

金牡丹不同茶类夏秋茶香品质差异分析

唐梦婷^{1,2}, 廖献盛¹, 吴先寿³, 魏明秀⁴, 郑玉成², 金珊¹, 张见明^{2,*}, 叶乃兴^{1,*}

(1.福建农林大学园艺学院, 农作物遗传育种与综合利用教育部重点实验室, 福建 福州 350002;

2.武夷学院中国乌龙茶产业协同创新中心, 福建 武夷山 354300; 3.福建谦谦一叶茶业科技有限公司, 福建 寿宁 355500; 4.寿宁县茶产业发展中心, 福建 寿宁 355500)

摘要:以‘金牡丹’品种夏、秋季嫩梢为原料, 分别加工成绿茶、黄茶、白茶、乌龙茶及红茶, 采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术对夏、秋季的5类茶中的挥发性代谢物进行测定和分析。结果表明, 夏茶中鉴定出522种挥发性代谢物, 以萜类、酯类及醇类为主; 秋茶中鉴定出502种挥发性代谢物, 以萜类、酯类和杂环化合物为主。香气活性值分析表明, β -紫罗兰酮、 α -紫罗兰酮、癸醛、苯甲酸甲酯、香叶醇等是金牡丹绿茶的关键呈香物质; β -紫罗兰酮、2-乙氧基-3-甲基吡嗪、癸醛、苯甲酸甲酯、香叶醇等是金牡丹黄茶的关键呈香物质; 香叶醇、苯乙醛、水杨酸甲酯、(E)-芳樟醇氧化物、2-乙氧基-3-甲基吡嗪等是金牡丹白茶的关键呈香物质; 吲哚、苯甲酸甲酯、苯乙醛、香叶醇、(E)-芳樟醇氧化物等是金牡丹乌龙茶的关键呈香物质; 香叶醇、芳樟醇、苯乙醛、苯甲酸甲酯、水杨酸甲酯等是金牡丹红茶的关键呈香物质。秋茶中呈香物质的贡献、种类与数量均多于夏茶, 其中, 香叶醇、水杨酸甲酯、苯乙醇等42种关键呈香物质在秋季样品中香气活性值均高于夏季。整体而言, 金牡丹茶以花香类为主要香型, 秋茶香气品质显著优于夏茶, 香叶醇、芳樟醇、2-乙氧基-3-甲基吡嗪、苯甲酸甲酯等14种挥发性代谢物为金牡丹茶品种的关键香气物质。

关键词: 金牡丹; 不同茶类; 夏秋茶; 香气品质; 香气活性值

Differences in Aroma Quality of Different Types of Jinmudan Tea Made from Tea Leaves Harvested in Summer and Autumn

TANG Mengting^{1,2}, LIAO Xiansheng¹, WU Xianshou³, WEI Mingxiu⁴, ZHENG Yucheng², JIN Shan¹, ZHANG Jianming^{2,*}, YE Naixing^{1,*}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Genetics, Breeding and Multiple Utilization of Crops, College of Horticulture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. China Oolong Tea Industry Collaborative Innovation Center of Wuyi University, Wuyishan 354300, China; 3. Fujian Qianqian Yiye Tea Technology Co. Ltd., Shouning 355500, China; 4. Shouning County Tea Industry Development Center, Shouning 355500, China)

Abstract: In this study, the tender shoots of ‘Jinmudan’ tea plants harvested in summer and autumn were processed separately into green tea, yellow tea, white tea, oolong tea and black tea. Headspace-solid phase microextraction (HS-SPME) combined with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) was used to determine and analyze the volatile metabolites in the 10 tea samples. The results showed that 522 volatile metabolites were identified in the summer tea, mainly including terpenes, esters and alcohols, and 502 volatile metabolites in the autumn tea, mainly including terpenes, esters and heterocyclic compounds. The analysis of odor activity value (OAV) showed that β -ionone, α -ionone, decanal, methyl benzoate and geraniol were the key aroma substances of Jinmudan green tea; β -ionone, 2-ethoxy-3-methylpyrazine, decanal, methyl benzoate and geraniol were the key aroma substances of Jinmudan yellow tea; geraniol, phenylacetaldehyde, methyl salicylate (E)-linalool oxide, and 2-ethoxy-3-methylpyrazine were the key aroma substances of Jinmudan white tea; indole, methyl benzoate, phenylacetaldehyde, geraniol, and (E)-linalool oxide were the key aroma substances of Jinmudan

收稿日期: 2024-05-25

基金项目: 中国乌龙茶产业协同创新中心开放基金项目(2024W01); 福建张天福茶叶发展基金会科技创新基金项目(FJZTF01)

第一作者简介: 唐梦婷(2000—)(ORCID: 0009-0001-7764-3894), 女, 硕士研究生, 研究方向为茶叶品质化学。

E-mail: 1660020107@qq.com

*通信作者简介: 张见明(1970—)(ORCID: 0000-0002-6647-7691), 男, 高级农艺师, 学士, 研究方向为茶树资源利用与茶园生态。E-mail: zjm0308@163.com

叶乃兴(1963—)(ORCID: 0000-0003-2955-2813), 男, 教授, 硕士, 研究方向为茶树栽培育种和品质化学。

E-mail: ynxtea@126.com

oolong tea; geraniol, linalool, phenylacetaldehyde, methyl benzoate, and methyl salicylate were the key aroma substances of Jinmudan black tea. The contribution, type and quantity of aroma substances in the autumn tea were greater than those in the summer tea. The OAV of 42 key aroma substances such as geraniol, methyl salicylate and phenylethanol in the autumn tea samples were higher than those in the summer tea samples. Overall, flowery aroma was the major aroma type of Jinmudan tea, and the aroma quality of the autumn tea was better than that of the summer tea. Totally 14 volatile metabolites such as geraniol, linalool, 2-ethoxy-3-methylpyrazine and methyl benzoate were the key aroma substances of the 'Jinmudan' tea variety.

Keywords: Jinmudan; different types of tea; summer and autumn tea; aroma quality; odor activity value

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240525-209

中图分类号: TS272

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2025) 02-0171-12

引文格式:

唐梦婷, 廖献盛, 吴先寿, 等. 金牡丹不同茶类夏秋茶香气品质差异分析[J]. 食品科学, 2025, 46(2): 171-182.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240525-209. <http://www.spkx.net.cn>

TANG Mengting, LIAO Xiansheng, WU Xianshou, et al. Differences in aroma quality of different types of Jinmudan tea made from tea leaves harvested in summer and autumn[J]. Food Science, 2025, 46(2): 171-182. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240525-209. <http://www.spkx.net.cn>

茶是世界上消费最多的无酒精饮料之一, 并且具有抗癌、抗菌、消炎等功效^[1]。根据加工方式不同, 可将茶叶分为红茶、乌龙茶、黄茶、白茶、绿茶和黑茶; 根据鲜叶采摘的季节不同, 又可将茶叶分为春茶、夏茶和秋茶。

香气成分约占茶叶干物质总质量的0.01%~0.05%, 是衡量茶叶品质的一个重要指标^[2]。不同茶类因其原料加工方式、品种以及采摘季节的不同而具有不同的香气特征^[3-4]。张雪波等^[5]发现各季节铁观音茶样的挥发性成分组成基本相似, 但各成分的相对含量存在较大差异, 其香气品质以春茶、秋茶为优, 暑茶和夏茶次之。郑挺盛等^[6]研究表明, 春茶、秋茶芳香物质种类相对较少, 夏暑茶芳香物质种类多, 但香叶醇、吲哚、橙花叔醇等花香型香气成分含量低于秋茶, 在感官审评方面, 秋茶、春茶香气品质要比夏、暑茶好。张悦等^[7]通过多元统计分析方法筛选出植醇、己醛、壬醛、1-辛烯-3-醇、辛醛和反式 β -紫罗兰酮这6种关键香气物质用于区分春、秋季烘青绿茶。因此, 采摘季节的不同影响着茶鲜叶中次生代谢物的组分和含量以及成品茶香气品质优劣。

‘金牡丹’(*Camellia sinensis* ‘Jinmudan’)是早生的高香优质茶树新品种(国品鉴茶2010024), 已在福建、广东、湖南、浙江、江西茶区等大面积推广种植^[8]。

‘金牡丹’茶树品种适制多种茶类, 其制成的茶叶具有馥郁持久的花果香^[9]。已有研究表明, 金牡丹红茶中的关键香气物质为 β -紫罗兰酮、香叶醇、癸醛和苯甲酸甲酯等, 以果香为主, 花香、甜香为辅^[10]。

夏、秋茶占我国茶叶产量的60%左右, 由于夏、秋季天气炎热, 导致夏、秋茶粗老且香气淡薄、滋味苦涩, 茶叶品质低于春茶, 这也造成了茶农和茶企生产积极低、采摘量少, 夏秋茶的利用率较低以及资源浪费等问题^[11]。目前, ‘金牡丹’品种制成的夏、秋茶的香气品质相关研究鲜见报道。因此, 本研究采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱(headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)技术对‘金牡丹’品种夏、秋季5类茶挥发性代谢物进行测定和分析, 旨在揭示金牡丹茶的香气品质特征, 探索不同茶类间主要香气成分及季节性的差异, 为今后挖掘利用茶叶生产资源、生产优质茶叶以及提高‘金牡丹’茶树品种夏秋茶品质和多茶类的利用率提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

