

康育鑫, 陈永快, 肖两德, 等. 安溪铁观音加工过程中影响色、香、味的成分变化 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(12): 291–298. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021090283

KANG Yuxin, CHEN Yongkuai, XIAO Liangde, et al. Changes of Components Affecting Color, Aroma and Taste during the Processing of Anxi Tieguanyin[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(12): 291–298. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021090283

· 分析检测 ·

安溪铁观音加工过程中影响色、香、味的成分变化

康育鑫¹, 陈永快¹, 肖两德², 廖水兰¹, 赵 健^{1,*}

(1.福建省农业科学院数字农业研究所, 福建福州 350003;

2.福建知茶科技有限公司, 福建泉州 362000)

摘要: 研究不同加工工序对安溪铁观音香气及品质成分的影响, 以期改进铁观音加工工艺及进一步开发利用铁观音香气及品质成分提供一定科学依据。本文按照安溪铁观音制作工艺进行加工, 研究了香气成分、茶多酚、咖啡碱、游离氨基酸、黄酮、茶色素等铁观音重要内含成分的变化, 发现铁观音加工过程中重要内含成分产生明显差异, 茶多酚、咖啡碱含量总体呈现下降趋势, 整个加工过程茶多酚含量下降了 68.52%, 咖啡碱含量下降了 47.74%, 而氨基酸、黄酮类含量总体呈现上升趋势, 整个加工过程氨基酸含量上升了 59.67%, 黄酮类含量上升了 1.62 倍, 茶色素含量无明显变化规律。其中, 在加工过程中杀青工序对铁观音色香味成分影响最大, 经过杀青工序之后茶多酚含量下降了 40.66%, 黄酮类含量显著增加到 6.93 mg/g, 是关键加工工序节点。此外, 晒青、摇青及凉青也是影响铁观音香气及品质成分的重要工序。本文为安溪铁观音品质提升及工艺优化提供了科学依据。

关键词: 铁观音, 加工工序, 香气, 品质成分

中图分类号: TS272

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)12-0291-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021090283

本文网刊:



Changes of Components Affecting Color, Aroma and Taste during the Processing of Anxi Tieguanyin

KANG Yuxin¹, CHEN Yongkuai¹, XIAO Liangde², LIAO Shuilan¹, ZHAO Jian^{1,*}

(1. Institute of Digital Agriculture, FAAS, Fuzhou 350003, China;

2. Fujian Zhicha Science Technology Co., Ltd., Quanzhou 362000, China)

Abstract: The effects of different processing procedures on the aroma and quality components of Anxi Tieguanyin were studied, to provide a certain scientific basis for improving further development of Tieguanyin. In this study, Tieguanyin was processed according to the production process of Anxi Tieguanyin. The changes of aroma components, tea polyphenols, caffeine, free amino acids, flavonoids, tea pigments and other important internal components of Tieguanyin were investigated. Significant differences of the component contents were observed in different processing stages. The content of tea polyphenols and caffeine showed an overall downward trend. The content of tea polyphenols and caffeine were decreased by 68.52% and 47.74% during the entire processing process, while the content of amino acids and flavonoids showed an overall upward trend. The amino acids content during the entire processing process was increased by 59.67% and the flavonoids content was increased by 1.62 times. The content of tea pigments showed no obvious changes. Among them, the Shaping process had the greatest impact on the color and fragrance components of Tieguanyin during the processing. After the Shaping process, the content of tea polyphenols was decreased by 40.66%, and the content of

收稿日期: 2021-09-24

基金项目: “5511”协同创新工程“福建省数字农业协同创新中心”项目(XTCXGC2021021); “5511”协同创新工程“福建省特色农业产业数字化关键技术”项目(XTCXGC2021015); 福建省智慧农业科技创新团队项目(CXTD2021013-1)。

作者简介: 康育鑫(1987-), 男, 硕士, 研究方向: 农产品加工自动化、智能化、信息化, E-mail: kangyuxin369@163.com。

* 通信作者: 赵健(1973-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 数字农业与数字乡村应用技术研究与应用示范工作, E-mail: zhaojian@faas.cn。

flavonoids significantly was increased to 6.93 mg/g, which was the key processing node. In addition, Shaiqing, Yaoqing and Liangqing were also important processes that affected the aroma and quality of Tieguanyin. This article provided scientific basis for the quality improvement and process optimization of Anxi Tieguanyin.

Key words: Tieguanyin; processing procedure; aroma; quality components

乌龙茶为中国特有的茶类,铁观音是最独特的乌龙茶品种之一。安溪铁观音以其与众不同的质量特点,标新立异的制作工艺^[1-3],源远流长的深厚内涵和富含营养功能成分获得饮茶爱好者的肯定。安溪铁观音不仅兼具绿茶的清香和红茶的醇厚,也富含茶多酚、茶氨酸、咖啡碱、茶多糖、黄酮类、茶色素等多种功能营养成分^[4]。药理研究表明,茶多酚具有抗氧化、抗动脉粥样硬化、抗龋齿及降血脂减肥醒酒等多种功效^[5-9]。咖啡碱能有效缓解疲惫,防治神经衰弱,激发中枢神经起到提神醒脑作用^[10]。茶氨酸具有保护神经系统、缓解人体疲劳及防治“三高”等功效^[11]。此外,茶色素可以抗氧化、抗炎症及预防癌症等功效作用^[12-13]。铁观音茶的香气成分也具有抗肿瘤作用,可促进人肺腺癌细胞株 A549 的凋亡^[14]。香气成分也是决定铁观音品质的关键因素之一,由不同酯类、醇类、烯类等芳香化合物以一定比例溶度组成特有的香型,对铁观音风味、工艺及产业发展等具有重要作用^[15-16]。铁观音作为乌龙茶中独具一格的佼佼者,茶叶香气及品质成分对铁观音品质和功效至关重要,具有重要研究价值和意义^[17]。

近年来,针对乌龙茶加工过程中的色香味成分的变化,开展了多方面的研究工作,如张珍珍等^[18]研究 3 种清香型铁观音挥发性成分及香味特征,发现 3 种铁观音中主要风味成分相同,均为癸醛、反式-橙花叔醇、苯乙醛、正己醛和吡嗪;嵇伟彬等^[19]对几种乌龙茶香气成分比较研究,发现反-橙花叔醇、吡嗪和 α -法尼烯是闽南清香型铁观音的主要香气成分;钟秋生等^[20]对九龙袍品种乌龙茶加工过程中主要生化成分的变化进行研究,发现在乌龙茶初制过程中,各主要内含成分均发生不同程度的变化,水浸出物、茶多酚和咖啡碱含量均表现出降低趋势;何加兴等^[21]研究黄金茶 1 号夏秋乌龙茶加工过程化学成分变化与品质形成分析,发现其中 α -法尼烯、反式-0-法尼烯和(Z, E)- α -法尼烯、芳樟醇、反式橙花叔醇、己酸己酯以及吡嗪占到毛茶香气总量的 69% 以上,是黄金茶 1 号夏秋乌龙茶香气的主要组成部分;黄欢等^[20-22]研究发现加工过程中铁观音的咖啡碱、茶多酚、游离氨基酸含量呈规律性变化。此外,林红等^[23]研究铁观音乌龙茶的营养成分和保健功效得出铁观音富含茶多酚、茶氨酸、茶色素等品质成分,具有抗氧化、抗肿瘤、降血脂等功效。安溪铁观音所含的有益功能成分,明显高于其他茶类^[24]。而目前未见文献对铁观音加工过程中影响色、香、味的成分的变化规律进行系统研究。本论文分析了铁观音加工过程中不同加工工序的香气成分数量变化及关键香气成分

