

不同中薯系列马铃薯淀粉组成与理化性质的差异分析

周童童** 梁 单** 刘 伟 张婷婷 张 良 刘倩楠 胡小佳 胡宏海*

(中国农业科学院农产品加工研究所/农业农村部农产品加工重点实验室,北京 100193)

摘 要:为分析不同品种马铃薯淀粉组成与理化性质的差异,本研究以 15 个不同品种中薯系列马铃薯为原料提取淀粉,并对其组成和理化性质进行了检测及相关性分析。光学显微镜和扫描电镜结果表明,马铃薯淀粉颗粒的粒径分布范围广,颗粒形貌存在差异,小颗粒多为卵圆形,大颗粒多为椭圆形、拉长形以及不规则形。不同马铃薯淀粉的理化性质存在显著差异,其溶解度、膨润力范围分别为 25.92%~28.74%,4.90~6.26 g·g⁻¹;糊化初始温度(T_0)、峰值温度(T_p)、终止温度(T_c)、糊化焓值(ΔH)范围分别为 61.44~65.55℃、64.49~68.69℃、67.87~72.54℃、7.21~13.49 J·g⁻¹;峰值黏度、衰减值、回生值范围分别为 2 499.3~3 220.4、514.0~2 218.4、401.0~884.1 BU。相关性分析结果表明,马铃薯淀粉中磷含量与峰谷黏度呈显著正相关,与溶解度呈显著负相关;平均粒径 $D[4,3]$ 与短程有序参数 1 045/1 022 cm⁻¹ 和 1 022/995 cm⁻¹ 均呈显著正相关; T_0 与峰值黏度呈显著负相关;糊化温度与峰值黏度和崩解值均呈显著负相关,与峰谷黏度、最终黏度和回生值均呈显著正相关。本研究结果可为中薯系列马铃薯淀粉在食品加工中的应用提供科学依据。

关键词:马铃薯;淀粉;成分;理化性质;相关性

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2022.04.0766

马铃薯(*Solanum tuberosum*)又名土豆、洋芋等,属茄科,为世界第四大粮食作物,同时也是重要的植物淀粉来源,新鲜马铃薯中淀粉含量一般为 9%~25%^[1]。与其他薯类、禾谷类淀粉相比,马铃薯淀粉颗粒的粒径偏大,粒径分布范围广,支链淀粉、磷等矿物质含量高,具有糊化初始温度低、成糊黏度和透明度高、吸水能力好及膨胀度高等特点。马铃薯淀粉在食品领域的应用十分广泛,可作为膨化食品、方便食品的优质原料,可改善肉制品的流变性质、减少水分流失、提升产品口感且不产生异味^[2]。

马铃薯淀粉的组成、结构和理化性质决定了其在食品工业领域的应用效果,不同品种马铃薯淀粉间的理化性质、加工适宜性的差异性研究备受关注^[3]。王子逸等^[1]比较了不同品种(华薯 1 号、0623、0687、中薯 5 号和 9728-04)马铃薯淀粉的晶体结构、微观结构、糊化特性以及淀粉凝胶的质构特性,发现马铃薯淀

粉结构与淀粉凝胶质构特性具有一定的相关性。汪兰等^[4]发现不同品种(华恩 1 号、南中 552、鄂薯 3 号、费乌瑞它、中薯 5 号、米拉、双丰 5 号和鲁引 1 号)马铃薯淀粉中直链淀粉含量与磷含量差异较大,直链淀粉含量和磷含量分别与储能模量最大值温度、储能模量峰值、糊化起始温度、峰值温度、终止温度、溶解度和膨润力呈正相关,与结晶度呈负相关。Dos Santos 等^[5]发现不同品种(Asterix、Atlantic、BRS Clara、Ágata、Mustang 和 Fontane)马铃薯淀粉中直链淀粉含量存在显著性差异,通过相关性分析发现马铃薯淀粉中直链淀粉含量与淀粉起始糊化温度、最高糊化温度和终止糊化温度呈负相关,磷含量与淀粉的结晶度、峰值黏度和崩解值呈负相关。

马铃薯淀粉的开发和利用对马铃薯产业增值至关重要,其产品品质与马铃薯品种密切相关。中薯系列马铃薯是中国农业科学院蔬菜花卉研究所培育的优良

收稿日期:2021-03-12 接受日期:2021-04-21

基金项目:中国农业科学院农业科技创新工程(CAAS-ASTIP-2021-IFST-01),中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(S2021JBKY-03),财政部和农业部:国家现代农业产业技术体系资助(CARS-09-P27),公益性行业(农业)科研专项(201503001-2)

作者简介:周童童,女,主要从事农产品加工与贮藏工程研究。E-mail:z18800175825@163.com;

梁单,女,主要从事农产品加工利用研究。E-mail:Liadan2020@163.com。* 同为第一作者。

* 通讯作者:胡宏海,男,研究员,主要从事农产品加工理论与技术研究。E-mail:huhonghai@caas.cn

品种,已有学者对其农艺性状、产量、抗病性等方面开展了广泛研究^[6]。然而,关于中薯系列马铃薯的加工适宜性,特别是其淀粉结构与性质及其相关性的研究鲜有报道。探明中薯系列马铃薯淀粉组成、结构、理化性质的差异对筛选适合不同烹饪加工要求的专用化马铃薯品种,推动中薯系列马铃薯多样化利用具有重要意义。基于此,本试验以 15 个不同中薯系列马铃薯淀粉为原料,对其组成和理化性质及其相关性展开系统研究,以期马铃薯加工品种选育和中薯系列马铃薯淀粉在食品中的开发利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

15 个不同中薯系列马铃薯原料(中薯 3、4、5、6、9、11、13、15、17、18、19、20、21、22、26 号),由中国农业科学院蔬菜花卉研究所察北马铃薯试验基地提供;试验中所用化学试剂(浓硫酸、硼酸、无水乙醚、石油醚等均为分析纯),国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器与设备

BGZ-140 电热鼓风干燥箱,上海博讯实业有限公司医疗设备厂;S-570 扫描电子显微镜,日本日立公司;K1100/K1100F 全自动凯氏定氮仪,济南海能仪器股份有限公司;SER 148/6 索式抽提仪,意大利 VELP 公司;Microtrac S3500 激光粒径分析仪,麦奇克(美国)有限公司;Q200 差示量热扫描仪,美国 TA 公司;傅立叶变换红外光谱仪,德国 TENSOR27 公司;Brabender 微型黏度糊化仪,德国布拉本德公司;Vista Pro ICP-OES 电感耦合等离子体原子发射光谱仪,美国 Varian Pty 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 马铃薯淀粉的制备 选取新鲜、无病、无腐烂的马铃薯,清洗、去皮、切成小块,置入蒸馏水中,打浆机破碎得到马铃薯浆。用 100 目滤布过滤马铃薯浆,自然沉降后,倾去上清液得到马铃薯淀粉粗提物。蒸馏水反复清洗 6~7 次,除去褐粉层,40℃干燥至恒重,粉碎过 100 目筛,得到马铃薯淀粉^[4]。

1.3.2 成分分析 蛋白质含量测定:参照 Zaidul 等^[7]的方法;灰分含量测定:参照 Ye 等^[8]的方法;脂质含量测定:参照 Zaidul 等^[7]的方法;磷含量测定:参照徐芬^[9]的方法;直链淀粉含量的测定:参照徐芬^[9]的方法,采用 Megazyme 直链淀粉试剂盒测定。

1.3.3 淀粉颗粒形貌分析

1.3.3.1 光学显微镜分析 将马铃薯淀粉样品按 2.0% 的比例调成淀粉乳,滴一滴于载玻片上,盖上盖

玻片,放到载物台上,放大 400 倍,在自然光下观察样品的颗粒形貌并拍照^[4]。

1.3.3.2 扫描电镜分析 将淀粉均匀地撒在粘有导电胶的载物台上,用吸耳球吹去多余的淀粉颗粒。在真空条件下喷金处理,最后将处理好的淀粉放入样品室观察样品的颗粒形貌,并拍照^[1]。

