

汽蒸处理对六堡茶感官品质和挥发性物质的影响

欧行畅^{1,2}, 许皓^{1,2}, 肖虹菲^{1,2}, 农寿华³, 陈国和^{1,2}, 黄豆⁴, 刘仲华^{1,2,5,6}, 黄建安^{1,2,5,6*}, 王超^{1,2,5,6*}

(1. 湖南农业大学 茶学教育部重点实验室, 湖南 长沙 410128; 2. 国家植物功能成分利用工程技术研究中心, 湖南 长沙 410128; 3. 广西梧州茶厂有限公司, 广西 梧州 543002; 4. 广州禾信仪器有限公司, 广东 广州 510530; 5. 湖南省植物功能成分利用协同创新中心, 湖南 长沙 410128; 6. 农业农村部园艺作物基因资源评价利用重点实验室, 湖南 长沙 410128)

摘要: 为探究汽蒸前后六堡茶风味品质和挥发性物质的差异, 采用感官评价和顶空固相微萃取(headspace solid phase microextraction, HS-SPME)结合全二维气相色谱-飞行时间质谱(comprehensive two-dimensional gas chromatography-time of flight mass spectrometry, GC×GC-TOF-MS)对汽蒸前后六堡茶进行分析。结果表明, 汽蒸能够有效提升六堡茶品质, 汤色由橙色、较亮转变为橙红明亮, 滋味方面酸味、涩味以及醇厚感得到有效改善, 香气方面汽蒸后堆味、豆豉味等不利于六堡茶品质的气味得到有效去除, 发酵气也得到减弱; 分别从汽蒸前后六堡茶中检测出189种和188种挥发性化合物, 碳氢类化合物最多, 其次为醇类、酮类、醛类、甲氧基苯类、酯类、呋喃类、含氮类、内酯类和酚类化合物。*T*检验分析表明, 汽蒸前后六堡茶中碳氢类、醛类、呋喃类和酚类化合物总含量无显著差异($p > 0.05$); 内酯类和含氮类化合物的总含量显著降低($p < 0.05$); 醇类、酮类、酯类和甲氧基苯类的总含量极显著降低($p < 0.01$), 其中碳氢类、醇类、酮类、醛类、甲氧基苯类、酯类、呋喃类、酚类、内酯类和含氮类化合物中差异显著($p < 0.05$)的化合物分别有10、3、3、5、2、1、2、0、2种和1种; 差异极显著($p < 0.01$)的化合物分别有32、24、11、4、14、6、6、1、2种和4种。

关键词: 六堡茶; 汽蒸; 挥发性物质; 顶空固相微萃取; 全二维气相色谱-飞行时间质谱

Effects of Steaming on the Sensory Quality and Volatile Compounds of Liubao Tea

OU Xingchang^{1,2}, XU Hao^{1,2}, XIAO Hongfei^{1,2}, NONG Shouhua³, CHEN Guohe^{1,2}, HUANG Dou⁴,
LIU Zhonghua^{1,2,5,6}, HUANG Jian'an^{1,2,5,6*}, WANG Chao^{1,2,5,6*}

(1. Key Laboratory of Tea Science of Ministry of Education, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, Hunan, China; 2. National Research Center of Engineering Technology for Utilization Ingredients from Botanicals, Changsha 410128, Hunan, China; 3. Guangxi Wuzhou Tea Factory Co., Ltd., Wuzhou 543002, Guangxi, China; 4. Guangzhou Hexin Instrument Co., Ltd., Guangzhou 510530, Guangdong, China; 5. Co-Innovation Center of Education Ministry for Utilization of Botanical Functional Ingredients, Changsha 410128, Hunan, China; 6. Key Laboratory for Evaluation and Utilization of Gene Resources of Horticultural Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Changsha 410128, Hunan, China)

Abstract: The differences in flavor quality and volatile compounds of Liubao tea before and after steaming were studied. Sensory evaluation and headspace solid phase microextraction (HS-SPME) combined with comprehensive two-dimensional gas chromatography-time of flight mass spectrometry (GC×GC-TOF-MS) were employed to analyze the aroma quality of Liubao tea before and after steaming. The results showed that steaming improved the quality of Liubao tea, with the tea infusion changing from orange and moderate bright to orange red and bright and the sour, astringent, and mellow taste ameliorated. In addition, steaming removed the aroma

基金项目: 广西六堡茶“八新双增”关键技术与产业化示范(桂科 AA20302018-12); 国家茶叶产业技术体系(CARS-19); 中国茶产业高质量发展战略研究(2023-XY-29); 湖南省研究生科研创新项目(QL20220174)

作者简介: 欧行畅(1995—), 女(汉), 博士研究生, 研究方向: 茶叶品质化学。

*通信作者: 黄建安(1965—), 女(汉), 教授, 博士, 研究方向: 茶叶品质化学; 王超(1987—), 男(汉), 高级工程师, 博士, 研究方向: 茶叶深加工技术及品质化学。

not conducive to the quality of Liubao tea and attenuated the fermentation gas. A total of 189 and 188 volatile compounds were detected in Liubao tea before and after steaming, respectively. Hydrocarbons were the richest, followed by alcohols, ketones, aldehydes, methoxybenzenes, esters, furans, nitrogen-containing compounds, lactones, and phenols. The *T*-test showed that steaming caused no significant difference in the total content of hydrocarbons, aldehydes, furans, and phenols in Liubao tea before and after steaming ($p>0.05$), while it reduced the total content of lactones and nitrogen-containing compounds ($p<0.05$) and the total content of alcohols, ketones, esters, and methoxybenzenes ($p<0.01$). Specifically, the number of hydrocarbons, alcohols, ketones, aldehydes, methoxybenzenes, esters, furans, phenols, lactones, and nitrogen-containing compounds with different content before and after steaming was 10, 3, 3, 5, 2, 1, 2, 0, 2, and 1 ($p<0.05$) and 32, 24, 11, 4, 14, 6, 6, 1, 2, and 4 ($p<0.01$), respectively.

Key words: Liubao tea; steaming; volatile compounds; headspace solid-phase microextraction (HS-SPME); comprehensive two-dimensional gas chromatography-time of flight mass spectrometry (GC×GC-TOF-MS)

引文格式:

欧行畅,许皓,肖虹菲,等.汽蒸处理对六堡茶感官品质和挥发性物质的影响[J].食品研究与开发,2025,46(2):183-193.
OU Xingchang, XU Hao, XIAO Hongfei, et al. Effects of Streaming on the Sensory Quality and Volatile Compounds of Liubao Tea[J]. Food Research and Development, 2025, 46(2): 183-193.

六堡茶是我国特有的一种黑茶,因产于广西壮族自治区梧州市苍梧县六堡镇而得名,距今已有1500年历史^[1]。六堡茶是采用梧州苍梧县群体种、大中叶种及其分离、选育的品种、品系茶树[*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze]为原料,经初制加工、筛选、拼配、渥堆、汽蒸、压制或不压制、陈化、包装等一系列工艺加工而成的茶叶^[2]。渥堆过程中原料在生化动力(微生物、酶解)和物化动力(湿热)的共同作用下,形成了六堡茶“红、浓、陈、醇”的独特品质,产品备受广大消费者的青睐^[3-4]。汽蒸是六堡茶加工过程中的关键工序之一,不但可以提升产品风味的纯净度和醇厚感,同时也便于六堡茶的塑形以及品质的转化、存储和运输。目前六堡茶中挥发性物质的研究主要集中在对终端产品的分析^[5-6],对汽蒸前后六堡茶挥发性香气物质的研究较少。

为了充分挖掘汽蒸前后六堡茶中挥发性物质的组成,有效的提取和检测技术至关重要。顶空固相微萃取(headspace solid phase microextraction, HS-SPME)是一种集取样、萃取、浓缩和进样为一体的挥发性物质提取技术,具有操作简单、样品用量少、无需使用溶剂、萃取样品后可直接色谱进样等优点,现已广泛应用于各种茶叶的香气分析^[7-8]。目前气相色谱质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)联用是检测茶叶中挥发性物质常用的方法。但由于后发酵茶挥发性物质组成的复杂性,一维气相色谱在检测过程中常出现化合物共流出的现象,影响化合物定性、定量的准确性。全二维气相色谱,一种用于分类、分析各种复杂样品挥发性物质的有效技术,分析过程中使用两根性质

不同的毛细管色谱柱,通过将第一维色谱柱的流出物在第二维色谱柱中再次分离,极大地提高峰容量和分辨率,提高了仪器检测的灵敏度^[9-10]。本研究采用HS-SPME结合全二维气相色谱-飞行时间质谱(comprehensive two-dimensional gas chromatography-time of flight mass spectrometry, GC×GC-TOF-MS)对汽蒸前后六堡茶挥发性物质组成进行分析和比较,以期六堡茶品质提升提供理论和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

