

有机酸—湿热复合处理土豆抗性淀粉的结构特性

Structural Properties of Potato Resistant Starches Modified by a Combination of Organic Acid and Heat-moisture Treatments

周 慧¹ 谢 涛² 蒋朝晖¹ 易翠平¹

ZHOU Hui¹ XIE Tao² JIANG Zhao-hui¹ YI Cui-ping¹

(1. 长沙理工大学化学与生物工程学院, 湖南 长沙 410015; 2. 湖南工程学院化学化工学院, 湖南 湘潭 411104)

(1. College of Chemistry and Biology Science, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410015, China; 2. College of Chemical Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan, Hunan 411104, China)

摘要:通过改变淀粉浆浓度、酸的种类及浓度,经酸水解—湿热复合处理(AH-HMT)制备土豆抗性淀粉(AH-HMT RS3),并研究了其结构特性的变化。结果表明:土豆淀粉经AH-HMT后,除其X-射线衍射图谱仍维持无酸湿热处理抗性淀粉(HMT RS3)的B-型不变外,其平均聚合度(DP)、比表面积(SSA)、微观形貌(MS)及相对结晶度(RC)都发生了或大或小的变化,高浓度酸比低浓度酸引起变性淀粉的平均聚合度与比表面积的降低,以及相对结晶度的增加更显著,但其表面微观结构的变化则要复杂得多。5种酸对土豆抗性淀粉结构的影响从大到小依次为柠檬酸、乙酸、琥珀酸、苹果酸和乳酸。

关键词:土豆抗性淀粉;有机酸—湿热复合处理;结构特性

Abstract: Resistant starches from potato (RS3) were modified by acid hydrolysis combined with heat-moisture treatment (AH-HMT). The effects of changing the starch slurry concentration, the type of acid and its concentration on the structure of RS3 were also studied. The results showed that after AH-HMT, the X-ray pattern remained practically the same with only small changes in the average degree of polymerization (DP), specific surface area (SSA), microstructure (MS), and relative crystallinity (RC). Compared with untreated RS3, the decrease in DP and SSA and the increase in RC caused by high concentrations of acid were significantly greater than those caused by low concentrations of acid. However, the changes in the surface microstructure of RS3 were much more complex. The influence of the five types of organic acid studied on the structural properties of RS3 varied from strong for citric acid, followed by acetic acid,

succinic acid, malic acid to weak for lactic acid.

Keywords: potato resistant starches; combination of organic acid and heat-moisture treatments; structural properties

淀粉被广泛应用于食品工业,既可作为主要原材料,也可作为食品添加剂。作为添加剂,淀粉在食品中可起增稠和稳定作用,也可改善食品的质构特征^[1]。但是,原淀粉在工业上用途有限。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。支链淀粉的短链簇(DP=15~17)构成淀粉结晶部分,酸水解优先发生在晶间区域,产生线性或轻度分支的短片段分子^[2]。酸改性也能增加淀粉的溶解性和凝胶强度,降低淀粉的黏度^[3];酸水解还影响淀粉的黏弹性^[4]。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^[5-7]。利用湿热、剪切或射线等物理方法制得的改性淀粉,其可接受度更为广泛,因为生产过程中没有使用化学试剂^[8]。淀粉的湿热处理是指在一定的温度范围(84~120℃)、一定的时间区段(15 min~16 h)内,在低湿含量水平(<35 g/100 g)下对淀粉颗粒进行处理的一种物理变性方法^[9]。目前,已对玉米、小麦等多种淀粉进行过湿热处理制备改性淀粉的研究^[10-11]。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。

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^[12],但酸水解结合湿热处理(AH-HMT)应用于土豆淀粉改性尚未见于报道。本试验拟阐明5种有机酸(柠檬酸、乙酸、琥珀酸、苹果酸和乳酸)—湿热复合处理对土豆淀粉结构特性的影响,为拓宽土豆淀粉的应用领域提供科学指导。

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:周慧,女,长沙理工大学讲师,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:2017-02-05

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

土豆淀粉:四川友嘉食品有限公司;

柠檬酸、苹果酸、乙酸、琥珀酸和乳酸:食用级,国药集团化学试剂有限公司;

