

# 乌龙茶茶树品种制白茶的风味特征及特征组分分析

戴浩民<sup>1,2</sup>, 张灵枝<sup>1,2</sup>, 梁轶琳<sup>1,2</sup>, 王治会<sup>1,2</sup>, 汪莹<sup>1,2</sup>, 曹士先<sup>3</sup>, 荣杰峰<sup>4</sup>, 孙威江<sup>1,2,\*</sup>, 陈志丹<sup>2,5,\*</sup>  
(1.福建农林大学园艺学院, 福建 福州 350002; 2.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.武夷星茶业有限公司, 福建 武夷山 354301; 4.泉州海关综合技术服务中心, 福建 泉州 362000;  
5.福建农林大学安溪茶学院 福建省茶产业技术开发基地, 福建 泉州 362400)

**摘要:** 为探究乌龙茶品种所制白茶与传统白茶的风味品质差异, 以紫玫瑰等8种乌龙茶品种所制白茶为研究对象, 以福鼎大毫茶所制传统白茶为对照, 结合感官审评、生化检测和多元统计分析手段进行分析。结果表明: 乌龙茶品种所制白茶的外形、汤色较传统白茶暗, 观感欠佳; 而滋味和香气优于传统白茶。生化成分检测分析发现电导率、pH值、可溶性糖含量、游离氨基酸含量、没食子儿茶素没食子酸酯含量以及表没食子儿茶素没食子酸酯含量的差异是导致传统白茶与乌龙茶品种所制白茶滋味迥异的重要因素。挥发性物质检测表明: 反式-2-壬醛、顺-3-壬烯-1-醇、棕榈酸甲酯、芳樟醇、亚油酸甲酯、柏木脑、甲酸香叶酯、苯乙醇、橙花醇、水杨酸甲酯、邻苯二甲酸二丁酯和植酮是影响传统白茶与乌龙茶品种所制白茶香型呈现的关键差异香气成分。本研究揭示了乌龙茶品种所制白茶与传统白茶间的风味品质差异, 证明了乌龙茶品种具有开发花香型白茶的潜力, 可为白茶风味进一步多元化提供理论参考。

**关键词:** 乌龙茶茶树品种; 白茶; 适制性; 挥发性物质; 品质差异

## Analysis of Flavor Characteristics and Characteristic Components of White Tea Made from Oolong Tea Cultivars

DAI Haomin<sup>1,2</sup>, ZHANG Lingzhi<sup>1,2</sup>, LIANG Yilin<sup>1,2</sup>, WANG Zhihui<sup>1,2</sup>, WANG Ying<sup>1,2</sup>,  
CAO Shixian<sup>3</sup>, RONG Jiefeng<sup>4</sup>, SUN Weijiang<sup>1,2,\*</sup>, CHEN Zhidan<sup>2,5,\*</sup>

(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, Fuzhou 350002, China;  
3. Wuyi Star Tea Industrial Co. Ltd., Wuyishan 354301, China; 4. Quanzhou Customs Comprehensive Technology Service Center, Quanzhou 362000, China; 5. Tea Industry Technology Development Base of Fujian, Anxi College of Tea Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Quanzhou 362400, China)

**Abstract:** In order to investigate the differences in flavor quality between white tea made from Oolong tea cultivars and traditional white tea, white teas made from eight Oolong tea cultivars such as Zimeigui and Fuding Dahao white tea as a control were analyzed by sensory evaluation, biochemical assays and multivariate statistical analysis. The results showed that the appearance and infusion color of Oolong white tea were darker, while the taste and aroma were better than those of traditional white tea. The biochemical analysis revealed that the differences in conductivity, pH, and the contents of soluble sugars, free amino acids, gallic acid gallate (GCG) and epigallocatechin gallate (EGCG) were important factors causing the differences in taste between traditional white tea and white tea made from Oolong tea cultivars. Volatile composition analysis showed that *trans*-2-nonenal, *cis*-3-nonen-1-ol, methyl palmitate, linalool, methyl linoleate, cedrol, geranyl formate, phenethyl alcohol, nerolidol, methyl salicylate, dibutyl phthalate and phytone were the key differential aroma components

收稿日期: 2023-03-03

基金项目: 福建省自然科学基金面上项目(2022J01614); 中国白茶研究院开放课题项目(BCY2021K04);  
安溪县农业农村局项目(2022AXFA01)

第一作者简介: 戴浩民(1997—)(ORCID: 0000-0002-1124-1489), 男, 硕士研究生, 研究方向为茶树种质资源创新与利用。  
E-mail: D13043500366@163.com

\*通信作者简介: 孙威江(1964—)(ORCID: 0000-0002-1008-1196), 男, 教授, 博士, 研究方向为茶叶品质化学与标准化。  
E-mail: swj8103@126.com

陈志丹(1984—)(ORCID: 0000-0002-1036-7194), 男, 副教授, 博士, 研究方向为茶树遗传育种及茶叶质量安全。E-mail: asbulletan@163.com

contributing to the difference in aroma between Oolong and traditional white tea. Findings from this study will provide a theoretical reference for flavor diversification of white tea.

**Keywords:** Oolong tea cultivars; white tea; suitability; volatile compounds; quality differences

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230303-035

中图分类号: S571.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2024) 02-0229-11

引文格式:

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. <http://www.spkx.net.cn>

DAI Haomin, ZHANG Lingzhi, LIANG Yilin, et al. Analysis of flavor characteristics and characteristic components of white tea made from Oolong tea cultivars[J]. Food Science, 2024, 45(2): 229-239. (in Chinese with English abstract)

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230303-035. <http://www.spkx.net.cn>

白茶是我国六大茶类之一, 属微发酵茶, 滋味鲜爽甘醇, 香气清香持久, 风味独特。白茶富含氨基酸<sup>[1]</sup>、可溶性糖<sup>[2]</sup>和黄酮<sup>[3-4]</sup>等物质, 具有多种保健功效<sup>[5-7]</sup>。白茶加工工序较为简单, 鲜叶经过萎凋、干燥后便完成初制。茶树品种差异导致鲜叶中内源性代谢物存在差异, 即使在相同工艺条件下也会对成品茶风味产生巨大影响。唯有茶树品种与加工工艺适配时, 才能保证生产出高质量的商品茶, 换言之, 每一个茶树品种都存在其最适宜的茶类<sup>[8]</sup>。

选择白茶适制品种是生产优质白茶的关键。近年来随着“白茶热”的持续, 促进了许多非传统白茶产区选用当地种质试制白茶<sup>[9-11]</sup>。乌龙茶普遍具有馥郁花果香和浓醇甘爽的风味特征<sup>[12]</sup>, 为进一步改善白茶风味, 优化产品多样性, 研究人员开始着手乌龙茶品种的白茶适制性研究。游小妹<sup>[13]</sup>、陈林<sup>[14]</sup>和卢莉<sup>[15]</sup>等比较了乌龙茶适制品种的白茶, 发现乌龙茶品种所制白茶样品呈现出花香显、味醇爽的特征, 尽管外形特征不如传统白茶, 但在花香型白茶的制作和游离氨基酸、咖啡碱等品质成分上具有明显的内质优势。上述研究对乌龙茶品种的白茶适制性进行了探究, 证明其具有制成花香型白茶的潜力, 但乌龙茶品种制白茶的茶汤品质参数、呈味物质组分较传统白茶的差异仍尚未明确。

福建拥有众多优异茶树种质资源, 其中适制乌龙茶的种质资源丰富, 现通过国家或省级审定(鉴、认)的适制乌龙茶品种多达45种<sup>[16]</sup>, 然而基于乌龙茶品种试制白茶的研究却少见报道。为进一步探明乌龙茶品种所制白茶与传统白茶间风味、品质参数上的差异, 本研究以紫玫瑰等8种乌龙茶品种和传统白茶品种福鼎大毫茶在相同采、制工艺条件下制得的白牡丹茶为研究对象, 通过感官审评、茶汤品质参数测定、生化成分和香气成分检测, 结合多元统计分析手段对9种茶样进行综合比较, 全

面、系统地探究乌龙茶品种的白茶适制性, 以期为白茶风味多样化、个性化提供理论参考和科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

2022年4月在福建武夷山武夷星茶树种质资源圃采摘紫玫瑰、金观音、金牡丹、黄观音、奇兰、毛蟹、梅占、金萱(上述为乌龙茶适制品种)及福鼎大毫茶(传统白茶适制品种)鲜叶, 采摘标准为一芽二/三叶。加工白茶使用室内自然萎凋方式, 控制摊叶厚度、萎凋时间、温湿度等工艺参数条件一致; 终止萎凋时样品含水率(12±2)%, 使用茶叶烘焙机烘干, 烘至统一含水率(6±2)%。初制完成后各样品使用铝箔袋分装成2份, 一份置于4℃冰箱用于感官审评及茶汤品质参数检测, 另一份磨碎成粉置于-20℃冰箱以待后续生化成分检测。不同茶树品种白茶样品信息见表1。

表1 不同品种白茶样品信息

Table 1 Sample information of white tea made from different varieties

序号	品种名称	茶样编号
1	福鼎大毫	FDDH
2	金观音	JGY
3	黄观音	HGY
4	金牡丹	JMD
5	金萱	JX
6	毛蟹	MX
7	梅占	MZ
8	奇兰	QL
9	紫玫瑰	ZMG

儿茶素(catechin, C)、没食子儿茶素(gallocatechin, GC)、表儿茶素(epicatechin, EC)、表儿茶素没食子酸酯(epicatechin gallate, ECG)、没食子儿茶素没食子酸酯(gallocatechin gallate, GCG)、

表没食子儿茶素 (epigallocatechin, EGC)、没食子酸 (gallic acid, GA)、表没食子儿茶素没食子酸酯 (epigallocatechin gallate, EGCG)、咖啡碱、可可碱以及茶碱 美国Sigma公司; 甲醇、乙腈、乙酸 (均为色谱级) 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 福林-酚、碳酸钠、茛三酮、磷酸氢二钠、磷酸二氢钾、氯化亚锡、浓硫酸 国药集团化学试剂有限公司; 植物可溶性糖含量检测试剂盒 南京建成生物工程研究所; 正构烷烃混标 C<sub>6</sub>~C<sub>40</sub> 上海源叶生物科技有限公司。

