

# HS-SPME-GC-MS结合化学计量学分析曲霉液态发酵对晒青毛茶汤挥发性成分的影响

杨子玺, 朱圆敏\*, 谢燕霞, 余龙江\*

(华中科技大学生命科学与技术学院, 分子生物物理教育部重点实验室,  
湖北省食药两用资源工程技术研究中心, 湖北武汉 430074)

**摘要:** 通过感官评价, 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱结合化学计量学方法研究了曲霉液态发酵对晒青毛茶汤香气特征和挥发性成分的影响。在香气品质方面, 未发酵的晒青毛茶汤呈清香和花蜜香, 利用黑曲霉发酵的茶汤呈现脂肪香, 米曲霉发酵的茶汤呈现浓郁的花果香和薄荷香, 混合发酵的茶汤呈现木香, 略带脂肪香。在挥发性成分方面, 米曲霉发酵后保留了最高含量的醇类(13.76%), 显著提升了酯类的含量(24.76%), 产生总的和特有的挥发性成分(23个)都最多, 包括呈现薄荷气味的水杨酸甲酯和水果气味的水杨酸苯酯; 黑曲霉发酵后保留了最高含量的醛类(4.44%), 且显著提升了酯类的含量(20.14%); 混合发酵显著提升了酮类(9.09%)和烃类(18.94%)的含量; 主成分分析和欧氏距离聚类表明, 单独接种米曲霉发酵茶汤的挥发性成分最为独特。总体而言, 单独和混合接种发酵可以显著改变晒青毛茶汤香气特征, 其中, 米曲霉在茶叶液态发酵中是一种较好的产香菌株, 且与黑曲霉具有协同作用增添茶汤风味。该结果为发酵类茶产品的增香技术研究和多样化产品开发提供理论依据, 促进了茶产业的多元化发展。

**关键词:** 晒青毛茶; 曲霉; 发酵; 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱; 化学计量学; 挥发性成分

文章编号: 1673-9078(2025)02-292-308

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.2.0140

## Effects of Liquid Fermentation by *Aspergillus* on Volatile Components of Sun-dried Green Tea Infusion Based on HS-SPME-GC-MS Combined with Chemometrics

YANG Zixi, ZHU Yuanmin\*, XIE Yanxia, YU Longjiang\*

(College of Life Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology,  
Key Laboratory of Molecular Biophysics, Ministry of Education, Hubei Engineering  
Research Center for both Edible and Medicinal Resources, Wuhan 430074, China)

引文格式:

杨子玺, 朱圆敏, 谢燕霞, 等. HS-SPME-GC-MS结合化学计量学分析曲霉液态发酵对晒青毛茶汤挥发性成分的影响[J]. 现代食品科技, 2025, 41(2): 292-308.

YANG Zixi, ZHU Yuanmin, XIE Yanxia, et al. Effects of liquid fermentation by *Aspergillus* on volatile components of sun-dried green tea infusion based on HS-SPME-GC-MS combined with chemometrics [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(2): 292-308.

收稿日期: 2024-01-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2100900); 中央高校基本科研业务费项目(2023XCZX001; 2020kfyXJJS120); 云南省院士(专家)工作站(202205AF150090)

作者简介: 杨子玺(1996-), 男, 博士研究生, 研究方向: 微生物发酵, E-mail: zixi\_yang@hust.edu.cn

通讯作者: 朱圆敏(1986-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 微生物技术与发酵工程, E-mail: zhuyuanmin@hust.edu.cn; 共同通讯作者: 余龙江

(1966-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 资源生物学与生物技术, E-mail: yulongjiang@hust.edu.cn

**Abstract:** The effects of liquid fermentation by *Aspergillus* on the aroma characteristics and volatile components of sun-dried green tea infusion were investigated through sensory evaluation, headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS), and chemometrics. The results show that unfermented sun-dried green tea infusion exhibits fresh and nectar aromas, while fermentation with *Aspergillus niger* alone results in a fatty aroma. In contrast, fermentation with *Aspergillus oryzae* alone produces floral and fruity aromas along with a mint aroma. Moreover, the infusion subjected to mixed fermentation exhibits a woody aroma with a slight fatty note. Fermentation with *Aspergillus oryzae* retains the highest alcohol content (13.76%), significantly increases the ester content (24.76%), and produces the greatest number of total and characteristic volatile components (23), including methyl salicylate (mint aroma) and benzyl salicylate (fruity aroma). Fermentation with *Aspergillus niger* retains the highest aldehyde content (4.44%) and significantly enhances ester content (20.14%). Mixed fermentation significantly increases the content of ketones (9.09%) and hydrocarbons (18.94%). Principal component analysis and Euclidean distance clustering reveal that the volatile components of the tea infusion fermented by *Aspergillus oryzae* alone are the most distinctive. Overall, fermentation using single strains and mixed strains significantly alters the aroma characteristics of sun-dried green tea infusion. Specifically, *Aspergillus oryzae* is identified as a superior aroma-producing strain in liquid fermentation, exhibiting a synergistic effect with *Aspergillus niger* to enhance the flavor of tea infusion. These results provide a theoretical basis for aroma enhancement technology and the development of diversified fermented tea products, which support innovation in the tea industry.

**Key words:** sun-dried green tea; *Aspergillus*; fermentation; headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry; chemometrics; volatile component

茶叶中的芳香物质是所有易挥发性成分的总称,是评价茶叶品质和市场价值的关键指标<sup>[1]</sup>。茶叶香气除受到栽培技术、地理位置、季节影响外,加工工艺也是重要的影响因素<sup>[2-4]</sup>。近年来,为满足消费者对茶产品的多样化需求,单一的茶产品开始向多元化方向发展,如速溶茶粉、茶膏、浓缩液等。液态发酵是茶叶提质增效的一种创新工艺,即以茶叶提取物为发酵基质,定向接种优势微生物制备多元化茶产品。徐瑞雪等<sup>[5]</sup>以晒青毛茶为原料,利用茶叶自身菌体建立了普洱茶液态发酵工艺,既解决了普洱茶发酵工序复杂,耗时耗力的问题,同时也避免了发酵液中茶渣不易处理的问题。赵宏朋等<sup>[6]</sup>将谢瓦曲霉和冠突曲霉分别接种于云南大叶种低级绿茶汤进行液态发酵,结果发现发酵液中茶多酚、总黄酮含量均显著降低,茶褐素含量均显著增加,为云南大叶种低级绿茶高值化产品的开发提供技术支撑。

曲霉是普洱熟茶渥堆发酵中的优势微生物,其中黑曲霉在整个发酵过程中占主导地位<sup>[7,8]</sup>。黑曲霉一方面可产生淀粉酶、纤维素酶和果胶酶等多种水解酶,促进茶叶细胞壁裂解,释放内含物质,最终形成普洱熟茶醇厚润滑的品质特征;另一方面,黑曲霉可以显著改善茶叶香气品质。周才碧等<sup>[9]</sup>采用黑曲霉发酵生产普洱熟茶,最终产品呈现香气浓纯、汤色黑褐、滋味平和。Cao等<sup>[10]</sup>研究发现,黑曲霉

发酵可以提高茶叶中香叶醇、芳樟醇氧化物、9,12-十八碳二烯酸和 $\beta$ -紫罗兰酮等香气物质的含量。此外,米曲霉也是渥堆发酵中主要的微生物之一。米曲霉是一种生长快、酶系丰富、不产毒素的菌种,常被用于增强产品风味<sup>[11]</sup>。Xu等<sup>[12]</sup>在酱油发酵过程利用米曲霉菌丝体,增加了酱油中挥发性风味成分的含量。杨志伟等<sup>[13]</sup>采用米曲霉发酵牡蛎肉,发酵后关键性风味成分如醇、醛、酮类化合物发生了明显变化。然而,目前关于米曲霉在茶叶发酵中的作用并不明晰。因此,需要进一步探索。

针对茶产品挥发性成分的研究,顶空固相微萃取-气相色谱-质谱(Head Space-Solid Phase Microextraction-Gas Chromatography-Mass Spectrometry, HS-SPME-GC-MS)分析方法应用广泛<sup>[13,14]</sup>,该方法通过提取茶汤中挥发性成分,然后使用GC-MS技术进行分析,可以快速、准确地鉴定和定量挥发性成分。此外,化学计量学分析方法可以对大量的数据进行处理和解释,从而鉴别样品之间的差异。

本研究通过HS-SPME-GC-MS结合化学计量学分析方法,研究了两种曲霉单独和混合接种液态发酵对晒青毛茶汤香气特征和挥发性成分的影响,以期发酵类茶产品的增香技术研究提供理论依据,从而为茶产业的多元化发展奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料与仪器

#### 1.1.1 试验材料

云南大叶种晒青毛茶, 由云南省临沧市临翔区蚂蚁堆茶厂提供; 黑曲霉和米曲霉均分离自普洱熟茶发酵过程茶样, 保藏于华中科技大学生命科学与技术学院资源生物学与生物技术研究所。

#### 1.1.2 主要仪器设备

手动 SPME 进样器和 50/30  $\mu\text{m}$  DVB/CAR/PDMS 固相微萃取头, 美国 Supeclo 公司; 30  $\text{m} \times 0.25 \text{ mm} \times 0.25 \mu\text{m}$  HP-5MS 毛细管柱、7890 A 气相色谱仪、5975 C 质谱仪, 美国 Agilent 公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 晒青毛茶汤及曲霉孢子悬浮液制备

##### 1.2.1.1 晒青毛茶汤制备

将晒青毛茶适当粉碎, 过 30 目筛, 121  $^{\circ}\text{C}$  灭菌 20 min。然后, 以 1:50 (g/mL) 的茶水比在无菌水中浸提 2 h, 用 8 层纱布过滤, 去除茶渣, 收集上清液, 得到晒青毛茶汤, 标记为 SGT。

##### 1.2.1.2 曲霉孢子悬浮液制备

将黑曲霉和米曲霉分别接种于 PDA 固体平板培养基 (马铃薯 200 g, 蔗糖 20 g, 琼脂 20 g, 加水至 1 000 mL, pH 自然) 中, 在 28  $^{\circ}\text{C}$  条件下培养 5~7 d。使用适量无菌水制备成孢子悬浮液, 使孢子个数的浓度约为  $1 \times 10^7$  CFU/mL。

