

渥堆时间对黔县黑茶滋味品质及非挥发性代谢物的影响

王 辉, 周汉琛, 刘亚芹, 杨霁虹, 张晓磊, 徐玉婕, 雷攀登

Influence of Pile Fermentation Time on the Sensory Flavor and Non-volatile Compounds of Yixian Dark Tea

WANG Hui, ZHOU Hanchen, LIU Yaqin, YANG Jihong, ZHANG Xiaolei, XU Yujie, and LEI Pandeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024050302>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

金花藏茶渥堆加工过程中的挥发性风味分析及感官评定

Volatile Flavor Analysis and Sensory Evaluation of Jinhua Tibetan Tea during Pile Processing

食品工业科技. 2022, 43(24): 305-310 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022030007>

六堡茶渥堆与蒸压工艺真菌多样性研究

Study on Fungal Diversity during the Pile-fermentation and Autoclaved Process of Liupao Tea

食品工业科技. 2023, 44(16): 172-179 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022100139>

高效液相色谱-串联质谱同时检测黑巧克力中的五种大麻酚

Simultaneous Determination of Five Cannabinoids in Dark Chocolate with High Performance Liquid Chromatography Tandem Mass Spectrometry

食品工业科技. 2021, 42(23): 303-310 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021030245>

不同叶色茶树品种原料对四川黑茶品质的影响

Effects of Raw Materials from Different Tea Cultivars of Leaf Colour on Sichuan Dark Tea Quality

食品工业科技. 2024, 45(16): 301-311 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023100060>

四川黑茶的特征香气成分分析

Analysis of Characteristic Aroma Components of Sichuan Dark Tea

食品工业科技. 2023, 44(12): 328-336 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022070344>

基于HS-SPME-GC-MS技术分析不同种类黑茶香气成分

Study on Aroma Components in Different Types of Dark Tea Based on HS-SPME-GC-MS

食品工业科技. 2023, 44(18): 378-386 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022110337>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王辉, 周汉琛, 刘亚芹, 等. 渥堆时间对黟县黑茶滋味品质及非挥发性代谢物的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(21): 283–291.
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050302

WANG Hui, ZHOU Hanchen, LIU Yaqin, et al. Influence of Pile Fermentation Time on the Sensory Flavor and Non-volatile Compounds of Yixian Dark Tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(21): 283–291. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050302

· 分析检测 ·

渥堆时间对黟县黑茶滋味品质及 非挥发性代谢物的影响

王 辉, 周汉琛, 刘亚芹, 杨霁虹, 张晓磊, 徐玉婕, 雷攀登*
(安徽省农业科学院茶叶研究所, 安徽黄山 245000)

摘 要: 为探究渥堆进程中影响黟县黑茶滋味品质变化的关键节点, 本研究通过感官评价、氨基酸分析仪、液相色谱及液相色谱质谱联用仪, 分析了不同渥堆时间下 (0、3、6、9、12、15 和 18 h) 其滋味品质及代谢物的变化。结果表明, 渥堆 9 h 后茶汤苦味开始降低、收敛性和厚度增加、陈醇风味凸显。儿茶素类物质总量在渥堆期间显著降低, 而没食子酸含量则显著增加; 咖啡碱含量在渥堆 18 h 后降低了 14.7%; 游离氨基酸总量在渥堆后期 (15~18 h) 呈现上升趋势; 黄酮醇及单糖苷的黄酮苷类物质含量在渥堆中期 (9~12 h) 显著增加 ($P<0.05$); 双糖苷的黄酮苷类物质含量则在渥堆中后期呈上升趋势。关键滋味物质分析显示 (VIP>1, DOT>1), 杨梅素-3-O-半乳糖苷、紫云英苷、异槲皮苷、槲皮素-3-O-芸香糖苷、表没食子儿茶素、表儿茶素、表没食子儿茶素没食子酸酯及咖啡碱是影响黟县黑茶品质变化的重要呈味物质, 其中, 前三种糖苷类物质在渥堆 9~12 h 含量显著增高; 表没食子儿茶素、表儿茶素在 9~12 h 期间含量显著降低; 表没食子儿茶素没食子酸酯、咖啡碱在渥堆后呈现显著降低; 槲皮素-3-O-芸香糖苷在渥堆中期 (9~12 h) 显著下降, 在渥堆 15 h 后显著增加, 是渥堆后期茶汤涩感增加的重要因子。本研究结果为后续黟县黑茶渥堆工艺优化及探究其滋味品质形成机制提供了重要理论参考。

关键词: 黟县黑茶, 渥堆, 感官评价, 滋味成分, 液相色谱质谱

中图分类号: TS272.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)21-0283-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050302

本文网刊:



Influence of Pile Fermentation Time on the Sensory Flavor and Non-volatile Compounds of Yixian Dark Tea

WANG Hui, ZHOU Hanchen, LIU Yaqin, YANG Jihong, ZHANG Xiaolei, XU Yujie, LEI Pandeng*

(Tea Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Huangshan 245000, China)

Abstract: In order to investigate the key nodes affecting the changes of Yixian dark tea flavor and quality during the Pile fermentation, in this study, the sensory quality and non-volatile profiles of Yixian dark tea samples at different pile fermentation periods (0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 h) were investigated by sensory evaluation, amino acids analyzer, liquid chromatography and liquid chromatography mass spectrometry. The results showed that the intensity of bitterness in dark tea infusions declined after 9 h of pile fermentation, along with the increasing intensities of astringency, thickness and stale-mellow. Total catechins showed a significant decrease in concentrations during pile fermentation. In contrast, the concentration of gallic acid increased. Concentration of caffeine reduced by 14.7% compared to the original concentration after 18 h of pile fermentation. Total amino acids concentration showed an increasing tendency in the later period of pile fermentation. Concentrations of flavonoids and its mono-glycosides increased after 9~12 hours, while its di-glycosides showed an increasing tendency after 12 hours of pile fermentation. The analysis of key taste substances (VIP>1, DOT>1) showed that myricetin-3-O-galactoside, astragalgin, isoquercitrin, quercetin-3-O-rutinoside, epigallocatechin, epicatechin,

收稿日期: 2024-06-06

基金项目: 黄山市科技计划项目 (2022KN-07); 黟县科技助力乡村振兴计划项目 (2021KN-03); 国家现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-19)。

作者简介: 王辉 (1988-), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 茶叶加工与品质化学研究, E-mail: 499575741@qq.com。

* 通信作者: 雷攀登 (1983-), 男, 硕士, 副研究员, 研究方向: 茶叶加工与生物化学研究, E-mail: lpteagle@126.com。

epigallocatechin gallate, and caffeine were the most important flavor presenting substances affecting the quality changes of Yixian dark tea. Among them, the content of the first three glycosides increased significantly from 9~12 hours of stacking; The contents of epigallocatechin and epicatechin were significantly reduced during 9~12 hours. Epigallocatechin gallate and caffeine showed a significant decrease after pile fermentation; Quercetin-3-O-rutinoside decreased significantly in the middle stage (9~12 hours) and increased significantly after 15 hours. It was an important factor in the increase of astringency of tea broth in the late stage of pile fermentation. This study give a theoretical basis for improving the tea processing of Yixian dark tea and understanding the formation mechanism of its key flavor.

