



# 基于 SPME-GC×GC-TOFMS 技术的丹参红茶和丹参绿茶香气成分分析

尹峰<sup>1</sup>, 罗建群<sup>2</sup>, 吴曼曼<sup>2</sup>, 赵宏光<sup>3</sup>, 李凯旋<sup>4</sup>, 张晓丹<sup>1</sup>

(1.浙江理工大学生命科学与医药学院,杭州 310018;2.广州禾信仪器股份有限公司,广州 510530;3.陕西天士力植物药业有限责任公司,陕西商洛 726000;4.暨南大学质谱仪器与大气环境研究所,广州 510632)

**摘要:**为探究丹参红茶(*Salvia miltiorrhiza* Bge. black tea, Smbt)和丹参绿茶(*S. miltiorrhiza* Bge. green tea, Smgt)香气差异的物质基础,采用固相微萃取(Solid phase microextraction, SPME)技术分别对其香气成分进行提取,并通过全二维气相色谱-飞行时间质谱联用(Comprehensive two-dimensional gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry, GC×GC-TOFMS)对香气成分进行定性定量分析。结果表明:从 Smbt 中鉴定出 245 种香气成分,Smgt 中鉴定出 233 种香气成分;2 种茶叶的共有香气成分有 124 种,以醇类、醛类、烯烃和饱和烷烃为主,这 4 类化合物占比高于 70%,构成这 2 种茶叶的基本香气成分。醇类、醛类、烯烃和饱和烷烃等物质在 2 种茶叶中的占比不同,Smbt 中醇类占比最高(25.771%),而 Smgt 中醛类占比最高(30.435%),饱和烷烃的占比均较低;正己醇等化合物只存在于一种茶叶中。香气成分的差异导致 2 种茶叶呈现不同的香型。该文为丹参叶的制茶工艺提供参考,并为丹参地上部分的进一步开发利用奠定理论基础。

**关键词:**丹参红茶;丹参绿茶;固相微萃取;全二维气相色谱-飞行时间质谱;香气成分

**中图分类号:** TS272.5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851(2023)09-0638-07

**引文格式:**尹峰,罗建群,吴曼曼,等.基于 SPME-GC×GC-TOFMS 技术的丹参红茶和丹参绿茶香气成分分析[J].浙江理工大学学报(自然科学),2023,49(5):638-644.

**Reference Format:** YIN Feng, LUO Jianqun, WU Manman, et al. Analysis of the aroma components in *Salvia miltiorrhiza* Bge. black tea and *S.miltiorrhiza* Bge. green tea based on SPME-GC×GC-TOFMS[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2023, 49(5): 638-644.

## Analysis of the aroma components in *Salvia miltiorrhiza* Bge. black tea and *S.miltiorrhiza* Bge. green tea based on SPME-GC×GC-TOFMS

YIN Feng<sup>1</sup>, LUO Jianqun<sup>2</sup>, WU Manman<sup>2</sup>, ZHAO Hongguang<sup>3</sup>, LI Kaixuan<sup>4</sup>, ZHANG Xiaodan<sup>1</sup>

(1. College of Life Science and Medicine, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. Guangzhou Hexin Instrument Co., Ltd., Guangzhou 510530, China; 3. Shanxi Tasly Plant

Pharmaceutical Co., Ltd., Shangluo 726000, China; 4. Institute of Mass Spectrometer and

Atmospheric Environment, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

**Abstract:** To explore the material basis of the aroma difference between *Salvia miltiorrhiza* Bge. black tea (Smbt) and *S.miltiorrhiza* Bge. green tea (Smgt), solid phase microextraction (SPME) was used to extract the aroma components, and qualitative and quantitative analyses of the aroma components were performed by comprehensive two-dimensional gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry (GC×GC-TOFMS). The results show that 245 aroma components are identified from Smbt and 233 from Smgt. From both kinds of tea, the 124 shared aroma components detected are dominated by alcohols,

收稿日期: 2023-02-17 网络出版日期: 2023-06-08

基金项目: 广州市黄埔区广州开发区科技计划项目(2020GH16)

作者简介: 尹峰(1996—),男,江西赣州人,硕士研究生,主要从事食品工艺方面的研究。

通信作者: 张晓丹, E-mail: zxd\_211@aliyun.com

aldehydes, olefins and saturated alkanes, which account for over 70% and constitute the basic aroma components of the two kinds of tea. However, the proportions of alcohols, aldehydes, olefins and saturated alkanes in these two kinds of tea are different. Specifically, Smbt has the highest proportion of alcohol (25.771%), while Smgt has the highest proportion of aldehyde (30.435%), and the proportion of saturated alkanes is relatively low in both types of tea. Additionally, such compounds as hexanol are only found in one kind of tea. The difference in aroma components leads to two types of tea showing different aroma types. This study provides some reference for the tea making process of *S.miltiorrhiza* Bge. leaves and lays a foundation for the development and utilization of the aboveground part of *S.miltiorrhiza* Bge.

