

刘国敏,覃维治,韦荣昌,等.不同品种(系)马铃薯挥发性风味物质对比分析[J].食品工业科技,2022,43(9):284-292. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080141

LIU Guomin, QIN Weizhi, WEI Rongchang, et al. Comparative Analysis of Volatile Flavor Compounds in Different Varieties (Lines) of Potatoes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(9): 284-292. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080141

· 分析检测 ·

不同品种(系)马铃薯挥发性风味物质对比分析

刘国敏¹,覃维治¹,韦荣昌¹,易若兰¹,廖玉娇¹,郑 虚¹,车江旅^{2,*}

(1.广西壮族自治区农业科学院经济作物研究所,广西南宁 530007;

2.广西壮族自治区农业科学院,广西南宁 530007)

摘 要:为探究不同品种(系)马铃薯挥发性风味物质,采用固相微萃取和气相色谱-质谱联用技术对蒸制 35 min 熟化的普通马铃薯品种(系)桂农薯 1 号、费乌瑞它、品系 25 号和 46 号以及特色品种桂彩薯 1 号 5 个马铃薯品种(系)进行挥发性风味物质萃取和分离鉴定,并利用相对气味活度值(ROAV)进行主成分分析,建立风味品质综合评价模型,结果表明:桂农薯 1 号和 46 号的检出物质种类最多,有 32 种,费乌瑞它 27 种,25 号 17 种,均表现为醛类物质种类最多,占总检出物比例也最高,桂彩薯 1 号检出物质有 21 种,其中,烃类物质种类最多,酯类物质占总检出物比例最高,醛类其次;46 号的关键性风味物质(ROAV ≥ 1)种类最多,达 18 种,桂农薯 1 号和费乌瑞它有 14 种,桂彩薯 1 号和 25 号只有 6 种,5 个马铃薯品种(系)共同的关键性香气物质有 4 种,为正辛醛、壬醛、正癸醛、2-戊基呋喃;主成分分析结果表明,马铃薯评价体系可由两个主成分来表征,不同马铃薯品种风味品质综合排名由高到低依次为 46 号、桂农薯 1 号、费乌瑞它、桂彩薯 1 号和 25 号。综合分析认为,醛类物质是蒸马铃薯的主体风味物质,5 个马铃薯品种(系)中 46 号整体风味最佳。

关键词:马铃薯,挥发性风味物质,主成分分析,相对气味活度值

中图分类号:TS215

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2022)09-0284-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080141



本文网刊:

Comparative Analysis of Volatile Flavor Compounds in Different Varieties (Lines) of Potatoes

LIU Guomin¹, QIN Weizhi¹, WEI Rongchang¹, YI Ruolan¹, LIAO Yujiao¹, ZHENG Xu¹, CHE Jianglü^{2,*}

(1.Cash Crops Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China;

2.Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

Abstract: To explore the volatile flavor compounds in different varieties (lines) of potatoes, volatile flavor substances were extracted, separated and identified by solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry in 5 potato varieties (lines) common potato varieties (lines) GuiNongshu No. 1, Favorita, strains 25 and 46, and characteristic variety GuiCaishu No. 1, which were steamed for 35 min and matured, and the relative odor activity value (ROAV) was used for principal component analysis to establish the comprehensive evaluation model of flavor quality. The results showed that: GuiNongshu No. 1 and 46 had the most types of detected substances, with 32 species, Favorita had 27 species, and strains 25 had 17 species, all showed the most types of aldehydes, accounting for the total proportion of detected substances was also the highest. There were 21 kinds of detected substances in GuiCaishu No. 1, among which hydrocarbon substances were the largest, ester substances accounted for the highest proportion of total detected substances, followed by aldehydes;

收稿日期: 2021-08-16

基金项目: 广西农业科学院基本科研业务专项(桂农科 2021JM66);国家现代农业产业技术体系广西薯类创新团队建设专项资助项目(nycytxgxcxtd-03-11-01);广西农业科学院基本科研业务专项稳定资助科研团队项目(桂农科 2021YT059);广西桂平特色作物试验站(TS202131)。

作者简介: 刘国敏(1989-),女,硕士,助理研究员,研究方向:马铃薯栽培与育种研究,E-mail: 1158593947@qq.com。

* 通信作者: 车江旅(1977-),男,硕士,副研究员,研究方向:蔬菜新品种选育与栽培技术研究,E-mail: 327019989@qq.com。

The key flavor substance ($ROA \geq 1$) of 46 was the most, up to 18 species, GuiNongshu No. 1 and Favorita had 14 species, GuiCaishu No. 1 and 25 had only 6 species, and the common key aroma substances to 5 potato varieties (lines) were four types, which were n-octanal, nonanal, n-decanal, and 2-pentylfuran; the principal component analysis results showed that the potato evaluation system could be characterized by two principal components, and the comprehensive ranking of flavor quality of different potato varieties from high to low was 46, GuiNongshu No. 1, Favorita, GuiCaishu No. 1 and 25. Comprehensive analysis shows that aldehydes are the main flavor substances of steamed potatoes, and 46 of the 5 potato varieties (lines) has the best overall flavor.

Key words: potato; volatile flavor compounds; principal component analysis; relative odor activity value

马铃薯又称土豆、洋芋,是一种菜粮两用的经济作物,2015 年被农业部列为继小麦、玉米、水稻之后的第四大主粮作物^[1],被誉为 21 世纪最有发展前景的经济作物之一^[2],也被称为地球未来的粮食^[3]。孙君茂等^[4]研究认为,马铃薯与稻米、小麦、玉米的营养当量折算比为 2.5:1,反映出马铃薯的整体营养价值和对人体营养素需求的满足程度均较高^[5]。马铃薯富含膳食纤维、蛋白质、维生素等人体必需物质,还含有禾谷类粮食不具有的胡萝卜素和抗坏血酸,从营养角度来看,马铃薯可称为“十全十美的食物”^[6]。目前,对马铃薯的研究仍集中在生产加工和营养品质方面,对马铃薯风味尤其是对蒸马铃薯风味的研究相对较少。目前,马铃薯中的挥发性风味物质共检出 300 多种^[7],烹饪方式、栽培条件、贮藏时间等均可对马铃薯风味产生影响^[8]。另外,马铃薯的风味具有基因特异性,不同的栽培品种,风味会有变化^[9-10]。而与欧美等国家不同,我国马铃薯现如今仍以鲜食为主^[11],风味品质是决定某个马铃薯品种能否持久被市场接受的主要因素之一^[12],分析研究马铃薯挥发性风味物质,对新品种的选育和推广具有重要意义,对推动广西马铃薯产业的可持续发展至关重要。

