

# 基于气味活度值法的凌云白毫发酵茶香气特征分析

阳景阳, 梁光志\*, 李子平, 梁贤智, 陈远权  
(广西南亚热带农业科学研究所, 广西 崇左 532415)

**摘要:** 为分析不同类型凌云白毫发酵茶的香气成分差异及呈香特点, 采用固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术鉴定茶叶香气成分, 运用气味活度值 (odor activity value, OAV) 法确定关键风味组分, 结合主成分分析 (principal component analysis, PCA)、正交偏最小二乘判别分析 (orthogonal partial least squares-discrimination analysis, OPLS-DA)、聚类分析和感官审评对凌云白毫发酵茶香气进行综合评价。结果表明, 共鉴定出48种香气成分, 其中15种关键和修饰性风味组分 (OAV>0.1), PCA模型 ( $R_x^2(\text{cum})=0.984$ ,  $Q^2(\text{cum})=0.846$ ) 和OPLS-DA ( $R_x^2(\text{cum})>0.7$ ,  $Q^2(\text{cum})>0.9$ ) 模型拟合度高, 主要差异成分为芳樟醇、异戊醇、2-甲基丁醛、 $\beta$ -紫罗兰酮、壬醛和茉莉酮。聚类分析将15种香气成分分为3类, I类包含吲哚、脱氢芳樟醇, II类包含芳樟醇、壬醛、苯乙醛、己醛、2-甲基丁醛、异戊醛、苯乙醇和异丁醛, III类包含茉莉酮、 $\beta$ -紫罗兰酮、水杨酸甲酯、2-正戊基呋喃和二甲基硫, 乌龙茶组表现突出的香气组分为I类, 红茶组为II类, 白茶组为III类, 黄茶组为II、III类, 分析所得各茶类的香气特点与感官审评的香气评价相符。OAV法处理气相色谱-质谱数据, 再结合PCA、OPLS-DA和聚类分析, 可以实现不同工艺发酵茶的区分和评价, 研究结果可为凌云白毫多茶类的深入开发提供一定参考依据。

**关键词:** 凌云白毫; 香气成分; 气味活度值; 发酵茶

## Analysis of Aroma Characteristics of Fermented Lingyun Baihao Tea Based on Odor Activity Value

YANG Jingyang, LIANG Guangzhi\*, LI Ziping, LIANG Xianzhi, CHEN Yuanquan  
(Guangxi South Subtropical Agricultural Science Research Institute, Chongzuo 532415, China)

**Abstract:** This study aimed to analyze the difference in aroma components and aroma characteristics of different types (white, oolong, yellow and black) of fermented Lingyun Baihao tea. The aroma components were identified by solid phase microextraction (SPME) combined with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), and odor activity value (OAV) was used to determine the key flavor components. By combined use of principal component analysis (PCA), orthogonal partial least square-discriminant analysis (OPLS-DA), cluster analysis and sensory evaluation, the aroma of fermented Lingyun baihao tea was comprehensively evaluated. The results showed that a total of 48 aroma compounds were identified in the tea samples, including 15 key flavor components and flavor-modifying components (OAV > 0.1). The cumulative interpretation rate  $R_x^2(\text{cum})$  and the cumulative prediction rate  $Q^2(\text{cum})$  of the PCA model were 0.984 and 0.846, respectively, and those of the OPLS-DA model were greater than 0.7 and 0.9, respectively. Both models had good fitness. The major differential components were linalool, isoamyl alcohol, 2-methylbutyraldehyde,  $\beta$ -ionone, nonanal and jasmine. The 15 aroma components were classified into three categories by hierarchical cluster analysis (HCA). Class I contained indole and dehydroalinalool, Class II contained linalool, nonanal, phenylacetaldehyde, hexanal, 2-methylbutyraldehyde, isovaleraldehyde, phenylethanol and isobutyraldehyde, and Class III contained jasmine,  $\beta$ -ionone, methyl salicylate, 2-pentylfuran and dimethyl sulfide. Class I was prominent in oolong tea samples, Class II was prominent in black tea samples, Class III was prominent in white tea samples, and Class II and III were prominent in yellow tea samples. These aroma characteristics were consistent with the results of sensory aroma evaluation. GC-MS analysis and OAV calculation

收稿日期: 2022-09-23

基金项目: 崇左市科技计划项目 (崇科攻2020003); 茶叶产业科技先锋队专项 (桂农科盟202206-1);

广西农科院基本科研业务专项 (桂农科2021YT164)

第一作者简介: 阳景阳 (1990—) (ORCID: 0000-0001-7152-8492), 男, 助理研究员, 硕士, 研究方向为茶树栽培与茶叶加工。

E-mail: 297449589@qq.com

\*通信作者简介: 梁光志 (1970—) (ORCID: 0000-0001-9832-502X), 男, 高级农艺师, 本科, 研究方向为茶叶加工与茶叶品质。E-mail: 2831526082@qq.com

combined with PCA, OPLS-DA and HCA can enable the identification and evaluation of Lingyun Baihao fermented tea aroma. The results of this study can provide a reference for the further development of Lingyun Baihao tea.

**Keywords:** Lingyun Baihao tea; aroma components; odor activity value; fermented tea

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220923-254

中图分类号: TS272

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2023)14-0336-08

引文格式:

阳景阳, 梁光志, 李子平, 等. 基于气味活度值法的凌云白毫发酵茶香气特征分析[J]. 食品科学, 2023, 44(14): 336-343.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220923-254. <http://www.spkx.net.cn>

YANG Jingyang, LIANG Guangzhi, LI Ziping, et al. Analysis of aroma characteristics of fermented Lingyun Baihao tea based on odor activity value[J]. Food Science, 2023, 44(14): 336-343. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220923-254. <http://www.spkx.net.cn>

