

## 热处理对谷物粉物化性质及淀粉体外消化性的影响

生庆海<sup>1</sup>, 龙金利<sup>1</sup>, 李朋亮<sup>2</sup>, 赵巍<sup>2</sup>, 张爱霞<sup>2\*</sup>, 刘敬科<sup>3\*</sup>

(<sup>1</sup>河北经贸大学生物科学与工程学院 石家庄 050071)

(<sup>2</sup>河北省农林科学院生物技术与食品科学研究所 石家庄 050050)

(<sup>3</sup>河北省农林科学院谷子研究所 国家谷子改良中心 河北省杂粮研究实验室 石家庄 050035)

**摘要** 为了研究热处理对谷物粉物化性质和淀粉体外消化性的影响,测定燕麦、小米和玉米 3 种谷物粉经蒸汽和烘烤热处理前、后糊化特性、膨胀势、吸水性和不同淀粉组成含量的变化。结果表明:热处理使燕麦粉的糊化温度显著降低、小米粉和玉米粉显著升高( $P<0.05$ ),燕麦粉和小米粉的回生值显著升高、玉米粉显著降低( $P<0.05$ ),玉米粉峰值黏度和崩解值显著降低( $P<0.05$ ),燕麦粉和小米粉的变化不同;蒸汽和烘烤处理使燕麦粉膨胀势分别降低 32%和 12%,吸水性指数升高 20%以上,但是小米粉和玉米粉变化较小;热处理使 3 种谷物粉水溶性指数降低 28%~55%;热处理使 3 种谷物粉中快消化淀粉含量降低 10%~20%,慢消化淀粉含量升高 3%~30%,抗性淀粉含量升高 20%,尤其热处理对燕麦淀粉组成含量影响最大。扫描电镜观察燕麦、小米和玉米淀粉颗粒直径分别为 5, 10, 15  $\mu\text{m}$ ,经热处理后淀粉发生团聚和黏结现象,尤其燕麦淀粉团聚和黏结程度最大。结论:适当的预处理可以改变谷物粉的物化特性,进而改善其加工性能。热处理改变了谷物淀粉的构成,减缓了淀粉的消化性,提高了其功能特性。

**关键词** 热处理; 谷物粉; 物化特性; 消化特性

文章编号 1009-7848(2022)09-0170-08 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2022.09.018

热处理是谷物粉品质改良的一项新技术,不仅可以改变谷物粉的物化特性,提升产品的感官品质,而且对其消化特性有一定影响,从而改变产品的营养和功能品质。Li 等<sup>[1]</sup>研究发现湿热处理后小麦粉和淀粉的峰值黏度降低,糊化温度升高。Keppler 等<sup>[2]</sup>发现干热处理有助于面粉在高温下淀粉颗粒发生溶胀,面粉中蛋白质变性。Hu 等<sup>[3]</sup>对小麦籽粒进行湿热处理,发现面团强度和黏度显著提高,面条有较高的硬度、弹性和咀嚼性,且蒸煮损失较低。马岁祥等<sup>[4]</sup>研究发现,淀粉经过热蒸汽处理,淀粉的糊化特性、热焓特性、粒径及结晶特性等发生改变。热处理可使大米和糯米的快消化淀粉(RDS, Ready digestible starch)和慢消化淀粉(SDS, Slowly digestible starch)含量下降,抗性淀粉(RS, Resistant starch)含量上升<sup>[5]</sup>,从而改变加

工食品营养和功能性质。

本研究对燕麦粉、小米粉和玉米粉进行热处理,探究蒸汽处理和烘烤处理方式对谷物粉加工特性和淀粉消化性的影响。通过比较热处理谷物粉的物化特性和淀粉消化性,选择合适的热处理方式,改变谷物粉的消化性,降低可消化淀粉含量,提高抗性淀粉含量,旨在为糖尿病患者主食食品的研制提供优质原料,为谷物粉深加工提供理论依据。

### 1 材料与方法

#### 1.1 材料与设备

1.1.1 试验材料 燕麦、玉米,市售;小米(冀谷 39),河北省农林科学院谷子研究所。

淀粉葡萄糖苷酶、 $\alpha$ -淀粉酶、胃蛋白酶(1:10 000),Sigma 有限公司;无水葡萄糖,北京中科质检生物技术有限公司;3-5 二硝基水杨酸,上海易恩化学技术有限公司;Tris、马来酸,Amresco 公司;HCl、KCl、乙酸钠、NaOH,国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 仪器与设备 SP-752 型紫外-可见分光光度计,上海化科试验器材有限公司;波通 RVA-

收稿日期: 2021-09-20

基金项目: 河北省重点研发计划项目(19227129D);财政部和农业农村部;国家现代农业产业技术体系资助项目(CARS-06-13.5-A29);石家庄市科学技术研究与发展计划项目(201170032A)

