

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2012.00479

淀粉型甘薯品种直链淀粉含量、糊化特性和乙醇发酵特性的关系

孙 健 岳瑞雪 钮福祥* 徐 飞 朱 红

中国农业科学院甘薯研究所 / 江苏徐州甘薯研究中心, 江苏徐州 221121

摘 要: 以 15 个淀粉型甘薯品种为试验材料, 测定其直链淀粉含量、糊化特性和乙醇发酵特性, 并分析它们之间的差异和相互关系。结果表明, 不同甘薯品种的干物率、淀粉含量和直链淀粉含量(AC)均存在较大差异, 相关分析表明, AC 与干物率、淀粉含量之间呈极显著正相关; 不同品种甘薯的糊化特性之间存在一定差异, 但 RVA 谱特征值之间关系密切; 不同甘薯品种的乙醇发酵特性之间也存在较大差异, 乙醇含量与发酵强度之间呈极显著正相关。进一步分析表明, AC 与 RVA 各特征值之间相关性不显著, 而干物率、淀粉含量与糊化温度(PT)均呈极显著正相关(相关系数分别为 $r=0.661$, $P<0.01$; $r=0.670$, $P<0.01$); AC 与乙醇含量、发酵强度之间有显著正相关关系(相关系数分别为 $r=0.653$, $P<0.01$; $r=0.698$, $P<0.01$), 但与发酵效率、发酵黏度的相关性不显著; 发酵黏度与崩解值(BDV)呈显著负相关($r=-0.563$, $P<0.05$), 与消减值(SBV)显著正相关($r=0.639$, $P<0.05$), 而乙醇含量、发酵效率和发酵强度与淀粉 RVA 各特征值之间的相关性均不显著。聚类分析将 15 个品种分为 3 大类, 第 I 类品种 AC 和 BDV 均较高, 第 II 类品种的 AC 最高、BDV 最低, 而第 III 类品种 AC 最低、BDV 最高。甘薯的 AC 和 BDV 可以作为评价甘薯乙醇发酵特性的指标, 同时较高 AC 和 BDV 值应是燃料乙醇专用甘薯品种的选育方向。

关键词: 甘薯; 直链淀粉; 糊化特性; 乙醇发酵; RVA

Relationship among Amylose Content, Starch Pasting and Ethanol Fermentation in Sweetpotato Varieties for Starch Use

SUN Jian, YUE Rui-Xue, NIU Fu-Xiang*, XU Fei, and ZHU Hong

Institute of Sweetpotato, Chinese Academy of Agricultural Sciences / Xuzhou Sweetpotato Research Centre of Jiangsu Province, Xuzhou 221121, China

Abstract: Fifteen starch-based sweetpotato varieties were used to test amylose contents (AC), starch pasting properties and ethanol fermentation characteristics, and analyze the difference and relationship among them. The results indicated that there were significant differences among dry matter content, starch content and AC of different sweetpotato varieties, and AC was significantly correlated to dry matter content and starch content. Differences presented among pasting properties in different varieties of sweetpotato, and the relationship among RVA eigenvalues was close. There were significant differences among ethanol fermentation characteristics of different sweetpotato varieties, and ethanol content was significantly correlated to fermentative strength. There were no significant correlation between AC and RVA eigenvalues, but pasting temperature (PT) was positively correlated to dry matter content ($r=0.661$, $P<0.01$) and starch content ($r=0.670$, $P<0.01$). AC was positively correlated to ethanol content ($r=0.653$, $P<0.01$) and fermentative strength ($r=0.698$, $P<0.01$), but not significantly correlated to fermentation efficiency and fermented mash viscosity. Fermented mash viscosity was negatively correlated to breakdown value (BDV) ($r=-0.563$, $P<0.05$) and positively correlated to setback value (SBV) ($r=0.639$, $P<0.05$), but ethanol content, fermentation efficiency and fermentative strength were not significantly correlated to RVA eigenvalues. The cluster analysis showed that 15 varieties were divided into three parts: the first part featured higher AC and BDV, the second part had the highest AC and the lowest BDV, and the third part had the lowest AC and the highest BDV. Consequently, AC and BDV could be used as the indexes to evaluate the ethanol fermentation characteristics of sweetpotato, and the sweetpotato with higher AC and BDV was the breeding targets for fuel ethanol.

Keywords: Sweetpotato; Amylose; Pasting property; Ethanol fermentation; RVA

本研究由国家现代农业产业技术体系建设项目(CARS-11-B-20)和徐州市科技计划项目(XJ11B005)资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 钮福祥, E-mail: niufuxiang@sina.com, Tel: 0516-82028151

第一作者联系方式: E-mail: sjsg9902@126.com

Received(收稿日期): 2011-08-24; Accepted(接受日期): 2011-12-15; Published online(网络出版日期): 2012-01-04.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20120104.1649.003.html>

甘薯 [*Ipomoea batatas* L. (Lam.)] 是甘薯属旋花科一年或多年生草本植物。目前我国每年种植面积近 410 万公顷, 年总产量 1.0 亿吨, 占世界甘薯产量的 80%^[1]。甘薯不仅可以作为粮食和饲料, 而且还是生产燃料乙醇等的重要工业原料^[2]。甘薯是典型的淀粉作物, 一般含淀粉 15%~25% 左右, 其直链淀粉含量和糊化特性对其用途和加工品质有重要影响^[3]。不同作物直链淀粉含量对其淀粉糊化特性均有显著影响。杨晓蓉等^[4]研究表明, 大米的直链淀粉含量越高, 峰值黏度越大, 回生现象越显著(回生值越高), 其食用品质就越差。刘辉等^[5]研究发现, 不同品种小米的直链淀粉含量与衰减度呈极显著负相关, 与回生值呈极显著的正相关。Varavinit 等^[6]研究发现, 大米淀粉和小麦淀粉的糊化峰值温度和崩解值都随着淀粉中直链淀粉含量的增大而升高。周小理等^[7]研究表明, 荞麦淀粉的糊化温度、糊化最终黏度、低谷黏度、回生值及衰减度与其直链淀粉含量均呈不同程度的正相关。直链淀粉含量的高低对乙醇发酵会产生一定的影响, Wu 等^[8]对不同基质进行研究后指出, 不同组分的含量对酒精转化效率存在明显的影响, 尤其是当直链淀粉含量高于 35% 时, 酒精的转化效率非常高。有关淀粉质原料的直链淀粉含量和糊化特性对乙醇发酵特性的影响研究还未见相关报道, 本文初步探讨了不同甘薯品种乙醇发酵特性与直链淀粉含量、淀粉的糊化特性之间的关系, 以期作为燃料乙醇专用甘薯品种的选育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

