# 广东花香型红茶与单丛茶挥发性成分比较分析

梅双[1,2]，陈维[1,3]，马成英[1,3]，陈栋[1]，乔小燕[1,3]
（1.广东省农业科学院茶叶研究所，广东广州 510640）（2.广东省农业科学院，广东广州 510640）
（3.广东省茶树资源创新利用重点实验室，广东广州 510640）

**摘要：**以不同茶树品种加工的红茶和单丛茶为试验材料，采用 HS-SPME-GC-MS 方法，比较分析同一茶树品种在不同年份、不同季节加工的红茶和单丛茶中挥发性成分差异，探明不同茶树品种红茶和单丛茶的特征性成分，为深入了解茶树品种特性和加工工艺对香气轮廓的影响提供借鉴。结果表明：萜醇是鸿雁 12 号（HY12）、大叶奇兰 10 号（QL10）、岭头单丛（LT）和乌叶单丛（WY）中最丰富的挥发性成分。萜醇和芳香醛是 HY12 和 QL10 的主体挥发性成分。萜烯、烃类、萜酮和脂肪酮是构成 LT 和 WY 的主体挥发性成分，吲哚可区分 LT 和 WY 香型。PLS-DA 进一步证实，遗传背景相似且加工工艺相同的 WY 和 LT 香气轮廓略有差异；遗传背景不同但加工工艺相同的 QL10 和 HY12 香气轮廓不同。因此，相同的加工工艺其主体挥发性成分相同，但茶树品种的遗传背景决定茶叶香气轮廓。

**关键词：**遗传背景；挥发性成分；偏最小二乘法判别分析
**文章篇号：**1673-9078(2020)01-242-252 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.1.034

# Comparative Analysis of Volatiles of Flowery Black Teas and Dancong Teas from Guangdong Province

**MEI Shuang[1,2], CHEN Wei[1,3], MA Cheng-ying[1,3], CHEN Dong[1], QIAO Xiao-yan[1,3]**
(1.Tea Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Science, Guangzhou 510640, China)
(2.Guangdong Academy of Agricultural Science, Guangzhou 510640, China)
(3.Guangdong Provincial Key Laboratory of Tea Plant Resources Innovation & Utilization, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** To provide reference for further understanding the characteristics of tea varieties, black teas and dancing teas processed by tea varieties with different genetic backgrounds as experimental materials, the volatiles were analyzed by gas chromatography and mass spectrometry (GC-MS), extracted by headspace solid phase microextraction (HS-SPME). The characteristic volatiles of black teas from different tea varieties were identified. The results showed that terpene alcohols were the most abundant volatiles in black teas made by tea plants of Hongyan 12 (HY12), Daye qilan 10(QL10), and dancing teas made by Lingtou dancong (LT) and Wuye dancong (WY). Terpene alcohols and aromatic aldehydes were the main volatiles of HY12 and QL10. Terpenes, hydrocarbons, terpene ketones, and fatty ketones were the important volatiles of LT and WY. And indoles may distinguished the flavors between LT and WY. Partial least squares discriminant analysis further confirmed that the aromas had slightly differences between WY and LT, due to similar genetic background and t identical processing technique. The aroma profiles were different between, in term of different genetic background. Therefore, the principal volatiles of all teas were the same through identical processing technique, QL10 and HY12 but the genetic background determines the aroma profile of tea varieties.

**Key words:** genetic backgrounds; volatiles; partial least squares discriminant analysis

香气是判别茶树品种优良与否的重要指标，也是成品茶品质优劣的重要指标。因此，茶叶香型和香气化合物一直是科研工作者和消费者关注的重点。茶叶香气是由不同沸点的挥发性成分组成的，目前已有 700 多种茶叶挥发性成分被鉴定出来。茶叶香气受茶树品种、采摘季节和加工工艺等因素影响，导致茶叶挥发性成分的组成和相对含量有所差异，从而产生不同类型的香气品质[1]。萜烯类、醇类、醛类、酮类和酯类等5类物质对茶叶芳香气味起主要作用[2,3]，酮基、醛基、羟基等是其发香基团，且香气的强弱与挥发性成分碳链长短有关，不饱和键能增强香气[4,5]。

收稿日期：2019-07-28
基金项目：广东省农业科学院院长专项（201906）；省农村科技领域项目（2017A020208020）
作者简介：梅双（1989-），女，硕士，农业经济师，研究方向：农业科技条件平台建设
通讯作者：乔小燕（1982-），女，副研究员，研究方向：茶树种质资源鉴评、加工和分子生物学

顶空固相微萃取和气相色谱—质谱联用分析技术（HS-SPME-GC-MS）已广泛应用于分析茶叶、昆虫、水瓜柳和苦艾蒿等挥发性和半挥发性成分[6-9]。对挥发性成分进行主成分分析来判别或分类品种是一种可行的办法[10-13]。研究证实，加工工艺可改变茶叶香气轮廓[14-17]，但品种是形成茶叶香型的重要物质基础[18]。现有研究大多是分析单一品种不同茶类[19]或者不同品种相同茶类[20]或同一品种不同季节的挥发性成分差异[1]。茶叶生产年份和采摘季节差异对同一品种、相同茶类的对香气轮廓的影响鲜有报道。本研究以不同遗传背景茶树品种加工的红茶和单丛茶为试验材料，采用 HS-SPME-GC-MS 方法，比较分析同一茶树品种在不同年份、不同季节加工的红茶和单丛茶可挥发性成分差异，通过统计学方法探明不同茶树品种红茶或单丛茶的特征性成分，为今后茶树种质资源的鉴评和新品种选育提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

HY12 为铁观音自然杂交后代中选育的国家级无性系品种-鸿雁 12 号；QL10 为广东饶平大叶奇兰群体中选育的无性系品种-大叶奇兰 10 号；LT 为凤凰水仙群体中选育的国家级茶树品种-乌叶单丛茶；WY 为凤凰水仙群体中选育的省级无性系品种-乌叶单丛茶。HY12 和 QL10 均种植于广东省农业科学院茶叶研究所英德基地，树龄为 10 年以上；LT 和 WY 均种植于广东省梅州市大埔凯达茶叶公司，树龄为 10 年以上。

HY12、QL10、LT 和 WY 采摘标准为一芽二叶，HY12 和 QL10 按照大叶种工夫红茶加工工艺加工，萎凋时间为 15~18 h（含水量 50%左右），发酵时间为 7~9 h，初烘温度为 120 ℃，足烘温度 80 ℃。LT 和 WY 按照单丛茶加工工艺加工，晒青时间为 3~4 h，摇青 5~6 次，初烘温度为 100~110 ℃，足烘温度 90 ℃。HY12、QL10、LT 和 WY 分别于 2011 年和 2013 年加工，保存于低温冰箱备用。

表 1 参试品种目录

**Table 1 The list of the experimental samples**

| 品种 | 茶类 | 201105 | 201107 | 201111 | 201305 | 201307 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| QL10 | 红茶 | QL10-1 | QL10-2 | \ | QL10-3 | QL10-4 |
| HY12 | 红茶 | HY12-1 | HY12-2 | \ | HY12-3 | HY12-4 |
| WY | 单丛茶 | WY-1 | \ | WY-2 | \ | \ |
| LT | 单丛茶 | LT-1 | \ | LT-2 | \ | \ |

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 挥发性成分的测定

挥发性成分测定采用 HS-SPME-GC-MS 进行分析，方法参照乔小燕等[21]。

#### 1.2.2 数据分析

所有数据统计及计算均使用 Microsoft Excel 2013 分析，采用 Graphpad prism 6 软件绘制分类图。采用 R 软件对挥发性成分绘制维恩图，SIMCA-P 11.5 软件对挥发性成分进行 PLS-DA 分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 挥发性成分相对含量与分类分析

