doi:10.12301/j.issn.2095-6002.2021.01.016　　文章编号:2095-6002(2021)01-0144-09
引用格式:方圆,任欣,彭洁,等. 青稞及其制品的体内外淀粉消化特性研究[J]. 食品科学技术学报,2021,39(1):144-152.
FANG Yuan, REN Xin, PENG Jie, et al. Study on *in vitro* and *in vivo* starch digestive characteristics of Qingke barley and its products[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021,39(1):144-152.

青稞及其制品的体内外淀粉消化特性研究

方　圆，　任　欣，　彭　洁，　谢仲寅，　张　敏*
(北京工商大学 北京食品营养与人类健康高精尖创新中心/北京市食品添加剂工程技术研究中心，北京　100048)

摘　要: 淀粉是青稞中的主要成分,其消化速率及程度直接影响餐后血糖反应。通过探究青稞及其制品体外淀粉消化特性,同时参照国际标准办法,招募12名健康志愿者,测定4种青稞制品的体内血糖生成指数(GI)。结果表明:青稞熟粉的淀粉消化速率显著低于小麦熟粉,蒸煮和挤压处理均可显著增加青稞及小麦中快消化淀粉(RDS)质量分数,降低抗性淀粉质量分数。青稞制品的GI值从大到小依次为青稞馒头(70±11)、青稞鲜湿面(60±13)、青稞挂面(51±11)、青稞炒面(33±14)。相关性分析结果表明,GI值与RDS呈极显著正相关($R=0.733$, $P=0.007$)。体内外实验均表明:不同加工方式可显著影响青稞制品的消化特性,消费者有必要根据自身的健康状况选择合适的产品。青稞挂面及青稞炒面属于低GI食品,有利于血糖控制人群或糖尿病病人食用。

关键词: 青稞; 淀粉; 加工方式; 体外消化特性; 血糖生成指数
中图分类号: TS210.9; TS213.2　　**文献标志码:** A

青稞是中国高寒地区主要农作物,高寒缺氧的环境孕育了青稞“三高两低”,即高蛋白、高维生素、高纤维和低脂肪、低糖的特性[1]。研究表明:长期食用青稞,可降低慢性代谢疾病的风险,如高血压[2]、肥胖[3]、高血脂等[4-5]。此外,青稞β-葡聚糖在水溶液中具有辅助降血糖功能,对葡萄糖稳态有良好的影响[6]。目前,青稞的营养价值及潜在健康效益日益受到关注,而淀粉作为青稞的主要成分,决定着青稞的营养价值及其生理特性。

近年来临床研究发现,淀粉的消化性与许多慢性疾病密切相关。餐后血糖应答很大程度上取决于碳水化合物的消化程度及消化速率,而具有缓慢消化性质的淀粉有利于维持餐后血糖的稳定,降低餐后胰岛素的分泌,适合糖尿病病人食用[7-9]。研究表明:淀粉来源、自身结构特征[10]、食品中其他组分以及食品加工过程等均可影响淀粉的消化特性[11]。

然而,关于从体内及体外综合探究青稞淀粉消化性的研究较少。因此,本研究主要从以下3个方面展开:1)以小麦粉为阳性对照,研究生青稞全粉的体外消化特性,以及加热和挤压处理对青稞全粉体外消化率的影响;2)探讨不同青稞制品体外消化特性及预估血糖生成指数(estimated glycemic index, eGI)的差异;3)探讨不同青稞制品体内血糖生成指数(glycemic index, GI)的差异。通过体外及体内对青稞消化特性进行综合探究,以了解青稞及其制品的消化特性。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

北青3号青稞(总淀粉质量分数60.7%、蛋白

收稿日期: 2020-01-14
基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFD0401200);北京市科技计划一般项目(KM202010011006);北京工商大学基本科研业务费项目(PXM2019_014213_000007);北京市人才培养质量建设–一流专业建设项目(PXM2019_014213_000010)。
第一作者: 方　圆,女,硕士研究生,研究方向为谷物营养特性及生理功能探究。
*通信作者: 张　敏,女,教授,博士,主要从事粮食、油脂与植物蛋白工程方面的研究。

质质量分数 9.6%、脂肪质量分数 2.2%、膳食纤维质量分数 13.5%、水分质量分数 12.2%），山西东方亮生命科技有限公司；金沙河小麦粉（总淀粉质量分数 67.6%、蛋白质质量分数 12.2%、脂肪质量分数 2.0%、膳食纤维质量分数 5.5%、水分质量分数 13.1%）、食盐，河北金沙河面业集团有限公司；转化酶（I4504）、淀粉葡萄糖苷酶（10113）、胃蛋白酶（P7000）、胰酶（P7545），美国 Sigma 公司；葡萄糖氧化酶法测定试剂盒（E1010），北京普利莱基因技术有限公司；氢氧化钾、无水乙酸钠、盐酸、乙酸、无水乙醇、氢氧化钾等，均为分析纯，北京半夏科技发展有限公司。

1.2　仪器与设备

WF-20B 型高效粉碎机，江阴市智健机械制造有限公司；SLG30 型双螺杆挤压机，济南赛百诺科技开发有限公司；JHMZ200 型和面机、JMTD168/140 型试验面条机，北京东孚久恒仪器技术有限公司；4-16KS 型冷冻离心机，德国 Sigma 冻干机有限公司；THZ-82A 型水浴恒温振荡器，上海江星仪器有限公司；F200-PRO 型酶标仪，帝肯 Tecan（上海）贸易有限公司；Aucc-Chek Performa 型（卓越）血糖仪，上海罗氏制药有限公司。

