

工夫红茶特征香气研究进展

李琛^{1,2}, 岳翠男^{1,2}, 杨普香^{1,2}, 曹挥华^{1,2}, 朱运华^{1,2}, 林淑红³, 江新风^{1,2*}

(1. 江西省蚕桑茶叶研究所/江西省茶叶质量与安全控制重点实验室, 南昌 330203;

2. 江西省经济作物研究所, 南昌 330203; 3. 铅山县农业农村局, 铅山 334599)

摘要: 红茶属全发酵茶, 分为工夫红茶、红碎茶、小种红茶 3 大类, 其中工夫红茶是中国特有和产量最大的红茶种类。香气是影响茶叶感官品质组成的重要因子之一, 不同产地的工夫红茶香气品质各异, 表现出甜香、果香和花香等香型。红茶中已鉴定的香气组分物质众多且含量差异明显, 各组分之间的不同含量和比例形成了红茶独特的香气特征。本文简要综述了不同产地、不同茶树品种的工夫红茶香气中关键呈香物质及加工工艺对工夫红茶特征香气的影响, 旨在为工夫红茶的加工技术提升和香气品质调控提供基础依据。

关键词: 工夫红茶; 特征香气; 关键呈香物质; 茶树品种; 加工工艺

Research progress on characteristic aroma of Congou black tea

LI Chen^{1,2}, YUE Cui-Nan^{1,2}, YANG Pu-Xiang^{1,2}, CAO Hui-Hua^{1,2}, ZHU Yun-Hua^{1,2},
LIN Shu-Hong³, JIANG Xin-Feng^{1,2*}

(1. Jiangxi Sericulture and Tea Research Institute/Jiangxi Province Key Laboratory of Tea Quality and Safety Control,

Nanchang 330203, China; 2. Jiangxi Economic Crop Research Institute, Nanchang 330203, China;

3. Department of Agriculture and Rural Affairs of Yanshan, Yanshan 334599, China)

ABSTRACT: Black tea belongs to fermented tea, and is mainly divided into Congou black tea, broken black tea and Souchong black tea, and Congou black tea is a unique type of black tea with highest production in China. Aroma is one of the important factors affecting the sensory quality of tea, the aroma quality of Congou black tea from different producing areas is different, showing sweet, fruity and floral aroma. There are many identified aroma components in black tea, and their content are obviously different, different content and proportions of each component form the unique aroma characteristics of black tea. This paper reviewed the key aroma compounds in the aroma of Congou black tea of different origins and tea cultivars and the effects of processing technology on the characteristic aroma, so as to provide the basis for the improvement of processing technology and the regulation of aroma of the Congou black tea.

KEY WORDS: Congou black tea; characteristic aroma; key aroma compounds; tea cultivars; processing technology

基金项目: 江西省茶叶产业技术体系(JXARS-02)、江西省茶叶质量与安全控制重点实验室项目(20192BCD40007)、上饶市科技计划项目(2020AB003)、江西省技术创新引导类科技计划科技合作专项重点项目(20212BDH80011)

Fund: Supported by the Agriculture Research System of Tea Industry in Jiangxi Province (JXARS-02), the Jiangxi Province Key Laboratory of Tea Quality and Safety Control Project (20192BCD40007), the Shangrao City Research and Development Projects (2020AB003), and the Key Projects of Science and Technology Cooperation of Technology Innovations and Guiding Plans in Jiangxi Province (20212BDH80011)

***通信作者:** 江新风, 博士, 副研究员, 主要研究方向为茶叶加工及资源利用。E-mail: jiangxin Yue003@163.com

***Corresponding author:** JIANG Xin-Feng, Ph.D, Associate Professor, Jiangxi Sericulture and Tea Research Institute, Nanchang, Jiangxi 330203, China. E-mail: jiangxin Yue003@163.com

0 引言

红茶是世界上产量最高、消费区域最广、贸易量最大的茶类^[1]。红茶属于全发酵茶, 主要分为工夫红茶、小种红茶和红碎茶, 其中工夫红茶由小种红茶演变而来, 是中国特有和产量最大的红茶种类, 主要有“祁红”“闽红”“宁红”“滇红”“川红”等, 因产地、茶树品种、加工工艺不同各有差异^[2]。香气是决定红茶品质的重要因子, 红茶中香气物质种类繁多, 目前已检测出的红茶香气物质多达 400 多种^[3]。红茶香气的形成主要是加工过程中的糖苷类水解、氨基酸的 Strecker 降解、美拉德反应、脂肪酸氧化及 β -胡

萝卜素降解转化产生, 与加工工艺密切相关^[3]。同时, 茶叶中香气物质还受茶树品种及其生长环境等因素的影响, 工夫红茶产区分布广泛, 气候环境差异较大, 不同产区赋予了工夫红茶独特的香型。本文主要从不同产地、不同茶树品种的工夫红茶香气中关键呈香物质及加工工艺对其特征香气的影响等方面进行综述, 旨在为工夫红茶的加工技术提升和香气品质调控提供基础依据。

1 工夫红茶的香气描述

相关标准对工夫红茶的感官品质进行了规定和描述, 如表 1 所示。甜香、花果香是工夫红茶的主要代表香型。

表 1 标准中的工夫红茶香气描述
Table 1 Descriptions for aroma of Congou black tea in the standards

红茶名称	香气描述	红茶产品标准
工夫红茶(大叶种)	甜香浓郁、甜香浓、香浓、纯正尚浓、纯正	GB/T 13738.2—2017《红茶 第二部分: 工夫红茶》
工夫红茶(中小叶种)	鲜嫩甜香、嫩甜香、甜香、纯正	GB/T 13738.2—2017
坦洋工夫	甜香浓郁、甜香、香较高、纯正	GB/T 24710—2009《地理标志产品 坦洋工夫》
九曲红梅茶	鲜嫩甜香、嫩甜香、清纯有甜香、纯正	GH/T 1116—2015《九曲红梅茶》
金骏眉茶	花、果、蜜、薯等综合香型、香气持久	GH/T 1118—2015《金骏眉茶》
祁门工夫红茶	毫香显示、祁门香显、甜香浓、甜香、纯正	GH/T 1178—2019《祁门工夫红茶》
信阳红茶	鲜嫩甜香、嫩甜香、甜香、纯正	GH/T 1248—2019《信阳红茶》
英德红茶	嫩甜兰香带毫香、幽长、清新细长、清甜香带毫香持久、甜香较持久	GH/T 1243—2019《英德红茶》
湖北宜红茶(工夫红茶)	鲜嫩甜香浓郁持久、甜香持久、纯正	DB42/T 916—2021《湖北宜红茶》
遵义红 红茶	甜香高持久、香高	DB52/T 1000—2015《遵义红 红茶》
地理标志产品 武夷红茶	花果香、蜜香显	DB35/T 1228—2015《地理标志产品 武夷红茶》
昌宁红茶	甜香浓郁持久、甜香浓、香浓、纯正	DBS 53/012—2013《昌宁红茶》
浮梁茶 红茶(工夫红茶)	鲜嫩甜香、嫩甜香、甜香、纯正	DB36/T 1028—2018《浮梁茶 红茶》

