张雯萍, 周晶晶, 潘宏英, 等. 优质建瓯矮脚乌龙茶风味品质分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(11): 315−325. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040392

ZHANG Wenping, ZHOU Jingjing, PAN Hongying, et al. Analysis of Flavor and Quality of High Quality Jian'ou Aijiao Oolong Tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(11): 315−325. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040392

· 分析检测 ·

优质建瓯矮脚乌龙茶风味品质分析

张雯萍[1], 周晶晶[1], 潘宏英[2], 郝韵智[1], 余欣茹[1], 李秋明[1], 何吉杭[1], 林宏政[3,*], 孙　云[1,*]

（1.福建农林大学园艺学院/茶学福建省高校重点实验室, 福建福州 350002;
2.建瓯市茶业发展中心, 福建建瓯 353100;
3.福建农业职业技术学院园艺园林学院, 福建福州 350303）

摘　要: '矮脚乌龙'为福建特色乌龙茶品种，为探讨优质矮脚乌龙茶产品风味品质特征，本研究以建瓯市矮脚乌龙茶产品为试验材料，将感官品质评分较高的样本归类为优质组，通过感官审评、生化成分分析及采用 UPLC-QqQ-MS（Ultra-Performance Liquid Chromatography Triple Quadrupole Mass Spectrometry）、HS-SPME-GC-MS（Head-space Solid-Phase Microextraction-Gas Chromatography-Mass Spectrometry）技术对其主要滋味物质和香气物质进行分析。结果表明：优质组矮脚乌龙茶滋味鲜爽醇厚、香气花香馥郁，茶汤花香显，清幽持久。优质矮脚乌龙茶水浸出物（34.70%±1.36%）、茶多酚（10.3%±0.69%）、咖啡碱（4.40%±0.32%）含量高于普通组，黄酮（1.50%±0.22%）含量低于普通组，均呈显著性差异（P<0.05），生化成分结果与感官审评优质组茶汤滋味醇厚度和收敛性强趋势一致。在主要呈味组分分析中，发现优质组鲜味类氨基酸含量占总氨基酸含量的 67.73%，进一步通过 OPLS-DA 模型分析，筛选出以鲜爽呈味的茶氨酸和芳香类呈味的精氨酸是主要差异氨基酸组分，这可能是优质建瓯矮脚乌龙茶汤滋味鲜爽度和回甘度更高的主要原因。通过 HS-SPME-GC-MS 技术共检测出 527 种茶叶香气物质，以 VIP≥1，P<0.05 为条件筛选出 54 种建瓯矮脚乌龙茶主要特征差异香气物质，结合香气活性值（OAV）和香气特征影响值（ACI）分析表明，优质组与普通组相比水杨酸甲酯、δ-癸内酯、乙酸香叶酯、2-乙基-3-甲基吡嗪的含量差异较大，是优质矮脚乌龙茶特征香气形成的关键物质，赋予优质矮脚乌龙茶清甜花香与果香。研究结果可为优质矮脚乌龙茶风味品质特征挖掘鉴定提供重要参考依据。

关键词: 矮脚乌龙, 品质, 滋味, 香气, 风味
中图分类号: TS272.5　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)11−0315−11
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040392
本文网刊:

Analysis of Flavor and Quality of High Quality Jian'ou Aijiao Oolong Tea

ZHANG Wenping[1], ZHOU Jingjing[1], PAN Hongying[2], HAO Yunzhi[1], YU Xinru[1], LI Qiuming[1], HE Jihang[1], LIN Hongzheng[3,*], SUN Yun[1,*]

（1.College of Horticulture, Fujian Agriculture and Forestry University, Key Laboratory of Tea Science of Fujian Universities, Fuzhou 350002, China;
2.Jian'ou Tea Industry Development Center, Jian'ou 353100, China;
3.Department of Horticulture and Landscape Architecture, Fujian Vocational College of Agriculture, Fuzhou 350303, China）

Abstract: 'Aijiao Oolong' is a distinctive type of Oolong tea from Fujian Province. To investigate the quality and flavor attributes of high-quality Aijiao Oolong tea, the Aijiao Oolong tea products from Jian'ou City were utilized as experimental materials, and classified samples with higher sensory quality scores into a high-quality group for analysis. The main taste

收稿日期: 2025−05−06
基金项目: 国家现代农业产业技术体系（CARS-19）; 福建张天福茶叶发展基金会科技创新基金 (FJZTF01)。
作者简介: 张雯萍（2000−）, 女, 硕士, 研究方向: 茶叶加工与品质, E-mail: zhangwenping4937@126.com。
*** 通信作者:** 孙云（1964−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 茶叶加工与品质, E-mail: sunyun1125@126.com。
林宏政（1986−）, 男, 博士, 讲师, 研究方向: 茶叶加工工程与品质, E-mail: linhongzheng2010@126.com。

and aroma compounds were analyzed using sensory evaluation, biochemical component analysis, and advanced technologies such as UPLC-QqQ-MS (Ultra-Performance Liquid Chromatography Triple Quadrupole Mass Spectrometry) and HS-SPME-GC-MS (Headspace Solid-Phase Microextraction-Gas Chromatography-Mass Spectrometry). The results demonstrated that the high-quality group of Aijiao Oolong tea had a distinct floral scent along with a rich, mellow, and fresh taste. Since the flavonoid content (1.50%±0.22%) was significantly lower than that of the ordinary group, the water extract (34.70%±1.36%), tea polyphenols (10.3%±0.69%), and caffeine (4.40%±0.32%) contents of high-quality Aijiao Oolong tea were all significantly higher than those of the ordinary group (P<0.05). The biochemical component results aligned with the tea soup's strong flavor and astringency trend in the high-quality group's sensory rating. Notably, 67.73% of the total amino acid content in the high-quality group was made up of umami amino acids. The fragrant arginine and the fresh, invigorating theanine were the primary distinguishing amino acid components, according to additional analysis using the OPLS-DA model. This could be the primary cause of the Jian'ou Aijiao Oolong tea soup's high freshness and sweet aftertaste. A total of 527 volatiles were identified in two group tea samples. Finally, 54 volatiles were screened as differential volatiles based on VIP≥1 and P<0.05. OAV and ACI analysis showed that mthyl salicylate, δ-decanolactone, geranyl acetate, and 2-ethyl-3-methylpyrazine were the main ingredients of the high-quality group, which mainly presented fruity and sweet flowery aroma, their content was significantly higher than that in the ordinary group. The findings can serve as a valuable foundation for investigating and determining the distinctive flavor and quality of high-quality Aijiao Oolong tea.

Key words: Aijiao Oolong; quality; taste; aroma; flavor

建瓯市是福建省主要的乌龙茶产区之一，是北苑贡茶的发源地，蕴藏着丰富的茶树种质资源[1]。‘矮脚乌龙’是建瓯市茶叶的特色和主要品种之一，拥有百年以上的栽培历史，其具抗逆性强、易栽培、品质优异等特点。1990 年姚月明等[2] 对福建省的乌龙茶茶树对比研究中，证实福建建瓯矮脚乌龙茶树是台湾当家品种青心乌龙的亲缘茶树。矮脚乌龙茶以其优异的抗逆性和品质特征著称，其成茶条索细紧重实、色泽乌褐油润，特征性香气融合桂花香与兰花香，汤色金黄明亮[3]，这些风味品质使其在消费市场广受欢迎。为提升优质矮脚乌龙茶供应，建瓯市虽举办茶王赛等审评活动，但该方法易受主观因素和环境干扰，耗资大且产出有限，难以满足日益增长的需求。

目前，矮脚乌龙茶的品质形成机制研究中建瓯矮脚乌龙茶初制工艺品质关键因子可归纳为鲜叶质量与加工技术两大要素。鲜叶质量研究表明，矮脚乌龙在生化成分上具有独特代谢谱，例如在没食子酸（GA）、表没食子儿茶素（EGC）、表没食子儿茶素没食子酸酯（EGCG）及总儿茶素等指标上表现突出，这与其浓醇回甘的滋味品质直接相关[4]；同时，引种至武夷山后，矮脚乌龙能保持稳定的植物学性状，并在茶多酚、咖啡碱和水浸出物含量上显著高于其他品种[5−6]，如九龙袍、毛蟹和丹桂等，这进一步证实了其适应性和品质优势。在加工过程中，矮脚乌龙的特征性花果香气形成与萜烯类物质的动态变化密切相关，包括反-β-罗勒烯、α-法尼烯及顺式-马鞭烯醇等成分的代谢调控[7]。烘焙工艺[8] 对香气组分影响显著：醇类和碳氢化合物随温度升高而递减，而酮类物质则呈上升趋势；烘焙试验表明，60~75 ℃ 为最佳烘焙区间，过高温度会导致花香衰减和火功味加重。

