

# 小红栲抗性淀粉的理化功能特性

## Physicochemical and functional properties of resistant starch from *Castanopsis carlesii*

谢 涛<sup>1</sup> 唐雅璐<sup>2</sup> 刘艳兰<sup>2</sup> 李晓文<sup>2</sup> 刘永乐<sup>2</sup> 易翠平<sup>2</sup>

XIE Tao<sup>1</sup> TANG Ya-lu<sup>2</sup> LIU Yan-lan<sup>2</sup> LI Xiao-wen<sup>2</sup> LIU Yong-le<sup>2</sup> YI Cui-ping<sup>2</sup>

(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食品工程学院, 湖南 长沙 410114)

(1. College of Chemical Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan, Hunan 411104, China;

2. School of Chemistry and Food Engineering, Changsha University of Science and Technology,  
Changsha, Hunan 410114, China)

**摘要:**以小红栲原淀粉(NS)为对照,研究了两种小红栲抗性淀粉(RS)的体外消化特性、结构特性、糊特性和益生特性。结果显示:与原淀粉对比,小红栲湿热处理抗性淀粉(HMT RS)与酸解—湿热处理抗性淀粉(AH-HMT RS)的RS含量显著增加,属于低血糖指数(pGI)食品配料。HMT RS与AH-HMT RS的晶体结构以B-型晶体占优且平均聚合度都降低,前者的微观结构呈规则片层结构,而后者则呈小片层散乱堆积结构。HMT RS和AH-HMT RS糊的峰值黏度、谷值黏度、冷却黏度、崩解值与回值均显著降低,特别是AH-HMT RS糊的峰值黏度、谷值黏度与冷却黏度均降至14 mPa·s以下,两者都只能形成低强度凝胶。HMT RS和AH-HMT RS的起始糊化温度、峰值糊化温度、终止糊化温度和糊化温度范围都显著增加,糊化焓则显著减少。以HMT RS或AH-HMT RS作为唯一碳源时,后者比前者对双歧杆菌、乳酸杆菌的增殖作用更强,丁酸产生也更多。

**关键词:**小红栲;抗性淀粉;体外消化;结构特性;糊特性;益生特性

**Abstract:** Using native starch (NS) of *Castanopsis carlesii* as the control, the properties of two kinds of resistant starch (RS) were studied, including in vitro digestible, structural, paste and probiotic. Results: Compared with *C. carlesii* NS, both HMT RS (RS sample made by heat-moisture treatment) and AH-HMT RS (RS sample made by a combination of acid hydrolysis and heat-moisture treatments) were the low glycemic index food additives,

their RS contents increased significantly. B-type crystal in either HMT RS or AH-HMT RS was dominated, and their average degree of polymerizations (DPs) reduced. As for microstructure, the former presented the rule layer structure, while the latter showed no rules of small layer structure. Whether HMT RS or AH-HMT RS paste can only form low strength gel because their hot viscosity (HV), low viscosity (LV), cold viscosity (CV), breakdown (BD) and setback (SB) decreased significantly, especially the HV, LV and CV value of AH-HMT RS dropped below 14 mPa·s. The onset gelatinization temperature ( $T_O$ ), peak gelatinization temperature ( $T_P$ ), concluding gelatinization temperature ( $T_C$ ) and gelatinization temperature range ( $T_C - T_O$ ) of HMT RS and AH-HMT RS increased markedly, but their gelatinization enthalpy ( $\Delta H$ ) observably reduced. When HMT RS or AH-HMT RS was used as the sole carbon source, the proliferation effects of the latter on bifidobacteria or *Lactobacillus* was stronger than that of the former, so did the butyric acid production.