**Key words:** *Salvia miltiorrhiza* Bge. black tea; *S. miltiorrhiza* Bge. green tea; solid phase microextraction; comprehensive two-dimensional gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry; aroma components

## 0 引 言

丹参(*Salvia miltiorrhiza* Bge)是唇形科鼠尾草属植物,具有活血祛瘀、通经止痛、清心除烦、凉血消痛的功效<sup>[1]</sup>。丹参作为传统大宗中药材,应用广泛,需求量大。丹参以根茎入药,地上部分一般不做药用,往往被丢弃<sup>[2]</sup>。丹参地上部分约占全草重量的 60%~70%<sup>[3]</sup>,且含有酚酸类、黄酮类、三萜类、甾体类等化合物<sup>[4]</sup>,如地上部分得不到合理地利用容易造成资源浪费和环境污染。关于丹参地上部分的开发利用,顾俊菲等<sup>[5]</sup>提出了精细高值化开发利用、转化增效资源开发利用和粗放低值化开发利用三大策略,由丹参叶制成的保健茶富含丹酚酸及多种微量元素,具有抗氧化、抗衰老、促进睡眠等功效。

茶叶香气是体现茶叶品质的重要指标之一。在茶叶中鉴定出来的香气化合物有 700 多种<sup>[6]</sup>。茶叶香气成分提取的常用方法有水蒸气蒸馏法<sup>[7]</sup>、同时蒸馏萃取法<sup>[8-9]</sup>、超临界流体萃取法<sup>[10]</sup>和旋转锥体柱提取法等<sup>[11]</sup>。固相微萃取(Solid phase microextraction, SPME)技术是一种集采样、萃取、浓缩、进样于一体的样品制备技术,能够极大简化样品的前处理过程,是复杂基质中目标化合物的高灵敏度分析的有效途径<sup>[12-14]</sup>。全二维气相色谱-飞行时间质谱联用(Comprehensive two-dimensional gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry, GC×GC-TOFMS)是利用 2 根性质不同的色谱柱,将第一维色谱柱的流出物再经第二维色谱柱中进行两次分离,具有高分辨率、高灵敏度、高峰容量的特点,能够有效解决一维气相色谱-质谱联用(Gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)技术灵敏度低、分辨能力不足的问题<sup>[15-17]</sup>,该技术广泛应用于石油化工、食品、药物、农药残留和代谢组学等领域。

本文采用 SPME-GC×GC-TOFMS 技术对丹参红茶(*Salvia miltiorrhiza* Bge. black tea, Smbt)和丹参绿茶(*S.miltiorrhiza* Bge. green tea, Smgt)的香气成分进行提取和定性、定量分析,以初步探明 2 种茶叶香气差异的物质基础,从而为丹参叶的制茶工艺提供技术指导,并为丹参地上部分的相关开发利用奠定一定的理论基础。

## 1 实验部分

### 1.1 材料与仪器

制作 Smbt 的 Smgt 的丹参鲜叶由陕西天士力植物药业有限责任公司提供。

GGT 0620 型全二维气相色谱-飞行时间质谱联用仪(广州禾信仪器股份有限公司)、全自动多功能在线前处理进样器(瑞士 CTC 公司)和 SPME Arrow 1.10 mm DVB/Carbon WR/PDMS 固相微萃取头(广州智达实验室科技有限公司)。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 Smbt 的制备

将丹参鲜叶摊晾在萎凋槽上,晾晒至颜色暗绿和叶质柔软,放入揉捻机中揉捻 90 min 使叶子成螺形;将螺形茶叶装于竹篮后稍加压,盖上发酵布,放入发酵箱发酵 5~6 h,至叶脉呈红褐色,将发酵好的茶叶均匀铺在筛子上,厚约 3 cm,放入烘焙机中,烘焙至触手有刺感,取出摊晾,即得 Smbt 成品。

