

山西小麦育成品种品质性状及 HMW-GS 组成演变分析

赵佳佳, 乔玲, 郑兴卫, 李晓华, 曹勇, 马小飞, 杨斌, 姬虎太, 乔麟轶, 郑军, 张建诚

(山西省农业科学院小麦研究所, 临汾 041000)

摘要: 研究山西省小麦育成品种的品质及高分子量麦谷蛋白亚基的演变, 有助于优异种质资源的挖掘和创新, 可以为小麦品质改良和品种推广提供依据。对山西小麦育成品种的品质及 HMW-GS 组成进行演变分析, 结果表明, 山西小麦整体上以中筋为主, 除硬度指数呈逐年下降趋势外, 其他品质指标在 20 世纪 90 年代之前均逐渐提升, 而后呈现下降趋势; 山西省小麦品种 HMW-GS 的 *Glu-1* 位点等位变异较为丰富, *Glu-A1* 位点有 1、2* 和 Null 3 种亚基类型, *Glu-B1* 位点有 7 种亚基类型 (7+8、7+9、6+8、13+16、14+15、17+18、20), *Glu-D1* 位点有 6 种亚基类型 (2+12、2+10、5+12、5+10、4+12 和 2.2+12), 共检测到亚基组合类型 32 种, “Null, 7+8, 2+12” 出现频率最高, 且优质亚基的变化与品质演变趋势一致; *Glu-D1* 位点对蛋白质含量、硬度指数、容重、湿面筋含量、延伸性和吸水率的效应较大, 其中 4+12 和 2+10 对蛋白质含量和湿面筋含量具有正效应, *Glu-B1* 位点主要影响沉降值、形成时间、稳定时间、拉伸面积和最大抗延阻力等指标, 其中 7+8、7+9 亚基对拉伸面积具有正效应, *Glu-A1* 位点的 2* 对沉降值、最大抗延阻力、稳定时间、形成时间和拉伸面积具有正效应; “2*, 7+8, 4+12” 和 “1, 7+9, 2+10” 亚基组合对品质性状效应较高。

关键词: 山西省; 小麦育成品种; 品质性状; 高分子量麦谷蛋白亚基; 演变

Variation of Quality-related Traits and HMW-GS of Wheat Varieties in Shanxi Province

ZHAO Jia-jia, QIAO Ling, ZHENG Xing-wei, LI Xiao-hua, CAO Yong, MA Xiao-fei,

YANG Bin, JI Hu-tai, QIAO Lin-yi, ZHENG Jun, ZHANG Jian-cheng

(Institute of Wheat Research, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Linfen 041000)

Abstract: In order to provide a theoretical basis for further improvement of quality, and to excavate excellent germplasm resources, quality-related traits and high molecular weight glutenin subunit (HMW-GS) composition of wheat varieties in Shanxi Province were investigated. Results showed that the medium-strong gluten wheat varieties dominate in Shanxi, with the hardness index decreasing year by year, and other quality traits increase first then decrease. Allelic variation at *Glu-1* locus, encoding HMW-GS, was abundant in wheat varieties in Shanxi. Three types of subunits (1 and 2*, Null) at the *Glu-A1*, seven types of subunits (7+8, 7+9, 6+8, 13+16, 14+15, 17+18, 20) at *Glu-B1* locus, and six types of subunits (2+12, 2+10, 5+12, 5+10, 4+12 and 2.2+12) at *Glu-D1* locus were detected. Totally, thirty-two subunit combinations were detected, and of that, the combination “Null, 7+8, 2+12” was abundant. The employment of the quality-related subunits was associated with that of quality traits. It was found that *Glu-D1* contributed to the protein content, hardness, test weight, wet gluten content, extensibility and ab-

收稿日期: 2018-04-09 修回日期: 2018-05-31 网络出版日期: 2018-08-28

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20180827.1020.001.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0100600); 山西省重点研发项目 (201703D211007); 山西省农科院育种工程项目 (17yzgc010); 山西省国际合作项目

第一作者研究方向为小麦遗传育种, E-mail: jjzh1990@163.com。乔玲为共同第一作者

通信作者: 郑军, 研究方向为小麦遗传育种, E-mail: sxnkyzj@126.com

张建诚, 研究方向为小麦遗传育种与栽培, E-mail: zhangjc@126.com

sorption. The glutenin subunits 4 + 12 and 2 + 10 positively contributed to the protein content and wet gluten content. *Glu-B1* is associated with the Zeleny sedimentation, development time, stability time, stretch area and max resistance, and out of that, the 7 + 8 and 7 + 9 subunits have positive effects on stretch area. 2* of *Glu-A1* locus has positive effects on Zeleny sedimentation, development time, stability time, stretch area and max resistance. Notably, the combinations “2*, 7 + 8, 4 + 12” and “1, 7 + 9, 2 + 10” positively contributed to the quality of wheat varieties in Shanxi province, China.

Key words: Shanxi province; modern varieties; quality traits; HMW-GS; evolution

我国面食文化源远流长,享誉中外,小麦历来就是主要口粮作物。随着生活水平的提高,人们对面食制品的要求也不断提高,而不同面食对面粉加工品质要求不同。小麦加工品质的评价指标很多,如蛋白质含量、沉降值、面筋含量、稳定时间和拉伸面积等,而蛋白质组分是决定加工品质的主要因素。麦谷蛋白是小麦贮藏蛋白的主要组成部分,包括高分子量麦谷蛋白亚基和低分子量麦谷蛋白亚基,两者通过形成谷物大聚体,进而影响其面团的弹性和延展性^[1-2]。研究表明,高分子量麦谷蛋白亚基(HMW-GS)往往可以解释面粉面团属性和加工品质性质的 45% ~ 70%,对小麦面筋特性、烘烤等加工品质具有重要作用^[3-7]。HMW-GS 是由第一同源群染色体 1A、1B 和 1D 长臂上的基因位点控制,每个位点编码不同的亚基,这 3 个位点称为 *Glu-1* 位点^[8]。不同亚基对品质的影响存在差异,如 *Glu-A1* 位点上的 2* 与较好的面包烘烤品质相关,*Glu-B1* 位点上 14 + 15 亚基通常与面条、饺子和较好的面包加工品质相关^[9],*Glu-D1* 位点上 5 + 10 亚基常与面包烘烤品质相关^[10]。近年来,小麦品质育种和优质资源筛选已成为小麦遗传育种的研究重点,明确种质中优质高分子量麦谷蛋白亚基及其组合类型,对于种质有效利用具有重要意义。

目前常采用十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳(SDS-PAGE)检测 HMW-GS 的组成,相关技术已得到广泛应用,如张学勇等^[11]分析了我国小麦大面积推广品种及骨干亲本的 HMW-GS 组成;张瑞奇等^[3]和陈晓杰等^[12]就黄淮和西北两个不同生态区主要小麦品种的 HMW-GS 进行了分析;He 等^[13]阐明了中国 10 个麦区 205 份小麦品种的 HMW-GS 的组成;Nakamura^[14]鉴定了中国和日本普通小麦品种的 HMW-GS 组成。但这类研究往往只是对不同种质资源的 HMW-GS 的组成进行区分,关于 HMW-GS 与不同品质性状的关系报道较少。此外,我国不同生态地区品质育种的目标也不尽相同。因此,对不

