

基于气相离子迁移谱技术分析杜仲叶茯砖茶加工过程中挥发性成分

曾桥, 吕生华, 段洁, 边文文, 刘静, 孙敏, 张静娴, 刘媛, 杨文娟, 冯小龙, 余郑绿

Analysis of Volatile Compounds in the Manufacturing Process of *Eucommia Ulmoides* Leaves Fu Brick Tea Based on Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry Method

ZENG Qiao, LV Shenghua, DUAN Jie, BIAN Wenwen, LIU Jing, SUN Min, ZHANG Jingxian, LIU Yuan, YANG Wenjuan, FENG Xiaolong, and YU Zhenglv

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021020147>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

同时蒸馏萃取法和顶空固相微萃取法提取茯砖茶挥发性成分的比较分析

Comparative Analysis of Volatile Components in Fu brick Tea by Simultaneous Distillation and Headspace Solid-phase Micro-extraction

食品工业科技. 2018, 39(24): 246–252

基于气相-离子迁移谱技术分析烤羊肉串的挥发性风味成分

Analysis of Volatile Flavor Substances in Mutton Shashlik Based on GC-IMS Technology

食品工业科技. 2021, 42(8): 256–263

基于气相离子迁移谱的发酵海带风味分析

Flavor Analysis of Fermented *Laminaria japonica* Based on Gas Chromatograph-Ion Mobility Spectrometer (GC-IMS)

食品工业科技. 2021, 42(12): 300–306

基于电子鼻、GC-MS和GC-IMS技术分析老香黄发酵期间的挥发性成分变化

Analysis of Volatile Components in Laoxianghuang During Fermentation by Electronic Nose, GC-MS and GC-IMS

食品工业科技. 2021, 42(12): 70–80

杏仁油挥发性成分指纹图谱的构建及掺伪定量检测方法研究

Detection method research of adulteration of apricot kernel oil based on fingerprint of volatile components

食品工业科技. 2017(01): 296–299

基于GC-MS与GC-IMS技术对四种柚皮精油挥发性风味物质的检测

Analysis of Volatile Flavour Components in Four Pomelo Peel Essential Oils Based on GC-MS and GC-IMS

食品工业科技. 2021, 42(15): 256–268



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

曾桥, 吕生华, 段洁, 等. 基于气相离子迁移谱技术分析杜仲叶茯砖茶加工过程中挥发性成分 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(21): 73–82. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021020147

ZENG Qiao, LV Shenghua, DUAN Jie, et al. Analysis of Volatile Compounds in the Manufacturing Process of *Eucommia Ulmoides* Leaves Fu Brick Tea Based on Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry Method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(21): 73–82. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021020147

基于气相离子迁移谱技术分析杜仲叶茯砖茶 加工过程中挥发性成分

曾桥^{1,2}, 吕生华^{1,*}, 段洁³, 边文文³, 刘静³, 孙敏², 张静娴², 刘媛², 杨文娟², 冯小龙⁴, 余郑绿⁵

(1. 陕西科技大学轻工科学与工程学院, 陕西西安 710021;
2. 陕西科技大学食品与生物工程学院, 陕西西安 710021;
3. 陕西省产品质量监督检验研究院, 陕西西安 710048;
4. 通化唐亦舒食品有限公司, 吉林通化 134000;
5. 陕西朴道茶业股份有限公司, 陕西西安 713700)

摘要: 为了解杜仲叶茯砖茶加工过程中挥发性成分变化, 采用气相离子迁移谱 (Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry, GC-IMS) 技术对加工过程中的挥发性成分进行测定, 使用 Gallery Plot 插件绘制了挥发性物质离子迁移指纹谱图, 比较不同阶段杜仲叶茯砖茶样本挥发性成分差异, 并进行主成分分析。结果表明: 杜仲叶茯砖茶原料筛选、渥堆、气蒸与成型 (即发花第 0 d)、发花第 8、25 d 及陈化 1 年等 6 个阶段样本共检出挥发性成分 70 种, 明确定性的有 51 种, 包括醛类、酮类、醇类、酯类、吡嗪类、酸类、萜烯类、呋喃类、醚类及含硫化合物等。PCA 分析显示, PC1 为 47%, PC2 为 27%, 累计贡献率为 74%, 较好的反映了不同茶样之间挥发性成分差异的影响因素。各不同阶段茶样在 PCA 图上呈分离状态, 说明加工过程中各不同阶段茶样挥发性成分存在差异, 部分呈青草味和泥土香的吡嗪、醛类和酮类物质相对含量随着加工过程的进行逐步减少, 而部分呈药香、果香和醇香的醇类、醛类和酯类物质相对含量逐步增加, 最终形成了杜仲叶茯砖茶较好的药香、果香和菌香。2-乙基-3,5-二甲基吡嗪二聚体在渥堆样本中, 2,4-庚二烯醛和 3-甲硫基丙醛在发花阶段样本中以及 5-甲基糠醛、丙烯酸正丁酯单体、丙烯酸正丁酯二聚体、糠醛二聚体、2,3-丁二醇在陈化阶段样本中的相对含量远高于上述各成分在其他阶段样本中的含量, 可以作为杜仲叶茯砖茶渥堆、发花和陈化阶段的候选标记物, 从而为杜仲叶茯砖茶加工过程中香气成分的调控提供参考。

关键词: 杜仲叶, 茯砖茶, 气相离子迁移谱 (GC-IMS), 挥发性成分, 感官评审, 指纹图谱, 二维图谱

中图分类号: TS272.8

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2021)21-0073-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021020147

本文网刊: 

Analysis of Volatile Compounds in the Manufacturing Process of *Eucommia Ulmoides* Leaves Fu Brick Tea Based on Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry Method

ZENG Qiao^{1,2}, LV Shenghua^{1,*}, DUAN Jie³, BIAN Wenwen³, LIU Jing³, SUN Min², ZHANG Jingxian², LIU Yuan², YANG Wenjuan², FENG Xiaolong⁴, YU Zhenglv⁵

(1. College of Bioresources Chemical and Materials Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China;

2. School of Food and Biological Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China;

3. Shaanxi Product Quality Supervision and Inspection Institute, Xi'an 710048, China;

收稿日期: 2021-02-22

基金项目: 陕西省科技厅重点研发计划项目 (2018NY-093); 陕西省创新能力支撑计划项目 (2021PT-044); 陕西省重点研发计划一般项目 (2021NY-133); 陕西省质监局系统科技计划项目 (2018); 西安市科技计划项目 (20NYYYF0022); 西安市未央区科技计划项目 (202040); 宁夏中宁枸杞产业专项基金项目 (ZNGQCX-B-202001)。

作者简介: 曾桥 (1982-), 男, 博士, 高级实验师, 研究方向: 食品新材料制备, E-mail: zengqiao@sust.edu.cn。

* 通信作者: 吕生华 (1963-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 天然高分子材料, E-mail: lvsh@sust.edu.cn。

4.Tonghua Tang Yishu Food Co., Ltd., Tonghua 134000, China;
 5.Shaanxi Pudao Tea Industry Co., Ltd., Xi'an 713700, China)