#### 1.2.2 曲霉液态发酵

##### 1.2.2.1 曲霉单独发酵

分别将黑曲霉和米曲霉孢子悬浮液接种至晒青毛茶汤中 (接种量为  $\phi=5\%$ ), 在 37  $^{\circ}\text{C}$ , 150 r/min 发酵 48 h, 分别标记为 ANFT 和 AOFT, 每个样品做 3 个平行。

##### 1.2.2.2 曲霉混合发酵

按 1:1 的菌种比例接种黑曲霉和米曲霉孢子悬浮液至晒青毛茶汤中 (总接种量为 5%), 在 37  $^{\circ}\text{C}$ , 150 r/min 发酵 48 h, 标记为 AONFT。以无菌自然发酵茶汤作为对照组 (CK), 发酵条件与接种发酵组相同。每个样品做 3 个平行。

#### 1.2.3 感官评价

茶汤颜色和香气感官审评参照 GB/T 23776-2018 《茶叶感官审评方法》。

#### 1.2.4 挥发性成分的测定

##### 1.2.4.1 挥发性成分提取

在顶空小瓶中加入 5 mL 样品, 60  $^{\circ}\text{C}$  磁力搅拌条件下提取 45 min, 将固相微萃取头取出后立即插入 GC-MS 进样器, 260  $^{\circ}\text{C}$  解吸 5 min。

##### 1.2.4.2 GC-MS 条件

采用 30  $\text{m} \times 0.25 \text{ mm} \times 0.25 \mu\text{m}$  HP-5MS 毛细管柱, 氦 (纯度  $>99.999\%$ ) 为载气, 流量为 1 mL/min; 色谱柱初始温度设定为 60  $^{\circ}\text{C}$  (保持 1 min), 然后以 3  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的速度增加到 160  $^{\circ}\text{C}$  (保持 8 min), 再以 8  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的速度增加到 260  $^{\circ}\text{C}$  (保持 8 min), 共运行 62.83 min。电离方式为电轰击电离 (EI) 源; 电离能量 70 eV; 离子源温度 250  $^{\circ}\text{C}$ ; 质量范围为 35~800 AMU。

##### 1.2.4.3 定性和定量分析

定性分析: 对质谱图进行峰面积积分, 利用 NIST 谱库检索, 筛选每个峰所对应的匹配度  $\geq 90\%$  的物质并结合书籍、文献与保留时间确定挥发性成分名称。

定量分析: 采用峰面积归一化法计算各挥发性成分的相对含量。

### 1.3 数据分析

采用 OriginPro 2022 绘制维恩图, 热图和欧氏距离聚类分析。使用 SIMCA-P 14.1 进行主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 和正交偏最小二乘法判别分析 (Orthogonal Partial Least Squares-Discriminant Analysis, OPLS-DA)。根据变量投影重要度 (Variable Important in Projection, VIP) 和 Student t 检验判别挥发性成分对茶汤香气的贡献度, 基于  $\text{VIP} > 1$  和  $P < 0.05$  筛选出关键差异挥发性成分。通过文献查阅和气味数据库 (<http://www.thegoodscentcompany.com>) 描述化合物香气特征。

## 2 结果与讨论

### 2.1 曲霉液态发酵对晒青毛茶汤颜色和香气特征的影响

为明晰曲霉液态发酵对晒青毛茶汤颜色和香气特征的影响, 本研究通过训练有素的小组成员对 5 组茶汤的颜色和香气进行感官描述, 结果如图 1 和表 1 所示。发酵后, 无菌自然发酵茶汤颜色由浅黄色变为橘黄色, 明亮度无显著变化, 而接种曲霉发酵茶汤颜色均变为红褐色且偏暗。接种发酵后茶汤颜色发生显著变化的主要原因是茶汤中多酚类化合



物发生氧化聚合后转化为茶褐素<sup>[9]</sup>。在香气特征方面,晒青毛茶汤香气纯正,呈清香和淡淡的花蜜香;无菌自然发酵茶汤香气尚纯正,具有刺激性气味且略带高火香;黑曲霉发酵茶汤香气纯正,呈现浓郁的脂肪气味;米曲霉发酵茶汤香气纯正,呈现令人愉悦的花果香和薄荷香;混合发酵茶汤香气纯正,呈现木香,略带脂肪气味。综上,曲霉的种类和接种方式对晒青毛茶汤香气特征影响显著。茶汤呈现不同的香气特征,主要归因于挥发性成分的差异,因此,进一步探究了曲霉发酵前后挥发性成分对香气特征的影响。

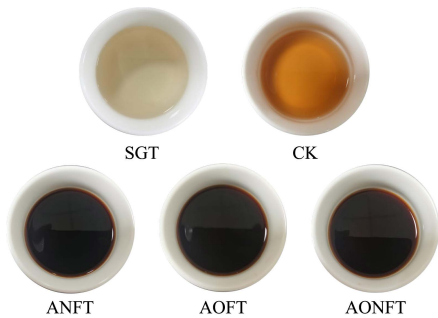


图 1 曲霉发酵前后茶汤颜色的变化

Fig.1 Changes in color of tea infusion before and after *Aspergillus* fermentation

注: SGT- 晒青毛茶汤, CK- 无菌自然发酵茶汤, ANFT- 黑曲霉发酵茶汤, AOFT- 米曲霉发酵茶汤, AONFT- 混合发酵茶汤, 下同。

表 1 曲霉发酵前后茶汤颜色和香气特征的感官描述

Table 1 Sensory description of color and aroma characteristics of tea infusion before and after *Aspergillus* fermentation

样品	汤色感官描述	香气描述
晒青毛茶汤 (SGT)	浅黄明亮	纯正, 清香、淡淡的花蜜香, 尚持久
自然发酵茶汤 (CK)	橘黄明亮	尚纯正, 刺激性气味、略带高火香, 持久
黑曲霉发酵茶汤 (ANFT)	红褐偏暗	纯正, 脂肪香馥郁, 持久
米曲霉发酵茶汤 (AOFT)	红褐偏暗	纯正, 花果香、薄荷香馥郁, 持久
混合发酵茶汤 (AONFT)	红褐偏暗	纯正, 木香, 略带脂肪香, 尚持久

## 2.2 曲霉液态发酵对晒青毛茶汤挥发性成分的影响

### 2.2.1 曲霉液态发酵对挥发性成分数量的影响

为进一步研究曲霉液态发酵对晒青毛茶汤挥发性成分的影响, 绘制了总离子谱图 (图 2a)。根据

匹配度  $\geq 90\%$ , 共筛选出了 129 种挥发性成分, 如表 2 所示。在晒青毛茶汤、自然发酵、黑曲霉发酵、米曲霉发酵和混合发酵后的茶汤中, 分别鉴定出了 44、59、58、69 和 50 个挥发性成分。结果表明, 曲霉发酵显著增加了茶汤中的挥发性成分数量, 其中单独接种米曲霉发酵的影响最为显著。为了更清晰地观察茶汤挥发性成分之间的关系, 绘制了韦恩图 (图 2b)。晒青毛茶汤与自然发酵、黑曲霉发酵、米曲霉发酵和混合发酵后的茶汤分别共有 35、27、29 和 24 个挥发性成分; 五种茶汤共有 20 个挥发性成分。初始晒青毛茶汤与曲霉发酵茶汤共有的挥发性成分数量均少于与自然发酵茶汤共有的, 并且曲霉发酵茶汤中共有的成分数量各不相同, 这进一步表明曲霉种类和接种方式对茶汤挥发性成分产生较大影响。米曲霉发酵茶汤和混合发酵茶汤共有 32 个挥发性成分, 而黑曲霉发酵茶汤和混合发酵茶汤共有 33 个挥发性成分。这表明混合接种发酵可以同时保留黑曲霉和米曲霉单独发酵产生的挥发性成分。黑曲霉发酵茶汤和米曲霉发酵茶汤共有 32 个挥发性化合物, 其中 21 个来自初始晒青毛茶汤, 另外 11 个来自各自发酵过程。此外, 黑曲霉发酵茶汤、米曲霉发酵茶汤和混合发酵茶汤分别特有 13、23 和 9 个挥发性成分。

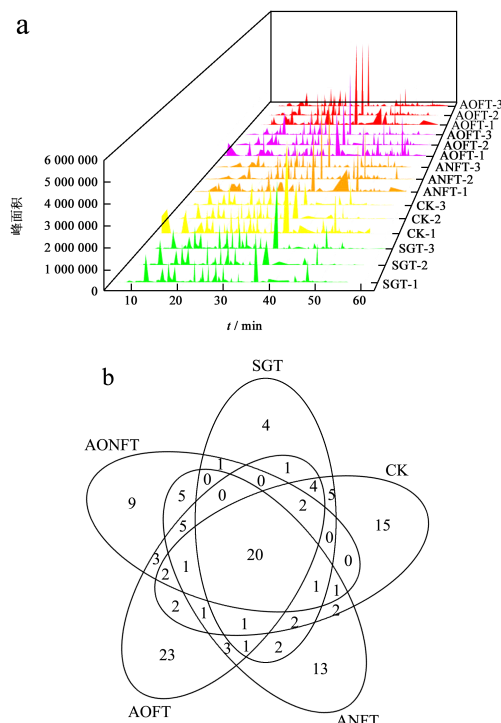


图 2 (a) 曲霉发酵前后茶汤中挥发性成分的总离子谱图; (b) 挥发性成分的韦恩图

Fig.2 (a) Total ion spectra of volatile components of tea infusion before and after *Aspergillus* fermentation; (b) Venn of volatile components

表 2 不同茶汤的挥发性成分鉴定结果 (匹配度  $\geq 90\%$ )  
 Table 2 Identification results of volatile components of different tea infusion (Matching degree  $\geq 90\%$ )

