

代表性葫芦科果蔬的挥发性风味成分研究进展

张曼玉, 朱妞妞, 邱 果, 田红玉, 刘永国

(北京市食品风味化学重点实验室·北京工商大学 北京 100048)

摘要: 葫芦科植物, 又称瓜类植物, 包括西瓜、甜瓜、南瓜等水果和蔬菜两部分, 在人类的饮食文化中占有重要地位。葫芦科作为一种重要的食用植物科, 具有分布广泛、种类繁多、风味清香、营养价值高、抗癌抗病毒等优点, 受到国内外消费者的喜爱。葫芦科果蔬与人类饮食密切相关, 研究其风味成分对进一步认识风味化合物的形成机制及变化途径有重要意义。系统综述了代表性葫芦科果蔬的挥发性风味成分在国内外的研究进展, 归纳总结了特征香气及研究方法, 对今后的研究方向进行了展望, 为该领域的深入研究提供思路及参考。

关键词: 葫芦科; 挥发性风味; 风味化合物; 香气; 香气成分

中图分类号: S642+S651+S652

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2023)04-001-011

Research progress on volatile flavor components of representative cucurbitaceae plants

ZHANG Manyu, ZHU Niuniu, QIU Guo, TIAN Hongyu, LIU Yongguo

(Beijing Key Laboratory of Flavor Chemistry/Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: Cucurbitaceae plants, also known as cucurbit plants, including watermelon, melon, pumpkin and other fruits and vegetables, play an important role in human food culture. Cucurbitaceae, as an important edible plant family, has the advantages of wide distribution, wide variety, fresh flavor, high nutritional value, anti-cancer and anti-virus, which is constantly loved by consumers. The study of volatile flavor substances in food is of great significance to understand the chemical composition, formation mechanism and control method of food. Since fruits and vegetables are closely related to human diet, different people have different perception of volatile odor, so it is necessary to explore the flavor components. Herein, the research progress of volatile flavor components of representative cucurbitaceae fruits and vegetables was systematically reviewed, the characteristic aroma and research methods were summarized, and the future research directions were prospected.

Key words: Cucurbitaceae; Volatile flavor; Flavor compounds; Aroma; Aroma components

食品中不到 3% 的挥发性物质产生特定气味, 构成了食品化学气味空间, 每种特征气味由其中 3~36 种化合物以不同比例构成^[1]。研究食品中的挥发性风味成分, 除了满足人体需求外, 还有助于了解食品的化学成分^[2-3]、形成机制^[4]及控制方法^[5], 并且与食品香料的研发密切相关^[6-7]。食品中挥发性风味物质的研究, 主要包括挥发性成分的提取、定性和定量、关键成分确定等方面, 其中挥发性成分的提取是风味研究的基础^[8]。

食品中风味物质的分析方法多样, 国内外已建

立了广泛的挥发性风味分析平台。如溶剂萃取法 (solvent extraction)^[9-10]、蒸馏法 (distillation)^[11-12]、顶空-固相微萃取 (head space-solid phase microextraction, HS-SPME)^[13]、气相色谱-质谱联用仪 (gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)^[14-15] 等。但存在于食品中的香气成分复杂, 一些含量极少且不稳定^[16], 因此挥发性研究存在一定难度。目前认为准确性较高的分析方法有溶剂辅助风味蒸发 (solvent assisted flavor evaporation, SAFE)^[17]、香气提取物稀释分析 (aroma extract dilution analysis, AE-

收稿日期: 2022-09-17; 修回日期: 2022-11-14

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (32130083); 北京市教育委员会科学研究计划项目 (KM202210011010); 北京工商大学青年教师科研启动基金项目 (QNJJ2021-10)

作者简介: 张曼玉, 女, 在读硕士研究生, 研究方向为食品风味化学。E-mail: zhangmanyu0613@163.com

通信作者: 邱 果, 女, 讲师, 研究方向为食品风味化学、香料绿色合成。E-mail: qiuguo@btbu.edu.cn

DA)^[18]和稳定同位素稀释分析(stable isotope dilution analysis, SIDA)^[19-20]。HS-SPME 无溶剂延迟,集采样、萃取、浓缩于一体,提高了分析检测的速度,SAFE 耗时短、高真空、超低压、可保证挥发物的稳定性,高沸点的化合物也可以实现高回收率。气质联用-嗅闻技术(gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry, GC-O-MS)实现了检测与嗅闻同时进行,通过嗅闻得到了关键香气化合物。而稳定同位素稀释分析(stable isotope dilution analysis, SIDA)更是提高了化合物定量的精确度。目前食品中关键香气成分的研究不断涌现,因此可以根据具体需求,综合选择或联用技术来达到更为理想的分析结果^[21]。

葫芦科植物种类繁多,其中具有代表性的包括西瓜、甜瓜、黄瓜、南瓜、冬瓜、苦瓜等9个属^[22],在我国果蔬生产中占有重要地位。葫芦科植物营养丰富,蛋白质、脂肪、碳水化合物、微量元素含量充足,新鲜瓜菜中富含水分和矿物质^[23],具有良好的营养价值。部分还具有降血压、清热解毒、保护血管等疗效^[24]。目前葫芦科果蔬的营养成分和食用价值的研究居多,如南瓜籽油中的营养成分^[25]、冬瓜皮成分及抗氧化活性分析^[26]等。在以产量和品质为主的科研大方向上,关于葫芦科果蔬挥发性风味成分的研究更能体现出良好的研究前景,尤其是近年来,随着食品风味分析的不断发 展,对葫芦科植物的挥发性成分研究也取得了较大进展。目前在挥发性风味研究中,葫芦科蔬菜的研究较少,水果的研究较多。在研究方法上主要采用固相微萃取(SPME)、气相色谱-质谱联用(GC-MS)及电子鼻(gas chromatography-olfactometry, GC-O)^[27],SAFE、SIDA 及香气提取物稀释分析(aroma extract dilution analysis, AEDA)^[28]等方法应用较少。部分研究未得到关键香气化合物以及通过重组实验和缺失实验验证的关键香气成分。因此,葫芦科的挥发性香气研究在科学性、严谨性和可靠性上存在很大的提升空间。因此,笔者归纳了代表性葫芦科植物的挥发性风味的研究进展,为葫芦科果蔬的进一步研究提供思路。

1 代表性葫芦科水果的挥发性风味

1.1 西瓜的挥发性风味

目前西瓜的挥发性风味研究比较成熟,研究方法以 SPME 和 GC-MS 为主,部分应用 SAFE 和 AEDA 技术^[29-40]。在西瓜的香气研究中,Pino 等^[29]得到主要挥发性物质为乙酸乙酯、乙醛、十四酸和乙

酸甲酯。Tang 等^[30]鉴定了鲜切西瓜汁中的36种主要挥发物醇和醛,约占总挥发物的48.27%。鲜切西瓜的香气形成是一个动态的酶促过程,切割会形成特征香气成分,高压处理对西瓜香气尤其是己醛、(Z)-2-烯醛、(E)-2-壬烯醇等有影响。Beaulieu 等^[31]在5种无籽西瓜中得到的主要香气成分是3-壬烯-1-醇、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、2-壬烯醛和6-壬烯醛,大部分是C6和C9醇和醛。Dima 等^[32]在迷你西瓜中定量了68种挥发性物质。Fredes 等^[33]采用动态顶空吹扫捕集,发现主要香气成分是(Z)-3-壬烯-1-醇、*b*-紫罗兰酮、(E)-2-庚烯醛和(E,Z)-2,6-壬二烯-1-醇。肖守华等^[34]在不同品种西瓜中得到香气成分是壬醛、反-2-壬烯醛、反,顺-2,6-壬二烯醛等。

