

不同品种马铃薯淀粉的微观结构及物化性质比较分析

王丽¹, 李淑荣^{1*}, 句荣辉¹, 王辉¹, 李娟², 张永春³, 杨洋¹

(1. 北京农业职业学院食品与生物工程系, 北京 102442)

(2. 中国农业科学院农产品加工研究所, 北京 100193) (3. 北京稻香村食品有限责任公司, 北京 100007)

摘要:以黑龙江、甘肃、北京三地的11个马铃薯品种为研究对象,比较分析不同品种马铃薯淀粉的直链淀粉含量,淀粉颗粒大小、热特性、微观结构特征、黏度特性、流变学特性的差异,分析不同品种马铃薯淀粉微观结构特征与物化特性的相关关系。结果显示,布尔班克的直链淀粉含量最高为16.64%,不同品种淀粉D₅₀值的变化范围是59.40~323.90 μm,荷兰薯的起始糊化温度、峰值温度、糊化焓值最高,淀粉颗粒多为圆形或椭圆形,陇薯9号的糊化温度最低,为62.27℃,陇14和陇薯7号的储能模量显著高于其他品种。D₅₀值与淀粉的糊化焓值($r=0.5963$)、糊化温度($r=0.5024$)呈显著的正相关,与直链淀粉含量($r=-0.5765$)、回生值($r=-0.5518$)呈显著的负相关;淀粉热特性的起始糊化温度与黏度特性的峰值温度($r=0.9610$)、峰值时间($r=0.7336$)、糊化温度($r=0.9339$)呈极显著的正相关。不同品种马铃薯淀粉的微观结构和物化性质间存在显著的相关关系,为马铃薯淀粉的加工利用及育种提供依据。

关键词:马铃薯淀粉;颗粒大小;热力学特性;黏度特性;流变学特性

文章编号:1673-9078(2022)12-329-339

DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.12.0061

Comparative Analysis of Microstructure and Physicochemical Properties of Starch from Different Varieties of Potatoes

WANG Li¹, LI Shurong^{1*}, JU Ronghui¹, WANG Hui¹, LI Juan², ZHANG Yongchun³, YANG Yang¹

(1. Department of Food and Biological Engineering, Beijing Vocational College of Agriculture, Beijing 102442, China)

(2. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

(3. Beijing Daoxiangcun Food Co. Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Potato starch has attracted much attention owing to its large particle size, low gelatinization temperature, high viscosity, and strong gelatinization. A total of 11 varieties of potatoes from Heilongjiang, Gansu, and Beijing were selected as the research objects for comparative analysis of differences in amylose content, starch granule size, thermal properties, microstructure characteristics, viscosity, and rheological properties among starch made from different varieties of potatoes, as well as correlation analysis between microstructure characteristics and physicochemical characteristics of different starch varieties. The results showed that Burbank had the highest amylose content of 16.64%, and the D₅₀ values of different varieties of starch ranged from 59.40 to 323.90 μm. Dutch potatoes had the highest initial gelatinization temperature, peak temperature, and gelatinization enthalpy, with starch granules mostly circular or elliptic. Longshu 9 had the lowest gelatinization temperature of 62.27 °C, while the storage moduli of Long 14 and Longshu 7 were significantly higher than those of other varieties. D₅₀ was significantly positively correlated with gelatinization enthalpy ($r=0.5963$) and gelatinization temperature ($r=0.5024$), but significantly negatively correlated with amylose content ($r=-0.5765$) and retrogradation value ($r=-0.5518$). Among starch thermal properties, initial gelatinization temperature was significantly positively correlated with the peak temperature ($r=0.9610$), peak time ($r=0.7336$), and

引文格式:

王丽,李淑荣,句荣辉,等.不同品种马铃薯淀粉的微观结构及物化性质比较分析[J].现代食品科技,2022,38(12):329-339

WANG Li, LI Shurong, JU Ronghui, et al. Comparative analysis of microstructure and physicochemical properties of starch from different varieties of potatoes [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(12): 329-339

收稿日期:2022-01-17

基金项目:北京市教委科技一般项目(KM201612448005);北京农业职业学院院级项目(XY-YF-19-18)

作者简介:王丽(1982-),女,博士,副教授,研究方向:食品质量与食物安全,E-mail:wangli2008_beijing@163.com

通讯作者:李淑荣(1968-),女,博士,教授,研究方向:食品加工与贮藏保鲜,E-mail:shurongL@163.com

gelatinization temperature ($r=0.933$) of viscosity properties. A significant correlation was observed between the microstructure and physicochemical properties of starch made from different varieties of potatoes, thus providing a basis for the processing and utilization of potato starch as well as potato breeding.

Key words: potato starch; particle size; thermodynamic property; viscosity properties; rheological property

马铃薯是仅次于小麦、稻谷、玉米的世界第四大粮食作物^[1]。马铃薯富含淀粉、纤维素、脂类、蛋白质等营养成分,其淀粉含量高达70.00%以上(湿重),是马铃薯的主要成分,也是食物淀粉的主要来源之一^[2]。淀粉的组成、颗粒大小、结构、流变性和黏度特性决定淀粉产品的感官特性、质构特性、贮藏特性等^[3],这些特性在很大程度上受到淀粉在糊化和回生过程中结构变化的影响。当淀粉悬浮液加热到糊化温度时,淀粉颗粒吸水膨胀,支链淀粉双螺旋解离,直链淀粉分子滤出,形成淀粉糊或凝胶^[4]。冷却后,解离的淀粉链逐渐重结晶为有序结构,淀粉凝胶的黏弹性和硬度逐渐增加^[5]。

马铃薯淀粉比其他淀粉颗粒大,具有较好的膨胀力,加热后可以形成清晰的糊状物,具有黏度高、结合力强,易于形成凝胶等特性而广泛应用于清汤^[6]、肉类制品^[7]、亚洲面条^[8]和零食^[9]等产品中。淀粉的性质以及淀粉在加热、冷却、剪切等过程中性质的变化影响着面条、香肠、方便面、汤圆、糖果等食品的黏度、质地、风味等^[10],而淀粉的凝胶特性、糊化特性、老化特性等取决于植物来源、品种、生长条件^[11,12]。王子逸^[13]研究了5个不同品种马铃薯的扫描电镜、小角X射线散射、X射线衍射、流变特性、黏度特性和质构特性,结果发现不同品种的品质特性差异显著,相关性分析发现马铃薯淀粉的结构与其凝胶的质构特性间有显著的相关性。Singh等^[14]对新西兰马铃薯淀粉的物化性质与组成进行了相关性分析,结果显示直链淀粉含量与膨润度和峰值黏度呈负相关,磷含量与透光率和峰值黏度呈正相关。Kaur等^[15]研究发现高粒径淀粉具有较高的直链淀粉含量、较高的抗消化性;糊化峰值黏度、最终黏度、破损值、回复值均高,仅峰值温度稍低。但是目前关于不同品种马铃薯淀粉微观结构特性及物化特性差异对产品的感官品质、蒸煮品质、贮藏品质的影响关系未见详细报道。为了更加清楚的了解不同品种马铃薯淀粉的品质特性差异情况,本文选取我国马铃薯主要种植地区的典型品种为研究对象,即以黑龙江、甘肃、北京三个地区的11个马铃薯品种为研究对象,分析不同品种马铃薯淀粉的直链淀粉含量,淀粉颗粒大小、热特性、微观结构特征、黏度特性、流变学特性的区别、差异及相互关系,为利用开发不同品质特性的马铃薯淀粉产品提供帮助,为