变化情况,并对其品质成分变化规律进行研究,以期改进铁观音加工工艺及进一步开发利用铁观音香气及品质成分提供一定科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

本试验所用铁观音鲜叶原料来源福建省泉州市安溪秉怀农场。采摘春季铁观音茶叶,按照安溪乌龙茶制作工艺进行加工。

GCMS-TQ8040 三重四极杆型气相色谱-质谱联用仪 岛津公司; SPME 萃取头(50/30 μ m DVB/CAR/PDMS) 上海安谱科学仪器有限公司; 顶空萃取瓶

Agilent 公司; 6CWT-105 杀青机、JY-6CHZ-7B 烘干机、JY-6CRT-55B 揉捻机 佳友机械公司。

1.2 工艺流程

安溪铁观音制作工艺: 茶青→晒青→摇青 1→凉青 1→摇青 2→凉青 2→摇青 3→凉青 3→杀青→揉捻→包揉 1→包揉 2→包揉 3→烘干→毛茶。

操作要点: 取同一批铁观音不同加工工序的茶叶,用锡箔纸包好,贮存在液氮中。采集春季铁观音茶叶,首先将采摘后的铁观音茶叶晒青 20 min,其次采用三摇三凉进行做青,其中摇青 1 时长为 4 min,凉青 1 时长为 1 h,摇青 2 时长为 7 min,凉青 2 时长为 2 h,摇青 3 时长为 11 min,凉青 3 时长为 10 h(摇青机转速均为 28 r/min),再次在 270~290 $^{\circ}$ C 的温度下用杀青机杀青 3~4 min,然后进行揉捻包揉塑形,先用揉捻机揉捻时长为 5 min,再通过“茶布巾包揉法”,运用揉、压、搓、抓等手法趁热包揉重复 3 次,最后放入茶叶烘干机,设定 85 $^{\circ}$ C 烘焙至完全干燥,待冷却后进行包装。分别测定品质成分茶多酚、咖啡碱、茶氨酸、黄酮类、茶色素含量,每一个工序取样品重复测定 3 次,计算平均值。

1.3 测定方法

1.3.1 香气成分测定方法

1.3.1.1 HS-SPME 条件 首先将 SPME 萃取头放入气相色谱仪进样口,于 250 $^{\circ}$ C 温度条件下老化 30 min 备用。其次称取 3.0 g 铁观音样品加入 20 mL 顶空萃取瓶中,加盖密封。置于 70 $^{\circ}$ C 水浴锅 60 min。最后将老化完成的 SPME 萃取头插入萃取瓶顶空部分,推出纤维头吸附 30 min。

1.3.1.2 GC-MS 条件 参考陈丽华等^[25]的香气成分检测方法,吸附完成后将 SPME 萃取头取出,放入气相色谱-质谱联用仪进样口解吸 3 min,启动 GC 仪进行铁观音香气成分测定。每个样品平行测定 3 次。

GC 条件: DB-5MS 气相毛细管柱(30 m $\times$ 0.25 mm,

0.25 μm);载气为纯氦气(99.99%),分流进样,流速 1.0 mL/min;进样口温度 250 $^{\circ}\text{C}$ 。程序升温,起始柱温 40 $^{\circ}\text{C}$ 保持 2 min,以 4 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度升温到 170 $^{\circ}\text{C}$ 保持 1 min,最后以 20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度升温到 260 $^{\circ}\text{C}$ 保持 2 min。

MS 条件: GC-MS 接口温度 260 $^{\circ}\text{C}$;离子源温度 200 $^{\circ}\text{C}$;四极杆温度 150 $^{\circ}\text{C}$;EI 电离能量为 70 eV;全质谱扫描模式,扫描质量范围 40~600 Amu。

1.3.1.3 定性定量方法 根据标准样品(C9~C22 正构烷烃)的色谱保留时间,计算样品各香气成分的保留指数,对比标准谱库中的保留指数值以及质谱信息对各香气成分进行定性分析。各香气成分的物质含量以相对含量表示。扫描图谱与 NIST 谱库对照进行鉴定,采用峰面积归一化法计算出各香气成分的相对含量。

1.3.2 品质成分测定方法 茶多酚总量采用福林酚比色法(GB/T 8313-2018)^[26];游离氨基酸总量采用茚三丙酮比色法(GB/T 8314-2013)^[27];咖啡碱采用紫外分光光度法(GB/T 8312-2013);黄酮采用紫外分光光度法^[28];叶绿素采用丙酮-乙醇混合液提取测定^[29];茶黄素、茶红素采用萃取比色法^[30]。

1.4 数据处理

采用 Excel 处理试验数据并作图,对各处理结果运用 DPS 软件进行方差分析,数据采取三次重复,结果以平均数 $\pm$ 标准差形式表示。

2 结果与分析

2.1 铁观音加工过程中香气成分数量的变化情况

本论文采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术分析鉴定铁观音加工过程中的香气成分。采用峰面积归一化法计算得到的挥发性香气组分的含量为相对含量,用相对含量代替绝对含量。对各组分进行分析,不同加工工序铁观音香气成分数量的变化情况具体见表 1。

表 1 铁观音加工过程中香气成分数量的变化情况
Table 1 Changes in the quantity of aroma components during the processing of Tieguanyin

工序	香气成分数量(个)	工序	香气成分数量(个)
茶青	46	凉青3	49
晒青	48	杀青	51
摇青1	47	揉捻	54
凉青1	48	包揉1	45
摇青2	51	包揉2	55
凉青2	49	包揉3	58
摇青3	48	毛茶	58

由表 1 可知,在 14 道铁观音茶叶加工工序中香气成分总数量总体呈现出略有增加趋势,其中,在晒青、摇青、凉青工序过程中香气成分总数量变化不明显,可能是由于这些工序对茶青香气成分的释放影响不大,在杀青工序之后香气成分总数量有所增加,可

