HS-SPME-GC-MS 分析武夷岩茶呈香挥发性物质

梁轶琳[1,2]，张灵枝[1,2]，戴浩民[1,2]，王治会[1,2]，
张黎剑[1]，荣杰峰[3]，岳 彬[4]，孙威江[*1,2]

（1. 福建农林大学 园艺学院，福建 福州 350002；2. 福建农林大学 海峡两岸特色作物安全生产省部共建协同创新中心，福建 福州 350002；3. 泉州海关综合技术服务中心，福建 泉州 362000；4. 六禾（武夷山）茶业有限公司，福建 武夷山 354300）

摘要：为探究 4 个茶树品种所制武夷岩茶风味特征、挥发性物质的差异及其品种香形成的物质基础，使用定量描述分析（quantitative description analysis，QDA）、顶空固相微萃取-气质联用（headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry，HS-SPME-GC-MS）、香气活力值（odor activity value，OAV）分析等方法结合化学计量学，对 4 个茶树品种所制武夷岩茶进行风味特征比对与挥发性物质差异性分析。结果表明，4 个茶树品种所制的武夷岩茶香气属性相似，花果香显，‘肉桂’品种所制武夷岩茶具有特殊且明显的桂皮香。使用化学计量学分析并以 VIP>1 且 OAV 可计算为准则，共计 14 种香气成分被认为是 4 个茶树品种所制武夷岩茶香气差异的原因。芳樟醇、β-紫罗酮、吲哚对 4 个茶树品种所制武夷岩茶花香的形成具有关键作用；β-环柠檬醛、香叶醇、苯乙醛对‘水仙’，芳樟醇氧化物 II 对‘瑞香’，(*E*)-2-壬烯醛对‘黄观音’所制武夷岩茶的花香呈现具有突出贡献；苯乙醇、己酸己酯、反式肉桂醛可能与‘肉桂’所制武夷岩茶的桂皮香形成有关。研究结果为武夷岩茶香型多元化及不同品种的品种香关键呈香物质基础研究提供理论参考。

关键词：武夷岩茶；茶树品种；呈香物质；关键挥发性成分

中图分类号：S 571.1　**文章编号：**1673-1689(2024)05-0110-12　**DOI：**10.12441/spyswjs.20230907005

Analysis of Aroma Volatile Compounds in Wuyi Rock Tea Based on HS-SPME-GC-MS

LIANG Yilin[1,2]，*ZHANG Lingzhi*[1,2]，*DAI Haomin*[1,2]，*WANG Zhihui*[1,2]，
ZHANG Lijian[1]，*RONG Jiefeng*[3]，*YUE Bin*[4]，*SUN Weijiang*[*1,2]

（1. College of Horticulture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Ministerial and Provincial Joint Innovation Centre for Safety Production of Cross-Strait Crops, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 3. Quanzhou Customs Comprehensive Technology Service Center, Quanzhou 362000, China; 4. Liuhe (Wuyishan) Tea Industry Company Limited, Wuyishan 354300, China）

Abstract: To investigate the flavor characteristics, volatile compound differences, and the material basis of aroma formation of special varieties in Wuyi rock tea produced from four tea plant varieties,

收稿日期：2023-09-07　**修回日期：**2023-11-21

基金项目：福建省科技计划项目（2021N3010，2022L3064）；福建张天福茶叶发展基金会科技创新基金项目（FJZTF01）。

*通信作者：孙威江（1964—），男，博士，教授，博士研究生导师，主要从事茶树种质资源与标准化研究。E-mail：swj8103@126.com

quantitative description analysis (QDA), headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS), and odor activity value (OAV) combined with chemometrics were employed. The comparative analysis of flavor characteristics and differences of volatile compounds in Wuyi rock tea produced from four tea plant varieties was conducted. The results showed that the aroma attributes of Wuyi rock tea produced from four tea plant varieties were similar, with obvious floral and fruity aromas, and the Wuyi rock tea produced by the 'Rougui' variety exhibited a unique and distinct cinnamon-like aroma. Chemometric analysis identified a total of 14 aroma components as the cause of the differences in the aroma of Wuyi rock tea produced from four tea plant varieties, using VIP＞1 and computable OAV as the criteria. Linalool, *β*-ionone, and indole played a key role in the formation of floral aroma in Wuyi rock tea produced from four tea plant varieties. *β*-Cyclocitral, geraniol and phenylacetaldehyde significantly contributed to the floral aroma in Wuyi rock tea produced from 'Shuixian', while linalool oxide II was responsible for 'Ruixiang', and *trans*-2-nonenal for 'Huangguanyin'. Phenylethyl alcohol, hexyl hexanoate, and *trans*-cinnamaldehyde might be related to the formation of cinnamon-like aroma in Wuyi rock tea produced from 'Rougui'. The results provide theoretical references for the diversification of aroma types of Wuyi rock tea and the material basis of key aroma compounds in Wuyi rock tea produced from different varieties.

Keywords: Wuyi rock tea, tea plant varieties, aroma volatiles, key volatile compounds

茶(*Camellia sinensis*(L.) O. Kuntze)是世界第二大无酒精饮料[1]，部分发酵的乌龙茶以醇厚滋味与馥郁香气闻名[2]。乌龙茶分为闽北乌龙、闽南乌龙、广东乌龙等，武夷岩茶作为闽北乌龙的代表，以独特“岩骨花香”久负盛名[3]。

武夷山茶树种质资源及新品种(系)武夷岩茶适制性的鉴定持续为人们所关注。有研究表明茶树品种‘紫鹃’适合制作武夷岩茶[4]，正白毫乌龙茶适制性较弱[5]。陈荣平分析了 6 个茶树单株的岩茶适制性，发现其均适制武夷岩茶[6]。李良清等在 14 个单株中筛选出 4 个具有适制优质武夷岩茶的单株[7]。曹士先等研究发现新品系‘金凤凰’所制武夷岩茶品质优良[8]。冯花等在 5 个茶树新品系中筛选出 4 个适制武夷岩茶品系[9]。鲜叶品种差异直接导致内源代谢产物差异[10]。不同鲜叶品种加工而成的成品茶化学成分与挥发性成分差异明显[11-12]。上述研究探究了不同茶树品种制武夷岩茶的可行性，但不同茶树品种所制武夷岩茶风味品质差异及‘肉桂’特殊品种香形成的物质基础仍不明确。

挥发性成分是茶叶中的一类次生代谢物，也是感官审评的重要指标，香气特征的呈现不仅与物质含量相关，更受到阈值的影响。茯砖茶中呈青草气的关键物质主要存在于去“金花”纯茶中，呈花香、木香、冬青香、蘑菇香的关键物质主要存在于“金花”中[13]。不同香气特征的白茶中主要特征挥发性成分存在差异[14]。品种对于呈香物质的影响也尤为突出，不同品种加工的‘遵义红’红茶中花果香物质成分具有差异[15]，上述研究证明茶叶呈香物质对茶叶香气特征的呈现具有关键作用，但形成不同品种武夷岩茶香气特征的呈香挥发性物质基础仍有待进一步挖掘。

