

土圞属块根淀粉的研究进展

伏曦, 边士超, 田耀旗, 金征宇, 焦爱权*

(江南大学食品学院, 江南大学食品科学与技术国家重点实验室, 江苏无锡 214122)

摘要:土圞属植物的块根具有重要的食用药用价值, 淀粉是其中最丰富的组分, 含量高达 75.1%, 且抗性淀粉的含量占比很高。随着种植能力的提升, 土圞属块根将成为一种新型的战略淀粉资源。本文对土圞属块根淀粉的含量、颗粒结构、热特性、功能性等近年来的研究进行了论述, 并展望了土圞属块根淀粉未来的研究方向, 以期对土圞属块根资源的开发和利用提供参考。

关键词:土圞, 淀粉, 结构, 热特性, 功能

Research Progress in Tuberous Starch of *Apios* Fabr.

FU Xi, BIAN Shichao, TIAN Yaoqi, JIN Zhengyu, JIAO Aiquan*

(State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The tuber of *Apios* Fabr. is a kind of critical dual-purpose resource for food and drug. Starch is the most abundant component with a content of up to 75.1% and contains a large proportion of resistant starch. As the planting capability increasing, the tuber of *Apios* Fabr. will be a new starch resource. This review summarizes the starch content, granular structure, thermal and functional properties in recent years. Finally, future research directions in tuberous starch of *Apios* Fabr. are discussed, which provide a reference basis for the future experiment research on the *Apios* Fabr. starch.

Key words: *Apios* Fabr.; starch; structure; thermal properties; functionality

中图分类号: TS231 文献标识码: A 文章编号: 1002-0306(2021)06-0377-06

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020040303

引文格式: 伏曦, 边士超, 田耀旗, 等. 土圞属块根淀粉的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(6): 377-382.

FU Xi, BIAN Shichao, TIAN Yaoqi, et al. Research Progress in Tuberous Starch of *Apios* Fabr. [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(6): 377-382. (in Chinese with English abstract) <http://www.spgykj.com>

土圞属(*Apios*)是豆科蝶形花类植物, 原产于美洲, 明末清初传入中国。北美的土圞属有 2 种, 中国的土圞属种类长期未得到整理, 种数并没有确定下来, 《中国植物志》认为中国产 6 种土圞儿^[1], 分布于山东、江苏、浙江、福建、江西、湖北、湖南、广西、贵州、四川、台湾等地^[2], 目前国内土圞(又称罗汉参)主要产自山东单县^[3]。

土圞属植物可利用部分包括花、叶、块根、种子。很多研究表明土圞花和叶中的提取物如多糖、类黄酮等可以作为治疗慢性疾病的潜在资源^[4-9], 在日本和东南亚, 土圞的花被人们制成保健茶^[10]。块根是土圞属植物的主要利用部分, 其味道香甜, 类似于土豆、芋头和栗子^[11], 具有丰富的寡糖、多糖、脂肪酸、蛋白质和氨基酸^[12], 块根粗蛋白的含量达到 16.5% (干基), 是马铃薯中蛋白含量的三倍^[13], 同时还具有大量生物活性物质和微量元素^[14-16], 土圞块根的丰富营养使得其具有改善慢性便秘、高血压、肥胖、糖尿

病等功效^[17]。土圞块根作为广泛食用的蔬菜, 其主要成分是淀粉, 总含量高达块根干重的 75.1%, 并且抗性淀粉的含量也高达生淀粉含量的 83%^[18], 含高抗性淀粉的土圞将是一种理想的淀粉资源。然而近些年, 对于土圞块根的活性成分的研究较为深入, 对其淀粉的加工利用却少有报道, 制约了土圞属蔬菜的加工发展, 这很大程度上归因于土圞的种植难度大与产量的低下。目前随着国内土圞主要种植基地的不断扩大, 土圞的种植能力与产量均得到提高, 甚至达到供不应求的状况^[19], 土圞淀粉的研究也受到更多科研工作者的关注。因此, 本文阐述了近些年来土圞属块根淀粉颗粒结构、热特性、功能特性等方面的研究进展, 以期更全面地了解土圞淀粉自身特性和淀粉与其他组分的相互作用, 此对于新型淀粉基食品开发、提升附加值和配方选择均具有重要的指导意义。

1 土圞淀粉组成

土圞块根淀粉由直链淀粉和支链淀粉构成。通

收稿日期: 2020-04-26

作者简介: 伏曦(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 碳水化合物资源开发与应用, E-mail: florencejiangnan@163.com。