作者简介: 生庆海(1970—),男,博士,教授

通信作者: 张爱霞 E-mail: zhangaixia1977@126.com

刘敬科 E-mail: liujingke79@163.com

Temaster 快速黏度仪,波通瑞华科学仪器有限公司;TMS-PRO 质构仪,美国 FTC 公司;FW80 型高速万能粉碎机,上海新诺仪器设备有限公司;AG285 型分析天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;DH6000 II 型电热恒温培养箱,天津泰斯特仪器有限公司;HM3SR+Centrifuge 台式高速离心机,赛默飞世尔科技有限公司;S-4800 扫描电子显微镜,日立公司。

## 1.2 试验方法

1.2.1 原料粉制备与热处理 将燕麦、小米和玉米分别采用磨粉机粉碎,全部过 100 目筛。

蒸汽处理:将燕麦粉、小米粉和玉米粉分别在蒸锅上沸水汽蒸 20 min,使淀粉糊化,自然晾干后备用。

烘烤处理:将燕麦粉、小米粉和玉米粉分别在烤箱中 155 ℃烘烤 30 min,使淀粉糊化无焦糊现象,自然冷却后备用。

1.2.2 淀粉提取 燕麦、小米和玉米淀粉提取采用碱提法<sup>[6]</sup>,用 0.2% 的 NaOH 溶液浸泡 12 h,下层沉淀继续用 0.2% 的 NaOH 溶液洗涤,重复 5 次,收集下层白色沉淀,水洗后离心(3 000 r/10 min),重复 3 次,白色沉淀即为淀粉粗品。

1.2.3 水分含量测定 直接干燥法,参考《食品中水分含量的测定》GB 5009.3-2016<sup>[7]</sup>。

1.2.4 糊化特性测定 使用快速黏度仪参考《谷物黏度测定 快速黏度仪法》LST 6101-2002 进行测定<sup>[8]</sup>,燕麦粉、小米粉和玉米粉取样质量 3.5 g,淀粉样品质量 2.5 g。

1.2.5 膨胀势、水溶性指数和吸水性指数测定 膨胀势测定参考刘淑一等<sup>[9]</sup>试验方法,水溶性指数和吸水性指数测定参考 Anstase 等<sup>[10]</sup>试验方法。

$$\text{膨胀势} = \frac{\text{样品吸水后膨胀质量}}{\text{样品质量}}$$

$$\text{吸水性指数}(\%) = \frac{\text{沉淀物质量}}{\text{样品干重}} \times 100$$

$$\text{水溶性指数}(\%) = \frac{\text{上清液蒸发后质量}}{\text{样品干重}} \times 100$$

1.2.6 淀粉含量测定 总淀粉含量测定参考《食品中淀粉含量的测定》GB 5009.9-2016<sup>[11]</sup>中第一法酶水解法。

1.2.7 淀粉体外消化性测定 根据测定的 RDS、SDS 和 RS 含量反映淀粉的体外消化性。参考 Is-

abel 等<sup>[12]</sup>的试验方法,准确称取 0.1 g 样品于试管中,放入 2 颗玻璃珠,加入 5 mL HCl-KCl 缓冲液(pH=1.5),涡旋混匀后加入 0.2 mL 胃蛋白酶溶液,再加入 5 mL HCl-KCl 缓冲液,40 ℃下恒温振荡 1 h。加入 10 mL Tris-马来酸缓冲液(pH=6.4)和 0.1 mL α-淀粉酶溶液,定容 25 mL,37 ℃下恒温振荡,分别在 0, 20, 120 min 取 1 mL 水解液,沸水浴 5 min 后,水浴冷却至室温,加入 3 mL 乙酸钠缓冲液(pH=4.8),加入 0.1 mL 淀粉葡萄糖苷酶溶液,定容 5 mL,0.45 μm 微孔滤膜过滤。取 1 mL 滤液进行显色反应,根据葡萄糖标准曲线计算葡萄糖含量,并根据下列公式计算 RDS、SDS、RS 含量。葡萄糖与淀粉的换算系数为 0.9。

$$\text{RDS}(\%) = (G_{20} - G_0) \times 0.9 \times 100$$

$$\text{SDS}(\%) = (G_{120} - G_{20}) \times 0.9 \times 100$$

$$\text{RS}(\%) = \text{TS} - \text{RDS} - \text{SDS}$$

式中:G<sub>0</sub>——样品中葡萄糖含量,g;G<sub>20</sub>——20 min 时葡萄糖含量,g;G<sub>120</sub>——120 min 时葡萄糖含量,g;TS——总淀粉含量,g。

