DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260302008
引用格式: 于娟, 刘新会, 陈茂婷, 等. 景迈山芒景村晒青毛茶的风味品质特征分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(18): 49–58.
Yu Juan, Liu Xinhui, Chen Maoting, et al. Analysis of the flavor quality characteristics of sun-dried green tea from Mangjing Village, Jingmai Mountain [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(18): 49–58. (in Chinese with English abstract).

景迈山芒景村晒青毛茶的风味品质特征分析

于 娟[1], 刘新会[1], 陈茂婷[1], 朱 涛[1], 刘 茹[2], 李亚莉[3], 周红杰[3], 黄 媛[1*], 郭雯飞[1*]

(1. 滇西应用技术大学普洱茶学院, 普洱 665000; 2. 昆明金达摩茶文化传播有限公司, 昆明 650201; 3. 云南农业大学茶学院, 昆明 650201)

摘 要: 目的 探究景迈山芒景村晒青毛茶的风味品质特征。**方法** 以不同区域的晒青毛茶为研究对象, 采用生化成分分析、电子鼻技术、顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法对茶样的品质成分进行检测, 并结合相对气味活度值对关键香气成分进行筛选。**结果** 不同区域晒青毛茶在生化成分含量上存在一定差异, 但整体差异较小。电子鼻分析表明, 各茶样在 W1S 传感器上的响应值均最高, 不同茶样的挥发性成分存在差异, 但整体气味轮廓较为相似。气相色谱-质谱法共鉴定出 126 种挥发性成分, 其中芳樟醇、己醛、壬醛、辛醛、庚醛、己醇、α-紫罗兰酮、α-松油醇、1-烯-3-辛醇是不同区域茶样的的关键香气物质。**结论** 在同一山系生态环境下, 区域差异对晒青毛茶风味特征的影响相对有限。本研究为揭示景迈山芒景村晒青毛茶的区域风味特征提供了一定参考依据。

关键词: 景迈山; 晒青毛茶; 风味品质
中图分类号: TS272 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)18–0049–10

Analysis of the flavor quality characteristics of sun-dried green tea from Mangjing Village, Jingmai Mountain

YU Juan[1], LIU Xin-Hui[1], CHEN Mao-Ting[1], ZHU Tao[1], LIU Di[2], LI Ya-Li[3], ZHOU Hong-Jie[3], HUANG Yuan[1*], GUO Wen-Fei[1*]

(1. *College of Pu-erh Tea*, *West Yunnan University of Applied Sciences*, *Pu'er* 665000, *China*; 2. *Kunming Jindamo Tea Culture Communication Co.*, *Ltd.*, *Kunming* 650201, *China*; 3. *College of Tea*, *Yunnan Agricultural University*, *Kunming* 650201, *China*)

ABSTRACT: Objective To investigate the flavor quality characteristics of sun-dried green tea from Mangjing Village, Jingmai Mountain. **Methods** Sun-dried green tea samples from different regions were selected as research objects. The quality components of tea samples were detected by biochemical component analysis, electronic nose technology and headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, and the key aroma

收稿日期: 2026-03-02
基金项目: 名优普洱茶品质成分的探讨项目; 2024 年普洱市自筹经费科技项目(ZCXM20240332, ZCXM20240335)
第一作者: 于娟(1997—), 女, 硕士, 助教, 主要研究方向为茶叶加工与品质化学。E-mail: 2402707222@qq.com
***通信作者:** 黄媛(1998—), 女, 硕士, 助教, 主要研究方向为茶叶加工与品质化学。E-mail: 3169630193@qq.com
郭雯飞(1959—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为茶叶风味化学。E-mail: wfguo@zju.edu.cn

components were screened in combination with the relative odor activity value. **Results** The biochemical components of sun-dried green tea from different regions showed certain differences, whereas the overall variation was relatively small. Electronic nose analysis indicated that all samples exhibited the highest response values on the W1S sensor. Although differences in volatile compounds were observed among samples, their overall odor profiles were highly similar. A total of 126 volatile compounds were identified by gas chromatography-mass spectrometry. Among them, linalool, hexanal, nonanal, octanal, heptanal, hexanol, *α*-ionone, *α*-terpineol and 1-octen-3-ol were identified as key aroma-active compounds in tea samples from different regions. **Conclusion** Under the same mountain ecological environment, regional differences exert relatively limited effects on the flavor characteristics of sun-dried green tea. This study provides a reference for revealing the regional flavor characteristics of sun-dried green tea from Mangjing Village, Jingmai Mountain.

KEY WORDS: Jingmai Mountain; sun-dried green tea; flavor quality

0 引 言

云南是全球茶文化的重要起源地之一，拥有悠久的茶叶栽培与利用历史。位于普洱市澜沧拉祜族自治县的景迈山古茶林，承载着深厚的历史和文化底蕴。2023 年 9 月 17 日，这片古茶林成功列入《世界遗产名录》，成为目前全球规模最大、保存最完好的栽培型古茶林[1]。这片古茶林不仅见证了长达 1800 余年的茶叶种植历史，也体现了人与自然和谐共生的智慧成果[2−3]。景迈山地处北纬 22°与东经 100°的交界处，横跨景迈和芒景两个行政村[4]。其中，芒景村作为景迈山古茶林的核心区域，坐落在澜沧拉祜族自治县惠民镇南部。区内雨热同季，干湿季分明，利气候条件十分适宜茶树生长[5]。独特的地理与生态条件不仅孕育了优质的茶叶资源，也为研究景迈山茶叶品质特征及其香气形成机制提供了重要的自然基础。作为景迈山古茶林的重要组成部分，芒景村晒青毛茶是景迈山茶风味的重要物质载体，深入探究景迈山芒景村晒青毛茶的生化成分与香气特征，不仅有助于揭示区域对茶叶风味品质形成的影响，也可为景迈山晒青毛茶品质评价及特征风味提供科学依据。

云南大叶种晒青毛茶是以云南地理区域范围内大叶种茶树鲜叶为原料，经摊晾、杀青、揉捻和自然晒干等传统工艺制成的初级茶产品[6]。晒青毛茶作为普洱茶加工的原料，直接决定了普洱茶的品质基础与风味特征，而晒青毛茶的品质不仅与加工工艺有关，而且还与生长的环境、区域相关。杨春华等[7]选取景迈山 7 个主要村寨的晒青毛茶，对其挥发性物质进行筛选与分类，发现共有 16 种具有香气特征的化合物，可分为果香、木香和花香三类，构成了景迈山晒青毛茶特有的“花蜜香”，可据此判别茶样来源。近年来，学者利用多种现代分析技术对晒青毛茶进行了深入研究，Zhang 等[8]采用气相色谱-质谱法和高效液相色谱法分析布朗山古树晒青茶，发现老曼峨、老班章和布朗茶样在香气成分及生化成分上有差异，结果说明香气物质及生化成分可为晒青茶地域的区分提供有效的方法。罗慧等[9]以易武和临翔两大茶区的古树晒青茶为研究对象，探究其品质差异，结果表明不同产地生态环境和内含成分差异是造成晒青茶品质差异的重要因素。Zhou 等[10]研究表明，不同地区晒青毛茶的风味特征受内含化学成分及挥发性成分差异的共同影响。其中，芳樟醇和香叶醇等花香物质的富集与茶叶的花香风味密切相关，而异佛尔酮、2-戊基呋喃等物质则赋予茶叶甜香、蜜香的香气特征。刘学艳等[11]对勐海县不同区域的晒青茶样品进行香气检测，发现不同产地的晒青茶具有不同的优势挥发性物质，正是这些不同种类及不同含量的挥发性物质共同形成了勐海县晒青茶的特点。Wu 等[12]对景迈山与无量山的晒青毛茶开展成分分析，共鉴定出 63 种挥发性化合物，其中醇类和碳氢化合物为主要香气成分，不同产地茶山品种间的香气成分差异显著。国内外学者的研究多集中于不同茶山或村寨之间的比较，而针对景迈山晒青毛茶的系统性研究仍相对不足，尤其缺乏对特定产区品质成分特征的分析。