西瓜成熟度不同,香气成分也有差异。黄沁怡等^[35]在成熟期西瓜得到主要挥发性物质为雪松烯、十六烷酸、顺丁烯二酸二丁酯和2,6-二叔丁基对甲基苯酚等。Liu 等^[36]首次鉴定(Z)-6-壬醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、(E)-2-壬醛等6种物质。Liu 等^[37]通过气味活性值(OAV)和AEDA确定了(Z,Z)-3,6-壬二烯醛、(Z)-6-壬烯-1-醇、(E)-2-己烯醛、(E)-2-壬烯醛等为关键香气化合物。何聪聪等^[38]得到己醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮、反-6-壬烯醛、反-2-壬烯醛等为主要风味物质。之后采用SAFE首次检测到醚类,采用OAV和AEDA鉴定出顺,顺-3,6-壬二烯醛、顺-3-壬烯-1-醇等11种物质^[39]。

西瓜中的挥发性香气成分主要是由醛类、烯醛类、醇类、酯类、酸类等共同组合而成的混合物,由于西瓜品种的不同,在香气成分上也有差异。其中己醛、壬醛、反-2-壬烯醛、反-6-壬烯醛、顺-3-壬烯-1-醇等在多数研究中存在,为西瓜香气的共有成分。

西瓜经过热处理会产生强烈的“煮熟味”,杨帆等^[27]利用气味稀释因子(FD)确定西瓜的挥发性物质为壬醛、反-2-壬烯醛、反,顺-2,6-壬二烯醛等,热处理西瓜的关键化合物为反-2-庚烯醛、1-癸醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮等。Yang 等^[40]得到(E)-2-庚醛、癸醛、辛醇、二异丙基二硫等7种异味化合物。香气重组和省略实验证明了辛醇、二异丙基二硫和(E)-2-癸醛为有效的异味化合物(表1)。

1.2 甜瓜的挥发性风味

甜瓜的风味研究以采用SPME-GC-MS为主,部分应用GC-O和AEDA技术。甜瓜品种不同,香气成分不同。最早Kemp等^[41]得出壬二烯醇、壬醇、己酸辛酯等与甜瓜香气有关。Kemp等^[42]在麝香瓜中鉴定出丙酸正己酯、己酸己酯等物质。Schieberle

表1 不同品种西瓜的主要挥发性成分

品种	种类	研究方法	挥发性香气物质	参考文献
加州西瓜	36	水蒸气蒸馏-溶剂萃取、GC-MS	乙酸乙酯、乙醛、十四酸和乙酸甲酯等	Pino, et al[29]
京灵无籽西瓜	68	SPME-GC-MS	顺-3-己烯醛、顺-3-烯醛、顺-6-壬醛、反-2-壬醛、反,顺-2,6-壬二烯醛等	Tang, et al[30]
5种无籽西瓜	59	SPME-GC-MS	3-壬烯-1-醇、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、2-壬烯醛、6-壬烯醛等	Beaulieu, et al[31]
迷你西瓜	68	HS-SPME-GC-MS	(Z)-3-壬烯-1-醇、(E)-2-壬烯醛和(Z,Z)-3,6-壬二烯-1-醇等	Dima, et al[32]
8种小型西瓜	61	DHS-P&T、GC-MS	己醛、壬醛、(E)-2-壬烯醛等	Fredes, et al[33]
江苏产西瓜 (品种未知)	36	SPME-GC-MS	雪松烯、十六烷酸、顺丁烯二酸二丁酯、2,6-二叔丁基对甲基苯酚等	黄沁怡,等[35]
5种西瓜(无籽西瓜、 京欣西瓜、莲发西 瓜、麒麟西瓜、特小 凤西瓜)	55	SPME-GC-MS-O	(E,Z)-2,6-壬二烯醛、(E)-2-壬醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛等	Liu, et al[36]
京欣西瓜	47	SPME-GC-MS/O-SAFE	(Z,Z)-3,6-壬二烯醛、(Z)-6-壬烯-1-醇、(E)-2-己烯醛等	Liu, et al[37]
京欣西瓜	46	SAFE-GC-O-MS	己醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮、壬醛、反-2-壬烯醛、反-6-壬烯醛等	何聪聪,等[38]
	49	SAFE-AEDA-OAV	顺,顺-3,6-壬二烯醛、顺-3-壬烯-1-醇、反,顺-3,6-壬烯-1-醇等	何聪聪,等[39]
麒麟西瓜	17	SAFE、GC-O-MS	(E)-2-癸醛、癸醛、2-己烯醛、2-戊基呋喃等	Yang, et al[40]

等^[43]得出 2-甲基丁酸甲酯、(Z)-3-己烯醛、(E)-2-己烯醛等为以色列甜瓜的香气物质。Buttery 等^[44]研究了美国甜瓜,得到 Z-6-乙酸壬烯酯、(Z,Z)-3,6-乙酸壬二烯酯、(Z)-3-乙酸壬烯酯等。Fallik 等^[45]在以色列加利亚甜瓜中检测到 12 种物质,乙酸丁酯、2-甲基乙酸丁酯、乙酸己酯含量最丰富。Hayata 等^[28]采用 Porapak Q 柱法结合 AEDA 在日本甜瓜中发现丁酸乙酯、乙酸乙酯、(E,Z)-2,6-壬二烯醛等气味稀释值最高。Verzera 等^[46]在网纹甜瓜和伊诺多勒斯甜瓜中鉴定出 66 种化合物,(Z)-6 壬烯醇、(E)-2-壬烯醇等含量最多。Guler 等^[47]在土耳其甜瓜中鉴定出 33 种挥发性化合物,含量最高的是乙酸乙酯、乙醛和乙

醇。赵光伟等^[48]在网纹 3 号甜瓜中鉴定出乙酸苯甲酯、乙酸-2-甲基-1-丁酯、2-苯基乙酸乙酯、乙酸己酯等 62 种物质对风味有重要影响。Shi 等^[49]在 39 个甜瓜品种中得到乙酸乙酯、(Z)-6 壬烯醇和 3,6-(E,Z)-壬二烯-1-醇最丰富。甜瓜中的香气物质以酯类为主,乙酸丁酯、乙酸己酯、乙酸苯甲酯等物质在各种甜瓜中大量存在,为共有成分。

刘勇等^[50]在 5 种薄皮甜瓜中得到乙酸乙酯、乙酸己酯和乙酸苯甲酯等物质。赵光伟等^[51]在研究 C51、C52、白玉满堂 3 种薄皮甜瓜中得到香气成分以酯类为主,乙酸丁酯、乙酸-2-甲基-1-丁醇酯、乙酸己酯、(Z)-乙酸-3-己烯-1-醇酯等为共有成分(表 2)。

表2 3种薄皮甜瓜中的挥发性成分

品种	种类	特有香气成分
C51	92	己酸乙酯、乙酸苯甲酯、氯乙酸-2-苯乙酯、丙酸-2-甲基 3-苯乙酯等
C52	58	乙酸丁酯、丙酸-2-甲基丙酯、乙酸-2-甲基-1-丁醇酯、乙酸己酯、乙酸苯甲酯、乙酸-2-苯基乙酯、2,4-壬二烯-1-醇等
白玉满堂	54	甲基硫代醋酸乙酯、2-甲基硫代乙酸甲酯、3-甲硫基丙酸乙酯、甲基硫丙杂环等

蒋玉梅等^[52]采用果腔顶空、GC-MS 在银帝中得到乙酸乙酯、丙酸-2-丁烯酯、羟氨基甲酸乙酯等成分。肖守华等^[53]在鲁厚甜 2 号中得到 79 种组分,有乙酸苯甲酯、n-软脂酸、2-苯基乙酸乙酯等。李国生等^[54]在 3 种厚皮甜瓜中鉴定出 136 种挥发性物质,A69 号香气种类和数量最为丰富(表 3)。

甜瓜成熟度不同,香气不同。Jordan 等^[55]在成熟甜瓜和果浆中鉴定出 53、38 种成分,包括 2-甲基-3-丁烯-2-醇、2,3-丁二醇、3-苯基丙酸甲酯等。唐贵敏等^[56]在 3 种甜瓜成熟果实中分离出 156 种挥发性物质,未成熟时挥发性物质以醛类为主,近成