1.3　实验方法

1.3.1　青稞粉的制备

青稞生粉：青稞经 80 目粉碎机粉碎后，再进行 120 目粉碎得到青稞生粉。

青稞挤压粉：青稞经 80 目粉碎机粉碎后，进行挤压处理（螺杆转速为 260 r/min，1～4 区温度分别为 40、70、100、150 ℃，模口 3.9 mm），再将挤压处理后的青稞粉进行 120 目粉碎，得到青稞挤压粉。

青稞熟粉：青稞生粉加入水中（料液比 1∶1 g/mL），沸水浴加热 15 min 得到青稞熟粉。

1.3.2　青稞制品的制备

青稞鲜湿面：称料（青稞生粉、青稞挤压粉、小麦粉质量比 1∶1∶3），混合均匀后进行和面、醒发，将醒发好的面团轧片、切条，得到厚度为 1 mm，宽度为 1.5 mm 的青稞鲜湿面。

青稞挂面：称料（青稞生粉、青稞挤压粉、小麦粉质量比 1∶1∶3），混合均匀后进行和面、醒发，将醒发好的面团轧片、切条，最后放入烘箱进行干燥处理（预干燥阶段为温度 25 ℃，时间 40 min；主干燥阶段为温度 45 ℃，时间 140 min；末干燥阶段为温度 30 ℃，时间 60 min），得到青稞挂面。

青稞馒头：称料（青稞生粉、青稞挤压粉、小麦粉质量比 1∶1∶3），混合均匀后进行和面、发酵，将发酵好的面团分割搓圆，然后放入蒸锅中蒸 15 min，冷却后得青稞馒头。

青稞炒面：称料（青稞生粉、青稞挤压粉、小麦粉质量比 1∶1∶3），混合均匀后放入锅中，电磁炉 120 W 翻炒 20 min，冷却后得到青稞炒面。

1.3.3　体外淀粉消化率测定

1.3.3.1　样品前处理

对青稞粉及不同青稞制品的体外淀粉消化速率测定，参照文献[12-13]进行适当修改。

游离葡萄糖（free glucose，FG）含量测定的前处理：称取约含 0.3 g 淀粉的待测样品于 50 mL 离心管中，加入 3 颗小玻璃珠以模拟消化过程中肠道环境；向离心管中准确加入 25 mL 0.1 mmol/L 的醋酸盐缓冲溶液（pH 值 5.2），充分涡旋后置于沸水浴中糊化 30 min。取出冷却至 37 ℃，加入 0.3 mL 3 000 U/mL 的转化酶溶液，涡旋混匀后 37 ℃ 水浴加热 30 min。取 0.2 mL 消化液于 4 mL 无水乙醇中进行灭酶。然后在 3 000 r/min 离心 5 min 后取上清液，用于测定 FG 含量。

20、120、180 min 时葡萄糖释放量（G_{20}、G_{120}、G_{180}）测定的前处理：称取一份约含 0.3 g 淀粉的待测样品置于 50 mL 离心管中，加入 10 mL 新鲜配制的质量分数为 0.5% 的胃蛋白酶溶液和 5 颗小玻璃珠，涡旋混匀后放入 37 ℃ 水浴中，30 min 后向离心管中加入 10 mL 0.1 mmol/L 的醋酸盐缓冲溶液（pH 值 5.5），然后加入 5 mL 混合酶溶液（胰酶、淀粉葡萄糖苷酶与转化酶组成）以启动消化。整个消化过程均在 37 ℃、210 r/min 水浴震荡中加热进行，共持续 180 min。分别于消化开始后的 20、120、180 min 时取 0.2 mL 消化液于 4 mL 的无水乙醇中进行灭酶。然后在 3 000 r/min 速率下离心 5 min 后取上清液，用于测定 20、120、180 min 时的葡萄糖释放量。

总葡萄糖（total glucose，TG）释放量测定的前处理：将消化 180 min 后的消化液充分涡旋震荡，沸水浴加热 30 min 后冰水浴 15 min，接着加入 10 mL 7 mol/L 的氢氧化钾溶液，冰水浴 30 min。然后分别取 0.2 mL 样本溶液加入 1 mL 1 mol/L 的醋酸溶液（含 40 μL 100 U/mL 淀粉葡萄糖苷酶）中，70 ℃ 水浴加热 30 min 后，沸水浴 10 min 灭酶，冷却至室温后再加入 20 mL 去离子水，在 3 000 r/min 离心 5 min 后取上清液，用于测定 TG 含量。

1.3.3.2 葡萄糖含量测定

根据 Trinder 反应原理[14-15]，葡萄糖在葡萄糖氧化酶作用下生成葡萄糖酸和过氧化氢；然后过氧化物酶催化过氧化氢，使色原物质(4-氨基安替比林)生成醌亚胺，颜色的深浅与葡萄糖浓度成正比。分别配制浓度为 0.125、0.250、0.500、1.000、1.500、2.000、2.500 mmol/L 的葡萄糖标准溶液，按照试剂盒说明操作，在 37 ℃孵育 20 min，用酶标仪在 530 nm 处测吸光度，绘制标准曲线，$y = 6.49688x + 0.02483$($R^2 = 0.99941$)。根据体外消化的数据，淀粉可被分为不同消化组分[12]，快消化淀粉(rapidly digestible starch，RDS)、慢消化淀粉(slowly digestible starch，SDS)及抗性淀粉(resistant starch，RS)，各组分质量分数(%)的计算方法见式(1)~式(4)：

$$w(\mathrm{RDS}) = \frac{[m(\mathrm{G}_{20}) - m(\mathrm{FG})] \times 0.9}{m(\mathrm{TS})} \quad ; \quad (1)$$

$$w(\mathrm{SDS}) = \frac{[m(\mathrm{G}_{180}) - m(\mathrm{G}_{20})] \times 0.9}{m(\mathrm{TS})} \quad ; \quad (2)$$

$$w(\mathrm{RS}) = \frac{[m(\mathrm{TG}) - m(\mathrm{G}_{180})] \times 0.9}{m(\mathrm{TS})} \quad ; \quad (3)$$

$$m(\mathrm{TS}) = [m(\mathrm{TG}) - m(\mathrm{FG})] \times 0.9 \quad 。 \quad (4)$$