Key words: Yixian dark tea; pile fermentation; sensory; taste compounds; liquid chromatography mass spectrometry

黑茶是我国六大茶类之一,其产量在 2022 年占比可达到 13% 左右^[1]。最新国际标准(ISO20715:2023《Tea-Classification of tea types. International standard》)表明,黑茶是一类具有渥堆工艺的茶产品,且主要分为两大类型,其一为熟普洱茶(Ripen pu-erh tea),其毛茶主要是通过晒青工艺制成,后通过渥堆发酵制成黑茶产品;其二为其他黑茶(Other dark teas),主要包括六堡茶、青砖茶、茯砖茶、康砖茶和安茶,此外日本的酸茶 Goishicha、Awaban-cha 以及缅甸的发酵茶 Lahpet-so 也属于此类。第二大类黑茶主要是通过杀青、揉捻、渥堆发酵、干燥等制成黑毛茶,再经其他工艺制成黑茶产品^[2]。黟县黑茶主产于黄山市黟县及周边区域,按其加工工艺,应归属于第二大类黑茶。与其他黑茶产品相比,黟县黑茶是采用黟县及周边地区的群体种嫩梢为鲜叶原料,其渥堆发酵程度相对较轻^[3]。

渥堆发酵是黑茶品质形成的重要工序,在此工序期间发生了滋味物质的大量转化,包括降解、氧化、聚合、缩聚和结构修饰等反应,是区别其他茶类的关键工序^[4-5]。Jiang 等^[6]的研究表明,黑茶工艺使得游离氨基酸物质保留较少,只保留了鲜叶中的 15%。与其他六大茶类相比较。鲜叶原料、渥堆时间及温度的不同,使得不同产区黑茶内含物质变化差异较大^[7]。Li 等^[8]对湖南黑毛茶的分析表明,渥堆 12 h 黑毛茶样品中水浸出物、茶多酚、类黄酮、氨基酸和可溶性糖等物质含量均呈现显著下降。Li 等^[9]在普洱茶的渥堆发酵研究中指出有微生物参与的渥堆发酵,可突显陈醇风味,无微生物参与的渥堆发酵,以甜醇风味为主;山奈酚、槲皮素、鞣花酸、没食子酸等化合物含量在普洱茶渥堆中的变化较大,是影响其风味不同的关键化合物。Wang 等^[10]研究藏茶的渥堆发酵显示,适度渥堆有利于黑茶醇厚品质的形成,尤其是没食子酸、表没食子儿茶素没食子酸酯、邻苯三酚和表儿茶素-3-O-没食子酸盐是品质变化的关键化合物。

黟县黑茶呈现甜醇爽口,收敛性弱的品质特征,与安化黑茶^[11]、青砖黑茶^[12]的特征风味具有较明显差异,其品质形成可能与环境、茶树资源及工艺密切相关。目前,黟县黑茶在加工过程中代谢物的变化研究还未有报道。本实验拟通过研究其渥堆进程中感官品质与滋味物质的变化规律,着重分析不同渥堆进

程中感官滋味与代谢物的变化,以探究影响黟县黑茶滋味变化的关键贡献化合物,为后续提升该类黑茶品质及探究其特征风味形成机制提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

7 种儿茶素类物质标准品:没食子酸(Gallic acid, GA)、儿茶素(Catechin, C)、表儿茶素(Epicatechin, EC)、表没食子儿茶素(Epigallocatechin, EGC)、表儿茶素没食子酸酯(Epicatechin gallate, ECG)、表没食子儿茶素没食子酸酯(Epigallocatechin gallate, EGCG)、没食子儿茶素没食子酸酯(Gallocatechin gallate, GCG)、咖啡碱标准品,黄酮醇及其苷类物质:槲皮素、杨梅素、槲皮素-3-O-芸香糖苷、杨梅素-3-O-半乳糖苷、槲皮素-3-O-葡萄糖苷、紫云英苷(别名:山奈酚-3-O-葡萄糖苷)、山奈酚-3-O-芸香糖苷、芹菜素-8-C-葡萄糖苷 上海源叶生物科技有限公司;咖啡碱(Caffeine, CAF)标准品 北京海岸鸿蒙标准物质技术有限责任公司;游离氨基酸标准品 美国 Sigma-Aldrich 公司;茶氨酸标准品 北京百灵威科技有限公司;氨基酸流动相(试剂 A、试剂 B、试剂 C、试剂 D) 德国赛卡姆公司;茛三酮 上海麦克林生化科技有限公司。

40 型杀青机、40 型揉捻机 浙江上洋机械有限公司;60 型斗式烘干机 浙江春江茶叶机械有限公司;S-433D 氨基酸分析仪 德国 Sykam 公司;Chromaster 高效液相色谱仪 日本日立公司;UHPLC-Q-Exactive/MS Q Exactive Plus 超高效液相色谱-四极杆-静电轨道阱质谱仪 美国赛默飞世尔科技公司;三重四级杆液质联用仪(LC-QQQ/MS) 日本岛津公司;C₁₈ 色谱柱(1.9 μm, 2.1×100 mm) 美国沃特世科技有限公司;ZORBAX SB-C₁₈(3 mm×150 mm, 1.8 μm)色谱柱 Agilent 公司;计算机液晶显示器 美国 View Sonic 公司;图像传感器 CCD 摄像头及支架、底座 YUESHI 公司;便携式摄影棚(80 cm×80 cm×80 cm,配有白色 PVC 背景布、LED 灯片) 德普公司。

1.2 实验方法

1.2.1 黑茶样品制备 选用安徽省农业科学院茶叶研究所试验茶园基地舒茶早鲜叶(一芽二、三叶)为原料,采用黑茶加工方法,基本工艺流程^[13]:鲜叶→摊放(4 h)→杀青(320 ℃, 90 s)→热揉捻(10 min)→渥

堆→毛火(120 ℃, 10 min)→摊凉(1 h)→足火(90 ℃, 30 min)。渥堆在控温、控湿培养箱进行, 温度 45 ℃, 含水量 58%, 取不同渥堆时间样进行图像采集, 同时制备成干茶样 100 g, 样品编号: CK(渥堆 0 h)、B3(渥堆 3 h)、B6(渥堆 6 h)、B9(渥堆 9 h)、B12(渥堆 12 h)、B15(渥堆 15 h)、B18(渥堆 18 h)。

1.2.2 图像采集与色泽参数提取 图像采集与色泽参数提取分析, 参考文献中的方法^[14]。为保证采集图像数据的一致性, 利用计算机图像系统, 设置同一参数, 在同一位置进行图像采集。根据渥堆叶采集的图像与实物接近度, 设定图像采集参数: 饱和度 38、对比度 100、红色 24、绿色 32、蓝色 41, 取 30 g 渥堆叶平铺白色 A4 纸上, 放于摄像头下方, 保证渥堆叶填满摄像头镜头, 同时保持与摄像头距离相同。茶汤图像采集设定参数: 饱和度 50、对比度 85、红色 25、绿色 32、蓝色 33, 将泡好的茶汤冷却 10 min, 统一盛放于白色审评杯中, 置于摄像头下方, 保证茶汤中心置于摄像头中心位置, 同时保持与摄像头距离相同。

基于 Adobe Color CC 图像处理技术, 提取茶汤图像色泽参数, 即将茶汤图片依次上传到 Adobe Color CC 后移动光标至茶汤区域, 快速读取对应的色泽参数亮度(L^*)、红绿度(a^*)、黄蓝度(b^*)值。

1.2.3 感官审评与茶汤制备 茶汤的制备参照 GB/T 23776-2018《茶叶感官审评标准》, 以茶(散茶)审评方法制备茶汤: 准确称取 3 g 茶样, 置于审评杯中, 注满 150 mL 沸水, 加盖浸泡 5 min 后滤出茶汤。本研究将感官滋味分成陈醇(带有陈香和木香的醇感、口感协调)、苦味(入口和回味苦度的强弱)、涩味(入口和回味涩度的强弱)、浓厚度(内含物质多、滋味足)、爽口度(入口和回味的滑爽度)等 5 个评价因子^[15], 构建评分标准及评语定义, 并进行评分(10 分制), 由 5 位茶叶感官审评专家依据滋味审评标准, 分别对 6 个评价因子打分。感官评价标准分别是: 0<弱≤2; 2<较弱≤4; 4<一般≤6; 6<较强≤8; 8<强≤10。

