

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241231007

引用格式: 张慧静, 王悦, 杨波, 等. 基于固相微萃取-气相色谱-串联质谱技术分析胡柚花窰制红茶香气成分特征[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(6): 266-274.

ZHANG HJ, WANG Y, YANG B, *et al.* Analysis of aroma component characteristics in Changshan-huyou scented tea by solid phase microextraction-gas chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(6): 266-274. (in Chinese with English abstract).

基于固相微萃取-气相色谱-串联质谱技术分析 胡柚花窰制红茶香气成分特征

张慧静¹, 王悦², 杨波³, 王长法², 陆胜民^{1*}

(1. 农产品质量安全全国重点实验室, 全省生鲜食品智慧物流与加工重点实验室, 农业农村部果品产后处理重点实验室, 浙江省农业科学院食品科学研究所, 杭州 310021;
2. 常山县雨生茶业专业合作社, 常山 324299; 3. 常山县胡柚产业发展中心, 常山 324200)

摘要: **目的** 揭示胡柚花香对红茶香气特征的影响。**方法** 通过固相微萃取-气相色谱-串联质谱技术(solid phase microextraction-gas chromatography-tandem mass spectrometry, SPME-GC-MS)对胡柚花窰制红茶和胡柚干花、鸠坑红茶的香气成分进行分析。**结果** 本研究共检测到 186 种挥发性化合物, 其中胡柚干花、鸠坑红茶和胡柚花窰制红茶中挥发性化合物分别为 92 种、78 种和 67 种。胡柚干花中挥发性成分以醇类和烯类为主, 而鸠坑红茶和胡柚花窰制红茶中挥发性成分以醇类为主。橙花醇和芳樟醇是胡柚花窰制红茶中最主要的香气成分, 赋予了其浓郁的花果香和甜香。与胡柚干花相比, 胡柚花窰制红茶中醇类成分增加, 烯类成分减少; 与鸠坑红茶相比, 胡柚花窰制红茶中烯类成分增加, 醛类成分减少。此外, 32 种成分为胡柚花窰制红茶特有成分, 可能与其独特加工工艺和原料种类有关。**结论** 本研究结果可为胡柚花窰制红茶的香气特征分析提供了可靠方法, 为其品质提升、其标准化生产和创新发展控制提供了技术基础, 也为其他花香型再制茶产品的开发提供借鉴。

关键词: 胡柚花窰制红茶; 挥发性成分; 固相微萃取-气相色谱-串联质谱技术; 香气特征

Analysis of aroma component characteristics in Changshan-huyou scented tea by solid phase microextraction-gas chromatography-tandem mass spectrometry

ZHANG Hui-Jing¹, WANG Yue², YANG Bo³, WANG Chang-Fa², LU Sheng-Min^{1*}

(1. State Key Laboratory for Quality and Safety of Agro-products, Zhejiang Key Laboratory of Intelligent Logistics and Processing of Fresh Products, Key Laboratory of Post-Harvest Handling of Fruits, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Food Science, Zhejiang Academy of Agricultural Science, Hangzhou 310021, China;
2. Changshan Yusheng Tea Industry Professional Cooperative, Changshan 324299, China;
3. Development Center of Changshan Huyou Industry, Changshan 324200, China)

收稿日期: 2024-12-31

基金项目: 浙江省团队科技特派员结对服务计划项目(2020-2024)

第一作者: 张慧静(1998—), 女, 硕士, 主要研究方向为果品加工。E-mail: Huijingzhang1220@163.com

*通信作者: 陆胜民(1969—), 男, 研究员, 主要研究方向为果品加工与综合利用。E-mail: lushengmin@hotmail.com

ABSTRACT: Objective To elucidate the effects of flower of Changshan-huyou on the aroma profile of black tea. **Methods** This study employed solid phase microextraction-gas chromatography-tandem mass spectrometry (SPME-GC-MS) to differentially analyze the aroma components of flower of Changshan-huyou, Jiukeng black tea, and the derived Changshan-huyou scented tea. **Results** A total of 186 volatile compounds were identified in this paper, with 92, 78 and 67 kinds of volatile compounds detected in flower of Changshan-huyou, Jiukeng black tea and Changshan-huyou scented tea, respectively. The volatile composition of flower of Changshan-huyou was mainly characterised by alcohols and alkenes, whereas the volatile profiles of Jiukeng black tea and Changshan-huyou scented tea were mainly alcohol-rich. Nerolidol and linalool were found to be the predominant aroma components in Changshan-huyou scented tea, imparting a pronounced flora, fruity aroma and sweetness. Comparative analysis revealed an increase in alcohols and a concomitant decrease in alkenes in Changshan-huyou scented tea compared to flower of Changshan-huyou. Conversely, an increase in alkenes and a decrease in aldehydes were observed in Changshan-huyou scented tea compared to Jiukeng black tea. In addition, 32 kinds of unique compounds were identified in Changshan-huyou scented tea, which may be due to its unique processing techniques and the specific varieties of raw materials used. **Conclusion** The results of this research not only substantiate the aroma signature of Changshan-huyou scented tea, but also provide insights into its quality enhancement, paving the way for standardised production and innovative development strategies.

KEY WORDS: Changshan-huyou scented tea; volatile components; solid phase microextraction-gas chromatography-tandem mass spectrometry; aroma characterisation

0 引言

茶叶及由饮茶、品茶等组成的茶文化是中国传统农产品和文化中不可或缺的一部分。随着消费者对健康和天然食品的关注度不断提升,消费者对于茶叶的要求不断提高,同时更加注重茶叶的风味、营养和健康功能。因此,以成品茶为原料配以能够吐香的可食用鲜花,采用窰制工艺制成的再加工茶,既含有茶叶的纯正滋味,又含有食用花馥郁香气的窰花茶,已成为大众所追求和喜爱的产品之一。近年来,随着网购、调饮茶的兴起,在新茶饮风尚的引领下,加上果树花的健康属性以及茶叶消费人群从中老年向青壮年人群扩展,消费者对于花茶的热情不断高涨,生产企业快速增加,由果树花制成的花茶产量得到了较大幅度的提升。

原料的多样化使得窰制花茶类产品丰富多彩。其中大部分企业多选用绿茶^[1]、红茶、乌龙茶^[2]、白茶^[3]等茶类作为原料,茉莉花^[4]、玉兰花^[5]、栀子花^[6]、桂花^[7]、柚子花^[8-9]、桔柑花^[10]等鲜花用于窰花。其中,柚子鲜花清爽甜美,在我国产量巨大,资源丰富,含有柠檬烯、罗勒烯、3-蒎烯等烯类,橙花叔醇、合欢醇、金合欢醇、叶绿醇、橙花醇等醇类主要芳香成分^[11],是理想的花茶原料。红茶属于全发酵茶,在制作红茶的过程中,鲜茶叶中的多酚类成分因酶促氧化逐渐转变成茶红素、茶黄素、茶褐素等生物活性成分^[12],形成了红汤、红叶及滋味醇厚等特有的品质特征。研究表明,红茶具有抗氧化^[13]、抗癌^[14]、预防心血管疾病^[15]等多种功效。因此,以红茶为茶坯,配以柚子花窰制成的花茶产品逐渐成为一种茶饮潮流。柚花因其独