**Keywords:** *Castanopsis carlesii*; resistant starch (RS); in vitro digestible; structural property; paste property; probiotic property

小红栲(*Castanopsis carlesii*)属壳斗科植物,中国江南各地广泛分布,其果实产量非常丰富<sup>[1-2]</sup>。小红栲种仁味甜可食,淀粉含量达60.5%<sup>[2]</sup>。关于小红栲原淀粉的颗粒结构、结晶特性、糊化特性、酶解特性及一些加工特性等已进行了较为系统全面的研究<sup>[1-4]</sup>。笔者<sup>[5-6]</sup>还对几种小红栲变性淀粉的结构、糊化与回生等特性进行了研究。湿热处理是变性淀粉加工中常见的物理改性方法之一,在中国越来越引起关注,研究内容涉及到湿热处理条件对淀粉结构与性质的影响,不同种类淀粉经湿热

**基金项目:**湖南省重点研发计划(编号:2018NK2104)

**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: yicp963@163.com

**收稿日期:**2019-07-03

处理后结构和性能的变化,以及湿热处理的潜在应用领域等许多方面。酸处理也是变性淀粉加工常用的辅助加工手段之一<sup>[3-4,7]</sup>。但小红栲淀粉作为一种新兴的淀粉资源,有关其湿热处理和酸处理制备抗性淀粉方面的研究尚未见诸报道。试验拟对小红栲原淀粉(NS)分别经湿热处理(HMT)、柠檬酸—湿热复合处理(AH-HMT)制得的抗性淀粉(RS)产品的体外消化特性、结构特性、糊特性及益生特性等进行研究,以期为进一步将小红栲淀粉开发成抗性淀粉产品的研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

1.1.1 材料与试剂

小红栲原淀粉(NS):淀粉含量 91.03%、湿含量 8.64%,实验室自制;  
培养基、酶制剂:参考文献[7]制备;  
培养基:上海源聚生物科技有限公司;  
 $\alpha$ -淀粉酶(15 000 U/g)、胰酶(20 000 U/g):美国 Sigma 公司;  
柠檬酸:食用级,上海源聚生物科技有限公司;  
其他试剂均为 AR 级。

1.1.2 主要仪器

高效阴离子交换色谱:ICS2500 型,美国 Dionex 公司;  
全自动 X 射线衍射仪:D/max2500 型,日本理学株式会社;  
扫描电子显微镜:S-3400N 型,日本日立公司;  
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 小红栲抗性淀粉的制备

参考 Kim 等<sup>[8]</sup>方法,稍做修改。称取小红栲原淀粉适量,加入 3.5 倍质量的水中制成淀粉乳液,不加或加入 0.5 g/100 g·淀粉的柠檬酸,将混匀乳液置于高压灭菌锅中 110 ℃加热 1 h,冷至室温,在 4 ℃储存 12 h,再次循环。将样品于 40 ℃烘干、粉碎,过 120 目筛,得 RS 样品;未加柠檬酸的称作湿热处理抗性淀粉(HMT RS),加柠檬酸的称作酸解—湿热处理抗性淀粉(AH-HMT RS)。

1.3 体外消化动力学特性测定

按文献[9]的方法进行,以完全糊化的冷冻干燥淀粉为对照。计算得到快速消化淀粉(RDS)、缓慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉含量,以及消化动力学参数水解速率常数( $k$ )、相对消化率( $D_r$ )和血糖指数(pGI)。

1.4 理化特性测定

1.4.1 平均聚合度(DP) 参考文献[8]。  
1.4.2 晶体结构 参考文献[5]。  
1.4.3 微观结构 参考文献[5]。  
1.4.4 黏度特性 参考文献[6]。  
1.4.5 质构性质 使用 TA-XT Plus 质构分析仪测定。设定发生 50%的形变,形变速率 1.5 mm/s。  
1.4.6 热特性 参考文献[6]。