表3 3种厚皮甜瓜中的挥发性成分

品种	种类	特有香气成分
A69	97	(Z)-乙酸-3-己烯-1-醇、甲酸辛酯、己酸乙酯等
鲁厚甜 1 号	40	苯甲酸乙酯、2-苯基乙酸乙酯、乙酸己酯、2-甲基-乙酸-1-丁醇等
A74×75	71	乙酸苯甲酯、乙酸乙酯、2-甲基-3-丙酸苯丙酯等

熟时酯类含量不断升高,成熟期以酯类为主(表 4)。刘圆等^[57]研究了 4 种不同成熟期的甜瓜,发现香气物质、特征性酯类及含量均不同,构成了不同品种甜瓜的特有香气(表 5)。

贮藏过程中甜瓜的香气成分会发生变化。陈

表4 3种甜瓜不同成熟期的挥发性成分^[56]

品种	成熟度	种类	挥发性物质
山农黄金1号	20 d	58	己醛、(Z)-6-壬烯醛、(Z)-2-庚烯醛、(E)-2-辛烯醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛等
	25 d	57	2-己烯醛、己醛、(Z)-6-壬烯醛、壬醛、(Z)-2-庚烯醛等
	30 d	58	乙酸苯甲酯、乙酸甲酯、2,4-二乙酸戊二酯、乙酸-3-甲基-1-丁酯等
Sweet Delight	30 d	52	(E,Z)-2,6-壬二烯醛、(E,E)-2,6-壬二烯-1-醇、(6Z)-壬烯-1-醇等
	45 d	57	己醛、(6Z)-壬烯-1-醇、(Z)-6-壬烯醛、壬醇等
	55 d	61	己醛、乙酸苯甲酯、1-戊醇、(E)-6-壬烯醛、(6E)壬烯-1-醇等
Takami	30 d	56	己醛、1-丁醇、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、(E)-2-壬烯醛等
	45 d	61	己醛、乙酸苯甲酯、乙酸-3-甲基-1-丁酯等
	55 d	62	乙酸苯甲酯、己醛、乙酸-2-苯乙酯、乙酸-2-甲基丙酯等

表5 4种甜瓜不同成熟度的挥发性成分^[57]

品种	成熟度	种类	挥发性物质
玉美人	25 d(未成熟期)	11	1-壬醇、壬醛、癸醛、(Z)-6-壬烯醛等
	30 d(近成熟期)	18	乙酸苯甲酯、2-乙基丁酸、乙酸己酯等
	35 d(成熟期)	16	乙酸-2-甲基丁酯、乙酸苯甲酯、乙酸-2-甲基丁酯、乙酸己酯等
龙甜雪冠	25 d(未成熟期)	12	(E)-2-壬烯醛、1-辛烯-3-醇、2E-6Z 壬二烯醇、壬醛等
	30 d(近成熟期)	15	乙酸苯甲酯、乙酸-2-甲基丁酯、烯丙基硫醚等
	35 d(成熟期)	13	乙酸苯甲酯、乙酸-2-甲基丁酯、2,3-丁二醇双乙酸酯等
Elizabeth	25 d(未成熟期)	10	(Z)-6-壬烯醛、顺-6-壬烯醇、乙酸苯甲酯等
	30 d(近成熟期)	11	乙酸苯甲酯、(Z)-6-壬烯醛、十四酸异丙酯等
	35 d(成熟期)	10	乙酸苯甲酯、乙酸-2-甲基丁酯、乙酸己酯、乙酸异丁酯等
创新1号	25 d(未成熟期)	7	(Z)-6-壬烯醛、无酯类
	30 d(未成熟期)	5	辛醛、癸醛、Z-6 壬烯醛、香叶基丙酮、1-壬醇
	35 d(近成熟期)	12	乙酸-2-甲基丁酯、(Z)-6-壬烯醛、2-甲基丁酸乙酯等
	40 d(成熟期)	13	乙酸-2-甲基丁酯、2-甲基丁酸乙酯、乙酸异丁酯等

存坤等^[58]发现在利用臭氧间隙处理和CA贮藏的新疆金凤凰甜瓜中共有酯类有14种,贮藏52d时挥发性物质的组成和相对含量差异显著,且CA贮藏更能有效地保持厚皮甜瓜中的香气成分。郝璐瑜等^[59]在薄皮哈甜2号中检测到酯类是香气的重要组成部分,乙酸乙酯、2,3-丁二醇二乙酸酯含量变化明显。张娜等^[60]在玉金香甜瓜中得到香气成分71种,随贮藏时间的延长,酯类含量增加,成为主体香气成分。张容鹄等^[61]在西州密25号中发现酯类和醇类含量总体升高,醛类和酮类含量总体降低。李旺雄等^[62]在3种甜瓜中得出香气以酯类和醇类为主,乙酸乙酯含量最多。

哈密瓜为葫芦科甜瓜属植物,属于甜瓜的一个变种。目前哈密瓜的香气研究以SPME-GC-MS居多,也有OAV、FD-GC-O技术,部分应用香气重组和缺失实验技术。哈密瓜品种不同,香气不同。Yabumoto等^[63]在网纹甜瓜中鉴定出乙酸甲酯、乙酸乙酯、乙酸丙酯、乙酸异丙酯等47种物质。Homatidou^[64]在哈密瓜中得到9种含硫化合物,其中2-甲硫基乙醇为首次报道。Aubert等^[65]在15种哈密瓜中

得到2-甲基丁酸乙酯、丁酸乙酯、己酸乙酯、乙酸己酯等28种挥发物。Kourkoutas等^[66]在哈密瓜、加利亚和蜜露3种甜瓜的研究中,发现哈密瓜具有甜香、花香和果香,回味持久;加利亚甜瓜具有强烈的黄瓜风味,蜜露甜瓜为黄瓜香气和甜味。Beaulieu等^[67]在哈密瓜中得到2-甲基丙酸乙酯、2-甲基丁酸甲酯、2-甲基丁酸乙酯等为主要香气成分。贾恺等^[68]得到乙酸乙酯、乙酸丙酯、2-甲基丙酸乙酯、丁酸乙酯、2-甲基丁酸乙酯等物质。胡国智等^[69]在4种哈密瓜中检测出66种芳香物质,不同甜瓜品种由于酯类、醇类、醛酮类等挥发性物质含量的差异,具有独特的风味和香型(表6)。

表6 4种哈密瓜中的挥发性成分

品种	种类	挥发性物质
新密9号	41	2-甲基-1-丁醇、正己醇、(E)-3-壬烯-1-醇、(Z)-6-壬烯醛等
西州密25号	38	乙酸异丁酯、乙酸-2,3-丁二酯、乙酸乙酯、丙酸甲酯、苯甲醛等
新密14号	34	壬醛、苯甲醛、己醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮、 β -紫罗兰酮等
黄皮9818	40	(Z)-3-壬烯-1-醇、3,6-壬二烯-1-醇等

气味活性值 OAV>1,对香气有贡献^[70]。Pang等^[70]在新疆伽师甜瓜(哈密瓜)中得到碳酸二乙酯、异佛尔酮、2-丁氧基乙酸乙酯和薄荷醇4种挥发物,通过OAV和检测频率分析(DFA)确定了(2E,6Z)-壬-2,6-二烯醛、(3Z,6Z)-壬-3,6-二烯-1-醇等12种物质。之后又采用GC-O-DFA、OAV、香气重建、遗漏测试证明(2E,6Z)-2,6-壬二烯醛和丁酸乙酯是最重要的两种香气成分^[71]。庞雪莉等^[72]又采用OAV、FD-GC-O鉴定出57种挥发性物质,其中碳酸二乙酯、异氟尔酮、薄荷醇被首次鉴定为瓜类香气组分。

