

炒烘结合工艺对烘青绿茶品质的影响

张荣祥^{1,2}, 杜亚如³, 张 德^{1,2}, 董智杰^{1,2}, 倪德江^{1,2}, 郑时兵⁴, 余 志^{1,2,*}

(1.华中农业大学园艺林学学院, 湖北 武汉 430070; 2.华中农业大学 果蔬园艺作物种质创新与利用
全国重点实验室, 湖北 武汉 430070; 3.恩施职业技术学院生物工程学院, 湖北 恩施 445000;
4.宣恩县伍台昌臣茶业有限公司, 湖北 宣恩 445500)

摘 要:以湖北宣恩县伍家台栽培茶一芽二、三叶鲜叶为实验原料,通过正交试验探究烘青绿茶加工过程中滚炒环节的温度、投叶量及茶叶水分含量对烘青产品品质的影响,采用主成分分析优化滚炒环节工艺参数,确定最优工艺。结果表明:综合32项指标提取的5个主成分累计贡献率为90.06%,以构建评价函数作为评判指标,结合主效应分析得到最佳工艺参数为:滚炒环节温度 $(150\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 、投叶量2 kg、炒制后水分质量分数25%;烘青绿茶经滚炒后,感官评价结果发现其外形、香气、滋味、叶底得分较未经滚炒处理的样品均有所提高,涩味降低;茶叶条索匀整度、紧细度更好。研究显示,对于烘青绿茶产品,在加工过程中增加滚炒工艺环节对提升烘青绿茶品质具有较好效果。

关键词:烘青绿茶;滚炒环节;主成分分析

Effect of Frying Combined with Roasting on the Quality of Roasted Green Tea

ZHANG Rongxiang^{1,2}, DU Yaru³, ZHANG De^{1,2}, DONG Zhijie^{1,2}, NI Dejiang^{1,2}, ZHENG Shibing⁴, YU Zhi^{1,2,*}

(1. College of Horticulture & Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
2. National Key Laboratory for Germplasm Innovation & Utilization of Horticultural Crops, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 3. College of Biotechnology, Enshi Polytechnic, Enshi 445000, China;
4. Xuan'en County Wu Tai Chang Chen Tea Co. Ltd., Xuan'en 445500, China)

Abstract: In this study, fresh tea shoots, one bud with two or three leaves, from a tea garden in Wujiatai village of Xuan'en County, Hubei Province were processed into roasted green tea. An orthogonal array design was employed to investigate the impact of roller frying temperature, the amount of tea shoots fed to the drum, and the residual water content after frying on the quality of roasted green tea. The roller frying parameters were optimized using principal component analysis (PCA). The results revealed that five principal components (PCs) were extracted in PCA performed on 32 physicochemical indexes, which together explained 90.06% of the total variance. Using the comprehensive evaluation function and main effect analysis, the optimum processing parameters were obtained as follows: roller roasting temperature $(150\pm 5)^{\circ}\text{C}$, feeding 2 kg of tea shoots, and retention of 25% water after frying. Compared with green tea samples without roller frying treatment, the sensory scores for appearance, aroma, taste and waste of roasted green tea with roller frying were higher, and the astringency was reduced. Additionally, roller frying improved the uniformity and tightness of tea strips. This study demonstrated that introducing roller frying to the tea-making process could enhance the quality of roasted green tea.

Keywords: roasted green tea; roller frying; principal component analysis

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20231027-237

中图分类号: S571.1; TS272.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2025) 01-0090-10

引文格式:

张荣祥, 杜亚如, 张德, 等. 炒烘结合工艺对烘青绿茶品质的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(1): 90-99. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20231027-237. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2023-10-27

基金项目: “十四五”国家重点研发计划重点专项(2021YFD1000401)

第一作者简介: 张荣祥(1998—)(ORCID: 0009-0007-7577-8342), 男, 硕士研究生, 研究方向为茶叶加工与品质。

E-mail: ZhangRX@webmail.hzau.edu.cn

*通信作者简介: 余志(1980—)(ORCID: 0000-0002-8748-847X), 男, 副教授, 博士, 研究方向为茶叶加工与品质检测。

E-mail: yuzhi@mail.hzau.edu.cn

ZHANG Rongxiang, DU Yaru, ZHANG De, et al. Effect of frying combined with roasting on the quality of roasted green tea[J]. Food Science, 2025, 46(1): 90-99. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx.1002-6630-20231027-237.
<http://www.spkx.net.cn>

绿茶在我国有着最大的生产量和消费量^[1-2],作为一种全球性的饮料,以其宜人风味及潜在益处风靡全球。许多研究^[3-4]表明,饮用绿茶对降低胆固醇、血糖、预防心血管疾病和癌症、减少体质量和体脂均有帮助,对促进人的健康和长寿有积极作用。绿茶按工艺主要分为烘青、蒸青、炒青、晒青4类,其中烘青绿茶作为我国绿茶中的重要品类,分布广、品类多、数量大^[5],既可直接饮用,也可作为主要原料窈制花茶^[6-8]。传统烘青绿茶外形完整稍弯曲、锋苗显露、干色墨绿、香清味醇、汤色叶底黄绿明亮^[9-10],其工艺通常包括摊放、杀青、揉捻、初干、做形、足干等。做形是绿茶加工的关键环节,对改善烘青绿茶品质极为重要,在名优绿茶加工中应用广泛^[11]。而烘青绿茶加工主要应用于特种烘青绿茶生产,如黄山毛峰、太平猴魁、六安瓜片等。大宗烘青绿茶因成本限制、工艺标准不统一等因素影响,其相关研究与应用较少,使烘青产品常出现外形欠紧细、滋味浓、醇度较低等问题。前期实践发现滚炒做形工艺可以提升烘青绿茶外形品质,也可以促进香气产生、增强滋味,如邱安冬等^[11]认为,滚炒做形有利于茶叶紧结匀齐、促发香气及内含物质的均匀转化;黎娜等^[12]认为,在变温滚炒后高温烘干提香,可以使烘青绿茶产品栗香高锐、持久,滋味浓强、回甘。因此选择滚炒做形来提升烘青绿茶品质较为可行,但在实际生产中,滚炒工艺的温度、投叶量、水分含量等均会对茶叶品质有一定影响,若参数控制不当,不仅会导致茶叶中叶绿素破坏严重,降低产品色泽的绿色度和润度^[13],更会影响其优良外形和内质的形成^[14-15]。

本研究以湖北宣恩产区茶叶为原料,采用初干后滚炒做形再烘干工艺,设计正交试验探究滚炒环节温度、投叶量、炒制后水分含量对于茶叶品质的影响,并对比优化工艺与传统工艺产品品质的差异,为生产内质香高味浓、外形色泽绿润的高品质烘青茶产品提供一定技术参考与理论支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

实验于2022年4月在湖北省恩施土家族苗族自治州宣恩县伍台昌臣茶业有限公司茶园进行,鲜叶品种主要以鄂茶10号为主,带少量福鼎大白和鄂茶1号,采摘标准为—芽二、三叶。