## 1.2 仪器与设备

MA150电子天平 德国Sartorius公司; TDZ5B-WS台式多管架离心机 上海卢湘仪离心机仪器有限公司; TU-1810紫外分光光度计 北京普析通用仪器有限责任公司; SevenExcellence多参数测试仪 瑞士梅特勒-托利多国际有限公司; ADCI全自动色差计 北京辰泰克仪器技术有限公司; 2695高效液相色谱、2998 PDA检测器 美国Waters公司; 手动固相微萃取 (solid-phase microextraction, SPME) 进样器、30 μm DB-17萃取头 美国Supelco公司; TRACE 1300 ISDDQ气相色谱仪 美国Thermo Fisher Scientific公司。

## 1.3 方法

### 1.3.1 感官审评

参照GB/T23776—2018《茶叶感官审评方法》，由福建农林大学园艺学院6名具有3 a以上白茶审评经验的专业评茶师 (3名为国家评茶高级技师, 3名为高级评茶员) 组成评价小组。对外形、汤色、香气、滋味、叶底5项因子进行审评, 采用评语和评分结合加权评分法计分。

### 1.3.2 生化指标检测

水浸出物检测参照GB/T 8305—2013《茶水浸出物测定》; 茶多酚质量分数、酚酸含量与儿茶素类组分含量测定参照GB/T 8313—2018《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》; 游离氨基酸质量分数测定参照GB/T 8314—2013《茶游离氨基酸总量测定》; 采用蒽酮比色法, 按照试剂盒流程测定可溶性糖含量; 黄酮含量采用三氯化铝比色法测定; 儿茶素与生物碱组分含量的检测参照ISO 14502-2: 2005《绿茶和红茶中特征物质的测定》, 采用高效液相色谱法<sup>[17]</sup>。每个样品检测重复3次。

### 1.3.3 香气检测

采用顶空固相微萃取法萃取样品的挥发性成分。准确称取茶粉1.0 g于20 mL顶空瓶中, 加入5 mL沸水和内标后立即加盖密封, 置于70 °C电加热器中平衡10 min, 然后插入已老化的纤维萃取头, 于液面上方顶空吸附

50 min, 随即向气相色谱仪-质谱联用 (gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) 仪器进样, 解吸附5 min后, 萃取下一个样品。每个样品检测重复3次。

GC条件: DB-17色谱柱 (30 m×0.25 mm, 0.25 μm), 载气为氦气 (纯度>99.999%)。升温程序: 起始柱温为50 °C, 保持5 min, 以5 °C/min升至210 °C, 保持3 min, 以15 °C/min升至230 °C, 保持5 min。MS条件: 离子源为电子电离源, 电离能70 eV, 离子源温度230 °C; 质谱传输线温度250 °C; 扫描范围m/z 45~500。

定性定量分析: 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; The Good Scents Company Information System (<http://www.thegoodscentscompany.com/>) 结合文献[18-20]对挥发物香型进行识别, 基于正构烷烃出峰时间算得各化合物保留指数, 并与相关文献对比, 以对各香气组分进一步定性。同时与内标物 (癸酸乙酯) 的峰面积比较, 得到香气成分的含量, 计算公式如下:

$$\text{香气成分含量} (\mu\text{g}/\text{kg}) = \frac{\text{香气成分物质峰面积} \times \text{内标物含量}}{\text{内标物峰面积}}$$

### 1.3.4 茶汤品质参数检测

根据GB/T 23776—2018制备茶汤, 冷却至室温, 通过全自动色差计与多参数测试仪分别测定各茶汤的色差、pH值和电导率, 每个样品检测重复3次。

## 1.4 数据分析

使用SPSS 25.0软件进行单因素方差分析; 使用Graphpad Prism 8软件绘制柱形图; 使用TBtools 1.1043软件对挥发物数据进行层次聚类分析与热图绘制; 使用MetaboAnalyst 5.0软件 (<https://www.metaboanalyst.ca>) 进行主成分分析 (principal components analysis, PCA)、正交偏最小二乘判别分析 (orthogonal partial least squares-discriminant analysis, OPLS-DA); 使用Origin 2019软件进行聚类分析及绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同茶树品种所制白茶感官审评及茶汤品质参数差异分析

#### 2.1.1 不同茶树品种所制白茶感官审评结果

各品种在相同条件下所制白茶所得5项审评因子的评语均存在一定差异 (表2), 可以反映出不同品种制白茶的品质特点, 参试样品基本可达到芽叶连枝、叶缘垂卷的形态, 具有白牡丹茶的外形特征。传统白茶品种 (FDDH) 所制成茶外形芽头较壮, 色白显毫, 芽叶连

表2 不同品种白茶样品感官审评结果  
Table 2 Sensory evaluation results of different white tea samples

品种	外形		汤色		香气		滋味		叶底		总分
	描述	得分	描述	得分	描述	得分	描述	得分	描述	得分	
JGY	略带芽, 芽叶连枝, 带铁板色	83	浅橙黄	84	甜花香, 高持久	89	较醇	85	尚匀亮, 带红张	84	84.4
JX	带细芽, 芽叶连枝, 色泽乌绿	85	深黄	85	清花香, 较浓郁	88	醇正	84	尚匀亮	84	85.35
MX	芽头尚壮, 芽叶连枝, 较灰绿, 有光泽	89	黄较亮	88	清纯	87	较醇爽, 带涩	87	较匀, 芽叶绿黄较嫩, 略带青张	89	87.8
MZ	芽头尚壮, 芽叶连枝, 色泽暗绿	87	黄亮	86	有花香	88	尚醇, 较涩	83	绿黄尚匀亮, 较嫩	89	86.15
ZMG	带芽, 色泽青绿	85	深黄	86	似花香, 品种香显	90	较醇尚爽	86	尚匀带红张	84	86.55
HGY	带细芽, 有破张	83	浅橙黄尚亮	86	花蜜香	87	较浓, 有涩感	85	尚匀带红张	83	84.9
QL	有芽头, 茶叶尚嫩、较匀, 灰褐	88	黄亮	88	品种香, 甜香	89	甘醇较爽	87	较匀亮, 芽叶绿黄较嫩	88	87.5
JMD	绿褐带细芽, 叶张尚嫩	85	黄亮	88	品种香突出	91	醇厚较爽	87	绿黄较匀亮	87	87.6
FDDH	芽头较壮, 色白显毫, 芽叶连枝, 叶绿参差	93	杏黄明亮	93	较清纯, 毫香持久	90	青味带涩, 较醇	86	匀亮, 芽头较粗壮	93	90.15

枝, 叶绿参差; 汤色杏黄明亮; 香气清纯、毫香持久; 滋味醇、带青涩; 叶底匀亮较粗壮。乌龙茶适制品种 (JGY、JX、MX、MZ、ZMG、HGY、QL、JMD) 所制成茶外形以传统白茶为标准而言, 质量欠佳, 芽头与白毫较少, 色泽偏暗; 汤色较FDDH偏黄与暗, 此外与前人研究结果<sup>[14-15]</sup>相似, 乌龙茶品种所制白茶样品香气多呈现为馥郁的品种香、花香; 且滋味较FDDH而言更浓厚。日后加工中应在保持香气和滋味的基础上, 提升外形与汤色的表现。各品种白茶总分排序为FDDH>MX>JMD>QL>ZMG>MZ>JX>HGY>JGY, FDDH是公认的传统白茶加工品种, 在对比中表现优异。乌龙茶品种所制白茶的感官得分皆大于80, 表明所用乌龙茶品种皆具有良好的白茶适制性, 除此之外, 乌龙茶品种所制白茶在香气上多呈现出明显的花香、品种香, 适用于花香型白茶产品的开发, 这与陈林等<sup>[14]</sup>研究结果类似。

### 2.1.2 不同茶树品种所制白茶茶汤品质参数差异分析

$L$ 、 $a$ 、 $b$ 值为茶汤的色差值, 分别代表亮度值 (数值越大则汤色越亮)、红 (+) 绿 (-) 值以及黄 (+) 蓝 (-) 值, 以数值形式更直观地呈现汤色差异。由表3可知, 传统白茶较乌龙茶品种所制白茶而言在 $L$ 值上具有明显优势,  $a$ 、 $b$ 值则小于大多数乌龙茶品种所制白茶;  $a$ 、 $b$ 值的提高会使茶汤色泽偏红、偏黄, 导致乌龙茶品种所制白茶汤色与传统白茶相比得分较低, 这与感官审评结果一致。茶汤pH值代表茶汤中氢离子浓度, 原料越嫩, 茶汤酸性越弱<sup>[21-22]</sup>。各品种白茶茶汤间pH值差异较小, 表明所用材料老嫩程度较为一致, 对比结果可靠。电导率可在一定程度上衡量水样中离子数量<sup>[23]</sup>。本实验的乌龙茶品种所制白茶的茶汤电导率皆显著高于传统白茶, 表明乌龙茶品种所制白茶在茶叶内含物的充分浸出上具有明显优势。除此之外, 滋味风格接近的FDDH和MX的电导率都较低, 这与前人研究结果<sup>[24-25]</sup>有差异, 推测是实验材料差异所致。

表3 不同品种白茶样品茶汤pH值、电导率、色差差异分析  
Table 3 pH, conductivity and color parameters of different white tea infusion samples

品种	$L$	$a$	$b$	电导率/ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	pH
JGY	30.55±0.08 <sup>d</sup>	2.99±0.48 <sup>b</sup>	14.81±0.23 <sup>b</sup>	570.32±2.31 <sup>b</sup>	6.26±0.02 <sup>a</sup>
JX	31.51±0.19 <sup>d</sup>	1.88±1.06 <sup>cd</sup>	11.99±2.51 <sup>c</sup>	524.15±2.20 <sup>c</sup>	6.17±0.00 <sup>b</sup>
MX	32.24±0.19 <sup>d</sup>	2.80±0.33 <sup>bc</sup>	8.32±0.39 <sup>d</sup>	407.42±3.97 <sup>d</sup>	6.24±0.01 <sup>a</sup>
MZ	33.26±0.00 <sup>b</sup>	0.94±0.04 <sup>de</sup>	7.16±0.04 <sup>d</sup>	460.80±1.18 <sup>d</sup>	6.06±0.00 <sup>c</sup>
ZMG	31.20±0.20 <sup>d</sup>	1.77±0.28 <sup>d</sup>	13.72±0.31 <sup>bc</sup>	461.57±2.59 <sup>d</sup>	6.15±0.05 <sup>b</sup>
HGY	29.09±0.14 <sup>e</sup>	4.67±0.24 <sup>a</sup>	18.60±0.49 <sup>a</sup>	614.94±1.02 <sup>a</sup>	6.24±0.00 <sup>b</sup>
QL	33.75±0.06 <sup>a</sup>	-2.00±0.36 <sup>f</sup>	8.44±0.23 <sup>d</sup>	424.17±0.68 <sup>c</sup>	6.16±0.02 <sup>b</sup>
JMD	33.23±0.19 <sup>b</sup>	0.77±0.04 <sup>e</sup>	9.09±0.54 <sup>d</sup>	462.31±0.09 <sup>d</sup>	6.13±0.02 <sup>b</sup>
FDDH	33.26±0.09 <sup>b</sup>	0.38±0.19 <sup>f</sup>	7.37±0.12 <sup>d</sup>	277.64±0.17 <sup>e</sup>	6.28±0.00 <sup>c</sup>

