

## 小麦籽粒不同部位蛋白质形貌与流变特性

代美瑶<sup>1</sup>, 张影全<sup>1</sup>, 潘伟春<sup>2</sup>, 张波<sup>1\*</sup>, 郭波莉<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国农业科学院农产品加工研究所 农业农村部农产品加工重点实验室 北京 100193

<sup>2</sup>浙江工商大学 杭州 310018)

**摘要** 目的:探索小麦籽粒不同部位蛋白质形貌和流变特性及其分布规律,为解释磨制所得不同粉路粉质量差异提供理论依据。方法:通过碾米机、三皮三心实验磨和六皮八心磨粉机制备参试粉,采用亮度值( $L^*$ )与灰分的比值定量表征籽粒的部位。参试粉在检测蛋白组分含量和质量指标的基础上,检测十二烷基硫酸钠可溶蛋白的形貌和谷蛋白大聚体动态流变学特性。结果:结果表明,从小麦籽粒外围到胚乳中心,粗蛋白的含量从 205.9 mg/g 降低至 93.4 mg/g;干面筋在总蛋白中的占比从 0 mg/g 蛋白升高至 1 210.2 mg/g 蛋白,而谷蛋白大聚体在总蛋白中占比变化趋势不明显;面筋持水率越高,十二烷基硫酸钠溶剂的保持力越低。十二烷基硫酸钠可溶性蛋白的密度总体上呈逐渐降低的趋势,谷蛋白大聚体凝胶的储能模量平台值从 13.5 Pa 上升至 141.6 Pa,损耗模量平台值从 5.3 Pa 上升至 26.2 Pa。结论:本研究结果表明靠近胚乳中心的蛋白质构象结构松散。

**关键词** 小麦籽粒; 不同部位; 蛋白质; 形貌; 流变特性

**文章编号** 1009-7848(2022)01-0314-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.01.034

小麦是重要的粮食作物,约 70%用于制粉。面粉制成的面制品是人们摄取能量和蛋白质的主要来源,是我国北方居民的主食。制粉是反复破碎、筛理,将皮层和胚芽从籽粒中分离出去,获得胚乳(面粉)的过程。根据破碎和筛理顺序,可以得到籽粒不同部位的面粉,俗称前路粉、中路粉和后路粉。一般而言,前路粉为靠近籽粒中心的胚乳,后路粉则为靠近籽粒外围皮层的胚乳。不同部位胚乳所含蛋白质的理化特性不同,所制成的面制品质量也不同。研究籽粒不同部位蛋白质的理化特性,可为面粉质量控制和专用粉生产提供帮助。小麦籽粒由胚乳(82.7%~83.7%)、皮层(13.1%~14.3%)和胚(3%)组成<sup>[1]</sup>。蛋白质和淀粉是小麦籽粒的主要组成成分,二者分别占成熟小麦籽粒重的 9%~15%和 65%~70%,其含量和组成决定了小麦籽粒的品质和最终加工用途<sup>[2]</sup>。蛋白质中 80%是面筋蛋白,其为面团提供独特的黏弹性,使小麦面粉适用于生产多种多样的面制品,如面包和面条等<sup>[3]</sup>。不溶于十二烷基硫酸钠溶液(Sodium dodecyl sulfate, SDS)的蛋白质被称为谷蛋白大聚体

(Glutenin macropolymer, GMP),其含量与面团流变学特性密切相关<sup>[4]</sup>。小麦籽粒不同部位的蛋白质<sup>[5]</sup>分布是不均匀的。王晓曦等<sup>[6]</sup>发现,蛋白质在越接近籽粒中心处含量越低,质量却很好,越接近皮层处含量越高,而质量较差。Zhong 等<sup>[7]</sup>在研究氮肥追肥时间对小麦籽粒不同部位蛋白质的空间分布和质量性状的影响时,发现粗蛋白、干面筋和谷蛋白大聚体的含量越接近胚乳中心越低。Wang 等<sup>[8]</sup>研究粉路中蛋白质组分的分布及其与面包品质的关系时,发现粗蛋白含量也呈现类似的分布趋势。Liu 等<sup>[9]</sup>研究粉路中的硫、蛋白质大小分布和游离氨基酸及其与面团流变学和面包制作特性的关系时,发现越靠近小麦籽粒胚乳中心,SDS 可溶和 SDS 不可溶蛋白在面粉中的占比越高。Pojić 等<sup>[10]</sup>采用化学计量学方法表征粉路粉的化学和流变性质时,发现蛋白质、湿面筋和干面筋均呈现先增加后降低的变化趋势。Banu 等<sup>[11]</sup>用工业磨制备样品,检测各粉路面粉理化特性和面团流变特性,结果表明,皮磨系统和心磨系统的粗蛋白和湿面筋含量从籽粒中心到外围总体上呈直线上升趋势,然而面筋指数各粉路之间差异并不显著。可见,蛋白质及其组分含量在籽粒中的分布已基本清晰,而籽粒中心面粉质量好的原因仍不清楚。本试验以同一批小麦籽粒为试验材料,分别使用碾米机、三皮

收稿日期: 2021-01-21

基金项目: 现代农业产业技术体系(CARS-03)

作者简介: 代美瑶(1994—),女,硕士生

通信作者: 张波 E-mail: zjb1978@126.com

三心实验磨和六皮八心磨粉机对应制备 7 份逐层碾磨粉,8 份三皮三心粉路粉和 36 份六皮八心粉路粉,采用亮度值( $L^*$ )与灰分的比值定量表征籽粒的部位,在检测参试粉的粗蛋白、干面筋、谷蛋白大聚体(十二烷基硫酸钠不溶性蛋白)等蛋白组分含量以及面筋持水率、十二烷基硫酸钠溶剂保持力等指标的基础上,重点研究参试粉十二烷基硫酸钠可溶蛋白的形貌和谷蛋白大聚体动态流变学特性,旨在探究籽粒不同部位蛋白质形貌和流变特性的差异,为解释磨制所得不同粉路粉制作面制品存在质量差异的原因提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

采用同一批师栾 02-1 小麦品种,河北金沙河面业集团有限责任公司 2018 年提供。逐层碾磨粉、三皮三心粉路粉,2018~2019 年在中国农业科学院农产品加工研究所制备。六皮八心粉路粉,2018 年在河北某企业制备。

