

8 个品种甘薯淀粉的理化性质及其相关性分析

张令文, 琚 星, 李欣欣, 胡新月, 计红芳*, 毕继才, 马汉军
(河南科技学院食品学院, 河南新乡 453003)

摘要:以 8 个品种甘薯淀粉为研究对象, 研究了甘薯淀粉的颗粒形态、粒径大小和结晶特性等结构特性, 糊化特性、凝胶质构、溶解度、膨胀度和冻融稳定性等功能特性, 并分析了甘薯淀粉结构与功能特性间的相关性。结果表明, 不同品种甘薯淀粉的直链淀粉含量不同, 其颗粒形态在不同品种间没有明显差异, 均具有典型的 A 型衍射图谱; 淀粉粒径大小和糊化参数在不同品种间差异明显。甘薯淀粉的溶解度和膨胀度与温度有关, 均随温度的上升而增大。相关性分析表明, 直链淀粉含量与回生值、硬度、胶着性、咀嚼性、析水率均呈显著正相关($r = 0.807, 0.721, 0.722, 0.734, 0.803, P < 0.05$), 与凝胶回复性呈显著负相关($r = -0.832, P < 0.05$)。平均粒径与内聚性、膨胀度呈显著负相关($r = -0.762, -0.775, P < 0.05$)。此外, 甘薯淀粉糊的回生值与凝胶硬度、胶着性和咀嚼性均呈显著正相关($P < 0.05$), 而与内聚性呈显著负相关($P < 0.05$)。本研究结果可为甘薯淀粉的精深加工和具体应用领域的甘薯淀粉选择提供一定的科学依据。

关键词:甘薯淀粉, 结构特性, 功能性质, 相关性

Physicochemical Properties and Their Correlation of Starches from Eight Sweet Potato Cultivars

ZHANG Lingwen, JU Xing, LI Xinxin, HU Xinyue, JI Hongfang*, BI Jicai, MA Hanjun
(School of Food Science, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China)

Abstract: The starches obtained from 8 different sweet potato cultivars were used as materials, the structural characteristics (the shape and size of granule, and crystallization) was explored. Simultaneously, the functional properties (pasting properties, gel texture, solubility, swelling ability and freeze-thaw stability) were investigated. Subsequently, the correlation between them was analyzed. Results showed that, the amylose contents of sweet potato starch (SPS) samples were different among cultivars. There was no significant difference in particle morphology among different varieties, and they all had typical A-type diffraction patterns. The starches differed in their mean granule sizes and gelatinization parameters. The solubility and swelling power of SPS increased along with the increasing of temperature. With the increasing of freeze-thaw cycles, the syneresis of starch gel rose. Pearson's correlation analysis indicated that amylose content was positively correlated to setback, hardness, gumminess, chewiness, and syneresis ($r = 0.807, 0.721, 0.722, 0.734$ and 0.803 , respectively, $P < 0.05$). While it was much negatively correlated to resilience ($r = -0.832, P < 0.05$). The average size of starch granules was negatively correlated to cohesiveness and swelling power ($r = -0.762, -0.775$, respectively, $P < 0.05$). In addition, setback of pasting was positively significantly ($P < 0.05$) correlated to the hardness, gumminess, and chewiness of gel, while it was negatively significantly ($P < 0.05$) correlated to cohesiveness. These results could provide some scientific basis for the deep-processing and the selection of SPS in specific application fields.

Key words: sweet potato starch; structural characteristics; functional properties; correlation

中图分类号: TS202.1 文献标识码: A 文章编号: 1002-0306(2021)04-0026-07
doi:10.13386/j.issn1002-0306.2020040334

引文格式: 张令文, 琚星, 李欣欣, 等. 8 个品种甘薯淀粉的理化性质及其相关性分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(4): 26-32.

ZHANG Lingwen, JU Xing, LI Xinxin, et al. Physicochemical Properties and Their Correlation of Starches from Eight Sweet Potato Cultivars[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(4): 26-32. (in Chinese with English abstract) <http://www.spngkj.com>

收稿日期: 2020-04-29

作者简介: 张令文(1977-), 男, 博士, 副教授, 主要从事传统食品技术与理论方面的研究, E-mail: lingwen2008@163.com。

* 通信作者: 计红芳(1978-), 女, 博士, 副教授, 主要从事传统食品技术与理论方面的研究, E-mail: jhf300@126.com。

基金项目: 河南省高等学校青年骨干教师项目(2017GGJS124); 河南省科技攻关项目(192102110218); 河南省高层次人才国际化培养资助项目(2020-16); 中国博士后科学基金项目(2016M592287); 河南省博士后基金项目(2015096)。

甘薯 (*Ipomoea batatas* L.) 是一种双子叶植物, 属于旋花科, 是人类和动物营养丰富的食物来源, 是世界上第六大重要的农作物^[1-2]。我国大部分地区均可种植甘薯, 其中, 南方产区以种植食用型品种为主, 北方产区以淀粉加工型为主, 长江流域产区兼有加工与食用品种^[3]。我国甘薯产量约占世界总产量的 90%, 年产量达 1.17 亿吨。

淀粉是甘薯块茎的主要成分, 占其干重的 50%~80%^[2-3]。甘薯淀粉可广泛用于面条、焙烤食品、糖果产品、纺织行业等^[4-5]。国内外学者对甘薯淀粉的制备、性质改良等进行了广泛深入的研究。超声波不仅能够引起甘薯淀粉表面出现孔洞和裂纹, 而且导致甘薯淀粉的短程分子有序度和有序分子结构更加明显^[6]; 喷雾干燥可增加甘薯淀粉的糊化温度, 但降低了糊化焓值; 增加预热温度, 可提高甘薯淀粉的溶解度和膨胀度^[7]; 干热处理提高了甘薯淀粉的糊化温度和透光率, 但降低了黏度、溶解度和膨胀度^[8]。然而, 人们对不同品种甘薯淀粉的理化性质了解有限。周婵媛等研究发现, 白心薯、红心薯和紫心薯等三种甘薯来源淀粉的凝沉性、透明度、溶解度、膨润度、表观黏度、冻融稳定性等物理特性存在显著差异^[9]; 余树玺等研究表明, 不同品种 (卢选 1 号、徐薯 22、冀薯 65 和冀薯 98) 甘薯淀粉的成分和物化性质与其粉条品质间具有相关性^[10]; 甘薯淀粉的糊化参数与直链淀粉和支链淀粉含量间均无显著差异^[11]。尽管国内外学者在甘薯淀粉的分离制备和物化性质等方面开展了大量的研究工作, 但对不同品种甘薯淀粉的结构性质和功能特性进行系统研究的文献相对较少, 这不利于充分利用优良甘薯品种, 一定程度上也造成甘薯原料的浪费。

