

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. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020120095

LIANG Shuilian, LV Daizhu, MA Chen, et al. Analysis of Volatile Components and Aroma Features of Banana ‘Guizhao No.1’ Fruit at Different Ripening Stages[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(14): 99–106 . (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020120095

· 研究与探讨 ·

# ‘桂蕉 1 号’香蕉成熟过程中挥发性成分 和香气特征分析

梁水连<sup>1,2</sup>, 吕岱竹<sup>2</sup>, 马 晨<sup>2</sup>, 相坛坛<sup>2</sup>, 周 佳<sup>2</sup>, 王明月<sup>1,2,\*</sup>

(1. 海南大学热带作物学院, 海南海口 570228;

2. 中国热带农业科学院分析测试中心, 海南海口 571101)

**摘要:**采用固相微萃取结合气相色谱串联质谱技术对‘桂蕉 1 号’香蕉果实的不同后熟时期进行挥发性物质的分析, 并使用气味“ABC”法对果实的香韵进行了分析。结果表明, ‘桂蕉 1 号’香蕉的绿熟、黄熟和过熟期共检测出 24 种相对含量大于 1% 的挥发性物质, 包括醛类、酯类和其他烷烃挥发性物质。其中绿熟期以反式-2-壬醛和反式-2-, 顺-6-壬二烯醛为主的挥发性物质, 黄熟期以反式-2-己烯醛、异丁酸异戊酯和己醛为主的挥发性物质, 在过熟期相对含量最高的是乙酸异戊酯。香韵分析结果表明绿熟期涵盖 15 种香型, 其中脂肪香味香型载荷较大, 黄熟期和过熟期分别包含 13 种和 14 种香型, 其中黄熟期以青香载荷最大, 过熟期以果香载荷最大。‘桂蕉 1 号’果实在不同的成熟阶段, 其香气成分的种类和相对含量有较大的变化, 并随着果实成熟度的增加, 其香韵的种类也有明显的变化, 绿熟期和过熟期的香型种类最多, 是食品香精开发的最佳时期。

**关键词:**香蕉, ‘桂蕉 1 号’, 挥发性成分, 香味特征, 后熟时期

中图分类号: TS255.1 文献标识码: A 文章编号: 1002-0306(2021)14-0099-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020120095

## Analysis of Volatile Components and Aroma Features of Banana ‘Guizhao No.1’ Fruit at Different Ripening Stages

LIANG Shuilian<sup>1,2</sup>, LV Daizhu<sup>2</sup>, MA Chen<sup>2</sup>, XIANG Tantan<sup>2</sup>, ZHOU Jia<sup>2</sup>, WANG Mingyue<sup>1,2,\*</sup>

(1. College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou 570228, China;

2. Analysis and Testing Center, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, China)

**Abstract:** Solid-phase microextraction combined with gas chromatography-tandem mass spectrometry technology was used to analyze the volatile compounds in the different ripening stages of banana ‘Guizhao No. 1’ fruit, and the smell ABC method was used to analyze the volatile compounds in the fruits of different ripening stages. The results showed that, 24 kinds of volatile substances with relative content greater than 1% were detected in the green maturity period, yellow maturity period and over-ripe period of the banana ‘Guizhao No. 1’, including aldehydes, esters and other alkane volatile substances. Among them, the green maturity period was characterized by trans-2-nonal and trans-2-, cis-6-nonadienal, and the yellow maturity period was characterized by trans-2-hexenal and isoamyl isobutyrate. Ester and hexanal were characteristic volatile substances, and isoamyl acetate had the highest relative content in the over-ripe period. Fragrance analysis results showed that the green maturity period covered 15 fragrance types, of which the fat fragrance type had a larger load. There were 13 kinds and 14 kinds of fragrance in the yellow and over ripening stages, respectively, among which the load of green was the largest in yellow and fruit aroma was the largest in over ripening stage. The type and relative content of aroma components of the fruit of ‘Guizhao No. 1’ varied greatly at different stages of maturity, and with

收稿日期: 2020-12-10

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金 (CARS-31-13); 水果营养品质评价与调控协同创新 (CATASATC-2020-009)。

作者简介: 梁水连 (1993-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品营养品质评价与调控, E-mail: 1016696034@qq.com。

\* 通信作者: 王明月 (1970-), 女, 本科, 研究员, 研究方向: 农产品质量安全, E-mail: hkwmy0815@163.com。

the increasing of fruit maturity, the type of fragrances also changed significantly. The green maturity period and over-ripe period both had the most flavor types, which was the best stages for the development of food flavors.

**Key words:** banana; 'gujiao No.1'; volatile components; aroma features; ripening period

香蕉是当前世界贸易中最重要的热带果品之一,在一百三十多个国家和地区广泛种植<sup>[1]</sup>,年产量达1.55亿吨(FAO,2020),中国是香蕉种植的主产国之一,近二十来中国的香蕉产业不断开发新品种<sup>[2]</sup>,成为了南亚热带地区最大宗水果,产量仅次于苹果、柑橘、梨。‘桂蕉1号’属香蕉的中矮把品种,是香蕉新培育的主栽品种之一,在广西、海南等地区均有推广种植<sup>[3-4]</sup>。

