

重结晶红薯淀粉体外消化前后益生作用与结构变化^{*}

谢 涛 张淑远 王美桂 聂超南 刘 慧

(湖南工程学院化学化工学院,湘潭 411104)

摘要:研究了体外消化前、后重结晶红薯淀粉的益生作用及其结构特性。实验结果表明,退火处理重结晶淀粉、温度循环处理重结晶淀粉与湿热处理重结晶淀粉、体外消化后的退火处理重结晶淀粉、体外消化后的温度循环处理重结晶淀粉和体外消化后的湿热处理重结晶淀粉既具有抗消化道酶降解的稳定结构,又能选择性促进人粪便中乳酸杆菌群、双歧杆菌群、粪链球菌群和梭状芽孢杆菌群等益生菌的增殖。与退火处理重结晶淀粉、温度循环处理重结晶淀粉与湿热处理重结晶淀粉相比,体外消化后的退火处理重结晶淀粉、体外消化后的温度循环处理重结晶淀粉和体外消化后的湿热处理重结晶淀粉的结构更稳定,对益生菌的选择性增殖作用也更显著。因此,这种重结晶淀粉完全满足作为益生元的条件,可作为新一代益生元产品进行深入研究。

关键词:重结晶红薯淀粉 体外消化 益生作用 结构特性

中图分类号: TS235.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)08-0202-05

Probiotic Functions and Structure Changes of Recrystallised Sweet Potato Starches Before and After in Vitro Digestion

Xie Tao Zhang Shuyuan Wang Meigui Nie Chaonan Liu Hui

(College of Chemical Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411104, China)

Abstract: The probiotic function and structural properties of recrystallised sweet potato starch before and after in vitro digestion were studied. The results demonstrated that the annealed, temperature-cycled and heat-moisture treated sweet potato starches before and after in vitro digestion could resist the degradation of tract enzymes and selectively promoted the proliferation of *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Fecal streptococci* and *Clostridium septicum* in human feces. Compared with the annealed, temperature-cycled and heat-moisture treated sweet potato starches, the digested annealed, temperature-cycled and heat-moisture treated sweet potato starches possessed the more stable structure as well as the higher selective proliferation of probiotics. Therefore, the recrystallised sweet potato starches could accord with the conditions of prebiotic, and be further studied as the new prebiotic product.

Key words: Recrystallised sweet potato starch In vitro digestion Prebiotic function Structural properties

引言

淀粉是人类膳食中主要的碳水化合物,根据淀粉在小肠内的生物可利用度可分为3类:快速消化淀粉(RDS)、缓慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉(RS)^[1]。其中RS与前两者不同,它不被小肠中的淀粉酶类水解,本身或其降解产物能完整地到达结

肠并被此处的微生物菌群发酵,从而发挥有益的生理作用,曾被看作膳食纤维(DF)的组成成分之一^[2~4]。由于RS在预防Ⅱ型糖尿病、结(直)肠癌和一些饮食相关的慢性病方面作用优于DF,且可有效克服强化纤维食品气味不佳、结构粗糙和口感较差等不足,因而成为国际上新兴的食品研究领域,也是最近十几年来碳水化合物与健康关系研究中最重

收稿日期:2012-07-26 修回日期:2012-09-15

^{*} 国家级大学生创新创业训练计划资助项目(教高司函[2013]8号)和湖南省自然科学基金资助项目(11JJ6009)

作者简介: 谢涛,教授,博士,主要从事再生资源与食品、生物化工研究,E-mail: xt1105@yahoo.com.cn

要的一项成果^[4-6]。RS 可分为 RS I、RS II、RS III 和 RSIV,其中 RSIII 为回生或重结晶淀粉,它结构更稳定,适合于用作功能性纤维成分,而且具有更优异的双歧因子与丁酸因子特性^[7-9]。关于红薯抗性淀粉的研究国内已有一些报道,但主要集中在其制备方法与理化性质的研究方面,而对其生理功能方面的研究还比较少^[10-12]。本文以红薯淀粉为原料,采用不同的重结晶方法制取一系列重结晶红薯淀粉样品,研究它们体外消化前、后的益生作用及结构变化,以期红薯淀粉的深加工及工业应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