同生态地区品种和种质材料的 HMW-GS 进行鉴定并研究其与品质的相关性,对于指导小麦品种推广和品质改良具有积极的作用。

山西省小麦种质资源丰富,以抗旱和优质著称,1949 年以来审定品种近 200 个;据不完全统计,我国以山西品种作为亲本选育出的品种数量超过 400 个,但山西小麦品种的遗传研究相对滞后,品质相关研究十分欠缺,已成为优异小麦资源利用和品质改良的主要限制因素。目前,关于山西省种质资源的 HMW-GS 也有报道,如李光蓉等^[15]、陈卫国等^[16]和姬虎太等^[17]对山西省小麦品种的 HMW-GS 进行了鉴定,但其中育成品种均未超过 40 个,且多为中间品系和地方品种,缺乏代表性,也未研究其与品质性状的关系。品种审定介绍虽提供了蛋白质含量、湿面筋含量和稳定时间 3 个指标,但在指导应用和品种推广方面存在明显不足。本文以山西省 20 世纪 70 年代以来育成的 145 个品种为材料,系统地分析了品质演变规律,及其与 HMW-GS 的相关性,可以为今后的品质改良及品种推广提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为山西省 1949 年以来审定的小麦品种 145 个(占审定总数 75.3%),相关品种来源于各育种单位和本课题组保存(表 1)。

1.2 田间试验

145 份山西省审定品种于 2015-2016 年度和 2016-2017 年度分别种植于临汾市本所试验基地,每份材料种植 2 行,行长 1.5 m,行距 22 cm,株距 10 cm,田间管理与大田生产一致。

1.3 HMW-GS 的鉴定

样品提取参照赵彬等^[18]的方法,采用十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳(SDS-PAGE)方法测定 HMW-GS 组成, HMW-GS 的命名参照 Payne 等^[19]的方法。对照品种为:中国春(Null, 7 + 8, 2 + 12)、师栾 02-1(1, 7 + 9, 5 + 10)以及烟农 19(1, 17 + 18, 5 + 10)。

表 1 145 份山西小麦育成品种及其审定年限

Table 1 145 wheat varieties bred in Shanxi and the approval year

编号 Code	品种 Variety	审定年份 Year	编号 Code	品种 Variety	审定年份 Year	编号 Code	品种 Variety	审定年份 Year
1	晋麦 1 号	1973	50	晋麦 60 号	1999	99	临汾 8050	2007
2	晋麦 5 号	1973	51	晋麦 61 号	1999	100	晋麦 83 号	2007
3	晋麦 8 号	1973	52	晋麦 62 号	1999	101	运早 20410	2007
4	晋春 3 号	1974	53	晋麦 63 号	1999	102	长麦 6686	2007
5	晋麦 11 号	1980	54	晋麦 65 号	2000	103	中麦 175	2007
6	晋麦 12 号	1980	55	晋麦 66 号	2000	104	太 5902	2008
7	晋麦 13 号	1980	56	晋麦 67 号	2000	105	晋麦 84 号	2008
8	晋麦 16 号	1982	57	晋麦 68 号	2000	106	晋麦 85 号	2008
9	晋麦 17 号	1982	58	晋麦 71 号	2001	107	长麦 6135	2008
10	晋麦 18 号	1983	59	晋麦 70 号	2001	108	晋麦 86 号	2008
11	晋麦 19 号	1983	60	晋农 207	2002	109	晋太 9923	2008
12	晋麦 20 号	1984	61	晋麦 72 号	2002	110	长 5222	2009
13	晋麦 21 号	1985	62	晋麦 73 号	2002	111	临 Y7287	2009
14	晋麦 22 号	1985	63	晋麦 74 号	2002	112	晋麦 87 号	2009
15	晋麦 23 号	1985	64	临汾 615	2002	113	运早 719	2009
16	晋麦 24 号	1987	65	长 6878	2002	114	晋麦 88 号	2009
17	晋麦 25 号	1988	66	晋太 170	2002	115	山农 129	2009
18	晋麦 27 号	1989	67	长治 5608	2002	116	太 13606	2009
19	晋麦 28 号	1989	68	中旱 110	2002	117	长麦 5973	2009
20	晋麦 29 号	1989	69	晋麦 75 号	2002	118	NC206	2009
21	晋麦 30 号	1990	70	邯 6172	2002	119	临远 8 号	2010
22	晋麦 31 号	1990	71	临优 145	2003	120	长麦 251	2011
23	晋麦 32 号	1990	72	临汾 138	2003	121	长 8744	2011
24	晋麦 33 号	1990	73	长 6154	2003	122	晋麦 90 号	2011
25	晋麦 35 号	1990	74	运早 21-30	2003	123	晋麦 91 号	2011
26	晋麦 36 号	1991	75	河东 TX-006	2003	124	运早 805	2011
27	晋麦 37 号	1991	76	晋太 65	2003	125	尧麦 16	2011
28	晋麦 38 号	1991	77	临丰 3 号	2004	126	舜麦 1718	2011
29	晋麦 39 号	1991	78	临远 3158	2004	127	晋麦 92 号	2013
30	晋麦 40 号	1991	79	临抗 11	2004	128	晋太 182	2013
31	晋麦 41 号	1992	80	泽优 2 号	2004	129	长 4853	2013
32	晋麦 42 号	1992	81	运黑 28 号	2004	130	晋麦 94 号	2014
33	晋麦 44 号	1992	82	临优 2018	2005	131	晋麦 95 号	2014
34	晋麦 43 号	1992	83	临优 2069	2005	132	晋太 102	2014
35	晋麦 45 号	1993	84	临选 2035	2005	133	晋麦 97 号	2014
36	晋麦 46 号	1994	85	运早 2335	2005	134	晋麦 98 号	2014
37	晋麦 47 号	1995	86	长 6359	2005	135	晋麦 99 号	2015
38	晋麦 48 号	1995	87	长 4640	2005	136	良星 67	2016
39	晋麦 49 号	1996	88	长麦 5079	2005	137	运早 137	2016
40	晋麦 50 号	1996	89	长 6452	2005	138	晋作 80	2016
41	晋麦 51 号	1996	90	临早 6 号	2006	139	晋太 1310	2016
42	晋麦 52 号	1996	91	晋麦 77 号	2006	140	长 7080	2016
43	晋麦 53 号	1996	92	运麦 218	2006	141	长 6990	2016
44	晋春 13 号	1996	93	晋麦 78 号	2006	142	长 6794	2016
45	晋麦 54 号	1997	94	晋麦 79 号	2006	143	石农 086	2017
46	晋麦 56 号	1998	95	晋麦 80 号	2006	144	翔麦 23	2017
47	晋麦 57 号	1998	96	晋麦 81 号	2006	145	品育 Y8161	2017
48	晋麦 58 号	1998	97	长 7016	2007			
49	晋麦 59 号	1998	98	晋麦 82 号	2007			

1.4 品质分析

采用 DA7200 二极管阵列近红外光谱仪(瑞典 Pertent)进行品质分析。近红外光谱仪可检测 700 ~ 2500 nm 近红外波长范围内的 C-H、N-H、O-H 和 S-H 化学键的吸收光谱,利用 Simplicity 软件可得到校正曲线,利用校正曲线测定样品的不同品质指标。测定的小麦品质指标包括蛋白质含量、湿面筋含量、沉降值、吸水率、容重、硬度指数、稳定时间、形成时间、最大抗延阻力、延展性和拉伸面积等,每份材料测量 5 次。

