

六堡茶控温控湿渥堆过程中主要品质成分变化

黎敏^{1,2}, 庞月兰^{1,2*}, 刘助生^{1,2}, 郭春雨^{1,2}, 吴应奇^{1,2}, 吴潜华^{1,2}

(1. 广西壮族自治区茶叶科学研究所, 广西桂林 541004)

(2. 广西茶树种质创新与资源利用重点实验室, 桂林茶树资源广西野外科学观测研究站, 广西桂林 541004)

摘要: 为探究六堡茶控温控湿渥堆过程中品质成分的变化规律, 该文以宛田种、苍梧群体种、凌云种和桂红 4 号渥堆过程茶样为研究对象, 利用感官审评、高效液相色谱法结合相关性分析和偏最小二乘判别法, 对茶样的感官品质、茶汤色差和主要生化成分进行比较分析。结果表明: 控温控湿渥堆 12 d, 六堡茶的汤色由橙黄转为红浓, 叶底由黄色转为铜褐色, 滋味由浓厚转为醇和; 水浸出物、氨基酸、茶多酚、茶红素、儿茶素总量分别显著下降至 42.20%~44.89%、2.44%~2.73%、11.03%~14.76%、1.68%~3.38%、32.13~43.45 mg·g⁻¹ ($P<0.05$), 咖啡碱、可可碱、茶褐素分别显著升高至 34.10~39.98 mg·g⁻¹、0.98~2.08 mg·g⁻¹、6.12%~8.23% ($P<0.05$), EGC、GA 含量先升高后降低 ($P<0.05$); 茶汤色差 L^* 呈降低趋势, a^* 和 b^* 呈升高趋势, L^* 与茶褐素、茶黄素、咖啡碱极显著负相关 ($P<0.01$), a^* 、 b^* 与茶褐素、咖啡碱极显著正相关 ($P<0.01$); 不同品种中凌云种六堡茶品质较好, 汤色红浓, 滋味醇和, EC、茶黄素含量较高, 茶多酚、茶红素、酯型儿茶素含量较低, 茶汤色差 L^* 较低, a^* 、 b^* 值较高。该研究结果为六堡茶控温控湿渥堆提供理论基础。

关键词: 六堡茶; 不同品种; 控温控湿渥堆; 品质变化; 茶汤色差; 相关性

文章编号: 1673-9078(2026)2-211-221

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.2.1665

Changes in Key Quality Components of Liupao Tea during Temperature- and Humidity-controlled Pile Fermentation

LI Min^{1,2}, PANG Yuelan^{1,2*}, LIU Zhusheng^{1,2}, GUO Chunyu^{1,2}, WU Yingqi^{1,2}, WU Qianhua^{1,2}

(1. Guangxi Research Institute of Tea Science, Guilin 541004, China)

(2. Guangxi Key Laboratory of Tea Plant Germplasm Innovation and Resource Utilization, Guangxi Field Scientific Observation and Research Station for Tea Resources, Guilin 541004, China)

Abstract: Temperature- and humidity-controlled pile fermentation can affect the quality of tea. This study investigated the changes in the quality components of Liupao tea during temperature- and humidity-controlled pile fermentation. Tea samples of the Wantian, Cangwu group, Lingyun, and Guihong No. 4 varieties were collected during the pile fermentation. The sensory attributes, tea infusion color, and major biochemical components of the tea samples were comparatively analyzed using sensory evaluation and high-performance liquid chromatography, combined with correlation and partial least squares discriminant analyses. The results showed that after 12 days of temperature- and humidity-controlled pile fermentation, the tea infusion color changed from orange-

引文格式:

黎敏, 庞月兰, 刘助生, 等. 六堡茶控温控湿渥堆过程中主要品质成分变化[J]. 现代食品科技, 2026, 42(2): 211-221.

LI Min, PANG Yuelan, LIU Zhusheng, et al. Changes in key quality components of Liupao tea during temperature- and humidity-controlled pile fermentation [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(2): 211-221.

收稿日期: 2024-11-08; 修回日期: 2025-04-22; 接受日期: 2025-04-30

基金项目: 广西科技重大专项(桂科 AA20302018-9); 广西科技计划项目(桂科 AD23026322); 广西茶叶创新团队(nycytxgxcxtd-2024-18-05); 广西茶叶科学研究所基本科研业务专项

作者简介: 黎敏(1990-), 女, 农艺师, 研究方向: 茶叶加工与生化, E-mail: limin0879@163.com

通讯作者: 庞月兰(1984-), 女, 硕士, 高级农艺师, 研究方向: 茶树资源与育种、茶叶加工研究, E-mail: pyl_2005@163.com

yellow to deep red, the dregs shifted from yellow to copper-brown, and the taste evolved from robust to mellow. The water extract, amino acid, tea polyphenol, thearubigin, and total catechin contents significantly decreased to 42.20%~44.89%, 2.44%~2.73%, 11.03%~14.76%, 1.68%~3.38%, and 32.13~43.45 mg·g⁻¹ ($P<0.05$), respectively. In contrast, caffeine, theobromine, and theabrownin significantly increased to 34.10~39.98 mg·g⁻¹, 0.98~2.08 mg·g⁻¹, and 6.12%~8.23% ($P<0.05$), respectively. Epigallocatechin and gallic acid initially increased, followed by a decrease ($P<0.05$). The L^* value of the tea infusion color decreased, whereas the a^* and b^* values showed an increasing trend. L^* was highly negatively correlated with theabrownin, theaflavin, and caffeine ($P<0.01$), whereas a^* and b^* were highly positively correlated with theabrownin and caffeine ($P<0.01$). Among the varieties, Lingyun demonstrated the best quality, characterized by a deep red tea infusion color, mellow taste, high epicatechin and theaflavin content, low tea polyphenol, thearubigin, and esterified catechin contents, and a tea infusion color with a low L^* value and high a^* and b^* values. These findings provide a theoretical basis for optimizing the temperature- and humidity-controlled pile fermentation of Liupao tea.

Key words: Liupao tea; different varieties; temperature- and humidity-controlled pile fermentation; quality changes; tea infusion color; correlation

六堡茶属于黑茶,为广西历史名茶、中国国家地理标志产品,源于广西梧州六堡而得名。六堡茶为后发酵茶,品质特点是外形黑褐油润,陈香或带槟榔香,汤色红浓,滋味醇厚,叶底黑褐^[1]。现代工艺六堡茶主要包括毛茶拼配、渥堆、蒸压、陈化等工序,其中渥堆是六堡茶滋味香气风味特征形成的关键工序^[2]。毛茶经过渥堆,汤色、滋味、叶底发生质的变化,初步形成六堡茶“红、浓、陈、醇”的品质特点。目前,六堡茶传统渥堆工艺的报道较多,有学者^[3-5]研究六堡茶渥堆过程微生物种群变化;许皓等^[6]、曹中环等^[7]研究六堡茶渥堆过程品质成分和茶汤色泽变化,Li等^[8]研究六堡茶渥堆过程的非挥发性化合物,Zhou等^[9]比较不同发酵方式对六堡茶香气的影响,Long等^[10]研究罐式发酵六堡茶的微生物群落、化学轮廓和代谢物。但是六堡茶传统渥堆工艺存在品质不稳定、发酵周期长(50~60 d)、生产中每批次发酵量大,会出现烧芯或泥烂等问题,为解决这些问题,需探索适合六堡茶发酵的精确控制发酵工艺,陈慧等^[11]将数控渥堆与传统渥堆相比,发现数控渥堆的茶叶香气更纯正高长,庞月兰等^[12]研究表明控温控湿渥堆工艺以精准控制发酵参数,稳定六堡茶品质,提高发酵效率,缩短发酵时间至12 d左右,并且适合小批量发酵,可为六堡茶加工的智能化、精准化提供参考,而对六堡茶控温控湿渥堆过程品质特征形成的报道较少。

广西地方茶树资源丰富,可用于加工六堡茶的茶树品种有桂青种、宛田种、苍梧群体种、六洞种、凌云种、桂红4号等^[13,14],该研究以宛田种、苍梧群体种、凌云种、桂红4号加工的毛茶为原料,通过控温控湿渥堆,对六堡茶渥堆过程中茶叶的感官品质变化、茶汤色差以及主要生化成分进行研究,并将各生化成分与茶汤色差数据进行相关性分析,探讨六堡茶控温控

湿渥堆过程品质成分的规律,为六堡茶控温控湿渥堆提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料、试剂及仪器设备

