

基于顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法分析 不同嫩度河红茶香气的差异

江新风^{1*}, 李琛¹, 曹挥华¹, 俞燕芳¹, 童忠飞¹, 李文金¹, 姚丽萍², 高银祥²

(1. 江西省经济作物研究所, 南昌 330046; 2. 九江学院药学院江西油茶研究中心, 九江 332000)

摘要: **目的** 了解不同嫩度河红茶特征香气组分情况。**方法** 利用顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱法, 对同一品种制作的不同嫩度的河红茶的香气组分进行分析。**结果** 河红茶中共检测并鉴定出 68 种香气成分。醇类、酸类、醛类、酮类、酯类、烯类、杂环类化合物相对含量分别为 14.03%~19.47%、1.29%~3.31%、3.64%~11.81%、0.94%~2.99%、10.29%~17.37%、1.43%~3.01%、4.03%~5.92%, 烷、萘及其他类化合物总相对含量低于 0.66%。不同的嫩度的河红茶香气物质含量及组成比例不尽相同; 香气化合物的含量也随着新梢嫩度的降低而提高, 香气成分含量以一芽三叶河红茶(T4)最优。通过正交偏最小二乘判别分析分析发现, 不同嫩度河红茶关键性成分分别为: 水杨酸甲酯、芳樟醇、苯乙醇、苯甲醇、己酸顺式-3-己烯酯、苯乙醛、 α -法呢烯、苯甲醛、 γ -杜松烯、(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯酸、癸酸乙酯、3-己烯-1-醇、反式氧化芳樟醇(呋喃类)、壬醛、 β -紫罗兰酮、反式氧化芳樟醇(吡喃类)、己酸己酯、 α -蒎烯。**结论** 不同嫩度河红茶呈现不同变化的关键性香气物质, 主要表现为花香、果香、青香、甜香等。以上结果阐明了河红茶香气成分分级指标, 为实现河红茶香气品质客观评价提供了参考。

关键词: 河红茶; 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法; 不同嫩度; 香气组分

Analysis of characteristic aroma components of different tenderness of Hekou black tea based on headspace solid-phase microextraction- gas chromatography-mass spectrometry

JIANG Xin-Feng^{1*}, LI Chen¹, CAO Hui-Hua¹, YU Yan-Fang¹, TONG Zhong-Fei¹,
LI Wen-Jin¹, YAO Li-Ping², GAO Yin-Xiang²

(1. Jiangxi Cash Crops Research Institute, Nanchang 330046, China; 2. Institute of Jiangxi Oil-tea Camellia,
Jiujiang University, Jiujiang 332000, China)

ABSTRACT: Objective To understand the changes in the aroma components during different grades of Hekou black teas. **Methods** Headspace solid-phase microextraction combined with gas chromatography-mass

基金项目: 江西省茶叶产业技术体系项目(JXARS-02)、江西省茶叶质量与安全控制重点实验室项目(20192BCD40007)、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、20212BDH80025)

Fund: Supported by the Modern Agricultural Industrial Technology System of Jiangxi Province (JXARS-02), the Jiangxi Key Laboratory of Tea Quality and Safety Control (20192BCD40007), and the Key Projects of Science and Technology Cooperation in Jiangxi Province (20212BDH8011, 20212BDH80025)

***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: jiangxinyue003@163.com

***Corresponding author:** JIANG Xin-Feng, Ph.D, Associate Professor, Jiangxi Cash Crops Research Institute, Nanchang 330046, China. E-mail: jiangxinyue003@163.com

spectrometry was used to analyze the aroma components of Hekou black teas made from the same tea plant variety.

Results The results showed that a total of 68 kinds of aroma compounds was detected and identified. The relative contents of alcohols, acids, aldehydes, ketones, esters, alenes and heterocyclic compounds were 14.03%–19.47%, 1.29%–3.31%, 3.64%–11.81%, 0.94%–2.99%, 10.29%–17.37%, 1.43%–3.01%, 4.03%–5.92%, respectively, and the total relative content of alkane, naphthalene and other compounds were lower than 0.66%. The content and composition ratio of aroma substances in different grades of Hekou black teas were not the same. The content of aroma compounds also increased with the decrease of shoot tenderness, and T4 was the excellent. Through orthogonal partial least squares discriminant analysis and Filter variance variables analysis, it was found that the key ingredients of different grades of river black tea were: Methyl salicylate, linalool, phenylethyl alcohol, (Z)-3-hexanoic acid hexenyl ester, phenylethyl alcohol, α -farnesene, benzaldehyde, (+)- γ -cadinene, (E)-3,7-dimethyl-2,6-octadienoic acid, decanoic acid ethyl ester and α -copaene. **Conclusion** Different Hekou black teas presents different key aroma substances, mainly including flower, fruit, green, sweet, etc.. The above results clarifies the classification index of aroma components of Hekou black teas, which provides a reference for the objective evaluation of Hehei tea aroma quality.

KEY WORDS: Hekou black teas; headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry; different grades; aroma components

0 引言

河红茶(又称河口红茶)产自于江西铅山县,与江西省修水县宁红茶、浮梁县浮红茶、铜鼓县宁红茶、井冈山市井冈红同属江西工夫红茶^[1]。铅山河红茶产业是铅山县主要的农业特色产业,更是“十四五”茶区全面推进乡村振兴和农民增收的支柱产业^[2]。铅山县种茶、制红茶历史悠久,具有深厚的茶文化底蕴,是江西省红茶主产区之一,截止2020年年底,铅山县茶园总面积10万亩,茶叶总产量4000 t,茶叶综合产值15亿元,茶农人均年茶叶收入达8000元以上^[3]。铅山地处武夷山北麓,丘陵山区密布,雨量充沛,湿度大,雾日长,得天独厚的气候环境十分有利于高品质茶叶种植,是农业部列为国家茶叶产业发展优势区域,制茶历史悠久,但是相对于福建、浙江等地生产力水平相对落后,制茶工艺不精湛,并且经济发展受限,导致茶叶产业发展效率低,存在发展缺口^[4]。随着国内经济形势的变化,江西省红茶消费需求发生了转变,消费者更青睐以细嫩茶鲜叶为原料,加工制作工夫红茶^[5]。因此外形秀美、风味独特、品质佳的工夫红茶产品得到快速发展。

目前,江西省茶叶主产区均可加工工夫红茶,省内知名红茶主要有宁红茶、浮红茶、河红茶、井冈红茶、遂川红茶、铜鼓红茶等,然而不同产区的环境条件、茶树品种、加工工艺不同,导致省内的工夫红茶产品有较大差异,如何客观准确地判定工夫红茶品质的优劣及差异,是茶叶研究热点之一^[6]。