序号	保留时间/min	化合物	CAS	分子式	相对含量/%					气味描述
					SGT	CK	ANFT	AOFT	AONFT	
1	50.7	反式-9-十八碳烯酸	000112-79-8	$C_{18}H_{34}O_2$	0	0.15 (0.00~0.45)	0	0	0	/
2	22.83	癸酸	000334-48-5	$C_{10}H_{20}O_2$	0	0.07 (0.00~0.21)	0	0	0	/
3	47.43	棕榈酸	000057-10-3	$C_{16}H_{32}O_2$	2.85 (0.00~5.57)	4.80 (1.49~9.35)	0	2.66 (0.00~4.62)	1.24 (0.00~2.31)	蜡香、脂肪气味
4	51.07	硬脂酸	000057-11-4	$C_{18}H_{36}O_2$	0.61 (0.00~1.47)	0.54 (0.43~0.66)	0.05 (0.00~0.16)	0.42 (0.00~0.69)	0.74 (0.00~2.10)	油味
5	46.87	棕榈油酸	000373-49-9	$C_{16}H_{30}O_2$	0	0.65 (0.00~1.95)	0	0	0	/
6	44.33	正十五酸	001002-84-2	$C_{15}H_{30}O_2$	0	0.42 (0.00~1.25)	0	0	0	蜡香
7	38.74	肉豆蔻酸	000544-63-8	$C_{14}H_{28}O_2$	0.28 (0.00~0.84)	1.29 (0.00~3.07)	0	0.32 (0.00~0.95)	0	蜡香、脂肪气味
8	50.7	反式-13-十八碳烯酸	000693-71-0	$C_{18}H_{34}O_2$	0	0	0	0.14 (0.00~0.43)	0	/
9	14.65	(-)-4-萜品醇	020126-76-5	$C_{10}H_{18}O$	0	0.23 (0.00~0.69)	0	0	0	木质、泥土和百合气
10	34	A-毕橙茄醇	000481-34-5	$C_{15}H_{26}O$	0	0.33 (0.00~0.62)	0	0	0	草药香
11	18.74	1-癸醇	000112-30-1	$C_{10}H_{22}O$	0	0	0.15 (0.00~0.45)	0	0	蜡香、甜香、花香、果香
12	11.06	顺- $\alpha,\alpha$ -5-三甲基-5-乙烯基四氢化呋喃-2-甲醇	005989-33-3	$C_{10}H_{18}O_2$	0	3.48 (0.00~10.43)	0	0	0	花香
13	49.81	山萜醇	000661-19-8	$C_{22}H_{46}O$	0	0.22 (0.00~0.49)	0	0	0	/
14	9	苯甲醇	000100-51-6	$C_7H_8O$	0	0	0	0.56 (0.00~1.06)	0	花香, 玫瑰, 香脂味
15	41.6	E-2-十四烯-2-醇	75039-86-0	$C_{14}H_{28}O$	0	0	0	0.20 (0.00~0.61)	0	/
16	17.96	香叶醇	000106-24-1	$C_{10}H_{18}O$	4.57 (0.00~7.11)	4.48 (0.00~6.83)	1.14 (0.00~3.41)	0	0	花香、柑橘香
17	11.49	芳樟醇	000078-70-6	$C_{10}H_{18}O$	26.17 (19.21~30.23)	20.12 (15.31~24.40)	2.45 (0.00~7.35)	9.80 (9.02~10.22)	0	花香、甜香
18	31.8	Longiborneol	000465-24-7	$C_{15}H_{26}O$	0	0	0.22 (0.00~0.66)	0	0	木质香
19	16.82	橙花醇	000106-25-2	$C_{10}H_{18}O$	6.03 (2.94~11.73)	4.16 (3.12~5.99)	0	0	0	玫瑰和橙花香
20	44.96	十九醇	001454-84-8	$C_{19}H_{40}O$	0	0	0.41 (0.00~1.22)	0	0.17 (0.00~0.51)	/
21	49.84	二十四烷醇	000506-51-4	$C_{24}H_{50}O$	0.04 (0.00~0.12)	0	0.18 (0.00~0.34)	0.14 (0.00~0.42)	0	/
22	12.02	苯乙醇	000060-12-8	$C_8H_{10}O$	0	0	0	0.28 (0.00~0.85)	0	花香、甜香
23	14.64	4-萜烯醇	000562-74-3	$C_{10}H_{18}O$	0.99 (0.61~1.21)	0	0	0	0	胡椒香、泥土香和木质香
24	15.25	松油醇	8000-41-7	$C_{10}H_{18}O$	0	0	0	1.75 (0.00~3.50)	1.28 (0.00~3.84)	丁香
25	11.04	反式氧化芳樟醇 (呋喃类)	034995-77-2	$C_{10}H_{18}O_2$	0	0	0	1.03 (0.00~3.08)	0	花香

续表 2

序号	保留时间/min	化合物	CAS	分子式	相对含量/%					气味描述
					SGT	CK	ANFT	AOFT	AONFT	
26	16.23	2,4-二甲基苯甲醛	015764-16-6	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O	0	0.58 (0.00~1.73)	0	0	0	苦杏仁气味
27	38.65	3,5-二叔丁基-4-羧基苯甲醛	001620-98-0	C <sub>15</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>	1.81 (1.60~1.92)	1.75 (1.33~2.05)	1.18 (0.72~1.45)	1.07 (0.00~1.79)	1.36 (0.75~1.92)	/
28	9.35	苯乙醛	000122-78-1	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O	0.95 (0.77~1.05)	0.14 (0.00~0.42)	0	0	0	蜂蜜香, 玫瑰花香, 甜香, 香气, 巧克力味, 略带泥土气息
29	15.87	癸醛	000112-31-2	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O	0.82 (0.60~1.00)	0.73 (0.38~0.92)	1.68 (0.45~3.17)	0.98 (0.51~1.59)	0.52 (0.00~1.01)	脂肪、木质香
30	24.46	十二醛	000112-54-9	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O	0.07 (0.00~0.22)	0.08 (0.00~0.25)	0	0	0	强烈脂肪香
31	49.81	E-15-十七碳烯醛	700381-35-7	C <sub>17</sub> H <sub>32</sub> O	0	0	0	0.08 (0.00~0.25)	0	/
32	44.45	邻苯二甲酸二异丁酯	000084-69-5	C <sub>16</sub> H <sub>22</sub> O <sub>4</sub>	0	0	1.69 (0.00~5.08)	1.63 (0.00~4.89)	0.15 (0.00~0.46)	芳香
33	47.34	1,2-苯二甲酸-2-甲基丙基丁基酯	017851-53-5	C <sub>16</sub> H <sub>22</sub> O <sub>4</sub>	0	1.52 (0.00~4.55)	0	0	0	/
34	28.09	对苯二甲酸二甲酯	000120-61-6	C <sub>10</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub>	0	0	0.07 (0.00~0.21)	0	0	/
35	50.12	11-十六碳烯酸, 16-甲基, 甲基酯	055044-54-7	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	0	0.08 (0.00~0.24)	0	0	0	/
36	31.38	2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯	006846-50-0	C <sub>16</sub> H <sub>30</sub> O <sub>4</sub>	0	0	0	2.06 (0.00~5.54)	0	/
37	53.21	2-乙基己基反-4-甲氧基肉桂酸	083834-59-7	C <sub>18</sub> H <sub>26</sub> O <sub>3</sub>	0	0	0.06 (0.00~0.18)	0	0	/
38	53.21	对甲氧基肉桂酸辛酯	005466-77-3	C <sub>18</sub> H <sub>26</sub> O <sub>3</sub>	0	0	0.08 (0.00~0.23)	0.02 (0.00~0.07)	0	/
39	56.77	2-噻吩乙酸-2,6-二甲基壬-1-烯-5-基酯	1000299-38-9	C <sub>17</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub> S	0	0	0	0	0.10 (0.00~0.29)	/
40	55.84	邻苯二甲酸二(2-乙基己)酯	000117-81-7	C <sub>24</sub> H <sub>38</sub> O <sub>4</sub>	0	0	0.85 (0.00~2.55)	0.33 (0.00~0.99)	0.84 (0.00~2.53)	/
41	51.5	琥珀酸二乙基己酯	2915-57-3	C <sub>20</sub> H <sub>38</sub> O <sub>4</sub>	0	0	0.28 (0.00~0.84)	0	0	果香
42	44.46	1,2-苯二甲酸二丁酯	4489-61-6	C <sub>16</sub> H <sub>22</sub> O <sub>4</sub>	0	1.03 (0.00~3.10)	0	0	0	甜香
43	47.34	邻苯二甲酸二丁酯	000084-74-2	C <sub>16</sub> H <sub>22</sub> O <sub>4</sub>	5.33 (5.03~5.76)	4.10 (0.00~6.67)	11.09 (3.93~15.19)	4.79 (2.92~7.68)	7.23 (5.88~8.65)	芳香
44	29.18	二氢猕猴桃内酯	015356-74-8	C <sub>11</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	0	0	0	0.23 (0.00~0.35)	0.1 (0.00~0.30)	成熟的杏果味, 木质香
45	52.85	戊二酸, 二(3-乙基己基)酯	21302-20-5	C <sub>21</sub> H <sub>40</sub> O <sub>4</sub>	0	0.09 (0.00~0.28)	0.18 (0.00~0.55)	0	0	/
46	46.44	棕榈酸甲酯	000112-39-0	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	0	0	0	0.11 (0.00~0.33)	0	油脂味, 蜡质, 脂肪味