马铃薯新品种的培育提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

马铃薯品种:由黑龙江八一农垦大学、甘肃省农科院及北京某蔬菜基地提供(表1)。黑龙江和甘肃为我国马铃薯主要产地,品种1~10号为以上两地的典型马铃薯品种,北京为荷兰马铃薯引进新品种的重要生产基地,以上三个产地和品种的选取均具有较好的代表性。

表1 马铃薯品种及来源

Table 1 Potato varieties and sources

序号	品种	来源
1	垦薯1号	黑龙江八一农垦大学
2	布尔斑克	黑龙江八一农垦大学
3	抗疫白	黑龙江八一农垦大学
4	克新27	黑龙江八一农垦大学
5	陇14	甘肃省农科院
6	LZ111	甘肃省农科院
7	陇薯9号	甘肃省农科院
8	陇薯7号	甘肃省农科院
9	LY08104-12	甘肃省农科院
10	陇薯8号	甘肃省农科院
11	荷兰薯	北京某蔬菜基地

其他试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

TU-1810D型紫外分光光度计,北京普析通用有限责任公司;LS13320型激光粒度分析仪,美国贝克曼库尔特公司;Discovery 25 DSC差示扫描量热仪,美国TA仪器公司;SN-3400N型扫描电子显微镜,日本日立株式会社;Viscograph-E型布拉本德黏度计,德国布拉本德;Physica MCR 301型流变仪,奥地利安东帕。

1.3 实验方法

1.3.1 马铃薯淀粉的提取

马铃薯淀粉提取方法参考王丽等^[16]的方法,马铃薯去皮、打碎后,采用溶剂法提取,马铃薯:溶液(1.00%氯化钠:0.20%亚硫酸钠=1:1, m/m)=1:5,浸泡4~5 h后,80目纱布过滤,如此反复4~5次,合并沉淀,40℃

烘干至恒重, 粉碎、过筛, 备用。

1.3.2 直链淀粉含量测定

参照王丽等^[17]的先脱脂后脱糖的方法处理样品, 采用双波长法进行测定。

马铃薯去皮、切片, 40℃条件下烘干, 粉碎过80目筛, 放入干燥器中保存备用。称取0.50g样品, 取20.00mL石油醚分4次浸提脂肪, 残余物挥干石油醚后再用20.00mL $\phi=85\%$ 乙醇分4次浸提可溶性糖, 挥干乙醇后烘干至恒重。称取恒重样品0.10g加入10mL 0.50 mol/L的KOH溶液, 在80℃震荡器中溶解10min后, 转移至50mL容量瓶中。定容后吸取样品溶液2.50mL, 加入20.00mL双蒸水, 用0.10 mol/L HCl调整pH值为3.00后, 加入0.50mL碘试剂, 转移至50.00mL容量瓶中并用双蒸水定容, 静置20min后, 等待测定。将直链淀粉在最大吸收波长609nm和参比波长473nm条件下进行测定。依据直链淀粉的标准曲线方程计算样品中直链淀粉含量。

1.3.3 淀粉粒径分布测定

参考张敏等^[18]的方法略有改动。利用LS13320型激光粒度分析仪测定, 称取0.05g淀粉, 加入5.00mL蒸馏水振荡分散成悬浊液, 设定仪器泵速为45r/min, 运行时间为35s, 注入1.00mL待测液, 待遮蔽率显示OK后开始分析, 每个样品重复5次。

1.3.4 淀粉热特性测定

参考Meyer等^[19]的方法, 分别进行糊化过程和老化过程热特性的分析测定, 测定方法略有改动, 具体方法如下:

糊化过程: 准确称取2.50mg淀粉置于去离子水的坩埚中, 按1:3的比例(m/m)加入去离子水。于室温密封放置使体系平衡24h后进行DSC测试。程序设置: 初始温度30℃, 样品平衡1min, 终止温度100℃, 升温速率10℃/min。以空坩埚作为参比, 氮气作为载气, 流速设置为20mL/min。

老化过程: 将经糊化测试后的淀粉样品在4℃环境下贮藏18h和54h后, 利用DSC测试淀粉老化特性。程序设置: 初始温度20℃, 样品平衡1min, 终止温度90℃, 升温速率10℃/min, 以空坩埚作为参比, 氮气作为载气, 流速设置为20mL/min。通过软件计算出样品的糊化温度以及焓值。

$$R = \Delta H_f / \Delta H_g \times 100\%$$

式中:

R ——老化率;

ΔH_f ——老化焓值;

ΔH_g ——糊化焓值。

1.3.5 淀粉微观结构测定

称取5.00mg淀粉样品于1.00mL 50%乙醇溶液

中, 超声匀化成淀粉悬浊液。将洁净的铝箔片粘附在样品台上, 将上述淀粉悬浊液滴在铝箔片上, 在红外灯下烘干至液体, 在15mA电流下喷金90s。样品取出后, 装入扫描电镜观察室, 进行观察。

1.3.6 淀粉黏度特性测定

经过优化后, 配制质量分数为6%淀粉溶液, 加入测定样品瓶中, 设定以1.50℃/min的速率从35℃升至95℃, 在95℃保温30min, 再以1.50℃/min的速率降温至50℃, 在50℃保温30min, 转速为75r/min, 以700cmg作为1000布拉班德黏度单位(BU)。

1.3.7 淀粉流变学特性测定

经过优化后, 配制质量分数为6%淀粉溶液, 设定角频率为5rad/s, 应变频率2%, 测定样品时从28℃升温至100℃使淀粉糊化, 升温速率为5℃/min, 平衡1min, 从100℃降温至28℃, 降温速率为5℃/min, 测定糊化及冷却过程中淀粉凝胶贮能模量、损耗模量随温度的变化。

1.4 数据分析

所有样品均测定三次以上, 取其平均值作为最终结果。分析和处理结果以平均值 \pm 标准差表示。各组数据间的显著性和相关性均采用SPSS软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 直链淀粉含量

表2为不同品种马铃薯中水分、直链淀粉含量。从表2中可以看出, 不同样品中各品质指标差异显著。其中直链淀粉含量最高的品种为布尔斑克, 为16.64%, 为黑龙江的品种, 其次为抗白疫和陇薯9号, 直链淀粉含量分别为14.76%和14.56%, 分别为黑龙江和甘肃的品种, 而北京的品种荷兰薯中直链淀粉含量最低, 为10.96%。不同地区不同品种间直链淀粉含量具有显著的变化规律, 说明所选取品种具有代表性。Kaur等^[20]、Diego等^[21]研究发现, 直链淀粉含量与淀粉的流变学特性、糊化温度、老化值、峰值黏度、糊化焓值等均具有显著的相关性。Cai等^[22]研究结果显示正常玉米淀粉的扫描电镜呈均质多边形颗粒, 放大图像显示颗粒表面有多个空腔; 高直链淀粉具有显著的异质性, 由单个、聚集和细长三种不同类型的颗粒组成。以上不同研究分别发现了直链淀粉和支链淀粉含量的高低影响着淀粉的流变学特性、黏度特性、热力学特性、微观结构特性等, 而这些特性的变化将直接影响着产品的加工特性, 因此, 进一步深入研究马铃薯中直链淀粉与淀粉物化特性的关系, 对于不同品种马铃薯的