广西是典型的马铃薯南方冬作区,马铃薯产业已成为广西农业的支柱产业之一。马铃薯风味的研究对提升广西马铃薯市场竞争力至关重要。本研究以广西农业科学院经济作物研究所选育品种桂农薯 1 号和桂彩薯 1 号、品系 46 号和 25 号及我国主栽品种费乌瑞它为试验材料,利用固相微萃取和气相色谱质谱联用技术测定 5 个不同品种(系)蒸熟马铃薯泥的挥发性风味物质,并对其进行主成分分析,分析不同马铃薯栽培品种(系)的风味差异,为以后的马铃薯品质评价、品种选育提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

试验所用材料均来自广西农业科学院经济作物研究所,供试的马铃薯品种(系)有 5 个,分别为桂农薯 1 号(黄皮黄肉)、桂彩薯 1 号(紫皮紫肉)、费乌瑞它(黄皮黄肉)、25 号(黄皮黄肉)、46 号(黄皮白肉),供试材料均种植于广西农科院里建基地,田间管理按当地生产技术标准进行。

50/30 μm DVB/CAR/PDMS (57298-U) 萃取头、SPME 手动进样手柄 美国安捷伦科技有限公

司;QP2010 Ultra GC-MS 仪器 日本岛津公司;DB-WAX 毛细管柱(30 m $\times$ 250 μm , 0.25 μm) 美国 Agilent 公司;DK-S28 恒温水浴锅 上海精宏。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备 每个品种分别选取 2~3 个新鲜马铃薯(每个约 100 g),用蒸锅隔水蒸 35 min。将熟化的马铃薯捣碎成泥状混合均匀,取 3 g 混合样放入 15 mL 萃取瓶中,密封待用。

1.2.2 固相微萃取和气相色谱仪分析 固相微萃取:Gerstel 全自动样品前处理平台;加热温度 80 $^{\circ}\text{C}$,平衡时间:20 min,吸附时间 60 min,解析时间 15 min。

气相色谱条件: TG-5SILMS 色谱柱(60 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm);载气为氦气,恒流模式:2.0 mL/min;进样口温度:270 $^{\circ}\text{C}$;进样方式为不分流进样。

柱箱升温程序:40 $^{\circ}\text{C}$ 保持 5 min,以 15 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升到 280 $^{\circ}\text{C}$ 保持 5 min,以 15 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升到 205 $^{\circ}\text{C}$ 保持 5 min。

质谱条件:电离方式为 EI,电子能量为 70 eV,离子源温度为 230 $^{\circ}\text{C}$,四级杆温度:150 $^{\circ}\text{C}$,辅助加热:280 $^{\circ}\text{C}$ 。质量扫描范围 29~550 m/z,阈值 150。

1.2.3 定性方法与相对含量计算方法 原始数据初步通过与 NIST 谱库进行匹配定性,每个峰使用软件自动确定的背景校正和分辨率,选择匹配度大于 80% 作为物质鉴定依据^[13]。采用峰面积归一化法定量,确定各挥发成分在各不同马铃薯品种中的相对含量^[14]。

1.2.4 ROAV 测定 利用 ROAV 定义对样品风味贡献最大的挥发性风味物质,即 $ROAV_{\text{max}}=100$,其他香气成分 ROAV 值计算公式为:

$$ROAV = \frac{C}{C_{\text{max}}} \times \frac{T_{\text{max}}}{T} \times 100$$

式中: T 为各挥发性风味物质相应的阈值, T_{max} 为贡献最大组分对应的阈值; C 为各挥发性风味物质的相对含量, C_{max} 为贡献最大组分的相对含量^[15]。

1.2.5 挥发性风味物质主成分分析评价 对不同马铃薯品种(系)挥发性组分进行主成分分析,确定主体挥发性成分,并构建风味品质综合评价模型^[16],计算综合得分。

1.3 数据处理

用 Excel 2013 输入数据和制作图表,用 SPSS 20.0 进行主成分分析,制作主成分分析得分图及载荷图。

2 结果与分析

2.1 不同品种(系)马铃薯挥发性组分比较

不同品种(系)马铃薯挥发性风味物质相对含量和数量见表1、表2。经过检测分析,5个马铃薯品种共检出57种挥发性风味物质,其中,醛类23种、醇类9种、酮类5种、酯类6种、烃类11种、呋喃类1种、酚类2种。不同品种(系)马铃薯挥发性风味物质数量和相对含量均有一定的差异,桂农薯1号共检出32种风味物质,桂彩薯1号21种、费乌瑞它27种、25号17种、46号32种。除桂彩薯1号之外,其他4个品种均表现为醛类物质种类最多,相对含量也最高,且阈值较低,对整体风味影响较大。桂彩薯1号表现为烃类物质种类最多,酯类物质相对含量最高,其中,烃类物质主要来源于脂肪酸烷氧自由基的均裂,阈值较高对整体风味影响较小;酯类物质主要来源于马铃薯泥中醇类和羧酸类化合物发生的酯化反应,使得蒸马铃薯具有独特的芳香气味。不同马铃薯品种(系)共有的挥发性风味物质有8种,分别是正辛醛、壬醛、正癸醛、2-乙基己醇、(1-羟基-2,4,4-三甲基-3-基)2-甲基丙酸酯、丙酸-2-甲基-3-羟基-2,4,4-三甲基戊酯、十四烷、2-戊基呋喃。

2.1.1 醛类物质分析 醛类物质是脂类降解的主要产物,不同品种(系)马铃薯中醛类物质对比分析发现,46号马铃薯检出的醛类物质种类最多(21种),其次分别是桂农薯1号(17种)、费乌瑞它(12种),桂彩薯1号和25号最少,均只有5种(表2所示)。从占总检出物的比例来看,费乌瑞它最高(71.44%),其次分别是46号(69.66%)、桂农薯1号(69.36%)、25号(55.73%)、桂彩薯1号(36.23%)。其中,正辛醛、壬醛和正癸醛是5种马铃薯品种(系)共同检出的醛类物质;桂农薯1号检出的醛类物质中正己醛、2-庚烯醛、壬醛相对含量较高;正己醛、2-庚烯醛具有青草香,主要来源于亚油酸的氧化和 Strecker 反应。壬醛有玫瑰柑橘香味,是油酸的氧化产物。桂彩薯1号中壬醛、3-甲硫基丙醛、苯乙醛相对含量较高。3-甲硫基丙醛有醇厚的酱香、红烧肉香味,主要来源于 Strecker 降解反应。苯乙醛有杏仁香,主要来源于脂质的降解。费乌瑞它中苯甲醛、正己醛、壬醛相对含量较高。25号中壬醛、3-甲硫基丙醛、正辛醛相对含量较高。正辛醛有玫瑰和橙皮香味;46号中正己醛、2-庚烯醛、正癸醛相对含量较高。

