碧香早夏季鲜叶加工乌龙茶过程中品质成分动态变化

宋加艳[1]，何加兴[1]，欧伊伶[2]，蒋平利[1]，薄佳慧[1]，宫连瑾[1]，肖力争[1]
（1.湖南农业大学园艺院，茶学教育部重点实验室，国家植物功能成分利用工程技术研究中心，湖南长沙 410128）（2.广东建设职业技术学院，广东广州 510440）

摘要：以碧香早夏季三四叶鲜叶为原料，按照萎凋、摇青、杀青、揉捻、干燥等工艺加工乌龙茶，对加工过程中的样品和干茶样进行生化成分分析及采用固相微萃取-气质联用（SPME/GC-MS）检测香气成分，并结合感官审评探讨碧香早鲜叶加工乌龙茶过程中品质成分动态变化及品质形成分析。感官审评结果表明，乌龙茶滋味醇和，香气带花香。品质成分分析表明，茶多酚、儿茶素、咖啡碱、可溶性糖、黄酮、水浸出物等成分总体呈现下降的趋势，从鲜叶到干茶分别下降了 5.32%、3.96%、0.48%、0.38%、22.35%、2.77%，游离氨基酸的含量总体呈现上升的趋势，相较于鲜叶干茶的含量升幅为 12.88%。挥发性成分分析结果表明，碳氢类、酮类、醛类及其他类物质总体含量呈现上升的趋势，而醇类、酯类、酚类物质含量总体呈现下降趋势。其中，反式-橙花叔醇、苯乙醇、二氢芳樟醇、苯甲醛、β-紫罗酮、吲哚、α-法呢烯、α-依兰油烯、香叶基丙酮等成分可作为夏季碧香早乌龙茶的特征香气成分。乌龙茶加工促使具苦涩味及青气物质逐渐减少、甜醇及花果香类物质逐渐增加，有利于茶汤滋味及香气的形成，为夏季茶资源利用提供科学的参考。

关键词：碧香早；夏茶；乌龙茶；固相微萃取-气质联用
文章篇号：1673-9078(2021)02-238-248 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.2.0688

Dynamic Changes in Quality and Composition of Oolong Tea Made with Fresh Bixiangzao Summer Tea Leaves during Processing

SONG Jia-yan[1], HE Jia-xing[1], OU Yi-ling[2], JIANG Ping-li[1], BO Jia-hui[1], GONG Lian-jin[1], XIAO Li-zheng[1]
(1.College of Horticulture, Hunan Agricultural University, Key Laboratory of Tea Science of Ministry of Education, National Research Center of Engineering Technology for Utilization of Botanical Functional Ingredients, Changsha 410128, China) (2.Guangdong Construction Polytechnic, Guangzhou 510440, China)

Abstract: Using three- four fresh leaves of Bixiangzao summer tea leaves as the raw materials, oolong tea was produced following the procedure involving withering, shaking, kill-green (de-enzyming), rolling and drying steps. The biochemical components of the samples generated from the tea processing and the dry tea samples were analyzed, and the aroma components were detected by solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (SPME/GC-MS). Combined with sensory evaluation, the dynamic changes of quality components and quality formation of Bixiangzao fresh leaves during oolong tea processing were examined. The results of sensory evaluation showed that the oolong tea had amellow taste and a floral aroma. Quality component analysis showed that tea polyphenols, catechins, caffeine, soluble sugars, flavonoids and water extracts showed an overall downward trend (decreases by 5.32%, 3.96%, 0.48%, 0.38%, 22.35%and 2.77%, respectively, from fresh leaves to dried tea),whilst the content of free amino acids

引文格式：
宋加艳,何加兴,欧伊伶,等.碧香早夏季鲜叶加工乌龙茶过程中品质成分动态变化[J].现代食品科技,2020, 37(2):238-248
SONG Jia-yan, HE Jia-xing, OU Yi-ling, et al. Dynamic changes in quality and composition of Oolong tea made with fresh Bixiangzao summer tea leaves during processing [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 37(2): 238-248

收稿日期：2020-07-21
基金项目：湖南省重点研发计划项目(2018NK2035)
作者简介：宋加艳（1994-），女，硕士研究生，研究方向：茶叶加工及功能成分化学
通讯作者：肖力争（1963-），男，博士，教授，研究方向：茶叶加工、茶文化与茶业经济

showed an overall upward trend (an increase by 12.88%from fresh leaves to dried tea). The analysis of volatile components revealed that the overall contents of volatile components (hydrocarbons, ketones, aldehydes and other substances) showed an upward trend, whilst the contents of alcohols, esters and phenols showed an overall downward trend. Among them, trans-nerol, phenylethanol, dihydrolinalool, benzaldehyde, *β*-ionone, indole, *α*-farnesene, *α*-ylenoleneand geranyl acetone can be used as the characteristic aroma components of Bixiangzao summer oolong tea. The processing of oolong tea promotes the gradual decrease of bitter and astringent tastes and greenish substances, and the gradual increase of sweet, mellow, and floral and fruity substances, which is conducive to the formation of the taste and aroma of this kind of tea, and provides a scientific reference for the utilization of summer tea resources.

Key words: Bixiangzao; summer tea; oolong tea; solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry

碧香早是以母本为福鼎大白、父本为云南大叶种所得的杂交品种，是湖南省级优良品种，具有生长快、产量高，适应性及抗寒能力强、内含物丰富等特性[1,2]。利用碧香早加工的茶叶各具特点，如红茶内含物质丰富，感官品质较优[3,4]。有研究表明，利用紫外线照射和做青处理碧香早鲜叶，所制得的红茶其多酚类及茶黄素的含量比传统工艺红茶更高[5]。近年来有很多关于碧香早品种的研究，但大多集中在利用碧香早加工花香型绿茶[6]、黑茶[7]、黄茶[8]及其内含成分和挥发性物质的变化、品种的遗传多样性[9,10]，多酚氧化酶和过氧化物酶活性变化等[11]，但未见利用碧香早为原料加工乌龙茶的相关报道。诸多研究表明乌龙茶品质形成的关键工序是摇青[12-14]，其机械力促进叶组织的水分输导能力，从而导致酶促作用加强促进茶叶内含物质的充分转变，茶多酚、脂肪族类等物质氧化降解为茶叶良好品质打基础，形成乌龙茶独特的滋味及香气。近年来有关于乌龙茶保健功能的报道，包括具有降脂[15]、降血糖[16]、调节肠道菌群[17,18]、对急性酒精肝的保护[19]等，对消费者具有很大吸引力。夏季的茶树由于雨水及光照充足叶片生长较快，具苦涩味的茶多酚及咖啡碱等物质大量积累，造成了夏季所加工茶叶滋味苦涩，市场接受度低，夏季高温造成采摘成本高等综合原因形成了茶资源的浪费。夏季鲜叶产量高，为充分合理利用茶资源，本试验以碧香早夏季鲜叶为原料，以本团队所得最优工艺进行加工乌龙茶，取每个关键节点的加工过程中的样品，并对加工过程中主要的非挥发性物质及挥发性物质进行系统性分析，为改善夏季茶苦涩味提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料与仪器