加工利用具有很好的帮助作用。

表2 不同品种马铃薯直链淀粉 (%)

Table 2 Different varieties of potato amylose

样品编号	样品名称	水分含量	直链淀粉含量
1	垦薯1号	8.68±0.40 ^d	12.26±0.07 ^{ef}
2	布尔斑克	8.36±0.60 ^d	16.64±0.27 ^a
3	抗疫白	6.57±0.08 ^f	14.76±0.17 ^b
4	克新27	8.38±0.30 ^d	12.00±0.17 ^g
5	陇14	10.08±0.01 ^b	12.53±0.06 ^{ef}
6	LZ111	11.06±0.11 ^a	14.10±0.15 ^c
7	陇薯9号	9.32±0.07 ^c	14.56±0.12 ^b
8	陇薯7号	9.29±0.06 ^c	12.58±0.17 ^e
9	LY08104-12	7.53±0.05 ^e	13.00±0.14 ^d
10	陇薯8号	10.17±0.52 ^b	12.12±0.11 ^{fg}
11	荷兰薯	9.75±0.48 ^b	10.96±0.15 ^h

注：表格中的小写字母代表同一列的显著性差异。

2.2 粒度分布

图1为布尔斑克和LY08104-12粒度分布图，其中图1a为两峰图，图1b为三峰图，说明不同样品具有不同的粒度大小分布。表3为不同样品颗粒大小的峰值及平均粒度大小。从表3可以看出，除了LY08104-12和荷兰薯以外，其他品种均为两峰品种（峰3和峰4），峰值分别出现在40~59 μm和123~344 μm左右，LY08104-12和荷兰薯分别在758.83 μm和723.13 μm处出现峰值（峰2），荷兰薯在1404 μm处又出现了一个峰值（峰1），说明LY08104-12和荷兰薯两个品种中具有较大的淀粉颗粒，同时表2结果显示，这两个品种的直链淀粉含量相对较低。从所有品种的D₅₀值（颗粒的平均粒度）也可以看出，不同品种差异显著，其中荷兰薯的D₅₀值最高为323.90 μm，LZ111颗粒的D₅₀

值最小为54.90 μm，本研究中有50%左右品种的D₅₀值小于100 μm，其余品种的D₅₀值大于100 μm而小于350 μm。本研究与其他研究者略有差别，Fuentes^[23]研究发现马铃薯的淀粉粒径平均值为100 μm左右。柳宁^[24]研究发现，小麦淀粉粒度大小分布的不同对面团流变学特性有重要的影响。王龙飞等^[25]研究发现，玉米淀粉粒度大小与淀粉颗粒的起始糊化温度、峰值糊化温度及终止糊化温度等热力学特性间存在显著正相关性。Liu等^[26]研究发现马铃薯淀粉颗粒的平均粒径范围大于玉米、甘薯、小麦淀粉，具有膨胀性好，峰值黏度大等特点，适宜添加到方便面、膨化食品与肉制品中。

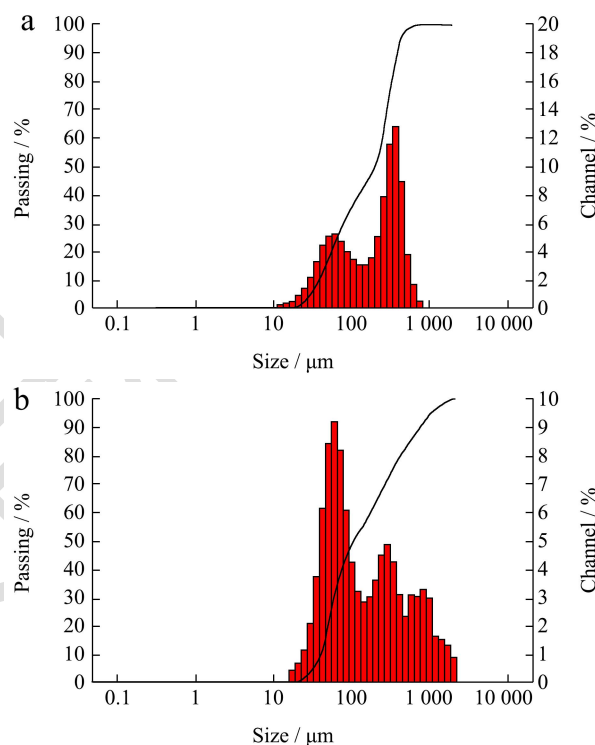


图1 布尔斑克和LY08104-12 粒度分布

Fig.1 Particle size distribution of Bourban and LY08104-12

表3 不同品种粒度峰值及D₅₀值

Table 3 Particle size peak and D₅₀ value of different varieties

样品名称	样品名称	D ₅₀ /μm	峰 1/μm	峰 2/μm	峰 3/μm	峰 4/μm
1	垦薯1号	184.80±8.97 ^c	---	---	274.83±21.81 ^c	50.48±0.38 ^b
2	布尔斑克	61.95±1.52 ^g	---	---	181.57±7.36 ^e	40.02±0.44 ^e
3	抗疫白	168.36±7.87 ^d	---	---	265.83±11.24 ^c	44.69±1.47 ^d
4	克新27	76.30±10.11 ^f	---	---	240.2±6.54 ^d	48.37±0.22 ^{bc}
5	陇14	61.93±1.50 ^g	---	---	192.03±6.72 ^e	58.58±2.67 ^a
6	LZ111	59.40±2.08 ^h	---	---	123.47±2.30 ^f	46.99±1.54 ^{cd}
7	陇薯9号	69.36±8.26 ^g	---	---	235.07±8.55 ^d	46.11±0.89 ^{cd}
8	陇薯7号	255.57±11.00 ^b	---	---	343.37±23.36 ^a	45.36±1.19 ^d
9	LY08104-12	119.33±14.52 ^c	---	758.83	252.93±12.56 ^{cd}	57.90±1.86 ^a
10	陇薯8号	187.77±1.19 ^c	---	---	324.93±2.27 ^a	58.14±1.07 ^a
11	荷兰薯	323.90±11.46 ^a	1404.00	723.13	301.03±2.17 ^b	44.48±2.69 ^d