式(1)~式(4)中，$m(\mathrm{G}_{20})$为体外水解 20 min 时释放的葡萄糖，mg；$m(\mathrm{G}_{180})$为体外水解 180 min 时释放的葡萄糖，mg；$m(\mathrm{FG})$为游离葡萄糖，mg；$m(\mathrm{TG})$为总葡萄糖释放量，mg；$m(\mathrm{TS})$为总淀粉干质量，mg；0.9 为转换系数。

1.3.4 预估血糖生成指数测定

体外模拟淀粉消化过程，分别于 20、40、60、90、120、180 min 时取样，计算水解液中葡萄糖的质量(mg)、体外淀粉消化动力学参数以及 eGI 值，并利用式(5)对消化过程进行拟合[16]。水解度(hydrolysis index，HI)通过待测样品水解曲线下面积与参照物(新鲜白面包)水解曲线下面积的比值计算得出。将白面包的 eGI 定义为 100，通过式(6)计算得出其他待测样品的 eGI。以白面包为参照物的 eGI 值乘以 0.7 即可得出以葡萄糖标准溶液为参照物(葡萄糖 eGI = 100)的 eGI 值[17]。

$$C = C_{\infty}(1 - e^{-kt}) \quad ; \quad (5)$$

$$eGI = 39.71 + 0.549HI \quad 。 \quad (6)$$

式(5)、式(6)中，C_{∞}为最终水解平衡时的葡萄糖水解率，%；k 为动力学常数，min^{-1}；t 为水解时间，min。

1.3.5 体内血糖反应测定

选取 12 名志愿者(男女各 6 人)，年龄介于 20~24 岁，平均 BMI 为(20.03 ± 1.66) $\mathrm{kg/m^2}$。受试者均无消化系统、呼吸系统、内分泌系统疾病和碳水化合物不耐受症，血糖、血脂等生化指标全部正常，1 个月内没有节食减肥及服用任何药物。在实验期间避免剧烈运动、暴饮暴食、饮酒、熬夜等不良生活行为，避免食用刺激性食物，每次测试前需正常饮食，按时休息。本研究经北京大学生物医学伦理委员会许可，并与受试者签订知情同意书。

志愿者从实验前 1 天晚 20:00 开始禁食，可少量饮水。实验当天上午 8:00—9:00 测定空腹血糖，然后向每位志愿者提供 1 份受试样品(见表 1)，要求志愿者在 15 min 内进食完毕。从第 1 口进食时间开始计时，分别于进食开始后的 15、30、45、60、90、120 min 采集指尖血，测定血糖浓度。参比物葡萄糖标准溶液进行 2~3 次实验，待测样品至少进行 1 次实验，每次实验间隔至少 72 h[18]。以葡萄糖作为参考食物(GI = 100)，以时间为横坐标，各个时点的血糖值为纵坐标，制作血糖应答曲线。用梯形法计算 2 h 餐后曲线下增量面积(IAUC)，然后根据式(7)计算待测物血糖生成指数[19]。

$$GI = \frac{IAUC(\text{待测食物})}{IAUC(\text{葡萄糖})} \times 100\% \quad 。 \quad (7)$$

1.4 数据处理

所有体外实验均至少进行 3 次重复。采用

表 1 青稞制品和标准葡萄糖溶液的进食量

Tab.1 Consumption amount of Qingke barley products and standard glucose solution

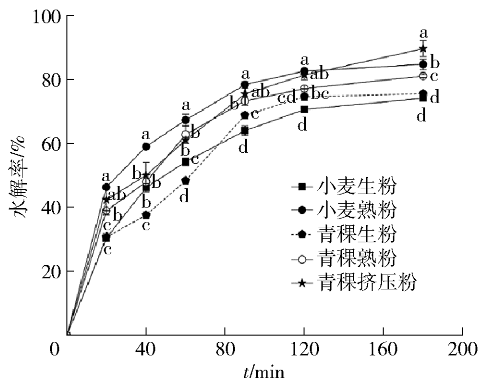
受试物	质量分数配比	w(水)/%	w(可利用碳水化合物)/%	m(可利用碳水化合物)/g	m(进食量)/g
青稞鲜湿面	40%青稞粉，60%小麦粉	32.3	47.6	50.0	105.0
青稞挂面	40%青稞粉，60%小麦粉	10.2	63.1	50.0	79.2
青稞馒头	40%青稞粉，60%小麦粉，酵母	42.8	42.6	50.0	117.4
青稞炒面	40%青稞粉，60%小麦粉	0.7	72.4	50.0	69.1
标准葡萄糖溶液	无水葡萄糖粉	80.0	20.0	50.0	250.0