1.3.4 粒径测定 将约 1.25 mg 马铃薯淀粉分散于 25 mL 蒸馏水中形成 5.0% 淀粉乳液,采用激光粒径分析仪进行粒径分布测定。参数设置:散射光角度固定 90°,温度为 25℃,光源为固定激光,运行 20 s。颗粒的折射指数为 1.53^[10]。

1.3.5 红外光谱分析 将 1 mg 淀粉样品与 120 mg 溴化钾(KBr)混合,充分研磨均匀后,放入模具中压片。然后在扫描分辨率 4 cm⁻¹、扫描次数 32 次、扫描波数范围 400~4 000 cm⁻¹ 的测试条件下进行红外光谱测定^[11]。

1.3.6 膨润力和溶解度的测定 参照 Xie 等^[12]的方法。将 0.5 g 马铃薯淀粉均匀分散于 25 mL 蒸馏水中,80℃水浴条件下加热 20 min。水浴加热过程中对样品进行搅拌,避免糊化不均匀。糊化后的马铃薯淀粉在冰水浴中冷却至常温,9 000×g 条件下离心 15 min。收集上层清液并完全转移到培养皿中,在 105℃条件下干燥至恒重,称取干物质与底部沉淀物的质量。按照公式(1)、(2)计算膨润力和溶解度:

$$\text{溶解度} = (\text{上清液干物质质量} / \text{样品干物质质量}) \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{膨润力} (\text{g} \cdot \text{g}^{-1}) = (\text{沉淀部物质质量}) / [(\text{样品干物质质量} \times (100\% - \text{溶解度}))] \quad (2)$$

1.3.7 热力学测定 参照 Dos Santos 等^[5]的方法。分别准确称取不同品种马铃薯淀粉 3.0 mg 于铝盒内,加入 10 μL 超纯水后密封铝盒,常温下平衡 24 h。以空铝盒做空白对照,设置温度范围为 25~90℃,升温速率为 5℃·min⁻¹,可得到样品的糊化初始温度(T_0)、糊化峰值温度(T_p)、糊化终止温度(T_e)及糊化焓值(ΔH)。

1.3.8 糊化特性测定 分别配制 4% 的淀粉乳 100 mL,混匀后移入 Brabender 微型黏度糊化仪测量杯中,从 30℃开始升温,以 3℃·min⁻¹ 的速率升温到 95℃后保温 5 min,再以 3℃·min⁻¹ 的速率降温到 50℃后保温 15 min,得到 Brabender 黏度曲线^[13]。

1.4 数据分析

试验均重复测定 3 次,数据结果以平均值±标准差表示,利用 Origin 8.0 软件制图。用 SAS 9.2 软件进行相关性分析和方差分析,并得到 Pearson 相关系数,检验的显著水平分别为 $P < 0.05$ 或 $P < 0.01$ 。

2 结果与分析

2.1 不同品种马铃薯淀粉化学成分

不同品种马铃薯淀粉基本成分如表 1 所示。中薯系列马铃薯淀粉蛋白质含量范围为 0.016% (中薯 22 号)~0.092% (中薯 11 号),灰分含量范围为 0.20% (中薯 21 号)~0.35% (中薯 18 号),脂质含量范围为

0.047% (中薯 26 号)~0.172% (中薯 9 号),直链淀粉含量范围为 22.1% (中薯 21 号)~26.8% (中薯 6 号),磷含量范围为 0.490‰~0.936‰,中薯 20 号和中薯 21 号马铃薯淀粉中磷含量较高,分别为 0.936‰和 0.902‰,直链淀粉含量较低,分别为 22.9% 和 22.1%。结果表明不同品种马铃薯的蛋白质、脂质、灰分、磷和直链淀粉含量之间差异显著。

表 1 不同品种马铃薯淀粉化学成分
Table 1 Chemical composition of starches from different varieties of potatoes

品种 Varieties	灰分 Ash/%	蛋白质 Protein/%	脂质 Lipid/%	磷 Phosphorus/‰	直链淀粉 Amylose/%
中薯 3 号 Zhongshu No. 3	0.21±0.01e	0.086±0.00b	0.122±0.03b	0.490±0.01h	25.4±0.20bed
中薯 4 号 Zhongshu No. 4	0.23±0.02d	0.046±0.00e	0.093±0.02e	0.627±0.00d	25.2±0.16def
中薯 5 号 Zhongshu No. 5	0.28±0.01c	0.054±0.00d	0.074±0.03d	0.625±0.00de	25.5±0.40bed
中薯 6 号 Zhongshu No. 6	0.26±0.04c	0.063±0.00c	0.099±0.05c	0.493±0.01h	26.8±0.24a
中薯 9 号 Zhongshu No. 9	0.24±0.01d	0.018±0.00ij	0.172±0.04a	0.510±0.02gh	26.0±0.42b
中薯 11 号 Zhongshu No. 11	0.23±0.03d	0.092±0.00a	0.121±0.03b	0.707±0.02bc	23.6±0.31fg
中薯 13 号 Zhongshu No. 13	0.31±0.03a	0.030±0.00h	0.118±0.02b	0.571±0.01ef	22.8±0.21bed
中薯 15 号 Zhongshu No. 15	0.30±0.01b	0.039±0.00f	0.143±0.03b	0.613±0.02de	25.3±0.28ede
中薯 17 号 Zhongshu No. 17	0.34±0.02a	0.035±0.00g	0.096±0.03c	0.707±0.04bc	24.7±0.25efg
中薯 18 号 Zhongshu No. 18	0.35±0.01a	0.020±0.00i	0.073±0.03d	0.558±0.04fg	25.9±0.18bc
中薯 19 号 Zhongshu No. 19	0.21±0.05d	0.018±0.00ij	0.119±0.04b	0.695±0.01c	24.7±0.30efg
中薯 20 号 Zhongshu No. 20	0.23±0.03d	0.039±0.00f	0.096±0.02c	0.936±0.01a	22.9±0.11h
中薯 21 号 Zhongshu No. 21	0.20±0.02e	0.036±0.00g	0.072±0.01d	0.902±0.02a	22.1±0.35i
中薯 22 号 Zhongshu No. 22	0.27±0.01c	0.016±0.00j	0.049±0.01e	0.755±0.06b	23.5±0.44h
中薯 26 号 Zhongshu No. 26	0.25±0.03c	0.046±0.00e	0.047±0.02e	0.708±0.00bc	25.3±0.27g

注:不同字母表示不同品种间差异显著 ($P<0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 level among different varieties. The same as following.

2.2 不同品种马铃薯淀粉颗粒形貌和粒径分布

如图 1-A、B 所示,不同品种马铃薯颗粒的表面光滑、形态完整,表观形态相似。多数大颗粒形状呈椭圆形、拉长形以及不规则形,而小颗粒多呈卵球形,这与前人关于马铃薯淀粉颗粒形态的研究报道相一致^[8]。不同品种马铃薯淀粉颗粒大小分布存在差异,其中,中薯 3 号、18 号、20 号颗粒大小较为均匀;中薯 15 号、17 号、19 号、21 号颗粒大小差异较为明显;中薯 4 号、15 号、17 号存在部分不规则颗粒。
 d_{10} 代表小于当前数值的淀粉颗粒占到 10%, d_{50} 代表小于当前数值的淀粉颗粒占到 50%, d_{90} 代表小于当前数值的淀粉颗粒占到 90%,对应不同品种马铃薯淀粉的分布范围依次为 28.57~44.88 μm 、63.46~76.76 μm 、97.95~131.00 μm 。 $D[4,3]$ 代表淀粉颗粒体积