* 通信作者: 焦爱权(1982-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 碳水化合物资源开发与应用, E-mail: jiaoq@jiangnan.edu.cn。

基金项目: 国家科技支撑计划项目课题(2016YFD0400304)。

表1 土圞属淀粉组成与形态
Table 1 Contents and structure of starch in *Apios Fabr.*

种类	又名	淀粉含量 (干重, %)	直链淀粉含量 (%)	抗性淀粉含量 (%)	淀粉颗粒形状	淀粉颗粒尺寸 (μm)	参考文献
<i>A. priceana</i> B.L. Rob	美洲土圞	20.58	/	/	/	/	[30]
<i>A. fourtuner</i> Maxim	美洲土圞	58.28	/	/	/	/	[30]
<i>A. americana</i> Medikus	美洲土圞	68	25.7	/	鸡蛋形、椭圆形	10.65~15	[11, 31]
<i>Apios americana</i>	美洲土圞	/	31.8~34.4	/	椭圆形、棒状	1~30	[27]
<i>A. fortunei</i>	罗汉参	75.1	35.0	83.00	球形、椭圆形	3~30	[18, 32]
罗汉参	/	31.78(湿重)	/	77.31	/	/	[28]

常块根类植物中的淀粉含量占干重的 30% ~ 88%^[20], 马铃薯作为一种广泛应用的淀粉资源, 其干基淀粉含量为 75% ~ 80%, 湿基淀粉含量为 13.5% ~ 15%^[21]。研究表明, 土圞干基淀粉含量在 20.58% ~ 75.1% 之间, 湿基淀粉含量为 31.78% (表 1), 除土圞 *A. priceana* B.L. Rob 品种的淀粉含量很低外, 其他品种的土圞淀粉含量均达到较高水平。直链淀粉含量是确定淀粉性质和应用的重要参数^[22-23], 豆类作物淀粉中直链淀粉含量在 17% ~ 52%^[24], 块茎类作物淀粉中直链淀粉含量在 26% ~ 45%^[25]。土圞中直链淀粉含量占总淀粉含量的 25.7% ~ 35%, 比玉米高, 但比马铃薯和豌豆低^[18]。同属的不同种土圞淀粉含量有所差异, 可能是由于土圞的来源不同, 种植环境不同, 测量时处理方式不同导致的^[18, 26]。Hanyu 等^[27]测定了土圞母代和子代支链淀粉不同聚合度侧链含量差异, 结果表明, 子代的短侧链 (DP < 12) 含量显著高于母代, 而子代的长侧链 (DP > 37) 含量显著低于母代。土圞淀粉中抗性淀粉的含量高达总淀粉含量的 77% ~ 83%^[18, 28], 近年来, 随着经济水平的提高与生活方式的改变, 糖尿病、结直肠癌等各类慢性疾病成为降低人们生活质量的的重要因素, 从食品的角度出发, 开发出营养更均衡, 减慢血糖应答的低 GI 食品已经成为食品领域研究热点。土圞淀粉中抗性淀粉含量高的特性是生产低 GI 食品的理想天然淀粉基来源。综上所述, 土圞属块根是一种较为重要的淀粉资源, 其淀粉资源有待更深入的挖掘与研究。

2 土圞淀粉颗粒

2.1 颗粒形态

通过光学显微镜、扫描电子显微镜等, 可以观察到不同种类的土圞淀粉颗粒大小与形态。淀粉以颗粒的形式储存在植物体内, 不同植物来源淀粉的大小和形态不同。图 1(a) 为土圞淀粉颗粒在细胞中分布的扫描电镜图, 图 1(b) 为提取出的土圞淀粉颗粒的扫描电镜图, 土圞淀粉颗粒呈椭圆形或圆形, 表面光滑, 其形状与马铃薯淀粉颗粒相似^[11]。不同品种的土圞淀粉颗粒大小之间存在差异, 其长轴长度在 1~30 μm 不等 (表 1), *A. americana* Medikus 品种 (取自日本) 的淀粉颗粒要比 *A. fortunei* 品种 (取自中国) 小, 这是由于淀粉颗粒结构是由控制淀粉合成的遗传因素决定的^[29], 不同品种土圞样品取自不同国家, 因此控制淀粉合成的遗传因素会有细微的差别, 导致淀粉颗粒大小出现差异。