茛三酮、蒽酮、磷酸二氢钾、磷酸氢二钠、氯化亚锡、浓硫酸(均为分析纯) 中国医药集团上海化学试剂公司;福林酚试剂、叶绿素a、b标准品(均为色谱纯) 美国Sigma-Aldrich公司;丙酮、乙醚、甲醇、乙酸(均为色谱纯) 德国Merck公司;叶黄素、 β -胡萝卜素标准品(均为色谱纯) 上海源叶生物科技有限公司;牛颌下腺黏蛋白(蛋白质质量分数36.6%,碳水化合物质量分数56.7%) 上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.2 仪器与设备

6CST-100F滚筒杀青机、6CR-65茶叶揉捻机组、6CCF-110茶叶炒干机 五峰天池茶叶机械有限公司;6CWH-100网带式回潮机、6CH-50链板式烘干机 浙江绿峰机械有限公司;6CHZ-9B茶叶烘焙机 福建佳友茶叶机械智能科技股份有限公司;锦农牌生物质燃烧机恩施市农艺农机有限公司;LRF35-S生物质颗粒燃料热风炉 福建政和县深山茶叶机械有限公司;PureLab Classic实验室超纯水机 英国ELGA公司;CS-820N台式分光测色仪 上海精密仪器仪表有限公司;LC-DCY-24G干式氮吹仪、CT-20笔式电导率仪 上海力辰邦西仪器科技有限公司;ME204E电子天平 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;1260高效液相色谱仪 美国Agilent公司。

1.3 实验方法

1.3.1 茶样制备

茶样制备工艺:1)传统工艺(对照)流程:鲜叶→摊放→杀青→回潮→揉捻→初干→烘干;2)优化工艺流程:鲜叶→摊放→杀青→回潮→揉捻→初干→滚炒→烘干。除滚炒环节外,各工艺参数设置如下:摊放:摊放厚度2~3 cm、温度23~28℃、相对湿度63%~72%,摊放至水分质量分数68%~72%;杀青:杀青机一区温度(240±10)℃、二区温度(260±10)℃、三区温度(220±10)℃、杀青时间(3.0±0.5)min;回潮:冷却回潮60 min;揉捻:揉捻机转速40~45 r/min,按轻-重-轻原则揉捻2.5 h;初干:链板式烘干机80℃烘干1次(约8.5 min);烘干:每筛称取0.6 kg茶样放入茶叶烘焙机,80℃烘干1.5 h、回潮1.5 h,再升温至85℃,烘干1 h。

1.3.2 正交试验设计

构建 $L_9(3^3)$ 正交试验,各处理组参数设置见表1。其中,滚炒工艺炒制程度在生产上由专业人员控制,并在炒制结束后立即进行快速水分含量检测,保留水分质量分数误差在±1%的样品。

表1 正交试验各处理组参数设置
Table 1 Orthogonal array design (OAD) matrix

组别	滚炒温度/℃	投叶量/kg	炒制后水分质量分数/%
1	100±5	2	25
2	100±5	3	20
3	100±5	4	15
4	150±5	2	20
5	150±5	3	15
6	150±5	4	25
7	200±5	2	15
8	200±5	3	25
9	200±5	4	20

1.3.3 茶样感官评价

参照GB/T 23776—2018《茶叶感官审评方法》，由5位专业人员（年龄22~58岁）对原料干样的外形、汤色、香气、滋味和叶底进行评价。外形从形状、色泽和匀整度方面进行评价；称取3 g原料干样，用150 mL沸水冲泡4 min，对汤色、香气、滋味品质进行评价；叶底放置于叶底盘进行评价。结果采用评语与评分形式展示，并按照加权法进行评分：总分=外形×30%（形状10%、颜色20%）+汤色×10%+香气×25%+滋味×25%+叶底×10%。每个小组成员对每个样本进行3次评价。

1.3.4 茶样色差测定

采用1.3.3节感官评价方法制得茶汤，干茶、茶汤使用台式分光测色仪，按照色差计法^[16]测定亮度值（ L^* ）、红度值（ a^* ）和黄度值（ b^* ）。

1.3.5 茶样理化成分含量测定

茶叶处理：干茶研磨成粉，过40目筛，在-20℃下密封保存。

可溶性糖含量参照比色法^[17]测定；多酚、儿茶素及咖啡碱含量参照GB/T 8313—2018《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》测定；游离氨基酸含量参照GB/T 8314—2013《茶 游离氨基酸总量的测定》测定。酚氨比为多酚和氨基酸含量的比值。实验重复3次。

1.3.6 茶样叶绿素含量测定

干茶叶绿素提取采用丙酮法，组分含量测定使用液相色谱法^[17-18]。

干茶中色素组分的提取：称取0.25 g茶粉至10 mL离心管中，加入5 mL丙酮（提前预冷），摇匀后封口膜密封，于4℃冰箱中在黑暗环境浸提12 h，3 500 r/min离心10 min，上清液转入分液漏斗，向其中加入5 mL乙醚，充分摇匀，静置1~2 min，再缓慢加入10 mL超纯水，轻轻摇匀，静置1 min，弃去下层水相，上层乙醚相再用10 mL超纯水提取1次，取上层墨绿色乙醚提取液，氮吹浓缩至1 mL；取1 mL乙醚提取液过滤膜（0.22 μm），转入棕色进样瓶，封口膜密封，尽快上机检测。

液相色谱检测条件：进样体积10 μL，检测波长450 nm，柱温35℃；流动相A为甲醇-超纯水（3:1， V/V ），流动相B

为乙酸乙酯，流速设置为1 mL/min；线性洗脱梯度如下：0~10 min，20%~30% B；10~30 min，30%~80% B；30~35 min，80% B；35~40 min，80%~20% B。通过与标准品出峰时间比对定性色素组分，再根据标准曲线计算各叶绿素组分含量（mg/g）。

1.3.7 茶样浊度测定

参考文献[19-21]方法。取1.50 g茶样加入225 mL沸蒸馏水，沸水浴浸提45 min，每10 min摇匀1次，脱脂棉过滤，洗涤残渣2~3次，滤液定容至250 mL容量瓶，取适量溶液于10 mL离心管离心（3 500 r/min）10 min后于660 nm波长处测定吸光度（ $A_{660\text{ nm}}$ ），参照浊度标准曲线得出茶汤浊度（ T_{ss} ）。使用纯水将黏蛋白溶解，配制成500 mg/L蛋白溶液。然后将2 mL茶汤溶液与蛋白溶液等体积混合，37℃水浴30 min，测定 $A_{660\text{ nm}}$ ，参照浊度标准曲线得出混合液浊度（ T_{test} ）。将2 mL水与蛋白溶液等体积混合，测定此时溶液的 $A_{660\text{ nm}}$ ，以此作为黏蛋白溶液的浊度（ T_{M} ）。购买相应的标准浊度液，按照所选梯度绘制相应的浊度标准曲线（ $A=0.001\ 6T+0.026\ 2$ ）。浊度按下式计算：

$$T=T_{\text{test}}-(T_{\text{ss}}+T_{\text{M}})$$

1.3.8 茶样物理指标测定

干茶长度与宽度测定方法：每个处理样品混匀后匀堆取样200个干茶条，平铺于白纸上，下方放置标尺作为刻度，用高清相机拍照后，通过粒径计算器（Nano Measurer 1.2软件）计算其长度（mm）与宽度（mm）。