Abstract: In order to examine the variation of volatile components of *Eucommia ulmoides* leaves Fu Brick Tea during processing, Gas Chromatography-Ion Mobility Spectroscopy (GC-IMS) was employed. The volatile compounds fingerprints of *Eucommia ulmoides* leaves Fu Brick Tea were plotted using Gallery Plot software. The differences between the samples from the six stages during processing and principal component analysis were assessed, respectively. The results showed that a total of 70 volatile compounds were detected in each sample of the six stages, including raw material screening, piling fermentation, steam and forming stage (the 0th day of flowering), the 8th day, the 25th day of flowering and the 1st year of aging stage. Among these compounds, qualitative analysis of 51 kinds of components were determined, including aldehydes, ketones, alcohols, esters, pyrazines, acids, terpenes, furans, ethers and sulfur compounds. PCA analysis showed that PC1 was 47%, PC2 was 27%, and the cumulative contribution rate was 74%, which was better reflected the influencing factors of the differences of volatile components among different tea samples. The tea samples at different stages were separated on the PCA chart, indicating that there were differences in the volatile components contents of tea samples at different stages in the processing. The relative contents of several kinds of pyrazines, aldehydes and ketones with grass flavor and earthy aroma in tea samples gradually decreased with the processing, while the relative contents of alcohols, aldehydes and esters with medicinal aroma, fruity aroma and mellow aroma gradually increased. Finally, the medicinal, fruity and fungus aroma of *Eucommia ulmoides* leaves Fu Brick Tea was formed. Moreover, the relative contents of 2-ethyl-3, 5-dimethylpyrazine dimer in the pile fermentation samples, 2, 4-heptadienol and 3-methylthiopropanal in the flowering stage samples, and 5-methylfurfural, butyl acrylate monomer, butyl acrylate dimer, furfural dimer, 2, 3-butanediol in the aging stage samples were higher than compared to other stages. Therefore, these compounds might be the potential indicators of the assessment of the piling fermentation, flowering and aging stage of *Eucommia ulmoides* leaves Fu brick tea, thus providing a tool for the regular monitoring of aroma components on the manufacturing process of *Eucommia ulmoides* leaves Fu brick tea.

Key words: *Eucommia ulmoides* leaves; Fu Brick Tea; gas chromatography-ion mobility spectroscopy (GC-IMS); volatile components; organoleptic testing; finger print; two dimensional map

茯砖茶为黑茶类后发酵茶^[1], 具有金花普茂, 菌香浓郁, 汤色红浓, 口感醇厚的特征^[2], 常以黑毛茶为原料, 经筛选、渥堆、气蒸、压制成型、发花干燥和陈化等一系列复杂工艺加工而成^[3]。近年来, 以茯砖茶、普洱茶等为代表的发酵茶类不仅风味和口感良好, 而且还具有降脂减肥、降糖、抗肿瘤和抑菌等多种保健功能^[4-5], 受到消费者的广泛青睐。研究表明, 茯砖茶的特殊加工工艺有效地降低了茯砖茶的涩味和苦味, 促进了醇和口感和红浓汤色的形成, 同时赋予了茯砖茶特有的药草香、木香、花果香的“菌花香”香气, 极大地提高了产品的风味和品质^[6]。

杜仲叶为杜仲科植物杜仲(*Eucommia ulmoides* Oliver)的干燥叶^[7], 长期以来作为中药材和保健食品的原料, 杜仲叶含有丰富的多糖、黄酮、氨基酸、多酚、绿原酸、苯丙素、环烯醚萜类等^[8-11]活性成分, 具有降压、降脂、补肾、抗肿瘤和增强免疫等作用^[8,12-14]。近年来, 结合传统饮食习惯和地方需求, 国家卫计委开展了将杜仲叶按照传统既是食品又是中药材的物质管理试点工作, 这将极大的促进杜仲叶资源的开发和利用。当前, 杜仲叶在食品中的开发主要包括杜仲叶茶、保健饮料^[15]和杜仲叶醋^[16]等, 其中, 杜仲叶茶在市场上最为常见。然而现有的杜仲叶茶普遍具有青辛味较重、茶汤发绿或发黑、滋味和口感欠佳等缺点, 基于此, 本文前期以杜仲叶茶为原料, 采用泾阳茯砖茶加工工艺制备了杜仲叶茯砖茶, 不仅改善了杜仲

叶茶的风味和口感, 而且保健功能较传统茯砖茶更为突出, 具有较好的市场前景。

气相色谱-离子迁移谱法(GC-IMS)是一种新兴的气相分离检测技术, 因具有样品制备简单、灵敏度高、分辨率高、操作简便、分析高效和风味物质可视化等^[17]特点而广泛应用于酒、中药、海产品、茶叶、乳制品等^[18-20]行业。GC-IMS 在茶叶方面主要用于品种鉴别、风味研究、真伪鉴定以及质量评价等, 如金文刚等^[21]基于 GC-IMS 技术对不同绿茶产地制作的“汉中仙毫”绿茶气味成分进行了特征分析, 为“汉中仙毫”绿茶品质控制、产地质量区分与品牌管理提供了依据, 李俊杰等^[6]采用 GC-IMS 结合顶空固相微萃取(Headspace Solid-phase Microextraction, HS-SPME) - 气质联用技术(Gas Chromatography-mass Spectrometry, GC-MS), 对手筑茯砖茶发花过程中的挥发性成分变化进行了研究, 实现了不同加工阶段茯砖茶风味物质的区分。本研究采用 GC-IMS 对杜仲叶茯砖茶加工过程中的挥发性成分进行检测, 对杜仲叶茯砖茶加工过程中挥发性成分的变化规律进行分析, 这不仅为杜仲叶茯砖茶品质提升提供了证据, 而且对于揭示杜仲叶茯砖茶独特风味和香气的形成机制以及加工过程中香气成分的调控提供了参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

杜仲叶茶 略阳县嘉灵特种茶开发中心。

FlavourSpec®风味分析仪 德国 G.A.S.公司;
MS105 电子天平 梅特勒-托利多仪器有限公司;
CTC-PAL 自动进样装置 瑞士 CTC Analytics AG 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备 杜仲叶茶经筛选、渥堆、气蒸、压制成型、发花干燥、陈化等工艺制成, 分别于加工过程中的原料筛选、渥堆、气蒸压制成型(即发花第 0 d), 发花第 8、25 d 及陈化 1 年等 6 个阶段取样, 依次编号为 EF0、EF1...EF5。所取得茶样迅速破碎混匀, 冷冻干燥后, 均匀的分为两份, 一份密封储藏于 4 °C, 用于感官内质评审, 另一份密封储存于-80 °C 下待进行 GC-IMS 分析。

1.2.2 茶叶感官评审 根据 GB/T16291.1-2012《感官分析 选拔、培训与管理评价员一般导则第 1 部分: 优选评价员》的相关要求, 从陕西科技大学食品科学与工程专业招募感官评审人员, 经综合评价, 筛选出 20 人进行茶叶感官培训及考核, 最终确定 10 人组成茶叶评审小组。按 GB/T 23776-2018《茶叶感官审评方法》中关于紧压茶的规定进行感官评审, 同时计算各不同样本审评得分, 其中, 各审评因子的评分系数分别为: 外形占 20%, 汤色占 10%, 香气占 30%, 滋味占 35%, 叶底占 5%, 茶样审评总得分计算式如下:

$$Y = A \times a + B \times b + \dots + E \times e$$

式中: Y 为茶叶审评总得分; A~E 分别为外形、汤色、香气、滋味和叶底等品质因子的审评得分; a~e 为各品质因子的评分系数。

1.2.3 顶空进样 精密称取 1 g 样品, 置于 20 mL 顶空瓶中, 密封后进样。顶空孵育温度 80 °C, 孵育时间 15 min, 孵化转速 500 r/min; 进样针温度 85 °C, 进样体积 500 μL, 载气为高纯度 N₂(纯度≥99.999%), 不分流模式。