马永昆等^[73]发现哈密瓜汁经超高压处理后,酯类、醇类、醛类和酮类等香气减弱。马永昆等^[74]又确定9种成分为特征香气,顺-3-壬烯醇、顺-3-己烯醇为主要香气成分。李佳等^[75]在哈密瓜中得到主要香气成分为醇类、酯类、酮类、醛类等物质,不同干制温度对香气成分有较大影响(表7),由此可知,哈密瓜经过不同温度处理,香气成分不同^[73]。

表7 不同干制温度下的哈密瓜挥发性成分

干制方式	种类	挥发性物质
常温干制	37	3-羟基-2-丁酮、(E)-2-十二烷基乙酸酯、苯甲醇、
40 °C	28	1-甲基甲酸丙酯、苯甲醇、反式-β-紫罗兰酮、3-苯基-2-丙烯酸
50 °C	37	1-甲基甲酸丙酯、苯甲醇、反式-β-紫罗兰酮、3-苯基-2-丙烯酸等
60 °C	43	1-甲基甲酸丙酯、苯甲醇、橙花基丙酮、苯甲醛、3-苯基-2-丙烯酸
70 °C	45	1-甲基甲酸丙酯、苯甲醇、反式-β-紫罗兰酮、苯甲醛等

张瑞廷等^[76]在加热处理的哈密瓜汁检测出57种物质,不同加热温度的挥发性物质和含量均不同。庄楷杏等^[77]采用热脱附方法在哈密瓜、哈密瓜果汁中得到共同香气为乙酸甲酯、乙酸乙酯、丙酸甲酯、异丁酸甲酯、丙酸乙酯等。由此得出不同品种甜瓜的挥发性成分(表8)。

表8 不同品种甜瓜的主要挥发性成分

品种	种类	研究方法	挥发性物质	参考文献
加利亚	12	SPME-GC-MS	乙酸丁酯、2-甲基乙酸丁酯、乙酸己酯	Fallik, et al[45]
日本甜瓜	46	PorapakQ 柱、AEDA、GC-MS	2-甲基丙酸乙酯、2-甲基丁酸甲酯、丁酸乙酯等	Hayata, et al[28]
意大利网纹甜瓜,伊诺多勒斯甜瓜	66	HS-SPME-GC-MS	(Z)-6 壬烯醇、(E)-2-壬烯醇、(Z,Z)-3,6 壬二烯-1-醇、壬醛等	Verzera, et al[46]
土耳其甜瓜	33	HS-GC-MS	乙酸乙酯、乙醛、乙醇等	Guler, et al[47]
网络时代3号	62	HS-SPME-GC-MS	乙酸苯甲酯、乙酸-2-甲基-1-丁酯、2-苯基乙酸乙酯等	赵光伟,等[48]
甘肃银帝	60	顶空、GC-MS	乙酸乙酯、丙酸-2-丁烯酯、羟甲基甲酸乙酯等	蒋玉梅,等[52]
鲁厚甜2号	79	HS-SPME-GC-MS	乙酸苯甲酯、n-软脂酸、2-苯基乙酸乙酯等	肖守华,等[53]
哈甜-2号	77	SPME-GC-MS	乙酸甲酯、乙酸乙酯、乙酸丙酯、乙酸异丁酯等	郝璐瑜,等[59]
玉金香	71	HS-SPME-GC-MS	正己醛、顺-3-己烯醇、2-己烯醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛等	张娜,等[60]
西州密25号	54	HS-SPME-GC-MS	乙酸乙酯、正丙酸乙酯、乙酸异丁酯、2-甲基丁酸甲酯等	张容鹤,等[61]
盛开花、甘甜3号、5号	52	GC-MS	乙酸乙酯、β-苯乙醇、正己醇、苯甲醇等	李旺雄,等[62]
39种甜瓜	146	HS-SPME-GC-MS	乙酸乙酯、(Z)-6 壬烯醇、3,6-(E,Z)-壬二烯-1-醇等	Shi, et al[49]
美国网纹甜瓜	47	GC-MS	乙酸甲酯、乙酸乙酯、乙酸丙酯、乙酸异丙酯等	Yabumoto, et al[63]
15种法国哈密瓜	28	GC-MS 和 GC-FID	2-甲基丁酸乙酯、丁酸乙酯、己酸乙酯、乙酸己酯等	Aubert, et al[65]
加利福尼亚瓜	53	SPME	2-甲基丙酸乙酯、2-甲基丁酸甲酯、2-甲基丁酸乙酯等	Kourkoutas, et al[66]
伽师瓜	42	HS-SPME	乙酸乙酯、乙酸丙酯、2-甲基丙酸乙酯、丁酸乙酯等	贾恺,等[68]
		GC-O-MS、OAV	(2E,6Z)-壬-2,6-二烯醛、(3Z,6Z)-壬-3,6-二烯-1-醇等	Pang, et al[70]
		GC-O-DFA、OAV、香气重建、遗漏测试	(2E,6Z)-2,6-壬二烯醛、丁酸乙酯等	Pang, et al[71]
		OAV、FD-GC-O	碳酸二乙酯、异氟尔酮、薄荷醇	庞雪莉,等[72]
金皇后甜瓜	45	SPME-GC-MS	顺-3-壬烯醇、顺-3-己烯醇、反-2-壬烯醇和顺-6-壬烯醇、反-2-壬烯醛等	马永昆,等[74]
伽师瓜	57	SPME-GC-MS	沉香醇、棕榈酸、油酸、油酸乙酯	张瑞廷,等[76]
	46	GC-MSD	乙酸甲酯、乙酸乙酯、丙酸甲酯、异丁酸甲酯等	庄楷杏,等[77]

2 代表性葫芦科蔬菜的挥发性风味

2.1 黄瓜的挥发性风味

目前关于黄瓜的挥发性研究以采用SPME-GC-MS为主,部分应用AEDA和GC-O技术^[43, 78-82]。Schieberle等^[43]得出(E,Z)-2,6-壬二烯

醛、(Z)-2-壬二烯醛、(E)-2-壬二烯醛是黄瓜最重要的气味物质。Palma 等^[78]也得到(E,Z)-2,6-壬二烯醛和(E)-2-壬烯醛为主要风味化合物。Sotiroudis 等^[79]在黄瓜中得到 Z-6-壬烯醇、E-2-壬烯醇、(E,Z)-2,6-壬二烯醛等物质。黄瓜品种不同,香气成分也有差异。郝丽宁等^[80]在黄瓜中首次检出 1,4-辛二烯、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、(E)-6-壬烯醛等成分。之后在 12 个基因型黄瓜中得到 1-戊

烯-3-醇、樟醇、1-戊醇、(Z)-3-壬烯-1-醇等^[81]。尚明月等^[82]在 6 种黄瓜中检测出(E)-6-壬烯醛、壬醛具有独特的水果香甜味道。马辉等^[83]在超高压处理的黄瓜中得到的主要成分是(E,Z)-2,6-壬二烯醛。谭梦男等^[84]采用 FD-GC-O、OAV 在黄瓜汁中得到正己醛、壬醛、醋酸、反-2-顺-6-壬二烯醛等物质,加热杀菌的黄瓜汁中正己醛、壬醛、反-2-顺-6-壬二烯醛较多。由此得出,黄瓜的主要挥发性成分见表 9。

表 9 黄瓜的主要挥发性成分

材料类型	研究方法	挥发性物质	参考文献
黄瓜果肉	AEDA	(E,Z)-2,6-壬二烯醛、(Z)-2-壬二烯醛等	Schieberle, et al[43]
	GC-MS	(E,Z)-2,6-壬二烯醛和(E)-2-壬烯醛	Palma, et al[78]
	GC-MS	Z-6-壬烯醇、E-2-壬烯醇、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、E-2-壬烯醇等	Sotiroudis, et al[79]
	GC-MS	1-戊烯-3-醇、樟醇、1-戊醇、(Z)-3-壬烯-1-醇等	郝丽宁,等[81]
	SPME-GC-MS	(E)-6-壬烯醛、壬醛等	尚明月,等[82]
	GC-MS	1,4-辛二烯、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、(E)-6-壬烯醛等	郝丽宁,等[80]
黄瓜汁	FD-GC-O、OAV	正己醛、壬醛、反-2-顺-6-壬二烯醛、反-2-顺-6-壬二烯醇等	谭梦男,等[84]