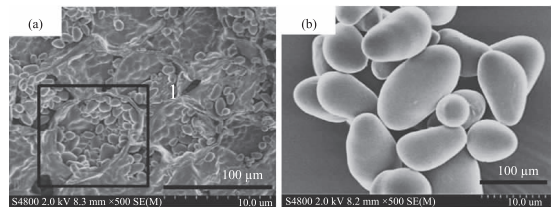


图1 土圞淀粉颗粒形态

Fig.1 Granule morphology of *Apios Fabr.* starch

2.2 结晶结构

淀粉颗粒是由半结晶生长环和无定形区交替形成天然的多晶体系, 即轮纹结构^[33]。其中半结晶生长环又由结晶层和无定形层结构交替组成, 结晶区的片层结构是由支链淀粉的双螺旋形成的晶格结构通过分子间作用力构成的, 这种晶格结构称为短程有序结构, 结晶片层又称为长程有序结构。无定形区的片层结构由带分支点的支链淀粉和直链淀粉组成的 (图 2)^[34]。根据双螺旋排列的不同, 淀粉可以分为 A-型、B-型和 C-型晶体^[35], A-型晶体由支链淀粉的短侧链组成且分支点相距较近, 导致双螺旋结构紧凑, B-型晶体由支链淀粉的长侧链组成并且分支点相距较远, 空间结构较大, C-型晶体由支链淀粉的中长链组成^[36-38]。

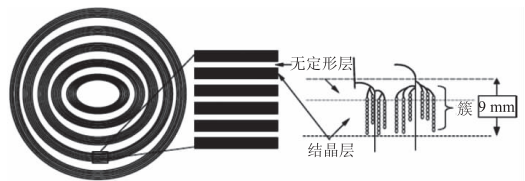


图2 淀粉颗粒结构模型

Fig.2 Schematic model of the structure of a starch granule

土圞淀粉在偏光显微镜下观察呈现偏光十字, 说明淀粉具有晶体结构^[39]。Kikuta 等^[11]通过 XRD 测得土圞淀粉为 C_A -型晶体。与典型的 C-型晶体相比, C_A -型晶体在 2θ 为 18° 处有肩峰, C_B -型晶体在 22° 和 24° 处具有两个肩峰^[40]。土圞淀粉的 XRD 图谱在 2θ 为 $5.6^\circ, 15^\circ, 17^\circ, 23^\circ$ 处出现强峰, 在 18° 处出现弱的肩峰^[32], 因此为 C_A -型晶体。Fan 等^[32]得到了同样的结论, 并认为生长温度影响土圞淀粉结晶的形成。如红薯块茎在低温下形成 B-型结晶, 高温下形成 A-型结晶, 因此在 C-型结晶中出现的 A-型和 B-型倾向可能是由于土壤温度升高导致的^[41], 从而形成土圞淀粉的 C_A -型结晶。Wang 等^[18]测得土圞淀粉颗粒的相对结晶度为 25.9%, 利用红外光谱仪

得到了土圜淀粉的短程有序度 $1045/1022 \text{ cm}^{-1}$ 比值约为 0.65, 对小角 X 射线散射波谱通过计算得到片层厚度为 9.6 nm, 与玉米淀粉、马铃薯淀粉、豌豆淀粉相比, 土圜淀粉结晶度最高, 短程有序度高于玉米和豌豆, 低于马铃薯淀粉。Cai 等^[42] 在研究大米淀粉的结构和功能特性关系时发现, 淀粉膨胀特性和淀粉的水解与淀粉短程有序性和片层峰强度呈正相关, 与片层厚度负相关。不同淀粉的结晶结构使得其理化特性呈现差异。

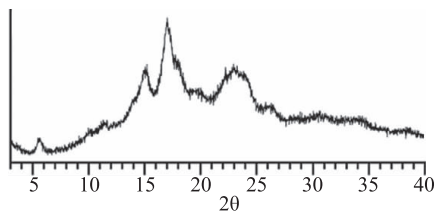


图3 土圜淀粉的晶体衍射图谱^[32]