茶叶香气是评价茶叶品质的重要因子, 对茶叶感官品质的贡献率达25%, 加工工艺是茶叶香气形成的主要影响因素之一, 目前我国将茶叶依据加工方法和发酵程度分为绿茶、白茶、乌龙茶、黄茶、红茶和黑茶六大类<sup>[1]</sup>, 除绿茶不需要发酵外, 其余茶类都需进行不同程度的发酵。大量研究<sup>[2-4]</sup>表明不同工艺处理的茶叶香气成分存在显著差异, 从而形成不同的香气类型, 目前已知的香气成分超过700种<sup>[5]</sup>。茶香是不同的芳香物质以不同的浓度组合, 并对嗅觉神经综合作用的结果<sup>[6]</sup>, 研究中常以某种香气占总香气成分的相对含量作为判断风味的标准, 但每种香气对于人体嗅觉的感官阈值不相同, 简单的香气成分占比并不能准确表征其对茶叶风味的贡献程度, 所以依据气味活度值(odor activity value, OAV)法作为判断风味的标准更为科学。该方法常见于食品研究领域<sup>[7-10]</sup>, 在茶叶香气评价中也有少量运用, 张锦程等<sup>[11]</sup>研究了加工工艺对藤茶特征香气成分的影响, 表明1-辛烯-3-醇和 $\beta$ -紫罗兰酮为4种加工工艺藤茶有关键香气组分, 其中 $\beta$ -紫罗兰酮的贡献度最大; 张铭铭等<sup>[12]</sup>研究了3种典型栗香型绿茶的OAV, 筛选出己醛等12种关键香气组分, 并通过香气重组实验验证了结果可靠; 江津津等<sup>[13]</sup>通过相对OAV确定青柑茶的香气活性成分是柠檬烯、 $\gamma$ -松油烯、蒎烯、2-甲胺基苯甲酸甲酯, 橘皮普洱茶的香气活性成分为碳氢化合物、松油醇和芳樟醇氧化物; 刘盼盼等<sup>[14]</sup>研究认为,  $\beta$ -紫罗兰酮、芳樟醇、顺-4-庚烯醛、反,顺-2,6-壬二烯醛、癸醛等12个OAV均值大于1的香气化合物对青砖茶不同加工阶段的风味变化有着重大贡献。

凌云白毫茶是国家级优良茶树品种<sup>[15-16]</sup>, 目前对凌云白毫茶的香气研究中, 已有报道仅对其进行感官描述<sup>[17-18]</sup>, 鲜见对其香气成分的深层次研究, 仅有田甜等<sup>[16]</sup>通过定性定量分析鉴定出壬醛、 $\beta$ -紫罗兰酮、L-薄荷醇、3,5-辛二烯-2-酮、反-橙花叔醇、苯甲醇等12种凌云白毫绿茶的关键化合物, 并通过偏最小二乘-判别分析

和聚类分析, 探明了3个季节凌云白毫绿茶的主要香气成分差异。本研究通过OAV法结合主成分分析(principal component analysis, PCA)、正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares-discrimination analysis, OPLS-DA)、层次聚类分析和感官审评, 对凌云白毫4种发酵茶(白茶、乌龙茶、黄茶、红茶)进行香气差异分析, 确定关键风味组成成分, 建立判别模型, 找出凌云白毫发酵茶的香气形成特征规律, 旨在为凌云白毫茶的深入开发提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

取自广西南亚热带农业科学研究所名优茶园的凌云白毫及其近似种茶树鲜叶, 鲜叶内含物: 水浸出物48.4%、茶多酚24%、咖啡碱5.1%、游离氨基酸3.2%。试验茶园位于南亚热带季风气候区, 北回归线以南, 北纬22°左右, 海拔100 m以上, 全年平均温度21.0~22.2℃, 年无霜期约350 d, 土壤pH 5.5~6.5。

### 1.2 仪器与设备

6CWD-6型茶叶萎凋槽 南宁市创宇茶叶机械有限公司; 新芳春摇青机 安溪县新芳春农业科技有限公司; 6CR-25型揉捻机 浙江武义增荣食品机械有限公司; 6CST-901型杀青机 泉州长盛茶叶机械有限公司; YX-6CFJ-10B型全自动红茶发酵机 福建安溪永兴茶叶机械厂; 6CW-80型包球机、6CWS-75型解块机 福建省安溪县西坪永兴农业机械厂; 6CTH型烘干机 浙江上洋机械有限公司; 茶叶标准审评用具 上海清友堂实业有限公司; 固相微萃取(solid-phase micro-extraction, SPME)手动进样手柄、50/30  $\mu\text{m}$  DVB/CAR/PDMS固相微萃取头 美国Supelco公司; 7890A-5975C型气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)联用仪 美国Agilent公司。

表1 制茶流程  
Table 1 Manufacturing process of white, oolong, yellow and black tea

样品组	鲜叶	控温萎凋	做青	杀青	揉捻/包揉	发酵/闷黄	干燥	提香
白茶 (WT)	标准叶	28 °C, 36 h, 至含水率20%				堆积微发酵, 6 h	65 °C, 2 h, 至含水率7%以下	90 °C, 30 min
乌龙茶 (OLT)	标准叶	28 °C, 2 h; 再晒青10 min 至含水率70%	摇青3次, 与静置交替 进行, 共10 h	220 °C, 8 min, 至含水率40%	用包揉机和解块机 交替进行, 2 h	静置微发酵, 在杀青前与摇青交替进行	65 °C, 2 h, 至含水率7%以下	90 °C, 30 min
黄茶 (YT)	标准叶	28 °C, 5 h, 至含水率80%		适度杀青至 含水率60%	揉捻机, 轻-重-轻交替, 1 h	湿坯闷黄, 趁热40 °C闷堆2 h; 待初烘后 再复闷8 h	初烘65 °C至含水率30%; 复烘 65 °C, 2 h, 至含水率7%以下	90 °C, 30 min
红茶 (BT)	标准叶	28 °C, 10 h, 至含水率60%			揉捻机, 轻-重-轻交替, 1 h	30 °C, 空气相对湿度>90%, 发酵6 h	65 °C, 2 h, 至含水率7%以下	90 °C, 30 min

### 1.3 方法

#### 1.3.1 制茶

选择凌云白毫及其近似种鲜叶一芽二叶标准鲜叶, 参考不同茶类制作标准 (GB/T 32743—2016《白茶加工技术规范》、GB/T 39592—2020《黄茶加工技术规范》、GB/T 35863—2018《乌龙茶加工技术规范》、GB/T 35810—2018《红茶加工技术规范》) 和传统制茶经验, 分别制作白茶 (WT)、黄茶 (YT)、乌龙茶 (OLT) 和红茶 (BT) 样品, 每个样品制作3批次, 制作流程见表1。

#### 1.3.2 香气成分检测

SPME: 采用SPME方法提取茶叶香气物质, 根据GB/T 8303—2013《茶磨碎试样的制备及其干物质含量测定》中茶试样制备法, 取出粉末茶样, 混匀、磨碎, 然后称取1 g茶样放入萃取瓶中, 萃取温度120 °C, 保温20 min, 吸附时间3 min。

GC条件: Agilent DB-5 ms毛细管色谱柱 (60 m×250 μm, 0.25 μm); 进样口温度270 °C; 升温程序: 40 °C保持5 min, 以15 °C/min升温至280 °C, 保持5 min, 以15 °C/min升温至305 °C, 保持5 min; 分流比10:1, 流速2.0 mL/min。

MS条件: 电喷雾电离源; 电子能量70 eV; 离子源温度230 °C; 传输线温度250 °C; 质量扫描范围  $m/z$  29~550。

数据获取: 由GC-MS分析得到的质谱数据经计算机在NIST标准谱库的检索, 筛选匹配度大于80的化合物成分, 并依据相关资料对各峰加以确认, 排除柱流失等干扰化合物, 鉴定样品中的挥发性香气成分, 分析各组成成分相对含量。