六堡茶汽蒸前后样品:广西梧州茶厂有限公司,取样后密封保存在-80℃冰箱中,样品分析前经真空冷冻干燥,研磨粉碎过2.0 mm圆孔筛。

癸酸乙酯(≥99.9%):上海安谱实验科技股份有限公司;C₇~C₂₅连续正构烷烃标准溶液:美国Sigma-Aldrich公司。

DC-100型高速多功能粉碎机:浙江武义鼎藏日用金属制品厂;MS204TS/00分析天平:瑞士Mettler Toledo公司;CTC全自动多功能处理进样平台:广州智达实验室科技有限公司;8890-7250全二维气相色谱-飞行时间质谱仪:美国Agilent公司;SSM1810固态调制器:上海雪景电子科技有限公司;ODP4嗅辨仪:德国Gerstel公司;50/30 μm DVB/CAR/PDMS固相微萃取头:美国Supelco公司。

1.2 方法

1.2.1 感官审评

感官审评小组由5名(2名男士,3名女士)具有

1年以上茶叶感官描述经验的研究人员组成,年龄在25~58岁。感官审评小组成员参考 GB/T 23776—2018《茶叶感官审评方法》中的黑茶审评方法,取3g茶叶,按茶水比1:50(g/mL)加入沸水,静置5min后过滤出茶汤。同时参考 GB/T 32719.4—2016《黑茶 第4部分:六堡茶》中的六堡茶感官品质要求,分别对样品的汤色、香气和滋味打分。

1.2.2 样品处理与分析

取0.5g茶粉(精确至0.001g)于20mL顶空瓶中,加入5.0mL热水(90℃)、10μL癸酸乙酯(10μg/mL),迅速拧紧瓶盖,将顶空瓶置于70℃恒温水浴杯中,平衡10min,插入50/30μm DVB/CAR/PDMS萃取头,恒温搅拌吸附30min,吸附结束后迅速将萃取头插入气相色谱进样口,解吸附5min,同时启动仪器数据采集。

GC条件:气相色谱进样口和传输线温度分别为250℃和280℃,载气(He>99.999%)流速为1.1mL/min,采用10:1分流进样,溶剂延迟时间为3min。色谱柱一为HP-5MS(30m×250μm×0.25μm),色谱柱二为DB-17MS(1.2m×180μm×0.18μm)。升温程序:初始温度40℃,以4℃/min升到105℃,保持2min,以4℃/min

升到170℃,再以20℃/min升到250℃。调制器使用HV调制柱(1.1m×0.25mm),调制周期为4s。

MS条件:离子源使用电子轰击离子化,电离电压70eV,离子源温度200℃,接口温度280℃,质量扫描范围为45~500amu,采集模式为全扫描。

1.3 数据处理

GC×GC-TOF-MS数据分析使用Canvas 2.0工作站进行处理,最小信噪比S/N设置为10,根据保留指数(采用C₇~C₂₅连续正构烷烃在相同色谱条件下分析计算所得)、精确分子质量、质谱和匹配相似度在美国国家标准技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)20数据库中鉴定挥发性化合物,根据癸酸乙酯的含量和峰面积半定量计算挥发性成分的相对浓度,使用Excel 2010对数据进行处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 汽蒸前后六堡茶感官审评

审评小组对汽蒸前后六堡茶进行感官审评,结果如表1所示。

表1 汽蒸前后六堡茶感官审评结果

Table 1 Sensory evaluation results of Liubao tea before and after steaming

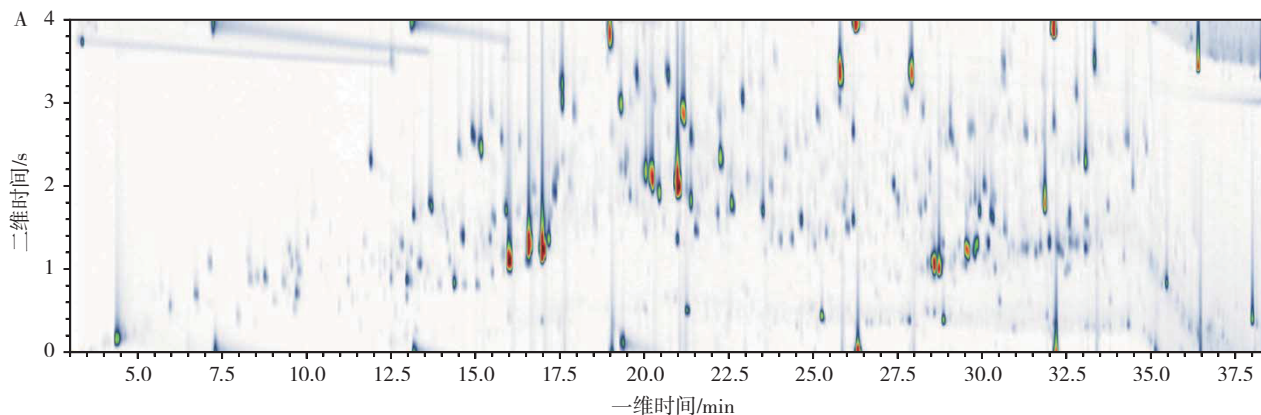
样品	外形		汤色		香气		滋味		叶底	
	感官评价	评分	感官评价	评分	感官评价	评分	感官评价	评分	感官评价	评分
汽蒸前	条索紧结,匀整,带嫩茎,色褐棕	85	橙、较亮	88	具堆味和豆豉味,发酵气浓,带木香和花果香	75	酸、涩,尚厚	75	色绿棕,带嫩茎,较匀齐	85
汽蒸后	条索紧细,匀整,带嫩茎,色黑褐	95	橙红、明亮	93	具果香、木香和陈香,轻微发酵气	90	较酸较涩较厚	85	色褐,带嫩茎,匀齐	94

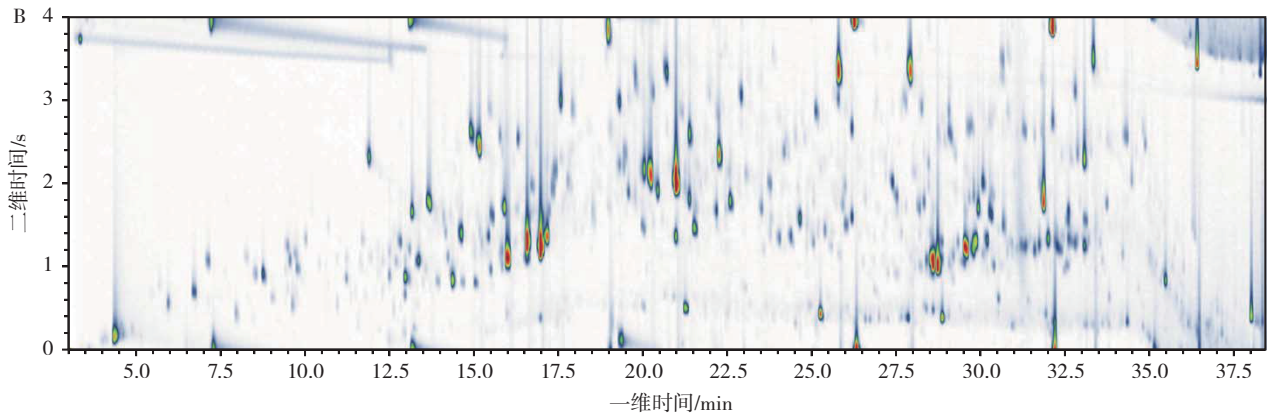
由表1可知,汽蒸工序有利于六堡茶品质特征的形成。在汤色上六堡茶由橙、较亮转变为橙红、明亮,评分结果显示六堡茶汽蒸后汤色评分提升;在香气上六堡茶汽蒸后堆味、豆豉味等不利于六堡茶品质的气味得到有效去除,发酵气得到一定的减弱,评分结果表明汽蒸能够有效提高六堡茶香气品质;在滋味方面六堡茶汽蒸后酸味、涩味以及醇厚感得到有效改善,评分结果显示汽蒸后六堡茶口感更佳。

2.2 汽蒸前后六堡茶挥发性物质鉴定

采用HS-SPME结合GC×GC-TOF-MS对汽蒸前后六堡茶进行分析,结果见图1。

由图1可知,3种挥发性化合物共流出现象有5组,两种挥发性化合物共流出现象有29组,全二维色谱可有效避免因共流出导致的化合物定性、定量不准确的问题。经数据库比对和保留指数,汽蒸前后挥发性物质结果见表2。





