

玉米淀粉磷酸双酯的理化特性研究

李光磊, 李一卓, 马汉军, 孙俊良

(河南科技学院食品学院, 河南新乡 453003)

摘要: 以玉米淀粉为参照, 采用红外光谱、差示扫描量热分析、快速粘度分析等现代仪器分析方法对玉米淀粉磷酸双酯的结构特征、热力学特性、黏度特性等物化性质进行了测定和研究, 并采用体外消化方法, 模拟人体肠道体系, 研究了玉米淀粉磷酸双酯的消化特性, 根据淀粉水解百分率推算其血糖指数的变化。结果表明, 玉米淀粉经三偏磷酸钠酯化交联后, 其红外光谱在 1028 cm^{-1} 处出现新的吸收峰, 说明分子中引入了磷酸根基团; 样品的糊化温度和热焓值都有所升高, 随着结合磷含量增加, 淀粉糊黏度降低, 稳定性增强; 随着酯化度的增加玉米淀粉磷酸双酯抗消化淀粉含量显著上升, 消化能力有较大水平的降低, 高酯化度玉米淀粉磷酸双酯预测血糖指数为 67.11, 为中等血糖指数食品, 可以添加在食品中为糖尿病患者食用。

关键词: 玉米淀粉磷酸双酯; 理化特性; 体外消化特性; 血糖指数

文章编号: 1673-9078(2014)3-18-22

Characteristic Study of Phosphodiester in Corn Starch

LI Guang-lei, LI Yi-zhuo, MA Han-jun, SUN Jun-liang

(School of Food Science, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China)

Abstract: The granule structure, thermal property and viscosity property of corn starch phosphodiester were investigated by Fourier transform infrared (FT-IR), differential scanning calorimeter (DSC), and rapid viscosity analyzer (RAV). The *in vitro* digestibility of corn starch phosphodiester was also studied by simulating human intestinal system with the comparison of corn starch. Meanwhile, Glycemic index (GI) was conjectured according to the percentage of starch hydrolysis. After cross-linked with sodium trimetaphosphate, new absorption peaks were appeared at 1028 cm^{-1} , indicating phosphate groups were incorporated into the molecular structure. In addition, the gelatinization temperature and gelatinization enthalpy of corn starch phosphodiester were increased. With the increase of phosphorus content, the viscosity of starch paste was decreased, but stability was enhanced. The contents of resistant starch of corn starch phosphodiester increased significantly, whereas the digestibility significantly decreased. The predicated GI of corn starch phosphodiester was 66.31, which belonged to middle GI foods, and could be appropriate for the diabetes food.

Key words: corn starch phosphodiester; physico-chemical property; *in vitro* digestibility; glycemic index

淀粉磷酸酯是将淀粉经磷酸化处理而获得的一种淀粉衍生物。淀粉磷酸酯有单酯和双酯两种类型, 其中淀粉磷酸单酯是指淀粉分子中只有一个羟基与正磷酸作用而酯化, 而淀粉磷酸双酯是三氯氧磷或三聚偏磷酸钠等交联剂作用于淀粉乳, 使两个或两个以上淀粉分子之间交联在一起的淀粉衍生物, 或一个淀粉分子的两个羟基同交联剂作用发生酯化, 一般采用正磷酸盐、三聚磷酸盐和偏磷酸盐等来制备^[1]。从淀粉酯的制备及应用历史看, 具有商业价值的淀粉酯是具有溶胶稳定性且价格低廉的产品^[2-3]。与淀粉磷酸单酯相比, 淀粉磷酸双酯具有粘性大、耐老化、冻融稳定性好及良好的分散性、乳化性和保型性等特点, 因而广

收稿日期: 2013-11-06

基金项目: 河南省高校科技创新团队支持计划 (13IRTSTHN006)

作者简介: 李光磊 (1970-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为淀粉科学与技术

泛应用于造纸工业、纺织工业、食品工业、饲料添加剂和农业等领域。

制备食品级淀粉磷酸双酯大多以三偏磷酸钠为交联剂, 因为三偏磷酸钠本身就可作为食品添加剂添加到食品中起分散、保水和质构改良等作用, 安全无害。美国 FDA 要求采用三偏磷酸钠为交联剂时, 合成交联淀粉中结合磷含量不能超过 0.04%。因此, 以三偏磷酸钠为原料制备的淀粉磷酸双酯产品具有较高的食用安全性, 联合国粮农组织和世界卫生组织认为可以食用且无需制定 ADI 值, 目前已被我国列入食品添加剂范畴 (GB2760-2011)^[4]。

