

# 不同瓢色西瓜果肉挥发性物质检测与分析

黄小忠<sup>1</sup>, 卢阳月<sup>2</sup>, 林远至<sup>2</sup>, 张旭淞<sup>1</sup>, 许鲈沔<sup>1</sup>, 张曼<sup>2</sup>

(1. 江苏农林职业技术学院茶与食品科技学院 江苏句容 212400;

2. 江苏省高效园艺作物遗传改良重点实验室·江苏省农业科学院蔬菜研究所 南京 210014)

**摘要:** 为了探明不同瓢色西瓜果肉挥发性物质的组成及差异, 采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法(headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, SPME-GC-MS)对2种不同瓢色西瓜的挥发性成分进行定性分析, 并利用主成分分析法(principal component analysis, PCA)分析西瓜果肉的主要香气成分。结果表明, 通过SPME-GC-MS从2种不同瓢色的西瓜中共鉴定出40种挥发性物质, 包括17种醛类、13种醇类、5种酮类、3种烯炔类、1种呋喃类和1种含氮化合物。不同瓢色西瓜果肉主要香气种类基本相似, 含量存在差异。主成分分析(PCA)能够对不同瓢色西瓜样本进行清晰的区分, 聚类分析与主成分分析结果一致。反, 顺-3, 6-壬二烯-1-醇、3-顺式壬-1-醇、反, 顺-2, 6-壬二烯醛、二甲基硅二醇、4-反式壬烯醛、顺式-6-壬烯醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮、顺-4-癸烯醛是形成红瓢西瓜果肉香气特征的重要成分, 3-顺式壬-1-醇、反, 顺-3, 6-壬二烯-1-醇、反, 顺-2, 6-壬二烯醛、二甲基硅二醇、顺式-6-壬烯醛、1-壬烯是形成黄瓢西瓜果肉香气特征的重要成分。研究结果可为解析不同瓢色西瓜的特征风味及品质调控提供参考。

**关键词:** 西瓜; 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱; 挥发性风味物质

中图分类号: S651

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2023)11-033-07

## Headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry analysis of volatile components of watermelon fruits with different flesh color

HUANG Xiaozhong<sup>1</sup>, LU Yangyue<sup>2</sup>, LIN Yuanzhi<sup>2</sup>, ZHANG Xuhao<sup>1</sup>, XU Lifeng<sup>1</sup>, ZHANG Man<sup>2</sup>

(1. College of Tea and Food Science Technology, Jiangsu Vocational College of Agriculture and Forestry, Jurong 212400, Jiangsu, China; 2. Jiangsu Key Laboratory for Horticultural Crop Genetic Improvement/Institute of Vegetable Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, Jiangsu, China)

**Abstract:** To investigate the composition and differences of volatile compounds in watermelon flesh with different flesh colors, headspace solid phase microextraction gas chromatography mass spectrometry (SPME-GC-MS) was used to qualitatively analyze the volatile components of watermelon flesh with different flesh colors, and principal component analysis (PCA) was used to analyze the main aroma components of watermelon flesh. The results showed that a total of 40 volatile substances, including 17 aldehydes, 13 alcohols, 5 ketones, 3 alkenes, 1 furan, and 1 nitrogen-containing compound, were identified from two different flesh colors of watermelon using SPME-GC-MS. The main aroma types of watermelon flesh with different flesh colors are basically similar, but there are differences in content. Principal component analysis(PCA) could clearly discriminate samples from different watermelon flesh, and the results obtained from hierarchical cluster analysis was in agreement with that of PCA. (E, Z)-3, 6-Nonadien-1-ol, cis-3-Nonen-1-ol, (E, Z)-2, 6-Nonadienal, Dimethyl silanediol, (E)-4-Nonenal, (Z)-6-Nonenal, 6-Methyl-5-Hepten-2-one and cis-4-Decenal are important components that form the aroma characteristics of red flesh watermelon flesh. cis-3-Nonen-1-ol, (E, Z)-3,6-Nonadien-1-ol, (E, Z)-2, 6-Nonadienal, Dimethyl silanediol, (Z)-6-Nonenal and 1-Nonene are important components to form the aroma characteristics of yellow watermelon flesh. These results provide a reference for analyzing the characteristic flavor and quality control of watermelon fruits with different flesh colors.

**Key words:** Watermelon; Headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry; Volatile flavor components

收稿日期: 2023-06-05; 修回日期: 2023-08-08

基金项目: 2021年江苏高校“青蓝工程”培养对象(苏教师函(2021)11号); 江苏现代农业(蔬菜)产业技术体系项目(JATS[2022]380)