SPSS 对获得的所有数据进行分析,数据以平均值 ± 标准差表示,使用 Origin 9.0 软件绘图。

2　结果与分析

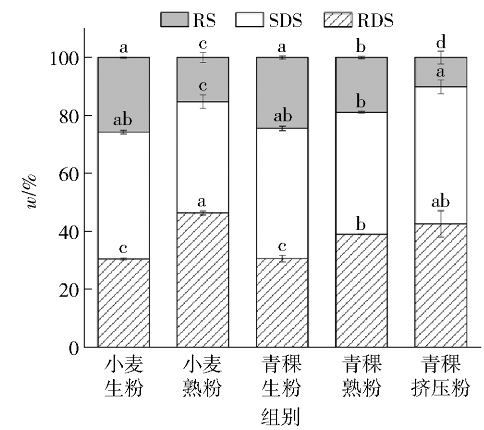
2.1　青稞全粉体外淀粉消化率及 eGI 分析

以小麦粉为阳性对照,分别测定青稞生粉、青稞熟粉及青稞挤压粉的体外淀粉消化率,见图 1。由图 1(a)可知,青稞和小麦体外淀粉水解速率均在前 20 min 增长最快;在 20 ~ 120 min 增速减慢;当水解进行到 120 min 后,水解速率基本趋于稳定。整体而言,青稞生粉与小麦生粉的体外淀粉水解率没有显著性的差异;但蒸煮过后,青稞熟粉的体外淀粉消化速率显著低于小麦熟粉。如图 1(b),蒸煮过后,青稞和小麦粉中 RDS 质量分数显著升高($P < 0.05$),SDS 和 RS 质量分数显著降低($P < 0.05$),其中以小麦粉 RDS 质量分数从 30.52% ±0.41% 增加到 46.41% ±0.67% 最为明显。这主要是因为蒸煮过后部分淀粉发生糊化。糊化后的淀粉更容易消化吸收,对血糖和胰岛素的刺激可能会更大。本研究结果也进一步说明:淀粉糊化是 SDS 和 RS 转化为 RDS 的过程[13]。与小麦熟粉相比,青稞熟粉 RDS 质量分数显著低于小麦熟粉($P < 0.05$),而 SDS 和 RS 质量分数显著高于小麦熟粉($P < 0.05$)。据此推测,日常膳食中以青稞熟粉代替小麦熟粉将更有利于血糖控制。



不同小写字母表示同一时间不同类别样品差异显著($P<0.05$)。

(a) 水解率的变化



不同小写字母表示不同类别样品中相同组分差异显著($P<0.05$)。

(b) 不同淀粉组分质量分数变化

图 1　青稞全粉体外淀粉消化特性分析

Fig. 1　Analysis of starch digestive characteristics of Qingke barley flour *in vitro*

挤压是一种常见的淀粉改性及食品预处理方式,具有高效、连续、能耗低、污染小等优点,已广泛应用于谷物生产加工中[20-21]。对青稞粉进行挤压处理后,青稞粉的体外淀粉消化率显著提高($P < 0.05$),RDS 质量分数显著增加,RS 质量分数显著降低,与以往的研究结果一致[22-23]。究其原因,在挤压过程中,高温、高压及高剪切力破坏淀粉颗粒结构,淀粉的结晶区遭到破坏,无定型区域增加,内部结构松散,淀粉酶因挤压后淀粉表面多孔疏松而更易与淀粉内部的酶作用位点结合,从而提高消化速率。

小麦粉和青稞粉的淀粉体外模拟水解动力学方程的特征参数见表 2。由表 2 可知,各样品的 eGI 值由高到低依次为小麦熟粉、青稞挤压粉、青稞熟粉、青稞生粉、小麦生粉。蒸煮和挤压处理使青稞的 eGI 值增加,但经过同样处理的青稞熟粉的体外淀粉消化各动力学参数及 eGI 值显著低于小麦熟粉($P < 0.05$),这可能与原料基本组分有一定的相关性。研究表明:eGI 值与蛋白质及膳食纤维含量呈显著负相关[24]。这主要是因为蛋白质与淀粉结合较紧密,限制淀粉酶与淀粉的接触[25]。而膳食纤维能够增加消化液体系黏度,并与淀粉分子相互缠绕,延缓了酶对淀粉的水解作用,从而降低淀粉消化率[26]。本研究中青稞粉的蛋白质含量低于小麦粉,但膳食纤维含量远高于小麦粉,使得青稞粉的酶敏感性相对较低,在一定程度上抵抗了淀粉酶的水解[27]。

2.2　不同青稞制品的体外淀粉消化率及 eGI 分析

淀粉的消化率受多种因素影响,如淀粉来源、淀粉结构、直链淀粉含量、食品中其他组分、不同加工方式等[11]。其中,不同加工方式是影响淀粉消化率的主要因素,并最终影响餐后血糖反应。食品经加工后,质构、营养特性、消化特性均会发生变化[26]。

表 2 青稞全粉淀粉体外模拟水解动力学方程的特征参数

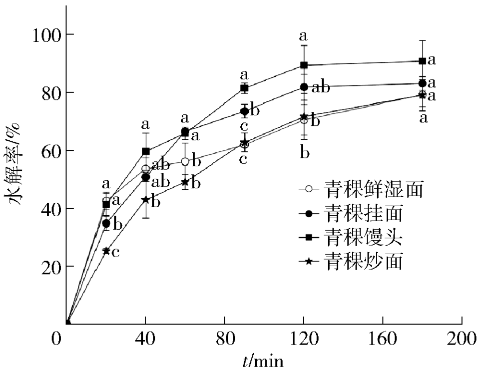
Tab. 2 Kinetic equation characteristics of enzymatic hydrolysis of starches of Qingke barley flour

产品	C_∞/%	k/min^{-1}	R^2	HI	eGI(参比物白面包)	eGI(参比物葡萄糖)
小麦生粉	74.28 ±1.50c	0.024 ±0.001ab	0.996 52	82.46 ±0.25d	84.98 ±0.14d	60.33 ±0.10d
小麦熟粉	82.93 ±2.48b	0.034 ±0.001a	0.987 79	100.11 ±0.65a	94.67 ±0.36a	67.22 ±0.25a
青稞生粉	81.06 ±5.45b	0.018 ±0.011d	0.976 21	82.86 ±0.80d	85.20 ±0.45d	60.49 ±0.31d
青稞熟粉	80.75 ±2.80b	0.026 ±0.001b	0.988 01	92.11 ±0.22c	90.28 ±0.12c	64.09 ±0.09c
青稞挤压粉	87.64 ±4.85a	0.023 ±0.010c	0.974 04	96.78 ±3.01b	92.84 ±1.65b	65.91 ±1.17b

