杨晶晶, 刘宝贵, 王云仙, 等. 不同产地红碎茶风味品质成分差异分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(14): 344−356. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060306

YANG Jingjing, LIU Baogui, WANG Yunxian, et al. Analysis of Flavor and Quality Differences in Broken Black Tea from Different Geographical Origins[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(14): 344−356. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060306

· 分析检测 ·

不同产地红碎茶风味品质成分差异分析

杨晶晶, 刘宝贵, 王云仙, 赵云雄, 李金婷, 高斯婷, 覃仁源, 冯红钰*

（广西南亚热带农业科学研究所, 广西崇左 532415）

摘　要: 为探究不同地区红碎茶风味品质特征，选取云南、广西、贵州、湖北 4 个地区的代表性红碎茶样品，采用感官评价、理化成分和香气物质检测，结合化学计量学法、滋味活度值（taste activity value，TAV）和香气活度值（odor activity value，OAV）分析不同产地红碎茶品质差异。结果表明：不同产地红碎茶滋味与风味品质有较大差异，云南茶样感官评分最高，湖北茶样咖啡碱（1.47%）和水浸出物（51.01%）含量最高，广西茶样茶多酚（17.28%）、儿茶素总量（10594.58 μg/g）和游离氨基酸总量（17913.09 μg/g）高于其他地区，咖啡碱、表没食子儿茶素（epigallocatechin，EGC）、表没食子儿茶素没食子酸酯（epigallocatechin gallate，EGCG）、表儿茶素（epicatechin，EC）、表儿茶素没食子酸酯（epicatechin gallate，ECG）、儿茶素没食子酸酯（catechin gallate，CG）、儿茶素（catechin，C）、异亮氨酸、赖氨酸、天冬氨酸、谷氨酸、丙氨酸、茶氨酸（TAV>1）13 个物质是茶汤滋味主要贡献物质；共鉴定出 76 种香气成分，贵州茶样香气成分含量（4898.50 μg/kg）最高，醇类和醛类是主要香气化合物，其中芳樟醇、己醛、反式-橙花叔醇、月桂烯、3,5-辛二烯-2-酮、β-紫罗兰酮、苯甲醛、苯甲醇、β-环柠檬醛（OAV>10）9 种成分是红碎茶甜香、花香的关键香气成分，芳樟醇和 3,5-辛二烯-2-酮（OAV>100）分别是广西和云南茶样甜香、花香的重要贡献物质，顺式-4-庚烯醛是贵州茶样的特征性香气物质，综合湖北与云南两组茶样香气类型较为相似。本研究结果综合分析了不同产地红碎茶品质成分差异，进一步丰富了红碎茶风味品质特征的研究理论。

关键词: 红碎茶, 风味品质, 滋味活度值, 香气活度值, 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用仪

中图分类号: TS272.5　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)14−0344−13

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060306　　本文网刊:

Analysis of Flavor and Quality Differences in Broken Black Tea from Different Geographical Origins

YANG Jingjing, LIU Baogui, WANG Yunxian, ZHAO Yunxiong, LI Jinting, GAO Siting, QIN Renyuan, FENG Hongyu*

（Guangxi South Subtropical Agricultural Science Research Institute, Chongzuo 532415, China）

Abstract: To investigate the flavor quality characteristics of broken black tea from different regions, representative samples from four regions, namely, Yunnan, Guangxi, Guizhou, and Hubei, were selected to analyze the quality differences of broken black tea from different origins employing sensory evaluation, chemical composition and aroma compound detection, combined with chemometric methodologies, taste activity value (TAV), and odor activity value (OAV). Results showed that significant disparities existed in the taste and flavor quality components of broken black tea across different regions. For instance, the Yunnan sample had the highest sensory evaluation scores, while the Hubei sample had the highest contents of caffeine (1.47%) and water extract levels (51.01%). The Guangxi sample exhibited elevated concentrations of tea polyphenols (17.28%), total catechins (10594.58 μg/g) and free amino acids (17913.09 μg/g) relative to other regions.

收稿日期: 2025−06−25

基金项目: 广西农业科学院基本科研业务专项（桂农科 2025YP112, 2021YT167, NYS2025ST08, NYS2025ZL02）; 广西重点研发项目（桂科 AB24010193, AB24010254, AD23026328）; 茶叶产业科技先锋队项目（桂农科盟 202506-1）。

作者简介: 杨晶晶（1995−）, 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 茶叶加工及应用技术, E-mail: 1980009454@qq.com。

*** 通信作者:** 冯红钰（1982−）, 女, 本科, 高级农艺师, 研究方向: 茶叶加工及应用技术, E-mail: 2532942886@qq.com。

Moreover, 13 substances-caffeine, epigallocatechin (EGC), epigallocatechin gallate (EGCG), epicatechin (EC), epigallocatechin gallate (ECG), catechin gallate (CG), catechin (C), isoleucine, lysine, aspartic acid, glutamic acid, alanine, theanine (TAV>1) -were identified as the main contributors to the taste substances. A total of 76 aroma components were identified across the samples, with alcohols and aldehydes emerging as the primary aroma constituents, while the Guizhou sample had the highest content of aroma components (4898.50 μg/kg). Notable contributors to the sweet and floral aroma of broken black tea included linalool, hexanal, trans-nerolidol, myrcene, 3,5-octadien-2-one, β-ionone, benzaldehyde, benzyl alcohol, and β-cyclocitral, 9 components (OAV>10). The Guangxi and Yunnan samples derived their rich floral and sweet aroma from methyl linalool and 3,5-octadien-2-one (OAV>100), respectively. Characteristic aroma substances were also observed, with cis-4-heptenal distinguishing the Guizhou sample. Additionally, the combined aroma compositions of the two groups of broken black tea samples from Hubei and Yunnan were relatively similar. Overall, this study provides a comprehensive analysis of flavor and quality in broken black tea across different regions, which enhancing the understanding of its quality components.

Key words: broken black tea; flavor quality; taste activity value (TAV); odor activity value (OAV); headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS)

红茶属于全发酵茶，因香气高扬，滋味甜爽的独特品质特征，深受广大消费者的喜爱，是世界上消费区域最广的茶类[1]，全球茶叶生产量和消费量均排在首位，据中国茶叶流通协会统计，2023 年中国茶叶产量为 355 万吨，其中红茶产量 49.1 万吨，内销量 37.9 万吨，产销量仅次于绿茶。红茶可分为工夫红茶、小种红茶、红碎茶，生产红茶的地区较多，有福建、安徽、浙江、云南、海南等多个省份，大多数地区以生产工夫红茶为主，仅少部分地区生产红碎茶。

红碎茶是国际市场的大宗产品，我国从 20 世纪 50 年代开始试制生产，以具备优良品质特征和丰富生化成分的云南大叶种（*Camellia sinensis* var. assamica）为原料加工而成的压碎撕裂卷曲（crush, tear and curl, CTC）红碎茶颗粒紧结，香气馥郁，汤色红亮，滋味浓强鲜爽，但在加工技术、品质与价格上难以与斯里兰卡、肯尼亚、印度尼西亚等地相匹敌[2]。提升红碎茶品质的报道较多，如桂香红碎茶加工新技术研究[3]、高茶黄素大叶种红碎茶的研制[4]、不同贮青温度及方式对红碎茶品质的影响[5]、不同萎凋时间对 CTC 红碎茶品质的影响[6]、传统加工（orthodox, OTD）红碎茶与 CTC 红碎茶香气成分比较[7] 等，但这些研究主要阐述加工过程对红碎茶品质的影响。红碎茶品质与茶树品种密切相关，邓少春等[8] 对不同茶树新品种加工手工红碎茶品质进行比较，发现‘云抗 12 号’品质较优；李金龙等[9] 用气相色谱-质谱法（gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS）测定斯里兰卡红碎茶及滇红碎茶样品的香气成分；杨盛美等[10] 对比云南省 11 个县茶树种质资源的红碎茶香气成分，得出香气地方风格与各地栽培的地方品种资源不同有关，然而这些品质差异研究对象主要是以云南区域不同茶树品种及产地，或与国外红碎茶样进行香气成分差异比较分析，且缺少结合滋味物质的对比分析，而对云南以外不同产地以种植云南大叶种为原料加工红碎茶品质之间的差异研究还鲜少，贵州等地的红碎茶品质分析还未见报道。

红碎茶滋味和香气在五项因子感官审评中各占比 30%，是决定茶叶风味特征的重要因子。本研究以云南及广西、贵州、湖北 4 个代表性地区引种种植的云南大叶种茶树鲜叶为原料制备 CTC 红碎茶，采用感官评价、高效液相色谱（high performance liquid chromatography, HPLC）、顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用（headspace solid phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS）探究不同产地红碎茶感官品质、理化成分、滋味物质、香气成分的影响，并结合化学计量学法、滋味活度值（taste activity value, TAV）、香气活度值（odor activity value, OAV）分析不同产地红碎茶品质差异，综合分析评价不同产地红碎茶滋味物质及关键香气成分与感官特征的差异性，为红碎茶品质控制提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

红碎茶　以机采茶树鲜叶为原料，一芽 3~5 叶茶青进行红碎茶加工，制成 CTC 红碎茶，样品信息如表 1 所示；没食子儿茶素（gallocatechin, GC）、表没食子儿茶素（epigallocatechin, EGC）、儿茶素（catechin, C）、表儿茶素（epicatechin, EC）、表没食子儿茶素没食子酸酯（epigallocatechin gallate, EGCG）、没食子儿茶素没食子酸酯（gallocatechin gallate, GCG）、表儿茶素没食子酸酯（epicatechin gallate, ECG）、儿茶素没食子酸酯（catechin gallate, CG）、咖啡碱标准品（纯度≥99%）　上海源叶生物科技有限公司；17 种氨基酸标准品（纯度≥99.9%）　维百奥北京生物科技有限公司；C_8~C_{40} 正构烷烃（色谱纯）　美国

表 1　红碎茶样品信息

Table 1　Sample information of broken black tea

样品编号	产地	样品来源
GXMY	广西南宁	广西南宁茗韵茶叶有限公司
GZZS	贵州遵义	贵州遵义紫山茶叶有限公司
HBDR	湖北利川	湖北鼎融茶叶公司
YMHY	云南德宏	云南芒市宏跃茶叶公司

TMstandard 公司; 乙腈、甲醇 色谱纯, 欧森巴克(天津)科技发展有限公司; 正亮氨酸、三乙胺、正己烷、无水乙醇、冰醋酸、无水乙酸钠、盐酸 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 异硫氰酸苯酯(纯度≥99.9%) 美国 Sigma-Aldrich 公司。

