

‘香粉1号’香蕉成熟过程中挥发性 成分组成及其变化分析

吴水金, 张 帅, 林宝妹, 吴妙鸿, 李海明*

(福建省农业科学院亚热带农业研究所, 漳州 363005)

摘 要: **目的** 揭示‘香粉1号’香蕉不同熟期的挥发性成分组成和变化。**方法** 应用顶空-气相色谱-质谱法对‘香粉1号’香蕉果实的不同成熟时期的挥发性成分进行测定, 利用主成分分析(principal component analysis, PCA)分析其不同熟度的特征性挥发性成分。**结果** 随着‘香粉1号’香蕉果实成熟度的提高, 其挥发性成分的种类呈递增的趋势, 醛类物质显著减少, 酯类物质显著增加。4级成熟果实主要的挥发性成分是反式-2己烯醛和己醛, 相对含量占90.04%; 6级成熟果实的醛类物质的含量显著降低, 相对含量为56.48%, 酯类挥发性成分提高至38.92%; 8级成熟度果实醛类物质占35.20%, 酯类挥发性物质达58.62%。挥发性成分PCA的两个主成分累积贡献率为99.5%, PCA结果也显示8级成熟度与4、6级成熟度挥发性成分差异较大。**结论** ‘香粉1号’香蕉果实随着熟度的增加, 醛类物质相对含量显著减少, 酯类物质相对含量显著增加, 本研究结果可为品质评价、贮藏保鲜及产品加工等提供理论依据。

关键词: 香蕉; ‘香粉1号’; 挥发性成分; 顶空-气相色谱-质谱法; 主成分分析

Composition and change analysis of volatile components in ‘Xiangfen No.1’ banana at different ripening stages

WU Shui-Jin, ZHANG Shuai, LIN Bao-Mei, WU Miao-Hong, LI Hai-Ming*

(Institute of Subtropical Agriculture, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Zhangzhou 363005, China)

ABSTRACT: Objective To reveal the compositions and changes of volatile components of ‘Xiangfen No.1’ banana at different ripening stages. **Methods** Headspace-gas chromatography-mass spectrometry was used to determine and analyze the volatile components of ‘Xiangfen No.1’ banana at different ripening stages. Principal component analysis (PCA) was used to analyze the main characteristic volatile components in different ripening stages of ‘Xiangfen No.1’. **Results** With the increase of maturity, the types of volatile components in ‘Xiangfen No.1’ banana also showed an increasing trend, the aldehydes decreased significantly, and the esters increased significantly. The main volatile components of grade 4 mature banana were *trans*-2-hexenal and hexanal, accounting for 90.04%. The content of aldehydes in grade 6 mature banana decreased significantly, the relative content was 56.48%, and the volatile components of esters increased to 38.92%. Aldehydes accounted for 35.20% and esters accounted for 58.62% in banana of grade 8 maturity. The cumulative contribution of the 2 principal components of

基金项目: 福建省公益类科研院所专项(2021R1030006、2022R1030006)

Fund: Supported by the Fujian Public Welfare Research Institute Special (2021R1030006, 2022R1030006)

*通信作者: 李海明, 副研究员, 主要研究方向为植物病理与品质分析。E-mail: lhm2208564@163.com

*Corresponding author: LI Hai-Ming, Associate Researcher, Institute of Subtropical Agriculture, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Zhangzhou 363005, China. E-mail: lhm2208564@163.com

volatile component PCA was 99.5%, and the results of PCA also showed that the volatile components of grade 8 maturity were significantly different from those of grade 4 and 6 maturity. **Conclusion** With the increase of maturity, the relative content of the aldehydes in 'Xiangfen No.1' banana fruit declined significantly, and the relative content of esters increased significantly. The results of this study can provide theoretical basis for quality evaluation, storage and product processing.

KEY WORDS: banana; 'Xiangfen No.1'; volatile component; headspace-gas chromatography-mass spectrometry; principal component analysis

0 引言

香蕉(*Musa paradisiaca* L.)是芭蕉科(*Musaceae*)芭蕉属(*Musa*)植物,为我国的四大水果之一。我国栽培品种以香牙蕉(AAA 基因型)种植面积最大,其次是粉蕉、大蕉(ABB 基因型)及少量龙牙蕉类型(AAB 组群)^[1]。'香粉 1 号'是中国热带农业科学院亚热带作物研究所从越南收集的香蕉优异种质资源,属于龙牙蕉类型,其植株中等偏高,果实颜色及果肉颜色与普通香蕉(巴西蕉、威廉斯等)不同,呈橙色或橙黄色,果皮鲜黄、明亮,生长周期较短,抗逆性强^[2-3]。

随着生活水平的提高,消费者在追求果蔬品质的同时对其风味的要求也不断提高,因此,香蕉品种特有的香气是吸引消费者和增强市场竞争力的重要因素之一;在农业生产上,香蕉的挥发性成分已成为香蕉杂交品种选育^[4]、栽培管理^[5-6]及保鲜贮藏^[7-8]等领域的研究重点。不同的香蕉品种具有不同的香气特征^[5],目前已知香蕉的香气成分有 200 多种,主要为酯类、醇类和羰基化合物^[7,9]。

