

黄刚骅, 李沅达, 邓秀娟, 等. 四种干燥方式云南白茶的香气组分分析 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(18): 283–292. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120080

HUANG Ganghua, LI Yuanda, DENG Xiujuan, et al. Analysis of Aroma Compounds of Yunnan White Tea by Four Drying Methods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(18): 283–292. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120080

· 分析检测 ·

四种干燥方式云南白茶的香气组分分析

黄刚骅, 李沅达, 邓秀娟, 苏 丹, 沈远载, 李亚莉, 周红杰*

(云南农业大学茶学院, 云南昆明 650000)

摘 要: 为研究四种干燥方式对云南白茶香气品质影响, 采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术 (Headspace Solid-Phase Micro Extraction and Gas Chromatography Mass Spectrometry, HS-SPME-GC/MS), 结合相对香气活度值 (relative odor activity value, ROAV) 法分析阴干、阴晒结合、晒干、烘干云南白茶的挥发性成分。结果表明: 共检测出 91 种有效香气成分, 以醇类、烯烃类挥发性成分种类为主, 芳樟醇、 β -蒎烯、水杨酸甲酯、苯乙醇、 α -石竹烯、苯乙醛相对含量较高, 不同干燥方式下茶香螺烷、反式青叶醇、己醇、2,2,3-三甲基-环丁酮、1-辛烯-3-醇、3,5-辛二烯-2-酮、苯甲酸甲酯、(E)-2-辛烯醇、苯甲醇的相对含量存在明显差异。ROAV 法分析结果显示: 云南白茶的主要香气贡献挥发性成分有 6 种, 分别是 2-庚醇、1-辛烯-3-醇、芳樟醇、香叶醇、苯乙醛、 β -蒎烯。综合评价结果可知: 不同干燥方式影响云南白茶香气类型和品质, 阴干白茶清香带毫香, 加工时间较长。晒干与晒阴结合干燥白茶带有日晒味。烘干白茶显花香, 加工周期较短且不易受环境影响。

关键词: 白茶, 晒干, 烘干, 香气成分, 相对香气活度值

中图分类号: TS272.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)18-0283-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120080



本文网刊:

Analysis of Aroma Compounds of Yunnan White Tea by Four Drying Methods

HUANG Ganghua, LI Yuanda, DENG Xiujuan, SU Dan, SHEN Yuanzai, LI Yali, ZHOU Hongjie*

(College of Tea, Yunnan Agricultural University, Kunming 650000, China)

Abstract: To investigate the effects of four drying methods on the aroma quality of Yunnan white tea, headspace solid phase microextraction and gas chromatography mass spectrometry (HS-SPME-GC/MS) combining with relative odor activity value (ROAV) method were used to analyze the volatile components of air drying, air-sun drying, sun drying and bake drying Yunnan white tea. The results showed that 91 effective volatile components were detected, mainly alcohols and olefins volatile component species, with the highest relative contents of linalool, (-)- β -pinene, methyl salicylate, phenylethanol, α -caryophyllene and phenylacetaldehyde. Significant differences in the contents of theaspirane, (E)-3-hexen-1-ol, 1-hexanol, 2,2,3-trimethyl-cyclobutanone, 1-octen-3-ol, 3,5-octadien-2-one, methyl benzoate, (E)-2-octen-1-ol and benzyl alcohol were observed under different drying methods. The results of ROAV method analysis showed that there were six main aroma contributing volatile components of Yunnan white tea, namely 2-heptanol, 1-octen-3-ol, linalool, geraniol, phenylethanol, (-)- β -pinene. The comprehensive evaluation results showed that: Different drying methods affected the aroma type and quality of Yunnan white tea. Air dried white tea had a faint fragrance and a long processing time. Both the sun drying and the air-sun drying white tea had the flavor of sun exposure. Bake drying white tea had a floral fragrance, short processing cycle and was not easily affected by the environment.

Key words: white tea; sun drying; bake drying; aroma compounds; relative odor activity value

收稿日期: 2021-12-08

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项目 (2020Y138); 无量山高山生态茶产业发展周红杰专家工作站。

作者简介: 黄刚骅 (1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 茶叶加工与质量控制, E-mail: 229233639@qq.com。

* 通信作者: 周红杰 (1962-), 男, 硕士, 教授, 研究方向: 茶叶加工与品质鉴定, E-mail: 1051195348@qq.com。

白茶是六大茶类中加工工序最少的一个茶类,主要产区有传统的福建福鼎、政和、松溪、建阳^[1],以及新兴的云南景谷、陕西汉中等地。近几年白茶凭借清鲜的口感和降血脂^[2]、抗氧化^[3]、降血糖^[4]、抗癌^[5]等保健功效,受到消费者一致好评。

干燥是茶叶加工的最后道工序,有利于降低茶叶含水量、抑制酶催化,在提高茶叶品质的同时便于贮藏^[6]。同时,干燥也是茶叶香气形成的关键工序,绿茶干燥温度变化时,苯乙醛、月桂酸乙酯、吡咯、吡嗪等特征香气成分随之发生改变,形成不同的香气类型^[7]。不同干燥方式对茶叶香气形成产生重要影响,袁林颖等^[8]分析微波与热风干燥对绿茶品质的影响,发现微波干燥使绿茶形成清香,热风干燥则使绿茶产生栗香。张凌云等^[9]研究传统烘干、微波干燥与复式干燥(烘干加微波干燥结合)对乌龙茶品质的影响,发现经烘干的乌龙茶香气最好,微波干燥的香气成分种类最少但总含量高于烘干处理,而复式干燥的香气成分含量与香气评分都为最低。阳景阳等^[10]对比冻干、晒干、热风干燥、冻干和热风复合干燥等四种处理制作的红茶,发现随着干燥温度的提升,芳樟醇、橙花醇等呈花果香化合物含量升高,经过热风干燥处理的红茶香气评分更好。热风干燥(烘干)对茶叶香气品质形成有促进作用,但云南白茶常采用自然晾干或晒干方式,其加工时间过长且过程与成品品质不易控制^[11]。目前关于云南白茶的研究集中在与福建白茶的比较分析,然而关于干燥工艺的相关研究报道较少。

顶空固相微萃取气质联用技术(Headspace Solid-Phase Micro Extraction and Gas Chromatography Mass Spectrometry, HS-SPME-GC/MS)采用无溶剂前处理的萃取方法结合气相色谱质谱的分离鉴别,能较真实地反映样品的风味挥发性成分组成,具有方便快捷,灵敏度高,选择性与重现性好等特点^[12],常运用于食品特征香气物质的研究^[13-15]。

经研究发现,香气的形成不是各挥发性有机化合物气味的简单叠加,而是由这些化合物相互作用形成^[16]。此外,这些化合物的感官不仅受浓度和味道的影

响,ROAV>1的组分可以认为是主要挥发性组分,0.1<ROAV<1的组分可认为对香气的构成有修饰作用。

本研究采用感官审评及HS-SPME-GC/MS,结合ROAV法,比较室内自然干燥(阴干)、室内自然—日光复合式干燥(阴晒结合干燥)、日光干燥(晒干)、机械热风干燥(烘干)等四种干燥方式所制成云南白茶的挥发性化合物,探究云南白茶较优的干燥方式。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