A. 汽蒸前; B. 汽蒸后。

图1 六堡茶挥发性成分 GC×GC-TOF-MS 分离图谱

Fig.1 GC×GC-TOF-MS spectrum of volatile compounds in Liubao tea

表2 汽蒸前后六堡茶样品中挥发性物质

Table 2 Volatile compounds in Liubao tea samples before and after steaming

序号	一维保留 时间/min	二维保留 时间/s	NIST 保留指数	实测 保留指数	化合物名称	汽蒸前后六堡茶挥发性物质含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)		显著性
						汽蒸前	汽蒸后	
碳氢类								
1	5.971	0.569	767	763	甲苯	524.82±15.90	636.59±42.52	$p<0.05$
2	6.504	0.067	792	800	正辛烷	103.97±4.47	45.26±4.79	$p<0.01$
3	8.571	0.907	863	855	苯乙烷	351.67±12.01	443.70±28.43	$p<0.05$
4	8.771	0.924	870	865	对二甲苯	1 251.99±44.04	1 711.47±118.59	$p<0.01$
5	9.038	0.622	879	879	(Z,Z,Z)-1,3,5-辛三烯	194.45±8.65	199.89±17.73	
6	9.504	1.250	895	893	苯乙烯	409.86±22.20	488.59±71.70	
7	9.571	1.079	897	888	邻二甲苯	403.52±38.64	528.23±25.44	$p<0.05$
8	10.971	0.546	937	929	α -侧柏烯	111.82±3.26	115.00±8.82	
9	11.238	0.857	944	944	3-丙基-环己烯	0.00±0.00	350.93±30.36	$p<0.01$
10	11.971	1.090	965	954	1-乙基-4-甲基苯	99.61±5.43	117.38±8.18	
11	12.171	1.098	971	972	三甲基苯	0.00±0.00	79.72±7.67	$p<0.01$
12	12.971	0.182	993	990	2,2,4,6,6-五甲基庚烷	93.50±12.29	195.21±19.54	$p<0.01$
13	12.971	0.655	993	991	β -月桂烯	381.31±11.14	0.00±0.00	$p<0.01$
14	13.105	1.218	997	990	1,2,4-三甲基苯	388.05±18.81	422.13±30.89	
15	13.238	0.266	1 000	1 000	正癸烷	157.98±9.15	182.98±25.79	
16	13.505	0.792	1 008	1 005	α -水芹烯	73.78±5.85	82.29±11.46	
17	13.971	0.819	1 020	1 017	α -松油烯	340.13±16.08	374.21±42.31	
18	14.171	1.411	1 026	1 013	1,2,3-三甲基苯	283.03±7.88	313.01±36.68	
19	14.238	1.095	1 028	1 025	对异丙基甲苯	314.77±6.83	346.02±43.32	
20	14.371	0.840	1 031	1 029	L-柠檬烯	3 404.04±125.92	3 721.69±319.78	
21	14.704	0.814	1 040	1 049	(Z)-罗勒烯	387.50±11.98	387.10±58.66	
22	15.038	0.822	1 049	1 048	(E)- β -罗勒烯	688.57±20.21	748.62±52.09	
23	15.504	0.965	1 061	1 060	γ -松油烯	523.49±55.49	594.38±84.05	
24	16.705	1.634	1 094	1 096	1-乙基-4-(甲基乙基)苯	0.00±0.00	468.45±36.65	$p<0.01$
25	16.971	0.387	1 100	1 100	正十一烷	370.84±41.33	842.87±81.30	$p<0.01$
26	17.238	1.636	1 107	1 105	2-乙基-1,3,3-三甲基-环己烯	0.00±0.00	454.05±56.53	$p<0.01$
27	19.505	1.669	1 160	1 157	戊基苯	0.00±0.00	44.39±3.47	$p<0.01$
28	20.704	3.326	1 189	1 182	萘	4 659.93±109.46	3 305.35±249.80	$p<0.01$
29	20.904	0.651	1 193	1 180	(E)-6-十二烯	204.84±17.20	189.49±10.99	
30	21.238	0.518	1 200	1 200	十二烷	3 660.10±370.86	3 258.11±396.28	
31	24.505	0.317	1 282	1 275	2,6,11-三甲基十二烷	0.00±0.00	160.07±19.11	$p<0.01$
32	25.105	2.890	1 298	1 297	2-甲基萘	1 661.22±65.06	1 407.05±127.54	
33	25.238	0.446	1 301	1 300	十三烷	4 310.00±173.52	4 870.43±493.30	

续表 2 汽蒸前后六堡茶样品中挥发性物质

Continue table 2 Volatile compounds in Liubao tea samples before and after steaming

序号	一维保留 时间/min	二维保留 时间/s	NIST 保留指数	实测 保留指数	化合物名称	汽蒸前后六堡茶挥发性物质含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)		显著性
						汽蒸前	汽蒸后	
34	25.771	3.052	1 317	1 307	1-甲基萘	1 155.81 \pm 49.64	996.84 \pm 76.10	
35	27.238	0.933	1 356	1 351	α -萜澄茄烯	98.68 \pm 3.12	88.55 \pm 9.86	
36	27.504	0.504	1 364	1 366	(Z)-7-十四烯	0.00 \pm 0.00	45.75 \pm 5.72	$p < 0.01$
37	27.505	0.867	1 364	1 375	异-喇叭烯	281.98 \pm 18.71	241.34 \pm 19.85	
38	28.038	0.977	1 379	1 372	衣兰烯	153.60 \pm 11.13	125.27 \pm 17.73	
39	28.171	1.023	1 382	1 376	古巴烯	397.00 \pm 23.69	332.24 \pm 40.69	
40	28.238	2.919	1 385	1 381	联苯	1 018.58 \pm 81.16	709.34 \pm 85.15	$p < 0.05$
41	28.371	0.501	1 388	1 407	3-亚甲基十三烷	0.00 \pm 0.00	539.07 \pm 56.79	$p < 0.01$
42	28.504	1.401	1 392	1 399	β -马榄烯	349.14 \pm 52.28	414.83 \pm 43.76	
43	28.571	0.482	1 393	1 392	十四碳烯	0.00 \pm 0.00	681.5 \pm 77.12	$p < 0.01$
44	28.638	1.192	1 395	1 386	isocomene	734.34 \pm 54.11	650.91 \pm 58.05	
45	28.704	2.600	1 398	1 391	2-乙基萘	639.27 \pm 94.10	709.28 \pm 71.70	
46	28.838	0.400	1 401	1 400	十四烷	3 553.82 \pm 113.94	3 720.38 \pm 367.49	
47	29.038	1.044	1 407	1 409	α -gurgujene	0.00 \pm 0.00	563.80 \pm 52.21	$p < 0.01$
48	29.104	2.574	1 410	1 419	1,7-二甲基萘	1 077.93 \pm 63.50	859.19 \pm 87.26	$p < 0.05$
49	29.171	0.844	1 411	1 394	倍半萜侧柏烯	125.60 \pm 5.99	0.00 \pm 0.00	$p < 0.01$
50	29.171	1.116	1 411	1 411	α -雪松烯	388.04 \pm 14.91	400.89 \pm 38.54	
51	29.171	0.850	1 411	1 415	(Z)- α -香柠檬烯	0.00 \pm 0.00	102.68 \pm 13.25	$p < 0.01$
52	29.305	1.303	1 415	1 406	长叶烯	412.65 \pm 8.08	408.25 \pm 27.08	
53	29.505	1.693	1 421	1 433	γ -榄香烯	453.00 \pm 60.09	558.78 \pm 91.14	
54	29.505	1.249	1 421	1 422	雪松烯	17 842.53 \pm 744.25	16 603.86 \pm 1 819.35	
55	29.638	2.689	1 426	1 422	1,6-二甲基萘	1 587.69 \pm 203.62	1 499.85 \pm 181.62	
56	29.772	1.223	1 429	1 419	石竹烯	5 217.63 \pm 267.95	4 234.09 \pm 615.74	
57	29.838	1.313	1 431	1 432	β -古巴烯	3 886.89 \pm 24.15	3 696.90 \pm 579.68	
58	30.172	1.316	1 441	1 429	(Z)-罗汉柏烯	2 428.17 \pm 48.93	2 148.65 \pm 306.07	
59	30.238	2.759	1 444	1 436	1,4-二甲基萘	497.75 \pm 30.64	367.35 \pm 50.06	$p < 0.05$
60	30.372	2.861	1 448	1 439	2,3-二甲基萘	132.38 \pm 10.29	91.23 \pm 7.92	$p < 0.05$
61	30.505	0.621	1 451	1 452	壬基环戊烷	594.19 \pm 18.19	534.15 \pm 75.22	
62	30.638	3.476	1 456	1 455	萜烯	1 969.94 \pm 78.46	1 090.90 \pm 31.62	$p < 0.01$
63	30.772	2.846	1 460	1 472	1,8-二甲基萘	389.27 \pm 26.12	307.88 \pm 30.41	$p < 0.05$
64	30.772	1.206	1 459	1 473	香树烯	256.20 \pm 2.19	211.25 \pm 16.85	$p < 0.05$
65	30.905	0.299	1 463	1 466	2,3,7-三甲基癸烷	474.31 \pm 50.94	447.12 \pm 49.79	
66	30.905	1.250	1 463	1 454	蛇麻烯	566.82 \pm 77.55	561.83 \pm 73.60	
67	31.305	1.256	1 475	1 475	4-epi- α -菖蒲二烯	1 764.86 \pm 171.49	1 403.38 \pm 139.48	
68	31.438	1.314	1 479	1 481	大根香叶烯 D	0.00 \pm 0.00	165.40 \pm 25.06	$p < 0.01$
69	31.571	1.213	1 483	1 477	γ -衣兰油烯	1 278.36 \pm 53.94	1 226.29 \pm 122.77	
70	31.705	1.266	1 487	1 483	α -姜黄烯	1 254.78 \pm 27.92	1 257.48 \pm 114.29	
71	31.772	3.218	1 490	1 482	二氢萜	234.84 \pm 28.88	448.54 \pm 68.25	$p < 0.05$
72	31.772	2.628	1 490	1 494	3-甲基-1,1'-联苯	359.68 \pm 9.53	355.08 \pm 49.67	
73	31.972	1.334	1 495	1 494	佛术烯	2 957.6 \pm 145.4	3 108.85 \pm 283.37	
74	32.038	0.214	1 496	1 500	正十五烷	268.41 \pm 16.92	725.42 \pm 92.72	$p < 0.01$
75	32.038	2.621	1 498	1 494	4-甲基-1,1'-联苯	140.20 \pm 18.90	122.60 \pm 9.97	
76	32.238	1.249	1 503	1 494	α -蛇床烯	3 941.56 \pm 434.85	3 801.56 \pm 226.67	
77	32.438	1.320	1 510	1 500	β -雪松烯	273.16 \pm 4.74	0.00 \pm 0.00	$p < 0.01$
78	32.438	0.965	1 510	1 508	α -金合欢烯	176.64 \pm 23.11	166.91 \pm 22.33	
79	32.438	1.351	1 510	1 509	α -呋卜任烯	0.00 \pm 0.00	221.48 \pm 25.13	$p < 0.01$
80	32.505	0.984	1 512	1 509	β -红没药烯	699.44 \pm 68.62	673.54 \pm 52.93	
81	32.571	1.337	1 515	1 505	δ -布黎烯	1 658.82 \pm 185.03	1 438.83 \pm 186.25	
82	33.038	1.261	1 531	1 518	δ -杜松烯	2 174.30 \pm 125.08	2 112.18 \pm 247.24	