1.5 数据分析

用 SPSS 软件进行方差分析和差异显著性比较;采用方差分析中的广义线性模型(GLM)计算不同位点对品质指标的影响^[20]。

2 结果与分析

2.1 山西省育成品种的品质性状分析

将品质性状分成籽粒品质、面粉品质和面团品质等 3 类指标进行分析(表 2),结果表明籽粒品质中容重平均值为 774.54 g/L,变异系数最小(1.63%),大部分品种达到国家专用小麦强筋、中筋以及弱筋标准(≥ 770 g/L)。蛋白质含量和硬度的变异系数较大,蛋白质含量平均值为 13.30%,变幅范围为 10.41% ~ 17.23%,变异系数为 10.13%;硬度指数平均值为 57.13%,变异系数为 13.39%。面粉

品质中沉降值变异系数最大,为 22.61%;湿面筋含量变异系数较小,为 10.23%,平均值为 28.51%,变幅范围为 22.69% ~ 37.08%。面团品质中吸水率变异系数最小为 6.20%,其次为延伸性(10.72%);吸水率平均值为 56.75%,变幅为 49.00% ~ 68.53%,延伸性平均值为 154.15 mm,稳定时间平均值为 7.71 min,变幅为 3.67 ~ 11.80 min,稳定时间在 6 ~ 8 min 之间品种数目最多,占总数的 52%。

根据国标专用小麦品种品质(GB/T 17320-1998)的标准对山西小麦品种分类后发现,33%的品种容重低于国标要求(≥ 770 g/L),表明审定品种籽粒商品性有待继续提高;面团稳定时间普遍较高,68%达强筋小麦品质标准;蛋白质含量达强筋水平约有 25%;沉降值、湿面筋含量和吸水率较低(达强筋水平分别为 10.42%、10.42%和 14.58%,而达弱筋小麦品质要求的分别为 22.92%、34.38%和 40.63%)。蛋白质含量、湿面筋含量、容重、沉降值、吸水率和稳定时间 6 项指标全部达强筋品质要求的仅为 4.17%,另有 3.10%的品种因容重低于 770 g/L 未能达到强筋品质要求;6 项指标均达中筋水平的品种占 30.2%,没有 6 项指标均达弱筋品质要求的品种。整体上看,山西小麦育成品种以中筋为主,兼有强筋、弱筋小麦,中强筋品种的部分指标分别达到强筋、中筋标准,但个别指标却不在标准范围内,出现强筋不强、弱筋不弱的现象。

表 2 山西小麦育成品种品质性状变异分析

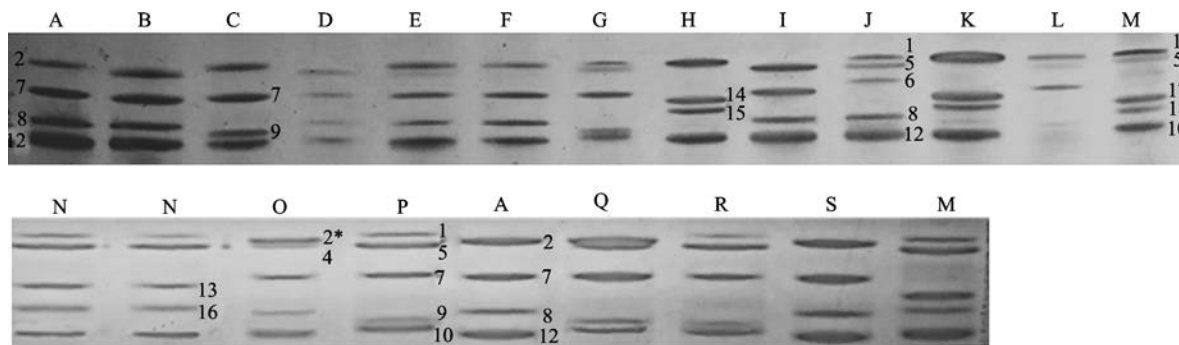
Table 2 Quality characters of wheat varieties in Shanxi

指标 Index	参数 Parameter	最大值 Max.	最小值 Min.	总平均数 Average	标准差 SD	变异系数 (%) CV
籽粒品质 Grain quality	蛋白质含量(%)	17.23	10.41	13.30	1.35	10.13
	硬度指数(%)	81.18	39.23	57.13	7.65	13.39
	容重(g/L)	802.00	740.33	774.54	12.65	1.63
面粉品质 Flour property	沉降值(mL)	62.67	19.77	37.53	8.48	22.61
	湿面筋含量(%)	37.08	22.69	28.51	2.92	10.23
面团品质 Dough quality	吸水率(%)	68.53	49.00	56.75	3.52	6.20
	延伸性(mm)	197.10	123.50	154.15	16.52	10.72
	稳定时间(min)	11.80	3.67	7.71	1.50	19.42
	形成时间(min)	6.90	2.03	4.76	0.87	18.19
	拉伸面积(cm ²)	191.00	37.67	113.05	26.61	23.54
	最大抗延阻力(E. U.)	1094.67	278.00	586.70	133.13	22.69

2.2 山西小麦育成品种 HMW-GS 变异及频率

对山西省育成小麦品种 HMW-GS 鉴定结果表明,Glu-A1、Glu-B1 和 Glu-D1 位点多态性较山东省

(13 种)和陕西省(15 种)丰富,共有 16 种等位变异。其中 Glu-A1 位点有 3 种等位变异,Glu-B1 位点为 7 种,Glu-D1 位点为 6 种(图 1、表 3)。



A: 中国春, B: 晋麦 1 号, C: 晋麦 11 号, D: 晋麦 57 号, E: 晋麦 13 号, F: 晋农 207, G: 师农 02-1, H: 晋太 65, I: 晋麦 5 号, J: 晋麦 82 号, K: 长 7016, L: 晋春 3 号, M: 烟农 19, N: 晋麦 8 号, O: 晋麦 38 号, P: 师农 02-1, Q: 晋麦 21 号, R: 晋麦 84 号, S: 晋麦 20 号
A: Chinese Spring, B: Jinmai 1, C: Jinmai 11, D: Jinmai 57, E: Jinmai 13, F: Jinnong 207, G: Shiluan 02-1, H: Jintai 65, I: Jinmai 5, J: Jinmai 82, K: Chang 7016, L: Jinchun 3, M: Yannong 19, N: Jinmai 8, O: Jinmai 38, P: Shiluan 02-1, Q: Jinmai 21, R: Jinmai 84, S: Jinmai 20

图 1 部分品种高分子量麦谷蛋白亚基的 SDS-PAGE 分析
Fig. 1 SDS-PAGE of HMW-GS in selected wheat varieties

表 3 山西小麦育成品种 HMW-GS 在不同位点的变异类型及频率

Table 3 Allele frequencies of HMW-GS in wheat varieties at the *Glu-1* loci

基因位点 Locus	等位基因 Allele	亚基 Subunit	品种数 Number of materials	频率 (%) Frequency
<i>Glu-A1</i>	a	1	64	44.14
	b	2*	5	3.45
	c	Null	76	52.41
<i>Glu-B1</i>	b	7+8	68	46.90
	c	7+9	56	38.62
	d	6+8	4	2.76
	e	20	4	2.76
	f	13+16	3	2.07
	h	14+15	8	5.52
	i	17+18	2	1.38
<i>Glu-D1</i>	a	2+12	73	50.35
	c	4+12	5	3.45
	d	5+10	17	11.72
	e	2+10	6	4.14
	f	2.2+12	1	0.69
		5+12	43	29.66

