

不同灌水处理对强筋小麦谷蛋白大聚合体 粒度分布和品质的影响*

周晓燕^{1,2} 贾殿勇¹ 代兴龙¹ 贺明荣^{1**}

(¹山东农业大学农学院/作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018; ²临沂大学生命科学学院, 山东临沂 276000)

摘要 在田间条件下,以两个优质强筋小麦品种(藁城 8901 和济麦 20)为供试材料,研究了不同灌水处理(全生育期不灌水、拔节期灌 1 次水、越冬期和拔节期灌 2 次水、越冬期、拔节期和灌浆期灌 3 次水,每次灌水量 $675 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)对强筋小麦谷蛋白大聚合体含量与粒度分布、品质和产量的影响.结果表明:两个小麦品种的面团形成时间、面团稳定时间、面包体积、籽粒产量、谷蛋白大聚合体含量以及体积加权平均粒径、表面积加权平均粒径、粒径 $>100 \mu\text{m}$ 的体积百分比和表面积百分比均以灌 2 水处理最高.相关分析显示,两个小麦品种的面团形成时间、面团稳定时间和面包体积与粒径 $<10 \mu\text{m}$ 和 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 的谷蛋白大聚合体颗粒体积百分比呈显著负相关,而与粒径 $>100 \mu\text{m}$ 的谷蛋白大聚合体颗粒体积百分比、体积加权平均粒径和表面积加权平均粒径呈显著正相关.水分供应过多或过少均不利于籽粒产量和品质的同步改善,灌溉水平可通过改变谷蛋白大聚合体粒度分布影响小麦籽粒品质.

关键词 强筋小麦 灌溉 产量 品质 谷蛋白大聚合体

文章编号 1001-9332(2013)09-2557-07 中图分类号 S311 文献标识码 A

Effects of irrigation scheme on the grain glutenin macropolymer's size distribution and the grain quality of winter wheat with strong gluten. ZHOU Xiao-yan^{1,2}, JIA Dian-yong¹, DAI Xing-long¹, HE Ming-rong¹ (¹College of Agronomy, Shandong Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an 271018, Shandong, China; ²College of Life Science, Linyi University, Linyi 276000, Shandong, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(9): 2557–2563.

Abstract: Taking two winter wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars (Gaocheng 8901 and Jimai 20) with high quality strong gluten as test materials, a 2-year field experiment was conducted to study the grain glutenin macropolymer (GMP)'s content and size distribution, grain quality, and grain yield under effects of different irrigation schemes. The schemes included no irrigation in whole growth period (W_0), irrigation once at jointing stage (W_1), irrigation two times at wintering and jointing stages (W_2), respectively, and irrigation three times at wintering, jointing, and filling stages (W_3), respectively, with the irrigation amount in each time being $675 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$. Among the test irrigation schemes, W_2 had the best effects on the dough development time, dough stability time, loaf volume, grain yield, GMP content, weighted average surface area of particle $D_{3,2}$, weighted average volume of particle $D_{4,3}$, and volume percent and surface area percent of particle size $>100 \mu\text{m}$ of the two cultivars. The dough development time, dough stability time, and loaf volume were negatively correlated with the volume percent of GMP particle size $<10 \mu\text{m}$ and $10 \sim 100 \mu\text{m}$, while positively correlated with the volume percent of GMP particle size $>100 \mu\text{m}$, $D_{3,2}$, and $D_{4,3}$. It was suggested that both water deficit and water excess had detrimental effects on the grain yield and grain quality, and irrigation level could affect the wheat grain quality through altering GMP particle size distribution.

Key words: winter wheat with strong gluten; irrigation; grain yield; grain quality; glutenin macropolymer (GMP).

* 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB118602)和国家公益性行业(农业)科研专项(201203096)资助.

** 通讯作者. E-mail: mrhe@sdau.edu.cn

2013-01-11 收稿, 2013-07-11 接受.

麦谷蛋白是小麦籽粒中重要的贮藏蛋白,约占面筋蛋白的 35%^[1],其在面筋中以聚合体形式存在,与面团的弹性、强度和面包烘烤品质密切相关^[1-2]. 依据 SDS 缓冲液中的溶解性可将麦谷蛋白划分为可溶性谷蛋白和不溶性谷蛋白两类,其中不溶性谷蛋白(unextractable polymeric protein)分子量较大,称为谷蛋白大聚合体(GMP)^[3-4]. 谷蛋白大聚合体在胚乳中以颗粒形式存在,粒径范围为 1~300 μm^[5-7]. 谷蛋白大聚合体的含量反映了谷蛋白聚合体的粒度分布. 小麦成熟期籽粒谷蛋白大聚体含量和分子量分布对面团特征和烘烤品质有重要影响,其作用远大于可溶性谷蛋白^[8]. 谷蛋白大聚合体含量与沉降值之间具有较高的相关性^[9-10],谷蛋白大聚合体的绝对含量和相对含量与面团形成时间、面团最大抗延阻力及面包体积呈显著正相关^[3,11],不溶性谷蛋白占谷蛋白总量的百分数与面团形成时间呈极显著正相关^[12-13]. 谷蛋白大聚合体含量可以作为预测面团特性的生化指标^[14].