关于优质矮脚乌龙茶的风味品质特征尚未明晰，其感官品质与化学品质关联有待进一步深入研究。为探究优质矮脚乌龙茶的风味品质特征，本研究以 2023 年建瓯市“北苑贡茶”茶王赛中矮脚乌龙茶样为研究对象，通过对感官品质、生化成分、关键滋味物质组分及香气物质检测与分析，旨在探究矮脚乌龙茶感官品质与化学成分的关系，为建瓯矮脚乌龙茶的风味品质特性的客观评价提供参考，为推广优质矮脚乌龙茶产品提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

矮脚乌龙茶样品　来自建瓯市 2023 年“北苑贡茶”茶王赛参赛样品，焙火程度为中火，以获奖茶 6 个茶样为优质组，用 AY 表示（AY1~AY6）；以未获奖 6 个茶样为普通组，用 AP 表示（AP1~AP6），样品情况见表 1。每个样品设置 3 个重复样；磷酸二氢钾、磷酸氢二钠、茚三酮、氯化亚锡、碱式乙酸铅、饱和草酸、福林酚、碳酸钠、碳酸氢钠　上海麦克林生化科技有限公司；甲醇、95% 乙醇、正丁醇、乙酸乙酯、盐酸、硫酸　国药集团化学试剂有限公司；3-己酮　色谱纯，BioBioPha/Sigma-Aldrich 公司；正己烷　色谱纯，德国 Meker 公司；标准品　色谱纯，BioBioPha/Sigma-Aldrich。

DK-S24 型电热恒温水浴锅　上海精宏实验设备有限公司；SHB—III 型循环水式真空泵　郑州长城科工贸有限公司；UV-2800AH 型紫外可见光光度计　上海尤尼克仪器有限公司；722S 可见分光光度仪　上海棱光技术有限公司；JY-5430R 型台式高速冷冻离心机　德国 Eppendorf 公司；GZY-P1O-W 超纯水机　湖南科尔顿水务有限公司；UPLC-QQQ-MS 三重四极杆液质联用仪　美国 Waters 公司；Vortex-Genie2 涡旋振荡器　美国 Scientific Industries 公司；G560E 涡旋振荡器　美国 Industrial Industries 公司；KQ-300GDV 恒温数控超声波清洗器　昆山超声仪器公司；8890-7000D GC-MS/MS、DB-5MS 石英毛细管柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm）　美国 Agilent 公司。

表 1　不同品质建瓯矮脚乌龙茶样品信息

Table 1　Sample information of Jian'ou Aijiao Oolong tea in different quality type

样品编号	获奖情况	采摘时间	厂家	产地
AY1	茶王	2023年4月	建瓯市范家茶源茶叶专业合作社	建瓯市东峰镇
AY2	金奖	2023年4月	福建省建瓯市东峰茶厂	建瓯市东峰镇
AY3	金奖	2023年4月	建瓯市东峰镇李墩茶厂	建瓯市东峰镇
AY4	银奖	2023年4月	建瓯市清华茶厂	建瓯市东峰镇
AY5	银奖	2023年4月	建瓯市小青茶厂	建瓯市东峰镇
AY6	银奖	2023年4月	建瓯市茗芝春茶业有限公司	建瓯市东峰镇
AP1	未获奖	2023年4月	建瓯市茗悠茶厂	建瓯市小桥镇
AP2	未获奖	2023年5月	建瓯市云中茶厂	建瓯市东峰镇
AP3	未获奖	2023年4月	建瓯市东奥茶厂	建瓯市南雅镇
AP4	未获奖	2023年4月	建瓯市世友茶庄	建瓯市玉山镇
AP5	未获奖	2023年4月	建瓯市御福岩茶厂	建瓯市东峰镇
AP6	未获奖	2023年4月	建瓯市双叶茶厂	建瓯市东峰镇

1.2　实验方法

1.2.1　感官审评　参照国家标准《茶叶感官审评方法》(GB/T 23776-2018)[9] 和团体标准《北苑贡茶 矮脚乌龙》(T/BYGC 0001-2023)[3]，由六名受过专业训练的高级评茶员对茶样进行感官审评。

1.2.2　常规生化成分含量测定　样品中水浸出物含量测定参照 GB/T 8305-2013[10]；游离氨基酸含量测定依据 GB/T 8314-2013[11]；茶多酚含量测定按照 GB/T 8313-2018[12]；咖啡碱含量测定采用 GB/T 8312-2013[13] 方法；茶红素、茶黄素及茶褐素含量测定参照系统比色法[14]，取 3 g 茶叶粉末，加入沸水水浴，使用分液漏斗加入 50 mL 茶汤和 50 mL 乙酸乙酯振荡 5 min 后分离，萃取溶液分别加入 95% 乙醇、饱和草酸溶液，在波长 380 nm 比色测定；黄酮类物质含量测定使用 $AlCl_3$ 比色法[15]，取 1 g 茶叶粉末，加入 70% 甲醇进行水浴，冷却离心后取上清液，取 0.5 mL 提取液加入 1% $AlCl_3$ 溶液至 10 mL，避光静置反应 10 min 后，在波长 420 nm 比色测定。

1.2.3　氨基酸、儿茶素组分含量测定　参照 Feng 等[16] 的方法，将矮脚乌龙茶茶样研磨至粉状，茶粉过 40 目筛，每份样品称 30 mg 于 2 mL 离心管中，实验全程于冰上完成。每份样品加入 1 mL 70% 甲醇/水溶液，室温超声 20 min、100% 功率。在离心机中 4 ℃，12000 r/min，离心 10 min，取上清液原液待用。将提取原液分别稀释 100 倍和 400 倍，取 700 μL 稀释的上清液至进样瓶中，供 UPLC-QQQ-MS 分析，每份样品重复 3 次。

氨基酸、儿茶素组分定性、定量分析参照占鑫怡等[17] 的方法进行数据计算。氨基酸、儿茶素标准曲线绘制：根据已测批量待测物的峰面积与已知质量浓度的标准溶液的峰面积进行比例换算，估算待测物的质量浓度范围；配制 5 个以上不同质量浓度的标准溶液，以标准溶液质量浓度 x 为横坐标(μg/mL)，峰面积为纵坐标(y)，绘制不同氨基酸、儿茶素组分的标准曲线，得出回归方程，然后根据标准曲线进行定量分析。

1.2.4　香气物质含量测定

1.2.4.1　样品前处理　将−80 ℃ 冰箱保存的矮脚乌龙茶样本于液氮环境中速冻脆化，经液氮辅助超细研磨后，采用涡旋振荡器实现基质均匀分散。使用分析天平(精度 0.1 mg)精确量取(500.0±0.5)mg 置于 20 mL 顶空瓶中。依次注入 5 mL 饱和氯化钠溶液及 20 μL 3-己酮(10 μg/mL)工作液，随即装配全自动固相微萃取装置进行吸附相选择与吸取操作。

1.2.4.2　GC-MS 条件　在 Fiber Conditioning Station 中完成 120 μm DVB/CAR/PDMS 复合涂层萃取头的老化处理(250 ℃，5 min)。样品在 60 ℃ 恒温条件下平衡 5 min 后，以 500 r/min 振荡频率进行 15 min 动态顶空吸附。热解析过程在 GC 进样口温度为 250 ℃，时间为 5 min，完成分离鉴定温度为 250 ℃×5 min。配置 DB-5MS 石英毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm)，载气采用高纯氦气(纯度不小于 99.999%)，恒流流速 1.2 mL/min。进样系统维持 250 ℃ 高温，采用不分流进样策略，设置 3.5 min 溶剂延迟窗口。程序升温梯度：初始 40 ℃ 保持 3.5 min，以 10 ℃/min 升至 100 ℃；7 ℃/min 升至 180 ℃；最终以 25 ℃/min 升至 280 ℃ 保持 5 min。EI 离子源(70 eV)与四极杆质量分析器联用，关键温控参数：离子源 230 ℃、四极杆 150 ℃、传输线 280 ℃。依据 GB 23200.8-2016 标准，扫描方式为选择离子检测模式，扫描范围覆盖目标化合物的特征离子质量数，针对目标化合物特征离子选择至少 1 个定量离子和 2 个定性离子，确保定性定量分析的专属性与灵敏度。

1.2.4.3　定性、定量分析　参考 Yuan 等[18] 报道的文献方法并基于迈维自建(MWGC)数据库，对香气组分进行定性定量分析，鉴定挥发性化合物。根据得到的物质峰与 NIST 谱库对比进行物质鉴定，并以相同前处理方式测定不同碳原子保留时间，计算出物质对应的保留指数(Retention Index，RI)，通过内标半定