Fig.3 Crystal diffraction patterns of starch granules of *Apios Fabr.*

3 淀粉热特性

3.1 糊化特性

淀粉在水中加热时, 淀粉颗粒会从有序向无序转变, 淀粉糊化过程会破坏淀粉颗粒分子有序结构。土圜淀粉颗粒糊化与马铃薯、玉米和竹芋淀粉相比, DSC 曲线的起始温度最低 ($55.7 \text{ }^\circ\text{C}$), 终止温度最高 ($80.4 \text{ }^\circ\text{C}$), 起始温度与终止温度范围最宽 ($24.7 \text{ }^\circ\text{C}$), 糊化焓最低 (10.4 J/g)^[11]。Hanyu 等^[27] 测定了不同品种土圜淀粉的糊化特性, 发现糊化起始温度与短支链 ($\text{DP} < 12$) 含量为负相关, 淀粉糊化焓反映解开淀粉双螺旋晶体结构所需的能量, 土圜结晶度越低焓变值越小, 实验中 2013 年编号 2127 品种的土圜 DSC 图像有 2 个峰, 分别是 $72.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 处的主峰和 $63.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 处的较小峰, 这是因为该土圜具有 2 种淀粉颗粒且在不同温度下发生糊化产生的。这种峰形除了在盐溶液中加热豆类淀粉 (C-型晶体) 外很少出现^[43]。研究表明, 阴离子或阳离子与淀粉之间可以发生相互作用, 进而影响淀粉的糊化^[44]。Fan 等^[32] 研究了不同浓度的 KCl 溶液对土圜淀粉糊化的影响, 发现土圜 C-型淀粉的 DSC 双峰形状在 KCl 浓度 2 mol/L 时最明显, 并将对应不同糊化温度的 2 种淀粉颗粒进行分离, 发现 2 种淀粉分别为 A-型结晶 (高糊化温度) 和 B-型结晶 (低糊化温度)。可以进一步探究土圜淀粉在糊化过程中的罕见双峰与其功能的关系, 为其产品开发提供依据。

3.2 水溶性和膨胀势

淀粉在过量水中加热时, 淀粉颗粒结构会分散, 水分子会通过氢键与直链淀粉或支链淀粉中暴露出的羟基连接, 从而使淀粉颗粒溶胀且水溶性增大。Kikuta 等^[11] 测得当温度达到 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 土圜淀粉颗粒开始溶解, 温度达到 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上时, 水溶性显著增大。在 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 土圜淀粉水溶性高于马铃薯和玉米。当水分子进入淀粉颗粒内部后会与形成一种共聚胶状物, 促使体积膨胀, 淀粉的膨胀势可以反映出淀粉晶

体结构强弱以及淀粉颗粒的紧密性^[45]。从 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 开始土圜淀粉和马铃薯淀粉膨胀势开始增加, 当温度达到 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 土圜淀粉的膨胀势比马铃薯淀粉低 25%。Wang 等^[18] 得到了类似的趋势, 认为不同淀粉的水溶性与膨胀势的差异与其淀粉颗粒结构与组成有关。游离直链淀粉易溶于水, 是影响淀粉溶解度的主要因素^[45], 因此土圜淀粉作为一种直链淀粉含量较高的植物其水溶性略高。在加工过程中可以根据土圜淀粉的不同糊化程度选择不同的加热温度从而达到不同的水溶性与膨胀势。

3.3 粘滞性

糊化过程中, 随着淀粉悬浮液转变为溶胀颗粒的悬浮液, 再转变为部分分解的颗粒, 最后变成颗粒的残余物和游离的直链与支链淀粉, 淀粉浆的流动特性会发生明显变化。Kikuta 等^[11] 测得土圜 *A.americana* Medikus 淀粉的起糊温度为 $72.6 \text{ }^\circ\text{C}$, 峰值粘度为 248 RVU, 最终粘度为 250 RVU, 衰减值为 105 RVU, 回升值 114 RVU, 峰值粘度与最终粘度差别很小, 粘度随温度变化较稳定, 认为土圜淀粉是用于制备浓酱的合适原料。而 Hanyu 等^[27] 测量了母代和子代土圜 *Apios americana* 的粘度特性, 结果发现该品种的土圜峰值粘度为在 120 RVU 以下, 与 Kikuta 的结果有较大的差别, 这可能是由于两种土圜的品种不同导致其粘度特性不同。同时, 研究表明母代与子代的淀粉粘度特性存在差异, 子代土圜的起糊温度比母代低, 但是峰值粘度要高于母代。子代和母代淀粉的粘度特性不同可能由于母代中含有更高的直链淀粉和脂质含量。直链淀粉-脂质复合物会与支链淀粉相互缠绕并限制淀粉颗粒的溶胀, 从而使得淀粉具有更高的起糊温度和更低的粘度^[46]。除此之外, 母代淀粉生长时间较长会经历更长的退火过程, 退火过程会增加淀粉的双螺旋结晶结构, 从而会降低淀粉的水解速率, 抑制淀粉颗粒溶胀^[47-48], 从而使母代淀粉的起糊温度升高, 粘度降低。因此, 在研究土圜淀粉的粘滞性时要考虑品种来源与栽培时间的因素。