香蕉属呼吸跃变型水果,果实采收后果皮颜色从绿转黄,其挥发性成分含量及种类会发生明显变化,酯类化合物会增加,当达到最大值后,会逐渐下降,过熟阶段会产生酒味^[10]。巴西蕉在果色为绿色时其主要挥发性成分是醛类,随着熟度的增加,酯类成分也明显增加,以丁酸酯及乙酸酯含量最多;当果实过熟时,酯类化合物的比例发生明显变化,乙酸酯类化合物含量下降,丁酸酯类化合物含量增加^[11]。'桂蕉 1 号'果实的香气成分在不同成熟时期的种类和含量有较大的差异,在绿熟期以反式-2-壬醛和反式-2,顺-6-壬二烯醛为主要特征挥发性物质,黄熟期以反式-2-己烯醛、异丁酸异戊酯和己醛为特征性挥发物质,在过熟期相对含量最高的是乙酸异戊酯^[12]。粉蕉果实总香气物质含量随着果实成熟不断增加,在果实贮藏前期以醇类物质和醛类物质为主,而中后期则大量合成酯类物质^[7]。目前,在龙牙蕉类型的香蕉挥发性成分上,陆永跃等^[13]对龙牙蕉和香芽蕉叶片挥发性化学成分进行比较,发现龙牙蕉叶挥发性物质以酮类为主,其次为酯类和酚类,而香芽蕉以酯类含量最高,其次为酮类和醛类,但该研究未涉及果实挥发性成分的研究。'香粉 1 号'作为龙牙蕉类型(AAB)的香蕉品种,具有典型的果型、果色及果实颜色特征,区别于传统的香牙蕉(AAA)及粉蕉(ABB),探究其果实的挥发性

成分组成及在不同熟期其挥发性成分的变化规律,可从风味层面上丰富其品种特征特性。因此,本研究以'香粉 1 号'为研究对象,采用顶空-气相色谱-质谱法(headspace-gas chromatography-mass spectrometry, HS-GC-MS)^[14-15]对'香粉 1 号'不同熟期的挥发性成分进行测定,揭示'香粉 1 号'不同熟期的挥发性成分组成及其变化规律,为香蕉果实的品质评价、贮藏保鲜及产品加工等提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

'香粉 1 号'香蕉果实采集于福建省农业科学院亚热带农业研究所香蕉种质资源圃。

Thermo Scientific TSQ 9000 三重四极杆气相-质谱联用仪、Thermo Scientific TriPlus 300 顶空自动进样器、TG-5SilMS 色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)(美国赛默飞世尔科技公司);JM.B500 电子天平(精度 0.01 g, 浙江诸暨市超泽衡器设备有限公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 取样方法

香蕉果实在(20±1)°C条件下喷施 0.1%乙烯利催熟处理。参考覃翠钠等^[1]、朱虹等^[11]的方法以果实颜色定义香蕉成熟阶段,分别在 4 级成熟(果皮绿色多于黄色)、6 级成熟(黄色,果尖带绿)和 8 级成熟(果皮黄色带少许褐色斑点)时,随机取 5 个成熟度一致的果实(图 1),去皮果肉用匀浆机研磨成胶泥状,称取 5 g 果肉于 20 mL 顶空瓶中备用。



图 1 不同熟度'香粉 1 号'果实

Fig.1 Different ripening levels of 'Xiangfen No.1'

1.2.2 仪器条件

顶空条件: 炉温 80°C, 腔温 90°C, 传输线温度 135°C, 瓶平衡时间 5 min。GC-MS 条件: 载气为高纯 He(纯度>99.999%); TG-5SilMS 色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm);

传输线温度 280℃, 电子轰击(electron impact, EI)源温度: 230℃; 升温程序以 50℃保持 2 min, 以 4℃/min 升至 180℃, 以 10℃/min 升至 240℃保持 2 min。质谱全扫描, 扫描范围 50~450 amu。

1.2.3 挥发性成分检测

称取样品 5 g 置于 20 mL 顶空瓶中(设 3 个平行重复), 放入顶空自动进样器测定挥发性成分。各组分质谱经 NIST 2017 检索和比对, 从各离子相对丰度等方面进行比较, 采用峰面积归一法计算各成分相对百分含量。

1.3 数据处理

采用 WPS Office 软件进行数据统计分析, 采用 DPS 3.0、SPSS 19.0 软件进行显著性分析和主成分分析(principal components analysis, PCA)^[16], 用 Origin 2019b 软件进行分析与作图, 运用基迪奥云平台(Omic Share tools, [https://www.omicshare.com/ tools/](https://www.omicshare.com/tools/))进行 Upset 维恩图作图^[17]。

2 结果与分析

2.1 ‘香粉 1 号’果实各级成熟度挥发性成分分析

‘香粉 1 号’4 级、6 级、8 级香蕉果实挥发性成分 GC-MS 总离子流见图 2, 从图 2 中可以看出, 不同成熟级别的挥发性成分及含量存在差异, 随着熟度的提高, 其挥发性成分的种类也呈递增的趋势。

2.2 ‘香粉 1 号’果实在不同成熟度挥发性成分主要种类

在催熟处理后, 不同熟度‘香粉 1 号’果实挥发性成分共检出 39 种, 4、6、8 级成熟度时共分别检测出 15、36、33 种挥发性成分(表 1、图 3), 主要包括醛类、酮

类、酯类、醇类等挥发性物质, 其中酯类种类最多, 4、6、8 级成熟度分别检测出 9、23、23 种酯类化合物。在 3 种成熟度‘香粉 1 号’果实中, 共有的成分有 12 种(图 3B); 4 级成熟度果实中未检出, 而 6 级成熟度与 8 级成熟度果实中均检出的共有挥发成分有 19 种; 正己酸乙酯、正己醇是 8 级成熟度果实的特有挥发性成分。

