

燕麦全麦粉中淀粉消化性的研究

张 洁, 张根义*

(江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 研究了燕麦 β -葡聚糖以及蛋白质对燕麦全麦粉中淀粉消化特性的影响,并对这一影响可能存在的机理进行了探索。燕麦通过磨粉,过筛后,按照颗粒大小分级成了不同的燕麦粉样品。检测表明,不同颗粒大小级别的燕麦粉具有不同质量分数的 β -葡聚糖和蛋白质,不同的糊化特性,燕麦的消化速度则随着颗粒的增大而减小。蛋白酶预处理燕麦全粉提高了淀粉的水解速率,但外加 β -葡聚糖到消化液中并没有对淀粉原有的消化特性产生显著影响。共聚焦显微镜结果显示,燕麦粉中蛋白质、 β -葡聚糖和淀粉可能共同形成了一种聚合结构。因此,燕麦粉固有的 β -葡聚糖可能与其他成分,如蛋白质交联而形成一定的空间结构,降低了消化酶与淀粉的接触度,从而延缓了燕麦粉中淀粉的消化。

关键词: 燕麦 β -葡聚糖;蛋白质;空间结构;淀粉消化

中图分类号: TS 231 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-1689(2018)02-0171-08

Oat Starch Digestibility in Whole Oat Flour

ZHANG Jie, ZHANG Genyi*

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

Abstract: The effect of oat beta- glucan and protein on oat starch digestion and related mechanism were studied in this paper. Methods: Oats grain was processed into flour and then, sieved into whole oat flour samples with different particle sizes which contain different amounts of β -glucan (O-glu) and protein, and an in vitro starch digestion assay revealed different starch digestibility among those flour samples. RVA analysis also showed different profiles, and the addition of β -glucan did not significantly affect the starch digestion while pretreatment with protease increased the rate of starch digestion. Confocal microscopy analysis showed some complexed structure formed among β -glucan, protein and starch. Thus, it seems that the effect of β -glucan on starch digestion needs certain structural forms that are natively present in oat flour, and a matrix structure formed by linking with other components such as protein, might be the basis for slow digestion property of starch in the whole oat flour.

Keywords: oat- β -glucan, protein, certain structural, oat starch digestion

收稿日期: 2015-09-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(31471585)。

* 通信作者: 张根义(1968—),男,山西高平人,工学博士,教授,主要从事食品科学研究。E-mail: genyiz@gmail.com

引用本文: 张洁,张根义. 燕麦全麦粉中淀粉消化性的研究[J]. 食品与生物技术学报,2018,37(2):171-178.

淀粉作为人类最重要的能量来源,其消化性与人体健康密切相关。正常人体摄入含淀粉类食物后,淀粉的种类、食物营养成分以及淀粉的加工处理方法等因素都可影响餐后血糖反应。淀粉消化从口腔中唾液淀粉酶作用下开始,经食管到达胃部,在胃的蠕动和强酸环境下(pH 1.5),食物结构发生改变,变成糊状物,在胃动力作用下进入十二指肠,而后开始消化。胰淀粉酶作用于淀粉分子的 α -1,4糖苷键,使淀粉降解为 α -极限糊精、麦芽三糖和麦芽糖,再经小肠粘膜上皮细胞刷状缘的异麦芽糖酶、麦芽糖酶、葡萄糖淀粉酶进一步水解为葡萄糖,而后小肠粘膜上皮微绒毛用主动运输的方式吸收葡萄糖进入血液循环系统^[1],完成淀粉的消化和吸收。目前,淀粉消化性的测定方法主要分体外消化和体内消化,其中Englyst法^[2]模仿了人体的胃肠道环境,是评估淀粉的消化特性的常用方法。

燕麦是公认的有益全麦谷物,被推荐为日常饮食的重要组成部分,其淀粉含量在50%~65%,是重要能源物质,燕麦含有可溶性膳食纤维和不溶性膳食纤维,其中 β -葡聚糖是可溶性膳食纤维的主要组成部分,也是燕麦降血糖作用的基础。

虽然 β -葡聚糖也被报道具有调节餐后血糖的功能,Wang等^[3]研究指出 β -葡聚糖的浓度和相对分子质量决定 β -葡聚糖在胃肠道的溶解度,从而影响餐后血糖;Hooda等^[4]通过动物实验发现,膳食中添加6%的 β -葡聚糖可使血糖浓度降低,并且增加短链脂肪酸的含量;Brockman等^[5]指出,糖尿病肥胖鼠长期摄入 β -葡聚糖可改善血糖的调控,并且可以有效降低脂肪肝。

更有研究指出,燕麦 β -葡聚糖并无降血糖的功能。Zhu等^[6]发现,高胆固醇病人摄入一定量的 β -葡聚糖时,可以有效降低总胆固醇和低密度脂蛋白-胆固醇的含量,却不能有效降低甘油三酯,高密度脂蛋白-胆固醇和血糖的含量。Belobrajdic^[7]等研究发现 β -葡聚糖可减少进食量,但并没有降低餐后血糖及提高胰岛素敏感性。Panahi^[8]等报道 β -葡聚糖添加到小麦粉中,人体摄入后,血糖并没有下降;把燕麦麸皮添加到面包中后,人体每天通过面包摄入5.9 g的 β -葡聚糖,人体血液生化指标没有明显的改善。

