

不同高香茶树品种加工尤溪红茶的关键香气成分及其在不同季节的差异分析

王月¹, 汪思佳¹, 陈谢勇¹, 唐梦婷¹, 张文敬¹, 向佳欣¹, 叶乃兴¹, 金珊¹, 王芳^{2*}, 杨江帆^{1*}

(1. 福建农林大学园艺学院, 福建福州 350002)(2. 宁德师范学院生物科学与工程学院, 福建宁德 352000)

摘要: 为探究不同高香茶树品种红茶的关键香气成分以及生长季节的影响。该研究以尤溪地区紫牡丹、瑞香、黄玫瑰的春茶和秋茶共 6 种高香型红茶为试验材料, 采用顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱联用 (Headspace Solid-Phase Microextraction-Gas Chromatography-Mass Spectrometry, HS-SPME-GC-MS) 结合相对气味活度值 (Relative Odor Activity Value, ROAV) 进行香气成分检测和分析。6 个红茶共鉴定出 116 种挥发性化合物, 醇类、酯类、杂环化合物、醛类和碳氢化合物是主要香气组分种类, 占香气总量的 94.81%~97.22%。结果表明, 2-异丙基-3-甲氧基吡嗪、 β -紫罗兰酮、苧烯醇、5-乙基-3-羟基-4-甲基-2(5H)-呋喃酮、二甲基三硫是 6 种高香型红茶共同的关键香气成分。香叶醇、月桂烯、乙酸芳樟酯、2-异丁基呋喃、丙酸叶醇酯、二氢月桂烯醇、芳樟醇氧化物 IV 可作为鉴别春季和秋季红茶的潜在化学标记物。研究结果有利于了解紫牡丹、瑞香、黄玫瑰红茶的香气特征, 为茶树品种的推广应用提供理论支持。

关键词: 高香茶树品种; 红茶; 关键香气成分; 季节

文章编号: 1673-9078(2025)12-265-277

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.12.1254

Key Aroma Components and Seasonal Differences of Youxi Black Teas Processed from Different High-aroma Tea Tree Varieties

WANG Yue¹, WANG Sijia¹, CHEN Xieyong¹, TANG Mengting¹, ZHANG Wenjing¹,

XIANG Jiabin¹, YE Naixing¹, JIN Shan¹, WANG Fang^{2*}, YANG Jiangfan^{1*}

(1.College of Horticulture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

(2.College of Biological Science and Engineering, Ningde Normal University, Ningde 352000, China)

Abstract: To investigate the key aroma components and the effects of growth seasons on Youxi high-aroma black teas from different tea tree varieties, this research was conducted using six high-aroma black teas, including spring and autumn teas of Zi Mudan, Rui Xiang, and Huang Meigui varieties, as the experimental materials. Headspace Solid-Phase Microextraction-Gas Chromatography-Mass Spectrometry (HS-SPME-GC-MS) and Relative Odor Activity Value (ROAV) were employed to detect and analyze the aroma compositions. A total of 116 volatile compounds were identified in the six black teas, with alcohols, esters,

引文格式:

王月,汪思佳,陈谢勇,等.不同高香茶树品种加工尤溪红茶的关键香气成分及其在不同季节的差异分析[J].现代食品科技, 2025,41(12):265-277.

WANG Yue, WANG Sijia, CHEN Xieyong, et al. Key aroma components and seasonal differences of youxi black teas processed from different high-aroma tea tree varieties [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(12): 265-277.

收稿日期: 2024-08-24; 修回日期: 2024-12-09; 接受日期: 2024-12-10

基金项目: 福建农林大学横向课题项目 (KH220108A); 福建张天福茶叶发展基金会科技创新基金项目 (FJZTF01); 中国乌龙茶产业协同创新中心开放研究基金项目 (2024W02)

作者简介: 王月 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 茶叶资源利用, E-mail: 1750673793@qq.com

通讯作者: 杨江帆 (1959-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 茶叶经济文化 with 资源利用, E-mail: yjf3001@163.com; 共同通讯作者: 王芳 (1982-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 茶叶加工与审评, E-mail: 809543206@qq.com

heterocyclic compounds, aldehydes, and hydrocarbons being the main aroma components, accounting for 94.81% to 97.22% of the total aroma content. The results showed that 2-isopropyl-3-methoxypyrazine, β -ionone, benzyl mercaptan, 5-ethyl-3-hydroxy-4-methyl-2(5H)-furanone, and dimethyl trisulfide were the common key aroma components in the six types of high-aroma black teas. Linalool, myrcene, acetate eugenol, 2-isobutylpiperazine, propionic acid linalool ester, dihydromyrcenol, and linalool oxide IV can be used as the potential chemical markers to distinguish between spring and autumn black teas. The findings contribute to the understanding of the aroma characteristics of Zi Mudan, Rui Xiang, and Huang Meigui black teas, and provide theoretical support for the promotion and application of tea plant varieties.

Key words: high aroma tea tree varieties; black tea; key aroma components; season

福建是世界红茶的发源地,其红茶品类丰富且各具特色,如正山小种、坦洋工夫、政和工夫、白琳工夫及尤溪工夫红茶等。这些茶叶因其独特的风味而受到广大消费者的喜爱^[1,2]。每种红茶独特品质的形成受多种因素的影响,如茶树品种、产地、采摘标准、生长季节和加工工艺等等。其中茶树品种是决定香气物质差异性和成茶香型的根本原因^[3]。在前人对于茶树品种的研究中,Tang等^[4]探究了金牡丹红茶的主要挥发性代谢物有水杨酸甲酯、香叶醇、(E)- β -罗勒烯和苯乙醇。罗学平等^[5]探究了宜宾黄观音的主体香气成分有香叶醇、芳樟醇氧化物II、芳樟醇、芳樟醇氧化物I等。欧晓西等^[6]明确了芳樟醇、香叶醇、苯乙醇、水杨酸甲酯、芳樟醇氧化物I等7个香气成分是梅占红茶的关键香气成分。

黄玫瑰、紫牡丹和瑞香是福建省农业科学院茶叶研究所通过不同选育方法选育而成的高香型茶树品种^[7-10]。其中,黄玫瑰是通过单株育种法从黄观音与黄桤的人工杂交一代中选育而成;紫牡丹则是通过单株选种法从铁观音的自然杂交后代中选育而成;瑞香则是通过系统选育法从黄桤的自然杂交后代中选育而成^[11]。利用高香型品种加工工夫红茶可以进一步提升红茶的香气和品质,目前,黄玫瑰、紫牡丹、瑞香3个高香型品种在福建省尤溪县地区小范围种植,具有较大的开发潜力。明确三个品种的香气品质特征可以为该品种在红茶加工中的应用奠定理论基础。前人研究中,郭向阳等^[12]分析黄玫瑰制成的乌龙茶的茶汤香气组分中,含有较多的挥发性物质类别是烯类、酯类、杂环类和醇类,同时检测出较多的低沸点化合物,为黄玫瑰乌龙茶整体香气组分做了有效补充。卢慰^[13]分析了紫牡丹乌龙茶的香气成分,发现构成紫牡丹乌龙茶的主要香气种类是醛类、烯类、酯类和醇类。王飞权等^[14]通过比较福鼎大毫、肉桂、黄玫瑰和瑞香制秋季新工艺白茶的研究得出,瑞香的花香和果香类物质在种类和相对含量上都多于福鼎大毫,感官品质较优异。而关于三个品种制红茶的研究鲜见。

该研究对黄玫瑰、紫牡丹、瑞香三个品种所制尤溪高香红茶的春茶和秋茶共6个茶样的挥发性组分构成及相对含量进行研究,以探究不同茶树品种红茶的香气特征和关键呈香物质,以及同一品种不同季节的挥发性成分差异,为尤溪高香红茶的香气品质特征提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料与仪器

1.1.1 实验材料

供试样品取自尤溪县云富茶叶有限公司;鲜叶原料采摘标准为一芽二、三叶,采摘时间为2023年3~4月与9~10月,按照鲜叶→萎凋→轻摇→揉捻→发酵→初烘→足火→精制等工艺制成的高香成品红茶;按照茶树品种与生长季节分别命名为HC(黄玫瑰春茶)、HQ(黄玫瑰秋茶)、ZC(紫牡丹春茶)、ZQ(紫牡丹秋茶)、RC(瑞香春茶)、RQ(瑞香秋茶)。

1.1.2 仪器与设备

8890-7000D气相色谱-质谱联用仪(GC-MS/MS),美国Agilent公司;DB-5MS(30.00 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μ m)色谱柱,美国Agilent公司;MM400球磨仪,德国Retsch公司;120 μ m DVB/CWR/PDMS萃取头,美国Agilent公司;SPME Arrow固相微萃取装置,瑞士思特斯分析仪器有限公司;Fiber Conditioning Station老化装置,瑞士思特斯分析仪器有限公司;Agitator样品加热箱,瑞士思特斯分析仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 感官审评

由6名高级评茶员按照GB/T 23776-2018《茶叶感官审评方法》对6份茶样进行感官审评并打分。

1.2.2 香气成分萃取与测定

1.2.2.1 样品前处理

将保存自-80 $^{\circ}$ C冰箱中的茶叶样品取出进行液氮

研磨,称取约 500 mg 研磨后的茶样于顶空瓶中,加入 20 μL (10 $\mu\text{g/mL}$) 正己烷内标溶液,将萃取手柄插入顶空瓶平衡 5 min,以供 GC-MS 分析。

1.2.2.2 HS-SPME 条件

在 60 $^{\circ}\text{C}$ 恒温条件下,震荡 5 min,随后将萃取头插入顶空瓶中萃取 15 min,设定 250 $^{\circ}\text{C}$,解析 5 min,随后进行 GC-MS 分离鉴定。采样前萃取头在 Fiber Conditioning Station 中 250 $^{\circ}\text{C}$ 下老化 5 min。