茶叶香气主要是由挥发性物质组成,是评价茶叶品质的关键指标之一,茶叶中的香气成分不仅仅取决于挥发性香气组分的种类,还和这些香气组分的相对含量有关^[7]。顶

空固相微萃取(headspace solid-phase microextraction, HS-SPME)-气相色谱质谱法(gas chromatography-mass spectroscopy, GC-MS)通过固相萃取头涂层对茶叶香气物质进行富集,在GC-MS进样口用高温将萃取头香气物质解吸附,从而进行检测,具有分离效率高、鉴别能力强,易于定性等特点,可以真实地反映茶叶香气物质特点^[7-8]。根据河红茶加工技术规程中鲜叶原料的分类,河红茶一般分为河红贡芽(特级、一级)、河红工夫(一级、二级、三级)、河红老枞(不分级)。虽然目前国内有不少研究是针对不同区域、不同品种的代表性红茶的香气成分进行检测或比较^[9-12],但同一地区同一品种不同嫩度工夫红茶香气成分间的差异性有待进一步研究^[7]。比如相同品种制作的河红茶,一般研究均偏向于品种适应性、生物物质的变化等^[1,3],而不同嫩度间香气成分差异研究还处于空白阶段。河红茶作为江西极具代表的红茶之一,对于同一产地、同一品种不同嫩度的河红茶香气组成、关键呈香物质及香气成分差异等方面的研究具有重要意义。鉴于此,本研究采用HS-SPME-GC-MS联用技术对不同等级(嫩度)河红茶的香气组成成分进行测定,并对其香气成分差异进行分析,确定各关键呈香物质在不同嫩度河红茶中的分布规律,有利于了解不同嫩度河红香气的品质特点,为加工实践中不断优化与改进其工艺从而提高河红香气品质提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

河红茶样品:制备单芽(T1)、一芽一叶(T2)、一芽二叶(T3)、一芽三叶(T4)、小开面新梢(T5)茶样,信息如表1。所用鲜叶为铅山县武夷山镇桐木关莱茶种的茶树新梢,参

照江西省地方标准 DB36/T 1440—2021《铅山河红茶加工技术规程》对河红茶不同嫩度进行采摘制作。2021 年 4~5 月初采摘不同嫩度鲜叶新梢后立即按相关加工标准制作成河红茶。所用河红茶制作工艺: 鲜叶-萎凋-揉捻-解块-发酵-干燥, 制备好的河红茶样在-20℃贮存待测。

表 1 河红茶样品信息 Table 1 Sample information of Hekou black teas			
编号	原料嫩度	对应级别	采摘信息
T1	单芽	河红贡芽特级	2021 年 4 月 8 日采摘
T2	一芽一叶	河红贡芽一级	2021 年 4 月 13 日采摘
T3	一芽二叶	河红小种一级	2021 年 4 月 25 日采摘
T4	一芽三叶	河红小种二级	2021 年 4 月 30 日采摘
T5	小开面新梢	河红老枞	2021 年 5 月 8 日采摘

纯净水[华润怡宝饮料(中国)有限公司]; C7-C40 饱和烷烃混合标准品(1000 μg/mL, 美国 Sigma-Aldrich 公司)。

TSQ8000Evo 气相色谱-三重四极杆质谱联用仪、Tri Plus RSH 三合一自动进样器、TG-5MS 气相色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm)(美国 Thermo Fisher Scientific 公司); 固相微萃取头 SPME50/30μm DVB/CAR/PDMS(美国 Supelco 公司); OP 275 嗅闻仪(日本 GLSciences 公司); ME104 电子天平[精度 0.1 mg, 赛多利斯科学仪器(上海)有限公司]; TG16-WS 离心机(常州金坛良友仪器有限公司); HH-4 数显恒温水浴锅(国华电器有限公司)。

1.2 样品处理

所有样品, 磨碎, 过 40 目筛, 精确称取 1.5 g 样品粉末, 置入 20 mL 样品瓶, 加 4.5 mL 水(加入 30%氯化钠)。

1.3 固相微萃取条件

SPME 条件: 60℃, 平衡 30 min, 平衡完成, 插入已老化(或已解吸附)的纤维萃取头, 于茶样上方顶空吸附(萃取温度为 60℃, 萃取时间 60 min), 后将萃取头进行解析(解析时间 5 min, 250℃)。

1.4 GC-MS 检测条件

载气为高纯氮气(纯度≥99.999%), 恒流流速 1.0 mL/min, 质谱接口温度 280℃, 不分流进样, 质谱条件: 电子轰击离子源温度 300℃。电子能量 70 eV; 质谱扫描范围: m/z 33~550 amu。

程序升温条件: 40℃ (2 min), 5℃/min; 85℃ (2 min), 2℃/min; 110℃ (2 min), 4℃/min; 220℃ (2 min), 5℃/min; 250℃ (10 min)。

1.5 香气组分定性定量方法

将采集到的总离子流图进行积分, 得到的组分在 NIST2014 质谱库中进行检索, 筛选出相对强弱指标(relative strength index, RSI)大于 800 的化合物。同时计算

化合物的保留指数(retention index, RI), 并检索文献中该化合物的保留指数, 进行比对, 从而对该化合物定性。

1.6 数据处理及绘图方法

本研究每种茶样的测定指标均做 3 次重复, 使用 IBM Statistics SPSS 20.0 软件对数据进行差异显著性($P<0.05$)统计分析。主成分分析采用 SIMCA-P 14.0 对绘制前数据标准化处理。

2 结果与分析

2.1 不同嫩度河红茶香气的感官审评分析

对 5 个不同嫩度的鲜叶原料制成的河红茶香气进行感官审评(参照 GB/T 23776—2018《茶叶感官审评方法》), 结果见表 2, 整体情况分析发现, 除 T5 外, T1 到 T4 随着鲜叶嫩度的老化, 制成的河红茶香气品质的得分也越来越高, 河红茶(T1)单芽与河红茶(T5)小开面新梢香气品质总分相差 4 分。香气品质得分最高的为 T4 处理, T4 成茶样品带花香, 香气宜人, 而茶叶新梢嫩度再降低的话, 像 T5 出现的香味为甜香, 且显粗老气味, 故得分也有所下降。

表 2 不同嫩度河红茶香气的感官审评 Table 2 Sensory evaluation of Hekou black teas aroma		
样品	香气	
	评语	评分
T1	鲜醇略显生青	90
T2	纯正	91
T3	微甜香	93
T4	花香	95
T5	甜香、略显粗老	94

2.2 不同嫩度河红茶香气成分分析

如表 3 所示, 本研究中共检测并鉴定出 68 种香气成分, 包括醇类化合物 10 种、酸类化合物 4 种、醛类化合物 9 种、酮类化合物 7 种、酯类化合物 19 种、烯类化合物 10 种、杂环类化合物 5 种、烷、萘及其他类化合物 4 种。香气化合物相对含量最高的为水杨酸甲酯, 含量最高的为 T2, 最低的为 T5, 除 T1、T2 外各处理组间差异显著($P<0.05$); 其次相对含量超过 1%的香气化合物分别为芳樟醇(1.86%~8.83%)、苯乙醇(3.00%~8.31%)、苯甲醇(2.10%~5.22%)、反式氧化芳樟醇(呋喃类)(1.76%~2.44%)、反式氧化芳樟醇(吡喃类)(1.13%~2.41%)、 α -法呢烯(0.08%~2.21%)、(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯酸(0.97%~1.86%)、 β -紫罗兰酮(0.21%~1.92%)、 γ -杜松烯(0.07%~1.42%)、己酸己酯(0.11%~1.10%)。相对含量超过 1%香气物质各组间差异性显著, 芳樟醇相对含量最高的是 T1; 苯乙醇相对含量最高的是 T5; 苯甲醇相对含量最