1.2.4 儿茶素、咖啡碱含量分析 儿茶素及咖啡碱分析参考文献中方法^[16], 步骤如下: 准确称取 0.25 g 黑茶样, 加入 8 mL 沸水, 于 90 ℃ 水浴 7 min 后收集茶汤。此步骤重复 3 次后, 将茶汤混合用于后续分析。分析前, 提取液利用超纯水稀释 4 倍, 后采用 0.22 μm 水系膜过滤。每个样品重复 3 次。

Ulti Mate 3000 超高效液相色谱仪, 检测条件: C_{18} 色谱柱(1.9 μm, 2.1×100 mm), 检测波长: 278 nm, 柱温: 35 ℃, 流动相: A 相: 2% 乙酸; B 相: 乙腈。梯度洗脱条件: 0~3 min(95% A), 3~5 min(80% A), 5~18 min(95% A), 流速: 0.2 mL/min, 进样量 5 μL。

儿茶素类物质和咖啡碱定性鉴定依据标准品出峰时间; 化合物定量(mg/g)依据已绘制的儿茶素、咖啡碱标准曲线计算, 如下: GA($y=29985x+265.87$, $R^2=1$); EC($y=4254.3x+1512.4$, $R^2=0.9995$); EGC($y=$

$1682.5x-741.81$, $R^2=0.9999$); EGCG($y=13434x-7428.5$, $R^2=0.9995$); GCG($y=9148.2x-1287.2$, $R^2=0.9998$); CAF($y=28586x-6782$, $R^2=1$); C($y=8076.5x-652.4$, $R^2=0.9999$); ECG($y=19849x+756.49$, $R^2=0.9999$)。

1.2.5 游离氨基酸含量测定 游离氨基酸分析参考文献中方法^[17-18]。流动相梯度为: 0~1 min(80% A, 20% B); 1~3 min(79% A, 21% B); 3~8 min(61% A, 39% B); 8~20 min(43% A, 57% B); 20~24 min(43% A, 57% B); 24~36 min(100% B); 36~42 min(100% C); 42~47 min(76% C, 24% D); 47~61 min(76% C, 24% D); 61~61.1 min(100% D); 61.1~68 min(100% D); 68~68.1 min(100% A); 68.1~84 min(100% A)。检测波长分别为 570 nm 和 440 nm。每个样品重复 3 次。

游离氨基酸定性以标准品出峰时间为基准; 游离氨基酸定量(mg/g)以样品中的峰面积与标准品峰面积之比计算相对含量。

1.2.6 黄酮醇及其苷类物质测定 黄酮醇及其苷类物质分析采用 LC-QQQ/MS。参考文献中方法^[19], 准确称取 60 mg 样品, 加入 4 mL 80% 预冷甲醇, 超声 10 min; 10000 r/min 离心 5 min 后取上清液。分析前采用 0.22 μm 有机系滤头过滤样品用于上样。分析色谱柱为 ZORBAX SB- C_{18} (3 mm×150 mm, 1.8 μm), 流动相及运行梯度与文献中方法一致^[20]。化合物提取离子分别为: 槲皮素(m/z 301)、杨梅素(m/z 317)、槲皮素-3-O-芸香糖苷(m/z 609)、杨梅素-3-O-半乳糖苷(m/z 479)、槲皮素-3-O-葡萄糖苷(m/z 463)、紫云英苷(m/z 447)和山奈酚-3-O-芸香糖苷(m/z 593)。

1.3 数据处理

本实验利用 Excel 软件进行数据统计; 利用 TBtools V 1.046 进行热图绘制; 利用 SPSS19.0 软件中的 Duncan 算法对样品数据进行显著性差异分析($P<0.05$); 利用 SIMCA 14.0 软件对样品主成分进行聚类分析(Partial Least Squares-Discriminant Analysis, PLS-DA)。

2 结果与分析

2.1 渥堆中感官品质评价与汤色分析

利用图像采集系统, 对渥堆中叶色、汤色图像进行采集(图 1A), 同时利用 Adobe Color CC 图像处理技术对茶汤 L^* (明亮度)、 a^* (红色/绿色)、 b^* (黄色/蓝色)值进行测定^[14]。结果显示, 随着渥堆时间增加, 叶色逐渐由绿色向黄色转变, 其中渥堆 0~6 h 期间叶色以绿色为主, 汤色呈现出黄绿色; 渥堆 6~9 h 期间, 叶色转变较大, 茶汤转为绿黄色; 18 h 后, 叶色变暗, 汤色呈黄色。 L^* 值代表茶汤亮度, a^* 值为负数时可表示茶汤以绿色为主, 而 b^* 值为正数时表明茶汤黄色值上升。汤色 L^* 、 a^* 、 b^* 值显示, 未渥堆样品茶汤明亮度最高, 随着渥堆的进行, 相较于未渥堆样

