付燕梦, 邹雅倩, 田星. 基于电子舌和 HS-SPME-GC-MS 技术的不同产地青钱柳茶风味特征及其生物活性成分分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(16): 366−380. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070013

FU Yanmeng, ZOU Yaqian, TIAN Xing. Flavor Characterization and Bioactive Compound Analysis of *Cyclocarya paliurus* Tea from Different Origins Using E-Tongue Combined with HS-SPME-GC-MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(16): 366−380. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070013

· 分析检测 ·

基于电子舌和 HS-SPME-GC-MS 技术的不同产地青钱柳茶风味特征及其生物活性成分分析

付燕梦[1,2], 邹雅倩[1,3], 田　星[1,2,*]

（1.湖南中医药大学药学院, 湖南长沙 410208;
2.湖南中医药大学药学院, 湖南省中医药民族医药国际联合实验室, 湖南长沙 410208;
3.湖南大学隆平农学院, 湖南长沙 410125）

摘　要: 目的：探究不同产地对青钱柳茶风味特征和生物活性成分的影响。方法：分别选取江西修水（Q1）、贵州雷公山（Q2）、湖南张家界（Q3）、湖南邵阳（Q4）、湖南壶瓶山（Q5）产青钱柳茶为研究对象，利用电子舌系统、感官评定、顶空固相微萃取（Headspace solid–phase microextraction，HS-SPME）和气相色谱-质谱（Gas chromatography-mass spectrometry，GC-MS）联用技术以及生物活性物质测定；通过皮尔逊相关性分析，揭示挥发性物质和非挥发性风味物质的相关性，较为系统地探究不同产地对青钱柳茶风味及其生物活性成分形成的综合影响。结果：从不同产地青钱柳茶中共计检测出 130 种挥发性有机物，其中主要分为 7 大类，分别为萜类 63 种，烃类 26 种、醛类 11 种、醇类 8 种、酮类 7 种、酯类 6 种、其他 9 种。电子舌分析显示，不同产地青钱柳茶的味觉强度整体呈现苦味>鲜味>甜味的特征分布。感官评定结果进一步表明，各产地在具体味觉属性上存在显著差异（P<0.05），其中 Q2 产地青钱柳茶苦味较强，Q4 产地鲜味评分较高，Q3 产地甜味评分较高。生物活性成分含量分析表明，不同产地青钱柳茶的总多酚、总黄酮、总多糖和总皂苷含量存在显著差异，其中 Q1 产地青钱柳茶在总多酚、总黄酮和总皂苷含量上均高于其他产地（P<0.05），而 Q5 产地青钱柳茶的总多糖含量突出。相关性分析显示，萜类、醇类、醛类物质与苦味、鲜味呈正相关，与甜味、涩味呈负相关（P<0.05）；酮类物质与苦味呈正相关，与甜味呈负相关（P<0.05）。结论：不同产地的青钱柳茶在挥发性有机物质组成与生物活性成分含量上存在显著差异，这种差异直接塑造了各产区青钱柳茶的独特风味特征。研究结果为消费者科学选购青钱柳茶提供了依据，同时也在产地鉴别、质量标准化控制及深加工产品开发等方面提供了理论支撑与实践指导。

关键词: 青钱柳茶, 不同产地, 气相色谱质谱联用仪（GC-MS）, 风味物质, 生物活性

中图分类号: TS207.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)16−0366−15

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070013　　本文网刊:

Flavor Characterization and Bioactive Compound Analysis of *Cyclocarya paliurus* Tea from Different Origins Using E-Tongue Combined with HS-SPME-GC-MS

FU Yanmeng[1,2], ZOU Yaqian[1,3], TIAN Xing[1,2,*]

（1.School of Pharmacy, Hunan University of Chinese Medicine, Changsha 410208, China;
2.TCM and Ethnomedicine Innovation & Development International Laboratory, School of Pharmacy, Hunan University

收稿日期: 2025−07−04

基金项目: 湖南省自然科学基金面上项目（2023JJ30445）; 湖南省中医药管理局科研项目（B2024012）。

作者简介: 付燕梦（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品风味与感官评定、食药资源的多元化开发与创新利用, E-mail: 3198926609@qq.com。

*** 通信作者:** 田星（1986−）, 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品风味与感官评定、食药资源的多元化开发与创新利用, E-mail: acctianxing@hotmail.com。

of Chinese Medicine, Changsha 410208, China;
3.Longping Agricultural College, Hunan University, Changsha 410125, China）

Abstract: Objective: This study aimed to investigate the impact of geographical origin on the flavor profile and bioactive constituents of *Cyclocarya paliurus* tea. Methods: *Cyclocarya paliurus* tea samples from five different geographical regions—Q1 (Xiushui, Jiangxi), Q2 (Leigongshan, Guizhou), Q3 (Zhangjiajie, Hunan), Q4 (Shaoyang, Hunan), and Q5 (Hupingshan, Hunan) were analyzed using an electronic tongue system, sensory evaluation, headspace solid-phase microextraction (HS-SPME) coupled with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), and quantitative determination of bioactive compounds. This integrated approach enabled a systematic investigation of the effects of geographical origin on flavor profiles and bioactive component contents in *Cyclocarya paliurus* tea. Results: A total of 130 volatile organic compounds (VOCs) were identified across all samples, and were primarily categorized into seven classes: 63 terpenes, 26 hydrocarbons, 11 aldehydes, 8 alcohols, 7 ketones, 6 esters, and 9 other miscellaneous compounds. Electronic tongue analysis showed that the taste intensity of *Cyclocarya paliurus* tea from different origins generally followed the order of bitterness>umami>sweetness. Sensory evaluation further indicated significant differences in specific taste attributes among different origins (P<0.05), with Q2 showing stronger bitterness, Q4 exhibiting relatively higher umami scores, and Q3 showing higher sweetness scores. Analysis of bioactive components revealed significant variations in the contents of total polyphenols, flavonoids, polysaccharides, and saponins across different geographical origins. Among the samples, Q1 showed the highest concentrations of total polyphenols, flavonoids, and saponins, while Q5 contained the highest level of polysaccharides. Correlation analysis revealed that terpenoids, alcohols, and aldehydes were negatively correlated with sweetness and astringency, but positively correlated with bitterness and umami (P<0.05). Ketones exhibited a negative correlation with sweetness and a positive correlation with bitterness (P<0.05). Conclusion: *Cyclocarya paliurus* tea from different geographical origins exhibits significant differences in the composition of volatile organic compounds and in the content of bioactive components, which contribute to the distinct flavor characteristics of teas from their respective production regions. These research findings not only provide a scientific basis for consumer decision-making in tea selection, but also offer theoretical support and practical implications for origin traceability, quality standardization, and the development of value-added processed products.

Key words: *Cyclocarya paliurus* tea; different origins; gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS); flavor substances; bioactivity

青钱柳（*Cyclocarya paliurus*）是胡桃科青钱柳属的珍稀落叶乔木，在江西、江苏、安徽、湖北、贵州等地广泛分布，其独特的生长环境造就了丰富的生物活性成分[1]。现代药理学研究表明，青钱柳叶中含有丰富的多酚、黄酮、总多糖、皂苷等多种功能性成分，可通过多靶点协同作用发挥降血糖、降血脂、抗氧化和免疫调节等作用[2−3]，对功能性食品开发及慢性病防治具有重要价值[4]。值得注意的是，青钱柳作为国家二级保护植物，其叶子（青钱柳叶）于 2013 年被国家卫生和计划生育委员会正式批准为新食品原料[5]；而青钱柳茶则是以青钱柳叶为原料，经过特定工艺制成的可冲泡饮用的深加工产品[6]。目前，青钱柳茶已实现产业化，并成功获得美国 FDA 认证，展现出广阔的市场前景[7]。青钱柳在适应环境的过程中，风味物质和功能成分呈现出独特性，而其风味代谢物含量的差异导致了其功能的多样性。风味是代用茶品质的重要指标[8]，直接影响消费者的接受度和选择倾向。然而，目前关于青钱柳叶的研究多集中于化学成分的分离鉴定及药理活性等领域[9]，但对其风味品质的系统研究相对匮乏[10]。因此，开展青钱柳茶风味特征的系统研究具有重要的理论价值和现实意义。

随着现代分析技术的快速发展，食品风味研究手段不断革新。智能电子舌技术通过模拟人类味觉系统，可实现对食品基本味觉特征的快速、客观评价；而顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术（Headspace solid phase microextraction gas chromatography-mass spectrometry，HS-SPME-GC-MS）则为挥发性风味物质的精准鉴定提供了可靠方法[11−12]。将这两种技术有机结合，可全面解析青钱柳茶的风味特征，为产品质量评价体系的建立提供科学依据。

本研究采用电子舌技术和 HS-SPME-GC-MS 技术，结合感官评定和生物活性成分测定，全面解析青钱柳茶的风味特征及其与生物活性成分的相关性。旨在系统分析不同产地青钱柳茶的风味特征及其生物活性成分，揭示产地对风味和生物活性的影响。因此，研究结果不仅为消费者选择青钱柳茶提供科学依据，也为青钱柳茶的产地鉴别、质量控制和产品开发提供理论支持，对推动青钱柳产业高质量发展具有重要意义。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

青钱柳茶　江西修水（Q1，北纬 28°47′~29°22′，源自修水县三高茶叶有限公司）、贵州黔东南（Q2，北纬 25°19′~27°31′，源自雷公山的贵州黔东南）、湖南张家界（Q3，北纬 28°52′~29°48′，源自张家界诺

康生态茶叶有限公司)、湖南邵阳(Q4, 北纬 25°58′~27°40′, 源自绥宁县六鹅洞养生茶叶有限公司)、湖南壶瓶山(Q5, 北纬 29°50′~30°09′, 源自湖南省月岭君山农林科技股份有限公司)。

TS-sa402b 电子舌系统　日本 INSENT 智能传感器技术有限公司; UV-1280 分光光度计　日本岛津仪器有限公司; 50/30 μm DVB/PDMS 萃取头、固相微萃取(Solid phase microextraction, SPME)手动进样手柄　美国 Supelco 公司; 气相色谱-质谱联用(Gas chromatographymass spectrometry, GC-MS)仪　美国 Agilent 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　不同产地青钱柳茶水提物的制备　取适量不同产地青钱柳茶, 经粉碎机粉碎, 以 1∶20 料液比于 90 ℃ 恒温水浴锅中浸提 40 min, 浸提液以 4500 r/min 离心 5 min, 上层清液经三层纱布过滤三次得滤液, 其中部分滤液直接用于电子舌分析; 其余滤液在旋转蒸发仪中于 75 kPa、65 ℃ 条件下浓缩至原体积的 1/5, 转移至冷冻干燥机中进行冻干处理, 所得冻干粉末密封 4 ℃ 储存以备后续使用。