量法[19] 计算出各代谢物的含量，香气组分含量=香气物质峰面积×内标物含量/内标物峰峰面积。

参照黄慧清等[20] 的方法计算 RI、香气活性值（Odor Activity Value, OAV）与香气特征影响值（Aroma Contribution Index, ACI），计算公式如下：

$$RI = 100n + 100 \times (RT_{样品} - RT_n)/(RT_{n+1} - RT_n)$$

式中：RI 为该香气物质的保留指数；n 为该化合物前一个碳标的原子数；$RT_{样品}$为该化合物的保留时间；RT_n为该化合物前一碳标的保留时间；RT_{n+1}为该化合物后一碳标的保留时间。

$$OVA_i = \frac{C_i}{T_i}$$

式中：OAV_i 为化合物 i 的香气活性值；C_i（μg/g）为香气物质的含量；T_i（μg/g）为香气物质的阈值[21−22]。

$$ACI(\%) = \frac{O_x}{\sum_n O_n} \times 100$$

式中：ACI 为香气特征影响值；O_x 为香气成分 x 的香气活性值[23]。

1.3 数据处理

每个样品均进行独立理化检测，均重复测定 3 次，优质组与普通组数据以样品平均值±标准差表示；采用 SIMCA-P14.1 进行正交偏最小二乘法判别分析；SPSS26 软件进行描述性分析及方差分析（ANOVA）的显著性分析；Origin 软件绘制堆积百分图；Graphpad Prism 9.0 软件绘制柱状图；TBools 绘制热图。

2 结果与分析

2.1 建瓯矮脚乌龙茶感官品质分析

两组矮脚乌龙茶感官审评结果表明（表 2），优质组各项感官指标评价均好于普通组，优质组感官总得分为 93~96.50 分，平均值为 94.93±1.24 分，普通组总得分为 83~88 分，平均值为 85.33±1.80 分。两组感官评价总分差异显著；优质组矮脚乌龙茶总体表现为条索紧细重实，干茶色泽乌褐油润，汤色橙黄明亮，香气花香馥郁持久悠长，滋味醇厚鲜爽，叶底肥厚软匀，红边显。普通组总体条索尚紧结，干茶色泽较乌润，香气清高细长，汤色橙黄尚明亮，滋味醇和略带苦涩，叶底较肥厚尚匀、有红边。

2.2 建瓯矮脚乌龙茶主要滋味成分品质分析

2.2.1 建瓯矮脚乌龙茶生化成分分析 茶叶主要生化成分能够在一定程度上反映茶汤滋味品质差异[24]，水浸出物是茶汤滋味厚薄的重要指标，而游离氨基酸是茶汤鲜甜的主要呈味物质，二者含量高低与茶叶品质呈正相关。根据表 3 的检测结果，发现优质组水浸出物和游离氨基酸含量比普通组高。在影响茶汤苦涩味的物质中，茶多酚和黄酮是茶汤苦涩味的主要贡献物质，优质组的茶多酚含量（10.30%）显著高于普通组（9.71%），而黄酮含量（1.50%）显著低于普通组（1.62%）（$P<0.05$）。同时，优质组的咖啡碱含量也显著高于普通组（$P<0.05$）。两组茶黄素含量无显著差异，普通组茶红素和茶褐素含量均显著高于优质组（$P<0.05$），这与感官审评中普通组茶汤汤色更橙红更深结果相一致。此外，研究表明咖啡碱能与儿茶素、茶黄素形成络合物，从而使茶汤形成一定刺激性且较协调的爽口感[25]。总体而言，优质组和普通组建瓯矮脚乌龙的主要生化结果分析与感官审评结果趋势一致。

2.2.2 建瓯矮脚乌龙茶氨基酸组分分析 通过 UPLC-QqQ-MS 共检测出 21 种氨基酸组分，氨基酸含量的变化与差异如表 4 所示。其中，优质组和普通组之间的总氨基酸含量没有显著性差异，分别为 5.66、5.52 mg/g。根据游离氨基酸的呈味特征[17]，氨基酸按照呈味特点可大致分为鲜味氨基酸、甜味氨基酸、苦味氨基酸和芳香类氨基酸。鲜味类氨基酸对茶汤鲜爽程度有正向作用[26]，优质组和普通组鲜味类氨基酸含量存在显著性差异（表 4，$P<0.05$），其含量占比分别占总氨基酸含量的 67.73%、63.07%，优质组的鲜味类氨基酸在呈味上更突出。其中茶氨酸

表 2 不同品质建瓯矮脚乌龙茶感官审评

Table 2 Sensory evaluation of Jian'ou Aijiao Oolong tea in different quality type

样品		外形	汤色	香气	滋味	叶底	总分
优质组	AY1	紧细重实，叶端弯曲，乌润	浅橙黄明亮	馥郁幽长，有桂花香	鲜爽醇厚，花香显	肥厚软匀亮，红边显	96.5
	AY2	紧细重实，叶端稍弯曲，乌润	浅橙黄明亮	香气馥郁幽长	醇爽，有回甘	匀整明亮，红边显	96
	AY3	紧细重实，叶端稍弯曲，较乌润	橙黄较明亮	馥郁幽长	醇厚，回甘显	匀整明亮，红边尚显	95.75
	AY4	紧结匀整，乌润	橙黄明亮	清高细长	醇厚，有回甘	匀整，红边尚显	94.3
	AY5	紧结匀整，较乌润	橙黄明亮	浓郁，花香显	醇厚，带花香	匀整明亮，红边尚显	94
	AY6	紧结匀整，乌润	橙黄尚明亮	馥郁细长	醇厚，有花香	匀整明亮，红边尚显	93
普通组	AP1	紧结尚匀整，较乌润	橙黄尚明亮	花香较显	醇和，带花香	匀整明亮，红边尚显	88
	AP2	紧结尚匀整，较乌润	橙黄尚明亮	花香较显	醇和，有涩感	尚匀整、红边尚显	86
	AP3	较紧结，尚匀整，较乌润	橙红尚明亮	清高细长	醇和，略带花香	尚匀整、红边尚显	87
	AP4	较紧结尚匀整，较乌润	橙黄尚明亮	香气细沉	较醇和，带花香	尚匀整、红边尚显	84
	AP5	尚紧结，较匀整，乌褐	橙红明亮	香气纯正	粗浓，略苦涩	尚匀整、红边尚显	83
	AP6	紧结尚匀整，较乌润	橙红尚明亮	花香显	纯和，带花香	尚匀整，红边尚显	84

表 3　不同品质建瓯矮脚乌龙茶生化成分含量

Table 3　Contents of biochemical components in Jian'ou Aijiao Oolong tea at different quality type

内含物(%)	优质组	普通组
水浸出物	34.70±1.36[a]	33.42±0.98[b]
游离氨基酸	1.13±0.19[a]	1.10±0.14[a]
茶多酚	10.30±0.69[a]	9.71±1.96[b]
咖啡碱	4.40±0.32[a]	3.67±0.77[b]
茶黄素	0.04±0.00[a]	0.04±0.01[a]
茶红素	1.49±0.21[b]	1.63±0.19[a]
茶褐素	1.90±0.17[b]	2.08±0.22[a]
黄酮	1.50±0.22[b]	1.62±0.77[a]

注：同行不同小写字母代表差异显著(P<0.05)，表4同。

表 4　不同品质建瓯矮脚乌龙茶氨基酸组分含量(mg/g)

Table 4　Content of amino acid components of Jian'ou Aijiao Oolong tea in different quality (mg/g)

类型	氨基酸	缩写	优质组	普通组
苦味类	色氨酸	Trp	0.18±0.01[a]	0.21±0.02[a]
	γ-氨基丁酸	GABA	0.14±0.01[a]	0.15±0.01[a]
	缬氨酸	Val	0.08±0.01[b]	0.10±0.01[a]
	亮氨酸	Leu	0.10±0.01[b]	0.13±0.00[a]
	异亮氨酸	Ile	0.07±0.01[b]	0.10±0.01[a]
	组氨酸	His	0.22±0.01[a]	0.30±0.03[a]
	苯丙氨酸	Phe	0.02±0.00[b]	0.22±0.01[a]
	半胱酰胺	Cys	0.01±0.00[a]	0.01±0.00[a]
	苦味类总量		0.81±0.11[b]	1.00±0.11[a]
甜味类	丙氨酸	Ala	0.03±0.00[a]	0.03±0.00[a]
	脯氨酸	Pro	0.08±0.01[a]	0.09±0.01[a]
	丝氨酸	Ser	0.35±0.02[a]	0.35±0.03[a]
	苏氨酸	Thr	0.02±0.00[b]	0.03±0.00[a]
	蛋氨酸	Met	0.00±0.00[a]	0.00±0.00[a]
	谷氨酰胺	Gln	0.04±0.00[b]	0.06±0.00[a]
	甜味类总量		0.53±0.02[a]	0.56±0.04[a]
鲜味类	天冬酰胺	Asn	0.11±0.00[b]	0.13±0.00[a]
	天冬氨酸	Asp	0.43±0.02[a]	0.42±0.00[a]
	甘氨酸	Gly	0.05±0.00[b]	0.06±0.00[a]
	谷氨酸	Glu	0.08±0.00[b]	0.09±0.00[a]
	茶氨酸	Theanine	3.17±0.10[a]	2.78±0.04[b]
	鲜味类总量		3.83±0.13[a]	3.48±0.04[b]
芳香类	赖氨酸	Lys	0.08±0.01[a]	0.09±0.01[a]
	精氨酸	Arg	0.10±0.01[a]	0.05±0.01[b]
	酪氨酸	Tyr	0.31±0.03[a]	0.32±0.02[a]
	芳香类总量		0.49±0.05[a]	0.46±0.03[a]
	所有氨基酸总量		5.66±0.22[a]	5.52±0.16[a]