### 1.2 设备与仪器

TM05-C 型碾米机,日本 SATAKE 公司;MLU 220 型实验磨,中国布勒机械制造有限公司;3-30K 型台式高速冷冻离心机,德国 SIGMA 公司;Thermomixer comfort 型恒温混匀仪,德国 EPPENDORF 公司;Vortex-Genie 2 型漩涡振荡器,美国 SCIENTIFIC INDUSTRIES 公司;ALPHA1-2LD-PLUS 型真空冷冻干燥机,德国 CHRIST 公司;DHG-9123A 型电热恒温鼓风干燥箱,中国精宏实验设备有限公司;CR-400/410 型色彩色差计,日本 PROCHEM PACIFIC 公司;DN2100 型杜马斯定氮仪,北京诺德泰科公司;Glutork2020 型电加热干燥器、CF 2015 型面筋指数仪,瑞典 Perten 公司;La Chrom 型高效液相系统,日本 Hitachi High Technologies 公司;DAWN Heleos-II 型多角度激光检测器、Optilab 型示差检测器,美国 Wyatt Technologies 公司;MCR502 型流变仪,奥地利 Anton Paar 公司。

### 1.3 方 法

#### 1.3.1 参试粉的制备

1) 逐层碾磨粉的制备 参考 Tosi 等<sup>[12]</sup>的方法,采用碾米机制备。用 8 目不锈钢筛网挑选均匀

饱满的小麦籽粒。将 200 g 籽粒逐层碾磨出 6 个样品,质量约占籽粒质量的 7%,6%,7%,10%,10%,10%,分别对应于富含果皮组织、糊粉层、亚糊粉层和 3 个逐渐靠近中心的胚乳,位置编号分别为 1,2,3,4,5,6。约占粒重 50%的剩余核心部位由于颗粒较小,无法使用碾米机制备,故采用实验磨粉机磨制,位置编号为 7,代表最接近中心的胚乳。

2) 三皮三心粉路粉的制备 将小麦籽粒水分调节至 15%,并用实验磨粉机进行磨粉,分别获得皮磨粉(B1,B2,B3)、心磨粉(R1,R2,R3)、细麸和粗麸,按照籽粒从外到内的顺序编号,分别对应位置编号 1~8,如表 1 所示。

3) 六皮八心磨粉机样品的制备 使用某企业车间六皮八心磨粉机进行制粉,组织多人在相同时间内收集各个粉路的面粉。对相近的粉路粉根据其流量进行配比得到 36 个面粉样品:皮磨粉 1B、2B、3B、3BF、4B、4BF、5B、5BF、6BF;重筛粉 D1、D2、D3、D4、D5、DS;打麸粉 DF;渣磨粉 1S、2S;心磨粉 1M1、1M2、1M3、2M1、2M2、3M1、3M2、4M1、4M2、5M1、5M2、6M1、6M2、7M、8M;尾磨粉 1T、2T;吸风粉 XF4。按照从外到内的部位,编制位置编号,根据制粉师的经验,来源于籽粒相近部位的面粉将编制相同的位置编号,36 个面粉分别编入 1~14 的位置编号,如表 1 所示。

由于位置编号 1 和 2 的参试粉中麸皮含量较高,基本不含面筋,并且其戊聚糖含量较高,对 GMP 组成和动态流变性质将产生影响<sup>[13]</sup>,故只选择位置编号 3~7 的逐层碾磨粉,编号 3~8 的三皮三心粉和编号 3~14 的六皮八心粉等参试粉进行研究。

1.3.2 色值的检测 采用色彩色差计检测,采用 Lab 色空间,用  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  等值表示。 $L^*$  是亮度值,0 代表黑色,100 代表白色。 $a^*$  是红绿值, $b^*$  是黄蓝值。每个参试粉平行测试 3 次。

1.3.3 灰分、粗蛋白、干面筋含量检测和面筋持水率的计算 参照 AACC 方法 08-01.01 测定灰分含量<sup>[14]</sup>。粗蛋白含量测定:参考 ISO/TS16634-2:2016 中所述的 Dumas 燃烧方法<sup>[15]</sup>,以天冬氨酸为标准,用杜马斯定氮仪检测,换算系数为 5.7。湿面筋参照 AACC 方法 38-10.01 制备<sup>[16]</sup>。干面筋含量

表1 三皮三心粉路粉和六皮八心粉路粉  
与对应的位置编号

Table 1 Correspondence between flour mill streams  
by experimental mill and industrial mill  
to position number

位置编号	三皮三心粉路粉	六皮八心粉路粉
1	粗麸	6BF
2	细麸	8M
3	3B	2T、7M
4	2B	DS、D5、DF
5	1B	3BF、5BF
6	3M	4BF、5B、6M1、6M2
7	1M	2S、1T、5M1、5M2
8	2M	D4、4B、1S
9	-	3B、D1、D3、4M1、4M2
10	-	1B、D2、XF4
11	-	2B
12	-	3M1、3M2
13	-	1M1、1M3、2M1、2M2
14	-	1M2

注：-，三皮三心粉路粉无此样品。表中皮磨系统(B)、渣磨系统(S)、心磨系统(M)、尾磨系统(T)和重磨系统(D)。

测定：参照 ISO 21415-3:2006<sup>[17]</sup>和 ISO 21415-4:2006<sup>[18]</sup>。采用式(1)计算面筋持水率。

$$\text{面筋持水率} = \frac{\text{湿面筋含量} - \text{干面筋含量}}{\text{干面筋含量}} \times$$

$$100\% \quad (1)$$

1.3.4 SDS可溶蛋白、GMP含量检测和 SDS 溶剂保持力的计算 参照 Don 等<sup>[19]</sup>的方法,称取 1.4 g 样品放入 50 mL 离心管( $m_1$ )内,旋涡振荡,同时加入超纯水 23.8 mL,平均分 2 次加入,振荡至样品完全分散在水中。加入 4.2 mL 的 10% SDS 溶液,盖紧瓶盖后手动缓慢上下颠倒,充分混匀。于 20 °C,20 000×g 离心 30 min。缓慢倒出上清液,倒扣离心管 10 s 后称重并记录上清液质量( $m_2$ )、离心管和沉淀质量( $m_3$ )。取 1 mL 上清液( $m_4$ ),在 50 °C 下干燥 48 h( $m_5$ ),利用杜马斯定氮仪分析 SDS 可溶蛋白质质量分数( $C$ )。采用式(2)和式(3)进行计算蛋白质质量分数( $w_1$ )<sup>[20]</sup>,采用式(4)计算 SDS 溶剂保持力(SRC),以质量分数计,数值以%表示。

$$w_1(\text{mg/g}) = \frac{C \times m_2 \times m_5}{1.4 \times m_4} \times 1000 \quad (2)$$

$$\text{GMP}(\text{mg/g}) = (w_2 - w_1) \times 1000 \quad (3)$$

$$\text{SRC} = \left( \frac{m_3 - m_1}{1.4} \times \frac{100 - 14}{100 - T_1} - 1 \right) \times 100\% \quad (4)$$

