汪艳霞, 冯霞, 黄国康, 等. 贵州桐梓古树绿茶特征风味物质分析及其品质评价 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(11): 34−43. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090162

WANG Yanxia, FENG Xia, HUANG Guokang, et al. Characteristic Flavor Compounds and Quality Analysis of Ancient Tree Green Tea from Tongzi, Guizhou[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(11): 34−43. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090162

·特邀主编专栏—茶饮品全产业链生产关键技术研究与应用（客座主编: 尹军峰、张建勇、许勇泉、崔宏春）·

贵州桐梓古树绿茶特征风味物质分析及其品质评价

汪艳霞[1], 冯　霞[1,2], 黄国康[1], 冯娅东[1], 陈　倩[1], 石瑾杰[1], 杨　娟[3], 黄小贞[1,*]

（1.贵州大学茶学院, 贵州贵阳 550025;
2.黔南民族职业技术学院, 贵州都匀 558000;
3.重庆市农业科学院茶叶研究所, 重庆 402160）

摘　要: 为探究贵州桐梓古树绿茶的特征风味物质构成及其品质，本研究以 12 份乔木型大叶种桐梓古树茶树单株所制烘青绿茶为研究对象，采用感官审评、高效液相色谱（HPLC）及顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用（HS-SPME-GC-MS）技术分析其感官品质、主要理化成分和挥发性香气成分，并结合聚类分析与相关性分析进行综合评估。结果表明：所有茶样感官审评总分均高于 90 分，具有“花香、滋味鲜醇”的典型特征。主要品质成分分析显示，样品氨基酸含量较高，最高达到 5.27%，酚氨比在 5.68~8.58，儿茶素总量为 9.14%~15.68%，酯型与非酯型儿茶素比值较低，仅 1.22~2.54。GC-MS 共鉴定出 24 种关键香气成分，其中芳樟醇、水杨酸甲酯、茉莉酮、α-法呢烯及 2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯等是构成其主体花果香风格的核心物质。聚类分析将 12 份茶样分为两大类：第一类，6 号、7 号和 8 号以高氨基酸含量和清甜风味为主，第二类以高花香、果香强度为主要特征。综上，桐梓古树绿茶品质优异，其独特的风味特征与特定的挥发性香气成分组成及含量密切相关。本研究为桐梓古树绿茶的品质评价、资源利用与产品定位提供了科学依据。

关键词: 桐梓古茶树, 绿茶, 风味, 品质分析, 香气成分

中图分类号: TS207.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)11−0034−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090162　　本文网刊:

Characteristic Flavor Compounds and Quality Analysis of Ancient Tree Green Tea from Tongzi, Guizhou

WANG Yanxia[1], FENG Xia[1,2], HUANG Guokang[1], FENG Yadong[1], CHEN Qian[1], SHI Jinjie[1], YANG Juan[3], HUANG Xiaozhen[1,*]

（1.College of Tea Science, Guizhou University, Guiyang 550025, China;
2.Qiannan Polytechnic for Nationalities, Duyun 558000, China;
3.Tea Research Institute, Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 402160, China）

Abstract: To investigate the characteristic flavor compounds and quality of ancient-tree green tea from Tongzi, Guizhou. This study analyzed 12 baked green-tea samples produced from individual arbor-type large-leaf ancient trees. Sensory evaluation, high-performance liquid chromatography (HPLC) and headspace solid-phase micro-extraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) were employed to determine sensory quality, key physicochemical components and volatile aroma compounds, followed by hierarchical clustering and correlation analyses for comprehen-

收稿日期: 2025−09−15

基金项目: 黔科合支撑 [2023] 一般 012;黔科合支撑 [2023] 一般 087;黔西南州科技支撑项目。

作者简介: 汪艳霞（1986−）, 女, 博士, 讲师, 研究方向: 茶叶加工过程质量和安全, E-mail: yxwang2@gzu.edu.cn。

*** 通信作者:** 黄小贞（1982−）, 女, 博士, 副教授, 研究方向: 发育生物学和生物工程, E-mail: xzhuang@gzu.edu.cn。

sive assessment. Results showed that all teas scored above 90 points in sensory evaluation, exhibiting typical "floral aroma and fresh mellow taste". Key quality indices revealed high amino-acid contents (up to 5.27%), phenol-to-amino ratios of 5.68~8.58, total catechins at 9.14%~15.68%, and low ratios of galloylated catechins tonon-galloylated catechins (1.22~2.54). GC-MS identified 24 key aroma compounds, linalool, methyl salicylate, jasmonate, α-farnesene and 2,2,4-trimethyl-1,3-pentanediol diisobutyrate were the core contributors to the dominant floral-fruity aroma. Cluster analysis divided the 12 samples into two groups: Group Ⅰ (samples 6, 7, 8) featured high amino acids and a sweet-mellow profile, while Group Ⅱ was characterized by intense floral and fruity aromas. In conclusion, Tongzi ancient-tree green tea possesses outstanding quality, and its unique flavor profile is closely linked to specific volatile aroma constituents and their concentrations. This study provides a scientific basis for quality evaluation, resource utilization and product positioning of Tongzi ancient-tree green tea.

Key words: Tongzi ancient tea tree; green tea; flavor; quality analysis; aroma compounds

古茶树作为重要的农业文化遗产和特色茶资源，因其长期自然选择及生态适应性，积累了丰富的次生代谢产物，赋予茶叶独特的风味与健康属性[1−2]。贵州桐梓县地处北纬 28°的武陵山区，拥有得天独厚的高海拔云雾环境，其古茶树群落树龄多逾百年，叶片肥厚、内含物质丰富，是地方特色茶产业的重要载体[3]。目前对古茶树的研究多集中于其遗传多样性分析[4−7] 或基本品质研究分析[8−10]，关键风味物质的组成及品质的系统解析，可为古茶树种质资源的特征分析和保存、产品的开发与发展奠定基础。从产业需求看，随着消费者对茶叶风味个性化与健康属性的追求，古树茶的市场溢价显著，但缺乏科学的质量评价体系。因此，通过现代分析技术明确贵州桐梓古树绿茶的特征风味物质，建立基于化学组学的品质评价方法，可为工艺优化与产品分级提供理论依据。

茶叶风味是挥发性香气与非挥发性呈味物质的协同作用结果。传统感官评价易受主观影响，而 GC-MS（气相色谱-质谱联用）[11−12] 及代谢组学[13−15] 等技术的结合，可有效量化和鉴定关键风味成分。绿茶特征风味研究方面主要集中于名优绿茶风味特征或绿茶新工艺应用等方面。如基于 HS-SPME-GC-MS，张一昊等[16] 比较分析临沧普洱生茶与传统绿茶香气差异，发现普洱生茶较其他绿茶具有更丰富的香气层次与醇厚的特征，主要归因于其关键香气成分种类、含量及香气活性值更高，其中 α-松油醇（木质香）、辛烯-3-醇（果甜香）、β-紫罗兰酮（花香）和二氢猕猴桃内酯（草本清香）可能是构成二者香气差异的核心物质[16]；翁丽萍等[17] 采用 HS-SPME/GC-MS 对不同区域西湖龙井茶的香气物质进行分析与比较，发现茶样分为四大区域，区域分组贡献较大的物质中芳樟醇、柠檬烯、香叶烯、γ-萜品烯的含量存在极显著差异，4-松油醇、苯乙醛、2-丁基-1-辛醇、癸醛、α-松油醇、（E）-β-法尼烯、Z-己酸-3-己烯酯的含量存在显著差异。可见 HS-SPME-GC-MS 等技术已较为成熟地应用于茶叶风味物质鉴定。