特的花香和观赏价值受到关注的同时,更因具有作为花茶原材料的潜力而备受瞩目。常山胡柚(*Citrus Aurantium* L. Changshan-huyou)为芸香科柑橘属植物,主产于浙江省常山县,是具有地方特色的胡柚品种,作为药食同源植物,胡柚鲜花、果皮和幼果(衢枳壳原料)干燥后均可药用,其优良的果实品质和独特风味在水果市场中占据重要地位,同样地,常山胡柚花同样具有重要的经济价值,因此,对常山胡柚花进行研究可为常山胡柚产业发展提供科学的支撑。

明确柚花天然花香成分,是开发柚花茶产品的前提。然而,关于胡柚花天然花香成分,以及以鸠坑红茶为茶胚窰制成的胡柚花茶香气成分比较分析的研究尚未见报道。固相微萃取是一种简便、快捷且破坏程度小的挥发性成分提取技术^[16],已广泛用于橙花^[17]、茉莉花^[18-19]等鲜花的香气成分提取。因此,本研究利用固相微萃取-气相色谱-串联质谱(solid phase microextraction-gas chromatography-tandem mass spectrometry, SPME-GC-MS)技术,分析胡柚干花、胡柚花窰制红茶和鸠坑红茶香气成分的差异,以期揭示胡柚花对鸠坑红茶香气特征的影响。此外,本研究可为常山胡柚鲜花的深加工开发利用提供可靠数据和科学依据,为胡柚花茶产品开发及其市场推广提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

胡柚干花、鸠坑红茶以及胡柚花窰制红茶由常山县雨生茶叶专业合作社提供。其中,选用树龄3年以上且预放

或已开放 1 d 的胡柚鲜花为原料, 采摘后摊平制成胡柚干花; 选用浙江省衢州市常山县坞坑品种茶树的叶芽, 采摘制作为坞坑红茶茶坯, 茶坯水份含量低于 10%, 胡柚干花及坞坑红茶按照一定的比例和加工工艺制成胡柚花窈制红茶。氯化钠(国药集团化学试剂有限公司)。

FA-1004 型万分之一电子分析天平(上海舜宇恒平科学仪器有限公司); 6890N-G5795B 型气相色谱质谱仪、HP-5MS 超高惰性色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)(美国安捷伦公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 加工工艺

胡柚花窈制红茶加工工艺流程见图 1。

1.2.2 制备样品

称取适量整粒样品至 20 mL 顶空瓶中, 加入饱和氯化钠溶液 10 mL, 在 80 °C 的温度条件下加热 30 min 后, 将顶空固相微萃取进样针扎入距离样品 2 cm 顶空瓶上方空气中, 吸附时间 30 min, 进样口解吸 5 min。

1.2.3 色谱条件

色谱柱: HP-5MS 超高惰性色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm); 进样口温度为 250 °C; 传输线温度为 280 °C; 氦气作为载气, 流速为 1.0 mL/min; 不分流进样。程序升温条件: (1)柱初始温度为 50 °C, 保持 2 min; (2)以 5 °C/min 升至 180 °C, 保持 5 min; (3)以 10 °C/min 升至 250 °C, 保持 5 min。

1.2.4 质谱条件

电子轰击离子源(electron ionization, EI)能量为 70 eV, 离子源温度为 230 °C, 四极杆温度为 150 °C, 全扫描模式, 质谱质量扫描范围为 40~600 amu。

1.3 数据处理

通过检索美国国家标准与技术研究院(national institute of standards and technology, NIST) 14 标准数据库检索确定挥发性化合物, 利用数据库中现有化合物的质谱数据进行比较和匹配, 采用峰面积归一化法计算各挥发性组分相对含量。

2 结果与分析

2.1 常山胡柚干花香气成分

由表 1 可知, 常山胡柚干花中共检测出 92 种化合物, 胡柚干花中挥发性成分以醇、烯类为主, 包括 39 种醇类、31 种烯类、7 种酯类、5 种酮类、5 种醛类、13 种烷类、4

种酚类、5 种其他类别的化合物。其中, 芳樟醇(25.94%) 相对含量最高, 为主要成分, 这与福建蜜柚柚花的香气成分有些不同^[20], 蜜柚柚花中芳樟醇相对含量超过 64%。(E)-β-金合欢烯(7.34%)、乙酸芳樟酯(7.20%)、β-榄香烯(6.71%) 等 3 种成分相对含量次之, (1S,2E,6E,10R)-3,7,11,11-四甲基双环[8.1.0]十一碳-2,6-二烯(3.22%)、西柏烯(3.03%)、2-亚甲基-4,8,8-三甲基-4-乙基-双环[5.2.0]壬烷(2.76%)、(1R,2S,6S,7S,8S)-8-异丙基-1-甲基-3-亚甲基三环[4.4.0.0.2,7]癸烯(2.33%)、(3R-反式)-4-乙基-4-甲基-3-(1-甲基乙基)-1-(1-甲基乙基)-环己烯(1.91%)、里哪醇(1.83%)、反式-橙花叔醇(1.67%)、2,6-二甲基-10-亚甲基十二碳-2,6,11-三烯-1-醛(1.55%)、1-异丙基-4,7-二甲基-1,2,3,5,6,8a-六氢萘(1.49%)、α-松油醇(1.20%) 和异环柠檬醛(1.03%)等 11 种成分相对含量均大于 1%。其中 70 种成分为胡柚干花特有的挥发性成分。

2.2 坞坑红茶香气成分

由表 1 可知, 坞坑红茶中共检测出 78 种化合物, 坞坑红茶中挥发性成分以醇类为主, 包括 41 种醇类、11 种烯类、15 种酯类、11 种酮类、9 种醛类、6 种烷类、2 种酚类、8 种其他类别的化合物。其中, 香叶醇(22.90%) 相对含量最高, 为主要成分, 与张琳等^[21]研究一致, 苯乙醇(7.95%)、芳樟醇(7.32%)、苯乙醛(4.86%)、(3R,6S)-2,2,6-三甲基-6-乙基四氢-2H-吡喃-3-醇(4.60%) 等 4 种成分相对含量次之, 水杨酸甲酯(2.71%)、2,5-二甲基-3-己烯-2,5-二醇(2.32%)、3-羟基-2,2,4-三甲基戊基异丁酸酯(2.26%)、苯甲醇(1.89%)、(Z)-2-甲基丙酸-3-己烯酯(1.55%)、β-紫罗兰酮(1.45%)、(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯酸(1.44%)、α-亚乙基-苯乙醛(1.40%)、橙花醇(1.23%)、可卡醛(1.22%)、橙花叔醇(1.21%)、大马士酮(1.17%)、3,5-二羟基戊苯(1.04%)、丁基苯基酯碳酸(1.00%)等 14 种成分相对含量均大于 1%。43 种成分为坞坑红茶特有的挥发性成分。

