

有机酸—湿热复合处理土豆抗性淀粉糊的理化特性
Physicochemical Properties of Resistant Starch Pastes from Potato Modified
by a Combination of Organic Acid and Heat-moisture Treatments

谢 涛¹ 李晓文² 蒋朝晖² 易翠平²

XIE Tao¹ LI Xiao-wen² JIANG Zhao-hui² YI Cui-ping²

(1. 湖南工程学院化学化工学院, 湖南 湘潭 411104; 2. 长沙理工大学化学与生物工程学院, 湖南 长沙 410015)
(1. College of Chemical Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan, Hunan 4111041, China; 2. College of Chemistry and Biology Science, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410015, China)

摘要:在过量水分条件下,采用有机酸水解—湿热复合处理制备土豆抗性淀粉(acid hydrolysis and heat-moisture treatment, AH-HMT RS3),并对其持水力、溶胀度、溶解度、黏度特性、质构特性和热特性进行研究。结果表明:AH-HMT RS3 的持水力分别增加到原淀粉的 1.38~2.32 倍(淀粉与水质量比 1:1)和 2.20~3.49 倍(淀粉与水质量比 1:3.5),95℃时溶胀度降低到原淀粉的 38.04%~58.10%(淀粉与水质量比 1:1)和 53.42%~86.05%(淀粉与水质量比 1:3.5)而溶解度增加到原淀粉的 1.57~2.04 倍(淀粉与水质量比 1:1)和 1.74~2.31 倍(淀粉与水质量比 1:3.5);形成的糊属于低黏度糊溶液,黏度低于 13 mPa·s,而崩解值与回值低于 3 mPa·s;形成的凝胶属于低强度凝胶,其硬度为 73.82~85.41 g(淀粉与水质量比 1:1)或 78.50~87.84 g(淀粉与水质量比 1:3.5);糊化温度均显著增高,糊化温度范围也大大拓宽,糊化焓减少至原淀粉的 39.29%~49.22%(淀粉与水质量比 1:1)和 30.75%~42.08%(淀粉与水质量比 1:3.5);AH-HMT RS3 这些性质的差异与使用的有机酸种类也有关。AH-HMT RS3 的高溶解度、低黏度与低糊化焓的特性很适合于添加到食用油脂、奶油等加工食品中,对控制这些食品的质量具有重要意义。

关键词:有机酸—湿热复合处理;土豆抗性淀粉糊;理化特性
Abstract: Resistant starches from potato modified by a combination of organic acid hydrolysis and heat-moisture treatments (AH-HMT RS3) were prepared under conditions of excess moisture. Their water binding capacity, degree of swelling, solubility, and pasting, texture

al, and thermal properties were all studied. The results demonstrated that the water binding capacity of AH-HMT RS3 increased to 1.38~2.32 times (starch: water = 1 g: 1 g) and 2.20~3.49 times (starch: water = 1 g: 3.5 g) that of the native starch. At 95℃, the degree of swelling decreased to 38.04%~58.10% (starch: water = 1 g: 1 g) and 53.42%~86.05% (starch: water = 1 g: 3.5 g) that of the native starch. The viscosity of all the pastes formed by AH-HMT RS3 were less than 13 mPa·s with breakdown and setback values below 3 mPa·s. All gels made with AH-HMT RS3 were of low strength: their hardness values were 73.82~85.41 g (starch: water = 1 g: 1 g) and 78.50~87.84 g (starch: water = 1 g: 3.5 g). The gelatinization temperatures and their ranges increased significantly, compared with native starch. The gelatinization enthalpy decreased to 39.29%~49.22% (starch: water = 1 g: 1 g) and 30.75%~42.08% (starch: water = 1 g: 3.5 g) that of the native starch. These quantitative differences in the effects of AH-HMT RS3 were also related to the type of organic acid used. Considering their high solubility, low viscosity, and low gelatinization enthalpy, AH-HMT RS3 could be suitable for adding to edible oils and fats, butter and other processed foods, and of great significance for controlling the quality of these foods.

