DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251105002
引用格式: 赵苗苗, 殷祥艳, 严亮, 等. 电子鼻联合气相色谱-质谱技术解析澜沧县不同晒青茶的香气指纹及地域差异[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(3): 289–299.
ZHAO MM, YIN XY, YAN L, *et al*. Aroma fingerprinting and geographical differentiation of sun-dried green teas from different regions of Lancang County by electronic nose coupled with gas chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(3): 289–299. (in Chinese with English abstract).

电子鼻联合气相色谱-质谱技术解析澜沧县不同晒青茶的香气指纹及地域差异

赵苗苗[1,2], 殷祥艳[1], 严　亮[1,2], 郑婷婷[1,2], 刘　丽[1,2], 张文杰[1],
王江川[3], 罗成燕[4], 吕才有[3,5*]

(1. 滇西应用技术大学普洱茶学院, 普洱　665000; 2. 普洱茶研究院, 普洱　665000; 3. 云南农业大学茶学院, 昆明 650201; 4. 孟连公信银海生态茶厂, 普洱　665800; 5. 普洱学院茶叶咖啡学院, 普洱　665000)

摘　要: 目的　探究云南省澜沧县不同产区晒青茶的香气特征及地域差异, 并建立具有可解释性的香气指纹判别思路。**方法**　联合电子鼻(electronic nose, E-nose)与气相色谱-质谱技术(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS), 对澜沧县 10 个地区茶样的挥发性成分展开系统研究。**结果**　电子鼻主成分分析(principal component analysis, PCA)表明, 传感器 W1W、W2W 与 W3S 为 PC1 主要贡献, W1S、W2S 等传感器对 PC2 香气贡献较大, 表明醇类、醛酮类、芳香族化合物以及甲基类物质在香气轮廓构建中起主导作用; 其中, 扎布(ZB)茶样明显偏离样本群, 可能是 W1W、W2W 与 W3S 等传感器较强响应密切相关。GC-MS 检测中主要以醇、醛、酮类为主, 其中芳樟醇与 β-紫罗酮为关键贡献香气成分。聚类结果显示, 东卡河(DKH)与邦坡大箐(BPDQ)形成独立分支, 表达其特殊的香气组分。不同产区呈现指示性挥发物组合: ZB 产区茶样富含橙花醇和环己烯酮, 呈现“橙花-青草”香气; 小坝(XB)样品独有柏木脑和 1,2,3-三甲氧基苯, 与其“清新青香-柔和木甜”的香气基调相关; 芒景(MJ)茶样中苯乙醛含量高, 可能贡献于其“蜂蜜熟果-清新柑橘木香”的复合蜜香; DKH 茶样香气中芳樟醇含量高, 呈现“高扬花香-柑橘”香型; BPDQ 茶样的香气以高含量 1-辛烯-3-醇为主导, 呈现出“菌菇、湿木与熟果甜润”的底香。**结论**　电子鼻与 GC-MS 联合分析方法不仅实现了晒青茶香气特征的快速、有效区分及产区鉴别, 而且具有良好的可解释性。本研究为澜沧县晒青茶的品质评价、产地认证与地理标志保护提供了可靠的理化指标依据。

关键词: 晒青茶; 香气成分; 电子鼻; 风味; 气相色谱-质谱法; 主成分分析

收稿日期: 2025-11-05
基金项目: 国家现代农业产业技术体系资助项目(CARS-19); 云南省古茶园生物多样性调查与保护项目; 滇西应用技术大学茶产品创新与资源综合利用科技创新团队项目; 2022 年云南省科技特派员项目; 2023 年云南省“三区”科技人才专项
第一作者: 赵苗苗(1988—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为茶叶加工与茶叶质量安全研究。E-mail: 19187974119@163.com
***通信作者:** 吕才有(1964—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为茶叶加工与茶叶质量安全研究。E-mail: 2495846526@qq.com

Aroma fingerprinting and geographical differentiation of sun-dried green teas from different regions of Lancang County by electronic nose coupled with gas chromatography-mass spectrometry