续表 2

序号	保留时间/min	化合物	CAS	分子式	相对含量/%					气味描述
					SGT	CK	ANFT	AOFT	AONFT	
47	54.13	己二酸二辛酯	000103-23-1	C <sub>22</sub> H <sub>42</sub> O <sub>4</sub>	0	0	0.08 (0.00~0.24)	2.02 (0.00~4.60)	0	
48	44.46	邻苯二甲酸壬酯异丁酯	1000309-04-4	C <sub>21</sub> H <sub>32</sub> O <sub>4</sub>	0	0	0	0	1.49 (0.00~4.46)	甜香
49	48.78	棕榈酸异丙酯	000142-91-6	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	0	0.12 (0.00~0.37)	0	0	0	油脂
50	53.54	脱氢枞酸甲酯	001235-74-1	C <sub>21</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	0	0	0	0.05 (0.00~0.14)	0	/
51	15.39	水杨酸甲酯	000119-36-8	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	0	0	0	9.76 (8.13~11.17)	0	薄荷香
52	46.48	14-甲基十五烷酸甲酯	005129-60-2	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	0	0.50 (0.00~1.51)	0	0	0	/
53	37.09	水杨酸苯酯	000118-55-8	C <sub>13</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	0	0	0	2.85 (0.28~4.94)	0	果香
54	55.83	邻苯二甲酸二(2-丙基)酯	1000377-93-5	C <sub>24</sub> H <sub>38</sub> O <sub>4</sub>	0	0	0	0.35 (0.00~1.05)	0	/
55	44.43	邻苯二甲酸-6-3-基异丁基酯	1000356-95-4		0.78 (0.00~2.35)	0	0	0	0	/
56	44.46	邻苯二甲酸-2-甲基戊-3-基的异丁酯	1000356-90-7		0	0	2.80 (0.00~8.40)	0	1.75 (0.00~5.25)	/
57	44.44	邻苯二甲酸-3-甲基丁基-3-烯丙基的异丁酯	1000357-10-1	C <sub>17</sub> H <sub>22</sub> O <sub>4</sub>	0	1.28 (0.00~3.83)	0	0	0	/
58	44.45	Phthalic acid, isobutyl octyl ester	1000309-04-5	C <sub>20</sub> H <sub>30</sub> O <sub>4</sub>	0	0	0	0.57 (0.00~1.70)	0	/
59	44.43	邻苯二甲酸, 反式-4-烯丙基异丁基酯	1000360-48-1	C <sub>18</sub> H <sub>24</sub> O <sub>4</sub>	1.45 (0.00~2.46)	0.67 (0.00~2.00)	2.95 (0.00~8.86)	0	0	/
60	49.05	(13 $\alpha$ )-D-Homo-5 $\alpha$ -androstane	054482-31-4	C <sub>20</sub> H <sub>34</sub>	0	0	0.14 (0.00~0.42)	0	0.31 (0.00~0.92)	/
61	42.65	(1S,4aS,4bS,7S,8aS,10aS)-7-Isopropyl-1,4a-dimethyl-tetradecahydronaphthalene	002221-95-6	C <sub>19</sub> H <sub>34</sub>	0	0	0	0.02 (0.00~0.06)	0	/
62	29.05	1-异丙基-4,7-二甲基-1,2,3,5,6,9a-六氢萘	016729-01-4	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	0	0	0	0	0.08 (0.00~0.25)	/
63	49.84	1-十九烯	018435-45-5	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub>	0	0	0.74 (0.00~2.23)	0	0.69 (0.00~2.08)	/
64	51.77	1-十八烯	000112-88-9	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub>	0	0	0.68 (0.00~2.03)	0.11 (0.00~0.33)	0.92 (0.00~2.77)	/
65	43.33	4-(4-乙基环己基)-1-戊基-2-环己烯	301643-32-3	C <sub>19</sub> H <sub>34</sub>	0	0	0	0	0.13 (0.00~0.35)	/
66	40.78	8-甲基-十七烷	013287-23-5	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>	0	0.15 (0.00~0.45)	0	0	0	/
67	40.79	9-甲基十九烷	013287-24-6	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>	0	0	0.69 (0.00~2.08)	0	0	/
68	38.82	萹	000120-12-7	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	0	0	0.09 (0.00~0.28)	0	0	/

续表 2

序号	保留时间/min	化合物	CAS	分子式	相对含量/%				气味描述	
					SGT	CK	ANFT	AOFT		AONFT
69	23.06	b-Patchoulene	000514-51-2	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	0	0	0	0	0.11 (0.00~0.32)	/
70	45.06	1-十六烯	000629-73-2	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub>	0	0	0.43 (0.00~1.29)	0.16 (0.00~0.49)	1.40 (0.00~2.28)	/
71	23.05	ALPHA-蒎烯	003856-25-5	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	0	0	0.10 (0.00~0.30)	0	0	蜜香
72	23.92	环十二烷	000294-62-2	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>	0	0.08 (0.00~0.24)	0	0	0	/
73	44.94	环十五烷	000295-48-7	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub>	0	0	0.23 (0.00~0.69)	0	0	/
74	44.95	环十四烷	000295-17-0	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>	0	0.39 (0.00~0.60)	0	0.04 (0.00~0.11)	0	/
75	51.61	二十二烷	000629-97-0	C <sub>22</sub> H <sub>46</sub>	0.03 (0.00~0.09)	0	0	0.07 (0.00~0.22)	0	蜡香
76	15.62	十二烷	000112-40-3	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	1.27 (0.97~1.56)	1.33 (0.85~1.64)	2.30 (1.53~3.29)	1.76 (1.58~1.99)	2.58 (1.90~3.92)	/
77	48.23	二十烷	000112-95-8	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>	0.30 (0.22~0.35)	0.42 (0.28~0.66)	0.90 (0.00~1.42)	0.74 (0.55~0.96)	2.87 (0.50~6.72)	蜡香
78	35.53	十七烷	000629-78-7	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>	0	0	0	0.07 (0.00~0.21)	0	/
79	56.42	二十六烷	000630-01-3	C <sub>26</sub> H <sub>54</sub>	0	0	0.08 (0.00~0.23)	0	0	/
80	32	十六烷	000544-76-3	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub>	2.70 (1.55~3.60)	2.62 (1.58~3.40)	5.77 (5.08~6.50)	3.26 (2.08~4.77)	6.35 (5.44~7.50)	/
81	28.16	十九烷	000629-92-5	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>	0	0	0.19 (0.00~0.57)	0	0.26 (0.00~0.78)	/
82	40.77	十八烷	000593-45-3	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>	0.74 (0.46~0.98)	0.62 (0.00~1.05)	1.01 (0.00~2.20)	1.07 (0.75~1.65)	1.86 (1.39~2.38)	/
83	28.13	十五烷	000629-62-9	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	0.24 (0.00~0.42)	0.31 (0.23~0.37)	0.22 (0.00~0.66)	0.38 (0.34~0.46)	0.25 (0.00~0.75)	/
84	54.12	二十四烷	000646-31-1	C <sub>24</sub> H <sub>50</sub>	0	0	0	0	0.92 (0.00~2.53)	/
85	24.1	十四烷	000629-59-4	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	5.48 (3.61~7.32)	5.40 (4.12~6.50)	9.19 (8.47~9.75)	5.81 (3.42~7.92)	10.77 (9.42~12.02)	/
86	19.89	十三烷	000629-50-5	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	0.35 (0.00~0.54)	0.42 (0.21~0.70)	0.79 (0.48~1.31)	0.37 (0.00~0.73)	0.68 (0.50~0.95)	/
87	48.15	三螺[4.2.4.2.4.2]二十烷烃	1000152-80-8	C <sub>21</sub> H <sub>36</sub>	0	0	0	0.10 (0.00~0.29)	0	/
88	44.99	Z-8-十六碳烯	1000130-87-5	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub>	0.19 (0.00~0.56)	0	0	0	0.07 (0.00~0.20)	花香
89	27.45	2,3,4,5,7-五甲基苯乙酮	1000342-53-1	C <sub>13</sub> H <sub>18</sub> O	0.25 (0.00~0.76)	0	0	0	0	/
90	27.02	2,6-二(叔丁基)-4-羟基-4-甲基-2,5-环己二烯-2-酮	1000401-12-0	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub>	6.84 (6.03~7.30)	6.64 (4.26~7.96)	5.41 (0.00~8.13)	4.77 (1.65~6.61)	8.41 (6.99~10.38)	/
91	27.45	4-(2,6,6-三甲基-1,3-环己二烯-1-基)-3-丁烯-2-酮	001203-08-3	C <sub>13</sub> H <sub>18</sub> O	0.62 (0.00~1.04)	0.11 (0.00~0.33)	0	0	0	/
92	10.19	苯乙酮	000098-86-2	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O	0	0	0	0	0.13 (0.00~0.39)	花香
93	26.25	香叶基丙酮	003796-70-1	C <sub>13</sub> H <sub>22</sub> O	0.47 (0.39~0.59)	0.37 (0.22~0.50)	0.50 (0.27~0.74)	0	0.55 (0.43~0.64)	甜香, 五兰花香, 玫瑰香, 玫瑰香, 果香
94	26.26	橙化基丙酮	003879-26-3	C <sub>13</sub> H <sub>22</sub> O	0	0	0	0.09 (0.00~0.28)	0	青甜香、玫瑰香