注: 同列不同字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

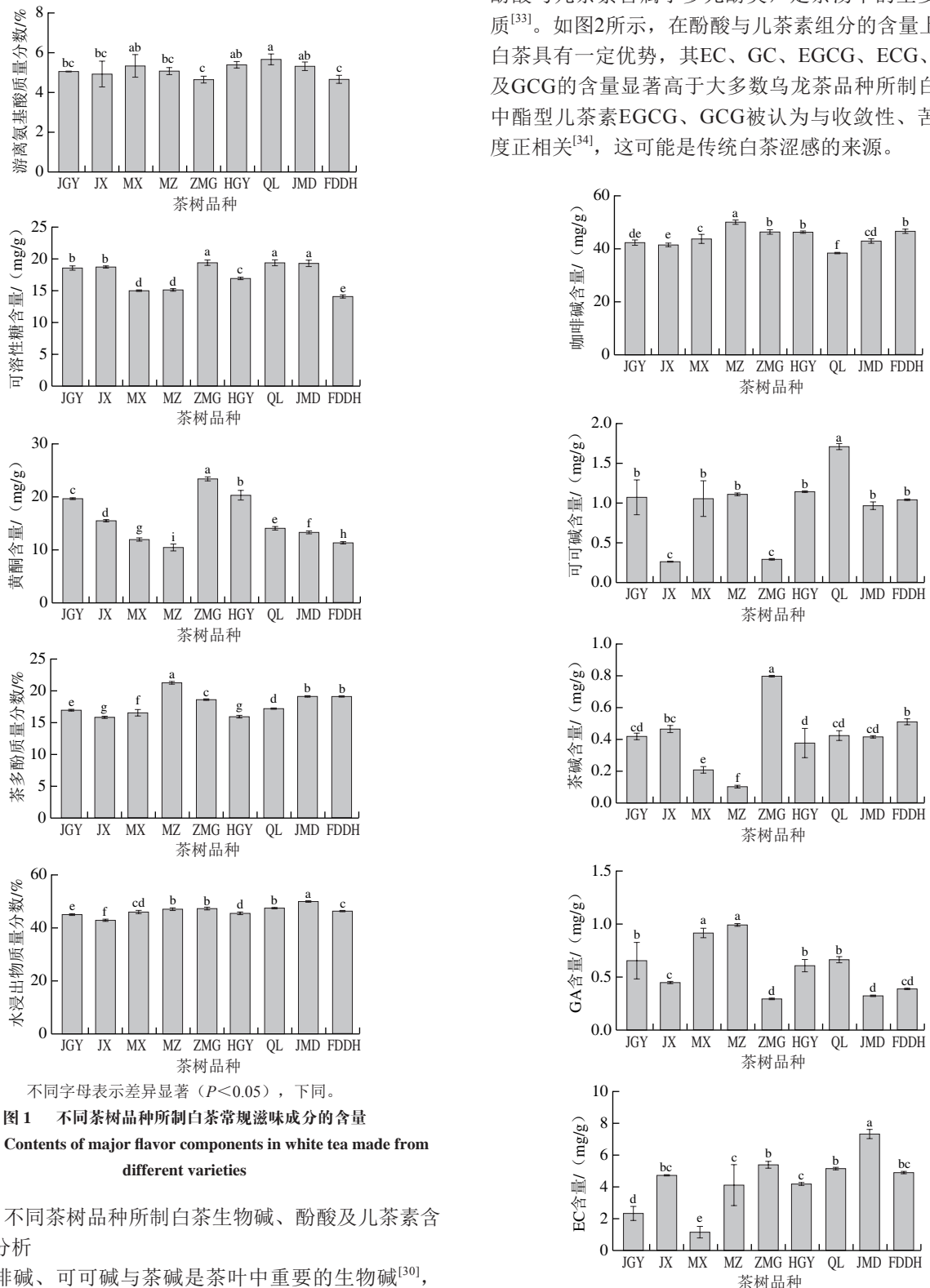
## 2.2 不同茶树品种所制白茶滋味成分差异分析

### 2.2.1 不同茶树品种所制白茶常规滋味成分差异分析

图1展示了不同茶树种质所制白茶常规滋味成分的检测结果, 乌龙茶品种所制白茶在游离氨基酸、黄酮、茶多酚、水浸出物及可溶性糖的含量上与传统白茶具有显著差异。氨基酸是茶叶中的鲜味物质, 与茶叶滋味、香气特点的产生关系密切, 是影响白茶品质的关键成分之一<sup>[26]</sup>, 9份样品游离氨基酸质量分数在4.73%~5.72%之间, 多数乌龙茶品种所制白茶的氨基酸含量明显高于传统白茶。可溶性糖是影响茶汤甜醇口感的主要因素, 白茶的可溶性糖含量在六大茶类中相对较高<sup>[27]</sup>, 可溶性糖与游离氨基酸的存在可缓解酚类物质赋予茶汤的苦涩感<sup>[18,20]</sup>。本研究中各品种白茶可溶性糖含量在14.30~19.67 mg/g之间, 乌龙茶品种所制白茶可溶性糖、游离氨基酸含量皆显著高于传统白茶, 这可能促进了其滋味品质的形成, 使其得分较佳。黄酮因其抗氧化、防癌护肝、预防心血管疾病等功效而备受关注<sup>[27]</sup>, 9份样品的黄酮类物质含量在10.78~23.76 mg/g之间, 对比传统白茶, 绝大多数乌龙茶品种所制白茶的黄酮含量呈现出显著优势。茶多酚对成品茶的色、香、味品质的形成有重要作用, 其在水浸出物中所占比重较大, 是决定茶汤浓度的主要物质<sup>[28]</sup>。各样品茶多酚质量分数在16.7%~21.4%之间, 传统白茶的茶多酚质量分数显著高于大多数乌龙茶品种所制白茶, 即传统白茶在茶多酚含量上具有

一定优势。茶叶中能溶于热水的可溶性物质统称为水浸出物，水浸出物含量的多寡在一定程度上反映了茶汤浓度的强弱，与茶叶的品质呈正相关<sup>[29]</sup>。各样品水浸出物的质量分数在43.2%~50.3%之间，绝大多数样品间差异较小，金牡丹白茶（50.3%）含量最高，并显著高于其余品种。

不同于咖啡碱，可可碱和茶碱在茶叶中的含量低，且可通过代谢途径转化为咖啡碱<sup>[31]</sup>。生物碱味苦，是茶汤滋味的重要组成部分，具有提神等作用<sup>[32]</sup>。与乌龙茶品种相比，传统白茶在咖啡碱、可可碱及茶碱的含量上呈现出一定优势，含量高于大多数乌龙茶品种所制白茶（图2）。酚酸与儿茶素皆属于多元酚类，是茶汤中的主要呈味物质<sup>[33]</sup>。如图2所示，在酚酸与儿茶素组分的含量上，传统白茶具有一定优势，其EC、GC、EGCG、ECG、EGC以及GCG的含量显著高于大多数乌龙茶品种所制白茶，其中酯型儿茶素EGCG、GCG被认为与收敛性、苦涩感高度正相关<sup>[34]</sup>，这可能是传统白茶涩感的来源。



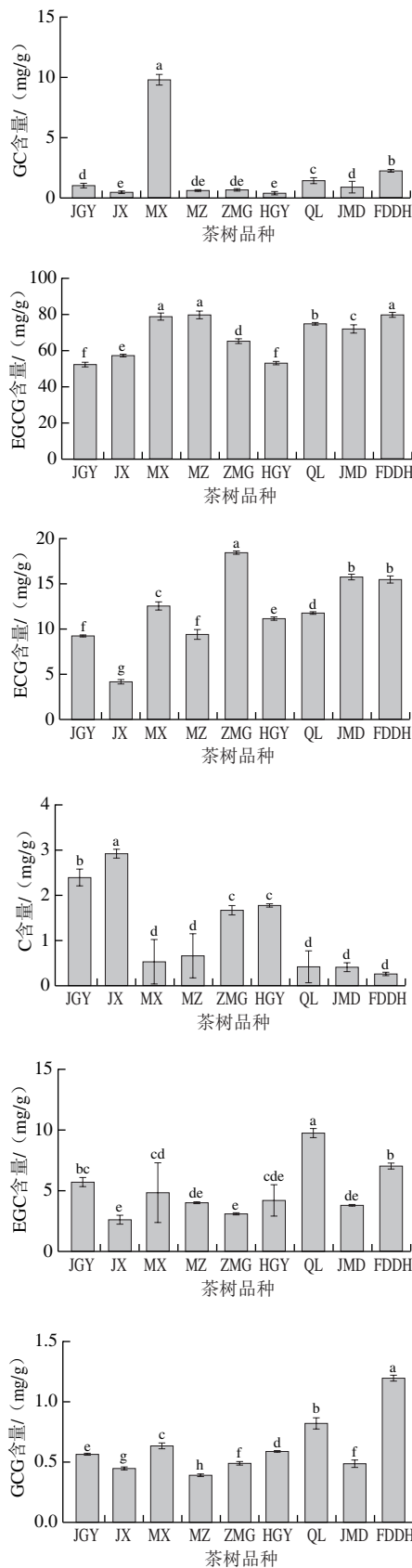
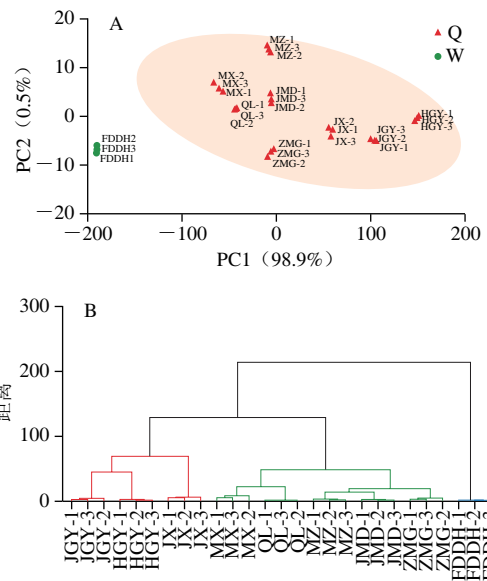