1.2.2　GC-MS 测定　准确称取 0.50±0.01 g 样品置于 15 mL 顶空瓶中, 于 60 ℃ 恒温水浴中平衡 10 min, 插入已活化(活化条件: 250 ℃ 下保持 30 min)的固相微萃取头采样, 顶空吸附 45 min。吸附完成立即将萃取头插入 GC 进样口, 在 250 ℃ 下解吸 3 min, 同时启动数据采集系统。

气相色谱条件: 采用 DB-5MS 毛细管色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)。载气为高纯氦气(纯度≥99.999%), 恒流模式, 流速 1.7 mL/min。进样口温度 250 ℃, 不分流模式。程序升温条件: 初始温度 40 ℃, 保持 5 min; 以 10 ℃/min 升至 85 ℃, 保持 3 min; 以 4 ℃/min 升至 200 ℃, 保持 3 min; 最后以 10 ℃/min 升至 230 ℃, 保持 1 min。

质谱条件: 采用电子轰击电离源(EI), 电离能量 70 eV。离子源温度 200 ℃, 传输线温度 250 ℃, 四极杆温度 150 ℃。全扫描模式, 质量扫描范围 m/z 35~400 amu。溶剂延迟时间 3 min, 发射电流 100 μA, 检测器电压 1.4 kV。质谱数据库采用 NIST 14 标准谱库进行化合物鉴定, 匹配度>80% 的化合物予以保留。挥发性有机物采用峰面积归一化法进行相对半定量分析, 即以总离子流图中各已鉴定化合物的峰面积占同一样品全部已鉴定挥发性化合物总峰面积的百分比表示其相对含量。该方法所得结果用于比较不同产地青钱柳茶样品中挥发性成分的相对组成差异。每个样品平行测定 3 次, 以确保分析结果的重复性和可靠性。

1.2.3　电子舌分析　采用 TS-sa402b 型智能味觉分析系统对 5 个不同产地青钱柳茶水提物进行味觉特征评价, 测定前, 取 1.2.1 节所得过滤后的水提液, 充分混匀并平衡至室温后用于电子舌测定; 若样品存在少量沉淀, 则再次过滤或离心后取上清液进行分析。系统配备 7 个广域选择性人工脂膜传感器阵列, 可识别咸味、苦味、酸味、鲜味、鲜味回味、涩味、苦回味和涩味回味等属性。每个样品平行测定 4 个循环, 取后 3 个循环的稳定响应值进行统计分析, 通过 TS-sa402b Library 软件计算相对味觉强度值(RTI)。参考溶液输出值被视为无味点, 而大于这些无味点值则被认为具有意义, 取有意义值进行主成分分析及差异分析。

1.2.4　感官评定　不同产地样品称取 2.00±0.05 g, 200 mL 的开水冲泡 30 min, 再将冲泡好的茶汤经双层纱布滤出, 得待评样本。感官评价员对每个样本的苦味、涩味、鲜味、甜味和香气 5 项指标的喜好进行感官评分。参照田星等[13] 的方法筛选出 10 名感官评价员(5 名男生, 5 名女生)组成感官评定小组进行感官评分, 评定过程和标准严格参照 GB/T 23776-2018《茶叶感官审评方法》。采用五分制评分标准(每个样本打乱顺序重复 3 次, 每个感官评定员共需要品尝 15 杯青钱柳茶)。

1.2.5　生物活性成分测定

1.2.5.1　总多酚含量测定　总多酚含量采用 Folin-Denis 法测定, 参考李巨秀等[14] 的方法, 将不同产地样品 1 mL 与福林酚试剂混合反应 30 s(室温), 准确加入 6.0 mL 碳酸钠溶液(12%), 充分搅拌, 定容至 25 mL 后避光 2 h。使用分光光度计在 760 nm 处测量吸光度。以不同浓度的没食子酸在同样条件下反应, 绘制多酚标准曲线, 得曲线回归方程 $Y = 0.1102X + 0.0498$, R^2=0.9989。使用以下公式计算总多酚含量:

$$M = \frac{(y - 0.0498) \times 25 \times 10 \times V}{0.1102 \times m \times 1000}$$

式中: M 为青钱柳茶样品中总多酚的含量(mg/g); y 为样品溶液在 760 nm 处的吸光度值; m 为青钱柳样品的质量(g); V 为样品提取液定容的体积(mL); 25 为测量时样品定容的体积(mL)。

1.2.5.2　总黄酮含量测定　总黄酮含量的测定采用硝酸铝比色法, 参考田星等[13] 方法, 将 1 mL 不同产地样品(1 mg/mL)倒入试管中, 再加入 5 mL 乙醇(70%), 1 mL 亚硝酸钠溶液(5%), 在试管中涡旋混合, 静置 6 min, 加入 1 mL 氯化铝(10%), 并用乙醇(70%)将溶液定容至 10 mL, 静置 15 min。使用分光光度计在 510 nm 处测量吸光度。以芦丁为参考标准品绘制标准曲线, 得 $Y = 0.014X - 0.0168$, R^2=0.9901。使用以下公式计算总黄酮含量:

$$M = \frac{(y + 0.0168) \times 25 \times 10}{0.014 \times m \times 1000 \times 6}$$

式中: M 为青钱柳茶样品中总黄酮的含量(mg/g); y 为样品溶液在 510 nm 处的吸光度值; m 为青钱柳样品的质量(g); 10 为样品提取液定容的

体积(mL)；25 为测量时样品定容的体积(mL)；6 为测量消耗样品的体积(mL)。

1.2.5.3　总多糖含量测定　总多糖含量的测定采用苯酚-硫酸法。取 2 mL 不同产地样品(1 mg/mL)，与 1 mL 苯酚(5%)和 5 mL 浓硫酸混合，沸水浴锅中反应 20 min。冷却至室温后，使用分光光度计在 488 nm 处测量样品的吸光度[15]。以葡萄糖为参考标准品绘制多糖含量标准曲线，得 $Y = 0.0137X - 0.0249$，R^2=0.9923。使用以下公式计算总多糖含量：

$$W(\%) = \frac{(y + 0.0249) \times 100 \times V}{0.0137 \times m \times 1000} \times 100$$

式中：W 为青钱柳茶样品中总多糖的含量(%)；y 为样品溶液在 488 nm 处的吸光度值；m 为青钱柳样品的质量(g)；V 为样品提取液定容的体积(mL)；100 为测量时样品稀释的倍数。

1.2.5.4　总皂苷含量测定　参考赵虎[16] 的方法并稍作修改，将不同产地样品 1 mL 放入试管，并在烘箱中加热蒸发溶剂。随后，加入由 0.5 mL 香兰素-冰醋酸(5%)和 1.4 mL 高氯酸组成的显色剂体系与样品中的皂苷反应，其颜色强度表示皂苷含量。在 560 nm 波长处用分光光度法测量样品的颜色强度，以试剂为空白。使用齐墩果酸为标准对照品绘制总皂苷标准曲线，得 $Y = 5.8167X - 0.0163$，R^2=0.9981。使用以下公式计算总皂苷含量：

$$M = \frac{(y + 0.0163) \times 1000}{5.8167 \times 2.5}$$

式中：M 为青钱柳茶样品中 TSC 的含量(mg/g)；y 为样品溶液在 560 nm 处的吸光度值；2.5 为测定时 1 mL 样品提取液中所含青钱柳茶样品的质量(mg)；1000 为 g 与mg 的换算比例。

1.3　数据处理

运用 SPSS Statistics 22.0 软件进行单因素方差分析(One-way analysis of variance, one-way ANOVA)和邓肯多重比较(Duncan multiple comparisons)，所有测试和分析均进行三次重复，并取平均值，结果显示为平均值±标准差(SD)，P<0.05 表示差异显著，反之则不显著；采用 SIMCA 14.1 软件进行主成分分析(Principal component analysis, PCA)，同时，采用 TBtools(版本 2.056, https://github.com/CJ-Chen/TBtools)绘制热图。

2　结果与分析

2.1　不同产地青钱柳茶挥发性有机物质定性及相对含量分析

对五种不同产地青钱柳茶挥发性有机物进行 GC-MS 分析，共检测出 130 种挥发性有机物。根据化合物类别可分为 7 类，分别为萜类 63 种、烃类 26 种、醛类 11 种、醇类 8 种、酮类 7 种、酯类 6 种和其他类 9 种。其中，萜类化合物种类最多，是青钱柳茶挥发性有机物的重要组成部分，这与植物次生代谢特征相符[17]。不同产地青钱柳茶的挥发性成分组成及相对含量存在明显差异(表 1、图 1)。

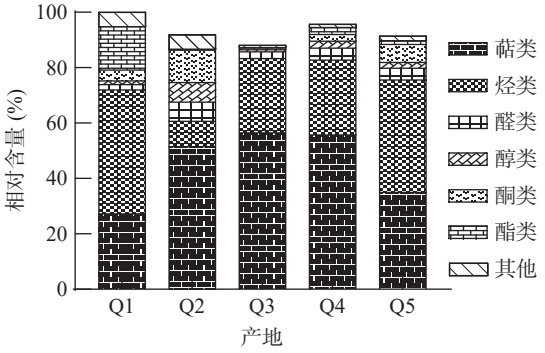


图 1　不同产地青钱柳茶中各类挥发性有机物质相对含量

Fig.1　Relative contents of various volatile organic compounds in different origins of *Cyclocarya paliurus* tea