水分供应状况是影响小麦籽粒品质的重要因子^[15-17]. 前人研究表明,小麦籽粒蛋白质含量和品质随降水量的增加而改善,超过一定限度后则表现为降低^[18-20];小麦生育后期灌水会显著降低籽粒蛋白质含量,缩短面团稳定时间,使小麦品质变劣^[21-23]. 花后干旱和渍水处理显著降低了成熟期籽粒谷蛋白大聚合体含量^[24],谷蛋白大聚合体平均粒径因灌麦黄水而显著降低^[15]. 然而,关于不同灌水条件对小麦籽粒谷蛋白大聚合体含量和粒度分布以及籽粒品质关系的研究迄今尚少. 本试验在不同灌水条件下,以优质强筋小麦品种藁城 8901 和济麦 20 为试验材料,研究了小麦籽粒谷蛋白大聚合体含

量和粒度分布以及与籽粒品质的关系,以期合理灌溉改善小麦籽粒品质提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验设计

选用优质强筋小麦品种藁城 8901 和济麦 20 为供试材料,于 2009—2010 年和 2010—2011 年连续两个生长季种植于山东农业大学泰安试验农场. 试验地 0~20 cm 土层土壤养分含量为:有机质 12.4 g·kg⁻¹,全氮 1.2 g·kg⁻¹,速效氮 71.5 mg·kg⁻¹,速效磷 12.5 mg·kg⁻¹,速效钾 86.7 mg·kg⁻¹. 播种前底施纯 N 120 kg·hm⁻²,P₂O₅ 105 kg·hm⁻²,K₂O 150 kg·hm⁻²,拔节期追施纯 N 120 kg·hm⁻²,所施肥料为尿素(含 N 46.4%)、磷酸二铵(含 P₂O₅ 46%,N 18%)和氯化钾(含 K₂O 60%). 两个小麦生长季的月平均降雨量、光照和气温见表 1.

试验设置 4 个灌水处理:全生育期不灌水(W₀);拔节期灌 1 次水(W₁);越冬期和拔节期灌 2 次水(W₂);越冬期、拔节期和灌浆期灌 3 次水(W₃). 2009—2010 年越冬期、拔节期和灌浆期的灌水时间分别为 12 月 11 日、4 月 12 日和 5 月 25 日;2010—2011 年分别为 12 月 17 日、4 月 15 日和 5 月 25 日. 每次灌水量为 675 m³·hm⁻²,使用水表(*d*=8 cm)控制,采用管灌. 两个生长季播种时间均为 10 月 10 日,两个品种的基本苗均为 225 万株·hm⁻²,行距 25 cm,3 次重复,小区面积 1.5 m×20 m=30 m²,随机区组排列. 收获期分别为 2010 年 6 月 10 日和 2011 年 6 月 13 日,除水分因子外,田间其他管理均按照高产麦田管理方式进行. 成熟期取样并进行单株分析、实收计产,籽粒贮存 3 个月后进行品质分析.

表 1 小麦生长期间的降雨量、光照和平均气温
Table 1 Rainfall, sunshine and average air temperature during wheat growth period

月份 Month	2009—2010			2010—2011		
	降雨量 Rainfall (mm)	光照 Sunshine (h)	平均气温 Average air temperature (℃)	降雨量 Rainfall (mm)	光照 Sunshine (h)	平均气温 Average air temperature (℃)
10	12.1	140.9	14.6	2.7	142.1	13.0
11	21.3	167.3	3.8	0	216.7	7.7
12	6.2	163.2	0	0.2	207.9	1.0
1	3.2	181.4	-2.1	0	180.4	-4.3
2	18.9	111.7	2.4	24.0	134.7	1.7
3	14.8	175.6	6.0	2.6	256.1	7.3
4	20.5	228.0	12.1	10.4	261.1	14.6
5	42.0	263.7	20.8	132.0	228.0	20.0
6	9.5	101.8	23.1	0.3	117.2	26.3
总计 Total	148.5	1533.6	-	172.2	1744.2	-
日平均 Daily average	-	170.4	9.0	-	193.8	9.7

1.2 测定项目及方法

1.2.1 小麦产量测定 在小麦收获期,每个小区选取长势均匀的 6 m²(1.5 m×4 m)地块收获脱粒后测产.

1.2.2 小麦品质测定 全麦粉用瑞士 Perten 公司生产的 3100 型试验磨磨制,面粉用德国 Brabender 公司生产的 BUHLER 试验磨磨制,细度均为 100 目.面粉湿面筋含量用瑞士 Perten 公司生产的 2200 型面筋洗脱仪按 GB 13150628 测定;面团流变学特性用德国 Brabender 公司生产的 810106002 型粉质仪按照 GB/T 14614—2006 测定.面包烘烤试验按照 AACCI0—01 方法进行,应用菜籽置换法(National MFG 公司生产的面包体积测定仪)测定面包体积.