本研究选取生长环境一致且无病虫害的夏季与秋季‘金牡丹’鲜叶(119°14'E、27°11'N), 分别按照绿茶、黄茶、白茶、乌龙茶及红茶的加工工艺制成夏茶和秋茶^[12](图1)。夏茶和秋茶鲜叶分别于2023年6月中下旬、10月上旬采摘; 采摘标准为一芽二叶(红茶、绿茶、黄茶、白茶)或一芽三四叶(乌龙茶), 设置3次生物学重复。

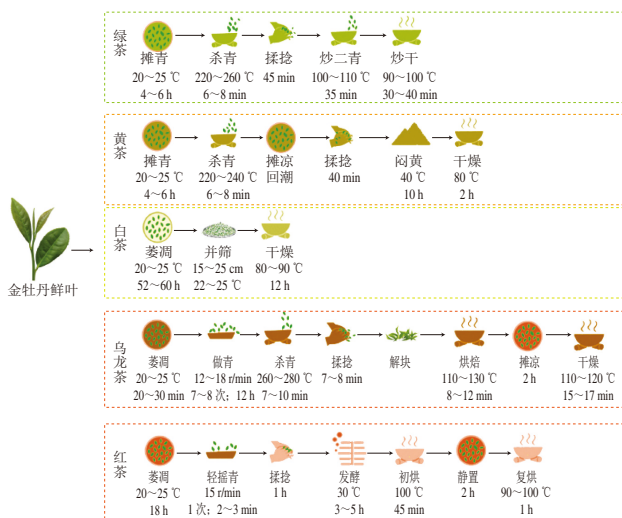


图1 金牡丹5类茶加工工艺流程

Fig. 1 Flow chart of the processing of 5 types of Jinmudan tea

氯化钠(分析纯) 国药集团化学试剂有限公司;
正己烷(色谱纯) 德国Merck公司; 标准品(色谱纯)
云南BioBioPha公司/美国Sigma-Aldrich公司。

1.2 仪器与设备

6CZ-110I茶叶综合做青机 福建望舒茶叶机械有限公司;
6CR-55茶叶揉捻机 浙江上洋机械股份有限公司;
6C3解块机 福建三叶茶叶机械有限公司; 6CWC-100炒青机、JY-6CHZ-7B干燥机 福建佳友机械有限公司;
8890-7000D GC-MS分析仪、DVB/CWR/PDMS萃取头、DB-5MS毛细管柱 美国安捷伦公司。

1.3 方法

1.3.1 茶样感官审评方法

金牡丹不同茶类的感官审评由6名受过专业训练的茶叶审评人员按照GB/T 23776—2018《茶叶感官审评方法》，在26 °C标准感官审评室内进行。绿茶、黄茶、白茶、红茶采用柱形杯审评法，乌龙茶采用盖碗审评法。由评审员对茶叶的外形、汤色、香气、滋味及叶底等品质因素进行评价和记录。

1.3.2 挥发性代谢物测定方法

参考文献[10]的方法，对供试样品进行液氮研磨并涡旋混合均匀，称取样本约500 mg置于顶空瓶中，分别加入饱和氯化钠溶液和10.00 μL (50.00 μg/mL)的3-己酮作为内标溶液，进样前先将萃取头在老化装置中250 °C老化5 min，后在60 °C恒温条件下振荡5 min，将120 μm DVB/CWR/PDMS萃取头插入样品顶空瓶，顶空萃取15 min，然后在250 °C解吸附5 min，进行全自动HS-SPME后用于GC-MS分析。

GC条件：DB-5MS毛细管柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)，载气(高纯氮气，纯度≥99.999%)，恒流

流速1.2 mL/min，进样口温度250 °C，不分流进样，溶剂延迟3.5 min。程序升温：40 °C保持3.5 min，以10 °C/min升至100 °C，再以7 °C/min升至180 °C，最后以25 °C/min升至280 °C，保持5 min。

MS条件：电子电离源，离子源温度230 °C，四极杆温度150 °C，质谱接口温度280 °C，电子能量70 eV，扫描方式为选择离子监测模式，定性定量离子精准扫描。以上方法参考自GB 23200.8—2016《水果和蔬菜中500种农药及相关化学品残留量的测定 气相色谱-质谱法》。

1.3.3 挥发性代谢物的定量与定性计算

参照文献[13]的方法，基于MWGC数据库，对样本的代谢物进行质谱定性；对于定量分析，挥发性代谢物的质量浓度参照内标法使用方程式计算，计算公式为：

$$A_x = \frac{b_1 \times c_2}{b_2 \times c_1} \quad (1)$$

式中： A_x 为任一组分挥发性代谢物的含量/(μg/g)； b_1 为任一组分的色谱峰面积； b_2 为内标物(3-己酮，50 μg/mL)的峰面积； c_1 为各茶叶样品的质量/g； c_2 为内标物质量/μg。

香气活性值(odor activity value, OAV)为风味化合物的质量浓度(C_i)与其在水中的香气阈值(OT_i)的比值(式(2))，通常用OAV表示呈香物质对整体风味的贡献值。

$$OAV = \frac{C_i}{OT_i} \quad (2)$$

1.4 数据分析

基于迈维云平台进行主成分分析(principal component analysis, PCA)、正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares-discriminant analysis, OPLS-DA)绘制Venn图、聚类热图及火山图；使用Origin 2024软件绘制香气风味轮；使用网站(<https://www.chiplot.online/>和<https://www.chemspider.com/>)绘制饼图和柱状图，下载化学结构式。

2 结果与分析

2.1 金牡丹夏、秋季5类茶的感官品质与分析

对金牡丹茶在夏秋季节下制成的5类茶的干茶外形、汤色、香气、滋味和叶底等审评因子进行综合评价并评分(表1、图2)。从整体上看，夏、秋季金牡丹5类茶类均具有不同程度花香，这是金牡丹茶独特的品种特征；从季节上看，夏茶香气较平和，滋味浓厚苦涩，秋茶香气明显，滋味尚纯，部分茶类滋味稍涩。因此，从感官审评角度，秋茶的品质优于夏茶。

表1 金牡丹夏、秋季5类茶的感官审评结果

Table 1 Sensory evaluation results of 5 types of Jinmudan tea made from tea leaves harvested in summer and autumn

茶样	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	
夏季绿茶	条索较紧卷, 灰绿带霜	84.17 ^b	黄绿亮	85.00 ^b	香气较高, 稍带花香	90.17 ^b	浓苦, 涩感显	79.50 ^b	叶张稍大, 黄绿有红叶, 软较匀	82.67 ^b	84.20 ^b
秋季绿茶	条索较紧结, 稍卷曲, 色泽深绿, 稍带白毫, 匀净	89.67 ^a	浅绿明亮	94.17 ^a	清香带花香, 清爽	95.00 ^a	鲜醇甘爽	96.17 ^a	较绿, 匀, 软亮	89.17 ^a	93.35 ^a
夏季黄茶	条索较紧结, 黄绿稍暗	82.50 ^b	浅黄绿	85.17 ^a	香气较高, 略带花香	90.50 ^b	较浓醇, 苦	80.83 ^b	叶底绿黄, 尚软嫩	84.83 ^a	84.50 ^b
秋季黄茶	条索卷曲, 稍粗壮, 尚紧结, 色泽绿黄, 匀净	90.17 ^a	绿黄	86.00 ^a	清高, 稍带花香	91.83 ^a	醇厚	89.33 ^a	绿黄, 软, 尚匀, 稍带红边	83.50 ^b	89.25 ^a
夏季白茶	叶态微卷, 叶张稍粗, 黄绿泛红	83.00 ^b	橙黄明亮	84.83 ^b	花香带奶香, 有青气, 微粗	83.67 ^b	醇和, 青味重	75.33 ^b	较粗老, 黄绿泛红, 尚匀	75.00 ^b	80.25 ^b
秋季白茶	叶自然, 叶片微卷, 色泽黄绿, 匀净	85.50 ^a	黄绿明亮	87.33 ^a	清香带花香, 微青	85.17 ^a	较醇厚, 微带青味	84.50 ^a	稍黄绿, 尚软, 较匀	84.00 ^a	85.15 ^a
夏季红茶	条索紧结肥壮, 乌润	89.83 ^a	较红艳	79.33 ^b	有花香, 带青气, 略粗	80.17 ^b	尚醇厚, 青涩明显	78.33 ^b	较肥厚, 红稍暗, 略带青条	82.67 ^a	82.20 ^b
秋季红茶	条索较肥壮, 稍卷曲, 色泽乌润, 稍带金毫, 匀净	90.50 ^a	橙红	88.00 ^a	有花香, 略闷	82.50 ^a	较甜醇	84.83 ^a	较红, 匀, 微泛青	83.50 ^a	85.85 ^a

茶样	外形 (20%)		汤色 (5%)		香气 (30%)		滋味 (35%)		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	
夏季乌龙茶	条索紧结肥壮, 黄褐匀齐	87.67 ^b	橙红	86.83 ^b	尚高, 有花香, 带脂粉香	84.83 ^b	浓厚, 苦涩明显	83.17 ^b	较肥厚, 尚匀, 有红边	82.67 ^b	84.70 ^b
秋季乌龙茶	条索壮结, 尚紧, 色泽黄褐, 匀净	89.83 ^a	橙黄	89.83 ^a	花香馥郁持久	91.33 ^a	浓厚, 苦涩稍明显	86.50 ^a	较肥厚软亮, 较匀	86.67 ^a	88.80 ^a

