

研究报告

DOI:10.14188/j.ajsh.20250311001

基于HS-SPME-GC-MS的临沧普洱生茶与传统绿茶香气差异分析

张一昊¹, 宗梦婷², 刘艳红³, 唐兴莹³, 方林江⁴, 马兆成^{1,2*}

(1. 武汉大学 公共卫生学院, 湖北 武汉 430071;

2. 华中农业大学 园艺林学学院, 湖北 武汉 430070;

3. 滇西科技师范学院 云南省澜沧江流域茶树资源保护与创新利用重点实验室, 云南 临沧 677000;

4. 临沧市茶叶研究院, 云南 临沧 677000)

摘要: 普洱生茶和绿茶同属非发酵茶且加工工艺相似,但在香气感知上存在较大差异,然而对于造成二者风味差异的物质基础却鲜有深入探究。基于此,通过顶空固相微萃取-气质联用技术(HS-SPME-GC-MS)比较分析了13个典型临沧地区普洱生茶样品与2个畅销型传统绿茶样品挥发性物质差异。结果显示,在临沧普洱生茶中共检出593种挥发性香气成分,低阈值成分有164种,以酯类、杂环化合物和萜类为主。高含量成分有芳樟醇、萜品油烯、 β -紫罗兰酮等,其中芳樟醇含量最高,平均含量占比高达23.90%,茶叶的主要香型以花香、草本清香、果甜香为主,辛香、木香为辅。绿茶样品中共检测到142种低阈值香气成分,比临沧普洱生茶少22种。两类茶的共有香气成分中有55种成分含量存在显著差异,其中临沧普洱生茶中以 α -松油醇为主的39种成分含量更高,绿茶中以(Z)-己酸-3-己烯酯为主的16种成分含量更高。此外,临沧普洱生茶含脱氢芳樟醇等29种特有成分,绿茶中含(E)-2-十一烯醛等17种特有成分。临沧普洱生茶较绿茶具有更丰富的香气层次与醇厚的特征,主要归因于其关键香气成分种类、含量及香气活性值更高,其中 α -松油醇(木质香)、辛烯-3-醇(果甜香)、 β -紫罗兰酮(花香)和二氢猕猴桃内酯(草本清香)可能是构成二者香气差异的核心物质。此结果为临沧普洱生茶香气成分的形成转化及相关茶产品的风味改进技术提供理论依据,有助于促进临沧市普洱茶产业的高质量发展。

关键词: 临沧普洱生茶; 绿茶; 香气; 差异比较

中图分类号: TS272.5

文献标志码: A

文章编号: 2096-3491(2025)05-0456-14

Analysis of aroma differences between Lincang Pu-er raw tea and traditional green tea based on HS-SPME-GC-MS

Zhang Yihao¹, Zong Mengting², Liu Yanhong³, Tang Xingying³, Fang Linjiang⁴, Ma Zhaocheng^{1,2*}

(1. School of Public Health, Wuhan University, Wuhan 430071, Hubei, China;

2. School of Horticulture and Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, Hubei, China;

3. Yunnan Key Laboratory of Tea Tree Resource Protection and Innovative Utilization in Lincang River Basin, West Yunnan University, Lincang 677000, Yunnan, China; 4. Lincang Tea Research Institute, Lincang 677000, Yunnan, China)

Abstract: Pu-er raw tea and green tea both belong to non-fermented teas and have similar processing techniques.

收稿日期: 2025-03-11 修回日期: 2025-05-19 接受日期: 2025-10-03

作者简介: 张一昊(2002-),男,硕士生,研究方向为食品营养与健康,E-mail: 15805449929@163.com

* 通信作者: 马兆成(1981-),男,副教授,博士,研究方向为药食同源资源精细与利用,E-mail: mzhaocheng@whu.edu.cn

基金项目: 云南省科技厅科技计划项目(202204AC100001-A01);中央高校基本科研业务费专项资金(2042024kf1045);湖北省中药材产业技术体系项目(2023HBSTX4-07)

引用格式: 张一昊,宗梦婷,刘艳红,等. 基于HS-SPME-GC-MS的临沧普洱生茶与传统绿茶香气差异分析[J]. 生物资源, 2025, 47(5): 456-469.

Zhang Yihao, Zong Mengting, Liu Yanhong, et al. Analysis of aroma differences between Lincang Pu-er raw tea and traditional green tea based on HS-SPME-GC-MS [J]. Biotic Resources, 2025, 47(5): 456-469.

However, there are significant differences in their aroma perception, and there is little in-depth exploration of the material basis causing these flavor differences. Based on this, this study compared and analyzed the differences in volatile substances between 13 typical Lincang Pu-er raw tea samples and 2 popular traditional green tea samples using the headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) technique. The results showed that a total of 593 volatile aroma components were detected in Lincang Pu-er raw tea, with 164 low-threshold components, mainly esters, heterocyclic compounds, and terpenoids. The components with high contents included linalool, terpinolene, β -ionone, etc. Among them, linalool had the highest content, with an average proportion as high as 23.90%. The main aroma types of the tea were floral, herbaceous, and fruity sweetness, supplemented by spicy and woody aromas. A total of 142 low-threshold aroma components were detected in the green tea samples, 22 fewer than those in Lincang Pu-er raw tea. Among the common aroma components of the two types of tea, 55 components had significant differences in content. In Lincang Pu-er raw tea, 39 components with α -terpineol as the main component had higher contents, while in green tea, 16 components with (Z)-hex-3-enyl hexanoate as the main component had higher contents. In addition, the Lincang Pu-er raw tea contained 29 unique components such as dehydro linalool, while the traditional green tea contained 17 unique components, including (E)-2-undecenal. In this study, Lincang Pu-er raw tea had richer aroma layers and a more mellow character compared with green tea, which was mainly attributed to its higher types, contents, and aroma activity values of key aroma components. Among them, α -terpineol (woody aroma), 3-octen-1-ol (fruity sweet aroma), β -ionone (floral aroma), and dihydroactinidiolide (herbaceous aroma) might be the core substances contributing to the aroma differences between the two. The results of this study provide a theoretical basis for the formation and transformation of aroma components in Lincang Pu-er raw tea and the flavor improvement techniques of related tea products, which helps to promote the high-quality development of the Pu-er tea industry in Lincang City.

Key words: Lincang Pu-er raw tea; green tea; aroma; comparison of differences

0 引言

茶香气是茶品质的关键指标,是吸引消费者,培养其品牌黏性的核心要素之一^[1],也是进行茶产地溯源的有效手段^[2]。普洱茶是云南省地理标志产品,承载着丰富的民族文化和历史底蕴,与茶马古道等文化遗产密切相关^[3],其中具有代表性的云南临沧普洱茶,其茶内富含多种成分,香气持久,口感润滑,吸引了众多消费者^[4]。在非发酵茶中,普洱生茶和绿茶是最重要的两种类型,都经过采摘-萎凋-炒青(杀青)-揉捻工艺,加工工艺相近^[5],在茶文化中都占据着重要地位。普洱生茶滋味甘滑醇厚,香气浓郁丰富并且具有特征性陈香气^[6]。绿茶天然鲜爽,具有独特的清香以及鲜醇爽口的口感。两种茶在品饮时的香气感知上存在较大差异,然而对于造成二者风味差异的物质基础却鲜有深入探究。

茶香气是由茶叶中的挥发性成分决定^[7],顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用技术(HS-SPME-GC-MS)凭借其高效快速,灵敏度高的特点已广泛用于茶叶挥发性物质组成检测^[8]。本文基于HS-SPME-GC-MS技术探究了临沧普洱生茶的挥发性香气成分组成,并对典型临沧普洱生茶与传统绿茶的差异香气成分进行了比较分析。通过对临沧普洱生茶香气物质的深入研究,从物质层面解构临沧普

洱茶独特香气构成,为临沧普洱茶及其相关深加工产品的风味创新提供思路和方向。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

本研究旨在分析临沧普洱生茶与传统绿茶的香气成分差异。在样本选择上,普洱生茶选取临沧地区具有代表性的不同产地、树龄及品种的茶叶,以尽可能全面覆盖该地区茶叶的香气特征;绿茶则挑选市场上广受欢迎、能体现绿茶典型香气特点的品种,确保样本对各自茶类具有充分代表性。

13份普洱生茶由云南省临沧市茶叶研究院提供。样本包含来自贺开、小户赛等知名茶区,以及冰岛老寨古树一、二、三代穗,冰岛老寨中小树,梅子菁中小树和老树等不同树龄的普洱生茶。这些样本覆盖了临沧地区主要产茶区域和不同茶树类型,能够全面反映临沧地区普洱生茶的香气成分特征;绿茶采购自上海仁真电子商务有限公司,包括“休宁松萝”和“太平猴魁”两种畅销型传统绿茶品种(茶叶原产地:安徽省黄山市)。

氯化钠,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;正己烷,色谱纯,德国Meker公司;标准品,色谱纯,云南西力生物技术有限公司。气相色谱-质谱联用仪(8890-7000D GC-MS/MS),色谱柱DB-5MS

(30 m×0.25 mm×0.25 μm),美国 Agilent 公司; MM400 球磨仪,德国 Retsch 公司;电子天平(MS105DU),瑞士 METTLER TOLEDO 公司;萃取头(120 μm DVB/CWR/PDMS),美国 Agilent 公司;固相微萃取装置(SPME Arrow),瑞士 CTC Analytics AG 公司;老化装置(Fiber conditioning Station),瑞士 CTC Analytics AG 公司;样品加热箱(Agitator),瑞士 CTC Analytics AG 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品提取流程