不同小写字母表示同列数据差异显著($P<0.05$)。

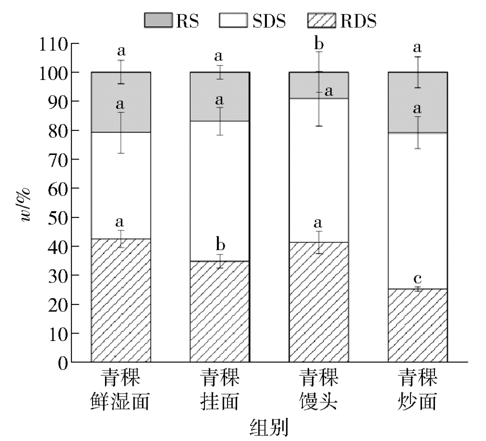
研究表明:马铃薯的淀粉消化率及预估血糖生成指数因加工烹调方式的不同而产生显著性的差异[28]。为了明确常见加工方式对青稞体外淀粉消化速率的影响,本研究评价了同种青稞原料粉经不同加工方式制成的青稞鲜湿面、青稞挂面、青稞馒头及青稞炒面的淀粉消化特性,见图 2。如图 2(a),青稞馒头的体外淀粉消化速率最快,青稞炒面的体外淀粉消化速率最慢。经过 180 min 水解后,青稞馒头中 90.86% ±6.97% 的淀粉被水解,青稞挂面中有 83.09% ±2.39% 的淀粉被水解,青稞鲜湿面和青稞炒面中分别有 79.16% ±4.03% 和 79.05% ±5.34% 的淀粉被水解。由图 2(b)可知,虽然青稞炒面的 RS 质量分数与青稞挂面及鲜湿面没有显著性的差异($P>0.05$);但青稞炒面的 RDS 质量分数显著低于其他 3 种制品,这也是青稞炒面消化速率低于其他 3 种制品的原因之一。4 种青稞制品由不同的加工方式制得,其中,在馒头的制作过程中,需要加入酵母进行发酵,因而形成疏松多孔的结构,使淀粉酶易于与淀粉内部的酶作用位点结合,从而促进酶解消化。与此同时,较高的水分含量和蒸制加热过程使淀粉的颗粒与结晶结构丧失,淀粉糊化,对酶解反应的敏感性增加[29]。青稞鲜湿面及挂面的生产过程中都经过了压延处理,使内部组织结构紧密[30],阻碍了淀粉与淀粉酶的接触,使其淀粉消化率低于青稞馒头。青稞炒面经过炒制工艺制成,水分含量低,淀粉糊化程度低。另外,在低水分含量炒制过程中,部分支链淀粉侧链降解为直链淀粉,生成直链淀粉–脂质复合物,提高了结晶度,降低了淀粉消化率[31]。

青稞制品的体外淀粉消化率及预估血糖生成指数如表 3,各样品的最终水解平衡时的葡萄糖水解率相差较大,其中青稞馒头具有最高的 C_∞、HI 及 eGI 值。与图 2(b)比较发现,淀粉样品中 RS 质量分数越高,其 C_∞、GI 值越低。动力学常数 k 也随着淀粉样品不同而存在差异,k 值越大说明淀粉的体外消化达到 C_∞ 的速度越快[32],但 C_∞ 与 k 变化趋势并不完全一致。青稞鲜湿面的 k 值显著高于青稞馒头($P<0.05$),但其 C_∞ 比青稞馒头低得多。也就是



不同小写字母表示同一时间不同类别样品差异显著($P<0.05$)。

(a) 水解率的变化



不同小写字母表示不同类别样品中相同组分差异显著($P<0.05$)。

(b) 不同淀粉组分质量分数变化

图 2 青稞制品体外淀粉消化特性分析

Fig. 2 Analysis of starch digestive characteristics of Qingke barley products *in vitro*

说，青稞鲜湿面早期水解速率较快，但其最终水解平衡时葡萄糖水解率较低，因此，青稞鲜湿面最终的 eGI 值低于青稞馒头。eGI 值以白面包或葡萄糖为参考食物，各样品的 eGI 值由大到小依次为青稞馒头、青稞挂面、青稞鲜湿面、青稞炒面，这一趋势与 RS 质量分数降低趋势一致。

表 3　青稞制品淀粉体外模拟水解动力学方程的特征参数

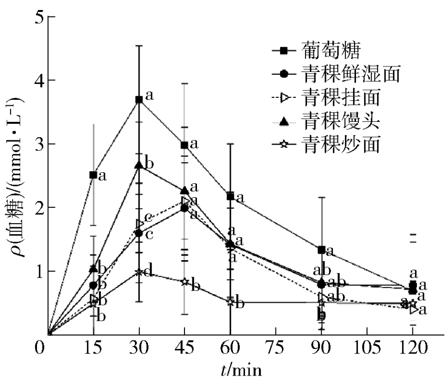
Tab. 3　Kinetic equation characteristics of enzymatic hydrolysis of starches of Qingke barley products

产品	C_∞/%	k/min^{-1}	R^2	HI	eGI(参比物白面包)	eGI(参比物葡萄糖)
青稞鲜湿面	71.43 ± 4.18c	0.035 ± 0.010a	0.942 87	85.91 ± 2.21bc	86.87 ± 1.22bc	61.68 ± 0.86bc
青稞挂面	84.46 ± 1.54b	0.025 ± 0.001b	0.996 45	94.08 ± 2.43ab	91.36 ± 1.33ab	64.87 ± 0.95ab
青稞馒头	91.14 ± 2.94a	0.026 ± 0.003b	0.987 92	102.90 ± 5.67a	96.20 ± 3.11a	68.30 ± 2.21a
青稞炒面	82.17 ± 2.67b	0.017 ± 0.001c	0.994 08	80.59 ± 5.16c	83.95 ± 2.83c	59.61 ± 2.01c