加权平均直径, $D[3,2]$ 表示淀粉颗粒表面积加权平均直径, $D[3,2]$ 和 $D[4,3]$ 越接近表明样品的形状越规则,粒径分布越集中^[14]。由表 2 可知,不同品种马铃薯淀粉的粒径分布指标存在差异。中薯 18 号的平均粒径最大($D[3,2]$ 82.06 μm , $D[4,3]$ 58.27 μm),中薯 3 号的平均粒径最小($D[4,3]$ 65.33 μm , $D[3,2]$ 44.67 μm)。

2.3 不同品种马铃薯淀粉的溶解度和膨润力

如图 2 所示,不同品种马铃薯淀粉的溶解度和膨润力存在差异,溶解度范围为 25.92%~30.60%,膨润力范围为 4.90~6.26 $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。中薯 21 号的溶解度最低,为 25.92%,中薯 13 号的溶解度最高,为 30.60%。与溶解度相比,不同马铃薯淀粉之间膨润力的差异更加明显。其中,中薯 4 号的膨润力最低,为 4.90 $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$;中薯 18

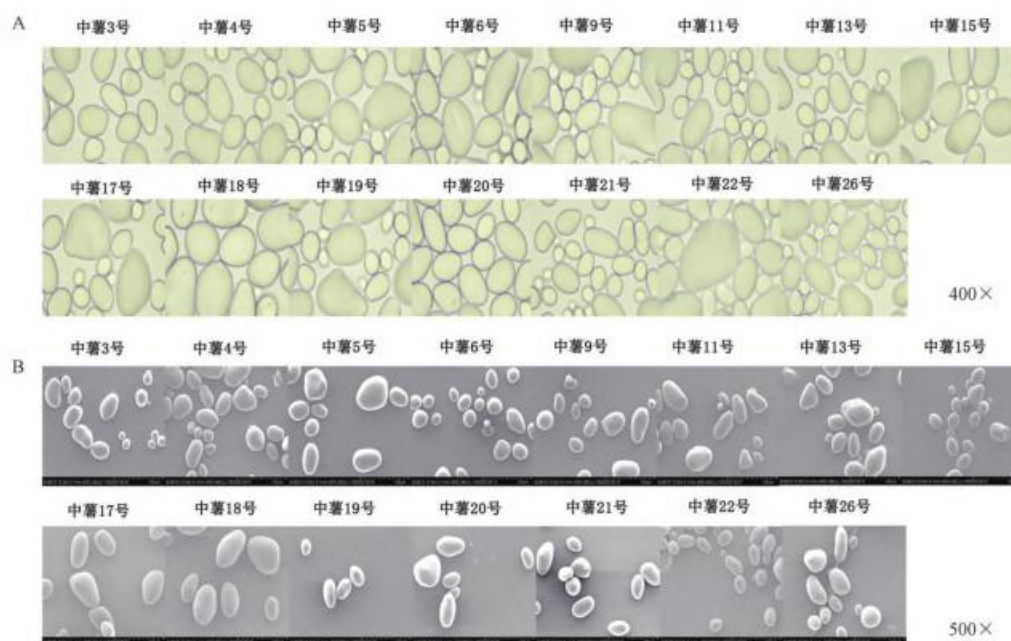


图1 不同品种马铃薯淀粉的光学显微镜图(A)和扫描电镜图(B)

Fig.1 The optical microscopy (A) and scanning electron microscopy (B) of starches from different varieties of potatoes

表2 不同品种马铃薯淀粉的粒径分布

Table 2 The granule size distribution of starch from different varieties of potatoes

品种 Varieties	$d_{10}/\mu\text{m}$	$d_{50}/\mu\text{m}$	$d_{90}/\mu\text{m}$	$D[4,3]/\mu\text{m}$	$D[3,2]/\mu\text{m}$
中薯3号 Zhongshu No. 3	$29.31 \pm 0.68\text{h}$	$63.46 \pm 0.99\text{h}$	$102.45 \pm 1.48\text{h}$	$65.33 \pm 0.74\text{g}$	$44.67 \pm 0.78\text{h}$
中薯4号 Zhongshu No. 4	$37.10 \pm 0.21\text{de}$	$69.94 \pm 0.45\text{cd}$	$109.95 \pm 0.49\text{ef}$	$72.84 \pm 0.02\text{cd}$	$53.11 \pm 1.01\text{e}$
中薯5号 Zhongshu No. 5	$39.49 \pm 0.30\text{bc}$	$76.47 \pm 0.10\text{a}$	$125.40 \pm 1.13\text{b}$	$80.34 \pm 0.29\text{a}$	$57.57 \pm 0.04\text{a}$
中薯6号 Zhongshu No. 6	$35.26 \pm 0.12\text{f}$	$70.51 \pm 0.25\text{cd}$	$113.70 \pm 0.85\text{de}$	$73.82 \pm 0.37\text{e}$	$51.02 \pm 0.16\text{de}$
中薯9号 Zhongshu No. 9	$31.31 \pm 0.57\text{g}$	$65.86 \pm 0.69\text{fg}$	$106.50 \pm 1.84\text{fg}$	$68.52 \pm 1.05\text{ef}$	$47.63 \pm 1.44\text{fg}$
中薯11号 Zhongshu No. 11	$35.06 \pm 0.34\text{f}$	$72.76 \pm 0.34\text{b}$	$126.45 \pm 1.34\text{b}$	$77.66 \pm 0.59\text{b}$	$54.87 \pm 0.40\text{b}$
中薯13号 Zhongshu No. 13	$28.57 \pm 0.01\text{h}$	$64.43 \pm 0.15\text{gh}$	$105.00 \pm 0.00\text{gh}$	$66.49 \pm 0.18\text{fg}$	$44.74 \pm 0.16\text{h}$
中薯15号 Zhongshu No. 15	$34.97 \pm 0.54\text{f}$	$71.84 \pm 1.10\text{bc}$	$117.70 \pm 2.40\text{c}$	$75.16 \pm 1.24\text{e}$	$52.68 \pm 0.41\text{cd}$
中薯17号 Zhongshu No. 17	$38.20 \pm 1.32\text{cd}$	$70.04 \pm 1.25\text{cd}$	$112.95 \pm 2.90\text{de}$	$73.84 \pm 2.14\text{e}$	$52.40 \pm 0.54\text{cde}$
中薯18号 Zhongshu No. 18	$40.75 \pm 2.29\text{b}$	$76.76 \pm 2.92\text{a}$	$131.00 \pm 4.10\text{a}$	$82.06 \pm 3.08\text{a}$	$58.27 \pm 0.64\text{a}$
中薯19号 Zhongshu No. 19	$44.88 \pm 0.83\text{a}$	$75.82 \pm 0.14\text{a}$	$124.80 \pm 0.99\text{b}$	$80.49 \pm 0.17\text{a}$	$58.06 \pm 0.28\text{a}$
中薯20号 Zhongshu No. 20	$35.74 \pm 0.42\text{ef}$	$69.53 \pm 0.72\text{de}$	$114.90 \pm 1.27\text{cd}$	$73.54 \pm 0.81\text{e}$	$50.89 \pm 0.45\text{e}$
中薯21号 Zhongshu No. 21	$32.70 \pm 0.02\text{g}$	$67.59 \pm 0.19\text{ef}$	$106.65 \pm 0.07\text{fg}$	$70.39 \pm 0.14\text{de}$	$49.20 \pm 0.08\text{f}$
中薯22号 Zhongshu No. 22	$35.08 \pm 0.19\text{f}$	$65.39 \pm 0.47\text{fgh}$	$113.80 \pm 0.28\text{de}$	$70.61 \pm 0.47\text{de}$	$48.50 \pm 0.21\text{f}$
中薯26号 Zhongshu No. 26	$31.04 \pm 0.18\text{g}$	$65.40 \pm 0.10\text{fgh}$	$97.95 \pm 0.27\text{i}$	$67.16 \pm 0.18\text{fg}$	$46.48 \pm 0.14\text{g}$

号的膨润力最高,为 $6.26 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。溶解度和膨润力分别用于表征淀粉颗粒在水中经过加热、冷却和离心处理后的水溶性和持水能力^[15],主要与淀粉链之间的相互作用有关。