香气是香蕉鲜食和果品加工过程中品质评价的一个重要因素,不同的香蕉品种具有各自独特的香气特征,这往往也是消费者选择购买的重要影响因素<sup>[5-6]</sup>。故香气成分已经成为了当前水果品质研究的一个重要热点,目前国内外关于不同水果(如番茄、苹果、梨和杏等)的特征香气及香气合成途径<sup>[6-11]</sup>的研究报道也较多。万鹏等<sup>[12]</sup>对19个苹果品种的香气成分进行了检测,发现其含量在不同品种间存在较大的差异。有学者测定了芒果、苹果的香气成分,发现同一品种不同部位香气物质的种类及相对含量也有显著的差异<sup>[13-14]</sup>。香蕉在后熟过程中会释放大量令人愉悦的芳香挥发性物质,目前关于香蕉挥发性成分的研究较多地集中在后熟阶段香气成分的变化及及不同品种香蕉的比较分析<sup>[15-17]</sup>。Zhu等<sup>[18]</sup>在不同的成熟时期‘巴西蕉’和粉蕉分别检测到62和59种挥发性化合物,发现两个香蕉品种在成熟过程中最丰富的芳香物质为乙酸异戊酯、丁酸、3-甲基-3-甲基丁酯、己醛、反式-2-己烯醇和1-己醇等,两个香蕉品种的挥发物成分在不同的成熟阶段存在差异,并且同一香蕉品种内的挥发性物质也存在着明显差异。水果作为一种天然的食物,其涵盖的香气并不是单一的,而是复杂多样的<sup>[19]</sup>。当前,用于香韵分类的方法有很多,而气味ABC分类法被认为是迄今为止定量描述和区分气味的唯一方法,该系统将大自然中的各种

挥发性组分的气味分类成26种,使用其代表香韵的首写字母为简写<sup>[20]</sup>。乔飞等<sup>[21-22]</sup>采用气味‘ABC’法分析了番荔枝花期及芒果不同组织部位的香气特征,而香蕉作为一种香气较为浓郁的水果,目前未见关于香蕉果实不同后熟时期整体香韵的相关报道。

因此,本实验以‘桂蕉1号’香蕉为研究对象,采用SPME-GC-MS的方法<sup>[23-26]</sup>对‘桂蕉1号’香蕉不同后熟时期的挥发性成分进行了测定,并与其他已报道的香蕉品种的挥发性成分进行了比较分析。此外,使用气味“ABC”法对香蕉果实的香韵进行初步的量化分析,揭示‘桂蕉1号’香蕉果实香韵的整体构成,为香蕉果实香气品质评价和产品加工等提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

香蕉‘桂蕉1号’,采集于海南省澄迈县的中国热带农业科学院海口实验站香蕉试验示范基地,样品为饱满度7~8成的香蕉果实,在(22±1)℃的条件下作催熟处理,在绿熟期、黄熟期和过熟期(见图1)<sup>[27]</sup>分别随机抽取15个饱满度相近、成熟度一致的果实,取可食用部位用液氮速冻后置于-80℃贮存备用。

7098A-5975C 气质联用仪 美国安捷伦公司;恒温水浴锅 上海亚荣生化仪器厂;50/30 μm DVB/CAR/PDMS(二乙烯基苯/碳分子筛/聚二甲基硅氧烷)固相微萃取纤维及萃取手柄 美国Supelco公司;JYL-Y20破壁机 九阳股份有限公司;NH300色差仪 深圳市三恩驰科技有限公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 理化指标的测定

1.2.1.1 果皮色泽 使用型号为NH300色差仪对不同成熟度‘桂蕉1号’果实果皮的色度指标进行测定:仪器条件设置为:光斑直径10 mm, C/2光源,用白板



图1 不同成熟时期的‘桂蕉1号’果实  
Fig.1 Different ripening stages of ‘Guojiao No. 1’ fruit

和黑板进行校准并进行测量相应的色度值( $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 值), 其中  $L^*$  值表示色泽亮度,  $a^*$  表示红绿色度,  $b^*$  表示黄蓝色度, 在不同成熟天数的果实中分别随机选取 3 个大小均匀、无发生病害的‘桂蕉 1 号’果实, 在每个果实的果皮沿赤道面去 3 个等距离的点进行测定, 并记录各个色差值。

**1.2.1.2 果实硬度** 使用德克 AGY 数显果实硬度计对不同成熟时期已经测定好色泽的‘桂蕉 1 号’果实, 在其赤道处等距离选取 3 个进行果实硬度的测定, 果实硬度计的探头直径调整为 5 mm, 下降速度 1 mm。

**1.2.1.3 果实可溶性固形物** 使用手持式数显糖度计对匀浆后的样品进行可溶性固形物的测定, 使用前先使用超纯水对手持式数显糖度计进行调零处理, 用无尘纸擦干。取匀浆样品滴加到糖度计测量, 记录读取到的数值, 每个样品进行 3 次重复, 计算去均值比较。

**1.2.2 固相微萃取方法** 将不同成熟时期的香蕉果实冷冻样品研磨成粉末, 称取 5 g 果肉冷冻干粉于 20 mL 螺口棕色顶空瓶中, 将 50/30  $\mu\text{m}$  DVB/CAR/PDMS 型萃取头插入顶空瓶中, 萃取纤维与样品保持 1.5 cm 距离, 并将其置于恒温水浴锅(40 °C)萃取 30 min, 缩回萃取纤维, 将萃取头从顶空瓶中拔出, 迅速插入 GC 进样口, 解析附 3 min。

**1.2.3 气相色谱串联质谱方法** 色谱条件: 色谱柱为 HP-MS Ultra Inert(30 m×250  $\mu\text{m}$ ×0.25  $\mu\text{m}$ ), 载气为氦气, 流速: 0.8 mL/min; 进样口温度: 250 °C, 不分流进样, 升温程序: 40 °C 保持 1 min, 以 3.5 °C/min 升至 135 °C 保持 0 min, 再以 10 °C/min 升至 200 °C, 保持 3 min。质谱条件: 传输线温度 270 °C, 离子源温度 230 °C, 四极杆温度 150 °C, 离子化方式: EI, 电子能量 70 eV, 全扫范围 40~450 amu/s。按面积归一法<sup>[28]</sup> 进行定量分析, 各分离组分相对含量(%)=(各分离组分的峰面积/总峰面积)×100。