续表 2

序号	保留时间/min	化合物	CAS	分子式	相对含量/%					气味描述
					SGT	CK	ANFT	AOFT	AONFT	
95	31.7	十六烷基七硅氧烷	000541-01-5	C <sub>16</sub> H <sub>36</sub> O <sub>7</sub> Si <sub>7</sub>	0	0	0	0	0.25 (0.00~0.75)	/
96	17.2	1,1,3,3,5,5,7,7-八甲基-7-(2-甲基丙氧基)四硅氧烷-2-醇	63305-43-1	C <sub>14</sub> H <sub>27</sub> F <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Si <sub>4</sub>	0	0.51 (0.00~1.52)	0.26 (0.00~0.78)	0	0.70 (0.00~1.10)	/
97	32.3	1,3,5-三溴-2-甲氧基苯	000607-99-8	C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> Br <sub>3</sub> O	0	0	0.10 (0.00~0.29)	0	0	/
98	36.83	2,5-二叔丁基对苯二酚	000088-58-4	C <sub>14</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>	0	0.05 (0.00~0.16)	0.12 (0.00~0.37)	0	0	/
99	51.77	十二烷硫醇	007773-83-3	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub> S	0	0	0	0	0.18 (0.00~0.53)	/
100	32.1	2-(1,1,3,3-四甲基丁基)-苯酚	1000400-52-5	C <sub>14</sub> H <sub>22</sub> O	0.17 (0.00~0.52)	0	0	0	0	/
101	31.73	2-甲硫基苯并噻唑	000615-22-5	C <sub>8</sub> H <sub>7</sub> NS <sub>2</sub>	0.13 (0.00~0.38)	0.36 (0.00~0.63)	0	0.39 (0.00~1.17)	0	/
102	26.77	2,6-二叔丁基苯醌	000719-22-2	C <sub>14</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	2.47 (2.20~2.96)	2.30 (1.69~2.66)	3.26 (2.48~3.77)	2.01 (1.03~2.82)	3.63 (3.13~4.14)	板栗香
103	24.8	2-氯-4-叔戊基苯酚	005323-65-9	C <sub>11</sub> H <sub>15</sub> ClO	0.43 (0.00~0.67)	0	0.26 (0.00~0.78)	0	0	/
104	20.52	4-叔丁基-2-氯苯酚	000098-28-2	C <sub>10</sub> H <sub>13</sub> ClO	0.62 (0.57~0.69)	0.43 (0.26~0.53)	0.24 (0.00~0.40)	0.12 (0.00~0.37)	0.39 (0.36~0.40)	/
105	32.1	对特辛基苯酚	000140-66-9	C <sub>14</sub> H <sub>22</sub> O	0.29 (0.00~0.54)	0.53 (0.25~0.74)	0	0.26 (0.00~0.79)	0	/
106	46.14	7,9-Di-tert-butyl-1-oxaspiro(4,5)deca-6,9-diene-2,9-dione	082304-66-3	C <sub>17</sub> H <sub>24</sub> O <sub>3</sub>	0	0.26 (0.00~0.58)	0.49 (0.00~1.48)	0.18 (0.00~0.54)	0	/
107	51.8	苯胺, N-[4-(1-甲基乙基)苯亚甲基]-4-(1-吡咯烷基)磺酰胺	314765-47-4	C <sub>20</sub> H <sub>23</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S	0	0	0	0.10 (0.00~0.30)	0	/
108	34.35	对甲苯磺酰胺	000070-55-3	C <sub>7</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>2</sub> S	0	0	0	0.08 (0.00~0.24)	0	/
109	16.53	苯并噻唑	000095-16-9	C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> NS	11.78 (11.25~12.42)	12.60 (8.04~15.32)	8.99 (6.36~11.41)	8.56 (2.78~15.57)	11.93 (11.41~12.36)	喹啉气味
110	13.06	苯乙腈	000140-29-4	C <sub>8</sub> H <sub>7</sub> N	0.62 (0.00~0.96)	0.75 (0.00~1.16)	0	0.21 (0.00~0.64)	0	苦杏仁、辛辣、花香
111	51.26	双酚 A	000080-05-7	C <sub>15</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	0.56 (0.45~0.67)	0.68 (0.14~0.97)	0.60 (0.24~0.80)	1.54 (1.31~2.01)	0.83 (0.22~1.54)	/
112	51.75	双酚 A, TMS 衍生物	133220-73-2		0	0	0	0.14 (0.00~0.41)	0	/
113	28.65	2,6-二叔丁基对甲酚	000128-37-0	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub> O	5.03 (4.69~5.42)	5.30 (4.42~5.88)	6.61 (6.10~6.97)	3.71 (2.26~4.74)	6.90 (6.40~7.28)	/
114	43.08	咖啡因	000058-08-2	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> N <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	0	1.00 (0.00~2.39)	5.22 (1.54~8.71)	6.63 (0.52~18.28)	4.99 (0.00~11.20)	/
115	48.31	八硫杂环辛烷	010544-50-0	S <sub>8</sub>	0.69 (0.58~0.75)	0.93 (0.82~1.12)	0	0.17 (0.00~0.50)	0.12 (0.00~0.36)	/
116	21.3	十二甲基环六硅氧烷	000540-97-6	C <sub>12</sub> H <sub>30</sub> O <sub>6</sub> Si <sub>6</sub>	1.13 (1.01~1.21)	1.29 (1.21~1.45)	1.47 (1.36~1.55)	3.16 (1.09~4.76)	1.46 (1.34~1.54)	/
117	23.64	十甲基环五硅氧烷	000541-02-6	C <sub>10</sub> H <sub>30</sub> O <sub>5</sub> Si <sub>5</sub>	0.51 (0.00~1.52)	0.76 (0.00~2.28)	1.52 (0.00~2.31)	2.13 (1.87~2.34)	0.80 (0.00~2.39)	/

其他

续表 2

序号	保留时间/min	化合物	CAS	分子式	相对含量/%						气味描述
					SGT	CK	ANFT	AOFT	AONFT		
118	11.08	2-(5-甲基-5-乙基四氢呋喃-2-基)丙烷-3-基碳酸酯	1000373-80-3		0	0	7.81 (6.99~9.30)	2.93 (1.07~6.15)	9.61 (5.01~15.26)		/
119	19.55	吡嗪	000120-72-9	C <sub>8</sub> H <sub>7</sub> N	0.35 (0.00~1.06)	0.13 (0.00~0.38)	0	0	0	0	皮革、樟脑气味
120	16.95	环己基异硫氰酸酯	001122-82-3	C <sub>7</sub> H <sub>11</sub> NS	0	0	0.10 (0.00~0.30)	0.17 (0.00~0.35)	0	0	/
121	43.95	十四酸三甲基硅基酯	018603-17-3	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> Si	0	0	0	0.14 (0.00~0.41)	0	0	/
122	51.61	1-氯-壬烷	062016-76-6	C <sub>10</sub> H <sub>21</sub> Cl	0	0	0	0.06 (0.00~0.17)	0.04 (0.00~0.12)	0	/
123	17.19	八甲基环四硅氧烷	000556-67-2	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub> Si <sub>4</sub>	2.93 (1.41~4.01)	0.78 (0.00~1.38)	2.02 (0.44~3.64)	1.16 (0.00~2.21)	1.19 (0.08~2.39)	0	/
124	5.58	N-羧基苯甲酰胺甲酯	67160-14-9	C <sub>8</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>2</sub>	0	2.57 (0.00~7.71)	0	1.36 (0.00~4.08)	0	0	霉味, 肉味
125	49.25	三甲基硅烷基棕榈酸酯	055520-89-3	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub> O <sub>2</sub> Si	0	0.06 (0.00~0.18)	0	0.79 (0.00~1.41)	0.49 (0.00~1.48)	0	/
126	47.15	十五酸三甲基硅基酯	074367-22-9	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub> Si	0	0	0	0.11 (0.00~0.33)	0	0	/
127	44.38	邻苯二甲酸, 7-溴庚基异丁基酯	1000415-51-7		0	0	0	0.70 (0.00~2.09)	0	0	/
128	52.27	三甲基硅烷基硬脂酸酯	018748-91-9	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub> O <sub>2</sub> Si	0	0	0	0.16 (0.00~0.25)	0.20 (0.00~0.59)	0	/
129	51.76	十八硫醇	002885-00-9	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub> S	0.04 (0.00~0.11)	0	0.09 (0.00~0.27)	0	0	0	/

注: 表中数值为平均值 (最小值 - 最大值); “/” 表示未检测到。

### 2.2.2 曲霉液态发酵对挥发性成分含量的影响

将鉴定出的 129 种挥发性成分分为 7 类, 包括酸类 (8 种)、醇类 (17 种)、醛类 (6 种)、酮类 (6 种)、酯类 (29 种)、烃类 (29 种) 和其他化合物 (35 种), 相对含量如图 3 所示。

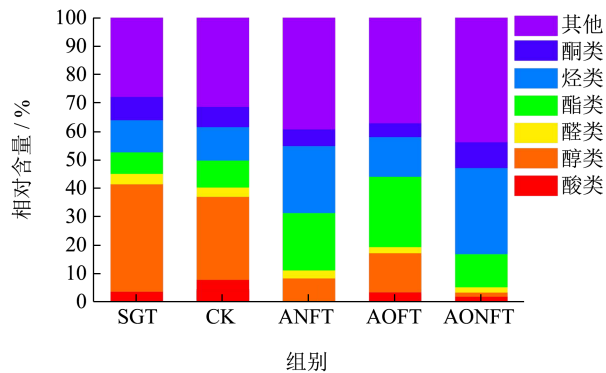


图 3 挥发性成分的相对含量

Fig.3 Relative content of volatile components

醇类化合物通常具有花香、清香和木质香等特殊的气味<sup>[15]</sup>, 被认为是普洱熟茶标志性香气成分。醇类化合物的含量在五组茶汤中的顺序依次为: 晒青毛茶汤 > 自然发酵茶汤 > 米曲霉发酵茶汤 > 黑曲霉发酵茶汤 > 混合发酵茶汤, 相对含量依次为 37.80%、29.21%、13.76%、8.35%、1.45%。结果表明, 接种曲霉发酵后醇类化合物含量显著降低。具体来讲, 单独接种米曲霉发酵后的茶汤中保留了更高含量的醇类化合物, 主要包括呈现花香、玫瑰香、丁香和木质香气味的芳樟醇、松油醇、苯乙醇和反式氧化芳樟醇(呋喃)<sup>[16]</sup>。黑曲霉发酵茶汤中主要保留呈现花香气味的顺- $\alpha,\alpha$ -5-三甲基-5-乙炔基四氢化呋喃-2-甲醇、芳樟醇和香叶醇<sup>[17]</sup>。混合发酵中主要保留了呈现丁香气味的松油醇<sup>[18]</sup>。

醛类化合物通常呈现草药和脂肪气味<sup>[19]</sup>。醛类化合物含量在晒青毛茶汤和自然发酵茶汤中相对最高, 分别为 3.65% 和 3.28%。接种曲霉发酵后醛类化合物的含量均降低。其中, 混合发酵和单独接种米曲霉发酵影响最为显著, 分别降低至 1.89% 和 2.13%。而单独接种黑曲霉发酵后醛类化合物的含量略有降低(降低了 0.79%)。因此, 单独接种黑曲霉发酵可以减少茶汤中醛类化合物含量的降低, 保留了浓郁的脂肪气味。而混合发酵不利于醛类化合物的保留。此外, 癸醛在单独接种黑曲霉发酵茶汤相对含量最高, 分别为 1.68% 和 0.98%。癸醛呈现脂肪和木质气味, 被认为是普洱熟茶中最重要的气味成分<sup>[19]</sup>。因此, 结合感官评价结果, 我们推测癸