2 工夫红茶香气的关键呈香物质

工夫红茶属于全发酵茶, 发酵过程中多酚类的酶促氧化以及偶联反应形成了醛、酮、酸等化合物, 构成了挥发性物质的基础成分^[4]。红茶加工过程中有 133 种挥发性香气化合物生成, 其中有 48 种羰基化合物、30 种酯类、25 种醇类、11 种碳氢化合物、3 种苯酚类、3 种内酯类以及 3 种未知的挥发性物质^[5]。主要包括: 香叶醇、香叶酸、芳樟醇及其氧化物、顺-2-己烯醛、茉莉酮甲酯、苯甲醇、2-苯乙醇、水杨酸甲酯等^[6-7]。前期研究表明, 工夫红茶的关键呈香物质为芳樟醇、(E)-呋喃芳樟醇氧化物、(Z)-吡喃芳樟醇氧化物、苯乙醇、 β -月桂烯、水杨酸甲酯^[8]。

不同红茶样品的香气表现具有特异性, 其对应的赋香物质也有所不同^[9]。部分香气化合物在特征香气呈现中

起主要的贡献作用, 这部分物质被称为关键香气组分(key odorant, KO), 决定茶叶整体香气的类型^[10], 这类物质通常具有较高的香气强度、较高的稀释因子(flavor dilution factor, FD)值或较高的香气活度值(odour intensity value, OAV)^[11-12]。XIAO 等^[13]采用顶空固相微萃取(headspace solid-phase microextraction, HS-SPME)气相色谱-嗅味计(gas chromatography olfactometry, GC-O)结合偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR)模型对滇红工夫、坦洋工夫、祁门工夫、宜兴工夫 4 种工夫红茶进行分析, 得出滇红工夫中的反式-芳樟醇氧化物, 坦洋工夫、滇红工夫以及祁门工夫红茶中的香叶醇均具有最高的 FD 值(4096)。香叶醇具有浓郁的玫瑰、蔷薇类花香, 香叶醇的高 FD 值及其在揉捻和发酵过程中含量的大量增加^[14], 决定了祁门红茶的“祁门香”。PANG 等^[15]采用吹扫/捕集-热脱

附法、GC-O 结合动态顶空稀释分析对滇红的香气成分进行分析,发现滇红中具有最高 FD 值(3125)的化合物为 2-甲基丁醛,而后是 2-甲基丙醛、芳樟醇、苯乙醛、香叶醇、3-甲基丁醛以及水杨酸甲酯。王红玲^[16]通过 HS-SPME 结合气相色谱-质谱联用技术(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)对不同品牌和种类的祁门红茶进行研究,结合对香气物质的 OAV 分析,得出香气贡献较大(OAV>10)的物质是:香叶醇、2-甲基丁醛、苯乙醛、反、反-2,4-壬二烯醛、反、反-2,4-癸二烯醛、大马士酮、 β -紫罗兰酮和水杨酸甲酯。

芳樟醇及其氧化物多表现出具有花香气味,醛类如己醛、糠醛、反、反-2,4-癸二烯醛则表现出甜香气味^[17]。工夫红茶的香型主要有果香、甜香和花香等,茶叶香型是对挥发性物质的综合表现,苯甲酸、 β -紫罗酮形成甜香, α -苯乙醇、芳樟醇及其氧化物构成果香,花香主要由异丁酸、异戊酸构成^[18]。近年来报道的工夫红茶香气的关键呈香物质如表 2 所示。

3 不同茶树品种工夫红茶关键呈香物质

茶树鲜叶固有游离态香气成分及前导物质是红茶特征香型形成的品质基础^[27]。茶树的品种不同,其内含的香气前体物质的含量、组分比和内含糖苷水解酶的特性等不同^[28],导致不同品种的茶树鲜叶制成的工夫红茶香气类

型各异。

中国红茶香气化合物以醇类、醛类为主导,祁红、金骏眉表现出以香叶醇为主体的玫瑰花香,云南滇红、广东英德红茶表现出以芳樟醇为主的花果香、甜香,祁门红茶由祁门楮叶种所制,云南滇红由凤庆大叶茶所制,福建金骏眉采用武夷菜茶所制,英德红茶采用英红一号茶树品种,为阿萨姆种单株育种法选育而来,品种特性对香气特征有影响,不同地区红茶香气特异性风格明显^[29]。祁门红茶具有典型的祁门香,即带有类似蜜糖或苹果的香气,其中芳樟醇和香叶醇含量均较高^[30],它们散发出带甜味的清香和花香,此外,酮类物质含量也较高,比如植酮和 β -紫罗酮,对祁红香气贡献较大^[31]。滇红中芳樟醇含量较高,以铃兰花香为主,对其香气特征的形成贡献较大^[15]。金骏眉毫香和花果香明显,主要在于醇类化合物含量高,其香叶醇、苯乙醇、 β -大马士酮和茉莉酮的含量也都较高^[32-33]。此外,橙花醇也是重要的醇类物质,橙花醇是甜香和糖香嗅觉的物质基础,是中国红茶香气的重要特色之一^[34];酯类化合物多呈现水果清香,对红茶香型的形成也起着重大贡献作用^[35]。曹晓念等^[36]采用 HS-SPME/GC-MS 分析比较了川红、宁红、祁红、滇红、正山小种红茶的香气成分,结果表明滇红茶中挥发性香气物质种类更丰富,且主要呈香物质芳樟醇的含量高于其他红茶。

