

云南高山普洱茶渥堆过程滋味和汤色品质的动态变化研究

杨希^{1,2#}, 李玉川^{1,2#}, 罗倩倩^{1,2}, 陈玉琼^{1,2}, 余志^{1,2}, 黄申逵³, 陈省忠³, 倪德江^{1,2*}

(1. 华中农业大学园艺林学学院, 果蔬园艺作物种质创新与利用全国重点实验室, 武汉 430070; 2. 农业农村部华中都市农业重点实验室, 武汉 430070; 3. 腾冲市高黎贡山生态茶业有限责任公司, 腾冲 679100)

摘要: **目的** 探究云南高山普洱茶渥堆过程滋味和汤色品质的动态变化。**方法** 采用云南省高海拔地区生产的普洱茶为研究样本, 通过理化成分测定、色差测定和感官审评的方法对普洱茶渥堆过程中主要品质成分及茶汤色差值变化进行分析, 并结合相关性分析探讨相应指标与滋味、汤色品质之间的关系。**结果** 在整个渥堆过程中, 茶多酚、游离氨基酸、可溶性糖、水浸出物、儿茶素等物质含量均显著降低($P<0.05$), 咖啡碱含量变化不明显。以茶多酚为主体, 生成的茶黄素和茶红素含量先升后降, 茶褐素含量显著增加($P<0.05$)。渥堆过程中, 茶汤明亮度(L^*)逐渐降低, 红色度(a^*)和黄色度(b^*)增强。相关性分析结果显示, 茶多酚、大多数儿茶素、水浸出物等物质与滋味品质呈负相关, 茶褐素可以正向促进普洱茶的滋味和汤色品质。**结论** 茶多酚和茶褐素是普洱茶渥堆过程中滋味和汤色品质形成的关键因子。

关键词: 普洱茶; 渥堆; 滋味; 汤色; 相关性

Dynamic changes of taste and brewing color quality during the pile-fermentation process of Yunnan alpine Pu-erh tea

YANG Xi^{1,2#}, LI Yu-Chuan^{1,2#}, LUO Qian-Qian^{1,2}, CHEN Yu-Qiong^{1,2}, YU Zhi^{1,2}, HUANG Shen-Kui³, CHEN Sheng-Zhong³, NI De-Jiang^{1,2*}

(1. National Key Laboratory for Germplasm Innovation & Utilization of Horticultural Crops, College of Horticulture & Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Key Laboratory of Urban Agriculture in Central China, Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China; 3. Tengchong Gaoligongshan Ecological Tea Industry Co., Ltd., Tengchong 679100, China)

ABSTRACT: Objective To explore the dynamic changes of taste and brewing color quality during the pile-fermentation process of Yunnan alpine Pu-erh tea. **Methods** Taking Pu-erh tea produced in high altitude areas of Yunnan Province as the research sample, the main quality component and color difference value change during

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1000401)、中央高校基金项目(2662017PY053)、云南省科技人才和平台计划项目(202005AF150075)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2021YFD1000401), the Fundamental Research Funds for the Central Universities, Huazhong Agricultural University (2662017PY053), and the Yunnan Province Technological Talents and Platform Funds (202005AF150075)

#杨希、李玉川为共同第一作者

#YANG Xi and LI Yu-Chuan are Co-first Authors

*通信作者: 倪德江, 博士, 教授, 主要研究方向为茶叶加工与功能化学。E-mail: nidj@mail.hzau.edu.cn

*Corresponding author: NI De-Jiang, Ph.D, Professor, National Key Laboratory for Germplasm Innovation & Utilization of Horticultural Crops, College of Horticulture & Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China. E-mail: nidj@mail.hzau.edu.cn

pile-fermentation were analyzed by chemical compositions determination, color difference determination, and sensory evaluation. Furthermore, the correlation analysis was used to explore the relationship between the corresponding indexes and the taste/brewing color quality. **Results** The content of tea polyphenols, free amino acids, soluble sugars, water extracts and catechins decreased significantly during the whole pile-fermentation process ($P<0.05$), while the content of caffeine did not change observably. With tea polyphenols as the main body, the content of theaflavins and thearubigins increased first and then decreased, while theabrownin content increased significantly ($P<0.05$). During the pile-fermentation process, the brightness (L^*) of tea soup gradually decreased, and the red (a^*) and yellow (b^*) colors increased. According to correlation analysis, tea polyphenols, most catechins and water extracts were negatively correlated with the taste quality, but theabrownins could positively promote the taste and color quality of Pu-erh tea. **Conclusion** Tea polyphenol and theabrownin are the key factors for the taste and color formation during pile-fermentation process of Pu-erh tea.

KEY WORDS: Pu-erh tea; pile-fermentation; taste; brewing color; correlation

0 引言

普洱茶是中国传统名茶,属于黑茶类,因其具有独特的风味品质和药理功效,近年来深受国内外消费者欢迎^[1]。普洱茶加工工序主要包括:毛茶初制(杀青、揉捻、干燥),渥堆发酵和精制蒸压^[2]。其中渥堆发酵被认为是普洱茶品质形成的关键步骤^[3]。研究表明,黑茶的风味品质和营养价值的形成与其独特工艺—渥堆密切相关^[4]。渥堆实质是在湿热条件下,以晒青毛茶内含成分为基质发生代谢、转化等反应,最终形成了普洱茶滋味醇和、陈香馥郁的风味品质^[5]。在渥堆过程由于微生物和湿热作用,茶叶内含成分发生复杂的化学变化,儿茶素类经氧化聚合形成儿茶素类衍生物,如普洱茶渥堆过程中形成普洱茶素(puerins C~F)等衍生物^[6],茯砖茶渥堆过程中形成的fuzhuanin A~F等6种儿茶素衍生物^[7]。青砖茶渥堆过程中甲基苯类物质含量的升高,有利于陈香品质的形成^[8]。

