + 8、14 + 15、5 + 10 在参试小麦

种质中出现的频率均较高,分别为 56.8%、33.8%、10.8%、43.2%,说明多数参试小麦种质的品质较好。共检测到 35 种亚基组合类型,其中,(1/7 + 9/2 + 12)、(1/7 + 8/5 + 10)、(N/7 + 9/2 + 12)、(1/7 + 9/5 + 10) 组合出现频率较高,均大于 10%,还存在 19 种稀有亚基组合,出现频率均仅为 0.7%。进一步说明参试小麦种质的 HMW-GS 组合具有较高的多样性。

不同来源小麦种质的 HMW-GS 组成存在一定

差异。其中 国外引进小麦种质和黄淮冬麦区小麦种质的亚基类型较丰富,分别为 13,15 种,且出现优质亚基的频率较高,说明国外引进种质和黄淮冬麦区种质具有较好的品质。研究表明,优质亚基 14 + 15 对面包、面条和饺子等面制品的品质具有重要影响,但在国外材料中比较少见<sup>[14,19-20]</sup>。本研究中,该亚基在黄淮冬麦区、长江中下游冬麦区和西南冬麦区小麦种质中均被检测到,且出现频率也较高,但未在外国引进和北方冬麦区小麦种质中检测到。另外 6 + 8 和 2 + 11 亚基仅出现在外国引进小麦种质中,2 + 12 亚基只在黄淮冬麦区种质中被检测到。

HMW-GS 对小麦蛋白质含量的影响不大,但对面团筋力和馒头加工品质的影响显著,这与以往研究结果基本一致<sup>[21-22]</sup>。其中,亚基 1、2\*、7 + 8、17 + 18、5 + 10 对面团稳定时间均具有明显的正向效应,这些亚基是多数研究者公认的优质亚基<sup>[23-26]</sup>。迄今,有关 HMW-GS 对馒头加工品质影响的研究报道较少。本研究发现,2\*、17 + 18、2 + 10 亚基对馒头的硬度和咀嚼性具有明显的正向效应,制作的馒头适口性较好;携带 (1/14 + 15/2 + 12)、(1/7 + 9/5 + 10)、(N/7 + 8/2 + 12) 亚基组合种质馒头的加工品质较好。范玉顶等<sup>[13]</sup>研究表明,N 和 2 + 12 亚基对馒头各品质指标均具有正向效应,(1/7 + 8/2 + 12)、(N/7 + 8/2 + 12) 是制作优质馒头的适宜亚基组合,这与本研究结果不太一致,可能是由于所用试验材料及馒头品质评价方法不同导致。

#### 参考文献:

[1] Gianibelli M C, Larroque O R, MacRitchie F, Wrigley C W. Biochemical, genetic and molecular characterization of wheat glutenin and its component subunits [J]. *Cereal Chemistry* 2001, 78: 635 - 646. doi: 10.1094/CCHEM.2001.78.6.635.

[2] Shewry P R, Halford N G, Lafandra D. Genetics of wheat gluten proteins [J]. *Advances in Genetics*, 2003, 49: 111 - 184. doi: 10.1016/S0065-2660(03)01003-4.

[3] Mohan D, Gupta R K. Gluten characteristics imparting bread quality in wheats differing for high molecular weight glutenin subunits at *Glu-D1* locus [J]. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 2015, 21(3): 447 - 451. doi: 10.1007/s12298-015-0298-y.

[4] Payne P I, Holt L M, Law C N. Structural and genetical studies on the high-molecular-weight subunits of wheat glutenin [J]. *Theoretical & Applied Genetics*, 1981, 60(4): 229 - 236. doi: 10.1007/BF02342544.

[5] 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]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*,

1987, 40: 51 - 65. doi: 10.1002/jsfa.2740400108.

[6] 张学勇,董玉琛. 过去 50 年中中国小麦品种在 *Glu-A1*, *Glu-B1* 和 *Glu-D1* 位点上等位基因的变化 [J]. *遗传* 2001, 23(1): 53 - 54. doi: 10.16288/j.yczs.2001.01.030.

Zhang X Y, Dong Y C. Allelic variation of *Glu-A1*, *Glu-B1* and *Glu-D1* in Chinese commercial wheat varieties in the last 50 years [J]. *Hereditas* 2001, 23(1): 53 - 54.

[7] 马传喜,吴兆苏. 小麦胚乳蛋白质组分及高分子量麦谷蛋白亚基与烘烤品质的关系 [J]. *作物学报*, 1993, 19(6): 562 - 566. doi: 10.3321/j.issn:0496-3490.1993.06.014.