注: 同一品种、不同季节茶样字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)。

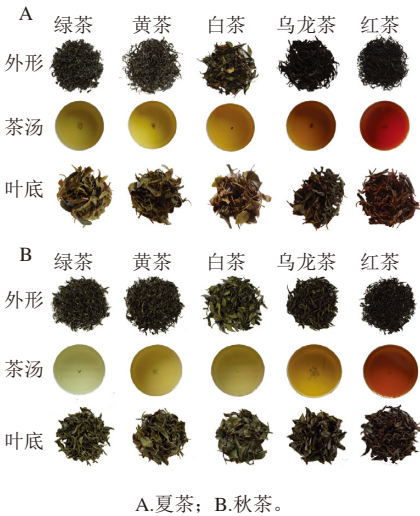


图2 金牡丹5类茶的外形、汤色和叶底

Fig. 2 Appearance, tea infusion and brewed tea of 5 types of Jinmudan tea

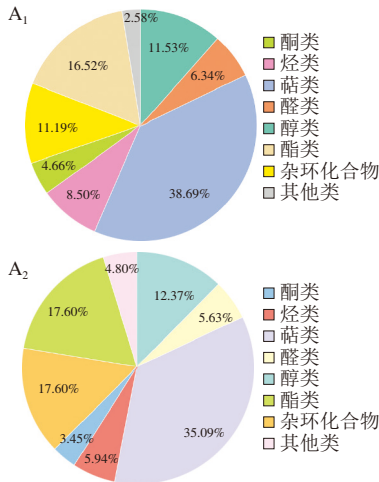
2.2 金牡丹夏、秋季5类茶的挥发性代谢物分析

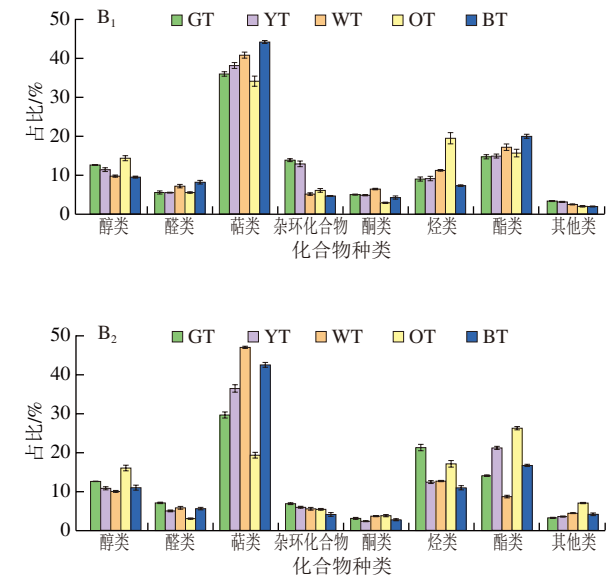
2.2.1 金牡丹夏、秋季5类茶的主要挥发性代谢物种类分析

从夏、秋两季5茶类中分别鉴定出522、502种挥发性代谢物, 包括醇类、醛类、萜类、烃类、酮类、杂环化合物、酯类及其他类。从季节上看, 萜类、酯类及醇类是夏季的主要挥发性代谢物, 约占其总量的66.74% (图3A₁); 萜类、酯类和杂环化合物为秋季的主要挥发性代谢物, 约占其总量的70.29% (图3A₂)。杂环化合物主要来源于氨基酸的降解^[14], 夏季较秋季温度更高、光照强度更大, 氨基酸分解速率加快^[15], 导致整体上夏茶杂环化合物较秋茶含量明显下降6.41%; 而萜类、烃类化合物占比较秋茶分别增加3.60%、2.56%。

图3B中展示了夏季、秋季不同茶类挥发性代谢物的变化情况。在金牡丹夏茶样品中, 绿茶和黄茶中萜

类、酯类、烃类、醇类化合物占主导地位, 其中萜类物质在黄茶中的占比较绿茶更高; 白茶和乌龙茶中萜类、酯类、烃类、醇类化合物占主导地位; 红茶中萜类、酯类、醇类占主导地位。在秋茶样品中, 5类茶中萜类、杂环化合物、酯类、醇类化合物均占主导地位。夏季绿茶中杂环化合物含量高于秋季, 主要为吲哚和(E)-芳樟醇氧化物的含量增加, 这两种物质是绿茶栗香的主要物质基础^[16], 吲哚呈花香, 具有增强绿茶香气的效果, 这是秋季绿茶香气得分高于夏季的原因之一。黄茶和乌龙茶中酯类物质秋季含量高于夏季, 其中3-己烯酸己酯和(Z)-己酸-3-己烯酯含量均明显增加, 是秋季黄茶、乌龙茶清香气品质的重要挥发性代谢物。有研究表明, 乌龙茶品质越好, 己酸己酯占比越大, 同时该物质也是乌龙茶花果香的重要来源物质之一^[17]。此外, 水杨酸甲酯在夏季黄茶中含量高于秋季, 是夏季黄茶清香气的重要来源。白茶的萜类物质在秋季含量较高, 其中香叶醇占比高出夏季2倍, 高达13.66%, 对白茶花香型特征具有重要贡献。





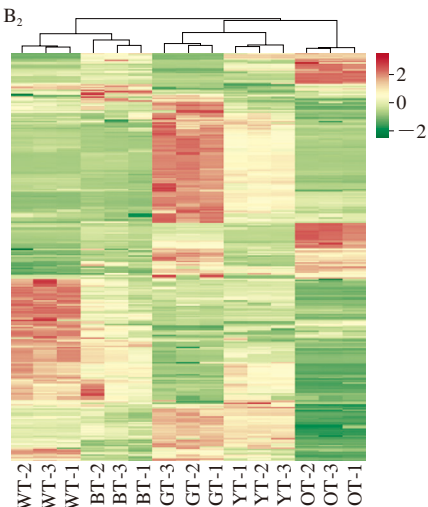
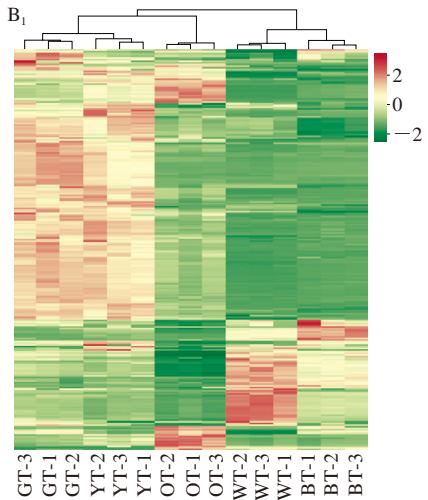
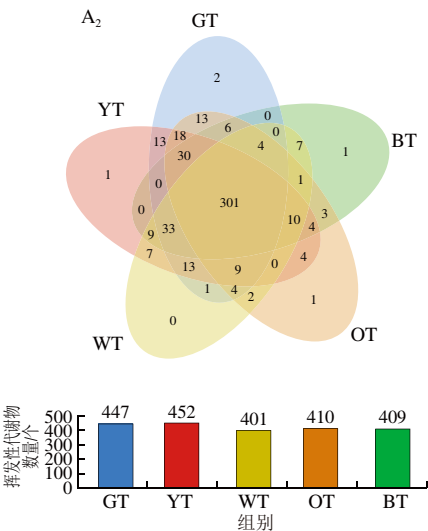
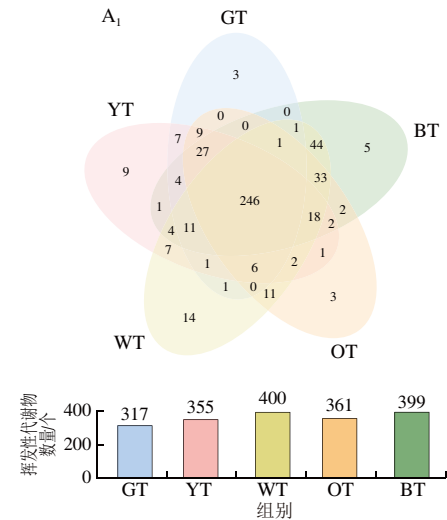
A.挥发性代谢物种类占比; B.挥发性代谢物种类的变化情况。下标1和2.分别代表夏季和秋季; GT.绿茶; YT.黄茶; WT.白茶; OT.乌龙茶; BT.红茶。下同。

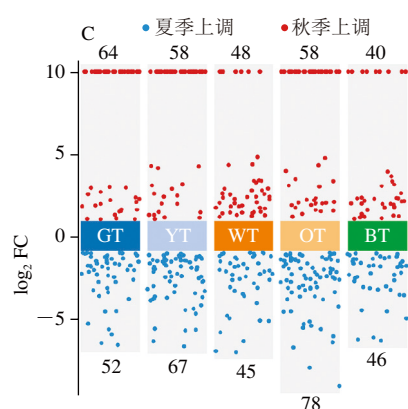
图3 金牡丹5类茶挥发性代谢物统计分析

Fig. 3 Statistical analysis of volatile metabolites in 5 types of Jinnudan tea

2.2.2 金牡丹夏、秋季5类茶挥发性代谢物的差异分析

夏、秋季的5类茶中分别有246、301种共有物质(图4A),大部分挥发性代谢物在不同茶类间都是共有的,只有少部分物质在不同茶类间是特有的,这说明以金牡丹为原料制成的不同茶类总体香气基调一致。此外,发现大部分挥发性代谢物在夏、秋季组成差异明显,只有212种挥发性代谢物在不同季节中共有(图4C),说明不同季节对金牡丹不同茶类的香气影响较大。