#### 1.2.2 Smgt 的制备

取丹参鲜叶于干净器具上,摊晾至叶片失水 30%,于 300 °C 杀青至叶色暗绿,青气消失时出锅;再次摊晾,使茶叶恢复至室温;放置过夜,放入揉捻机揉捻约 40 min,使叶子成条,再放入干燥滚筒中干燥,至叶片含水量小于 10%,即得 Smgt 成品。

#### 1.2.3 SPME 检测

分别取 Smbt 和 Smgt 10 g,经中药粉碎机粉

碎,过60目筛得到茶叶粉末;称取茶叶粉末2g于20 mL顶空瓶中,封闭瓶口,放入自动进样器中。萃取前老化温度为230℃,70℃预孵化10 min,然后70℃萃取20 min,解析3 min。

#### 1.2.4 全二维气相色谱检测

进样口温度220℃,不分流进样;一维色谱柱:DB-5(30 m×0.25 mm×0.25 μm);二维色谱柱:DB-17 MS(1.5 m×0.18 mm×0.18 μm);载气为高纯氮,柱流量为1 mL/min;柱温箱采用程序升温,起始温度为35℃,保持5 min,然后以3℃/min升温到230℃,保持5 min,共75 min。

#### 1.2.5 全二维气相调制器检测

采用固态热调制器,选择HV调制柱,调制周期为10 s,进口温度偏置30℃,出口温度偏置120℃。

#### 1.2.6 飞行时间质谱检测参数

电子轰击离子源,灯丝发射电流200 μA,电离能70 eV;离子源温度230℃,传输线温度240℃;检测器电压-1800 V,采集速率100谱/s,质量扫描范围35~550  $m/z$ 。

### 1.3 数据处理

采用全二维气相色谱数据处理工作站软件Canvas载入数据,绘制全二维总离子流轮廓图,对信噪比大于3 dB的峰自动识别,标识出的每个峰点代表一种化合物。在Canvas软件上通过对每个化合物的质谱图进行NIST 17标准质谱数据库比对检索,并结合保留指数(Retention index, RI)对化合物进行定性分析,具体方法参考文献[18-19]。采用峰面积归一化法自动生成各成分的相对含量。根据各化合物的定性定量信息,统计Smbt和Smgt样品中的香气成分,并根据化合物官能团对香气成分进行分类,统计各成分的数量和相对含量。

## 2 结果与分析

### 2.1 Smbt与Smgt香气成分GC×GC-TOFMS轮廓图

根据GC×GC-TOFMS的结果,每个化合物由一对保留时间确定,X轴方向为第一维保留时间(min),Y轴方向为第二维保留时间(s)。使用Canvas工作站对Smbt和Smgt香气成分数据进行自动峰积分,并使用NIST 17数据库结合保留指数对每个峰进行检索定性。Smbt与Smgt香气成分GC×GC-TOFMS轮廓图见图1。由图1可知,2种茶叶的大部分香气化合物通过正交分离都得到了较