**1.2.4 果实的香韵分析方法** 香韵量化描述参照林翔云<sup>[29]</sup> 和气味‘ABC’分类法, 将该分类系统中各香气组分的 ABC 量化值乘以香比强值再结合实验所测得该香气组分的相对含量, 即可计算出各香韵的比重, 并绘制出各香韵分布的雷达图。

### 1.3 数据处理

数据使用 Excel 2019 和 SPSS24.0 对果实的挥发性成分进行数据处理及统计分析, 结果表示未平均

值±标准偏差; 用 R 软件进行 PCA 分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 ‘桂蕉 1 号’香蕉果实成熟的理化指标

由表 1 可知, ‘桂蕉 1 号’香蕉果实采后不同的成熟阶段, 果实的色泽、硬度和可溶性固形物等理化指标均存在不同程度的显著性差异( $P<0.05$ )。色泽是评价果实成熟度的一个既重要又是最直观的依据。‘桂蕉 1 号’香蕉果实随着后熟成熟度的增加, 果皮亮度  $L^*$  值呈先升后降的趋势, 绿熟期、黄熟期和过熟期的色泽均呈现出显著性差异( $P<0.05$ ), 果肉的绿色度  $a^*$  值不断升高, 说明果肉逐渐由绿色度转向红色度, 果实逐渐成熟, 色泽逐渐均匀。其果实硬度随着成熟度的增加, 硬度呈现下降趋势, 到过熟时期下降到(13.53±0.95)N, 表明此时的果实已达到鲜食储存的极限, 果实进入过度成熟阶段且开始腐烂。可溶性固形物在‘桂蕉 1 号’香蕉果实后熟过程中呈现出逐渐增加的趋势, 表明随着成熟度的增加, 香蕉的口感不断地变甜, 这主要是因为香蕉后熟过程中果肉的淀粉逐渐转化为可溶性糖的原因。

### 2.2 ‘桂蕉 1 号’果实不同后熟时期挥发性成分的 GC-MS 总离子流图分析

‘桂蕉 1 号’香蕉果实在绿熟期、黄熟和过熟期的挥发性成分 GC-MS 总离子流图如图 2 所示, 其中 3 个时期共检测出 44 种挥发性成分, 相对含量大于 1% 的挥发性物质有 24 种, 主要包括醛类、酯类、酮类、醇类和烷烃等其他挥发性物质。不同后熟时期, ‘桂蕉 1 号’香蕉的挥发性物质的组分和相对含量均存在明显差异, 随着果实的成熟, 所含的挥发性成分种类逐渐增多。

### 2.3 ‘桂蕉 1 号’香蕉果实在不同后熟时期挥发性成分的主要种类

如图 3 所示, 各挥发性组分经 GC-MS 检测和分析, 在绿熟期检测出 12 种挥发性物质, 在黄熟时期检测出 21 种挥发性物质, 在过熟期检测出 28 种挥发性物质。由图 4 可看出, 从绿熟期到黄熟期的转变, 大部分醛类挥发性物质的相对含量在这个过程中显著下降( $P<0.05$ ); 从黄熟期开始果实成熟, 酯类挥发性物质相对含量显著增加( $P<0.05$ ), ‘桂蕉 1 号’果实黄熟期和过熟期酯类挥发性物质相对含量分别为

表 1 ‘桂蕉 1 号’香蕉果实成熟的理化指标  
Table 1 Basic physical and chemical indexes of banana fruit ripening of ‘Guizhao No. 1’

成熟期	色泽			硬度(N)	可溶性固形物(%)
	$L^*$	$a^*$	$b^*$		
绿熟	65.21±0.98 <sup>c</sup>	-15.08±1.14 <sup>c</sup>	40.67±0.023 <sup>b</sup>	55.6±1.93 <sup>a</sup>	2.00±0.57 <sup>c</sup>
黄熟	77.32±1.21 <sup>a</sup>	4.86±0.61 <sup>b</sup>	46.36±1.40 <sup>a</sup>	22.95±1.92 <sup>b</sup>	18.00±0.15 <sup>b</sup>
过熟	69.99±0.67 <sup>b</sup>	8.31±0.57 <sup>a</sup>	40.42±0.50 <sup>b</sup>	13.53±0.95 <sup>c</sup>	22.13±0.26 <sup>a</sup>

