罗雨芊, 黄少奇, 饶玉莹, 等. 不同季节宜红工夫茶理化品质与关键呈香成分分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(12): 350−360. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050241

LUO Yuqian, HUANG Shaoqi, RAO Yuying, et al. Analysis of the Physicochemical Quality and Key Aroma Components of Yihong Congou Black Tea in Different Seasons[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(12): 350−360. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050241

· 分析检测 ·

不同季节宜红工夫茶理化品质与关键呈香成分分析

罗雨芊[1,2], 黄少奇[3], 饶玉莹[1,2], 高士伟[2], 郑鹏程[2], 王坤波[1], 曹冰冰[4,*], 叶　飞[2,*]

（1.湖南农业大学茶学教育部重点实验室, 湖南长沙 410128;
2.湖北省农业科学院果树茶叶研究所, 湖北武汉 430064;
3.五峰土家族自治县茶叶发展中心, 湖北五峰 443400;
4.宜昌茶业集团有限公司, 湖北宜昌 443001）

摘　要: 为探究不同季节宜红工夫茶的理化品质和关键呈香成分，本研究采用感官审评、色差分析、理化检测、顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用（Headspace solid-phase microextraction gas chromatography-mass spectrometry，HS-SPME-GC-MS）和气相色谱-嗅辨（Gas chromatography olfactometry，GC-O）等技术，系统解析了高海拔地区春季、夏季和秋季所制宜红工夫茶的品质特征与关键呈香成分。结果表明：不同季节的工夫红茶的理化品质存在显著差异，其中春茶的氨基酸含量较高（4.13%，P<0.05）且感官审评综合评分最高，香气成分含量也相对较高（1633.68 μg/kg，P<0.05），夏茶的多酚类物质含量较高（10.76%，P<0.05），秋茶的可溶性糖含量较高（5.69%，P<0.05）。不同季节所制的宜红工夫茶共检测出 63 种挥发性香气物质，其中共性成分 40 种，采用正交偏最小二乘判别分析（Orthogonal partial least squares-discriminant analysis，OPLS-DA）及变量投影重要性分析（Variable importance in projection，VIP）筛选发现橙花醇、芳樟醇、水杨酸甲酯、反式-2-己烯醛、壬醛、芳樟醇氧化物 I 和柠檬醛的 VIP>1 且 P<0.05。GC-O 分析鉴定出 18 种呈香成分，其中 AI>2.5 的有苯乙醛、芳樟醇氧化物 II、芳樟醇、β-紫罗兰酮。比较不同季节宜红工夫茶的呈香成分，发现呈花甜香的苯乙醛在三个季节中差异显著，芳樟醇氧化物 II 及 (E)-吡喃型芳樟醇氧化物在春茶中的呈香强度更高，夏茶中芳樟醇、N-丁酸 (反-2-己烯基) 酯与 α-苹澄茄油烯呈香强度较高，呈木香的 α-松油醇仅在秋茶中被鉴定出来。综合 GC-O 和相对香气活度值（Relative odor activity value，ROAV）结果，分析发现芳樟醇（ROAV>10，AI>3.0）、橙花醇（ROAV>10，AI>2.5）、β-紫罗兰酮（ROAV>1，AI>2.5）、壬醛（ROAV>1，AI>2.0）是宜红工夫茶的关键呈香成分。本研究可为进一步提升宜红工夫茶品质和鲜叶资源利用率提供理论依据。

关键词: 季节, 宜红工夫茶, 气相色谱-嗅辨仪, 理化品质, 相对香气活度值, 呈香成分

中图分类号: TS272.7　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)12−0350−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050241

本文网刊:

Analysis of the Physicochemical Quality and Key Aroma Components of Yihong Congou Black Tea in Different Seasons

LUO Yuqian[1,2], HUANG Shaoqi[3], RAO Yuying[1,2], GAO Shiwei[2], ZHENG Pengcheng[2], WANG Kunbo[1], CAO Bingbing[4,*], YE Fei[2,*]

收稿日期: 2025−05−26

基金项目: 国家重点研发计划项目（2022YFD1600804, 2024YFD1702003）; 国家茶叶产业技术体系项目（CARS-19）; 特色茶树品种选育及配套技术研发（HBZY2023B00505）; 宜昌茶业集团有限公司研发项目（宜红工夫茶特色资源挖掘与高值化利用）; 广西茶树种质创新与资源利用重点实验室开放基金课题（2026YB02）。

作者简介: 罗雨芊（1999−）, 女, 硕士, 研究方向: 茶叶加工与综合利用, E-mail: luoyuqian77@163.com。

*** 通信作者:** 曹冰冰（1991−）, 女, 高级工程师, 研究方向: 茶叶加工与新产品研发, E-mail: caobba@angelyeast.com。
叶飞（1983−）, 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 茶叶加工与综合利用, E-mail: yf421@163.com。

（1.Key Laboratory of Tea Science, Ministry of Education, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China；
2.Institute of Fruit and Tea, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China；
3.Tea Development Center of Wufeng Tujia Autonomous County, Wufeng 443400, China；
4.Yichang Tea Industry Group Co., Ltd., Yichang 443001, China）

Abstract: To investigate the physicochemical properties and key aroma compounds of Yihong congou tea across different seasons, a multidisciplinary methodology was employed, integrating sensory evaluation, colorimetry, standardized physicochemical assays, headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS), and gas chromatography-olfactometry (GC-O). Samples of spring-, summer-, and autumn-harvested teas from high-altitude regions were systematically analyzed. Results showed that significant seasonal differences were found in physicochemicals. Spring tea exhibited the highest amino acid content (4.13%, $P<0.05$) and sensory evaluation scores, along with the highest volatile compound concentration (1633.68 μg/kg, $P<0.05$). Summer tea had the more content of polyphenols (10.76%, $P<0.05$), while autumn tea showed increased soluble sugar content (5.69%, $P<0.05$). 63 volatile compounds were identified across seasons, including 40 common to all samples. Orthogonal partial least squares-discriminant analysis (OPLS-DA) and variable importance in projection (VIP) identified 7 key discriminators (VIP>1, $P<0.05$): Nerol, linalool, methyl salicylate, (E)-2-hexenal, nonanal, linalool oxide I, and citral. GC-O analysis detected 18 aroma-active compounds. Phenylacetaldehyde, linalool oxide II, linalool, and β-ionone demonstrated high aroma intensity (AI>2.5). A comparative analysis of the aroma components in Yihong Gongou tea across different seasons showed notable seasonal differences in phenethylaldehyde, a key element of floral sweetness. Higher aroma levels of linalool oxide II, and (E)-furanoid linalool oxide were found in spring tea. In summer tea, higher aroma intensity values were observed for linalool, N-butyric acid (trans)-2-hexenyl ester and α-phellandrene. The woody aroma compound α-terpineol was only found in autumn tea. Integrated analysis of GC-O and relative odor activity value (ROAV) established linalool (ROAV>10, AI>3.0), nerol (ROAV>10, AI>2.5), β-ionone (ROAV>1, AI>2.5) and nonanal (ROAV>1, AI>2.0) were the key aroma compounds. These findings could provide a theoretical foundation for enhancing the quality of Yihong Congou tea and the utilization of fresh leaf resources.