鲜叶：碧香早，采摘标准为一芽三四叶，采自湖南省湘西州古丈县古阳河茶业有限公司茶叶基地，采摘时间为 2018 年 7 月。

检测试剂：茚三酮、蒽酮、甲醇（分析纯）、福林酚、三氯化铝、浓硫酸等均采购自国药集团化学试剂有限公司。

设备：6CHZ-9B 型茶叶烘干机，福建佳友茶机智能科技股份有限公司；60 型茶叶炒干机，浙江 SUNYOUNG 公司；6CR-55 型茶叶揉捻机，浙江上洋机械有限公司；综合做青机，福建武岩茶叶机械有限公司；6CTH-6 茶叶提香机，浙江 SUNYOUNG 公司；UV-1801 紫外分光光度计，北京北分瑞利分析仪器有限责任公司；Aglient1260 高效液相色谱仪，美国安捷伦公司；固相微萃取装置、DVB/CAR/PDMS 萃取头，美国 Supelco 公司等。

1.2 实验方法

1.2.1 乌龙茶加工工艺及其参数

乌龙茶的加工流程：

鲜叶→萎凋→做青→堆青→揉捻→发酵→干燥→干茶

工艺参数参照欧依伶[20]，摇青阶段的堆青时间 40~60 min，采用表 1 工艺参数。

表 1 乌龙茶加工工艺参数

Table 1 Processing parameters for olong tea

加工工艺	工艺参数
萎凋	加温萎凋，减重率 10%
一摇	摇青 4 min（3 r/min）
二摇	摇青 3 min（16 r/min）
三摇	摇青 5 min（16 r/min）
四摇	摇青 10 min（16 r/min）
五摇	摇青 15 min（16 r/min）
杀青	温度 220~230 ℃
揉捻	8~10 min，成条即可
初烘	110 ℃~120 ℃烘至七成干
复烘	100 ℃~110 ℃
提香	90 ℃烘至足干

1.2.2 取样方法

理化检测取样：取鲜叶、萎凋叶、五次摇青叶、杀青叶和干茶各 500 g 用微波干燥法固样，烘箱 85 ℃烘至足干，密封保存。靖翠翠等人[21]研究表明，微

波固样能较好的保留茶叶内含成分，固样方法参考其进行。

香气成分检测取样：取样点与理化检测取样一致，将其用液氮固样后经真空冷冻干燥，超低温冰箱保存。

1.2.3 生化成分检测方法

每个粉碎试样取 3 份，重复测定 3 次，取其平均值。茶多酚含量参考国标 GB/T 8313-2018 进行测定；游离氨基酸含量测定参考国标GB/T 8314-2013 进行；采用蒽酮硫酸比色法进行测定可溶性糖含量；采用三氯化铝法进行黄酮含量测定，方法参照文献进行[22]；参考国标 GB/T 8305-2013 进行水浸出物含量测定。

1.2.4 咖啡碱及儿茶素测定

每个样品取 3 份粉碎试样，每份试样测定 1 次，取平均值。采用高效液相色谱法，参照文献进行[20]。

C18 色谱柱（150 mm×4.6 mm），流动相 A 为水，流动相 B 为 N,N-二甲基甲酰胺：甲醇：冰醋酸（体积比 40:2:1.5），柱温 35 ℃，检测波长 278 nm，梯度洗脱。茶汤经过 0.45 μm 微孔滤膜过滤，取滤液于高效液相色谱分析。

1.2.5 香气检测方法

采用固相微萃取-气质联用仪进行分析，重复测定 2 次，取其平均值。检测方法参考文献[20]进行。

（1）前处理称取 1 g 粉碎后的茶样，装入 15 mL 萃取瓶中，加入 3 mL 超纯水及 30 ppm 癸酸乙酯作为内标，以四氟乙烯封口，于 80 ℃恒温水浴中平衡 10 min，吸附 60 min 后，在 240 ℃下脱附 5 min。固相微萃取头经 240 ℃老化 45 min 后备用。

（2）GC/MS 条件

GC 条件：石英色谱柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm），进样量 1 μL，不分流进样，进样温度 240 ℃，样品流速 0.98 mL/min。载气为高纯度 He，升温程序为 60 ℃保留 2 min，5 ℃/min 升至 180 ℃保留 10 min，10 ℃/min 升至 220 ℃保留 5 min。

MS 条件：EI 离子源，温度 200 ℃，色谱接口温度 220 ℃，质核比范围：45~500 *m/z*。

1.2.6 感官审评

参照 GB/T 23776-2018《茶叶感官审评方法》进行，由茶叶审评专家组成专业评审组，综合审评茶样的外形（20%）、香气（30%）、汤色（5%）、滋味（35%）、叶底（10%），最后加权得出总分。

1.2.7 香气组分的定性定量分析

检索普库：NIST-17，找相似度 80%以上的进行定性分析。定量分析内标为癸酸乙酯，计算香气物质含量参照文献[23]进行。

1.2.8 数据处理

采用三次重复实验的平均值，利用 SPSS 25 进行显著性差异（p<0.05）分析，作图利用 Origin 2019。

2 结果与分析

2.1 碧香早夏秋乌龙茶加工过程中品质成分分析

表 2 碧香早夏秋乌龙茶审评结果

Table 2 The result of the sensory quality in Bixiangzao summer oolong tea

指标	评语	得分	总分
外形(20%)	条索紧结较壮实，色泽青褐	89	90.95
汤色(5%)	橙红明亮	90	
香气(30%)	清花香，较高长	91	
滋味(35%)	醇和（带花香）	93	
叶底(10%)	黄绿柔软，红边显	88	

表 3 碧香早夏秋乌龙茶各工序品质成分含量动态变化

Table 3 Dynamic changes of component content in each process of Bixiangzao summer and autumn oolong tea

工序	茶多酚/%	游离氨基酸/%	可溶性糖/%	黄酮/(mg/g)	咖啡碱/%	水浸出物/%
鲜叶	17.07±0.09^{b}	2.95±0.05^{e}	7.22±0.05^{d}	5.89±0.03^{b}	3.67±0.19^{b}	44.39±0.38^{a}
萎凋	17.75±0.17^{a}	3.16±0.05^{cd}	7.48±0.09^{b}	5.61±0.02^{c}	4.71±0.47^{a}	44.69±0.20^{a}
一摇	16.45±0.14^{c}	3.14±0.06d^{e}	7.53±0.03^{b}	5.61±0.02^{a}	3.68±0.38^{b}	44.29±0.10^{a}
二摇	15.98±0.13^{d}	3.21±0.03^{bc}	7.34±0.02^{c}	4.97±0.02^{f}	2.77±0.24^{b}	43.47±0.27^{b}
三摇	15.13±0.16^{e}	3.24±0.04^{b}	6.45±0.03^{g}	5.02±0.07^{ef}	3.11±0.42^{b}	41.66±0.01^{d}
四摇	14.08±0.12^{f}	3.24±0.03^{bcd}	7.86±0.07^{a}	5.28±0.07^{d}	3.37±0.38^{b}	43.37±0.49^{b}
五摇	13.77±0.10^{g}	3.14±0.02^{d}	6.88±0.88^{e}	5.08±0.02^{e}	3.60±0.33^{b}	42.37±0.22^{c}
杀青	13.03±0.11^{h}	3.19±0.04^{bcd}	6.73±0.04^{f}	5.18±0.07^{d}	3.38±0.98^{b}	42.47±0.42^{c}
干茶	11.75±0.12^{k}	3.33±0.02^{a}	6.84±0.04^{e}	4.58±0.03^{g}	3.19±0.32^{ab}	41.62±0.19^{d}