Agilent1100 高效液相色谱仪、7890A+5975C 气相色谱-质谱联用仪、Compass C_{18}(2)反相色谱柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm) 美国 Agilent 公司; Supelco 萃取针(50/30 μm DVB/CAR/PDMS) 美国 Sigma-Aldrich 公司; 固相微萃取 SPME 手柄 上海安谱实验科技股份有限公司; Infinite M200 PRO 多功能酶标仪 奥地利 Tecan 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 感官审评方法 茶叶审评方法按照 GB/T 23776-2018《茶叶感官审评方法》中的红碎茶审评法进行审评, 由经验丰富的 5 名高级评茶员(2 男 3 女)对茶样的外形、汤色、香气、滋味、叶底进行感官审评。

1.2.2 红碎茶样品主要内含物测定 将红碎茶样品研磨后过 60 目筛, 参照 GB/T 8305-2013《茶 水浸出物测定》、GB/T 8314-2013《茶 游离氨基酸总量的测定》、GB/T 8312-2013《茶 咖啡碱测定》、GB/T 8313-2018《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》, 检测茶叶中的游离氨基酸、水浸出物、咖啡碱、茶多酚和儿茶素类的含量。氨基酸组分含量参照 GB/T 30987-2020《植物中游离氨基酸的测定》中高效液相色谱法(第二法)测定: 氨基酸分析柱为赛分 Amethyst C_{18}-H(250 mm×4.6 mm, 5 μm), 检测波长为 254 nm, 柱温 40 ℃、流速 1 mL/min, 进样体积 10 μL, 流动相A: 称取 7.6g 无水乙酸钠, 用 925 mL 纯净水溶解, 后用冰醋酸调节 pH 至 6.5, 后加入 70 mL 乙腈, 混匀, 并用 0.45 μm 滤膜过滤; 流动相 B: 80% 乙腈。

1.2.3 TAV 的计算 TAV 用来表示滋味物质对样品整体滋味的贡献程度, 按照下式计算:

$$TAV = \frac{T_x}{T} \quad \text{式(1)}$$

式中: T_X 为滋味物质的含量(mg/g); T 为滋味物质的阈值(mg/g)。

1.2.4 挥发性物质测定 称取 2.00 g 茶粉放到顶空瓶中, 参考邵淑贤等[11] 方法并作一定调整, 加入 100 μg/mL 正丁烷(C_4H_{10})溶液 10 μL 作为内标物, 在 60 ℃ 恒温条件振荡 5 min, 使用 Supelco 萃取头(50/30 μm DVB/CAR/PDMS), 距离样品 0.5 cm 高度萃取, 萃取温度 60 ℃, 萃取 40 min。采样前萃取头在气相色谱进样口老化 16 min, 老化温度 250 ℃。

GC 条件: HP-5MS 色谱柱(30 m×250 μm×0.25 μm); 前进样口温度 280 ℃; 载气氦气(99.999%); 流量 3 mL/min; 分流比为 8∶1; 进样量 1 μL; 程序升温: 起始温度 50 ℃ 保持 5 min, 以 5 ℃/min 升温至 210 ℃, 保持 3 min; 再以 10 ℃/min 升温至 250 ℃, 保持 3 min。

MS 条件: 安捷伦 GC-MS 气质联用仪 7894A+5975C, 传输线温度 280 ℃, 离子源温度 230 ℃, 四级杆温度 150 ℃, 电离模式 EI, 溶剂延迟时间 2 min, 电离电压−70 eV, 全扫描模式, 质量分析范围 m/z 50~550。

1.2.5 挥发性物质定性定量和 OAV 分析 GC-MS 数据检测结果通过 NIST14 谱库进行检索比对, 解析图谱后筛选匹配度大于 80% 的物质, 根据挥发性成分的保留时间、基峰、质核比等对香气物质的化学结构和名称加以确认, 将 C_8~C_{40} 正构烷烃单独进样, 检测条件与样品检测条件一致, 参考 Yang 等[12] 的方法计算保留指数(retention index, RI), 按公式(2)计算, 结果与数据库中化合物的保留指数进行比对, 结合相关文献和数据库对各香气成分进行定性, 每种挥发性物质浓度根据内标物峰面积按式(3)计算[13]; 挥发性物质 OAV 值按公式(4)计算。

$$RI = \frac{100\times(t_x - t_n)}{t_{n+1} - t_n} + 100n \quad \text{式(2)}$$

式中: t_x 为待测物保留时间; t_n 为碳原子数是 n 的正构烷烃的保留时间; t_{n+1} 为碳原子是(n+1)的正构烷烃的保留时间。

$$\text{香气成分质量浓度}(\mu g/kg) = \frac{\text{各成分峰面积}}{\text{内标物峰面积}} \times \text{内标物质量浓度} \quad \text{式(3)}$$

$$OAV = \frac{C_x}{OT} \quad \text{式(4)}$$

式中: C_X 为香气物质的浓度(μg/kg); OT 为香气物质在水中的阈值(μg/kg)。

1.3 数据处理

实验结果取每个样品独立重复测定 3 次平行的平均值。采用 SPSS Statistics 26.0 中 Duncan 检验进行差异显著性分析(P<0.05), 采用 SIMCA 14.1、Origin 2025 和 TBtools 等进行数据统计分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 不同产地红碎茶感官审评结果

红碎茶感官审评结果见表 2, 不同产地红碎茶感官审评结果存在差异, GXMY 与 HBDR 茶样的外形特征相近, GXMY 外形颗粒较紧实、色润、较匀净, HBDR 颗粒较紧实、色红润、尚匀净, GZZS 外形匀整度表现较差, 颗粒紧结带梗。香气因子表现上, YMHY 与 HBDR 茶样均带有花香, GXMY 与 GZZS 茶样仅呈现甜香。GZZS 茶样汤色表现较差, 呈较红亮, 亮度低色泽暗, YMHY 汤色红明亮, 优于其他茶样。GXMY 滋味浓强鲜爽, 口感最佳; YMHY 滋味浓强鲜爽但醇厚口感次之, 这可能是由于

表 2　不同产地红碎茶感官审评结果

Table 2　Sensory evaluation results of broken black tea from different geographical origins

样品	外形(20%)		香气(30%)		汤色(10%)		滋味(30%)		叶底(10%)		总分	排名
	评价	得分	评价	得分	评价	得分	评价	得分	评价	得分		
GXMY	颗粒较紧实、色润、较匀净	88	甜香，香高	90	红亮	90	浓强鲜爽	92	红匀亮	90	90.2	2
GZZS	颗粒紧结带梗、色润、尚匀净	85	甜香，香高	90	较红亮	86	尚浓厚	88	红匀尚明亮	88	87.8	4
HBDR	颗粒较紧实、色红润、尚匀净	88	甜香，带花香，较香高	88	红浓亮	88	鲜爽较浓强	90	红匀亮	90	88.8	3
YMHY	颗粒紧实、色红润、匀净	92	甜香带花香，香高持久	92	红明亮	92	浓强鲜爽，醇厚	90	红匀明亮	91	91.3	1

YMHY 茶树在高海拔地区多云雾，生长缓慢，茶树鲜叶中内含物质积累形成[14]。GXMY 与 HBDR 叶底特征相近，红匀亮且柔软，YMHY 叶底红匀明亮且匀整柔软。在四个茶样中，YMHY 茶样得分最高，其次是 GXMY，两个茶样综合得分均在 90 分以上，GZZS 感官评分最低，这可能与原料嫩度有关，GZZS 茶样梗多匀整度差，叶底略硬，或许说明嫩度是形成红碎茶差异的主要因素，已有报道证明茶鲜叶采摘时间相同但采摘嫩度不同加工制作的红茶外形、香气、汤色、滋味和叶底均具有明显差异[15]。

2.2　不同产地红碎茶内含物比较

咖啡碱和儿茶素类是红茶的重要滋味物质，结果见表 3，不同产地红碎茶在水浸出物、茶多酚及咖啡碱含量上均存在显著差异(P<0.05)。HBDR(51.01%)茶样的水浸出物含量最高，YMHY(49.14%)次之，其次是 GXMY(46.37%)和 GZZS(40.29%)，这可能是 HBDR 茶样滋味更醇厚的原因之一。茶多酚是茶叶中含量最多的可溶性成分，也是最主要的呈味物质之一，表现为苦涩且具有收敛性，含量的高低决定着茶汤的苦涩程度，亦是主要的特征成分之一[16−17]，就茶多酚而言，GXMY 茶样中的茶多酚含量最高(17.28%)，其次是 HBDR(15.23%)、YMHY(14.12%)、GZZS(11.66%)，这可能是 GXMY 茶样茶汤收敛性更强及苦涩原因。咖啡碱、茶碱是茶叶中的主要生物碱，具有较好的生理活性[18]，刘湛军等[19]研究发现，加工工艺的处理对咖啡碱含量影响很小，其含量主要来源于原料自身，细嫩的新梢及叶片含量多，而茎秆、花、果中含量少。已有研究证实，当红茶咖啡碱含量高于 0.2%，容易与儿茶素、茶黄素、茶红素等通过氢键和疏水作用结合形成茶乳凝复合物，使茶汤由清转浊，出现“冷后浑”[20]，4 组红碎茶样品咖啡碱含量均高于 0.2%，含量从高到底依次为 HBDR(1.47%)、GXMY(1.38%)、YMHY(1.23%)、GZZS(1.01%)。

表 3　不同产地红碎茶主要内含物分析

Table 3　Analysis of chemical components of broken black tea from different geographical origins

指标	含量(%)			
	GXMY	GZZS	HBDR	YMHY
水浸出物	46.37±0.28^{c}	40.29±0.15^{d}	51.01±0.18^{a}	49.14±0.19^{b}
茶多酚	17.28±0.11^{a}	11.66±0.11^{d}	15.23±0.31^{b}	14.12±0.16^{c}
咖啡碱	1.38±0.00^{b}	1.01±0.00^{d}	1.47±0.00^{a}	1.23±0.00^{c}

注：同行不同字母表示差异显著(P<0.05)，表4~表5同。

表 4 显示，共检测出 8 种儿茶素物质，其中顺式儿茶素有 4 种：EGC、EGCG、EC、ECG；反式儿茶素有 4 种：GC、C、GCG、CG。茶多酚是多酚类物质的总称，以儿茶素为主，具有苦和涩双重滋味属性，是茶叶中主要的功能性成分[21−22]，同时也是茶汤呈现涩味的重要物质之一。儿茶素含量与原料品种有关，另一方面在发酵过程中，由于酶促反应，儿茶素类不断转化为茶黄素、茶红素、茶褐素[23]，也是儿茶素总量低的原因。

表 4　不同产地红碎茶儿茶素类含量分析

Table 4　Analysis of catechins content of broken black tea from different geographical origins