能与杀青过程高温有关,揉捻、包揉过程中香气成分总数量逐渐增加,可能是由于揉捻、包揉过程中较强的物理摩擦压力导致茶叶细胞破裂,产生新的香气成分。

2.2 铁观音加工过程中关键香气成分变化情况

采用峰面积归一化法计算得到的挥发性香气组分的含量为相对含量,用相对含量代替绝对含量,鉴定出 14 种关键香气成分,相对含量从大到小分别为芳樟醇、(E)-3-己烯-1-醇乙酸酯、水杨酸甲酯、香叶醇、2-甲基丁酸-3-己烯醇酯、(Z)-己酸-3-己烯酯、2-己烯醛、叶醇、Z,Z-3-己烯酸-3-己烯酯、顺- α,α -5-三甲基-5-乙基四氢化呋喃-2-甲醇、 α -法呢烯、反-橙花叔醇、吲哚。铁观音加工过程中不同加工工序的关键香气成分变化情况如表 2 所示。不同加工工序芳樟醇相对含量差异较明显,以茶青最高,达 24.02%,杀青最低仅为 3.04%,做青过程含量较高,包揉过程含量快速上升,其中包揉 3 比杀青增长了 1.61 倍;不同加工工序(E)-3-己烯-1-醇乙酸酯相对含量变化明显,以摇青 1 相对含量最高为 22.44%,凉青 2 最低为 7.95%,做青过程中呈现出一定周期性变化,而从做青之后均未检测出;不同加工工序水杨酸甲酯相对含量以凉青 1 最高,相对含量为 23.54%,杀青最低 1.54%,整个杀青过程下降了 53.89%,杀青之前均产生较明显的差异,而杀青之后差异不明显,毛茶中相对含量为 4.27% 比烘焙之前增长了 30.18%;不同加工工序香叶醇相对含量表现为,凉青 1 相对含量最高,达到 10.71%,杀青最低为 1.25%,做青过程从摇青 1 到摇青 2 差异不显著($P>0.05$),揉捻到包揉 2 也差异不显著($P>0.05$),毛茶中相对含量为 3.35%,比烘焙之前增长了 66.67%;不同加工工序 2-甲基丁酸-3-己烯醇酯相对含量为摇青 2 相对含量最高,高达 6.84%,摇青 3 最低,仅仅为 0.06%,从杀青之后差异不显著($P>0.05$);不同加工工序(Z)-己酸-3-己烯酯相对含量存在一定差异,摇青 2 相对含量最高为 12.31%,包揉 3 最低 1.65%,做青过程相对含量稳定在 3.83%~12.31%,杀青过程下降了 17.23%,烘干过程上升了 12.12%;而不同加工工序 2-己烯醛、叶醇和 Z,Z-3-己烯酸-3-己烯酯相对含量表现为三个香气成分相对含量较低,均稳定在 0.03%~2.31%,而且从摇青 3 开始均未检测出;不同加工工序顺- α,α -5-三甲基-5-乙基四氢化呋喃-2-甲醇相对含量在晒青过程中下降了,从晒青到凉青 1 有所上升,之后从摇青 2 到揉捻逐渐下降,此后从包揉 1 到毛茶逐渐上升;不同加工工序 α -法呢烯相对含量差异明显,从茶青到凉青 2 逐渐上升,之后开始下降杀青过程快速上升,此后呈现出整体下降趋势;不同加工工序 β -石竹烯相对含量表现为晒青过程下降了 43.36%,从晒青到凉青 1 逐渐上升,凉青 1 到凉青 3 开始逐渐下降,之后从摇青 3 到毛茶相对含量差异不显著,整个加工过程中相对含量较低,稳定在 0.14%~1.27%;不同

表 2 铁观音加工过程中关键香气成分的变化情况

Table 2 Changes of key aroma components during the processing of Tieguanyin

序号	化合物名称	保留时间(min)	不同加工工序关键香气成分相对含量(%)														香气描述
			茶青	晒青	摇青1	凉青1	摇青2	凉青2	摇青3	凉青3	杀青	揉捻	包揉1	包揉2	包揉3	毛茶	
1	芳樟醇	15.54	24.02±0.04 ^a	20.55±0.17 ^b	19.59±0.12 ^c	18.54±0.08 ^d	15.97±0.18 ^e	16.80±0.22 ^f	14.2±0.28 ^g	6.65±0.23 ^h	3.04±0.23 ^h	5.95±0.25 ⁱ	5.32±0.26 ^j	6.33±0.24 ^j	7.93±0.14 ^k	10.19±0.17 ^k	铃兰花香
2	(E)-3-己烯-1-醇乙酸酯	11.94	21.38±0.19 ^b	19.45±0.23 ^c	22.44±0.20 ^d	15.12±0.17 ^e	17.65±0.19 ^f	7.95±0.16 ^g	11.25±0.18 ^h	—	—	—	—	—	—	—	花香
3	水杨酸甲酯	18.95	19.25±0.24 ^a	20.31±0.19 ^b	18.57±0.24 ^c	23.54±0.19 ^d	13.06±0.19 ^e	14.60±0.22 ^f	9.80±0.22 ^g	3.34±0.17 ^h	1.54±0.20 ^h	2.29±0.18 ⁱ	3.25±0.23 ⁱ	2.38±0.11 ^j	3.28±0.21 ^j	4.27±0.19 ^k	冬青油香
4	香叶醇	20.97	6.99±0.18 ^a	7.65±0.21 ^b	7.12±0.21 ^c	10.71±0.22 ^d	6.62±0.16 ^e	7.03±0.16 ^f	2.74±0.17 ^g	1.26±0.14 ^h	1.25±0.19 ^h	2.00±0.17 ⁱ	2.68±0.20 ⁱ	1.84±0.15 ^j	2.01±0.18 ^j	3.35±0.19 ^k	玫瑰花香
5	2-甲基丁酸-3-己烯醇酯	18.6	3.93±0.14 ^a	3.62±0.21 ^d	4.62±0.17 ^b	3.23±0.18 ^c	6.84±0.19 ^d	4.44±0.16 ^e	0.06±0.02 ^f	1.73±0.13 ^g	0.31±0.12 ^h	0.72±0.10 ^h	0.36±0.15 ^h	0.41±0.10 ⁱ	0.36±0.18 ⁱ	0.38±0.14 ^j	青香、果香
6	(Z)-己酸-3-己烯酯	25.23	3.76±0.21 ^f	3.87±0.16 ^f	6.96±0.16 ^d	5.33±0.16 ^e	12.31±0.18 ^f	9.60±0.19 ^g	10.75±0.15 ^h	3.83±0.16 ^g	3.17±0.22 ^g	3.04±0.19 ^g	2.25±0.21 ^h	2.36±0.23 ^h	1.65±0.14 ⁱ	1.85±0.18 ⁱ	/
7	2-己烯醛	6.53	2.31±0.16 ^f	0.07±0.01 ^f	0.04±0.02 ^f	0.06±0.02 ^f	1.15±0.16 ^g	0.03±0.02 ^f	—	—	—	—	—	—	—	—	/
8	叶醇	6.65	1.36±0.15 ^f	1.06±0.17 ^g	0.93±0.18 ^{bc}	0.57±0.17 ^h	0.69±0.15 ^{cd}	0.66±0.14 ^{cd}	—	—	—	—	—	—	—	—	青香、绿叶香
9	Z,Z-3-己烯酸-3-己烯酯	25.35	1.24±0.14 ^h	0.82±0.14 ^f	1.05±0.17 ^{bc}	0.57±0.14 ^h	1.72±0.14 ^h	0.03±0.01 ^e	—	—	—	—	—	—	—	—	薄荷油香味
10	顺- α , α -5-三甲基-5-乙基四氢吡喃-2-甲醇	14.9	1.23±0.15 ^b	0.74±0.14 ^c	1.15±0.14 ^b	1.13±0.14 ^b	1.47±0.19 ^a	1.06±0.16 ^b	0.52±0.15 ^{cd}	0.23±0.12 ^e	0.13±0.11 ^e	0.50±0.17 ^{cd}	0.24±0.15 ^e	0.32±0.15 ^{bc}	0.58±0.12 ^{cd}	1.08±0.15 ^b	/
11	α -法呢烯	29.13	1.16±0.15 ^f	1.81±0.17 ^b	0.55±0.17 ^h	0.75±0.16 ^g	1.65±0.17 ^b	2.60±0.19 ^g	2.57±0.16 ^g	0.03±0.01 ^f	15.81±0.14 ^h	11.73±0.15 ⁱ	16.34±0.12 ^a	12.37±0.14 ^d	14.38±0.15 ^e	11.04±0.16 ^f	清香、药香
12	β -石竹烯	26.49	1.13±0.14 ^h	0.64±0.16 ^g	0.82±0.14 ^h	1.27±0.15 ^g	0.76±0.16 ^g	0.64±0.19 ^g	0.35±0.15 ^h	0.14±0.08 ^h	0.17±0.09 ^g	0.26±0.15 ^h	0.22±0.11 ^h	0.23±0.11 ^h	0.24±0.14 ^h	0.27±0.16 ^h	丁香
13	反-橙花叔醇	30.829	0.32±0.11 ^h	0.39±0.10 ^h	0.69±0.11 ^h	4.1±0.12 ⁱ	7.75±0.09 ^b	1.41±0.08 ^h	7.01±0.10 ⁱ	17.39±0.08 ^h	29.43±0.09 ^a	18.49±0.12 ^a	24.56±0.09 ^b	19.51±0.08 ^b	17.18±0.09 ^c	14.74±0.09 ^c	橙花香
14	吲哚	22.506	0.06±0.01 ^h	0.13±0.06 ⁱ	1.15±0.04 ^d	1.54±0.08 ^d	4.59±0.08 ^h	1.12±0.09 ^h	4.02±0.07 ^h	4.17±0.07 ^h	19.47±0.09 ^b	18.87±0.12 ^c	18.52±0.11 ^d	19.64±0.12 ^c	17.41±0.13 ^c	14.36±0.13 ^f	樟脑味