Keywords: Organic acid combined with heat-moisture treatment; Potato resistant starch paste; Physicochemical property

抗性淀粉(resistant starch, RS)的生理活性类似于膳食纤维,如对结肠微生物菌落的益生作用、改善脂代谢和胆固醇代谢、预防肥胖症等^[1]。由于 RS 是淀粉在小肠里未被消化的一部分,它具有控制血糖指数的功能特性^[2]。RS 通常被分为 4 种:RS1、RS2、RS3 和 RS4。RS3 制备自直链淀粉结晶,它通过在靠近链末端区域的直链淀粉分子和可折叠链之间形成双螺旋使链伸长($DP_n=30\sim65$),X-射线衍射特征为 B 型,具有很好的热稳定性^[3]。影响 RS3 理化特性的因素有

基金项目:长沙市科技计划项目(编号:Kq1602040);国家自然科学基金青年基金(编号:21307008)
作者简介:谢涛,男,湖南工程学院教授,博士。
通信作者:易翠平(1973—),女,长沙理工大学教授,博士。
E-mail:109823769@qq.com
收稿日期:2017-03-20

改性方法、湿含量、加热(或贮藏)温度与时间、加热/冷却循环次数、直链淀粉含量、链长度和淀粉来源等^[4-5]。化学和物理改性常被应用于生产具有特殊性质的变性淀粉产品。酸改性在不破坏淀粉颗粒结构情况下,改变了淀粉的理化特性,如能增加淀粉的溶解性和凝胶强度,降低淀粉的黏度,还影响淀粉的黏弹性^[6]。针对玉米、小麦、木薯、土豆和绿豆等淀粉,已进行过许多酸水解的研究^[7-8]。湿热处理也是一种常用的物理变性淀粉制备的方法^[9]。湿热处理通常能增加淀粉的糊化温度,缩小或拓宽其 DSC 热焓范围,改变其 X-射线衍射图形、溶胀度和溶解度,以及随之发生的功能改变。目前,已对多种淀粉进行过湿热处理制备改性淀粉的研究^[10]。

酸水解和湿热处理分别作为淀粉物理改性的手段已被广泛研究,但酸水解结合湿热处理(AH-HMT)应用于淀粉改性尚未涉及。本试验拟以柠檬酸、乙酸、琥珀酸、苹果酸和乳酸—湿热复合处理制备土豆 RS3,并对其持水力、溶胀度、溶解度、黏度特性、质构特性及热特性进行研究,以期为开展土豆淀粉的深加工提供科学依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

土豆淀粉:四川友嘉食品有限公司;
柠檬酸、乙酸、琥珀酸、苹果酸、乳酸:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

电子天平:AB104-N 型,上海第二天平仪器厂;
快速黏度分析仪:RVA-4 型,澳大利亚 Warriewood 公司;
质构分析仪:TA-XT Plus 型,英国 Surrey 公司;
示差扫描量热仪:DSC200 型,德国 NETZSCH 公司。

1.2 土豆 AH-HMT RS3 的制备

参照 Kim 等^[11]的方法,略做改动。称取适量土豆淀粉置于 500 mL 锥形瓶中,分散到水中制成淀粉乳(淀粉与水质量比为 1:3.5 或 1:1),分别加入柠檬酸、乙酸、琥珀酸、乳酸(0.5 g/100 g·干基),混合均匀,将混合淀粉乳液置于高压灭菌锅中 110 ℃加热 1 h。冷却至室温,储存在 4 ℃的环境中 12 h,再次循环加压、冷却步骤,将产品置于 40 ℃干燥箱烘干,粉碎,过 120 目筛,即得土豆 AH-HMT RS3。

