

云茶香 1 号不同萎凋工艺白茶的化学品质研究

吴 婷, 邓秀娟, 李沅达, 黄刚骅, 周红杰, 李亚莉*, 周小慧

(云南农业大学茶学院, 昆明 650201)

摘 要: 目的 探究云茶香 1 号茶树品种不同萎凋处理白茶的品质特征及香气特征物质。**方法** 以一芽二叶鲜叶(YC-R)为原料, 采用自然萎凋(YC-T)和复式萎凋(YC-L)工艺加工白茶, 进行感官审评, 理化分析结合气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)对白茶中的挥发性及非挥发性成分进行检测。通过挥发性物质代谢通路富集分析出的代谢途径注释物质, 结合差异倍数前 20 的物质, 揭示了两种白茶的风味特征物质。**结果** 云茶香 1 号加工的白茶品质优质, YC-T 的儿茶素、可溶性糖含量高, YC-L 茶多酚、咖啡碱、氨基酸、黄酮含量高。两种白茶中共鉴定出挥发性物质 234 种, YC-T 229 种, YC-L 226 种, 可分为 12 类, 杂环类化合物最高; YC-T 中具有果香的(*E*)-2-己酸丁酯和癸醛含量较高, YC-L 中橙花醇、亚油酸甲酯、乙酸叶醇酯、亚麻酸、(*E*)-2-己酸丁酯、3-甲基苯甲醛、香叶酸、苯乙醇、3-甲基-1H-吡啶、 α -松油醇、(-)-4-萜品醇、香叶醇、左旋- β -蒎烯、苯乙醛、3,6-壬二烯醛较高, 具有花香、果香、甜香、嫩香、香料香、蜜香、坚果香的香气表征。**结论** 自然萎凋白茶有利于白茶外形叶底均匀性的固定, 复式萎凋有利于白茶形成丰富的滋味和丰富白茶香气特征。

关键词: 萎凋; 云茶香 1 号; 白茶品质; 挥发性成分

Study on the chemical quality of white tea with different withering processes of *Camellia sinensis* vs Yunchaxiang 1

WU Ting, DENG Xiu-Juan, LI Yuan-Da, HUANG Gang-Hua, ZHOU Hong-Jie, LI Ya-Li*, ZHOU Xiao-Hui

(College of Tea, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the quality characteristics and aroma characteristic substances of white tea with different withering process of *Camellia sinensis* vs Yunchaxiang 1. **Methods** White tea was processed by natural withering (YC-T) and combined withering (YC-L) using one bud and two fresh leaves (YC-R) as raw material. Then, the sensory quality evaluation, physical and chemical composition, and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) were used to test the variety components. Through the metabolic pathway enrichment analysis of metabolic pathway annotation substances, combined with the top 20 substances in terms of difference multiplicity, revealed the flavor characteristic substances of 2 kinds of white teas. **Results** High quality white tea produced with *Camellia sinensis* vs Yunchaxiang 1. YC-T was high in catechin and soluble sugar, and YC-L was high in polyphenols, caffeine, amino acids and flavonoids. A total of 234 kinds of volatile substances, including 229 kinds of YC-T and 226 kinds of

基金项目: 云岭产业技术领军人才项目(发改委[2014]1782)、云南省教育厅科学研究基金研究生项目(2020Y137)

Fund: Supported by the Yunling Industrial Technology Leading Talents Program (NDRC [2014]1782), and the Graduate Program of Yunnan Provincial Education Department Scientific Research Fund (2020Y137)

***通信作者:** 李亚莉, 博士, 教授, 主要研究方向为茶叶加工与茶文化。E-mail: 595778901@qq.com

***Corresponding author:** LI Ya-Li, Ph.D, Professor, College of Tea, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China. E-mail: 595778901@qq.com

YC-L, were identified in the 2 kinds of white teas, which could be classified into 12 categories, with the highest heterocyclic compounds; the content of (*E*)-2-butyl hexanoate and decanal in YC-T with fruity aroma were higher, and nerolidol, methyl linoleate, acetate leaf alcohol ester, nerolidol, linolenic acid, (*E*)-2-hexanoic acid butyl ester, 3-methylbenzaldehyde, geranyl acid, phenylethyl alcohol, 3-methyl-1H-indole, α -terpineol, (-)-4-terpineol, geraniol, leuco- β -pinene, phenylethyl aldehyde, 3,6-nonadienal, with aroma characterization of floral, fruity, sweet, tender, spicy, honey and nutty aromas were higher than those in YC-L. **Conclusion** The natural withering of white tea is conducive to the fixation of the uniformity of the leaf base of white tea shape, and the compound withering is conducive to the formation of rich taste as well as the enrichment of the aroma characteristics of white tea.

KEY WORDS: withering; *Camellia sinensis* vs Yunchaxiang 1; white tea quality; volatile components

0 引 言

白茶是中国的特种茶类,主产于福建^[1-2],此外贵州^[3]、广西、云南^[4-6]等省也有生产。白茶具有独特的不炒不揉工艺,其主要工艺步骤中的萎凋可形成白茶特有的香气和滋味^[7]。白茶丰富的内含物质赋予了其预防心血管疾病、抗抑郁、预防 2 型糖尿病等保健功效^[8-9]。

萎凋是白茶品质形成的关键工艺,可分为自然萎凋、加温萎凋、复式萎凋、LED 灯萎凋^[10]等,自然萎凋和复式萎凋是最常用的两种方式。自然萎凋能形成较为稳定的白茶品质,但需要较大的加工场地,不利于大规模生产;加温萎凋可通过温湿度调控缩短萎凋时间,解决了自然萎凋因气候等因素而不能大规模生产的难题;复式萎凋结合室内、加温、日光萎凋等方式,其中,日光萎凋中的太阳光短波光照射可有效提高白茶的芳香物质、氨基酸、可溶性糖等物质^[11-13]。有研究表明,与鲜叶相比,复式萎凋白茶茶多酚、可溶性糖、水浸出物含量减少,黄酮、氨基酸、咖啡碱含量增加^[14];在萎凋时间一致时,复式萎凋的水浸出物和氨基酸含量较高,而自然萎凋具有较高的茶多酚、儿茶素、可溶性糖含量是白茶主要的呈味物质^[15]。

白茶萎凋过程中鲜叶失水,细胞原生质膜透性增加,不饱和脂肪酸在酶的作用下发生氧化、降解、异构等生成小分子的醇、酮、醛、酸等香气化合物^[16]。有研究表明,白茶香气物质中,清花香的物质含量相对较高^[17],其挥发性成分成分以正己醛、壬醛、癸醛、苯甲醇、芳樟醇、1-戊醇和 β -紫罗兰酮为主^[18],其芳樟醇及其氧化物、香叶醇、橙花醛、水杨酸甲酯、 β -紫罗兰酮、二氢猕猴桃内酯、 β -芳樟醇、氧化芳樟醇、水杨酸甲酯、苯乙醇、反-3-己烯醇和苯甲醛等香气成分可视为花香白茶香气品质工艺耦合调控的主要化学评测指标^[19-21],萎凋中,游离香气前体氨基酸和糖苷结合挥发物参与了白茶香气的形成,与香气相关的关键代谢物差异表达导致了不同内源挥发物的积累^[22],并最终形成白茶特有的香气特征。