高的是 T5; 反式氧化芳樟醇(呋喃类)相对含量较为稳定, 除 T3 含量稍低外, 其余各组均为 2.00%以上, 且组间差异性不显著; 反式氧化芳樟醇(吡喃类)相对含量最高的为 T5, 且其相对含量随着河红茶嫩度的升高而降低, 芽

叶越粗老, 香气越明显, T1、T2 组间无显著性差异, T3、T4 组间无显著性差异, 但 5 个嫩度间 T5 与 T3、T4 和 T1、T2 间差异显著。其余一些香气化合物也呈现类似的变化趋势。

表 3 经分析鉴定出的河红茶中的香气物质
Table 3 Aroma compounds in Hekou black teas identified by analysis

序号	类别	化合物名称	RT/min	RI	SI	RSI	T1	T2	T3	T4	T5
1	醇类 (10)	3-己烯-1-醇	8.234	862	862	906	0.57±0.07 ^b	0.51±0.06 ^b	1.84±0.04 ^a	1.87±0.18 ^a	1.82±0.10 ^a
2		苯甲醇	14.344	1037	904	925	2.12±0.08 ^c	2.10±0.08 ^c	4.27±0.06 ^b	5.19±0.65 ^a	5.22±0.36 ^a
3		2-呋喃甲醇	16.001	1073	921	923	0.88±0.04 ^b	0.74±0.03 ^c	0.96±0.01 ^b	0.98±0.09 ^b	1.10±0.07 ^a
4		芳樟醇	17.362	1103	945	945	8.83±0.17 ^a	6.05±0.23 ^b	2.64±0.04 ^d	3.23±0.02 ^c	1.86±0.14 ^c
5		苯乙醇	18.154	1118	935	943	4.28±0.17 ^b	3.00±0.14 ^c	4.85±0.07 ^b	4.55±0.62 ^b	8.31±0.33 ^a
6		α -松油醇	22.319	1195	900	905	0.23±0.00 ^b	0.25±0.00 ^b	0.30±0.01 ^a	0.24±0.01 ^b	0.17±0.02 ^b
8		橙花醇	24.428	1230	924	925	0.77±0.03 ^b	0.92±0.02 ^a	0.59±0.01 ^d	0.63±0.02 ^{cd}	0.67±0.04 ^c
9		α -毕橙茄醇	43.527	1664	767	828	0.05±0.00 ^a	0.03±0.00 ^b	0.33±0.01 ^b	0.27±0.01 ^b	0.20±0.00 ^c
10		柏木醇	41.904	1610	876	886	0.09±0.00 ^b	0.12±0.00 ^a	0.05±0.00 ^c	0.05±0.00 ^d	0.07±0.00 ^c
11		植物醇	55.238	2115	857	911	0.01±0.00 ^c	0.02±0.00 ^b	0.23±0.00 ^b	0.01±0.00 ^c	0.04±0.00 ^a
12	酸类 (4)	正辛酸	12.754	1002	678	860	0.24±0.05 ^c	0.39±0.07 ^{bc}	0.61±0.05 ^a	0.54±0.21 ^{ab}	0.48±0.03 ^{ab}
13		辛烯酸	13.006	1007	687	827	0.06±0.01 ^b	0.06±0.01 ^b	0.38±0.01 ^a	0.41±0.05 ^a	0.38±0.00 ^a
14		莽草酸	13.358	1015	751	815	0.02±0.00 ^c	0.07±0.02 ^d	0.54±0.02 ^b	0.36±0.03 ^c	0.59±0.03 ^a
15		(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯酸	32.470	1370	917	930	0.97±0.06 ^d	1.64±0.14 ^b	1.28±0.04 ^c	1.19±0.06 ^c	1.86±0.06 ^a
16	醛类 (9)	2-己烯醛	8.572	873	810	831	0.28±0.03 ^b	0.24±0.02 ^b	0.57±0.11 ^a	0.56±0.05 ^a	0.47±0.04 ^a
17		苯甲醛	11.564	966	925	930	0.59±0.02 ^c	0.76±0.05 ^c	3.28±0.09 ^a	2.90±0.25 ^b	3.41±0.17 ^a
18		苯乙醛	14.740	1045	909	974	0.11±0.19 ^d	0.73±0.44 ^c	1.92±0.03 ^b	1.76±0.25 ^b	3.94±0.23 ^a
19		壬醛	17.560	1107	809	816	0.35±0.02 ^c	0.55±0.03 ^c	1.63±0.02 ^b	1.08±0.09 ^b	1.99±0.23 ^a
20		癸醛	23.050	1207	811	891	0.01±0.00 ^c	0.01±0.00 ^c	0.12±0.01 ^{ab}	0.11±0.02 ^b	0.14±0.02 ^a
21		β -环柠檬醛	24.049	1224	767	882	0.10±0.01 ^c	0.18±0.02 ^d	0.58±0.01 ^b	0.51±0.03 ^c	0.74±0.02 ^a
22		香叶醛	25.176	1242	928	932	0.57±0.06 ^a	0.26±0.07 ^b	0.22±0.01 ^b	0.18±0.01 ^b	0.18±0.01 ^b
23		柠檬醛	27.081	1273	873	926	1.25±0.13 ^a	0.89±0.03 ^b	0.87±0.00 ^b	0.85±0.01 ^b	0.62±0.12 ^c
24		5-甲基-2-苯基-2-己醛	37.923	1493	784	814	0.36±0.07 ^a	0.25±0.01 ^{bc}	0.16±0.01 ^d	0.18±0.02 ^{cd}	0.28±0.03 ^b
25	酮类 (7)	3,5-辛二烯-2-酮	17.047	1096	685	843	0.01±0.00 ^b	0.00±0.00 ^b	0.01±0.00 ^a	0.01±0.00 ^a	0.01±0.00 ^a
26		α -苯丁烯- γ -酮	27.269	1276	852	914	0.13±0.01 ^d	0.17±0.01 ^c	0.31±0.01 ^a	0.27±0.02 ^b	0.15±0.02 ^{cd}
27		顺式-茉莉酮	34.144	1403	915	916	0.54±0.01 ^b	0.43±0.01 ^c	0.58±0.01 ^a	0.55±0.02 ^{ab}	0.31±0.03 ^d
28		α -紫罗兰酮	35.378	1432	832	890	0.04±0.00 ^a	0.05±0.01 ^a	0.19±0.01 ^b	0.18±0.02 ^b	0.54±0.03 ^a
29		3,4-脱氢- β -紫罗兰酮	37.655	1487	763	839	0.02±0.00 ^c	0.56±0.01 ^a	0.27±0.01 ^{bc}	0.04±0.02 ^b	0.03±0.01 ^{bc}
30		β -紫罗兰酮	37.752	1489	886	890	0.21±0.16 ^d	0.47±0.01 ^c	1.51±0.04 ^b	1.35±0.09 ^b	1.92±0.06 ^a
31		植酮	48.685	1847	787	905	0.01±0.00 ^b	0.01±0.00 ^b	0.03±0.00 ^a	0.02±0.00 ^{ab}	0.03±0.01 ^a
32	酯类 (19)	水杨酸甲酯	22.517	1198	946	948	12.07±0.42 ^a	12.54±0.16 ^a	8.07±0.09 ^c	10.41±0.67 ^b	6.04±0.40 ^d
		戊酸叶醇酯	24.579	1232	877	899	0.36±0.05 ^a	0.30±0.05 ^{ab}	0.38±0.02 ^a	0.38±0.10 ^a	0.19±0.03 ^b
33		壬酸乙酯	28.620	1298	685	856	0.06±0.00 ^{ab}	0.04±0.02 ^{ab}	0.04±0.03 ^b	0.07±0.02 ^{ab}	0.08±0.01 ^a
34		甲酸香叶酯	29.023	1305	902	916	0.13±0.02 ^{bc}	0.14±0.01 ^b	0.23±0.01 ^a	0.23±0.03 ^a	0.10±0.02 ^c
35		己酸顺式-3-己烯酯	33.252	1385	896	903	0.17±0.01 ^b	0.22±0.08 ^b	2.34±0.09 ^a	2.36±0.67 ^a	0.46±0.29 ^b
36		乙酸香叶酯	33.369	1387	917	923	0.24±0.05 ^a	0.20±0.03 ^a	NA	NA	0.26±0.04 ^a
37		己酸己酯	33.453	1389	740	890	0.11±0.04 ^b	0.32±0.07 ^b	1.10±0.06 ^a	1.00±0.30 ^a	0.35±0.06 ^b
38		癸酸乙酯	33.902	1397	925	944	0.77±0.04 ^b	0.91±0.27 ^b	2.58±0.55 ^a	2.27±0.75 ^a	1.89±1.12 ^{ab}
39		2-(2-氯苯基)环丙烷甲酸乙酯	36.578	1461	799	889	0.07±0.02 ^b	0.07±0.01 ^b	0.08±0.01 ^b	0.09±0.02 ^b	0.13±0.02 ^a
40		二氢猕猴桃内酯	39.449	1537	887	907	0.25±0.07 ^{ab}	0.09±0.01 ^c	0.18±0.06 ^{bc}	0.16±0.01 ^c	0.28±0.00 ^a
41		茉莉酮酸甲酯	43.292	1656	779	849	0.11±0.03 ^b	0.06±0.00 ^c	0.14±0.01 ^a	0.15±0.01 ^a	0.07±0.01 ^c
42		己酸香叶酯	46.257	1758	842	922	0.06±0.01 ^b	0.08±0.00 ^a	0.02±0.00 ^c	0.01±0.00 ^d	0.00±0.00 ^c