指标	含量(μg/g)			
	GXMY	GZZS	HBDR	YMHY
GC	46.65±1.29^{a}	14.19±0.05^{c}	18.58±0.17^{b}	15.67±0.36^{c}
EGC	459.47±0.74^{c}	805.34±1.03^{b}	1281.46±4.18^{a}	382.64±2.49^{d}
C	646.24±0.29^{b}	3.75±0.20^{d}	12.72±0.14^{c}	962.15±0.05^{a}
EGCG	2642.10±4.66^{a}	526.55±0.17^{c}	500.85±0.50^{d}	1638.27±1.37^{b}
EC	1342.79±1.06^{b}	141.50±0.12^{d}	231.51±0.20^{c}	2243.53±3.65^{a}
GCG	36.52±1.19^{a}	35.64±0.04^{a}	15.81±0.05^{b}	16.06±0.73^{b}
ECG	5225.57±1.87^{a}	302.53±0.43^{c}	296.36±0.63^{d}	4978.70±0.07^{b}
CG	196.24±0.31^{d}	296.95±0.49^{b}	355.80±0.08^{a}	246.06±0.16^{c}
酯型儿茶素	8100.43±5.04^{a}	1134.66±1.05^{d}	1168.81±0.11^{c}	6879.09±2.19^{b}
非酯型儿茶素	2077.22±1.04^{b}	964.78±1.67^{d}	1544.26±3.68^{c}	3603.98±6.45^{a}
儿茶素总量	10594.58±4.36^{a}	2099.45±2.72^{d}	2713.07±3.79^{c}	10483.07±8.63^{b}
酯型儿茶素/非酯型儿茶素	3.90	1.18	0.76	1.91

已有研究表明，儿茶素的苦涩味主要由酯型儿茶素提供，酯型儿茶素与非酯型儿茶素的比值是衡量茶汤滋味苦涩度和回甘性的主要参数[24−25]，EGCG、GCG、ECG、CG 为酯型儿茶素，不同的儿茶素单体有不同的苦涩味倾向，EGCG 苦味强度高于涩味强度，ECG、EGC 与 EGCG 表现相反，涩味更突出。GXMY 的酯型儿茶素含量(8100.43 μg/g)最高，其次是 YMHY(6879.09 μg/g)，与 GZZS(1134.66 μg/g)、HBDR(1168.81 μg/g)含量存在显著性差异(P<0.05)。不同地区间酯型儿茶素 EGCG 含量差异较大，GXMY 含量(2642.10 μg/g)最高，约是 HBDR(500.85 μg/g)的 5 倍；GCG 含量中，GXMY 含量(36.52 μg/g)最高，与 GZZS 含量(35.64 μg/g)无显著性差异(P>0.05)，HBDR 含量(15.81 μg/g)最低；

GXMY 中 ECG含量(5225.57 μg/g)最高; HBDR 中 CG 含量(355.80 μg/g)最高。综上, 儿茶素总含量从高到低依次为 GXMY(10594.58 μg/g)、YMHY(10483.07 μg/g)、HBDR(2713.07 μg/g)、GZZS(2099.45 μg/g), 其中 GXMY 茶样中儿茶素总量显著高于 HBDR 和 GZZS, 含量接近于它们的 3 倍以上, 这与感官审评在滋味方面 GXMY 茶样苦涩感、收敛性强于其他地区的结果一致。肖巧梅等[26] 分别对红碎茶 2 号(39.87 mg/g)、红碎茶 3 号(96.93 mg/g)、红碎茶 5 号(27.36 mg/g)以及末茶(24.76 mg/g)的儿茶素总量进行测定, 其中红碎茶 3 号儿茶素含量最高, 远高于本研究 4 组茶样, 这可能是原料嫩度差异造成的, 前者所用原料为一芽二、三叶茶青, 原料嫩度越高, 叶片占比越高, 儿茶素总量越高。石琳琳等[2] 从鲜叶、萎凋、揉切、发酵、成品等红碎茶加工过程中发现, EC、EGCG、GCG、ECG 等含量在不断降低。酯型儿茶素与非酯型儿茶素比值越高发酵程度越低, 涩感越明显, GXMY 组茶样最高, HBDR 最低。

游离氨基酸是茶中的主要呈味物质之一, 赋予茶叶甜香、蜜香的口感, 红碎茶口感呈现醇厚饱满、浓强带鲜甜就是因为其中丰富的氨基酸。由表 5 可以看出, GXMY、GZZS、HBDR、YMHY4 个茶样均检测出 17 种氨基酸组分, 包含鲜味、甜味、苦味、无味 4 种类型, 鲜味和甜味氨基酸可以削弱咖啡碱的苦味, 提高茶汤滋味品质[27−28]。GXMY 茶样中总氨基酸含量最高, 为 17913.09 μg/g, 其次为 HBDR(14698.43 μg/g)、YMHY(14113.33 μg/g)与 GZZS(9473.79 μg/g), 不同地区之间氨基酸含量上存在显著差异(P<0.05)。茶样中鲜味氨基酸含量>甜味氨基酸>苦味氨基酸>无味氨基酸, 鲜味氨基酸含量最高, 表现出较好的风味口感。在 4 种类型的氨基酸中, GXMY 茶样中鲜味、甜味和无味氨基酸含量均明显较高, 其中鲜味氨基酸占比最高达 53.72%, 甜味氨基酸占比 26.13%, 苦味氨基酸含量(2014.64 μg/g)较高, 占比 11.25%, 与咖啡碱共同呈现苦味, 这与审评滋味结果 GXMY 茶样苦味明显、收敛性强于其他地区, 滋味浓强、醇厚一致。GZZS 茶样总氨基酸含量和鲜味氨基酸、苦味氨基酸、甜味氨基酸均低于其他地区, 与感官审评茶汤滋味较淡相符。

表 5 不同产地红碎茶中氨基酸的含量

Table 5 Content of free amino acids in broken black tea from different geographical origins

指标	含量(μg/g)			
	GXMY	GZZS	HBDR	YMHY
天冬氨酸	1666.15±0.05^{a}	645.20±6.26^{c}	1667.79±0.36^{a}	1300.20±5.98^{b}
谷氨酸	1896.16±1.38^{a}	1085.57±4.25^{d}	1596.50±0.23^{b}	1232.03±1.95^{c}
丝氨酸	398.22±1.31^{a}	106.18±2.93^{d}	257.60±2.33^{c}	332.00±0.96^{b}
甘氨酸	19.05±0.03^{c}	31.90±1.34^{a}	21.28±0.38^{b}	8.82±0.14^{d}
组氨酸	33.37±0.21^{c}	52.08±1.58^{a}	49.10±0.62^{b}	50.92±1.79^{ab}
精氨酸	215.75±0.17^{c}	187.05±1.57^{d}	390.38±0.75^{a}	267.71±5.54^{b}
苏氨酸	94.65±1.53^{b}	10.03±0.38^{d}	130.08±0.66^{a}	80.50±1.05^{c}
丙氨酸	4043.76±2.22^{a}	2794.65±0.94^{d}	3898.22±9.60^{b}	3863.69±1.88^{c}
脯氨酸	125.31±0.77^{b}	54.35±0.63^{d}	167.90±0.38^{a}	94.92±0.59^{c}
酪氨酸	110.84±0.53^{c}	40.43±1.27^{d}	151.21±1.41^{a}	125.13±0.63^{b}
缬氨酸	138.08±1.01^{b}	45.07±3.81^{d}	220.93±1.08^{a}	115.81±1.08^{c}
蛋氨酸	36.59±0.10^{b}	16.09±0.43^{c}	126.61±3.31^{a}	39.02±0.40^{b}
异亮氨酸	1222.25±1.37^{b}	553.89±1.42^{d}	821.82±7.15^{c}	1363.10±1.13^{a}
亮氨酸	126.99±1.28^{b}	66.65±1.11^{d}	141.57±0.29^{a}	104.85±0.08^{c}
苯丙氨酸	241.62±1.17^{a}	35.19±2.36^{d}	180.96±1.77^{b}	142.34±0.68^{c}
赖氨酸	1483.74±0.21^{a}	1318.01±1.55^{d}	1373.73±2.18^{b}	1345.58±1.52^{c}
茶氨酸	6060.56±26.57^{a}	2431.45±25.67^{d}	3494.74±0.19^{c}	3646.73±24.62^{b}
总鲜味氨基酸	9622.87±25.25^{a}	4162.22±6.54^{d}	6759.03±0.32^{b}	6178.95±16.69^{c}
总甜味氨基酸	4681.00±1.63^{a}	2997.12±0.41^{d}	4483.09±6.60^{b}	4379.94±2.42^{c}
总苦味氨基酸	2014.64±2.15^{a}	956.02±2.22^{d}	1931.37±11.57^{c}	2083.74±4.91^{b}
总必需氨基酸	3343.90±0.45^{a}	2044.93±1.02^{d}	3003.69±12.96^{c}	3191.19±4.99^{b}
总氨基酸	17913.09±24.41^{a}	9473.79±4.21^{d}	14698.43±18.63^{b}	14113.33±18.30^{c}

2.3 不同产地红碎茶关键滋味成分比较

TAV 是综合考虑滋味成分的含量和呈味阈值, 避免仅以滋味成分含量反映其对滋味贡献的误区, 通过计算 TAV 明确各组分对滋味属性的贡献。当 TAV>1 时, 表示该物质对茶汤滋味品质有显著贡献, 为关键风味成分, 且 TAV 值越大, 说明该物质成分对茶汤滋味贡献度越大。当 0.1<TAV<1 时, 为修饰性风味成分; 当 TAV<0.1 时, 为潜在风味成分[29]。

由表 6 可知, 有 13 种成分 TAV>1, 它们构成茶样滋味物质的关键成分, 其中咖啡碱、EGC、EGCG、EC、ECG、CG、C、异亮氨酸、赖氨酸 9 个物质是茶汤苦涩味主要贡献物质; 天冬氨酸、谷氨酸、茶氨酸为鲜味主要贡献成分; 甜味氨基酸仅有丙氨酸 TAV 值介于 4.66~6.74, 是甜味主要贡献物质。修饰性成分有 8 种, 其中 GCG、组氨酸、精氨酸、酪氨酸、缬氨酸、苯丙氨酸是茶汤苦味的次要贡献物质; 苏氨酸、丝氨酸是茶汤甜味的次要贡献物质。潜在成分有甘氨酸、脯氨酸、蛋氨酸、亮氨酸 4 种。GXMY 和 YMHY 样品中关键滋味成分数量最多, 为 13 种; 其次是 HBDR 有 11 种; GZZS 样品关键滋味成分数量最少, 仅有 9 种, EC、天冬氨酸、异亮氨酸由GXMY 和 YMHY 样品中的关键成分转而呈现为修饰性成分, 而呈苦味有收敛感的 C 则呈现为潜在风味成分。YU 等[30] 认为, 涩、苦、鲜、甜、酸为红茶滋味主要表现, 其中涩味主要是由儿茶素等黄烷醇类呈现, 苦味是由儿茶素、咖啡碱和少量苦味氨基酸呈现, 甜味由可溶性糖和甜味氨基酸呈现, 酸味对滋味品质有负面影响。咖啡碱 TAV 值大于 100, 且在 4 组茶样中均有较高表现, 李家锋等[25] 在云南芽孢茶、白茶和滇红中也发现咖啡碱的 TAV 值最高, 与本研究结果一致; SCHARBERT 等[31] 通过滋味缺失实验发现, 咖啡碱是含有苦味的嘌呤碱, 能与涩味物质绿原酸形