2.4 不同品种马铃薯淀粉的热力学特性

由表3可知,不同品种马铃薯淀粉的热力学性质

存在差异,糊化初始温度、糊化峰值温度、糊化终止温度和糊化焓值的范围分别为 $61.44 \sim 65.55^\circ\text{C}$ 、 $64.49 \sim 68.69^\circ\text{C}$ 、 $67.87 \sim 72.54^\circ\text{C}$ 、 $7.21 \sim 13.49 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ 。其中,中薯20号的糊化初始温度(65.55°C)、糊化峰值温度(68.69°C)和糊化终止温度(72.54°C)以及糊化焓值($13.49 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$)均最高,表明其不易糊化,且糊化过程

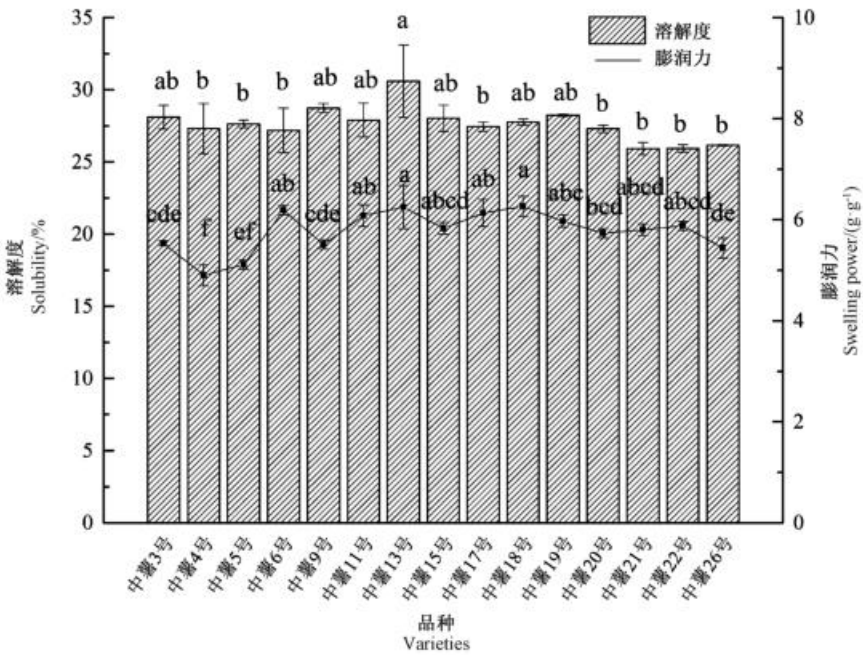


图 2 不同品种马铃薯淀粉的溶解度和膨润力

Fig.2 Water solubility and swelling power of starches from different varieties of potatoes

表 3 不同品种马铃薯淀粉的热力学特性

Table 3 Thermal properties of starch from different varieties of potatoes

品种 Varieties	$T_o/^{\circ}\text{C}$	$T_p/^{\circ}\text{C}$	$T_c/^{\circ}\text{C}$	$\Delta H/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$
中薯 3 号 Zhongshu No. 3	64.41±0.12b	66.96±0.02cd	70.33±0.13bcd	13.05±1.13a
中薯 4 号 Zhongshu No. 4	63.58±0.07cd	65.91±0.14e	68.69±0.16fgh	12.05±0.64ab
中薯 5 号 Zhongshu No. 5	63.91±0.04bc	66.52±0.11de	69.44±0.09def	11.01±1.05ab
中薯 6 号 Zhongshu No. 6	63.32±0.03cd	66.17±0.06e	69.23±0.07defg	8.53±0.65bc
中薯 9 号 Zhongshu No. 9	63.65±0.52bcd	66.38±0.53de	69.47±0.56def	11.87±0.29ab
中薯 11 号 Zhongshu No. 11	65.50±0.97a	67.77±0.79b	71.05±1.19bc	7.21±4.65c
中薯 13 号 Zhongshu No. 13	65.23±0.03a	67.84±0.01b	71.21±0.08b	11.87±1.67ab
中薯 15 号 Zhongshu No. 15	62.96±0.27de	66.24±0.04de	69.92±0.05de	10.77±0.20abc
中薯 17 号 Zhongshu No. 17	63.03±0.09de	66.01±0.09e	69.53±0.39def	9.87±2.02abc
中薯 18 号 Zhongshu No. 18	61.44±0.14f	64.49±0.02f	67.87±0.14h	10.75±0.65abc
中薯 19 号 Zhongshu No. 19	63.61±0.00bcd	66.42±0.15de	70.04±0.00cde	12.02±0.71ab
中薯 20 号 Zhongshu No. 20	65.55±0.57a	68.69±0.67a	72.54±0.50a	13.49±0.97a
中薯 21 号 Zhongshu No. 21	63.97±0.29bc	66.95±0.36cd	70.02±0.36cde	11.62±0.26ab
中薯 22 号 Zhongshu No. 22	64.51±0.14b	67.49±0.04bc	71.34±0.23b	12.19±0.16ab
中薯 26 号 Zhongshu No. 26	62.39±0.16e	65.07±0.23f	68.26±0.51gh	11.84±2.13ab

中需要消耗的能量最多。而中薯 18 号的糊化初始温度(61.44℃)、糊化峰值温度(64.49℃)和糊化终止温度(67.87℃)最低,中薯 11 号的糊化焓值最低(7.21℃)。

2.5 不同品种马铃薯淀粉的糊化特性

如表 4 所示,不同品种马铃薯淀粉的糊化特性参

数存在差异,成糊温度、峰值黏度、峰谷黏度、最终黏度、崩解值和回生值的范围分别为 63.2~67.8℃、2 499.3~3 220.4 BU、1 002.2~2 099.3 BU、1 403.6~2 887.0 BU、514.0~2 218.4 BU、401.0~884.1 BU。其中,成糊温度反映淀粉在高温条件下溶胀形成均匀糊状物质、黏度迅速上升的温度,主要与直链淀粉含

量、结晶度和支链淀粉的结构等因素有关^[16]。不同马铃薯淀粉中,中薯 11 号的成糊温度最高(67.8℃),而中薯 6 号的成糊温度最低(63.2℃)。峰值黏度可以反映淀粉在糊化过程中淀粉颗粒的溶胀程度,主要与支链淀粉含量、淀粉颗粒粒径有关^[17]。中薯 6 号的峰值黏度最高(3 220.4 BU),表明其在糊化过程中溶胀程度较高。在持续的高温作用下,淀粉糊由凝胶状态转变为溶胶状态,淀粉分子之间的距离变大,相互作用减弱,导致黏度迅速下降,达到的最低值为峰谷黏度^[18]。峰谷黏度可以反映淀粉在高温条件下的耐剪切能力,不同马铃薯淀粉中,中薯 19 号的峰谷黏度最

高(2 099.3 BU),而中薯 6 号的峰谷黏度最低(1 002.2 BU)。崩解值为峰值黏度和峰谷黏度的差值,可以反映高温条件下淀粉糊的抗剪切能力和淀粉的热糊稳定性,崩解值越大,表明淀粉糊的抗剪切能力和淀粉的热糊稳定性越好^[19]。不同马铃薯淀粉中,中薯 6 号的崩解值最高(2 218.4 BU),说明该淀粉的黏度降低速率高^[20];中薯 11 号的崩解值最低(514.0 BU)。回生值则反映了淀粉的冷糊稳定性和老化趋势,其值越小,表明冷糊稳定性越好,不易老化^[21]。不同马铃薯淀粉中,中薯 11 号的回生值最高(884.1 BU),中薯 6 号的回生值最低(401.0 BU)。