注: 不同小写字母表示同一列数据差异显著,  $P<0.05$ 。

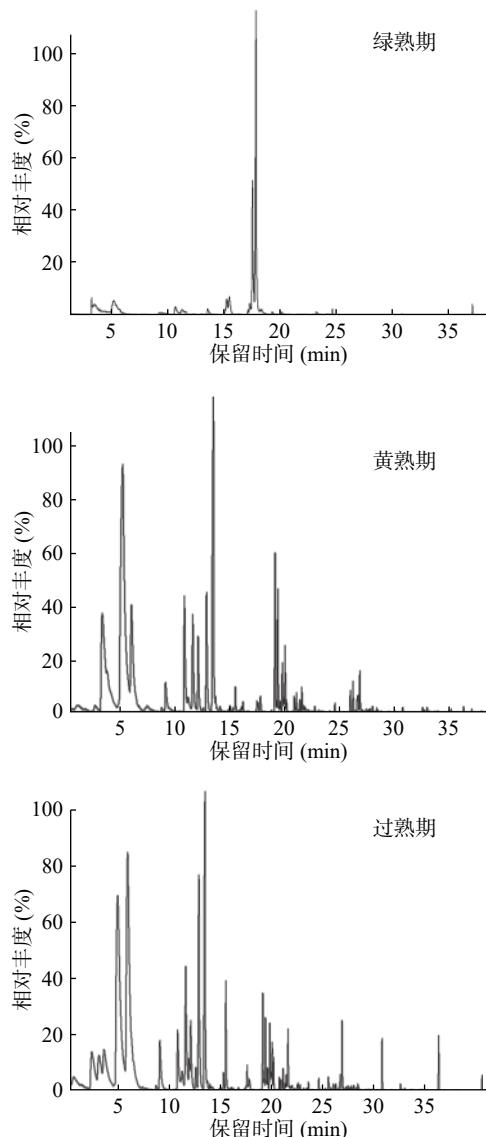


图2 ‘桂蕉1号’不同成熟时期果实挥发性成分的总离子流图

Fig.2 GC-MS total ionic chromatogram of volatile components in different ripening stages of ‘Guojiao No. 1’ fruit

40.5% 和 59.9%。

#### 2.4 ‘桂蕉1号’香蕉果实主要挥发性成分及含量分析

‘桂蕉1号’不同成熟时期的果实挥发性成分相对含量大于1%的物质共检出24种(表2),主要包括酯类(11种)、醛类(7种)和其他挥发性物质(6种),其中酯类挥发性物质种类最多。在果实不同成熟时期,各组分的种类和相对含量产生较大的变化。由表2可知,绿熟期果实主要挥发性物质有9种,为己醛、反式-2-己烯醛、2-正戊基呋喃、3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯、苯乙醛、反-2-辛烯醛、反-2-,顺-6-壬二烯醛、反式-2-壬醛、反式-2,4-癸二烯醛。这9种挥发性物质占绿熟期挥发性物质相对含量的86.57%,主要是醛类化合物;其中含量较高的有反式-2-壬醛(49.74%)和反式-2-,顺-6-壬二烯醛(18.04%),这两种挥发性物质为‘桂蕉1号’绿熟期特征香气物质。

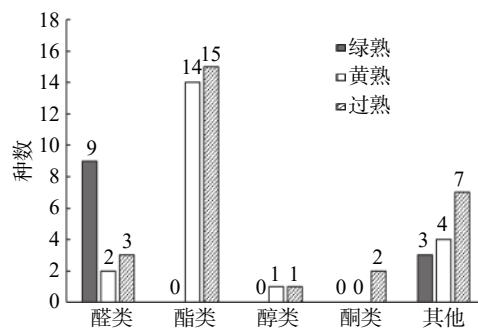


图3 ‘桂蕉1号’不同成熟时期果实挥发性成分的种类和数量变化

Fig.3 Variations in types and quantities of volatile components in fruits of ‘Guojiao No. 1’ in different ripening stages

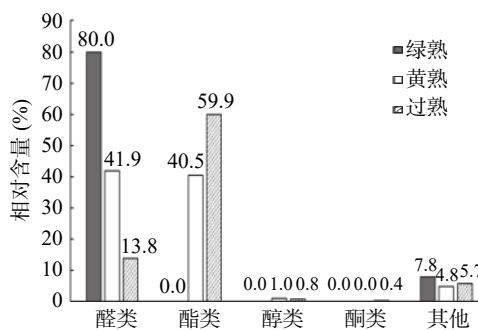


图4 ‘桂蕉1号’不同成熟时期果实主要挥发性成分的含量变化

Fig.4 Variations of main volatile components in the fruits of ‘Guojiao No. 1’ in different ripening stages

黄熟期果实主要挥发性物质有10种,分别为己醛、乙酸丁酯、反式-2-己烯醛、乙酸异戊酯、丁酸丁酯、丁酸异丁酯、乙酸己酯、丁酸2-戊酯、异丁酸异戊酯、丁酸己酯、乙烯基环己烷,占黄熟阶段总挥发性物质相对含量的81.76%;其中相对含量较高的有反式-2-己烯醛(31.56%)、异丁酸异戊酯(13.91%)、己醛(10.36%)和乙酸异戊酯(7.80%),这几种挥发性组分构成了黄熟时期的特征性化合物。该时期相对于绿熟期,作为一个较为重要的转折点,在该时期除正己醛、反式-2-己烯醛的相对含量逐渐增多外,其他醛类挥发性物质及2-正戊基呋喃在该时期未被检出或者相对含量小于1%,其中以绿熟期相对含量最高的反式-2-壬醛的变化最为明显。此外,在该时期部分酯类化合物在该时期被检测出,但总的酯类挥发性物质的相对含量仍低于该时期醛类挥发性物质的相对含量,说明该时期‘桂蕉1号’果实的果皮虽然已经全部褪绿转黄,但该时期果实香气品质仍未达到最佳食用期,这时期仍是醛类挥发性物质为特征挥发性组分,果实香味较淡,但可作为香蕉最佳的商品期。

过熟期主要挥发性物质有14种,主要有乙酸异戊酯(21.57%)、丁酸异戊酯(13.25%)、反式-2-己烯醛(12.31%)、乙酸己酯(5.42%)和乙酸异丁酯(4.46%)。该时期主要为酯类化合物(57.69%),而相对含量大于1%的醛类物质只有己醛和反式-2-己烯醛。由表2

表 2 ‘桂蕉 1 号’果实不同成熟时期的主要挥发性成分  
Table 2 Main volatile components of the fruit of ‘Guizhao No. 1’ in different ripening stages