表 6　不同产地红碎茶滋味化合物的 TAV 分析

Table 6　TAV analysis of flavor compounds in broken black tea f from different geographical origins

滋味物质	名称	阈值（μg/g）[21]	TAV				呈味特征[2]
			GXMY	GZZS	HBDR	YMHY	
关键成分	咖啡碱	100	137.94	100.70	146.93	123.28	苦味
	EGC	165	2.78	4.88	7.77	2.32	褶皱型收敛感、苦味
	EGCG	180	14.68	2.93	2.78	9.10	苦味、褶皱型收敛感
	EC	230	5.84	0.62	1.01	9.75	褶皱型收敛感
	ECG	200	26.13	1.51	1.48	24.89	褶皱型收敛感、苦味
	CG	110	1.78	2.45	3.23	2.24	苦味、收敛感
	C	290	2.23	<0.1	<0.1	3.32	褶皱型收敛感、苦味
修饰性成分	天冬氨酸	1000	1.67	0.65	1.67	1.30	鲜味
	谷氨酸	300	6.32	3.62	5.32	4.11	鲜味
	丙氨酸	600	6.74	4.66	6.50	6.44	甜味
	异亮氨酸	900	1.36	0.62	0.91	1.51	苦味
	赖氨酸	500	2.97	2.64	2.75	2.69	苦味
	茶氨酸	1050	5.77	2.32	3.33	3.47	鲜爽带甜
	GCG	180	0.20	0.20	<0.1	<0.1	褶皱型收敛感、苦味
	组氨酸	200	0.17	0.26	0.25	0.25	苦味
	精氨酸	500	0.43	0.37	0.78	0.54	苦味
	苏氨酸	2600	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	甜味
	酪氨酸	910	0.12	<0.1	0.17	0.14	苦味
	缬氨酸	400	0.35	0.11	0.55	0.29	苦味
	苯丙氨酸	900	0.27	<0.1	0.20	0.16	苦味
	丝氨酸	1500	0.27	<0.1	0.17	0.22	甜味
	甘氨酸	1300	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	甜味
潜在成分	脯氨酸	3000	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	甜味
	蛋氨酸	3000	<0.1	<0.11	<0.1	<0.1	苦味
	亮氨酸	1900	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	苦味

成络合物，降低茶汤的粗涩感，提高鲜爽度。EGCG 在 GXMY 样品中 TAV 值表现水平显著高于其他三组，呈现更明显的苦味；GXMY 和 YMHY 样品中 ECG 的 TAV 接近于 GZZS、HBDR 的 17 倍，涩味表现更明显，与感官审评结果一致。

2.4　不同产地红碎茶挥发性物质比较

不同产地的红碎茶通过 GC-MS 共鉴定出 76 种挥发性化合物，依据化合物官能团的不同分为 8 类，包括醇类 8 种、醛类 10 种、酸类 3 种、酮类 13 种、酯类 4 种、烯烃类 10 种、烷烃 20 种、其他 8 种，具体结果见表 7。为直观地观察挥发性香气成分的化合物种类、数量及含量分布，绘制堆叠柱状图、Venn 图和饼图。

由图 1a、图 1b 可知，不同产地红碎茶中香气成分的种类和含量有较大差异，其中 GXMY 样品 64 种、GZZS 样品 66 种、HBDR 和 YMHY 样品均为 71 种，各组间香气成分含量差异显著（P<0.05），香气质量浓度从高到低依次为 GZZS（4898.50 μg/kg）、HBDR（4808.40 μg/kg）、YMHY（4649.86 μg/kg）、GXMY（4569.40 μg/kg）。由图 1c 可以看出，4 组共有香气成分 55 种，占比 80.07%~90.63%，GXMY 分别与 GZZS、HBDR 和 YMHY 茶样共有 2 种、8 种和 7 种，GZZS 组与 HBDR 组和 YMHY 组分别共有 8 种和 7 种，HBDR 和 YMHY 茶样共有 14 种。2 个香气成分仅在 GZZS 样品检出，1 个香气成分仅在 YMHY 样品检出。

每类挥发性香气成分含量占比结果如图 2 所示，醇类和醛类在 4 种红碎茶中含量较高，醇类在 GXMY 和 YMHY 样品占主导地位，比例最高，醛类在 GZZS 和 HBDR 样品中比例含量最高，醇类物质主要呈现花果香特征[32]，这与林冬纯等[5] 对不同贮青

表 7　不同产地红碎茶香气成分及含量

Table 7　Aroma components of broken black tea from different geographical origins

序号	化合物	分子式	CAS	RI	保留时间（min）	含量（μg/kg）			
						GXMY	GZZS	HBDR	YMHY
1	1-辛烯-3-醇	$C_8H_{16}O$	3391-86-4	970	12.444	17.25±0.31^{d}	39.47±0.10^{a}	19.04±0.06^{c}	28.01±1.01^{b}
2	3-氨基苯甲醇	C_7H_9NO	1877-77-6	1405	15.549	19.72±0.14^{b}	–	11.38±0.45^{c}	27.41±0.08^{a}
3	苯甲醇	C_7H_8O	100-51-6	1035	16.941	88.12±0.33^{c}	212.41±0.34^{a}	102.38±0.33^{b}	85.96±0.72^{d}
4	芳樟醇	$C_{10}H_{18}O$	78-70-6	1098	17.942	877.11±2.94^{a}	59.70±0.43^{d}	293.05±3.82^{c}	491.21±7.25^{b}
5	反式-橙花叔醇	$C_{15}H_{26}O$	40716-66-3	1562	18.198	179.04±1.82^{d}	233.47±0.16^{c}	286.64±0.88^{b}	422.20±0.38^{a}
6	（3R,6S）-2,2,6-三甲基-6-乙烯基四氢-2H-吡喃-3醇	$C_{10}H_{18}O_2$	39028-58-5	1685	21.445	43.55±0.03^{b}	47.16±0.54^{a}	24.05±0.21^{c}	20.73±0.33^{d}
7	4-萜烯醇	$C_{10}H1_8O$	562-74-3	1117	21.496	40.65±0.21^{a}	10.69±0.09^{d}	29.54±0.48^{b}	24.49±0.07^{c}
8	3-（N-苄基-N-甲基）-1,2-丙二醇	$C_{11}H_{17}NO_2$	60278-98-0	1801	28.303	32.21±0.17^{c}	15.21±0.08^{d}	62.41±0.20^{b}	88.83±1.80^{a}
	醇类（8种）								
9	己醛	$C_6H_{12}O$	66-25-1	800	5.708	437.75±0.18^{c}	907.61±15.51^{a}	483.50±2.24^{b}	355.44±3.57^{d}
10	反式-2-己烯醛	$C_6H_{10}O$	6728-26-3	850	7.389	146.29±1.05^{b}	64.30±0.48^{d}	165.00±4.11^{a}	112.43±1.99^{c}
11	顺式-4-庚烯醛	$C_7H_{12}O$	18829-55-5	893	11.405	–	149.85±0.12	–	–
12	苯甲醛	C_7H_6O	100-52-7	960	11.514	–	32.79±0.30^{c}	68.89±0.27^{a}	35.25±1.04^{b}
13	反式-2-庚醛	$C_7H_{10}O$	18829-55-5	1050	13.862	75.10±0.25^{c}	176.52±0.16^{a}	74.44±0.16^{c}	100.59±0.73^{b}
14	苯乙醛	C_8H_8O	122-78-1	1045	15.273	–	–	25.17±0.11^{a}	17.60±0.14^{b}
15	反式-4-癸烯醛	$C_{10}H_{18}O$	65405-70-1	1260	15.934	193.47±0.44^{c}	252.51±0.94^{a}	220.82±0.06^{b}	166.19±1.47^{d}