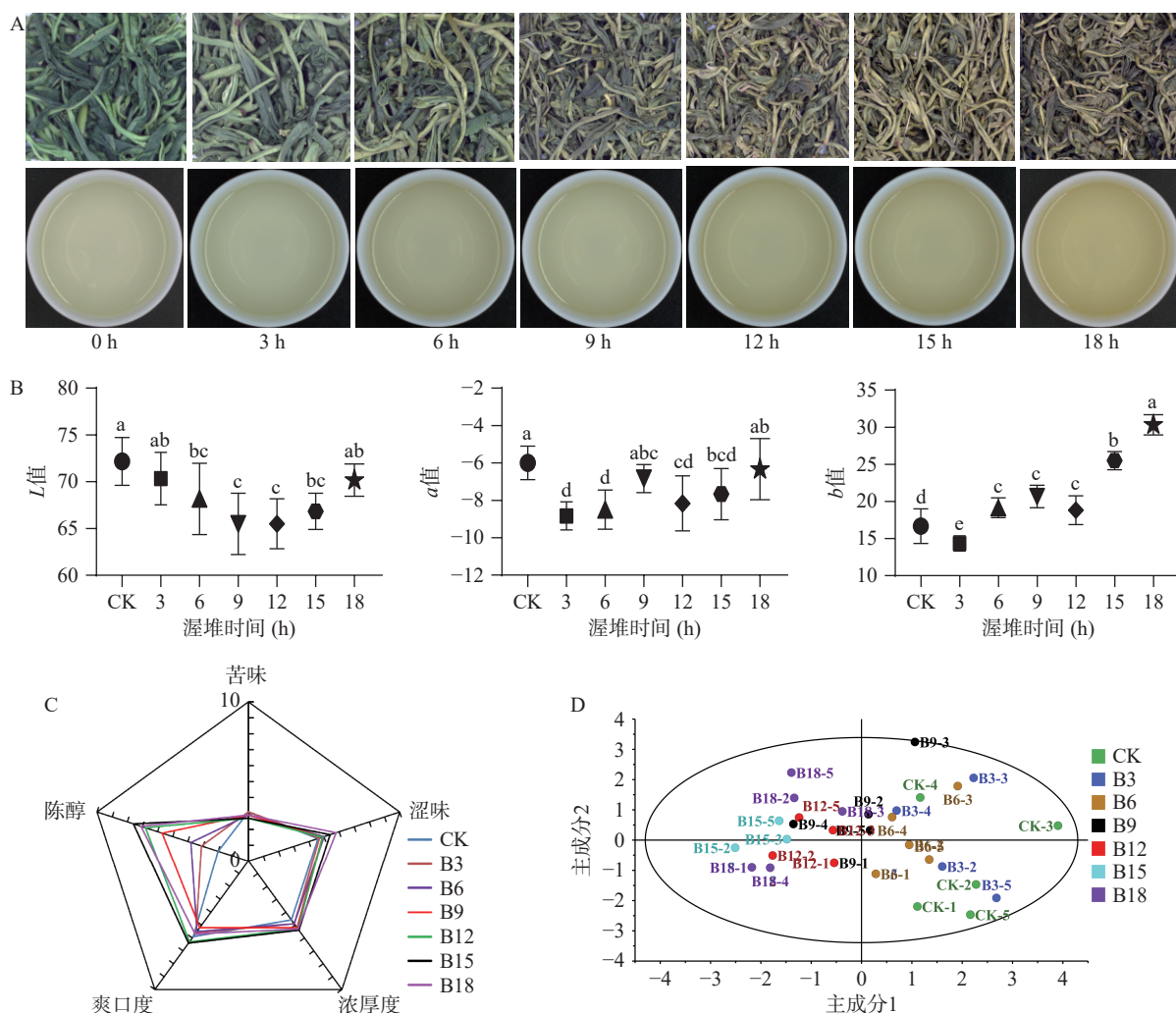


图1 黔县黑茶渥堆期间叶色、茶汤颜色及感官品质变化

Fig.1 Changes of sensory quality during pile fermentation from Yixian dark tea

注: A 叶色与汤色变化; B 汤色 L^* 、 a^* 、 b^* 值; C 感官滋味风味变化轮; D 感官品质得分的主成分分析 ($R^2X=1$, $R^2Y=0.219$, $Q^2=-0.329$); 图 B 中不同小写字母表示差异显著 $P < 0.05$ 。

品, 9~15 h 茶汤亮度降低, 在后期略有增加; 渥堆中茶汤 a^* 值呈现下降趋势, 与 CK 相比, 3~6 h 和 12~15 h 降低达到显著性 ($P < 0.05$); b^* 值在渥堆中呈现显著增加趋势 ($P < 0.05$), 在渥堆 18 h 后, 达到最高值。这表明随着渥堆进行, 茶汤中呈黄色特征的化合物显著增加, 使得茶汤黄色度值增加。

通过对感官属性描述词的收集、分类、归纳和整理, 可用于描述产品的风味特征^[21-22]。本文将黑茶滋味分成陈醇、苦味、涩味、浓厚度、爽口度、总分(综合品质)等 6 个评价因子, 建立了黔县黑茶渥堆期间的风味变化轮(图 1C)。结果显示, 渥堆期间黔县黑茶茶汤陈醇风味变化较大, 在初期其茶汤陈醇风味得分较低, 且变化不明显, 而渥堆 9 h 后, 陈醇风味得分增加明显 ($P < 0.05$)。陈醇风味是黑茶区别于其他茶类的重要风味特征^[23]。相关性分析表明, 陈醇风味与渥堆时间呈显著正相关 ($r=0.97$, $P < 0.05$), 这表明渥堆显著促进了黔县黑茶特征风味的形成。渥堆期间, 茶汤涩味得分在 3~12 h 期间的波动较小, 而渥堆后期(15~18 h), 茶汤涩感开始上升; 茶汤爽口度在渥堆

中期(12~15 h)评分较高; 茶汤浓厚度、苦味得分在渥堆进程中的波动较小。基于感官品质得分值进行 PLS-DA 聚类分析(图 1D), 结果显示, 渥堆 0~9 h 的样品聚于轴的一侧, 而渥堆 12~18 h 的样品聚于另一侧, 这表明渥堆 9 h 后黔县黑茶风味品质呈现较大变化。

2.2 渥堆期间主要滋味成分变化分析

儿茶素、咖啡碱是茶叶中重要的滋味成分, 分别占干重的 12%~24%、2%~4%, 与茶汤滋味的苦涩度密切相关^[24-25]。滋味成分分析结果显示(表 1、图 2A), 儿茶素总量、C、EGCG、GCG、ECG 等在渥堆期间呈现降低趋势; GA、EGC、EC 等在渥堆期间呈现显著性变化, 表现出先降后升的趋势 ($P < 0.05$)。此外, 酯型儿茶素比非酯型儿茶素变化剧烈, 其中没食子酸含量在渥堆 9 h 后显著增加 ($P < 0.05$), 可能来源于酯型儿茶素的降解^[26]。已有研究显示, 在普洱茶的湿热发酵中, 儿茶素类物质可发生降解转化反应, 比如 EGCG 可降解转化成 EGC 和 GA^[9,27-28]。儿茶素类物质的异构化也可发生在渥堆进程中, 比如黄烷-3-醇的 C-2 位置易发生异构化反应, 使得表型儿茶素

表 1 黔县黑茶渥堆中滋味物质含量变化
Table 1 Changes in flavor substance content the pile fermentation of Yixian dark tea