由此可见,目前绝大部分研究都是集中在提取的具有一定纯度的燕麦 β -葡聚糖,然而以燕麦粉作

为研究对象,探究其中3种主要成分,对共同发挥燕麦全谷物粉对人体益处相互影响的研究报道甚少。本实验,通过将燕麦磨粉,过筛分级成为同时包含淀粉,蛋白质,葡聚糖等主要成分的不同颗粒大小的燕麦粉,探究燕麦粉中固有的 β -葡聚糖对燕麦粉消化的影响。研究结果可为制备以燕麦为原料的功能食品提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

燕麦,产自黑龙江。燕麦 β -葡聚糖:张家口市一康生物科技有限公司产品。万能粉碎机;水浴锅;磁力搅拌器;电子天平;马福炉;微量凯氏定氮蒸馏装置器;电热恒温鼓风干燥箱;RVA-4C快速黏度分析仪;UV2000型分光光度计;RJ-LD-II B离心机;酶标仪;pH计;涡旋振荡器;激光粒径分析仪,激光共聚焦显微镜。

1.2 实验方法

1.2.1 不同颗粒大小燕麦粉以及燕麦淀粉的制备将燕麦磨粉,分别用60目、80目、100目筛子过筛,得到4种不同级别颗粒大小的燕麦粉,命名为A、B、C、D颗粒,其中A颗粒最大,D颗粒最小,并用激光粒径分布仪器测定粒径分布。分析不同颗粒大小燕麦粉中蛋白质(GB/T 5009.5-2003),脂肪(GB/T 5009.6-2003),水分(GB/T 5009.3-2003),灰分(GB/T 5009.4-2003)的质量分数。采用总淀粉试剂盒(爱尔兰,Megazyme)测定淀粉的质量分数。采用刚果红法,测定 β -葡聚糖(O-glu)的质量分数。

燕麦颗粒磨粉过60目筛,按固液比1:4(g/mL)进行乙醇脱脂4 h,然后1500 r/min,离心5 min。通风干燥沉淀,得到脱脂粉。按固液比1:6(g/mL)将脱脂粉与0.01 mol/L NaOH混合,调pH至11,30℃搅2 h。混合液过80目筛,除去筛上物,滤液3500 r/min,离心15 min。去除上清液以及褐色沉淀层,收集下层白色沉淀。加水分散白色沉淀,再次离心,重复至上清液澄清,无褐色沉淀。50℃,干燥白色沉淀。粉碎过筛80目,即为燕麦纯淀粉(OS)^[9]。采用氧化酶法测定葡萄糖浓度,转化为淀粉含量,即可得淀粉纯度。

1.2.2 β -葡聚糖对燕麦粉消化的影响称取A、B、C、D级别的燕麦粉(总淀粉)各50 mg,加入5 mL pH 5.2的醋酸缓冲液,加入一颗磁力搅拌珠,95℃

水浴中糊化 20 min。冷却至 37 ℃后,加入已预热至 37 ℃的 5 mL (2 900 U/mL,150 U/mL) α -淀粉酶与淀粉葡萄糖苷酶的混合液中,37 ℃震荡酶解,在反应 20、40、60、80、100 min 和 120 min 时取样 200 μ L 加入到 800 μ L 无水乙醇中灭酶^[10-11]。经 10 000 r/min 离心 3 min,采用氧化酶法测定上清液中葡萄糖浓度。

称取称取 A、D 级别的燕麦粉(总淀粉)各 50 mg,加入 5 mL pH 5.2 含有不同浓度的 β -葡聚糖酶的醋酸缓冲溶液,其余水解测定方法同上。

称取纯燕麦淀粉 50 mg,加入不同质量分数(0.5%,10%,15%)的 β -葡聚糖,其余水解测定方法同上。

1.2.3 蛋白质对燕麦粉消化影响 称取 A、D 级别的燕麦粉(淀粉 50 mg),加入 4 mL pH 2.5 含有不同胃蛋白酶的醋酸缓冲溶液,37 ℃震荡酶解 1 h。然后,95 ℃水浴糊化 20 min,冷却至 37 ℃后,调节 pH 到 5.2。加入已预热至 37 ℃的 5 mL (2 900 U/mL,150 U/mL) α -淀粉酶与淀粉葡萄糖苷酶的混合液中,37 ℃震荡酶解,在反应 20、40、60、80、100 min 和 120 min 时取样 200 μ L 加入到 800 μ L 无水乙醇中灭酶。经 10 000 r/min 离心 3 min,采用己糖激酶法测定上清液中葡萄糖浓度。

1.2.4 燕麦淀粉糊化曲线特征 按照 AACC (1995,61-02)要求,取 A、B、C、D 级别的燕麦粉(淀粉基重 1.00 g),加入蒸馏水 25 mL。测定过程如下:从 50 ℃开始以每分钟增加 12 ℃至 95 ℃,然后在 95 ℃保温 2.5 min,冷却过程是从 95 ℃开始以每分钟降低 12 ℃至 50 ℃,然后在 50 ℃保温 2 min。搅拌器 10 s 内转速为 960 r/min,之后维持在 160 r/min。快速黏度分析仪(RVA)特征值主要用峰值黏度、崩解值、最终黏度和消减值等表示。

