



茶叶科学
Journal of Tea Science
ISSN 1000-369X, CN 33-1115/S

《茶叶科学》网络首发论文

题目：不同茶树品种的径山茶挥发性成分差异研究
作者：侯智炜，吕永铭，马宽，张汇源，顾哲，张然，李乐，金俞谷，苏祝成，陈红平
DOI：10.13305/j.cnki.jts.20240824.001
收稿日期：2024-07-04
网络首发日期：2024-08-26
引用格式：侯智炜，吕永铭，马宽，张汇源，顾哲，张然，李乐，金俞谷，苏祝成，陈红平. 不同茶树品种的径山茶挥发性成分差异研究[J/OL]. 茶叶科学. <https://doi.org/10.13305/j.cnki.jts.20240824.001>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

不同茶树品种的径山茶挥发性成分差异研究

侯智炜¹, 吕永铭^{2,3}, 马宽⁴, 张汇源¹, 顾哲¹, 张然¹, 李乐¹, 金俞谷¹,
苏祝成^{1*}, 陈红平^{2*}

1. 浙江农林大学茶学与茶文化学院, 浙江 杭州 311300; 2. 中国农业科学院茶叶研究所, 浙江 杭州 310008;
3. 厦门市谷特美生物科技有限公司, 福建 厦门 361000; 4. 杭州径山五峰茶业有限公司, 浙江 杭州 311123

摘要: 为深入探究不同茶树品种的径山茶挥发性成分差异, 采用搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用技术 (SBSE-GC-MS)、顶空-气相色谱-离子迁移谱技术 (HS-GC-IMS) 对径山 1 号、径山 2 号、鸠坑种、迎霜和翠峰 5 个茶树品种的径山茶挥发性成分进行分析。首先, 基于 GC-MS 和 GC-IMS 分别共鉴定出 93 种和 79 种挥发性成分。其次, 通过主成分分析 (PCA) 揭示了不同茶树品种的径山茶挥发性成分之间的差异。最后, 运用正交偏最小二乘法判别分析 (OPLS-DA) 的变量投影重要性 (VIP) 确定不同品种间的差异挥发性成分, 并通过相对香气活度值 (ROAV) 进一步筛选关键差异挥发性成分。结果表明, 在 GC-MS 和 GC-IMS 中分别有 16 种和 12 种挥发性化合物被鉴定为不同茶树品种径山茶的关键差异挥发性化合物。其中, 径山 2 号的特征挥发性成分包括 2-庚醇、茉莉酸甲酯、2-甲基丁醛和 2-庚酮等, 具有较为明显的清香特征, 其含量高于其他品种; 径山 1 号中顺茉莉酮、庚醛和 (Z)-3-己烯醇的含量较为丰富; 迎霜品种中氧化柠檬烯和戊醛的含量较高。结合感官评价结果表明, 径山 1 号、翠峰和径山 2 号的香气评分较高。研究揭示了不同茶树品种径山茶的特征性挥发物具有显著差异, 为径山茶生产中优质原料的选择提供理论依据, 对实现高品质径山茶的精准加工和定向品质控制具有重要价值。

关键词: 径山茶; 茶叶香气; 茶树品种; 气相色谱-质谱联用; 气相色谱-离子迁移谱

Study on the Differences in Volatile Components of Different Tea Cultivars of Jingshan Tea

HOU Zhiwei^{1*}, LÜ Yongming^{2,3}, MA Kuan⁴, ZHANG Huiyuan¹, GU Zhe¹, ZHANG Ran¹,
LI Le¹, JIN Yugu¹, SU Zhucheng^{1*}, CHEN Hongping^{2*}

1. College of Tea Science and Tea Culture, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China; 2. Tea Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310008, China; 3. Xiamen Gutemei Biotechnology Co., Ltd., Xiamen 361000, China;
4. Hangzhou Jingshan Wufeng Tea Co., Ltd., Hangzhou 311123, China

Abstract: To investigate the differences in the volatile components of Jingshan tea from different tea cultivars, this study used the stir bar sorptive extraction gas chromatography-mass spectrometry (SBSE-GC-MS), headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry (HS-GC-IMS) to analyze the volatile components of Jingshan tea from five tea cultivars, including 'Jingshan No. 1', 'Jingshan No. 2', 'Jiukeng', 'Yingshuang' and 'Cuifeng'. First, a total

收稿日期: 2024-07-04

修订日期: 2024-08-15

基金项目: 国家自然科学基金 (32302608)、浙江农林大学科研发展基金人才启动项目 (2022FR025)、径山茶国家现代农业全产业链标准化示范基地项目 (TRIKJ2023070)、中国农业科学院创新工程 (CAAS-ASTIP-2021-TRI)、国家现代茶叶产业技术体系 (CARS-19)

作者简介: 侯智炜, 男, 讲师, 从事茶叶加工与品质分析、茶叶天然产物等方面研究。*通信作者: zhuchengsu@zafu.edu.cn; thean27@tricaas.com

of 93 volatile components were identified by GC-MS and 79 volatile components by GC-IMS. Second, principal component analysis (PCA) was used to reveal the differences in the volatile components of Jingshan tea from different tea tree varieties. Finally, orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA) was used to determine the differential volatile components between different varieties, and the relative odor activity value (ROAV) was used to further select key differential volatile components. Through SBSE-GC-MS, 16 volatile compounds were pinpointed as critical differentiators amongst the cultivars, while HS-GC-IMS revealed an additional 12 unique volatile components that distinguished between the tea varieties. Among them, the characteristic volatile components of 'Jingshan No. 2' include 2-heptanol, methyl jasmonate, 2-methyl butanal, and 2-heptanone, which have a clear fragrance characteristic, and their content is higher than that of other cultivars. The content of methyl eugenol, hexanal, and (Z)-3-hexen-1-ol in 'Jingshan No. 1' is relatively rich. The content of oxidized limonene and pentanal in 'Jiukeng' is higher. The sensory evaluation results indicate that 'Jingshan No. 1', 'Cuifeng' and 'Jingshan No. 2' received higher aroma scores. This study reveals that the characteristic volatile compounds of different tea cultivars of Jingshan tea have significant differences, providing theoretical basis for selecting high-quality raw materials in Jingshan tea production, and has important value for achieving precise processing and targeted quality control of high-quality Jingshan tea.

Keywords: Jingshan tea, tea aroma, tea cultivars, GC-MS, GC-IMS

绿茶具有丰富的风味特征和多种健康益处^[1-3]。径山茶是浙江省传统名优绿茶及中国历史文化名茶，主要产自杭州市余杭区^[4]，经杀青、理条、揉捻、干燥等工艺制成，具有香气嫩香持久，滋味甘醇鲜爽的品质特点^[5]。茶叶品质风味的形成不仅与加工工艺有关，还会受到茶树品种的影响^[6]。研究表明，不同茶树品种鲜叶加工制成的绿茶品质各具特色^[7]。因此，一些名优绿茶逐渐对茶树品种提出了新的要求。例如，安吉白茶通常选用白叶一号作为原料^[8]，太平猴魁茶通常选用柿大茶作为原料等^[9]。

近年来，随着无性系良种的筛选和推广，径山茶主要产区内目前有鸠坑种、迎霜、翠峰、径山1号、径山2号、乌牛早、龙井43、浙农117等茶树品种^[10]，其中径山1号和径山2号是由中国农业科学院茶叶研究所和杭州市余杭区农业技术推广中心等单位从当地的鸠坑群体种中筛选繁育而成，具有抗逆性强、扦插成活率高^[11]等特点。这些新品种的推出，不仅提高了径山茶的市场竞争力，也丰富了产品风味类型。然而，不同茶树品种鲜叶制成的径山茶化学品质特征仍有待探究。

香气是衡量绿茶风味品质的重要因子^[12]，不同茶树品种具有不同的遗传背景和代谢途径，所产生的挥发性物质存在差异。Feng等^[7]采用溶剂辅助风味蒸发法（SAFE）通过气相色谱-质谱联用（GC-MS）等技术研究了由安徽1号、群体种和舒茶早加工的六安瓜片的挥发性物质差异，发现安徽1号制成的六安瓜片花香更显著，且茶叶中的苯乙醛、芳樟醇、香叶醇、顺茉莉酮和(E)-异丁香酚等关键香气活性物质的含量显著高于其他两个品种。Yue等^[13]采用固相微萃取法（SPME）通过GC-MS测定了不同茶树品种的武夷岩茶挥发性成分，建立了不同茶树品种的武夷岩茶挥发性化合物的指纹图谱，并运用化学计量学法结合相对香气活性值（ROAV）确定了不同品种间的关键香气物质。

气相色谱-离子迁移谱（GC-IMS）技术具有无需样品前处理、灵敏度高、检测速度快、无环境污染、可直观分析挥发性化合物、易于识别小分子挥发性化合物等优点^[14]，目前在风味研究^[15]、产地鉴别^[16]、加工过程监测^[17]、储藏^[18]等多个食品科学领域得到了广泛应用。搅拌棒

吸附萃取 (SBSE) 是一种稳定便捷的萃取技术, 对茶叶中的挥发性化合物和半挥发性化合物均有很好的吸附效果, 搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用技术 (SBSE-GC-MS) 由于其重复性好、检出限低等特点, 是目前茶叶挥发性化合物研究中的常用方法。Wang 等^[6]采用不同的吸附技术研究了武夷岩茶中的香气物质, 认为 SBSE 可以更好地吸附武夷岩茶中的香气活性物质, 采用不同的技术可以获得更加全面的检测数据。

本研究从径山茶原产地的同一区域茶园采集了由径山 1 号、径山 2 号、鸠坑种、迎霜、翠峰共 5 个茶树品种的鲜叶, 按照相同的加工工艺制成径山茶样品, 通过 SBSE-GC-MS 和 GC-IMS 技术, 运用化学计量学并结合感官审评, 对不同茶树品种制得的径山茶的挥发性物质进行解析鉴定, 分析不同茶树品种的径山茶香气品质差异, 旨在进一步拓展径山茶风味化学研究, 为径山茶生产中优质原料的选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