江西修水(Q1)所产青钱柳茶的主要挥发性成分以甲苯-2,4-二异氰酸酯(15.68%)、4-溴环己烯(15.65%)、1-甲基-4-异丙基-1-环己烯(9.59%)等为主，其组成特征可能与当地较低光照和较高湿度的气候条件有关。这种环境条件有利于特定挥发性有机物的合成与积累，尤其是烃类和卤代烃类化合物；同时，这些挥发性成分可能与青钱柳茶的清新果香、花香及柔和口感有关[18]。贵州雷公山(Q2)青钱柳茶中相对含量较高的挥发性成分依次为 6-甲基-6-庚烯-2-酮(6.35%)、3-蒈烯(5.98%)、2-己基癸醇(5.10%)、(-)-松香芹醇(4.62%)等。Q2 地区多云雾、高湿度、低光照条件可能促进萜类和酮类化合物的积累，其相对较高的酮类及萜类成分可能与茶汤苦味及香气特征有关；醛类化合物则可能与茶汤鲜味和甜味特征有关[19]。湖南张家界(Q3)青钱柳茶挥发性成分以 3-蒈烯(14.16%)、(+)-香橙烯(9.13%)及 3-溴环己烯(9.05%)等为主。当地适宜的土壤与气候可能有利于萜类化合物积累，尤其是倍半萜类成分，如(+)-香橙烯和 δ-榄香烯，可能与木香、辛香等香气特征有关[20−21]；湖南邵阳(Q4)青钱柳茶中相对含量较高的挥发性成分依次为 3-蒈烯(15.33%)、4-溴-1-环己烷(9.48%)、(−)-松香芹醇(8.72%)、1-氯-2-溴丙烷(7.18%)、δ-榄香烯(5.80%)和 2-癸炔(5.57%)；湖南壶瓶山(Q5)青钱柳茶挥发性成分以 4-溴-1-环己烷(11.13%)、2-癸炔(9.31%)、(+)-长叶烯(9.23%)和正十八炔(9.12%)为主，其中 2-癸炔与正十八炔相对含量较高，且这类炔烃在青钱柳中鲜有报道，可能作为防御性次生代谢物存在。研究表明，较高的土壤肥力可促进植物生长和次生代谢产物合成，从而影响挥发性有机物的积累[22]。

2.2　不同产地青钱柳茶电子舌结果分析

5 种不同产地青钱柳茶的味觉轮廓在整体上呈现相似性，但其涩味、苦味回味、涩味回味及丰富性等指标的相对味觉强度值(Relative taste intensity, RTI)接近无味点(|RTI|<0.5)(图 2)，表明这些指标在

表 1　不同产地青钱柳茶挥发性有机物定性分析结果

Table 1　Results of the qualitative analysis of volatile organic compounds in *Cyclocarya paliurus* tea of different origins

分类	英文名称	中文名称	CAS号	修水		雷公山		张家界		邵阳		壶瓶山	
				相对含量（%）	保留时间（min）	相对含量（%）	保留时间（min）	相对含量（%）	保留时间（min）	相对含量（%）	保留时间（min）	相对含量（%）	保留时间（min）
萜类醇	(+)-Cyclosativene	(+)-环苜蓿烯	22469-52-9	0.21±0.05	44.49	1.01±0.16	22.73	0.47±0.32	47.54	0.83±0.07	22.74	–	–
	(+)-Alpha-Longipinene	*α*-依兰烯	14912-44-8	1.56±0.22	44.76	–	–	–	–	–	–	–	–
	Ascaridole	阿斯克烯	512-85-6	1.16±0.25	36.43	–	–	–	–	–	–	–	–
	(Z)-sabinene hydrate	(Z)-沙宾烯水合物	54679-68-4	0.80±0.03	22.71	–	–	–	–	–	–	–	–
	Thujyl alcohol	蒽紫红素/伊索舒约尔	513-23-5	0.95±0.33	31.33	–	–	0.84±0.02	35.24	–	–	–	–
	(Z)-(3,3-dimethylcyclohexylidene)ethanol	(Z)-3,3-二甲基环亚己基乙醇	26532-23-0	0.01±0.00	36.14	–	–	–	–	–	–	3.40±1.00	35.25
	2-Cyclohexen-1-ol,2-methyl-5-(1-methylethenyl)-,(1R,5R)-rel-	rel-(1R,5R)-2-甲基-5-(1-甲基乙烯基)环己-2-烯-1-醇	10482-56-1	1.09±0.45	35.77	4.28±0.00	19.13	–	–	–	–	–	–
	2-Isopropylidene-3-methylhexa-3,5-dienol	2-异亚丙基-3-甲基己-3, 5-二烯醇	515-69-5	0.22±0.05	30.91	–	–	–	–	–	–	–	–
	(-)-Carveol	(-)-香芹醇	2102-58-1	0.53±0.27	34.11	–	–	–	–	–	–	–	–
	3-Carene	3-蒈烯	13466-78-9	0.45±0.06	19.18	5.98±0.50	43.63	14.16±1.28	43.86	15.33±0.47	43.63	–	–
	Bicyclo[3.2.0]heptane, 2-ethenyl-2,6,6-trimethyl-1-(1-methylethenyl)-(1R,2S,5S)-rel-	*α*-桉叶油醇	473-16-5	4.85±1.09	41.53	4.74±1.80	43.85	–	–	3.55±0.18	43.85	–	–
	δ-elemene,(3R-trans)-4-ethenyl-4-methyl-3-(1-methylethenyl)-1-(1-methylethyl)-cyclohexene,(1S,2R)-(-)-2-isopropenyl-1-vinyl-p-menth-3-ene	*δ*-榄香烯	515-13-9	0.89±0.19	41.84	0.63±0.18	43.51	–	–	5.80±4.68	43.52	–	–
	Cyclopenta[c]pentalene,1,2,3,3a,4,5,5a,6- octahydro-1,4,4,5a-tetramethyl-,(1R,3aS,5aS,- 8aR)-	(-)-雪松烯	469-61-4	6.29±1.60	43.62	0.89±0.69	44.04	–	–	3.98±3.15	43.88	–	–
	Cyclopenta[c]pentalene, 1,3a,4,5,5a,6,7,8-octahydro-1,2,3a,6-tetramethyl-, (1R,3aS,5aS,6R,8aR)-	异长叶烯	54809-74-8	2.66±1.32	43.85	–	–	0.55±0.19	45.83	–	–	–	–
	(-)-Alpha-Cubebene	(-)-Alpha-荜澄茄油烯	17699-14-8	2.45±1.15	43.52	–	–	6.82±2.32	45.76	0.48±0.18	45.82	0.90±0.94	43.08
	Alpha-longipinene	(+)-*α*-长叶蒎烯	5989-08-2	1.72±2.16	43.08	0.54±0.23	47.54	–	–	–	–	–	–
	(-)-Isoledene	(-)-异喇叭烯	50771-99-2	0.44±0.06	44.60	–	–	0.84±0.53	27.81	–	–	–	–
	Beta-elemene	*β*-榄香烯	515-13-9	0.43±0.09	45.82	–	–	0.76±0.29	27.24	–	–	–	–
	(-)-Thujopsene	(-)-罗汉柏烯	28634-89-1	0.28±0.05	47.66	–	–	3.03±1.82	17.70	–	–	–	–

续表 1

分类	英文名称	中文名称	CAS号	修水		雷公山		张家界		邵阳		壶瓶山	
				相对含量（%）	保留时间（min）	相对含量（%）	保留时间（min）	相对含量（%）	保留时间（min）	相对含量（%）	保留时间（min）	相对含量（%）	保留时间（min）
	(+)-Aromadendrene	(+)-香橙烯	489-39-4	0.31±0.15	47.91	0.79±0.60	17.72	9.13±2.11	40.44	0.42±0.13	17.73	–	–
	Laevo-pinocarveol	(-)-松香芹醇	547-61-5	–	–	4.62±3.90	41.54	1.05±0.78	42.38	8.72±6.14	41.54	–	–
	(Z)-verbenol	(Z)-马鞭烯醇	1845-33-0	–	–	0.89±0.48	43.33	3.30±0.89	42.62	–	–	–	–
	Pseudo-limonene	伪柠檬烯	555-10-2	–	–	1.74±1.24	42.61	6.25±3.24	43.51	–	–	0.62±0.02	41.83
	Bicyclo[3.2.0]heptane, 2-ethenyl-2,6,6-trimethyl-1-(1-methylethenyl)-, (1R,2S,5S)-rel-	(-)-β-石竹烯氧化物	17696-40-5	–	–	–	–	2.59±0.14	42.73	–	–	–	–
	Delta-elemene isomer	δ-榄香烯异构体	20307-84-0	–	–	–	–	6.30±2.03	44.76	–	–	–	–
	(+)-Alpha-Longipinene	(+)α-长叶蒎烯	1686-30-2	–	–	–	–	0.40±0.09	45.15	0.24±0.00	45.16	–	–
	Tricyclo[4.4.0.0^{2,7}]dec-3-ene,1,3-dimethyl-8-(1-methylethyl)-, (1S,2R,6R,7R,8S)-	(1S,2R,6R,7R,8S)-1,3-二甲基-8-(1-甲基乙基)-三环[4.4.0.0^{2,7}]癸-3-烯	无	–	–	1.22±0.30	47.65	–	–	–	–	–	–
	α-Copaene	α-荜澄茄烯	3856-25-5	–	–	2.11±0.65	47.97	–	–	2.50±2.34	47.91	–	–
	Beta-patchoulene	β-广藿香烯	514-51-2	–	–	–	–	–	–	0.73±0.01	27.80	–	–
	Beta-copaene	β-可帕烯	3856-26-6	–	–	–	–	–	–	0.20±0.05	30.25	–	–
	Alpha-guaiene	α-愈创木酚	3691-12-1	–	–	–	–	–	–	1.19±0.09	35.28	–	–
	Bicyclo[3.1.1]heptan-3-ol,6,6-dimethyl-2-methylene-, (1S,3R,5S)-	(-)-桃金娘烯醇	515-00-4	1.30±1.08	32.05	–	–	–	–	2.79±0.47	39.72	–	–
	Bicyclo[3.1.0]hexan-3-ol,4-methyl-1-(1-methylethyl)	诺卜醇	50770-44-4	–	–	–	–	–	–	0.31±0.09	26.13	1.66±0.48	26.10
	1-(3,3-dimethylcyclohexylidene)ethanol	1-(3,3-二甲基环己亚基)乙醇	107295-28-3	–	–	0.76±0.05	30.93	–	–	1.09±0.75	30.92	1.10±0.02	30.93
	Dihydro-beta-ionone	二氢-β-紫罗兰酮	53452-26-5	–	–	–	–	–	–	1.45±1.36	47.97	1.00±0.11	47.91
	(+)-3-Thujone	(+)-3-侧柏酮	546-80-5	–	–	–	–	–	–	0.35±0.27	47.03	0.23±0.06	47.04
	Bicyclo[3.1.0]hex-3-en-2-one,4-methyl-1-(1-methylethyl)-	诺卡酮	33756-41-3	–	–	1.65±0.26	46.36	–	–	2.85±3.27	46.37	–	–
	1,2,3,4,5,6,7,8-octahydro-1,4-dimethyl-7-(1-methylethenyl)-, [1S-(1.alpha.,4.alpha.,7.alpha.)]-Azulene	(-)-α-愈创木烯	489-84-9	–	–	–	–	–	–	3.23±2.53	47.03	–	–
	(-)-Valencene	(-)-瓦伦西亚烯	4630-07-3	–	–	0.69±0.40	14.45	–	–	0.53±0.48	14.46	–	–
	(+)-Longicyclene	(+)-长叶环烯	1137-12-8	–	–	0.54±0.20	45.16	–	–	1.01±0.54	14.45	0.96±0.79	15.47

