

# 乌龙茶香气成分研究进展

邵静娜, 郑生宏, 周大云, 吉庆勇, 宁秋燕, 何卫中\*

(浙江省丽水市农林科学研究院, 浙江丽水 323000)

**摘要:** 香气是决定乌龙茶品质等级的重要因素, 乌龙茶香型丰富, 香气成分复杂, 不同茶叶的香气特征主要由多种成分的有机组合形成, 文章总结了乌龙茶主要香气成分和常见检测方法, 并就乌龙茶品种、工艺、产区、季节对乌龙茶香气组分的影响进行综述。

**关键词:** 乌龙茶; 香气; 组分

中图分类号: TS272.5+9

文献标识码: A

文章编号: 2095-0306(2024)02-0012-06

## Research Progress on Aroma Components of Oolong Tea

SHAO Jingna, ZHENG Shenghong, ZHOU Dayun, JI Qingyong, NING Qiuyan, HE Weizhong\*

(Lishui Agricultural and forestry Sciences, Lishui 323000, China)

**Abstract:** Aroma is an important factor determining the quality of oolong tea. Oolong tea exhibits rich aroma types with complex aroma components. The aroma characteristics of different tea leaves are mainly formed by the organic combination of multiple components. The article summarizes the primary aroma components of oolong tea and common detection methods. It also reviews how oolong tea varieties, production processes, production areas, and seasons influence the aroma components of oolong tea.

**Keywords:** Oolong tea; Aroma; Component

**DOI:** 10.15905/j.zgcyjg.2095-0306.2024.02.02

乌龙茶, 又叫青茶, 属半发酵茶, 主要产于福建、广东、台湾。乌龙茶中香气物质种类繁多, 具有天然浓郁的花果香型, 受到国内外专家学者广泛关注。近年来, 对乌龙茶香气物质的形成机制、提取方法、检测手段等方面进行了大量的研究<sup>[1]</sup>, 发现茶树品种、茶叶产地、加工工艺与乌龙茶香气特征的形成密切相关<sup>[2]</sup>。文章对乌龙茶主要香气成分、检测方法以及品种、加工、产区、季节对香气组分影响的研究进展展开综述。

## 1 乌龙茶主要香气成分

乌龙茶有别于其他茶类最显著的特征是具有自然优雅的花果香。郭玉琼等<sup>[3]</sup>认为带有玫瑰、铃兰和苹果花香味的萜类物质橙花叔醇是乌龙茶的主要香气成分。HU等<sup>[4]</sup>认为香叶醇、苯乙醇、反式橙花叔醇、芳樟醇及芳樟醇氧化物 II 是乌龙茶的主要花香物质。吕世懂等<sup>[5]</sup>认为芳樟醇、反式-橙花叔醇、茉莉内酯、茉莉酸甲酯和吲哚是乌龙茶的重要香气成分。近年研究表明, 乌龙茶的主要香气组

收稿日期: 2023-11-29, 修改日期: 2024-04-30

基金项目: 国家现代农业产业技术体系资助(CARS-19)

作者简介: 邵静娜(1986-), 女, 河南安阳人, 助理研究员, 主要从事茶叶加工与品质方面的研究

\* 通讯作者: jnhwz@126.com

分为橙花叔醇、吡啶、茉莉内酯等<sup>[6-7]</sup>。陈寿松等<sup>[8]</sup>认为橙花叔醇、 $\alpha$ -法呢烯呈现宜人的花果香,其香味阈值对乌龙茶的风味形成贡献很大。