茶树品种与武夷岩茶风味特征密切相关，‘水仙’‘黄观音’‘瑞香’等茶树良种所制武夷岩茶品质优异，广受青睐[9]。作者以‘肉桂’‘黄观音’‘瑞香’‘水仙’茶树品种所制武夷岩茶为实验对象，基于定量描述分析(QDA)构建香气剖面图，对样品香气成分进行检测，探究 4 个茶树品种所制武夷岩茶的风味特征差异，寻找对其品种香具有关键作用的挥发性成分，以期为武夷岩茶香型多元化研究提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 材料 实验所用武夷岩茶样品取自六禾(武夷山)茶业有限公司,样品由同一制茶师、同一时间(2022 年 5 月)、采用武夷岩茶传统加工工艺(晒青、做青、揉捻、干燥、烘焙)制成。‘肉桂’茶树品种所制武夷岩茶(RG)样品编号分别为 RG1、RG2、RG3,‘黄观音’茶树品种所制武夷岩茶样品编号为 HGY,‘瑞香’茶树品种所制武夷岩茶样品编号为 RX,‘水仙’茶树品种所制武夷岩茶样品编号为 SX。

1.1.2 试剂 C_7~C_{40} 正构烷烃标准品:美国 o2si 公司;癸酸乙酯:美国 Sigma-Aldrich 公司。

1.2 仪器与设备

TRACE 1300 ISDDQ 气相色谱-质谱联用仪:美国 Thermo Fisher Scientific 公司;色谱柱 DB-5MS(30 m×0.25 mm,0.25 μm):美国 Agilent 公司;手动 SPME 进样器、65 μm PDMS/DVB 萃取头:美国 Supeclo 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 分属性尺度评分法 冲泡方法与评判标准参照 GB/T 23776—2018《茶叶感官审评方法》,由福建农林大学园艺学院 7 名专业审评员(3 名男性和 4 名女性)对茶叶香气特征进行评价。讨论后选取花香、果香、辛香、桂皮香、火功香 5 个香气属性进行定量描述分析。采取 7 点强度尺度法进行评分,强度尺度为 0~7(0 为未察觉,1 为极弱,2 为弱,3 为较弱,4 为一般,5 为较强,6 为强,7 为极强)。各样本随机审评 3 次,取平均值为最终得分。

1.3.2 挥发性成分检测方法

1)前处理条件 首次进行香气萃取时,将纤维萃取头插入 GC-MS 仪器进样口,于 250 ℃条件下老化 30 min,待用;准确称取经磨样机磨碎的茶样 1.0 g 于 20 mL 顶空瓶中,加入 5 mL 沸水后,立即加盖密封,置于 70 ℃电加热器中平衡 10 min,然后插入已老化的纤维萃取头,于茶样上方顶空吸附 40 min,立即向 GC-MS 仪器进样,解吸 5 min 后,萃取下一个样品。每个样品重复检测 3 次。

2)GC-MS 条件 GC 条件:色谱柱为 DB-5MS(30 m×0.25 mm,0.25 μm),载气为氦气(纯度>99.999%)。升温程序:起始温度 50 ℃,保持 5 min,以 5 ℃/min 升至 210 ℃,保持 3 min,以 15 ℃/min 升至 230 ℃,保持 5 min。MS 条件:离子源为 EI,电离能为 70 eV,离子源温度为 230 ℃;质谱传输线温度为 250 ℃;扫描范围为 m/z 45~500。

3)挥发性成分定性 根据总离子图中各色谱峰的质谱信息,经 NIST11 标准质谱库进行串联检索和人工解析,结合保留时间(RT)、保留指数(RI),并参考相关文献辅助定性[16-20]。

4)挥发性成分定量 以癸酸乙酯为内标,使用内标法计算香气成分质量分数,公式如下:

$$w_{voc}=\frac{S_{voc}\times w_i}{S_i} \quad (1)$$

式中:w_{voc} 为挥发性成分的质量分数,μg/kg;w_i 为内标的质量分数,μg/kg;S_{voc} 为挥发性成分的峰面积;S_i 为内标的峰面积。

1.3.3 OAV 计算 香气活力值是指一种化合物的质量分数与其阈值的比值,通常认为 OAV>1 的物质对样品香气有突出贡献,其计算公式如下:

$$O_{AV}=\frac{w_C}{T} \quad (2)$$

式中:O_{AV} 为挥发性成分的气味活度值;w_C 为挥发性成分的质量分数,μg/kg;T 为其对应的阈值,μg/kg。

1.4 数据分析

使用 SPSS 25.0 软件进行单因素方差分析;使用 MetaboAnalyst 5.0 与 SIMCA 14.1 进行多元统计分析;使用 Excel 2019、TBtools 进行雷达图和热图绘制与处理;使用 Cytoscape v3.9.1 进行相关网络图绘制。

2 结果与分析

2.1 不同武夷岩茶定量描述分析审评

4 个茶树品种所制武夷岩茶 QDA 审评结果如图 1 所示。HGY、RX 和 SX 香气属性相似,花香、果香和火功香明显;RG1 以花香、火功香为主;RG2 桂皮香、辛香显著,火功香较弱;RG3 以果香、火功香为主;‘肉桂’所制武夷岩茶香气馥郁,明显差异于其他 3 个茶树品种所制武夷岩茶,具有明显花果香且带有辛香和桂皮香,这与前人结论一致[16,21]。RG 主要香气特征为花果香带桂皮香,RG2 桂皮香最为明显,RG3 桂皮香最弱,主要呈现果香和火功香,HGY 和 RX 则以花果香为主。茶叶焙火过程中发生的美拉德反应会产生诸多香气化合物,丰富武夷岩茶香气;适度焙火能够改善‘肉桂’所制武夷岩茶的

香气品质，使桂皮香更加明显[22-23]。本研究中‘肉桂’所制武夷岩茶均具有火功香、桂皮香，推测是焙火工艺适度所致。

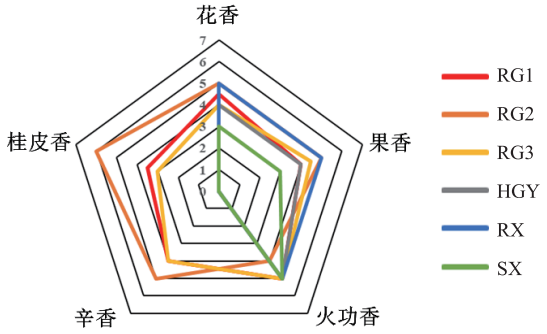


图 1　不同茶树品种所制武夷岩茶香气描述

Fig. 1　Aroma description of Wuyi rock tea produced from different tea plant varieties

2.2　不同茶树品种所制武夷岩茶挥发性成分分析

2.2.1　不同茶树品种所制武夷岩茶香气成分特征分析　使用顶空固相微萃取-气质联用(HS-SPME-GC-MS)技术对样品进行挥发性成分检测，共鉴定筛选出 49 种挥发性成分(见表 1)。49 种挥发性成分中含醇类 13 种、醛类 12 种、酯类 10 种、酮类 7 种、萜烯类 3 种、杂环类 2 种和其他物质 2 种，4 个茶树品种所制武夷岩茶香气成分以醇类为主，其次为醛类、酯类。

对 4 个茶树品种所制武夷岩茶样品挥发性成分进行热图和层次聚类分析，结果如图 2 所示。SX 单独为一类，RG1 与 RG2 聚为一类，RG3、HGY 与 RX 聚为一类。RG1 与 RG2 的桂皮香特征明显，RG3、HGY 与 RX 以花果香为主，SX 与其他茶树品种所制样品差异明显。