本文探讨了我国东部地区 8 个品种甘薯淀粉的主要结构参数 (颗粒形态大小、直链淀粉含量) 和淀粉的功能特性 (糊化、溶解性、膨胀度、冻融稳定性和质构特性), 分析了甘薯淀粉的主要结构参数与功能特性之间的关系, 以期为我国甘薯淀粉的开发利用提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

8 个品种甘薯: 济薯 5 号、苏薯 8 号、徐薯 18 号、商薯 19S、商薯 19H、龙岩 73 号、济薯 21 号、龙薯 9 号 (2015 年产) 由山东枣庄山亭甘薯合作社提供, 贮藏一个月后提取淀粉; 马铃薯直链淀粉 分析纯, Sigma 公司; 马铃薯支链淀粉 分析纯, Fluka 公司; 其他试剂 均为国产分析纯。

101-2A 电热鼓风干燥箱 天津市通力信达仪器厂; BSA124S 电子天平 赛多利斯科学仪器有限公司; BT-9300H 激光粒度分析仪 丹东百特仪器有限公司; Quanta 200 型扫描电镜 美国 FEI 公司; D8 Advance X-射线衍射仪 德国 Bruker 公司; STA449C 差示扫描量热仪 德国 NETZSCH 公司; Lambda 35 紫外/可见分光光度计 美国珀金埃尔默公司; Super 3 快速黏度分析仪 澳大利亚新港科技公司; TA-XT2i 质构仪 英国 Stable Micro System。

1.2 实验方法

1.2.1 甘薯淀粉分离 采用 Abegunde 等^[1]法并进行了一定修改。将甘薯块茎洗净, 切成小块 (长 × 宽 × 高: 0.5 cm × 0.5 cm × 0.5 cm), 放入 0.1% (w/v) 亚硫酸氢钠溶液 (500 g 块茎, 500 mL 溶液) 处理 10 min 后用匀浆机匀浆 3 min。所得浆液用 100 目筛过滤 3 次得悬浮液, 然后在 25 ℃ 下沉淀 18 h。收集沉淀, 45 ℃ 干燥 48 h 后粉碎、过 150 目筛, 装入塑料瓶中, 置于 4 ℃ 下, 备用。

1.2.2 水分、灰分、总淀粉和表观直链淀粉含量测定 淀粉水分和灰分测定分别采用 AACC 法 44-15A 和 AOAC 法 923.03^[12-13], 表观直链淀粉含量按 AACC 法 61-03^[12]进行测定。每个样品平行 3 次。

1.2.3 颗粒大小 采用激光粒度分析仪以去离子水为溶剂, 对甘薯淀粉颗粒的粒度进行分析。每个样品平行 3 次。

1.2.4 颗粒形貌 样品用双胶带活性炭固定在扫描电镜 (SEM) 的样品盘上, 然后喷一层金, 在电压为 15 kV 下观察淀粉颗粒形貌。

1.2.5 结晶特性 采用 X 射线衍射仪测定淀粉粉末的 X 射线图谱。测定条件: 40 kV, 40 mA, 扫描速率 3 °/min, 步长 0.02°, 衍射角 (2θ) 为 4°~45°。

1.2.6 糊化性质 利用快速黏度分析仪测定淀粉的糊化性能^[14]。在 RVA 铝盒中加入 3 g 淀粉样品 (干基) 后加入 25 mL 去离子水, 用塑料桨搅拌均匀。混悬液在 50~95 ℃ 范围内加热, 升温速率为 6 ℃/min, 在 95 ℃ 下保持 5 min, 再以相同的升温速率冷却至 50 ℃, 在 50 ℃ 下保温 2 min。每个样品做 3 次平行。

1.2.7 凝胶质构 参考 Zhang 等^[15]法并稍作修改。将 RVA 分析后的淀粉糊冷却至室温, 并覆盖保鲜膜, 4 ℃ 保存 48 h, 去除薄膜后取出凝胶, 置于测试板上。利用质构仪选择 P50 探头进行分析。测试前后的速度为 4 mm/s, 测试中的速度为 1 mm/s。通过质构分析软件计算硬度、内聚性、胶着性、咀嚼性和回复性。每个样品重复 3 次。

1.2.8 溶解度和膨胀度 淀粉的溶解度和膨胀度参考文献^[16]方法并稍作修改。将 0.50 g 淀粉 (干基) 与 30 mL 去离子水混合, 分别在 55、65、75、85、95 ℃ 水浴中加热 20 min, 并不断搅拌。所得糊液冷却至 25 ℃, 并在 4800 r/min 离心 30 min。上清液倒入称量皿中, 105 ℃ 烘干 4 h。分别对烘干的上清液和沉淀物进行称重。溶解度 (Sol, %)、膨胀度 (SP, g/g, 干基) 计算如下: $Sol(\%) = 100 \times \text{干上清液质量} / \text{干淀粉质量}$; $SP(g/g) = \text{沉淀物重量} / [\text{干淀粉质量} \times (1 - Sol/100)]$ 。每个样品做 3 次平行。

1.2.9 冻融稳定性 采用 Hoover 等^[17]法并进行了一些修改。10% (w/w) 淀粉悬浮液在 100 ℃ 下加热 20 min (保持体积不变), 冷却至 25 ℃ 后在 4 ℃ 保存 16 h, 接着在 -18 ℃ 下冷冻 24 h, 随后在 25 ℃ 下解冻 6 h, 完成一次冻融循环。将经三次冻融循环处理的样品转移至离心机, 在 4000 r/min 条件下离心 20 min, 计算析水率。通过析水率分析淀粉的冻融稳定性。每个样品重复 3 次。