红薯淀粉购自湖北省凤凰县天豫薯业有限公司,α-淀粉酶、普鲁兰酶、胰酶-5.0 和糖化酶均购自美国 Sigma 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 重结晶淀粉制备

参考文献^[10]的方法,红薯原淀粉在沸水浴中充分糊化,糊化后经普鲁兰酶脱支处理得到脱支淀粉(DS),DS 再分别经退火、温度循环和湿热处理得到退火处理重结晶淀粉(ANN-DS)、温度循环处理重结晶淀粉(TC-DS)和湿热处理重结晶淀粉(HMT-DS)。由质量分数为 20% 的 DS 乳液在 121℃ 高压处理 15 min 后再在 60℃ 恒温水浴中加热 24 h,即得 ANN-DS;由质量分数为 20% 的 DS 乳液经 3 个高压灭菌(121℃,1 h)和恒温加热(温度均为 60℃,前两次加热 1 h,第 3 次加热 16 h)循环处理即得 TC-DS;由冷冻干燥 DS 加水配成质量分数为 20% 的乳液,再经 121℃ 高压处理 2 h,即得 HMT-DS。所有样品均被冷冻干燥并粉碎过 200 目筛。

1.2.2 重结晶淀粉体外消化

参考文献^[13]的方法,并略作改动:①称量重结晶淀粉 50 g,让其悬浮于 500 mL 的醋酸钠缓冲溶液(pH 值 5.2,含质量分数为 0.02% 的叠氮化钠)中。②称取 0.05 g 胰酶-5.0 于 100 mL 醋酸钠缓冲液中,37℃ 水浴 10 min,1 500 r/min 离心 10 min 回收上清液;称取糖化酶粉(10 万 U/g)1.875 0 g,先用少量的醋酸钠缓冲液溶解,将上清液小心倾入容量瓶中,沉渣部分再加入少量缓冲液冲洗,如此反复 3~4 次,最后全部移入 25 mL 容量瓶中,用缓冲液定容至刻度,摇匀,通过 4 层纱布过滤,滤液备用;取上述胰酶液 16 mL 与糖化酶液 2 mL 混合制成淀粉酶混合液。③取 8 mL 上述酶混合物转移至淀粉悬浮液中,于 42℃ 摇床中维持 4 h;将上述混合物离心

分离(4 000 r/min,10 min),上清液倒出,用 0.1 mol/L 的磷酸缓冲液(pH 值 7.4)洗涤 2 次;经离心、冷冻干燥回收未被消化的淀粉。ANN-DS、TC-DS 和 HMT-DS 经体外消化所得的样品分别称为 dANN-DS、dTC-DS 和 dHMT-DS。

1.2.3 体外厌氧培养

参考文献^[14~15],取年龄 23~31 岁健康男子(此前至少 3 个月以上未注射抗生素,没有预先服用已知的益生元或益生菌,没有胃肠病史)的粪便,将粪使用磷酸盐缓冲溶液(PBS)制成均匀的悬浮液配制 MRS 乳酸菌选择性培养基,在 MRS 培养基中添加重结晶淀粉样品(质量浓度为 10 g/L),将 MRS 培养基按每份 180 mL 分装,然后接种粪便悬浮液 20 mL 厌氧培养;当发酵至 24 h 时,取样。上述取样用 8.5% 生理盐水稀释至 10% 后涂布选择性平板于 37℃ 厌氧培养 48~72 h 后计数。不同微生物菌群所用选择性培养基分别为大肠杆菌群 MacConkey 琼脂、乳酸杆菌群 LAMVAB 琼脂、粪链球菌群 AM 琼脂、梭状芽孢杆菌群 TSC 琼脂、双歧杆菌群 RB 琼脂、葡萄球菌群 MSA 琼脂和产气荚膜梭菌群 OPSP 琼脂等。