表 2 工夫红茶中的关键呈香物质
Table 2 Key aroma compounds in Congou black tea

红茶名称	萃取方法	鉴定方法	特征成分	参考文献
工夫红茶	HS-SPME	GC-O	芳樟醇、苯甲醛、芳樟醇氧化物、反、反-2,4-庚二烯醛	葛晓杰等 ^[19]
工夫红茶	HS-SPME	AEDA/OAV	1-戊醇、叶醇、1-辛烯-3-醇、氧化芳樟醇、芳樟醇、6-壬烯醇、香叶醇、苯甲醇、苯乙醇、橙花叔醇、戊醛、己醛、2-己烯醛、糠醛、反、反-2,4-庚二烯醛、苯乙醛、反、反-2,4-癸二烯醛、水杨酸甲酯、丙位-壬内酯、2,3-丁二酮、2-庚酮、香豆素	肖作兵等 ^[20]
工夫红茶	HS-SPME	GC-O	芳樟醇、呋喃芳樟醇氧化物、吡喃芳樟醇氧化物、苯乙醇、 β -月桂烯、水杨酸甲酯	MAO 等 ^[18]
祁门红茶	SDE	GC-MS	反式香叶醇、芳樟醇及其氧化物、顺-3-己烯醇、苯乙醇、苯甲醇、反-2-己烯醇、苯乙醛、壬醛、顺式茉莉酮、植醇	赵常锐 ^[21]
工夫红茶	HS-SPME	GC-O	反、反-2,4-庚二烯醛、反、反-3,5-辛二烯-2-酮、脱氢芳樟醇、苯甲醛、橙花醇、芳樟醇、香叶醇、苯甲醇、苯乙醇	狄德荣 ^[22]
祁门红茶	SDE	GC-MS	香叶醇、芳樟醇及其氧化物、苯甲醇、植醇、苯乙醛、2-己烯醛、十六酸	雷攀登等 ^[23]
川红工夫	SPME	GC-MS	反-香叶醇、水杨酸甲酯、苯乙醇、芳樟醇及其氧化物、苯甲醛、苯乙醛、苯甲醇、反-2-己烯醛	周雪芳等 ^[24]
宁红茶	HS-SPME	GC-MS	香叶醇、反式-橙花叔醇、苯乙醇、苯甲醛、芳樟醇、 α -紫罗酮、 β -水芹烯、罗勒烯、 β -紫罗酮、橙花醇、棕榈酸乙酯、3-糠醛、苯甲醇、己酸、反式-3-己烯酸、水杨酸甲酯	岳翠男等 ^[25]
江西工夫红茶	HS-SPME	GC-MS	芳樟醇、香叶醇、苯甲醇、2-呋喃甲醇、苯乙醛、棕榈酸甲酯、邻苯二甲酸二异丁酯、呋喃醇、橙花醇、水杨酸甲酯、甲基吡嗪、苯乙醇	YUE 等 ^[26]

注: SDE: simultaneous solvent extraction, 同时蒸馏萃取; AEDA: aroma extract dilution analysis, 香气提取物稀释分析。

云南红茶中, 工夫红茶和红碎茶的香气成分组成基本一致, 但在含量上有差异^[37], 工夫红茶的苯乙醛、香叶醇、苯乙醇等物质含量较红碎茶高。云南中小叶种红茶主要香型以花香甜香为主, 具体化合物为芳樟醇、苯乙醇、芳樟醇氧化物、香叶醇、苯甲醇、苯乙醛、顺-茉莉酮、二氢猕猴桃内酯、橙花叔醇、植物醇等, 较滇红茶有很大区别^[38]。云南不同茶区的红碎茶香气也存在各自的地方风格, 与各地栽培品种资源不同有关^[39]。滇红主要用作拼配茶来提高茶叶香气, 不同品种和地方之间的茶叶香气区别在红茶拼配及新产品的开发上有一定的利用价值。

地方特色茶树资源受人工栽培和复杂的自然环境影响, 表现出与其他品种差别的特性, 近年来成为茶叶加工研究的一个热点。广东地方红茶香气特征表现为花香、甜香和果香, 芳樟醇、橙花醇、水杨酸甲酯、氧化芳樟醇、壬醛是 5 种最主要的呈香物质^[40]; 英德红茶中醇类物质含量最高, 5 种主要呈香物质占英德红茶香气物质总量的 60% 以上, 是英红呈现蔗糖甜香、花香的物质基础^[41]。此外, 对广东单丛茶树品种和罗坑野生茶树品种红茶的特异性香气成分的分析鉴定表明^[42-43], 花蜜香是单丛红茶的典型香气特征, 5 种主要呈香物质占香气总量 60% 以上; 香叶醇、苯甲醛、 β -芳樟醇和水杨酸甲酯是罗坑野生红茶香气化合物中 4 种最主要的成分, 与苯乙醛、脱氢芳樟醇及 β -紫罗酮共同构成主导香气成分, 其中苯甲醛是特异性香气成分, 也是罗坑野生红茶杏仁香的重要体现物质。湖南省 3 个地方性资源(汝城白毛茶、江华苦茶、桑植大叶茶)工夫红茶的香气成分主要有香叶醇、水杨酸甲酯、 β -芳樟醇、橙花叔醇、 β -紫罗酮、反-3,7-二甲基-2,6-辛二烯酸、苯乙醇、氧化芳樟醇II(呋喃型)、3-甲基呋喃、苯甲醇、苯甲醛、顺-己酸-3-己烯酯、氧化芳樟醇I(呋喃型)等^[44]。湖北红茶的香气以甜香为主, 带花果香、糖香和高火香。郑鹏程等^[45]在 32 个湖北不同区域的红茶样中分析鉴定出 93 种香气成分和 10 个关键香气成分的 OAV 相对较高的组分, 醇类和醛类是主要的香气化合物, 含量相对较高的有芳樟醇、香叶醇、水杨酸甲酯和乙醛等; 10 个 OAV 相对较高的组分为芳樟醇、 β -大马烯酮、 β -紫罗酮、癸醛、香叶醇、顺-4-庚烯醛、反-2-壬烯醛、己醛、1-辛烯-3-醇和反,反-2,4-壬二烯醛, 对湖北红茶香气特征贡献较大。

用乌龙茶品种制作的红茶, 香气高爽带花香。赖幸菲等^[46]采用不同季节的金萱品种鲜叶加工的红茶, 从中检测出 50 种香气物质, 主导香气成分以醇类和醛类为主, 春茶中橙花醇、苯乙醛含量较高, 夏茶中 β -芳樟醇和橙花醇含量较高, 秋茶中相对含量最高的是脱氢芳樟醇和水杨酸甲酯, 其中秋茶香气品质最好, 香气鲜爽带花果香。乌龙茶品种制成的花香型红茶(金观音红茶和黄观音红茶)除了含有芳樟醇、香叶醇、苯甲醇、苯乙醇等红茶特征性香气成分外, 还含有乌龙茶的特征性香气成分, 包括橙花叔醇、 α -法尼烯、吲哚等, 花香较其他红茶花香更加明显^[47]。