作者简介: 黄小忠, 男, 讲师, 主要研究方向为生物技术与植物逆境生理。E-mail: 523855294@qq.com

通信作者: 张曼, 女, 副研究员, 主要研究方向为西瓜分子育种。E-mail: fldzm04@126.com

挥发性物质是食品风味的重要组成物质,主要包括醛类、醇类、萜烯类、酯类、酮类等,这些物质的组成及含量决定了不同食品的独特香气特征<sup>[1]</sup>。不同类型的物质呈现的香味特征有所不同。食品或水果的典型风味是由不同含量的挥发性物质组合共同决定的<sup>[2]</sup>,如 $\gamma$ -十二内酯和 $\gamma$ -癸内酯是蜜思李的特有香气物质<sup>[3]</sup>;癸醛、香茅醛、左旋香芹酮和 $\alpha$ -萜品醇形成了狮头柑的特殊香气<sup>[4]</sup>;香叶醇、二甲基二硫醚等为枳实的特征性挥发性成分<sup>[5]</sup>。挥发性物质对风味的贡献也与其气味阈值相关,气味阈值较高的物质虽然含量较高,但对风味贡献小,而一些气味阈值较低的物质成为了食品风味的主要贡献因子<sup>[6-7]</sup>。

西瓜甘甜多汁,富含多种维生素、氨基酸和矿物质等成分,具有丰富的营养和良好的药用价值,是盛夏消暑的必备果品。果实挥发性物质客观反映了果实风味特点,是评价果实风味品质的重要指标之一<sup>[4]</sup>。西瓜中的挥发性物质主要包括醛类、醇类、酮类和烯类物质。其中,醛类和烯类物质是西瓜清香味的主要贡献因子;醇类和酮类对西瓜的甜香、水果香、油脂香起重要作用<sup>[8-9]</sup>。肖守华等<sup>[10]</sup>分析了3种不同瓤色的地方西瓜品种果实的挥发性物质,发现醛类和醇类在3种不同瓤色西瓜中均含量最高,烯类和酯类在黄瓤西瓜中的含量高于两种红瓤西瓜,而黄瓤西瓜中酮类含量明显低于两种红瓤西瓜。Yuan等<sup>[11]</sup>分析了5种不同瓤色西瓜中类胡萝卜素的组成及含量差异,明确了类胡萝卜素在不同瓤色西瓜中的分布。Gong等<sup>[12]</sup>研究了西瓜果实发育过程中初级代谢物的积累模式,发现初级代谢物可能通过糖酵解和TCA循环参与西瓜果实风味的形成,认为香叶基丙酮、反,顺-2,6-壬二烯醛等11种挥发性物质可能是西瓜风味形成的关键代谢物<sup>[13]</sup>。

目前,关于西瓜挥发性物质的研究多集中于加工工艺对鲜榨西瓜汁的影响方面<sup>[4]</sup>,而关于西瓜种质材料果实挥发性物质的研究则鲜有报道<sup>[10-13]</sup>,实践中仍主要通过人工嗅觉来进行评价<sup>[15]</sup>,限制了对西瓜香气品质的科学认知。笔者在本研究中拟采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法对不同瓤色西瓜果肉挥发性物质进行分析,并结合主成分分析(principal component analysis, PCA)研究不同瓤色西瓜挥发性物质组成,为进一步解析不同瓤色西瓜的特征风味及品质调控机制提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

供试材料为黄瓤西瓜自交系 WM-26(YF)和红瓤西瓜自交系 WM-53(RF),由江苏省农业科学院蔬菜研究所提供。材料于2022年4月定植在江苏农林职业技术学院江苏园博园试验基地,采取相同的栽培管理措施,2022年5月下旬,在果实完全成熟期取不同植株上成熟度和大小均匀一致的瓜进行挥发性物质测定分析,每个瓤色取6个瓜为1组,设3次重复,所有样品液氮速冻后置于-80℃保存备用。

### 1.2 仪器与设备

安捷伦 7890A-5975CMS 气质联用仪(美国安捷伦公司),TG-16G 台式高速离心机(湖南凯达科学仪器有限公司),Hei-VAP Expert Control 旋转蒸发仪(上海那艾仪器有限公司),Agilent DB-225 色谱柱(30 m×0.25 mm,0.25  $\mu$ m,美国安捷伦公司),SY-1220 电热恒温水浴锅(南京联策科学仪器有限公司)。

### 1.3 方法

1.3.1 样品处理 称量西瓜果肉样品 1.000 0 g,将样品切碎后装入 40 mL 样品瓶,密封。60℃水浴中平衡 10 min,插入 100  $\mu$ m 聚二甲基硅氧烷萃取头在 60℃条件下顶空萃取 30 min,于 SPME-GC-MS 进样口 250℃解吸 5 min。

1.3.2 SPME- GC- MS 条件 安捷伦 7890A-5975CMS,色谱柱:Agilent DB-225(30 m×0.25 mm,0.25  $\mu$ m),汽化室温度 250℃,采取不分流模式,载气为氦气(纯度为 99.9%),载气流速为 1 mL·min<sup>-1</sup>;升温程序如下:初始温度 40℃,以 3℃·min<sup>-1</sup>速率升温至 160℃,再以 15℃·min<sup>-1</sup>的温度升至 230℃,保持 0.5 min;结束进程。质谱电离方式:电子轰击(Electron Impact Ionization, EI),全扫描模式,扫描范围为 50~500 m/z。

### 1.4 数据分析

利用 Thermo Xcalibur 2.2 软件进行数据采集和处理。获得的挥发性物质质谱与 NIST08 质谱库进行比对,筛选匹配度大于 80 的物质,采用峰面积归一化法计算各个组分在待测样品中的相对含量。使用 TBtools<sup>[16]</sup>软件进行挥发性物质热图绘制和层次聚类分析。采用 MetaboAnalyst 5.0 软件进行偏最小二乘判别分析(Partial Least Squares Discrimination Analysis, PLS-DA)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同瓢色西瓜果肉挥发性物质分析