在淀粉分子内交联上酯基团之后, 增加了网状结构和空间障碍, 由于空间位阻的作用, 抑制或降低了淀粉酶对淀粉中糖苷键的水解作用, 从而表现出交联淀粉的抗降解性质。Chung 等研究表明, 淀粉磷酸双酯具有一定的抗消化性能^[5]。

Jenkins^[6]等根据食物对餐后血糖引起的反应,提出食物血糖指数(Glycemic index, GI)的概念,定义为含50 g碳水化合物的食品引起的血糖反应曲线下的面积与含等量的碳水化合物的标准食品血糖反应之比,以百分含量表示。但血糖指数测定需做人体摄食研究,获得大量数据较为困难,因此,人们通常采用体外测定的方法研究血糖指数。采用测定淀粉水解速率来预测碳水化合物食品的生理效果,已经成为体外分析碳水化合物食品生理效果的主要途径^[7-8]。

本文以玉米淀粉磷酸双酯为研究对象,系统分析了其红外光谱、热力学特性、黏度特性以及体外消化特性,并根据淀粉水解百分率推测其血糖指数,为玉米淀粉磷酸双酯在食品中的推广应用提供科学指导。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

玉米淀粉,河南新乡圣立淀粉有限公司;高温 α -淀粉酶、葡萄糖淀粉酶,郑州福源生物科技有限公司;三偏磷酸钠、尿素、盐酸、氢氧化钠等均为分析纯。

1.2 主要仪器设备

X-650 红外扫描分析仪,日本日立公司;Q200 差示扫描量热仪,美国TA公司;TecMaster 快速粘度分析仪,澳大利亚新港科学仪器有限公司;7200 型可见光光度计,尤尼柯仪器有限公司;BS124S 电子天平,北京赛多利斯仪器系统有限公司;202-2 型干燥箱,上海一恒科技有限公司;SHA-B 恒温振荡器,常州国华电器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 玉米淀粉磷酸双酯的制备

按照 Tachibe 的方法^[9]改进:取一定量的玉米淀粉,加入一定量的三偏磷酸钠、氯化钠、氢氧化钠、水,恒温 40 °C,连续搅拌,反应 2 h,然后将 pH 值调至 6.5 左右。经四次水洗、离心(3000×g, 30 min)后,烘干(40 °C),粉碎,过筛(80 目)。

1.3.2 玉米淀粉磷酸双酯样品磷含量测定

样品磷含量测定采用分光光度法^[10]。

1.3.3 淀粉红外扫描图谱分析

红外扫描图谱采用 KBr 压片法,具体过程为:称取约 2 mg 样品,在红外灯的照射下,置于玛瑙研钵中研磨 4~10 min,再与 150 mg 左右干燥的 KBr 粉末充分混合,继续研磨 2~5 min。将研磨好的混合物粉末倒在硫酸纸上灌注于压模中,抽真空,缓慢除去压力,

放入样品架上,置于红外谱仪内全波段扫描,绘出红外光谱图。

1.3.4 淀粉差示扫描量热分析

准确称取一定量的淀粉试样于铝坩埚中,用微量进样器加入一定量的纯水,混匀,使淀粉乳的浓度达到 30% 左右。坩埚加盖密封后,于室温下平衡 24 h,以空坩埚为参比,从 40 °C 升温至 190 °C,升温速率为 10 °C/min。

1.3.5 淀粉红外扫描图谱分析

用 RVA 测定其黏度特性,测定方法用 Standard 1 标准方法:称取 2.50 g 样品置于铝盒内,然后加入 25.00 mL 蒸馏水,用 RVA 快速粘度分析仪测定淀粉的黏度特性,并用 ThermoLine for Windows 配套软件分析。测定程序如下:50 °C 下保温 1 min,然后以 12/min 的速度上升至 95 °C,在 95 °C 下保温 2.5 min,之后温度下降到 50 °C。搅拌开始 10 s 内转动速度为 960 r/min,之后一直维持在 160 r/min。