Key words: seasons; Yihong congou black tea; gas chromatography-olfactory; physicochemical quality; relative odor activity value; aroma components

茶作为全球三大无酒精饮料之首，其特征风味与健康属性引领茶叶消费稳步增长[1−2]。中国是世界茶产业的主导力量，茶园面积和茶叶产量均居世界前列，2014 年~2023 年我国红茶生产和消费呈现高速增长状态，红茶加工量和内销量年平均增长率分别为 12.8% 和 11.9%，可见我国红茶产业兴旺[3]。

宜昌工夫红茶是中国传统三大工夫红茶之一，其核心产地之一的宜昌市夷陵区，以高海拔、毗邻三峡库区等特点在业界享有盛誉。前人研究已为宜红工夫茶的工艺优化奠定了重要基础。如付本鑫[4] 优化得到了宜红工夫茶的萎凋程度、发酵时间和干燥温度等参数，显著提升了感官品质；Qu 等[5] 优化了发酵参数；仇方方等[6] 采用远红外和微波处理，显著提高了苯甲醛、(E)-β-紫罗酮、反式-橙花叔醇等关键香气成分含量，并促进吡嗪、嘧啶等具有特征烘烤香的杂环化合物生成，为提升宜红工夫茶独特的甜香风味提供了新方法。

香气是衡量红茶品质的关键因素，红茶的特征香气表现为甜香、花果香及蜜甜香[7]。蜜甜香是宜红工夫茶的显著特点，相关的研究鉴定得到了宜红的主要香气成分有苯乙醛、2-甲基丁醛、β-紫罗酮和水杨酸甲酯等[8−9]。在红茶香气特征品质形成机制研究中，采用合适的滚炒干燥可以提高宜红工夫茶中部分甜香成分含量[10]。茶叶的理化和香气品质不仅取决于加工工艺，地理环境和季节更替等也显著影响红茶中香气物质的组成和含量[11]。相关研究表明，高海拔产地的茶叶香气品质更高，甜味、果味和花香等特征更明显[12]。目前关于宜红工夫茶的研究多集中于优化加工工艺，而对不同季节高海拔地区所制宜红工夫茶的关键呈香成分的研究未见报道。在此背景下，为了更好地提高宜昌产区鲜叶的资源利用率，发挥宜红工夫茶的产地优势，扩大产业规模，本文拟采用不同季节的高海拔鲜叶原料和同一加工工艺，研究比较宜红工夫茶的理化品质，筛选得到关键呈香成分，为宜红工夫茶的定向精准加工和精细化拼配提供理论依据和技术指导。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

茶鲜叶　宜昌市夷陵区邓村乡群体种（海拔 800~1000 米），1 芽 1 叶，分别采摘于 2024 年 4 月 5 日、2024 年 7 月 20 日和 2024 年 9 月 2 日，每个样品设置三个重复；甲醇、乙腈、乙酸　色谱级，美国 Fisher 公司；表没食子儿茶素没食子酸酯（≥98%）、表没食子儿茶素（≥95%）、表儿茶素（≥98%）、表儿茶素没食子酸酯（≥98%）、没食子儿茶素没食子酸酯（≥98%）、儿茶素没食子酸酯（≥98%）、没食子儿茶素（≥98%）、儿茶素（≥99%）、咖啡碱（≥99%）、癸酸乙酯（99%）　美国 Sigma Aldrich

公司。

6CR-55 茶叶揉捻机组　五峰天池茶叶机械有限公司; 6CJ-50 茶叶解块机　黄山市白云机械有限公司; 6CH-20 链板式烘干机　宜昌旺盛茶叶机械设备有限公司; JY-6HZ-7B 茶叶烘焙机　福建佳友茶叶机械智能科技股份有限公司; Milli-RO PLUS 30 纯水机　法国 Millipore 公司; UV-2550 紫外可见分光光度计　日本岛津公司; CM-5 分光光度色差计　日本柯尼卡美能达公司; Water 2695 高效液相色谱仪、2998 PDA 检测器　美国 Waters 公司; SPME 手动进样手柄、50/30 μm DVB/CAR/PDMS 固相微萃取头　美国 SuPeclo 公司; Agilent 7890A 气相色谱仪、Agilent 5975C 质谱、DB-5MS UI 弹性石英毛细管柱(60 m×0.25 mm, 0.25 μm)　美国 Agilent 公司; Gerstel ODP3 嗅觉检测口　德国 Gerstel 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　宜红工夫茶加工　工艺流程: 茶鲜叶(1 芽 1 叶, 含水率 75%~77%)→萎凋(12~14 h, 茶坯含水率 56%~58%)→揉捻(90~100 min)→解块→发酵(温度 30 ℃, 时间 4.5 h, 中间翻堆 2 次)→毛火(100~105 ℃, 15 min)→足火(80 ℃, 90 min)→提香(60 ℃, 180 min)。

1.2.2　感官和理化品质分析　茶叶感官品质: 由 3 名(2 女 1 男, 年龄在 25~42, 审评经验 5~20 年)专业审评员组成, 采用 GB/T 23776-2018《茶叶感官审评方法》对茶样进行感官审评[13], 计算公式为: 感官得分=外形×0.25+汤色×0.10+香气×0.25+滋味×0.30+叶底×0.10; 茶多酚和儿茶素含量采用 GB/T 8313-2008《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》进行检测[14]; 儿茶素苦涩指数=(ECG+EGCG+EGC+GC)/(EC+C)[15]; 游离氨基酸总量采用 GB/T 8314-2013《茶 游离氨基酸总量的测定》方法检测[16]; 可溶性糖含量采用蒽酮比色法; 干茶、茶汤和叶底色泽: 色差法测定(光源 D65, 角度 4°), 汤色检测采取 3 g 茶叶加 150 mL 沸水冲泡 5 min, 过滤后用专用比色皿测定茶汤色泽属性 L^*、a、b 值, 分别代表汤色的明亮度、红绿色度、黄蓝色度。a/b 比值越高, 红色越明显; 比值越低, 黄色越突出[17]。

1.2.3　HS-SPME-GC-MS-O 分析　HS-SPME-GC-MS 分析测定香气成分, 首先, 准确称取 1.0 g 茶样放入顶空萃取瓶中并加入 50.0 mL 沸水, 再加入 2.0 μL 的内标(0.862 g/mL×10^{-3} 癸酸乙酯), 然后将萃取头(试验前在 240 ℃ 下老化 15 min)插入顶空萃取瓶中, 在 60 ℃ 水浴中平衡 10 min, 吸附 50 min 后取出并立即插入 GC 仪的进样口中, 解吸附 6 min, 同时启动仪器收集数据[18]。

GC 条件: 载气为高纯氦气, 进样口温度 240 ℃, 流速 1.0 mL/min。色谱柱(DB-5MS UI, 60 m×0.25 mm×0.25 μm)温度以 50 ℃ 保持 5 min, 以 3 ℃/min 升至 180 ℃ 保持 2 min, 然后以 10 ℃/min 升至 250 ℃ 保持 3 min。

MS 条件: 电子电离能量为 70 eV; 质量扫描范围为 50~600 u; 离子源温度为 230 ℃; 四极杆温度为 150 ℃; MS 传输线温度为 280 ℃。

GC-O 分析: 载气为高纯氮气, 氮气流量 1.45 mL/min, 加湿器流速为 12 mL/min。嗅闻系统输出温度为 220 ℃, 嗅闻出口温度为 240 ℃。分析方法: 香气强度描述采用 5 点刻度法: 0 表示未闻到; 1 表示微弱; 2 表示中等; 3 表示较强; 4 表示极强。嗅闻过程中记录保留时间、强度值和呈味描述。

1.2.4　挥发性成分的定性与定量　定性: 将 GC-MS 分析得到的质谱数据在 NIST17.L 标准谱库中检索, 综合质谱匹配度来进行筛选化合物。

定量: 采用内标法定量, 各组分含量的计算公式如下:

$$W_i = \frac{S_i}{S_{is}} \times M_{is}$$

其中: W_i 为每个挥发性成分的含量(μg/kg); S_i 为挥发性成分的峰面积; M_{is} 为内标癸酸乙酯的质量; S_{is} 为内标癸酸乙酯的峰面积。

ROAV 分析: 采用相对香气活度值(Relative odor activity value, ROAV)分析并确定对样品总体风味贡献最大的组分, 并分析春夏秋 3 个季节的宜红茶茶样的关键香气成分。ROAV 为挥发性成分的相对浓度(C)与其气味阈值(T)的比值, C 为组分在样品中的质量浓度(μg/L); T 为对应组分在水中的气味阈值[19]。

1.3　数据处理

本研究实验测定均重复 3 次, 采用 Origin 软件进行数据处理并绘制图表, 数据采用单因素(ANOVA)分析和显著性分析, $P<0.05$ 表示有显著差异。

2　结果与分析

2.1　不同季节宜红工夫茶的感官品质分析

不同季节宜红工夫茶的感官审评结果见图 1, 春

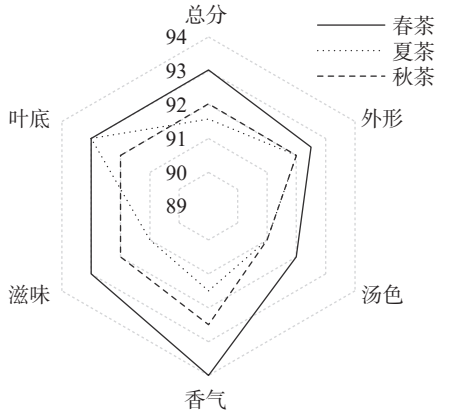


图 1　不同季节宜红工夫茶的感官审评结果

Fig.1　Sensory qualities of Yihong congou black tea processed in different seasons