A. Venn图; B.共有物质聚类热图; C.夏秋两季5类茶挥发性代谢物火山图。下标1~3.分别代表夏季、秋季、夏秋两季。FC.差异倍数 (fold change)。

图4 金牡丹夏、秋季5类茶挥发性代谢物组成比较分析

Fig. 4 Comparative analysis of volatile metabolite compositions in 5 types of Jinmudan tea made from tea leaves harvested in summer and autumn

基于夏、秋两季5类茶的共有挥发性代谢物(图4B), 筛选变量投影重要性(variable importance in projection, VIP) ≥ 1 、 $P < 0.05$ 、 $FC \geq$ 或 ≤ 0.5 的代谢物进行聚类分析和火山图分析(图4C)。结果表明, 在夏季绿茶中, β -罗勒烯、 γ -松油烯、 α -紫罗兰酮、 δ -杜松烯、月桂醛、丁酸芳樟酯、薄荷醇、脱氢芳樟醇等挥发性物质含量较高; 与秋季绿茶相比, α -松油醇、 γ -癸内酯、香叶醇、芳樟醇、苯乙酸乙酯、香豆素等52种挥发性代谢物的含量则在夏季显著升高。香叶醇作为茶叶中重要的单萜烯醇, 是绿茶和红茶的重要呈香物质, 具有浓郁的玫瑰花香和甜香^[18], 也是花香型绿茶的主要香气物质^[19]。秋季绿茶中, 丁酸丁酯、正十二烷、 β -罗勒烯、 α -紫罗兰酮、异香叶醇、薄荷醇、脱氢芳樟醇、松香醇等挥发性物质含量较高, 其中表现为甜花香的 α -紫罗兰酮、 β -罗勒烯是炒青绿茶的关键呈香物质, 对金牡丹绿茶的香气品质有重要贡献。与夏季绿茶相比, 水杨酸甲酯、柠檬醛、乙酸香叶酯、 δ -癸内酯、吲哚、月桂烯、橙花醇等64种挥发性代谢物的含量在秋季显著升高。由于秋季绿茶中吲哚、水杨酸甲酯等“清香”型挥发性物质含量较高, 秋季绿茶清香味特征更明显。

夏季黄茶中, 十三烷醛、 γ -癸内酯、苯乙酸乙酯、 γ -戊基丁内酯、 α -侧柏酮、茶螺烷等挥发性代谢物含量较高, 具有木香、清香的茶螺烷是黄茶闷黄过程中形成的特有香气物质^[20]。与秋季相比, 水杨酸甲酯、 α -松油醇、苯乙酸乙酯、吲哚、脱氢芳樟醇、反式-橙花叔醇、丁酸丁酯等67种挥发性代谢物的含量在夏季显著升高。秋季黄茶中, 壬醇、 β -波旁烯、松油烯、2,5-辛二酮、苯甲腈等挥发性代谢物含量较高, 香叶醇、苯乙醇、苯乙醛、(Z)-己酸-3-己烯酯、 β -罗勒烯、月桂烯、橙花醇、乙酸香叶酯等58种挥发性代谢物的含量在秋季显著升高, 有助于秋季金牡丹黄茶香气品质的提升。

夏季白茶中, 苯甲酸甲酯、 ϵ -己内酯、(E)-芳樟醇氧化物、二氢月桂烯醇、橙花醇、 α -氧化蒎烯、 β -紫罗兰酮等挥发性代谢物含量较高, 水杨酸甲酯、 α -松油醇、反式-橙花叔醇、橙花醇、香豆素等45种挥发性代谢物的含量则在夏季时显著升高, 有利于夏季金牡丹白茶花果香的呈现。研究表明, 乌龙茶品种所制白茶橙花醇的含量较高, 这也是金牡丹白茶花香馥郁的原因之一^[21]。秋季白茶中, 香芹醇、香叶酸甲酯、芳樟醇、 β -紫罗兰酮、柠檬醛、松油烯、月桂烯、水杨酸甲酯、苯甲醛等物质含量较高。 β -紫罗兰酮、 β -罗勒烯、月桂烯、 α -紫罗兰酮、香芹醇、2-戊基呋喃等48种挥发性代谢物的相对含量在秋季时显著上调。此外, 苯甲醛、水杨酸甲酯对形成金牡丹白茶“清鲜、花香”的香气特征具有重要贡献^[22]。来自糖苷和类胡萝卜素降解的芳樟醇和紫罗兰酮均有助于白茶甜花香特征的形成^[23]。

夏季乌龙茶中, 吲哚、反式-橙花叔醇、 β -杜松烯、2-戊基呋喃、苯甲醇、香叶基丙酮、 α -法尼烯等挥发性物质含量较高。水杨酸甲酯、萜品油烯、 α -松油醇、紫苏烯、丁酸丁酯、苯甲酸甲酯、 γ -癸内酯、香叶酸甲酯等78种挥发性代谢物的含量在夏季显著上调。其中, γ -癸内酯具有桃子、椰子香味特征, 通过与其他物质发生相互作用, 间接参与花香的呈现^[24]; 水杨酸甲酯则具有花香和较强的冬青油香味, 参与乌龙茶花香的形成^[25]。秋季乌龙茶中, 吲哚、反式-橙花叔醇、己酸己酯、 α -法尼烯、茉莉酸甲酯、 δ -癸内酯、苯乙醇等挥发性物质含量较高, 这些具有特殊的天然花果香和独特韵味的挥发性代谢物是形成金牡丹乌龙茶特征香气的基础。吲哚是乌龙茶区别于其他茶类的香气特征成分, 在摇青过程中大量积累, 对金牡丹乌龙茶花果香的形成有重要贡献^[18]。 δ -癸内酯呈浓郁的果香, 是茶叶中一种重要的内酯类化合物^[10]。此外, α -法尼烯、反式-橙花叔醇等花果香型化合物增加, 也有利于乌龙茶特征香气的形成^[26-27]。柠檬醛、异香叶醇、丁酸戊酯、 δ -癸内酯、月桂烯、苯乙醇等58种挥发性代谢物的含量在秋季时显著升高。其中, 苯乙醇是乌龙茶形成花香的重要挥发性代谢物, 由于秋季气温较夏季更低且光照较弱, 有利于苯乙醇前体物质苯丙氨酸的积累, 进而使苯乙醇在秋季更多的积累^[28]。

夏季红茶中, 乙酸芳樟酯、芳樟醇、罗勒烯、松油烯、 β -水芹烯、月桂烯等挥发性物质含量较高。呈青气的丁酸异戊酯、丙酸己酯以及呈清香气味的 γ -松油烯、水杨酸甲酯等46种挥发性代谢物的含量夏季显著上调。秋季红茶中, 十一烷、橙花醇、苯乙醛、香叶醇、己酸甲酯等挥发性物质含量较高。月桂烯、 δ -癸内酯、罗勒烯、吲哚等呈甜香、花香的40种挥发性代谢物的含量在秋季含量显著升高。香叶醇, 苯乙醇和橙花醇呈现令人愉悦的“花香”气味, 曾被鉴定对红茶和普洱晒红茶特征香气的形成起关键作用^[29]。金牡丹红茶中高含量的花

果香物质得益于发酵前轻摇青的创新工艺，主要目的是通过对茶叶的逆境胁迫（叶片细胞脱水和机械损伤）来控制茶叶中代谢产物的变化，促进呈花果香的香叶醇、芳樟醇及橙花醇等挥发性物质的释放，从而提高金牡丹红茶的品质。具体而言，夏季红茶中呈清香、青气味的挥发性代谢物较多，而秋季红茶的花香更明显，这与感官审评结果一致。

2.3 金牡丹夏、秋季5类茶的关键香气物质

茶叶香气是由各挥发性代谢物的气味阈值与浓度共同决定的。关键挥发性代谢物的OAV表示呈香物质对

整体风味的贡献值，当OAV>1时通常被认为对茶叶的整体香气特征具有贡献；当OAV>100时则具有显著贡献^[18,30]。计算夏秋茶共有的212种挥发性代谢物OAV，最终筛选出42种金牡丹茶中关键的挥发性代谢物（表2）。整体而言，在感官审评中，秋茶不同茶类的香气得分均显著高于夏茶，这与秋茶关键挥发性代谢物呈香物质的贡献、种类与数量均大于夏茶相关。