其他试剂均为分析纯;

电子分析天平:AVY120型,北京赛多利斯天平有限公司;

高压灭菌锅:YXQ-SG46-280S型,西北仪(北京)科技有限公司;

激光粒度分析仪:Mastersizer 2000型,杭州科晓化工仪器设备有限公司;

电子显微镜:S-3400N型,日本日立公司;

全自动X射线衍射仪:D/max2500型,北京理化赛思科技有限公司。

1.2 土豆抗性淀粉 AH-HMT RS3 的制备

参照 Kim 等^[13]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、苹果酸、乙酸、琥珀酸、乳酸 5 种有机酸(0.25% 和 0.50%),混合均匀,将混合淀粉乳液置于高压灭菌锅中 110 °C 加热 1 h。冷却至室温,储存在 4 °C 的环境中 12 h,再次循环,将产品置于 40 °C 干燥箱烘干,粉碎,过 120 目筛,即得土豆 AH-HMT RS3。

1.3 平均聚合度测定

参照文献^[14]。

1.4 粒度分布测定

采用激光粒度分析仪(UK),参照文献^[15]的方法,并略做改动。称取淀粉样品 500 mg 分散在 10 mL 的蒸馏水中,并通过 175 mm 的筛网,不加任何外力(除去较大的团块),收集的液体悬浮液涡旋混合 5 s,以进一步分开附聚颗粒。样品分散液加到水的循环液中,直到 15%~20% 都被记录下来,循环液用 20 kHz 超声波处理 30 s,除去大团块及附聚物,测定比表面积与粒径 $d(0.9)$ 。

1.5 微观结构测定

将干燥样品用导电胶黏在样品座上,并置于离子溅射仪中,在样品表面蒸镀一层铂金膜后,再在 S-3400N 型扫描电子显微镜下进行观察与拍照。

1.6 结晶结构测定

采用连续扫描法,D/max2500 型全自动 X 射线衍射仪测定条件:扫描速率 12°/min,扫描范围 5°~60°,步长 0.04,管压 40 kV,管流 30 mA。软件 Jade 6.5 计算样品的结晶度。

1.7 数据处理

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 平均聚合度

在酸-湿热复合处理淀粉过程中,直链淀粉与支链淀粉分子都会发生断裂,而且酸对 α -1,4-糖苷键和 α -1,6-糖苷键

没有选择性,因此支链淀粉发生的变化更为复杂多变。无酸和有酸-湿热复合变性土豆 RS3 的平均聚合度(DPs)见表 1。在无酸加入时,淀粉浓度对湿热处理淀粉的平均聚合度影响不大。与无酸参与变性处理相比,无论淀粉乳浓度高或低,5 种有机酸对土豆 AH-HMT RS3 的平均聚合度都产生了或大或小的影响,而且高酸浓度比低酸浓度引起变性淀粉的平均聚合度降低更显著。说明有机酸与湿热复合处理对土豆淀粉中的直链淀粉、支链淀粉发生了不同程度的降解作用,降解产物既包含来自支链淀粉分子的直链和支链,也有来自直链淀粉分子的直链^[16]。但是,当有机酸浓度不变时,淀粉乳浓度高低对变性淀粉平均聚合的影响则有所不同。如柠檬酸或乙酸参与变性处理时,低浓度淀粉乳对土豆 RS3 的平均聚合度影响更大,而苹果酸、琥珀酸或乳酸参与复合变性时,结果正好与前两者相反。总体上,这 5 种有机酸中,以柠檬酸的影响最大,经它处理后的土豆淀粉分子链要更短些,其后依次为乙酸、琥珀酸、苹果酸和乳酸,它们对淀粉分子链的断裂作用可能与其酸性强度、羧基数以及其它基团的存在等有关。