表1 不同品种甘薯淀粉的化学组成(w/w,%)

Table 1 Analysis of chemical composition of starch from different sweet potato cultivars(w/w,%)

品种 ^a	水分(db)	灰分(db)	总淀粉(db)	直链淀粉(db)	支链淀粉(db)
济薯5	5.85 ± 0.03 ^a	0.15 ± 0.03 ^{cd}	96.05 ± 0.33 ^a	19.89 ± 0.49 ^c	80.11 ± 0.49 ^b
苏薯8	5.35 ± 0.08 ^d	0.04 ± 0.01 ^f	96.86 ± 0.25 ^a	20.61 ± 0.51 ^c	79.39 ± 0.51 ^b
徐薯18	4.37 ± 0.90 ^e	0.18 ± 0.02 ^{bc}	90.15 ± 1.02 ^{bc}	17.73 ± 0.50 ^d	82.27 ± 0.50 ^a
商薯19S	5.17 ± 0.19 ^d	0.18 ± 0.15 ^{bc}	91.79 ± 1.49 ^b	21.66 ± 0.41 ^b	78.34 ± 0.41 ^c
商薯19H	5.23 ± 0.13 ^d	0.08 ± 0.02 ^{ef}	90.01 ± 0.43 ^c	22.47 ± 0.49 ^b	77.53 ± 0.49 ^c
龙岩73	5.82 ± 0.02 ^{ab}	0.05 ± 0.02 ^{ef}	88.96 ± 1.04 ^{cd}	26.64 ± 0.62 ^a	73.36 ± 0.62 ^d
济薯21	5.59 ± 0.23 ^c	0.10 ± 0.01 ^{de}	88.23 ± 0.55 ^d	20.26 ± 0.49 ^c	79.74 ± 0.49 ^b
龙薯9	5.62 ± 0.08 ^{bc}	0.32 ± 0.08 ^a	90.36 ± 1.19 ^{bc}	17.82 ± 0.50 ^d	82.18 ± 0.50 ^a

注:同一列内不同字母差异性显著($P < 0.05$);db:干基;表2~表7同。

1.3 数据分析

试验数据采用单因素方差分析(ANOVA),以平均值 ± 标准差表示。使用SPSS 13.0的Pearson分析相关关系,进行LSD检验, $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同品种甘薯淀粉的化学组成

8个品种甘薯淀粉的主要化学组成如表1所示。甘薯淀粉水分含量约为5%,纯度较高(总淀粉含量>88%)。研究发现,徐薯18号品种的水分含量低于文献中的数据(其值为8.7%^[1]和6.25%^[18])。这种差异可能与干燥方法和淀粉的水结合能力不同有关^[19]。

淀粉中直链淀粉含量差异显著,其值介于17.73%~26.64%之间,与文献[20]报道的结果相近。8种甘薯淀粉中,龙岩73的直链淀粉含量最高,显著高于其他品种($P < 0.05$),而徐薯18的直链淀粉含量最低(表1)。淀粉的直链淀粉含量在影响淀粉的功能性质方面起着重要作用。直链淀粉含量高的淀粉凝胶强度高^[21~22]。甘薯淀粉直链淀粉含量的差异可能与基因类型、环境因素和淀粉处理方法有关^[20,23]。

2.2 不同品种甘薯淀粉的形态和粒径分布

不同品种甘薯淀粉颗粒的扫描电镜如图1所示。8个品种甘薯淀粉的形态稍有差异。这些淀粉

由小颗粒、中颗粒和大颗粒组成,呈椭圆形、半球形、五角形和六角形等形状,表面光滑(见图1)。济薯5和商薯19H的淀粉颗粒较大的多呈椭圆形和半球形,多边形的较少;而龙岩73较小的多呈多边形(见图1)。这与文献报道的关于甘薯淀粉颗粒形貌的文献一致^[15,24]。

不同品种甘薯淀粉的粒度分布特征相似,颗粒大小在品种间存在显著差异(表2)。商薯19H的平均粒径最大(14.88 μm),其粒径范围为3.42~36.07 μm。龙薯9号的平均粒径最低(8.78 μm),其粒径范围仅为1.45~18.97 μm。本试验测得的所有样品的平均粒径为12.65 μm,与Noda等^[25]报道相似,但是大于Abegunde等^[1]研究的结果。这可能与甘薯遗传基因、生长环境和淀粉分离方法的不同有关^[26]。

2.3 不同品种甘薯淀粉的结晶特性

可利用X-射线衍射技术研究淀粉的颗粒特性^[27]。通过XRD分析,通常存在A、B和C型等三种类型淀粉。A型淀粉主要来自谷类,2θ在15°和23°左右有较强的衍射峰,在17°和18°左右有未分解的双峰。B型淀粉主要来自块状淀粉和高直链淀粉,2θ在约17°处产生最强的衍射峰,在15°、20°、22°和24°附近有几个小的峰,在约5.6°处具有特征峰。C型淀粉主要来自豆类、根、部分果实和茎,同时含有A型和B型多态性。C型淀粉2θ在17°和23°左右有较