阜徐薯 20、徐薯 4401、郑红 22、洛薯 96-6、烟薯 24、商薯 056-3、徐 01-5-11、徐薯 29、农大 6-2、徐薯 24、洛徐薯 9 号、徐薯 28、徐薯 18、徐 01-2-5、徐薯 508、苏薯 3 号和商薯 19, 均由江苏徐州甘薯研究中心提供, 均收获于 2009 年秋季, 经过高温愈合处理。酿酒酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*) 为本实验室保藏菌株。液化酶 Liquezyme Supra 购自诺维信公司, 标准酶活力为 90 KNU g⁻¹ (KNU 为诺维信液化酶的专有单位); 糖化酶 Suhong GAI, 购自诺维信公司, 标准酶活力为 500 AGU mL⁻¹。(AGU 为诺维信液化酶的专有单位)。

1.2 甘薯干物率测定

采用烘干法^[9], 每样品重复测定 3 次。

1.3 淀粉和直链淀粉含量的测定

采用水提法制备淀粉^[10]。取甘薯 500 g, 洗净, 切成小块丁, 用搅拌机打成均匀的糊状, 倒入 100 目纱袋, 在 0.5 L 水中洗提, 另 0.5 L 水再洗提一次, 将洗提液合并过 100 目筛, 静置 12 h; 将沉淀淀粉置烘箱 50℃ 干燥 24 h; 将干燥淀粉研磨, 过 100 目筛, 入密封袋, 备用。采用酶法分析淀粉含量^[11], 每样品重复测定 3 次。采用碘蓝比色法测定直链淀粉含量 (AC)^[12], 以 Sigma 公司的纯马铃薯直链淀粉为标样, 每样品重复测定 3 次。

1.4 淀粉糊化特性测定

采用 PERTEN Newport Scientific 仪器公司生产的 Tech-master 型黏度速测仪及 TCW 配套软件, 参照唐忠厚等^[13]的方法测定。样品用量 3.00 g, 以 25.0 mL 水溶解。所有样品均重复测定 3 次。在搅拌过程中罐内温度为: 50℃ 下保持 1 min, 以 11.25℃ min⁻¹ 的速度上升到 95℃ 4 min; 95℃ 下保持 4.5 min; 以 11.25℃ min⁻¹ 下降到 50℃ 4 min; 50℃ 下保持 3.5 min。搅拌器在起始 10 s 内转动速度为 960 r min⁻¹, 之后保持在 160 r min⁻¹。黏滞性值用 cP (centPoise) 表示。RVA 谱特征除用最高黏度 (PKV)、最低黏度 (HPV) 和最终黏度 (CPV) 描述外, 还用崩解值 (BDV=PKV-HPV)、消减值 (SBV=CPV-PKV)、回复值 (CSV=CPV-HPV)、糊化温度 (PT) 等表示。

1.5 乙醇含量的测定

鲜甘薯打浆后, 按照 2:1 料水比加水调浆, 按照 150 KNU kg⁻¹ 淀粉添加液化酶, 95℃ 液化至碘反应为红棕色, 115℃ 灭菌 15 min, 冷却后接入菌种, 同时按照 1 AGU g⁻¹ 鲜甘薯添加糖化酶, 采用同步糖化发酵, 发酵温度为 30℃^[14]。采用气相色谱法测定乙醇含量, 使用氢火焰离子化检测器和 Porapak Q 填充柱, 柱箱温度 150℃, 检测器温度 180℃, 进样器温度 180℃^[15-16]。

1.6 发酵效率和发酵强度计算方法

发酵效率 (%) = 100 × 乙醇总质量 / (0.511 × 总糖质量);
发酵强度 (g L⁻¹ h⁻¹) = 发酵液的乙醇浓度 / 发酵时间。

1.7 数据分析

采用 SPSS13.0 软件对数据进行显著性分析和聚类分析, 并计算各性状间的相关系数。

2 结果与分析

2.1 不同品种甘薯淀粉和直链淀粉含量的差异

从表 1 可见, 不同品种甘薯的干物率、淀粉含

量和 AC 均存在较大差异。不同甘薯品种干物率差异极显著($P<0.01$), 其变幅为 28.5%~38.1%, 变异系数 8.75%; 淀粉含量差异极显著($P<0.01$), 其变幅为 20.0%~26.6%, 变异系数 8.7%; AC 差异显著($P<0.05$), 其变幅为 9.6%~15.4%, 变异系数 15.5%。相关性分析表明, 淀粉含量与干物率极显著正相关($r=0.998$, $P<0.01$), AC 与干物率极显著正相关($r=0.778$, $P<0.01$), AC 与淀粉含量极显著正相关($r=0.776$, $P<0.01$)。

2.2 不同品种甘薯淀粉糊化特性比较

从表 2 可见, 甘薯淀粉的 RVA 谱特征值均有显著品种间差异($P<0.05$)。RVA 谱特征值的标准差和变异系数都反映了各特征值的变异程度, 标准差越大、变异系数越大, 说明各品种之间的差异程度越大。研究发现, PKV 标准差最大, 为 847 cP, CSV 标准差最小, 为 190 cP, HPV 变异系数最大, 为 30.2%, BDV 变异系数最小, 为 18.9%。