使用 Agilent 8890-7000D GC-MS/MS 配备毛细管柱(DB-5MS 30 m×0.25 mm×0.25 μm,配备自动采样单元分析茶样中的挥发性化合物。将茶粉(1 000 mg)放入 20 mL 顶空玻璃采样瓶中,分别加入饱和 NaCl 溶液及 10 μL(50 μg/mL)内标溶液,随后,在 60 °C 恒温条件下震荡平衡 5 min 后,采用 120 μm DVB/CWR/PDMS 萃取头插入样品顶空瓶中,顶空萃取 15 min,采样前萃取头在 Fiber Conditioning Station 中 250 °C 老化 5 min,然后进行 GC-MS 分离鉴定。

1.2.2 色谱条件

采用 DB-5MS 毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm, Agilent J&W Scientific, Folsom, CA, USA),载气为纯度≥99.999%的高纯氦气,恒流流速 1.2 mL/min,进样口温度 250 °C,不分流进样,溶剂延迟 3.5 min。程序升温:40 °C 保持 3.5 min,10 °C/min 升至 100 °C,再以 7 °C/min 升至 180 °C,最后以 25 °C/min 升至 280 °C,保持 5 min。

1.2.3 质谱条件

电子轰击离子源(EI),离子源温度 230 °C,四级杆温度 150 °C,质谱接口温度 280 °C,电子能量 70 eV,扫描方式为选择离子检测模式(SIM),按 GB 23200.8-2016 进行定性定量离子精准扫描。香气活性值(odour activity value, OAV)计算如下:

$$OAV = \frac{C_i}{OT_i} \quad (1)$$

式中, C_i 为某香气成分的浓度; OT_i 为该香气成分在水中的香气阈值。

普洱生茶与绿茶挥发性成分含量比值(content ratio, CR)计算如下:

$$CR = \frac{C_{Pi}}{C_{Gi}} \quad (2)$$

式中, C_{Pi} 表示某香气成分在普洱生茶中的含量; C_{Gi} 表示同一香气成分在绿茶中的含量。

1.3 数据处理

用 MassHunter 软件处理质谱分析后的下机原始数据用于定性定量分析,通过与内标物的峰面积进行比较,得到样本香气成分的含量(mg/kg),即香气成分含量=(香气成分物质峰面积×内标物含量)/内标物峰面积,且各样品香气成分含量以平均值±标准差表示。使用 Origin 2021 绘制统计图;以 $CR \geq 1.5$, $P < 0.05$ 为条件筛选普洱生茶和绿茶的差异香气成分。

2 结果与分析

2.1 临沧普洱生茶主要挥发性香气成分分析

2.1.1 临沧普洱生茶主要挥发性香气成分种类和含量分析

13 种典型普洱生茶样品中共检测出 593 种挥发性成分,初步筛选出主要香气成分(香气阈值≤1)有 164 种。将 164 种香气成分基于碳氢骨架结构不同分为 12 大类,各成分种类数及占比如图 1(a)所示。其中,酯类成分 31 种,占比 18.90%;杂环化合物 30 种,占比 18.29%;萜类成分 26 种,占比 15.85%;醇类成分 20 种,占比 12.20%;醛类成分 17 种,占比 10.37%;芳烃 14 种,占比 8.54%;酮类成分 13 种,占比 7.93%;酚类成分 6 种,占比 3.66%;含硫化合物 3 种,占比 1.83%;烃类成分 2 种,占比 1.22%;酸类成分 1 种,含氮化合物 1 种。该结果表明普洱生茶香气成分含量丰富且多样,为进一步研究其主要香气成分提供了基础数据。

将 164 种挥发性香气成分根据含量从高到低排列,结果见表 1 所示。在普洱生茶主要挥发性香气成分中,平均含量占比在 1% 的化合物有 29 种。萜类化合物整体含量相对较高,其中芳樟醇在所有香气成分中含量最高,为(14.848±0.8255) mg/kg,平均相对含量占比达 23.90%,高占比的萜类成分还有萜品油烯(13.31%)、β-紫罗兰酮(8.63%)、(-)-顺-香芹醇(4.42%)、α-松油醇(3.82%)等,这些物质凭借自身独特的化学结构赋予普洱生茶丰富的花香、果香、木香等多层次香气。酯类的占比同样较大,有水杨酸甲酯(5.06%)、二氢猕猴桃内酯(3.86%)、乙酸苯酯(2.59%)等。杂环化合物如呋喃酮(4.02%)、2-甲基丙基吡嗪(3.31%)等在香气构成中也占有一定比例,以特定香气丰富了临沧普洱生茶风味。

2.1.2 普洱生茶整体香气香型分析

借助香气活性值(odour activity value, OAV)分析,能够推断出各香气成分对普洱生茶独特香型的

贡献度以及茶叶的主要香型。通常认为OAV值>1的挥发性成分对样品香气形成有贡献^[9],将临沧普洱茶中OAV值>1的主要香气成分整理绘制香气轮。如图1(b)所示,普洱茶中的茶香分子以具有草本清香、果甜香、花香香气的挥发性成分为主,多种呈辛香、木香等香型的成分为辅。此外,临沧普洱茶中还具有多种烤香、坚果味、化学药品气味、烟熏味、硫磺味等其他复杂香型的挥发性成分,对普洱茶的多层次香气也起到一定贡献作用。

结合物质含量和OAV值具体来看, β -紫罗兰酮是对临沧普洱香气贡献最大的成分之一,其OAV值高达36 714.21个单位,该物质有着特有的紫罗兰花香、松木香和果香^[10]。芳樟醇作为茶叶中含量最高的成分,其OAV值达2 474.71个单位,以紫丁香、铃

兰和玫瑰的花香香气为主,并伴有果香、草本清新气息^[11-12],这两种成分奠定了临沧普洱生茶整体的花香和草本清香基调。5-乙基-3-羟基-4-甲基-2(5H)-呋喃酮的OAV值达577 114.67个单位,具有甜香、果香及焦糖香气^[13]; (Z)-6-壬醛OAV值达14 298.43个单位,具有类似瓜类的清新甘甜味;呋喃酮OAV值达2 818.39个单位,是典型的烤甜香风味物质^[14],这些物质赋予临沧普洱生茶明显的甜香。二氢猕猴桃内酯是类胡萝卜素降解的产物,具有香豆素香、麝香气的香气特征^[15],OAV值达1 514.97个单位,对茶叶草本清香贡献突出。此外,二氢猕猴桃内酯、 β -紫罗兰酮等多种物质还伴有较为显著的木香和药香,使临沧普洱生茶具有独特的木质香特征。

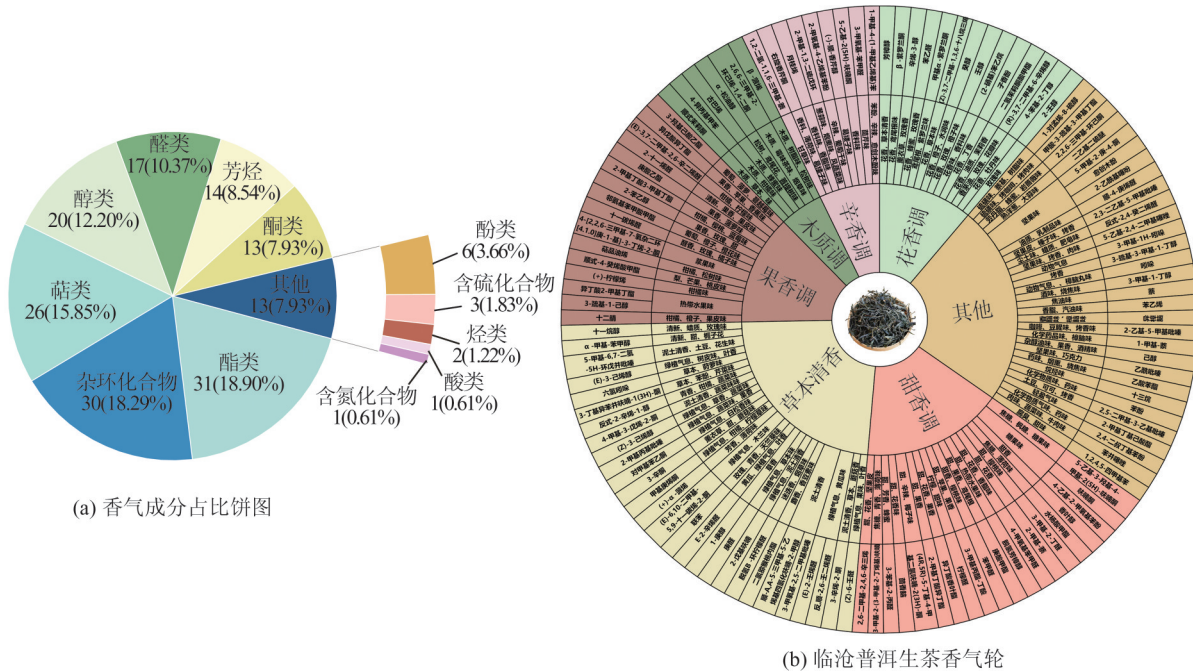


图1 临沧普洱生茶样品的香气成分和香气轮

Figure 1 Proportion of various aroma components and the aroma wheel in Lincang Pu-er raw tea samples

