

脱脂脱蛋白质对黑麦粉理化特性及体外消化特性的影响

崔亚楠, 张 晖*, 齐希光, 王 立, 钱海峰

(江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 黑麦是制作面包的常用原料,但是关于黑麦的消化特性鲜有报道。作者以黑麦粉为原料,制备了脱脂黑麦粉、脱蛋白质黑麦粉及黑麦淀粉;探究了蛋白质、脂肪、淀粉对黑麦粉理化特性、体外淀粉消化速率及估计血糖生成指数的影响。经不同处理后,样品在化学组成、溶解度、糊化特性等方面均有显著差异,尤以黑麦粉和黑麦淀粉之间的差异最为显著。实验结果表明黑麦粉的淀粉水解速率低于脱脂黑麦粉、脱蛋白质黑麦粉和黑麦淀粉,且脱蛋白质处理对于黑麦粉体外淀粉消化速率的影响较脱脂处理更为显著。血糖生成指数 (eGI) 从低到高依次为: 黑麦 (69.19) < 脱脂黑麦 (76.77) < 脱蛋白质黑麦 (79.73) < 黑麦淀粉 (81.08)。

关键词: 黑麦; 淀粉; 理化特性; 体外消化性; 血糖生成指数

中图分类号: TS 223 文章编号: 1673-1689(2019)05-0037-07 DOI: 10.3969/j.issn. 1673-1689.2019.05.006

Physicochemical Properties, In Vitro Starch Digestibility of Rye as Affected by Defatted and Deproteinized Treatment

CUI Yanan, ZHANG Hui*, QI Xiguang, WANG Li, QIAN Haifeng

(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Rye is one of the most commonly used cereals in bread making. However, there are few reports about its digestive properties. Using rye flour as raw material for preparation of the defatted rye flour, deproteinized rye flour and rye starch. This study investigated the effects of protein, lipid and starch on the in vitro starch digestibility, expected glycemic index (eGI) and physicochemical properties of rye flour. Significant differences among samples, and particularly between whole rye flour and starch, were observed with respect to chemical composition, swelling power and gelatinization properties. Compared with lipid removal, protease treatment had a more significant effect on in vitro starch digestibility of rye. The expected glycemic index of samples were given as follows: rye (69.19) < defatted rye flour (76.77) < deproteinized rye flour (79.73) < rye starch (81.08).

Keywords: rye, starch, physicochemical properties, in vitro starch digestibility, glycemic index

收稿日期: 2016-12-28

基金项目: 国家 863 计划项目 (2013AA102207)。

* 通信作者: 张 晖 (1966—), 女, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事粮食深加工研究。E-mail: zhanghui@jiangnan.edu.cn

引用本文: 崔亚楠, 张晖, 齐希光, 等. 脱脂脱蛋白质对黑麦粉理化特性及体外消化特性的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38(05): 37-43.

黑麦营养丰富,又被称为“蛋白麦”、“富硒麦”,黑麦中富含淀粉、蛋白质、脂肪、B族维生素、磷、钾等多种营养成分。黑麦中蛋白质及钙的含量均略高于小麦^[1-4]。相关研究表明,杂交黑麦(西北野生小麦与东北等地耐寒小麦杂交而成)中硒、钙、锌、铁、磷等微量元素的含量要比普通小麦高出50%~70%^[5]。黑龙江省北大荒麦业种植的黑麦其微量元素如磷、铁、钙的含量分别比普通小麦高出33.0%、81.03%、132.3%^[6]。另外,黑麦中含有77.1 mg/kg的硒、39 mg/kg的碘,这是普通小麦所没有的。

黑麦面包是俄罗斯西北部、德国北部、芬兰、丹麦等国的一种传统饮食。除了制作面包外,黑麦还可用于酿造啤酒,制造动物饲料等^[6]。

研究表明,较高的黑麦摄入量可以减少罹患心脏病、高胆固醇血症、肥胖等疾病的风险^[7-9]。Biskup等的研究表明在膳食中增加黑麦的摄入量可能对二型糖尿病具有预防作用^[10]。通常来说,食物对糖尿病的防治作用与其消化特性有关。影响黑麦消化特性的因素众多,但是目前国内外对黑麦的研究主要集中在黑麦中功能成分的分离提取及黑麦面包的品质改良上,黑麦粉的理化性质和淀粉消化特性的相关研究则鲜有报道^[11-12]。作者研究了蛋白质、脂肪对于黑麦粉糊化特性、溶胀度、可溶指数等理化特性的影响。