表 3(续)

序号	类别	化合物名称	RT/min	RI	SI	RSI	T1	T2	T3	T4	T5
43		肉豆蔻酸乙酯	47.327	1796	852	874	0.02±0.00 ^a	0.01±0.00 ^b	0.01±0.00 ^b	0.01±0.00 ^b	0.01±0.00 ^b
44		邻苯二甲酸二异丁酯	49.429	1876	847	901	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00
45		十六酸甲酯	50.751	1928	917	920	0.10±0.01 ^a	0.07±0.00 ^c	0.09±0.00 ^b	0.10±0.01 ^{ab}	0.06±0.01 ^d
46		邻苯二甲酸二丁酯	51.814	1971	886	935	0.04±0.00 ^a	0.03±0.00 ^{ab}	0.03±0.00 ^b	0.02±0.00 ^b	0.02±0.00 ^b
47		软脂酸乙酯	52.414	1995	937	937	0.66±0.12 ^a	0.38±0.04 ^{bc}	0.33±0.06 ^c	0.31±0.03 ^c	0.52±0.07 ^b
48		亚油酸乙酯	56.418	2163	919	927	NA	NA	NA	0.01±0.00	NA
49		亚麻酸乙酯	56.613	2171	914	915	0.10±0.02 ^{bc}	0.07±0.01 ^c	0.13±0.04 ^b	0.10±0.00 ^{bc}	0.23±0.03 ^a
50		香芹烯	14.035	1030	726	807	0.45±0.11 ^a	0.40±0.07 ^a	0.22±0.01 ^b	0.38±0.07 ^a	0.47±0.03 ^a
51		α -萜荜油烯	31.632	1355	920	935	0.32±0.12 ^a	0.12±0.02 ^b	0.03±0.00 ^b	0.02±0.00 ^b	0.02±0.00 ^b
52		α -蒎烯	32.963	1380	826	858	0.17±0.05 ^b	0.21±0.02 ^b	0.24±0.01 ^b	0.52±0.09 ^a	0.44±0.04 ^a
53		α -柏木烯	34.677	1415	785	849	0.03±0.01 ^{ab}	0.02±0.01 ^{ab}	0.02±0.00 ^b	0.05±0.02 ^a	0.03±0.01 ^{ab}
54	烯类 (10)	β -石竹烯	34.989	1423	843	866	0.06±0.03	0.05±0.01	0.07±0.01	0.09±0.03	0.06±0.01
55		α -衣兰油烯	38.275	1502	890	901	0.15±0.05 ^a	0.06±0.01 ^b	0.01±0.00 ^c	0.03±0.01 ^{bc}	0.01±0.00 ^c
56		α -法呢烯	38.490	1508	834	883	0.09±0.04 ^c	0.08±0.02 ^c	2.21±0.35 ^a	1.34±0.65 ^b	0.69±0.21 ^c
57		γ -杜松烯	39.127	1527	853	854	1.42±0.41 ^a	0.41±0.07 ^b	0.12±0.01 ^b	0.14±0.05 ^b	0.07±0.02 ^b
58		α -二氢莰蒲烯	39.845	1548	910	952	0.14±0.03 ^a	0.06±0.00 ^b	0.06±0.01 ^b	0.06±0.01 ^b	0.02±0.01 ^c
59		新植二烯	48.490	1840	839	918	0.01±0.00 ^b	0.01±0.00 ^b	0.02±0.00 ^a	0.01±0.00 ^b	0.02±0.00 ^a
60		反式氧化芳樟醇 (呋喃类)	16.772	1090	930	936	2.37±0.11 ^a	2.44±0.10 ^a	1.76±0.03 ^b	2.24±0.29 ^a	2.27±0.18 ^a
61	杂环类 (5)	顺式氧化芳樟醇 (吡喃类)	21.078	1172	927	933	0.33±0.01 ^d	0.45±0.02 ^c	0.81±0.02 ^b	0.78±0.07 ^b	0.95±0.05 ^a
62		反式氧化芳樟醇 (吡喃类)	21.350	1177	927	933	1.13±0.04 ^c	1.26±0.06 ^c	1.52±0.03 ^b	1.70±0.20 ^b	2.41±0.13 ^a
63		茶香螺烷	36.367	1456	858	877	0.11±0.01 ^d	0.18±0.02 ^c	0.31±0.01 ^a	0.27±0.03 ^{ab}	0.26±0.02 ^b
64		2,4-二叔丁基苯酚	38.735	1516	827	865	0.08±0.00 ^a	0.08±0.00 ^a	0.05±0.00 ^b	0.04±0.00 ^b	0.02±0.00 ^c
65		1,1,6-三甲基-1,2-二氢萘	31.830	1358	849	895	0.05±0.01 ^c	0.08±0.02 ^{bc}	0.13±0.01 ^{ab}	0.16±0.06 ^a	0.06±0.01 ^c
66	其他 (4)	十六烷	41.542	1598	853	915	0.12±0.03 ^b	0.32±0.02 ^{ab}	0.50±0.01 ^a	0.41±0.05 ^{ab}	0.45±0.34 ^a
67		1,6-二甲基-4-(1-甲基 乙基)萘	44.164	1685	829	887	0.04±0.00 ^a	0.02±0.00 ^b	NA	NA	NA
68		2,2',5,5'-四甲基联苯基	44.238	1687	769	849	0.02±0.00 ^c	0.02±0.00 ^c	0.04±0.01 ^a	0.03±0.00 ^b	0.02±0.01 ^c

