不同渥堆发酵方法对普洱茶品质的影响

赵苗苗[1,2], 严 亮[1,2], 张文杰[1,2], 赵 明[4], 杨瑞娟[3], 刘 丽[1,2], 范 垚[1,2], 郑婷婷[1,2], 马 莉[1,2], 吕才有[4*]

(1. 滇西应用技术大学普洱茶学院, 普洱 665000; 2. 普洱茶研究院, 普洱 665000; 3. 云南农业大学食品科学技术学院, 昆明 650201; 4. 云南农业大学茶学院, 昆明 650201)

摘 要: 目的 研究不同渥堆发酵方法对普洱茶品质的影响。**方法** 以三级晒青茶为原料, 分别以高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)、气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)、电子鼻结合感官审评方法对比数控渥堆发酵及传统渥堆发酵对普洱茶品质的影响。**结果** 主成分分析(principal component analysis, PCA)及聚类分析结果表明, 两种渥堆发酵出堆样的香气有差异, 但差异不明显。传感器区别贡献率分析(Loading)结果表明, 甲基类(W1S)、硫化物类(W1W)对香气测定的贡献率最大, 且对数控渥堆发酵出堆的贡献率大于传统渥堆发酵; GC-MS 结果表明数控渥堆发酵出堆样的甲氧基类含量高于传统渥堆发酵, 进一步佐证了感官审评中数控渥堆发酵出堆样陈香更浓郁。聚类分析和感官审评结果表明, 数控渥堆发酵更利于品质稳定的普洱茶的形成。HPLC 结果表明, 两种渥堆发酵方式的化学物质变化规律基本相同, 但数控渥堆发酵出堆样的氨基酸、茶多酚、水浸出物及没食子酸含量显著低于传统渥堆发酵($P<0.05$), 总儿茶素及咖啡碱含量差异不显著($P>0.05$), 进一步佐证了感官审评传统渥堆发酵滋味更醇厚。**结论** 数控发酵可加工几十千克至数吨茶叶, 加工周期短, 且发酵过程中品质变化稳定性比传统发酵好, 传统发酵滋味比数控发酵滋味醇厚度高且化学成分含量高于数控发酵, 但继续摸索数控发酵技术的参数设置, 可以弥补这一缺点。

关键词: 普洱茶; 传统渥堆发酵; 数控渥堆发酵; 气相色谱-质谱法; 高效液相色谱法; 电子鼻

Effects of different pile-fermentation methods on the quality of Pu-erh tea

ZHAO Miao-Miao[1,2], YAN Liang[1,2], ZHANG Wen-Jie[1,2], ZHAO Ming[4], YANG Rui-Juan[3], LIU Li[1,2], FAN Yao[1,2], ZHENG Ting-Ting[1,2], MA Li[1,2], LV Cai-You[4*]

[1. *College of Tea* (*Pu'er*), *West Yunnan University of Applied Sciences*, *Pu'er* 665000, *China*; 2. *Pu'er Institute of Pu-erh Tea*, *Pu'er* 665000, *China*; 3. *College of Food Science and Technology*, *Yunnan Agricultural University*, *Kunming* 650201, *China*; 4. *College of Tea Science*, *Yunnan Agricultural University*, *Kunming* 650201, *China*]

ABSTRACT: Objective To study the effects of different pile-fermentation methods on the quality of Pu-erh tea. **Methods** Three-level sun-dried green tea was used as raw material, high performance liquid chromatography (HPLC), gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), and electronic nose combined with sensory evaluation were used to compare the effects of numerical control (NC) pile-fermentation and traditional pile-fermentation on the qualities of Pu-erh tea. **Results** Principal component analysis (PCA) and cluster analysis showed that there were

基金项目: 国家现代农业产业技术体系资助项目(CARS-19)、云南省重点项目云南绿色食品国际合作研究中心项目(2019ZG00909-02)

Fund: Supported by the China Agriculture Research System of Ministry of Finance and Ministry of Agriculture and Rural Affairs (CARS-19), and the Yunnan Provincial Key Project Yunnan Green Food International Cooperation Research Center Project (2019ZG00909-02)

***通信作者:** 吕才有, 博士, 教授, 主要研究方向为普洱茶加工。E-mail: 2495846526@qq.com

***Corresponding author:** LV Cai-You, Ph.D, Professor, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China. E-mail: 2495846526@qq.com

differences in the aroma of the 2 kinds of fermentation piles, but the differences were not significant. Sensor difference contribution analysis (Loading) showed that methyls (W1S) and sulfides (W1W) contributed the most to the aroma determinationl, and the contribution to the NC pile-fermentation was greater than that of traditional pile-fermentation; GC-MS analysis showed that the methoxyl content of the NC pile-fermentation pile sample was higher than that of the traditional pile-fermentation, which further supported the stronger aging aroma of the NC pile-fermentation sample in the sensory evaluation. Cluster analysis and sensory evaluation showed that NC pie-fermentation process was more conducive to the formation of Pu-erh tea with stable quality. HPLC showed that the change patterns of chemical substances were the same between the 2 types of fermentation methods, but the content of amino acids, tea polyphenols, water extracts and gallic acids in the NC pile-fermentation was significantly lower than those of traditional pile-fermentation (P<0.05), and the differences in the content of total catechins and caffeine was not significant (P>0.05), further supporting the sensory evaluation of the taste of traditional fermentation was mellower than that of NC pile-fermentation. **Conclusion** NC pile-fermentation can process dozens of kilograms to several tons of tea, with a shorter processing cycle and the stability of quality change during fermentation is better than traditional pile-fermentation, the traditional fermentation taste thicker and the chemical composition content is higher than that of NC pile-fermentation, but the parameter setting of NC pile-fermentation technology can make up for this shortcoming.

KEY WORDS: Pu-erh tea; traditional pile-fermentation; numerical control pile-fermentation; gas chromatography-mass spectrometry; high performance liquid chromatography; electronic nose

0　引　言

普洱茶的渥堆发酵以晒青毛茶为原料, 经微生物、酶、湿热、氧化等综合作用, 使多酚类成分发生诸如氧化、聚合、缩合、分解等为主的电化学变化[1], 从而形成普洱茶特有的色香味。发酵是改变普洱茶茶多酚含量、组成及其他生物活性成分含量的关键步骤[2]。普洱茶熟茶加工步骤包括选料、潮水、渥堆发酵、翻堆解块及开沟摊晾等工序, 普洱茶的渥堆发酵以传统渥堆发酵为主, 原料经潮水后, 在一定的温度、湿度条件下, 依靠微生物进行发酵。传统普洱茶渥堆发酵生产周期长(50~60 d), 发酵原料以2.5~15 t 为宜[3], 最佳潮水量为 45%[4], 翻堆间隔为 6 d 最佳[5], 整个渥堆发酵过程一般进行 6~8 次翻堆, 渥堆发酵结束后, 室温 17~23 ℃晾干的普洱茶品质最佳[6]。