1.3 溶胀度与溶解度的测定

将 0.8 g 样品(干基)悬浮于装有 80 mL 蒸馏水的 100 mL 带盖离心管中,在振动(150 r/min)水浴锅中于 25、95 ℃分别加热 30 min,再冷却到室温,于 3 000 r/min 离心 15 min,上清液在 105 ℃干燥至恒重,沉淀用滤纸吸干后称重。按式(1)、(2)计算溶胀度(g/g)和溶解度(%)。

$$\text{溶胀度} = \frac{\text{沉淀层湿重}}{\text{样品重} - \text{上清液干重}}, \tag{1}$$

$$\text{溶解度} = \frac{\text{上清液干重}}{\text{样品重}} \times 100\%。 \tag{2}$$

1.4 持水力的测定

将 5 g 样品(干基)悬浮于 75 mL 蒸馏水中,25 ℃搅拌 1 h,于 3 000 r/min 离心 10 min,倒出上层游离水,再沥干 10 min,湿沉淀层称重。按式(3)计算持水力(%)。

$$\text{持水力} = \frac{\text{湿沉淀重}}{\text{样品重}} \times 100\%。 \tag{3}$$

1.5 黏度特性的测定

采用快速黏度分析仪分析:3 g 含 10 g/100 g·淀粉 AH-HMT RS3 与 25 mL 去离子水在一个小铝罐内混合均匀。每个样品悬浮液在 50 ℃保持 1 min,以 12 ℃/min 快速加热至 95 ℃并维持 2.5 min,再以 12 ℃/min 降温至 50 ℃。

1.6 质构特性的测定

采用质构分析仪分析:设定发生 50%的形变,形变速率 1.5 mm/s。

1.7 热特性的测定

称取一定量含水 10 g/100 g·淀粉的 AH-HMT RS3,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 左右于铝坩埚中,压片。用示差扫描量热仪测定:扫描温度范围 20~180 ℃,扫描速率 10 ℃/min,以空坩埚为参比,载气氮流速 20 mL/min。

所有数据为 3 个平行试验的平均值,且采用 SPSS 20.0 进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 持水力、溶胀度与溶解度

土豆 AH-HMT RS3 的持水力、溶胀度和溶解度见表 1。HMT(无酸) RS3 的持水力是原淀粉持水力的 2.75~3.95 倍,但 AH-HMT RS3 的持水力增加幅度减小,是由于 RS3 的无定形部分溶解度和颗粒间紧密度增加所致。当淀粉:水=1:1 时,AH-HMT RS3 的持水力是原淀粉持水力的 1.38~2.32 倍,而当淀粉:水=1:3.5 时,AH-HMT RS3 的持水力是原淀粉持水力的 2.20~3.49 倍,结果表明 RS3 的无定形区域吸收了更多水分。由表 1 可知,所有 HMT RS3 或 AH-HMT RS3 在 25 ℃时的溶胀度都没有明显的差别($P>0.05$),可能是其超过 80%的体积在反复的加热—冷却循环过程中转变成了淀粉颗粒的无定形部分^[11]。当温度升高到 95 ℃时,土豆原淀粉的溶胀度显著增高到 26.81 g/g($P<0.05$),HMT RS3 的溶胀度为 9.23 g/g(淀粉:水=1:1)和 12.68 g/g(淀粉:水=1:3.5),结果与已有文献^[11-12]报道类似。与无酸—HMT RS3 相比,在 95 ℃时柠檬酸、乙酸、琥珀酸、苹果酸、乳酸—HMT RS3 的溶胀度分别增加了 81.37%,74.21%,47.20%,22.32%和 18.74%(淀粉:水=1:1)或 95.50%,77.13%,57.02%,34.31%和 21.37%(淀粉:水=1:3.5),其差别的显著性取决于有机酸的种类。与溶胀度不同,无论温度或淀粉:水是多少,AH-HMT RS3 的溶解度都极显著增加($P<0.05$)。由以上结果可以推断:加热能促使水解的淀粉分子更易扩张,从而引起 AH-HMT RS3 的溶胀度和溶解度都升高。在 95 ℃时,与原淀粉比,AH-HMT RS3 的溶胀度降低而溶解度大幅增加($P<0.05$),

是因为酸处理可切断相邻淀粉多聚物分子间的氢键,破坏无定形区域,而 HMT 进一步促进了内生脂类物质的溢出,并与无定形直链淀粉结合为更稳定的螺旋晶体结构^[9,13–14]。