#### 1.3.3 OAV评价

采用OAV<sup>[19]</sup>对各香气成分的风味贡献度进行评价, 按下式计算:

$$OAV = \frac{C}{T} \times 1000$$

式中:  $C$ 为香气成分含量/%;  $T$ 为感觉阈值/(mg/kg)。

当OAV>1时, 定义为关键风味成分, 该香气成分对总体风味有直接影响; 当0.1<OAV<1时, 定义为修饰性风味成分, 该香气成分对总体风味有修饰作用; 当OAV<0.1时, 定义为潜在风味成分, 该香气成分对总体

风味无显著影响。在一定范围内, OAV越大说明该香气成分对总体风味贡献越大<sup>[20]</sup>。

#### 1.3.4 感官审评

参照GB/T 23776—2018《茶叶感官审评方法》中各茶类的审评方法, 邀请5名具备高级以上专业技术资格的评茶员对茶样进行审评, 并对香气指标给出综合评语。

#### 1.4 数据处理

通过Microsoft Excel对GC-MS数据进行预处理, SPSS 19.0比较均值; 对OAV法得出的数据于SIMCA 14.1中进行PCA和OPLS-DA, 采用Origin 2019b软件进行热图绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 GC-MS分析

表2 4种凌云白毫发酵茶香气成分及相对含量 ( $n=3$ )  
Table 2 Relative contents of aroma compounds in four kinds of fermented Lingyun Baihao tea ( $n=3$ )

编号	香气成分	阈值/ (mg/kg) <sup>[21-22]</sup>	相对含量/%			
			OLT组	BT组	WT组	YT组
<b>醇类</b>						
1	甲醇	40	2.89±0.31 <sup>ab</sup>	ND	3.51±0.32 <sup>a</sup>	2.26±1.06 <sup>b</sup>
2	(Z)-2-戊烯醇	0.15	ND	0.13±0.01 <sup>b</sup>	0.39±0.02 <sup>a</sup>	ND
3	叶醇	0.2	0.33±0.13 <sup>a</sup>	ND	1.31±1.39 <sup>a</sup>	ND
4	(E)-3-己烯醇	8	ND	ND	0.54±0.55 <sup>a</sup>	0.50±0.15 <sup>a</sup>
5	正己醇	0.2	ND	0.13±0.11 <sup>ab</sup>	0.28±0.24 <sup>a</sup>	0.06±0.06 <sup>b</sup>
6	2-庚醇	0.6	ND	0.31±0.27 <sup>b</sup>	1.00±0.15 <sup>a</sup>	0.17±0.05 <sup>b</sup>
7	苯甲醇	5.5	0.86±0.12 <sup>b</sup>	3.63±0.30 <sup>a</sup>	3.89±0.27 <sup>a</sup>	4.09±0.20 <sup>a</sup>
8	正辛醇	0.054	0.13±0.12 <sup>a</sup>	ND	ND	ND
9	芳樟醇氧化物II	NF	2.85±0.62 <sup>a</sup>	0.45±0.25 <sup>b</sup>	0.08±0.14 <sup>b</sup>	0.27±0.11 <sup>b</sup>
10	芳樟醇	0.0015	3.01±0.73 <sup>a</sup>	18.90±1.83 <sup>a</sup>	15.71±0.66 <sup>b</sup>	12.55±1.27 <sup>b</sup>
11	脱氢芳樟醇	0.11	19.65±2.65 <sup>a</sup>	ND	ND	ND
12	芳樟醇氧化物III	NF	4.70±0.85 <sup>a</sup>	ND	0.75±1.30 <sup>b</sup>	ND
13	苯乙醇	0.045	3.79±1.04 <sup>ab</sup>	8.80±0.52 <sup>a</sup>	3.18±1.21 <sup>b</sup>	7.29±0.52 <sup>a</sup>
14	芳樟醇氧化物IV	NF	4.72±0.50 <sup>a</sup>	0.89±0.14 <sup>b</sup>	ND	ND
15	橙花醇	0.5	2.29±0.66 <sup>b</sup>	1.50±0.20 <sup>b</sup>	2.24±0.51 <sup>b</sup>	4.18±0.55 <sup>a</sup>
16	橙花叔醇	10	5.34±0.42 <sup>a</sup>	1.08±0.11 <sup>b</sup>	0.37±0.41 <sup>c</sup>	ND
17	叶绿醇	0.9	ND	0.29±0.26 <sup>c</sup>	0.48±0.07 <sup>a</sup>	ND
18	植物醇	370	ND	0.12±0.20 <sup>c</sup>	0.61±0.02 <sup>b</sup>	1.23±0.27 <sup>a</sup>
<b>醛类</b>						
19	异丁醛	0.001	ND	0.83±0.15 <sup>a</sup>	0.06±0.10 <sup>c</sup>	0.48±0.14 <sup>b</sup>
20	异戊醛	0.005	0.21±0.06 <sup>b</sup>	2.02±0.29 <sup>a</sup>	0.51±0.11 <sup>b</sup>	0.22±0.23 <sup>b</sup>
21	2-甲基丁醛	0.002	0.35±0.06 <sup>b</sup>	2.00±0.54 <sup>a</sup>	0.7±0.09 <sup>b</sup>	0.65±0.12 <sup>b</sup>