1.2.3 GMP 含量及粒度测定 参照 Weegels 等^[25]的方法测定 GMP 含量,并稍作改进.0.05 g 全麦粉加 1.5% SDS 提取液 1 mL,常温下 15500 ×g 离心 15 min,弃上清液,用双缩脲法测定残余物中氮含量作为 GMP 的近似值.每个样品测定 3 次,取平均值.

参考 Don 等^[26]的方法测定 GMP 粒度分布,称取 1.5 g 脱脂面粉,放入 50 mL 离心管,加 1.5% SDS 溶液 30 mL,混匀,在 20 ℃、75000×g 离心 30 min,倒掉上清液,取上层蛋白质凝胶放入另一个 50 mL 离心管,加入 1.5% SDS 溶液再提取 1 次,取上层蛋白质凝胶 1 g 放入 10 mL 离心管,加 10 mL 1.5% SDS 溶液,混匀,取其悬浮液,用 Beckman Coulter 公司生产的 LS13320 型激光衍射粒度分析仪(laser diffraction particle size analyzer, Universal Liquid Modules)测定.仪器可直接给出谷蛋白大聚合体基于体积、表面积和数目的粒径分布情况.

1.3 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2007 软件进行处理,采用 SigmaPlot 10.0 软件作图,采用 DPS 2007 软件进行数据统计与分析;多重比较采用 LSD 法,相关分析采用线性相关分析方法,*t* 测验检测相关系数的显著性.

2 结果与分析

2.1 不同灌水处理对小麦籽粒产量的影响

连续 2 年的试验结果(图 1)显示,两个品种的籽粒产量均随灌水次数的增加呈先增加后降低的趋势,以不灌水(W₀)处理的产量最低,灌 2 水(W₂)处理的产量最高.统计分析表明,两个品种各处理间产量的差异情况不同,其中,藁城 8901 的 W₂处理产量两个年份均显著高于 W₀和 W₃,但与 W₁处理的产量

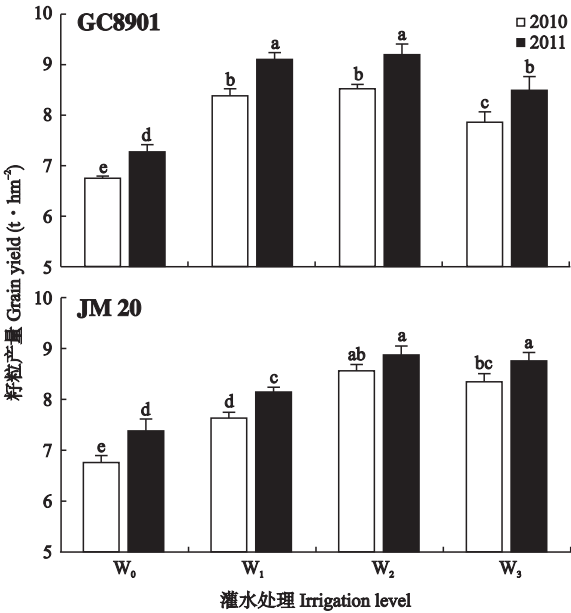


图 1 不同灌水处理对藁城 8901 和济麦 20 籽粒产量的影响
Fig.1 Effects of different irrigation treatments on grain yield of Gaocheng 8901 and Jimai 20.

W₀:全生育期不灌水 No irrigation in the growing season; W₁:拔节期灌 1 次水 Irrigation one time at jointing stage; W₂:越冬期和拔节期灌 2 次水 Irrigation two times at wintering and jointing stages; W₃:越冬期、拔节期和灌浆期灌 3 次水 Irrigation three times at wintering, jointing and filling stages. 不同字母表示处理间差异显著 Different letters meant significant difference among treatments at 0.05 level.

无显著差异;济麦 20 的 W₂处理产量显著高于 W₀和 W₁,但与 W₃处理的产量无显著差异.

2.2 不同灌水处理对小麦面团流变学特性的影响

如表 2 所示,随灌水次数的增加,面团吸水率和湿面筋含量无显著变化,但两个品种 W₂处理的面团稳定时间和面团形成时间均显著优于其他灌水处理.藁城 8901 的 W₂处理面团稳定时间和面团形成时间分别比其他灌水处理高 5.1%~28.6%(0.7~3.1 min)和 3.0%~28.3%(0.3~1.8 min),济麦 20 的 W₂处理面团稳定时间和面团形成时间分别比其他灌水处理高 6.2%~32.0%(0.6~2.0 min)和 3.5%~31.6%(0.2~1.8 min).表明小麦生育期间适量灌水可以改善籽粒品质,但是水分供应不足或者过量都会对籽粒品质产生不利影响.