茶叶感官审评是辨别茶叶优劣的有效手段,审评因子包括外形、汤色、香气、滋味和叶底,其中黑茶审评中滋味的加权占比最高,为30%^[9]。由此可知滋味品质的重要程度。在普洱茶生产渥堆中,通常会采用取样冲泡的方法,通过观察汤色颜色的变化来判断发酵程度。因此茶汤色泽在茶叶感官评价同样起到重要作用,但当前鲜有普洱茶渥堆过程中汤色变化的相关研究。

“高山云雾出好茶”,高海拔地区昼夜温差大,并且受漫射光的影响,茶鲜叶可积累更丰富的风味成分,有利于茶叶风味品质的形成^[2,10]。云南省普洱茶产区主要包括低山(海拔1500 m以下)和高山(海拔2000 m以上),目前普洱茶的相关研究主要集中于低海拔地区的茶叶研究,如勐海、普洱等地^[10],而关于高海拔产区的普洱茶研究相对较少。因此本研究选用高海拔茶区(2500 m以上)生产的晒青毛茶为原料,在高海拔区域进行渥堆发酵,对渥堆过程主要品质成分和色差变化进行分析,探究其变化规律,同时结合相关性分析,探讨滋味品

质、汤色品质与其相应指标之间的相互关系,以期普洱茶渥堆过程中滋味和汤色品质形成的机制探究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

晒青毛茶(云南大叶种,一芽二三叶)来源于云南省元阳县水卜龙茶厂。

茛三酮、蒽酮、乙酸乙酯、浓硫酸、正丁醇、乙醇、甲醇(分析纯,中国医药集团上海化学试剂公司);福林酚(分析纯,美国Sigma-Aldrich公司);甲醇(色谱纯,美国Thermo Fisher Scientific公司);甲酸(色谱纯,韩国德山药品工业有限公司);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)、表没食子儿茶素(epigallocatechin, EGC)、没食子儿茶素(gallocatechin, GC)、表儿茶素没食子酸酯(epicatechin gallate, ECG)、没食子酸儿茶素酯(catechin gallate, CG)、表儿茶素(epicatechin, EC)、儿茶素(catechin, C)(纯度 $\geq 98\%$,上海源叶生物科技有限公司)。

1.2 仪器与设备

LC1200 高效液相色谱仪(美国安捷伦公司);WSC-S 测色色差计(上海精密科学仪器有限公司);HH 恒温水浴锅(江苏金坛富华电器有限公司);JP-250A-8 高速多功能粉碎机(永康市久品工贸有限公司);TU-1810 紫外分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司);AWPHAL-2 万分之一电子分析天平(日本京都岛津有限公司);LD5-10 普通离心机(北京医用离心机厂)。

1.3 渥堆方法

设置渥堆含水量38%。基于毛茶水分含量计算需要添加的水量,喷水加湿,待茶叶充分吸水回软后进行渥堆。渥堆叶长宽高分别为10.0、3.0、1.5 m,温度控制在40~60℃,超过

65℃进行翻堆, 渥堆共计38 d, 分别于0、3、6、9、12、15、18、21、29、32、35和38 d进行取样, 茶样在80℃烘箱干燥。

1.4 实验方法

黑茶感官审评方法参照 GB/T 23776—2018《茶叶感官审评方法》。可溶性糖、茶多酚、游离氨基酸和水浸出物测定分别参照国家标准 GB/T 36056—2018《茶 可溶性糖的测定》、GB/T 8313—2018《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》、GB/T 8314—2013《茶 游离氨基酸总量的测定》和 GB/T 8305—2013《茶 水浸出物测定》。茶黄素、茶红素和茶褐素测定采用有机溶液提取法, 采用分光光度计法, 以95%乙醇为空白, 于380 nm波长下测定吸光值, 通过系统分析法计算3种茶色素的含量^[11]。采用WSC-S测色色差计进行茶汤色差值测定^[12]。咖啡碱和儿茶素组分测定采用高效液相色谱法^[13]。