由表 2 可知，HY12 检测到 60 种挥发性成分，QL10 检测到 62 种挥发性成分，WY 则检测到 59 种挥发性成分，LT 检测到 80 个组分。根据挥发性成分的化学结构，醇类、酯类、醛类、酮类等是 4 个样品中主要的挥发性成分，以醇类相对含量最高，在 38.18%~68.26%之间。

由图 1 可知，萜醇是醇类中主要的挥发性成分，QL10（52.26%）萜醇平均相对含量高于 HY12（44.71%）、LT（37.93）和 WY（38.63%）。橙花醇和 $\beta$-芳樟醇是 HY 12 和 QL10 中主要的萜醇，$\beta$-芳樟醇和脱氢芳樟醇是 WY1 和 LT2 中主要的萜醇；反-橙花叔醇是 WY2 中主导萜醇，$\beta$-芳樟醇则是 LT1 中主导萜醇。酯类在 HY 12 和 QL10 中相对含量仅次于萜醇，水杨酸甲酯是酯类中主要的挥发性成分。水杨酸甲酯也是 WY1 和 LT1 中主要的酯类；WY2 和 LT2 中主导酯类挥发性成分不同，分别为顺-己酸-3-己烯酯和苯甲酸甲酯。

醛类和酮类在 HY12、QL10、LT 和 WY 中相对含量低于醇类。萜酮是酮类中主要挥发性成分，而芳香醛则是醛类中主要挥发性成分。HY12（6.66%）和 QL10（6.25%）萜酮平均相对含量低于 LT（8.32%）和 WY（8.84%），$\beta$-紫罗酮是主要萜酮。脂肪酮在 HY12（1.98%）和 QL10（1.55%）中平均相对含量低于 LT（3.33%）和 WY（3.06%）。QL10（5.71%）和 HY12（8.67%）芳香醛平均相对含量高于 LT（4.62%）和 WY（2.13%），苯甲醛是主要挥发性成

分。

烃类和杂环化合物在红茶和单丛茶中相对含量差异较大。WY 中杂环化合物相对含量远高于 LT、HY12 和 QL10，杂环化合物吲哚在 WY（16.46%）中相对含量远高于 LT（2.40%），未在 HY12 和 QL10 检测到吲哚。萜烯和烃类在 LT（2.69%、1.39%）和 WY（2.22%、2.36%）中平均相对含量高于 HY12（1.8%、0.53%）和 QL10（0.53%、0.20%）。酚类和酸类只在 HY12 和 QL10 中检测到，醚类则只在 LT 和 WY 检测到。

由表 2 和图 1（韦恩图）可知，HY12、QL10 和 WY 有 30 个共有组分，主要为萜醇、芳香醛和萜酮。共有组分中 7 个挥发性成分（反-橙花叔醇、1-辛烯-3-醇，D-柠檬烯，二氢猕猴桃内酯、2，3-环氧-*β*-紫罗酮、*β*-紫罗酮、3,5-辛二烯-2-酮）在 2011 年（QL10-1、QL10-2、HY12-1、HY12-2）高于 2013 年（QL10-3、QL10-4、HY12-3、HY12-4）。反-橙花叔醇和 3,5-辛二烯-2-酮在 QL10 中低于 HY12。7 个挥发性成分在 HY12-2、HY12-4 中总体高于 HY12-1、HY12-3。反-橙花叔醇、1-辛烯-3-醇，D-柠檬烯、3,5-辛二烯-2-酮在 QL10-4 中高于 QL10-3。7 个挥发性成分在 QL10-1 中总体高于 QL10-2。HY12 和 QL10 有 53 个共有组分，芳香醇、萜酮、脂肪酮、芳香醛和酸类挥发性成分相同，HY12 中 5 类挥发性成分占 13.39%~30.66%，HY12-1、HY12-2 高于 HY12-3、HY12-4；QL10 则为 11.68%~18.92%，QL10-1、QL10-2 高于 QL10-3、QL10-4。

HY12 和 QL10 中共有成分构成红茶的基本香气轮廓，特征性成分主导其特征香型。香叶醇、2-乙基-1-己醇、乙醇、顺-柠檬醛、3-甲基丁醛、5-甲基-2-苯基己烯-2-醛、乙酸香叶酯等 7 种挥发性成分是 QL10 的特征性成分；异戊酸苯乙酯、反-2-辛烯醛、癸醛、2-蒎烯、2,4-二特丁基苯酚等 5 种挥发性成分是 HY12 的特征性成分。WY 与 HY12、QL10 相比，有 25 种特征性成分，以酯类（11 种）为主，水杨酸甲酯、顺-己酸-3-己烯酯相对含量最高。吲哚和 6-甲基-5-庚烯-2-酮分别是杂环化合物和脂肪酮类的特征性成分，吲哚相对含量在 10.7%~22.21%。