茶汤电导率测定方法：按照茶水比1:50（g/mL）制备茶汤，在茶汤温度处于45~50℃时，使用笔式电导率仪测定茶汤电导率。

1.4 数据处理

使用WPS Excel进行数据统计及主效应分析并绘制雷达图及柱状图；使用R软件计算平均值及标准差，数据结果以平均值±标准差表示，显著性水平设置为 $P<0.05$ ，并进行数据标准化，使数据集数值处于-1~1之间，利用相关系数法进行相关性分析、主成分分析（principal component analysis, PCA）及构建函数关系式，使用SPSS 23软件进行主效应分析，使用Nano Measurer 1.2软件测量干茶长、宽，并分析其数据分布。

2 结果与分析

2.1 炒烘结合工艺滚炒环节正交试验茶样品质分析

2.1.1 茶样感官评价结果

由表2可知，不同滚炒处理对茶样外形、香气、滋味的影响显著（ $P<0.05$ ）。炒制温度100、150℃处理时，所得茶样滋味醇和度增加、涩味降低；炒制温度200℃处理时，醇和度下降，涩味增加。同时，香气受投叶量影响较大，投叶量2~3 kg时香气品质较好，投叶量3 kg时香气低闷。

表2 炒烘结合工艺正交试验制得茶样感官审评结果

Table 2 Sensory evaluation results of tea samples prepared in 9 OAD experiments

组别	外形 (30%)		汤色 (10%)		香气 (25%)		滋味 (25%)		叶底 (10%)		总分
	评语	得分	评语	得分	评语	得分	评语	得分	评语	得分	
1	尚紧实, 欠平伏, 欠匀整, 尚绿, 绿暗	82.0 ^f	浅黄绿明	83.7 ^a	清香纯正	84.6 ^d	醇和	84.4 ^c	黄绿尚明亮	81.0 ^b	83.3 ^d
2	较紧实, 尚平伏, 尚匀整, 较绿, 尚润	85.5 ^{bc}	浅黄绿明	83.2 ^{ab}	略低闷	83.8 ^e	醇和	84.9 ^b	黄绿较明亮	81.3 ^b	84.3 ^c
3	尚紧细, 平伏, 匀整, 较绿润	87.0 ^a	浅黄绿明	83.1 ^b	较低闷	82.8 ^f	醇和	84.6 ^c	黄绿较明亮	81.8 ^a	84.4 ^c
4	较紧实, 尚平伏, 较匀整, 尚绿润	85.0 ^{cd}	浅黄绿明	83.2 ^{ab}	清香较高	86.1 ^c	醇和尚鲜	87.1 ^a	黄绿明亮	81.9 ^a	85.3 ^b
5	尚紧细, 较平伏, 较匀整, 较绿, 尚润	86.2 ^b	浅黄绿明	83.3 ^{ab}	清香较高	87.1 ^b	醇和尚鲜	86.9 ^a	黄绿较明亮	81.8 ^a	85.9 ^a
6	较紧实, 尚平伏, 较匀整, 尚绿	84.3 ^d	浅黄绿明	83.3 ^{ab}	略低闷	84.1 ^e	醇和略涩	83.0 ^e	黄绿明亮	81.8 ^a	83.6 ^d
7	尚紧实, 欠平伏, 欠匀整, 尚绿	83.0 ^e	浅黄绿明	83.7 ^a	清香较高	87.6 ^a	醇和略涩	82.4 ^f	黄绿较明亮	81.3 ^b	83.9 ^d
8	紧实, 尚平伏, 较匀整, 较绿, 尚润	85.5 ^{bc}	浅黄绿明	83.3 ^{ab}	清香较高	87.2 ^b	醇和略涩	83.3 ^d	黄绿较明亮	81.3 ^b	84.7 ^c
9	尚紧细, 较平伏, 较匀整, 尚绿, 绿暗	83.5 ^c	浅黄绿明	83.2 ^{ab}	略低闷	84.0 ^e	较涩	81.2 ^e	黄绿尚明亮	81.0 ^b	82.8 ^e

注: 同列小写字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)。表4同。

主效应分析是正交试验常用的一种分析方法, 可以有效判断不同炒制条件对茶叶品质的影响, 结合主效应分析 (表3), 在滚炒环节中, 随温度上升, 干茶香气得分极显著上升 ($P<0.01$); 随投叶量上升, 干茶香气得分极显著下降 ($P<0.01$); 随炒制后水分含量降低, 干茶香气得分显著上升 ($P<0.05$)。

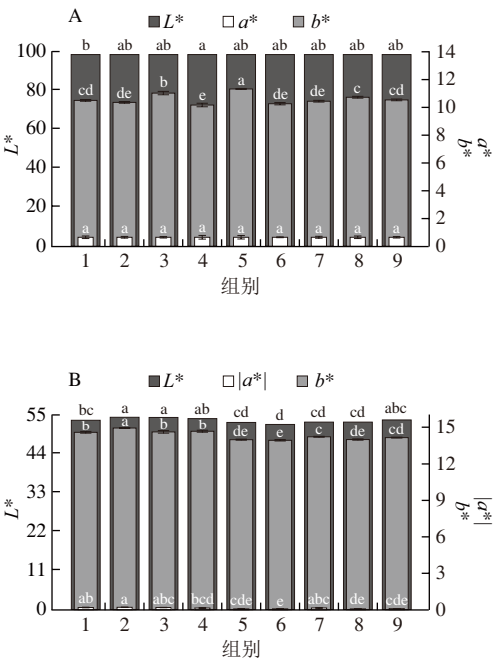
表3 滚炒参数对烘青绿茶品质影响主效应分析结果

Table 3 Main effect analysis of roller frying parameters on the quality of roasted green tea

指标	影响因素		
	滚炒温度	投叶量	水分含量
香气得分	K_1	83.73	86.10
	K_2	85.77	86.03
	K_3	86.27	83.63
	R	2.53	-2.47
	P	0.005 7	0.005 2
			0.027 8
a^*	K_1	0.16	0.13
	K_2	0.06	0.11
	K_3	0.08	0.07
	R	-0.08	-0.05
	P	0.030 6	0.113 4
			0.103 6
没食子儿茶素 (gallocatechin, GC) 含量	K_1	0.94	1.03
	K_2	1.03	1.09
	K_3	1.23	1.09
	R	0.29	0.07
	P	0.038 7	0.398 9
			0.886 7
儿茶素含量	K_1	0.93	0.86
	K_2	0.79	0.82
	K_3	0.70	0.74
	R	-0.23	-0.12
	P	0.029 7	0.099 9
			0.168 9

2.1.2 茶样色差分析结果

由图1可知, 不同炒制条件对茶汤色泽的影响较小, 对干茶色泽的影响较大。通过主效应分析发现, 滚炒温度与干茶 a^* 呈现显著负相关 ($P<0.05$; 表3), 即在滚炒环节中, 温度越低, 干茶色泽越绿。



A. 茶汤; B. 干茶。小写字母不同表示组间差异显著 ($P<0.05$)。图2、3、5同。

图1 炒烘结合工艺正交试验制得茶样色差

Fig. 1 Color parameters of tea samples and tea infusions prepared in 9 OAD experiments