供试茶样 选用云南大叶种南涧群体种一芽二叶鲜叶,于2020年9月在大理南涧鑫凤凰生态茶厂制作,按照不同的干燥方式制成;氯化钠 分析纯,国药集团化学试剂有限公司;正己烷、正构烷烃(C₇~C₂₀)标准品 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。

MS105DU型数显电子天平 梅特勒托利多仪器(上海)有限公司;DGG-9620A型电热恒温鼓风干燥箱 上海齐欣科学仪器有限公司;GT10-2型高速台式离心机 北京时代北利离心机有限公司;SPME Arrow型顶空固相微萃取装置、8890-5977B气相色谱质谱联用仪 美国Agilent公司。

1.2 实验方法

1.2.1 云南白茶制备 按照传统白茶加工方法:萎凋、干燥的工序依次进行,均采用室内自然萎凋60 h,在干燥阶段分批处理,干燥至含水量<8.5%,符合(GB/T 22291-2017)白茶成品茶含水量标准。具体干燥工艺见表1。

1.2.2 感官审评 根据国家标准(GB/T 23776-2018)茶叶感官审评方法由8位经过专业茶叶审评训练的小组成员进行审评(3男5女,年龄范围21~58岁)。

1.2.3 挥发性成分测定

1.2.3.1 样品提取方法 采用顶空固相微萃取方法提取挥发性香气成分。从-80℃冰箱中取出待测样品进行液氮研磨,每个样品涡旋混合后各取约1 g于顶空瓶中,分别加入饱和氯化钠溶液与10 μL内标溶液,全自动顶空固相微萃取HS-SPME进行样本萃取。

1.2.3.2 检测条件 HS-SPME进样参数:老化温度250℃,老化时间5 min,加热温度60℃,加热时间

表1 干燥工艺参数

Table 1 Parameters of different drying processes

编号	干燥方式
AD(阴干)	室内自然干燥(室内静置30 h,温度23~26℃,空气相对湿度55%)
SAD(阴晒结合干燥)	室内自然-日光复合式干燥(室外日晒1 h后转室内静置1 h,重复三次,温度23~32℃)
SD(晒干)	日光干燥(室外日晒7.5 h,温度27~32℃)
BD(烘干)	机械热风干燥(先使用100℃烘10 min,待摊凉30 min后再用80℃烘20 min)

10 min, 吸附时间 20 min, 解析时间 5 min, 进样后老化时间 5 min。

色谱条件: DB-5 MS 色谱柱 (30 m×0.25 mm×0.25 μm); 进样口温度: 250 ℃; 载气: Helium, 载气流速: 1.0 mL/min; 柱温条件: 40 ℃ (5 min), 以 6 ℃/min 升至 280 ℃ (5 min); 不分流进样模式。

质谱条件: 电离模式为 EI, 电离能量 70 eV; 传输线温度 280 ℃; 离子源温度 230 ℃; 四极杆温度 150 ℃。

1.2.3.3 定性、定量方法 通过 MassHunter 程序对质谱峰提取, 根据检测到挥发性成分的保留时间 (RT) 与相同色谱条件下正构烷烃 (C₇~C₂₀) 的保留时间计算保留指数 (RI), 通过比对 NIST、Wiley、MWCG 数据库和已有文献的 RI 数值进行化合物定性筛选。采用峰面积归一化法进行定量计算。

挥发性成分保留指数 = 100Z + 100 $\frac{[RT_{R(x)} - RT_{R(z)}]}{[RT_{R(z+1)} - RT_{R(z)}]}$

式中: RT_{R(x)}, RT_{R(z)}, RT_{R(z+1)} 表示挥发性成分及碳数为 Z, Z+1 正构烷烃的保留时间, 且 RT_{R(z)} < RT_{R(x)} < RT_{R(z+1)}。

相对含量 (%) = $\frac{\text{任意挥发性组分峰面积}}{\text{总挥发性组分峰面积}} \times 100$

1.2.4 ROAV 计算方法

ROAV = $\frac{\text{任一挥发性组分相对含量}(\%)}{\text{最大香气贡献组分相对含量}(\%)} \times \frac{\text{最大香气贡献组分阈值}}{\text{任一挥发性组分阈值}} \times 100$

1.3 数据处理

使用 Excel 2016 软件进行数据处理与制图。

2 结果与分析

2.1 不同干燥方式云南白茶的感官评价结果

根据 1.2.2 方法进行感官审评, 结果如表 2 所示, 不同干燥方式白茶的香气特征和得分存在明显差异: AD 具有清香带毫香的品质特点, SAD 具有清香带花香且带有日晒味的品质特点, SD 具有清香带花

香且带有日晒味的品质特点, BD 具有花香的品质特点。香气得分排序依次为: AD>BD>SAD>SD, 其中 SAD、SD 白茶经过日晒, 带有日晒味, 造成感官审评香气得分比未经过日晒的 AD、BD 白茶低。

2.2 四种干燥方式云南白茶挥发性成分分析

茶叶中已鉴定出 700 余种挥发性成分, 其中饱和烃类化合物的香气阈值较高, 对香气的贡献程度小, 在进行香气成分分析时常将其忽略^[19]。本试验鉴定出 133 种挥发性成分, 最终根据化合物与数据库的匹配度 (≥ 70) 筛选出 91 种挥发性成分用于分析, 根据化学结构分为醇类、醛类、酮类、酯类、芳香烃类、烯炔类、杂环化合物、酸类及酚类等 9 类, 具体挥发性成分相对含量 (%) 情况见表 3。

试验结果显示, 四种干燥工艺制作出的白茶中醇类化合物数量最多 (17 种), 且在样品中相对含量占比最高 (39.71%~41.89%)。其次是烯炔类 14 种 (24.06%~26.43%)、酯类 14 种 (12.07%~13.13%)、醛类 10 种 (8.80%~9.35%) (图 1)。云南大叶种白茶显花香, 挥发性成分以醇类、烯炔类为主^[20], 而福建白茶主要呈现清鲜的香气特征, 挥发性成分以醇类和醛类为主^[21]。Chen 等^[22] 研究白茶加工过程挥发物动态变化, 结果表明白茶的主要挥发物以烃类、酯类、醇类、醛类为主, 其中芳樟醇、芳樟醇氧化物、苯乙醇、苯甲醛、苯乙醛、香叶醇等化合物浓度较高; 张晓珊等^[23] 用 HS-SPME-GC/MS 测定云南白茶挥发性成分的结果表明, 云南白茶挥发物主要组分是醇类、烃类、酮类, 其中芳樟醇及其氧化物、香叶醇、苯乙醇、β-蒎烯、水杨酸甲酯等挥发物成分含量较多, 与本研究结果类似。