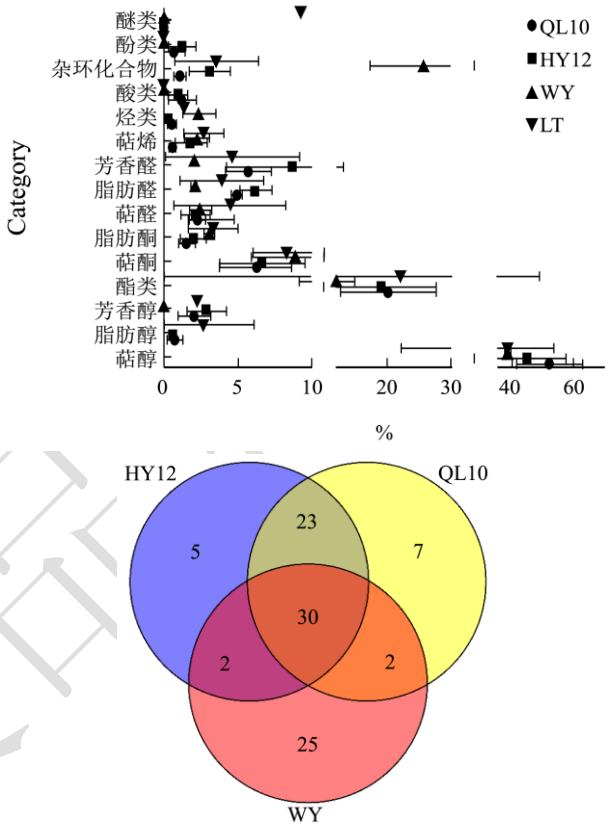



图 1 挥发性成分分类图（上）和韦恩图（下）

**Fig.1 Volatile categories charts (up) and Wayne diagram (down)**

表 2 挥发性成分及相对含量%

**Table 2 The relative content and categories of volatile %**

| 挥发性成分 | 类别 | QL10-1 | QL10-2 | QL10-3 | QL10-4 | HY12-1 | HY12-2 | HY12-3 | HY12-4 | WY1 | WY2 | LT1 | LT2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| α-萜品醇 | 萜醇 | 0.54±0.03 | 0.8±0.02 | 0.31±0.02 | 0.47±0.02 | 0.76±0.06 | 0.77±0.03 | 0.37±0.02 | 0.09±0.04 | 0.68±0.05 | 0.32±0.04 | 1.46±0.05 | 0.63±0.08 |
| β-芳樟醇 | | 7.28±0.77 | 19.16±1.43 | 4.84±0.13 | 16.28±0.36 | 14.57±0.57 | 16.03±0.8 | 6.64±0.38 | 20.01±1.29 | 9.85±0.68 | 7.77±1.65 | 23.3±0.89 | 6.65±0.49 |
| 橙花醇 | | 36.02±1.12 | 7.52±0.28 | 53.68±0.53 | 10.71±0.5 | 2.64±0.26 | 8.41±0.26 | 46.34±1.19 | 3.85±0.04 | 1.86±0.06 | 0.55±0.06 | 1.66±0.26 | 1.51±0.32 |
| 反-橙花叔醇 | | 1.06±0.05 | 0.96±0.13 | 0.47±0.03 | 0.88±0.17 | 4.7±0.92 | 2.32±0.12 | 0.74±0.04 | 2.47±0.44 | 7.64±1.12 | 21.53±2.93 | 0.82±0.11 | 4.2±0.31 |
| 橄榄醇 | | 0.74±0.07 | 1.13±0.1 | 0.26±0.03 | 0.9±0.06 | 0.96±0.04 | 0.82±0.07 | 0.29±0.03 | 0.75±0.12 | \ | \ | \ | \ |
| 环氧芳樟醇 | | 1.9±0.04 | 2.55±0.12 | 1.45±0.03 | 2.6±0.09 | 1.31±0.08 | 1.57±0.05 | 1.68±0.07 | 0.66±0.43 | \ | \ | 2.28±0.17 | \ |
| 顺-氧化芳樟醇 I | | 1.23±0.19 | 3.66±0.35 | 1.31±0.01 | 3.57±0.12 | 2.21±0.03 | 2.52±0.04 | 1.32±0.09 | 2.72±0.23 | 1.8±0.18 | 0.8±0.09 | 7.12±0.05 | 1.12±0.15 |
| 顺-氧化芳樟醇 II | | 2.3±0.26 | 4.81±0.44 | 2.85±0.06 | 5.41±0.12 | 2.12±0.02 | 3.09±0.06 | 3.29±0.25 | 2.27±0.17 | 0.98±0.11 | 0.36±0.04 | 8.76±0.1 | 0.84±0.18 |
| 顺-氧化芳樟醇 III | | 0.49±0.02 | 1.28±0.03 | 0.35±0.01 | 1.26±0.06 | 1.35±0.05 | 1.06±0.11 | 0.37±0.03 | 0.8±0.06 | \ | \ | 1.03±0.16 | \ |
| 脱氢芳樟醇 | | 0.59±0.24 | 1.7±0.29 | 1.07±0.04 | 1.47±0.13 | 2.58±0.08 | 3.28±0.07 | 1.79±0.1 | 9.33±0.69 | 15.25±1.04 | 7.86±1.78 | 1.99±0.02 | 11.92±2.97 |
| 香叶醇 | | 1.02±0.04 | 0.75±0.02 | 0.61±0.04 | 0.81±0.11 | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ |
| 4-萜烯醇 | | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 0.62±0.01 | \ |
| α-杜松醇 | | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 0.36±0.08 | 0.25±0.03 | \ | 0.39±0.07 |
| α-杜松醇 | | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 0.26±0.02 | 0.17±0.02 | \ | 0.15±0.03 |
| 1-辛烯-3-醇 | 脂肪醇 | 0.16±0.06 | 0.35±0.03 | 0.03±0.03 | 0.1±0.03 | 0.34±0.02 | 0.23±0.02 | 0.11±0.05 | 0.22±0.02 | 0.44±0.03 | 0.34±0.09 | 1.05±0.07 | 0.22±0.04 |
| 2-乙基-1-己醇 | | 0.46±0.04 | 0.15±0.04 | 0.01±0 | 0.09±0.02 | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ |
| 3-己烯-1-醇 | | 0.32±0.02 | 0.46±0.04 | 0.1±0.02 | 0.18±0.02 | 0.23±0.01 | 0.41±0.05 | 0.39±0.01 | 0.35±0.04 | \ | \ | 1.36±0.31 | \ |
| 己醇 | | 0.22±0.02 | 0.33±0.03 | 0.07±0.01 | 0.09±0.03 | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 0.98±0.22 | \ |
| 反-2-己烯醇 | | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 0.8±0.09 | \ |
| 顺-2-戊烯醇 | | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 0.87±0.38 | \ |
| 苯甲醇 | 芳香醇 | 0.61±0.05 | 0.86±0.05 | 0.4±0.03 | 1.73±0.23 | 1.22±0.05 | 0.87±0.02 | 0.42±0 | 0.51±0.04 | \ | \ | 0.63±0.06 | \ |
| 苯乙醇 | | 0.92±0.07 | 1.68±0.1 | 0.45±0.01 | 1.46±0.09 | 3.19±0.07 | 2.66±0.08 | 1.02±0.04 | 1.79±0.13 | \ | \ | 1.61±0.1 | \ |
| 醇类 | | 55.86 | 48.26 | 68.26 | 48.01 | 38.18 | 44.04 | 64.77 | 45.82 | 39.12 | 39.65 | 56.34 | 27.63 |
| 苯甲酸甲酯 | 酯类 | 0.21±0.03 | 0.27±0.05 | 0.05±0.03 | 0.05±0.05 | 0.18±0.02 | 0.08±0.01 | 0.04±0.02 | 0.18±0.04 | 0.08±0.04 | 0.06±0.02 | \ | 34.61±5.92 |
| 二氢猕猴桃内酯 | | 0.99±0.11 | 0.72±0.1 | 0.16±0.01 | 0.13±0.05 | 0.89±0.15 | 0.82±0.02 | 0.19±0.02 | 0.15±0.03 | 1.19±0.07 | 0.74±0.1 | 1.08±0.05 | 0.73±0.24 |
| 反-己酸-2-己烯酯 | | 0.27±0.03 | 1.15±0.26 | 0.17±0.03 | 0.27±0.01 | 0.29±0.01 | 0.13±0.01 | 0.15±0.02 | 0.24±0.04 | 0.7±0.06 | 0.61±0.03 | \ | 0.15±0 |
| 己酸己酯 | | \ | \ | \ | \ | 0.56±0.07 | 0.2±0.03 | 0.11±0.01 | 0.31±0.06 | 0.99±0.09 | 0.84±0.09 | \ | 0.24±0.01 |
| 水杨酸甲酯 | | 12.04±0.19 | 17.82±0.22 | 11.79±0.24 | 27.33±1.67 | 13.66±0.27 | 10.58±0.34 | 10.46±0.41 | 27.43±0.88 | 3.87±0.64 | 0.99±0.11 | 1.93±0.41 | 1.91±0.25 |
| 顺-3-己烯异戊酸酯 | | 0.31±0.05 | 0.82±0.07 | 0.12±0.01 | 0.1±0.04 | 0.65±0.02 | 0.66±0.25 | 0.26±0.08 | 0.8±0.12 | 0.41±0.12 | 0.28±0.06 | \ | 0.3±0.03 |