醛是黑曲霉发酵茶汤呈现脂肪气味的主要贡献者。

酮类化合物在晒青毛茶汤和自然发酵茶汤中的含量分别为 8.18%、7.12%。单独接种黑曲霉和米曲霉发酵后酮类化合物含量均显著降低, 而混合发酵后的含量增加至 9.09%, 主要包括呈现花香和玫瑰香气味的苯乙酮, 香叶基丙酮和 2,2,6-二(叔丁基)-4-羟基-4-甲基-2,5-环己二烯-2-酮<sup>[20]</sup>。因此, 两种曲霉相互作用促进了酮类化合物的合成。此外, 仅在米曲霉发酵茶汤中检测到了呈现脂肪气味橙花基丙酮。

酸类化合物在自然发酵茶汤中含量最高, 为 7.91%, 晒青毛茶汤次之 (3.74%), 接种发酵组中较低。其中, 黑曲霉发酵茶汤酸类化合物的含量最低, 为 0.05%, 说明黑曲霉对酸转化的影响最大。而米曲霉发酵茶汤和混合发酵茶汤分别为 3.53% 和 1.98%, 说明米曲霉减缓了酸类化合物转化, 且主要为呈现脂肪气味的棕榈酸<sup>[21]</sup>。

酯类化合物在单独接种米曲霉发酵茶汤中的含量 (24.76%) > 单独接种黑曲霉发酵茶汤 (20.14%) > 混合发酵茶汤 (11.66%) > 自然发酵茶汤 (9.47%) > 晒青毛茶汤 (7.57%)。结果表明, 单独接种发酵更有利于提升酯类化合物含量, 并且米曲霉发酵最为显著。水杨酸甲酯在普洱茶、茯砖茶、六堡茶和青砖茶中呈现薄荷香气味, 水杨酸苯酯呈现出水果气味<sup>[22]</sup>。它们仅在米曲霉发酵中检测到, 可能是由于米曲霉独特的代谢途径所产生。此外, 五组茶汤中均检出呈现芳香气味的邻苯二甲酸二丁酯<sup>[23]</sup>, 尤其在单独接种黑曲霉发酵和混合发酵中含量较高。

烃类化合物是茶叶中数量最多的挥发性成分<sup>[24]</sup>, 在晒青毛茶汤中的含量为 11.30%, 而曲霉发酵后烃类化合物含量均增加。其中, 在混合发酵茶汤中含量最高 (30.24%), 黑曲霉发酵茶汤次之 (23.54%), 米曲霉发酵茶汤略有增加 (13.96%)。大多数已被鉴定的烃类化合物都是饱和的, 并且呈现的气味很少。因此, 饱和烃类化合物通常对茶叶的整个香气贡献较小, 而不饱和烃通常在茶叶香气形成中起着至关重要的作用<sup>[25]</sup>。ALPHA-蒎烯是一种不饱和烃, 呈现木质气味<sup>[26]</sup>, 仅在米曲霉发酵中发现。在其他挥发性化合物中, 具有类似喹啉气味的苯并噻唑在五个样品中含量均很高。此外, 咖啡因含量在黑曲霉发酵茶汤、米曲霉发酵茶汤和混合发酵茶汤中相对较高, 分别占 5.22%、6.63% 和

4.99%。然而，由于咖啡因气味阈值较高，很难捕捉到它的气味进行嗅觉分析<sup>[27]</sup>，因此，咖啡因几乎对茶汤香气没有影响。

综上，曲霉发酵后显著提升了酯类和烃类化合物的含量，降低了酸类、醇类和醛类化合物的含量。单独接种米曲霉发酵后不仅挥发性成分数量增加最多，而且产生的独特挥发性成分也最多，如呈现薄荷气味的水杨酸甲酯和水果气味的水杨酸苯酯。此外，米曲霉单独发酵可以保留更高含量的醇类和酯类化合物。黑曲霉单独发酵能够保留更多的醛类和降低酸类化合物含量。混合发酵可以同时保留米曲霉和黑曲霉单独发酵产生的 26 个挥发性成分，且较单独接种发酵显著增加了酮类和烃类化合物的含量。

### 2.3 曲霉液态发酵后差异挥发性成分的筛选

#### 2.3.1 PCA和聚类分析

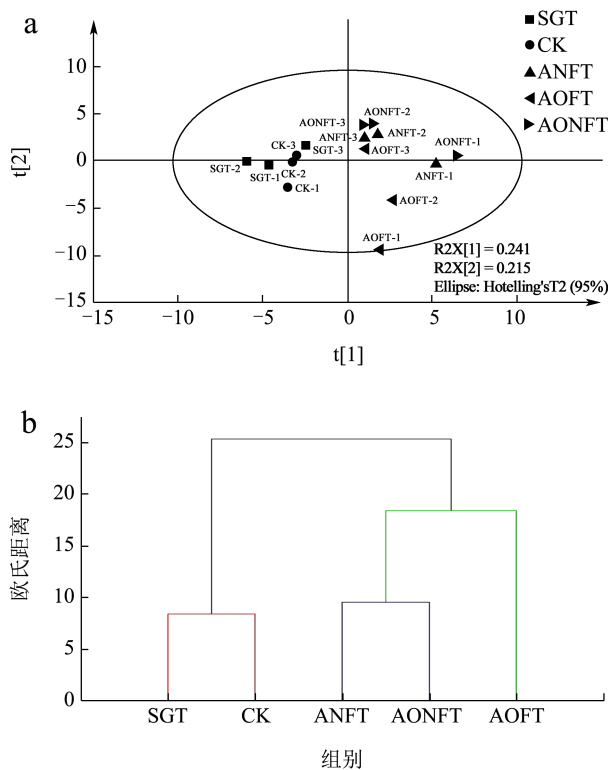


图4 (a) 主成分分析 (PCA) 得分图、  
(b) 欧氏距离聚类分析

Fig.4 (a) Principal component analysis (PCA) score plot,  
(b) Euclidean distance clustering analysis

采用 PCA 分析曲霉发酵对晒青毛茶汤挥发性成分的影响，结果如图 4a。基于主成分 t[2]，可以很

好地区分曲霉发酵茶汤、自然发酵茶汤和晒青毛茶汤，说明曲霉发酵对茶汤挥发性成分影响较为显著。为了进一步比较黑曲霉和米曲霉单独和混合发酵对晒青毛茶汤挥发性成分的影响，采用欧氏距离聚类分析，结果如图 4b。五种茶汤被分为 3 个簇，SGT-CK、AOFT、ANFT-AONFT。结果表明，自然发酵与初始晒青毛茶汤挥发性成分并没有显著差异，结果与 PCA 分析一致；黑曲霉发酵茶汤与混合接种发酵茶汤相似，而米曲霉单独发酵茶汤比较独特。

#### 2.3.2 OPLS-DA分析

进一步构建 OPLS-DA 模型筛选影响茶汤香气特征差异的挥发性成分，如图 5a-5c。SGT vs ANFT、SGT vs AOFT 和 SGT vs ANFT 的 OPLS-DA 得分图的  $[R^2_Y(\text{cum}), Q^2(\text{cum})]$  值分别为 (0.957,0.784)、(0.975,0.766) 和 (0.968,0.906)，表明三个模型稳定性均良好，可以应用于差异挥发性成分的筛选。进一步对模型进行 200 次置换验证检验如图 5d-5f)，结果表明三个 OPLS-DA 模型均没有过拟合，具有统计学意义。

#### 2.3.3 差异挥发性成分筛选

基于  $VIP > 1$  和  $P < 0.05$  共筛选了 29 种挥发性成分对茶汤香气特征差异贡献较大，结果如表 3。其中，与晒青毛茶汤相比，单独接种黑曲霉发酵后有 8 个差异挥发性成分，包括苯乙醛、芳樟醇、4-萜烯醇、咖啡因、八硫杂环辛烷、2-(5-甲基-5-乙炔基四氢呋喃-2-基)丙烷-3-基碳酸酯、十六烷和十五烷；单独接种米曲霉发酵后有 12 个差异挥发性成分，包括芳樟醇、苯乙醛、香叶基丙酮、水杨酸甲酯、4-萜烯醇、八硫杂环辛烷、2-氯-4-叔戊基苯酚、4-(2,6,6-三甲基-1,3-环己二烯-1-基)-3-丁烯-2-酮、4-叔丁基-2-氯苯酚、双酚 A、十甲基环五硅氧烷、硬脂酸，TMS 衍生物；混合发酵后有 21 个差异挥发性成分，包括芳樟醇、4-萜烯醇、苯乙醛、二氢猕猴桃内酯、邻苯二甲酸二异丁酯、八硫杂环辛烷、2-氯-4-叔戊基苯酚、4-(2,6,6-三甲基-1,3-环己二烯-1-基)-3-丁烯-2-酮、2-(5-甲基-5-乙炔基四氢呋喃-2-基)丙烷-3-基碳酸酯、十六烷、1-异丙基-4,7-二甲基-1,2,3,5,6,9a-六氢萘、2-噻吩乙酸-2,6-二甲基壬-1-烯-5-基酯、对特辛基苯酚、苯乙酮、苯乙腈、b-Patchoulene、2,6-二叔丁基对甲酚、十二醛、十九醇、1-氯-壬烷、十四烷。