所测出挥发性化合物中相对含量较高的 20 种分别是芳樟醇 (17.08%~18.42%)、β-蒎烯 (10.41%~11.31%)、水杨酸甲酯 (8.44%~9.57%)、苯乙醇 (8.24%~9.64%)、α-石竹烯 (4.60%~5.10%)、苯乙醛 (4.62%~4.81%)、香叶醇 (3.15%~4.05%)、3,6,6-三甲基-双环 [3.1.1] 庚-2-烯 (2.83%~3.13%)、苯甲醛 (2.71%~3.11%)、2-糠酸己酯 (2.43%~2.80%)、(3R, 6S)-2,2,6-三甲基-

表 2 四种干燥方式云南白茶感官审评结果
Table 2 Sensory evaluation results of Yunnan white tea by four drying methods

样品名称	外形 (25%)		香气 (25%)		汤色 (10%)		滋味 (30%)		叶底 (10%)		总分 (分)
	评语	得分 (分)	评语	得分 (分)	评语	得分 (分)	评语	得分 (分)	评语	得分 (分)	
AD	芽叶连枝 青褐 较匀整	94	清香带毫香	93	浅杏黄 明亮	94	甜醇 回甘	94	黄褐尚润	93	93.65
SAD	芽叶连枝 青褐泛灰 较匀整	92	清香带花香 带日晒味	90	黄 较亮	92	尚醇	91	黄绿尚软	93	91.30
SD	芽叶连枝 灰绿泛褐 匀整	92	清香带花香 有日晒味	89	黄 明亮	93	尚醇	90	黄绿泛褐	90	90.55
BD	芽叶连枝 青褐 匀整	91	花香	92	黄 较亮	92	甜醇 回甘	93	黄褐泛红	92	92.05

表3 挥发性成分及相对含量
Table 3 Volatile components and their relative contents

序号	挥发性成分	保留时间(min)	保留指数	相对含量(%)			
				AD	SAD	SD	BD
醇类							
1	反式青叶醇	6.90	852	1.33±0.04	1.75±0.03	2.09±0.10	2.30±0.01
2	己醇	7.25	865	1.06±0.08	1.97±0.02	2.16±0.14	2.61±0.03
3	2-庚醇	8.14	900	2.37±0.04	2.56±0.05	2.25±0.13	2.30±0.15
4	1-辛烯-3-醇	10.48	979	0.51±0.02	0.88±0.11	1.18±0.05	0.79±0.09
5	(E)-2-辛烯醇	13.13	1066	0.27±0.00	0.56±0.00	0.57±0.01	0.32±0.00
6	苯甲醇	13.21	1068	0.18±0.00	0.36±0.00	0.36±0.00	0.21±0.00
7	芳樟醇	14.18	1100	18.42±0.44	17.95±0.15	17.22±0.36	17.08±0.29
8	二氢芳樟醇	14.25	1103	0.39±0.01	0.43±0.00	0.38±0.00	0.62±0.00
9	2,6-二甲基-环己醇	14.46	1110	0.07±0.00	0.10±0.00	0.10±0.00	0.09±0.00
10	苯乙醇	14.49	1111	8.41±0.03	8.31±0.17	8.24±0.06	9.64±0.55
11	(-)-4-萜品醇	16.57	1181	0.07±0.00	0.06±0.00	0.07±0.00	0.06±0.00
12	(E)-2,6-二甲基辛基-3,7-二烯-2,6-二醇	16.73	1186	0.01±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	0.01±0.00
13	松油醇	16.98	1195	0.33±0.00	0.31±0.00	0.29±0.00	0.30±0.00
14	橙花醇	17.80	1223	0.37±0.03	0.35±0.00	0.37±0.01	0.36±0.01
15	2-甲基异冰片	18.27	1240	2.45±0.23	2.42±0.18	2.12±0.42	1.94±0.48
16	香叶醇	18.50	1248	3.47±0.17	3.15±0.05	4.05±0.15	3.24±0.11
17	棕榈醇	28.81	1657	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00
	总计			39.71±0.26	41.08±0.28	41.46±0.05	41.89±0.52
醛类							
18	乙缩醛	5.11	773	0.35±0.01	0.29±0.02	0.29±0.00	0.32±0.03
19	反-2-庚醛	9.76	954	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00
20	苯甲醛	9.91	959	2.71±0.03	2.75±0.03	3.03±0.07	3.11±0.23
21	2,4-庚二烯醛	11.40	1009	0.48±0.01	0.58±0.04	0.66±0.04	0.58±0.02
22	苯乙醛	12.39	1042	4.81±0.16	4.62±0.12	4.63±0.08	4.71±0.36
23	藏红花醛	17.09	1198	0.09±0.00	0.07±0.00	0.07±0.00	0.09±0.00
24	癸醛	17.26	1204	0.02±0.00	0.03±0.00	0.03±0.00	0.02±0.00
25	β-环柠檬醛	17.67	1219	0.15±0.00	0.15±0.00	0.14±0.00	0.14±0.00
26	香草醛	18.71	1255	0.02±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00
27	橙花醛	18.98	1265	0.43±0.05	0.29±0.01	0.37±0.01	0.35±0.04
	总计			9.06±0.10	8.80±0.17	9.24±0.11	9.35±0.64
酮类							
28	2,2,3-三甲基-环丁酮	4.85	757	0.08±0.00	0.18±0.00	0.21±0.00	0.17±0.00
29	2,2,6-三甲基-环己酮	12.17	1034	0.13±0.00	0.10±0.00	0.09±0.00	0.09±0.00
30	3,5-辛二烯-2-酮	13.90	1091	0.31±0.02	0.71±0.02	0.72±0.01	0.38±0.00
31	N-乙基琥珀酰亚胺	15.02	1129	0.31±0.02	0.19±0.00	0.16±0.00	0.20±0.01
32	茶香酮	15.43	1142	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00
33	3-乙基-4-甲基-1H-吡咯-2,5-二酮	17.91	1227	0.02±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00
34	茉莉酮	22.38	1391	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00
35	α-紫罗兰酮	23.15	1421	0.11±0.00	0.14±0.00	0.15±0.00	0.12±0.00
36	香叶基丙酮	23.76	1445	0.04±0.00	0.04±0.00	0.04±0.00	0.03±0.00
37	植酮	32.75	1862	0.12±0.01	0.13±0.03	0.11±0.00	0.11±0.00
	总计			1.14±0.00	1.53±0.06	1.52±0.01	1.14±0.01
酯类							
38	丁酸丁酯	10.95	994	0.05±0.00	0.04±0.00	0.03±0.00	0.03±0.00
39	苯甲酸甲酯	13.89	1091	0.09±0.00	0.19±0.00	0.20±0.00	0.10±0.00
40	2-糠酸己酯	15.91	1158	2.80±0.12	2.68±0.09	2.43±0.37	2.76±0.65
41	乙酸苄酯	15.96	1160	0.04±0.00	0.03±0.00	0.04±0.00	0.03±0.00
42	水杨酸甲酯	16.89	1191	8.44±0.08	9.57±0.07	9.38±0.06	8.91±0.13
43	Z-3-甲基丁酸-3-己烯酯	18.10	1234	0.13±0.00	0.14±0.01	0.17±0.02	0.11±0.01
44	2,6-辛二酸-3,7-二甲基-甲酯	18.17	1237	0.08±0.00	0.06±0.00	0.08±0.00	0.07±0.01
45	香叶酸甲酯	20.46	1319	0.19±0.00	0.17±0.00	0.21±0.01	0.15±0.00