本研究所用径山茶样由杭州径山五峰茶业有限公司提供, 茶树品种分别为径山 1 号、径山 2 号、鸠坑种、翠峰和迎霜 (表 1), 2024 年 3 月按一芽二叶的标准采摘于浙江省杭州市余杭区径山镇相同区域茶园, 按照相同加工工艺及参数制作, 并参照 GH/T 1127—2016 进行等级区分。茶样经密封后, 放置于 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 避光保存, 待检测。

正构烷烃 ($\text{C}_6\sim\text{C}_{40}$) 购自上海 Sigma-Aldrich 公司, 无水乙醇购自天津市大茂化学试剂厂, 氯化钠购自国药集团化学试剂有限公司, 正构酮 ($\text{C}_4\sim\text{C}_9$) 购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司, 纯净水购自杭州娃哈哈集团有限公司, 癸酸乙酯购自上海源叶生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

聚二甲氧基硅烷 (Polydimethylsiloxane, PDMS) 磁力搅拌转子 (10 mm, 膜厚度 0.5 mm), 德国 Gerstel 公司; DF-101S 型磁力搅拌水浴锅, 上海力辰邦西仪器科技有限公司; Agilent7890B-5977B 气相色谱质谱联用、10 μL 手动进样针、HP-5MS 色谱柱 (30 m $\times$ 0.25 mm, 0.25 μm), 购自美国 Agilent 公司; FlavourSpec[®] 气相离子迁移谱, 德国 G.A.S. 公司; CTC-PAL3 静态顶空自动进样装置, 瑞士 CTC Analytics AG 公司; MXT-5 毛细管色谱柱 (15m $\times$ 0.53 mm, 1.0 μm), 美国 Restek 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 SBSE-GC-MS 方法

SBSE-GC-MS 试验参考张汇源等^[5]的方法。称取 3 g 茶样置于 150 mL 的锥形瓶中, 然后加入 60 mL 沸水, 冲泡 5 min 后立即将茶汤滤出并置于冰水浴中快速冷却, 从锥形瓶中移取 10 mL 冷却后的茶汤于 20 mL 顶空瓶中, 加入 3 g 氯化钠、4 μL 质量浓度为 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的癸酸乙酯和 PDMS 磁力搅拌吸附转子, 密封顶空瓶。将顶空瓶置于 50 $^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴磁力搅拌器中, 使转子吸附 90 min 后取出。搅拌转子表面的残留物采用纯水清洗, 擦拭干燥后立即放入气相瓶中待检测。将装有搅拌转子的气相瓶放置在热脱附单元中对转子物质进行解吸附。

GC-MS 条件: HP-5MS 型气相色谱柱; 升温程序为初始温度 40 $^{\circ}\text{C}$ 保持 5 min, 以 3 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 100 $^{\circ}\text{C}$, 以 2 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 130 $^{\circ}\text{C}$, 以 10 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 250 $^{\circ}\text{C}$ 并保持 5 min; 载气为氦气 (纯

度 $\geq 99.999\%$)。质谱采用正离子模式采集数据,质量扫描范围为质荷比(m/z) 30~350,电子能量为 70 eV。

1.3.2 HS-GC-IMS 方法

HS-GC-IMS 试验参考 Zhang 等^[19]的方法。将 1 g 完全磨碎的样品置于 20 mL 顶空瓶中,在 50 °C 下以 500 r·min⁻¹ 在顶空装置中孵育 20 min。进样针在 85 °C 下,通过进样器向进样口进样 500 μ L 的顶空气体,不分流,通过 GC-IMS 气相离子迁移谱(FlavourSpec[®])测定挥发性成分。

GC-IMS 条件:采用 MXT-5 毛细管色谱柱,色谱柱温度为 60 °C;载气为高纯氮气(纯度 $\geq 99.999\%$);升压按照初始流量为 2 mL·min⁻¹,保持 2 min,在 8 min 内按照线性条件增加到 10 mL·min⁻¹,然后在 10 min 内按照线性条件增加到 100 mL·min⁻¹;色谱的运行时间为 20 min;进样口温度维持在 80 °C。电离源采用氘源(³H);迁移管长度为 53 mm;电场强度设置为 500 V·cm⁻¹;迁移管温度保持在 45 °C;漂移气为高纯氮气(纯度 $\geq 99.999\%$);氮气流速为 150 mL·min⁻¹;选择正离子模式进行检测。

1.3.3 挥发性化合物的定性定量分析

GC-MS:根据正构烷烃(C₆~C₄₀)的进样检测得到的保留时间(RT),计算 GC-MS 所有检测到挥发性成分的保留指数(RI),通过 NIST 2017 标准谱库检索,并对比公开数据库中的保留指数^[20],对检测到的未知化合物进行定性分析,采用内标法通过加入的癸酸乙酯计算相对含量。

GC-IMS:根据检测 6 种正构酮(C₄~C₉)的混合标准品,建立保留时间和保留指数的校准曲线,随后通过目标物的保留时间计算出该物质的保留指数,使用 VOCal 软件内置的 GC 保留指数(NIST 2020)数据库和 IMS 迁移时间数据库检索和比对,对目标物进行定性分析。

计算相对活性值: $OAV_i = C_i / OT_i$, $ROAV_i = OAV_i \times (OT_{max} / C_{max}) \times 100$,其中 C_i 为挥发性化合物 i 的相对含量, OT_i 为挥发性化合物 i 的气味阈值, OT_{max} 为香气活性值(OAV)值最大的挥发性化合物的气味阈值, C_{max} 为 OAV 值最大的挥发性化合物的相对含量^[21]。

1.3.4 感官审评方法

参照 GB/T 23776—2018《茶叶感官审评方法》^[22],由 10 位经验丰富的茶叶审评员组成审评小组,对各径山茶样品进行 5 项因子综合评判,单项因子满分为 100 分,根据外形、汤色、香气、滋味、叶底进行加权得分(总分=外形 $\times 0.25$ +汤色 $\times 0.10$ +香气 $\times 0.25$ +滋味 $\times 0.30$ +叶底 $\times 0.10$)。

1.4 数据处理

采用 VOCal 数据处理软件中的 Reporter 和 Gallery Plot 插件分别生成 GC-IMS 检测到的挥发性化合物的三维谱图、二维谱图、差异谱图及指纹图谱;采用 SPSS 26.0 进行试验数据的方差分析;使用 SIMCA 14.1 软件进行主成分分析(PCA)和正交偏最小二乘判别(OPLS-DA)分析;使用 TBtools 和 Origin 2022 绘图。

2 结果与分析

2.1 感官审评

本研究对不同茶树品种鲜叶制成的径山茶样品进行了感官审评,根据 5 项因子的得分并加权计算总评分。如表 1 所示,由径山 1 号茶树品种制成的茶样评分最高,其香气特征表现为清香较嫩,纯正,持久。其次是径山 2 号制成的茶样,其特征香气表现为嫩清香,纯正,香气的

持久度较径山 1 号稍差。由迎霜和鸠坑种制成的茶样香气也以清香为主，与径山 1 号和径山 2 号相比，嫩香和持久度表现不足。在 5 个茶样中，以翠峰品种为原料制成的径山茶表现出清花香，但茶汤滋味与径山 1 号和径山 2 号相比稍差，总评分不高。

表 1 不同茶树品种的径山茶的感官审评表
Table 1 Sensory evaluation table of Jingshan tea with different tea cultivars

品种	外形	香气	汤色	滋味	叶底	香气得分	总评分
Cultivars	Appearance	Aroma	Liquor color	Taste	Infused leaf	Aroma score	Total score
径山 2 号	条索较紧，毫较显，绿	嫩清香，纯正，	黄绿亮	鲜醇稍厚	芽叶细嫩，	94.80±0.84 ^b	92.41±0.46 ^b
Jingshan No. 2	透翠，匀整	较持久			绿亮		
迎霜	条索较卷紧，毫较显，	清香纯正	黄绿亮	醇厚	芽叶嫩软，	92.40±0.89 ^c	91.88±0.64 ^b
Yingshuang	显锋苗，绿，较匀整				绿亮		
径山 1 号	条索较卷紧，显锋苗，	清香较嫩，纯	黄绿亮	鲜醇	芽叶细嫩，	95.60±0.89 ^a	93.90±0.41 ^a
Jingshan No. 1	绿稍深，匀整	正，持久			嫩黄绿亮		
翠峰	条索较紧，显毫，灰绿，	清花香，较持	嫩黄亮	厚较醇	芽叶嫩软，	95.40±0.55 ^a	90.82±0.44 ^c
Cuifeng	较匀整	久			嫩黄绿		
鸠坑种	条索较卷紧，毫较显，	清香，较持久	黄绿亮	较醇厚	芽叶嫩软，	90.60±1.14 ^c	90.18±0.70 ^c
Jiukeng	墨绿，匀整				黄绿		