式中, $w_1$ ——单位质量组分中 SDS 可溶蛋白质质量分数 (mg/g); $w_2$ ——单位质量组分粗蛋白质质量分数 (mg/g); $m_1$ ——空离心管质量(g); $m_2$ ——上清液总质量 (g); $m_3$ ——离心管和离心后小麦 GMP 凝胶的总质量 (g); $m_4$ ——1 mL 上清液的质量(g); $m_5$ ——1 mL 上清液干燥后的质量(g); $C$ ——各组分蛋白质质量分数(%);1.40——公式(2)中各组分样品的质量(g);1.40——公式(4)中试样质量(g);14——将溶剂保持力转换成 14% 湿基标准的水分含量; $T_1$ ——试样的水分质量(g)。

1.3.5 蛋白质形貌特征分析 SDS 可溶性蛋白形貌特征参考 Fang 等<sup>[21]</sup>的方法,采用尺寸排阻色谱 (SEC) 和多角度激光散射 (MALLS) 联用技术进行十八角度激光光散射仪检测。十八角度激光光散射仪配备 La Chrom 型高效液相系统:Hitachi L-2130 泵和 Hitachi L-2400 紫外检测器。检测器工作波长为 280 nm。色谱柱:TSK G4000 SWXL,规格 7.8 mm×300 mm,柱温 25 °C。流动相:0.1%–50 mmol/L 磷酸缓冲液,流速 0.5 mL/min,使用前先超声 30 min,再用 0.2 μm 的滤膜过滤。DAWN Heleos-II 激光检测器:检测波长 658 nm,工作温度 25 °C;Optilab 型示差检测器:特定示差折光增量(dn/dc)0.185 mL/g;进样量 200 μL。

检测结果分为激光信号、示差信号和紫外信号,标样牛血清白蛋白的洗脱图如图 1 所示。采用系统自带的 ASTRA 软件分析,可得到样品的  $M_w$ 、 $M_n$  和  $R_{gz}$  等指标。 $M_w$  是指样品的重均摩尔质量。 $R_{gz}$  是指样品的 z-均回转半径,用于描述粒子形状的大小<sup>[21–22]</sup>。 $M_w/R_{gz}^3$  表示样品粒子的紧密度,比值越大,越致密。 $M_w/M_n$  为多分散系数,用于表征样品粒子摩尔质量的分布,该值越接近 1,样品越均

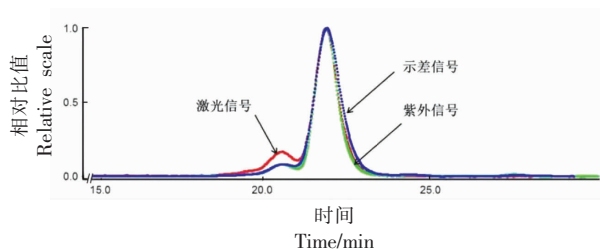


图1 标样牛血清白蛋白的洗脱图

Fig.1 Elution profiles of bovine serum albumin

匀;该值越大,分布越宽,组成越复杂<sup>[23]</sup>。

**1.3.6 动态流变特性的检测** 参考 Don 等<sup>[19]</sup>的方法,采用流变仪检测 GMP 凝胶的流变特性。在谷蛋白大聚体提取过程中,加入 SDS 离心得到沉淀,沉淀表面的胶状物质为谷蛋白大聚体凝胶。用小勺子轻刮收集 GMP 凝胶约 1 g。将 GMP 凝胶转移至流变仪平板中心,选择 25 mm 直径的平行几何平板,平板间间隙为 1 mm,加盖,静置 5~10 min。采用应变扫描,温度 20 ℃,固定频率 1 Hz,应变扫描范围 0.01%~100%。随着凝胶形变增加,应力基本不变的区域被称为线性黏弹区,其平台值分别代表样品的储能模量 ( $G'$ ) 和损耗模量 ( $G''$ ),如图 2 所示。 $G'$  代表样品的固体或弹性特性, $G''$  代表样品的液体或黏性特性。 $G''/G'$  定义为  $\tan\delta$ ,当  $\tan\delta > 1$  时,样品总体呈现液体或黏性体系;反之,当  $\tan\delta < 1$  时,则呈现固体或弹性体系<sup>[24]</sup>。

#### 1.4 数据分析

采用 Excel 2010 整理数据,Origin 8.6 处理数据以及绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 灰分含量和亮度值 ( $L^*$ )

参试小麦的逐层碾磨粉、三皮三心粉路粉和六皮八心粉路粉的灰分含量和亮度值 ( $L^*$ ) 如图 3a~3b 所示。越接近胚乳中心,灰分含量越低, $L^*$  值越高;越接近皮层,灰分含量越高, $L^*$  值越低。灰分含量在麦心粉中变化幅度较小,位置分辨率较

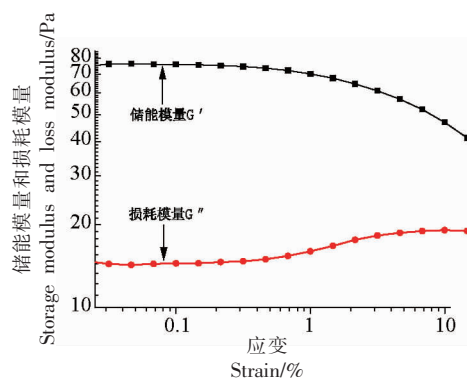


图 2 GMP 动态流变特性

Fig.2 GMP dynamic rheology

低; $L^*$  值变化幅度较大,波动较大,故采用  $L^*$  值和灰分含量的比值(简称  $L^*/$ 灰分)作为参试粉在籽粒中位置定量表征指标,即比值越小越靠近皮层,比值越大越靠近胚乳中心。

5 份逐层碾磨粉、6 份三皮三心粉路粉和 34 份六皮八心粉路粉的位置编号与  $L^*/$ 灰分的关系如图 3c 所示。45 份参试粉的位置编号与  $L^*/$ 灰分的线性回归系数  $R^2$ (简称  $R^2$ )为 0.499( $P < 0.01$ );5 份逐层碾磨粉的位置编号与  $L^*/$ 灰分的  $R^2$  为 0.742( $P < 0.05$ );6 份三皮三心粉路粉和 34 份六皮八心粉路粉的位置编号与  $L^*/$ 灰分的  $R^2$  分别为 0.894( $P < 0.01$ )和 0.530( $P < 0.01$ )。