2.1.3 茶样理化成分含量

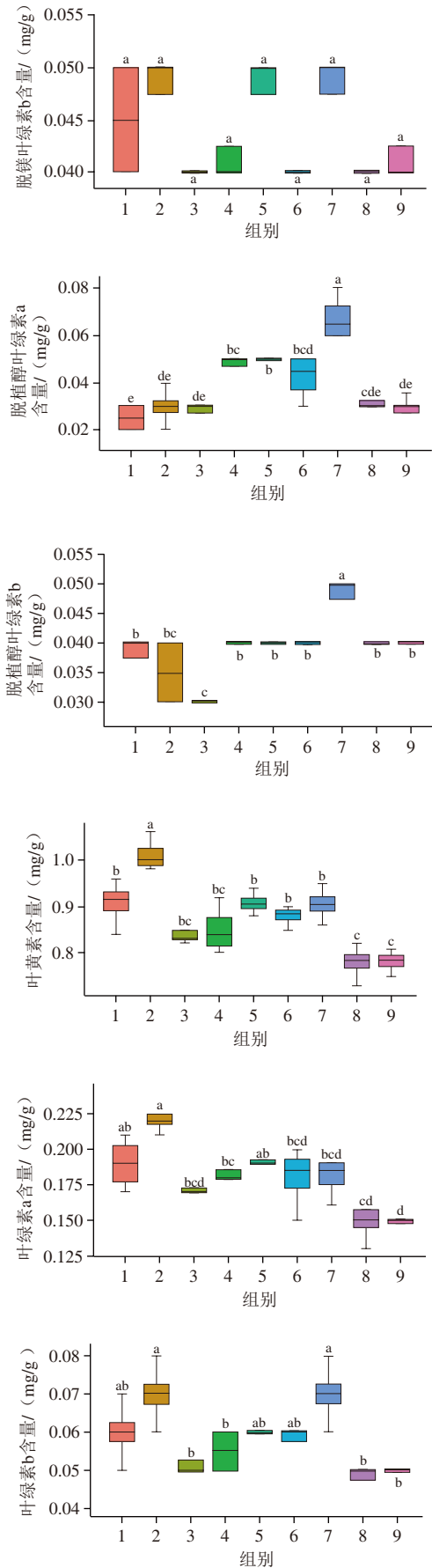
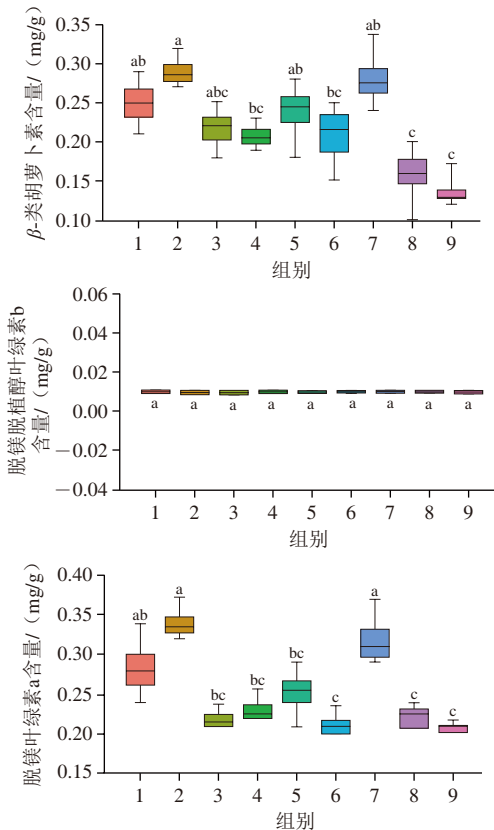
由表4可知, 不同炒制条件对咖啡碱含量的影响较小。与其余处理组相比, 150 ℃炒制温度下, 处理组5、6游离氨基酸及可溶性糖含量较低, 多酚含量及酚氨比较高, 而降低投叶量后, 同样150 ℃温度下炒制的处理组4, 多酚含量显著降低 ($P<0.05$), 可溶性糖、游离氨基酸含量显著升高 ($P<0.05$), 表明在滚炒环节降低投叶量有利于降低多酚等涩味物质含量, 提升游离氨基酸等鲜味物质含量, 继而改善茶叶滋味, 这也与感官审评滋味评分的结果一致。

表4 炒烘结合工艺正交试验制得茶样基础理化成分含量

9 OAD experiments					
组别	多酚 质量分数/%	游离氨基酸 质量分数/%	可溶性糖 质量分数/%	酚氨比	咖啡碱 质量分数/%
1	16.47±0.12 ^{bc}	3.69±0.02 ^{cd}	3.45±0.06 ^c	4.46±0.01 ^d	6.80±0.08 ^{ab}
2	16.60±0.14 ^b	3.76±0.04 ^c	3.57±0.05 ^b	4.41±0.08 ^{de}	6.67±0.11 ^{ab}
3	15.65±0.15 ^d	4.04±0.07 ^a	3.78±0.04 ^a	3.87±0.04 ^f	6.60±0.13 ^{ab}
4	16.15±0.10 ^f	3.76±0.03 ^c	3.73±0.02 ^a	4.30±0.02 ^e	6.57±0.14 ^b
5	17.87±0.21 ^a	3.38±0.02 ^f	3.41±0.01 ^c	5.29±0.05 ^a	6.70±0.22 ^{ab}
6	16.77±0.08 ^b	3.40±0.03 ^f	3.36±0.03 ^c	4.93±0.03 ^b	6.92±0.13 ^a
7	16.66±0.11 ^b	3.55±0.03 ^c	3.35±0.04 ^c	4.69±0.04 ^c	6.78±0.19 ^{ab}
8	16.75±0.13 ^b	3.59±0.05 ^b	3.58±0.05 ^b	4.66±0.10 ^c	6.87±0.17 ^{ab}
9	16.78±0.11 ^b	3.90±0.03 ^b	3.78±0.05 ^a	4.30±0.07 ^c	6.83±0.01 ^{ab}

2.1.4 茶样叶绿素组分及其含量

由图2可知，处理组7~9经200℃高温炒制容易导致叶绿素类物质的降解，不利于形成烘青的“三绿”特征。处理组1~3经100℃的相对低温炒制可以更多地保留叶绿素类物质，但相同炒制程度下，更长的炒制时间会导致脱镁叶绿素积累，而脱镁叶绿素通常被认为是导致茶叶褐变的主要原因之一。处理组4~6脱镁叶绿素含量相对较低，在一定程度上说明150℃的炒制温度有利于滚炒环节茶叶“保绿”；同时该温度处理下叶绿素a和叶绿素b含量较为稳定，其原因可能是氨基酸和还原糖在适宜水分含量下发生美拉德反应，美拉德反应产物抑制了叶绿素降解^[22]，这也符合150℃炒制温度下游离氨基酸和可溶性糖含量降低的实验结果。