好的分离效果,体现了全二维气相色谱高分辨率的特点。

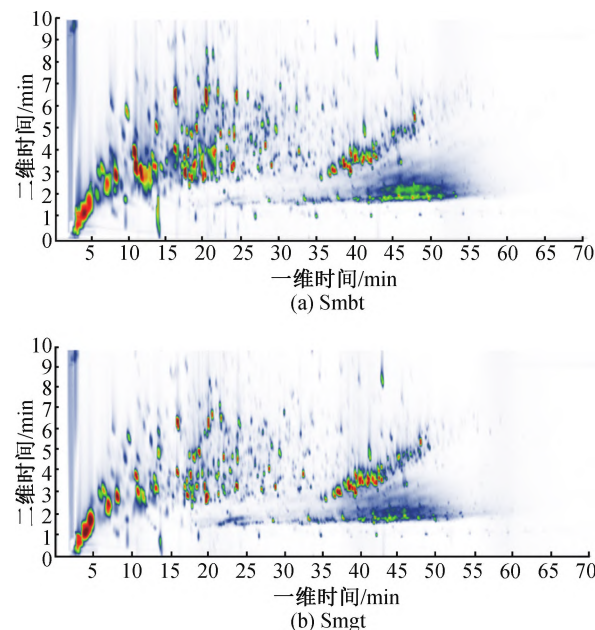


图1 Smbt和Smgt的香气成分GC×GC-TOFMS轮廓图

### 2.2 Smbt与Smgt香气成分分析

#### 2.2.1 Smbt与Smgt共有香气成分分析

从Smbt和Smgt中共鉴定出349种香气成分,其中Smbt中245种,Smgt中233种,主要化合物见表1。二者的共有香气成分有124种,主要包括24种饱和烷烃、23种醇类、17种酮类、16种烯烃、15种醛类、5种芳烃、4种酯类、3种呋喃酮3种环烷烃以及种类较少的酸类、呋喃、酚类、吡嗪和吡啶等。在124种共有香气中,部分化合物在2种茶叶中占比均较高,而部分化合物在2种茶叶中差异较大。占比较高的化合物构成了2种茶叶的基本香气,高占比的正己醛和2-庚烯醛使得2种茶叶均具有清香气味;而具有果香的γ-己内酯<sup>[20]</sup>在Smbt中占比是Smgt的3.9倍,具有玫瑰花香的苯乙醇<sup>[21]</sup>在Smbt中占比是Smgt的3.8倍,因此Smbt具有更浓郁的花果香气。

#### 2.2.2 Smbt与Smgt香气成分的差异分析

从Smbt及Smgt中鉴定的化合物分类见表2。由表2可知,Smbt共鉴定出245种香气成分,根据官能团将其分成不同类别,其中占比较高的是醇类、醛类、烯烃及饱和烷烃,峰面积分别占比25.771%、21.469%、14.485%和8.358%,酸酐、吡啶、吡嗪、卤代烃等物质也有检出,但占比较低(不足1%)。

Smgt共鉴定出234种香气成分,根据官能团分类,占比较高的是醛类、烯烃、醇类,峰面积分别占比30.435%、20.462%和17.979%,最少的3类物质

表 1 Smbt 和 Smgt 中香气成分及其相对含量

序号	类别	化合物名称	CAS 号	化学式	一维时间/min	二维时间/s	Smbt 相对含量/%	Smgt 相对含量/%
1	饱和烷烃	7-甲基十六烷	26730-20-1	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>	51.23	1.86	0.961	0.508
2	呋喃酮	4,4,7α-三甲基-5,6,7,7α-四氢苯并吡喃酮	17092-92-1	C <sub>11</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	42.90	8.57	0.406	0.513
3	醇类	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	17.40	2.71	1.988	1.059
4		苯乙醇	1960-12-8	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	24.23	6.11	1.337	0.354
5		3-己烯-1-醇	928-96-1	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	10.90	2.95	7.528	—
6		1-己醇	111-27-3	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	11.40	2.79	4.031	—
7		2-戊基-1-醇	6261-22-9	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	6.23	3.13	—	1.235
8		1-戊醇	71-41-0	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	6.73	2.18	—	3.764
9		3-己烯-1-醇	544-12-7	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	10.73	3.05	—	2.243
10		苯甲醇	100-51-6	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	20.06	6.26	—	1.560
11		十六醛	66-25-1	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	8.06	2.85	3.202	3.149
12		2-庚烯醛	57266-86-1	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O	15.90	4.07	2.141	1.121
13	醛类	3-甲基丁醛	590-86-3	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	3.73	1.17	5.991	—
14		2-戊烯醛	1576-87-0	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	6.23	3.16	1.118	—
15		2,4-己二烯醛	142-83-6	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O	13.56	4.90	1.142	—
16		2-丁烯醛	4170-30-3	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O	3.90	1.14	—	8.011
17		戊醛	110-62-3	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	4.40	1.75	—	6.428
18		2-己烯醛	505-57-7	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O	10.56	3.78	—	1.827
19		苯甲醛	100-52-7	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O	16.06	6.25	—	2.033
20	酮类	6-甲基-5-庚烯-2-酮	110-93-0	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O	17.73	3.89	1.146	1.261
21	酸类	3-甲基丁酸	503-74-2	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	12.06	2.77	1.932	—
22		反式-2-己烯酸	13419-69-7	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	21.23	3.80	1.304	—
23	酯类	乙酸芳氨酯	115-95-7	C <sub>12</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	23.56	3.21	1.064	—
24	芳烃	1-异丙基-3-甲苯	535-77-3	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	19.56	3.33	1.112	—
25	烯烃	石竹烯	87-44-5	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	38.56	3.38	1.806	3.269
26		α-愈创木烯	3691-12-1	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	39.40	3.13	1.257	—
27		β-愈创木烯	88-84-6	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	41.23	3.61	0.467	2.700
28		葎草烯	6753-98-6	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	40.06	3.62	1.588	—
29		柠檬烯	138-86-3	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	19.73	2.74	—	1.129
30		广藿香烯	1405-16-9	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	40.06	3.59	—	2.675
31	其他化合物	(1R,2S,8S)-1-甲基-3-亚甲基-8-丙基-2-乙基三环癸烷	18252-44-3	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	39.06	3.26	0.721	1.361