将碾米机逐层碾磨粉作为标准,位置编号 3~7 的样品,分别对应小麦籽粒的亚糊粉层、胚乳外围、胚乳次外围、胚乳中心外围、胚乳中心。从图 3c 可知,三皮三心粉路粉和六皮八心粉路粉所对

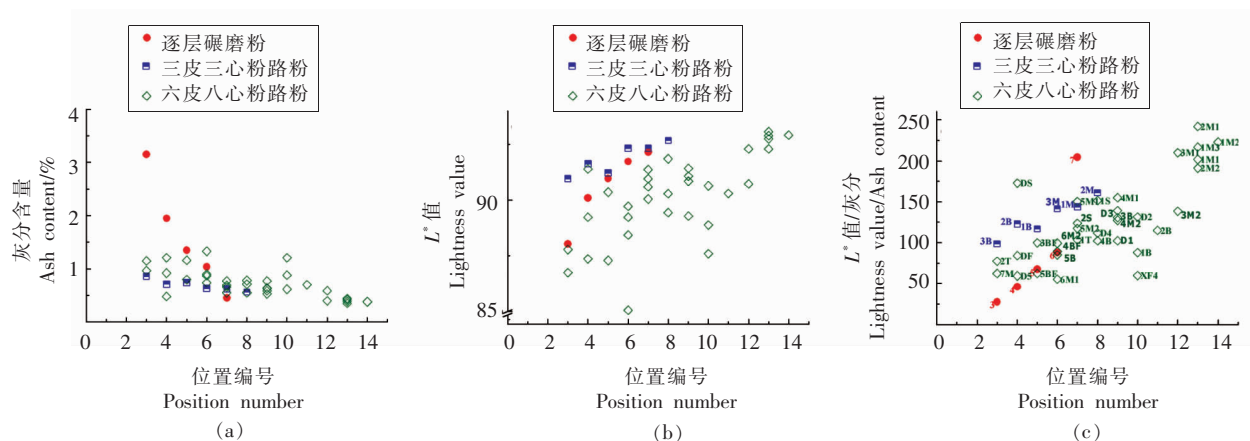


图 3 小麦籽粒不同部位制粉的灰分(a)、亮度值  $L^*$ (b)和  $L^*/$ 灰分(c)

Fig.3 The ash content (a), lightness (b),  $L^*/$  ash (c) of flour from different fractions of wheat kernels

应的小麦籽粒的不同部位,比如:三皮三心粉路粉中 1M、2M 和 3M,六皮八心粉路粉中 1M1、1M2、1M3、2M1、2M2、3M1、4M1、5M1、1S 和 DS 与代表胚乳中心的位置编号 7 对应。如表 2 所示,对应位置编号 6 和 7 的三皮三心粉路粉的出粉率分别为 50.1%和 12.8%,对应位置编号 5、6 和 7 的六皮八

心粉路粉的出粉率分别为 5.5%、27.9%、40.4%。通过计算出粉率发现,三皮三心粉路粉样品的出粉率和逐层碾磨粉样品的出粉率类似。而六皮八心粉路粉的出粉率和逐层碾磨粉样品存在差别,胚乳中心的出粉率要低于前两种制备方式。

表 2 不同制备方式的小麦籽粒不同部位制粉的出粉率

Table 2 Extraction rate of flour from different fractions of different preparation methods

逐层碾磨粉位置编号	$L^*$ /灰分范围	出粉率/%		
		逐层碾磨粉	三皮三心粉路粉	六皮八心粉路粉
7	146.5~260.0	50	50.1	40.4
6	77.8~146.5	10	12.8	27.9
5	56.8~77.8	10	-	5.5
4	37.1~56.8	10	-	-
3	10.0~37.08	7	-	-

## 2.2 粗蛋白含量、干面筋和 GMP 在总蛋白中占比

越接近胚乳中心, $L^*$ /灰分越大,粗蛋白的含量呈逐渐降低的趋势,如图 4a 所示。45 份参试粉的  $L^*$ /灰分与粗蛋白含量的  $R^2$  为 0.704 ( $P < 0.01$ ); 5 份逐层研磨粉的  $L^*$ /灰分与粗蛋白含量的  $R^2$  为 0.844 ( $P < 0.05$ ); 6 份三皮三心粉路粉和 34 份六皮八心粉路粉的  $L^*$ /灰分与粗蛋白含量的  $R^2$  分别为 0.679 ( $P < 0.05$ ) 和 0.646 ( $P < 0.01$ )。越靠近胚乳中心,45 份参试粉的干面筋、SDS 可溶蛋白和 GMP

含量均呈现出逐渐降低的趋势(数据未提供)。

如图 4b 所示, $L^*$ /灰分越大,干面筋在总蛋白中占比呈逐渐增加的趋势,表明与粗蛋白含量的降低速率相比,干面筋含量的降低速率较小;45 份参试粉的  $L^*$ /灰分与干面筋在总蛋白中占比(简称干面筋占比)的  $R^2$  为 0.299 ( $P < 0.01$ ); 5 份逐层研磨粉的  $L^*$ /灰分与干面筋占比的  $R^2$  为 0.985 ( $P < 0.01$ ); 6 份三皮三心粉路粉和 34 份六皮八心粉路粉的  $L^*$ /灰分与干面筋占比的  $R^2$  分别为 0.596 ( $P < 0.05$ ) 和 0.283 ( $P < 0.01$ )。其中,六皮八心粉路粉中