1.5 益生特性测定

参考文献[7]。

1.6 数据处理方法

全部数据均取 3 个平行的试验均值,并运用 SPSS 20.0 分析不同因素对试验结果影响的显著性。

2 结果与分析

2.1 小红栲抗性淀粉体外消化动力学的研究

如表 1 所示,小红栲 NS 分别经湿热处理、酸解—湿热复合处理后,RDS、SDS、RS 含量及体外消化动力学参数与 pGI 值均发生了显著变化。与 NS 比,HMT RS 中 RDS 减少 66.63%、SDS 增加 2.18 倍、RS 增加 3.62 倍,AH-HMT RS 中 RDS 减少 96.12%、SDS 增加 1.56 倍、RS 增加 6.76 倍,而 AH-HMT RS 较之 HMT RS 中功能性成分 SDS、RS 的总含量又增加了 32.93%。由此表明,湿热处理有利于 SDS、RS 的形成,而辅以酸水解更进一步促进了其形成。从表 1 还可知,HMT RS 与 AH-HMT RS 较之原淀粉的 pGI 值分别降低了 31.43 和 41.75。而依据 pGI 值不同可将食物分为低 pGI(<55)、中 pGI 和高 pGI(>75)3 类<sup>[10-12]</sup>。因此,小红栲原淀粉属高 pGI 食物,而小红栲 HMT RS 与 AH-HMT RS 属低 pGI 食物,适合于糖尿病、肥胖症类病人食用。

2.2 小红栲 RS 的结构特性

湿热处理和酸解—湿热复合变性小红栲 RS 的 DP 见表 1。与小红栲原淀粉比,HMT RS 与 AH-HMT RS

表 1 小红栲 RS 的体外消化与血糖指数<sup>†</sup>  
Table 1 In-vitro digestibility and glycemic index of *C. carlesii* RS

| 样品        | RDS/%                   | SDS/%                   | RS/%                    | $k/\text{min}^{-1}$     | $D_r/\%$                | pGI                     |
|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| NS        | 81.37±0.54 <sup>a</sup> | 9.18±0.21 <sup>b</sup>  | 9.45±0.36 <sup>c</sup>  | 24.53±1.06 <sup>a</sup> | 79.33±0.47 <sup>a</sup> | 76.58±1.32 <sup>a</sup> |
| HMT RS    | 27.15±0.42 <sup>b</sup> | 29.15±1.07 <sup>a</sup> | 43.70±2.10 <sup>b</sup> | 2.63±0.73 <sup>b</sup>  | 42.87±0.37 <sup>b</sup> | 45.15±1.10 <sup>b</sup> |
| AH-HMT RS | 3.16±0.57 <sup>c</sup>  | 23.50±1.12 <sup>a</sup> | 73.34±1.90 <sup>a</sup> | 1.99±0.24 <sup>c</sup>  | 30.90±1.35 <sup>c</sup> | 34.83±1.09 <sup>c</sup> |

<sup>†</sup> 字母不同表示差别显著(P<0.05)。

的 DP 都明显下降,而且酸解引起 RS 的 DP 降低更为显著,说明柠檬酸与湿热复合处理对小红栲淀粉中的直链淀粉、支链淀粉发生了不同程度的降解作用,产生更多的低分子质量水解产物。图 1 是小红栲 RS 的 X-衍射图谱,各样品的晶体结构或多或少都是 A-、B-与 V-型晶体的混合体,小红栲 NS 以 A-型晶体占优,HMT RS 与 AH-HMT RS 则 B-型晶体占优。由表 2 可知,HMT RS 与 NS 的总结晶度基本相等,但 AH-HMT RS 的总结晶度则较 NS 有显著的提高。