称取纯燕麦淀粉 1 g,分别添加质量分数为 0.5%,10%,15%的 β -葡聚糖,加入蒸馏水 25 mL,

糊化过程同上。

称取 A、D 级别的燕麦粉(淀粉基重 1.00 g)加入 25 mL pH 7.5 含有蛋白酶 K(15 U/g 蛋白酶 K/蛋白质底物)的磷酸缓冲溶液,37 ℃震荡酶解 1 h。对照组为 A、D 级别燕麦粉(淀粉基重 1.00 g)为加 25 mL pH 7.5,37 ℃的磷酸缓冲溶液,37 ℃震荡 1 h,糊化过程同上。

1.2.5 不同颗粒大小燕麦粉激光共聚焦显微镜观测 将 A、D 级别燕麦粉加到 pH 7 磷酸缓冲溶液中,避光染色标记。用 FITC I 标记蛋白(最大吸收光波长为 490~495 nm,最大发射光波长为 525~530 nm);采用荧光染色剂(Fluorescent Brightener 28)标记 β -葡聚糖(吸收波长 500 nm,最大发射波长 400~410 nm)呈蓝色;采用罗丹明 B 标记淀粉(最大吸收波长 552 nm,激光峰值波长 610 nm)。避光标记 1 h,经 3 000 r/min 离心 3 min,除去多余染料。采用激光共聚焦显微镜观察。

1.2.6 不同颗粒大小燕麦粉餐后血糖曲线 小鼠禁食 12 h,测完空腹血糖之后,将冷却至 37 ℃的 A、D 级别颗粒燕麦糊(0.5 g/(kg·bw))的剂量对小鼠进行灌胃,并在灌胃后的 15、30、45、60、90 min 和 120 min 时于尾静脉取血,采用血糖测试仪测定血液中葡萄糖的浓度(mmol/L)。

2 结果与分析

2.1 不同颗粒大小燕麦粉粒径分布

燕麦粒磨粉,分别过 60 目、80 目、100 目筛,成 A、D、C、D 4 种级别颗粒大小的燕麦粉。通过激光粒径分布仪器检测粒径,按面积计算得到 A、D、C、D 平均粒径(Ma)分别为 349.9,126.2,36.8,26.9 μ m,各尺寸之间具有显著差异。

2.2 基本成分的测定

提取的燕麦粉纯度为 99.9%,A、D、C、D 4 种级别颗粒大小的燕麦粉基本成分分析如表 1。其中蛋

表 1 不同颗粒大小燕麦粉成分质量分数分析

Table 1 Composition of the different particle of oat flour ($\bar{x} \pm SD$)

%

样品	淀粉	蛋白质	脂肪	β -葡聚糖	水分	灰分
A	39.65 $\pm$ 0.90 ^a	19.42 $\pm$ 0.08 ^a	11.37 $\pm$ 0.11 ^a	15.61 $\pm$ 0.42 ^a	8.31 $\pm$ 0.04 ^a	3.28 $\pm$ 0.12 ^a
B	46.16 $\pm$ 1.70 ^b	18.77 $\pm$ 0.12 ^a	10.03 $\pm$ 0.04 ^a	12.65 $\pm$ 0.71 ^b	9.55 $\pm$ 0.16 ^a	2.61 $\pm$ 0.01 ^a
C	65.06 $\pm$ 0.50 ^c	12.91 $\pm$ 0.12 ^b	7.98 $\pm$ 0.11 ^b	4.86 $\pm$ 0.12 ^c	10.42 $\pm$ 0.05 ^b	1.42 $\pm$ 0.03 ^b
D	70.90 $\pm$ 1.90 ^d	11.58 $\pm$ 0.08 ^b	6.33 $\pm$ 0.32 ^b	2.95 $\pm$ 0.13 ^d	10.83 $\pm$ 0.02 ^b	1.09 $\pm$ 0.03 ^b

注:每列字母不同代表显著性差异($P < 0.05$),采用 LSD 检验法,不同字母表示具有显著差异。

白质和 β -葡聚糖质量分数都具有显著差异,可以检测燕麦粉中固有的 β -葡聚糖对燕麦粉中淀粉消化的影响。

2.3 β -葡聚糖对燕麦淀粉消化性的影响

2.3.1 不同颗粒大小燕麦粉体外消化实验 A、B、C、D 不同级别颗粒大小的燕麦粉,体外模拟消化结果如图 1 所示。从图可以看出颗粒越细,淀粉消化速度越快。水解 20 min, A 和 B 颗粒燕麦粉水解后葡萄糖浓度为 2.3, 3.3 mmol/L, 水解速率不存在显著差异; C 和 D 颗粒燕麦粉水解后葡萄糖浓度为 6.0, 6.3 mmol/L, 水解速度不存在显著差异, A(B) 和 C(D) 颗粒燕麦粉水解存在显著差异。水解 120 min 时, 同样存在显著差异。一方面可能是由于颗粒越粗, β -葡聚糖以及蛋白质对淀粉的包裹严密, 糊化过程中淀粉溶出率少, α -淀粉酶接触淀粉越慢, 导致消化越慢; 另外一方面由于 A、B、C、D 含有的 β -葡聚糖质量分数约 15.6%、12.7%、4.9%、2.9%, β -葡聚糖质量分数越高, 越延缓淀粉消化, 可能是从理化性质上造成这一影响; 同时 A、B、C、D 蛋白质质量分数约为 19.4%、18.8%、12.9%、11.6%, 蛋白质的质量分数在一定程度上也可能会延缓燕麦淀粉的消化。