本研究结合生化成分分析、电子鼻技术、顶空固相微萃取-气相色谱-质谱技术，探究景迈山芒景村晒青毛茶的生化成分及香气特征，为揭示景迈山芒景村晒青毛茶的风味品质的形成及特定区域品质特征提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鲜叶采自云南省普洱市澜沧拉祜族自治县景迈山芒景村，采样海拔约 1450 m，根据茶园的位置及生产管理习惯，将采样区域划分为 T1 区、T2 区、T3 区、T4 区、T5 区、T6 区，各区域茶园均位于芒景村范围内，采摘时间为 2024 年 9 月。

甲醇、福林酚、磷酸二氢钾(分析纯，天津聚恒达化工有限公司)；碳酸钠(分析纯，台山市粤侨试剂有限公司)；

没食子酸(分析纯, 天津市大茂化学试剂厂); 三氯化铝、蒽酮(分析纯, 天津市华盛化学试剂有限公司); 茚三酮(分析纯, 福晨化学试剂有限公司); 碱性乙酸铅(分析纯, 天津市光复精细化工研究所); 癸酸乙酯、乙腈、氯化钠(色谱纯, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司)。

1.2　仪器与设备

UV-5100H 紫外可见分光光度仪(上海元析仪器有限公司); L420 台式低速离心机(湖南湘仪实验室仪器开发有限公司); AE224 电子天平(精度 0.0001 g, 上海舜宇恒平科学仪器有限公司); DK-98-IIA 恒温水浴锅、101-3AB 电热鼓风干燥箱(天津市泰斯特仪器有限公司); QP2020NX 气相色谱-质谱联用仪、SH-5Sil-MS 色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm) 日本岛津公司); B13-3 磁力搅拌器(上海司乐仪器有限公司); PEN3 电子鼻(北京盈盛恒泰科技有限责任公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　茶样制备

各区域均按照一芽二叶的标准随机采摘多株茶树鲜叶, 混合均匀后作为该区域的代表性样品, 所采鲜叶均为云南大叶种茶, 采用当地传统工艺加工制成晒青毛茶。所有样品加工完成后密封保存, 用于后续检测分析, 各检测指标均进行 3 次平行测定。制作流程如图 1。

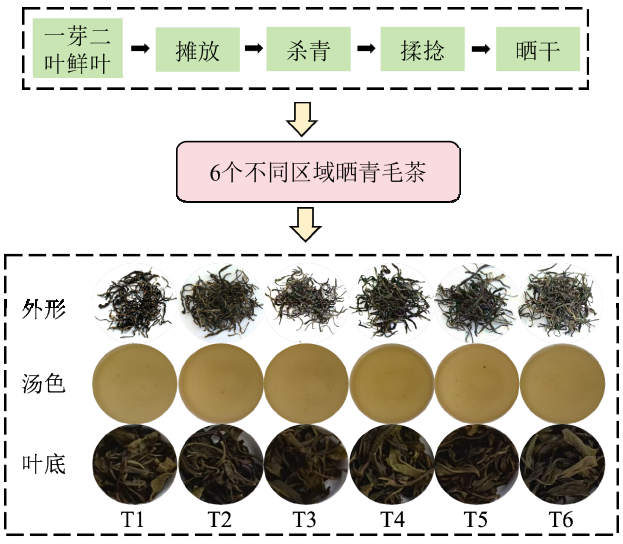


图 1　景迈山不同区域晒青毛茶制作流程

Fig.1　Processing flow of sun-dried green tea from different regions of Jingmai Mountain

1.3.2　生化成分测定

水浸出物含量参照 GB/T 8305—2013《茶 水浸出物测定》; 氨基酸含量参照 GB/T 8314—2013《茶 游离氨基酸总量测定》; 咖啡碱含量参照 GB/T 8312—2013《茶 咖啡碱测定》; 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》; 黄酮含量采用三氯化铝比色法[13]; 可溶性糖含量采用蒽酮比色法[13]。

1.3.3　电子鼻测定

移取 2.0 g 干茶于 10 mL 顶空瓶中(加盖), 在室温下静置 30 min 后进样。设定传感器清洗时间 80 s、自动调零时间 0 s, 样品准备时间 5 s, 样品测试时间 80 s, 传感器流速 100 mL/min。该电子鼻 10 个传感器的性能描述如表 1 所示。

表 1　PEN3 电子鼻传感器敏感物质

Table 1　Sensitive compounds of PEN3 electronic nose sensors

阵列序号	传感器编号	对应敏感气体
1	W1C	芳香成分
2	W5S	氮氧化合物
3	W3C	氨类和芳香成分
4	W6S	氢化物
5	W5C	短链烷烃芳香成分
6	W1S	甲烷等短链烷烃
7	W1W	无机硫化物
8	W2S	醇、醚、醛、酮类
9	W2W	芳香成分、有机硫化物
10	W3S	烷烃、长链烷烃类

1.3.4　挥发性成分测定

准确称取 0.2 g 粉碎茶样置于 20 mL 顶空瓶中, 依次加入 0.2 g 氯化钠、1 mL 预热至 60 ℃的超纯水及 10 μL 癸酸乙酯甲醇溶液(50 mg/L)。充分混匀后放入搅拌子, 密封后于 60 ℃恒温水浴平衡 20 min。随后进行 20 min 的固相微萃取吸附, 所得样品立即进行气相色谱-质谱法分析。

GC 条件: 色谱柱: SH-5Sil-MS 毛细管柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm); 载气为氦气(纯度>99.999%); 流速为 2.15 mL/min; 进样口温度为 250 ℃; 分流比 1:50; 升温程序: 起始温度 40 ℃保持 5 min, 以 1.3 ℃/min 升温至 75 ℃, 保持 2 min, 以 3 ℃/min 升温至 120 ℃, 以 3.5 ℃/min 升温至 150 ℃, 再以 20 ℃/min 升温至 220 ℃, 保持 2 min。

MS 条件: 电子轰击(electron impact, EI)能量 70 eV, 离子源 230 ℃, 传输线 250 ℃, 检测器电压 0.89 kV, 质量扫描范围 *m*/*z* 40~450。