2.1.2 醇类物质分析 由表1、2不同品种(系)马铃薯中检出的醇类物质可以看出,桂农薯1号检出的醇类物质最多(6种),其次分别是46号(4种)、费乌瑞它(3种),桂彩薯1号和25号最少,均只有2种。

从占总检出物的比例可以看出,桂农薯1号最高(9.22%),其次分别是46号(5.44%)、费乌瑞它(4.69%)、桂彩薯1号(4.07%)和25号(2.23%)。其中,2-乙基己醇是5种马铃薯品种(系)共同检出的醇类物质。

2.1.3 酮类物质分析 由表1、2不同品种(系)马铃薯检出的酮类物质可以看出,桂农薯1号、25号、46号检出1种酮类化合物,桂彩薯1号、费乌瑞它检出2种酮类化合物。从占总检出物比例可以看出,桂彩薯1号最高(3.73%),其次分别是费乌瑞它(2.68%)、25号(2.65%)、桂农薯1号(2.13%)、46号(0.59%)。5种马铃薯品种(系)未检出共同的酮类物质。

2.1.4 呋喃类物质分析 由表1、2可以看出,不同品种(系)马铃薯均检出同一种呋喃类物质,2-戊基呋喃,占总检出物质的比例表现为46号最高(18.26%),其次是桂农薯1号(10.93%)、费乌瑞它(3.06%)、桂彩薯1号(2.48%)、25号(2.12%)。

2.1.5 酚类物质分析 从表1、2可以看出,桂农薯1号、费乌瑞它、46号马铃薯品种(系)均未检出酚类物质,桂彩薯1号检出1种,占总检出物的2.68%;25号检出1种,占总检出物的0.41%。

2.1.6 酯类物质分析 由表1、2不同品种(系)马铃薯检出的酯类物质可以看出,桂农薯1号、桂彩薯1号、费乌瑞它均检出4种酯类化合物,25号马铃薯检出3种酯类化合物,46号马铃薯检出2种酯类化合物。从占总检出物的比例可以看出,桂彩薯1号最高(40.71%)、其次是25号(23.35%)、费乌瑞它(10.89%)、桂农薯1号(5.56%)、46号(1.93%)。(1-羟基-2,4,4-三甲基-3-基)2-甲基丙酸酯和丙酸-2-甲基-3-羟基-2,4,4-三甲基戊酯为5个马铃薯品种(系)共同检出的酯类化合物,且在5个马铃薯品种(系)所检出的酯类化合物中丙酸-2-甲基-3-羟基-2,4,4-三甲基戊酯的相对含量均最高,具体表现为桂彩薯1号(24.65%)>25号(15.81%)>费乌瑞它(7.23%)>桂农薯1号(3.68%)>46号(1.64%)。

2.1.7 烃类物质分析 由表1、2不同品种(系)马铃薯检出的烃类物质可以看出,桂彩薯1号检出的烃类化合物种类最多(6种),其次是费乌瑞它(5种)、25号(4种),桂农薯1号和46号最少,均只检出3种。从占总检出物的比例可以看出,25号最高(13.52%),其次分别是桂彩薯1号(10.78%)、费乌瑞它(7.81%)、46号(4.13%)、桂农薯1号(2.81%)。其中,十四烷为5种马铃薯品种(系)共同检出物。

2.2 不同品种(系)马铃薯挥发性风味物质 ROAV 分析

不同品种(系)马铃薯检测出了多种挥发性风味物质,但是只有其中一部分对马铃薯的整体风味有贡献,剩下的部分物质对马铃薯整体风味的呈现只起到

表 1 不同品种(系)马铃薯挥发性风味物质相对含量
Table 1 Relative content of volatile flavor substances in different varieties (lines) of potatoes

种类	物质名称	品种				
		桂农薯1号(%)	桂彩薯1号(%)	费乌瑞它(%)	25号(%)	46号(%)
醛类	正己醛	42.33	—	19.51	—	26.21
	庚醛	0.90	—	1.09	—	0.58
	2-庚烯醛	7.78	—	2.00	—	10.39
	苯甲醛	0.09	—	24.55	—	0.32
	正辛醛	1.68	1.86	1.92	5.11	1.39
	反,反-2,4-庚二烯醛	0.50	—	—	—	1.10
	壬醛	5.93	19.10	9.32	26.08	4.28
	反式-2-壬烯醛	0.33	—	0.32	—	—
	4-乙基苯甲醛	0.23	—	—	—	0.82
	正癸醛	5.37	2.31	3.45	2.97	6.09
	(E,E)-2,4-壬二烯醛	0.54	—	—	—	0.85
	反式-2-癸烯醛	0.14	—	—	—	0.20
	(E,E)-2,4-癸二烯醛	1.61	—	—	—	3.25
	十一醛	0.22	—	0.25	—	0.36
	2-十一烯醛	1.22	—	—	—	1.62
	十二醛	0.12	—	—	—	—
	2-十二烯醛	0.37	—	—	—	0.64
	3-甲硫基丙醛	—	7.34	6.93	18.69	0.79
	5-乙基-1-环戊烯-1-甲醛	—	—	—	—	3.08
	苯乙醛	—	5.62	—	2.88	0.81
	反-2-辛烯醛	—	—	1.10	—	5.74
	顺-6-壬烯醛	—	—	—	—	0.59
	2,4-癸二烯醛	—	—	0.47	—	0.55
醇类	3-甲硫基丙醇	1.30	—	—	—	—
	蘑菇醇	1.79	—	—	—	4.37
	2-乙基己醇	0.55	1.70	2.71	1.11	0.17
	反-2-辛烯醇	3.94	—	—	—	—
	正壬醇	0.32	—	—	—	—
	L-薄荷醇	1.32	—	—	—	0.14
	1-戊醇	—	—	—	—	0.76
	2-异丙基-5-甲基环己醇	—	2.37	1.33	1.12	—
	正辛醇	—	—	0.65	—	—
	3-丁基环己酮	—	—	—	—	0.59
酮类	薄荷酮	2.13	2.40	—	2.65	—
	(-)-薄荷酮	—	—	2.06	—	—
	异薄荷酮	—	—	0.62	—	—
	左旋薄荷酮	—	1.33	—	—	—
酯类	乙酸薄荷酯	0.26	—	0.53	—	—
	(1-羟基-2,4,4-三甲基戊-3-基)2-甲基丙酸酯	0.97	10.74	2.53	4.74	0.29
	丙酸-2-甲基-3-羟基-2,4,4-三甲基戊酯	3.68	24.65	7.23	15.81	1.64
	2,4,4-三甲基戊烷-1,3-二基双(2-甲基丙酸酯)	0.65	4.42	—	2.80	—
	1-[2-(异丁氧基)-1-甲基乙基]-2,2-二甲基丙基-2-甲基丙酸酯	—	—	0.60	—	—
	邻苯二甲酸二异丁酯	—	0.90	—	—	—
烃类	(1E)-1-亚乙基八氢-1H-蒽	1.62	—	0.32	—	—
	十四烷	1.01	3.16	1.05	3.14	0.21
	正十九烷	0.18	—	0.53	—	—
	正十五烷	—	3.44	1.41	5.96	0.32
	巴伦西亚橘烯	—	—	—	1.58	—
	正十六烷	—	1.83	—	2.84	—
	反式角鲨烯	—	—	4.50	—	—
	4-甲基辛烷	—	0.38	—	—	—
	2,6,10-三甲基十四烷	—	0.67	—	—	—