云茶香 1 号(*Camellia sinensis* vs Yunchaxiang 1)由云南省农业科学院茶叶研究所云抗 14 号为母本,福鼎大白茶为父

本,采用人工杂交育种从杂交子一代中选择的单株,主要用于生产绿茶和普洱茶^[23-24],用于制作白茶的研究鲜少报导。

本研究选用云茶香 1 号茶树品种以自然萎凋和复式萎凋工艺加工白茶,进行感官审评,并通过理化分析结合气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)对白茶中的挥发性及非挥发性成分进行检测,探究云茶香 1 号不同萎凋工艺白茶的化学品质,对云茶香 1 号茶树品种开发白茶产品及改进和创新云南白茶的加工工艺提供指导。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

实验材料:云茶香 1 号茶树品种一芽二叶鲜叶由云南省茶叶科学研究所提供。

主要试剂:香兰素、碱式醋酸铅(分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司);三氯化铝(分析纯,天津市风船化学试剂科技有限公司);水合茚三酮(分析纯,广东光华科技股份有限公司);蒽酮(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);福林酚(分析纯,上海源叶生物科技有限公司);正己烷(色谱纯,德国 Merck 公司);芳樟醇标准品(同位素内标,色谱纯,云南西力生物技术股份有限公司)。

1.2 仪器与设备

UV-5100H 紫外可见分光光度计(上海元析仪器有限公司);8890-5977B 气相色谱-质谱联用仪(美国 Agilent 公司);DB-5MS 毛细管柱(30 m $\times$ 0.25 mm, 0.25 μ m)、DVB/CAR/PDMS 萃取头(120 μ m)(美国 Agilent 公司);MM400 球磨机(德国 Retsch 公司);SPME AllowCond 固相微萃取装置、Fiber Conditioning Station 老化装置、Agitator 样品加热箱(瑞士思特斯分析仪器有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 实验样制备

2021 年 3 月 15 日上午,于云南省茶叶科学研究所国家茶树种质资源圃,选用云茶香号茶树品种,采摘一芽二叶为原料。鲜叶样品、自然萎凋白茶样品、复式萎凋白茶

样品编号分别为 YC-R、YC-T、YC-L。

自然萎凋工艺制备茶样：在摊叶厚度 5 cm 左右，温度 25 ℃左右、湿度 80%左右环境条件下萎凋 86 h，60 ℃烘干机烘干。

复式萎凋工艺制备茶样：在摊叶厚度 5 cm 左右，温度 25 ℃左右、湿度 80%左右环境条件下萎凋 60 h，室外非阳光直射区域日晒 4 h，室内堆积于高 40 cm 直径 40 cm 的箩筐中 18 h，室外日晒 4 h，60 ℃烘干机烘干。鲜叶样品采用微波干燥固定。

1.3.2 感官审评

按照 GB/T 23776—2018《茶叶感官审评方法》采用评语与评分相结合的方式评定茶叶品质。

1.3.3 生化成分分析

水浸出物采用全量法、茶多酚采用福林酚比色法、游离氨基酸采用茚三酮比色法、咖啡碱采用碱式乙酸铅比色法、儿茶素总量采用香荚兰素比色法、可溶性糖采用三氯化铝比色法进行测定^[25]，黄酮采用蒽酮-硫酸比色法^[26]进行测定。

1.3.4 GC-MS 进行挥发性成分检测分析

样品提取流程：从 -80 ℃冰箱中取出样品进行液氮研磨，涡旋混合均匀，每个样称取约 1 g(液体 1 mL)于顶空瓶中。分别加入饱和 NaCl 溶液，10 μL 内标溶液。全自动顶空固相微萃取(headspace solid phase microextraction, HS-SPME)进行样本萃取，以供 GC-MS 分析。

HS-SPME 萃取条件：在 100 ℃恒温条件下，振荡 5 min，120 μm DVB/CAR/ PDMS 萃取头插入样品顶空瓶，顶空萃取 15 min，于 250 ℃下解析 5 min，然后进行 GC-MS 分离鉴定。采样前萃取头在 Fiber Conditioning Station 中加热老化 5 min(新萃取头在萃取前在 Fiber Conditioning Station 中老化 2 h)。

色谱条件：DB-5MS 毛细管柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)，载气为高纯氮气(纯度不小于 99.999%)，恒流流速 1.0 mL/min，进样口温度 250 ℃，不分流进样，溶剂延迟 3.5 min。程序升温：40 ℃，保持 3.5 min，以 10 ℃/min 升至 100 ℃，再以 7 ℃/min 升至 180 ℃，最后以 25 ℃/min 升至 280 ℃，保持 5 min。

质谱条件：电子轰击离子源(electron impact, EI)，离子源温度 230 ℃，四极杆温度 150 ℃，质谱接口温度 280 ℃，电子能量 70 eV，扫描方式为全扫描模式(SCAN)，质量扫描范围： m/z 50~500 amu。

定性定量分析：通过软件 Qualitative Analysis Workflows B.08.00 打开浏览质谱分析后的下机原始数据，得到总离子流图用于定性分析；基于 MWGC 数据库，用 MassHunter 定量软件打开样本下机质谱文件，进行色谱峰的积分和校正工作，对样本挥发性代谢物进行定量分析。

1.4 数据分析

所有数据测定平行进行 3 次，计算平均值，采用软件 IBM SPSS 25.0 进行方差分析；通过 R 软件进行聚类分

析、KEGG 挥发性代谢功能富集分析，Heatmap 绘制热图。

2 结果与分析

2.1 不同白茶感官品质分析

不同白茶感官审评风味轮如图 1 所示，感官审评结果中，自然萎凋总评分(92.4)高于复式萎凋(91.2)，YC-T 的外形和叶底高于 YC-L，YC-T 芽叶较匀整，叶底较较亮，YC-L 的香气、滋味、汤色评分较高，香气馥郁带花香，汤色杏黄明亮，滋味鲜甜，YC-T 香气浓郁，带毫香、花香，滋味甜爽带涩，汤色浅杏黄明亮。综上，自然萎凋有利于白茶保持均匀的外形，YC-L 在加工后期处理中翻动增加了机械损伤，叶片完整度降低，柔软度下降，通过复式萎凋处理后增加了香气的馥郁度、滋味鲜甜、杏黄明亮的品质特征，降低了白茶的苦涩感，与其生化成分氨基酸、儿茶素、黄酮类及挥发性物质的变化密切相关。

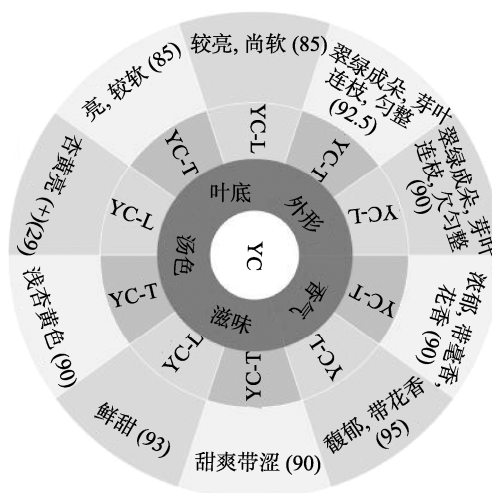


图 1 不同白茶感官审评风味轮
Fig.1 Sensory quality evaluation flavor wheel of different white teas

2.2 不同白茶生化成分分析

由表 1 可知，云茶香 1 号鲜叶主要生化成分含量较为丰富，与包云秀等^[23-24]研究相比，氨基酸含量较高，茶多酚较低，酚氨比较低，儿茶素含量较高，可溶性糖及黄酮含量适中，表明云茶香 1 号茶树品种一芽二叶鲜叶原料在生化成分含量和组成上对加工白茶具有一定的潜力。