## 2 乌龙茶香气成分的检测方法

乌龙茶中香气组分复杂、检测技术多样,乌龙茶香气成分的提取方法有蒸馏萃取(Simultaneous distillation extraction, SDE)、搅拌棒吸附萃取(Stir bar sorptive extraction, SBSE)、超临界 CO<sub>2</sub> 流体萃取法(Supercritical CO<sub>2</sub> fluid extraction, SFE-CO<sub>2</sub>)、固相微萃取方法(Solid phase microextraction, SPME)、热脱附技术(Thermal desorption, TD)等<sup>[9]</sup>,检测方法主要有仪器检测和嗅闻检测,仪器检测方法主要有全二维气相色谱/飞行时间质谱联用技术(Comprehensive two-dimensional gas chromatography/time-of-flight mass spectrometry, GC $\times$ GC-TOFMS)、气相色谱-质谱联用法(GC-MS)、实时直接分析质谱(DART-MS)等,并以 GC-MS 法最为常用<sup>[10]</sup>,GC-MS 能测定食品香气成分的组成和含量,可以一定程度反映香气化合物的重要程度<sup>[11]</sup>。GC $\times$ GC-TOFMS 技术目前在茶叶香气成分检测分析上已经得到初步应用,具有分析速度快、范围广、灵敏度高和分辨率高的优点。嗅闻检测主要有电子鼻(E-nose)、气相色谱-气味测定法(GC-O)。电子鼻技术是一种新型的智能仿生技术,与主成分分析法、线性判别分析法、判别因子分析法等模式识别技术相结合,能有效识别不同类型和不同陈化年份茶的特征气味<sup>[12-13]</sup>,但是无法分离、鉴定样品的香气成分<sup>[14]</sup>。而气相色谱嗅觉测定(GC-O)技术对鉴别特征香气化合物及其香气强度和作用大小均非常有效<sup>[11]</sup>。目前已经开发了许多分析技术来确定气味活性化合物的相对气味,常用的方法有香气提取物稀释分析(Aroma extract dilution analysis, AEDA),有效气味物质中哪种化合物对香气有贡献的问题必须通过香气遗漏实验来确定,香气遗漏模型一般通过从完全重组模型中遗漏目标化合物来制备。在关键物质的筛选方面,通常会用气味活度值(Odor active values, OAV)或相对气味活度值(Relative odor activity value, ROAV)分析,以鉴定对乌龙茶感官风味贡献较大的物质。

## 3 乌龙茶香气成分的影响因素

### 3.1 茶树品种对乌龙茶香气成分的影响

茶树品种对乌龙茶香气特征有显著影响,如铁观音具有“观音韵”品质特征;肉桂品种香气馥郁清长,带乳香或桂皮香或花果香;凤凰单丛具有“山韵”和花果香蜜香;岭头单丛具有“蜜韵”;台湾金萱具有具有独特的花香且带奶香味;黄观音具有花香蜜韵;黄金桂品种香气芬芳优雅,常带有桂花、梔子花和梨香的混合香;丹桂品种具有“特殊花香”等<sup>[15]</sup>。不同乌龙茶品种的主要香气成分如表1所示,各种乌龙茶香气成分的比例、阈值的不同、特有的香气成分,形成了不同品种乌龙茶独特的香气特征<sup>[5]</sup>。

### 3.2 加工工艺对乌龙茶香气成分的影响

#### 3.2.1 萎凋对乌龙茶香气成分的影响

刘彬彬等<sup>[29]</sup>研究发现乌龙茶 606 品系鲜叶的主要香气成分是乙酸叶醇酯、苯基乙醇、松油醇、反式-2-己烯-1-醇、苯甲醇,而萎凋叶的主要香气成分是青叶醇、水杨酸甲酯、氧化芳樟醇呋喃型。萎凋对乌龙茶香气的形成起重要作用,乌龙茶香气物质主要来源于萜烯类和芳香醇类配糖体的水解,脂肪酸的氧化裂解和胡萝卜素类的氧化降解产物<sup>[30-31]</sup>。王日为等<sup>[32]</sup>研究认为,萎凋(晒青)使柠檬醛、苯甲酸顺-3-己烯酯、橙花叔醇、水杨酸顺-3-己烯酯、顺-3-己烯酯、乙酸顺-3-己烯酯、芳樟醇、乙酸苯甲酯、己酸顺-3-己烯酯、 $\alpha$ -法呢烯等含量增加,乙苯含量减少。WANG 等<sup>[33]</sup>研究发现紫外线 B 波段(UV-B)作为阳光的重要组成部分,在日光萎凋中刺激乌龙茶的香气形成,起着至关重要的作用,可提高乌龙茶的香气成分,UV-B 的应用会导致  $\beta$ -月桂烯、顺式- $\beta$ -罗勒烯、反式- $\beta$ -罗勒烯和反式芳樟醇氧化物(呋喃类)显著增长。NI 等<sup>[34]</sup>在乌龙茶加工中利用采后补充 LED 光,可以促进叶黄素循环中花药黄质和玉米黄素的积累,促进类胡萝卜素类挥发物如  $\alpha$ -紫罗兰酮、假紫罗兰酮、大马酮、柠檬醛、乙酸香叶醚和  $\alpha$ -法尼烯的形成,从而提高乌龙茶的香气品质。光照是一种重要的植物外源调控因子,与茶鲜叶和萎凋叶内香气成分的生物合成有重要关联,光因子对 MEP 上游关键基因的表达和主要萜类香气组分的生成具有调控作用<sup>[35]</sup>。