表 1　不同季节宜红工夫茶的干茶、茶汤和叶底色泽品质结果

Table 1　Color qualities of dry tea, brew and infused leaves of Yihong congou black tea processed in different seasons

时间	干茶色泽		茶汤色泽		叶底色泽	
	L^*	a/b	L^*	a/b	L^*	a/b
春	41.76±0.02^a	0.33±0.01^c	31.15±0.02^c	0.09±0.00^b	44.66±0.06^b	0.53±0.00^b
夏	41.77±0.01^a	0.34±0.00^b	33.24±0.18^a	0.08±0.00^c	44.41±0.05^c	0.51±0.01^c
秋	41.20±0.01^b	0.38±0.00^a	31.48±0.03^b	0.18±0.00^a	44.97±0.02^a	0.56±0.01^a

注：同列标注字母不同表示具有显著性差异（P<0.05）。

夏秋三季宜红工夫茶的总分均高于 90 分，外形上条索均较紧细显金毫，说明高海拔地区鲜叶所制的宜红工夫茶外形品质优异；汤色上，春茶红艳明亮（92 分），比夏茶和秋茶高 1 分；在滋味上，春茶滋味醇厚鲜爽（93 分），而夏茶表现出醇厚（91.5 分），秋茶则表现为醇厚尚爽（92.5 分）；在香气上，春茶香气蜜甜，馥郁持久（94 分），次之的是秋茶甜香持久（92 分），夏茶甜香尚持久（91.5 分）。在叶底上，秋茶的叶底颜色稍暗，比春茶和夏茶低 1 分。在外形上，春夏秋三个季节的宜红工夫茶没有明显的差异。因此，单从感官品质评价来说，春茶最佳，秋茶次之，夏茶最后。付静[20]对不同季节的工夫红茶进行感官审评，综合排序依次为春季、秋季、夏季，本研究结果与之相符。

2.2　不同季节宜红工夫茶的色泽品质分析

比较不同季节的宜红工夫茶的色泽品质（图 2 和表 1），结果发现春季和夏季的干茶较亮，干茶 L^*值相比秋季较高（P<0.05）。不同季节的干茶色相值（a/b）具有显著差异（P<0.05），其中春茶最低（P<0.05），秋茶最高（P<0.05）。不同季节的茶汤色泽 L^*值在 31.15~33.24 之间，夏茶 L^*值最高（33.24，P<0.05），春茶最低（31.15，P<0.05），其中感官品质得分与茶汤色差分析有较高的相关性，L^*值与品质得分呈极显著负相关[21]，说明春茶的茶汤最优，这与感官审评结果一致。在叶底色泽上，秋茶的 L^*值与 a/b 比值均最高（P<0.05），说明秋茶叶底色泽偏红。综合以上的色泽数据结果可以发现，高海拔地区不同季节的宜红工夫茶的色泽品质都相对较好，其中春茶色泽品质最好，夏茶次之，秋茶最后。



图 2　不同季节宜红工夫茶的干茶、茶汤和叶底

Fig.2　Dry tea, brew and infused leaves of Yihong congou black tea processed in different seasons

2.3　不同季节宜红工夫茶的理化品质分析

理化成分是茶叶的感官品质基础，水浸出物、可溶性糖、茶多酚、氨基酸类物质等主要化学成分含量呈现明显的季节性变化规律。比较发现，夏茶的水浸出物和茶多酚（图 3）含量显著高于春秋两季（P<0.05），夏茶的茶多酚含量达 10.76%，较春茶（8.31%）和秋茶（8.40%）分别升高了 29.48% 和 28.10%，推测这与高海拔地区夏季的高温强光，促进儿茶素类物质合成直接相关[22]。水浸出物含量达 37.43%，推测是夏季高温多雨，茶树生长旺盛，叶片成熟度高，导致水

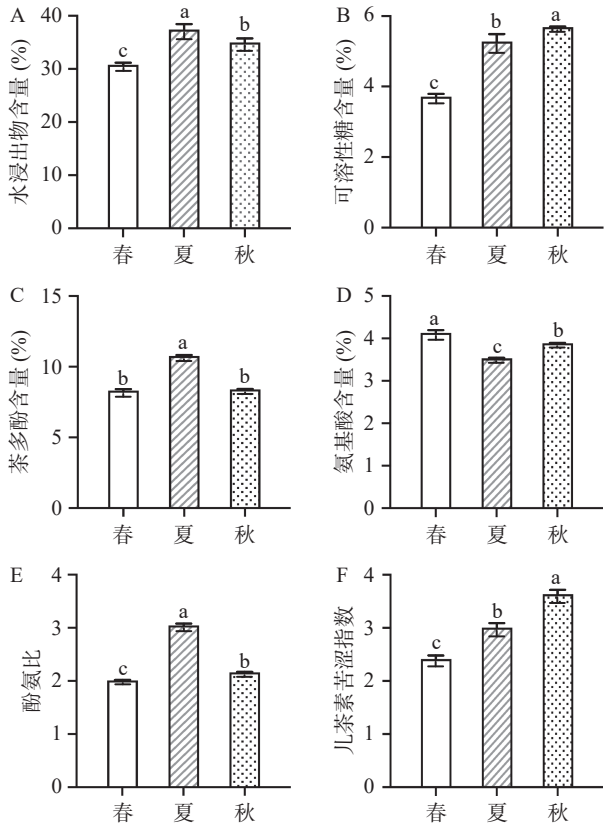


图 3　不同季节宜红工夫茶主要理化成分含量的变化

Fig.3　Changes of the main physico chemical components of Yihong congou black tea processed in different seasons

注：A.水浸出物含量；B.可溶性糖含量；C.茶多酚含量；D.氨基酸含量；E.酚氨比；F.儿茶素苦涩指数；不同小写字母表示数据之间差异显著（P<0.05）。

浸出物升高，所制成的红茶滋味醇厚。可溶性糖与茶叶中的甜味呈正相关[23]，秋茶的可溶性糖（5.69%）含量在 3 个季节中最高，呈现独特的甜味，可能与高海拔地区秋茶鲜叶中的糖类物质转化相关[24]。氨基酸是茶叶鲜爽滋味的主要贡献者[22]，春茶的氨基酸含量（4.13%）显著高于夏季（3.53%）和秋季（3.89%）（P<0.05），可能与春季低温和昼夜温差相关，但滋味浓度可能不及夏茶。酚氨比可作为茶树品种适制红茶的重要指标，酚氨比高通常表现为滋味更浓、涩感明显[25]，夏茶的酚氨比为 3.05，显著高于春茶和秋茶（P<0.05）。

儿茶素是决定茶汤滋味、浓稠度的关键成分，儿茶素可分为非酯性儿茶素和酯型儿茶素两类，非酯型儿茶素（EGC、GC、EC 和 C）的收敛性较弱，苦涩味较轻，而酯型儿茶素（EGCG、GCG、ECG 和 CG）则具有更强的收敛性和明显的涩味[26]。不同季节宜红工夫茶的儿茶素总量为 3.40%~6.05%，比较发现，夏茶的儿茶素总量（6.05%）最高，秋茶最低（3.40%），夏茶酯型儿茶素中的 EGCG、ECG 含量显著高于春秋两季（P<0.05），分别为 1.38% 和 1.49%。在非酯型儿茶素中，春茶的 EGC 含量最高，为 0.46%，较夏茶增加了 36.90%，这可能是由于不同季节的光照强度和温度协同调节儿茶素合成，从而影响茶汤滋味[27]。咖啡碱是红茶重要的苦味物质[28]，从图 4 可知，咖啡碱的含量从春季到秋季呈显著下降趋势（P<0.05）。茶叶品质不仅与儿茶素总量有关，还与儿茶素苦涩味指数有关[29]，从图 3 可知，春夏秋 3 个季节的儿茶素苦涩指数分别为 2.42、3.00 和 3.63，秋茶的苦涩指数显著高于春夏两季（P<0.05），儿茶素苦涩指数季节变化：秋茶>夏茶>春茶，说明秋茶的苦涩味最强，夏茶次之，春茶较柔和。