续表 3

序号	挥发性成分	保留时间(min)	保留指数	相对含量(%)			
				AD	SAD	SD	BD
46	(Z)-3-己烯己酸酯	22.03	1378	0.03±0.00	0.04±0.00	0.05±0.00	0.04±0.00
47	己酸己酯	22.18	1383	0.03±0.00	0.04±0.00	0.05±0.00	0.03±0.00
48	二氢猕猴桃内酯	25.79	1527	0.08±0.00	0.09±0.00	0.09±0.00	0.09±0.00
49	1,3-苯二醇单乙酸酯	26.60	1561	0.02±0.00	0.01±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00
50	邻苯二甲酸二乙酯	27.13	1583	0.01±0.00	0.01±0.00	0.02±0.00	0.01±0.00
51	2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯	27.19	1586	0.08±0.00	0.09±0.00	0.06±0.00	0.09±0.00
	总计			12.07±0.17	13.13±0.11	12.83±0.37	12.44±0.52
	芳香烃类						
52	对二甲苯	7.29	867	0.04±0.00	0.02±0.00	0.04±0.00	0.04±0.00
53	苯乙烯	7.86	889	0.04±0.00	0.03±0.00	0.04±0.00	0.04±0.00
54	间伞花烃	11.88	1025	1.46±0.01	1.26±0.03	1.30±0.03	1.39±0.03
55	1-异丙烯基-3-甲基苯	13.86	1090	0.30±0.00	0.25±0.00	0.26±0.00	0.30±0.00
56	萘	16.69	1185	0.10±0.00	0.07±0.00	0.06±0.00	0.06±0.00
57	N-苯基-甲酰胺	17.56	1215	0.01±0.00	0.01±0.00	0.02±0.00	0.01±0.00
58	2-甲基-萘	20.25	1311	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00
59	1,2-二氢-4,5,7-三甲基-萘	21.42	1355	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00	0.02±0.00
60	2,4-二叔丁基苯酚	25.21	1503	2.26±0.04	2.04±0.11	1.78±0.11	2.47±0.10
61	二苯甲酮脞	29.19	1674	0.03±0.00	0.06±0.00	0.05±0.00	0.04±0.00
	总计			4.25±0.04	3.75±0.07	3.55±0.09	4.39±0.13
	烯烃类						
62	β -蒎烯	10.80	989	11.31±0.05	10.41±0.24	10.58±0.21	10.46±0.26
63	α -侧柏烯	11.33	1007	1.35±0.02	1.23±0.05	1.26±0.03	1.21±0.03
64	4-萜烯	11.65	1017	1.10±0.02	1.02±0.03	1.04±0.03	0.97±0.02
65	D-柠檬烯	12.03	1030	2.30±0.02	2.13±0.06	2.13±0.08	2.08±0.04
66	3,6,6-三甲基-双环[3.1.1]庚-2-烯	12.20	1036	3.13±0.02	2.88±0.07	2.97±0.06	2.83±0.07
67	α -石竹烯	12.53	1046	5.10±0.03	4.71±0.11	4.81±0.10	4.60±0.12
68	γ -萜品烯	12.91	1059	0.68±0.00	0.64±0.02	0.66±0.02	0.61±0.19
69	1,2,3,4,5-五甲基环戊二烯	13.74	1086	0.79±0.01	0.71±0.02	0.73±0.02	0.70±0.02
70	对薄荷烯	14.79	1121	0.04±0.00	0.03±0.00	0.04±0.00	0.04±0.00
71	别罗勒烯	15.35	1140	0.54±0.01	0.50±0.01	0.52±0.01	0.48±0.01
72	3,3-二甲基-6-亚甲基环己烯	15.51	1145	0.01±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	0.01±0.00
73	1-十三烯	22.39	1391	0.02±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	0.01±0.00
74	α -姜烯	25.01	1495	0.02±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00
75	去氢白菖烯	25.68	1523	0.04±0.00	0.02±0.00	0.03±0.00	0.03±0.00
	总计			26.43±0.18	24.53±0.63	24.81±0.58	24.06±0.62
	杂环类化合物						
76	2-乙基-5-甲基-呋喃	8.32	906	0.02±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00
77	N-甲基咪唑	9.87	958	0.93±0.03	0.84±0.02	0.74±0.10	0.94±0.15
78	2-丙基-呋喃	10.96	995	0.07±0.00	0.08±0.00	0.09±0.00	0.06±0.00
79	2-乙酰基1,4,5,6-四氢吡啶	12.69	1051	0.01±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	0.01±0.00
80	(Z)-芳樟醇氧化物	13.28	1071	2.28±0.04	2.38±0.03	2.25±0.03	1.93±0.02
81	2-乙酰基-5-甲基呋喃	14.23	1102	0.06±0.00	0.06±0.00	0.07±0.00	0.05±0.00
82	(3R, 6S)-2,2,6-三甲基-6-乙烯基四氢-2H-吡喃-3-醇	16.38	1174	2.78±0.05	2.67±0.07	2.38±0.05	2.75±0.16
83	四氢-3-甲基-5-氧代-2-呋喃羧酸	18.45	1246	0.04±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	0.03±0.00
84	茶香螺烷	20.39	1316	0.16±0.00	0.11±0.00	0.11±0.01	0.09±0.00
85	咖啡因	32.63	1856	0.23±0.03	0.28±0.06	0.20±0.02	0.20±0.00
	总计			6.57±0.02	6.45±0.13	5.89±0.14	6.08±0.11
	酸类						
86	甲基丁酸	6.70	844	0.21±0.01	0.20±0.00	0.19±0.00	0.23±0.00
87	己酸	13.34	1073	0.15±0.00	0.15±0.00	0.14±0.00	0.13±0.00
88	壬酸	18.88	1262	0.10±0.01	0.08±0.00	0.08±0.01	0.06±0.00
89	甲酸冰片	19.51	1284	0.01±0.00	0.00±0.00	0.01±0.00	0.00±0.00
	总计			0.47±0.00	0.42±0.02	0.41±0.01	0.43±0.01

续表 3

序号	挥发性成分	保留时间(min)	保留指数	相对含量(%)			
				AD	SAD	SD	BD
酚类							
90	对乙酰氨基酚	22.76	1405	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00
91	5-戊基间二酚	25.49	1515	0.28±0.01	0.29±0.02	0.28±0.03	0.21±0.01
总计				0.29±0.01	0.30±0.02	0.29±0.03	0.22±0.01