注：同列不同字母表示差异显著（p<0.05），表 4 同。

表 4 碧香早夏秋乌龙茶各工序儿茶素组分动态变化

Table 4 Dynamic changes of catechin components in each process of Bixiangzao summer and autumn oolong tea

工序	EGC/%	DLC/%	EC/%	EGCG/%	GCG/%	ECG/%	儿茶素总量/%	酯型儿茶素/%	非酯型儿茶素/%
鲜叶	1.51±0.12^{ab}	0.88±0.05^{abc}	0.39±0.03^{abc}	4.87±0.24^{ab}	3.58±0.15^{b}	1.08±0.06^{ab}	12.28±0.70^{b}	9.53±0.50^{b}	2.78±0.20^{ab}
萎凋	1.84±0.55^{a}	1.01±0.18^{a}	0.50±0.14^{a}	6.05±1.70^{a}	4.64±1.17^{a}	1.36±0.38^{s}	15.39±4.11^{a}	12.05±3.25^{a}	3.35±0.87^{a}
一摇	1.36±0.13^{bc}	0.92±0.05^{ab}	0.38±0.05^{abc}	4.78±0.52^{abc}	3.64±0.36^{b}	1.08±0.12^{ab}	12.15±1.22^{bc}	9.50±1.00^{b}	2.65±0.16^{bc}
二摇	0.90±0.08^{d}	0.67±0.05^{de}	0.28±0.03^{c}	3.35±0.33^{d}	2.49±0.20^{c}	0.77±0.07^{c}	8.45±0.75^{d}	6.61±0.59^{c}	1.85±0.16^{d}
三摇	1.04±0.17^{cd}	0.66±0.07^{e}	0.31±0.02^{bc}	3.38±0.47^{d}	2.40±0.33^{cd}	0.80±0.11^{bc}	8.57±1.16^{d}	6.57±0.91^{c}	2.01±0.26^{cd}
四摇	1.07±0.22^{cd}	0.73±0.07^{cde}	0.38±0.05^{abc}	3.73±0.51^{bcd}	2.40±0.18^{cd}	0.89±0.13^{bc}	9.18±1.15^{cd}	7.01±0.82^{c}	2.17±0.33^{bcd}
五摇	1.26±0.10^{bcd}	0.78±0.15^{bcde}	0.48±0.11^{a}	3.56±0.42^{cd}	2.20±0.29^{cd}	0.86±0.11^{bc}	9.12±1.16^{cd}	6.07±0.82^{c}	2.51±0.35^{bcd}
杀青	1.02±0.22^{cd}	0.78±0.19^{bcde}	0.45±0.06^{ab}	3.23±0.93^{d}	1.98±0.56^{cd}	0.79±0.23^{bc}	8.23±2.19^{d}	5.99±1.72^{c}	2.24±0.47^{bcd}
干茶	1.08±0.10^{cd}	0.77±0.08^{bcde}	0.51±0.19^{a}	3.49±0.39^{d}	1.61±0.29^{d}	0.88±0.12^{bc}	8.32±1.00^{d}	5.97±0.79^{c}	2.36±0.21^{bcd}

碧香早夏秋乌龙茶感官审评、加工过程中的品质成分及儿茶素成分变化如下表 2、3、4 所示。

如表 2 所示，经感官审评，乌龙茶色泽青褐，条索较壮实，汤色橙红明亮，滋味醇和，带有较高长的清花香，叶底黄绿红边显。

内含成分方面，从表 3、4 可以看出，茶多酚、咖啡碱、可溶性糖、黄酮、水浸出物等含量总体呈现下降的趋势，从鲜叶到干茶，分别下降了 5.32%、0.48%、0.38%、22.35%、2.77%，这与王飞权等人[24]研究夏季乌龙茶加工过程中的品质变化结论一致。茶多酚含量从鲜叶到干茶，由 17.07%降至 11.75%，降幅为 31.17%，具显著性。其含量在萎凋过程中略有上升，这可能是由于游离态的水分减少，水溶性的茶多酚浓度增大，而摇青过程中则是由于水解及氧化作用使加强，复杂多酚类物质降解氧化为简单物质，其含量逐渐减少。

咖啡碱呈苦味，其含量多少与茶汤的苦味相关，在摇青过程中变化幅度不大，从鲜叶到干茶含量下降了 0.48%，降幅为 13.00%，差异不显著。在摇青阶段略有上升，这可能是由于多糖类、果胶等物质的降解使其有所上升。在摇青阶段由于堆青作用产生了一部分的茶黄素，咖啡碱与茶黄素络合形成具有鲜爽味的化合物，杀青阶段由于高温致使咖啡碱升华[25]，这些变化利于减少苦涩味。

黄酮总体含量呈下降趋势，从鲜叶到干茶，含量减少了 22.35%，具显著性差异。摇青过程中黄酮类物质从一次摇到五次摇青减少了 8.07%，具有显著性。这是由于机械力破坏了细胞结构，使酶与底物接触更多，反应化学加快的原因。同时由于在萎凋及做青阶段光与热的共同作用，某些黄酮苷易发生热降解[26]。黄酮类的物质减少幅度较大，这可能解释了乌龙茶口感质量的提高[27]。

水浸出物含量表示了茶汤的厚薄，影响了茶汤的口感[28]，直接体现可溶物的含量、滋味的浓强度，同时也决定了茶叶的耐泡程度[29]。总体含量呈现下降的趋势，从鲜叶到干茶下降了 2.77%，总降幅为 6.24%，具有显著性差异。但在萎凋及摇青过程中有所上升，这是由于茶多酚、可溶性糖、黄酮等物质发生水解及氧化反应，使水溶性的物质含量在这个过程中增加，这与其他物质的含量减少有一定关系。高温杀青后，氧化型的茶多酚、咖啡碱、可溶性糖等形成了络合物[30]，造成水浸出物含量的下降。