从表 3 可以看出, 不同品种甘薯淀粉的 RVA 谱特征值之间关系密切。PKV 与 HPV、BDV、CPV、CSV, HPV 与 BDV、CPV、CSV, BDV 与 CPV、CSV, CPV 与 CSV 均呈极显著正相关。SBV 与 PKV、BDV、

CSV 均呈极显著负相关。但 SBV 与 HPV、CPV 之间, 以及 PT 与 RVA 谱各特征值之间的相关性均不显著。

2.3 不同甘薯品种乙醇发酵特性比较

从表 4 可见, 不同甘薯品种的乙醇发酵特性存在较大差异。其乙醇含量、发酵效率、发酵强度和发酵黏度差异显著($P<0.05$), 发酵黏度变幅最大, 为 2.84~898 Pa.s, 变异系数也最大, 为 127.41%; 发酵效率变幅为 64.44%~90.33%, 变异系数最小, 为 8.92%; 发酵强度变幅最小, 为 2.39~3.29 g L⁻¹ h⁻¹。此外, 不同甘薯品种乙醇发酵特性值之间相关性分析表明, 乙醇含量与发酵强度极显著正相关($r=0.995$, $P<0.01$), 如徐薯 4401; 发酵效率与乙醇含量间的正相关不显著, 如徐薯 18 发酵效率高达 90.33%, 而其乙醇含量只是略高于平均水平; 发酵黏度与乙醇含量、发酵效率、发酵强度之间的相关均不显著。

2.4 甘薯直链淀粉含量与糊化特性的关系

从表 5 可见, 不同甘薯品种淀粉的 RVA 各特征值与干物率、淀粉含量和 AC 相关性差异较小。PT 与干物率、淀粉含量均呈极显著正相关(相关系数分

表 1 不同品种甘薯淀粉含量和直链淀粉含量
Table 1 Starch content and amylose content from different sweetpotato varieties (%)

品种 Variety	干物率 Dry matter content	淀粉含量 Starch content	直链淀粉含量 Amylose content
阜徐薯 20 Fuxushu 20	38.05±0.17 A	26.65±0.16 A	15.43±0.61 a
徐薯 4401 Xushu 4401	36.46±0.09 B	25.53±0.09 B	14.28±0.40 bc
郑红 22 Zhenghong 22	36.37±0.64 B	25.47±0.25 B	10.84±0.14 hi
洛薯 96-6 Luoshu 96-6	35.53±0.23 BC	24.88±0.06 B	14.96±0.23 ab
烟薯 24 Yanshu 24	35.26±0.24 C	24.69±0.13 BC	13.42±0.59 cd
商薯 056-3 Shangshu 056-3	34.03±0.13 D	23.83±0.54 CD	12.90±0.29 de
徐 01-5-11 Xu 01-5-11	32.64±0.35 E	22.86±0.28 DE	13.57±0.71 cd
徐薯 29 Xushu 29	32.58±0.44 E	22.82±0.49 E	12.53±0.42 ef
农大 6-2 Nongda 6-2	32.49±0.45 E	23.22±0.57 DE	11.80±0.28 fg
徐薯 24 Xushu 24	32.43±0.18 E	22.71±0.29 E	11.69±0.14f gh
洛徐薯 9 号 Luoxushu 9	32.09±0.08 E	22.47±0.10 E	9.62±0.42 j
徐薯 28 Xushu 28	30.52±0.29 F	21.38±1.06 F	11.36±0.51 gh
徐薯 18 Xushu18	29.53±0.13 G	20.68±1.04 FG	10.46±0.28 ij
徐 01-2-5 Xu 01-2-5	29.02±0.14 FGH	20.32±0.11 G	10.12±0.17 ij
徐薯 508 Xushu 508	28.51±0.20 H	19.96±0.25 GH	9.63±0.26 j
平均值 Average	33.03	23.16	12.17
标准差 SD	2.89	2.02	1.89
变异系数 CV	8.75	8.72	15.53
极差 Range	9.54	6.69	5.81

标以不同大写字母和小写字母的数值分别在 $P<0.01$ 和 $P<0.05$ 水平上差异显著。

Values followed by different capitals and lowercases are significantly different at $P<0.01$ and $P<0.05$ respectively according to LSD test.

表 2 不同品种甘薯淀粉的 RVA 谱特征值
Table 2 Characteristic values of RVA profile of starch in different sweetpotato varieties