选用宛田种(Wantian Species, WTS)、苍梧群体种(Cangwu Group Species, CWGS)、凌云种(Lingyun Species, LYS)、桂红4号(Guihong No.4, GHN4)鲜叶为试验原料。

标准品及化学试剂:谷氨酸标准品、福林酚试剂(BR)均购于上海源叶生物科技有限公司;咖啡碱、可可碱、没食子酸(Gallic Acid, GA)、儿茶素(Catechin, C)、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)、表儿茶素(Epicatechin, EC)标准品,均购于成都麦德生科技有限公司;碱式乙酸铅、盐酸、硫酸、磷酸氢二钠、磷酸二氢钾、甲醇、碳酸钠、甲酸均为分析纯,购于西陇科学股份有限公司;茚三酮,AR,阿拉丁试剂有限公司;甲醇,色谱级,Thermo Fisher Scientific。

主要仪器设备:UltiMate 3000 高效液相色谱(Thermo Fisher Scientific)、UV8100D 紫外可见分光光度计,北京莱伯泰科仪器股份有限公司;ME204T 电子天平(0.000 1 g),梅特勒-托利多仪器有限公司;DHG-9140A 电热恒温鼓风干燥箱,上海精宏实验设备有限公司;HH-8 数显恒温水浴锅,金坛市顺华仪器有限公司;TDZ5-WS 低速离心机,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;MA160-1CN 快速水分测定仪,赛多利斯科学仪器有限公司;LRH-250-HSE 恒温恒湿箱,广东泰宏科学仪器股份有限公司;100 型电磁加

热朝天锅、萎凋槽,宁波市姚江源机械有限公司;JY-6CRT-25型茶叶揉捻机、6CHZ-9烘焙提香机,福建佳友茶叶机械智能科技股份有限公司;CS-821N台式分光测色仪,杭州彩谱科技有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 六堡毛茶制作

工艺流程如下:

鲜叶→摊青→杀青→揉捻→复炒→堆闷→复揉→干燥→六堡毛茶

加工工艺参数:鲜叶:采摘宛田种、苍梧群体种、凌云种、桂红4号茶树一芽二三叶;摊青:将鲜叶摊放在萎凋槽,摊放时间12 h,叶质变软,叶色由鲜绿变为暗绿;杀青:用朝天锅杀青,280℃炒6 min,然后杀青温度降至200℃炒20 min,茶叶青草气消失;揉捻:用揉捻机揉捻20 min,揉出茶汁;复炒:用朝天锅复炒,200℃炒5 min;堆闷:待茶叶温度下降到50℃左右进行堆闷,将茶叶用湿纱布包裹轻压入竹筐,待叶色变黄,发出醇香,堆闷时间12 h;复揉:用揉捻机复揉15 min,使茶叶揉成条;干燥:用茶叶烘焙机进行干燥,固定茶叶品质,烘干温度80℃,将茶叶烘至水分7.0%以下。

1.2.2 六堡茶控温控湿渥堆试验

利用毛茶进行渥堆发酵,参考庞月兰^[12]的六堡茶发酵方法,每批发酵量为5.0 kg干茶,加水使茶叶增湿至含水率40%,然后装入不锈钢桶中,盖上湿纱布,设置温度45℃、湿度95%,置于恒温恒湿箱内发酵。渥堆过程每天记录茶叶堆温、测茶叶含水率,渥堆15 d结束,分别在六堡茶渥堆过程的0、6、9、12、15 d重复3次取样,将茶样置于室内开空调除湿,晾干使水分低于12%,然后保存于-20℃冰箱,待测。

1.2.3 感官审评方法

依据《茶叶感官审评方法》(GB/T 23776-2018),按照黑茶(散茶)的感官审评方法,对茶样的外形、汤色、香气、滋味及叶底5项因子分别进行术语描述。感官审评人员为获得评茶员及以上职称的技术人员3人。

1.2.4 生化成分测定方法

水分含量测定参照GB 5009.3-2016;水浸出物含量的测定参照GB/T 8305-2013;茶多酚总量的测定参照GB/T 8313-2018;游离氨基酸总量的测定参照GB/T 8314-2013。

茶色素用系统分析法:准确称取3.0 g不磨碎茶样于250 mL锥形瓶中,加沸水125 mL,于沸水浴中提

取10 min,提取过程中,摇瓶1次至2次,立即用脱脂棉过滤,冷却试液备用。取30 mL试液注入60 mL分液漏斗中,加入30 mL乙酸乙酯,振摇5 min,静置分层,分别放出水层和倒出乙酸乙酯层。吸取乙酸乙酯层溶液2 mL,加入 $\varphi=95\%$ 的乙醇定容至25 mL,摇匀(溶液A)。吸取水层2 mL,加入2 mL饱和草酸溶液和6 mL蒸馏水,再加入 $\varphi=95\%$ 乙醇定容至25 mL,摇匀(溶液D)。吸取乙酸乙酯层15 mL,置于30 mL分液漏斗中,加入2.5 wt.% NaHCO₃溶液15 mL,振摇30 s后静置分层,弃去NaHCO₃层。吸取乙酸乙酯层4 mL,加入 $\varphi=95\%$ 的乙醇定容至25 mL,摇匀(溶液C)。取试液15 mL,置于30 mL分液漏斗中,加正丁醇15 mL,振摇3 min,静置分层。吸取水层2 mL,加入饱和草酸溶液2 mL和蒸馏水6 mL,再加入 $\varphi=95\%$ 乙醇定容至25 mL,摇匀(溶液B)。

将溶液A、B、C、D分别置于10 mm比色皿,以 $\varphi=95\%$ 乙醇作参比,于380 nm处分别测定吸光度 E_A 、 E_B 、 E_C 、 E_D 。

茶黄素、茶红素、茶褐素分别以干态质量分数 w_y 、 w_h 、 w_r 计,数值以%表示,计算公式如下:

$$w_y = \frac{E_C \times 2.25}{c} \quad (1)$$

式中:

w_y ——茶黄素质量分数,%;

E_C ——溶液C的吸光度;

c ——茶样的干物率,%。

$$w_h = \frac{7.06 \times (2E_A + 2E_D - E_C - 2E_B)}{c} \quad (2)$$

式中:

w_h ——茶红素质量分数,%;

E_A ——溶液A的吸光度;

E_D ——溶液D的吸光度;

E_C ——溶液C的吸光度;

E_B ——溶液B的吸光度;

c ——茶样的干物率,%。

$$w_r = \frac{2E_B \times 7.06}{c} \quad (3)$$

式中:

w_r ——茶褐素质量分数,%;

E_B ——溶液B的吸光度;

c ——茶样的干物率,%。

1.2.5 没食子酸、儿茶素组分、生物碱组分测定方法

样品前处理参考GB/T 8313-2018。儿茶素(C、EC、EGC、ECG、EGCG)、没食子酸、咖啡碱、可碱含量的测定参照王丽丽^[15]的检测方法并做适当

改进,液相色谱条件:色谱柱 Thermo Acclaim™ 120 (C18, 4.6×250 mm, 5 μm), 检测波长 280 nm, 柱温箱 40 °C, 流动相 A 0.1% (φ) 甲酸水, 流动相 B 甲醇, 流量 1.0 mL·min⁻¹, 进样量 10 mL, 洗脱方式为 83% A (0 min)→75% A (5 min)→73% A (7 min)→58% A (16 min)→83% A (18 min)。

1.2.6 茶汤色差测定方法

均匀称取 3.0 g 茶样,置于 150 mL 标准审评杯中,加 150 mL 沸水,冲泡 5 min,滤出茶汤,用台式分光测色仪对茶汤进行分析,分别记录每个茶样茶汤的 L^* 值、 a^* 值、 b^* 值。

1.3 数据统计分析

利用 Excle 和 SPSS 软件进行数据分析,结果以平均值 ± 标准偏差表示,采用 OriginPro 软件绘图,通过 MetaboAnalyst (<https://www.metaboanalyst.ca/>) 进行 PLS-DA 分析及绘制得分图。

2 结果与讨论

2.1 六堡茶控温控湿渥堆过程中感官品质的变化

2.1.1 茶堆温度与茶叶含水率的变化

如图 1 所示,不同品种六堡茶在控温控湿渥堆过程中茶堆温度和含水率的变化呈现相同规律,茶叶含水率呈降低的趋势,发酵第 8 天含水率略升高是因为给茶叶补水;茶堆温度在 45~58 °C 之间,呈先升高后降低的趋势;在发酵第 7 天,含水率降到 20.64%,茶堆温度随之快速下降;发酵第 8 天,给茶叶补水,茶堆温度也回升;对茶堆温度与含水率进行皮尔逊相关性分析,两者呈极显著正相关 ($P<0.01$),相关系数值为 0.64,由此推测控制茶叶含水率可以维持适宜的堆温,有助于六堡茶渥堆。