表 4 不同品种马铃薯淀粉的糊化特性参数

Table 4 Pasting properties of starch from different varieties of potatoes

品种 Varieties	成糊温度 Pasting temperature/℃	峰值黏度 Peak viscosity/BU	峰谷黏度 Trough viscosity /BU	最终黏度 Final viscosity/BU	崩解值 Breakdown/BU	回生值 Setback/BU
中薯 3 号 Zhongshu No. 3	65.9±0.23a	2 705.1±8.2c	1 500.2±19.0f	2 100.1±42.0f	1 205.1±18.3e	600.3±4.5f
中薯 4 号 Zhongshu No. 4	65.5±0.10a	2 723.5±18.5e	1 200.4±21.2i	1 732.0±22.3h	1 523.2±20.2d	532.4±5.6g
中薯 5 号 Zhongshu No. 5	65.5±0.12a	2 723.5±13.4c	1 200.2±11.3i	1 732.5±17.2h	1 523.0±35.1d	532.5±9.1g
中薯 6 号 Zhongshu No. 6	63.2±0.09bc	3 220.4±11.6a	1 002.2±22.5j	1 403.6±20.1i	2 218.4±12.0a	401.0±10.3h
中薯 9 号 Zhongshu No. 9	65.8±0.21a	2 499.3±13.0d	1 296.0±17.2h	1 998.3±32.0g	1 203.7±25.3e	702.2±8.6c
中薯 11 号 Zhongshu No. 11	67.8±0.20a	2 517.5±10.1d	2 003.6±21.5b	2 887.0±26.1a	514.0±16.5i	884.1±6.1a
中薯 13 号 Zhongshu No. 13	66.6±0.15a	2 522.6±15.7d	1 746.7±12.2c	2 411.0±18.0c	776.5±9.2h	665.0±3.5d
中薯 15 号 Zhongshu No. 15	65.4±0.16a	2 910.6±14.0b	1 951.3±9.2c	2 702.4±27.5b	959.7±14.4g	751.2±8.6b
中薯 17 号 Zhongshu No. 17	64.7±0.19ab	3 149.7±14.5a	1 750.2±15.0c	2 450.5±32.3e	1 399.3±20.6c	700.3±3.2c
中薯 18 号 Zhongshu No. 18	64.2±0.13a	2 831.6±12.4c	1 800.3±18.6e	2 492.2±37.2d	1 031.2±14.1f	692.8±11.3c
中薯 19 号 Zhongshu No. 19	65.8±0.15a	2 772.8±10.2c	2 099.3±14.2a	2 851.1±9.5a	673.5±3.2e	752.5±6.4b
中薯 20 号 Zhongshu No. 20	66.4±0.04a	2 901.8±15.6b	1 856.6±20.9c	2 499.1±21.1d	1 045.3±8.9f	643.7±5.0e
中薯 21 号 Zhongshu No. 21	66.1±0.12a	2 717.0±10.3c	1 898.4±11.2d	2 657.9±13.2c	819.5±12.5g	759.9±2.8b
中薯 22 号 Zhongshu No. 22	66.3±0.10a	2 560.0±17.5d	1 800.2±7.0e	2 498.0±22.0d	760.0±25.3h	698.1±12.2c
中薯 26 号 Zhongshu No. 26	64.0±0.15a	3 095.0±19.9a	1 400.2±14.5g	2 010.0±9.5c	1 695.1±15.2b	610.2±8.2f

2.6 不同品种马铃薯淀粉的短程有序结构

如图 3-A 所示,不同品种马铃薯淀粉的原始红外光谱图在 4 000~400 cm⁻¹有几乎相同的吸收峰频带,仅在吸收峰强度和峰位上有微小差异。其中,3 400 cm⁻¹附近为 O-H 键的伸缩振动;2 931 cm⁻¹附近为 -CH₂ 的反对称伸缩振动;1 641 cm⁻¹附近为淀粉吸附水中无定型区域的吸收峰;红外光谱在 1 200~800 cm⁻¹区代表 C-C 和 C-O 键的伸缩振动以及 C-H 键的弯曲振动,对于淀粉短程有序的分子重排较为敏感^[22]。

对原始红外光谱图 1 200~800 cm⁻¹谱段进行去卷积处理,半峰宽设置为 58.5,增强因子设置为 3.0,得到不同品种马铃薯淀粉去卷积后的红外光谱图。如图 3-B 所示,1 045 cm⁻¹附近的吸收峰是淀粉结晶区的结

构特征,对应于淀粉聚集态结构中的有序结构;1 020 cm⁻¹附近的吸收峰则是淀粉非晶区的结构特征,对应于淀粉大分子的无规线团结构;990 cm⁻¹附近的吸收峰主要是由于 C-OH 的弯曲振动引起的,对应于淀粉中羟基间所形成的氢键结构。1 045 cm⁻¹和 1 022 cm⁻¹的峰强度比值用于表征淀粉的有序程度,其比值越大,有序度越高。而 1 022 cm⁻¹和 995 cm⁻¹的峰强度比值用于表征淀粉中有序结构中无定型区的比例,其比值越大,无定形区的比例越高^[23]。如表 5 所示,1 045/1 022 cm⁻¹的范围为 0.680~0.832,中薯 22 号最低(0.680),中薯 18 号最高(0.832)。1 022/995 cm⁻¹的范围为 0.711~0.864,中薯 3 号最低(0.711),中薯 15 号最高(0.864)。

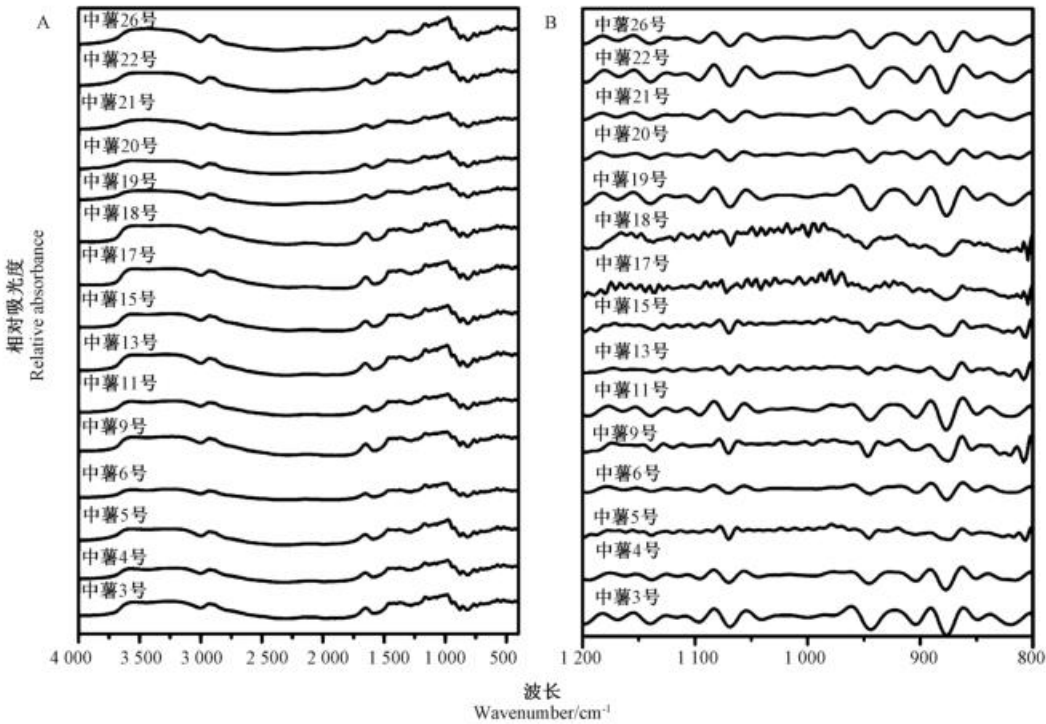


图 3 不同马铃薯淀粉的红外光谱图 (A) 和去卷积的红外光谱图 (B)
Fig.3 Fourier transform infrared spectroscopy (A) and deconvoluted spectroscopy (B) of starches from different varieties of potatoes

表 5 不同品种马铃薯淀粉的红外光谱检测指数
Table 5 Infrared spectroscopy detection index of starches from different varieties of potatoes