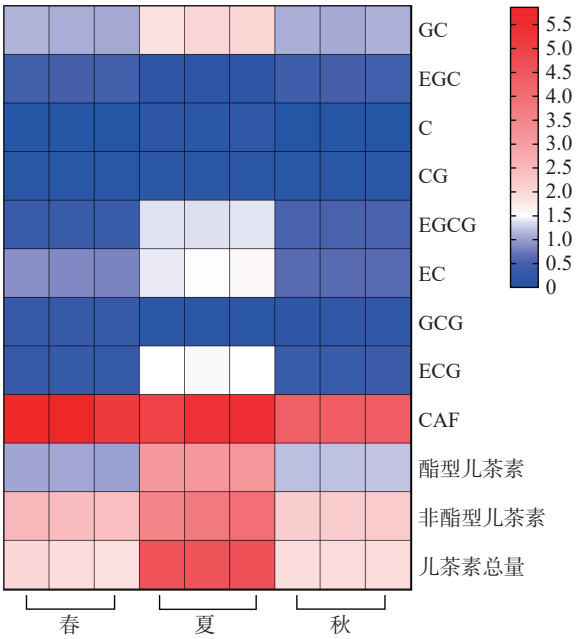


图 4 不同季节宜红工夫茶酚类物质含量的变化热图

Fig.4 Heat map of phenolic content changes of Yihong congou black tea processed in different seasons

综合以上结果发现，不同季节所制的宜红茶的理化成分具有显著区别（P<0.05），春茶的氨基酸含量最高，为所制成的红茶滋味鲜爽奠定了基础。夏茶的多酚类物质以及水浸出物含量最高，说明高海拔地区的夏茶滋味相对醇厚。秋茶的可溶性糖含量较高，赋予了独特的甜味。综合比较，春茶品质最优，这与感官审评结果一致。

2.4 不同季节宜红工夫茶的香气成分分析

宜红工夫茶的总离子色谱图如图 5 所示，不同季节所制茶样的挥发性化合物存在一定差异，其中春茶的挥发性化合物峰面积较高，秋茶次之。从表 2 可知，3 个季节宜红工夫茶共检测出 63 种挥发性香气物质，其中醇类 16 种，醛类 17 种，酯类 7 种，酮类 5 种，烯烃类 12 种，其他类化合物 6 种，其中共有挥发性成分 40 种。比较发现，春夏秋 3 个季节宜红工夫茶检测出的香气挥发性化合物分别有 40 种、50 种、48 种。春茶的挥发性香气物质总量为 1633.68 μg/kg（P<0.05），夏茶的挥发性香气物质总量为 1204.17 μg/kg，秋茶的挥发性香气物质总量为 1102.48 μg/kg。由此可见，从所检测到的香气挥发性化合物的种类及总含量综合来看，夏季宜红工夫茶所检测到的香气挥发性化合物的种类最多，而春茶的香气总含量最高。

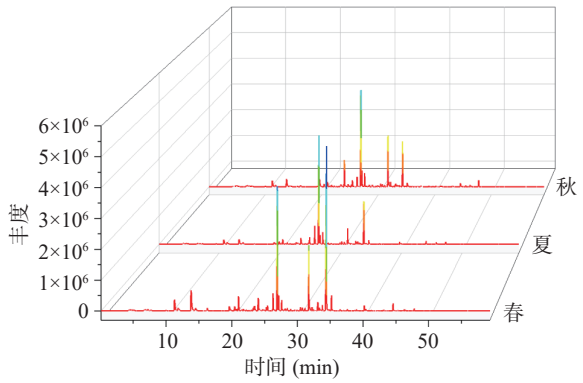


图 5 不同季节宜红工夫茶的总离子流图

Fig.5 Total ion chromatograms of Yihong congou black tea processed in different seasons

从图 6 可知，3 个季节的宜红工夫茶的挥发性香气物质组分上有较大区别，其中醇类、醛类和酯类化合物被认为是红茶中关键的香气成分[30]。醇类多显花果甜香，醛类常带青草芬芳，酯类兼具花果青香，上述香气成分的相互协调，赋予工夫红茶的特征香型[31]。在宜红工夫茶中醇类物质相对含量最高，其含量远远高于其他香气物质含量，各季节的醇类物质相对含量在 51.79%~67.48% 之间，其中夏茶的醇类物质相对含量最高，高达 67.48%。醛类物质占比第二，相对含量在 18.26%~32.86%，其中秋茶的醛类相对含量最高（32.86%）。第三大挥发性化合物为酯类，相对含量在 5.78%~11.58% 之间，春茶的酯类相对含

表 2　不同季节宜红工夫茶 GC-MS 定性定量结果

Table 2　Qualitative and quantitative results of aroma components of Yihong congou black tea

类别	CAS	时间(min)	香气组分	香气组分含量(μg/kg)		
				春	夏	秋
醇类	1576-95-0	9.73	顺-2-戊烯醇	–	–	5.32±1.43
	928-95-0	13.97	反式-2-己烯醇	5.02±1.66^{a}	5.30±1.72^{a}	7.78±3.82^{a}
	100-51-6	22.83	苯甲醇	9.14±3.67^{a}	4.11±2.61^{a}	8.75±5.27^{a}
	10339-61-4	23.01	3-壬烯醇	–	3.02±2.69	–
	111-87-5	24.72	辛醇	–	–	5.74±3.73
	5989-33-3	25.09	芳樟醇氧化物II	32.00±11.68^{a}	60.23±10.27^{b}	40.56±21.99^{a}
	34995-77-2	26.59	芳樟醇氧化物I	11.81±4.53^{a}	24.62±4.24^{a}	28.35±17.07^{a}
	78-70-6	26.63	芳樟醇	297.62±81.41^{a}	493.57±110.56^{a}	481.13±262.31^{a}
	20053-88-7	26.74	脱氢芳樟醇	–	–	59.25±33.07
	60-12-8	27.23	苯乙醇	21.62±7.21^{b}	36.78±7.87^{a}	31.49±13.66^{a}
	143-08-8	29.88	1-壬醇	–	4.32±1.22^{a}	6.34±4.01^{a}
	112-42-5	30.21	十一醇	5.94±4.11	–	–
	14049-11-7	30.35	(E)-芳樟醇氧化物(吡喃型)	7.92±2.83^{a}	8.87±2.54^{a}	7.77±3.83^{a}
	99-48-9	33.42	香芹醇	12.11±2.17^{a}	2.79±0.97^{b}	2.46±2.26^{b}
	98-55-5	31.45	α-松油醇	–	3.88±1.53	–
	106-25-2	33.98	橙花醇	590.04±131.89^{a}	167.03±30.31^{b}	118.91±51.49^{b}
醛类	590-86-3	6.42	异戊醛	4.49±1.60^{a}	3.44±1.36^{a}	15.74±12.82^{a}
	96-17-3	6.58	2-甲基丁醛	7.83±2.78^{a}	7.72±1.39^{a}	39.37±38.29^{a}
	66-25-1	10.92	正己醛	53.19±20.04^{a}	42.34±7.05^{a}	66.67±31.27^{a}
	6728-26-3	13.46	反式-2-己烯醛	102.57±30.27^{a}	48.99±8.05^{a}	85±0.98^{a}
	111-71-7	15.90	庚醛	9.87±3.25^{a}	5.57±1.60^{a}	12.56±6.21^{a}
	100-52-7	19.23	苯甲醛	21.16±5.93^{b}	17.46±3.01^{b}	52.89±26.05^{a}
	124-13-0	21.38	正辛醛	5.00±1.72^{a}	7.94±1.84^{a}	6.88±2.98^{a}
	4313-03-5	21.92	(E,E)-2,4-庚二烯醛	3.67±1.18^{a}	3.31±0.19^{a}	–
	122-78-1	23.62	苯乙醛	38.72±23.02^{b}	36.22±6.45^{b}	81.99±1.02^{a}
	2548-87-0	24.41	反-2-辛烯醛	3.55±0.79^{a}	3.80±0.45^{a}	8.04±4.08^{a}
	124-19-6	26.77	壬醛	35.31±5.18^{a}	37.90±8.33^{a}	48.60±9.74^{a}
	18829-56-6	29.57	反-2-壬烯醛	1.24±0.52^{a}	2.31±0.58^{a}	2.25±1.64^{a}
	116-26-7	31.67	藏红花醛	2.90±0.74^{a}	1.61±0.61^{a}	3.31±1.98^{a}
	112-31-2	31.84	癸醛	6.58±2.90^{a}	5.66±2.83^{a}	10.28±6.00^{a}
	432-25-7	32.65	β-环柠檬醛	7.37±1.83^{a}	7.13±2.40^{a}	4.92±0.89^{a}
	472-66-2	34.40	2,6,6-三甲基-1-环己烯基乙醛	4.91±1.82^{a}	3.44±0.73^{a}	3.53±2.13^{a}
	5392-40-5	34.79	柠檬醛	33.23±8.69^{a}	8.61±4.45^{b}	6.63±4.16^{b}
酯类	16491-36-4	30.58	N-己酸(反-2-己烯基)酯	–	8.44±0.43	–
	119-36-8	31.32	水杨酸甲酯	149.25±35.20^{a}	49.98±9.14^{b}	104.99±47.56^{ab}
	53398-85-9	32.98	2-甲基丁酸叶醇酯	3.38±0.80^{b}	8.24±3.07^{a}	5.17±0.72^{b}
	35154-45-1	33.22	异戊酸叶醇酯	7.66±1.41^{a}	5.54±2.29^{a}	4.45±2.66^{a}
	1189-09-9	37.44	香叶酸甲酯	4.58±1.15	–	–
	6378-65-0	40.07	己酸己酯	3.60±0.59^{a}	1.85±1.12^{b}	1.33±0.35^{b}
	31501-11-8	40.11	(Z)-己酸-3-己烯酯	0.23±0.01^{a}	4.40±0.03^{b}	2.39±1.63^{b}
酮类	110-93-0	20.32	甲基庚烯酮	6.20±1.76^{a}	4.38±1.05^{a}	4.16±1.99^{a}
	127-41-3	27.99	α-紫罗兰酮	2.51±0.74	–	–
	79-76-5	41.85	γ-紫罗兰酮	–	0.88±0.27	–
	689-67-8	42.78	香叶基丙酮	3.75±1.00^{a}	1.69±0.79^{b}	–
	14901-07-6	44.21	β-紫罗兰酮	14.29±8.46^{a}	8.73±2.80^{ab}	5.81±3.19^{b}
烯烃类	123-25-3	20.44	月桂烯	43.38±13.37^{a}	23.98±12.76^{a}	28.20±17.50^{a}
	99-83-2	21.42	α-水芹烯	1.17±0.43^{a}	0.83±0.42^{a}	–
	138-86-3	22.79	柠檬烯	7.08±0.85^{b}	7.06±4.48^{b}	23.80±10.83^{a}
	80-56-8	23.52	α-蒎烯	11.13±3.36	–	–
	586-63-0	22.02	萜品油烯	–	0.89±0.33	–
	673-84-7	29.58	2,6-二甲基-2,4,6-辛三烯	3.13±1.43	–	–
	13466-78-9	32.55	3-蒈烯	15.49±4.30^{a}	7.54±1.74^{b}	7.04±2.89^{b}