1.2.4 GC-IMS 条件 MXT-5 色谱柱(15 m×0.53 mm×1 μm), 色谱柱温 60 °C, 分析时间 30 min, 载气流速

初始为 2 mL/min, 保持 2 min; 18 min 内线性升至 100 mL/min 后保持 10 min。

1.3 数据处理

使用仪器配套的分析软件 Vocal 查看分析谱图和数据的定性, 应用软件内置的 NIST 数据库和 IMS 数据库可对挥发性物质进行定性分析, 运用 Reporter 插件对比样品之间的谱图差异, Gallery Plot 插件生成挥发性化合物指纹图谱, 运用 Dynamic PCA 插件进行聚类分析, 生成挥发性化合物 PCA 谱图。

2 结果与分析

2.1 杜仲叶茯砖茶感官评审

对杜仲叶茯砖茶加工过程中所取茶样的外形、汤色、香气、滋味以及叶底等 5 个相关因子进行感官审评结果如表 1 所示。

由表 1 可知, 筛选的杜仲叶茶原料呈褐色, 少梗, 冲泡后有较浓青辛气, 汤色黄中带绿, 有一定的苦涩味, 叶底黄褐并少梗。渥堆过程既包括微生物生长代谢作用, 又包括茶叶自身的酶促作用^[22], 对茯砖茶品质形成和后续发花的顺利进行有较大影响, 杜仲叶茶经过渥堆变得湿润柔软, 为后续发花提供了适宜的水分, 同时经过渥堆, 茶叶色泽加深, 茶汤的绿色淡化, 苦涩味进一步减弱。经气蒸和压制后初成型的茯砖茶砖面平整, 紧度适中, 茶砖表面油亮, 茶汤色泽、香气和滋味变化不大。发花 8 d 后, 茶砖表面较干燥, 稍显油亮, 打开茶砖发现有较茂盛的金花, 茶汤呈橙黄色, 有明显的菌花香, 苦涩味进一步减弱, 有一定的醇和口感, 叶底颜色由黄色转为棕褐。发花 25 d 后, 茶砖内部金花普遍茂盛, 茶汤呈橙红色, 略有青辛气, 具有纯正的菌花香和较为圆润、醇和的口感。陈化过程中, 茶砖内部金花颜色由金黄转为黄褐色, 茶汤颜色进一步由橙红转为棕红, 菌花香纯正, 无青辛气, 无苦味, 口感更加的圆润醇和, 品质得到了进一步的提升。

表 1 杜仲叶茯砖茶感官审评结果

Table 1 The result of the organoleptic testing for *Eucommia ulmoides* leaves Fu brick tea

茶样	外形(分)	汤色(分)	香气(分)	滋味(分)	叶底(分)	感官审评得分
EF0	净度较好, 干燥, 呈褐色, 少梗, 匀整(70)	呈黄色, 较显绿, 稍显浊(63)	无菌花香, 较浓青辛气(60)	涩味, 略苦, 有青辛味(60)	黄褐, 少梗, 叶片完整, 较软亮(75)	63
EF1	净度较好, 湿润柔软, 呈黑褐色, 少梗, 尚匀整(70)	呈黄色, 略显绿, 稍显浊(66)	无菌花香, 较浓青辛气(68)	较苦涩, 有青辛味(70)	黄褐, 少梗, 叶片完整, 较软亮(75)	69
EF2	砖面平整, 湿润柔软, 紧度适中, 呈黑褐色, 油亮, 少梗, 无肉眼可见金花, 无杂菌(75)	呈黄色, 略显绿, 稍显浊(70)	无菌花香, 较浓青辛气(70)	较苦涩, 有青辛味(70)	黄褐, 少梗, 叶片完整, 较软亮(80)	72
EF3	砖面平整, 表面较干燥, 紧度适中, 呈黑褐色, 稍显油亮, 少梗, 金花较茂盛, 无杂菌(80)	橙黄色, 稍显浊(82)	菌花香, 淡青辛气(78)	略有苦涩, 略有青辛味, 尚醇和(85)	棕褐, 少梗, 叶片完整, 软亮(85)	82
EF4	砖面平整, 表面干燥, 紧度适中, 呈黑褐色, 少梗, 金花普遍茂盛, 无杂菌(88)	橙红色, 清澈明亮(90)	纯正菌花香, 略有青辛气(91)	略有苦涩, 口感较圆润和醇和(92)	棕褐, 少梗, 叶片完整, 软亮(83)	90
EF5	砖面平整, 表面干燥, 紧度适中, 呈黑褐色, 少梗, 金花普遍茂盛且由金黄转为黄褐色, 无杂菌(92)	棕红色, 清澈明亮(93)	纯正菌花香无青辛气(93)	略有涩味, 口感圆润、醇和(95)	棕褐, 少梗, 叶片完整, 较软亮(80)	93

2.2 杜仲叶茯砖茶加工过程中 GC-IMS 二维谱图分析

图 1 为杜仲叶茯砖茶加工过程中 EF0(原料筛选)、EF1(渥堆)、EF2(气蒸及压制成型, 即发花第 0 d)、EF3(发花第 8 d), EF4(发花第 25 d) 及 EF5(陈化 1 年)样品的 GC-IMS 二维谱图, 图中纵坐标表示气相色谱的保留时间(Retention time, Rt), 横坐标表示归一化处理后的漂移时间(Drift time, Dt), 而左侧红色垂直线表示反应离子峰(Reaction ion peak, RIP), RIP 峰两侧的每一个点代表一种挥发性成分, 白色表示浓度较低, 红色表示浓度较高, 且点的颜色越深表示浓度越大, 该谱图较直观的反映了茯砖茶加工过程中各不同阶段挥发性物质种类及浓度差异^[23]。从图 1 中可以看出, 杜仲叶茯砖茶加工过程中挥发性成分差异明显, 和原料相比, 杜仲叶茶经渥堆处理后挥发性组分更为丰富, 且部分组分含量增大, 发花 8 d 和 0 d 相比, 部分挥发性组分含量变化较大。和其他

阶段样品相比, 杜仲叶茯砖茶经过陈化后在谱图上的红点明显增多, 说明其挥发性成分越来越丰富^[6]。

以 EF0 为参照, 其他阶段样品所含挥发性成分扣减参照后的对比差异情况如图 2 所示, 红色代表该物质在该样品中浓度高于 EF0, 蓝色则代表低于 EF0, 而浓度相同的物质颜色抵消后呈白色。总体来看, EF1 和 EF2 中红色部分明显大于蓝色部分, EF3 中红色部分和蓝色部分相当, EF4 中蓝色部分略大于红色部分, 而 EF5 中红色部分明显大于蓝色部分。图 1 和图 2 可共同说明杜仲叶茯砖茶加工过程中挥发性成分有明显的变化。