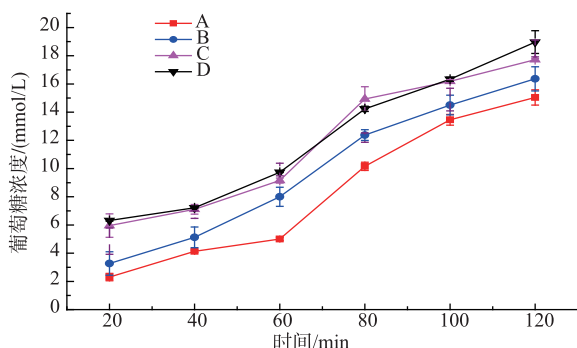


图 1 不同颗粒大小燕麦粉体外消化

Fig. 1 In vitro digestion of different particle oat flours

2.3.2 不同级别颗粒燕麦粉添加 β -葡聚糖酶后体外消化实验 由于 A、D 级别颗粒燕麦粉含有 β -葡聚糖以及蛋白质质量分数具有极显著差异, 故选择 A、D 颗粒燕麦粉作为研究对象, 添加葡聚糖酶以后, 测定淀粉水解速度, 结果如图 2 所示。A 颗粒, 加入不同浓度的 β -葡聚糖酶水解 β -葡聚糖后, 从体外消化结果来看, 在水解 20 min 时, A 颗粒燕麦粉水解后葡萄糖浓度为 2.3 mmol/L, 当加入 0.02 mg/mL 的葡聚糖酶以后, 葡萄糖浓度为 4.8 mmol/L, 与原 A 颗粒差异极显著, 当加入 0.002 mg/mL 的葡聚糖酶以后, 葡萄糖浓度为 3.0 mmol/L, 与 A 颗粒差异亦

显著; 在水解 120 min 时, 3 组样品中葡萄糖浓度差异都极为显著。说明 β -葡聚糖会延缓燕麦淀粉的消化, 并且这与 β -葡聚糖的质量分数有关, 质量分数越大, 淀粉消化越慢。当选取 D 颗粒时, 上述结果也得到了验证。

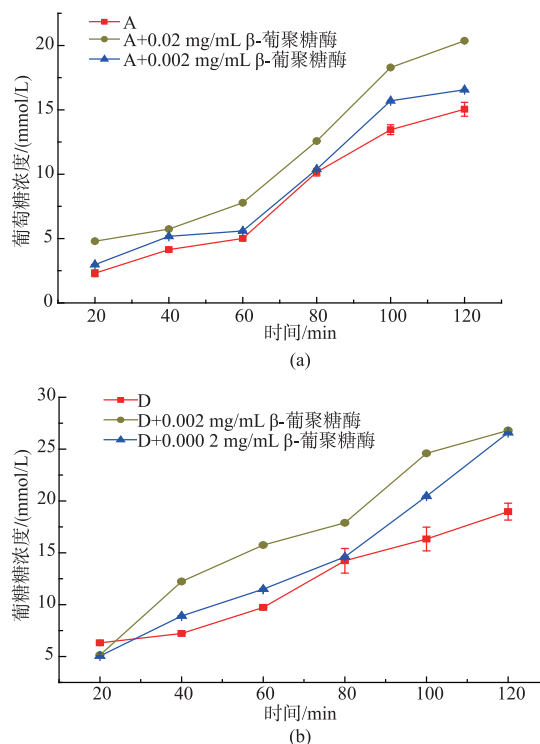


图 2 β -葡聚糖对燕麦粉消化性影响

Fig. 2 Effect of oat-glu on oat flours Digestion

2.3.3 燕麦淀粉添加 β -葡聚糖体外消化实验 提取纯燕麦淀粉, 加入不同质量分数的 β -葡聚糖 ($\leq 15\%$, 干重), 体外消化结果图 3 所示, 在一定质量分数范围内, 添加 β -葡聚糖以后, 体外水解速度并无显著下降。说明外加的 β -葡聚糖并不能有效降低燕麦粉中淀粉的消化, 而燕麦粉中固有的 β -葡聚糖才具有延缓淀粉消化的功能。