2.2 黏度特性

由表 2 可知,与土豆原淀粉相比,HMT RS3 和 AH-HMT RS3 的起始糊化温度都显著增加($P<0.05$)。RS3 起始糊化温度增高说明 HMT 或 AH-HMT 可以促使淀粉分子链重新取向、重新排列,提高了淀粉颗粒结晶的完整性,淀粉结构强度增加^[14]。由表 2 还可知,无论是 HMT RS3 或 AH-HMT RS3,它们的糊黏度都比原淀粉糊的低得多($P<$

0.05),特别是 AH-HMT RS3 的糊黏度均低至 $13\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 以下,且酸种类不同糊黏度下降的幅度也不一样。分析发现,AH-HMT RS3 在加热过程中表现出很低的黏度,原因可能是:① 在高温下易于溶解^[16];② 酸水解导致链长的支链淀粉的糖苷键断裂严重,引起糊黏度显著降低($P<0.05$),甚至水解成糊精而不能产生黏度^[17]。此结果与表 1 中 AH-HMT RS3 的溶解度增加是一致的。与原淀粉相比,AH-HMT RS3 糊的崩解值和回值均大幅下降,表明颗粒内重组使它们对剪切和加热更具抗性,即 RS3 糊在持续的加热和剪切过程中变得更加稳定,这与文献^[18]报道也是一致的。

表 1 酸水解—湿热处理土豆淀粉的持水力、溶胀度及溶解度[†]
Table 1 Water binding capacity, swelling power, and solubility of AH-HMT potato RS3

样品	有机酸	持水力/％	溶胀度/(g·g ⁻¹)		溶解度/％	
			25 ℃	95 ℃	25 ℃	95 ℃
原淀粉		95.37±2.16	3.35±0.16	28.81±0.25	0.94±0.05	34.05±0.17
	无酸	261.84±3.91 ^a	5.18±0.12	9.23±0.17 ^c	2.85±0.05 ^e	8.53±0.14 ^e
	柠檬酸	221.28±7.59 ^b	5.31±0.16	16.74±0.38 ^a	27.92±0.26 ^a	69.53±0.37 ^a
	乙酸	195.76±3.84 ^c	5.09±0.08	16.08±0.13 ^a	22.37±0.18 ^b	63.29±0.29 ^b
	琥珀酸	172.75±3.50 ^d	4.96±0.15	13.62±0.10 ^b	19.83±0.24 ^c	57.47±0.61 ^c
	苹果酸	154.38±1.09 ^e	4.87±0.07	11.29±0.23 ^{bc}	16.56±0.31 ^d	50.67±1.07 ^d
淀粉：水＝ 1：1	乳酸	149.85±0.87 ^e	4.65±0.13	10.96±0.06 ^{bc}	15.58±0.07 ^d	49.90±1.64 ^d
	无酸	376.81±3.97 ^a	5.73±0.10 ^{bc}	12.68±0.54 ^d	4.84±0.06 ^d	12.97±0.32 ^d
	柠檬酸	332.57±2.08 ^b	6.38±0.09 ^a	24.79±0.63 ^a	43.62±0.65 ^a	78.54±1.69 ^a
	乙酸	309.36±1.67 ^c	6.09±0.05 ^{ab}	22.46±0.28 ^{ab}	40.19±0.47 ^a	75.28±2.08 ^a
	琥珀酸	273.52±1.54 ^d	5.65±0.11 ^{bc}	19.91±0.07 ^b	27.82±0.19 ^b	68.19±1.46 ^b
	苹果酸	231.83±1.92 ^e	4.94±0.03 ^c	17.03±0.04 ^c	14.74±0.07 ^c	63.72±0.87 ^c
淀粉：水＝ 1：3.5	乳酸	209.59±0.95 ^f	4.67±0.02 ^c	15.39±0.13 ^{cd}	12.58±0.21 ^c	59.38±0.63 ^c