氨基酸对茶叶香气形成有一定促进作用, 一方面氨基酸可氧化成为有香气的物质, 另一方面某些氨基酸本身带有香气。高氨基酸茶树品种多为白化品种。狄德荣^[22]对安吉白茶鲜叶为原料加工而成的红茶新产品进行呈香活性成分鉴定, 得出顺式-芳樟醇氧化物、(E,E)-2,4-庚二烯醛、(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮、苯甲醛、芳樟醇、脱氢芳樟醇、苯乙醛、氧化芳樟醇、香叶醇、苯甲醇、苯乙醇等成分是“安吉红茶”的关键呈香物质。

4 加工工艺对工夫红茶特征香气的影响

加工是工夫红茶香气形成的关键, 加工过程中香气物质的变化十分复杂, 在酶促或非酶促氧化作用、湿热作用等理化反应引起了大量挥发性物质的激发和保留, 综合形成了工夫红茶的特征香型。

4.1 萎凋

萎凋是工夫红茶中香气物质形成的基础工序。研究表明^[48], 萎凋的香气物质总量增加将近为鲜叶的一倍。鲜叶经过萎凋后部分芳香物质的含量增加, 如橙花醇、芳樟醇氧化物等, 也有部分呈降低的趋势, 如芳樟醇、香叶醇、苯甲醇等。

萎凋阶段易受光照、温度等因素影响。采用人工光照可提高 β -葡萄糖苷酶活性, 提升茶叶香气^[49], 尤其是黄光、红光、橙光等光质处理影响较大^[50]。经黄光萎凋处理后, 红茶的香气总量显著增加, 主要是一些具有花香、果香的成分, 尤其是香叶醇, 同时一些具有青气等不利气味成分含量减少或消失^[51]。多项研究表明^[52-54], 对鲜叶进行冷冻萎凋处理, 抑制了香气形成关键酶 β -葡萄糖苷酶的活性, 不利于红茶香气形成。

近年来, 为进一步满足市场需求, 提高红茶香气品质, 丰富红茶香气类型, 在充分利用丰富的茶树种质资源的基础上, 乌龙茶的晒青、做青工艺也被借鉴到红茶的萎凋工序中。乔小燕等^[55]分析了不同萎凋方式对金萱红茶香气影响, 结果表明萎凋方式对主要挥发性组分影响不大, 但可引起挥发性成分相对含量的变化, 从而改变茶叶香型, 采用日光萎凋的金萱红茶花香明显, 而鼓风机萎凋则甜香明显。增加摇青工艺制得花香型红茶与普通红茶在香叶醇、水杨酸甲酯、 α -毕橙茄醇、香叶基丙酮等成分上存在显著区别, 具有梨似的酸甜味道的乙酸己酯、苹果香韵的(E)-乙酸-2-己烯-1-醇酯及微有特殊气味的壬酸等的相对含量在摇青叶中较高, 是摇青叶香气特征的主要影响物质^[56]。很多香气物质仅在摇青工艺中产生, 如波斯菊萜、异戊酸己酯、苯甲酸己酯等^[57]。

4.2 揉捻

揉捻是工夫红茶酶促氧化的重要工序。由于外力作用, 鲜叶细胞组织破损, 糖苷类香气前体物质与水解酶发生作

用反应,形成大量香气物质。揉捻阶段挥发性香气成分含量从鲜叶的0.012%增加到0.034%,主要增加的化合物为青叶醇、青叶醛等^[48]。糖苷的水解主要发生在揉捻阶段^[58],此外,类胡萝卜素的降解和脂质的降解也是香气的主要来源。不同揉捻温度处理的工夫红茶在主要香气类别总量上存在显著性差异,朱宏凯等^[59]研究表明,低温揉捻(18~22℃)在香气种类和含量上均超过中温(28~32℃)、高温(38~42℃)处理,尤其是醛类、醇类及酮类等,如2-甲基丁醛、正己醛、顺-2-己烯醛、苯乙醛、辛醛、反-2-辛烯醛、 β -芳樟醇、橙花醇、十五醇、顺-橙花叔醇、水杨酸甲酯、3,5-辛二烯-2-酮、 α -雪松烯、紫罗酮和香叶基丙酮等的含量,这些都是工夫红茶的重要香气成分。在此温度范围内揉捻更有利于发展红茶的花果香和甜香^[60]。

4.3 发酵

发酵是红茶香气品质形成的关键工序。发酵过程中的大量香气物质形成主要通过糖苷类物质的水解和多酚的偶联氧化作用。氨基酸、胡萝卜素、亚麻酸等不饱和脂肪酸在多酚的氧化产物邻醌的作用下,氧化降解生成挥发性香气物质^[61],其中反-2-己烯醛(青叶醛)生成显著,胡萝卜素转化形成紫罗酮关联物^[62]。发酵阶段几乎所有的香气化合物含量都增加,红茶特征性香气成分增加明显^[3],尤其是具有浓烈花香和果香的苯甲醇、苯乙醇、沉香醇氧化物等^[63]。任洪涛等^[48]研究了云南大叶种红茶的发酵过程,得出正己醛、糠醛、青叶醛、青叶醇、苯乙醛、苯甲醇、苯乙醇、苯甲醛、香叶醇等主要化合物相对含量显著增加,芳樟醇、芳樟醇氧化物、 α -松油醇等显著减少。通氧发酵处理能不同程度地增加成品茶中醇类、醛类及酮类物质,香气组分种类也有所增加^[64]。不同发酵温度处理对红茶香气的形成也有一定影响,发酵温度24℃的处理较发酵温度30℃的处理醇类和酮类化合物含量高,更有利于甜香和花果香的形成^[65]。鸭屎香单丛红茶发酵过程中,增加的香气以甜花香为主,主要香气化合物有苯乙醛、芳樟醇、香叶醇、氧化芳樟醇、二氢芳樟醇、2-戊基呋喃等,而具有清香的己醛、青叶醛、青叶醇、苯乙醇、 α -松油醇、水杨酸甲酯、吡啶等物质则显著减少,这些成分的增减协调使发酵叶初步构成红茶的香气特征^[66]。

4.4 干燥

干燥是工夫红茶品质的固定工序。高温下低沸点的香气化合物挥发,含量明显减少,但高沸点的芳香物质得到保留,同时在类胡萝卜素热降解、焦糖化反应和美拉德反应等非酶促氧化反应作用下,香气化合物的种类增多。

干燥方式对工夫红茶香气成分有一定的影响。滑金杰等^[67]采用偏最小二乘判别分析(partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)结合差异性分析获得区分工夫红茶毛火方式的标志性差异挥发性化合物有2,4,6-三(1,1-