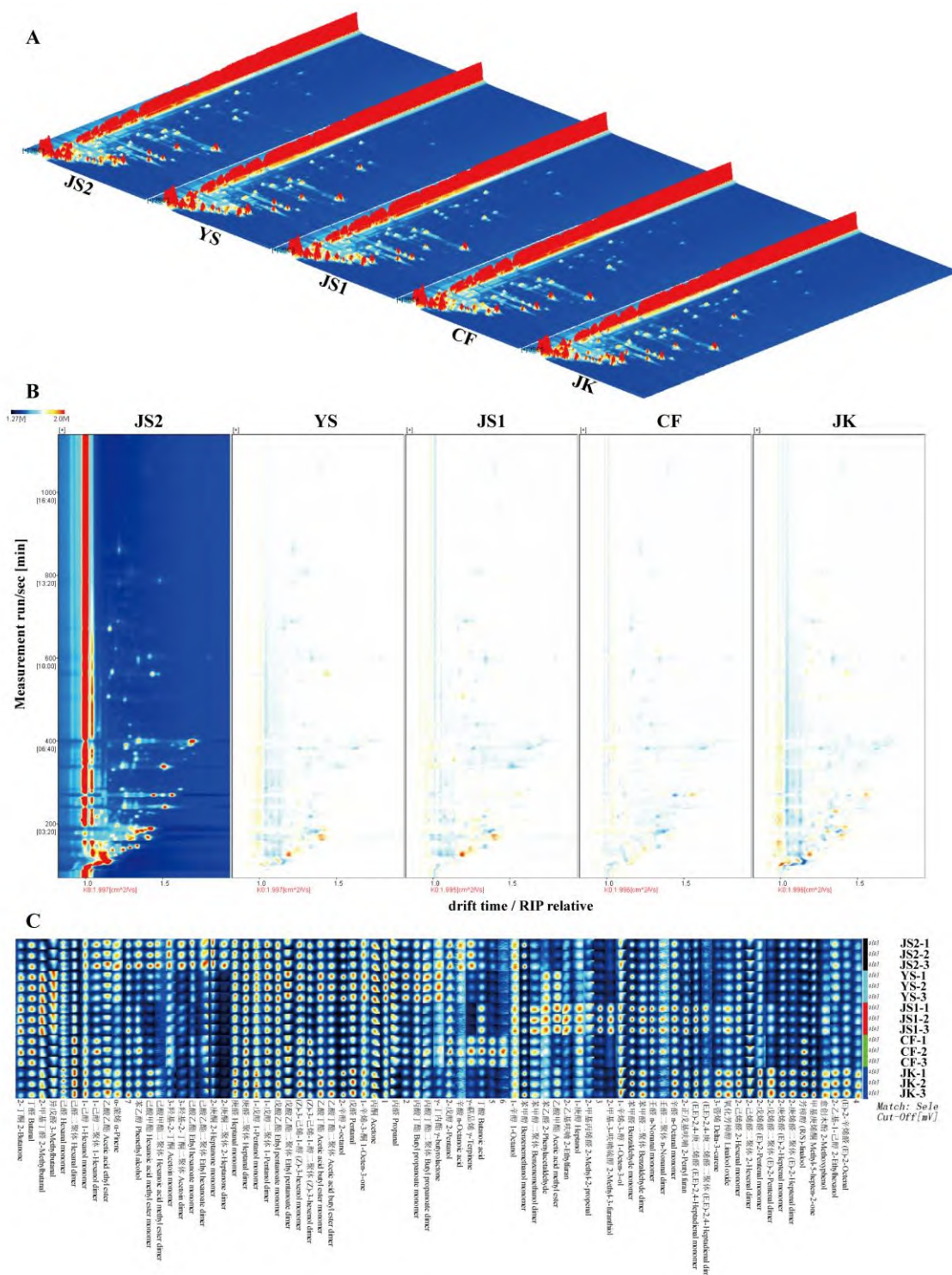
注：不同上标字母表示不同茶样的评分差异显著（ $P<0.05$ ）
Note: Different superscript letters indicate significant differences ($P<0.05$) in the scores of the different tea samples

2.2 基于 GC-IMS 的不同茶树品种的径山茶挥发性成分分析

为了阐明不同茶树品种的径山茶挥发性物质的差异，采用 GC-IMS 分析了径山茶的挥发性化合物。如图 1 所示，5 个样品中共鉴定出 79 种挥发物，主要由醇类、酮类、醛类、酯类和杂环类化合物组成。图 1A 为 GC-IMS 的三维谱图，3 个坐标轴分别表示相对迁移时间（X 轴）、保留时间（Y 轴）和信号峰强度（Z 轴），三维谱图显示不同茶树品种加工成的径山茶挥发性成分化合物组成与含量存在差异。为进一步直观对比样品中挥发性成分的差异，选取样品 JS2 的谱图作为参比，其他样品的谱图扣减参比，得到不同样品的差异对比图（图 1B）。由图 1B 所示，大部分检测信号的保留时间在 100~800 s，漂移时间在 1.0~2.0 s。图 1C 显示了不同茶树品种径山茶的挥发性成分指纹图谱，颜色的强度与其含量成正比，越明亮的颜色代表该化合物的含量越高。JS1 中含量较高的物质主要有 2-甲基-3-呋喃硫醇、辛醇、2-乙基呋喃等；YS 中 γ -丁内酯、丙酸丁酯等含量较高；JK 中芳樟醇、(Z)-3-己烯-1-醇的含量较高；2-庚酮、己酸乙酯等在 JS2 中的含量较高；CF 中(Z)-3-己烯-1-醇二聚体、己醛二聚体等含量较高。GC-IMS 分析显示，不同茶树品种径山茶的挥发性成分谱图基本一致，但其各自的化合物浓度存在显著差异。

2.3 基于 GC-MS 的不同茶树品种的径山茶挥发性成分分析

如表 2 所示，通过 GC-MS 技术检测和鉴定了 93 种挥发性化合物，其中醇类 18 种，烯烃类 14 种，酮类 13 种，酯类 12 种，醛类 11 种，酸类 7 种，杂环类 6 种，芳香族类 5 种，酚类 3 种，内酯类 1 种及其他类 3 种。在 JS2、YS、JS1、CF 和 JK 的茶样中分别检测到 58、44、57、50、55 种挥发性化合物（图 2），其中 JS1 和 JS2 样品中挥发性化合物的数量明显高于其他样品。如图 3 所示，在 JS1、CF 和 JK 样品中醇类物质的占比最大，在 JS1、JS2 和 YS 样品中酮类和酯类物质占总挥发性成分含量的一半以上。此外，不同类别的化合物在不同茶树品种的样品之间含量及占比均存在差异。



注：A 为三维谱图；B 为二维谱图（差异比较），如果目标样品和参比中的挥发性化合物含量一样，则扣减后的背景为白色，红色代表该物质的含量在目标样品中高于参比，蓝色代表该物质的含量在目标样品中低于参比；C 为指纹谱图。JS2，径山 2 号；YS，迎霜；JS1，径山 1 号；CF，翠；JK，鸠坑种；下同

Note: A, three-dimensional spectrum. B, two-dimensional spectrum(comparative difference), if the volatile compound contents in the target sample and reference are the same, a white background is shown. Red indicates higher content in the target sample compared to the reference, while blue indicates lower content. C, fingerprint spectrum. JS2, 'Jingshan No.2'. YS, 'Yingshuang', JS1, 'Jingshan No.1', CF, 'Cuifeng'. JK, 'Jiukeng'. The same below

图 1 不同茶树品种的径山茶 GC-IMS 谱图

Fig. 1 Spectrogram of different tea cultivars of Jingshan tea by GC-IMS

表 2 GC-MS 检测 5 个茶树品种径山茶挥发性化合物及其含量

Table 2 Total volatile compounds of Jingshan tea of five tea cultivars detected by GC-MS

分类 Category	化合物 Compounds	CAS 编号 CAS No.	保留时间 RT	保留指数 RI	含量 Content/ $\mu\text{g L}^{-1}$				
					JS2	YS	JS1	CF	JK
醇类 Alcohols	(Z)-3-己烯醇	928-96-1	12.03	887	0.38±0.01 ^a	0.29±0.01 ^b	0.23±0.09 ^b	0.33±0.00 ^{ab}	0.34±0.01 ^{ab}
	1-己醇	111-27-3	12.68	901	n.d.	n.d.	n.d.	0.17±0.01 ^a	0.17±0.01 ^a
	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	18.30	1 006	0.26±0.03 ^{ab}	0.15±0.03 ^b	0.39±0.19 ^{ab}	0.32±0.01 ^{ab}	0.58±0.08 ^a
	2-乙基己醇	104-76-7	20.85	1 056	4.53±0.16 ^a	1.77±0.20 ^b	5.54±0.21 ^a	5.43±0.30 ^a	6.09±0.04 ^a
	(Z)-芳樟醇氧化物 (呋喃型)	34995-77-2	23.00	1 097	0.66±0.12 ^b	0.55±0.15 ^b	2.63±0.24 ^b	1.50±0.16 ^b	4.63±0.62 ^a
	(E)-芳樟醇氧化物 (呋喃型)	5989-33-3	23.01	1 097	n.d.	0.47±0.04 ^c	4.14±0.33 ^a	1.49±0.10 ^c	2.42±0.35 ^b
	芳樟醇	78-70-6	24.42	1 125	15.09±0.19 ^{ab}	7.67±0.15 ^c	22.43±0.02 ^a	16.38±0.12 ^b	21.16±0.34 ^a
	苯乙醇	60-12-8	25.19	1 140	4.32±0.01 ^b	1.44±0.26 ^c	5.78±0.72 ^{ab}	0.11±0.06 ^d	6.16±0.66 ^a
	(E)-芳樟醇氧化物 (吡喃型)	39028-58-5	27.91	1 194	0.22±0.05 ^a	0.11±0.02 ^a	0.34±0.01 ^a	0.40±0.03 ^a	0.76±0.12 ^a
	薄荷脑	1490-04-6	28.07	1 197	1.29±0.10 ^a	0.11±0.03 ^b	2.03±0.07 ^a	1.73±0.12 ^a	2.18±0.12 ^a
	(Z)-马鞭烯醇	1845-30-3	28.18	1 199	n.d.	1.37±0.17	n.d.	n.d.	n.d.
	4-萜烯醇	562-74-3	28.29	1 201	n.d.	n.d.	n.d.	0.20±0.03 ^b	0.86±0.01 ^a
	α -松油醇	98-55-5	29.02	1 215	1.12±0.07 ^{ab}	0.46±0.02 ^c	1.48±0.02 ^{ab}	1.21±0.10 ^b	1.56±0.21 ^a
	橙花醇	106-25-2	32.48	1 279	n.d.	n.d.	17.86±0.71 ^b	n.d.	60.78±2.96 ^a
	香叶醇	106-24-1	32.53	1 280	n.d.	n.d.	n.d.	15.73±0.85 ^b	65.83±2.10 ^a
	月桂醇	112-53-8	43.13	1 498	0.32±0.05 ^a	n.d.	0.37±0.04 ^a	n.d.	0.43±0.10 ^a
	檀香醇	115-71-9	46.05	1 641	n.d.	0.15±0.01	n.d.	n.d.	n.d.
	杜松醇	5937-11-1	46.85	1 691	0.09±0.01 ^b	0.52±0.02 ^a	n.d.	n.d.	n.d.
醛类 Aldehydes	己醛	66-25-1	9.13	827	n.d.	n.d.	n.d.	0.22±0.01	n.d.
	庚醛	111-71-7	14.12	928	n.d.	n.d.	n.d.	0.08±0.01	n.d.
	苯甲醛	100-52-7	17.23	986	0.40±0.01 ^b	0.16±0.06 ^c	1.92±0.25 ^a	0.38±0.02 ^b	0.30±0.05 ^b
	正辛醛	124-13-0	19.42	1 028	0.20±0.03 ^a	0.08±0.01 ^b	0.23±0.01 ^a	0.14±0.01 ^{ab}	0.10±0.01 ^b
	苯乙醛	122-78-1	21.57	1 069	n.d.	0.48±0.09 ^b	2.07±0.09 ^a	n.d.	n.d.
	壬醛	124-19-6	24.57	1 128	n.d.	0.65±0.01	n.d.	n.d.	n.d.
	(E,E)-2,6-壬二醛	17587-33-6	28.17	1 199	n.d.	n.d.	0.78±0.01	n.d.	n.d.
	藏红花醛	116-26-7	29.45	1 223	0.18±0.01 ^a	0.14±0.01 ^b	0.14±0.01 ^b	0.05±0.01 ^c	0.21±0.01 ^a
	癸醛	112-31-2	29.74	1 228	1.32±0.07 ^a	0.25±0.01 ^c	1.37±0.03 ^{ab}	0.57±0.02 ^{bc}	0.42±0.01 ^{bc}
	甜橙醛	60066-88-8	47.06	1 705	n.d.	n.d.	n.d.	0.53±0.06	n.d.
	3,5-二叔丁基-4-羟基苯甲醛	1620-98-0	48.37	1 802	0.26±0.01 ^a	n.d.	0.33±0.03 ^a	n.d.	n.d.