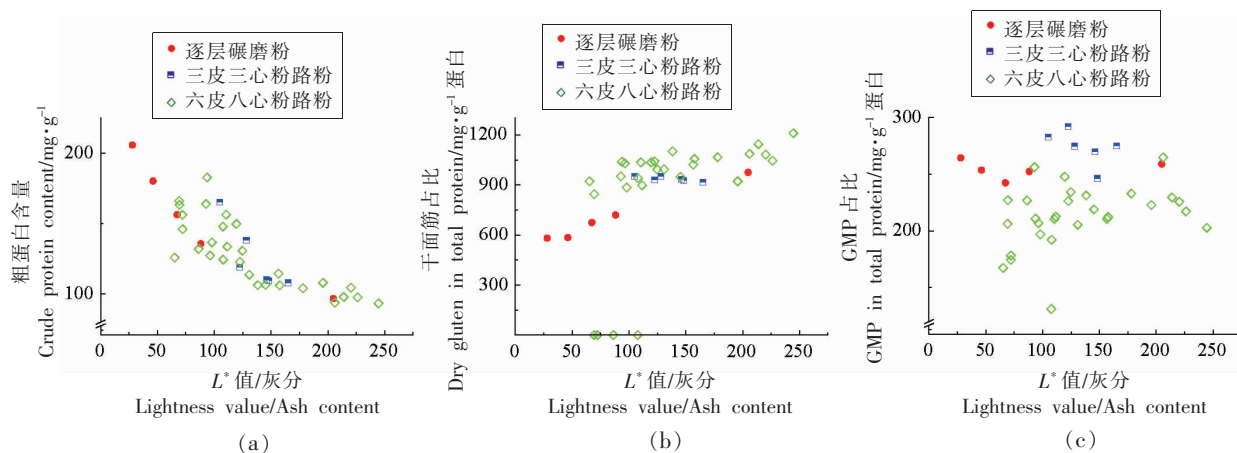


图 4 小麦籽粒不同部位制粉的粗蛋白含量(a)、干面筋(b)和 GMP(c)在总蛋白中的占比

Fig.4 The content of crude protein (a) in flour, the content of dry gluten (b) and GMP (c) in total protein from different fractions of wheat kernels

2T、D5、5BF、6M2、4M1 等 5 份参试粉无法制得面筋,其干面筋占比按 0 处理。如图 4c 所示, $L^*$ /灰分越大,GMP 在总蛋白中占比基本不变,表明其降低速率与粗蛋白含量降低速率基本一致。

### 2.3 面筋持水率和 SDS 持溶剂力

小麦籽粒不同部位制粉的面筋持水率和 SDS 持溶剂力与  $L^*$ /灰分的关系如图 5 所示。 $L^*$ /灰分越大,面筋持水率呈现出逐渐增加的趋势;SDS 溶剂保持力呈现出逐渐降低的趋势。45 份参试粉的  $L^*$ /灰分与面筋持水率、SDS 持溶剂力的  $R^2$  分别为

0.180 ( $P < 0.01$ ) 和 0.310 ( $P < 0.01$ ); 5 份逐层研磨粉的  $L^*$ /灰分与面筋持水率、SDS 持溶剂力的  $R^2$  分别为 0.580 和 0.497; 6 份三皮三心粉路粉面筋持水率、SDS 持溶剂力的  $R^2$  分别为 0.692 ( $P < 0.05$ ) 和 0.529 ( $P > 0.05$ ); 34 份六皮八心粉路粉与面筋持水率、SDS 持溶剂力的  $R^2$  分别为 0.213 ( $P < 0.01$ ) 和 0.177 ( $P < 0.05$ )。其中,六皮八心粉路粉中 2T、D5、5BF、6M2、4M1 等 5 份参试粉无法制得面筋,其面筋持水率按 0 处理。

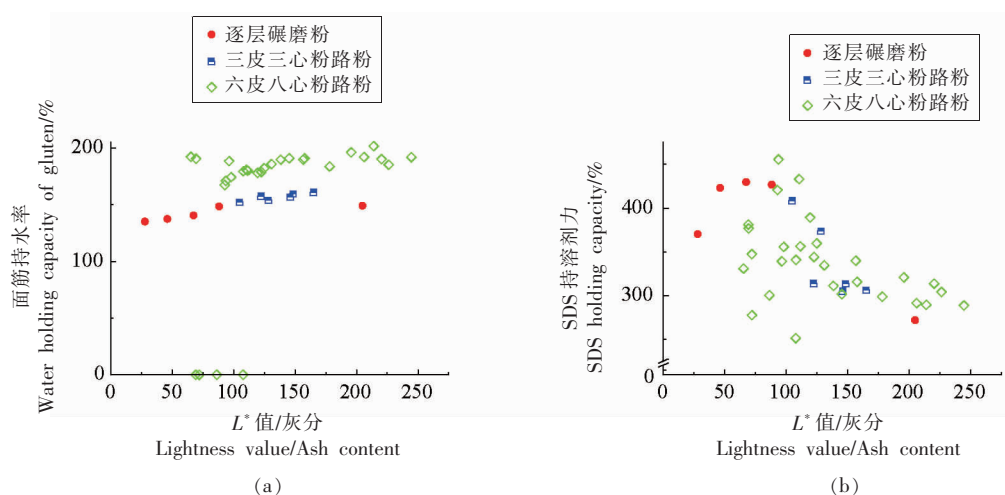


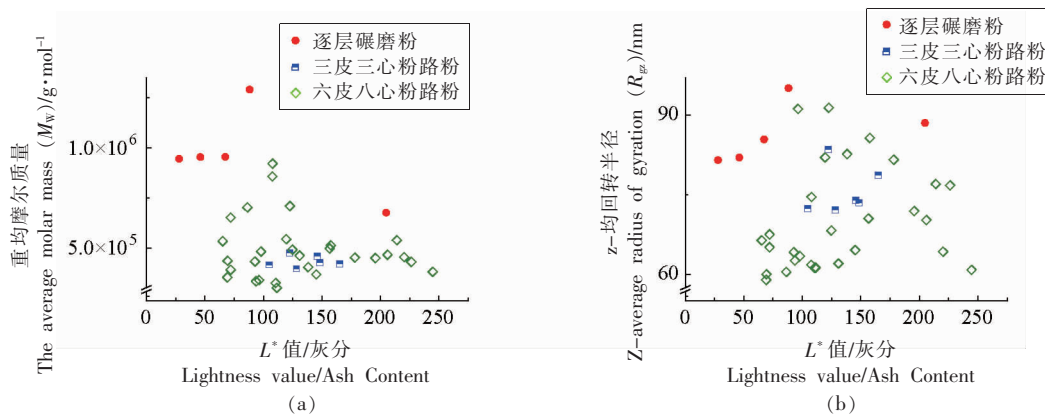
图 5 小麦籽粒不同部位制粉的面筋持水率(a)和 SDS 持溶剂力(b)

Fig.5 Water holding capacity of gluten (a) and SDS holding capacity (b) of flour from different fractions of wheat kernels

### 2.4 SDS 可溶蛋白形貌

小麦籽粒不同部位制粉的 SDS 可溶蛋白形貌特征如图 6 所示。越接近胚乳中心, $L^*$ /灰分越大,SDS 可溶蛋白重均摩尔质量和多分散指数呈现出波动后降低的趋势, $z$ -均回转半径变化趋势不明显,密度总体呈逐渐降低的趋势。