续表2 汽蒸前后六堡茶样品中挥发性物质

Continue table 2 Volatile compounds in Liubao tea samples before and after steaming

序号	一维保留时间/min	二维保留时间/s	NIST保留指数	实测保留指数	化合物名称	汽蒸前后六堡茶挥发性物质含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)		显著性
						汽蒸前	汽蒸后	
83	33.105	1.564	1 533	1 531	(Z)-去氢白菖烯	1 250.73 \pm 92.73	1 158.23 \pm 107.11	
84	33.171	1.280	1 535	1 538	α -杜松烯	438.85 \pm 67.66	309.77 \pm 47.21	
85	33.238	2.424	1 538	1 537	1,4,6-三甲基萘	177.38 \pm 29.08	148.24 \pm 19.04	
86	33.505	2.570	1 547	1 546	2,2'-二甲基联苯	74.20 \pm 5.42	0.00 \pm 0.00	$p < 0.01$
87	33.705	1.771	1 554	1 542	α -二去氢菖蒲烯	591.86 \pm 32.12	540.95 \pm 42.38	
88	33.705	2.535	1 554	1 565	2,3,5-三甲基萘	331.84 \pm 42.56	0.00 \pm 0.00	$p < 0.01$
89	33.705	2.506	1 554	1 550	2,3,6-三甲基萘	0.00 \pm 0.00	154.36 \pm 24.38	$p < 0.01$
90	33.771	0.608	1 555	1 556	壬基环己烷	195.62 \pm 21.97	213.57 \pm 25.13	
91	34.305	0.337	1 573	1 570	3-甲基-十五烷	0.00 \pm 0.00	942.13 \pm 82.81	$p < 0.01$
92	34.638	0.752	1 585	1 577	(3E,7E)-4,8,12-三甲基十三碳-1,3,7,11-四烯	115.61 \pm 6.58	0.00 \pm 0.00	$p < 0.01$
93	34.772	2.685	1 593	1 583	芴	551.10 \pm 27.46	187.15 \pm 25.14	$p < 0.01$
94	35.105	0.029	1 601	1 600	十六烷	2 632.43 \pm 252.51	2 188.41 \pm 226.16	
95	35.905	0.025	1 646	1 632	(1-丁基庚基)苯	210.21 \pm 33.89	0.00 \pm 0.00	$p < 0.01$
96	35.905	0.027	1 646	1 632	(1-丙辛基)苯	0.00 \pm 0.00	258.26 \pm 15.20	$p < 0.01$
97	36.172	3.794	1 664	1 660	十一烷基环戊烷	0.00 \pm 0.00	700.47 \pm 58.55	$p < 0.01$
98	36.772	3.593	1 697	1 700	十七烷	3 577.68 \pm 454.18	2 885.31 \pm 269.06	
99	37.972	0.407	1 797	1 786	蒽	8 051.9 \pm 263.29	7 544.53 \pm 645.47	
醇类								$p < 0.01$
1	8.371	0.872	857	857	(Z)-3-己烯-1-醇	534.28 \pm 41.09	0.00 \pm 0.00	$p < 0.01$
2	9.705	0.707	901	900	2-庚醇	1 697.10 \pm 35.14	0.00 \pm 0.00	$p < 0.01$
3	12.505	0.898	980	980	1-辛烯-3-醇	580.21 \pm 30.97	457.53 \pm 49.10	$p < 0.05$
4	14.505	2.473	1 035	1 036	苯甲醇	1 337.10 \pm 100.34	52.91 \pm 8.18	$p < 0.01$
5	15.238	1.284	1 054	1 054	2,4,4-三甲基-2-环己烯-1-醇	353.82 \pm 15.46	421.24 \pm 28.68	$p < 0.05$
6	15.505	2.260	1 062	1 061	α -甲基苯甲醇	121.32 \pm 16.09	0.00 \pm 0.00	$p < 0.01$
7	15.972	1.121	1 074	1 074	芳樟醇氧化物 I	53 929.01 \pm 1 025.88	24 007.92 \pm 1 710.34	$p < 0.01$
8	16.572	1.298	1 090	1 086	芳樟醇氧化物 II	80 704.19 \pm 1 695.59	37 873.64 \pm 2 607.57	$p < 0.01$
9	16.972	1.240	1 101	1 099	芳樟醇	134 699.18 \pm 2 817.75	79 752.48 \pm 7 289.55	$p < 0.01$
10	17.572	3.220	1 116	1 116	苯乙醇	8 692.97 \pm 370.43	0.00 \pm 0.00	$p < 0.01$
11	17.638	1.742	1 117	1 116	exo-葑醇	0.00 \pm 0.00	143.65 \pm 12.75	$p < 0.01$
12	19.238	1.832	1 154	1 155	(Z)-罗勒烯醇	84.12 \pm 2.32	0.00 \pm 0.00	$p < 0.01$
13	20.038	2.178	1 173	1 171	芳樟醇氧化物 III	10 807.18 \pm 182.62	5 086.63 \pm 510.22	$p < 0.01$
14	20.238	2.096	1 178	1 173	芳樟醇氧化物 IV	35 937.97 \pm 556.76	18 286.86 \pm 1 009.37	$p < 0.01$
15	20.238	2.781	1 178	1 173	环氧芳樟醇	0.00 \pm 0.00	273.06 \pm 17.16	$p < 0.01$
16	20.439	1.919	1 182	1 177	4-松油醇	7 756.6 \pm 237.95	3 416.21 \pm 222.76	$p < 0.01$
17	20.705	2.651	1 189	1 183	α, α -4-三甲基苯甲醇	225.39 \pm 3.66	103.05 \pm 8.46	$p < 0.01$
18	20.971	2.047	1 195	1 189	α -萜品醇	130 959.34 \pm 1 730.84	80 681.52 \pm 5 917.03	$p < 0.01$
19	21.572	1.714	1 209	1 196	二氢香芹醇	610.10 \pm 91.16	0.00 \pm 0.00	$p < 0.01$
20	21.838	2.030	1 216	1 219	紫丁香醇 B	304.16 \pm 18.10	176.80 \pm 21.86	$p < 0.01$
21	22.438	1.717	1 231	1 228	橙花醇	787.65 \pm 62.85	463.44 \pm 55.42	$p < 0.01$
22	22.438	2.074	1 216	1 232	紫丁香醇 D	243.24 \pm 19.67	0.00 \pm 0.00	$p < 0.01$
23	23.505	1.709	1 258	1 255	香叶醇	4 465.17 \pm 359.30	867.35 \pm 91.55	$p < 0.01$
24	26.571	1.797	1 338	1 337	β -环高香叶醇	167.53 \pm 4.33	129.22 \pm 9.51	$p < 0.01$
25	30.505	1.423	1 451	1 452	二氢- β -紫罗兰醇	244.88 \pm 11.64	139.94 \pm 12.89	$p < 0.01$
26	34.171	1.156	1 569	1 564	(E)-橙花叔醇	334.27 \pm 9.84	337.37 \pm 55.24	
27	35.438	0.829	1 620	1 600	雪松醇	3 169.95 \pm 488.27	2 658.85 \pm 152.77	
28	36.105	0.300	1 657	1 640	T-杜松醇	1 091.62 \pm 140.47	1 136.56 \pm 169.31	
29	36.371	0.228	1 672	1 653	α -杜松醇	1 360.15 \pm 55.80	1 035.79 \pm 98.56	$p < 0.05$
30	36.771	0	1 694	1 695	左旋没药醇	351.57 \pm 48.64	0.00 \pm 0.00	$p < 0.01$