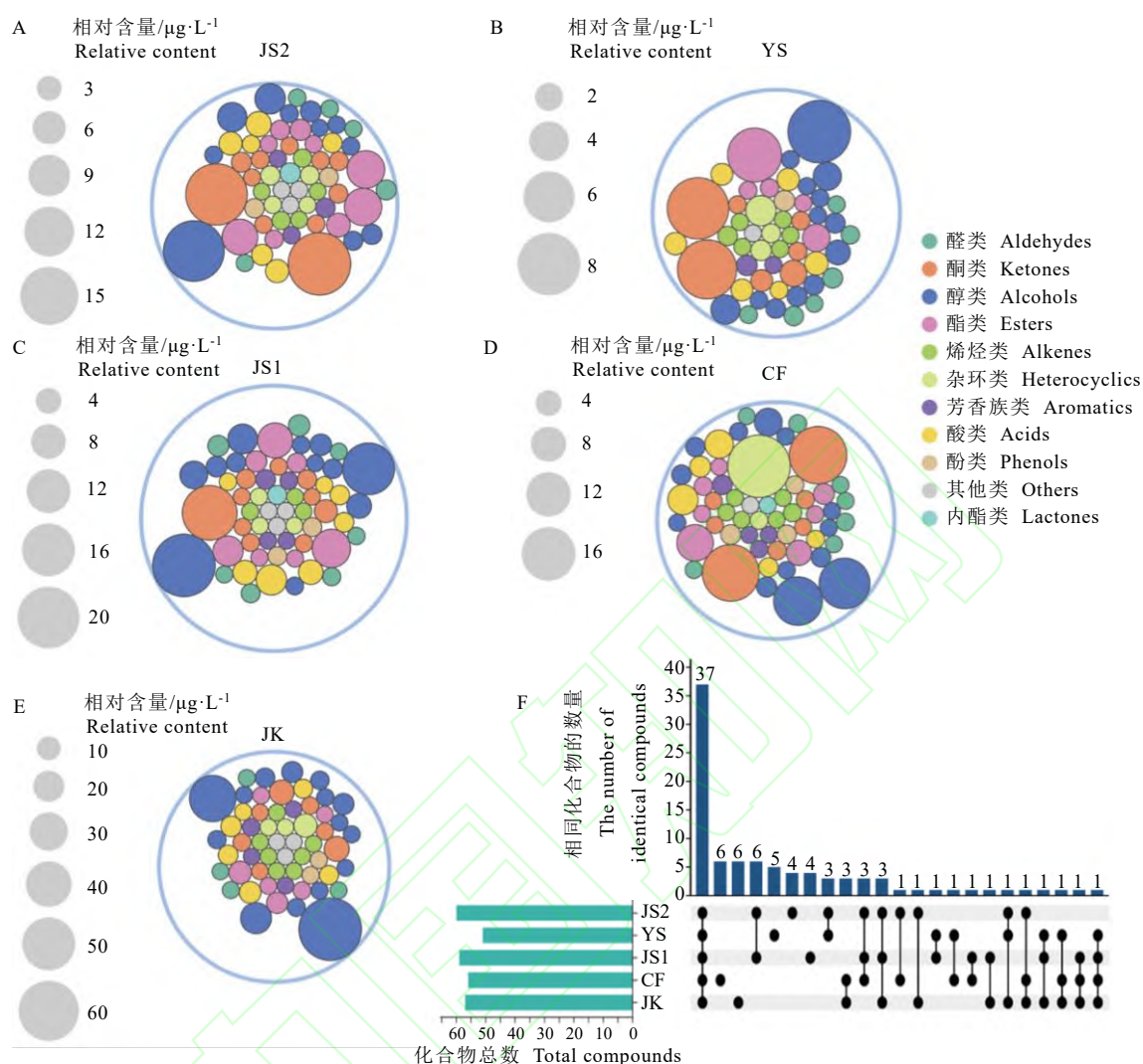
注：保留指数 RI 为 HP-5MS 型气相色谱柱条件下的计算值；不同上标字母表示样品之间的挥发性组分相对含量差异显著 ($P<0.05$)Note: Retention index (RI) by HP-5MS capillary chromatography column. Different superscript letters indicate significant differences ($P<0.05$) in the relative content of volatile components of tea samples

续表 2-1

分类 Category	化合物 Compounds	CAS 编号 CAS No.	保留时间 RT	保留指数 RI	含量 Content/ $\mu\text{g L}^{-1}$				
					JS2	YS	JS1	CF	JK
酮类 Ketones	4-甲基-3-戊烯-2-酮	141-79-7	9.15	828	n.d.	n.d.	0.22±0.01	n.d.	n.d.
	2-庚酮	110-43-0	13.60	918	0.32±0.02	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	2-庚醇	543-49-7	14.19	929	0.40±0.01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	2,3-辛二酮	585-25-1	18.50	1 010	0.38±0.02 ^b	n.d.	0.53±0.05 ^a	n.d.	n.d.
	6-甲基-5-庚烯-2-酮	110-93-0	18.64	1 013	0.46±0.04 ^a	0.21±0.01 ^b	0.36±0.03 ^{ab}	0.19±0.08 ^b	0.23±0.01 ^b
	3-辛烯-2-酮	1669-44-9	21.36	1 065	n.d.	n.d.	0.14±0.01	n.d.	n.d.
	苯乙酮	98-86-2	22.71	1 091	0.92±0.01 ^a	0.21±0.03 ^c	0.43±0.01 ^b	0.26±0.01 ^{bc}	0.91±0.04 ^a
	异佛尔酮	78-59-1	25.39	1 144	15.75±0.27 ^a	11.56±0.68 ^a	17.84±0.37 ^a	15.92±1.59 ^a	17.22±0.57 ^a
	羟基苯乙酮	118-93-4	25.46	1 145	0.39±0.02	n.d.	0.06±0.01	n.d.	n.d.
	樟脑	76-22-2	26.55	1 167	0.26±0.01 ^a	0.17±0.01 ^c	0.21±0.01 ^b	0.14±0.01 ^c	0.21±0.01 ^b
	顺茉莉酮	488-10-8	40.51	1 432	17.26±0.08 ^a	6.93±0.34 ^c	2.87±0.13 ^d	19.15±0.21 ^a	10.97±0.08 ^a
	香叶基丙酮	3796-70-1	42.49	1 482	1.12±0.04 ^a	0.85±0.10 ^b	1.26±0.22 ^{ab}	0.82±0.08 ^b	0.76±0.01 ^b
	反式 β -紫罗酮	79-77-6	43.46	1 512	0.73±0.01 ^a	0.62±0.16 ^a	1.40±0.13 ^a	0.67±0.06 ^a	1.69±0.08 ^a
酸类 Acids	壬酸	112-05-0	34.25	1 311	2.63±0.15 ^{bc}	0.54±0.07 ^c	4.88±3.81 ^a	3.85±0.76 ^{ab}	5.78±0.34 ^{ab}
	正癸酸	334-48-5	39.60	1 409	1.98±0.02 ^{bc}	0.9±0.06 ^c	2.78±1.60 ^b	1.08±0.15 ^c	7.88±0.02 ^a
	月桂酸	143-07-7	45.36	1 599	2.02±0.12 ^b	0.87±0.12 ^b	3.01±0.23 ^{ab}	4.24±0.86 ^{ab}	4.67±0.52 ^a
	肉豆蔻酸	544-63-8	48.28	1 796	1.32±0.32 ^{ab}	0.49±0.13 ^b	1.26±0.39 ^b	0.48±0.04 ^b	3.84±0.64 ^a
	棕榈油酸	373-49-9	50.30	1 975	0.46±0.05 ^a	n.d.	0.21±0.04 ^b	n.d.	n.d.
	棕榈酸	57-10-3	50.50	1 994	1.83±0.03 ^b	0.93±0.16 ^b	1.62±0.35 ^b	1.37±0.61 ^b	3.34±0.15 ^a
	硬脂酸	57-11-4	52.41	2 193	n.d.	0.23±0.02 ^a	0.2±0.03 ^a	n.d.	0.26±0.01 ^a
芳香族类 Aromatics	1,2,3,4-四甲基苯	488-23-3	26.91	1 174	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.13±0.01
	萘	91-20-3	28.52	1 206	0.91±0.04 ^{ab}	0.82±0.03 ^b	1.40±0.10 ^a	1.24±0.02 ^a	1.34±0.03 ^a
	4-异丙基苯甲醛	122-03-2	31.61	1 262	0.17±0.01 ^a	n.d.	0.26±0.01 ^a	0.27±0.01 ^a	n.d.
	2-甲基萘	91-57-6	34.51	1 315	0.25±0.01 ^b	0.13±0.01 ^b	0.40±0.04 ^a	0.27±0.01 ^a	0.34±0.01 ^a
	1-甲基萘	90-12-0	35.42	1 332	n.d.	n.d.	0.18±0.02 ^a	0.09±0.01 ^a	0.15±0.01 ^a
烯烃类 Alkenes	β -月桂烯	123-35-3	18.80	1 016	0.13±0.01 ^c	0.10±0.02 ^d	0.25±0.02 ^b	0.12±0.01 ^{cd}	0.38±0.01 ^a
	柠檬烯	138-86-3	20.70	1 053	0.14±0.01 ^a	0.04±0.01 ^b	0.14±0.05 ^a	0.10±0.01 ^b	0.14±0.02 ^a
	β -罗勒烯	13877-91-3	21.24	1 063	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.10±0.01
	(<i>E</i>)- β -罗勒烯	3779-61-1	21.76	1 073	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.22±0.01
	β -蒎品烯	99-84-3	21.76	1 073	0.14±0.01 ^a	0.15±0.04 ^a	0.11±0.01 ^a	0.11±0.01 ^a	0.14±0.01 ^a
	γ -松油烯	99-85-4	22.25	1 082	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.16±0.01
	α -衣兰烯	14912-44-8	37.63	1 371	n.d.	n.d.	n.d.	0.06±0.01	n.d.
	α -蒎澄茄油烯	17699-14-8	37.66	1 372	n.d.	0.09±0.01 ^a	n.d.	0.08±0.01 ^a	n.d.