2.3 不同灌水处理对小麦面包加工品质的影响

面包加工品质测定结果(表 2)显示,两个小麦品种随灌水次数的增加,面包体积和总评分均呈现先增加后降低的趋势,且均在 W₂处理时达到最优,其面包体积和总评分均显著优于其他灌水处理.藁城 8901 的 W₂处理面包体积和面包评分分别比其他灌水处理高 19.2~55.2 cm³和 0.7~6.5,济麦 20

表 2 不同灌水处理对小麦面团和面包品质参数的影响
Table 2 Effects of different irrigation treatments on dough and bread quality characteristics of wheat

品种 Variety	年份 Year	处理 Treatment	湿面筋含量 Wet gluten content (%)	吸水率 Water absorption (%)	面团形成时间 Dough development time (min)	面团稳定时间 Dough stability time (min)	面包体积 Loaf volume (cm ³)	总评分 Total score
藁城 8901 Gaocheng 8901	2009	W ₀	32.9d	63.2c	7.37d	10.77f	780.0c	86.5c
		W ₁	33.3d	63.1c	8.40a	13.18b	815.0b	89.9b
		W ₂	33.8cd	64.1c	8.65a	13.85a	834.2a	93.0a
		W ₃	33.2d	63.6c	7.98b	11.97d	800.0b	87.8bc
	2010	W ₀	34.1c	65.6b	6.23e	9.90g	705.5f	70.8e
		W ₁	35.0ab	66.1ab	7.67c	11.97d	735.0e	71.8de
		W ₂	35.7a	66.8a	8.00b	12.63c	760.7d	72.5d
		W ₃	34.6bc	66.8a	7.26d	11.27e	725.0e	71.2de
济麦 20 Jimai 20	2009	W ₀	33.1c	60.6b	5.70e	10.45c	782.5c	84.3c
		W ₁	34.3bc	60.0b	7.02b	11.21b	800.8b	87.0b
		W ₂	34.7bc	59.4b	7.50a	11.90a	815.0a	89.0a
		W ₃	34.1c	60.0b	6.75c	10.95b	795.0b	84.5c
	2010	W ₀	33.6c	62.0a	4.95g	6.25g	705.0f	63.7f
		W ₁	34.7bc	61.3a	5.76de	7.67e	727.5e	68.5de
		W ₂	35.4ab	61.6a	5.95d	8.25d	740.3d	70.3d
		W ₃	34.5bc	62.4a	5.32f	7.16f	715.0ef	67.3e

W₀:全生育期不灌水 No irrigation in the growing season; W₁:拔节期灌 1 次水 Irrigation one time at jointing stage; W₂:越冬期和拔节期灌 2 次水 Irrigation two times at wintering and jointing stages; W₃:越冬期、拔节期和灌浆期灌 3 次水 Irrigation three times at wintering, jointing and filling stages. 同列不同小写字母表示同一品种不同处理间差异显著 ($P<0.05$) Different small letters in the same column in the same cultivar meant significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

的 W₂ 处理面包体积和面包评分分别比其他灌水处理高 14.3 ~ 35.3 cm³ 和 1.8 ~ 6.7. 说明在保障产量的前提下,灌 2 水(越冬水+拔节水)处理是产量与品质兼顾的节水灌溉方式.

2.4 不同灌水处理对小麦籽粒谷蛋白大聚合物粒

度分布的影响
从表 3 可以看出,小麦谷蛋白大聚合物粒径 <10 μm 颗粒所占体积为 9.8% ~ 18.4%, 10 ~ 100 μm 颗粒所占体积为 45.6% ~ 51.0%, >100 μm 颗粒所占体积为 32.8% ~ 43.2%. 粒径 <10 μm 颗粒

表 3 不同灌水处理下小麦谷蛋白大聚合体的粒度分布
Table 3 Particle size distribution of wheat GMP under different irrigation treatments (%)