续表 7

序号	化合物	分子式	CAS	RI	保留时间（min）	含量（μg/kg）			
						GXMY	GZZS	HBDR	YMHY
16	2,6,6-三甲基-1,3-环己二烯-1-甲醛	$C_{10}H_{14}O$	116-26-7	1200	22.529	–	–	7.35±0.25^{b}	14.47±0.11^{a}
17	*β*-环柠檬醛	$C_{10}H_{16}O$	432-25-7	1237	23.497	27.44±0.10^{d}	32.99±0.02^{c}	50.58±0.25^{b}	90.35±0.38^{a}
18	柠檬醛	$C_{10}H_{16}O$	5392-40-5	1256	25.974	7.61±0.01^{d}	18.48±0.21^{a}	15.55±0.82^{b}	14.20±0.25^{c}
	醛类（10种）								
19	己酸	$C_{6}H_{12}O_{2}$	142-62-1	990	13.124	–	529.94±6.90^{a}	–	86.74±0.61^{b}
20	亚麻酸	$C_{18}H_{30}O_{2}$	463-40-1	1680	16.537	38.69±0.16^{b}	617.13±8.28^{a}	27.95±0.25^{c}	8.35±0.01^{d}
21	棕榈酸	$C_{16}H_{32}O_{2}$	57-10-3	1960	31.074	38.01±0.28^{a}	15.06±0.03^{d}	27.13±0.22^{b}	22.47±0.07^{c}
	酸类（3种）								
22	3-（甲基环戊基）丙酮	$C_{9}H_{16}O$	24070-70-0	1150	9.076	75.45±0.70^{d}	129.61±0.49^{a}	112.55±0.24^{b}	91.72±2.75^{c}
23	甲基庚烯酮	$C_{8}H_{14}O$	110-93-0	980	12.771	83.64±0.38^{d}	275.61±0.91^{a}	161.13±0.90^{b}	89.92±1.77^{c}
24	2,2,6-三甲基环己酮	$C_{9}H_{16}O$	2408-37-9	1080	14.766	31.21±2.48^{a}	21.25±0.07^{c}	26.70±0.17^{b}	31.21±0.22^{a}
25	3,5-辛二烯-2-酮	$C_{8}H_{12}O$	30086-02-3	1100	16.652	124.98±1.34^{b}	–	127.45±3.15^{b}	230.77±0.09^{a}
26	香豆素	$C_{9}H_{6}O_{2}$	91-64-5	1430	17.672	40.06±0.16^{d}	122.24±0.31^{a}	63.82±0.48^{c}	71.03±1.49^{b}
27	1-乙基吡咯烷-2,5-二酮	$C_{6}H_{9}NO_{2}$	314-78-5	1100	19.597	7.23±0.04^{c}	4.60±0.04^{d}	33.69±0.24^{b}	43.35±0.11^{a}
28	2,6,6-三甲基-2-环己烯-1,4-二酮	$C_{9}H_{12}O_{2}$	1125-21-9	1350	19.969	–	15.82±0.10^{a}	11.05±0.28^{c}	13.19±0.21^{b}
29	4-异丙基环己-2-烯-1-酮	$C_{9}H_{14}O$	500-02-7	1233	21.958	20.69±0.10^{a}	4.89±0.05^{d}	17.48±0.01^{b}	14.59±0.15^{c}
30	(-)-马鞭草烯酮	$C_{10}H_{14}O$	1196-01-6	1210	23.01	10.08±0^{a}	3.20±0.02^{d}	8.96±0.01^{b}	4.75±0.03^{c}
31	*α*-紫罗酮	$C_{13}H_{20}O$	127-41-3	1425	32.601	13.21±0.09^{d}	18.54±0.07^{c}	26.58±0.19^{b}	43.53±0.57^{a}
32	香叶基丙酮	$C_{13}H_{22}O$	3796-70-1	1450	33.672	–	24.32±0.7^{a}	12.24±0.22^{b}	10.04±0.39^{c}
33	*β*-紫罗兰酮	$C_{13}H_{20}O$	79-77-6	1480	34.981	15.61±0.15^{d}	46.55±0.08^{c}	81.74±2.15^{b}	113.24±1.98^{a}
34	1,6,6-三甲基环己烯-3-酮	$C_{9}H_{14}O$	17299-41-1	1250	39.696	9.16±0.14^{a}	3.10±0.01^{d}	4.73±0.01^{b}	3.75±0.11^{c}
	酮类（13种）								
35	水杨酸甲酯	$C_{8}H_{8}O_{3}$	119-36-8	1190	22.368	9.72±0.02^{c}	22.93±0.05^{a}	7.14±0.10^{d}	18.65±0.22^{b}
36	1,7,7-三甲基-双环[2.2.1]庚-2-醇乙酸酯	$C_{12}H_{20}O_{2}$	92618-89-8	1285	26.487	26.07±0.22^{a}	7.08±0.06^{d}	19.09±0.47^{b}	17.40±0.27^{c}
37	二氢猕猴桃内酯	$C1_{1}H_{16}O2$	17092-92-1	1470	36.604	–	14.92±0.06^{c}	45.22±0.24^{b}	78.18±1.15^{a}
38	2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇双异丁酸酯	$C_{16}H_{30}O_{4}$	6846-50-0	1660	39.362	3.76±0.01^{b}	3.16±0^{c}	7.16±0.06^{a}	–
	酯类（4种）								
39	2,4-二甲基-1-庚烯	$C_{9}H_{18}$	19549-87-2	800	6.875	113.08±0.26^{a}	29.46±0.03^{d}	79.37±0.14^{c}	91.78±0.95^{b}
40	*β*-罗勒烯	$C_{10}H_{16}$	13877-91-3	1045	12.136	–	5.97±0.01^{b}	59.41±0.11^{a}	–
41	月桂烯	$C_{10}H_{16}$	123-35-3	985	12.867	113.92±0.29^{c}	76.68±0.41^{d}	217.31±2.96^{a}	130.88±1.23^{b}
42	(R)-(+)-柠檬烯	$C_{10}H_{16}$	5989-27-5	1020	14.484	285.03±5.22^{a}	44.25±1.85^{d}	243.84±4.59^{b}	142.73±0.33^{c}
43	1-甲基环丙烯	$C_{4}H_{6}$	3100-04-7	890	15.17	4.54±0.02^{c}	–	27.46±0.05^{b}	37.49±1.29^{a}
44	3-甲基-6-（1-甲基乙亚基）环己烯	$C_{10}H_{16}$	586-63-0	1015	17.313	–	76.94±0.34	–	–
45	1-十二碳烯	$C_{12}H_{24}$	112-41-4	1190	22.234	13.65±0.25^{a}	–	11.81±0.09^{b}	8.56±0.05^{c}
46	(+)-香橙烯	$C_{15}H_{24}$	489-39-4	1440	31.863	8.48±0.20^{a}	3.38±0.01^{d}	7.93±0^{b}	6.68±0.01^{c}
47	L-石竹烯	$C_{15}H_{24}$	87-44-5	1420	32.158	52.32±0.09^{a}	9.54±0.08^{d}	17.39±0.07^{b}	15.39±0.21^{c}
48	*α*-石竹烯	$C_{15}H_{24}$	6753-98-6	1450	33.563	68.87±2.00^{a}	20.08±0.17^{d}	45.61±0.42^{b}	38.94±0.46^{c}
	烯烃类（种10种）								
49	4-甲基-辛烷	$C_{9}H_{20}$	2216-34-4	860	7.6	120.69±0.31^{a}	–	96.36±0.18^{b}	80.70±0.06^{c}
50	癸烷	$C_{10}H_{22}$	124-18-5	1000	13.259	68.79±0.05^{b}	–	88.9±0.66^{a}	65.24±0.18^{c}
51	邻位伞花烃	$C_{10}H_{14}$	527-84-4	1020	14.311	119.41±0.49^{a}	19.50±0.23^{d}	98.11±4.64^{b}	68.56±0.46^{c}
52	4-甲基-癸烷	$C_{11}H_{24}$	2847-72-5	909	16.062	38.23±0.74^{a}	22.69±0.14^{c}	28.38±0.57^{b}	9.05±0.02^{d}
53	十二烷	$C_{12}H_{26}$	112-40-3	918	16.178	39.79±0.30^{c}	–	81.63±0.31^{a}	54.04±0.64^{b}
54	2-甲基癸烷	$C_{11}H_{24}$	6975-98-0	1050	16.229	32.39±0.55^{a}	7.49±0.09^{b}	–	–
55	3,7-二甲基癸烷	$C_{12}H_{26}$	17312-54-8	1080	18.044	189.97±0.01^{b}	29.50±0.01^{d}	232.1±1.42^{a}	178.91±0.18^{c}
56	3,3-二甲基己烷	$C_{8}H_{18}$	563-16-6	710	18.628	56.89±0.44^{c}	29.50±0.16^{d}	77.56±0.60^{a}	60.23±0.93^{b}
57	4-甲基十一烷	$C_{12}H_{26}$	2980-69-0	1210	18.705	67.49±1.38^{a}	11.71±0.14^{c}	67.50±0.26^{a}	46.91±0.32^{b}
58	2-甲基十一烷	$C_{12}H_{26}$	7045-71-8	1220	20.951	14.24±0.02^{b}	18.46±0.01^{a}	19.08±0.49^{a}	14.23±0.46^{b}
59	3-甲基-十一烷	$C_{12}H_{26}$	1002-43-3	1230	21.239	35.39±0.03^{b}	51.35±0.03^{a}	33.33±0.34^{c}	22.89±0.10^{d}
60	十二烷	$C_{12}H_{26}$	112-40-3	1200	22.631	122.09±0.03^{b}	31.70±1.19^{d}	127.98±1.06^{a}	93.54±0.01^{c}
61	3,5-二甲基辛烷	$C_{10}H_{22}$	15869-93-9	850	23.273	4.55±0.01^{d}	10.31±0.02^{c}	20.26±0.39^{a}	19.40±0.19^{b}
62	10-甲基十九烷	$C_{20}H_{42}$	56862-62-5	1950	26.641	7.78±0.13^{c}	3.75±0.03^{d}	16.36±0.07^{b}	21.51±0.28^{a}
63	3,6-二甲基癸烷	$C_{12}H_{26}$	17312-53-7	1070	26.891	7.54±0.11^{c}	5.06±0.04^{d}	13.79±0.03^{b}	20.87±0.24^{a}
64	4-甲基十四烷	$C_{15}H_{32}$	25117-24-2	1410	28.007	10.48±0.14^{c}	3.80±0.01^{d}	13.86±0.34^{b}	19.60±0.02^{a}
65	2,6,10-三甲基十三烷	$C_{16}H_{34}$	3891-99-4	1450	29.027	10.25±0.15^{c}	5.38±0.02^{d}	22.03±0^{b}	28.14±0.17^{a}

续表 7

序号	化合物	分子式	CAS	RI	保留时间（min）	含量（μg/kg）			
						GXMY	GZZS	HBDR	YMHY
66	十二烷	$C_{12}H_{26}$	112-40-3	1200	29.124	8.50±0.28^{c}	3.46±0.01^{d}	18.36±0^{a}	16.85±0.06^{b}
67	十四烷	$C_{14}H_{30}$	629-59-4	1400	31.472	27.37±0.43^{a}	9.53±0.09^{d}	25.85±0.47^{b}	20.89±0.56^{c}
68	二十一烷	$C_{21}H_{44}$	629-94-7	2100	37.162	6.32±0^{c}	2.86±0.07^{d}	10.62±0^{b}	15.82±0.02^{a}
	烷烃类（20种）								
69	2-蒎烯	$C_{10}H_{16}$	80-56-8	975	10.269	94.61±0.01^{a}	21.21±0.09^{d}	53.97±0.74^{b}	35.42±1.33^{c}
70	莰烯	$C_{10}H_{16}$	79-92-5	950	10.859	42.82±0.01^{c}	59.11±0.11^{a}	44.14±0.8^{b}	34.57±0.80^{d}
71	2-正戊基呋喃	$C_{9}H_{14}O$	3777-69-3	990	15.004	–	114.94±0.75^{a}	40.89±0.31^{b}	7.86±0.12^{c}
72	1-碘癸烷	$C_{10}H_{21}I$	2050-77-3	1470	25.55	6.88±0.38^{c}	3.54±0.01^{d}	15.02±0.07^{b}	17.25±0.34^{a}
73	2-甲氧基呋喃	$C_{5}H_{6}O_{2}$	25414-22-6	810	26.269	30.34±0.41^{c}	27.50±0^{d}	77.63±0.73^{b}	113.07±2.04^{a}
74	2-(1,3-丁二烯基)-1,3,5-三甲基-苯	$C_{13}H_{16}$	5732-00-3	1320	29.355	–	–	–	4.93±0.11
75	1-丁基吡咯	$C_{8}H_{13}N$	589-33-3	1100	30.715	6.98±0.05^{b}	2.98±0.02^{d}	6.75±0.01^{c}	10.64±0.07^{a}
76	2,6-二叔丁基对甲苯酚	$C_{15}H_{24}O$	128-37-0	1450	36.065	6.87±0.08^{b}	3.77±0.01^{d}	6.20±0.01^{c}	8.09±0.15^{a}
	其他类（8种）								