而游离氨基酸总量呈现上升的趋势，从鲜叶到干茶，上升了 0.38%，上升幅度为 12.88%，具有显著性差异。这有利于增加茶汤的鲜爽味，与审评结果相符合。游离氨基酸的含量有增加可能是由于脯氨酸转化为衍生氨基酸引起的[31]。可溶性糖含量从鲜叶到干茶的加工程中下降了 0.38%，总体变化具有显著性，可溶性糖与茶汤的甜醇度有关[28]，与其他水溶性的物质共同形成了茶汤滋味醇和。可溶性糖在萎凋及摇青过程中有所上升，这可能是由于多糖类、果胶等物质的降解使其有所上升，而含量下降可能是由于糖类物质水解作用的加强而不断积累，氧化型的茶多酚含有较多的多聚酚羟基，与其聚合沉淀[30]，因而造成了可溶性糖及茶多酚的含量逐渐下降。

儿茶素总量呈现下降趋势，从鲜叶到干茶下降 3.96%，降幅为 32.25%。酯型儿茶素减少了 3.56%，降幅为 37.36%，非酯型儿茶素减少了 0.42%，降幅为 15.11%，儿茶素的总量和酯型儿茶素的变化具有显著性差异。由表 3 可知，随着做青程度的增加，酯型儿茶素的含量逐渐减少，这是由于茶叶在萎凋及做青过程中所受到的热力、湿气、机械力等多方面综合因素的影响，酯型儿茶素发生氧化、异构化和沉淀等化学反应降解为简单儿茶素。儿茶素组分总体含量呈

下降的趋势，EGC、DL-C、EGCG、GCG、ECG 分别下降了 0.43%、0.77%、0.12%、1.38%、1.97%和 0.20%，降幅最大的是 GCG 与 EGCG，具显著性差异，而 EC 含量上升了 0.12%，上升幅度为 30.77%。这与 Liu Panpan[32]、Zhang Yingna[33]、刘洪林[34]等人的研究结果较为一致，茶汤的苦味及涩味来源于儿茶素及其氧化产物，儿茶素的浓度越大茶汤滋味强度越强，而 EGC 和 EC 是茶汤甜回味的主要物质，有所增加可能是由于儿茶素发生了异构化作用。GCG 与 EGCG 在摇青过程中的降幅最大，这说明摇青能促进酯型儿茶素的氧化降解，这与雷攀登等人的研究结论一致[35]。

2.2 碧香早夏秋乌龙茶加工过程中主要香气成分变化

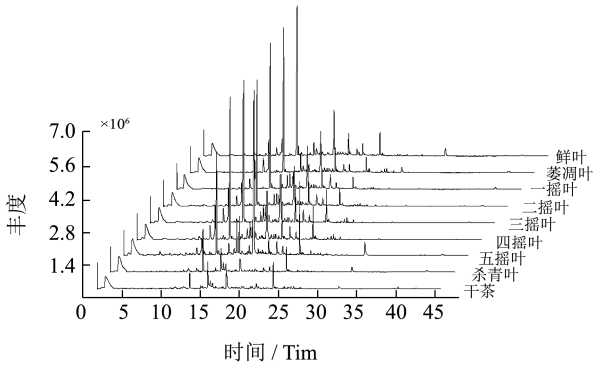


图 1 碧香早夏秋乌龙茶加工过程香气物质 GC/MS 色谱图

Fig.1 GC/MS chromatogram of aroma substances during the processing of Bixiangzao summer and autumn Oolong tea

表 5 碧香早加工乌龙茶过程中的香气组分动态变化

Table 5 Dynamic changes of aroma components during Bixiangzao processing of oolong tea (relative content unit: μg/kg)

名称	保留时间/min	鲜叶	萎凋	一摇	二摇	三摇	四摇	五摇	杀青	干茶
醇类香气										
顺-2-戊烯-1-醇	7.53	-	-	-	-	-	-	4.71	-	-
反-3-己烯醇	8.93	10.52	3.40	6.60	10.38	17.74	7.68	24.31	-	-
反式-2-己烯-1-醇	9.44	3.14	0.88	3.55	5.12	10.35	4.26	10.42	-	-
环戊基甲醇	7.44	-	-	-	-	-	8.53	-	-	-
正己醇	8.27	-	1.24	4.81	7.22	11.15	5.01	16.74	-	-
(E)-氧化芳樟醇	10.34	72.70	109.57	33.93	129.93	233.16	79.45	211.92	6.23	27.97
芳樟醇	12.86	362.06	251.87	360.15	337.57	442.52	320.13	399.46	92.86	132.63
正辛醇	13.18	-	-	-	-	9.48	-	-	-	2.27
二氢芳樟醇	14.26	2.29	3.39	2.32	3.03	5.10	4.44	6.18	3.19	24.19
α-松油醇	16.19	9.54	-	8.36	-	-	-	-	2.20	-
顺-3-壬烯-1-醇	15.96	-	0.57	1.54	1.61	1.54	1.23	3.89	-	-
4-正丙基-4-庚醇	17.21	-	-	-	-	-	-	5.12	-	-
顺式吡喃芳樟醇	17.06	-	-	-	-	-	-	-	1.77	-
2,2,6-三甲基-6-乙烯基四氢-2H-呋喃-3-醇	17.05	-	2.24	2.84	-	6.89	-	-	-	-
顺马鞭烯醇	17.99	-	-	-	-	-	0.64	-	-	-
马鞭烯醇	17.98	-	0.98	-	-	-	-	-	-	-
橙花醇	18.52	4.56	4.88	7.84	10.40	11.69	6.88	8.78	2.79	4.16
异香叶醇	18.73	4.58	4.18	5.62	8.97	22.89	8.35	5.58	-	-
反式-4-甲基-*β*-亚甲基-环己烷乙醇	18.76	-	-	-	-	-	-	-	2.50	-
香叶醇	19.53	41.86	37.16	42.69	64.87	87.98	55.58	69.10	13.63	22.03
苯甲醇	19.86	-	1.85	3.28	4.91	6.10	4.36	9.34	1.40	-
苯乙醇	20.62	15.42	17.07	39.84	37.17	48.02	35.27	71.64	6.43	28.21
月桂醇	22.15	1.82	-	-	-	-	-	-	-	-