注: 图中数值表示为平均值±标准差; AD指阴干白茶样; SAD指阴晒结合干燥白茶样; SD指晒干白茶样; BD指烘干白茶样。

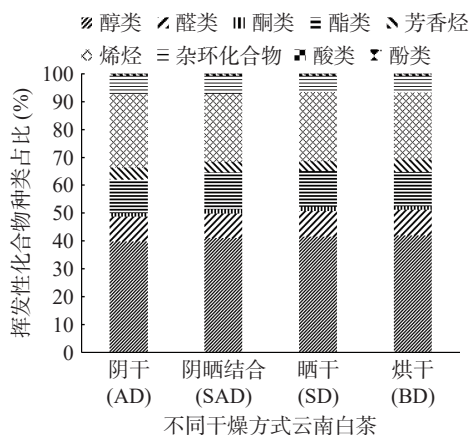


图1 不同干燥方式白茶挥发性化合物种类百分比

Fig.1 Percentage of volatile compound types in white tea by different drying methods

6-乙基四氢-2H-吡喃-3-醇(2.38%~2.78%)、2-庚醇(2.25%~2.56%)、2-甲基异冰片(1.94%~2.45%)、(Z)-芳樟醇氧化物(1.93%~2.38%)、D-柠檬烯(2.08%~2.30%)、2,4-二叔丁基苯酚(1.78%~2.47%)、己醇(1.06%~2.61%)、反式青叶醇(1.33%~2.30%)、间伞花烃(1.26%~1.46%)、 α -侧柏烯(1.21%~1.35%)，占总体的 87.28% 以上。

相较其他干燥方式，阴干白茶的烯炔类、杂环化合物类、酸类相对含量较高，醇类、酮类、酯类相对含量最低，挥发性物质中芳樟醇、 β -蒎烯、 α -石竹烯、苯乙醛、3,6,6-三甲基-双环[3.1.1]庚-2-烯、2-糠酸己酯、(3R, 6S)-2,2,6-三甲基-6-乙基四氢-2H-吡喃-3-醇、2-甲基异冰片、D-柠檬烯、间伞花烃、 α -侧柏烯、4-萜烯、1,2,3,4,5-五甲基环戊二烯、 γ -萜品烯、别罗勒烯、橙花醛、橙花醇、乙缩醛、松油醇、N-乙基琥珀酰亚胺、1-异丙烯基-3-甲基苯、茶香螺烷、2,2,6-三甲基-环己酮、萘、壬酸、藏红花醛、2,6-辛二酸-3,7-二甲基-甲酯、丁酸丁酯、去氢白菖烯、四氢-3-甲基-5-氧代-2-呋喃羧酸、1-十三烯、 α -姜烯、对乙酰氨基酚、甲酸冰片等相对含量较高。

阴晒结合干燥的白茶酯类、酮类、酚类物质相对含量较高，醛类相对含量最低，挥发性物质中水杨酸甲酯、2-庚醇、(Z)-芳樟醇氧化物、5-戊基 1,3-苯二酚、咖啡因、苯甲醇、 β -环柠檬醛、己酸、植酮、二氢猕猴桃内酯、2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯、2,6-二甲基-环己醇、香叶基丙酮、二苯基-甲酮、癸醛、香草醛、3-乙基-4-甲基-1H-吡咯-2,5-二酮、(E)-

2,6-二甲基辛基-3,7-二烯-2,6-二醇、3,3-二甲基-6-亚甲基环己烯等相对含量高。

晒干白茶的酸类、芳香烃类物质相对含量最低，挥发性物质中香叶醇、N-甲基咪唑、1-辛烯-3-醇、2,4-庚二烯醛、3,5-辛二烯-2-酮、(E)-2-辛烯醇、香叶酸甲酯、Z-3-甲基丁酸-3-己烯酯、 α -紫罗兰酮、苯甲酸甲酯、2,2,3-三甲基环丁酮、(-)-4-萜品醇、2-丙基-呋喃、2-乙酰基-5-甲基呋喃、乙酸苄酯、(Z)-3-己烯己酸酯、己酸己酯、N-苯基-甲酰胺、2-乙酰基 1,4,5,6-四氢吡啶、邻苯二甲酸二乙酯等相对含量最高。

烘干白茶的醇类、醛类、芳香烃类物质相对含量高，酚类物质总量最低，可能是因为高温促使茶叶中酚类物质发生氧化降解反应^[24]，挥发性物质中苯乙醇、2,4-二叔丁基苯酚、苯甲醛、反式青叶醇、己醇、二氢芳樟醇、甲基丁酸、苯乙烯、对二甲苯、对薄荷烯、2-乙基-5-甲基-呋喃、1,3-苯二醇单乙酸酯、棕榈醇、1,2-二氢-4,5,7-三甲基-萘、2-甲基萘、反-2-庚醛、茶香酮、茉莉酮等相对含量最高。而芳樟醇、 α -石竹烯、D-柠檬烯、 α -侧柏烯、 γ -萜品烯、茶香螺烷、壬酸、2,2,6-三甲基-环己酮、别罗勒烯、2-甲基异冰片等中沸点挥发性物质含量较自然晾干白茶低，其原因可能是这些物质在高温干燥条件下蒸发或转化为其他物质，导致这些物质含量有所减少^[22]。

不同浓度化合物会产生不同嗅觉感官气味^[25]，具有红茶香的茶香螺烷在 AD 中含量比 BD 高 89%。BD 的反式青叶醇是 AD 的 1.72 倍，低沸点的青叶醇具有青草气是茶叶鲜叶中主要香气成分，经过高温加工后挥发或热化学作用形成反式青叶醇具有清香^[26]。己醇呈清香、花香在 BD 中含量是 AD 的 2.46 倍。SD 中 2,2,3-三甲基-环丁酮、1-辛烯-3-醇、3,5-辛二烯-2-酮、苯甲酸甲酯、(E)-2-辛烯醇、苯甲醇含量均是 AD 的 2 倍以上。这些化合物可能是不同干燥方式云南白茶香气产生感官差异的成分。

比较发现，低温干燥的阴干白茶中烯炔类、杂环类化合物香气成分含量高，与刘通讯等^[27]研究结果一致。随着干燥温度升高或紫外线强度增强^[28]，由油酸、亚油酸等多不饱和脂肪酸受光、热降解产生^[29]的醛类物质占比逐渐增大。

类胡萝卜素是茶叶香气形成的前体物质之一，茶叶加工如萎凋、发酵过程中会发生酶促或非酶促降解反应^[30]。云南大叶种中类胡萝卜素含量较高^[31]，白茶在干燥过程中 α -紫罗兰酮、 β -紫罗兰酮、大马士