注：数据以“$\bar{X}$±S”表示，同行不同小写字母表示具有显著性差异（P<0.05）；“–”表示未检出。

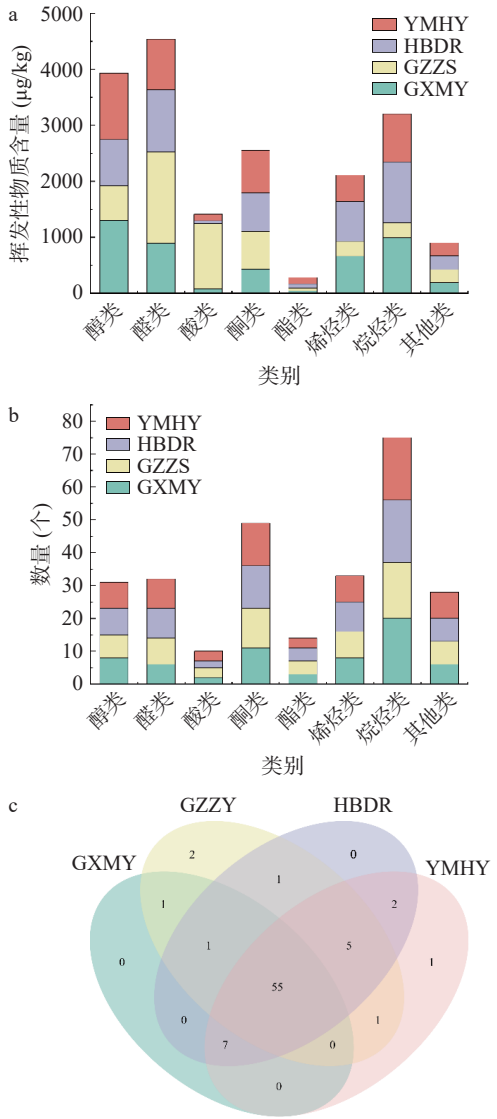


图 1　不同产地红碎茶样品中香气成分分布及含量

Fig.1　Distribution and contents of aroma components in broken black tea from different geographical origins

注：a.香气成分的种类与含量；b.香气成分的种类与数量；c.香气成分的 Venn 图分析。

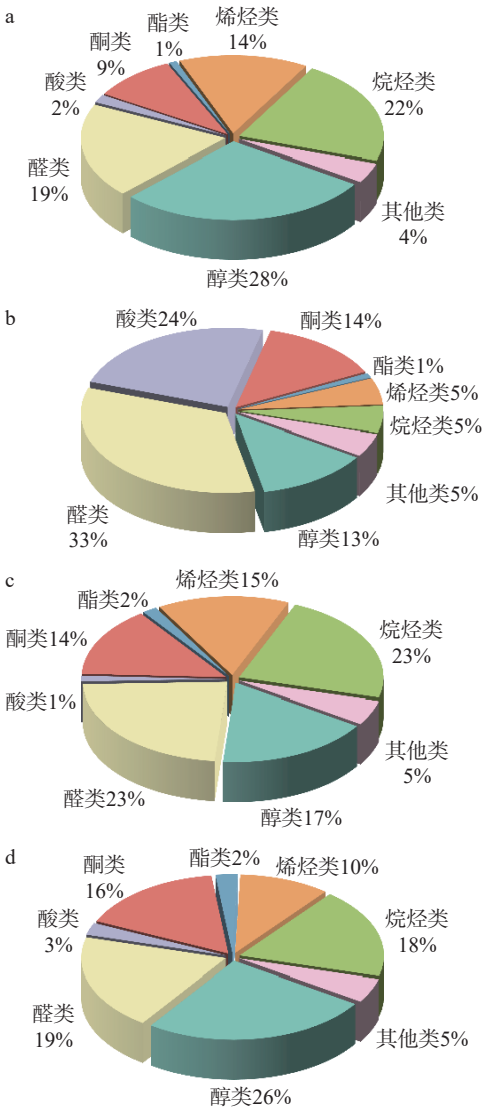


图 2　不同产地红碎茶香气成分的比例

Fig.2　Proportion of aroma components in broken black tea from different geographical origins

注：a.GXMY 香气成分比例；b.GZZS 香气成分比例；c.HBDR 香气成分比例；d.YMHY 香气成分比例。

处理英红九号红碎茶挥发性成分测定结果一致。检测出的醇类化合物，除 3-氨基苯甲醇外，其余 7 个均为共有组分，其中苯甲醇、芳樟醇、反式-橙花叔醇的含量较高，占比 80% 以上，芳樟醇主要表现为甜花香，在 GXMY 茶样中的含量为 877.11 μg/kg，显著高于其他三组，在醇类化合物中占比 67.59%，其次是 YMHY（491.21 μg/kg）。苯甲醇有花香味，GZZS（212.41 μg/kg）中的含量最高，YMHY（85.96 μg/kg）中的含量最低；反式-橙花叔醇主要呈现为果香、木质香，在 YMHY（422.20 μg/kg）中含量最高；酮类化合物一般带有甜香和花果香，HBDR 和 YMHY 茶样各检出 13 种酮类化合物，含量为 688.13、761.08 μg/kg；其次是 GZZS 茶样 12 种，含量为 669.71 μg/kg；最少的是 GXMY 茶样 11 种。欧晓西等[33] 发现梅占红茶花香浓郁带甜香，芳樟醇、香叶醇、苯乙醇等是梅占不同茶类香气差异的关键化合物，周汉琛等[34] 得出嫩叶、嫩茎、单芽和一芽二叶加工的祁门红茶，香气类型均为甜香型，WANG 等[35] 研究得出红茶以甜香、花香为主要基调，本研究结果与之一致，而王艳燕等[36] 对变温发酵滇红工夫红茶进行检测，发现杂环类化合物和萜类物质含量较高，其次是酯类、醛类、醇类，这可能与挥发性成分的测定条件不同或茶树品质与加工工艺有关。除醇类和醛类外，GXMY、HBDR 和 YMHY 茶样中烷烃类含量较高，而 GZZS 茶样中酸类物质较高，烷烃类香气较弱或基本没有香气，对香气直接贡献率很小，但对香气的构造起着间接的重要作用。酯类物质在各组中占比较少，均在 2% 以内，多呈水果清香，如水杨酸甲酯呈现独特药草味，酯类物质主要来源于脂肪酸和氨基酸代谢及醇类物质酯化反应生成[37]。酸类在除 GZZS 茶样以外的其他三组均占比较少，棕榈酸本身没有任何的香气，但能降解生成壬醛、庚醛等香气物质[38]。烯烃类化合物在 GXMY（659.89 μg/kg）和 HBDR（710.13 μg/kg）中含量较高，月桂烯和（R）-(+)-柠檬烯是 4 种红碎茶的主要烯烃类成分，其中 GXMY 的（R）-(+)-柠檬烯含量为 285.03 μg/kg，显著高于其他三组；HBDR 的月桂烯含量较高，为 217.31 μg/kg。

OPLS-DA 是一种监督的多元判别分析统计方法，可以有效筛选关键标志性差异物质。为进一步分析不同产地红碎茶之间的香气差异物质，以 76 种香气物质为因变量，4 个不同产地为自变量，通过 OPLS-DA，自变量拟合指数 R^2_x 为 0.998，因变量拟合指数 R^2_y 为 0.995，模型预测指数 Q^2 为 0.995，R^2 和 Q^2 均超过 0.5 且接近 1，模型拟合较好。经 200 次置换检验，如图 3c 所示，Q^2 回归线与纵轴相交小于零，模型不存在过度拟合情况，验证有效，该结果可用于这 4 个不同产地红碎茶挥发性香气成分的差异分析。

如图 3a 所示，通过 OPLS-DA，4 个产地的红碎茶能有效区分，说明不同产地红碎茶的挥发性香气成分差异明显，HBDR 和 YMHY 两组茶样差异较小，这两个地区的红碎茶香气特征较为相似；GXMY 和 GZZS 两组茶样差异较大，香气特征差异明显。

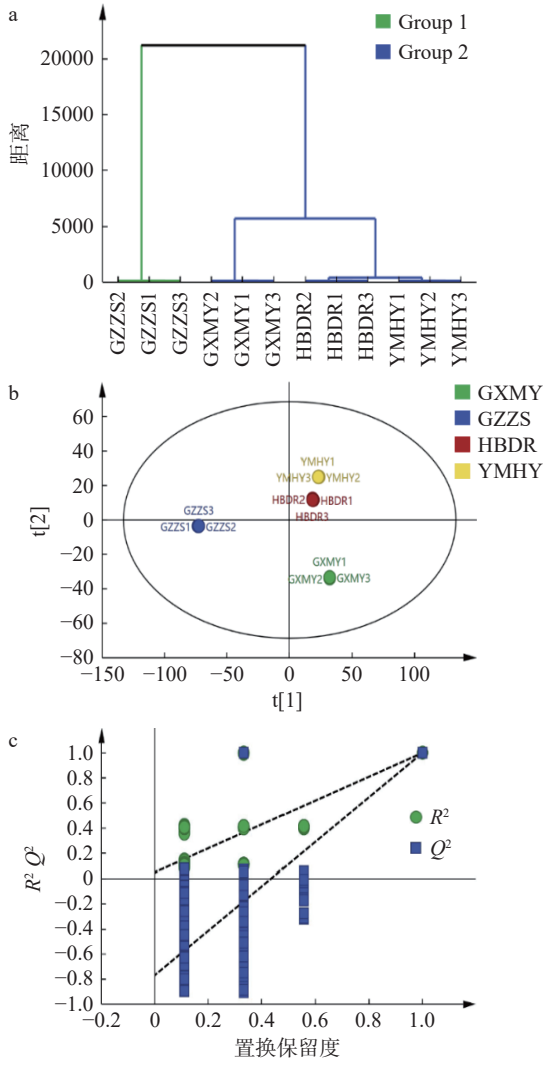


图 3 不同产地红碎茶香气成分的多元统计分析

Fig.3 Multivariate statistical analysis of aroma components in broken black tea from different geographical origins

注：a.HCA 图；b.OPLS-DA 模型；c.交叉验证。

变量投影重要度（variable importance for the projection，VIP）可反映 OPLS-DA 模型中挥发性香气成分对整体风味的贡献程度，VIP≥1 认为对整体风味有重要贡献，即 VIP 越高的化合物对样品越重要[39]。基于 OPLS-DA 模型，根据 VIP>1 且 P<0.05 的筛选条件，进行重要挥发性香气成分筛选。如图 4 所示，共筛选出 20 种香气差异物质，醇类 3 种（苯甲醇、反式-橙花叔醇、芳樟醇）、醛类 7 种（β-环柠檬醛、苯甲醛、反式-2-庚醛、反式-2-己烯醛、反式-4-癸烯醛、己醛、顺式-4-庚烯醛）、酸类 2 种（己酸、亚麻酸）、酮类 3 种（3,5-辛二烯-2-酮、β-紫罗兰酮、甲基庚烯酮）、烯烃类 3 种（β-罗勒烯、（R）-(+)-柠檬烯、月桂烯）、其他类 2 种（2-甲氧基呋喃、2-正戊基呋喃）。

