

引用格式:

李欣璐, 杨玉子, 安勤, 鲍肃都, 安会敏, 牛丽, 陈金华, 白思蕾, 刘仲华, 黄建安. 不同品类武夷红茶滋味特征及其关键成分表征[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2026, 52(1): 56–66.

LI X L, YANG Y Z, AN Q, BAO S D, AN H M, NIU L, CHEN J H, BAI S L, LIU Z H, HUANG J A. Taste characteristics and characterization of key components of different categories of Wuyi black tea[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2026, 52(1): 56–66.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



不同品类武夷红茶滋味特征及其关键成分表征

李欣璐^{1,2,3}, 杨玉子^{1,2,3}, 安勤^{1,2,3}, 鲍肃都^{1,2,3}, 安会敏^{1,2,3}, 牛丽^{1,2,3,4},
陈金华^{1,2,3,4}, 白思蕾^{1,2,3,4}, 刘仲华^{1,2,3,4*}, 黄建安^{1,2,3,4}

1. 湖南农业大学园艺学院, 湖南 长沙 410128; 2. 茶学教育部重点实验室, 湖南 长沙 410128;
3. 国家植物功能成分利用工程技术研究中心, 湖南 长沙 410128;
4. 湖南省植物功能成分利用协同创新中心, 湖南 长沙 410128)

摘要: 为探究不同品类及同一品类不同等级武夷红茶的滋味特征与关键滋味成分, 以‘奇红’(金骏眉)‘正山小种’‘小种’‘烟小种’4类武夷红茶(共12个等级样品)为材料, 采用感官审评法分析滋味特征, 结合高效液相色谱法(HPLC)和超高效液相色谱-四极杆-飞行时间串联质谱技术(UHPLC-Q-TOF/MS)对非挥发性成分进行定性定量分析, 并通过多元统计分析筛选差异代谢物。结果表明: 4类武夷红茶的滋味差异主要源于茶多酚及多酚类衍生物、有机酸类、氨基酸及其衍生物、核苷酸类化合物的种类与含量差异; ‘奇红’的水浸出物含量(34.47%~41.50%)、游离氨基酸总量(2.83%~4.98%)、儿茶素组分总量(1.96%~2.66%)及茶多酚含量(11.79%~21.88%)均高于其他品类, 多成分的协同作用使其呈现甜醇、爽滑滋味; ‘正山小种’的特征滋味以桂圆汤味为主, 黄酮类(圣草酚、异槲皮苷等)与氨基酸类化合物是其关键贡献物质; ‘小种’与‘烟小种’的滋味受酸类化合物的影响显著, 其中, ‘烟小种’呈现独特的烟味特征。同一品类不同等级的差异代谢物具有特异性, ‘奇红’以酸类化合物、核苷酸类及儿茶素类为主要差异成分, ‘正山小种’以黄酮类与氨基酸类为核心差异成分, ‘小种’以氨基酸类、黄酮类化合物为主要差异成分, ‘烟小种’则以核苷酸类和氨基酸类为主要差异成分, 这些成分直接调控各等级产品的滋味浓郁度与特征表现。

关键词: 武夷红茶; 感官评价; 滋味成分; 差异代谢物

中图分类号: TS272.5+2

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2026)01-0056-11

Taste characteristics and characterization of key components of different categories of Wuyi black tea

LI Xinlu^{1,2,3}, YANG Yuzi^{1,2,3}, AN Qin^{1,2,3}, BAO Sudu^{1,2,3}, AN Huimin^{1,2,3}, NIU Li^{1,2,3,4}, CHEN Jinhua^{1,2,3,4},
BAI Silei^{1,2,3,4}, LIU Zhonghua^{1,2,3,4*}, HUANG Jian'an^{1,2,3,4}

1. College of Horticulture, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2. The Key Laboratory of Tea Science, Ministry of Education, Changsha, Hunan 410128, China; 3. National Engineering Research Center for the Utilization of Plant Functional Ingredients, Changsha, Hunan 410128, China; 4. Collaborative Innovation Center for the Utilization of Plant Functional Ingredients of Hunan Province, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: To investigate the taste characteristics and key taste components of different categories and different grades within the same category of Wuyi black tea, four categories of Wuyi black tea, namely 'Qihong'(Jinjunmei), 'Zhengshan xiaozhong', 'Xiaozhong', and 'Yanxiaozhong'(with a total of 12 graded samples) were used as materials. Sensory evaluation was adopted to analyze the taste characteristics, while high-performance liquid chromatography(HPLC) and

收稿日期: 2025-02-13

修回日期: 2025-12-02

基金项目: 福建省武夷山三茶集团有限公司项目(XCZX-2024025); 国家现代农业产业技术体系(CARS-19)

作者简介: 李欣璐(2000—), 女, 湖南长沙人, 硕士研究生, 主要从事茶叶品质化学研究, 983677941@qq.com; *通信作者, 刘仲华, 博士, 教授, 主要从事茶叶加工理论与技术研究, larkin-liu@163.com

ultra-high performance liquid chromatography-quadrupole-time-of-flight tandem mass spectrometry(UHPLC-Q-TOF/MS) were used for the qualitative and quantitative analysis of non-volatile components. Multivariate statistical analysis was applied to screen for differential metabolites. The results showed that the taste differences among the four categories of Wuyi black tea are mainly derived from the differences in the types and contents of tea polyphenols and their derivatives, organic acids, amino acids and their derivatives, and nucleotide compounds. The water extract content(34.47%-41.50%), total free amino acids(2.83%-4.98%), total catechin components(1.96%-2.66%), and tea polyphenols content (11.79%-21.50%) of 'Qihong' are significantly higher than those of the other categories, and the synergistic effect of multiple components contributed to its sweet, mellow and smooth taste. The characteristic taste of 'Zhengshan xiaozhong' is dominated by a dried longan flavor, with flavonoids(such as eriodictyol and isoquercitrin) and amino acidic compounds being the core contributing substances. The taste of 'Xiaozhong' and 'Yanxiaozhong' is significantly influenced by acidic compounds, and 'Yanxiaozhong' has a unique smoky flavor. Differential metabolites among different grades within the same category are species-specific: those of 'Qihong' are dominated by organic acids, nucleotides, and catechins; those of 'Zhengshan xiaozhong' are characterized by flavonoids and amino acids as core differential components; those of 'Xiaozhong' are primarily composed of amino acids and flavonoids; while those of 'Yanxiaozhong' are mainly nucleotides and amino acids. These components directly regulate the taste intensity and characteristic expression of products at different grades.