2.3 胡柚花窈制红茶香气成分

由表 1 可知, 胡柚花窈制红茶中共检测出 67 种化合物, 胡柚花窈制红茶中挥发性成分以醇类为主。包括 41 种醇类、10 种烯类、12 种酯类、11 种酮类、8 种醛类、5 种烷类、1 种酚类、5 种其他类别的化合物。橙花醇(18.89%) 相对含量最高, 为主要成分, 芳樟醇(9.81%)、顺式 1-甲基-4-(1-甲基乙基)-环己醇-(7.04%)、苯乙醇(4.94%)等 3 种

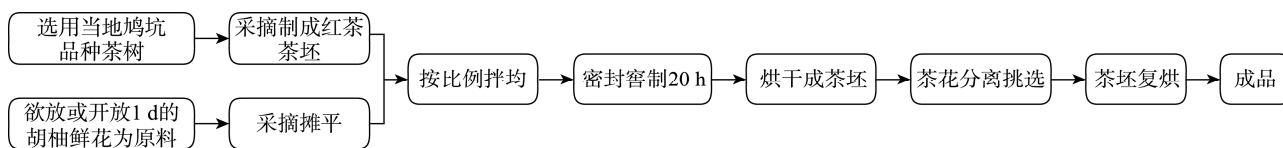


图 1 胡柚花窈制红茶加工工艺流程图

Fig.1 Flowchart of the process for scented Changshan-huyou scented tea

表1 胡柚花窰制红茶、胡柚干花及鸠坑红茶香气成分分析结果

Table 1 Analysis of volatile components in Changshan-huyou scented tea, flower of Changshan-huyou and Jiukeng black tea

编号	分子式	化合物	相对含量/%			编号	分子式	化合物	相对含量/%		
			胡柚干花	鸠坑红茶	胡柚花窰制红茶				胡柚干花	鸠坑红茶	胡柚花窰制红茶
1	154.25	橙花醇	0.21	1.23	18.89	41	306.44	5-羟基-2,4-二叔丁基苯基戊酸酯	0.15	-	0.13
2	154.25	α -松油醇	1.20	0.89	0.73	42	222.37	(3R,3aR,3bR,4S,7R,7aR)-4-异丙基-3,7-二甲基八氢-1H-环戊烷[1,3]环丙烷[1,2]苯-3-醇	0.17	-	-
3	154.25	芳樟醇	25.94	7.32	9.81	43	174.28	1,2-癸二醇	-	0.28	-
4	122.16	苯乙醇	0.30	7.95	4.94	44	174.19	乙酸-2-甲基-1,3-二氧杂环己烷-2-乙醇	-	0.45	-
5	120.15	苯乙醛	0.84	4.86	3.18	45	222.37	反式-橙花叔醇	1.67	-	-
6	164.24	茉莉酮	0.95	0.26	0.14	46	180.24	甲酸酯-4-(1-甲基乙基)-1-环己基-1-甲醇	-	0.30	-
7	194.31	香叶基丙酮	0.38	0.33	0.23	47	294.52	3,7,11,15-四甲基十六醇-1-YN-3-OL	0.30	-	-
8	214.26	1,2-二苯氧基乙烷	0.23	0.33	0.34	48	220.35	[1aR-(1aa,4aa,7b,7ab,7ba)]-1-氢-1,1,7-三甲基-4-亚甲基-1H-环丙基[e]天青-7-醇	0.14	-	-
9	286.41	2,2,4-三甲基戊二醇异丁酯	0.47	0.88	0.99	49	222.37	里哪醇	1.83	-	-
10	216.32	3-羟基-2,2,4-三甲基戊基丁酸酯	0.98	2.26	1.83	50	170.25	2,6-二甲基辛-2,7-二烯-1,6-二醇	-	0.37	-
11	170.25	(3R,6S)-2,2,6-三甲基-6-乙基四氢-2H-吡喃-3-醇	-	4.60	3.29	51	152.23	2-丁烯-4-醇	-	-	0.34
12	170.25	2,6-二甲基-3,7-辛二烯-2,6-二醇	-	0.48	0.19	52	222.37	[2R-(2 α ,4 $\alpha\alpha$,8 $\alpha\beta$)]-1,2,3,4,4 α ,5,6,8 α -八氢- α , α ,4 α ,8-四甲基-2-萘甲醇	0.27	-	-
13	222.37	橙花叔醇	-	1.21	0.96	53	222.37	[2R-(2 α ,4 $\alpha\beta$,8 β)]-2,3,4,4 α ,5,6,7,8-八氢- α , α ,4 α ,8-四甲基-2-萘甲醇	0.36	-	-
14	226.36	2,4,7,9-四甲基-5-癸炔-4,7-二醇	0.13	0.48	-	54	140.22	3,6-二甲基-1-庚炔-3-醇	0.16	-	-
15	108.14	苯甲醇	-	1.89	1.40	55	154.25	(-)-4-萜品醇	0.99	-	-
16	154.25	香叶醇	-	22.9	0.68	56	142.20	2,5-二甲基-3-己炔-2,5-二醇	-	2.32	-
17	180.24	3,5-二羟基戊酸	-	1.04	0.48	57	154.25	薰衣草醇	0.15	-	-
18	168.23	(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯酸	-	1.44	1.45	58	222.37	7-表- α -桉叶油醇	0.08	-	-
19	144.13	四氢环丁烷[1,2-d:3,4-d']双[1,3]二唑,(3aa,3ba,6aa,6ba)-	0.30	0.34	-	59	136.19	(\pm)-1-苯基-2-丙醇	0.28	-	-
20	98.10	2-甲氧基呋喃	0.11	-	0.27	60	152.23	葛缕醇	0.21	-	-
21	150.22	2,3-二氢-2,2,6-三甲基苯甲醛	-	0.28	0.24	61	222.37	榄香醇	0.33	-	-
22	188.27	可卡醛	-	1.22	0.91	62	154.25	顺式-1-甲基-4-(1-甲基乙基)-环己醇	-	-	7.04
23	146.19	α -亚乙基-苯乙醛	-	1.4	0.92	63	142.24	4-(1-甲基乙基)环己醇	-	-	0.67
24	152.23	柠檬醛	-	0.79	0.48	64	156.27	DL-薄荷醇	0.16	-	-
25	156.27	癸醛	0.08	0.13	-	65	114.19	trans-4-甲基环己醇	-	0.55	-
26	152.23	(Z)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛	-	0.39	0.26	66	220.35	异戊烯醇	0.30	-	-
27	190.28	大马士酮	-	1.17	0.74	67	152.19	甲氧基-二甲基苯甲醇	0.46	-	-
28	192.30	β -紫罗兰酮	-	1.45	1.03	68	152.23	2-二烯-8-醇对薄荷-1(7)	-	-	1.69
29	190.28	4-(2,6,6-三甲基-1,3-环己二烯-1-基)-3-丁烯-2-酮	-	0.23	0.25	69	170.25	反-A,4-5-三甲基-5-乙基四氢化-2-呋喃甲醇	-	-	1.85
30	204.35	2-亚甲基-4,8,8-三甲基-4-乙基双环[5.2.0]壬烷	2.76	-	0.31	70	56.06	炔丙醇	-	-	0.29
31	240.47	2-甲基二六烷	0.15	-	0.05	71	222.37	[1R-(1 α ,4 β ,4 $\alpha\beta$,8 $\alpha\beta$)]-1,2,3,4,4 α ,7,8,8 α -八氢-1,6-二甲基-4-(1-甲基乙基)-1-萘酚	0.20	-	-
32	198.39	十四烷	0.20	-	0.17	72	206.32	2,4-二叔丁基苯酚	-	0.50	-
33	184.36	十三烷	0.11	0.10	-	73	150.22	4-异丙基-3-甲基苯酚	0.15	-	-
34	204.35	(E)- β -金合欢烯	7.34	0.46	-	74	150.22	香芹酚	0.18	-	-
35	204.35	β -榄香烯	6.71	-	0.33	75	150.17	5-乙基-2-甲氧基-苯酚	0.27	-	-
36	204.35	Δ -杜松烯	0.24	0.44	-	76	136.19	3,5-二甲基苯甲醚	0.94	-	-
37	204.35	长叶蒎烯	-	0.18	0.15	77	114.14	四氢-1H,3H-呋喃并[3,4-c]呋喃	-	-	0.08
38	170.25	(Z)-2-甲基丙酸-3-己烯酯	-	1.55	1.04	78	190.24	2,3-二氢-1,1-二甲基-1H-茛-4-羧酸	-	0.46	-
39	198.30	(Z)-己酸-3-己烯酯	-	0.17	0.14	79	138.16	2,2'-四氢-2,2',5'-双呋喃	-	0.27	-
40	152.15	水杨酸甲酯	-	2.71	1.79	80	204.26	2,2'-异亚丙基双(5-甲基呋喃)	0.19	-	-