† 同列同一样品不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

表 2 酸水解—湿热处理土豆淀粉的黏度特性
Table 2 Pasting properties of AH-HMT potato RS3

样品	有机酸	起糊温度/ ℃	峰值黏度/ (mPa·s)	低谷黏度/ (mPa·s)	冷却黏度/ (mPa·s)	崩解值/ (mPa·s)	回值/ (mPa·s)
原淀粉		73.5±0.42	285.63±3.19	190.47±1.92	288.51±2.09	95.16±0.64	98.04±0.76
	无酸	78.3±0.65 ^b	15.92±0.83 ^a	14.37±0.25 ^a	15.59±0.34 ^a	1.55±0.57 ^{bc}	1.22±0.10 ^b
	柠檬酸	88.7±0.53 ^a	12.86±0.21 ^b	9.93±0.18 ^b	10.48±0.26 ^b	2.93±0.03 ^a	0.55±0.08 ^c
	乙酸	85.6±0.37 ^a	9.95±0.17 ^c	7.69±0.30 ^{bc}	8.68±0.29 ^{bc}	2.26±0.13 ^b	0.99±0.02 ^b
	琥珀酸	87.4±0.71 ^a	6.36±0.23 ^d	4.07±0.06 ^c	6.59±0.04 ^c	2.29±0.18 ^b	2.52±0.02 ^a
	苹果酸	86.9±0.26 ^a	4.07±0.02 ^{de}	2.90±0.03 ^{cd}	3.57±0.07 ^{cd}	1.17±0.01 ^c	0.67±0.04 ^{bc}
淀粉：水＝ 1：1	乳酸	87.7±0.80 ^a	2.39±0.06 ^e	1.03±0.02 ^d	1.82±0.06 ^d	1.36±0.04 ^{bc}	0.79±0.04 ^{bc}
	无酸	78.6±0.51 ^b	49.72±0.65 ^a	48.26±0.71 ^a	68.90±0.83 ^a	1.46±0.06 ^{ab}	20.64±0.12 ^a
	柠檬酸	87.3±0.29 ^a	10.08±0.42 ^{bc}	8.90±0.36 ^{bc}	9.35±0.19 ^{bc}	1.18±0.06 ^{ab}	0.45±0.17 ^c
	乙酸	84.2±0.38 ^a	11.35±0.86 ^b	10.58±0.43 ^b	12.02±0.73 ^b	0.77±0.44 ^b	1.44±0.30 ^b
	琥珀酸	85.7±0.76 ^a	5.47±0.18 ^c	3.75±0.07 ^c	5.27±0.10 ^c	1.72±0.09 ^a	1.52±0.04 ^b
	苹果酸	84.5±0.45 ^a	3.21±0.06 ^{cd}	2.38±0.09 ^{cd}	3.21±0.02 ^{cd}	0.83±0.03 ^{ab}	0.83±0.07 ^{bc}
淀粉：水＝ 1：3.5	乳酸	84.8±0.63 ^a	2.33±0.01 ^d	1.69±0.04 ^d	2.06±0.03 ^d	0.64±0.03 ^b	0.37±0.01 ^c

† 同列同一样品不同字母相同表示差异显著($P<0.05$)。

2.3 质构特性

淀粉凝胶是一个固—液双相系统,具有束缚液相的连续网状结构。理论上,淀粉溶胀度降低,其凝胶硬度增加^[11]。由表 1 可知,95 ℃时所有 HMT RS3 或 AH-HMT RS3 的溶胀度都比原淀粉的溶胀度要低很多($P<0.05$),意味着 RS3 凝胶的硬度会增加。由表 3 可知,所有 HMT RS3 和 AH-HMT RS3 凝胶均具有比原淀粉凝胶更大的硬度($P<0.05$),这与已有研究^[19]是一致的。但由于 AH-HMT RS3 凝胶的硬度为 73.82~85.41 g(淀粉:水=1:1)和 78.50~87.84 g(淀粉:水=1:3.5),比原淀粉凝胶的硬度仅提高了 16.33%~38.36%($0.01<P<0.05$),且所有淀粉凝胶的弹性和黏着性都很低且没有明显差别($P<0.05$),因此无论是原淀粉还是 HMT RS3 或 AH-HMT RS3,都只能形成不牢固的低强度凝胶。