品种 Variety	年份 Year	处理 Treatment	数目 Number (%)			谷蛋白大 聚体含量 GMP content (%)	加权平均粒径 Weighted average of GMP particles (μm)		粒径 Diameter of GMP particle (μm)					
			<4.5 μm	4.5 ~ 10 μm	>10 μm		V	S _A	<10		10 ~ 100		>100	
									V	S _A	V	S _A	V	S _A
藁城 8901 Gaocheng 8901	2009	W ₀	98.44c	1.48b	0.08c	1.31e	77.29e	16.14e	14.5c	78.3ab	46.1b	17.2 d	39.5c	4.5e
		W ₁	98.40d	1.51ab	0.09c	1.53b	86.45b	19.56b	13.8de	75.5d	45.6bc	19.2b	40.7b	5.4d
		W ₂	98.31e	1.56a	0.13a	1.68a	90.09a	21.37a	10.6g	71.9e	44.1d	20.6a	45.3a	7.5a
		W ₃	98.47b	1.45bc	0.08c	1.49c	80.28d	18.58c	12.4f	77.1c	47.2ab	18.2c	40.4b	4.6e
	2010	W ₀	98.44c	1.48b	0.07c	1.24h	74.83f	14.74f	16.9a	77.8bc	47.5a	18.3c	35.6e	4.0g
		W ₁	98.47b	1.45bc	0.08c	1.34de	80.29d	17.61d	15.1b	75.7d	46.2b	18.6bc	38.7c	5.7c
		W ₂	98.38d	1.52a	0.11b	1.37d	84.19c	19.06bc	13.4e	75.3d	45.6bc	18.7bc	41.0b	6.0b
		W ₃	98.51a	1.42c	0.07c	1.27g	78.43e	15.88e	14.2cd	79.8a	48.4a	15.9e	37.4d	4.3f
济麦 20 Jimai 20	2009	W ₀	98.51a	1.41c	0.08c	1.25c	73.56e	14.26fg	15.4b	81.8a	48.8b	14.9c	35.8cd	3.4f
		W ₁	98.49ab	1.41c	0.09c	1.34b	82.81b	17.81b	14.1c	79.0c	47.9b	14.7c	38.0b	6.3b
		W ₂	98.43b	1.43b	0.14a	1.38a	85.53a	20.17a	12.7d	76.4e	45.9c	15.7b	41.5a	7.9a
		W ₃	98.53a	1.40c	0.08c	1.31b	78.37c	16.36c	14.0c	78.8c	49.5ab	16.7a	36.5c	4.5d
	2010	W ₀	98.53a	1.40c	0.07c	1.02e	70.64f	13.22h	17.5a	79.2bc	51.0a	16.7a	31.5f	4.0e
		W ₁	98.46b	1.46a	0.08c	1.12d	76.58d	14.57f	15.9b	78.8c	49.1b	16.7a	35.1d	4.5d
		W ₂	98.42b	1.47a	0.12b	1.25c	77.37cd	15.17e	14.1c	78.0d	47.7b	16.7a	38.2b	5.3c
		W ₃	98.51a	1.41c	0.08c	1.03e	74.68e	13.88g	15.6b	80.1b	51.5a	15.7b	32.9e	4.2e

V: 体积 Volume; S_A: 表面积 Surface area. 下同 The same below.

表 4 小麦谷蛋白大聚合体体积分布与面团和面包品质参数的相关系数
Table 4 Correlation coefficients between volume distribution of wheat GMP and dough properties

品种 Variety	品质性状 Quality trait	粒径 Diameter of GMP particle (μm)			加权平均粒径 Weighted average of GMP particles	
		<10	10 ~ 100	>100	V	S _A
藁城 8901 Gaocheng 8901	I	-0.87 **	-0.72 *	0.90 **	0.92 **	0.95 **
	II	-0.82 **	-0.75 *	0.89 **	0.98 **	0.98 **
	III	-0.84 **	-0.72 *	0.89 **	0.79 *	0.84 **
	IV	-0.87 **	-0.73 *	0.91 **	0.89 **	0.93 **
济麦 20 Jimai 20	I	-0.91 **	-0.80 **	0.90 **	0.96 **	0.97 **
	II	-0.82 **	-0.73 *	0.81 **	0.78 *	0.83 **
	III	-0.81 **	-0.74 *	0.81 **	0.78 *	0.84 **
	IV	-0.89 **	-0.86 **	0.92 **	0.82 **	0.85 **

I：面团形成时间 Dough development time；II：面团稳定时间 Dough stability time；III：面包体积 Loaf volume；IV：谷蛋白大聚合体含量 GMP content. * $P<0.05$ ；** $P<0.01$.

占总表面积的 71.9% ~ 81.8%，10 ~ 100 μm 颗粒占总表面积的 14.7% ~ 20.6%，>100 μm 颗粒占总表面积的 3.4% ~ 7.9%。粒径<4.5 μm 颗粒占总数目的 98.3% ~ 98.5%，4.5 ~ 10 μm 颗粒占总数目的 1.4% ~ 1.6%，<10 μm 颗粒占总数目的 99.86% ~ 99.93%，而>10 μm 颗粒仅占总数目的 0.07% ~ 0.14%。随着灌水次数的增加，两个小麦品种的谷蛋白大聚合体粒径<10 μm 和 10 ~ 100 μm 的颗粒所占体积、表面积百分比及粒径<4.5 μm 颗粒所占数目百分比均表现为先降低后增加，而粒径>100 μm 颗粒所占体积和表面积百分比、粒径>10 μm 颗粒所占数目百分比、谷蛋白大聚合体含量、体积加权平均粒径和表面积加权平均粒径则先升高后降低，其中 W_2 处理的大颗粒所占比例最高、平均粒径最大，且与其他灌水处理差异显著。表明适量灌水有利于增加小麦谷蛋白大聚合体的含量，提高小麦谷蛋白大聚合体大颗粒所占的比例。