二甲基乙基)-4-甲基环己-2,5-二烯-1-酮、香叶醇、3-辛酮、水杨酸甲酯,可作为定向加工甜香型工夫红茶的指标物质。微波干燥有利于迅速钝化酶活,加快香气物质的非酶促氧化、美拉德和焦糖化反应,同时缩短了热化学反应时间,增加了芳樟醇、芳樟醇氧化物、苯乙醇等甜花香型成分的保留量。崔俪丹等^[68]研究表明,与传统热风初干工艺相比,采用微波初干工艺技术,红茶香气品质成分由43种增加到50种,其中芳樟醇、苯乙醇等花果香香气成分的相对含量显著提高,并产生了(Z)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯-1-醇、2,6,6-三甲基-1,3-环己二烯-1-甲醛、2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-甲醛、丁香酚等甜香、花香成分。提香有利于茶叶甜香风味的形成^[69],芳樟醇、苯甲醇等含量下降,苯甲醛、(E)- β -紫罗酮、反式-橙花叔醇等物质含量升高,同时还出现吡嗪、嘧啶等具有烘烤香的杂环化合物,顺-3-己烯醇、甲基庚烯酮、2,3-二氢-2,2,6-三甲基苯甲醛、(Z)-橙花醇、大马士酮、己酸己酯、香叶基丙酮、可卡醛、二苯甲酮、棕榈酸甲酯、棕榈酸乙酯等具有花果香的成分物质提香后相对含量也出现不同程度的升高^[70]。冷冻干燥技术可有效保留红茶原始风味及营养物质,但由于未经高温处理,低沸点的挥发性物质保留,有较浓的青草气息,需后期采用高温提香处理,可有效降低青草气并产生甜果香^[71]。

干燥环节中工夫红茶挥发性成分的变化受温度影响较大。初烘过程中,随着温度增加,苯乙醇、苯甲醇、香叶醇、 β -紫罗酮等物质含量都有所增加,芳樟醇等低沸点的脂肪族醇醛类物质含量则减少;复烘过程中,香叶醇、苯乙醇、苯甲醇等含量随着温度升高而增加,苯甲醛、反式-2-己烯醛、芳樟醇等物质含量减少^[72]。

5 结束语

工夫红茶因其原料和独特的加工工艺,香型丰富且地域性明显,茶叶香气物质成分及其形成途径复杂途径。工夫红茶的特征香气是香气成分的不同种类和含量组合及对嗅觉神经综合作用的结果,其差异性与茶树品种、产地(栽培环境条件)及加工工艺密不可分,现在红茶研究较多集中在不同品种和地区之间的工夫红茶香气检测鉴定和比较,同一地区同品种不同生态环境的工夫红茶香气成分之间的差异性还有待研究,如不同海拔对工夫红茶香气的影响。

由于香气化合物的阈值差异悬殊,工夫红茶香型的判断也受人为因素的影响,目前人工审评很难准确地区分工夫红茶香气的不同特性,含量高的香气成分不一定就对香型贡献大,茶叶关键呈香物质的含量与茶叶香气审评结果也没有确切的数学关系,同时加工过程和提取过程也会产生较大差异,很难完全重复。因此,不仅对茶叶香气关键呈香物质的检测技术和分析方法有了更高的要求,特性香气成分的组成、含量变化以及加工工艺对香气类型的影