不同小写字母表示同列数据差异显著(P < 0.05)。

2.3　不同青稞制品 GI 值分析

GI 是 Jenkins 等[33]于 1981 年首次提出的，它是反映食物引起人体血糖升高程度的指标，是人体进食后机体血糖生成的应答状况，对饮食控制餐后血糖有指导意义；然而淀粉体外消化特性是否能准确地反映出体内餐后血糖变化仍然存在争议[34]。为了综合评价不同加工方式制成的青稞制品间消化率的差异，研究进一步对青稞制品的体内淀粉消化率进行探究，如图 3。峰值时间和浓度是影响血糖曲线的 2 个主要因素，葡萄糖标准溶液在进食 30 min 时达到峰值，接着血糖浓度又快速下降，而 4 种青稞制品的峰值浓度都显著低于葡萄糖标准溶液(P < 0.05)，同时，青稞挂面及青稞鲜湿面的峰值出现在 45 min，即青稞制品使餐后血糖峰值降低和延迟。而 4 种制品中，青稞馒头餐后血糖应答曲线波动最大，青稞炒面餐后血糖应答曲线波动最小，最为平稳，这与淀粉体外消化率趋势一致。



不同小写字母表示同一时间不同类别样品差异显著(P < 0.05)。

图 3　青稞制品及葡萄糖餐后血糖应答曲线

Fig. 3　Glycemic response curves of Qingke barley products and glucose

表 4 对各样品的餐后血糖反应特征进行了分析。4 种青稞制品的 0 ~ 60 min 血糖应答曲线下增量面积($IAUC_{0\sim60}$)显著低于葡萄糖标准溶液，说明青稞产品使餐后血糖在前期较为平稳，不容易造成前期血糖浓度过高。从 GI 值来看，以葡萄糖为参考，青稞馒头 GI 为 70 ± 11，属于高 GI 食物；青稞鲜湿面 GI 为 60 ± 13，处于 55 < GI < 70，属于中 GI 食物；青稞挂面 GI 为 51 ± 11，青稞炒面 GI 为 33 ± 14，2 种产品 GI≤55，都属于低 GI 食物。低 GI 食物进入人体后，消化吸收慢，血糖变化平稳，有利于控制血糖，适合糖尿病病人食用。虽然青稞馒头属于高 GI 产品，其餐后血糖浓度的变化峰值显著高于其他 3 种制品(P < 0.05)，但青稞馒头 GI 值小于国际血糖指数表[35]中小麦馒头(88)的数值；同时，青稞挂面的 GI 值也小于国际血糖指数表[36]中小麦挂面(81)的数值。食物对血糖的影响不仅与碳水化合物的含量有关，还与碳水化合物的来源、类型、物理性状、化学结构、加工方式、贮存条件等有关[36]；因此即便是同一种原料制成的不同制品也可以产生不同的血糖应答，具有不同的 GI 值。4 种青稞制品中，由于添加 40% 青稞，使其 GI 值低于小麦制品，且青稞挂面及青稞炒面都属于低 GI 产品，更有利于维持餐后血糖的稳定。因此，无论是青稞原料粉，还是经过不同加工方式制成的青稞制品的淀粉消化率都低于小麦。在 4 种青稞制品中，青稞炒面及青稞挂面更适合糖尿病病人食用。同时，青稞炒面具有更低的 GI 值，说明炒制更适合青稞功能保健食品的加工。

此外，青稞产品的 GI 值与 RDS(R = 0.733，P = 0.007)呈极显著正相关。研究发现：对青稞来说，体外淀粉消化在一定程度上是一个可靠的指标，

可预测青稞食物的体内餐后血糖反应。但是,由于食物特性不同及肠胃系统的复杂性,是否所有的食物体外淀粉消化率都能准确预测出其体内血糖反应还不确定,需要开展更广泛、更具体的工作,才能将特定食品的体外结果应用于临床应用或流行病学研究。

表 4　青稞制品的餐后血糖反应特征分析

Tab. 4　Analysis of postprandial glycemic response characteristics of Qingke barley products

指标	葡萄糖	青稞鲜湿面	青稞挂面	青稞馒头	青稞炒面
GI	100a	60 ± 13bc	51 ± 11c	70 ± 11b	33 ± 14d
$IAUC_{0\sim60}$/(mmol·min·L^{-1})	143.4 ± 40.9a	79.5 ± 30.6b	71.4 ± 21.4b	96.4 ± 29.0b	39.1 ± 16.6c
$IAUC_{0\sim120}$/(mmol·min·L^{-1})	227.2 ± 62.6a	139.8 ± 47.5b	122.9 ± 37.6b	151.5 ± 52.9b	70.3 ± 29.4c
ρ(血糖变化峰值)/(mmol·L^{-1})	3.4 ± 0.9a	2.1 ± 0.6b	2.1 ± 0.5b	2.6 ± 0.7b	1.3 ± 0.3c

$IAUC_{0\sim60}$表示 0 ~ 60 min 血糖应答曲线下增量面积;$IAUC_{0\sim120}$表示 0 ~ 120 min 血糖应答曲线下增量面积;不同小写字母表示同行数据差异显著($P<0.05$)。