Keywords: Wuyi black tea; sensory evaluation; taste components; differential metabolite

红茶为全发酵茶,是我国传统的茶叶种类,占全球茶叶总消费量的75%^[1]。武夷红茶产自福建省武夷山市,至今已有400多年的历史,以其独特韵味、花果香味或桂圆干味的品质特征备受国内外消费者喜爱。‘奇红’‘正山小种’‘小种’‘烟小种’是4类具有代表性的武夷红茶。受加工技术的影响,不同品类武夷红茶滋味特征存在差异。其中,‘奇红’是包含金骏眉、银骏眉在内的系列红茶产品,具有甜醇的滋味特征。‘正山小种’是由菜茶鲜叶制成的红茶,具有桂圆汤味的滋味特征。‘小种’红茶是以武夷小叶种鲜叶为原料制成的红茶,初制与精制工序均与‘正山小种’基本一致,其滋味特征与‘正山小种’类似。‘烟小种’红茶是以小叶种鲜叶经初制工序后再经过筛分、风选、拣剔、松柴熏焙等工序精制而成,其滋味带有“烟味”。

近年来有关红茶感官特征、生化品质成分及基因表达的研究较多,李梦婷等^[2]以广西贺州产的2种红茶为研究对象,比较分析了2种红茶的化学成分、主要元素、氨基酸和主要香气成分,得出2种红茶化学成分中含量较高的是茶多酚和蛋白质;肖雨竹等^[3]系统分析了武夷山茶区10个红茶品种的感官特征和生化品质成分,发现10个茶样中咖啡碱含量较低,茶多酚及游离氨基酸含量适中,水浸出物含量相对较高。卢莉等^[4]以13个武夷名丛为材料,分析了其适制性及主要品质成分,发现鲜叶水浸出物、咖啡碱含量、酚咖比和氨咖比与红茶品质及其

关键影响因子呈显著相关。LU等^[5]研究分析了武夷红茶在加工过程中的品质成分、关键调控基因表达和部分酶活性,探索了武夷红茶的滋味形成机制,推测促进品质成分转化的多酚氧化酶和纤维素酶是武夷红茶品质形成的关键因素。虽然目前关于武夷红茶品质形成的研究较多,但运用超高效液相色谱-四极杆-飞行时间串联质谱技术(UHPLC-Q-TOF/MS)对其进行的研究尚少。

本研究以同一区域4种不同品类、不同等级的武夷红茶为材料,旨在探究不同品类武夷红茶滋味特征及其关键品质成分,采用UHPLC-Q-TOF/MS对4类武夷红茶鲜叶内含成分进行分析,并结合感官审评,比较其品质差异,明确不同品类武夷红茶的内含成分差异及其特征品质,以期为武夷红茶工艺改进和品质提升提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

本研究供试茶样为武夷山市茶业同业公会提供的12个武夷红茶样品:‘奇红’特级(A1)、‘奇红’一级(A2)、‘奇红’二级(A3);‘正山小种’特级(B1)、‘正山小种’一级(B2)、‘正山小种’二级(B3);‘小种’特级(C1)、‘小种’一级(C2)、‘小种’二级(C3);‘烟小种’特级(D1)、‘烟小种’一级(D2)、‘烟小种’二级(D3)。所有茶样均以茶树一芽二叶新梢为原料,于2023年

采摘加工而成,茶样采用自封袋密闭,置于4℃冰箱保存备用。

甲醇、福林酚、茛三酮、无水碳酸钠、N,N-二甲基甲酰胺、冰乙酸等购自国药集团化学试剂有限公司;甲酸、甲醇和乙腈均为质谱级,购自德国默克集团;没食子酸、谷氨酸、可可碱、咖啡碱、儿茶素(所有标准品均为混合标准品)购自美国Sigma公司。

ZORBAX Eclipse XDB-C₁₈ 色谱柱、Agilent 1290 Infinity超高效液相色谱仪、6530四极杆飞行时间质谱仪购自美国安捷伦科技有限公司;LC-2010AHT高效液相色谱仪、UV-2250紫外分光光度计购自日本岛津公司;5810R型高速冷冻离心机购自德国Eppendorf公司;UPLC-Q-Orbitrap-MS联用仪购自美国赛默飞世尔科技有限公司。

1.2 方法

1.2.1 感官审评

由评茶专家构成的7人审评小组,参照《茶叶感官审评方法》(GB/T 23776—2018)和《地理标志产品武夷红茶》(DB35/T 1228—2015)对武夷红茶样品进行感官审评。

1.2.2 主要化学成分含量的检测

采用GB/T 8305—2013测定水浸出物含量;采用GB/T 8314—2013茛三酮比色法测定游离氨基酸总量;采用三氯化铝比色法测定黄酮类化合物含量;采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量;采用GB/T 8313—2018紫外分光光度法(福林酚比色法)测定茶多酚含量。

1.2.3 儿茶素及生物碱组分的检测

参考GB/T 8313—2013测定儿茶素含量,将浸提所得供试液过0.45 μm滤膜,用于HPLC分析。采用高效液相色谱法检测儿茶素(C)、表没食子儿茶素(EGC)、消旋儿茶素(DL-C)、表儿茶素(EC)、表没食子儿茶素没食子酸酯(EGCG)、没食子儿茶素没食子酸酯(GCG)、表儿茶素没食子酸酯(ECG)及没食子酸(GA)和3种生物碱组分(可可碱、茶碱、咖啡碱)含量。色谱条件:色谱柱为C₁₈(4.6 mm×150.0 mm, 5.0 μm),检测波长278 nm,进样量10 μL,柱温35℃,流速1.0 mL/min。流动相A为超纯水,流动相B为N,N-

二甲基甲酰胺、甲醇和冰乙酸的混合液(体积比为39.5:2.0:1.5);B相以9%的初始比例进行梯度洗脱,10 min内上升至14%,27 min内上升至36%并持续4 min,32 min下降至9%并持续至37 min结束。

以标准品的出峰时间为依据定性鉴定儿茶素类物质及生物碱,依据已绘制的儿茶素类及咖啡碱标准曲线定量计算分析化合物含量,各物质对应的标准曲线方程及相关系数(R^2)分别为:没食子酸(GA), $y=29\,985x+265.87(R^2=1)$;表儿茶素(EC), $y=4\,254.3x+1\,512.4(R^2=0.999\,5)$;表没食子儿茶素(EGC), $y=1\,682.5x-741.81(R^2=0.999\,9)$;表没食子儿茶素没食子酸酯(EGCG), $y=13\,434x-7\,428.5(R^2=0.999\,5)$;没食子儿茶素没食子酸酯(GCG), $y=9\,148.2x-1\,287.2(R^2=0.999\,8)$;咖啡碱(CAF), $y=28\,586x-6\,782(R^2=1)$;儿茶素(C), $y=8\,076.5x-652.4(R^2=0.999\,9)$;表儿茶素没食子酸酯(ECG), $y=19\,849x+756.49(R^2=0.999\,9)$ 。其中,标准曲线方程中 y 代表峰面积, x 代表对应化合物的质量浓度,相关系数 R^2 均大于0.999 5,表明标准曲线线性关系良好,可用于定量分析。

1.2.4 氨基酸组分的检测

参考国家检测标准(GB/T 8313—2013)测定氨基酸组分含量,将浸提所得供试液过0.45 μm滤膜,用于HPLC分析。采用高效液相色谱法检测18种氨基酸组分含量。色谱条件:色谱柱为Waters AccQ·Tag(3.9 mm×150.0 mm, 5.0 μm),检测波长为248 nm,进样量10 μL,柱温37℃,流速1.0 mL/min,流动相A为10% Waters AccQ·Tag液,B相为60%乙腈。B相以2%初始比例进行梯度洗脱,15 min时上升至7%,19 min时上升至10%,32 min时上升至33%,34 min时上升至100%,保持3 min,39 min时降至0%,结束洗脱。

1.2.5 茶黄素组分的检测

参考国家检测标准(GB/T 8313—2013)测定茶黄素组分含量。将浸提所得供试液过0.45 μm滤膜,用于HPLC分析。采用高效液相色谱法检测茶黄素组分含量。色谱条件:色谱柱为Agilent Eclipse Plus C₁₈(2.1 mm×100.0 mm, 1.8 μm);色谱柱温度为35℃;流量为0.2 mL/min;进样量为2 μL;流动相A为0.1%甲酸水溶液,流动相B为乙腈。梯度洗脱程序为:

0~10 min, A相比比例由90%降至87%; 10~25 min, A相比比例由87%降至70%; 25~30 min, A相比比例由70%降至2%; 30~35 min, 保持A相比比例为2%; 35.0~35.1 min, A相比比例由2%快速回升至90%; 35.1~45.0 min, 保持A相比比例为90%以平衡色谱柱。

1.2.6 非挥发性化合物检测方法

将0.5 g武夷红茶磨碎样加入含25 mL、质量分数为70%的甲醇溶液的锥形烧瓶中, 将样品在室温下超声30 min(每10 min摇动1次)。将上清液倒入离心管中, 在转速为12 000 r/min、温度为10 °C的条件下离心10 min后, 经0.22 μm尼龙膜过滤, 移至液相瓶进行色谱检测。液相色谱条件为: 流动相A为0.1%甲酸水溶液, 流动相B为0.1%甲酸乙腈溶液; 洗脱梯度以B相比比例进行调控, 0.0~1.6 min, B相由0%升至5%; 1.6~18.0 min, B相由5%升至18%; 18.0~38.4 min, B相由18%升至95%; 38.4~42.0 min, B相维持0%; 色谱柱温度为35 °C, 进样体积2 μL。

质谱分析条件: 离子源类型为加热电喷雾电离源(H-ESI); 喷雾电压正离子模式下为3 500 V, 负离子模式下为2 500 V; 离子传递管温度325 °C; 喷雾温度300 °C; 鞘气流量35 arb; 辅助气体流量10 arb; 吹扫气体流量1 arb; 轨道分辨率120 000; 扫描范围(m/z)为100~1 500; 扫描周期3 s。

原始数据采用Compound Discoverer软件进行处理分析。结合保留时间、质荷比(m/z)、相对分子质量及加合离子特征等信息来预测分子式。将预测结果与mzCloud数据库进行匹配比对, 匹配维度包括化合物的特征碎片离子及对应的碰撞能量。筛选样品中变异系数(CV值)低于30%的化合物作为最终定性结果。整合样品中检测到的色谱峰, 以各特征峰的峰面积作为对应化合物的相对定量指标, 通过总峰面积对定量结果进行归一化处理, 最终获得代谢物的定量数据。

1.3 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2019、IBM SPSS Statistics 26.0、Simca-p14.1软件进行统计分析; 采用Graphpad Prism 7、Adobe illustrator 2024软件进行绘图。每个样品设3次重复, 实验数据以平均值±标准差表示。

2 结果与讨论

2.1 不同品类武夷红茶的滋味特征

为确定不同品类武夷红茶的滋味差异, 对所有武夷红茶样品进行感官审评。从表1可以看出, ‘奇红’呈甜醇或醇厚味, 等级高的‘奇红’甜味更为明显; ‘正山小种’滋味醇厚, 带有桂圆汤味, 随着等级降低, 醇厚感逐渐减弱; ‘小种’滋味醇和, 带有松烟味, 等级降为二级后松烟味消失; ‘烟小种’滋味醇正, 烟味浓郁, 等级间醇度差异较大。

表1 武夷红茶滋味审评结果

样品	滋味	滋味综合评分
A1	甜醇, 爽	93.6
A2	醇厚, 稍涩	89.2
A3	醇尚厚	85.1
B1	醇厚, 桂圆汤味明显	84.0
B2	较醇厚, 带有桂圆汤味	82.5
B3	较醇厚, 带有桂圆汤味	81.7
C1	醇厚, 松烟味浓(带酸)	83.2
C2	较醇, 带松烟味	81.0
C3	尚醇	78.0
D1	醇, 烟味浓郁	80.5
D2	较醇, 烟味浓郁	80.0
D3	尚醇, 烟味浓郁	75.0

2.2 不同品类武夷红茶主要内含成分分析

水浸出物含量是反映茶叶特征成分含量和茶汤浓稠度的重要指标, 与茶汤的苦涩味呈显著正相关^[6-7]。由表2可知, 相同等级下, ‘奇红’茶样的水浸出物含量最高。氨基酸组分在一定程度上有利于增强茶汤的鲜味和香味, 成为衡量茶叶鲜爽程度的重要指标^[8]。本研究发现, 不同品类武夷红茶中的游离氨基酸总量存在差异, 相同等级下, ‘奇红’‘小种’‘正山小种’‘烟小种’的含量依次降低, 同一品类特级、一级、二级的含量也依次降低。推测鲜叶成熟度与加工技术可以影响武夷红茶中游离氨基酸总量进而使其滋味呈现差异^[9]。这在一定程度上解释了‘奇红’较其他品类稍甜且醇厚的现象。

不同品类武夷红茶的茶多酚含量(8.87%~21.88%)差异显著, ‘奇红’的含量最高, 醇味最浓。茶黄素是茶叶多酚类物质在发酵过程中经酶促氧化生成的一类水溶性色素, 是红茶汤色明亮度、滋味强度与鲜爽度的关键贡献成分, 也是红茶茶汤“金圈”形成的最主要物质^[10-11]。不同品类武夷红茶中

的茶黄素总量(0.09%~0.45%)差异显著,同一品类等级高低对茶黄素总量的影响不大。‘奇红’样品中茶黄素组分的含量较高,这可能是该样品汤色“橙红明亮”的重要原因;‘正山小种’的茶黄素总量处于中等水平,对应样品汤色“橙黄明亮”;‘小种’的茶黄素总量略低于前两类的,其对应样品呈“橙红较亮”汤色,明亮度稍逊;‘烟小种’不同等级的茶黄素含量存在波动,这一变化对应其汤色呈从“黄橙较亮”(特级、一级)到“黄橙明亮”(二级)的细微差异

表2 不同品类武夷红茶部分滋味成分含量

样品	水浸出物	游离氨基酸	氨基酸组分	茶多酚	茶黄素	黄酮类化合物	儿茶素组分	生物碱	可溶性糖	%
A1	(41.50±0.02)a	(4.98±0.12)a	(3.98±0.11)a	(21.88±0.14)a	(0.45±0.03)a	(1.16±0.01)e	(2.66±0.09)a	(2.86±0.05)g	(5.41±0.10)d	
A2	(35.80±0.01)b	(3.44±0.11)c	(3.82±0.11)b	(15.13±0.09)b	(0.29±0.02)b	(1.19±0.02)d	(2.46±0.04)b	(3.93±0.12)a	(5.09±0.12)e	
A3	(34.47±0.01)d	(2.83±0.02)f	(3.83±0.04)b	(12.00±0.19)c	(0.26±0.01)c	(1.14±0.02)f	(1.96±0.04)c	(3.27±0.10)e	(6.04±0.14)a	
B1	(35.41±0.00)c	(3.02±0.04)e	(3.77±0.04)c	(9.83±0.20)f	(0.15±0.03)d	(1.08±0.03)h	(1.77±0.01)d	(3.49±0.05)c	(5.43±0.10)d	
B2	(34.04±0.01)d	(2.83±0.02)f	(3.83±0.02)b	(9.65±0.31)g	(0.15±0.01)d	(1.09±0.01)g	(1.53±0.04)e	(3.36±0.07)d	(5.66±0.23)c	
B3	(32.17±0.01)f	(2.78±0.01)g	(3.79±0.01)c	(9.33±0.14)h	(0.14±0.01)e	(1.06±0.00)i	(1.48±0.04)e	(3.15±0.03)f	(5.86±0.11)b	
C1	(35.20±0.01)c	(3.75±0.10)b	(2.81±0.01)f	(9.83±0.21)f	(0.12±0.00)f	(1.21±0.00)c	(1.44±0.02)e	(3.66±0.03)b	(6.02±0.03)a	
C2	(35.72±0.00)b	(3.54±0.06)c	(2.85±0.06)f	(8.94±0.26)i	(0.09±0.01)g	(1.15±0.01)f	(1.34±0.01)f	(3.36±0.02)d	(5.84±0.07)b	
C3	(35.03±0.00)c	(3.33±0.05)d	(2.82±0.05)f	(10.33±0.41)d	(0.10±0.00)g	(1.34±0.06)a	(1.48±0.09)e	(3.22±0.02)e	(4.95±0.30)f	
D1	(34.13±0.01)d	(2.68±0.11)h	(3.12±0.11)d	(9.26±0.24)h	(0.14±0.01)e	(1.27±0.01)b	(1.22±0.04)g	(3.13±0.01)f	(5.34±0.23)d	
D2	(32.12±0.00)f	(2.58±0.04)i	(3.06±0.01)e	(8.87±0.07)i	(0.14±0.00)e	(1.21±0.00)c	(1.11±0.00)h	(2.83±0.04)g	(6.18±0.23)a	
D3	(33.22±0.01)e	(2.26±0.04)j	(3.02±0.03)e	(10.13±0.09)e	(0.12±0.00)f	(1.12±0.01)g	(1.25±0.50)g	(2.69±0.03)h	(5.52±0.04)c	