转下页

接上页

2-(4-亚甲基环己基)-2-丙烯-1-醇	23.17	3.28	3.25	1.81	-	6.22	2.96	6.84	-	-
叶绿醇	22.24	-	-	-	-	-	-	-	-	7.74
反-橙花叔醇	23.51	34.48	16.24	20.56	33.16	75.09	64.00	238.57	20.77	188.42
表毕澄茄烯醇	23.84	1.74	7.84	7.96	8.19	14.73	10.09	12.33	2.52	21.75
喇叭茶醇	24.17	-	-	-	-	0.81	-	-	-	-
柏木醇	24.76	0.78	0.59	0.79	0.84	1.01	1.41	-	0.62	4.70
雪松醇	25.81	3.25	5.04	3.54	5.10	9.74	4.13	5.81	1.15	28.12
α-毕橙茄醇	26.98	5.60	7.35	5.28	8.48	21.05	8.91	14.60	2.48	28.12
香榧醇	26.35	0.57	1.04	0.81	1.53	3.28	1.86	1.48	0.34	3.59
亚麻醇	37.29	-	-	0.88	-	-	-	-	-	-
植醇	39.46	2.51	0.92	2.45	1.78	1.75	1.97	2.59	-	22.03
碳氢类香气										
罗勒烯	5.61	15.21	4.69	5.14	11.17	8.87	5.15	33.53	2.61	6.35
十二烷	4.50	-	-	-	-	-	-	-	-	6.49
(3E)-4,8-二甲基-1,3,7-壬三烯	6.88	-	-	-	1.89	4.16	-	13.54	4.55	3.64
甲基庚烯酮	7.89	-	-	0.80	1.21	-	-	-	-	-
2,6,11-三甲基十二烷	9.88	4.37	-	-	-	-	-	-	-	9.95
3-乙基苯甲醛	10.13	3.05	-	-	-	-	-	-	-	-
β-乙基苯乙烯	10.10	-	-	1.38	-	-	-	-	-	-
(-)-α-荜澄茄油烯	18.87	-	-	-	-	-	-	-	2.82	-
α-蒎烯	11.69	1.94	2.90	2.56	5.46	7.53	3.28	5.74	-	-
1,3-二乙烯苯	13.11	15.33	-	-	2.85	-	-	17.53	-	-
长叶烯	13.31	-	-	1.55	-	-	-	-	-	-
对二乙烯苯	13.50	6.95	1.19	3.64	-	-	-	9.91	-	-
β-榄香烯	13.86	-	-	-	-	-	5.14	-	-	-
正十六烷	14.60	5.24	2.32	3.61	5.64	-	-	-	-	-
顺式-依兰油-3,5-二烯	16.63	-	2.23	3.27	3.16	4.72	2.56	3.56	1.08	-
[4,4,0]-1-癸烯	16.65	-	-	-	-	-	-	-	-	6.96
顺式-依兰油-4(15),5-二烯	16.63	1.50	-	-	-	-	-	-	-	-
二十一烷基环戊烷	16.85	6.58	-	-	-	-	-	-	-	-
大根香叶烯	16.51	-	-	-	1.06	-	0.18	1.28	-	-
β-荜澄茄油烯	16.64	-	4.02	5.47	6.29	9.61	5.61	7.35	-	-
(Z,E)-α-法呢烯	17.05	-	-	-	-	-	-	38.88	-	-
α-法呢烯	17.55	-	-	-	206.33	-	-	566.40	281.04	365.75
α-依兰油烯	16.90	-	4.73	-	-	11.58	7.99	5.98	0.97	8.39
β-姜黄烯	18.18	-	-	-	-	-	-	17.66	-	-
(3E,5E)-2,2-二甲基-3,5-癸二烯	17.34	-	-	-	-	3.00	-	-	-	-
(3E,7E)-4,8,12-三甲基三苯甲基-1,3,7,11-四烯	18.87	-	-	-	-	-	-	-	-	5.59
荜澄茄油烯	18.15	-	-	11.01	11.88	-	-	-	2.66	13.39
反-α-香柠檬烯	17.05	-	-	-	-	-	4.77	-	-	-

转下页

接上页

7-反式倍半香桧烯水合物	18.16	-	-	-	-	-	11.19	-	-	-
α-柏木烯	18.15	-	7.06	-	-	-	-	-	-	-
反式-β-法呢烯	18.17	-	-	-	-	16.83	-	-	-	-
2,6-二甲基-1,5-庚二烯	18.84	-	-	-	-	-	-	1.44	-	-
顺-菖蒲烯	10.14	-	-	-	-	12.57	-	5.88	-	-
去氢白菖烯	19.15	-	3.83	-	7.79	-	8.45	-	2.78	12.02
反-菖蒲烯	19.14	4.24	-	6.42	-	-	-	-	-	-
3,6-二甲基-1,5-庚二烯	20.34	-	1.07	-	1.32	1.43	1.15	-	0.33	-
α-二去氢菖蒲烯	20.88	-	4.40	4.80	5.27	6.01	5.41	-	1.52	-
新植二烯	21.61	-	-	2.61	-	-	-	-	-	20.28
4(15),5,10(14)-大根香叶三烯-1-醇	35.37	-	2.42	-	-	-	-	-	-	-
2,3-二氢-1,1,3-三甲基-3-苯基-1H-茚	26.43	-	-	-	-	-	-	-	-	2.78
酯类香气										
乙酸叶醇酯	7.26	12.19	-	-	-	-	-	3.60	-	-
顺式-3-己烯醇-2-甲基丁酸酯	11.15	-	-	6.71	-	-	-	-	0.94	-
丙酸叶醇酯	7.44	-	-	-	-	6.30	-	-	-	-
甲酸环己酯	7.45	-	1.16	-	4.86	-	-	-	-	-
丁酸己酯	9.62	-	-	6.25	-	6.47	3.99	19.61	-	-
异戊酸己酯	10.15	-	-	-	-	-	-	4.78	-	-
(E)-3-己基丁酸丁酯	10.68	-	-	-	-	-	-	4.56	-	-
丁酸叶醇酯	10.84	10.41	-	-	-	-	-	-	-	-
反式-2-己烯-2-丁酸甲酯	11.36	-	-	-	2.29	3.19	-	18.49	0.74	-
己酸己酯	14.47	-	1.39	7.08	6.80	16.08	14.81	47.81	3.68	20.18
1-甲基十三烷基苯乙酸酯	14.64	-	-	-	-	-	-	9.76	-	-
己酸叶醇酯	15.46	17.94	-	36.75	35.51	57.25	48.72	105.19	51.18	66.78
Z,Z-3-己烯酸-3-己烯酯	16.85	-	-	-	-	-	-	15.09	-	-
水杨酸甲酯	17.64	117.60	87.84	134.14	206.84	234.51	176.26	-	-	-
乙酸苯乙酯	18.64	-	-	-	-	-	-	1.35	-	-
2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯	20.26	0.81	-	-	-	-	-	-	-	-
异丁酸叶醇酯	10.86	-	0.52	14.16	-	1.27	10.31	-	-	-
甲酸癸酯	22.15	-	1.27	-	-	-	-	-	-	-
丁酸苯乙酯	21.76	-	-	-	-	-	0.75	4.71	-	-
椰子醛(γ-壬内酯)	22.94	-	-	-	-	-	-	0.72	-	-
苯甲酸己酯	24.03	-	-	-	-	-	-	5.05	1.75	7.11
苯甲酸叶醇酯	24.92	-	-	-	-	-	-	16.77	2.01	-
(2E)-2-己烯基苯甲酸酯	25.33	-	-	-	-	-	-	9.02	-	-
苯甲酸己烯酯	24.94	1.05	0.47	2.13	2.03	2.41	4.16	-	-	18.30
氨茴酸甲酯	26.77	0.58	-	0.51	0.71	0.65	0.93	1.87	0.50	-
棕榈酸乙酯	28.10	3.72	-	5.84	4.43	2.80	3.79	4.99	1.81	11.06