2.4 热特性

土豆 AH-HMT RS3 的起始糊化温度(T_o)、峰值糊化温度(T_P)、终止糊化温度(T_c)和糊化焓(ΔH)见表 4。由表 4 可知,与高淀粉:水(1:1)比,低淀粉:水(1:3.5)所得 HMT RS3 和 AH-HMT RS3 的 T_o 、 T_P 、 T_c 和 ΔH 都稍有下降($P<0.05$)。但与原淀粉比,HMT RS3 或 AH-HMT RS3 的 T_o 、 T_P 、 T_c 和熔融范围(T_c-T_o)都明显增加($P<0.05$), ΔH 则显著减小($P<0.05$)。 T_o 、 T_P 、 T_c 和 T_c-T_o

增加表明熔融的晶体是经 HMT 或 AH-HMT 处理后淀粉颗粒分子或链段重新取向并重结晶而形成的。在淀粉颗粒内部,无定形区影响结晶区的熔融,而 HMT 能够降低这种失稳效应,致使糊化温度变得更高。这种在更高温度下出现更宽糊化温度范围的现象,在小麦淀粉、普通玉米淀粉和高直链玉米淀粉中也已观察到^[10,20]。另外, ΔH 值可用于表征在糊化过程中被拆散和溶解的双螺旋数量^[21]。HMT 能够增加结晶的完整性,但酸水解却能破坏淀粉晶体。AH-HMT RS3 的 ΔH 降低可能归因于酸水解,即在 AH-HMT 过程中存在于淀粉颗粒结晶区域和非结晶区域的一些双螺旋结构出现瓦解,无定形区域淀粉链的联结方式和晶体的有序程度都发生了改变^[22]。

3 结论

与土豆原淀粉相比,过量水条件下制得的 AH-HMT RS3 的持水力大幅增加,高温时溶胀度降低而溶解度显著升高,只能形成稳定的低黏度糊溶液和不稳定的低强度凝胶,糊化温度增高,糊化温度范围拓宽,且糊化焓大幅降低。因此,如果将其添加到食用油脂、奶油等食品体系中,不仅不会对原有食品体系的流变性质产生太大的影响,还可以增加膳食纤维含量,对控制加工食品的质量起到至关重要的作用。至于土豆 AH-HMT RS3 在食品中的具体应用效果及其相应的结构与功能之间的关系,尚需进一步研究。

表 3 酸水解—湿热处理土豆淀粉的质构特性
Table 3 Textural properties of AH-HMT potato RS3

有机酸	淀粉:水=1:1			淀粉:水=1:3.5		
	硬度/g	弹性/g	黏着性/g	硬度/g	弹性/g	黏着性/g
原淀粉	61.73±0.87 ^d	0.84±0.07 ^a	0.83±0.02 ^a	67.48±1.09 ^d	0.83±0.04 ^a	0.81±0.03 ^a
无酸	95.09±2.63 ^a	0.83±0.01 ^a	0.84±0.09 ^a	102.05±1.06 ^a	0.81±0.02 ^a	0.80±0.05 ^a
柠檬酸	73.82±1.57 ^c	0.79±0.02 ^a	0.82±0.03 ^a	78.50±1.18 ^c	0.75±0.04 ^a	0.77±0.02 ^a
乙酸	76.36±3.18 ^{bc}	0.77±0.04 ^a	0.78±0.06 ^a	80.67±2.03 ^c	0.79±0.01 ^a	0.76±0.05 ^a
琥珀酸	81.75±2.46 ^{bc}	0.79±0.03 ^a	0.76±0.07 ^a	83.90±3.27 ^b	0.76±0.06 ^a	0.78±0.03 ^a
苹果酸	83.59±1.97 ^{bc}	0.76±0.01 ^a	0.78±0.04 ^a	86.25±1.03 ^{ab}	0.78±0.05 ^a	0.77±0.01 ^a
乳酸	85.41±2.05 ^b	0.79±0.05 ^a	0.77±0.01 ^a	87.84±1.66 ^{ab}	0.75±0.04 ^a	0.79±0.02 ^a