表1(续)

编号	分子式	化合物	相对含量/%			编号	分子式	化合物	相对含量/%		
			胡柚干花	鸬坑红茶	胡柚花蜜制红茶				胡柚干花	鸬坑红茶	胡柚花蜜制红茶
81	150.22	薄荷醇呋喃	0.22	-	-	121	226.44	2,5-二甲基十五烷-	0.08	-	-
82	432.68	3-甲氧基-二十烷基酯苯甲酸	-	0.62	-	122	184.36	2,8-二甲基十一烷-	-	0.20	-
83	194.23	丁苯基酯碳酸	-	1	-	123	204.35	α -人参烯	0.20	-	-
84	112.13	甲基糠基醚	-	0.19	-	124	204.35	(+)-表-双环倍半水芹烯	0.25	-	-
85	144.17	3-苯基呋喃	-	0.5	-	125	204.35	(1R,2S,6S,7S,8S)-8-异丙基-1-甲基-3-亚甲基三环[4.4.0.0.2,7]癸烯-	2.33	-	-
86	248.36	2-乙基己基酯苯乙酸	-	-	0.18	126	204.35	(1S,2E,6E,10R)-3,7,11,11-四甲基双环[8.1.0]十一碳-2,6-二烯	3.22	-	-
87	188.22	2,7-二甲氧基萘	-	-	0.27	127	204.35	(1S,4aR,8aS)-1-异丙基-7-甲基-4-亚甲基-1,2,3,4,4a,5,6,8a-八氢萘	0.14	-	-
88	90.08	三聚甲醛	-	0.54	-	128	272.47	(S,E)-8,12,15,15-四甲基-4-亚甲基二环[9.3.1]十五碳-7,11-二烯	0.56	-	-
89	152.23	β -环柠檬醛	-	-	0.33	129	200.32	A-二去氢菖蒲烯	-	0.21	-
90	218.33	2,6-二甲基-10-亚甲基十二碳-2,6,11-三烯-1-醛	1.55	-	-	130	204.35	(-)-A-橙澄茄油烯	0.16	-	-
91	106.12	苯甲醛	-	-	0.52	131	204.35	α -依兰烯	-	0.17	-
92	168.23	丁香醛 B	0.13	-	-	132	136.23	月桂烯	-	-	0.28
93	152.23	异环柠檬醛	1.03	-	-	133	272.47	西柏烯	3.03	-	-
94	134.13	间苯二甲醛	-	0.17	-	134	204.35	[S-(R*,S*)]-5-(1,5-二甲基-4-己烯基)-2-甲基-1,3-环己二烯	0.16	-	-
95	192.30	α -紫罗酮	-	0.16	-	135	148.16	1,4-二醛基-2-甲基苯	-	-	0.11
96	202.21	5-甲氧基-7-甲基-1,2-萘醌-	-	0.43	-	136	204.35	大根香叶烯 B	0.19	-	-
97	192.21	5-(1,1-二甲基乙基)-1,3-苯并二氧杂环-2-酮	-	0.28	-	137	280.53	1-二十碳烯	0.09	-	-
98	138.16	2-甲基-5-丙酰呋喃	-	0.76	-	138	128.21	3-甲氧基-1-庚烯	-	-	2.15
99	164.20	2'-羟基-4';5'-二甲基苯乙酮	0.58	-	-	139	204.35	1-异丙基-4,7-二甲基-1,2,3,5,6,8a-六氢萘	1.49	-	-
100	110.15	3-甲基-2-环己烯-1-酮	-	-	0.22	140	272.47	2-丁基-3-己基-1,2,3,4-四氢萘-	0.09	-	-
101	198.30	2,9-二甲基-3,8-癸二酮	-	0.13	-	141	112.21	2,4,4-三甲基-2-戊烯	0.10	-	-
102	192.30	4-(2,6,6-三甲基-2-环己烯-1-基)-3-丁烯-2-酮	-	-	0.26	142	178.27	3-(2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-基)-2-丙烯	-	0.80	-
103	142.24	2,4-二甲基-3-庚酮	-	0.14	-	143	136.23	3-萘烯	0.42	-	-
104	206.28	4'-丙氧基-2-甲基丙酮	0.22	-	-	144	180.25	4a,9a-甲基-9H-芴	-	-	0.03
105	112.17	5-甲基-4-己烯-3-酮	-	-	0.15	145	200.32	4-异丙基-6-甲基-1-亚甲基-1,2,3,4-四氢萘	-	-	0.12
106	150.22	右旋香芹酮	0.56	-	-	146	232.40	(1-丙基辛基)-苯	0.59	-	-
107	174.24	3-苯基环己酮	-	-	0.37	147	204.35	A-布黎烯	0.23	-	-
108	194.31	二环己基甲酮	-	-	0.14	148	136.19	4-甲基苯乙醚	-	-	0.21
109	194.18	4,6-二甲氧基-1,3-二氢-2-苯并呋喃-1-酮	-	-	0.84	149	190.32	1,4-二异丙基-2,5-二甲苯	-	-	0.33
110	146.23	1-乙基茛菪满	-	-	0.15	150	136.23	左旋- β -蒎烯	0.59	-	-
111	136.23	1-亚甲基-4-(1-甲基乙基)环己烷	-	0.37	-	151	204.35	双环倍半萜烯	0.13	-	-
112	170.33	十二烷	-	0.18	-	152	272.47	2,3-二乙基-4a,5,6,7,8,9,10,12,13-十氢苯并环十二烯	0.10	-	-
113	184.36	4-甲基十二烷	-	0.18	-	153	204.35	β -石竹烯	-	-	0.68
114	240.47	正十七烷	0.22	-	-	154	136.23	(+)-柠檬烯	0.49	-	-
115	254.49	3-甲基十七烷	0.13	-	-	155	204.35	(3R-反式)-4-乙基-4-甲基-3-(1-甲基乙基)-1-(1-甲基乙基)-环己烯	1.91	-	-
116	296.57	正二十一烷	0.07	-	-	156	204.35	(-)-异喇叭烯	0.56	-	-
117	282.55	正二十烷	0.08	-	-	157	272.47	m-樟脑烯	0.25	-	-
118	226.44	杨白纹潜叶蛾性信息素	0.15	-	-	158	160.26	1-乙基-1,2,3,4-四氢萘-	-	0.08	-
119	254.49	正十八烷	0.05	-	-	159	172.27	1,1,6-三甲基-1,2-二氢萘	-	0.15	-
120	198.39	3-甲基十三烷	0.07	-	-	160	204.35	β -瑟林烯	0.79	-	-