2.2 南瓜的挥发性风味

目前南瓜的香气研究采用 HS-SPME、GC-MS 技术^[85-93]。南瓜香气成分主要为醛类和醇类。最早李瑜^[85]在新鲜南瓜和南瓜汁中得到戊醇、1-己醇、3-己烯-1-醇、壬醛等物质,加工成南瓜汁增加的是羰基、芳香族以及糠醛、吡啶等热降解产物。

周春丽等^[86]从新鲜南瓜和南瓜汁中鉴定出 51、45 种挥发性物质(图 1、2),与李瑜^[85]分析结果有差别(表 10)。

南瓜品种很多,张伟等^[87]从金钩南瓜果肉、瓢中得到十六醛、(R,R)-2,3-丁二醇和 2,3-丁二醇含量最高。又从蜜本南瓜果肉和瓢中得出挥发性成分以酮类和酯类为主^[88-89],李昌勤等^[90]在超甜蜜本南瓜中得到的结果相同,含量略有差异。周春丽等^[91]在

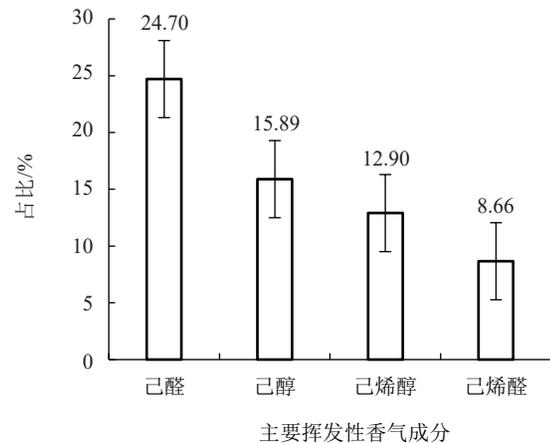


图 2 南瓜汁中的挥发性香气成分

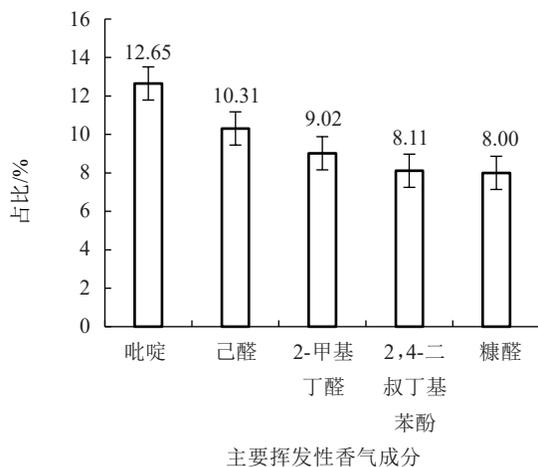


图 1 新鲜南瓜中的挥发性香气成分

表 10 利用 GC-O 鉴定的特征香气成分及其相对含量

新鲜南瓜		发酵南瓜汁	
香气物质	相对含量/%	香气物质	相对含量/%
己醛	21.32	己醛	13.43
壬醛	7.70	3-甲基乙醇	8.38
3-甲基丁醛	7.34	3-氨基-2-甲基丁酸	5.34
3-己烯醇	5.37	环丁醇	4.25
戊醛	4.52	壬醛	2.63
1-己醛	3.87	3-甲基丁醛	2.23
辛醛	3.32	辛醛	1.27

3 种南瓜中得到乙酸乙酯和乙醇为中国和美洲南瓜共同香气物质,与印度南瓜没有相同香气物质(表 11)。

香芋南瓜为中国南瓜特有品种,李俊星等^[92]鉴

表 11 3种南瓜中的挥发性成分

品种	种类	挥发性物质
中国南瓜	44	乙酸乙酯、乙醇、 β -紫罗兰酮、茨醇等
印度南瓜	51	己醛、壬醛、3-甲基丁醛、3-己烯醇、戊醛、1-己醇等
美洲南瓜	25	乙酸乙酯、乙醇、己烷、2-庚酮、3-甲基正丁醇、苯等

定出 31 种挥发性物质,2-乙酰基-1-吡咯啉对风味的影响较大。陈敏氩等^[93]在 5 个品种南瓜(新美玉、宝丰、金磨盘、健宝和东升)中鉴定出 68 种成分,醇

类、醛类和烃类化合物为南瓜果肉中主要的挥发性物质。其中新美玉、宝丰、金磨盘 3 种南瓜中的醇类物质含量远高于其他 2 种南瓜,而健宝和东升中醛类物质含量最丰富。十一醛和反-2-壬烯醛为健宝和东升的特征风味物质,宝丰、金磨盘、健宝中的烃类物质含量丰富,高于新美玉和东升 2 个品种。但金磨盘中的醛类和酸类物质含量均少于其他 4 种南瓜。这 5 种南瓜中的酸酯类物质较少,在东升中未检测到酸酯类物质。得到南瓜的主要挥发性化合物如表 12 所示。

表 12 南瓜的主要挥发性化合物

品种	种类	研究方法	主要挥发性物质	参考文献
金钩南瓜	35(果肉) 33(瓤)	HS-SPME-GC-MS	十六醛、 β -紫罗兰酮等 (R,R)-2,3-丁二醇和 2,3-丁二醇等	张伟,等[87]
蜜本南瓜	29(果肉) 23(瓤)	HS-SPME-GC-MS	吡喃酮、 β -紫罗兰酮等 棕榈酸乙酯、二氢猕猴桃内酯	张伟,等[88, 89]
超甜蜜本南瓜	23(果肉) 32(瓤)	HS-SPME-GC-MS	吡喃酮、棕榈酸等 棕榈酸乙酯、亚麻酸乙酯等	李昌勤,等[90]
香芋南瓜	31(果肉)	HS-SPME-GC-MS	反式-2-己烯醛,2-乙酰基-1-吡咯啉等	李俊星,等[92]

2.3 冬瓜的挥发性风味

冬瓜的挥发性研究较少,采用 GC-MS 检测,主要挥发性成分为醛类。最早 Wu 等^[94]在冬瓜和冬瓜饮料中得到 e-2-己烯醛、正己醛和甲酸正己酯。杨敏^[95]在甘肃产冬瓜中得出己醛、2,4,4-三乙基-1-己烯、3-甲基戊烷、3-十二烯醇等的含量最高。

香芋冬瓜为中国冬瓜特有品种。反-2-己烯醛、正己醛和(E,E)-2,4-己二烯醛等 C6 醛类呈现出青草味,对香芋冬瓜的香气贡献度最高。壬醛呈现油脂和甜橙等香气。香芋冬瓜中主要是正己醇、2-乙基己醇、正辛醇等醇类,在普通冬瓜中并未检测到苯甲醛,可能与特征香气有关^[96]。由此得出 3 种冬瓜的挥发性成分如表 13 所示。

表 13 3种冬瓜的挥发性成分

材料类型	特征香味物质	参考文献
冬瓜果肉	己醛、4-甲基戊烯、(Z)-2-庚烯醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮、辛醛、2-丙基戊醇、甲酸辛酯、癸醛、3-十二烯醇等	杨敏[95]
冬瓜果肉	反-2-己烯醛、正己醛、(E,E)-2,4-己二烯醛、正己醇、2-乙基己醇等	吕先绪,等[96]
冬瓜果肉和冬瓜饮料	E-2-己烯醛、正己醛、甲酸正己酯等	Wu, et al[94]