1.5 数据处理

文章数据以平均值±标准偏差($n=3$)表示, 通过 SPSS

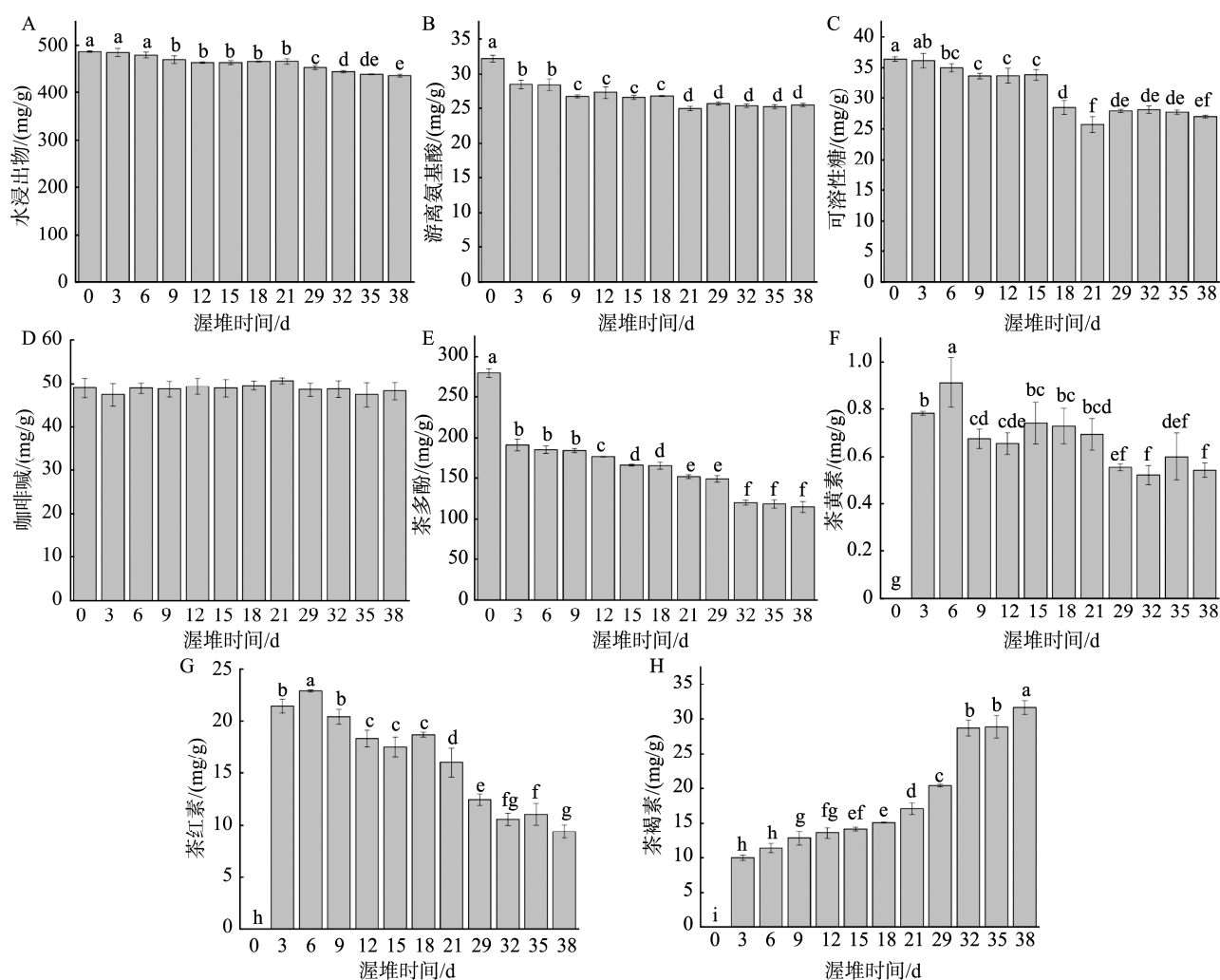
Statistics 20 软件对数据进行 Duncan 检验($P<0.05$)和皮尔森相关性分析。采用 OriginPro 2018 和 Adobe Illustrator CC 2019 软件作图。

2 结果分析

2.1 主要品质成分的变化

水浸出物含量在渥堆过程中呈下降趋势(图 1A), 这与 HU 等^[4]的研究一致。值得注意的是, 渥堆至21 d后, 水浸出物含量下降速率相比之前有所提升。这可能跟此时微生物作用增强, 所需茶叶内含成分的消耗量增加有关^[14]。

游离氨基酸的含量在渥堆过程呈阶段性的下降趋势, 渥堆前期(0~3 d)绿毛茶的氨基酸含量显著降低, 之后3~6 d游离氨基酸含量变化不显著; 6~9 d游离氨基酸含量显著降低, 而后9~18 d氨基酸含量变化不显著; 到了渥堆中后期(18~21 d)游离氨基酸含量继续显著下调, 最后趋于平衡(图 1B)。研究表明渥堆过程氨基酸的变化与脱羧脱氨产生



注: 不同小写字母表示各组之间具有显著差异($P<0.05$), 下同。

图1 普洱茶渥堆过程中水浸出物、游离氨基酸、可溶性糖和咖啡碱含量变化

Fig.1 Changes of aqueous extracts, free amino acids, soluble sugars and caffeine content during Pu-erh tea pile-fermentation process

芳香族物质或者发生偶联氧化等反应有关^[15]。此外氨基酸作为稳定的氮源,为嗜热类菌属、蓝状菌属、曲霉属等微生物的大量繁殖提供营养物质^[16]。值得注意的是,氨基酸含量呈阶段性变化,可能与该阶段微生物的繁殖代谢能力或此时渥堆环境的温湿度变化有关^[17]。

渥堆过程中可溶性糖含量主要呈下降趋势(图 1C),可能是因为微生物繁殖将其作为碳源消耗^[18]。由图 1C 可以看出,渥堆中后期 21~38 d,可溶性糖含量略有波动,出现了短暂升高。研究表明随着渥堆时间的延续,微生物产生丰富的水解酶,水解茶叶细胞壁中纤维素等多糖物质,产生可溶性糖,导致其含量变化发生波动^[19]。

咖啡碱的含量在普洱茶渥堆过程中变化不显著(图 1D)。有研究表明咖啡碱受高温的影响较大,在茶叶干燥提香阶段会发生降解^[20]。而普洱茶渥堆时,环境温度一般不超过 60℃,并且咖啡碱自身结构稳定性较好^[21],所以含量变化不大。