† 同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

表 4 酸水解—湿热处理土豆淀粉的热特性
Table 4 Thermal properties of AH-HMT potato RS3

有机酸	淀粉:水=1:1				淀粉:水=1:3.5			
	$T_o/^\circ\text{C}$	$T_P/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$T_o/^\circ\text{C}$	$T_P/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$
原淀粉	70.8±0.53 ^d	81.2±0.8 ^c	94.1±1.7 ^d	64.4±0.5 ^a	70.8±0.5 ^c	81.2±0.8 ^c	94.1±1.7 ^c	64.4±0.5 ^a
无酸	76.6±0.37 ^{cd}	91.7±1.2 ^{bc}	107.9±0.8 ^c	50.3±1.0 ^b	73.9±0.4 ^{bc}	87.0±1.3 ^{bc}	104.5±2.7 ^{bc}	45.6±1.9 ^b
柠檬酸	88.4±0.64 ^c	97.0±1.8 ^{bc}	122.3±2.5 ^b	31.7±0.8 ^c	86.6±0.7 ^{bc}	101.2±1.6 ^b	117.8±2.0 ^{bc}	27.1±0.3 ^c
乙酸	86.3±0.71 ^{bc}	99.8±0.9 ^b	120.6±1.2 ^b	30.4±1.6 ^c	81.7±0.9 ^b	96.8±1.5 ^{ab}	115.6±2.6 ^b	25.8±1.4 ^{cd}
琥珀酸	86.1±0.54 ^b	101.2±1.3 ^{ab}	121.9±2.3 ^b	29.2±1.3 ^c	83.4±0.6 ^{ab}	100.7±0.6 ^a	120.5±1.5 ^{ab}	23.5±0.9 ^{cd}
苹果酸	87.4±0.48 ^{ab}	111.5±4.5 ^a	122.3±1.5 ^b	27.9±0.8 ^{cd}	84.2±0.6 ^a	106.0±1.3 ^a	121.9±2.7 ^{ab}	20.4±0.6 ^d
乳酸	86.9±0.53 ^a	110.8±1.4 ^a	131.4±2.9 ^a	25.3±0.4 ^d	84.3±0.3 ^a	103.3±1.2 ^a	125.7±1.4 ^a	19.8±1.7 ^d

† 同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

参考文献

[1] 黄志强,唐健,白永亮,等. 抗性淀粉及其防治肥胖症的研究进展[J]. 食品与机械, 2012, 28(4): 250-253.

[2] PONGJANTA J, UTAIPATTANACEEP A, NAIVIKUL O. Debranching enzyme concentration effected on physicochemical properties and α -amylase hydrolysis rate of resistant starch type III from amylose rice starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 78(1): 5-9.

[3] ASHWAR B A, GANI A W I A, SHAH A, et al. Production of resistant starch from rice by dual autoclaving-retrogradation treatment; Invitro digestibility, thermal and structural characterization[J]. Food Hydrocolloids, 2016(56): 108-117.

[4] EERLINGEN R C, CROMBEZ M, DELCOUR J A. Enzyme-resistant starch. I. Quantitative and qualitative influence of incubation time and temperature of autoclaved starch on resistant starch formation[J]. Cereal Chemistry, 1993, 70(3): 339-344.

[5] EERLINGEN R C, DECEUNINCK M, DELCOUR J A. Enzyme-resistant starch. II. Influence of amylose chain length on resistant starch formation [J]. Cereal Chemistry, 1993, 70(3): 345-350.

[6] WANG Ya-Jane, TRUONG V N, WANG Lin-feng. Structures and rheological properties of corn starch as affected by acid hydrolysis [J]. Carbohydrate Polymers, 2003, 52(3): 327-333.

[7] NAKAZAWA Y, WANG Ya-Jane. Acid hydrolysis of native and annealed starches and branch-structure of their Naegeli dextrins [J]. Carbohydrate Research, 2003, 338(24): 2 871-2 882.