2.3 热力学特性

2.3.1 不同样品之间的差异情况

表4为不同品种马铃薯淀粉的热特性及同一品种在不同储藏时间下的热特性。淀粉的热特性反应了淀粉在加热过程中的糊化过程,糊化温度反应了淀粉的稳定性和抗凝胶化能力,糊化焓值反应了淀粉糊化过程中破坏淀粉双螺旋结构所需能量^[27]。从表4中可以看出,不同品种的起始糊化温度(T_0)、峰值温度(T_p)和糊化焓值差异显著。在所有品种中,荷兰薯的 T_0 最高,为65.54℃,陇薯9号的 T_0 最低,为61.25℃,说明荷兰薯淀粉结构的稳定性和抗凝胶化能力最强。荷兰薯开始糊化的温度较高,而陇薯9号开始糊化的温度较低,这与粒径分布类似,即荷兰薯的粒径最大,陇薯9号的粒径相对较小。颗粒较大的淀粉膨胀、破裂所需要的温度更高,而颗粒较小的淀粉更易于糊化^[26]。

T_p 和 T_0 有类似的变化趋势。即荷兰薯的峰值温度最高,而陇薯9号的峰值温度最低,荷兰薯的糊化焓值最高,克新27最低,这与Monjezi等^[12]的研究结果一致,即随着淀粉颗粒尺寸的增大,凝胶化的糊化焓值增加。

2.3.2 贮藏时间对淀粉热特性的影响

表4数据显示,针对同一品种而言,大多数品种

随着贮藏时间的延长,糊化温度、峰值温度和糊化焓值逐渐降低。糊化温度的降低表明在贮藏过程中淀粉结构趋于松散;糊化焓值降低表明淀粉中颗粒的有序结构被破坏。即贮藏时间的延长,使得淀粉糊化中有更多的老化淀粉^[28]。但样品的贮藏时间为18h和54h时,其各项热力学特性数据差异不显著,说明在贮藏过程中淀粉的结构趋于稳定。

2.4 微观结构

图2为不同品种马铃薯淀粉的电子显微镜扫描图,从图中可以看出,马铃薯淀粉的颗粒大小不同,不同颗粒间差异显著,而同一品种粒度分布情况与图1和表3结果一致。从2图中可以看出,同一品种的淀粉颗粒不同,但均以圆形和椭圆形为主。同时发现马铃薯淀粉表面有一些包裹在淀粉球表面的蛋白和杂质存在,其中杂质可能是淀粉在提取过程中残留物的影响^[29]。图2结果显示1~4号黑龙江不同品种马铃薯淀粉的颗粒形状、颗粒大小组成、颗粒表面物质均有不同;同样地甘肃地区的5个不同品种马铃薯淀粉也具有类似的变化趋势。下一步将深入分析同一地区不同品种马铃薯淀粉微观结构和粒径结构的差异及与物化性质之间的关系。