根据保留时间(retention time, RT)算出各个被测组分的保留指数(retention index, RI), 保留指数计算公式如下, 通过检索与 NIST20s.lib、NIST20-1.lib、NIST20-2.lib 质谱库提供的质谱图进行对照, 以匹配度大于 75, RI 与谱库中的保留指数相差 60 为条件对挥发性物质进行定性, 根据内标物浓度以及各挥发性物质峰面积与内标峰面积比值进行定量。RI 计算如公式(1)。

$$RI = 100n + 100 \times \frac{RT(x) - RT(n)}{RT(n+1) - RT(n)} \quad (1)$$

式中: RI 为被测组分的保留指数; n 为被测组分的碳原子数, RT(x)为被测组分的保留时间, min; RT(n)为被测组分保留时间的前一个正构烷烃的保留时间, min; RT(n+1)为被测组分保留时间的后一个正构烷烃的保留时间, min, 其中 RT(n)<RT(x)<RT(n+1)。

1.3.5 相对气味活度值分析

采用相对气味活度值(relative odor activity values, ROAV)评价体系量化各挥发性组分对茶叶风味的贡献程度, 将茶样中总体风味贡献最为显著的组分设为 $ROAV_{stan}$=100。其余成分则按照公式(2)进行计算。

$$ROAV = \frac{C_i}{C_{max}} \times \frac{T_{max}}{T_i} \times 100 \quad (2)$$

式中: C_i为组分 i 的相对含量, %; C_{max}为总体风味贡献最为显著组分的相对含量, %; T_i为组分 i 的香气阈值, μg/kg; T_{max}为总体风味贡献最为显著组分的香气阈值, μg/kg。

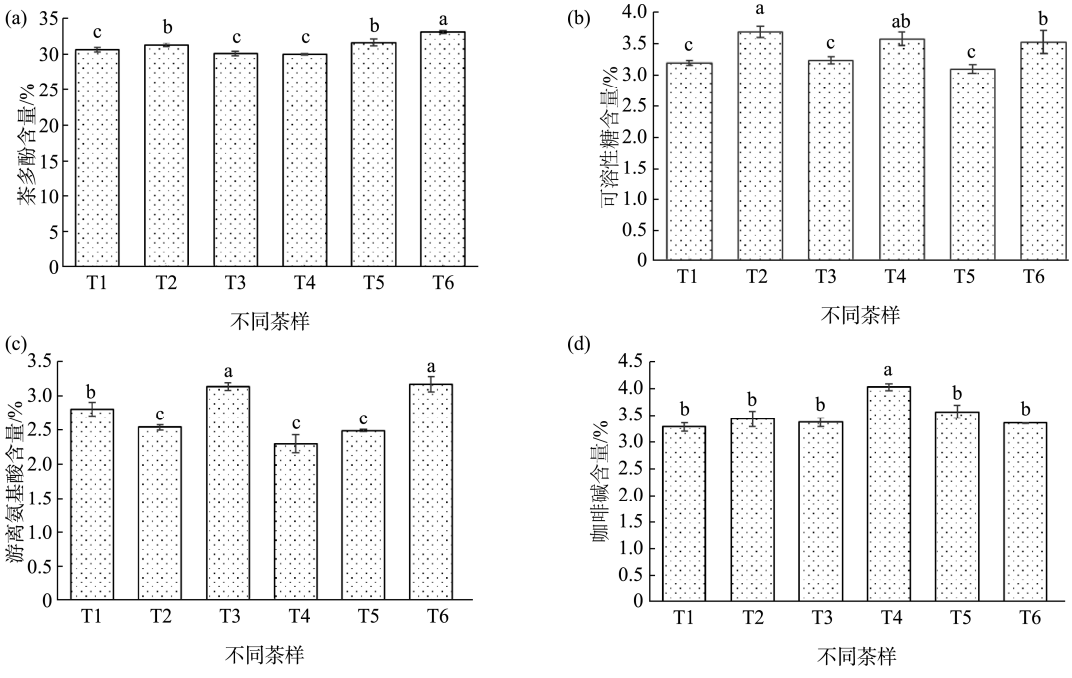
1.4 数据处理

使用 Excel 2021 进行数据处理及图表制作, 使用 IBM SPSS Statistics 27.0 进行数据分析, 使用 Origin 2024 绘制雷达图、使用 TBtools 绘制 UpSet 图和热图, 使用 SIMCA 14.1 绘制正交偏最小二乘-判别分析(orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA)得分图及置换检验图。

2 结果与分析

2.1 生化成分分析

生化成分是茶叶品质的基础, 茶多酚、可溶性糖、氨基酸、咖啡碱等主要化学成分在景迈山芒景村的不同区域有差异但差异不大。如图 2 所示, 不同样品(T1~T6)晒青毛茶的茶多酚总含量整体处于 30.06%~33.10%的范围内, 整体来看, T6 的茶多酚含量最高, 为 33.10%, 而 T4 茶多酚含量最低为 30.06%, 其中 T1、T3、T4 组间无显著差异(P>0.05), T2 和 T5 无显著差异(P>0.05), T6 与其他组别之间均存在显著差异(P<0.05), 同一地区的茶样之间有差异, 但总体上看茶多酚含量起伏幅度不大。茶叶中可溶性糖主要以小分子糖为主, 是茶汤滋味的主要成分。不同品种、不同种类、不同地区、不同采摘老嫩度的茶叶可溶性糖含量有所差异[14]。如图 2 所示, 可溶性糖含量在 3.09%~3.68%之间, T2 组可溶性糖含量最高, 为 3.68%, T5 组可溶性糖含量最低, T2 和 T4 组间无显著差异(P>0.05), T4 和 T6 组间无显著差异(P>0.05), T1、T3、T5 组间无显著差异(P>0.05)。可溶性糖的含量与光合作用强度及碳水化合物代谢密切相关, 不同区域气候条件的差异可能影响糖类物质的合成与转化。在茶叶滋味物质的组成中, 氨基酸占据着重要地位, 氨基酸具有明显的鲜味和一定的甜味, 能够显著提升茶汤的鲜爽度和醇厚感[15−16], 氨基酸含量总体在 2.31%~3.18%之间, 其中 T2、T4、T5 组间无显著差异(P>0.05), T3 和 T6 无显著差异(P>0.05)。咖啡碱是茶叶中主要的生物碱之一, 影响茶汤的苦味[17]。茶样的咖啡碱含量在 3.29%~4.04%之间,



注: 图中不同小写英文字母表示差异显著(P<0.05)。

图 2 不同区域晒青毛茶生化成分含量

Fig.2 Content of biochemical components in sun-dried green tea from different regions

茶叶中咖啡碱结构相对稳定, 相同品种生长环境对晒青毛茶咖啡碱的含量影响较小。

2.2　电子鼻分析

2.2.1　挥发性成分轮廓分析

为探究晒青毛茶在不同区域的整体香气轮廓, 采用 PEN3 电子鼻分析比较了景迈山芒景村 6 个不同区域的晒青毛茶的香气特征。如图 3 所示, W1S(对甲烷等短链烷烃敏感)、W5S(对氮氧化合物敏感)、W6S(对氢化物敏感)、W1W(对无机硫化物敏感)、W3C(对氨类和芳香成分敏感)以及 W2S(对醇类、醚类、醛类、酮类敏感)在所有检测茶样中均显示出相对较高的响应。这表明 6 个茶样的主体挥发性成分为甲烷等短链烷烃、氮氧化合物、氢化物、无机硫化物、氨类和芳香成分及醇、醚、醛、酮类等化合物。此外, 在 W1S 传感器的响应强度上, T1~T6 茶样均有较高的响应值, 其中, T4 茶样的响应最为显著, 达到峰值, 说明甲烷等短链烷烃的含量在 T4 茶样中占比最多, 而 T6 茶样的响应相对较弱, 其含量相对较低。在 W1W 传感器上, T4 茶样的响应强度明显超过其他茶样, 说明其含有大量的无机硫化物。6 个茶样对 W6S、W2S、W3C 传感器的响应强度差异则不大, 雷达图显示的曲线几乎重叠, 这反映出 6 个茶样中都含有氢化物、醇、醚、醛、酮类、氨类和芳香成分物质, 且含量差别不大, 整体来看, 6 个茶样的香气轮廓具有明显的相似性。