1.2.2.3 GC-MS 条件

色谱条件: DB-5MS 毛细管柱 (30.00 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm),高纯氦气作为载气,纯度不小于 99.99%,流速 1.2 mL/min,进样口温度 230 $^{\circ}\text{C}$,溶剂延迟 3.5 min。程序升温: 40 $^{\circ}\text{C}$ 保持 3.5 min,以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 100 $^{\circ}\text{C}$,再以 7 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 180 $^{\circ}\text{C}$,最后以 25 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 280 $^{\circ}\text{C}$,保持 5 min。质谱条件: 电子轰击离子源 (EI),质谱接口温度 280 $^{\circ}\text{C}$,离子源温度 230 $^{\circ}\text{C}$,四级杆温度 150 $^{\circ}\text{C}$,电子能量 70 eV,选择离子检测模式 (SIM) 进行扫描。

1.3 红茶挥发性成分的定性与定量分析

1.3.1 定性分析

定性参考任卫威等^[15]报道方法,根据得到的质谱数据与 NIST (2020) 谱库进行物质鉴定,以相同的 GC-MS 条件测定不同碳原子数的保留时间,利用公式计算出对应的保留指数 (Retention Index, RI),基于迈维自建数据库,对样本的代谢物进行质谱定性。

1.3.2 定量分析

采用内标半定量法,各个组分含量的计算方法,见公式 (1)。

$$X_i = \frac{V_s \times C_s}{M} \times \frac{I_i}{I_s} \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中:

X_i ——待测样品中化合物 i 的含量, $\mu\text{g/g}$;

V_s ——加入内标物的体积, μL ;

C_s ——内标物的质量浓度, $\mu\text{g/mL}$;

M ——待测样品的量, g;

I_s ——内标物的峰面积;

I_i ——待测样品中化合物 i 的峰面积。

1.3.3 ROAV 值分析

参照刘登勇等^[16]的方法,采用 ROAV 分析确定茶样的关键香气成分。规定香气成分中阈值 (0.002 $\mu\text{g/kg}$) 较低但相对含量较高的 2-异丙基-3-甲氧基吡嗪 ROAV 值为 100,进而计算其他香气成分的 ROAV 值,见公式 (2)。

$$ROAV_i = \frac{C_i}{C_{\max}} \times \frac{T_{\max}}{T_i} \times 100 \quad (2)$$

式中:

C_i ——各挥发性成分的相对含量, $\mu\text{g/g}$;

T_i ——各挥发性成分的感觉阈值, $\mu\text{g/mL}$;

$C_{\max}$ ——对茶样香气贡献值最大的挥发性成分所对应的相对含量, $\mu\text{g/g}$;

$T_{\max}$ ——对茶样香气贡献值最大的挥发性成分所对应的感觉阈值, $\mu\text{g/mL}$ 。

1.4 数据处理

每个样品进行 3 次重复试验。基于迈维云平台进行主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA); 通过 TBtools 软件绘制热图; 利用 GraphPad Prism 8 软件绘制百分比堆积图和香气总量柱状图; 使用 SIMCA 14.1 软件进行正交偏最小二乘判别分析 (Orthogonal Partial Least Squares-Discriminant Analysis, OPLS-DA), 计算得出预测变量重要性投影 (Variable Importance in Projection, VIP); 使用 SPSS 26.0 软件进行单因素分析,以 $P < 0.05$, $VIP > 1$ 筛选差异香气成分。

2 结果与讨论

2.1 6 份茶样的感官审评分析

根据表 1 的数据可知,紫牡丹红茶和瑞香红茶均展现出持久的花香特性,而黄玫瑰红茶则表现出显著的甜香特征。另外,同一品种不同季节之间,三个品种的春茶均显现出果香的特征。在 6 份茶样中,以紫牡丹春茶整体得分最高,显示出其香气品质的优越性。

2.2 6 份红茶挥发性成分分类及其相对含量

由表 2 所示,6 个红茶共鉴定出 116 种挥发性化合物,包括酯类 26 种、醇类 23 种、杂环化合物 11 种、醛类 18 种、碳氢化合物 17 种、酮类 13 种、酸类 2 种、含硫化合物 3 种、酚类 2 种、含氮化合物 1 种。其中,紫牡丹红茶在香气成分上具有显著的季节性差异,共有 70 种香气成分的含量差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。具体而言,春茶香气总量为 175.21 $\mu\text{g/g}$,显著高于秋茶的 116.36 $\mu\text{g/g}$ 。对于瑞香红茶,同样存在显著的季节性香气成分差异,共有 75 种香气成分的含量差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。然而,瑞香红茶春茶的香气总量为 127.96 $\mu\text{g/g}$,略高于秋茶的 118.08 $\mu\text{g/g}$,香气总量差异不显著。黄玫瑰红茶在香气成分上也表现出显著的季节性差异,共有 75 种香气成分的含量差异达到显著水平 ($P < 0.05$),秋茶香气总量为 127.45 $\mu\text{g/g}$,显著高于春茶的 88.78 $\mu\text{g/g}$ 。

表 1 6份茶样感官审评结果
Table 1 Sensory evaluation results of 6 tea samples

茶样 名称	外形 (25%)		汤色 (10%)		香气 (25%)		滋味 (30%)		叶底 (10%)		总分
	评语	得分	评语	得分	评语	得分	评语	得分	评语	得分	
ZC	条索匀整、乌黑	92.00	橙黄	93.00	花香显、馥郁悠长、有果香	94.00	甜淳、水香带花香	95.00	匀整、褐红、软亮	92.00	93.50
ZQ	条索匀整、乌黑油润、茶毫稍显	94.00	橙红	95.00	花香浓郁	92.00	较浓淳、水香带花香	94.00	匀整、褐红、软亮	92.00	93.40
RC	条索紧细、乌黑、有茎梗	92.00	橙黄	93.00	花香浓郁有果香	92.00	甘淳、稍有收敛感	90.00	匀整、褐红、软亮	92.00	91.50
RQ	条索匀整、乌黑	92.00	浅橙红	94.00	花香、较浓持久	91.00	较淳厚、甘淳	91.00	匀整、褐红、软亮	92.00	91.65
HC	条索紧细、乌黑	92.00	橙黄	93.00	甜花香、果香、持久	90.00	鲜淳爽	93.00	匀整、褐红、软亮	92.00	91.90
HQ	条索匀整、乌黑	92.00	橙红	95.00	甜花香带薯香、浓郁持久	93.00	醇厚、有收敛感	91.00	匀整、褐红、软亮	92.00	92.25

表 2 6份红茶挥发性成分组成及其相对含量

Table 2 The volatile composition and relative content of 6 parts of black tea (n=3)						平均相对含量 (10.00 µg/kg)					
化合物名称	保留指数 (RI)	CAS	ZC			ZQ	RC			RQ	HQ
			评语	得分	相对含量		评语	得分	相对含量		
异戊烯醛	782	107-86-8	4.57 ± 1.02 ^{ab}		3.88 ± 0.27 ^{bc}	4.43 ± 0.05 ^{abc}	5.02 ± 0.12 ^a	3.63 ± 0.09 ^e	2.6 ± 0.39 ^d		
3-己酮	784	589-38-8	3.06 ± 0.18 ^a		0.95 ± 0.07 ^e	2.72 ± 0.15 ^b	1.74 ± 0.1 ^c	1.84 ± 0.04 ^e	1.33 ± 0.13 ^d		
2-己醇	799.79	626-93-7	66.62 ± 3.5 ^a		16.16 ± 0.98 ^e	53.28 ± 0.52 ^b	34.5 ± 1.08 ^c	35.26 ± 1.06 ^c	21.46 ± 0.73 ^d		
己醛	799.79	66-25-1	144.06 ± 8.08 ^a		36.39 ± 1.5 ^e	120.36 ± 3.63 ^b	76.56 ± 0.97 ^c	81.58 ± 0.94 ^e	49.62 ± 2.01 ^d		
己醇	869.20	111-27-3	13.72 ± 3.16 ^b		17.8 ± 1.58 ^a	13.13 ± 2.34 ^b	15.14 ± 1.98 ^{ab}	15.3 ± 0.73 ^{ab}	15.58 ± 0.2 ^{ab}		
间二甲苯	870.58	108-38-3	53.62 ± 7.36 ^a		28.21 ± 1.5 ^{bc}	21.71 ± 4.44 ^{cd}	33.7 ± 3.06 ^b	18.21 ± 0.73 ^d	23.14 ± 3.39 ^{cd}		
苯乙烯	893	100-42-5	3.1 ± 0.09 ^{bc}		3.51 ± 0.11 ^{ab}	2.83 ± 0.41 ^c	3.6 ± 0.43 ^a	2.74 ± 0.02 ^e	2.69 ± 0.08 ^e		
环己烷酮	893.55	108-94-1	15.48 ± 0.9 ^a		6.96 ± 0.38 ^e	15.26 ± 1.65 ^a	12.01 ± 0.73 ^b	17.1 ± 3.62 ^a	10.31 ± 0.39 ^b		
顺-4-庚烯醛	900	6728-31-0	5.5 ± 0.43 ^a		2.91 ± 0.28 ^c	5.26 ± 0.27 ^a	4.11 ± 0.25 ^b	5.46 ± 0.32 ^a	3.16 ± 0.4 ^c		
2-庚醇	900.36	543-49-7	2.38 ± 0.24 ^a		0.6 ± 0.39 ^c	2.66 ± 0.45 ^a	0.91 ± 0.14 ^c	1.63 ± 0.51 ^b	0.79 ± 0.1 ^c		
庚醛	901.30	111-71-7	18.52 ± 0.57 ^{ab}		5.93 ± 0.29 ^e	20.13 ± 2.37 ^a	10.5 ± 0.98 ^c	16.59 ± 0.47 ^b	8.34 ± 0.8 ^d		
反-2-庚醛	957	18829-55-5	2.86 ± 0.45 ^a		1.86 ± 0.12 ^c	2.5 ± 0.52 ^{ab}	2.74 ± 0.19 ^a	2.01 ± 0.21 ^{bc}	1.54 ± 0.11 ^c		
苯甲醛	962.46	100-52-7	147.12 ± 3.01 ^c		224.06 ± 18.3 ^a	147.5 ± 18.4 ^c	234.92 ± 18.84 ^a	160.39 ± 4.1 ^{bc}	180.97 ± 11.46 ^b		
1-庚醇	970.42	111-70-6	3.78 ± 0.27 ^a		2.21 ± 0.21 ^c	2.41 ± 0.64 ^{bc}	3.13 ± 0.54 ^{ab}	1.9 ± 0.11 ^c	2.44 ± 0.48 ^{bc}		
二甲苯三硫	972.31	3658-80-8	17.48 ± 1.95 ^a		13.55 ± 0.85 ^b	10.2 ± 1.16 ^{cd}	12.17 ± 1.33 ^{bc}	12.84 ± 0.42 ^b	9.81 ± 0.88 ^d		
甲基庚烯酮	987.68	110-93-0	65.82 ± 2.35 ^a		53.81 ± 3.07 ^b	38.46 ± 5.78 ^d	44.11 ± 3.69 ^{cd}	60.71 ± 1.29 ^a	50.11 ± 2.88 ^{bc}		
月桂烯	992.01	123-35-3	333.73 ± 31.98 ^a		83.93 ± 2.75 ^d	230.66 ± 53.91 ^b	97.42 ± 6.45 ^d	167.59 ± 18.15 ^c	66.28 ± 10.53 ^d		