表1 临沧普洱生茶样品中主要挥发性香气成分表

Table 1 Table of main volatile aroma components in Lincang Pu-er raw tea samples

序号	分子式	名称	CAS	物质一级分类	香气阈值/(mg·kg ⁻¹)	平均含量/(mg·kg ⁻¹)	平均相对占比/%	OAV值
1	C ₉ H ₁₄ N ₂ O	芳樟醇	78-70-6	萜类	0.006	14.848 2±0.825 5	23.90	2 474.71
2	C ₁₀ H ₁₆	萜品油烯	586-62-9	萜类	0.200	9.866 1±3.706 0	13.31	49.33
3	C ₁₃ H ₂₀ O	β -紫罗兰酮	79-77-6	萜类	0.000 2	7.342 8±3.074 7	8.63	36 714.21
4	C ₈ H ₈ O ₃	水杨酸甲酯	119-36-8	酯类	0.040	4.233 1±2.353 9	5.06	105.83
5	C ₁₁ H ₁₆ O ₂	二氢猕猴桃内酯	17092-92-1	酯类	0.002 1	3.181 4±1.487 1	3.86	1 514.97
6	C ₁₀ H ₁₆ O	(-)-顺-香芹醇	1197-06-4	萜类	0.250	3.057 3±0.289 5	4.42	12.23
7	C ₈ H ₁₆ O	辛烯-3-醇	3391-86-4	醇类	0.001	2.976 6±1.728 4	4.11	2 976.64

续表

序号	分子式	名称	CAS	物质一级分类	香气阈值/ (mg·kg ⁻¹)	平均含量/ (mg·kg ⁻¹)	平均相对 占比/%	OAV 值
8	C ₁₀ H ₁₈ O	α-松油醇	98-55-5	萜类	0.300	2.914 8±1.116 8	3.82	9.72
9	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	顺-A,A-5-三甲基-5-乙基四氢呋喃-2-甲醇	5989-33-3	杂环化合物	0.320	2.905 9±0.819 7	3.85	9.08
10	C ₆ H ₈ O ₃	呋喃酮	3658-77-3	杂环化合物	0.001	2.818 4±0.278	4.02	2 818.39
11	C ₈ H ₁₂ N ₂	2-甲基丙基吡嗪	29460-92-2	杂环化合物	0.400	2.502 9±0.670 5	3.31	6.26
12	C ₈ H ₇ N	吡啶	120-72-9	杂环化合物	0.040	2.408 5±2.139 2	2.93	60.21
13	C ₁₀ H ₁₆ O	脱氢芳樟醇	20053-88-7	醇类	0.110	2.147 2±0.876 4	2.64	19.52
14	C ₁₃ H ₂₀ O ₂	4-[2,2,6-三甲基-7-氧杂二环[4.1.0]庚-1-基]-3-丁烯-2-酮	23267-57-4	萜类	0.100	2.115 8±1.176 3	2.58	21.16
15	C ₁₀ H ₁₄	4-异丙基甲苯	99-87-6	芳烃	0.011 4	2.061 3±1.047 6	2.67	180.81
16	C ₉ H ₁₆ O	(Z)-6-壬醛	2277-19-2	醛类	0.000 14	2.001 8±0.613	2.70	14 298.43
17	C ₇ H ₆ O	苯甲醛	100-52-7	醛类	0.350	1.962 1±0.976 1	2.58	5.61
18	C ₁₀ H ₁₆	(+)-柠檬烯	5989-27-5	萜类	0.034	1.921 3±0.840 7	2.68	56.51
19	C ₈ H ₈ O ₂	乙酸苯酯	122-79-2	酯类	0.200	1.727 1±0.690 9	2.59	8.64
20	C ₁₀ H ₈	萘	91-20-3	芳烃	0.050	1.512 3±0.724 4	2.03	30.25
21	C ₈ H ₈ O ₂	3-甲氧基-苯甲醛	591-31-1	醛类	0.181	1.413 4±0.781	1.99	7.81
22	C ₈ H ₁₀ O	2-苯乙醇	60-12-8	醇类	0.140	1.171 2±0.510 9	1.59	8.37
23	C ₇ H ₁₀ O ₃	5-乙基-3-羟基-4-甲基-2(5H)-呋喃酮	698-10-2	杂环化合物	0.000 002	1.154 2±0.116 3	1.66	577 114.67
24	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	2-甲基丁酸 3-甲基丁酯	27625-35-0	酯类	0.140	1.148 3±0.525 9	1.70	8.2
25	C ₉ H ₁₆ O	2,2,6-三甲基-环己酮	2408-37-9	酮类	0.000 1	1.112 1±0.521 1	1.50	11 120.92
26	C ₁₀ H ₁₆	β-蒎烯	127-91-3	萜类	0.140	1.014 6±0.426 3	1.46	7.25
27	C ₇ H ₈ O ₂	愈创木酚	90-05-1	酚类	0.001 6	0.965 8±0.666 8	1.42	603.64
28	C ₁₄ H ₂₂ O	2,4-二叔丁基苯酚	96-76-4	酚类	0.500	0.946 3±0.516 7	1.37	1.89
29	C ₈ H ₁₀ O	α-甲基-苯甲醇	98-85-1	醇类	0.479	0.826 1±0.320 7	1.29	1.72
30	C ₆ H ₁₀ O	4-甲基-3-戊烯-2-酮	141-79-7	酮类	0.200	0.788 9±0.403 6	0.94	3.94
31	C ₁₀ H ₁₈ O	香叶醇	106-24-1	萜类	0.006 6	0.779±0.181 2	0.99	118.03
32	C ₁₀ H ₁₆	(Z)-3,7-二甲基-1,3,6-十八烷三烯	3338-55-4	萜类	0.034	0.747 4±0.234 7	0.99	21.98
33	C ₁₀ H ₁₄ O	脱氢B-环柠檬醛	116-26-7	萜类	0.003	0.715 3±0.272 5	0.88	238.43
34	C ₉ H ₁₄ O	2-戊基呋喃	3777-69-3	杂环化合物	0.006	0.624 3±0.142 4	0.86	104.06
35	C ₈ H ₁₄ O	甲基庚烯酮	110-93-0	酮类	0.050	0.576 6±0.222 9	0.80	11.53
36	C ₈ H ₈ O	苯乙醛	122-78-1	醛类	0.006 3	0.438 0±0.130 5	0.62	69.53
37	C ₆ H ₆ OS	2-乙酰基噻吩	88-15-3	杂环化合物	0.001	0.437 0±0.168 7	0.59	436.96
38	C ₁₀ H ₁₆	月桂烯	123-35-3	萜类	0.015	0.428 5±0.227 5	0.67	28.57
39	C ₄ H ₈ S ₂	2-甲基-1,3-二硫戊环	5616-51-3	杂环化合物	0.020	0.411 7±0.16	0.51	20.59
40	C ₆ H ₁₀ S ₂	二烯丙基二硫	2179-57-9	含硫化合物	1.000	0.370 2±0.113	0.50	0.37
41	C ₁₃ H ₁₆	1,2-二氢-1,1,6-三甲基-萘	30364-38-6	芳烃	0.002 5	0.331 4±0.159 3	0.48	132.58
42	C ₁₀ H ₁₄ O	右旋香芹酮	2244-16-8	萜类	0.010	0.308 9±0.031 8	0.44	30.89
43	C ₁₀ H ₁₆ O	柠檬醛	5392-40-5	萜类	0.100	0.289 1±0.075 3	0.40	2.89