品种 Variety	最高黏度 PKV (cP)	最低黏度 HPV (cP)	崩解值 BDV (cP)	最终黏度 CPV (cP)	消减值 SBV (cP)	回复值 CSV (cP)	糊化温度 PT (℃)
阜徐薯 20 Fuxushu 20	4780±13 c	2072±44 a	2708±11 def	3155±71 a	-1625±42 g	1083±45 b	76.45±0.64 a
徐薯 4401 Xushu 4401	3296±28 h	962±58f g	2334±48 g	1563±89 hi	-1733±60 f	601±28 fgh	74.95±1.34 ab
郑红 22 Zhenghong 22	5737±52 a	2001±16 a	3736±51 a	3196±27 a	-2541±74 a	1195±84 a	74.90±1.22 ab
洛薯 96-6 Luoshu 96-6	3045±64 i	701±22 i	2344±62 g	1248±68 j	-1797±14 ef	547±49 hi	73.45±0.64 bc
烟薯 24 Yanshu 24	5155±71 b	1888±40 b	3267±95 b	2836±51 b	-2319±19 b	948±11 c	74.80±1.13 ab
商薯 056-3 Shangshu 056-3	3950±70 g	1274±54 de	2676±11 ef	1967±47 ef	-1983±24 c	693±42 f	74.90±1.27 ab
徐 01-5-11 Xu 01-5-11	2879±12 j	1062±56 f	1817±24 ij	1720±28 gh	-1159±83 i	658±71 fg	74.85±1.20 ab
徐薯 29 Xushu 29	3032±45 i	899±37 gh	2133±47 h	1463±39 i	-1569±43 g	564±45 ghi	73.40±0.56 bc
农大 6-2 Nongda 6-2	4634±45 d	1776±54 c	2858±32 d	2679±17 bc	-1953±66 c	903±42 cd	74.90±1.27 ab
徐薯 24 Xushu 24	3864±61 g	1260±65 de	2604±56 f	1886±71 fg	-1988±10 c	626±37 fgh	74.85±1.20 ab
洛徐薯 9 号 Luoxushu 9	4118±25 f	1335±49 d	2783±38 de	2183±42 d	-1935±16 cd	848±21 de	74.95±1.34 ab
徐薯 28 Xushu 28	4378±10 e	1282±56 de	3096±13 c	2082±15 de	-2296±16 b	800±56 e	74.15±0.21 abc
徐薯 18 Xushu 18	4410±14 e	1764±57 c	2646±65 ef	2570±57 c	-1840±42 de	806±48 de	73.40±0.56 bc
徐 01-2-5 Xu 01-2-5	3135±49 i	1201±14 e	1934±48 i	1878±28 fg	-1257±21 h	677±46 f	74.20±0.28 ab
徐薯 508 Xushu 508	4001±14f g	1328±40 d	2673±10 ef	2182±57 d	-1819±55 ef	854±43 cde	72.60±0.85 bc
平均值 Average	4027	1387	2640	2173	-1853	786	74.45
标准差 SD	847	419	499	598	370	190	0.93
变异系数 CV	21.03	30.21	18.90	27.52	19.97	24.17	1.25
极差 Range	2858	1371	1919	1948	1382	648	3.85

标以不同小写字母的数值在 $P<0.05$ 水平上差异显著。

Values followed by different lowercases are significantly different at $P<0.05$ according to LSD test. PKV: peak viscosity; HPV: hot paste viscosity; BDV: breakdown value; CPV: cool paste viscosity; SBV: setback value; CSV: consistence value; PT: pasting temperature.

表 3 RVA 谱各特征值之间的相关系数
Table 3 Correlation coefficients between RVA profile characteristics

特征值 Characteristic value	最高黏度 PKV	最低黏度 HPV	崩解值 BDV	最终黏度 CPV	消减值 SBV	回复值 CSV
最低黏度 HPV	0.906**					
崩解值 BDV	0.935**	0.696**				
最终黏度 CPV	0.925**	0.992**	0.736**			
消减值 SBV	-0.790**	-0.468	-0.947**	-0.498		
回复值 CSV	0.913**	0.915**	0.779**	0.959**	-0.536**	
糊化温度 PT	0.346	0.456	0.204	0.449	-0.066	0.407

**表示在 0.01 水平上差异显著。

**Significant at $P<0.01$. PKV: peak viscosity; HPV: hot paste viscosity; BDV: breakdown value; CPV: cool paste viscosity; SBV: setback value; CSV: consistence value; PT: pasting temperature.

别为 $r=0.661$, $P<0.01$; $r=0.670$, $P<0.01$), 如阜徐薯 20; 而干物率、淀粉含量与其他 6 个 RVA 各特征值之间相关性不显著, 但 PKV、HPV、BDV、CPV、CSV 表现出随干物率和淀粉含量升高而升高的趋势, SBV 却恰好相反。AC 与 PKV、HPV、BDV、CPV、CSV 呈负相关但不显著, 与 SBV、PT 呈正相关但也不显著, 这可能与不同品种淀粉的分子结构和组成有关。

2.5 甘薯乙醇发酵特性与直链淀粉含量的关系

统计分析表明(表 6), 不同品种甘薯的乙醇发酵

特性与干物率、淀粉含量和 AC 相关性不尽相同。乙醇含量与干物率、淀粉含量、AC 显著正相关(相关系数分别为 $r=0.622$, $P<0.05$; $r=0.625$, $P<0.05$; $r=0.653$, $P<0.01$), 发酵强度与干物率、淀粉含量、AC 极显著正相关(相关系数分别为 $r=0.675$, $P<0.01$; $r=0.677$, $P<0.01$; $r=0.698$, $P<0.01$), 这说明干物率、淀粉含量和 AC 越高的甘薯品种, 其乙醇含量和发酵强度越高, 典型品种如徐薯 4401、阜徐薯 20 和洛薯 96-6 等。干物率、淀粉含量、AC 与发酵效率、

发酵黏度相关不显著，这说明发酵效率和发酵黏度受甘薯的干物率、淀粉含量和 AC 影响较小，而可能受甘薯中丰富的膳食纤维等影响较大。由此可见，不同甘薯品种的乙醇含量和发酵强度受干物率、淀粉含量和 AC 影响很大，这对燃料乙醇专用甘薯品种的选育具有重要意义。

2.6 甘薯乙醇发酵特性与淀粉糊化特性的关系

从表 7 可见，不同甘薯品种的乙醇发酵特性与淀粉 RVA 各特征值相关性差异较小。发酵黏度与崩解值显著负相关($r=-0.563$, $P<0.05$), 与消减值显著正相关($r=0.639$, $P<0.05$), 而乙醇含量、发酵效率和

发酵强度与淀粉 RVA 各特征值相关均不显著，但却表现出随 PKV、BDV、CSV 增加而降低的趋势。由此可见，不同甘薯品种的乙醇发酵特性受糊化特性影响不同，其中发酵黏度受淀粉 RVA 特征值影响较大，高发酵黏度对甘薯乙醇发酵是不利的，因此选育的燃料乙醇专用品种应具有低 SBV、高 BDV 特性。