2.1.2 感官品质的变化

渥堆是现代工艺六堡茶加工过程中关键的工序,是决定六堡茶品质的关键,在发酵过程中风味特征发生显著变化^[16]。从表 1 可以看出,不同品种六堡茶在控温控湿渥堆过程中感官品质转化规律大致相同,汤色均由橙黄→橙红→红转变,叶底颜色由黄→黄褐→褐→铜褐色转变,滋味的苦涩味降低,由浓→尚浓→

醇和发生转变。渥堆 12 d 即形成汤色红、叶底铜褐色、滋味醇和的六堡茶典型品质特征;渥堆 15 d,汤色的亮度稍低,发酵程度稍过,品质次之。在相同发酵条件下,凌云种六堡茶与其他品种六堡茶相比,汤色较红浓,滋味更醇和,而苍梧群体种六堡茶的香气较纯正。

由于湿热和微生物的作用,茶叶的品质发生改变,而微生物是控制黑茶品质的关键因素^[17],微生物在六堡茶中发挥了重要作用^[18-20],发酵时长、渥堆温度和含水量是影响黑茶品质的发酵条件,黑茶独特香气也与微生物发酵存在相关性^[21],推测由于控温控湿渥堆的发酵条件有助于六堡茶的微生物发酵,快速促进了滋味、香气、叶底的转变而形成六堡茶的风味品质特点,有学者^[7,13,22]研究表明苍梧群体种、凌云种、桂红 4 号毛茶需渥堆 30~56 d,才能达到汤色红浓、滋味醇厚、叶底红褐的品质特点,控温控湿渥堆缩短了发酵时间,而且适用于不同品种,制成的六堡茶品质稳定。

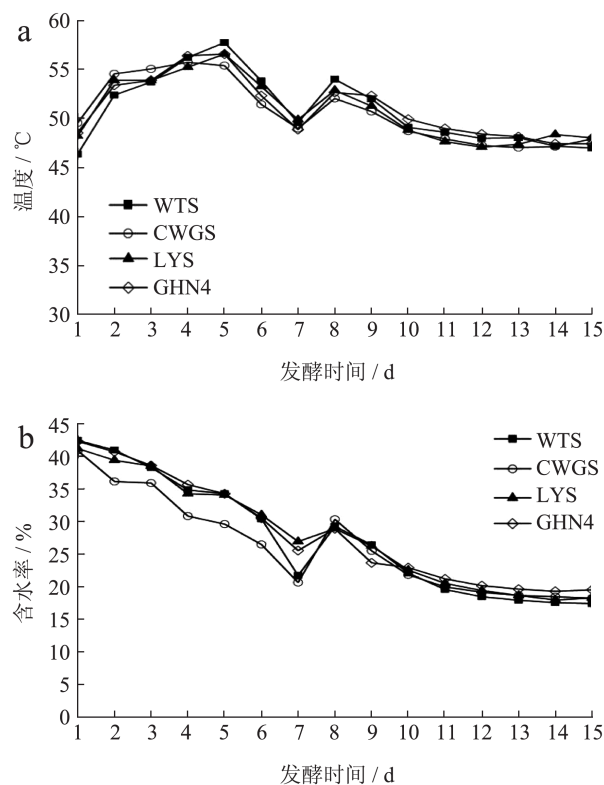


图 1 六堡茶渥堆过程中茶叶茶堆温度和含水率的变化
Fig.1 Change of temperature and moisture content of Liupao tea during fermentation

表 1 六堡茶控温控湿渥堆过程样感官审评结果
Table 1 Sensory evaluation of fermentation process of Liupao tea

样品名称	渥堆时间/d	外形	汤色	香气	滋味	叶底
WTS	0	黄，尚紧结	橙黄	花蜜香	浓，稍涩	黄，柔软
	6	黄褐，尚紧结	橙红	带花蜜香	浓	黄褐，柔软
	9	褐，尚紧结	红	稍闷	尚浓	褐，柔软
	12	黑褐，尚紧结	红	稍杂	醇和	铜褐色，柔软
	15	黑褐，尚紧结	红	稍杂	尚醇	铜褐色，柔软
CWGS	0	黄，紧结	橙黄	花蜜香	浓、稍涩	黄，柔软
	6	褐，紧结	橙红	稍杂	尚浓	黄褐，柔软
	9	褐，紧结	红	稍杂	尚浓	褐，柔软
	12	黑褐，紧结	红	稍杂	醇和	铜褐色，柔软
	15	黑褐，紧结	红	较纯	尚醇	铜褐色，柔软
LYS	0	黄，尚紧结	橙黄	纯正，带蜜香	浓厚	黄，柔软
	6	黄褐，尚紧结	橙红	稍杂	尚浓	黄褐，柔软
	9	褐，尚紧结	红	稍杂	尚浓	褐，柔软
	12	红褐，尚紧结	红	稍杂	醇和	铜褐色，柔软
	15	红褐，尚紧结	红浓	尚纯	尚醇	铜褐色，柔软
GHN4	0	黄，尚紧结	橙黄	纯正、带蜜香	浓，稍涩	黄，柔软
	6	黄褐，尚紧结	橙红	稍杂	尚浓	黄褐，柔软
	9	褐，尚紧结	橙红	稍闷	尚浓	褐，柔软
	12	褐，尚紧结	红	稍杂	尚浓	褐，柔软
	15	黑褐，尚紧结	红	稍杂	尚醇	铜褐色，柔软

2.2 六堡茶控温控湿渥堆过程中主要生化成分的变化

2.2.1 六堡茶主要生化成分的偏最小二乘判别分析 (Partial Least Squaresdiscriminant Analysis, PLS-DA)

PLS-DA 可反应样品组间的差异，对控温控湿渥堆过程六堡茶样的主要生化成分进行 PLS-DA，如图 2 所示，不同渥堆时间六堡茶样分离明显，Component 1 和 Component 2 的总贡献率均在 95.4% 以上，其中宛田种 Component 1 和 Component 2 的贡献率分别为 90.9%、7.3%，苍梧群体种 Component 1 和 Component 2 的贡献率分别为 94.6%、4.1%，凌云种 Component 1 和 Component 2 的贡献率分别为 88.6%、6.8%，桂红 4 号 Component 1 和 Component 2

的贡献率分别为 90.1%、8.4%。发酵 0 d 与发酵后的茶样间距比较远，说明经过控温控湿渥堆，生化成分变化较大；发酵 6 d 与发酵 9 d、发酵 12 d、发酵 15 d，在 Component 2 方向也很好区分，说明渥堆过程生化成分变化明显；发酵 12 d 和发酵 15 d 几乎重叠，说明生化成分变化不明显，推测渥堆 12 d 是发酵的关键节点。不同品种六堡茶控温控湿渥堆过程生化成分含量呈现相同的变化规律，结果表明，可根据生化成分含量差异将控温控湿渥堆分为四个阶段：发酵 0~6 d，生化成分含量快速变化；发酵 6~9 d，生化成分含量变化较快；发酵 9~12 d，生化成分含量变化趋于平缓；发酵 12~15 d 生化成分含量几乎没变化，渥堆 12 d 是发酵的关键性转折点，此时六堡茶风味已基本形成。