对样品生化成分分析后发现，YC-R 的水浸出物、咖啡碱、氨基酸、黄酮均低于 YC-T、YC-L，酚氨比和茶多酚均高于 YC-T、YC-L，经过复式萎凋后儿茶素呈现下降趋势。两种不同处理的白茶对比后分析发现，YC-T 的水浸出物、儿茶素和可溶性糖含量高于 YC-L，YC-T 酚氨比、茶多酚、咖啡碱、氨基酸、黄酮含量低于 YC-L，这些物质的变化主要影响茶汤滋味和色泽^[27]，复式萎凋中黄酮含量的增加是茶

汤杏黄明亮的关键。有研究^[28]证明咖啡碱与茶黄素以氢键缔合后的复合物具有鲜爽味, 氨基酸含量提高对茶汤滋味鲜爽度、缓解苦涩味具有重要作用, 黄酮类物质是白茶区别于其他茶类的特征性物质之一。

由表 1 可知, 两种不同萎凋处理间除儿茶素总量、可溶性糖和水浸出物含量存在显著差异($P<0.05$), 其余各成分含量均无显著差异($P>0.05$)。YC-T 和 YC-L 加工中不同的处理是其不同成分变化的关键, 陈可坚^[12]研究表明, 复式萎凋中日晒的短波光可有效提高白茶的氨基酸, 与本研究结果一致, 但可溶性糖含量上升与本研究结果相反, 可能与本研究所用品种和地域性有较大关系。在白茶萎凋过程中, 随多酚类物质氧化增加, 儿茶素总量逐渐减少, 尤其是苦涩味和收敛性较强的酯型儿茶素含量降低, 从而形成了白茶滋味醇和的品质特征。茶多酚与儿茶素含量降低与茶叶的发酵程度密切相关, 复式萎凋经过堆积增加了茶叶的发酵度, 茶叶发酵程度增高, 其儿茶素总量越低^[15,29]。

表 1 生化成分分析 Table 1 Analysis of the biochemical composition			
成分	YC-R	YC-T	YC-L
水浸出物含量/%	43.53 ^c	46.01 ^a	45.83 ^b
酚氨比/%	4.38 ^b	2.75 ^a	2.88 ^c
茶多酚/%	19.96±1.12 ^a	14.6±0.09 ^b	17.01±1.59 ^b
咖啡碱/%	3.86±0.38 ^a	3.94±0.14 ^a	4.29±0.16 ^a
氨基酸/%	4.56±0.19 ^b	5.32±0.22 ^a	5.9±0.44 ^a
儿茶素总量/%	30.69±1.39 ^b	37.63±1.82 ^a	24.66±0.87 ^c
黄酮类/%	3.87±0.39 ^b	7.5±0.37 ^a	8.19±0.34 ^a
可溶性糖/%	5.57±0.05 ^a	5.53±0.31 ^a	4.8±0.16 ^b

注: 同列不同小写字母表示不同处理之间差异显著($P<0.05$)。

2.3 不同白茶挥发性成分分析

2.3.1 不同白茶挥发性成分

茶叶中主要挥发性物质以醇类、萜类、酯类、醛类、杂环类为主^[27], 如表 2 所示, 两种白茶中共鉴定出挥发性物质 234 种, YC-T 中检出挥发性物质 229 种, 其主要成分有 28 种(相对含量大于 1 的), 占提取物总量的 99.19%, YC-L 中检测出挥发性物质 226 种, 其主要成分 33 种, 占提取物总量的 68.13%。其挥发性物质可分为 12 类, 醇类、酚类、含氮化合物、含硫化合物、醛类、酸类、萜类、酮类、杂环化合物、脂类、烃类及其他类, 表明不同萎凋加工的白茶挥发性物质种类繁多、物质丰富, 具有开发不同香型白茶的潜在价值, 有研究表明白茶主要挥发性物质以醇类、醛类为主^[29-30], 本研究分析发现 YC-L 不同类别挥发性物质总量均高于 YC-T, 其中含量最高的是杂环类化合物(YC-T: 0.41%; YC-L: 0.50%), 其次是酯类(YC-T: 0.20%; YC-L: 0.31%), 酮类(YC-T: 0.11%, YC-L: 0.17%), 烃类(YC-T: 0.06%, YC-L: 0.17%), 萜类(YC-T: 0.08%, YC-L: 0.11%), 可能与加工的品种云茶香 1 号本身有密切关系, 需进一步研究。

表 2 两种白茶挥发性成分分析
Table 2 Analysis of volatile components of 2 types of white tea

挥发性成分	保留指数	相对含量/%	
		YC-T	YC-L
醇类			
3,7,11,15-四甲基-1-十六烷基-3-醇	2141.89	0.45	0.11
正十五醇	1792.52	0.10	0.09
2-己基-1-癸醇	1674.86	0.07	0.05
鲸蜡醇	1591.03	0.20	0.15
3-十一烷醇	1556.24	0.07	0.09
2,4,7,9-四甲基-5-癸炔-4,7-二醇	1405.71	0.04	0.14
癸醇	1390.70	0.05	0.04
月桂醇	1390.70	0.05	0.04
1,3-二氧戊环-2,2-乙二醇	1382.38	0.01	0.08
2-丁基-2-辛醇	1369.73	0.02	0.01
神经醇	1224.71	0.03	0.60
3,7-二甲基-1,5,7-辛三烯-3-醇	1188.08	0.03	0.12
1-(2-丁氧基乙氧基)-乙醇	1185.43	0.17	0.17
(E)-6-壬烯-1-醇	1153.52	0.07	0.05
1-金刚烷醇	1144.29	0.01	0.01
2-苯乙醇	1114.56	0.36	0.73
苯甲醇	1034.18	0.33	0.23
辛烯-3-醇	979.57	0.17	0.25
2-庚醇	899.67	0.02	0.05
(E)-3-己烯醇	853.82	0.04	0.16
酚类			
2,5-双(1,1-二甲基乙基)-1,4-苯二醇	1967.11	10.56	5.35
5-戊基 1,3-苯二酚	1708.34	0.03	0.06
2-(1,1-二甲基乙基)-6-(1-甲基乙基)苯酚	1682.16	0.01	0.01
3,5-二甲基苯酚	1628.07	0.01	0.02
含氮化合物			
4,8,12-三甲基-3,7,11-三苯乙腈	1519.91	0.01	0.01
赤型-N-(β-羟基-α-甲基苯乙基)-N-(甲基)氨基乙腈	1503.95	1.71	1.95
1-异氰基-3-甲基苯	1478.80	7.19	6.00
5-甲基-1,2,5,6-四氢吡啶-2--2-酮	1477.18	0.08	0.11
2-异氰酸根合-2-甲基丙烷	1405.17	0.05	0.14
含硫化合物			
2-甲基硫烷,S,S-二氧化物	1399.99	0.06	0.06
磺酰胺	1359.46	0.05	0.08
二乙基二硫	1314.99	0.01	0.02
其他类			
N-(2,6-二乙基苯基)-1,1,1-三氟甲烷磺酰胺	1171.73	0.02	0.03
N,4,5-三甲基-苯基-1,2-二胺	1121.40	0.02	0.03
4-甲基巯基苯胺	1087.01	0.02	0.38
间氨基苯乙炔	1025.51	0.04	0.17
4-乙氧基苯乙胺	1006.06	0.01	0.03
N-甲基甲基丙烯酰胺	1517.44	1.67	1.61
1H-吡咯-2,5-二酮	1259.60	0.01	0.04
(S)-N-甲基-2-吡咯烷甲胺	933.13	0.01	0.01
N,N-二丙基-1-丙胺	1795.13	0.08	0.07
醛类			

表 2(续)