续表2

化合物名称	保留指数 (RI)	CAS	平均相对含量/(10.00 μg/kg)					
			ZC	ZQ	RC	RQ	HC	HQ
2-戊基呋喃	992.70	3777-69-3	48.81 ± 3.2 ^b	54.92 ± 2.99 ^b	53.12 ± 23.67 ^b	78.72 ± 7.57 ^a	36.59 ± 1.55 ^b	48.32 ± 3.07 ^b
丁酸丁酯	996.04	109-21-7	4.74 ± 0.39 ^{ab}	4.16 ± 0.36 ^{bc}	5.27 ± 0.55 ^a	4.65 ± 0.5 ^{ab}	4.6 ± 0.36 ^{ab}	3.67 ± 0.26 ^c
异戊酸异丁酯	1 005	589-59-3	7.97 ± 0.54 ^a	3.07 ± 0.18 ^b	5.03 ± 3.64 ^b	3.4 ± 0.38 ^b	2.89 ± 0.23 ^b	2.7 ± 0.21 ^b
乙酸叶醇酯	1 006.91	3681-71-8	1.91 ± 0.66 ^c	4.3 ± 0.41 ^b	1.35 ± 0.81 ^c	5.42 ± 0.56 ^a	1.22 ± 0.22 ^c	3.95 ± 0.37 ^b
异丁酸异戊酯	1 016	2445-69-4	7.82 ± 1.15 ^{ab}	7.08 ± 0.87 ^{ab}	5.9 ± 1.8 ^b	8.58 ± 1.59 ^a	6.61 ± 1.54 ^{ab}	9.02 ± 0.13 ^a
邻伞花烃	1 022	527-84-4	20.69 ± 1.32 ^a	19.79 ± 0.5 ^{ab}	16.85 ± 3.83 ^{bc}	22.17 ± 2.58 ^a	14.75 ± 0.77 ^c	14.34 ± 0.73 ^c
4-异丙基甲苯	1 025.98	99-87-6	7.65 ± 0.49 ^a	6.6 ± 0.44 ^{ab}	6.38 ± 1.53 ^{ab}	7.35 ± 1.06 ^a	5.48 ± 0.39 ^{bc}	4.81 ± 0.17 ^c
柠檬烯	1 026	138-86-3	62.42 ± 4.95 ^a	52.42 ± 3.54 ^b	45.95 ± 3.82 ^{bc}	69.25 ± 4.3 ^a	39.4 ± 6.52 ^c	39.06 ± 1.95 ^c
(+)-柠檬烯	1 031.27	5989-27-5	68.85 ± 5.58 ^b	60.56 ± 3.47 ^{bc}	59.95 ± 8.94 ^{bc}	82.81 ± 4.53 ^a	51.87 ± 1.96 ^{bc}	43.82 ± 2.22 ^d
苯乙醛	1 045.59	122-78-1	1 167.65 ± 52.94 ^a	1 096.61 ± 84.66 ^a	823.69 ± 47.8 ^b	912.05 ± 66.38 ^b	679.65 ± 17.78 ^c	1 103.27 ± 80.04 ^a
反-2-己烯酸乙酯	1 049	27829-72-7	22.12 ± 1.86 ^a	20.58 ± 2.25 ^a	16.11 ± 2.53 ^b	21.79 ± 1.39 ^a	15.75 ± 0.52 ^b	14.26 ± 0.18 ^b
β-罗勒烯	1 049	3779-61-1	159.22 ± 16.53 ^a	73.01 ± 3.01 ^c	109.99 ± 32.09 ^b	79.88 ± 7.06 ^c	82.01 ± 8.62 ^{bc}	88.82 ± 5.55 ^{bc}
γ-己内酯	1 054.85	695-06-7	151.19 ± 22.51 ^{ab}	138.98 ± 11.33 ^{bc}	115.56 ± 17.98 ^{cd}	173.05 ± 23.94 ^a	135.09 ± 1.79 ^{bc}	97.03 ± 15.05 ^d
二氢月桂烯醇	1 064	18479-58-8	326.19 ± 24.59 ^d	460 ± 33.88 ^c	311.48 ± 49.82 ^{de}	533.1 ± 26.51 ^b	255.73 ± 5.46 ^c	663.45 ± 40.12 ^a
2-乙氧基-3-甲基吡嗪	1 065	32737-14-7	90.9 ± 6.86 ^d	125.58 ± 9.8 ^c	90.72 ± 11.12 ^d	148.97 ± 9.03 ^b	85.9 ± 3.04 ^d	182.85 ± 10.59 ^a
反式-2-辛烯-1-醇	1 067.61	18409-17-1	19.4 ± 1.3 ^d	26.38 ± 1.98 ^c	18.4 ± 2.94 ^{de}	31.18 ± 2.18 ^b	15.1 ± 0.36 ^c	37.6 ± 2.33 ^a
1-辛醇	1 069.76	111-87-5	7.73 ± 0.58 ^d	16.38 ± 1.15 ^c	7.08 ± 1.27 ^d	19.31 ± 1.34 ^b	6.13 ± 0.21 ^d	23.6 ± 1.35 ^a
2-异丁基吡嗪	1 074	29460-92-2	250.5 ± 18.59 ^d	376.98 ± 29.29 ^c	248.82 ± 53.82 ^d	446.19 ± 28.1 ^b	211.32 ± 3.17 ^d	567.75 ± 29.64 ^a
芳樟醇氧化物IV	1 075.24	34995-77-2	363.95 ± 26.29 ^d	517.73 ± 38.77 ^c	348.04 ± 58.41 ^d	605.6 ± 37.38 ^b	285.33 ± 5.63 ^c	778.03 ± 20.35 ^a
庚酸	1 079.91	111-14-8	31.56 ± 2.53 ^b	32.05 ± 1.76 ^b	21.16 ± 4.72 ^c	33.35 ± 1.95 ^b	21.27 ± 0.71 ^c	48.6 ± 2.91 ^a
2-庚酸	1 081	18999-28-5	15.74 ± 1.4 ^b	16.57 ± 1.59 ^b	11.2 ± 2.43 ^c	16.83 ± 1.59 ^b	10.56 ± 0.37 ^c	25.43 ± 2.15 ^a
2-乙基-3,5-二甲基吡嗪	1 084	13925-07-0	2.45 ± 0.23 ^b	4.05 ± 0.99 ^a	1.68 ± 0.21 ^b	3.95 ± 0.26 ^a	2.16 ± 0.44 ^b	3.77 ± 0.3 ^a
愈创木酚	1 090.66	90-05-1	19.34 ± 1.29 ^b	19.02 ± 1.26 ^b	23.75 ± 1.7 ^{ab}	22.02 ± 0.43 ^{ab}	26.11 ± 5.48 ^a	26.92 ± 2.33 ^a
萜品油烯	1 090.66	586-62-9	483.22 ± 34.68 ^b	515.22 ± 44.81 ^b	341.74 ± 59.64 ^c	516.69 ± 28.63 ^b	323.4 ± 10.99 ^c	762.55 ± 11.01 ^a
2-壬酮	1 091.46	821-55-6	1.69 ± 0.39 ^{ab}	2.11 ± 0.35 ^{ab}	1.44 ± 0.2 ^b	2.19 ± 0.44 ^a	1.85 ± 0.45 ^{ab}	2.19 ± 0.28 ^a
苄硫醇	1 092	100-53-8	21.33 ± 1.88 ^{bc}	17.34 ± 4.04 ^c	31.18 ± 4.81 ^a	23.12 ± 1.09 ^{abc}	28.47 ± 8.34 ^{ab}	31.02 ± 3.26 ^a
2-乙酰基噻吩	1 092	88-15-3	432.46 ± 28.59 ^b	469.51 ± 41.22 ^b	305.36 ± 52.97 ^c	473.26 ± 29.42 ^b	290.63 ± 9.03 ^c	675.6 ± 35.21 ^a
2-异丙基-3-甲氧基吡嗪	1 097	25773-40-4	116.63 ± 6.72 ^b	126.12 ± 9.32 ^b	78.95 ± 16.9 ^c	127.31 ± 9.29 ^b	77.22 ± 2.64 ^c	176.56 ± 9.68 ^a