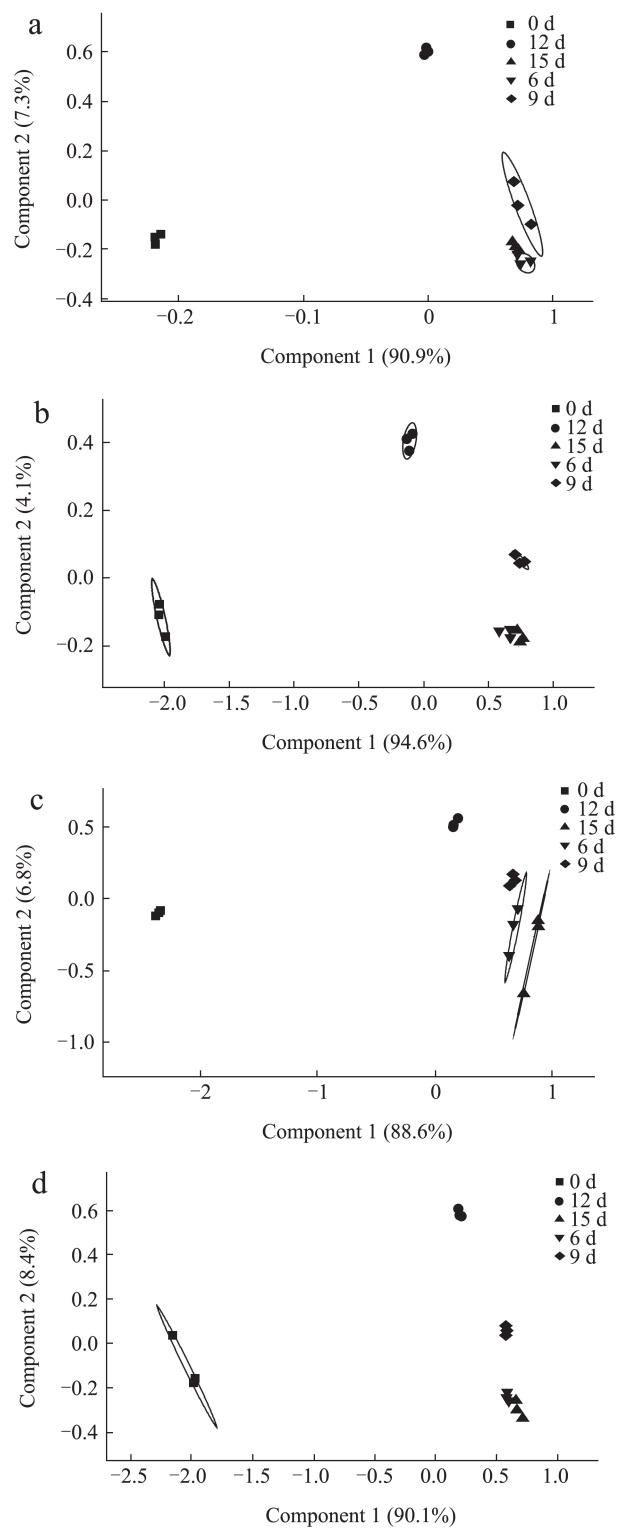


图2 不同品种六堡茶控温控湿渥堆过程中主要生化成分
PLS-DA 得分图

Fig.2 PLS-DA scores of main biochemical components during
fermentation of different varieties Liupao tea

注:(a) 宛田种;(b) 苍梧群体种;(c) 凌云种;(d) 桂红4号。

2.2.2 水浸出物含量、游离氨基酸总量、咖啡碱和可可碱含量的变化

如图3所示,水浸出物含量、游离氨基酸总量随着发酵时间均呈降低的趋势,咖啡碱、可可碱含量呈升高的趋势,同一品种六堡茶在不同发酵时间具有显著性差异($P<0.05$),发酵0 d,水浸出物的含量为(质量分数)48.56%~51.60%,游离氨基酸含量为(质量分数)3.66%~4.26%,渥堆12 d水浸出物含量下降至42.20%~44.89%,游离氨基酸下降至2.44%~2.73%,水浸出物含量降幅为10.83%~15.51%,游离氨基酸降幅为30.85%~42.67%,其中发酵第一阶段(0~6 d),下降幅度最大,水浸出物的降幅分别为7.29%~10.86%,游离氨基酸降幅为27.87%~32.65%。发酵0 d,咖啡碱含量为27.57~34.34 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,可可碱含量为0.76~1.69 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,渥堆12 d咖啡碱含量升高至34.10~39.98 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,可可碱升高至0.98~2.08 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,咖啡碱含量增幅为10.00%~23.69%,可可碱增幅为14.48%~59.63%。六堡茶发酵后苦味增加,涩味降低^[23],咖啡碱含量升高而六堡茶滋味却不苦涩,可能由于其它物质转化调和了咖啡碱的苦味。曹中环等^[7]研究表明苍梧群体种、凌云种毛茶渥堆56 d后,水浸出物下降6.05%~7.29%,氨基酸下降12.32%~40.41%,控温控湿渥堆12 d水浸出物、氨基酸的降幅也相当,说明控温控湿渥堆的物质转化更快,为感官品质的形成提供物质基础。

相同发酵时间下不同品种六堡茶存在显著性差异($P<0.05$),发酵12 d,水浸出物含量为GHN4>WTS、LYS>CWGS,游离氨基酸总量为WTS>LYS、GHN4>CWGS,水浸出物含量的降幅分别为15.51%(WTS)>13.93%(CWGS)>13.00(GHN4)>10.83%(LYS),游离氨基酸降幅为42.67%(CWGS)>31.32%(WTS)>30.98%(GHN4)>30.85%(LYS)。发酵12 d,咖啡碱含量LYS>WTS>GHN4>CWGS,可可碱含量GHN4>WTS>LYS>CWGS,发酵12 d与发酵0 d相比,咖啡碱含量的增幅分别为23.69%(CWGS)>22.31%(LYS)>15.06%(WTS)>10.00%(GHN4),可可碱的增幅分别为59.63%(LYS)>29.38%(CWGS)>23.52%(GHN4)>14.48%(WTS)。LYS水浸出物、游离氨基酸降幅最小,可可碱增幅最大,咖啡碱含量总体较高;CWGS游离氨基酸降幅最大,咖啡碱、可可碱含量最低;WTS水浸出物降幅最大,咖啡碱含量总体较高。

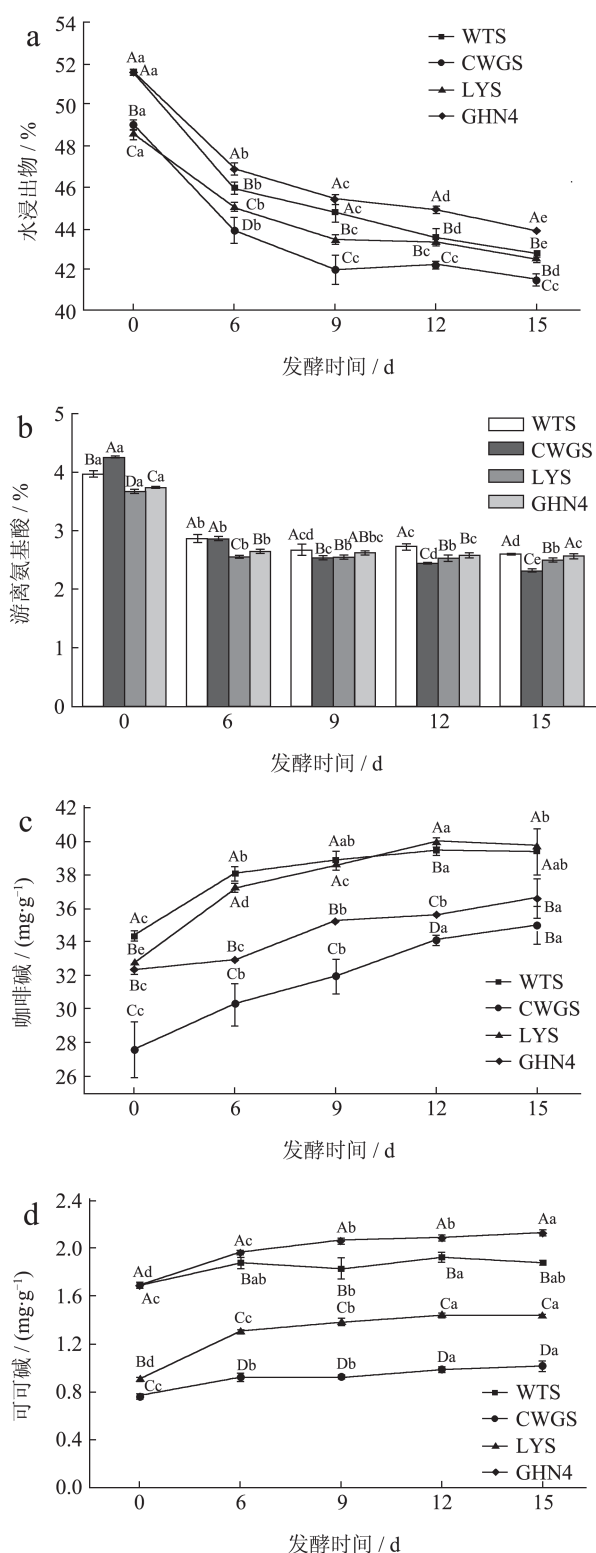


图3 六堡茶渥堆过程中不同化学成分含量变化

Fig.3 Changes of chemical components during the fermentation of Liupao tea

注: (a) 水浸出物含量; (b) 游离氨基酸总量; (c) 咖啡碱; (d) 可可碱。不同小写字母表示同一品种六堡茶在不同发酵时间具有显著性差异 ($P<0.05$); 不同大写字母表示在相同发酵时间下不同品种六堡茶之间具有显著性差异 ($P<0.05$)。图4、6同。