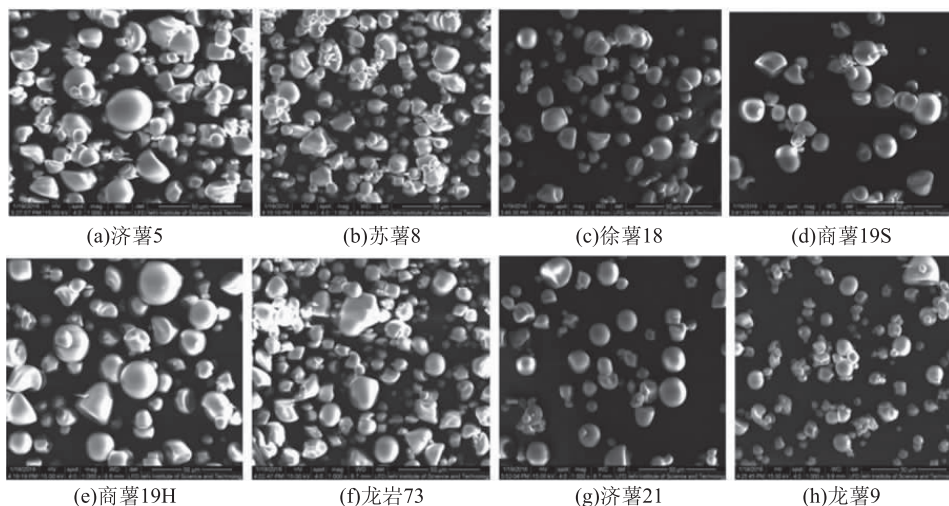


图1 不同品种甘薯淀粉的扫描电镜图

Fig.1 Scanning electron micrographs of starch from different sweet potato cultivars

表2 不同品种甘薯淀粉的颗粒大小
Table 2 Granule size of starch from different sweet potato cultivars

品种#	直径范围(μm)	平均粒径(μm)	中位径(μm)	D ₁₀ (μm)	D ₉₀ (μm)
济薯5	3.42~36.07	14.47 ± 0.13 ^c	14.15 ± 0.13 ^b	7.18 ± 0.13 ^b	22.18 ± 0.28 ^{ab}
苏薯8	3.42~26.16	11.07 ± 0.10 ^f	10.86 ± 0.20 ^e	6.11 ± 0.07 ^f	17.10 ± 1.27 ^e
徐薯18	3.42~26.16	11.61 ± 0.08 ^e	11.50 ± 0.11 ^d	6.49 ± 0.04 ^d	16.94 ± 0.08 ^e
商薯19S	3.42~36.07	14.66 ± 0.10 ^b	14.31 ± 0.11 ^b	7.01 ± 0.04 ^e	22.77 ± 0.10 ^a
商薯19H	3.42~36.07	14.88 ± 0.13 ^a	14.55 ± 0.16 ^a	7.38 ± 0.08 ^a	22.80 ± 0.12 ^a
龙岩73	3.42~26.16	11.57 ± 0.02 ^e	11.49 ± 0.03 ^d	6.36 ± 0.02 ^e	16.94 ± 0.03 ^e
济薯21	3.42~36.07	14.15 ± 0.03 ^d	13.76 ± 0.03 ^e	6.91 ± 0.02 ^e	21.94 ± 0.03 ^b
龙薯9	1.45~18.97	8.78 ± 0.02 ^g	8.47 ± 0.03 ^f	5.02 ± 0.01 ^g	13.17 ± 0.03 ^d
平均值		12.65	12.39	6.56	19.23

表3 不同品种甘薯淀粉的糊化特性
Table 3 Pasting properties of starch from different sweet potato cultivars

品种	峰值黏度(cP)	谷值黏度(cP)	破损值(cP)	最终黏度(cP)	回生值(cP)	糊化时间(min)	糊化温度(℃)
济薯5	4418 ± 115 ^g	1963 ± 64 ^g	2455 ± 63 ^g	2657 ± 83 ^f	694 ± 22 ^b	4.35 ± 0.04 ^c	73.90 ± 0.48 ^d
苏薯8	7323 ± 38 ^a	3368 ± 19 ^e	3955 ± 23 ^a	4071 ± 52 ^e	703 ± 58 ^b	4.22 ± 0.04 ^d	70.92 ± 0.41 ^f
徐薯18	6340 ± 58 ^d	3455 ± 32 ^b	2886 ± 73 ^d	4211 ± 60 ^b	757 ± 51 ^b	4.62 ± 0.04 ^a	74.73 ± 0.49 ^c
商薯19S	5133 ± 147 ^f	2371 ± 54 ^f	2763 ± 93 ^e	3226 ± 40 ^d	856 ± 78 ^a	4.20 ± 0.07 ^d	76.62 ± 0.41 ^b
商薯19H	5409 ± 91 ^e	2473 ± 45 ^e	2936 ± 47 ^d	3326 ± 76 ^e	853 ± 34 ^a	4.45 ± 0.04 ^b	77.73 ± 0.14 ^a
龙岩73	6947 ± 93 ^b	3276 ± 13 ^d	3671 ± 80 ^b	4192 ± 11 ^b	916 ± 9 ^a	3.98 ± 0.04 ^e	73.67 ± 0.03 ^d
济薯21	6559 ± 49 ^c	3272 ± 21 ^d	3287 ± 32 ^e	4021 ± 48 ^e	748 ± 69 ^b	4.27 ± 0.00 ^d	71.97 ± 0.08 ^e
龙薯9	6344 ± 29 ^d	3776 ± 33 ^a	2568 ± 35 ^f	4334 ± 26 ^a	558 ± 51 ^c	4.29 ± 0.03 ^{cd}	68.75 ± 0.05 ^g

强的衍射峰，在 5.6° 和 15° 左右有少量小的衍射峰^[28]。

图2 为不同品种甘薯淀粉的 X 射线衍射图。8 种甘薯淀粉 2θ 在 15°、17° 和 23° 左右均表现出较强的峰值。另外，在 23° 附近只有一个较强的衍射峰。分析表明，这些淀粉的晶体类型为典型的 A 型。这与肖瑀等^[29]、Gou 等^[30] 报道的结果相同，而 Noda 等^[31] 研究发现甘薯淀粉的晶型为 C 型。这可能与甘薯品种来源、种植和收获日期不同有关^[25]。

甘薯淀粉的相对结晶度在不同品种间存在差别（见图2）。8 个不同品种甘薯淀粉的相对结晶度在 27.85%~35.6% 之间。其中苏薯 8 甘薯淀粉具有最低的相对结晶度，商薯 19S 和商薯 19H 甘薯淀粉具有较高的相对结晶度，龙薯 9 甘薯淀粉具有最高的相对结晶度。本研究所测定的甘薯淀粉的结晶度数据接近于 Ye 等^[32] 报道的结果，但与 Wang 等^[6] 和 Gou 等^[8] 报道的数据存在较大差别。淀粉的相对结晶度除与植物来源有关外，淀粉的水分含量、结晶结构测试手段和结晶度计算方法等也会影响淀粉的结晶度大小。