续表2

化合物名称	保留指数 (RI)	CAS	平均相对含量/(10.00 μg/kg)					
			ZC	ZQ	RC	RQ	HC	HQ
2-壬醇	1 099.19	628-99-9	10.73 ± 0.68 ^b	11.44 ± 1.05 ^b	7.3 ± 1.6 ^c	11.44 ± 0.8 ^b	7.16 ± 0.25 ^c	16.33 ± 0.95 ^a
3,6-壬二烯醛	1 100	21944-83-2	20.72 ± 1.62 ^{bc}	19.3 ± 1.78 ^c	27.09 ± 5.6 ^{ab}	21.1 ± 0.9 ^{abc}	27.82 ± 5.37 ^a	25.36 ± 3.19 ^{abc}
丙酸叶醇酯	1 100	33467-74-2	317.32 ± 22.82 ^d	582.58 ± 54.85 ^b	416.81 ± 77.34 ^c	940.28 ± 46.73 ^a	357.96 ± 18.17 ^{cd}	618.31 ± 45.61 ^b
芳樟醇	1 100.58	78-70-6	105.16 ± 9.86 ^c	98.08 ± 7.75 ^c	134.65 ± 28.19 ^{ab}	114.58 ± 8.91 ^{bc}	119.84 ± 3.42 ^{bc}	148.8 ± 6.98 ^a
(Z)-6-壬烯醛	1 103.52	2277-19-2	82.96 ± 5.74 ^b	80.15 ± 7.05 ^b	111.72 ± 23.21 ^{ab}	172.87 ± 73.96 ^a	116.83 ± 36.23 ^{ab}	127.48 ± 15.82 ^{ab}
2-甲基丁酸 2-甲基丁酯	1 105	2445-78-5	1.94 ± 0.7 ^{ab}	0.74 ± 0.05 ^b	3.05 ± 0.59 ^a	2.79 ± 1.52 ^a	1.66 ± 0.82 ^{ab}	1.25 ± 0.25 ^b
正壬醛	1 105.02	124-19-6	51.29 ± 3.9 ^a	7.61 ± 0.9 ^b	41.49 ± 17.43 ^a	43.08 ± 3.44 ^a	21.11 ± 15.25 ^b	9.41 ± 1 ^b
可酮醛	1 106	35158-25-9	32 ± 2.44 ^c	31.06 ± 2.65 ^c	102.24 ± 18.44 ^a	30.28 ± 6.8 ^c	90.15 ± 7.27 ^a	60 ± 25.38 ^b
丙酸己酯	1 108	2445-76-3	2.6 ± 0.25 ^a	2.57 ± 0.2 ^a	1.87 ± 0.29 ^b	2.81 ± 0.43 ^a	2.3 ± 0.41 ^{ab}	2.91 ± 0.31 ^a
二丙基二硫	1 110.02	629-19-6	1.5 ± 0.16 ^a	1.09 ± 0.1 ^b	1.3 ± 0.36 ^{ab}	1.22 ± 0.26 ^{ab}	0.41 ± 0.06 ^c	1.02 ± 0.11 ^b
乙酸庚酯	1 112	112-06-1	24.32 ± 1.65 ^a	4.38 ± 0.54 ^c	22.88 ± 2.97 ^a	20.64 ± 1.87 ^{ab}	15.46 ± 7.25 ^b	5.02 ± 0.82 ^c
(-)-玫瑰醚	1 112.95	16409-43-1	20.44 ± 2.21 ^{ab}	18.92 ± 1.2 ^b	20.76 ± 3.3 ^{ab}	21.43 ± 2.62 ^{ab}	21.64 ± 2.79 ^{ab}	23.81 ± 0.75 ^a
2-苯乙醇	1 116.09	60-12-8	2 358.61 ± 102.96 ^a	2 279.47 ± 185.87 ^a	2 110.29 ± 412.33 ^a	1 677.25 ± 112.6 ^b	1 333.67 ± 80.83 ^b	2 298.76 ± 109.77 ^a
L (-)-葑酮	1 121	7787-20-4	8.29 ± 1.01 ^b	8.32 ± 1.14 ^b	7.28 ± 2.4 ^b	12.41 ± 2.21 ^a	3.91 ± 0.32 ^c	11.88 ± 0.72 ^a
辛酸甲酯	1 126	111-11-5	7.88 ± 2.0 ^b	7.81 ± 2.52 ^b	12.06 ± 2.08 ^a	4.21 ± 0.75 ^c	0.6 ± 0.04 ^d	7.32 ± 2.59 ^{bc}
3-巯基-1-己醇	1 127	51755-83-0	3.03 ± 0.31 ^{ab}	2.3 ± 0.28 ^b	2.82 ± 0.63 ^{ab}	1.94 ± 1.36 ^b	0.36 ± 0.02 ^c	3.58 ± 0.38 ^a
2,6-二甲基-2,4,6-辛三烯	1 131	673-84-7	5.96 ± 0.72 ^a	2.72 ± 0.23 ^{cd}	5 ± 1.89 ^{ab}	2.93 ± 0.29 ^{cd}	3.54 ± 0.29 ^{bc}	1.58 ± 0.1 ^d
3-羧基己酸乙酯	1 133	2305-25-1	1 306.73 ± 68.58 ^a	1 148.59 ± 141.97 ^b	0.48 ± 0.04 ^d	840.09 ± 53.24 ^c	0.48 ± 0.03 ^d	748.16 ± 33.6 ^c
反-2,顺-6-壬二烯醇	1 170	28069-72-9	121.86 ± 2.36 ^b	111.57 ± 15.41 ^b	95 ± 15.21 ^{bc}	53.38 ± 54.38 ^c	78.36 ± 5.13 ^{bc}	167.21 ± 9.88 ^a
壬醇	1 170.64	143-08-8	18.78 ± 2.95 ^{ab}	17.39 ± 1.88 ^{ab}	3.59 ± 0.24 ^c	3.76 ± 0.39 ^c	13.01 ± 7.54 ^b	23.14 ± 2.86 ^a
顺-6-壬烯醇	1 171	35854-86-5	288.03 ± 22.1 ^{ab}	242.42 ± 34.32 ^{bc}	205.02 ± 32.25 ^{bc}	114.05 ± 100.59 ^d	169.45 ± 10.26 ^{cd}	360.24 ± 21.82 ^a
2,2,6-三甲基-6-乙烯基四氢-2H-呋喃-3-醇	1 173	14049-11-7	428.84 ± 50.38 ^b	335.47 ± 35.36 ^c	262.52 ± 64.14 ^d	305.36 ± 28.71 ^{cd}	259.87 ± 10.11 ^d	499.2 ± 15.38 ^a
5-乙基-3-羧基-4-甲基-2(5H)-呋喃酮	1 195	698-10-2	12.43 ± 1.7 ^a	9.8 ± 0.93 ^a	10.96 ± 1.22 ^a	12.34 ± 1.43 ^a	10.44 ± 2.69 ^a	9.7 ± 0.45 ^a
γ-萜品醇	1 197	586-81-2	54.91 ± 3.78 ^{ab}	47.73 ± 6.57 ^{bc}	61.03 ± 10.67 ^a	64.51 ± 2.3 ^a	43.56 ± 4.76 ^c	55.1 ± 1.93 ^{ab}
水杨酸甲酯	1 200	119-36-8	281.49 ± 24.97 ^{ab}	178.48 ± 22.77 ^d	303.25 ± 43.03 ^a	251.89 ± 9.95 ^{bc}	214.92 ± 21.18 ^{cd}	196.29 ± 13.26 ^d
藏红花醛	1 205.71	116-26-7	3.53 ± 0.09 ^{ab}	2.63 ± 0.35 ^{cd}	3.28 ± 0.6 ^b	3.19 ± 0.24 ^{bc}	3.98 ± 0.23 ^a	2.41 ± 0.02 ^d
癸醛	1 206.42	112-31-2	1.98 ± 0.39 ^{ab}	2.14 ± 0.48 ^{ab}	2.83 ± 0.8 ^a	2.01 ± 0.18 ^{ab}	1.95 ± 0.3 ^b	1.96 ± 0.11 ^b