短链脂肪酸(SCFAs)测定:采用 HPLC 法^[16]。

1.2.4 聚合物链分布

未消化与已消化重结晶淀粉的分子链分布按 Mutungi 等的方法采用 HPAEC(美国 Dionex 公司,ICS2500 型)测定^[17]。

1.2.5 广角 X-射线衍射(XRD)分析

重结晶红薯淀粉在体外消化前、后的广角 X-射线衍射图谱采用粉末法。X-射线衍射仪(美国, TTRAX3 型)分析条件:特征射线 CuKα,石墨单色器,管压 40 kV,电流 25 mA,测量角度 $2\theta = 10^\circ \sim 50^\circ$,步长 $0.02^\circ/\text{步}$,扫描速度 $2^\circ/\text{min}$ 。

1.2.6 差示扫描量热(DSC)分析

称取一定量体外消化前、后的重结晶淀粉,按质量比 1:2 加入重蒸水,密封后置于 4℃ 冰箱中隔夜平衡,再称取 5.0 mg 左右(精确到 0.1 mg)于铝坩埚中,压片。用 DSC200 型示差扫描量热仪(德国 NETZSCH 公司)测定;扫描温度范围为 20~150℃,扫描速率为 10℃/min,以空坩埚为参比,载气氮流速 20 mL/min。

本文中所有实验重复 3 次,结果取平均值。

2 结果与分析

2.1 益生作用

在体外厌氧培养实验中,重结晶红薯淀粉与体外消化后重结晶红薯淀粉对粪便微生物菌群生长及

短链脂肪酸产生的影响分别见表 1 和表 2。由表 1 可看出,ANN-DS、TC-DS 和 HMT-DS 对乳酸杆菌群、双歧杆菌群、粪链球菌群和梭状芽孢杆菌群等益生菌有较强的增殖作用($0.01 < P < 0.05$),对大肠杆菌群、葡萄球菌群和产气芽孢杆菌等有害菌也有较强的抑制作用($0.01 < P < 0.05$);而 dANN-DS、dTC-DS 和 dHMT-DS 对乳酸杆菌群、双歧杆菌群、粪链球菌群和梭状芽孢杆菌群等的增殖作用,以及对大肠

杆菌群、葡萄球菌群和产气芽孢杆菌等的抑制作用则进一步加强($P < 0.01$)。由表 2 可知,与对照相比,ANN-DS、TC-DS 和 HMT-DS 的添加,可减少乙酸、丙酸的生成而促进乳酸、丁酸的生成($0.01 < P < 0.05$),而添加 dANN-DS、dTC-DS 和 dHMT-DS,乙酸、丙酸的生成量进一步减少($P < 0.01$),丁酸生成量则增加约 2 倍($P < 0.01$)。文献[7~9]报道,丁酸大量生成能增强益生作用。

表 1 重结晶红薯淀粉消化前、后对粪便微生物菌群生长的影响

Tab.1 Influence of recrystallised sweet potato starches before and after digestion on growth of fecal microbial floras							
微生物菌群	对照	ANN-DS	TC-DS	HMT-DS	dANN-DS	dTC-DS	dHMT-DS
乳酸杆菌群	1.16×10^8	1.78×10^8	1.65×10^8	1.58×10^8	2.47×10^8	3.05×10^8	2.83×10^8
双歧杆菌群	1.34×10^8	2.08×10^8	2.36×10^8	1.91×10^8	3.12×10^8	3.85×10^8	2.64×10^8
粪链球菌群	2.27×10^7	3.57×10^7	2.92×10^7	3.18×10^7	4.35×10^7	3.81×10^7	4.09×10^7
梭状芽孢杆菌群	1.09×10^8	1.53×10^8	1.80×10^8	1.74×10^8	2.08×10^8	2.58×10^8	3.11×10^8
大肠杆菌群	5.57×10^7	2.64×10^7	2.87×10^7	3.39×10^7	1.05×10^7	1.16×10^7	1.32×10^7
葡萄球菌群	6.25×10^6	3.53×10^6	3.35×10^6	2.94×10^6	2.01×10^6	1.42×10^6	7.60×10^5
产气芽孢杆菌群	5.64×10^6	3.37×10^6	3.08×10^6	2.52×10^6	1.29×10^6	2.01×10^6	8.30×10^5