注: RT: 表示保留时间; RI: 通过计算所得到的保留指数; SI: 表示该化合物的 MS 图谱与 NIST2014 质谱库的标准谱图比较得到的相似度; RSI: NIST2014 质谱库的标准谱图与该化合物反向比较得到的相似度; T1~T5 检出化合物质单位为%。NA: 表示未检出该类化合物。同一行用不同小写字母标记(a~f)的值表示差异显著($P<0.05$), 下同。

2.3 不同嫩度河红茶香气化合物种类及含量分析

试验中检测出的香气物质含量各异, 不同处理间香气成分差异显著, 其中醇类相对含量 14.03%~19.47%, 酸类相对含量 1.29%~3.31%, 醛类相对含量为 3.64%~11.81%, 酮类化合物相对含量为 0.94%~2.99%, 酯类化合物相对含量 10.29%~17.37%, 烯类在 1.43%~3.01%, 杂环类化合物含量在 4.03%~5.92%, 烷、萘及其他类化合物总相对含量低于 0.66%(表 4)。在相对含量最高的三类化合物中, 醇类化合物共有 10 种, 以芳樟醇、苯乙醇、苯甲醇和橙花醇的含量最高, 研究表明这几种化合物具有花香、果香、木香、薄荷味等香气^[13-15]; 酯类化合物共有 19 种, 以水杨酸甲

酯、癸酸乙酯、己酸己酯、软脂酸乙酯等相对含量比较高, 其中水杨酸甲酯具有青冬树叶香气、药味^[16]; 其次相对含量较高为杂环类化合物共有 4 种, 以反式氧化芳樟醇(吡喃类)、反式氧化芳樟醇(呋喃类)的化合物为主, 主要呈花香、木香^[17-20]。以上化合物是河红茶的馥郁持久的花香、甜香等香气的主要呈香物质。醇类、酸类、醛类、酮类、酯类、烯类、杂环类、烷、萘及其他类化合物各组间差异性显著, 醇类化合物最低为 T2 的 14.03%, 最高为 19.47%, 5 个处理间有显著性差异, 酯类物质含量最高的为 T4, 其余香气化合物的含量也有随着新梢嫩度的降低而提高的趋势, 感官审评中香气最好的也是 T4, 如表 4, 说明酯类化合物的含量高低可能与 T4 良好香气有一定关系。

表 4 不同河红茶的挥发性成分种类数及含量
Table 4 Types and content of volatile components in different Hekou black tea samples

类别	T1	T2	T3	T4	T5
醇类	18.16±0.38 ^{ab}	14.03±0.31 ^d	15.91±0.24 ^c	17.15±1.41 ^{bc}	19.47±1.03 ^a
酸类	1.29±0.01 ^e	2.16±0.10 ^d	2.81±0.09 ^b	2.51±0.26 ^c	3.31±0.10 ^a
醛类	3.64±0.12 ^d	3.88±0.52 ^d	9.35±0.20 ^b	8.15±0.44 ^c	11.81±0.60 ^a
酮类	0.94±0.17 ^e	1.18±0.03 ^d	2.67±0.06 ^b	2.43±0.10 ^c	2.99±0.13 ^a
酯类	14.89±0.27 ^b	15.31±0.56 ^{ab}	15.43±0.67 ^{ab}	17.37±2.37 ^a	10.29±1.19 ^c
烯类	2.87±0.84 ^{ab}	1.43±0.16 ^c	3.01±0.38 ^a	2.64±0.78 ^{ab}	1.84±0.33 ^{bc}
杂环类	4.03±0.14 ^c	4.42±0.15 ^c	4.46±0.09 ^c	5.04±0.53 ^b	5.92±0.37 ^a
其他	0.23±0.04 ^b	0.44±0.02 ^{ab}	0.66±0.01 ^a	0.60±0.10 ^a	0.53±0.34 ^{ab}

2.4 不同嫩度河红茶关键香气成分的 PCA 分析

PCA 是一种无监督模式识别多维数据统计分析方法,通过每个样本点在得分图上的位置信息来显示样本的分类信息,因此分类的结果更加客观可信^[21]。本研究基于不同嫩度的河红茶香气组分的相对含量构建了 PCA 模型(拟合参数 $R^2X=0.93$, $Q^2=0.71$),如图 1 所示,PC1 为 52.1%,PC2 为 21.1%。T1、T2 位于右偏中下的位置,T3、T4 位于左下部分,T5 位于左边上方位置,由图 1 可见主成分分析方法对不同嫩度河红茶有较好的区分效果,说明 T3、T4、T1、T2、T5 5 个类别的河红茶香气物质可明显分成 3 大类别。香气物质的相对含量至少呈现 3 个族群的区别。

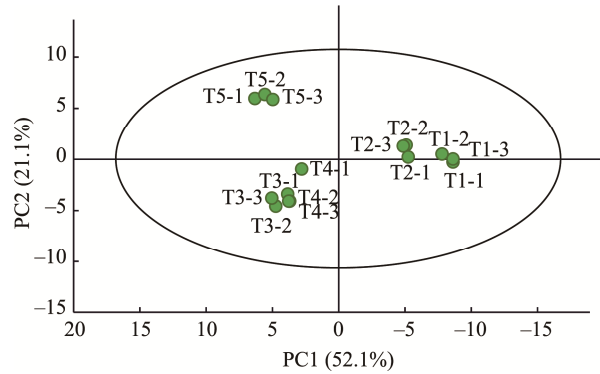


图 1 不同嫩度河红茶香气组分的 PCA 分析图
Fig.1 PCA analysis of aroma components of Hekou black teas in different grades