续表 1

分类	英文名称	中文名称	CAS号	修水		雷公山		张家界		邵阳		壶瓶山	
				相对含量（%）	保留时间（min）	相对含量（%）	保留时间（min）	相对含量（%）	保留时间（min）	相对含量（%）	保留时间（min）	相对含量（%）	保留时间（min）
	(+)-Longifolene	(+)-长叶烯	475-20-7	–	–	4.09±3.05	28.00	–	–	–	–	9.23±0.77	28.03
	Alpha-fenchene	α-葑烯	471-84-1	–	–	1.45±0.59	27.80	–	–	–	–	–	–
	(+)-Camphene	(+)-莰烯	5794-03-6	–	–	0.79±0.72	35.29	–	–	–	–	–	–
	(1S,5α)-4β-Methyl-1-isopropylbicyclo[3.1.0]hexan-3α-ol	(1S, 5a)-4β-甲基-1-异丙基双环[3.1.0]己烷-3α-醇	124-76-5	–	–	2.56±0.29	31.77	–	–	–	–	–	–
	Bicyclo[3.1.1]heptan-3-ol,6,6-dimethyl-2-methylene-	6,6-二甲基-2-亚甲基双环[3.1.1]庚烷-3-醇	103050-39-9	–	–	1.70±0.12	27.23	–	–	–	–	–	–
	Ethanol,2-(3,3-dimethylcyclohexylidene)-,(2Z)-	(Z)-3,3-二甲基环亚己基乙醇	67634-25-9	–	–	1.83±0.01	46.63	–	–	–	–	–	–
	1-Methyl-4-(isopropyl)cyclohexan-1-ol	4-异丙基-1-甲基环己醇	6370-22-7	–	–	3.54±2.96	44.31	–	–	–	–	–	–
	Bicyclo[3.1.1]hept-3-en-2-ol,4,6,6-trimethyl-,(1R,2R,5R)-rel-	(+)-反式-马鞭草烯醇	1845-30-3	–	–	1.61±0.42	45.02	–	–	–	–	–	–
	Beta-damascone	β-大马酮	23726-91-2	–	–	0.55±0.50	11.97	–	–	–	–	–	–
	Tricyclo[4.4.0.0^{2,7}]dec-3-ene,1,3-dimethyl-8-(1-methylethyl)-,(1R,2S,6S,7S,8S)-	(1R,2S,6S,7S,8S)-1,3-二甲基-8-(1-甲基乙基)三环[4.4.0.0^{2,7}]癸-3-烯	104934-53-4	–	–	0.32±0.08	45.83	–	–	–	–	–	–
	Fenchene	葑烯	5006-88-8	–	–	–	–	–	–	–	–	1.84±1.56	42.88
	4,7-Methanoazulene,1,2,3,4,5,6,7,8-octahydro-1,4,9,9-tetramethyl-,(1S,4R,7R)-	(-)-愈创木烷	489-40-7	–	–	–	–	–	–	–	–	3.12±0.09	31.78
	Cyclohexane,1-ethenyl-1-methyl-2,4-bis(1-methylethenyl)-,(1S,2S,4R)-	(-)-α-荜澄茄烯	17699-14-8	–	–	–	–	–	–	–	–	2.98±0.25	28.00
	Alpha-dihydroterpineol	α-二氢松油醇	10482-56-1	–	–	–	–	–	–	–	–	0.46±0.12	23.68
	Isopulegol	异普列戈	89-79-2	–	–	–	–	–	–	–	–	0.67±0.39	21.78
	(E)-para-2,8-1-menthadienol	(E)--2,8-1-薄荷二烯酚	19686-21-4	–	–	–	–	–	–	–	–	1.57±0.19	46.63
	(Z)-para-2,8-menthadien-1-ol	(Z)--2,8-薄荷二烯-1-醇	50767-79-0	–	–	–	–	–	–	–	–	0.47±0.12	44.93
	(E)-sabinene hydrate	(E)-桧烯水合物	546-79-2	–	–	–	–	–	–	–	–	0.95±0.47	35.70
	ALPHA-DAMASCONE	α-大马酮	43052-87-5	–	–	–	–	–	–	–	–	0.21±0.04	34.15
	Dihydrojasmone	二氢茉莉酮	1128-08-1	–	–	–	–	–	–	–	–	2.68±0.17	44.76
	Bicyclo[3.1.1]hept-3-en-2-one,4,6,6-trimethyl-,(1R,5R)-	(1R, 5R)-4,6,6-三甲基双环[3.1.1]庚-3-烯-2-酮	1196-01-6	–	–	–	–	–	–	–	–	0.95±0.25	47.06

续表 1

分类	英文名称	中文名称	CAS号	修水		雷公山		张家界		邵阳		壶瓶山	
				相对含量（%）	保留时间（min）	相对含量（%）	保留时间（min）	相对含量（%）	保留时间（min）	相对含量（%）	保留时间（min）	相对含量（%）	保留时间（min）
烃类	α-Yangene	α-依兰烯	无	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	Tricyclo[4.4.0.02,7]decane,1-methyl-3-methylene-8-(1-methylethyl)-, (1R,2S,6S,7S,8S)-rel-	(1R,2S,6S,7S,8S)-rel-1-甲基-3-亚甲基-8-(1-甲基乙基)三环[4.4.0.0^{2,7}]癸烷	104934-52-3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	(1aR,4aα,7aα,7bβ)-Decahydro-1,1,4α,7α-tetramethyl-1H-cycloprop[e]azulene	(1aR,4aα,7aα,7bβ)-十氢-1,1,4a,7a-四甲基-1H-环丙并[e]氮杂环苯	6874-01-5	1.65±0.81	44.85	–	–	–	–	–	–	–	–
	n-Tridecane	十三烷	629-50-5	0.29±0.07	40.94	–	–	3.56±0.58	20.71	0.27±0.09	36.89	–	–
	8-(1-Methylethylidene)bicyclo[5.1.0]octane	8-(1-甲基亚乙基)双环[5.1.0]辛烷	29577-83-5	0.86±0.07	24.06	1.69±0.57	20.70	–	–	–	–	3.85±0.13	20.73
	1-Methyl-4-isopropyl-1-cyclohexene	1-甲基-4-异丙基-1-环己烯	99-83-2	9.59±4.02	19.49	–	–	–	–	–	–	–	–
	1-Octadecyne	正十八炔	629-89-0	0.35±0.24	36.87	–	–	3.54±1.30	16.69	–	–	9.12±0.76	15.85
	2-Decyne	2-癸炔	2384-70-5	1.71±0.10	20.70	1.87±0.19	16.72	1.15±0.06	6.45	5.57±2.94	16.71	9.31±0.75	16.70
	2-Bromo-1-chloro-propan	2-溴-1-氯丙烷	5578-76-5	5.21±1.89	5.14	–	–	2.32±1.12	15.44	–	–	–	–
	4-Bromocyclohexene	4-溴环己烯	2535-56-4	15.65±5.93	15.88	–	–	2.73±0.63	17.97	–	–	–	–
	3-Bromocyclohexene	3-溴环己烯	1521-55-3	9.42±2.32	16.75	1.14±0.14	18.01	9.05±0.88	5.27	–	–	2.79±0.62	17.95
	3,4-Dimethyl-Hexane	3,4-二甲基己烷	922-28-1	–	–	–	–	4.50±1.48	15.85	–	–	–	–
	2,2-Dimethyl-3-methylene-, (1R)-Bicyclo[2.2.1]heptane	(1R)-2,2-双甲基-3-亚甲基二环[2.2.1]庚烷	102061-42-3	–	–	1.80±0.41	15.88	–	–	3.41±2.07	15.90	–	–
	1-Decene	正癸烯	872-05-9	–	–	–	–	–	–	0.27±0.04	12.23	–	–
	2-Bromo-1-chloropropane	1-氯-2-溴丙烷	3017-95-6	–	–	–	–	–	–	7.18±4.88	20.72	–	–
	Cyclohexene, 4-bromo-	4-溴-1-环己烷	2535-56-4	–	–	–	–	–	–	9.48±6.15	23.13	11.13±0.51	23.10
	Santolina triene	桑托利纳·特里内	29573-83-3	–	–	–	–	–	–	0.84±0.05	35.76	–	–
	Dec-2-yne	2-癸炔	2384-85-2	–	–	1.22±1.53	19.47	–	–	–	–	–	–
	1-Undecyne	1-十一炔	2243-98-3	–	–	0.42±0.15	14.85	–	–	–	–	–	–
	2,4,6-Trimethylstyrene	2,4,6-三甲基苯乙烯	769-28-8	–	–	1.08±0.07	5.07	–	–	–	–	–	–
	4-Isopropyl-1-methylcyclohexene	卡沃门特尼	536-95-8	–	–	–	–	–	–	–	–	1.18±0.03	14.80
	(Z)-9-Methyl-5-undecene	(Z)-9-甲基-5-十一烯	13138-57-1	–	–	–	–	–	–	–	–	1.52±0.05	9.83