由图 2 可知,小红栲 NS 的颗粒完整、表面光滑,经湿热处理后,完全糊化的淀粉分子在冷却冷藏过程发生重组并堆积形成 HMTRS 的规则片层结构,但若有柠檬酸

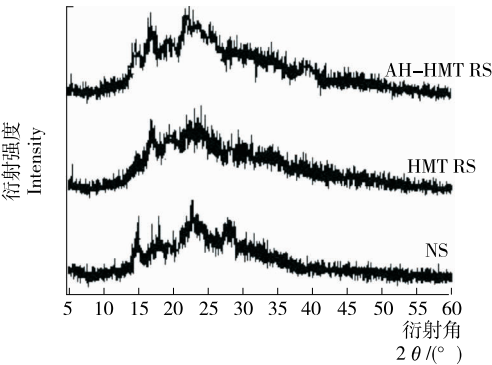


图 1 小红栲 RS 的 X-射线衍射图谱

Figure 1 X-ray diffractions of *C. carlesi* starches RS

表 2 小红栲 RS 的平均聚合度、晶型及相对结晶度<sup>†</sup>

Table 2 Average degree of polymerization, crystal types and its relative crystallinities of *C. carlesi* RS

| 样品        | DP                     | A-型晶体/%                 | B-型晶体/%                 | V-型晶体/%                | 总结晶度/%                  |
|-----------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| NS        | 238.4±6.3 <sup>a</sup> | 16.28±1.02 <sup>a</sup> | 6.91±0.29 <sup>c</sup>  | 1.67±0.18 <sup>c</sup> | 24.86±1.27 <sup>b</sup> |
| HMT RS    | 103.5±3.7 <sup>b</sup> | 6.57±0.56 <sup>b</sup>  | 12.93±0.75 <sup>b</sup> | 3.89±0.32 <sup>b</sup> | 23.39±0.86 <sup>b</sup> |
| AH-HMT RS | 45.9±1.8 <sup>c</sup>  | 7.52±0.31 <sup>b</sup>  | 19.36±1.13 <sup>a</sup> | 5.54±0.43 <sup>a</sup> | 32.42±0.55 <sup>a</sup> |

<sup>†</sup> 字母不同表示差别显著(P<0.05)。

参与湿热处理过程,则形成 AH-HMT RS 的小片层散乱堆积结构。

2.3 小红栲 RS 的糊特性

与小红栲 NS 糊相比,HMT RS 和 AH-HMT RS 糊

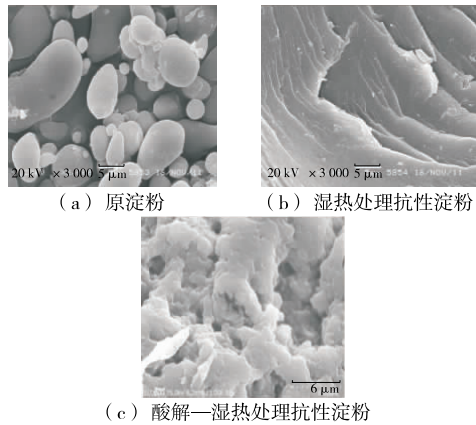


图 2 小红栲 RS 的扫描电镜照片

Figure 2 Scanning electron microphotographs of *C. carlesi* RS (×3 000)

的峰值黏度(HV)、谷值黏度(LV)和冷却黏度(CV)均显著降低,特别是 AH-HMT RS 糊的 HV、LV 与 CV 值均降至 14 mPa·s 以下(表 3),说明湿热处理有利于降低淀粉的黏度,而酸水解的协同作用则加剧其黏度的降低。AH-HMT RS 在加热过程中表现出很低的黏度,一方面是由于其在高温下易于溶解<sup>[13]</sup>;另一方面,也可能是长支链淀粉受到酸的作用而使糖苷键被大量切断,显著降低了淀粉糊的黏度,严重时水解成小分子糊精而增加淀粉糊的溶解度<sup>[14]</sup>。较之小红栲 NS 糊,小红栲 HMT RS 与 AH-HMT RS 糊的回值(SB)、崩解值(BD)都显著降低(表 3),说明淀粉颗粒内部分子链的重排增强了它们对剪切和加热的抗性,也就是说小红栲 RS 糊正是因为持续的剪切和加热而变得更为稳定<sup>[15]</sup>。