续表2

化合物名称	保留指数 (RI)	CAS	平均相对含量/(10.00 µg/kg)					
			ZC	ZQ	RC	RQ	HC	HQ
橙花醇	1 230.47	106-25-2	2.47 ± 0.3 ^{cd}	16.8 ± 1.3 ^b	3.79 ± 0.72 ^c	15.6 ± 0.99 ^b	1.8 ± 1.39 ^d	19.22 ± 0.38 ^a
顺式-3-己烯醇 2-甲基丁酸酯	1 234	53398-85-9	28.14 ± 1.76 ^a	21.93 ± 1.74 ^b	9.28 ± 3.74 ^c	20.28 ± 0.77 ^b	10.78 ± 0.33 ^c	26.18 ± 0.48 ^a
香芹酮	1 242	99-49-0	2.02 ± 0.62 ^{ab}	2.35 ± 0.14 ^a	1.14 ± 0.26 ^b	2.69 ± 0.59 ^a	1.99 ± 0.9 ^{ab}	2.39 ± 0.14 ^a
2-辛烯酸 乙酯	1 243	2351-90-8	133.29 ± 15.57 ^a	4.4 ± 0.33 ^c	94.1 ± 6.82 ^b	23.52 ± 0.85 ^d	46.57 ± 5.45 ^c	4.07 ± 0.28 ^c
异戊酸正己酯	1 244	10032-13-0	66.42 ± 13.35 ^a	6.86 ± 0.63 ^d	40.16 ± 2.1 ^b	7.21 ± 0.32 ^d	20.16 ± 2.7 ^c	4.01 ± 0.39 ^d
右旋香芹酮	1 246	2244-16-8	6.45 ± 1.99 ^a	4.15 ± 0.07 ^{ab}	3.94 ± 0.65 ^{ab}	5.08 ± 1.61 ^{ab}	5.35 ± 3.29 ^{ab}	2.92 ± 0.16 ^b
己酸异戊酯	1250	2198-61-0	193.5 ± 48.59 ^a	36.47 ± 3.19 ^{cd}	123.72 ± 9.86 ^b	29.75 ± 0.52 ^{cd}	63.93 ± 7.18 ^c	23.75 ± 0.9 ^d
香叶醇	1 255.60	106-24-1	3 494.4 ± 300.38 ^a	498.93 ± 35.22 ^d	2 617.23 ± 340.52 ^b	456.64 ± 17.55 ^d	1 254.39 ± 146.25 ^c	285.7 ± 16.91 ^d
反式-2-癸烯醇	1 257	18409-18-2	61.32 ± 8.02 ^a	9.43 ± 0.97 ^d	46.56 ± 10.38 ^b	9.8 ± 0.48 ^d	29.25 ± 3.27 ^c	6.07 ± 0.08 ^d
乙酸芳樟酯	1 257	115-95-7	580.41 ± 50.02 ^a	78.8 ± 7.75 ^d	336.49 ± 33.5 ^b	80.27 ± 2.55 ^d	214.51 ± 34.42 ^c	69.22 ± 3.25 ^d
乙酸异胡薄荷酯	1 259	89-49-6	112.54 ± 5.92 ^a	17.57 ± 0.77 ^d	80.63 ± 8.41 ^b	18.61 ± 0.75 ^d	48.59 ± 3.89 ^c	13.78 ± 0.82 ^d
薄荷酮	1 261.16	89-81-6	50.9 ± 4.69 ^a	5.65 ± 0.52 ^d	35.12 ± 3.05 ^b	5.89 ± 0.22 ^d	17.89 ± 2.47 ^c	2.44 ± 0.21 ^d
4-苯基-2-丁醇	1 262.35	2344-70-9	7.83 ± 1.21 ^a	0.29 ± 0.02 ^d	2.47 ± 0.35 ^b	0.3 ± 0.02 ^d	1.36 ± 0.16 ^c	0.27 ± 0.02 ^d
反-2-癸烯醛	1 263	3913-81-3	141.38 ± 12.7 ^a	17.75 ± 1.22 ^d	79.32 ± 6.58 ^b	18.24 ± 0.38 ^d	41.37 ± 5.02 ^c	11.24 ± 0.8 ^d
柠檬醛	1 273.04	5392-40-5	70.57 ± 8.96 ^a	9.22 ± 0.69 ^c	50.02 ± 7.89 ^b	9.57 ± 0.67 ^c	43.2 ± 6.52 ^b	8.53 ± 0.59 ^c
2-苯基-2-丁烯醛	1 276	4411-89-6	14.75 ± 1.17 ^d	24.98 ± 2.32 ^{ab}	17.99 ± 3.88 ^{cd}	21.54 ± 0.41 ^{bc}	25.93 ± 2.65 ^a	20.81 ± 0.82 ^c
4-乙基愈创木酚	1 281.96	2785-89-9	17.33 ± 1.49 ^a	3.7 ± 0.39 ^d	12.31 ± 1.8 ^b	3.52 ± 0.56 ^d	9.93 ± 1.22 ^c	2.99 ± 0.21 ^d
甲基壬基甲酮	1 294.65	112-12-9	54.85 ± 4.7 ^a	15.63 ± 1.77 ^d	28.83 ± 2.1 ^b	20.41 ± 0.98 ^c	11.26 ± 0.83 ^e	16.72 ± 0.96 ^{cd}
丁酸庚酯	1 296	5870-93-9	22.09 ± 2.96 ^b	21.2 ± 3.45 ^b	53.73 ± 10.14 ^a	21.85 ± 0.2 ^b	10.58 ± 2.44 ^c	8.41 ± 0.15 ^c
呋喃	1 298.64	120-72-9	1 450.01 ± 95.24 ^a	439.25 ± 40.69 ^d	753.35 ± 59.6 ^b	597.8 ± 18.56 ^c	318.22 ± 27.71 ^e	476.91 ± 23.53 ^d
十三烷	1 300	629-50-5	31.66 ± 3.87 ^b	13.19 ± 4.16 ^c	71.94 ± 13.98 ^a	14.09 ± 5.37 ^c	11.31 ± 2.18 ^c	7.59 ± 0.19 ^c
邻氨基苯甲酸甲酯	1 348.50	134-20-3	1.37 ± 1.56 ^d	2.28 ± 0.06 ^{cd}	6.58 ± 2.02 ^a	4.72 ± 0.2 ^{ab}	4 ± 0.36 ^{bc}	5.96 ± 0.3 ^{ab}
γ-壬内酯	1 368.02	104-61-0	1.61 ± 0.49 ^b	0.21 ± 0.02 ^c	4.11 ± 0.68 ^a	0.22 ± 0.02 ^c	0.46 ± 0.48 ^c	0.19 ± 0.01 ^c
α-古巴烯	1 376	3856-25-5	1.01 ± 0.1 ^c	1.31 ± 0.08 ^b	0.77 ± 0.09 ^d	1.22 ± 0.23 ^{bc}	0.24 ± 0.07 ^c	1.73 ± 0.16 ^a
己酸叶醇酯	1 380	31501-11-8	99.34 ± 10.19 ^a	53.47 ± 2.15 ^b	90.15 ± 18.2 ^a	107.13 ± 7.04 ^a	51.5 ± 8.59 ^b	61.5 ± 7.94 ^b
大马士酮	1 386	23726-93-4	1.71 ± 0.26 ^d	3.59 ± 0.19 ^a	0.14 ± 0.01 ^e	3.44 ± 0.04 ^a	2.74 ± 0.28 ^b	2.38 ± 0.12 ^c
顺-3-己烯酸顺-3-己烯酯	1 389	61444-38-0	137.44 ± 14.31 ^a	69.36 ± 3.37 ^b	126.18 ± 26.31 ^a	144.16 ± 6.66 ^a	72.14 ± 11.45 ^b	83.21 ± 5.7 ^b
β-榄香烯	1 398	33880-83-0	14.3 ± 1.13 ^c	7.86 ± 0.56 ^d	27.9 ± 2.24 ^b	30.83 ± 0.45 ^a	8.33 ± 1.5 ^d	3.32 ± 0.71 ^e

续表2

化合物名称	保留指数 (RI)	CAS	平均相对含量/(10.00 μg/kg)					
			ZC	ZQ	RC	RQ	HC	HQ
(-)-异丁香烯	1 406	118-65-0	24.56 ± 1.72 ^c	17 ± 1.43 ^d	49.41 ± 3.99 ^b	55.77 ± 3.23 ^a	14.24 ± 2.13 ^d	6.71 ± 0.93 ^c
邻甲基苯甲酸甲酯	1 408	85-91-6	6.89 ± 0.35 ^b	4.94 ± 0.47 ^c	14.73 ± 1.94 ^a	14.71 ± 0.51 ^a	4.25 ± 0.76 ^c	1.96 ± 0.42 ^d
反, 反-2,4-十一碳烯醛	1 430	30361-29-6	1.11 ± 0.11 ^c	1.52 ± 0.06 ^b	1.67 ± 0.32 ^b	2.12 ± 0.08 ^a	0.38 ± 0.26 ^d	2.3 ± 0.29 ^a
α-紫罗兰酮	1 435.12	127-41-3	2.21 ± 0.36 ^d	3.65 ± 0.19 ^b	3.09 ± 1.07 ^{bcd}	9.72 ± 0.6 ^a	3.28 ± 0.34 ^{bc}	2.36 ± 0.15 ^{cd}
香叶基丙酮	1 453	3796-70-1	28.36 ± 2.03 ^b	20.86 ± 1.51 ^c	21.28 ± 4.67 ^c	35.4 ± 3.81 ^a	16.61 ± 2.33 ^c	21.3 ± 3.37 ^c
十二醇	1 490	2437-25-4	2.19 ± 0.48 ^{ab}	1.52 ± 0.22 ^b	1.79 ± 0.04 ^b	1.49 ± 0.5 ^b	3.63 ± 2.06 ^a	1.92 ± 0.11 ^b
β-紫罗兰酮	1 491	14901-07-6	150.29 ± 10.69 ^b	90.11 ± 3.22 ^d	141 ± 18.47 ^{bc}	109.29 ± 11.11 ^{cd}	202.9 ± 38.59 ^a	92.71 ± 10.56 ^d
α-摩尔烯	1 499	10208-80-7	30.49 ± 3.48 ^a	27.24 ± 1.84 ^a	12.81 ± 3.35 ^b	22.38 ± 4.78 ^{ab}	23.19 ± 12.24 ^{ab}	24.17 ± 3.35 ^a
α-法呢烯	1 508	502-61-4	19.76 ± 1.16 ^a	7.12 ± 0.5 ^d	5.66 ± 1.68 ^d	15.13 ± 0.92 ^b	6.48 ± 1.49 ^d	10.11 ± 1.15 ^c
十三醛	1 513	10486-19-8	3.24 ± 0.15 ^a	2.2 ± 0.57 ^c	1.66 ± 0.23 ^c	3.07 ± 0.58 ^{ab}	2.3 ± 0.61 ^{bc}	2.47 ± 0.34 ^{abc}
δ-杜松烯	1 524	483-76-1	6.97 ± 0.52 ^c	10.73 ± 1.36 ^{bc}	11.96 ± 4.24 ^b	13.77 ± 1.21 ^b	7.62 ± 1.31 ^c	17.95 ± 1.58 ^a
橙花叔醇	1 537.04	7212-44-4	0.53 ± 0.05 ^c	0.59 ± 0.07 ^{bc}	0.6 ± 0.16 ^{bc}	0.79 ± 0.18 ^{ab}	0.45 ± 0.1 ^c	0.86 ± 0.17 ^a
喇吡茶醇	1 568	5986-49-2	43.18 ± 2.82 ^a	27.33 ± 4.17 ^b	26.37 ± 8.06 ^b	38.47 ± 3.36 ^a	14.6 ± 5.89 ^c	25.41 ± 2.54 ^b
(+)-柏木脑	1 600	77-53-2	2.97 ± 0.13 ^{bc}	2.1 ± 0.3 ^c	2.99 ± 0.44 ^{bc}	8.73 ± 1 ^a	3.43 ± 0.45 ^b	2.97 ± 0.13 ^{bc}
二氢茉莉酮酸甲酯	1 665.06	24851-98-7	10.13 ± 1.11 ^a	7.63 ± 0.9 ^b	6.93 ± 1.12 ^b	6.13 ± 0.63 ^b	4.26 ± 0.6 ^c	4.03 ± 0.76 ^c
丁位十二内酯	1 720	713-95-1	0.48 ± 0.1 ^{ab}	0.46 ± 0.04 ^{ab}	0.34 ± 0.24 ^b	0.57 ± 0.11 ^{ab}	0.64 ± 0.2 ^a	0.47 ± 0.14 ^{ab}
总和			17 521.36 ± 1 137.15 ^a	11 636.15 ± 983.96 ^b	12 796.46 ± 1 844.31 ^b	11 808.24 ± 609.34 ^b	8 878.34 ± 603.69 ^c	12 744.53 ± 438.28 ^b

注：同行不同小写字母表示样本间差异达显著水平 ($P < 0.05$)；表中数值为平均值 ± 标准差；保留指数 (Retention Index, RI) 参考值为 DB-5MS (30.00 m × 0.25 mm × 0.25 μm) 在气相色谱条件下的保留指数值，数据来源为迈维自建数据库。