表 1(续)

编号	分子式	化合物	相对含量/%			编号	分子式	化合物	相对含量/%		
			胡柚干花	鸠坑红茶	胡柚花窰制红茶				胡柚干花	鸠坑红茶	胡柚花窰制红茶
161	204.35	2,3,4,4a,5,6-六氢-1,4-二甲基-7-(1-甲基乙基)-萘	0.76	-	-	174	386.52	2-乙基-1,2,3-丙三基丁酸酯	-	-	0.39
162	188.31	6-(1,1-二甲基乙基)-1,2,3,4-四氢萘-	-	0.44	-	175	184.28	Z-3-甲基丁酸-3-己烯酯	-	-	0.14
163	136.23	1,3,3-三甲基三环[2.2.1.0(2,6)]庚烷-	0.51	-	-	176	212.29	碳酸甲酯[(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯-1-基]酯	-	-	0.15
164	204.35	S-3,7(11)-二烯	0.26	-	-	177	222.24	邻苯二甲酸二乙酯	-	0.61	-
165	190.24	7-甲氧基-2,2-二甲基色烯	-	0.16	-	178	232.32	3-苯基-2-丙烯基己酸酯	-	0.12	-
166	210.27	9,9-二甲基氧杂蒽	-	0.04	-	179	270.45	棕榈酸甲酯	-	0.07	-
167	180.24	二氢猕猴桃内酯	-	0.39	-	180	196.29	乙酸香叶酯	-	-	0.11
168	196.29	(Z)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯-1-醇乙酸酯	0.40	-	-	181	196.29	乙酸芳樟酯	7.2	-	-
169	154.16	糠酸丙酯	-	0.12	-	182	224.30	茉莉酸甲酯	0.29	-	-
170	142.20	丁位辛内酯	-	-	0.1	183	98.10	2-丁炔酸甲酯	-	-	0.17
171	196.29	5-甲基-2-(1-甲基乙基)-4-己烯-1-醇乙酸酯	0.32	-	-	184	184.28	正戊酸叶醇酯	-	0.14	-
172	316.48	二十碳五烯酸甲酯	-	0.26	-	185	184.28	反-2-己烯基异戊酸酯	-	0.13	-
173	204.26	苯甲酸环己酯	-	0.14	-	186	182.26	(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯酸甲酯	-	0.2	-

注: -表示未检出。

成分相对含量次之, (3*R*,6*S*)-2,2,6-三甲基-6-乙基四氢-2*H*-吡喃-3-醇(3.29%)、苯乙醛(3.18%)、3-甲氧基-1-庚烯(2.15%)、反-4,4-5-三甲基-5-乙基四氢化-2-呋喃甲醇(1.85%)、3-羟基-2,2,4-三甲基戊基异丁酸酯(1.83%)、水杨酸甲酯(1.79%)、2-二烯-8-醇对薄荷-1(7)(1.69%)、(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯酸(1.45%)、苯甲醇(1.40%)、(Z)-2-甲基丙酸-3-己烯酯(1.04%)、β-紫罗兰酮(1.03%)等 11 种成分相对含量均大于 1%。其中 32 种成分为胡柚花窰制红茶特有的挥发性成分。

2.4 胡柚干花、胡柚花窰制红茶及鸠坑红茶香气共同成分分析

胡柚干花、胡柚花窰制红茶及鸠坑红茶香气中均检出橙花醇、α-松油醇、芳樟醇、苯乙醇、苯乙醛、茉莉酮、香叶基丙酮、1,2-二苯氧基乙烷、2,2,4-三甲基戊二醇异丁酯、3-羟基-2,2,4-三甲基戊基异丁酸酯等 10 种成分, 图 2 为 10 种共有成分在 3 种样品中的相对含量变化趋势。

其中, 橙花醇、1,2-二苯氧基乙烷、2,2,4-三甲基戊二醇异丁酯等 3 种成分在胡柚花窰制红茶中的相对含量较胡柚干花和鸠坑红茶均有不同程度的提高, 橙花醇增幅最大, 相对含量增加至 18.89%。橙花醇是一种具有花果甜香的较为温和的香气成分^[22-23], 这一结果表明胡柚花窰制红茶较鸠坑红茶、胡柚干花更具有花果香。

苯乙醇、苯乙醛、3-羟基-2,2,4-三甲基戊基异丁酸酯等 3 种成分在胡柚干花中相对含量最低, 在鸠坑红茶中相对含量最高, 其中苯乙醇、苯乙醛为花香化合物^[24-25], 表明鸠坑红茶较胡柚花窰制红茶具有更浓的花香味, 而胡柚花窰制红茶较胡柚干花具有更浓的花香味。