续表

序号	分子式	名称	CAS	物质一级分类	香气阈值/ (mg·kg ⁻¹)	平均含量/ (mg·kg ⁻¹)	平均相对 占比/%	OAV 值
44	C ₆ H ₁₂ O	(Z)-3-己烯醇	928-96-1	醇类	0.050	0.283 7±0.131 8	0.38	5.67
45	C ₁₃ H ₂₈	十三烷	629-50-5	烃类	0.042	0.283 2±0.116 5	0.41	6.74
46	C ₁₁ H ₁₆ O	顺式茉莉酮	488-10-8	酮类	0.000 26	0.283 2±0.134	0.42	1089.29
47	C ₇ H ₈ O	间甲酚	108-39-4	酚类	0.380	0.260 1±0.125 4	0.34	0.68
48	C ₅ H ₁₂ OS	3-巯基-3-甲基-1-丁醇	34300-94-2	醇类	0.004	0.258 3±0.139	0.36	64.57
49	C ₇ H ₁₀ N ₂	2-乙基-5-甲基吡嗪	13360-64-0	杂环化合物	0.016	0.250 2±0.100 8	0.35	15.64
50	C ₆ H ₁₂ O	(E)-3-己烯醇	928-97-2	醇类	0.110	0.243 4±0.086 6	0.33	2.21
51	C ₁₂ H ₂₆ O	月桂醇	112-53-8	醇类	1.000	0.233 9±0.085 5	0.31	0.23
52	C ₁₀ H ₁₂	1-甲基-4-(1-甲基乙炔基)苯	1195-32-0	芳烃	0.085	0.222 7±0.113 3	0.31	2.62
53	C ₁₀ H ₂₂ O	癸醇	112-30-1	醇类	0.023	0.222 6±0.068 4	0.30	9.68
54	C ₁₃ H ₂₂ O	(E)-6,10-二甲基-5,9-十一碳烯-2-酮	3796-70-1	酮类	0.010	0.211 9±0.060 1	0.30	21.19
55	C ₁₁ H ₁₀	2-甲基-萘	91-57-6	芳烃	0.004	0.211 1±0.172 8	0.28	52.78
56	C ₁₀ H ₂₀ O	(R)-3,7-二甲基-6-辛烯醇	1117-61-9	萜类	0.040	0.210 3±0.087 3	0.29	5.26
57	C ₉ H ₁₆ O	(E)-2-壬烯醛	18829-56-6	醛类	0.000 08	0.2±0.063 8	0.29	2 500.18
58	C ₁₀ H ₁₈ O	异樟脑	124-76-5	萜类	0.008 5	0.197 3±0.073 5	0.29	23.21
59	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	己酸丁酯	626-82-4	酯类	0.700	0.195±0.085 3	0.29	0.28
60	C ₈ H ₁₄ O	5-甲基-2-庚-4-酮	102322-83-8	酮类	0.000 05	0.192 9±0.079 9	0.29	3 858.07
61	C ₇ H ₁₀ N ₂ O	3-甲氧基-2,5-二甲基吡嗪	19846-22-1	杂环化合物	0.000 1	0.191 2±0.103 5	0.24	1 911.87
62	C ₉ H ₁₂ O ₂	2,6,6-三甲基-2-环己烯-1,4-二酮	1125-21-9	酮类	0.025	0.186 7±0.028 9	0.27	7.47
63	C ₅ H ₁₂ O	3-甲基-1-丁醇	123-51-3	醇类	0.004	0.169 9±0.038 9	0.26	42.47
64	C ₈ H ₁₂ N ₂	2,3,5,6-四甲基吡嗪	1124-11-4	杂环化合物	1.000	0.166 7±0.079 5	0.24	0.17
65	C ₁₂ H ₂₂ O ₂	(Z)-己酸-3-己烯酯	31501-11-8	酯类	0.781	0.164 3±0.135 8	0.20	0.21
66	C ₁₀ H ₁₆ N ₂	5-(仲丁基)-2,3-二甲基吡嗪	32263-00-6	杂环化合物	0.680	0.158 1±0.075 8	0.22	0.23
67	C ₇ H ₁₄ O	庚醛	111-71-7	醛类	0.002 8	0.155 4±0.068 6	0.24	55.51
68	C ₇ H ₁₆ O	1-庚醇	111-70-6	醇类	0.003	0.152 4±0.047 7	0.20	50.81
69	C ₁₁ H ₂₀ O ₂	顺式-4-癸烯酸甲酯	7367-83-1	酯类	0.003	0.150 7±0.071 1	0.21	50.22
70	C ₁₂ H ₂₃ N	十二腈	2437-25-4	含氮化合物	0.000 09	0.144 3±0.064 8	0.19	1 603.71
71	C ₁₀ H ₁₆ O	(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛	141-27-5	萜类	0.028	0.143 9±0.046 5	0.21	5.14
72	C ₉ H ₁₀ O	对甲基苯乙酮	122-00-9	酮类	0.021	0.143 2±0.061 7	0.17	6.82
73	C ₆ H ₁₂ O ₂ S	甲酸-3-巯基-3-甲基丁酯	50746-10-6	酯类	0.000 002	0.142 3±0.079 2	0.20	71 135.25
74	C ₇ H ₅ NS	苯并噻唑	95-16-9	杂环化合物	0.080	0.142 2±0.123 6	0.19	1.78
75	C ₇ H ₁₄ O ₂	庚酸	111-14-8	酸类	0.640	0.139 1±0.041	0.19	0.22
76	C ₁₀ H ₂₀ O	薄荷醇	2216-51-5	萜类	0.900	0.138 5±0.047 1	0.20	0.15
77	C ₈ H ₁₄ O	E-2-辛烯醛	2548-87-0	醛类	0.003	0.138±0.054	0.21	45.99
78	C ₉ H ₁₂	1,2,4-三甲基苯	95-63-6	芳烃	0.260	0.136 6±0.074 7	0.17	0.53
79	C ₉ H ₁₈ O ₂	异丁酸2-甲基丁酯	2445-69-4	酯类	0.014	0.130 4±0.035 3	0.20	9.31

续表

序号	分子式	名称	CAS	物质一级分类	香气阈值/ (mg·kg ⁻¹)	平均含量/ (mg·kg ⁻¹)	平均相对 占比/%	OAV 值
80	C ₁₀ H ₁₄	1,2,4,5-四甲基苯	95-93-2	芳烃	0.087	0.127 6±0.045	0.19	1.47
81	C ₆ H ₆ O	苯酚	108-95-2	酚类	0.03	0.118±0.026 5	0.15	3.93
82	C ₈ H ₁₄ O	3-辛烯-2-酮	1669-44-9	酮类	0.000 03	0.112 1±0.054 1	0.18	3 738.30
83	C ₈ H ₁₀	间二甲苯	108-38-3	芳烃	1.000	0.112±0.052	0.15	0.11
84	C ₈ H ₁₄ O ₂	反-2-己烯酸乙酯	27829-72-7	酯类	0.140	0.111 6±0.045 6	0.17	0.80
85	C ₁₁ H ₁₀	1-甲基-萘	90-12-0	芳烃	0.008	0.105 9±0.095 1	0.14	13.24
86	C ₆ H ₁₀ O	环己酮	108-94-1	酮类	0.880	0.105 7±0.047 4	0.16	0.12
87	C ₉ H ₂₀ O	2-壬醇	628-99-9	醇类	0.058	0.105 3±0.060 1	0.15	1.82
88	C ₁₁ H ₂₂ O ₂	己酸异戊酯	2198-61-0	酯类	0.320	0.102±0.110 5	0.17	0.32
89	C ₁₀ H ₁₄ O	3-甲基-2-(3-甲基-2-丁烯基)呋喃	15186-51-3	杂环化合物	0.080	0.100 8±0.056 9	0.13	1.26
90	C ₉ H ₁₈ O	(E)-2-壬烯-1-醇	31502-14-4	醇类	0.209	0.100 3±0.034 1	0.15	0.48
91	C ₈ H ₈	苯乙烯	100-42-5	芳烃	0.003 6	0.097 8±0.032 8	0.14	27.18
92	C ₉ H ₁₈ O ₂	2-甲基丁酸异丁酯	2445-67-2	酯类	0.043	0.094 6±0.035 9	0.15	2.20
93	C ₁₀ H ₁₆	(+)- α -蒎烯	7785-70-8	萜类	0.005 3	0.093 5±0.035 5	0.13	17.64
94	C ₁₂ H ₁₀	联苯	92-52-4	芳烃	0.003 3	0.093 4±0.046 6	0.13	28.30
95	C ₈ H ₁₀ N ₂	5-甲基-6,7-二氢-5H-环戊并吡嗪	23747-48-0	杂环化合物	0.050	0.092±0.051 4	0.13	1.84
96	C ₁₄ H ₂₂ O	甲基 α -紫罗兰酮	79-69-6	萜类	0.002	0.090 5±0.013 6	0.11	45.24
97	C ₆ H ₁₄ OS	3-巯基-1-己醇	51755-83-0	醇类	0.000 06	0.087 2±0.042 7	0.11	1 453.96
98	C ₆ H ₆ N ₂ O	乙酰吡嗪	22047-25-2	杂环化合物	0.010	0.086 7±0.040 5	0.12	8.67
99	C ₉ H ₁₂ O ₂	4-乙基-2-甲氧基苯酚	2785-89-9	酚类	0.033	0.086 1±0.044 1	0.11	2.61
100	C ₆ H ₈ O ₂	5-乙基-2(5H)-呋喃酮	2407-43-4	杂环化合物	0.009 7	0.083 7±0.035 8	0.11	8.63
101	C ₁₃ H ₂₂ O ₃	二氢茉莉酮酸甲酯	24851-98-7	酯类	0.013	0.083 2±0.041 7	0.12	6.40
102	C ₈ H ₁₆ O ₃	3-羟基己酸乙酯	2305-25-1	酯类	0.045	0.081 7±0.034	0.13	1.81
103	C ₉ H ₁₀ O	4-乙基苯甲醛	4748-78-1	醛类	0.123 23	0.080 7±0.040 8	0.10	0.65
104	C ₁₅ H ₂₄	古巴烯	3856-25-5	萜类	0.006	0.079 4±0.036 1	0.11	13.23
105	C ₉ H ₁₈ O ₂	乙酸庚酯	112-06-1	酯类	0.420	0.079 1±0.034	0.13	0.19
106	C ₄ H ₁₀ S ₂	二乙基二硫醚	110-81-6	含硫化合物	0.000 007 2	0.075 3±0.026 4	0.11	10 455.01
107	C ₁₁ H ₂₂ O ₂	2-甲基丁基己酸酯	2601-13-0	酯类	0.032	0.071 6±0.014	0.11	2.24
108	C ₉ H ₁₆ O ₂	(4R,5R)-5-丁基-4-甲基二氢呋喃-2(3H)-酮	55013-32-6	杂环化合物	0.035	0.070 5±0.026 1	0.10	2.01
109	C ₁₃ H ₁₆ O ₂	顺-3-己烯基苯甲酸酯	25152-85-6	酯类	0.500	0.069 3±0.029 4	0.10	0.14
110	C ₁₀ H ₁₆ O	六氢吡啶	70786-44-6	杂环化合物	0.030	0.068 1±0.030 8	0.10	2.27
111	C ₁₁ H ₂₄ O	十一烷醇	112-42-5	醇类	0.050	0.065 1±0.023 2	0.09	1.30
112	C ₇ H ₁₂ O	顺-4-庚烯醛	6728-31-0	醛类	0.000 025	0.064±0.027 2	0.10	2 559.77
113	C ₉ H ₉ N	3-甲基-1H-吡啶	83-34-1	杂环化合物	0.000 41	0.063 9±0.030 5	0.09	155.88
114	C ₈ H ₁₆ O	反式-2-辛烯-1-醇	18409-17-1	醇类	0.020	0.062 9±0.023 5	0.10	3.14
115	C ₉ H ₁₈ O ₂	异戊酸异丁酯	589-59-3	酯类	0.034	0.062±0.024 9	0.09	1.82
116	C ₇ H ₁₀ N ₂	2-乙基-3-甲基吡嗪	15707-23-0	杂环化合物	0.240	0.060 7±0.028 5	0.10	0.25
117	C ₉ H ₁₄ N ₂	2,3-二乙基-5-甲基吡嗪	18138-04-0	杂环化合物	0.000 031	0.059 1±0.090 2	0.07	1 907.76