2.2.2　OPLS-DA 分析

为进一步分析不同区域晒青毛茶的香气构成, 本研究采用有监督的 OPLS-DA 分析和置换检验对挥发性成分进行分析。OPLS-DA 能够最大化凸显模型内部不同组别之间的差异[18]。将检测的挥发性组分作为因变量, 不同茶样为自变量, 通过 OPLS-DA 可以实现 6 个晒青毛茶的有效区分[19]。

如下所示, 图 4(a)展示了晒青毛茶挥发性物质含量的 OPLS-DA 模型, 图 4(a)中可以看出, 6 个茶样在得分散点图上均无交叉, 具有相对独立性, 进一步说明电子鼻能够较好的区分样品且重复性良好, 均得到了有效区分。不同样品间距离的远近代表样品间香气物质的差异程度, 其中 T2 和 T6 与其他样品的距离较远, 说明这两个地区的晒青毛茶香气组分与其他地区差异较大, 而 T1、T3、T4、T5 的距离较近, 茶样之间差异较小, 图 4(b)置换检验是一种用来评价 OPLS-DA 模型准确性的随机排序方法, 采用 200 次置换检验未出现过拟合, Q^2 回归线与纵轴的相交点小于 0, 表明模型验证有效。

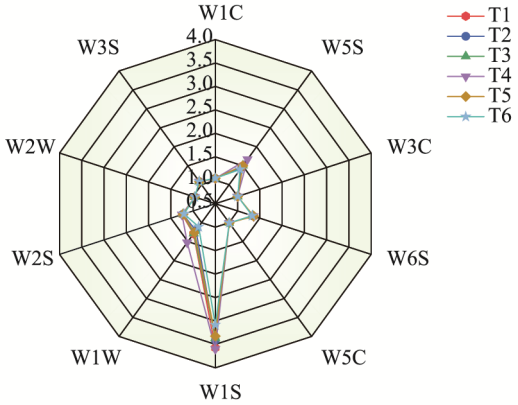


图 3　不同区域晒青毛茶电子鼻响应值雷达图

Fig.3　Radar plot of electronic nose response values for sun-dried green tea from different regions

2.3　气相色谱-质谱法分析

2.3.1　挥发性成分总量分析

通过气相色谱-质谱法对景迈山芒景村 6 个区域茶样的挥发性物质进行测定, 在剔除无名物质、非挥发性成分及重复项后, 共筛选出了 126 种挥发性成分, 按照结构特性分为 9 大类, 包括 28 种醇类, 24 种醛类, 23 种酮类, 19 种酯类, 18 种碳氢化合物, 5 种酚类, 4 种有机酸类, 3 种杂环化合物, 2 种其他类。

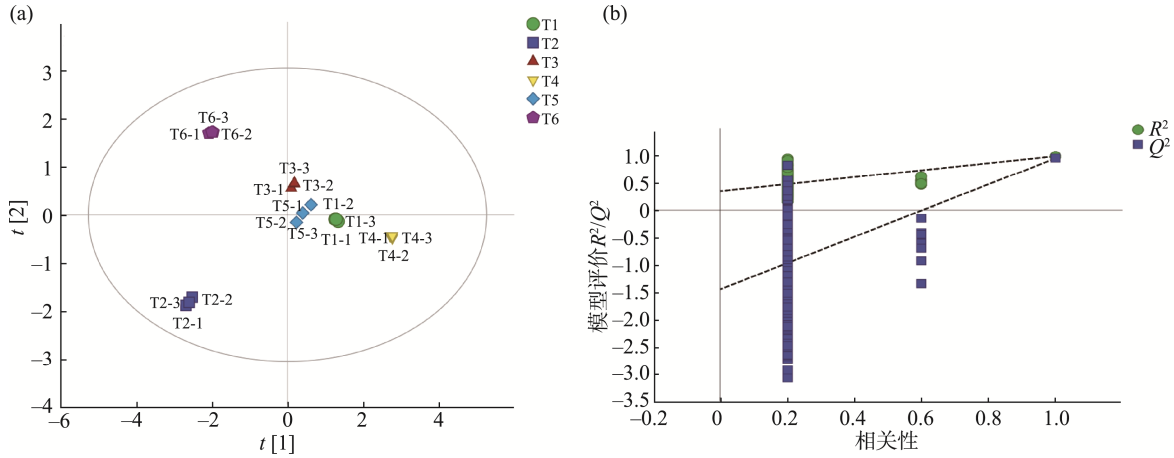


图 4　不同区域晒青毛茶的 OPLS-DA 得分(a)及置换检验(b)

Fig.4　OPLS-DA score (a) and permutation test (b) of sun-dried green tea from different regions

6 个区域中各类挥发性物质含量占比如图 5 所示，各茶样中香气物质的种类及其所占比例存在差异，6 个茶样中，化合物相对含量最高的均为醛类，醛类化合物是晒青毛茶中至关重要的挥发性物质，这类化合物通常具有较低的感觉阈值，对茶叶的风味贡献尤为突出[20]，其中 T3 的占比最高，占整体化合物含量的 30.14%，整体占比较高的还有醇类、酮类、酯类、碳氢化合物，醇类中含量占比最高的为 T4，含量为 25.33%，酮类中含量占比最高的为 T5，含量为 21.25%，酯类中含量占比最高的为 T3，含量为 15.07%，碳氢化合物中含量占比最高的为 T5，含量为 13.75%，由此可见，晒青毛茶的挥发性成分具有一定的复杂性和相似性，各类化合物对茶叶的整体风味和特性可能产生不同影响。

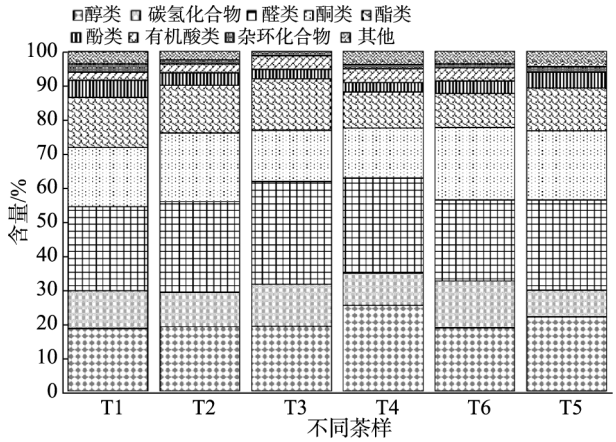


图 5 不同区域晒青毛茶挥发性成分占比

Fig.5 Proportion of volatile compounds in sun-dried green tea from different regions