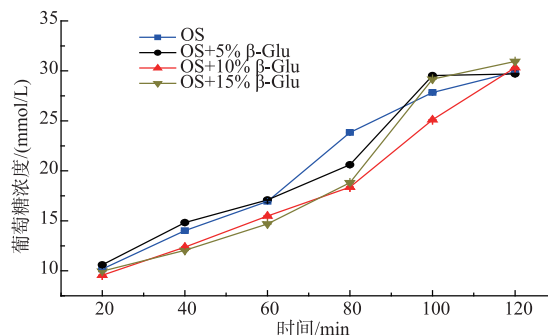


图 3 β -葡聚糖对燕麦淀粉消化性影响

Fig. 3 Effect of oat-glu on oat starch digestion

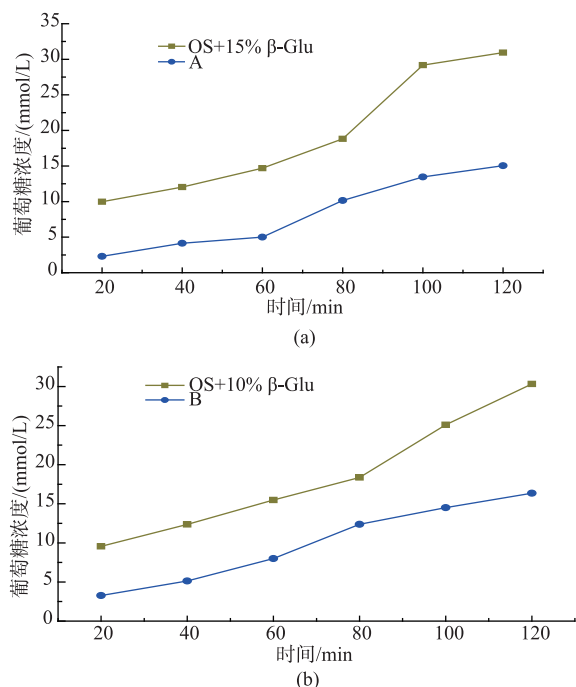


图4 β-葡聚糖存在形式对燕麦淀粉消化性影响

Fig. 4 Effect of oat-glu form on oat starch digestion

由于A颗粒燕麦粉含有β-葡聚糖质量分数约为15.6%,当纯燕麦淀粉(OS)加入质量分数15%的β-葡聚糖以后,水解速度如图4(a)所示。2组样品含有等量的β-葡聚糖,水解速度却有极为显著的差异,A颗粒燕麦粉的水解速度,显著低于纯燕麦淀粉加β-葡聚糖组,再次验证燕麦粉中固有的β-葡聚糖具有延缓燕麦淀粉消化的作用。

2.4 蛋白质对燕麦粉消化影响

将A、D颗粒燕麦中的蛋白质水解后,模拟淀粉体外消化。A颗粒燕麦粉蛋白质质量分数为19.5%,水解掉蛋白质后消化速度和A颗粒燕麦粉相比,极显著提高($P<0.01$)。而D颗粒中的蛋白质质量分数为11.6%,水解蛋白质后消化速度显著增加($P<0.05$)。说明燕麦粉中本身存在的蛋白质在一定程度上也会延缓淀粉消化,且与蛋白质质量分数有关。

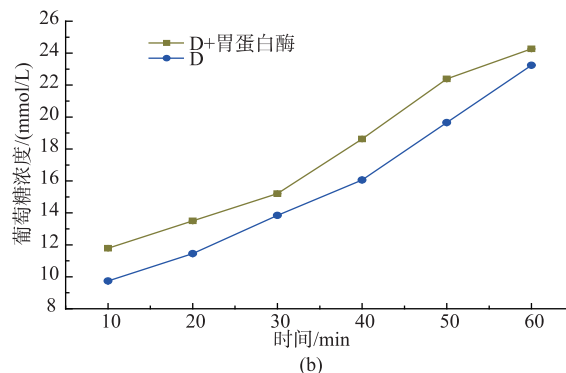
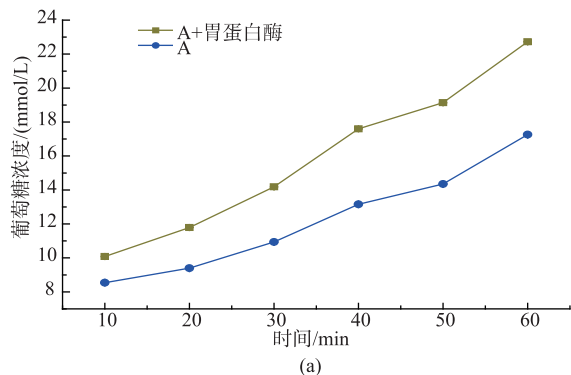
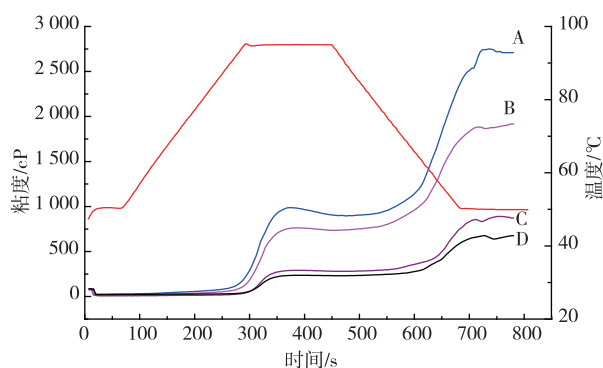