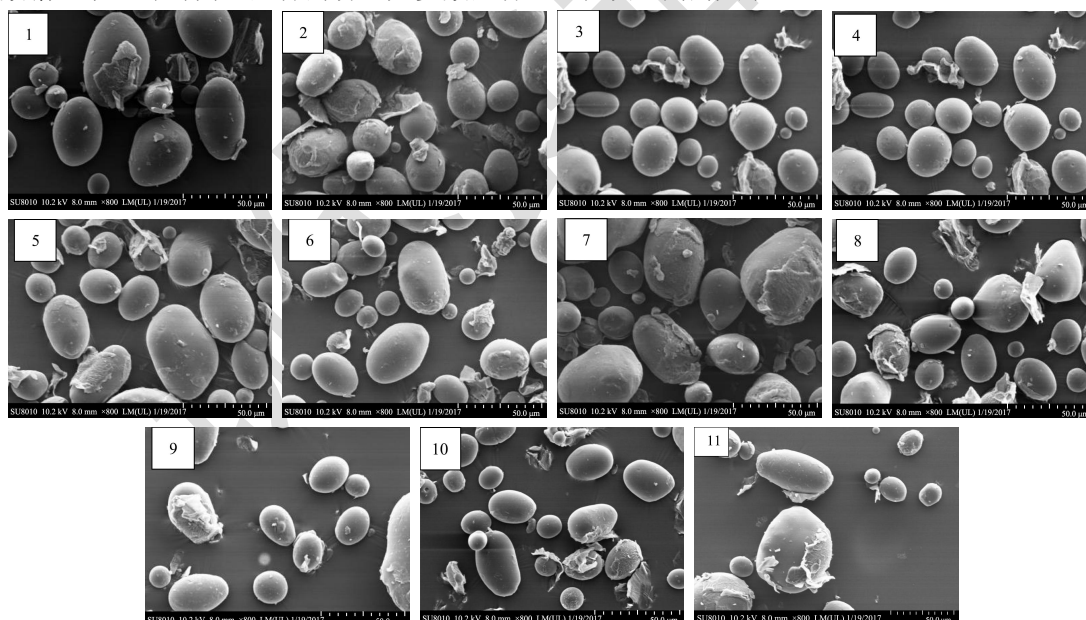


图2 不同品种马铃薯淀粉电子显微镜扫描图

Fig.2 Electron microscope scanning of potato starch of different varieties

注:图中1~11分别对应不同品种马铃薯。

表4 不同样品热力学特性

Table 4 Thermodynamic characteristics of different samples

序号	名称	平衡 24 h			放置 18 h			放置 54 h		
		糊化初始温度 $T_0/^\circ\text{C}$	峰值温度 $T_p/^\circ\text{C}$	糊化焓值 $\Delta H_g/(\text{J/g})$	$T_0/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	老化焓值 $\Delta H_r/(\text{J/g})$	$T_0/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$\Delta H_r/(\text{J/g})$
1	垦薯 1 号	64.26±0.31 ^{cA}	68.58±0.69 ^{bA}	11.22±0.21 ^{bcA}	58.28±0.33 ^{aB}	65.63±0.57 ^{aB}	1.86±0.06 ^{bB}	58.21±0.32 ^{aB}	64.04±0.23 ^{abcC}	0.68±0.03 ^{eC}
2	布尔斑克	63.89±0.16 ^{cdA}	68.31±0.23 ^{bA}	11.62±1.15 ^{abcA}	55.26±0.19 ^{bcB}	63.95±0.53 ^{bB}	1.40±0.23 ^{cB}	54.45±0.63 ^{fC}	64.72±1.01 ^{aB}	1.53±0.09 ^{dB}
3	抗疫白	64.84±0.14 ^{bA}	68.34±0.16 ^{bA}	11.03±0.31 ^{bcA}	55.21±1.07 ^{bcB}	64.01±0.49 ^{bccB}	1.14±0.05 ^{dB}	52.87±0.12 ^{gC}	62.97±0.20 ^{cdC}	1.49±0.01 ^{dB}
4	克新 27	63.58±0.36 ^{deA}	67.01±0.30 ^{dA}	7.31±1.00 ^{eA}	56.13±0.28 ^{bc}	62.76±0.05 ^{dC}	0.72±0.04 ^{eB}	58.25±0.98 ^{aB}	63.99±0.52 ^{abcB}	1.00±0.09 ^{FB}
5	陇 14	62.81±0.36 ^{fA}	66.97±0.35 ^{dA}	10.56±0.67 ^{cA}	55.65±0.33 ^{bcB}	63.88±0.15 ^{cB}	1.45±0.04 ^{eB}	55.86±0.50 ^{cdeB}	63.59±0.36 ^{abcdB}	1.45±0.12 ^{dB}
6	LZ111	62.75±0.39 ^{fA}	66.55±0.41 ^{dA}	10.67±0.13 ^{bcA}	58.53±0.66 ^{aB}	61.38±1.04 ^{eC}	0.26±0.02 ^{fC}	57.60±0.82 ^{abB}	64.21±0.47 ^{abB}	0.47±0.03 ^{hB}
7	陇薯 9 号	61.25±0.19 ^{gA}	64.56±0.36 ^{fA}	9.36±0.38 ^{dA}	58.29±0.88 ^{aB}	64.32±0.47 ^{bcA}	0.40±0.04 ^{fC}	56.66±0.58 ^{bcC}	62.73±0.48 ^{dB}	0.89±0.01 ^{FB}
8	陇薯 7 号	61.75±0.22 ^{gA}	65.31±0.60 ^{eA}	11.63±0.29 ^{abcA}	54.77±0.48 ^{cC}	61.88±0.87 ^{deC}	1.42±0.17 ^{eB}	56.11±0.78 ^{cdB}	63.29±0.64 ^{bcdB}	1.69±0.02 ^{cB}
9	LY08104-1 2	63.09±0.37 ^{efA}	67.64±0.39 ^{cA}	11.00±0.21 ^{bcA}	58.02±0.69 ^{aB}	64.39±0.36 ^{bcB}	1.99±0.09 ^{bB}	54.89±1.35 ^{defC}	63.45±0.70 ^{bcdB}	1.86±0.12 ^{bB}
10	陇薯 8 号	62.96±0.46 ^{fA}	66.96±0.26 ^{dA}	11.68±0.52 ^{abA}	55.71±0.96 ^{bcB}	65.01±0.54 ^{abB}	1.58±0.02 ^{eB}	54.62±0.12 ^{efB}	62.64±1.28 ^{dC}	1.24±0.04 ^{eB}
11	荷兰薯	65.54±0.46 ^{aA}	69.56±0.06 ^{aA}	12.39±0.26 ^{aA}	54.89±1.13 ^{cB}	62.84±0.71 ^{dB}	3.79±0.14 ^{aB}	51.22±0.66 ^{hC}	60.54±0.24 ^{eC}	3.45±0.11 ^{aB}

注：小写字母为同列的显著性差异，大写字母为同一行的显著性差异 ($p<0.05$)。

表5 不同样品黏度特性

Table 5 Viscosity characteristics of different samples

序号	名称	峰值时间 (TP)/min	峰值粘度 (PV)/BU	谷值粘度 (TV)/BU	最终粘度 (FV)/BU	崩解值 (BD)/BU	回生值 (SB)/BU	糊化温度 (PT)/ $^\circ\text{C}$
1	垦薯 1 号	47.30±0.61 ^b	416.33±3.03 ^k	378.03±1.79 ^h	548.03±1.35 ^g	38.23±1.08 ^h	169.75±1.85 ^g	68.63±0.93 ^{ab}
2	布尔斑克	51.20±0.56 ^a	484.67±2.02 ^h	461.78±2.01 ^{de}	641.67±1.04 ^f	23.45±0.93 ⁱ	180.53±2.03 ^f	67.80±0.60 ^{bc}
3	抗疫白	44.51±0.03 ^c	648.02±2.34 ^c	560.38±1.82 ^a	798.05±1.21 ^a	88.05±0.59 ^e	238.64±1.98 ^c	67.50±0.50 ^{bcd}
4	克新 27	46.46±0.43 ^b	512.54±2.56 ^g	451.67±2.06 ^{ef}	682.00±1.38 ^e	57.47±0.83 ^f	227.59±2.37 ^d	66.27±0.85 ^{cde}
5	陇 14	43.16±0.70 ^{de}	561.00±2.12 ^f	465.09±1.92 ^d	721.28±1.27 ^c	98.65±1.24 ^d	256.75±1.75 ^b	65.33±0.55 ^{ef}
6	LZ111	42.46±0.72 ^{de}	666.00±2.43 ^b	506.54±2.65 ^b	810.56±1.82 ^a	160.39±0.92 ^b	304.64±1.46 ^a	64.04±0.85 ^f
7	陇薯 9 号	41.33±0.45 ^f	713.67±2.51 ^a	495.33±1.51 ^c	807.33±1.03 ^a	219.25±0.51 ^a	312.54±0.63 ^a	62.27±0.60 ^g
8	陇薯 7 号	43.36±0.57 ^d	594.33±1.51 ^d	496.67±1.97 ^{bc}	741.48±1.61 ^b	97.38±1.64 ^d	244.58±1.18 ^c	64.73±0.67 ^{ef}
9	LY08104-1 2	42.19±0.72 ^{ef}	577.67±2.51 ^e	445.23±1.67 ^f	642.28±1.27 ^f	133.73±0.74 ^c	197.92±1.52 ^e	66.06±1.15 ^{de}
10	陇薯 8 号	42.10±1.01 ^{ef}	594.02±1.54 ^d	462.67±2.54 ^d	699.06±1.58 ^d	133.85±1.63 ^c	237.64±1.86 ^c	65.43±0.46 ^{ef}
11	荷兰薯	50.78±0.30 ^a	463.67±2.49 ⁱ	417.24±1.99 ^e	554.83±1.52 ^g	46.90±0.76 ^g	136.94±1.17 ^h	69.60±0.86 ^a

注：不同字母代表同一列的显著性差异。

表 6 不同品种马铃薯结构与功能特性相关性分析

Table 6 Correlation analysis of structural and functional characteristics of different potato varieties

	直链淀粉	D ₅₀ 值	起始糊化温度	峰值温度	糊化焓值	峰值时间	峰值粘度	谷值黏度	最终黏度	崩解值	回生值	糊化温度	贮能模量	耗能模量	损耗因子	
直链淀粉	1.000															
D ₅₀ 值	-0.576 5*	1.000														
起始糊化温度	-0.166 6	0.414 1	1.000													
峰值温度	-0.146 0	0.359 4	0.961 0**	1.000												
糊化焓值	0.000	0.596 3*	0.304 7	0.416 7	1.000											
峰值时间	0.041 9	0.291 9	0.733 6**	0.730 5**	0.239 7	1.000										
峰值粘度	0.356 9	-0.333 7	-0.626 5*	-0.711 8**	-0.206 6	-0.789 7**	1.000									
谷值黏度	0.522 2*	-0.243 2	-0.294 8	-0.429 9	-0.112 0	-0.458 0	0.822 0**	1.000								
最终黏度	0.438 6	-0.444 5	-0.595 0*	-0.709 6**	-0.318 3	-0.690 8*	0.930 3**	0.902 6**	1.000							
崩解值	0.127 8	-0.317 6	-0.732 0**	-0.749 3**	-0.211 3	-0.855 8**	0.881 3**	0.455 6	0.703 7**	1.000						
回生值	0.299 8	-0.551 8*	-0.766 0**	-0.840 6**	-0.435 9	-0.789 8**	0.879 6**	0.671 5	0.924 9**	0.815 1**	1.000					
糊化温度	-0.213 5	0.502 4*	0.933 9**	0.950 8**	0.406 2	0.823 1**	-0.824 3**	-0.493 9	-0.789 8**	-0.875 5**	-0.925 0**	1.000				
贮能模量	-0.275 2	0.116 5	-0.136 0	-0.085 3	0.119 4	-0.018 4	-0.172 7	-0.090 0	-0.082 3	-0.186 6	-0.062 5	0.012 2	1.000			
耗能模量	-0.338 5	0.366 9	-0.075 2	-0.065 6	0.268 2	0.046 4	-0.145 5	-0.063 4	-0.096 9	-0.167 0	-0.111 4	0.062 7	0.944 2**	1.000		
损耗因子	0.000 7	0.350 8	0.068 4	-0.037 0	0.337 5	-0.047 9	0.353 2	0.262 1	0.261 7	0.335 0	0.221 3	-0.102 3	-0.396 6	-0.130 7	1.000	