保留时间 (min)	挥发性组分	分子式	相对含量(%)		
			绿熟期	黄熟期	过熟期
2.04	乙酸异丁酯	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	—	—	4.46±0.12
3.36	己醛	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	2.57±0.08	10.36±1.01	1.42±0.05
3.35	乙酸丁酯	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	—	—	1.26±0.05
5.20	反式-2-己烯醛	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O	2.61±0.09	31.56±1.01	12.31±0.25
6.15	乙酸异戊酯	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	—	7.80±0.12	21.57±0.15
9.25	丁酸异丁酯	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	—	1.43±0.05	2.93±0.07
10.65	2-戊基庚酮	C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O	6.18±0.12	—	—
10.97	丁酸丁酯	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	—	4.79±0.20	3.29±0.03
11.73	乙酸己酯	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	—	3.39±0.07	5.42±0.12
12.20	丁酸2-戊酯	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	—	2.56±0.05	2.87±0.12
12.25	3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>	1.51±0.02	—	—
12.88	苯乙醛	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O	1.52±0.02	—	—
13.40	丁酸异戊酯	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	—	—	13.25±0.39
13.54	反-2-辛烯醛	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O	2.77±0.05	—	—
13.62	异丁酸异戊酯	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	—	13.91±0.41	—
15.50	异戊酸异戊酯	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	—	—	2.64±0.08
17.50	反-2-,顺-6-壬二烯醛	C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O	18.04±0.59	—	—
17.77	反式-2-壬醛	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub> O	49.74±0.65	—	—
19.20	丁酸己酯	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	—	3.17±0.12	—
19.46	乙烯基环己烷	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>	—	2.79±0.04	—
19.83	环辛烯	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>	—	—	1.30±0.20
23.20	反式-2,4-癸二烯醛	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O	1.62±0.03	—	—
25.55	2-甲氧基-5-丙-2-烯基苯酚	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	—	—	1.27±0.15
26.91	环己烷, 1-丁烯基	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	—	—	1.26±0.13

可知, 该时期总的酯类挥发性物质相对含量和种类远大于醛类物质, 综合该时期挥发性物质的相对含量, 可将乙酸异戊酯、丁酸异戊酯、反式-2-己烯醛、乙酸己酯和乙酸异丁酯视为过熟时期的特征香气成分。结合图 3 和表 2 可看出, 不同成熟阶段‘桂蕉 1 号’的挥发性物质的数量和种类都发生了明显的变化, 其中绿熟期主要为醛类挥发性物质, 占该时期总挥发性物质含量的 78.87%, 该阶段未检测出酯类化合物; 在黄熟期, 醛类挥发性物质不断下降, 酯类挥发性物质迅速增加, 醛类挥发性物质降低到 41.92%, 酯类挥发性物质增加到 40.49%。随着后熟过程中, 果实的挥发性物质种类越来越丰富, 但总挥发性物质的相对含量变化不明显, 在过熟时期, 酯类挥发性物质占总挥发性成分相对含量的 75.26%, 以乙酸异戊酯相对含量最高。

## 2.5 ‘桂蕉 1 号’不同成熟时期挥发性物质主成分分析

主成分分析是通过利用降维思想将原始数据集进行重组, 从而使得分析简单并可视化。它也适用于样品成熟期的初步评估, 探索挥发性物质间的相关依赖性。将‘桂蕉 1 号’香蕉果实 3 个不同成熟时期的所有定性大于 80% 的挥发性化合物进行 PCA 分析。如图 5A 所示, 第一主成分(PC1)的贡献率为 52.00%, 第二个主成分(PC2)为 33.2%, 累计贡献率

为 85.20%。不同的分布表示不同香蕉果实的成熟期, 如图 5A 所示, 绿熟时期位于 X 轴的上方, 黄熟时期最为接近 X 轴, 过熟时期位于 X 轴下方。醛类挥发性物质是绿熟时期的最主要贡献者, 其中以反式-2-壬醛(27)和反-2-,顺-6-壬二烯醛(26)最为明显。对于黄熟时期的香蕉果实, 醛类、酯类以及一些未确定的挥发性化合物也占较大权重。反式-2-己烯醛(6)、己醛(4)、异丁酸异戊酯(22)和乙酸异戊酯(7)是该时期的主要贡献物质。过熟时期主要以酯类挥发性物质为主。酯类挥发性物质对过熟期的贡献最大, 乙酸异戊酯(7)丁酸异戊酯(20)和反式-2-己烯醛(6)是该时期最主要的挥发性物质。图 5B 中的 Cos2 值能够显示出样本特征分析的质量高低, 其中 Cos2 值较高表示挥发性成分在主成分呈现良好水平, 例如, 图 5B 直观地显示出绿熟时期挥发性物质主要对 PC2 有较大贡献, 对 PC1 贡献不大, 而通过 PC1 也能很好地代表了黄熟时期和绿熟时期的酯类挥发性物质。