为更清晰地展示景迈山芒景村不同区域中挥发性物质情况，采用 UpSet 图进行分析，结果见图 6，T1~T6 6 个茶样分别检测出 77、84、78、78、87 和 71 种挥发性风味物质。其中，T5 茶样中所含的物质种类最为丰富，高达 87 种，而 T6 茶样中所含的物质种类最少，为 71 种，不同区域的 6 个茶样中有 40 种共有物质，有 9 种物质是 T1 特有的，有 11 种物质是 T2 特有的，有 6 种物质是 T3 特有的，有 7 种物质是 T4 特有的，有 9 种物质是 T5 特有的，有 8 种物质是 T6 特有的，大部分挥发性化合物在不同区域中都是共有的，只有少部分挥发性物质是不同区域茶样所特有的，这说明景迈山芒景粗不同区域的晒青毛茶，总体的香气基调是一致的。

2.3.2 挥发性成分聚类分析

聚类热图能直观地展现晒青毛茶中关键香气成分的含量对比，既可以清晰地体现茶样间的相关性，也能够直观反映出各茶样之间的联系与差异。图 7 展示了 6 个茶样挥发性成分相对含量的聚类热图，颜色深浅代表含量比例高低，橙色表示高表达，蓝色表示低表达。经聚类分析可将样品明显分为两大类群，其分布特征与香气化合物的含量高度相关。第一类主要是 T1、T3、T4 样品，主要以醇类与醛类为主，茶叶中醇类主要是源于微生物分解糖苷类、氨基酸及脂肪酸的过程[19]。醇类化合物以花果香味著称[21]，是晒青毛茶中挥发性物质的主要成分；醛类常带有鲜明的气味，如果味、花香气味、青草味等，一部分源自茶叶中少量油脂的脂肪酸受热分解的产物，另一部分则由鲜叶中氨基酸在加工时 Strecker 降解生成[22]，结合生化成分测定结果可知，T4 的氨基酸含量相对较低，但其

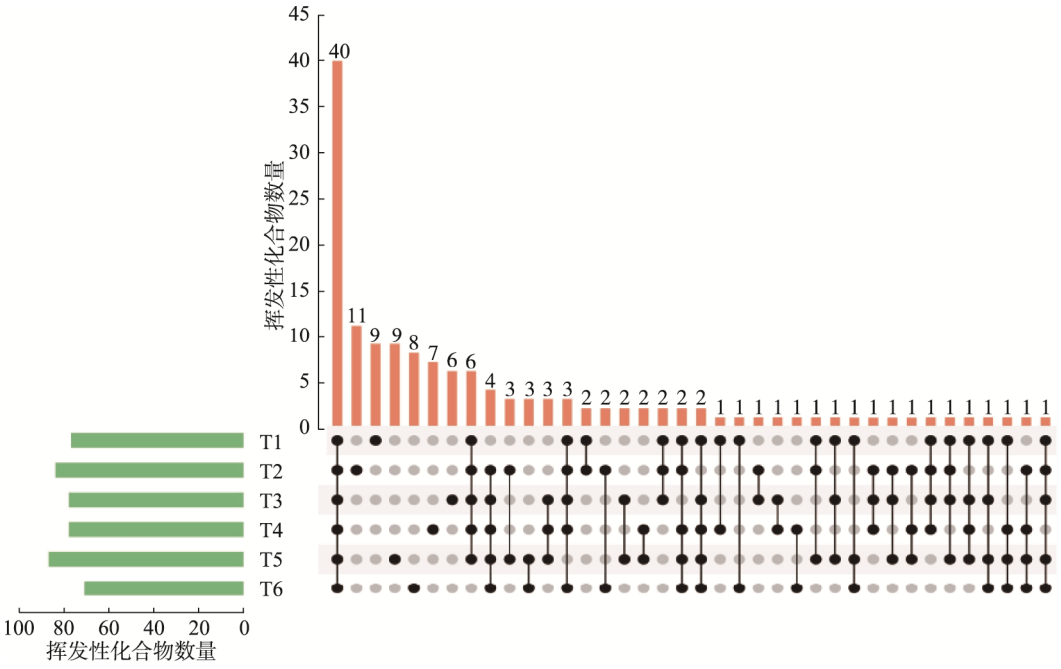


图 6 不同区域晒青毛茶挥发性成分 UpSet 图

Fig.6 UpSet plot of volatile compounds in sun-dried green tea from different regions