表 1 无酸和有酸-湿热处理土豆 RS3 的平均聚合度
Table 1 Average degree of polymerization of potato RS3 without and with acid and heat-moisture treatments

| 有机酸 | 浓度/% | $m_{\text{淀粉}}:m_{\text{水}}=1:1$ | $m_{\text{淀粉}}:m_{\text{水}}=1:3.5$ |
|-----|------|----------------------------------|------------------------------------|
| 无酸 | 0.00 | 108±4 | 105±3 |
| 柠檬酸 | 0.25 | 59±2 | 47±1 |
| | 0.50 | 45±3 | 40±3 |
| 苹果酸 | 0.25 | 65±1 | 88±6 |
| | 0.50 | 54±1 | 67±2 |
| 琥珀酸 | 0.25 | 62±4 | 70±1 |
| | 0.50 | 50±3 | 62±2 |
| 乳酸 | 0.25 | 75±6 | 96±5 |
| | 0.50 | 66±2 | 80±3 |
| 乙酸 | 0.25 | 61±5 | 56±1 |
| | 0.50 | 52±1 | 45±2 |

2.2 粒度分布

无酸和有酸-湿热复合变性土豆 RS3 的粒度分布规律与其平均聚合度的变化规律非常一致,见表 2。在无酸加入时,淀粉浓度对湿热处理淀粉的比表面积与 $d(0.9)$ 的影响不大($P>0.05$)。与无酸处理相比,无论淀粉乳浓度高低,高酸浓度比低酸浓度引起变性淀粉比表面积的降低、 $d(0.9)$ 的增加更明显($P<0.01$)。这是由于酸对淀粉的断裂作用越大,产生的短链分子越多,在低温处理过程中,短链分子更易取向发生重组或重排,从而聚集形成更大的颗粒。

2.3 微观结构

文献^[17]报道,经湿热法制备的土豆 RS3 较之原淀粉发生了显著改变,颗粒状结构消失,取而代之的为不规则呈片层状堆积结构。土豆淀粉经酸-湿热复合处理制得的 RS3 的扫描电镜照片见图 1。除柠檬酸 0.50% 与乙酸 0.25%

表 2 无酸和有酸-湿热处理土豆 RS3 的比表面积与 $d(0.9)$ Table 2 Specific surface area and $d(0.9)$ of potato RS3 without and with acid and heat-moisture treatments

| 有机酸 | 浓度/% | $m_{\text{淀粉}} : m_{\text{水}} = 1 : 1$ | | $m_{\text{淀粉}} : m_{\text{水}} = 1 : 3.5$ | |
|-----|------|---|----------------------|---|----------------------|
| | | 比表面积/ ($10^{-2} \text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) | $d(0.9)/\mu\text{m}$ | 比表面积/ ($10^{-2} \text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) | $d(0.9)/\mu\text{m}$ |
| 无酸 | 0.00 | 15.73±1.12 | 276.28±3.20 | 16.34±0.92 | 273.02±1.09 |
| 柠檬酸 | 0.25 | 4.13±0.26 | 494.65±1.85 | 3.85±0.13 | 513.00±3.00 |
| | 0.50 | 3.75±0.09 | 515.33±2.07 | 3.49±0.20 | 532.61±1.83 |
| 苹果酸 | 0.25 | 7.12±0.11 | 384.04±0.43 | 8.90±0.35 | 308.59±0.76 |
| | 0.50 | 5.69±0.07 | 436.30±0.95 | 6.86±0.27 | 395.34±0.58 |
| 琥珀酸 | 0.25 | 5.85±0.21 | 413.87±2.13 | 7.17±0.36 | 383.41±0.12 |
| | 0.50 | 4.37±0.16 | 466.59±0.87 | 6.22±0.05 | 406.06±0.87 |
| 乳酸 | 0.25 | 9.06±0.20 | 307.34±0.54 | 11.76±0.20 | 292.33±0.90 |
| | 0.50 | 5.39±0.06 | 457.16±1.96 | 7.98±0.06 | 348.55±2.47 |
| 乙酸 | 0.25 | 5.17±0.10 | 461.39±3.01 | 4.65±0.03 | 452.02±1.06 |
| | 0.50 | 4.28±0.03 | 487.18±2.38 | 3.66±0.02 | 519.88±2.03 |