从表 4 可知,小红栲 HMT RS 和 AH-HMT RS 凝胶的硬度(HD)都比 NS 凝胶的 HD 值大,与已有的研究结果<sup>[16]</sup>相吻合。但由于 AH-HMT RS 凝胶的 HD 值仅比 NS 凝胶的 HD 值提高了 16.33%,加之 3 种小红栲淀粉凝胶的弹性(SP)和黏着性(AD)均很小且几无差别,因此

表 3 小红栲 RS 的黏度特性<sup>†</sup>

Table 3 Pasting properties of *C. carlesi* RS

mPa·s

| 样品        | 峰值黏度                     | 谷值黏度                     | 冷却黏度                     | 崩解值                     | 回值                      |
|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| NS        | 269.37±2.14 <sup>a</sup> | 183.91±3.12 <sup>a</sup> | 273.16±4.33 <sup>a</sup> | 85.46±1.95 <sup>a</sup> | 89.25±0.96 <sup>a</sup> |
| HMT RS    | 54.93±1.83 <sup>b</sup>  | 50.74±1.71 <sup>b</sup>  | 74.46±2.05 <sup>b</sup>  | 4.19±0.33 <sup>b</sup>  | 23.72±1.08 <sup>b</sup> |
| AH-HMT RS | 13.60±0.92 <sup>c</sup>  | 10.38±0.64 <sup>c</sup>  | 12.55±1.03 <sup>c</sup>  | 3.22±0.19 <sup>b</sup>  | 2.17±0.14 <sup>c</sup>  |

<sup>†</sup> 字母不同表示差别显著(P<0.05)。

表 4 小红栲 RS 的质构特性<sup>†</sup>  
Table 4 Textural properties of *C. carlesi* RS

| 样品        | 硬度/g                     | 弹性/g                   | 黏着性/g                  |
|-----------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| NS        | 69.83±1.35 <sup>c</sup>  | 3.18±0.09 <sup>a</sup> | 3.67±0.10 <sup>a</sup> |
| HMT RS    | 104.40±2.37 <sup>a</sup> | 2.94±0.07 <sup>a</sup> | 3.39±0.08 <sup>a</sup> |
| AH-HMT RS | 80.85±1.43 <sup>b</sup>  | 2.46±0.03 <sup>a</sup> | 3.14±0.06 <sup>a</sup> |

<sup>†</sup> 字母不同表示差别显著(P<0.05)。

小红栲 NS、HMT RS 或 AH-HMT RS 都只能形成低强度的不牢固凝胶。

小红栲 NS、HMT RS 和 AH-HMT RS 的起始糊化温度( $T_o$ )、峰值糊化温度( $T_p$ )、终止糊化温度( $T_c$ )和熔融范围( $T_c - T_o$ )都相应地显著增加,而  $\Delta H$  明显降低(表 5)。 $T_o$ 、 $T_p$ 、 $T_c$ 和  $T_c - T_o$ 的增加正好说明了熔融晶体是经 HMT 或 AH-HMT 处理后淀粉颗粒内部的分子链重排并重结晶而成。而且,HMT 能够降低淀粉颗粒内部无定形区对结晶区熔融的影响程度,从而增高其糊化温度,这种现象在普通玉米淀粉和小麦淀粉中也有<sup>[17]</sup>。此外, $\Delta H$  值也可反映出在糊化过程中被拆散和溶解的

双螺旋数量<sup>[18]</sup>, $\Delta H$  值越高,被拆散和溶解的双螺旋数量就越多。

2.4 小红栲 RS 的益生特性

由表 6、7 可知,小红栲 HMT RS 和 AH-HMT RS 对双歧杆菌与乳酸杆菌的增殖作用在发酵至第 24 h 时达到最大;与空白对照相比,HMT RS 对双歧杆菌与乳酸杆菌均有显著增殖作用,而 AH-HMT RS 的增殖作用尤其明显,且样品中 RS 含量越大这种增殖作用越强(表 1),这些结果与前人<sup>[19]</sup>的研究一致。由于大多数双歧杆菌与乳酸杆菌不产淀粉水解酶类,故而不能分解利用淀粉,导致 NS 对两者的增殖作用较之空白对照没有显著变化(表 6)。然而,到目前为止尚未弄清楚 RS 的未消化部分是怎样促进肠道菌群增殖生长的<sup>[10]</sup>。