4 土圜淀粉消化特性

按照淀粉的消化速率分, 抗性淀粉是指在肠道内 120 min 未被消化酶水解的淀粉^[49]。土圜淀粉中抗性淀粉的含量占总淀粉含量的 77%~83% (表 1), 高于玉米和豆类中的抗性淀粉含量, 但是低于马铃薯中抗性淀粉含量。当淀粉糊化或老化后, 土圜中抗性淀粉含量均显著降低至 5% 以下, 在玉米、豌豆、马铃薯中含量最低, 这些差异可能是由于四种作物中直链淀粉含量和支链淀粉结构的差异造成的^[18]。刘彬等^[28] 将罗汉参与土豆、芋头、地瓜、山药利用蒸熟方式加工后, 罗汉参中的抗性淀粉含量高于其他 4 种薯类。虽然不同研究结果表明罗汉参糊化后抗性淀粉含量与相同处理下其他作物抗性淀粉含量略有差异, 但是总体结论表明罗汉参是一种很好的抗性淀粉资源, 常规加工方式会使其大量损失, 因此寻求一种可以更多保留抗性淀粉的加工方式和工艺参数还有待研究。

淀粉在人体内首先被口腔中的 α -淀粉酶、糖苷酶等水解,再通过食道进入胃,再传递至小肠被胰蛋白酶等多种酶水解并吸收,淀粉在小肠中水解不完全的不能被吸收,会与非淀粉多糖一起进入结肠进行细菌发酵^[50]。血糖生成指数(GI)是在观测人体进食后血糖反应的基础上计算出来的,可以将食物与生理效应联系起来,是描述消化吸收率和血糖应答的重要指标^[51]。Kikuta等^[11]实验表明土圞淀粉颗粒对胰腺酶的敏感性比马铃薯高,比玉米低。韩文婷等^[52]对罗汉参的血糖生成指数分析表明,罗汉参的GI值为 48.87 ± 0.06 ,是低GI食品,认为可能是由于罗汉参中抗性淀粉含量较高所致。韩文婷等^[53]研究表明,罗汉参可以降低糖尿病模型小鼠的空腹血糖,改善糖耐量,改善糖尿病导致的多食和体重降低或增长缓慢的症状,对糖尿病患者有积极作用,这也与抗性淀粉的存在有关。抗性淀粉进入结肠后大约有80%~90%被发酵,大大降低了非淀粉多糖的细菌发酵,非淀粉多糖可以增加粪便排泄量并提高其保水能力,因此抗性淀粉对于人体消化是很重要的^[54]。刘彬等^[55]研究表明罗汉参对便秘模型小鼠有通便作用,而对正常小鼠无通便作用。常食用具有高GI的食物与增大II型糖尿病、肥胖、冠心病和其他慢性病的风险越来越相关,正确的血糖控制受到碳水化合物摄入的直接影响^[56],因此低GI食品摄入已经被认为是缓解II型糖尿病的主要战略^[57]。土圞以其高抗性淀粉含量可以作为一种新型的淀粉基原料生产低GI食品。

5 土圞淀粉的其他研究

5.1 淀粉改性

天然淀粉具有的功能性质有限,利用化学、物理或酶的方式进行淀粉改性,从而为食品和非食品应用产生一系列功能^[58]。Meera^[59]为了改善土圞淀粉凝胶特性,研究了土圞淀粉与环氧氯丙烷反应制备交联淀粉后的理化特性,结果表明交联不影响淀粉的相对结晶度和X衍射图,对淀粉颗粒破坏很小。胡爱军等^[60]以土圞为原料,在超声作用下用苹果酸作为改性剂制备改性淀粉,结果表明超声明显促进了土圞淀粉的酸改性,不同处理方式的土圞抗性淀粉凝沉性均增加,抗凝性均减弱。

5.2 淀粉提取

土圞淀粉作为发展前景较好的新淀粉资源,Yu等^[61]以传统水提法提取了罗汉参淀粉,在最优工艺条件下(液料比为8:1(L/kg),磨浆时间15 min,提取液pH为8),罗汉参粗淀粉得率为21.5%,同时对罗汉参淀粉的理化性质进行分析,部分指标优于马铃薯淀粉国家标准。韦存虚等^[62]发明了一种从土圞块根C-型淀粉中分离出A-型淀粉的方法,通过淀粉浸泡、糊化、清洗、甘油沉降、清洗、脱水、冷冻干燥的步骤,可以简单快速获得高纯度A-型淀粉颗粒。对于罗汉参淀粉进一步研究与开发有一定实践意义。