表 1 不同乌龙茶品种的主要香气成分  
Table 1 Main aroma components of different oolong tea varieties

| 品种<br>Variety                    | 品种香型<br>Aroma type          | 主要香气成分<br>Main aroma components                                                                              | 参考文献<br>Reference |
|----------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| 铁观音                              | 兰花香、观音韵                     | 橙花叔醇、 $\alpha$ -法呢烯、吲哚、丁酸苯乙酯、己酸异戊酯、2-甲基丁酸-2-苯乙酯                                                              | [5,16]            |
| 黄观音                              | 花香蜜韵                        | 芳樟醇、反式-橙花叔醇、癸醛、茉莉酮、茉莉酸甲酯和吲哚                                                                                  | [2]               |
| 黄玫瑰                              | 谷物香及花香                      | $\alpha$ -法呢烯、橙花叔醇、芳樟醇氧化物 I、芳樟醇氧化物 II、水杨酸甲酯、吲哚和糠醛、苯乙醛                                                        | [17-18]           |
| 紫牡丹                              | 馥郁优雅的果香,灵动的花香,同时有饱满的炒香和焦糖香气 | 苯甲醛、芳樟醇氧化物( I 和 II )、芳樟醇、水杨酸甲酯、3,5-二乙基-2-甲基吡嗪                                                                | [18-19]           |
| 丹桂                               | 花果香、清香                      | 芳樟醇及其氧化物、橙花叔醇、香叶醇、苯甲醛、苯乙醛、 $\beta$ -紫罗酮、顺-己酸-3-己烯酯、3-甲基丁酸-2-苯乙酯、顺-苯甲酸-3-己烯-1-酯、法呢烯、十四烷、吲哚、 $\alpha$ -合金欢烯    | [20-21]           |
| 黄金桂                              | 香气芬芳优雅,常带有桂花、梔子花和梨香的混合香     | $\beta$ -紫罗酮、 $\alpha$ -紫罗酮、 $\beta$ -二氢紫罗兰酮、 $\gamma$ -十二内酯、 $\gamma$ -癸内酯、吲哚、氨基甲酸酯、 $\gamma$ -杜松烯          | [5]               |
| 凤凰单丛(群体种及蜜兰香、姜花香、杏仁香、夜来香单丛茶无性品系) | 花果香、蜜香                      | 脱氢芳樟醇、芳樟醇、芳樟醇氧化物、D-柠檬烯、 $\beta$ -月桂烯、吲哚、茉莉酮、橙花叔醇、苯乙腈、伞花烃、 $\beta$ -蒎烯、D-柠檬烯、 $\alpha$ -松油烯、2,6-二甲基-2,4,6-辛三烯 | [5,22]            |
| 软枝乌龙                             | 花果香                         | $\alpha$ -法尼烯、橙花叔醇、吲哚、3,7-二甲基-1,6-辛二烯-3-醇、己酸己酯、3,7-二甲基-1,5,7-辛三烯-3-醇、(Z)-己酸-3-己烯酯、香叶醇                        | [23]              |
| 新品系“606”(黄旦自然杂交的后代)              | 馥郁幽长                        | 己酸叶醇酯、 $\alpha$ -法呢烯、香叶醇、苯基乙醇、吲哚、芳樟醇、水杨酸甲酯、氧化芳樟醇呋喃型、青叶醇、乙酸叶醇酯                                                | [24]              |
| 春闰                               | 花香浓郁持久                      | 橙花叔醇、吲哚、(E)-4,8-二甲基壬-1,3,7-三烯、2-甲基丁酸苯乙酯、己酸叶醇酯、苯乙醇、(Z,E)- $\alpha$ -法尼烯、脱氢芳樟醇、茉莉内酯                            | [25]              |
| 金萱                               | 具有独特的花香且带奶香味                | 橙花叔醇、(顺)-己酸-3-己烯酯、3-二甲基-1,5,7-辛三烯-3-醇、芳樟醇氧化物( III )、吲哚和己醛                                                    | [26]              |
| 肉桂                               | 香气馥郁清长,带乳香或桂皮香或花果香          | 甲酸甲酯、2-甲基呋喃、乙酸苯乙酯、2,3,7-三甲基辛烷、2,6,10-三甲基-十二烷、2-甲基戊二酸酐类似物、异戊醛、乙酸甲酯、糠醛                                         | [10,27-28]        |
| 武夷水仙                             | 兰花香                         | 1,2-戊二烯、脱氢芳樟醇、2,5-二甲氧基苯甲腈                                                                                    | [10]              |