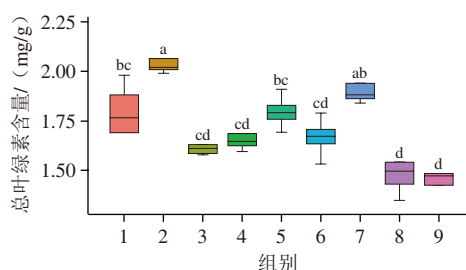
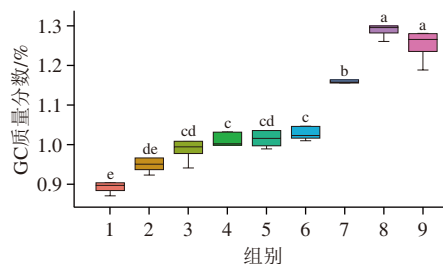
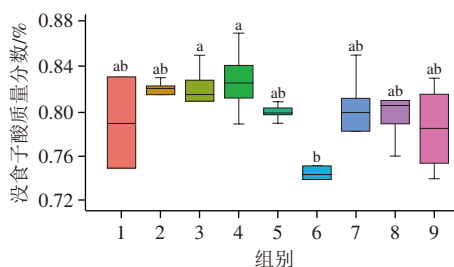
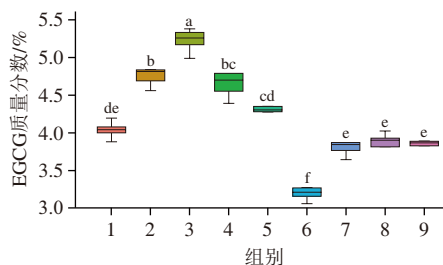
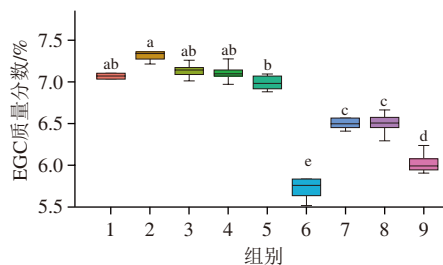
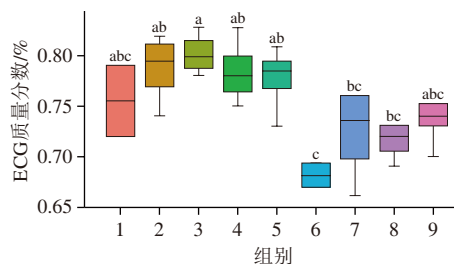
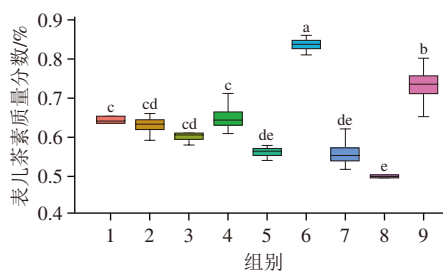
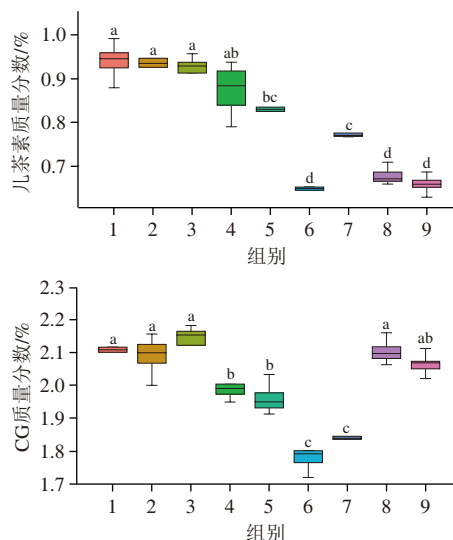


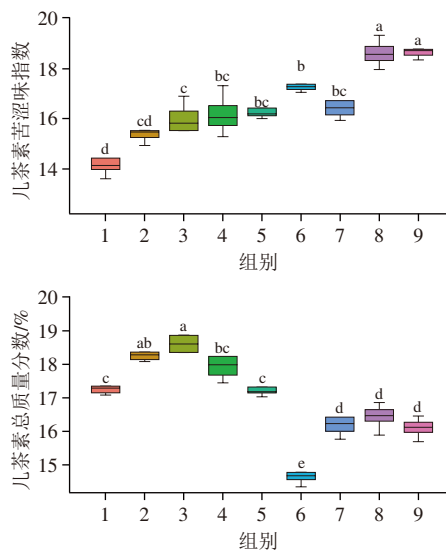
图2 炒烘结合工艺滚炒环节正交试验制得茶样叶绿素含量

Fig. 2 Chlorophyll contents in tea samples prepared in 9 OAD experiments

2.1.5 茶样中儿茶素及相关成分含量

茶叶炒制过程中,低温有利于儿茶素类物质的积累,温度升高容易促使儿茶素类物质分解,儿茶素组分发生的变化主要包括差向异构作用、水解作用、热聚合作用和热裂解作用等^[23]。由图3可知,滚炒工艺环节,儿茶素总量、表没食子儿茶素没食子酸酯(epigallocatechin gallate, EGCG)、表没食子儿茶素(epigallocatechin, EGC)、表儿茶素没食子酸酯(epicatechin gallate, ECG)含量在炒制过程中有随温度上升而下降的趋势。此外,主效应结果表明(表3),随温度上升,GC含量显著升高($P<0.05$)、儿茶素含量显著下降($P<0.05$),其原因可能是EGCG在高温下发生差向异构作用和热裂解作用^[24-25];同时EGC含量下降可能是由其本身与氨基酸在高温作用下氧化聚合或热裂解等反应引起的。200℃下,EGC还可能与1-O-没食子酰-β-D-葡萄糖(1-O-galloyl-β-D-glucose, β-G)参与结合形成EGCG有关,这也与200℃下EGCG含量趋于一致的实验结果相符^[26],且儿茶素或EGC分解的小分子物质与β-G结合都有可能引起GC含量上升。儿茶素苦涩味指数=(EGCG含量+ECG含量+EGC含量+GC含量)/(表儿茶素含量+儿茶素含量)^[27]。随着温度升高,儿茶素苦涩味指数随之升高,这一现象符合生产上高温加工容易造成茶汤苦涩的现象,与表2中200℃炒制处理降低茶汤品质、增加涩味的结果相符,表明较高的滚炒温度不利于烘青茶汤滋味的发展。





CG.儿茶素没食子酸酯 (catechin gallate)。
图3 炒烘结合工艺正交试验制得茶样儿茶素及相关成分含量
Fig.3 Contents of catechin and related component in tea samples prepared in 9 OAD experiments

2.1.6 PCA结果

为进一步确定烘青绿茶滚炒环节参数对产品品质的影响并确定最优参数，对32项烘青绿茶理化指标数据进行标准化处理后（使数据集数值处于-1~1之间）进行PCA，以累计贡献率大于85%为标准，提取5个PC（表5）。这5个PC的贡献率分别为35.30%、25.63%、12.07%、9.10%和7.96%，累计贡献率达90.06%，表明它们能够反映全部性状的大部分信息^[28-29]。

表5 PC贡献率及累计贡献率
Table 5 Contribution rates and cumulative contribution rates of PCs

PC	贡献率	累计贡献率
1	35.30	35.30
2	25.63	60.93
3	12.07	73.00
4	9.10	82.10
5	7.96	90.06

由PCA得到32个指标的特征向量矩阵（表6），构建出5个PC的评价函数。然后分别以5个PC的贡献率为权重，构建PC综合评价函数： $Z=0.353\ 0y_1+0.256\ 3y_2+0.120\ 7y_3+0.091\ 0y_4+0.079\ 6y_5$ 。