从各个亚基出现频率看, *Glu-A1* 位点 Null 亚基频率最高, 为 52.41%, 1 亚基为 44.14%, 2* 亚基最少, 仅为 3.45%。 *Glu-B1* 位点上共 7 个等位变异, 分别编码 7+8、7+9、6+8、20、13+16、14+15 和 17+18 亚基, 其中 7+8 和 7+9 两种亚基出现频率

较高, 分别为 46.90% 和 38.62%, 优质亚基 17+18 出现频率较低, 仅为 1.38%, 同时还存在较为少见的 13+16 和 20 等亚基类型。在 *Glu-D1* 位点上 2+12 亚基频率最高, 占 50.35%, 其次为 5+12 亚基, 而优质亚基 5+10 仅为 11.72%, 2+10 和 4+12 各为 4.14% 和 3.45%; 还发现一个稀有亚基 2.2+12。

2.3 山西小麦育成品种 HMW-GS 组合类型及频率

HMW-GS 组合类型及频率分析表明, 16 种 HMW-GS 共有 32 种组合类型, “Null, 7+8, 2+12” 组合出现频率最高, 为 17.93%; 其次为 “Null, 7+9, 2+12”、“1, 7+8, 5+12” 和 “1, 7+9, 2+12” 组合类型, 分别为 11.72%、11.03% 和 8.28%; 其他亚基组合类型出现频率较低, 其中 “Null, 7+8, 2.2+12”、“Null, 7+8, 4+12”、“Null, 7+9, 4+12”、“Null, 14+15, 5+12”、“2*, 7+8, 2+12”、“1, 13+16, 5+12”、“1, 20, 4+12”、“1, 7+8, 5+10”、“1, 14+15, 2+12” 和 “1, 6+8, 5+12” 等亚基组合类型均只有 1 份材料。尽管优质亚基 2*、13+16、14+15、17+18 和 5+10 占有一定比例, 但含两个或两个以上优质亚基的组合较少 (表 4)。

2.4 HMW-GS 不同位点对品质指标的影响

通过多因素方差分析 *Glu-A1*、*Glu-B1* 和 *Glu-D1* 位点对品质效应后发现 (表 5), 3 个位点对蛋白质含量、容重、湿面筋含量、沉降值和最大抗延阻力的影响均未达到显著水平, *Glu-A1* 位点对拉伸面积、稳定时间和形成时间等面团品质指标的影响达显著水平, 贡献率分别为 25.79%、33.05% 和 23.61%;

表 4 山西小麦育成品种 HMW-GS 组合类型及频率

Table 4 The genotype and frequency of HMW-GS compositions of wheat varieties bred in Shanxi

亚基组合类型 Subunit composition			品种数量 Number of varieties	频率(%) Frequency	品种编号 Code
<i>Glu-A1</i>	<i>Glu-B1</i>	<i>Glu-D1</i>			
Null	7 + 8	5 + 12	6	4.14	1, 2, 19, 59, 143, 124
Null	7 + 8	2 + 12	26	17.93	5, 12, 24, 25, 16, 20, 33, 42, 49, 53, 56, 62, 60, 65, 71, 78, 94, 106, 107, 114, 123, 134, 137, 104, 103, 108
Null	7 + 8	5 + 10	5	3.45	47, 79, 116, 127, 136
Null	7 + 8	2, 2 + 12	1	0.69	135
Null	7 + 8	4 + 12	1	0.69	40
Null	7 + 9	2 + 12	17	11.72	31, 32, 27, 37, 43, 10, 54, 55, 77, 91, 93, 102, 133, 138, 81, 132, 70
Null	7 + 9	4 + 12	1	0.69	45
Null	7 + 9	5 + 10	5	3.45	9, 66, 95, 113, 141
Null	7 + 9	2 + 10	2	1.38	67, 85
Null	7 + 9	5 + 12	7	4.83	84, 92, 96, 112, 119, 122, 90
Null	6 + 8	5 + 12	3	2.07	142, 86, 140
Null	14 + 15	2 + 12	2	1.38	76, 100
Null	14 + 15	5 + 12	1	0.69	144
2 *	7 + 9	5 + 10	2	1.38	13, 14
2 *	7 + 8	2 + 12	1	0.69	18
2 *	7 + 8	4 + 12	2	1.38	28, 29
1	13 + 16	5 + 12	1	0.69	3
1	13 + 16	2 + 12	2	1.38	34, 50
1	20	2 + 12	3	2.07	21, 22, 23
1	20	4 + 12	1	0.69	36
1	7 + 8	2 + 12	9	6.21	6, 11, 26, 51, 35, 39, 63, 64, 68
1	7 + 8	5 + 12	16	11.03	7, 17, 57, 38, 41, 46, 73, 74, 89, 87, 99, 111, 118, 109, 44, 69
1	7 + 8	5 + 10	1	0.69	30
1	7 + 9	2 + 12	12	8.28	8, 61, 15, 80, 82, 115, 117, 120, 121, 145, 128, 110
1	7 + 9	2 + 10	2	1.38	48, 52
1	7 + 9	5 + 10	2	1.38	75, 105
1	7 + 9	5 + 12	6	4.14	4, 101, 130, 125, 129, 88
1	14 + 15	2 + 12	1	0.69	97
1	14 + 15	2 + 10	2	1.38	58, 139
1	14 + 15	5 + 12	2	1.38	131, 72
1	17 + 18	5 + 10	2	1.38	83, 126
1	6 + 8	5 + 12	1	0.69	98

表 5 HMW 不同位点对小麦品质指标方差显著性检测

Table 5 GLM analysis of HMW-GS loci effects on quality traits

指标 Index	参数 Parameter	<i>Glu-A1</i>		<i>Glu-B1</i>		<i>Glu-D1</i>	
		平方和 SS	效应(%) Effection	平方和 SS	效应(%) Effection	平方和 SS	效应(%) Effection
籽粒品质 Grain quality	蛋白质含量(%)	1.10	6.70	1.68	10.25	10.78	65.68
	容重(g/L)	1.42	10.24	2.35	16.88	13.89	76.61
	硬度指数(%)	2.188	10.13	10.32	47.78	11.75*	54.41
面粉品质 Flour property	湿面筋含量(%)	0.91	6.08	1.34	8.93	10.34	68.92
	沉降值(mL)	4.44	20.97	10.42	49.23	5.77	27.26
面团品质 Dough quality	吸水率(%)	0.406	2.08	8.447	43.27	11.72*	60.04
	延伸性(mm)	0.613	3.06	5.59	27.93	12.12*	60.52
	最大抗延阻力(E.U)	5.19	26.98	11.84	61.58	1.91	9.96
	拉伸面积(cm ²)	7.35*	25.79	18.87**	66.22	1.88	6.59
	稳定时间(min)	7.56*	33.05	14.11*	61.68	3.64	15.93
	形成时间(min)	6.56*	23.61	10.91	39.28	8.49	30.57

* 和 ** 分别表示 5% 和 1% 显著水平,效应表示平方和占总平方和的百分比,即某一位点变异解释了各个品质性状总变异的比例

* and ** indicate significance at 5% and 1% probability levels, respectively. Effection is the partial sum of squares as percentage of the total sum of squares, which can be interpreted as an indication of the relevance of various traits

Glu-B1 位点对稳定时间和拉伸面积的影响达显著水平,贡献率分别为 61.68% 和 66.22%; *Glu-D1* 位点对硬度指数、延伸性和吸水率的影响均达显著水平,贡献率分别为 54.41%、60.52% 和 60.04%。可见各位点对不同指标影响不同,对籽粒品质以及面粉品质中湿面筋含量和面团品质中延伸性和吸水率的效应大小为: *Glu-D1* > *Glu-B1* > *Glu-A1*, 对面粉品质指标中沉降值以及面团品质中形成时间的效应大小为: *Glu-B1* > *Glu-D1* > *Glu-A1*, 而对面团品质其他指标的效应大小则为: *Glu-B1* > *Glu-A1* > *Glu-D1*。