2.5 不同嫩度河红茶香气成分的正交偏最小二乘方判别分析及重要性因子分析

OPLS-DA 结合了正交信号矫正(orthogonal signal correction, OSC)和偏最小二乘判别分析(partial least squares-discriminant analysis, PLS-DA)方法,能够将 X 矩阵信息分解成与 Y 相关和不相关的两类信息,通过去除不相关的差异来筛选变异变量,建模时(拟合参数 $R^2X=0.97$, $R^2Y=0.98$, $Q^2=0.94$),与 Y 相关的变量信息为预测主成分,与 Y 不相关的变量信息正交主成分。根据 OPLS-DA 模型分析香气物质数据,绘制各分组的得分图见图 2 所示,PC1

为 70.3%,PC2 为 16.3%。说明模型具有很强的累计解释度和预测能力,且稳定性良好。

如图 3,利用置换检验的方法进行 200 次交叉验证($R^2=0.382$, $Q^2=-0.929$), Q^2 为负值说明所建的 OPLS-DA 模型可靠,且没有出现拟合现象。且重要性因子(variable importance in the projection, VIP)值可以量化 OPLS-DA 模型中香气组分对 OPLS-DA 分类的贡献大小,在判别过程中,一般认为 $VIP>1$ 表示该化合物组分在不同

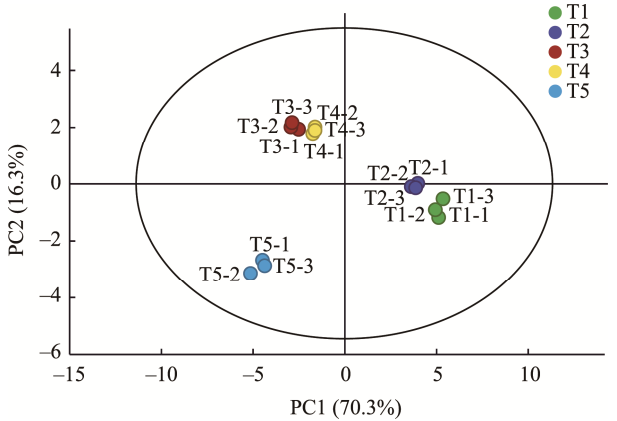


图 2 不同嫩度河红茶香气组分 OPLS-DA 模型图
Fig.2 OPLS-DA analysis of aroma components of Hekou black teas in different grades

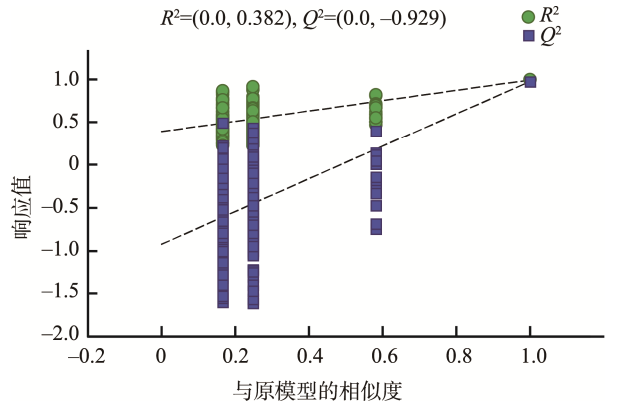


图 3 不同嫩度河红茶香气组分 OPLS-DA 验证模型
Fig.3 OPLS-DA cross-validation analysis of aroma components of Hekou black teas in different grades

嫩度间具有统计意义, 可以作为不同嫩度河红茶香气物质变化的关键性成分。VIP 值越大, 说明该类化合物组分在不同嫩度河红茶中差异越明显。表 5 为不同嫩度河红茶香气组分差异关键物质, 其中 VIP 值大于 1 的有 18 种。

表 5 不同嫩度河红茶香气组分差异关键物质				
Table 5 Key substances for different aroma components of Hekou black teas in different grades				
序号	化合物	VIP 值	阈值 ($\mu\text{g/L}$)	香气特征
1	水杨酸甲酯	2.72	60	焦糖香, 薄荷味
2	芳樟醇	2.53	10	玫瑰香, 柠檬香
3	苯乙醇	2.38	6	甜香
4	苯甲醇	2.26	300	苦杏味, 焦糖香
5	己酸顺式-3-己烯酯	1.91	—	玫瑰香, 薄荷香
6	苯乙醛	1.80	—	果香, 甜香
7	α -法呢烯	1.77	107	花香, 青香, 脂香气
8	苯甲醛	1.67	350	果香
9	γ -杜松烯	1.47	—	熏香, 药香
10	(<i>E</i>)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯酸	1.43	—	—
11	癸酸乙酯	1.36	1	果香, 青草香
12	3-己烯-1-醇	1.30	1	青香, 青苹果香
13	反式氧化芳樟醇 (呋喃类)	1.29	6	花香, 木香
14	壬醛	1.28	1	玫瑰香、柑橘香
15	β -紫罗兰酮	1.17	0	花香
16	反式氧化芳樟醇 (吡喃类)	1.17	3000	木香
17	己酸己酯	1.15	6400	果香
18	α -蒎烯	1.06	6	檀香

注: —代表为查询到该物质的阈值, 香气物质描述性特征参考 <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>, <https://www.flavomet.org/>网站。

VIP 值大于 1 的不同嫩度河红茶关键性成分见表 5。这些变化的关键性香气物质的香气特征也不尽相同, 主要表现为花香、果香、青香、甜香等。由研究中 T1 到 T5 嫩度变化也可知, 水杨酸甲酯、芳樟醇等香气关键性成分呈现不同的变化, 从而导致 T1、T2、T3、T4、T5 呈现不同类型的香型变化。感官审评中, T4 香气得分最好, 而香气物质检测中 T4 也是酯类物质含量最高的香气种类。T4 处理中, 水杨酸甲酯 VIP 值最高, 为 2.72, 说明水杨酸甲酯可能在河红茶香气中是关键性物质。根据河红茶加工过程中物质成分的变化, 推测不同嫩度河红茶关键性成分水杨酸甲酯形成的机制(图 4 所示)^[22]。茶树鲜叶中的葡萄糖、葡萄糖-6 磷酸分别在糖酵解、磷酸戊糖途径中形成磷酸烯醇式丙酮酸和赤藓糖-4-磷酸; 前二者在 3-脱氢-*D*-阿拉伯糖庚酮糖-7-磷酸合酶的作用下形成 3-脱氢-*D*-阿拉伯糖庚酮糖-7-磷酸; 后在茶树鲜叶萎凋、揉捻、发酵、干燥的过程中通过一系列的酶促氧化、湿热反应, 水杨酸、苯甲酸