品种 Varieties	1 047/1 022 cm ⁻¹	1 022/995 cm ⁻¹
中薯 3 号 Zhongshu No. 3	0.692	0.711
中薯 4 号 Zhongshu No. 4	0.730	0.783
中薯 5 号 Zhongshu No. 5	0.813	0.854
中薯 6 号 Zhongshu No. 6	0.807	0.828
中薯 9 号 Zhongshu No. 9	0.732	0.774
中薯 11 号 Zhongshu No. 11	0.729	0.782
中薯 13 号 Zhongshu No. 13	0.755	0.783
中薯 15 号 Zhongshu No. 15	0.822	0.864
中薯 17 号 Zhongshu No. 17	0.797	0.833
中薯 18 号 Zhongshu No. 18	0.832	0.858
中薯 19 号 Zhongshu No. 19	0.782	0.813
中薯 20 号 Zhongshu No. 20	0.751	0.798
中薯 21 号 Zhongshu No. 21	0.748	0.814
中薯 22 号 Zhongshu No. 22	0.680	0.723
中薯 26 号 Zhongshu No. 26	0.721	0.752

2.7 相关性分析

不同品种马铃薯淀粉组成与性质之间的相关性分析结果如表 6 所示。不同马铃薯淀粉中直链淀粉含量

与峰值黏度等糊化特性参数无显著相关性,磷含量与峰谷黏度呈显著正相关($r = 0.524, P < 0.05$),与溶解度呈显著负相关($r = -0.529, P < 0.05$)。另外,平均粒径 $D[4,3]$ 与 $1\ 045/1\ 022\ \text{cm}^{-1}$ ($r = 0.688, P < 0.01$)和 $1\ 022/995\ \text{cm}^{-1}$ ($r = 0.721, P < 0.01$)均呈极显著正相关;同样,平均粒径 $D[3,2]$ 也与之呈极显著正相关。 T_o 与 T_p ($r = 0.967, P < 0.01$)和 T_c ($r = 0.896, P < 0.01$)呈正相关。成糊温度与峰值黏度($r = -0.804, P < 0.01$)和崩解值($r = -0.807, P < 0.01$)均呈极显著负相关,与峰谷黏度($r = 0.533, P < 0.05$)、最终黏度($r = 0.576, P < 0.05$)和回生值($r = 0.641, P < 0.01$)均呈显著正相关。脂质含量与溶解度呈极显著正相关($r = 0.707, P < 0.01$)。膨润力与峰谷黏度($r = 0.849, P < 0.01$)、最终黏度($r = 0.866, P < 0.01$)和回生值($r = 0.823, P < 0.01$)均呈极显著正相关,与崩解值($r = -0.803, P < 0.01$)呈极显著负相关。

3 讨论

淀粉的提取方法包括水提法、碱提法、酶解法、超声法等,不同提取方法对于淀粉中蛋白质、灰分、脂质等组分的含量有显著影响^[24]。本研究采用水提法提

表 6 不同品种马铃薯淀粉组成与性质的皮尔森相关性分析
Table 6 Pearson correlation between components and properties of starches isolated from different varieties of potatoes

组成与性质 Composition and properties	灰分 Ash	脂质 Lipid	磷 Phosphorus	蛋白质 Protein	直链 淀粉 Amylose	D[4,3]	D[3,2]	T_o	T_p	T_c	ΔH	成糊 温度 Pasting temperature	峰值 黏度 Peak viscosity	峰谷 黏度 Trough viscosity	最终 黏度 Final viscosity	崩解值 Break-down	回生值 Setback	溶解度 Solubility	膨润力 Swelling power	1 045/ 1 022 cm^{-1}	1 022/ 995 cm^{-1}
灰分 Ash	1																				
脂质 Lipid	-0.125	1																			
磷 Phosphorus	-0.290	-0.424	1																		
蛋白质 Protein	-0.327	0.086	-0.176	1																	
直链淀粉 Amylose	-0.298	-0.107	0.333	-0.081	1																
D[4,3]	0.268	-0.098	0.066	-0.090	-0.255	1															
D[3,2]	0.190	-0.084	0.070	-0.102	-0.178	0.983**	1														
T_o	-0.452	0.223	0.337	0.330	0.315	-0.276	-0.304	1													
T_p	-0.379	0.210	0.437	0.198	0.332	-0.249	-0.299	0.967**	1												
T_c	-0.280	0.189	0.474	0.092	0.264	-0.205	-0.267	0.896**	0.970**	1											
ΔH	-0.256	-0.079	0.212	-0.429	0.381	-0.412	-0.362	0.092	0.154	0.197	1										
成糊温度 Pasting temperature	-0.371	0.294	0.366	0.154	0.035	-0.089	-0.088	0.812**	0.772**	0.735**	0.103	1									
峰值黏度 Peak viscosity	0.260	-0.293	0.032	0.063	0.171	0.126	0.117	-0.529*	-0.447	-0.379	-0.191	-0.804**	1								
峰谷黏度 Trough viscosity	0.033	0.070	0.524*	-0.225	-0.152	0.243	0.214	0.214	0.322	0.465	0.023	0.533*	-0.238	1							
最终黏度 Final viscosity	0.017	0.118	0.502	-0.209	-0.218	0.226	0.201	0.216	0.309	0.440	-0.020	0.576*	-0.302	0.991**	1						
崩解值 Breakdown	0.107	-0.201	-0.376	0.200	0.201	-0.119	-0.101	-0.428	-0.468	-0.540*	-0.114	-0.807**	0.686**	-0.870**	-0.896**	1					
回生值 Setback	-0.033	0.245	0.385	-0.138	-0.388	0.152	0.145	0.199	0.237	0.320	-0.144	0.641*	-0.459	0.858**	0.919**	-0.876**	1				
溶解度 Solubility	0.257	0.707**	-0.529*	-0.018	-0.073	-0.041	-0.060	0.240	0.190	0.168	-0.004	0.268	-0.368	0.063	0.073	-0.234	0.094	1			
膨润力 Swelling power	0.160	-0.018	0.457	-0.321	-0.207	0.032	0.000	0.104	0.192	0.283	0.068	0.460	-0.328	0.849**	0.866**	-0.803**	0.823**	0.084	1		
1 045/1 022 cm^{-1}	0.579*	0.085	-0.188	-0.184	-0.086	0.688**	0.643**	-0.506	-0.418	-0.378	-0.372	-0.478	0.474	0.016	-0.021	0.228	-0.127	0.206	-0.020	1	
1 022/995 cm^{-1}	0.489	0.065	-0.002	-0.203	-0.020	0.721**	0.688**	-0.426	-0.334	-0.316	-0.386	-0.339	0.385	0.090	0.067	0.128	-0.009	0.105	0.063	0.962**	1

注: * 表示 $P < 0.05$ 水平下差异显著, ** 表示 $P < 0.01$ 水平下差异显著; D[4,3]: 表面积加权平均直径; D[3,2]: 表面积加权平均直径; T_o : 初始糊化温度; T_p : 峰值糊化温度; T_c : 终止糊化温度; ΔH : 糊化焓。
Note: * indicate significant correlation at 0.05 level, ** indicate significant correlation at 0.01 level. D[4,3]: Weighted average diameter. D[3,2]: Weighted average diameter. T_o : Onset temperature. T_p : Peak temperature. T_c : End temperature. ΔH : Enthalpy.