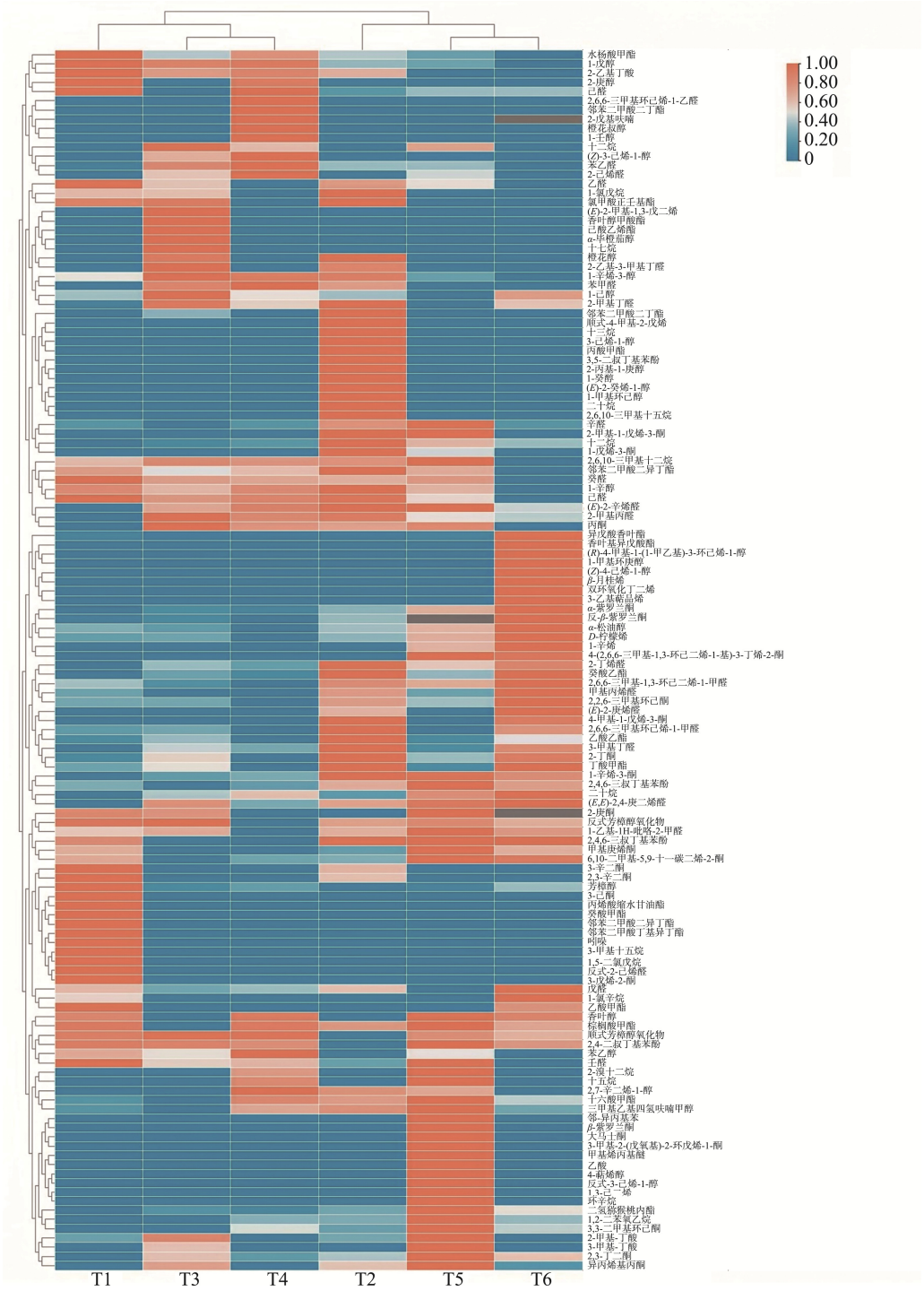


图 7　不同区域晒青毛茶挥发性成分含量聚类热图

Fig.7　Cluster heatmap of volatile compound content in sun-dried green tea from different regions

苯甲醛和苯乙醛等醛类物质含量在各样品中较高。该现象表明, 醛类物质的形成不仅与氨基酸含量有关, 还可能受到加工过程中反应条件及其他前体物质转化的共同影响。图 7 中以 1-戊醇、橙花叔醇、1-壬醇、苯乙醛、己醛、芳樟醇等为代表的条带呈高表达, 表明该类样品具有明显的花香、清新气息, 可能赋予茶汤以柔和的花果香气, 第二类是 T2、T5、T6 样品, 主要以醛类、酮类为主, 酮类化合物常由类胡萝卜素和不饱和脂肪酸的降解或其糖苷前体水解而形成[23−24], 图 7 中以 *α*-紫罗兰酮、反-*β*-紫罗兰酮、2-丁烯醛、(*E*)-2-庚烯醛、二氢猕猴桃内酯、*β*-紫罗兰酮、*α*-松油醇等化合物为代表的条带呈高表达, 这类成分通常与花香、甜香的香气特征相关, 该组样品的香气表现偏向于

花蜜香气。聚类热图结果显示，不同区域的晒青毛茶在挥发性成分组成上存在一定差异，但整体香气轮廓具有较高的一致性，而电子鼻结果也显示不同样品之间整体气味轮廓较为相似，进一步观察可发现，热图中仍有若干挥发性化合物在不同样品间呈现出差异性分布，部分化合物在某一组样品中相对高表达，而在另一组中则明显降低，这一现象表明，不同区域的香气特征并非由单一关键成分所决定，而是多种挥发性物质在不同比例组合下共同作用的结果。不同区域间在气候条件、海拔高度及土壤等生态因子上的细微差异，可能导致香气物质含量的变化，从而形成一定程度的区域差异性[25]，但这些差异并未改变其整体香气的基本特征，说明景迈山芒景村晒青毛茶具有一致的香气特征。

2.4 挥发性成分 ROAV 分析

ROAV 是衡量某一香气成分对茶叶整体香气特征贡献度的指标[26]，茶叶的关键香气特征则由各挥发性成分的气味阈值与浓度共同决定。研究表明[27]，当化合物的浓度固定的情况下，感觉阈值越低的化合物越容易被人体感知，在一定范围内，ROAV 越大，说明该组分对总体香气贡献越大。经查阅相关文献[28–31]，共搜集到 30 种香气成分的感觉阈值。在 6 个茶样中，芳樟醇的相对含量均最高，感觉阈值较低，对形成茶样的整体气味特征至关重要，因此将芳樟醇的 ROAV 设定为 100.00，以此为基准对其他成分进行 ROAV 计算，结果如表 2 所示。芳樟醇 ROAV 均最高，

表 2 不同区域晒青毛茶挥发性成分的 ROAV

Table2 ROAV of volatile compounds in sun-dried green tea from different regions

CAS 号	中文名称	感觉阈值/(μg/kg)	呈味特性	ROAV					
				T1	T2	T3	T4	T5	T6
78-70-6	芳樟醇	0.22	铃兰花香	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
110-93-0	6-甲基-5-庚烯-2-酮	50000.00	果香、柠檬香	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
18829-55-5	(*E*)-2-庚烯醛	0.04	青草香、油脂香	-	63.60	-	-	-	98.10
2408-37-9	2,2,6-三甲基环己酮	100.00	-	0.01	-	-	-	-	0.03
66-25-1	己醛	0.21	苹果香、青草香	10.15	18.66	17.07	15.99	16.99	13.05
432-25-7	*β*-环柠檬醛	10000.00	清香、果香	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
141-78-6	乙酸乙酯	5.00	青刀豆香、果香、甜香	0.14	-	-	0.17	0.23	0.34
124-19-6	壬醛	1.00	柑橘香、玫瑰香	2.05	2.29	2.68	2.62	3.61	1.51
689-67-8	香叶基丙酮	60.00	玫瑰香、果香	0.01	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02
106-24-1	香叶醇	130.00	玫瑰花香、柑橘香	0.02	-	-	0.01	0.02	0.01
111-87-5	辛醇	110.00	花果香	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01
4313-03-5	(*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛	10.00	甜香、果香	0.04	0.09	0.09	0.07	0.10	0.08
17092-92-1	二氢猕猴桃内酯	43.00	杏仁香、果香、冬青油香	<0.01	0.02	0.01	<0.01	0.06	0.02
119-36-8	水杨酸甲酯	40.00	杏仁香、果香、冬青油香	0.12	0.07	0.07	0.10	0.05	0.03
124-13-0	辛醛	0.01	果香茉莉气、脂肪香	55.77	92.02	90.15	89.43	82.66	81.68
112-39-0	棕榈酸甲酯	4000.00	蜡香、油脂香	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-	<0.01
123-35-3	月桂烯	1.20	香脂香	-	-	-	-	-	1.03
111-71-7	庚醛	0.03	柑橘香、脂肪香	14.79	17.00	13.85	23.72	18.47	15.22
112-31-2	癸醛	0.10	甜香、花香、果香香气	5.83	6.65	7.08	7.35	10.13	-
111-27-3	己醇	0.0056	果香、清香	39.84	73.66	68.99	67.43	58.99	68.07
64-19-7	乙酸	99.00	酸味	-	-	-	-	0.01	-
527-84-4	邻异丙基苯	0.005	土腥香	-	-	-	-	92.49	-
110-43-0	2-庚酮	0.68	药香、果香	0.20	-	0.32	-	0.42	-
75-07-0	乙醛	0.17	刺鼻的水果气味	0.89	1.24	0.90	-	0.79	-
71-41-0	戊醇	0.15	青草香、脂肪香	26.08	10.38	35.44	36.39	46.33	-
143-08-8	壬醇	0.68	面包香、酒香、果香	-	-	-	0.02	-	-
106-25-2	橙花醇	400.00	玫瑰花香、果香、柠檬香	-	<0.01	<0.01	-	-	-
127-41-3	*α*-紫罗兰酮	0.006	紫罗兰香	43.38	52.22	89.43	76.18	61.49	72.44
98-55-5	*α*-松油醇	0.33	松木香 、柑橘香	6.67	14.24	9.89	6.02	20.49	27.39
3391-86-4	1-烯-3-辛醇	1.00	土腥、蘑菇香	8.65	19.09	18.69	16.71	14.29	10.06