2.4 不同品种甘薯淀粉的糊化特性

糊化特性是淀粉的重要流变性能之一，直接影响淀粉的加工性能和产品质量。用 RVA 测定甘薯淀粉的糊化特性如表 3 所示。结果表明，不同品种甘薯淀粉的糊化特性差异显著。所测样品的峰值黏度范围为 4418~7323 cP，其中苏薯 8 显著高于其他品种（*P* < 0.05），济薯 5 显著低于其他品种（*P* < 0.05）。所测甘薯淀粉的谷值黏度范围为 1963~3776 cP，破损值

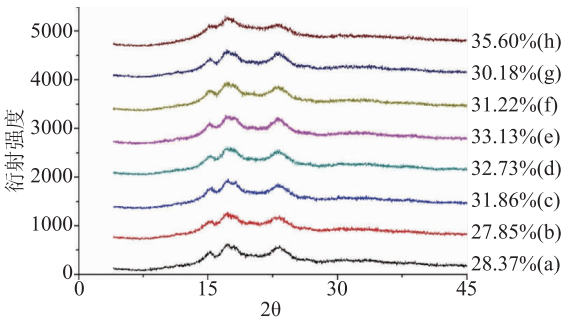


图2 不同品种甘薯淀粉的 X-射线衍射图谱
Fig.2 X-ray diffraction patterns of starch from different sweet potato cultivars

注：(a) 济薯 5，(b) 苏薯 8，(c) 徐薯 18，(d) 商薯 19S，(e) 商薯 19H，(f) 龙岩 73，(g) 济薯 21，(h) 龙薯 9。

范围为 2455~3955 cP。最终黏度和回生值分别在 2657~4334 和 558~916 cP 之间。此外，被测样品的糊化温度范围为 68.75~77.73 ℃，其中商薯 19H 淀粉糊化温度最高，龙薯 9 淀粉糊化温度最低。

2.5 不同品种甘薯淀粉凝胶的质构特性

不同品种甘薯淀粉凝胶的质构参数测定结果如表 4 所示。甘薯淀粉凝胶在不同品种间差异较大。龙岩 73 的硬度最高(559.03 g)，胶着性(513.18 g)和咀嚼性(421.69)也最高，而苏薯 8 号的硬度(165.21 g)和胶着性(164.95 g)最低。凝胶回复性范围为 0.69(龙岩 73)~0.87(济薯 21)。苏薯 8 号的内聚性最高(1.00)，龙薯 9 号(0.99)次之。淀粉凝胶的力学性能可能与直链淀粉含量和支链淀粉的结构有关^[33]。另

表4 不同品种甘薯淀粉的凝胶质构特性

Table 4 Gel textural-properties of starch from different sweet potato cultivars

品种	硬度(g)	内聚性	胶着性(g)	咀嚼性	回复性
济薯5	383.73 ± 52.51 ^{bc}	0.93 ± 0.02 ^b	355.88 ± 53.13 ^{bd}	291.90 ± 15.45 ^{bc}	0.80 ± 0.02 ^{bc}
苏薯8	165.21 ± 8.80 ^e	1.00 ± 0.02 ^a	164.95 ± 4.84 ^e	353.52 ± 101.26 ^{ac}	0.86 ± 0.01 ^a
徐薯18	355.03 ± 20.92 ^{cd}	0.92 ± 0.00 ^b	326.69 ± 18.28 ^{cd}	318.03 ± 15.30 ^{bc}	0.86 ± 0.01 ^a
商薯19S	419.02 ± 18.80 ^b	0.90 ± 0.01 ^b	377.64 ± 16.89 ^b	359.70 ± 23.02 ^{ab}	0.79 ± 0.00 ^e
商薯19H	375.44 ± 20.01 ^{bd}	0.91 ± 0.01 ^b	342.09 ± 13.47 ^{bd}	328.87 ± 38.57 ^{bc}	0.84 ± 0.01 ^{ab}
龙岩73	559.03 ± 21.16 ^a	0.92 ± 0.02 ^b	513.18 ± 25.87 ^a	421.69 ± 61.88 ^a	0.69 ± 0.07 ^d
济薯21	326.07 ± 34.21 ^{cd}	0.92 ± 0.01 ^b	334.46 ± 27.58 ^{bc}	333.81 ± 27.83 ^{bc}	0.87 ± 0.02 ^a
龙薯9	172.91 ± 5.53 ^e	0.99 ± 0.06 ^a	170.36 ± 4.28 ^e	181.33 ± 17.70 ^d	0.86 ± 0.00 ^a

有研究表明,长链支链淀粉含量与蒸煮大米的硬度呈正相关,而直链淀粉尺寸大小与蒸煮大米的硬度呈负相关^[34];直链淀粉峰的第一个峰的聚合度与甘薯淀粉凝胶的硬度呈显著负相关($r = -0.562, P < 0.05$),与胶着性呈极显著负相关($r = -0.681, P < 0.01$);支链淀粉峰的第二峰高与甘薯淀粉凝胶的胶着性呈负相关($r = -0.659, P < 0.05$)^[35]。

2.6 不同品种甘薯淀粉的溶解度和膨胀度

溶解度反映了淀粉在膨胀过程中溶解的程度,膨胀度表示淀粉的持水能力;它们均体现凝胶化特性^[2]。甘薯淀粉在55、65、75、85和95℃时的溶解度和膨胀度见表5和表6。结果表明,甘薯淀粉的溶解度和膨胀度均随温度的升高而增大,这与Lai等报道相似^[2]。在95℃时,溶解度和膨胀度的数值最大。95℃下的溶解度为8.40%(济薯21)~13.89%(济薯5)之间,95℃下膨胀度为12.53~21.28 g/g。龙薯9