注：“*”代表 $p < 0.05$ ；“**”代表 $p < 0.01$ 。

2.5 淀粉的黏度特性

表 5 为不同品种淀粉的黏度特性。表 5 显示，不同品种各黏度特性指标差异显著。淀粉的糊化温度表明淀粉糊化的难易程度，糊化温度越低，淀粉越易于糊化，淀粉糊化的难易程度直接影响着淀粉的加工特性。荷兰薯的糊化温度最高，为 69.60 °C，陇薯 9 号的糊化温度最低，为 62.27 °C，说明陇薯 9 号更易于加工成熟制品，淀粉的糊化温度越高，糊化后越容易老化。崩解值越高，说明淀粉糊的稳定性、抗剪切力和耐搅拌力较差^[30]。回生值是淀粉冷却后的重新排列，与产品的老化程度有关，回生值越大，产品越容易老化^[31]。

2.6 流变学特性

图 3~图 8 为不同样品在升温和降温过程的储能模量 (G')、耗能模量 (G'') 和损耗因子 ($\tan\delta$) 的变化趋势图。储能模量表征淀粉糊产生弹性变形难易程度的指标，值越大，表明淀粉糊在一定外力作用下，所发生的变形越小；耗能模量表征能量消散的黏性性质。图 3 和图 4 结果显示，储能模量大于耗能模量，说明马铃薯淀粉糊的弹性大于黏性，符合非牛顿流体。图 3 中不同样品的储能模量随着温度的升高而逐渐减低，说明随着温度的升高，淀粉逐渐糊化，并逐渐形成柔软的凝胶体，在一定外力作用条件下，淀粉所发生的变形随着温度的升高而增大。同时随着温度的升高，淀粉颗粒逐渐膨胀，淀粉颗粒中残留的结晶区域熔化，淀粉颗粒变形、破裂、崩解，分子流动性增加，导致链间相互作用减弱，进而导致 G' 逐渐降低^[23]。从图 3 中可以看出，在同一温度条件下，陇 14 和陇薯 7 号的储能模量显著高于其他品种，说明这两种淀粉糊体系内部的分子链之间的缠结点更多，凝胶体系网络结构更强，即具有更强的三维网络结构。而 LZ 111 的储能模量最低，说明在相同外力作用条件下陇 14 形成的淀粉糊变形较小，而 LZ 111 形成的淀粉糊变形较大。图 4 为不同品种随着温度升高耗能模量的变化情况，耗能模量表示初始流动所需能量，表明淀粉糊黏性程度的变化，从图 4 中发现不同品种的耗能模量变化显著，在相同温度条件下，陇 14 和陇薯 7 号显著高于其他品种，而 LZ 111 的耗能模量最低。

损耗因子 ($\tan\delta$) 为 G'' 和 G' 的比值， $\tan\delta$ 越小，说明体系的弹性成分越多， $\tan\delta$ 越大，表明体系的黏性比例越大，流动性越强，反之则弹性比例较大。图 5 中结果显示，随着温度的升高， $\tan\delta$ 值逐渐增大，说明淀粉糊体系的弹性、刚性逐渐增加。而抗疫白在 100 °C

时有一个明显的不同变化，将是下一步研究的重点。

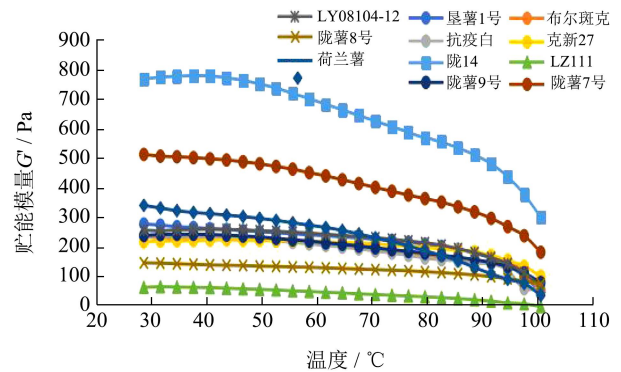


图 3 升温过程储能模量随着温度的变化

Fig.3 The energy storage modulus varies with temperature during the heating process

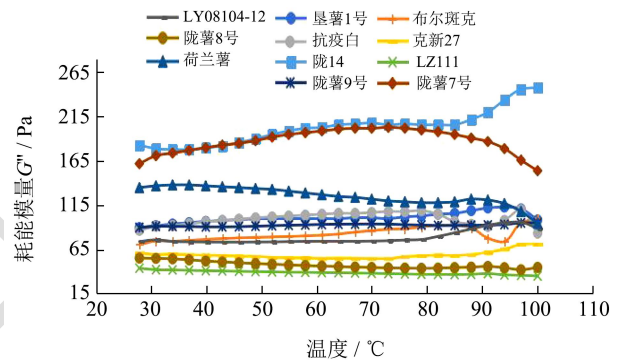


图 4 升温过程耗能模量随着温度的变化

Fig.4 The energy dissipation modulus of the heating process changes with temperature

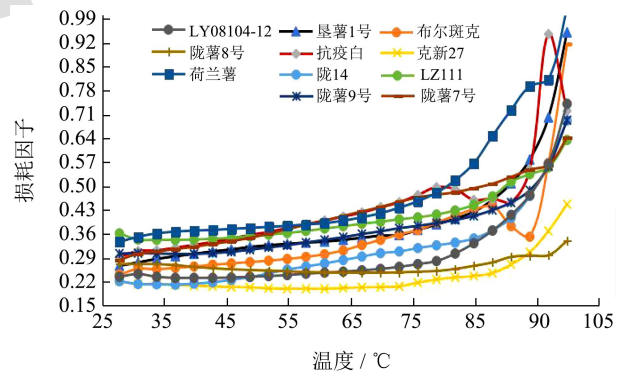


图 5 升温过程损耗因子随着温度的变化

Fig.5 Change of loss factor with temperature during heating process

图 6 为温度降低过程储能模量的变化，是先升高后降低，然后再逐渐升高的过程，说明糊化后在降温冷却期间淀粉糊的黏弹性增加^[32]。说明随着温度的降低，糊化的淀粉开始凝胶化，淀粉颗粒间通过相互作用而形成的网络结构逐渐增强。在相同温度条件下，陇 14 和陇薯 7 号均显著高于其他品种，说明陇 14 的凝胶强度最强，LZ 111 凝胶强度最弱。图 7 为降温过程中耗能模量的变化，总体趋势为随着温度的降低，