表6 5个PC对应的32个特征向量
Table 6 Thirty-two feature vectors corresponding to 5 PCs

指标	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
脱植醇叶绿素b	0.144 6	0.257 3	-0.031 4	0.041 2	-0.259 6
脱植醇叶绿素a	0.071 0	0.200 8	0.216 5	0.163 6	-0.226 6
叶黄素	-0.131 0	0.278 4	0.023 8	0.010 6	0.201 8
叶绿素b	-0.046 5	0.329 1	0.013 3	0.138 8	0.014 0
叶绿素a	-0.156 2	0.247 9	0.053 4	0.032 1	0.211 0
脱镁叶绿素b	-0.063 2	0.249 8	-0.094 6	0.092 2	-0.208 2
脱镁叶绿素a	-0.119 3	0.296 0	-0.095 4	-0.049 1	-0.093 5

续表6

指标	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
β -类胡萝卜素	-0.128 0	0.300 7	0.054 7	0.009 4	0.080 9
没食子酸	-0.264 2	-0.018 4	0.091 7	0.088 0	-0.227 0
GC	0.185 1	-0.125 3	-0.019 7	-0.000 3	-0.406 7
EGC	-0.273 1	0.065 9	0.085 8	-0.090 1	-0.083 3
儿茶素	-0.273 3	0.095 3	-0.007 8	-0.060 3	0.076 9
EGCG	-0.282 2	-0.077 1	0.076 9	0.021 3	-0.082 1
咖啡碱	0.257 6	0.023 0	-0.146 9	-0.156 7	0.098 0
表儿茶素	0.097 8	-0.035 4	-0.177 1	0.256 5	0.436 9
ECG	-0.281 4	-0.045 7	0.085 1	-0.061 9	-0.001 4
CG	-0.187 2	-0.155 7	-0.158 2	-0.250 2	-0.112 5
多酚	0.128 5	0.104 3	0.248 2	-0.260 8	0.045 9
游离氨基酸	-0.176 6	-0.188 5	-0.259 9	0.060 7	-0.119 2
可溶性糖	-0.156 0	-0.261 9	-0.095 9	0.136 3	-0.150 4
茶汤L*	0.097 3	-0.100 3	0.131 4	0.422 1	-0.189 5
茶汤a*	-0.116 8	-0.069 9	0.050 1	-0.395 8	0.053 3
茶汤b*	-0.051 1	-0.106 6	0.292 3	-0.403 5	0.017 0
干茶L*	-0.263 5	-0.078 0	-0.157 3	0.080 5	-0.091 3
干茶a*	-0.244 7	0.135 5	-0.179 9	-0.055 0	-0.095 6
干茶b*	-0.259 4	0.061 4	-0.196 8	0.135 0	-0.006 6
干茶外形	-0.055 4	-0.291 8	0.187 7	-0.033 2	0.059 6
干茶色泽	-0.137 6	-0.076 8	0.341 4	0.094 8	-0.013 4
汤色	0.106 8	0.241 3	-0.088 5	-0.220 8	-0.056 3
香气	0.109 2	0.136 4	0.255 8	-0.074 5	-0.375 4
滋味	-0.177 6	0.042 4	0.321 9	0.061 7	0.102 6
叶底	-0.035 9	-0.055 7	0.390 0	0.282 0	0.183 4

将各处理的5个PC代入综合评价函数，即得到综合评价结果（表7），并以其作为主效应分析评判标准进行分析，得到滚炒环节最佳参数组合为滚炒温度（ 150 ± 5 ）℃、投叶量2 kg、炒制后水分质量分数25%。

表7 滚炒参数优化正交试验分析结果
Table 7 Results of OAD experiments

组别	滚炒温度/℃	投叶量/kg	水分质量分数/%	综合评价
1	100±5	2	25	-0.27
2	100±5	3	20	-1.05
3	100±5	4	15	-2.66
4	150±5	2	20	-0.60
5	150±5	3	15	0.52
6	150±5	4	25	2.42
7	200±5	2	15	1.84
8	200±5	3	25	0.22
9	200±5	4	20	-0.43
K ₁	4.00	8.95	10.35	
K ₂	10.33	7.66	5.90	
K ₃	9.61	7.31	7.68	
k ₁	1.33	2.98	3.45	
k ₂	3.44	2.55	1.97	
k ₃	3.20	2.44	2.56	
R	1.87	-0.55	-0.89	

2.2 优化工艺与传统工艺产品品质对比分析

本研究对比分析增加滚炒环节的优化工艺样品与对照（传统工艺，未经滚炒做形处理）茶样品质差异。感官评价分析（表8）表明，优化工艺制得的茶样外形、香

表 8 最优工艺与对照工艺制得茶样感官审评结果
Table 8 Sensory evaluation results of tea samples prepared with and without optimized roller frying

组别	外形 (30%)		汤色 (10%)		香气 (25%)		滋味 (25%)		叶底 (10%)		总分
	评语	得分	评语	得分	评语	得分	评语	得分	评语	得分	
对照组	尚紧细, 条状, 尚匀整, 尚绿, 带白毫	88.7	尚绿明	87.8	嫩栗香, 较浓郁, 持久	91.3	尚浓略涩	82.7	绿明, 匀整, 调匀	91.3	88.1
优化组	尚紧细, 略曲, 匀整, 尚绿, 带白毫	90.0	尚绿明	87.5	嫩栗香, 浓郁, 持久	93.1	浓醇	87.1	绿明, 匀整, 调匀	93.0	90.3

气、滋味、叶底表现更优。由图4可知, 优化工艺的干茶匀整度、明亮度、润度、调匀度均更优, 但绿度和显毫度稍差于传统工艺样品。此外, 在香气品质方面, 优化工艺茶样在嫩香、栗香、浓度、持久度上更优; 滋味品质方面, 优化工艺样品滋味浓度更高, 苦度、涩度降低。感官评价总体结果表明, 优化的烘青工艺能有效提升产品综合感官品质。