2.4 苦瓜的挥发性风味

苦瓜的挥发性研究集中在果肉、苦瓜粉、苦瓜茶等。最早乐长高等^[97]在苦瓜瓤中鉴定出 12 种成分,经超临界 CO₂ 萃取后,苦瓜产物的挥发性成分为十六碳酸乙酯、十六碳酸甲酯等^[98](图 3)。杨敏^[99]得出 2-己烯醛、己醛、4-己烯醇、己醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛等为苦瓜挥发性物质。夏兴莉等^[100]利用低温富集液液萃取和 GC-MS 测定苦瓜,得到较高含量的棕榈酸、硬脂酸和十八烯。

苦瓜加工产品不断涌现,邓媛元等^[101]在苦瓜茶中得到 6,6-二甲基二环、2-己烯醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、苯乙醛等物质。蒋鹏飞等^[102]在苦瓜粉中得到

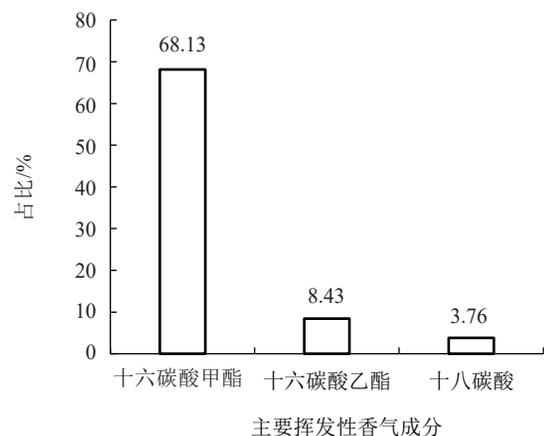


图 3 苦瓜瓤的主要挥发性成分和比例

3-己烯醇、桃金娘烯醇、壬醛、癸醛、 β -环柠檬醛等成分。奚星林等^[103]在苦瓜粉中得到2,4-壬二烯醛、苯

乙醛等物质。总结得出苦瓜的主要挥发性化合物如表14所示。

表14 苦瓜的主要挥发性化合物

材料类型	研究方法	挥发性物质	参考文献
苦瓜果肉	超临界 CO ₂ 流体萃取、GC-MS	十六碳酸乙酯、十六碳酸甲酯、十八碳酸等	贾素花,等[98]
	SPME-GC-MS	2-己烯醛、己醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、4-己烯醇等	杨敏[99]
	低温富集液液萃取、GC-MS	棕榈酸、硬脂酸,烷烃类	夏兴莉,等[100]
苦瓜茶	GC-MS	6,6-二甲基二环、庚-2-烯-2-甲醇、2-己烯醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、苯乙醛等	邓媛元,等[101]
苦瓜粉	GC-MS	3-己烯醇、桃金娘烯醇、壬醛、癸醛、 β -环柠檬醛、十四烷、2,4-二叔丁基苯酚等	蒋鹏飞,等[102]
	SPME-GC-MS、ROAV	2,4-壬二烯醛、苯乙醛、顺,顺,顺-7,10,13-十六碳三烯醛等	奚星林,等[103]

3 展 望

近些年来,关于挥发性风味的研究不断向深度和广度发展,葫芦科果蔬如西瓜^[29-40]、甜瓜^[41-77]等水果的挥发性研究较多,而葫芦科蔬菜的挥发性研究鲜有报道。在葫芦科水果中,西瓜的香气研究较为成熟,得到了关键香气化合物,进行了香气模型构建和重组实验。甜瓜和哈密瓜品种繁多,可以针对某个品种进行研究,应用准确度较高的研究方法得到关键香气物质。在葫芦科蔬菜中,黄瓜和南瓜研究较多,冬瓜和苦瓜研究较少。因此,在葫芦科果蔬的挥发性香气研究中,可以参考其他相关挥发性香气的研究,适当将SAFE、GC-O、AEDA、SIDA等技术结合确定香气化合物,通过计算气味活性值(OAV)筛选出贡献值较大的化合物。综合结果进行香气重组实验和缺失实验,从而确定关键香气成分,得到更为准确的分析结果。葫芦科果蔬的风味研究,将使人们从风味方面进一步认识葫芦科果蔬,这是风味研究一个可行的方向。

参考文献

- [1] DUNKEL A, STEINHAUS M, KOTTHOFF M, et al. Nature's chemical signatures in human olfaction: A foodborne perspective for future biotechnology[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2014, 53(28):7124-7143.
- [2] 刘纯友,江素珍,冯笑,等. HS-SPME-GC-MS 测定三种类型百香果果实挥发性风味成分[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(11):255-262.
- [3] BUTTERY R G, LING L C. Volatile flavor components of corn tortillas and related products[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1995, 43(7):1878-1882.
- [4] 杨玉平,焦春海,廖涛,等. 鲤鱼挥发性成分测定及其产生机理初探[J]. *湖北农业科学*, 2010, 49(3):688-691.
- [5] 王梦琪,朱荫,张悦,等. 茶叶挥发性成分中关键呈香成分研究进展[J]. *食品科学*, 2019, 40(23):341-349.
- [6] ZELLER A, RYCHLIK M. Impact of estragole and other odor-

ants on the flavour of anise and tarragon[J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 2007, 22(2):105-113.

- [7] 赵钰玲,戚欢阳,李菊白,等. 固相微萃取法结合 GC-MS 分析八角茴香中挥发性化合物[J]. *分析测试技术与仪器*, 2006, 12(1):20-25.
- [8] 谢诚,欧昌荣,汤海青,等. 食品中挥发性风味成分提取技术研究进展[J]. *核农学报*, 2015, 29(12):2366-2374.
- [9] 杨梦云,郑福平,段艳,等. 溶剂萃取/溶剂辅助风味蒸发-气相色谱/质谱联用分析野韭菜花挥发性成分[J]. *食品科学*, 2011, 32(20):211-216.
- [10] YAHYA F, LU T, SANTOS R C D, et al. Supercritical carbon dioxide and solvent extraction of 2-acetyl-1-pyrroline from Pandan leaf: The effect of pre-treatment[J]. *Journal of Supercritical Fluids*, 2010, 55(1):200-207.
- [11] DA PORTO C, DECORTI D. Ultrasound-assisted extraction coupled with under vacuum distillation of flavour compounds from spearmint (carvone-rich) plants: Comparison with conventional hydrodistillation[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2009, 16(6):795-799.
- [12] 张鹏云,李蓉,卢俊文,等. 顶空-固相微萃取法与水蒸气蒸馏法提取沙棘挥发油组分的比较研究[J]. *分析测试学报*, 2019, 38(6):699-705.
- [13] 朱文政,严顺阳,徐艳,等. 顶空固相微萃取-气质联用分析不同烹制时间红烧肉挥发性风味成分[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(2):247-253.
- [14] AVSAR Y K, KARAGUL- YUCEER Y, DRAKE M A, et al. Characterization of nutty flavor in Cheddar cheese[J]. *Journal of Dairy Science*, 2004, 87(7):1999-2010.
- [15] 崔琳琳,赵染,周一鸣,等. 基于 GC-MS 和电子鼻技术的大米挥发性风味成分分析[J]. *中国粮油学报*, 2018, 33(12):134-141.
- [16] GROSCH W. Evaluation of the key odorants of foods by dilution experiments, aroma models and omission[J]. *Chemical Senses*, 2001, 26(5):533-545.
- [17] 宫俐莉,李安军,孙金沅,等. 溶剂辅助风味蒸发法与顶空-固相微萃取法结合分析白酒酒醅中挥发性风味成分[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(9):169-177.
- [18] REINERS J, GROSCH W. Odorants of virgin olive oils with different flavor profiles[J]. *Journal of Agricultural and Food Chem-*