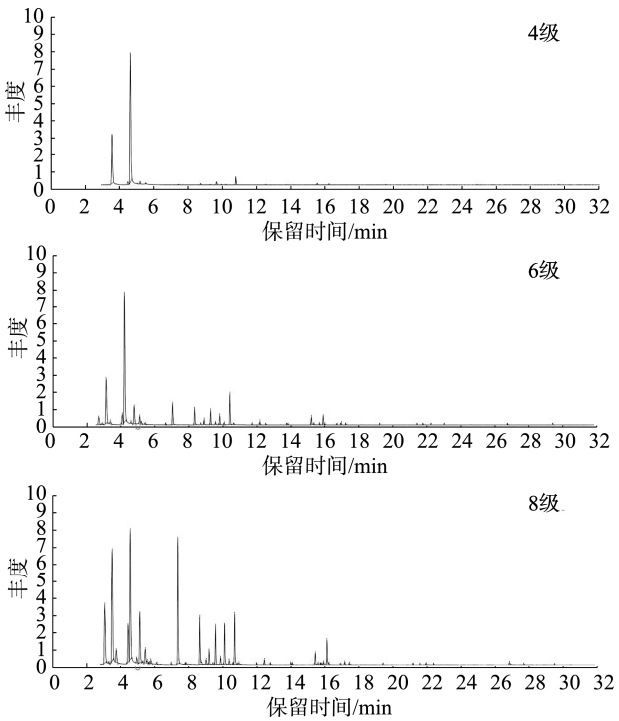


图 2 不同熟度‘香粉 1 号’果实挥发性成分的总离子流图
Fig.2 Total ion flow diagrams of volatile components at different ripening levels of ‘Xiangfen No.1’ fruits

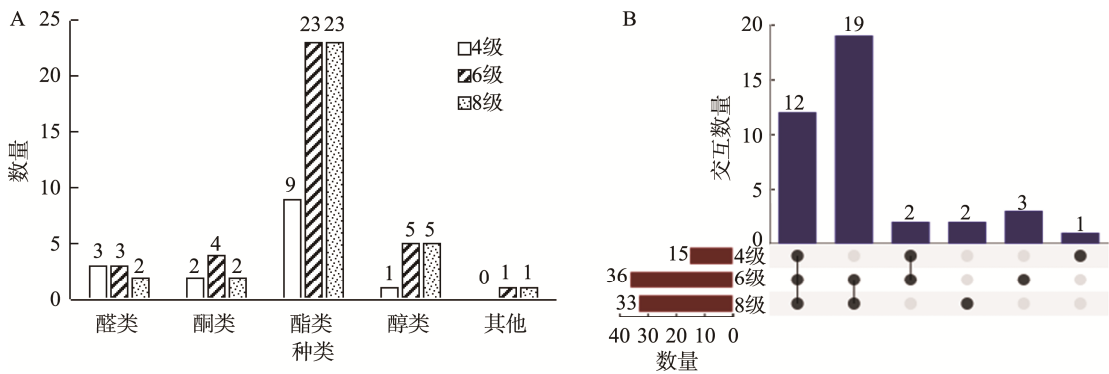
表 1 不同熟度‘香粉 1 号’果实的主要挥发性成分
Table 1 Main volatile components of ‘Xiangfen No.1’ at different ripening levels

种类	序号	保留时间	挥发性组分	分子式	相对含量/%			气味描述 ^[18-19]
					4 级	6 级	8 级	
醛类	1	4.771	反式-2 己烯醛	C ₆ H ₁₂ O	64.06±3.69 ^a	40.79±6.50 ^b	17.81±3.25 ^c	青草香
	2	3.713	己醛	C ₆ H ₁₂ O	25.73±2.55 ^a	15.07±1.43 ^b	17.39±0.68 ^c	青草香
	3	5.146	2-甲基-4-戊醛	C ₆ H ₁₀ O	0.25±0.16 ^b	0.62±0.04 ^a	-	青草香
			合计		90.04 ^a	56.48 ^b	35.20 ^c	
酮类	4	5.652	2-庚酮	C ₇ H ₁₄ O	0.77±0.06 ^c	2.28±0.07 ^a	1.86±0.11 ^b	梨香味
	5	3.512	2-己酮	C ₆ H ₁₂ O	-	0.26±0.01 ^a	-	杏仁味
	6	5.757	庚-5-烯-2-酮	C ₇ H ₁₂ O	-	0.42±0.05 ^a	0.36±0.01 ^a	果香、甜香
	7	17.081	2-(2-甲基-1-丙烯基)环己酮	C ₁₀ H ₁₆ O	0.07±0.02 ^a	0.08±0.01 ^a	-	果香、甜香
酯类			合计		0.84 ^b	3.04 ^a	2.22 ^a	
	8	3.277	乙酸异丁酯	C ₆ H ₁₂ O ₂	-	2.59±0.18 ^b	9.20±0.18 ^a	果香、香蕉香
	9	4.647	乙酸仲戊酯	C ₇ H ₁₄ O ₂	1.60±0.19 ^c	3.07±0.36 ^b	4.91±0.31 ^a	果香、香蕉香

表 1(续)