注: 同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

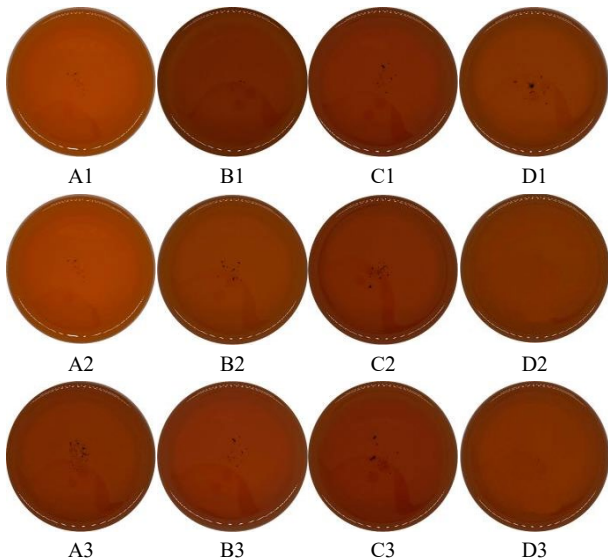


图1 不同品类武夷红茶汤色图

Fig. 1 Color of Wuyi black tea infusions from different varieties

茶叶中的生物碱,如咖啡碱、可可碱、茶碱是茶汤苦味的重要物质基础^[15-16]。‘奇红’、‘正山小种’、‘小种’和‘烟小种’中生物碱的总含量差异不大,均在3%左右。其中,‘正山小种’、‘小种’和‘烟小种’中生物碱的含量呈现等级越高、含量越高的趋势。

(图1)。黄酮类化合物对茶汤苦涩滋味的呈现具有一定的贡献^[12-13]。本研究中,不同品类及同一品类不同等级武夷红茶的黄酮类化合物含量均存在一定差异。儿茶素类是影响茶叶苦涩味的重要物质。儿茶素中的酯型儿茶素是茶汤苦味的主要贡献者^[14-15]。本研究中,武夷红茶的酯型儿茶素含量占总儿茶素含量的64.7%,这可能是导致武夷红茶带苦涩味的因素之一。

咖啡碱是武夷红茶中含量最高的生物碱,含量为2.4%~3.9%,在茶汤中呈苦味^[17]。茶汤中的生物碱与儿茶素容易形成氢键,而氢键络合物会增强茶汤的醇度和鲜爽度^[18]。但咖啡碱在改善茶汤滋味品质的同时也可能会对滋味产生消极影响。徐文平等^[19]和韦雅杰等^[20]定量分析了茶汤苦涩度强度,发现咖啡碱可以增强EGCG的涩度^[19-20]。‘奇红’中咖啡碱的含量较高,这在一定程度上解释了‘奇红’滋味稍涩的特征。茶汤中的可溶性糖含量是影响茶汤甜味的重要指标^[21-22],果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖等是茶叶糖类化合物的几种主要组分。不同品类武夷红茶中的可溶性糖类化合物总量为4.95%~6.18%,整体差异不大,但也可能与其他滋味物质协同影响武夷红茶甜味的综合呈现。这些糖类物质能够在一定程度上增强武夷红茶的甜度。

整体而言,武夷红茶水浸出物含量丰富,游离氨基酸总量及茶多酚含量较高,使武夷红茶滋味呈醇厚特征。‘奇红’各滋味成分的含量均相对较高,氨基酸组分含量充足;‘烟小种’大部分组分含量略低于其他样品的,这一差异可能与其独特的滋味特征存在关联;‘正山小种’与‘小种’在滋味相关成分组

成及含量上整体差异较小。

2.3 不同品类武夷红茶非挥发性成分差异性分析

为探究影响不同品类武夷红茶感官品质的非

挥发性成分，本研究利用UHPLC-Q-TOF/MS对4类武夷红茶鲜叶内含成分进行分析，共鉴定出304种特征化合物(表3)。

表3 武夷红茶中非挥发性成分的种类

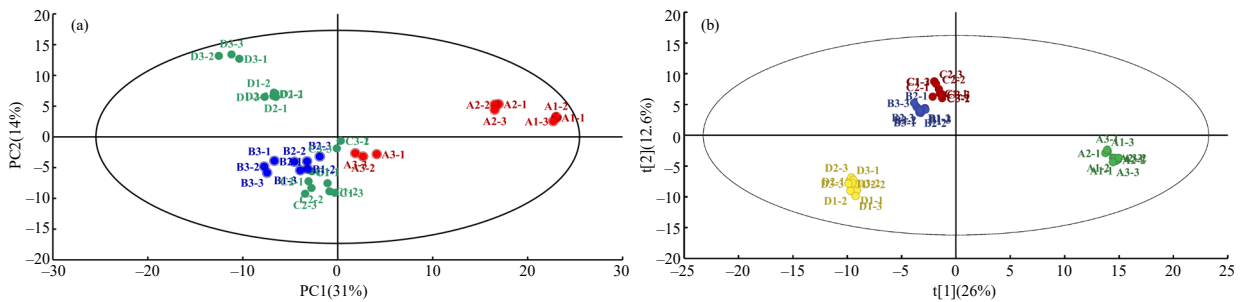
名称	有机酸类	氨基酸类	核苷酸类	酚酸类	糖及糖苷类	脂质及脂肪酸	生物碱类	黄酮类	儿茶素类	萜类	其他化合物
数量/种	31	32	29	14	23	24	2	55	12	9	73

为进一步阐明不同品类武夷红茶的滋味差异，本研究采用主成分分析(PCA)法和正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)法对12个武夷红茶样品进行差异性分析，结果如图2所示。从图2可知，‘奇红’集中分布于右侧，‘正山小种’与‘小种’聚类较为集中，‘烟小种’则分布在左上侧，样品呈现清晰的品类区分趋势，表明4类武夷红茶的非挥发性成分存在显著差异，模型能有效反映品类间的代谢组学分化特征。