图5 蛋白质对燕麦粉消化性影响

Fig. 5 Effect of protein on oat flour digestion

2.5 燕麦淀粉糊化曲线特征

2.5.1 不同颗粒大小燕麦粉糊化曲线 燕麦粉淀粉质量分数最多,因而主要决定淀粉糊化粘度,这与直链淀粉和支链淀粉的比例以及分支链长分布有关^[12],支链淀粉导致淀粉颗粒的膨胀和粘性,而直链淀粉抑制膨胀。而Liu等指出在燕麦粉整个糊化体系中,葡聚糖影响最大,淀粉次之,再次之就是蛋白质^[13-14]。不同颗粒大小的燕麦粉(淀粉基重1g)糊化特征曲线如图6所示,颗粒越大,β-葡聚糖和蛋白质含量越大,最终糊化粘度越大,说明β-葡聚糖和蛋白质对粘度有影响,且他们的联合作用大于淀粉的单独作用。燕麦粉糊化后,粘度增大,粘度越大,淀粉消化越慢。



注:A、B、C、D分别代表不同颗粒大小级别的4种燕麦粉,其中A颗粒最粗,D颗粒最细。

图6 不同颗粒大小燕麦粉糊化曲线

Fig. 6 Pasting properties of different particle oat flours

A、B、C、D本身含有的燕麦淀粉类型不存在差异,而从表2中可以看出,燕麦颗粒越小,衰减值越小,其中A颗粒燕麦衰减值最大,为92 cP。在溶胀

表 2 不同颗粒大小燕麦粉的糊化特性

Table 2 Pasting characteristics of different particle of oat flour

不同颗粒燕麦	峰值粘度/cP	最低粘度/cP	衰减值/cP	最终粘度/cP	回升值/cP
A	988	896	92	2709	1813
B	763	735	28	1918	1183
C	291	280	11	873	593
D	236	231	5	675	444

期间,A 颗粒燕麦粉溶胀,不断破裂,热糊相对不太稳定,而 D 颗粒达到峰值以后,热糊粘度较为稳定。说明 A,D 颗粒燕麦粉中的 β -葡聚糖和蛋白质对淀粉的包裹也存在差异,并且在糊化过程中,空间结构可能会再次改变,从而影响淀粉的消化速度。

2.5.2 β -葡聚糖对燕麦淀粉糊化的影响 燕麦 β -葡聚糖具有降低胆固醇、促进胰岛素分泌和调控血糖作用,这些生理活性与燕麦 β -葡聚糖能够增加肠道内消化物粘度相关^[15]。 β -葡聚糖的相对分子质量和质量浓度影响 β -葡聚糖的粘度^[16],但当低相对分子质量 β -葡聚糖和高相对分子质量 β -葡聚糖溶液混合时,低相对分子质量 β -葡聚糖的聚合链能与高相对分子质量 β -葡聚糖聚合链之间发生交缠作用,也能够快速网络化形成凝胶^[17]。然而这一研究,都是针对提取的,具有一定纯度的 β -葡聚糖的研究。实验

发现, β -葡聚糖本身不具有糊化特征, β -葡聚糖的质量浓度为 6 mg/mL 时,粘度在 11~14 cP,纯燕麦淀粉分别添加质量分数 5%,10%,15%的 β -葡聚糖(淀粉基重 1 g)时,对淀粉本身终粘度并无著影响。

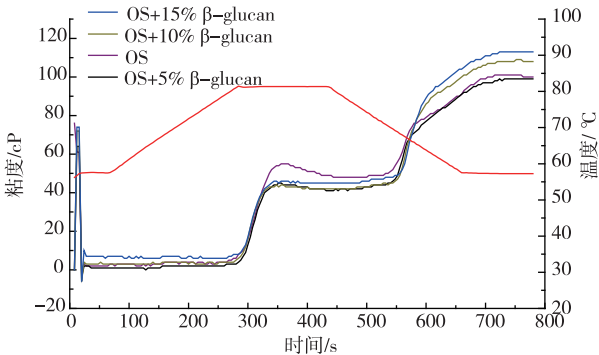


图 7 β -葡聚糖对燕麦淀粉糊化影响
Fig. 7 Effect of oat-glu on oat starch pasting

表 3 β -葡聚糖对燕麦淀粉糊化曲线的影响

Table 3 Effect of oat-glu on oat starch pasting characteristics

样品	峰值粘度/cP	最低粘度/cP	衰减值/cP	最终粘度/cP	回升值/cP
OS	55	48	7	100	42
OS+5% β -glu	45	41	4	99	58
OS+10% β -glu	44	42	2	108	66
OS+15% β -glu	46	45	1	113	68

虽然 β -葡聚糖在一定程度影响衰减值,但是表 3 和表 2 相比可以看出,额外添加 β -葡聚糖后,燕麦淀粉糊化最终粘度是小于 A、B、C、D 颗粒燕麦粉的糊化粘度,衰减值也更小。在一定范围以内,额外添加的 β -葡聚糖,对燕麦淀粉糊化终粘度无显著影响,说明燕麦粉颗粒中固有的 β -葡聚糖对燕麦糊化后的粘度有重要影响,燕麦粉糊化后,粘度越大,消化越慢。