续表 1

分类	英文名称	中文名称	CAS号	修水		雷公山		张家界		邵阳		壶瓶山	
				相对含量（%）	保留时间（min）	相对含量（%）	保留时间（min）	相对含量（%）	保留时间（min）	相对含量（%）	保留时间（min）	相对含量（%）	保留时间（min）
	1,2-Dichloroisobutane	1,2-二氯-2-甲基丙烷	594-37-6	–	–	–	–	–	–	–	–	0.25±0.03	37.49
	4,5-Dimethyloctane	4,5-二甲基辛烷	15869-95-7	–	–	–	–	–	–	–	–	1.16±0.37	17.48
	1,3,5,7-Cyclooctatetraene	环辛四烯	629-20-9	–	–	–	–	–	–	–	–	0.25±0.03	29.66
	Dodec-2-yne	十二烷-2-炔	7065-46-1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	t-Butylbenzene	叔丁基苯	98-06-6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	Tetramethylbenzene	四甲苯	95-93-2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	2,2-Dimethylocta-3,4-dienal	2,2-二甲基-3,4-辛二烯醛	851178-13-5	0.64±0.42	25.76	3.55±0.18	39.68	1.91±0.63	33.75	0.21±0.04	39.68	0.39±0.06	39.69
	Campholenic aldehyde	龙脑烯醛	4501-58-0	0.22±0.01	26.12	–	–	–	–	0.95±0.68	33.76	1.93±0.17	33.76
	(Z)-2-nonenal	(Z)-2-壬烯醛	60784-31-8	0.49±0.03	27.81	–	–	–	–	0.66±0.15	14.90	–	–
	10-Undecenal	10-十一烯醛	112-45-8	0.58±0.23	39.69	–	–	–	–	0.57±0.47	28.82	–	–
醛类	Bicyclo[3.1.1]hept-2-en-6-ol, 2,7,7-trimethyl-, 6-formate, (1R,5S,6S)-rel-	(1R,5S,6S)-rel-2,7,7-三甲基双环[3.1.1]庚-2-烯-6-醇甲酸酯	7775-35-1	–	–	–	–	–	–	–	–	0.33±0.13	3.25
	Hexanal, 2-ethyl-	2-乙基己醛	123-05-7	–	–	–	–	–	–	–	–	1.01±0.05	25.56
	3,4-Dimethylbenzaldehyde	3,4-二甲基苯甲醛	5973-71-7	–	–	–	–	–	–	–	–	0.45±0.44	37.61
	Cyclopropanecarboxaldehyde	环丙甲醛	1489-69-6	–	–	–	–	–	–	–	–	0.20±0.02	38.79
	Alpha-Cyclociral	alpha-环柠檬醛	432-25-7	–	–	0.53±0.35	33.75	0.57±0.01	36.15	–	–	–	–
	Beta-Homocyclocitral	beta-同环柠檬醛	472-66-2	–	–	1.05±0.32	36.14	–	–	0.78±0.19	36.14	–	–
	2-Methyl-5-prop-1-en-2-ylcyclopentene-1-carbaldehyde	2-甲基-5-丙-1-烯-2-基环戊烯-1-甲醛	29548-14-9	–	–	1.76±0.21	10.42	–	–	1.15±0.39	10.49	–	–
	(3Z)-3,7-Dimethyl-3,6-octadien-1-ol	(3Z)-3,7-二甲基-3,6-辛二烯-1-醇	106-25-2	–	–	0.34±0.04	30.25	–	–	–	–	1.67±0.03	30.24
	4-Hepten-1-ol	4-庚烯-1-醇	5927-65-9	–	–	0.35±0.17	8.34	–	–	–	–	–	–
醇类	trans-2-Nonen-1-ol	反式-2-壬烯-1-醇	188345-34-0	–	–	0.47±0.07	50.46	–	–	–	–	0.15±0.03	50.60
	2,6-Dimethylocta-5,7-dien-2-ol	2,6-二甲基-5,7-辛-2-醇	40716-66-3	–	–	0.82±0.01	25.61	–	–	–	–	–	–
	2-Hexyn-1-ol	2-己炔-1-醇	764-60-3	–	–	–	–	0.74±0.35	15.33	–	–	0.25±0.08	24.56
	2-Hexyl-1-decanol	2-己基癸醇	101236-77-5	–	–	5.10±5.55	15.55	–	–	–	–	–	–

续表 1

分类	英文名称	中文名称	CAS号	修水		雷公山		张家界		邵阳		壶瓶山	
				相对含量（%）	保留时间（min）	相对含量（%）	保留时间（min）	相对含量（%）	保留时间（min）	相对含量（%）	保留时间（min）	相对含量（%）	保留时间（min）
酮类	3,7-Dimethyloct-6-en-1-yn-3-ol	3,7-二甲基-6-辛烯-1-炔-3-醇	29171-20-8	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	P-tolylmethanol	对甲苯甲醇	589-18-4	–	–	–	–	–	–	0.71±0.33	15.35	–	–
	6-Methyl-6-hepten-2-one	6-甲基-6-庚烯-2-酮	110-93-0	3.69±0.97	15.30	6.35±1.04	22.25	–	–	2.37±2.00	22.23	0.51±0.08	51.08
	2,6-Dihydroxyacetophenone	2,6-二羟基乙酰苯	699-83-2	0.23±0.06	52.56	0.93±0.06	51.08	–	–	–	–	–	–
	3,5-Octadien-2-one,(3E,5E)-	3,5-辛二烯-2-酮	30086-02-3	–	–	–	–	–	–	–	–	0.26±0.03	47.73
	Tridecan-2-one	2-十三烷酮	593-08-8	–	–	–	–	–	–	–	–	0.98±0.04	23.21
	2-Butanone,4-(2,6,6-trimethyl-1-cyclohexen-1-yl)-	二氢-β-紫罗兰酮	79-77-6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	2-Propan-2-ylidenecyclohexan-1-one	2-丙烷-2-亚基环己烷-1-酮	3758-60-7	–	–	4.43±1.11	34.01	–	–	–	–	–	–
	(E,E)-3,5-octadien-2-one	(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮	30086-02-3	–	–	–	–	–	–	–	–	4.71±0.65	16.15
酯类	Toluene 2,4-diisocyanate	甲苯-2,4-二异氰酸酯	584-84-9	15.68±5.00	44.15	–	–	–	–	–	–	0.24±0.01	31.28
	4-Methyl pentyl isovalerate	4-甲基戊酸戊酯	7779-81-9	–	–	–	–	–	–	–	–	0.15±0.01	37.09
	Ethyl 4-methyl valerate	4-甲基戊酸乙酯	25415-67-2	–	–	–	–	–	–	–	–	0.24±0.03	40.44
	Methyl 2-methylnonanoate	2-甲基壬酸甲酯	51534-66-4	–	–	–	–	–	–	2.16±0.05	32.59	–	–
	Ethyl 3-cyclopentylpropanoate	3-环戊基丙酸乙酯	2349-04-0	–	–	0.20±0.00	29.65	–	–	0.42±0.01	29.65	–	–
	(-)-Lavandulyl acetate	(-)-薰衣草甲酸酯	38863-50-8	–	–	–	–	0.66±0.11	39.42	–	–	0.63±0.07	42.21
	(3S,3aS,7aR)-2,3,3a,4,5,7a-hexahydro-3,6-dimethylbenzofuran	(3S,3aS,7aR)-2,3,3a,4,5,7a-六氢-3,6-二甲基苯并呋喃	19905-17-0	0.82±0.14	32.60	0.70±0.02	39.42	–	–	–	–	1.00±0.09	39.42
	4-Methoxystyrene	4-甲氧基苯乙烯	637-69-4	–	–	–	–	–	–	1.14±0.09	39.42	–	–
	2-Ethyl-1,4-dimethoxybenzene	2-乙基-1,4-二甲氧基苯	1706-40-1	–	–	1.10±0.32	30.44	–	–	–	–	–	–
	2,3-Dihydro-2,2-dimethyl-7-benzofuranol	呋喃酚	1563-38-8	–	–	2.91±0.21	45.32	0.88±0.20	45.31	–	–	0.39±0.06	45.32
其他	2-Nitrotoluene	2-硝基甲苯	88-72-2	4.03±1.03	30.47	0.61±0.01	49.33	–	–	–	–	–	–
	3,9-Epoxy-p-mentha-1,8(10)-diene	3,9-环氧对薄荷-1,8(10)-二烯	16409-43-1	0.30±0.05	32.41	–	–	–	–	–	–	0.38±0.26	6.36
	2,8-Dimethylquinoline	2,8-二甲基喹啉	6540-53-4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	2,5-Di-tert-butyl-1,4-benzoquinone	2,5-二叔丁基-1,4-苯醌	2923-52-0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	rel-2α-Propyl-3α-methyloxirane	rel-2α-丙基-3α-甲基环氧乙烷	无	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

注：无：NIST库仅给出结构匹配，但未分配CAS编号；–：未检出。

区分不同产地青钱柳茶风味特征方面缺乏显著性差异（P>0.05）[23]。相比之下，甜味、苦味和鲜味的 RTI 值显著高于无味点（|RTI|>0.5），具有统计学意义（P<0.05），可作为区分不同产地青钱柳茶风味特征的有效味觉指标。可能是因为苦味、涩味、回味的物质基础不同，苦味的来源通常是生物碱、苷类，这些物质对环境比较敏感，所以不同产地的微小环境差异会导致苦味物质浓度发生变化，从而评价员感受到差异；而涩味与回味是多酚类物质与唾液中的蛋白质结合后，产生的味觉感知，其多酚物质生长稳定，无论产地如何，种类与浓度都会保持在一个相对稳定的范围，同时回味是味道在口腔中的残留和持续，其本身强度就很弱。

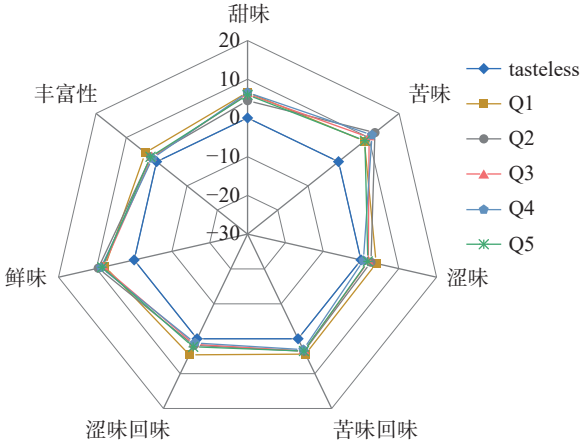


图 2 不同产地青钱柳茶味觉指标雷达图

Fig.2 Radar charts of taste indicators in different origins of *Cyclocarya paliurus* tea