RS 主要的末端代谢产物是短链脂肪酸(SCFAs)。表 7 为大便接种物分批发酵过程中乙酸与丁酸的变化。以小红栲 NS 作为唯一碳源与空白对照一样,整个发酵过程中产酸一直维持在低水平;但以 HMT RS 或 AH-HMT RS 做唯一碳源时,如果增加样品中 RS 的含量(表 1),不但产酸能力明显提高,而且发酵前期(0→12 h)

表 5 小红栲 RS 的热特性<sup>†</sup>  
Table 5 Thermal properties of *C. carlesi* RS

| 样品        | 起始糊化温度/℃              | 峰值糊化温度/℃               | 终止糊化温度/℃               | 熔融温度范围/℃              | 糊化焓/(J·g <sup>-1</sup> ) |
|-----------|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|
| NS        | 66.3±1.0 <sup>c</sup> | 74.2±1.8 <sup>c</sup>  | 97.6±2.1 <sup>c</sup>  | 31.3±1.2 <sup>c</sup> | 67.9±1.3 <sup>a</sup>    |
| HMT RS    | 75.7±1.5 <sup>b</sup> | 87.0±1.3 <sup>b</sup>  | 113.5±3.8 <sup>b</sup> | 37.8±0.9 <sup>b</sup> | 48.3±1.1 <sup>b</sup>    |
| AH-HMT RS | 86.3±2.0 <sup>a</sup> | 104.8±3.5 <sup>a</sup> | 130.7±4.0 <sup>a</sup> | 44.4±2.0 <sup>a</sup> | 29.7±0.8 <sup>c</sup>    |

<sup>†</sup> 字母不同表示差别显著(P<0.05)。

表 6 大便培养物分批发酵过程中双歧杆菌计数变化<sup>†</sup>  
Table 6 Changes in bifidobacteria counts during fecal batch fermentations lg(CFU/mL)

| 样品        | 双歧杆菌                    |                         |                         | 乳酸杆菌                    |                         |                        |
|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
|           | 12 h                    | 24 h                    | 36 h                    | 12 h                    | 24 h                    | 36 h                   |
| 空白        | 7.19±0.38 <sup>c</sup>  | 7.23±0.11 <sup>c</sup>  | 6.72±0.35 <sup>d</sup>  | 4.08±0.08 <sup>c</sup>  | 4.14±0.06 <sup>c</sup>  | 3.93±0.09 <sup>d</sup> |
| NS        | 7.40±0.57 <sup>bc</sup> | 7.89±0.25 <sup>bc</sup> | 7.49±0.19 <sup>c</sup>  | 4.12±0.05 <sup>bc</sup> | 4.87±0.12 <sup>bc</sup> | 4.39±0.10 <sup>c</sup> |
| HMT RS    | 8.91±0.48 <sup>b</sup>  | 9.65±0.44 <sup>b</sup>  | 9.37±0.46 <sup>b</sup>  | 5.03±0.13 <sup>b</sup>  | 5.95±0.36 <sup>b</sup>  | 5.57±0.38 <sup>b</sup> |
| AH-HMT RS | 9.63±0.93 <sup>a</sup>  | 11.89±0.39 <sup>a</sup> | 11.15±0.62 <sup>a</sup> | 5.66±0.35 <sup>a</sup>  | 6.92±0.37 <sup>a</sup>  | 6.38±0.64 <sup>a</sup> |