Ma C X, Wu Z S. Effect of variation of protein fractions and HMW glutenin subunits on SDS sedimentation volume in wheat varieties [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1993, 19(6): 562 - 566.

[8] Kolster P, Krechting C F, van Gelder W M J. Quantification of individual high molecular weight subunits of wheat glutenin using SDS-PAGE and scanning densitometry [J]. *Journal of Cereal Science*, 1992, 15: 49 - 61. doi: 10.1016/S0733-5210(09)80056-8.

[9] 杨丹,姚金保,杨学明,周森平,马鸿翔,王亚松. 北方麦区小麦品种高分子量谷蛋白亚基组成及其与品质性状的关系 [J]. *江苏农业学报*, 2015, 31(2): 241 - 246. doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2015.02.003.

Yang D, Yao J B, Yang X M, Zhou M P, Ma H X, Wang Y S. High molecular weight gluten subunit (HMW-GS) composition of wheat cultivars in northern region and its relationship with quality traits [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences* 2015, 31(2): 241 - 246.

[10] 李鸿恩,张玉良,吴秀琴,李宗智. 我国小麦种质资源主要品质特性鉴定结果及评价 [J]. *中国农业科学*, 1995, 28(5): 29 - 37.

Li H E, Zhang Y L, Wu X Q, Li Z Z. Determination and evaluation on the main quality characters of wheat germplasm resources in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1995, 28(5): 29 - 37.

[11] 马传喜,吴兆苏. 我国主要冬小麦推广品种的高分子量麦谷蛋白亚基变异分析 [J]. *安徽农业大学学报*, 1993, 20(4): 298 - 302. doi: 10.13610/j.cnki.1672-352x.1993.04.003.

Ma C X, Wu Z S. Variation of high molecular weight glutenin subunits in China-grown winter wheat cultivars [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 1993, 20(4): 298 - 302.

[12] 董永梅,杨欣明,柴守诚,李洪杰,李立会,李秀全. 中国小麦代表性地方品种高分子量谷蛋白亚基组成分析 [J]. *麦类作物学报*, 2007, 27(5): 820 - 824. doi: 10.7606/j.issn.1009-1041.2007.05.201.

Dong Y M, Yang X M, Chai S C, Li H J, Li L H, Li X Q. HMW-GS composition in the representative wheat landraces from China [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2007, 27(5): 820 - 824.

[13] 范玉顶,李斯深,孙海艳,李瑞军. HMW-GS 与北方手工馒头加工品质关系的研究 [J]. *作物学报*, 2005, 31(1): 97 - 101. doi: 10.3321/j.issn:0496-3490.2005.01.018.

Fan Y D, Li S S, Sun H Y, Li R J. Relationship between HMW-GS and making quality of northern style hand-made steamed bread [J]. *Acta Agronomica Sinica*,