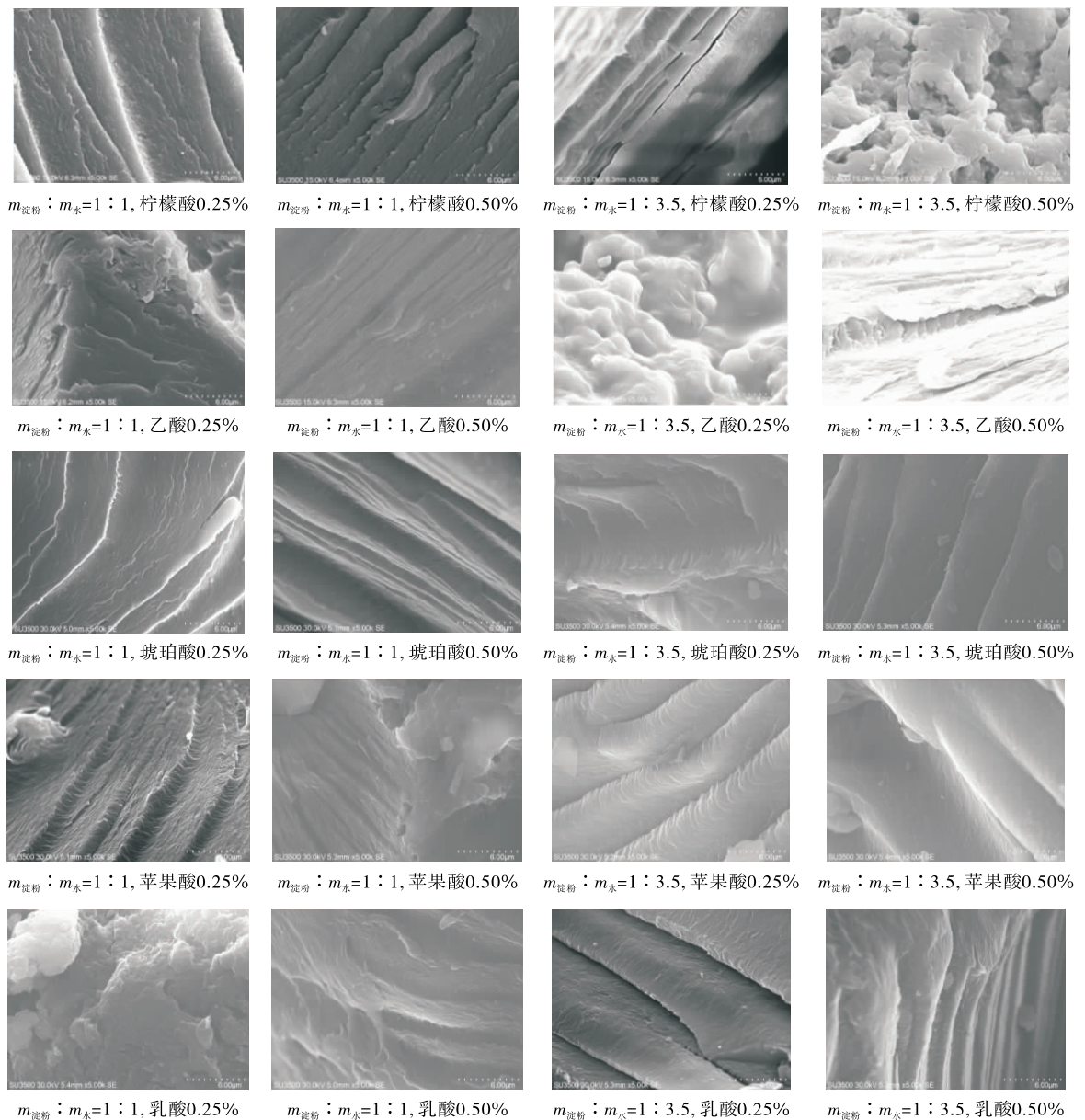
图 1 土豆 AH-HMT RS3 的扫描电镜照片($\times 5000$ 倍)

Figure 1 Scanning electron microphotographs of potato RS3 with acid and heat-moisture treatments