续表 1

种类	物质名称	品种				
		桂农薯1号(%)	桂彩薯1号(%)	费乌瑞它(%)	25号(%)	46号(%)
	正二十烷	—	0.65	—	—	—
	4-乙基-3-壬烯-5-炔	—	—	—	—	3.60
呋喃	2-戊基呋喃	10.93	2.48	3.06	2.12	18.26
酚类	2,5-二叔丁基苯酚	—	—	—	0.41	—
	2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚	—	2.68	—	—	—

注: “—”代表未检出;表2同。

表 2 不同品种(系)马铃薯挥发性风味物质成分种类及占总量的百分比

Table 2 Types and percentages of volatile flavor components in different varieties (lines) of potatoes

挥发性成分	桂农薯1号		桂彩薯1号		费乌瑞它		25号		46号	
	种类(种)	占比(%)	种类(种)	占比(%)	种类(种)	占比(%)	种类(种)	占比(%)	种类(种)	占比(%)
醛类	17	69.36	5	36.23	12	71.44	5	55.73	21	69.66
醇类	6	9.22	2	4.07	3	4.69	2	2.23	4	5.44
酮类	1	2.13	2	3.73	2	2.68	1	2.65	1	0.59
酯类	4	5.56	4	40.71	4	10.89	3	23.35	2	1.93
烃类	3	2.81	6	10.78	5	7.81	4	13.52	3	4.13
呋喃	1	10.93	1	2.48	1	3.06	1	2.12	1	18.26
酚类	—	—	1	2.68	—	—	1	0.41	—	—
合计	32	100	21	100	27	100	17	100	32	100

修饰和协同作用。挥发性风味物质对马铃薯风味特征的贡献由其相对含量和香气阈值决定,香气阈值是一种气味最小可嗅值,所以风味物质相对含量的高低并不能说明其对马铃薯风味的贡献大小^[17]。因此,本文结合各风味物质的阈值,进行了 ROAV 分析。ROAV ≥ 1 的物质对样品香气贡献较大,为关键性香气化合物,并且 ROAV 值越大的组分对样品总体风味的贡献也越大,0.1 $\leq$ ROAV <1 的物质对马铃薯泥香气有重要修饰作用,一般认为 ROAV <0.1 的物质对样品风味贡献较小。本文中,桂农薯 1 号、46 号中的正己醛含量最高,对样品的香气贡献最大,定义正己醛为 ROAV_{max}=100;桂彩薯 1 号、25 号中壬醛含量最高,对样品香气贡献最大,定义壬醛为 ROAV_{max}=100;费乌瑞它中苯甲醛含量最高,对样品香气贡献最大,定义苯甲醛为 ROAV_{max}=100。由表 3 可以看出,桂农薯 1 号马铃薯泥检出物中,有 14 种关键性香气物质,桂彩薯 1 号有 6 种、费乌瑞它 14 种、25 号有 6 种、46 号有 18 种。其中,正辛醛、壬醛、正癸醛、2-戊基呋喃阈值较低,对 5 个马铃薯品种香气均有重要贡献(ROAV ≥ 1),是共有的关键性香气物质。正己醛、庚醛、2-庚烯醛对桂农薯 1 号、费乌瑞它、46 号整体风味影响较大,使其具有独特的水果香气。反,反-2,4-庚二烯醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、反式-2-癸烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、2-十一烯醛、蘑菇醇阈值较低,对桂农薯 1 号和 46 号整体风味影响较大,使其风味特征与其他 3 个品种存在差异。苯甲醛、正辛醇是费乌瑞它特有的关键性香气物质,赋予了其杏仁香和油脂香味,对费乌瑞它风味特征的形成有重要贡献。3-甲硫基丙醛阈值

较低,相对含量较高,ROAV 值较大,对桂彩薯 1 号、费乌瑞它、25 号、46 号香气有较大贡献,是这 4 个品种共有的关键性香气物质。

2.3 主成分分析

2.3.1 不同品种(系)马铃薯挥发性风味物质主成分分析 为进一步研究挥发性风味物质对马铃薯风味的影响,选取 22 种 ROAV ≥ 0.1 对马铃薯风味有贡献的物质进行主成分分析,提取出特征值大于 1 的 4 个主成分(表 4)。第 1 主成分贡献率为 58.619%,第 2 主成分贡献率为 20.997%,累计贡献率达到 79.616%,可以解释原始数据的大部分信息,因此只选择前两个主成分进行分析。前两个主成分得分图如图 1 所示,不同品种马铃薯区分效果较好,将得分图分为 4 个象限,可以看出 25 号和桂彩薯 1 号均分布于第三象限,有较好的聚集性,说明这两个马铃薯品种风味特征相近,其与费乌瑞它、桂农薯 1 号、46 号没有较好的聚集,表明不同马铃薯品种风味特征存在一定的差异。各主成分载荷值代表主成分对该类物质反映程度,可用于风味数据分析^[32]。由表 5 和图 2 可以看出,决定第 1 主成分的主要是 2-庚烯醛、正癸醛、2-十一烯醛、反式-2-癸烯醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、2-正戊基呋喃、壬醛、十一醛、反,反-2,4-庚