苯乙醛、β-环柠檬醛、(*E*)-2-十六烯醛、臧红花醛、新植二烯、β-紫罗酮、吲哚、十七烷和十九烷在 SX 中质量分数明显高于其他茶树品种所制样品，可能是其香气特征形成的关键物质。芳樟醇氧化物 II 仅在 RX 中检测到，可能与其花果香有关；HGY 中芳樟醇、法尼醇、金合欢醇质量分数高于其他茶树品种所制样品，推测其为花香的来源；RG1 中(*Z*)-7-十六碳烯醛、橙花醛、二氢猕猴桃内酯质量分数较高，RG2 中二氢芳樟醇、苯乙醇、反式-橙花叔醇、异植物醇、香叶基丙酮、(*E*)-β-金合欢烯质量分数相对高于其他茶树品种所制样品。柠檬醛、反式肉桂醛、苯甲酸叶醇酯、苯甲酸己酯同时出现在 RG1 与 RG2 中，且质量分数明显高于其他茶树品种所制样品，推测与桂皮香形成有关。

表 1　不同茶树品种所制武夷岩茶挥发性成分定性与定量分析

Table 1　Qualitative and quantitative analysis of volatile components in Wuyi rock tea produced from different tea plant varieties

类别	CAS#	物质名称	RT/min	RI	挥发性成分质量分数/(μg/kg)						定性方式
					RG1	RG2	RG3	HGY	RX	SX	
醇类(13)	5989-33-3	芳樟醇氧化物 II	10.18	1 032	0^{b}	0^{b}	0^{b}	0^{b}	61.38±4.25^{a}	0^{b}	MS/RI
	78-70-6	芳樟醇	11.67	1 073	510.29±28.29^{b}	475.65±1.39^{b}	290.58±53.16^{c}	703.68±65.16^{a}	319.15±12.54^{c}	446.00±56.67^{b}	MS/RI
	29957-43-5	二氢芳樟醇	11.81	1 077	1 043.31±13.04^{b}	1 452.26±3.49^{a}	892.61±217.91^{bc}	648.07±64.52^{c}	607.94±19.36^{c}	1 083.03±222.76^{b}	MS/RI
	60-12-8	苯乙醇	12.01	1 083	487.39±48.45^{a}	496.68±20.98^{a}	387.17±141.68^{ab}	272.59±30.45^{b}	279.64±18.47^{b}	275.76±47.21^{b}	MS/RI
	106-24-1	香叶醇	17.12	1 242	513.54±4.86^{b}	496.35±14.13^{b}	287.39±51.68^{a}	301.12±11.73^{a}	268.18±21.11^{a}	535.75±53.86^{b}	MS/RI
	4602-84-0	法尼醇	22.19	1 424	3.81±3.11^{c}	6.77±5.52^{c}	3.87±2.74^{c}	27.76±0.63^{a}	15.80±2.89^{b}	0^{c}	MS
	40716-66-3	反式-橙花叔醇	25.61	1 561	2 598.99±83.74^{c}	3 861.76±72.69^{a}	2 680.10±389.30^{c}	3 292.08±195.17^{b}	3 238.28±297.74^{b}	2 228.31±99.62^{c}	MS/RI
	19903-73-2	(-)-异雪松醇	26.62	1 603	118.04±5.53^{ab}	143.05±4.39^{a}	76.48±7.48^{b}	137.61±3.20^{a}	74.69±4.73^{b}	69.26±51.84^{b}	MS/RI