的含量与茶叶品质呈正相关，也是评价滋味品质的重要指标[27]。优质组茶氨酸含量(3.17 mg/g)显著高于普通组(2.78 mg/g)(P<0.05)，是普通组茶氨酸含量的 1.14 倍。此外，优质组的苦味类氨基酸含量显著低于普通组(P<0.05)。这些综合结果也进一步解释了优质组滋味更醇爽的原因。

进一步将氨基酸组分进行 OPLD-DA，得分图显示(图 1a)优质组和普通组分别聚类，经过 200 次置换验证，排列交叉模型验证的 Q^2 回归直线与 Y 轴的截距小于 0(图 1b)，表明该模型可信度较高，不存在过度拟合，认为该结果可用于建瓯矮脚乌龙茶氨基酸组分判别分析。OPLS-DA 模型中 VIP 值体现其物质贡献大小，以 VIP 值>1 为筛选指标。如图 1c 所示，茶氨酸、苯丙氨酸、精氨酸、亮氨酸、异亮氨酸和半胱酰胺 6 个氨基酸组分的 VIP 值大于 1，说明这 6 个氨基酸组分在不同品质矮脚乌龙茶中差异显著且贡献较大。图 1d 散点图表明茶氨酸和精氨酸是优质组中关键影响物质，而苯丙氨酸、亮氨酸、异亮氨酸和半胱酰胺是普通组的关键物质。

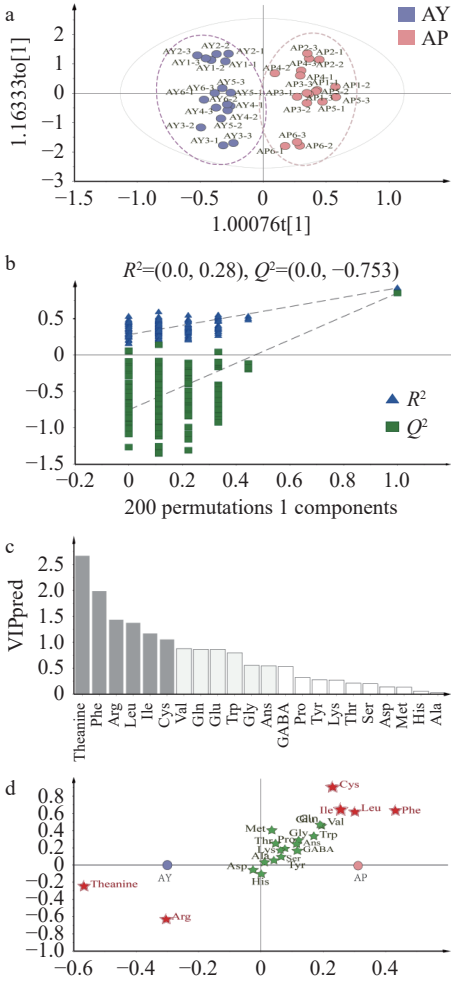


图 1　不同品质建瓯矮脚乌龙茶

Fig.1　Jian'ou Aijiao Oolong tea of different quality

注：(a)OPLS-DA 得分图；(b)模型交叉验证结果；(c)OPLS-DA 模型 VIP 值(灰色区域表示 VIP>1)；(d)OPLS-DA 散点图(红色为优质组、普通组含量高的物质)。

2.2.3　建瓯矮脚乌龙茶儿茶素组分分析　儿茶素组分分为酯型儿茶素和非酯型儿茶素。优质组与普通组儿茶素总含量无显著性差异，含量变化分别为 61.48~81.08 mg/g，58.74~75.36 mg/g。由图 2a 可知矮脚乌龙茶样的酯型儿茶素总含量均高于非酯型儿茶素含量。有研究表明酯型儿茶素虽然是苦涩味主要来源，但能增加茶汤的浓稠度和醇厚感，而非酯型儿茶素则苦涩感较低，具有一定的爽口感[28]。优质组酯型儿茶素含量高于普通组，而非酯型儿茶素含量

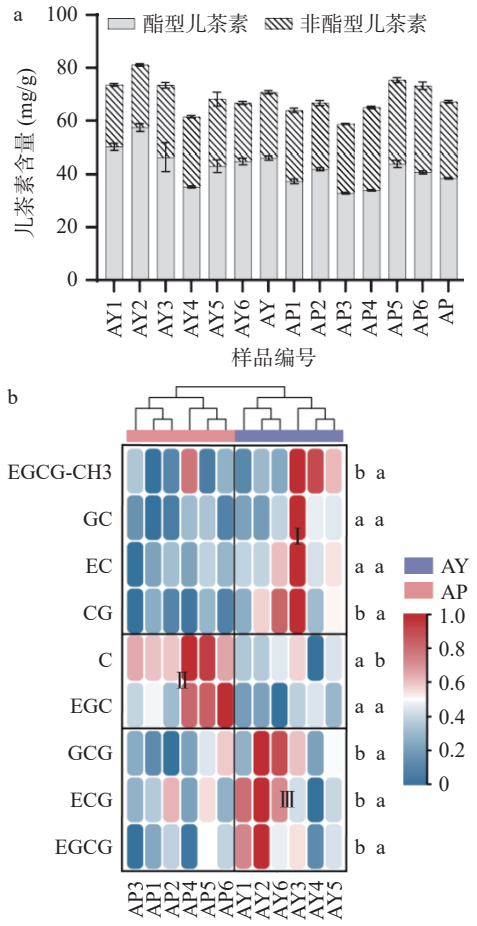


图 2 不同品质建瓯矮脚乌龙茶儿茶素种类含量堆积图(a)和儿茶素组分含量热图(b)

Fig.2 Accumulation map of catechin content types (a) and heat map of the relative content of catechin components (b) of different quality Jian'ou Aijiao Oolong tea

注: 图中同行不同小写字母(a、b)表示差异显著(P<0.05), 标尺从 0.00~1.00 对应颜色由蓝变红, 颜色越偏向红色表示儿茶素组分含量越高, 则蓝色与之相反。

低于普通组。基于儿茶素组分含量进行聚类分析, 结果如图 2b 所示, 优质组和普通组明显被分为两大类, 其中Ⅰ和Ⅲ区域中具有强收敛性的酯型儿茶素中 EGCG(Epigallocatechin Gallate)、EGCG-CH3 (Epigallocatechin-3-methylgallate)、ECG(Epicatechin gallate)、GCG(Gallocatechin gallate)、CG(Catechin gallate)含量优质组显著高于普通组(P<0.05), 而Ⅱ区域非酯型儿茶 C(Ccatechin)含量普通组显著高于优质组(P<0.05), 儿茶素 C 含量过高, 会使茶汤苦涩味加重和掩盖茶汤的醇厚感[29]。优质组儿茶素含量较普通组儿茶素高, 儿茶素种类的含量差异是使不同品质矮脚乌龙茶茶汤苦涩味、收敛性强弱产生差异的重要原因[30]。本研究结果与叶江华等[31]研究中武夷山高等级乌龙茶的儿茶素含量较低的结果不一致, 可能与矮脚乌龙茶树品种产地、鲜叶采摘的时间、加工条件等因素有关。

2.3 建瓯矮脚乌龙茶香气品质分析

2.3.1 建瓯矮脚乌龙茶总香气物质分析 为探究建瓯矮脚乌龙茶香气组分特征, 利用 HS-SPME-GC-MS 联用的方法[32], 从 12 个建瓯矮脚乌龙茶样品中检测鉴定到 527 种已知香气物质, 分为 11 大类, 如图 3a 所示, 包括 130 种酯类、109 种萜类、76 种杂环化合物、47 种醛类、43 种醇类、41 种酮类、34 种烃和芳烃类化合物、14 种酚类、14 种酸类、12 种含硫和含氮化合物、7 种其他类物质。由图 3b 可知, 检测出香气物质以酯类(25%)、萜类(21%)、杂环类化合物(14%)为主, 其中酯类物质相对含量在建瓯矮脚乌龙茶中最高, 达到 27%~37%; 其次是杂环类化合物相对含量在 19%~28% 之间, 萜类化合物相对含量在 15%~19% 之间。