表 2 消化前、后的重结晶红薯淀粉促进短链脂肪酸的产生情况

Tab.2 Recrystallised sweet potato starches before and after digestion promote short chain fatty acid production							
短链脂肪酸	对照	ANN-DS	TC-DS	HMT-DS	dANN-DS	dTC-DS	dHMT-DS
乙酸	2.67	1.83	2.06	1.95	1.27	1.32	1.25
丙酸	1.06	0.77	0.81	0.75	0.41	0.44	0.42
乳酸	2.19	3.04	3.13	3.21	2.32	2.39	2.43
丁酸	1.82	2.32	2.08	2.16	3.68	3.56	3.79

2.2 分子链分布

ANN-DS、TC-DS 和 HMT-DS 中抗性淀粉的质量分数分别为 59.8%、52.6% 和 76.4%。Colonna 等研究认为,重结晶淀粉对淀粉水解酶产生抗性的机理是因其双螺旋有序结构的形成,这种结构能阻碍酶分子的结合;双螺旋可进一步形成更为稳定的结晶实体,减少淀粉颗粒与酶接触的有效表面^[18]。Cairns 等研究报道,在缺陷晶体内部的无定形区域

和非晶双螺旋结构也可以诱导对酶水解的抗性^[19]。图 1 表示重结晶红薯淀粉在体外消化前、后的分子链分布。ANN-DS、TC-DS 和 HMT-DS 的平均聚合度分别为 22.70、22.53 和 22.92,说明重结晶淀粉制备方法对平均聚合度没有影响($P > 0.05$)。经体外消化后,dANN-DS、dTC-DS 和 dHMT-DS 的平均聚合度有所增加,分别为 24.88、24.23 和 24.36;而且,它们的长链分子(平均聚合度为 22~44)数量也增加,这

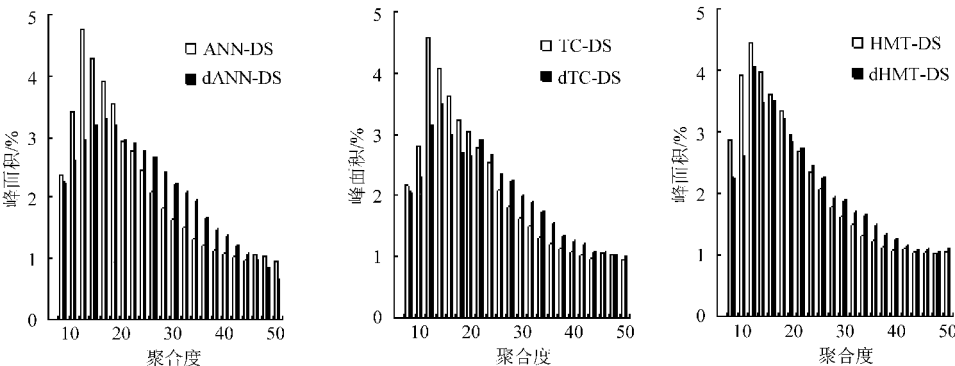


图 1 重结晶红薯淀粉在体外消化前、后的分子链分布

Fig.1 Polymer chain distributions of recrystallised sweet potato starches before and after in vitro digestion

表明线性聚合物有形成对酶更具抗性结构的能力。Eerlingen 等发现太长的聚合链因熵高而容易受损,而太短的链长则缺少形成稳定双螺旋结构所必需具备的最小长度^[20]。由此可见,在消化过程中,长链也能水解成合适长度的链,获得形成更稳定的酶抗性结构的能力。从图 1 还可看出,对于消化后的 3 种重结晶淀粉,它们在分子链数量变化方面的规律也是一致的,当平均聚合度为 34 时峰面积的增量最大。