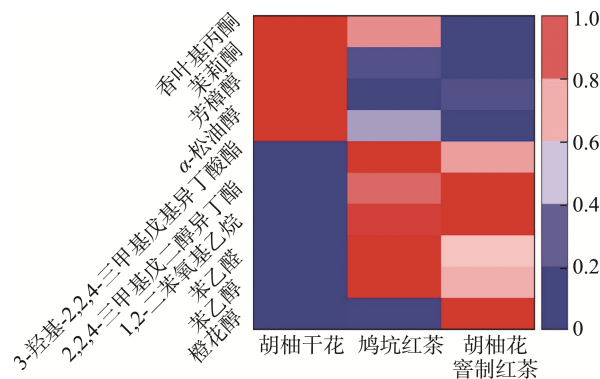


图 2 3 种样品共有挥发性成分热图
Fig.2 Heatmap of common volatile components in 3 kinds of samples

芳樟醇相对含量在胡柚干花中最高(25.94%), 在鸠坑红茶中最低(7.32%), 而芳樟醇是体现花香和甜香的代表性化合物^[26], 表明胡柚花窰制红茶较鸠坑红茶具有一定的花香味。茉莉酮^[27]、α-松油醇^[28]和香叶基丙酮^[29]等 3 种成分均为花香香气化学成分, 其相对含量均在胡柚干花中最高, 胡柚花窰制红茶中最低。表明经过加工后, 胡柚花窰制红茶中挥发性成分相对含量和种类与鸠坑红茶差异较小。

综上所述, 胡柚花窰制红茶中香气成分主要以鸠坑红茶为主, 但与鸠坑红茶相比更具有一定的果香, 因此胡柚花窰制红茶兼具花果香和甜香。

2.5 胡柚干花、胡柚花窰制红茶及鸠坑红茶香气成分差异分析

与胡柚干花相比,胡柚花窰制红茶中醇、醛、酮类成分相对含量有一定程度的增高,主要为顺式 1-甲基-4-(1-甲基乙烯基)-环己醇-、橙花醇、苯甲醇、苯乙醇和(3*R*,6*S*)-2,2,6-三甲基-6-乙炔基四氢-2*H*-吡喃-3-醇等 5 种醇类成分;而酚、醚、烷、烯、酯等成分相对含量降低,主要为(*E*)- β -金合欢烯、 β -榄香烯、(1*R*,2*S*,6*S*,7*S*,8*S*)-8-异丙基-1-甲基-3-亚甲基三环[4.4.0.0_{2,7}]癸烯-、(1*S*,2*E*,6*E*,10*R*)-3,7,11,11-四甲基双环[8.1.0]十一碳-2,6-二烯、西柏烯、(3*R*-反式)-4-乙炔基-4-甲基-3-(1-甲基乙烯基)-1-(1-甲基乙基)-环己烯、 β -瑟林烯等 7 种烯类成分,相对含量下降最多。

与鸠坑红茶相比,胡柚花窰制红茶中烯类成分相对含量中有一定程度的增高,主要为 β -榄香烯、月桂烯、1,4-二醛基-2-甲基苯、3-甲氧基-1-庚烯、4*a*,9*a*-甲基-9*H*-蒈、4-异丙基-6-甲基-1-亚甲基-1,2,3,4-四氢萘、4-甲基苯乙醚、1,4-二异丙基-2,5-二甲苯、 β -石竹烯等 9 种成分,3-甲氧基-1-庚烯相对含量提升最多,达到了 2.15%。而酚、醛、酯类成分相对含量较鸠坑红茶中有一定程度的降低,主要为苯乙醛、3-羟基-2,2,4-三甲基戊基异丁酸酯、3,5-二羟基戊苯、2,3-二氢-2,2,6-三甲基苯甲醛、可卡醛、 α -亚乙基-苯乙醛、柠檬醛、(*Z*)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛、(*Z*)-2-甲基丙酸-3-己烯酯、(*Z*)-己酸-3-己烯酯、水杨酸甲酯等 11 种成分,苯乙醛相对含量降低最多,从鸠坑红茶中的 4.86%降为 3.18%。

胡柚花窰制红茶中有 51 种成分在胡柚干花中未检出,其中含醇类 11 种,酮烯酯类各 9 种,醛类 7 种。51 种成分中,顺式 1-甲基-4-(1-甲基乙烯基)-环己醇-以及(3*R*,6*S*)-2,2,6-三甲基-6-乙炔基四氢-2*H*-吡喃-3-醇两种成分相对含量在胡柚干花茶中检测得到的相对含量较高,分别为 7.04%和 3.29%;3-甲氧基-1-庚烯、反-*A*,*A*-5-三甲基-5-乙炔基四氢化-2-呋喃甲醇、水杨酸甲酯、2-二烯-8-醇对薄荷-1(7)、(*E*)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯酸、苯甲醇、(*Z*)-2-甲基丙酸-3-己烯酯、 β -紫罗兰酮等 8 种成分相对含量增加超过 1%。

胡柚花窰制红茶中有 38 种成分在鸠坑红茶未检出,其中含烯类 9 种,酯类 7 种,醇酮类各 6 种。38 种成分中,其中顺式 1-甲基-4-(1-甲基乙烯基)-环己醇-以及 3-甲氧基-1-庚烯两种成分相对含量在胡柚花窰制红茶中检测得到的相对含量较高,分别为 7.04%和 2.15%;反-*A*,*A*-5-三甲基-5-乙炔基四氢化-2-呋喃甲醇和 2-二烯-8-醇对薄荷-1(7)两种成分相对含量增加超过 1.00%。

76 种成分在胡柚干花中检出而在胡柚花窰制红茶中未得到检出,其中含烯类 30 种,醇类 18 种。76 种成分中,(*E*)- β -金合欢烯和乙酸芳樟酯两种成分相对含量在胡柚干花中检测得到的相对含量较高,分别为 7.34%和 7.20%;(1*S*,2*E*,6*E*,10*R*)-3,7,11,11-四甲基双环[8.1.0]十一碳-2,6-二

烯、西柏烯、(1*R*,2*S*,6*S*,7*S*,8*S*)-8-异丙基-1-甲基-3-亚甲基三环[4.4.0.0_{2,7}]癸烯-、(3*R*-反式)-4-乙炔基-4-甲基-3-(1-甲基乙烯基)-1-(1-甲基乙基)-环己烯、里哪醇、反式-橙花叔醇、2,6-二甲基-10-亚甲基十二碳-2,6,11-三烯-1-醛、1-异丙基-4,7-二甲基-1,2,3,5,6,8*a*-六氢萘、异环柠檬醛等 9 种成分相对含量降低幅度超过 1.00%。

49 种成分在鸠坑红茶中检出而在胡柚花窰制红茶中未得到检出,其中含烯酯类各 10 种。49 种成分中,2,5-二甲基-3-己炔-2,5-二醇以及丁基苯基酯碳酸两种成分相对含量降低幅度超过 1%,其在鸠坑红茶中检测得到的相对含量分别为 2.32%和 1%。