续表2

编号	香气成分	阈值/ (mg/kg) <sup>[21-22]</sup>	相对含量/%			
			OLT组	BT组	WT组	YT组
22	糠醛	0.1	ND	0.24±0.10 <sup>a</sup>	ND	ND
23	己醛	0.007 5	ND	0.64±0.15 <sup>a</sup>	ND	ND
24	苯甲醛	0.1	1.06±0.17 <sup>a</sup>	1.78±1.66 <sup>a</sup>	1.00±0.21 <sup>a</sup>	1.00±0.22 <sup>a</sup>
25	苯乙醛	0.005	0.40±0.04 <sup>b</sup>	1.98±0.43 <sup>a</sup>	1.00±0.56 <sup>b</sup>	0.81±0.07 <sup>b</sup>
26	N-乙基吡咯-2-甲醛	2	ND	1.29±0.20 <sup>a</sup>	0.72±0.10 <sup>b</sup>	1.13±0.24 <sup>a</sup>
27	壬醛	0.003 5	ND	1.42±0.32 <sup>a</sup>	0.87±0.94 <sup>ab</sup>	ND
<b>酯类</b>						
28	水杨酸甲酯	0.06	1.82±0.38 <sup>c</sup>	3.65±0.47 <sup>b</sup>	6.17±1.57 <sup>a</sup>	3.14±0.65 <sup>bc</sup>
29	己酸叶醇酯	0.012	0.79±0.14 <sup>a</sup>	ND	0.62±0.05 <sup>b</sup>	ND
<b>酮类</b>						
30	丙酮	50	ND	ND	0.57±0.06 <sup>c</sup>	0.46±0.10 <sup>d</sup>
31	异亚丙基丙酮	4	ND	ND	0.33±0.06 <sup>c</sup>	ND
32	茉莉酮	0.7	ND	0.14±0.13 <sup>a</sup>	0.37±0.33 <sup>a</sup>	0.23±0.10 <sup>d</sup>
33	β-紫罗兰酮	0.000 1	ND	ND	0.64±0.07 <sup>a</sup>	ND
<b>酸类</b>						
34	乙酸	50	0.78±0.10 <sup>f</sup>	1.19±0.40 <sup>bc</sup>	1.84±0.07 <sup>b</sup>	1.59±0.48 <sup>ab</sup>
<b>碳氢化合物</b>						
35	罗勒烯异构体混合物	NF	ND	0.04±0.07 <sup>bc</sup>	0.80±0.31 <sup>a</sup>	0.35±0.10 <sup>d</sup>
36	正十九烷	NF	ND	ND	0.31±0.19 <sup>a</sup>	ND
37	2,6,11-三甲基十二烷	NF	0.35±0.09 <sup>b</sup>	1.08±0.38 <sup>a</sup>	0.15±0.15 <sup>b</sup>	0.19±0.18 <sup>b</sup>
38	γ-榄香烯	NF	ND	0.26±0.23 <sup>a</sup>	0.25±0.22 <sup>a</sup>	0.08±0.14 <sup>d</sup>
39	正十五烷	NF	ND	0.39±0.67 <sup>a</sup>	0.24±0.41 <sup>a</sup>	ND
40	δ-杜松烯	NF	ND	0.04±0.08 <sup>b</sup>	0.37±0.32 <sup>a</sup>	ND
41	α-法尼烯	NF	4.3±0.41 <sup>a</sup>	ND	ND	ND
<b>其他</b>						
42	二甲基硫	0.012	1.34±1.15 <sup>a</sup>	2.12±0.20 <sup>bc</sup>	5.04±2.89 <sup>ab</sup>	7.19±0.39 <sup>a</sup>
43	2-正戊基呋喃	0.004 8	ND	1.11±0.15 <sup>b</sup>	2.01±0.40 <sup>b</sup>	1.07±0.16 <sup>b</sup>
44	2-乙酰基吡咯	100	0.11±0.10 <sup>d</sup>	0.28±0.25 <sup>a</sup>	0.32±0.30 <sup>a</sup>	0.37±0.13 <sup>a</sup>
45	N-乙基琥珀酰亚胺	NF	ND	0.29±0.07 <sup>a</sup>	0.10±0.17 <sup>b</sup>	ND
46	2,3-二氢苯并呋喃	NF	0.03±0.04 <sup>d</sup>	0.59±0.09 <sup>b</sup>	0.94±0.12 <sup>a</sup>	0.73±0.06 <sup>b</sup>
47	吡嗪	0.04	5.38±0.61 <sup>a</sup>	ND	ND	ND
48	咖啡因	177	18.91±2.05 <sup>a</sup>	28.10±1.48 <sup>b</sup>	27.23±0.77 <sup>b</sup>	37.04±2.49 <sup>a</sup>

注：NF.未找到该成分察觉阈值相关文献报道；ND.未检出该成分。同行不同字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。

凌云白毫4种发酵茶样共鉴定出48种香气成分，如表2所示。可鉴定峰面积占比分别为87.17%（OLT）、87.48%（BT）、89.25%（WT）、89.42%（YT）。依据化学结构将香气成分划分为6类；其中醇类18种，占总峰面积50.56%（OLT）、36.22%（BT）、34.32%（WT）、32.75%（YT），其中峰占比大于1%的主要醇类物质为甲醇、叶醇、苯甲醇、芳樟醇氧化物II、芳樟醇、脱氢芳樟醇、芳樟醇氧化物III、苯乙醇和芳樟醇氧化物IV、橙花醇、橙花叔醇、植物醇等；醛类物质9种，占总峰面积2.02%（OLT）、12.20%（BT）、4.86%（WT）、4.31%（YT），主要醛类物质有异戊醛、2-甲基丁醛、苯甲醛、苯乙醛、N-乙基吡咯-2-甲醛、壬醛等；酯类物质2种，占总峰面积2.61%（OLT）、3.65%（BT）、6.79%（WT）、3.14%（YT），主要物质为水杨酸甲酯；酮类物质4种，占总峰面积0%（OLT）、0.41%（BT）、1.90%（WT）、0.70%（YT），无峰占比大于1%的酮类物质；酸类物质

1种，占总峰面积0.78%（OLT）、1.19%（BT）、1.84%（WT）、1.59%（YT），主要物质为乙酸；碳氢化合物7种，占总峰面积4.65%（OLT）、1.81%（BT）、2.12%（WT）、0.62%（YT），主要物质为罗勒烯异构体混合物、α-法尼烯等；其他类物质7种，占总峰面积26.54%（OLT）、32.27%（BT）、37.43%（WT）、46.46%（YT），主要物质为二甲基硫、2-正戊基呋喃、吡嗪和咖啡因。

## 2.2 香气评价

香气物质对整体香味的贡献度主要取决于其含量和阈值，可由OAV进行表征，凌云白毫发酵茶的OAV见表3。乌龙茶组（OLT）关键风味组分（OAV>1）为芳樟醇，红茶组（BT）为芳樟醇、2-甲基丁醛和壬醛，白茶组（WT）为芳樟醇、β-紫罗兰酮、茉莉酮和异戊醛，黄茶组（YT）为芳樟醇。芳樟醇在各组凌云白毫发酵茶中都占据主导地位，以发酵度较高的红茶最高，达到12.60，Tadakazu等<sup>[23]</sup>将我国红茶按照芳樟醇和香叶醇的比例分为3类，以芳樟醇占主导的为其中一类（如云南红茶），凌云白毫茶是亲源上与云南大叶种相近的大叶品种，可归为此类，芳樟醇是构成凌云白毫茶馥郁“品种香”的主要物质之一。除芳樟醇外，凌云白毫红茶的关键风味组分还有2-甲基丁醛和壬醛，白茶有β-紫罗兰酮（紫罗兰香味）、茉莉酮和异戊醛，各茶类间的关键和修饰性风味组分和OAV存在显著差异，和摇青、发酵等加工工艺不同有密切联系，构成了各茶类的特色香气，通过感官审评（表4）可以感受到不同凌云白毫发酵茶香气的主观差异。