转下页

接上页

棕榈酸甲酯	27.17	-	-	-	-	-	-	-	-	2.13
邻苯二甲酸二异丁酯	36.91	1.61	-	-	-	-	-	-	-	-
亚麻酸乙酯	38.94	-	0.68	1.80	1.44	1.28	1.37	1.98	-	10.99
邻苯二甲酸二丁酯	40.42	0.43	-	-	-	-	-	0.95	-	-
醛类香气										
壬醛	9.28	-	1.03	1.02	-	-	-	-	1.87	20.22
癸醛	11.77	-	-	-	-	-	-	-	-	15.26
苯甲醛	12.04	6.45	8.57	5.63	9.21	17.21	13.91	19.52	6.33	37.70
β-环柠檬醛	14.38	2.46	-	-	-	-	-	-	-	4.85
苯乙醛	14.69	-	-	-	-	2.01	1.92	-	2.18	7.28
藏红花醛	14.90	-	-	-	-	-	-	-	-	10.28
1,3,4-三甲基-3-环己烯-1-羧醛	17.34	1.59	-	-	-	-	-	-	-	-
α-甜橙醛	22.50	-	-	-	-	2.26	-	-	-	-
酚类香气										
2,6-二叔丁基对甲基苯酚	20.84	6.62	-	-	-	-	-	-	-	-
丁香酚	25.53	0.65	1.28	2.38	2.10	3.21	2.51	2.92	0.65	-
2,4-二叔丁基苯酚	28.91	2.89	0.70	-	1.44	-	-	2.15	-	-
2,5-二叔丁基酚	28.92	-	-	0.85	-	-	-	-	-	3.74
酮类香气										
茄酮	16.13	-	15.30	-	-	29.00	14.85	-	-	-
香叶基丙酮	19.71	2.02	2.91	3.16	6.49	5.25	3.64	7.88	3.98	9.08
β-紫罗酮	31.32	-	-	-	-	-	-	-	-	68.95
茉莉己醛酮	21.32	26.88	9.78	16.09	22.61	26.18	14.18	50.17	7.63	-
3-十五烷酮	22.57	2.66	-	-	-	-	-	3.55	-	-
其他类香气										
二甲基硫醚	1.61	4.03	7.49	5.80	4.21	24.56	8.87	29.66	5.37	68.46
2-正戊基呋喃	5.20	-	-	-	-	-	-	-	-	9.42
反式-2-己烯基己酸	15.78	3.36	3.49	24.53	23.27	43.35	52.87	109.15	38.23	51.36
邻甲基苯腈	20.75	-	-	-	-	-	-	0.94	-	-
N,N-二乙基间基苯甲酰胺	28.03	-	15.23	-	-	-	-	-	-	-
吲哚	31.93	31.58	1.58	3.35	5.81	6.89	9.68	112.10	10.74	54.23
α-亚麻酸	38.95	0.87	-	-	-	-	-	-	-	-

注：“-”表示未检出

茶叶香气来源于萎凋和摇青过程中的脂肪酸和不饱和脂肪酸的氧化裂解[13]、萜烯类物质水解[36]、氨基酸和糖的美拉德反应[37]、胡萝卜素氧化降解产物等[38]。而摇青过程中由于酶促作用等化学反应形成氧化产物，有利于香气物质的发展[39]。乌龙茶加工过程中检出的香气主要包括醇类、酯类、酮类、碳氢类、酚类、醛类、其他物质等七大类物质，共 129 种。香气物质 GC/MS 色谱图如图 1 所示，主要香气成分含量变化如表 5 所示，在乌龙茶加工过程中，碳氢类、酮类、醛类及其他类物质总体含量呈现上升趋势，而醇类、酯类、酚类物质总体呈现下降趋势。在加工过程中增加的香气组分有苯乙醇、苯甲醇、反式-橙花叔醇、二氢芳樟醇、壬醛、苯甲醛、*β*-紫罗酮、*α*-法尼烯、吲哚等，这些成分有利于乌龙茶花果香的增加[40]；而橙花醇、芳樟醇、E-氧化芳樟醇等花果香成分则是逐渐减少，但仍对乌龙茶香气具有重要贡献。这与 Zeng Lanting 等人[41]的研究结果一致，乌龙茶香气组成中芳樟醇及其氧化产物、苯乙醇、反式-橙花叔醇、*α*-法呢烯、紫罗酮和吲哚等是其主要的香气成分。随着加工的进行，具有青草气味低沸点的罗勒烯、反式-2-己烯

-1-醇、正己醇等在摇青过程中逐渐降低有助于减少青草气[42]，而反式-橙花叔醇、α-法呢烯、吲哚、二氢芳樟醇等成分是乌龙茶做青阶段品质形成的关键成分[43,44]，也可作为乌龙茶品质优良的评价标准。

此外，香气组成成分中碳氢类具有依兰花香的α-依兰油烯、新植二烯、去氢白菖烯、具有木香的荜澄茄油烯等成分大量增加；酮类中的具有甜香的香叶基丙酮及醛类中具有甜花香的苯乙醛、壬醛等及具果香的β-环柠檬醛和反式-2-己烯基己酸；醇类中具木香的柏木醇、松子香的雪松醇；具清香的二甲基硫醚、烘烤香的2-正戊基呋喃等成分逐渐积累，与主要的香气物质共同作用形成碧香早夏乌龙茶独有的香气特征成分，这与审评结论茶汤花香较为明显较为一致。而茉莉酮、水杨酸甲酯、丁香酚等在干茶样品中则未检出。从鲜叶到干茶，低沸点的具有青草气的不利于茶叶香气组成的成分逐渐消散，而利于乌龙茶具花香和甜香类高沸点物质逐渐积累或仍保留了一定量，对茶叶香气具有重要作用。

3 结论

3.1 非挥发性的呈味物质和挥发性的香气共同决定了茶叶的品质，乌龙茶品质形成的关键工序是摇青。影响茶汤滋味的黄酮类、茶多酚、咖啡碱、水浸出物、可溶性糖含量等总体呈现下降的趋势，而游离氨基酸的含量总体呈现上升的趋势。

3.2 造成茶汤苦涩味的黄酮类物质、酯型儿茶素在摇青阶段大量减少，由于机械力及酶等作用水解氧化作用加强，湿热作用同时也促进各类物质的氧化聚合。多酚类物质在摇青过程中被氧化形成氧化产物，有利于改善茶汤苦涩味。

3.3 游离氨基酸含量总体呈现上升的趋势，有利于增加茶汤鲜爽味。有些氨基酸本身具有甜味和香味，有助于协调茶汤滋味和香气，杀青阶段略有下降这可能是由于氨基酸与可溶性糖在高温下发生了美拉德缩合反应，造成了游离氨基酸和可溶性糖含量的下降。可溶性糖与水浸出物的含量决定了茶汤的口感，含量有所下降是酶促和湿热作用造成了一些化学物质的分解，形成了香气成分的前体物质。