号在95和55℃时的膨胀度显著高于其他品种($P < 0.05$),而济薯5在95和55℃时的溶解度高于其他品种。淀粉膨胀度和溶解度的差异与淀粉的直链淀粉含量、磷和颗粒性质的差异有关^[36]。

2.7 不同品种甘薯淀粉的析水性

脱水收缩与冻融稳定性有关,可作为淀粉回生的指标^[17,37]。不同品种甘薯淀粉的析水率随冻融循环处理次数的增加而增加,品种间甘薯淀粉析水率不同(表7)。经1次冻融循环处理后,商薯19S甘薯淀粉的析水率最高(75.62%);济薯21、苏薯8、商薯19H的甘薯淀粉析水率较高,分别为75.20%、73.52%、73.40%;徐薯18甘薯淀粉的析水率最低(70.89%)。经3次冻融处理后,商薯19S的析水率最高(83.96%),龙岩73次之,龙薯9最低(78.06%)。由表7可知,龙薯9号甘薯淀粉的冻融稳定性较好,更适宜加工冷冻食品。

表5 不同品种甘薯淀粉的溶解度

Table 5 Water solubility of starch from different sweet potato cultivars

品种	溶解度(%)				
	55℃	65℃	75℃	85℃	95℃
济薯5	1.24 ± 0.21 ^a	5.42 ± 0.49 ^a	8.19 ± 0.09 ^a	12.67 ± 0.21 ^a	13.89 ± 0.38 ^a
苏薯8	0.66 ± 0.15 ^b	2.76 ± 0.08 ^{bc}	6.24 ± 0.19 ^b	9.89 ± 0.29 ^b	13.04 ± 0.62 ^a
徐薯18	0.55 ± 0.11 ^{bc}	0.78 ± 0.09 ^c	2.86 ± 0.26 ^{deg}	7.12 ± 1.63 ^c	10.52 ± 0.64 ^c
商薯19S	1.14 ± 0.09 ^a	2.34 ± 0.20 ^c	3.27 ± 0.66 ^{cef}	7.44 ± 0.71 ^c	10.99 ± 0.28 ^{bc}
商薯19H	0.54 ± 0.13 ^{bd}	0.90 ± 0.20 ^c	2.36 ± 0.35 ^g	6.52 ± 0.40 ^c	9.06 ± 0.62 ^d
龙岩73	0.68 ± 0.10 ^b	1.39 ± 0.10 ^d	3.92 ± 0.76 ^c	9.20 ± 0.61 ^b	11.89 ± 0.45 ^b
济薯21	0.34 ± 0.12 ^{cd}	1.34 ± 0.35 ^d	2.53 ± 0.61 ^{fg}	6.31 ± 0.28 ^c	8.40 ± 0.37 ^d
龙薯9	1.002 ± 0.26 ^a	3.11 ± 0.16 ^b	3.44 ± 0.36 ^{cd}	8.83 ± 0.95 ^b	13.14 ± 0.65 ^a

表6 不同品种甘薯淀粉的膨胀度

Table 6 Swelling power of starch from different sweet potato cultivars

品种	膨胀度(g/g)				
	55℃	65℃	75℃	85℃	95℃
济薯5	1.95 ± 0.05 ^{bc}	4.04 ± 0.13 ^{de}	11.15 ± 0.42 ^{cde}	13.35 ± 0.90 ^e	20.05 ± 0.66 ^b
苏薯8	1.90 ± 0.02 ^{bc}	7.03 ± 0.24 ^b	13.75 ± 0.18 ^a	16.37 ± 0.51 ^a	19.48 ± 0.10 ^{bc}
徐薯18	1.94 ± 0.06 ^{bc}	3.16 ± 0.83 ^{ef}	10.74 ± 0.51 ^{def}	12.72 ± 0.55 ^e	17.91 ± 0.88 ^{de}
商薯19S	1.84 ± 0.05 ^c	2.92 ± 0.10 ^f	10.33 ± 1.14 ^e	12.45 ± 0.59 ^{cd}	17.07 ± 0.94 ^e
商薯19H	1.96 ± 0.08 ^{bc}	5.67 ± 0.72 ^c	8.19 ± 0.35 ^g	11.50 ± 0.51 ^d	12.53 ± 0.60 ^f
龙岩73	2.10 ± 0.03 ^b	4.26 ± 0.18 ^d	12.75 ± 0.74 ^{ab}	15.83 ± 0.55 ^a	18.56 ± 0.55 ^{cd}
济薯21	2.10 ± 0.25 ^b	6.23 ± 0.29 ^{bc}	12.20 ± 0.17 ^{bc}	14.42 ± 0.70 ^b	17.20 ± 0.83 ^e
龙薯9	3.88 ± 0.20 ^a	8.47 ± 0.96 ^a	11.65 ± 1.14 ^{bdf}	16.39 ± 0.17 ^a	21.28 ± 0.67 ^a

表 8 不同甘薯淀粉性质间的相关系数

Table 8 Correlation coefficients among different properties of the various sweet potato starches

	平均 粒径	直链淀粉 含量	峰值 黏度	谷值 黏度	破损值	最终 黏度	回生值	糊化 温度	硬度	内聚性	胶着性	咀嚼性	回复性	溶解度 (85℃)	膨胀度 (85℃)
直链淀粉含量	0.265														
峰值黏度	-0.650	0.131													
谷值黏度	-0.838**	-0.219	0.871**												
破损值	-0.198	0.506	0.807*	0.414											
最终黏度	-0.778*	-0.078	0.907**	0.984**	0.498										
回生值	0.549	0.807*	-0.050	-0.355	0.334	-0.185									
糊化温度	0.769*	0.374	-0.551	-0.688	-0.194	-0.578	0.772*								
硬度	0.485	0.721*	-0.276	-0.425	-0.001	-0.289	0.838**	0.652							
内聚性	-0.762*	-0.372	0.504	0.551	0.271	0.439	-0.748*	-0.835**	-0.824*						
胶着性	0.493	0.722*	-0.238	-0.393	0.032	-0.258	0.826*	0.608	0.994**	-0.823*					
咀嚼性	0.533	0.734*	-0.013	-0.436	0.500	-0.308	0.802*	0.523	0.713*	-0.506	0.720*				
回复性	-0.102	-0.832*	0.073	0.261	-0.179	0.154	-0.641	-0.287	-0.818*	0.379	-0.799*	-0.642			
溶解度	-0.153	0.006	-0.245	-0.303	-0.090	-0.381	-0.335	-0.305	-0.056	0.390	-0.075	0.143	-0.307		
膨胀度	-0.775*	0.048	0.707*	0.675	0.500	0.626	-0.443	-0.892**	-0.397	0.781*	-0.362	-0.195	-0.086	0.356	
析水率	0.470	0.803*	-0.102	-0.467	0.373	-0.355	0.722*	0.419	0.585	-0.385	0.578	0.765*	-0.704	0.090	-0.063