由表1可以看出,在不同类型果肉颜色西瓜中检测出的挥发性物质不尽相同。两种不同瓢色西瓜中共检测出六大类共40种挥发性物质,包括醛

表1 不同瓢色类型西瓜中的挥发性风味成分

Table 1 Content and volatile components of watermelon fruits with different flesh color

类别	化合物名称	CAS 编号	保留时间/min	相对含量/%		香气特征	
				RF	YF		
醛类	2-反式己烯醛	6728-26-3	6.97	0.49±0.17	0.26±0.14	清香	
	顺式-2-癸烯醛	2497-25-8	8.57	0.06±0.00	ND		
	2-反式庚醛	18829-55-5	10.68	0.34±0.08	0.38±0.17	水果香、清香	
	2-顺式庚醛	57266-86-1	11.57	0.22±0.01	0.23±0.09		
	2-反式辛烯醛	2548-87-0	14.55	0.72±0.44	1.48±0.62	绿色坚果香、清香	
	4-反式壬烯醛	2277-16-9	15.93	3.17±0.84	1.69±0.77		
	顺-4-癸烯醛	21662-09-9	16.05	2.19±0.69	1.59±0.63		
	顺式-6-壬烯醛	2277-19-2	16.30	2.89±0.70	2.73±0.99		
	2,5-二羟基苯甲醛	1194-98-5	17.21	0.11±0.00	0.11±0.04		
	2-反式壬烯醛	18829-56-6	17.98	0.66±0.17	0.43±0.16	清凉、清香	
	反,顺-2,6-壬二烯醛	557-48-2	18.28	12.87±4.86	13.22±4.20	紫罗兰香、黄瓜味	
	癸醛	112-31-2	20.21	0.13±0.03	0.09±0.02		
	2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-甲醛	432-25-7	20.73	0.32±0.10	0.51±0.12	果香、花香	
	顺-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛	106-26-3	21.54	0.06±0.02	0.06±0.04	柠檬香	
	柠檬醛	5392-40-5	22.62	0.11±0.05	0.07±0.05	青草香	
	2-甲酰基-3-甲基- $\alpha$ -亚甲基-环戊醛	5951-57-5	23.75	0.02±0.01	0.01±0.00		
	十五醛	2765-11-9	36.76	0.01±0.01	0.01±0.00		
	合计				24.37±8.19	22.88±8.05	
	醇类	二甲基硅二醇	1066-42-8	5.13	5.30±0.99	5.14±1.04	
1-己醇		111-27-3	7.15	0.17±0.02	0.03±0.01	水果香	
1-辛烯-3-醇		3391-86-4	11.01	0.02±0.01	0.03±0.01	蘑菇味、泥土味	
6-甲基-5-庚烯-2-醇		1569-60-4	12.33	0.94±0.05	0.60±0.03		
3-癸炔-2-醇		69668-93-5	15.18	0.19±0.05	0.29±0.06		
2-壬炔-1-醇		5921-73-3	17.86	0.29±0.00	0.28±0.10		
3-顺式壬-1-醇		10340-23-5	18.54	31.56±7.39	42.11±6.60	清香、动物脂味	
反,顺-3,6壬二烯-1-醇		56805-23-3	18.65	31.70±4.15	22.61±5.23	黄瓜味	
反式-7-四癸烯醇		37011-95-3	21.29	0.08±0.01	ND		
2,5-五碳二烯-1-醇		139185-79-8	23.51	0.03±0.00	0.04±0.01		
1-十六烷醇		36653-82-4	26.68	0.04±0.02	0.02±0.00		
反式-2-十六烯-1-醇			29.86	0.05±0.01	0.08±0.04		
顺,顺-2-(9,12-十八碳二酰氧基)-乙醇		17367-08-7	32.29	0.02±0.00	0.01±0.01		
合计					70.41±12.71	71.24±13.15	
酮类		6-甲基-5-庚烯-2-酮	110-93-0	11.77	2.56±0.53	0.78±0.06	柠檬味、苹果味
	2,4'-二甲氧基-2'-羟基查尔酮		22.05	0.07±0.01	0.12±0.02		
	4,6'-二甲氧基-2'-羟基查尔酮		22.13	0.07±0.01	0.05±0.03		
	反式-6,10-二甲基-5,9-十一二烯-2-酮	3796-70-1	28.80	0.28±0.13	0.18±0.05	清香、果香、蜡香	
	4-(2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-基)-3-丁烯-2-酮	14901-07-6	29.94	0.11±0.06	0.15±0.09		
	合计				3.09±0.74	1.28±0.24	
烯烃类	顺-3-癸烯	19398-86-8	13.36	0.70±0.18	0.36±0.09		
	3,7-二甲基-1,6-辛二烯	2436-90-0	14.35	0.14±0.09	0.20±0.04		
	1-壬烯	124-11-8	19.04	0.95±0.35	2.50±0.25		
	合计				1.79±0.62	3.07±0.38	
呋喃类	2-戊基呋喃	3777-69-3	11.93	ND	1.42±0.54	果香、清香	
含氮化合物	甲氧基苯基胍		9.93	0.32±0.16	0.12±0.07	霉味、肉香	