图2 不同品种白茶样品酚酸、儿茶素与生物碱组分的含量差异  
Fig. 2 Contents of phenolic acid, catechin and alkaloid in white tea made from different varieties

2.2.3 多元统计分析筛选关键品质参数

PCA在茶叶产地溯源、等级判别及品种选育等方面有着广泛应用<sup>[35-37]</sup>。为了解9个不同茶树品种所制白茶在品质参数(包括茶汤品质参数、常规滋味成分、生物碱、酚酸及儿茶素)上的相似性,基于品质参数数据进行PCA。由图3A可知,前2个PC的累计贡献率为99.4%,说明提取的PC可以有效地反映不同品种间的关系。各品种的3个重复被有效地聚集在一起,表明数据可靠、拥有良好的重复性。除此之外,由得分图可看出白茶品种与乌龙茶品种区分明显,表明它们内质含量间有较大差异。为进一步明确不同茶树品种基于品质参数的聚类趋势,对其进行聚类分析(图3B),结果显示,9个品种共聚成2个类群,传统白茶品种单独聚为一类,乌龙茶品种聚为一类;乌龙茶品种中又可分为2个类群,金观音、黄观音及金萱为一类,毛蟹、奇兰、梅占、金牡丹、紫玫瑰为另一类,这与OPLS-DA的结果(图4A)类似。



Q为乌龙茶品种样品;W为福鼎大毫茶样品;图4、7同。

图3 不同品种白茶样品主要滋味成分含量及茶汤品质参数的PCA得分图(A)和聚类分析图(B)

Fig. 3 PCA score plot (A) and cluster analysis plot (B) of major flavor components and physicochemical properties of white tea made from different varieties

OPLS-DA是一种有监督的分类方法,能够有效区分样本并提取关键差异参数<sup>[38]</sup>。基于品质参数构建的OPLS-DA模型如图4A所示,其拟合参数 $R^2_Y$ 为0.978,预测能力 $Q^2$ 为0.954,经1000次交叉验证后 $P$ 值小于0.05,表明模型不存在过拟合现象,解释能力强。模型结果显示传统白茶品种位于右侧,与其余样品差距较远,组间差异大,说明该模型基于茶汤品质参数、滋味成分能有效区分传统白茶与乌龙茶品种所制白茶。一般认为变量差异贡献度(variable important for the projection, VIP) > 1

且 $P < 0.05$ 表示该参数/变量对组间分离有较大贡献<sup>[39]</sup>。由图4B可知, GCG含量、茶汤电导率、可溶性糖含量、游离氨基酸含量、茶汤pH值、EGCG含量被认为是造成传统白茶与乌龙茶品种所制白茶间品质差异的关键参数。

茶汤品质参数和呈味物质的多寡与白茶品质的形成息息相关<sup>[40]</sup>, 通过多元统计分析发现茶汤电导率与pH值、可溶性糖含量、游离氨基酸含量、GCG含量以及EGCG含量是造成传统白茶与乌龙茶品种所制白茶茶汤以及滋味差异的重要原因。pH值越低, 茶汤鲜爽度和收敛性越强, 另外, 有研究认为茶叶等级越低则茶汤pH值越低, 茶叶等级越高, 茶汤电导率越高<sup>[41-42]</sup>, 在本研究中, 所用乌龙茶品种制白茶的电导率皆显著高于传统白茶, 表明其内容物在相同冲泡条件下更易浸出。长期的萎凋促进了白茶中可溶性糖的积累, 可溶性糖在游离氨基酸的协同下将有效缓解酚类物质赋予茶汤的苦味和收敛性<sup>[18,20]</sup>。乌龙茶品种所制白茶在可溶性糖与游离氨基酸的含量上显示出优势, 这可能是其滋味更加丰富的原因。GCG、EGCG属于酯型儿茶素, 茶叶中酯型儿茶素含量与感官中苦涩、收敛性强度高度正相关<sup>[43]</sup>, 推测对照“涩”味的体现主要受到酯型儿茶素含量的影响。

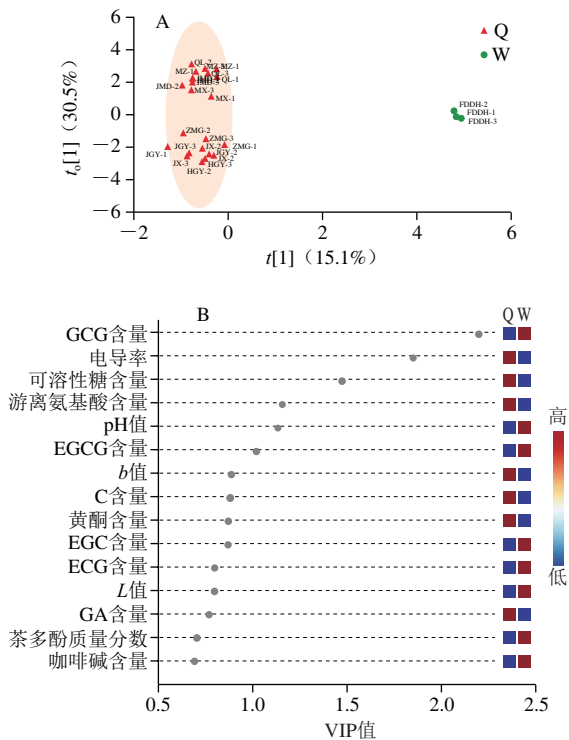


图4 不同品种白茶样品主要滋味成分含量及茶汤品质参数的OPLS-DA得分图(A)和变量因子散点图(B)

Fig. 4 OPLS-DA score plot (A) and scatter plot (B) of contents of major flavor components and physicochemical properties of white tea made from different varieties

### 2.3 不同茶树品种制白茶香气成分分析

#### 2.3.1 GC-MS质谱分析挥发性成分及含量

9个不同茶树品种所制白茶中共检出12类64种挥发性成分, 包括醇类12种、醛类10种、酮类12种、酯类16种、内酯类3种、醚类2种、酸类2种、含氮化合物2种、烯炔类2种、芳香族化合物1种、碳氢化合物1种(图5)。各茶样挥发性物质均以醇类和酯类为主, 传统白茶酯类含量占比为16.99%, 高于本研究中所有乌龙茶品种所制白茶。

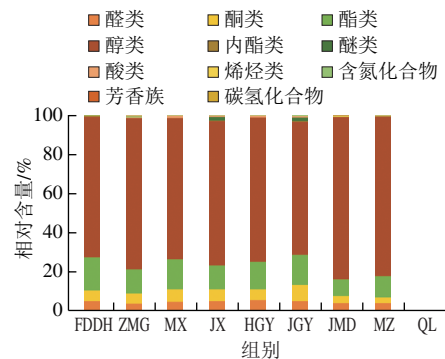


图5 不同品种白茶样品香气类型的相对含量

Fig. 5 Relative contents of aroma types in white tea made from different varieties

由表4可知, 金牡丹白茶总香气成分含量最高, 比传统白茶约高出1倍, 各样品的总香气成分含量大多存在显著差异。总香气成分含量由高到低排名依次为: 金牡丹、奇兰、金观音、金萱、梅占、福鼎大毫茶、紫玫瑰、黄观音、毛蟹, 香气含量与种类的差异可能是乌龙茶品种所制白茶香气成分类型不同的原因。