2.2 酚类物质及其氧化产物含量变化

在普洱茶渥堆发酵的过程中,茶多酚变化最显著(图 1E),从绿毛茶(0 d)到渥堆结束(38 d),茶多酚的含量下降了约 59%。其中渥堆初期(0~3 d)茶多酚含量迅速下降,之后同游离氨基酸和可溶性糖类似,呈阶段性下降趋势。儿茶素是一种酚类活性物质,约占茶多酚类总量的 70%~80%^[22]。普洱茶渥堆过程,儿茶素总量显著下降,至渥堆 32 d 后含量趋于稳定(表 1)。其中 EGCG 变化最明显,渥堆 3 d 后,其含量迅速下降 76%;ECG、EC 和 C 含量同样在渥堆过程中呈下降趋势;并且渥堆 18 和 32 d 后,GCG 和 GC 含量因过低而检测不出。EGC、GC 等物质在渥堆 0~3 d 时会出现短暂的含量升高,这可能跟复杂儿茶素在湿热作用下发生水解反应,能够产生简单儿茶素有关^[23]。

综上所述,在整个渥堆过程中,儿茶素含量整体呈现下降趋势,与茶多酚变化一致,这与前人研究结果相同^[4,24]。

已表明,渥堆过程中茶多酚物质的转化主要是发生酶促氧化,产生茶黄素、茶红素、茶褐素等物质^[10]。茶黄素、茶红素和茶褐素在渥堆 3 d 后,其含量均显著升高(图 1F~H),目前认为渥堆过程中由 EGCG 先氧化形成茶黄素,再由茶黄素氧化生成茶红素,之后茶黄素和茶红素进一步氧化聚合为茶褐素^[19]。此外,前面提到渥堆 3 d 后,EGCG 含量迅速下降 76%,由此可知,渥堆初期茶色素的生成和转化速率相对较快,之后随着渥堆的进行,3 种茶色素出现不同程度的变化。其中茶黄素和茶红素含量呈整体减少趋势,至渥堆后期趋于平衡(图 1F~G);而茶褐素含量持续增加(图 1H)。

2.3 品质成分与滋味品质的相关性分析

表 2 为茶样滋味的感官审评分析,渥堆不同阶段的黑茶滋味审评差异显著。随着渥堆天数的增加,黑茶的滋味得分呈现先增后降趋势。0~6 d 茶样滋味较苦涩,刺激性强;9~12 d 苦涩感和刺激性均有所下降;渥堆 15 d 时,茶样滋味特征开始转变为醇和品质;之后 18~32 d 醇和品质逐步加强,且滋味得分于 32 d 最高(88 分);但是渥堆 35~38 d 时,滋味品质变差,甚至略带酸味。由此可知,合理的渥堆时间对于黑茶滋味品质的形成至关重要。

茶叶的滋味品质是由茶多酚、游离氨基酸、可溶性糖等呈味物质共同决定的^[25]。对检测到的 17 个理化指标与滋味审评分值进行皮尔森相关性分析,探究普洱茶渥堆过程中呈味物质和滋味品质的关联性。结果显示,共有 13 个指标与滋味之间存在相关性,其中只有茶褐素与滋味得分之间呈极显著正相关,其余指标均与滋味之间呈负相关(图 2)。

表 1 普洱茶渥堆过程中儿茶素含量变化(mg/g)
Table 1 Changes of catechins content during Pu-erh tea pile-fermentation process (mg/g)

时间/d	儿茶素总量	EGCG	EGC	ECG	EC	C	CG	GCG	GC
0	113.37±4.23 ^a	43.70±2.27 ^a	13.68±1.00 ^c	26.07±1.20 ^a	17.08±0.91 ^a	10.13±1.33 ^a	0.72±0.03 ^f	0.33±0.01 ^c	1.66±0.20 ^f
3	78.50±6.29 ^b	10.47±0.90 ^b	21.23±3.20 ^a	24.63±2.00 ^a	11.41±0.62 ^b	6.34±0.63 ^b	1.63±0.02 ^c	0.34±0.00 ^c	2.45±0.17 ^a
6	64.09±5.27 ^c	8.00±0.60 ^c	18.57±1.90 ^b	18.68±2.00 ^c	9.35±0.55 ^c	5.80±0.11 ^b	1.14±0.02 ^d	0.38±0.01 ^b	2.17±0.30 ^c
9	66.15±2.94 ^c	8.02±0.07 ^c	17.19±0.66 ^b	22.39±2.30 ^b	8.94±0.52 ^c	5.83±0.86 ^{bc}	0.93±0.03 ^c	0.43±0.00 ^a	2.42±0.22 ^{ab}
12	54.50±2.43 ^d	5.50±0.13 ^d	14.00±0.90 ^c	19.42±1.20 ^c	6.30±0.37 ^d	5.21±0.36 ^{cd}	1.55±0.07 ^c	0.32±0.05 ^c	2.20±0.10 ^b
15	52.89±1.08 ^d	5.49±0.11 ^d	13.29±0.75 ^c	18.26±0.60 ^c	6.13±0.08 ^d	4.75±0.62 ^{de}	2.82±0.10 ^a	0.32±0.01 ^c	2.15±0.06 ^{cd}
18	46.60±0.75 ^e	5.16±0.26 ^{de}	11.01±0.09 ^d	16.18±0.20 ^d	5.67±0.10 ^d	4.64±0.09 ^{de}	1.55±0.09 ^c	未检出	2.07±0.09 ^{cd}
21	40.16±1.34 ^f	4.08±0.09 ^e	9.12±0.50 ^d	14.20±0.50 ^d	4.43±0.11 ^e	4.02±0.07 ^{ef}	2.40±0.11 ^b	未检出	1.91±0.10 ^{de}
29	29.92±0.70 ^g	2.01±0.06 ^f	7.05±0.49 ^e	12.03±0.03 ^c	2.59±0.07 ^f	3.24±0.05 ^{fg}	1.16±0.03 ^d	未检出	1.84±0.07 ^{ef}
32	20.05±0.35 ^h	1.67±0.04 ^f	4.76±0.36 ^f	8.55±0.04 ^f	1.75±0.02 ^g	2.77±0.12 ^g	0.55±0.01 ^g	未检出	未检出
35	17.85±0.18 ^h	1.16±0.02 ^f	4.18±0.25 ^f	7.52±0.08 ^f	1.72±0.03 ^g	2.82±0.22 ^g	0.45±0.02 ^h	未检出	未检出
38	18.61±0.34 ^h	1.34±0.07 ^f	4.49±0.44 ^f	7.65±0.04 ^f	1.39±0.02 ^g	2.43±0.31 ^g	0.34±0.04 ⁱ	未检出	未检出