1.2.8 淀粉颗粒形貌观察 通过扫描电镜对提取淀粉颗粒的状态进行观察。将提取的一定量干淀粉分散在载物台双面导电胶上,在真空条件下进行喷金处理,加速电压为 5.0 kV,放大倍数为 1 000 倍进行观察。

## 1.3 数据处理

所有试验数据为 3 次试验平均值,利用 SPSS 22.0 和 Excel 2019 等软件对数据进行统计分析,显著性差异水平取 P<0.05。数据作图采用 Graphpad 软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 热处理对谷物粉糊化特性的影响

分析了燕麦粉、小米粉和玉米粉经过热处理后的糊化特性指标变化,结果如表 1 所示。由结果可知,蒸汽处理和烘烤处理使燕麦粉的糊化温度显著降低(P<0.05),回生值显著升高(P<0.05),峰值黏度有一定升高,说明热处理后燕麦粉更易糊化,同时容易回生老化,尤其蒸汽热处理燕麦粉的变化程度更大;蒸汽处理和烘烤处理小米粉的糊化温度和回生值均显著升高(P<0.05),说明热处理后小米粉不容易糊化,同时容易回生老化;蒸汽

处理和烘烤处理使玉米粉糊化温度显著升高 ( $P < 0.05$ ), 回生值和崩解值显著降低 ( $P < 0.05$ ), 峰值黏度有一定降低, 表明热处理后玉米粉不易糊化, 不易回生老化, 形成的淀粉糊相对稳定。烘烤处理3种谷物粉其崩解值均显著降低 ( $P < 0.05$ ), 说明淀粉的热稳定性增强。Ma等<sup>[13]</sup>对小麦粉进行过热蒸汽处理后发现小麦粉的黏度和糊化温度升高, 制作的蛋糕硬度显著降低, 而且比容增加。刘琳等<sup>[14]</sup>研究小麦粉中加入不同比例的热处理小米粉, 发现热处理可以提高小米粉的黏度, 显著降低馒头

的硬度, 改善馒头的品质, 且小米粉的加热温度为110℃、时间为15 min时, 混合粉做出的馒头品质最好。高晴等<sup>[15]</sup>研究发现玉米粉经过热处理后崩解值显著降低, 蒸制处理使玉米粉崩解值下降幅度最大, 提高了玉米粉的热糊稳定性。综上可知, 预处理在一定程度上可以改变谷物粉的糊化特性, 进而对加工产品的品质产生一定影响, 因此本试验结果对下一步改善杂粮产品品质研究具有一定指导意义。

表1 谷物粉糊化特性指标检测结果 ( $n=3, \bar{x} \pm s$ )  
Table 1 The gelatinization property results of grain flours ( $n=3, \bar{x} \pm s$ )

样品	处理方式	糊化温度/℃	峰值黏度/cP	崩解值/cP	回生值/cP
燕麦粉	未处理	91.25 ± 0.07 <sup>a</sup>	2 543.00 ± 69.30 <sup>b</sup>	1 043.00 ± 15.56 <sup>a</sup>	2 422.00 ± 118.79 <sup>b</sup>
	蒸汽处理	88.03 ± 0.04 <sup>a</sup>	3 205.50 ± 3.54 <sup>a</sup>	1 053.50 ± 6.36 <sup>a</sup>	4 139.50 ± 43.13 <sup>a</sup>
	烘烤处理	90.53 ± 0.04 <sup>b</sup>	2 640.00 ± 1.41 <sup>b</sup>	857.00 ± 9.90 <sup>b</sup>	3 711.50 ± 260.92 <sup>a</sup>
小米粉	未处理	75.43 ± 0.60 <sup>b</sup>	2 570.50 ± 17.68 <sup>b</sup>	1 292.00 ± 25.46 <sup>b</sup>	1 270.00 ± 2.83 <sup>c</sup>
	蒸汽处理	76.98 ± 0.60 <sup>b</sup>	3 670.00 ± 4.24 <sup>a</sup>	1 552.50 ± 20.51 <sup>a</sup>	2 060.50 ± 37.48 <sup>a</sup>
	烘烤处理	79.08 ± 0.11 <sup>a</sup>	1 665.50 ± 2.12 <sup>c</sup>	158.00 ± 7.07 <sup>c</sup>	1 705.50 ± 0.71 <sup>b</sup>
玉米粉	未处理	75.82 ± 0.06 <sup>c</sup>	2 295.67 ± 22.05 <sup>a</sup>	841.67 ± 28.43 <sup>a</sup>	3 605.00 ± 28.93 <sup>a</sup>
	蒸汽处理	78.52 ± 0.42 <sup>b</sup>	2 252.67 ± 28.75 <sup>a</sup>	205.67 ± 15.95 <sup>c</sup>	3 072.00 ± 67.76 <sup>b</sup>
	烘烤处理	82.60 ± 0.48 <sup>a</sup>	1 802.00 ± 38.35 <sup>b</sup>	335.33 ± 28.54 <sup>b</sup>	2 868.33 ± 97.85 <sup>c</sup>