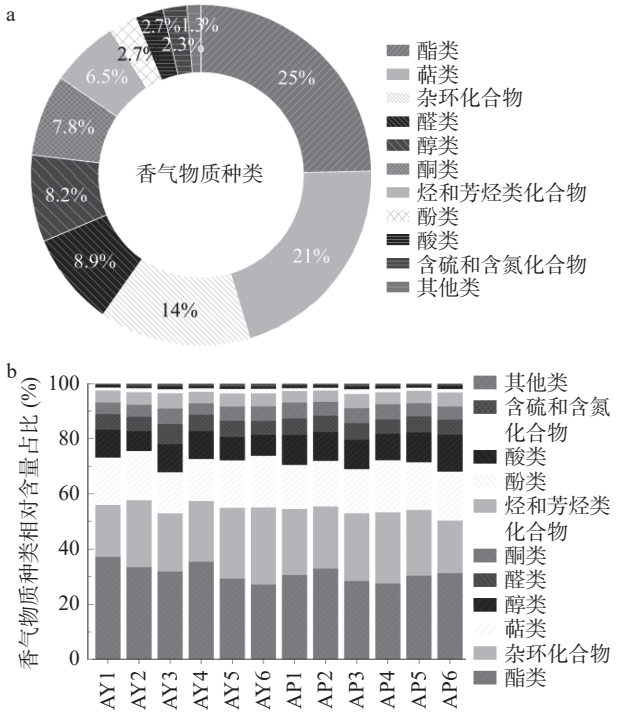


图 3 不同品质建瓯矮脚乌龙茶香气物质种类占比环状图(a)和香气物质种类相对含量占比堆积图(b)

Fig.3 Ring diagram of aroma substances type (a) and accumulation diagram of relative contents of aroma substances type (b) of different quality Jian'ou Aijiao Oolong tea

2.3.2 矮脚乌龙茶主要差异香气物质分析 为了进一步分析优质矮脚乌龙特征香气物质, 本研究对 527 种香气物质进行 OPLS-DA 建模, 得分图(图 4a)将优质组和普通组划分为两组, 并且验证模型(图 4b)不存在过度拟合。以 VIP≥1 且 P<0.05 为筛选条件, 共筛选出 54 种建瓯矮脚乌龙茶主要特征差异香气物质(见表 5), 其中酯类 16 种、萜类 10 种、杂环类 8 种、醛类 6 种、烃类 5 种、醇类 3 种、酮类 3 种、酚类 2 种、含氮化合物 1 种。这些变化的关键性香气组分主要表现为花香、果香、木香[33]。不同品质矮脚乌龙茶的酯类化合物含量在主要差异香气物质中占据首位(41.50%~42.93%), 其次是杂环类化合物达到 17.79%~20.75%。由表 5 结果可知, 除醇类、酮类外, 酯类、萜类、杂环类等化合物含量优质组均显著高于普通组。优质组酯类成分中丙酸叶醇酯、己酸

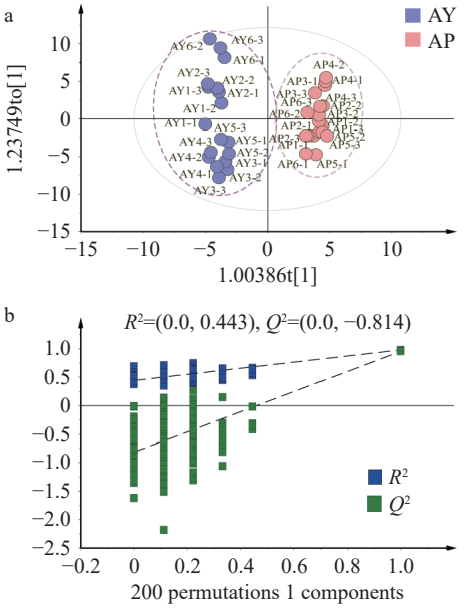


图 4　不同品质建瓯矮脚乌龙香气物质 OPLS-DA 得分图(a)和模型交叉验证结果(b)

Fig.4　OPLS-DA score chart (a) and cross-validation results of model of aroma substances (b) in Jian'ou Aijiao Oolong of different quality

叶醇酯、顺-3-己烯基丁酸酯、δ-癸内酯等的含量较高，具有清果香、花香等[34]香气特征；萜类中薄荷醇、乙酸香叶酯、β-罗勒烯的含量较高，具有淡淡的木香、柑橘香、花香、果香、青香和甜润的香脂香气[20]。而普通组醇类中 2-丁基-2-辛醇、苯甲醇的含量较高，具有轻微的青气和花香香气；酮类中甲基庚烯酮的含量较高，富有果香香气[35]。上述这些主要差异香气物质的存在可能构成了优质矮脚乌龙茶花香馥郁，清幽持久的香气特征。

2.3.3　矮脚乌龙产品主要差异香气的 OAV 和 ACI 分析　茶叶中香气的呈现是由各个挥发性成分的气味阈值与浓度所决定的。OAV 是通过香气成分含量与气味阈值比值，来综合评价各香气物质在样品中贡献度，但其贡献率则通过 ACI 值来比较[26]。通常认为 1<OAV≤10 的香气物质对茶叶香气形成有贡献，OAV>10，则对茶叶香气形成有显著影响。在筛选的特征性香气物质的基础上，分析出 OAV>1 的有 12 种挥发性物质(表 6)。优质组 OAV 大于 1 的有 12 种，而普通组 OAV 大于 1 的有 10 种。用这

表 5　不同品质建瓯矮脚乌龙关键香气物质(VIP≥1)

Table 5　Key aroma substances in Jian'ou Aijiao Oolong of different quality (VIP≥1)

序号	RI	物质	CAS编号	含量(μg/g)		VIP值
				优质组	普通组	
1	1100	丙酸叶醇酯	33467-74-2	12.15±0.92	7.58±0.27	7.14
2	1380	己酸叶醇酯	31501-11-8	9.58±0.23	6.60±0.21	5.67
3	1187	顺-3-己烯基丁酸酯	16491-36-4	3.14±0.15	1.30±0.06	4.99
4	1502	δ-癸内酯	705-86-2	2.46±0.01	0.86±0.06	4.26
5	1396	丁位壬内酯	3301-94-8	3.24±0.14	1.87±0.05	3.79
6	1388	9-癸烯酸乙酯	67233-91-4	2.27±0.04	3.99±0.11	3.48
7	1054	γ-己内酯	695-06-7	1.85±0.08	1.04±0.07	3.37
8	1200	水杨酸甲酯	119-36-8	2.23±0.09	1.26±0.06	3.10
9	1190	丁酸己酯	2639-63-6	2.10±0.08	1.24±0.04	3.04
10	1393	丁酸辛酯	110-39-4	2.34±0.12	4.00±0.33	2.80
11	1389	顺式-3-己烯酸顺式-3-己烯酯	61444-38-0	1.02±0.03	0.53±0.03	2.32
12	912	γ-丁内酯	96-48-0	1.41±0.07	0.82±0.01	2.11
13	1234	二甲基丁酸叶醇酯	53398-85-9	1.51±0.07	1.05±0.02	1.92
14	1189	己酸丁酯	626-82-4	0.83±0.04	0.56±0.03	1.63
15	1284	己酸3-甲基-2-丁烯酯	76649-22-4	0.34±0.01	0.15±0.01	1.44
16	1110	3-甲基丁酸戊酯	25415-62-7	0.51±0.06	0.32±0.02	1.28
	酯类			46.97	33.18	
1	1176	薄荷醇	2216-51-5	2.03±0.11	0.78±0.03	4.09
2	1384	乙酸香叶酯	105-87-3	2.45±0.07	1.23±0.02	3.84
3	1049	β-罗勒烯	3779-61-1	2.09±0.07	1.36±0.03	2.79
4	1195	6,6-二甲基-双环[3.1.1]庚-2-烯-2-甲醇	515-00-4	0.47±0.01	0.11±0.00	2.00
5	1384	β-波旁烯	5208-59-3	0.83±0.02	0.53±0.02	1.74
6	1100	芳樟醇	78-70-6	1.05±0.01	0.69±0.03	1.55
7	1037	罗勒烯	13877-91-3	0.85±0.02	0.63±0.02	1.27
8	1523	顺-菖蒲烯	483-77-2	0.48±0.00	0.69±0.02	1.23
9	1031	(+)-柠檬烯	5989-27-5	1.29±0.06	1.06±0.04	1.04
10	1147	(S)-2-甲基-6-亚甲基-2,7-辛二烯-4-醇	35628-00-3	0.30±0.01	0.18±0.01	1.01
	萜类			11.83	7.25	
1	909	2,5-二甲基吡嗪	123-32-0	7.51±0.35	4.13±0.38	5.38