2.3 杜仲叶茯砖茶加工过程中 GC-IMS 挥发性成分定性分析

图 3 中所示的每一个数字代表定性分析出一种挥发性气味物质, 整个杜仲叶茯砖茶加工过程中, 共检测出 70 种挥发性物质, 应用软件内置的 NIST 数

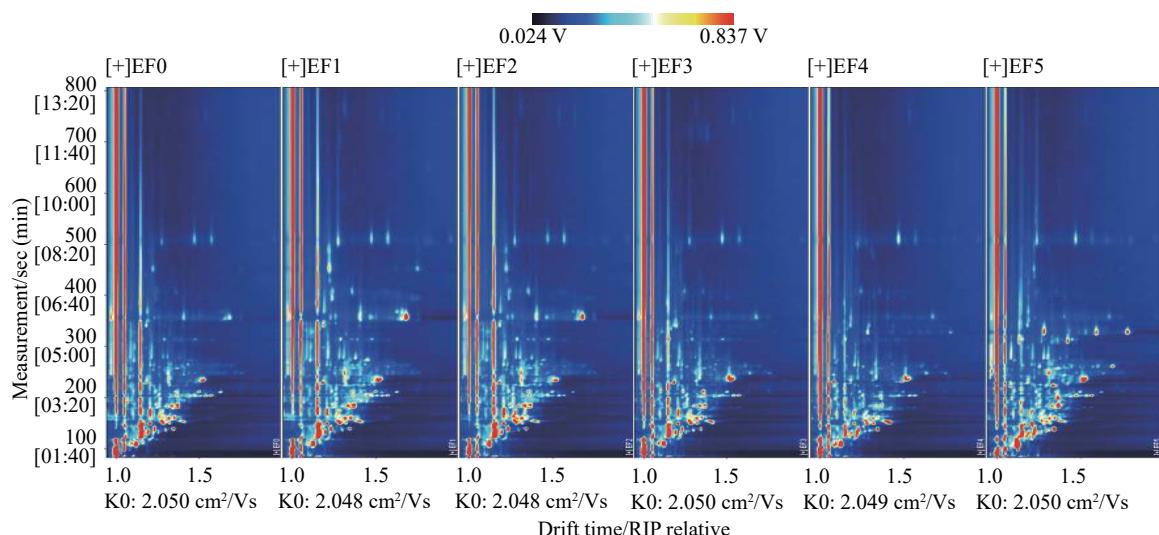


图 1 不同加工阶段杜仲叶茯砖茶的 GC-IMS 二维谱图分析

Fig.1 GC-IMS two-dimensional map of samples from different stage during processing of *Eucommia ulmoides* leaves Fu Brick Tea

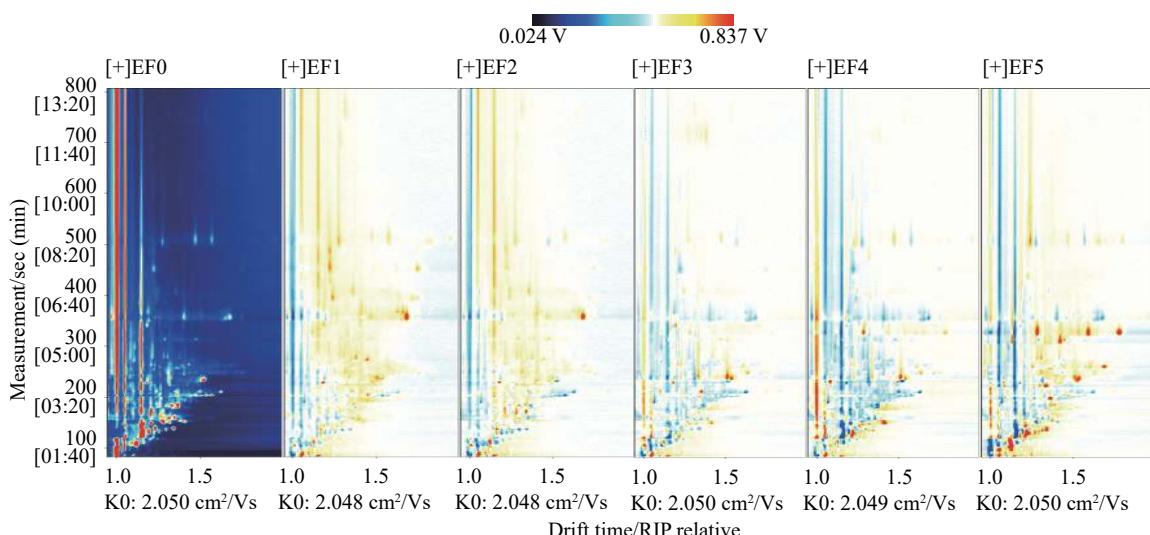


图 2 不同加工阶段杜仲叶茯砖茶的气相色谱离子迁移谱差异图

Fig.2 GC-IMS different two-dimensional map of samples from different stage during processing of *Eucommia ulmoides* leaves Fu Brick Tea

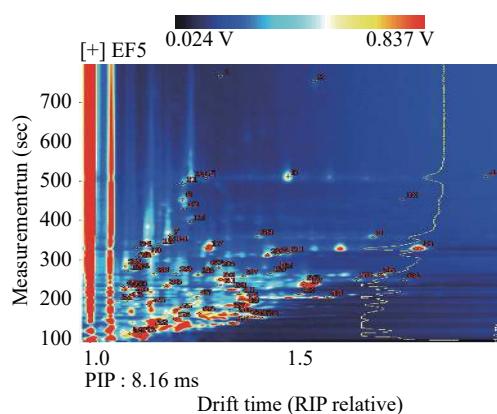


图 3 杜仲叶茯砖茶的挥发性成分气相离子迁移谱定性分析

Fig.3 GC-IMS qualitative analysis of volatile compounds of *Eucommia ulmoides* leaves Fu Brick Tea

数据库和 IMS 数据库可对物质进行定性分析发现, 可以明确定性的挥发性物质有 51 种, 包括部分挥发性物质的单体及二聚体, 具体见表 2。

由表 1 可知, 明确定性的 51 种挥发性物质 C 链介于 $C_2 \sim C_{10}$, 主要包括醛类、酮类、醇类、酯类、吡嗪类、酸类、萜烯类、呋喃类、醚类及含硫化合物等, 其中醛类、醇类、酮类、酯类、吡嗪类数量较多。和传统以黑毛茶为原料加工的茯砖茶相比, 二者存在一些共有的挥发性成分, 包括壬醛、5-甲基糠醛、辛醛、正己醛、芳樟醇、1-辛烯-3-醇、丙酮、乙酸乙酯等^[6], 这些挥发性成分都具有特殊的香味, 如壬醛在低浓度

时具有橙子及玫瑰香气, 5-甲基糠醛具有甜香、辛香气^[6], 辛醛具有醛、蜡香、青果皮香, 脂肪和水果香气, 正己醛呈青草气味^[24], 芳樟醇具有柑橘、铃兰香、花香、青香及木香, 1-辛烯-3-醇呈真菌清香、泥土芳香、蔬菜香, 乙酸乙酯则具有似醚的气味和微果酒香^[6]。同时, 杜仲叶茯砖茶和传统以黑毛茶为原料加工的茯砖茶相比^[6], 大多数挥发性成分种类不同, 说明杜仲叶茯砖茶有其独特的气味特征。

醛类是杜仲叶茯砖茶中鉴定出的数量最多的挥发性成分, 共计 16 种, 从表 1 可以看出, 醛类物质中的 2-己烯醛的单体和二聚体、正己醛的单体和二聚体、壬醛单体和二聚体、癸醛、辛醛和异戊醛等主要赋予了杜仲叶茯砖茶青草香, 柑橘香、橙子香等果香及花香^[6,24-27], 此外, 2-甲基丁醛给予了其焦香和烘焙香^[28], 3-甲硫基丙醛赋予了其醇厚的酱香、肉香等, 由于醛类的香气阈值较低, 因而是影响杜仲叶茯砖茶风味的重要因素。和传统以黑毛茶为原料加工的茯砖茶相比, 杜仲叶茯砖茶中具有青草香气和果香花香的醛类物质较多^[6], 这可能赋予其更好的风味。杜仲叶茯砖茶中鉴定出的醇类挥发性成分有 10 种, 主要以蘑菇香、花香、清香、草药香和木香为主, 此外, 还给予了芝麻、洋葱、大蒜、肉、咖啡香的香气特征以及奶酪香等。杜仲叶茯砖茶中鉴定出的酮类和酯类挥发性成分分别有 9 种和 5 种, 其中酮类以果香、甜香和奶香等为主, 而酯类主要是果香和微果酒香, 鉴