古树茶的风味独特性可能源于其高含量的萜烯类、芳香族衍生物及氨基酸（如茶氨酸、γ-氨基丁酸），这些物质受树龄、生态环境及加工工艺共同调控[18−19]。目前乔木型大叶种茶树由于其多酚类物质含量较高以制作红茶类较多，绿茶多在云南制作生普类绿茶，较少应用于烘青类绿茶。本研究以贵州桐梓县乔木型大叶种古树茶鲜叶为原料制作烘青绿茶，结合 HS-SPME/GC-MS（顶空固相微萃取-气相色谱质谱）和 HPLC（高效液相色谱）技术，系统鉴定其挥发性香气与非挥发性滋味物质，分析确定其关键风味成分。进一步采用化学计量学建立风味物质与感官评分的量化关联模型，最终构建贵州桐梓古树绿茶品质评价体系，为古树茶资源开发利用提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

2025 年 4 月，于贵州省遵义市桐梓县，分别采摘箭头村的箭头 1 号、箭头 2 号、箭头 5 号、箭头 6 号、箭头 7 号，凤凰村的金凤凰 1 号、金凤凰 2 号、金凤凰 3 号，茅坝坪的 1 号、2 号、3 号，大田村的大田 1 号等 12 个树龄在 100 年以上的乔木型古茶树单株资源一芽二叶鲜叶，分别编号 1~12 号。各采摘点地理信息如表 1 所示。

表 1　桐梓古树绿茶单株资源地理信息

Table 1　Geographic information of Tongzi ancient tree green tea single-plant resources

编号	地理位置	经度	纬度	海拔（m）
1	箭头村	106°48′	N28°35′7″	1140.2
2	箭头村	106°48′	N28°35′7″	1140.2
3	箭头村	106°48′	N28°35′7″	1140.2
4	箭头村	106°48′	N28°35′7″	1140.2
5	箭头村	106°48′	N28°35′7″	1140.2
6	凤凰村	106°46′	N28°30′24″	1454.0
7	凤凰村	106°46′	N28°30′24″	1454.0
8	凤凰村	106°46′	N28°30′24″	1454.0
9	茅坝坪	106°46′	N28°34′17″	972.0
10	茅坝坪	106°46′	N28°34′17″	972.0
11	茅坝坪	106°46′	N28°34′17″	972.0
12	大田村	106°51′	N28°34′43″	1004.0

57328-U 萃取头（50/30 μm DVB/CAR/PDMS）美国 Supelco 公司；7890B-7000D 气相色谱-质谱联用仪、DB-5MS 色谱柱（30 mm×0.25 mm，0.25 μm）安捷伦科技中国有限公司；20 AD 高效液相色谱

仪(HPLC)、UV-2550 紫外-可见分光光度计　日本岛津公司。

1.2 实验方法

1.2.1 桐梓古树绿茶制备　将采摘的鲜叶(水分含量在 75.15%~77.99%)在摊青槽中摊晾 3 h,用热风杀青(温度 250 ℃ 左右,时间 2~3 min),揉捻 40 min,解块,用无风电热烘焙干燥至茶叶含水率 5%~6%。

1.2.2 桐梓古树绿茶感官品质分析　感官审评参照 GB/T 23776-2018《茶叶感官审评方法和评分标准》[20]。其中外形 25%、汤色 10%、香气 25%、滋味 30% 和叶底 10%。根据标准,按外形、汤色、香气、滋味和叶底“五因子”,采用百分制,评分标准及审评术语按绿茶品质评语与各因子评分标准进行。审评员 7 人,都经过严格的评茶培训并取得高级评茶员以上证书,审评得分为 7 人评分的平均值,由主评综合 7 人结果给出最后评语。

1.2.3 桐梓古茶树单株绿茶主要内含成分测定　水浸出物含量:参照 GB/T 8305-2013《茶水浸出物测定》测定[21]。游离氨基酸含量:参照 GB/T 8314-2013《茶游离氨基酸总量测定》中茚三酮比色法测定[22]。茶多酚含量:参照 GB/T 8313-2018《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》中福林酚试剂法测定[23]。咖啡碱含量:参照 GB/T 8312-2013《茶咖啡碱测定》测定[24]。

儿茶素含量[25−26]:取适量茶粉,在 70 ℃ 水浴条件下用 70% 甲醇提取 10 min,3500 r·min^{-1} 离心后过 0.45 μm 滤膜,待测。色谱仪:LC-1200;色谱柱(Agelatechnologies,TC-C_{18} 柱),流动相:A 相:0.1% 甲酸水溶液,B 相:含 0.1% 甲酸的甲醇溶液;梯度洗脱条件:0~1 min(85% A),1~2 min(80% A),2~8 min(80% A),8~15 min(75% A),15~23 min(75% A),23~25 min(85% A),25~30 min(85% A),流速 0.8 mL·min^{-1};进样量 5 μL;紫外检测波长:280 nm;柱温:35 ℃。

1.2.4 桐梓古树绿茶挥发性物质成分的测定　顶空固相微萃取法:量取 20 mL 沸水(去离子水)倒入 60 mL 顶空瓶,称取 4 g 茶粉样品及 3 g 氯化钾倒入顶空瓶,再加入 20 mL 沸腾去离子水,立即封盖并放入 60 ℃ 集热式恒温加热磁力搅拌器中(480 r/min),待稳定 6 min 后,将固相微萃取头插入顶空瓶中吸附 50 min,最后,将挥发性化合物在 250 ℃ 下解吸 5 min,以进行下一步分析。每个样品重复 3 次。

气相色谱-质谱条件:色谱条件:DB-5MS 色谱柱(30 mm×0.25 mm,0.25 μm),升温程序:起始柱温 40 ℃,以 7 ℃/min 升到 100 ℃,保持 1 min,再以 5 ℃/min 升到 170 ℃,保持 1 min,以 5 ℃/min 升到 230 ℃,保持 1 min,最后以 9 ℃/min 升到 260 ℃,保持 0 min。进样体积 1 μL,载气为氦气,流速 2.25 mL/min,进样口温度为 250 ℃,不分流进样,平均线速度 36.262 cm/sec。质谱条件:电子轰击(electron impact,EI)离子源,离子源温度 230 ℃,溶剂延迟 3.75 min,扫描范围(MS1):40~400 u。

定性定量分析:通过固相微萃取-气相色谱-质谱法获得每个样品的色谱图,记录香气组分的峰面积、保留指数(retention index,RI)、出峰时间、相似度(syn)、相对分子质量和 CAS 号,由 GC-MS 分析得到的质谱图经 NIST W8N08L 标准谱库的检索,并结合相关文献核对确定各化学成分,根据峰面积归一法得到各香气成分的相对含量。

1.3 数据处理

采用 Office Excel 2010 软件对香气数据进行整理、统计,采用 SPSS 20.0 软件对理化成分及感官审评结果进行方差分析。采用 SIMCA-14.1 软件进行层次聚类分析(HCA)、偏最小二乘判别分析(PLS-DA)及其置换检验,并基于变量投影重要性值(variables important in the projection,VIP)>1.0、P<0.05 筛选差异香气成分,采用 TBtools 软件进行香气成分可视化聚类分析[27]。

2 结果与分析

2.1 桐梓古树绿茶感官品质比较

分别对 12 个桐梓古树绿茶茶样进行感官品质分析,结果如表 2 所示。

由表 2 可知,贵州桐梓 12 个古茶树单株所制绿茶在感官品质上整体品质优异,总分均在 90 分以上。外形上,评分介于 90.5~92 分之间,各茶样均表现出条索紧结度和色泽的润度,其中 1 号、3 号、11 号和 12 号茶样外形评分较高,均为 92 分。汤色方面,各茶样评分在 91.5~94 分之间,3 号样品的汤色评分最高,为 94 分。香气方面,各茶样评分均较高,在 91~94 分,且 12 个茶样均带有花香,其中 3 号和 5 号茶样香气评分最高,均为 94 分。滋味上,各茶样评分也较高,在 91~94 分之间,其中,1 号、3 号和 5 号样品滋味“鲜醇爽、回甘”且评分高达 94 分,说明了其滋味的鲜爽度和协调性,其余多数样品表现为醇厚回甘,滋味浓郁度和持续性较好。叶底均表现优异,各茶样均有肥厚、匀整、绿润的特点,反映了古树茶鲜叶原料的质地。综合来看,桐梓古树绿茶感官品质较高,以带有特殊“花香”香气特征和“鲜醇、回甘”的滋味特点构成了其独特的感官品质风格。