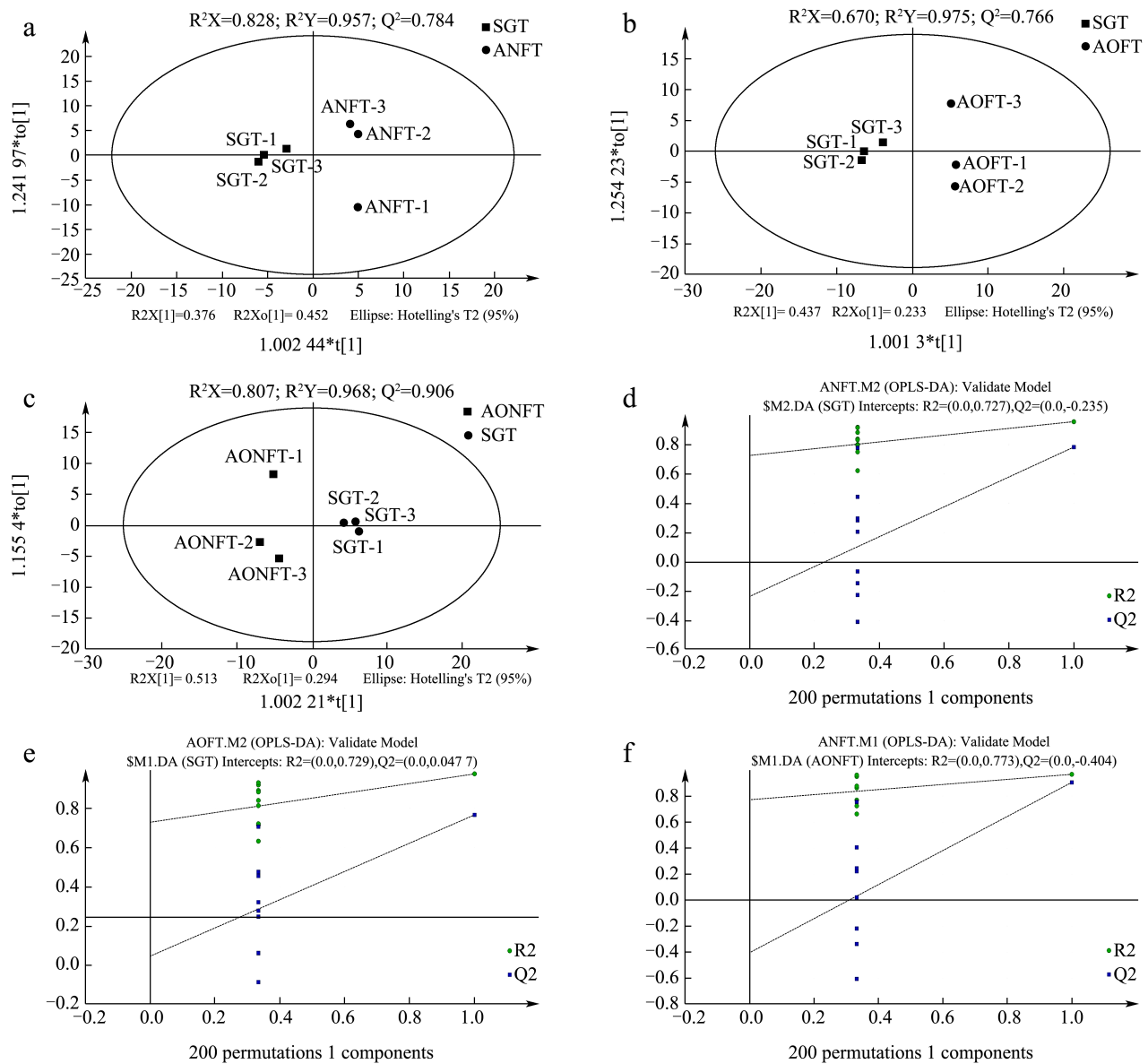


图 5 OPLS-DA 模型得分图和 200 次置换验证检验

Fig.5 OPLS-DA model score plots and 200 permutation validation tests

注：(a) SGT vs ANFT；(b) SGT vs AOFT；(c) SGT vs AONFT；(d) SGT vs ANFT；(e) SGT vs AOFT；(f) SGT vs AONFT。

表 3 基于VIP > 1和P < 0.05共筛选的29种差异挥发性成分

Table 3 A total of 29 differential volatile components screened based on VIP > 1 and P < 0.05

序号		VIP (SGT vs ANFT)	P (SGT vs ANFT)	VIP (SGT vs AOFT)	P (SGT vs AOFT)	VIP (SGT vs AONFT)	P (SGT vs AONFT)
1	二氢猕猴桃内酯	/	/	/	/	1.17	0.03
2	邻苯二甲酸二异丁酯	/	/	/	/	1.28	0.01
3	1-异丙基-4,7-二甲 基-1,2,3,5,6,9a- 六氢茶	/	/	/	/	1.24	0.02
4	2-氯-4-叔戊基苯酚	/	/	1.38	0.03	1.24	0.03
5	2-噻吩乙酸-2,6- 二甲基壬-1-烯 -5-基酯	/	/	/	/	1.28	0.01

续表 3

序号	VIP (SGT vs ANFT)	P (SGT vs ANFT)	VIP (SGT vs AOFT)	P (SGT vs AOFT)	VIP (SGT vs AONFT)	P (SGT vs AONFT)
6	/	/	1.37	0.04	1.23	0.04
7	/	/	1.39	0.00	/	/
8	/	/	/	/	1.22	0.03
9	/	/	/	/	1.31	0.01
10	1.45	0.01	1.46	0.00	1.33	0.00
11	/	/	/	/	1.24	0.03
12	/	/	1.46	0.01	/	/
13	/	/	/	/	1.29	0.01
14	/	/	/	/	1.33	0.01
15	1.38	0.04	/	/	/	/
16	1.37	0.03	1.38	0.01	1.37	0.00
17	/	/	1.30	0.02	/	/
18	/	/	/	/	1.14	0.05
19	1.44	0.01	/	/	1.16	0.02
20	/	/	1.40	0.01	/	/
21	1.41	0.04	/	/	1.31	0.02
22	/	0.00	1.49	0.00	1.38	0.00
23	/	/	1.48	0.00	/	/
24	/	/	/	/	1.21	0.04
25	/	/	/	/	1.15	0.04
26	/	0.04	/	/	/	/
27	/	/	1.24	0.04	/	/
28	/	0.02	1.48	0.00	1.35	0.00
29	/	/	/	/	1.32	0.01

#### 2.4 共有和特有的差异挥发性成分分析

进一步对 3 组发酵茶汤共有和特有的差异挥发性成分进行分析,如图 6a 和 6b。单独接种黑曲霉、单独接种米曲霉发酵茶汤与混合发酵茶汤共有 4 个差异挥发性成分,包括芳樟醇、苯乙醛、4-萜烯醇和八硫杂环辛烷。先前的研究报道了芳樟醇呈现花香、玫瑰香、丁香和木质香<sup>[16]</sup>,苯乙醛呈现蜜香,花香和甜香<sup>[28]</sup>,4-萜烯醇呈现胡椒香、泥土香和木质香<sup>[29]</sup>。芳樟醇在晒青毛茶汤中的相对含量为 26.17%,显著高于苯乙醛(0.95%)和 4-萜烯醇(0.99%)的含量,是相对含量最高的挥发性化合物。

因此,曲霉发酵后茶汤中芳樟醇含量的显著降低是影响晒青毛茶汤香气特征改变主要原因。单独接种黑曲霉发酵与混合发酵茶汤共有 2 个差异挥发性成分,2-(5-甲基-5-乙烯基四氢呋喃-2-基)丙烷-3-基碳酸酯和十六烷,较晒青毛茶汤含量显著增加。单独接种米曲霉发酵茶汤与混合发酵茶汤共有 2 个差异挥发性成分,2-氯-4-叔戊基苯酚和 4-(2,6,6-三甲基-1,3-环己二烯-1-基)-3-丁烯-2-酮,其中 4-(2,6,6-三甲基-1,3-环己二烯-1-基)-3-丁烯-2-酮仅存在于晒青毛茶汤中,2-氯-4-叔戊基苯酚存在于晒青毛茶汤和黑曲霉发酵茶汤中,而在米曲霉发酵茶汤与

混合发酵茶汤均未检测到。因此，米曲霉独特的代谢途径造成了 2-氯-4-叔戊基苯酚和 4-(2,6,6-三甲基-1,3-环己二烯-1-基)-3-丁烯-2-酮含量降低至检测范围以下。

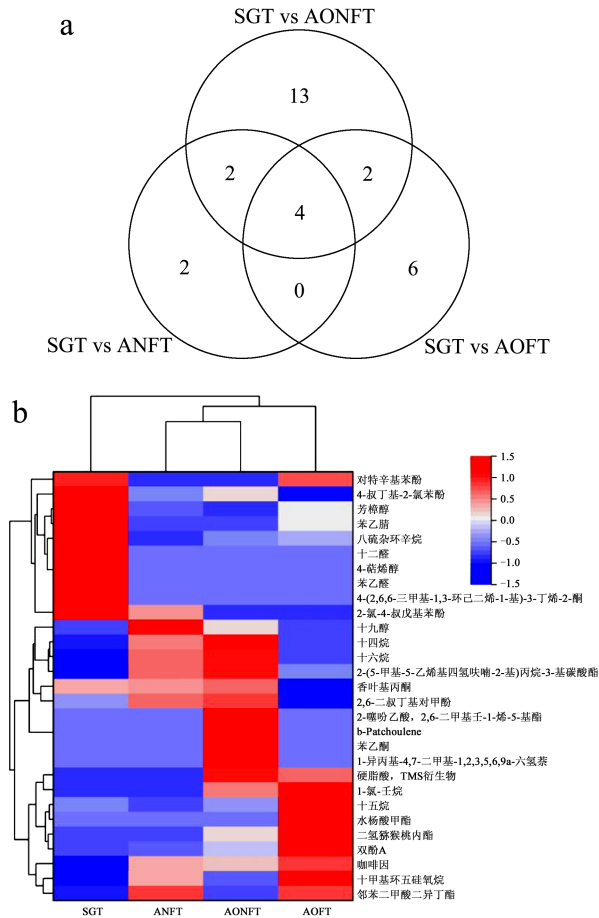


图6 (a) 共有和特有的差异挥发性成分韦恩图、  
(b) 聚类热图

Fig.6 (a)Venn diagram of shared and unique differential volatile components, (b) Cluster heatmap of component analysis