表3 香气成分的OAV分析

香气组分	OLT		BT		WT		YT	
	组分	OAV	组分	OAV	组分	OAV	组分	OAV
关键香气组分	芳樟醇	2.01	芳樟醇	12.60	芳樟醇	10.47	芳樟醇	8.37
			2-甲基丁醛	2.00	β-紫罗兰酮	6.37		
			壬醛	1.42	茉莉酮	1.41		
			异戊醛	1.68	异戊醛	1.28		
	异戊醛	0.53	二甲基硫	0.16	壬醛	0.87	茉莉酮	0.90
修饰性香气组分	2-甲基丁醛	0.35	异丁醛	0.83	二甲基硫	0.57	二甲基硫	0.60
	二甲基硫	0.18	己醛	0.14	2-甲基丁醛	0.70	异丁醛	0.49
	脱氢芳樟醇	0.18	2-正戊基呋喃	0.23	2-正戊基呋喃	0.42	异戊醛	0.55
	吡嗪	0.13	苯乙醛	0.49	苯乙醛	0.25	2-正戊基呋喃	0.22
			苯乙醇	0.20	水杨酸甲酯	0.15	苯乙醛	0.20
			茉莉酮	0.52			苯乙醇	0.16
							2-甲基丁醛	0.22
潜在香气组分	其他	<0.1	其他	<0.1	其他	<0.1	其他	<0.1

表4 感官审评

组别	OLT组	WT组	YT组	BT组
香气评语	花香明显	清甜香, 稍稍青草气息	毫香明显, 带花果香	毫香明显, 浓甜香, 烘焙香

凌云白毫4种发酵茶样品共同的关键及修饰性风味组分(OAV>0.1)为芳樟醇(甜嫩花清香)、异戊醛(青草气和果子香味)、2-甲基丁醛(咖啡香和烘烤香)、苯乙醛(水果甜香)和二甲基硫(青果香),共同构成了凌云白毫发酵茶的品种香气。制作工艺及发酵程度的差异产生了不同的特征香气,如乌龙茶样中的脱氢芳樟醇(花果香)、吡嗪(橙子和茉莉花香)呈现的特色花香;红茶样中的壬醛(玫瑰、柑橘等香气)、异丁醛、己醛(青草及苹果香味)、2-正戊基呋喃(蔬菜香味)、苯乙醇(玫瑰香)、茉莉酮(清甜香)呈现的浓甜香和烘焙香;白茶样中的 $\beta$ -紫罗兰酮、茉莉酮(清甜香)、壬醛(玫瑰、柑橘等香气)、2-正戊基呋喃(蔬菜香味)、水杨酸甲酯(冬青叶香)呈现的清甜香和青草气息;黄茶样中的茉莉酮(清甜香)、异丁醛、2-正戊基呋喃、苯乙醇(玫瑰香)呈现的花果香等。在GC-MS检测中一些含量较高的香气物质,如咖啡因、甲醇、苯甲醇、橙花醇、橙花叔醇等,因其阈值较高,普通情况下难以被嗅觉察觉和识别,所以归为潜在风味组分。

### 2.3 PCA结果

对OAV法筛选出的共15个关键风味组分及修饰性风味组分进行PCA,生成5个PC,验证Significance都为R1,模型累计解释率 $R^2_X$ (cum)为0.984,整体预测能力 $Q^2$ (cum)为0.846,表明模型的拟合度高,具备较好的预测能力。PC1~5解释率 $R^2_X$ 分别为0.493、0.315、0.104、0.058,每个PC预测能力 $Q^2$ 分别为0.186、0.409、0.201、0.489、0.217;PC1、PC2累计解释率 $R^2_X$ (cum)为0.808, $Q^2$ (cum)为0.519,PC1~3累计解释率 $R^2_X$ (cum)为0.912, $Q^2$ (cum)为0.616,二维、三维得分图见图1,各实验组间都能实现较好地区分。

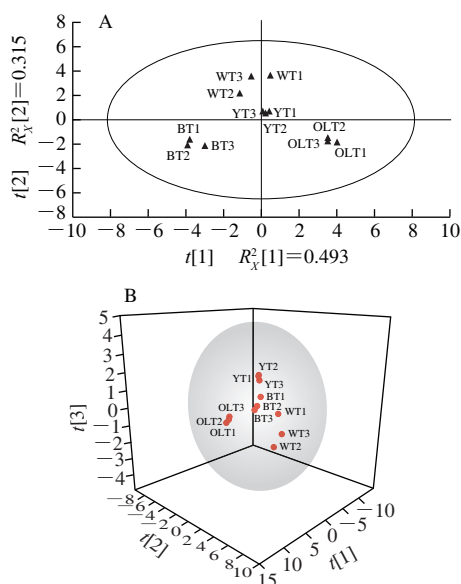


图1 PCA二维散点图(A)和三维散点图(B)

Fig. 1 Two-dimensional (A) and three-dimensional (B) scatter plots of PCA

载荷因子是PCA中重要变量贡献的集合,反映了各香气物质对主成分负荷的相对大小和作用方向,可以显示具体变量对主成分的贡献情况,拟合形成 $p[1]$ 、 $p[2]$ 的相关性载荷图(图2), $p[1]$ 中脱氢芳樟醇(0.300)和吡嗪(0.299)具有较大正系数,芳樟醇(-0.350)、苯乙醛(-0.324)、2-甲基丁醛(-0.319)、异戊醛(-0.308)、异丁醛(-0.297)、壬醛(-0.287)、己醛(-0.284)、苯乙醇(-0.252)、2-正戊基呋喃(-0.206)等具有较大的负系数; $p[2]$ 中二甲基硫(0.395)、 $\beta$ -紫罗兰酮(0.393)、2-正戊基呋喃(0.366)、水杨酸甲酯(0.328)、茉莉酮(0.326)等具有较大的正系数,己醛(-0.252)、苯乙醇(-0.227)、吡嗪(-0.219)、脱氢芳樟醇(-0.218)等具有较大的负系数,香气成分在 $p[1]$ 、 $p[2]$ 坐标上正相关性强的变量聚合在一起,相关性相反的变量在纵轴两侧分布。

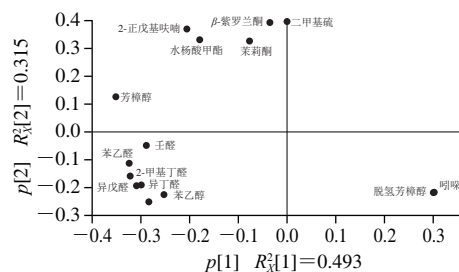


图2 模型因子载荷图

Fig. 2 Loading plot of PCA

### 2.4 OPLS-DA结果

对各组香气成分数据帕累托标度化(Pareto scaling, Par)后进行OPLS-DA<sup>[24-25]</sup>,选取变量投影重要度(variable importance for the projection, VIP)预测值大于1的点为两组间的差异成分,见图3。所有组间在假设验证次数为200次前提下,所有模型的累计方差 $R^2$ 与累计交叉有效性 $Q^2$ 值都低于最右侧的值,且回归线斜率大于1,说明模型拟合良好。