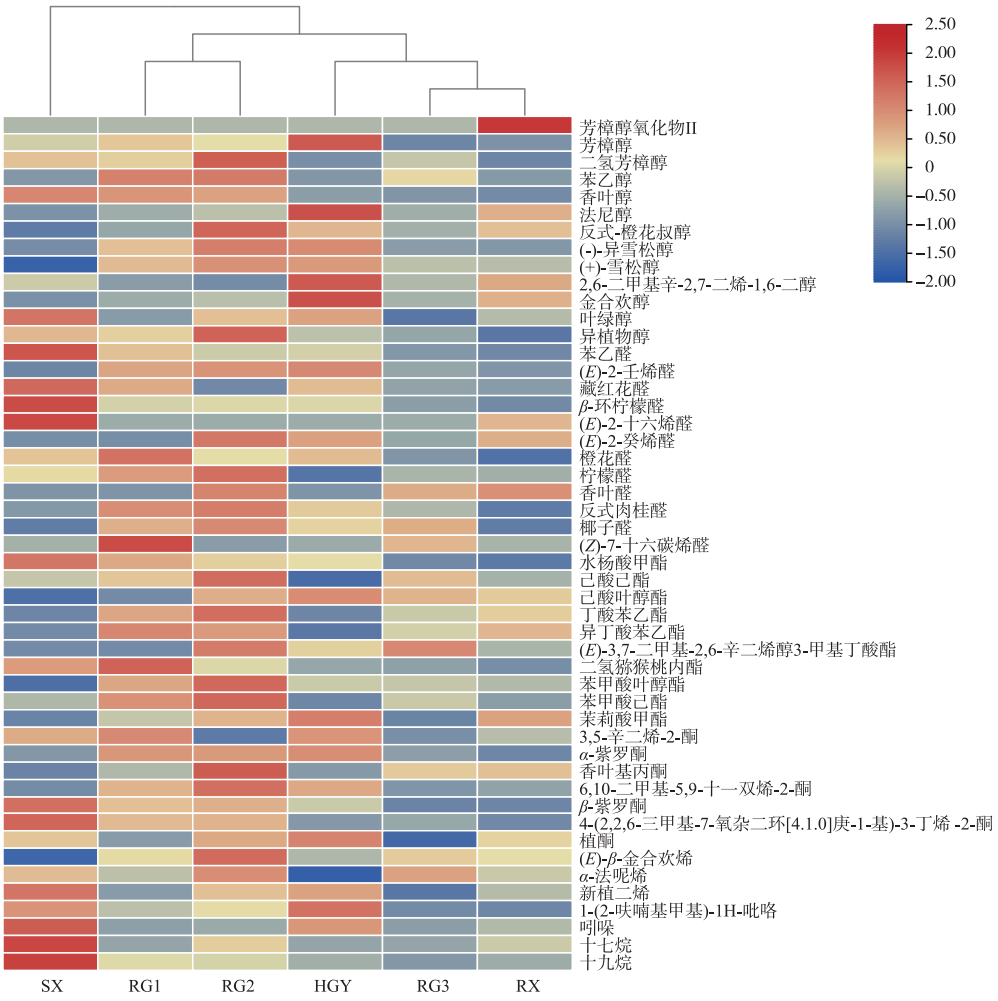
续表 1

类别	CAS#	物质名称	RT/min	RI	挥发性成分质量分数/(μg/kg)						定性方式
					RG1	RG2	RG3	HGY	RX	SX	
醇类（13）	77-53-2	(+)-雪松醇	26.62	1 603	118.04±5.53^{b}	143.05±4.39^{a}	76.48±7.48^{c}	137.61±3.20^{a}	74.69±4.73^{c}	0^{d}	MS/RI
	64142-78-5	2,6-二甲基辛-2,7-二烯-1,6-二醇	28.00	1 663	0.34±0.28^{b}	0^{b}	0.96±0.68^{ab}	3.93±1.58^{a}	2.49±1.88^{ab}	1.34±1.89^{ab}	MS
	106-28-5	金合欢醇	29.11	1 712	3.81±3.11^{c}	6.77±5.52^{c}	4.88±3.62^{c}	27.76±0.63^{a}	15.80±2.89^{b}	0^{c}	MS/RI
	102608-53-7	叶绿醇	31.74	1 835	64.38±4.58^{c}	107.28±2.98^{ab}	45.05±7.15^{c}	118.08±20.34^{ab}	80.29±4.91^{bc}	136.42±35.90^{a}	MS
	505-32-8	异植物醇	33.96	1 944	25.03±1.41^{ab}	44.16±6.49^{a}	10.57±7.96^{b}	16.66±23.56^{ab}	0^{b}	28.82±20.95^{ab}	MS/RI
醛类（12）	122-78-1	苯乙醛	8.71	992	346.75±11.24^{b}	286.48±11.90^{b}	203.39±49.12^{c}	294.23±16.45^{b}	181.74±4.84^{c}	488.51±38.71^{a}	MS/RI
	18829-56-6	(*E*)-2-壬烯醛	14.03	1 143	46.91±5.92^{a}	51.82±0.35^{a}	11.29±15.97^{b}	54.77±10.47^{a}	5.74±8.12^{b}	0^{b}	MS/RI
	116-26-7	藏红花醛	15.26	1 181	164.81±4.05^{ab}	85.18±69.55^{c}	101.74±16.77^{bc}	155.96±17.29^{abc}	97.35±5.56^{bc}	200.88±16.36^{a}	MS/RI
	432-25-7	β-环柠檬醛	15.95	1 202	95.24±4.42^{b}	97.91±0.26^{b}	70.07±9.67^{c}	97.56±12.58^{b}	60.83±3.56^{c}	157.33±12.42^{a}	MS/RI
	22644-96-8	(*E*)-2-十六烯醛	17.47	1 254	0^{c}	0^{c}	0^{c}	0^{c}	22.67±10.09^{b}	49.23±5.99^{a}	MS
	3913-81-3	(*E*)-2-癸烯醛	17.49	1 254	0^{c}	91.75±4.01^{a}	14.67±20.75^{bc}	71.77±52.41^{a}	65.24±7.14^{ab}	0^{c}	MS/RI
	106-26-3	橙花醛	17.63	1 259	69.35±4.88^{a}	39.50±32.25^{ab}	13.64±19.28^{b}	47.78±4.58^{ab}	0^{b}	45.67±32.30^{ab}	MS/RI
	5392-40-5	柠檬醛	17.63	1 259	31.69±25.88^{a}	39.50±32.25^{a}	13.64±19.28^{a}	0^{a}	12.48±17.65^{a}	22.55±31.88^{a}	MS
	141-27-5	香叶醛	17.64	1 259	0^{b}	40.95±33.44^{a}	31.50±24.02^{ab}	0^{b}	38.07±0.98^{ab}	0^{b}	MS/RI
	14371-10-9	反式肉桂醛	17.69	1 261	263.07±7.17^{ab}	286.50±43.24^{a}	100.58±71.28^{bcd}	185.27±145.36^{abc}	0^{d}	50.84±71.90^{cd}	MS/RI
	104-61-0	椰子醛	20.28	1 353	34.48±28.15^{a}	42.38±34.61^{a}	34.82±24.91^{a}	27.56±38.98^{a}	0^{a}	0^{a}	MS/RI
	56797-40-1	(*Z*)-7-十六碳烯醛	28.16	1 640	1.91±1.56^{a}	0.05±0.04^{b}	0.99±0.74^{ab}	0.19±0.27^{ab}	0.29±0.32^{ab}	0.25±0.35^{ab}	MS
酯类（10）	119-36-8	水杨酸甲酯	15.00	1 173	404.13±7.93^{b}	357.99±7.91^{bc}	195.65±35.63^{d}	338.80±23.89^{c}	167.49±4.70^{d}	478.61±41.40^{a}	MS/RI
	6378-65-0	己酸己酯	21.12	1 383	380.63±6.11^{ab}	494.47±12.52^{a}	391.77±72.02^{ab}	165.33±21.78^{c}	283.73±16.83^{bc}	316.52±115.90^{b}	MS/RI
	31501-11-8	己酸叶醇酯	20.96	1 377	355.28±11.63^{bc}	576.73±63.24^{a}	567.92±122.25^{a}	627.98±141.51^{a}	537.19±31.92^{b}	301.91±68.35^{c}	MS/RI
	103-48-0	异丁酸苯乙酯	22.47	1 435	84.37±3.67^{a}	76.47±32.42^{a}	45.27±32.33^{ab}	0^{c}	65.50±4.23^{a}	10.20±14.42^{bc}	MS
	103-52-6	丁酸苯乙酯	22.48	1 435	84.37±3.67^{b}	116.35±0.15^{a}	45.27±32.33^{c}	0^{d}	65.50±4.23^{bc}	0^{d}	MS

续表 1

类别	CAS#	物质名称	RT/min	RI	挥发性成分质量分数/(μg/kg)						定性方式
					RG1	RG2	RG3	HGY	RX	SX	
酯类（10）	109-20-6	(*E*)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醇 3-甲基丁酸酯	23.15	1 461	2.73±2.23^{a}	39.07±31.90^{a}	36.69±25.98^{a}	23.80±33.58^{a}	12.57±16.19^{a}	2.71±3.83^{a}	MS
	17092-92-1	二氢猕猴桃内酯	24.62	1 520	225.71±12.45^{a}	146.04±4.18^{bc}	103.92±26.36^{c}	107.28±19.68^{c}	88.88±22.72^{c}	188.21±49.35^{ab}	MS/RI
	25152-85-6	苯甲酸叶醇酯	25.78	1 568	96.65±0.52^{b}	113.24±3.49^{a}	76.72±9.68^{c}	78.16±4.37^{c}	73.20±4.49^{c}	48.56±3.54^{d}	MS/RI
	6789-88-4	苯甲酸己酯	25.98	1 576	71.79±0.40^{b}	85.27±1.80^{a}	44.48±5.68^{c}	20.75±1.67^{e}	28.57±1.96^{de}	38.44±12.95^{cd}	MS
	1211-29-6	茉莉酸甲酯	27.44	1 639	37.21±2.59^{ab}	44.45±1.74^{a}	28.08±7.60^{b}	50.31±6.40^{a}	46.16±10.34^{a}	27.96±1.06^{b}	MS
酮类（7）	30086-02-3	3,5-辛二烯-2-酮	11.35	1 060	187.76±0.61^{a}	0^{c}	25.03±35.40^{c}	176.36±10.55^{a}	78.27±4.50^{b}	155.58±4.95^{c}	MS/RI
	127-41-3	α-紫罗酮	22.00	1 416	129.47±3.65^{a}	128.78±0.12^{a}	95.68±12.91^{a}	131.60±13.36^{a}	88.58±1.85^{a}	93.72±66.47^{a}	MS/RI
	3796-70-1	香叶基丙酮	22.70	1 444	92.92±75.87^{ab}	213.03±0.87^{a}	135.02±12.86^{ab}	66.02±93.37^{b}	141.61±2.25^{ab}	46.65±65.97^{b}	MS/RI
	689-67-8	6,10-二甲基-5,9-十一双烯-2-酮	22.71	1 444	185.39±0.37^{b}	213.03±0.87^{a}	135.02±12.86^{c}	189.60±19.74^{b}	141.61±2.25^{c}	130.65±8.05^{c}	MS/RI
	79-77-6	β-紫罗酮	23.46	1 473	401.44±4.87^{b}	415.51±3.05^{b}	272.12±32.55^{d}	354.68±18.06^{c}	273.42±16.43^{d}	477.90±30.82^{a}	MS/RI
	23267-57-4	4-(2,2,6-三甲基-7-氧杂二环[4.1.0]庚-1-基)-3-丁烯-2-酮	23.54	1 477	93.38±5.76^{b}	95.43±8.19^{b}	65.43±16.05^{c}	60.48±3.66^{c}	54.99±9.95^{c}	118.15±4.25^{a}	MS
	502-69-2	植酮	31.84	1 840	98.82±3.32^{bc}	148.88±1.36^{a}	72.08±11.66^{c}	163.47±30.19^{a}	134.07±21.77^{ab}	138.66±13.39^{c}	MS
萜烯类(3)	18794-84-8	(*E*)-β-金合欢烯	22.84	1 449	58.91±0.30^{b}	99.47±1.50^{a}	63.27±8.22^{b}	39.83±28.30^{b}	57.73±5.45^{b}	0^{c}	MS/RI
	502-61-4	α-法呢烯	24.17	1 501	93.22±7.13^{ab}	170.19±9.42^{a}	155.49±26.08^{a}	0^{b}	100.31±11.57^{a}	137.98±102.08^{a}	MS/RI
	504-96-1	新植二烯	31.74	1 835	64.38±4.58^{c}	107.28±2.98^{ab}	45.05±7.15^{c}	118.08±20.34^{ab}	80.29±4.91^{bc}	136.42±35.90^{a}	MS/RI
杂环类(2)	1438-94-4	1-(2-呋喃基甲基)-1H-吡咯	14.57	1 160	111.63±0.64^{b}	127.57±0.32^{b}	84.17±13.53^{c}	170.27±14.62^{a}	82.44±1.38^{c}	155.14±8.46^{a}	MS
	120-72-9	吲哚	18.29	1 281	621.05±19.59^{c}	671.17±20.66^{c}	610.74±130.20^{c}	1 253.64±78.63^{b}	768.22±74.59^{c}	1 534.43±49.72^{a}	MS/RI
其他（2）	629-78-7	十七烷	21.51	1 397	0^{b}	43.37±35.41^{b}	0^{b}	0^{b}	24.23±34.26^{b}	112.32±41.34^{a}	MS
	629-92-5	十九烷	31.00	1 799	46.93±38.32^{ab}	43.37±35.41^{ab}	14.31±20.24^{b}	25.93±36.68^{b}	24.23±34.26^{b}	112.32±41.34^{a}	MS