## 2.6 ‘桂蕉 1 号’香蕉不同成熟时期挥发性成分气味 ABC 分析

为了更直观地表达‘桂蕉 1 号’整体的香韵, 将所有挥发性物质中香料物质的气味 ABC 值、相对含量和香比强值结合起来, 绘制出其香韵分布的雷达图

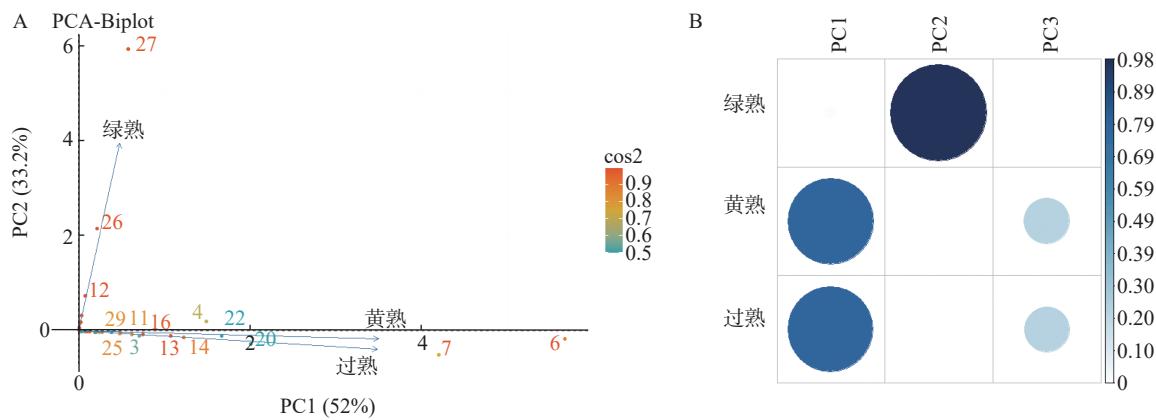


图 5 ‘桂蕉 1 号’香蕉果实不同成熟时期的 PCA 图

Fig.5 PCA analysis at different ripening stage of ‘Guizhao No. 1’

注: 图 5A 中的 1~42 分别代表 2-戊酮、庚醛、乙酸异丁酯、己醛、乙酸丁酯、反式-2-己烯醛、乙酸异戊酯、2-庚酮、1-甲基乙酸戊酯、(E)-2-庚烯醛、丁酸异丁酯、2-正戊基呋喃、丁酸丁酯、乙酸己酯、1-己酸 4-己烯-1-醇、丁酸 2-戊酯、3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯、苯乙醛、戊酸丁酯、丁酸异戊酯、反-2-辛烯醛、异丁酸异戊酯、顺式 5-辛烯-1-醇、2-甲基丁酸-3-甲基丁酯、异戊酸异戊酯、反-2-,顺-6-壬二烯醛、反式-2-壬醛、丁酸己酯、乙烯基环己烷、环辛烯、9-氮杂双环(6,2,0)癸-10-酮、乙酸辛酯、(E,E)-2,4-壬二烯醛、3-甲基丁酸己(基)酯、己酸异戊酯、反式-2,4-癸二烯醛、2-甲氧基-5-丙-2-烯基苯酚、1,3-环辛二烯、环己烷, 1-丁烯基、3,5-辛二烯, (Z,Z)、榄香素、1-丙烷, 1-[3,5-双(1,1-二甲基乙基)-4-羟基苯基]。

(图 6)。从图 6 可以看出, 绿熟期的‘桂蕉 1 号’涵盖 15 种香型, 该时期涵盖香型最多, 其中脂肪香香韵荷载最大, 其次为青香, 木香荷载最小(图 6a); 黄熟期涵盖了 13 种香型, 青香荷载最大, 其次为果香(图 6b), 脂肪香香型荷载迅速下降。过熟期果实的香韵涵盖了 14 种香型, 在该时期果香的荷载最大(图 6c), 从图 5 可看出‘桂蕉 1 号’的香韵主要由脂肪香味、青香、果香、乳酪香和辛香构成, 将其和香气较为浓郁的‘汤米\_阿京斯’杧果果肉相比, 发现‘汤米\_阿京斯’杧果的香味主要贡献香韵为果香、松香和木香<sup>[21]</sup>, 由此可见, 不同品种水果所涵盖的香韵有较大的差异。

### 3 讨论与结论

香蕉的感官品质包括香蕉的外观、风味、色泽和硬度等, 风味是由味道(甜、酸)和香气相互作用的结果, 而味道基本上是由糖和酸决定的。糖酸水平是直接影响了水果风味可接受性<sup>[30]</sup>。研究表明, 香蕉果实中影响甜味最重要的是葡萄糖、果糖和蔗糖<sup>[31]</sup>, 而可溶性固形物主要包括一些可溶性糖(果糖、蔗糖和葡萄糖等)。糖的积累极有可能影响了果实的香气强度<sup>[32]</sup>。在番茄中, 发现随着糖含量的增加、发现果实的香气强度增强。芳香挥发性物质的产生是对香蕉果实的风味较为直接的一个重要特征。香蕉特有的香气是由许多种挥发性化合物混合构成<sup>[33]</sup>。本研究对‘桂蕉 1 号’香蕉不同后熟时期的果实的外观、色泽、硬度、可溶性固形物以及挥发性物质进行了鉴定, 在后熟过程的, 香蕉果皮逐渐褪绿转黄、硬度在黄熟时期迅速下降, 可溶性固形物逐渐增多, 到过熟时期达到最大值, 大部分挥发性成分逐渐增多。在绿熟期、黄熟期和过熟期时期共检出 44 种挥发性物质, 其中醛类和酯类挥发性物质的种类和相对含量丰

富, 包括 24 种相对含量大于 1% 的挥发性物质。绿熟、黄熟和过熟期共同检出的挥发性物质有 2 种, 分别是己醛和反式-2-己烯醛, 黄熟和过熟期共同检出的挥发性物质有 14 种。水果的特征香气是一个较为复杂的混合物, 是由许多具有特征香气的物质组成<sup>[33]</sup>, 本研究对‘桂蕉 1 号’香蕉绿熟期、黄熟期和过熟期的香韵进行了初步量化分析, 发现不同成熟时期‘桂蕉 1 号’果实的香气成分的种类和含量有较大的差异, ‘桂蕉 1 号’果实在绿熟期以反式-2-壬醛和反式-2-,顺-6-壬二烯醛为主要特征挥发性物质, 其香韵以脂肪香气香型和青香香型为主, 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, 该时期的香韵特征主要以青香型和果香型为主, 在过熟期相对含量最高的是乙酸异戊酯, 其整体香韵以果香香型为主。在果实成熟的不同阶段, 其挥发性成分的种类和数量均有明显变化, 并随着果实成熟度的增加, 果实香气物质种类逐渐增多, 果实的特征风味逐渐形成。醛类香料和酯类香料是日常香料合成中常用的两类, 尤其是酯类香料是目前合成香料里最大的一组, 芳香族形成的酯类化合物是自然界中动植物及微生物产生的香气中最重要和含量最丰富的物质。低碳脂肪酸和脂肪醇形成的酯类化合物是配制各种水果香精的主要香料, 而成熟的香蕉具有浓郁的香气, 对‘桂蕉 1 号’香蕉果实不同成熟时期的挥发性成分及香韵组成进行分析, 对香蕉的综合品质评价和生产加工具有指导性的意义, 同时也为天然香料的提取及开发提供参考数据。