- istry, 1998, 46(7):2754-2763.
- [19] BUETTNER A, SCHIEBERLE P. Evaluation of aroma differences between hand-squeezed juices from valencia late and navel oranges by quantitation of key odorants and flavor reconstitution experiments[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(5):2387-2394.
- [20] MUNCH P, SCHIEBERLE P. Quantitative studies on the formation of key odorants in thermally treated yeast extracts using stable isotope dilution assays[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(11):4695-4701.
- [21] 任西营. 食品风味分析技术研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2014(7):173-178.
- [22] 李宗扬, 秦智伟, 周秀艳, 等. 葫芦科蔬菜苦味研究进展[J]. 中国蔬菜, 2013(24):1-9.
- [23] 王文正, 张丽华, 张丙春. 几种常食瓜类蔬菜的主要营养成分分析[J]. 食品研究与开发, 2000, 21(4):41-42.
- [24] 郭智广, 王毅红, 张颖, 等. 黄瓜、冬瓜、苦瓜、丝瓜和西瓜中的钾、钙、镁等8种元素含量分析[J]. 中国瓜菜, 2019, 32(9):25-29.
- [25] STEVENSON D G, ELLER F J, WANG L P, et al. Oil and tocopherol content and composition of pumpkin seed oil in 12 cultivars[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(10):4005-4013.
- [26] 王栋梁, 王娜, 王丹蕾, 等. 冬瓜皮成分及抗氧化活性成分分析[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(11):411-414.
- [27] 杨帆, 陈尔豹, 牛晓媛, 等. GC-O-MS 分析热处理前后西瓜汁挥发性风味成分[J]. 食品科学技术学报, 2020, 38(3):35-42.
- [28] HAYATA Y, SAKAMOTO T, MANEERAT C, et al. Evaluation of aroma compounds contributing to muskmelon flavor in Porapak Q extracts by aroma extract dilution analysis[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(11):3415-3418.
- [29] PINO J A, MARBOT R, AGUERO J. Volatile components of watermelon [*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. et Nakai] fruit[J]. Journal of Essential Oil Research, 2003, 15(6):379-380.
- [30] TANG X W, HE H J, LIU Y, et al. Identification of aroma compounds in watermelon juice by SPME-GCMS[C]. Journal Article, 2012, 944:183-191.
- [31] BEAULIEU J C, LEA J M. Characterization and semiquantitative analysis of volatiles in seedless watermelon varieties using solid-phase microextraction[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(22):8654.
- [32] DIMA G, TRIPODI G, CONDURSO C, et al. Volatile constituents of mini-watermelon fruits[J]. Journal of Essential Oil Research, 2014, 26(5):323-327.
- [33] FREDES A, SALES C, BARREDA M, et al. Quantification of prominent volatile compounds responsible for muskmelon and watermelon aroma by purge and trap extraction followed by gas chromatography-mass spectrometry determination[J]. Food Chemistry, 2016, 190:689-700.
- [34] 肖守华, 马德源, 王施慧, 等. 不同瓤色小型西瓜成熟果实挥发性风味物质 GC-MS 分析[J]. 中国园艺文摘, 2014, 30(5):1-7.
- [35] 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.
- [36] LIU Y, HE C C, SONG H L. Comparison of fresh watermelon juice aroma characteristics of five varieties based on gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry[J]. Food Research International, 2018, 107:119-129.
- [37] LIU Y, HE C C, SONG H L. Comparison of spme versus safe processes for the analysis of flavor compounds in watermelon juice[J]. Food Analytical Methods, 2018, 11(6):1677-1689.
- [38] 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.
- [39] 何聪聪, 苏柯冉, 刘梦雅, 等. 基于 AEDA 和 OAV 值确定西瓜汁香气活性化合物的比较[J]. 现代食品科技, 2014, 30(7):279-285.
- [40] YANG X, YANG F, LIU Y, et al. Identification of key off-flavor compounds in thermally treated watermelon juice via gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry, aroma recombination, and omission experiments[J]. Foods, 2020, 9(2):227.
- [41] KEMP T R, KNAVEL D E, STOLTZ L P. Characterization of some volatile components of musk-melon fruit[J]. Phytochemistry, 1971, 10(8):1925-1928.
- [42] KEMP T R, STOLTZ L, KNAVEL D E. Volatile components of muskmelon fruit[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1972, 20(2):196-198.
- [43] SCHIEBERLE P, OFNER S, GROSCH W. Evaluation of potent odorants in cucumbers (*Cucumis sativus*) and muskmelons (*Cucumis melo*) by aroma extract dilution analysis[J]. Journal of Food Science, 1990, 55(1):193-195.
- [44] BUTTERY R G, SEIFERT R M, LING L C, et al. Additional aroma components of honeydew melon[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1982, 30(6):1208-1211.
- [45] FALLIK E, ALKALI-TUVIA S, HOREV B, et al. Characterisation of 'Galia' melon aroma by GC and mass spectrometric sensor measurements after prolonged storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2001, 22(1):85-91.
- [46] VERZERA A, DIMA G, TRIPODI G, et al. Fast quantitative determination of aroma volatile constituents in melon fruits by headspace-solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Analytical Methods, 2011, 4(2):141-149.
- [47] GULER Z, KARACA F, YETISIR H. Volatile compounds and sensory properties in various melons, which were chosen from different species and different locations, grown in turkey[J]. International Journal of Food Properties, 2013, 16(1):168-179.
- [48] 赵光伟, 刘君璞, 徐志红, 等. 网纹甜瓜(*Cucumis melo*)网络时代3号香气成分的 HS-SPME/GC-MS 分析[J]. 果树学报, 2011, 28(2):301-304.
- [49] SHI J D, WU H B, XIONG M, et al. Comparative analysis of volatile compounds in thirty nine melon cultivars by headspace solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Chemistry, 2020, 316:126342.