挥发性成分	保留指数	相对含量/%	
		YC-T	YC-L
3,5-二叔丁基水杨醛	1616.93	0.01	0.02
2,4-二羟基-3,6-二甲基-苯甲醛	1137.24	0.02	0.24
2,4-二羟基-6-甲基苯甲醛	1016.81	0.28	0.55
3-甲基-3-(4-甲基-3-戊烯基)- 环氧乙烷甲醛	927.08	0.03	0.06
α -亚乙基-苯乙醛	1554.17	0.03	0.02
2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-乙醛	1454.63	6.33	3.90
3-甲基苯甲醛	1047.09	0.06	0.57
癸醛	1697.11	0.24	0.11
3-乙基-苯甲醛	1620.97	0.01	0.02
3,6-壬二烯醛	1421.00	0.04	0.03
苯乙醛	1293.26	6.66	8.64
苯甲醛	1280.90	0.01	0.04
己醛	1180.25	0.01	0.21
酸类			
(Z,Z,Z)-9,12,15-十八碳三烯酸	1035.82	-	0.04
正十六烷酸	989.38	0.01	0.01
壬酸	899.55	0.07	0.06
庚酸	862.90	0.65	0.74
己酸	1761.63	0.01	0.01
萜类			
植物醇	1589.19	0.02	0.02
异植醇	1396.18	0.13	0.54
3,7,11,15-四甲基-2-十六烯-1-醇	1271.90	0.07	0.05
(+)-壬基酮	1268.68	0.11	0.43
6-异丙基-1,4-二甲基萘	1257.99	0.02	0.02
双环锍树脂	1217.02	0.44	2.24
反式-橙花叔醇	1204.73	0.01	-
4-二去氢菖蒲烯	1164.66	0.02	0.05
α -法尼烯	1071.94	0.09	0.57
γ -杜松烯	1043.21	0.14	0.32
环氧- β -紫罗兰酮	961.80	0.19	0.13
(Z)- β -法呢烯	2097.93	0.01	0.25
β -大马烯酮	1265.95	0.06	0.18
香叶酸	998.49	0.65	1.14
(S)-2-甲基-5-(1-甲基乙基)-2-环己 烯-1-酮	2111.51	2.90	0.97
2,6,10,10-四甲基-1-氧杂螺[4.5]癸 烯	1946.70	1.55	0.55
香叶醇	1861.31	11.55	7.11
甲基异冰片	1814.96	0.01	0.01
β -环柠檬醛	1681.13	0.02	0.04
脱氢 B-环柠檬醛	1665.56	0.04	0.09
L- α -松油醇	1560.09	0.79	0.82
(R)-4-甲基-1-(1-甲基乙基)-3-环己 烯-1-醇	1545.77	0.05	0.11
1,5,6,7-四甲基双环[3.2.0]庚-2,6- 二烯	1502.80	0.22	0.13
芳樟醇	1497.88	0.01	0.03
1-甲基-4-(1-甲基亚乙基)-环己醇	1483.04	0.55	0.27
2-(3-甲基-2-环戊烯-1-基)-2-甲基 丙醛	1480.17	3.45	2.67

表 2(续)

挥发性成分	保留指数	相对含量/%	
		YC-T	YC-L
3,6,6-三甲基-双环[3.1.1]庚-2-烯	1451.39	0.22	0.21
3,4-二甲基-1,5-环辛二烯	1422.96	0.11	0.09
β -水芹烯	1380.24	0.04	0.05
(1S)-6,6-二甲基-2-亚甲基-双环 [3.1.1]庚烷	1357.71	0.04	0.12
烃类			
3-甲基-6-苯基-4-(1-苯基乙氧 基)-1-己烯	1346.23	0.05	0.06
苯佐卡因	1303.42	0.05	0.04
异橐香素	1249.11	0.23	2.57
1-(1-丁烯-3-基)-4-戊基苯	1242.48	8.16	7.06
2,4-二叔丁基苯酚	1221.47	0.08	0.07
1,9-二甲基茚	1201.32	0.06	0.08
3,4,5,6-四甲基-1,2-二乙基-苯	1197.36	0.12	2.72
(2-氟苯基)甲醇,正戊醚	1183.33	0.01	0.40
1-丁氧基-4-甲氧基苯	1144.49	0.01	0.02
4-(1,1-二甲基-2-丙炔氧基)-甲苯	1103.04	1.13	4.28
(1-甲基庚基)-苯	1103.03	1.77	5.40
丙氧基苯	1068.02	0.07	0.11
2-乙基-1,4-二甲基-苯	1034.77	0.07	0.38
1-乙基-4-甲氧基-苯	1030.48	0.07	0.73
1-甲基-3-(1-甲基乙基)-苯	1007.52	0.02	0.13
1,4-二乙基-苯	989.86	0.16	1.04
3,5-二甲基-1-(4-氟苯基)氨基羰基 -吡啶	2187.58	-	0.01
1-碘-十六烷	1745.43	0.11	0.09
1-氯-十八烷	1729.38	0.12	0.08
2-溴十二烷	1549.97	0.15	0.10
1-氯十二烷	1470.67	0.05	0.06
二乙基(癸氧基)-硼烷	1698.73	0.08	0.07
2,6,10,14-四甲基-十六烷	1798.60	0.20	0.18
3-甲基-十七烷	1772.44	0.32	0.24
4-甲基十八烷	1766.33	0.09	0.07
4-乙基-十四烷	1752.42	0.09	0.07
2-甲基-十六烷	1691.84	0.06	0.05
1,1'-氧双-辛烷	1666.78	0.12	0.15
十六烷	1598.52	0.64	0.51
3-甲基十五烷	1569.49	0.64	0.41
2,6,10-三甲基十三烷	1459.28	0.14	0.09
辛基-环己烷	1449.98	0.06	0.04
十四烷	1398.70	0.87	0.62
5-丙基十三烷	1369.47	0.40	0.25
4,4-二甲基-十一烷	1351.31	0.05	0.03
二甲基十六烷	1344.30	0.03	0.02
3,5-二甲基十二烷	1344.12	0.03	0.02
1-甲氧基-4-甲基-双环[2.2.2]辛烷	1337.52	0.04	0.03
3,9-二甲基-十一烷	1319.99	0.03	0.02
2,2,4,4,6,8,8-七甲基-壬烷	1273.63	0.08	0.05
十二烷	1199.28	0.40	0.30
1-甲氧基金刚烷	1188.49	0.12	0.11
3,4-二甲基-2,4,6-辛三烯	1127.57	0.01	0.10
6-甲基十二烷	1126.99	0.05	0.04

表 2(续)