2.3 结晶结构

淀粉主要是由 A-型和 B-型晶体及少量 V-型晶体组成的混合物。Lopez-Rubio 等研究表明,A-型晶体通常 2θ 为 17.14° 、 18.14° 、 15.11° 和 26.27° 出现强的特征衍射峰,另外 2θ 为 9.98° 、 11.19° 、 22.93° 、 23.68° 、 30.30° 和 33.08° 也有衍射峰;B-型晶体 2θ 为 5.51° 、 14.60° 和 16.85° 具有典型衍射峰,以及 2θ 为 10.01° 、 11.02° 、 13.85° 、 22.30° 、 23.71° 、 26.16° 、 30.61° 和 33.84° 也出现衍射峰;V-型晶体在 2θ 为 19.80° 处出现标志性衍射峰,有时 2θ 为 7.40° 和 12.90° 也有衍射峰^[21]。图 2 为重结晶红薯淀粉在体外消化前、后的广角 X-射线衍射图谱,其总结晶度及各型晶体的质量分数计算并列于表 3 中。由表 3 可看出,重结晶淀粉经消化处理后,dANN-DS、

dTC-DS 和 dHMT-DS 的结晶度分别增加了 27.11%、20.09% 和 16.60% ($P < 0.01$),其中 B-型晶体增加而 A-型和 V-型晶体则减少,且 dANN-DS 比 dTC-DS 和 dHMT-DS 的这种晶型变化程度更显著些。这说明在消化过程中,有相当数量的分子链发生了有利于酶抗性提高的结构重组,即低密度双螺旋包裹结构增加而与酶解有关的结构刚性丧失^[13,21]。

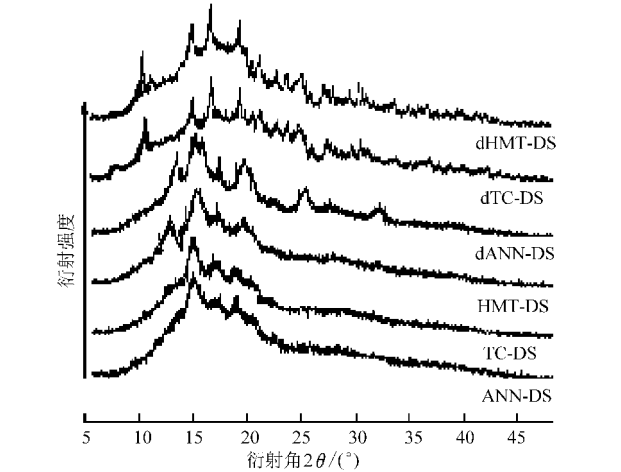


图2 重结晶红薯淀粉在体外消化前、后的广角 X-射线衍射图谱

Fig.2 Wide-angle X-ray diffractograms of recrystallised sweet potato starches before and after in vitro digestion

表 3 重结晶红薯淀粉在体外消化前、后的结晶参数						
Tab.3 Crystallinity parameters of recrystallised sweet potato starches before and after digestion						
参数	ANN-DS	TC-DS	HMT-DS	dANN-DS	dTC-DS	dHMT-DS
结晶度	30.32	39.08	44.10	38.54	46.93	51.42
A-型晶体质量分数	17.30	30.90	40.83	10.13	33.38	43.10
B-型晶体质量分数	10.62	5.40	0.59	26.92	11.32	6.18
V-型晶体质量分数	2.40	2.94	2.68	1.51	2.33	2.15

2.4 热特性

重结晶红薯淀粉在体外消化前、后的差示扫描量热图谱见图 3,熔融温度范围 $T_c - T_o$ 与热焓变化 ΔH 列于表 4 中。Abd Karim 等认为, $T_c - T_o$ 能作为解释晶体同质性和非晶形态的一种方法,而 ΔH 则反映有序结构的数量,如微晶和双螺旋结构的熔融

焓^[22]。与 ANN-DS 和 HMT-DS 不同,TC-DS 呈现 2 个主要的吸热峰,说明 DS 在高温循环的诱导下重结晶形成了 2 个不同性质的结晶域;而 dTC-DS 只有单吸热峰表明在消化过程中其特征性的结晶域不仅仍被保留,而且还有所增加。除 TC-DS 和 dTC-DS 的 $T_c - T_o$ 相差不大之外 ($P > 0.05$),与 ANN-DS 和