金牡丹绿茶的关键呈香物质（夏、秋季均OAV>10）为 β -紫罗兰酮、癸醛、苯甲酸甲酯、香叶醇、2-乙氧基-3-甲基吡嗪等。与夏季相比，苯乙醛（甜花香）、甲

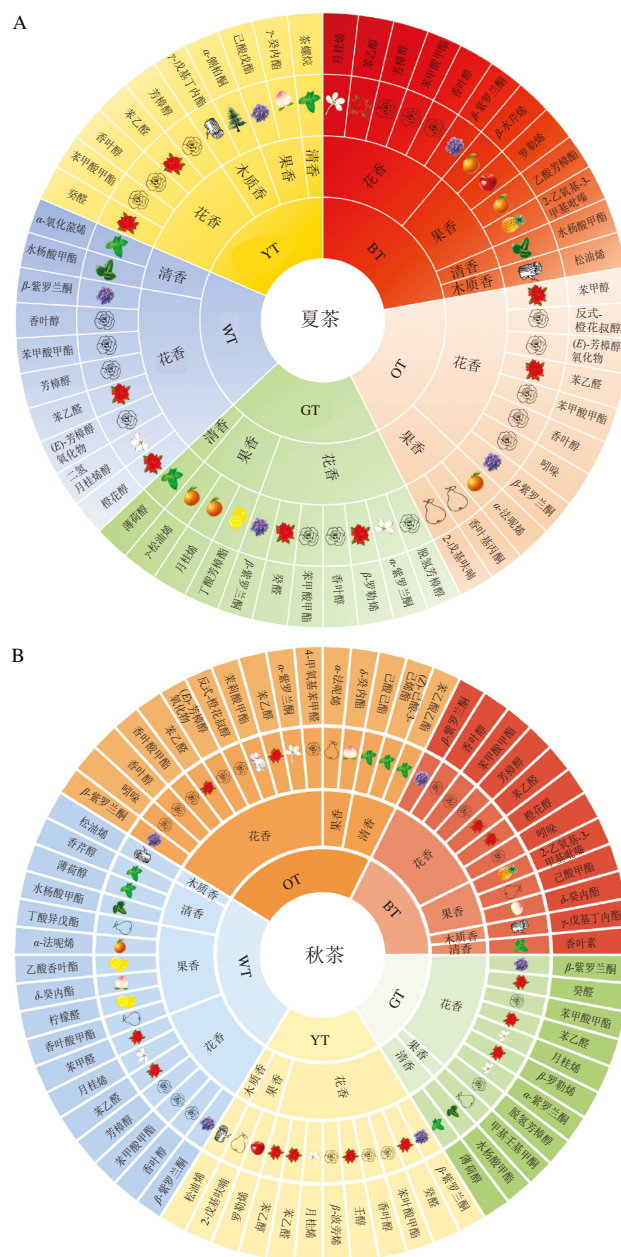
表2 金牡丹不同茶类关键香气物质OAV
Table 2 OAV of key aroma compounds in different types of Jinmudan tea

挥发性代谢物	香气描述	阈值 γ ($\mu\text{g/kg}$)	绿茶		黄茶		白茶		乌龙茶		红茶	
			夏季	秋季	夏季	秋季	夏季	秋季	夏季	秋季	夏季	秋季
香叶醇	花香	6.60	11.51	675.89	23.92	11 343.26	642.81	52 386.12	17.4	5 169.85	968.80	35 181.13
水杨酸甲酯	清香、冬青	40.00	0.00	38.77	2.62	127.12	109.42	1 488.49	1.70	290.59	116.04	593.04
苯乙醇	果香、玫瑰、甜香	140.00	0.00	33.68	0.00	203.89	15.77	539.34	3.69	4 095.48	15.81	448.61
萜品油烯	清香	200.00	0.6	27.91	0.66	91.45	10.93	387.62	0.66	119.57	8.02	153.9
苯乙醛	花香、甜香	6.30	0.00	3 145.24	0.00	2 608.04	124.78	6 222.17	24.13	12 900.76	219.26	7 187.85
芳樟醇	花香	6.00	5.41	485.02	6.72	864.05	187.58	4 493.84	15.27	968.68	358.12	1 232.9
(Z)-己酸-3-己烯酯	清香、果香	781.00	0.11	5.41	0.06	72.84	0.23	5.22	0.32	306.30	1.03	51.53
(E)-芳樟醇氧化物	花香	6.00	7.35	10 385.49	8.54	13 899.99	245.59	16 902.79	11.04	12 158.89	92.08	13 003.22
苯甲醇	花香	100.00	0.07	6.94	0.13	36.63	6.01	200.77	1.53	438.80	5.05	112.76
苯乙酸乙酯	清香、薄荷	100.00	0.36	13.26	0.57	55.25	2.91	145.70	0.49	56.82	3.94	86.91
吲哚	花香	40.00	1.26	1 818.29	1.94	76.66	1.33	28.11	38.69	17 369.49	0.53	84.45
脱氢芳樟醇	花香、甜香	110.00	2.54	303.7	2.66	207.89	3.92	234.25	5.28	1 463.86	3.29	215.4
2-乙氧基-3-甲基吡嗪	烘焙香、烤香	0.80	35.91	3 668.13	34.65	5 617.72	934.71	20 721.88	53.60	18 899.39	416.05	8 427.33
β -紫罗兰酮	花香、木质香	0.20	75.49	15 440.57	92.53	27 961.55	1 183.45	122 036.88	127.14	53 163.32	640.67	22 926.66
薄荷醇	清香、薄荷	900.00	0.05	6.94	0.06	7.33	0.30	9.58	0.06	3.47	0.10	4.27
β -罗勒烯	花香、甜香	34.00	2.01	1 126.97	1.32	784.24	8.22	1 851.56	2.54	1 781.57	14.39	1 362.7
月桂烯	花香、桂花	15.00	0.71	771.82	0.83	3 507.63	10.01	8 797.42	1.18	1 912.63	9.21	5 988.06
罗勒烯	果香	34.00	0.33	171.54	0.34	656.16	3.65	1 603.77	0.41	379.08	4.94	1 072.12
丁酸丁酯	果香	28.00	1.68	126.63	1.90	77.51	2.76	54.58	1.39	96.31	3.50	17.79
苯甲酸甲酯	花香	0.52	18.67	2 514.98	10.78	1 952.22	336.91	8 618.46	37.27	8 112.56	129.67	2 366.09
丙酸己酯	果香、青香	8.00	4.85	37.48	4.92	50.68	10.32	35.28	5.26	55.09	9.95	14.55
丁酸异戊酯	果香、青香	70.00	0.76	2.23	0.80	1.70	1.02	4.91	0.67	25.86	1.25	11.77
异戊酸异丁酯	甜香、果香、苹果	34.00	0.84	86.32	0.95	51.58	1.35	35.11	0.89	61.58	1.79	11.50
1-辛醇	果香、柑橘	22.00	0.21	12.16	0.22	24.74	4.60	97.13	0.32	72.14	2.05	39.94
2-戊基呋喃	果香、青香	6.00	0.66	212.08	0.65	569.74	13.75	1 648.22	4.51	2 016.27	10.95	851.57
异丁酸2-甲基丁酯	果香、香蕉	14.00	1.28	112.45	1.40	74.46	2.03	51.43	1.17	72.88	2.82	18.07
乙酸香叶酯	柠檬香	100.00	0.00	2.57	0.00	70.89	0.36	16.81	0.33	453.84	0.75	55.62
δ -癸内酯	果香、蜜桃香、奶香	66.00	0.00	5.28	0.00	4.88	0.60	24.83	0.61	1 135.46	0.45	102.77
十三烷醛	果香	70.00	0.11	11.11	0.23	8.80	0.37	3.22	0.26	111.72	0.31	7.35
香叶基丙酮	果香、玫瑰香、木质香	10.00	0.42	213.11	1.07	129.15	2.19	139.06	2.21	4 512.68	1.96	213.72
反-2-己烯酸乙酯	青香、果香	140.00	0.05	4.06	0.05	2.82	0.21	2.00	0.08	18.18	0.18	2.55
α -紫罗兰酮	甜香、花香、果香	3.78	3.05	791.84	2.61	732.85	4.09	492.16	0.94	585.18	4.79	245.3
γ -戊基丁内酯	木质香	7.90	0.32	213.42	0.39	181.56	0.70	174.75	0.28	411.60	0.67	82.55
癸醇	花果香、柑橘、甜香	23.00	0.47	37.90	0.46	35.10	0.60	22.04	0.36	35.39	0.73	19.87
脱氢 β -环柠檬醛	果香	3.00	0.68	168.16	1.06	157.93	4.92	283.57	3.28	708.52	4.55	145.89
α -法尼烯	果香、柑橘	87.00	0.25	73.85	0.57	40.72	0.16	5.00	1.79	1 577.90	1.05	67.63
4-甲氧基苯甲醛	甜花香	0.20	0.00	61.03	0.00	565.47	28.20	1 888.85	0.00	1 900.38	35.05	1 286.71
香豆素	清香	10.00	0.09	0.39	0.08	0.33	0.13	0.20	0.03	14.15	0.15	1.82
γ -癸内酯	果香	1.10	1.96	107.17	2.54	100.54	3.12	126.06	1.54	319.41	3.74	68.34
2,5-二甲基-3-乙基吡嗪	烘焙香	8.60	0.00	6.95	0.00	16.33	1.45	41.81	0.00	43.18	0.76	25.10
癸醛	甜花香	0.10	21.42	8 045.35	22.98	6 271.32	29.82	4 084.80	14.53	6 612.54	33.67	1 537.98
甲基壬基甲酮	花果香、奶香	6.20	0.50	357.52	0.52	2.21	0.14	1.34	0.00	3 480.19	0.19	5.14