续表 2-2

分类 Category	化合物 Compounds	CAS 编号 CAS No.	保留时间 RT	保留指数 RI	含量 Content/ $\mu\text{g L}^{-1}$				
					JS2	YS	JS1	CF	JK
烯烃类 Alkenes	β -毕澄茄烯	13744-15-5	39.95	1 417	n.d.	0.14 $\pm$ 0.01	n.d.	n.d.	n.d.
	β -古巴烯	18252-44-3	39.95	1 417	n.d.	0.15 $\pm$ 0.01	n.d.	n.d.	n.d.
	γ -衣兰油烯	30021-74-0	40.70	1 436	n.d.	n.d.	0.01 $\pm$ 0.01	n.d.	n.d.
	γ -杜松烯	39029-41-9	43.71	1 523	0.55 $\pm$ 0.04 ^a	n.d.	n.d.	0.60 $\pm$ 0.08 ^a	n.d.
	萆澄茄烯	29837-12-5	44.22	1 547	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.25 $\pm$ 0.01
	Δ -杜松烯	483-76-1	44.23	1 547	0.55 $\pm$ 0.01 ^a	0.42 $\pm$ 0.01 ^a	n.d.	n.d.	n.d.
杂环类 Heterocyclics	2-正戊基呋喃	3777-69-3	18.86	1 017	n.d.	n.d.	0.17 $\pm$ 0.01	n.d.	n.d.
	2,6-二乙基吡嗪	13067-27-1	23.37	1 104	0.09 $\pm$ 0.01 ^a	n.d.	0.07 $\pm$ 0.01 ^a	n.d.	n.d.
	氧化柠檬烯	1195-92-2	23.79	1 112	0.68 $\pm$ 0.07 ^a	0.56 $\pm$ 0.06 ^a	n.d.	n.d.	n.d.
	吡咯	120-72-9	35.16	1 327	n.d.	2.04 $\pm$ 0.34 ^b	n.d.	24.50 $\pm$ 2.09 ^a	10.27 $\pm$ 0.30 ^b
	茶螺烷	36431-72-8	35.76	1 338	0.76 $\pm$ 0.06 ^a	0.35 $\pm$ 0.04 ^b	0.33 $\pm$ 0.04 ^b	0.50 $\pm$ 0.03 ^b	0.33 $\pm$ 0.01 ^b
	石竹素	1139-30-6	46.04	1 641	0.27 $\pm$ 0.01 ^a	n.d.	n.d.	n.d.	0.45 $\pm$ 0.02 ^a
酯类 Esters	甲酸己酯	629-33-4	12.67	900	0.35 $\pm$ 0.01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	乙酸叶醇酯	3681-71-8	19.68	1 033	0.65 $\pm$ 0.01 ^b	0.18 $\pm$ 0.01 ^b	0.22 $\pm$ 0.03 ^b	1.98 $\pm$ 0.04 ^a	0.42 $\pm$ 0.01 ^b
	异丁酸叶醇酯	41519-23-7	24.67	1 130	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2.06 $\pm$ 0.10
	乙酸苯甲酯	140-11-4	27.63	1 188	1.86 $\pm$ 0.06 ^b	n.d.	2.10 $\pm$ 0.08 ^a	n.d.	n.d.
	(Z)-3-己烯基丁酯	16491-36-4	28.74	1 210	0.97 $\pm$ 0.04 ^a	0.28 $\pm$ 0.02 ^{cd}	0.22 $\pm$ 0.01 ^d	0.82 $\pm$ 0.08 ^b	0.37 $\pm$ 0.01 ^c
	水杨酸甲酯	119-36-8	29.19	1 218	2.41 $\pm$ 0.08 ^d	1.42 $\pm$ 0.49 ^d	6.30 $\pm$ 0.11 ^b	3.99 $\pm$ 0.07 ^c	8.38 $\pm$ 0.20 ^a
	异戊酸叶醇酯	35154-45-1	31.17	1 254	0.21 $\pm$ 0.01 ^a	0.1 $\pm$ 0.01 ^b	n.d.	n.d.	0.21 $\pm$ 0.01
	2-甲基-丙酸 3-羟基-2,2,4-三甲基戊基酯	77-68-9	37.82	1 374	6.31 $\pm$ 0.99 ^a	5.51 $\pm$ 0.58 ^a	11.02 $\pm$ 0.47 ^a	9.59 $\pm$ 1.41 ^a	5.30 $\pm$ 0.08 ^a
	异丁酸 2-乙基-3-羟基己酯	74367-31-0	39.06	1 396	5.31 $\pm$ 0.83 ^a	n.d.	9.18 $\pm$ 0.01 ^a	0.15 $\pm$ 0.01 ^b	n.d.
	(Z)-3-己烯醇苯甲酸酯	25152-85-6	45.35	1 598	n.d.	n.d.	n.d.	0.29 $\pm$ 0.03	n.d.
	4-庚基苯甲酸甲酯	6892-80-4	46.04	1 641	n.d.	n.d.	n.d.	0.17 $\pm$ 0.01	n.d.
酚类 Phenols	茉莉酸甲酯	1211-29-6	46.69	1 681	7.23 $\pm$ 0.24 ^a	n.d.	1.42 $\pm$ 0.05 ^b	n.d.	n.d.
	丁香酚	97-53-0	38.21	1 381	n.d.	n.d.	1.01 $\pm$ 0.04 ^a	0.70 $\pm$ 0.02 ^a	n.d.
	2,6-二叔丁基对甲苯酚	128-37-0	43.11	1 498	0.86 $\pm$ 0.22 ^b	0.55 $\pm$ 0.02 ^b	1.05 $\pm$ 0.09 ^{ab}	1.14 $\pm$ 0.09 ^a	0.64 $\pm$ 0.02 ^{ab}
内酯类 Lactones	2,4-二叔丁基苯酚	96-76-4	44.18	1 545	0.8 $\pm$ 0.03 ^a	n.d.	n.d.	1.63 $\pm$ 0.02 ^a	1.08 $\pm$ 0.04 ^a
	二氢猕猴桃内酯	17092-92-1	44.55	1 562	1.42 $\pm$ 0.09 ^a	n.d.	1.13 $\pm$ 0.15 ^b	0.23 $\pm$ 0.02 ^c	n.d.
其他类 Others	2-甲基十三烷	1560-96-9	38.38	1 384	0.23 $\pm$ 0.01 ^b	n.d.	0.43 $\pm$ 0.03 ^a	n.d.	0.47 $\pm$ 0.02 ^a
	3-甲基十三烷	6418-41-3	38.78	1 391	0.34 $\pm$ 0.03 ^a	n.d.	0.27 $\pm$ 0.02 ^a	n.d.	0.19 $\pm$ 0.02 ^a
	2-甲基十五烷	1560-93-6	45.11	1 588	0.21 $\pm$ 0.01 ^a	0.10 $\pm$ 0.01 ^b	0.18 $\pm$ 0.01 ^a	0.18 $\pm$ 0.09 ^a	0.17 $\pm$ 0.01 ^a

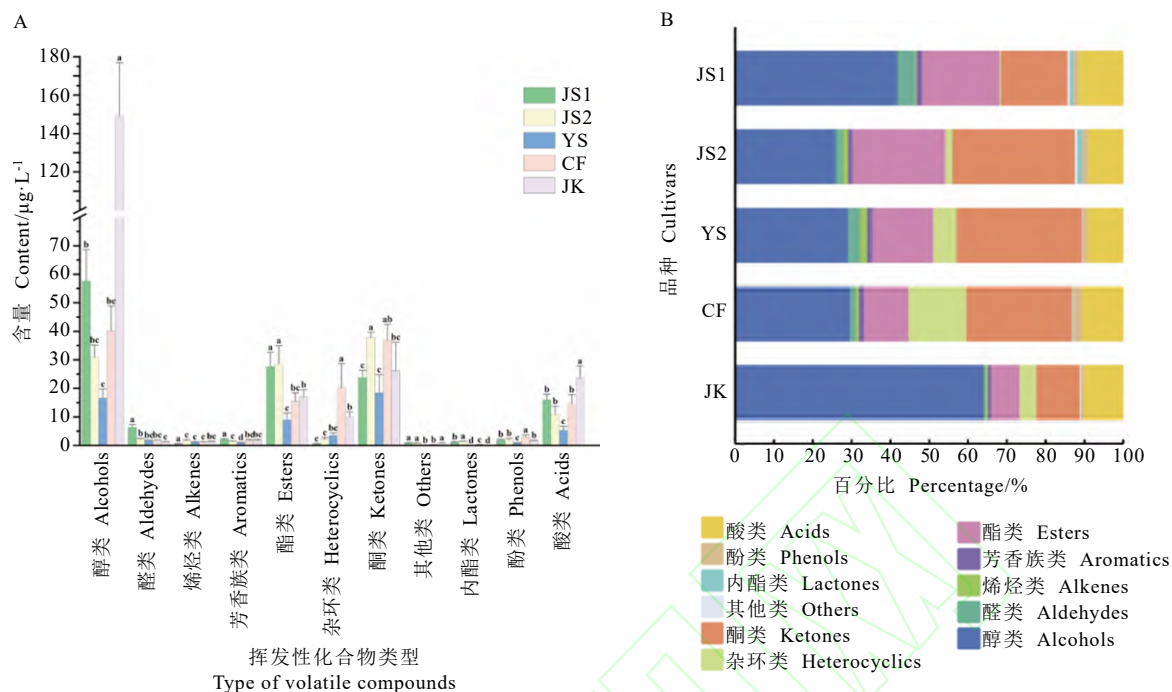


注：圆圈气泡图中每个气泡代表单个化合物，气泡尺寸代表化合物的含量，不同的颜色代表不同的种类

Note: In circle packing plots, each bubble represents a compound, with its size indicating the content and different colors denoting various types