种类	序号	保留时间	挥发性组分	分子式	相对含量/%			气味描述 ^[18-19]
					4 级	6 级	8 级	
酯类	10	5.334	乙酸异戊酯	C ₇ H ₁₄ O ₂	1.07±0.09 ^c	5.22±0.04 ^b	6.27±0.66 ^a	果香、甜香
	11	3.956	乙酸丁酯	C ₆ H ₁₂ O ₂	-	0.89±0.06 ^b	1.88±0.11 ^a	果香
	12	9.390	乙酸己酯	C ₈ H ₁₆ O ₂	0.14±0.03 ^b	1.14±0.27 ^a	1.36±0.38 ^a	果香、甜香
	13	7.17	1-甲基戊基乙酸酯	C ₈ H ₁₆ O ₂	-	0.08±0.05 ^b	0.11±0.01 ^a	果香
	14	7.562	丁酸异丁酯	C ₈ H ₁₆ O ₂	-	4.88±1.01 ^b	12.40±0.91 ^a	果香、甜香
	15	8.846	丁酸丁酯	C ₈ H ₁₆ O ₂	0.50±0.05 ^b	3.64±0.66 ^a	4.56±0.46 ^a	果香
	16	16.389	己酸环戊酯	C ₁₁ H ₂₀ O ₂	-	0.10±0.02 ^a	0.13±0.02 ^a	果香
	17	10.889	丁酸异戊酯	C ₉ H ₁₈ O ₂	2.60±0.31 ^c	6.27±1.20 ^a	4.58±0.41 ^b	果香
	18	9.768	丁酸 2-戊酯	C ₉ H ₁₈ O ₂	0.99±0.15 ^b	3.14±0.70 ^a	3.52±0.43 ^a	果香
	19	15.612	丁酸己酯	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	0.57±0.06 ^c	1.77±0.27 ^a	1.21±0.12 ^b	甜香、苹果香
	20	12.189	戊酸丁酯	C ₉ H ₁₈ O ₂	-	0.12±0.03 ^a	0.06±0.01 ^b	果香
	21	11.135	戊酸 2-戊酯	C ₁₁ H ₂₂ O ₂	-	0.10±0.01 ^b	0.19±0.03 ^a	果香
	22	14.285	戊酸癸酯	C ₁₅ H ₃₀ O ₂	-	0.12±0.02 ^a	-	果香
	23	9.215	异戊酸异丁酯	C ₉ H ₁₈ O ₂	-	0.16±0.04 ^b	0.48±0.06 ^b	果香
	24	12.632	异戊酸异戊酯	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	-	0.69±0.16 ^a	0.45±0.05 ^a	果香
	25	10.569	异戊酸丁酯	C ₉ H ₁₈ O ₂	-	0.31±0.07 ^a	0.38±0.06 ^a	果香、甜香
	26	10.299	1-甲基乙酸己酯	C ₉ H ₁₈ O ₂	0.21±0.01 ^c	1.99±0.23 ^b	3.67±0.06 ^a	果香
	27	16.295	庚烷-2-基丁酸酯	C ₁₁ H ₂₂ O ₂	0.38±0.07 ^c	1.98±0.36 ^b	2.57±0.31 ^a	果香
	28	12.975	2-壬烷基丁酸酯	C ₁₃ H ₂₆ O ₂	-	0.10±0.02 ^a	0.08±0.02 ^b	果香
	29	22.072	己酸己酯	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	-	0.10±0.01 ^a	0.10±0.00 ^{2a}	果香、甜香
	30	8.946	正己酸乙酯	C ₉ H ₁₈ O ₂	-	-	0.24±0.02 ^a	果香、酒香
	31	17.340	3-甲基丁酸己酯	C ₁₁ H ₂₂ O ₂	-	0.46±0.08 ^a	0.27±0.03 ^b	果香
			合计		8.06 ^c	38.92 ^b	58.62 ^a	
醇类	32	5.985	2-庚醇	C ₇ H ₁₆ O	-	0.19±0.02 ^b	0.39±0.08 ^a	青香、果香
	33	10.047	顺式-3-甲基环己醇	C ₇ H ₁₄ O	-	0.49±0.05 ^b	0.68±0.03 ^a	青草香
	34	16.085	反式-3-甲基环己醇	C ₇ H ₁₄ O	-	0.23±0.03 ^a	0.26±0.02 ^a	油脂香
	35	3.529	1-甲基环戊醇	C ₆ H ₁₂ O	0.09±0.03 ^a	-	-	果香
	36	15.781	(<i>E</i>)-辛-3-烯-1-醇	C ₈ H ₁₆ O	-	0.11±0.05 ^a	0.09±0.03 ^b	油脂香
	37	21.739	反-3-辛烯-2-醇	C ₈ H ₁₆ O	-	0.09 ^a ±0.01	-	油脂香
	38	5.154	正己醇	C ₆ H ₁₄ O	-	-	0.68±0.09 ^a	果香、甜香
			合计		0.09 ^c	1.11 ^b	2.10 ^a	
其他	39	26.988	榄香素	C ₁₂ H ₁₆ O ₃	-	0.13±0.01 ^b	0.29±0.09 ^a	辛香、木香

注：同行数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$); -表示未检测出。



注：B 图橙色柱状表示不同成熟度果实挥发性物质总量，蓝色柱状表示共有的挥发性成分总量，黑色圆点之间连线表示共有的挥发性成分。

图 3 不同熟度‘香粉 1 号’果实挥发性成分种类及数量(A)和维恩图(B)

Fig.3 Variations in types and quantities (A) and Venn diagram (B) of volatile components of ‘Xiangfen No.1’ fruits in different ripening levels