VIP值是评估代谢物与样本分类关联性的核心指标，VIP值越高表明化合物对品类区分的贡献越大。本研究以VIP值>1.2为筛选标准，共鉴定出14

种关键差异化合物，包括氨基酸类1种、酚酸类2种、黄酮类4种、儿茶素类3种、糖苷类1种、其他类化合物3种。

由图3可知，‘奇红’中的儿茶素类化合物含量高于‘小种’及‘烟小种’的，这一结果与理化分析结论一致。4类茶叶的关键差异化合物具体包括：黄酮类(原飞燕草素B2 3"-O-没食子酸酯、杨梅素 3-O-β-D-吡喃半乳糖苷、3,5,7-三羟基-4H-苯并吡喃-4-酮)、儿茶素类(表没食子儿茶素没食子酸酯等)、氨基酸类(谷氨酰胺)、酚酸类(麦芽酚、水杨酸)。



(a) 非挥发性成分PCA得分图; (b) OPLS-DA得分图

图2 武夷红茶非挥发性成分PCA得分图及OPLS-DA得分图

Fig. 2 PCA score plot and OPLS-DA score plot of non-volatile components in Wuyi black tea

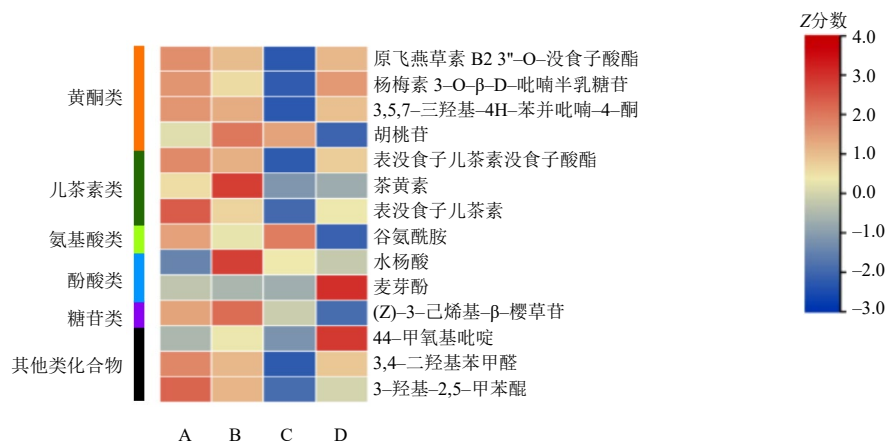


图3 武夷红茶关键性差异化合物热图

Fig. 3 Heat map of key differential compounds in Wuyi black tea

游离氨基酸是茶叶中具有生物活性和味觉活性的物质,对丰富茶汤的口感(如鲜味、甜味和苦味等)起着重要作用,是影响红茶风味的关键因素^[23]。本研究中4种武夷红茶的氨基酸类、核苷酸类及其相应的衍生物含量存在明显差异。‘奇红’产品中的苯丙氨酸、天冬氨酸、异亮氨酸、苏氨酸、谷氨酸、焦谷氨酸、丝氨酸的含量略高于‘正山小种’的,与‘小种’的相近,显著高于‘烟小种’的($P<0.05$)。苏氨酸和丝氨酸属于甜味氨基酸,天冬氨酸和谷氨酸则呈现鲜味特征^[24],该类氨基酸的味觉属性与‘奇红’的滋味表现一致。‘正山小种’和‘小种’中上述氨基酸的含量与‘烟小种’的存在显著性差异,说明其对武夷红茶的甜醇滋味具有一定贡献。在核苷酸及其衍生物方面,‘正山小种’的胞嘧啶、胞苷、尿嘧啶、鸟苷的含量显著高于其他3类的。嘌呤类核苷酸具有鲜味特征,且可增强茶汤中的甜味、鲜味以及醇厚感^[25],因此,‘正山小种’中该类差异性核苷酸及其衍生物可能是其滋味醇厚、高山韵明显的重要物质基础。‘小种’中的谷氨酰胺含量显著高于其他3类武夷红茶的。‘烟小种’的游离氨基酸总量及多数氨基酸组分含量显著低于其余3类武夷红茶的($P<0.05$),推测这类差异代谢物对‘烟小种’独特的滋味具有重要贡献。

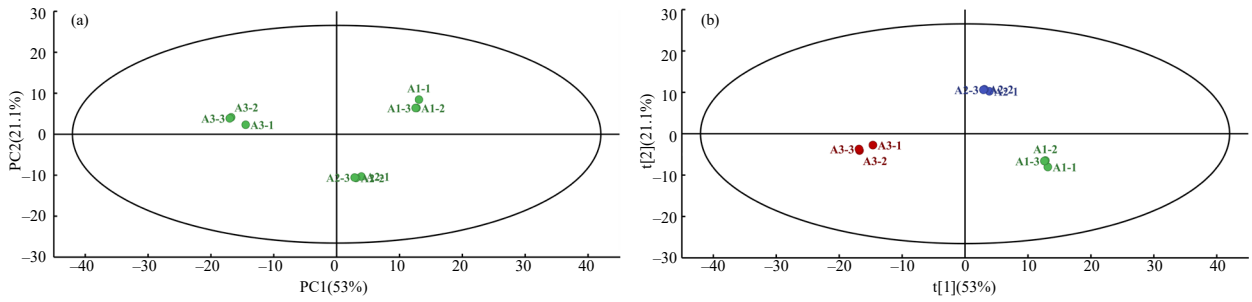
儿茶素类、黄酮类、酚酸类等茶多酚组分是红茶中苦涩味以及收敛性的主要物质来源,对红茶的滋味具有重要影响。本研究中,‘奇红’中的3,3'-二没食子酸酯茶黄素、茶黄素没食子酸酯、表没食子儿茶素、儿茶素、柚皮素、查尔酮、新绿原酸的含量均高于其他3类武夷红茶的。其中,3,3'-二没食子酸酯茶黄素和茶黄素没食子酸酯对‘奇红’橙黄明亮的汤色具有重要贡献,而表没食子儿茶素和儿茶素因具有较弱的涩味和收敛性,使‘奇红’滋味回味爽口^[26]。‘正山小种’的差异代谢物与‘奇红’的相差不多,其差异代谢物主要为茶黄素和水杨酸。‘小种’的茶多酚类差异代谢物与其他3类红茶的差异较大,其儿茶素类、黄酮类、酚酸类差异代谢物含量

整体较低,但谷氨酰胺这种氨基酸类物质含量却显著高于其他3类武夷红茶的。尽管‘烟小种’与‘正山小种’的儿茶素类差异代谢物无显著差异,但在胡桃苷、44-甲氧基吡啶、谷氨酰胺及麦芽酚等组分上,‘烟小种’与其他3类红茶存在显著差异。此外,‘小种’与‘烟小种’的特征性物质以黄酮类及酚酸类为主,这可能是其口感厚度略低于‘奇红’和‘正山小种’的重要原因。

有机酸以及脂质的降解物对红茶的滋味形成有重要影响^[27]。本研究中,‘奇红’的差异有机酸(丁二酸、二氢咖啡酸等)及部分脂肪酸(棕榈酸乙酯、单油酸甘油酯、十二烷二酸等)含量均低于其他3类武夷红茶的。脂肪酸的分解产物(含多种短链脂肪烃、脂肪醛和脂肪醇等)对‘正山小种’‘小种’以及‘烟小种’的滋味形成具有独特贡献。‘正山小种’中的特征性差异代谢物富马酸的含量显著高于其他3类武夷红茶的。这些物质的降解与转化可生成一系列具有特殊口感的化合物,丰富了‘正山小种’的风味特点。‘小种’中的乙基丙二酸和莽草酸等成分含量高于其他品类的,提升了其滋味层次感^[28]。‘烟小种’的特征性差异代谢物为熊果酸和11-羟基- γ -十二内酯,这些成分有助于‘烟小种’独特的烟味特征的形成。