注: 不同小写字母表示各组之间具有显著差异(P<0.05),下同。

表 2 普洱茶滋味感官审评
Table 2 Taste sensory evaluation of Pu-erh tea

渥堆时间/d	滋味感官审评	
	评语	得分
0	较苦涩, 刺激性强	72.00±0.71 ⁱ
3	较苦涩, 刺激性强	72.00±0.35 ⁱ
6	较苦涩, 刺激性强	73.00±0.71 ⁱ
9	略苦涩, 刺激性较强	75.00±0.00 ^h
12	略苦涩, 刺激性较强	75.00±0.79 ^h
15	略带刺激性, 尚醇和	80.00±0.00 ^e
18	尚醇和	82.00±0.79 ^d
21	尚醇和	83.00±0.35 ^c
29	尚醇和	85.00±0.00 ^b
32	醇和	88.00±1.22 ^a
35	略酸	79.00±1.00 ^f
38	略酸	78.00±1.27 ^g

的重要活性物质, 在茶汤中呈苦涩有较强的刺激性^[26]。因此, 渥堆过程中多酚类物质含量的降低有利于黑茶滋味品质的形成^[14]。值得注意的是, 本次研究发现可溶性糖和游离氨基酸含量与滋味得分之间同样存在负相关, 相关性系数分别为-0.789 和-0.703。研究表明可溶性糖是茶汤甜味的主要成分, 能缓解茶汤中苦涩味物质的刺激性作用^[25]。氨基酸是影响茶汤滋味鲜爽度的重要成分^[16]。不过在普洱茶渥堆过程, 随着渥堆进行, 可溶性糖和游离氨基酸含量呈下降趋势, 滋味得分逐渐升高, 风味逐渐转变为醇和品质, 所以数据显示呈负相关。

水浸出物是指茶叶经冲泡后溶入茶汤中无机和有机物的总和, 其含量的高低可反映出茶叶品质的优劣^[27]。由图 2 可知, 水浸出物含量与滋味得分呈负相关, 相关系数分为-0.627。以往的研究中同样发现品质较高的青砖茶的水浸出物含量往往较低^[28]。通过相关性分析发现, 3 种茶色素中仅有茶褐素与滋味得分呈正相关。相关性系数为 0.632。一般认为茶褐素是普洱茶中酚类物质的主要水溶性氧化产物, 可使得茶汤滋味浓醇, 降低刺激感^[15,29]。

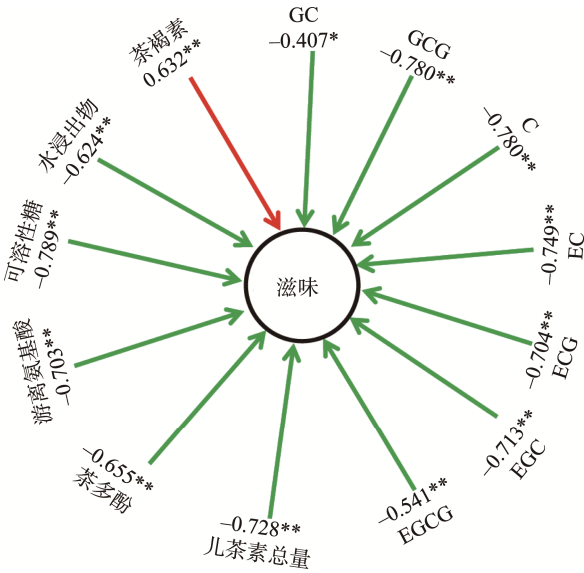
2.4 普洱茶汤色审评及色差值变化

由表 3 可知, 普洱茶渥堆过程中汤色变化明显。随着渥堆进行, 汤色逐渐变化: 尚绿黄→尚黄→尚橙黄→橙黄→尚橙红→橙红→棕褐。渥堆 29~38 d 时, 普洱茶汤色稳定, 且该阶段审评得分均在 90 分以上。从色差值变化可知, 随着渥堆程度的加深, L^* 从 52.48 逐渐降低至 45.14, 说明茶汤明亮度逐渐降低; a^* 由负值(0~3 d)向正值逐渐升高, 说明此时汤色从“绿色”向“红色”过渡, 红色度加强; b^* 在 0~9 d 时, 含量显著升高, 说明茶汤黄色度加强, 之后呈波动趋势, 总体表现为先升后降, 于 29 d 达到峰值(24.47)。该结果与感官审评中汤色变化趋势呼应度较好。