注：MS 表示质谱法；RI 表示保留指数法；同行中不同字母表示组间差异显著。



颜色越红表示质量分数越高,颜色越蓝表示质量分数越低。

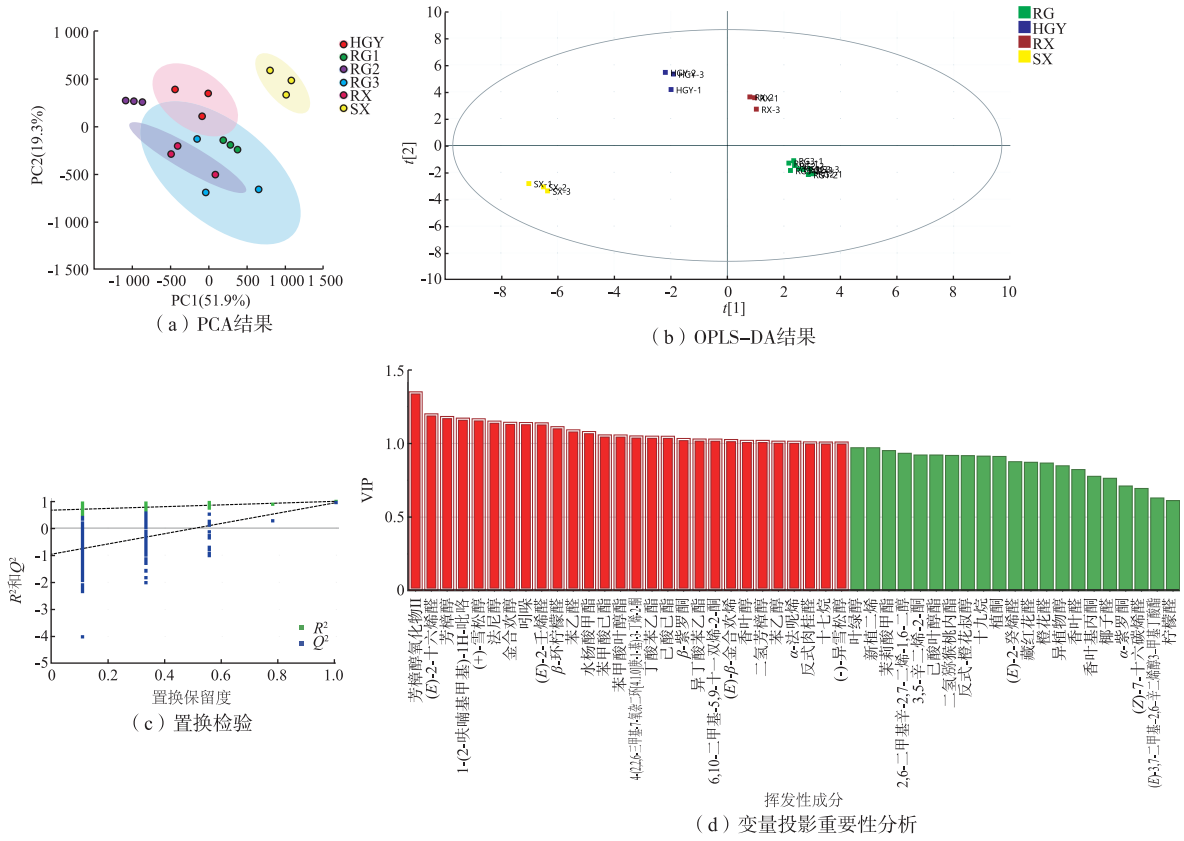
图 2　不同茶树品种所制武夷岩茶挥发性成分层次聚类热图

Fig. 2　Hierarchical clustering heat map of volatile components in Wuyi rock tea produced from different tea plant varieties

2.2.2　不同茶树品种所制武夷岩茶关键挥发性成分分析　以 49 个挥发性成分作因变量，对 4 个茶树品种所制武夷岩茶进行主成分分析(PCA),PC1 和 PC2 的方差贡献率分别为 51.9%、19.3%,累计方差贡献率为 71.2%，可以较有效地反映不同样品间的关系,结果如图 3(a)所示。4 个茶树品种所制武夷岩茶区分较为明显,RG3 与 RX、HGY、RG1 均有一定重合,PCA 结果与层次聚类及感官描述结果一致。

为了明确 4 个茶树品种所制样品之间的关键差异挥发性物质,针对 4 个茶树品种所制样品建立 OPLS-DA 模型(见图 3(b)),$R^2_{x(cum)}$=0.869,$R^2_{y(cum)}$=0.991,$Q^2_{(cum)}$=0.904,R^2 和 Q^2 均超过 0.5,表示模型拟合结果可接受[24]。经过 200 次置换检验,Q^2 回归线与纵轴的相交点小于零，说明模型不存在过拟合,模型验证有效,见图 3(c)。共有 28 种挥发性成分对 4 个茶树品种所制武夷岩茶的区分起重要作用(VIP > 1),见图 3(d)。

2.2.3　不同茶树品种所制武夷岩茶呈香挥发性成分分析　OAV>1 的挥发性成分被认为对样品香气形成有贡献,通过查阅相关资料[25],不同茶树品种所制武夷岩茶的 28 种差异挥发性物质中 14 种物质的阈值被查到。结合香气特征进行进一步分析,挖掘对不同茶树品种所制武夷岩茶香气具有特殊呈香贡献的挥发性物质,28 种关键挥发性物质中 25 种具有不同的香气特征,对不同茶树品种所制武夷岩茶特殊香型的呈香具有关键作用(见表 2)。