目前, 茶叶品质评定方法仍以感官评定为主, 辅以其他的检测手段, 常见的香气分析技术是气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)及电子鼻, 单一的分析技术研究关键呈香成分存在局限性[7], GC-MS 可以检测出普洱茶挥发性物质种类含量, 有助于详细鉴别[8], 而电子鼻可以快速获取样本中挥发性化合物的整体信息[9], 电子鼻和 GC-MS 联合使用可以综合分析普洱茶香气物质和品质, 研究显示, 花香、陈香和木香是普洱熟茶的主要香气类别, 而花香、果香是生茶的主要香气类型[10]。为了促进传统渥堆发酵普洱茶的品质转化, 普洱茶微生物制剂的研究、开发和应用已较为成熟[11], 如赵腾飞等[12]使用筛选出的酵母菌发酵普洱茶, 促使普洱茶产生愉悦的甜香和花香; 李亚莉等[13]利用人工筛选的近平滑假丝酵母发酵制备高 γ-氨基丁酸普洱茶, 不仅具有传统普洱茶的陈香, 且有明显的乳香。但是, 目前普洱茶传统渥堆发酵仍存在原料量大、加工周期长、品质稳定性难以保证等问题, 比较适合发酵原料成本不高的大众普洱熟茶产品, 随着普洱熟茶价值被越来越多的人认可, 原料优质的高品质普洱熟茶成为市场新宠, 为了发酵原料优质的普洱熟茶, 近年来, 研究发酵周期短、可以少量发酵的普洱熟茶发酵等创新型技术不断出现, 如采用竹筐发酵的普洱茶小堆发酵方法[14], 同时, 云南普洱茶树良种场将微生物技术与工业控制相结合, 控制发酵过程中的各种参数条件, 研究开发了数字控制立体普洱茶发酵系统[15], 该系统可以发酵少量、原料粗老的机械化晒青茶[16], 但目前并未得到大面积推广使用。

为了客观、综合地对比传统渥堆发酵和数控渥堆发酵技术对普洱茶品质的影响, 本研究将两种渥堆发酵技术应用于三级晒青茶, 采用高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)、GC-MS、电子鼻结合感官审评方法分析渥堆发酵过程中香气物质及理化成分变化规律, 探索两种发酵技术对普洱茶品质的影响, 为创新熟茶发酵技术提供理论支持, 为后续的快速发酵工艺研究和深加工产品研究提供实验基础。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

发酵原料为云南省普洱茶树良种场生产的群体种三级晒青毛茶, 样品信息见表 1, 加工地点为云南省茶树良种场发酵室。

表 1 实验样品信息
Table 1 Experimental sample information

样品编号	传统渥堆发酵样品名称	样品编号	数控渥堆发酵样品名称
晒青		晒青	
A1	第一翻(发酵 7 d)	B1	第一翻(发酵 8 d)
A2	第二翻(发酵 14 d)	B2	第二翻(发酵 18 d)
A3	第三翻(发酵 21 d)	B3	第三翻(发酵 23 d)
A4	第四翻(发酵 28 d)	B 出堆	出堆样(50 ℃干燥 3 d)
A5	第五翻(发酵 35 d)	/	/
A6	第六翻(发酵 42 d)	/	/
A 出堆	开沟摊晾、自然晾干 15 d	/	/

注: /表示无此项。

甲醇、乙腈(色谱纯, 美国 Sigma 公司); 磷酸、硫酸亚铁、酒石酸钾钠、磷酸氢二钠、磷酸二氢钾(分析纯, 西陇化工股份有限公司); 茚三酮、三氯化铝、氢氧化钠(分析纯, 广东光华科技股份有限公司); 乙酸乙酯、正丁醇、乙醇、碳酸钠、草酸(分析纯, 天津市分船化学试剂科技有限公司); 咖啡碱(caffeine, CA, 0.109 mg/mL)、没食子酸(gallic acid, GA, 0.05 mg/mL)、儿茶素(catechins, C, 0.101 mg/mL)、表儿茶素(epicatechin, EC, 0.103 mg/mL)、表没食子儿茶素(epigallocatechin, EGC, 0.116 mg/mL)、表儿茶素没食子酸酯(epicatechin gallate, ECG, 0.108 mg/mL)、表没食子儿茶素没食子酸酯(epigallocatechin gallate, EGCG, 1.08 mg/mL)对照品(德国 Dr. Ehrenstorfer 公司)。

1.2 仪器与设备

101A-2 型电热鼓风恒温干燥箱(宁波新芝生物科技公司); 756CRT 紫外可见分光光度计(上海元析仪器有限公司); 7890A-5975C 气相色谱-质谱联用仪、1200 型高速液相色谱系统(美国安捷伦公司); SB-120D 型超声波清洗机、瑞士 BUCHI R-3 旋转蒸发仪[瑞士步琦有限公司]; SDE 同时蒸馏萃取设备[云南省科仪化玻有限公司]; HP-5MS 色谱柱[美国安捷伦科技公司]; PEN3 便携式电子鼻(德国 Airsens 公司); CP313 电子分析天平[0.001 g, 奥豪斯仪器(上海)有限公司]; CS-2000 型高速多功能粉碎机(武义海纳电器有限公司); TSKgel ODS-80^{TM} 色谱柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm, 日本 TOSOH 公司); Smart-Q30 实验室纯水系统(上海和泰仪器有限公司); 立体多层框式数控发酵系统[配有可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)主控设备、温湿度传感器及温湿度控制系统组成的发酵室和立体发酵筐, 云南省普洱茶树良种场]; 0.45 μm 有机膜(天津市津腾设备有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 传统发酵

三级晒青茶 3.03 t, 潮水 1320 kg, 至含水量 30.34%, 堆成梯形的茶堆, 堆高 64 cm, 覆盖湿麻布发酵, 整个发酵过程共进行 6 次翻堆, 隔 6 d 翻一次堆, 第一次翻堆后补水 80 kg, 二翻、三翻、四翻、五翻、六翻不补水, 共发酵 57 d。渥堆发酵结束后, 室内开沟摊晾, 自然晾干 15 d(室温 17~23 ℃)。每次翻堆解块混合后取样, 对所取的翻堆样进行室内晾干后装袋供实验数据检测分析使用, 各样品见表 1。

1.3.2 数控发酵

三级晒青茶 1.2 t, 潮水 480 kg, 至含水量 28.57%。潮水混匀后将茶叶装入长宽约 50 cm×50 cm 的大号塑料框, 每框可放茶叶 25 kg, 茶叶厚度 25 cm 左右, 放置于多层发酵架上, 置于云南省普洱茶树良种场的立体多层框式数控发酵系统发酵, 发酵室全封闭, 应用 PLC 系统对温度、湿度、供养、排二氧化碳等进行监测与控制[15]。整个发酵过程分 4 个阶段完成, 第 1 阶段阶段数控发酵室的温湿度设定 40 ℃、80%, 发酵 8 d, 第 2 阶段温湿度设定 48 ℃、80%, 发酵 10 d, 第 3 阶段温湿度设定 50 ℃、80%, 发酵 5 d, 第 4 阶段温湿度设定 50 ℃、0%, 发酵 3 d, 共发酵 26 d。每次翻堆解块混合补水前取样, 对所取的翻堆样进行室内阴干后装袋供实验数据检测分析使用, 各样品见表 1。

1.3.3 GC-MS 分析

GC-MS 检测参照[16]。由 GC-MS 分析得到的质谱数据经计算机在 NIST 2011 标准谱库的检索, 结合保留指数(retention index, RI)和保留时间对化合物进行定性分析, 按照峰面积归一法测得各香气组分的相对含量。