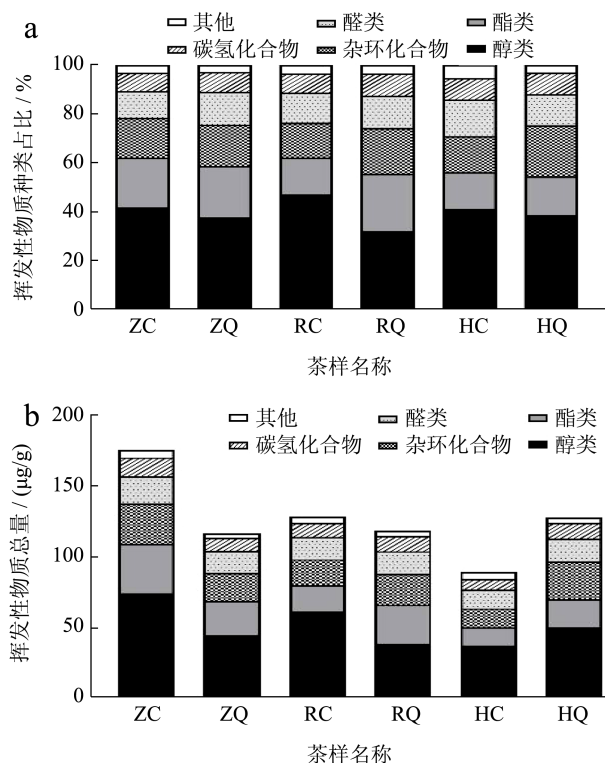


图1 6个红茶茶样的挥发性物质种类占比和总量

Fig.1 The preportion and total amount of volatile compounds in 6 black tea samples

注: a 为种类占比堆积图; b 为总量柱状图。其他类包括酮类、酸类、含硫化合物、酚类和含氮化合物。

对挥发性香气物质进行归类与整理。通过图 1a 可以看出, 醇类、酯类、杂环化合物、醛类和碳氢化合物是 6 份红茶中相对含量较高的挥发性组分, 占香气总量的 94.81%~97.22%。其中, 在 6 份红茶茶样中醇类占比最高, 占香气总量的 32.30%~47.48%。在紫牡丹和瑞香红茶中, 酯类是占比第二的香气种类, 杂环化合物排在第三。而在黄玫瑰红茶中, 杂环化合物是占比第二的香气总类, 酯类排在第三。Yan 等^[17]对福云六号和金观音红茶进行香气成分测定, 香气含量由高到低的种类是醇类、酮类和酯类; Sang 等^[18]用 GC-MS 技术分析了广东英德红茶的香气成分, 发现醇类是英德红茶中含量最高的香气种类, 其次是醛类和酯类, 三种香气种类占总香气物质的 60% 以上。由此可以看出, 茶树品种、茶叶产地和不同的香气检测方法都会在一定程度上影响茶叶中香气类别的占比。由图 1b 可以看出, 紫牡丹春茶的挥发性物质总量最高, 香气特征突出, 与感官审评结果一致。

2.3 紫牡丹、瑞香与黄玫瑰红茶的关键香气成分及其 ROAV 比较

为筛选构成 3 个高香型茶树品种的关键香气成

分, 采用 ROAV 将各香气成分的浓度与感觉阈值相结合, 评估不同香气成分对整体香气的贡献程度, 进而确定关键香气成分^[19,20]。若香气成分的 $\text{ROAV} > 1.00$, 则判定该香气成分为茶样的关键香气成分; 若 $0.10 \leq \text{ROAV} < 1.00$ 时, 表明该香气成分对茶样香气有重要修饰作用^[21]。

ROAV 计算结果表明, 6 个红茶样品中 ROAV 值均大于 1 的物质有 5 种 (表 3): 2-异丙基-3-甲氧基吡嗪、 β -紫罗兰酮、苧硫醇、5-乙基-3-羟基-4-甲基-2(5H)-呋喃酮、二甲基三硫, 认为这些香气物质可能是紫牡丹、瑞香、黄玫瑰红茶中的关键香气成分, 对总体香气贡献较大。2-异丙基-3-甲氧基吡嗪呈巧克力香、坚果香, 是 6 个红茶样品中香气贡献最大的香气成分。 β -紫罗兰酮是由类胡萝卜素降解形成, 呈现出水果香、木香和紫罗兰香气且感官阈值较低^[22], 对红茶香气贡献较大。5-乙基-3-羟基-4-甲基-2(5H)-呋喃酮呈甜香、果香和奶香, 属于甜香型, 是传统工夫红茶的香气特征。苧硫醇 (大蒜味) 和二甲基三硫 (肉味) 属于含硫化合物, 含硫化合物通常表现出较强的刺激性气味, 且具有量小香大的特点^[23,24]。另外, 具有甜花香和花果香香型的香叶醇、苯乙醛、(Z)-6-壬醛、3,6-壬二烯醛等在 6 个红茶样品中 ROAV 值均 > 0.1 , 对红茶香气都具有修饰作用。这些物质共同赋予了紫牡丹、瑞香、黄玫瑰红茶花香、果香、甜香及特殊香气。值得一提的是, 具有果香特性的 β -紫罗兰酮和 5-乙基-3-羟基-4-甲基-2(5H)-呋喃酮在春茶中的 ROAV 值都大于秋茶, 使得春茶有较明显的果香特征, 与感官审评相对应。

2.4 不同品种红茶之间的差异香气成分分析

PCA 是一种去除随机变量间相关性的线性变换, 形成主成分 (Principal Component, PC) 变量, 以展示数据特征的方法^[25,26]。将所有挥发性成分进行 PCA 分析, 生成 7 个主成分, 验证 Significance 都为 R1, 模型累计解释率 $R^2_{X(\text{cum})}$ 为 0.989, 整体预测能力 $Q^2_{(\text{cum})}$ 为 0.913, 表明模型拟合度高, 具有一定预测能力, PC1~7 解释率 R^2_X 分别为 0.517、0.292、0.078、0.059、0.028、0.009、0.005, 每个 PC 预测能力 Q^2 值分别为 0.429、0.718、0.751、0.826、0.888、0.902、0.913。如图 2a 所示, 每份茶样实现了较好的区分, 且组内重合度较好。在 PCA 载荷图中, 距离中心点越远的香气成分认为对样本分类贡献越大。如图 2b 所示, 香叶醇 ($P_1=0.664$, $P_2=0.092$)、吡啶 ($P_1=0.294$, $P_2=0.271$)、乙酸芳樟酯 ($P_1=0.255$, $P_2=0.060$)、2-苯乙醇 ($P_1=0.064$, $P_2=0.438$) 等香气物质对 ZC 区别于其他样本贡献较

大；同理，可可醛（P1=0.024，P2=-0.089）与 β -紫罗兰酮（P1=0.069，P2=-0.092）对于 RC、HC 区别于其他样本贡献较大；而丙酸叶醇酯（P1=-0.201，P2=0.071）、芳樟醇氧化物IV（P1=-0.190，P2=0.190）、萜品油烯（P1=-0.131，P2=0.232）、2-乙酰基噻吩（P1=-0.126，P2=0.221）、2-异丁基吡嗪（P1=-0.169，P2=0.155）等对 ZQ、RQ、HQ 区别于其他样本贡献较大，可见，这些成分对秋茶香气影响较大。

为了进一步明确春、秋两个季节 3 个品种红茶之间的差异香气成分，对 ZC、RC 与 HC 和 ZQ、RQ 与 HQ 分别进行 OPLS-DA 分析（ $P < 0.05$ ，VIP > 1），

分别筛选出 18、22 个差异香气成分。

如图 3a 所示，在 3 个品种的春季红茶中，含量存在明显差异的香气成分有 18 种。在 ZC 中具有花果香的 2-苯乙醇、香叶醇、月桂烯、苯乙醛、吲哚、顺-6-壬烯醇、己酸异戊酯、2,2,6-三甲基-6-乙烯基四氢-2H-呋喃-3-醇、3-羟基己酸乙酯和具有坚果香、木质香的 2-乙酰基噻吩、萜品油烯的相对含量显著高于其他两个品种，RC 中可可醛、水杨酸甲酯、(-)-异丁香烯、十三烷、丁酸庚酯的相对含量显著高于其他两个品种，而 β -紫罗兰酮在 HC 中显著高于其他两个品种。

表 3 6 个红茶茶样关键香气成分及对应ROAV值
Table 3 Key aroma components and corresponding ROAV values of six volatile substances in black tea samples

	化合物名称	CAS 号	香气阈值/ ($\mu\text{g/kg}$)	香气类型	ROAV 值					
					ZC	ZQ	RC	RQ	HC	HQ
关键 香 气 成 分	2-异丙基-3-甲氧基吡嗪	25773-40-4	0.002	坚果香、巧克力香	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	β -紫罗兰酮	14901-07-6	0.007	果香、木香、紫罗兰香	36.82	20.41	51.03	24.53	75.07	15.00
	5-乙基-3-羟基-4-甲基-2(5H)-呋喃酮	698-10-2	0.002	甜香、果香、奶香	10.66	7.77	13.88	9.69	13.52	5.49
	苜硫醇	100-53-8	0.003 5	大蒜味	10.45	7.86	22.57	10.38	21.07	10.04
	二甲基三硫	3658-80-8	0.008	肉味	3.75	2.69	3.23	2.39	4.16	1.39
	(Z)-6-壬烯醛	2277-19-2	0.14	甜瓜香、花香	1.02	0.91	2.02	1.94	1.44	1.03
	香叶醇	106-24-1	6.6	甜香、花果香、玫瑰香			1.00			
	3,6-壬二烯醛	21944-83-2	0.05	黄瓜清香			1.37		1.44	
	香叶醇	106-24-1	6.6	甜香、花果香、玫瑰香	0.91	0.12		0.11	0.49	0.05
	2-乙酰基噻吩	88-15-3	1	坚果香	0.74	0.74	0.77	0.74	0.75	0.77
修 饰 性 香 气 成 分	3,6-壬二烯醛	21944-83-2	0.05	黄瓜清香	0.71	0.61		0.66		0.57
	顺-6-壬烯醇	35854-86-5	1	瓜香、清香	0.49	0.38	0.52	0.18	0.44	0.41
	顺-4-庚烯醛	6728-31-0	0.025	奶油香	0.38	0.18	0.53	0.26	0.57	0.14
	苯乙醛	122-78-1	6.30	花香、蜜香	0.32	0.28	0.33	0.23	0.28	0.20
	反-2, 顺-6-壬二烯醇	28069-72-9	1	黄瓜香	0.21	0.18	0.24	0.08	0.20	0.19
	2-乙氧基-3-甲基吡嗪	32737-14-7	0.8	烘烤香、杏仁香	0.19	0.16	0.29	0.16	0.28	0.26
	(-)-玫瑰醚	16409-43-1	0.2	甜花香、玫瑰香	0.18	0.15	0.26	0.17	0.28	0.13
	γ -己内酯	695-06-7	1.6	椰奶香、果香	0.16	0.14	0.18	0.17	0.28	0.13
	1-辛醇	111-87-5	0.125 8	柑橘香、玫瑰香	0.11	0.21	0.14	0.24	0.13	0.21
	2-乙基-3,5-二甲基吡嗪	13925-07-0	0.04	烘烤香、咖啡香	0.11	0.16	0.11	0.16	0.14	0.11
	正壬醛	124-19-6	1	柑橘香			0.11			
	3-巯基-1-己醇	51755-83-0	0.06	果香			0.12			
	十二腈	2437-25-4	0.09	柑橘香					0.10	