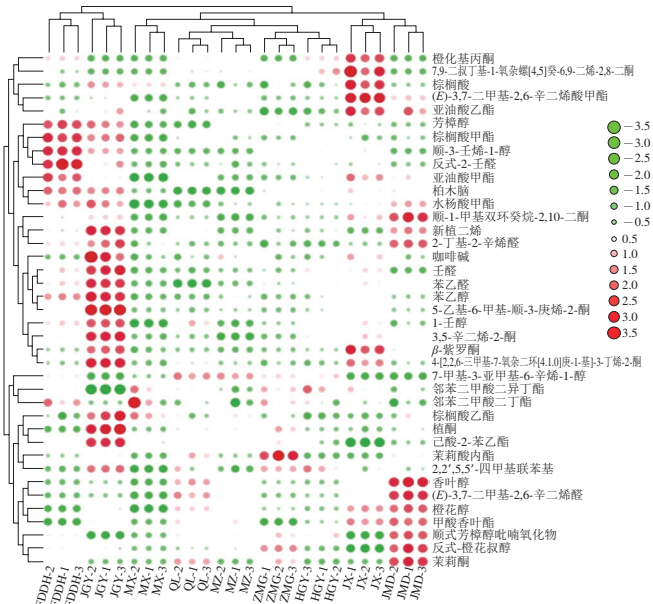


图6 不同品种白茶样品挥发性成分的热图

Fig. 6 Heatmap of volatile components in white tea made from different varieties

表4 不同品种白茶样品香气成分

Table 4 Aroma components of white tea made from different varieties

种类	香气成分	香气类型	香气成分含量/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )									
			JGY	JX	MX	MZ	ZMG	HGY	QL	JMD	FDDH	
烯炔类	新植二烯	—	5.74±0.14 <sup>a</sup>	—	—	—	1.35±0.41 <sup>c</sup>	1.08±0.38 <sup>c</sup>	2.08±0.19 <sup>e</sup>	4.14±0.22 <sup>b</sup>	1.48±0.09 <sup>e</sup>	—
	(E)- $\beta$ -罗勒烯	甜香、清香	—	—	—	—	—	—	—	20.19±0.85 <sup>a</sup>	—	—
	芳樟醇	百合花或玉兰花香	1 648.10±59.53 <sup>b</sup>	973.31±68.49 <sup>f</sup>	638.49±33.90 <sup>g</sup>	1 147.86±46.53 <sup>d</sup>	1 284.40±18.19 <sup>c</sup>	919.81±30.20 <sup>df</sup>	596.64±27.50 <sup>g</sup>	851.41±18.01 <sup>f</sup>	1 831.46±35.14 <sup>d</sup>	—
	1-壬醇	橙花香	54.12±0.27 <sup>a</sup>	38.92±1.67 <sup>b</sup>	11.33±0.47 <sup>f</sup>	17.51±1.57 <sup>e</sup>	26.50±0.05 <sup>d</sup>	32.05±0.55 <sup>e</sup>	40.53±3.58 <sup>b</sup>	23.57±3.62 <sup>d</sup>	41.11±0.71 <sup>b</sup>	—
醇类	苯乙醇	甜蜜香、玫瑰花香	308.06±9.79 <sup>a</sup>	146.62±4.19 <sup>f</sup>	69.77±7.81 <sup>f</sup>	120.70±10.99 <sup>d</sup>	86.36±6.17 <sup>ef</sup>	126.78±26.63 <sup>cd</sup>	79.23±2.59 <sup>f</sup>	107.28±1.29 <sup>de</sup>	234.16±5.76 <sup>b</sup>	—
	顺式芳樟醇吡喃氧化物	柑橘香	—	—	23.31±1.21 <sup>d</sup>	66.07±3.03 <sup>bc</sup>	73.56±6.78 <sup>b</sup>	64.25±12.53 <sup>bc</sup>	67.24±4.13 <sup>bc</sup>	111.28±2.52 <sup>a</sup>	58.52±1.28 <sup>c</sup>	—
	7-甲基-3-亚甲基-6-辛烯-1-醇	—	—	—	4.23±0.20 <sup>f</sup>	13.05±0.44 <sup>f</sup>	10.43±0.19 <sup>g</sup>	10.11±0.74 <sup>f</sup>	13.60±0.80 <sup>f</sup>	—	9.85±0.07 <sup>b</sup>	—
	橙花醇	花香、柠檬果香	62.68±2.22 <sup>a</sup>	99.29±2.21 <sup>b</sup>	18.65±0.63 <sup>f</sup>	66.86±0.04 <sup>d</sup>	54.10±1.61 <sup>f</sup>	47.39±1.67 <sup>f</sup>	87.17±0.73 <sup>e</sup>	113.09±3.49 <sup>f</sup>	29.25±0.65 <sup>b</sup>	—
	香叶醇	玫瑰花香、甜香	2 138.41±103.01 <sup>f</sup>	3 200.83±30.43 <sup>d</sup>	797.60±35.38 <sup>g</sup>	2 907.93±44.89 <sup>d</sup>	2 070.91±54.24 <sup>e</sup>	1 801.26±37.56 <sup>f</sup>	5 002.49±205.58 <sup>d</sup>	7 310.30±223.47 <sup>d</sup>	1 462.34±12.75 <sup>f</sup>	—
	反式橙花叔醇	橙花香、木香	40.52±2.10 <sup>ab</sup>	13.08±1.20 <sup>f</sup>	29.44±0.68 <sup>f</sup>	41.68±1.83 <sup>d</sup>	64.42±0.94 <sup>d</sup>	28.39±0.34 <sup>e</sup>	36.86±1.45 <sup>e</sup>	76.11±4.22 <sup>d</sup>	46.12±0.32 <sup>e</sup>	—
	苯甲醇	苹果香、微弱的蜜甜香	—	—	—	48.71±10.56 <sup>g</sup>	—	—	—	—	62.14±0.90 <sup>f</sup>	—
	柏木醇	木香、甜香	22.72±0.16 <sup>c</sup>	16.44±1.57 <sup>b</sup>	6.69±0.01 <sup>f</sup>	—	12.82±1.88 <sup>c</sup>	13.51±0.83 <sup>e</sup>	—	11.58±0.51 <sup>c</sup>	24.32±0.61 <sup>d</sup>	—
	顺-3-壬烯-1-醇	蘑菇香、果香	13.23±0.05 <sup>d</sup>	8.95±0.65 <sup>e</sup>	—	—	6.02±0.15 <sup>e</sup>	7.10±0.03 <sup>d</sup>	—	—	20.28±0.08 <sup>d</sup>	—
	脱氢芳樟醇	霉味	—	—	—	—	35.43±1.08 <sup>a</sup>	—	—	—	—	—
醛类	壬醛	柑橘香、玫瑰花香	49.35±1.66 <sup>d</sup>	33.88±0.66 <sup>b</sup>	17.35±0.93 <sup>e</sup>	21.56±0.57 <sup>cd</sup>	22.48±1.91 <sup>c</sup>	31.34±2.05 <sup>b</sup>	19.22±1.48 <sup>de</sup>	17.06±0.41 <sup>c</sup>	34.05±1.41 <sup>b</sup>	—
	反式-2-壬醛	柑橘香、花果香	6.80±1.47 <sup>a</sup>	4.65±0.44 <sup>cd</sup>	2.60±0.28 <sup>e</sup>	3.35±1.06 <sup>bc</sup>	4.13±0.35 <sup>bc</sup>	5.40±0.76 <sup>bc</sup>	3.63±0.18 <sup>de</sup>	3.29±0.26 <sup>ce</sup>	12.14±0.98 <sup>d</sup>	—
	(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛	柠檬香、花果香	84.26±0.10 <sup>cd</sup>	142.83±4.53 <sup>c</sup>	32.83±0.47 <sup>b</sup>	129.11±2.63 <sup>d</sup>	75.90±1.93 <sup>f</sup>	88.15±1.18 <sup>e</sup>	192.02±10.54 <sup>b</sup>	253.44±5.94 <sup>d</sup>	64.21±0.39 <sup>g</sup>	—
	2-丁基-2-辛烯醛	果香、甜香	9.53±0.70 <sup>a</sup>	4.66±0.15 <sup>cd</sup>	4.73±1.23 <sup>e</sup>	4.22±0.27 <sup>cd</sup>	3.64±0.86 <sup>cd</sup>	3.32±0.19 <sup>e</sup>	4.41±0.40 <sup>cd</sup>	9.80±0.18 <sup>e</sup>	7.35±0.06 <sup>b</sup>	—
	苯乙醛	草香、蜜香	131.26±2.23 <sup>a</sup>	78.16±2.71 <sup>f</sup>	24.99±0.01 <sup>b</sup>	31.17±0.88 <sup>g</sup>	50.79±2.97 <sup>f</sup>	66.50±0.82 <sup>d</sup>	—	56.99±0.89 <sup>e</sup>	82.91±2.92 <sup>b</sup>	—
	反-2-辛烯醛	草香、蜜香	—	—	—	—	—	3.50±0.66 <sup>e</sup>	—	—	—	—
	(Z)-2-癸烯醛	松脂香	—	—	—	—	—	9.23±0.38 <sup>a</sup>	—	—	—	—
	$\alpha$ -亚乙基-苯乙醛	甜香、坚果香	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6.39±0.21 <sup>a</sup>
	3,5-二叔丁基-4-羧基苯甲醛	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.07±0.00 <sup>b</sup>	—
	反顺-2,6-壬二烯醛	草香、紫罗兰叶气息	—	—	—	—	—	—	—	—	22.53±0.79 <sup>a</sup>	—
酮类	3,5-辛二烯-2-酮	草香、果香	160.12±3.45 <sup>d</sup>	91.99±6.11 <sup>b</sup>	23.78±4.60 <sup>f</sup>	—	28.63±1.19 <sup>e</sup>	68.02±9.23 <sup>d</sup>	38.43±5.06 <sup>d</sup>	78.20±0.39 <sup>f</sup>	69.02±3.43 <sup>c</sup>	—
	5-乙基-6-甲基-顺-3-庚烯-2-酮	—	27.91±0.07 <sup>a</sup>	12.56±0.53 <sup>b</sup>	8.08±0.33 <sup>f</sup>	9.96±0.22 <sup>d</sup>	8.02±0.07 <sup>f</sup>	10.63±0.69 <sup>e</sup>	8.60±0.87 <sup>ef</sup>	9.44±0.26 <sup>ce</sup>	11.75±0.26 <sup>b</sup>	—
	橙化基丙酮	金属味	—	42.65±2.18 <sup>e</sup>	—	19.58±0.24 <sup>d</sup>	—	26.23±0.24 <sup>d</sup>	23.31±0.20 <sup>f</sup>	—	26.20±0.24 <sup>b</sup>	—
	茉莉酮	木香、药草香	15.77±0.71 <sup>a</sup>	13.65±0.35 <sup>e</sup>	13.22±0.27 <sup>e</sup>	10.87±0.14 <sup>d</sup>	68.25±7.14 <sup>c</sup>	8.57±0.21 <sup>e</sup>	79.79±1.92 <sup>b</sup>	114.28±5.48 <sup>d</sup>	49.87±2.20 <sup>d</sup>	—
	$\beta$ -紫罗兰酮	似紫罗兰香、木香	117.66±3.55 <sup>b</sup>	126.21±6.56 <sup>d</sup>	42.74±5.60 <sup>e</sup>	42.43±0.77 <sup>e</sup>	51.15±1.54 <sup>d</sup>	57.84±0.20 <sup>d</sup>	51.85±0.67 <sup>d</sup>	67.39±2.51 <sup>c</sup>	55.31±1.54 <sup>d</sup>	—