2.3 ‘香粉 1 号’果实在不同成熟度挥发性成分相对含量分析

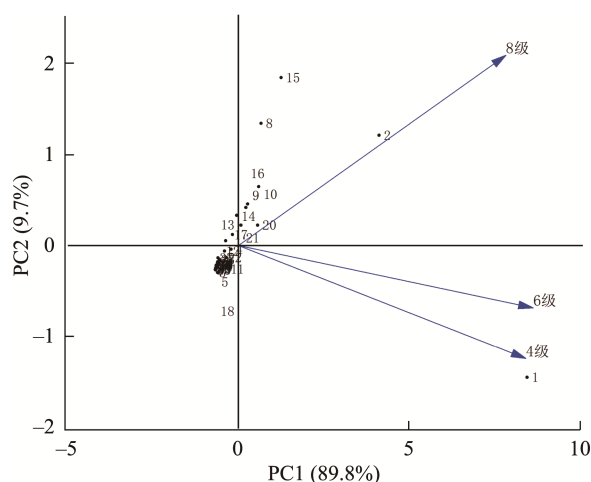
结合表 1 和图 4 可知, 经催熟处理后, 随着时间的增长, ‘香粉 1 号’果实在成熟过程中表现出醛类挥发性化合物显著减少、酯类化合物显著增加的趋势, 4、6、8 级成熟度时醛类物质相对含量分别为 90.04%、56.48%、35.20% ($P<0.05$); 酯类挥发性成分从 4 级成熟度的 8.06% 上升到 8 级的 58.62% ($P<0.05$); 另外, 酮类、醇类物质的相对含量较少, 但其相对含量在 4 级与 8 级成熟度之间仍具有显著性差异 ($P<0.05$)。香蕉果实中的酯类物质随着熟度增加而显著增加, 与其他水果不同熟期的挥发性成分的变化规律相近, 例如, 与较熟果(花后 50 d 果)相比, 百香果的熟果(花后 60 d 果)的大部分挥发性成分含量增加, 包含 2-戊酮、乙酸丁酯、2-庚酮、 α -蒎烯、(E,E)-2,4-庚二烯醛、苯甲醛、2-丁酮、丁酸甲酯、丁酸乙酯和乙酸乙酯等, 少数挥发性物质含量降低, 包括乙酸异戊酯和乙酸异丁酯^[20], 芒果成熟过程中, 酯类物质含量也不断增加^[21]; 香水柠檬挥发性成分在不同成熟阶段也会发生变化, 随果实成熟, 香水柠檬果皮中酯类含量呈先上升后下降的趋势^[22], 果实成熟过程中酯类物质的形成主要与酸类物质与醇类物质酯化反应有关; 也可通过氨基酸代谢产生的醇、酸酯化形成^[23]。

4 级成熟度时, 由表 1 可知, 其主要的挥发性成分是反式-2 己烯醛和己醛, 相对含量分别为 64.06%、25.73%, 醛类物质相对含量为 90.04%, 检测出 9 种酯类成分, 共占比 8.06%; 这个时期香蕉的青草香味比较浓郁, 香蕉的果香味淡。6 级成熟度时, 醛类物质的含量显著降低, 反式-2 己烯醛和己醛相对含量分别为 40.79%、15.07%, 检测出 23 种酯类成分, 以丁酸酯类、乙酸酯类为主, 其中乙酸酯类占 14.98%, 丁酸酯类占 22.24%, 排名前三的酯类化合物为丁酸异戊酯(6.27%)、乙酸异戊酯(5.22%)、丁酸异丁酯(4.88%), 这个成熟度的青草香味有所减弱, 香蕉以酯类为代表的果香逐渐增强, 该成熟度香蕉口感不佳, 可作为香蕉的商品期。8 级成熟度时, 此熟度的香蕉果实反式-2 己烯醛和己醛下降为 17.81%、17.39%, 检测出 23 种酯类成分, 总占比 58.62%, 以丁酸、乙酸酯类为主, 其中乙酸酯类占 27.40%, 丁酸酯类占 29.19%, 排名前 3 的丁酸异丁酯(12.40%)、乙酸异丁酯(9.20%)、乙酸异戊酯(6.27%), 这个成熟度的香蕉果香味浓郁, 略有青草香味。

2.4 ‘香粉 1 号’不同成熟度挥发性物质的主成分分析

PCA 是通过降维将原始变量进行重组转化为少数指标进行分析, 使分析简单且可视化^[24-25]。如图 4 所示, 第一主成分(PC1)的贡献率为 89.8%, 第二个主成分(PC2)为 9.7%, 两个主成分的累计贡献率为 99.5% ($>90\%$), 表明两

个主成分构成的信息能够反映原来变量的大部分信息。由图 4 可知, 8 级成熟度分布第 1 象限, 4 级成熟度和 6 级成熟度样本间距离较近, 分布在第 4 象限, 表明 8 级成熟度样本与 4 级、6 级的挥发性成分有明显差异。结合表 2 可知, 对第一主成分产生正向影响(载荷值 >0.900)的是乙酸异戊酯、乙酸己酯、丁酸丁酯、异戊酸丁酯、丁酸 2-戊酯、己酸环戊酯、1-甲基戊基乙酸酯、庚烷-2-基丁酸酯、反式-3-甲基环己醇、顺式-3-甲基环己醇、己酸己酯、戊酸 2-戊酯、庚-5-烯-2-酮、1-甲基乙酸己酯、2-庚醇、(E)-辛-3-烯-1-醇、乙酸丁酯、2-壬烷基丁酸酯、榄香素、乙酸仲戊酯, 主要贡献了果香、香蕉香、甜香; 产生负向影响的为己醛、1-甲基环戊醇、反式-2-己烯醛, 主要贡献的为青草香; 第二主成分主要代表为 2-甲基-4-戊醛、戊酸癸酯, 贡献了主要的青草香及果香。



注: 图中数字表示表 1 中挥发性成分的序号。

图 4 不同熟度‘香粉 1 号’果实的 PCA 图

Fig.4 PCA map of ‘Xiangfen No.1’ at different ripening levels

3 讨论

果蔬的成熟度是影响风味的重要因素^[26], 果蔬中的挥发性成分种类及含量随着成熟度的增加会发生明显变化。本研究中, 4 级成熟度香蕉果实到 8 级成熟度果实, 醛类物质显著下降, 酯类物质显著上升, 究其原因, 在‘香粉 1’号果实成熟的过程中, 酯类物质的形成与转化并存, 在 6 级与 8 级成熟度的时, 形成的总量大于分解和转化, 酯量含量上升, 醛类物质主要来源于脂肪酸和氨基酸代谢^[27], 可由亚油酸经脂肪氧酶氧化产生, 大多数的醛类物质表现为类似于青草的气味, 也为香蕉的特征性气味; 已有研究表明, 在未成熟果实中, 六碳醛类物质是主要的挥发性物质, 随着成熟度增加, 醛类物质会不断减少^[28-29], 其中, 六碳醛类物质下降可能与脂肪氧合酶活力下降及其参与合成酯类物质有关^[26]。