3　结　论

通过对青稞原料粉及 4 种青稞制品的体内外淀粉消化特性进行探究,发现蒸煮和挤压处理均可显著增加青稞及小麦中 RDS 质量分数,降低 RS 质量分数,经过蒸煮处理的青稞熟粉的淀粉消化速率显著低于小麦熟粉。因此与日常生活中常见的主食小麦相比,青稞更适合于血糖控制人群或糖尿病病人食用。与此同时,不同的加工方式制得的青稞制品的淀粉消化率和餐后血糖反应有很大的差异,其中青稞馒头 GI 值最高,青稞炒面 GI 值最低,说明炒制更适合青稞功能保健食品的加工。在日常生活中,消费者需要根据自身的健康状况选择合适的产品。此外,为了进一步明确青稞改善血糖代谢的作用,有必要针对青稞对糖尿病的干预作用及其青稞降糖机理进行研究,以期促进青稞产业的发展和青稞食品的推广。

参考文献:

[1] 臧靖巍, 阚建全, 陈宗道, 等. 青稞的成分研究及其应用现状[J]. 中国食品添加剂, 2004(4):43 – 46.
ZANG J W, KAN J Q, CHEN Z D, et al. Applications of barley and study on its components[J]. China Food Additives, 2004(4):43 – 46.

[2] LIN S, GUO H, GONG J D B, et al. Phenolic profiles, β-glucan contents, and antioxidant capacities of colored Qingke (Tibetan hulless barley) cultivars[J]. Journal of Cereal Science, 2018, 81:69 – 75.

[3] SHEN Y, HU C, ZHANG H, et al. Characteristics of three typical chinese highland barley varieties: phenolic compounds and antioxidant activities[J]. Journal of Food Biochemistry, 2018, 42(2):e12488.

[4] 阚建全,洪晴悦. 青稞生物活性成分及其生理功能研究进展[J]. 食品科学技术学报,2020,38(6):11 – 20.
KAN J Q, HONG Q Y. Research progress of bioactive ingredients and physiological functions in Qingke[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 38(6): 11 – 20.

[5] XIA X, LI G, SONG J, et al. Hypocholesterolaemic effect of whole-grain highland hull-less barley in rats fed a high-fat diet[J]. British Journal of Nutrition, 2018,119(10):1102 – 1110.

[6] LIU R, ZHAO J, GUO J, et al. Postprandial metabolomics: GC-MS analysis reveals differences in organic acid profiles of impaired fasting glucose individuals in response to highland barley loads[J]. Food & Function, 2019, 10(3):1552 – 1562.

[7] 钟少文. 青稞粉消化性能的调控及其在面条应用的研究[D]. 广州:华南理工大学,2018: 8 – 9.
ZHONG S W. Digestibility control of highland barley flour and its application to noodle processing[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018: 8 – 9.

[8] 肖兵. 抗性淀粉对糖尿病小鼠血糖和短链脂肪酸的影响及代餐产品开发[D]. 南昌: 南昌大学,2018: 23 – 34.

[9] 王志凡, 杨秀琳, 陈旺盛, 等. 抗性淀粉对饮食诱导肥胖大鼠排便状况及肠道菌群的影响[J]. 动物营养学报, 2016,28(5):1626 – 1632.
WANG Z F, YANG X L, CHEN W S, et al. Effects of resistant starch on defecation and intestinal microflora of diet induced obesity rats[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2016,28(5):1626 – 1632.

[10] ZHANG T, LI X, CHEN L, et al. Digestibility and structural changes of waxy rice starch during the fermen-

tation process for waxy rice vinasse[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 57:38 – 45.

[11] ZHANG G, AO Z, HAMAKER B R. Slow digestion property of native cereal starches[J]. Biomacromolecules, 2006,7(11):3252 – 3258.

[12] 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(s2):33.

[13] 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(1):372 – 379.

[14] ZHANG J D, HAN L, YAN S, et al. The non-metabolizable glucose analog D-glucal inhibits aflatoxin biosynthesis and promotes kojic acid production in *Aspergillus flavus*[J]. BMC Microbiology, 2014, 14(1):95.

[15] LI D, SONG J, LI H, et al. Storage lipid synthesis is necessary for autophagy induced by nitrogen starvation[J]. FEBS Letters, 2015,589(2):269 – 276.

[16] GARCIA-AlONSO A, SAURA-CALIXTRO F. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index[J]. Nutrition Research, 1997, 17(3):430 – 437.

[17] FERNANDES G, VELANGI A, WOLEVER T M S. Glycemic index of potatoes commonly consumed in north america[J]. Journal of the American Dietetic Association, 2005,105(4):557 – 562.

[18] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 食物血糖生成指数测定方法: WS/T 652—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
National Health Commission of the People's Republic of China. Standard for determination of food glycemic index: WS/T 652—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.

[19] WOLEVER T M S, JENKINS D J A, JENKINS A L, et al. The glycemic index: methodology and clinical implications[J]. American Journal of Clinical Nutrition, 1991,54(5):846 – 854.

[20] 张文蕾, 李清清, 姜松, 等. 基于挤压蒸煮的荞麦粉加工品质改良及其机制研究[J]. 食品与机械, 2019,35(6):18 – 23.
ZHANG W L, LI Q Q, JIANG S, et al. Improvement and mechanism of processing quality of buckwheat flour based on extrusion cooking[J]. Food & Machinery, 2019,35(6):18 – 23.

[21] YE J, HU X, LUO S, et al. Properties of starch after extrusion: a review[J]. Starch-Stärke, 2018, 70(11/12):110.

[22] 谢岩黎, 张春雨, 王小丽. 挤压膨化对婴幼儿颗粒面条中淀粉结构及消化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2018,33(7):38 – 42.
XIE Y L, ZHANG C Y, WANG X L. Effects of extrusion for the starch structure and digestive characteristics of cereal granule noodle[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2018,33(7):38 – 42.