五种不同产地青钱柳茶的味觉强度呈现一致的特征分布：苦味>鲜味>甜味（图 3），这与以往的青钱柳茶感官评价一致[24]。其中贵州雷公山（Q2）、湖南张家界（Q3）和湖南邵阳（Q4）样品的味觉强度存在显著差异（P<0.05），而江西修水（Q1）和湖南壶瓶山（Q5）样品的风味特征较为接近。尽管产地来源与加工工艺等因素可能导致各滋味绝对强度存在一定波动，其相对强度排序呈现出高度保守性。研究表明，“苦>鲜>甜”的感官属性强度顺序，构成了青钱柳茶区别于其他传统茶类的特征性风味图谱。这一规律不仅为青钱柳茶的品质评价提供了客观、可量化的感官指标，也与其内在生化成分组成的稳定性相互印证，对构建标准化质量体系、指导产品定向开发以及引导消费者科学认知具有重要价值。

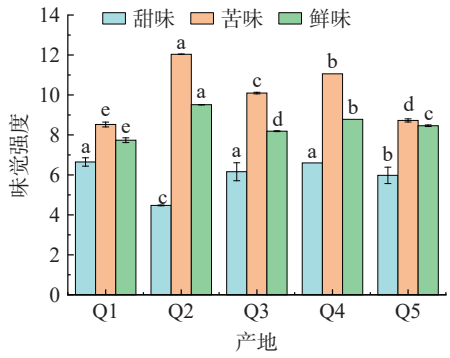


图 3 不同产地青钱柳味觉强度

Fig.3 Taste intensity in different origins of *Cyclocarya paliurus* tea

注：同一指标不同小写字母表示不同产地青钱柳茶样本之间差异显著（P<0.05）。

由于青钱柳茶的香气组成体系复杂多样，难以通过单一香气成分指标及简单的一元分析手段获取有效的区分变量。而主成分分析作为一种综合性的分析策略，能够依据数据内部的统计规律，在多个观测对象与指标变量互相关联的背景下揭示其潜在模式。图 4 为 5 种不同产地青钱柳的电子舌主成分分析图，其中 PC1 的贡献率为 68.6%，PC2 的贡献率为 23.8%，总贡献率达到 92.4%，说明 PC1 和 PC2 基本包含了样品的所有成分信息，能够反映出不同产地青钱柳茶的整体风味。在 PCA 得分图中，不同产地样品虽然分布区域相对集中，但仍可被明显区分，Q1 和 Q2 在 PCA 图中距离较远，表明其风味特征差异较大；而 Q3、Q4 和 Q5 距离较近，相对来说其风味特征较为接近，这表明地理来源对青钱柳茶的风味特征具有显著影响。

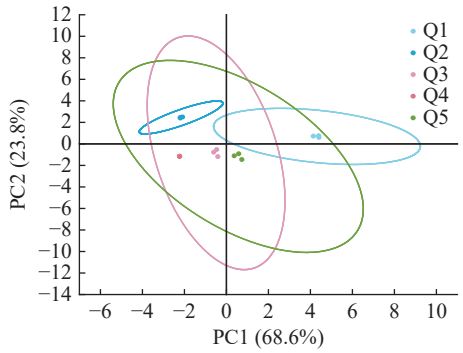


图 4 不同产地青钱柳味觉指标主成分分析（PCA）

Fig.4 Principal component analysis (PCA) of taste indicators in different origins of *Cyclocarya paliurus* tea

2.3 不同产地青钱柳茶风味感官评定结果分析

对五种不同产地青钱柳茶进行感官评定，结果如表 2。Q2 地区青钱柳茶香味评分最高（2.10±0.10），显著高于 Q5 地区（1.53±0.15）（P<0.05），但与 Q1、Q3 和 Q4 地区差异不显著。Q2 地区样品香气评分相对较高，可能与其挥发性有机物的组成和相对含量有关，特别是萜类和醛类等香气化合物的相对含量较高。Q2 地区青钱柳茶苦味评分最高（3.13±0.06），显著高于其他地区（P<0.05）；Q3 和 Q4 地区苦味评分相近，分别为 2.40±0.56 和 2.33±0.25，而 Q1 和 Q5 地区苦味评分相对较低，分别为 2.07±0.21 和 1.63±0.35。Q2 地区青钱柳茶苦味较为突出，这一结果与电子舌分析结果基本一致。Q2 地区青钱柳茶涩味评分最高（2.73±0.12），显著高于其他地区（P<0.05）；Q3 地区涩味评分次之，为 1.93±0.25；Q1 和

Q4 地区位于其后，分别为 1.80±0.10 和 1.60±0.17；Q5 地区涩味评分最低，为 1.43±0.06。鲜味方面，Q4 地区青钱柳茶鲜味评分最高（1.20±0.17），Q1 和 Q2 地区鲜味评分相同（1.00±0.10），Q3 地区鲜味评分为 0.97±0.12，略低于 Q1 和 Q2，Q5 地区鲜味评分最低（0.90±0.10）。甜味方面，Q3 地区青钱柳茶甜味评分最高（2.03±0.21），显著高于 Q1 和 Q5（P<0.05），但与 Q2 和 Q4 差异不显著；Q2 和 Q4 地区甜味评分相近，分别为 1.63±0.31 和 1.70±0.26，Q1 和 Q5 地区甜味评分相对较低，分别为 1.10±0.26 和 1.37±0.15。

表 2　五种不同产地青钱柳茶的感官特征比较

Table 2　Comparison of sensory characteristics of five different origins of *Cyclocarya paliurus* tea

感官特征	Q1（江西修水）	Q2（贵州雷公山）	Q3（湖南张家界）	Q4（湖南邵阳）	Q5（湖南壶瓶山）
香味	1.73±0.40^{ab}	2.10±0.10^{a}	1.67±0.12^{ab}	1.73±0.32^{ab}	1.53±0.15^{b}
苦味	2.07±0.21^{bc}	3.13±0.06^{a}	2.40±0.56^{b}	2.33±0.25^{b}	1.63±0.35^{c}
涩味	1.80±0.10^{bc}	2.73±0.12^{a}	1.93±0.25^{b}	1.60±0.17^{cd}	1.43±0.06^{d}
鲜味	1.00±0.10^{b}	1.00±0.10^{b}	0.97±0.12^{b}	1.20±0.17^{a}	0.90±0.10^{b}
甜味	1.10±0.26^{c}	1.63±0.31^{ab}	2.03±0.21^{a}	1.70±0.26^{ab}	1.37±0.15^{bc}

注：同行不同字母表示显著差异（P<0.05），n=15。

综上所述，感官评价结果表明，不同产地青钱柳茶在风味特征上具有显著差异，尤其体现在苦味、涩味、鲜味和甜味等关键味觉属性的强度方面。结合电子舌分析结果可知，这些差异可能与产地地理环境及青钱柳茶挥发性和非挥发性风味物质组成有关。该结果为青钱柳茶的品质评价、产地溯源及市场开发提供了科学依据。

2.4　不同产地青钱柳茶生物活性成分含量分析

由表 3 可知，不同产地青钱柳茶的总多酚、总黄酮、总多糖和总皂苷含量存在显著差异。Q1 和 Q4 的总多酚含量显著高于其他产地（P<0.05），分别为 2.873 mg/g 和 2.733 mg/g。Q1 的总黄酮含量最高，且显著高于其余产地（P<0.05），为 111.564 mg/g，其次为 Q4（87.897 mg/g）和 Q3（86.968 mg/g）。值得注意的是，不同产地青钱柳茶的总黄酮含量均高于李富民等[25]的测定数据，且相较于青钱柳叶中的总黄酮含量，本研究中青钱柳茶总黄酮含量更为丰富[26]。Q5 的总多糖含量最高，且显著高于其他产地（P<0.05），为 3.364%；Q1 次之，为 3.307%；Q4、Q3 和 Q2 总多糖含量依次为 3.263%、3.194% 和 3.164%，其含量高于陈木森等[27]的研究结果。不同产地青钱柳茶总皂苷含量介于 14.297~18.735 mg/g 之间，与已有研究报道的青钱柳总皂苷含量范围（15.02~23.15 mg/g）基本相近[28]。其中 Q1 的总皂苷含量最高，且显著高于其他产地（P<0.05），为 18.735 mg/g。总体来看，江西修水样品（Q1）在所测生物活性成分指标中表现较突出，其总多酚、总黄酮及总皂苷含量均处于较高水平，这可能与当地紫外线辐射及相应逆境胁迫促进酚类、黄酮类和皂苷类成分积累有关。湖南邵阳样品（Q4）的总多酚和总黄酮含量也较高，湖南张家界样品（Q3）的总黄酮含量较高，而贵州雷公山样品（Q2）在所测指标中未表现出明显优势。另一方面，多糖的积累可能与充足光照和温和生长环境有关，壶瓶山样品（Q5）因种植海拔较高、光合作用效率较高，故总多糖含量较高。

表 3　五个不同产地青钱柳茶生物活性成分含量

Table 3　Bioactive component contents of *Cyclocarya paliurus* tea from five different origin

产地	总多酚含量（mg/g）	总黄酮含量（mg/g）	总多糖含量（%）	总皂苷含量（mg/g）
Q1	2.873±0.029^{a}	111.564±0.285^{a}	3.307±0.001^{b}	18.735±0.110^{a}
Q2	1.900±0.007^{d}	78.512±0.224^{d}	3.164±0.001^{e}	16.469±0.076^{c}
Q3	1.902±0.002^{d}	86.968±0.275^{c}	3.194±0.001^{d}	14.297±0.488^{e}
Q4	2.733±0.015^{b}	87.897±0.882^{b}	3.263±0.003^{c}	17.462±0.450^{b}
Q5	2.083±0.029^{c}	76.756±0.078^{e}	3.364±0.000^{a}	15.415±0.328^{d}