1 材料与方法

1.1 材料及主要试剂

黑麦:市售;猪胰 α -淀粉酶、淀粉转葡萄糖苷酶:Sigma公司产品;直链淀粉试剂盒(Amylose assay Kit)、Megazyme;碱性蛋白酶:上海金穗生物科技有限公司产品;其他试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

电热可调温鼓风干燥箱:上海一恒科学仪器有限公司产品;不锈钢五谷杂粮磨粉机 CLF-150;浙江省温岭市创力药材器械厂产品;L-550 低速大容量离心机:湖南湘仪实验室仪器开发有限公司产品;SKY-110WX 水浴恒温振荡器:上海苏坤实业有限公司产品;CR21G3号冷冻离心机:日本 HITACHI 公司产品;紫外可见分光光度计(T6 新世纪):北京普析通用仪器有限责任公司产品;全自动还原糖测定仪:山东省科学院生物研究所产品;SH220N 石墨消解仪、脂肪测定仪 SOX406:海能仪器股份有限公

司产品;S-4800 场发射扫描电子显微镜:日本日立株式会社产品;RVA-3D 型快速黏度分析仪(RVA):澳大利亚 Newport 科学仪器公司产品。

1.3 试验方法

1.3.1 黑麦粉的制备 黑麦用磨粉机粉碎至全部通过60目筛,装入封口袋于-20℃贮存。

1.3.2 黑麦淀粉的制备 淀粉提取参考 chung 等人的方法并做适当调整^[13]。黑麦(100 g)洗净后,用0.05%亚硫酸钠溶液在室温下浸泡18 h,倾去溶液。去离子水洗涤3次,加适量去离子水后打碎,胶磨10 min,胶磨结束后的液体过120目筛。筛上物加适量去离子水后再次胶磨5 min,并将液体过120目筛,弃去筛上物。筛下液体静置30 min,倾去上清液。将剩余液体用低速大容量离心机在3 000 r/min离心15 min,倾去上清液,用刮勺将沉淀物表面的黄褐色杂质刮除。用适量去离子水使沉淀物重新悬浮,再次离心,倾去上清液,刮除杂质。重复以上步骤3次至杂质完全除去。将得到的沉淀物在平皿上摊平摊薄,并用微量去离子水冲洗离心杯,将溶液一起转移到平皿中。45℃干燥12 h。研磨粉碎,装袋,-20℃贮存。

1.3.3 脱脂黑麦粉的制备 参考张杰等人的方法并做适当改动^[14]。将适量黑麦粉置于烧杯中,加入石油醚(质量体积比为1 g:7 mL)。在室温下,用置顶式搅拌器搅拌3 h,离心除去石油醚(3 000 r/min, 15 min)。重新加入石油醚,重复以上步骤一次。将所得沉淀物平摊在平皿中,在通风橱中放置一段时间,待溶剂完全挥发后,于45℃干燥12 h。研磨粉碎,装袋,-20℃贮存。

1.3.4 脱蛋白黑麦粉的制备 参考张慧等人的方法^[11]。取100 g黑麦粉置于600 mL高脚烧杯中,加入300 mL的碱性蛋白酶(100 U/mL, pH 11),置于45℃水浴锅中酶解40 min,期间使用置顶式搅拌器搅拌均匀。酶解完成后,用低速大容量离心机在4 000 r/min离心10 min。再以相同的方法酶解沉淀物一次。沉淀物用去离子水反复洗涤直至溶液呈中性,离心,倾去上层溶液。将沉淀物铺于平皿中,45℃干燥12 h。研磨粉碎,装袋,-20℃贮存。

1.3.5 基本组成成分测定 水分含量测定:快速水分测定仪测定;粗蛋白质含量测定:采用自动定氮仪进行测定;淀粉含量的测定:GB/T 5514—2008;粗脂肪含量的测定:采用索氏抽提法,具体操作参