经过加工处理后,共 32 种成分均在胡柚干花和鸠坑红茶中未检出,为胡柚花窰制红茶特有的香气成分,其中包含烯类 8 种,酯酮醇各 6 种。32 种成分中,顺式 1-甲基-4-(1-甲基乙烯基)-环己醇-相对含量增加最多,为 7.04%,3-甲氧基-1-庚烯(2.15%)、反-*A*,*A*-5-三甲基-5-乙炔基四氢化-2-呋喃甲醇(1.85%)、2-二烯-8-醇对薄荷-1(7) (1.69%)等 3 种成分相对含量增加幅度超过 1%。

3 讨论与结论

通过 SPME-GC-MS 技术对胡柚干花、鸠坑红茶和胡柚花窰制红茶的香气成分进行测定分析,共检测到挥发性化合物 186 种,其中共有挥发性成分 10 种,胡柚干花、鸠坑红茶和胡柚花窰制红茶中挥发性化合物分别为 92、78 和 67 种。胡柚干花中挥发性成分以醇、烯类为主,鸠坑红茶和胡柚花窰制红茶中挥发性成分以醇类为主。橙花醇、芳樟醇等呈花果香以及甜香的成分是胡柚花窰制红茶中最主要的香气成分,这使得胡柚花窰制红茶呈现出浓郁的花果香和甜香,但要明确其贡献率,还需对两种成分进行定量分析并结合阈值进行深入讨论。

通过对比分析,胡柚花窰制红茶相较于胡柚干花,醇类成分增加,烯类成分减少;相较于鸠坑红茶,烯类成分增加,醛类成分减少。胡柚花窰制红茶中分别有 51 种和 38 种成分在胡柚干花、鸠坑红茶未被检出,主要为醇酮烯酯等 4 类,而 76 种和 49 种成分分别在胡柚干花和鸠坑红茶中检出而在胡柚花窰制红茶中未被检出,主要为烯醇类和烯酯类。胡柚花窰制红茶中挥发性成分的增加可能与胡柚干花的添加有关,在胡柚干花与红茶的结合过程中,茶叶中活性物质可能在微生物和热处理的作用下促进醇类化合物的生成^[30],而加工过程中的挥发或反应造成了醛类成分的减少^[31],使得胡柚花窰制红茶相较于胡柚干花醇类成分增加,相较于鸠坑红茶醛类成分减少。

胡柚花窰制红茶中特有的 32 种成分可能与其独特的加工工艺和胡柚干花、红茶种类的选择有关,这些成分的发现在胡柚花窰制红茶的香气特征提供了科学依据,也

为进一步的香气成分研究和胡柚花窰制红茶品质改良提供了方向。因此,对特定成分进行定量分析,并研究其对胡柚花窰制红茶风味贡献将成为待解决的问题。此外,研究还应探讨胡柚花窰制红茶加工过程中香气成分的变化机制,以及如何通过工艺优化来增强胡柚花窰制红茶的香气特性。除此之外,还可以考虑以胡柚干花窰制其他茶类,以开发出更多的胡柚花香的窰制茶,丰富花香再制茶的品类。

参考文献

- [1] 罗学平,李丽霞,钟晓雪,等.桂花绿茶窰花前后品质成分变化研究[J].茶叶通讯,2021,48(3):448-455.
LUO XP, LI LX, ZHONG XX, *et al.* Study on the changes of quality components of *Osmanthus fragrans* green tea before and after scenting [J]. Journal of Tea Communication, 2021, 48(3): 448-455.
- [2] 阮舒铃,杨梓煜,周子维.花果香型工夫红茶工艺与品质研究进展[J].食品安全质量检测学报,2024,15(13):248-257.
RUAN SL, YANG ZY, ZHOU ZW, *et al.* Research advance on processing craft and quality flowery-fruity flavour Congou black tea [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(13): 248-257.
- [3] 阙玉林,阙忠熠.一种梔子花香白茶的制作技术[J].农业与技术,2020,40(23):45-48.
QUE YL, QUEE ZY. A study on the preparation technology of gardenia jasminoides flower scented white tea [J]. Agriculture and Technology, 2020, 40(23): 45-48.
- [4] 崔宏春,赵芸,黄海涛,等.茉莉花茶加工技术及风味品质研究进展[J].安徽农业科学,2024,52(1):17-20.
CUI HC, ZHAO Y, HUANG H, *et al.* Research progress on processing technology and flavor quality of jasmine tea [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2024, 52(1): 17-20.
- [5] 谷凤林,房一明,胡荣锁,等.电子感官在玉兰花茶品质分析中的应用[J].中国食品学报,2012,12(3):167-175.
GU FL, FANG YM, HU RS, *et al.* Application of electronic sensors on quality analysis of magnolia tea [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2012, 12(3): 167-175.
- [6] 李丽霞,罗学平,敬廷桃,等.SPME-GC-MS联用法分析梔子红茶香气成分[J].食品工业科技,2016,37(17):302-307.
LI LX, LUO XP, JING TT, *et al.* SPME-GC-MS analysis of aroma components in gardenia jasminoides scented black tea [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(17): 302-307.
- [7] 赖建东,余子铭,郭志明,等.桂花青砖茶制备工艺优化及挥发性成分分析[J].中国酿造,2024,43(12):224-230.
LAI JD, YU ZM, GUO ZM, *et al.* Preparation process optimization and volatile components analysis of *Osmanthus fragrans* Qingzhu tea [J]. China Brewing, 2024, 43(12): 224-230.
- [8] 唐梦婷,廖献盛,谷梦雅,等.基于HS-SPME-GC-MS分析三种茶窰窰制桂花茶的香气成分[J].现代食品科技,2024,40(3):247-258.
TANG MT, LIAO XX, GU MY, *et al.* Analysis of aromatic compounds in three types of tea dhoools scented with osmanthus using HS-SPME-GC-MS [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(3): 247-258.
- [9] 廖远东,夏红玲,刘容飞,等.不同茶窰窰制柚花茶中化学成分变化及感官品质差异[J].广东茶业,2023(6):9-12.
LIAO YD, XIA HL, LIU RF, *et al.* Variations in chemical components and sensory quality differences in pomelo flower tea made from different tea substrates [J]. Guangdong Tea Industry, 2023(6): 9-12.
- [10] 徐凯明,吴晔,吴航,等.桔柑花茶窰制加工工艺探索[J].中国茶叶加工,2020(2):30-32.
XU KM, WU Y, WU H, *et al.* Study on the processing technology of orange flower tea [J]. China Tea Processing, 2020(2): 30-32.
- [11] 张远志.乙醇提取法与树脂吸附法提取柚子花香气成分的对比较研究[J].饮料工业,2017,20(3):12-16.
ZHANG YZ. Comparative study on aroma components from citrus maxima flower by ethanol extraction method and resin adsorption method [J]. Beverage Industry, 2017, 20(3): 12-16.
- [12] 孙丹,王登良.红茶发酵与干燥工序技术理论与品质关系的探讨[J].广东茶业,2016(1):2-6.
SUN D, WANG DL. A discussion on the relationship between the theory of fermentation and drying process techniques and the quality of black tea [J]. Guangdong Tea Industry, 2016(1): 2-6.
- [13] TAN QY, PENG LJ, HUANG YY, *et al.* Structure-activity relationship analysis on antioxidant and anticancer actions of theaflavins on human colon cancer cells [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 67(1): 159-170.
- [14] PAN HB, LI J, RANKIN OG, *et al.* Synergistic effect of black tea polyphenol, theaflavin-3,3'-digallate with cisplatin against cisplatin resistant human ovarian cancer cells [J]. Journal of Functional Foods, 2018, 46: 1-11.
- [15] ZHANG H, QI RL, MINE Y. The impact of oolong and black tea polyphenols on human health [J]. Food Bioscience, 2019, 29: 55-61.
- [16] 郑云云,黄锐敏,陈美卿,等.固相微萃取结合气相色谱-质谱联用技术对黄金蜜柚天然花香成分的分析[J].食品安全质量检测学报,2020,11(14):4602-4607.
ZHENG YY, HUANG RM, CHEN MQ, *et al.* Analysis of natural floral components of golden pomelo by solid phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(14): 4602-4607.
- [17] 李福香,明建,敖森,等.柑橘花不同部位香气成分的测定及主成分分析[J].食品与机械,2018,34(10):31-34,85.
LI FX, MING J, AO M, *et al.* Determination and principal component analysis of volatile compounds in different parts of *Citrus reticulata* Blanco. flowers [J]. Food & Machinery, 2018, 34(10): 31-34, 85.
- [18] 陈青,姚蓉君,张前军.固相微萃取气质联用分析野茉莉花的香气成分[J].精细化工,2007(2):159-161.
CHEN Q, YAO RJ, ZHANG QJ. Analysis of volatile components from flowers of *Styrax japonicus* Sieb. by GC-MS with solid-phase microextraction [J]. Fine Chemicals, 2007(2): 159-161.
- [19] 李丽华,郑玲,刘晓松.固相微萃取气质联用分析茉莉花的香气成分[J].化学分析计量,2006(2):37-39.
LI LH, ZHENG L, LIU XS. Solid phase microextraction gas chromatography mass spectrometry (SPME-GC-MS) analysis of jasmine flower aroma components [J]. Chemical Analysis and Meterage, 2006(2): 37-39.