注: 同行数据后不同字母表示差异显著($P<0.05$); 气味描述由相关文献[31]得到。

加工工序反-橙花叔醇相对含量从茶青到摇青 1 逐渐上升, 杀青过程显著上升了 69.24%($P<0.05$), 之后包揉 1 到毛茶完成工序逐渐下降; 而不同加工工序吲哚相对含量从茶青到摇青 2 逐渐上升, 之后凉青 2 快速下降了 75.60%, 摇青 3 到杀青后相对含量呈现上升, 揉捻到毛茶工序过程呈现下降趋势。

在 14 道铁观音茶叶加工工序中, 铁观音的关键香气成分 α -法呢烯、反-橙花叔醇、吲哚总体呈现出上升趋势, 相对含量显著增加; 芳樟醇、水杨酸甲酯、香叶醇、2-甲基丁酸-3-己烯醇酯、(Z)-己酸-3-己烯酯、甲基-5-乙基四氢吡喃-2-甲醇、 β -石竹烯在加工过程中相对含量呈现整体下降趋势; (E)-3-己烯-1-醇乙酸酯、2-己烯醛、叶醇、Z,Z-3-己烯酸-3-己烯酯在加工过程中相对含量逐渐下降, 在摇青、凉青工序之后香气成分未检出。因此, 本研究中的铁观音加工工艺能明显增加关键香气成分的相对含量, 提升铁观音的香气品质。

2.3 铁观音加工过程中茶多酚含量变化情况

由图 1 可知, 在 14 道铁观音茶叶加工工序中茶多酚含量总体呈现为下降趋势, 其中摇青 3 和杀青过程茶多酚含量下降较快。晒青过程中茶多酚含量相对于茶青下降了 42.89%, 做青过程中从摇青 1 到凉青 3 茶多酚含量变化幅度波动相对较大, 特别是摇青 3 相对于凉青 2 变化幅度最大, 下降了 47.38%, 杀青工序茶多酚含量下降了 40.66%, 从揉捻到毛茶茶多酚含量基本变化不大, 整个过程茶多酚下降了 68.52%, 综上所述, 铁观音加工过程中茶多酚含量呈现下降趋势, 其中摇青、凉青及杀青工序是铁观音茶多酚的关键加工工序节点。

2.4 铁观音加工过程中咖啡碱含量变化情况

由图 2 可知, 在 14 道铁观音茶叶加工工序中咖啡碱含量总体呈现下降趋势, 其中晒青、摇青、凉青、杀青、揉捻 5 个工序中变化相对较大, 而整个包揉过程中咖啡碱基本上没有变化。做青过程中咖啡

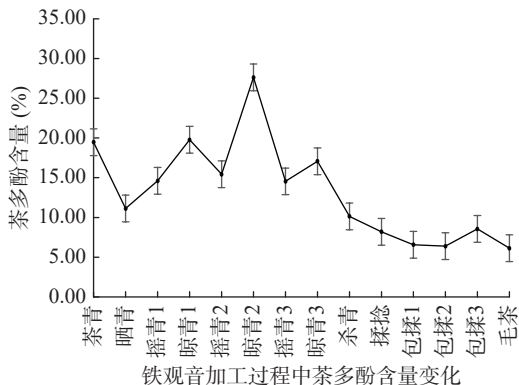


图 1 不同加工工序铁观音茶多酚变化情况

Fig.1 Changes of Tieguanyin tea polyphenols in different processing procedures

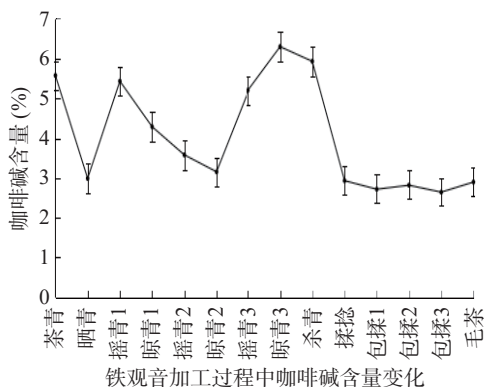


图 2 不同加工工序铁观音咖啡碱变化情况

Fig.2 Changes of Tieguanyin caffeine in different processing procedures

碱含量变化幅度波动相对较大, 特别是摇青 1 相对于晒青变化幅度最大, 揉捻过程咖啡碱含量快速下降了 50.27%, 包揉过程咖啡碱含量变化相对较小。整个过程咖啡碱下降了 47.74%, 其中凉青 1 相对于摇青 1 下降了 20.95%, 杀青过程下降了 5.82%, 显而易见, 整个加工过程咖啡碱总量减少, 其中摇青、凉青和杀青工序是铁观音咖啡碱变化的关键加工工序节点。