注：**相关性在 0.01 水平显著，* 相关性在 0.05 水平显著。

表 7 不同品种甘薯淀粉凝胶的析水性

Table 7 The gel syneresis of starch from different sweet potato cultivars

品种	析水率(%)		
	冻融循环 1 次	冻融循环 2 次	冻融循环 3 次
济薯 5	72.31 ± 1.03 ^{ce}	76.26 ± 0.70 ^{de}	80.82 ± 1.23 ^b
苏薯 8	73.52 ± 0.61 ^{ac}	78.76 ± 0.38 ^e	81.41 ± 0.96 ^b
徐薯 18	70.89 ± 0.49 ^{eg}	76.00 ± 0.71 ^{ed}	78.07 ± 0.98 ^c
商薯 19S	75.62 ± 1.39 ^a	81.99 ± 0.98 ^a	83.96 ± 1.56 ^a
商薯 19H	73.40 ± 1.20 ^{bcd}	79.40 ± 0.73 ^{bc}	80.75 ± 0.56 ^b
龙岩 73	71.30 ± 1.18 ^{def}	80.48 ± 0.65 ^b	83.41 ± 0.81 ^a
济薯 21	75.20 ± 1.50 ^{ab}	74.48 ± 1.15 ^f	80.57 ± 0.44 ^b
龙薯 9	71.75 ± 0.91 ^{cfg}	76.11 ± 0.38 ^d	78.06 ± 0.88 ^c

2.8 甘薯淀粉各项特性间相关性分析

甘薯淀粉各项理化性质间关系的 Pearson 相关系数如表 8 所示。直链淀粉含量与淀粉糊的回生值、凝胶的硬度、胶着性、咀嚼性和析水率均呈显著正相关，相关系数(r)分别为 0.807、0.721、0.722、0.734、0.803；但与凝胶回复性呈显著负相关(r = -0.832, P < 0.05)。Sandhu 也报道了直链淀粉与硬度间类似的正相关关系^[38]。直链淀粉含量与回生值间的关系与文献报道相似^[39]。

甘薯淀粉颗粒的平均粒径与谷值黏度、最终黏度、内聚性及膨胀度间均呈负相关，相关系数分别为 -0.838、-0.778、-0.762、-0.775，而与糊化温度呈显著正相关(r = 0.769, P < 0.05)。周文超发现，小米淀粉颗粒的中位径与糊化性能没有显著相关性^[40]。

不同品种甘薯淀粉糊化参数间存在相关性。峰值黏度与谷值黏度、破损值和最终黏度间均呈正相关，相关系数分别为 0.871、0.807、0.907；甘薯淀粉的谷值黏度与最终黏度，回生值与糊化温度间也具有正相关关系。而 Sandhu 等研究报道，淀粉回生值与糊化温度间呈负相关关系^[38]。

不同品种甘薯淀粉糊化参数与凝胶质构参数间具有相关关系。甘薯淀粉回生值与凝胶硬度、胶着性、咀嚼性均具有正相关关系，相关系数分别为

0.838、0.826、0.802。此外，甘薯淀粉凝胶质构参数间也存在相关关系。甘薯淀粉凝胶的硬度与胶着性呈正相关(r = 0.994, P < 0.01)，而与内聚性、回复性却具有负相关关系。胶着性与内聚性呈负相关关系(r = -0.823, P < 0.05)，而与咀嚼性具有正相关关系(r = 0.720, P < 0.05)。

3 结论

不同品种甘薯淀粉糊化特性指标间有明显差异。甘薯淀粉的峰值黏度分布范围为 4418~7323 cP，最终黏度在 2657~4334 cP 之间，回生值在 558~916 cP 之间，糊化温度在 68.75~77.73℃ 之间。在试验范围内，随温度增加，甘薯淀粉的溶解度和膨胀度均增大。随冻融循环次数的增加，供试品种甘薯淀粉的析水率均逐渐增大。经过 3 次冻融循环后，商薯 19S 的析水率最大，龙薯 9 的析水率最低。甘薯淀粉的直链淀粉含量和粒径大小与糊化参数、质构参数、溶解度和膨胀度间确实存在多种相关性。可根据甘薯淀粉不同性质指标间的相关关系，通过一种性质推测其另一种性质。此外，不同品种甘薯淀粉的精细结构及其与糊化和质构特性间的相关关系有待进一步研究。

参考文献

[1] Abegunde O K, Mu T H, Chen J W, et al. Physicochemical characterization of sweet potato starches popularly used in Chinese starch industry[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 33(2): 169-177.
[2] Lai Y C, Wang S Y, Gao H Y. Physicochemical properties of starches and expression and activity of starch biosynthesis-related genes in sweet potatoes[J]. Food Chemistry, 2016, 199: 556-564.
[3] 季蕾蕾, 孙红男, 木泰华, 等. 12 种甘薯淀粉产品的理化和卫生指标分析[J]. 食品科技, 2019, 44(3): 245-251, 255.
[4] Akintayo O A, Obadu J M, Karim O R, et al. Effect of replacement of cassava starch with sweet potato starch on the functional, pasting and sensory properties of tapioca grits[J]. LWT - Food Science and Technology, 2019, 111: 513-519.
[5] Menon R, Padmaja G, Sajeew M S. Cooking behavior and starch digestibility of NUTRIOSE® (resistant starch) enriched