6 展望

土圞属中多种土圞儿都具有较高的食用与药用价值,淀粉以其独特的结构与属性在土圞属植物中

占有重要地位,对于土圞淀粉的研究可以极大地促进其在食品工业中的加工和应用。土圞作为一种新型的高抗性淀粉资源,随着国内种植能力的不断提升,将会是II型糖尿病人群很好的膳食来源。目前,国内外对土圞属淀粉的研究刚刚起步,土圞块根的结构与功能之间的关系研究不深入,高抗性淀粉的特点研究不充分,合适的加工方式研究存在空白。如何保持土圞抗性淀粉含量,土圞淀粉与高含量蛋白质或其他组分的作用效果等问题均有待被发掘。

参考文献

- [1]任勃.土圞儿属和旋花豆属的系统学研究[D].北京:中国科学院研究生院(植物研究所),2005.
- [2]王冉冉.土圞儿根化学成分研究[D].济南:山东中医药大学,2015.
- [3]宋曙辉,刘庞源,何伟明,等.菜用土圞儿的营养成分分析[J].营养学报,2013,35(6):618-619.
- [4]Chu Q, Yu L S, Zheng Z H, et al. *Apios americana* Medik flowers extract protects PC12 cells against H_2O_2 induced neurotoxicity via regulating autophagy [J]. Food and Chemical Toxicology, 2019, 124: 231-238.
- [5]Chu Q, Chen M, Song D X, et al. *Apios americana* Medik flowers polysaccharide (AFP-2) attenuates H_2O_2 induced neurotoxicity in PC12 cells [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 123: 1115-1124.
- [6]Chu Q, Yu X, Jia R Y, et al. Flavonoids from *Apios americana* Medikus leaves protect RAW264.7 cells against inflammation via inhibition of MAPKs, Akt-mTOR pathways, and Nfr2 Activation [J]. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2019, 2019: 1563024.
- [7]Fujie Y, Yunyun Y, Lushuang Y, et al. Effects of C-glycosides from *Apios americana* leaves against oxidative stress during hyperglycemia through regulating mitogen-activated protein kinases and nuclear factor erythroid 2-related factor 2 [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(34): 7457-7466.
- [8]Chu Q, Zhang Y R, Chen W, et al. *Apios americana* Medik flowers polysaccharide (AFP) alleviate Cyclophosphamide-induced immunosuppression in ICR mice [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 144: 829-836.
- [9]Kawamura J, Miura E, Kawakishi K, et al. Investigation of the safety and antihyperglycemic effect of *Apios americana* flower intake as a food material in normal and diabetic mice [J]. Food Science and Technology Research, 2015, 21(3): 453-462.
- [10]Kashiwazaki S, Kashiwazaki M. *Apios* flower tea manufacturing method and *apios* flower tea; JP, 2017123830 A [P].
- [11]Kikuta C, Sugimoto Y, Konishi Y, et al. Physicochemical and structural properties of starch isolated from *Apios americana* Medikus [J]. Journal of Applied Glycoscience, 2012, 59(1): 21-30.
- [12]Ichige M, Fukuda E, Miida S, et al. Novel isoflavone glucosides in groundnut (*Apios americana* Medik) and their antiandrogenic activities [J]. Journal of Agricultural and Food