物质	物质含量(mg/g)						
	渥堆0 h(CK)	渥堆3 h(B3)	渥堆6 h(B6)	渥堆9 h(B9)	渥堆12 h(B12)	渥堆15 h(B15)	渥堆18 h(B18)
GA	0.34±0.00 ^b	0.24±0.02 ^c	0.29±0.03 ^{bc}	0.47±0.03 ^a	0.48±0.06 ^a	0.51±0.05 ^a	0.53±0.04 ^a
C	1.09±0.03 ^b	1.48±0.07 ^a	1.11±0.14 ^b	0.72±0.02 ^c	0.67±0.01 ^{cd}	0.55±0.01 ^{de}	0.52±0.04 ^c
EGC	36.23±0.96 ^a	31.98±2.65 ^{ab}	27.35±2.46 ^b	27.45±2.69 ^b	27.29±4.98 ^b	29.68±3.70 ^{ab}	30±2.07 ^{ab}
EC	13.52±0.57 ^a	13.07±1.02 ^a	11.14±1.01 ^a	11.46±1.09 ^a	10.63±1.60 ^a	11.84±1.59 ^a	11.88±0.80 ^a
非酯型儿茶素	51.18±1.49 ^a	46.78±3.67 ^{ab}	39.89±3.43 ^b	40.09±3.80 ^b	39.07±6.56 ^b	42.58±5.34 ^{ab}	42.93±2.87 ^{ab}
EGCG	38.28±1.99 ^a	39.63±5.13 ^a	35.25±7.35 ^{ab}	34.40±4.20 ^{abc}	33.13±6.56 ^{abc}	24.61±6.16 ^{bc}	22.17±1.55 ^c
GCG	2.89±0.08 ^a	2.65±0.32 ^{ab}	2.53±0.82 ^{ab}	2.02±0.12 ^{bc}	1.71±0.12 ^c	0.47±0.08 ^d	0.36±0.06 ^d
ECG	7.85±0.52 ^{ab}	8.41±1.29 ^a	7.33±1.96 ^{ab}	7.58±0.88 ^{ab}	7.42±1.58 ^{ab}	5.10±1.48 ^{bc}	4.27±0.56 ^c
酯型儿茶素	49.02±2.59 ^a	50.69±6.69 ^a	45.12±10.09 ^{ab}	44.00±5.18 ^{ab}	42.26±8.25 ^{ab}	30.19±7.71 ^{bc}	26.79±2.15 ^c
儿茶素总量	100.2±3.42 ^a	97.46±10.03 ^{ab}	85.01±10.8 ^{abc}	84.08±8.97 ^{abc}	81.33±14.4 ^{abc}	72.77±13.04 ^{bc}	69.72±2.81 ^c
咖啡碱	31.37±0.64 ^a	29.21±1.82 ^a	28.12±2.84 ^a	29.11±2.69 ^a	27.98±3.76 ^a	27.47±3.73 ^a	26.75±1.64 ^a
天冬氨酸	2.56±0.02 ^{ab}	2.46±0.03 ^b	2.48±0.22 ^b	2.58±0.04 ^{ab}	2.61±0.10 ^{ab}	2.70±0.02 ^a	2.66±0.02 ^{ab}
苏氨酸	0.37±0.01 ^a	0.36±0.01 ^a	0.35±0.04 ^a	0.36±0.01 ^a	0.40±0.05 ^a	0.37±0.00 ^a	0.35±0.01 ^a
丝氨酸	0.64±0.01 ^a	0.58±0.01 ^a	0.59±0.05 ^a	0.61±0.01 ^a	0.70±0.13 ^a	0.60±0.02 ^a	0.59±0.01 ^a
谷氨酸	3.69±0.03 ^a	3.39±0.06 ^a	3.45±0.31 ^a	3.70±0.10 ^a	3.45±0.36 ^a	3.68±0.07 ^a	3.50±0.06 ^a
茶氨酸	19.87±1.01 ^a	20.80±1.03 ^a	19.67±2.87 ^a	19.61±0.78 ^a	20.65±0.64 ^a	21.44±0.41 ^a	21.38±1.15 ^a
脯氨酸	0.35±0.00 ^a	0.28±0.02 ^b	0.30±0.05 ^{ab}	0.34±0.01 ^{ab}	0.31±0.04 ^{ab}	0.34±0.01 ^{ab}	0.33±0.01 ^{ab}
甘氨酸	0.11±0.00 ^a	0.11±0.00 ^a	0.11±0.01 ^a	0.11±0.00 ^a	0.11±0.01 ^a	0.12±0.00 ^a	0.12±0.00 ^a
丙氨酸	0.36±0.01 ^{ab}	0.34±0.00 ^b	0.35±0.03 ^b	0.35±0.01 ^b	0.37±0.05 ^{ab}	0.41±0.00 ^a	0.41±0.01 ^a
鲜甜氨基酸总量	27.95±1.08 ^a	28.32±1.17 ^a	27.3±3.58 ^a	27.67±0.81 ^a	28.59±0.98 ^a	29.66±0.38 ^a	29.34±1.13 ^a
缬氨酸	0.50±0.01 ^a	0.47±0.01 ^a	0.48±0.05 ^a	0.51±0.02 ^a	0.51±0.06 ^a	0.53±0.01 ^a	0.51±0.01 ^a
异亮氨酸	0.45±0.03 ^{ab}	0.37±0.01 ^b	0.39±0.04 ^b	0.44±0.02 ^{ab}	0.44±0.09 ^{ab}	0.46±0.02 ^{ab}	0.52±0.02 ^a
亮氨酸	0.43±0.07 ^{abc}	0.31±0.01 ^d	0.33±0.04 ^{cd}	0.38±0.02 ^{bcd}	0.37±0.08 ^{bcd}	0.44±0.02 ^{ab}	0.48±0.00 ^a
酪氨酸	0.23±0.13 ^a	0.33±0.05 ^a	0.34±0.03 ^a	0.31±0.04 ^a	0.33±0.03 ^a	0.33±0.02 ^a	0.30±0.02 ^a
苯丙氨酸	0.61±0.03 ^b	0.65±0.03 ^b	0.64±0.08 ^b	0.65±0.03 ^b	0.75±0.05 ^a	0.67±0.01 ^{ab}	0.52±0.02 ^c
组氨酸	0.13±0.01 ^{ab}	0.12±0.01 ^{abc}	0.12±0.02 ^{abc}	0.11±0.01 ^{bc}	0.10±0.02 ^c	0.15±0.02 ^a	0.11±0.01 ^{bc}
赖氨酸	0.51±0.01 ^a	0.48±0.03 ^a	0.48±0.07 ^a	0.48±0.03 ^a	0.48±0.06 ^a	0.49±0.03 ^a	0.46±0.04 ^a
精氨酸	1.53±0.26 ^{ab}	1.10±0.04 ^b	1.07±0.12 ^b	1.49±0.48 ^{ab}	2.31±1.19 ^a	0.85±0.08 ^b	0.89±0.09 ^b
苦味氨基酸总量	4.39±0.35 ^a	3.83±0.1 ^a	3.85±0.41 ^a	4.38±0.6 ^a	5.29±1.49 ^a	3.92±0.06 ^a	3.78±0.16 ^a
氨基酸总量	32.34±1.28 ^a	32.15±1.25 ^a	31.16±3.99 ^a	32.05±0.73 ^a	33.88±2.38 ^a	33.59±0.42 ^a	33.13±1.07 ^a
物质含量(mg/kg)							
杨梅素	4.27±0.82 ^c	3.87±0.50 ^c	4.00±0.57 ^c	7.87±0.82 ^b	13.87±1.15 ^a	3.47±0.82 ^c	6.80±0.57 ^b
槲皮素	3.73±0.19 ^d	3.33±0.68 ^d	6.00±0.33 ^c	8.00±0.57 ^b	11.87±0.82 ^a	4.53±0.75 ^{cd}	6.13±0.68 ^c
槲皮素-3-O-葡萄糖苷	27.87±1.47 ^b	43.47±23.87 ^{ab}	33.07±1.86 ^b	41.07±6.71 ^b	63.87±0.82 ^a	43.60±3.53 ^{ab}	44.27±0.82 ^{ab}
槲皮素-3-O-芸香糖苷	52.53±0.19 ^c	49.73±3.87 ^{bc}	55.87±2.07 ^{bc}	38.00±5.07 ^d	39.33±1.61 ^d	62.13±3.64 ^{ab}	67.60±3.22 ^a
紫云英苷	33.33±7.31 ^b	28.53±1.47 ^b	76.40±43.87 ^a	49.60±3.85 ^{ab}	65.47±3.30 ^{ab}	48.80±5.44 ^{ab}	46.80±1.73 ^{ab}
山柰酚-3-O-芸香糖苷	54.67±4.96 ^d	47.20±3.44 ^d	67.87±6.06 ^c	82.8±7.16 ^b	103.87±3.92 ^a	86.40±7.07 ^b	86.53±4.46 ^b
杨梅素-3-O-半乳糖苷	106.27±42.72 ^d	134.00±1.31 ^d	145.60±4.61 ^{cd}	270.40±11.36 ^b	354.67±2.22 ^a	175.60±15.00 ^c	184.80±4.27 ^c
芹菜素-8-C-葡萄糖苷	12.00±1.42 ^c	10.53±0.82 ^c	16.13±1.15 ^b	16.8±1.5 ^{ab}	17.73±2.49 ^{ab}	17.73±1.32 ^{ab}	20.00±1.18 ^a
黄酮醇及其苷类物质总量	294.67±59.07 ^d	320.67±35.96 ^d	404.93±60.51 ^c	514.53±37.00 ^b	670.67±16.35 ^a	442.27±37.58 ^c	462.93±16.90 ^{bc}

注: 同行不同小写字母表示样品间存在显著差异($P<0.05$)。

转换为非表型儿茶素^[29-30]。儿茶素类物质的总量在渥堆进程中整体呈现下降趋势,比如渥堆 6 h 后,该类物质总量下降了 15%;渥堆 6~12 h 期间儿茶素物质变化较为缓慢,而随着渥堆时间延长,在 15 h 后总含量下降到 72.5%。咖啡碱在渥堆初期略有降低,但未达到显著水平($P>0.05$)。

氨基酸是茶汤中的重要滋味物质,赋予了茶汤鲜爽的特征^[31-32]。游离氨基酸总量在渥堆前期(0~9 h)变化较小,在渥堆 12 h 后增加了 4.76%,不同类型的游离氨基酸含量在渥堆期间的变化较为明显

(图 2A)。相对未渥堆样品,游离氨基酸在渥堆 0~6 h 期间呈现降低趋势,而在 9~12 h 期间略有增加,天冬氨酸、丙氨酸、茶氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、甘氨酸、缬氨酸等在渥堆 15、18 h 后含量增加明显,其中茶氨酸含量增加最多,而精氨酸在渥堆 15、18 h 后含量下降。具有鲜甜属性的游离氨基酸在渥堆 12 h 后呈现上升趋势,与感官评价相对一致。