3.4 儿茶素的含量随着青草气的降低而减少，形成了香气的某些前体物质，为香气物质的形成提供物质基础。在本研究中，乌龙茶的香气组分上升和下降的幅度各不相同，其中苯乙醇、苯甲醇、反式-橙花叔醇、二氢芳樟醇、壬醛、苯甲醛、β-紫罗酮、α-法尼烯、吲哚、α-依兰油烯、去氢白菖烯、荜澄茄油烯、香叶基丙酮、苯乙醛、壬醛、β-环柠檬醛等对乌龙茶形成花果香具有重要作用，可作为夏秋碧香早乌龙茶特征香气成分。

3.5 在本试验中，摇青有助于减少苦涩味的物质，而甜醇类物质及水浸出物的增加有利于茶汤强度；同时促进花果香类物质的形成，形成乌龙茶茶汤滋味醇和带花香的品质。利用夏季碧香早加工乌龙茶，不仅可以解决资源浪费的问题，也可以改善夏季加工绿茶及红茶苦涩及香气低下的品质，为夏季茶资源充分利用提供可能性。但乌龙茶加工过程中的品质形成机理有待结合代谢组学等研究手段进一步研究。

参考文献

[1] 罗意,李赛君,谭正初,等.早生优质绿茶良种碧香早应用与推广[J].中国茶叶,2013,35(10):28
LUO Yi, LI Sai-jun, TAN Zheng-chu, et al. Application and promotion of early-growing high-quality green tea variety Bixiangzao [J]. China Tea, 2013, 35(10): 28

[2] 侯渝嘉,邓敏,徐泽,等.‘碧香早’‘乌牛早’在重庆茶区的适应性研究[J].南方农业,2016,10(4):12-14
HOU Yu-jia, DENG Min, XU Ze, et al. Research on the adaptability of "Bixiangzao" and "Wuniuzao" in Chongqing tea area [J]. South China Agriculture, 2016, 10(4): 12-14

[3] 胡俐泉,张欢,沈程文.3 个茶树品种“湖红”工夫红茶适制性比较研究[J].食品安全质量检测学报,2019,10(13):4199-4204
HU Li-quan, ZHANG Huan, SHEN Cheng-wen. Comparative study on the suitability of 3 kinds of tea cultivars for the production Huhong congou black tea [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(13): 4199-4204

[4] 银霞,郑红发,黄怀生,等.高档红条茶适制品种筛选研究[J].茶叶通讯,2014,41(1):21-23
YIN Xia, ZHENG Hong-fa, HUANG Huai-sheng, et al. The screening of cultivars for high quality congu black tea [J]. Journal of Tea Communication, 2014, 41(1): 21-23

[5] 罗勇,周颖,谭婷,等.紫外照射与做青处理对红茶茶多酚及茶黄素的影响研究[J].茶叶通讯,2015,42(1):34-37
LUO Yong, ZHOU Ying, TAN Ting, et al. Studies on the UV-B irradiation and zuoqing treatments effect on the concentrations of tea polyphenols, theaflavins in black tea procession [J]. Journal of Tea Communication, 2014, 42(1): 34-37

[6] 贺麟,李宗琼,张拓,等.夏季茶鲜叶加工花香型绿茶工艺技术研究[J].食品与机械,2019,35(6):195-200
HE Lin, LI Zong-qiong, ZHANG Tuo, et al. Study on processing of flower-scrented green tea with fresh tea leaves

in summer [J]. Food & Machinery, 2019, 35(6): 195-200

[7] 梁敏敏,曹冰冰,杨亚,等.以碧香早品种夏茶鲜叶加工高香型黑毛茶工艺探讨[J].茶叶通讯,2017,44(1):19-23
LIANG Min-min, CAO Bing-bing, YANG Ya, et al. Study on the processing technology of high aroma dark tea from Bixiangzao tea varirties summer tea leaves [J]. Journal of Tea Communication, 2017, 44(1): 19-23

[8] 张娇,梁壮仙,张拓,等.黄茶加工中主要品质成分的动态变化[J].食品科学,2019, 40(16):200-205
ZHANG Jiao, LIANG Zhuang-xian, ZHANG Tuo, et al. Dynamic changes of main quality components during yellow tea processing [J]. Food Science, 2019, 40(16): 200-205

[9] 谭月萍,李娟,刘硕谦,等.43 份茶树品种资源遗传多样性的 SSR 研究[J].茶叶科学,2009,29(4):271-274
TAN Yue-ping, LI Juan, LIU Shuo-qian, et al. Genetic diversity of 43 tea cultivars (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) by SSR markers [J]. Journal of Tea Science, 2009, 29(4): 271-274

[10] 齐冬晴.不同茶树品种（品系）鲜叶香气及其表型差异的研究[D].长沙:湖南农业大学,2015
QI Dong-qing. Study on the tea leaves aroma components and phenotype differences of different tea varieties [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015

[11] 银霞,赵熙,黄浩,等.湖南主栽茶树品种 PPO 和 POD 活性比较[J].中国茶叶加工,2015,138(6):27-29,40
YIN Xia, ZHAO Xi, HUANG Hao, et al. Comparisons on the PPO and POD activities of main tea cultivars in Hunan province [J]. China Tea Processing, 2015, 138(6): 27-29, 40

[12] 金心怡,郭雅玲,孙云,等.摇青不同机械力对青叶理化变化及乌龙茶品质的影响[J].福建农业大学学报,2003,2:201-204
JIN Xin-yi, GUO Ya-ling, SUN Yun, et al. The effects of different rocking mechanical forces on the green leaf physiology and biochemistry and raw tea quality [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University, 2003, 2: 201-204

[13] 周子维,游芳宁,刘彬彬,等.摇青机械力对乌龙茶脂肪族类香气形成的影响[J].食品科学,2019,40(13):52-59
ZHOU Zi-wei, YOU Fang-ning, LIU Bin-bin, et al. Effect of mechanical force during turning-over on the formation of aliphatic aroma in oolong tea [J]. Food Science, 2019, 40(13): 52-59

[14] Lin Shuyen, Lo Lichiao, Chen Iouzen, et al. Effect of shaking process on correlations between catechins and volatiles in oolong tea [J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2016, 24(3): 500-507

[15] 高远.乌龙茶多酚及其儿茶素单体的降脂减肥作用研究[D].南京:南京农业大学,2012
GAO Yuan. Study on the lipid-lowering and weight-reducing effects of oolong tea polyphenols and catechin monomers [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012

[16] 邵淑宏.乌龙茶多糖理化性质及抗氧化、降血糖活性研究[D].杭州:浙江大学,2015
SHAO Shu-hong. Physicochemical properties, antioxidant and hypoglycemic activity of polysaccharide from oolong tea [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015

[17] 郭彤彤,宋丹,张鑫.乌龙茶多酚对高脂饮食诱导肥胖小鼠模型肠道菌群的调节作用[J].中国野生植物资源,2019,38(4):24-29
GUO Tong-tong, SONG Dan, ZHANG Xin. Regulation effect of oolong tea polyphenols on intestinal flora in obese mice induced by high-fat diet [J]. Chinese Wild Plant Resources, 2019, 38(4): 24-29