注: 表中同一列不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。

## 2.2 热处理对谷物粉膨胀势的影响

图1显示了谷物粉经热处理后膨胀势的变化。由结果可知, 蒸汽处理使燕麦粉的膨胀势下降了32%, 烘烤处理使燕麦粉的膨胀势下降了12%。热处理能显著改变燕麦粉的膨胀势 ( $P < 0.05$ ), 尤其是蒸汽热处理影响程度较大。膨胀势的变化原因可能是加热后淀粉结晶度的提高和水合作用的下降, 也可能由于直-支链淀粉相互作用增强、直链-脂质复合物的形成和淀粉结晶区域结构的变化影响<sup>[16]</sup>。蒸汽处理和烘烤处理后小米粉和玉米粉的膨胀势基本不变。Jacobs<sup>[16]</sup>对洋山芋淀粉、大米淀粉和马铃薯淀粉等进行热处理, 结果发现膨胀势下降。卢丹妮<sup>[17]</sup>研究发现膨胀势可以有效预测馒头的品质, 一般淀粉的膨胀势高时, 馒头的表面较光滑且弹性较好。姚大年等<sup>[18]</sup>发现小麦粉的膨胀势越大, 面条的评分越高, 膨胀势可以反映面条的蒸煮品质。通过本研究结果, 说明热处理对小米粉和玉米粉的膨胀势影响不大, 因此可以根据

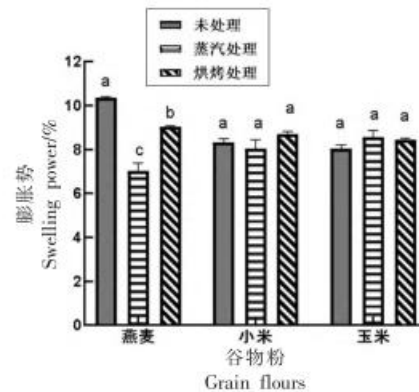


图1 谷物粉膨胀势结果

Fig.1 The swelling power results of grain flours

加工不同产品要求对原料进行适当的热处理。

## 2.3 热处理对谷物粉吸水性指数与水溶性指数的影响

热处理对谷物粉吸水性指数与水溶性指数的影响如图2和图3所示。由结果可知, 蒸汽处理和烘烤处理使燕麦粉的吸水性指数分别上升21%和



27%。热处理对小米粉和玉米粉的吸水性指数影响较小。3 种谷物粉经过热处理后其水溶性指数均有一定程度降低, 蒸汽处理使水溶性指数下降 38%到 55%, 而烘烤处理使其下降 28%到 36%。分析原因可能为蒸汽处理比烘烤处理更易使谷物粉

颗粒发生黏结, 产生团聚作用, 溶解度降低。原料粉在水中分散吸水的能力即为吸水性指数, 数值越大, 产品黏牙感越强, 吸水性指数影响产品的品质<sup>[9]</sup>。还有研究发现原料的吸水性指数和水溶性指数与面条的质构品质有关<sup>[9]</sup>。