是酸酐(0.04%)、环氧烷(0.046%)和吡啶(0.058%),均不足0.1%。Smbt与Smgt香气物质均以醇类、醛类、烯烃和饱和烷烃为主,对茶叶的香气品质形成促进作用;对比Smbt与Smgt香气成分,醇类化合物在Smbt中占25.771%,高于Smgt中的17.979%,醇类化合物多呈现花果香气,使得Smbt的花果香气更加浓郁;Smbt中醛类占21.469%,低于Smgt中的醛类占比(30.435%),醛类化合物形成茶叶的各种特异香气,多呈现清香气息,因而Smgt的清香更加浓郁,可能是Smgt未经过发酵的原因。Smgt(20.462%)中烯烃占比高于Smbt(14.458%),饱和烷烃在2种茶叶中占比差异

不大,酮类、环烷烃、吡嗪、呋喃以及其他含氮化合物占比Smgt均高于Smbt,单独从Smbt中检测出4种卤代烃,从Smgt中单独检测出吡咯啉、醚类、环氧烷各1种,但占比均较低(均低于0.5%)。一些化合物在其中一种茶叶中检出,且占比较高,对2种茶叶的香气差异具有较大影响,具有青草香的顺-3-己烯-1-醇<sup>[22]</sup>、具有果香的正己醇<sup>[23]</sup>、具有清香和可可香气的3-甲基丁醛<sup>[24]</sup>在只在Smbt中检出,且占比较高,赋予Smbt浓郁的花果香气;而具有果香的戊醇<sup>[25]</sup>和具有烘烤杏仁气味的苯甲醛<sup>[25]</sup>等只在Smgt中检出,且占比较高,使Smgt体现出烘烤杏仁的香味。



表2 Smbt 中香气成分的分类及数量

序号	类别	数量/种		峰面积比例/%	
		Smbt	Smgt	Smbt	Smgt
1	醇类	43	41	25.771	17.979
2	醛类	28	27	21.469	30.435
3	烯烃	35	33	14.485	20.462
4	饱和烷烃	40	42	8.358	6.685
5	酸类	8	4	6.374	1.410
6	酮类	22	27	5.298	6.594
7	酯类	16	10	3.337	1.662
8	芳烃	10	8	2.724	2.662
9	酚类	6	4	0.794	0.325
10	含氮化合物	2	—	7.109	—
11	呋喃酮	5	4	0.776	0.647
12	呋喃	2	2	0.695	1.014
13	环烷烃	7	11	0.366	2.510
14	酰胺	1	1	0.265	0.118
15	卤代烃	4	—	0.207	—
16	吡嗪	2	4	0.159	1.415
17	吡啶	1	1	0.109	0.056
18	酸酐	1	2	0.019	0.040
19	吡咯啉	—	1	—	0.170
20	醚类	—	1	—	0.153
21	环氧烷	—	1	—	0.046
22	其他化合物	12	10	1.685	5.617
总计		245	234	100.000	100.000

### 3 讨论

丹参以根茎入药,叶片不做药用而被丢弃。以丹参叶片制成的 Smbt 和 Smgt 风味独特,清新爽口,以水冲泡有利于丹酚酸等水溶性类成分的溶出,因此,丹参叶片制茶产业化对于丹参药材的充分利用具有重要意义。

对于茶叶香气化合物的分离鉴定多使用一维 GC-MS 技术,董玉玮等<sup>[26]</sup>采用一维 GC-MS 技术从牛蒡茶中分离鉴定到 97 种香气成分,张俊杰等<sup>[27]</sup>采用一维 GC-MS 技术从山苏茶中鉴定出 60 种香气成分。具有茶叶香气的化合物众多,一维 GC-MS 技术在分析茶叶香气成分时显得灵敏度低、分辨能力不足,本文采用 GC×GC-TOFMS 技术对丹参制成的 2 种茶叶的香气物质进行检测,鉴定化合物种类多(共 349 种),且能检测出在 Smbt 中吡啶、酸酐,Smgt 中的环氧烷等微量化合物,体现了 GC×GC-TOFMS 技术的高峰容量、高灵敏度的特点。