注: -表示未检出该物质。

其具有典型的铃兰花香特征, 芳樟醇奠定了芒景村晒青毛茶花香香气的基础, 也是不同区域香气共性的关键香气物质。除芳樟醇外, 己醛、壬醛、辛醛、庚醛、己醇、α-紫罗兰酮、α-松油醇、1-烯-3-辛醇在各样品中均表现出ROAV>1, 对整体香气具有重要贡献。这些香气物质主要分为 6 种香气类型, 分别为芳樟醇(铃兰花香)、壬醛(玫瑰香、柑橘香)、α-紫罗兰酮(紫罗兰香)等物质赋予茶样明显的花香特征, 己醛(苹果香)、辛醛(果香茉莉气)、庚醛(柑橘香)、己醇(果香、清香)等物质主要表现为果香特征, 癸醛贡献茶样的甜香, α-松油醇(松木香 、柑橘香)赋予茶样的木香, 1-烯-3-辛醇贡献茶样的蘑菇香。β-环柠檬醛、香叶基丙酮、辛醇、(*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛、二氢猕猴桃内酯成分在各样品中的 ROAV 普遍小于 1, 表明这些香气物质对整体香气的直接贡献有限, 而这些化合物多具有花香、果香或清香特征, 可能通过辅助作用对茶样香气的馥郁性、复杂性产生一定影响。从 T1~T6 样品的 ROAV 分布情况来看, 各样品在关键香气成分的组成上总体一致, 表明不同样品在整体香气轮廓上具有较高的相似性。综合 ROAV 分析显示, 景迈山芒景村晒青毛茶的香气主要由花香、果香、清香、甜香、木香、蘑菇香共同构成, 不同香气物质在含量和 ROAV 上的相对差异, 使各样品在保持整体香气轮廓一致的基础上, 呈现出一定的样品差异性。

3　结　论

本研究以景迈山芒景村不同区域的晒青毛茶为研究对象, 综合生化成分分析、电子鼻技术及顶空固相微萃取-气相色谱-质谱技术, 对其香气特征及区域差异进行了系统研究。生化成分结果显示, 不同区域茶样的茶多酚、可溶性糖、氨基酸及咖啡碱含量存在一定差异, 但整体变化幅度较小, 各成分总体水平相近, 其中茶多酚含量在不同茶样间虽存在显著性差异, 但整体分布较为集中, 景迈山芒景村各区域整体处于同一山头, 其气候类型及土壤形成条件相对一致, 可能在一定程度上限制了滋味相关生化成分的差异, 使整体品质仍保持较高一致性。电子鼻结果显示, W1S 传感器对 6 个茶样都具有较高的响应值, 不同茶样在传感器响应强度上存在一定差别, 但整体香气轮廓相似, 说明区域差异并未改变其总体香气类型。不同区域茶样共鉴定出 126 种挥发性成分, 主要包括醇类、醛类、酮类、酯类、碳氢化合物等。ROAV 分析结果表明, 芳樟醇在各茶样中均具有最高的 ROAV, 是形成景迈山芒景村晒青毛茶花香特征的关键香气成分, 为整体香气奠定了花香基础。己醛、壬醛、辛醛、庚醛、己醇、α-紫罗兰酮、α-松油醇、1-烯-3-辛醇在各样品的 ROAV 均大于 1, 对整体香气有主要贡献, 这些关键香气物质共同形成了景迈山芒景村晒青毛茶以花香为主, 带有果香、清香和甜香等的香气特征。电子鼻更侧重于整体气味特征的快速表征, 而气相色谱-质谱法则能够对具体香气物质进行定性定量分析, 两者结合可更加全面地反映茶叶香气特征。综上, 景迈山芒景村不同区域由于气候条件、海拔高度及土壤等生态因子的细微差异, 生化成分、香气物质含量存在一定差异, 但这种差异主要表现为含量水平的变化, 并未改变晒青毛茶整体风味基调, 其品质特征与香气轮廓仍具有较高的相似性, 说明在同一山系生态环境下, 区域差异对茶叶风味的影响相对有限, 本研究从理化角度为认识该区域晒青毛茶风味特征提供了一定参考。本研究样品采集于同一季节, 研究结果主要反映该季节条件下不同区域晒青毛茶的品质特征, 关于不同季节对其品质形成的影响仍有待进一步系统研究。

参考文献

[1] 朱世龙, 龚红梅, 高敏. 景迈山气候条件对茶叶生产的影响分析[J]. 热带农业科技, 2024, 47(1): 34–40.
Zhu Shilong, Gong Hongmei, Gao Min. Analysis of tea production by weather in Jingmai Mountain [J]. Tropical Agricultural Science & Technology, 2024, 47(1): 34–40.

[2] 谢春波. 云南“普洱景迈山古茶林文化景观”世界遗产保护现状及对策建议[J]. 新西部, 2023(10): 5–10.
Xie Chunbo. Present situation and countermeasures of world heritage protection of “Pu’er Jingmai Mountain ancient tea forest cultural landscape” [J]. New West, 2023(10): 5–10.

[3] 周伍阳. 地方高校产教协同赋能民族村寨茶旅融合发展研究: 以云南景迈山为例[J]. 旅游纵览, 2023(14): 96–98.
Zhou Wuyang. Research on the integration development of tea tourism in ethnic villages empowered by the cooperation between industry and education in local universities: taking Jingmai Mountain as an example [J]. Tourism Overview, 2023(14): 96–98.

[4] 王润强, 彭威浩, 陈娟, 等. 基于“三生空间”的景迈山村落景观营建模式[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(12): 206–216.
Wang Runqiang, Peng Weihao, Chen Juan, et al. Landscape construction model of Jingmai Mountain village based on “production-living-ecology” space [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023, 43(12): 206–216.

[5] 石月. 生态美学语境下艺术介入传统村落文化建设的策略研究[D]. 昆明: 云南艺术学院, 2023: 14.
Shi Yue. In the context of ecological aesthetics, art intervenes in traditional villages a strategic study on cultural construction [D]. Kunming: Yunnan Arts University, 2023: 14

[6] 杨雪梅, 刘莹亮, 李家华, 等. 基于 PCA 和聚类分析方法对云南不同茶区晒青毛茶生化成分分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(3): 236–240.
Yang Xuemei, Liu Yingliang, Li Jiahua, et al. Research for biochemical components of Sun-dried green tea in different tea areas of Yunnan by using PCA and cluster analysis methods [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(3): 236–240.

[7] 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(自然科学版), 2024(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 (Natural Science), 2024(1): 111–119.

[8] Zhang Wenjie, Liu Cong, Yang Ruijuan, et al. Comparison of volatile profiles and bioactive components of sun-dried Pu-erh tea leaves from ancient tea plants on Bulang Mountain measured by GC-MS and HPLC [J]. Journal of Zhejiang University: Science B, 2019, 20(7): 563–575.