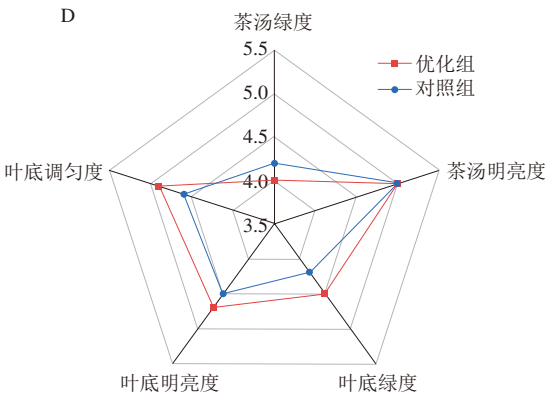
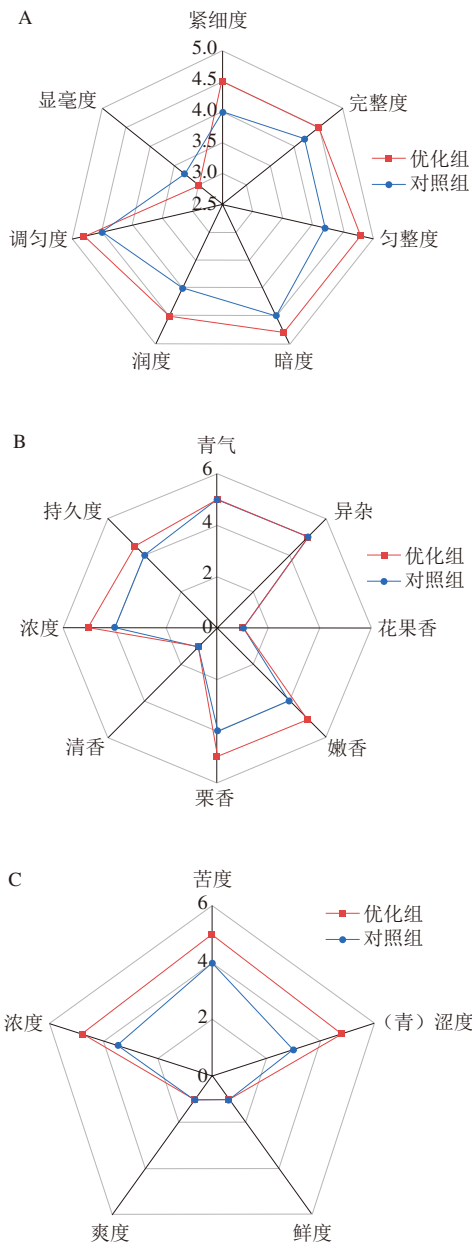
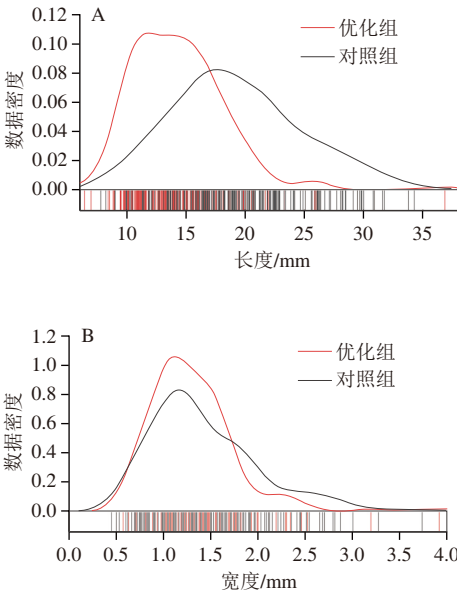


图 4 最优工艺与对照工艺制得茶样感官评价雷达图
Fig. 4 Radar maps of the sensory evaluation of tea samples prepared with and without optimized roller frying

为验证优化工艺茶样与传统工艺茶样的外形与色泽差异, 分别统计2个样品各200个干茶条的长度与宽度。由图5A、B可知, 相对于传统工艺茶样, 优化工艺茶样的茶条长度、宽度数值较小, 分布相对集中, 表明优化工艺茶样条索更紧结、匀整。干茶(茶粉)色差数据在显示在经过滚炒处理后, L^* 显著升高 ($P<0.05$), a^* 和 b^* 无显著差异(图5C)。以上结果表明, 滚炒处理优化工艺可以提升干茶外形紧结度、匀整度和亮度, 并且能保持干茶绿度。



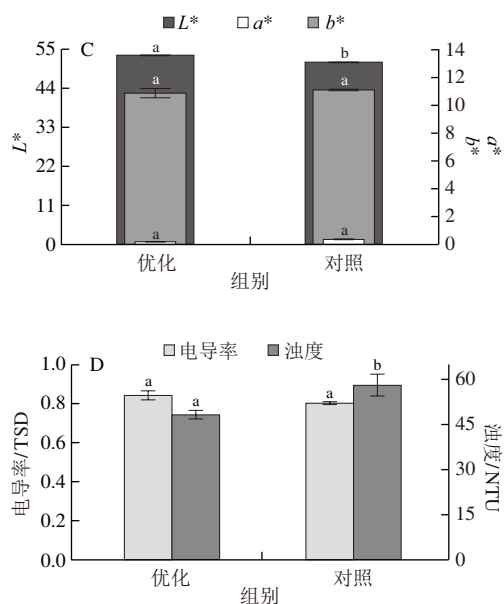


图5 最优工艺与对照工艺制得茶样长(A)、宽(B)分布、色差(C)、电导率及浊度(D)

Fig. 5 Length (A) and width (B) distribution, color parameters (C), electrical conductivity and turbidity (D) of tea samples prepared with and without optimized roller frying

优化工艺茶样与传统工艺茶样相比滋味湿度降低, 浓度提升。涩味物质可以和蛋白络合作用, 在模拟口腔温度37℃的情况下浑浊度会有所增加^[19-21], 通过牛上颌腺黏蛋白与茶汤涩味物质形成的络合物浊度可以判断茶汤的湿度, 由图5D可知, 优化工艺茶样的浊度显著低于传统工艺茶样 ($P < 0.05$), 表明优化工艺茶样湿度低于传统工艺茶样。茶汤电导率与茶汤的浓度呈现正相关, 电导率越大, 茶汤越浓^[30]。优化工艺茶样的电导率略高于传统工艺茶样, 即优化工艺茶样茶汤的浓度略高于传统工艺茶样。以上结果与感官评价结果一致。

3 结论

本研究表明, 优化后的烘青工艺相较于对照的传统工艺, 在烘青产品的外形、香气、滋味、叶底等方面均有一定的提升。在提升烘青干茶外形品质方面, 增加滚炒可以改善烘青外形, 使其条索更匀整、更紧细。干茶色泽品质形成方面, 相关研究^[31-32]认为加工过程中100℃及以下的相对低温是形成绿茶“三绿”的良好措施, 而在中高温条件下的长时间滚炒会引起叶绿素降解、干茶绿度下降等问题。本研究发现, 在温度150℃、投叶量2 kg、炒制后水分质量分数25%的炒制条件下, 干茶绿度变化不明显, 这可能是由于在优化的工艺中, 较低的投叶量减缓了湿热作用对于叶绿素降解的影响^[33], 同时在适当温度与水分含量下滚炒, 茶叶中的游离氨基酸和

可溶性糖类成分被消耗, 发生美拉德反应, 其产物会抑制叶绿素的降解、延缓干茶褐变, 进而保护干茶绿度。烘青内质品质形成方面, 其成分变化相对更为复杂, 增加滚炒工艺可以适当降低烘青茶茶汤涩味, 增加其茶汤浓度, 对茶汤色泽影响不明显。陈义^[34]、张铭铭^[35]等认为, 在做形过程投叶量大会影响茶叶制品水汽挥发程度, 使最终茶产品在感官评价时带有水闷味, 本研究正交试验过程中发现, 4 kg投叶量处理时香气较低闷, 较大的滚炒投叶量不利于其香气品质形成。综上所述, 认为在烘青绿茶工艺中通过滚炒做形环节有利于生产高品质烘青产品, 工艺参数为温度150℃、投叶量2 kg、炒制后水分质量分数25%的滚筒炒制条件最适宜实验地烘青绿茶的加工, 既可以保证绿茶色泽品质, 又可以发展香气、提升滋味, 有利于提高烘青绿茶综合品质, 进而提高烘青绿茶产品的综合效益。