1.3.4 电子鼻分析

采用电子鼻进行检测, 仪器设置测定时间为 60 s, 传感器归零时间为 10 s; 样品准备时间为 5 s; 进样流量为 300 mL/min; 清洗通道 200 s, 平衡 45 s, 运用电子鼻自带软件 Win Muster, 取 T=55~58 s 的响应值, 采用主成分分析法(principal component analysis, PCA)、传感器区别贡献率分析法(Loading)进行模式识别分析, 各传感器的主要性能: 传感器 W1C(R1)对芳香成分、苯类灵敏; 传感器 W5S(R2)对氮氧化合物敏感; 传感器 W3C(R3)对芳香成分、氨类敏感; 传感器 W6S(R4)主要对氢化物有选择性; 传感器 W5C(R5)对短链烷烃芳香成分敏感; 传感器 W1S(R6)对甲基类灵敏; 传感器 W1W(R7)对硫化物灵敏; 传感器 W2S(R8)对醇类、醛酮类灵敏; 传感器 W2W(R9)对芳香成分、有机硫化物灵敏; 传感器 W3S(R10)对长链烷烃灵敏。干茶、茶汤及叶底香气采集方法参照[16]。

1.3.5 理化检测

水浸出物检测参照 GB/T 8305—2013《茶 水浸出物测定》; 茶多酚检测参照 GB/T 8313—2008《茶叶中茶多酚和儿茶素含量的检测方法》; 游离氨基酸检测参照 GB/T 8314—2013《茶 游离氨基酸总量的测定》; 儿茶素、GA 及咖啡碱测定应用实验室建立的 HPLC 法测定, 主要方法如下:

(1)将待测样磨碎准确称取 0.5 g, 先加入 2%磷酸 10 mL 之后加 10 mL 甲醇, 混合后静置 1 h, 过滤于 50 mL 容量瓶, 重复提取 2 次, 定容至 25 mL, 测定前经用 0.45 μm 有机膜进行过滤, 再进入液相色谱仪检测, 重复两次 4 个平行取

平均值记结果。

(2)使用TSKgel ODS-80^{TM}色谱柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm)分离，检测波长：λ=280 nm；流速：1 mL/min；柱温 40 ℃；进样量：2 μL；流动相 A：5%乙腈、0.261%磷酸；流动相 B：80%乙腈、0.261%磷酸；洗脱梯度：B 相线性梯度洗脱从 5% (0 min)~34.5% (22 min)；34.5% (22 min)~100% (22.5 min)；100% (22.5~27.5 min)；100% (27.5 min)~5% (27.8 min)；流速 1 mL/min, 28 min 内完成，每一次完结后系统平衡 6 min 后再次进样，根据保留时间确定化合物，使用溶剂匹配外标外标法根据峰面积定量。

1.3.6　感官审评

由 8 位云南农业大学茶学院的茶叶科学专家根据 GB/T 23776—2018《茶叶感官审评方法》黑茶(散茶)的规定进行感官审评，同时计算不同茶样审评得分，茶样审评总得分按照公式(1)计算：

$$Y=A\times a+B\times b+\ldots+E\times e \quad (1)$$

式中：Y 为茶叶审评总得分；A、B~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、b~e 为各品质因子的评分系数；各审评因子的评分系数分别为：外形占 20%、汤色占 15%、香气占 25%、滋味占 30%、叶底占 10%。

1.3.7　数据分析

试验数据用 Excel 2016 软件整理，每个样重复 4 次理化检测，运用 SPSS 22 进单因素方差分析，使用 Duncan 多重比较分析差异的显著性(P<0.05)以平均值±标准偏差表示；每个茶样分别采用干茶法、茶汤法、叶底法 3 种不同的香气采集法重复 3 次，运用 Win Muster 软件进行 PCA 及 Loading 分析。

2　结果与分析

2.1　电子鼻分析

目前，已有学者利用电子鼻通过检测茶叶香气的综合信息特征来判别不同种类茶叶[17]，鉴别不同品质的普洱茶[18]。对干茶法、茶汤法、叶底法 3 种不同香气采集法检测的 3 次平行数据中分别选出 1 次数据进行 PCA 分析(选取 55~58 s 的 4 个检测信号)，由于叶底法与干茶法、茶汤法相比，更能把各茶样较好地区分开(图略)，所以采用叶底法检测不同发酵阶段茶样的香气。

叶底法采集的电子鼻各个传感器在 T=55~58 s 的响应值用 SPSS 22 软件进行分析，筛选出更具代表性的一组数据进行 PCA 及 Loading 分析。由图 1 的 PCA 散点图可知，A4 及 A5 茶样有部分区域重叠，说明香气差异不明显。两种发酵方法的二翻(A2 与 B2)及三翻(A3 与 B3)区分度大，数据采集点所在的椭圆形都分布在特定的区域中没有重叠区域，说明香气差异明显，究其原因是传统渥堆发酵是自然发酵(6 次翻堆)，而数控渥堆发酵是控温、控湿发酵(3 次翻堆)，控温控湿发酵条件导致数控渥堆发酵的品质变化快。A 出堆与 B 出堆虽没有重叠区域但两者之间距离不远，说明 PCA 分析能够较好区分不同渥堆发酵方法和不同渥堆发酵阶段的茶样，两种渥堆发酵方法的出堆样香气有差异，但差异不明显。

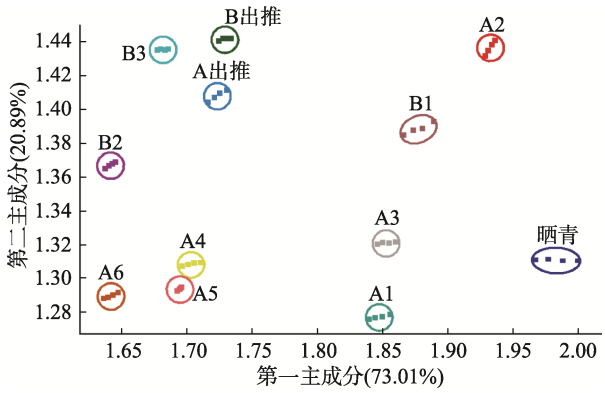

图 1　叶底 PCA 分析

Fig.1　PCA analysis of leaves

传感器区别贡献率分析法结果见图 2，在 Correlation-M 矩阵中，起主要区分作用的是传感器 W1W(硫化物类)、传感器 W2S(醇醛酮类)及传感器 W1S(甲基类)。传感器 R7(硫化物)的位点距离 x=0 最远，说明其对第一主成分贡献率最大，传感器 R6(W1S)的位点距离 y=0 最远，说明其对第二主成分贡献率最大，其次是传感器 R8(醇醛酮类)。结合图 1 和图 2 可知，B 出堆距离 x=0 及 y=0 的距离比 A 出堆远，表明两种发酵方法的出堆样中，甲基类(W1S)、硫化物(W1W)类香气物质对数控渥堆发酵出堆样的贡献率大于传统渥堆发酵出堆样。

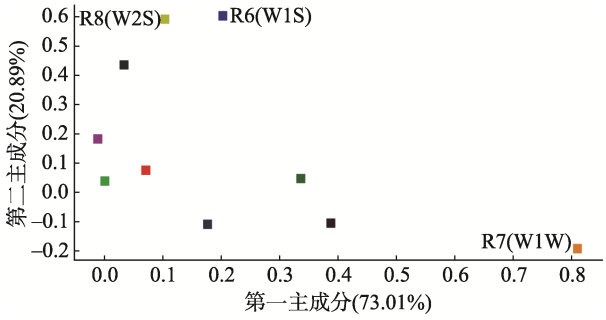

图 2　叶底 Loading 分析

Fig.2　Loading analysis of brewed tea leaves

2.2　GC-MS 分析

2.2.1　挥发性化合物组成分析

由表 2 可知，晒青茶以醇类、酯类及碳氢类为主，两种渥堆发酵出堆样以醇类、酯类及杂氧类为主。这与陈保等[19]研究结果一致。晒青原料共检测出 35 种香气物质(相对含量 78.60%，下同)，检测出主要物质有醇类 14 种