续表 2 汽蒸前后六堡茶样品中挥发性物质

Continue table 2 Volatile compounds in Liubao tea samples before and after steaming

序号	一维保留 时间/min	二维保留 时间/s	NIST 保留指数	实测 保留指数	化合物名称	汽蒸前后六堡茶挥发性物质含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)		显著性
						汽蒸前	汽蒸后	
酮类								
1	9.438	0.951	892	891	2-庚酮	78.23 \pm 7.70	60.97 \pm 3.73	$p < 0.01$
2	12.838	1.303	990	986	6-甲基-5-庚烯-2-酮	876.52 \pm 39.44	909.67 \pm 67.33	
3	14.638	1.383	1 038	1 036	2,6,6-三甲基环己酮	2 760.53 \pm 128.64	3 395.78 \pm 360.39	
4	15.505	2.873	1 062	1 063	1-(1H-吡咯-2-基)-乙酮	590.29 \pm 52.85	0.00 \pm 0.00	$p < 0.01$
5	15.905	2.300	1 073	1 073	(<i>E,E</i>)-3,5-辛二烯-2-酮	3 555.43 \pm 104.09	4 017.47 \pm 581.23	
6	16.705	1.959	1 094	1 091	3,5-辛二烯-2-酮	976.57 \pm 28.44	918.61 \pm 50.79	
7	17.372	1.928	1 110	1 108	2,2,6-三甲基-6-乙炔基四氢-2H-呋喃-3(4H)-酮	4 233.13 \pm 116.54	1 239.45 \pm 129.48	$p < 0.01$
8	17.905	2.915	1 123	1 123	异氟尔酮	1 509.18 \pm 47.02	715.26 \pm 44.55	$p < 0.01$
9	18.905	3.533	1 147	1 145	2,6,6-三甲基-环己烯-1,4-二酮	234.05 \pm 8.62	89.19 \pm 5.61	$p < 0.01$
10	19.038	2.657	1 150	1 145	樟脑	744.03 \pm 19.42	392.54 \pm 33.80	$p < 0.01$
11	19.571	3.040	1 162	1 156	桉酮	553.42 \pm 49.90	228.77 \pm 36.88	$p < 0.01$
12	19.971	3.754	1 172	1 183	2,2,6-三甲基-1,4-环己二酮	443.16 \pm 56.08	0.00 \pm 0.00	$p < 0.01$
13	22.238	2.822	1 226	1 243	优葛缕酮	1 672.16 \pm 183.91	1 255.23 \pm 120.30	
14	24.638	0.272	1 285	1 292	α -萘酮	149.76 \pm 8.46	0.00 \pm 0.00	$p < 0.01$
15	25.038	1.296	1 296	1 294	2-十一酮	583.37 \pm 39.41	528.44 \pm 41.39	
16	28.438	1.983	1 390	1 386	β -大马酮	181.71 \pm 9.40	167.52 \pm 10.02	
17	28.905	2.542	1 404	1 395	(<i>Z</i>)-茉莉酮	474.40 \pm 34.04	292.22 \pm 21.48	$p < 0.01$
18	29.772	1.868	1 429	1 433	6-甲基-6-(5-甲基-2-呋喃基)-2-庚酮	1 618.04 \pm 27.21	1 133.59 \pm 65.53	$p < 0.01$
19	29.905	1.686	1 433	1 426	α -紫罗兰酮	3 642.48 \pm 115.31	3 134.20 \pm 189.18	$p < 0.05$
20	30.305	1.619	1 445	1 433	二氢- β -紫罗兰酮	5 639.99 \pm 490.07	2 875.90 \pm 114.05	$p < 0.01$
21	30.638	1.485	1 455	1 453	香叶基丙酮	1 603.04 \pm 78.30	1 495.68 \pm 52.33	
22	31.705	2.022	1 487	1 485	脱二氢- β -紫罗兰酮	404.38 \pm 3.23	350.01 \pm 17.18	$p < 0.05$
23	31.838	1.792	1 491	1 491	β -紫罗兰酮	18 095.42 \pm 397.12	16 773.05 \pm 1 347.07	
醛类								
1	6.771	0.703	803	801	己醛	1 140.14 \pm 35.70	1 523.87 \pm 113.78	$p > 0.05$
2	8.305	1.087	854	854	(<i>E</i>)-2-己烯醛	234.56 \pm 18.11	186.97 \pm 18.20	
3	9.705	1.166	901	900	(<i>Z</i>)-4-庚烯醛	300.29 \pm 21.96	228.27 \pm 26.08	$p < 0.05$
4	9.771	0.990	903	901	庚醛	784.10 \pm 41.26	760.65 \pm 87.61	
5	14.905	2.646	1 046	1 045	苯乙醛	4 026.73 \pm 170.65	4 268.74 \pm 329.90	
6	15.172	2.464	1 053	1 046	1-乙基-1H-吡咯-2-甲醛	8 166.97 \pm 167.16	9 951.05 \pm 768.29	$p < 0.05$
7	15.438	1.374	1 060	1 060	(<i>E</i>)-2-辛烯醛	1 054.53 \pm 101.84	1 209.27 \pm 77.78	
8	17.172	1.365	1 106	1 104	正壬醛	9 182.03 \pm 1 381.61	5 415.68 \pm 534.13	$p < 0.05$
9	17.772	2.030	1 120	1 116	α -环柠檬醛	877.03 \pm 122.42	712.45 \pm 35.63	
10	19.571	1.900	1 162	1 162	(<i>E</i>)-2-壬烯醛	1 301.72 \pm 39.29	1 077.68 \pm 50.38	$p < 0.05$
11	20.305	3.096	1 180	1 182	苯甲醛	765.60 \pm 32.38	882.28 \pm 126.89	
12	21.371	2.618	1 205	1 201	藏红花醛	4 613.12 \pm 392.44	3 855.49 \pm 298.41	
13	21.505	1.455	1 208	1 206	正癸醛	5 122.85 \pm 746.62	1 600.44 \pm 153.09	$p < 0.01$
14	22.238	2.354	1 226	1 220	β -环柠檬醛	9 257.16 \pm 208.66	9 139.64 \pm 574.12	
15	23.038	0.728	1 246	1 263	(<i>Z</i>)-2-癸烯醛	95.17 \pm 13.59	0.00 \pm 0.00	$p < 0.01$
16	23.771	1.989	1 264	1 254	β -环高柠檬醛	1 054.99 \pm 14.85	1 022.91 \pm 51.31	
17	25.038	1.758	1 296	1 295	(<i>E,Z</i>)-2,4-癸二烯醛	192.72 \pm 1.95	0.00 \pm 0.00	$p < 0.01$
18	25.972	2.909	1 322	1 339	2,4,6-三甲基苯甲醛	340.90 \pm 23.40	138.14 \pm 6.47	$p < 0.01$
酯类								
1	16.838	2.516	1 098	1 094	苯甲酸甲酯	107.39 \pm 0.99	104.66 \pm 11.59	
2	17.972	1.472	1 124	1 126	辛酸甲酯	130.48 \pm 3.41	97.90 \pm 8.82	$p < 0.01$
3	21.171	2.865	1 200	1 192	水杨酸甲酯	27 350.54 \pm 3 103.38	607.77 \pm 42.09	$p < 0.01$