在苯甲酸羧基甲基转移酶、水杨酸羧基甲基转移酶的催化下, 最终形成具有焦糖香, 薄荷味香气的水杨酸甲酯。具体反应过程和物质变化过程, 还有待进一步研究。

3 讨论与结论

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^[23]。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^[24]。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^[25-26]。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^[27]。本研究以铅山县黄岗山有机农业开发有限公司同一产地、同一品种、同一加工工艺, 不同新梢嫩度按河红茶制作标准制作而成的 5 个嫩度的河红茶, 利用 HS-SPME-GC-MS 技术, 对 5 个不同嫩度河红茶进行了香气组分的分析, 结果表明, 河红茶嫩度不同, 香气物质相对含量及组分分类也不同。不同嫩度的河红茶中共检测出 68 种香气成分, 包括醇类、酸类、醛类、酮类、酯类、烯类、杂环类、烷、萘及其他类化合物。其中醇类、酯类和杂环类是河红茶中主要的挥发性化合物, 可能对河红茶的香气品质起着关键作用。检测 68 中香气物质不同嫩度间含量不同, 不同嫩度间香气物质成分差异显著($P<0.05$), 这与蒋勋等^[28], GUO 等^[29]研究不同嫩度普安红茶、祁红茶的成分差异的结果一致。

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, 不同地区红茶香气特异性风格明显^[30]。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^[31], 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 -紫罗兰酮, 对祁红香气贡献较大^[32]。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^[7]。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^[33-34]。本研究中 OPLS-DA 分析表明, 不同嫩度的河红茶标志差异挥发性成分为水杨酸甲酯、芳樟醇、苯乙醇、苯甲醇、己酸顺式-3-己烯酯、苯乙醛、 α -法呢烯、苯甲醛、 γ -杜松烯、(*E*)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯酸、癸酸乙酯、3-己烯-1-醇、反式氧化芳樟醇(呋喃类)、壬醛、 β -紫罗兰酮、反式氧化芳樟醇(吡喃类)、己酸己酯、 α -蒎烯 18 种。这些香气物质含量的高低及相互重组的混合香气是形成河红茶糖香、花香关键呈香成分。关键呈香物质与 YUE 等^[11]研究的浮红茶、宁红茶关键香气物质有区别, 相同的是反式氧化芳樟醇(呋喃类)、水杨酸甲

酯、芳樟醇、苯乙醇、苯甲醇等香气化合物依然是河红茶中关键香气物质,不同的是河红茶中这些物质所占比例或含量不同,其他香气化合物如癸酸乙酯、3-己烯-1-醇、 β -紫罗兰酮等香气物质是河红茶香气形成的关键物质。本研究对江西不同嫩度河红茶的香气特征及关键呈香成分进行

了分析,后续研究中针对鉴定出的关键性呈香物质进行系统的香气重组,需补充试验验证关键香气成分的致香效果,同时河红茶加工过程中关键香气成分的变化尚不清晰,有必要进一步明确河红茶特征香气形成的机制,为提高河红茶产品质量提供依据。

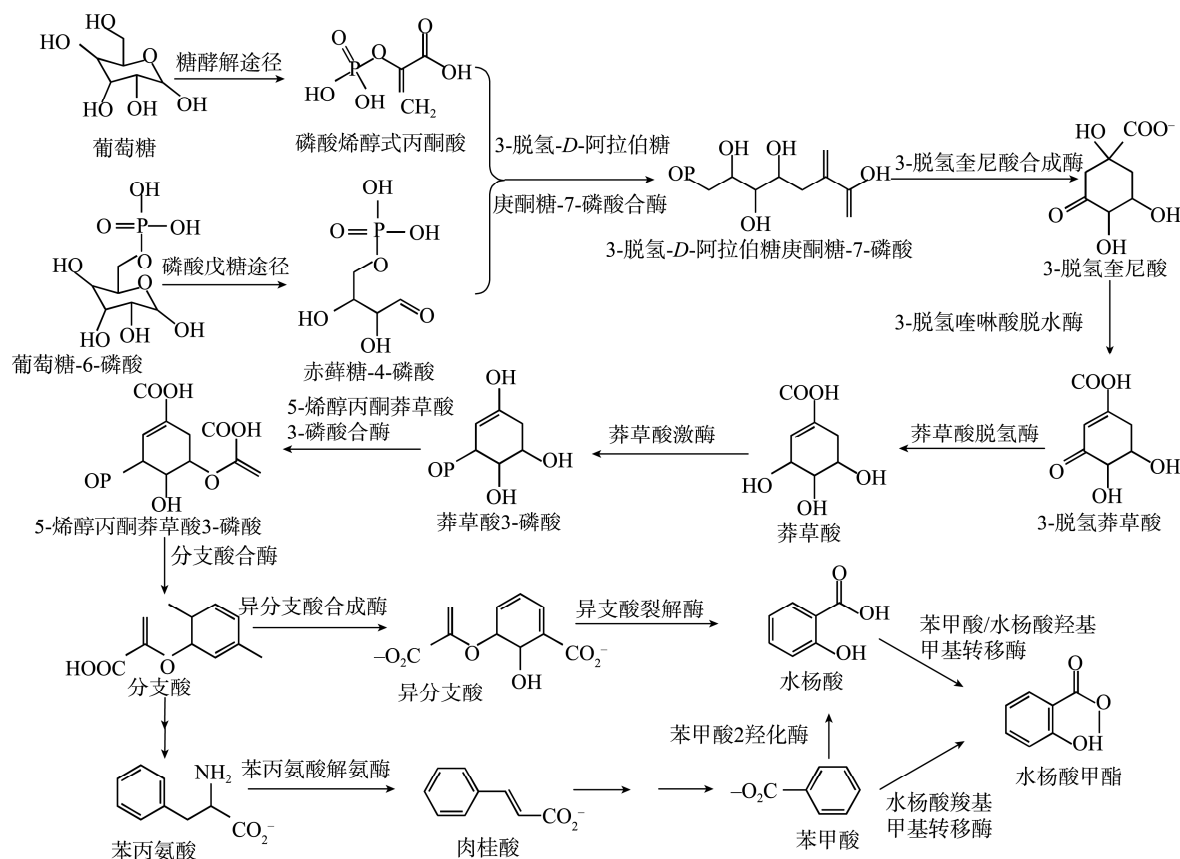


图4 河红茶中水杨酸甲酯合成途径

Fig.4 Enrichment of methyl salicylate in Hekou black teas

参考文献

- [1] 曹挥华, 江新风, 李琛, 等. 铅山引进茶树品种的红茶适制性及制茶品质研究[J]. 江西农业学报, 2022, 34(4): 145-149.
CAO HH, JIANG XF, LI C, *et al.* Suitability of introduced cultivars in Yanshan for processing black tea and black tea quality evaluation [J]. Jiangxi Acta Agric, 2022, 34(4): 145-149.
- [2] 江新风, 孙永明, 童忠飞, 等. 菜籽饼肥施用深度对茶叶产量、品质和氮素利用的影响[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(12): 172-178.
JIANG XF, SUN YM, TONG ZF, *et al.* Effects of base application depths of rapeseed cake fertilization on tea yield, tea quality and nitrogen utilization [J]. J Agric Sci Technol, 2021, 23(12): 172-178.
- [3] 林淑红, 李灵芝. 传承古茶道文化 重振河红茶品牌[J]. 江西农业, 2019, (13): 58-59.
LIN SH, LI LZ. Inherit the ancient tea ceremony culture and revitalize Kekou black tea [J]. Jiangxi Agric, 2019, (13): 58-59.
- [4] 郑淑琴. 铅山茶叶产业发展升级战略研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2017.
ZHENG SQ. Research on the development and upgrading strategy of tea industry in Yanshan [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2017.
- [5] 滑金杰, 袁海波, 江用文. 我国红茶产业现状、加工进展及前景展望[J].