注:ND表示该成分未检测到。RF表示红瓢西瓜样品;YF表示黄瓢西瓜样品。下同。

类 17 种、醇类 13 种、酮类 5 种、烯炔类 3 种、呋喃类 1 种和含氮化合物 1 种。其中,醛类物质种类最多,包括反,顺-2,6-壬二烯醛、顺式-6-壬烯醛、4-反式壬烯醛等;醇类物质次之,主要有 3-顺式壬-1-醇、反,顺-3,6 壬二烯-1-醇等。说明醛类和醇类是西瓜果肉的主要挥发性物质。

从相对含量看,不同类别挥发性物质在两组样品中含量存在差异,红色和黄色果肉中均检测出醇类物质含量最高,分别为 70.41%和 71.24%;其次为醛类,在红色和黄色果肉中含量分别为 24.37%和 22.88%。酮类总含量在红色果肉中高于黄色果肉,但有 3 种酮类含量在红色果肉中高于黄色果肉,有 2 种酮类含量在红色果肉中低于黄色果肉;烯炔类物质总含量在黄色果肉中高于红色果肉,2 种烯炔类物质含量在黄色果肉中高于红色果肉,但有 1 种烯炔类物质含量在黄色果肉中低于红色果肉。呋喃类物质只在黄色果肉中检出。进一步比较不同瓢色西瓜样品发现,红瓢西瓜中,反,顺-2,6-壬二烯醛、反,顺-3,6 壬二烯-1-醇、6-甲基-5-庚烯-2-酮、1-壬烯、甲氧基苯基脞等

在同类别物质中含量最高;黄瓢西瓜中,反,顺-2,6-壬二烯醛、3-顺式壬-1-醇、6-甲基-5-庚烯-2-酮、1-壬烯、2-戊基呋喃等在同类别物质中含量最高。

### 2.2 不同瓢色西瓜果肉挥发性物质的主成分堆积分析

不同瓢色西瓜中挥发性物质组成和占比存在一定差异。笔者在本研究中对 15 种相对含量大于 0.5%的主要挥发性物质进行分析。如图 1 所示,3-顺式壬-1-醇和反,顺-3,6 壬二烯-1-醇在两组样品中都占有较大比例。3-顺式壬-1-醇在红瓢西瓜中占总挥发性物质含量的 31.56%,在黄瓢西瓜中占总挥发性物质含量的 42.11%,该物质具有清香味,说明其是主导黄瓢西瓜果实风味的主要成分。反,顺-3,6 壬二烯-1-醇在红瓢和黄瓢西瓜中分别占总挥发性物质含量的 31.70%和 22.61%,说明该物质是主导红瓢西瓜果实风味的主要成分。在两组样品中含量较高的物质还有反,顺-2,6-壬二烯醛和二甲基硅二醇,这两种物质在不同瓢色西瓜果肉中的含量相当且都超过了 5.00%。其他酮类、烯炔类等