表 4 主成分特征值及贡献率

Table 4 Principal component eigenvalues and contribution rate

主成分	特征值	贡献率(%)	累计贡献率(%)
1	12.896	58.619	58.619
2	4.619	20.997	79.616
3	3.431	15.594	95.210
4	1.054	4.790	100.000

表 3 不同品种(系)马铃薯挥发性风味物质的香气阈值及 ROAV 值

Table 3 Aroma threshold and ROAV value of volatile flavor compounds in different varieties (lines) of potatoes

物质名称	阈值(μg/kg) ^[18-24]	ROAV(相对气味活度值)					风味特征描述 ^[25-31]
		桂农薯1号	桂彩薯1号	费乌瑞它	25号	46号	
正己醛	4.50	100.00	—	6181.03	—	100.00	呈苹果香
庚醛	3.00	3.19	—	517.99	—	3.32	呈水果香味
2-庚烯醛	13.00	6.36	—	219.33	—	13.72	呈青草香
苯甲醛	350.00	<0.01	—	100.00	—	0.02	有杏仁香味道
正辛醛	0.70	25.51	24.55	3910.38	27.96	34.09	有玫瑰和橙皮香味
反,反-2,4-庚二烯醛	0.10	53.15	—	—	—	188.87	脂肪、水果和香辛料香
壬醛	1.00	63.04	100.00	13287.15	100.00	73.49	有玫瑰、柑橘香味
反式-2-壬烯醛	0.08	43.85	—	5702.64	—	—	呈鸡和烤猪肉香
4-乙基苯甲醛	350.00	<0.01	—	—	—	0.04	甜杏仁味
正癸醛	1.00	57.08	21.34	4918.53	11.38	104.57	脂肪香
(E,E)-2,4-壬二烯醛	0.09	63.78	—	—	—	162.16	脂肪香、鸡汤香味
反式-2-癸烯醛	0.30	4.96	—	—	—	11.45	呈鸡和橙子香味
(E,E)-2,4-癸二烯醛	0.07	244.49	—	—	—	797.18	有鸡肉香
十一醛	5.00	0.47	—	71.28	—	1.24	有玫瑰香
2-十一烯醛	5.00	2.59	—	—	—	5.56	脂肪香
十二醛	2.00	0.64	—	—	—	—	脂肪香
3-甲硫基丙醛	0.20	—	339.11	49399.12	357.91	67.82	肉类香味
苯乙醛	4.00	—	12.98	—	2.76	3.48	有杏仁、樱桃香
反-2-辛烯醛	3.00	—	—	522.74	—	32.85	花香
2,4-癸二烯醛	0.07	—	—	9572.29	—	134.91	脂肪香
蘑菇醇	1.00	19.03	—	—	—	75.03	清新蘑菇味
2-乙基己醇	270000.00	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	甜味和淡淡的花香
正壬醇	50.00	0.07	—	—	—	—	玫瑰香
1-戊醇	4000.00	—	—	—	—	<0.01	
正辛醇	120.00	—	—	7.72	—	—	油脂香味、柑橘气息
正十六烷	300000.00	—	<0.01	—	<0.01	—	
正二十烷	2040.00	—	<0.01	—	—	—	
2-戊基呋喃	6.00	19.36	3.82	727.09	1.35	52.25	有豆香果香味

注:表中未列出的检出物质均为无法查到该物质阈值。

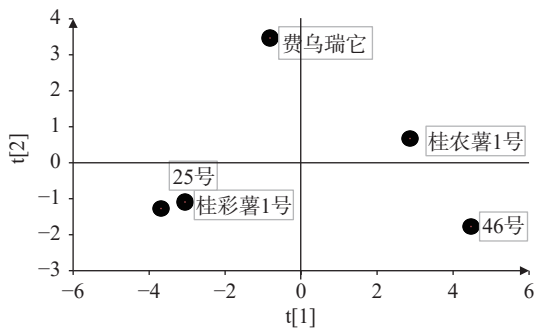


图 1 不同品种(系)马铃薯主成分分析得分图

Fig.1 Principal component analysis score chart in different varieties (lines) of potatoes

二烯醛、蘑菇醇;决定第 2 主成分的主要是正辛醇、苯甲醛。

2.3.2 挥发性风味物质综合评价模型的建立 根据 2 个主成分 22 类物质各自的特征向量,可以得到各个主成分的得分,分别用 F_1 、 F_2 表示, F 表示综合得分,得到马铃薯挥发性风味物质的线性关系式,分别为:

$$F_1=0.243X_1+0.175X_2+0.275X_3-0.023X_4-0.185X_5+0.253X_6-0.258X_7+0.082X_8+0.271X_9+0.262X_{10}+0.263X_{11}+0.124X_{12}+0.253X_{13}+0.264X_{14}+0.124X_{15}-0.238X_{16}-0.195X_{17}+0.195X_{18}+0.151X_{19}+0.250X_{20}-0.026X_{21}+0.262X_{22}$$

$$F_2=0.149X_1+0.361X_2-0.071X_3+0.419X_4-0.114X_5-0.180X_6-0.148X_7+0.405X_8-0.051X_9-0.156X_{10}-0.148X_{11}+0.081X_{12}+0.127X_{13}-0.141X_{14}+0.081X_{15}-0.067X_{16}-0.253X_{17}-0.138X_{18}+0.126X_{19}-0.185X_{20}+0.420X_{21}-0.151X_{22}$$

(X_1 、 X_2 X_{22} 为 22 种挥发性风味物质标准化之后的数值)

将 2 个主成分的贡献率作为加权系数,对主成分得分进行加权平均,建立综合评价模型: $F=0.586F_1+0.210F_2$ 。综合得分越高表明香气品质越好。根据不同主成分综合得分,不同品种(系)马铃薯香气品质从高到低综合排名依次为 46 号、桂农薯 1 号、费乌瑞它、桂彩薯 1 号、25 号(表 6)。