已有文献表明,各种茶叶的香气成分均以醛类、醇类、烯烃为主<sup>[28-31]</sup>,这与本文的结果一致。含量占比上,Smgt 中醛类和烯烃占比较高,而 Smbt 中醇

类和饱和烷烃占比较高,这几类化合物对茶叶香气的形成具有重要意义,不同类型的化合物呈现不同的香型,其中醇类化合物多呈现花香和果香,而醛类化合物多呈现清香,因而 Smbt 的花果香气更加浓郁,而 Smgt 清香更加明显。2 种茶叶中均检出酸类化合物(Smbt 中占 6.374%,Smgt 中占 1.410%),这类化合物往往呈现出酸臭、腐臭等令人不愉快的味道,但由于其香气阈值较高,所以对于茶叶风味的贡献较小。针对 2 种丹参茶叶共有香气成分的研究发现,Smbt 中具有果香的  $\gamma$ -己内酯<sup>[20]</sup>占比是 Smgt 的 3.9 倍,具有玫瑰花香的苯乙醇<sup>[21]</sup>占比是 Smgt 的 3.8 倍,表明 Smbt 的花香、果香更加浓郁,只在一种茶叶中检出且占比较高的香气化合物对于茶叶的香气差异具有重要影响。本文在 Smbt 中检出了高含量占比的具有青草味的顺-3-己烯-1-醇<sup>[22]</sup>、具有果香的正己醇<sup>[23]</sup>和具有清香、可可香的 3-甲基丁醛<sup>[24]</sup>,而这些化合物在 Smgt 中并未检出,Smgt 中检出了高含量占比的具有酯类香气的戊醇<sup>[25]</sup>、具有烘烤杏仁味的苯甲醛<sup>[25]</sup>,这些化合物在 Smbt 中未检出。Smbt 呈现出更浓郁的花香、果香,而 Smgt 则呈现出清香、酯香、烘烤杏仁香等较为复杂的香

味,由于这2种茶叶均使用丹参叶片制成,推测香气差异的形成可能与2种茶叶的制作工艺不同有关。

## 4 结 论

本文运用SPME-GC×GC-TOFMS技术,对Smbt和Smgt的香气成分进行鉴定,并对香气成分的差异进行分析,主要结论如下。

a)分析丹参叶片制作茶叶的香气成分,在2种茶叶中鉴定出245种和233种香气成分;

b)香气成分分析表明,Smbt具有更浓郁的花果香气,而Smgt清香气息更加明显;