- Chemistry, 2013, 61(9):2183–2187.
- [13] Reyonolds B D, Blackmon W J, Wickremesinha E, et al. Domestication of *Apios americana* [D]. Portland, Oregon, 1990.
- [14] Krishnan H B. Identification of genistein, an anticarcinogenic compound, in the edible tubers of the American groundnut (*Apios americana* Medikus) [J]. Crop Science, 1998, 38(4):1052–1056.
- [15] Nara K, Nihei K I, Ogasawara Y, et al. Novel isoflavone diglycoside in groundnut (*Apios americana* Medik) [J]. Food Chemistry, 2011, 124(3):703–710.
- [16] 张峰景. ICP-AES 内标法测定罗汉参中 7 种微量元素的含量 [J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(12):181–184.
- [17] Nakahashi H, Nishino Y, Nakagawa H, et al. Evaluation of the key odorants in volatile oils from tubers of *Apios americana* Medikus [J]. Journal of Oleo Science, 2015, 64(11):1235–1242.
- [18] Wang J, Guo K, Fan X, et al. Physicochemical properties of C-type starch from root tuber of *apios fortunei* in comparison with maize, potato, and pea starches [J]. Molecules, 2018, 23(9):2132.
- [19] 杨峰. “单县罗汉参”变“金”记 [J]. 中华商标, 2015(6):91–92.
- [20] Hoover R. Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: A review [J]. Carbohydrate Polymers, 2001, 45(3):253–267.
- [21] Liu Q, Weber E, Currie V, et al. Physicochemical properties of starches during potato growth [J]. Carbohydrate Polymers, 2003, 51(2):213–221.
- [22] Lin L, Guo D, Zhao L, et al. Comparative structure of starches from high-amylose maize inbred lines and their hybrids [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 52:19–28.
- [23] Cai C, Lin L, Man J, et al. Different structural properties of high-amylose maize starch fractions varying in granule size [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(48):11711–11721.
- [24] Wani I A, Sogi D S, Hamdani A M, et al. Isolation, composition, and physicochemical properties of starch from legumes: A review [J]. Starch – Starke, 2016, 68(9–10):834–845.
- [25] Moorthy S N. Physicochemical and functional properties of tropical tuber starches: A review [J]. Starch – Starke, 2002, 54(12):559–592.
- [26] Cai J, Cai C, Man J, et al. Structural and functional properties of C-type starches [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 101:289–300.
- [27] Hanyu Yangcheng, Vikas Belamkar, Steven B. et al. Characterization and development mechanism of *Apios americana* tuber starch [J]. Carbohydr Polym, 2016, 151:198–205.
- [28] 刘彬, 徐贵发, 韩文婷, 等. 罗汉参中抗性淀粉的含量 [J]. 山东大学学报(医学版), 2009, 47(1):103–105.
- [29] Dupuis J H, Liu Q. Potato starch: A review of physicochemical, functional and nutritional properties [J]. American Journal of Potato Research, 2019, 96(2):127–138.
- [30] Walter W M, Croom E M, Catignani G L, et al. Compositional study of *Apios priceana* tubers [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1986, 34(1):39–41.
- [31] Ogasawara Y, Hidano Y, Kato Y. Study on carbohydrate composition of *apios* (*Apios americana* Medikus) flowers and tubers [J]. Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology – Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi, 2006, 53(2):130–136.
- [32] Fan X, Zhao L, Zhang L, et al. A new allomorph distribution of C-type starch from root tuber of *Apios fortunei* [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 66:334–342.
- [33] Daniel, J, Gallant, et al. Microscopy of starch: Evidence of a new level of granule organization [J]. Carbohydrate Polymers, 1997, 32(3):177–191.
- [34] 黄峻榕, 付良绅. 淀粉颗粒结构的研究方法 [J]. 食品与机械, 2010, 26(6):5–9.
- [35] Pfister B, Zeeman S C. Formation of starch in plant cells [J]. Cellular and Molecular Life Sciences, 2016, 73(14):2781–2807.
- [36] 廖丽莎, 刘宏生, 刘兴训, 等. 淀粉的微观结构与加工过程中相变研究进展 [J]. 高分子学报, 2014(6):761–773.
- [37] Cheetham N W H, Tao L. Variation in crystalline type with amylose content in maize starch granules: An X-ray powder diffraction study [J]. Carbohydrate Polymers, 1998, 36(4):277–284.
- [38] Blazek J, Gilbert E P. Application of small-angle X-ray and neutron scattering techniques to the characterisation of starch structure: A review (Review) [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 85(2):281–293.
- [39] 赵米雪, 包亚莉, 刘培玲. 淀粉颗粒微观精细结构研究进展 [J]. 食品科学, 2018, 39(11):284–294.
- [40] Cheetham N W H, Tao L P. Variation in crystalline type with amylose content in maize starch granules: An X-ray powder diffraction study [J]. Carbohydrate Polymers, 1998, 36(4):277–284.
- [41] Genkina N K, Noda T, Koltisheva G I, et al. Effects of growth temperature on some structural properties of crystalline lamellae in starches extracted from sweet potatoes (Sunnyred and Ayamurasaki) [J]. Starch – Starke, 2003, 55(8):350–357.
- [42] Cai J, Man J, Huang J, et al. Relationship between structure and functional properties of normal rice starches with different amylose contents [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 125:35–44.
- [43] Bogracheva T Y, Morris V J, Ring S G, et al. The granular structure of C-type pea starch and its role in gelatinization [J]. Biopolymers, 1998, 45(4):323–332.
- [44] Lii C Y, Lee B L. Heating A-type, B-type, and C-type starches in aqueous sodium-chloride – effects of sodium-chloride concentration and moisture – content on differential scanning calorimetry thermograms [J]. Cereal Chemistry, 1993, 70(2):188–192.
- [45] 欧阳梦云, 王燕, 赵传文. RS-3 型粳米抗性淀粉制备方法对其结构和理化性质的影响 [J]. 食品与机械, 2017, 33(8):14–18.
- [46] Srichuwong S, Sunarti T C, Mishima T, et al. Starches from different botanical sources II: Contribution of starch structure to swelling and pasting properties [J]. Carbohydrate Polymers, 2006,

62(1):25-34.