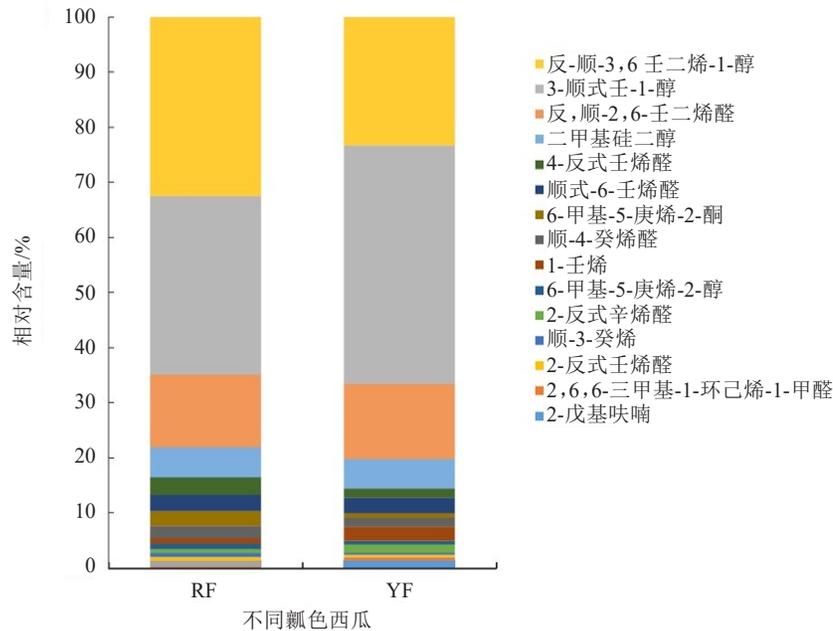


图 1 不同瓢色西瓜果实挥发性物质主成分堆积图

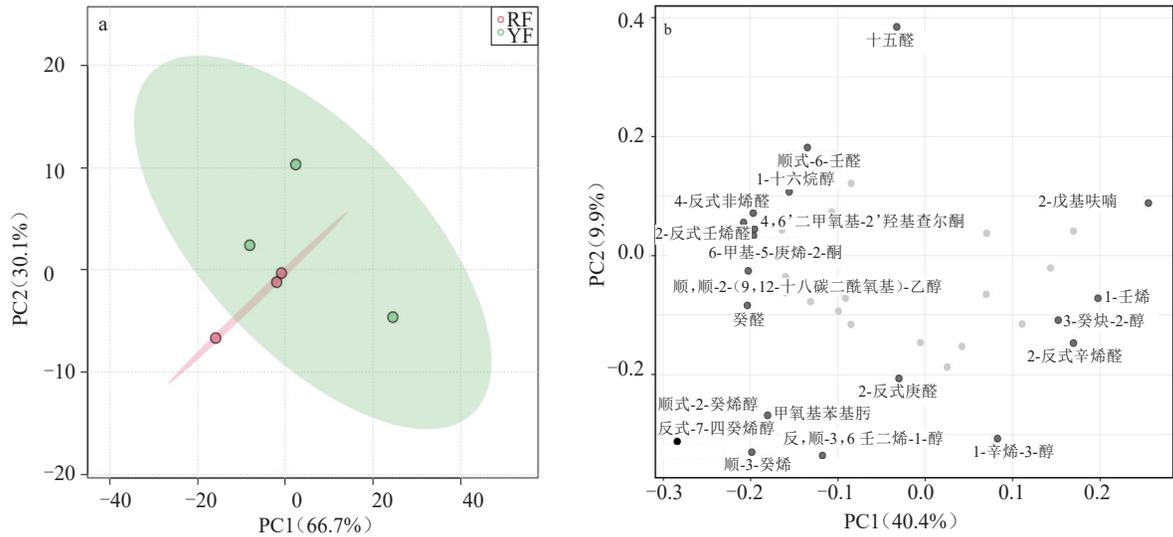
Fig. 1 Stacking diagram of principal volatile components from watermelon fruits with different color

物质也对西瓜果实风味具有贡献作用。

### 2.3 不同瓢色西瓜果肉挥发性物质 PCA 分析

不同瓢色西瓜样品挥发性物质主成分差异的 PCA 分析结果如图 2 所示,2 种瓢色西瓜主成分分析图中第 1 主成分(PC1)的区分贡献率为 66.7%,第 2 主成分(PC2)的区分贡献率为 30.1%,累计贡献率为 96.8%。RF 样品分布相对比较集中,表明挥

发性物质组成比较相似;YF 样品分布比较分散,说明其挥发性物质组成存在一定差异,可能与样品个体间差异有关。总体来看,2 种瓢色西瓜数据点有部分重叠,说明这两组样品的香气特征有一定的相似性(图 2-a)。由各主成分载荷二维图(图 2-b)可知,2-戊基呋喃(Furan, 2-pentyl-)、1-壬烯(1-Nonene)在第一主成分的载荷值较大;十五醛(Pentadec-



注:a为PLS-DA模型样品得分图,b为载荷图。

图2 不同瓤色西瓜果肉样本主成分分析图

Fig. 2 Score plot of principal component analysis of volatile components from watermelon fruits with different colors

anal-)、顺式-6-壬烯醛(6-Nonenal, (Z)-)在第二主成分的载荷值较大。

### 2.4 不同瓤色西瓜果肉挥发性物质的层次聚类分析

对2种不同瓤色西瓜中的挥发性物质进行了

层次聚类分析,不同瓤色西瓜果肉挥发性物质分布规律如图3所示,相对含量越高红色越深,反之则蓝色越深。红瓤和黄瓤西瓜中各类挥发性物质具有一定的相似性,含量略有差异。总体分析,不同瓤色西瓜中挥发性物质分为4个类别,I类(6-甲