转下页

接上页

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 顺-己酸-3-己烯酯 | | 0.61±0.17 | 2.55±0.32 | 0.19±0.08 | 0.59±0.11 | 1.58±0.11 | 0.61±0.1 | 0.59±0.08 | 1.7±0.29 | 2.72±0.28 | 2.52±0.15 | \ | 0.78±0.01 |
| 乙酸香叶酯 | | 0.39±0.03 | 0.15±0.03 | 0.33±0.03 | 0.08±0.03 | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ |
| 棕榈酸甲酯 | | 0.43±0.02 | 0.42±0.07 | 0.16±0.05 | 0.16±0.01 | 0.19±0.02 | 0.7±0.05 | 0.25±0.02 | 0.14±0 | \ | \ | 0.19±0.02 | \ |
| 异戊酸苯乙酯 | | \ | \ | \ | \ | 1.1±0.22 | 0.59±0.05 | 0.19±0 | 0.08±0.04 | \ | \ | \ | \ |
| 5-癸内酯 | | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 0.44±0.03 | 0.3±0.02 | \ | 0.21±0.05 |
| 丁酸苯乙酯 | | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 0.4±0.07 | 0.61±0.03 | \ | 0.16±0.01 |
| 丁酸己酯 | | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 0.47±0.06 | 0.45±0.1 | \ | 0.1±0.02 |
| 反-丁酸-3-己烯酯 | | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 0.69±0.05 | 0.66±0.13 | \ | 0.3±0.02 |
| 茉莉酸甲酯 | | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 0.79±0.16 | 0.89±0.2 | \ | 0.14±0.01 |
| 顺-3-己烯-苯甲酸酯 | | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 0.28±0.04 | 0.43±0.03 | \ | 0.58±0.24 |
| 香叶酸甲酯 | | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 0.49±0.08 | 0.18±0.03 | \ | 0.02±0.02 |
| 乙酸苯甲酯 | | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 0.08±0.02 | 0.04±0.02 | \ | 0.26±0.07 |
| 己酸戊酯 | | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 0.44±0.04 | 0.41±0.01 | \ | 0.2±0.04 |
| 甲基-2-丙烯酸乙酯 | | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 0.04±0.01 | 0.02±0.01 | \ | 0.27±0.03 |
| 酯类 | | 15.25 | 23.9 | 12.97 | 28.71 | 19.1 | 14.37 | 12.24 | 31.03 | 14.08 | 10.03 | 3.2 | 40.96 |
| 2，3-环氧-*β*-紫罗酮 | 萜酮 | 0.44±0.01 | 0.52±0.01 | 0.18±0.03 | 0.16±0.02 | 0.6±0.04 | 0.49±0.02 | 0.24±0.01 | 0.23±0.06 | 0.89±0.03 | 0.62±0.07 | 0.75±0.05 | 0.53±0.1 |
| 3,4-脱氢-*β*-紫罗兰酮 | | 0.27±0.04 | 0.34±0.04 | 0.07±0.01 | 0.12±0.04 | 0.45±0.02 | 0.45±0.04 | 0.05±0.04 | 0.16±0.02 | 1.06±0.01 | 0.31±0.03 | \ | 0.2±0.02 |
| *α*-紫罗酮 | | 0.73±0.08 | 0.81±0.04 | 0.36±0.03 | 0.44±0.04 | 0.83±0.04 | 0.89±0.11 | 0.61±0.03 | 0.32±0.02 | 1.21±0.01 | 0.7±0.06 | 1.34±0.12 | 1.11±0.26 |
| *β*-达马烯酮 | | 1.48±0.24 | 1.88±0.09 | 0.45±0.01 | 1.43±0.14 | 1.21±0.05 | 1.54±0.07 | 0.26±0.04 | 0.38±0.06 | \ | \ | 1.65±0.07 | \ |
| *β*-紫罗酮 | | 3.68±0.39 | 3.22±0.34 | 1.72±0.03 | 1.42±0.11 | 3.72±0.21 | 3.3±0.19 | 2.25±0.16 | 1.49±0.18 | 3.21±0.08 | 2.49±0.07 | 5.26±0.26 | 2.27±0.46 |
| 顺-茉莉酮 | | 0.5±0.07 | 0.06±0.07 | 0.14±0.03 | 0.29±0.03 | 0.59±0.15 | 0.71±0.03 | 0.36±0.01 | 0.52±0.06 | 2.47±0.02 | 1±0.12 | \ | 1.43±0.25 |
| 香叶基丙酮 | | 0.89±0.11 | 1.51±0.19 | 0.49±0.03 | 0.83±0.04 | 1.78±0.11 | 0.95±0.09 | 0.56±0.02 | 0.68±0.12 | 1.69±0.09 | 1.6±0.09 | 0.93±0.16 | 1.16±0.1 |
| 紫罗酮 | | 0.12±0.01 | 0.21±0.01 | 0.08±0.02 | 0.14±0.01 | 0.41±0.02 | 0.36±0.01 | 0.04±0.04 | 0.21±0.02 | 0.4±0.03 | 0.03±0.02 | \ | 0.01±0.01 |
| 2,6,6-三甲基环己烷酮 | 脂肪酮 | 0.56±0.04 | 0.71±0.04 | 0.38±0.02 | 0.38±0.05 | 0.57±0.06 | 0.54±0.04 | 0.54±0.03 | 0.38±0.03 | \ | \ | 1.59±0.1 | \ |
| 3,5-辛二烯-2-酮 | | 0.63±0.03 | 0.69±0.24 | 0.19±0.01 | 0.38±0.02 | 1.17±0.07 | 0.67±0.01 | 0.25±0.01 | 0.37±0.03 | 1.6±0.2 | 1.28±0.23 | 0.45±0.08 | 1.2±0.34 |
| 甲基庚烯酮 | | 0.62±0.05 | 0.8±0.23 | 0.37±0.02 | 0.5±0.06 | 1.48±0.01 | 0.63±0.09 | 0.68±0.03 | 0.63±0.03 | \ | \ | 1.74±0.23 | \ |
| 2-庚酮 | | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 0.26±0.02 | 0.21±0.06 | 0.45±0.12 | 0.09±0.02 |
| 3-己烯-2-酮 | | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 0.27±0.02 | \ |
| 6-甲基-5-庚烯-2-酮 | | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 1.43±0.14 | 1.33±0.29 | \ | 0.86±0.14 |
| 酮类 | | 9.92 | 10.75 | 4.43 | 6.09 | 12.81 | 10.53 | 5.84 | 5.37 | 14.22 | 9.57 | 14.43 | 8.86 |