2.5 小麦谷蛋白大聚合体粒径分布与籽粒品质参数间的相关关系

从表 4 可以看出，两个品种的面团形成时间与粒径<10 μm 和 10 ~ 100 μm 谷蛋白大聚合体颗粒体积百分比呈显著或者极显著负相关，与粒径>100 μm 谷蛋白大聚合体颗粒体积百分比呈极显著正相关；面团稳定时间与粒径<10 μm 和 10 ~ 100 μm 谷蛋白大聚合体颗粒体积百分比呈显著或者极显著负相关，与粒径>100 μm 谷蛋白大聚合体颗粒体积百分比呈极显著正相关。

谷蛋白大聚合体含量与粒径<10 μm 和 10 ~ 100 μm 谷蛋白大聚合体颗粒体积百分比均呈显著或者极显著负相关，与体积加权平均粒径、表面积加权平均粒径和粒径>100 μm 谷蛋白大聚合体颗粒体积百分比呈极显著正相关。表明大粒径谷蛋白大

聚合体颗粒所占比例越大，体积加权平均粒径和表面积加权平均粒径越大，谷蛋白大聚合体含量越高。

面包体积与粒径<10 μm 、10 ~ 100 μm 谷蛋白大聚合体颗粒体积百分比均呈显著或者极显著负相关，与粒径>100 μm 谷蛋白大聚合体颗粒体积百分比呈极显著正相关。表明大粒径谷蛋白大聚合体颗粒所占比例越大，面包体积越大。

3 讨 论

3.1 水分运筹对小麦谷蛋白大聚合体粒度分布的影响

Don 等^[6]在 Carceller 等^[27]提出的谷蛋白 hyper-aggregation 模型基础上，提出了麦谷蛋白大聚合体颗粒形成的 3 个步骤：谷蛋白亚基的生物合成、大量低聚物的形成与聚合、进一步聚合为不溶性谷蛋白颗粒；并通过一系列研究表明，小麦胚乳中谷蛋白大聚合体是以颗粒形式存在的，其粒径大小受谷蛋白亚基组成及栽培条件的影响^[5-7]。岳鸿伟等^[24]研究结果表明，适量灌水（田间持水量的 70% ~ 80%）条件下小麦籽粒 GMP 含量显著高于干旱（田间持水量的 45% ~ 50%）和渍水（保持 1 ~ 2 cm 的水层）处理的小麦籽粒 GMP 含量。本研究结果表明，不同灌水处理能够显著影响小麦籽粒中 GMP 含量和 GMP 颗粒粒径分布，适量灌水能够显著增加小麦籽粒中 GMP 含量，提高大、中体积颗粒所占总体积比例，降低<10 μm 颗粒所占总面积比例，提高>10 μm 颗粒数目比例。这与岳鸿伟等^[24]的研究结果相一致。表明适量灌水能够提升谷蛋白的聚合作用，有利于低聚物向高聚物的进一步聚合，促进大颗粒 GMP 的形成，干旱和过多灌水均不利于小麦籽粒 GMP 的积累和聚合成大颗粒。

3.2 水分运筹对强筋冬小麦籽粒产量和籽粒品质的影响

赵广才等^[28]在小麦全生育期降水量 47.9 mm 条件下提出,产量随灌水次数增加而提高,灌 4 水产量最高,但与灌 3 水的处理无显著差异,因此春季以灌 3 水为宜. 本研究结果表明,两个小麦品种籽粒均在灌 2 水时达到最高,再增加灌水,产量降低. 这与人研究结果不同. 其原因应该与小麦生育期间降水量不同有关. 本研究中两年降水量分别为 148.5 和 172.2 mm,远大于其他研究中的降水量.

范雪梅等^[29-30]研究结果表明,干旱处理提高了蛋白质含量,干、湿面筋含量、沉降值和降落值;而渍水处理则降低了小麦籽粒蛋白质含量和干、湿面筋含量. 赵广才等^[31]研究结果表明,减少春季灌水次数有利于多项加工品质指标的改善,面团形成时间和稳定时间均随灌水次数减少而提高,但对产量不利. 本研究表明,随灌水次数增加,面团形成时间、面团稳定时间、面包体积和面包总评分均呈现先增加后降低的趋势. 其中面包体积、面团形成时间和面团稳定时间均在灌 2 水(越冬水和拔节水)时达到最优,且与其他灌水处理差异显著. 这与赵广才等^[31]的研究结果基本一致. 表明小麦生育期适宜的灌水有利于多项加工品质指标的改善、面团形成时间和稳定时间的提高,从而改善籽粒品质;但是水分供应不足或者过量都会缩短面团稳定时间,使小麦品质变劣. 以上结果表明,适当灌水可以使小麦籽粒产量和品质同步提高. 这与王月福等^[32]的研究结果相一致.