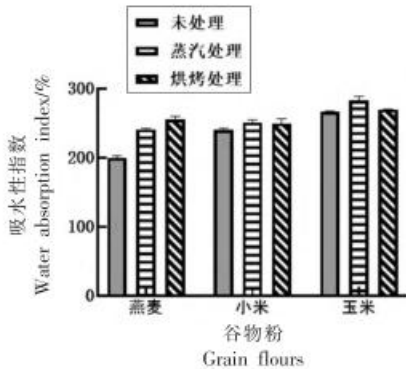


图 2 谷物粉吸水性指数结果

Fig.2 The water absorption of grain flours

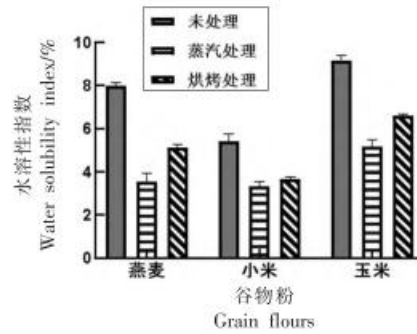


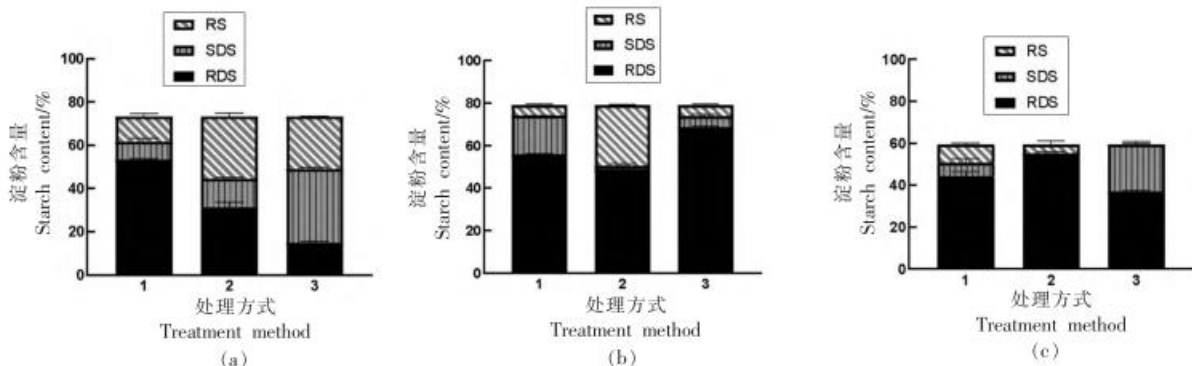
图 3 谷物粉水溶性指数结果

Fig.3 The water solubility of grain flours

#### 2.4 热处理对淀粉体外消化性的影响

热处理谷物粉中快、慢消化淀粉和抗性淀粉的含量结果如图 4 所示。热处理使燕麦粉快消化淀粉含量降低大约一半, 慢消化淀粉含量和抗性淀粉含量增加 1 倍以上。蒸汽处理使小米粉的快消化淀粉含量降低 7%, 慢消化淀粉含量降低 16%, 抗性淀粉增加 23%。烘烤处理使玉米粉的快消化淀粉含量降低 7%, 慢消化淀粉含量增加 16%, 抗性淀粉含量减少 8%。热处理能显著降低 3 种谷物粉的快消化淀粉含量, 增加大部分慢消化淀粉含量和抗性淀粉含量, 尤其热处理对燕麦粉

的淀粉组成含量影响最大。Gonzalez 等<sup>[20]</sup>研究了干热处理温度对小麦粉和淀粉结构及面包体外淀粉消化率的影响, 发现干热处理温度为 200 °C 时, 快消化淀粉含量显著降低, 慢消化淀粉比例增加。Meera 等<sup>[21]</sup>将具有不同水分含量的高粱粉加热处理时, 发现高粱粉的抗性淀粉含量增加且淀粉不会发生糊化。综上可知, 预处理可以改变谷物粉的淀粉组成, 使淀粉的快消化淀粉含量下降, 慢消化淀粉和抗性淀粉含量上升, 淀粉消化性下降, 即增加了淀粉的抗消化能力和营养健康功效。



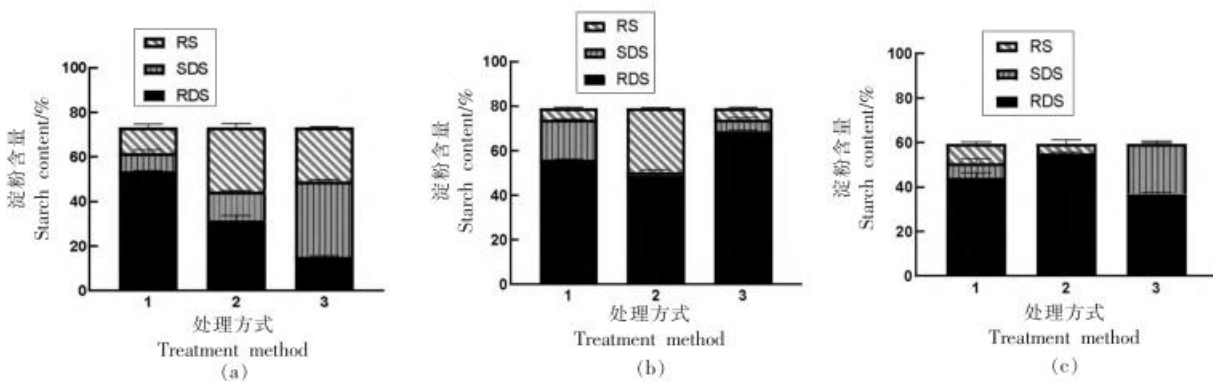
注: (a)燕麦淀粉, (b)小米淀粉, (c)玉米淀粉; 1.未处理, 2.蒸汽处理, 3.烘烤处理。