续表 2

类别	CAS	时间(min)	香气组分	香气组分含量(μg/kg)		
				春	夏	秋
其他	99-86-5	33.15	松油烯	–	–	3.71±2.54
	17699-14-8	39.08	α-荜澄茄油烯	–	11.06±5.03	–
	483-76-1	45.74	Δ-杜松烯	3.70±0.19^{a}	3.44±0.28^{a}	1.06±0.34^{a}
	483-77-2	45.91	顺-菖蒲烯	2.50±0.32^{a}	2.22±0.62^{a}	1.79±1.13^{a}
	87-44-5	47.28	石竹烯	–	4.12±2.91^{a}	11.59±4.73^{a}
	75-18-3	4.74	二甲基硫	6.61±2.07^{b}	7.09±2.37^{b}	41.61±27.49^{a}
	3208-16-0	7.45	2-乙基呋喃	7.33±1.96^{a}	4.43±0.99^{a}	–
	70424-14-5	21.13	(E)-2-(2-戊烯基)呋喃	3.79±1.16^{a}	1.93±1.01^{a}	3.28±1.44^{a}
	106-87-6	29.36	乙烯基环己烯二氧化物	–	–	0.90±0.17
	36431-72-8	36.76	茶香螺烷	0.66±0.19^{b}	1.34±0.64^{a}	1.40±1.19^{b}
	96-76-4	45.50	2,4-二叔丁基苯酚	1.63±0.08^{a}	–	2.96±1.09^{a}

注: “–”表示未检出挥发性成分; 同行不同小写字母表示数据之间差异显著(P<0.05)。

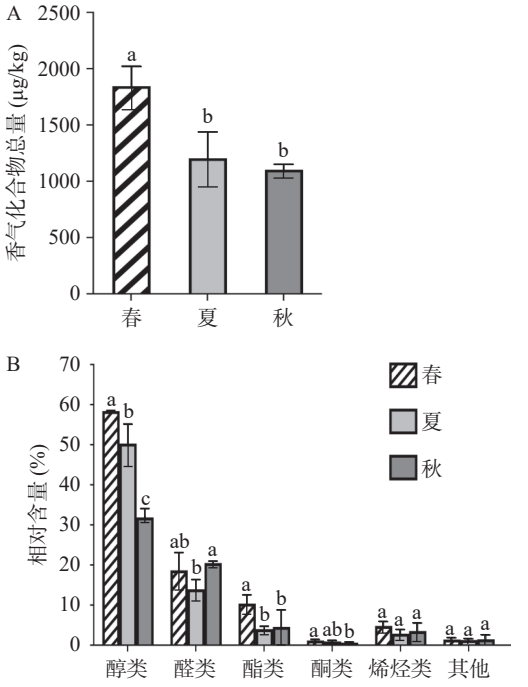


图 6 不同季节宜红工夫茶的主要香气成分总含量及相对含量

Fig.6 Total and relative contents of the main aroma components of yihong congou black tea processed in different seasons

注: A.香气化合物总量; B.香气化合物相对含量; 不同小写字母表示不同季节的茶叶相对含量差异显著(P<0.05)。

量最高(11.58%), 几乎是夏茶的两倍。酮类、烯烃类以及其他类物质的相对含量占比低, 酮类(0.77%~1.29%), 烯烃类(3.25%~5.46%), 其他类(1.49%~3.25%)。

正交偏最小二乘法(Orthogonal partial least squares-discriminant analysis, OPLS-DA)是茶叶品质判别中一种有效方法[32]。结果表明: 春夏秋 3 个季节的宜红工夫茶区分明显(图 7A), 具有 95% 的置信区间, 其拟合参数 R^2X=0.841, R^2Y=0.98, Q^2=0.873, R^2 和 Q^2 超过 0.5 表示模型拟合结果可接受[33]。为进一步验证模型的稳定性, 采用置换检验方法, 进行了 200 次的交叉验证(图 7B), 其参数为 R^2=0.603, Q^2=-0.792, Q^2 与 Y 轴相交的截距<0, 说明该模型没有出现过拟合, 具有较强的预测能力, 能较好地区分 3 个季节宜红工夫茶的挥发性化合物。从图中(图 7C)可以看出, VIP>1 的物质有 11 种, 综合 OPLS-DA 判别发现, 三个季节中 VIP>1, P<0.05 的香气成分有 7 种, 分别是橙花醇、芳樟醇、水杨酸甲酯、反式-2-己烯醛、壬醛、芳樟醇氧化物 I、柠檬醛, 这 7 种挥发性化合物是区分春夏秋 3 个不同季节的宜红工夫茶的关键差异性香气成分。