[47] Tester R F, Debon S J J, M D. Sommerville. Annealing of maize starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2000, 42(3):287-299.

[48] Tester R F. Influence of growth conditions on barley starch properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 1997, 21(No.1-2):37-45.

[49] 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: S33-S50.

[50] Perera A, Meda V, Tyler R T. Resistant starch: A review of analytical protocols for determining resistant starch and of factors affecting the resistant starch content of foods[J]. Food Research International, 2010, 43(8):1959-1974.

[51] 者炜, 丁红. 血糖生成指数及其与某些疾病发生关系的研究进展[J]. 卫生研究, 2007(6):769-771.

[52] 韩文婷, 徐贵发, 刘彬. 罗汉参血糖生成指数的测定分析[J]. 山东大学学报(医学版), 2009, 47(3):98-100.

[53] 韩文婷, 徐贵发, 刘彬. 罗汉参对糖尿病小鼠降糖作用的研究[J]. 卫生研究, 2009, 38(4):475-477.

[54] Cummings J H, Beatty E R, Kingman S M, et al. Digestion and physiological properties of resistant starch in the human large bowel[J]. British Journal of Nutrition, 1996, 75(5):733-747.

(上接第 370 页)

2020, 87:103391.

[60] Mahnot N K, Mahanta C L, Farkas B E, et al. Atmospheric cold plasma inactivation of *Escherichia coli* and *Listeria*

(上接第 376 页)

[56] 郭斌, 梁萌青, 徐后国, 等. 江蒿、浒苔、藻渣和菌渣替代鱼粉对大菱鲆幼鱼生长性能、血清和肝脏生化指标、体组成和肠道组织结构的影响[J]. 动物营养学报, 2018, 30(1):299-312.

[57] Meinita M D N, Mahaeni B, Jeong G T, et al. Sequential acid and enzymatic hydrolysis of carrageenan solid waste for bioethanol production: A biorefinery approach [J]. Journal of Applied Phycology, 2019, 31(4):2507-2515.

[58] Tan I S, Lee K T. Enzymatic hydrolysis and fermentation of seaweed solid wastes for bioethanol production: An optimization

[55] 刘彬, 徐贵发, 韩文婷, 等. 罗汉参对小鼠通便作用的研究[J]. 山东大学学报(医学版), 2009, 47(2):95-98.

[56] Bao J. Starch in health and disease[J]. Starch-Stärke, 2017, 69(7-8):1770076.

[57] Meera K, Smita M, Haripriya S, et al. Varietal influence on antioxidant properties and glycemic index of pigmented and non-pigmented rice[J]. Journal of Cereal Science, 2019, 87:202-208.

[58] Wang S, Yu J, Zhu Q, et al. Granular structure and allomorph position in C-type Chinese yam starch granule revealed by SEM, C-13 CP/MAS NMR and XRD[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(2):426-433.

[59] Meera K. Physicochemical properties of cross-linked *Apios* starch[J]. The East Asian Society of Dietary Life, 2014, 24(3):400-406.

[60] 胡爱军, 曹园园, 罗惠泽, 等. 超声苹果酸改性香芋淀粉的结构及性质研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(10):6-10.

[61] Yu Z, Ya P S, Xiang L, et al. Study on extraction technology of Luohanshen starch by response surface methodology [J]. Food Research and Development, 2018, 39(18):61-65.

[62] 韦存虚, 范孝旭, 张龙. 一种从土圪儿块根 C-型淀粉中分离纯化 A-型淀粉粒的方法: 中国, 106279445B[P]. 2019-01-18.

monocytogenes in tender coconut water: Inoculation and accelerated shelf - life studies [J]. Food Control, 2019, 106:106678.

study[J]. Energy, 2014, 78(SI):53-62.

[59] Solorzano-Chavez E G, Paz-Cedeno F R, De Olivira L E, et al. Evaluation of the *Kappaphycus alvarezii* growth under different environmental conditions and efficiency of the enzymatic hydrolysis of the residue generated in the carrageenan processing [J]. Biomass and Bioenergy, 2019, 127: UNSP 105254.

[60] Masarin F, Cedeno F R P, Chavez E G S, et al. Chemical analysis and biorefinery of red algae *Kappaphycus alvarezii* for efficient production of glucose from residue of carrageenan extraction process[J]. Biotechnology for Biofuels, 2016, 9:122.