2.5 不同亚基对品质的影响

在明确 HMW-GS 不同位点对品质影响的基础上,分析了 11 种蛋白亚基 ($n \geq 5$) 与品质指标之间的关系。 *Glu-A1* 位点各亚基的籽粒品质指标差异不显著, 2* 亚基的沉降值显著高于 1 和 Null 亚基, 面团品质指标中除吸水率和延伸性无显著差异外, 其他指标 2* 亚基均显著高于 1 和 Null 亚基。 *Glu-B1* 位点含有 7+8、7+9 亚基的品种拉伸面积显著高于含有 14+15 亚基的品种。 *Glu-D1* 位点 4+12 与 5+12 亚基在硬度指数、容重、形成时间和拉伸面积间差异显著, 延伸性 4+12、2+10 和 5+10 之间存在显著差异, 此外, 4+12 和 2+10 亚基的蛋白质含量和湿面筋含量显著高于其他亚基 (表 6)。

进一步分析亚基组合类型对品质指标的效应发现, 不同组合类型与面粉品质差异不显著; 籽粒品质方面, 蛋白质含量和容重各组合间无显著差异, 硬度

指数“1,7+9,2+10”亚基组合显著高于“Null,7+8,5+10”和“1,14+15,5+12”组合; 面团品质方面, 组合间最大抗延阻力和稳定时间差异不显著, “1,7+9,2+10”吸水率显著高于“Null,7+8,5+10”、“Null,7+9,5+12”和“1,14+15,5+12”, “1,7+9,2+10”和“2*,7+8,4+12”两个亚基组合延伸性显著高于“1,14+15,5+12”; 此外, “2*,7+8,4+12”形成时间显著高于“Null,7+8,5+10”、“Null,7+9,5+10”和“1,14+15,5+12”, 该组合拉伸面积显著高于“Null,14+15,2+12”和“1,14+15,5+12”(表 7)。总体上来看, 山西小麦育成品种以“2*,7+8,4+12”和“1,7+9,2+10”亚基组合对品质性状的效应较高。

2.6 山西小麦育成品种品质性状和 HMW-GS 演变分析

山西省育成品种的品质性状演变分析表明, 籽粒品质中蛋白质含量和容重总体上呈现先升后降的趋势, 硬度指数则呈现逐年下降的趋势; 面粉品质中湿面筋含量和沉降值也呈现先增后降趋势, 1990-1995 年间达到最高值, 之后逐年下降; 面团品质指标均在 2000 年前逐渐增加, 20 世纪 90 年代达到最高值后逐年下降 (图 2)。总体上山西小麦品种的品质性状呈现先增后降现象, 出现这种变化的原因与小麦育种的历史有关, 20 世纪 80 年代加强了对品质育种的重视, 使得 90 年代育成品种的品质状况较好, 之后由于国家粮食安全的需要, 高产育种成为主要目标, 忽略了品质育种。

表 6 不同亚基类型对品质性状的效应

Table 6 Effects of individual HMW-GS on quality traits

变异 位点 Locus	亚基 Subunit	籽粒品质指标 Grain quality index			面粉品质指标 Flour property index			面团品质指标 Dough quality index				
		蛋白质含量 (%)	硬度指数 (%)	容重 (g/L)	湿面筋含量 (%)	沉降值 (mL)	吸水率 (%)	延伸性 (mm)	最大抗延阻力 (E. U.)	稳定时间 (min)	形成时间 (min)	拉伸面积 (cm ²)
<i>Glu - A1</i>	1	13.54 ± 0.22a	56.99 ± 1.25a	776.21 ± 2.05a	29.06 ± 0.47a	38.18 ± 1.36b	56.88 ± 0.59a	154.86 ± 2.69a	579.99 ± 21.24b	7.80 ± 0.24b	4.88 ± 0.14b	111.45 ± 4.12b
	2 *	13.82 ± 0.59a	60.05 ± 3.44a	778.80 ± 5.65a	29.43 ± 1.29a	44.47 ± 3.74a	57.75 ± 1.58a	163.21 ± 7.39a	717.07 ± 58.55a	9.11 ± 0.66a	5.65 ± 0.38a	142.47 ± 11.61a
	Null	13.07 ± 0.18a	56.96 ± 1.06a	772.94 ± 1.74a	28.03 ± 0.39a	36.41 ± 1.15b	56.56 ± 0.59a	152.78 ± 2.27a	579.21 ± 17.98b	7.51 ± 0.20b	4.59 ± 0.12b	111.43 ± 3.57b
	7 + 8	13.34 ± 0.20a	55.78 ± 1.14a	773.8 ± 1.95a	28.51 ± 0.44a	37.7 ± 1.24a	56.2 ± 0.51a	154.31 ± 2.45a	590.97 ± 19.12a	7.72 ± 0.21a	4.79 ± 0.12a	114.64 ± 3.63a
<i>Glu - B1</i>	7 + 9	13.17 ± 0.23a	58.31 ± 1.39a	774.85 ± 2.21a	28.30 ± 0.50a	37.63 ± 1.40a	56.32 ± 0.58a	154.18 ± 2.77a	598.38 ± 21.62a	7.78 ± 0.24a	4.73 ± 0.14a	114.32 ± 4.10a
	14 + 15	13.26 ± 0.61a	54.94 ± 3.46a	772.53 ± 5.92a	28.81 ± 1.33a	32.4 ± 3.75a	56.10 ± 1.57a	144.31 ± 7.44a	491.33 ± 58.00a	7.10 ± 0.65a	4.57 ± 0.37a	89.4 ± 11.01b
	2 + 12	13.40 ± 0.17b	57.46 ± 1.00ab	775.21 ± 1.67ab	28.7 ± 0.38b	38.29 ± 1.13a	58.85 ± 0.46a	155.41 ± 2.12bc	592.81 ± 18.08a	7.79 ± 0.20a	4.82 ± 0.11bc	115.22 ± 3.59ab
<i>Glu - D1</i>	4 + 12	14.60 ± 0.58a	63.34 ± 3.32a	783.8 ± 5.55a	31.28 ± 1.25a	42.9 ± 3.75a	59.24 ± 1.53a	174.13 ± 7.04a	648.93 ± 59.98a	8.23 ± 0.68a	5.67 ± 0.37ab	130.67 ± 11.90a
	5 + 10	12.66 ± 0.37b	56.15 ± 2.15ab	774.11 ± 3.58ab	27.11 ± 0.81b	35.84 ± 2.42a	55.96 ± 0.99a	147.12 ± 4.54c	595.56 ± 38.71a	7.56 ± 0.44a	4.49 ± 0.24bc	111.64 ± 7.68ab
	2 + 10	14.64 ± 0.74a	61.4 ± 4.29ab	780.44 ± 7.17ab	31.36 ± 1.62a	42.3 ± 4.83a	59.70 ± 1.97a	164.59 ± 9.08b	606.67 ± 77.43a	8.24 ± 0.87a	5.42 ± 0.48ab	112.33 ± 15.36ab
	5 + 12	12.88 ± 0.29b	55.72 ± 1.66b	769.1 ± 2.78b	27.73 ± 0.63b	34.91 ± 1.87a	56.22 ± 0.78a	148.49 ± 3.52bc	552.83 ± 29.99a	7.45 ± 0.34a	4.46 ± 0.18c	103.78 ± 5.95b