表 2 挥发性组分定性分析
Table 2 Qualitative analysis of volatile compounds

类别	化合物名称	CAS#	分子式	分子量	保留指数	保留时间(s)	漂移时间(ms)	气味特征
醛类	癸醛(Decanal)	112-31-2	$C_{10}H_{20}O$	156.3	1280.6	754.403	1.541	甜香、柑橘香、蜡香、花香
	壬醛单体(Nonanal-M)	124-19-6	$C_9H_{18}O$	142.2	1111.4	511.116	1.477	稀释时具有橙子及玫瑰香气
	壬醛二聚体(Nonanal-D)	124-19-6	$C_9H_{18}O$	142.2	1110.9	510.500	1.955	稀释时具有橙子及玫瑰香气
	2,4-庚二烯醛(2,4-Heptadienal)	5910-85-0	$C_7H_{10}O$	110.2	992.2	342.268	1.199	清香、醛香、脂肪香及蔬菜香
	5-甲基糠醛(5-Methylfurfural)	620-02-0	$C_6H_6O_2$	110.1	956.4	311.681	1.135	甜香、辛香, 烟用香精成分
	3-甲硫基丙醛(3-methylthiopropanal)	3268-49-3	C_4H_8OS	104.2	907	269.553	1.093	醇厚酱香、洋葱香和红烧肉香 香气
	苯甲醛二聚体(Benzaldehyde-D)	100-52-7	C_7H_6O	106.1	959.5	314.326	1.479	特殊的苦杏仁气味
	2-己烯醛单体((E)-2-hexenal-M)	6728-26-3	$C_6H_{10}O$	98.1	846.5	232.432	1.185	青草香味
	2-己烯醛二聚体((E)-2-hexenal-D)	6728-26-3	$C_6H_{10}O$	98.1	850.2	234.413	1.523	青草香味
	糠醛单体(Furfural-M)	98-01-1	$C_5H_4O_2$	96.1	829.9	223.520	1.086	烟用香精成分
	糠醛二聚体(Furfural-D)	98-01-1	$C_5H_4O_2$	96.1	830	223.591	1.341	烟用香精成分
	正己醛单体(Hexanal-M)	66-25-1	$C_6H_{12}O$	100.2	795.9	205.317	1.258	青草气味
	辛醛(Octanal)	124-13-0	$C_8H_{16}O$	128.2	1004.9	358.030	1.405	醛、蜡香、青果皮香, 脂肪和水果香
	2-甲基丁醛(2-methylbutanal)	96-17-3	$C_5H_{10}O$	86.1	666.8	154.396	1.399	焦香、烘焙香
	正己醛二聚体(Hexanal-D)	66-25-1	$C_6H_{12}O$	100.2	794	204.330	1.572	青草气味
	异戊醛(3-methylbutanal)	590-86-3	$C_5H_{10}O$	86.1	654.2	151.018	1.417	稀释后具有水果香气
醇类	芳樟醇(Linalool)	78-70-6	$C_{10}H_{18}O$	154.3	1098.5	492.624	1.224	柑橘、铃兰香、花香、青香及木香
	1-辛烯-3-醇(1-Octen-3-ol)	3391-86-4	$C_8H_{16}O$	128.2	983.9	335.210	1.165	泥土芳香、蔬菜、真菌清香
	糠硫醇(2-furanmethanethiol)	98-02-2	C_5H_6OS	114.2	912.1	273.899	1.108	芝麻、洋葱、大蒜、肉、咖啡香的香气特征
	2,3-丁二醇(2,3-Butanediol)	513-85-9	$C_4H_{10}O_2$	90.1	783.4	198.734	1.370	黄油、奶酪香
	异丙醇(Isopropyl alcohol)	67-63-0	C_3H_8O	60.1	505.7	110.945	1.096	似乙醇和丙酮混合物的气味

续表 2

类别	化合物名称	CAS#	分子式	分子量	保留指数	保留时间(s)	漂移时间(ms)	气味特征
酮类	3-甲基-1-戊醇(3-Methylpentanol)	589-35-5	C ₆ H ₁₄ O	102.2	879.2	249.940	1.314	蘑菇真菌和土壤的香气
	4-甲基-1-戊醇(4-Methylpentanol)	626-89-1	C ₆ H ₁₄ O	102.2	852.1	235.416	1.316	苦杏仁气味和烘烤味
	正丁醇(1-butanol)	71-36-3	C ₄ H ₁₀ O	74.1	669.4	155.099	1.381	类似杂醇油的气味
	叶醇((Z)-3-hexen-1-ol)	928-96-1	C ₆ H ₁₂ O	100.2	864.3	242.000	1.515	青香、药草香、绿叶香香气, 清新浓郁
	3-呋喃甲醇(3-Furanmethanol)	4412-91-3	C ₅ H ₆ O ₂	98.1	838.3	228.053	1.102	DNC
	2-庚酮(2-heptanone)	110-43-0	C ₇ H ₁₄ O	114.2	878.6	249.633	1.642	香蕉、干酪、果香及药香
	甲基庚烯酮 (methyl-5-hepten-2-one)	110-93-0	C ₈ H ₁₄ O	126.2	992.6	342.584	1.185	甜香, 果香
	环己酮(cyclohexanone)	108-94-1	C ₆ H ₁₀ O	98.1	899.9	263.534	1.156	泥土气息
	2-己酮(2-Hexanone)	591-78-6	C ₆ H ₁₂ O	100.2	808.2	211.899	1.504	熟蔬菜香
	3-羟基-2-丁酮 (3-hydroxybutan-2-one)	513-86-0	C ₄ H ₈ O ₂	88.1	718.8	172.553	1.339	蘑菇和奶香味
酯类	丙酮(acetone)	67-64-1	C ₃ H ₆ O	58.1	502.9	110.201	1.123	DNC
	2-甲基-3-庚酮 (2-Methyl-3-heptanone)	13019-20-0	C ₈ H ₁₆ O	128.2	1109.2	508.040	1.281	DNC
	二氢-2(3H)-呋喃酮单体 (dihydro-2(3h)-furanone-M)	96-48-0	C ₄ H ₆ O ₂	86.1	923.1	283.261	1.086	DNC
	二氢-2(3H)-呋喃酮二聚体 (dihydro-2(3h)-furanone-D)	96-48-0	C ₄ H ₆ O ₂	86.1	917.6	278.580	1.313	DNC
	乙酸异戊酯(isoamyl acetate)	123-92-2	C ₇ H ₁₄ O ₂	130.2	875.1	247.761	1.758	香蕉、梨、果香
	己酸甲酯(Methyl hexanoate)	106-70-7	C ₇ H ₁₄ O ₂	130.2	920.8	281.365	1.285	菠萝香味
	乙酸乙酯(Ethyl Acetate)	141-78-6	C ₄ H ₈ O ₂	88.1	609	138.834	1.346	似醚的气味和微果酒香
	丙烯酸正丁酯单体 (Butyl acrylate-M)	141-32-2	C ₇ H ₁₂ O ₂	128.2	897.2	261.194	1.262	DNC
	丙烯酸正丁酯二聚体 (Butyl acrylate-D)	141-32-2	C ₇ H ₁₂ O ₂	128.2	898.4	262.197	1.699	DNC
	2-乙基-5-甲基吡嗪单体 (2-ethyl-5-methylpyrazine-M)	13360-64-0	C ₇ H ₁₀ N ₂	122.2	1006.4	360.166	1.192	青草味, 坚果味
吡嗪类	2-乙基-5-甲基吡嗪二聚体 (2-ethyl-5-methylpyrazine-D)	13360-64-0	C ₇ H ₁₀ N ₂	122.2	1004.2	357.032	1.683	青草味, 坚果味
	2-乙基-3,5-二甲基吡嗪单体 (2-Ethyl-3,5-dimethylpyrazine-M)	13925-07-0	C ₈ H ₁₂ N ₂	136.2	1072.2	454.821	1.225	焦香, 烤香
	乙基-3,5-二甲基吡嗪二聚体 (2-Ethyl-3,5-dimethylpyrazine-D)	13925-07-0	C ₈ H ₁₂ N ₂	136.2	1071	452.994	1.752	焦香, 烤香
	其他类	γ-松油烯(Gamma-Terpinene)	99-85-4	C ₁₀ H ₁₆	136.2	1054.9	429.966	1.227
	二甲基二硫单体 (Dimethyl disulfide-M)	624-92-0	C ₂ H ₆ S ₂	94.2	752.6	186.228	1.145	不良气味
	二甲基二硫二聚体 (Dimethyl disulfide-D)	624-92-0	C ₂ H ₆ S ₂	94.2	749.3	184.911	1.373	不良气味
	乙酸(Acetic acid)	64-19-7	C ₂ H ₄ O ₂	60.1	571.2	128.632	1.151	醋酸味
	丙酸(Propanoic acid)	79-09-4	C ₃ H ₆ O ₂	74.1	696	163.311	1.266	DNC
	二乙二醇丁醚 (2-(2-Butoxyethoxy)ethanol)	112-34-5	C ₈ H ₁₈ O ₃	162.2	1290	767.950	1.316	DNC
	2-甲基-3-甲硫基呋喃 (2-methyl-3-(methylthio)furan)	63012-97-5	C ₆ H ₈ OS	128.2	942.7	300.029	1.111	DNC