酮、二氢猕猴桃内酯、茶香螺酮等类胡萝卜素产物增加,使白茶增添了花果的香气^[32]。

脂肪酸氧化降解也是茶叶中挥发性化合物来源之一,有光致氧化、热致氧化等自由基引发的氧化反应和由脂氧合酶介导的氧化反应两种,其代谢产物有癸醛、(E)-2-辛烯醇、2,4-庚二烯醛、3,5-辛二烯-2-酮等^[33]。经过日晒处理的白茶 SD、SAD 中,水杨酸甲酯、苯甲酸甲酯、 α -紫罗兰酮、己酸己酯、二氢猕猴桃内酯、苯甲醇、(E)-2-辛烯醇、癸醛、1-辛烯-3-醇、2,4-庚二烯醛、3,5-辛二烯-2-酮等物质相对含量要高于未经过日晒处理的白茶。其中癸醛(油脂味)、1-辛烯-3-醇(泥腥味)、(E)-2-辛烯醇(油脂味)、2,4-庚二烯醛(油脂味)、3,5-辛二烯-2-酮(劣变气味)等脂肪酸氧化降解产物可能是白茶带有日晒味的主要香气成分。

2.3 四种干燥方式云南白茶特征香气成分比较

如表 4 所示,通过查找阈值计算,发现四种白茶中 ROAV 均大于 1 的物质有 6 种: 2-庚醇、1-辛烯-3-醇、芳樟醇、香叶醇、苯乙醛、 β -蒎烯,而 SD 和 SAD 的癸醛 ROAV>1,且 SD 的 2,4-庚二烯醛、水杨酸甲酯 ROAV>1。同时 β -环柠檬醛、茉莉酮、 α -侧柏烯、D-柠檬烯(0.1<ROAV<1)对四种白茶香气都具有修饰作用,反式青叶醇、 α -紫罗兰酮对 SD 风味有修饰作用。

2-庚醇的 ROAV 值为 100,其含量不是很高,然而较低的阈值(0.1 $\mu\text{g/kg}$)使其对香气形成有巨大贡

献,呈现蘑菇、泥土、草药的气味,是建阳贡眉白茶的主要香气成分^[34]。1-辛烯-3-醇有蘑菇、泥土、油脂的气息,是亚油酸经脂肪氧化酶催化的产物,在纯日晒处理的白茶 SD(ROAV=5.217)中香气贡献度大于其他白茶 AD(ROAV=2.165)、SAD(ROAV=3.457)、BD(ROAV=3.426),推测与茶叶日晒味有关。芳樟醇的 ROAV 值均大于 10 对白茶香气贡献较大,带有强烈的铃兰花、玫瑰花香,又有果香、木香的气息,是茶叶鲜叶及其制品的主要挥发性成分^[7,21,35]。芳樟醇和香叶醇是以糖苷为前体的香气化合物,在一定条件下芳樟醇可转化成有玫瑰花香的香叶醇或橙花醇,而香叶醇结构稳定性较弱,在茶叶中通常以芳樟醇化合物形式存在^[36]。苯乙醛有较低的阈值,显风信子、玫瑰花香气,在低浓度时有杏仁香,是茶叶中重要的醛类挥发性物质,其含量在萎凋过程中显著上升^[37]。有研究表明芳樟醇及其氧化物、香叶醇、苯乙醇、苯乙醛、苯甲醛等是白茶显清香、毫香的主要成分^[38]。蒎烯具有松香、木香,在白茶中均有发现且在陈年寿眉白茶当中含量较高^[39]。云南大叶种所制白茶 β -蒎烯含量较高^[30],此次试验中 β -蒎烯含量(10.41%~11.31%)仅次于芳樟醇,且 ROAV 值大于 1 是此次实验白茶的主要香气成分。 β -蒎烯易被氧化、裂解,进而得到一系列的香料产物,可能是后期存放过程中易产生木香、药香的原因,有待进一步的研究。癸醛、2,4-庚二烯醛具有油脂味,可能是日晒后产生日晒味的主要挥发性物质。水杨酸甲酯具有冬青的气味,对茶叶的清香、果香的形成有一定的贡献^[40]。

表 4 四种干燥方式白茶中的挥发性成分香气贡献度

Table 4 Aroma contribution of volatile compound types in white tea by four drying methods

挥发性成分	OT($\mu\text{g/kg}$) ^[41-43]	香气类型	ROAV			
			AD	SD	SAD	BD
反式青叶醇	70	清香	0.080	0.132	0.098	0.143
己醇	250	清香	0.018	0.038	0.031	0.045
2-庚醇	0.1	柑橘	100.000	100.000	100.000	100.000
1-辛烯-3-醇	1	油脂	2.165	5.217	3.457	3.426
(E)-2-辛烯醇	40	清香	0.029	0.063	0.055	0.035
松油醇	350	清香	0.004	0.004	0.003	0.004
反-2-庚醛	13	脂肪	0.003	0.003	0.002	0.004
苯乙烯	730	清香	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
苯甲醇	10000	玫瑰	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
芳樟醇	6	铃兰	12.933	12.731	11.708	12.369
苯乙醇	1000	甜花	0.035	0.037	0.033	0.042
橙花醇	300	花果	0.005	0.005	0.005	0.005
香叶醇	7.5	花果	1.948	2.395	1.642	1.877
癸醛	0.1	油脂	0.787	1.338	1.235	0.926
香草醛	25	香草	0.003	0.004	0.004	0.004
茉莉酮	0.26	花香	0.151	0.129	0.119	0.178
α -紫罗兰酮	5.67	紫罗兰	0.083	0.118	0.098	0.090
水杨酸甲酯	40	甜花	0.889	1.041	0.936	0.968
棕榈醇	750	花香	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
丁酸丁酯	400	花香	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
苯甲醛	750.9	果香	0.015	0.018	0.014	0.018

续表 4

挥发性成分	OT($\mu\text{g/kg}$) ^[41-43]	香气类型	ROAV			
			AD	SD	SAD	BD
β -环柠檬醛	5	果香	0.126	0.127	0.117	0.120
香叶基丙酮	60	果香	0.003	0.003	0.003	0.002
D-柠檬烯	10	柑橘	0.969	0.946	0.833	0.903
3,5-辛二烯-2-酮	100	脂肪	0.013	0.032	0.028	0.017
乙酸苄酯	364	果香	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
己酸己酯	820	桃子	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
苯乙醛	4	甜香	5.069	5.134	4.522	5.116
藏红花醛	3	草木	0.131	0.100	0.093	0.123
2,4-庚二烯醛	2.56	油脂	0.784	1.137	0.892	0.977
萘	50	油脂	0.009	0.005	0.006	0.006
γ -萜品烯	100	柑橘	0.029	0.029	0.025	0.026
β -蒎烯	36.1	松脂	1.320	1.301	1.129	1.259
α -侧柏烯	22	木香	0.259	0.254	0.219	0.240
二氢猕猴桃内酯	500	木香	0.001	0.001	0.001	0.001