数值后无相同字母表示差异达到 5% 显著水平,下同

Values with different letters mean significantly difference at 5% level, the same as below

表 7 亚基组合对品质指标的影响效应

Table 7 Effects of glutenin subunit on quality index

亚基组合 Subunit combination	籽粒品质指标 Grain quality index			面粉品质指标 Flour property index			面团品质指标 Dough quality index				
	蛋白质含量 (%)	容重 (g/L)	硬度指数 (%)	湿面筋含量 (%)	沉降值 (mL)	吸水率 (%)	延伸性 (mm)	最大抗延阻力 (E. U.)	稳定时间 (min)	形成时间 (min)	拉伸面积 (cm ²)
	Protein content	Test weight	Hardness	Wet gluten content	Zel	Absorption	Tractility	Max Resistance	Stability time	Development time	Stretch area
Null, 7 + 8, 2 + 12	13.05 ± 0.30a	773.42 ± 2.88a	54.81 ± 1.63ab	28.05 ± 0.66a	35.29 ± 1.87a	55.45 ± 7.34ab	149.84 ± 3.53ab	550.97 ± 31.17a	7.40 ± 0.34a	4.61 ± 0.19ab	107.50 ± 6.05ab
Null, 7 + 8, 5 + 12	13.25 ± 0.67a	765.08 ± 6.43a	63.66 ± 3.56ab	28.10 ± 1.47a	41.41 ± 4.18a	59.29 ± 1.65ab	156.48 ± 7.89ab	648.67 ± 69.68a	8.36 ± 0.75a	4.81 ± 0.42ab	120.92 ± 13.53ab
Null, 7 + 8, 5 + 10	12.19 ± 0.66a	769.75 ± 5.43a	52.18 ± 3.65b	25.97 ± 0.68a	31.35 ± 4.20a	53.78 ± 1.65b	142.49 ± 4.78abc	544.58 ± 69.69a	6.62 ± 0.68a	3.90 ± 0.23b	100.25 ± 12.67ab
Null, 7 + 9, 2 + 12	13.57 ± 0.37a	776.41 ± 3.57a	62.29 ± 2.03ab	28.81 ± 0.82a	41.26 ± 2.32a	59.42 ± 0.91ab	164.28 ± 4.38ab	642.85 ± 38.66a	8.26 ± 0.42a	4.92 ± 0.24ab	125.51 ± 7.51ab
Null, 7 + 9, 5 + 12	12.75 ± 0.55a	764.61 ± 5.25a	52.34 ± 2.98ab	27.91 ± 1.20a	32.24 ± 3.42a	54.49 ± 1.34b	145.83 ± 6.44ab	534.61 ± 56.90a	6.96 ± 0.61a	4.35 ± 0.35ab	102.33 ± 11.05ab
Null, 7 + 9, 5 + 10	11.900.78 ± a	766.67 ± 7.43a	57.54 ± 4.22ab	25.47 ± 1.70a	33.93 ± 4.83a	56.20 ± 1.90ab	137.53 ± 9.11abc	584.78 ± 80.48a	7.03 ± 0.87a	3.97 ± 0.49b	102.00 ± 15.63ab
Null, 14 + 15, 2 + 12	13.46 ± 0.95a	781.67 ± 9.10a	56.35 ± 5.17ab	29.21 ± 2.08a	32.22 ± 5.92a	57.25 ± 2.33ab	148.78 ± 11.16ab	474.83 ± 98.56a	6.78 ± 1.06a	4.48 ± 0.60ab	83.17 ± 19.14b
1, 7 + 8, 2 + 12	13.47 ± 0.48a	773.83 ± 4.55a	55.47 ± 2.58ab	28.57 ± 1.04a	39.31 ± 2.96a	56.68 ± 1.16ab	154.43 ± 5.58ab	611.38 ± 49.28a	8.07 ± 0.53a	4.89 ± 0.30ab	116.46 ± 9.57ab
1, 7 + 8, 5 + 12	13.68 ± 0.60a	777.00 ± 5.75a	56.20 ± 3.27ab	29.01 ± 1.32a	40.07 ± 3.74a	57.27 ± 1.47ab	158.83 ± 7.06ab	596.20 ± 62.34a	8.42 ± 0.67a	4.92 ± 0.38ab	114.27 ± 12.10ab
1, 7 + 9, 2 + 12	13.48 ± 0.51a	778.10 ± 4.86a	55.80 ± 2.76ab	29.33 ± 1.11a	37.10 ± 3.16a	56.17 ± 1.24ab	151.80 ± 5.96ab	585.57 ± 52.68a	7.65 ± 0.57a	4.97 ± 0.32ab	112.24 ± 10.23ab
1, 7 + 9, 2 + 10	14.15 ± 0.95a	786.17 ± 9.10a	65.65 ± 5.17a	29.88 ± 2.08a	42.77 ± 5.67a	60.68 ± 2.33a	168.37 ± 9.76a	623.33 ± 98.56a	8.18 ± 1.12a	5.18 ± 0.59ab	114.50 ± 19.14ab
1, 20, 2 + 12	13.83 ± 0.6a	777.53 ± 5.75a	60.58 ± 3.27ab	29.69 ± 1.32a	41.02 ± 3.74a	58.42 ± 1.9ab	160.47 ± 3.27ab	585.07 ± 62.34a	7.74 ± 0.65a	5.02 ± 0.37ab	119.80 ± 12.09ab
1, 14 + 15, 5 + 12	11.87 ± 0.95a	765.17 ± 9.21a	51.63 ± 4.36b	25.66 ± 2.43a	28.10 ± 5.92a	54.13 ± 2.33b	133.48 ± 11.16c	466.83 ± 89.14a	6.78 ± 0.98a	3.98 ± 0.61b	86.33 ± 18.57b
2 [*] , 7 + 8, 4 + 12	13.82 ± 0.90a	784.00 ± 6.24a	61.59 ± 5.01ab	29.91 ± 2.09a	41.33 ± 4.89a	58.77 ± 2.33ab	168.63 ± 11.21a	678.00 ± 98.56a	8.00 ± 1.06a	5.65 ± 0.60a	136.50 ± 19.13a