2.5 铁观音加工过程中氨基酸含量变化情况

由图 3 可知,在 14 道铁观音茶叶加工工序中氨基酸总体呈现为上升趋势,从茶青到杀青,氨基酸反复波动,晒青工序略有上升,摇青 1 到凉青 3 变化较小基本稳定在 1.74%~2.01%,杀青过程快速上升而揉捻过程又下降,从包揉 1 到毛茶氨基酸含量逐渐上升了 28.4%,其中晒青、摇青 1、杀青、揉捻 4 个工序中变化相对较大。整个加工过程氨基酸上升了 59.67%,其中晒青工序相对于茶青工序上升 15.76%,杀青过程上升了 29.5%,概而言之,整个加工过程氨基酸总量呈上升趋势,其中晒青、摇青和杀青工序是铁观音氨基酸变化的关键加工工序节点。

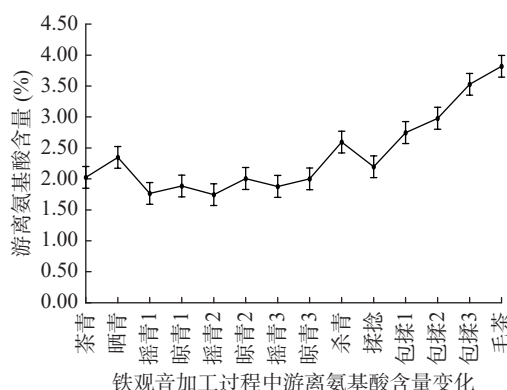


图 3 不同加工工序铁观音氨基酸变化情况

Fig.3 Changes of Tieguanyin amino acids in different processing procedures

2.6 铁观音加工过程中黄酮类含量变化情况

由图 4 可知,在 14 道铁观音茶叶加工工序中,黄酮类总体呈现为上升趋势,其中在晒青工序之后黄酮类含量略有下降,在做青过程中从摇青 1 到凉青 3 黄酮类含量稳定在 2.27~2.70 mg/g,从凉青 1 到凉青 3 含量基本没有变化。经过杀青工序之后,茶叶中黄酮类含量显著增加到 6.93 mg/g ($P<0.05$),揉捻工序黄酮类含量略有降低,从包揉 1 到毛茶黄酮类含量逐渐上升,最后毛茶黄酮类含量达到 8.9 mg/g。整个加工过程茶叶中黄酮类含量上升了 1.62 倍,其

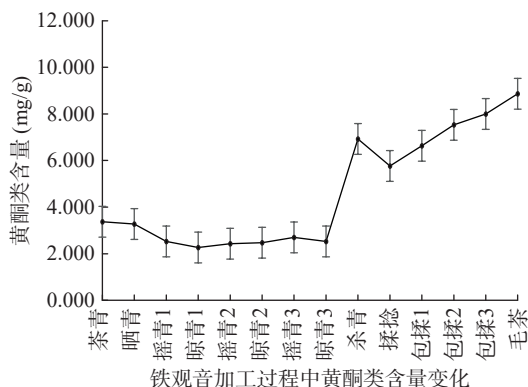


图 4 不同加工工序铁观音黄酮类变化情况

Fig.4 Changes of Tieguanyin flavonoids in different processing procedures

中杀青工序相对于凉青 3 上升了 1.76 倍,包揉 1 到包揉 3 上升了 20.66%,由此可见,整个加工过程黄酮类总量呈上升趋势,其中杀青和包揉工序是铁观音黄酮类变化的关键加工节点。

2.7 铁观音加工过程中茶色素含量变化情况

由图 5 可知,在 14 道铁观音茶叶加工工序中,3 个茶色素均表现出不同的趋势,叶绿素总体呈现为下降趋势,晒青过程下降了 46%,随后摇青 1 相对于晒青上升了 67.95%,之后从凉青 1 到摇青 3 逐渐下降,杀青工序相对凉青 3 又上升了 68.45%,之后加工过程中呈现周期性变化,而茶褐素在晒青、凉青 3 和杀青工序变化幅度较大,从揉捻到毛茶含量基本没有太大变化,茶黄素基本稳定在较低水平含量在 0.078%~0.38%,叶绿素含量相对其他两个茶色素相对较高,茶黄素含量最少。综上所述,整个加工过程叶绿素总量呈现下降趋势,茶褐素波动较大,茶黄素变化较小,其中凉青和杀青工序是铁观音茶色素变化的关键加工工序节点。

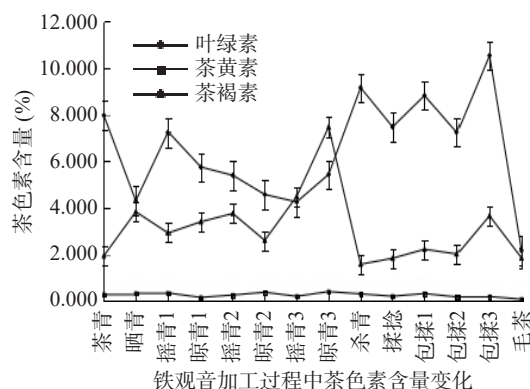


图 5 不同加工工序铁观音茶色素变化情况

Fig.5 Changes of Tieguanyin tea pigment in different processing procedures

3 讨论

茶叶中关键香气化合物对茶叶香气品质起到重要作用,测定结果表明:芳樟醇、(E)-3-己烯-1-醇乙酸酯、水杨酸甲酯、香叶醇、2-甲基丁酸-3-己烯醇酯、(Z)-己酸-3-己烯酯、2-己烯醛、叶醇、Z,Z-3-己烯酸-3-己烯酯、顺- α,α -5-三甲基-5-乙基四氢吡喃-2-甲醇、 α -法呢烯、 β -石竹烯、反-橙花叔醇、吲哚是铁观音中关键香气化合物,对铁观音不同加工工序的香气品质形成发挥关键作用,这与张珍珍等^[18]研究结果相仿。醇类化合物和酯类化合物是铁观音主要香气成分,醇类化合物的种类较少而其含量较高,这与嵇伟彬等^[19]的研究结论相似。其中芳樟醇等醇类化合物呈现铃兰花、玫瑰花等花果香,在不同加工工序存在一定差异,做青过程中不同加工工序呈现出下降趋势,表现为随着铁观音加工发酵程度加大,芳樟醇等醇类化合物含量呈下降趋势,且做青过程中呈现周期性变化,摇青工序会使其含量下降^[32],同时,在一定条件下芳樟醇还会发生异构化,转化为香叶醇^[33],