ZHAO Miao-Miao[1,2], YIN Xiang-Yan[1], YAN Liang[1,2], ZHENG Ting-Ting[1,2], LIU Li[1,2], ZHANG Wen-Jie[1], WANG Jiang-Chuan[3], LUO Cheng-Yan[4], LV Cai-You[3,5*]

[1. *College of Tea* (*Pu'er*), *West Yunnan University of Applied Sciences*, *Pu'er* 665000, *China*; 2. *Pu'er Institute of Pu-erh Tea*, *Pu'er* 665000, *China*; 3. *College of Tea Science*, *Yunnan Agricultual University*, *Kunming* 650201, *China*; 4. *Pu'er Menglian Gongxin Yinhai Ecological Tea Factory*, *Pu'er* 665800, *China*; 5. *College of Tea and Coffee*, *Puer University*, *Pu'er* 665000, *China*]

ABSTRACT: Objective To elucidate the aroma characteristics and regional differences of sun-dried green tea from different producing areas in Lancang County, Yunnan Province, and to establish an interpretable framework for aroma fingerprinting and geographical origin discrimination. **Methods** Volatile profiles of sun-dried green tea samples collected from 10 producing areas in Lancang County were systematically characterized by combining an electronic nose (E-nose) with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). **Results** Principal component analysis (PCA) of E-nose responses showed that sensors W1W, W2W and W3S contributed predominantly to PC1, whereas sensors such as W1S and W2S contributed more to PC2, indicating that alcohols, aldehydes/ketones, aromatic compounds and methyl-related substances were major drivers shaping the overall aroma profile. The ZB samples deviated markedly from the main cluster, which was likely attributable to the stronger responses of sensors W1W, W2W and W3S. GC-MS profiling revealed that alcohols, aldehydes and ketones dominated the volatile composition, and linalool together with *β*-ionone were identified as key contributors to aroma differentiation. Hierarchical clustering further indicated that DKH and BPDQ formed independent branches, reflecting their distinctive volatile signatures. Region-discriminating marker sets were identified: ZB samples were enriched in nerol and 2-cyclohexen-1-one, corresponding to an "orange blossom-grassy" note; XB samples uniquely contained cedrol and 1,2,3-trimethoxybenzene, consistent with a "Fresh green notes to soft woody sweetness" tone; MJ samples showed elevated phenylacetaldehyde, potentially contributing to a compound honey-like aroma characterized by "honey-ripe fruit with fresh citrus-woody notes"; DKH samples exhibited high linalool levels, presenting a pronounced "floral-citrus" profile; and BPDQ samples were dominated by 1-octen-3-ol, featuring base notes reminiscent of "mushroom, wet wood and mellow sweet ripe fruit". **Conclusion** The integrated E-nose and GC-MS strategy enables rapid and effective discrimination of aroma characteristics and producing areas of sun-dried green tea with good interpretability, providing reliable physicochemical evidence for quality evaluation, origin authentication and geographical indication protection of sun-dried green tea from Lancang County.

KEY WORDS: sun-dried green tea; aroma compounds; electronic nose; flavor profile; gas chromatography-mass spectrometry; principal component analysis

0 引 言

云南省澜沧拉祜族自治县是普洱茶重要产区之一，也是云南重点打造的"普洱边三县茶祖文化"核心区域[1]。近年来，"普洱景迈山古茶林文化景观"列入《世界遗产名录》，凸显了澜沧古茶林生态系统与传统制茶技艺的独特价值[2]。依托丰富的古茶树资源与长期加工实践，澜沧县形成了市场认可度较高的晒青毛茶产品体系[3]；在相关产业政策推动下，当地持续推进良种化、清洁化与标准化生产，以提升产品风格稳定性与品牌辨识度[4–5]。茶叶品质的核心在于风味特征，其中香气成分的组成与配比对品质表现与市场接受度具有关键影响[6–7]。为支撑晒青毛茶品质评价、地域标识与产品分级，亟需以客观、可量化指标刻画其典型风味特征[8]。在风味要素中，香气由多类挥发性成分协同形成，其组成与相对丰度能够反映产地生态条件、种质背景及加工差异，可作为茶叶的"风味指纹"[9]；尽管含量较低(0.01%~0.05%)[10]，仍对品质差异贡献显著，是差异解析的重要指标。现行评价主要依赖感官审评，易受评审经验、嗅觉疲劳与主观偏好影响，导致结果重复性与可追溯性不足[11]。因此，构建兼具快速表征与成分解析能力的香气分析策略，对提高晒青毛茶分级与产地差异评价的客观性具有重要意义。