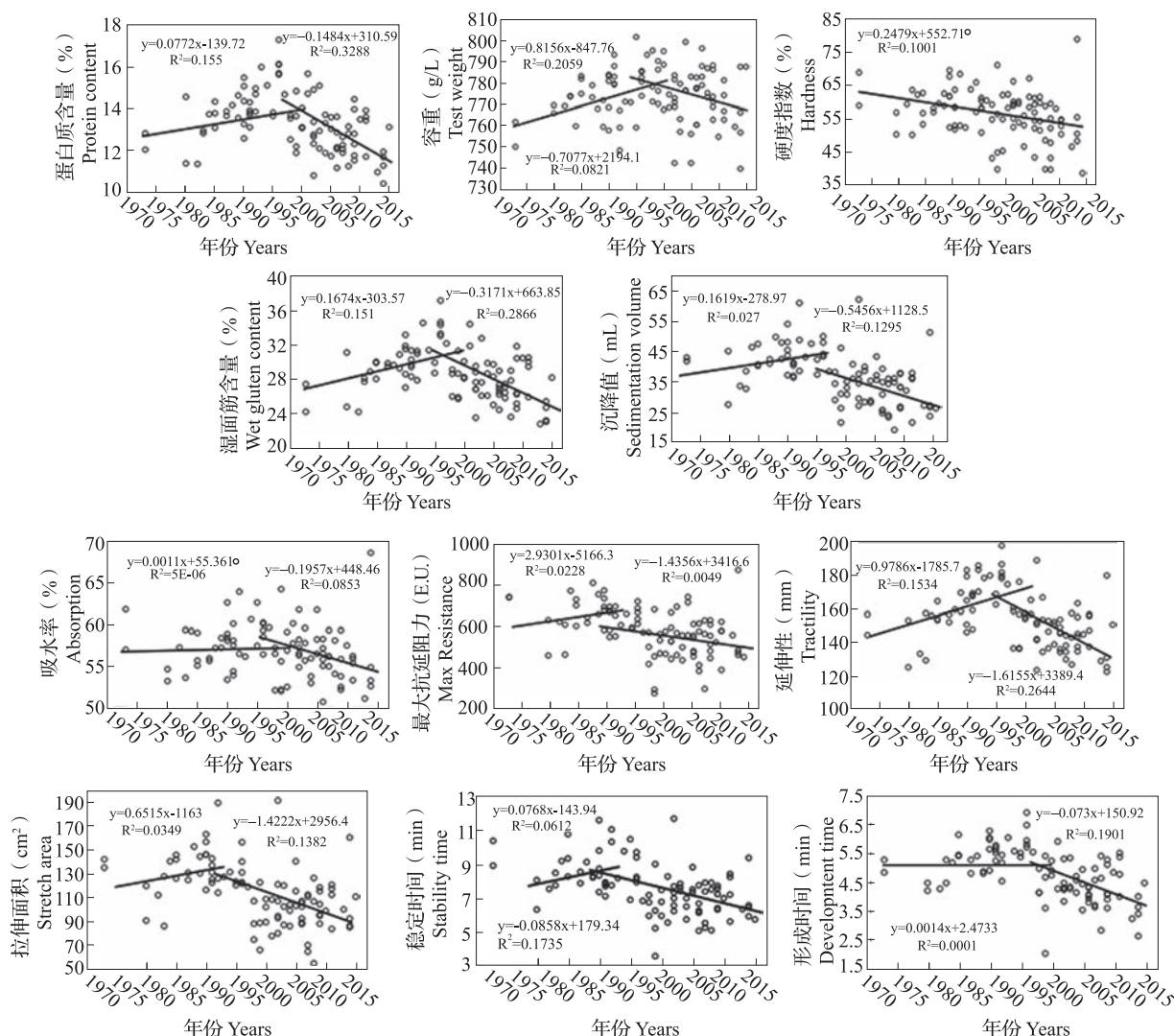


图2 山西小麦育成品种品质性状的演变

Fig.2 Evolution of quality-related traits of wheat cultivars in Shanxi province

Glu-A1 位点编码的 1 和 2* 亚基, *Glu-B1* 位点编码的 17 + 18、13 + 16、14 + 15 亚基以及 *Glu-D1* 位点编码的 5 + 10 亚基被认为是优质亚基^[21]。山西省小麦优质亚基与品质性状演变趋势相同(图 3), *Glu-A1* 位点优质亚基 2000 年前逐渐增加, 20 世纪 90 年代达到最高值, 随后逐渐降低; *Glu-B1* 位点 20 世纪 70 年代到 80 年代呈下降趋势, 80 年代至 90 年代优质亚基逐渐增加, 随后逐渐减低, 70 年代审定品种只有 4 份, 导致优质亚基比率偏差较大; *Glu-D1* 位点上的 5 + 10 亚基可能由于引进较晚, 育种中一直未被重视, 频率一直较低。

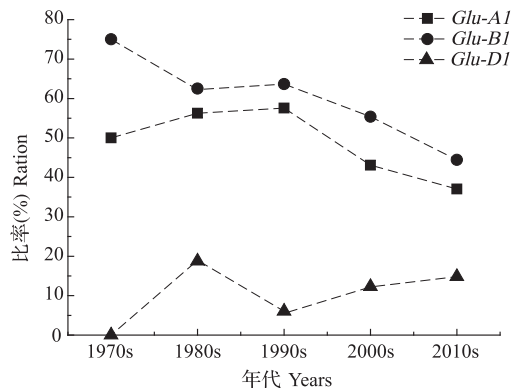


图3 山西小麦育成品种 HMW 优质亚基演变

Fig.3 Excellent HMW-GS used in wheat cultivars that were released in Shanxi province

3 讨论

山西省小麦种质资源以抗旱和优质著称。临汾 5064 是我国 3 大优质骨干亲本之一;晋麦 47 是黄淮麦区旱薄地、山西和陕西旱地区试对照品种;长 6878 为北部冬麦区旱地组区试对照品种;此外还有太谷核不育、平遥小白麦和黑小麦 76 号、河东乌麦 526 等很多著名的种质资源。已有一些资源得到挖掘和利用,还有很多优异资源尚待鉴定和开发。长久以来,小麦品种缺乏系统、深入的品质研究,已成为限制山西省小麦遗传改良和优异资源利用瓶颈所在。本文以山西省 1949 年以来育成品种为材料,系统地分析了品种 HMW-GS 组成与不同品质指标的演变规律,可以为今后的品质改良及品种推广提供依据。山西小麦生产属于黄淮冬麦中强筋麦区,万富世等^[22]研究表明,20 世纪 80 年代山西省品种容重平均值为 796 g/L,粗蛋白含量 15.70%,湿面筋含量 32.30%,沉降值 34.4 mL,吸水率 64.20%,形成时间 4.18 min,稳定时间 8.68 min;除吸水率略低于全国水平,容重与全国水平持平外,其他指标均高于全国平均水平。但近年来审定品种的品质状况并不乐观,以蛋白质含量、湿面筋含量、容重、沉降值、吸水率、稳定时间等 6 项为标准,仅 4.17% 达强筋标准;此外山西小麦品种蛋白质含量平均为 13.3%,也低于全国平均的 15.1%^[23]。20 世纪 70 年代以来山西省审定的小麦品种除硬度指数呈下降趋势外,其他品质指标均呈现先增后降趋势。出现这种变化的原因与中国小麦育种的历史有关,20 世纪 80 年代加强了对品质育种的重视,使得 90 年代后育成品种的品质状况较好,之后由于国家粮食安全的需要,高产育种成为主要目标,忽略了品质育种。但山西小麦品种的品质指标总体变异幅度较大,如拉伸面积变异幅度为 37.67 ~ 191.00 cm²,最大抗延阻力变异幅度为 278.00 ~ 1094.67 E. U.。此外,还储备了一些优质资源,如晋麦 52 号蛋白质含量达到 17.23%、湿面筋含量达到 37.08%、形成时间 6.90 min,中旱 110 沉降值为 62.67 mL、稳定时间 11.8 min,晋麦 97 号吸水率达 68.53%。这可作为当前较高的育种水平条件下产量和品质协同提高的材料基础,关键问题是尽快把这些优异性状(基因)聚合,从而实现山西省小麦品质遗传改良的新突破。