黄酮醇类物质是茶汤中重要的呈味物质,且阈值普遍较低,且多以糖苷形式存在^[33-34]。液相色谱-质谱联用仪测定了渥堆期间 8 种黄酮醇及其苷类物

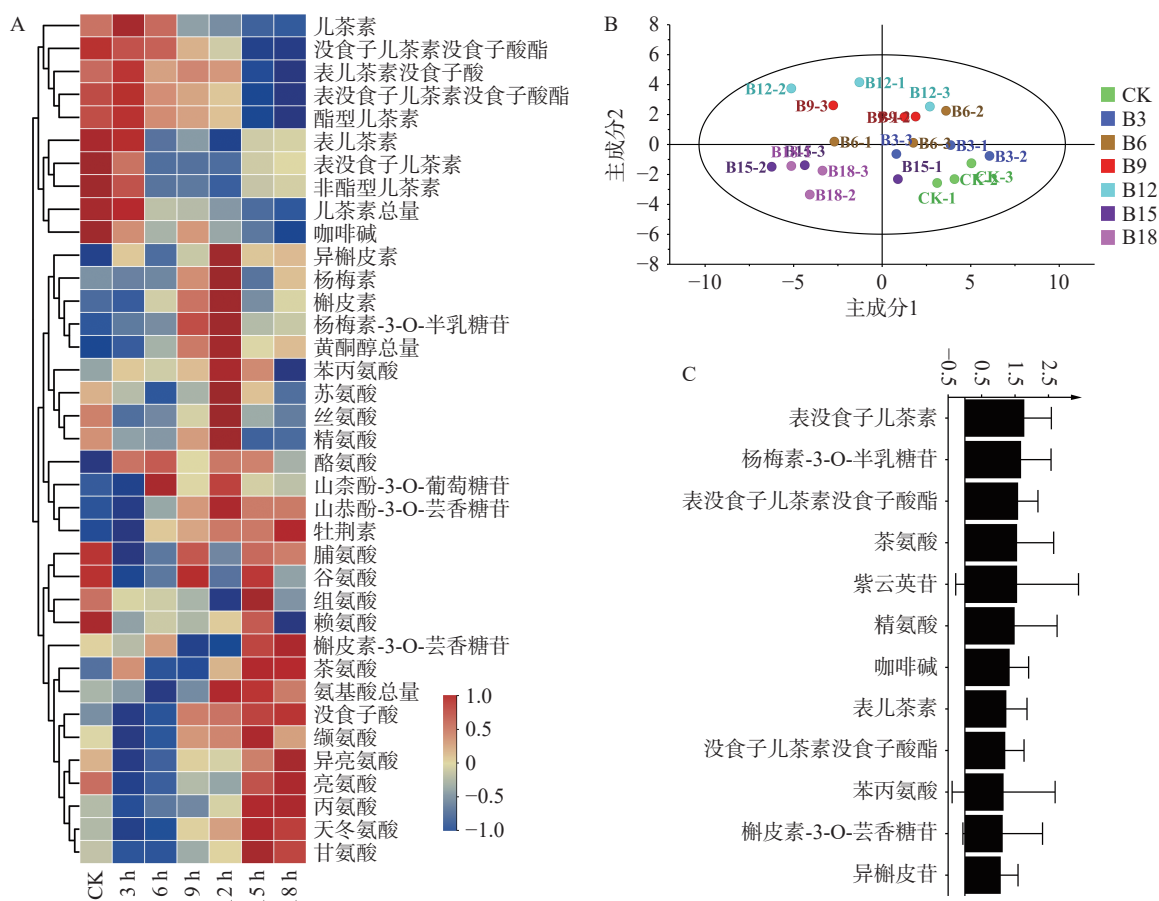


图2 黔县黑茶渥堆中样品呈味物质变化热图及主成分分析

Fig.2 Heat map and principal component analysis of odor change in pile fermentation from Yixian dark tea

注: A 滋味物质热图; B 样品 PLS-DA 聚类分析; C VIP>1 的关键物质。

质的含量变化(表 1)。结果显示,黄酮醇类(杨梅素、槲皮素)含量均在渥堆 6 h 后开始上升;渥堆 12 h 样品中二者的含量为最高,其中杨梅素含量由 4.27 mg/kg 上升至 13.87 mg/kg,而槲皮素由 3.73 mg/kg 上升至 11.87 mg/kg。研究显示,类黄酮糖苷的生成有利于增加该类物质的水溶性,使得其利于植物中的储藏^[35],且随着糖苷元的增加,此类物质多具有苦涩味属性。

黄酮醇苷类物质在渥堆期间整体呈现上升趋势,其中单糖苷类物质在渥堆中期显著增加,在渥堆后期呈现明显下降趋势($P<0.05$);双糖苷类的黄酮苷在渥堆后期略有降低。但槲皮素-3-O-芸香糖苷在渥堆 9~12 h 样品中的含量为最低,降低了 27.6%,后随着渥堆时间增加,该物质含量显著上升($P<0.05$),具柔和的收敛性,对茶汤滋味品质贡献较大,尤其是对茶汤甜醇度具有显著的负面影响^[36]。结合感官审评结果,表明黔县黑茶渥堆 9 h 和 12 h 样品茶汤爽口度上升,可能与该物质含量显著下降密切相关。相关性分析显示,渥堆期间槲皮素-3-O-芸香糖苷与槲皮素含量变化具有显著负相关性($r=-0.85$, $P<0.05$),推测渥堆期间黄酮醇类物质与其糖苷类存在相互转化。Lin 等^[37]研究表明,槲皮素-3-O-芸香糖苷可水解为异槲皮苷、槲皮素。

2.3 黔县黑茶渥堆期间差异代谢物筛选

热图聚类分析表明(图 2A),儿茶素类物质及咖啡碱聚为一类;该类物质在渥堆期间呈现降低趋势,尤其是非酯型儿茶素类。其他滋味成分聚为一类,在渥堆中期和后期整体表现出上升趋势,其中杨梅素及其糖苷、山奈酚糖苷等物质含量均在渥堆中期显著上升,并随着渥堆进行,呈现下降趋势;槲皮素糖苷、没食子酸、茶氨酸及天冬氨酸等化合物含量均在渥堆后期增加较多。

通过 PLS-DA 对七组样品中滋味成分进行聚类分析(图 2B),拟合参数 $R^2_X=0.992$, $R^2_Y=0.922$, $Q^2=0.22$, 200 次的交叉检验验证($R^2=0.677$, $Q^2=-0.835$), Q^2 回归直线与纵轴的截距小于 0,说明模型不存在过度拟合现象,模型较为可靠。结果显示,渥堆 0、3、6 h 样品聚于一侧,而渥堆 9 h 后的样品逐渐聚于另一侧,这与感官评价得分结果相一致。进一步通过关键变量(VIP>1.0),分析影响渥堆进程的关键滋味物质(图 2C),共鉴定出 12 种化合物(VIP>1.0),分别是表没食子儿茶素、杨梅素-3-O-半乳糖苷、表没食子儿茶素没食子酸酯、茶氨酸、紫云英苷(山奈酚-3-O-葡萄糖苷)、精氨酸、咖啡碱、表儿茶素、没食子儿茶素没食子酸酯、苯丙氨酸、槲皮素-3-O-芸香糖苷、异槲皮苷。

表 2 不同渥堆时间样品中物质的滋味活度值及与苦、涩味的相关性分析

Table 2 Analysis of taste activity values of substances in samples with different woke times and their correlation with bitterness and astringency