2.5.3 蛋白质对燕麦粉糊化的影响 A、D 燕麦颗粒粉中添加蛋白酶 K 以后,对于 A 颗粒燕麦粉来说,最终粘度无显著差异,而 D 颗粒燕麦粉最终粘度具有显著差异,见图 8。一方面,是由于 A 颗粒燕

麦中本身含有的 β -葡聚糖较多,蛋白质水解后,对最终粘度影响不太;而 D 颗粒燕麦粉中 β -葡聚糖质量分数较少,蛋白质水解以后最终粘度发生显著变化,说明葡聚糖对淀粉粘度的作用远远大于蛋白质,而蛋白质延缓淀粉消化,主要不是从粘度上影响,可能还会存在其他机理。

2.6 不同颗粒大小级别燕麦粉激光共聚焦显微镜观测

A 和 D 颗粒燕麦粉中, β -葡聚糖和蛋白质以及淀粉存在一定的交联,通过图 9 可以看出,A 颗粒中, β -葡聚糖以及蛋白质质量分数较多,交联密度大于 D 颗粒,说明交联密度越大,越延缓淀粉的消

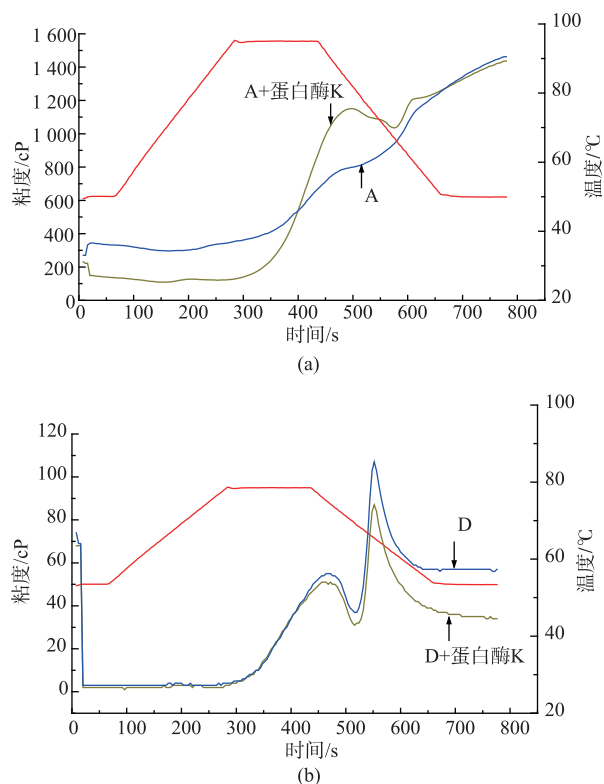
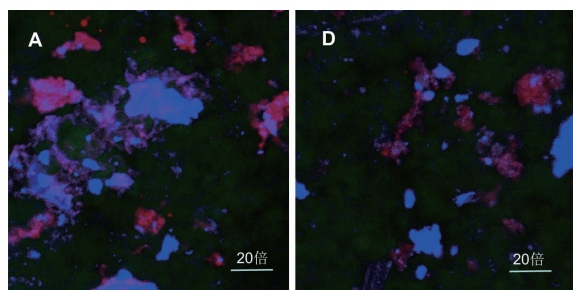


图 8 蛋白质对燕麦粉消化性影响

Fig. 8 Effect of protein on oat flour pasting

化。这种交联结构可能包括空间物理结构,也可能存在化学结构交联。这种交联结构对燕麦淀粉消化可能具有重要影响。



注:红色代表蛋白质,蓝色代表葡聚糖,黑绿色代表淀粉

图 9 不同级别颗粒燕麦粉共聚焦显微镜图

Fig. 9 CLSM images of different particle oat flour

2.7 不同颗粒大小燕麦粉餐后血糖曲线

餐后血糖的动态变化既反映外源性受试物的

消化吸收状况,又反映食物对血糖的影响。从图 10 可以看出 A 和 D 颗粒燕麦粉的餐后血糖曲线不同。45 min 时,A 颗粒餐后血糖值较 D 颗粒燕麦粉餐后血糖峰值低,且有显著差异。说明燕麦粉颗粒越大,即固有 β -葡聚糖和蛋白质质量分数越大,燕麦粉在体内消化速度越慢。Chanrashekar^[18]研究表明蛋白质对淀粉具有包埋作用,从而抑制直链淀粉的回生,不利于抗性淀粉的生成。而淀粉消化速度减慢,说明燕麦粉中 β -葡聚糖可能与蛋白质有一定的交联,这种交联结构在一定程度上延缓燕麦淀粉的消化。