- 2005 31(1): 97-101.
- [14] 张玲丽, 李秀全, 杨欣明, 李洪杰, 王辉, 李立会. 小麦优良种质资源高分子量麦谷蛋白亚基组成分析[J]. 中国农业科学, 2006, 39(12): 2406-2414. doi: 10.3321/j.issn:0578-1752.2006.12.002.  
Zhang L L, Li X Q, Yang X M, Li H J, Wang H, Li L H. High-molecular-weight glutenin subunit composition of Chinese wheat germplasm [J]. Scientia Agricultura Sinica 2006 39(12): 2406-2414.
- [15] Payne P I, Lawrence G J. Catalogue of alleles for the complex gene loci, *Glu-A1*, *Glu-B1* and *Glu-D1* which code for high molecular weight subunits of glutenin in hexaploid wheat [J]. Cereal Research Communications, 1983, 11: 29-35. doi: 10.2307/23781365.
- [16] 姜小苓, 张自阳, 冯素伟, 董娜, 陈向东, 茹振钢. 收获期对 BNS 杂交小麦面粉和馒头品质的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(12): 3495-3500. doi: 10.13287/j.1001-9332.2013.0585.  
Jiang X L, Zhang Z Y, Feng S W, Dong N, Chen X D, Ru Z G. Effects of harvest time on quality of flour and steamed bread in BNS hybrid wheat [J]. Chinese Journal of Applied Ecology 2013 24(12): 3495-3500.
- [17] 付蕾, 田纪春, 孙振. 抗性淀粉对北方馒头加工品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(7): 53-56.  
Fu L, Tian J C, Sun Z. Effect of resistant starch on processing quality of northern style Chinese steamed bread [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association 2010 25(7): 53-56.
- [18] 吴芳, 董惠, 韩兆雪, 潘志芬, 邓光兵, 余懋群. 中国小麦品种高分子量谷蛋白亚基和低分子量谷蛋白亚基组成分析[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(3): 82-86. doi: 10.7606/j.issn.1009-1041.2006.03.110.  
Wu F, Dong H, Han Z X, Pan Z F, Deng G B, Yu M Q. Genetic diversity of HMW and LMW glutenin subunits in Chinese hexaploid wheats [J]. Journal of Triticeae Crops 2006 26(3): 82-86.
- [19] 张学勇, 董玉琛, 游光侠, 王兰芬, 李培, 贾继增. 中国小麦大面积推广品种及骨干亲本的高分子量麦谷蛋白亚基组成分析[J]. 中国农业科学, 2001, 34: 355-362. doi: 10.3321/j.issn:0578-1752.2001.04.002  
Zhang X Y, Dong Y C, You G X, Wang L F, Li P, Jia J Z. Composition of High molecular weight glutenin subunit in Chinese wheat major cultivars and corner stone breeding parents [J]. Scientia Agricultura Sinica 2001, 34: 355-362.
- [20] 李硕碧, 单明珠, 李必运. 陕西省小麦品种资源高分子量谷蛋白亚基组成研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2002, 30(4): 1-5. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2002.04.001.  
Li S B, Shan M Z, Li B Y. Study on high molecular weight glutenin subunit composition of wheat genetic resources in Shaanxi province [J]. Journal of Northwest A & F University( Natural Science Edition) 2002 30(4): 1-5.
- [21] 雷振生, 刘丽, 王美芳, 阎俊, 杨攀, 张艳, 何中虎. HMW-GS 和 LMW-GS 组成对小麦加工品质的影响[J]. 作物学报, 2009, 35(2): 203-210. doi: 10.3724/SP.J.1006.2009.00203.  
Lei Z S, Liu L, Wang M F, Yan J, Yang P, Zhang Y, He Z H. Effect of HMW and LMW glutenin subunits on processing quality in common wheat [J]. Acta Agronomica Sinica 2009 35(2): 203-210.
- [22] Nagamine T, Kai Y, Takayama T, Yanagisawa T, Taya S. Allelic variation at the *Glu-1* and *Glu-3* loci in southern Japanese wheats, and its effects on gluten properties [J]. Journal of Cereal Science 2000 32: 129-135.
- [23] 谢科军, 朱保磊, 孙家柱, 刘冬成, 陈树林, 任妍, 程西永, 薛辉, 常向楠, 詹克慧. 黄淮南片小麦高分子量谷蛋白亚基组成及其与品质的关系[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(5): 595-602. doi: 10.7606/j.issn.1009-1041.2016.05.09.  
Xie K J, Zhu B L, Sun J Z, Liu D C, Chen S L, Ren Y, Chen X Y, Xue H, Chang X N, Zhan K H. Composition of high molecular weight glutenin subunits of wheat varieties (lines) in huanghuai southern region and their relationship with quality [J]. Journal of Triticeae Crops, 2016 36(5): 595-602.
- [24] 张钰, 杨坤, 曾卫军, 范玲, 祝长青. 新疆小麦高分子量麦谷蛋白亚基组成及主效亚基分析[J]. 核农学报, 2015, 29(2): 0229-0234. doi: 10.11869/j.issn.100-8551.2015.02.0229.  
Zhang Y, Yang K, Zeng W J, Fan L, Zhu C Q. Analysis of high molecular weight glutenin subunit composition and main subunits of Xinjiang wheat [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(2): 0229-0234.
- [25] 相吉山, 穆培源, 桑伟, 徐红军, 聂迎彬, 庄丽, 崔凤娟, 韩新年, 邹波. 小麦 HMW-GS 和 LMW-GS 对新疆拉面及蛋白质品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(5): 629-637. doi: 10.7606/j.issn.1009-1041.2015.05.08.  
Xiang J S, Mu P Y, Sang W, Xu H J, Nie Y B, Zhuang L, Cui F J, Han X N, Zou B. Effect of allelic variation in HMW/LMW-GS on processing quality of Xinjiang hand-stretched noodles and protein traits of wheat [J]. Journal of Triticeae Crops 2015 35(5): 629-637.
- [26] 张金乾, 张成, 刘自成, 施万喜, 孟建军, 杨琥. 陇东旱塬冬小麦资源的 HMW-GS 组成及品质比较[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(2): 146-151. doi: 10.7606/j.issn.11300-7601.2016.02.24.  
Zhang J Q, Zhang C, Liu Z C, Shi W X, Meng J J, Yang X. Compositions of HMW-GS and quality properties of winter wheat varieties in Longdong drought area [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016 34(2): 146-151.