- [20] 郑云云, 黄锐敏, 陈美卿, 等. SPME-GC/MS 联用技术比较分析不同品种蜜柚花的香气成分[J]. 中国南方果树, 2021, 50(2): 44–47.
ZHENG YY, HUANG RM, CHEN MQ, *et al.* SPME-GC/MS combined technology for comparative analysis of aroma components in different varieties of pomelo flowers [J]. South China Fruits, 2021, 50(2): 44–47.
- [21] 张琳, 鲁成银, 陈红平, 等. 顶空搅拌子吸附-热脱附-气相色谱-质谱联用法分析 4 种金华红茶香气成分[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(7): 2575–2581.
ZHANG L, LU CY, CHEN HP, *et al.* Analysis of aroma components from 4 varieties of Jinhua black tea by headspace-stir bar sorptive extraction-thermal desorption-gas chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(7): 2575–2581.
- [22] 潘婉舒, 胡先强, 张正义, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和 PLS-DA 分析不同季节早白尖红茶挥发性风味物质[J]. 食品工业科技, 2023, 44(1): 277–283.
PAN WS, HU XQ, ZHANG ZY, *et al.* Identification of volatile flavor compounds of Zaobaijian black tea harvested in different seasons based on HS-SPME-GC-MS and PLS-DA [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(1): 277–283.
- [23] 李金枝, 李伟才, 王弋, 等. “井岗红糯”荔枝果肉香气成分 GC-MS 分析[J]. 中国南方果树, 2023, 52(2): 54–57, 65.
LI JZ, LI WC, WANG Y, *et al.* GC-MS analysis of aroma components in Jinggang HongNuo Litchi Pulp [J]. South China Fruits, 2023, 52(2): 54–57, 65.
- [24] 冯立国, 生利霞, 赵兰勇, 等. 玫瑰花发育过程中芳香成分及含量的变化[J]. 中国农业科学, 2008, 41(12): 4341–4351.
FENG LG, SHENG LX, ZHAO LY, *et al.* Changes of the aroma constituents and contents in the course of *Rosa rugosa* Thunb. flower development [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(12): 4341–4351.
- [25] WU QY, ZHOU ZH, ZHANG YN, *et al.* Identification of key components responsible for the aromatic quality of Jinmudan black tea by means of molecular sensory science [J]. Foods, 2023, 12(9): 1794.
- [26] 王艳燕, 刘志薇, 严慧婷, 等. 变温发酵工艺滇红工夫挥发性成分及关键香气成分分析[J]. 食品科学, 2024, 45(23): 159–167.
WANG YY, LIU ZW, YAN HT, *et al.* Analysis of volatile components and key aroma components in Dianhong congou black tea produced by variable temperature fermentation [J]. Food Science (Beijing, China), 2024, 45(23): 159–167.
- [27] 赵志强, 陈罗君, 饶雨, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 对不同等级双井绿茶香气物质的研究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(10): 273–281.
ZHAO ZQ, CHEN LJ, RAO Y, *et al.* Aroma compounds of different grades Shuangjing green tea based on HS-SPME-GC-MS [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(10): 273–281.
- [28] 郑芳玲, 甘诗雅, 赵蕾, 等. 基于 GC-MS/GC-O 的不同地区红茶特征香气及分子感官分析[J]. 食品科学, 2023, 44(24): 262–268.
ZHENG FL, GAN SY, ZHAO L, *et al.* Characteristic aroma and molecular sensory analysis of black teas from different regions by gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-olfactometry [J]. Food Science, 2023, 44(24): 262–268.
- [29] 苗爱清, 吕海鹏, 孙世利, 等. 乌龙茶香气的 HS-SPME-GC-MS/GC-O 研究[J]. 茶叶科学, 2010, 30(S1): 583–587.
MIAO AIQ, LV HP, SUN SL, *et al.* HS-SPME-GC-MS/GC-O study on aroma of oolong tea [J]. Journal of Tea Science, 2010, 30(S1): 583–587.
- [30] FENG L, GAO S, LIU P, *et al.* Microbial diversity and characteristic quality formation of Qingzhuan tea as revealed by metagenomic and metabolomic analysis during pile fermentation [J]. Foods, 2023, 12(19). DOI: 10.3390/foods12193537
- [31] 马梦君, 彭茜雅, 涂修亮, 等. 不同加花工艺对桂花红茶品质的影响研究[J]. 食品科技, 2024, 49(5): 42–50.
MA MJ, PENG QY, TU XL, *et al.* Influence of different flower-adding techniques on osmanthus black tea quality [J]. Food Science and Technology, 2024, 49(5): 42–50.

(责任编辑: 蔡世佳 于梦娇)