	4-[2,6-三甲基-7-氧杂二环[4.1.0]庚-1-基]-3-丁烯-2-酮	果香、花香	49.18±0.08 <sup>a</sup>	40.21±1.67 <sup>b</sup>	19.28±1.23 <sup>c</sup>	22.92±0.71 <sup>d</sup>	20.91±2.34 <sup>cd</sup>	20.69±1.84 <sup>cd</sup>	25.92±0.33 <sup>e</sup>	22.67±1.40 <sup>d</sup>	22.83±0.86 <sup>d</sup>	—
	顺-1-甲基双环癸烷-2,10-二酮	—	36.08±0.25 <sup>b</sup>	37.22±2.33 <sup>b</sup>	14.86±0.45 <sup>e</sup>	14.13±0.52 <sup>e</sup>	22.36±1.53 <sup>d</sup>	23.42±0.30 <sup>d</sup>	23.42±0.36 <sup>d</sup>	51.15±2.87 <sup>d</sup>	27.41±1.36 <sup>c</sup>	—
	植酮	草药香、木质味	23.62±0.93 <sup>a</sup>	8.73±0.96 <sup>e</sup>	8.91±0.23 <sup>e</sup>	12.32±0.66 <sup>e</sup>	15.63±1.33 <sup>d</sup>	9.64±0.29 <sup>de</sup>	11.43±0.13 <sup>e</sup>	11.20±1.03 <sup>cd</sup>	7.05±0.07 <sup>b</sup>	—
	7,9-二叔丁基-1-氧杂螺[4.5]癸-6,9-二烯-2,8-二酮	—	—	0.32±0.06 <sup>f</sup>	—	0.08±0.00 <sup>f</sup>	0.10±0.01 <sup>f</sup>	0.18±0.03 <sup>f</sup>	0.08±0.00 <sup>f</sup>	—	0.06±0.02 <sup>e</sup>	—
	$\alpha$ -紫罗兰酮	果香、甜香	40.86±2.37 <sup>a</sup>	—	—	15.00±0.33 <sup>b</sup>	—	—	—	—	15.87±0.32 <sup>b</sup>	—
酯类	香叶基丙酮	果香、木香	—	—	—	—	—	—	—	27.47±0.67 <sup>a</sup>	—	—
	6,10-二甲基-5,9-十一双烯-2-酮	果香、玉兰香	53.51±1.84 <sup>a</sup>	—	14.84±1.05 <sup>e</sup>	—	23.94±1.69 <sup>b</sup>	—	—	—	—	—
	水杨酸甲酯	薄荷味、冬青树味	734.81±55.86 <sup>d</sup>	522.69±51.92 <sup>b</sup>	185.43±24.12 <sup>e</sup>	419.61±28.74 <sup>c</sup>	449.61±36.39 <sup>bc</sup>	446.59±2.74 <sup>bc</sup>	295.01±17.81 <sup>d</sup>	677.36±15.18 <sup>d</sup>	695.12±51.04 <sup>d</sup>	—
	甲酸香叶酯	清新的水果香、玫瑰花香	3.36±0.32 <sup>d</sup>	6.05±0.19 <sup>b</sup>	1.08±0.06 <sup>f</sup>	4.30±0.30 <sup>e</sup>	—	2.24±0.22 <sup>e</sup>	4.36±0.30 <sup>f</sup>	6.79±0.17 <sup>a</sup>	—	—
	(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯酸甲酯	花香、果香	17.82±1.04 <sup>d</sup>	60.82±0.66 <sup>e</sup>	—	21.66±0.44 <sup>d</sup>	9.62±1.15 <sup>f</sup>	13.87±1.18 <sup>e</sup>	14.29±0.84 <sup>e</sup>	33.54±0.86 <sup>b</sup>	10.54±0.12 <sup>f</sup>	—
	己酸-2-苯乙酯	甜花香	5.19±0.04 <sup>a</sup>	—	2.44±0.10 <sup>f</sup>	2.95±0.17 <sup>b</sup>	3.01±0.26 <sup>b</sup>	1.94±0.37 <sup>d</sup>	2.51±0.07 <sup>e</sup>	1.78±0.13 <sup>d</sup>	2.78±0.14 <sup>cd</sup>	—
	棕榈酸甲酯	油脂香	30.71±0.76 <sup>b</sup>	17.44±1.97 <sup>a</sup>	12.99±0.21 <sup>c</sup>	19.46±1.48 <sup>d</sup>	17.17±0.53 <sup>d</sup>	21.03±0.05 <sup>d</sup>	21.01±0.77 <sup>e</sup>	18.01±1.22 <sup>d</sup>	34.42±0.71 <sup>a</sup>	—
	棕榈酸乙酯	温和的果香、油脂香	119.98±7.02 <sup>a</sup>	72.13±1.88 <sup>e</sup>	105.14±5.53 <sup>b</sup>	96.58±0.79 <sup>bc</sup>	80.82±4.05 <sup>de</sup>	68.80±2.49 <sup>f</sup>	79.14±5.00 <sup>de</sup>	87.67±9.48 <sup>cd</sup>	73.05±7.75 <sup>e</sup>	—
	邻苯二甲酸二异丁酯	—	—	1.96±0.21 <sup>ab</sup>	2.11±0.44 <sup>ab</sup>	1.10±0.24 <sup>d</sup>	2.16±0.12 <sup>bc</sup>	2.30±0.38 <sup>b</sup>	1.62±0.09 <sup>cd</sup>	1.32±0.27 <sup>cd</sup>	1.71±0.14 <sup>bc</sup>	—
	亚油酸甲酯	油脂香	3.66±0.07 <sup>d</sup>	5.82±0.49 <sup>b</sup>	—	1.65±0.06 <sup>e</sup>	1.96±0.09 <sup>e</sup>	3.08±0.20 <sup>f</sup>	3.41±0.01 <sup>d</sup>	4.40±0.44 <sup>e</sup>	6.81±0.44 <sup>d</sup>	—
内酯类	邻苯二甲酸二丁酯	微弱臭气	3.19±0.03 <sup>bc</sup>	3.75±0.27 <sup>abc</sup>	5.36±2.13 <sup>b</sup>	2.63±0.98 <sup>e</sup>	4.89±0.48 <sup>bc</sup>	3.73±0.91 <sup>abc</sup>	3.56±0.63 <sup>abc</sup>	2.54±0.65 <sup>e</sup>	5.51±0.48 <sup>d</sup>	—
	乙酸香叶酯	玫瑰花香、薰衣草香	—	—	—	—	—	—	—	18.09±0.26 <sup>a</sup>	—	—
	顺式-3-己烯醇苯甲酸酯	草香、兰脂香	—	5.86±0.72 <sup>b</sup>	—	—	8.92±0.83 <sup>b</sup>	6.70±0.13 <sup>b</sup>	—	6.51±0.28 <sup>b</sup>	—	—
	(E)-2-苯甲酸己烯酯	—	1.43±0.07 <sup>a</sup>	—	—	0.77±0.11 <sup>d</sup>	1.20±0.04 <sup>d</sup>	—	—	1.00±0.05 <sup>e</sup>	—	—
	3,7-二甲基-2,6-辛二烯酸甲酯	—	—	—	5.53±1.28 <sup>a</sup>	—	—	—	—	—	—	—
	壬酸甲酯	甜果香、酒香	—	—	—	—	—	—	—	—	5.53±0.38 <sup>a</sup>	—
	异戊酸叶醇酯	果香	—	3.34±0.21 <sup>a</sup>	—	—	3.83±0.78 <sup>a</sup>	—	—	—	3.73±0.03 <sup>b</sup>	—
	亚油酸乙酯	胭脂香、果香	22.49±2.11 <sup>bc</sup>	28.69±1.27 <sup>b</sup>	18.49±2.28 <sup>cd</sup>	17.31±0.61 <sup>d</sup>	12.98±0.66 <sup>e</sup>	15.33±1.15 <sup>de</sup>	17.70±2.34 <sup>d</sup>	24.81±2.94 <sup>ab</sup>	18.97±2.21 <sup>cd</sup>	—
	丙位壬内酯	奶香、甜香	—	17.15±0.62 <sup>b</sup>	—	—	—	—	13.19±0.62 <sup>b</sup>	10.61±0.57 <sup>c</sup>	17.18±0.97 <sup>a</sup>	—
	茉莉酸内酯	花香、椰子香	3.94±0.07 <sup>a</sup>	—	—	1.54±0.04 <sup>d</sup>	9.86±1.02 <sup>b</sup>	—	5.21±0.87 <sup>b</sup>	4.73±0.11 <sup>bc</sup>	1.72±0.03 <sup>d</sup>	—
醚类	香豆素	甜香、干草香	—	—	—	13.07±0.02 <sup>a</sup>	—	—	—	—	—	—
	石竹素	甜香、木香	5.66±0.02 <sup>a</sup>	—	—	—	2.59±0.29 <sup>b</sup>	—	1.26±0.01 <sup>e</sup>	—	—	—
酸类	(E)-芳樟醇吡喃氧化物(吡喃型)	木香	124.60±1.72 <sup>a</sup>	107.02±2.53 <sup>b</sup>	—	—	—	—	—	—	—	—
	棕榈酸	轻微油脂香	30.74±1.25 <sup>b</sup>	41.43±2.78 <sup>a</sup>	26.53±0.31 <sup>b</sup>	10.60±3.95 <sup>e</sup>	13.14±6.78 <sup>e</sup>	11.89±4.04 <sup>f</sup>	10.81±1.19 <sup>f</sup>	13.64±0.40 <sup>f</sup>	11.53±1.36 <sup>c</sup>	—
含氮化合物	垅牛儿酸	干草、朽木味	—	—	—	—	—	27.15±15.62 <sup>a</sup>	—	—	—	—
	吡嗪	橘子香、茉莉香	—	—	—	—	19.33±2.51 <sup>a</sup>	—	7.14±0.50 <sup>b</sup>	2.62±0.21 <sup>c</sup>	4.21±0.07 <sup>c</sup>	—
芳香族化合物	咖啡碱	—	36.85±6.54 <sup>d</sup>	22.07±2.37 <sup>b</sup>	6.32±2.94 <sup>d</sup>	17.08±4.04 <sup>bc</sup>	9.75±3.46 <sup>cd</sup>	9.56±3.04 <sup>cd</sup>	7.77±3.01 <sup>d</sup>	10.30±2.42 <sup>cd</sup>	6.84±0.40 <sup>d</sup>	—
	2,2',5,5'-四甲基联苯基	—	1.33±0.01 <sup>a</sup>	0.86±0.13 <sup>b</sup>	0.47±0.00 <sup>f</sup>	0.60±0.07 <sup>e</sup>	1.19±0.01 <sup>a</sup>	1.18±0.10 <sup>a</sup>	0.96±0.16 <sup>b</sup>	0.82±0.05 <sup>b</sup>	0.65±0.02 <sup>c</sup>	—
碳氢化合物	$\alpha$ -蒎烯	木香、焦香	—	—	—	3.13±0.00 <sup>a</sup>	—	—	—	—	—	—
	总香气成分含量	—	6 245.23±217.54 <sup>d</sup>	6 052.23±148.04 <sup>d</sup>	2 205.02±98.91 <sup>f</sup>	5 400.33±134.07 <sup>d</sup>	4 773.82±81.94 <sup>e</sup>	4 120.96±136.95 <sup>f</sup>	6 896.91±169.26 <sup>b</sup>	10 281.62±308.14 <sup>d</sup>	5 232.63±68.53 <sup>d</sup>	—