数值逐渐降低,说明随着淀粉糊的逐渐老化,体系的黏度逐渐减低,表示链段和分子链相对移动造成的黏性形变和内摩擦引起的能量损耗,说明淀粉糊的结构逐渐趋于稳定状态^[33]。图8为降温过程中损耗因子的变化,总体趋势为随着温度的降低,数值先降低后升高再降低,说明随着淀粉糊的冷却,体系弹性先占有主导作用,随后黏性增加,而后弹性又有一个显著升高,并在90℃后弹性成分逐渐增多,体系的黏度逐渐减低,说明随着温度的降低,体系的凝胶强度逐渐增加。

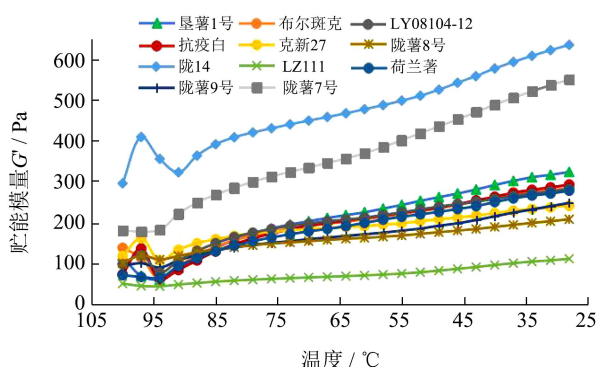


图6 降温过程储能模量随着温度的变化

Fig.6 The energy storage modulus varies with temperature during cooling process

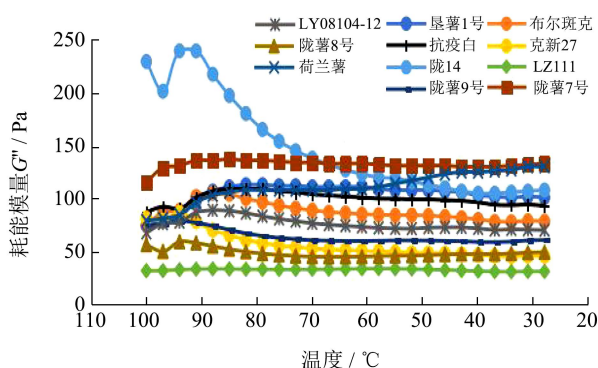


图7 降过温耗能模量随着温度的变化

Fig.7 The energy dissipation modulus varies with temperature

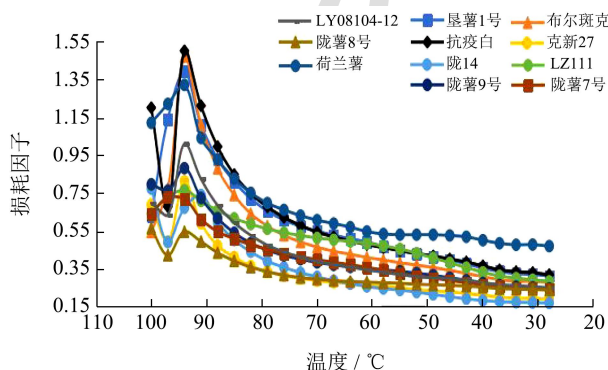


图8 降温过程耗能模量随着温度的变化

Fig.8 The energy dissipation modulus of the cooling process changes with temperature

2.7 马铃薯淀粉品质特性间的相关性分析

以上分析发现,不同品种马铃薯淀粉品质特性之间变化显著,但变化趋势各有不同,为了更进一步的分析各品质特性之间的关系,将马铃薯的直链淀粉含量、颗粒 D_{50} 值、平衡24h热特性的 T_0 、 T_p 、 ΔH_g ,黏度特性、流变特性升温过程的28℃条件下的储能模量、耗能模量和损耗因子进行相关性分析(如表6所示),比较分析马铃薯淀粉不同微观结构特性与功能特性之间的关系,为马铃薯淀粉的进一步加工利用及育种提供一定的依据。表6结果显示,马铃薯淀粉的很多指标之间呈显著的相关性。如直链淀粉含量与 D_{50} 值之间呈显著的负相关($r=-0.5765$),即淀粉颗粒越大,直链淀粉含量越小^[34]; D_{50} 值与淀粉的糊化焓值($r=0.5963$)、糊化温度($r=0.5024$)呈显著的正相关,与回生值($r=-0.5518$)呈显著的负相关;淀粉热特性的起始糊化温度与峰值温度呈极显著的正相关($r=0.9610$),与黏度特性的峰值时间($r=0.7336$)、糊化温度($r=0.9339$)呈极显著的正相关,说明热特性和黏度特性得到了类似的结论,与糊化特性的峰值黏度($r=-0.6265$)、最终黏度($r=-0.5950$)、崩解值($r=-0.7320$)、回生值($r=-0.7660$)呈显著的负相关,说明起始糊化温度越低,淀粉越不易回生(Diego, 2017)。黏度特性的峰值温度与峰值时间($r=0.7305$)、糊化温度($r=0.9508$)有极显著的正相关,与峰值黏度($r=-0.7118$)、最终黏度($r=-0.7096$)、崩解值($r=-0.7493$)、回生值($r=-0.8496$)呈极显著的负相关;谷值黏度与最终黏度呈极显著的正相关($r=0.9026$);最终黏度与崩解值($r=0.7037$)、回生值($r=0.9249$)呈极显著的正相关,与糊化温度($r=-0.7898$)呈极显著的负相关;崩解值与回生值($r=0.8151$)呈极显著的正相关,与糊化温度($r=-0.8755$)呈极显著的负相关;流变特性的储能模量与耗能模量呈极显著的正相关($r=0.9442$),与Zhu等^[34]结果相一致。

3 结论

淀粉的粒形为圆形或椭圆形,颗粒大小 D_{50} 值为59.40~323.90 μm ,所有品种在40~59 μm 和123~344 μm 左右出现峰值,而部分品种在723.13 μm 、758.83 μm 和1404 μm 左右分别出现了大量的峰值,使得不同品种颗粒差异显著。荷兰薯的热力学特性和黏度特性显著高于其他品种,其变化趋势与粒径一致。陇14和陇薯7号的流变学特性显著高于其他品种。

相关性进一步揭示了淀粉各品质间的关系及变化趋势,即淀粉颗粒越大,直链淀粉含量越小; D_{50} 值越

大, 淀粉的糊化焓值、糊化温度越大, 回生值越小; 淀粉热特性的起始糊化温度与黏度特性的峰值时间、糊化温度具有相同的变化趋势, 而与糊化特性的峰值黏度、最终黏度、崩解值、回生值具有相反的变化趋势, 说明起始糊化温度越低, 淀粉越不易回生。流变特性的贮能模量与耗能模量呈极显著的正相关。