续表

序号	分子式	名称	CAS	物质一级分 类	香气阈值/ (mg·kg ⁻¹)	平均含量/ (mg·kg ⁻¹)	平均相对 占比/%	OAV 值
118	C ₁₂ H ₁₄ O ₄	邻苯二甲酸二乙酯	84-66-2	酯类	0.330	0.058 9±0.071 1	0.08	0.18
119	C ₆ H ₁₄ O	己醇	111-27-3	醇类	0.005 6	0.057 4±0.018 2	0.09	10.24
120	C ₁₁ H ₂₀ O	十一碳烯醛	112-45-8	醛类	0.003 5	0.056 6±0.025 9	0.08	16.18
121	C ₁₅ H ₂₆ O	反式-橙花叔醇	40716-66-3	萜类	0.250	0.056±0.029 4	0.08	0.22
122	C ₉ H ₁₀ O ₂	2-甲氧基-4-乙基苯酚	7786-61-0	芳烃	0.003	0.054 4±0.020 5	0.07	18.12
123	C ₈ H ₁₄ O ₂	四氢-6-丙基-2H-吡喃-2-酮	698-76-0	杂环化合物	0.420	0.054 2±0.018 9	0.08	0.13
124	C ₉ H ₁₆ O ₂	5-丁基二氢-4-甲基-2(3H)-咪唑酮	39212-23-2	杂环化合物	0.075	0.053 8±0.018 2	0.07	0.72
125	C ₁₃ H ₂₆ O	十三烷醛	10486-19-8	醛类	0.070	0.053±0.008 5	0.08	0.76
126	C ₁₁ H ₂₀ O	2-十一烯醛	2463-77-6	醛类	0.010	0.052 5±0.021 2	0.08	5.25
127	C ₅ H ₈ O	3-甲基-2-丁醛	107-86-8	醛类	0.000 5	0.047 8±0.018 3	0.06	95.67
128	C ₉ H ₂₀ O	壬醇	143-08-8	醇类	0.005 3	0.046 7±0.014 1	0.07	8.81
129	C ₈ H ₁₆ O ₂	3-甲基丙酯-丁酸	557-00-6	酯类	0.008 7	0.040 6±0.018 1	0.06	4.66
130	C ₁₀ H ₁₈ S	1-对孟烯-8-硫醇	71159-90-5	含硫化合物	0.000 000 02	0.038 3±0.020 2	0.05	1 914 098.6 5
131	C ₁₀ H ₁₆ O	反式-2,4-癸二烯醛	25152-84-5	醛类	0.000 07	0.037 6±0.013 5	0.06	537.22
132	C ₈ H ₉ NO ₂	邻氨基苯甲酸甲酯	134-20-3	酯类	0.003	0.035 1±0.013 9	0.05	11.69
133	C ₁₀ H ₁₆	2,6-二甲基-2,4,6-辛三烯	673-84-7	萜类	0.034	0.034 9±0.009	0.05	1.03
134	C ₁₂ H ₂₄ O	2-十二烷酮	6175-49-1	酮类	0.042	0.034 2±0.020 1	0.05	0.81
135	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	乙酸辛酯	112-14-1	酯类	0.140	0.034 2±0.006 8	0.05	0.24
136	C ₉ H ₈ O	3-苯基-2-丙醛	104-55-2	醛类	0.024	0.031 9±0.010 3	0.04	1.33
137	C ₁₄ H ₂₄ O ₂	异丁酸香叶酯	2345-26-8	酯类	0.013	0.029 2±0.01	0.04	2.25
138	C ₈ H ₁₂ N ₂	2,5-二甲基-3-乙基吡嗪	13360-65-1	杂环化合物	0.008 6	0.028 4±0.008 6	0.04	3.3
139	C ₉ H ₁₄ O	反,顺-2,6-壬二烯醛	557-48-2	醛类	0.000 01	0.027 9±0.011 8	0.04	2 794.56
140	C ₁₀ H ₁₂ O	茴香脑	104-46-1	芳烃	0.015	0.027 8±0.019 6	0.04	1.85
141	C ₈ H ₁₆ O ₂	庚酸甲酯	106-73-0	酯类	0.004	0.025 8±0.004 5	0.03	6.45
142	C ₁₅ H ₂₄	α-法呢烯	502-61-4	萜类	0.087	0.023 6±0.012 3	0.04	0.27
143	C ₁₂ H ₁₄ O ₂	3-丁基异苯并咪唑-1(3H)-酮	6066-49-5	杂环化合物	0.010	0.023 5±0.012 1	0.04	2.35
144	C ₉ H ₁₀ O ₂	2-苯基甲酸乙酯	104-62-1	酯类	0.270	0.018 7±0.008 1	0.02	0.07
145	C ₈ H ₁₈ O	2-辛醇	123-96-6	醇类	0.071 5	0.018 6±0.010 9	0.03	0.26
146	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	子香酚	97-53-0	酚类	0.002 5	0.018 1±0.009 5	0.03	7.25
147	C ₆ H ₈ N ₂ O	2-甲氧基-6-甲基-吡嗪	2882-21-5	杂环化合物	0.017	0.016 3±0.004 9	0.02	0.96
148	C ₇ H ₁₄ O	2-庚酮	110-43-0	酮类	0.650	0.015 7±0.005 4	0.03	0.02
149	C ₇ H ₁₄ O ₂	己酸甲酯	106-70-7	酯类	0.070	0.015 3±0.011	0.02	0.22
150	C ₁₀ H ₁₂ O	4-异丙基苯甲醛	122-03-2	萜类	0.400	0.015 2±0.007 2	0.02	0.04
151	C ₇ H ₁₁ NS	5-乙基-2,4-二甲基噻唑	38205-61-7	杂环化合物	0.000 09	0.015 1±0.004 9	0.02	167.63
152	C ₉ H ₁₈ O ₂	庚酸乙酯	106-30-9	酯类	0.002	0.014 8±0.002 9	0.02	7.4
153	C ₈ H ₉ NO ₂	(2-硝基)苯乙烷	6125-24-2	芳烃	0.002	0.014 6±0.008 2	0.02	7.31
154	C ₈ H ₁₆ O	3-辛酮	106-68-3	酮类	0.001 3	0.013 9±0.007 7	0.02	10.70

续表

序号	分子式	名称	CAS	物质一级分类	香气阈值/ (mg·kg ⁻¹)	平均含量/ (mg·kg ⁻¹)	平均相对 占比/%	OAV 值
155	C ₇ H ₁₄ O ₂	乙酸戊酯	628-63-7	酯类	0.080	0.011 9±0.003 1	0.02	0.15
156	C ₁₀ H ₁₈ O	1,4-桉树脑	470-67-7	萜类	1.000	0.011 5±0.011 4	0.02	0.01
157	C ₉ H ₁₈ O ₂	辛酸甲酯	111-11-5	酯类	0.200	0.010 3±0.010 6	0.01	0.05
158	C ₁₈ H ₃₈	十八烷	593-45-3	烃类	0.020	0.009 6±0.012	0.01	0.48
159	C ₈ H ₈ O ₂	4-甲氧基苯甲醛	123-11-5	醛类	0.000 2	0.008 6±0.004 5	0.01	42.80
160	C ₁₀ H ₁₄ O	4-苯基-2-丁醇	2344-70-9	醇类	0.004 3	0.008 2±0.004 5	0.01	1.90
161	C ₁₂ H ₁₆ O ₂	β-苯基乙基丁酸酯	103-52-6	酯类	0.376 0	0.007 3±0.005	0.01	0.02
162	C ₆ H ₇ NS	5-乙基-4-甲基-噻唑	1759-28-0	杂环化合物	0.300 0	0.007 1±0.002 1	0.01	0.02
163	C ₆ H ₈ N ₂	2,3-二甲基吡嗪	5910-89-4	杂环化合物	0.100 0	0.007±0.004 6	0.01	0.07
164	C ₁₄ H ₁₂ O ₂	苯甲酸苄酯	120-51-4	酯类	0.341 0	0.006 7±0.001 9	0.01	0.02