2.4 不同等级武夷红茶非挥发性差异代谢物分析

3个等级的‘奇红’产品的感官品质存在一定的差异。选取VIP值 >1.2 的化合物进行PCA及OPLS-DA分析,结果见图4(拟合系数 $R^2=0.678$,预测系数 $Q^2=-0.694$)。从图4可以看出,不同等级的‘奇红’具有较好的分离趋势。差异代谢物在不同等级‘奇红’产品中的含量如图5所示。结合热图可知,不同等级‘奇红’中的胸苷、丁二酸、(-)-表儿茶素等6种特征化合物差异较大,这些特征差异性物质中以酸类化合物为主,使得不同等级的‘奇红’产品在滋味上呈现差异。



(a) PCA得分图; (b) OPLS-DA得分图

图4 不同等级‘奇红’武夷红茶非挥发性成分得分图及OPLS-DA得分图

Fig. 4 PCA score plot and OPLS-DA score plot of non-volatile components in different grades of ‘Qihong’ Wuyi black tea

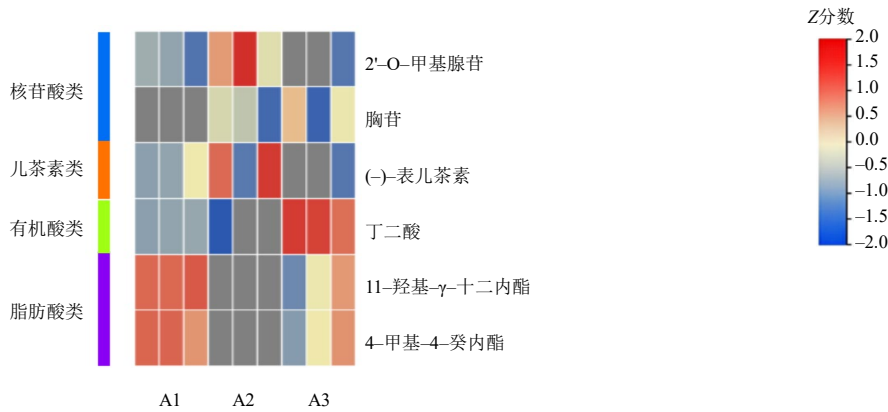
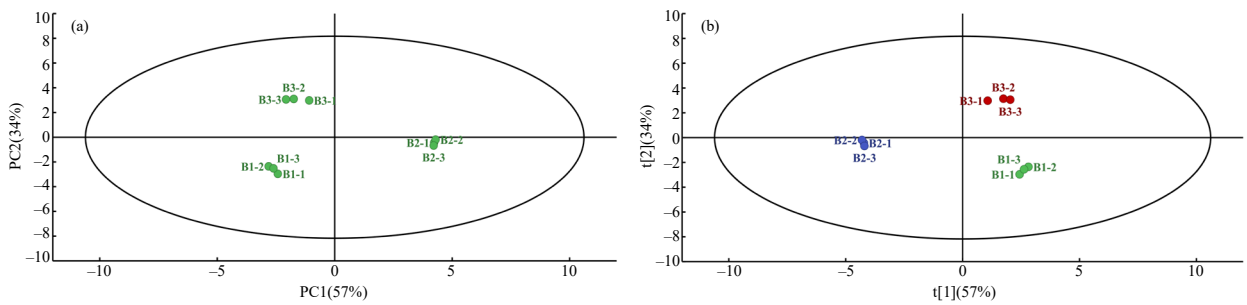


图5 不同等级‘奇红’武夷红茶差异性物质热图

Fig. 5 Heat map of differential compounds in different grades of ‘Qihong’ Wuyi black tea

不同等级‘正山小种’的PCA及OPLS-DA分析结果如图6($R^2=0.356$, $Q^2=-0.822$)所示, 从图6可知, 样品呈现较好的分离趋势。由图7可知, 圣草酚、异槲皮苷、焦谷氨酸、N-乙酰-D-异亮氨酸、柠檬酸

等11种化合物在不同等级‘正山小种’间的差异最大。其中, 黄酮类和有机酸类化合物占比较高, 推测这可能是其形成醇厚滋味及桂圆汤味等特征的主要物质基础。



(a) PCA得分图; (b) OPLS-DA得分图

图6 不同等级‘正山小种’武夷红茶非挥发性成分得分图及OPLS-DA得分图

Fig. 6 PCA score plot and OPLS-DA score plot of non-volatile components in different grades of ‘Zhengshan xiaozhong’ Wuyi black tea

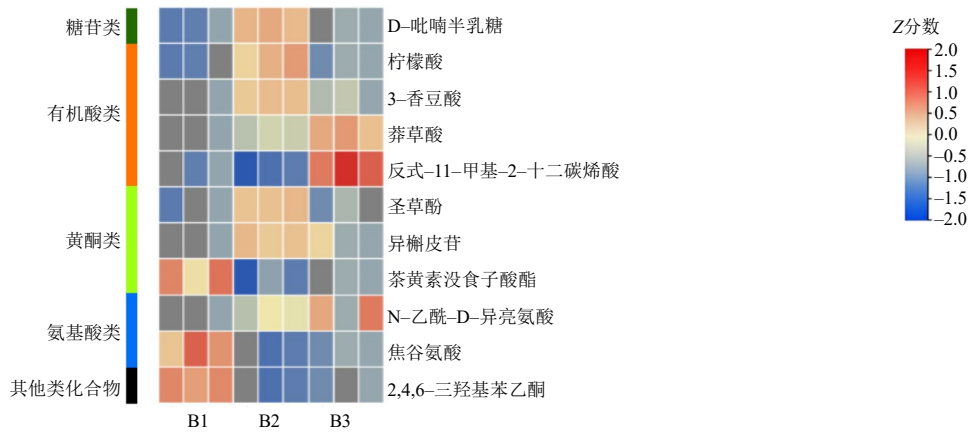
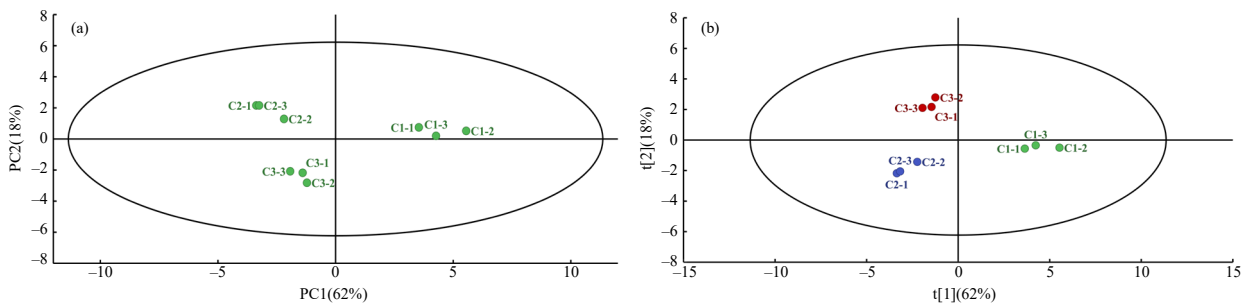


图7 不同等级‘正山小种’武夷红茶主要差异性物质热图

Fig.7 Heat map of key differential compounds in different grades of ‘Zhengshan xiaozhong’ Wuyi black tea