45 份参试粉的  $L^*$ /灰分与密度的  $R^2$  为 0.096; 5 份逐层研磨粉的  $L^*$ /灰分与密度的  $R^2$  为 0.980 ( $P < 0.01$ ); 6 份三皮三心粉路粉与密度的  $R^2$  为  $-0.203$ ; 34 份六皮八心粉路粉的  $L^*$ /灰分与密度的  $R^2$  为 0.078。



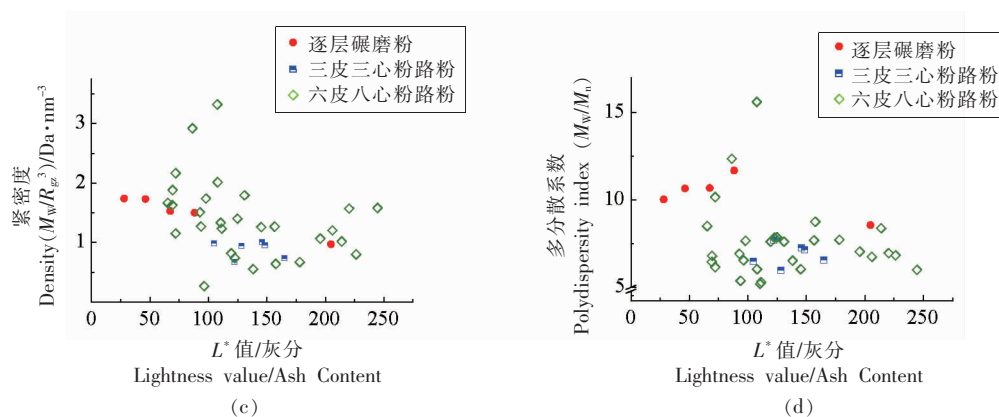


图6 小麦籽粒不同部位制粉的 SDS 可溶蛋白形貌

Fig.6 Morphology of SDS soluble protein of flour from different fractions of wheat kernels

## 2.5 小麦籽粒不同部位制粉的 GMP 动态流变

小麦籽粒不同部位制粉的 GMP 动态流变如图 7 所示。 $L^*$ /灰分越大, GMP 凝胶的  $G'$  和  $G''$  平台值均呈现逐渐增加的趋势; 除个别样品存在波动, 损耗因子整体上基本不变或呈现略有降低的趋势。

45 份参试粉的  $L^*$ /灰分与  $G'$ 、 $G''$  平台值的  $R^2$

分别为 0.511 ( $P < 0.01$ ) 和 0.517 ( $P < 0.01$ ); 5 份逐层研磨粉的  $L^*$ /灰分与  $G'$ 、 $G''$  平台值的  $R^2$  分别为 0.953 ( $P < 0.01$ ) 和 0.931 ( $P < 0.01$ ); 6 份三皮三心粉路粉的  $L^*$ /灰分与  $G'$ 、 $G''$  平台值的  $R^2$  分别为 0.268 和 0.272; 34 份六皮八心粉路粉的  $L^*$ /灰分与  $G'$ 、 $G''$  平台值的  $R^2$  分别为 0.426 ( $P < 0.01$ ) 和 0.429 ( $P < 0.01$ )。

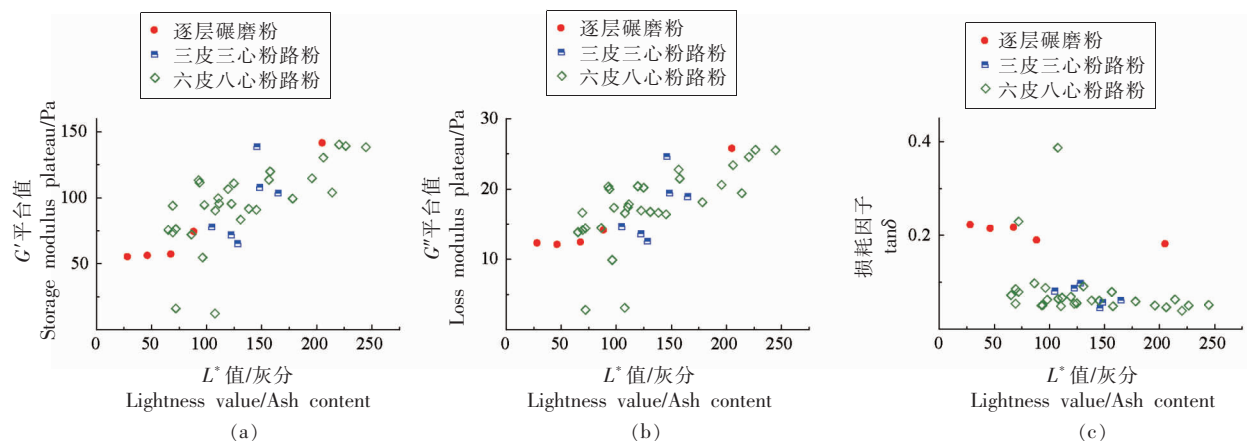


图7 小麦籽粒不同部位制粉的 GMP 动态流变

Fig.7 GMP dynamic rheology of flour from different fractions of wheat kernels

## 3 讨论

越接近胚乳中心, 灰分含量越低,  $L^*$  值越高。使用  $L^*$ /灰分比值表征籽粒部位, 增加了表征指标的变化范围, 提高了胚乳中心部位的分辨率, 是定量表征参试粉在籽粒中位置的适宜指标。

研究发现, 越靠近小麦籽粒胚乳中心, 粗蛋白、干面筋、SDS 可溶蛋白和谷蛋白大聚体含量越

低, 这与前人发现小麦籽粒中蛋白质含量变化的结果一致<sup>[7,10,25-26]</sup>。从小麦籽粒的最外层到最内层, GMP 含量在总蛋白中的占比基本保持不变或略有下降。而干面筋的占比呈现出逐渐增加的趋势, 这与 He 等<sup>[5]</sup>的研究结果一致。越靠近胚乳中心, 面筋持水率越高, 面筋吸水能力越强, 这与王义斌<sup>[27]</sup>研究发现胚乳中面筋蛋白分布由外向内的质

量逐渐变好的观点一致。面粉 SDS 持溶剂力逐渐降低与刘晓菲<sup>[28]</sup>研究小麦籽粒不同层次面粉 SDS-沉降值变化趋势一致,却不同于 Zhou 等<sup>[25]</sup>试验中 SDS-沉降值变化趋势。