2.2 桐梓古树绿茶主要内含成分比较

分别对桐梓古树绿茶的游离氨基酸含量、茶多酚含量、咖啡碱含量及水浸出物含量等主要品质成分进行测定分析,结果如表 3 所示。

水浸出物含量是茶汤厚度和物质丰富度的重要指标。由表 3 可知,桐梓古树绿茶 12 个样品,水浸出物含量均较高,均达到 40% 以上,其中最低的是 12 号,水浸出物含量为 42.78%,3 号、6 号和 10 号,都达到 50% 以上。说明桐梓古树绿茶都有较高的茶

表 2　桐梓古树绿茶感官品质

Table 2　Sensory quality of Tongzi ancient tree green tea

编号	外形		汤色		香气		滋味		叶底		总分
	评语	评分	评语	评分	评语	评分	评语	评分	评语	评分	
1	条索较紧细、绿润	92	黄绿明亮	93	清香带花香	93	鲜醇爽回甘	94	肥厚、匀整、黄绿润	92.5	93
2	条索较紧、绿润	91	绿明亮	91.5	清香带花香	92	醇厚回甘	93	肥厚、较匀整、较绿润	91.5	91.95
3	条索较紧、较匀整	92	黄绿明亮	94	清香花香浓郁持久	94	鲜醇爽回甘	94	肥厚、较匀整、绿润	92	93.3
4	条索较紧、较绿润	91	黄绿明亮	93.5	清香花香浓郁较持久	93.5	醇厚回甘	93.5	肥厚、较匀整、较绿润	91	92.63
5	条索较紧、较绿润	91	绿黄明亮	93.5	清香花香浓郁持久	94	醇厚回甘	94	肥厚、较匀整、较绿润	91.5	92.95
6	条索较紧、黄绿	91	黄绿明亮	91.5	清香略带花香	92.5	醇和回甘	93	肥厚、较匀整、黄绿润	91.5	92.08
7	条索较紧、较绿润	90.5	黄绿明亮	92	清香略带花香	91.5	醇和	91.5	肥厚、匀整、绿润	91	91.25
8	条索较紧、深绿较润	91	绿明亮	92	清香略带花香	91	醇厚回甘	92	肥厚、匀整、绿润	91.5	91.45
9	条索较紧、较绿润	91	绿黄明亮	92	清香带花香	92.5	醇和	91.5	肥厚、较匀整、较绿润	91.5	91.68
10	条索较紧、较绿润	91	黄绿明亮	92.5	清香带花香	92	醇和	91	肥厚、较匀整、较绿润	91	91.4
11	条索较紧、较绿润	92	黄绿明亮	92	清香带花香	92	醇和	92	肥厚、匀整、绿润	92	92
12	条索较紧、黄绿较润	92	绿黄明亮	93	清香带花香	93.5	醇厚	92.5	肥厚、匀整、黄绿润	92	92.63

表 3　桐梓古树绿茶主要品质成分含量

Table 3　Content of main components of Tongzi ancient tree green tea

编号	氨基酸含量(%)	茶多酚含量(%)	酚氨比	咖啡碱含量(%)	水浸出物含量(%)
1	3.24±0.03^{a}	27.34±1.23^{c}	8.43	2.93±0.04^{c}	47.27±0.08^{b}
2	3.47±0.04^{a}	22.90±1.57^{a}	6.59	2.58±0.07^{b}	42.92±0.28^{a}
3	3.06±0.04^{a}	25.18±1.88^{b}	8.22	2.88±0.05^{c}	50.93±0.31^{c}
4	3.08±0.06^{a}	23.30±1.12^{a}	7.56	2.68±0.04^{b}	49.25±0.13^{c}
5	3.17±0.05^{a}	27.21±1.23^{c}	8.58	2.82±0.04^{c}	47.76±0.22^{b}
6	4.39±0.07^{b}	26.92±1.24^{c}	6.13	3.28±0.04^{d}	51.77±0.28^{c}
7	5.27±0.09^{c}	29.94±1.04^{d}	5.68	3.48±0.15^{d}	49.03±0.21^{c}
8	4.45±0.10^{b}	32.35±1.80^{e}	7.26	3.10±0.09^{d}	47.49±0.24^{b}
9	2.74±0.04^{a}	23.42±1.73^{a}	8.54	2.41±0.10^{b}	49.07±0.08^{c}
10	3.27±0.08^{a}	27.72±1.82^{c}	7.98	3.26±0.10^{d}	51.53±0.11^{c}
11	2.9±0.11^{a}	23.54±1.79^{b}	7.67	1.92±0.04^{a}	44.20±0.24^{a}
12	4.89±0.04^{c}	28.31±1.34^{c}	5.78	3.26±0.07^{d}	42.78±0.18^{a}

注：同列数据不同小写字母表示差异显著(P<0.05)，表4同。

汤浓度和物质丰富度。氨基酸是构成茶汤滋味和色泽的重要成分。氨基酸含量是衡量绿茶鲜爽味的关键指标之一，对茶叶滋味品质有显著影响。由表 3 可知，12 个桐梓古树绿茶样品的氨基酸含量在 2.74%~5.27%，整体均表现出较高的氨基酸积累水平，其中 7 号样品最高，达到 5.27%；6、7、8、12 号样品也均高于 4.0%，9 号样品最低，为 2.74%，与牛淼等[2] 同为 4 月采摘的易武古茶树氨基酸含量水平较为相当。在茶叶中，茶多酚的含量尤为丰富，是茶叶汤色和口感的决定性因素，对绿茶的品质具有重要影响。然而，当茶多酚在茶汤中的含量过高时，主要表现出的苦涩口感可能会对茶汤的整体品质造成负面影响，导致口感质量下降。由表 3 可知，8 号样本的茶多酚含量最高为 32.35%，而其他样本含量皆在 25%~30%。特别地，2 号和 9 号样本的茶多酚含量相对较低为 22.9%、23.42%。酚氨比，指茶多酚与氨基酸的含量比值，可以作为茶叶适制性的重要指标，一般来说酚氨比<8 适制绿茶，酚氨比在 8~15，红、绿茶兼制。由表 3 可知，12 个桐梓古树绿茶样酚氨比差异较大，分别在 5.68~8.58，12 个样品中仅有 1、3、5 和 9 四个样品酚氨比略高于 8，显示出整体酚氨比相对较低，是取样的 12 个样品适合制作绿茶的重要佐证。咖啡碱是茶汤苦味口感的重要呈现物质，还可与氨基酸、茶黄素缔合形成具有鲜爽味的滋味物质[28]。由表 3 可知，12 个桐梓古树绿茶样咖啡碱含量均较低，其中咖啡碱含量较高的 6 号、7 号、8 号、10 号、12 号茶样咖啡碱含量高于 3%；而 1 号、2 号、3 号、4 号、5 号、9 号样本的咖啡碱含量在 2%~3%；11 号样本的咖啡碱含量最低，仅 1.92%。