($m_{\text{淀粉}} : m_{\text{水}} = 1 : 3.5$)、乳酸 0.25% ($m_{\text{淀粉}} : m_{\text{水}} = 1 : 1$) 处理得到的 RS3 为不规则片层的散乱堆积结构外,其余均为有规则的层状堆积结构,但层与层之间的贴合紧密度不尽相同。例如,柠檬酸 0.50% ($m_{\text{淀粉}} : m_{\text{水}} = 1 : 1$),乙酸 0.50%、琥珀酸 0.50%、苹果酸 0.25% 与乳酸 0.25% ($m_{\text{淀粉}} : m_{\text{水}} = 1 : 3.5$) 处理得到的 RS3,层与层之间都有较大的间隙,其间填充有小的颗粒或片层起到支撑作用,但经乙酸 0.50% 处理得到的 RS3,其层与层间的间隙则由垂直方向平行排列的片层支撑。其余情况下得到的 RS3,其层与层之间贴合得都很紧密,但片层的质地、厚度各尽不同,表面浅沟宽度、深度不一。说明酸对湿热法制备的土豆 RS3 结构有着进一步的影响,且不仅是有机酸的浓度,酸的分子量大小、空间结构、电离情况均影响淀粉的微观结构。

2.4 结晶结构

文献[18]报道,湿热处理所得土豆 RS3 的晶型为 B-型,与原淀粉比,其相对结晶度变化不大。在本研究中,尽管有各种有机酸参与变性处理,但它们没有改变土豆 RS3 晶体原有的 B-型结构,经酸-湿热复合变性处理得到的土豆 RS3 的相对结晶度比原淀粉和无酸湿热处理所得抗性淀粉的都有不同程度的增加(表 3),这与文献[9]和[18]报道的结果正好相反。然而,有研究^[19-21]发现,太长的聚合链因熵高而容易受损断裂,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。由此可见,在土豆淀粉复合变性过程中,由于酸的降解作用一方面能够形成一些适合形成稳定双螺旋结构所需链长的分子链,另一方面短链也能重新聚合成稳定双螺旋结构所必需的链长,这样极有可能获得形成更稳定的结晶结构的能力,因而相对结晶度出现不同幅度的增加。而且,对土豆淀粉分子链的影响越大,其形成稳定双螺旋结构分子链的机率越高,相对结晶度也可能越高。

3 结论

5 种有机酸(柠檬酸、乙酸、琥珀酸、苹果酸和乳酸)一湿

表 3 无酸和有酸-湿热处理土豆 RS3 的相对结晶度

Table 3 Crystallinities of potato RS3 without and with acid and heat-moisture treatments

| 有机酸 | 浓度/% | $m_{\text{淀粉}} : m_{\text{水}} = 1 : 1$ | $m_{\text{淀粉}} : m_{\text{水}} = 1 : 3.5$ |
|-----|------|--|--|
| 无酸 | 0.00 | 23.13±1.37 | 23.61±1.06 |
| 柠檬酸 | 0.25 | 27.25±2.18 | 32.50±0.84 |
| | 0.50 | 33.06±2.05 | 35.72±1.96 |
| 苹果酸 | 0.25 | 26.92±0.67 | 25.38±0.59 |
| | 0.50 | 28.75±0.91 | 26.47±0.86 |
| 琥珀酸 | 0.25 | 27.19±1.06 | 25.92±1.53 |
| | 0.50 | 28.06±2.17 | 27.13±1.32 |
| 乳酸 | 0.25 | 25.23±0.58 | 24.63±0.64 |
| | 0.50 | 27.02±0.75 | 25.91±1.08 |
| 乙酸 | 0.25 | 26.35±1.06 | 28.90±1.25 |
| | 0.50 | 28.16±0.87 | 33.02±1.03 |

热复合处理对土豆 RS3 的结构特性存在程度不一的影响,高浓度酸比低浓度酸的影响程度要显著些,对土豆淀粉结构的影响程度从大到小依次为柠檬酸、乙酸、琥珀酸、苹果酸和乳酸。淀粉乳浓度对土豆淀粉结构的影响则复杂得多,柠檬酸或乙酸变性处理时,低浓度淀粉乳对 RS3 的结构特性影响更大,而苹果酸、琥珀酸或乳酸变性处理时,结果正好相反。至于有机酸-湿热复合处理后土豆淀粉的结构特性的变化将对其功能特性有何影响,尚需进一步研究。