从结果来看, ‘桂蕉 1 号’香蕉与粉蕉在后熟阶段的挥发性物质的相对含量和种类有明显差异。粉蕉在绿熟期主要以醛类和醇类为主, 而在‘桂蕉 1 号’香

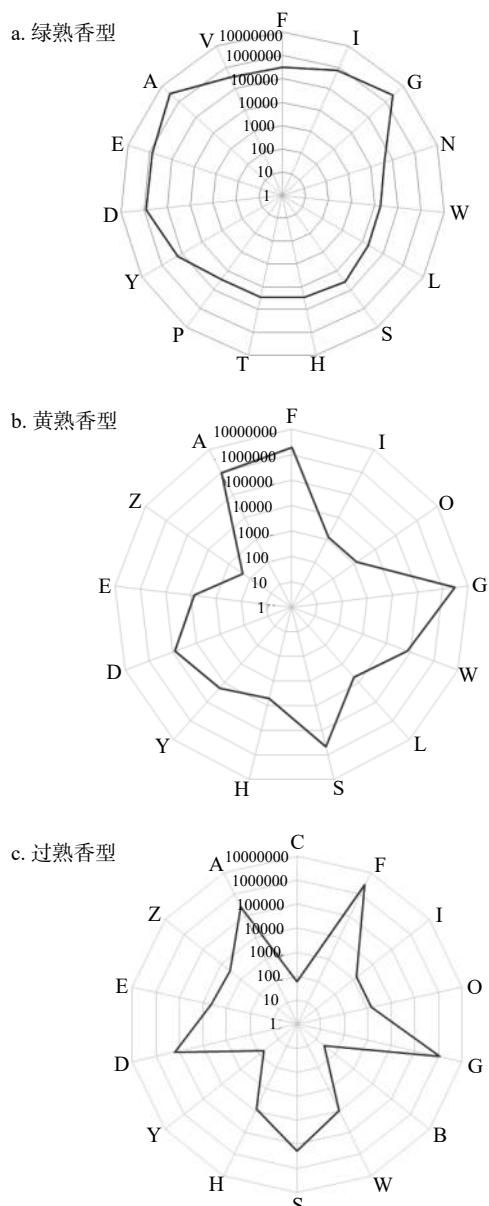


图 6 ‘桂蕉 1 号’果实不同成熟时期的香韵分布雷达图

Fig.6 Radar map of aroma distribution in banana of ‘Guizhao No. 1’

注: 大写字母代表不同的香型, 分别为: F-果香; I-鸢尾香; G-青香; N-麻醉性香气; W-木香; L-芳香族化合物香气; S-辛香味; H-药草香; T-烟焦香; P-苯酚香; Y-土壤香; D-乳酪香; E-食品香; A-脂肪香味; V-香茅兰香; C-柑橘香; O-兰花香; B-冰凉香气; Z-有机溶剂气味。

蕉主要以醛类为主, 且醛类相对含量约达 80%, 到了黄熟和过熟阶段, 在‘桂蕉 1 号’香蕉中, 酯类挥发性物质的相对含量变化趋势表现为先迅速增加, 然后缓慢增加的趋势, 而在粉蕉果实中, 其酯类挥发性物质的变化趋势则表现为先缓慢增加, 然后迅速增加<sup>[34]</sup>。但两者酯类挥发性成分的总体变化均是随着果实的不断成熟, 其相对含量和种类不断增加。过熟的粉蕉除富含乙酸乙酯、乙酸异戊酯、乙酸丁酯、乙酸己酯、3-甲基丙酸-3-甲基丁酯和乙酸乙酯等乙酸酯及丁酸酯外, 还包含一些少量的其他酯类, 如辛酸酯和癸酸酯, 构成了粉蕉的特征香气组成<sup>[18]</sup>。过熟的‘桂

蕉 1 号’香蕉果实香气浓郁, 其主要以酯类挥发性物质起主导作用, 其中乙酸异戊酯、丁酸异戊酯、乙酸己酯、乙酸异丁酯及丁酸丁酯 5 种香气物质相对含量较高且阈值较低, 呈现出典型香气。同时‘桂蕉 1 号’与所报道的‘巴西蕉’中香气成分进行了比较, 发现它与‘巴西蕉’的香气成分的种类和数量基本一致<sup>[24,35]</sup>, 表明‘桂蕉 1 号’香蕉与‘巴西蕉’有较为接近的风味品质。