转下页

现代食品科技

接上页

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| β-环柠檬醛 | 萜醛 | 1.11±0.05 | 1.6±0.22 | 0.52±0.02 | 1.07±0.15 | 1.84±0.17 | 1.71±0.05 | 1.19±0.09 | 0.76±0.04 | 1.85±0.14 | 1.33±0.25 | 3.56±0.21 | 1.06±0.26 |
| 藏红花醛 | | 0.78±0.07 | 0.95±0.09 | 0.17±0.02 | 0.52±0.08 | 0.95±0.11 | 1.34±0.06 | 0.4±0.04 | 0.28±0.03 | 0.88±0.11 | 0.62±0.12 | 3.6±0.23 | 0.54±0.11 |
| 顺-柠檬醛 | | 0.81±0.06 | 0.22±0 | 0.96±0.03 | 0.26±0.04 | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ |
| 柠檬醛 | | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 0.26±0.03 | 0.02±0.01 | \ | 0.19±0.04 |
| 2-苯基丁烯 2-醛 | 脂肪醛 | 0.4±0.1 | 0.31±0.07 | 0.11±0.08 | 0.4±0.04 | 0.75±0.03 | 1.63±0.11 | 0.14±0.21 | 0.63±0.04 | \ | \ | 0.68±0.1 | \ |
| 2-己烯醛 | | 0.99±0.09 | 0.82±0.04 | 0.48±0.05 | 0.96±0.17 | 1.01±0.05 | 1.47±0.06 | 1.09±0.03 | 0.86±0.08 | \ | \ | 1.15±0.09 | \ |
| 2-甲基丁醛 | | 0.41±0.07 | 0.47±0.05 | 0.74±0.08 | 0.61±0.02 | 0.4±0.07 | 0.9±0.02 | 0.52±0.04 | 0.69±0.09 | \ | \ | 1.57±0.15 | \ |
| 3,7-二甲基-2,6-二辛烯醛 | | 1.41±0.14 | 0.63±0.03 | 1.72±0.09 | 0.85±0.15 | 0.22±0.02 | 0.33±0 | 2.7±0.28 | 0.24±0.02 | \ | \ | | \ |
| 3-甲基丁醛 | | 0.18±0.03 | 0.15±0.02 | 0.15±0.02 | 0.15±0 | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 0.41±0.04 | \ |
| 4-甲基-2-苯基戊烯-2-醛 | | 0.41±0.03 | 0.21±0.14 | 0.43±0.02 | 0.32±0.04 | 0.32±0.05 | 0.88±0.03 | 0.27±0.02 | 0.23±0.02 | \ | \ | 0.49±0.02 | \ |
| 5-甲基-2-苯基己烯-2-醛 | | 0.41±0.06 | 0.08±0.1 | 0.26±0 | 0.21±0.04 | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ |
| 对异丙基甲苯 | | 0.18±0.01 | 0.6±0.03 | 0.11±0.01 | 0.3±0.01 | 0.35±0.02 | 0.36±0.04 | 0.13±0.02 | 0.13±0.01 | \ | \ | 0.66±0.02 | \ |
| 反-2-反-4-庚二烯醛 | | 0.66±0.06 | 0.78±0.05 | 0.45±0.05 | 0.48±0.07 | 1.96±0.15 | 0.74±0.03 | 0.42±0.03 | 0.86±0.05 | 1.07±0.08 | 0.95±0.18 | \ | 1.08±0.24 |
| 反-2-辛烯醛 | | \ | \ | \ | \ | 0.48±0.06 | 0.15±0.03 | 0.04±0.01 | 0.18±0.01 | \ | \ | \ | \ |
| 癸醛 | | \ | \ | \ | \ | 0.28±0.01 | 0.21±0.03 | 0.11±0.01 | 0.2±0.03 | \ | \ | \ | \ |
| 顺-2-壬烯醛 | | 0.2±0.02 | 0.43±0.06 | 0.11±0.01 | 0.26±0.02 | 0.64±0.06 | 0.34±0.03 | 0.09±0.01 | 0.55±0.19 | \ | \ | \ | \ |
| 正己醛 | | 0.23±0.03 | 0.29±0.02 | 0.1±0.01 | 0.15±0.02 | 0.52±0.03 | 0.23±0.01 | 0.12±0.02 | 0.39±0.04 | 0.16±0.02 | 0.14±0.05 | 0.92±0.14 | 0.14±0.04 |
| 2-丁基-2-辛烯醛 | | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 0.57±0.04 | 0.53±0.01 | \ | 0.33±0.08 |
| 苯甲醛 | 芳香醛 | 2.8±0.15 | 2.88±0.12 | 3.03±0.08 | 4.02±0.2 | 6.74±0.31 | 9.68±0.17 | 2.5±0.13 | 3.13±0.19 | 1.79±0.16 | 1.71±0.34 | 6.21±0.87 | 1.14±0.29 |
| 苯乙醛 | | 2.12±0.24 | 1.72±0.2 | 2.29±0.13 | 3.97±0.13 | 2.2±0.02 | 5.18±0.28 | 3±0.21 | 2.23±0.21 | 0.34±0.04 | 0.42±0.11 | 1.59±0.44 | 0.3±0.08 |
| 醛类 | | 13.1 | 12.14 | 11.63 | 14.53 | 18.66 | 25.15 | 12.72 | 11.36 | 7.22 | 6.02 | 20.84 | 5.16 |
| 2-菠烯 | 萜烯 | \ | \ | \ | \ | 2.4±0.15 | 0.55±0.32 | 0.18±0.06 | 1.03±0.12 | \ | \ | 2.49±0.14 | \ |
| D-柠檬烯 | | 0.23±0.03 | 0.46±0 | 0.21±0.02 | 0.26±0.04 | 0.47±0.05 | 0.44±0.04 | 0.22±0.03 | 0.35±0.02 | 1.43±0.14 | 0.56±0.07 | 0.92±0.13 | 0.78±0.19 |
| δ-杜松烯 | | 0.31±0.04 | 0.24±0.01 | 0.12±0.01 | 0.29±0.06 | 0.21±0.01 | 0.27±0.04 | 0.25±0.02 | 0.83±0.13 | 0.28±0.16 | 0.16±0.02 | 0.23±0.04 | 0.08±0.01 |
| L-莒薄烯 | | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 0.26±0.06 | 0.21±0.01 | \ | 0.21±0.05 |
| 顺-β-法尼烯 | | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 0.22±0.02 | 0.28±0.03 | \ | 0.14±0.03 |
| 2,6-二甲基-1,3,5,7-辛四烯 | 烃类 | 0.38±0.09 | 0.23±0.01 | 0.3±0.05 | 0.14±0.03 | \ | \ | \ | \ | 1.46±0.17 | 0.95±0.07 | \ | 1.01±0.25 |
| 萘 | | 0.51±0.06 | 0.31±0.02 | 0.06±0.01 | 0.2±0.03 | 0.26±0.05 | 0.36±0.03 | 0.08±0.03 | 0.09±0.06 | \ | \ | \ | \ |
| 1,2-二甲基-4-苯乙烯 | | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 0.65±0.13 | 0.39±0.06 | \ | 0.01±0 |
| 1-甲基-2-异丙基苯 | | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 1.03±0.18 | 0.23±0.04 | \ | 0.37±0.07 |
| 碳水化合物 | | 1.43 | 1.24 | 0.69 | 0.89 | 3.34 | 1.62 | 0.73 | 2.3 | 5.33 | 2.78 | 3.64 | 2.6 |

转下页

接上页

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 香叶酸 | 酸类 | 1.53±0.18 | 0.24±0.05 | 0.88±0.06 | 0.2±0.02 | 0.19±0 | 1.09±0.19 | 0.79±0.09 | 0.1±0.04 | \ | \ | \ | \ |
| 棕榈酸 | | 1.05±0.14 | 0.58±0.06 | 0.2±0.08 | 0.31±0.06 | 0.35±0.02 | 0.65±0.11 | 0.34±0.07 | 0.26±0.03 | \ | \ | \ | \ |
| 酸类 | | 2.58 | 0.82 | 1.08 | 0.51 | 0.54 | 1.74 | 1.13 | 0.36 | \ | \ | \ | \ |
| 1-乙基-2-甲酰吡咯 | 杂环化合物 | 1.11±0.17 | 0.54±0.02 | 0.56±0.03 | 0.4±0.1 | 0.7±0.09 | 1.18±0.01 | 1.16±0.05 | 1.81±0.45 | \ | \ | 0.22±0.1 | \ |
| 2-正戊基呋喃 | | \ | \ | \ | \ | 0.74±0.02 | 0.6±0.02 | 0.77±0.1 | 0.67±0.06 | 1.82±0 | 0.97±0.17 | \ | 0.78±0.18 |
| 2-乙酰吡咯 | | 0.15±0 | 0.08±0.03 | 0.01±0 | 0.07±0.02 | \ | \ | \ | \ | 0.47±0.01 | 0.21±0.04 | \ | 0.16±0.05 |
| 苯乙腈 | | 0.31±0.02 | 0.57±0.04 | 0.19±0.02 | 0.29±0.03 | 3.55±0.3 | 0.28±0.11 | 0.14±0.09 | 0.84±0.36 | 6.69±0.44 | 8.06±0.79 | \ | 1.1±0.17 |
| 1-乙基吡咯 | | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 0.15±0.01 | 0.1±0.03 | \ | 0.04±0.01 |
| 吲哚 | | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 10.70±0.82 | 22.21±2.86 | 1.35±0.15 | 3.44±0.46 |
| 杂环化合物 | | 1.57 | 1.19 | 0.76 | 0.76 | 4.99 | 2.06 | 2.07 | 3.32 | 19.83 | 31.55 | 1.57 | 5.52 |
| 2,4-二特丁基苯酚 | 酚类 | \ | \ | \ | \ | 1.09±0.1 | 0.63±0.23 | 0.24±0.02 | 0.45±0.32 | \ | \ | \ | \ |
| 2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚 | | 0.29±0.07 | 1.8±0.25 | 0.17±0.05 | 0.53±0.13 | 1.3±0.18 | 0.85±0.18 | 0.27±0.03 | \ | \ | \ | \ | \ |
| 酚类 | | 0.29 | 1.8 | 0.17 | 0.53 | 2.39 | 1.48 | 0.51 | 0.45 | \ | \ | \ | \ |
| 环己基乙烯醚 | 醚类 | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | \ | 0.17±0.03 | 0.11±0.01 | \ | 9.24±2.43 |