挥发性成分	保留指数	相对含量/%	
		YC-T	YC-L
3,3,4-三甲基-庚烷	1021.81	0.01	0.03
3,5,5-三甲基-2-己烯	973.31	-	0.05
酮类			
(<i>E,E</i>)-法呢基丙酮	1910.46	0.12	0.13
过氢法呢基丙酮	1843.70	0.26	0.19
4-(4-羟基-2,2,6-三甲基-7-氧杂双 环[4.1.0]庚-1-基)-3-丁烯-2-酮	1687.83	0.03	0.02
4-(4-羟基-3-甲氧基苯基)-2-丁酮	1528.96	0.03	0.03
7-甲氧基-4-甲基-1,3-二氢 -2H-1,5-苯并二氮杂-2-酮	1521.48	0.08	0.05
(<i>Z</i>)-四氢-6-(2-戊烯基)-2H-吡喃-2- 酮	1488.67	0.12	0.44
2,5-二羟基-4-异丙基-2,4,6-环庚 三烯-1-酮	1477.92	27.34	21.41
2,6-双(1,1-二甲基乙基)-2,5-环己 二烯-1,4-二酮	1462.61	0.08	0.06
顺式香叶基丙酮	1445.53	0.51	0.59
1-(4-叔丁基苯基)丙-2-酮	1428.35	0.02	0.05
6-甲基-6-(5-甲基呋喃-2-基)庚烷 -2-酮	1415.79	0.03	0.04
4-(2,6,6-三甲基环己-1,3-二烯基) 丁-3-烯-2-酮	1406.95	0.01	0.05
(<i>Z</i>)-3-甲基-2-(2-戊烯基)-2-环戊烯 -1-酮	1393.17	0.19	0.97
1-(2-羟基-5-甲基苯基)-乙酮	1310.10	0.11	0.49
4,6-二甲基-2,7-壬二烯-5-酮	1265.72	0.24	1.01
3-丁基环己酮	1261.53	0.05	0.19
3-乙基-4-甲基-1H-吡咯-2,5-二酮	1229.35	0.09	0.04
1-壬烯-3-酮	1170.62	1.89	1.61
(<i>R,S</i>)-5-乙基-6-甲基-3 <i>E</i> -庚烯-2- 酮	1140.34	0.03	0.03
1-乙基-2,5-吡咯烷二酮	1130.23	0.30	0.51
3,5-辛二烯酮	1068.15	0.02	0.03
1-(3-羟基呋喃-2-基)乙酮	1036.29	0.07	0.07
甲基异己烯基酮	983.54	0.25	0.21
4-甲基脲	863.43	0.17	0.19
杂环化合物			
7,9-二叔丁基-1-氧杂螺(4,5)癸 -6,9-二烯-2,8-二酮	1907.16	0.04	0.14
咖啡因	1857.40	91.55	59.77
N-(2,6-二甲基苯基)-N-[(2 <i>E</i>)-3-甲 基-1,3-噻嗪南-2-亚烷基]胺	1761.57	0.01	0.01
9-乙基-9H-吡唑-3-胺	1680.81	0.04	0.10
邻-(2-呋喃基)-1,3-苯二醇	1665.31	0.04	0.08
1,1'-(6-甲氧基-2,5-苯并呋喃二基) 双乙酮	1623.07	0.01	0.03
2,6-二氨基-4(1H)-嘧啶酮	1598.37	0.13	0.10
2-(1-甲基乙基)-1H-吡咯并[2,3- <i>b</i>] 吡啶	1519.91	0.01	0.01
5-乙酰基-2-甲基-3-噻吩甲醛	1502.39	0.03	0.05
3-甲基-1H-咪唑	1387.44	-	0.03
萘并[2,1- <i>b</i>]呋喃	1363.53	0.05	0.03

表 2(续)

挥发性成分	保留指数	相对含量/%	
		YC-T	YC-L
(5 <i>S</i> ,8 <i>R</i> ,8 <i>aS</i>)-8-甲基-5-[(<i>Z</i>)-戊-2-烯 -4-炔-1-基]八氢吡啶	1319.07	0.06	0.05
2-己基噻吩	1272.09	0.01	0.01
α -氧代呋喃-2-乙腈	1229.24	0.03	0.05
(5 <i>R</i> ,8 <i>aR</i>)-5-氢丙啶	1192.69	6.82	6.65
(3 <i>R</i> ,6 <i>S</i>)-2,2,6-三甲基-6-乙烯基四 氢-2H-吡喃-3-醇	1175.96	0.21	0.27
1H-替硝唑-5-胺	1133.70	0.04	0.03
双(η -5-吡啶基环戊二烯基)钴	1132.58	1.02	1.36
2-(5-甲基-5-乙烯基四氢呋喃-2- 基)丙-2-基酯-碳酸	1088.41	0.18	0.41
二甲基呋喃硫醇	1083.55	1.93	1.93
(<i>Z</i>)-芳樟醇氧化物	1071.81	0.06	0.23
1-甲基-1H-咪唑	1061.00	4.07	3.66
6-甲基-3(2H)-吡嗪酮	1060.77	7.14	6.49
3-丙基吡啶	1030.72	0.04	0.22
3-乙基-1H-1,2,4-三唑	989.12	0.22	0.17
2-乙酰基 1,4,5,6-四氢吡啶	985.10	0.18	0.33
4-乙基-2,5-二甲基-恶唑	984.93	0.16	0.32
2-乙烯基四氢-2,6,6-三甲基-2H- 吡喃	971.87	0.01	0.01
2-甲基-2H-四唑	868.19	0.13	0.18
3,4-二氨基-3H-吡唑	827.46	0.02	0.11
双硫[2,3- <i>c</i> :3',2'- <i>e</i>]吡嗪,4-氧化物	814.62	0.69	0.64
3-乙基-1H-吡咯	807.63	0.04	0.31
2-甲氧基呋喃	792.49	0.08	0.19
3-(1-甲基乙基)-氧杂环丁烷 酯类	761.57	0.25	0.32
十六烷酸丁酯	2182.95	0.03	0.03
十八烯酸甲酯	2123.26	0.01	0.01
(<i>Z,Z</i>)-9,12-十八碳二烯酸-甲酯	2092.24	-	0.23
棕榈酸异丙酯	2020.20	0.01	0.02
d-脯氨酸,N-甲氧羰基-,甲酯	1995.57	0.02	0.02
十六烷酸乙酯	1990.23	-	0.02
亚硫酸,2-乙基己基酯	1971.69	0.04	0.04
邻苯二甲酸丁酯-4-丁基酯	1956.68	0.32	0.40
十六酸甲酯	1922.87	0.26	0.55
肉豆蔻酸异丙酯	1822.73	0.08	0.04
[1 <i>a</i> ,2 <i>a</i> -(<i>Z</i>)]-3-氧代-2-(2-戊烯基)- 环戊烷乙酸甲酯	1646.91	1.32	1.04
富马酸二(顺式-己-3-烯基)酯	1603.49	0.01	0.01
2-(甲酰氧基)-1-苯基-乙酮	1586.66	0.01	0.03
苯甲酸己酯	1579.29	0.01	0.01
3-己烯-1-醇苯甲酸酯	1571.91	0.21	0.18
环己基丙基膦酸酯	1564.45	8.65	6.45
2(4H)-苯并呋喃酮,5,6,7,7 <i>a</i> -四氢 -4,4,7 <i>a</i> -三甲基-,(<i>R</i>)-	1532.53	0.28	0.16
戊酸 4-硝基苯酯	1486.94	0.06	0.06
苯乙酸丙酯	1479.90	2.16	1.84
4-羟基苯乙酸乙酯	1477.88	27.34	21.41
(<i>E</i>)-2-己酸丁酯	1436.14	0.02	-
(<i>E,Z</i>)-2-己酸,3-己烯基酯	1430.23	0.03	0.02

表 2(续)

挥发性成分	保留指数	相对含量/%	
		YC-T	YC-L
己酸己酯	1383.20	0.18	0.13
(Z)-3-己烯己酸酯	1377.09	0.09	3.27
(E)-己-3-烯基(E)-2-甲基丁-2-烯酸酯	1369.67	0.02	0.01
γ -非内酯	1358.50	0.06	0.08
乙酸异丁香酚酯	1352.18	0.02	0.02
(Z)-3-己烯基酯辛酸	1320.54	0.03	0.13
香叶酸甲酯	1318.82	0.02	0.03
2-甲基丁酯-己酸	1284.65	0.02	0.02
4-(乙氧基)-2-氧代丁-3-烯酸乙酯	1245.59	0.07	0.15
(乙二烷基)双(乙烷-2,1-二基)二乙酯	1206.99	0.07	0.21
水杨酸甲酯	1195.08	0.80	0.89
环丁烷羧酸 3-甲基丁酯	1191.19	0.06	0.05
乙酸己烯酯	1183.53	0.03	0.47
2-(2-丁氧基乙氧基)-乙醇乙酸酯	1167.93	4.96	4.20
乙酸苄酯	1161.34	0.01	0.01
2-糠酸己酯	1159.27	7.55	7.30
2,2-二甲基-丙酸,与二乙基硼酸的酸酐	1141.42	0.03	0.02
磷酸三乙酯	1118.98	1.71	1.91
正炔丙氧基羰基-1-丙氨酸乙酯	1111.12	-	0.11