图 4 热处理谷物粉中淀粉组成含量检测结果

Fig.4 Starch composition of heat treatment grain flours

为进一步明确热处理对淀粉组分的影响,检测了提取的谷物粗淀粉经过蒸汽处理和烘烤热处理后其快、慢消化淀粉和抗性淀粉的含量,如图5所示。提取的燕麦、小米、玉米淀粉纯度均大于99%(干基)。由结果可知,热处理使3种谷物淀粉中快消化淀粉降低10%到20%,慢消化淀粉升高3%到30%不等,抗性淀粉升高20%左右。热处理能显著降低快消化淀粉含量,升高慢消化淀粉和抗性淀粉含量,与加热谷物粉后测定的淀粉组成变化趋势一致,但是数值上具有一定差别,分析是

原料粉中的非淀粉物质对淀粉具有一定干扰,从而影响了淀粉的消化。郝赫男<sup>[5]</sup>的研究结果发现经过干热处理,大米和糯米的快消化淀粉和慢消化淀粉含量下降,抗性淀粉含量上升。热处理对淀粉的影响是一个复杂的过程,热处理会影响淀粉的结构,使淀粉链内和链间重排,还会影响非淀粉物质的变化及淀粉与非淀粉之间的相互作用形成淀粉-脂肪复合物等<sup>[2]</sup>。预处理能够改变淀粉的组成,增加了淀粉的抗消化能力,对开发低糖功能食品研究具有重要意义。



注:(a)燕麦淀粉,(b)小米淀粉,(c)玉米淀粉;1.未处理,2.蒸汽处理,3.烘烤处理。

图5 热处理提取淀粉组成含量检测结果

Fig.5 Starch composition of heat treatment grain starch

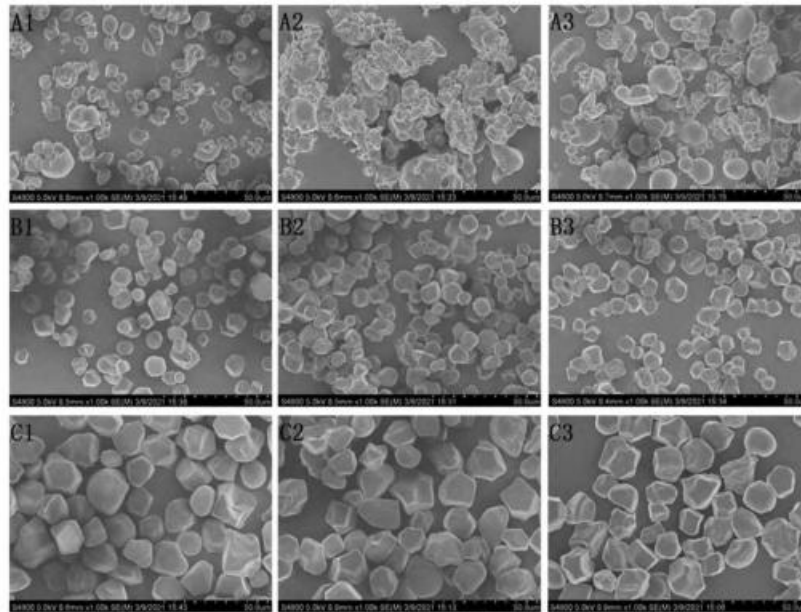
## 2.5 热处理对淀粉颗粒形貌的影响

对提取的燕麦、小米和玉米3种淀粉进行蒸汽处理和烘烤热处理,通过扫描电镜观察其外貌形态,如图6所示。未处理的燕麦淀粉颗粒直径5 μm左右,有球形、多面体,形状不规则,属于小颗粒淀粉。未处理小米淀粉颗粒直径10 μm左右,大部分呈多角形,少数为球形。小米淀粉颗粒表面较为光滑,且有细小的孔道。未处理玉米淀粉颗粒直径15 μm左右,为多面体形,棱角圆滑,颗粒表面稍有凹凸不平。3种谷物淀粉经过热处理之后均发生团聚和黏结现象,燕麦淀粉发生团聚和黏结现象最为明显,结合前面测定的快、慢消化淀粉和抗性淀粉的变化情况,说明淀粉颗粒团聚对3种谷物淀粉抗消化能力增强具有一定作用。汝远等<sup>[23]</sup>研究了干热处理对玉米淀粉性质的影响,研究发现玉米淀粉经过干热处理后,颗粒间发生黏结现象,淀粉表面也出现一些凹坑。许诗尧等<sup>[24]</sup>研

究发现湿热处理使大米淀粉颗粒表面紧密堆积,在高温条件下形成具有酶抗性的“外壳”。这种“外壳”能够阻碍酶溶液进入米粉团粒,但是外壳上的破损可使酶溶液进入团粒内水解淀粉,最终留下抗性较大的“外壳”。