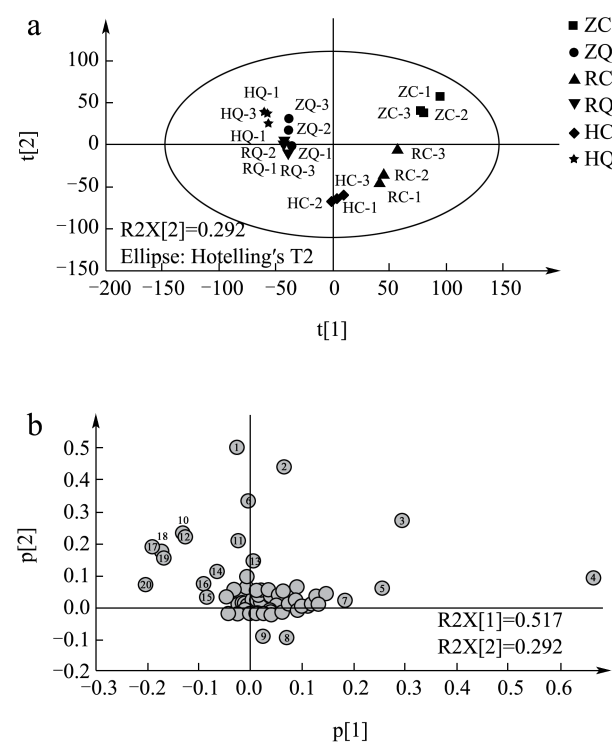


图 2 6 个红茶茶样挥发性物质的差异香气分析

Fig.2 Differential aroma analysis of volatile compounds in 6 black tea samples

注：a 为 PCA 得分图；b 为载荷图。图 2b 中数字与香气成分对应为：1（3-羟基己酸乙酯）；2（2-苯乙醇）；3（吲哚）；4（香叶醇）；5（乙酸芳樟酯）；6（苯乙醛）；7（月桂烯）；8（ β -紫罗兰酮）；9（可可醛）；10（蒎品油烯）；11（2,2,6-三甲基-6-乙烷基四氢-2H-呋喃-3-醇）；12（2-乙酰基噻吩）；13（顺-6-壬烯醇）；14（4-苯基-2-丁醇）；15（苯甲醛）；16（2-乙氧基-3-甲基吡嗪）；17（芳樟醇氧化物IV）；18（二氢月桂烯醇）；19（2-异丁基吡嗪）；20（丙酸叶醇酯）。

如图 3b 所示，在 3 个品种的秋季红茶中，22 种香气成分的含量存在明显差异。在 ZQ 中，具有花果香的 2-苯乙醇、苯乙醛、3-羟基己酸乙酯、香叶醇的相对含量显著高于其他两个品种，RQ 中具有花果香的 γ -己内酯、吲哚、丙酸叶醇酯、顺-3-己烯酸顺-3-己烯酯、己酸叶醇酯、具有焦糖香的水杨酸甲酯和具有木质香的 (-)-异丁香烯的相对含量显著高于其他两个品种，HQ 中具有果香的 2-异丁基吡嗪、二氢月桂烯醇、2-乙氧基-3-甲基吡嗪、顺-6-壬烯醇、反-2, 顺 6-壬二烯醇、具有花香的芳樟醇氧化物IV、芳樟醇、2,2,6-三甲基-6-乙烷基四氢-2H-呋喃-3-醇和具有坚果香、木质香的 2-乙酰基噻吩、2-异丙基-3-甲氧基吡嗪、蒎品油烯的相对含量显著高于其他两个品种。分析结果与 PCA 分析结果基本对应。

通过以上结果发现，紫牡丹春茶的差异香气成分

大多呈现花果香，而紫牡丹秋茶的差异香气成分呈现甜香与花果香。瑞香春茶的差异香气成分以木质香和焦糖香为主，瑞香秋茶的差异香气成分在木质香与焦糖香的基础上，增加了一些花果香。黄玫瑰春茶的差异香气成分呈现花果香和甜香，黄玫瑰秋茶则呈现坚果香与花果香。结合 ROAV 值（表 3）分析， β -紫罗兰酮（ROAV=75.07）为黄玫瑰春茶的重要香气成分，2-异丙基-3-甲氧基吡嗪（ROAV=100.00）为黄玫瑰秋茶的重要香气成分。其他差异香气物质仅作为 6 份红茶的修饰性香气成分，不起主导作用。

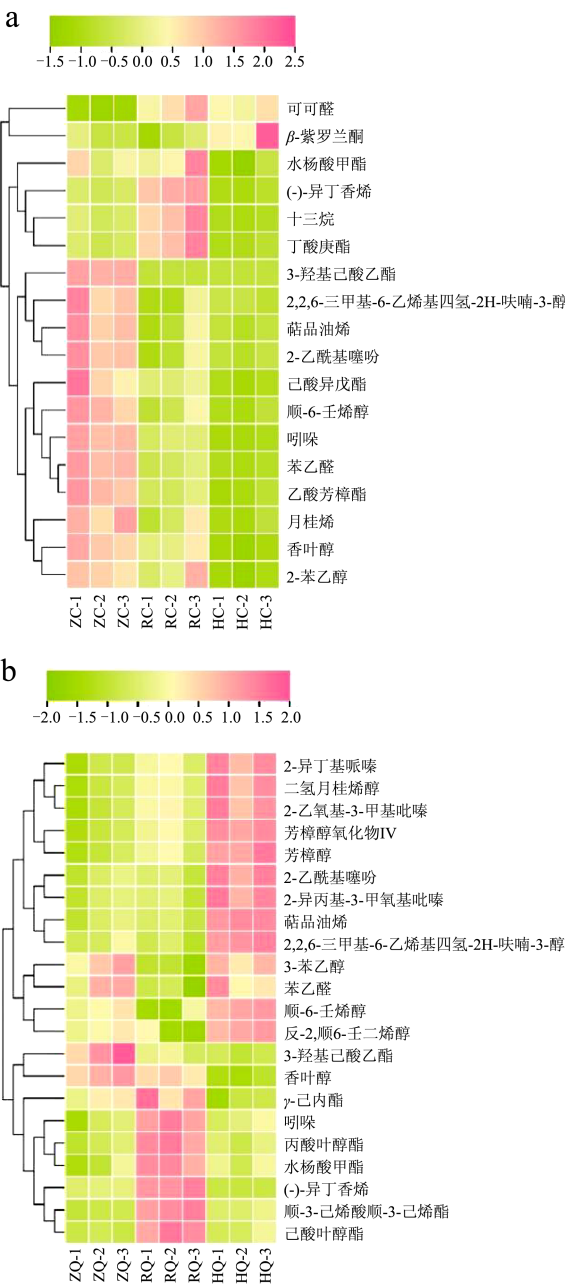


图 3 紫牡丹、瑞香、黄玫瑰红茶之间的差异香气成分热图

Fig.3 Heatmap of different aroma components between Zi Mudan, Rui Xiang and Huang Meigui black tea

注：a 为春季红茶；b 秋季红茶。

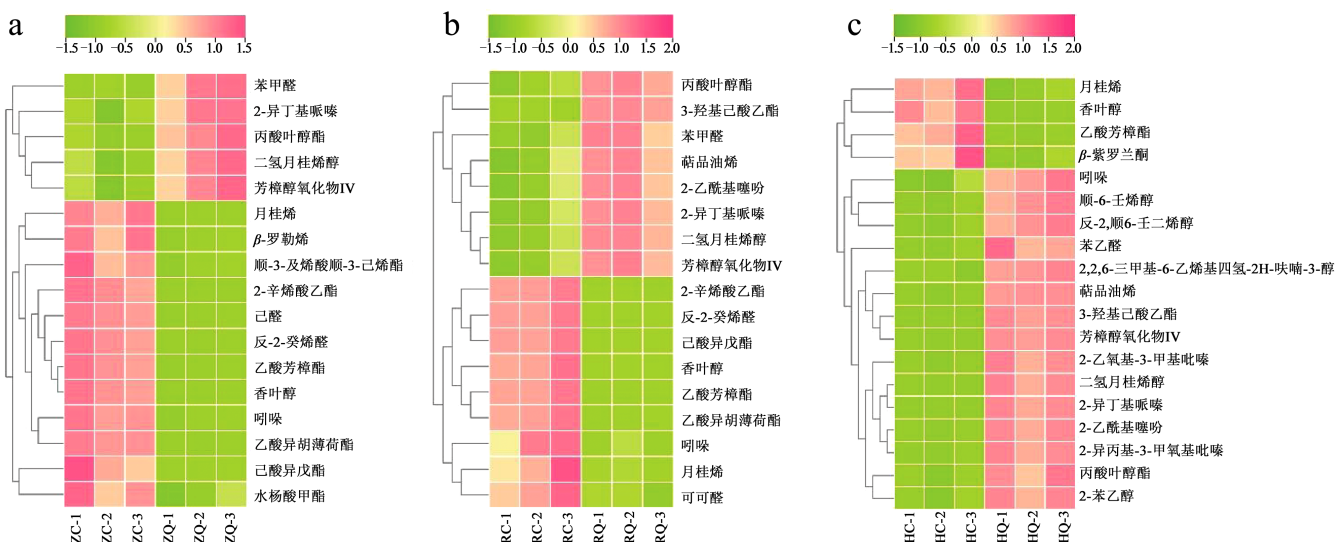


图4 不同春季红茶和秋季红茶之间的差异香气成分热图

Fig.4 Heatmap of aroma components differences between different spring and autumn black tea