3.2.2 做青对乌龙茶香气成分的影响

乌龙茶的浓郁花果香，主要与做青工艺密切相关。在做青过程中,低沸点的青草气成分得以挥发和转化,高沸点的花果香成分显露出来<sup>[15]</sup>,新的芳香物质大量形成。苯乙醛、芳樟醇、吲哚、己酸-3-己烯酯、法尼烯、茉莉内酯、橙花叔醇、苯甲酸-3-己烯酯、植醇等乌龙茶特征香气增加明显<sup>[36]</sup>。MA 等<sup>[37]</sup>发现乌龙茶在摇青过程中  $\alpha$ -法尼烯、橙

花叔醇、吲哚含量显著增加。宋加艳等<sup>[38]</sup>认为反式-橙花叔醇、 $\alpha$ -法呢烯、吲哚、二氢芳樟醇等成分 是乌龙茶做青工序花香形成的关键成分，也可作为乌龙茶品质优良的评价标准。邓慧莉等<sup>[39]</sup>研究发现做青温度对铁观音毛茶的香气类型有较大影响。低温做青茶叶香气组分更为丰富,主要成分 为吲哚、橙花叔醇、芳樟醇、氧化芳樟醇、己酸叶醇 酯等，高温做青茶叶以法呢烯和甲基庚烯酮等果

香型香气为主,其他香气组分相对含量低于低温和常温做青茶样。黄旦品种在相对湿度75%的条件下,橙花叔醇、香叶醇、 $\beta$ -紫罗酮、顺茉莉酮等提高香气品质的组分含量较高,毛茶香气浓爽持久,花香明显,香气高于低湿度(55%)做青<sup>[40]</sup>。邢家宝等<sup>[41]</sup>认为摇青器械对茶叶造成的机械损伤,导致叶片失水速率加大以及内源乙烯的多次跃变,且在摇青和晾青的共同作用下,叶片呼吸强度急剧上升,香气和酶的活性也发生变化。在做青工艺的研究中发现,萜类香气物质在乌龙茶摇青阶段大量形成并释放,这些香气成分共同组成乌龙茶的特征香气。有研究发现在摇青过程机械力和低温胁迫共同引起乌龙茶在制叶的吲哚、橙花叔醇和茉莉内酯等特征香气组分积累,主要因为在摇青阶段叶片的连续损伤胁迫激活了CsNES的表达增加,导致E-橙花醇类化合物的积累<sup>[42-44]</sup>。

### 3.2.3 烘焙对乌龙茶香气成分的影响

乌龙茶独特品质的形成,烘焙工艺尤为重要。烘焙是形成乌龙茶特有香气和独特的茶汤口感的关键工序<sup>[45-46]</sup>。轻火烘焙的乌龙茶具有清香或淡花香,中火烘焙后具有花香或花果香,足火烘焙后的乌龙茶有明显果香或果糖香,而高火烘焙后则具有明显焦糖香或火功香<sup>[47]</sup>。轻火烘焙的乌龙茶中具有较高含量青草香特征的庚醛、己醛、3-辛酮。中、足火乌龙茶中具有果香气特征的2-己酮、丙酸、 $\gamma$ -丁内酯、正己醛等含量较为突出。高火烘焙的乌龙茶具有烘烤香呈香特性的反-2,4-庚二烯醛、对乙基苯酚、5-甲基糠醛的含量较高<sup>[48]</sup>。乌龙茶在焙火过程中L-茶氨酸和D-葡萄糖相互作用,在热反应下形成2,5-二甲基吡嗪为烘烤香的美拉德反应产物<sup>[49]</sup>。黄毅彪等<sup>[50]</sup>研究发现热风连续焙火处理的具有烘焙、焦糖香的吡嗪类、呋喃类物质高于热风间歇焙火处理。可能是采用连续焙火通过美拉德反应产生与烘烤香相关的物质较多;采用间歇式焙火生成与烘烤香相关的物质比较少。在乌龙茶烘焙过程中形成香气的重要途径主要为美拉德反应及氨基酸和烃类(碳氢化合物)的降解<sup>[51]</sup>。