照 GB/T 5009.6—2003;直链淀粉含量的测定:直链淀粉试剂盒法。

1.3.6 黑麦粉糊化特性的测定 参照 GB/T 24853—2010《小麦、黑麦及其粉类和淀粉糊化特性测定快速粘度仪法》进行糊化特性的测定。

1.3.7 微观结构的测定 取适量颗粒,利用导电胶将其粘在样品台上,经 IB-5 离子溅射仪镀金后,使用 SU1510 型扫描电子显微镜(SEM)进行拍照。

1.3.8 溶胀度和可溶指数的测定 参考 Shi 等人的方法^[15]。用电子天平称取 0.1 g 样品于 50 mL 离心管中,准确记录样品及离心管质量。加入 10 mL 去离子水,漩涡震荡混合均匀。将离心管分别置于 60、70、80、90 °C 的振荡水浴锅中振荡 1 h。振荡结束后,将离心管置于冰水中迅速冷却至室温。4 000 g 离心 15 min,将上清液转移至已恒重称量的称量皿中,105 °C 烘至恒重,记录质量。称量并记录离心管及沉淀物质量。

1.3.9 体外淀粉消化法及估计血糖生成指数 参考 Englyst、Wang 等人的方法^[16-17]。准确称量含 600 mg 淀粉的样品于测试管中,加入 10 mL 去离子水,漩涡震荡混合均匀。沸水浴加热 30 min,期间不断震荡试管以避免结块。将测试管移入 37 °C 振荡水

浴锅中,每个试管均加入 5 个玻璃珠、10 毫升醋酸钠缓冲液(0.2 mol/L,pH 5.2),温育 30 min。加入新鲜制备的混合酶溶液 5 mL,37 °C 水浴振荡。在 20、30、60、90、120、180 min 分别取 1 mL 水解液,煮沸灭酶后,用还原糖测定仪测定其葡萄糖含量。参考 Goni 等人的方法计算样品的消化动力学及估计血糖生成指数^[18]。

1.3.10 数据统计与分析 所有数据均进行了 3 次重复测定,采用 SPSS19.0 和 Origin 8.0 对数据进行处理和统计分析。

2 结果与讨论

2.1 黑麦、脱脂黑麦、脱蛋白质黑麦、黑麦淀粉基本组成成分

样品的基本化学组成如表 1 所示。黑麦经脱脂处理后脂肪质量分数由原料中的 1.87% 降至 0.37%,脱脂率达 80.21%,脱脂处理后蛋白质质量分数略有下降,淀粉质量分数升高。经脱蛋白质处理后,蛋白质质量分数由原料中的 19.86% 降至 4.40%,蛋白质去除率达 77.84%,且经脱蛋白质处理后,脂肪质量分数亦有下降。

表 1 主要化学组成成分

Table 1 Chemical composition of samples

样品	质量分数(干基)/%			
	淀粉	脂肪	蛋白质	直链淀粉
黑麦	65.98±0.54 ^a	1.87±0.03 ^b	19.86±0.54 ^c	17.51±0.13 ^a
脱脂黑麦	74.92±1.60 ^b	0.37±0.01 ^a	19.95±0.18 ^c	17.92±0.11 ^a
脱蛋白质黑麦	78.57±0.41 ^b	1.61±0.01 ^b	4.40±0.19 ^b	21.48±0.12 ^b
黑麦淀粉	98.51±2.32 ^c	未检出	1.09±0.005 ^a	45.70±0.35 ^c

注:数据表示为平均数(标准差);在同一列,不同字母表示有显著差异($p < 0.05$);a 为最小值。

2.2 黑麦、脱脂黑麦、脱蛋白质黑麦、黑麦淀粉的糊化特性

样品的糊化特性如表 2 所示。经不同处理后,样品的糊化温度、峰值黏度、谷值黏度、终值黏度、衰减值、回生值分别在 73.08~86.8 °C,1 831.5~6 028 cp,1 097~5 007 cp,2 393~7 389.5 cp,557.5~1 483 cp,1 024.5~2 382.5 cp 之间。样品之间的糊化特性差异显著,说明蛋白质和脂肪对于样品的糊化特性具有显著影响。与黑麦粉相比,脱脂黑麦、脱蛋白质黑麦、黑麦淀粉的糊化温度均下降,峰值黏度、衰减值、回生值均上升,说明脱脂黑麦、脱蛋白质黑麦、