3 结论

通过 HS-SPME-GC/MS 结合 ROAV 对四种干燥方式制作的云南白茶进行定性定量分析,共鉴定出以醇类、烯炔类为主的 91 种香气成分,芳樟醇、 β -蒎烯、水杨酸甲酯、苯乙醇、 α -石竹烯、苯乙醛是含量较高的 6 种物质,占比超过总挥发性成分的 54%,此外茶香螺烷、反式青叶醇、己醇、2,2,3-三甲基-环丁酮、1-辛烯-3-醇、3,5-辛二烯-2-酮、苯甲酸甲酯、(E)-2-辛烯醇、苯甲醇含量存在明显差异。所分析挥发物中 2-庚醇、1-辛烯-3-醇、芳樟醇、香叶醇、苯乙醛、 β -蒎烯等 6 种对云南白茶香气具有重要贡献作用,而癸醛、2,4-庚二烯醛、水杨酸甲酯、 β -环柠檬醛、茉莉酮、 α -侧柏烯、D-柠檬烯、反式青叶醇、 α -紫罗兰酮等对香气有修饰作用。不同干燥方式影响云南白茶香气类型和品质,阴干白茶清香带毫香,需经过较长时间干燥才能达到成品茶含水量标准。经日晒的白茶 1-辛烯-3-醇、癸醛、2,4-庚二烯醛、3,5-辛二烯-2-酮等相对含量较高,呈现较明显的日晒味,而在日光干燥过程中将白茶收回置于阴凉处会有效提升茶叶香气品质。采用烘干干燥的云南白茶花香明显,加工周期较短且不易受环境影响,可以有效提高生产效率且过程、品质可控,后续可以对云南白茶烘干温度进行研究,以进一步为云南白茶提质增效以及标准化生产提供参考依据。

参考文献

- [1] 俞少娟,李鑫磊,王婷婷,等.白茶香气及萎凋工艺对其形成影响的研究进展[J].茶叶通讯,2015,42(4):14-18. [YU S J, LI X L, WANG T T, et al. Research progress on white tea flavor and its withering processing[J]. Journal of Tea Communication, 2015, 42(4): 14-18.]
- [2] LUO K, MA C, XING S, et al. White tea and its active polyphenols lower cholesterol through reduction of very-low-density lipoprotein production and induction of LDLR expression[J]. Biomed Pharmacother, 2020, 127: 110146.
- [3] NING J M, DING D, SONG Y S, et al. Chemical constituents analysis of white tea of different qualities and different storage times[J]. European Food Research and Technology, 2016, 242(12): 2093-2104.
- [4] XIA X, XU J, WANG X, et al. Jiaogulan tea (*Gpostemma pentaphyllum*) potentiates the antidiabetic effect of white tea via the AMPK and PI3K pathways in C57BL/6 mice[J]. Food Funct, 2020, 11(5): 4339-4355.
- [5] LIU L Y, LIU B, LI J Z, et al. Responses of different cancer cells to white tea aqueous extract[J]. Journal of Food Science, 2018, 83: 2593-2601.
- [6] 邓仕彬,林国荣,周凤超.制茶工艺对白茶品质影响研究进展[J].食品工业科技,2021,42(2):333-337. [DENG S B, LIN G R, ZHOU F C. Research progress of tea-making technology on the quality of white tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(2): 333-337.]
- [7] 邱太妹,傅财贤,赵磊,等.基于 HS-SPME/GC-MS 方法研究绿茶香气特征及形成[J].食品工业科技,2017,38(18):269-274,284. [DI T M, FU C X, ZHAO L, et al. Study on characteristics and formation of aroma components in green tea based on HS-SPME/GC-MS method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(18): 269-274,284.]
- [8] 袁林颖,钟应富,李中林,等.微波干燥对条形绿茶品质的影响[J].福建茶叶,2009,31(4):18-19. [YUAN L Y, ZHONG Y F, LI Z L, et al. Effect of microwave drying on quality of strip green tea[J]. Tea in Fujian, 2009, 31(4): 18-19.]
- [9] 张凌云,魏青,吴颖,等.不同干燥方式对金牡丹乌龙茶品质的影响[J].现代食品科技,2013,29(8):1916-1920. [ZHANG L Y, WEI Q, WU Y, et al. Effect of different drying technologies on qualities of Jinmudan oolong tea[J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(8): 1916-1920.]
- [10] 阳景阳,李子平,陆金梅,等.不同干燥方式的桂热 2 号红茶香气成分分析及判别[J].食品工业科技,2020,41(16):67-73. [YANG J Y, LI Z P, LU J M, et al. Analysis and discrimination of aroma compounds of guire 2 black tea treated with different drying methods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020,

41(16): 67-73.]

[11] 周雪芳, 武珊珊, 阮朝帅, 等. 云南白茶与福建白茶对比研究[J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(2): 177-179. [ZHOU X F, WU S S, RUAN C S, et al. Comparative study of Yunnan white tea and Fujian white tea[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 48(2): 177-179.]

[12] 张文娟, 周考文. HS-SPME-GC-MS 在食品挥发性物质分析中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(17): 218-224. [ZHANG W J, ZHOU K W. Application of HS-SPME-GC-MS in the analysis of volatile components in food[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(17): 218-224.]

[13] ZHANG R, TANG C C, JIANG B Z, et al. Optimization of HS-SPME for GC-MS analysis and its application in characterization of volatile compounds in sweet potato[J]. *Molecules*, 2021, 26: 5808.

[14] MANOUSI N, ZACHARIADIS G A. Determination of volatile compounds in nut-based milk alternative beverages by HS-SPME Prior to GC-MS analysis[J]. *Molecules*, 2019, 24(17): 3091.

[15] ZHANG W J, CAO J X, LI Z G, et al. HS-SPME and GC/MS volatile component analysis of Yinghong No. 9 dark tea during the pile fermentation process[J]. *Food Chemistry*, 2021, 357: 129654.

[16] ZHU J C, CHEN F, WANG L Y, et al. Evaluation of the synergism among volatile compounds in Oolong tea infusion by odour threshold with sensory analysis and E-nose[J]. *Food Chemistry*, 2017, 221: 1484-1490.

[17] GUO X Y, HO C T, SCHWAB W, et al. Aroma profiles of green tea made with fresh tea leaves plucked in summer[J]. *Food Chemistry*, 2021, 363: 130328.

[18] WANG L, CHEN Z, HAN B, et al. Comprehensive analysis of volatile compounds in cold-pressed safflower seed oil from Xinjiang, China[J]. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8(2): 903-914.

[19] 陈梅春, 陈峥, 史怀, 等. 陈年普洱茶特征风味成分分析[J]. *茶叶科学*, 2014, 34(1): 45-54. [CHEN M C, CHEN Z, SHI H, et al. Analysis on characteristic flavor components of aged Pu-erh tea[J]. *Journal of Tea Science*, 2014, 34(1): 45-54.]

[20] 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研究[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(13): 171-177. [YAN X W, ZHONG Y P, LÜ S D, et al. A comparative study of aroma components in Yunnan Yueguang white tea and Fujian Baihaoyinzen white tea[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(13): 171-177.]

[21] 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]. *食品工业科技*, 2021(1): 261-268. [SHAO S X, WANG S Y, WANG L, et al. Analysis of aroma components of different cultivars of white peony tea based on ATD-GC-MS[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021(1): 261-268.]