<sup>†</sup> 字母不同表示差别显著(P<0.05)。

表 7 大便培养物分批发酵过程中乙酸与丁酸的变化<sup>†</sup>  
Table 7 Changes in acetic acid and butyric acid during fecal batch fermentations mmol/L

| 样品        | 乙酸                       |                          |                          | 丁酸                      |                         |                         |
|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|           | 12 h                     | 24 h                     | 36 h                     | 12 h                    | 24 h                    | 36 h                    |
| 空白        | 18.56±0.94 <sup>c</sup>  | 14.15±0.47 <sup>c</sup>  | 12.69±1.03 <sup>c</sup>  | 1.26±0.09 <sup>c</sup>  | 1.87±0.04 <sup>c</sup>  | 3.63±0.07 <sup>c</sup>  |
| NS        | 20.40±0.77 <sup>bc</sup> | 18.51±0.59 <sup>bc</sup> | 16.09±0.94 <sup>bc</sup> | 1.81±0.10 <sup>bc</sup> | 2.46±0.09 <sup>bc</sup> | 4.42±0.12 <sup>bc</sup> |
| HMT RS    | 51.63±0.85 <sup>b</sup>  | 47.36±0.72 <sup>a</sup>  | 30.47±1.03 <sup>a</sup>  | 5.91±0.15 <sup>b</sup>  | 18.97±0.42 <sup>b</sup> | 31.96±0.73 <sup>b</sup> |
| AH-HMT RS | 83.13±1.59 <sup>a</sup>  | 25.08±0.83 <sup>b</sup>  | 14.32±0.45 <sup>b</sup>  | 12.34±0.08 <sup>a</sup> | 40.79±1.06 <sup>a</sup> | 56.09±1.15 <sup>a</sup> |

<sup>†</sup> 字母不同表示差别显著(P<0.05)。

显著积累的乙酸将(24→36 h)大大减少,同时伴有后期丁酸的积累显著增加。这与前人<sup>[20]</sup>的研究是一致的。

### 3 结论

与小红栲原淀粉相比,湿热处理与酸解—湿热复合处理后的小红栲变性淀粉,在结构特性、糊特性和热力学特性等都发生了较大的变化,特别是湿热处理促进了SDS、RS的形成,而酸解—湿热复合处理更加剧了RDS向RS的转化。小红栲HMT RS或AH-HMT RS对双歧杆菌、乳酸杆菌有明显的增殖作用,但AH-HMT RS比HMT RS的增殖作用更强。初步说明小红栲淀粉可以用作制备抗性淀粉的新原料,关于小红栲HMT RS或AH-HMT RS的益生作用,将进一步采用动物喂饲试验进行详细的研究。