2.7 聚类分析

直链淀粉含量和淀粉的糊化特性可以在很大程度上影响甘薯乙醇发酵特性，因此根据 AC 和 BDV 两个主要参数对 15 个不同淀粉型品种甘薯进行聚类分析。由图 1 可见，15 个品种按照组内最短距离法

表 4 不同甘薯品种乙醇发酵特性
Table 4 Characteristic values of ethanol fermentation in different sweetpotato varieties

品种 Variety	乙醇含量 EC (%)	发酵效率 FE (%)	发酵强度 FS (g L ⁻¹ h ⁻¹)	发酵黏度 FMV (Pa.s)
阜徐薯 20 Fuxushu 20	7.64±0.21 ab	73.85±2.94 bcd	3.18±0.12 ab	732.00±42.42 b
徐薯 4401 Xushu 4401	7.90±0.28 a	68.71±0.57 cde	3.29±0.21 a	7.32±0.28 d
郑红 22 Zhenghong 22	6.61±0.08 cdefg	66.64±0.28 de	2.75±0.13 bcde	84.30±5.66 d
洛薯 96-6 Luoshu 96-6	7.32±0.35 abc	78.84±3.36 b	3.05±0.22 abc	2.84±0.28 d
烟薯 24 Yanshu 24	6.41±0.04 defg	68.68±0.36 cde	2.67±0.10 cdef	26.52±1.41 d
商薯 056-3 Shangshu 056-3	7.14±0.29 abcd	77.98±4.58 b	2.98±0.23 abcd	4.33±0.47 d
徐 01-5-11 Xu 01-5-11	6.15±0.04 efg	73.52±0.40 bcd	2.56±0.14 def	868.00±70.71 a
徐薯 29 Xushu 29	6.20±0.94 efg	72.53±0.61 bcde	2.58±0.43 def	681.00±31.13 b
农大 6-2 Nongda 6-2	6.77±0.07 bcde	80.30±0.68 b	2.82±0.10 bcde	17.68±0.85 d
徐薯 24 Xushu 24	6.78±0.01 bcde	74.92±0.75 bcd	2.83±0.12 bcde	898.00±84.85 a
洛徐薯 9 号 Luoxushu 9	5.75±0.10 g	64.44±0.43 e	2.40±0.34 f	4.94±0.70 d
徐薯 28 Xushu 28	5.74±0.08 g	68.04±0.45 cde	2.39±0.18 f	3.64±0.71 d
徐薯 18 Xushu 18	6.81±0.18 bcde	90.33±4.05 a	2.84±0.24 bcde	246.00±36.56 c
徐 01-2-5 Xu 01-2-5	6.47±0.28 cdefg	71.60±1.09 bcde	2.70±0.15 cdef	749.00±56.56 b
徐薯 508 Xushu 508	6.29±0.87 defg	78.21±10.11 b	2.62±0.45 def	30.60±0.84 d
平均值 Average	6.66	73.90	2.78	290.41
标准差 SD	0.63	6.59	0.26	370.81
变异系数 CV	9.46	8.92	9.35	127.41
极差 Range	2.16	25.89	0.90	895.16

标以不同小写字母的数值在 $P<0.05$ 水平上差异显著。

Values followed by different lowercases are significantly different at $P<0.05$ according to LSD test. EC: ethanol content; FE: fermentation efficiency; FS: fermentative strength; FMV: fermented mash viscosity.

表 5 不同甘薯品种直链淀粉含量与 RVA 谱特征值的相关关系
Table 5 Correlation coefficients between amylose content and characteristic values of RVA profile in different sweetpotato varieties

项目 Item	最高黏度 PKV	最低黏度 HPV	崩解值 BDV	最终黏度 CPV	消减值 SBV	回复值 CSV	糊化温度 PT
干物率 DMC	0.263	0.208	0.271	0.230	-0.229	0.265	0.661**
淀粉含量 SC	0.275	0.224	0.278	0.244	-0.234	0.275	0.670**
直链淀粉含量 AC	-0.185	-0.132	-0.203	-0.148	0.184	-0.174	0.433

**表示在 0.01 水平上差异显著。

**Significant at $P<0.01$. DMC: dry matter content; SC: starch content; AC: amylose content; PKV: peak viscosity; HPV: hot paste viscosity; BDV: breakdown value; CPV: cool paste viscosity; SBV: setback value; CSV: consistence value; PT: pasting temperature.

表 6 不同甘薯品种乙醇发酵特性与直链淀粉含量的相关关系
Table 6 Correlation coefficients between amylose content and characteristic values of ethanol fermentation in different sweetpotato varieties

	乙醇含量 EC	发酵效率 FE	发酵强度 FS	发酵黏度 FMV
干物率 DMC	0.622 [*]	-0.318	0.675 ^{**}	-0.078
淀粉含量 SC	0.625 [*]	-0.302	0.677 ^{**}	-0.090
直链淀粉含量 AC	0.653 ^{**}	-0.003	0.698 ^{**}	0.132

^{*}和^{**}分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。
^{*} Significant at $P<0.05$; ^{**} Significant at $P<0.01$. DMC: dry matter content; SC: starch content; AC: amylose content; EC: ethanol content; FE: fermentation efficiency; FS: fermentative strength; FMV: fermented mash viscosity.