表 2 主成分载荷表
Table 2 Principal component load table

挥发性成分	主成分		挥发性成分	主成分	
	1	2		1	2
反式-2 己烯醛	-0.945	0.326	丁酸异戊酯	0.787	0.617
己醛	-0.923	-0.386	丁酸 2-戊酯	0.999	0.048
2-甲基-4-戊醛	-0.076	0.997	丁酸己酯	0.782	0.623
2-庚酮	0.896	0.444	戊酸丁酯	0.758	0.653
2-己酮	0.837	0.547	戊酸 2-戊酯	0.954	-0.301
2-(2-甲基-1-丙烯基)环己酮	-0.561	0.828	戊酸癸酯	0.33	0.944
庚-5-烯-2-酮	0.949	0.315	异戊酸异丁酯	0.865	-0.502
乙酸异丁酯	0.835	-0.551	异戊酸异戊酯	0.859	0.512
乙酸仲戊酯	0.921	-0.390	异戊酸丁酯	1.000	0.014
乙酸异戊酯	1.000	-0.005	己酸环戊酯	0.999	-0.035
乙酸丁酯	0.933	-0.359	己酸己酯	0.982	0.186
乙酸己酯	1.000	0.018	正己酸乙酯	0.653	-0.758
1-甲基戊基乙酸酯	0.997	-0.079	2-庚醇	0.939	-0.344
1-甲基乙酸己酯	0.949	-0.314	顺式-3-甲基环己醇	0.996	-0.087
丁酸异丁酯	0.897	-0.443	反式-3-甲基环己醇	0.997	0.082
丁酸丁酯	1.000	-0.030	1-甲基环戊醇	-0.982	-0.186
庚烷-2-基丁酸酯	0.997	-0.076	(E)-辛-3-烯-1-醇	0.936	0.351
2-壬烷基丁酸酯	0.930	0.369	正己醇	0.653	-0.758
3-甲基丁酸己酯	0.819	0.574	榄香素	0.923	-0.386

在成熟香蕉果实中,挥发性酯类、醇类、酸类和羰基类化合物是 4 种主要成分,酯类是香蕉中的风味化合物,为成熟香蕉甜香味的重要来源,有研究表明乙酸酯类和丁酸酯类物质是香蕉成熟期挥发性的主要成分^[30],尤其是丁酸丁酯、丁酸异戊酯、乙酸异戊酯和乙酸异丁酯提供了成熟香蕉果实中的特征果香味^[31-32],‘香粉 1 号’果实在 8 级成熟度时可检测出 23 种酯类成分,总占比 58.62%,排名前 3 的为丁酸异丁酯、乙酸异丁酯、乙酸异戊酯,异戊酯、乙酸酯和丁酸酯被认为是成熟阶段主要的挥发性化合物^[33]。‘香粉 1 号’在 6 级 8 级成熟度时,酯类以丁酸酯及乙酸酯为主,与赵明等^[10]、DOU 等^[34]报道的香牙蕉结果相同,但‘香粉 1 号’丁酸酯类化合物相对含量大于乙酸酯类,而香牙蕉桂蕉 6 号、金粉 1 号的乙酸酯类挥发性成分相对含量比丁酸酯类要高^[10]。

与巴西蕉相比,‘香粉 1 号’作为龙牙蕉类型(AAB)的香蕉品种,在 8 级成熟度时醛类物质相对含量 35.20%,‘桂蕉 1 号’(巴西蕉)醛类物质总量在过熟期占 13.8%^[12];与粉蕉相比,‘香粉 1 号’在 4 级成熟度时的主要成分为醛类,未检测出醇类成分,与粉蕉果皮在转色期挥发物主要是醛类、未检测出醇类物质相同,粉蕉在完熟阶段(果皮果实全部转黄)醛类含量急剧下降,酯类成分明显增加,在此阶段也未检测到醇类物质,到过熟期(果实衰老),其醛类物质高于完熟期,占 58.07%^[7],粉蕉在后期醛类物

质会上升与本研究 8 级成熟度时醛类物质降低不同。基于实验样本香蕉同样的果皮外观表现即同样的熟度,醛类比粉蕉过熟阶段要低,青草味较重;究其原因,可能是因为品种不同,果肉成熟时间存在差异。后续研究可开展不同品种及不同熟度的香蕉果实的挥发性成分分析,探究挥发性成分在香蕉分类鉴定及熟度分级中的可行性,鉴于本研究中的醛类、酯类的变化规律,可结合相关基因的表达特性揭示其相关关系,为采后的品质及保鲜加工提供理论依据。

4 结 论

本研究采用 HS-GC-MS 结合 NIST 2017 质谱数据库对‘香粉 1 号’不同成熟度的果实的挥发性成分的组成及其变化进行分析,共检测出醛类、酯类、酮类等 4 类 38 种挥发性化合物。随着熟度的增加,醛类物质显著减少,酯类物质显著增加。4 级成熟果实主要的挥发性成分是反式-2 己烯醛和己醛,相对含量占 90.04%; 6 级成熟果实的醛类物质的含量显著降低,相对含量为 56.48%,酯类挥发性成分提高至 38.92%; 8 级成熟度果实醛类物质占 35.20%,酯类挥发性物质达 58.62%,酯类物质以丁酸酯类及乙酸酯类为主。本研究揭示了‘香粉 1 号’不同熟期的挥发性成分构成,为香蕉果实的品质评价、贮藏保鲜及产品加工等提供理论依据。