香气成分对整体风味的贡献主要取决于其含量和阈值[40]，可由 OAV 进行表征。一般认为 OAV≥

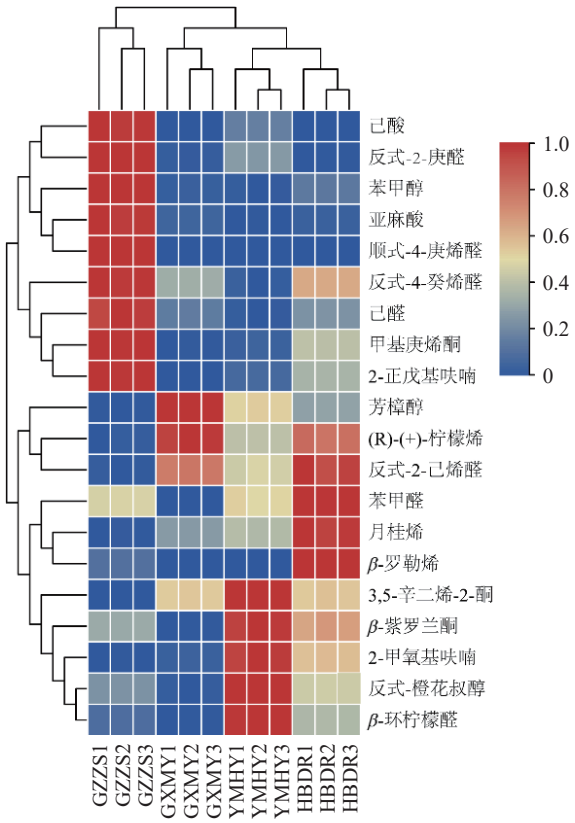


图 4　不同产地红碎茶特征香气成分聚类热图

Fig.4　Cluster heatmap of characteristic markers of aroma components in broken black tea from different geographical origins

1，该香气成分对茶叶整体香气贡献较大；OAV>10，该香气成分对茶叶整体香气贡献极大，且被确定为重要香气成分；0.1≤OAV<1，说明该香气成分对茶叶整体风味具有修饰作用。根据查阅相关文献及书籍报道的香气成分阈值及香气类型描述，计算 4 个产地红碎茶样品差异香气成分 OAV 值，结果如表 8 所示，共有 19 种香气成分 OAV>1，其中 GXMY 茶样 14 种、GZZS 茶样 16 种、HBDR 茶样 17 种、YMHY 茶样筛选出 16 种，认为这些差异香气成分可能对判别不同产地的红碎茶香气特征具有重要作用。

各组特征香气成分种类数量不同，但 OAV 较高的香气成分基本一致，进一步筛选 OAV>10 的挥发性香气成分，都主要以芳樟醇、己醛、反式-橙花叔醇、月桂烯、3,5-辛二烯-2-酮、β-紫罗兰酮、苯甲醛、苯甲醇、β-环柠檬醛等为主，认为这些香气物质可能是红碎茶的关键香气成分构成香气成分的主体，共同组成红碎茶的香气基调，主要呈现甜香、花香、木香和青草气味，与杨盛美等[10] 的研究结果一致。反式-2-己烯醛为修饰性香气物质。芳樟醇(OAV>100)是 GXMY 的重要香气物质，具有甜花香的芳樟醇对 GXMY 的贡献度高于其他地区的红碎茶，与其他物质相结合共同构成 GXMY 甜花香的品质特征。具有坚果香的亚麻酸和苹果香、青草香的己醛(OAV>100)对 GZZS 的贡献高于其他三组，是 GZZS 重要赋香物质，青草气味较明显可能与红碎茶加工原料为一芽 4~5 叶，粗老叶与茎秆发酵不完全有关；具有甜香的顺式-4-庚烯醛(OAV>10)仅在 GZZS 检出，是构成甜香的重要香气物质。呈现甜香的 3,5-辛二烯-

表 8　不同产地红碎茶的特征香气成分 OAV 及风味特征描述

Table 8　OAV and flavor description of characteristic markers of aroma components in broken black tea from different geographical origins

序号	化合物	VIP值	阈值(μg/kg)[31,33-34]	OAV				香气描述[13,33]
				GXMY	GZZS	HBDR	YMHY	
1	芳樟醇	3.07	6	146.19	9.95	48.84	81.87	甜花香
2	亚麻酸	2.37	5	7.74	123.43	5.59	1.67	坚果香
3	己酸	2.24	150	–	3.53	–	<1	酸性气味
4	己醛	2.21	4.5	97.28	201.69	107.45	78.99	苹果香、青草香
5	反式-橙花叔醇	1.95	25	7.16	9.34	11.47	16.89	木香、果香
6	(R)-(+)-柠檬烯	1.67	34	8.38	1.30	7.17	4.20	柑橘香
7	月桂烯	1.58	15	7.59	5.11	14.49	8.73	甜香
8	3,5-辛二烯-2-酮	1.57	0.5	249.97	–	254.90	461.54	甜香
9	甲基庚烯酮	1.42	50	1.67	5.51	3.22	1.80	青气
10	β-罗勒烯	1.27	34	–	<1	1.75	–	青气、花香
11	β-紫罗兰酮	1.20	3.5	4.46	13.30	23.35	32.35	木香、花香
12	顺式-4-庚烯醛	1.19	4.2	–	35.68	–	–	甜香
13	反式-2-己烯醛	1.14	3000	<1	<1	<1	<1	果香、蔬菜香
14	2-甲氧基呋喃	1.13	30	1.01	<1	2.59	3.77	甜香
15	苯甲醛	1.13	3.5	–	9.37	19.68	10.07	焦糖甜香、杏仁气味
16	反式-4-癸烯醛	1.07	25	7.74	10.10	8.83	6.65	青果香
17	苯甲醇	1.07	3	29.37	70.80	34.13	28.65	花香
18	2-正戊基呋喃	1.05	4.8	–	23.95	8.52	1.64	果香、青香
19	β-环柠檬醛	1.02	5	5.49	6.60	10.12	18.07	果香
20	反式-2-庚醛	1.01	13	5.78	13.58	5.73	7.74	青草气

注：表中阈值均为化合物在水中的感官阈值；“–”表示未检出。

2-酮（OAV>100）在 GZZS 茶样中未检出，而在其他三组中均有较高表现，特别在 YMHY 茶样贡献度最高，葛晓杰等[41] 证实该物质是甜香型红茶的关键因子，呈香显著。具有花香的苯甲醇在 GZZS 茶样中贡献度显著高于其他地区，是重要呈香物质。具有木香、花香属性的 β-紫罗兰酮（OAV>10）在 GZZS、HBDR 和 YMHY 均是重要的呈香物质；除此之外，GZZS 茶样中亚麻酸、反式-4-癸烯醛、2-正戊基呋喃、反式-2-庚醛，HBDR 茶样中月桂烯、苯甲醛、β-环柠檬醛等 OAV 值大于 10，可见这些挥发性香气成分为各组样品特征香气的重要成分，不同产地的红碎茶香气特征不同，可能与红碎茶样的特征性香气成分密切相关，茶树生长环境、气候等差异，造成茶叶中香气物质含量和比例存在差异，形成风格各异的红碎茶。综上，具有甜香、花香特征的香气物质在 4 个产地红碎茶中均表现出较高强度，整体呈现甜香、花香为主，果香、青香、木香为辅，HBDR 与 YMHY 两组茶样香气类型较为相似。

3 结论

本研究通过感官审评、HPLC、HS-SPME-GC-MS 等方法，分析 GXMY、GZZS、HBDR 和 YMHY 4 个红碎茶的感官特性、滋味物质和香气成分差异。结果表明，YMHY 茶样感官评分最高，GXMY 茶多酚含量、儿茶素总含量、游离氨基酸总量最高，与感官审评滋味苦涩感、收敛性强于其他地区对应；HBDR 水浸出物和咖啡碱含量高于其他地区；而 GZZS 水浸出物、茶多酚、咖啡碱含量与儿茶素总含量和游离氨基酸总量均最低，滋味较淡薄。通过 TAV 分析发现，GXMY 和 YMHY 茶样关键滋味成分种类数量最多，咖啡碱、EGC、EGCG、EC、ECG、CG、C、异亮氨酸、赖氨酸 9 个物质是茶汤苦涩味主要贡献物质；天冬氨酸、谷氨酸、茶氨酸为鲜味主要贡献成分；丙氨酸是甜味的主要贡献物质。咖啡碱（TAV>100）是含有苦味的嘌呤碱，在四组茶样中均有较高表现，能与涩味物质绿原酸形成络合物，降低茶汤的粗涩感，提高鲜爽度。从综合感官评价和滋味物质化学成分含量来看，红碎茶滋味浓强鲜爽，苦涩味重与茶多酚、咖啡碱和苦味氨基酸及酯型儿茶素含量较高相吻合。通过 OPLS-DA 模型，根据 VIP> 1，从已鉴定的 76 种香气物质筛选出 20 种差异香气物质，结合 OAV 分析，筛选出 19 种特征香气成分（OAV>1），其中 GXMY 茶样 14 种、HBDR 茶样 17 种、GZZS 和 YMHY 茶样各 16 种，但 OAV 较高的香气成分基本一致，主要以芳樟醇、己醛、反式-橙花叔醇、月桂烯、3,5-辛二烯-2-酮、β-紫罗兰酮、苯甲醛、苯甲醇、β-环柠檬醛 9 种物质为主，认为这些香气物质可能是红碎茶的关键香气成分构成香气成分的主体，共同组成红碎茶的香气基调，反式-2-己烯醛为修饰性香气物质，HBDR 与 YMHY 两组茶样香气类型较为相似。芳樟醇（OAV>100）是 GXMY 的重要香气物质，具有甜花香的芳樟醇对 GXMY 的贡献度高于其他地区的红碎茶，与其他物质相结合共同构成 GXMY 甜花香的品质特征。具有坚果香的亚麻酸和苹果香、青草香的己醛（OAV>100）对 GZZS 的贡献高于其他组，是 GZZS 茶样重要赋香物质。具有甜香的顺式-4-庚烯醛（OAV>10）仅在 GZZS 茶样检出，是构成甜香的重要香气物质；3,5-辛二烯-2-酮（OAV>100）在 GZZS 茶样中未检出，而在其他三组中均有较高表现，尤其在 YMHY 茶样贡献度最高。总体而言，红碎茶以甜香、花香、果香物质为主。本研究为不同地区红碎茶滋味、香气成分及品质差异分析提供了一定的化学基础，通过 TAV 和 OAV 分析筛选主要滋味及香气成分，但未明确物质间的协同效应或掩盖效应，还需从多角度深入探究物质的呈味机理，后期继续丰富不同等级、品种、季节等样品，以更全面科学的分析红碎茶特征。

© 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] MA Chunhua, HUNG Y C. Effect of brewing conditions using a single-serve coffee maker on black tea (Lapsang Souchong) quality[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(8): 4379−4387.

[2] 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 in major taste compounds during the processing of broken black tea from Rucheng Baimao Tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(13): 1−9.]

[3] 冯红钰, 黄建国, 阳景阳, 等. 桂香红碎茶加工技术研究[J]. 中国热带农业, 2020(1): 47−51. [FENG H Y, HUANG J G, YANG J Y, et al. Research on processing technology of 'Guixiang' broken black tea[J]. China Tropical Agriculture, 2020(1): 47−51.]