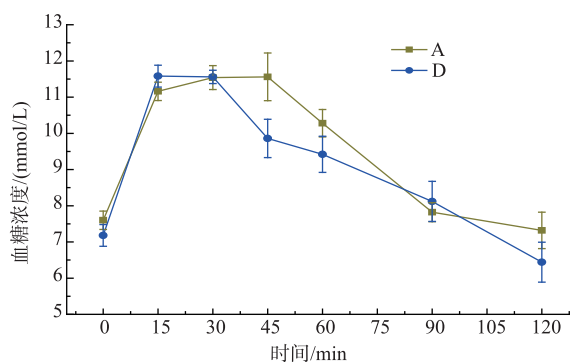


图 10 A、D 颗粒燕麦粉餐后血糖曲线

Fig. 10 Postprandial glucose curve of A, D oat flour

3 结 语

本文作者通过将燕麦颗粒磨粉,过筛分级成不同颗粒大小的燕麦粉,模拟燕麦粉体外消化,探究 β -葡聚糖对燕麦淀粉消化的影响。结果显示燕麦粉中,固有的 β -葡聚糖和蛋白质的存在会延缓燕麦淀粉的消化;而额外添加 β -葡聚糖到纯燕麦淀粉中, β -葡聚糖并不会延缓燕麦淀粉消化。说明,燕麦粉中 β -葡聚糖本身存在一定的空间结构,并且与蛋白质有一定的交联,这种空间结构,在一定程度上延缓燕麦淀粉的消化。通过对这一结构的进一步研究,可以更好地理解 β -葡聚糖的结构与其影响淀粉消化的关系,为以燕麦为基础的功能食品的加工提供一定的理论基础。

参考文献:

- [1] QUEZADA CR. Luminal substrate "brake" on mucosal maltase-glucoamylase activity regulates total rate of starch digestion to glucose[J]. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*, 2007, 45(1):32-43.
- [2] ENGLYST H N, CUMMINGS J H. Non-starch polysaccharides (dietary fiber) and resistant starch[J]. *Advances in Experimental*

- Medicine and Biology**, 1990, 270:205-215.
- [3] WANG Q, ELLIS P R. Oat beta-glucan: physico-chemical characteristics in relation to its blood-glucose and cholesterol-lowering properties[J]. **The British Journal of Nutrition**, 2014, 112(2): S4-S13.
- [4] HOODA S. Dietary oat beta-glucan reduces peak net glucose flux and insulin production and modulates plasma incretin in portal-vein catheterized grower pigs[J]. **Journal of Nutrition**, 2010, 140(9): 1564-1569.
- [5] BROCKMAN D A, CHEN X, GALLAHER D D. Consumption of a high beta-glucan barley flour improves glucose control and fatty liver and increases muscle acylcarnitines in the Zucker diabetic fatty rat[J]. **European Journal of Nutrition**, 2013. 52(7): 1743-1753.
- [6] ZHU X. Quantitative assessment of the effects of beta-glucan consumption on serum lipid profile and glucose level in hypercholesterolemic subjects[J]. **Nutrition Metabolism and Cardiovascular Diseases**, 2015, 25(8): 714-723.
- [7] BELOBRAJDIC D P. Wholegrain barley beta-glucan fermentation does not improve glucose tolerance in rats fed a high-fat diet. **Nutrition Research**, 2015, 35(2): 162-168.
- [8] PANAHI S. Glycemic effect of oat and barley beta-glucan when incorporated into a snack bar: a dose escalation study[J]. **Journal of the American College of Nutrition**, 2014, 33(6): 442-449.
- [9] LIU Gang, LIU Ying. On extract ion and purification of oat starch[J]. **Deep Processing of Oil and Food**, 2007(1): 11-13. (in Chinese)
- [10] SINGH J, DARTOIS A, KAUR L. Starch digestibility in food matrix: a review[J]. **Trends in Food Science & Technology**, 2010, 21(4): 168-180.
- [11] ZHANG G, YAO Z, ZHAMAKER B R. Slow digestion property of native cereal starches[J]. **Biomacromolecules**, 2006, 7(11): 3252-3258.
- [12] KAMAL E A, LAERKE H N, KNUDSEN K E B, et al. Physical, microscopic and chemical characterisation of industrial rye and wheat brans from the Nordic countries[J]. **Food Nutr Res**, 2009, 53: 1-11.
- [13] LIU Y, BAILEY T B, WHITE P J. Individual and interactional effects of beta-glucan, starch, and protein on pasting properties of oat flours[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2010, 58(16): 9198-9203.
- [14] CHENG Ke, CHEN Jiwang. The studies of rice starch physicochemical properties and pasting characteristics[J]. **Journal of the Chinese Cereals and Oils Association**, 2006, 21(6): 4-8. (in Chinese)
- [15] ANDERSSON A A, BRJESDOTTER D. Effects of environment and variety on content and molecular weight of β -glucan in oats [J]. **Journal of Cereal Science**, 2011, 54(1): 122-128.
- [16] DONGOWSKI G, DRZIKOVA B, SENGE B, et al. Rheological behaviour of β -glucan preparations from oat products[J]. **Food Chemistry**, 2005, 93(2): 279-291.
- [17] KWONG M G, WOLEVER T M, BRUMMER Y, et al. Attenuation of glycemic responses by oat β -glucan solutions and viscoelastic gels is dependent on molecular weight distribution[J]. **Food & Function**, 2013, 4(3): 401-409.
- [18] CHANDRASHEKAR A, KIRLEIS A W. Influence of protein on starchgelatinization in sorghum[J]. **Cereal Chemistry**, 1998, 65(6): 457-462.