2.5 不同季节宜红工夫茶主要呈香成分分析

2.5.1 不同季节宜红主要香气组分的 ROAV 分析

ROAV 值是评价香气贡献度的重要指标, ROAV>1 的成分对茶叶整体香气品质的贡献度更大[34]。从表 3 可以看出, 在 3 个季节的宜红工夫茶中 ROAV>1 的香气化合物有芳樟醇、脱氢芳樟醇、橙花醇、(E,E)-2,4-庚二烯醛、反-2-辛烯醛、壬醛、癸醛、α-荜澄茄油烯、β-紫罗兰酮、辛醇。与春茶相比, 夏茶的香气差异性化合物为 α-荜澄茄油烯, 具有草本香气, 赋予了夏茶的草香, 秋茶的差异性香气化合物为脱氢芳樟醇、壬醛、辛醇, 具有热带草木味和柠檬香, 形成了秋茶的木质香调。

在 3 个季节所制的宜红工夫茶中 ROAV 值最高的是芳樟醇(9.92~16.45), 芳樟醇以花香和蜜香为主[36], 是形成宜红工夫茶花蜜香的主要贡献成分, 其次是带有玫瑰花香的橙花醇(7.93~39.34), 这两种香气化合物对宜红的香气贡献值最大, 共同构成了宜红独特的花香和甜香。β-紫罗兰酮作为茶叶香气中一种关键的酮类香气代谢物[37], 一般具有紫罗兰花香, 还可能呈现出水果的香气特性, 为茶叶香气增添了花果甜香的特征。本结果与郑鹏程等[8]研究结果相符。

2.5.2 不同季节宜红工夫茶呈香成分的 GC-O 分析

GC-O 是鉴别和量化茶叶中的关键香气成分的重要手段[38]。本研究在 3 个季节的宜红工夫茶中共鉴定得到 18 种呈香成分(AI>1), 包括醇类 8 种、醛类 4 种、酯类 3 种、酮类 2 种、烯烃类 1 种(表 4), 其中

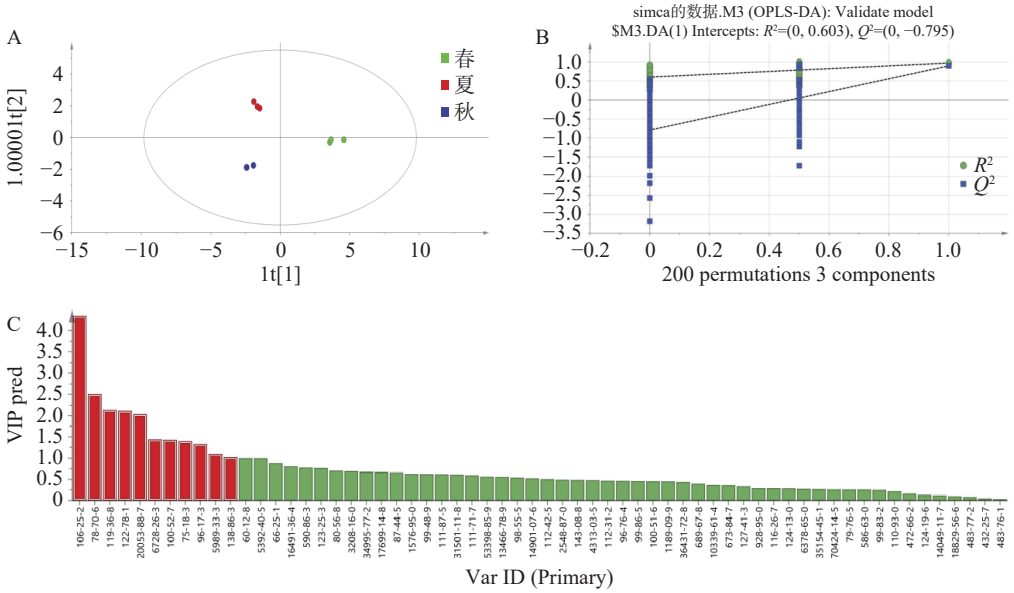


图 7　不同季节宜红工夫茶挥发性化合物 OPLS-DA 得分图(A)及其验证模型(B)、VIP 得分图(C)

Fig.7　OPLS-DA score chart of Yihong congou black tea processed in different seasons compounds in black tea (A), validation model (B), VIP score plot (C)

表 3　不同季节宜红工夫茶关键香气成分的 ROAV 值

Table 3　ROAV values of key aroma components of Yihong congou black tea in different seasons

香气组分	阈值[35]	ROAV		
		春	夏	秋
芳樟醇	0.6	9.92±2.72^{a}	16.45±3.69^{a}	16.04±8.74^{a}
脱氢芳樟醇	0.11	–	–	10.77±6.01
橙花醇	0.3	39.34±8.79^{a}	11.14±2.02^{b}	7.93±3.43^{b}
(E,E)-2,4-庚二烯醛	0.049	1.50±0.48^{a}	1.35±0.05^{a}	–
反-2-辛烯醛	0.003	23.65±5.28^{a}	2.53±0.21^{b}	5.36±2.72^{b}
壬醛	1	–	–	1.16±0.36
癸醛	0.1	1.37±0.58^{a}	1.13±0.57^{a}	2.06±0.48^{a}
α-荜澄茄油烯	0.03	–	9.75±4.38	–
β-紫罗兰酮	0.09	3.44±0.69^{a}	1.94±0.62^{b}	1.29±0.71^{b}
辛醇	0.054	–	–	2.13±1.38

表 4　不同季节宜红工夫茶的 GC-O 结果

Table 4　Based on GC-O smelling the aroma of Yihong congou black tea processed in different seasons

序号	时间(min)	香气成分	气味特征[30,39]	气味强度(AI)		
				春	夏	秋
1	6.95	2-甲基丁醛	刺激性气味	2	2	1.5
2	11.25	正己醛	青草香	2	1	1.75
3	20.53	甲基庚烯酮	柑橘香	2	2	2
4	24.05	苯乙醛	花甜香	2	3.5	2.5
5	25.47	芳樟醇氧化物I	花香	2	2.5	2
6	26.27	芳樟醇氧化物II	玉兰花香	3	2.25	2
7	26.62	芳樟醇	花香	3	3.5	3
8	26.86	壬醛	柠檬香	2	2.5	2
9	27.63	苯乙醇	蜜甜香	1	1.5	2
10	29.62	顺-3-壬烯-1-醇	蜡状密瓜皮	2	0	2
11	30.73	(E)-芳樟醇氧化物(吡喃型)	花香、木香	2.5	2	1.75
12	30.95	N-丁酸(反-2-己烯基)酯	杏子成熟发酵味	0	1.75	0
13	31.73	水杨酸甲酯	薄荷香	1	1.5	1.75
14	33.18	α-松油醇	松木和丁香花香气	0	0	1.75
15	34.39	橙花醇	花香	1.75	1.5	2
16	39.08	α-荜澄茄油烯	草本气味	0	1.75	0
17	40.32	己酸己酯	青甜香	2	2	0
18	44.53	β-紫罗兰酮	花香	2.5	2.5	3

注：“0”表示未嗅出该挥发性成分。

春季 10 种、夏季 11 种、秋季 12 种，3 个季节共有的呈香物质有 13 种，分别为 2-甲基丁醛、正乙醛、甲基庚烯酮、苯乙醛、芳樟醇氧化物 I、芳樟醇氧化物 II、芳樟醇、壬醛、苯乙醇、(E)-芳樟醇氧化物(吡喃型)、水杨酸甲酯、橙花醇、β-紫罗兰酮。GC-O 嗅闻鉴定出的 18 种挥发性物质的香气成分主要有花香、甜香、果香、青草香、木质香等类型，其中含量较高和呈香强的有芳樟醇氧化物 II(玉兰花香)、芳樟醇(花香)、苯乙醛(花甜香)、β-紫罗兰酮(花香)，呈香强度均接近 3.0，表明它们是宜红工夫茶花香和甜香的重要贡献物质，这与在审评时所闻到的蜜甜香一致。该结论与 Lu 等[40] 研究结果相符，其研究表明单萜醇、芳香醇等香气物质能促进红茶香气的形成。比较不同季节的宜红工夫茶的呈香成分，结果发现春茶中的芳樟醇氧化物 II 及(E)-吡喃型芳樟醇氧化物的呈香强度均高于夏秋茶，其中花香和甜香风味贡献较大。夏茶中芳樟醇的呈香强度值最高(3.5)，且 N-丁酸(反-2-己烯基)酯与 α-荜澄茄油烯呈香强度也高于春秋茶，这些香气物质共同构成了夏茶特有的香气特征。秋茶中的苯乙醇(蜜甜香)、水杨酸甲酯(薄荷香)、α-松油醇(松木香)和橙花醇(花香)的呈香强度较高。值得注意的是，赋予木香的 α-松油醇仅在秋茶中被鉴定出来，而花甜香的苯乙醛在三个季节中也有显著差异，其呈香强度以夏茶最高(3.5)，秋茶次之(2.5)，这可能与春、夏、秋三季光照强度的变化等因