[23] 陈峰青, 汪建明, 陈前. 挤压工艺对青稞粉产品特性的影响[J]. 粮食与油脂, 2017,30(10):75 – 79.
CHEN F Q, WANG J M, CHEN Q. Effect of extrusion processing on product characteristics of barely powder[J]. Cereals & Oils, 2017,30(10):75 – 79.

[24] 韩玲玉,汪丽萍,谭斌,等. 7 种杂粮抗氧化活性及其挤压杂粮粉体外消化特性研究[J]. 中国粮油学报, 2019,34(6):45 – 52.
HAN L Y,WANG L P,TAN B, et al. Comparative study of 7 kinds of cereals on antioxidant activity and *in vitro* digestion characteristics of extruded cereal powders[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019,34(6):45 – 52.

[25] TANG M, WANG L, CHENG X, et al. Non-starch constituents influence the *in vitro* digestibility of naked oat (*Avena nuda* L.) starch[J]. Food Chemistry, 2019, 297:124953.

[26] SASAKI T, OKUNISHII T, SOTOME I, et al. Effects of milling and cooking conditions of rice on *in vitro* starch digestibility and blood glucose response[J]. Cereal Chemistry, 2016, 93(3):242 – 247.

[27] 刘娟, 李俏, 张玉红, 等. 青稞全麦馒头的营养、质构及体外淀粉水解特性[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(5):1073 – 1080.
LIU J, LI Q, ZHANG Y H, et al. Nutritional components, textural properties, and *in vitro* starch hydrolysis of steamed hulless barley bread[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2018,24(5):1073 – 1080.

[28] TIAN J, CHEN S, CHEN J, et al. Cooking methods altered the microstructure and digestibility of the potato[J]. Starch-Stärke, 2018,70(5/6):241.

[29] ZHU F. Glycemic control in chinese steamed bread: strategies and opportunities[J]. Trends in Food Science & Technology,2019,86:252 – 259.

[30] 何兴芬, 杨富民, 张学梅, 等. 不同加工条件对藜麦面条质构特性的影响[J]. 包装与食品机械, 2019, 37(2):12 – 18.
HE X F, YANG F M,ZHANG X M, et al. Effects of

different processing conditions on texture properties of quinoa noodles[J]. Packaging and Food Machinery, 2019,37(2):12 - 18.

[31] 张天学. 热处理对青稞淀粉结构和性质的影响[D]. 广州:华南理工大学,2016: 12 - 15.
ZHANG T X. Effect of heat treatment on structure and properties of highland barley starch[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016: 12 - 15.

[32] 唐晓婷, 刘骞, 孔保华, 等. 压热-冷却循环工艺对淀粉理化特性及消化动力学的影响[J]. 中国食品学报, 2016,16(4):113 - 121.
TANG X T, LIU Q, KONG B H, et al. The effect of autoclaving-cooling treatment on physicochemical properties and digestion kinetics of starch[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016,16(4):113 - 121.

[33] JENKINS D J, WOLEVER T M, TAYLOR R H, et al. Glycemic index of foods: a physiological basis for carbohydrate exchange[J]. American Journal of Clinical Nutrition,1981,34(3):362 - 366.

[34] MINEKUS M, ALMINGER M, ALYITO P, et al. A standardised static *in vitro* digestion method suitable for food: an international consensus[J]. Food Function, 2014,5(6):1113 - 1124.

[35] FOSTER-POWELL K, HOLT S H A, BRAND-MILLER J C. International table of glycemic index and glycemic load values: 2002[J]. American Journal of Clinical Nutrition, 2002, 76(1): 5 - 56.

[36] 刘彩虹, 李晓明, 赵秋玲. 食物血糖生成指数与相关慢性病的关系研究进展[J]. 中国慢性病预防与控制, 2007,15(4):408 - 410.
LIU C H, LI X M, ZHAO Q L. Research progress on the relationship between food glycemic ondex and related chronic diseases[J]. Chinese Journal of Prevention and Control of Chronic Diseases, 2007,15(4):408 - 410.

Study on *in Vitro* and *in Vivo* Starch Digestive Characteristics of Qingke Barley and Its Products

FANG Yuan, REN Xin, PENG Jie, XIE Zhongyin, ZHANG Min*

(*Beijing Advanced Innovation Center for Food Nutrition and Human Health/Beijing Engineering and Technology Research Center of Food Additives*, *Beijing Technology and Business University*, *Beijing* 100048, *China*)

Abstract: Starch is the main component of Qingke barley, its digestion rate and degree directly affects the postprandial blood glucose response. Therefore, *in vitro* starch digestibility of Qingke barley and it's products were investigated in this study. Meanwhile, 12 healthy volunteers were recruited to measure the glycemic index (GI) of 4 kinds of Qingke barley products according to international standard methods. The results showed that the starch digestibility rate of the cooked Qingke barley flour was significantly lower than that of cooked wheat flour. Cooking and extrusion significantly increased rapidly digestible starch (RDS) and decreased resistant starch in both Qingke barley and wheat. GI values of Qingke barley steamed bread, Qingke barley fresh noodles, Qingke barley noodles and Qingke barley fried noodles were 70 ± 11, 60 ± 13, 51 ± 11, and 33 ± 14, respectively. The results of correlation analysis showed that GI value was significantly positively correlated with RDS($R = 0.733$, $P = 0.007$). *In vitro* and *in vivo* tests both suggested that different processing techniques could affect the digestive characteristics of Qingke barley products. It is necessary for consumers to select appropriate products according to their own health status. Qingke barley noodles and Qingke barley fried noodles were classified as low GI food, which were conducive to the glycemic control crowd or diabetic patients to eat.

Keywords: Qingke barley; starch; processing methods; *in vitro* digestive characteristics; glycemic index

(责任编辑:张逸群)