2.2.3 茶多酚总量、没食子酸和儿茶素组分含量的变化

茶多酚总量、没食子酸和儿茶素组分变化如表2所示, 简单儿茶素和酯型儿茶素总含量的变化如图4所示, 同一品种六堡茶在不同发酵时间均具有显著性差异 ($P<0.05$)。随着发酵时间, 没食子酸含量呈先升高后降低的趋势, 发酵6 d含量最高, 发酵0 d含量为 $0.33\sim 0.72\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 发酵6 d增加了 $9.27\sim 14.78\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 发酵12 d增加了 $2.31\sim 5.86\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。茶多酚总量呈降低的趋势, 发酵12 d茶多酚含量(质量分数)下降到 $11.03\%\sim 14.76\%$, 降幅为 $35.63\%\sim 48.52\%$, 茶多酚含量符合六堡茶的化学成分特征^[24]。曹中环等^[7]研究表明苍梧群体种、凌云种毛茶渥堆56 d后, 茶多酚下降了 $41.81\%\sim 63.67\%$, 快速渥堆12 d, 这两个品种的茶多酚下降了 $39.25\%\sim 48.52\%$, 与传统渥堆相比, 控温控湿渥堆使茶多酚在更短发酵时间内快速氧化, 形成六堡茶的生化成分特征。

儿茶素总量随着发酵时间呈降低的趋势, 发酵12 d儿茶素总量下降至 $32.13\sim 43.45\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 儿茶素总量降幅为 $76.56\%\sim 81.75\%$ 。简单儿茶素总量呈降低的趋势, 与渥堆0 d相比, 渥堆12 d简单儿茶素降幅为 $26.80\%\sim 48.62\%$, 其中, EGC含量在发酵第一阶段呈升高的趋势然后趋于降低; EC含量总体呈降低的趋势, 发酵0 d含量为 $19.78\sim 35.47\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 发酵12 d下降至 $8.38\sim 14.17\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。酯型儿茶素总量也呈降低的趋势, 渥堆12 d降幅为 $92.40\%\sim 97.85\%$, 其中, EGCG和ECG含量均呈降低的趋势, 分别由发酵0 d的 $64.59\sim 127.22\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $23.72\sim 57.17\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 下降至发酵12 d的 $1.38\sim 8.52\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $1.54\sim 2.73\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。酯型儿茶素含量的降低对六堡茶滋味有贡献^[25], 儿茶素的氧化、黄酮类化合物的糖基化或甲基化对六堡茶风味有显著影响^[26], 说明在渥堆过程中, 由于湿热和微生物的作用, 酯型儿茶素发生转化而大量降低, 表现为茶叶的苦涩味降低, 茶汤滋味变得醇和。

相同发酵时间下不同品种六堡茶的茶多酚、没食子酸、儿茶素存在显著性差异 ($P<0.05$), 发酵9 d至15 d, 没食子酸GA的含量WTS最高, LYS则最低, GHN4茶多酚总量和儿茶素总量最高。发酵12 d儿茶素总量WTS、GHN4 $>$ CWGS、LYS, 茶多酚总量GHN4 $>$ CWGS $>$ WTS、LYS。渥堆6 d至15 d, 儿茶素C的含量CWGS最高, LYS次之, LYS的EGCG含量最低而EC含量最高; 发酵0 d, 简单儿茶素含量WTS $>$ CWGS、GHN4 $>$ LYS, 发酵12 d, 简单儿茶素含量WTS、GHN4 $>$ LYS $>$ CWGS, 降

幅为 CWGS (48.62%) > WTS (43.08%) > GHN4 (36.36%) > LYS (26.80%); 发酵 0 d, 酯型儿茶素含量 GHN4 > WTS > CWGS > LYS, 发酵 12 d, 酯型儿茶素含量 GHN4 > WTS > CWGS > LYS, 降幅为 LYS (97.85%) > WTS (93.52%) > GHN4 (92.92%) > CWGS (92.40%), 说明渥堆后 LYS 中呈苦涩味的茶多酚、酯型儿茶素含量都比其他品种低, 与感官品质 LYS 滋味更醇和一致。

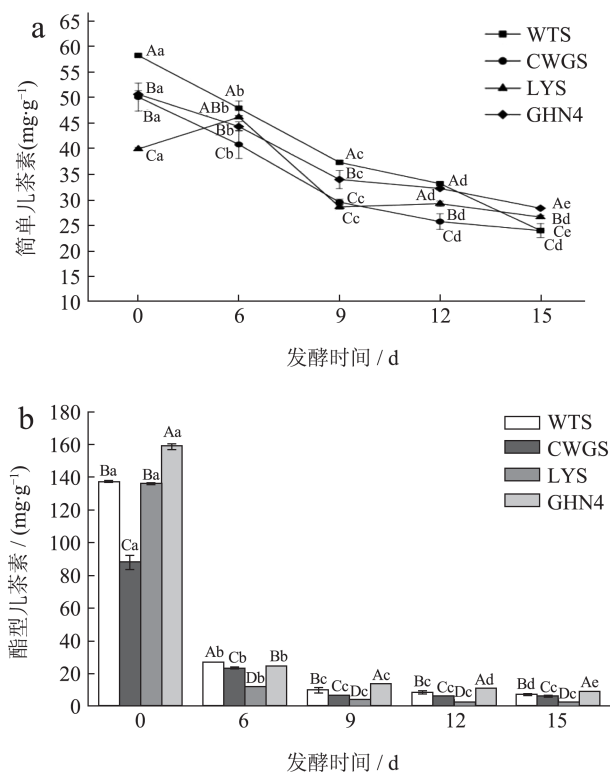


图4 六堡茶渥堆过程中简单儿茶素和酯型儿茶素含量变化
Fig.4 Changes of simple catechins and ester catechins contents during the fermentation of Liupao tea

2.2.4 茶色素的变化

茶色素变化如图5所示: 渥堆 12 d, 茶黄素含量由原料的 0.08%~0.27% 上升至 0.25%~0.32%, 渥堆后的六堡茶茶黄素有所升高, 可能由于渥堆过程中由简单儿茶素和没食子酸儿茶素氧化缩合形成^[27]。渥堆过程茶红素呈总体下降的趋势, 渥堆 0 d, 茶红素含量为 3.78%~5.61%, 渥堆 12 d 后下降了 10.53%~69.99%。茶褐素随着发酵时间均呈升高的趋势, 渥堆 0 d, 茶褐素含量为 1.50%~2.17%, 渥堆 12 d 后升高至 6.12%~8.23%。在渥堆过程中茶红素和茶黄素进一步氧化聚合形成茶褐素, 茶褐素是影响六堡茶汤色加深的主要色素物质^[28], 六堡茶中茶褐素含量范围在 5.84%~10.00%^[29], 说明经过控温控湿渥堆 12 d, 已形

成六堡茶的生化成分特征, 与感官审评结果汤色为红色一致。

不同品种六堡茶存在差异, 原料中 LYS 的茶黄素、茶红素、茶褐素含量较高, CWGS 的茶黄素、茶褐素含量较低; 经过渥堆 12 d 后, 茶黄素含量为 LYS (0.32%) > GHN4 (0.26%)、WTS (0.26%) > CWGS (0.25%), 茶红素降幅为 LYS (69.99%) > CWGS (43.27%) > WTS (31.88%) > GHN4 (10.53%), 茶褐素含量为 WTS (8.23%) > CWGS (7.40%)、LYS (7.41%) > GHN4 (6.12%), LYS 的茶黄素含量最高、茶红素含量最低, WTS 茶褐素含量较高。