2.2 临沧普洱生茶与绿茶香气成分差异比较

2.2.1 临沧普洱生茶与绿茶香气成分种类差异及共有成分分析

绿茶样品中共检测到142种主要香气成分(香气阈值≤1),包括26种酯类,26种萜类,23种杂环化合物,16种醇类,16种醛类,15种芳烃类,10种酮类,3种酚类,2种酸类,2种炔类,2种含硫化合物,1种含氮化合物。如图2(a)所示,临沧普洱生茶和绿茶在主要香气成分种类上存在一定差异,临沧普洱生茶中香气成分的种类更加丰富,酯类、杂环化合物、醇类、酚类、酮类、醛类、含硫化合物均多于绿茶,而绿茶的芳香烃类成分的种类数多于临沧普洱生茶。但两种茶的香气成分在每种类别的数目上并没有非常明显的差异,具体香气香型的差异还要结合其挥发性香气成分的含量和OAV值来对比。

为清晰呈现临沧普洱生茶与绿茶共有成分在含量上的差异并确保图表中数值直观,本研究引入CR值作为量化指标,其代表某成分在两种茶中的较高含量值与较低含量值的比。图2(b)为以物质类别划分的临沧普洱生茶和绿茶共同香气成分含量比值图,红色标记为在临沧普洱生茶中含量及贡献度高于绿茶的成分,黑色标记为在绿茶中含量及贡献度高于普洱生茶的成分。红点数量更多且CR值普遍偏大,说明多数香气成分在普洱生茶中的含量相对更高,且差异倍数显著。特别是在酯类、杂环化合物、萜类等类别中,许多成分在两茶中表现出较大的含量差异。反观绿茶,相较于普洱生茶其含量高的香气成分整体种类较少,且差异倍数相对不大。

为进一步探明本研究临沧普洱生茶与绿茶的挥

发性物质差异,以CR值为标准对两种茶共有香气成分进行了含量差异成分的筛选。筛选的条件为差异倍数CR≥1.5,结果如图3所示,筛选出的含量差异成分共55种。普洱生茶中的高含量成分共有39种;其中,α-松油醇在普洱生茶中的含量达到了绿茶中的34.35倍,是两种茶共有香气成分中差异最大的物质。该物质具有清新的紫丁香花香和木质香味,也有研究表明其对普洱生茶的独特陈香有较好的调和和优化作用^[1]。同属于醇类的辛烯-3-醇在普洱生茶中的含量是绿茶中的22.19倍,能产生类似于薰衣草香、玫瑰香和蘑菇香的混合香气^[16];酯类中的二氢猕猴桃内酯和萜类中β-紫罗兰酮在普洱生茶中的含量比在绿茶中分别高14.54倍和3.47倍,这两种物质除了分别具有草本香和花香的主要特征香气外,还共同属于普洱生茶陈香特征的物质基础^[17]。此外,水杨酸甲酯、苯乙醛、5-(仲丁基)-2,3-二甲基吡嗪等成分也具有较高的含量比,可能同样是使普洱生茶区别于绿茶具有特征陈香的关键成分。绿茶中的高含量成分有16种,其中(Z)-己酸-3-己烯酯的含量是普洱生茶中的22.84倍,(Z)-己酸-3-己烯酯为绿茶常见香气物质,具有水果青香^[18];吡嗪是普洱生茶中的6.84倍,带来香苦气味^[19];邻氨基苯甲酸甲酯是普洱生茶中的5.10倍,提供更多的独特甜香。这些差异成分可能是造成普洱生茶和绿茶不同的香气层次和风味特征的关键因素。

2.2.2 临沧普洱生茶与绿茶特有香气成分分析

表2列出了本研究选用的普洱生茶和绿茶样品中各自特有的香气成分。普洱生茶和绿茶各自含有多种特有的香气成分,涵盖醛、萜类、酯、醇、杂环化合物、酚、酸以及芳香烃不同类物质。普洱生茶

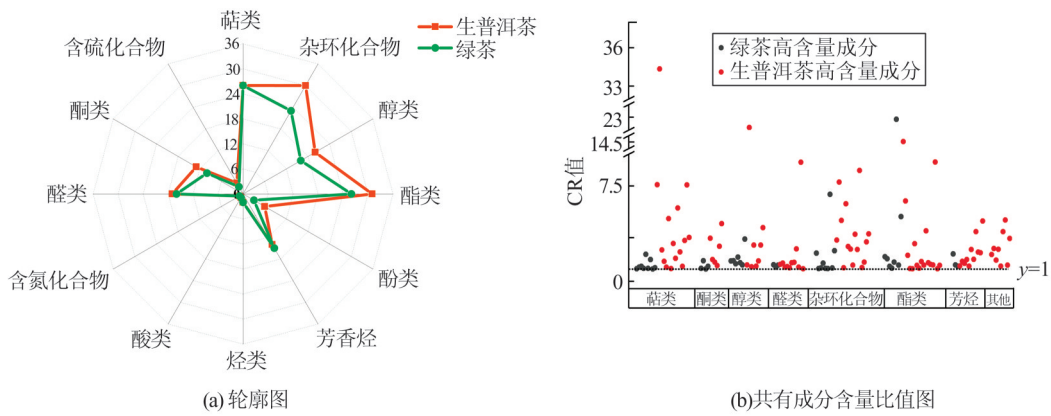


图2 临沧普洱生茶与绿茶香气成分种类对比及共有成分含量比值

Figure 2 Comparison contour diagram and common component content ratio of aroma components between Lincang Pu-er raw tea and green tea

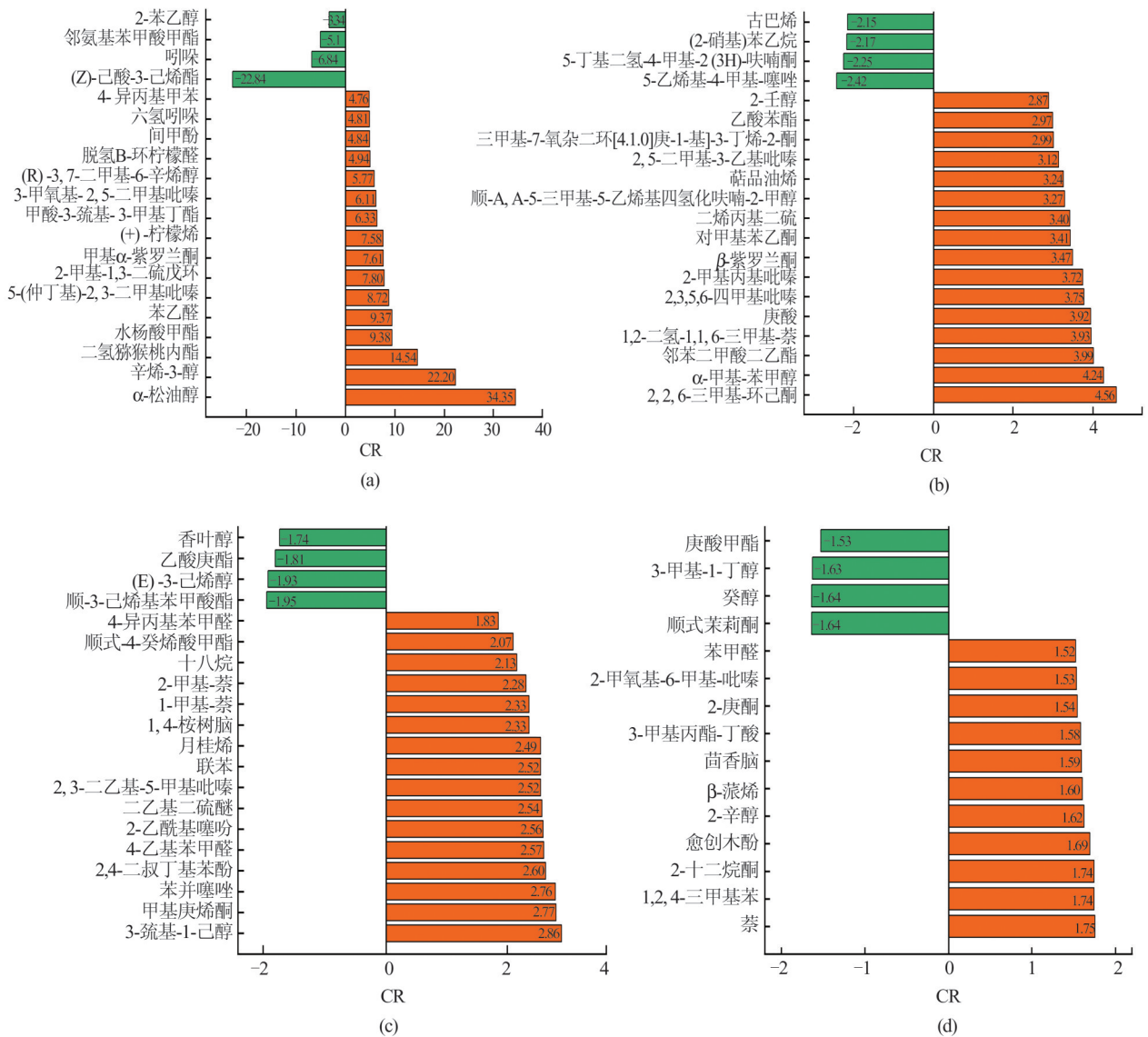


图3 临沧普洱生茶和绿茶样品中主要差异香气成分含量比值图

Figure 3 Ratio chart of main aroma component content differences between Lincang Pu-er raw tea and green tea samples