参考文献:

- [1] 尤秋爽, 石亚丽, 朱荫, 等. 不同加工工艺对绿茶关键呈香成分的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(8): 194-200. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220718-204.
- [2] 汤晨. 甲级烘青绿茶等级标志物的质谱鉴定与风味表征[D]. 北京: 北京工商大学, 2023: 1-11. DOI:10.26934/d.cnki.gbgssu.2021.000077.
- [3] NAGAO T, HASE T, TOKIMITSE I. A green tea extract high in catechins reduces body fat and cardiovascular risks in humans[J]. Obesity, 2007, 15: 1473-1483.
- [4] SU X G, DUAN J, JIANG Y M, et al. Polyphenolic profile and antioxidant activities of oolong tea infusion under various steeping conditions[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2007, 8: 1196-1205.
- [5] AFZAL M, SAFER A M, MENON M. Green tea polyphenols and their potential role in health and disease[J]. Inflammopharmacology, 2015, 23(4): 151-161. DOI:10.1007/s10787-015-0236-1.
- [6] OHISHI T, GOTO S, MONIRA P, et al. Anti-inflammatory action of green tea[J]. Anti-Inflammatory and Anti-Allergy Agents in Medicinal Chemistry, 2016, 15(2): 74-90. DOI:10.2174/1871523015666160915154443.
- [7] 张悦, 朱荫, 吕海鹏, 等. 不同海拔烘青绿茶的品质成分分析[J]. 食品科学, 2022, 43(2): 2257-2268. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210114-152.
- [8] 苏秀平. 福州茉莉花茶产业发展研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015: 12-15.
- [9] 齐忠焰. 烘青绿茶精制工艺技术要点[J]. 中国茶叶加工, 2005(1): 29-32.
- [10] 杨志强, 薛晓霆, 王明珠. 春夏秋冬不同茶树品种烘青绿茶品质分析[J]. 现代农业科技, 2019(10): 210-212.
- [11] 邱安冬, 武世华, 陈玉琼, 等. 不同做形方式对湖北条形绿茶品质的影响[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(6): 195-202. DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.06.024.
- [12] 黎娜, 唐睿, 钟兴刚, 等. 变温滚炒与高温足干提香结合对秋季炒青绿茶品质的影响[J]. 茶叶通讯, 2023, 50(3): 344-351.
- [13] 倪德江, 陈玉琼, 袁芳亭, 等. 绿针茶加工过程中叶绿素的变化与色泽品质的形成[J]. 华中农业大学学报, 1996(6): 96-99.
- [14] 董晨, 何畅, 朱珺语, 等. 不同做形方式对鄂茶10号优质绿茶品质的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2020, 35(1): 139-148.

- [15] 赵瑶, 封雯, 贺勇, 等. 针形名优绿茶固形机的研制与固形工艺优化[J]. 华中农业大学学报, 2014, 33(2): 116-122. DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2014.02.032.
- [16] YU X L, LI Y C, HE C, et al. Nonvolatile metabolism in postharvest tea (*Camellia sinensis* L.) leaves: effects of different withering treatments on nonvolatile metabolites, gene expression levels, and enzyme activity[J]. Food Chemistry, 2020, 327: 126992. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.126992.
- [17] 张正竹. 茶叶生物化学实验教程[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009: 44-46.
- [18] 虞昕磊. 鲜叶摊放方式对绿茶色、香、味品质成分代谢的影响研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020: 29-30. DOI:10.27158/d.cnki.ghznu.2020.000041.
- [19] WEN M C, HAN Z S, CUI Y Q, et al. Identification of 4-*O*-*p*-coumaroylquinic acid as astringent compound of Keemun black tea by efficient integrated approaches of mass spectrometry, turbidity analysis and sensory evaluation[J]. Food Chemistry, 2022, 368: 130803. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.130803.
- [20] YE Q Q, CHEN G S, PAN W C, et al. A Predictive model for astringency based on *in vitro* interactions between salivary proteins and (–)-epigallocatechin gallate[J]. Food Chemistry, 2021, 340: 127845. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.127845.
- [21] 刘艳艳, 许勇泉, 陈建新, 等. 冲泡用水中 Mg^{2+} 对红茶茶汤滋味品质的影响及机制[J]. 食品科学, 2020, 41(18): 14-20. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190723-294.
- [22] KUMAR R, RAJAMANICKAM R, NADANASABAPATHI S. Effect of Maillard reaction products (MRP) on chlorophyll stability in green peas[J]. Food and Nutrition Sciences, 2013, 4(9): 879-883. DOI:10.4236/fns.2013.49115.
- [23] 何雪军, 王进, 陆国栋, 等. 基于特征尺寸及局部极值点的茶鲜叶方向识别[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 233-238.
- [24] SETO R, NAKAMURA H, NANJO F, et al. Preparation of epimers of tea catechins by heat treatment[J]. Bioscience, Biotechnology and Biochemistry, 1997, 61(9): 1434-1439. DOI:10.1271/bbb.61.1434.
- [25] CHEN Z Y, ZHU Q Y, TSANG D, et al. Degradation of green tea catechins in tea drinks[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(1): 477-482. DOI:10.1021/jf000877h.
- [26] 夏涛, 高丽萍, 刘亚军, 等. 茶树酯型儿茶素生物合成及水解途径研究进展[J]. 中国农业科学, 2013, 46(11): 2307-2320.
- [27] 施兆鹏, 刘仲华. 夏茶苦涩味化学实质的数学模型探讨[J]. 茶叶科学, 1987, 7(2): 7-12.
- [28] 白雪梅, 赵松山. 对主成分分析综合评价方法若干问题的探讨[J]. 统计研究, 1995(6): 47-51. DOI:10.19343/j.cnki.11-1302/c.1995.06.012.
- [29] 李靖华, 郭耀煌. 主成分分析用于多指标评价的方法研究: 主成分评价[J]. 管理工程学报, 2002(1): 39-43.
- [30] 曹学娇, 兰亚琼, 徐为民, 等. 不同饮用水对惠明茶茶汤品质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(3): 68-76. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020040080.
- [31] 梁名志, 浦绍柳, 王琳. 大叶茶毛尖型名优绿茶做形及干燥技术研究[J]. 中国茶叶加工, 2001(1): 19-21. DOI:10.15905/j.cnki.33-1157/ts.2001.01.007.
- [32] 张善明, 冉维, 倪德江, 等. 机制针芽形名优绿茶做形抛光工艺研究[J]. 中国茶叶, 2020(8): 41-47.
- [33] 伍洵. 绿茶炒制过程品质变化及连续做形机参数优化研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020: 22-45. DOI:10.27684/d.cnki.gxndx.2020.003370.
- [34] 陈义. 机制信阳毛尖秋茶加工工艺研究[J]. 河南农业科学, 2016, 45(3): 148-151. DOI:10.15933/j.cnki.1004-3268.2016.03.030.
- [35] 张铭铭, 江用文, 袁海波, 等. 绿茶栗香的形成及工艺研究进展[J]. 中国农学通报, 2020, 36(2): 129-137.