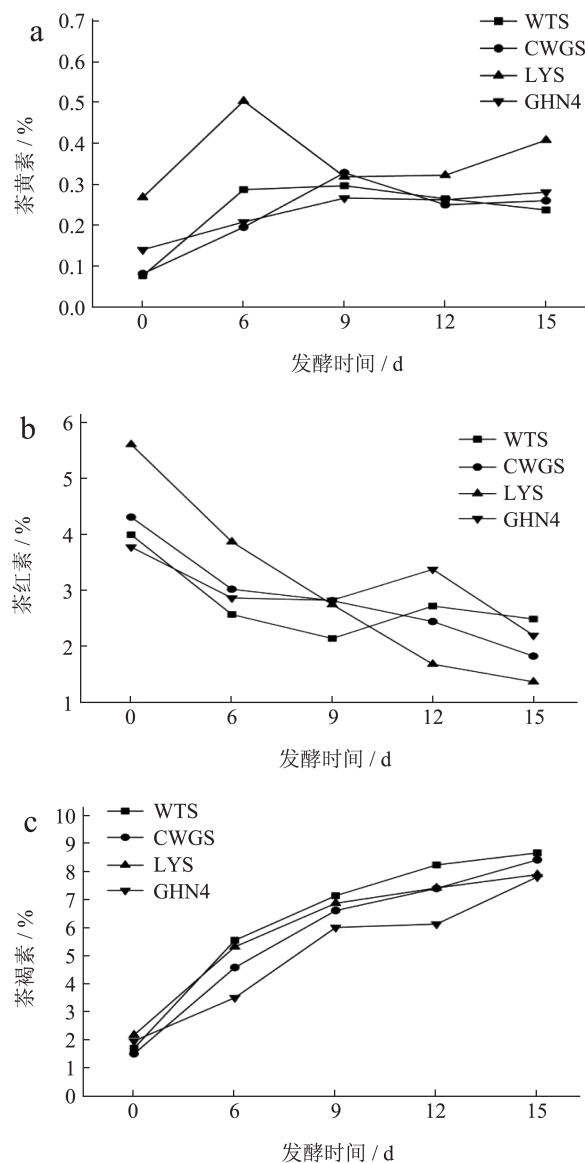


图5 六堡茶渥堆过程中茶色素含量的变化
Fig.5 Changes of tea pigments during the fermentation of Liupao tea

注: (a) 茶黄素; (b) 茶红素; (c) 茶褐素。

表 2 六堡茶渥堆过程中没食子酸、儿茶素和茶多酚含量的变化

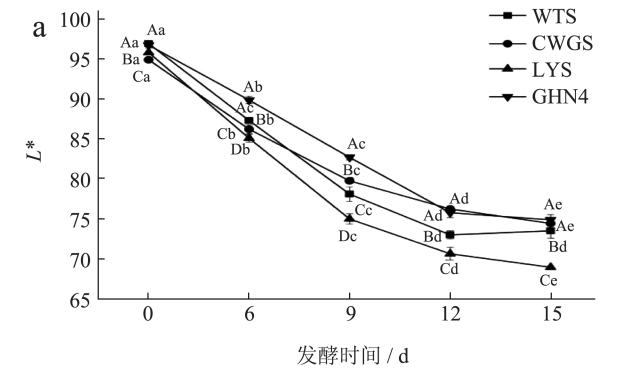
Table 2 Changes of gallic acid,catechins and tea polyphenol contents during the fermentation of Liupao tea (mg·g ⁻¹)									
样品名称	发酵时间/d	GA	EGC	C	EGCG	EC	ECG	儿茶素总量	茶多酚总量
WTS	0	0.45 ± 0.01 ^{Cd}	22.08 ± 0.13 ^{Aa}	4.88 ± 0.05 ^{Cc}	108.79 ± 0.15 ^{Ba}	31.24 ± 0.18 ^{Ba}	28.61 ± 0.54 ^{Ca}	195.68 ± 0.53 ^{Ba}	204.19 ± 7.92 ^{Ba}
	6	13.73 ± 0.16 ^{Ba}	22.14 ± 1.53 ^{Aa}	6.37 ± 0.29 ^{Ca}	20.43 ± 0.10 ^{Ab}	19.38 ± 0.39 ^{Bb}	6.86 ± 0.09 ^{Ab}	75.20 ± 1.32 ^{Ab}	126.51 ± 2.93 ^{Db}
	9	8.49 ± 0.66 ^{Ab}	20.05 ± 0.93 ^{Ab}	5.34 ± 0.20 ^{Bb}	7.46 ± 1.05 ^{Bc}	11.91 ± 0.74 ^{Bc}	2.55 ± 0.28 ^{Bc}	47.30 ± 1.12 ^{Ac}	125.81 ± 1.76 ^{Cb}
	12	6.31 ± 0.02 ^{Ac}	18.11 ± 0.64 ^{Bc}	4.52 ± 0.07 ^{Cd}	6.53 ± 0.42 ^{Bc}	10.50 ± 0.58 ^{Bd}	2.37 ± 0.27 ^{Bcd}	42.02 ± 0.76 ^{Ad}	110.27 ± 2.24 ^{Cc}
	15	6.02 ± 0.01 ^{Ac}	12.62 ± 0.31 ^{Bd}	3.12 ± 0.07 ^{De}	5.40 ± 0.27 ^{Bd}	8.23 ± 1.03 ^{Bc}	1.85 ± 0.14 ^{Bd}	31.22 ± 1.78 ^{Be}	106.98 ± 3.36 ^{Cc}
CWGS	0	0.72 ± 0.04 ^{Ad}	8.03 ± 0.66 ^{Dd}	6.56 ± 0.44 ^{Bc}	64.59 ± 3.16 ^{Da}	35.47 ± 1.68 ^{Aa}	23.72 ± 1.21 ^{Da}	138.36 ± 7.00 ^{Da}	211.31 ± 7.89 ^{Ba}
	6	9.99 ± 0.58 ^{Da}	13.93 ± 0.69 ^{Ba}	8.34 ± 0.50 ^{Aa}	16.20 ± 0.09 ^{Cb}	18.53 ± 1.74 ^{Bb}	7.32 ± 0.54 ^{Ab}	64.31 ± 3.31 ^{Cb}	163.01 ± 2.77 ^{Bb}
	9	7.60 ± 0.03 ^{Bb}	11.10 ± 0.41 ^{Cb}	8.29 ± 0.14 ^{Aa}	4.68 ± 0.04 ^{Cc}	10.12 ± 0.17 ^{Cc}	2.37 ± 0.03 ^{Bc}	36.56 ± 0.62 ^{Bc}	110.04 ± 6.03 ^{Dd}
	12	4.99 ± 0.02 ^{Cc}	9.77 ± 0.17 ^{Cc}	7.57 ± 0.07 ^{Ab}	4.50 ± 0.05 ^{Cc}	8.38 ± 1.30 ^{Cc}	2.21 ± 0.02 ^{Bc}	32.43 ± 1.57 ^{Bc}	128.38 ± 1.01 ^{Bc}
	15	5.31 ± 0.02 ^{Bc}	8.57 ± 0.57 ^{Dc}	6.56 ± 0.08 ^{Ac}	4.24 ± 0.18 ^{Cc}	8.83 ± 0.38 ^{Bc}	2.14 ± 0.06 ^{Ac}	30.34 ± 0.61 ^{BCc}	118.34 ± 1.33 ^{ABd}
LYS	0	0.33 ± 0.01 ^{Dd}	11.34 ± 0.20 ^{Cb}	8.80 ± 0.06 ^{Aa}	78.91 ± 0.30 ^{Ca}	19.78 ± 0.06 ^{Db}	57.17 ± 0.01 ^{Aa}	176.01 ± 0.62 ^{Ca}	224.53 ± 2.54 ^{Aa}
	6	10.69 ± 0.03 ^{Ca}	14.32 ± 0.15 ^{Ba}	7.20 ± 0.07 ^{Bb}	6.57 ± 0.04 ^{Db}	24.61 ± 0.08 ^{Aa}	5.71 ± 0.03 ^{Bb}	58.41 ± 0.21 ^{Db}	176.68 ± 2.43 ^{Ab}
	9	3.83 ± 0.02 ^{Cb}	8.26 ± 0.39 ^{De}	5.38 ± 0.02 ^{Bc}	2.21 ± 0.06 ^{De}	14.95 ± 0.04 ^{Ac}	1.75 ± 0.05 ^{Cc}	32.55 ± 0.39 ^{Cc}	145.57 ± 3.65 ^{Bc}
	12	2.64 ± 0.01 ^{De}	9.88 ± 0.31 ^{Cc}	5.17 ± 0.03 ^{Bd}	1.38 ± 0.04 ^{Dd}	14.17 ± 0.25 ^{Ad}	1.54 ± 0.03 ^{Cd}	32.13 ± 0.51 ^{Bc}	115.59 ± 2.01 ^{Cd}
	15	2.69 ± 0.02 ^{De}	9.30 ± 0.28 ^{Cd}	4.65 ± 0.04 ^{Be}	1.02 ± 0.03 ^{De}	12.66 ± 0.09 ^{Ac}	1.26 ± 0.02 ^{Ce}	28.89 ± 0.40 ^{Cd}	112.76 ± 1.43 ^{BCd}
GHN4	0	0.51 ± 0.01 ^{Be}	16.29 ± 0.30 ^{Bd}	4.75 ± 0.03 ^{Cb}	127.22 ± 1.33 ^{Aa}	29.56 ± 0.47 ^{Ca}	31.61 ± 0.23 ^{Ba}	209.43 ± 2.26 ^{Aa}	229.27 ± 7.95 ^{Aa}
	6	15.29 ± 0.03 ^{Aa}	23.16 ± 0.98 ^{Aa}	5.28 ± 0.09 ^{Da}	19.19 ± 0.08 ^{Bb}	15.87 ± 0.02 ^{Cb}	5.36 ± 0.04 ^{Bb}	68.86 ± 1.01 ^{Bb}	154.26 ± 2.20 ^{Cb}
	9	9.02 ± 0.02 ^{Ab}	17.52 ± 1.07 ^{Bc}	4.81 ± 0.05 ^{Cb}	10.26 ± 0.05 ^{Ac}	11.61 ± 1.02 ^{Bc}	3.17 ± 0.08 ^{Ac}	47.37 ± 1.76 ^{Ac}	154.08 ± 0.90 ^{Ab}
	12	5.41 ± 0.03 ^{Bc}	18.89 ± 0.16 ^{Ab}	4.02 ± 0.04 ^{Dc}	8.52 ± 0.03 ^{Ad}	9.29 ± 0.40 ^{BCd}	2.73 ± 0.04 ^{Ad}	43.45 ± 0.27 ^{Ad}	147.57 ± 7.25 ^{Ab}
	15	4.71 ± 0.03 ^{Cd}	16.06 ± 0.02 ^{Ad}	3.72 ± 0.06 ^{Cd}	6.72 ± 0.05 ^{Ae}	8.55 ± 0.11 ^{Bd}	2.26 ± 0.01 ^{Ae}	37.30 ± 0.07 ^{Ae}	123.93 ± 6.08 ^{Ac}