2.5 汤色品质的相关性分析

研究表明, L^* 表示茶汤的明亮度, L^* 越大, 表示明亮度越高; a^* 正值表示茶汤红色度, b^* 正值为茶汤黄色程度^[30]。由相关性分析(表 4)可知, a^* 和 b^* 均与汤色得分呈极显著正相关, 其中 a^* 与汤色得分的相关性系数为 0.810 ($|r|>0.8$), 存在高度线性正相关关系, 说明红色色调对汤色品质的贡献较大。而 L^* 与汤色得分呈负相关, 相关性系数为-0.775。说明随着渥堆进行, 茶汤明亮度逐渐降低, 红黄色调加重, 最终形成了普洱茶汤色的棕褐特征。

茶黄素是茶汤“亮”的主要成分, 茶红素是茶汤“红”的主要成分, 茶褐素是茶汤“褐”的主要成分, 均为水溶性色素, 最终体现在汤色上^[29]。表 4 同样显示, 茶黄素与 L^* (明亮度) 之间呈正相关。此外, 3 种茶色素均与 a^* 、 b^*



注: 红色箭头表示正相关, 绿色箭头表示负相关, */**表示在 $P<0.05/0.01$ 水平上存在显著相关性或极显著相关性。
图 2 普洱茶滋味审评与主要品质成分相关性分析
Fig.2 Correlation analysis between taste evaluation and main quality components of Pu-erh tea

本研究发现茶多酚保留含量越高, 不利于黑茶的滋味品质的形成, 其相关性系数为-0.655, 与滋味评价呈负相关。儿茶素类化合物作为茶多酚的主体物质, 除了 CG 与滋味得分之间不相关, 其余检测到的儿茶素类化合物, 包括儿茶素总量均与滋味之间呈负相关。酚类是形成黑茶品质

表 3 普洱茶渥堆过程中汤色审评和色差变化					
Table 3 Brewing color evaluation and chromatic aberration changes during Pu-erh tea pile-fermentation process					
渥堆时间/d	汤色感官审评		L^*	a^*	b^*
	评语	得分			
0	尚绿黄	75.00±0.71 ^h	52.48±0.60 ^a	-5.68±0.06 ⁱ	17.29±0.69 ^g
3	尚黄	78.00±0.61 ^g	49.67±0.77 ^b	-0.96±0.02 ^h	22.62±0.22 ^{cd}
6	尚黄	78.50±0.61 ^g	48.05±0.26 ^c	0.86±0.04 ^g	22.87±0.47 ^c
9	尚橙黄	80.00±0.00 ^f	48.28±0.50 ^{cd}	1.53±0.04 ^f	23.59±0.32 ^b
12	橙黄	82.00±0.35 ^e	47.80±0.36 ^{de}	1.48±0.02 ^f	22.12±0.08 ^{def}
15	尚橙红	85.00±0.35 ^d	46.79±0.42 ^f	3.09±0.19 ^e	22.42±0.34 ^{cde}
18	尚橙红	86.00±0.71 ^c	47.31±0.33 ^{ef}	2.00±0.09 ^e	21.84±0.34 ^f
21	橙红	88.00±1.22 ^b	47.29±0.28 ^{ef}	2.58±0.02 ^d	24.31±0.06 ^a
29	棕褐	91.50±0.87 ^a	47.24±0.24 ^{ef}	2.63±0.10 ^d	24.47±0.35 ^a
32	棕褐	92.00±1.00 ^a	47.16±0.19 ^{ef}	2.95±0.06 ^e	22.78±0.17 ^c
35	棕褐	92.00±0.60 ^a	47.05±0.20 ^f	3.69±0.05 ^b	21.61±0.22 ^f
38	棕褐	91.00±0.71 ^a	45.14±0.18 ^g	3.84±0.14 ^a	22.02±0.10 ^{ef}

表 4 汤色指标的相关性分析				
Table 4 Correlation analysis of brewing color index				
指标	汤色	茶黄素	茶红素	茶褐素
L^*	-0.775**	0.478**	-0.253	-0.822**
a^*	0.810**	0.536**	0.334*	0.829**
b^*	0.483**	0.717**	0.641**	0.410*
汤色	1	0.103	-0.174	0.885**

呈正相关,茶褐素与 L^* (明亮度)呈负相关。通过分析汤色与 3 种茶色素之间的相关性,发现茶褐素均与汤色审评呈正相关,相关性系数为 0.885;而茶红素和茶黄素与汤色审评之间不存在明显的相关性。由此推断茶褐素对普洱茶渥堆过程中汤色品质形成的贡献度较大。普洱茶渥堆过程中,明亮度(L^*)逐渐降低,红黄色调(a^* 和 b^*)加深,汤色由尚绿黄逐步转变为棕褐。这可能跟茶黄素和茶红素先升后降,茶褐素逐渐升高得到了一定量的积累有关。

3 讨论与结论

渥堆是普洱茶品质形成的关键工序^[26]。本研究通过理化成分测定、色差值和感官审评分析,发现在此过程中茶叶的内含成分逐步发生变化(茶多酚、儿茶素、可溶性糖、游离氨基酸主要滋味指标含量降低,生成茶黄素、茶红素