## 3 结论

预处理能够改变谷物粉黏度、抗老化性能和稳定性等糊化特性,在一定程度上还可以降低谷物粉的膨胀势和水溶性,提高其吸水性,最终影响原料的加工适应性和产品的加工品质。热处理能显著降低3种谷物粉快消化淀粉含量,增加慢消化淀粉和抗性淀粉含量,延缓谷物粉的淀粉消化性,对研究低血糖生成指数产品和糖尿病食品具有重要作用,且热处理对燕麦淀粉组成含量影响最大。通过扫描电镜观察,淀粉颗粒直径由小到大依次为:燕麦淀粉<小米淀粉<玉米淀粉,经过热



注:A.燕麦淀粉,B.小米淀粉,C.玉米淀粉;1.未处理,2.蒸汽处理,3.烘烤处理。

图6 淀粉颗粒形貌扫描电镜观察

Fig.6 Scanning electron microscope images of grain starch

处理之后均发生团聚和黏结现象,燕麦淀粉受热处理影响最大,淀粉团聚和黏结现象最为明显。由此可见,热处理可以显著改变谷物粉的物化特性和淀粉消化特性,为下一步研究谷物产品深加工和营养功能性谷物食品开发提供理论依据。

### 参 考 文 献

- [1] LI M, LIU C, ZHENG X, et al. Physicochemical properties of wheat flour modified by heat-moisture treatment and their effects on noodles making quality [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(9): e14590.
- [2] KEPPLER S, BAKALIS S, LEADLEY C E, et al. Evaluation of dry heat treatment of soft wheat flour for the production of high ratio cakes[J]. *Food Research International*, 2018, 107(5): 360-370.
- [3] HU Y, WANG L, ZHU H, et al. Superheated steam treatment improved flour qualities of wheat in suitable conditions[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2017, 41(6): e13238.
- [4] 马岁祥, 李涛, 宋洪波, 等. 过热蒸汽改性典型晶型淀粉的理化性质研究[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(8): 99-106.
- [5] MA S X, LI T, SONG H B, et al. Studies on physicochemical properties of typical crystalline starches by superheated steam treatment[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2018, 18(8): 99-106.
- [6] 郝赫男. 不同热处理对大米及糯米淀粉理化性质和体外消化性的影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [7] HAO H N. Effect of different heat treatment on the physicochemical properties and in vitro digestibility of starches from normal rice and waxy rice[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [8] 郭晓冬, 李颖. 小米淀粉提取方法的比较[J]. *中国粮油学报*, 2011, 26(5): 26-29.
- [9] GUO X D, Li Y. Comparative study on methods for extracting starch from millet[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2011, 26(5): 26-29.
- [10] 中华人民共和国国家卫生和生育计划委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定: GB 5009.3-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [11] National Health and Family Planning Commission of PRC. National Food Safety Standard, Determination of Moisture in Food: GB 5009.3-2016[S]. Beijing: Standard Press, 2016.