OLT与BT组间 $R^2$ (cum)=0.988, $Q^2$ (cum)=0.993,两组间能很好地区分,VIP值大于1的变量有芳樟醇(2.67)、异戊醇(1.74)、2-甲基丁醛(1.05),为OLT组与BT组间的差异成分。OLT与WT组间 $R^2$ (cum)=0.890, $Q^2$ (cum)=0.982,两组间能很好区分,VIP值大于1的变量为芳樟醇(2.42)和 $\beta$ -紫罗兰酮(2.11),为OLT与WT组间的差异成分。OLT与YT组间 $R^2$ (cum)=0.898, $Q^2$ (cum)=0.959,两组

间能很好区分, VIP值大于1的变量为芳樟醇(2.91)和茉莉酮(1.04), 为OLT与YT组间的差异成分。BT与WT组间 $R^2(\text{cum})=0.813$ ,  $Q^2(\text{cum})=0.954$ , 两组间能很好区分, VIP值大于1的变量为 $\beta$ -紫罗兰酮(2.24)、异戊醛(1.76)、芳樟醇(1.28)和2-甲基丁醛(1.02), 为BT与WT组间的差异成分。BT与YT组间 $R^2(\text{cum})=0.945$ ,  $Q^2(\text{cum})=0.992$ , 两组间能很好区分, VIP值大于1的变量为异戊醛(2.02)、芳樟醇(1.96)、壬醛(1.14)和2-甲基丁醛(1.12), 为BT与YT组间的差异成分。WT与YT组间 $R^2(\text{cum})=0.740$ ,  $Q^2(\text{cum})=0.941$ , 两组间能较好区分, VIP值大于1的变量为 $\beta$ -紫罗兰酮(2.70)和芳樟醇(1.53), 为BT与YT组间的差异成分。

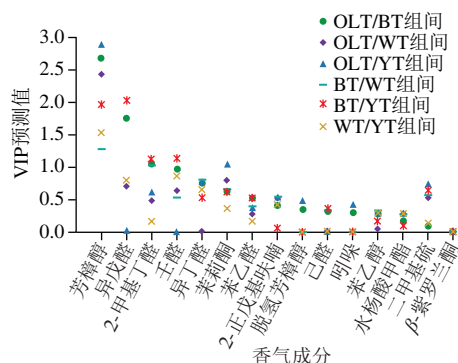


图3 组间VIP预测值分布散点图  
Fig. 3 Scatter plot of VIP prediction between groups

### 2.5 层次聚类分析

选取凌云白毫发酵茶OAV大于0.1的15种香气成分, 绘制聚类热图(图4), 格子颜色代表OAV大小, 由红到蓝代表由高到低。由聚类分析可将香气成分分为3类: I类包含吲哚、脱氢芳樟醇; II类包含芳樟醇、壬醛、苯乙醛、己醛、2-甲基丁醛、异戊醛、苯乙醇和异丁醛; III类包含茉莉酮、 $\beta$ -紫罗兰酮、水杨酸甲酯、2-正戊基呋喃和二甲基硫。I类香气物质在OLT组中表现突出, 吲哚和脱氢芳樟醇主要表现为橙香、茉莉花香, 构成了凌云白毫乌龙茶的主要呈香特色; II类香气物质在BT组中表现突出, 香气表现主要为甜香、咖啡香、玫瑰花香、苹果香, 构成了凌云白毫红茶的香气特点, 是深度醇度和适度烘焙的结果; III类香气物质在WT组中表现突出, 香气表现主要为清香、青果香、木香、冬青叶香, 是凌云白毫白茶的香气特点, 与感官评价中白茶带有的青草气息相吻合; YT组的主要呈香物质不均匀分布在II、III类, 主要香气物质表现为青果香、玫瑰花香和清甜香, 是凌云白毫黄茶的呈香特点。

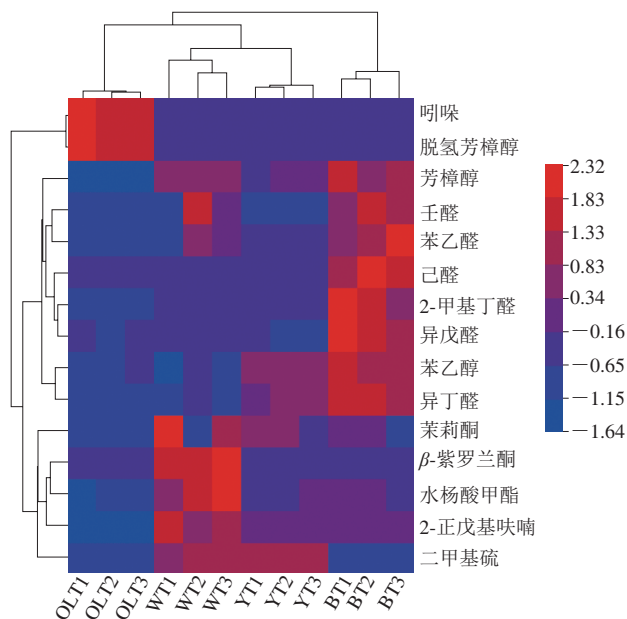


图4 15种关键香气成分分布热图  
Fig. 4 Heatmap of the distribution of 15 key aroma components

### 3 讨论

#### 3.1 凌云白毫茶香气成分分析与特征评价

目前对凌云白毫茶的香气研究中, 多是对其进行感官描述<sup>[17-18]</sup>, 仅田甜等<sup>[16]</sup>对3个季节的凌云白毫绿茶进行测定, 鉴定出37种香气成分, 9种主要香气成分, 主要香气成分中芳樟醇、异丁醛、异戊醛、壬醛、二甲基硫、吲哚在本研究中也检出, 香叶醇、L-薄荷醇、乙酸乙酯在本研究中未检出, 研究认为上述9种主要香气成分构成了广西凌云白毫绿茶清新、浓醇鲜爽、回味清甘的独特香气风味,  $\beta$ -紫罗兰酮、己醛、芳樟醇对形成凌云白毫绿茶的板栗香有一定贡献作用。

而本研究认为, 芳樟醇、异戊醛、2-甲基丁醛、苯乙醛和二甲基硫共同构成了凌云白毫发酵茶的香气基调, 部分特殊香气物质是形成各茶类香气特征的主要因素之一。凌云白毫乌龙茶中脱氢芳樟醇、吲哚对其茉莉花香有一定贡献, 与乌龙茶独特的做青工艺有关, 这与钟秋生等<sup>[26]</sup>对“春闰”乌龙茶香气特征的研究结果类似; 凌云白毫红茶中壬醛、异丁醛、己醛、2-正戊基呋喃、苯乙醇、茉莉酮对其甜香、咖啡香、玫瑰花香和苹果香有一定贡献, 这与阳景阳等<sup>[27-28]</sup>研究“桂热2号”红茶呈现花果甜香的香气物质部分吻合, “桂热2号”是凌云群体种通过系统选育的优良品种, 与凌云白毫茶树有紧密的亲缘关系, 并且红茶进行了充分的发酵, 容易产生相似的花果甜香特征; 凌云白毫白茶中的 $\beta$ -紫罗兰酮、茉莉酮、壬醛、2-正戊基呋喃、水杨酸甲酯对其清香、青果香、木香、冬青叶香有一定贡献, 白茶重萎凋