注: DNC 表示未确定。

定出的吡嗪类挥发性成分有 4 种, 主要具有青草味, 坚果味以及焦香、烤香, 上述挥发性成分构成了杜仲叶茯砖茶特有的气味。

2.4 杜仲叶茯砖茶加工过程中 GC-IMS 挥发性气味成分指纹图谱分析

为了进一步更具体直观的表现杜仲叶茯砖茶加工过程中挥发性物质的变化规律, 使用 Gallery Plot 插件绘制了 EF0、EF1、EF2、EF3、EF4 和 EF5 的挥发性物质离子迁移指纹谱图, 如图 4 所示, 每个样本 3 个平行, 图中右侧为样本名称, 底部为挥

发性物质定性结果, 各点颜色深浅代表物质浓度高低, 红色代表浓度较高, 白色代表浓度较低。

从图 4 可以直观看出茯砖茶不同阶段挥发性物质组成具有明显差异, 且随着加工过程的进行, 杜仲叶茯砖茶中一部分挥发性成分不断减少, 另有一部分挥发性成分先增加后减少, 还有一部分挥发性成分不断增加。将不同加工阶段的杜仲叶茯砖茶样本指纹图谱分为 A、B、C、D、E、F、G 等 7 个区域, A 区域的挥发性成分包括康硫醇、2-甲基-3-甲硫基呋喃、环己酮和 2-己酮, 上述成分主要具有

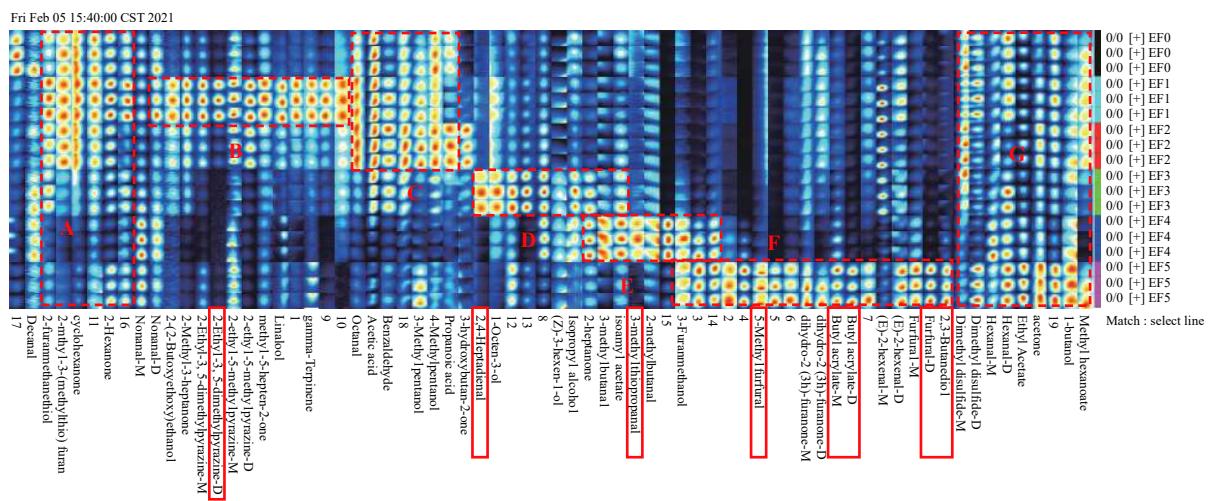


图 4 杜仲叶茯砖茶的挥发性成分指纹图谱分析

Fig.4 Volatile components fingerprint of samples from different stage during processing of *Eucommia ulmoides* leaves Fu Brick Tea

泥土气息,熟菜香和洋葱、大蒜、肉、咖啡香等,在样本中的相对含量总体上随加工过程的进行而逐步减少,其中 2-己酮自渥堆阶段起开始逐渐下降,2-甲基-3-甲硫基呋喃、环己酮和糠醛在发花过程中下降明显。B 区域的挥发性成分是壬醛二聚体、二乙二醇丁醚、2-甲基-3-庚酮、2-乙基-3,5-二甲基吡嗪单体、2-乙基-3,5-二甲基吡嗪二聚体、2-乙基-5-甲基吡嗪单体、2-乙基-5-甲基吡嗪二聚体、甲基庚烯酮、芳樟醇和 γ -松油烯,上述挥发性成分以焦香、烤香、青草香、橘香和果香为主,且在原料中相对含量较低,而经过渥堆处理后上升明显,这可能是由于渥堆提供的高温高湿环境促进了糖类物质发生脱水、缩合、聚合等焦糖化反应,从而产生焦香^[22],而甜香、果香和花香则可能是由于渥堆过程中微生物的作用。此外,呈青草香、焦香和烤香的吡嗪类物质在进入发花阶段后下降明显,这有助于改善茶叶的风味。C 区域的挥发性成分为辛醛、乙酸、苯甲醛二聚体、3-甲基-1-戊醇、4-甲基-1-戊醇和丙酸,从图 4 中可以看出,这些成分在原料、渥堆和气蒸及压制成型阶段变化较小,而进入发花阶段后,上述挥发性成分明显下降直至发花结束(25 d),该区域的挥发性成分主要以苦杏仁味、烘烤味和醋味为主,其相对含量的下降有助于产品风味的改善。同时,在陈化阶段具有真菌香气的 3-甲基-1-戊醇相对含量明显上升,从而增强产品菌香味。D 区域包含的鉴定出的挥发性成分包括 2,4-庚二烯醛、1-辛烯-3-醇、叶醇、异丙醇、2-庚酮、异戊醛和乙酸异戊酯,这些成分主要以青香、药香和果香为主,在原料、渥堆和气蒸压制成型样本中含量均较低,但发花促进了上述挥发性成分含量的增加,随着发花时间的延长,2-庚酮、异戊醛和乙酸异戊酯相对含量继续增加,至陈化阶段则开始下降,而其他挥发性成分则在发花 8 d 后和后续干燥陈化阶段,相对含量开始下降。区域 E 中包含的挥发性成