[9] 罗慧, 宗加福, 刘春艳, 等. 云南易武和临翔茶区古树晒青茶品质差异分析[J]. 茶叶通讯, 2023, 50(4): 500–508.
Luo Hui, Zong Jiafu, Liu Chunyan, et al. Quality differences of ancient tree Sun-dried green tea between Yiwu and Linxiang tea areas in Yunnan Province [J]. Journal of Tea Communication, 2023, 50(4): 500–508.

[10] Zhou Miao, Deng Xiujuan, Wang Qiaomei, et al. Flavor characteristics of Sun-dried green tea in different regions of Yunnan: metabolite basis and soil influencing factors [J]. Foods, 2025, 14(7): 1280.

[11] 刘学艳, 黄飞燕, 周启武. 基于电子鼻和 SPME/GC-MS 技术对勐海县晒青茶的挥发性物质分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(19): 84–91.
Liu Xueyan, Huang Feiyan, Zhou Qiwu. Analysis of volatile substances in Sun-dried green tea in Menghai County based on electronic nose and SPME/GC-MS technology [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(19): 84–91.

[12] Wu Yuanshuang, Lv Shidong, Wang Chen, et al. Comparative analysis of volatiles difference of Yunnan Sun-dried Pu-erh green tea from different tea mountains: jingmai and Wuliang mountain by chemical fingerprint similarity combined with principal component analysis and cluster analysis [J]. Chemistry Central Journal, 2016, 10(1): 11.

[13] 张正竹. 茶叶生物化学实验教程[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009: 17-18.
Zhang Zhengzhu. Tea biochemistry experiment course [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2009: 17-18.

[14] 苏美丞, 李俊, 蔡滔, 等. 气相色谱-氢火焰离子化法测定茶叶中 5 种可溶性糖的含量[J]. 现代食品, 2022(5): 155–159.
Su Meicheng, Li Jun, Cai Tao, et al. Determination of five soluble sugars in tea by gas chromatography-hydrogen flame ionization [J]. Modern Food, 2022(5): 155–159.

[15] 姜燕华, 曾小敏, 秦芳婷, 等. 干燥温度对‘望海茶 1 号’所制刀切绿茶风味品质的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(13): 223–231.
Jiang Yanhua, Zeng Xiaomin, Qin Fangting, et al. Effect of drying temperature on the flavor quality of cut green tea produced from the cultivar ‘Wanghaicha No.1’ [J]. Food Science, 2025, 46(13): 223–231.

[16] 屈丽池, 王近近, 黄纯勇, 等. 绿茶加工工艺对氨基酸及风味品质形成的影响研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(5): 380–388.
Qu Lichi, Wang Jinjin, Huang Chunyong, et al. Research progress on effects of processing technology of green tea on formation of amino acids and flavor quality [J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(5): 380–388.

[17] 杨子玺, 朱圆敏, 谢燕霞, 等. 不同组合曲霉发酵对夏秋茶汤品质成分和颜色的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(5): 127–135.
Yang Zixi, Zhu Yuanmin, Xie Yanxia, et al. Impact of different *Aspergillus* fermentation combinations on the quality components and color of summer and autumn tea infusion [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(5): 127–135.

[18] 史峰,张嘉恒,蒋文键,等.不同茶园武夷岩茶水仙关键呈香物质分析[J]. 南方农业学报,2025,56(10):3093-3105.
Shi F, Zhang J H, Jiang W J, et al. Analysis of key aroma compounds in Shuixian Wuyi rock tea from different tea gardens[J]. Journal of Southern Agriculture, 2025, 56(10): 3093-3105.

[19] Bueno M, Campo M M, Cacho J, et al. A model explaining and predicting lamb flavour from the aroma-active chemical compounds released upon grilling light lamb loins [J]. Meat Science, 2014, 98(4): 622–628.

[20] Li Yuanda, Wu Ting, Deng Xiujuan, et al. Characteristic aroma compounds in naturally withered and combined withered *γ*-aminobutyric acid white tea revealed by HS-SPME-GC-MS and relative odor activity value [J]. LWT, 2023, 176: 114467.

[21] 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.

[22] 夏益民, 王近近, 袁海波. 后发酵工艺对夏秋红茶品质形成的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(13): 180–189.
Xia Yimin, Wang Jinjin, Yuan Haibo. Effect of post-fermentation process on the quality of summer-autumn black tea [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(13): 180–189.

[23] Dippong T, Cadar O, Kovacs M H, et al. Chemical analysis of various tea samples concerning volatile compounds, fatty acids, minerals and assessment of their thermal behavior [J]. Foods, 2023, 12(16): 3063.

[24] Zheng Xiaoting, Zeng Xingyao, Lin Xiaoling, et al. Exploring aromatic components differences and composition regularity of 5 kinds of these 4 aroma types Phoenix Dancong tea based on GC–MS [J]. Scientific Reports, 2024, 14: 2727.

[25] Chen Guohe, Zhu Guangmei, Xie He, et al. Characterization of the key differential aroma compounds in five dark teas from different geographical regions integrating GC–MS, ROAV and chemometrics approaches [J]. Food Research International, 2024, 194: 114928.

[26] 薛东, 易宇文, 夏翠群, 等. 基于电子鼻和气相色谱-质谱法结合相对气味活度值分析植物油对红油辣椒气味的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(22): 241–251.
Xue Dong, Yi Yuwen, Xia Cuiqun, et al. Analysis of the effects of plant oil on the odor of red pepper based on electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry combined with relative odor activity value [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2023, 14(22): 241–251.

[27] 黄维, 张灵枝, 张嘉琳, 等. 不同贮藏年份政和白茶的香气特征与挥发性成分分析[J]. 茶叶科学, 2023, 43(5): 667–680.
Huang Wei, Zhang Lingzhi, Zhang Jialin, et al. Analysis of aroma characteristics and volatile components of Zhenghe white tea with different storage years [J]. Journal of Tea Science, 2023, 43(5): 667–680.

[28] Wang Mengqi, Ma Wanjun, Shi Jiang, et al. Characterization of the key aroma compounds in Longjing tea using stir bar sorptive extraction (SBSE) combined with gas chromatography-mass spectrometry (GC–MS), gas chromatography-olfactometry (GC-O), odor activity value (OAV), and aroma recombination [J]. Food Research International, 2020, 130: 108908.

[29] 阳景阳, 陈远权, 梁贤智, 等. HS-SPME-GC-MS 结合 OAV 对乌龙茶树品种制花香型红茶的香气评价[J]. 食品工业科技, 2025, 46(6): 315–324.
Yang Jingyang, Chen Yuanquan, Liang Xianzhi, et al. HS-SPME-GC-MS coupled with OAV to evaluate the aroma of flowery black tea made from oolong tea varieties [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(6): 315–324.

[30] Zhai Xiaoting, Zhang Liang, Granvogl M, et al. Flavor of tea (*Camellia sinensis*): a review on odorants and analytical techniques [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2022, 21(5): 3867–3909.

[31] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法: “ROAV”法[J]. 食品科学, 2008, 29(7): 370–374.
Liu Dengyong, Zhou Guanghong, Xu Xinglian. ROAV method: a new method for determining key odor compounds of Rugao ham [J]. Food Science, 2008, 29(7): 370–374.

(责任编辑: 韩晓红 安香玉)