### 参考文献

- [1] 刘文清, 崔广娟, 王芳, 等. 香蕉-甘蔗轮作对土壤养分含量及酶活性的影响[J]. 广东农业科学, 2019, 46(8): 86–96.
- [2] Dale J, Paul J-Y, Dugdale B, et al. Modifying bananas: From transgenics to organics[J]. Sustainability, 2017, 9(3): 1–7.
- [3] 牟海飞, 刘洁云, 韦绍龙, 等. 早熟短果指型香蕉新品种桂蕉早 1 号的选育及其高产栽培技术[J]. 南方农业学报, 2017, 48(6): 1048–1053.
- [4] 林贵美, 李小泉, 韦绍龙, 等. 桂蕉 1 号香蕉种植试验[J]. 中国热带农业, 2012(5): 64–65.
- [5] Wei S, Tao S, Qin G, et al. Transcriptome profiling reveals the candidate genes associated with aroma metabolites and emission of pear (*Pyrus ussuriensis* cv.)[J]. Scientia Horticulturae, 2016, 206: 33–42.
- [6] Selli S, Gubbuk H, Kafkas E, et al. Comparison of aroma compounds in dwarf cavendish banana (*Musa* spp. AAA) grown from open-field and protected cultivation area[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 141: 76–82.
- [7] 张静, 罗敏蓉, 王西芳, 等. 固相微萃取-气质联用测定番茄香气成分条件优化[J]. 北方园艺, 2017(13): 7–13.
- [8] Wang L, Baldwin E A, Bai J. Recent advance in aromatic volatile research in tomato fruit: The metabolisms and regulations[J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 9(2): 203–216.
- [9] 刘畅. 4 种小苹果香气物质检测及主成分分析[J]. 中国林副特产, 2020(3): 17–19.
- [10] 邝瑞彬, 孔凡利, 杨护, 等. 百香果果汁营养特性分析与评价 [J/OL]. 食品工业科技: 1–16[2021-05-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20201027.1325.002.html>.
- [11] 朱殊芸茜, 王斌, 邓乾坤, 等. 新疆 5 种鲜食葡萄挥发性香气成分比较分析[J]. 农产品加工, 2020(20): 68–74.
- [12] 万鹏, 梁国平, 马丽娟, 等. 19 个苹果品种果实香气成分的 GC-MS 分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(14): 227–232.
- [13] 刘华南, 江虹锐, 陆雄伟, 等. 顶空固相微萃取-气质联用分析不同芒果品种香气成分差异 [J/OL]. 食品工业科技: 1–18[2021-05-09]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020060377>.
- [14] 李瑞, 刘翠华, 石金瑞, 等. ‘蜜脆’苹果果皮和果肉香气差异[J]. 西北农业学报, 2019, 28(10): 1621–1631.
- [15] Shiota H. New esteric components in the volatiles of banana fruit (*Musa sapientum* L. )[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1993, 41(11): 2056–2062.
- [16] 张远良. 香蕉转录因子 MabZIPs 参与调控香气合成基因的机制分析[D]. 广州: 华南农业大学, 2017.

- [ 17 ] Zhu H, Li X P, Yuan R C, et al. Changes in volatile compounds and associated relationships with other ripening events in banana fruit[J]. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2010, 85(4): 283–288.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] 张劲. 芒果香气特征分析研究[D]. 南宁: 广西大学, 2011.
- [ 20 ] 范彬彬. 菊花精油特征香气成分的鉴定及香气模拟研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2016.
- [ 21 ] 乔飞, 江雪飞, 丛汉卿, 等. 杠果‘汤米·阿京斯’香气特征分析[J]. *热带农业科学*, 2015, 35(12): 63–66.
- [ 22 ] 乔飞, 江雪飞, 徐子健, 等. ‘阿蒂莫耶’番荔枝花期挥发性成分和香味特征分析[J]. *果树学报*, 2016, 33(12): 1502–1509.
- [ 23 ] San A T, Joyce D C, Hofman P J, et al. Stable isotope dilution assay (SIDA) and HS-SPME-GC/MS quantification of key aroma volatiles for fruit and sap of Australian mango cultivars[J]. *Food Chemistry*, 2017, 221: 613–619.
- [ 24 ] 李映晖. 香蕉和粉蕉果实后熟过程中挥发物的变化及肥料对其的影响[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2014.
- [ 25 ] 陶晨, 王道平, 杨小生, 等. 固相微萃取气相色谱质谱法分析香蕉中的香气成分[J]. *甘肃农业大学学报*, 2010, 45(4): 139–141.
- [ 26 ] Cuevas F J, Moreno-Rojas J M, Arroyo F, et al. Effect of management (organic vs conventional) on volatile profiles of six plum cultivars (*Prunus salicina* Lindl.). A chemometric approach for varietal classification and determination of potential markers[J]. *Food Chemistry*, 2016, 199: 479–484.
- [ 27 ] 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(2): 485–488.
- [ 28 ] 徐子健, 龙娅丽, 江雪飞, 等. 山刺番荔枝果实发育进程中挥发性成分的组成分析[J]. *果树学报*, 2016, 33(8): 969–976.
- [ 29 ] 林翔云. 调香术[M]. 化学工业出版社, 2013: 181–188.
- [ 30 ] 王俊文, 武玥, 郁继华, 等. 外源ALA促进番茄糖酸品质及挥发性物质含量的作用研究[J/OL]. *园艺学报*: 1–14[2021-05-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1924.S.20210311.1107.003.html>.
- [ 31 ] Vermeir S, Hertog M, Vankerschaver K, et al. Instrumental based flavour characterisation of banana fruit[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2009, 42(10): 1647–1653.
- [ 32 ] Beckles D M. Factors affecting the postharvest soluble solids and sugar content of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2012, 63(1): 129–140.
- [ 33 ] Wyllie S G, Fellman J K. Formation of volatile branched chain esters in bananas (*Musa sapientum* L. )[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2000, 48(8): 3493–3496.
- [ 34 ] 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.
- [ 35 ] 黎源. 两个香蕉品种果实香气物质研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2014.