黑麦淀粉比黑麦粉更容易糊化;与黑麦粉相比,脱脂黑麦、脱蛋白质黑麦、黑麦淀粉的粘滞性增大,热稳定性降低,说明脱脂黑麦、脱蛋白质黑麦、黑麦淀粉比黑麦粉更容易老化。糊化温度反映了淀粉糊化的难易程度,经处理后糊化温度下降可能是因为处理后的淀粉颗粒在加热过程中更易膨胀和破裂。衰减值反映了淀粉糊的稳定性,脱脂、脱蛋白、提淀粉处理使得淀粉颗粒结构遭到破坏,因此稳定性下降、衰减值增加。峰值黏度的增加与处理后淀粉膨润度的增加相一致。回生值越大,淀粉越容易老化。Myles 认为终值黏度的增加可能是由直链淀粉聚集

引起的,黑麦粉经处理后,回生值和终值黏度均增加这意味着经处理后样品中的直链淀粉更容易聚集,与表1中测得的经不同处理后样品中直链淀粉质量分数的增加相一致^[19]。Jane等认为直链淀粉质量分数及脂肪质量分数均可以影响糊化特性^[20]。在淀粉膨胀及糊化过程中,直链淀粉与脂肪形成复合物从而抑制淀粉的膨胀^[21]。Han和Lim的研究显示

蛋白质质量分数也可以影响糊化特性^[22-23]。蛋白质通过结合更多的水来抑制淀粉吸水膨胀^[24-25]。刘晓娟等认为蛋白质的含量越高,谷物颗粒结构就越紧密,淀粉粒之间的缝隙也就越小,从而使得淀粉颗粒吸水速度减慢,吸水量减少^[26]。脂肪和蛋白质通过阻止淀粉颗粒的膨胀,使淀粉颗粒更加稳定,从而影响糊化特性^[27]。

表2 黑麦、脱脂黑麦、脱蛋白质黑麦、黑麦淀粉的糊化特性

Table 2 Pasting properties of samples

样品	糊化温度/℃	峰值黏度/(mPa·s)	谷值黏度/(mPa·s)	终值黏度/(mPa·s)	衰减值/(mPa·s)	回生值/(mPa·s)
黑麦	86.8±0.49 ^d	1 831.5±73.24 ^a	1 097±69.60 ^a	2 393±105.76 ^a	607.5±6.36 ^a	1 169±43.84 ^a
脱脂黑麦	71.38±0.60 ^a	2 079.5±4.95 ^a	1 522±2.83 ^b	2 546.5±23.33 ^{ab}	657.5±2.12 ^a	1 224.5±20.51 ^a
脱蛋白质黑麦	82.73±0.035 ^c	2 628.5±78.09 ^b	1 230.5±19.50 ^{ab}	2 828.5±45.96 ^b	1 483±1.41 ^b	1 683±73.54 ^b
黑麦淀粉	73.08±0.67 ^b	6 028±92.33 ^c	5 007±30.11 ^c	7 389.5±89.20 ^c	1 021±32.22 ^c	2 382.5±19.09 ^c

注:数据表示为平均数(标准差);在同一列,不同字母表示有显著差异($p < 0.05$);a为最小值。

2.3 黑麦、脱脂黑麦、脱蛋白质黑麦、黑麦淀粉的溶解度及膨润度

黑麦、脱脂黑麦、脱蛋白质黑麦、黑麦淀粉的溶解度及膨润度分别如图1、图2所示。脱脂、脱蛋白质及提淀粉处理使得黑麦的溶解度及膨润度发生了变化。由图1可以看出,60~80℃时脱脂黑麦的溶解度始终高于黑麦,90℃脱脂黑麦与黑麦的溶解度基本持平,说明脂肪对水分进入淀粉颗粒内部有阻碍作用。而脱蛋白质黑麦和黑麦淀粉的溶解度始终低于黑麦。熊柳等的研究表明薏米溶解度始终高于薏米淀粉与本研究黑麦的溶解度始终高于黑麦淀粉相一致^[28]。熊柳认为造成薏米与薏米淀粉溶解度差异的原因是薏米粉中含有大量的可溶性成分。图1显示,脱蛋白质黑麦的溶解度也始终低于黑麦,因此,脱蛋白质黑麦及黑麦淀粉溶解度的下降可能是因为脱蛋白及提淀粉过程中可溶性成分的损失造成的。