续表 5

序号	RI	物质	CAS编号	含量(μg/g)		VIP值
				优质组	普通组	
2	1004	2-乙基-3-甲基吡嗪	15707-23-0	7.36±0.34	4.68±0.06	4.52
3	1082	2-乙酰基-3-甲基吡嗪	23787-80-6	1.80±0.13	1.05±0.06	2.46
4	1063	2-乙酰吡咯	1072-83-9	2.95±0.07	2.26±0.10	2.31
5	1162	3,5-二乙基-2-甲基-吡嗪	18138-05-1	1.40±0.05	0.82±0.01	2.15
6	911	2-乙酰呋喃	1192-62-7	1.20±0.06	0.74±0.02	1.95
7	1004	三甲基吡嗪	14667-55-1	0.35±0.02	0.20±0.00	1.13
8	1012	1H-吡咯-2-甲醛	1003-29-8	0.14±0.04	0.32±0.04	1.09
	杂环类			22.70	14.21	
1	1100	3,6-壬二烯醛	21944-83-2	1.52±0.10	0.89±0.04	2.58
2	964	5-甲基糠醛	620-02-0	1.63±0.08	0.82±0.02	2.36
3	1103	(*Z*)-6-壬醛	2277-19-2	1.52±0.25	0.87±0.04	2.15
4	962	苯甲醛	100-52-7	3.02±0.17	3.70±0.07	2.04
5	1106	可可醛	35158-25-9	1.14±0.03	0.78±0.03	1.80
6	853	2-己烯醛	505-57-7	0.44±0.02	0.32±0.01	1.04
	醛类			9.27	7.39	
1	871	对二甲苯	106-42-3	1.36±0.03	0.83±0.02	1.96
2	1354	1,2-二氢-1,1,6-三甲基-萘	30364-38-6	2.48±0.05	1.90±0.03	1.92
3	1115	1,2,4,5-四甲基苯	95-93-2	0.57±0.02	0.36±0.01	1.58
4	763	甲苯	108-88-3	2.02±0.06	1.64±0.02	1.41
5	1400	十四烷	629-59-4	0.89±0.01	1.07±0.02	1.11
	烃类			7.33	5.80	
1	1378	2-丁基-2-辛醇	13019-16-4	1.06±0.03	1.97±0.06	2.68482
2	1123	(1R, 4R)-1-甲基-4-丙-1-烯-2-基环己基-2-烯-1-醇	7212-40-0	2.22±0.14	1.37±0.06	2.49
3	1034	苯甲醇	100-51-6	2.74±0.13	3.62±0.18	2.18
	醇类			6.02	6.97	
1	987	甲基庚烯酮	110-93-0	2.22±0.10	3.33±0.10	3.44
2	1183	1-苯基-1,2-丙二酮	579-07-7	0.25±0.01	0.07±0.00	1.38
3	1067	苯乙酮	98-86-2	0.64±0.03	0.47±0.02	1.18
	酮类			3.11	3.87	
1	1075	间甲酚	108-39-4	0.59±0.03	0.33±0.00	1.59
2	1073	对甲酚	106-44-5	0.39±0.01	0.22±0.01	1.17
	酚类			0.97	0.55	
1	1194	2-壬腈	29127-83-1	1.21±0.05	0.7±0.03	1.88
	含氮化合物			1.21	0.7	
	总量			109.40	79.93	

12 种香气物质含量进行可视化热图聚类分析(图 5),A 区域中优质组的 OAV 高于普通组,并划分为 3 部分,A1 包括呈坚果、豆香和可可香型的 2,5-二甲基吡嗪和 2-乙基-3-甲基吡嗪;A2 包括呈花香、清甜香、清香香型的水杨酸甲酯、丁酸己酯、乙酸香叶酯、己酸叶醇酯、丁位壬内酯;A3 包括呈甜香、清凉感、奶香、具有持久性香气型的 *γ*-己内酯、*δ*-癸内酯、薄荷醇。这些 OAV 高的香气物质可能共同组成了优质组花果香馥郁悠长的风味品质特征。而 B 区域甲基庚烯酮(果香、清香)和 9-癸烯酸乙酯(果香、脂肪香)两种物质在普通组含量高,有研究表明这两种香气物质具有果香浓郁的香气特征[35],使得普通组矮脚乌龙茶香气以果香为主。

进一步计算 12 种香气物质的 ACI 值,以 ACI> 10% 筛选出 6 个关键香气物质(表 6,图 5):水杨酸甲酯(杏仁香、果香、青香)、*δ*-癸内酯(甜香、奶油香、水果香)、甲基庚烯酮(果香)、乙酸香叶酯(清甜花香)、2-乙基-3-甲基吡嗪(坚果香)和 9-癸烯酸乙酯(果香、脂肪香)。推测这些香气物质可能是构成不同品质建瓯矮脚乌龙茶的差异特征香气成分。与普通组相比,水杨酸甲酯、*δ*-癸内酯、乙酸香叶酯和 2-乙基-3-甲基吡嗪四种香气物质在优质组中较为突出,其中,兼具清香与薄荷香的水杨酸甲酯在优质组中的 OAV 高达 55.64。作为茶叶中关键的香气化合物,水杨酸甲酯不仅赋予茶叶高品质的花香基调,还在整体茶香形成过程中发挥重要作用。*δ*-癸内酯凭借清新的甜香、果香气息,以及浓郁的奶油香气[36],为优质茶增添独特风味;乙酸香叶酯散发着清甜平和的花香[37],丰富香气层次;2-乙基-3-甲基吡嗪则带来烘烤香与坚果香气,使茶香更具深度。综上,水杨酸甲

表 6　不同品质建瓯矮脚乌龙样品 OAV>1 香气物质及 ACI 值

Table 6　OAV>1 aroma substance and ACI value of Jian'ou Aijiao Oolong samples with different quality

序号	关键香气物质	阈值[17,19,38-40](μg/g)	OAV		ACI(%)		香气特征[17,20,38,41]
			优质组	普通组	优质组	普通组	
1	水杨酸甲酯	0.04	55.64±2.37	31.48±1.61	23.05±0.31	16.97±0.34	杏仁香、薄荷香、冬青油香
2	δ-癸内酯	0.066	37.21±0.21	13.10±0.87	15.44±0.50	7.06±0.33	甜香、奶油香、水果香
3	甲基庚烯酮	0.05	44.39±2.09	66.53±2.08	18.39±0.42	35.89±0.30	果香、清香
4	乙酸香叶酯	0.1	24.49±0.73	12.28±0.20	10.15±0.13	6.63±0.12	花香
5	2-乙基-3-甲基吡嗪	0.24	30.66±1.41	19.51±0.26	12.70±0.20	10.53±0.25	坚果香
6	9-癸烯酸乙酯	0.2	11.36±0.19	19.97±0.55	4.71±0.07	10.78±0.10	果香、脂肪香
7	丁酸己酯	0.203	10.37±0.41	6.12±0.19	4.30±0.07	3.30±0.06	甜香、果香
8	己酸叶醇酯	0.781	12.26±0.30	8.45±0.27	5.08±0.10	4.56±0.04	青草香、果香
9	γ-己内酯	0.26	7.10±0.31	3.99±0.26	2.94±0.04	2.15±0.08	甜香
10	2,5-二甲基吡嗪	1.75	4.29±0.20	2.36±0.22	1.78±0.03	1.28±0.14	可可香
11	薄荷醇	0.9	2.26±0.13	0.86±0.03	0.93±0.03	0.47±0.01	清凉薄荷香
12	丁位壬内酯	2.6	1.25±0.05	0.72±0.02	0.52±0.01	0.39±0.01	椰子香、奶香