参考文献

- [1] 覃翠钠, 李志春, 何雪梅, 等. 基于成熟度研究不同品种香蕉多酚含量及抗氧化活性的差异[J]. 食品工业科技, 2022, 43(22): 52–60.
- QIN CN, LI ZC, HE XM, *et al.* Polyphenol content and antioxidant capacity from banana with different varieties and maturity [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(22): 52–60.
- [2] 胡会刚, 赵巧丽. 香粉 1 号香蕉果肉黄色素的提取、稳定性及抗氧化活性分析[J]. 食品科技, 2019, 44(10): 251–260.
- FU HG, ZHAO QL. Extraction optimization, stability and antioxidant activity of yellow pigment from the banana pulp of Xiangfen No.1 [J]. *Food Sci Technol*, 2019, 44(10): 251–260.
- [3] 李跃森, 吴水金, 张帅, 等. 香蕉优异种质香粉 1 号在漳州地区的适应性研究[J]. 福建农业科技, 2021, 52(4): 38–42.
- LI YS, WU SJ, ZHANG S, *et al.* Adaptability of the excellent banana germplasm xiangfen No. 1 in Zhangzhou Region [J]. *Fujian Agric Sci Technol*, 2021, 52(4): 38–42.
- [4] BUGAUD C, ALTER P. Volatile and non-volatile compounds as odour and aroma predictors in dessert banana (*Musa* spp.) [J]. *Postharv Biol Technol*, 2016, 112: 14–23.
- [5] ZHU X, LI Q, LI J, *et al.* Comparative study of volatile compounds in the fruit of two banana cultivars at different ripening stages [J]. *Molecules*, 2018, 23(10): 2456.
- [6] NOGUEIRA JM, FERNANDES PJ, NASCIMENTO AM. Composition of volatiles of banana cultivars from Madeira Island [J]. *Phytochem Anal*, 2003, 14(2): 101–103.
- [7] 朱孝扬, 李秋棉, 罗均, 等. 粉蕉后熟过程中香气品质变化及其关键基因表达特性[J]. 食品科学, 2019, 40(17): 96–103.
- ZHU XY, LI QM, LUO J, *et al.* Evolution of aroma components and key gene expression during postharvest ripening of banana (*Musa* ABB Pisang Awak) [J]. *Food Sci*, 2019, 40(17): 96–103.
- [8] 黄俊豪, 段承煜, 邓英毅, 等. 4 个粉蕉品种后熟过程中果实色泽及质构特性变化规律比较[J]. 热带作物学报, 2022, 43(2): 277–284.
- HUANG JH, DUAN CY, DENG YY, *et al.* Comparison of color and texture property change rules of four Fenjiao (*Musa* ABB Pisang Awak) varieties during fruit ripening [J]. *Chin J Trop Crops*, 2022, 43(2): 277–284.
- [9] 蒋盈盈, 卿志星. 基于 GC-MS 技术分析香蕉成熟前后香味物质变化[J]. 热带农业科学, 2020, 40(11): 102–106.
- JIANG YY, QIN ZX. Analysis of the volatile components of unripe and ripe banana fruit by GC-MS [J]. *Chin J Trop Agric*, 2020, 40(11): 102–106.
- [10] 赵明, 邹瑜, 何海旺, 等. 基于 GC-MS 的不同香蕉品种果实香气品质分析[J]. 西南农业学报, 2021, 34(5): 964–970.
- ZHAO M, ZOU Y, HE HW, *et al.* Analysis of aromatic components from six banana varieties by GC-MS [J]. *Southwest China J Agric Sci*, 2021, 34(5): 964–970.
- [11] 朱虹, 陈玉芬, 李雪萍, 等. 顶空固相微萃取气-质联用分析香蕉的香气成分[J]. 园艺学报, 2007, 34(2): 485–488.
- ZHU H, CHENG YF, LI XP, *et al.* Determination of volatiles in harvested banana fruit by HS-SPME and GC-MS [J]. *Acta Horti Sin*, 2007, 34(2): 485–488.
- [12] 梁水连, 吕岱竹, 马晨, 等. ‘桂蕉 1 号’香蕉成熟过程中挥发性成分和香气特征分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(14): 99–106.
- LIANG SL, LV DZ, MA C, *et al.* Analysis of volatile components and aroma features of banana ‘Guijiao No.1’ fruit at different ripening stages [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(14): 99–106.
- [13] 陆永跃, 梁碧玲. 龙牙蕉和香蕉蕉叶片挥发性化学成分比较[J]. 果树学报, 2006, (5): 711–714.
- LU YY, LIANG BL. Comparison of volatile chemical components in the leaves of *Musa* AAB and *Musa* AAA [J]. *J Fruit Sci*, 2006, (5): 711–714.
- [14] 邱珊莲, 林宝妹, 郑开斌. 5 个番石榴品种果实食用品质和香气特征分析[J]. 热带亚热带植物学报, 2023, 31(3): 408–416.
- QIU SL, LIN BM, ZHENG KB. Analysis of edible quality and aroma characteristics of fruits in five cultivars of *Psidium guajava* [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2023, 31(3): 408–416.
- [15] 邱珊莲, 林宝妹, 吴妙鸿, 等. 3 个嘉宝果品种花果香气成分研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2021, 47(6): 757–767.
- QIU SL, LIN BM, WU MH, *et al.* Research on aroma components in flowers and fruits of three varieties of jaboticaba [J]. *J Zhejiang Univ (Agric Life Sci)*, 2021, 47(6): 757–767.
- [16] 林海明. 如何用 SPSS 软件一步算出主成分得分[J]. 统计与信息论坛, 2007, 22(5): 15–17.
- LIN HM. How to use SPSS software calculate the value of the principal component scores in one step [J]. *Stat Inform Forum*, 2007, 22(5): 15–17.
- [17] 王珊珊, 赵晨辉, 李红莲, 等. 东北地区 10 份李种质资源果实香气成分分析[J]. 中国农业科学, 2021, 54(11): 2476–2486.
- WANG SS, ZHAO CH, LI HL, *et al.* Analysis of fruit aromatic components of ten plum germplasm resources in Northeast China [J]. *Sci Agric Sin*, 2021, 54(11): 2476–2486.
- [18] 王文治, 陈璐, 米艳华, 等. 基于顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法鉴别 3 种葡萄香气特征成分[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(24): 8075–8082.
- WANG WZ, CHEN L, MI YH, *et al.* Characterization on aroma components of 3 kinds of table grapes based on headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(24): 8075–8082.
- [19] 陈海婷. 香蕉特征香气成分分析及对甜味感知的影响[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2021.
- CHEN HT. Characterization of the aroma-active compounds in banana and their influence on perception of sweetness [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2021.
- [20] 罗杨, 冯涛, 王凯, 等. 基于 GC-IMS 分析不同成熟度百香果挥发性有机物的差异[J]. 食品工业科技, 2022, 43(15): 321–328.
- LUO Y, FENG T, WANG K, *et al.* Analysis of difference volatile organic compounds in passion fruit with different maturity via GC-IMS [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(15): 321–328.
- [21] HIJAZ F, GMITTER FG, BAI J, *et al.* Effect of fruit maturity on volatiles and sensory descriptors of four mandarin hybrids [J]. *J Food Sci*, 2020,