注：同行不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )，下同。



为进一步明确不同茶树品种所制白茶香气成分的组成差异,所有样品的挥发性物质含量数据经标准化后以欧氏距离为聚类标准绘制层次聚类热图,结果如图6所示。传统白茶与金观音白茶聚为一类,这2个样品的芳樟醇(百合花香)、棕榈酸甲酯(油脂香)、苯乙醇(玫瑰花香)等物质含量显著高于其余品种,香气成分组成上有一定的相似性。奇兰、梅占、紫玫瑰白茶聚为一类,可能是因为芳樟醇(百合花香)、棕榈酸甲酯(油脂香)、棕榈酸(轻微油脂香)、香叶醇(甜花香、果香)、苯乙醛(草香、蜜香)、苯乙醇(玫瑰花香)等物质含量较低且含量接近。橙花醇(花香、甜香)、甲酸香叶酯(玫瑰花香)、亚油酸乙酯(胭脂香、果香)含量较高而7-甲基-3-亚甲基-6-辛烯-1-醇含量较低可能是金牡丹、金萱白茶聚为一类的重要原因。

### 2.3.2 乌龙茶品种所制白茶与传统白茶的关键差异香气成分挖掘

为进一步挖掘乌龙茶品种所制白茶与传统白茶的关键差异香气成分,基于多元统计分析手段以挥发性物质含量构建了OPLS-DA模型(图7),其拟合参数 $R^2_y=0.98$ ,预测能力 $Q^2=0.959$ ,经1 000次交叉验证后 $P$ 值小于0.05,说明模型不存在过拟合现象,效果较好。从图7A可看出传统白茶位于得分图右侧中部,而乌龙茶品种则聚集于得分图的左侧,这表明传统白茶与乌龙茶品种所制白茶的香气内质差异较大。

以 $VIP>1$ 、 $P<0.05$ 为标准,筛选关键挥发性物质。如图7B所示,反式-2-壬醛、顺-3-壬烯-1-醇、棕榈酸甲酯、芳樟醇、亚油酸甲酯、柏木脑、甲酸香叶酯、苯乙醇、橙花醇、水杨酸甲酯、邻苯二甲酸二丁酯以及植酮被认为是决定传统白茶与乌龙茶品种所制白茶香气特征差距的关键挥发性物质。

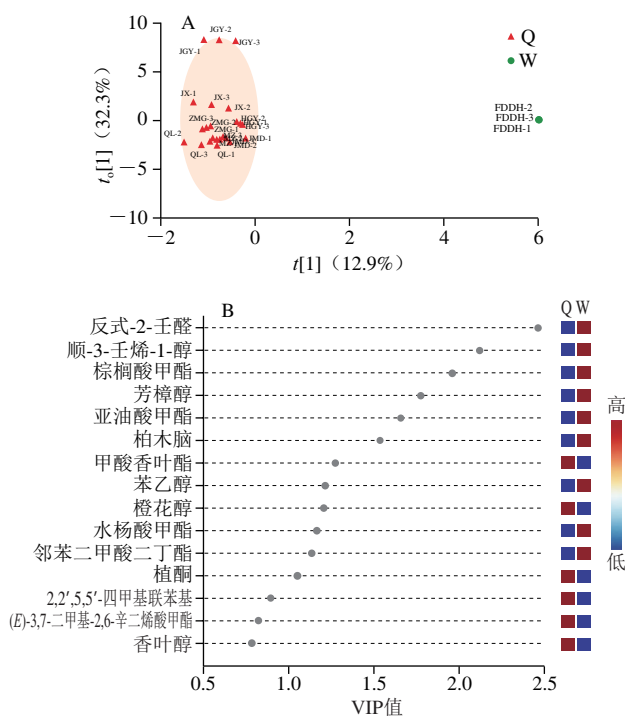


图7 不同品种白茶样品挥发性成分OPLS-DA得分图(A)和变量因子散点图(B)

Fig. 7 OPLS-DA score plot (A) and variable factor scatter plot (B) of volatile components in white tea made from different varieties

表5呈现的是关键挥发性物质在不同茶树品种所制白茶中的含量。橙花醇、植酮、甲酸香叶酯等带有花果香、胭脂香、柑橘香的物质含量在传统白茶中显著低于乌龙茶品种所制白茶,这可能是其相较乌龙茶品种而言花香/品种香弱势的根本原因。

由表4、5可知,芳樟醇、柏木脑、顺-3-壬烯-1-醇、反式-2-壬醛、苯乙醇、水杨酸甲酯等具有甜香、青草香的物质含量在传统白茶中显著多于乌龙茶品种所制白茶,且反式-2-壬醛(青草香)在传统白茶中的含量(12.14  $\mu\text{g}/\text{kg}$ )显著高于本研究中所有乌龙茶品种所制

表5 不同品种白茶样品中OPLS-DA变量因子及VIP>1的挥发性物质

Table 5 OPLS-DA variable factors and volatile components with VIP values greater than 1 in white tea made from different varieties

挥发性成分	VIP值	香型	含量/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )									
			JGY	JX	MX	MZ	ZMG	HGY	QL	JMD	FDDH	
芳樟醇	1.78	柑橘、花香、木质香	1 648.10±59.53 <sup>b</sup>	973.31±68.49 <sup>e</sup>	638.49±33.90 <sup>f</sup>	1 147.86±46.53 <sup>d</sup>	1 284.40±18.19 <sup>e</sup>	919.81±30.20 <sup>d</sup>	596.64±27.50 <sup>f</sup>	851.41±18.01 <sup>f</sup>	1 831.46±35.14 <sup>d</sup>	
苯乙醇	1.22	玫瑰花香、甜蜜香	308.06±9.79 <sup>a</sup>	146.62±4.19 <sup>e</sup>	69.77±7.81 <sup>f</sup>	120.70±10.99 <sup>d</sup>	86.36±6.17 <sup>ef</sup>	126.78±26.63 <sup>cd</sup>	79.23±2.59 <sup>f</sup>	107.28±1.29 <sup>ef</sup>	234.16±5.76 <sup>b</sup>	
橙花醇	1.21	花香、柠檬果香	62.68±2.22 <sup>e</sup>	99.29±2.21 <sup>b</sup>	18.65±0.63 <sup>i</sup>	66.86±0.04 <sup>d</sup>	54.10±1.61 <sup>f</sup>	47.39±1.67 <sup>g</sup>	87.17±0.73 <sup>c</sup>	113.09±3.49 <sup>a</sup>	29.25±0.65 <sup>h</sup>	
柏木脑	1.54	木香、甜香	22.72±0.16 <sup>e</sup>	16.44±1.57 <sup>b</sup>	6.69±0.01 <sup>d</sup>	—	12.82±1.88 <sup>c</sup>	13.51±0.83 <sup>c</sup>	—	11.58±0.51 <sup>f</sup>	24.32±0.61 <sup>a</sup>	
顺-3-壬烯-1-醇	2.12	蘑菇香、果香	13.23±0.05 <sup>b</sup>	8.95±0.65 <sup>e</sup>	—	—	6.02±0.15 <sup>c</sup>	7.10±0.03 <sup>d</sup>	—	—	20.28±0.08 <sup>e</sup>	
反式-2-壬醛	2.46	柑橘香、青草香	6.80±1.47 <sup>b</sup>	4.65±0.44 <sup>cd</sup>	2.60±0.28 <sup>de</sup>	3.35±1.06 <sup>de</sup>	4.13±0.35 <sup>cd</sup>	5.40±0.76 <sup>bc</sup>	3.63±0.18 <sup>de</sup>	3.29±0.26 <sup>de</sup>	12.14±0.98 <sup>e</sup>	
植酮	1.06	草药香	23.62±0.93 <sup>a</sup>	8.73±0.96 <sup>e</sup>	8.91±0.23 <sup>c</sup>	12.32±0.66 <sup>e</sup>	15.63±1.33 <sup>b</sup>	9.64±0.29 <sup>bc</sup>	11.43±0.13 <sup>c</sup>	11.20±1.03 <sup>cd</sup>	7.05±0.07 <sup>f</sup>	
水杨酸甲酯	1.17	甜香、胭脂香	734.81±55.86 <sup>a</sup>	522.69±51.92 <sup>b</sup>	185.43±24.12 <sup>c</sup>	419.61±28.74 <sup>c</sup>	449.61±36.39 <sup>bc</sup>	446.59±2.74 <sup>bc</sup>	295.01±17.81 <sup>d</sup>	677.36±15.18 <sup>a</sup>	695.12±51.04 <sup>a</sup>	
甲酸香叶酯	1.28	玫瑰花香、清新的水果香	3.36±0.32 <sup>d</sup>	6.05±0.19 <sup>b</sup>	1.08±0.06 <sup>f</sup>	4.30±0.30 <sup>e</sup>	—	2.24±0.22 <sup>e</sup>	4.36±0.30 <sup>e</sup>	6.79±0.17 <sup>b</sup>	—	
棕榈酸甲酯	1.96	胭脂香	30.71±0.76 <sup>b</sup>	17.44±1.97 <sup>d</sup>	12.99±0.21 <sup>f</sup>	19.46±1.48 <sup>cd</sup>	17.17±0.53 <sup>d</sup>	21.03±0.05 <sup>c</sup>	21.01±0.77 <sup>e</sup>	18.01±1.22 <sup>d</sup>	34.42±0.71 <sup>a</sup>	
亚油酸甲酯	1.66	胭脂香、木质味	3.66±0.07 <sup>d</sup>	5.82±0.49 <sup>b</sup>	—	1.65±0.06 <sup>f</sup>	1.96±0.09 <sup>f</sup>	3.08±0.20 <sup>d</sup>	3.41±0.01 <sup>d</sup>	4.40±0.44 <sup>e</sup>	6.81±0.44 <sup>a</sup>	
邻苯二甲酸二丁酯	1.14	微弱的香味	3.19±0.03 <sup>bc</sup>	3.75±0.27 <sup>abc</sup>	5.36±2.13 <sup>b</sup>	2.63±0.98 <sup>e</sup>	4.89±0.48 <sup>ab</sup>	3.73±0.91 <sup>abc</sup>	3.56±0.63 <sup>bc</sup>	2.54±0.65 <sup>e</sup>	5.51±0.48 <sup>e</sup>	

白茶。具有草香、紫罗兰叶气息的反,顺-2,6-壬二烯醛仅在传统白茶中检出(22.53  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ),其余样品均未检出。王丽丽等<sup>[44]</sup>发现水杨酸甲酯、苯甲醇、苯乙醇是白茶“清鲜毫香”的物质基础,而在川红功夫红茶中芳樟醇、香叶醇浓度较高时表现出较浓的青气<sup>[39]</sup>,由此推测上述物质奠定了传统白茶“清纯、毫香”的香气特征。带有花果香、胭脂香、柑橘香的橙花醇、植酮、甲酸香叶酯等物质的含量在传统白茶中显著低于其余样品,而在金观音、金牡丹等样品中含量却较高,审评结果显示金牡丹、金观音白茶中保留了更多的“花香”,这些香气成分含量高可能是此现象存在的根本原因。梅占、奇兰、紫玫瑰样品所含花果香物质含量整体处于中等水平,但具有草香的苯乙醛、3,5-辛二烯-2-酮等物质的含量显著低于传统白茶,推测上述几种挥发性物质在梅占、奇兰、紫玫瑰样品中存在比例差异使得花果香得到凸显,从而呈现出花香或品种香。金萱样品中花果香类物质含量显著高于包括传统白茶在内的5个品种,香气表现为“清花香,较浓郁”。黄观音样品中除了壬醛含量超过其余5个品种样品,其余带花香的物质如芳樟醇、苯乙醇含量在所有样品中处于中等偏下水平,呈蜜香、甜香的反-2-辛烯醛只在黄观音中检出,结合感官审评“花蜜香”的结果,推测反-2-辛烯醛是影响黄观音整体香气特点的重要因素。传统白茶与乌龙茶品种所制白茶中,关键差异香气成分对香型呈现的贡献存在差异,证实了乌龙茶品种制花香型白茶的内在优势,为使用乌龙茶品种开发花香型白茶产品提供科学依据。