现代食品科技

## 2.2 挥发性成分 PLS-DA 分析

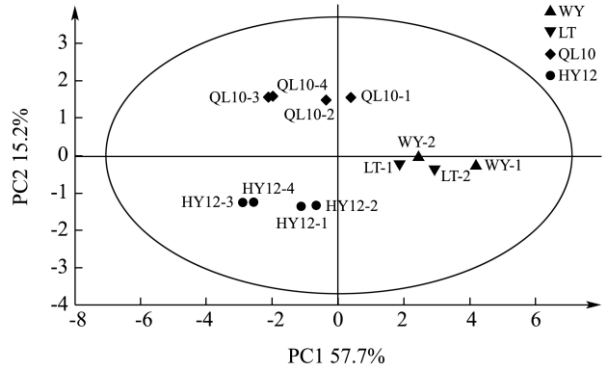



图 2 PLS-DA 分析

**Fig.2 Partial least square discriminant analysis**

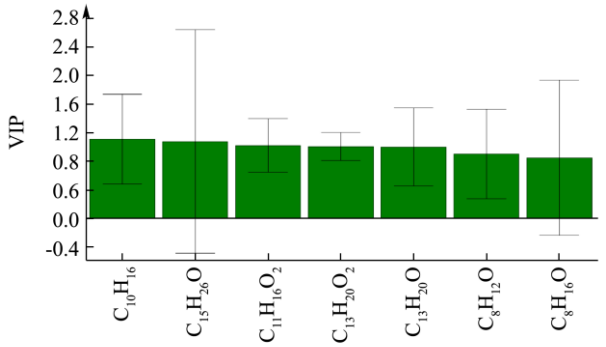



图 3 PLS-DA 模型 VIP 图

**Fig.3 VIP plot of PLS-DA**

注：$C_{10}H_{16}$：D-柠檬烯；$C_{15}H_{26}O$：反-橙花叔醇；$C_{11}H_{16}O_2$：二氢猕猴桃内酯；$C_{13}H_{20}O_2$：2,3-环氧-β-紫罗酮；$C_{13}H_{20}O$：α-紫罗酮；$C_8H_{12}O$：3, 5-辛二烯-2-酮；$C_8H_{16}O$：1-辛烯-3-醇。

以 7 个有显著性差异的挥发性成分为自变量建立 PLS-DA 数学模型，PLS-DA 模型包含 3 个主成分，拟合参数为 R2X=0.86，Q2=0.596，R2Y=0.81。R2X 越接近 1 表明模型越稳定，Q2>0.5 表明预测率较高，因此该分析结果可信。由图 2 可知，PLS-DA 模型的 PC 1 和 PC 2 的累积解释率为 72.9%。HY12、QL10、LT 和 WY 明显的区分为 3 类。QL10 为一类，在 PC2 上为正值；HY12 单独为一类，在 PC1 和 PC2 上均为负值；LT 和 WY 为一类，在 PC1 上为正值。

PLS-DA 变量重要性因子（Variable important for the projection, VIP）可以衡量变量的重要性。VIP 值越大，对应变量对 HY12、QL10、LT 和 WY 分类的贡献率越大。由图 3 所示, PLS-DA 分析计算出的 VIP 值，有 5 个挥发性成分的 VIP 值>1。D-柠檬烯、二氢猕猴桃内酯、反-橙花叔醇、2,3-环氧-β-紫罗酮和 α-紫罗酮对 HY12、QL10、LT 和 WY 的香气轮廓有最显著的作用。

## 3 讨论

凤凰单丛和大叶奇兰原产于广东潮州，铁观音则原产于福建安溪，均是传统乌龙茶茶树品种，以高香闻名于世。随着茶叶市场产品多样化发展和消费需求的多元化，乌龙茶品种改制红茶成为一种趋势，不仅提高企业市场竞争力，也为挖掘品种特性提供了很好的机会。研究证实，乌龙茶品种改制红茶后，形成品种特有的香气轮廓，花果香明显[19,22]。PLS-DA 进一步证实，遗传背景相似的 WY 和 LT 香气轮廓接近；遗传背景不同、加工工艺相同的 QL10 和 HY12 香气轮廓不同，与朱荫等对龙井茶香气的研究结果一致，品种对香型具有决定作用[18,23,24]。

醇类是红茶（HY12 和 QL10）和单丛茶（LT 和 WY）中最丰富的挥发性成分，红茶中醇类平均相对含量高于单丛茶，橙花醇和 β-芳樟醇是 HY12 和 QL10 中主要的萜醇。张磊等对茗科 1 号和金萱的多茶类研究结果也表明，红茶中醇类相对含量高于乌龙茶[19,25]，王秋霜等对单丛红茶的挥发性成分分析进一步证实，橙花醇和 β-芳樟醇是主要的萜醇[26]。碳原子个数和分子结构式对醇、醛、酮、酸等挥发性成分香味有明显影响[27]，橙花醇和 β-芳樟醇是 C10 链状单萜烯醇，香味活性高、感受阈值低[28]，常带有浓郁的甜香、花香，对成品茶香气香型有特别的影响[29]，QL10 春红茶橙花醇和 β-芳樟醇相对含量在 43%以上，远高于夏季红茶，这与感官审评的结果一致，春季红茶花果香浓郁持久（未发表数据）。醛类一般阈值较低，对总体风味影响巨大，中等分子量的醛（6 至 9 个碳原子）具有清香、油香和脂香。QL10（52.26%）萜醇相对含量高于 HY12（44.71%），芳香醛则在 HY12（8.67%）中高于 QL10（5.71%），这可能与 HY12 和 QL10 的香型有关，QL10 为花果香型红茶，HY12 则为花香型红茶。

WY 和 LT 主体挥发性成分因加工季节和品种的不同，种类和相对含量均有差异。吲哚、脱氢芳樟醇占 WY1 总挥发成分的 25.95%；β-芳樟醇、苯甲醛占 LT1 总挥发成分的 29.51%。吲哚、反-橙花叔醇占 WY2 总挥发成分的 43.74%；苯甲酸甲酯、脱氢芳樟醇占 LT2 总挥发成分的 46.83%。因此，春冬 WY 和 LT 的主体挥发性组分占比接近，但不同种类的挥发性形成了栀子花香型 WY[30]，蜜香型 LT[31]，冬茶（雪片成分）主体挥发性的高占比可能是冬茶高香的主要原因。