(57.59%)、酯类 4 种(7.86%)、碳氢类 7 种(4.48%)。A 出堆检测出 30 种香气物质(75.07%), 主要成分为醇类 9 种(47.64%)、酯类 8 种(12.24%)、杂氧类 4 种(7.91%)。B 出堆检测出 32 种香气物质(68.28%), 主要成分为醇类 9 种(38.86%)、杂氧类 4 种(8.57%)、酯类 3 种(3.02%)。吕世懂等[20]研究发现, 伴有木香的醇类化合物(如芳樟醇及其氧化物)对普洱茶陈香有较好的协调作用, 能使普洱茶香味更加陈醇。由表 2 可知, 两种发酵出堆样的芳樟醇低于晒青原料, 传统渥堆发酵减少了 80.56%, 数控渥堆发酵出堆样减少 82.27%。芳樟醇氧化物(I、II、III、IV)在两种渥堆发酵出堆样中的含量均高于晒青原料, 芳樟醇氧化物的含量提高是因为普洱茶渥堆发酵过程中, 芳樟醇在微生物作用下发生了氧化作用, 从而形成了部分芳樟醇氧化物和糖苷类物质水解释放出萜烯醇类香气。

甲氧基苯类化合物是普洱茶具有典型陈香味最主要的原因, 1,2,3-三甲氧基苯是陈香普洱茶中含量最丰富的香气物质[21], 由表 2 可知, 传统渥堆后期(六翻), 1,2,3-三甲氧基苯和 1,2,4-三甲氧基苯含量最高, 而在七翻时两者含量降低, 这与陈保等[19]研究结果一致, 其中 1,2,3-三甲氧基苯在每一次翻堆样中都能检测出。A 出堆检测出 4 种杂氧类化合物, 占比 7.91%, 其中 1,2,3-三甲氧基苯含量最高(3.86%), 其次是 1,2-二甲氧基苯(2.56%), 再次为 1,2,4-三甲氧基苯(1.27%); B 出堆检测出 4 种杂氧类化合物, 占比 8.57%, 其中 1,2,3-三甲氧基苯含量最高(3.57%), 其次是 1,2 二甲氧基苯(3.49%), 第三是 1,2,4-三甲氧基苯(1.04%)。

电子鼻分析结果表明(图 2), 硫化物类(W1W)及甲基类(W1S)对香气贡献率最大, 硫化物类及甲基类对 A 出堆香气贡献率小于 B 出堆（图 1、图 2）, 杂氧化合物是普洱熟茶区别于生茶的重要特色香气成分[22], 感官审评中普洱熟茶有强烈的陈味是由甲氧基苯所致[23], 由表 2 可知, 两种渥堆发酵出堆样均检测出 4 种杂氧类物质, A 出堆杂氧类(7.91%)含量比 B 出堆(8.57%)低, 因此, B 出堆的陈香成分应比 A 出堆的显。

表 2 传统与数控渥堆发酵茶样的香气成分及其相对含量(%)

Table 2 Aroma components and their relative content of tea samples in the numerical control pile-fermentation and traditional pile-fermentation (%)

化合物类别	香气成分	茶样编号											
		晒青	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A 出堆	B1	B2	B3	B 出堆
醛类	反式-2-己烯醛	-	0.21	0.14	0.16	0.23	-	-	-	0.15	-	-	0.24
	苯甲醛	0.92	0.82	0.73	1.02	1.48	1.19	2.2	-	0.79	0.45	0.97	1.01
	己醛	0.52	0.35	0.33	0.62	0.73	-	-	-	0.52	-	0.8	1.08
	苯乙醛	0.94	2.24	2.7	4.62	5.97	0.6	4.86	0.52	1.9	-	1.28	2.37
	β-环柠檬醛	0.37	0.18	0.16	0.17	-	-	-	-	0.25	-	-	-
	2,3-二氢-2,2,6-三甲基苯甲醛	0.92	-	0.44	0.46	-	-	-	-	0.63	-	-	-
	庚醛	-	-	0.08	-	-	-	-	-	0.19	-	-	-
	糠醛	-	2.38	1.15	0.51	0.44	-	-	-	-	-	-	-
醇类	脱氢芳樟醇	1.67	1.11	0.73	0.8	1.14	0.44	-	0.37	1.71	1.18	1.65	1.47
	苯甲醇	0.80	0.82	2.07	0.71	-	0.7	-	-	0.6	-	-	-
	香叶基芳樟醇	-	0.08	-	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-
	芳樟醇氧化物 I	1.16	2.35	2.95	3.17	4.08	4.78	4.35	1.97	4.1	3.92	1.96	2.4
	芳樟醇氧化物II	1.95	2.79	3.57	4.58	6.76	8.41	8.54	4.75	6.21	8.85	5.78	6.3
	芳樟醇	27.58	22.03	12.48	8.58	9.7	1.81	5.49	5.36	19.49	9.19	2.92	4.89
	芳樟醇氧化物III	0.33	0.75	1.38	2.06	3.11	3.97	3.99	5.04	2.9	6.65	4.07	4.1
	芳樟醇氧化物IV	0.98	1.16	3.04	4.67	8.29	10.93	11.53	15.78	6.2	16.15	10.54	9.74
	2-茨醇	-	-	-	-	-	-	-	0.3	-	-	-	-
	苯乙醇	0.97	11.46	16.14	13.1	17.62	17.42	-	4.83	5.57	0.68	1.01	-
	橙花醇	-	1.14	0.55	0.25	0.44	-	-	-	-	-	-	-
	α-松油醇	9.31	7.87	5.5	4.84	6.66	6.33	6.79	9.24	7.66	6.13	4.44	4.52
	1-辛烯-3-醇	0.11	-	-	-	0.14	-	-	-	0.26	-	-	-
	香叶醇	3.90	3.59	2.25	0.8	-	-	-	-	3.19	-	-	-
	4-萜烯醇	0.43	0.43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	α-毕橙茄醇;	0.30	-	-	0.31	-	-	0.5	-	-	0.98	1.59	1.12
	植物醇	8.10	5.06	-	6.02	-	2.06	3.38	-	9.13	7.53	4.7	4.32
酮类	2,26-三甲基环己酮	0.17	0.10	0.05	-	0.13	-	-	-	0.11	-	-	0.13
	3,5,5-三甲基环己-2-烯酮	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	0.25	2.15
	α-紫罗酮	-	0.07	0.07	-	0.08	0.12	-	0.18	-	0.13	0.17	0.15

表 2(续)