3.3 小麦谷蛋白大聚合体粒径分布与籽粒品质参数间的相关关系

近年来的研究表明,谷蛋白聚合体的粒度分布比含量更重要,是决定面筋物理特性及面包烘烤品质的关键因素^[33-34]. 本研究结果表明,面团形成时间和稳定时间均与粒径 $<10\ \mu\text{m}$ 和 $10\sim100\ \mu\text{m}$ 的谷蛋白大聚合体颗粒体积百分比呈显著或极显著负相关,与粒径 $>100\ \mu\text{m}$ 的谷蛋白大聚合体颗粒体积百分比呈极显著正相关;面包体积均与粒径 $<10\ \mu\text{m}$ 、 $10\sim100\ \mu\text{m}$ 的谷蛋白大聚合体颗粒体积百分比呈显著或极显著负相关,与粒径 $>100\ \mu\text{m}$ 的谷蛋白大聚合体颗粒体积百分比呈极显著正相关. 这与人研究结果相一致. 表明大粒径谷蛋白大聚合体颗粒具有较长的面团形成时间和面团稳定时间,以及较大的面包体积.

综上,在底墒充足的前提下,全生育期灌 2 次水

(越冬期+拔节期)有利于小麦谷蛋白大聚合体(GMP)含量的提高和聚合成粒径更大的颗粒,从而改善籽粒品质,实现籽粒产量和品质的同步提高.

参考文献

- [1] Sugiyama T, Rafalski A, Peterson D, *et al.* A wheat HMW glutenin subunit gene reveals a highly repeated structure. *Nucleic Acids Research*, 1985, **13**: 8729–8737
- [2] Ciaffi M, Tozzi L, Lafiandra D. Relationship between flour protein composition determined by size-exclusion high-performance liquid chromatography and dough rheological parameters. *Cereal Chemistry*, 1996, **73**: 346–351
- [3] Gupta RB, Khan K, MacRitchie F. Biochemical basis of flour properties in bread wheats. I. Effects of variation in the quantity and size distribution of polymeric protein. *Journal of Cereal Science*, 1993, **18**: 23–41
- [4] Liang R-Q (梁荣奇), Zhang Y-R (张义荣), You M-S (尤明山), *et al.* Multi-stacking SDS-PAGE for wheat glutenin polymer and its relation to bread-making quality. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2002, **28** (5): 609–614 (in Chinese)
- [5] Don C, Lichtendonk WJ, Plijter JJ, *et al.* Glutenin macropolymer: A gel formed by glutenin particles. *Journal of Cereal Science*, 2003, **37**: 1–7
- [6] Don C, Lookhart G, Naeem H, *et al.* Heat stress and genotype affect the glutenin particles of the glutenin macropolymer-gel fraction. *Journal of Cereal Science*, 2005, **42**: 69–80
- [7] Don C, Mann G, Bekes F, *et al.* HMW-GS affects the properties of glutenin particles in GMP and thus flour quality. *Journal of Cereal Science*, 2006, **44**: 127–130
- [8] Sun H (孙 辉), Yao D-N (姚大年), Li B-Y (李保云), *et al.* Correlation between content of glutenin macropolymer (GMP) in wheat and baking quality. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association* (中国粮油学报), 1998, **13**(6): 13–16 (in Chinese)
- [9] Fu BX, Sapirstein HD. Procedure for isolating monomeric proteins and polymeric glutenin of wheat flour. *Cereal Chemistry*, 1996, **73**: 143–152
- [10] MacRitchie F. Conversion of a weak flour to a strong one by increasing the proportion of its high molecular weight gluten protein. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1976, **24**: 1325–1329
- [11] Sapirstein HD, Fu BX. Intercultivar variation in the quantity of monomeric proteins, soluble and insoluble glutenin, and residue protein in wheat flour and relationships to breadmaking quality. *Cereal Chemistry*, 1998, **74**: 500–507
- [12] Zhao H-X (赵惠贤), Hu S-W (胡胜武), Ji W-Q (吉万全), *et al.* Study on relationship between the size distribution of glutenin polymeric protein and wheat flour mixing properties. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2001, **34**(5): 465–468 (in Chinese)
- [13] Zhu J, Khan K. Characterization of glutenin protein