（a）PCA结果　（b）OPLS-DA结果

（c）置换检验　（d）变量投影重要性分析

图 3　不同茶树品种所制武夷岩茶间主要香气成分 PCA 及 OPLS-DA

Fig. 3　PCA and OPLS-DA of main aroma compounds in Wuyi rock tea produced from different tea plant varieties

通过计算 14 种已知阈值的关键化合物的 OAV，发现不同茶树品种所制武夷岩茶的呈香挥发性成分（VIP>1 且 OAV>1）有所差异，其中‘肉桂’所制样品含 9 种，‘黄观音’所制样品含 9 种，‘瑞香’所制样品含 8 种，‘水仙’所制样品含 8 种。‘肉桂’与‘黄观音’所制样品呈香挥发性成分数量一致，且物质相同，‘瑞香’与‘水仙’所制样品中呈香挥发性成分数量虽一致，但物质有所不同，如（*E*）-2-壬烯醛在‘水仙’所制样品中并未检测到，故无法计算 OAV，1-（2-呋喃基甲基）-1H-吡咯在‘水仙’所制样品中 OAV 为 1.55，但在‘瑞香’所制样品中仅为 0.82。水杨酸甲酯由于较低的阈值，在 4 个茶树品种所制武夷岩茶中 OAV 较高，法尼醇、己酸己酯、苯乙醇和反式肉桂醛由于阈值较高，故 OAV 较小。苯乙醇、己酸己酯是两个高阈值物质，呈香特征分别为玫瑰花香和草木、水果香，在 RG 中 OAV 大于其他品种，推断可能与 RG 桂皮香形成有关。芳樟醇（花香、柑橘）和（*E*）-2-壬烯醛（花香、柑橘）在 HGY 中远高于其他茶树品种所制样品，对 HGY 的花香具有贡献。芳樟醇氧化物 II（花香、木质）仅在 RX 中检测到，但 OAV 较低（0.61），可能对 RX 的花香具有关键作用。吲哚（花香）、*β*-紫罗酮（花香）、*β*-环柠檬醛（花香）和香叶醇（花果香）在 SX 中 OAV 高于其他 3 个茶树品种所制样品，推断是 SX 木质、花果香的关键挥发性物质。

大多差异挥发性物质同时具有多种香气特征，说明武夷岩茶馥郁香气是在多种物质交互作用下形成的[26-27]。吲哚是乌龙茶中相对有效的气味物质[28]，乌龙茶做青过程中连续的机械损伤会使吲哚含量显著增加[29]，吲哚是武夷岩茶花香形成的关键物质。反式肉桂醛为樟科樟属植物肉桂（*Cinnamomum cassia* Presl）和肉桂精油中主要的挥发性成分，香气特征呈现出桂皮的味道[30-31]，可能对‘肉桂’所制武夷岩茶桂皮香具有特殊贡献。

2.3　不同茶树品种所制武夷岩茶感官特征与滋味及香气相关性

将 14 个 VIP>1、能够计算 OAV 且具有香气特征的关键挥发性化合物与感官特征进行相关性分析，绘制相关网络图（见图 4）。*β*-环柠檬醛、苯乙醛对果香呈负相关，己酸己酯对辛香和桂皮香呈正相

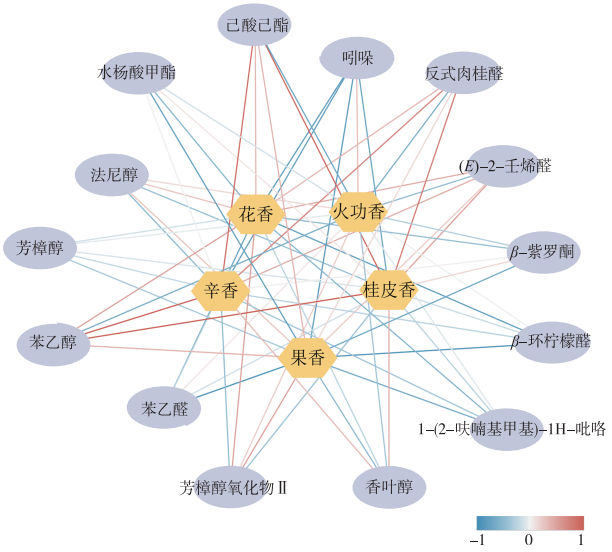
表 2　不同茶树品种所制武夷岩茶茶香关键成分 OAV

Table 2　OAV of key aroma components in Wuyi rock tea produced from different tea plant varieties

序号	挥发性物质	VIP 值	阈值/(μg/kg)	OAV				香气特征
				RG	HGY	RX	SX	
1	芳樟醇氧化物 II	1.368 89	100	ND	ND	0.61	ND	泥土、花香、木质
2	(*E*)-2-十六烯醛	1.246 53	—	—	—	—	—	—
3	芳樟醇	1.206 24	0.22	1 934.12	3 198.56	1 450.68	2 027.28	柑橘、花香、木质
4	1-(2-呋喃基甲基)-1H-吡咯	1.206 88	100	1.08	1.70	0.82	1.55	塑料、咖啡、蔬菜
5	(+)-雪松醇	1.210 12	—	—	—	—	—	雪松木质、甜
6	法尼醇	1.171 87	1 000	0.004 8	0.027 8	0.015 8	0	当归花香
7	金合欢醇	1.146 02	—	—	—	—	—	木槿花
8	吲哚	1.193 50	40	15.86	31.34	19.21	38.36	花香
9	(*E*)-2-壬烯醛	1.155 25	0.001 5	24 449.28	36 514.33	3 828.38	ND	柑橘、花香、木质
10	*β*-环柠檬醛	1.164 54	30	2.92	3.25	2.03	5.24	藏红花、玫瑰
11	苯乙醛	1.148 49	6.3	44.27	46.70	28.85	77.54	甜花香
12	水杨酸甲酯	1.129 80	0.071	4 496.56	4 771.79	2 358.99	6 741.03	薄荷
13	苯甲酸己酯	1.107 97	—	—	—	—	—	新鲜、木本
14	苯甲酸叶醇酯	1.110 09	—	—	—	—	—	新鲜、兰花
15	4-(2,2,6-三甲基-7-氧杂二环[4.1.0]庚-1-基)-3-丁烯-2-酮	1.094 11	—	—	—	—	—	浆果、紫罗兰
16	丁酸苯乙酯	1.072 31	—	—	—	—	—	甜花香、草莓
17	己酸己酯	1.071 10	6 400	0.07	0.03	0.04	0.05	草本、水果
18	*β*-紫罗酮	1.073 54	3.5	103.72	101.34	78.12	136.54	花香
19	异丁酸苯乙酯	1.011 49	—		—	—	—	花香、玫瑰香
20	6,10-二甲基-5,9-十一双烯-2-酮	1.067 20	—	—	—	—	—	玫瑰、清新、果香
21	(*E*)-*β*-金合欢烯	1.072 53	—	—	—	—	—	木质、柑橘
22	香叶醇	1.041 14	6.6	65.52	45.62	40.63	81.17	甜花果香、玫瑰、柑橘
23	二氢芳樟醇	1.053 96	—	—	—	—	—	霉味
24	苯乙醇	1.037 46	546.23	0.84	0.50	0.51	0.50	玫瑰花香
25	*α*-法呢烯	1.006 72	—	—	—	—	—	柑橘、草本、佛手柑
26	反式肉桂醛	1.020 66	6 000	0.04	0.03	ND	0.01	肉桂
27	十七烷	1.063 96	—	—	—	—	—	—
28	(-)-异雪松醇	1.013 38	—	—	—	—	—	—