且发酵程度较轻,青草气息重于经过充分发酵的茶类;凌云白毫黄茶中的茉莉酮、异丁醛、2-正戊基呋喃、苯乙醇对其青果香、玫瑰花香、清甜香有一定贡献,与其特殊的闷黄工艺有关。凌云白毫各茶类间香气组成结构与相对含量有显著差异,可见制茶工艺及发酵程度对凌云白毫茶的香气特征有重要影响。

### 3.2 OAV法结合PCA、OPLS-DA对茶叶香气特征的客观判断

毛世红<sup>[29]</sup>分析了川红工夫(红茶)的香气成分,得出OAV较高物质为 $\beta$ -紫罗兰酮、2-甲基丁醛、芳樟醇、苯乙醛、香茅醇和香叶醇,并认为香气感官品质控制的领域存在着“二八定律”,即20%的香气成分决定了整体香气品质的80%,这与本次凌云白毫发酵茶的香气OAV结果部分相似。茶叶风味作为一种“感觉-心理”现象,与仪器检测不同,人类在嗅闻过程中前后的香气分子之间可能存在协同、掩蔽、对比等多种效应的影响,OAV法更能反映人体真实感受,在茶叶领域具有很高的参考价值,也被应用于其他食品香气研究<sup>[7,30-33]</sup>。

田甜等<sup>[16]</sup>的研究使用香气数据建立PLS-DA模型将3个季节的茶样有效区分,分析得到12种关键差异化合物;马林龙等<sup>[24]</sup>通过对6个茶树品系所制绿茶香气成分进行OAV、PCA和OPLS-DA,得到OAV大于1的9种香气成分(芳樟醇、癸醛、二甲基硫、 $\beta$ -紫罗兰酮、香叶醇、壬醛、庚醛、(E)-2-壬烯醛、(Z)-己酸-3-己烯酯),将GC-MS数据通过OPLS-DA出19个区分所测样品的关键差异香气成分。但本研究与上述两项研究的不同之处在于:在进行PCA和OPLS-DA前先对GC-MS数据进行OAV比较,剔除OAV小于0.1的成分,包括含量较高(如甲醇、橙花叔醇、叶醇、咖啡因)但OAV较低的成分也被剔除,可减少该成分因素对后续分析的干扰,从而更准确地分析出茶叶风味的主要组成。筛选出关键风味组分后,采用PCA和OPLS-DA建立和验证判别模型,最终达到对样品进行判别分类的目的,此方法已在饮料领域有所运用<sup>[34]</sup>,可行性较高。本研究样品能被明显区分,OPLS-DA模型拟合度高,通过VIP值大于1可找到关键差异成分,乌龙茶和红茶间关键差异成分为芳樟醇、异戊醇、2-甲基丁醛,乌龙茶和白茶为芳樟醇和 $\beta$ -紫罗兰酮,乌龙茶和黄茶为芳樟醇和茉莉酮,红茶与白茶为 $\beta$ -紫罗兰酮、异戊醛、芳樟醇和2-甲基丁醛,红茶和黄茶为异戊醛、芳樟醇、壬醛和2-甲基丁醛,白茶与黄茶为 $\beta$ -紫罗兰酮和芳樟醇。所得关键风味组分及差异成分的呈香情况与感官审评结果基本相符,具备参考价值。

本研究对凌云白毫4种发酵茶的香气组成进行了主成分和差异分析,后续将丰富样本容量,继续通过OAV法结合PCA、OPLS-DA、聚类等方法综合探讨凌云白毫茶与其他代表性品种发酵茶的香气差异,进一步研

究茶叶发酵和关键加工工艺过程中特征香气的产生机理和途径。

## 4 结论

4种凌云白毫发酵茶样共鉴定出48种香气成分,GC-MS结果占比较高的物质有甲醇、二甲基硫、苯甲醛、苯甲醚、芳樟醇氧化物II、芳樟醇、壬醛、脱氢芳樟醇、芳樟醇氧化物III、苯乙醇、芳樟醇氧化物IV、水杨酸甲酯、橙花醇、橙花叔醇、吲哚、 $\alpha$ -法尼烯、咖啡因等。通过OAV法筛选出对香气贡献度高的15种香气成分,关键风味组分(OAV>1)有芳樟醇、2-甲基丁醛、异戊醛、壬醛、茉莉酮和 $\beta$ -紫罗兰酮,修饰性风味组分(OAV>0.1)有二甲基硫、异丁醛、己醛、脱氢芳樟醇、苯乙醛、2-正戊基呋喃、苯乙醇、水杨酸甲酯和吲哚。将15个贡献度高的香气成分进行PCA,生成模型的拟合度高( $R_x^2(\text{cum})=0.984$ ;  $Q^2(\text{cum})=0.846$ ),能通过OAV数据有效区分凌云白毫茶制茶类别。OPLS-DA表明,各组样品间能实现很好区分( $R_x^2(\text{cum})>0.7$ ,  $Q^2(\text{cum})>0.9$ ),以VIP值大于1为标准,OLT组与BT组差异成分为芳樟醇、异戊醇和2-甲基丁醛;OLT组与WT组差异成分为芳樟醇和 $\beta$ -紫罗兰酮;OLT组与YT组差异成分为芳樟醇和茉莉酮;BT组与WT组差异成分为 $\beta$ -紫罗兰酮、异戊醛、芳樟醇和2-甲基丁醛;BT组与YT组差异成分为异戊醛、芳樟醇、壬醛和2-甲基丁醛;WT组与YT组差异成分为 $\beta$ -紫罗兰酮和芳樟醇。层次聚类分析表明,可将15种香气成分分为3类,乌龙茶组香气表现为橙香和茉莉花香(I类);红茶组香气表现为甜香、咖啡香、玫瑰花香和苹果香(II类);白茶组中香气表现为清香、青果香、木香、冬青叶香(III类);黄茶组香气表现为青果香、玫瑰花香和清甜香(II、III类)。

本研究运用OAV法处理GC-MS数据,去除GC-MS相对含量高但OAV低的成分,可更加精准地找到对人体嗅觉贡献度大的香气组分,再结合PCA、OPLS-DA和聚类分析,可以实现对不同制茶工艺茶叶的区分和聚类,分析所得各茶类的香气特点与感官审评的香气评价相吻合。研究结果可为凌云白毫多茶类的深入开发提供参考依据,并且研究方法可以运用于各种与香气相关的领域。

## 参考文献:

- [1] ZHENG W J, WAN X C, BAO G H. Brick dark tea: a review of the manufacture, chemical constituents and bioconversion of the major chemical components during fermentation[J]. *Phytochemistry Reviews*, 2015, 14(3): 499-523. DOI:10.1007/s11101-015-9402-8.
- [2] 陈娇娇,鲁成银,王国庆,等.3种方法吸附绿茶、黄茶与白茶香气成分的比较[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2020, 46(4): 449-458. DOI:CNKI:SUN:ZJNY.0.2020-04-011.