注：*.阈值参考文献[7,10-11,13,32-33,35]。

基壬基甲酮（花果香）、月桂烯（花香）、水杨酸甲酯（清香）等26种挥发性代谢物仅在秋季绿茶中OAV>1。金牡丹黄茶的关键呈香物质为 β -紫罗兰酮、2-乙氧基-3-甲基吡嗪、香叶醇、癸醛、苯甲酸甲酯等。与夏季相比，月桂烯（花香）、苯乙醛（甜花香）、罗勒烯（果香）、苯乙醇（花果香）、2-戊基呋喃（果香）等23种挥发性代谢物仅在秋季黄茶中OAV>1。 β -紫罗兰酮、香叶醇、月桂烯以及苯乙醇等香气物质是芽型、芽叶型黄茶的关键香气成分，有助于黄茶形成清香、清甜的香气特征^[31]。金牡丹白茶具有显著贡献的呈香物质（夏、秋季OAV>100）为 β -紫罗兰酮、香叶醇、苯甲酸甲酯、芳樟醇、苯乙醛、水杨酸甲酯、(E)-芳樟醇氧化物、2-乙氧基-3-甲基吡嗪，构成金牡丹白茶清香、花香的香气特征，同时也是花香型白茶的主要特征成分^[32]。与夏季相比， δ -癸内酯（果香）、乙酸香叶酯（果香）、薄荷醇（清香）、 α -法尼烯（果香）、癸醇（花果香）等10种挥发性物质仅在秋季白茶中OAV>1。金牡丹乌龙茶的关键呈香物质（夏、秋季均OAV>10）为 β -紫罗兰酮、吡啶、苯甲酸甲酯、苯乙醛、香叶醇、(E)-芳樟醇氧化物等。与夏季相比， α -紫罗兰酮（甜香、花果香）、(Z)-己酸-3-己烯酯（果香）、 δ -癸内酯（果香）、苯乙酸乙酯（清香）、4-甲氧基苯甲醛（甜花香）等19种挥发性代谢物仅在秋季乌龙茶中OAV>1。(Z)-己酸-3-己烯酯具有水果青香，在乌龙茶做青过程中含量逐渐增加，有助于金牡丹乌龙茶花果香型的形成^[33]。金牡丹红茶中有显著贡献的呈香物质（夏、秋季均OAV>100）为香叶醇、 β -紫罗兰酮、2-乙氧基-3-甲基吡嗪、芳樟醇、苯乙醛、苯甲酸甲酯、水杨酸甲酯等，与前人研究一致^[34]。与夏季相比， δ -癸内酯（果香、奶香）、吡啶（花香）、 γ -戊基丁内酯（木质香）、香豆素（甜香）等11种挥发性代谢物仅在秋季红茶中OAV>1，其中 δ -癸内酯的OAV在秋季红茶中约为夏季红茶的228倍，是秋季红茶蜜桃香和奶油香属性的重要来源^[10]。此外，香叶醇、水杨酸甲酯、苯乙醇等42种关键呈香物质在秋季样品中的OAV均高于夏季。

茶叶香气的呈现是由各挥发性成分的气味阈值与浓度共同决定的。金牡丹5类茶的主要挥发性代谢物影响着茶叶的整体香气品质。为更直观地展示金牡丹夏秋5类茶的主要香气物质，基于上述陈述筛选夏、秋两季金牡丹5类茶中含量较高且OAV>1的挥发性代谢物，构建了夏、秋季金牡丹5类茶重要的挥发性代谢物的香气风味轮（图5）。整体而言，金牡丹茶以花香类为主要香型，秋茶香气品质显著优于夏茶，尤其是秋季白茶和乌龙茶的主要挥发性代谢物的香型和种类均多于夏季。



A.夏茶; B.秋茶。

图5 金牡丹5类茶的香气风味轮

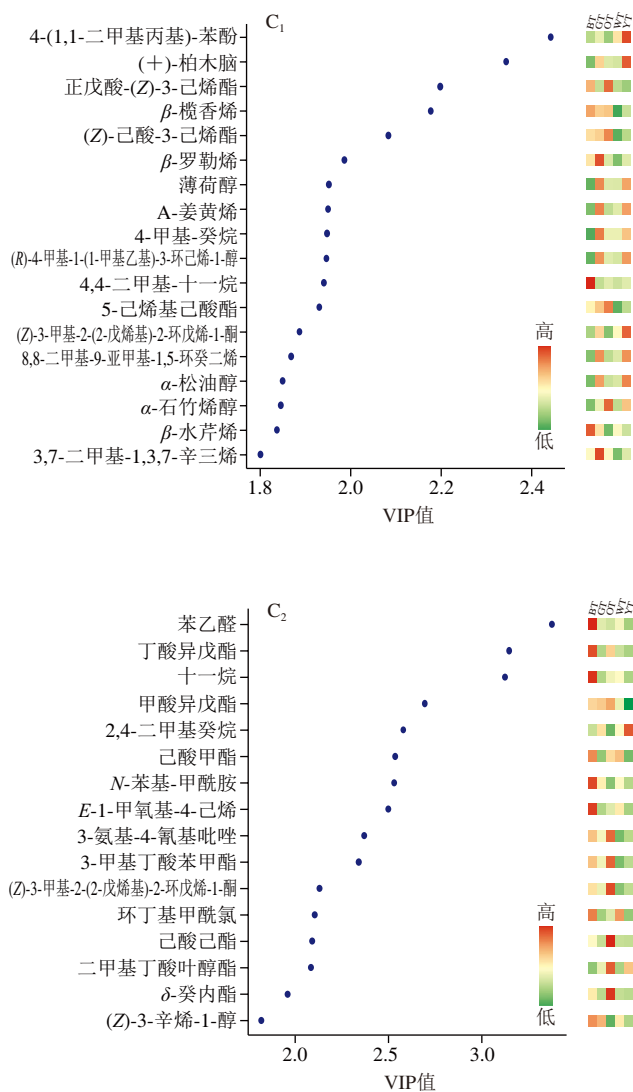
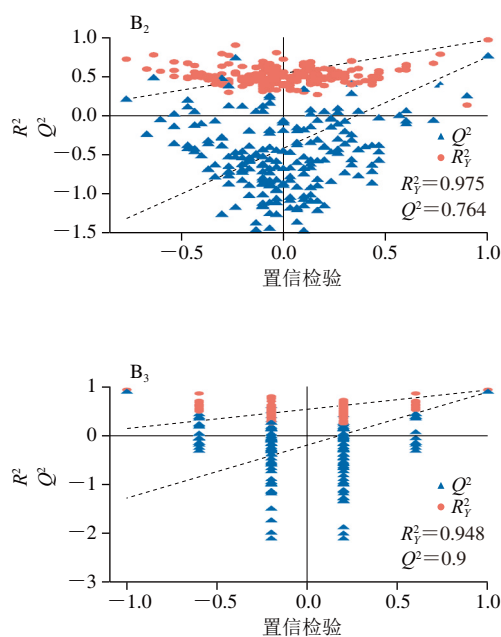
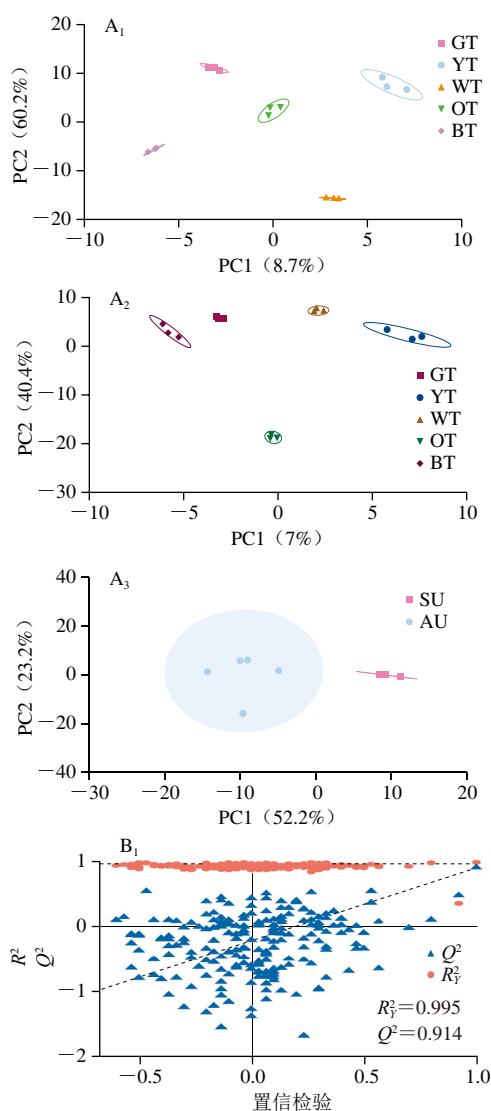
Fig. 5 Aroma wheels of 5 types of Jinmudan tea