### 3.3 产区对乌龙茶香气成分的影响

不同的产区具有不同地区的气候、土质特点,形成了各种产区乌龙茶自己独特的品质特征。不同产区的乌龙茶香气成分差异很大,构成

了它们自身的香气特点<sup>[5]</sup>。邵淑贤等<sup>[2]</sup>对云霄和武夷山生产的黄观音乌龙茶香气成分进行分析,发现云霄黄观音中OAV较高的茉莉酸甲酯、吲哚、茉莉酮、反式-橙花叔醇和茉莉内酯等香气成分多具花香特征,而武夷山黄观音中OAV较高的芳樟醇、癸醛、月桂烯、异戊醛和己醛等香气成分多具有花果香气特征。甘爽等<sup>[48]</sup>对不同产地乌龙茶挥发性成分的指纹图谱进行分析,发现我国不同产地乌龙茶样品差异显著,如广东乌龙茶中2-乙基吡嗪、柠檬烯、2,6-二甲基吡嗪含量较高;闽南地区乌龙茶中苯甲醛、辛醛、庚醛、己醛、正丁酸、反-2-庚烯醛、3-辛酮含量较高;闽北地区乌龙茶中对乙基苯酚、癸醛、2-庚酮、反-2,4-庚二烯醛、 $\gamma$ -丁内酯、5-甲基糠醛、反-2-辛烯醛、苯乙醇、2-甲基丁醇、甲基苯甲醇、顺-3-壬烯醇含量较高;台湾地区乌龙茶中2-庚酮、糠醛、 $\gamma$ -丁内酯、2-乙酰基呋喃、戊醇、乙酸、正己醛、2-己酮、戊醛、丙酸含量较高。各乌龙茶产区种植环境及加工工艺的不同,可能是其香气成分差异较大的主要原因<sup>[5]</sup>。

### 3.4 季节对乌龙茶香气成分的影响

乌龙茶在做青过程中形成乌龙茶特有花香,主要在于各个茶季原料品质、气候特点和制茶时的天气。一般在相同加工技术情况下,茶叶质量优次分别为春茶、秋茶、夏茶、暑茶<sup>[52]</sup>。吕小菊<sup>[53]</sup>研究发现秋茶香气浓郁高扬的关键成分是顺-3-己烯醇、芳樟醇、香叶醇和苯甲醇等物质,春茶香气的关键成分是水杨酸甲酯、橙花醇。夏季芽叶内的香气组分含量较低,导致夏茶香气平淡。回瑞华等<sup>[54]</sup>研究发现春季乌龙茶主要香气成分为苯乙醇、吲哚、橙花叔醇、邻苯二甲酸二丁酯,秋季乌龙茶主要香气成分为芳樟醇、橙花叔醇。赖幸菲等<sup>[55]</sup>发现不同季节的乌龙茶的香气组分较有规律,春夏秋三个季节的乌龙茶香气组分均以醇类、吡咯类及其衍生物为主,秋季的特征香气物质主要是反-橙花叔醇和吲哚。李晓玲等<sup>[56]</sup>发现凤凰单丛春茶中3,7-二甲基-1,5,7-辛三烯-3-醇、香叶醇和月桂烯等组分含量最高,秋茶中芳樟醇、(E)-4,8-二甲基-1,3,7-壬三烯、(E)-3,7-二甲基-1,3,6-辛三烯和苯乙醇等的相对含量最高。郑挺盛等<sup>[57]</sup>发现单丛秋茶中青叶醛、苯乙醛、萜品醇、水杨酸甲酯、香叶醛、3-环己-1-烯-