- [3] YENER S, JOSE A S, PABLO M G, et al. Rapid and direct volatile compound profiling of black and green teas (*Camellia sinensis*) from different countries with PTR-ToF-MS[J]. *Talanta*, 2016, 152: 45-53. DOI:10.1016/j.talanta.2016.01.050.
- [4] 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. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.10.004.
- [5] LEE J, CHAMBERS D H, CHAMBERS E, et al. Volatile aroma compounds in various brewed green teas[J]. *Molecules*, 2013, 18: 1024-1041. DOI:10.3390/molecules180810024.
- [6] 宛晓春. 茶叶生物化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 39.
- [7] 辛秀兰, 张强, 赵新颖, 等. 主成分分析法评价树莓中挥发性香气成分气味活度值[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(2): 395-403. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2022.02.052.
- [8] 沈菲, 罗瑞明, 丁丹, 等. 基于相对气味活度值法的新疆大盘鸡中主要挥发性风味物质分析[J]. *肉类研究*, 2020, 34(8): 46-50. DOI:CNKI:SUN:RLYJ.0.2020-08-008.
- [9] 程华峰, 林琳, 葛孟甜, 等. 3种生态环境中华绒螯蟹肉挥发性风味特征的比较[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(23): 247-256. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.021502.
- [10] MARSILI R. Flavor, fragrance, and odor analysis[M]. Los Angeles: CRC Press, 2013.
- [11] 张锦程, 余估, 麻成金, 等. GC-MS结合ROAV分析评价加工工艺对藤茶香气成分的影响[J]. *食品与机械*, 2021, 37(12): 20-25; 31. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2021.12.003.
- [12] 张铭铭, 尹洪旭, 邓余良, 等. 基于HS-SPME/GC × GC-TOFMS/OAV不同栗香特征绿茶关键香气组分分析[J]. *食品科学*, 2020, 41(2): 244-252. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190126-337.
- [13] 江津津, 贾强, 谢佩桦, 等. 新会青柑茶与橘皮普洱茶的风味差异分析[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(8): 266-274. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.8.0330.
- [14] 刘盼盼, 郑鹏程, 王胜鹏, 等. 青砖茶初制、渥堆过程中挥发性风味成分分析[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(12): 176-183. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.014144.
- [15] 南国佳木: 记国家地理标志产品凌云白毫茶[J]. *标准生活*, 2017(7): 92-96.
- [16] 田甜, 韦锦坚, 文金华, 等. 不同季节凌云白毫绿茶的香气成分差异分析[J]. *食品科学*, 2020, 41(22): 252-259. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20191020-206.
- [17] 庞月兰, 杨春, 林国轩, 等. 凌云白毫茶红茶萎凋工艺研究[J]. *西南农业学报*, 2017, 30(5): 1214-1217. DOI:10.16213/j.cnki.scjas.2017.5.039.
- [18] 叶靖平, 贺汤强, 姜民国. 凌云白毫茶树品种为原料制作六堡茶(黑茶)工艺[J]. *中国茶叶*, 2010, 32(8): 22-23. DOI:10.3969/j.issn.1000-3150.2010.08.008.
- [19] SWIEGERS J H, BARTOWSKY E J, HENSCHKE P A, et al. Yeast and bacterial modulation of wine aroma and flavour[J]. *Australian Journal of Grape & Wine Research*, 2005, 11(2): 139-173. DOI:10.1111/j.1755-0238.2005.tb00285.x.
- [20] 陈芝飞, 蔡莉莉, 郝辉, 等. 香气活力值在食品关键香气成分表征中的应用研究进展[J]. *食品科学*, 2018, 39(19): 329-335. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201819049.
- [21] 孙保国. 食用调香术[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [22] 里奥·范海默特. 化合物香味阈值汇编[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2015.
- [23] TADAKAZU T, YOU X Q, WANG H F, et al. One speculation on the origin and dispersion of tea plant in China: one speculation based on the chemotaxonomy by using the content-ratio of terpen-alcohols found in tea aroma composition[J]. *Journal of Tea Science*, 1992(2): 81-86.
- [24] 马林龙, 刘艳丽, 曹丹, 等. 湖北优良茶树品种绿茶香气成分分析[J]. *食品科学*, 2019, 40(10): 251-256. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180206-088.
- [25] CAI T, WU H Z, QIN J L, et al. *In vitro* evaluation by PCA and AHP of potential antidiabetic properties of lactic acid bacteria isolated from traditional fermented food[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 155: 108455. DOI:10.1016/j.lwt.2019.108455.
- [26] 钟秋生, 李鑫磊, 林郑和, 等. ‘春闰’乌龙茶加工过程中香气成分的变化研究[J]. *茶业通报*, 2021, 43(1): 21-31. DOI:10.16015j.cnki.jteabusiness.2021.0006.
- [27] 阳景阳, 罗莲凤, 骆妍妃, 等. 桂热2号红茶冷冻干燥关键技术研究及品质评价[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(20): 97-104. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025206.
- [28] 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; 87. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020.16.012.
- [29] 毛世红. 基于风味组学的工夫红茶品质分析与控制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [30] 俞飞, 周健, 明红梅, 等. 机械化与传统酿造方式的浓香型原酒风味成分对比[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(23): 233-239. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.027439.
- [31] 赵鹏涛. 西拉葡萄酒的香气活性物质以及影响瓶装葡萄酒香气因素的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017. DOI:CNKI:CDMD:1.1018.007990.
- [32] 闫新焕, 谭梦男, 孟晓萌, 等. 红枣片热风干制过程中特征香气活性化合物的确定及表征[J]. *食品科学*, 2022, 43(20): 222-231. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20211213-140.
- [33] TIAN P, ZHAN P, TIAN H L, et al. Analysis of volatile compound changes in fried shallot (*Allium cepa* L. var. *aggregatum*) oil at different frying temperatures by GC-MS, OAV, and multivariate analysis[J]. *Food Chemistry*, 2021, 345: 128748. DOI:10.1016/J.FOODCHEM.2020.128748.
- [34] 张强, 辛秀兰, 杨富民, 等. 主成分分析法评价红树莓果醋的相对气味活度值[J]. *现代食品科技*, 2015, 31(11): 332-338. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.11.050.