参考文献

- [1] ANN-CHARLOTTE Eliasson. 食品淀粉的结构、功能及应用 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2009: 201-258.
- [2] BILIADERIS C G, GRANT D R, VOSE J R. Structural characterization of legume starch. II. Studies on acid-treated starches [J]. Cereal Chemistry, 1981, 58(2): 502-507.
- [3] KIM R E, AHN S Y. Gelling properties of acid-modified red bean starch gels [J]. Agric Chem Biotechnol, 1996, 39(1): 49-53.
- [4] WANG Ya-janel, TRUONG Van-den, WANG Lin-feng. Structures and rheological properties of corn starch as affected by acid hydrolysis [J]. Carbohydr Polym, 2003, 52(3): 327-333.
- [5] NAKAZAWA Yu-ta, WANG Ya-Jane. Acid hydrolysis of native and annealed starches and branch-structure of their Naegeli dextrans [J]. Carbohydr Res, 2003, 338(24): 2 871-2 882.
- [6] SHIN S I, BYUN J, PARK K H, et al. Effect of partial acid hydrolysis and heat-moisture treatment on formation of resistant tuber starch [J]. Cereal Chem, 2004, 81(2): 194-198.
- [7] 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]. Carbohydr Polym, 2003, 54(4): 449-455.
- [8] ADEBOWALE K O, AFOLABI T A, OLU-OWOLABI B I. Hydrothermal treatments of Finger millet (Eleusine coracana) starch [J]. Food Hydrocolloids, 2005, 19(6): 974-983.
- [9] GUNARATNE A, HOOVER R. Effect of heat-moisture on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches [J]. Carbohydr Polym, 2002, 49(4): 425-437.
- [10] 何健, 王韧, 张昊, 等. 改性蜡质玉米淀粉抗消化组分的理化性质及分子结构表征 [M]. 食品与机械, 2016, 32(5): 1-4, 10.
- [11] HOOVER R, MANUEL H. Theeffect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of normal maize, waxy maize, dull waxy maize and amylomaize V starches [J]. J Cereal Sci, 1996, 23(2): 153-162.
- [12] KKSEL H, BASMAN A, KAHRAMAN K, et al. Effect of acid modification and heat treatments on resistant starch formation and functional properties of corn starch [J]. International Journal of Food Properties, 2007, 10(4): 691-702.
- [13] 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.

(下转第 32 页)