素有关[41]。

综合 GC-O 和 ROAV 结果，比较发现 ROAV 值较高的香气化合物，其嗅闻的气味强度也会较高，两种方法呈现出了一致性，但两种方法鉴定出的部分香气物质贡献度也存在差异[42]，在 GC-O 所鉴别出来的 18 个物质中，部分 ROAV 值<1 的化合物也能被嗅闻到较高的气味强度，其中包括 3 个季节中共有的甲基庚烯酮（柑橘香）、(E)-芳樟醇氧化物（吡喃型）（花香），春茶、秋茶中的顺-3-壬烯-1-醇（蜡状密瓜皮）以及夏茶中的壬醛（柠檬香）。而部分 ROAV>1 的物质却没有被嗅闻到，其中包括(E,E)-2,4-庚二烯醛、反-2-辛烯醛、癸醛等，可能是由于 ROAV 的计算基于一个简单的模型系统中的浓度-阈值比率，这可能无法完全捕捉到茶叶基质中香气感知的复杂性[39]。因此，本研究结合 GC-O 和 ROAV 两种方法，综合分析发现芳樟醇、β-紫罗兰酮、橙花醇、壬醛 ROAV>1 且 GC-O 嗅闻强度 AI>2 的香气活性化合物是形成不同季节宜红工夫茶特征香气的关键化合物，而苯乙醛、甲基庚烯酮、芳樟醇氧化物Ⅰ、芳樟醇氧化物Ⅱ及(E)-芳樟醇氧化物（吡喃型）等 AI>2 的香气活性化合物可能对宜红工夫茶的香气特征及强弱具有辅助作用。

Xu 等[43] 研究表明，香叶醇、苯乙醛、芳樟醇、苯乙醇和 β-紫罗兰酮是影响祁门红茶整体香气的关键化合物，Ma 等[44] 发现，苯乙醛、芳樟醇、香茅醇和 3-乙基-2,5-二甲基吡嗪对滇红香气具有重要贡献，Lu 等[40] 则鉴定出芳樟醇、β-大马士酮和苯乙醛为英红的主要香气活性化合物。本研究分析发现，芳樟醇、β-紫罗兰酮、橙花醇和壬醛为宜红工夫茶的关键呈香成分。相比其他地区的工夫红茶，β-紫罗兰酮和橙花醇为宜红工夫茶的差异性香气化合物。值得注意的是，宜红与祁红的关键呈香物质较为相似，这可能是由于两者均为中小叶种的茶树鲜叶所制[45]。此外，虽然芳樟醇、苯乙醛等香气成分在四种工夫红茶中均存在，但其呈香强度在不同产区红茶间存在显著差异，推测这种差异主要受栽培环境及气候条件等因素影响，最终造就了不同产区红茶特征香气的感官差异[34]。

3 结论

本研究综合分析了高海拔地区春、夏、秋三季所制宜红工夫茶的理化品质与香气成分。结果表明：三季宜红工夫茶均符合优质商品茶标准。在理化成分方面，春茶氨基酸含量最高；夏茶的水浸出物、茶多酚含量及儿茶素总量较高；秋茶的可溶性糖含量最高。香气分析共鉴定出 63 种香气物质，其中共性成分 40 种。夏茶香气种类最多（50 种），春茶香气物质总量最高（1633.68 μg/kg，$P<0.05$）。通过 OPLS-DA 分析，春、夏、秋三季宜红工夫茶样品区分明显，并筛选出 7 种关键差异香气成分（VIP 值>1 且 $P<0.05$）：橙花醇、芳樟醇、水杨酸甲酯、反式-2-己烯醛、壬醛、芳樟醇氧化物 I、柠檬醛。比较不同季节宜红工夫茶的呈香成分，发现呈花甜香的苯乙醛在三个季节中差异显著，芳樟醇氧化物 II 及(E)-吡喃型芳樟醇氧化物在春茶中的呈香强度更高，夏茶中芳樟醇、N-丁酸（反-2-己烯基）酯与 α-荜澄茄油烯呈香强度较高，呈木香的 α-松油醇仅在秋茶中被鉴定出来。综合 GC-O 与 ROAV 结果，确定宜红工夫茶的关键香气物质为芳樟醇（花香）、β-紫罗兰酮（花香）、橙花醇（花香）和壬醛（柠檬香）。

综上所述，本研究分析了不同季节宜红工夫茶的理化品质，并筛选出其关键呈香成分。然而，在实际生产中，高海拔地区的夏茶资源尚未得到充分利用，后续研究将基于夏茶特性，优化夏季宜红工夫茶定向精准加工技术，并开展产品拼配工作，为宜红工夫茶的品质调控及新产品研发提供数据与理论支撑。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] LIU Z H, HUANG J A, SHI J, et al. Leading progress on genomics, health benefits and utilization of tea resources in China[J]. Nature, 2019, 566(7742): S1−S10.

[2] 刘仲华, 黄建安, 龚雨顺, 等. 茶叶功能成分的健康作用研究新进展[J]. 中国茶叶, 2021, 43(9): 1−11. [LIU Z H, HUANG J A, GONG Y S, et al. New progress in research on the health effects of functional components in tea[J]. Chinese Tea, 2021, 43(9): 1−11.]

[3] 中国茶叶流通协会. 2023 年度中国茶叶产销形势报告[R]. 北京: 中国茶叶流通协会, 2023. [China Tea Marketing Association. 2023 Annual report on China's tea production and sales situation[R]. Beijing: China Tea Marketing Association, 2023.]

[4] 付本鑫. 优质宜红茶初制工艺试验小结[J]. 茶业通报, 2017, 39(2): 57−59. [FU B X. Summary of the experiment on the primary processing technology of high-quality Yihong tea[J]. Journal of Tea Business, 2017, 39(2): 57−59.]

[5] QU Fengfeng, ZENG Weichao, TONG Xin, et al. The new insight into the influence of fermentation temperature on quality and bioactivities of black tea[J]. Lwt, 2020, 117: 108646.

[6] 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 F F, QU F F, YU Z, et al. The influence of microwave and light wave aroma enhancement on the quality of Gongfu black tea [J]. China Tea Processing,2018(4):48-52.]

[7] CHEN Qincao, ZHU Yin, LIU Yafang, et al. Black tea aroma formation during the fermentation period[J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131640.

[8] 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 P C, LIU P P, GONG Z M, et al. Analysis of characteristic aroma components of Hubei black tea[J]. Journal of Tea Science, 2017, 37(5): 465−475.]

[9] JIN Lei, LIAN Xueyan, CHEN Li, et al. Characteristic aroma analysis and interaction study of key aroma compounds of Chuanhong congou black tea[J]. European Food Research and Technolo-