响还有待进一步积累大量更全面的茶叶样品进行科学性分析和综合评价来确定, 以期为工夫红茶的加工技术提升和香气品质调控提供较为充分的基础数据依据。

参考文献

- [1] 彭迎. 我国红茶产业现状及可持续发展对策[J]. 中国食物与营养, 2017, 23(7): 25–28.
PENG Y. Status and development strategies of Chinese black tea [J]. Food Nutr China, 2017, 23(7): 25–28.
- [2] 李小娜. 工夫红茶风味感官品质与化学品质研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
LI XY. Relationship between sensory character and chemical components of Congou's flavor [D]. Chongqing: Southwest University, 2015.
- [3] 张娅楠, 欧伊伶, 覃丽, 等. 红茶中香气物质的形成及工艺对其影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(11): 351–357.
ZHANG YN, OU YL, QIN L, *et al.* Research progress on the formation of aroma substances and its influence of processes in black tea [J]. Sci Technol Food Ind, 2019, 40(11): 351–357.
- [4] 陈昌辉, 杜晓, 齐桂年. 工夫红茶主要内含成分与品质的相关性分析[J]. 食品科技, 2011, 36(9): 83–87.
CHEN CH, DU X, QI GN. The relativity analysis between the main components of congou black tea and its quality [J]. Food Sci Technol, 2011, 36(9): 83–87.
- [5] MICK W, SCHREIER P. Additional volatiles of black tea aroma [J]. J Agric Food Chem, 1984, 32(4): 924–929.
- [6] 王秋霜, 陈栋, 吴华玲. 红茶香气研究进展[J]. 广东农业科学, 2011, 38(18): 86–88.
WANG QS, CHEN D, WU HL. Research progress on aroma of black tea [J]. Guangdong Agric Sci, 2011, 38(18): 86–88.
- [7] 赵丹, 吕才有. 红茶香气研究进展[J]. 安徽农业科学, 2016, (23): 45–46, 83.
ZHAO D, LV CY. Research progress of the aroma of black tea [J]. J Anhui Agric Sci, 2016, (23): 45–46, 83.
- [8] MAO SH, LU CQ, LI MF, *et al.* Identification of key aromatic compounds in Congou black tea by PLSR with variable importance of projection scores and gas chromatography mass spectrometry/gas chromatography-olfactometry: Identification of key aromatic compounds in Congou black tea by PLS [J]. Sci Food Agric, 2018, 98(14): 5278–5286.
- [9] 施莉婷, 江和源, 张建勇, 等. 茶叶香气成分及其检测技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, (12): 347–351.
SHI LT, JIANG HY, ZHANG JY, *et al.* Progress on components and detection technology of tea aroma [J]. Sci Technol Food Ind, 2018, (12): 347–351.
- [10] 毛世红. 基于风味组学的工夫红茶品质分析与控制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
MAO SH. Quality analysis and control of Congou black tea based on sensomics [D]. Chongqing: Southwest University, 2018.
- [11] ZHU JC, CHEN F, WANG LY, *et al.* Comparison of aroma-active volatiles in oolong tea infusions using GC-olfactometry, GC-FPD, and GC-MS [J]. J Agric Food Chem, 2015, 63(34): 7499–7510.
- [12] BABA R, KUMAZAWA K. Characterization of the potent odorants contributing to the characteristic aroma of Chinese green tea infusions by aroma extract dilution analysis [J]. J Agric Food Chem, 2014, 62(33): 8308–8313.
- [13] XIAO ZB, WANG HL, NIU YW, *et al.* Characterization of aroma compositions in different Chinese congou black teas using GC-MS and GC-O combined with partial least squares regression [J]. Flavour Frag J, 2017, 32(4): 265–276.
- [14] 舒庆龄, 赵和涛. 祁门红茶香气成分的初步研究[J]. 植物学报, 1991, 33(3): 226–231.
SHU QL, ZHAO HT. Preliminary studies on flavour volatiles in Qimen black tea [J]. Acta Bot Sin, 1991, 33(3): 226–231.
- [15] PANG XL, QIN ZH, ZHAO L, *et al.* Development of regression model to differentiate quality of black tea (Dianhong): Correlate aroma properties with instrumental data using multiple linear regression analysis [J]. Int J Food Sci Technol, 2012, 47(11): 2372–2379.
- [16] 王红玲. 祁门红茶特征香气成分研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2017.
WANG HL. Characterization of aroma compositions of Keemun black tea [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2017.
- [17] 陈娇娇. 茶叶挥发性成分定量方法建立与六大茶类香气骨架成分确定[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2020.
CHEN JJ. Establishment of quantitative method and determination of skeletal volatile components of six types of tea [D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2020.
- [18] 袁海波, 尹军峰, 叶国注, 等. 茶叶香型及特征物质研究进展(续)[J]. 中国茶叶, 2009, 31(9): 11–13.
YUAN HB, YIN JF, YE GZ, *et al.* Research progress of tea flavor and characteristic substances (continued) [J]. China Tea, 2009, 31(9): 11–13.
- [19] 葛晓杰, 苏祝成, 狄德荣, 等. 基于顶空固相微萃取/气质联用的红茶特征香型呈香活性成分研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(23): 304–310.
GE XJ, SU ZC, DI DR, *et al.* Comparison of odor-active components of two different odor type 'Black Tea' based on HS-SPME/GC-O-MS [J]. Sci Technol Food Ind, 2016, 37(23): 304–310.
- [20] 肖作兵, 王红玲, 牛云蔚, 等. 基于 OAV 和 AEDA 对工夫红茶的 PLSR 分析[J]. 食品科学, 2018, 39(10): 242–249.
XIAO ZB, WANG HL, NIU YW, *et al.* Analysis of aroma components in four Chinese Congou black teas by odor active values and aroma extract dilution analysis coupled with partial least squares regression [J]. Food Sci, 2018, 39(10): 242–249.
- [21] 赵常锐. 祁门红茶特征香气成分研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2010.
ZHAO CR. Studies on the characteristic aroma components of Qimen black tea [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2010.
- [22] 狄德荣. “安吉红茶”理化成分分析及呈香活性成分鉴定[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014.
DI DR. Analysis of physicochemical compositions of “Anji black tea” and identification its aroma-active components [D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2014.