化合物类别	香气成分	茶样编号											
		晒青	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A 出堆	B1	B2	B3	B 出堆
酮类	*β*-紫罗酮	2.15	0.56	0.39	0.43	0.45	-	-	-	0.66	1.17	1.33	1.33
	香叶基丙酮	0.21	0.09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4-(2,2-二甲基-6-亚甲基环己基)-3-丁烯-2-酮	-	-	-	0.06	-	-	-	-	0.13	-	-	-
	大马士酮	0.65	0.21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	植酮	1.03	0.99	0.60	0.52	0.20	0.43	0.34	0.82	1.71	1.37	1.69	0.87
酯类	甲基硫代磺酸甲酯	-	-	-	-	-	0.62	-	-	-	-	-	0.48
	二氢猕猴桃内酯	5.70	1.47	1.39	1.34	1.08	1.14	1.62	1.51	2.14	1.26	0.90	1.31
	丁位辛内酯	-	-	-	-	-	-	-	1.61	-	-	-	-
	棕榈酸甲酯	0.77	2.77	3.65	4.22	1.07	1.03	0.68	1.56	0.62	0.24	-	-
	邻苯二甲酸二丁酯	-	2.16	0.55	0.45	-	0.26	0.20	0.46	2.52	1.04	1.89	1.23
	邻苯二甲酸二异丁酯	-	-	-	-	0.15	-	-	2.68	-	-	1.52	-
	亚油酸甲酯	0.38	2.80	4.61	5.27	0.65	0.86	0.44	1.16	0.47	-	-	-
	亚麻酸甲酯	1.01	7.21	9.86	12.21	2.04	2.05	1.14	2.87	1.49	-	-	-
	硬脂酸甲酯	-	0.21	0.54	0.75	-	-	-	0.39	-	-	-	-
	亚麻酸乙酯	-	0.09	0.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
碳氢类	月桂烯	0.27	0.26	0.18	0.17	0.17	-	-	-	-	-	-	-
	右旋萜二烯	0.73	0.37	0.26	0.24	0.30	0.07	0.26	-	0.30	0.11	-	0.40
	罗汉柏烯	-	-	-	-	-	0.12	-	-	-	0.17	0.16	-
	2-莰烯	0.17	0.16	0.08	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	莰烯	-	-	-	-	0.80	-	0.77	-	0.1	0.83	1.04	-
	α-蒎烯	-	-	-	0.06	-	-	0.08	-	-	-	-	-
	3,4-二甲氧基苯乙烯	-	-	0.2	-	0.08	-	0.19	-	-	0.60	0.73	0.83
	4-甲氧基苯乙烯	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.93
	长叶烯	-	-	-	-	-	-	0.26	0.31	-	-	-	-
	雪松烯	-	0.13	-	-	-	-	-	1.41	-	-	-	-
	二十烷	0.89	0.18	0.14	-	-	-	-	2.79	-	-	-	-
	十八烷	1.95	0.10	-	-	-	-	-	-	0.20	-	-	-
	蒎烷	-	-	-	-	-	-	-	0.31	-	-	-	-
	菲	0.28	0.14	-	0.14	-	0.22	-	0.28	-	-	0.55	-
	蒽	-	-	0.08	-	-	-	0.19	-	0.23	0.35	-	-
杂氧类	1,2,3-三甲氧基苯	-	0.35	0.32	0.38	3.94	5.63	6.50	3.86	0.19	1.30	3.74	3.57
	1,2,4-三甲氧基苯	-	-	-	-	0.52	1.11	2.09	1.27	-	0.83	0.96	1.04
	1,2-二甲氧基苯	-	-	1.02	0.97	3.52	2.42	3.60	2.56	-	0.8	4.06	3.49
	3,4-二甲氧基甲苯	-	-	-	-	-	0.14	-	-	-	-	-	-
	2,3-二氢苯并呋喃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.76	-	-
	1,3-二氢异苯并呋喃	-	-	-	-	-	-	-	0.22	-	-	-	-
	3,4,5-三甲氧基甲苯	-	-	-	-	-	0.36	0.41	-	-	-	0.57	0.47
醚类	异丁香酚甲醚	-	-	-	-	0.77	-	0.13	-	-	0.61	0.76	0.55
	2-氟苯甲醚	-	-	-	-	-	-	-	0.66	-	1.33	-	-
含氮化合物	N-乙基琥珀酰亚胺	-	-	-	-	-	1.17	-	-	-	-	-	0.84
	吲哚	-	-	0.24	-	-	-	0.45	-	0.30	0.39	0.51	0.26
	咖啡碱	0.98	0.20	1.52	2.03	0.12	2.93	2.82	-	1.10	1.78	0.69	4.69
酸类	十二酸	-	0.06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	十四酸	-	0.07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	顺式-十八碳烯酸	-	-	0.28	0.18	-	-	-	-	-	-	-	-
	棕榈酸	-	0.14	0.18	2.42	-	0.45	-	-	-	-	-	-
合计	含量/%	78.6	87.71	82.9	89.34	82.86	79.77	73.8	75.07	83.72	75.63	63.23	68.28
	种类/种	35	45	43	40	33	31	29	30	35	30	31	32

注: “-”表示未检测出。

2.2.2　GC-MS 聚类分析

据徐春晖等[24]研究, 使用聚类分析和主成分分析可以很好地评价样本之间的差异。本研究对 GC-MS 检测的定量数据进行聚类分析, 聚类方法为组间联接, 聚为一类的茶样香气成分无明显差异。结果见图 3, 类间距为 15 时, 把茶样分为 3 大类, 两种渥堆发酵出堆样聚为一类, 即两者香气差异不明显, 这与主成分分析结果相对应。数控发酵二翻到出堆样聚为一类, 表明数控渥堆发酵过程中香气成分相近, 差异不明显, 发酵过程中香气变化比较稳定。通过 GC-MS 聚类分析(图 3)及主成分分析(图 1) 结果表明, 两种渥堆发酵出堆样

香气有差异, 但差异不明显。

2.3 理化分析

根据表 3, 两种发酵方式的化学物质变化规律基本相同, 出堆样氨基酸、茶多酚、GA、总儿茶素含量降低, 水浸出物增加、咖啡碱含量变化不大。B 出堆的氨基酸、茶多酚、水浸出物、咖啡碱、总儿茶素及 GA 含量均低于 A 出堆, 总儿茶素及咖啡碱含量差异不显著(P>0.05), 其余含量均存在显著差异(P<0.05)。A 出堆氨基酸(4.14%)、茶多酚(22.44%)、水浸出物(42.53%)、GA (1.63%)含量是 B 出堆的氨基酸(2.56%)、茶多酚(15.11%)、水浸出物(35.95%)、GA (0.25%)的 1.62 倍、1.49 倍、1.18 倍、6.52 倍, 造成该结果的原因可能与数控渥堆发酵前 3 个阶段喷水加湿(80%)导致茶叶内含物质大量浸出有关, 数控渥堆发酵的参数设置后期需继续摸索。

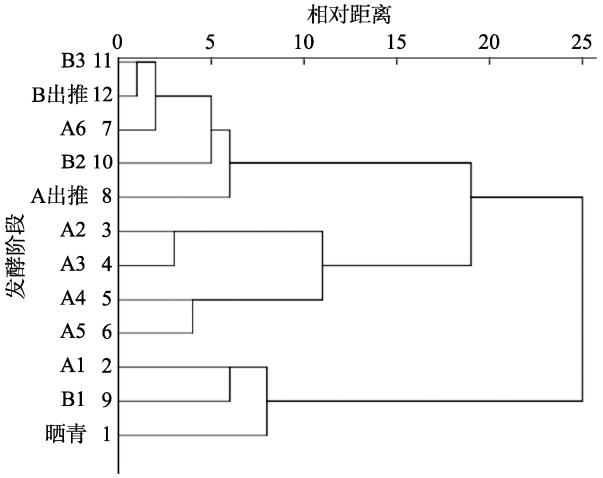

图 3 茶样的 GC-MS 聚类分析图

Fig.3 Clustering analysis of tea samples by GC-MS

表 3 传统与数控渥堆发酵茶样中的化学成分(n=4, %)