图 2 GC-MS 检测的挥发性物质的圆圈气泡图和 Upset 图

Fig.2 Circle packing plots and Upset diagram of the volatile profiles detected by GC-MS



注：柱状图上的不同字母表示香气组分含量差异显著 ($P<0.05$)
 Note: The different letters on the bar chart indicate that the content of aroma components is significantly different ($P<0.05$)

图 3 不同茶树品种的径山茶中的挥发性化合物的含量 (A) 及占比 (B)

Fig. 3 Content (A) and proportion (B) of volatile compounds in different tea cultivars of Jingshan tea

2.4 不同茶树品种的径山茶中差异挥发性成分分析

为了更好地区分 5 个品种径山茶之间的差异, 采用 PCA 对 5 个品种的茶样进行分析。如图 4A 和图 4D 所示, 相同茶树品种的样品聚在一起, 而不同茶树品种的样品则表现出较大的分离。为了提高分离度和描述 5 个样品之间的差异, 对 GC-MS 和 GC-IMS 分析鉴定的挥发性化合物进行了 OPLS-DA 分析 (图 4B, 图 4E)。GC-IMS 的模型参数 ($R^2X=0.969$, $R^2Y=0.994$, $Q^2=0.984$) 和 GC-MS 的模型参数 ($R^2X=0.862$, $R^2Y=0.978$, $Q^2=0.95$) 在两种情况下均具有较高的解释方差 (R^2Y) 和较强的预测性能 (Q^2)。200 次置换检验结果表明 (图 4C, 图 4F), 本研究所构建的 OPLS-DA 模型在性能上拟合较好, 可以用于下一步筛选差异挥发性成分。

为进一步解析不同品种间的差异挥发性成分, 基于 OPLS-DA 模型的 VIP 值, 分别在 GC-IMS 和 GC-MS 检测的样品中筛选出 VIP>1 的差异挥发性成分 31 种和 58 种, 绘制热图直观展示这些挥发性成分在不同品种茶样中的含量变化。GC-IMS 的结果显示 (图 5A), 2-甲基丁醛, 2-乙基呋喃在 JS1 中含量较高; 3-羟基-2-丁酮、己酸甲酯在 JS2 中含量较高; 庚醛 (二聚体) 和 (Z)-3-己烯-1-醇 (二聚体) 在 CF 中含量较高; 1-戊醇和 2-甲基-3-呋喃硫醇在 YS 中含量较高; 戊醛和苯甲醇在 JK 中含量较高。GC-MS 的结果显示 (图 5B), 壬醛和 T-杜松醇在 JS1 的含量较高; 2-正戊基呋喃、乙酸苯甲酯、苯甲醛和苯乙醛在 JS2 中的含量较高; CF 中, 顺茉莉酮, 吡啶的含量较高; YS 中, 氧化柠檬烯的含量较高; JK 中, (E)- β -罗勒烯和香叶醇的含量较高。

2.5 不同茶树品种的径山茶中关键差异挥发性化合物的分析

茶叶的整体香气表现取决于挥发性化合物的浓度及其香气阈值^[23]。一些阈值和浓度较低的

挥发性化合物在香气表现中仍然发挥着显著作用。因此，为了评估单个化合物对整体香气的确切贡献，本研究以 $ROAV \geq 1$ 、 $VIP > 1$ 为标准^[24]，筛选 5 个样品的关键香气活性物质。在 GC-MS 结果中筛选出 16 种关键物质，分别为茉莉酸甲酯、氧化柠檬烯、顺茉莉酮、吡啶、香叶醇、石竹素、乙酸苯甲酯、4-异丙基苯甲醛、2-正戊基呋喃、2-甲基萘、2-庚醇、2,6-二乙基吡嗪、2,4-二叔丁基苯酚、1-甲基萘、1,2,3,4-四甲基苯、(E,E)-2,6-壬二醛；在 GC-IMS 结果中筛选出 12 种关键物质，分别为戊醛、辛醛、庚醛、己醛二聚体、庚醛二聚体、异戊醛、2-甲基丁醛、2-庚酮、2-庚酮二聚体、(Z)-3-己烯-1-醇、(Z)-3-己烯-1-醇二聚体、芳樟醇（图 6）。

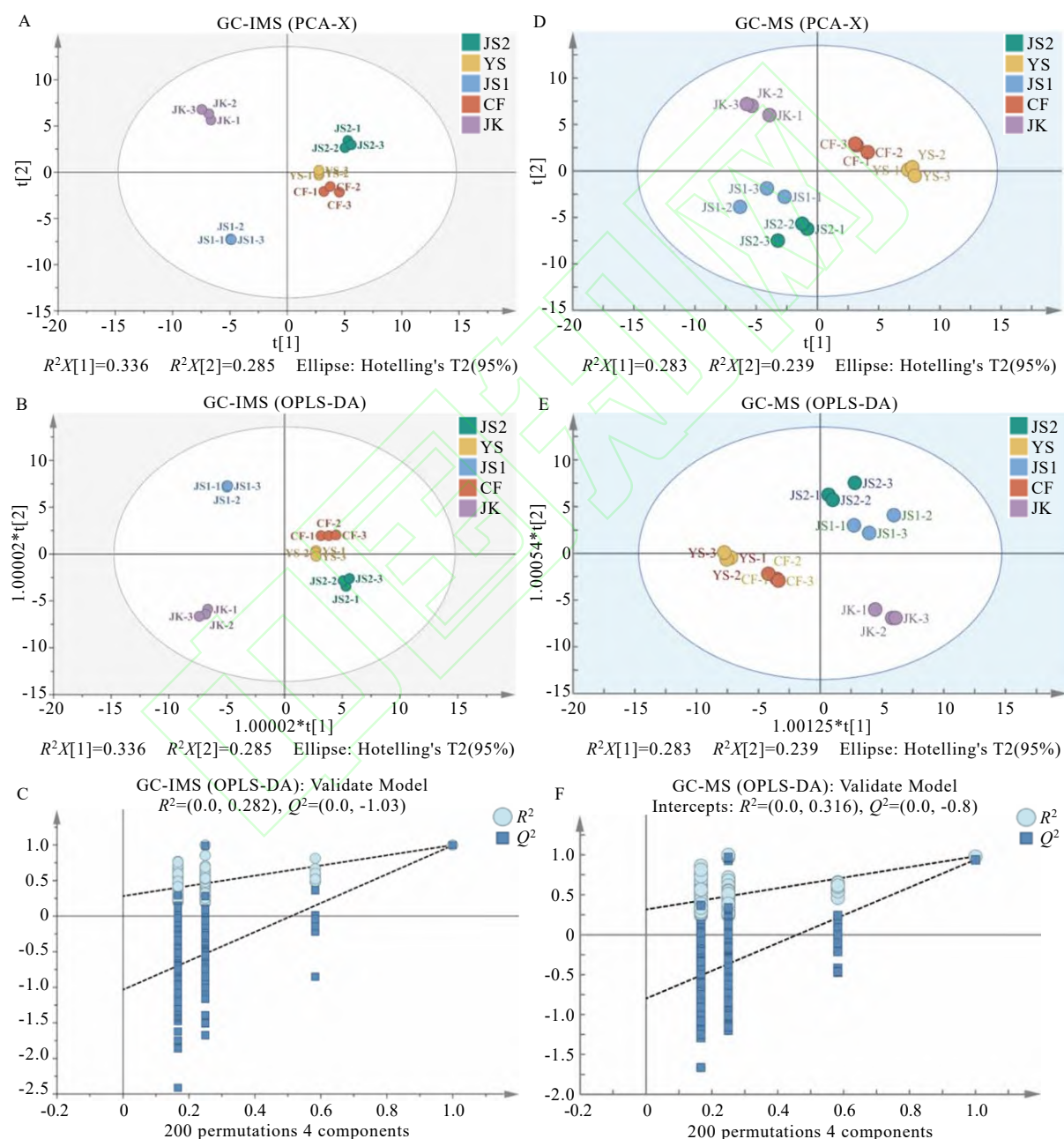
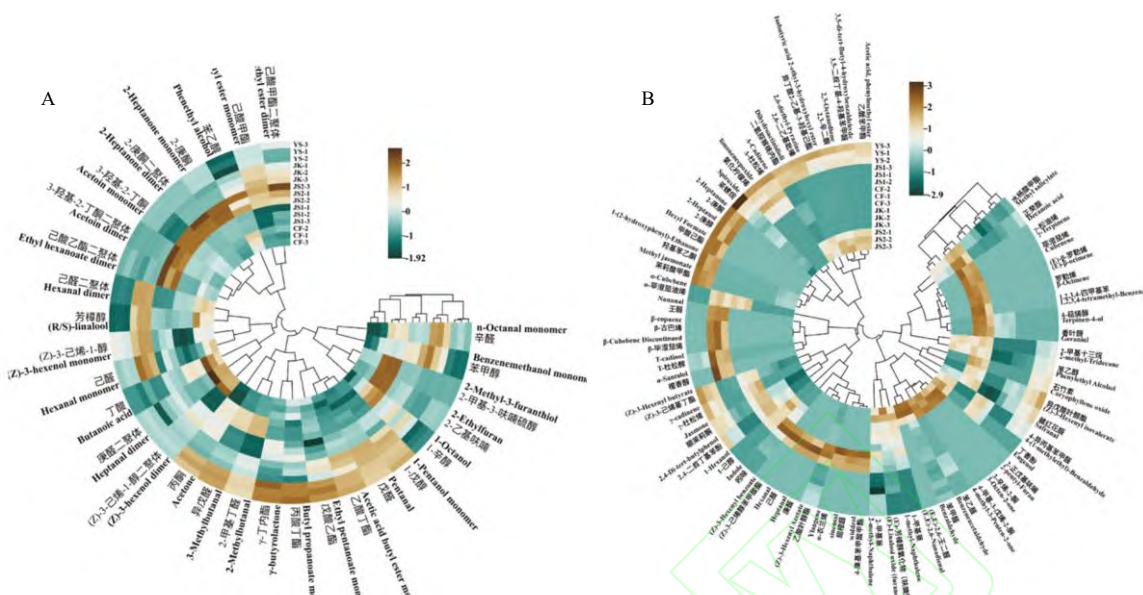