- noodles from sweet potato flour and starch[J]. Food Chemistry, 2015, 182: 217–223.
- [6] Wang H, Xu K, Ma Y, et al. Impact of ultrasonication on the aggregation structure and physicochemical characteristics of sweet potato starch[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 63: 10486.
- [7] Santos T P R, Franco C M L, Leonel M, et al. Gelatinized sweet potato starches obtained at different preheating temperatures in a spray dryer[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 149: 1339–1346.
- [8] Guo M, Wu H, Saleh A S M, et al. Effects of repeated and continuous dry heat treatments on properties of sweet potato starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 129: 869–877.
- [9] 周婵媛, 唐乐, 兰岚, 等. 3 种甘薯淀粉性质差异分析[J]. 食品工业, 2017, 38(5): 171–174.
- [10] 余树奎, 邢丽君, 木泰华, 等. 4 种不同甘薯淀粉成分、物化特性及其粉条品质的相关性研究[J]. 核农学报, 2015, 29(4): 734–742.
- [11] 靳艳玲, 何素兰, 李育明, 等. 不同品种甘薯淀粉产量及糊化特性的比较研究[J]. 江苏师范大学学报(自然科学版), 2018, 36(1): 17–20.
- [12] AACC. Method 44–15A, and 61–03 in Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists, 10th Edn[S].
- [13] AOAC. Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists, 17th Ed[S].
- [14] Wan J, Zhou G H, Luo S J, et al. A study of the effect of amino acids on pasting and short-term retrogradation properties of rice starch based on molecular dynamics simulation[J]. Starch–Stärke, 2017, 69: 9–10.
- [15] Zhang L, Wang X, Ji H, et al. Effect of dry heating with short-chain inulin on physicochemical properties of sweet potato starch[J]. CyTa–Journal of Food, 2020, 18(1): 216–228.
- [16] Vashisht D, Pandey A, Hermenean A, et al. Effect of dry heating and ionic gum on the physicochemical and release properties of starch from Dioscorea[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 95: 557–563.
- [17] Hoover R, Li Y X, Hynes G, et al. Physicochemical characterization of mungbean starch[J]. Food Hydrocolloids, 1997, 11(4): 401–408.
- [18] Chen Z. Physicochemical properties of sweet potato starches and their application in noodle products[D]. PhD Thesis Wageningen University, The Netherlands, 2003.
- [19] 邓福明, 木泰华, 陈井旺, 等. 甘薯淀粉的结构、成分及其特性研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(13): 373–377.
- [20] Oduro I, Ellis W O, Aryeetey S K, et al. Pasting characteristics of starch from new varieties of sweet potato[J]. Tropical Science, 2000, 40: 25–28.
- [21] Hung P V, Yamamori M, Morita N. Formation of enzyme resistant starch in bread as affected by high amylose wheat flour substitutions[J]. Cereal Chemistry, 2005, 82: 690–694.
- [22] Vignaux N, Doehlert D C, Elias E M, et al. Quality of spaghetti made from full and partial waxy durum wheat[J]. Cereal Chemistry, 2005, 82: 93–100.
- [23] 张令文, 计红芳, 白师师, 等. 不同品种绿豆淀粉的功能特性比较研究[J]. 现代食品科技, 2015, 31(6): 84–90.
- [24] 陈梦雪, 冯亮, 李飞, 等. 果胶协同干热变性对甘薯淀粉分子结构的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(9): 60–65.
- [25] Noda T, Kobayashi T, Suda I. Effect of soil temperature on starch properties of sweet potatoes[J]. Carbohydrate Polymer, 2001, 44: 239–246.
- [26] Singh N, Singh J, Kaur L, et al. Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources[J]. Food Chemistry, 2003, 81: 219–231.
- [27] 张令文, 计红芳, 白师师, 等. 不同品种绿豆淀粉微观结构和热力学特性的比较[J]. 现代食品科技, 2015, 31(7): 80–85.
- [28] Hoover R. Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: A review[J]. Carbohydrate Polymers, 2001, 45: 253–267.
- [29] 肖瑀, 郭丽, 邓银凤, 等. 复合酶修饰对红薯淀粉分支结构和物化特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(3): 18–23.
- [30] Gou M, Wu H, Saleh A S M, et al. Effects of repeated and continuous dry heat treatments on properties of sweet potato starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 129: 869–877.
- [31] Noda T, Takahata Y, Sato T, et al. Physicochemical properties of starches from purple and orange fleshed sweet potato roots at two levels of fertilizer[J]. Starch/Stärke, 1996, 48: 395–399.
- [32] Ye F, Li J, Zhao G. Physicochemical properties of different-sized fractions of sweet potato starch and their contributions to the quality of sweet potato starch[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 168: 10623.
- [33] Kaur A, Singh N, Ezekiel R, et al. Physicochemical, thermal and pasting properties of starches separated from potato cultivars grown at different locations[J]. Food Chemistry, 2007, 101: 643–651.
- [34] Li H, Prakash S, Nicholson T M, et al. The importance of amylose and amylopectin fine structure for textural properties of cooked rice grains[J]. Food Chemistry, 2016, 196: 702–711.
- [35] Tong C, Ru W, Wu L, et al. Fine structure and relationships with functional properties of pigmented sweet potato starches[J]. Food Chemistry, 2020, 311: 126011.
- [36] 谭洪卓. 甘薯淀粉流变学、热力学特性和分子结构研究及其在粉丝生产中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2007.
- [37] Dobosz A, Sikora M, Krystyan M, et al. Influence of xanthan gum on the short- and long-term retrogradation of potato starches of various amylose content[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 102: 105618.
- [38] Sandhu K S, Singh N. Some properties of corn starches II: Physicochemical, gelatinization, retrogradation, pasting and gel textural properties[J]. Food Chemistry, 2007, 101: 1499–1507.
- [39] 钟葵, 佟立涛, 刘丽娅, 等. 绿豆淀粉性质和糊化特性研究[J]. 作物杂志, 2013(2): 134–138.
- [40] 周文超. 我国不同地区特色品种小米淀粉理化性质的研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2013.