2-烯醛、吲哚、茉莉酮、法呢烯、橙花叔醇、香柠檬醇、4-(2,4,4-三甲基-1,5-环己二烯基)-2-丁烯-4-酮、棕榈酸甲酯等的含量要高于其它季节。由于秋茶中含有较高的醛类和醇类,而烯类物质含量较少,所以秋茶花香要比其它季节的茶叶更明显。

已有研究表明,茶叶糖苷类香气前体含量的季节性变化明显,在香气前体总量上,春、秋季含量较高而夏季较低。糖苷类香气前体种类不同,故乌龙茶香气组分随季节变化的消长规律也存在明显差异<sup>[58]</sup>。

## 4 展望

乌龙茶香型丰富,香气成分复杂,主要受品种、制作工艺、产区、季节的影响。近几年对乌龙茶香气的研究,主要聚焦于乌龙茶香气形成机制、提取方法、检测手段和香气物质的组成等方面。而呈现不同乌龙茶香气特征各组分的阈值浓度、香气成分间的协同作用以及香气成分之间的抑制作用的研究较少,需要进一步深入研究。随着科技的发展,基于挥发性香气物质、物理特性传感器与云服务器实现智能化判别模式做青<sup>[59]</sup>。人为调控、在线生产智能调控、定向调控香气成分以生产不同定制香气特征的茶叶产品,将成为进一步研究的方向。

## 参考文献:

- [1] 萧涵,周宇飞,陈毅欣,等. 基于 CiteSpace 的乌龙茶香气研究知识图谱分析 [J]. 食品与发酵工业, 2023, 49 (5): 344-351.
- [2] 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.
- [3] 郭玉琼,詹梓金,金心怡,等. 梅占茶不同环境做青过程香气形成及其变化[J]. 中国农学通报, 2007(5): 115-119.
- [4] HU C J, LI D, MA Y X, et al. Formation mechanism of the oolong tea characteristic aroma during bruising and withering treatment[J]. Food Chemistry, 2018, 269: 202-211.
- [5] 吕世懂,吴远双,姜玉芳,等. 不同产区乌龙茶香气特征及差异分析[J]. 食品科学, 2014, 35(2): 146-153.
- [6] ZENG L, ZHOU Y, FU X, et al. Biosynthesis of jasmine lactone in tea (*Camellia sinensis*) leaves and its formation in response to multiple stresses [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66: 3899-3909.
- [7] 陈寿松,金心怡,游芳宁,等. 多次间歇 LED 光照射对铁观音风味组分的影响 [J]. 农业工程学报, 2018, 34 (2): 308-314.
- [8] 陈寿松,林宏政,孙云,等. 乌龙茶萜类物质及其代谢调控研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(5): 72-80.
- [9] 黄绮婷,李妙清,李娜. TD-GC-MSD 法分析四季春与金萱挥发性香气成分[J]. 饮料工业, 2022, 25(2): 29-36.
- [10] 陈林,余文权,张应根,等. 基于 SDE 和 HS-SPME/GC-MS 的乌龙茶香气组成特征分析 [J]. 茶叶科学, 2019, 39(6): 692-704.
- [11] 程宏桢,蔡志鹏,王静,等. 基于 GC-MS,GC-O 和电子鼻技术评价百香果酒香气特征[J]. 食品科学, 2021, 42(6): 256-264.
- [12] 施莉婷,江和源,张建勇,等. 茶叶香气成分及其检测技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(12): 347-351.
- [13] 欧伊伶,张娅楠,覃丽,等. 茶叶色香味品质评价方法研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(6): 342-347.
- [14] 王淑燕,赵峰,饶耿慧,等. 基于电子鼻和 ATD-GC-MS 技术分析茉莉花茶香气成分的产地差异 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(15): 234-239.
- [15] 钟秋生,李鑫磊,林郑和,等. ‘春闰’乌龙茶加工过程中香气成分的变化研究[J]. 茶业通报, 2021, 43(1): 21-31.
- [16] 钟秋生,吕海鹏,林智,等. 东方美人茶和铁观音香气成分的比较研究[J]. 食品科学, 2009(8): 182-186.
- [17] 郭向阳,宛晓春. 黄玫瑰乌龙茶挥发性香气成分的 GC-MS 分析[J]. 中国食品添加剂, 2019, 30(2): 152-161.
- [18] GUO X Y, SCHWAB W, HO C T, et al. Characterization of the aroma profiles of Oolong tea made from three tea cultivars by both GC-MS and GC-IMS [J]. Food Chemistry, 2022, 376: 131933.
- [19] 卢慰. 紫牡丹乌龙茶香气成分的 SPME/HS-GC-MS 分析[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(20): 161-165.
- [20] 钟秋生,陈常颂,张应根,等. SDE-GC/MS 分析丹桂品种乌龙茶香气成分[J]. 福建农业学报, 2012, 27(5): 498-506.
- [21] 孙君,朱留刚,林志坤,等. 变温烘焙技术对丹桂乌龙茶香气品质的影响[J]. 茶叶科学, 2017, 37(3): 266-272.
- [22] 史敬芳,陈栋,黄文洁,等. 基于 HS-SPME-GC-MS 技术对凤凰单丛乌龙茶香气成分比较分析 [J]. 食品科学, 2016, 37(24): 111-117.
- [23] 刘晓慧,王琼,邓德涵,等. 不同等级软枝乌龙茶品质研究 [J]. 云南农业大学学报: 自然科学, 2022, 37(3): 464-470.
- [24] 刘彬彬,周子维,胡娟,等. 茶树新品系“606”乌龙茶加工过程中挥发性成分的变化[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2019, 48(6): 746-752.
- [25] 李鑫磊,邓慧莉,钟秋生,等. ‘春闰’与‘福云 6 号’乌龙茶香气组分差异研究[J]. 茶叶学报, 2021, 62(3): 112-116.
- [26] 苗爱清,凌彩金,庞式,等. 金萱乌龙茶香气成分的分析研究[J]. 广东农业科学, 2007(9): 82-83, 97.
- [27] 项金茂,林慧,刘宝顺,等. 漫话武夷肉桂茶 [J]. 福建茶叶, 2015, 37(3): 7-9.