取马铃薯淀粉,不同品种马铃薯淀粉中蛋白质、灰分、脂质的总含量低于 0.50%,表明淀粉的提取纯度较高^[10]。本研究不同品种马铃薯的淀粉组成差异较大,马铃薯淀粉中直链淀粉含量为 22.1%~26.8%,其中中薯 6 号的含量最高,中薯 20 号和中薯 21 号较低,分别为 22.9%和 22.1%。张攀峰^[25]对下寨 65 号、费乌瑞它、青 6 号、青 168 号、青 2 号等 10 个品种马铃薯的淀粉组成进行测定,直链淀粉含量范围为 23.6%~34.8%。Singh 等^[26]检测了印度 42 个品种的马铃薯淀粉组成成分,发现直链淀粉的含量范围为 9.5%~32.2%。可见,马铃薯的生长地区、品种对直链淀粉含量有一定影响。杨丽萍^[27]发现 3 种不同颜色马铃薯淀粉中直链淀粉及磷的含量有显著性差异,且呈负相关。Noda 等^[28]检测了 96 个品种马铃薯淀粉中磷的含量,范围为 0.541‰~1.334‰。汪兰等^[4]检测了 8 个品种马铃薯淀粉中磷的含量,范围为 0.156‰~0.256‰。不同品种马铃薯淀粉中磷的含量差异较大,在前人研究的基础上,本试验发现磷含量的范围为 0.490‰~0.936‰。该结果与 Noda 等^[28]的结果范围较接近,其中中薯 20 号和中薯 21 号马铃薯淀粉中磷含量较高,分别为 0.936‰和 0.902‰。同时,这两个品种的直链淀粉含量偏低,可能与马铃薯淀粉颗粒中磷酸基团多结合在支链淀粉上有关。

淀粉粒径分布是指不同粒径范围的淀粉颗粒个数与总颗粒数的比值^[8],主要与品种、生长环境、生长部位、成熟程度等因素有关^[29]。在本试验中,不同品种马铃薯淀粉粒径范围约为 20~120 μm ,平均粒径为 63.46~76.76 μm 。Martínez 等^[30]测定了秘鲁安第斯山脉地区 3 个品种 (Imilla blanca, Imilla negra 和 Loc' ka) 马铃薯淀粉的粒径,发现 Loc' ka 淀粉粒径分布范围为 11.2~51.8 μm ; Imilla negra 淀粉粒径分布范围为 0.6~58.9 μm ; Imilla blanca 淀粉粒径分布范围为 0.013~272 μm 。张攀峰^[25]对国内 10 个不同品种 (青薯 168 号、青薯 2 号、青薯 5 号、青薯 6 号、青薯 8 号、青薯 9 号、青薯 10 号、陇薯 3 号、下寨 65 号、费乌瑞它) 马铃薯淀粉的粒径进行测定,发现淀粉颗粒的平均粒径范围为 38.44~50.62 μm 。由此可见,不同品种马铃薯淀粉的粒径分布范围具有明显差异。以不同系列马铃薯淀粉之间的粒径范围差异较为显著,而同一系列马铃薯淀粉的粒径范围较为接近,这不仅与马铃薯的品种有关,更与其种植地区、生长环境、气候变化、采集状态等多种因素有关。

不同品种马铃薯淀粉的热力学性质主要与淀粉颗粒大小、直链淀粉含量、支链淀粉精细结构及晶体结构

等因素有关^[31]。在本研究中,不同品种马铃薯淀粉中直链淀粉含量与糊化初始温度等热力学指数呈一定的负相关性。同样,杨丽萍^[27]发现直链淀粉含量与糊化初始温度、糊化峰值温度、糊化终止温度呈负相关。Singh 等^[26]报道支链淀粉长链 (DP19~30) 比例与糊化初始温度、糊化峰值温度、糊化终止温度成正相关,而支链淀粉中短链 (DP6~12) 含量与之呈负相关,可能与支链淀粉长链有利于淀粉晶体形成更加紧密而有序的分子结构有关^[16]。Kim 等^[32]发现磷含量对于淀粉的热力学特性没有显著影响,本研究结果与之一致。根据相关性分析结果可知,平均粒径与短程有序参数 $1\ 045/1\ 022\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 022/995\ \text{cm}^{-1}$ 呈正相关,该结果与 Zhang 等^[33]针对不同品种甘薯淀粉的研究结果相一致。根据本研究中相关性分析结果可知,直链淀粉的含量对淀粉的糊化和老化性质没有影响。Ganga 等^[34]和 Wiesenborn 等^[35]发现直链淀粉的含量对马铃薯淀粉的峰值黏度没有显著性影响,与本研究结果一致。然而也有研究认为直链淀粉通过抑制支链淀粉双螺旋发生断裂,抑制淀粉颗粒发生溶胀从而导致淀粉峰值黏度降低^[5, 36]。这可能与试验条件有关,当水分含量充裕时部分抑制作用被忽视。

与禾谷类淀粉相比较,马铃薯淀粉中磷含量较高,其主要组成为磷酸酯^[37]。磷酸酯通过共价键结合在支链淀粉上,可以显著提高淀粉黏度^[7]。根据相关性分析结果可知,磷含量与峰谷黏度呈显著正相关 ($r=0.524, P<0.05$),与溶解度呈显著负相关 ($r=-0.529, P<0.05$)。这可能是由于带负电的磷酸酯基团引起相互排斥作用,促进淀粉颗粒发生溶胀,导致淀粉糊的黏度增加^[37]。Noda 等^[38]发现随着磷含量增加,马铃薯淀粉膨润力、峰值黏度显著增加,可能与磷酸酯基团具有较好的亲水性有关。同样, Lu 等^[39]发现不同马铃薯淀粉中磷含量与峰值黏度、峰谷黏度呈正相关。Dos Santos 等^[5]发现磷含量与峰值黏度、崩解值呈正相关,表明磷含量与马铃薯淀粉糊化、老化特性有关。而且马铃薯淀粉的磷酸基团带负电,这赋予其电解质的性质,导致淀粉糊具有较高的透明度^[40]。

4 结论

本研究结果表明,15 个不同品种马铃薯淀粉的化学组成、微观形貌、粒径分布、溶解度、膨润力、热力学性质和有序结构等方面存在差异。其中,中薯 6 号马铃薯淀粉糊化后黏度下降速率快,而中薯 18 号马铃薯淀粉易于溶胀糊化。中薯 20、21 号马铃薯淀粉分别具

有最高的磷含量和最低的直链淀粉含量,同时具有较高的糊化温度和糊化焓,成糊的最终黏度也相对较高。相关性分析结果表明,与直链淀粉含量相比,磷含量对马铃薯淀粉糊化特性的影响更显著。

参考文献:

- [1] 王子逸, 张宾佳, 赵思明, 牛猛, 贾才华, 熊善柏, 林亲录. 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
- [2] 夏天雨. 射频/微波初化处理对马铃薯淀粉结构及理化特性的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019
- [3] 李建武, 文国宏, 李高峰, 王一航, 贾小霞, 张荣, 马胜. 陇薯系列高淀粉马铃薯品种的淀粉产量及品质性状综合评价[J]. 核农学报, 2020, 34(2): 329-338
- [4] 汪兰, 任斯忱, 杜欣, 王俊, 程薇, 孙智达, 熊光权. 不同品种马铃薯淀粉物化特性与组成结构的关系[J]. 食品科学, 2010, 31(21): 39-44
- [5] Dos Santos T P R, Leonel M, Garciaé L, Do Carmo E L, Franco C M L. Crystallinity, thermal and pasting properties of starches from different potato cultivars grown in Brazil[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 82: 144-149
- [6] 杨丹, 李树举, 王素华, 万国安, 段慧. 中薯系列马铃薯新品种比较试验[J]. 作物研究, 2018, 32(1): 18-22
- [7] Zaidul I S M, Yamauchi H, Kim S J, Hashimoto N, Noda T. RVA study of mixtures of wheat flour and potato starches with different phosphorus contents[J]. Food Chemistry, 2007, 102(4): 1105-1111
- [8] Ye F Y, Li J F, Zhao G H. Physicochemical properties of different-sized fractions of sweet potato starch and their contributions to the quality of sweet potato starch[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 108: 106023
- [9] 徐芬. 马铃薯全粉及其主要组分对面条品质影响机理研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016
- [10] Zhu F, Cui R B. Comparison of molecular structure of oca (*Oxalis tuberosa*), potato, and maize starches[J]. Food Chemistry, 2019, 296: 116-122
- [11] 卢俊宇, 朱芮, 吴贺君, 雷晏琳, 肖迪, 焦春, 魏雪颖, 刘登鸿. 茶多酚对可食性马铃薯淀粉/海藻酸钠复合膜性能影响及表征[J]. 核农学报, 2020, 34(10): 2226-2234
- [12] Chen L, Ma R R, McClements D J, Zhang Z P, Jin Z Y, Tian Y Q. Impact of granule size on microstructural changes and oil absorption of potato starch during frying[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 94: 428-438
- [13] Li H, Zhai F Y, Zhu X X, Guo Y Y, Zhao B B, Xu B C. Physicochemical properties and structure of modified potato starch granules and their complex with tea polyphenols[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 166: 521-528
- [14] Cai C H, Lin L S, Man J M, Zhao L X, Wei C X. 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
- [15] Molavi H, Razavi S M A, Farhoosh R. Impact of hydrothermal modifications on the physicochemical, morphology, crystallinity, pasting and thermal properties of acorn starch[J]. Food Chemistry, 2018, 245(15): 385-393
- [16] Lacerda L D, Leite D C, Silveira N P. Relationships between enzymatic hydrolysis conditions and properties of rice porous starches[J]. Journal of Cereal Science, 2019, 89: 102819
- [17] Ayenampudi S B, Ramanathan P. Effect of pullulanase debranching and storage temperatures on structural characteristics and digestibility of sweet potato starch[J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2016, 17(2): 208-216
- [18] Li P, He X W, Dhital S, Zhang B, Huang Q. Structural and physicochemical properties of granular starches after treatment with debranching enzyme[J]. Carbohydr Polymers, 2017, 169: 351-356
- [19] Singh M, Adedeji A A. Characterization of hydrothermal and acid modified proso millet starch [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 79: 21-26
- [20] 李维, 汪静心, 杨芳, 郑玉莹, 龚亚玲, 刘凤娟. 添加马铃薯全粉的汤圆工艺研究[J]. 农业与技术, 2019, 39(5): 9-12
- [21] Li M, Li J X, Zhu C H. Effect of ultrasound pretreatment on enzymolysis and physicochemical properties of corn starch [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 111: 848-856
- [22] 方玲. 不同氨基酸对马铃薯淀粉特性影响的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012
- [23] Sevenou O, Hill S E, Farhat I A, Mitchell J R. Organisation of the external region of the starch granule as determined by infrared spectroscopy[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2002, 31: 79-85
- [24] 芦鑫, 张晖, 姚惠源. 不同提取方法对粳米淀粉结构的影响[J]. 食品科学, 2008(1): 102-106
- [25] 张攀峰. 不同品种马铃薯淀粉结构与性质的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012
- [26] Singh N, Kaur A, Shevkani K, Ezekiel R, Kaur P, Isono N, Noda T. Structural, morphological, thermal, and pasting properties of starches from diverse indian potato cultivars [J]. Starch-Strke, 2018, 70(3/4): 1700130
- [27] 杨丽萍. 三种马铃薯淀粉物化性质, 精细结构及其酸改性研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019
- [28] Noda T, Tsuda S, Mori M, Takigawa S, Matsuura-Endo C, Saito K, Mangalika W H A, Hanaoka A, Suzuki Y, Yamauchi H. The effect of harvest dates on the starch properties of various potato cultivars[J]. Food Chemistry, 2004, 86(1): 119-125
- [29] 徐忠, 徐巧姣, 王胜男, 王志鹏, 赵丹. 不同品种马铃薯淀粉微观结构和热力学性质比较[J]. 食品工业科技, 2017, 38(6): 90-94
- [30] Martínez P, Pea F, Bello-Pérez L A, Núñez-Santiago C, Velezmoro C. Physicochemical, functional and morphological characterization of starches isolated from three native potatoes of the Andean region[J]. Food Chemistry, 2019, 2: 100030
- [31] Zhang H, Wang R, Chen Z X, Zhong Q X. Enzymatically modified starch with low digestibility produced from amylopectin by sequential amylosucrase and pullulanase treatments [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 95: 195-202
- [32] Kim Y S, Wiesenborn D P, Orr P H, Grant L A. Screening potato starch for novel properties using differential calorimetry[J]. Journal of Food Science, 1995, 60(5): 1060-1065

- [33] Zhang L, Zhao L L, Bian X F, Guo K, Zhou L, Wei C X. Characterization and comparative study of starches from seven purple sweet potatoes[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 80: 168–176
- [34] Ganga Z N, Corke H. Physical properties of starch of Asian-adapted potato varieties[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1999, 79(12): 1642–1646
- [35] Wiesenborn D P, Orr P H, Casper H H, Tacke B K. Potato starch paste behavior as related to some physical/chemical properties[J]. Journal of Food Science, 2010, 59(3): 644–648
- [36] Pycia K, Juszczak L A, Ga Kowska D, Witczak M. Physicochemical properties of starches obtained from Polish potato cultivars [J]. Starch-Strke, 2012, 64(2): 105–114
- [37] Nutting G C. Effect of electrolytes on the viscosity of potato starch pastes[J]. Journal of Colloid Science, 1952, 7(2): 128–139
- [38] Noda T, Kottearachchi N S, Tsuda S, Mori M, Takigawa S, Matsuura-Endo C, Kim S J, Hashimoto N, Yamauchi H. Starch phosphorus content in potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars and its effect on other starch properties [J]. Carbohydrate Polymers, 2007, 68(4): 793–796
- [39] Lu Z H, Rickey Y Y, Liu Q, Bizimungu B, Murphy A, Koeper D D, Li X Q, Pinhero G R. Correlation of physicochemical and nutritional properties of dry matter and starch in potatoes grown in different locations[J]. Food Chemistry, 2011, 126(3): 1246–1253
- [40] Dutta H, Paul S K, Kalita D, Mahanta C L. Effect of acid concentration and treatment time on acid-alcohol modified jackfruit seed starch properties[J]. Food Chemistry, 2011, 128(2): 286–291
- [41] 刘振亚. 不同品种马铃薯的加工适应性及应用研究[D]. 宁夏: 北方民族大学, 2019

Components and Physicochemical Properties of Starches From Different Zhongshu Series Potato Cultivars

ZHOU Tongtong^{**} LIANG Dan^{**} LIU Wei ZHANG Tingting ZHANG Liang LIU Qiannan
HU Xiaojia HU Honghai^{*}

(Key Laboratory of Agro-products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193)

Abstract: The compositions and physicochemical properties of starches from 15 different Zhongshu series potato cultivars were evaluated. The optical microscope and scanning electron microscope results showed a wide range of particle size distribution of potato starch granules and different morphologies of potato starches. The small granules of potato starches were ellipsoidal, the large ones were oval, elongated or irregular. The result showed that physicochemical properties were varied from different potato starches. The solubility and swelling degree of different potato starches were ranged from 25.92%~28.74% and 4.90~6.26 g·g⁻¹, respectively. The onset temperature (T_o), peak maximum temperature (T_p), conclusion temperature (T_c) and gelatinization enthalpy (ΔH) were 61.44~65.55℃、64.49~68.69℃, 67.87~72.54℃, 7.21~13.49 J·g⁻¹, respectively. The peak viscosity, setback and consistence were 2 499.3~3 220.4 BU, 514.0~2 218.4 and 401.0~884.1 BU, respectively. Correlation analysis results showed that phosphorus content was positively correlated with peak and trough viscosity and negatively correlated with solubility. The average particle size D [4,3] was positively correlated with the short-range order parameters 1 045/1 022 cm⁻¹ and 1 022/995 cm⁻¹, respectively. T_o was negatively correlated with peak viscosity. The gelatinization temperature was negatively correlated with peak viscosity and break value, and positively correlated with and trough viscosity, final viscosity and consistence, respectively. The results of this study can provide a scientific basis for promoting the application of Zhongshu series potato starch in food processing.

Keywords: potato, starch, components, physicochemical properties, correlation