[18] Liu Zhibin, Chen Zhichao, Guo Hongwen, et al. The modulatory effect of infusions of green tea, oolong tea, and black tea on gut microbiota in high-fat-induced obese mice [J]. Food & Function, 2016, 7(12): 4869-4879

[19] 陈永旻.乌龙茶多糖的提取及其对小鼠急性酒精肝损伤的保护作用研究[D].福州:福建农林大学,2015
CHEN Yong-min. Study on the extraction of oolong tea polysaccharide and its protective effect on acute alcoholic liver injury in mice [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015

[20] 欧伊伶.槠叶齐夏秋乌龙茶加工工艺及香味品质形成机理研究[D].长沙:湖南农业大学,2018
OU Yi-ling. Study on the processing technology of Chuyeqi oolong tea and the formation mechanism of aroma quality [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2018

[21] 靖翠翠,杨秀芳,谭蓉,等.微波制样对茶叶内质成分的影响[J].食品安全质量检测学报,2015,6(4):1265-1270
JING Cui-cui, YANG Xiu-fang, TAN Rong, et al. Effect of microwave fixation on tea chemical components [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2015, 6(4): 1265-1270

[22] 何书美,刘敬兰.茶叶中总黄酮含量测定方法的研究[J].分析化学,2007,9:1365-1368
HE Shu-mei, LIU Jing-lan. Study on the determination method of flavone content in tea [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2007, 9: 1365-1368

[23] 乔阳,杜丽平,肖冬光.不同极性色谱柱在滇红香气成分分析中的对比研究[J].茶叶科学,2016,1:38-44

QIAO Yang, DU Li-ping, XIAO Dong-guang. Comparative study of different polarity columns in the analysis of Dianhong aroma components [J]. Journal of Tea Science, 2016, 1: 38-44

[24] 王飞权,冯花,王芳,等.闽北夏暑乌龙茶加工过程中生化成分的变化及其品质分析[J].武夷学院学报,2013,32(5):28-32
WANG Fei-quan, FENG Hua, WANG Fang, et al. Changes of biochemical components and quality analysis of oolong tea during summer heat in northern Fujian [J]. Journal of Wuyi University, 2013, 32(5): 28-32

[25] 朱磊.山东乌龙茶加工工艺及适制品种研究[D].泰安:山东农业大学,2014
ZHU Lei. Study on srocessing technology and cultivars shandong oolong tea [D]. Tai`an: Shandong Agricultural University, 2014

[26] Zheng Xinqiang, Nie Ying, Gao Ying, et al. Screening the cultivar and processing factors based on the flavonoid profiles of dry teas using principal component analysis [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2018, 67: 29-37

[27] Chen Si, Liu Huihui, Zhao Xiaoman, et al. Non-targeted metabolomics analysis reveals dynamic changes of volatile and non-volatile metabolites during oolong tea manufacture [J]. Elsevier Ltd, 2020, 128: 108778

[28] Zhang Xuebo, Feng Duxian. Effects of exogenous enzymatic treatment during processing on the sensory quality of summer Tieguanyin oolong tea from the Chinese Anxi County [J]. Food Technology and Biotechnology, 2015, 53(2): 180-189

[29] 郑吉文,马会杰,谢瑾,等.茶树品种铁观音和金萱引种云南茶叶品质成分的比较研究[J].云南农业大学学报(自然科学),2018,33(1):106-112
ZHENG Ji-wen, MA Hui-jie, XIE Jin, et al. Comparative study on the tea quality components between Tieguanyin and Jinxuan of oolong tea plant varieties introduced into Yunnan [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2018, 33(1): 106-112

[30] 黄业伟,王素敏,徐欢欢,等.不同氧化程度茶多酚与咖啡因及糖的相互作用[J].云南农业大学学报(自然科学),2015,30(3):413-417
HUANG Ye-wei, WANG Su-min, XU Huan-huan, et al. Interaction between various oxidation degrees of tea polyphenols and caffeine or carbohydrate [J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2015, 30(3): 413-417

[31] Zhang Na, Jing Tingting, Zhao Mingyue, et al. Untargeted metabolomics coupled with chemometrics analysis reveals potential non-volatile markers during oolong tea shaking [J]. Food Research International, 2019, 123: 125-134

[32] Liu Panpan ,Yin Junfeng ,Chen Gensheng ,et al. Flavor characteristics and chemical compositions of oolong tea processed using different semi-fermentation times [J]. Pubmed, 2018, 55(3): 1185-1195

[33] Zhang Yingna, Feng Yinjun, Chen Jianxin, et al. Improving the sweet aftertaste of green tea infusion with tannase [J]. Food Chemistry, 2016, 192: 470-476

[34] 刘洪林,曾艺涛,赵欣.乌龙茶加工过程中儿茶素的稳定性及化学变化[J].食品科学,2019,40(16):69-74
LIU Hong-lin, ZENG Yi-tao, ZHAO Xin. Stability and chemical changes of catechins during oolong tea processing [J]. Food Science, 2019, 40(16): 69-74

[35] 雷攀登,周汉琛,吴琼,等.做青工艺对夏季祁门红茶品质形成影响[J].食品工业科技,2017,38(8):108-112,117
LEI Pan-deng, ZHOU Han-chen, WU Qiong, et al. Effect of green-making technique on the quality of summer Keemun black tea [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(8): 108-112, 117

[36] 张冬桃,孙君,叶乃兴,等.茶树萜烯类香气物质合成相关酶研究进展[J].茶叶学报,2015,56(2):68-79
ZHANG Dong-tao, SUN Jun, YE Nai-xing, et al. Research progress of enzymes associated with terpene synthesis in *Camellia sinensis* [J]. Acta Tea Sinica, 2015, 56(2): 68-79

[37] 沈力飞,刘更生,张聪,等.茶叶香气的形成及检测研究进展[J].农产品加工(学刊),2014,37(21):58-61
SHEN Li-fei, LIU Geng-sheng, ZHANG Cong, et al. Research of formation mechanism and detection technology on aroma in tea [J]. Farm Products Processing, 2014, 37(21): 58-61

[38] Hu Cijie, Li Da, Ma Yixiao, et al. Formation mechanism of the oolong tea characteristic aroma during bruising and withering treatment [J]. Food Chemistry, 2018, 269: 202-211

[39] 王赞,郭雅玲.做青工艺对乌龙茶特征香气成分影响的研究进展[J].食品安全质量检测学报,2017,5:1603-1609
WANG Zan, GUO Ya-ling. Research progress on influence of green-making process on characteristic aroma components of oolong tea [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2017, 5: 1603-1609

[40] Shi Jiang, Xie Dongchao, Qi Dandan, et al. Methyl jasmonate-induced changes of fflavor profiles during the processing of green, oolong, and black tea [J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 781

（下转第 163 页）