2.3　桐梓古树绿茶儿茶素组成及含量比较分析

茶叶中含有丰富的酯型和非酯型儿茶素，是茶叶主要成分，主要由儿茶素(C)、表儿茶素(EC)、表没食子儿茶素(EGC)、表儿茶素没食子酸酯(ECG)以及表没食子儿茶素没食子酸酯(EGCG)组成。其中 ECG、EGCG 是主要的酯型儿茶素，EGC、EC 和 C 是主要非酯型儿茶素[29]。酯型儿茶素有较强的苦涩味和收敛性且具有抗氧化、防癌抗癌、降血脂、除胆固醇、抑制细菌病毒、抗糖尿病等保健药用功效[28−29]，是茶汤苦涩味的重要来源物质，亦是影响茶叶品质好坏的重要指标之一；非酯型儿茶素的苦涩味和收敛性较弱，回味清爽。因此分析不同茶叶品种(系)儿茶素类型和含量至关重要[30]。对桐梓古树绿茶的儿茶素组成及含量进行比较分析，结果如表 4 所示。

由表 4 可知，桐梓古树绿茶 12 个茶样的儿茶素总量在 9.14%~15.68%；其中非酯型儿茶素在儿茶素中占比均较小且差异显著(P<0.05)，以 GC 和 EC 为主；酯型儿茶素含量占比最大，各样品均以 EGCG 含量最高，其次为 ECG、GCG，CG。12 个茶样的酯型儿茶素与非酯型儿茶素的比值均较低，在 1.22~2.54 之间，且差异显著(P<0.05)，其中除 1 号和 6 号茶样酯型儿茶素与非酯型儿茶素的比值>2，其他茶样都在 1.5 左右。

表 4 桐梓古树绿茶儿茶素组分分析

Table 4 Analysis of components of catechins in Tongzi ancient tree green tea

编号	非酯型儿茶素					酯型儿茶素					酯型儿茶素/非酯型儿茶素	儿茶素总量(%)
	GC(%)	EGC(%)	C(%)	EC(%)	总量(%)	EGCG(%)	GCG(%)	ECG(%)	CG(%)	总量(%)		
1	1.08±0.0^{a}	0.82±0.02^{b}	1.21±0.01^{c}	0.66±0.0^{b}	3.77	6.99±0.04^{c}	0.04±0^{a}	1.13±0.03^{b}	0.01±0.01^{a}	8.17	2.17	11.94
2	2.35±0.1^{b}	0.46±0.06^{a}	0.48±0.01^{a}	0.45±0.0^{a}	3.74	5.79±0.16^{b}	0.03±0^{a}	0.85±0.01^{a}	0.013±0^{a}	6.68	1.79	10.42
3	2.21±0.0^{b}	0.88±0.02^{b}	0.87±0.01^{b}	0.70±0.0^{b}	4.66	6.85±0.10^{c}	0.05±0.02^{a}	1.03±0.02^{b}	0.008±0^{a}	7.94	1.7	12.60
4	2.41±0.1^{b}	0.74±0.00^{b}	0.89±0.04^{b}	0.63±0.0^{b}	4.67	6.69±0.18^{c}	0.05±0^{a}	0.93±0.02^{a}	0.003±0^{a}	7.67	1.64	12.34
5	2.98±0.0^{c}	0.59±0.02^{a}	1.01±0.00^{c}	0.78±0.0^{b}	5.36	6.25±0.07^{c}	0.04±0^{a}	0.72±0^{a}	0.01±0.01^{a}	7.02	1.31	12.38
6	1.09±0.0^{a}	0.47±0.00^{a}	0.53±0.01^{a}	1.05±0.0^{c}	3.14	6.49±0.11^{c}	0.40±0^{c}	1.04±0.01^{b}	0.04±0^{b}	7.97	2.54	11.11
7	3.61±0.3^{d}	1.07±0.21^{c}	0.63±0.05^{a}	1.57±0.1^{d}	6.88	7.43±0.32^{d}	0.11±0.06^{b}	1.23±0.06^{b}	0.03±0^{b}	8.8	1.28	15.68
8	2.48±0.0^{b}	0.98±0.04^{c}	0.54±0.02^{a}	1.30±0.0^{d}	5.30	6.56±0.14^{c}	0.08±0.08^{a}	1.23±0.04^{b}	0.02±0^{a}	7.89	1.49	13.19
9	3.42±0.0^{d}	0.66±0.01^{a}	0.68±0.11^{a}	0.45±0.0^{a}	5.2	5.43±0.01^{b}	0.02±0^{a}	0.89±0^{a}	0.01±0^{a}	6.35	1.22	11.56
10	2.05±0.0^{b}	0.38±0.02^{a}	1.01±0.01^{c}	1.05±0.0^{c}	4.49	5.87±0.08^{b}	0.03±0^{a}	0.02±0^{a}	0.004±0^{a}	5.92	1.32	10.41
11	2.20±0.0^{b}	0.54±0.03^{a}	0.56±0.01^{a}	0.42±0.0^{a}	3.72	4.69±0.06^{a}	0.02±0^{a}	0.70±0.02^{a}	0.01±0^{a}	5.42	1.46	9.14
12	3.40±0.1^{d}	0.75±0.26^{b}	0.55±0.01^{a}	1.12±0.0^{d}	5.82	6.14±0.17^{b}	0.02±0^{a}	0.98±0.04^{b}	0.01±0^{a}	7.15	1.23	12.97

2.4 桐梓古树绿茶挥发性成分分析

不同香气成分在 12 个桐梓古树绿茶中存在不同程度的差异, GC-MS 色谱图如图 1 所示, 分析鉴定发现, 12 个桐梓古树绿茶茶样中共鉴定出 332 种挥发性物质, 包括醇类 53 种、酯类 79 种、酮类 25 种、烯烃类 22 种、醛类 14 种、有机酸类 16 种、萜类 30 种、其他化合物 93 种(图 2)。从化合物的数量占比看, 醇类占比 15.96%、酯类占比 23.80%、萜类占比 9.04%、酮类占比 7.53%, 这四种化合物数量最多。

采用面积归一法得到不同桐梓古树绿茶各香气组分的相对含量, 其中相对含量>1% 的有 24 种, 共 5 类, 其中醇类有 5 种, 酯类有 10 种, 烯烃类有 6 种, 酮类有 1 种, 醛类有 2 种, 如表 5 所示。这些相对含