1.3.6 体外消化特性测定

1.3.6.1 淀粉消化性能测定

称取 200 mg 淀粉样品置于测试管中,添加 15 mL pH 5.2 的 0.2 mol/L 醋酸钠缓冲液,沸水浴糊化 10 min,冷却后加入 10 mL 的猪胰 α -淀粉酶(290 U/mL)和糖化酶(15 U/mL),置于 37 °C 恒温水浴下振荡(转速为 150 r/min)并准确计时。水解 20 或 120 min 后取出 0.5 mL 水解液加 4 mL 无水乙醇灭酶,然后离心处理后的上清液用葡萄糖氧化酶法在 510 nm 比色测定产生的葡萄糖含量^[11]。样品中快消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)、抗消化淀粉(RS)的质量分数具体计算公式如下:

$$RDS(\%) = \frac{(G20 - FG) \times 0.9}{TS} \quad (1)$$

$$SDS(\%) = \frac{(G120 - G20) \times 0.9}{TS} \quad (2)$$

$$RS(\%) = \frac{TS - (RDS + SDS)}{TS} \quad (3)$$

注:G20-淀粉酶水解 20 min 后产生的葡萄糖含量(mg);G120-淀粉酶水解 120 min 后产生的葡萄糖含量(mg);FG-酶水解处理前淀粉中游离葡萄糖含量(mg);TS-样品中总淀粉含量(mg)。

1.3.6.2 淀粉消化速率的测定

称取 200 mg 淀粉样品置于测试管中,添加 15 mL pH 5.2 的醋酸钠缓冲液,沸水浴糊化 10 min,冷却后加入 10 mL 的猪胰 α -淀粉酶(290 U/mL)和糖化酶(15 U/mL),置于在 37 °C 恒温水浴下振荡(转速 150 r/min)并准确计时,水解不同时间(0、30、60、90、120、

150、180 min) 后取 1 mL 反应液并停止反应, 然后采用 3,5-二硝基水杨酸 (DNS) 法测定还原糖含量并计算淀粉水解率 (%) [12]。

$$\text{淀粉水解率}(\%) = \frac{G_t \times 25 \times 0.9}{200} \times 100 \quad (4)$$

注: G_t -淀粉酶水解 t 时间后产生的葡萄糖含量(mg)。

2 结果与讨论

2.1 红外扫描图谱分析

玉米淀粉、玉米淀粉磷酸双酯(结合磷 0.021%) 和玉米回生淀粉(RS24%) 红外光谱图见图 1。

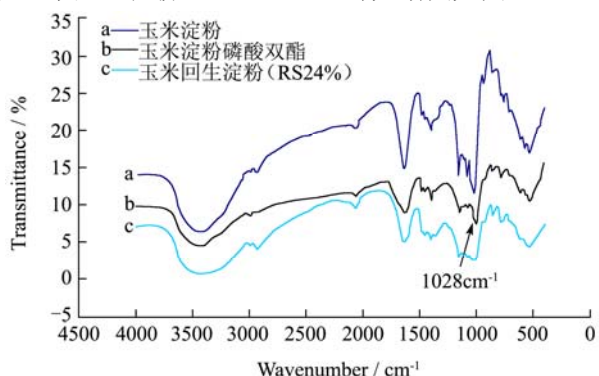


图 1 玉米淀粉磷酸双酯红外扫描图谱

Fig.1 FT-IR spectrum of corn starch phosphodiester

比较玉米淀粉磷酸双酯和玉米淀粉以及玉米回生淀粉红外扫描图谱可以发现, 玉米淀粉和玉米回生淀粉红外图谱基本相同, 说明淀粉回生没有引入新的化学基团, 玉米淀粉磷酸双酯扫描曲线除保持原淀粉的红外吸收特征外, 在 1028 cm^{-1} 处出现一个新的特征峰, 该吸收峰对应着淀粉葡萄糖单元中 $\text{C}_6\text{-O-H}$ 的伸缩振动, 由于每个葡萄糖单元中只有 1 个 $\text{C}_6\text{-OH}$, 且该基团化学反应活性在葡萄糖单元所连接的 3 个 -OH 中最高, 最易参与化学反应而消失, 在三偏磷酸

表 1 玉米淀粉磷酸双酯 DSC 测定结果

Table 1 Parameters tested by DSC from corn starch phosphodiester

样品	热焓值 $\Delta H/(\text{J/g})$	起始糊化 温度 $T_0/^\circ\text{C}$	峰值糊化 温度 $T_p/^\circ\text{C}$	糊化结束 温度 $T_c/^\circ\text{C}$
玉米淀粉	8.64 ± 0.03	67.61 ± 0.05	72.63 ± 0.05	83.70 ± 0.05
玉米淀粉磷酸双酯(结合磷 0.021%)	10.37 ± 0.03	70.43 ± 0.05	75.14 ± 0.05	83.91 ± 0.05
玉米回生淀粉 (RS24%)	3.99 ± 0.03	152.10 ± 0.06	157.88 ± 0.06	162.71 ± 0.06