续表2 汽蒸前后六堡茶样品中挥发性物质

Continue table 2 Volatile compounds in Liubao tea samples before and after steaming

序号	一维保留时间/min	二维保留时间/s	NIST保留指数	实测保留指数	化合物名称	汽蒸前后六堡茶挥发性物质含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)		显著性
						汽蒸前	汽蒸后	
4	24.171	2.406	1 275	1 286	苯甲酸丙酯	897.66±49.00	817.17±109.34	
5	25.238	2.204	1 301	1 301	甲基桂酸酯	242.74±5.81	162.65±15.97	$p<0.01$
6	26.171	1.592	1 327	1 322	香叶酸甲酯	2 572.26±22.25	1 428.11±106.52	$p<0.01$
7	27.171	1.531	1 355	1 350	α -萜烯基乙酸酯	86.58±2.61	0.00±0.00	$p<0.01$
8	28.038	2.126	1 379	1 377	苯甲酸丁酯	0.00±0.00	341.38±40.54	$p<0.01$
9	28.171	1.702	1 383	1 388	丙酸异冰片酯	1 034.49±55.55	837.46±73.26	$p<0.05$
10	34.438	2.060	1 579	1 570	(Z)-3-苯甲酸己烯酯	459.66±70.73	558.00±83.50	
甲氧基苯类								$p<0.01$
1	14.038	1.727	1 023	1 021	1-甲氧基-4-甲基苯	224.85±2.95	0.00±0.00	$p<0.01$
2	17.571	2.309	1 115	1 110	1-乙基-4-甲氧基苯	609.96±27.80	253.03±19.74	$p<0.01$
3	18.971	3.845	1 149	1 148	1,2-二甲氧基苯	26 841.67±352.44	9 673.98±1 181.04	$p<0.01$
4	19.305	2.991	1 156	1 156	1-亚乙基-4-甲氧基苯	8 485.33±100.80	2 174.59±147.96	$p<0.01$
5	19.771	3.341	1 167	1 169	1,4-二甲氧基苯	3 944.86±132.81	0.00±0.00	$p<0.01$
6	21.305	2.530	1 203	1 196	1-烯丙基-4-甲氧基苯	248.02±15.04	174.41±16.69	$p<0.01$
7	22.904	3.060	1 243	1 233	3,4-二甲氧基甲苯	3 493.14±17.08	1 717.09±151.23	$p<0.01$
8	24.038	2.805	1 271	1 274	3,5-二甲氧基甲苯	203.59±32.46	97.03±11.74	$p<0.05$
9	24.771	2.577	1 290	1 287	(E)-1-甲氧基-4-(1-丙烯基)苯	292.98±3.41	115.38±11.97	$p<0.01$
10	25.771	3.383	1 317	1 313	1,2,3-三甲氧基苯	36 501.57±508.21	20 859.78±1 499.13	$p<0.01$
11	26.171	3.136	1 328	1 320	4-乙基-1,2-二甲氧基苯	2 297.45±83.90	1 430.10±142.87	$p<0.01$
12	27.771	2.987	1 372	1 369	4-亚乙基-1,2-二甲氧基苯	1 400.73±40.05	363.27±56.82	$p<0.01$
13	27.904	3.360	1 376	1 372	1,2,4-三甲氧基苯	23 586.67±574.20	15 490.88±1 171.34	$p<0.01$
14	29.038	2.885	1 408	1 407	1,2,3-三甲氧基-5-甲基苯	801.91±55.94	634.54±43.33	$p<0.05$
15	29.038	2.648	1 408	1 403	1,2-二甲氧基-4-(2-丙烯基)苯	1 252.13±8.55	714.17±52.59	$p<0.01$
16	32.104	2.743	1 500	1 500	1,2-二甲氧基-4-烯丙基苯	2 068.72±40.67	1 483.04±99.68	$p<0.01$
咪唑类								$p>0.05$
1	4.638	0.176	704	703	2-乙基咪唑	0.00±0.00	776.42±86.30	$p<0.01$
2	4.905	0.251	717	707	2,5-二甲基咪唑	0.00±0.00	273.11±42.56	$p<0.01$
3	9.505	0.734	894	893	2-正丁基咪唑	53.68±1.20	61.21±2.63	$p<0.05$
4	12.971	0.881	993	993	2-戊基-咪唑	2 908.92±75.45	3 082.69±243.03	
5	13.238	1.965	1 001	1 000	苯并咪唑	0.00±0.00	85.04±9.23	$p<0.01$
6	13.371	1.067	1 004	1 002	(E)-2-(2-戊烯基)咪唑	1 759.6±183.55	1 724.34±231.20	
7	21.971	3.115	1 220	1 224	二氢苯并咪唑	287.81±20.78	0.00±0.00	$p<0.01$
8	23.838	3.572	1 267	1 259	7-甲氧基-苯并咪唑	414.25±15.48	174.46±12.06	$p<0.01$
9	31.238	2.669	1 474	1 468	5-甲氧基-6,7-二甲基苯并咪唑	1 580.07±156.87	1 141.63±118.99	$p<0.05$
10	32.771	3.104	1 523	1 515	二苯并咪唑	0.00±0.00	1 237.92±142.38	$p<0.01$
酚类								$p>0.05$
1	21.972	3.089	1 220	1 223	4-乙烯基苯酚	0.00±0.00	346.33±25.30	$p<0.01$
2	32.571	1.525	1 515	1 514	2,4-二叔丁基苯酚	2 281.39±243.04	2 203.72±124.80	
内酯类								$p<0.05$
1	12.505	3.518	981	983	α -甲基- γ -巴豆内酯	813.04±114.33	0.00±0.00	$p<0.01$
2	19.771	1.852	1 167	1 169	脱氢缬氨酸内酯	637.28±48.40	0.00±0.00	$p<0.01$
3	33.304	3.517	1 541	1 537	二氢猕猴桃内酯	6 076.35±329.29	5 659.38±546.78	
含氮类								$p<0.05$
1	7.171	1.073	817	821	1-乙基-1H-吡咯	621.57±13.76	823.34±69.07	$p<0.05$
2	16.238	1.694	1 081	1 081	3-乙基-2,5-二甲基吡嗪	461.81±25.43	0.00±0.00	$p<0.01$
3	16.504	1.895	1 089	1 084	2-乙基-3,5-二甲基吡嗪	163.26±5.91	0.00±0.00	$p<0.01$
4	22.972	0.005	1 244	1 238	喹啉	0.00±0.00	105.72±4.90	$p<0.01$
5	25.105	0.305	1 297	1 295	吡啶	0.00±0.00	247.95±38.05	$p<0.01$

由表2可知,共检测出216种挥发性化合物,从汽蒸前六堡茶中检测出189种,从汽蒸后六堡茶中检测出188种。

在鉴定出的挥发性化合物中,碳氢类化合物数量最多,为99种,含量较高的为雪松烯、蒎、石竹烯、萘、 α -蛇床烯、十七烷、十三烷、 β -古巴烯、十四烷、*L*-柠檬烯、十二烷、佛术烯、(*Z*)-罗汉柏烯、十六烷、 δ -杜松烯、4-*epi*- α -菖蒲二烯、蒈烯、1,6-二甲基萘、2-甲基萘、 δ -布黎烯、(*Z*)-去氢白菖烯、 α -姜黄烯、 γ -衣兰油烯、对二甲苯、1,7-二甲基萘、联苯和1-甲基萘,其中雪松烯、石竹烯和 δ -杜松烯均呈现木香气味,被鉴定对六堡茶木香属性起贡献作用^[11-12]; *L*-柠檬烯呈现柠檬的气味,被鉴定对六堡茶果香属性起贡献作用^[13],饱和烃类化合物一般都具有较高的阈值和较低的气味强度,对整体香气的贡献较小^[14]。