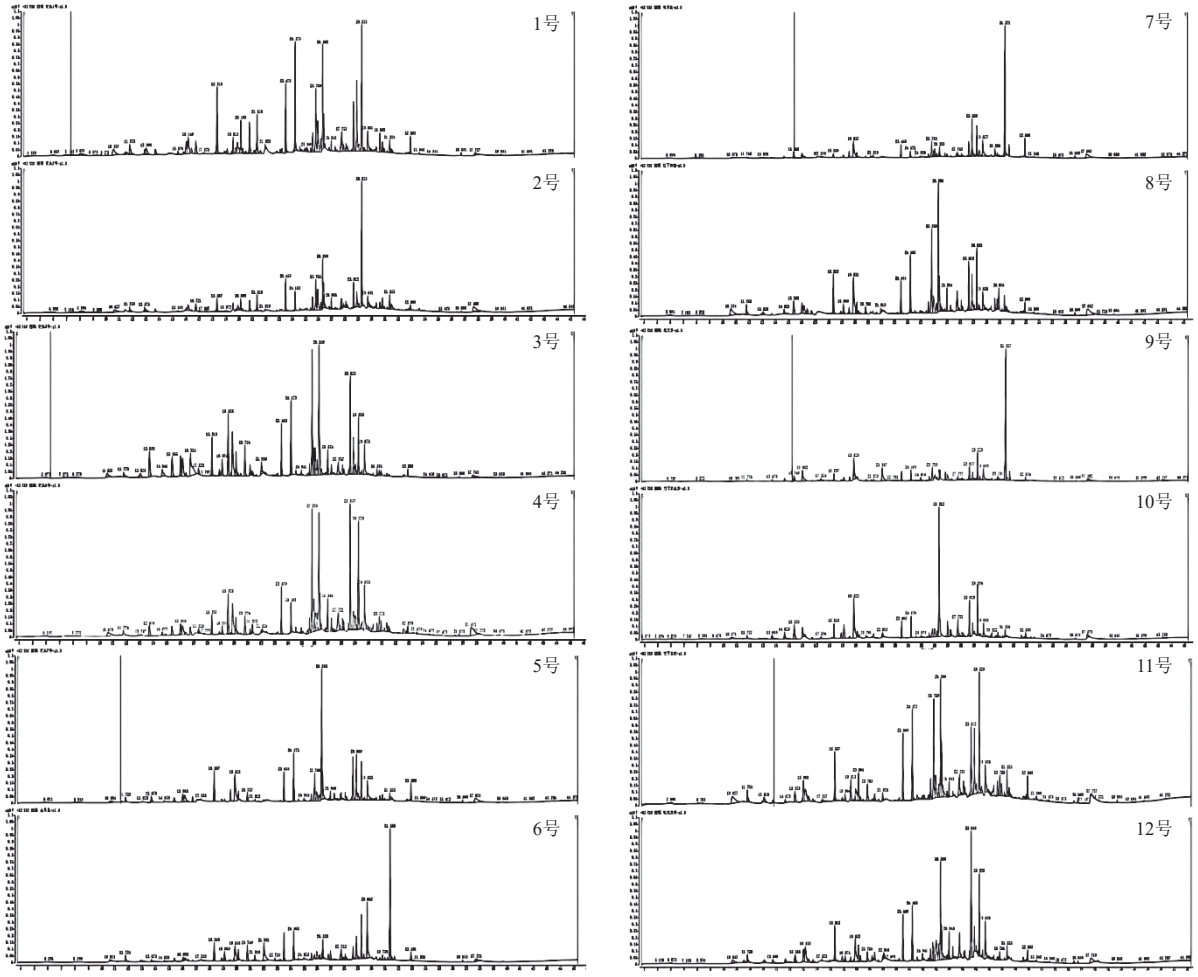


图 1 桐梓古树绿茶挥发性成分的总离子流图

Fig.1 Total ion flow diagram of volatile components of Tongzi ancient tree green tea

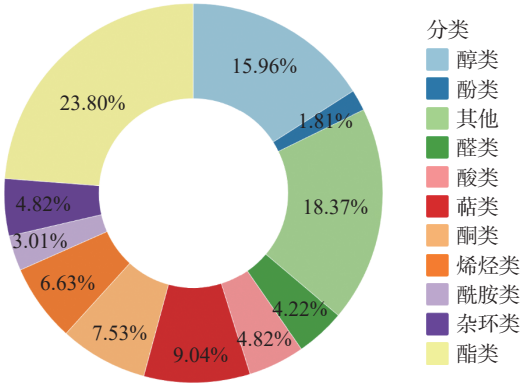


图 2　桐梓古树绿茶 12 个茶样各类化合物占总挥发物数目的百分比

Fig.2　Percentages of compound categories among total volatiles in 12 Tongzi ancient tree green tea

量较高的香气成分在茶中主要贡献玫瑰香、茉莉香、木兰香、紫罗兰香等花香，杏仁香、橙香、柠檬香等果香，以及木香、清香等特征香气类型[30−33]。

由表 5 可知，5 种特征性醇类挥发性物质中，芳樟醇在 12 个桐梓古树绿茶样本中均被检出，相对含量介于 0.34%~3.33%，尤其在 8 号、3 号和 9 号中含量较高，分别达到 3.33%、2.15% 和 2.24%。香叶醇和橙花叔醇虽同属玫瑰香型花香型物质，但分布不同，香叶醇在样本 8 中含量最高，达 4.61%，其次是 3 号 1.27%，其他样品中含量均<1%。而橙花叔醇则在样本 1 中含量最高，达 2.59%，在 7 号中未检出。苯甲醇在不同样本间波动较大，3 号中含量最高，达 2.76%，11 号最低，仅 0.21%。木质香的雪松醇多数样本中含量较低，多低于 1%，仅 6 号达 2.13%。

10 种特征性酯类挥发性物质中表现为果香的特征成分较多，分别有(Z)-2-甲基丙酸-3-己烯酯、己酸叶醇酯、顺-3-己烯基异丁酸酯、乙酸糠酯、2-甲基戊酸甲酯和 2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯，其中己酸叶醇酯在各样本中含量均较高，除在 7 号中含量仅 0.43%，其余样本中均超过 1%，在 3 号、4 号和 11 号中甚至超过 7%。水杨酸甲酯含量也普遍较高，尤其在 12 号、8 号和 5 号样本中表现突出，分别达 8.99%、7.63% 和 6.72%。乙酸叶醇酯(青草香)与水杨酸甲酯(清香)虽同属清香型物质，但分布特征不同，乙酸叶醇酯仅在 2 号样本中含量较高，为 1.21%。胡萝卜籽酯(胡萝卜香)在 6 号、7 号和 8 号中未检，而其他样本中含量总体均较高，均超过 1%，最高在 1 号中，达到 3.79%。酯类物质中，2,2,4-三甲基-1,3-戊

表 5　桐梓古树绿茶特征挥发性物质相对含量

Table 5　Relative contents of characteristic volatile substances in Tongzi ancient tree green tea

序号	化学物名称	1号	2号	3号	4号	5号	6号	7号	8号	9号	10号	11号	12号
	醇类相对含量(%)												
1	芳樟醇(甜花香)	0.62	0.34	2.15	1.19	1.73	1.6	1.53	3.33	2.24	1.76	1.52	1.98
2	橙花叔醇(玫瑰香)	2.59	1.21	0.48	0.69	0.66	1.42	0	0.36	1.21	0.47	1.16	0.45
3	苯甲醇(芳香)	0.34	0.94	2.76	1.2	1.73	0.41	1.71	0.72	0.28	0.78	0.21	0.99
4	香叶醇(玫瑰香)	0.27	0.54	1.27	0.18	0.25	0.09	0.51	4.61	0.57	0.27	0.43	0.12
5	雪松醇(木质香)	0.1	0	0	0	0.11	2.13	0.34	1.75	0.19	0.15	0	0.06
	酯类相对含量(%)												
1	(Z)-2-甲基丙酸-3-己烯酯(果香)	0.73	1.78	4.3	2.96	1.99	1.57	0.22	0.91	1.6	0.56	0.69	0.46
2	水杨酸甲酯(清香)	1.12	1.9	4.79	3.52	6.72	5.45	0.75	7.63	1.75	3.52	5.79	8.99
3	己酸叶醇酯(果香)	4.49	5.22	7.89	7.49	3.53	2.96	0.43	2.94	6.23	1.1	7.54	1.63
4	胡萝卜籽酯(胡萝卜香)	3.79	1.9	2.5	4	3.67	0	0	0	2.08	3.37	1.91	2.43
5	乙酸叶醇酯(青草香)	0.51	1.21	0.62	0.29	0.24	0.51	0.38	0	0.68	0.59	0.72	0.15
6	2-甲基丁酸己酯(玫瑰香)	1.22	1.66	0.49	0.54	0.33	0.72	1.62	0.48	0.54	0.65	0.22	0.6
7	顺-3-己烯基异丁酸酯(果香)	0.73	1.78	4.3	2.96	1.99	1.57	0.22	0.91	1.6	0.56	0.69	0.46
8	乙酸糠酯(水果香)	0	0.07	1.02	0.35	0.41	0.56	1.1	0.93	0.3	0.64	0.71	1.48
9	2-甲基戊酸甲酯(果香)	1.63	2.35	2.34	1.61	1.62	0.49	0.68	0.59	1.55	1.18	0.89	0.38
10	2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯(果香)	1.42	0.98	0.22	0.6	0.91	25.0	10.0	31.5	1.57	1.01	1.37	1.57
	烯烃类相对含量(%)												
1	α-法呢烯(花香)	11.87	8.57	3.25	6.4	4.36	4.24	3.53	5.06	6.89	5.76	4.84	6.08
2	香叶烯(柠檬香)	5.85	3.52	6.17	7.74	5.89	2.59	1.05	2.75	4.29	10.19	4.17	4.86
3	7-表-反-水和倍半香桧烯水合物(香草香)	1.55	1.2	1.44	1.52	1.05	0.65	0.66	0.8	0.93	1.96	1.37	1.11
4	石竹烯(丁香)	0.86	1.43	1.6	1.99	1.06	0.76	1.41	1.67	0.92	2.3	2.02	2.28
5	雪松烯(木质香)	0.31	0.32	0.19	0.32	0.05	0.66	1.00	1.69	0.46	0.48	0.36	0.24
6	柠檬烯(柠檬香)	0.31	1.01	0.16	0.14	0.06	0.11	2.18	0	0.09	0.14	0.18	0.06
	醛类相对含量(%)												
1	壬醛(花香)	1.09	1.14	2.22	1.4	1.55	0.88	1.16	0.55	2.07	2.69	1.45	0.7
2	苯甲醛(杏仁香)	0.8	2.43	0.92	1.33	1.03	0.45	0.31	0.34	2.54	1.28	2.82	1.09
	酮类相对含量(%)												
1	茉莉酮(茉莉花香)	8.14	0.23	7.91	6.88	15.59	0.16	0.76	2.09	7.47	8.00	10.9	19.98