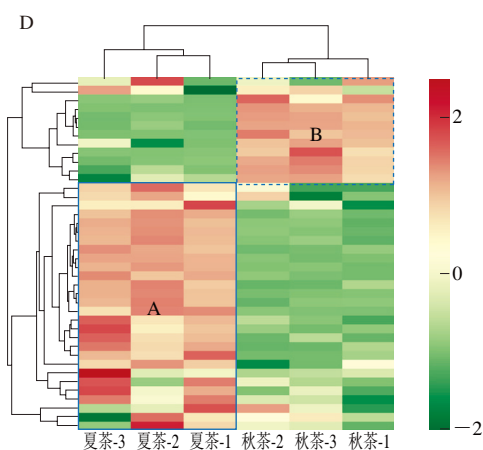
2.4 金牡丹茶品种的关键香气物质

OPLS-DA评价模型中 R^2_X 和 R^2_Y 分别表示所建模型对X和Y矩阵的解释率， Q^2 表示模型的预测能力，这3个指标越接近于1时表示模型越稳定可靠，即可以用此模型筛选差异代谢物^[35]。夏、秋季不同茶类及夏秋两季均可通过2个PC实现区分（图6A）；图6B为置换检验图，表明所建立的OPLS-DA模型有效。根据VIP分析代谢产物对不同茶类、不同季节的贡献率差异，VIP值越大，表示该代谢产物对OPLS-DA模型分类贡献越大，也表明在茶类和季节间差异越大。如图6C所示，夏季不同茶类间， β -罗勒烯、 α -松油醇、 α -石竹烯醇、 β -水芹烯、薄荷醇等18种挥

发性代谢物的VIP ≥ 1.8 ;如图6C₂所示,秋季不同季节间,苯乙醛、丁酸异戊酯、十一烷、甲酸异戊酯、己酸甲酯、 δ -癸内酯等16种挥发性代谢物的VIP ≥ 1.8 。夏、秋两季共有40种挥发性代谢物VIP ≥ 1 、 $P < 0.01$,其中脱氢芳樟醇、4,6-二甲基十二烷、癸醇、2-甲基十一烷等28种物质在夏茶中含量较高;而异香叶醇、橙花醇、癸醛、 α -紫罗兰酮等12种挥发性代谢物则在秋茶中含量较高(图6C₃)。以上结果显示,可通过对主要特征代谢物构成的OPLS-DA判别分析,实现对茶类和季节的区分,这些物质是形成夏、秋季及不同茶类香气差异的重要挥发性代谢物。

为进一步筛选金牡丹品种香的关键香气物质,以VIP ≥ 1 、 $P < 0.05$ 且OAV > 1 为条件筛选出关键香气物质(图7),芳樟醇、2-乙氧基-3-甲基吡嗪、苯甲酸甲酯、丙酸己酯、异丁酸2-甲基丁酯、丁酸丁酯、 γ -癸内酯、脱氢芳樟醇在夏季不同茶类间高;(E)-芳樟醇氧化物、 α -紫罗兰酮、 β -罗勒烯、香叶醇、 β -紫罗兰酮、癸醛在秋季不同茶类间占比高,这14种具有花香和果香等的挥发性代谢物被确定为金牡丹茶品种的关键香气物质,是形成高香型金牡丹茶的重要挥发性代谢物。

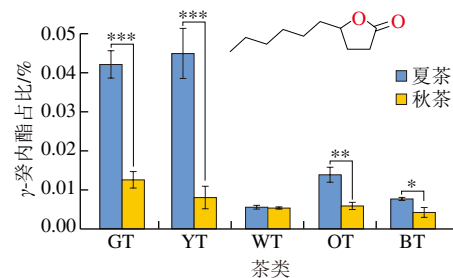
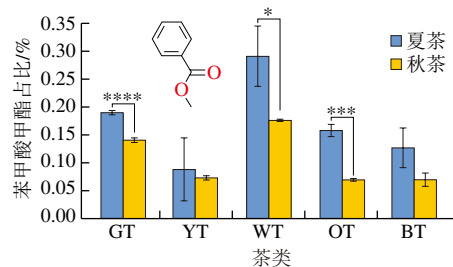
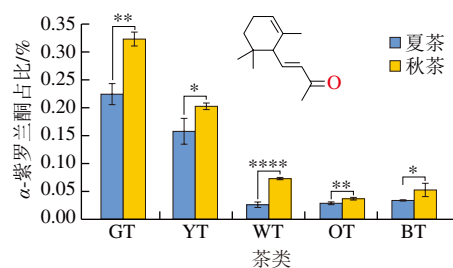
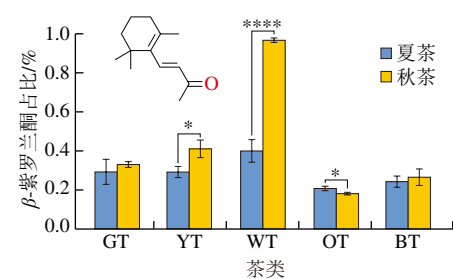
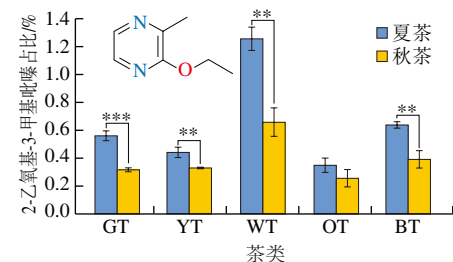
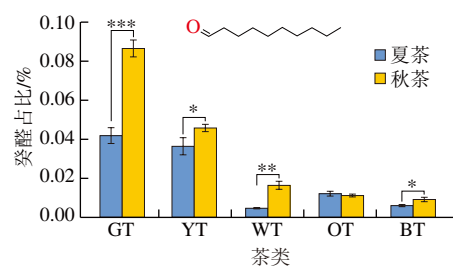
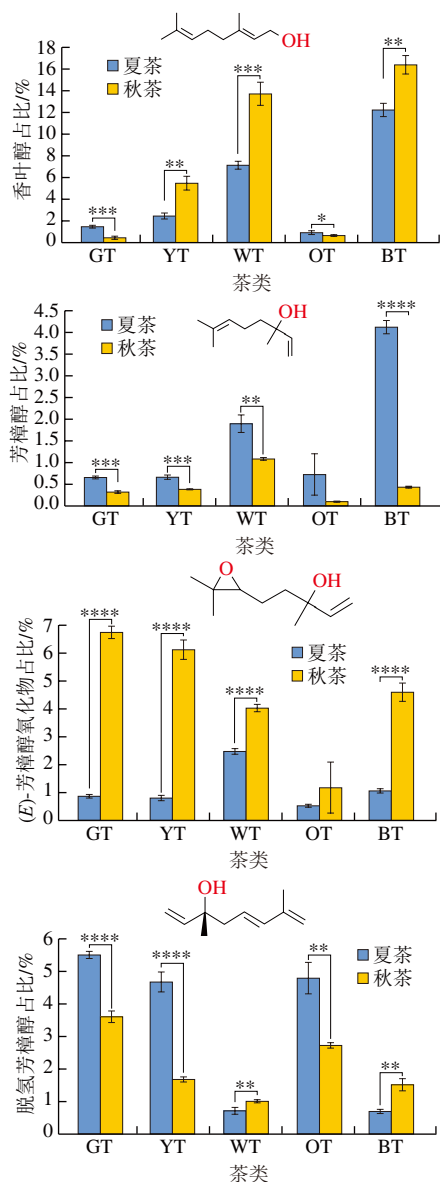




A. OPLS-DA得分图; B. OPLS-DA置换检验图; C.挥发性代谢物VIP值图;
D.聚类热图。下标1~3.分别代表夏季5类茶、秋季5类茶、夏秋两季茶。

图6 金牡丹5类茶夏秋两季挥发性化合物差异的OPLS-DA与热图综合分析

Fig. 6 OPLS-DA plot and heatmap of differential volatile compounds between 5 types of Jinmudan tea made from tea leaves harvested in summer and autumn



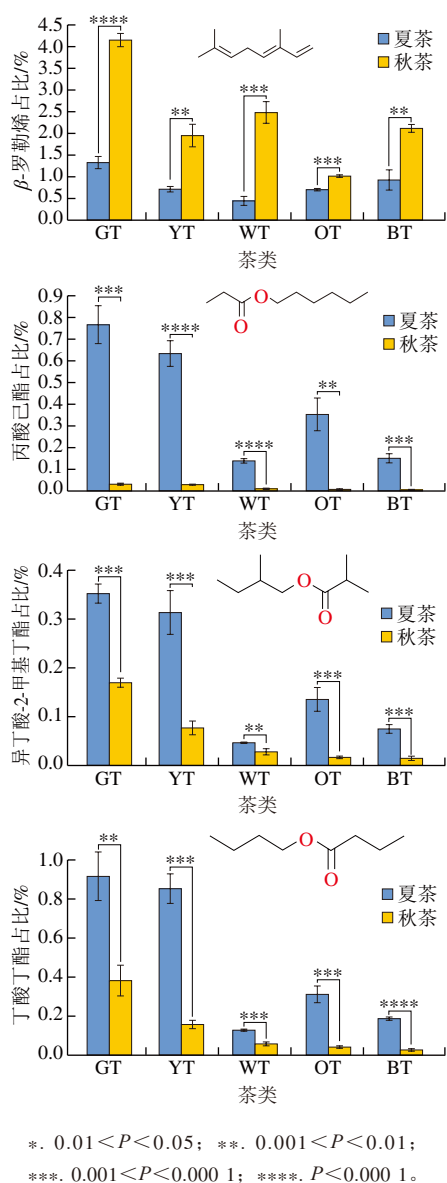


图7 构成金牡丹茶品种的关键香气物质

Fig. 7 Key aroma substances in Jinmudan tea

3 结论

本研究采用HS-SPME-GC-MS技术对‘金牡丹’茶树品种夏、秋季5类茶的挥发性代谢物进行测定分析,结果表明,金牡丹茶花香较明显,萜类、酯类、醇类及杂环化合物为其主要挥发性代谢物。基于 P 值与VIP值发现, γ -癸内酯、香叶醇、芳樟醇、香豆素等是夏季绿茶的主要挥发性代谢物;水杨酸甲酯、柠檬醛、 δ -癸内酯、橙花醇等为秋季绿茶的主要挥发性代谢物。水杨酸甲酯、吡咯、脱氢芳樟醇、反式-橙花叔醇等为夏季黄茶的主要挥发性代谢物;香叶醇、 β -罗勒烯、月桂烯、橙花醇、乙酸香叶酯等为秋季黄茶的主要挥发性代谢物。水杨酸甲酯、 α -松油醇、橙花醇、香豆素等是夏季白茶的主要挥