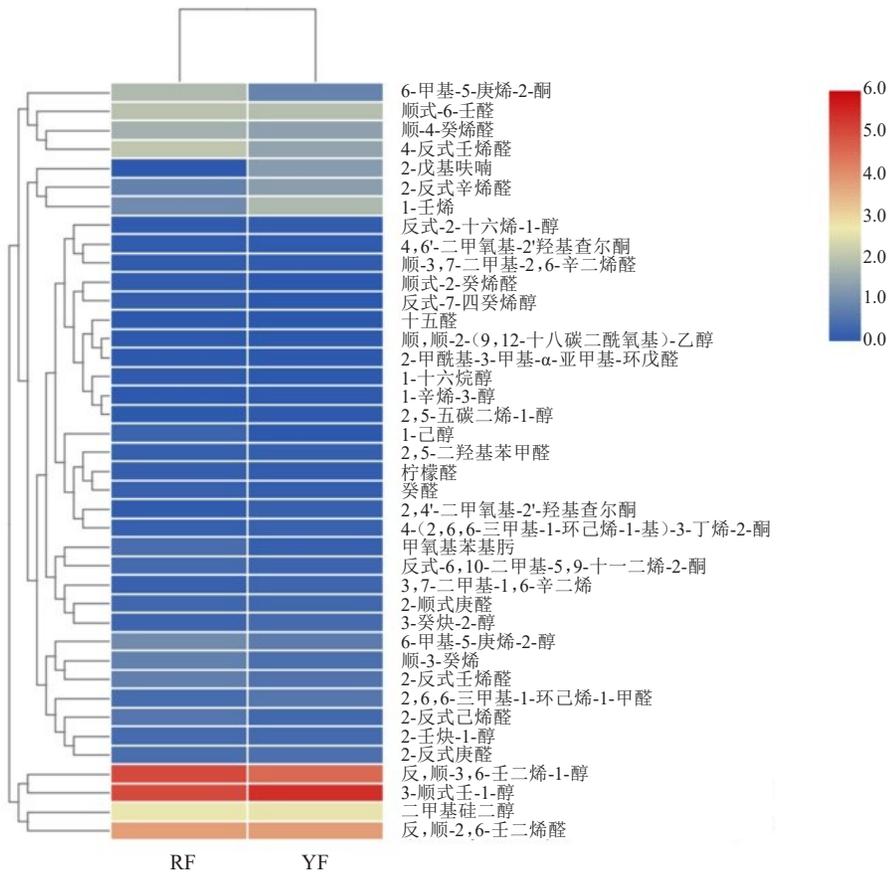


图3 不同瓤色西瓜果肉挥发性物质聚类热图

Fig. 3 Heat map cluster of volatile components in watermelon fruits with different flesh colors

基-5-庚烯-2-酮~4-反式壬烯醛)主要是醛类和酮类物质,4-反式壬烯醛为主要挥发性物质,在红瓢西瓜中的含量要高于黄瓢西瓜;II类(2-戊基呋喃~2-反式庚醛)主要是烯炔类和醛类物质,1-壬烯为主要挥发性物质,在黄瓢西瓜中的含量要高于红瓢西瓜;III类包含反,顺-3,6壬二烯-1-醇和3-顺式壬-1-醇两种物质,为西瓜清香味的主要贡献因子;IV类包括二甲基硅二醇和反,顺-2,6-壬二烯醛,后者具有强烈的紫罗兰和黄瓜味香气,这也为西瓜赋予了清香味。

### 3 讨论与结论

研究表明,不同类型、不同成熟期西瓜挥发性物质组成不同。何聪聪等<sup>[8]</sup>和 Du 等<sup>[17]</sup>分别从无籽西瓜中鉴定出 46 种和 59 种挥发性香气物质,其中醛类、醇类和酮类物质对无籽西瓜风味贡献最大。Yang 等<sup>[18]</sup>对西瓜果汁中的关键香气物质进行鉴定,发现西瓜汁的关键香气物质以醛类为主;热浓缩降低了西瓜汁的香气含量<sup>[9]</sup>,乳酸发酵后西瓜汁中醇类、酮类和单萜类物质含量增加,而醛类和烷类含量降低<sup>[9]</sup>。黄沁怡等<sup>[20]</sup>从未成熟西瓜中分离出 40 种挥发性物质,其中含氮杂环化合物和醚类含量较高;从成熟西瓜中分离出 36 种物质,其中酯类、烷炔类和醇类的相对含量都较高。肖守华等<sup>[10]</sup>从不同瓢色西瓜果实中共得到 59 种风味物质,其中醛类和醇类在 3 种不同瓢色西瓜果实中含量最高。Gong 等<sup>[21]</sup>研究发现,(5E)-6,10-dimethylundeca-5,9-dien-2-one(香叶基丙酮)和 1-(4-methylphenyl)ethanone(对甲基苯乙酮)与西瓜果肉颜色的形成有关。笔者在不同瓢色西瓜中共鉴定出 40 种挥发性物质,种类与 Du 等<sup>[17]</sup>、Maletti 等<sup>[22]</sup>和肖守华等<sup>[10]</sup>的研究结果是一致的,醛类和醇类物质含量最高,为主要成分。与前人研究不同的是,肖守华等<sup>[10]</sup>的研究结果表明醛类物质在 3 种不同瓢色西瓜果实中含量最高,占 35.60%,而本研究结果表明对西瓜果肉清香起重要作用的是醇类物质,在黄肉西瓜中占 71.24%,尤其是反,顺-3,6壬二烯-1-醇和 3-顺式壬-1-醇。相反的是,本研究中 3 种酮类物质在红瓢西瓜中的含量高于黄瓢西瓜,而且在黄瓢西瓜中特异性的检测出了呋喃类物质,这些挥发性物质组成和含量的差异可能与不同西瓜品种、采收期或地域的差异有关。

醛类物质是挥发性物质中含量比较丰富的一类,为果实提供青草香、花香、果香及脂肪香

味<sup>[23-26]</sup>。醛类物质因其阈值低,易与萜烯类<sup>[27-31]</sup>、酮类<sup>[32-33]</sup>、酯类<sup>[34-36]</sup>等其他挥发性物质协同作用进而决定果实的香气特征。如金合欢烯、正十一醛和紫苏醛等是芦柑特征香气的主要成分;桉烯、月桂醛等是脐橙的特征香气成分<sup>[4]</sup>。己醛、癸醛、4-甲氧基苯甲醛是枇杷花的关键香气成分<sup>[37]</sup>。本研究中醛类也是检测到的种类最多的挥发性物质,占检测出的总挥发性物质的 42.5%。本研究中醛类物质主要成分是反,顺-2,6-壬二烯醛,该物质在已有报道中是西瓜清香味的关键香气成分<sup>[8,16,38]</sup>,因而推测其是本研究中西瓜果肉清香味的主要成分。