通过 SEC-MALLS 研究了来自小麦籽粒不同部位 SDS 可溶性蛋白的构象,其中  $M_w$  和  $R_{gz}$  可以指示聚合物的构象状态,这些变量之间的关系如式(5)所示。

$$R_{gz} = K \times M_w^\alpha \quad (5)$$

常数  $\alpha$  推导溶液中聚合物的构象。从理论上讲,当  $\alpha=0.33$  时,聚合物构型为球形,而当  $0.4 < \alpha < 0.6$  时,则存在无规卷曲,当  $\alpha=1.0$  时,构型为棒状<sup>[29]</sup>。此外, Mendichi 等<sup>[30]</sup>认为,当  $\alpha < 0.33$  时,聚合物的构象是致密的准球形。本试验中 SDS 可溶性蛋白的  $\alpha$  值均低于 0.33,所以其构型是准球形的,这与 Zhao 等<sup>[31]</sup>结果相符。随着  $L^*$  灰分比值越大,离籽粒中心较近时,SDS 可溶蛋白的重均分子量呈现出波动后降低的趋势, $z$ -均回转半径变化趋势不明显, $M_w/R_{gz}^3$  值总体上呈现出逐渐降低的趋势,表明 SDS 可溶蛋白聚集体形态变得松散,这个结果与 Carceller 等<sup>[32]</sup>发现类似,随着蛋白质聚集体重均分子质量的增加,其致密性也增加。Stevenson 等<sup>[33]</sup>也验证了这一点,较低分子质量的蛋白质聚合物构象松散,而较高分子质量构象则更紧密。多分散指数总体上呈现出波动后降低的趋势,越靠近皮层,样品的成分越复杂。

GMP 如需检测形貌,需用超声将其分散在 SDS 溶液中,已破坏其构象<sup>[34]</sup>,故采用动态流变学间接检测表征其形貌。GMP 粒子尺寸大小和浓度会影响 GMP 凝胶的动态流变学性质<sup>[19]</sup>。GMP 在总蛋白中占比基本不变,而储能模量和损耗模量同时增加,说明 GMP 凝胶结构存在差异<sup>[13]</sup>。可能是 GMP 粒子构象疏松,增强了疏水氨基酸残基的暴露程度,加强了疏水相互作用,使得聚集体缠结概率增加。进一步增加了 GMP 粒子尺寸,使储能模量和损耗模量呈现出增加的趋势<sup>[35]</sup>。

综上,小麦籽粒中心部位蛋白质的构象可能比其它部分松散,故当面筋蛋白含量基本相同时,籽粒中心部位样品会形成更大的面筋网络结构,包裹更多的蛋白质和水,引起干面筋占比增加,以及面筋持水率增加。此外,松散的蛋白质构象增加

了蛋白质聚集体缠结的概率,引起储能模量和损耗模量平台值的增加。

## 4 结论

$L^*$  灰分含量是定量表征小麦籽粒从外到内不同部位的有效指标。越接近小麦胚乳中心,粗蛋白含量越低,干面筋在总蛋白中占比越高,GMP 在总蛋白中占比变化趋势不明显;面筋持水率越高,SDS 溶剂保持力越低。SDS 可溶性蛋白的密度 ( $M_w/R_{gz}^3$ ) 总体上呈现出逐渐降低的趋势。GMP 凝胶的储能模量和损耗模量平台值呈现逐渐增加的趋势。基于这些结果推测,靠近胚乳中心蛋白质构象的结构松散,面筋网络能够包裹更多的蛋白质和水,松散的构象增加了聚集体缠结的概率,引起储能模量和损耗模量平台值的增加。

## 参 考 文 献

- [1] BARRON C, SURGET A, ROUAU X. Relative amounts of tissues in mature wheat (*Triticum aestivum* L.) grain and their carbohydrate and phenolic acid composition[J]. *Journal of Cereal Science*, 2007, 45(1): 88-96.
- [2] MORELL M K, RAHMAN S, ABRAHAMS S L, et al. The biochemistry and molecular biology of starch synthesis in cereals[J]. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1995, 22(4): 647-660.
- [3] LANDRISCINA L, D'AGNELLO P, BEVILACQUA A, et al. Impact of gluten-friendly™ technology on wheat kernel endosperm and gluten protein structure in seeds by light and electron microscopy[J]. *Food Chemistry*, 2017, 221: 1258-1268.
- [4] DON C, LICHTENDONK W, PLIJTER J J, et al. Glutenin macropolymer: A gel formed by glutenin particles[J]. *Journal of Cereal Science*, 2003, 37(1): 1-7.
- [5] HE J, PENSON S, POWERS S J, et al. Spatial patterns of gluten protein and polymer distribution in wheat grain[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2013, 61(26): 6207-6215.
- [6] 王晓曦, 陈颖, 徐荣敏, 等. 小麦加工工艺与小麦粉品质[J]. *粮食与饲料工业*, 2006(10): 9-12.  
WANG X X, CHEN Y, XU R M, et al. Wheat processing technology and wheat flour wheat pro-