注: -表示物质未检出,下同。

2.3.2 差异挥发性物质筛选

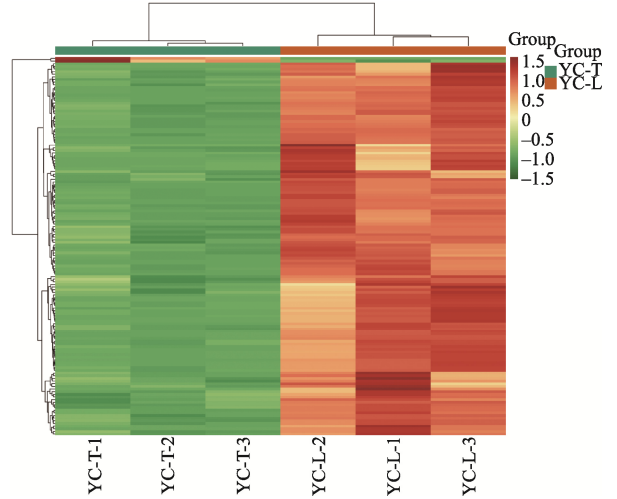
为进一步解析两种白茶挥发性成分差异,设置 $\log_2FC \geq 2$ 和 $\log_2FC \leq 0.5$, $P < 0.05$, $VIP \geq 1$ 为差异挥发性物质的筛选条件,筛选出 YC-T 和 YC-L 中具有差异显著性的挥发性物质共计 144 种,详见图 2。YCT-1、YCT-2、YCT-3 明显聚类到一支,而 YCL-1、YCL-2、YCL-3 明显聚类到另一支,表明不同样品的挥发性存在差异,即不同萎凋处理后各样本相对含量表达发生了依赖于萎凋方式不同的变化。通过热图分析, YC-L 中有两种物质下调, 142 种物质上调, YC-T 则相反, 通过复式萎凋处理更有利于挥发性成分的积累和生成, 复式萎凋处理后的白茶物质含量更为丰富, 物质组成更复杂, 有利于增加白茶香气的类型。

2.3.3 差异挥发性代谢物 KEGG 功能注释及富集分析

对差异显著代谢物 Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes (KEGG)的注释结果按照 KEGG 中通路类型进行分类,通过 KEGG 富集分析,挥发性物质代谢通路富集分析出 7 条有效代谢途径可揭示两种白茶的差异注释代谢物,结果如下:

(1)影响色氨酸代谢途径(tryptophan metabolism)的挥发性代谢物有 3 种,占 9.09%: *L*- α -松油醇、香叶醇、(1*S*)-6,6-二甲基-2-亚甲基-双环[3.1.1]庚烷;

(2)影响苯丙氨酸代谢途径(phenylalanine metabolism)的挥发性代谢物有 5 种,占 18.18%: 3-甲基苯甲醛、*L*- α -松油醇、香叶醇、(Z,Z,Z)-9,12,15-十八碳三烯酸、苯乙醛;



注: 横向为样品名称,纵向为差异代谢物信息,图中左侧为差异代谢物聚类,不同颜色为相对含量标准化处理得到值(红色代表高含量,绿色代表低含量)。

图 2 差异挥发性物质聚类热图分析

Fig.2 Heat map analysis of clustering of differential volatiles

(3)影响单萜生物合成途径(monoterpenoid biosynthesis)的挥发性代谢物有 7 种,占 27.27%: 乙酸己烯酯、3,6-壬二烯醛、香叶醇、*L*- α -松油醇、(1*S*)-6,6-二甲基-2-亚甲基-双环[3.1.1]庚烷、(Z,Z,Z)-9,12,15-十八碳三烯酸、香叶醇;

(4)影响代谢途径的挥发性代谢物(metabolic pathways)有 3 种,占 45.45%: 乙酸己烯酯、(Z,Z,Z)-9,12,15-十八碳三烯酸、3,6-壬二烯醛;

(5)影响不饱和脂肪酸的生物合成途径(biosynthesis of unsaturated fatty acids)的挥发性代谢物有 2 种,占 9.09%: 2-苯乙醇、苯乙醛;

(6)影响次生代谢物的生物合成途径(biosynthesis of secondary metabolites)的挥发性代谢物有 1 种,占 63.64%: 3-甲基-1*H*-吡啶;

(7)影响 α -亚麻酸代谢(α -linolenic acid metabolism)的挥发性代谢物有 1 种,占 27.27%: (Z,Z,Z)-9,12,15-十八碳三烯酸。

2.3.4 不同白茶特征风味物质分析

通过对两种白茶差异挥发性物质进行筛选,结合差异倍数前 20 的物质(图 3)及 KEGG 分析的 7 条途径中主要挥发性物质,结合相关文献^[30-33],其中 17 种具有明确的香气特征定性结果(见表 3),影响两种白茶挥发性物质的香气特征主要有花香、果香为主,含有香料、嫩香、清香、坚果香、蜜香、甜香、薄荷香、松脂香等,表明不同萎凋加工的白茶具有开发不同香型白茶的潜力。

YC-T 的(E)-2-己酸丁酯和癸醛含量较高,具有果香香气表征; YC-L 的橙花醇、亚油酸甲酯、乙酸叶醇酯、亚麻酸、(E)-2-己酸丁酯、3-甲基苯甲醛、香叶醇、苯乙醇、3-甲基-1*H*-吡啶、 α -松油醇、(-)-4-萜品醇、香叶醇、左旋- β 蒎烯、苯乙

醛、3,6-壬二烯醛较高, 具有花香、果香、甜香、嫩香、香料香、蜜香、坚果香的香气表征。表明云茶香 1 号自然萎凋处理的白茶以清香和果香为主, 经过复式萎凋处理的白茶, 香气类型多样, 日晒、堆积处理后使白茶香气物质更丰富, 有利于花果香、蜜香、坚果香等香气类型的形成。