物质	阈值 ^[38,40] (mg/L)	滋味	DOT							相关性(r)	
			CK	B3	B6	B9	B12	B15	B18	苦味	涩味
槲皮素-3-O-芸香糖苷	0.0007	柔涩	1500.95	1420.95	1596.19	1085.71	1123.81	1775.24	1931.43	0.02	0.71
山萘酚-3-O-芸香糖苷	0.15	柔涩	7.29	6.29	9.05	11.04	13.85	11.52	11.54	—	—
异槲皮苷	0.3	柔涩	1.86	2.9	2.2	2.74	4.26	2.91	2.95	-0.65	0.19
杨梅素-3-O-半乳糖苷	1.3	柔涩	1.63	2.06	2.24	4.16	5.46	2.7	2.84	-0.68	0.06
紫云英苷	0.3	柔涩	2.22	1.9	5.09	3.31	4.36	3.25	3.12	-0.64	0.21
EGC	498.72	苦	1.45	1.28	1.10	1.10	1.09	1.19	1.20	—	—
	79.56	涩感	9.11	8.04	6.88	6.90	6.86	7.46	7.54	—	-0.33
EC	249.63	苦	1.08	1.05	0.89	0.92	0.85	0.95	0.95	—	—
	249.63	涩感	1.08	1.05	0.89	0.92	0.85	0.95	0.95	—	-0.34
EGCG	100.84	苦味	7.59	7.86	6.99	6.82	6.57	4.88	4.40	—	—
	73.34	涩感	10.44	10.81	9.61	9.38	9.03	6.71	6.05	—	-0.96
ECG	79.63	苦味	1.97	2.11	1.84	1.90	1.86	1.28	1.07	—	—
	59.72	涩感	2.63	2.82	2.46	2.54	2.49	1.71	1.43	—	—
CAF	155.00	苦味	4.05	3.77	3.63	3.76	3.61	3.54	3.45	0.69	-0.85

滋味活度值(DOT)是用来描述物质呈味强度的指标,可以用来衡量物质对人味觉感知的程度^[38]。一般认为滋味成分的 DOT>1.0,表示该物质对滋味有显著贡献^[39]。本研究结果显示共有 10 种滋味物质 DOT 值大于 1(表 2),分别是槲皮素-3-O-芸香糖苷、异槲皮苷、杨梅素-3-O-半乳糖苷、紫云英苷、表没食子儿茶素、表儿茶素、表没食子儿茶素没食子酸酯、咖啡碱、山萘酚-3-O-芸香糖苷、表儿茶素没食子酸酯等物质。结合主成分分析,表明槲皮素-3-O-芸香糖苷、异槲皮苷、杨梅素-3-O-半乳糖苷、紫云英苷、表没食子儿茶素、表儿茶素、表没食子儿茶素没食子酸酯及咖啡碱等 8 种滋味物质,可能是影响渥堆进程变化的关键滋味物质,其中,杨梅素-3-O-半乳糖苷与异槲皮苷在 9~12 h 含量最高,槲皮素-3-O-芸香糖苷、表没食子儿茶素、表儿茶素在 9~12 h 含量最低,表没食子儿茶素没食子酸酯、咖啡碱在渥堆中呈现降低。相关性分析显示(表 2),槲皮素-3-O-芸香糖苷与涩味呈现正相关性,这与上述分析较为一致,推测是渥堆中影响涩感变化的重要因子;咖啡碱与苦味呈现正相关性,推测是渥堆中影响苦味降低的重要因子。

3 结论

本研究基于茶叶感官评价标准、茶叶中主要呈味物质分析,探究了黔县黑茶渥堆进程中的滋味品质及物质代谢谱的变化。感官评价表明渥堆对黔县黑茶风味形成具有重要影响,其增加了茶汤陈醇风味和柔涩感,降低了苦味。滋味成分分析表明,儿茶素类物质在渥堆期间总体呈现降低趋势;游离氨基酸类在渥堆前期变化较小,在渥堆中期略有增加,特别是具有鲜甜属性的游离氨基酸在渥堆 12 h 后呈现上升趋势;黄酮醇及其苷类物质在渥堆期间变化较为剧烈,达到显著水平($P<0.05$),多数黄酮醇类物质及总量在

渥堆 9~12 h 含量最高。相反,与甜醇属性呈负相关、与涩感正相关的槲皮素-3-O-芸香糖苷在渥堆 9~12 h 期间显著降低。感官与滋味的聚类显示,渥堆呈现 0~9 h、9~12 h、12~18 h 三个变化阶段,推荐在黔县黑茶加工中,渥堆 9~12 h 有利于获得较佳的风味品质。该研究为指导黔县黑茶渥堆生产及滋味品质调控提供了重要的参考价值和理论基础。黔县黑茶作为新创制黑茶产品,其特征品质与其他类黑茶的差异性,及其特征品质成分的形成与茶树资源、加工的相关性还有待深入研究。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

[1] 姜仁华. 统筹做好“茶文章”[N]. 经济日报, 2023-9-25(11).
[JIANG R H. Doing a good job of "tea article"[N]. Economic Daily News, 2023-9-25(11).]

[2] Tea-Classification of tea types. International standard(ISO 20715: 2023)[S].

[3] 王辉,刘亚芹,雷攀登,等. 渥堆对黑茶色泽形成的作用及适度判别分析[J]. 中国茶叶加工, 2022(4): 29–38. [WANG H, LIU Y Q, LEI P D, et al. Effect of pile-fermentation on the color formation of dark tea and its moderate discrimination analysis[J]. China Tea Processing, 2022(4): 29–38.]

[4] GE Y, BIAN X, WU J L, et al. Dynamic profiling of phenolic acids during Pu-erh tea fermentation using derivatization liquid chromatography-mass spectrometry approach[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(16): 4568–4577.

[5] LONG P, WEN M, ZHANG L, et al. Untargeted and targeted metabolomics reveal the chemical characteristic of Pu-erh tea (*Camellia assamica*) during pile fermentation-fermentation[J]. *Food Chemistry*, 2020, 311: 125895.

[6] JIANG H, YU F, QIN L, et al. Dynamic change in amino acids, catechins, alkaloids, and gallic acid in six types of tea pro-