- [23] 雷攀登, 黄建琴, 丁勇, 等. 不同区域祁门红茶品质特点分析[J]. 食品科学, 2015, 36(10): 144-149.
LEI PD, HUANG JQ, DING Y, *et al.* Quality characteristics of Keemun black tea from various regions [J]. Food Sci, 2015, 36(10): 144-149.
- [24] 周雪芳, 唐洪, 雷茜, 等. 四川工夫红茶香气成分分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2011, (3): 178-182.
ZHOU XF, TANG H, LEI Q, *et al.* Analysis of aroma components of sichuan black tea [J]. J Southwest Chin Norm Univ (Nat Sci Ed), 2011, (3): 178-182.
- [25] 岳翠男, 秦丹丹, 蔡海兰, 等. QDA 和 GC-MS 结合 PLSR 分析宁红茶中的风味物质[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(7): 225-231.
YUE CN, QIN DD, CAI HL, *et al.* Flavor compounds in Ning black tea by QDA and GC-MS combined with PLSR [J]. Food Ferment Ind, 2021, 47(7): 225-231.
- [26] YUE CN, YANG PX, QIN DD, *et al.* Identification of volatile components and analysis of aroma characteristics of Jiangxi Congou black tea [J]. Int J Food Prop, 2020, 23(1): 2160-2173.
- [27] 刘飞, 王云, 张厅, 等. 红茶加工过程香气变化研究进展[J]. 茶叶科学, 2018, 38(1): 9-19.
LIU F, WANG Y, ZHANG T, *et al.* Review on aroma change during black tea processing [J]. J Tea Sci, 2018, 38(1): 9-19.
- [28] 廖书娟, 童华荣. 不同茶树品种脂肪酸和糖苷类香气前体分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2008, 30(8): 62-66.
LIAO SJ, TONG HR. Studies on the fatty acid and glycoside aroma precursors of different tea varieties [J]. J Southwest Univ (Nat Sci Ed), 2008, 30(8): 62-66.
- [29] 方维亚, 陈萍. 不同地区红茶特异性香气成分比较研究[J]. 茶叶, 2014, 40(3): 138-145.
FANG WY, CHEN P. Comparative study on characteristic aroma components of black teas from different regions [J]. J Tea, 2014, 40(3): 138-145.
- [30] 李健权. 不同产地红茶香气成分的测定及分析[J]. 湖南农业科学, 2017, (8): 85-92, 97.
LI JQ. Analysis of aromacomponents of blackteas from different regions [J]. Hunan Agric Sci, 2017, (8): 85-92, 97.
- [31] KANANI DM, NIKHADE BP, BALAKRISHNAN P, *et al.* Recovery of valuable tea aroma components by pervaporation [J]. Ius Eng Chem Res, 2003, 42(26): 6924-6932.
- [32] SCHUH C, SCHIEBERLE P. Characterization of the key aroma compounds in the beverage prepared from Darjeeling black tea: Quantitative differences between tea leaves and infusion [J]. Agric Food Chem, 2006, 54(3): 916-924.
- [33] 廉明, 吕世懂, 吴远双, 等. 我国 4 种红茶的挥发性成分分析[J]. 热带亚热带植物学报, 2015, 23(3): 301-309.
LIAN M, LV SD, WU YS, *et al.* Analysis of volatile compounds of four kinds of black tea from China [J]. J Trop Subtrop Bot, 2015, 23(3): 301-309.
- [34] 王秋霜, 陈栋, 许勇泉, 等. 中国名优红茶香气成分的比较研究[J]. 中国食品学报, 2013, 13(1): 195-200.
WANG QS, CHEN D, XU YQ, *et al.* Study on the aroma components in Chinese famous black tea [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2013, 13(1): 195-200.
- [35] 彭云, 李果, 刘学艳, 等. 不同产地红茶香气品质的 SPME/GC-MS 分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(9): 228-235.
PENG Y, LI G, LIU XY, *et al.* SPME/GC-MS analysis of aroma quality of black tea from different producing areas [J]. Sci Technol Food Ind, 2021, 42(9): 228-235.
- [36] 曹晓念, 周志磊, 刘青青, 等. 基于香气成分的红茶品种比较分析[J]. 食品与发酵科技, 2020, 56(3): 118-122.
CAO XN, ZHOU ZL, LIU QQ, *et al.* The characteristics analysis of black tea based on kinds and aroma components [J]. Food Ferment Technol, 2020, 56(3): 118-122.
- [37] 任洪涛, 周斌, 方林江, 等. 云南红茶的香气特征研究[J]. 茶叶科学技术, 2012, (3): 1-8.
REN HT, ZHOU B, FANG LJ, *et al.* Study on the characteristic aroma components of Yunnan black tea [J]. Tea Sci Technol, 2012, (3): 1-8.
- [38] 易超, 吕才有. 基于 GC-MS 的几种云南中小叶种红茶香气分析[J]. 黑龙江农业科学, 2019, (3): 122-126.
YI C, LV CY. Aroma analysis of several small and medium leaf black tea in Yunnan based on GC-MS [J]. Heilongjiang Agric Sci, 2019, (3): 122-126.
- [39] 杨盛美, 许玫, 唐一春, 等. 云南不同茶区茶树种质资源的红碎茶香气成分研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(11): 156-161.
YANG SM, XU M, TANG YC, *et al.* Study on aromatic compositions of the broken black tea from different tea areas in Yunnan [J]. Chin Agric Sci Bull, 2015, 31(11): 156-161.
- [40] 王秋霜, 陈栋, 许勇泉, 等. 广东红茶香气成分的比较研究[J]. 茶叶科学, 2012, 32(1): 9-16.
WANG QS, CHEN D, XU YQ, *et al.* Investigation and comparison of the aroma components in Guangdong black tea [J]. J Tea Sci, 2012, 32(1): 9-16.
- [41] 王秋霜, 吴华玲, 陈栋, 等. 广东英德红茶代表产品的香气成分鉴定研究[J]. 茶叶科学, 2012, 32(5): 448-456.
WANG QS, WU HL, CHEN D, *et al.* Study and identification on the aroma components of the representative products of Yingde black tea in Guangdong [J]. J Tea Sci, 2012, 32(5): 448-456.
- [42] 王秋霜, 刘淑媚, 姜晓辉, 等. 广东罗坑野生茶树群落红茶香气物质鉴别[J]. 中国农学通报, 2015, 31(5): 120-126.
WANG QS, LIU SM, JIANG XH, *et al.* Analysis of aroma components in black tea made from wild tea community in Luokeng Guangdong [J]. Chin Agric Sci Bull, 2015, 31(5): 120-126.
- [43] 王秋霜, 乔小燕, 操君喜, 等. 广东单丛茶树品种红茶香气成分的 GC-MS 分析[J]. 食品科学, 2015, 36(4): 114-118.
WANG QS, QIAO XY, CAO JX, *et al.* Analysis of flavor components in black tea made from Guangdong Dancong tea variety by GC-MS [J]. Food Sci, 2015, 36(4): 114-118.
- [44] 黄怀生, 粟本文, 钟兴刚, 等. 湖南地方特色茶树资源加工的工夫红茶香气特征研究[J]. 广东农业科学, 2019, 46(1): 101-107.