小麦 HMW-GS 受遗传控制,与加工品质密切相关^[24],山西小麦 HMW-GS 等位变异类型较山东省

和陕西省丰富,*Glu-A1* 位点 1 优质亚基出现频率(44.14%)与国内育成品种(30.60% ~ 42.60%)、国外育成品种(45.50%)相当,*Glu-B1* 位点 7 + 8 亚基(46.90%)略低于我国小麦育成品种(56.36%),17 + 18 亚基类型较少(1.38%);但 *Glu-D1* 位点的 5 + 12 亚基(29.66%)较国内育成品种(5.54%)有较大提高,烘烤质量效应最高的 5 + 10 亚基(11.72%)则低于国内育成品种(18.59%),且与国外小麦品种(系)相差甚远(73.50%)^[25-26],这种现象可能与山西小麦主要是自给为主,基本用于馒头和面条消费有关。目前,小麦品质测定存在仪器昂贵、费时费力和样品量大的缺点,蛋白质含量测定主要是采用凯氏定氮法,面团拉伸参数和粉质参数主要采用拉伸仪和粉质仪测定,如波通粉质仪,需要 300 g 左右面粉揉面,从磨面到测定完成所需时间较长。近红外品质分析仪采用漫反射技术,可以快速、准确地测定少量样品的蛋白含量、沉降值、面筋和稳定时间等指标。本文采用近红外分析仪测定了山西小麦品种的品质指标,发现不同 HMW-GS 及亚基组合类型对品质的效应差异较大,如 *Glu-A1* 位点 2* 亚基与 1、Null 亚基在沉降值、稳定时间、形成时间、拉伸面积以及最大抗延阻力等指标存在明显差异,如“2*, 7 + 8, 4 + 12”形成时间显著高于“Null, 7 + 8, 5 + 10”、“Null, 7 + 9, 5 + 10”和“1, 14 + 15, 5 + 12”,其拉伸面积也显著高于“Null, 14 + 15, 2 + 12”和“1, 14 + 15, 5 + 12”。可见,亚基间的互作效应使得利用单个亚基很难满足对品种品质的改良,在今后的育种中应注重这些亚基的利用和组合效应,以便充分发挥其在品种改良中的作用。

致谢: 本文在材料征集的过程中得到山西省农科院柴永峰、任杰成、张晓军、卜斌、张东旭、闫金龙和任永康等老师的大力协助,谨致热忱!

参考文献

- [1] Ciaffi M, Tozzi L, Lafiandra D. Relationship between flour composition determined by size-exclusion high-performance liquid chromatography and dough rheological parameters. *Cereal Chemistry*, 1996, 73: 346-351
- [2] Zhang P P, He Z H, Zhang Y, Xia X C, Chen D S, Zhang Y. Association between SDS-unextractable polymeric protein (% UPP) and end-use. *Cereal Chemistry*, 2008, 85: 696-700
- [3] 张瑞奇, 胡琳, 许为钢, 张清珍, 王根松. 黄淮冬麦区不同时期大面积推广品种的高分子量麦谷蛋白亚基组成成分. *麦类作物学报*, 2006, 26(2): 63-67
- [4] Payne P I, Corfield K G, Blackman J A. Correlation between the inheritance of certain high-molecular-weight subunits of glutenin and bread-making quality in progenies of six crosses of bread wheat. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1981, 32: 51-60

- [5] Lawrence G J, Shepherd K W. Inheritance of glutenin protein subunits of the high molecular wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 1981, 60:333-337
- [6] Payne P I, Law C N, Mudd E E. Control by homoeologous group 1 chromosomes of the high-molecular-weight subunits of glutenin, a major protein of wheat endosperm. *Theoretical and Applied Genetics*, 1980, 58:113-120
- [7] Lawrence G J, Shepherd K W. Variation in glutenin protein subunits of wheat. *Australian Journal of Biological Sciences*, 1980, 33:221-233
- [8] Gianibelli M C, Larroque O R, MacRitchie F. Biochemical, genetic, molecular characterization of wheat glutenin and its component subunits. *Cereal Chemistry*, 2001, 78:635-646
- [9] Bumouf T, Bouriquet R. Glutenin subunits of genetically related European hexaploid wheat cultivars: Their relation to bread-making quality. *Theoretical and Applied Genetics*, 1980, 58:107-111
- [10] Ciaff M, Lafiandra D, Porceddu E, Benedettelli S. Storage-protein variation in wild emmer wheat (*Triticum turgidum* ssp. *dicoccoides*) from Jordan and Turkey: I. Electrophoretic characterization of genotypes. *Theoretical and Applied Genetics*, 1993, 86:474-480
- [11] 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谷蛋白亚基组成分析. *中国农业科学*, 2001, 34(4):355-362
- [12] 陈晓杰, 王亚娟, 申磊, 吉万全. 西北春麦区小麦地方品种高分子量麦谷蛋白亚基组成分析. *植物遗传资源学报*, 2009, 10(1):42-45
- [13] He Z H, Peña R J, Rajaram S. High molecular weight glutenin subunit composition of Chinese bread wheats. *Euphytica*, 1992, 64:11-20
- [14] Nakamura H. Allelic variation at high molecular weight glutenin subunit loci, *Glu-A1*, *Glu-B1* and *Glu-D1*, in Japanese and Chinese hexaploid wheats. *Euphytica*, 2000, 112:187-193
- [15] 李光蓉, 杨足君, 畅志坚. 山西小麦品种(系)的高分子谷蛋白亚基遗传变异分析. *四川农业大学学报*, 2000, 18(2):113-116
- [16] 陈卫国, 王曙光, 史雨刚, 孙黛珍. 山西省不同来源小麦品种(系)的 HMW-GS 组成分析. *中国农业大学学报*, 2015, 20(4):19-28
- [17] 姬虎太, 张建华, 王敏, 吕雪梅, 曹勇, 裴雪霞, 张定一. 山西省小麦品种(系)蛋白质品质的差异. *麦类作物学报*, 2011, 31(6):1077-1081
- [18] 赵彬, 唐映军, 夏燕, 余娟. 贵州小麦品种(系)与引进品种高分子量麦谷蛋白亚基组成比较. *麦类作物学报*, 2004, 24(4):80-83
- [19] Payne P I, Nightingale M A, Krattiger A F, Holt L M. The relationship between HMW glutenin subunit composition and the bread-marking quality of British-grown wheat varieties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1987, 40(1):51-65
- [20] Jin H, Yan J, Peña R J, Xia X C, Morgounov A, Han L M, Zhang Y, He Z H. Molecular detection of high-and low-molecular-weight glutenin subunit genes in common wheat cultivars from 20 countries using allele-specific markers. *Crop & Pasture Science*, 2011, 62:746-754
- [21] 郝晨阳, 尚勋武, 张海泉. 甘肃省春小麦品种高分子量麦谷蛋白亚基组成分析. *植物遗传资源学报*, 2004, 5(1):38-42
- [22] 万富世, 王光瑞, 李宗智. 我国小麦品质现状及其改良目标初探. *中国农业科学*, 1989, 22(3):14-21
- [23] 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. *中国农业科学*, 1995, 28(5):29-37
- [24] 孙辉, 刘广田, 李保云, 刘桂芳, 王岳光. 小麦高分子量谷蛋白亚基的遗传规律研究. *中国农业大学学报*, 2000, 5(1):58-62
- [25] 毛沛, 李宗智, 卢少源. 小麦遗传资源 HMW 麦谷蛋白亚基组成及其与面包烘烤品质关系的研究. *中国农业科学*, 1995, 28(S1):22-27
- [26] 张学勇, 庞斌双, 游光霞, 王兰芬, 贾继增, 董玉琛. 中国小麦品种资源 *Glu-1* 位点组成概况及遗传多样性分析. *中国农业科学*, 2002, 35(11):1302-1310