- cessed from the same batch of fresh tea (*Camellia sinensis* L.) leaves[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2019, 77: 28–38.
- [7] 安会敏, 陈圆, 李适, 等. 六大茶类加工关键工序及风味物质研究进展[J]. *中国茶叶加工*, 2023(4): 5–14. [AN H M, CHEN Y, LI S, et al. Research progress on key processes and flavor substances of six basic tea types[J]. *China Tea Processing*, 2023(4): 5–14.]
- [8] LI Q, XIAO L Z, LIU Z H, et al. Biochemical components associated with microbial community shift during the pile fermentation of primary dark tea[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 1509.
- [9] LI T H, ZHANG Y Y, NING J M, et al. Effects of microbial action and moist-heat action on the nonvolatile components of Pu-erh tea, as revealed by metabolomics[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70: 15602–15613.
- [10] WANG Z Q, LI H Y, LIU Y T, et al. Landscapes of the main components, metabolic and microbial signatures, and their correlations during pile fermentation of Tibetan tea[J]. *Food Chemistry*, 2023, 430: 136932.
- [11] HUANG X, LI Y, ZHOU F, et al. Insight into the chemical compositions of Anhua dark teas derived from identical tea materials: A multi-omics, electronic sensory, and microbial sequencing analysis[J]. *Food Chemistry*, 2024, 441: 138367.
- [12] LIU P P, FENG L, CHEN J, et al. Unlocking the secrets of Qingzhuan tea: A comprehensive overview of processing, flavor characteristics, and health benefits[J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2024, 147: 104450.
- [13] 陈慧, 杨丽玲, 陈金华, 等. 控温渥堆对黑毛茶香气品质的影响[J]. *茶叶科学*, 2022, 42(5): 717–730. [CHEN H, YANG L L, CHEN J H, et al. Effect of Temperature-controlled pile-fermentation on aroma quality of primary dark tea[J]. *Journal of Tea Science*, 2022, 42(5): 717–730.]
- [14] 马婉君, 马士成, 施江, 等. 六堡茶茶汤色泽量化分析 3 种方法的比较[J]. *食品科学*, 2021, 42(16): 155–161. [MA W J, MA S C, SHI J, et al. Comparative study on three quantitative analysis methods for the color Liupao tea infusion[J]. *Food Science*, 2021, 42(16): 155–161.]
- [15] 刘盼盼, 郑鹏程, 陈军海, 等. 青砖茶渥堆工艺优化及风味物质分析[J]. *中国食品学报*, 2021, 8(21): 224–233. [LIU P P, ZHENG P C, CHEN J H, et al. Pile-fermentation process optimization and flavor components analysis of Qingzhuan tea[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 8(21): 224–233.]
- [16] 刘亚芹, 王辉, 杨霖虹, 等. 基于滋味成分变化的祁门红茶发酵程度差异研究[J]. *茶叶通讯*, 2022, 49(2): 193–201. [LIU Y Q, WANG H, YANG J H, et al. Research on the difference of the fermentation degree of Keemun black tea based on the changes of taste components[J]. *Journal of Tea Communication*, 2022, 49(2): 193–201.]
- [17] 周汉琛, 王辉, 雷攀登, 等. ‘柿大茶’品系间芳香类物质、儿茶素及游离氨基酸差异分析[J]. *热带亚热带植物学报*, 2018, 26(3): 302–308. [ZHOU H C, WANG H, LEI P D, et al. Analysis of aromatics, catechins and free amino acids in different strains of ‘Shi-da Tea’[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2018, 26(3): 302–308.]
- [18] YANG J H, ZHOU H C, LIU Y Q, et al. Chemical constituents of green teas processed from albino tea cultivars with white and yellow shoots[J]. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 2022, 5: 100–143.
- [19] 周汉琛, 杨霖虹, 刘亚芹, 等. 茎和叶对祁门红茶品质的贡献分析[J]. *食品科学*, 2023, 44(24): 220–228. [ZHOU H C, YANG J H, LIU Y Q, et al. Contribution of stems and leaves to the quality of Keemun black tea[J]. *Food Science*, 2023, 44(24): 220–228.]
- [20] ZHUANG J H, DAI X L, ZHU M Q, et al. Evaluation of astringent taste of green tea through mass spectrometry-based targeted metabolic profiling of polyphenols[J]. *Food Chemistry*, 2020, 305: 125507.
- [21] 陈国和, 胡腾飞, 刘仲华, 等. 普洱茶与茯砖茶风味轮的构建及应用[J]. *茶叶科学*, 2023, 43(5): 631–644. [CHEN G H, HU T F, LIU Z H, et al. Construction of flavor wheel and quantitative sensory description analysis of Pu’er tea and Fu Brick tea[J]. *Journal of Tea Science*, 2023, 43(5): 631–644.]
- [22] 欧阳建, 黄纯勇, 李适, 等. 黄金茶绿茶风味轮及滋味分类模型的构建[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(24): 139–146. [OUYANG J, HUANG C Y, LI S, et al. Construction of flavor wheel and taste classification model for Huangjinchang green tea[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(24): 139–146.]
- [23] 李适, 刘仲华, 黄建安, 等. 不同年份茯砖茶感官品质研究[J]. *茶叶科学*, 2016, 36(5): 500–504. [LI S, LIU Z H, HUANG J A, et al. Organoleptic quality analysis of Fuzhuan brick teas in different storage years[J]. *Journal of Tea Science*, 2016, 36(5): 500–504.]
- [24] 张英娜, 许勇泉, 尹军峰, 等. 烘青绿茶苦涩味及其滋味贡献物质分析[J]. *茶叶科学*, 2015, 35(4): 377–383. [ZHANG Y N, XU Y Q, YIN J F, et al. Analysis of the bitter and astringent taste of baked green tea and their chemical contributors[J]. *Journal of Tea Science*, 2015, 35(4): 377–383.]
- [25] 刘忠英, 杨婷, 戴宇樵, 等. 基于分子感官科学的茶叶滋味研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(4): 337–343, 355. [LIU Z Y, YANG T, DAI Y Q, et al. Research progress of tea taste based on molecular sensory science[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(4): 337–343, 355.]
- [26] ZHU M Z, LI N, ZHOU F, et al. Microbial bioconversion of the chemical components in dark tea[J]. *Food Chemistry*, 2019, 312: 126043.
- [27] NI H, CHEN F, JIANG Z D, et al. Biotransformation of tea catechins using *Aspergillus niger* tannase prepared by solid state fermentation on tea byproduct[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 60(2): 1206–1213.
- [28] LI J, WU S, JIANG Y, et al. Chemical profile of a novel ripened Pu-erh tea and its metabolic conversion during Pile fermentation[J]. *Food Chemistry*, 2022, 6(1): 378.
- [29] WU L Y, HUANG X J, LIU S R, et al. Understanding the formation mechanism of Oolong tea characteristic non-volatile chemical constituents during manufacture process by using integrated widely-targeted metabolome and DIA proteome analysis[J]. *Food Chemistry*, 2020, 310: 125941.
- [30] WANG Z Q, LI H Y, HUANG W M, et al. Landscapes of the main components, metabolic and microbial signatures, and their correlations during pile-fermentation of Tibetan tea[J]. *Food Chemistry*, 2024, 430: 136932.
- [31] JABEEN S, ALAM S, SALEEM M, et al. Withering timings affect the total free amino acids and mineral contents of tea leaves during black tea manufacturing[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2019, 12(8): 2411–2417.
- [32] 张翔, 陈学娟, 王聪明, 等. 蒙顶甘露茶滋味特征及主要呈味成分贡献率分析[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(4): 783–791. [ZHANG X, CHEN X J, WANG C M, et al. Analysis on

taste characteristics and main component contribution of Mengding Ganlu tea[J]. *Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition*, 2020, 42(4): 783–791.]

[33] 周闯, 林智, 戴伟东, 等. 基于代谢组学的‘铁观音’和‘水仙’品种茶叶化学成分解析[J]. *食品科学*, 2024, 45(4): 171–182.

[ZHOU C, LIN Z, DAI W D, et al. Chemical composition analysis of 'Tieguanyin' and 'Shuixian' teas using metabolomics method[J]. *Food Science*, 2024, 45(4): 171–182.]

[34] ZHANG L, CAO Q Q, GRANATO D, et al. Association between chemistry and taste of tea: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 101: 139–149.

[35] GUO T, PAN F, CUI Z, et al. FAPD: An astringency threshold and astringency type prediction database for flavonoid compounds based on machine learning[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(9): 4172–4183.

[36] LI J, YAO Y, WANG J, et al. Rutin, γ -aminobutyric acid, gallic acid, and caffeine negatively affect the sweet-mellow taste of

Congou black tea infusions[J]. *Molecules*, 2019, 24(23): 4221.

[37] LIN S, ZHU Q, WEN L, et al. Production of quercetin, kaempferol and their glycosidic derivatives from the aqueous-organic extracted residue of litchi pericarp with *Aspergillus awamori*[J]. *Food Chemistry*, 2014, 145(4): 220–227.

[38] LIU Z Y, YANG T, DAI Y Q, et al. Research progress of tea taste based on molecular sensory science[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(4): 337–343, 355.

[39] 彭艾婧. 基于感官组学的名优绿茶浓、涩、鲜、甜滋味特征研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021: 15–24. [PENG A Q. Study on taste characteristics of strong feeling, astringency, umami and sweetness of famous green teas based on sensory omics[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021: 15–24.]

[40] 毛世红. 基于风味组学的工夫红茶品质分析与控制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018: 61–70. [MAO S H. Quality analysis and control of Congou black tea based on sensomics[D]. Chongqing: Southwest University, 2018: 61–70.]