4 展望

不同淀粉品质特性之间的差异及相互关系, 为马铃薯淀粉的进一步加工利用和品种选育提供依据。马铃薯淀粉的微观结构和功能特性与面条、馒头、香肠的品质特性的影响很少见报道, 为了更好地推广马铃薯主粮化, 不断研究马铃薯淀粉的品质特性与产品品质特性的关系, 对于优化马铃薯产品的品种选择、品种培育具有重要的意义。下一步, 将深入分析测定不同品种马铃薯淀粉中磷酸盐含量, 直链淀粉分子量和链长分布等, 找到各马铃薯品种不同寻常的加工特性与其淀粉微观结构之间关联性, 为我国马铃薯品种培育提供有力筛选辅助方法。

参考文献

- [1] FAOSTAT. [http://faostat3.fao.org/home/E\[DB/OL\]](http://faostat3.fao.org/home/E[DB/OL]). 2021
- [2] 利辛斯卡, 莱斯兹克辛斯基. 刘孟君翻译. 马铃薯加工原理与工艺技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2019
- [3] Berski W, Ziobro R. Pasting and gel characteristics of normal and waxy maize starch in glucose syrup solutions [J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 79: 253-258
- [4] Ren F, Dong D, Yu B, et al. Rheology, thermal properties, and microstructure of heat induced gel of whey protein-acetylated potato starch [J]. *Starch-Stärke*, 2017, 69(9-10): 1600344
- [5] Hoover R, Hughes T, Chung H J, et al. Composition, molecular structure, properties, and modification of pulse starches: a review [J]. *Food Research International*, 2010, 43(2): 399-413
- [6] Van Der Sman Rgm, Broeze J. Structuring of indirectly expanded snacks based on potato ingredients: a review [J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 114: 413-425
- [7] Liu W, Budtova T. Dissolution of unmodified waxy starch in ionic liquid and solution rheological properties [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 93(1): 199-206
- [8] Shah U, Naqash F, Gani A, et al. Art and science behind modified starch edible films and coatings: a review [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2016, 15: 568-580
- [9] Dar Y L, Light J M. *Food Texture Design and Optimization* [M]. UK: Wiley Online Library, 2014: 93-107
- [10] Van Der Sman Rg, Broeze J. Multiscale analysis of structure development in expanded starch snacks [J]. *Journal of Physics - Condensed Matter*, 2014, 26: 464103
- [11] Kumar L, Brennan M, Zheng H, et al. The effects of dairy ingredients on the pasting, textural, rheological, freeze-thaw properties and swelling behaviour of oat starch [J]. *Food Chemistry*, 2018, 245: 518-524
- [12] Monjezi S, Schneier M, Choi J, et al. The shape effect on the retention behaviors of ellipsoidal particles in field-flow fractionation: theoretical model derivation considering the steric-entropic mode [J]. *Journal of Chromatography A*, 2019, 1587: 189-196
- [13] 王子逸, 张宾佳, 赵思明, 等. 不同品种马铃薯淀粉的多层次结构和理化特性研究[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(3): 24-30
- [14] Singh J, Mccarthy O J, Singh H. Physicochemical and morphological characteristics of New Zealand taewa (Maori potato) starches [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2006, 64(4): 569-581
- [15] Kaur A, Singh N, Ezekielr, et al. Physicochemical, thermal and pasting properties of starches separated from different potato cultivars grown at different locations [J]. *Food Chemistry*, 2007, 101(2): 643-651
- [16] 王丽, 罗红霞, 李淑荣, 等. 马铃薯淀粉提取方法的优化研究[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(32): 84-85
- [17] 王丽, 罗红霞, 李淑荣, 等. 马铃薯中直链淀粉和支链淀粉含量测定方法的优化[J]. *食品工业科技*, 2017, 17: 220-223
- [18] 张敏, 刘希伟, 赵城, 等. 不同 Waxy 蛋白亚基型小麦胚乳淀粉粒度分布特征[J]. *河北科技师范学院学报*, 2015, 29(4): 47-54
- [19] Meyer D, Bayarri S, Tarrega E, et al. Inulin as texture modifier in dairy products [J]. *Food Hydrocolloids*, 2011, 25(8): 1881-1890
- [20] Kaur S, Panesar P S, Bera M B, et al. Physicochemical, textural, pasting, and in vitro digestion properties of some basmati and non-basmati rice cultivars [J]. *International Journal of Food Properties*, 2014, 17: 1055-1066
- [21] Diego R T, Walter M A, Henry Alexander V H, et al. Thermal and physicochemical properties of starches from three Colombian rice varieties [J]. *Agronomía Colombiana*, 2017, 35(1): 116-124
- [22] Cai J W, Chiang J H, Tan M Y P, et al. Physicochemical properties of hydrothermally treated glutinous rice flour and xanthan gum mixture and its application in gluten-free noodles [J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 186: 1-9
- [23] Fuentes C, Kang I, Lee J, et al. Fractionation and

- characterization of starch granules using field-flow fractionation (FFF) and differential scanning calorimetry (DSC) [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2019, 411: 3665-3674
- [24] 柳宁,罗登欢,陈名钰,等.无果枸杞叶粉对小麦面团流变特性及面包品质的影响[J].*食品工业科技*,2021,42(3):88-94
- [25] 王龙飞,杨倩,李广浩,等.吐丝后不同阶段干旱胁迫对糯玉米子粒产量和淀粉品质的影响[J].*玉米科学*,2021,29(1):69-76
- [26] Liu Y, Xu Y, Yan Y, et al. Application of Raman spectroscopy in structure analysis and crystallinity calculation of corn starch [J]. *Starch-Stärke*, 2015, 67: 612-619
- [27] Qian S Y, Tang M Q, Gao Q, et al. Effects of different modification methods on the physicochemical and rheological properties of Chinese yam (*Dioscorea opposita* Thunb.) starch [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2019, 116
- [28] Wei C X, Zhang J, Chen Y F, et al. Physicochemical properties and development of wheat large and small starch granules during endosperm development [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2010, 32: 905-916
- [29] 张奎亮,代养勇,张慧,等.超声处理对马铃薯淀粉结构特性及理化性质的影响[J].*食品科学*,2018,39(5):128-135
- [30] 刘兴丽,赵双丽,靳艳军,等.挤压膨化紫薯粉对小麦面团糊化特性和热机械学特性的影响[J].*食品科学*,2019,40(15):106-112
- [31] 刘蒙,曲智雅,李小定,等.紫薯淀粉理化性质的研究[J].*中国粮油学报*,2013,28(5):24-30
- [32] 张玲.玛咖淀粉的物理化学性质及分子结构研究[D].无锡:江南大学,2018
- [33] Ek K L, Wang S, Copeland L, et al. Discovery of a low-glycaemic index potato and relationship with starch digestion *in vitro* [J]. *British Journal of Nutrition*, 2014, 111: 699-705
- [34] Zhu F, Wang Y J. Rheological and thermal properties of rice starch and rutin mixtures [J]. *Food Research International*, 2012, 49: 757-762