共分为 3 大类。第 I 类共 9 个品种, 该类中所占比例最大, 占试验品种的 60%, 这一大类具有 AC 和 BDV 均较高的特点; 第 II 类共 5 个品种, 占试验品种的 33%, 这一类群 AC 显著高于其他类群, BDV 显著低于其他类群; 第 III 类 1 个品种, 即郑红 22, AC 显著低于其他类群, 而 BDV 显著高于其他类群。从以上分析可知, 第 II 类品种具有乙醇含量高、发酵黏度大的特性, 第 III 类品种具有乙醇含量低、发酵黏度小的特性, 而第 I 类品种乙醇含量和发酵黏度介于 II 和 III 之间。

表 7 不同甘薯品种乙醇发酵特性与淀粉 RVA 谱特征值的相关关系
Table 7 Correlation coefficients between characteristic values of RVA profile and ethanol fermentation in different sweetpotato varieties

	最高黏度 PKV	最低黏度 HPV	崩解值 BDV	最终黏度 CPV	消减值 SBV	回复值 CSV	糊化温度 PT
乙醇含量 EC	-0.040	0.042	-0.103	0.009	0.105	-0.066	0.337
发酵效率 FE	-0.113	0.048	-0.233	-0.026	0.218	-0.187	-0.391
发酵强度 FS	-0.044	0.025	-0.096	-0.002	0.098	-0.061	0.356
发酵黏度 FMV	-0.379	-0.096	-0.563 [*]	-0.141	0.639 [*]	-0.231	0.208

^{*}表示在 0.05 水平上差异显著。
^{*} Significant at $P<0.05$. PKV: peak viscosity; HPV: hot paste viscosity; BDV: breakdown value; CPV: cool paste viscosity; SBV: setback value; CSV: consistence value; PT: pasting temperature; EC: ethanol content; FE: fermentation efficiency; FS: fermentative strength; FMV: fermented mash viscosity.

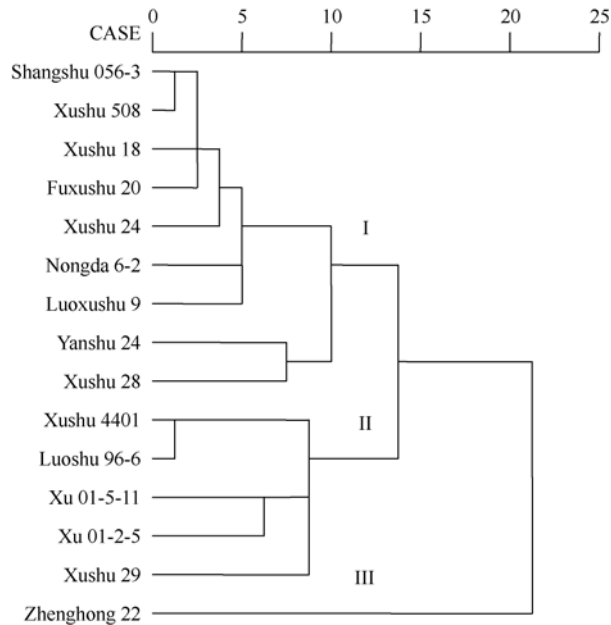


图 1 按直链淀粉含量和崩解值对 15 个甘薯品种的聚类图
Fig. 1 Diagram of 15 varieties of sweetpotato based on amylose content and breakdown value

3 讨论

淀粉含量是甘薯淀粉加工业、酒精生产企业选用甘薯的一个重要指标, 而直链淀粉含量对甘薯的加工性能有一定的影响。不同甘薯品种的淀粉和直

链淀粉含量差异很大, 陆国权等^[17]研究表明, 其淀粉率变幅为 15.27%~25.60%, 变异系数为 19.65%, 直链淀粉含量变幅为 8.38%~14.81%, 变异系数达 19.9%。本研究表明, 淀粉含量为 19.96%~26.65%, 变异系数 8.75%, AC 为 9.63%~15.43%, 变异系数 15.53%, 而且 AC 与淀粉含量极显著正相关。

直链淀粉是影响淀粉糊化特性的主要因子之一^[18]。淀粉开始糊化时, 从淀粉粒中溶出的直链淀粉分子之间能较容易地平行取向, 延链排列的大量羟基靠得很近, 通过氢键结合在一起, 形成不溶于水的聚合体, 这种聚合体在稀溶液中形成沉淀^[19-20]。淀粉的糊化特性在一定程度上反映了直链淀粉含量的多少。梁丽松等^[21]研究发现板栗淀粉的 RVA 谱特征值与直链淀粉含量密切相关, 直链淀粉含量越高, 板栗淀粉的峰值黏度、谷值黏度、最终黏度、稀懈值等越低, 而回冷值和糊化温度越高、峰值时间越长。张凯等^[22]研究玉米的糊化特性发现, 直链淀粉含量最高的秦龙 9 号的回生值、破损值和最终黏度均较高, 而含量低的三北 1 号的破损值较低。张艳霞等^[23]研究发现, 稻米的直链淀粉含量从 3.43%至 21.65%, 消减值表现为升高趋势, 且与直链淀粉含量呈极显著正相关。与国内研究相比, 国外在这方面研究更为深入和全面, 不仅涉及作物淀粉特性还

考虑到相关制品。Lii 等^[24]发现, 直链淀粉含量低的蜡质大米淀粉其结晶结构在加热糊化时最容易被破坏。Toyokawa 等^[25]和 Hideho 等^[26]研究发现, 直链淀粉含量较低的小麦品种, 其制成面条具有较好的韧性和食用品质, 而直链淀粉含量较高的品种, 其韧性和食用品质较差。Oda 等^[27]和 Konik 等^[28]报道, 淀粉糊化特性对日本面条食用品质影响很大, 其峰值黏度、低谷黏度和最终黏度与面条硬度和口感极显著相关。本研究发现, 不同甘薯品种淀粉的糊化特性之间存在较大差异, 6 个 RVA 谱特征值之间相关性显著, 但 AC 与 RVA 谱特征值相关性不显著。同时, 糊化温度受干物率和淀粉含量影响较大。Kitahara 等^[10]的研究未发现甘薯直链淀粉含量与黏滞性参数间存在显著相关性, 但 Collado 等^[29]发现甘薯直链淀粉含量显著影响 PKV、HPV 和 CPV ($P<0.01$), 而黄华宏等^[3]研究表明, 浙大 9201 的直链淀粉含量与 PKV、HPV 和 CPV 都呈极显著负相关, 徐薯 18 的直链淀粉含量只与 PKV 极显著负相关, 而在浙 3449 中未发现直链淀粉对糊化特性有显著影响。基因型差异可能是造成研究结论不一致的主要原因之一。