由表 1 可以看出, 玉米淀粉经三偏磷酸钠酯化交联后, 样品的起始糊化温度 T_0 、峰值糊化温度 T_p 、糊化结束温度 T_c 和热焓值 ΔH 都有所升高, 这说明酯化之后玉米淀粉颗粒因为酯化交联化学键的存在, 水分子难以进入淀粉颗粒内部, 导致玉米淀粉磷酸双酯糊化所需热能增加。

钠与淀粉分子的酯化反应过程中只会因为参与反应而减少, 不会再增加, 因此 1028 cm^{-1} 处附近的吸收峰的增强不是由淀粉分子中 $\text{C}_6\text{-OH}$ 引起的。从三偏磷酸钠的化学结构特点和脂肪族的磷酸酯及类似化合物的振动规律来看, 在指纹区存在 P-O-C 伸缩振动吸收带其波数范围为 $1050 \sim 995 \text{ cm}^{-1}$, 因此, 三偏磷酸钠与淀粉经酯化反应后, 1028 cm^{-1} 吸收峰的强度增加是因为葡萄糖单元上引入了 P-O-C 基团, 说明玉米淀粉与三偏磷酸钠发生了酯化反应, 在淀粉中确实引入了磷酸根基团, 同时, 红外光谱图中其它基团的特征吸收峰并没有明显的变化, 说明交联反应并未破坏淀粉的基本化学结构, 只是在原来淀粉链上增加了新的基团。

2.2 差示扫描量热分析

按 1.3.4 方法分别测定玉米淀粉、玉米淀粉磷酸双酯和玉米回生淀粉的热力学特性, 结果见图 2 和表 1。

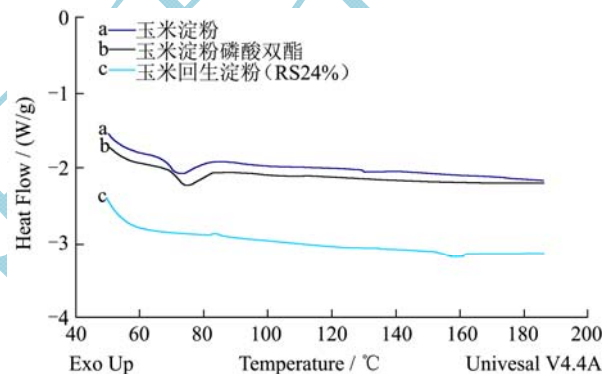


图 2 玉米淀粉磷酸双酯 DSC 扫描曲线

Fig.2 DSC scanning curves from corn starch phosphodiester

由图 2 可知, 玉米淀粉和玉米淀粉磷酸双酯 DSC 曲线相似, 在 $70 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内有一吸热峰, 在 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 以后为一平坦直线, 而玉米回生淀粉在 $160 \text{ }^\circ\text{C}$ 有一较小吸热峰, 说明玉米淀粉磷酸双酯的抗消化能力并不是依赖于淀粉的结晶结构 [13]。

2.3 RVA 特性分析

玉米淀粉、玉米淀粉磷酸双酯和玉米回生淀粉的 RVA 黏度曲线如图 3 所示, RVA 的主要参数, 如峰值粘度(Peak Viscosity)、谷值粘度(Trough Viscosity)、最终粘度(Final Viscosity)、破损值(Breakdown)、回