导致不同加工工序芳樟醇等醇类含量存在显著差异^[34],这与郭丽等^[35]研究结果基本一致;水杨酸甲酯等酯类化合物呈现出冬青油香、薄荷油、水果香等香气,做青过程含量较杀青之后工序明显较高,说明随着铁观音加工中发酵程度加大,其含量呈现上升的趋势,这可能是引发类似水果香型的气味逐渐明显的原因,且经过烘焙工序香气成分含量显著上升,明显受到烘焙工序影响^[36-37],表明烘焙在铁观音香气品质形成中起着关键的作用,这与郭丽等^[35]研究结果相似; α -法呢烯、 β -石竹烯等烯类化合物呈现出花香、丁香叶油香, α -法呢烯在杀青工序之后快速上升这可能与温度有关,而 β -石竹烯加工过程中稳定在较低含量;2-己烯醛等醛类化合物呈现出青香、果香、苹果香,其能与其他成分相互协同作用从而对铁观音整体香气产生影响^[38],晒青、做青工序有利于2-己烯醛等醛类化合物形成,其与铁观音发酵程度密切相关,之后加工工序均为检测出该物质,这可能其含量较低易于挥发导致的。此外铁观音还存在其他挥发性成分,还需对未知成分进行更深入研究,未来还将进一步研究香气及营养功能成分在食品、医药领域的应用。

茶多酚是茶叶中主要的营养成分,是影响茶汤浓醇度的主要因素^[39]。茶多酚具有抗氧化、抗肿瘤、延缓衰老及预防和治疗糖尿病、高血压、高血脂、动脉硬化等多种生理功能^[5-7]。本试验茶多酚含量在不同加工工序中总体呈下降趋势,其中杀青工序之后含量下降较快。这与黄欢等^[22]研究结果类似。分析其原因可能是茶多酚在茶多酚酶和过氧化酶作用下进行氧化及茶多酚与咖啡碱之间相互作用产生缔合物造成了整个加工过程茶多酚含量减少,其中杀青工序是铁观音茶多酚变化的关键加工节点,杀青过程中高温引起酶失活降低了酶促氧化使其含量下降较快。

咖啡碱是茶叶中重要的风味物质,对茶汤鲜爽度具有重要影响,咖啡碱能祛除疲惫、提神醒脑、兴奋中枢神经、加速人体血液循环、促进人体新陈代谢^[40-41]。本试验咖啡碱含量的总体趋势为下降趋势,做青过程中咖啡碱含量变化幅度波动相对较大,从包揉到毛茶变化相对较小。摇青、凉青和杀青工序是铁观音咖啡碱变化的关键加工节点,这与黄欢等^[22]研究相似。这种变化可能是由于咖啡碱与茶多酚之间发生缔合作用^[42]导致咖啡碱含量不断减小而且咖啡碱高温易升华^[43],因而在摇青、凉青和杀青工序中咖啡碱含量变化明显。

氨基酸能减轻茶汤中的苦涩味,进而增加茶汤的甜味,其含量的高低对茶汤的滋味、色泽等都有影响^[39],其中茶氨酸具有抗疲劳、抗肿瘤、减体脂、降血压、保护脑神经细胞作用^[41],整个加工过程氨基酸含量呈上升趋势,其中晒青、摇青和杀青工序是铁观音氨基酸变化的关键加工节点,这与黄欢等^[22]研究相似。分析其可能原因是蛋白质在蛋白酶作用下水解形成游离氨基酸而杀青过程中热作用会加速蛋

白质的水解作用,增加氨基酸含量^[44]。

黄酮类是纯天然的抗氧化剂,具有多种生物活性,可以抵御紫外线,还可以清除体内的自由基,美白肌肤延缓衰老^[45]。铁观音整个加工过程黄酮类含量呈上升趋势,其中杀青和包揉工序是铁观音黄酮类变化的关键加工节点。这与陈琳琳等^[46]研究结果类似。可能原因是铁观音萎凋程度较轻,而杀青过程中温度上升促进内含物质发生更多物理、化学变化^[47]。

茶色素具有抗癌、抗肿瘤、抗氧化、消除炎症及降低血脂等功效^[12]。叶绿素是影响铁观音茶干叶色泽和茶汤色泽的主要物质,而茶黄素、茶褐素对茶汤滋味具有重要影响。整个加工过程叶绿素含量呈下降趋势,茶褐素波动较大,茶黄素变化较小,其中凉青和杀青工序是铁观音茶色素变化的关键加工节点。这与陈文君等^[48]研究相仿。可能原因是叶绿素在叶绿素酶作用下降解,而发酵过程中一部分茶多酚可以转化为茶色素^[49]。

4 结论

安溪铁观音含有丰富的品质成分,传统加工工艺主要包括14道加工工序,研究发现在铁观音加工过程中,铁观音的关键香气成分 α -法呢烯、反-橙花叔醇、吲哚总体呈现出上升趋势,相对含量明显增加。说明本研究中的铁观音加工工艺能明显增加关键香气成分的相对含量,提升铁观音的香气品质。除了香气成分以外,茶多酚、咖啡碱、氨基酸、黄酮类、茶色素等重要品质成分在不同加工工序中呈现不同变化规律,茶多酚、咖啡碱含量总体呈现下降趋势,而氨基酸、黄酮类含量总体呈现上升趋势,茶色素含量无明显变化规律。研究表明,杀青对品质成分变化影响最大,是关键加工工序节点。此外,晒青、摇青及凉青也是影响铁观音香气及品质成分的重要工序,本研究结果为安溪铁观音品质提升及工艺优化提供理论依据。

参考文献

- [1] 张木树. 乌龙茶审评[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2011. [ZHANG Mushu. Oolong tea review[M]. Xiamen: Xiamen University Press, 2011.]
- [2] 苏兴茂. 烘焙技术在闽南乌龙茶中的应用与探索[J]. 福建茶叶, 2012(3): 27-29. [SU Xingmao. Application and exploration of baking technology in oolong tea in southern Fujian[J]. Fujian Tea, 2012(3): 27-29.]
- [3] 张木树. 铁观音加工技术[M]. 福州: 海潮摄影艺术出版社, 2010. [ZHANG Mushu. Tieguanyin processing technology[M]. Fuzhou: Haichao Photography Art Publishing House, 2010.]
- [4] 金少华, 姜晓东. 茶叶成分与防癌抗癌作用研究进展[J]. 安徽预防医学杂志, 1998, 4(3): 352-354. [JIN Shaohua, JIANG Xiaodong. Research progress of tea ingredients and anticancer and anticancer effects[J]. Anhui Journal of Preventive Medicine, 1998, 4(3): 352-354.]
- [5] DOUMERC N, BONHOURE E, DAYON A, et al. Green tea (EGCG) and prostate cancer a new sphingosine kinase inhibitor[J].

European Urology Supplements, 2006, 5(2): 168.

[6] YU H N, YIN J J, SHEN S R. Effects of epi-gallocatechin gallate on PC-3 cell cytoplasmic membrane in the presence of Cu^{2+} [J]. *Food Chemistry*, 2006, 95(1): 108–115.