影响淀粉质原料的乙醇发酵特性因素很多, 如干物质含量、淀粉含量、可发酵糖含量、蛋白质含量和膳食纤维含量等, 但目前的研究还比较浅显。高锦合等^[30]采用摇瓶发酵法研究不同品种木薯在相同条件下酒精发酵的出酒率发现, 华南 7 号的淀粉含量最高, 但出酒率却最低, 得出了木薯原料的淀粉含量与出酒率之间不存在正相关性的结论。宋高友等^[31]研究发现, 高粱籽粒中各种成分的含量特别是淀粉和蛋白质含量, 对出酒率的影响较大, 总淀粉含量与出酒率呈极显著正相关 ($r=0.60$, $P<0.01$), 蛋白质的含量与出酒率呈显著正相关 ($r=0.44$, $P<0.05$)。Liimatainen 等^[32]研究指出, 马铃薯带皮和不带皮的加工处理对酒精产量和质量有影响。孙健等^[33]研究发现, 甘薯乙醇产量与干物率呈极显著正相关 ($r=0.842$, $P<0.01$), 与淀粉和蛋白质含量呈显著正相关 ($r=0.671$, $P<0.05$; $r=0.714$, $P<0.05$), 而与可溶性糖和还原糖含量之间相关不显著。本研究发现, 甘薯 AC 与乙醇发酵特性密切相关, AC 与乙醇含量、发酵强度呈极显著正相关 ($r=0.653$, $P<0.01$; $r=0.698$, $P<0.01$), 干物率、淀粉含量与乙醇含量、发酵强度也呈显著正相关; 甘薯淀粉糊化特性对乙醇发酵特性影响较小, RVA 谱特征值中仅崩解值、消减值分别与发酵黏度显著负相关 ($r=-0.563$, $P<0.05$) 和正相

关 ($r=0.639$, $P<0.05$)。鉴于 AC 和 BDV 与甘薯乙醇发酵特性有很大相关性, 因此将 AC 和 BDV 作为对品种进行聚类分析的依据, 聚类分析将 15 个品种所划分的 3 个类型, 在很大程度上反映了不同品种甘薯乙醇发酵特性。AC、BDV 与乙醇含量、发酵黏度联系密切, 因此认为 AC 和 BDV 可以作为评价甘薯乙醇发酵特性的指标。

4 结论

不同甘薯品种的干物率、淀粉含量和 AC 均存在显著差异, AC 对甘薯淀粉糊化特性影响较小, 而干物率、淀粉含量对 PT 影响是显著的; 不同品种甘薯的糊化特性之间存在一定差异, 且 RVA 谱特征值之间关系密切, BDV、SBV 对发酵黏度影响是显著的; 不同品种甘薯的乙醇发酵特性之间差异显著, 乙醇含量、发酵强度受 AC、干物率和淀粉含量影响显著。AC 和 BDV 与乙醇发酵特性关系密切, 可以作为评价甘薯乙醇发酵特性的指标, 同时较高 AC 和 BDV 值应是燃料乙醇专用甘薯品种的选育方向。

References

- [1] Ma D F, Li H M, Tang J, Xie Y P, Li Q, Cao Q H, Zhang Y G, Zhang A J. Current status and future prospects of development of sweet potato industry in China. In: Ma D F ed. Sweetpotato in Food and Energy Security. Beijing: China Agricultural University Press, 2010. pp 3-9
- [2] Fu Y-F(傅玉凡), Liang Y-Y(梁媛媛), Sun F-N(孙富年), Li M(李明), Leng J-C(冷晋川), Zhang Q-T(张启堂), He P(何平). Variations of starch content in storage roots of sweetpotato during their development. *J Southwest Univ* (西南大学学报), 2008, 30(4): 56-60 (in Chinese with English abstract)
- [3] Huang H-H(黄华宏), Lu G-Q(陆国权), Zheng Y-F(郑遗凡). Variation in root starch gelatinization characteristics during the growth and development of sweetpotato. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2005, 38(3): 462-467 (in Chinese with English abstract)
- [4] Yang X-R(杨晓蓉), Li X(李歆), Ling J-Y(凌家煜). Differences among rice categories in pasting characteristics and amylose content. *J Chin Cereals Oils Assoc* (中国粮油学报), 2001, 16(6): 37-40 (in Chinese with English abstract)
- [5] Liu H(刘辉), Zhang M(张敏). Relationships between amylose content and gelatinization characteristics of different varieties of millet. *Food Sci* (食品科学), 2010, 31(15): 31-33 (in Chinese with English abstract)
- [6] Varavinit S, Shobsngob S, Varayanond W. Effect of amylose content on gelatinization, retrogradation and pasting properties of flours from different cultivars of Thai rice. *Starch/Staerke*, 2003, 55: 410-415
- [7] Zhou X-L(周小理), Xiao W-Y(肖文艳), Zhou Y-M(周一鸣).