图 4 不同径山茶样品的主成分分析、正交偏最小二乘判别分析和置换检验

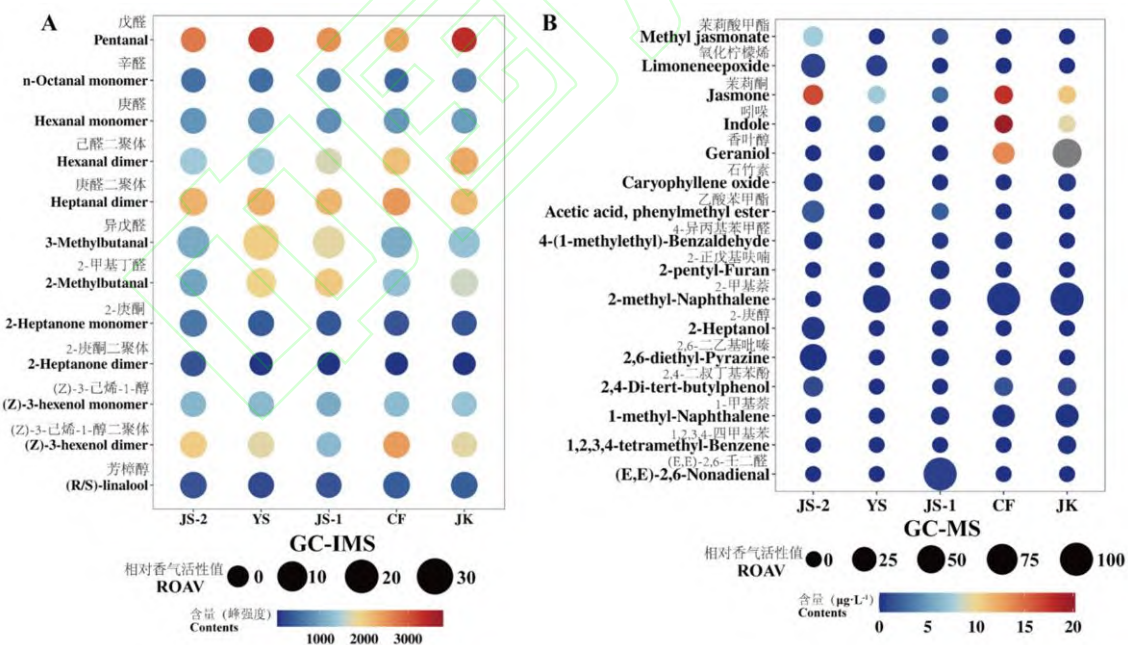
Fig. 4 Principal component analysis, orthogonal partial least squares discriminant analysis, and permutations in different Jingshan tea samples



注：A 为 GC-IMS，B 为 GC-MS；棕色表示高于平均含量，绿色表示低于平均含量
 Note: A, GC-IMS. B, GC-MS. Brown indicates the content above the average, green indicates the content below the average

图 5 不同径山茶样品中 VIP>1 挥发性差异化合物的分组热图

Fig. 5 Heatmap of the groupings of the differential volatile compounds with VIP > 1 in different Jingshan tea samples



注：圆圈的大小与 ROAV 值呈正比，圆圈的颜色代表了各个挥发性化合物的含量（峰面积）
 Note: The circle size is proportional to the ROAV value, and its color represents the content (peak area) of each volatile compound

图 6 不同茶树品种径山茶关键差异标志物的相对香气活性值气泡图

Fig. 6 Bubble map of relative aroma activity values of key difference markers of Jingshan tea in different tea cultivars

3 讨论

茶树品种是茶叶品质的基础,在相同工艺条件下,茶树品种直接决定鲜叶内源物质条件,进而导致不同茶树品种制得的成品茶风味品质差异。本研究通过采用 HS-GC-IMS 和 SBSE-GC-MS 技术,对不同茶树品种所制径山茶的挥发性化合物进行详细分析,并利用化学计量学方法和 ROAV 筛选对径山茶香气特性有显著贡献的关键挥发性成分,全面了解了径山茶中的挥发性化合物,解析了不同茶树品种制作的径山茶中的关键香气成分。

通过对 GC-IMS 的检测结果分析,发现关键挥发性成分中己醛二聚体显示出较高的含量和相对香气活性值 (ROAV),尤其是在迎霜样品中,表明其对样品的香气贡献显著。己醛具有青草气味^[25],广泛存在于茶叶和其他植物性食物中,与茶叶中清香的特征香气有关^[26]。2-庚酮在各样品中均有检测到,但其含量和 ROAV 值相对较低,表明其在径山茶中具有一定的香气贡献。2-庚酮具有果香和脂香特征,通常在发酵茶中香气贡献较为明显^[27]。研究表明,2-庚酮是清香型绿茶的特征性香气成分之一^[28],也存在于花香型绿茶中^[29]。3-甲基丁醛具有强烈的麦芽香和甜香^[30],在翠峰和径山 2 号样品中显示出较高的含量。(Z)-3-己烯醇对翠峰样品的香气贡献较大。

径山 1 号中,茉莉酸甲酯含量最高,茉莉酸甲酯是茶叶中兰花香的主要贡献者^[31]。在茶叶加工过程中由脂质降解产生^[32], α -亚麻酸可能是它的前体物质,在氧化作用下转化为茉莉酸,再通过茉莉酸羧基甲基转移酶进一步转化为茉莉酸甲酯^[33]。在翠峰和迎霜中,吲哚的含量较高。低浓度的吲哚表现出花香特征,吲哚常在茶叶加工的过程中大量积累,其中高温是增加吲哚含量的重要途径之一^[34]。在鸠坑种中,香叶醇的含量最高,其在该样品中对香气影响显著。香叶醇具有玫瑰香、甜香,是绿茶中的重要呈香物质之一^[35-36]。2-庚醇在径山 1 号和径山 2 号中含量较高。2-庚醇具有新鲜的草本植物香气,研究表明,2-庚醇在白茶香气的形成中起着重要作用^[37]。2-庚醇的含量较高可能是径山 1 号和径山 2 号具有明显的清香和嫩香的原因之一。

感官评价结果显示,本研究 5 个茶树品种制成的径山茶均展现出明显的“清香”特征。径山 1 号和径山 2 号还表现出不同程度的“嫩香”特性,与高品质径山茶“内质嫩香持久”的品质特征相符合。其中,径山 1 号中顺茉莉酮、庚醛和(Z)-3-己烯醇的含量较为丰富,而径山 2 号的特征挥发性化合物主要有 2-庚醇、茉莉酸甲酯、2-甲基丁醛和 2-庚酮,且含量高于其他样品。这些挥发性成分都具有较为明显的清香或花香特征,(Z)-3-己烯醇、顺茉莉酮、2-庚酮和茉莉酸甲酯的前体物质都是 α -亚麻酸^[25,38],在醇脱氢酶、丙二烯氧化物合成酶和脂肪氧化酶等的参与下,通过不同的代谢途径形成这些关键的挥发性香气。因此,这些含量较高的关键挥发性化合物可能与径山 1 号和径山 2 号茶树品种的独特性有关。此外,径山 1 号和径山 2 号中检测到的挥发性成分的数量较其他品种更多,是适制径山茶的优良品种。

以翠峰品种为原料制成的径山茶表现出清香带花香的品质特点,这可能是由于翠峰品种制成的径山茶其吲哚和芳樟醇的含量较高。吲哚被认为是绿茶中的重要香气物质,不仅在高温条件下由 L-色氨酸热裂解产生,还是一种茶树内源性挥发物^[39],在色氨酸吲哚裂解酶的作用下产生,低浓度下呈现花香和水果香^[35]。此外,香叶醇是鸠坑种径山茶中重要的香气活性成分,在茶树体内可以由香叶醇合成酶作用产生^[40],其含量与茶树品种的叶片大小存在一定关系^[25]。通过化学计量学和多元统计分析发现,虽然这 5 种径山茶在感官上都具有清香的特点,但形成其各自清香特征的物质基础可能有所不同。例如,迎霜品种制成的茶叶中具有清香特征的氧化柠檬烯和戊醛的含量较高^[28,41]。因此,径山茶独特的“清香”可能是在多种物质协同作用下形成的,在实际生产中可以根据径山茶的风味目标选择特定茶树品种,或通过拼合不同品种原料提

高径山茶品质。本研究通过解析不同茶树品种所制径山茶中关键差异挥发性成分，为径山茶生产中优质原料的选择提供理论依据，对实现高品质径山茶的精准加工和定向品质控制具有重要参考价值。