### 3 结论

本研究通过对传统白茶和乌龙茶品种所制白茶进行感官审评、茶汤品质参数、生化成分与香气成分的检测分析,发现乌龙茶品种所制白茶在香气与滋味上具有传统白茶所不具备的优势,但在外形汤色方面较为弱势。经检测分析发现电导率、pH值、可溶性糖含量、游离氨基酸含量、GCG含量以及EGCG含量是造成传统白茶与乌龙茶品种所制白茶滋味风格不同的重要因素。挥发性物质检测结果表明反式-2-壬醛、顺-3-壬烯-1-醇、棕榈酸甲酯、芳樟醇、亚油酸甲酯、柏木脑、甲酸香叶酯、苯乙醇、橙花醇、水杨酸甲酯、邻苯二甲酸二丁酯和植酮是传统白茶与乌龙茶品种所制白茶间香气特征差异的关键成分。本研究明确了8个乌龙茶品种的白茶适制性,可为白茶品质调控、风味多元化提供理论参考。

### 参考文献:

- [1] CHEN Q C, SHI J, MU B, et al. Metabolomics combined with proteomics provides a novel interpretation of the changes in nonvolatile compounds during white tea processing[J]. Food Chemistry, 2020, 332: 127412. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.127412.
- [2] ZHOU C Z, ZHU C, LI X Z, et al. Transcriptome and phytochemical analyses reveal the roles of characteristic metabolites in the taste formation of white tea during the withering process[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2022, 21(3): 862-877. DOI:10.1016/S2095-3119(21)63785-1.
- [3] DENG X M, SHANG H, CHEN J J, et al. Metabolomics combined with proteomics provide a novel interpretation of the changes in flavonoid glycosides during white tea processing[J]. Foods, 2022, 11(9): 1226. DOI:10.3390/foods11091226.
- [4] TAN J F, ENGELHARDT U H, LIN Z, et al. Flavonoids, phenolic acids, alkaloids and theanine in different types of authentic Chinese white tea samples[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2017, 57: 8-15. DOI:10.1016/j.jfca.2016.12.011.
- [5] SANLIER N, ATIK I, ATIK A. A minireview of effects of white tea consumption on diseases[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 82: 82-88. DOI:10.1016/j.tifs.2018.10.004.
- [6] CHEN X M, KITTS D D, MA Z. Demonstrating the relationship between the phytochemical profile of different teas with relative antioxidant and anti-inflammatory capacities[J]. Functional Foods in Health and Disease, 2017, 7(6): 375. DOI:10.31989/ffhd.v7i6.342.
- [7] DAI W D, LOU N, XIE D C, et al. *N*-Ethyl-2-pyrrolidinone-substituted flavan-3-ols with anti-inflammatory activity in lipopolysaccharide-stimulated macrophages are storage-related marker compounds for green tea[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 68(43): 12164-12172. DOI:10.1021/acs.jafc.0c03952.
- [8] CHEN D, SUN Z, GAO J J, et al. Metabolomics combined with proteomics provides a novel interpretation of the compound differences among Chinese tea cultivars (*Camellia sinensis* var. *sinensis*) with different manufacturing suitabilities[J]. Food Chemistry, 2022, 377: 131976. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.131976.
- [9] 粟本文, 黄怀生, 钟兴刚, 等. 汝城白毛茶白茶品质特征分析[J]. 茶叶通讯, 2018, 45(3): 21-26. DOI:10.3969/j.issn.1009-525X.2018.03.005.
- [10] 张帆, 伍孝冬, 余鹏辉, 等. 桑植白茶产业发展的现状、问题及对策[J]. 湖南农业科学, 2022(1): 84-87. DOI:10.16498/j.cnki.hnnykx.2022.001.022.
- [11] 李远达, 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. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2022060240.
- [12] 周玲. 乌龙茶香气挥发性成分及其感官性质分析[D]. 重庆: 西南大学, 2006.
- [13] 游小妹, 陈志辉, 李鑫磊, 等. “一路香”等5个新品系制作花香白茶感官品质分析[J]. 茶叶学报, 2022, 63(2): 82-85. DOI:10.3969/j.issn.1007-4872.2022.02.004.
- [14] 陈林, 张应根, 项丽慧, 等. ‘茗科1号’等5个福建乌龙茶品种的白茶适制性鉴定[J]. 茶叶学报, 2019, 60(2): 64-68. DOI:10.3969/j.issn.1007-4872.2019.02.004.
- [15] 卢莉, 程曦, 叶国盛, 等. 4种乌龙茶树鲜叶适制绿茶、黄茶、白茶、红茶可行性研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(2): 33-38. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020.02.006.
- [16] 叶乃兴, 杨如兴, 郭吉春. 福建茶树种质资源的遗传多样性和品种创新[J]. 福建茶叶, 2003(3): 42. DOI:10.3969/j.issn.1005-2291.2003.03.025.

- [17] 黄艳, 商虎, 朱嘉威, 等. 加工工艺对茶树花品质及抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 165-170. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190505-018.
- [18] 翁晶晶, 周承哲, 朱晨, 等. 不同风味类型漳平水仙茶的主要品质差异分析[J]. 食品科学, 2021, 42(20): 208-215. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200928-354.
- [19] 银霞. 湖南红茶特征香气物质基础研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020. DOI:10.27136/d.cnki.ghnu.2020.000001.
- [20] 田宇倩. 基于感官评价和化学计量学的白茶风味品质研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [21] 沈培和. 茶汤的pH值[J]. 中国茶叶, 1985(3): 12-13.
- [22] 郭桂义, 葛国平. 不同茶类茶汤pH值的研究[J]. 食品科技, 2012, 37(5): 74-76. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2012.05.036.
- [23] 郑少燕. 不同水质对白茶内含物溶解及茶汤品质风味的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2016.
- [24] 夏涛, 黄继珍, 高丽萍. 祁门红茶化学评审的定量分析[J]. 茶叶科学, 1994, 14(1): 55-58. DOI:10.13305/j.cnki.jts.1994.01.009.
- [25] 林瑞勋. 评茶用水水质及其快速检查法[J]. 茶叶通报, 1983(2): 36-39. DOI:10.16015/j.cnki.jteabusiness.1983.02.017.
- [26] WANG K B, RUAN J Y. Analysis of chemical components in green tea in relation with perceived quality, a case study with Longjing teas[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2009, 44(12): 2476-2484. DOI:10.1111/j.1365-2621.2009.02040.x.
- [27] 刘菲, 孙威江. 白茶品质研究进展[J]. 食品工业科技, 2015, 36(10): 365-368. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.10.069.
- [28] 亓俊然. 鲜叶低温处理对金萱白茶品质的影响研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- [29] 陈义, 张永瑞, 张禄焕, 等. 不同嫩度茶树新梢主要滋味物质分布规律研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(22): 7-11.
- [30] 沈强, 孔维婷, 于洋, 等. 国内外茶叶咖啡碱研究进展[J]. 中国茶叶, 2010, 32(1): 15-18. DOI:10.3969/j.issn.1000-3150.2010.01.005.
- [31] ASHIHARA H, KUBOTA H. Patterns of adenine metabolism and caffeine biosynthesis in different parts of tea seedlings[J]. Physiologia Plantarum, 1986, 68(2): 275-281. DOI:10.1111/j.1399-3054.1986.tb01926.x.
- [32] HIGDON J V, FREI B. Coffee and health: a review of recent human research[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2006, 46(2): 101-123. DOI:10.1080/10408390500400009.
- [33] 虞昕磊. 鲜叶摊放方式对绿茶色、香、味品质成分代谢的影响研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020. DOI:10.27158/d.cnki.ghznu.2020.000041.
- [34] 毛世红. 基于风味组学的工夫红茶品质分析与控制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [35] 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220413-160.
- [36] WU H T, CHEN Y Y, FENG W Z, et al. Effects of three different withering treatments on the aroma of white tea[J]. Foods, 2022, 11(16): 2502. DOI:10.3390/foods11162502.
- [37] 王治会, 彭华, 杨普香, 等. 17份黄金菊茶树自然杂交单株的表型变异与资源价值评价[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(2): 298-307.
- [38] LI T H, XU S S, WANG Y J, et al. Quality chemical analysis of crush-tear-curl (CTC) black tea from different geographical regions based on UHPLC-Orbitrap-MS[J]. Journal of Food Science, 2021, 86(9): 3909-3925. DOI:10.1111/1750-3841.15871.
- [39] 尹洪旭, 杨艳芹, 姚月凤, 等. 基于气相色谱-质谱技术与多元统计分析对不同栗香特征绿茶判别分析[J]. 食品科学, 2019, 40(4): 192-198. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180120-276.
- [40] 童慧霖, 范方媛, 田宇倩, 等. 白茶感官滋味特征属性及相关贡献组分研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(7): 286-293. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2021060260.
- [41] 刘艳艳. 不同水质对祁门红茶茶汤滋味、汤色品质影响及作用机制研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020. DOI:10.26919/d.cnki.gannu.2020.000040.
- [42] 徐邢燕, 陈思, 俞晓敏, 等. 不同烘焙程度与等级武夷肉桂茶品质差异分析[J]. 食品科学, 2020, 41(13): 22-28. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190619-220.
- [43] 魏沙沙, 彭静, 陈志丹, 等. 尤溪苦茶苦味相关物质检测及与苦味的关联分析[J]. 茶叶科学, 2021, 41(3): 337-349. DOI:10.3969/j.issn.1000-369X.2021.03.005.
- [44] 王丽丽, 张应根, 杨军国, 等. 顶空固相微萃取/气相色谱-质谱联用法分析绿茶和白茶香气物质[J]. 茶叶学报, 2017, 58(1): 1-7.