Table 3 Chemical compositions of tea samples in the traditional and numerical control pile-fermentation (n=4, %)

茶样	氨基酸	茶多酚	水浸出物	咖啡碱	GA	非酯型儿茶素	酯型儿茶素	总儿茶素
晒青	4.40±0.08^{cd}	31.25±1.48^{b}	33.35±3.33^{f}	2.20±0.34^{a}	0.09±0.02^{g}	3.19±0.60^{b}	9.22±1.27^{a}	12.41±1.88^{a}
A1	5.12±0.08^{b}	33.34±0.57^{a}	40.54±2.91^{cd}	2.30±0.42^{a}	2.80±0.42^{a}	4.70±0.92^{a}	2.05±0.42^{b}	6.76±1.26^{b}
A2	6.43±0.07^{a}	33.26±0.87^{a}	47.97±3.16^{a}	1.86±1.18^{a}	2.37±1.57^{ab}	3.00±2.21^{b}	0.38±0.17^{d}	3.38±2.37^{c}
A3	5.14±0.03^{b}	28.62±0.53^{c}	40.02±2.48^{cde}	2.36±0.62^{a}	2.60±0.63^{a}	2.43±0.80^{bc}	0.21±0.04^{d}	2.64±0.83^{cd}
A4	5.09±0.46^{b}	25.93±1.98^{d}	39.49±5.36^{cde}	2.71±0.09^{a}	2.83±0.06^{a}	1.70±0.18^{cd}	0.17±0.03^{d}	1.88±0.19^{de}
A5	4.45±0.11^{c}	24.67±0.53^{e}	39.64±1.62^{cde}	2.30±0.46^{a}	1.71±0.26^{bc}	0.74±0.14^{de}	0.05±001^{d}	0.79±0.15^{ef}
A6	4.22±0.09^{cd}	21.68±0.45^{f}	41.71±2.62^{bc}	1.97±0.39^{a}	0.89±0.16^{def}	0.49±0.10^{e}	0.04±0.01^{d}	0.53±0.10^{ef}
A 出堆	4.14±0.11^{d}	22.44±0.22^{f}	42.53±1.68^{bc}	2.53±0.07^{a}	1.63±0.05^{bcd}	0.64±0.04^{de}	0.08±0.03^{d}	0.72±0.02^{ef}
B1	3.51±0.14^{e}	26.56±0.56^{d}	42.75±1.74^{bc}	1.90±0.10^{a}	1.53±0.12^{cde}	2.73±0.18^{bc}	1.30±0.09^{c}	4.04±0.24^{c}
B2	3.64±0.09^{e}	18.96±0.20^{g}	37.03±2.33^{def}	1.85±0.14^{a}	0.75±0.02^{efg}	0.94±0.09^{de}	0.16±0.02^{d}	1.10±0.12^{ef}
B3	2.63±0.09^{f}	14.22±0.27^{h}	33.22±1.35^{f}	1.92±0.42^{a}	0.17±0.48^{fg}	0.19±0.06^{e}	-	0.19±0.06^{f}
B 出堆	2.56±0.09^{f}	15.11±0.41^{h}	35.95±1.11^{ef}	2.25±0.29^{a}	0.25±0.05^{fg}	0.27±0.44^{e}	0.02±0.03^{d}	0.29±0.07^{ef}

注: -表示未检测出, 数据用平均值±标准偏差表示。同一行中不同字母(a~f)表示数值间存在显著差异(P < 0.05)。

根据表 3, 发酵过程中儿茶素含量呈下降趋势, 晒青的酯型儿茶素含量比非酯型儿茶素含量高, 发酵过程中不同出堆样的非酯型儿茶素含量均高于酯型儿茶素, 这与生茶以酯型儿茶素为主, 而熟茶以非酯型儿茶素为主相一致[25]。熟茶的 GA 含量高于生茶[26], 本研究发现, 晒青 GA 的含量为 0.09%, 远低于 A 出堆的 1.63%和 B 出堆的 0.25%。

根据表 3, 与晒青相比, 不同渥堆发酵出堆样的氨基酸、茶多酚及总儿茶素含量均少于晒青原料, 而水浸出物、咖啡碱及 GA 含量增加。据宁静等[27]与刘菲等[28]研究, 茶多酚、氨基酸及儿茶素含量在发酵过程中减少是因为在渥堆发酵过程中, 微生物利用茶叶中的氨基酸作为氮源进行生长, 从而造成氨基酸总量减少, 微生物酶促作用使多酚类分解, 茶多酚含量在渥堆过程中呈下降趋势这与秦俊哲等[29]研究结果一致。根据表 3, 晒青与 B 出堆及 A 出堆的咖啡碱含量差异不显著, 这与何建刚等[30]研究结果一致, 由于咖啡碱是杂环含氮结构, 分子结构较为稳定, 堆发酵的加工过程中难于被破坏, 因此保留得较多。

2.4 感官评价与分析

对茶样的外形、汤色、香气、滋味及叶底 5 个相关因子进行感官审评, 审评结果见表 4, 茶叶的外形由色泽墨绿变为褐色, 汤色由绿黄变为褐红或红褐、香气由清香浓郁变为陈香纯正、滋味纯正清香浓郁变成醇厚、叶底由黄绿变成红褐。数控渥堆发酵中, 随着渥堆发酵的进行, 茶叶品质是稳定的朝熟茶品质标准变化。传统渥堆发酵五翻(A5)评分高于六翻(A6), 由于长时间 57 d 渥堆发酵, 传统在渥堆发酵过程中品质变化不稳定。

传统发酵出堆样(A 出堆)香气陈香纯正、滋味醇厚, 感官评分为 83, 数控发酵出堆样(B 出堆)滋味陈香浓郁、滋味陈香纯正, 感官评分为 79。感官审评结果表明, 传统渥堆发酵的滋味更醇厚, 数控渥堆发酵香气更浓郁, 传统渥堆发酵审评评分高于数控渥堆发酵, 数控渥堆发酵更利于品质稳定的普洱茶的形成。

3 结论与讨论

本研究结果表明传统渥堆发酵滋味比数控发酵的更醇厚, 这与王兴华等[15]研究结果相反, 究其原因是王兴华等为了对比研究两种渥堆发酵对普洱茶品质的影响均进行 33 d 渥堆发酵，3 次翻堆，数控发酵是可以通过监测和控

制发酵室温湿度, 而传统发酵是自然发酵, 所以传统渥堆发酵很难在同样时间达到熟茶出堆标准。常见的传统渥堆发酵周期为 50~60 d, 整个加工工序翻堆 6~8 次, 为了客观对比研究数控渥堆发酵与传统渥堆发酵的品质变化, 更好地服务于普洱茶实际生产, 本研究的传统渥堆发酵进行了 6 次翻堆, 间隔 6 d 翻堆, 发酵时长 57 d。

本研究结果显示, 数控渥堆发酵滋味醇厚度低于传统渥堆发酵, 究其原因, 其一, 数控渥堆发酵中, 潮水后的晒青毛茶直接放入大号透气塑料筐并置于可控温控湿发酵室发酵, 发酵前 3 个阶段均设置自动喷水加湿(80%), 水直接喷在茶叶上, 导致茶叶内含成分浸出有关, 这也可能是导致数控发酵出堆样的氨基酸、茶多酚、水浸出物、咖啡碱、总儿茶素及没食子酸含量均低于传统发酵的原因; 其二, 可能与数控渥堆发酵渥堆只进行 26 d, 而传统渥堆发酵进行了 57 d 有关, 据任洪涛等[31]研究表明, 发酵过生滋味苦中带涩, 发酵过熟滋味淡薄少韵, 适度发酵滋味浓醇甘甜, 冯超浩[3]研究表明在潮水 45%条件下发酵普洱茶, 渥堆发酵 24 d 的滋味比渥堆发酵 18 d 醇厚。