参考文献

- [1] 熊立瑰, 刘思慧, 黄建安, 等. 茶的抗病毒作用研究进展[J]. 茶叶科学, 2021, 41(2): 143-158.
Xiong L G, Liu S H, Huang J A, et al. The antiviral properties of tea [J]. Journal of Tea Science, 2021, 41(2): 143-158.
- [2] 俞蓉欣, 郑芹芹, 陈红平, 等. 儿茶素生物医用纳米材料研究进展[J]. 茶叶科学, 2022, 42(4): 447-462.
Yu R X, Zheng Q Q, Chen H P, et al. Recent advances in catechin biomedical nanomaterials [J]. Journal of Tea Science, 2022, 42(4): 447-462.
- [3] 徐伟, 俞蓉欣, 张相春, 等. 多酚自组装抗菌生物材料的构建及其应用进展[J]. 茶叶科学, 2024, 44(1): 1-15.
Xu W, Yu R X, Zhang X C, et al. Construction of polyphenol self-assembly antibacterial biomaterials and progress in their applications [J]. Journal of Tea Science, 2024, 44(1): 1-15.
- [4] 敖存, 余继忠, 黄海涛, 等. 不同茶树品种加工径山茶品质的比较研究[J]. 中国茶叶加工, 2013(2): 28-31, 41.
Ao C, Yu J Z, Huang H T, et al. Comparative study on the quality of Jingshan tea processed from different species [J]. China Tea Processing, 2013(2): 28-31, 41
- [5] 张汇源, 马宽, 高婧, 等. 不同等级径山茶特征香气成分分析[J]. 茶叶科学, 2024, 44(1): 101-18.
Zhang H Y, Ma K, Gao J, et al. Analysis of the major characteristic aroma compounds in different grades of Jingshan tea [J]. Journal of Tea science, 2024, 44(1): 101-18.
- [6] Wang B S, Yu M G, Tang Y, et al. Characterization of odor-active compounds in Dahongpao Wuyi Rock Tea (*Camellia sinensis*) by sensory-directed flavor analysis [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 123: 105612. doi: 10.1016/j.jfca.2023.105612.
- [7] Feng W Z, Zhou H, Xiong Z C, et al. Exploring the effect of different tea varieties on the quality of Lu'an Guapian tea based on metabolomics and molecular sensory science [J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101534. doi: 10.1016/j.fochx.2024.101534.
- [8] 全国原产地域产品标准化工作组. 地理标志产品 安吉白茶: GB/T 20354—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
National Regional Product Standardization Working Group. Product of geographical indication: Anji bai tea: GB/T 20354—2006 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [9] 全国原产地域产品标准化工作组. 地理标志产品 太平猴魁茶: GB/T 19698—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
National Regional Product Standardization Working Group. Product of geographical indication: Taiping houkui tea: GB/T 20354—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [10] 汪辉. 茶树品种优化配置在径山茶生产中的应用[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(8): 1528-1529.
Wang H. Application of tea variety optimization allocation in Jingshan tea production [J]. Zhejiang Agricultural Sciences, 2021, 62(8): 1528-1529.
- [11] 庞法松, 陈峰, 马春蕾, 等. 径山茶专用品种的选育[J]. 浙江农业科学, 2018, 59(7): 1114-1116.
Pang F S, Chen F, Ma C L, et al. Breeding of Jingshan tea cultivars [J]. Zhejiang Agricultural Sciences, 2018, 59(7): 1114-1116.
- [12] Wang Y J, Liu N F, Yu T Z, et al. The enhancement of flowery-like aroma in green tea under optimized processing conditions by sensory-directed flavor analysis [J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101427. doi: 10.1016/j.fochx.2024.101427.
- [13] Yue C, Cao H L, Zhang S R, et al. Aroma characteristics of Wuyi rock tea prepared from 16 different tea plant varieties [J]. Food Chemistry: X, 2023, 17: 100586. doi: 10.1016/j.fochx.2023.100586.
- [14] Rong Y T, Xie J L, Yuan H B, et al. Characterization of volatile metabolites in Pu-erh teas with different storage years by combining GC-E-Nose, GC-MS, and GC-IMS [J]. Food Chemistry: X, 2023, 18: 100693. doi: 10.1016/j.fochx.2023.100693.
- [15] Xiong Y, Zheng X F, Tian X H, et al. Comparative study of volatile organic compound profiles in aromatic and non-aromatic rice cultivars using HS-GC-IMS and their correlation with sensory evaluation [J]. LWT, 2024, 203: 116321. doi: 10.1016/j.lwt.2024.116321.

-
- [16] Ma M T, Chen Z Q, Huang B, et al. Characterizing the key aroma compounds of barley malt from different origins using GC-E-Nose, HS-SPME-GC-MS, and HS-GC-IMS [J]. Food Bioscience, 2024, 58: 103707. doi: 10.1016/j.fbio.2024.103707.
- [17] Wang Z, Hao W J, Wang J H, et al. Using GC-O-MS, GC-IMS, and chemometrics to investigate flavor component succession regularity in the Niulanshan Erguotou Baijiu brewing process [J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101353. doi: 10.1016/j.fochx.2024.101353.
- [18] Xu L R, Wang J X, Tian A L, et al. Characteristic volatiles fingerprints in olive vegetable stored at different conditions by HS-GC-IMS [J]. Food Chemistry: X, 2023, 18: 100707. doi: 10.1016/j.fochx.2023.100707.
- [19] Zhang H Y, Zhang J X, Liu S T, et al. Characterization of the key volatile compounds in longjing tea (*Camellia sinensis*) with different aroma types at different steeping temperatures by GC-MS and GC-IMS [J]. LWT, 2024, 200: 116183. doi: 10.1016/j.lwt.2024.116183.
- [20] The National Institute of Standards and Technology. NIST inorganic crystal structure database, NIST standard reference database [DB/OL]. [2024-06-10]. <https://webbook.nist.gov/chemistry>.
- [21] Xiao Y, Huang Y X, Chen Y L, et al. Discrimination and characterization of the volatile profiles of five Fu brick teas from different manufacturing regions by using HS-SPME/GC-MS and HS-GC-IMS [J]. Current Research in Food Science, 2022, 5: 1788-1807.
- [22] 中华全国供销合作总社. 茶叶感官审评方法: GB/T 23776—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
All China Federation of Supply and Marketing Cooperatives. Methodology for sensory evaluation of tea: GB/T 23776—2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [23] Liang Y L, Wang Z H, Zhang L Z, et al. Characterization of volatile compounds and identification of key aroma compounds in different aroma types of Rougui Wuyi rock tea [J]. Food Chemistry, 2024, 455: 139931. doi: 10.1016/j.foodchem.2024.139931.
- [24] Wang Y J, Huang L F, Deng G J, et al. The shaking and standing processing improve the aroma quality of summer black tea [J]. Food Chemistry, 2024, 454: 139772. doi: 10.1016/j.foodchem.2024.139772.
- [25] Yin P, Kong Y S, Liu P P, et al. A critical review of key odorants in green tea: Identification and biochemical formation pathway [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 129: 221-232.
- [26] Qin Z H, Pang X L, Chen D, et al. Evaluation of Chinese tea by the electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry: Correlation with sensory properties and classification according to grade level [J]. Food Research International, 2013, 53: 864-874.
- [27] Ma J Q, Wang Y J, Li J Y, et al. Aroma formation mechanism by the drying step during Congou black tea processing: analyses by HP-SPME and SAFE with GC-MS [J]. LWT, 2024, 198: 116019. doi: 10.1016/j.lwt.2024.116019.
- [28] Wang Q W, Xie J L, Wang L L, et al. Comprehensive investigation on the dynamic changes of volatile metabolites in fresh scent green tea during processing by GC-E-Nose, GC-MS, and GC × GC-TOFMS [J]. Food Research International, 2024, 187: 114330. doi: 10.1016/j.foodres.2024.114330.
- [29] Liu N F, Shen S S, Huang L F, et al. Revelation of volatile contributions in green teas with different aroma types by GC-MS and GC-IMS [J]. Food Research International, 2023, 169: 112845. doi: 10.1016/j.foodres.2023.112845.
- [30] Huang W J, Liu Q Y, Fu X X, et al. Fatty acid degradation driven by heat during ripening contributes to the formation of the “Keemun aroma” [J]. Food Chemistry, 2024, 451: 139458. doi: 10.1016/j.foodchem.2024.139458.
- [31] Feng Z H, Li Y F, Li M, et al. Tea aroma formation from six model manufacturing processes [J]. Food Chemistry, 2019, 285: 347-354.
- [32] Gan S Y, Chen Y Q, Zhao L, et al. Characterization of the aroma-active compounds in Xiaokeng green tea by three pretreatment methods combined with gas chromatography-olfactometry (GC-O) [J]. Food Research International, 2024, 187: 114359. doi: 10.1016/j.foodres.2024.114359.
- [33] Feng Z H, Li Y F, Zhang P, et al. Formation and isomerization of (Z)-methyl epijasmionate, the key contributor of the orchid-like aroma, during tea processing [J]. Food Research International, 2023, 172: 113186. doi: 10.1016/j.foodres.2023.113186.
- [34] Ho C T, Zheng X, Li S. Tea aroma formation [J]. Food Science and Human Wellness, 2015, 4(1): 9-27.
- [35] Zhu J C, Niu Y W, Xiao Z B. Characterization of the key aroma compounds in Laoshan green teas by application of odour activity value (OAV), gas chromatography-mass spectrometry-olfactometry (GC-MS-O) and comprehensive two-dimensional gas chromatography mass spectrometry (GC×GC-qMS) [J]. Food Chemistry, 2021, 339: 128136. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.128136.

-
- [36] Jiang G X, Xue R, Xiang J, et al. Dynamic changes in the aroma profiles and volatiles of *Enshi Yulu* tea throughout its industrial processing [J]. Food Chemistry, 2024, 458: 140145. doi: 10.1016/j.foodchem.2024.140145.
- [37] Li Y D, Wu T, Deng X J, et al. Characteristic aroma compounds in naturally withered and combined withered γ -aminobutyric acid white tea revealed by HS-SPME-GC-MS and relative odor activity value [J]. LWT, 2023, 176: 114467. doi: 10.1016/j.lwt.2023.114467.
- [38] Feng Z H, Li M, Li Y F, et al. Characterization of the orchid-like aroma contributors in selected premium tea leaves [J]. Food Research International, 2020, 129: 108841. doi: 10.1016/j.foodres.2019.108841.
- [39] Chen M J, Guo L, Zhou H W, et al. Absolute quantitative volatile measurement from fresh tea leaves and the derived teas revealed contributions of postharvest synthesis of endogenous volatiles for the aroma quality of made teas [J]. Applied Sciences, 2021, 11(2): 613. doi: 10.3390/app11020613.
- [40] Ho C T, Zheng X, Li S. Tea aroma formation [J]. Food Science and Human Wellness, 2015, 4: 9-27.
- [41] Wei Y M, Yin X C, Wu H T, et al. Improving the flavor of summer green tea (*Camellia sinensis* L.) using the yellowing process [J]. Food Chemistry, 2022, 388: 132982. doi: 10.1016/j.foodchem.2022.132982.