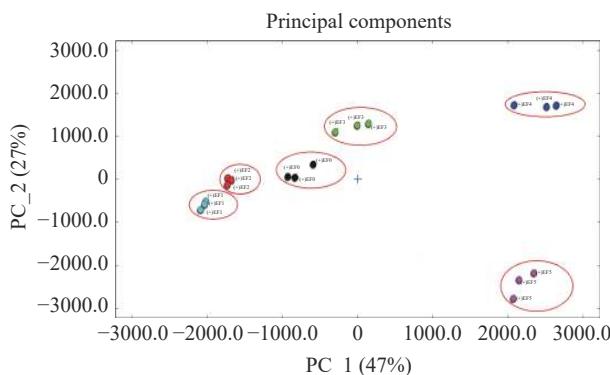
分主要有 2-庚酮、异戊醛、乙酸异戊酯、3-甲硫基丙醛、2-甲基丁醛和 3-呋喃甲醇等,上述挥发性成分以药香、果香和醇厚的酱香为主,在发花的 8~25 d 中增加较为明显,这对于形成杜仲叶茯砖茶良好的风味具有重要作用。F 区域中包含的挥发性成分包括 3-呋喃甲醇、5-甲基糠醛、二氢-2(3H)-呋喃酮单体、二氢-2(3H)-呋喃酮二聚体、丙烯酸正丁酯单体、丙烯酸正丁酯二聚体、2-己烯醛单体、2-己烯醛二聚体、糠醛单体、糠醛二聚体、2,3-丁二醇等,上述挥发性成分主要具有甜香、辛香、青草香和乳酪香,其中,除具有青草味的 2-己烯醛单体相对含量明显下降外,其余成分在杜仲叶茯砖茶陈化阶段的含量均高于其他阶段。区域 G 中包含的挥发性成分主要为二甲基二硫单体、二甲基二硫二聚体、正己醛单体、正己醛二聚体、乙酸乙酯、丙酮、正丁醇和己酸甲酯,上述挥发性成分以果酒香、果香和青草香为主,值得注意的是,此区域中大多数挥发性成分在加工不同阶段相对含量较稳定,包括具有青草香的正己醛单体和二聚体,由于杜仲叶茯砖茶样本中呈青草香气挥发性成分较多,除正己醛和其他阶段相比变化不大外,其他如 2-乙基-5-甲基吡嗪单体、2-己烯醛单体随加工过程的进行均明显下降,因此最终杜仲叶茯砖茶中青辛气不明显,这和感官评审结果基本一致。此外,不在上述区域中的呈甜香、花香、橙香和橘香的葵醛、壬醛单聚体在随着加工的进行相对含量逐步上升,促进了杜仲叶茯砖茶良好风味的形成。

从图 4 还可以发现,陈化和渥堆阶段红点最多,说明挥发性成分最为丰富,其次为原料和气蒸及压制成型阶段,最后为发花阶段样本,这可能是由于在发花阶段以冠突散囊菌为主的曲霉属为绝对优势菌群,茯砖茶发酵过程中微生物多样性较低^[29~30] 导致的,尚需进一步证实。此外,和其他加工阶段相比,发花阶段促进了杜仲叶茯砖茶药香、果香和菌香的形成,

因此,发花和陈化是促进杜仲叶茯砖茶香气和风味形成的重要步骤。总体来看,所有的70种挥发性成分在EF5中的含量较EF0上升的有37种,主要为醛类、醇类、酮类和酯类,这些成分具有良好的香气,而下降的成分有33种,其中下降较为明显的有呈醋酸味的乙酸以及具有青草味、坚果味的2-乙基-5-甲基吡嗪二聚体等,上述成分的含量变化有助于改善杜仲叶茯砖茶成品的香气。不同香气成分之间具有一定的协同作用,如甲苯、乙醇、苯甲醛、2-庚酮、乙酸乙酯、乙酸等风味物质可发生加成或协同作用,从而使酒香、果香和花香更强烈^[31],酯类香气物质之间也有较强的协同作用^[32]。本实验表明,和EF0相比,EF5中苯甲醛二聚体、2-庚酮、乙酸乙酯含量均增加,而且所鉴定出的5种酯类挥发性成分中有4种含量增加,这有助于增强各成分之间的协同作用,从而提升杜仲叶茯砖茶的香气品质。此外,渥堆样本中2-乙基-3,5-二甲基吡嗪二聚体,发花8 d样本中的2,4-庚二烯醛和发花25 d样本中的3-甲硫基丙醛,以及陈化阶段5-甲基糠醛、丙烯酸正丁酯单体、丙烯酸正丁酯二聚体、糠醛二聚体、2,3-丁二醇等在图4中各点的颜色明显较其他阶段深,说明其相对含量明显高于上述各成分在其他阶段样本中的含量,这些成分可以分别作为杜仲叶茯砖茶渥堆、发花和陈化阶段的候选标记物进行深入研究。

2.5 基于GC-IMS的主成分分析

主成分分析可以简化数据并揭示变量间的相互关系,其作为一种多元统计分析技术已广泛应用于食品加工过程中品质差异分析。从图5可以看出,不同加工阶段杜仲叶茯砖茶挥发性成分PCA图中PC1的贡献率为47%,PC2的贡献率为27%,累计贡献率为74%,表明PC1、PC2的总贡献率包含了杜仲叶茯砖茶样本的大部分信息,较好的反映了不同茶样之间挥发性成分差异的影响因素。从主成分分析图中可以看出,EF1和EF2样本间距离最近,说明渥堆和气蒸压制成型样本之间差异性相对较小,而EF0和EF1样本间距离较大,说明渥堆对杜仲叶茯