[7] PAN M H, LIN C C, LIN J K, et al. Tea polyphenol (-)-epigallocatechin 3-gallate suppresses heregulin-beta1-induced fatty acid synthase expression in human breast cancer cells by inhibiting phosphatidylinositol 3-kinase/Akt and mitogen-activated protein kinase cascade signaling[J]. *Agric Food Chem*, 2007, 55(13): 530–537.

[8] 李宗垣. 铁观音的保健功能[J]. *福建茶叶*, 2010, 32(11): 44–48. [LI Zongyuan. The health function of Tieguanyin[J]. *Fujian Tea*, 2010, 32(11): 44–48.]

[9] 张自然. 醒酒功能性食品及其醒酒机理研究进展[J]. *钦州学院学报*, 2012, 27(3): 66–69. [ZHANG Ziran. Research progress on sobering functional food and its sobering mechanism[J]. *Journal of Qinzhou University*, 2012, 27(3): 66–69.]

[10] 刘莉. 浅谈茶叶主要功效成分及其生物活性[J]. *南方农业*, 2018, 12(24): 132–133, 141. [LIU Li. Talking about the main functional components of tea and its biological activity[J]. *Southern Agriculture*, 2018, 12(24): 132–133, 141.]

[11] 林伟东, 孙威江, 郭义红, 等. 茶叶中茶氨酸的研究与利用[J]. *食品研究与开发*, 2016(20): 201–206. [LIN Weidong, SUN Weijiang, GUO Yihong, et al. Research and utilization of theanine in tea[J]. *Food Research and Development*, 2016(20): 201–206.]

[12] 卢素芳, 王胜鹏. 茶色素及其生物活性功能研究[J]. *湖北农业科学*, 2015(24): 6117–6119. [LU Sufang, WANG Shengpeng. Study on tea pigment and its biological activity function[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2015(24): 6117–6119.]

[13] 刘秋彬. 论铁观音茶的养生保健功能[J]. *福建农业*, 2014(5): 79–80. [LIU Qiubin. On Tieguanyin tea's health care function[J]. *Fujian Agriculture*, 2014(5): 79–80.]

[14] 袁杰. 铁观音香气化学成分及活性研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2014. [YUAN Jie. Study on the chemical composition and activity of Tieguanyin aroma[D]. Xiamen: Huaqiao University, 2014.]

[15] YE N, ZHANG L, GU X. Discrimination of green teas from different geographical origins by using HS-SPME/GC-MS and pattern recognition methods[J]. *Food Anal Method*, 2012, 5(4): 856–860.

[16] LIN J, ZHANG P, PAN Z, et al. Discrimination of oolong tea (*Camellia sinensis*) varieties based on feature extraction and selection from aromatic profiles analysed by HS-SPME/GC-MS[J]. *Food Chem*, 2013, 141(1): 259–265.

[17] 王梦琪, 朱荫, 张悦, 等. 茶叶挥发性成分中关键呈香成分研究进展[J]. *食品科学*, 2019, 40(23): 341–349. [WANG Mengqi, ZHU Yin, SUN Yue, et al. Research progress of key aroma components in tea volatile components[J]. *Food Science*, 2019, 40(23): 341–349.]

[18] 张珍珍, 杨远帆, 孙浩, 等. 3 种清香型铁观音挥发性成分及香味特征[J]. *集美大学学报(自然科学版)*, 2016, 21(3): 175–183. [ZHANG Zhenzhen, YANG Yuanfan, SUN Hao, et al. Three kinds of volatile components and fragrance characteristics of Tieguanyin[J]. *Journal of Jimei University (Natural Science Edition)*, 2016,

21(3): 175–183.]

[19] 嵇伟彬, 刘盼盼, 许勇泉, 等. 几种乌龙茶香气成分比较研究[J]. *茶叶科学*, 2016, 36(5): 523–530. [JI Weibin, LIU Panpan, XU Yongquan, et al. Comparative study on aroma components of several kinds of Oolong tea[J]. *Tea Science*, 2016, 36(5): 523–530.]

[20] 钟秋生, 林邦和, 陈常颂, 等. 九龙袍品种乌龙茶加工过程中主要生化成分的变化[J]. *中国茶叶加工*, 2015(6): 15–19. [ZHONG Qiusheng, LIN Zhenghe, CHEN Changsong, et al. Changes of main biochemical components of Jiulongpao variety Oolong tea during processing[J]. *Chinese Tea Processing*, 2015(6): 15–19.]

[21] 何加兴, 欧伊伶, 宋加艳, 等. 黄金茶 1 号夏秋乌龙茶加工过程化学成分变化与品质形成分析[J]. *食品工业科技*, 2020(18): 223–230. [HE Jiaxing, OU Yiling, SONG Jiayan, et al. Analysis of chemical composition changes and quality formation during processing of golden tea No. 1 summer and autumn Oolong tea[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020(18): 223–230.]

[22] 黄欢, 赵展恒, 王玉娇, 等. 铁观音加工过程中咖啡碱、茶多酚、游离氨基酸含量变化研究[J]. *福建农业学报*, 2014, 29(3): 282–285. [HUANG Huan, ZHAO Zhanheng, WANG Yujiao, et al. Study on the changes of caffeine, tea polyphenols and free amino acids during the processing of Tieguanyin[J]. *Fujian Journal of Agriculture*, 2014, 29(3): 282–285.]

[23] 林红, 曾玲珍, 林育钊, 等. 铁观音乌龙茶的营养成分和保健功效[J]. *保鲜与加工*, 2020, 20(6): 238–242. [LIN Hongjiao, ZENG Lingzhen, LIN Yuzhao, et al. Nutritional components and health benefits of Tieguanyin Oolong tea[J]. *Preservation and Processing*, 2020, 20(6): 238–242.]

[24] 杨家干, 黄亚辉, 李丹, 等. 上川岛红茶主要生化成分研究[J]. *食品研究与开发*, 2016, 37(5): 106–110. [YANG Jiagan, HUANG Yahui, LI Dan, et al. Study on the main biochemical components of Shangchuandao black tea[J]. *Food Research and Development*, 2016, 37(5): 106–110.]

[25] 陈丽华, 吕新, 韦航, 等. 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用法分析茶树花茶香气成分[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021(1): 115–121. [CHEN Lihua, LÜ Xin, WEI Huang, et al. Analysis of aroma components of tea tree scented tea by headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Journal of Food Safety and Quality Inspection*, 2021(1): 115–121.]

[26] 张妙芬. 茶叶中茶多酚含量测定方法的研究[J]. *化学工程与装备*, 2012, 5: 152–155. [ZHANG Miaofen. Study on the determination method of tea polyphenols in tea[J]. *Chemical Engineering and Equipment*, 2012, 5: 152–155.]

[27] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. GBT 8314-2013 茶 游离氨基酸总量的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, State Standardization Administration Committee. GBT 8314-2013 Tea determination of total free amino acids[S]. Beijing: China Standard Press, 2013.]