注：同列不同小写字母表示同一品种六堡茶在不同发酵时间存在显著差异 $P<0.05$ ；同列不同大写字母表示相同发酵时间下不同品种六堡茶存在显著差异 $P<0.05$ ；GA：没食子酸；EGC：表没食子儿茶素；C：儿茶素；EGCG：表没食子儿茶素没食子酸酯；EC：表儿茶素；ECG：表儿茶素没食子酸酯。

2.2.5 茶汤色差值的变化

色差系统中 L^* 代表明暗度， a^* 代表红绿度，正值表示偏红，负值表示偏绿， b^* 代表黄蓝色，正值表示偏黄，负值表示偏蓝。茶汤色差值变化如图 6 所示，茶汤亮度 L^* 值随发酵时间呈降低的趋势，红绿色度 a^* 和蓝黄色度 b^* 值呈升高的趋势，同一品种在不同发酵时间存在显著性差异 ($P<0.05$)，发酵 12 d 后 L^* 值由 94.89~96.72 下降至 70.66~76.26， a^* 由 -4.15~-1.82 升高至 18.68~26.67， b^* 由 12.25~21.54 升高至 63.14~86.80，经过渥堆，茶汤的亮度下降，但是红色度增加。相同发酵时间下不同品种茶汤色差存在显著性差异 ($P<0.05$)，发酵 0 d， L^* 值为 WTS、GHN4 > LYS > CWGS， a^* 绝对值为 LYS > WTS > GHN4 > CWGS， a^* 为负数时绝对值越大代表绿色度越浓， b^* 值为 LYS > WTS > GHN4 > CWG，

发酵 12 d 后， L^* 值为 CWGS、GHN4 > WTS > LYS， a^* 值为 LYS > WTS、GHN4、CWGS， b^* 值为 LYS > WTS、GHN4 > CWGS，经过控温控湿渥堆后，LYS 茶汤的 L^* 值最低， a^* 和 b^* 值最大，说明 LYS 的汤色更红浓，与感官审评结果一致。



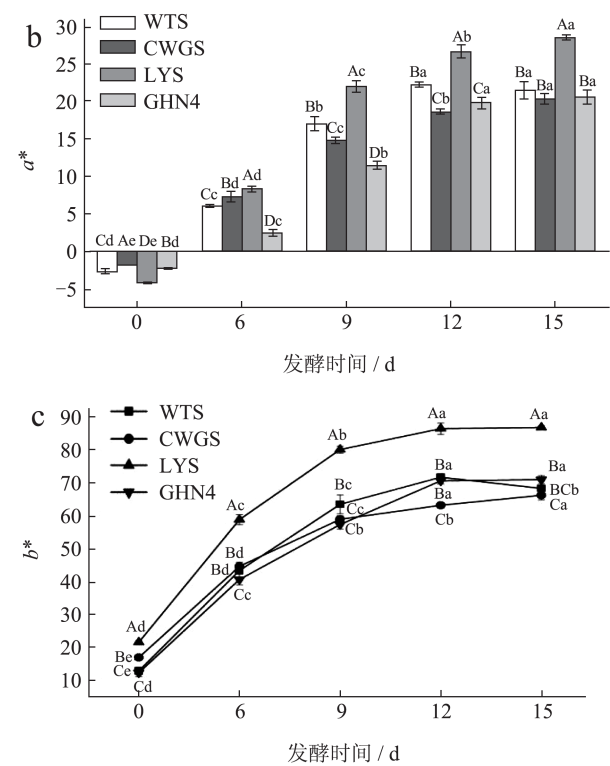


图 6 六堡茶渥堆过程中茶汤色差值的变化

Fig.6 Changes of tea soup chromatism during the fermentation of Liupao tea

2.2.6 茶汤色差值变化与主要生化成分的相关性分析

六堡茶控温控湿渥堆过程中，茶汤色差 L^* 与水浸出物、游离氨基酸、茶红素、茶多酚、儿茶素总量、EGCG、EC、ECG 之间均存在极显著正相关性 ($P<0.01$)，其中水浸出物、儿茶素总量、茶多酚的相关系数较高，分别为 0.89、0.89、0.89，与茶褐素、茶黄素、咖啡碱存在极显著负相关 ($P<0.01$)，相关系数分别为 -0.96、-0.57 和 -0.70。茶汤色差 a^* 与茶褐素、咖啡碱存在极显著正相关 ($P<0.01$)，相关系数为 0.94 和 0.71；与水浸出物、游离氨基酸、茶红素、茶多酚、儿茶素总量、EGCG、EC、ECG 之间均存在极显著负相关性 ($P<0.01$)，其中水浸出物、儿茶素总量、茶多酚的相关系数较高，分别为 -0.86、-0.86、-0.87。茶汤色差 b^* 与水浸出物、游离氨基酸、茶红素、茶多酚、儿茶素总量、EGCG、EC、ECG 之间均存在极显著负相关性 ($P<0.01$)，其中水浸出物、氨基酸、儿茶素总量、EGCG 的相关系数较高，分别为 -0.88、-0.88、-0.92、-0.88，与茶褐素、茶黄素、咖啡碱存在极显著正相关 ($P<0.01$)，相关系数为 0.92、0.69 和 0.73。茶褐素、茶多酚类物质与茶汤色差的相关系数较高，可能在渥堆过程中，随着茶叶含水率和堆温的变化，内含物发生分解、聚合和转化等化学变化，主要是茶多酚、茶红素发生转化，茶褐素

的形成，使得六堡茶汤色变红浓。

表 3 六堡茶茶汤色差与主要生化成分含量的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between chromatism of Liupao tea soup and content of main biochemical components

	L^*	a^*	b^*
水浸出物	0.89**	-0.86**	-0.88**
游离氨基酸	0.83**	-0.80**	-0.88**
茶黄素	-0.57**	0.55*	0.69**
茶红素	0.81**	-0.82**	-0.78**
茶褐素	-0.96**	0.94**	0.92**
茶多酚总量	0.89**	-0.87**	-0.86**
儿茶素总量	0.89**	-0.86**	-0.92**
GA	-0.08	0.02	0.18
EGC	0.33	-0.33	-0.29
C	0.36	-0.39	-0.31
EGCG	0.83**	-0.80**	-0.88**
EC	0.83**	-0.79**	-0.80**
ECG	0.78**	-0.77**	-0.80**
咖啡碱	-0.70**	0.71**	0.73**
可可碱	-0.19	0.20	0.21