- activity and gallic acid content in *Eurotium cristatum*-fermented loose tea[J]. *Food Science and Technology*, 2017, 82(9): 248–254.
- [6] 李俊杰, 徐元昊, 陈梦娟, 等. 手筑茯砖茶加工过程中挥发性组分变化分析[J]. *食品科学*, 2020, 41(24): 144–124. [Li J J, Xu Y H, Chen M J, et al. Analysis on changes of volatile components in processing of manual fuzhuan tea[J]. *Food Science*, 2020, 41(24): 144–124.]
- [7] 李旭, 刘停, 陈时建, 等. 杜仲叶绿原酸提取工艺优化及对自发性高血大鼠的降压作用[J]. *食品科学*, 2013, 34(14): 30–34. [Li X, Liu T, Chen S J, et al. Optimization of extraction process for chlorogenic acid from *Eucommia ulmoides* leaves and its hypotensive effect on spontaneously hypertensive rats[J]. *Food Science*, 2013, 34(14): 30–34.]
- [8] Xu J K, Hou H J, Hu J P, et al. Optimized microwave extraction, characterization and antioxidant capacity of biological polysaccharides from *Eucommia ulmoides oliver leaf*[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 6561.
- [9] Li H, Zhao J, Deng W, et al. Effects of chlorogenic acid-enriched extract from *Eucommia ulmoides Oliver leaf* on growth performance and quality and oxidative status of meat in finishing pigs fed diets containing fresh or oxidized corn oil[J]. *Journal of Animal Physiology Animal Nutrition*, 2019(00): 1–10.
- [10] Liu Y S, Li S M, Wu G D. Studies on resin purification process optimization of *Eucommia ulmoides oliver* and its antihypertensive effect mechanism[J]. *African Journal of Traditional Complementary and Alternative Medicines*, 2014, 11(2): 475–480.
- [11] 吴红艳, 彭呈军, 邓后勤. 杜仲叶化学成分研究进展[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(17): 360–364. [Wu H Y, Peng C J, Deng H Q. Research progress on chemical component of *Eucommia folium*[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(17): 360–364.]
- [12] Zhang Y P, Peng M J, Liu L L, et al. Screening, identification, and potential interaction of active compounds from *Eucommia ulmoides leaves* binding with bovine serum albumin[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(12): 3119–3125.
- [13] Hao S, Xiao Y, Lin Y, et al. Chlorogenic acid-enriched extract from *Eucommia ulmoides leaves* inhibits hepatic lipid accumulation through regulation of cholesterol metabolism in hepG2 cells[J]. *Pharmaceutical Biology*, 2015, 54(2): 251–259.
- [14] Liu L Q, Li M Z, Yu M L, et al. Natural polysaccharides exhibit anti-tumor activity by targeting gut microbiota[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019(121): 743–751.
- [15] 罗阳帆, 万茵, 柴建新, 等. 应用纳米细化和复合生物酶解技术开发杜仲全叶系列产品[J]. *食品科技*, 2011, 36(11): 82–85. [Luo Y F, Wan Y, Chai J X, et al. Development of the series products of *Eucommia ulmoides olive leaves* by the combining technique of microfluidization nanometer refining and complex biological enzymolysis[J]. *Food Science and Technology*, 2011, 36(11): 82–85.]
- [16] Jia C F, Yu W N, Zhang B L. Optimization of *Eucommia ulmoides Leaves* vinegar process to improve the antioxidant activity[J]. *Food Science and Technology Research*, 2019, 25(2): 197–205.
- [17] 弘子姗, 谭超, 苗玥, 等. 基于顶空气相色谱-离子迁移谱的不同产地咖啡挥发性有机物指纹图谱分析[J]. *食品科学*, 2020, 41(8): 243–249. [Hong Z S, Tan C, Miao Y, et al. Fingerprint analysis of volatile organic compounds in coffees from different geographical origins by headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. *Food Science*, 2020, 41(8): 243–249.]
- [18] 张媛媛, 孙金沅, 张锋国, 等. 芝麻香型白酒中含硫风味组分的分析[J]. *中国食品学报*, 2014, 14(5): 218–225. [Zhang Y Y, Sun J Y, Zhang F G, et al. Analysis of sulfur compounds in sesame flavor liquor[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2014, 14(5): 218–225.]
- [19] 李娟, 任芳, 甄大卫, 等. 气相色谱-离子迁移谱分析几种乳制品挥发性风味化合物[J]. *食品科学*, 2021, 42(10): 235–240. [Li J, Ren F, Zhen D W, et al. Analysis of volatile flavor compounds in several dairy products by gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. *Food Science*, 2021, 42(10): 235–240.]
- [20] 陈彦憬, 于建娜, 敬国兴, 等. 气相色谱-离子迁移谱技术在农业领域的应用[J]. *分析试验室*, 2020, 39(12): 1480–1488. [Chen Y J, Yu J N, Jing G X, et al. Application of gas chromatography-ion mobility spectrometry in agriculture[J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2020, 39(12): 1480–1488.]
- [21] 金文刚, 陈小华, 耿敬章, 等. 基于气相-离子迁移谱分析不同产地“汉中仙毫”气味指纹差异[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(5): 231–237. [Jin W G, Chen X H, Geng J Z, et al. Analysis of "Hanzhong Xianhao" odor fingerprints from different places[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(5): 231–237.]
- [22] 傅冬和, 刘仲华, 黄建安, 等. 茯砖茶加工过程中主要化学成分的变化[J]. *食品科学*, 2008, 29(2): 64–67. [Fu D H, Liu Z H, Huang J A, et al. Variations of components of fuzhuan tea during processing[J]. *Food Science*, 2008, 29(2): 64–67.]
- [23] 杨芳, 杨莉, 张振宇, 等. 基于气相-离子迁移谱对竹燕窝菌汤风味成分的分析[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(23): 8–14, 24. [Yang F, Yang L, Zhang Z Y, et al. Analysis of volatile flavor constituents in bamboo bird 's nest soups with headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(23): 8–14, 24.]
- [24] 稷海峰, 朱艳冰, 蔡慧农, 等. 3 种福建省柚子汁挥发性成分及香气分析[J]. *集美大学学报(自然科学版)*, 2014, 19(4): 266–273. [Ji H F, Zhu Y B, Cai H N, et al. Analysis of the volatiles and aroma of the juice of three varieties of pummelo in fujian province[J]. *Journal of Jimei University(Natural Science)*, 2014, 19(4): 266–273.]
- [25] 滑金锋. 绿盲蝽化学感觉分子机制的研究[D]. 郑州: 河南

- 大学, 2012. [Hua J F. Molecular mechanisms of chemical senses in apolygus lucorum(Meyer-dvr)[D]. Zhengzhou: Henan University, 2012.]
- [26] 吴薇, 陶宁萍, 顾赛麒, 等. 蒸制刀鲚肉挥发性成分的鉴定与分析[J]. 食品工业科技, 2013, 34(20): 82–86. [Wu W, Tao N P, Gu S Q, et al. Identification and analysis of volatile compounds in steamed coilia ectenes meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(20): 82–86.]
- [27] 王娟. 杜仲红枣复合饮料研究与开发[D]. 天津: 天津科技大学, 2019. [Wang J. Research and development of compound beverage of Euotium and red dates[D]. Tianjin: Tianjin University of Science& Technology, 2019.]
- [28] 许曼筠, 张婕, 李美萍, 等. HS-GC-O-MS 分析细叶韭花易挥发性风味成分[J]. 食品科学, 2017, 38(10): 199–203. [Xu M J, Zhang J, Li M P, et al. Analysis of the volatile compounds in the flowers of allium tenuissimum by headspace-gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry[J]. Food Science, 2017, 38(10): 199–203.]
- [29] 曾桥, 吕生华, 李祥, 等. 不同原料茯砖茶活性成分及微生物多样性分析[J]. 食品科学, 2020, 41(24): 69–77. [Zeng Q, Lv S H, Li X, et al. Bioactive ingredients and microbial diversity of fuzhuan tea produced from different raw materials[J]. Food Science, 2020, 41(24): 69–77.]
- [30] Li Q, Huang J N, Li Y D, et al. Fungal community succession and major components change during manufacturing process of fu brick tea[J]. Scientific Report, 2017, 7(1): 6947–6955.
- [31] 罗天淇, 张健, 余志坚, 等. 传统宫廷奶酪挥发性风味物质研究[J]. 中国乳品工业, 2019, 47(4): 14–19. [Luo T Q, Zhang J, Yu Z J, et al. Studies on volatile flavor compounds of traditional royal cheese[J]. China Dairy Industry, 2019, 47(4): 14–19.]
- [32] 陈臣, 袁佳杰, 杨仁琴, 等. 食品风味协同作用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(3): 663–668. [Chen C, Yuan J J, Yang R Q, et al. Research progress of synergistic effect of food flavor[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2020, 11(3): 663–668.]
- [33] 欧伊伶, 张娅楠, 覃丽, 等. 茶叶色香味品质评价方法研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(6): 342–347, 360. [Ou Y L, Zhang Y N, Qin L, et al. Research advances on quality evaluation methods of tea color, aroma and taste[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(6): 342–347, 360.]
- [34] Ghosh S, Tudu B, Bhattacharyya N, et al. A recurrent elman network in conjunction with an electronic nose for fast prediction of optimum fermentation time of black tea[J]. Neural Computing and Applications, 2019, 31(Suppl 2): S1165–S1171.
- [35] Xiao Z, Wang H, Niu Y, et al. Characterization of aroma compositions in different Chinese congou black teas using GC-MS and GC-O combined with partial least squares regression[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2017, 32(4): 265–276.