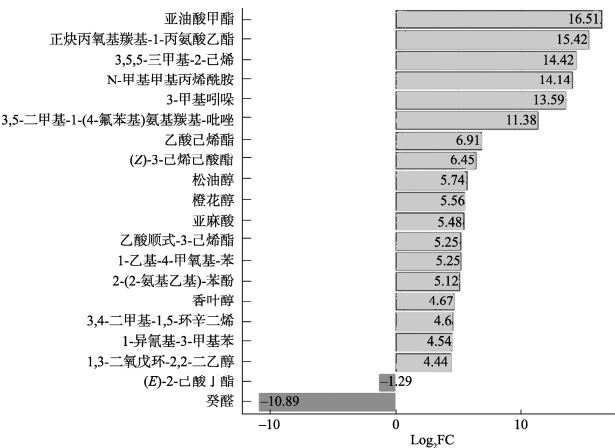


图 3 差异倍数前 20 柱状图
Fig.3 Top 20 histogram of variance multipliers

表 3 风味物质特征描述				
Table 3 Flavor substance characterization				
物质	物质分类	相对含量/%		香气描述
		YCT	YCL	
亚油酸甲酯	酯	-	0.69	香料
乙酸叶醇酯	酯	0.02	1.19	清香、甜香、果香
(Z)-己酸-3-己烯酯	酯	0.26	9.80	清香、果香、嫩香
橙花醇	醇	0.09	1.81	花香、果香
亚麻酸	酸	0.04	0.75	果香
(E)-2-己酸丁酯	酯	0.05	0.01	果香
3-甲基苯甲醛	醛	1.34	6.72	杏仁
香叶酸	萜类	0.16	0.19	甜香
苯乙醇	醇	1.10	2.19	花香、果香、蜜香、香料
3-甲基-1H-吡啶	杂环化合物	0	0.03	动物香、花果香
α -松油醇	萜类	0.36	8.14	香料、清香、薄荷、辛辣
(-)-4-萜品醇	萜类	0.08	1.40	香料
香叶醇	萜类	0.71	7.71	花香、果香
癸醛	醛	0.03	-	花香、果香、奶油香
左旋- β -蒎烯	萜类	0.49	3.13	松脂
苯乙醛	醛	0.43	0.95	花香、甜香、蜜香、清香
3,6-壬二烯醛	醛	0.17	0.69	果香、杏仁香

注: -表示物质未检出。

3 结论与讨论

云茶香 1 号茶树品种氨基酸含量较高, 茶多酚较低, 酚氨比较低, 具有生产白茶的潜力。以云茶香 1 号为原料加工

的白茶, 经过不同萎凋处理后呈现出不同的风味特征, YC-T 有利于白茶外形叶底的均匀性的固定, YC-L 茶多酚、氨基酸、黄酮较高, 是形成白茶丰富的滋味、茶汤杏黄明亮、香气馥郁、香型多变的前体物质。茶多酚、酚氨比、儿茶素类总量是白茶茶汤滋味浓度、厚度和涩度的主要贡献物质, 游离氨基酸总量是茶汤滋味鲜度和醇度的主要贡献物质^[31]。不同氨基酸含量通过与其他成分交互作用对白茶的滋味形成产生整体性的贡献作用^[32]。不同萎凋处理对白茶茶多酚及儿茶素含量影响较大, 对咖啡碱含量的影响不大, 与黄彪等^[33]研究一致。影响 YC-T 的主要挥发性物质是带有果香和清香的物质 (E)-2-己酸丁酯和癸醛; TC-L 挥发性物质较丰富, 主要特征物质有橙花醇、亚油酸甲酯、乙酸叶醇酯、亚麻酸、(E)-2-己酸丁酯、3-甲基苯甲醛、香叶酸、苯乙醇、3-甲基-1H-吡啶、 α -松油醇、(-)-4-萜品醇、香叶醇、左旋- β -蒎烯、苯乙醛、3,6-壬二烯醛, 具有多种特征物质的复合香气, 主要以花香、果香为主, 其次是清香、蜜香、甜香、嫩香, 还带有特殊的香料香、坚果香、辛香及动物香。研究发现云茶香 1 号茶树品种加工的白茶杂环类物质最高, 猜想与其品种本身有着紧密联系, 而杂环类化合物在卫生保健和药物分子设计领域发挥关键作用, 在西药中占有重要地位^[34], 其在功能性研究方面有较大潜力。本研究弥补了云茶香 1 号茶树品种在白茶风味物质研究及白茶工艺研究方面的空白, 为云茶香 1 号茶树品种开发云南白茶新产品与香气特征成分之间的关系提供一定理论依据, 为云南白茶加工工艺的创新和云茶香 1 号茶树品种开发不同香型白茶提供理论指导。

参考文献

[1] 于学领, 张雯婧, 刘丽英, 等. 福建省茶产业“十三五”回顾与“十四五”展望[J]. 中国茶叶加工, 2021, (1): 72-77.
YU XL, ZHANG WJ, WEN LJ, et al. “Thirteenth Five year Plan” review and “Fourteenth Five-year Plan”, prospect of Fujian tea industry [J]. China Tea Process, 2021, (1): 72-77.

[2] 危赛明. 白茶的产区 and 品质特征[J]. 中国茶叶加工, 2019, (3): 77-78.
WEI SM. The production areas and quality characteristics of white tea [J]. China Tea Process, 2021, (1): 72-77.

[3] 黄筑斌. 贵州省茶产业现状与发展建议[J]. 农技服务, 2020, 37(10): 124-126.
HUANG ZB. The current situation of tea industry in Guizhou province and development proposals [J]. Agrotechl Ser, 2020, 37(10): 124-126.

[4] 晏祥文, 钟一平, 吕世懂, 等. 云南月光白茶和福建白毫银针白茶香气成分的对比较研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(13): 171-177.
YAN XW, ZHONG YP, LU SD, et al. A comparative study of aroma components in Yunnan Yueguang white tea and Fujian Baihaoyinzen white tea [J]. Food Res Dev, 2019, 40(13): 171-177.

[5] 蒋宾, 鄢远珍, 刘琨毅, 等. 云南和福建白茶差异比较研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(4): 62-72.
JIANG B, YAN YZ, LIU KY, et al. Comparison of the difference between Yunnan and Fujian white tea [J]. Southwestern Univ (Nat Sci Ed), 2021, 43(4): 62-72.

[6] 张春花, 单治国, 满红平, 等. 对相同鲜叶加工的不同类茶品化学成分含量的差异性研究[J]. 现代园艺, 2020, 43(9): 22-24.
ZHANG CH, SHAN ZG, MAN HP, et al. A study on the variability of chemical composition content of different types of tea products processed from the same fresh leaves [J]. Mod Gard, 2020, 43(9): 22-24.

[7] 王艳艳. 浅述云南勐库大叶种白茶加工工艺[J]. 中国茶叶, 2019, 41(10): 38-39, 43.
WANG YY. A brief description of the processing of Yunnan Mengku big