注: ** 在 0.01 级别 (双尾), 相关性显著。* 在 0.05 级别 (双尾), 相关性显著。

3 结论

渥堆是六堡茶品质特点形成的关键工序，六堡茶的汤色由橙黄向红浓转变，叶底颜色由黄色向铜褐色转变，滋味由浓厚向醇和转变，控温控湿渥堆 12 d 可形成汤色红浓、叶底铜褐色、滋味醇和的六堡茶典型品质特征。LYS 比其它品种的汤色更红浓，滋味更醇和。水浸出物、游离氨基酸、茶多酚、茶红素、儿茶素总量、EC 和酯型儿茶素 (ECG、EGCG) 含量显著下降，尤其是儿茶素总量和酯型儿茶素，渥堆 12 d 后分别只有原料的 18.25%~23.44%、2.15%~7.60%，咖啡碱、可可碱和茶褐素含量显著升高，EGC、GA 含量呈先升高后降低的趋势，茶黄素呈波动变化。随着渥堆时间六堡茶茶汤色差值 L^* 呈降低的趋势， a^* 和 b^* 呈升高趋势， L^* 与茶褐素、茶黄素、咖啡碱极显著负相关 ($P<0.01$)， a^* 、 b^* 与茶褐素、咖啡碱极显著正相关 ($P<0.01$)。贡献鲜爽味的游离氨基酸和贡献苦涩味的茶多酚、酯型儿茶素大量降低使得茶汤滋味更醇和，茶褐素含量增加使茶汤颜色红浓，与传统渥堆 (50~60 d) 相比，控温控湿渥堆大大缩短了六堡茶发酵周期，通过精确控制发酵条件，内含物发生转化，茶样水浸出物由发酵 0 d 的 48.56%~51.60% 下降

至渥堆 12 d 的 42.20%~44.89%，在快速形成六堡茶红浓、醇和品质的同时保留了一定内含物，保证六堡茶的滋味浓度。渥堆 12 d 后，CWGS 儿茶素 C 含量较高，咖啡碱和可可碱含量较低；LYS 茶黄素、EC 含量较高，茶多酚、酯型儿茶素、茶红素含量较低，茶汤色差 L^* 较低， a^* 、 b^* 值较高；GHN4 水浸出物、茶多酚、酯型儿茶素（EGCG、ECG）含量较高。LYS 的滋味更醇和可能与茶多酚、酯型儿茶素含量较低有关。

综上所述，感官审评和生化成分检测结果均表明控温控湿渥堆 12 d 可以形成六堡茶的风味品质特征，不同品种中 LYS 感官品质较好，汤色红浓、滋味浓醇，该研究后续将挖掘控温控湿发酵过程中品质特点形成的机理，以期为六堡茶控温控湿渥堆的标准化生产提供科学依据。

参考文献

- [1] 夏涛.制茶学（第三版）[M].北京:中国农业出版社,2016.
- [2] 许皓,欧行畅,欧阳建,等.六堡茶香气与滋味成分及评价方法研究进展[J].现代食品科技,2025,41(1):381-392.
- [3] 龚受基,滕翠琴,郭德军,等.六堡茶香气特征和真菌群落鉴定分析[J].现代食品科技,2023,39(6):252-262.
- [4] PAN J C, WANG J, TENG J W, et al. Deciphering the underlying core microorganisms and the marker compounds of Liupao tea during the pile-fermentation process [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 104(5): 2862-2875.
- [5] 温志杰,卢洁,曹璐璐,等.六堡茶渥堆过程中优势酵母菌的分离与鉴定[J].基因组学与应用生物学,2016,35(5):1149-1155.
- [6] 许皓,肖虹菲,林家威,等.现代工艺六堡茶渥堆过程中茶汤色泽及主要滋味品质成分动态变化[J].食品与发酵工业,2024, 50(11):317-326.
- [7] 曹中环,邱瑞瑾,王登良,等.六堡茶加工过程中主要生化成分的变化[J].广东茶业,2016,3:26-28.
- [8] LI Y, LIANG J F, LIANG L L, et al. Identification of non-volatile compounds during the pile fermentation process of Liupao tea using widely targeted metabolomics based on UPLC-QTOF-MS [J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 62(2): 377-388.
- [9] ZHOU X H, TIAN D, ZHOU H G, et al. Effects of different fermentation methods on flavor quality of Liupao tea using GC-Q-TOF-MS and electronic nose analyses [J]. Foods, 2024, 13(16): 2595.
- [10] LONG J Y, CHEN C, WANG Y Q, et al. Exploring the microbial community, physicochemical properties, metabolic characteristics, and pathways during tank fermentation of Liupao tea [J]. LWT, 2024, 204: 116449.
- [11] 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.
- [12] 庞月兰,黎敏,刘助生,等.一种六堡茶控温控湿发酵方法及得到的六堡茶:中国,CN202310432331.1[P].2023-08-18.
- [13] 叶靖平,贺汤强,姜明国.凌云白毫茶树品种为原料制作六堡茶(黑茶)工艺[J].中国茶叶,2010,32(8):22-23.
- [14] 张芬,温立香,彭靖茹,等.广西六堡茶的研究进展[J].茶叶通讯,2018,45(3):13-16.
- [15] 王丽丽,陈键,宋振硕,等.茶叶中没食子酸、儿茶素类和生物碱的HPLC检测方法研究[J].福建农业学报,2014,29(10):987-994.
- [16] LIANG J F, WU H L, LU M F, et al. HS-SPME-GC-MS untargeted metabolomics reveals key volatile compound changes during Liupao tea fermentation [J]. Food Chemistry: X, 2024:23101764-101764.
- [17] ZOU Y, LIU M Q, LAI Y Q, et al. The glycoside hydrolase gene family profile and microbial function of *Debaryomyces hansenii* Y4 during South-road dark tea fermentation [J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1229251.
- [18] LI Q, HONG X, ZHENG X X, et al. Characterization of key aroma compounds and core functional microorganisms in different aroma types of Liupao tea [J]. Food Research International, 2022, 152: 110925.
- [19] WANG J, ZHANG J W, CHEN Y, et al. The relationship between microbial dynamics and dominant chemical components during Liupao tea processing [J]. Food Bioscience, 2021, 43: 101315.
- [20] FENG X Y, CHEN M, SONG H Z, et al. A systemic review on Liubao tea: A time-honored dark tea with distinctive raw materials, process techniques, chemical profiles, and biological activities [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(6): 5063-5085.
- [21] WENG Y W, CHEN L M, KUN J R, et al. The unique aroma of ripened Pu-erh tea, Liupao tea and Tietban tea: Associated post-fermentation condition and dominant microorganism with key aroma-active compound [J]. Food Chemistry, 2024, 464(Pt 2): 141788.
- [22] 唐海芹,王磊,甘春萍,等.桂红4号等无性系茶树品种开发六堡茶工艺[J].广东农业科学,2012,39(12):101-103.
- [23] WANG H F, TENG J W, HUANG L, et al. Determination of the variations in the metabolic profile and sensory quality of Liupao tea during fermentation through UHPLC-HR-MS metabolomics [J]. Food Chemistry, 2022, 404(PB): 134773.
- [24] 陈小强,叶阳,成浩,等.六堡茶的理化分析研究[J].中国农学通报,2008,7:77-80.
- [25] HUO H Z, CAI A H, XIE Y C, et al. Changes in flavor quality of raw Liupao tea during the piling process [J]. Heliyon, 2024, 10(22): e40175.
- [26] HUANG Y Y, LIU H H, WANG J, et al. Impact of the long-term storage on flavor quality of Liupao tea using sensory evaluation combined with metabolomics analysis [J]. Food Research International, 2024, 198: 115386.
- [27] 张均伟,侯粲,杜昱光,等.基于高分辨质谱结合主成分分析技术评价发酵过程对六堡茶关键品质成分的影响[J].食品科技,2019, 44(12):328-334.
- [28] 肖虹菲,许皓,欧行畅,等.六堡茶汤色品质差异分析[J].食品工业科技,2025,46(11):292-301.
- [29] 王洁仪,郑丹,郑晓皎,等.茶褐素生物学活性及其作用机制的研究进展[J].上海交通大学学报(医学版),2023,43(6):768-774.