- [50] 刘勇,齐红岩,王博,等.不同类群薄皮甜瓜感官检验与主要风味物质的关系[J].西北农业学报,2009,18(4):355-358.
- [51] 赵光伟,徐志红,孔维虎,等.3个甜瓜品种果实香气成分的HS-SPME/GC-MS比较分析[J].果树学报,2015,32(2):259-266.
- [52] 蒋玉梅,毕阳,周小平,等.果腔顶空法分析厚皮甜瓜“银帝”的挥发性成分[J].食品工业科技,2005,26(8):173-175.
- [53] 肖守华,王崇启,乔卫华,等.厚皮甜瓜(*Cucumis melo*)鲁厚甜2号香气成分的GC-MS分析[J].果树学报,2010,27(1):140-145.
- [54] 李国生,焦自高,陈子雷,等.不同厚皮甜瓜品种成熟果实香气成分的GC-MS分析[J].果树学报,2010,27(4):591-597.
- [55] JORDAN M J, SHAW P E, GOODNER K L. Volatile components in aqueous essence and fresh fruit of *Cucumis melo* cv. Athena(muskmelon) by GC-MS and GC-O[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(12):5929-5933.
- [56] 唐贵敏,于喜艳,赵登超,等.不同品种厚皮甜瓜果实成熟过程中挥发性物质成分分析[J].中国蔬菜,2007(4):7-11.
- [57] 刘圆,齐红岩,王宝驹,等.不同品种甜瓜果实成熟过程中香气物质动态分析[J].华北农学报,2008,23(2):49-54.
- [58] 陈存坤,王文生,冯炯琦,等.用SPME方法分析不同贮藏方式厚皮甜瓜香气成分的研究[J].食品工业科技,2008,28(12):210-212.
- [59] 郝璐瑜,于泽源,李兴国.薄皮甜瓜后熟过程中香气成分的动态分析[J].中国蔬菜,2011(16):79-85.
- [60] 张娜,蒋玉梅,李雯昕,等.“玉金香”甜瓜常温贮藏期间香气构成变化分析[J].食品科学,2014,35(16):96-100.
- [61] 张容鹤,邓浩,梁振深,等.HS-SPME-GC-MS法分析西州蜜25号甜瓜贮藏中的香气成分[J].保鲜与加工,2017,17(6):98-105.
- [62] 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.
- [63] YABUMOYO K, JENNINGS W G, YAMAGUCHI M. Volatile constituents of cantaloupe, *Cucumis melo*, and their biogenesis[J]. Journal of Food Science, 1977, 42(1):32-37.
- [64] HOMATIDOU V L, KARVOUNI S S, DOURTOGLOU V G, et al. Determination of total volatile components of *Cucumis melo* L. variety Cantaloupensis[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1992, 40(8):1385-1388.
- [65] AUBERT C, BOURGER N. Investigation of volatiles in charentais cantaloupe melons (*Cucumis melo* var. *cantalupensis*): Characterization of aroma constituents in some cultivars[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52(14):4522-4528.
- [66] KOURKOUTAS D, ELMORE J S, MOTTRAM D S. Comparison of the volatile compositions and flavour properties of cantaloupe, galia and honeydew muskmelons[J]. Food Chemistry, 2006, 97(1):95-102.
- [67] BEAULIEU J C, GRIMM C C. Identification of volatile compounds in cantaloupe at various developmental stages using solid phase microextraction[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(3):1345-1352.
- [68] 贾恺,胡小松,廖小军,等.顶空固相微萃取法测定哈密瓜中挥发性芳香成分研究[J].食品科学,2010,31(10):239-243.
- [69] 胡国智,熊韬,吴海波,等.新疆哈密瓜不同品种果实风味物质分析[J].新疆农业科学,2017,54(7):1232-1238.
- [70] PANG X L, GUO X F, QIN Z H, et al. Identification of aroma-active compounds in jiashi muskmelon juice by GC-O-MS and OAV calculation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(17):4179-4185.
- [71] PANG X L, CHEN D, HU X S, et al. Verification of aroma profiles of jiashi muskmelon juice characterized by odor activity value and gas chromatography-olfactometry/detection frequency analysis: aroma reconstitution experiments and omission tests[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(42):10426-10432.
- [72] 庞雪莉,胡小松,廖小军,等.FD-GC-O和OAV方法鉴定哈密瓜香气活性成分研究[J].中国食品学报,2012,12(6):174-182.
- [73] 马永昆,周日兴,胡小松.不同超高压处理压力对哈密瓜汁香气的影响[J].食品与发酵工业,2003,29(11):14-19.
- [74] 马永昆,周珊,陈计峦,等.用SPME方法分析不同成熟度哈密瓜香气的研究[J].食品科学,2004,25(7):136-139.
- [75] 李佳,王瑾,玛尔哈巴·帕尔哈提,等.不同干制温度对哈密瓜片香气成分的影响[J].保鲜与加工,2020,20(2):200-207.
- [76] 张瑞廷,徐佳,许建.不同加热温度对哈密瓜汁挥发性成分的影响[J].农产品加工,2020(15):42-45.
- [77] 庄楷杏,陈泽娜.用热脱附方法分析哈密瓜香气成分[J].饮料工业,2022,25(1):33-36.
- [78] PALMA-HARRIS C, MCFEETERS R F, FLEMING H P. Solid-phase microextraction (SPME) technique for measurement of generation of fresh cucumber flavor compounds[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(9):4203-4207.
- [79] SOTIROUDIS G, MELLIOU E, SOTIROUDIS T G, et al. Chemical analysis, antioxidant and antimicrobial activity of three greek cucumber (*Cucumis sativus*) cultivars[J]. Journal of Food Biochemistry, 2010, 34(SI):61-78.
- [80] 郝丽宁,陈书霞,刘拉平,等.不同基因型黄瓜果实香气组成的主成分分析和聚类分析[J].西北农业学报,2013,22(5):101-108.
- [81] 郝丽宁,陈书霞,王聪颖,等.不同基因型黄瓜果实芳香物质组成及含量差异研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(6):139-146.
- [82] 尚明月,吴燕,陈劲枫,等.黄瓜果皮和果肉芳香物质的成分鉴定及差异比较[J].西北农业学报,2021,30(9):1365-1373.
- [83] 马辉,王亚超,马永昆,等.基于主成分分析法分析超高压处理对黄瓜水香气的影响[J].现代食品科技,2014,30(3):220-226.
- [84] 谭梦男,潘少香,孟晓萌,等.基于FD-GC-O和OAV法分析不同处理的黄瓜汁关键活性成分差别[J].中国果菜,2022,42(1):52-58.
- [85] 李瑜.新鲜南瓜和南瓜汁挥发性风味物质的成分比较[J].食品科学,2010,31(2):208-210.
- [86] 周春丽,刘伟,李慧,等.混合菌株发酵南瓜汁及其香气分析[J].现代食品科技,2014,30(5):301-310.
- [87] 张伟,卢引,李昌勤,等.辽宁新民金钩南瓜肉和瓤挥发性成分的HS-SPME-GC-MS分析[J].中国药房,2012,23(39):

- 3706-3708.
- [88] 张伟,卢引,顾雪竹,等.HS-SPME-GC-MS 分析两种南瓜瓤挥发性成分[J].中国实验方剂学杂志,2013,19(20):97-99.
- [89] 张伟,卢引,顾雪竹,等.HS-SPME-GC-MS 分析两种南瓜肉挥发性成分[J].中国实验方剂学杂志,2013,19(7):117-119.
- [90] 李昌勤,王海燕,卢引,等.顶空固相微萃取法分析超甜蜜本南瓜肉挥发性成分[J].河南大学学报(医学版),2013,32(1):19-21.
- [91] 周春丽,刘伟,陈冬,等.基于电子鼻与 SPME-GC-MS 法分析不同南瓜品种中的挥发性风味物质[J].现代食品科技,2015,31(7):293-301.
- [92] 李俊星,钟玉娟,罗剑宁,等.基于电子鼻与 HS-SPME/GC-MS 技术的香芋南瓜果实香气物质解析[J].现代食品科技,2018,34(9):244-250.
- [93] 陈敏氢,王彬,刘建汀,等.南瓜 5 个品种果肉的挥发性成分分析[J].热带亚热带植物学报,2020,28(6):633-643.
- [94] WU C M, LIOU S E, CHANG Y H, et al. Volatile compounds of the wax gourd (*Benincasa hispida* Cogn.) and a wax gourd beverage[J]. Journal of Food Science, 1987, 52(1): 132-134.
- [95] 杨敏.冬瓜挥发性成分的固相微萃取-气质联用分析[J].食品工业科技,2010,31(1):134-137.
- [96] 吕先绪,程志魁,王东登,等.香芋冬瓜果实挥发性香气化合物的固相微萃取优化及解析[J].南方农业学报,2021,52(11):3067-3075.
- [97] 乐长高,付红蕾.苦瓜瓤和籽的挥发性成分研究[J].林产化工通讯,2003,37(3):12-13.
- [98] 贾素花,胡志国,李昌,等.气相色谱-质谱法测定苦瓜超临界 CO₂ 流体萃取产物的挥发性成分[J].南昌大学学报(理科版),2008,32(5):479-482.
- [99] 杨敏.苦瓜挥发性成分的固相微萃取-气质联用分析[J].食品科学,2010,31(2):171-174.
- [100] 夏兴莉,李琦,魏远隆,等.低温富集液液萃取分析苦瓜挥发性成分[J].生命科学仪器,2018,16(3):60-65.
- [101] 邓媛元,张雁,汤琴,等.干燥方式对苦瓜茶感官品质及挥发性物质的影响[J].中国食品学报,2019,19(2):173-184.
- [102] 蒋鹏飞,王赵改,史冠莹,等.不同干燥方式的苦瓜粉品质特性及香气成分比较[J].现代食品科技,2020,36(3):234-244.
- [103] 奚星林,曾广丰,谢建军,等.SPME-GC-MS 结合 ROAV 法分析苦瓜粉中挥发性特征风味物质[J].中国食品添加剂,2022,33(2):153-160.