3 讨论与结论

不同品种(系)马铃薯检出物中,占总检出物比例

表 5 主成分载荷矩阵和特征向量

Table 5 Principal component loading matrix and eigenvector

主成分物质	主成分1		主成分2	
	载荷	特征向量	载荷	特征向量
正己醛	0.874	0.243	0.320	0.149
庚醛	0.627	0.175	0.777	0.361
2-庚烯醛	0.986	0.275	-0.152	-0.071
苯甲醛	-0.081	-0.023	0.901	0.419
正辛醛	-0.665	-0.185	-0.244	-0.114
反,反-2,4-庚二烯醛	0.909	0.253	-0.386	-0.180
壬醛	-0.926	-0.258	-0.317	-0.148
反式-2-壬烯醛	0.296	0.082	0.871	0.405
正癸醛	0.972	0.271	-0.110	-0.051
(E,E)-2,4-壬二烯醛	0.941	0.262	-0.336	-0.156
反式-2-癸烯醛	0.945	0.263	-0.317	-0.148
(E,E)-2,4-癸二烯醛	0.446	0.124	0.175	0.081
十一醛	0.910	0.253	0.274	0.127
2-十一烯醛	0.946	0.264	-0.302	-0.141
十二醛	0.446	0.124	0.175	0.081
3-甲硫基丙醛	-0.856	-0.238	-0.143	-0.067
苯乙醛	-0.700	-0.195	-0.544	-0.253
反-2-辛烯醛	0.700	0.195	-0.297	-0.138
2,4-癸二烯醛	0.542	0.151	0.272	0.126
蘑菇醇	0.896	0.250	-0.397	-0.185
正辛醇	-0.092	-0.026	0.903	0.420
2-正戊基呋喃	0.940	0.262	-0.325	-0.151

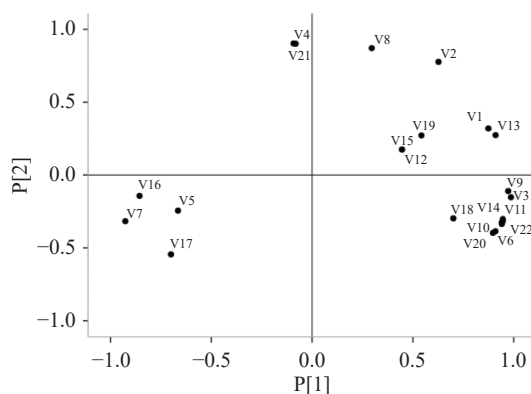


图 2 不同品种(系)马铃薯主成分分析载荷图

Fig.2 Principal component analysis load diagram in different varieties (lines) of potatoes

注: V1 为正己醛, V2 为庚醛, V3 为 2-庚烯醛, V4 苯甲醛, V5 为正辛醛, V6 为反,反-2,4-庚二烯醛, V7 为壬醛, V8 为反式-2-壬烯醛, V9 为正癸醛, V10 为 (E,E)-2,4-壬二烯醛, V11 为反式-2-癸烯醛, V12 为 (E,E)-2,4-癸二烯醛, V13 为十一醛, V14 为 2-十一醛, V15 为十二醛, V16 为 3-甲硫基丙醛, V17 为苯乙醛, V18 为反-2-辛烯醛, V19 为 2,4-癸二烯醛, V20 为蘑菇醇, V21 正辛醇, V22 为 2-正戊基呋喃。

较高的物质分别是, 桂农薯 1 号中的正己醛 (42.33%)、2-戊基呋喃 (10.93%), 桂彩薯 1 号中的丙酸-2-甲基-3-羟基-2,4,4-三甲基戊酯 (24.65%)、壬醛 (19.1%), 费乌瑞它中的苯甲醛 (24.55%)、正己醛 (19.51%), 25 号中的壬醛 (26.08%)、3-甲硫基丙醛 (18.69%), 46 号中的正己醛 (26.21%)、2-正戊基呋喃

表 6 标准化后主成分综合得分

Table 6 Principal component composite score after normalization

品种	得分			排序
	F ₁	F ₂	F	
桂农薯1号	2.864	0.673	1.820	2
桂彩薯1号	-3.062	-1.097	-2.025	4
费乌瑞它	-0.809	3.472	0.255	3
25号	-3.690	-1.274	-2.431	5
46号	4.477	-1.774	2.252	1

喃 (18.26%), 说明醛类物质对马铃薯风味的呈现至关重要, 其中, 正己醛、壬醛、3-甲硫基丙醛占比较高且阈值相对较低, 对马铃薯香气贡献较大。Morris 等^[33] 研究表明己醛与香味强度呈负相关, 但与特征风味呈正相关, 对蒸煮马铃薯芳香差异有重要作用。壬醛有强烈的脂肪气息, 稀释时具有橙子及玫瑰香韵^[34]。甲硫基丙醛是马铃薯的特征风味物质^[35], 在适度的稀释浓度下有马铃薯的香气^[36]。2-戊基呋喃在桂农薯 1 号和 46 号中占比较高, 并且是 5 个品种 (系) 的共同检出物, 它的阈值相对较低, ROAV 值均大于 1, 是重要的关键性风味物质, 可使马铃薯呈现豆香、果香味, 对马铃薯整体风味有贡献作用。2-戊基呋喃是美拉德反应的产物, 龚兴旺等^[37] 研究认为 2-戊基呋喃对蒸煮马铃薯风味有潜在的影响, 是蒸马铃薯的主要芳香物质。李凯峰等^[38] 研究认为, 2-甲基呋喃有香草味, 与风味强度呈正相关, 是品种间主要的差异挥发性化合物。杨妍等^[39] 研究认为呋喃类化合物可能是由马铃薯细胞中还原糖降解产生的, 对马铃薯香气形成起到不可忽视的作用。这与本研究结果相似。

本文对 ROAV 值进行分析表明, 46 号马铃薯的关键风味物质 (ROAV ≥ 1) 种类最多, 多达 18 种, 其次是桂农薯 1 号和费乌瑞它 (14 种), 桂彩薯 1 号和 25 号均只有 6 种。5 个不同品种 (系) 的所有检出物中, 醛类物质相对阈值较低, 是蒸马铃薯的关键性香气物质, 对马铃薯总体风味贡献最大, 是马铃薯风味成分中最重要的一类化合物, 使马铃薯呈现脂肪香和果香味。