生值(Setback)、出峰时间(Peak Time)及成糊温度(Peak Temperature)均在表 2 中列出。

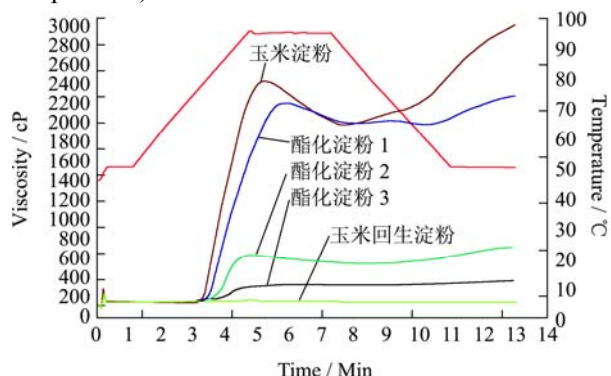


图 3 玉米淀粉磷酸双酯 RVA 图谱

Fig.3 RVA viscosity curves of corn starch phosphodiester

注：酯化淀粉 1-玉米淀粉磷酸双酯（结合磷 0.013%）；酯化淀粉 2-玉米淀粉磷酸双酯（结合磷 0.021%）；酯化淀粉 3-玉米淀粉磷酸双酯（结合磷 0.026%）；玉米回生淀粉（RS24%）。

由图 3 和表 2 可以看出，玉米淀粉经三偏磷酸钠酯化交联后，其峰值黏度、最终黏度随着结合磷含量的增加而降低，成糊温度随着结合磷含量的增加而升

表 2 红薯淀粉辛烯基琥珀酸酯 RVA 特征参数

Table 2 Characteristic values tested by RVA from corn starch phosphodiester

样品	峰值粘度/cp	谷值粘度/cp	破损值/cp	最终粘度/cp	回生值/cp	出峰时间/min	成糊温度/°C
玉米淀粉	2443±10	1994±10	449±6	3023±10	1029±6	5.2±0.06	76.9±0.16
酯化淀粉 1	2215±10	1994±10	221±7	2290±10	296±4	5.87±0.06	78.45±0.14
酯化淀粉 2	583±6	498±6	85±4	692±6	194±4	4.6±0.06	79.35±0.14
酯化淀粉 3	357±4	352±4	5±1	403±4	51±2	6.2±0.06	-
玉米回生淀粉	74±4	53±4	21±2	56±4	3±1	-	-

注：酯化淀粉 1-玉米淀粉磷酸双酯（结合磷 0.013%）；酯化淀粉 2-玉米淀粉磷酸双酯（结合磷 0.021%）；酯化淀粉 3-玉米淀粉磷酸双酯（结合磷 0.026%）；玉米回生淀粉（RS24%）。

表 3 不同淀粉的体外消化性能

Table 3 In vitro digestibility of starches

淀粉种类	RDS/%	SDS/%	RS/%
玉米淀粉	86.6±1.9	11.5±1.1	1.9±1.0
玉米淀粉磷酸双酯 (结合磷 0.013%)	56.7±1.6	22.1±1.1	21.2±1.4
玉米淀粉磷酸双酯 (结合磷 0.021%)	27.2±1.2	32.7±1.3	40.1±1.4
玉米淀粉磷酸双酯 (结合磷 0.026%)	10.9±0.9	37.3±1.3	51.8±1.6
玉米回生淀粉 (RS24%)	41.8±1.6	34.2±1.3	24.0±1.4

从表 3 中可以看出，玉米淀粉 RDS 含量最高，达到了 86.6%，RS 含量只有 2%左右。玉米淀粉经三偏磷酸钠酯化交联后，随着结合磷含量的增加，RDS 含量由 86.6%下降到了 10.9%，RS 含量由 1.9%上升到了 51.8%，说明玉米淀粉磷酸双酯的营养品质得到了较

高，说明玉米淀粉磷酸双酯分子链内部或之间化学键交联，增强了淀粉间相互作用，使淀粉在加热过程中糊化难度增加。玉米淀粉磷酸双酯破损值、回生值降低说明淀粉经交联酯化后淀粉糊的黏度稳定性增强。玉米回生淀粉几乎没有黏度，表明玉米淀粉磷酸双酯具有更佳的在食品中应用的特性。

2.4 体外消化特性分析

2.4.1 淀粉消化性能测定

按 1.3.6.1 实验方法，玉米淀粉、玉米淀粉磷酸双酯和玉米回生淀粉的体外消化性能见表 3。

根据消化时间不同，淀粉可划分 RSD、SDS 与 RS 三种类型，其中，RDS 食用后产生高血糖应答，产生胰岛素抵抗，易引起一些与饮食相关的慢性疾病或代谢综合症，SDS 持续消化释放葡萄糖，具有维持低血糖应答的特性，而 RS 只在大肠中被微生物发酵产生短链脂肪酸，有利于肠道健康。因此，SDS 与 RS 均可以改善淀粉的营养品质。