- from black rice(Heugjinjubyeo) and screening of its antioxidant activities[J]. Korean Journal of Microbiology and Biotechnology, 2008, 36(1): 55-60.
- [6] 张名位, 郭宝江, 张瑞芬. 黑米抗氧化活性成分的分离纯化和结构鉴定[J]. 中国农业科学, 2006, 39(1): 153-160.
- [7] YANG Yan, ANDREWS M C, HU Yan, et al. Anthocyanin extract from black rice significantly ameliorates platelet hyperactivity and hypertriglyceridemia in dyslipidemic rats induced by high fat diets[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59: 6 759-6 764.
- [8] THUMMAYOT S, TOCHARUS C, PINKAEW D, et al. Neuroprotective effect of purple rice extract and its constituent against amyloid beta-induced neuronal cell death in SK-N-SH cells[J]. Neurotoxicology, 2014, 45: 149-158.
- [9] TANAKA J, NAKANISHI T, SHIMODA H, et al. Purple rice extract and its constituents suppress endoplasmic reticulum stress-induced retinal damage in vitro and in vivo[J]. Life Sciences, 2013, 92(1): 17-25.
- [10] 杨加珍, 曾亚文, 杜娟, 等. 紫黑米种质功能成分综合研究与利用[J]. 生物技术进展, 2015(1): 47-53.
- [11] MIN B, GU Li-wei, MCCLUNG A M, et al. Free and bound total phenolic concentrations, antioxidant capacities, and profiles of proanthocyanidins and anthocyanins in whole grain rice (*Oryza sativa* L.) of different bran colollrs[J]. Food Chemistry, 2012, 133(3): 715-722.
- [12] SHEN Yun, JIN Liang, XIAO Peng, et al. Total phenolics, flavonoids, antioxidant capacity in rice grain and their relations to grain color, size and weight[J]. Journal of Cereal Science, 2009, 49(1): 106-111.
- [13] 叶玲旭, 刘兴训, 马晓军, 等. 不同颜色糙米的酚类物质组成及抗氧化活性分析[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(9): 75-80.
- [14] HUANG Shao-hua, LEAN T N. Quantification of polyphenolic content and bioactive constituents of some commercial rice varieties in Taiwan[J]. Journal of Food Composition & Analysis, 2012, 26(1/2): 122-127.
- [15] ZHANG Ming-wei, ZHANG Rui-Feng, ZHANG Fang-xuan, et al. Phenolic profiles and antioxidant activity of black rice bran of different commercially available varieties[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2010, 58(13): 7 580-7 587.
- [16] 张晴, 陈勇, 李衫, 等. 黑米色素的吸收光谱及色差分析研究[J]. 食品科学, 1999(7): 12-17.
- [17] LEE J, DURST R W, WROLSTAD R E. Determination of total monomeric anthocyanin pigment content of fruit juices, beverages, natural colorants, and wines by the pH differential method: collaborative study [J]. Journal of AOAC International, 2005, 88(5): 1 269-1 278.
- [18] 张清安, 史芳芳, 王袭, 等. 超声波处理对黑米酒中酚类物质、颜色及抗氧化性的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(12): 1-6.
- [19] BONOLI M, MARCONI E, CABONI M F. Free and bound phenolic compounds in barley (*Hordeum vulgare*, L) flours: Evaluation of the extraction capability of different solvent mixtures and pressurized liquid methods by micellar electrokinetic chromatography and spectrophotometry[J]. Journal of Chromatography A, 2004, 1 057(1/2): 1-12.
- [20] 李青, 张名位, 张瑞芬, 等. 5种籼稻品种谷壳中游离态和结合态酚类物质含量及其抗氧化活性比较[J]. 中国农业科学, 2012, 45(6): 1 150-1 158.
- [21] 张名位, 张瑞芬, 郭宝江, 等. 黑米皮提取物的抗氧化与降血脂作用及其成分分析[J]. 中国农业科学, 2006, 39(11): 2 368-2 373.
- [22] 何婷. 黑米花青苷抗氧化活性研究进展[J]. 安徽体育科技, 2015, 36(4): 36-38.
- [23] 邹红梅. 特殊粒色小麦种子籽粒营养成分分析与评价[D]. 雅安: 四川农业大学, 2015: 19-31.
- [24] 王利珍, 赵嫦玲, 闫静, 等. 马铃薯皮总黄酮的提取及纯化[J]. 太原理工大学学报, 2011, 42(6): 598-602.
- [25] 丁璇子, 王岸娜, 吴立根. 响应面法优化小麦麸皮中总酚含量的测定[J]. 粮食与油脂, 2016, 29(9): 37-41.
- [26] 陈智毅, 徐玉娟, 尹艳, 等. 甜玉米多酚类成分的测定[J]. 食品科学, 2010, 31(10), 235-238.
- [27] 蔡湛, 兰余, 赵淑娟, 等. 紫薯的抗氧化及活性成分研究[J]. 粮食与油脂, 2015, 28(1): 43-48.

(上接第12页)

- [14] 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.
- [15] SUSHIL D, ASHOK K S, MICHAEL J G. Effect of cryo-milling on starches: functionality and digestibility [J]. Food Hydrocolloids, 2010, 24(2/3): 152-163.
- [16] SHIN S I, LEE C J, KIM M J, et al. Structural characteristics of low-glycemic response rice starch produced by citric acid treatment [J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 78(3), 588-595.
- [17] 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.
- [18] 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]. J Food Sci Technol, 2015, 52(1): 375-382.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] ROBIN F, MERINAT S, SIMON A, et al. Influence of chain length on α -1,4-D-glucan recrystallization and slowly digestible starch formation[J]. Starch/Stärke, 2008, 60(10): 551-558.