- cessing technology and wheat flour quality[J]. Cereal and Feed Industry, 2006(10): 9-12.
- [7] ZHONG Y, YANG M, CAI J, et al. Nitrogen top-dressing timing influences the spatial distribution patterns of protein components and quality traits of flours from different pearling fractions of wheat (*Triticum aestivum* L.) grains[J]. Field Crops Research, 2018, 216: 120-128.
- [8] WANG Y G, KHAN K, HARELAND G, et al. Distribution of protein composition in bread wheat flour mill streams and relationship to breadmaking quality[J]. Cereal Chemistry, 2007, 84(3): 104-107.
- [9] LIU Y, OHM J, HARELAND G, et al. Sulfur, protein size distribution, and free amino acids in flour mill streams and their relationship to dough rheology and breadmaking traits[J]. Cereal Chemistry, 2011, 88(2): 109-116.
- [10] POJIĆ M M, SPASOJEVIĆ N B, ATLAS M Đ. Chemometric approach to characterization of flour mill streams: Chemical and rheological properties[J]. Food & Bioprocess Technology, 2014, 7(5): 1298-1309.
- [11] BANU I, STOENESCU G, IONESCU V, et al. Physicochemical and rheological analysis of flour mill streams[J]. Cereal Chemistry, 2010, 87(2): 1002120907-1002120117.
- [12] TOSI P, GRITSCH C S, HE J, et al. Distribution of gluten proteins in bread wheat (*Triticum aestivum*) grain[J]. Annals of Botany, 2011, 108(1): 23-35.
- [13] WANG M W, TON V V, ROBERT J H. How gluten properties are affected by pentosans[J]. Journal of Cereal Science, 2004, 39(3): 395-402.
- [14] AACC International. Approved methods of analysis (11th ed). Method 08-01[S]. St. Paul, MN: AACC International, 2010.
- [15] International Organization for Standardization. Food products - Determination of the total nitrogen content by combustion according to the Dumas principle and calculation of the crude protein content - Part 2: Cereals, pulses and milled cereal products: ISO/TS16634-2:2016[S]. Switzerland: International organization for standardization, 2016.
- [16] AACC International. Approved methods of analysis (11th ed.) Method 38-10.01[S]. St. Paul, MN: AACC International, 2010.
- [17] International Organization for Standardization. Wheat and wheat flour - Gluten content - Part 3: Determination of dry gluten from wet gluten by an oven drying method: ISO 21415-3:2006[S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 2006.
- [18] International Organization for Standardization. Wheat and wheat flour - Gluten content - Part 4: Determination of dry gluten from wet gluten by a rapid drying method: ISO 21415-4:2006[S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 2006.
- [19] DON C, LICHTENDONK W J, PLIJTER J J, et al. Understanding the link between GMP and dough: From glutenin particles in flour towards developed dough[J]. Journal of Cereal Science, 2003, 38(2): 157-165.
- [20] LI F, ZHANG Y, LI M, et al. The impact of extrusion parameters on the glutenin macropolymer content of flour-water dough[J]. Journal of Cereal Science, 2019, 90: 102849.
- [21] FANG Y, ZHANG B, WEI Y, et al. Effects of specific mechanical energy on soy protein aggregation during extrusion process studied by size exclusion chromatography coupled with multi-angle laser light scattering[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 115(2): 220-225.
- [22] YANG Q, QI L, LUO Z, et al. Effect of microwave irradiation on internal molecular structure and physical properties of waxy maize starch[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 69: 473-482.
- [23] TANG C H, MA C Y. Effect of high pressure treatment on aggregation and structural properties of soy protein isolate[J]. Lwt Food Science & Technology, 2009, 42(2): 611.
- [24] KHATKAR B S, BELL A E, SCHOFIELD J D. The dynamic rheological properties of glens and gluten sub-fractions from wheats of good and poor bread making quality[J]. Journal of Cereal Science, 1995, 22(1): 29-44.
- [25] ZHOU Q, LI X, YANG J, et al. Spatial distribution patterns of protein and starch in wheat grain affect baking quality of bread and biscuit[J]. Journal of Cereal Science, 2018, 79: 362-369.
- [26] 魏帅, 魏益民, 郭波莉. 小麦制粉系统各粉路产品铅、镉含量特征[J]. 中国食品学报, 2016, 16(9): 206-210.

- WEI S, WEI Y M, GUO B L. Pb and Cd concentration in different flour flow of wheat milling system [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(9): 206–210.
- [27] 王义斌. 制粉流程各系统粉流特性分析[J]. 粮食与饲料工业, 2005(4): 10–13.
- WANG Y B. Analysis of flour flow characteristics of each system in processing process [J]. Cereal and Feed Industry, 2005(4): 10–13.
- [28] 刘晓菲. 配方面粉和小麦籽粒不同层次面粉理化特性及其饼干加工品质研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- LIU X F. Formular flour and flour in pearling fractions of grains on flour physicochemical properties and biscuits processing quality[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.
- [29] MEZIANI S, NADAUD I, GAILLARD–MARTINIE B, et al. Proteomic analysis of the mature kernel aleurone layer in common and durum wheat[J]. Journal of Cereal Science, 2012, 55(3): 323–330.
- [30] MENDICHI R, FISICHELLA S, SAVARINO A. Molecular weight, size distribution and conformation of glutenin from different wheat cultivars by SEC–MALLS[J]. Journal of Cereal Science, 2008, 48(2): 486–493.
- [31] ZHAO L, LI L, LIU G Q, et al. Effect of frozen storage on molecular weight, size distribution and conformation of gluten by SAXS and SEC–MALLS[J]. Molecules, 2012, 17(6): 7169–7182.
- [32] CARCELLER J L, AUSSÉNAC T. Size characterisation of glutenin polymers by HPSEC–MALLS [J]. Journal of Cereal Science, 2001, 33(2): 131–142.
- [33] STEVENSON S G, YOU S, IZYDORCZYK M S, et al. Characterization of polymeric wheat proteins by flow field - Flow fractionation/MALLS[J]. Journal of Liquid Chromatography, 2003, 26(17): 2771–2781.
- [34] ARFVIDSSON C, WAHLUND K G, ELIASSON A C. Direct molecular weight determination in the evaluation of dissolution methods for unreduced glutenin[J]. Journal of Cereal Science, 2004, 39(1): 1–8.
- [35] DON C, LOOKHART G, NAEEM H, et al. Heat stress and genotype affect the glutenin particles of the glutenin macropolymer–gel fraction[J]. Journal of Cereal Science, 2005, 42(1): 69–80.

### The Morphological and Rheological Properties of Protein from Different Fractions of Wheat Kernels (*Triticum aestivum* L.)

Dai Meiyao<sup>1</sup>, Zhang Yingqian<sup>1</sup>, Pan Weichun<sup>2</sup>, Zhang Bo<sup>1\*</sup>, Guo Boli<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193

<sup>2</sup>Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018)

**Abstract** **Objection:** To explore the distribution of protein morphology and rheological characteristics from different fractions of wheat kernels, and to provide a theoretical basis for explaining the differences in the quality of flour products from different flour mill streams. **Methods:** The flour was prepared by pearling mill, experimental mill and industrial mill. On the basis of protein quality and quantity, the flour was used to detect the morphology of sodium dodecyl sulfate soluble protein and the dynamic rheological properties of gluten macropolymer. **Results:** The closer to the wheat endosperm center, the crude protein content decreased from 205.9 mg/g to 93.4 mg/g, the percentage of dry gluten in total protein increased from 0 mg/g to 1 210.2 mg/g, but the trend of gluten macropolymer in total protein is not obvious; the higher the water holding capacity of gluten, the lower the sodium dodecyl sulfate solvent retention. The density of sodium dodecyl sulfate soluble protein generally showed a gradual decrease, but the storage modulus and loss modulus plateau values of gluten macropolymer gel showed an opposite trend. They increased from 13.5 Pa to 141.6 Pa, 5.3 Pa to 26.2 Pa separately.  $L^*$ ash can be used to quantitatively characterize the different fractions of wheat kernels from outside to inside effectively. **Conclusions:** The results showed the protein conformation structure near the endosperm center is loose.

**Keywords** wheat kernels; different fractions; protein; morphology; rheological properties