表2 普洱生茶和绿茶样品中特有挥发性香气成分表
Table 2 Table of specific volatile aroma components in Pu-er raw tea and green tea samples

茶种类	成分名称	物质一级分类	对应茶中平均相对含量/%	OAV 值
临沧普洱生茶	E-2-辛烯醛	醛类	0.21	0.02
	α -法呢烯	萜类	0.04	0.27
	β -苯基乙基丁酸酯	酯类	0.01	0.02
	月桂醇	醇类	0.31	0.23
	1-庚醇	醇类	0.20	50.81
	5-乙基-2(5H)-呋喃酮	杂环化合物	0.11	8.63
	反式-2-辛烯-1-醇	醇类	0.10	3.14
	3-苯基-2-丙醛	醛类	0.04	1.33
	1-对孟烯-8-硫醇	含硫化合物	0.05	1 914 098.65
	3-甲基-2-(3-甲基-2-丁烯基)呋喃	杂环化合物	0.13	1.26
	3-辛酮	酮类	0.02	10.70
	3-辛烯-2-酮	酮类	0.18	3 738.30
	5-甲基-2-庚-4-酮	酮类	0.29	3 858.07
	乙酰吡嗪	杂环化合物	0.12	8.67
	3-甲氧基-苯甲醛	醛类	1.99	7.81
	苯甲酸苄酯	酯类	0.01	0.02
	子香酚	酚类	0.03	7.25
	2-苯基甲酸乙酯	酯类	0.02	0.07
	2-甲基丁基己酸酯	酯类	0.11	2.24
	己酸甲酯	酯类	0.02	0.22
	脱氢芳樟醇	醇类	2.64	19.52
	3-甲基-1H-吡啶	杂环化合物	0.09	155.88
	己酸异戊酯	酯类	0.17	0.32
	苯酚	酚类	0.15	18.12
	4-乙基-2-甲氧基苯酚	酚类	0.11	2.61
	2,3-二甲基吡嗪	杂环化合物	0.01	0.07
	2-乙基-5-甲基吡嗪	杂环化合物	0.35	15.64
	5-乙基-2,4-二甲基噻唑	杂环化合物	0.02	167.63
	绿茶	3-甲基-1-苯基-3-戊醇	醇类	0.04
4-(1-甲基乙烯基)-1-环己烯-1-甲醛		醛类	0.09	2.30
(E)-2-十一烯醛		醛类	0.05	49.10
3-苯丙酸乙酯		酯类	0.01	0.04
α -石竹烯		萜类	0.05	0.25
氯化肉桂酸		酸类	0.03	0.07
2,6-二甲基萘		芳香烃	0.01	0.61

的特有香气成分达 29 种,绿茶特有的香气成分较少,只有 7 种。脱氢芳樟醇(2.64%)、3-甲氧基-苯甲醛(1.99%)是普洱生茶主要香气成分中平均含量占比较高的特有成分,其他成分在对应茶中的平均含量占比均不高(<1%)。脱氢芳樟醇具有一定的花香、甜香属性^[20],已有研究证明该成分在茶叶中的含量与茶叶的烘焙时间有关^[21];3-甲氧基-苯甲醛具有持久的山楂香气^[22]。临沧普洱生茶中的

1-对孟烯-8-硫醇的 OAV 值极高,达 1 914 098.65 个单位,该物质具有一种强烈的类似烟熏、烤肉或者一些特殊的硫化物的气味,但一般不将其作为一种香气活性物质。3-辛烯-2-酮 OAV 值为 3 738.30 个单位,5-甲基-2-庚-4-酮 OAV 值为 3 858.07 个单位,OAV 值均较高且含量可观,可能会为普洱生茶提供一种特殊的果香。这些物质的特有香气同样是组成普洱生茶区别于绿茶香气的关键成分。绿

茶特有的香气成分中OAV值相对最高的是(E)-2-十一烯醛,为49.10,带有一种柑橘皮的清香。绿茶中特有成分数量少且其他各成分的OAV值也并不高,说明绿茶中的特有成分对其独特香气特点的贡献相对不大。

3 讨论

本研究基于HS-SPME-GC-MS在13种典型的临沧普洱生茶样品中共检测出593种挥发性成分,其中主要香气成分有164种,酯类和杂环化合物是主要类别,但高含量成分中萜类物质更多。芳樟醇在临沧普洱生茶样品中平均含量最高,相对含量占比达23.90%。此外,萜品油烯(13.31%)、 β -紫罗兰酮(8.63%)、水杨酸甲酯(5.06%)、 α -松油醇(3.82%)、二氢猕猴桃内酯(3.86%)等成分也同样具有较高的平均含量占比,是临沧普洱生茶关键挥发性香气成分。茶叶香型的形成源于内部各类成分的比例差异,是多种成分协同作用的结果。一般情况下,有一种或几种香气成分起主导作用,其余成分则辅助协调,共同塑造出茶独特的香气^[10]。根据香气组成及各成分的香气特征综合来看,临沧普洱生茶主要香型以花香、草本清香和果甜香为主,辛香、木香为辅,香气层次丰富,多种香气相互交织、平衡,共同构成丰富、立体的香气体系。

相比畅销型传统绿茶,临沧普洱生茶的挥发性香气物质种类和含量均更丰富,可能是临沧普洱生茶具有更复杂的香气层次与醇厚特征的原因。脱氢芳樟醇、3-甲氧基-苯甲醛、3-辛烯-2-酮和5-甲基-2-庚-4-酮等是临沧普洱生茶区别于绿茶的关键特有成分。根据差异倍数CR \geq 1.5筛选出55种含量差异香气成分,其中临沧普洱生茶的高含量成分有39种,包括 α -松油醇、辛烯-3-醇、二氢猕猴桃内酯、 β -紫罗兰酮等。这些物质赋予了临沧普洱生茶区别于绿茶特有的花香、木质陈香和甜香,可能同样是造成两种茶香气层次和风味特征不同的关键物质。本研究为后续针对普洱生茶叶加工和储存过程中关键香气成分含量变化及形成转化机制的研究提供了参考依据,同时从分子层面为临沧普洱生茶及其产品的进一步风味改进提供了理论基础,有利于促进云南省普洱茶产业的高质量发展。

本研究结果显示临沧普洱生茶中含量第二高的成分是萜品油烯,已有研究发现该物质是资阳香橙砧沃柑和枳砧沃柑两个品种沃柑果肉中的香气特征物^[23],是芒果花中的高含量挥发性成分^[24],也是陈皮精油中存在的有效抗氧化成分^[25]。但这种物质在茶

香成分的研究中鲜有报道,可能是普洱茶的新型潜在香气成分或临沧当地普洱生茶的特有高含量成分。其次,多项研究表明,普洱茶香气成分受多种因素影响,如干燥方式、贮藏时间及渥堆过程^[26-28]。同时普洱生茶的香气在加工和储存过程中会发生动态变化这一特点也被证明可能与其香气成分有关,例如普洱生茶陈香的形成可能涉及发酵过程中 β -紫罗兰酮、水杨酸甲酯和环氧芳樟醇等物质的转变^[29-30]。后续研究可针对普洱生茶加工和储存过程中的香气成分动态变化,深入探究其形成或转化机制,为茶叶品质调控和产品开发提供理论依据。此外,本研究通过OAV值筛选茶叶主要香气贡献物的方法存在一定局限性。例如,某些低含量占比物质例如1-对孟烯-8-硫醇(0.05%)、甲酸-3-巯基-3-甲基丁酯(0.20%)、二乙基二硫醚(0.11%)等因香气阈值极低而表现出高OAV值,在香气表现上这些物质可能被高含量成分掩盖,同时其所具有的复杂气味特性可能并不符合人们对茶叶香气的期望和喜好,在现有研究中一般不将这些物质作为茶叶具有香气活性的成分;而某些高含量物质(如 α -松油醇)因协同作用或其他因素对茶叶整体香气贡献突出,但其OAV值可能低于预期。因此,从茶叶香气成分的分析到整体香气的评定需结合感官分析,并进一步完善量化方法^[10]。

参考文献

- [1] 吕世懂,孟庆雄,徐咏全,等.普洱茶香气分析方法及香气活性物质研究进展[J].食品科学,2014,35(11):292-298.
Lü S D, Meng Q X, Xu Y Q, et al. Recent progress in aroma analysis methods and aroma active compounds in Pu-erh tea [J]. Food Science, 2014, 35 (11): 292-298.
- [2] 王宇童,唐卿雁,邵金良,等.基于GC-MS的普洱生茶香气成分产地溯源[J].茶叶通讯,2024,51(4):496-507.
Wang Y T, Tang Q Y, Shao J L, et al. Origin tracing of Pu-er raw tea aroma components based on GC-MS [J]. Tea Commun, 2024, 51(4): 496-507.
- [3] 陈文品.市场经济中凤凰涅槃的普洱茶呼唤科学理性与尊重[J].广东茶业,2017(4):26-30.
Chen W P. In the market economy, Pu'er tea with Phoenix Nirvana calls for scientific rationality and respect [J]. Guangdong Tea Industry, 2017(4): 26-30.
- [4] 靳三五.临沧寻茶之旅[J].道路交通管理,2019(6):84-85.
Jin S W. The tea-searching journey in Lincang [J].