### 参考文献

- [1] 谢涛, 谢碧霞. 小红栲淀粉糊特性的研究[J]. 食品工业科技, 2002, 23(11): 43-46.
- [2] 谢涛, 谢碧霞. 小红栲淀粉颗粒特性的研究[J]. 食品科学, 2003, 23(1): 23-26.
- [3] 钟秋平, 谢碧霞, 李清平, 等. 高压处理对橡实淀粉黏度特性影响的研究[J]. 中国粮油学报, 2008, 23(3): 31-35.
- [4] 钟秋平, 谢碧霞, 王森, 等. 高压处理对橡实淀粉晶体特性的影响规律[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 45-48.
- [5] 谢涛, 王焕龙, 张儒, 等. 几种小红栲变性淀粉的结构特性[J]. 林业科学, 2011, 47(9): 185-188.
- [6] 谢涛, 张儒, 王焕龙, 等. 几种小红栲变性淀粉的糊化与回生特性[J]. 食品工业科技, 2011, 32(8): 77-80.
- [7] 谢涛, 张淑远. 重结晶红薯淀粉体外消化前后益生作用与结构变化[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 203-208.
- [8] KIM W, SHIN M. Effects of organic acids and starch water ratios on the properties of retrograded maize starches[J]. Food Sci Biotechnol, 2011, 20(4): 1 013-1 019.
- [9] MUTUNGI C, ONYANGO C, ROST F, et al. Structural and physicochemical properties and in vitro digestibility of recrystallized linear  $\alpha$ -D-(1→4) glucans derived from mild-acid modified cassava starch[J]. Food Research International, 2010, 43(4): 1 144-1 154.
- [10] BAE C H, PARK M S, JI G E, et al. Effects of phosphorylated cross-linked resistant corn starch on the intestinal microflora and short chain fatty acid forming during in vitro human fecal batch culture[J]. Food Sci Biotechnol, 2013, 22(6): 1 649-1 654.
- [11] ZHANG Gen-yi, HAMAKER B R. Slowly digestible starch: Concept, mechanism, and proposed extended glycaemic index[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2009, 49(10): 73-85.
- [12] 谢涛, 曾红华, 汪婕, 等. 4种抗性淀粉的主要理化特性[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(9): 78-84.
- [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] HAN Xian-zhong, CAMPANELLA O H, MIX N C, et al. Consequence of starch damage on rheological properties of maize starch pastes[J]. Cereal Chem, 2002, 79(3): 897-901.
- [15] COLLADO L S, MABESA L B, OATES C G, et al. Bihon-type noodles from heat-moisture treated sweet potato starch[J]. J Food Sci, 2001, 66(2): 604-609.
- [16] WATCHARATEWINKUL Y, PUTTANLEK C, RUNG-SARDTHONG V, et al. Pasting properties of a heat-moisture treated canna starch in relation to its structural characteristics[J]. Carbohydr Polym, 2009, 75(2): 505-511.
- [17] KIM R E, AHN S Y. Gelling properties of acid-modified red bean starch gels[J]. Agric Chem Biotechnol, 1996, 39(1): 49-53.
- [18] HIGGINS J A, BROWN I L. Resistant starch: A promising dietary agent for the prevention/treatment of inflammatory bowel disease and bowel cancer[J]. Curr Opin Gastroenterol, 2013, 29(1): 190-194.
- [19] WANG Xia, BROWN I L, KHALED D, et al. Manipulation of colonic bacteria and volatile fatty acid production by dietary high amylose maize (amylomaize) starch granules[J]. J Appl Microbiol, 2002, 93(2): 390-397.
- [20] LEE C J, KIM Y. Slowly digestible starch from heat-moisture treated waxy potato starch: Preparation, structural characteristics, and glucose response in mice [J]. Food Chemistry, 2012, 133(4): 1 222-1 229.
- (上接第16页)
- [43] GAO Yun-feng, ZHANG Meng-na, WANG Tian-xin, et al. Hypoglycemic effect of D-chiro-inositol in type 2 diabetes mellitus rats through the PI3K/Akt signaling pathway[J]. Molecular and Cellular Endocrinology, 2016, 433: 26-34.
- [44] LIU Ya-long, DONG Man, YANG Zi-yu, et al. Anti-diabetic effect of citrus pectin in diabetic rats and potential mechanism via PI3K/Akt signaling pathway[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 89: 484-488.
- [45] YIN Wen-bin, LI Bao-ying, LI Xiao-li, et al. Anti-inflammatory effects of grape seed procyanidin B2 on a diabetic pancreas[J]. Food & Function, 2015, 6(9): 3 065-3 071.
- [46] COSTABILE L B G A, VETRANI C, VITALE M, et al. Polyphenol-rich diets improve glucose metabolism in people at high cardiometabolic risk a controlled randomised intervention trial[J]. Diabetologia, 2015, 58(7): 1 551-1 560.
- [47] PAQUETTE M, LARQUÉ A S M, WEISNAGEL S J, et al. Strawberry and cranberry polyphenols improve insulin sensitivity in insulin-resistant, non-diabetic adults: A parallel, double-blind, controlled and randomised clinical trial[J]. British Journal of Nutrition, 2017, 117(4): 519-531.