[4] 陈春林, 梁明志, 田易萍, 等. 高茶黄素大叶种红碎茶的研制[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(13): 5947−5948. [CHEN C L, LIANG M Z, TIAN Y P, et al. Initial research on brand-name high theaflavin big-leaf broken black tea[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(13): 5947−5948.]

[5] 林冬纯, 胡蝶, 陈维, 等. 不同贮青温度及方式对红碎茶品质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(9): 212−218. [LIN D C, HU D, CHEN W, et al. Effects of different storage temperatures and methods for fresh tea leaves on the quality of broken black tea[J]. Food Science, 2024, 45(9): 212−218.]

[6] 王伟伟, 江和源, 江用文, 等. 不同萎凋时间对 CTC 红碎茶品质的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(4): 129−135. [WANG W W, JIANG H W, JIANG Y W, et al. Effect of withering time on CTC black tea quality[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(4): 129−135.]

[7] 刘洪林, 曾艺涛, 赵欣. HS-SPME-GC-MS 对传统红碎茶和 CTC 红碎茶挥发性化合物分析和比较[J]. 食品科学, 2019, 40(18): 248−252. [LIU H L, ZENG Y T, ZHAO X. Comparative analysis of volatile profiles orthodox black teas and CTC black teas using HS-SPME-GC-MS[J]. Food Science, 2019, 40(18): 248−252.]

［8］ 邓少春, 梁名志, 田易萍, 等. 三个茶树新品种加工手工滇红碎茶品质对比研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(1): 125−129. ［DENG S C, LIANG M T, TIAN Y P, et al. Quality comparative study on Yunnan manual broken black tea of 3 new tea tree varieties[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(1): 125−129.］
［9］ 李金龙, 杨盛美, 李友勇, 等. 斯里兰卡红碎茶与滇红碎茶主要香气成分比较分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(21): 8536−8542. ［LI J L, YANG S M, LI Y Y, et al. Comparative analysis of main aroma components between Sri Lanka broken black tea and Yunnan broken black tea[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2021, 12(21): 8536−8542.］
［10］ 杨盛美, 许玫, 唐一春, 等. 云南不同茶区茶树种质资源的红碎茶香气成分研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(11): 156−161. ［YANG S M, XU M, TANG Y C, et al. Study on aromatic compositions of the broken black tea from different tea areas in Yunnan[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(11): 156−161.］
［11］ 邵淑贤, 徐梦婷, 林燕萍, 等. 基于电子鼻与 HS-SPME-GC-MS 技术对不同产地黄观音乌龙茶香气差异分析[J]. 食品科学, 2023, 44(4): 232−239. ［SHAO S X, XU M T, LIN Y P, et al. Differential analysis of aroma aomponents of Huangguanyin oolong tea from different geographical origins using electronic nose and headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Science, 2023, 44(4): 232−239.］
［12］ YANG Ping, SONG Huanlu, LIN Yanping, et al. Differences of characteristic aroma compounds in Rougui tea leaves with different roasting temperatures analyzed by switchable GC-O-MS and GC×GC-O-MS and sensory evaluation[J]. Food & Function, 2021, 12(11): 4797−4807.
［13］ 陈倩莲, 刘仕章, 占仕权, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和 OAV 鉴定 4 种武夷岩茶关键呈香物质[J]. 食品工业科技, 2023, 44(14): 296−303. ［CHEN Q L, LIU S Z, ZHAN S Q, et al. Identification of four kind key aroma components of Wuyi rock tea based on HS-SPME-GC-MS and OAV[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(14): 296−303.］
［14］ 余丽辰, 游玲, 王锐檣, 等. 茶树品种对筠连红茶品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(8): 43−48. ［YU L C, YOU L, WANG R Q, et al. Effect of tea cultivars on the quality of Junlian black tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(8): 43−48.］
［15］ 江新凤, 李琛, 曹挥华, 等. 基于顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法分析不同嫩度河红茶香气的差异[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(22): 7305−7313. ［JIANG X F, LI C, CAO H G, et al. Analysis of characteristic aroma components of different tenderness of Hekou black tea based on headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2022, 13(22): 7305−7313.］
［16］ 杨天铭, 马玉青, 梁名志. 不同杀青方式对茶叶中氟及主要呈味物质含量的影响[J]. 农产品加工, 2022(22): 19−22. ［YANG T M, MA Y Q, LIANG M Z. Effects of different fixation methods on fluorine and mainly flavored substance content in tea[J]. Farm Products Processing, 2022(22): 19−22.］
［17］ YAN Shuaishuai, ZHOU Zhihao, WANG Kaijie, et al. Chemical profile and antioxidant potential of extractable and non-extractable polyphenols in commercial teas at different fermentation degrees[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(6).
［18］ 李倩, 邵金良, 尹本林, 等. 不同加工方式的云南大叶种茶生物活性成分差异分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(18): 37−46. ［LI Q, SHAO J L, YIN B L, et al. Difference analysis of bioactive components of Yunnan large-leaf tea by different Processing technologies[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(18): 37−46.］
［19］ 刘湛军, 蹇丹, 李滔滔, 等. 黑茶活性成分及健康功效研究进展[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2024, 33(4): 67−72. ［LIU Z J, JIAN D, LI T T, et al. Research progress on active ingredients and health effects of dark tea[J]. Journal of Hunan City University (Natural Science), 2024, 33(4): 67−72.］
［20］ 金阳, 刘亚峰, 赵玉香, 等. 茶叶中咖啡碱的研究进展及展望[J]. 中国茶叶加工, 2017(Z2): 38−43. ［JIN Y, LIU Y F, ZHAO Y X, et al. Research progress and prospect of caffeine substance in tea[J]. China Tea Processing, 2017(Z2): 38−43.］
［21］ TAN Junfeng, DAI Weidong, LU Meiling, et al. Study of the dynamic changes in the non-volatile chemical constituents of black tea during fermentation processing by a non-targeted metabolomics approach[J]. Food Research International, 2016, 79: 106−113.
［22］ PENG Chuanyi, REN Yinfeng, YE Zhihao, et al. A comparative UHPLC-Q/TOF-MS-based metabolomics approach coupled with machine learning algorithms to differentiate Keemun black teas from narrow-geographic origins[J]. Food Research International, 2022, 158: 111512.
［23］ 黄藩, 王迎春, 叶玉龙, 等. 变温萎凋技术对贡眉白茶品质的影响[J]. 中国农学通报, 2022, 38(19): 159−164. ［HUANG P, WANG Y C, YE Y L, et al. Effects of temperature-changing withering technology on the quality of Gongmei white tea[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(19): 159−164.］
［24］ SCHARBERT S, HOLZMANN N, HOFMANN T. Identification of the astringent taste compounds in black tea infusions by combining instrumental analysis and human bioresponse[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52(11): 3498−3508.
［25］ 李家锋, 李国萍, 欧阳建, 等. 盈江大理种芽孢茶感官品质及滋味化学成分分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(16): 339−347. ［LI J F, LI G P, OUYANG J. Analysis on the sensory quality and taste's chemical composition of spore tea of Yingjiang *Camellia taliensis*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(16): 339−347.］
［26］ 肖巧梅, 张晓宇, 王娟, 等. 不同规格 CTC 红碎茶理化与香气成分比较[J]. 现代食品科技, 2023, 39(3): 262−271. ［XIAO Q M, ZHANG X Y, WANG J, et al. comparison of physicochemical and aroma components of CTC broken black teas with different specifications[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(3): 262−271.］
［27］ YU Zhenming, YANG Ziyin. 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.
［28］ CHEN Yiyong, ZENG Lanting, LIAO Yinyin, et al. Enzymatic reaction-related protein degradation and proteinaceous amino acid metabolism during the black tea (*Camellia sinensis*) manufacturing process[J]. Foods, 2020, 9(1): 66.
［29］ 刘忠英, 杨婷, 戴宇樵, 等. 基于分子感官科学的茶叶滋味研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(4): 337−343. ［LIU Z Y, YANG T, DAI Y Q, et al. Research progress of tea taste based on molecular sensory science[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(4): 337−343.］
［30］ YU Penghui, HUANG Hao, ZHAO Xi, et al. Dynamic varia-

tion of amino acid content during black tea processing: A review[J]. Food Reviews International, 2023, 39(7): 3970−3983.
[31] 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.
[32] 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.
[33] 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 M Q, et al. Key aromatic compounds analysis of 'Meizhan' tea based on SBSE-GC-O-MS technology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(2): 271−279.]
[34] 周汉琛, 杨霁虹, 刘亚芹, 等. 茎和叶对祁门红茶品质的贡献分析[J]. 食品科学, 2023, 44(24): 220−228. [ZHOU H S, YANG J H, LIU Y Q, et al. Contribution of stems and leaves to the quality of Keemun black tea[J]. Food Science, 2023, 44(24): 220−228.]
[35] WANG Qiushuang, QIN Dandan, HUANG Guozi, et al. Identification and characterization of the key volatile flavor compounds in black teas from distinct regions worldwide[J]. Journal of Food Science, 2022, 87(8): 3433−3446.
[36] 王艳燕, 刘志薇, 严慧婷, 等. 变温发酵工艺滇红工夫挥发性成分及关键香气成分分析[J]. 食品科学, 2024, 45(23): 159−167. [WANG Y Y, LIU Z W, YAN H T, et al. Analysis of volatile components and key aroma components in Dianhong Congou black tea produced by variable temperature fermentation[J]. Food Science, 2024, 45(23): 159−167.]
[37] 彭云, 李果, 刘学艳, 等. 不同产地红茶香气品质的 SPME/GC-MS 分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(9): 237−244. [PENG Y, LI G, LIU X Y, et al. SPME/GC-MS analysis of aroma quality of black tea from different producing areas[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(9): 237−244.]
[38] 肖春燕, 李晶, 王治会, 等. 福建不同产地红茶风味品质差异分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(5): 255−266. [XIAO C Y, LI J, WANG Z H, et al. Analysis of flavor and quality differences in black tea from different geographical origins in Fujian[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(5): 255−266.]
[39] 金友兰, 黄甜, 蒋容港, 等. 不同类型发花砖茶特征香气成分研究[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(3): 188−196. [JIN Y L, HUANG T, JIANG R G. Characteristic volatile components of different types of fermented brick tea[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(3): 188−196.]
[40] QIN Xinxue, ZHOU Jingtao, HE Chang, et al. Non-targeted metabolomics characterization of flavor formation of Lichuan black tea processed from different cultivars in Enshi[J]. Food Chemistry: X, 2023, 19: 100809.
[41] 葛晓杰, 苏祝成, 狄德荣, 等. 基于顶空固相微萃取/气质联用的红茶特征香型呈香活性成分研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(23): 304−310. [GE X J, SU Z C, DI D R, et al. Comparison of odor-active components of two different odor type ‘black tea' based on HS-SPME/GC-O-MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(23): 304−310.]