- leaf white tea [J]. *China Tea*, 2019, 41(10): 38–39, 43.
- [8] 陈荣冰. 白茶色、香、味的化学组成[J]. *茶道*, 2021, (4): 91–92.
CHENG RB. Chemical composition of white tea color, aroma and taste [J]. *Tea Ceremony*, 2021, (4): 91–92.
- [9] 严云玉, 张迎阳, 赵丞. 白茶主要成分在疾病防治方面的研究进展[J]. *福建茶叶*, 2021, 43(4): 76–77.
YAN YY, ZHANG YY, ZHAO C. Research progress on the main components of white tea in disease control [J]. *Fujian Tea*, 2021, 43(4): 76–77.
- [10] 赵余庆, 夏晓艳, 林振传, 等. 胶股蓝协同白茶预防 2 型糖尿病的配方制备方法及应用: 中国, CN111450173A[P]. 2020-07-28.
ZHAO YQ, XIA XY, LIN ZC, *et al.* Preparation method and use of giberellic acid synergistic white tea formulation for the prevention of type 2 diabetes: China, CN111450173A [P]. 2020-07-28.
- [11] 黄藩, 唐晓波, 张成, 等. 不同光质萎凋对白牡丹茶品质的影响[J]. *热带作物学报*, 2021, 42(6): 1735–1744.
HUANG F, TANG XB, ZHANG C, *et al.* Effect of different light quality withering on the quality of white peony tea [J]. *J Trop Crops*, 2021, 42(6): 1735–1744.
- [12] 陈可坚. 不同萎凋方式对白茶品质的影响[J]. *福建茶叶*, 2020, 42(6): 35–36.
CHEN KJ. Effect of different withering methods on the quality of white tea [J]. *Fujian Tea*, 2020, 42(6): 35–36.
- [13] 张婷. 萎凋方式与技术对福鼎白茶品质影响初探[J]. *福建农业*, 2016, (12): 40, 42.
ZHANG T. Preliminary investigation on the effect of withering method and technology on the quality of Fuding white tea [J]. *Fujian Agric*, 2016, (12): 40, 42.
- [14] 周才碧, 张敏星, 穆瑞禄, 等. 白茶萎凋技术的研究进展[J]. *农产品加工(学刊)*, 2014, (2): 48–50.
ZHOU CB, ZHANG MX, MU RL, *et al.* Research progress of withering technology of white tea [J]. *Acad Period Farm Prod Process*, 2014, (2): 48–50.
- [15] 李金辉, 袁弟顺, 岳文杰, 等. 复式萎凋、加温萎凋对白茶品质的影响[C]. *中国茶叶科技创新与产业发展学术研讨会论文集*, 2009.
LI JH, YUAN DS, YUE WJ, *et al.* Effect of compound withering and heated withering on the quality of white tea [C]. *Proceedings of the Symposium on Tea Science and Technology Innovation and Industrial Development in China*, 2009.
- [16] 王子浩, 刘威, 尹鹏, 等. 三种萎凋方式对信阳群体种白茶成分及品质影响分析[J]. *陕西农业科学*, 2018, 64(6): 19–21.
WANG ZH, LIU W, YIN P, *et al.* Analysis of the effects of three withering methods on the composition and quality of white tea of Xinyang group species [J]. *Shaanxi Agric Sci*, 2018, 64(6): 19–21.
- [17] 谢关华, 陆安霞, 欧阳珂, 等. GC-MS 结合化学计量学用于探究六大茶类香气形成的差异[J/OL]. *食品与发酵工业*: 1–19. [2021-07-31]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.027026
XIE GH, LU ANX, OUYANG K, *et al.* GC-MS combined with chemometrics for exploring the differences in aroma formation of six major tea types [J/OL]. *Food Ferment Ind*: 1–19. [2021-07-31]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.027026
- [18] 邵淑贤, 王淑燕, 王丽, 等. 基于 ATD-GC-MS 技术的不同品种白牡丹茶香气成分分析[J/OL]. *食品工业科技*: 1–14. [2021-07-31]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021030180
SHAO SX, WANG SY, WANG L, *et al.* Analysis of aroma components of different varieties of white peony tea based on ATD-GC-MS technique [J/OL]. *Food Ind Technol*: 1–14. [2021-07-31]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021030180
- [19] 陈林, 张应根, 陈键, 等. 乌龙茶品种鲜叶加工白茶过程中香气成分动态变化规律[J]. *茶叶科学*, 2020, 40(6): 771–781.
CHENG L, ZHANG YG, CHEN J, *et al.* Dynamic change pattern of aroma components during processing of white tea from fresh leaves of oolong tea varieties [J]. *Tea Sci*, 2020, 40(6): 771–781.
- [20] 汤志飞, 周小芬, 邵秋艳, 等. 基于感官审评和 GC-MS 检测的春雨二号白茶香气成分分析[J]. *中国茶叶*, 2021, 43(7): 40–47.
TANG ZF, ZHOU XF, HAO QY, *et al.* Analysis of aroma composition of Chunyu No.2 white tea based on sensory review and GC-MS detection [J]. *China Tea*, 2021, 43(7): 40–47.
- [21] ZHAO F, CHEN MJ, JIN S, *et al.* Macro-composition quantification combined with metabolomics analysis uncovered key dynamic chemical changes of aging white tea [J]. *Food Chem*, 2021, 366: 130593.
- [22] 郭雯飞. 茶叶香气生成机理的研究[J]. *中国茶叶加工*, 1996, (4): 34–37.
GUO WF. A study on the mechanism of aroma production in tea [J]. *China Tea Process*, 1996, (4): 34–37.
- [23] 云南省农业科学院茶叶研究所. 云南省农业科学院茶叶研究所志[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2018.
Institute of Tea Research, Yunnan Academy of Agricultural Sciences. *Journal of the institute of tea research, Yunnan academy of agricultural sciences, Yunnan province* [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2018.
- [24] 包云秀, 田易萍, 梁名志, 等. 植物新品种茶树云茶香 1 号的选育[J]. *陕西农业科学*, 2019, 65(11): 17–18.
BAO YX, TIAN YP, LIANG MZ, *et al.* Selection and breeding of a new plant variety of tea tree Yuncha Xiang No.1 [J]. *Shaanxi Agric Sci*, 2019, 65(11): 17–18.
- [25] 张正竹. 茶叶生物化学教程[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009.
ZHANG ZZ. *Tea Biochemistry Tutorial* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2009.
- [26] 刘非, 孙威江, 黄艳, 等. 人工接种冠突散囊菌对白茶主要呈味物质的影响[J]. *菌物学报*, 2016, 35(8): 975–983.
LIU F, SUN WJ, HUANG Y, *et al.* Effect of artificial inoculation of *Corynebacterium corynebacterium* on the main flavoring substances of white tea [J]. *J Mycol*, 2016, 35(8): 975–983.
- [27] 宛晓春. 茶叶生物化学第三版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
WAN XC. *Tea Biochemistry Third edition* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2003.
- [28] 刘东娜, 罗凡, 李春华, 等. 白茶品质化学研究进展[J]. *中国农业科技导报*, 2018, 20(4): 79–91.
LIU DN, LUO F, LI CH, *et al.* Advances in quality chemistry of white tea [J]. *China Agric Sci Technol Guid*, 2018, 20(4): 79–91.
- [29] 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.
TIAN YQ. *Research on the flavor quality of white tea based on sensory evaluation and chemometrics* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [30] 陈志达. 白茶风味品质的物质基础与量化评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
CHEN ZD. *Study on the material basis and quantitative evaluation of white tea flavor quality* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [31] 沈强, 张小琴, 许凡凡, 等. 不同时期正安白茶呈味物质变化及滋味评价[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(24): 31–35, 43.
SHEN Q, ZHANG XQ, XU FF, *et al.* Changes in flavoring substances and taste evaluation of Zheng'an white tea in different periods [J]. *Food Ind Sci Technol*, 2020, 41(24): 31–35, 43.
- [32] 陈思彤, 赵峰, 王淑燕, 等. 不同等级白牡丹茶游离氨基酸构成分析[J]. *福建农业学报*, 2019, 34(8): 965–973.
CHEN ST, ZHAO F, WANG SY, *et al.* Analysis of free amino acid composition of different grades of white peony tea [J]. *Fujian J Agric*, 2019, 34(8): 965–973.
- [33] 黄彪, 刘文静, 吴建鸿, 等. 福鼎大白茶树鲜叶不同茶制品活性成分比较[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(8): 3219–3223
HUANG B, LIU WJ, WU JH, *et al.* Comparison of the active ingredients of different tea products from the fresh leaves of Fuding tea tree [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(8): 3219–3223.
- [34] 朱志臣, 王强, 贾青竹, 等. 多种杂环化合物的药理和毒理活性系数构效关系(英文)[J]. *物理化学学报*, 2014, 30(6): 1086–1090.
ZHU ZC, WANG Q, JIA QZ, *et al.* Pharmacological and toxicological activity coefficient conformational relationships of multispecies heterocyclic compounds (in English) [J]. *J Phys Chem*, 2014, 30(6): 1086–1090.

(责任编辑: 郑丽于梦娇)

作者简介



吴婷, 硕士, 主要研究方向为茶叶加工与品质控制。
E-mail: 1156739844@qq.com



李亚莉, 博士, 教授, 主要研究方向为茶叶加工与茶文化。
E-mail: 595778901@qq.com