不同等级‘小种’武夷红茶的滋味差异主要体现在甜醇程度上。由图8可知，不同等级‘小种’武夷红茶样品的分离趋势良好($R^2=0.999$, $Q^2=-0.322$)。由图9可知，L-苏氨酸、槲皮素3-O-β-D-半乳糖苷等12种化合物在不同等级‘小种’间的差异最大，其中

黄酮类(槲皮素3-O-β-D-半乳糖苷等)7种，氨基酸类1种，脂质类2种，核苷酸类1种，糖苷类1种，推测黄酮类、脂质类化合物是导致不同等级‘小种’武夷红茶酸味差异的主要物质基础。



(a) PCA得分图; (b) OPLS-DA得分图

图8 不同等级‘小种’武夷红茶非挥发性成分PCA得分图及OPLS-DA得分图

Fig. 8 PCA score plot and OPLS-DA score plot of non-volatile components in different grades of ‘Xiaozhong’ Wuyi Black Tea

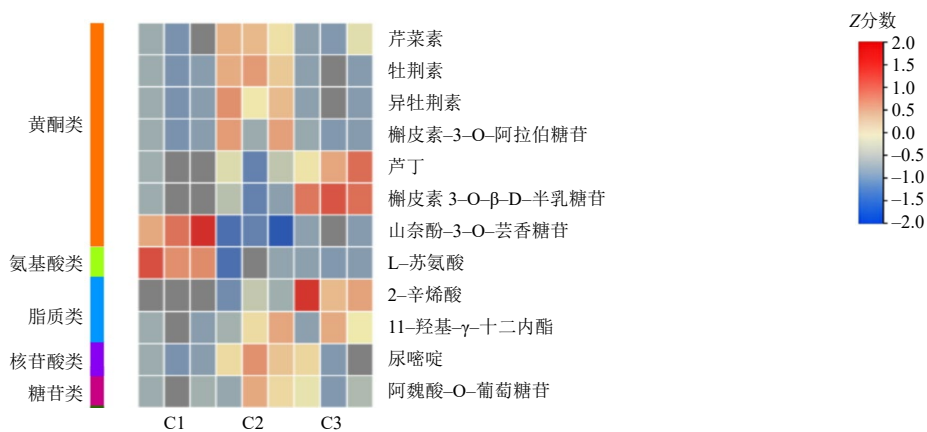


图9 不同等级‘小种’武夷红茶主要差异性物质热图

Fig. 9 Heat map of key differential compounds in different grades of ‘Xiaozhong’ Wuyi black tea

不同等级的‘烟小种’红茶的滋味差异主要体现在松烟味浓郁度及滋味浓醇度上。PCA及OPLS-DA分析($R^2=0.866$, $Q^2=-0.379$)结果(图10)显示，不同等级‘烟小种’样品的分离趋势良好。从图11可以看

出，胞嘧啶、鸟苷、焦谷氨酸、L-天冬氨酸等13种化合物在不同等级‘烟小种’中的差异较大，其中核苷酸类7种，氨基酸类2种，这些特征代谢物共同影响了‘烟小种’红茶的品质形成，使不同等级产品呈

现差异化滋味特征。已有研究^[29-30]表明,氨基酸及其衍生物、核苷酸衍生物可能是影响‘烟小种’浓醇滋味的关键物质,而三级‘烟小种’的特征性代谢物

可能通过调控茶汤滋味与汤色相关指标,形成其独特的品质特点。

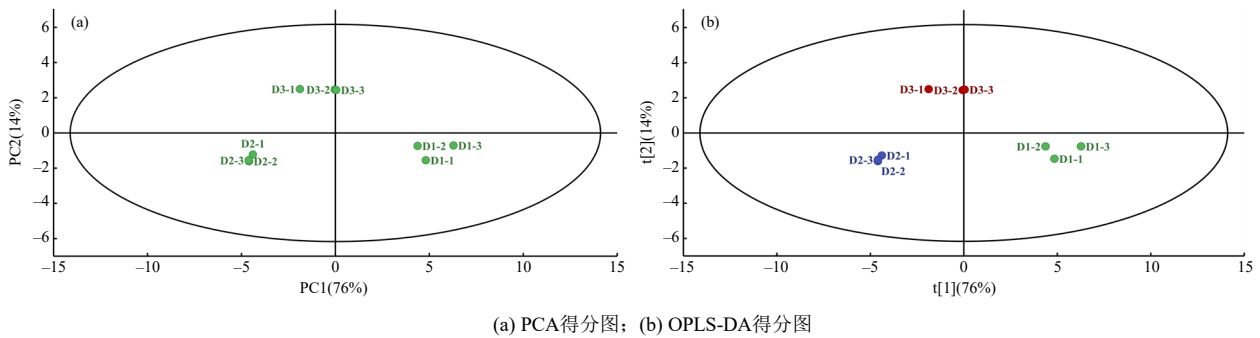


图10 不同等级‘烟小种’武夷红茶非挥发性成分PCA得分图及OPLS-DA得分图

Fig. 10 PCA score plot and OPLS-DA score plot of non-volatile components in different grades of ‘Yanxiaozhong’ Wuyi black tea

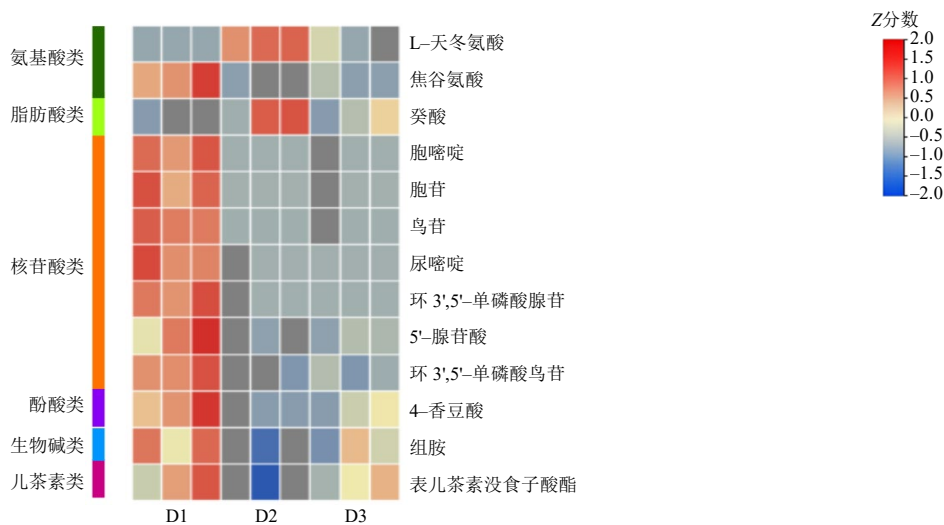


图11 不同等级‘烟小种’武夷红茶主要差异性物质热图

Fig. 11 Heat map of key differential compounds in different grades of ‘Yanxiaozhong’ Wuyi black tea

3 结论

本研究运用感官审评和代谢组学方法,系统分析了不同品类、不同等级武夷红茶的滋味品质特征及差异代谢物,感官审评结果显示,4类武夷红茶滋味特征差异显著,‘奇红’滋味甜醇爽滑,等级越高甜味特征越突出;‘正山小种’滋味醇厚且桂圆汤味显著;‘小种’滋味甜醇,二级产品松烟味消失;‘烟小种’滋味醇和且烟味浓郁,等级间醇度差异较大。代谢组学分析结果表明,4类武夷红茶的差异代谢物主要集中于茶多酚及多酚类衍生物(杨梅素 3-O-β-D-吡喃半乳糖苷、原飞燕草素B2 3"-O-没食子酸酯等)、有机酸类(乙基丙二酸)、氨基酸类及其衍生物(谷氨酰胺等),这些成分是其感官品质分化的核心物质。