注:—表示 OAV 无法计算或无香气特征;ND 表示未检出。

关,与苯乙醇呈显著正相关。结合挥发性成分质量分数与 VIP 值、OAV 分析,芳樟醇、*β*-紫罗酮和吲哚对 4 个茶树品种所制武夷岩茶的花香具有关键作用,*β*-环柠檬醛、香叶醇、苯乙醛是 SX 果香较弱的原因, 芳樟醇氧化物 II 对 RX 的花香具有关键作用,(*E*)-2-壬烯醛对 HGY 的花香形成有贡献,己酸己酯、苯乙醇和反式肉桂醛对 RG 的桂皮香形成具有贡献。前文中推断焙火可能与'肉桂'所制武夷岩茶的桂皮香形成有关,己酸己酯、苯乙醇与辛香、桂皮香呈正相关,但与火功香呈负相关,说明高程度焙火加强了'肉桂'武夷岩茶的火功香,而适度焙火有利于桂皮香形成[32]。



六边形代表香气属性，椭圆代表香气成分；红线表示正相关，蓝线表示负相关，颜色越深表示相关性越强。

图 4　不同茶树品种所制武夷岩茶关键挥发性成分与感官特征网络相关图

Fig. 4　Correlation network between different key volatile components and sensory characteristics of Wuyi rock tea produced from different tea plant varieties

2.4　讨论

相同工艺条件下，鲜叶品种直接决定内源物质基础，进而导致成品茶风味品质差异。本研究中以 4 个适制武夷岩茶的茶树品种所制武夷岩茶成品茶为研究对象，其中‘肉桂’所制成品茶由于香气馥郁且香型丰富，选择了桂皮香、花香、果香突出的 3 个样品，使用感官定量描述分析评价其风味特征，HS-SPME-GC-MS 技术检测其挥发性成分，并结合化学计量学及 OAV，综合判定筛选出对 4 个茶树品种所制武夷岩茶具有关键呈香作用的物质。

感官定量描述分析发现 4 个茶树品种所制武夷岩茶“岩骨花香”特征明显，均具有不同程度的花香，其中‘肉桂’所制武夷岩茶具有特殊且明显的桂皮香与辛香。结合化学计量学，发现 4 个茶树品种所制武夷岩茶虽然感官特征上均具有花香，但形成其各自花香的物质基础有所不同，其中花香型‘肉桂’所制武夷岩茶与其他茶树品种所制样品均有一定程度的重叠，SX 中苯乙醛、β-环柠檬醛、(*E*)-2-十六烯醛、臧红花醛、新植二烯、β-紫罗酮、吲哚、十七烷和十九烷质量分数明显高于其他茶树品种所制样品，芳樟醇氧化物 II 仅在 RX 中检测到，HGY 中芳樟醇、法尼醇、金合欢醇质量分数高于其他茶树品种所制样品，RG1 和 RG2 桂皮香较为明确，两个样品中柠檬醛、反式肉桂醛、苯甲酸叶醇酯、苯甲酸己酯同时出现且明显高于其他茶树品种所制样品。通过构建 OPLS-DA 模型，筛选出 28 种区分 4 个茶树品种所制武夷岩茶的差异挥发性成分，结合 OAV 与不同物质的香气特征，认为芳樟醇、β-紫罗酮、吲哚对 4 个茶树品种所制武夷岩茶的花香具有关键作用，β-环柠檬醛、香叶醇、苯乙醛对 SX，芳樟醇氧化物 II 对 RX，(*E*)-2-壬烯醛对 HGY 的花香呈现具有突出贡献，苯乙醇、己酸己酯、反式肉桂醛可能与 RG 的桂皮香形成有关。

3　结　语

武夷岩茶独特的“岩骨花香”是在多种物质交叉复合作用下产生的，作者从 4 个茶树品种所制武夷岩茶挥发性成分中筛选出关键呈香物质，为了进一步深入挖掘、确认关键呈香物质，并明确不同物质所发挥的作用，下一步将使用气相色谱嗅闻（gas chromatography olfactometry，GC-O）、香气重组等感官组学技术更加深入地研究武夷岩茶“岩骨花香”与独特品种香的关键物质。

参考文献：

[1] ZHANG L Z，DAI H M，ZHANG J L，et al. A study on origin traceability of white tea （white peony） based on near-infrared spectroscopy and machine learning algorithms[J]. **Foods**，2023，12(3)：499.

[2] KUO P C，LAI Y Y，CHEN Y J，et al. Changes in volatile compounds upon aging and drying in oolong tea production[J]. **Journal of the Science of Food and Agriculture**，2011，91(2)：293-301.

[3] XIAO K B. The taste of tea：material，embodied knowledge and environmental history in northern Fujian，China[J]. **Journal of Material Culture**，2017，22(1)：3-18.

[4] 李良清，王文震，徐秋生，等. 紫娟武夷岩茶适制性的研究[J]. 福建茶叶，2019，41(7)：11-12.
LI L Q，WANG W Z，XU Q S，et al. Study on the adaptability of Zijuan Wuyi rock tea[J]. **Tea in Fujian**，2019，41(7)：11-12.（in