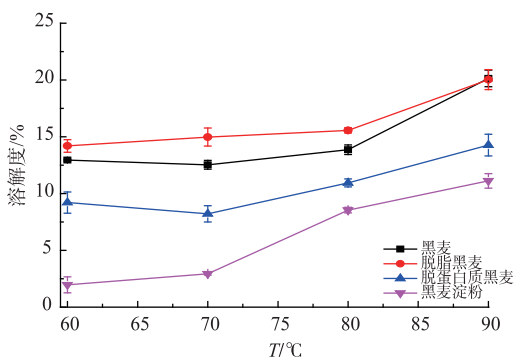


图1 黑麦、脱脂黑麦、脱蛋白质黑麦、黑麦淀粉的溶解度

Fig. 1 Swelling power and starch solubility of samples

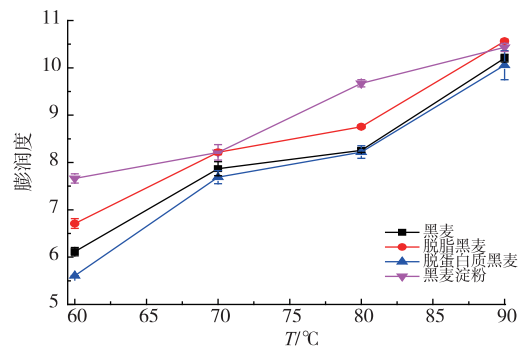


图2 黑麦、脱脂黑麦、脱蛋白质黑麦、黑麦淀粉的膨润度

Fig. 2 Starch solubility of samples

由图2可以看出,脱脂黑麦、黑麦淀粉的膨润度始终高于黑麦,脱蛋白质黑麦的膨润度与黑麦相差不大。膨润度反映了淀粉的水合能力,膨润度高,水合能力强。相关研究表明,膨润度主要是由直链淀粉-脂肪复合物及支链淀粉分子结构决定的^[29-33]。脱脂及提淀粉处理使得黑麦中的大部分脂肪被除去,脂肪-淀粉复合物结构被破坏,膨润度上升。蛋白质一般填充于淀粉颗粒之间或存在于淀粉表面,可以结合一定数量的水分子。脱蛋白质后,一方面,蛋白质固定的水相对分子质量减少;另一方面,淀粉表面及缝隙中的蛋白质被除去,水分更容易进入淀粉颗粒内部,淀粉颗粒吸水膨胀。所以,脱蛋白质黑麦与黑麦膨润度相差不大。

2.4 黑麦、脱脂黑麦、脱蛋白质黑麦、黑麦淀粉的微观结构

黑麦粉、脱脂黑麦粉、脱蛋白质黑麦粉、黑麦淀

粉的微观结构如图 3 所示。在黑麦粉中,淀粉颗粒相互粘连聚集,淀粉颗粒为卵圆形或不规则多边形,颗粒表面附着杂质,粗糙不平。脱脂黑麦粉中淀粉颗粒之间粘连聚集减少,颗粒相对分散。脱蛋白质黑麦粉的淀粉颗粒表面较为光滑,颗粒之间仍存