gy, 2024, 250(2): 441−454.
[10] ZHANG Jixin, XIA Dongzhou, LI Tiehan, et al. Effects of different over-fired drying methods on the aroma of Lu'an Guapian tea[J]. Food Research International, 2023, 173: 113224.
[11] LIU Chengshun, LI Jianlong, LI Hanxiang, et al. Differences in the quality of black tea (*Camellia sinensis* var. *yinghong* No.9) in different seasons and the underlying factors[J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 100998.
[12] KFOURY N, MORIMOTO J, KERN A, et al. Striking changes in tea metabolites due to elevational effects[J]. Food Chemistry, 2018, 264: 334−341.
[13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 23776-2018: 茶叶感官审评方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 23776-2018: Sensory evaluation methods for tea[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.]
[14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 8313-2008: 茶叶中茶多酚和儿茶素含量的检验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 8313-2008: Test methods for content of tea polyphenols and catechins in tea[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.]
[15] 施兆鹏, 刘仲华. 夏茶苦涩味化学实质的数学模型探讨[J]. 茶叶科学, 1987(2): 7−12. [SHI Z P, LIU Z H. Discussion on the mathematical model of the chemical essence of the astringent taste of summer tea[J]. Tea Science, 1987(2): 7−12.]
[16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 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 of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 8314-2013: Determination of total free amino acids in tea[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.]
[17] LONG Piaopiao, SU Shengxiao, HAN Zisheng, et al. The effects of tea plant age on the color, taste, and chemical characteristics of Yunnan Congou black tea by multi-spectral omics insight[J]. Food Chemistry: X, 2024, 21: 101190.
[18] LIU Panpan, ZHENG Pengcheng, FENG Lin, et al. Dynamic changes in the aroma profile of Qingzhuan tea during its manufacture[J]. Food Chemistry, 2022, 375: 131847.
[19] WANG Yujie, DENG Guojian, HUANG Lunfang, et al. Sensory-directed flavor analysis reveals the improvement in aroma quality of summer green tea by *Osmanthus* scenting[J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101571.
[20] 付静. 不同采摘季节工夫红茶品质的研究[J]. 食品科技, 2017, 42(11): 90−95. [FU J. Research on the quality of black tea produced at different harvesting seasons[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(11): 90−95.]
[21] LONG Piaopiao, LI Yaxin, HAN Zisheng, et al. Discovery of color compounds: Integrated multispectral omics on exploring critical colorant compounds of black tea infusion[J]. Food Chemistry, 2024, 432: 137185.
[22] 宛晓春. 茶叶生物化学[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2003. [WAN X C. Tea biochemistry[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2003.]
[23] 岩嘎, 杨艳芬, 杨梓泰, 等. 景迈山古茶园与生态茶园晒青茶品质特征的研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(19): 346−354. [YAN G, YANG Y F, YANG Z T, et al. King Michael mountain ancient tea garden and the study of ecological tea garden bask in oolong tea quality characteristics[J]. Food and Fermentation Industry, 2025, 51(19): 346−354.]
[24] JIANG Hao, YU Feng, QIN Li, et al. Dynamic change in amino acids, catechins, alkaloids, and Gallic acid in six types of tea processed from the same batch of fresh tea (*Camellia sinensis* L.) leaves[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2019, 77: 28−38.
[25] 石琳琳, 赵楠楠, 朱俊烨, 等. 汝城白毛茶加工红碎茶过程中主要滋味物质动态变化[J]. 食品工业科技, 2025, 46(13): 1−9. [SHI L L, ZHAO N N, ZHU J Y, et al. Dynamic changes of major aroma compounds during processing of Yucheng baimao tea into red broken tea[J]. Food Industry Science and Technology, 2025, 46(13): 1−9.]
[26] DENG Shuaijun, ZHANG Ge, OLAYEMI ALUKO O, et al. Bitter and astringent substances in green tea: Composition, human perception mechanisms, evaluation methods and factors influencing their formation[J]. Food Research International, 2022, 157: 111262.
[27] WANG Miao, YANG Jie, LI Jianlong, et al. Effects of temperature and light on quality-related metabolites in tea [*Camellia sinensis* (L.) Kuntze] leaves[J]. Food Research International, 2022, 161: 111882.
[28] YE Fei, GUO Xinbo, LI Bo, et al. Characterization of effects of different tea harvesting seasons on quality components, color and sensory quality of 'Yinghong 9' and 'Huangyu' large-leaf-variety black tea[J]. Molecules, 2022, 27(24): 8720.
[29] 毛娟, 王文海, 洛英, 等. 西藏墨脱县 6 个茶树品种春夏两季化学品质差异分析[J]. 食品科学, 2024, 45(10): 10167−10174. [MAO J, WANG W H, LUO Y, et al. Analysis of chemical quality differences of six tea tree varieties in Motuo county, tibet between spring and summer seasons[J]. Food Science, 2024, 45(10): 10167−10174.]
[30] 肖作兵, 王红玲, 牛云蔚, 等. 基于 ROAV 和 AEDA 对工夫红茶的 PLSR 分析[J]. 食品科学, 2018, 39(10): 242−249. [XIAO Z B, WANG H L, NIU Y W, et al. PLSR analysis of Keemun black tea based on ROAV and AEDA[J]. Food Science, 2018, 39(10): 242−249.]
[31] YUN Jing, CUI Chuanjian, ZHANG Shihua, et al. Use of headspace GC/MS combined with chemometric analysis to identify the geographic origins of black tea[J]. Food Chemistry, 2021, 360: 130033.
[32] LIU Mengjie, YANG Yang, ZHAO Xiaobo, et al. Classification and characterization on sorghums based on HS-GC-IMS combined with OPLS-DA and GA-PLS[J]. Current Research in Food Science, 2024, 8: 100692.
[33] 黄慧清, 郑玉成, 胡清财, 等. 基于 SBSE-GC-O-MS 技术的 3 个代表性乌龙茶品种关键香气成分分析[J]. 食品科学, 2024, 45(1): 101−108. [HUANG H Q, ZHENG Y C, HU Q C, et al. Analysis of key volatile components in three representative Oolong tea varieties based on SBSE-GC-O-MS technology[J]. Food Science, 2024, 45(1): 101−108.]
[34] YIN Peng, KONG Yashuai, LIU Panpan, et al. A critical review of key odorants in green tea: Identification and biochemical formation pathway[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 129: 221−232.
[35] 里奥·范海默特. 化合物香味阈值汇编[M]. 北京: 科学出版社, 2015. [LEO V H. Compilation of aroma thresholds of com-

pounds[M]. Beijing: Science Press, 2015.]
[36] 宋振硕, 卫聿铭, 李铁汉, 等. 室温贮藏对花果香红茶风味品质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(2): 258−267. [SONG Z S, WEI Y M, LI T H, et al. Effects of room temperature dtorage on the flavor and quality of floral and Fruit-Aroma black tea[J]. Food Science, 2024, 45(2): 258−267.]
[37] 郑芳玲, 甘诗雅, 赵蕾, 等. 基于 GC-MS/GC-O 的不同地区红茶特征香气及分子感官分析[J]. 食品科学, 2023, 44(24): 262−268. [ZHENG F L, GAN S Y, ZHAO L, et al. Characteristic aroma and molecular sensory analysis of different regions of black tea based on GC-MS/GC-O[J]. Food Science, 2023, 44(24): 262−268.]
[38] 欧晓西, 黄慧清, 李秋明, 等. 基于 SBSE-GC-O-MS 技术‘梅占’茶关键香气成分分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(2): 271−279. [OU X X, HUANG H Q, LI Q M, et al. Analysis of key aroma components of 'Meizhan' tea based on SBSE-GC-O-MS technology[J]. Food Industry Science and Technology, 2025, 46(2): 271−279.]
[39] KUN Jirui, LUO Zhengfei, GONG Menghan, et al. Characterization of the key aroma compounds in the floral honey-like cup aroma of Fenghuang Dancong oolong tea by application of the sensomics approach[J]. Food Chemistry: X, 2025, 28: 102538.
[40] LU Mingxia, SHENG Caiyan, KE Han, et al. Revealing the differences in aroma of black tea under different drying methods based on GC–MS, GC-O[J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101782.
[41] LIU Haocheng, XU Yujuan, WU Jijun, et al. GC-IMS and olfactometry analysis on the tea aroma of Yingde black teas harvested in different seasons[J]. Food Research International, 2021, 150: 110784.
[42] WANG Mengqi, MA Wanjun, SHI Jiang, et al. Characterization of the key aroma compounds in Longjing tea using stir bar sorptive extraction (SBSE) combined with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), gas chromatography-olfactometry (GC-O), odor activity value (OAV), and aroma recombination[J]. Food Research International, 2020, 130: 108908.
[43] XU Yujie, LIU Yaqin, YANG Jihong, et al. Manufacturing process differences give Keemun black teas their distinctive aromas[J]. Food Chemistry: X, 2023, 19: 100865.
[44] MA Lijuan, GAO Manman, ZHANG Linqi, et al. Characterization of the key aroma-active compounds in high-grade Dianhong tea using GC-MS and GC-O combined with sensory-directed flavor analysis[J]. Food Chemistry, 2022, 378: 132058.
[45] 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 P P, ZHENG P C, GONG Z M, et al. Quality analysis and comprehensive evaluation of Gongou black tea[J]. Food Science, 2021, 42(12): 195−205.]