[22] CHEN Q, ZHU Y, DAI W, et al. Aroma formation and dynamic changes during white tea processing[J]. *Food Chemistry*, 2019, 274: 915-924.

[23] 张晓珊, 吕世懂, 刘伦, 等. 顶空固相微萃取与气相色谱-质谱法分析月光白茶香气成分[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2014, 36(5): 740-749. [ZHANG X S, LÜ S D, LIU L, et al. Anal-

ysis of aroma components in Yueguangbai tea using headspace solid-phase microextraction coupled with GC-MS[J]. *Journal of Yunnan University(Natural Sciences Edition)*, 2014, 36(5): 740-749.]

[24] 汪芳, 汪洁琼, 曹青青, 等. 杀青及干燥工艺对碾茶品质的影响[J]. *茶叶通讯*, 2021, 48(1): 60-70. [WANG F, WANG J Q, CAO Q Q, et al. Effects of fixing and drying processes on the quality of Tencha[J]. *Journal of Tea Communication*, 2021, 48(1): 60-70.]

[25] 雷乙, 陈竞豪, 涂金金, 等. 鱼肉加工过程特征气味物质变化研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(15): 201-210. [LEI Y, CHEN J H, TU J J, et al. Research progress on changes of characteristic odor substances in fish processing[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(15): 201-210.]

[26] 孙慕芳, 郭桂义, 张洁. 蒸青绿茶和炒青信阳毛尖绿茶香气品质的 GC-MS 分析[J]. *食品科学*, 2014, 35(12): 151-155. [SUN M F, GUO G Y, ZHANG J. Analysis of aroma quality of steamed green tea and roasted Xinyang Maojian tea by GC-MS[J]. *Food Science*, 2014, 35(12): 151-155.]

[27] 刘通讯, 谭梦珠. 不同干燥温度对普洱茶多酚类物质和香气成分的影响[J]. *现代食品科技*, 2015, 31(4): 264-271, 143. [LIU T X, TAN M Z. The effect of different drying temperatures on the transformation of polyphenols and volatile aroma components in Pu-erh tea[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2015, 31(4): 264-271, 143.]

[28] 坤吉瑞, 闫敬娜, 舒娜, 等. 不同日晒技术对晒青绿茶中挥发性化合物、脂肪酸和感官品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(21): 154-160. [KUN J R, YAN J N, SHU N, et al. Effect of different sun drying techniques on fatty acids, volatile compounds and sensory quality of green tea[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(21): 154-160.]

[29] 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 X Y, WU H L, CHEN D. Effects of drying temperatures on the volatile flavor compounds in white tea[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2017, 33(11): 171-179.]

[30] 陈丽, 叶玉龙, 王春燕, 等. 茶叶中类胡萝卜素香气前体研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(5): 266-273. [CHEN L, YE Y L, WANG C Y, et al. Research progress on carotenoid aroma precursors in tea[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(5): 266-273.]

[31] 陈丽坤, 吉瑞, 王静, 等. HPLC-PDA 法分析不同茶树品种类胡萝卜素香气前体[J]. *食品科学*, 2020, 41(4): 193-198. [CHEN L K, JI R, WANG J, et al. Analysis of carotenoids as aroma precursors in different varieties of tea leaves by high performance liquid chromatography with photodiode array detection[J]. *Food Science*, 2020, 41(4): 193-198.]

[32] 傅秀敏, 唐劲驰, 杨子银. 茶叶类胡萝卜素合成、代谢调控研究进展[J]. *广东农业科学*, 2021, 48(5): 18-27. [FU X M, TANG J C, YANG Z Y. Research progress in biosynthesis and metabolism regulation of carotenoids in tea plants[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2021, 48(5): 18-27.]

[33] 郭丽, 彭群华, 赵锋, 等. 不同等级新九曲红梅茶的风味化学特征[J]. *食品科学*, 2021, 42(4): 215-220. [GUO L, PENG Q H,

- ZHAO F, et al. Flavor chemistry characteristics of new jiuqu hongmei tea of different grade levels[J]. *Food Science*, 2021, 42(4): 215–220.]
- [34] 廖献盛, 王淑燕, 黄世建, 等. 基于 ATD-GC-MS 的建阳马当山 1 号白茶香气成分分析[J]. *茶叶学报*, 2021, 62(2): 66–72. [LIAO X S, WANG S Y, HUANG S J, et al. ATD-GC-MS analysis on aromatics in Jianyang Madangshan 1 white tea[J]. *Acta Tea Sinica*, 2021, 62(2): 66–72.]
- [35] 刘晶晶, 王富民, 刘国峰, 等. 茶树萜类香气物质代谢谱与相关基因表达谱时空变化的关系[J]. *园艺学报*, 2014, 41(10): 2094–2106. [LIU J J, WANG F M, LIU G F, et al. Correlation between spatiotemporal profiles of volatile terpenoids and relevant terpenoid synthase gene expression in *Camellia sinensis*[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2014, 41(10): 2094–2106.]
- [36] 郭丽, 杜正花, 姚丽鸿, 等. 铁观音乌龙茶和红茶的香气化学特征分析[J]. *食品科学*, 2021, 42(10): 255–261. [GUO L, DU Z H, YAO L H, et al. Chemical characterization of the aroma of Tieguanyin oolong tea and black tea[J]. *Food Science*, 2021, 42(10): 255–261.]
- [37] 方骏婷. 祁门红茶加工过程中主要化学成分分析[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016. [FANG J T. Analysis on metabolic chemical composition of Keemun black tea in processing[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2016.]
- [38] 郭丽, 郭雅玲, 廖泽明, 等. 中国白茶的香气成分研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2015, 6(9): 3580–3586. [GUO L, GUO Y L, LIAO Z M, et al. Research advance in aroma components of white tea[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2015, 6(9): 3580–3586.]
- [39] 刘琳燕, 周子维, 邓慧莉, 等. 不同年份白茶的香气成分[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2015, 44(1): 27–33. [LIU L Y, ZHOU Z W, DENG H L, et al. Analysis of the aromatic components in white tea produced in different years[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Natural Science Edition)*, 2015, 44(1): 27–33.]
- [40] 佟文哲. 普洱茶特征香气化合物的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2020. [TONG W Z. Study on the characteristic aroma compounds of Pu-erh tea[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2020.]
- [41] KANG S Y, YAN H, ZHU Y, et al. Identification and quantification of key odorants in the world's four most famous black teas[J]. *Food Research International*, 2019, 121: 73–83.
- [42] ZHU Y, LV H P, SHAO C Y, et al. Identification of key odorants responsible for chestnut-like aroma quality of green teas[J]. *Food Research International*, 2018, 108: 74–82.
- [43] GUO X Y, HO C T, WAN X C, et al. Changes of volatile compounds and odor profiles in Wuyi rock tea during processing[J]. *Food Chemistry*, 2021, 341: 128230.