- fractions from sequential extraction of hard red spring wheats of different breadmaking quality. *Cereal Chemistry*, 2004, **81**: 681–685
- [14] Bean SR, Lyne RK, Tilley KA, *et al.* A rapid method for quantitation of insoluble polymeric proteins in flour. *Cereal Chemistry*, 1998, **75**: 374–379
- [15] Yao F-J (姚凤娟), He M-R (贺明荣), Jia D-Y (贾殿勇), *et al.* Effects of post-anthesis irrigation on degree of polymerization of storage protein and rheological properties in wheat. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2010, **34**(3): 271–278 (in Chinese)
- [16] Ma D-Y (马冬云), Zhu Y-J (朱云集), Guo T-C (郭天财), *et al.* Effects of genotype, environment and G × E interaction on wheat quality of Henan Province and the stability analysis. *Journal of Triticeae Crops* (麦类作物学报), 2002, **22**(4): 13–18 (in Chinese)
- [17] Fan X-M (范雪梅), Jiang D (姜 东), Dai T-B (戴廷波), *et al.* Effects of nitrogen supply on flag leaf photosynthesis and grain starch accumulation of wheat from its anthesis to maturity under drought or waterlogging. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(10): 1883–1888 (in Chinese)
- [18] Ozturk A, Aydin F. Effect of water stress at various growth stages on some quality characteristics of winter wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2004, **190**: 93–99
- [19] Guttieri MJ, Ahmad R, Stark JC, *et al.* End-use quality of six hard red spring wheat cultivars at different irrigation levels. *Crop Science*, 2000, **40**: 631–635
- [20] Wang X-Y (王晓英), He M-R (贺明荣). Coupling effects of irrigation and nitrogen fertilizer on protein composition and quality of winter wheat cultivar Jimai 20. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2007, **33**(1): 126–131 (in Chinese)
- [21] Xu Z-Z (许振柱), Yu Z-W (于振文), Wang D (王东), *et al.* Effect of irrigation conditions on protein composition accumulation of grain and its quality in winter wheat. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2003, **29**(5): 683–687 (in Chinese)
- [22] Lan T (兰 涛), Jiang D (姜 东), Xie Z-J (谢祝捷), *et al.* Effects of post-anthesis drought and waterlogging on grain quality traits in different specialty wheat varieties. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2004, **18**(1): 193–196 (in Chinese)
- [23] Yao F-J (姚凤娟), He M-R (贺明荣), Li F (李 飞), *et al.* Effects of post-anthesis irrigation frequency on the grain quality of strong gluten winter wheat cultivars. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(12): 2627–2631 (in Chinese)
- [24] Yue H-W (岳鸿伟), Tan W-N (谭维娜), Jiang D (姜 东), *et al.* Effects of post-anthesis drought and waterlogging on contents of high molecular weight glutenin subunits and glutenin macropolymer in wheat grain. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2007, **33**(11): 1845–1849 (in Chinese)
- [25] Weegels PL, van de Pijpekamp AM, Graveland A, *et al.* Depolymerisation and re-polymerisation of wheat glutenin during dough processing. I. Relationships between glutenin macropolymer content and quality parameters. *Journal of Cereal Science*, 1996, **23**: 103–111
- [26] Don C, Lichtendonk W, Plijter JJ, *et al.* Understanding the link between GMP and dough from glutenin particles in flour towards developed dough. *Journal of Cereal Science*, 2003, **38**: 157–165
- [27] Carceller JL, Aussenac T. Size characterisation of glutenin polymers by HPSEC-MALLS. *Journal of Cereal Science*, 2001, **33**: 131–142
- [28] Zhao G-C (赵广才), Chang X-H (常旭虹), Chen X-M (陈新民), *et al.* Effect of the treatment of nitrogen and irrigation on grain yield and quality in different wheat varieties. *Journal of Plant Genetic Resources* (植物遗传资源学报), 2007, **8**(4): 447–450 (in Chinese)
- [29] Fan X-M (范雪梅), Jiang D (姜 东), Dai T-B (戴廷波), *et al.* Effects of nitrogen on grain yield and quality in wheat grown under drought or waterlogging stress from anthesis to maturity. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2006, **30**(1): 71–77 (in Chinese)
- [30] Fan X-M (范雪梅), Jiang D (姜 东), Dai T-B (戴廷波), *et al.* Effects of post-anthesis drought and waterlogging on the quality of grain formation in different wheat varieties. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2004, **28**(5): 680–685 (in Chinese)
- [31] Zhao G-C (赵广才), He Z-H (何中虎), Liu L-H (刘利华), *et al.* Study on the co-enhancing regulating effect of fertilization and watering on the main quality and yield in Zhongyou9507 high gluten wheat. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2004, **37**(3): 351–356 (in Chinese)
- [32] Wang Y-F (王月福), Chen J-H (陈建华), Qu J-L (曲健磊), *et al.* Effects of soil water on grain yield and quality in winter wheat. *Journal of Laiyang Agricultural College* (莱阳农学院学报), 2002, **19**(1): 7–9 (in Chinese)
- [33] Huang DY, Khan K. Characterization and quantification of native glutenin aggregates by multistacking sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) procedures. *Cereal Chemistry*, 1997, **74**: 229–234
- [34] Zhu J, Khan K. Effects of genotype and environment on glutenin polymers and bread making quality. *Cereal Chemistry*, 2001, **78**: 125–130

作者简介 周晓燕,女,1968年生,博士研究生.主要从事作物生理生态研究. E-mail: lysyxy129@sina.com

责任编辑 张凤丽