特色品种桂彩薯 1 号检出物中烃类物质种类最多 (6 种), 酯类物质占比最大 (40.71%), 其次是醛类物质 (36.23%), 这与其他 4 个普通品种 (系) 明显不同, 有研究表明^[40] 烃类、酯类物质对整体风味虽未起到决定性作用, 但有可能对马铃薯的整体香气起到提升或降低的作用。王榛等^[41] 认为, 酯类物质是最重要的香味物质, 由于其阈值较低, 能产生强烈的果香味。本文中, 除 46 号马铃薯之外, 其他 4 个品种 (系) 的检出物中酯类物质占比均较高, 所以酯类物质对马铃薯整体风味的影响也不可小觑, 具体作用机制有待进一步研究。Wang 等^[42] 研究认为, 花青素和类胡萝卜素的分解物可能对蒸煮之后的马铃薯风味产生负

面影响。这可能也是本研究中富含花青素的桂彩薯 1 号风味表现一般的重要原因。

本文通过对 ROAV ≥ 0.1 的 22 种挥发性风味物质进行主成分分析,找出 2 个主成分代表了 79.616% 的样品信息,可以说明不同马铃薯品种(系)之间的差异,2 个主成分指向了 9 种醛类物质,2 种醇类物质,1 种呋喃类物质,风味品质从高到低综合排名依次为 46 号、桂农薯 1 号、费乌瑞它、桂彩薯 1 号、25 号。

结果表明,醛类物质是蒸马铃薯的主体风味物质,5 个马铃薯品种(系)中 46 号整体风味最佳。为新品种(系)的市场推广提供了技术支撑,为选育风味品质较佳马铃薯新品种提供了理论基础。

参考文献

- [1] AKYOL H, RICIPUTI Y, CAPANOGLU E, et al. Phenolic compounds in the potato and its byproducts: An overview[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2016, 17(6): 835.
- [2] 李靛. 6 个彩色马铃薯新品系的细胞学、重要性状及 SSR 遗传差异分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021. [LI L. Cytology, important characteristics and SSR genetic difference analysis of 6 new colored potato strains[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.]
- [3] 李明朝. 马铃薯主食产业化的南阳探索[J]. 农村. 农业. 农民(B 版), 2017(4): 52-53. [LI M Z. Nanyang exploration of the industrialization of potato staple food[J]. *Country Agriculture Farmers (B)*, 2017(4): 52-53.]
- [4] 孙君茂, 徐海泉, 王小虎. 马铃薯与稻米、小麦、玉米营养当量折算研究[J]. 营养学报, 2016, 38(5): 448-450, 455. [SUN J M, XU H Q, WANG X H. Study on the conversion of potato, rice, wheat and corn nutrition equivalent[J]. *Acta Nutrimenta Sinica*, 2016, 38(5): 448-450, 455.]
- [5] 徐海泉, 卢世军, 周琳, 等. 以营养当量评价食物营养价值的方法学研究[J]. 营养学报, 2016, 38: 341-344. [XU H Q, LU S J, ZHOU L, et al. Methodological research on evaluating the nutritional value of food by nutritional equivalent[J]. *Acta Nutrimenta Sinica*, 2016, 38: 341-344.]
- [6] 唐金蕾. 外源绿原酸处理对鲜切马铃薯褐变抑制作用研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2020. [TANG J L. Study on the inhibitory effect of exogenous chlorogenic acid treatment on browning of fresh-cut potato[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2020.]
- [7] JANSKY S H. Potato flavor[J]. *American Journal of Potato Research*, 2010, 87(2): 209-217.
- [8] DUCKHAM S C, DODSON A T, BAKKER J, AMES J M. Effect of cultivar and storage time on the volatile flavor components of baked potato[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(20): 5640-5648.
- [9] ORUNA-CONCHA M J, BAKKER J, AMES J M. Comparison of the volatile components of eight cultivars of potato after microwave baking[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2002, 35(1): 80-86.
- [10] ORUNA-CONCHA M J, BAKKER J, AMES J M. Comparison of the volatile components of two cultivars of potato cooked by boiling, conventional baking and microwave baking[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2002, 82(9): 1080-1087.
- [11] 王颖. 5 个马铃薯新品种的细胞学、主要性状及 SSR 分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020. [WANG Y. Cytogenetics, main characteristics and SSR analysis of 5 new potato varieties[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020.]
- [12] 邹婷婷, 何天鹏, 宋焕禄, 等. 香气对饱腹感和味觉影响的研究进展[J]. *食品科学*, 2017, 38(17): 306-311. [ZOU T T, HE T P, SONG H L, et al. Recent progress in the effect of aroma on satiety and taste[J]. *Food Science*, 2017, 38(17): 306-311.]
- [13] HU W, ZHANG L, LI P, et al. Characterization of volatile components in four vegetable oils by headspace two-dimensional comprehensive chromatography time-of-flight mass spectrometry[J]. *Talanta*, 2014, 129: 629-635.
- [14] 程超, 杜芬妮, 李伟, 等. 基于 9 种风味物质的利川红 SPME 优化及 PLS-DA 风味识别[J]. *食品科学*, 2021, 42(6): 215-222. [CHENG C, DU F N, LI W, et al. Optimization of solid phase microextraction for GC-MS analysis of nine flavor compounds in Lichuanhong tea and flavor discrimination by partial least squares-discriminant analysis[J]. *Food Science*, 2021, 42(6): 215-222.]
- [15] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法: “ROAV”法[J]. *食品科学*, 2008(7): 370-374. [LIU D Y, ZHOU G H, XU X L. “ROAV” method: A new method for determining key odor compounds of rugao ham[J]. *Food Science*, 2008(7): 370-374.]
- [16] 马琦, 伯继芳, 冯莉, 等. GC-MS 结合电子鼻分析干燥方式对杏鲍菇挥发性风味成分的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(14): 276-282. [MA Q, BO J F, FENG L, et al. Effect of drying method on volatile components of *Pleurotus eryngii* analyzed by combined use of GC-MS and electronic nose[J]. *Food Science*, 2019, 40(14): 276-282.]
- [17] 范晓文. 真菌联合细菌发酵改性豆渣风味及食用品质研究[D]. 重庆: 西南大学, 2021. [FAN X W. Study on flavor and edible quality of soybean dregs modified by fungus and bacteria fermentation[D]. Chongqing: Southwest University, 2021.]
- [18] 孙宝国. 食用菌调香术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003, 25-27. [SUN B G. Edible mushroom fragrance[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003, 25-27.]
- [19] 唐静, 张迎阳, 吴海舟, 等. 顶空吹扫捕集-气相色谱-质谱法分离鉴定强化高温火腿中的挥发性风味物质[J]. *食品科学*, 2014, 35(8): 115-120. [TANG J, ZHANG Y Y, WU H Z, et al. Separation and identification of volatile flavors of high-temperature intensified ham by gas chromatography-mass spectrometry coupled with head space purge and trap[J]. *Food Science*, 2014, 35(8): 115-120.]
- [20] (荷) 海默特 Gemert. 化合物香味阈值汇编[M]. 北京: 科学出版社, 2015. [(Holland) Heimert Gemert. Compilation of compound fragrance threshold[M]. Beijing: Science Press, 2015.]
- [21] 张文文, 吴玉森, 陈毓谨, 等. 3 种巨峰系葡萄的香气特征[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2018, 36(5): 51-59, 66. [ZHANG W W, WU Y S, CHEN Y J, et al. Aroma characteristics of three kyoho grapevine series[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong*