- [8] 国家粮食局. 谷物黏度测定 快速黏度仪法: LS/T 6101-2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.  
State Administration of Grain, Determination of viscosity for flours and meals with rapid-Visco analyser: LS/T 6101-2002[S]. Beijing: Standard Press, 2002.
- [9] 刘淑一, 赵芳芳, 周小玲, 等. 预糊化对燕麦全粉理化性质的影响[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(9): 56-61.  
LIU S Y, ZHAO F F, ZHOU X L, et al. Effect of pre-gelatinization on the physical and chemical properties of whole oat flour[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(9): 56-61.
- [10] ANASTASE H, XIAOLIN D, TAO F. Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking[J]. Journal of Cereal Science, 2006, 43(1): 38-46.
- [11] 中华人民共和国国家卫生和生育计划委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中淀粉的测定: GB 5009.9-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.  
National Health and Family Planning Commission of PRC, China Food and Drug Administration. National Food Safety Standard Determination of Starch in Food; GB 5009.9-2016[S]. Beijing: Standard Press, 2016.
- [12] ISABEL G, ALEJANDRA G, FULGENCIO S. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index[J]. Nutrition Research, 1997, 17(3): 427-437.
- [13] MA Y, SANG S, XU D, et al. The contribution of superheated steam treatment of wheat flour to the cake quality[J]. LWT, 2021, 141(4): 1-7.
- [14] 刘琳, 刘翀, 郑学玲, 等. 热处理小米粉对米面混合粉品质的影响[J]. 粮油食品科技, 2014, 22(5): 1-4.  
LIU L, LIU C, ZHENG X L, et al. Effect of heat treatment of millet flour on the quality of millet and wheat mixed flour[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2014, 22(5): 1-4.
- [15] 高晴, 郑学玲, 刘翀. 不同热处理对玉米粉理化性质影响[J]. 粮食加工, 2017, 42(5): 66-69.  
GAO Q, ZHENG X L, LIU C. Effects of different heat treatments on the physical and chemical properties of corn flour[J]. Grain Processing, 2017, 42(5): 66-69.
- [16] JACOBS H. Influence of annealing on the pasting properties of starches from varying botanical sources [J]. Cereal Chemistry, 1995, 5(72): 480-487.
- [17] 卢丹妮. 不同淀粉对面团特性及馒头品质的影响研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018.  
LU D N. Study on the effect of different starch on properties of mixed dough and quality of Chinese steamed bread[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018.
- [18] 姚大年, 李保云, 朱金宝, 等. 小麦品种主要淀粉性状及面条品质预测指标的研究[J]. 中国农业科学, 1999, 32(6): 84-88.  
YAO D N, LI B Y, ZHU J B, et al. Study on main starch properties and predictive indexes of noodle quality in common wheat (*Triticum aestivum*) [J]. Scientia Agricultura Sinica, 1999, 32(6): 84-88.
- [19] WANG N, WARKENTIN T D, VANDENBERG B, et al. Physicochemical properties of starches from various pea and lentil varieties, and characteristics of their noodles prepared by high temperature extrusion[J]. Food Research International, 2014, 55(1): 119-127.
- [20] GONZÁLEZ M, VERNON-CARTER E J, ALVAREZ-RAMIREZ J, et al. Effects of dry heat treatment temperature on the structure of wheat flour and starch in vitro digestibility of bread[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 166(1): 1439-1447.
- [21] MEERA M S, BHASHYAM M K, ALI S Z. Effect of heat treatment of sorghum grains on storage stability of flour[J]. Food Science & Technology, 2011, 44(10): 2199-2204.
- [22] YONGSHUAI M, DAN X, SHANGYUAN S, et al. Effect of superheated steam treatment on the structural and digestible properties of wheat flour[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 112(3): 1-9.
- [23] 汝远, 王蕾, 周君, 等. 干热处理对玉米淀粉性质的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(16): 138-141.  
RU Y, WANG L, ZHOU J, et al. Effect of dry heating on properties of corn starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(16): 138-141.
- [24] 许诗尧, 李芳, 胡忠泽, 等. 水处理对大米粉及抗性淀粉性质影响[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(6): 1-7.  
XU S Y, LI F, HU Z Z, et al. Effects of hydrothermal treatments on properties of rice powder and rice resistant starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(6): 1-7.

## Effect of Heat Treatment on Physicochemical Properties of Grain Flours and *in Vitro* Digestibility of Grain Starch

Sheng Qinghai<sup>1</sup>, Long Jinli<sup>1</sup>, Li Pengliang<sup>2</sup>, Zhao Wei<sup>2</sup>, Zhang Aixia<sup>2\*</sup>, Liu Jingke<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>College of Bioscience and Bioengineering, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang 050071)

<sup>2</sup>Institute of Biotechnology and Food Science, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences,  
Shijiazhuang 050050)

<sup>3</sup>Institute of Millet Crops, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, National Foxtail Millet Improvement  
Center, Minor Cereal Crops Laboratory of Hebei Province, Shijiazhuang 050035)

**Abstract** It was studied the physicochemical properties of pre-heating treatment grain flours and *in-vitro* digestibility of grain starch. By analyzing the gelatinization property, swelling power, water absorption and starch composition of oat, foxtail millet and corn flours were heated by steam and baking. Results showed that: Heat treatment caused a significant decrease in the gelatinization temperature of oat flour and a significant increase of millet and corn flour ( $P<0.05$ ). Heat treatment caused a significant increase in the setback of oat and millet flour and a significant decrease of corn flour ( $P<0.05$ ). Heat treatment significantly decreased the peak viscosity and breakdown of corn flour ( $P<0.05$ ). Different heat treatments had different trends in the effects of peak viscosity and breakdown of oat and millet flour. The swelling power of oat flour, when heated by steam and baking, decreased by 32% and 12%, respectively, and the water absorption index increased by more than 20%. But heat treatment made millet and corn flour change less. Heat treatment reduced the water solubility index of three kinds of cereal flour by 28% to 55%. The fast-digestible starch was decreased by 10% to 20%, but the slow-digestible starch was increased by 3% to 30%, and the resistant starch was increased about 20%. The oat starch composition was most affected by heat treatment. The particle diameters of oat, millet and corn starch were about 5, 10 and 15  $\mu\text{m}$  respectively. After heat treatment, the starch of oat, millet and corn were agglomerated and bonded, especially oat starch. The physical and chemical properties of grain flours were affected by appropriate pre-heat treatment, then improved the processing properties. The starch composition was changed by heat treatment, reduced digestibility, and improved the functional properties.

**Keywords** heat treatment; grain flour; physicochemical properties; digestion properties