醇类化合物检测出30种,含量较高的为芳樟醇、 α -萜品醇、芳樟醇氧化物II、芳樟醇氧化物I、芳樟醇氧化物IV、芳樟醇氧化物III、苯乙醇、4-松油醇、香叶醇、雪松醇、2-庚醇、 α -杜松醇、苯甲醇和*T*-杜松醇。芳樟醇呈现令人愉悦的“花香”气味,被鉴定是六堡茶花香属性主要的贡献者,也被鉴定是各类茶叶特征香气形成的关键化合物^[15]; α -萜品醇和4-松油醇呈现丁香气味,被鉴定对发酵茶特征香气的形成起贡献作用^[16]; 芳樟醇氧化物(芳樟醇氧化物I、芳樟醇氧化物II、芳樟醇氧化物III和芳樟醇氧化物IV)呈现“花香”和“木香”气味,在半发酵和发酵茶中含量较高^[17-18]; 苯乙醇和香叶醇呈现令人愉悦的玫瑰花香,被鉴定对红茶特征香气的形成起关键作用^[19]; 雪松醇、 α -杜松醇和*T*-杜松醇呈现木香气味,对六堡茶木香属性起主要的贡献^[20]。

酮类化合物检测出23种,含量较高的为 β -紫罗兰酮、二氢- β -紫罗兰酮、2,2,6-三甲基-6-乙基四氢-2H-呋喃-3(4H)-酮、 α -紫罗兰酮、(*E,E*)-3,5-辛二烯-2-酮、2,6,6-三甲基环己酮、香叶基丙酮、6-甲基-6-(5-甲基-2-呋喃基)-2-庚酮、异氟尔酮、优葛缕酮和3,5-辛二烯-2-酮。 β -紫罗兰酮、二氢- β -紫罗兰酮和 α -紫罗兰酮3种类胡萝卜素衍生物,均呈现木香、花香气味,被鉴定对多种茶叶特征香气的形成起关键作用^[21-22]; 香叶基丙酮呈现新鲜和清新的玫瑰花香,被鉴定是红茶特征香气形成的关键化合物之一^[23]。

醛类化合物检测出18种,含量较高的为 β -环柠檬醛、1-乙基-1H-吡咯-2-甲醛、正壬醛、正癸醛、藏红花醛、苯乙醛和(*E*)-2-壬烯醛。醛类被认为主要通过脂质氧化和分解产生,该类物质一般具有较低的气味阈值,对六堡茶香气形成有显著贡献, β -环柠檬醛具有草药、甜味和烟草气味,被鉴定对普洱茶和茯砖茶香气的形成起贡献作用^[24]; 1-乙基-1H-吡咯-2-甲醛、藏红花醛和苯乙醛呈现绿草气味,被鉴定存在于茯砖茶中^[25]; 正

壬醛呈现脂肪和玫瑰花气味,正癸醛呈现草药和脂肪气味,被检测到对后发酵茶整体香气的形成起贡献作用^[26]; (*E*)-2-壬烯醛呈现脂肪和绿草气味,被检测到在普洱茶中具有较高的稀释因子^[27]。

甲氧基苯类化合物检测出16种,含量较高的为1,2,3-三甲氧基苯、1,2-二甲氧基苯、1,2,4-三甲氧基苯、1-亚乙基-4-甲氧基苯、1,4-二甲氧基苯、3,4-二甲氧基甲苯、4-乙基-1,2-二甲氧基苯、1,2-二甲氧基-4-烯丙基苯、4-亚乙基-1,2-二甲氧基苯和1,2-二甲氧基-4-(2-丙烯基)苯。甲氧基苯类化合物是对后发酵茶类(六堡茶、普洱茶等)陈香风味形成起关键贡献作用的化合物,被认为是发酵过程中微生物降解、甲基化儿茶素以及堆积发酵中的热降解形成的一类物质^[17]。

酯类化合物检测出10种,含量较高的为水杨酸甲酯和香叶酸甲酯。水杨酸甲酯呈现冬青和薄荷气味,不仅存在于六堡茶,在其他类黑茶中也被检测到^[15]; 香叶酸甲酯呈现花香、果香和药草香,对六堡茶特征香气的形成起一定的贡献作用。

呋喃类化合物检测出10种,含量较高的为2-戊基-呋喃、(*E*)-2-(2-戊烯基)呋喃、5-甲氧基-6,7-二甲基苯并呋喃。呋喃类化合物对后发酵茶整体香气的形成贡献度较小,其中2-戊基呋喃被描述为果味和绿草气味,在普洱茶中被检测到呈现较低的气味强度^[27]。

酚类、内酯类和含氮类化合物分别被检测出2种、3种和5种,含量较高的分别为2,4-二叔丁基苯酚、二氢猕猴桃内酯和1-乙基-1H-吡咯。2,4-二叔丁基苯酚被描述为酚类和草本气味,存在于六堡茶和其他类黑茶中^[28]; 二氢猕猴桃内酯被呈现木质气味,来源于六堡茶发酵过程中微生物或湿热作用的 β -胡萝卜素降解^[29]。

2.3 汽蒸前后六堡茶挥发性物质差异性分析

由表2可知,通过*T*检验分析,汽蒸前后六堡茶中碳氢类、醛类、呋喃类和酚类化合物总含量无显著性差异($p>0.05$)。相比于汽蒸前的六堡茶,内酯类和含氮类化合物的总含量在汽蒸后六堡茶中的含量显著降低($p<0.05$); 醇类、酮类、酯类和甲氧基苯类化合物的总含量在汽蒸后六堡茶中的含量极显著降低($p<0.01$)。

碳氢类化合物中,汽蒸前后含量差异显著($p<0.05$)的化合物有10种,含量差异极显著($p<0.01$)的化合物有32种,含量无显著差异($p>0.05$)的化合物有57种; 醇类化合物中,汽蒸前后六堡茶中含量差异显著($p<0.05$)的化合物有3种,含量差异极显著($p<0.01$)的化合物有24种,含量无显著差异($p>0.05$)的化合物仅有3种; 酮类化合物中,汽蒸前后含量差异显著($p<0.05$)的化合物有3种,含量差异极显著($p<0.01$)的化合物有11种,含量无显著差异($p>0.05$)的化合物有9种; 醛类化合物中,汽蒸前后六堡茶中含量差异显著

($p < 0.05$)的化合物有5种,含量差异极显著($p < 0.01$)的化合物有4种,含量无显著差异($p > 0.05$)的化合物有9种;甲氧基苯类化合物中,汽蒸前后六堡茶中含量差异显著($p < 0.05$)的化合物有2种,含量差异极显著($p < 0.01$)的化合物有14种;酯类化合物中,汽蒸前后六堡茶中含量差异显著($p < 0.05$)的化合物有1种,含量差异极显著($p < 0.01$)的化合物有6种,含量无显著差异($p > 0.05$)的化合物有3种;呋喃化合物中,汽蒸前后六堡茶中含量差异显著($p < 0.05$)的化合物有2种,含量差异极显著($p < 0.01$)的化合物有6种,含量无显著差异($p > 0.05$)的化合物有2种;酚类化合物中,汽蒸前后六堡茶中含量差异极显著($p < 0.01$)的化合物有1种,含量无显著差异($p > 0.05$)的化合物有1种;内酯类化合物中,汽蒸前后六堡茶中含量差异极显著($p < 0.01$)的化合物有2种,含量无显著差异($p > 0.05$)的化合物有1种;含氮类化合物中,汽蒸前后六堡茶中含量差异显著($p < 0.05$)的化合物有1种,含量差异极显著($p < 0.01$)的化合物有4种。通过对比汽蒸前后六堡茶中化合物的变化和感官审评的结果,可以得出汽蒸过程损失一些气味化合物可明显提升六堡茶整体风味品质,该研究可为六堡茶品质的再提升提供理论参考。

3 结论

采用感官评价和顶空固相微萃取(headspace solid phase microextraction, HS-SPME)结合全二维气相色谱-飞行时间质谱(comprehensive two-dimensional gas chromatograph-time of flight mass spectrometer, GC×GC-TOF-MS)对汽蒸前后六堡茶风味品质和挥发性物质进行研究,结果表明,汽蒸能够有效提高六堡茶品质,汤色上由橙、较亮转变为橙红、明亮,滋味上酸味、涩味以及醇厚感得到有效改善,香气上汽蒸后堆味、豆豉味等不利于六堡茶品质的气味得到有效去除,发酵气也得到一定的减弱。采用HS-SPME结合GC×GC-TOF-MS共检测出216种挥发性物质,从汽蒸前后六堡茶中分别检测出189种和188种挥发性化合物,碳氢类化合物最多(99种),其次为醇类(30种)、酮类(23种)、醛类(18种)、甲氧基苯类(16种)、酯类(10种)、呋喃类(10种)、含氮类(5种)、内酯类(3种)和酚类(2种)化合物。通过 T 检验分析,汽蒸前后六堡茶中碳氢类、醛类、呋喃类和酚类化合物总含量无显著差异($p > 0.05$);内酯类和含氮类化合物的总含量显著降低($p < 0.05$);醇类、酮类、酯类和甲氧基苯类化合物的总含量极显著降低($p < 0.01$)。汽蒸前后六堡茶中碳氢类、醇类、酮类、醛类、甲氧基苯类、酯类、呋喃类、酚类、内酯类和含氮类化合物中差异显著($p < 0.05$)的化合物分别有10、3、3、5、2、1、2、0、2种和1种;差异极显著($p < 0.01$)的化合物分别有32、24、11、4、14、6、6、1、2种和4种。通过