醇类是本研究中检测到的含量最高的挥发性物质,其中,反,顺-3,6壬二烯-1-醇、3-顺式壬-1-醇是主要成分。在前人的研究中,反,顺-3,6壬二烯-1-醇赋予果实黄瓜味;3-顺式壬-1-醇赋予果实清香味和花香味,是西瓜<sup>[8,20]</sup>、甜瓜<sup>[38-39]</sup>、牡丹<sup>[40]</sup>等果实特征香气的主要物质。研究表明,果实风味是由多种挥发性物质共同作用决定的,而且每种挥发性物质对果实香气的贡献也与其风味阈值相关<sup>[40]</sup>。相比醛类物质,醇类物质一般阈值较高,因而对风味的贡献相对较小。本研究中虽然醇类物质含量最高,但其是否为决定西瓜果肉风味特征的关键成分还需进一步结合气味阈值进行验证。

笔者在本研究中采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法对不同瓢色西瓜果肉挥发性物质进行检测,发现不同瓢色西瓜的挥发性物质种类和含量存在一定差异。本研究中 2 个不同瓢色西瓜样品中挥发性物质主要以醇类和醛类为主,反,顺-3,6壬二烯-1-醇、3-顺式壬-1-醇、反,顺-2,6-壬二烯醛、二甲基硅二醇、4-反式壬烯醛、顺式-6-壬烯醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮、顺-4-癸烯醛是形成红瓢西瓜果肉香气特征的重要成分。3-顺式壬-1-醇、反,顺-3,6壬二烯-1-醇、反,顺-2,6-壬二烯醛、二甲基硅二醇、顺式-6-壬烯醛、1-壬烯是形成黄瓢西瓜果肉香气特征的重要成分。试验结果为进一步解析不同瓢色西瓜的特征风味及品质形成与调控机制提供了科学依据。

#### 参考文献

- [1] MA Q, XU Y Q, XIAO H, et al. Rethinking of botanical volatile organic compounds applied in food preservation: Challenges in acquisition, application, microbial inhibition and stimulation[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 125: 166-184.
- [2] ZHANG H P, XIE Y X, LIU C H, et al. Comprehensive comparative analysis of volatile compounds in citrus fruits of different species[J]. Food Chemistry, 2017, 230: 316-326.
- [3] 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.