二醇二异丁酸酯在 6 号、7 号和 8 号中含量都较高，均超过 10%。

6 种烯烃类挥发性物质中，α-法呢烯在 12 个样本中含量均较高，尤其在 1 号和 2 号样本中分别达到 11.87% 和 8.57%。香叶烯在 12 个样本中含量也均较高，在 10 号样本中含量最高，为 10.19%，4 号样本次之，为 7.74%，在 7 号和 8 号样本中含量较低，也达到 1.05% 和 2.75%。石竹烯整体含量介于 0.76%~2.30% 之间，在 10 号、12 号和 11 号样本中含量较高，分别为 2.30%、2.28% 和 2.02%。具有木质和香草特征的烯烃类物质整体含量偏低，雪松烯（木质香）在 8 号和 7 号样本中含量较高，分别为 1.69% 和 1.00%，而在其他样本中多低于 0.5%。7-表-反-水和倍半香桧烯水合物普遍分布于 1%~2% 之间，在 10 号样本中含量最高，为 1.96%，在 6 号样本中最低，仅 0.65%，表明其存在较广泛但强度不高。柠檬烯在多数样本中含量均低于 0.5%，仅在 7 号样本中显著偏高，达 2.18%，且其在 8 号样本中未检出。

醛类挥发性物质中，壬醛和苯甲醛相对含量较高，其中壬醛相对含量介于 0.55%~2.69%，在 10 号样本中含量最高，达到 2.69%；苯甲醛在 11 号样本中含量最高，为 2.82%，在 2 号茶样中也达到 2.43%。酮类挥发性物质中，茉莉酮的含量差异最为显著，其相对含量在 0.16%~19.98%，其中，5 号、11 号和 12 号样本中茉莉酮含量均超过 10%，分别达到 15.59%，10.9% 和 19.98%。然而，在 6 号与 7 号中，茉莉酮含量极低，仅 0.16% 和 0.76%。

2.5 基于主要内含成分和香气成分的聚类分析

茶多酚、氨基酸、咖啡碱等主要内含成分和特征香气成分都是构成茶叶主要风味的主要物质。基于主要品质成分和特征香气成分对研究的 12 个桐梓古树绿茶单株茶样进行聚类分析，结果如图 3 和图 4 所示。

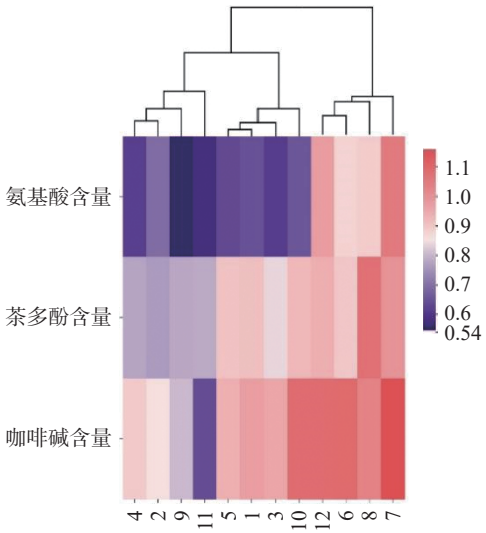


图 3 基于主要内含成分的桐梓古树绿茶聚类分析

Fig.3 Cluster analysis of Tongzi ancient tree green tea based on main components

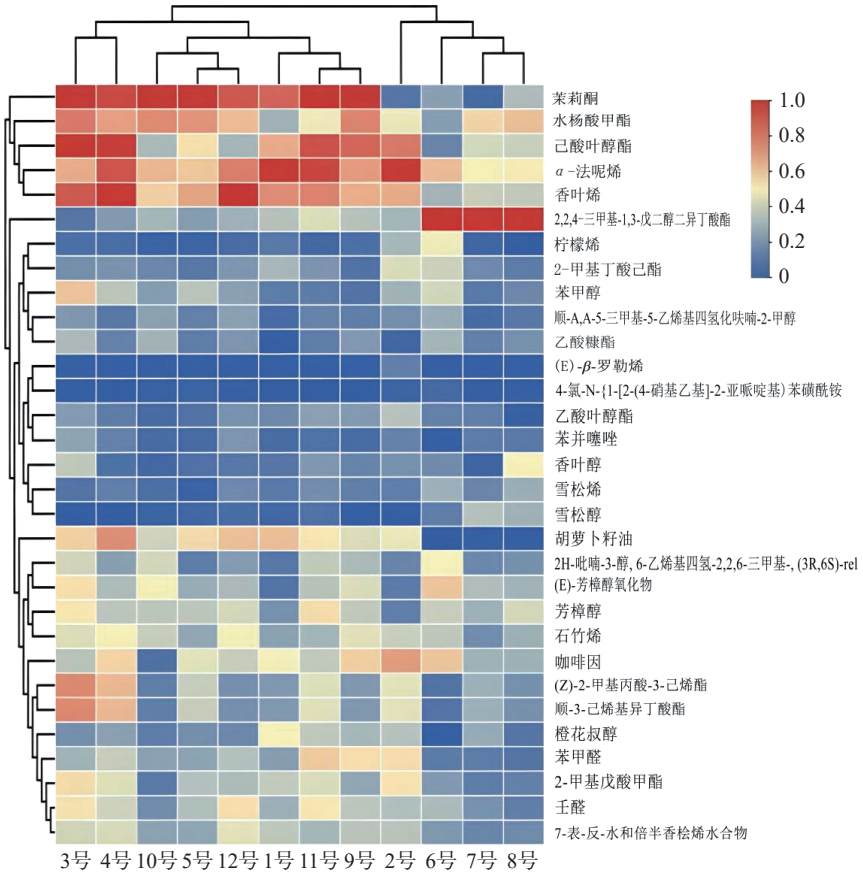


图 4 基于特征香气成分的桐梓古树绿茶聚类分析

Fig.4 Cluster analysis of Tongzi ancient tree green tea based on key aroma components

由图 3 和图 4 可知，12 个桐梓古树绿茶茶样主要分为 2 类，其中采自凤凰村的 6 号、7 号和 8 号始终在一类，这类氨基酸含量最高，鲜爽滋味显著，以 2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯为突出的香气成分，其香气以清甜香气为主，略带花香，另一类中，较为突出的是特征香气成分，由图 4 可知，3 号、4 号、10 号、5 号、12 号、1 号、9 号、2 号具有香气的挥发性物质相对含量较多的集中在图的上端，包含了茉莉酮、水杨酸甲酯、己酸叶醇酯、α-法呢烯、香叶烯等挥发性物质。其中茉莉酮具有花香和甘甜风味；水杨酸甲酯具有冬青油般的清香；己酸叶醇酯具有苹果和梨的香气；α-法呢烯具有十分浓烈的花香；香叶烯具有清淡的香气。