对比汽蒸前后六堡茶中化合物的变化和感官审评的结果,可以得出汽蒸过程损失一些气味化合物可明显提升六堡茶品质。

参考文献:

- [1] 许皓,肖虹菲,林家威,等.现代工艺六堡茶渥堆过程中茶汤色泽及主要滋味品质成分动态变化[J].食品与发酵工业,2024,50(11):317-326.
XU Hao, XIAO Hongfei, LIN Jiawei, et al. Dynamic changes of color and main taste quality components of tea soup during pile fermentation of modern technology Liubao tea[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(11): 317-326.
- [2] 黄刚骅,张均伟,谢加仕,等.影响六堡茶品质形成的微生物研究现状[J].茶叶通讯,2024,51(2):53-64.
HUANG Ganghua, ZHANG Junwei, XIE Jiashi, et al. Study status of microorganisms affecting the formation of quality of Liupao tea [J]. Journal of Tea Communication, 2024, 51(2): 53-64.
- [3] WANG J, ZHANG J W, CHEN Y, et al. The relationship between microbial dynamics and dominant chemical components during Liupao tea processing[J]. Food Bioscience, 2021, 43: 101315.
- [4] LI Q, HONG X, ZHENG X X, et al. Characterization of key aroma compounds and core functional microorganisms in different aroma types of Liupao tea[J]. Food Research International, 2022, 152: 110925.
- [5] 滕翠琴,李锦锋,庞月兰,等.不同陈化年份传统工艺六堡茶品质差异研究[J].安徽农业科学,2024,52(7):174-177,199.
TENG Cuiqin, LI Jinfeng, PANG Yuelan, et al. Study on the quality difference of traditional process Liupao tea in different aging years[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2024, 52(7): 174-177, 199.
- [6] 温立香,张芬,何梅珍,等.陈香六堡茶品质特征及香气质量评价方法建立[J].食品工业科技,2021,42(2):230-236.
WEN Lixiang, ZHANG Fen, HE Meizhen, et al. Quality characteristics of stale flavor Liupao teas and establishment for evaluation method of aroma quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(2): 230-236.
- [7] MA L J, GAO M M, HU J N, et al. Characterization of the key active aroma compounds in Pu-erh tea using gas chromatography-time of flight/mass spectrometry-olfactometry combined with five different evaluation methods[J]. European Food Research and Technology, 2022, 248(1): 45-56.
- [8] ZHENG X X, HU T F, XIE H, et al. Characterization of the key odor-active compounds in different aroma types of Fu brick tea using HS-SPME/GC-MSO combined with sensory-directed flavor analysis[J]. Food Chemistry, 2023, 426: 136527.
- [9] DU L P, WANG C, ZHANG C X, et al. Characterization of the volatile and sensory profile of instant Pu-erh tea using GC×GC-TOFMS and descriptive sensory analysis[J]. Microchemical Journal, 2019, 146: 986-996.
- [10] WEN S, JIANG R G, AN R, et al. Effects of pile-fermentation on the aroma quality of dark tea from a single large-leaf tea variety by GC×GC-QTOFMS and electronic nose[J]. Food Research International, 2023, 174(Pt 1): 113643.
- [11] 刘泽森,邓庆森,何志强,等.槟榔香六堡茶的特征香气成分研究[J].农业研究与应用,2016(3):36-42.
LIU Zesen, DENG Qingsen, HE Zhiqiang, et al. Research on the characteristic aroma components of Areca-flavored Liupao tea[J]. Agricultural Research and Application, 2016(3): 36-42.

- [12] 马士成, 王梦琪, 刘春梅, 等. 六堡茶挥发性成分中关键香气成分分析[J]. 食品科学, 2020, 41(20): 191-197.
MA Shicheng, WANG Mengqi, LIU Chunmei, et al. Analysis of volatile composition and key aroma compounds of Liupao tea[J]. Food Science, 2020, 41(20): 191-197.
- [13] 覃榕珍, 黄丽, 滕建文, 等. 基于 GC-IMS 法分析不同烘焙温度对六堡茶香气品质的影响[J]. 食品科技, 2022, 47(5): 282-290.
QIN Rongzhen, HUANG Li, TENG Jianwen, et al. Effects of different baking temperatures on the aroma of Liupao tea based on GC-IMS[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(5): 282-290.
- [14] LV S D, WU Y S, WEI J F, et al. Application of gas chromatography-mass spectrometry and chemometrics methods for assessing volatile profiles of Pu-erh tea with different processing methods and ageing years[J]. RSC Advances, 2015, 5(107): 87806-87817.
- [15] MA W J, ZHU Y, SHI J, et al. Insight into the volatile profiles of four types of dark teas obtained from the same dark raw tea material [J]. Food Chemistry, 2021, 346: 128906.
- [16] LIU C, WANG C, ZHENG T T, et al. Characterization of key odor-active compounds in Sun-dried black tea by sensory and instrumental-directed flavor analysis[J]. Foods, 2022, 11(12): 1740.
- [17] PANG X L, YU W S, CAO C D, et al. Comparison of potent odorants in raw and ripened Pu-erh tea infusions based on odor activity value calculation and multivariate analysis: Understanding the role of pile fermentation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(47): 13139-13149.
- [18] FENG Z H, LI Y F, LI M, et al. Tea aroma formation from six model manufacturing processes[J]. Food Chemistry, 2019, 285: 347-354.
- [19] XU Y Q, WANG C, LI C W, et al. Characterization of aroma-active compounds of Pu-erh tea by headspace solid-phase microextraction (HS-SPME) and simultaneous distillation-extraction (SDE) coupled with GC-olfactometry and GC-MS[J]. Food Analytical Methods, 2016, 9(5): 1188-1198.
- [20] 舒娜. 六堡茶关键风味物质研究[D]. 重庆: 西南大学, 2021.
SHU Na. Study on key flavor substances of Liubao tea[D]. Chongqing: Southwest University, 2021.
- [21] ZHAI X T, ZHANG L, GRANVOGL M, et al. Flavor of tea (*Camellia sinensis*): A review on odorants and analytical techniques[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2022, 21(5): 3867-3909.
- [22] XU X D, XU R, JIA Q, et al. Identification of dihydro- β -ionone as a key aroma compound in addition to C8 ketones and alcohols in *Volvariella volvacea* mushroom[J]. Food Chemistry, 2019, 293: 333-339.
- [23] WANG C, LI J, WU X J, et al. Pu-erh tea unique aroma: Volatile components, evaluation methods and metabolic mechanism of key odor-active compounds[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 124: 25-37.
- [24] WANG C, LI J, ZHANG Y, et al. Effects of electrostatic spray drying on the sensory qualities, aroma profile and microstructural features of instant Pu-erh tea[J]. Food Chemistry, 2022, 373(Pt B): 131546.
- [25] LI Q, LI Y D, LUO Y, et al. Characterization of the key aroma compounds and microorganisms during the manufacturing process of Fu brick tea[J]. LWT - Food Science and Technology, 2020, 127: 109355.
- [26] LV H P, ZHONG Q S, LIN Z, et al. Aroma characterisation of Pu-erh tea using headspace-solid phase microextraction combined with GC/MS and GC-olfactometry[J]. Food Chemistry, 2012, 130(4): 1074-1081.
- [27] 念波, 焦文文, 和明珠, 等. 花果香与陈香型普洱茶生化成分与香气物质的比较[J]. 现代食品科技, 2020, 36(2): 241-248.
NIAN Bo, JIAO Wenwen, HE Mingzhu, et al. Determination and comparison of biochemical components and aroma substances in the Pu-erh teas with mellow flavor and floral-fruity aroma[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(2): 241-248.
- [28] 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 Wenzhe. Study on characteristic aroma compounds of Pu'er Tea[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2020.
- [29] 陈国和, 胡腾飞, 王乐涯, 等. 基于 HS-SPME-GC-O-MS 结合 OAV 鉴定槟榔香六堡茶关键香气物质[J/OL]. 食品与发酵工业, 1-9[2023-11-02]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.037083>.
CHEN Guohe, HU Tengfei, WANG Leya, et al. Identification of the key aroma components in areca-flavor Liupao tea based on HS-SPME-GC-O-MS and odor activity value[J]. Food and Fermentation Industries: 1-9[2023-11-02]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.037083>.

责任编辑:冯娜

收稿日期:2023-11-19