- Study on relationship between pasting properties and amylose content of different buckwheat varieties. *Food Sci* (食品科学), 2008, 29(11): 37–40 (in Chinese with English abstract)
- [8] Wu X, Zhao R, Wang D. Effects of amylose, corn protein, and corn fiber contents on production of ethanol from starch-rich media. *Cereal Chem*, 2006, 83: 569–575
- [9] Zhang Y-G(张允刚), Fang B-P(房伯平). Descriptors and Data Standard for Sweetpotato (甘薯种质资源描述规范和数据标准). Beijing: China Agriculture Press, 2006. pp 83–84 (in Chinese)
- [10] Kitahara K, Ooi Y, Mizukami S, Suganuma T, Nagahama T. Physicochemical properties of starches from sweet potato cultivars. *J Appl Glycosci*, 1996, 43: 59–66
- [11] Mcleary B V, Solah V, Gibson T S. Quantitative measurement of total starch in cereal flours and products. *J Cereal Sci*, 1994, 20: 51–58
- [12] Standards of Ministry of Agriculture, the People's Republic of China (中华人民共和国农业部标准). Measuring Methods of Rice Quality Characteristics (米质测定方法). Beijing: China Standards Press, 1988 (in Chinese)
- [13] Tang Z-H(唐忠厚), Li H-M(李洪民), Zhang A-J(张爱君), Shi X-M(史新敏), Sun J(孙健), Zhu H(朱红), Xu F(徐飞). Effects of long-term phosphorus fertilization on quality and starch RVA characters in sweetpotato. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 2011, 17(2): 391–396 (in Chinese with English abstract)
- [14] Jin Y-L(靳艳玲), Gan M-Z(甘明哲), Zhou L-L(周玲玲), Xue H-L(薛慧玲), Zhang L(张良), Zhao H(赵海). Ethanol production with 4 varieties of sweet potato at different growth stages. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2009, 15(2): 267–270 (in Chinese with English abstract)
- [15] Liu Y(刘艳), Zhao H(赵海), Qi T-S(戚天胜), Tang Q-L(唐秋琳), Huang Y-F(黄宇峰). Fast production of ethanol by *Zymomonas mobilis* (Zy-1). *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2007, 13(1): 69–72 (in Chinese with English abstract)
- [16] Wang F Z, Shen W, Rao Z M. Construction of a flocculating yeast for fuel ethanol production. *Biotechnol Lett*, 2008, 30: 97–102
- [17] Lu G-Q(陆国权), Tang Z-H(唐忠厚), Huang H-H(黄华宏). Genotype variation in amylose content and starch pasting properties of sweetpotato storage at two K levels. *Acta Agric Zhejiangensis* (浙江农业学报), 2005, 17(5): 280–283 (in Chinese with English abstract)
- [18] Zhang L(张莉), Li Z-X(李志西), Mao J-Y(毛加银). Rheology of chestnut starch paste. *Acta Agric Boreali-Occident Sin* (西北农业学报), 2001, 10(3): 90–92 (in Chinese with English abstract)
- [19] Cooke D, Gidley M J. Loss of crystalline and molecular order during starch gelatinization origin of the enthalpic transition. *Carbohydr Res*, 1992, 227: 103–112
- [20] Ramesh M, Ali S Z, Bhattacharya K R. Structure of rice starch and its relation to cooked-rice texture. *Carbohydr Polym*, 1999, 38: 337–347
- [21] Liang L-S(梁丽松), Xu J(徐娟), Wang G-X(王贵禧), Ma H-L(马惠铃). Relationship between starch pasting, amylose content and starch granule size in different Chinese chestnut variety groups. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2009, 42(1): 251–260 (in Chinese with English abstract)
- [22] Zhang K(张凯), Li X-H(李新华), Zhao Q-C(赵前程), Li N-J(李乃洁), Yang X-L(杨晓丽). Study and comparison on gelatinization characteristics of starches from different maize varieties. *J Shenyang Agric Univ* (沈阳农业大学学报), 2005, 36(1): 107–109 (in Chinese with English abstract)
- [23] Zhang Y-X(张艳霞), Ding Y-F(丁艳锋), Li G-H(李刚华), Wang Q-S(王强盛), Huang P-S(黄丕生), Wang S-H(王绍华). Starch structure and paste property of rice with different amylose content. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2007, 33(7): 1201–1205 (in Chinese with English abstract)
- [24] Lii C Y, Tsai M L, Tseng K H. Effect of amylose content on the rheological property of rice starch. *Cereal Chem*, 1996, 73: 415–420
- [25] Toyokawa H, Rubenthaler G L, Powers J R, Schanus E G. Japanese noodle qualities: II. Starch components. *Cereal Chem*, 1989, 66: 387–391
- [26] Hideho M, Sachiko T. Endosperm starch properties in several wheat cultivars preferred for Japanese noodles. *Euphytica*, 1994, 72: 171–175
- [27] Oda M, Yasuda Y, Okazaki S, Yamauchi Y, Yokoyama Y. A method of flour quality assessment for Japanese noodles. *Cereal Chem*, 1980, 57: 253–254
- [28] Konik C M, Miskelly D M, Gras P W. Starch swelling power, grain hardness and protein: relationship to sensory properties of Japanese noodles. *Starch/Stärke*, 1993, 45: 139–144
- [29] Collado L S, Corke H. Properties of starch noodles as affected by sweetpotato genotype. *Cereal Chem*, 1997, 74: 182–187
- [30] Gao J-H(高锦合), Liang Y-C(梁宇朝), Song F-P(宋付平), Li K-M(李开绵). Alcoholic fermentation of cassava of different varieties. *Chin J Trop Crops* (热带作物学报), 2009, 30(2): 215–218 (in Chinese with English abstract)
- [31] Song G-Y(宋高友), Zhang C-S(张纯慎), Su Y-M(苏益民), Liao M-D(廖美丹), Bai C-P(白昌平). Effects of sorghum grain quality on alcohol yield. *Liaoning Agric Sci* (辽宁农业科学), 1986, (5): 6–9 (in Chinese with English abstract)
- [32] Liimatainen H, Kuokkanen T, Kriinen J. Development of bio-ethanol production from waste potatoes. In: Pongrácz E ed. Proceedings of the Waste Minimization and Resources Use Optimization Conference. Finland Oulu: Oulu University Press, 2004. pp 123–129
- [33] Sun J(孙健), Zhang C-Y(张翠英), Li H-M(李洪民), Zhang A-J(张爱君), Tang Z-H(唐忠厚). Multivariate regression analysis on ethanol yield and quality traits of fresh sweetpotato. *J Chin Cereals Oils Assoc* (中国粮油学报), 2010, 25(7): 49–53 (in Chinese with English abstract)