- [4] 张涵,鲁周民,王锦涛,等.4种主要柑橘类香气成分比较[J].食品科学,2017,38(4):192-196.
- [5] 何佳,罗镭,陈浩,等.基于顶空-气相色谱-离子迁移谱法的酸橙枳实与甜橙枳实挥发性化学成分表征及鉴别研究[J].食品安全质量检测学报,2022,13(22):7227-7235.
- [6] 王鑫源,齐继风,赵巍,等.食醋挥发性物质研究进展[J].食品科技,2022(9):224-230.
- [7] ZHU R Y, WEN Y X, WU W H, et al. The flavors of edible mushrooms: A comprehensive review of volatile organic compounds and their analytical methods[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 56:1-15.
- [8] 何聪聪,刘梦雅,刘建彬,等.SPME和SAFE结合GC-O-MS分析鲜榨西瓜汁挥发性香气成分[J].食品工业科技,2014,35(2):49-53.
- [9] MANDHA J, SHUMOY H, DEVAERE J, et al. Effect of lactic acid fermentation of watermelon juice on its sensory acceptability and volatile compounds[J]. Food Chemistry, 2021, 358: 129809.
- [10] 肖守华,焦自高,马德源,等.不同瓤色西瓜成熟果实香气成分的GC-MS分析[C]//中国园艺学会2012年学术年会论文集,2012.
- [11] YUAN P L, UMER M J, HE N, et al. Transcriptome regulation of carotenoids in five flesh-colored watermelons (*Citrullus lanatus*) [J]. BMC Plant Biology, 2021, 21(1):203.
- [12] GONG C S, ZHU H J, LU X Q, et al. An integrated transcriptome and metabolome approach reveals the accumulation of taste-related metabolites and gene regulatory networks during watermelon fruit development[J]. Planta, 2021, 254(2):35.
- [13] GONG C S, DIAO W N, ZHU H J, et al. Metabolome and transcriptome integration reveals insights into flavor formation of 'Crimson' watermelon flesh during fruit development[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 629361.
- [14] SHI F F, WANG L, LI S R. Enhancement in the physicochemical properties, antioxidant activity, volatile compounds, and non-volatile compounds of watermelon juices through *Lactobacillus plantarum* JHT78 fermentation[J]. Food Chemistry, 2023, 420:136-146.
- [15] PENDYALA B, PATRAS A, RAVI R, et al. Evaluation of UV-C irradiation treatments on microbial safety, ascorbic acid, and volatile aromatics content of watermelon beverage[J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 13: 101-111.
- [16] CHEN C J, CHEN H, ZHANG Y, et al. TBtools, an integrative toolkit developed for integrative analyses of big biological data[J]. Molecular Plant, 2020, 13(8):1194-1202.
- [17] DU X F, DAVILA M, RAMIREZ J, et al. Free amino acids and volatile aroma compounds in watermelon rind, flesh, and three rind-flesh juices[J]. Molecules, 2022, 27(8):2536.
- [18] YANG F, CHEN E B, DAI Y X, et al. Elucidation of the interaction between fructose and key aroma compounds in watermelon juice via Raman spectroscopy and nuclear magnetic resonance[J]. Food Research International, 2022, 159:111613.
- [19] MILCZAREK R R, SEDEJ I. Aroma profiling of forward-osmosis watermelon juice concentrate and comparison to fresh fruit and thermal concentrate[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 151:112147.
- [20] 黄沁怡,秦琰琪,周锋瑜.不同成熟期西瓜挥发性物质成分的GC-MS分析[J].上海蔬菜,2019(2):68-70,76.
- [21] GONG C S, HE N, ZHU H J, et al. Multi-omics integration to explore the molecular insight into the volatile organic compounds in watermelon[J]. Food Research International, 2023, 166:112603.
- [22] MALETTI L, D'EUSANIO V, DURANTE C, et al. VOCs analysis of three different cultivars of watermelon (*Citrullus lanatus* L.) whole dietary fiber[J]. Molecules, 2022, 27(24):8747.
- [23] 刘芹,崔筱,宋志波,等.不同成熟度平菇新鲜子实体中风味物质的比较分析[J].中国瓜菜,2022,35(9):38-47.
- [24] LIU Q, BAU T, JIN R X, et al. Comparison of different drying techniques for shiitake mushroom (*Lentinus edodes*): Changes in volatile compounds, taste properties, and texture quality[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 164:113651.
- [25] 王鑫源,齐继风,赵巍,等.食醋挥发性物质研究进展[J].食品科技,2022(9):224-230.
- [26] GRANVOGL M, BEKSAN E, SCHIEBERLE P. New insights into the formation of aroma-active Strecker aldehydes from 3-oxazolines as transient intermediates[J]. Journal of Agricultural Food Chemistry, 2012, 60(25):6312-6322.
- [27] PAN T F, KONG L C, ZHANG X X, et al. Fruit quality and volatile constituents of a new very early-ripening pummelo (*Citrus maxima*) cultivar 'Liuyueza' [J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 13: 1089009.
- [28] COZZOLINO R, CAMARA J S, MALORNI L, et al. Comparative volatilomic profile of three finger lime (*Citrus australasica*) cultivars based on chemometrics analysis of HS-SPME/GC-MS data[J]. Molecules, 2022, 27(22):7846.
- [29] 冯桂蓉,谢姣,邓丽莉,等.柑橘果实萜烯类挥发性物质研究进展[J].食品与机械,2017,33(10):200-204.
- [30] XIE J, DENG L L, ZHOU Y H, et al. Analysis of changes in volatile constituents and expression of genes involved in terpenoid metabolism in oleocellosis peel[J]. Food Chemistry, 2017, 243: 269-276.
- [31] 纪佳璐,鞠兴荣,吴莹,等.菜籽油挥发性成分中特征风味物质研究进展[J].粮食科技与经济,2020,45(2):119-123.
- [32] ZHANG X L, ZHANG X R, YAN Y H, et al. Relationship between flavor compounds and changes of microbial community in the solid fermented vinegar[J]. Bioscience Biotechnology Biochemistry, 2022, 86(11):1581-1589.
- [33] LIU Q, BAU T, JIN R X, et al. Comparison of different drying techniques for shiitake mushroom (*Lentinus edodes*): Changes in volatile compounds, taste properties, and texture qualities[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 164:113651.
- [34] CHEN H W, CHENG J T, HUANG Y, et al. Comparative analysis of sugar, acid, and volatile compounds in CPPU-treated and honeybee-pollinated melon fruits during different developmental stages[J]. Food Chemistry, 2023, 401:134072.
- [35] 李旺雄,唐中祺,程鸿,等.不同甜瓜品种贮藏期间品质变化和风味物质分析[J].中国瓜菜,2021,34(9):50-55.
- [36] 田军,吕海鹏,马婉君,等.基于SBSE-GC-MS的紫芽茶挥发性成分分析[J].中国茶叶,2021,43(6):46-53.
- [37] 黄佳瑜,薛岩伟,王菲,等.'白玉'枇杷花不同花期挥发性物质分析[J].食品安全质量检测学报,2022,13(22):7287-7296.
- [38] LECHOLOCHOLO N, SHOKO T, MANHIVI V E, et al. Influence of different rootstocks on quality and volatile constituents of cantaloupe and honeydew melons (*Cucumis melo* L.) grown in high tunnels[J]. Food Chemistry, 2022, 393:133388.
- [39] ZHANG J, SUN Y X, GUAN X Q, et al. Characterization of key aroma compounds in melon spirits using the sensomics concept[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 161:113341.
- [40] LEI G M, SONG C Y, LUO Y Q. Chemical composition of hydrosol volatiles of flowers from ten *Paeonia x suffruticosa* Andr. cultivars from Luoyang, China[J]. Natural Product Research, 2020, 35(20):3509-3513.