- [28] 毕婉君, 郑玉成, 柳镇章, 等. 乌龙茶 ATD-GC-MS 检测方法优化及不同等级肉桂乌龙茶香气成分分析 [J]. 食品科学, 2022, 43(12): 243–251.
- [29] 刘彬彬, 周子维, 胡娟, 等. 茶树新品系“606”乌龙茶加工过程中挥发性成分的变化[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2019, 48(6): 746–752.
- [30] WANG C, LYU S, WU Y, et al. Oolong tea made from tea plants from different locations in Yunnan and Fujian, China showed similar aroma but different taste characteristics [J]. Springer Plus, 2016, 5(1): 576.
- [31] ZHANG N, JING T, ZHAO M, et al. Untargeted metabolomics coupled with chemometrics analysis reveals potential non-volatile markers during oolong tea shaking [J]. Food Research International, 2019, 123: 125–134.
- [32] 王日为, 张丽霞, 杨伟丽, 等. 乌龙茶做青过程中香气的动态变化规律 [J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 1999, 25(3): 194–199.
- [33] WANG X H, CAO J J, CHENG X. UV-B application during the aeration process improves the aroma characteristics of oolong tea.[J]. Food Chemistry, 2024, 435: 137585.
- [34] NI Z X, YANG Y, ZHANG Y N, et al. Dynamic change of the carotenoid metabolic pathway profile during oolong tea processing with supplementary LED light [J]. Food Research International, 2023, 169: 112839.
- [35] 芳芳宁, 邓慧莉, 胡娟, 等. 不同温度 LED 光萎凋对铁观音 MEP 上游关键基因和香气的影响 [J]. 中国农业科学, 2020, 53(2): 346–356.
- [36] 宛晓春. 茶叶生物化学 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [37] MA C Y, LI J X, CHEN W, et al. Study of the aroma formation and transformation during the manufacturing process of Oolong tea by solid-phase micro-extraction and gas chromatography-mass spectrometry combined with chemometrics [J]. Food Research International, 2018, 108: 413–422.
- [38] 宋加艳, 何加兴, 欧伊伶, 等. 碧香早夏季鲜叶加工乌龙茶过程中品质成分动态变化 [J]. 现代食品科技, 2020, 37(2): 238–248.
- [39] 邓慧莉, 李鑫磊, 毛贻帆, 等. 不同做青温度对乌龙茶滋味与香气品质的影响 [J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(14): 5766–5771.
- [40] 张方舟, 陈荣冰. 不同湿度做青环境对乌龙茶香气的影响[J]. 福建农业学报, 1999, 14(4): 34–37.
- [41] 邢家宝, 曹藩荣. 乌龙茶做青工艺中萜类挥发性香气形成机制研究进展[J]. 广东茶业, 2022(1): 2–7.