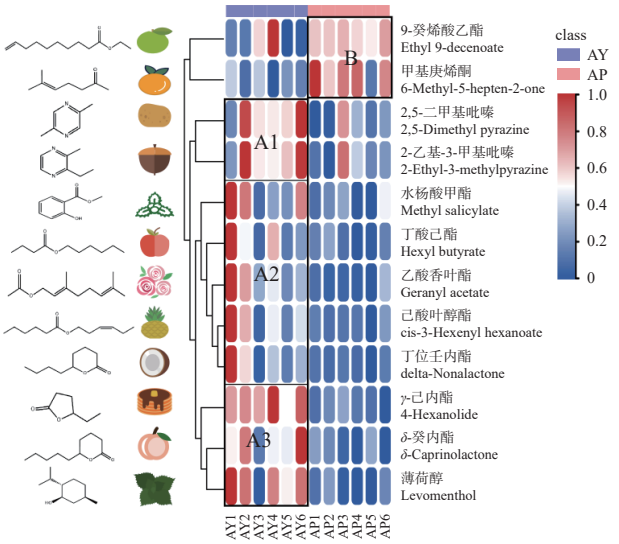


图 5　不同品质建瓯矮脚乌龙关键香气物质

Fig.5　Different quality Jian'ou Aijiao Oolong key aroma substance

酯、δ-癸内酯、乙酸香叶酯和 2-乙基-3-甲基吡嗪是优质组矮脚乌龙相对于普通组具有更好的花香且香气馥郁幽长的关键特征香气物质。

3　讨论与结论

本研究通过感官审评、主要生化成分、关键呈味物质组分和香气共同探讨了优质建瓯矮脚乌龙茶风味品质与化学成分的联系。在感官评审中，优质矮脚乌龙茶各项审评分数均高于普通矮脚乌龙茶。在滋味品质方面，水浸出物、茶多酚、咖啡碱与品质呈现正相关，黄酮、茶红素、茶褐素呈现负相关且具有显著性差异（P<0.05）。优质组矮脚乌龙茶优异的滋味品质推测与茶叶氨基酸中鲜味类氨基酸含量较高密切相关。高含量的鲜味类氨基酸使其茶汤入口清甜，回甘持久。进一步分析发现虽然优质组茶多酚含量较高，但可能通过茶氨酸对苦涩滋味有抑制作用，形成了“浓而不涩”的特点。同时，茶多酚与咖啡碱含量在优质矮脚乌龙茶有正向协同效应，强化了滋味的立体感。在儿茶素组分研究中，较高的酯型儿茶素含量加强茶汤滋味浓厚度。前人研究中氨基酸组分和儿茶素组分在茶汤呈味上有重要协同作用[39]。本研究中茶氨酸、精氨酸等氨基酸在优质组中占比更高，其呈味阈值低且能抑制 EGCG 的苦涩感，这类氨基酸的生成与茶树品种特性及嫩梢原料等级密切相关[42]。

在香气品质方面，通过 GC-MS 技术从 12 个茶样中检测到 527 种挥发性成分，以酯类（25%）、萜类（21%）和杂环化合物（14%）构成香气物质的主要成分，赋予矮脚乌龙茶花香、清果香的香气特征。茶叶的香气特征由香气成分、比例和气味活性值共同决定。进一步结合 OPLS-DA 筛选出 54 种 VIP≥1 的香气物质，并基于 OAV>1 与 ACI>10% 分析最终确定水杨酸甲酯、δ-癸内酯、乙酸香叶酯、2-乙基-3-甲基吡嗪 4 种物质是优质组的特征香气成分。水杨酸甲酯具有冬青油香、薄荷香和杏仁香特征，其香气活性值（OAV）最高，表明其对矮脚乌龙茶馥郁清幽的形成起关键作用。研究表明，水杨酸甲酯在乌龙茶中常与美拉德反应产物中如吡嗪类共同作用[43]，能增强茶汤的甜润与冷香特征。δ-癸内酯具有甜香与水果香特征，是奶油香和椰子香的关键成分，其香气阈值极低，即使微量存在也能显著提升茶汤的甜润感和果香[44]。乙酸香叶酯则赋予茶汤浓郁的花香（如玫瑰、天竺葵香），其香气强度与酯化反应程度密切相关，在乌龙茶中常与芳樟醇、橙花叔醇等萜烯类物质协同作用，形成复合型花香[40]。2-乙基-3-甲基吡嗪为坚果香与烘烤香贡献者，是美拉德反应的典型产物[45]，增加了优质矮脚乌龙茶的风味品质。

本研究通过多维度解析揭示了优质建瓯矮脚乌龙茶“浓而不涩”的滋味特征与“馥郁清幽”香气特征形成的化学机制。结果表明，其优异品质源于滋味成分与香气物质的协同增效作用。研究从生化成分、呈味物质及香气物质入手，明确了优质矮脚乌龙茶的核心品质指标，为构建品质评价体系及定向化加工工

艺优化提供了科学依据。后续研究中，通过香气重组与缺失实验精准鉴定矮脚乌龙茶的特征挥发性香气成分，并解析其关键香气物质的生物合成途径。在此基础上，通过统一茶青原料品质、优化摇青强度及烘焙温度等工艺参数，实现对香气滋味轮廓的定向调控，从而提升矮脚乌龙茶的风味品质与市场辨识度，深化其品质形成机制研究。

© 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］潘宏英. 建瓯市茶产业发展现状与思考[J]. 中国农技推广, 2021, 37(1): 35−37. ［PAN Hongying. Present situation and thinking of tea industry development in Jian'ou City[J]. China Agricultural Technology Extension, 2021, 37(1): 35−37.］

［2］姚月明, 巩志. 闽台乌龙茶同根同祖[J]. 农业考古, 1993, 2: 20−21. ［YAO Yueming, GONG Zhi. Fujian-Taiwan oolong tea shares the same origin and ancestral roots[J]. Agricultural Archaeology, 1993, 2: 20−21.］

［3］建瓯市北苑贡茶协会. 北苑贡茶 矮脚乌龙茶 T/BYGC 0001-2020[S]. 北京: 中国团体标准, 2023. ［Jian'ou City Beiyuan Tribute Tea Association. Beiyuan tribute tea-Aijiao Oolong tea T/BYGC 0001-2020[S]. Beijing: China Association Standard, 2023.］

［4］段联勃, 徐丹, 杨丽蓉, 等. 36 份茶树种质资源所制武夷岩茶毛茶的内含成分分析[J]. 中国茶叶, 2021, 43(1): 54−58,63. ［DUAN Lianbo, XU Dan, YANG Lirong, et al. Analysis of quality components in Wuyi rock tea processed with 36 tea germplasm resources[J]. China Tea, 2021, 43(1): 54−58,63.］

［5］李远华, 姜兰, 彭璐. ‘奇兰’等 4 个品种引种武夷山的植物学性状观察及主要生化成分分析[J]. 中国农学通报, 2014, 30(19): 205−209. ［LI Yuanhua, JIANG Lan, PENG Lu. Botanical characters observation and main biochemical components analysis of four varieties introduced to Wuyishan including ‘Qilan’[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(19): 205−209.］

［6］卢莉, 程曦, 叶国盛, 等. 4 种乌龙茶树鲜叶适制绿茶、黄茶、白茶、红茶可行性研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(2): 33−38. ［LU Li, CHENG Xi, YE Guosheng, et al. Feasibility of green tea, yellow tea, white tea and black tea made from the fresh leaves of four oolong tea varieties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(2): 33−38.］

［7］ZHANG Mengcong, ZHANG Lixuan, ZHOU Chengzhe, et al. Metabolite profiling reveals the dynamic changes in non-volatiles and volatiles during the enzymatic-catalyzed processing of Aijiao Oolong tea[J]. Plants, 2024, 13(9): 1249.

［8］武帅强. 闽北乌龙茶清洁化做青及关键技术提升与应用[D]. 福州: 福建农林大学, 2021. ［WU S Q. Clean green-making of Minbei Oolong tea and its key technology promotion and application[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2021.］

［9］国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 茶叶感官审评方法 GB/T 23776-2018[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 the People's Republic of China. Methodology for sensory evaluation of tea GB/T 23776-2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.］

［10］国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 茶 水浸出物测定 GB/T 8305-2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014. ［General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Tea-Determination of water extracts content GB/T 8305-2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.］

［11］国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 植物中游离氨基酸的测定: GB/T 30987-2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020. ［State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People’s Republic of China. Determination of free amino acids in plant: GB/T 30987-2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.］

［12］国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法 GB/T 8313-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018. ［State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of total polyphenols and catechins content in tea GB/T 8313-2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.］

［13］国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 茶 咖啡碱测定 GB/T 8312-2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014. ［General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Tea-Determination of caffeine content GB/T 8312-2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.］

［14］张正竹. 茶叶生物化学实验教程[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009. ［ZHANG Zhengzhu. Tea biochemistry experiment course[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2009.］

［15］何书美, 刘敬兰. 茶叶中总黄酮含量测定方法的研究[J]. 分析化学, 2007, 35(9): 1365−1368. ［HE Shumei, LIU Jinglan. Study on the determination method of flavone content in tea[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2007, 35(9): 1365−1368.］

［16］FENG Jiao, ZHUANG Jiayun, CHEN Qianlian, et al. The effect of maturity of tea leaves and processing methods on the formation of milky flavor in white tea-A metabolomic study[J]. Food Chemistry, 2024, 447: 139080.