在粘连现象,淀粉颗粒形状较为规则,多为椭圆形或圆形。黑麦淀粉颗粒表面光滑,为卵圆形或圆形,颗粒之间聚集较少,颗粒大小不均,有破损颗粒出现。

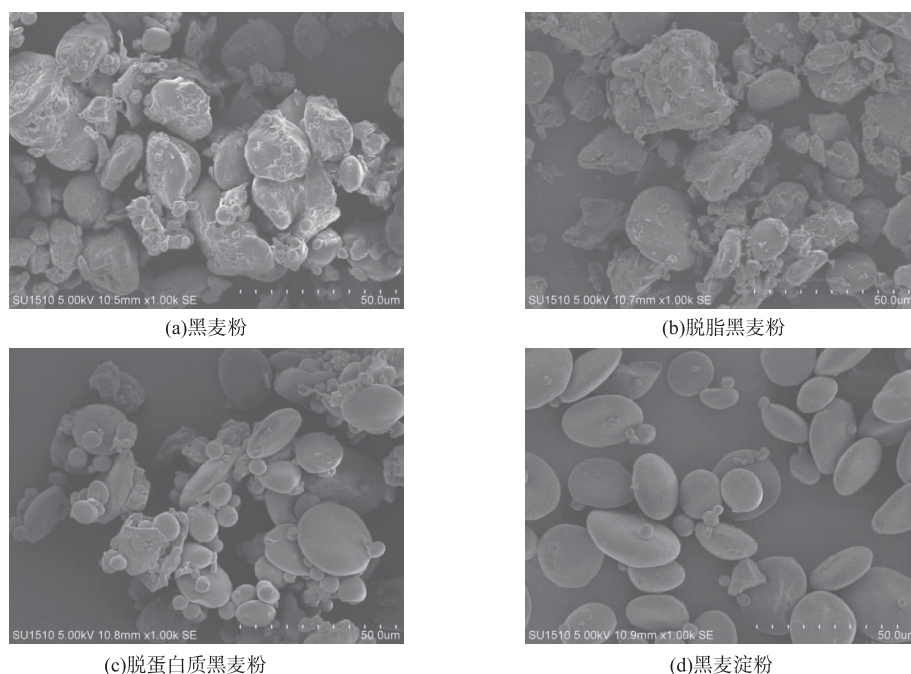


图 3 样品颗粒表面扫描电镜图($\times 1\ 000$)

Fig. 3 Micrographs of samples

2.5 黑麦、脱脂黑麦、脱蛋白质黑麦、黑麦淀粉的体外淀粉消化特性及血糖生成指数

黑麦、脱脂黑麦、脱蛋白质黑麦、黑麦淀粉的体外淀粉消化特性如图 4 所示。在消化初期,所有样品均呈现较高的消化增长率,在 90 min 以后,淀粉水解率趋于平缓。脱脂黑麦、脱蛋白质黑麦、黑麦淀粉中快消化淀粉(RDS)的含量均高于黑麦。脱脂黑麦、脱蛋白质黑麦、黑麦淀粉中抗性淀粉(RS)的含量均低于黑麦。4 种样品的估计血糖生成指数(eGI)从低到高依次为:黑麦(69.19)<脱脂黑麦(76.77)<脱蛋白质黑麦(79.73)<黑麦淀粉(81.08)。脱脂肪、脱蛋白质、提淀粉处理后,黑麦的估计血糖生成指数均显著提高,说明脂肪、蛋白质对黑麦的消化具有显著影响。附着在淀粉颗粒表面或填充于淀粉颗粒之间的蛋白质和脂肪可以通过减少淀粉酶与淀粉颗粒的接触来限制淀粉的水解速率^[34-35]。脂肪与淀粉形成淀粉脂肪复合物,也可以影响淀粉的水解速率^[36-37]。脂肪、蛋白质脱除后,淀粉酶易于渗入淀

粉颗粒内部,淀粉水解率增大,估计血糖生成指数升高。

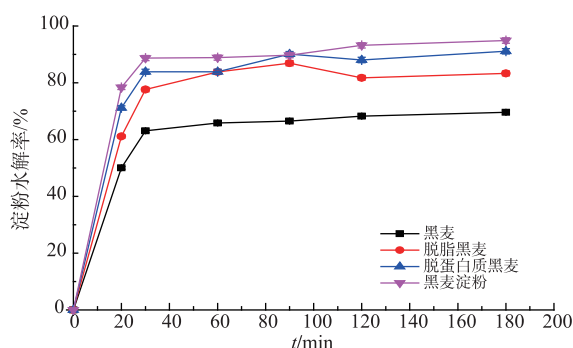


图 4 黑麦、脱脂黑麦、脱蛋白质黑麦、黑麦淀粉的体外淀粉消化特性

Fig. 4 Starch hydrolysis kinetics of samples

脱脂肪、脱蛋白质、提淀粉处理后,黑麦的淀粉水解速率增快,最大水解值增高。而且蛋白质对淀粉消化的影响大于脂肪,这一结果与 Ren 等在小米中所得的结果一致,但与 Annor 等在 kodo 米中得到

的结论不同^[38-39]。Ren 认为造成这种差异的原因可能是因为不同原料中淀粉与蛋白质、脂肪之间的相互作用不同。

3 结 语

通过对黑麦、脱脂黑麦、脱蛋白质黑麦和黑麦淀粉的化学组成、微观结构、糊化特性、溶解度、膨

润度及体外消化特性的测定,研究了脂肪和蛋白质对黑麦理化特性及体外淀粉消化特性的影响。研究发现:脱脂、脱蛋白质、提淀粉处理使得黑麦的糊化温度下降,峰值黏度、谷值黏度、终值黏度、衰减值、回生值变大;溶解度和膨润度发生变化;淀粉水解速率增加;蛋白质对淀粉消化的影响大于脂肪。