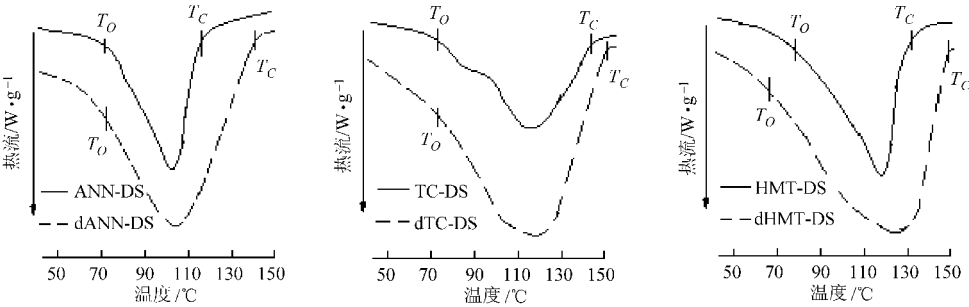


图3 重结晶红薯淀粉在体外消化前、后的差示扫描量热图谱

Fig.3 Differential scanning calorimetry thermograms of recrystallised sweet potato starches before and after digestion

HMT-DS 相比,dANN-DS 和 dHMT-DS 的 T_c-T_o 显著增加($P<0.01$),这是由于更宽范围内有序结构的形成,其中包含因高温诱导结构重排而新形成的长

链分子^[23]。dANN-DS、dTc-DS 和 dHMT-DS 更高的熔融焓则进一步表明,在消化过程中因无序排列的消除而形成更多、更稳定的有序结构。

表 4 重结晶红薯淀粉在体外消化前、后的熔化参数

Tab. 4 Melting parameters of recrystallised sweet potato starches before and after digestion

参数	ANN-DS	TC-DS	HMT-DS	dANN-DS	dTC-DS	dHMT-DS
$T_c-T_o/^\circ\text{C}$	43.72	65.74	46.38	65.94	71.23	74.19
$\Delta H/\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$	23.45	29.08	33.42	47.36	48.69	60.57

3 结论

(1)体外厌氧培养实验表明,ANN-DS、TC-DS、HMT-DS、dANN-DS、dTc-DS 和 dHMT-DS 都能选择性促进乳酸杆菌群、双歧杆菌群、粪链球菌群和梭状芽孢杆菌群等益生菌的增殖,而 dANN-DS、dTc-DS 和 dHMT-DS 的这种选择性增殖作用更显著。

(2)分子链分布、XRD 和 DSC 分析表明,ANN-DS、TC-DS、HMT-DS、dANN-DS、dTc-DS 和 dHMT-DS

都具有稳定的抗人体消化道酶降解的结构特性,比较而言,dANN-DS、dTc-DS 和 dHMT-DS 抗酶解的结构稳定性更好。

(3)消化前、后的重结晶红薯淀粉,特别是 dANN-DS、dTc-DS 和 dHMT-DS,既有抗消化道酶的稳定结构,又能选择性地刺激益生菌的生长和代谢活性,完全满足作为益生元的两个条件,具备作为新一代益生元产品的开发潜力。

参 考 文 献

1 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 (1): 33 ~50.

2 Escarpa A, Gonzalez M C, Morales M D, et al. An approach to the influence of nutrients and other food constituents on resistant starch formation[J]. Food Chemistry, 1997, 60 (2): 527 ~532.

3 Englyst H N, Trowel H, Cumming J H. Dietary fiber and resistant starch[J]. American Journal of Clinical Nutrition, 1987, 46(3): 873 ~874.

4 Shao Y Y, Tseng Y H. Rheological properties of rice amylase gels and their relationships to the structures of amylase and its subfractions[J]. Food Chemistry, 2007, 103(5): 1 324 ~1 329.