[8] CHUNG H J, JEONG H Y, LIM S T. Effects of acid hydrolysis and defatting on crystallinity and pasting properties of freeze-thawed high amylose corn starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2003, 54(4): 449-455.

[9] GUNARATNE A, HOOVER R. Effect of heat-moisture on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches[J]. Carbohydrate Polymers, 2002, 49(4): 425-437.

[10] HOOVER R, MANUEL H. The effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of normal maize, waxy maize, dull waxy maize and amylomaize V starches[J]. Journal of Cereal Science, 1996, 23(2): 153-162.

[11] KIM W, SHIN M. Effects of organic acids and starch water ratios on the properties of retrograded maize starches[J]. Food Science and Biotechnology, 2011, 20(4): 1 013-1 019.

[12] 何健,王韧,张昊,等. 不同修饰程度对蜡质玉米淀粉理化性质和消化特性的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(1): 1-5.

[13] HORMDOK R, NOOMHORM A. Hydrothermal treatments of rice starch for improvement of rice noodle quality[J]. LWT - Food Science and Technology, 2007, 40(10):1 723-1 731.

[14] OLAYINKA O O, ADEBOWALE K O, OLU-OWOLABI B I. Effect of heat moisture treatment on physicochemical properties of white sorghum starch[J]. Food Hydrocolloids, 2008, 22(2): 225-230.

[15] JIRANUNTAKUL W, PUTTANLEK C, RUNGSARDT-HONG V, et al. Microstructural and physicochemical properties of heat-moisture treated waxy and normal starches[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 104(2): 246-258.

[16] HAN Xian-zhong, CAMPANELLA O H, MIX N C, et al. Consequence of starch damage on rheological properties of maize starch pastes[J]. Cereal Chemistry, 2002, 79(6): 897-901.

[17] COLLADO L S, MABESA L B, OATES C G, et al. Bihon-type noodles from heat-moisture treated sweet potato starch [J]. Journal of Food Science, 2001, 66(4): 604-609.

[18] WATCHARATEWINKUL Y, PUTTANLEK C, RUNGSARDTHONG V, et al. Pasting properties of a heat-moisture treated canna starch in relation to its structural characteristics [J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 75(3): 505-511.

[19] XING Jun-jie, LIU Yin, LI Dong, et al. Heat-moisture treatment and acid hydrolysis of corn starch in different sequences [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017(79): 11-20.

[20] VERMEYLEN R, GODERIS B, DELCOUR J A. An X-ray study of hydrothermal treated potato starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2006, 64(2): 364-375.

[21] LORETO A M, FRANCO P, ANGEL L, et al. Loss of birefringence and swelling behavior in native starch granules: Microstructural and thermal properties[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 152: 65-71.

[22] SUN Qing-jie, ZHU Xiao-lei, SI Fu-mei, et al. Effect of acid hydrolysis combined with heat moisture treatment on structure and physicochemical properties of corn starch[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(1): 375-382.

信息窗

欧盟食品安全局：三氯蔗糖无致癌风险

据外媒报道，意大利拉玛齐尼研究所 Morando Soffritti 发布研究指出，小白鼠实验发现，三氯蔗糖与癌症存在关联。

然而，欧盟食品安全局(EFSA)对此发布意见指出，意大利研究人员采用了非常规的实验设计，得出了不可靠的数据，三氯蔗糖与癌症并无关联。

欧盟食品安全局还指出，意大利的实验缺少行为模式，三氯蔗糖与癌症的因果关系不成立。

国际甜味剂协会对欧盟食品安全局的意见表示欢迎。

甜味剂协会 Robert Peterson 指出，欧盟食品安全局的意见与国际科学界以及监管机构的意见一致，那就是三氯蔗糖是安全的。

欧盟食品安全局最早于 1989 年开展了对三氯蔗糖安全性的风险评估。之后，在 2000 年欧盟食品安全局将其每日推荐摄入量定为 15 mg/kg·体重。

三氯蔗糖的甜度是蔗糖的 600 倍。在世界范围内，它被用于超过 4 500 种食品、饮料以及医疗产品。

(来源:www.foodmate.net)