渥堆的实质是微生物的酶促作用、微生物呼吸代谢产物的热量和茶叶水分的湿热协同下, 发生了一系列生化反应[32]。由于普洱茶渥堆过程的微生物来源于环境及原料鲜叶, 从而形成了云南各地普洱茶的不同风味品质[33]。普洱茶的传统渥堆发酵是依靠发酵环境的自然发酵, 渥堆发酵的温湿度不可控, 加工周期长, 每次参与渥堆发酵的微生物及发酵程度不稳定, 导致普洱茶品质不稳定。本研究中, 虽然普洱茶传统发酵比数控发酵滋味更醇厚, 但是数控发酵只需要 26 d, 且原料较少也可以发酵(25 kg 至数吨), 加工周期、发酵条件具有可控性, 更利于普洱茶品质稳定性的形成, 为了使普洱茶数控发酵品质更优, 需继续摸索数控渥堆发酵的参数设置, 但两种渥发酵过程中微生物与普洱茶品质之间的关系需要进一步的研究。

未来茶叶加工技术发展的趋势是标准化、机械化、自动化和智能化[34], 目前, 普洱茶的渥堆发酵是没有标准化控制的自然发酵工序, 为了突破普洱茶产业发展中“标准化生产瓶颈”, 只有通过深入研究后发酵实现数控发酵技术的应用, 在保留普洱茶传统渥堆发酵制茶工艺的同时, 将更新进的发酵理念及发酵工艺引入传统行业, 使普洱熟茶的发酵工艺更加规范, 是普洱茶未来的发展趋势。本研究对普洱茶创新发酵进行了有益研究与探索, 对于目前云南茶叶产业来说具有一定的科学指导意义。

表 4　不同渥堆发酵阶段茶样的感官审评结果(n=8)

Table 4　Sensory evaluation results of tea samples in the numerical control pile-fermentation and traditional pile-fermentation (n=8)

发酵方法	茶样	外形/分	汤色/分	香气/分	滋味/分	叶底/分	总分/分
	晒青	墨绿紧结	绿黄	清香浓郁	纯正清香浓郁	黄绿	80
传统渥堆发酵	A1	墨绿紧实(50)	绿黄(50)	略酸(53)	欠纯正 稍酸(54)	深绿(50)	52
	A2	稍褐紧实(55)	橙黄明亮(50)	略酸(55)	欠纯正 酸(55)	墨绿(50)	54
	A3	稍红褐(68)	红亮(70)	甜香(60)	纯正(76)	棕红(60)	68
	A4	红褐(80)	红浓明亮(80)	甜香(60)	纯正(76)	棕褐(65)	72
	A5	红褐(80)	褐红明亮(78)	堆味重(70)	纯正浓厚(82)	红褐(80)	78
	A6	褐色稍灰(70)	褐红(70)	陈香纯正(80)	稍酸略苦(77)	红褐(80)	77
	A 出堆	红褐(80)	红浓明亮(80)	陈香纯正(82)	醇厚(87)	红褐(80)	83
数控渥堆发酵	B1	墨绿紧实(50)	橙黄(50)	酸味(50)	苦涩偏酸(50)	深绿(50)	50
	B2	棕色 枯(61)	红浓明亮(80)	浓 陈香(74)	纯正略苦(70)	红褐(80)	72
	B3	红褐(80)	红褐(75)	浓 陈香(76)	纯正略陈(77)	褐色(70)	76
	B 出堆	红褐(80)	红褐较明亮(80)	浓 陈香(80)	陈香纯正(80)	褐色(74)	79

注: 审评总分保留整数。

参考文献

[1] 吕海鹏, 王梦琪, 张悦, 等. 普洱茶后发酵过程中多酚类成分生物转化的研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(23): 306–312.
LV HP, WANG MQ, ZHANG Y, *et al*. Recent advances in research on biotransformation of polypheonls during Pu-erh tea pile fermentation [J]. Food Sci, 2018, 39(23): 306–312.

[2] LONG P, WEN M, GRANATO D, *et al.* Untargeted and targeted metabolomics reveal the chemical characteristic of Pu-erh tea (*Camellia assamica*) during pile-fermentation [J]. Food Chem, 2020, 311(1): 125895.1–125895.8.

[3] 冯超浩. 不同渥堆工艺条件对普洱茶品质的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
FENG CH. Effect of different pile-fermentation process conditions on the quality of Pu-erh tea [D]. Guangzhou: South China University of Technol, 2013.

[4] 冯超浩, 刘通讯. 不同潮水量条件下普洱茶渥堆过程化学成分的变化[J]. 食品科学, 2013, 34(7): 135–139.
FENG CH, LIU TX. Effect of different pile-fermentation process conditions on the quality of Pu-erh tea [D]. Food Sci, 2013, 34(7): 135–139.

[5] 胡捷. 不同季节普洱茶渥堆过程动态分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
HU J. Dynamic analysis of pile-fermentation process for Pu-erh tea at different seasons [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.

[6] 刘通讯, 谭梦珠. 不同干燥温度对普洱茶多酚类物质和香气成分的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(4): 264–271.
LIU TX, TAN MZ. The effect of different drying temperatures on the transformation of polyphenols and volatile aroma components in Pu-erh tea [J]. Mod Food Sci Technol, 2015, 31(4): 264–271.

[7] 王梦琪, 朱荫, 张悦, 等. 茶叶挥发性成分中关键呈香成分研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 341–349.
WANG MQ, ZHU Y, ZHANG Y, *et al.* A review of recent research on key aroma compounds in tea [J]. Food Sci, 2019, 40(23): 341–349.

[8] 李大雷, 翁彦如, 杜丽平, 等. 电子鼻和气质联用法分析普洱茶香气成分[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(3): 237–245.

LI DL, WEN YR, DU LP, *et al*. Detection of volatile compounds in different brands of Pu-erh tea using electronic nose and GC-MS [J]. Food Ferment Ind, 2019, 45(3): 237–245.

[9] TIGGEMANN L, BALLEN SC, BOCALON CM, *et al*. Electronic nose system based on polyaniline films sensor array with different dopants for discrimination of artificial aromas [J]. Innov Food Sci Emerg, 2017, 43: 112–116.

[10] XU YQ , WANG C, LI CW, *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 Anal Methods, 2016, 9(5): 1188–1198.

[11] 龙丹, 罗龙新, 吴函殷, 等. 微生物制剂提升茶制品香气的研究进展[J]. 食品与发酵科技, 2018, 54(5): 80–85.
LONG D, LUO LX, WU HY, *et al.* The research progress on microbial agents applied in enhancing aroma enhancement of tea products [J]. Food Ferment Sci Technol, 2018, 54(5): 80–85.

[12] 赵腾飞, 郭学武, 张长霞, 等. 酵母菌纯种发酵普洱茶初探[J]. 食品科技, 2012, 37(2): 57–60.
ZHAO TX, GUO XW, ZHANG CX, *et al.* Influence of advantage Saccharomycetes to Pu-er tea fermentation [J]. Food Sci Technol, 2012, 37(2): 57–60.