吲哚是成分不同香型单丛茶的主要赋香成分[32,33]，在福建乌龙茶也有发现[34-36]。本研究中吲哚在

LT 和 WY 中相对含量在 3%~22.21%之间，是 WY 的主体挥发性成分，福选 9 号和金萱加工的红茶中有检测到吲哚[21,25]。醚类则只在单丛茶中 LT 和 WY 检测到，这与史敬芳等对凤凰单丛中挥发性成分的分析结果一致，在不同香型的单丛茶中有不同的醚类挥发性成分存在[37-39]，在福建和台湾乌龙茶中并没有检测到醚类[40-42]。

## 4 结论

3.1 萜醇和芳香醛是 HY12 和 QL10 的主体挥发性成分。香叶醇、2-乙基-1-己醇、乙醇、顺-柠檬醛、3-甲基丁醛、5-甲基-2-苯基己烯-2-醛、乙酸香叶酯是 QL10 的特征性成分。异戊酸苯乙酯、反-2-辛烯醛、癸醛、2-蒎烯、2,4-二特丁基苯酚是 HY12 的特征性成分。*β*-芳樟醇、橙花醇和水杨酸甲酯可能是引起 QL10 和 HY12 春夏茶香型差异的重要挥发性成分。

3.2 萜烯、烃类、萜酮和脂肪酮是构成 LT 和 WY 的主体挥发性成分，吲哚和醚类是 LT 和 WY 的特征性成分。吲哚、脱氢芳樟醇和反-橙花叔醇可能是引起 WY 春冬茶香型差异的重要成分。*β*-芳樟醇、脱氢芳樟醇、苯甲醛和苯甲酸甲酯则可能是 LT 春冬茶香型差异的重要成分。吲哚对区别 LT 和 WY 香型有重要意义。

3.3 遗传背景相似且加工工艺相同的 WY 和 LT 香气轮廓相近；QL10 和 HY12 虽加工工艺相同但遗传背景不同，香气轮廓也不同。因此，茶树品种遗传背景对茶叶香气轮廓有决定作用，D-柠檬烯、二氢猕猴桃内酯、反-橙花叔醇、2,3-环氧-*β*-紫罗酮和 *α*-紫罗酮对香气轮廓有最显著作用。

## 参考文献


[1] Suyoung K,朱荫,郑新强,等.不同季节绿茶香气成分的判别与聚类分析[J].食品科学,2018,39(14):268-275
Suyong K, Zhu Ying, Zheng Xin-qiang, et al. Multivariate statistical analysis of volatiles compounds in green teas from different harvesting seasons [J]. Food Science, 2018, 39(14): 268-275

[2] Mahanta P K, Hazarika M, Takeo T. Flavour volatiles and lipids in various components of tea shoots *Camellia sinensis* L. [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1985, 36(11): 1130-1132

[3] Rawat R, Gulati A, Babu G D K, et al. Characterization of volatile components of Kangra orthodox black tea by gas chromatography-mass spectrometry [J]. Food Chemistry, 2007, 105(1): 229-235

[4] 王飞生,叶荣飞.分子结构对香味影响的研究[J].中国调味品,2009,34(4):39-42
WANG Fei-sheng, YE Rong-fei. Effect of molecular structure on the fragrance [J]. China Condiment, 2009, 34(4): 39-42

[5] Feng T, Zhuang H, Ye R, et al. Analysis of volatile compounds of *Mesona Blume*s, gum/rice extrudates *via* GC-MS and electronic nose [J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2011, 160(1): 964-973

[6] Romeo V, Ziino M, Giuffrida D, et al. Flavour profile of capers (*Capparis spinosa* L.) from the Eolian archipelago by HS-SPME/GC-MS [J]. Food Chemistry, 2007, 101(3): 1272-1278

[7] Stoppacher N, Kluger B, Zeilinger S, et al. Identification and profiling of volatile metabolites of the biocontrol fungus *Trichoderma atroviride* by HS-SPME-GC-MS [J]. Journal of Microbiological Methods, 2010, 81(2): 187-193.

[8] Nezhadali A, Parsa M. Study of the volatile compounds in *Artemisia absinthium* from Iran using HS/SPME/GC/MS [J]. International Journal of Environmental Science & Development, 2010, 1(3): 287-289

[9] Qi D D, Miao A Q, Cao J X, et al, Study on the effects of rapid aging technology on the aroma quality of white tea using GC-MS combined with chemometrics: In comparison with natural aged and fresh white tea [J]. Food Chemistry, 2018, 05, 241-250

[10] Van Ruth S M, Villegas B, Akkermans W, et al. Prediction of the identity of fats and oils by their fatty acid, triacylglycerol and volatile compositions using PLS-DA [J]. Food Chemistry, 2010, 118(4): 948-955

[11] Wei J, Wan K, Luo Y, et al. The global volatile signature of veal *via* solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry [J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2014, 34(5): 700-708

[12] Melucci D, Bendini A, Tesibi F, et al. Rapid direct analysis to discriminate geographic origin of extra virgin olive oils by flash gas chromatography electronic nose and chemometrics [J]. Food Chemistry, 2016, 204: 263-273

[13] Menzel T R, Weldegergis B T, David A, et al. Synergism in the effect of prior jasmonic acid application on herbivore-induced volatile emission by Lima bean plants: transcription of a monoterpene synthase gene and volatile emission [J]. Journal of Experimental Botany, 2014, 65(17): 4821

[14] 李拥军,施兆鹏.炒青绿茶加工中香气的动态变化[J].茶叶

科学,2001,21(2):124-129
LI Yong-jun, SHI Zhao-peng. Dynamic variation of tea aroma during the processing of roasted green tea [J]. Tea Science, 2001, 21(2): 124-129

[15] 潘科,冯林,陈娟,等.HS-SPME-GC-MS 联用法分析不同通氧发酵加工工艺红茶香气成分[J].食品科学,2015,36(8): 181-186
PAN Ke, FENG Lin, CHEN Juan, et al. Analysis of aroma compounds in black tea ventilated with oxygen for different durations during the fermentation process by Head space-solid phase micro-extraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry [J]. Food Science, 2015, 36(8): 181-186

[16] 李永迪,刘仲华,黄建安,等.基于主成分和聚类分析研究茯砖茶加工过程品质变化[J].食品工业科技,2017,38(17): 1-4
LI Yong-di, LIU Zhong-hua, HUANG Jian-an, et al. Quality changes of Fuzhuan tea during processing period based on principal component and cluster analysis [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(17): 1-4

[17] MA Cheng-ying, LI Jun-xi, CHEN Wei, 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

[18] 朱荫,邵晨阳,张悦,等.不同茶树品种龙井茶香气成分差异分析[J].食品工业科技,2018,39(23):241-246,254
ZHU Yin, SHAO Chen-yang, ZHANG Yue, et al. Comparison of differences in aroma constituents of Longjing tea produced from different tea germplasms [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(23): 241-246, 254

[19] 张磊,杨如兴,陈芝芝,等.不同茶类加工工艺对茗科 1 号香气成分的影响[J].福建农业学报,2013,28(12):1257-1262
ZHANG Lei, YANG Ru-xing, CHEN Zhi-zhi, et al. Effect of tea processing techniques on aromatic components of Mingke 1 [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2013, 28(12): 1257-1262

[20] 杨娟,李中林,袁林颖,等.重庆不同茶树品种加工工夫红茶香气成分分析[J].西南大学学报(自然科学版),2019,41(6): 21-27
YANG Juan, LI Zhong-lin, YUAN Lin-ying, et al. Analysis of aroma components of congou black tea made of different tea varieties in Chongqing [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2019, 41(6): 21-27

[21] 乔小燕,吴华玲,陈栋.干燥温度对丹霞白茶挥发性成分的影响[J].现代食品科技,2017,33(11):171-179
QIAO Xiao-yan, WU Huang-lin, CHEN Dong, et al. Effects of tea green Leafhoppers *Empoasca vitis* Gothe hazards on volatiles of Jin xuan black tea [J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(11): 171-179