5 Niba L L. Resistant starch: a potential functional food ingredient[J]. Nutrition & Food Science, 2002, 32(2): 62 ~65.

6 Shin S I, Kim H J, Ha H J, et al. Effect of hydrothermal treatment on formation and structural characteristics of slowly digestible non-pasted granular sweet potato starch[J]. Starch-Starke, 2005, 57(2): 421 ~430.

7 Lehmann U, Jacobasch G, Schmiedl D. Characterization of resistant starch typeⅢ from banana (*Musa acuminata*) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(18): 5 236 ~5 240.

8 Zampa A, Silvi S, Fabiani R, et al. Effects of different digestible carbohydrates on bile acid metabolism and SCFA production by human gut micro-flora grown in an in vitro semi-continuours culture[J]. Anaerobe, 2004, 10(1): 19 ~25.

9 Rideout T C, Liu Q, Wood P, et al. Nutrient utilization and intestinal fermentation are differentially affected by the consumption of resistant starch varieties and conventional fibres in pigs[J]. British Journal of Nutrition, 2008, 99(5): 984 ~992.

10 连喜军,张燕.不同老化工艺对甘薯回生抗性淀粉制备率的影响[J].粮食加工,2012,37(3):46~48.
Lian Xijun, Zhang Yan. The influence of different aging process on the retrograded rate of sweet potato starch[J]. Grain Processing, 2012, 37(3): 46 ~48. (in Chinese)

11 唐忠厚,陆国权.甘薯抗性淀粉理化特性研究[J].中国粮油学报,2010,25(1):37~42.
Tang Zhonghou, Lu Guoquan. Physicochemical properties of sweet potato resistant starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association,2010, 25(1): 37 ~42. (in Chinese)

12 于淼,邬应龙.甘薯抗性淀粉对高脂血症大鼠降脂利肝作用研究[J].食品科学,2012,33(1):244~247.
Yu Miao, Wu Yinglong. Hypolipidemic and liver-benefiting effect of sweet potato resistant starch in hyperlipidemic rats[J]. Food Science, 2012, 33(1): 244 ~247. (in Chinese)

13 Mutungi C, Onyango C, Doert T, et al. Long- and short-range structural changes of recrystallised cassava starch subjected to in vitro digestion[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(2): 477 ~485.

14 Wichienchot S, Jatupornpipat M, Rastall R A. Oligosaccharides of pitaya (dragon fruit) flesh and their prebiotic properties[J]. Food Chemistry, 2010, 120(3): 850 ~857.

15 Synytsya A, Mickova K, Synytsya A, et al. Glucans from fruit bodies of cultivated mushrooms *Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus eryngii*: structure and potential prebiotic activity[J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 76(2): 548 ~556. (下转第 218 页)

影响规律。采用二次回归正交旋转组合设计法,分析了各因素对微波灭酶效果的显著性程度,并得出马铃薯综合品质和各因素编码值的回归方程。

(2)根据回归方程的结果,借助 SAS 9.0 软件进行响应面分析,确定最佳工艺参数为:微波源阳极

电流 161.78 mA、微波作用时间 10.19 s、马铃薯片厚度 2.88 mm。使用最佳工艺参数进行验证,结果显示回归模型的预测值与试验值较为接近,回归模型的拟合度较好。

参 考 文 献

1 Debowska R. Polyphenol oxidases in higher plants [J]. Postepy Biochemii, 2002, 48(1): 81~91.

2 贺立红,宾金华. 高等植物中的多酚氧化酶[J]. 植物生理学通讯,2001,37(4):340~345.

He Lihong, Bin Jinhua. Polyphenol oxidase in higher plants [J]. Plant Physiology Communications, 2001, 37(4):340~345. (in Chinese)

3 唐小俊,池建伟,张名位,等. 苦瓜的微波灭酶技术[J]. 农业机械学报,2008,39(4):200~203.

4 李全宏,赵雅松,蔡同一,等. 鲜切马铃薯褐变抑制效果研究[J]. 食品科学,2005,26(9):92~95.