［17］占鑫怡, 欧晓西, 张雯萍, 等. 不同烘焙程度‘春闺’闽北乌龙茶风味品质分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(10): 242−253. ［ZHAN Xinyi, OU Xiaoxi, ZHANG Wenping, et al. Analysis of flavor quality of 'Chungui' Minbei Oolong tea with different baking degrees[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(10): 242−253.］

［18］YUAN H L, JIANGFANG Y, LIU Z H, et al. WTV2.0: A high-coverage plant volatilomics method with a comprehensive selective ion monitoring acquisition mode[J]. Molecular Plant, 2024, 17(6): 972−985.

［19］HUANG Wenjing, FANG Shimao, WANG Jing, et al. Sensomics analysis of the effect of the withering method on the aroma components of Keemun black tea[J]. Food Chemistry, 2022, 395: 133549.

［20］黄慧清, 杨云, 柳镇章, 等. 茶树新品系‘606’乌龙茶在不同季节的品质分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(14): 272−281. ［HUANG Huiqing, YANG Yun, LIU Zhenzhang, et al. Quality analysis of a new tea line '606' Oolong tea in different seasons[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(14): 272−281.］

［21］XU Kai, TIAN Caiyun, ZHOU Chengzhe, et al. Non-targeted metabolomics analysis revealed the characteristic non-volatile and

volatile metabolites in the Rougui Wuyi rock tea (*Camellia sinensis*) from different culturing regions[J]. Foods, 2022, 11(12): 1694.
[22] GUO X Y, SCHWAB W, HO C T, et al. Characterization of the aroma profiles of oolong tea made from three tea cultivars by both GC-MS and GC-IMS[J]. Food Chemistry, 2022, 376: 131933.
[23] GUO Jie, YU Zhihao, LIU Meiyan, et al. Analysis of volatile profile and aromatic characteristics of raw Pu-erh tea during storage based on GC-MS and odor activity value[J]. Foods, 2023, 12(19): 3568.
[24] ZHANG L, CAO Q Q, GRANATO D, et al. Association between chemistry and taste of tea: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 101: 139−149.
[25] 刘长梅, 陈悦鸣, 胡煜. 不同茶叶中儿茶素、芦丁含量和抗氧化性效果研究[J]. 中国卫生工程学, 2022, 21(3): 453−455,458. [LIU Changmei, CHEN Yueming, HU Yu. Study on the contents of catechin and rutin in different tea leaves and their antioxidant effects[J]. Chinese Journal of Public Health Engineering, 2022, 21(3): 453−455,458.]
[26] LIN Hongbin, YU Xiaoyu, FANG Jiaxing, et al. Flavor compounds in Pixian broad-bean paste: Non-volatile organic acids and amino acids[J]. Molecules, 2018, 23(6): 1299.
[27] LI Qiuming, HU Qingcai, OU Xiaoxi, et al. Insights into "Yin Rhyme": Analysis of nonvolatile components in Tieguanyin Oolong tea during the manufacturing process[J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101729.
[28] 张奇, 张荧, 晏紫, 等. 不同等级金牡丹乌龙茶品质和矿质元素差异分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(24): 288−295. [ZHANG Qi, ZHANG Ying, YAN Zi, et al. Analysis on the difference of quality and mineral elements among Jinmudan Oolong tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(24): 288−295.]
[29] YANG Jihong, ZHOU Hanchen, LIU Yaqin, et al. Chemical constituents of green teas processed from albino tea cultivars with white and yellow shoots[J]. Food Chemistry. Molecular Sciences, 2022, 5: 100143.
[30] CHEN G H, YANG C Y, LEE S J, et al. Catechin content and the degree of its galloylation in Oolong tea are inversely correlated with cultivation altitude[J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2014, 22(3): 303−309.
[31] 叶江华, 刘德发, 刘国英, 等. 不同等级武夷水仙茶品质和矿质元素差异分析[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(6): 105−112. [YE Jianghua, LIU Defa, LIU Guoying, et al. Analysis on the difference of quality and mineral elements among Wuyi Shuixian tea (*Camellia sinensis* cv. Shuixian) with different grades[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(6): 105−112.]
[32] 王立磊, 杨艳芹, 谢佳灵, 等. 基于电子鼻与 GC-MS 融合技术的优质红茶和缺陷红茶香气品质评价[J]. 食品科学, 2024, 45(2): 274−282. [WANG Lilei, YANG Yanqin, XIE Jialing, et al. Aroma quality evaluation of high-quality and quality-deficient black tea by electronic nose coupled with gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Science, 2024, 45(2): 274−282.]
[33] 何春梅, 李明金, 李新月, 等. 清香型铁观音香气与滋味的化学品质解析[J]. 食品科学, 2024, 45(15): 157−167. [HE Chunmei, LI Mingjin, LI Xinyue, et al. Chemical characterization of the aroma and taste of Qingxiang Tieguanyin tea[J]. Food Science, 2024, 45(15): 157−167.]
[34] 林进龙, 何春梅, 杨书理, 等. 不同香型南路水仙茶香气分析[J]. 南方农业学报, 2023, 54(5): 1488−1498. [LIN Jinlong, HE Chunmei, YANG Shuli, et al. Aroma analysis on Nanlu Shuixian tea in different types[J]. Journal of Southern Agriculture, 2023, 54(5): 1488−1498.]
[35] 张莉, 肖静, 胡鸿飞, 等. 4 个品种猕猴桃发酵酒品质评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(4): 146−154. [ZHANG Li, XIAO Jing, HU Hongfei, et al. Evaluation of the quality of fermented kiwi wines made from four kiwi fruit cultivars[J]. Journal of Northwest A& F University (Natural Science Edition), 2024, 52(4): 146−154.]
[36] WU Qingyang, ZHOU Ziwei, ZHANG Yining, et al. Identification of key components responsible for the aromatic quality of Jinmudan black tea by means of molecular sensory science[J]. Foods, 2023, 12(9): 1794.
[37] 徐梦婷, 谷梦雅, 陈静, 等. 基于代谢组学的金牡丹和金观音高香红茶风味品质解析[J]. 食品科学, 2024, 45(19): 150−161. [XU Mengting, GU Mengya, CHEN Jing, et al. Flavor quality analysis of the high-aroma black tea cultivars 'Jinmudan' and 'Jinguanyin' using metabolomics[J]. Food Science, 2024, 45(19): 150−161.]
[38] 邵淑贤, 陈潇敏, 林燕萍, 等. 不同产地黄观音乌龙茶的广泛靶向代谢组学分析[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(9): 57−67. [SHAO Shuxian, CHEN Xiaomin, LIN Yanping, et al. Widely targeted metabolomic analysis of Huang Guanyin Oolong tea from different areas[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(9): 57−67.]
[39] 占鑫怡, 杨云, 陈彬, 等. 不同摇青程度春闽闽北乌龙茶品质差异分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(11): 271−279. [ZHAN Xinyi, YANG Yun, CHEN Bin, et al. Difference analysis of major quality components in different turning over intensities of Chungui Oolong tea in northern Fujian[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(11): 271−279.]
[40] 何春梅, 林进龙, 丁凤娇, 等. 安溪铁观音香气如兰似桂的化学机理分析[J]. 茶叶学报, 2023, 64(4): 1−13. [HE Chunmei, LIN Jinlong, DING Fengjiao, et al. Chemistry of orchid-and-*Osmanthus* fragrance of Anxi Tieguanyin tea[J]. Acta Tea Sinica, 2023, 64(4): 1−13.]
[41] 徐邢燕, 陈思, 俞晓敏, 等. 不同烘焙程度与等级武夷肉桂茶品质差异分析[J]. 食品科学, 2020, 41(13): 22−28. [XU Xingyan, CHEN Si, YU Xiaomin, et al. Quality differences of different grades of Wuyi Rougui tea with different baking degrees[J]. Food Science, 2020, 41(13): 22−28.]
[42] LU Xiaofeng, LIN Yanyan, TUO Yanming, et al. Optimizing processing techniques of Oolong tea balancing between high retention of catechins and sensory quality[J]. Foods, 2023, 12(23): 4334.
[43] 廉明, 吕世懂, 吴远双, 等. 三种不同发酵程度的台湾乌龙茶香气成分对比研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(3): 297−302. [LIAN Ming, LÜ Shidong, WU Yuanshuang, et al. Comparative analysis of aroma characteristics of three kinds of Taiwan Oolong tea from different fermentation degree[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(3): 297−302.]
[44] 张汇源, 马宽, 高婧, 等. 不同等级径山茶特征香气成分分析[J]. 茶叶科学, 2024, 44(1): 101−118. [ZHANG Huiyuan, MA Kuan, GAO Jing, et al. Analysis of the major characteristic aroma compounds in different grades of Jingshan tea[J]. Journal of Tea Science, 2024, 44(1): 101−118.]
[45] DUAN Yue, YU Mingguang, RAZA J, et al. Effect of roasting time on aroma quality of Shuixian Wuyi rock tea (*Camellia sinensis*)[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 135: 106662.