华中农业大学学报, 2022, 41(5): 16-23.

- HUA JJ, YUAN HB, JIANG YW. Status of industry, progress of processing, and prospect of black tea in China [J]. J Huazhong Agric Univ, 2022, 41(5): 16-23.
- [6] 刘盼盼, 郑鹏程, 龚自明, 等. 工夫红茶品质分析与综合评价[J]. 食品科学, 2021, 42(12): 195-205.
LIU PP, ZHENG PC, GONG ZM, *et al.* Quality analysis and comprehensive evaluation of Chinese Congou black tea [J]. Food Sci, 2021, 42(12): 195-205.
- [7] 李琛, 岳翠男, 杨普香, 等. 工夫红茶特征香气研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(22): 8834-8842.
LI C, YUE CN, YANG PX, *et al.* Research progress on characteristic aroma of Congou black tea [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(22): 8834-8842.
- [8] LV SD, WU YS, LI CW, *et al.* Comparative analysis of Pu-erh and Fuzhuan teas by fully automatic headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry and chemometric methods [J]. J Agric Food Chem, 2014, 62(8): 1810-1818.
- [9] 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.
- [10] 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]. *J Flavour Frag*, 2017, 32(4): 265–276.
- [11] 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.
- [12] 杨霁虹, 周汉琛, 刘亚芹, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和 OAV 值分析黄山地区不同茶树品种红茶香气的差异[J]. *食品科学*, 2022, 43(16): 235–241.
- YANG JH, ZHOU HC, LIU YQ, *et al.* Differences in aroma components of black tea processed from different tea cultivars in huangshan by using headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry and odor activity value [J]. *Food Sci*, 2022, 43(16): 235–241.
- [13] CHI TH, XIN Z, SHI ML. Tea aroma formation [J]. *Food Sci Human Wellness*, 2015, 4(1): 9–27.
- [14] JOSHI R, GULATI A. Fractionation and identification of minor and aroma-active constituents in Kangra orthodox black tea [J]. *Food Chem*, 2015, 167: 290–298.
- [15] 田甜, 韦锦坚, 文金华, 等. 不同季节凌云白毫绿茶的香气成分差异分析[J]. *食品科学*, 2020, 41(22): 252–259.
- TIAN T, WEI JJ, WEN JH, *et al.* Seasonal variability of aroma components of Lingyun Pekoe green tea [J]. *Food Sci*, 2020, 41(22): 252–259.
- [16] 刘洋, 刘雅芳, 林智, 等. 白茶贡眉的香气组成与关键呈香成分分析[J]. *食品科学*, 2021, 42(24): 183–190.
- LIU Y, LIU YF, LIN Z, *et al.* Volatile components and key aroma-active compounds in gongmei white tea [J]. *Food Sci*, 2021, 42(24): 183–190.
- [17] ZHU JC, CHEN F, WANG LY, *et al.* Comparison of aroma-active volatiles in oolong tea infusions using GC-O factometry, GC-FPD, and GC-MS [J]. *J Agric Food Chem*, 2015, 63(34): 7499–7510.
- [18] VAN-GEMERT LJ. Compilations of odor threshold values in air, water and other media [M]. The Netherlands: Oliemans, Punter & Partners BV, 2011.
- [19] 王梦琪. 基于 SBSE-GC-MS 的“清香”绿茶挥发性成分及其关键呈香成分研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
- WANG MQ. Study on the volatile components and key aroma components of “Qingxiang” green tea based on SBSE-GC-MS [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.
- [20] ZHU JC, NIU YW, XIAO ZB. Characterization of the key aroma compounds in lao shan green teas by application of odor activity value (OAV), gas chromatography-mass spectrometry-olfactometry (GC-MS-O) and comprehensive two-dimensional gas chromatography mass spectrometry (GC×GC-qMS) [J]. *Food Chem*, 2021, 339: 128–136.
- [21] 曾敏, 龚正礼. 基于主成分分析法构建云南古树普洱生茶香气质量评价模型[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(15): 264–269, 279.
- ZENG M, GONG ZL. Modeling for aroma quality evaluation of Yunnan Pu-erh raw tea made from ancient trees based on principal component analysis [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2017, 38(15): 264–269, 279.
- [22] 荣朵艳. 水杨酸和水杨酸甲酯对拟南芥花粉管生长调控的分子机制研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- RONG DY. The molecular mechanism study of salicylic acid and methylsalicylic acid regulation of pollen tube growth in Arabidopsis [D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [23] 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.
- [24] MICK W, SCHREIER P. Additional volatiles of black tea aroma [J]. *J Agric Food Chem*, 1984, 32(4): 924–929.
- [25] 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.
- [26] 赵丹, 吕才有. 红茶香气研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2016, (23): 45–46.
- ZHAO D, LV CY. Research progress on aroma of black tea [J]. *Anhui Agric Sci*, 2016, (23): 45–46.
- [27] 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 chromatographymass spectrometry/gas chromatography-olfactometry [J]. *Sci Food Agric*, 2018, 98(14): 5278–5286.
- [28] 蒋勋, 陶会, 宋杰玉, 等. 不同嫩度普安红茶的成分差异及其品质特征[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(13): 4235–4241.
- JIANG X, TAO H, SONG JY, *et al.* Composition differences and quality characteristics of Pu'an black tea with different tenderness [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(13): 4235–4241.
- [29] GUO X, LONG P, MENG Q, *et al.* An emerging strategy for evaluating the grades of Keemun black tea by combinatory liquid chromatography-orbitrap mass spectrometry-based untargeted metabolomics and inhibition effects on α -glucosidase and α -amylase [J]. *Food Chem*, 2018, 246: 74–81.
- [30] 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 specific aroma components of black tea from different regions [J]. *Tea*, 2014, 40(3): 138–145.
- [31] 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 aroma components of black teas from different regions [J]. *Hunan Agric Sci*, 2017, (8): 85–92, 97.
- [32] 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.
- [33] 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]. *J Agric Food Chem*, 2006, 54(3): 916–924.
- [34] 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.

(责任编辑: 韩晓红 张晓寒)

作者简介



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: jiangxinyue003@163.com