成分含量分析结果显示,‘奇红’的水浸出物

(34.47%~41.50%)、游离氨基酸(2.83%~4.98%)、儿茶素组分(1.96%~2.66%)及茶多酚含量(11.79%~21.88%)均较高,多成分协同作用使其甜醇滋味特征突出;‘正山小种’与‘小种’的整体化学成分差异较小,其中黄酮类(圣草酚、异槲皮苷等)、氨基酸类化合物(焦谷氨酸、N-乙酰-D-异亮氨酸等)是‘正山小种’桂圆汤味形成的关键物质;‘烟小种’多数滋味相关组分的含量整体低于其余3个品类,且受酸类化合物(L-天冬氨酸、焦谷氨酸等)影响显著,使其兼具醇和与烟味特征。

等级差异分析结果表明,同一品类不同等级的差异代谢物具有品类特异性:‘奇红’不同等级的特征差异代谢物以酸类(丁二酸)、核苷酸类(胸苷)及儿茶素类((-)-表儿茶素)为主,其含量变化直接影响甜醇滋味的浓郁度;‘正山小种’各等级的差异代谢物为黄酮类(圣草酚等)和氨基酸类化合物,其含量的变化对

茶汤的醇厚感与桂圆汤味强度的调控作用显著;‘小种’等级差异主要体现在氨基酸类(L-苏氨酸等)、黄酮类(槲皮素3-O- β -D-半乳糖苷等)化合物的含量变化,导致不同等级的‘小种’甜醇程度与酸味呈现差异;‘烟小种’不同等级的差异代谢物以核苷酸类(胞嘧啶、鸟苷等)和氨基酸类(焦谷氨酸、L-天冬氨酸)为主,这些成分共同影响其松烟味浓度与滋味浓醇度,从而形成等级间的品质差异。

参考文献:

- [1] XUE J J, LIU P P, YIN J F, et al. Dynamic changes in volatile compounds of Shaken black tea during its manufacture by GC \times GC-TOFMS and multivariate data analysis[J]. *Foods*, 2022, 11(9): 1228.
- [2] 李梦婷, 银秋玲, 刘艳珍, 等. 广西贺州红茶的化学成分与主要香气物质分析[J]. *广东化工*, 2023, 50(11): 205–207, 204.
- [3] 肖雨竹, 张涛, 周琼. 武夷山茶区不同品种红茶品质成分研究[J]. *湖北农业科学*, 2022, 61(24): 109–113.
- [4] 卢莉, 程曦, 曾晶晶, 等. 武夷名丛的红茶适制性研究[J]. *热带作物学报*, 2019, 40(11): 2246–2254.
- [5] LU L, LIU J X, ZHANG W N, et al. Key factors of quality formation in Wuyi black tea during processing timing[J]. *Foods*, 2024, 13(9): 1373.
- [6] 刘盼盼, 邓余良, 尹军峰, 等. 绿茶滋味量化及其与化学组分的相关性研究[J]. *中国食品学报*, 2014, 14(12): 173–181.
- [7] 张婷, 刘慧琴, 郭勤卫, 等. 十六份辣椒材料游离氨基酸组成的主成分分析与聚类分析[J]. *浙江农业学报*, 2021, 33(4): 640–650.
- [8] 云金虎, 江皓, 韩文学, 等. 不同品种海棠叶茶游离氨基酸组成分析与评价[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(19): 237–243.
- [9] HUANG R, WANG Z H, WEN W W, et al. Comprehensive dissection of variation and accumulation of free amino acids in tea accessions[J]. *Horticulture Research*, 2023, 11(1): uhad263.
- [10] 李金, 陈莲芙, 金恩惠, 等. 不同茶树品种的茶树花黄酮苷研究[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2019, 45(6): 707–714.
- [11] CHEN Q S, ZHAO J W, VITTAYAPADUNG S. Identification of the green tea grade level using electronic tongue and pattern recognition[J]. *Food Research International*, 2008, 41(5): 500–504.
- [12] 魏明香. 基于电子舌技术的红茶滋味品质检测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [13] 张英娜, 嵇伟彬, 许勇泉, 等. 儿茶素呈味特性及其感官分析方法研究进展[J]. *茶叶科学*, 2017, 37(1): 1–9.
- [14] 陈美丽. 基于感官审评与化学计量学的茶叶色香味品质研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [15] 谭和平, 叶善蓉, 邹燕, 等. 茶叶中生物碱的分析方法概述[J]. *中国测试技术*, 2008(5): 5–9.
- [16] 鲍肃都, 安勤, 陈宏宇, 等. 不同施肥处理对黄金茶鲜叶挥发性成分及其制成绿茶品质的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2025, 51(2): 24–35.
- [17] 张英娜, 陈根生, 刘阳, 等. 烘青绿茶苦涩味及其滋味贡献物质分析[J]. *茶叶科学*, 2015, 35(4): 377–383.
- [18] 施兆鹏. 茶叶审评与检验[M]. 4版. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [19] 徐文平, 李大祥, 张正竹, 等. 绿茶几种化学组分苦涩味非线性回归分析及在感官审评中的应用[J]. *茶叶科学*, 2010, 30(5): 399–406.
- [20] 韦雅杰, 高彦祥. 茶汤滋味物质及其调控研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(11): 189–197.
- [21] CHEN H B, YU F, KANG J X, et al. Quality chemistry, physiological functions, and health benefits of organic acids from tea(*Camellia sinensis*)[J]. *Molecules*, 2023, 28(5): 2339.
- [22] 张向娜, 林勇, 黄建安, 等. 茶叶提取物EGCG和GCG及ECG对B16细胞内黑色素生成的抑制作用[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2017, 43(4): 405–410.
- [23] SCHARBERT S, HOFMANN T. Molecular definition of black tea taste by means of quantitative studies, taste reconstitution, and omission experiments[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, 53(13): 5377–5384.
- [24] YU Z M, YANG Z Y. Understanding different regulatory mechanisms of proteinaceous and non-proteinaceous amino acid formation in tea (*Camellia sinensis*) provides new insights into the safe and effective alteration of tea flavor and function[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60(5): 844–858.
- [25] 崔桂友. 呈味核苷酸及其在食品调味中的应用[J]. *中国调味品*, 2001, 26(10): 25–29, 32.
- [26] 杨晨, 戴伟东, 吕美玲, 等. 基于UHPLC-Q-TOF/MS的不同产地普洱生茶化学成分差异研究[J]. *茶叶科学*, 2017, 37(6): 605–615.
- [27] ZENG L T, WATANABE N, YANG Z Y. Understanding the biosyntheses and stress response mechanisms of aroma compounds in tea (*Camellia sinensis*) to safely and effectively improve tea aroma[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(14): 2321–2334.
- [28] 黄创盛. 白茶特征香气成分及萎凋成香代谢机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- [29] JABEEN S, ALAM S, SALEEM M, et al. Withering timings affect the total free amino acids and mineral contents of tea leaves during black tea manufacturing[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2019, 12(8): 2411–2417.
- [30] 张翔, 陈学娟, 杜晓, 等. 蒙顶甘露茶滋味特征及主要呈味成分贡献率分析[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(4): 783–791.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 罗维