Li Quanhong, Zhao Yasong, Cai Tongyi, et al. Study on the effection of prevent browning of fresh-cut potato[J]. Food Science, 2005,26(9):92~95. (in Chinese)

5 郁志芳,彭贵霞,夏志华,等. 鲜切山药酶促褐变机理研究[J]. 食品科学,2003,24(5):44~49.

Yu Zhifang, Peng Guixia, Xia Zhihua, et al. Studies on enzymatic browning mechanism of fresh-cut yams[J]. Food Science, 2003, 24(5): 44~49. (in Chinese)

6 Underhill S J R, Critchley C. Cellular localisation of polyphenol oxidase and peroxidase activity in *Litchi chinensis* Sonn. pericarp [J]. Functional Plant Biology, 1995, 22(4): 627~632.

7 张玉荣,周显青,果玉茹. 小麦胚微波灭酶工艺参数研究[J]. 河南工业大学学报:自然科学版,2008,29(2):7~10.

Zhang Yurong, Zhou Xianqing, Guo Yuru. Study on the technological parameters of de-activating enzyme in wheat germ by microwave[J]. Journal of Henan University of Technology: Natural Science Edition, 2008,29(2):7~10. (in Chinese)

8 王绍林. 微波钝化酶的机理及其设备开发[J]. 农业工程学报,1996, 12(3):168~171.

Wang Shaolin. Mechanism and microwave equipment for passivate enzyme[J]. Transactions of the CSAE, 1996, 12(3):168~171. (in Chinese)

9 孟雅,李刚,崔焱,等. 马铃薯多酚氧化酶的提取纯化条件对其活性影响的研究[J]. 化学与生物工程,2006,23(10):47~49.

Meng Ya, Li Gang, Cui Yan, et al. The effect of extraction and purification condition on the activity of PPO from potato[J]. Chemistry & Bioengineering, 2006,23(10):47~49. (in Chinese)

10 李树君,张琥,林亚玲,等. 马铃薯片红外和漂烫灭酶工艺对比试验[J]. 农业机械学报,2012,43(10):118~123.

Li Shujun, Zhang Hu, Lin Yaling, et al. Comparison between infrared and hot water blanching processing on enzyme inactivation for potato slice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(10):118~123. (in Chinese)

11 邱敦莲. 国内外马铃薯生产、加工及市场需求现状[J]. 四川农业科技,2004(3):56~57.

(上接第 206 页)

16 Xie T, Fang H Y, Zhuge B, et al. Promotional mechanism of high glycerol productivity in the aerobic batch fermentation of *Candida glycerinogenes* after feeding several amino acids[J]. Applied Biochemistry and Microbiology, 2009,45(3): 303~308.

17 Mutungi C, Onyango C, Rost F, et al. Structural and physicochemical properties and in vitro digestibility of recrystallized linear α -D-(1 $\rightarrow$ 4) glucans derived from mild-acid modified cassava starch[J]. Food Research International, 2010, 43(4): 1 144~1 154.

18 Colonna P, Leloup V, Buleon A. Limiting factors of starch hydrolysis[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46(1): 17~32.

19 Cairns P, Sun L, Morris V J. Physicochemical studies using amylase as an in-vitro model for resistant starch[J]. Journal of Cereal Science, 1995, 21(1): 37~47.

20 Eerlingen R C, Deceuninck M, Delcour J A. Enzyme-resistannt starch: influence ofamylase chain-length on resistant starch formation[J]. Cereal Chemistry, 1993, 70(3): 345~350.

21 Lopez-Rubio A, Flanagan B M, Gilbert E P. Molecular rearrangement of starch during in vitro digestion: toward a better understanding of enzyme resistant starch formation in processed starches[J]. Biomacromolecules, 2008, 9(7): 1 951~1 958.

22 Abd Karim A, Norziah M H, Seow C C. Methods for the study of starch retrogratation[J]. Food Chemistry, 2000, 71(1):9~36.

23 Mutungi C, Rost F, Onyango C, et al. Crystallinity, thermal and morphological characteristics of resistant starch type III produced by hydrothermal treatment of debranched cassava starch[J]. Starch-Starke, 2009, 61(11): 634~645.