- 85(5): 1548–1564.
- [22] 李春秀, 李勋兰, 梁国鲁, 等. 不同成熟阶段柠檬果皮挥发物和酚类成分分析[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 215–224.
- LI CX, LI XL, LIANG GL, *et al.* Analysis of volatile components and phenols from peels of two lemon cultivars during fruit ripening [J]. Food Sci, 2022, 43(4): 215–224.
- [23] SCHWAB W, DAVIDOVICH-RIKANATI R, LEWINSOHM E. Biosynthesis of plant-derived flavor compounds [J]. Plant J, 2008, 54(4): 712–732.
- [24] JI XY. Investigation of the volatile components in commercial sufu (Chinese fermented soybean curd) based on HS-SPME/GC-MS combined with multivariate statistical analysis [J]. J Food Process Preserv, 2020, 44(1): e14309.
- [25] 刘玉兰, 宋二立, 郭平平, 等. SDE-GC-MS 分析不同油莎豆油中挥发性风味成分[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(11): 69–74, 103.
- LIU YL, SONG ERL, GUO PP, *et al.* Analysis of volatile flavor components in different *Cyperus esculentus* oil by SDE-GC-MS [J]. Cere Oils, 2022, 35(11): 69–74, 103.
- [26] 李国琰, 张雁, 廖娜, 等. 甜玉米成熟过程中挥发性风味物质的变化规律[J]. 食品科学, 2022, 43(10): 271–280.
- LI GY, ZHANG Y, LIAO N, *et al.* Changes of volatile flavor compounds in sweet corn during maturation [J]. Food Sci, 2022, 43(10): 271–280.
- [27] 孙昕萌, 袁惠萍, 赵钜阳. 发酵乳风味及其分析技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(15): 6111–6117.
- SUN XM, YUAN HP, ZHAO JY. Research progress in flavor and analytical technology of fermented milk [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(15): 6111–6117.
- [28] MENAGER I, JOST M, AUBERT C. Changes in physicochemical characteristics and volatile constituents of strawberry (Cv. Cigaline) during maturation [J]. J Agric Food Chem, 2004, 52(5): 1248–1254.
- [29] FENG SS, YAN CT, ZHANG TH, *et al.* Comparative study of volatile compounds and expression of related genes in fruit from two apple cultivars during different developmental stages [J]. Molecules, 2021, 26(6): 1553.
- [30] ZHANG J, JHA SK, LIU C, *et al.* Tracing of chemical components of odor in peels and flesh from ripe banana on a daily basis using GC-MS characterization and statistical analysis for quality monitoring during storage [J]. Food Anal Method, 2019, 12: 947–955.
- [31] DAGMAR M, TILMANN M, WERNER L, *et al.* Breath-by-breath analysis of banana aroma by proton transfer reaction mass spectrometry [J]. Int J Mass Spectrom, 2003, 223: 743–756.
- [32] 朱孝扬, 沈玲, 司振伟, 等. 低浓度乙烯利结合 1-甲基环丙烯处理对香蕉果实香气合成的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(7): 191–201.
- ZHU XY, SHENG L, SI ZW, *et al.* Effect of combined treatment with 1-methylcyclopropene (1-MCP) and low concentration of ethephon on aroma synthesis of banana fruits [J]. Food Sci, 2022, 43(7): 191–201.
- [33] ZHU H, LI XP, YUAN RC, *et al.* Changes in volatile compounds and associated relationships with other ripening events in banana fruit [J]. J Hort Sci Biotechnol, 2010, 85(4): 283–288.
- [34] DOU TX, HU CH, ZHAO SJ, *et al.* RNA-Seq reveals the effect of ethylene on the volatile organic components (VOCs) of Cavendish banana at different post-harvesting stages [J]. J Plant Growth Regul, 2022, 41: 3061–3074.

(责任编辑: 郑 丽 张晓寒)

作者简介



吴水金, 助理研究员, 主要研究方向为作物栽培与品质。
E-mail: 40083320@qq.com



李海明, 副研究员, 主要研究方向为植物病理与品质分析。
E-mail: lhm2208564@163.com