大程度的改善。

2.4.2 体外消化速率测定

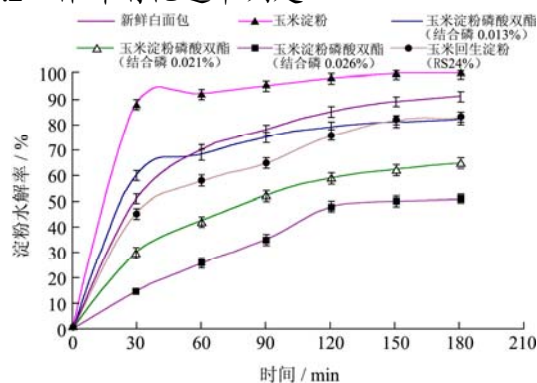


图 4 不同淀粉体外消化速率

Fig.4 In vitro starch hydrolysis rate of starches

以新鲜白面包为参照，测定了玉米淀粉、玉米淀粉磷酸双酯和玉米回生淀粉的体外消化速率，结果见图 4，消化速率表示为不同时间淀粉的水解百分率。

由图4可以看出,玉米淀粉在0到30 min时间内,水解速率快速上升,30 min以后趋于平缓,说明玉米淀粉易被淀粉酶水解产生葡萄糖;玉米淀粉磷酸双酯在酯化度较低时仍有较快的淀粉水解速率,随着酯化度的增加,其淀粉水解速率快速下降,结合磷含量达到0.026%时玉米淀粉磷酸双酯在0到120 min时间内,水解速率缓慢上升,120 min后上升速率减慢,说明玉米淀粉接入磷酸酯基团后,淀粉酶与淀粉的结合产生阻碍,淀粉的消化能力有较大水平的降低。

2.4.3 玉米淀粉磷酸双酯的体外水解指数

通过淀粉的水解曲线可计算出其血糖指数。淀粉水解曲线遵循一级反应方程式,即反应速度与反应物浓度一次方成正比。水解物浓度随时间而变化的曲线下的面积(Area under curve, AUC)由下述公式计算而得:

$$AUC=C_{\infty}(t_f-t_0)-(C_{\infty}/k)[1-\exp[-k(t_f-t_0)]] \quad (5)$$

C_{∞} 对应于在浓度平衡时(t_{180})的浓度, t_f 为最终的时间(180 min), t_0 是反应初始时间(0 min), k 为一级反应动力学常数。 k 值可由公式 $C=C_{\infty}(1-e^{-kt})$ 计算。

当样品的水解曲线下的面积确定后,通过与参考食品(新鲜的白面包)的水解曲线下的面积相比,就可得到水解指数(Hydrolysis index, HI)。

Atkinson等人对体内、体外GI值实验结果地分析表明,实验获得的淀粉水解指数HI和GI之间有好的相关性($r=0.894$),而在90 min时的淀粉水解百分率(percentage of total starch hydrolysed, H_{90})与GI值的相关性更好($r=0.91, p \leq 0.05$)^[14],能很好的预测碳水化合物食品餐后的血糖反应。

用淀粉酶水解获得的在90 min时的淀粉水解百分率(H_{90}),就能通过以下回归方程来预测其血糖指数值(GI):

$$GI=39.21+0.803 \times (H_{90}) \quad (6)$$

用淀粉在90 min时的淀粉水解百分率获得不同淀粉的血糖指数值见表4。

表4 淀粉水解百分率(H_{90})和预测的血糖指数(GI)

Table 4 Hydrolysis rate (H_{90}) and predicated Glycemic index (GI)

淀粉样品	H_{90}	血糖指数
玉米淀粉	94.92±1.8	115.43
玉米淀粉磷酸双酯(结合磷0.013%)	75.11±1.5	99.52
玉米淀粉磷酸双酯(结合磷0.021%)	52.26±1.4	81.17
玉米淀粉磷酸双酯(结合磷0.026%)	34.75±1.3	67.11
玉米回生淀粉(RS24%)	65.09±1.4	91.48

通常以白面包作为标准,其血糖指数定为100,则蔗糖的血糖指数为92,也就是说,白面包餐后使血糖中的葡萄糖升高比蔗糖稍快。实验结果显示:玉米淀粉血糖指数在100以上,低酯化度玉米淀粉磷酸双酯血糖指数在70以上,均为高血糖指数食品,高酯化度玉米淀粉磷酸双酯(结合磷0.026%)血糖指数为67.11,在56~69范围内,为中等血糖指数食品,可以添加在食品中为糖尿病患者食用。