Chinese)
[5] 程曦,卢莉,曹士先,等. 武夷名丛正白毫植物学形态及适制性研究[J]. 中国茶叶,2022,44(11):39-44.
CHENG X,LU L,CAO S X,et al. Study on botanical morphology and processing property of Wuyi Mingcong Zhengbaihao[J]. **China Tea**,2022,44(11):39-44. (in Chinese)
[6] 陈荣平. 武夷山 6 个茶树单株植物学特性和岩茶适制性分析[J]. 中国茶叶加工,2022(2):69-74.
CHEN R P. Study on botanical characteristics and processing feasibility of rock tea with fresh leaves picked from 6 tea bushes in Wuyi mountains[J]. **China Tea Processing**,2022(2):69-74. (in Chinese)
[7] 李良清,王文震,徐秋生,等. 武夷地方群体种单株岩茶适制性研究[J]. 中国茶叶,2020,42(6):38-41.
LI L Q,WANG W Z,XU Q S,et al. Study on the individuals of Wuyi local tea population for their suitability to make rock tea[J]. **China Tea**,2020,42(6):38-41. (in Chinese)
[8] 曹士先,冯卫虎,林燕清,等. 茶树品系‘金凤凰’早期鉴定及试制性研究初探[J]. 福建农业,2017(8):40-42.
CAO S X,FENG W H,LIN Y Q,et al. Preliminary study on early identification and trial-production of tea strain ‘golden phoenix’[J]. **Fujian Agriculture**,2017(8):40-42. (in Chinese)
[9] 冯花,王飞权,陈荣冰,等. 不同茶树新品系的武夷岩茶适制性鉴定[J]. 江苏农业科学,2021,49(23):173-184.
FENG H,WANG F Q,CHEN R B,et al. Adaptability identification of Wuyi rock tea with different new tea strains[J]. **Jiangsu Agricultural Sciences**,2021,49(23):173-184. (in Chinese)
[10] 韩沙沙,郑伟,南易,等. 基于 UHPLC-Q-TOF/MSE 技术分析武夷岩茶的化学成分[J]. 现代食品科技,2022,38(6):234-247.
HAN S S,ZHENG W,NAN Y,et al. Analysis of chemical components of Wuyi rock tea based on UHPLC-Q-TOF/MSE[J]. **Modern Food Science and Technology**,2022,38(6):234-247. (in Chinese)
[11] CHEN S,LI M H,ZHENG G Y,et al. Metabolite profiling of 14 Wuyi rock tea cultivars using UPLC-QTOF MS and UPLC-QqQ MS combined with chemometrics[J]. **Molecules**,2018,23(2):104.
[12] 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.
[13] 蒋容港,黄燕,金友兰,等. 茯砖茶呈香挥发性物质及其来源[J]. 食品与生物技术学报,2021,40(9):101-111.
JIANG R G,HUANG Y,JIN Y L,et al. Study of aroma compounds and their source in Fu brick tea[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**,2021,40(9):101-111. (in Chinese)
[14] 傅海峰,林琼珍,朱晨,等. 6 种不同香型白茶香气成分的 GC-MS 分析[J]. 食品与生物技术学报,2020,39(10):91-97.
FU H F,LIN Q Z,ZHU C,et al. GC-MS analysis of aroma components of white tea with six different aroma types[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**,2020,39(10):91-97. (in Chinese)
[15] 艾安涛,陈曦,李燕丽,等. 不同品种‘遵义红’红茶香气成分分析[J]. 食品与生物技术学报,2023,42(4):103-111.
AI A T,CHEN X,LI Y L,et al. Analysis of aroma components in different varieties of ‘Zunyi Red’ black tea[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**,2023,42(4):103-111. (in Chinese)
[16] 陈倩莲,刘仕章,占仕权,等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和 OAV 鉴定 4 种武夷岩茶关键呈香物质[J]. 食品工业科技,2023,44(14):296-303.
CHEN Q L,LIU S Z,ZHAN S Q,et al. Identification of four kind key aroma components of Wuyi rock tea based on HS-SPME-GC-MS and OAV[J]. **Science and Technology of Food Industry**,2023,44(14):296-303. (in Chinese)
[17] 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.
FENG H,WANG F Q,ZHANG B,et al. Analysis of aroma components of Baimudan tea from different tea plant varieties using HS-SPME-GC-MS[J]. **Modern Food Science and Technology**,2021,37(12):252-264. (in Chinese)
[18] ZHAI X T,ZHANG L,GRANVOGL M,et al. Flavor of tea(*Camellia sinensis*):a review on odorants and analytical techniques[J]. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**,2022,21(5):3867-3909.
[19] XU K,TIAN C Y,ZHOU C Z,et al. Non-targeted metabolomics analysis revealed the characteristic non-volatile and volatile metabolites in the Rougui Wuyi rock tea(*Camellia sinensis*) from different culturing regions[J]. **Foods**,2022,11(12):1694.
[20] YANG P,SONG H L,LIN Y P,et al. Differences of characteristic aroma compounds in Rougui tea leaves with different roasting temperatures analyzed by switchable GC-O-MS and GC×GC-O-MS and sensory evaluation[J]. **Food & Function**,2021,12(11):4797-4807.

[21] 黄毅彪，林燕萍，刘宝顺，等. 武夷岩茶“肉桂”与其副产品黄片香气品质差异分析[J]. 食品研究与开发，2021，42(6)：155-161.
HUANG Y B，LIN Y P，LIU B S，et al. Difference analysis of aroma quality between Wuyi rock tea “Rougui” and its byproduct old leaves[J]. **Food Research and Development**，2021，42(6)：155-161.（in Chinese）

[22] 张丽，张蕾，罗理勇，等. 焙火工艺对武夷岩茶挥发性组分和品质的影响[J]. 食品与发酵工业，2017，43(7)：186-193.
ZHANG L，ZHANG L，LUO L Y，et al. Effects of baking technics on the volatile components and aroma characteristics of Wuyi mountain tea[J]. **Food and Fermentation Industries**，2017，43(7)：186-193.（in Chinese）

[23] 林燕萍，刘宝顺，黄毅彪，等. 焙火程度对武夷岩茶“大红袍”品质的影响[J]. 食品研究与开发，2020，41(22)：49-54.
LIN Y P，LIU B S，HUANG Y B，et al. Effect of baking degrees on the quality of Wuyi rock tea “Dahongpao”[J]. **Food Research and Development**，2020，41(22)：49-54.（in Chinese）

[24] 邵淑贤，徐梦婷，林燕萍，等. 基于电子鼻与 HS-SPME-GC-MS 技术对不同产地黄观音乌龙茶香气差异分析[J]. 食品科学，2023，44(4)：232-239.
SHAO S X，XU M T，LIN Y P，et al. Differential analysis of aroma components of Huangguanyin oolong tea from different geographical origins using electronic nose and headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry[J]. **Food Science**，2023，44(4)：232-239.（in Chinese）

[25] VAN GENMERT L J. Odor thresholds compilations of odor threshold values in air，water and other media[M]. Zeist：Oliemans Punter & Partners BV，2011：1-228.

[26] 李沅达，吴婷，黄刚骅，等. SPME-GC-MS 技术结合 rOAV 分析不同加工工艺紫娟白茶的关键香气物质[J]. 食品工业科技，2023，44(9)：324-332.
LI Y D，WU T，HUANG G H，et al. SPME-GC-MS technique combined with rOAV for the analysis of key aroma substances of Zijuan white tea with different processing processes[J]. **Science and Technology of Food Industry**，2023，44(9)：324-332.（in Chinese）

[27] 潘思竹. GC-MS 技术分析贵州产嫩栗香型绿茶的香气成分[J]. 云南化工，2022，49(11)：66-69.
PAN S Z. Analysis of aroma components of Guizhou green tea with tender chestnut aroma by gas chromatography-mass spectrometry[J]. **Yunnan Chemical Technology**，2022，49(11)：66-69.（in Chinese）

[28] GUI J D，FU X M，ZHOU Y，et al. Does enzymatic hydrolysis of glycosidically bound volatile compounds really contribute to the formation of volatile compounds during the oolong tea manufacturing process? [J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**，2015，63(31)：6905-6914.

[29] ZENG L T，ZHOU Y，FU X M，et al. Does oolong tea（*Camellia sinensis*）made from a combination of leaf and stem smell more aromatic than leaf-only tea?Contribution of the stem to oolong tea aroma[J]. **Food Chemistry**，2017，237：488-498.

[30] 韦露玲，谢凤凤，黄飘玲，等. HS-SPME-GC-MS 分析比较肉桂挥发性成分[J]. 湖北农业科学，2021，60(21)：97-102.
WEI L L，XIE F F，HUANG P L，et al. Analysis and comparison of volatile components of *Cinnamomum cassia* Presl by HS-SPME-GC-MS[J]. **Hubei Agricultural Sciences**，2021，60(21)：97-102.（in Chinese）

[31] 张笮晦，陈耿，李伟光，等. 贮存时间对不同规格肉桂的挥发油含量及主要成分含量的影响[J]. 中国食品添加剂，2022，33(5)：138-147.
ZHANG Z H，CHEN G，LI W G，et al. Effect of storage time on volatile oil content and main components in cinnamon by different cinnamon tree bark[J]. **China Food Additives**，2022，33(5)：138-147.（in Chinese）

[32] HAN Z S，ZHU M T，WAN X C，et al. Food polyphenols and Maillard reaction：regulation effect and chemical mechanism[J]. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**，2022，15(64)：4904-4920.

（责任编辑：许艳超）