[13] 李亚莉, 秘鸣, 魏珍珍, 等. 近平滑假丝酵母(*Candida parapsilosis*)发酵普洱茶初探[J]. 茶叶科学, 2013, 33(5): 436–442.
LI YL, MI M, WEI ZZ, *et al.* Application of *Candida parapsilosis* GPT-5-11 for Pu-erh tea fermentation [J]. J Tea Sci, 2013, 33(5): 436–442.

[14] 普洱杂志社. 熟茶, 一片茶叶的蝶变与升华[M]. 北京: 中国林业出版社, 2020.
Pu'er Magazine. Fermented tea, the butterfly transformation and sublimation of a tea leaf [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2020.

[15] 王兴华, 念波, 段双梅, 等. 数控与传统发酵普洱茶抗氧化活性与化学成分的比较[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(5): 138–143.
WANG XH, NIAN B, DUAN SM, *et al*. Comparison on chemical compounds and antioxidant activity of Pu-erh tea fermented by numerical control and traditional methods [J]. Food Ferment Ind, 2017, 43(5): 138–143.

[16] 赵苗苗, 何鲁南, 李果, 等. 普洱茶机械化生产及数控发酵的品质研究[J]. 茶叶科学, 2020, 40(5): 676–688.
ZHAO MM, HE LN, LI G, *et al*. Study on quality of mechanical production and numerical control fermentation of Pu-er tea [J]. J Tea Sci, 2020, 40(5): 676–688.

[17] 潘玉成, 宋莉莉, 叶乃兴, 等. 电子鼻技术及其在茶叶中的应用研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(9): 213–218.
PAN YC, SONG LL, YE NX, *et al*. Electronic nose technology and its application tea [J]. Food Mach, 2016, 32(9): 213–218.

[18] 高林, 秦子涵, 赵文婷, 等. 电子鼻区分不同品质的普洱茶[J]. 中国食品学报, 2017, 17(6): 206–212.
GAO L, QIN ZH, ZHAO WT, *et al*. The application of electronic nose for distinction on different varieties of Pu-erh [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2017, 17(6): 206–212.

[19] 陈保, 满红平, 姜东华, 等. 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法分析普洱茶渥堆发酵过程中的香气成分变化[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(6): 2191–2198.
CHEN B, MAN HP, JIANG DH, *et al.* Changes of aroma components during Pu'er tea fermentation process by headspace-solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry [J]. J Food Saf Qual, 2017, 8(6): 2191–2198.

[20] 吕世懂, 孟庆雄, 徐咏全, 等. 普洱茶香气分析方法及香气活性物质研究进展[J]. 食品科学, 2014, 35(11): 292–298.
LV SD, MENG QX, XU YQ, *et al*. Recent progress in aroma analysis methods and aroma active compounds in Pu-erh tea [J]. Food Sci, 2014, 35(11): 292–298.

[21] LV HP, ZHONG QS, LIN Z, *et al*. Aroma characterisation of Pu-erh tea using headspace-solid phase microextraction combined with GC/MS and GC-olfactometry [J]. Food Chem, 2012, 130(4): 1074–1081.

[22] LV S, WU Y, WEI J, *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 Adv, 2015, 5(107): 87806–87817.

[23] ZHANG T, NI H, QIU XJ, *et al*. Suppressive interaction approach for masking stale note of instant ripened Pu-erh tea products [J]. Molecules, 2019, 24(24): 4473.

[24] 徐春晖, 王远兴. 基于 GC-MS 结合化学计量学方法鉴别 3 种江西名茶[J]. 食品科学, 2020, 41(20): 141–150.
XU CH, WANG YX. Discrimination of three famous teas in Jiangxi using gas chromatography-mass spectrometry combined with chemometrics [J]. Food Sci, 2020, 41(20): 141–150.

[25] 蒋睿, 罗理勇, 常睿, 等. 普洱生茶和熟茶的品质化学成分分析比较[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(6): 38–47.
JIANG R, LUO LY, CHANG R, *et al*. Comparative analysis of quality-related chemical components of raw Pu-erh tea and ripe Pu-erh tea [J]. J Southwest Univ (Nat Sci Ed), 2018, 40(6): 38–47.

[26] PEDAN V, ROHN S, HOLINGER M, *et al*. Bioactive compound fingerprint analysis of aged raw Pu'er tea and young ripened Pu'er tea [J]. Molecules, 2018, 23(8): 1931.

[27] 宁静, 李健权, 刘本英, 等. 云南大叶种晒青茶发花前后主要风味成分的变化研究[J]. 茶叶科学, 2021, 41(2): 213–227.
NING J, LI JQ, LIU BY, *et al.* Study on the changes of main flavor components of Yunnan large leaf sun-dried green tea before and after fungal fermentation [J]. J Tea Sci, 2021, 41(2): 213–227.

[28] 刘菲, 薛志慧, 叶倩林, 等. "发花"对白茶风味品质的影响研究[J]. 茶叶科学, 2016, 36(3): 301–311
LIU F, XUE ZH, YE QL, *et al.* Study on effect of fungal-fermentation process on flavor quality in white tea [J]. J Tea Sci, 2016, 36(3): 301–311.

[29] 秦俊哲, 杨苗, 夏飞, 等. 渥堆条件对黑毛茶主要功效成分的影响[J]. 陕西科技大学学报, 2018, 36(5): 51–56.
QIN JZ, YANG M, XIA F, *et al.* Effect of different fermentation conditions on chemical components of material tea [J]. J Shaanxi Univ Sci Technol, 2018, 36(5): 51–56.

[30] 何建刚, 黄玮, 肖长义, 等. 青砖茶加工过程品质成分变化研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(12): 4534–4538.
HE JG, HUANG W, XIAO CY, *et al.* Changes of components in Chin-brick tea during processing [J]. J Food Saf Qual, 2017, 8(12): 4534–4538.

[31] 任洪涛, 周斌, 夏凯国, 等. 不同发酵程度普洱茶香气成分的比较分析[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(11): 23–26.
REN HT, ZHOU B, XIA KG, *et al.* Compare analysis of fermentation degree on the aromatic components of Pu-erh tea [J]. Food Res Dev, 2011, 32(11): 23–26.

[32] 刘石泉, 赵运林, 胡治远, 等. 不同渥堆条件对茯砖茶品质的影响研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(22): 256–259.
LIU SQ, ZHAO YL, HU ZY, *et al*. Research of influence of pile-fermentation on the qualities of Fuzhuan dark tea [J]. Sci Technol Food Ind, 2012, 33(22): 256–259.

[33] 郝彬秀, 李颂, 田海霞, 等. 普洱熟茶的发酵微生物研究进展[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(8): 203–206.
HAO BX, LI S, TIAN HX, *et al*. Research progress of fermented microbes in Pu-erh tea [J]. Food Res Dev, 2018, 39(8): 203–206.

[34] 刘仲华, 陈宗懋, 杨亚军, 等. 创新驱动中国茶产业高质量发展—从茶学基础研究到支撑产业发展[J]. 中国茶叶, 2021, 43(2): 1–9.
LIU ZH, CHEN ZM, YANG YJ, *et al*. Innovation drives high-quality development of Chinese tea industry-From basic research of tea science to supporting industrial development [J]. China Tea, 2021, 43(2): 1–9.

(责任编辑: 郑 丽 韩晓红)

作者简介

赵苗苗, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为普洱茶加工。
E-mail: 408925409@qq.com

吕才有, 博士, 教授, 主要研究方向为普洱茶加工。
E-mail: 2495846526@qq.com