University (Agricultural Science), 2018, 36(5): 51–59, 66.]

[22] 赵宁, 魏新元, 樊明涛, 等. SPME-GC-MS 结合电子鼻技术分析不同品种猕猴桃酒香气物质[J]. 食品科学, 2019, 40(22): 249–255. [ZHAO J, WEI X Y, FAN M T, et al. Analysis of volatile components of kiwifruit wines made from different cultivars using solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry combined with electronic nose[J]. Food Science, 2019, 40(22): 249–255.]

[23] 蒋彰. 黍米黄酒关键风味物质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021. [JIANG Z. Study on the key aroma compounds of millet wine[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]

[24] POLLNER G, SCHIEBERLE P. Characterization of the key odorants in commercial cold-pressed oils from unpeeled and peeled rapeseeds by the sensomics approach[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(3): 627–636.

[25] 王玺, 闫晨苗, 李铁梅, 等. 马铃薯粉粒度对面包风味及品质的影响[J]. 食品工业, 2020, 41(12): 137–141. [WANG X, YAN C M, LI T M, et al. Effect of potato flour mesh size on the flavor and quality of bread[J]. The Food Industry, 2020, 41(12): 137–141.]

[26] CHEN Q, SONG J, BI J, et al. Characterization of volatile profile from ten different varieties of Chinese jujubes by HSSPME/GC-MS coupled with E-nose[J]. Food Research International, 2018, 105(3): 605–615.

[27] 黄欢. 超高压处理对鲜切马铃薯质地及风味品质的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020. [HUANG H. Effects of ultra-high pressure treatment on texture and flavor quality of fresh-cut potatoes[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020.]

[28] LI H B, KANG X F, WANG S, et al. Early detection and monitoring for Aspergillus flavus contamination in maize kernels[J]. Food Control, 2021, 121: 107636.

[29] FENG T, YANG M Y, MA B W, et al. Volatile profiles of two genotype Agaricus bisporus species at different growth stages[J]. Food Research International, 2020, 140: 109761.

[30] 刘政海, 董志刚, 李晓梅, 等. 黄土高原地区干红葡萄酒香气组分分析[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(24): 204–209. [LIU Z H, DONG Z G, LI X M, et al. Aroma components of dry red wine brewed by different grape varieties in Loess Plateau[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(24): 204–209.]

[31] 张薇薇, 张秀玲. 基于主成分分析和聚类分析的苹果香气成分比较及品种分类研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(17): 217–224. [ZHANG W W, ZHANG X L. Comparative on apple aroma components and variety classification study based on principal component analysis and cluster analysis[J]. Science and Techno-

logy of Food Industry, 2018, 39(17): 217–224.]

[32] 沈静, 杜若曦, 魏婷, 等. 干制方式对鲜食枣脆片香气品质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(18): 131–137. [SHEN J, DU R X, WEI T, et al. Effect of drying methods on aroma components of jujube fruits (*Ziziphus jujube* mill. cv. dongzao)[J]. Food Science, 2017, 38(18): 131–137.]

[33] MORRIS W L, SHEPHERD HEPHERD T, VERRALL S R, et al. Relationships between volatile and non-volatile metabolites and attributes of processed potato flavor[J]. Phytochemistry, 2010, 71(15): 1765–1773.

[34] 林翔云. 香料香精辞典[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007. [LIN X Y. Fragrance and fragrance dictionary[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.]

[35] MUTTI B, GROSCH W. Potent odorants of boiled potatoes[J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2015, 43(5): 302–306.

[36] JOSEPHSON D B, LINDSAY R C. C4-heptenal: An influential volatile compound in boiled potato flavor[J]. Journal of Food Science, 2010, 52(2): 328–331.

[37] 龚兴旺, 肖继坪, 王婷婷, 等. 马铃薯芳香物质的初步研究[J]. 西南农业学报, 2019, 32(3): 516–521. [GONG X W, XIAO J P, WANG T T, et al. Primary research on aroma compounds of potato[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(3): 516–521.]

[38] 李凯峰, 尹玉和, 王琼, 等. 不同马铃薯品种挥发性风味成分及代谢产物相关性分析[J]. 中国农业科学, 2021, 54(4): 792–803. [LI K F, YIN Y H, WANG Q, et al. Correlation analysis of volatile flavor components and metabolites among potato varieties[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(4): 792–803.]

[39] 杨妍, 马晓军, 王黎瑾. 马铃薯泥挥发性风味物质研究[J]. 食品科技, 2007(2): 100–105. [YANG Y, MA X J, WANG L J. Research on volatile compounds of potato puree[J]. Food Science and Technology, 2007(2): 100–105.]

[40] NURSTEN H E, SHEEN M R. Volatile flavor components of cooked potatoes[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 25(6): 643–663.

[41] 王榛, 陈雷, 潘超, 等. 不同熟化方法对紫色马铃薯挥发性风味物质形成的影响[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(6): 128–133.

[WANG Z, CHEN L, PAN C, et al. The effect of different cooking methods on volatile compounds of purple potato[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(6): 128–133.]

[42] WANG Yan, S J Kays. Contribution of volatile compounds to the characteristic aroma of baked 'Jewel' sweet potatoes[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2000, 125(5): 638–643.