- HUANG HS, LI BW, ZHONG XG, *et al.* Aroma characteristics of Congou black teas made from local tea plant resource in Hunan [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2019, 46(1): 101–107.
- [45] 郑鹏程, 刘盼盼, 龚自明, 等. 湖北红茶特征性香气成分分析[J]. *茶叶科学*, 2017, 37(5): 465–475.
- ZHENG PC, LIU PP, GONG ZM, *et al.* Analysis of characteristic aroma components of Hubei black tea [J]. *J Tea Sci*, 2017, 37(5): 465–475.
- [46] 赖幸菲, 潘顺顺, 李裕南, 等. 不同季节和茶类的金萱品种茶叶香气成分分析[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(10): 62–68.
- LAI XF, PAN SS, LI YN, *et al.* Analysis of aromatic components in Jinxuan tea of different kinds and seasons [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2015, 36(10): 62–68.
- [47] 徐元骏, 何靓, 贾玲燕, 等. 不同地区及特殊品种红茶香气的差异性[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2015, 41(3): 323–330.
- XU YJ, HE L, JIA LY, *et al.* Difference of aroma compositions on different regions and special varieties of black tea [J]. *J Zhejiang Univ (Agric Life Sci)*, 2015, 41(3): 323–330.
- [48] 任洪涛, 周斌, 方林江, 等. 云南红茶加工过程中香气成分的变化[J]. *食品与发酵工业*, 2013, (3): 187–191.
- REN HT, ZHOU B, FANG LJ, *et al.* Analysis of the aroma components in the processing of Yunnan black tea [J]. *Food Ferment Ind*, 2013, (3): 187–191.
- [49] 范仕胜, 晋秀, 杨清, 等. 人工光照萎凋对茶叶主要品质成分与酶活性的影响[J]. *湖北农业科学*, 2012, (6): 1152–1155.
- FANG SH, JIN X, YANG Q, *et al.* Effects on main quality components and enzyme activity of tea leaves by artificial light withering [J]. *Hubei Agric Sci*, 2012, (6): 1152–1155.
- [50] 张贝贝. 不同光质萎凋对红茶品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- ZHANG BB. Effect of different light withering on the quality of black tea [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017.
- [51] 张贝贝, 艾仄宜, 曲凤凤, 等. 黄光萎凋对红茶品质的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2016, (2): 108–114.
- ZHANG BB, AI ZY, QU FF, *et al.* Effect of yellow light irradiation during withering of tea leaves on the qualities of black tea [J]. *J Huazhong Agric Univ*, 2016, (2): 108–114.
- [52] 夏涛, 童启庆. 冷冻萎凋对茶叶多酚氧化酶和葡萄糖苷酶活性的影响初探[J]. *浙江农业大学学报*, 1997, 23(1): 108–110.
- XIA T, TONG QQ. Effect of freeze withering on polyphenol oxidase and glucosidase activity of tea leaves [J]. *J Zhejiang Agric Univ*, 1997, 23(1): 108–110.
- [53] 黄建琴, 王文杰, 丁勇, 等. 冷冻萎凋对工夫红茶品质的影响研究[J]. *中国茶叶*, 2005, (2): 18–19.
- HUANG JQ, WANG WJ, DING Y, *et al.* The effects of freezing withering on quality of congou black tea [J]. *China Tea*, 2005, (2): 18–19.
- [54] MUTHUMANI T, KUMAR R. Studies on freeze-withering in black tea manufacturing [J]. *Food Chem*, 2007, 101(1): 103–106.
- [55] 乔小燕, 操君喜, 吴华玲, 等. 不同萎凋方式和碰青工艺对红茶挥发性成分的影响[J]. *热带作物学报*, 2017, 38(8): 1572–1577.
- QIAO XY, CAO JX, WU HL, *et al.* Effects of different withering measures and peng-qing treatments on volatile flavor compounds of black tea [J]. *Chin J Trop Crops*, 2017, 38(8): 1572–1577.
- [56] 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 YF, DI TM, YANG SL, *et al.* Changes in aroma components in the processing of flowery black tea [J]. *Food Sci*, 2018, 39(8): 167–175.
- [57] 潘一斌. 花果香型工夫红茶香气特征及关键工艺研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.
- PANG YB. Studies on the aroma characteristic and the key technology of Congou black tea with flowery-fruity flavor [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2014.
- [58] WANG DM, ERIKO KURASAWA, YUICHI YAMAGUCHI, *et al.* Analysis of glycosidically bound aroma precursors in tea leaves. 2. Changes in glycoside contents and glycosidase activities in tea leaves during the black tea manufacturing process [J]. *J Agric Food Chem*, 2001, 49(4): 1900–1903.
- [59] 朱宏凯, 何华锋, 叶阳, 等. 温度对工夫红茶揉捻理化品质的影响[J]. *现代食品科技*, 2017, 33(5): 168–175.
- ZHU HK, HE HF, YE Y, *et al.* Influence of rolling temperature on physicochemical quality of Congou black tea [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2017, 33(5): 168–175.
- [60] 蒋金星. 揉捻温度对工夫红茶品质的影响研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- JIANG JX. Study on the effect of rolling temperature on quality of Congou black tea [D]. Chongqing: Southwest University, 2017.
- [61] SELVENDRAN RR, REYNOLDS J, GALLIARD T. Production of volatiles by degradation of lipids during manufacture of black tea [J]. *Phytochemistry*, 1978, 17(2): 233–236.
- [62] 宛晓春. 茶叶生物化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- WANG XC. *Tea Biochemistry* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003.
- [63] 赵和涛. 红茶发酵时主要化学变化及不同发酵方法对工夫红茶品质的影响[J]. *蚕桑茶叶通讯*, 1989, (2): 10–13.
- ZHAO HT. Main chemical changes during black tea fermentation and effects of different fermentation methods on quality of Congou black tea [J]. *Newsl Seri Tea*, 1989, (2): 10–13.
- [64] 潘科, 冯林, 陈娟, 等. HS-SPME-GC-MS 联用法分析不同通氧发酵加工工艺红茶香气成分[J]. *食品科学*, 2015, 36(8): 181–186.
- PAN K, FENG L, CHEN J, *et al.* Analysis of aroma compounds in black tea ventilated with oxygen for different durations during the fermentation process by head space-solid phase micro-extraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Food Sci*, 2015, 36(8): 181–186.
- [65] 宋晓东, 赵瑶, 陈玉, 等. 发酵条件对宜昌红茶香气的影响[J]. *中国茶叶加工*, 2021, (2): 32–35.
- SONG XD, ZHAO Y, CHEN Y, *et al.* Effect of fermentation conditions on aroma of Yichang black tea [J]. *China Tea Process*, 2021, (2): 32–35.
- [66] 杨永利, 郭守军, 苏杭, 等. 鸭屎香单丛红茶加工过程中香气成份的变化[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(22): 82–90.

- YANG YL, GUO SJ, SU H, *et al.* Changes in the aroma components of Yashixiang dancong black tea during processing [J]. *Food Res Dev*, 2019, 40(22): 82–90.
- [67] 滑金杰, 王华杰, 王近近, 等. 采用 PLS-DA 分析毛火方式对工夫红茶品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(8): 260–270.
- HUA JJ, WANG HJ, WANG JJ, *et al.* Influences of first-drying methods on the quality of Congou black tea using partial least squares-discrimination analysis [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2020, 36(8): 260–270.
- [68] 崔偲丹, 张湘琳, 项希, 等. 微波初干工艺对红茶品质的影响[J]. *茶叶科学*, 2021, 41(3): 406–418.
- CUI LD, ZHANG XL, XIANG X, *et al.* The effect of initial microwave drying on black tea quality [J]. *J Tea Sci*, 2021, 41(3): 406–418.
- [69] 仇方方, 曲凤凤, 余志, 等. 微波和光波提香对工夫红茶品质的影响[J]. *中国茶叶加工*, 2018, (4): 48–52.
- QIU FF, QU FF, YU Z, *et al.* Effect of microwave and light-wave for aroma-improving on the quality of Congou black tea [J]. *China Tea Process*, 2018, (4): 48–52.
- [70] 仇方方, 曾维超, 曲凤凤, 等. 提香方式对工夫红茶品质的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(11): 82–87.
- QIU FF, ZENG WC, QU FF, *et al.* Effect of aroma enhancement methods on the quality of Congou black tea [J]. *Food Sci*, 2019, 40(11): 82–87.
- [71] 阳景阳, 罗莲凤, 骆妍妃, 等. 桂热 2 号红茶冷冻干燥关键技术研究及

品质评价[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(20): 97–104.

YANG JY, LUO LF, LUO YF, *et al.* Research on freeze-drying key technology and quality evaluation of Guire2 black tea [J]. *Food Ferment Ind*, 2021, 47(20): 97–104.

[72] 古能平. 红茶加工过程中干燥工艺对其主要挥发性物质的影响[J]. *食品工业*, 2018, 39(10): 78–81.

GU NP. The Effect of drying process on the main volatile substances in black tea processing [J]. *Food Ind*, 2018, 39(10): 78–81.

(责任编辑: 张晓寒 郑 丽)

作者简介



李 琛, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为茶叶加工。

Email: hanwuj11111@126.com



江新风, 博士, 副研究员, 主要研究方向为茶叶加工及资源利用。

Email: jiangxinyue003@163.com