注：同列不同字母表示显著差异（P<0.05），n=15。

2.5　青钱柳茶挥发性有机物质与非挥发性风味物质测定结果的相关性分析

为了评估五种不同产地青钱柳茶挥发性有机物质与非挥发性风味物质的潜在相关性，根据挥发性有机物质种类总含量和非挥发性风味物质强度确定了皮尔逊相关系数。利用 TBtools 绘制热图（图 5），可以直观地比较挥发性与非挥发性物质的相关性，萜类、醇类、醛类物质与苦味、鲜味呈正相关，与甜味、涩味、苦味回味、涩味回味及丰富度呈负相关，其中醇类与鲜味呈强正相关（P<0.05），与甜味呈强负相关（P<0.05），萜类与涩味回味呈强负相关（P<0.05），表明萜类含量较高的样品，其茶汤在鲜味的呈现上更为浓郁，在口腔中停留的时间相对更长，对涩味的减淡有一定贡献[29]；醛类与鲜味呈强正相关（P<0.05）。这些化合物通过增强苦味和鲜味受体的激活效应，同时

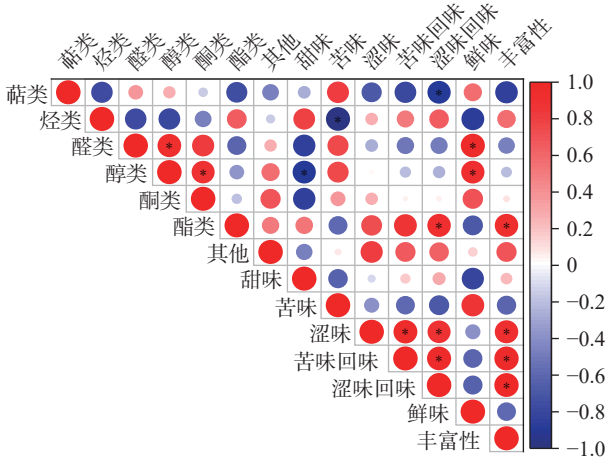


图 5　不同产地青钱柳茶挥发性物质与非挥发性风味物质相关性热图

Fig.5　Heat map of correlation of volatile and non-volatile flavor compounds in *Cyclocarya paliurus* tea from different origins

注：$^{*}P$<0.05，图 7 同。

抑制甜味和涩味感知，显著影响青钱柳茶的风味特征。酮类物质与苦味呈正相关，与甜味呈负相关。表明酮类化合物可能通过激活苦味受体，增强茶汤的苦味感知，同时抑制甜味感知。烃类及酯类物质与其他滋味物质的相关性相对较弱，但一定程度上反映它们在青钱柳茶风味构成中的潜在作用，其与丰富度、甜味、涩味、涩味回味、苦味回味呈正相关，与鲜味、苦味呈负相关，通过提供轻微的甜味和水果香味，显著提升茶汤的甜味感知，同时抑制苦味和涩味感知。

Q1 甜味强度最高，可能与其烃类、酯类含量较高有关，烃类化合物在食品风味中主要提供烃类特有的气味和滋味，在植物中，烃类化合物可以带来蜡质味、脂肪味或轻微的甜味，但烃类物质香气一般较弱，对风味贡献较小，但酯类化合物在食品中通常具有水果香味和甜味[28]，故烃类化合物与酯类化合物可能存在协同作用，增加物质风味。Q2 地区青钱柳茶醛类物质含量为所有地区中最高，且鲜味强度最高，醛类化合物具有青草清香[30]，表明醛类化合物在茶汤中起到一种调和与增益的作用，含量丰富的茶叶样品，在口感上更甜润、鲜美且层次丰富；其苦味强度为最高值，可能与其酮类物质含量最高有关，酮类化合物可以带来苦味或与苦味相关的味觉体验。因此，Q2 中相对含量较高的酮类物质 6-甲基-6-庚烯-2-酮(6.35%)、2-丙烷-2-亚基环己烷-1-酮(4.43%)可能与其苦味强度较高有关。

利用 TBtools 绘制热图，可以直观地比较挥发性成分绝对含量的变化，Q1 和 Q5 挥发性有机物组成相似(图 6)，苦味强度接近，鲜味和甜味特征差异小，风味特征接近，挥发性物质与滋味物质呈现出较高的一致性，聚类为同一组。表明这些产地的茶叶在风味物质的协同作用方式上具有相似性，可能受到相似的土壤条件、气候环境或加工工艺等因素的影响，形成具有共性的风味特征。这种产地间的风味相似性为

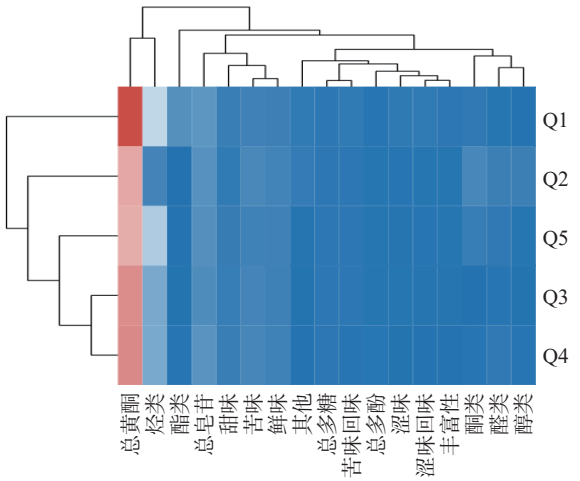


图 6 不同产地青钱柳茶挥发性物质与非挥发性风味物质聚类分析图

Fig.6 Cluster analysis chart of correlation of volatile and non-volatile flavor compounds in *Cyclocarya paliurus* tea from different origins

茶叶产地分类与品质评价提供了新的视角，有助于进一步探索产地因素对茶叶风味的综合影响。Q2 挥发性有机物组成较为均衡，苦味、鲜味强度显著高于其他样本，甜味相对较弱，风味独特。Q3 挥发性有机物含量较低，尤其是酯类和醇类，苦味、鲜味强度适中，甜味温和，风味较淡。Q4 部分挥发性有机物含量较低，苦味强度较高，鲜味和甜味较弱，各味觉特征协调。Q2 与 Q3、Q4 风味相关性特征存在明显差异，形成独立的聚类分支。由于其特殊的地理环境、生态环境导致独特的风味物质组合及风味表达。

2.6 基于电子舌传感器与生物活性对不同产地青钱柳茶滋味特征对比分析

为了评估五种不同产地青钱柳茶滋味特征，基于电子舌味觉强度与四种生物活性指标进行关联分析，进一步揭示了青钱柳茶滋味特征的形成机制(图 7)。总多酚含量与甜味、苦味回味、涩味回味及丰富性呈正相关，与苦味呈负相关；总黄酮含量与苦味、鲜味呈负相关，与其余滋味均呈正相关；总多糖含量与甜味及涩味回味呈正相关，与苦味、鲜味呈负相关；总皂苷仅与涩味、苦味回味、涩味回味及丰富性呈正相关。总体发现，青钱柳茶生物活性与苦味、鲜味呈负相关，与其余滋味呈正相关，表明其对于青钱柳茶滋味的影响多体现在滋味回味上，在口腔中后苦、后涩感较强，饮用体验感有所降低，但同时也增强了青钱柳茶滋味的丰富性。

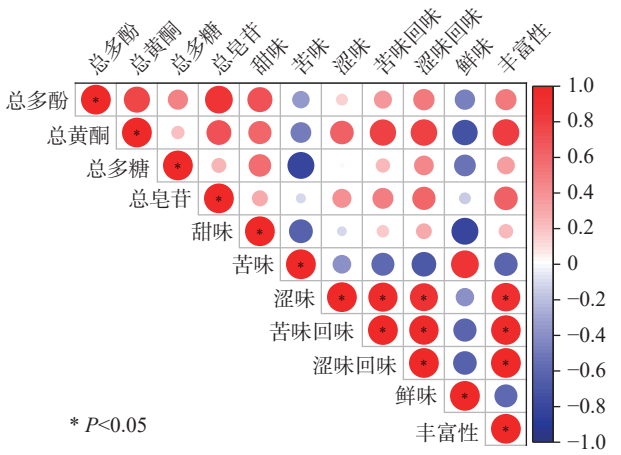


图 7 不同产地青钱柳电子舌味觉强度与生理活性成分相关性热图

Fig.7 Heat map of correlation between electronic tongue taste intensity and physiologically active components in *Cyclocarya paliurus* from different origins

GC-MS 共鉴定出 130 种挥发性物质，其中萜类物质种类最为丰富(63 种)，Q2 地区萜类与酮类含量最高，赋予茶汤强烈苦味与清新香气；Q1 地区烃类与酯类占比突出，形成独特的甜味特征。如表 3 所示，生物活性成分中，Q1 地区总多酚(2.8732 mg/g)、总黄酮(111.5640 mg/g)及总皂苷(18.7346 mg/g)含量均高于其他地区，其多酚与皂苷可能通过增强苦味受体的激活效应，掩盖部分甜味感知[31]，同时提升茶汤

的丰富性；Q1 中烃类和酯类物质的协同作用可能是通过挥发性香气分子的释放，提升甜味的感官体验，形成后甜感的独特风味。Q2 地区总多糖含量最低（3.1635%），但其萜类（63 种）和酮类（7 种）物质含量最高，其中 6-甲基-6-庚烯-2-酮（5.98%）与 Laevo-松香芹酚（4.62%）可能通过激活苦味传感器通道，同时总黄酮（78.512 mg/g）与多酚的抗氧化活性协同增强了鲜味的持久性。Q5 地区总多糖含量最高（3.3638%），但其甜味强度较低，表明多糖主要通过增加茶汤黏稠度间接影响口感，而非直接贡献甜味感知。

3　结论

本研究通过 GC-MS 与电子舌技术，系统分析了不同产地青钱柳茶中挥发性气味成分与非挥发性滋味物质和生物活性的相关性，并借助相关性聚类热图绘制直观呈现了其内在联系。研究显示，从不同产地青钱柳茶中共计检测出 130 种挥发性有机物，其中主要分为 7 大类，分别为萜类 63 种，烃类 26 种、醛类 11 种、醇类 8 种、酮类 7 种、酯类 6 种、其他 9 种。电子舌分析显示，不同产地青钱柳茶的味觉强度呈现一致的特征分布：苦味>鲜味>甜味，感官评定结果与电子舌分析结果一致。但各产地在具体味觉强度上存在显著差异，Q2 地区青钱柳茶的苦味和鲜味显著高于其他地区，Q1 地区甜味表现突出。生物活性成分含量分析表明，不同产地青钱柳茶的总多酚、总黄酮、总多糖和总皂苷含量存在显著差异，其中 Q1 地区青钱柳茶在总多酚、总黄酮和总皂苷含量上均表现突出，而 Q5 地区青钱柳茶则在总多糖含量上占据优势。相关性分析数据也进一步明确了萜类、醇类、醛类物质对苦味和鲜味的正向贡献，以及酮类物质对苦味的增强作用与对甜味的抑制效应，这与多数传统代用茶中挥发性成分与味觉感知的关联模式具有明显区别，凸显了青钱柳茶风味的独特性。