参考文献:

- [1] ZHANG HUI, WEN JIPING, GUO LINHUA, et al. The nutritional characteristics of rye and the research for food [J]. **Food Research And Development**, 2014(3): 97-99. (in Chinese)
- [2] SHEN RUILING, ZHU HONGLEI, LI HONG. The nutritional health function of rye and the research for food [J]. **Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)**, 2008(5): 79-82+92. (in Chinese)
- [3] BUSHUK W. Rye production and uses worldwide[J]. **Cereal Foods World**, 2001(2): 70-73.
- [4] D I HĂDĂRUGĂ, C I COSTESCU, L CORPAS, N G HĂDĂRUGĂ. Isengard Differentiation of rye and wheat flour as well as mixtures by using the kinetics of Karl Fischer water titration[J]. **Food Chemistry Y**, 2016, 195: 49-55.
- [5] ZHANG SHOUWEN. Nutrition function of rye flour and its development and application [J]. **Cereal and Food Industry**, 2005(1): 9-11+14. (in Chinese)
- [6] HANSEN HB, MOLLER B, ANDERSEN SB. Grain characteristics, chemical composition, and functional properties of rye (*Secale cereale* L.) as influenced by genotype and harvest year [J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2004, 52: 2282-2291.
- [7] KRITCHEVSKY D. Dietary fibre and cancer[J]. **European Journal of Cancer Prevention**, 1997(6): 435-441.
- [8] ADLERCREUTZ H. Western diet and western diseases; some hormonal and biochemical- mechanisms and associations [J]. **Scandinavian Journal of Clinical and laboratory Investigation Supplementum**, 1990, 201: 3-23.
- [9] ZHANG J X, LUNDIN E, REUTERVING C O, HALLMANS G, et al. Effect of rye bran, oat bran and soy bean fibre on bile composition, gallstone formation, gallbladder morphology and serum- cholesterol in Syrian golden-hamsters (*mesocricetus-auratus*) [J]. **British Journal of Nutrition**, 1994, 71: 861-870.
- [10] BISKUP IZABELA, KYRO CECILIE, MARKLUND MATTI. Plasma alkylresorcinols, biomarkers of whole-grain wheat and rye intake, and risk of type 2 diabetes in Scandinavian men and women [J]. **American Journal of Clinical Nutrition**, 2016, 104: 88-96.
- [11] ZHANG HUI, HONG YAN, GU ZHENG BIAO, et al. Three kinds of grain starch digestibility and influencing factors [J]. **Food and Fermentation Industries**, 2012, 11: 26-31. (in Chinese)
- [12] 张国权. 荞麦淀粉理化特性及改性[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [13] CHUNG Q LIU. Physicochemical properties and in vitro digestibility of flour and starch from pea (*Pisum sativum* L.) cultivars [J]. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2012, 50: 131-137.
- [14] ZHANG JIE, HE YIPING, HAN XIAOXIAN, et al. Effects of defatting on the physicochemical properties of buckwheat starch [J]. **Journal of the Chinese Cereals and Oils Association**, 2013(3): 17-22. (in Chinese)
- [15] SHI M, GU F, WU J, et al. Preparation, physicochemical properties, and in vitro digestibility of cross-linked resistant starch from pea starch [J]. **Starch-Starke**, 2013, 65: 947-953.
- [16] ENGLYST H N, KINGMAN S M, CUMMINGS J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. **European Journal of Clinical Nutrition**, 1992, 46: S33-S50.
- [17] WANG S, LUO H, ZHANG J, et al. Alkali-induced changes in functional properties and in vitro digestibility of wheat starch: The role of surface proteins and lipids [J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2014, 62: 3636-3643.
- [18] GONI I, GARCIA-ALONSO A, SAURA-CALIXTO F. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index [J]. **Nutrition Research**, 1997, 17: 427-437.