3　讨论与结论

本研究系统评价了贵州桐梓县 12 个古茶树单株绿茶的品质特征，结果表明桐梓古树绿茶整体品质优异，感官审评总分均在 90 分以上，呈现出“花香明显、滋味鲜醇”的独特风格。生化成分分析显示，12 个古茶树单株绿茶样品水浸出物含量均较高，都超过 40%，同时都含有丰富的游离氨基酸，最高达到 5.27%，以及多数<8 的适中的酚氨比，这些共同构成了茶汤浓醇、鲜爽、苦涩感低的物质基础。儿茶素分析进一步显示，12 个古茶树单株绿茶酯型与非酯型儿茶素比值均较低，仅在 1.22~2.54 之间，表明其潜在的苦涩味较轻，这与感官审评中“醇厚回甘”的滋味描述相吻合。香气成分鉴定出 24 种关键挥发性物质，芳樟醇、水杨酸甲酯、茉莉酮、α-法呢烯及 2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯等是构成其花果香风格的核心成分。聚类分析将 12 份茶样分为两类，分别以 6、7、8 号高氨基酸清甜型和高花香果香型为主要特征，揭示了不同单株资源在风味类型上的分化。

茶叶的风味是品种、环境、树龄及加工工艺共同作用的结果。本研究中桐梓古树绿茶普遍表现出高氨基酸和适宜酚氨比的特征，这可能与其树龄及特殊的生长环境密切相关。古茶树根系发达，能够吸收更深层土壤的养分，且长期适应高海拔、多云雾的生态条件，可能有利于氮代谢和鲜味氨基酸的积累。此外，研究还发现部分样品表现出异于其他样品的独特特征：同一区域、海拔最高的凤凰村的 6 号、7 号、8 号以高氨基酸含量和含量较高及贡献了特征的果香的 2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯，可能对桐梓古树绿茶独特的甜香风味有重要贡献，尤其是 7 号的氨基酸含量显著高于其他样品；在香气构成方面，桐梓古树绿茶的关键香气成分与许多优质绿茶有共同之处，如芳樟醇、香叶醇、苯甲醇等醇类物质共同塑造了其典型的花果香韵[34]，而 5 号、11 号和 12 号则在茉莉酮等花香成分上表现突出，表现出明显的花香，这些特征成分的具体来源及形成机制有待深入探究。与霍华珍等[35] 对广西本地群体种选育品系的研究及 Li 等[36] 研究的不同品种的茶树制作绿茶相比，均证实了品种（系）对绿茶香气成分组成的关键影响，但桐梓古树绿茶在香气类型上似乎更集中于花果香，这可能与树种、地域环境及加工工艺的差异有关。这些内含成分与香气组成的差异反映了古茶树群体内丰富的遗传多样性，为后续的优良单株选育提供了物质基础。

然而本研究仍存在一定局限。首先，样品均采自同一时期的同一嫩度标准，未能探究不同采摘季节或嫩度对风味的影响。其次，虽然鉴定了大量挥发性成分，但仅基于相对含量进行分析，未能结合香气阈值计算香气活性值，以更精确地评估各类成分对整体香气的实际贡献。此外，滋味形成的机理复杂，本研究虽分析了主要生化成分与感官得分的关联，但未能进一步解析关键呈味氨基酸的组成及其贡献度。综上，贵州桐梓古树绿茶品质优异，风味独特，其品质特征的形成是古茶树特异种质资源与特定生态环境协同作用的结果。未来研究可结合代谢组学、转录组学等技术，深入解析其风味物质合成的分子机制；同时，可系统研究栽培管理措施（如修剪、施肥）及加工工艺参数优化对其品质的调控作用，以推动这一特色资源的科学保护与高效利用。桐梓古茶树资源具有较高的遗传多样性和品质潜力，可在保护原有生态环境的基础上，进行科学选育与推广，避免过度开采，实现资源的可持续利用。

© 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] 马春莲，余金慧，龚正礼，等. 凤庆古茶树种质资源表型性状及生化成分多样性分析[J]. 中国茶叶，2025，47(6)：71−79. [MA Chunlian, YU Jinhui, GONG Zhengli, et al. Phenotypic and biochemical diversity analysis of ancient tea germplasm resources in Fengqing[J]. China Tea, 2025, 47(6): 71−79.]

[2] 牛森，杨洪焱，李雄宇，等. 易武茶区 4 个村寨古茶树资源生化成分多样性分析[J/OL]. 江苏农业科学，1−9. https://link.cnki.net/urlid/32.1214.S.20250625.1525.009. [NIU M, YANG H Y, LI X Y, et al. Analysis of biochemical composition diversity of ancient tea trees in 4 villages of Yiwu tea area[J/OL]. Jiangsu Agricultural Sciences, 1−9. https://link.cnki.net/urlid/32.1214.S.20250625.1525.009.]

[3] 刘冠群，杜素华，杨再琴，等. 贵州桐梓野生古茶树的种质资源保护与开发利用[J]. 农技服务，2022，39(10)：112−115. [LIU Guanqun, DU Suhua, YANG Zaiqin, et al. Protection, development and utilization of germplasm resources of wild ancient tea trees in Tongzi, Guizhou[J]. Agricultural Technology Service, 2022, 39(10): 112−115.]

[4] 张满引，段健伟，王彬力，等. 南江大叶茶古茶树资源主要农艺性状及遗传多样性分析[J/OL]. 茶叶通讯，1−8. https://link.cnki.net/urlid/43.1106.S.20250717.1130.006. [ZHANG X Y, DUAN J W, WANG B L, et al. Analysis of main agronomic traits and genetic diversity of ancient tea trees in Nanjiang Daye tea[J/OL]. Journal