青钱柳茶的风味特征不仅在地理维度上呈现规律性分异，其活性成分的积累亦显著受产地环境因子调控。不同产地的青钱柳茶的挥发性有机物质含量和生物活性物质存在明显差异，并形成不同地区青钱柳茶的独特风味。不同产地青钱柳茶样品中表现出一定的聚集性与差异性，证实了环境因素对青钱柳茶风味的显著影响。这一结果不仅为深入解析其产地对风味物质和生物活性影响提供了理论支持，也为青钱柳茶品质评价、产地溯源以及新产品开发等实际应用领域提供了重要参考和依据。然而，本研究尚未阐明关键环境因子（如光照、温度、土壤等）通过代谢通路调控风味成分合成的具体机制，未来研究中可通过转录组与代谢组学，深入解析青钱柳茶风味及活性成分合成的分子调控网络，并拓展样本量与产地类型，为实现青钱柳茶资源的高值化利用提供系统支撑。

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

参考文献

［1］ YANG Yong, GUO Tingsi, HUANG Feibing, et al. *α*-Glucosidase inhibitory flavonol glycosides from *Cyclocarya paliurus* (Batalin) iljinskaja and their kinetics characteristics[J]. Phytochemistry, 2024, 225: 114195.

［2］ FANG Shengzuo, SUN Daiyan, SHANG Xulan, et al. Variation in radial growth and wood density of *Cyclocarya paliurus* across its natural distribution[J]. New Forests, 2020, 51(3): 453−467.

［3］ ZHAO Jinjin, WANG Zhangtie, XU Deping, et al. Advances on *Cyclocarya paliurus* polyphenols: Extraction, structures, bioactivities and future perspectives[J]. Food Chemistry, 2022, 396: 133667.

［4］ XIE Jianhua, SHEN Mingyue, XIE Mingyong, et al. Ultrasonic-assisted extraction, antimicrobial and antioxidant activities of *Cyclocarya paliurus* (Batal.) iljinskaja polysaccharides[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 89(1): 177−184.

［5］ CHEN Zhuliang, JIAN Yuqing, WU Qian, et al. *Cyclocarya paliurus* (Batalin) iljinskaja: Botany, ethnopharmacology, phytochemistry and pharmacology[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2022, 285: 114912.

［6］ 王云冰, 鲍若晗. 青钱柳袋泡茶加工工艺技术[J]. 现代农业研究, 2022, 28(5): 38−40. ［WANG Yunbing, BAO Ruohan. Processing technology of *Cyclocarya paliurus* tea bag[J]. Modern Agriculture Research, 2022, 28(5): 38−40.］

［7］ LIU Cencen, ZHAO Mouming, WEN Lingrong, et al. The chemical composition and toxic effects of aqueous extracts of *Cyclocarya paliurus* leaves[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 994055.

［8］ MOREIRA J, ARYAL J, GUIDRY L, et al. Tea quality: An overview of the analytical methods and sensory analyses used in the most recent studies[J]. Foods, 2024, 13(22): 3580.

［9］ 王承福, 陆廷祥, 曾欢, 等. 响应面法优化青钱柳茶不同冲泡工艺总黄酮含量比较[J]. 广东化工, 2024, 51(19): 169−171,162. ［WANG Chengfu, LU Tingxiang, ZENG Huan, et al. Comparison of total flavonoids content of *Cyclocarya paliurus* tea in different brewing processes by response surface methodology[J]. Guangdong Chemical Industry, 2024, 51(19): 169−171,162.］

［10］ ZHAO Shiqi, CHENG Haiyan, XU Ping, et al. Regulation of biosynthesis of the main flavor-contributing metabolites in tea plant (*Camellia sinensis*): A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(30): 10520−10535.

［11］ KHAN I, HOU Fujun, LE H P. The impact of natural resources, energy consumption, and population growth on environmental quality: Fresh evidence from the United States of America [J]. Science of the Total Environment, 2021, 754: 142222.

［12］ LI Yuhao, QUAN Huali, LIANG Lu, et al. Nontargeted metabolomics reveals the discrimination of *Cyclocarya paliurus* leaves brewed by different methods[J]. Food Research International, 2021, 142: 110221.

［13］ 田星, 叶慧洁, 刘石峰, 等. 不同品种菊花涩味成分及其与唾液的相互作用[J]. 食品与机械, 2022, 38(4): 42−46,53. ［TIAN Xing, YE Huijie, LIU Shifeng, et al. Study on the interaction between the astringent constituents of different varieties of *Chrysanthemum* and saliva[J]. Food & Machinery, 2022, 38(4): 42−46, 53.］

［14］ 李巨秀, 王柏玉. 福林—酚比色法测定桑椹中总多酚[J]. 食品科学, 2009, 30(18): 292−295. ［LI Juxiu, WANG Baiyu. Folin-ciocalteu colorimetric determination of total polyphenols in mulberry fruits[J]. Food Science, 2009, 30(18): 292−295.］

[15] WU Lun, GAO Yue, REN Wenchen, et al. Rapid determination and origin identification of total polysaccharides contents in *Schisandra chinensis* by near-infrared spectroscopy[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2022, 264: 120327.
[16] 赵虎. 青钱柳总皂苷及三萜皂苷元动态变化规律研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2011. [ZHAO Hu. Researches on dynamic changes of total saponins and triterpenoid sapogenin of *Cyclocarya paliurus*[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011.]
[17] ROSENKRANZ M, CHEN Yuanyuan, ZHU Peiyuan, et al. Volatile terpenes–mediators of plant-to-plant communication[J]. The Plant Journal, 2021, 108(3): 617−631.
[18] 席慧婷. 青钱柳叶中萜类化合物分布、分离鉴定及生物活性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2024. [XI Huiting. The distribution, isolatio, identification and biological activity of terpenoids in *Cyclocarya paliurus* leaves[D]. Nanchang: Nanchang University, 2024.]
[19] YAO Shanshan, GUO Wenfei, LU Yi, et al. Flavor characteristics of lapsang souchong and smoked lapsang souchong, a special Chinese black tea with pine smoking process[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(22): 8688−8693.
[20] HAN Zhuoxiao, RANA M M, LIU Guofeng, et al. Green tea flavour determinants and their changes over manufacturing processes[J]. Food Chemistry, 2016, 212: 739−748.
[21] LI Ninghong, DONG Yingxue, LÜ Min, et al. Combined analysis of volatile terpenoid metabolism and transcriptome reveals transcription factors related to terpene synthase in two cultivars of *Dendrobium officinale* flowers[J]. Frontiers in Genetics, 2021, 12: 661296.
[22] 邓波, 尚旭兰, 刘桂华, 等. 不同季节遮荫对青钱柳生长和主要次生代谢物积累的影响[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(9): 66−75. [DENG Bo, SHANG Xulan, LIU Guihua, et al. Effects of shading and season on growth and accumulation of major secondary metabolites in *Cyclocarya paliurus*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(9): 66−75.]
[23] 任新乐, 李长春, 孙斐, 等. 基于电子舌和质构仪的不同品种樱桃滋味及质地差异分析[J]. 中国果菜, 2023, 43(2): 66−71. [REN Xinle, LI Changchun, SUN Fei, et al. Analysis on flavor and texture difference of different cherry varieties based on electronic tongue technology and texture analyzer[J]. China Fruit & Vegetable, 2023, 43(2): 66−71.]
[24] 寇晓琳. 青钱柳茶主要特征性风味成分分析[D]. 南京: 南京林业大学, 2019. [KOU Xiaolin. Analysis of main characteristic flavor components of *Cyclocarya paliurus* tea[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2019.]
[25] 李富民, 谭杰, 聂少平, 等. 青钱柳总黄酮测定方法研究[J]. 江西食品工业, 2006(4): 34−37. [LI Fumin, TAN Jie, NIE Shaoping, et al. The study on determination methods of total flavonoids in *Cyclocarya paliurus*[J]. Jiangxi Food Industry, 2006(4): 34−37.]
[26] 朱贵峰, 贺肇东, 王政峰, 等. 不同产地青钱柳的总黄酮含量比较[J]. 海峡药学, 2004, 16(3): 88−89. [ZHU Benfeng, HE Zhaodong, WANG Zhengfeng, et al. Comparison of total flavonoids in *Cyclocarya paliurus* from different areas[J]. Strait Pharmaceutical Journal, 2004, 16(3): 88−89.]
[27] 陈木森, 洪艳平, 上官新晨. 青钱柳多糖的提取及含量测定[J]. 西北农业学报, 2007, 16(3): 192−195. [CHEN Musen, HONG Yanping, SHANGGUAN Xinchen. Extraction and content determination of polysaccharide from *Cyclocarya paliurus* (Batal) ijinskaja leaves[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2007, 16(3): 192−195.]
[28] 郭亮, 李晓铁, 秦丽凤. 桂北地区青钱柳不同时期活性成分分析[J]. 四川林业科技, 2019, 40(6): 81−84,114. [GUO Liang, LI Xiaotie, QIN Lifeng. Analysis of active ingredients of *Cyclocarya paliurus* in northern Guangxi[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2019, 40(6): 81−84,114.]
[29] TIAN Xinyu, ZHONG Fang, XIA Yixun. Dynamic characteristics of sweetness and bitterness and their correlation with chemical structures for six steviol glycosides[J]. Food Research International, 2022, 151: 110848.
[30] 刘纯友, 江素珍, 冯笑, 等. HS-SPME-GC-MS 测定三种类型百香果果实挥发性风味成分[J]. 食品工业科技, 2021, 42(11): 255−262. [LIU Chunyou, JIANG Suzhen, FENG Xiao, et al. Study on volatile flavor compounds from three types of passion fruit using headspace solid phase micro-extraction gas chromatography mass spectrometry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(11): 255−262.]
[31] WEI Fang, LUO Liyong, WANG Xi, et al. The masking mechanism of catechin to the sweet taste of phloridzin[J]. Food Chemistry, 2025, 464: 141756.