- [19] M J MILES, V J MORRIS, R D ORFORD, et al. The roles of amylose and amylopectin in the gelation and retrogradation of starch [J]. **Carbohydrate Research**, 1985, 135: 271-281.
- [20] CHEN X, HE X, FU X, et al. In vitro digestion and physicochemical properties of wheat starch/flour modified by heat-moisture treatment[J]. **Journal of Cereal Science**, 2015, 63: 109-115.
- [21] LIM S T, LEE J H, SHIN D H, et al. Comparison of protein extraction solutions for rice starch isolation and effects of residual protein content on starch pasting properties[J]. **Starch-Starke**, 1999, 51: 120-125.
- [22] HAN X Z, CAMPANELLA O H, GUAN H, et al. Influence of maize starch granule-associated protein on the rheological properties of starch pastes[J]. **Carbohydrate Polymers**, 2002, 49: 315-321.
- [23] LI W H, WU G L, LUO Q G. Effects of removal of surface proteins on physicochemical and structural properties of A- and B-starch isolated from normal and waxy wheat[J]. **Journal of Food Science and Technology Mysore**, 2016, 53: 2673-2685.
- [24] DEBET M R, GIDLEY M J. Three classes of starch granule swelling: Influence of surface proteins and lipids [J]. **Carbohydrate Polymers**, 2006, 64: 452-465.
- [25] MARTIN M, FITZGERALD M A. Proteins in rice grains influence cooking properties [J]. **Journal of Cereal Science**, 2002, 36: 285-294.
- [26] LIU X J, YANG L, MAO X, et al. The research for adly, s difficult pasting mechanism[J]. **Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology**, 2012, 12(7): 55-60.
- [27] WU Guiling, LI Wenhao, ZHANG Guoquan, et al. Effects of defatting coupled with deproteinization on the physicochemical properties of A- and B-type wheat starch[J]. **Modern Food Science and Technology**, 2015, 10: 227-233. (in Chinese)
- [28] XIONG Liu, HAN Zhongjie, SUN Qingjie. Comparison of adly and its starch on physicochemical properties and in vitro digestibility[J]. **Journal of the Chinese Cereals and Oils Association**, 2012(7): 32-37. (in Chinese)
- [29] JIANG Q Q, GAO W Y, SHI Y P. Comparison of starches from five plants of sect stenophora uline and sect. lasiophyton uline of dioscorea grown in China[J]. **Journal of The Science of Food and As Agriculture**, 2015, 95: 836-842.
- [30] DEMIATE IVO MOTTIN, FIGUEROA AMANDA MILEO, GUIDOLIN MANOELA ESTEFANEA BOFF ZORTEA. Physicochemical characterization of starches from dry beans cultivated in Brazil[J]. **Food Hydrocolloids**, 2016, 61: 812-820.
- [31] MA M T, WANG Y J, WANG M X. Physicochemical properties and in vitro digestibility of legume starches [J]. **Food Hydrocolloids**, 2017: 249-255.
- [32] JIANG Q Q, GAO W Y, LI X. Comparative susceptibilities to alkali-treatment of A-, B- and C-type starches of *Dioscorea zingiberensis*, *Dioscorea persimilis* and *Dioscorea opposita*[J]. **Food Hydrocolloids**, 2014, 39: 286-294.
- [33] CHEN X T, MAO X H, JIANG Q Q. Study on the physicochemical properties and in vitro digestibility of starch from yam with different drying methods[J]. **International Journal of Food Science and Technology**, 2016, 51: 1787-1792.
- [34] SVIHUS B, UHLEN A K, HARSTAD O M. Effect of starch granule structure, associated components and processing on nutritive value of cereal starch: A review[J]. **Animal Feed Science and Technology**, 2005, 122: 303-320.
- [35] OATES C G. Towards an understanding of starch granule structure and hydrolysis [J]. **Trends in Food Science & Technology**, 1997, 8: 375-382.
- [36] CHEN Jie, MENG Chunyu, HE Zhiyong, et al. Research progress of low glycemic-load food [J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**, 2016(5): 449-456. (in Chinese)
- [37] SINGH J, DARTOIS A, KAUR L. Starch digestibility in food matrix: A review [J]. **Trends in Food Science & Technology**, 2010, 21: 168-180.
- [38] REN X, CHEN J, MOLLA M M, et al. In vitro starch digestibility and in vivo glycemic response of foxtail millet and its products [J]. **Food Function**, 2016(7): 372-379.
- [39] G A ANNOR, M MARCONE, E BERTOFT, et al. In vitro starch digestibility and expected glycemic index of kodo millet (*Paspalum scrobiculatum*) as affected by starch-protein-lipid interactions[J]. **Cereal Chemistry**, 2013, 90: 211-217.