- Road & Traffic Management, 2019(6): 84-85.
- [5] Su D, Xu T S, Li Y L, et al. Flavor evolution in raw Pu-erh tea during manufacturing using different processing types [J]. *Lwt*, 2022, 154: 112905.
- [6] 邓德涵, 王琼, 罗蓉, 等. 普洱茶滋味形成机制研究现状[J]. *中国茶叶*, 2021, 43(7): 1-8.
Deng S H, Wang Q, Luo R, et al. Mechanism of Pu-erh tea taste formation [J]. *China Tea*, 2021, 43(7): 1-8.
- [7] Chaturvedula V S P, Prakash I. The aroma, taste, color and bioactive constituents of tea [J]. *Journal of Medicinal Plants Research*, 2011, 5(11): 2110-2124.
- [8] Jin G, Zhu Y Y, Cui C J, et al. Tracing the origin of Taiping Houkui green tea using 1H NMR and HS-SPME-GC-MS chemical fingerprints, data fusion and chemometrics [J]. *Food Chemistry*, 2023, 425: 136538.
- [9] 梁铁琳, 张灵枝, 戴浩民, 等. HS-SPME-GC-MS分析武夷岩茶呈香挥发性物质 [J]. *食品与生物技术学报*, 2024, 43(5): 110-121.
Liang Y L, Zhang L Z, Dai H M, et al. Analysis of aroma volatile compounds in Wuyi rock tea based on HS-SPME-GC-MS [J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2024, 43(5): 110-121.
- [10] 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 L, Yang R X, Chen Z Z, et al. Effect of tea processing techniques on aromatic components of mingke 1 [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 28(12): 1257-1262.
- [11] 王清艺, 熊梦钊, 涂青, 等. 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法分析不同产地普洱茶发酵阶段样香气组分 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(18): 39-49.
Wang Q Y, Xiong M F, Tu Q, et al. Analysis of the aroma components of Pu-erh tea samples from different producing areas during fermentation by headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(18): 39-49.
- [12] 孙奇芳, 董方, 胡蕾, 等. 不同产地筠连红茶风味化学成分差异分析 [J]. *食品科学*, 2025, 46(6): 172-182.
Sun Q F, Dong F, Hu L, et al. Differential analysis of flavor compounds in Junlian Black Tea from different geographical origins [J]. *Food Science*, 46(6): 172-182.
- [13] 吴坤龙, 刘标, 刘辉, 等. 杀菌条件、包装材料对真空包装甜玉米挥发性风味物质的影响 [J]. *食品与机械*, 2024, 40(11): 102-114.
Wu K L, Liu B, Liu H, et al. Effects of sterilization conditions and packaging materials on volatile flavor substances in vacuum-packed sweet corn [J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(11): 102-114.
- [14] 柴颖, 乔月梅, 郭春生, 等. 烟叶醇化初期烤甜香风味物质形成规律 [J]. *安徽农业科学*, 2024, 52(24): 158-162, 87.
Chai Y, Qiao Y M, Guo C S, et al. Formation patterns of smoky-sweet aromatic substances during the early stage of tobacco leaf aging [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2024, 52(24): 158-162, 87.
- [15] 张曦, 刘玲, 童华荣. 普洱茶生茶挥发性成分分析 [J]. *西南农业学报*, 2014, 27(1): 94-98.
Zhang X, Liu L, Tong H R. Analysis of volatile components of Pu-erh tea [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 27(1): 94-98.
- [16] 马雪茗, 李海燕, 曾斌, 等. ‘狗牯脑2号’所制红茶“蜜兰香”关键香气成分分析 [J]. *现代食品科技*, 2025, 41(3): 340-347, 349-350.
Ma X M, Li H Y, Zeng B, et al. Analysis of key odorants responsible for Honey Orchid-like Aroma of black teas processed from Tea Cultivar ‘Gougunao No. 2’ [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2025, 41(3): 340-347, 349-350.
- [17] 王秋霜, 吴华玲, 凌彩金, 等. 普洱茶理化品质及特征“陈香”物质基础研究 [J]. *食品工业科技*, 2017, 38(5): 308-314.
Wang Q S, Wu H L, Ling C J, et al. Research of physical and chemical quality and characteristic ‘Chenxiang’ material basis of pu-erh Tea [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(5): 308-314.
- [18] 崔继来, 周洁, 周倩倩, 等. 信阳毛尖茶品质成分分析 [J]. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, 2022, 35(2): 259-268.
Cui J L, Zhou J, Zhou Q Q, et al. The quality compounds analysis of Xinyang Maojian tea [J]. *Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition)*, 2022, 35(2): 259-268.
- [19] 王志霞, 苏丹, 任洪涛, 等. 紫娟与丹妃挥发性成分差异分析 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(18): 7388-7396.
Wang Z X, Su D, Ren H T, et al. Analysis of the differences in the volatile components between Zijuan and Danfei [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(18): 7388-7396.
- [20] 梁子钧, 俞滢, 张磊, 等. 基于HS-SPME-GC-MS分析茶树新品系‘白云0492’白茶香气特征成分 [J]. *食品科学*, 2023, 44(22): 313-321.
Liang Z J, Yu Y, Zhang L, et al. Analysis of volatile

- aroma components in white tea from the new tea cultivar 'Baiyun 0492' using HS-SPME-GC-MS [J]. *Food Science*, 2023, 44(22): 313-321.
- [21] 张俊, 唐德松, 龚淑英, 等. 烘焙处理对夏秋绿茶香气品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2010, 10(6): 94-100.
Zhang J, Tang D S, Gong S Y, et al. Effect of baking on the aroma quality of green tea produced in summer and autumn [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2010, 10(6): 94-100.
- [22] 徐大国, 柯中炉, 黄振东. 间甲氧基苯甲醛合成新工艺[J]. *应用化工*, 2013, 42(10): 1778-1781.
Xu D G, Ke Z L, Huang Z D. A new synthesis process of 3-methoxybenzaldehyde [J]. *Applied Chemical Industry*, 2013, 42(10): 1778-1781.
- [23] 罗义灿, 邓有展, 姚金洁, 等. 不同砧木沃柑成熟期果肉香气成分及特征物[J/OL]. *中国南方果树*, 2024-09-12. <https://doi.org/10.13938/j.issn.1007-1431.20240379>.
Luo Y C, Deng Y Z, Yao J J, et al. Volatile components and characteristic substances in the flesh of different rootstocks of Wogon fruit during maturity [J/OL]. *South China Fruit*, 2024-09-12. <https://doi.org/10.13938/j.issn.1007-1431.20240379>.
- [24] 王帅, 郑霞林, 罗聪, 等. 7个品种芒果花的挥发性化合物比较与分析[J]. *热带作物学报*, 2024, 45(3): 551-563.
Wang S, Zheng X L, Luo C, et al. Comparative analysis of volatile compounds in flowers of seven mango varieties [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2024, 45(3): 551-563.
- [25] 陈霖虹, 肖更生, 徐玉娟, 等. 不同贮藏方式陈皮精油成分及其抗氧化活性分析[J]. *食品与发酵工业*, 2025, 51(3): 215-224.
Chen L H, Xiao G S, Xu Y J, et al. Analysis of essential oil composition and antioxidant activity of *Pericarpium Citri Reticulatae* in different storage methods [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2025, 51(3): 215-224.
- [26] 张灵枝, 陈维信, 王登良, 等. 不同干燥方式对普洱茶香气的影响研究[J]. *茶叶科学*, 2007, 27(1): 71-75.
Zhang L Z, Chen W X, Wang D L, et al. Effect of drying methods on the aromatic character of Pu-erh tea [J]. *Journal of Tea Science*, 2007, 27(1): 71-75.
- [27] 田小军, 王杰, 邓宇杰, 等. 不同贮藏时间普洱生茶的特征性香气成分分析[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(12): 194-202.
Tian X J, Wang J, Deng Y J, et al. Characteristic aroma components analysis of raw Pu'er tea at different storage time [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2016, 42(12): 194-202.
- [28] 吕海鹏, 钟秋生, 王力, 等. 普洱茶加工过程中香气成分的变化规律研究[J]. *茶叶科学*, 2009, 29(2): 95-101.
Lü H P, Zhong Q S, Wang L, et al. Study on the change of aroma constituents during Pu-erh tea process [J]. *Journal of Tea Science*, 2009, 29(2): 95-101.
- [29] 吕海鹏, 钟秋生, 林智. 陈香普洱茶的香气成分研究[J]. *茶叶科学*, 2009, 29(3): 219-224.
Lü H P, Zhong Q S, Lin Z. Study on the aroma components in Pu-erh tea with stale flavor [J]. *Journal of Tea Science*, 2009, 29(3): 219-224.
- [30] 罗发美, 詹家芬, 罗正刚, 等. SPME-GC-MS分析普洱茶的挥发性成分[J]. *林产化学与工业*, 2010, 30(5): 95-98.
Luo F M, Zhan J F, Luo Z G, et al. Analysis of volatile components in Pu-er tea by SPME-GC-MS [J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2010, 30(5): 95-98.