of Tea Communication, 1−8. https://link.cnki.net/urlid/43.1106.S.20250717.1130.006.］
［5］马春莲, 刘学艳, 曹琦, 等. 临沧古茶树种质资源表型性状遗传多样性研究[J]. 植物遗传资源学报, 2026, 27(2): 373−386.［MA Chunlian, LIU Xueyan, CAO Qi, et al. Research on the genetic diversity of phenotypic traits of ancient tea tree germplasm resources in Lincang city[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2026, 27(2): 373−386.］
［6］李龙, 刘敏, 谭廷鸿, 等. 基于 GBS 技术的贵州铜仁地方茶树资源遗传关系研究[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2025, 46(5): 23−30.［LI Long, LIU Min, TAN Tinghong, et al. Population genetic relationships of local tea germplasms resources in Tongren city of Guizhou Province based on genotyping by sequencing[J]. Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition), 2025, 46(5): 23−30.］
［7］李燕, 密孝增, 张小琴, 等. 普安古茶树种质资源茶叶生化成分多样性分析[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(5): 984−995.［LI Yan, MI Xiaozeng, ZHANG Xiaoqin, et al. Diversity analysis of biochemical components of ancient tea germplasm resources in Pu'an[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2025, 41(5): 984−995.］
［8］岩嘎, 杨艳芬, 杨梓泰, 等. 景迈山古茶园与生态茶园晒青茶品质特征的研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(19): 346−354.［YAN Ga, YANG Yanfen, YANG Zitai, et al. Quality characteristics of sun-dried green tea from ancient tea gardens and ecological tea gardens in Jingmai mountain[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(19): 346−354.］
［9］汤海昆, 杨方慧, 张艳梅, 等. 西双版纳地区古树和乔木普洱茶(生茶)品质差异分析[J]. 茶叶通讯, 2025, 52(1): 61−69.［TANG Haikun, YANG Fanghui, ZHANG Yanmei, et al. Analysis on the quality difference between ancient tree and arborous Pu'er tea (raw tea) in Xishuangbanna area[J]. Journal of Tea Communication, 2025, 52(1): 61−69.］
［10］杨春华, 袁文侠, 张世浩, 等. 景迈山 7 个村寨古树茶的品质特征[J]. 云南农业大学学报, 2024, 39(1): 111−119.［YANG Chunhua, YUAN Wenxia, ZHANG Shihao, et al. Quality characteristics of ancient tree tea in seven villages of Jingmai mountain[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Social Science), 2024, 39(1): 111−119.］
［11］谢关华, 李博洋, 吕逸凡, 等. 白茶饮料高温贮藏期间香气感官评价及挥发性物质分析[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(20): 313−320.［XIE Guanhua, LI Boyang, LÜ Yifan, et al. Aroma sensory evaluation and volatile compounds analysis of white tea beverage during high-temperature storage[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(20): 313−320.］
［12］汤志飞, 周小芬, 郜秋艳, 等. 基于感官审评和 GC-MS 检测的春雨二号白茶香气成分分析[J]. 中国茶叶, 2021, 43(7): 40−47.［TANG Zhifei, ZHOU Xiaofen, GAO Qiuyan, et al. Aroma component analysis of 'Chunyu 2' white tea based on sensory test and GC-MS[J]. China Tea, 2021, 43(7): 40−47.］
［13］吴福茹. 基于代谢组学研究不同产地狗牯脑茶化学成分差异[D]. 南昌: 南昌大学, 2024.［WU Furu. Metabonomics-based study on the difference of chemical constituents of Gougunao tea from different producing areas[D]. Nanchang: Nanchang University, 2024.］
［14］王辉, 周汉琛, 刘亚芹, 等. 渥堆时间对黟县黑茶滋味品质及非挥发性代谢物的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(21): 283−291.［WANG Hui, ZHOU Hanchen, LIU Yaqin, et al. Influence of pile fermentation time on the sensory flavor and non-volatile compounds of Yixian dark tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(21): 283−291.］
［15］陈德权, 任杨梅, 何梦迪, 等. 基于感官评价和代谢组学技术解析紫阳绿茶风味特征和生化成分差异[J]. 茶叶科学, 2024, 44(2): 316−328.［CHEN Dequan, REN Yangmei, HE Mengdi, et al. Analysis of flavor characteristics and biochemical composition differences of Ziyang green tea based on sensory evaluation and metabolomics techniques[J]. Journal of Tea Science, 2024, 44(2): 316−328.］
［16］张一昊, 宗梦婷, 刘艳红, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 的临沧普洱生茶与传统绿茶香气差异分析[J]. 生物资源, 2025, 47(5): 456−469.［ZHANG Yihao, ZONG Mengting, LIU Yanhong, et al. Analysis of aroma differences between Lincang Pu-er raw tea and traditional green tea based on HS-SPME-GC-MS[J]. Amino Acids and Biotic Resources, 2025, 47(5): 456−469.］
［17］翁丽萍, 刘超, 丰榕, 等. 不同区域西湖龙井茶的香气物质分析与比较[J]. 食品科技, 2023, 48(8): 51−58.［WENG Liping, LIU Chao, FENG Rong, et al. Analysis and comparison on the aroma substances of West Lake Longjing tea in different regions[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(8): 51−58.］
［18］王佳佳, 薛桥丽, 胡永金, 等. 易武古树茶理化成分分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(15): 211−217.［WANG Jiajia, XUE Qiaoli, HU Yongjin, et al. Analysis of physicochemical composition of Yiwu ancient tree tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(15): 211−217.］
［19］张春花, 王子龙, 浦如秋, 等. 普洱生茶风味轮的构建与感官特性研究[J]. 食品工业科技, 2025, 46(15): 1−11.［ZHANG Chunhua, WANG Zilong, PU Ruqiu, et al. Construction and sensory characteristics of the flavor wheel of raw Pu-erh tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(15): 1−11.］
［20］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.］
［21］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.］
［22］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 游离氨基酸总量的测定: GB/T 8314-2013[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 free amino acids content: GB/T 8314-2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.］
［23］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.］
［24］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.］
［25］ AI Zeyi, ZHANG Beibei, CHEN Yuqiong, et al. Impact of light irradiation on black tea quality during withering［J］. Journal of Food Science and Technology，2017，54(5)：1212−1227.
［26］ 殷雨心，陈玉琼，焦远方，等. 不同茶树品种原料对青砖茶品质的影响［J］. 茶叶科学，2021，41(1)：48−57.［YIN Yuxin, CHEN Yuqiong, JIAO Yuanfang, et al. Effects of raw materials from different tea cultivars on green brick tea quality［J］. Journal of Tea Science，2021，41(1)：48−57.］
［27］ 冯花，王飞权，张渤，等. 不同茶树品种白牡丹茶香气成分的 HS-SPME-GC-MS 分析［J］. 现代食品科技，2021，37(12)：252−264,251.［FENG Hua, WANG Feiquan, ZHANG Bo, et al. Analysis of aroma components of baimudan tea from different tea plant varieties using HS-SPME-GC-MS［J］. Modern Food Science & Technology，2021，37(12)：252−264,251.］
［28］ 冯花，王飞权，陈荣冰，等. 不同茶树新品系的武夷岩茶适制性鉴定［J］. 江苏农业科学，2021，49(23)：173−184.［FENG Hua, WANG Feiquan. CHEN Rongbing, et al. Identification of suitability for Wuyi rock tea of different tea plant lines［J］. Jiangsu Agricultural Sciences，2021，49(23)：173−184.］
［29］ 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 Jiafeng, LI Guoping, OUYANG Jian, et al. 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.］
［30］ HO C T, ZHENG X, LI S M. Tea aroma formation［J］. Food Science and Human Wellness，2015，4(1)：9−27.
［31］ JOSHI R, GULATI A. Fractionation and identification of minor and aroma-active constituents in Kangra orthodox black tea［J］. Food Chemistry，2015，167：290−298.
［32］ LI Huanhuan, LUO Liyong, MA Mengjun, et al. Characterization of volatile compounds and sensory analysis of jasmine scented black tea produced by different scenting processes［J］. Journal of Food Science，2018，83(11)：2718−2732.
［33］ 郑琳，刘盼盼，金孝芳，等. 不同茶树品种(系)黄大茶的品质分析［J］. 食品工业科技，2022，43(21)：310−318.［ZHENG Lin, LIU Panpan, JIN Xiaofang, et al. Quality analysis of large-leaf yellow tea made from different tea cultivars(strains)［J］. Science and Technology of Food Industry，2022，43(21)：310−318.］
［34］ 王海利，杨秀芳，孔俊豪，等. 不同品种名优绿茶理化品质及挥发性成分分析［J］. 食品工业科技，2019，40(18)：217−223.［WANG Haili, YANG Xiufang, KONG Junhao, et al. Analysis of physical and chemical indicators and aroma components of different green tea［J］. Science and Technology of Food Industry，2019，40(18)：217−223.］
［35］ 霍华珍，郭春雨，蔡爱华，等. 广西本地群体种选育的不同茶树品系绿茶适制性研究［J/OL］. 食品工业科技，1−22. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024100208.［HUO H Z, GUO C Y, CAI A H, et al. Study on the suitability of different strains of locally bred tea plant populations in Guangxi for green tea production［J/OL］. Science and Technology of Food Industry，1−22. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024100208.］
［36］ LI Y H, RAN W, HE C, et al. Effects of different tea tree varieties on the color, aroma, and taste of Chinese Enshi green tea［J］. Food Chemistry：X，2022，14：100289.