发性代谢物; β -紫罗兰酮、 β -罗勒烯、月桂烯、 α -紫罗兰酮等是秋季白茶的主要挥发性代谢物。紫苏烯、苯甲酸甲酯、 γ -癸内酯、香叶酸甲酯等为夏季乌龙茶的主要挥发性代谢物;柠檬醛、丁酸戊酯、 δ -癸内酯、月桂烯等为秋季乌龙茶的主要挥发性代谢物。丁酸异戊酯、丙酸己酯、 γ -松油烯等为夏季红茶的主要挥发性代谢物;月桂烯、 δ -癸内酯、罗勒烯等为秋季红茶的主要挥发性代谢物。基于OPLS-DA判别模型可知脱氢芳樟醇、癸醇、2-甲基十一烷、橙花醇、癸醛、 α -紫罗兰酮等40种物质对于区分夏、秋季金牡丹茶具有重要作用。本研究主要揭示了金牡丹5类茶的香气品质特征及夏秋茶季节性的差异,为‘金牡丹’品种资源的高效利用和适制性研究提供科学依据,为提高‘金牡丹’品种夏秋茶的品质及利用率提供了理论支持。

参考文献:

- [1] BUTT M S, AHMAD R S, SULTAN M T, et al. Green tea and anticancer perspectives: updates from last decade[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2015, 55(6): 792-805. DOI:10.1080/10408398.2012.680205.
- [2] 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. DOI:10.1016/j.foodres.2021.110784.
- [3] SHEN J Z, WANG Y, CHEN C S, et al. Metabolite profiling of tea (*Camellia sinensis* L.) leaves in winter[J]. Scientia Horticulturae, 2015, 192: 1-9. DOI:10.1016/j.scienta.2015.05.022.
- [4] WANG P J, GU M Y, SHAO S X, et al. Changes in non-volatile and volatile metabolites associated with heterosis in tea plants (*Camellia sinensis*)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(9): 3067-3078. DOI:10.1021/acs.jafc.1c08248.
- [5] 张雪波, 肖世青, 杜先锋, 等. 基于主成分分析法的安溪铁观音香气质量评价模型的构建[J]. 食品科学, 2012, 33(22): 225-230.
- [6] 郑挺盛, 张凌云. 不同采摘季节对重发酵单丛茶香气品质影响研究[J]. 现代食品科技, 2007, 23(2): 11-15. DOI:10.3969/j.issn.1673-9078.2007.02.004.
- [7] 张悦, 邵晨阳, 吕海鹏, 等. 不同季节烘青绿茶中的挥发性成分与关键香气活性成分分析[J]. 食品科学, 2024, 45(21): 213-221. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240221-103.
- [8] 黄玮. 3个高香型品种工夫红茶风味品质比较研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015. DOI:10.27018/d.cnki.gfjnu.2015.000197.
- [9] 杨军, 孔祥瑞, 郑国华, 等. 茶树品种‘金牡丹’自然杂交后代遗传鉴定[J]. 热带亚热带植物学报, 2023, 31(1): 69-80. DOI:10.11926/jtsb.4557.
- [10] 徐梦婷, 谷梦雅, 陈静, 等. 基于代谢组学的金牡丹和金观音高香红茶风味品质解析[J]. 食品科学, 2024, 45(19): 150-161. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20231130-268.
- [11] KANG S Y, 朱荫, 郑新强, 等. 不同季节绿茶香气成分的判别与聚类分析[J]. 食品科学, 2018, 39(14): 268-275. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201814040.
- [12] 叶乃兴. 茶学概论[M]. 2版. 北京: 中国农业出版社, 2021: 81-110.
- [13] 唐梦婷, 廖献盛, 谷梦雅, 等. 基于HS-SPME-GC-MS分析三种茶坯窖制桂花茶的香气成分[J]. 现代食品科技, 2024, 40(3): 247-258. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.3.0452.

- [14] GUAN L N, ZHANG M. Formation and release of cooked rice aroma[J]. Journal of Cereal Science, 2022, 107: 103523. DOI:10.1016/j.jcs.2022.103523.
- [15] 周丽华, 欧阳学文, 于化泓, 等. 夏秋红茶的再加工与冷泡茶制备研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(21): 263-273.
- [16] ZHU Y, LV H P, SHAO C Y, et al. Identification of key odorants responsible for chestnut-like aroma quality of green teas[J]. Food Research International, 2018, 108: 74-82. DOI:10.1016/j.foodres.2018.03.026.
- [17] 刘晓慧, 王琼, 邓锬涵, 等. 不同等级软枝乌龙茶品质研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(3): 464-470.
- [18] HO C T, ZHENG X, LI S M. Tea aroma formation[J]. Food Science and Human Wellness, 2015, 4(1): 9-27. DOI:10.1016/j.fshw.2015.04.001.
- [19] 黄海涛, 敖存, 郭敏明, 等. 花香与清香绿茶的香气组分及品种相关性分析[J]. 浙江农业科学, 2018, 59(5): 738-741; 771. DOI:10.16178/j.issn.0528-9017.20180519.
- [20] 夏红玲, 苗爱清, 陈维, 等. 闷黄对黄茶香气特征及关键香气化合物的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 28-37. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2022040079.
- [21] 戴浩民, 张灵枝, 梁铁琳, 等. 乌龙茶茶树品种制白茶的风味特征及特征组分分析[J]. 食品科学, 2024, 45(2): 229-239. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230303-035.
- [22] WANG Z H, WANG Z H, DAI H M, et al. Identification of characteristic aroma and bacteria related to aroma evolution during long-term storage of compressed white tea[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1092048. DOI:10.3389/fnut.2022.1092048.
- [23] 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): 1299-1309. DOI:10.1007/s00217-022-03967-3.
- [24] 吕世懂, 吴远双, 姜玉芳, 等. 不同产区乌龙茶香气特征及差异分析[J]. 食品科学, 2014, 35(2): 146-153. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201614011.
- [25] HE C, LI Y C, ZHOU J T, et al. Study on the suitability of tea cultivars for processing oolong tea from the perspective of aroma based on olfactory sensory, electronic nose, and GC-MS data correlation analysis[J]. Foods, 2022, 11(18): 2880. DOI:10.3390/foods11182880.
- [26] ZHANG J, JIA H Y, ZHU B Y, et al. Molecular and biochemical characterization of jasmonic acid carboxyl methyltransferase involved in aroma compound production of methyl jasmonate during black tea processing[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(10): 3154-3164. DOI:10.1021/acs.jafc.0c06248.
- [27] ZENG L T, ZHOU Y, GUI J D, et al. Formation of volatile tea constituent indole during the oolong tea manufacturing process[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(24): 5011-5019. DOI:10.1021/acs.jafc.6b01742.
- [28] 陈林, 林清霞, 张应根, 等. 不同风味类型铁观音乌龙茶香气组成化学模式识别研究[J]. 茶叶科学, 2018, 38(3): 253-262. DOI:10.13305/j.cnki.jts.2018.03.005.
- [29] LIU C, WANG C, ZHENG T T, et al. Characterization of key odor-active compounds in sun-dried black tea by sensory and instrumental-directed flavor analysis[J]. Foods, 2022, 11(12): 1740. DOI:10.3390/foods11121740.
- [30] YUN J, CUI C J, ZHANG S H, et al. Use of headspace GC/MS combined with chemometric analysis to identify the geographic origins of black tea[J]. Food Chemistry, 2021, 360: 130033. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.130033.
- [31] 蒋容港, 黄燕, 金友兰, 等. 不同原料等级黄茶特征香气成分分析[J]. 食品科学, 2021, 42(16): 89-98. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200709-137.
- [32] 冯花, 王飞权, 张渤, 等. 不同茶树品种白牡丹茶香气成分的HS-SPME-GC-MS分析[J]. 现代食品科技, 2021, 37(12): 252-264; 251. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.12.1273.
- [33] 陈林, 陈键, 陈泉宾, 等. 做青工艺对乌龙茶香气组成化学模式的影响[J]. 茶叶科学, 2014, 34(4): 387-395. DOI:10.13305/j.cnki.jts.2014.04.011.
- [34] WU Q Y, ZHOU Z W, ZHANG Y N, 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. DOI:10.3390/foods12091794.
- [35] LI M W, SHEN Y, LING T J, et al. Analysis of differentiated chemical components between Zijuan purple tea and Yunkang green tea by UHPLC-orbitrap-MS/MS combined with chemometrics[J]. Foods, 2021, 10(5): 1070. DOI:10.3390/foods10051070.