[28] 王丽丽, 林清霞, 宋振硕, 等. 分光光度法测定茶叶中总黄

- 酮含量[J]. *茶叶学报*, 2021, 62(1): 1-6. [WANG Lili, LIN Qingxia, SONG Zhenshuo, et al. Determination of total flavonoids in tea by spectrophotometry[J]. *Journal of Tea*, 2021, 62(1): 1-6.]
- [29] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. [GAO Junfeng. Plant physiology experiment guidance[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.]
- [30] 谭和平, 叶善蓉, 陈丽, 等. 茶叶中色素的测试方法概述[J]. *中国测试*, 2009, 35(2): 78-82. [TAN Heping, YE Shanrong, CHEN Li, et al. Summary of the test methods of pigments in tea[J]. *China Test*, 2009, 35(2): 78-82.]
- [31] JOSHI R, GULATI A. Fractionation and identification of minor and aroma-active constituents in Kangra orthodox black tea[J]. *Food Chemistry*, 2015, 167: 290-298.
- [32] 石渝凤, 邸太妹, 杨绍兰, 等. 花香型红茶加工过程中香气成分变化分析[J]. *食品科学*, 2018, 39(8): 167-175. [SHI Yufeng, DI Taimei, YANG Shaolan, et al. Analysis of changes in aroma components of floral black tea during processing[J]. *Food Science*, 2018, 39(8): 167-175.]
- [33] 宛晓春, 夏涛. 茶树次生代谢[M]. 北京: 科学出版社, 2015. [WAN Xiaochun, XIA Tao. Tea plant secondary metabolism[M]. Beijing: Science Press, 2015.]
- [34] FENG Z H, LI Y F, LI M, et al. Tea aroma formation from six model manufacturing processes[J]. *Food Chemistry*, 2019(285): 347-354.
- [35] 郭丽, 杜正花, 姚丽鸿, 等. 铁观音乌龙茶和红茶的香气化学特征分析[J]. *食品科学*, 2021, 42(10): 7. [GUO Li, DU Zhenghua, YAO Lihong, et al. Analysis of aromatic chemical characteristics of Tieguanyin Oolong tea and black tea[J]. *Food Science*, 2021, 42(10): 7.]
- [36] 陈贤明, 冯林, 李腊, 等. 组合式焙火工艺对铁观音品质及挥发性香气组分的影响[J]. *食品科学*, 2015, 36(20): 80-85. [CHEN Xianming, FENG Lin, LI La, et al. Effect of combined baking process on Tieguanyin quality and volatile aroma components[J]. *Food Science*, 2015, 36(20): 80-85.]
- [37] 张俊, 唐德松, 龚淑英, 等. 烘焙处理对夏秋绿茶香气品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2010, 10(6): 94-100. [ZHANG Jun, TANG Desong, GONG Shuying, et al. Effect of baking treatment on aroma quality of summer and autumn green tea[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2010, 10(6): 94-100.]
- [38] (荷)里奥·范海默特著, 刘强, 冒德寿, 等. 化合物香味阈值汇编(第2版)[M]. 北京: 科学出版社, 2015. [(H) LEO Vanheimer, LIU Qiang, MAO Deshou, et al. Compilation of compound fragrance thresholds (Second Edition)[M]. Beijing: Science Press, 2015.]
- [39] 文祎. 安溪铁观音品质化学及抗炎功能研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2018. [WEN Yi. Study on quality chemistry and anti-inflammatory function of Anxi Tieguanyin[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2018.]
- [40] 陈宇宏, 王振, 文祠, 等. 茶叶咖啡碱的研究进展[J]. *茶叶通讯*, 2016, 43(3): 3-7. [CHEN Yuhong, WANG Zhen, WEN Ci, et al. Research progress of tea caffeine[J]. *Tea Newsletter*, 2016, 43(3): 3-7.]
- [41] 申雯, 黄建安, 李勤, 等. 茶叶主要活性成分的保健功能与作用机制研究进展[J]. *茶叶通讯*, 2016, 43(1): 8-13. [SHEN Wen, HUANG Jianan, LI Qin, et al. Research progress on the health function and mechanism of tea's main active ingredients[J]. *Tea Newsletter*, 2016, 43(1): 8-13.]
- [42] 吴雅红, 罗宗铭. 茶多酚与咖啡碱相互作用对绿茶饮料质量的影响[J]. *广东工业大学学报*, 2005, 22(2): 21-25. [WU Yahong, LUO Zongming. Effect of the interaction between tea polyphenols and caffeine on the quality of green tea beverages[J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2005, 22(2): 21-25.]
- [43] 杜继煜, 白岚, 白宝璋. 茶叶的主要化学成分[J]. *农业与技术*, 2003, 24(1): 53-55. [DU Jiyu, BAI Lan, BAI Baozhang. The main chemical components of tea[J]. *Agriculture and Technology*, 2003, 24(1): 53-55.]
- [44] 黄天福. 武夷肉桂和安溪铁观音在制造过程中主要化学成分变化比较[J]. *安徽农业大学学报*, 1999, 26(4): 470-473. [HUANG Tianfu. Comparison of the main chemical composition changes of Wuyi cinnamon and Anxi Tieguanyin during the manufacturing process[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 1999, 26(4): 470-473.]
- [45] 李任强, 吴志炜, 梁云涛. 绿茶、红茶、银杏叶的黄酮类物质的比较分析初报[J]. *福建茶叶*, 1997, 72(3): 30-32. [LI Renqiang, WU Zhiwei, LIANG Yuntao. A preliminary report on the comparative analysis of flavonoids in green tea, black tea and ginkgo biloba leaves[J]. *Fujian Tea*, 1997, 72(3): 30-32.]
- [46] 陈琳琳, 邱树毅, 罗小叶, 等. 夏秋茶发花工艺及发花过程中主要物质成分变化[J]. *食品工业*, 2017, 38(9): 5. [CHEN Linlin, QIU Shuyi, LUO Xiaoye, et al. The blooming process of summer and autumn tea and the changes of main substances in the blooming process[J]. *Food Industry*, 2017, 38(9): 5.]
- [47] 张杰, 朱先明, 施兆鹏. 乌龙茶色泽形成机理的研究[J]. *福建茶叶*, 1989, 40(3): 23-39. [ZHANG Jie, ZHU Xianming, SHI Zhaopeng. Study on the formation mechanism of Oolong tea color[J]. *Fujian Tea*, 1989, 40(3): 23-39.]
- [48] 陈文君, 许文璨, 向晶, 等. 不同发酵方式对青砖茶中茶色素含量的影响[J]. *湖北工业职业技术学院学报*, 2020, 33(1): 4. [CHEN Wenjun, XU Wencan, XIANG Jing, et al. Effects of different fermentation methods on the content of tea pigment in Qingzhu tea[J]. *Journal of Hubei Institute of Industry and Technology*, 2020, 33(1): 4.]
- [49] 李萍. 普洱茶及乌龙茶发酵过程中品质变化的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2009. [LI Ping. Study on the quality changes of Pu'er tea and Oolong tea during fermentation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2009.]