和茶褐素等物质),最终物质间相互配合形成了普洱茶滋味醇和、汤色棕褐的品质特征。

结合相关性分析,说明渥堆过程中茶多酚和儿茶素等酚类物质的降低有利于普洱茶滋味品质的形成,这与前人研究一致^[1,4,26]。不同于以往的相关性研究^[25],本研究发现水浸出物、游离氨基酸和可溶性糖与普洱茶滋味呈负相关。在以往的研究中同样发现,优质黑茶的水浸出物含量往往偏低^[28]。研究表明构成茶叶滋味的化学组成种类繁多,呈味化合物的含量、比例等因素均可影响茶叶滋味品质,呈味物质之间的协同和互作效应,目前还不得而知。普洱茶经过渥堆处理后,可溶性糖和游离氨基酸并未得到一定的积累,含量与酚类物质相比相对较小。一般而言,普洱茶的呈味特点为醇和口感,目前可以证实的结论为渥堆过程酚类物质的降低有利于普洱茶醇和滋味的形成。此外,研究表明茶叶中茶褐素含量越高,会导致茶汤明亮度降低,而汤色更红^[30],本研究同样发现茶褐素与汤色得分呈正相关。普洱茶茶汤颜色为棕褐色,棕色和褐色介于红色和黄色之间,棕色多表现为适度的浅红,褐色多为适中的浅灰^[31]。作为水溶性色素,茶褐素在普洱茶汤色品质的形成中起到至关重要的作用。

综上所述,普洱茶渥堆过程中茶多酚(尤其是 EGCG)和茶褐素含量变化最为明显,茶多酚含量显著下降,累计生成了茶褐素等物质,这有利于茶汤苦涩味的降低,

对普洱茶醇和品质的形成有促进作用。同时这些由儿茶素氧化聚合形成的茶褐素等物质参与了普洱茶汤色棕褐特征的形成。

参考文献

- [1] 邓德涵, 王琼, 罗蓉, 等. 普洱茶滋味形成机制研究现状[J]. 中国茶叶, 2021, 43(7): 1–8.
- DENG SH, WANG Q, LUO R, *et al.* Mechanism of Pu-erh tea taste formation [J]. China tea, 2021, 43(7): 1–8. .
- [2] 彭功明. 云南普洱茶加工技术的发展和演变[J]. 现代食品, 2019, (23): 80–82.
- PENG GM. Development and evolution of Yunnan Pu'er tea processing technology [J]. Mod Food, 2019, (23): 80–82.
- [3] 张亚, 黄亚亚, 梁艳, 等. 黑茶渥堆工艺研究进展[J]. 食品与机械, 2017, 33(3): 216–220.
- ZHANG Y, HUANG YY, LIANG Y, *et al.* Research progress of black tea stacking technology [J]. Food Mach, 2017, 33(3): 216–220.
- [4] HU S, HE C, LI YC, *et al.* Changes of fungal community and non-volatile metabolites during pile-fermentation of dark green tea [J]. Food Res Int, 2021, 147(1): 110472.
- [5] 张灵枝, 程楚镇, 李焱. 普洱茶渥堆过程主要酶系活性变化研究[J]. 食品科学, 2010, (11): 1–4.
- ZHANG LZ, CHENG CZ, LI Y. Change of major enzymes during pile-fermentation process of Pu'er tea [J]. Food Sci, 2010, (11): 1–4.
- [6] LUO ZM, DU HX, LI LX, *et al.* Fuzhuanins A and B: The B-ring fission lactones of flavan-3-ols from Fuzhuan brick-tea [J]. J Agric Food Chem, 2013, 61(28): 6982–6990.
- [7] ZHU Y, CHEN J, JI X, *et al.* Changes of major tea polyphenols and production of four new B-ring fission metabolites of catechins from post-fermented Jing-Wei Fu brick tea [J]. Food Chem, 2015, 170: 110–117.
- [8] ZHANG H, WANG J, ZHANG D, *et al.* Aged fragrance formed during the post-fermentation process of dark tea at an industrial scale [J]. Food Chem, 2021, 342: 128175.
- [9] 胡圆圆, 杨云忠, 杨亚萍, 等. 普洱茶熟茶(散茶)感官品质与内质分析[J]. 食品安全导刊, 2021, (29): 75–76.
- HU YY, YANG YZ, YANG YP, *et al.* Sensory quality and endoplasmic analysis of Pu'er tea [J]. China Food Saf Magaz, 2021, (29): 75–76.
- [10] 武珊珊, 李芬, 熊昌云, 等. 基于电子鼻技术的云南不同茶区晒青毛茶香气分析[J]. 茶叶通讯, 2022, 49(1): 88–95, 107.
- WU SS, LI F, XIONG CY, *et al.* Analysis of aroma of sun-dried green tea in different areas of yunnan province based on electronic nose technology [J]. J Tea Commun, 2022, 49(1): 88–95, 107.
- [11] ROBERTS EAH, SMITH RF. Spectrophotometric measurements of theaflavins and thearubigins in black tea liquors in assessments of quality in teas [J]. Analyst, 1961, 86(1019): 94–98.
- [12] LI YC, RAN W, HE C, *et al.* Effects of different tea tree varieties on the color, aroma, and taste of Chinese Enshi green tea [Z]. 2022.
- [13] 刘璇, 殷雨心, 李天吉, 等. 原料嫩度差异对青砖茶品质的影响[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(2): 237–244.
- LU X, YIN YX, LI TJ, *et al.* Effects of raw materials with different tenderness on quality of Qingzhuan tea [J]. J Huazhong Agric Univ, 2021, 40(2): 237–244.
- [14] ZHAO M, ZHANG DL, SU XQ, *et al.* An Integrated metagenomics/metaproteomics investigation of the microbial communities and enzymes in solid-state fermentation of Pu-erh tea [J]. Sci Rep, 2015, 14: 10117.
- [15] LIN FJ, WEI XL, LIU HY, *et al.* State-of-the-art review of dark tea: From chemistry to health benefits [J]. Trends Food Sci Technol, 2021, 109: 126–138.
- [16] MOE LA. Amino acids in the rhizosphere: From plants to microbes [J]. Am J Botany, 2013, 100(9): 1692–1705.
- [17] 刘盼盼, 郑鹏程, 龚自明, 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, 21(8): 224–234.
- LIU PP, ZHENG PC, GONG ZM, *et al.* Pile-fermentation process optimization and flavor components analysis of Qingzhuan tea [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2021, 21(8): 224–234.
- [18] WANG J, ZHANG J, CHEN Y, *et al.* The relationship between microbial dynamics and dominant chemical components during Liupao tea processing [J]. Food Biosci, 2021(2): 101315.
- [19] WANG Q, PENG C, GONG J. Effects of enzymatic action on the formation of theabrownin during solid state fermentation of Pu-erh tea [J]. J Sci Food Agric, 2011, 91(13): 2412–2418.
- [20] 胡源, 刘梦圆, 周秦羽, 等. 干燥工艺对红茶品质的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(6): 191–200, 232.
- HU Y, LIU MY, ZHOU QY, *et al.* Effect of different drying process on the quality of black tea [J]. Food Mach, 2021, 37(6): 191–200, 232.
- [21] 张建勇, 王伟伟, 崔宏春, 等. 温度对茶多酚制品中儿茶素、没食子酸和咖啡碱贮藏稳定性的影响[J]. 中国茶叶加工, 2020, (4): 69–75.
- ZHANG JY, WANG WW, CUI HC, *et al.* Effect of temperature on storage stability of tea catechins, gallic acid and caffeine in tea polyphenols products [J]. China Tea Process, 2020, (4): 69–75.
- [22] RAEISS E, FARHADIAN S, SHAREGHI B. The interaction of the green tea polyphenol (catechin) with pepsin: Insights from spectroscopic to molecular dynamics studies [J]. J Mol Liquids, 2021, 326(6): 115196.
- [23] QIN JH, LI N, TU PF, *et al.* Change in tea polyphenol and purine alkaloid composition during solid-state fungal fermentation of postfermented tea [J]. J Agric Food Chem, 2012, 60(5): 1213–1217.
- [24] 张厅, 刘晓, 熊元元, 等. 四川黑茶渥堆过程中主要品质成分和茶汤色差变化及其相关性研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(9): 154–162.