单独接种黑曲霉发酵茶汤特有 2 种差异挥发性成分，咖啡因和十五烷。单独接种米曲霉发酵茶汤特有 6 种差异挥发性成分，包括香叶基丙酮、水杨酸甲酯、4-叔丁基-2-氯苯酚、双酚 A、十甲基环五硅氧烷和硬脂酸，TMS 衍生物。混合发酵特有 13 个差异挥发性成分，包括二氢猕猴桃内酯、邻苯二甲酸二异丁酯、苯乙酮、十二醛、1-异丙基-4,7-二甲基-1,2,3,5,6,9a-六氢萘、2-噻吩乙酸-2,6-二甲基壬-1-烯-5-基酯、对特辛基苯酚、苯乙腈、b-Patchoulene、2,6-二叔丁基对甲酚、十九醇、1-氯-壬烷和十四烷。值得注意的是，单独接种黑曲霉发酵后产生的咖啡因和十五烷对茶汤香气特征并

无实质贡献，而在单独接种米曲霉发酵后产生的香叶基丙酮和水杨酸甲酯对茶汤呈现花香、果香、薄荷香等香气具有至关重要的贡献<sup>[22,30]</sup>。此外，水杨酸甲酯在单独接种米曲霉发酵茶汤中特有，且相对含量最高 (9.76%)。基于先前的报道，我们推测水杨酸甲酯的产生可能是由米曲霉通过苯丙氨酸代谢产生<sup>[31]</sup>。混合发酵后产生更多具有芳香气味的差异挥发性成分，如二氢猕猴桃内酯、邻苯二甲酸二异丁酯、苯乙酮和十二醛。结果表明，黑曲霉和米曲霉协同发酵可以促使更多具有香气特征的挥发性成分产生。已有较多研究报道了有益微生物协同发酵不仅可以促使晒青毛茶原料中苦涩味物质的含量降低，而且赋予最终普洱熟茶产品更加醇厚的口感和独特的香气特征<sup>[32-34]</sup>。因此，本研究结果表明，在液态发酵体系中，混菌发酵较单菌发酵会产生更丰富的香气成分，为多样化茶产品的开发提供理论指导。

### 3 结论

本研究通过感官评价、HS-SPME-GC-MS 结合化学计量学分析方法，探究了单独和混合接种曲霉液态发酵对晒青毛茶汤挥发性成分的影响。感官评价结果表明，发酵 48 h 后，接种发酵后的茶汤颜色均发生显著变化，且均变为红褐色偏暗。在香气特征方面，黑曲霉发酵茶汤呈现脂肪香，米曲霉发酵茶汤呈现花果香，而混合发酵茶汤呈现木香，略带脂肪香。在挥发性成分种类和数量方面，米曲霉单独发酵后不仅挥发性成分数量增加最多，而且产生的特有挥发性成分也最多；此外，单独接种米曲霉发酵显著提升了酯类化合物的含量，同时保留更高含量的醇类化合物。单独接种黑曲霉发酵显著提升了酯类化合物含量，同时保留更高含量的醛类化合物。混合发酵可以同时保留米曲霉和黑曲霉单独发酵产生的 26 个挥发性成分，且显著提升了酮类化合物的含量。PCA 和欧氏距离聚类分析表明，晒青毛茶汤与自然发酵茶汤挥发性成分相似，单独接种黑曲霉发酵茶汤与混合接种发酵茶汤挥发性成分相似，而单独接种米曲霉发酵茶汤比较独特。基于 VIP>1 和 P<0.05 共筛选了 29 种差异挥发性成分，其中单独接种黑曲霉、米曲霉发酵和混合发酵后分别有 8、12 和 21 个挥发性成分。进一步对共有和特有的差异挥发性成分分析发现，芳樟醇是曲霉发酵后晒青毛茶汤香气特征改变的主要原因。此外，

混合发酵和单独接种米曲霉发酵后可产生较多的具有香气属性的挥发性成分。

综上所述,相较于黑曲霉,米曲霉在茶叶液态发酵中具有独特性,是一种较好的产香菌株。此外,两种曲霉的三种接种方式对茶汤的香气特征和挥发性成分的影响不同,根据开发茶产品的需求,选择合适的微生物和接种方式,若要提升酯类化合物含量同时保留更高含量的醇类可选择单独接种米曲霉发酵;若要提升酯类化合物含量同时保留最高含量的醛类化合物可选择单独接种黑曲霉发酵;若要提升酮类和烃类化合物含量可选择混合发酵。因此,本研究为发酵类茶产品的增香技术研究和多样化产品开发提供理论依据,促进茶产业的多元化发展。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] HE C, ZHOU J T, LI Y C, et al. The aroma characteristics of oolong tea are jointly determined by processing mode and tea cultivars [J]. *Food Chemistry: X*, 2023, 18: 100730.
- [3] LIU H C, XU Y J, WU J, et al. GC-IMS and olfactometry analysis on the tea aroma of Yingde black teas harvested in different seasons [J]. *Food Research International*, 2021, 150: 110784.
- [4] YUN J, CUI C J, ZHANG S H, et al. Use of headspace GC/MS combined with chemometric analysis to identify the geographic origins of black tea [J]. *Food Chemistry*, 2021, 360: 130033.
- [5] 徐瑞雪,杜丽平,郝瑞雪,等.普洱茶液态自然发酵的工艺研究[J].*食品工业科技*,2012,33(11):243-246.
- [6] 赵宏朋,黄斯晨,施丽娟,等.茯砖茶优势菌株分离鉴定及发酵低级绿茶分析[J].*食品科学*,2022,43(6):89-95.
- [7] LI Z Y, FENG C X, LUO X G, et al. Revealing the influence of microbiota on the quality of Pu-erh tea during fermentation process by shotgun metagenomic and metabolomic analysis [J]. *Food Microbiology*, 2018, 76: 405-415.
- [8] 姜姝,吕杰,李灏.普洱茶不同发酵时期微生物群落宏转录组学研究[J].*北京化工大学学报(自然科学版)*,2012, 39(6):84-89.
- [9] 周才碧,陈文品,吴钟玲,等.普洱茶优势菌株黑曲霉的分离及其功能和安全性研究[J].*食品安全质量检测学报*, 2015,6(3):1006-1010.
- [10] CAO LT, GUO X M, LIU G J, et al. A comparative analysis for the volatile compounds of various Chinese dark teas using combinatory metabolomics and fungal solid-state fermentation [J]. *Journal of Food and Drug Analysis*, 2018, 26(1): 112-123
- [11] CHANCHAROONPONG C, HSIEH P C, SHEU S C. Enzyme production and growth of *Aspergillus oryzae* S. on soybean koji fermentation [J]. *APCBEE Procedia*, 2012, 2: 57-61.
- [12] XU N, LIU Y Q, HU Y, et al. Autolysis of *Aspergillus oryzae* mycelium and effect on volatile flavor compounds of soy sauce [J]. *Journal of Food Science*, 2016, 81(7-9): 1883-1890.
- [13] 杨志伟,包琪,杨锡洪,等.米曲霉发酵牡蛎调味基料的开发及其风味品质分析[J].*现代食品科技*,2023,39(4):271-277.
- [14] 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.
- [15] LV H P, ZHANG Y J, LIN Z, et al. Processing and chemical constituents of Pu-erh tea: A review [J]. *Food Research International*, 2013, 53(2): 608-618.
- [16] 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.
- [17] YANG T, ZHU Y, SHAO C Y, et al. Enantiomeric analysis of linalool in teas using headspace solid-phase microextraction with chiral gas chromatography [J]. *Industrial Crops and Products*, 2016, 83: 17-23.
- [18] 霍镇永,黎金凤,朱守记.松油醇应用研究进展[J].*广东化工*,2022,49(8):106-108.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 马超龙.晒青毛茶加工过程中香气变化研究[D].重庆:西南大学,2017.
- [22] 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.
- [23] 蒋容港.不同香型黄茶特征香气成分研究[D].长沙:湖南农业大学,2021.
- [24] 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.



- [25] LV S D, WU Y S, ZHOU J S, et al. The study of fingerprint characteristics of Dayi Pu-erh tea using a fully automatic HS-SPME/GC-MS and combined chemometrics method [J]. Plos One, 2015, 9(12): e116428.
- [26] 杨晓蓓,王雅琴,谢勇,等.顶空固相微萃取和气相色谱-质谱联用分析流苏石斛花的香气成分[J].日用化学品科学,2019,42(8):40-43.
- [27] WANG S N, QIU Y, GAN R Y, et al. Chemical constituents and biological properties of Pu-erh tea [J]. Food Research International, 2022, 154: 110899.
- [28] YAO, H B, SU H, MA, J Y, et al. Widely targeted volatileomics analysis reveals the typical aroma formation of Xinyang black tea during fermentation [J]. Food Research International, 2022, 164: 112387.
- [29] NAKAMURA A, MIYAZAWA, M. Evaluation of volatiles from *Ampelopsis brevipedunculata* var. *heterophylla* using GC-olfactometry, GC-MS and GC-pulsed flame photometric detector [J]. Journal of Oleo Science, 2013, 62(9): 645-655.
- [30] LI Q Q, LI, B, ZHANG C Y, et al. Insights into key aroma of vine tea (*Ampelopsis grossedentata*) for grade evaluation integrating relative odor activity value, gas chromatography-olfactometry and chemometrics approaches [J]. Food Control, 2024, 155: 110048
- [31] ZHOU Y, PENG Q Y, ZENG L T, et al. Study of the biochemical formation pathway of aroma compound 1-phenylethanol in tea (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) flowers and other plants [J]. Food Chemistry, 2018, 258: 352-358.
- [32] 颜学行,赵媛,满红平,等.不同有益微生物协同发酵对普洱茶芳香物质的影响[J].食品科学,2023,44(10):188-194.
- [33] 李萍.普洱茶及乌龙茶发酵过程中品质变化的研究[D].广州:华南理工大学,2009.
- [34] 付秀娟,宋文军,徐咏全,等.不同种类微生物对普洱茶发酵过程的影响[J].茶叶科学,2012,32(4):325-330.