3 结论

3.1 经过对比玉米淀粉和玉米淀粉磷酸双酯红外扫描图谱,证明玉米淀粉经酯化交联后在淀粉的葡萄糖单元上引入了磷酸基团。

3.2 经DSC检测分析,玉米淀粉经三偏磷酸钠酯化交联后,样品的糊化温度和热焓值都有所升高,说明玉米淀粉磷酸双酯糊化所需热能增加。

3.3 RVA分析说明玉米淀粉磷酸双酯随着结合磷含量增加,黏度、破损值、回生值降低,说明淀粉糊化难度增加,淀粉糊黏度稳定性增强,比玉米回生淀粉具有更好的应用特性。

3.4 经淀粉体外消化特性分析,玉米淀粉磷酸双酯随着酯化度的增加淀粉水解速率快速下降,其营养品质得到了较大程度的改善。高酯化度玉米淀粉磷酸双酯预测血糖指数为67.11,为中等血糖指数食品。

参考文献

- [1] 张力田.变性淀粉(第二版)[M].广州:华南理工大学出版社,1999
ZHANG L T. Modified Starch (Second Edition) [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1999
- [2] Lars Passauer, Falk Liebner, Klaus Fischer. Starch Phosphate Hydrogels. Part I: Synthesis by Mono-phosphorylation and Cross-linking of Starch [J]. Starch/Stärke, 2009, 69(11): 621-627
- [3] Rong Huang, Can-Peng Li, Deyi Chen, et al. Preparation of Phosphorylated Starch by Dry-heating in the Presence of Pyrophosphate and its Calcium-phosphate Solubilizing Ability [J]. Journal of Food Science and Technology, 2013, 50(3): 561-566
- [4] 刘亚伟.淀粉基食品添加剂[M].北京:化学工业出版社,2008
LIU Y W. Starch Based Food additive [M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2008
- [5] Chung C, Sanguansri L, Augustin M A. Resistant Starch Modification: Effects on Starch Properties and Functionality

- as Co-Encapsulant in Sodium Caseinate-Based Fish Oil Microcapsules [J]. *Journal of Food Science*, 2010, 75(9): E636-E642
- [6] Jenkins D J A, Wolever T M S, Taylor R H, et al. Glycemic Index of Foods: a Physiological Basis for Carbohydrate Exchange [J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 1981, 34: 362-366
- [7] Ornanong S Kittipongpatana, Nisit Kittipongpatana. Physicochemical, in vitro digestibility and functional properties of carboxymethyl rice starch cross-linked with epichlorohydrin [J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(2): 1438-1444
- [8] Amaka Odenigbo, Jamshid Rahimi, Michael Ngadi, et al. Starch Digestibility and Predicted Glycemic Index of Fried Sweet Potato Cultivars [J]. *Functional Foods in Health and Disease*, 2012, 2(7): 280-287
- [9] Tachibe M, Ohga H, Nishibata T, et al. Digestibility, Fermentability and Energy Value of Highly Cross-Linked Phosphate Tapioca Starch in Men [J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76(6): H152-H155
- [10] 刘高梅,王常青,王菲.低温法制备马铃薯淀粉磷酸双酯的工艺研究[J].*中国农学通报*,2011,27(23):145-149
LIU G M, WANG C Q, WANG F. Study on Process in Fabricating Phosphodiesterase of Potato Starch at Low Temperature [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(23): 145-149
- [11] Goni I, Alejandra-Alonso. A Starch Hydrolysis Procedure to Estimate Glycemic Index [J]. *Nutrition Research*, 1997, 17: 427-437
- [12] 洪雁,顾娟,顾正彪.体内外实验测定荞麦淀粉消化特性[J].*食品科学*,2010,31(5): 293-297
HONG Y, GU J, GU Z B. Digestion Properties of Buckwheat Starch [J]. *Food Science*, 2010, 31(5): 293-297
- [13] Xie Xueju (Sherry), Liu Qiang. Development and Physicochemical Characterization of New Resistant Citrate Starch from Different Corn Starches [J]. *Stärke*, 2004, 56(8): 364-370
- [14] Atkinson FS, Foster-Powell K, Brand-Miller JC. International Tables of Glycemic Index and Glycemic Load Values: 2008 [J]. *Diabetes Care*. 2008, 31(12): 2281-2283 (下转第 27 页)