[22] 王自琴,唐茜,陈玖琳,等.四川引进茶树品种茗科 1 号、铁观音、黄棪的红茶适制性与香气成分分析[J].食品与发酵工业,2015,41(9):192-197
WANG Zi-qin, TANG Qian, CHENG Jiu-lin, et al. Analysis of the suitability for making black tea and aroma components of black tea produced by Mingke1, Tieguan-yin, and Huangyan introduced to Sichuan [J]. Food and Fermentation Industries, 2015, 41(9): 192-197

[23] 汪琦,赵贵福,张续周,等.4 个茶树品种与季节对绿茶香气成分特征的影响[J].食品科学,2016,37(20):102-107
WANG Qi, ZHAO Gui-fu, ZHANG Xu-zhou, et al. Effects of four different tea varieties and harvesting seasons on aroma characteristics of green tea [J]. Food Science, 2016, 37(20): 102-107

[24] 罗学平,李丽霞,马超龙,等.四川主栽茶树品种红茶香气成分的 SPME-GC-MS 分析[J].食品科学,2016,37(16):173-178
LUO Xue-ping, LI Li-xia, MA Chao-long, et al. SPME-GC-MS analysis of aroma components in black tea prepared with main tea cultivars in Sichuan [J]. Food Science, 2016, 37(16): 173-178

[25] 赖幸菲,潘顺顺,李裕南,等.不同季节和茶类的金萱品种茶叶香气成分分析[J].食品工业科技,2015,36(10): 62-68,72
LAI Xing-fei, PAN Shun-shun, LI Yu-nan, et al. Analysis of aromatic components in Jinxuan tea of different kinds and seasons [J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(10): 62-68, 72

[26] 王秋霜,乔小燕,操君喜,等.广东单丛茶树品种红茶香气成分的 GC-MS 分析[J].食品科学,2015,36(4):114-118
WANG Qiu-shuang, QIAO Xiao-yan, CAO Jun-xi, et al. Analysis of flavor components in black tea made from Guangdong Dancong tea variety by GC-MS [J]. Food Science, 2015, 36(4): 114-118

[27] 孙宝国,何坚.香料化学与工艺学(第 2 版)[M].北京:化学工业出版社,2004
SUN Bao-guo,HE Jian. Perfume chemistry and Technology (2nd Edition) [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2004

[28] Schieberle P. Recent Developments in Method for Analysis of Flavor Compounds and Their Precursors [M]. Goankar A. Characterization of Food: Emerging Methods. Amsterdam: Elvesier, 1995: 403-431

[29] Schuh C, Schieberle P. Characterization of the key aroma compounds in the beverage prepared from Darjeeling black tea quantitative differences between tea leaves and infusion [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(3): 916-924

[30] 陈栋,陈少平,乔小燕,等.晚生茶树新品种‘乌叶单丛茶’[J].园艺学报,2013,40(8):1627-1628
CHEN Dong, CHEN Shao-ping, QIAO Xiao-yan, et al. A new lately-sprouting tea cultivar ‘Wuye Dancongcha’ [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2013, 40(8): 1627-1628

[31] 苗爱清,伍锡岳,庞式,等.岭头单丛茶加工过程中香气变化研究[J].中国农学通报,2006,22(11):330-333
MIAO Ai-qing, WU Xi-yue, PANG Shi, et al. Changes of aromatic constituents during the processing of Lingtou Dancong oolong tea [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(11): 330-333

[32] 戴素贤,谢赤军,李启念,等.凤凰单枞 5 个名枞乌龙茶香气组分分析[J].茶叶科学,1998,18(1):39-46
DAI Su-xian, XIE Chi-jun, LI Qi-nian, et al. Analysis of flavor components in five Fenghuang Dancong oolong teas [J]. Tea Science, 1998, 18(1): 39-46

[33] 周春娟,庄东红,郭守军,等.不同品种（系）凤凰单丛成品茶的香型分类与鉴定[J].茶叶科学,2014,6:609-616
ZHOU Chun-juan, ZHUANG Dong-hong, GUO Shou-jun, et al. Classification and identification of different aromatics in tea made from different cultivar of Fenghuang Dancong [J]. Tea Science, 2014, 6: 609-616

[34] 苗爱清,吕海鹏,孙世利,等.乌龙茶香气的 HS-SPME-GC-MS/GC-O 研究[J].茶叶科学,2010,30(1):583-587
MIAO Ai-qing, LU Hai-peng, SUN Shi-li, et al. Aroma components of Oolong tea by HS-SPME-GC-MS and GC-O [J]. Tea Science, 2010, 30(1): 583-587

[35] 陈林,林清霞,张应根,等.不同风味类型铁观音乌龙茶香气组成化学模式识别研究[J].茶叶科学,2018,38(3):36-45
CHEN Lin, LIN Qing-xia, ZHANG Ying-gen, et al. Aroma profiling of Tieguanyin oolong tea with different flavor characteristics based on chemical pattern recognition [J]. Tea Science, 2018, 38(3): 36-45

[36] 乔小燕,操君喜,黄华林,等.茶小绿叶蝉危害对金萱红茶挥发性成分的影响[J].现代食品科技,2018,34(9):234-240,249
QIAO Xiao-yan, CAO Jun-xi, HUANG Huang-lin, et al. Effects of tea green Leafhoppers *Empoasca vitis* Gothe hazards on volatiles of Jinxuan black tea [J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(9): 228-234, 243

[37] 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
SHI Jing-fang, CHEN Dong, HUANG Wen-jie, et al. Analysis of flavor components in Fenghuang Dancong oolong teas using HS-SPME-GC-MS [J]. Food Science, 2016, 37(24): 111-117

[38] 陈丹生,周春娟,庄东红.不同香型凤凰单丛鲜叶与成茶香气成分的比较分析[J].井冈山大学自然版,2016,37(4):37-42
CHEN Dan-sheng, ZHOU Chun-juan, ZHUANG Dong-hong. Comparison analysis on the bolatile composition in Fenghuang Dancong tea with different aromatics between fresh leaves and tea products [J]. Journal of Jinggangshan University (Natural Sciences Edition), 2016, 37(4): 37-42

[39] 肖凌,毛世红,童华荣.3 种香型凤凰单丛茶挥发性成分分析[J].食品科学,2018,39(20):244-250
XIAO Ling, MAO Shi-hong, TONG Hua-rong. Analysis of volatile components of three types of Fenghuang Dancong tea [J]. Food Science, 2018, 39(20): 244-250

[40] 周昱,魏宏.乌龙茶“铁观音”香气成分的气相色谱质谱分析[J].色谱,1994,12(5):355-357
ZHOU Yi, WEI Hong. Analysis of volatile components of Tieguanyin by gas chromatography/mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Chromatography, 1994, 12(5): 355-357

[41] 陈常颂,张应根,钟秋生,等.同时蒸馏萃取法分析 4 种台式乌龙茶香气成分[J].食品与发酵工业,2011,37(2):165-171
CHEN Chang-song, ZHANG Ying-gen, ZHONG Qiu-sheng, et al. Analysis of aroma compounds on four Taiwang oolong tea using simultaneous sistillation extraction [J]. Food and Fermentation Industries, 2011, 37(2): 165-171

[42] 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
ZHONG Qiu-sheng, CHEN Chang-song, ZHANG Ying-gen, et al. Analyses of aromatic compounds in Dangui oolong tea with simultaneous distillation extraction and GC-MS [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2012, 27(5): 498-506