注: a 为紫牡丹; b 为瑞香; c 为黄玫瑰。

2.5 同一品种不同季节红茶之间的差异香气成分分析

季节是影响茶树物质代谢的重要环境条件,不同季节成品茶香气品质成分含量通常有较大差异^[27]。该研究对 ZC 和 ZQ、RC 和 RQ、HC 和 HQ 进行 OPLS-DA 分析,分别筛选出 17、17、19 个差异香气成分 ($P < 0.05$, $VIP > 1$)。并通过热图(图4)可视化了差异香气成分的变化。由图4可以看出,在紫牡丹红茶中,月桂烯、 β -罗勒烯、顺-3-己烯酸顺-3-己烯酯、2-辛烯酸乙酯、己醛、反-2-癸烯醛、乙酸芳樟酯、香叶醇、吡嗪、乙酸异胡薄荷酯、己酸异戊酯、水杨酸甲酯的相对含量春季高于秋季;苯甲醛、2-异丁基吡嗪、丙酸叶醇酯、二氢月桂烯醇、芳樟醇氧化物IV的相对含量秋季高于春季。在瑞香红茶中,2-辛烯酸乙酯、反-2-癸烯醛、己酸异戊酯、香叶醇、乙酸芳樟酯、乙酸异胡薄荷酯、吡嗪、月桂烯、可可醛的相对含量春季高于秋季,丙酸叶醇酯、3-羟基己酸乙酯、苯甲醛、萜品油烯、2-乙酰基噻吩、2-异丁基吡嗪、二氢月桂烯醇、芳樟醇氧化物IV的相对含量秋季高于春季;在黄玫瑰红茶中,月桂烯、香叶醇、乙酸芳樟酯、 β -紫罗兰酮的相对含量春季高于秋季;吡嗪、顺-6-壬烯醇、反-2-顺6壬二烯醇、苯乙醛、2,2,6-三甲基-6-乙基四氢-2H-呋喃-3-醇、萜品油烯、3-羟基己酸乙酯、芳樟醇氧化物IV、2-乙氧基-3-甲基吡嗪、二氢月桂烯醇、2-异丁基吡嗪、2-乙酰基噻吩、2-异丙基-3-甲氧基吡嗪、丙酸叶醇酯、2-苯乙醇的相对含量秋季高于春季。

综上所述,香叶醇、月桂烯、乙酸芳樟酯的相对含量在三个品种中均是春季高于秋季;而2-异丁基吡

嗪、丙酸叶醇酯、二氢月桂烯醇、芳樟醇氧化物IV的相对含量表现为秋季高于春季。由此可见,香叶醇、月桂烯、乙酸芳樟酯、2-异丁基吡嗪、丙酸叶醇酯、二氢月桂烯醇、芳樟醇氧化物IV的相对含量在春、秋季红茶中的分布具有较明显规律性,对于区分春、秋季红茶具有重要作用,可作为不同季节红茶鉴别的潜在化学标记物。

3 结论

紫牡丹、瑞香和黄玫瑰茶树品种是福建省尤溪县目前正在计划推广的茶树品种。该研究对该3个品种的春、秋季共6个红茶样品的挥发性物质进行比较分析,以探究3个高香型品种所制红茶的香气成分差异以及生长季节对于香气成分的影响。共鉴定出116种挥发性化合物,醇类、酯类、杂环化合物、醛类和碳氢化合物是6份红茶中相对含量较高的挥发性组分,占香气总量的94.81%~97.22%。在三个品种中共鉴定出5个共同的关键香气成分,分别是2-异丙基-3-甲氧基吡嗪、 β -紫罗兰酮、苧烯醇、5-乙基-3-羟基-4-甲基-2(5H)-呋喃酮、二甲基三硫。基于 $VIP > 1$ 和 $P < 0.05$ 值,进一步筛选出了紫牡丹春茶和秋茶、瑞香春茶和秋茶、黄玫瑰春茶和秋茶的差异香气成分。得出 β -紫罗兰酮是黄玫瑰春茶的重要香气成分,2-异丙基-3-甲氧基吡嗪是黄玫瑰秋茶的重要香气成分。另外,香叶醇、月桂烯、乙酸芳樟酯、2-异丁基吡嗪、丙酸叶醇酯、二氢月桂烯醇、芳樟醇氧化物IV可作为鉴别春季和秋季红茶的潜在化学标记物。制作红茶的茶树品种繁多,该研究仅对尤溪地区紫牡丹、瑞香、

黄玫瑰三个高香型茶树品种进行了分析,这些香气物质在其他品种中的表现有待进一步拓展探究。该研究结果明确了紫牡丹、瑞香、黄玫瑰三个高香型茶树品种加工工夫红茶的关键香气成分及季节性差异,目前关于三个品种的研究较少,关于其滋味品质特征有待进一步研究,以期为紫牡丹、瑞香、黄玫瑰茶树品种加工红茶的风味品质特征提供科学依据。

参考文献

- [1] 李晶.福建红茶品质特征研究与综合评价[D].福州:福建农林大学,2023.
- [2] PENG Q, LI S S, SHEN R, et al. Comparative study of volatile compounds and metabolic pathways of Congou black tea from four regions based on sensory evaluation and HS-SPME/GC-MS [J]. Microchemical Journal, 2024, 205: 111276.
- [3] 袁海波,尹军峰,叶国柱,等.茶叶香型及特征物质研究进展[J].中国茶叶,2009,31(8):14-15.
- [4] TANG M T, LIAO X S, XU M T, et al. Comprehensive investigation on the flavor difference in five types of tea from JMD (*Camellia sinensis* 'Jinmudan') [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2025, 105(2): 990-1002.
- [5] 罗学平,李丽霞,钟晓雪,等.HS-SPME-GC-MS联用测定宜宾黄观音红茶香气成分[J].现代农业科技,2022,(9):181-185,193.
- [6] 欧晓西,黄慧清,李秋明,等.基于SBSE-GC-O-MS技术‘梅占’茶关键香气成分分析[J].食品工业科技,2025,46(2):271-279..
- [7] 李鑫磊,陈泉宾,孔祥瑞,等.3个高香茶树品种(系)制作沙县红边茶香气特征研究[J].茶叶学报,2024,65(3):1-10.
- [8] 陈常颂,游小妹,陶湘辉,等.瑞香等3个高香型红茶与乌龙茶兼用新品种的主要性状[C]//中国茶叶学会.2011中国红茶高峰论坛论文集.福建省农业科学院茶叶研究所,2011:4.
- [9] 尤志明,郭吉春.福建茶区茶树品种的搭配种植[J].中国茶叶,2008,11:7-9.
- [10] 郭吉春,杨如兴,叶乃兴,等.10个茶树高优新品种的育成与应用[J].福建茶叶,2003,3:19-21.
- [11] 杨亚军,梁月荣.中国无性系茶树品种志[M].上海:上海科学技术出版社,2014.
- [12] 郭向阳,宛晓春.黄玫瑰乌龙茶挥发性香气成分的GC-MS分析[J].中国食品添加剂,2019,30(2):152-161.
- [13] 卢慰.紫牡丹乌龙茶香气成分的SPME/HS-GC-MS分析[J].食品研究与开发,2018,39(20):161-165.
- [14] 王飞权,冯花,葛捷琳,等.不同茶树品种新工艺秋季白茶品质比较分析[J].茶叶通讯,2019,46(4):441-447.
- [15] 任卫威,徐梦婷,陈文贤,等.基于HS-SPME-GC-MS分析不同包揉方式安溪黄金桂乌龙茶香气成分[J].食品工业科技,2024,45(24): 263-271.
- [16] 刘登勇,周光宏,徐幸莲.确定食品关键风味化合物的一种新方法:"ROAV"法[J].食品科学,2008,7:370-374
- [17] YAN T Y, LIN J X, ZHU J X, et al. Aroma analysis of Fuyun 6 and Jinguanyin black tea in the Fu'an area based on E-nose and GC-MS [J]. European Food Research and Technology, 2022, 248(4): 1-15.
- [18] SANG J Q, LIU H C, WEN J, et al. GC-MS Analysis of aroma components in different varieties of Yingde black tea [J]. Journal of Innovation and Social Science Research, 2020, 7(3): 111-120
- [19] HUANG W J, FANG S M, WANG J, et al. Sensomics analysis of the effect of the withering method on the aroma components of Keemun black tea [J]. Food Chemistry, 2022, 395: 133549.
- [20] FENG Z H, LI M, LI Y F, et al. Characterization of the key aroma compounds in infusions of four white teas by the sensomics approach [J]. European Food Research and Technology, 2022, 248 (5): 1-11.
- [21] SU D, HE J J, ZHOU Y Z, et al. Aroma effects of key volatile compounds in Keemun black tea at different grades: HS-SPME-GC-MS, sensory evaluation, and chemometrics [J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131587.
- [22] DHARMESH M K, BHARAO P N, PADMA B, et al. Recovery of valuable tea aroma components by pervaporation [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2003, 42 (26) :6924-6932.
- [23] YANG F, CHEN E B, FU A Z, et al. Formation of key aroma compounds in *Agrocybe aegerita* during hot air drying: amino acids and reducing sugars identified as flavor precursors [J]. Food Chemistry, 2025, 465(P1): 141975.
- [24] SUN J Y, WANG Z, SUN B G. Low quantity but critical contribution to flavor: review of the current understanding of volatile sulfur-containing compounds in Baijiu [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 103: 104079.
- [25] ZHAO F, CHEN M J, JIN S, et al. Macro-composition quantification combined with metabolomics analysis uncovered key dynamic chemical changes of aging white tea [J]. Food Chemistry, 2022, 366(1): 130593.
- [26] WANG B Y, CHEN H M, QU F F, et al. Identification of aroma-active components in black teas produced by six Chinese tea cultivars in high-latitude region by GC-MS and GC-O analysis [J]. European Food Research and Technology, 2022, 248: 645-657.
- [27] LIU H C, XU Y J, WU J J, et al. GC-IMS and olfactometry analysis on the tea aroma of Yingde black teas harvested in different seasons [J]. Food Research International, 2021, 150: 110784.