- ZHANG T, LIU X, XIONG YY, *et al.* Correlation between main quality components and teasoup color of Sichuan dark tea during post-fermentation [J]. *Food Ferment Ind*, 2022, 48(9): 154–162.
- [25] LI YC, HE C, YU XL, *et al.* Effects of red-light withering on the taste of black tea as revealed by non-targeted metabolomics and transcriptomics analysis [J]. *LWT*, 2021, 147: 111620.
- [26] 高慢慢, 张林奇, 王晓蕊, 等. 不同品牌和年份普洱茶的主要品质成分比较研究[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(16): 16–22.
- GAO MM, ZHANG LQ, WANG XR, *et al.* Comparison of the main quality components of Pu-erh tea with different brands and years [J]. *Food Res Dev*, 2021, 42(16): 16–22.
- [27] 李星, 刘学, 李伟. 浅析都匀毛尖茶灰分和水浸出物含量[J]. *农业与技术*, 2020, 40(8): 34–35, 44.
- LI X, LIU X, LI W. Analysis on ash and water extract content of Duyun Maojian tea [J]. *Agric Technol*, 2020, 40(8): 34–35, 44.
- [28] 李玉川, 董晨, 陈玉琼, 等. 优质青砖茶渥堆工艺优化[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(14): 4431–4438.
- LI YC, DONG C, CHEN YQ, *et al.* Pile-fermentation conditions optimization of high-quality Qingzhuan tea [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(14): 4431–4438.
- [29] 张云天, 姚晓玲, 鲁江, 等. 黑茶茶褐素的研究现状及进展[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(11): 395–399.
- ZHANG YT, YAO XL, LU J, *et al.* Current research status and progress of the theabrownine in dark tea [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2017, 38(11): 395–399.
- [30] 杨娟, 袁林颖, 钟应富, 等. 工夫红茶色泽与品质相关性研究[J]. *西南农业学报*, 2014, 27(6): 2605–2610.
- YANG J, YUAN LY, ZHONG YF, *et al.* Study on correlations between color and quality of congou made of different varieties of tea [J]. *Southwest China J Agric Sci*, 2014, 27(6): 2 605–2610.
- [31] 沈宏. 传统文化与传统绘画色彩演变探究[J]. *美术教育研究*, 2022, (5): 86–87.
- SHEN H. Research on the evolution of traditional culture and traditional painting colors [J]. *Art Educ Res*, 2022, (5): 86–87.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)

作者简介



杨 希, 硕士, 主要研究方向为茶叶加工
E-mail: 1195937946@qq.com



李玉川, 博士研究生, 主要研究方向为茶叶加工与品质调控。
E-mail: 1107513450@qq.com



倪德江, 博士, 教授, 主要研究方向为茶叶加工与功能化学。
E-mail: nidj@mail.hzau.edu.cn