c)本文将为丹参叶的制茶工艺提供参考,并为丹参地上部分的开发利用奠定理论基础。

## 参考文献:

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:2020版:一部[M].北京:中国医药科技出版社,2020:77-79.
- [2] 段金廛.中药废弃物的资源化利用[M].北京:化学工业出版社,2013:64.
- [3] 张玉,刘谦,蒲高斌,等.丹参非药用部位药用价值及开发利用研究进展[J].中国现代中药,2019,21(2):266-270.
- [4] 杨帆,戚莹雪,张永清.丹参地上部分化学成分与药理作用研究进展[J].中成药,2020,42(6):1558-1564.
- [5] 顾俊菲,宿树兰,彭珂毓,等.丹参地上部分资源价值发现与开发利用策略[J].中国现代中药,2017,19(12):1659-1664.
- [6] 王秋霜,陈栋,许勇泉,等.中国名优红茶香气成分的比较研究[J].中国食品学报,2013,13(1):195-200.
- [7] 朱利芳,董鸿竹,杨世雄,等.我国西南元江大理茶的挥发性成分及其抗氧化活性[J].植物分类与资源学报,2012,34(4):409-416.
- [8] 王利妍,郭天杰,石兴云,等.SDE-GC-MS法重现性及普洱茶发酵香气变化研究[J].西南农业学报,2019,32(4):810-815.
- [9] 杨婷,雷攀登,周汉琛,等.同时蒸馏萃取法结合主成分分析研究祁门红茶的香气成分[J].食品科技,2017,42(6):264-269.
- [10] 麻少莹,杨昌鹏,韦璐,等.利用超临界流体萃取法提取天然香蕉香精[J].食品工业,2021,42(6):179-183.
- [11] 舒心,高彦祥.茶叶挥发性成分提取及其香气特征分析研究进展[J].食品工业科技,2022,43(15):469-480.
- [12] Tiessen M, Stock N L, Stotesbury T. Untargeted SPME-GC-MS characterization of VOCs released from spray paint[J]. Journal of Chromatographic Science, 2021, 59(2):103-111.
- [13] Fung A G, Yamaguchi M S, McCartney M M, et al. SPME-based mobile field device for active sampling of volatiles[J]. Microchemical Journal, 2019, 146:407-413.
- [14] 李俊,祝愿,方舒婷,等.基于固相微萃取气质联用对贵州红茶香气成分特征的研究[J].食品工业科技,2021,42(13):304-316.
- [15] Dugo G, Franchina F A, Scandinaro M R, et al. Elucidation of the volatile composition of Marsala wines by using comprehensive two-dimensional gas chromatography[J]. Food Chemistry, 2014, 142:262-268.
- [16] Setyaningsih W, Majchrzak T, Dymerski T, et al. Key-marker volatile compounds in aromatic rice (*Oryza sativa*) grains: an HS-SPME extraction method combined with GC×GC-TOFMS[J]. Molecules, 2019, 24(22):4180.
- [17] Wang L L, Gao M X, Liu Z P, et al. Three extraction methods in combination with GC×GC-TOFMS for the detailed investigation of volatiles in Chinese herbaceous aroma-type Baijiu[J]. Molecules, 2020, 25(19):4429.
- [18] Torregiani E, Lorier S, Sagratini G, et al. Comparative analysis of the volatile profile of 20 commercial samples of truffles, truffle sauces, and truffle-flavored oils by using HS-SPME-GC-MS[J]. Food Analytical Methods, 2017, 10(6):1857-1869.
- [19] 王建霞,郭洪伟,刘一涵,等.GC-MS结合保留指数分析轮钟花果实的挥发性成分[J].西南民族大学学报(自然科学版),2020,46(4):380-385.
- [20] 崔萃,谢婷婷,周宇,等.祁门红茶对传统猪肉脯感官品质及风味的影响[J].肉类研究,2022,36(5):54-61.
- [21] 胡苑,王雅静,张敏,等.4种酿酒酵母对马瑟兰干红葡萄酒香气成分的影响[J].酿酒科技,2021(7):41-48.
- [22] 李玉川,陈玉琼,秦慕雪,等.不同光质对夏秋红茶萎凋叶挥发性成分的影响[J].食品安全质量检测学报,2022,13(14):4415-4422.
- [23] 刘安齐,郭全友,杨絮,等.香糟大黄鱼混菌发酵工艺及物质成分变化研究[J].食品与发酵科技,2022,58(4):46-51.
- [24] 牛云蔚,朱全,肖作兵.茅台酒香气组成及关键香气成分间的协同作用[J].中国食品学报,2021,21(10):215-226.
- [25] 王丽,李雪,刘光宪,等.芦笋猕猴桃复合果酒发酵过程中挥发性香气物质的变化[J].食品工业科技,2022,43(13):242-250.
- [26] 董玉玮,顾鑫玥,庄聪林,等.HS-SPME-GC-MS法分析3种加工工艺牛蒡茶特征性风味物质[J].食品研究与开发,2022,43(12):164-176.

- [27] 张俊杰, 黄伟航, 钟嘉杰, 等. 基于 SPME-GC-MS 法分析山苏茶的香气成分[J]. 现代食品, 2021(16):171-175.
- [28] 吴学进, 陈克, 揭国良, 等. 红茶加工过程萎调和发酵工序技术研究进展[J]. 中国茶叶加工, 2018(4):17-23.
- [29] 陈泽娜, 庄楷杏, 林晓珊. 绿宝石绿茶及红宝石红茶香气分析[J]. 饮料工业, 2022, 25(3):27-32.
- [30] 余胜奎, 伍贤学, 何芹, 等. SDE-GC-MS 法分析滇绿茶和滇红茶中的挥发性成分[J]. 玉溪师范学院学报, 2018, 34(8):28-34.
- [31] 马敬宜, 姚衡斌, 赵仁亮. 基于 HS-SPME/GC-MS 和 OAV 对春季信阳红茶关键呈香化合物分析[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(14):189-198.

(责任编辑:张会巍)