- [42] ZHOU Y, ZENG L, HOU X, et al. Low temperature synergistically promotes wounding-induced indole accumulation by INDUCER OF CBF EXPRESSION-mediated alterations of jasmonic acid signaling in *Camellia sinensis* [J]. Journal of Experimental Botany, 2020, 71: 2172–2185.
- [43] ZHOU Y, ZENG L T, LIU X Y, et al. Formation of (E)-nerolidol in tea (*Camellia sinensis*) leaves exposed to multiple stresses during tea manufacturing [J]. Food Chemistry, 2017, 231: 78–86.
- [44] ZENG L T, ZHOU Y, FU X M, et al. Biosynthesis of jasmine lactone in tea (*Camellia sinensis*) leaves and its formation in response to multiple stresses [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(15): 3899–3909.
- [45] 刘宝顺, 潘玉华. 武夷岩茶烘焙技术 [J]. 安徽农业科学, 2013, 41(34): 13385–13386.
- [46] 黄艳, 孙威江. 闽南乌龙茶烘焙的研究进展 [J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(5): 1525–1529.
- [47] 项应萍, 徐邢燕, 刘国英, 等. 乌龙茶烘焙技术研究进展[J]. 亚热带农业研究, 2019, 15(3): 211–216.
- [48] 甘爽, 陈志丹, 商虎, 等. 基于气相离子迁移谱技术的不同产地乌龙茶挥发性物质分析 [J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(9): 68–77.
- [49] GUO X Y, SONG C K, HO C T, et al. Contribution of 1-theanine to the formation of 2, 5-dimethylpyrazine, a key roasted peanutty flavor in Oolong tea during manufacturing processes [J]. Food Chemistry, 2018, 263: 18–28.
- [50] 黄毅彪, 林燕萍, 张见明, 等. 焙火方式对武夷岩茶瑞香品质的影响 [J]. 食品研究与开发, 2020, 41(11): 124–128, 200.
- [51] 洪翠云, 林廷好, 高建设, 等. 武夷岩茶炭焙工艺对肉桂乌龙茶挥发性组分的影响 [J]. 亚热带植物科学, 2021, 50(6): 421–429.
- [52] 陈慧聪. 闽南水仙、永春佛手茶品质特征和审评要点[J]. 中国茶叶加工, 2003(4): 34–35.
- [53] 吕小菊. 不同采摘季节对乌龙茶的品质影响 [J]. 蚕桑茶叶通讯, 2023(2): 15–17.
- [54] 回瑞华, 侯冬岩, 李铁纯, 等. 春秋两季乌龙茶香气组分的比较分析[J]. 鞍山师范学院学报, 2023, 25(2): 45–48.
- [55] 赖幸菲, 庞式, 李裕南, 等. 不同季节翠玉品种茶叶香气组分的 GC-MS 分析 [J]. 现代食品科技, 2014, 30(12): 287–293, 301.
- [56] 李晓玲, 李斌, 张媛媛, 等. 广东凤凰单丛三种香型乌龙茶的理化与香气特性[J]. 食品工业科技, 2014, 35(23): 302–307.
- [57] 郑挺盛, 张凌云. 不同采摘季节对重发酵单枞茶香气品质影响研究[J]. 现代食品科技, 2007(2): 11–15.
- [58] 张凌云, 张燕忠, 叶汉钟. 采摘时期对重发酵单丛茶香气及理化品质影响研究[J]. 茶叶科学, 2007, 27(3): 236–242.
- [59] 魏子淳. 基于在线反馈参数的闽北乌龙茶智能化做青技术研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2022.