目前, 茶叶香气研究主要采用感官审评、电子鼻与气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)等技术[12]。其中 GC-MS 可在分子层面探究挥发性化合物的组成及相对丰度, 广用于香气物质的定性定量研究[13–14], 但其前处理需随茶类优化, 检测周期较长, 且在大样本、多产区快速筛查中成本较高。电子鼻以仿生传感阵列获取整体气味指纹并进行模式识别, 目前处理简便、检测迅速、无损、适宜现场分级与产地判别等优势[15–16]。将电子鼻的快速区分能力与 GC-MS 的组分级分辨率耦合, 可实现“整体感知—分子溯源”的联合解析[17]。然而, 现有茶叶研究中联用仍存在“可区分但难解释”的问题: 电子鼻指纹差异与 GC-MS 关键挥发物之间缺少清晰的对应解释路径, 且采样条件不一致会削弱结果的可比性与互证性。为提升方法的可解释性与可复现性, 本研究在统一采样条件下同步开展电子鼻与 GC-MS 检测, 并结合差异筛选与结果互证, 提炼可用于产区区分的指示性化合物组合。

澜沧县古茶树资源丰富、微生态多样, 不同产区在海拔、土壤、古茶树种质及初制工艺等方面存在差异, 导致晒青毛茶香气特征呈现明显地域性[18]。基于此, 本研究选取邦崴、东卡河、扎布、邦坡大箐、水塘、县城、南段、下谷地、小坝、芒景等 10 个典型产区晒青茶样品, 首先比较干茶、茶汤与叶底等不同香气体系的电子鼻指纹判别效果并确定更具区分力的体系; 随后在同一体系下开展 GC-MS 挥发性成分鉴定与差异筛选, 建立“指纹差异—关键成分/类别”的解释路径, 进而构建产区香气指纹并筛选指示性挥发物组合。研究结果可为澜沧晒青茶的香气指纹构建与产地鉴别提供可量化指标, 并为质量控制与产地认证中的快速筛查与溯源解释提供方法学依据。

1　材料与方法

1.1　实验材料

实验材料分别来自澜沧县的 10 个乡镇, 均于 2022 年(该年 5—6 月完成 GC-MS 和电子鼻检测)春季按一芽三四叶的标准采摘云南大叶种茶鲜叶, 经摊晾、杀青、揉捻、日光干燥(2 d)工艺加工而成, 茶样以所属乡镇名称命名。具体的茶样信息如表 1。

1.2　仪器与试剂

LFP-2500A 型高速多功能粉碎机(南京东迈科技仪器有限公司); 7890A-5975C 型气相色谱-质谱联用仪、Agilent J&W HP-5MS 毛细管柱(60 m×0.32 mm, 0.25 μm)(美国安捷伦科技公司); PEN 3 电子鼻(德国 Airsence 公司); FA1204N 型电子分析天平(精度 0.1 mg, 上海菁海仪器有限公司)。

氯化钠(纯度≥99.8%, 国药集团化学试剂有限公司); 甲醇(色谱纯, 纯度≥99.9%; 上海阿拉丁生化科技股份有限公司); 癸酸乙酯(纯度≥98%; 上海麦克林生化科技有限公司)。其他溶剂及试剂均为分析纯, 购自上海麦克林生化科技有限公司。

表 1　不同地区的晒青茶茶样信息

Table 1　Information on sun-dried green tea samples from different regions

序号	茶样	编号	产地
1	邦崴	BW	富东乡邦威村
2	东卡河	DKH	勐朗镇大平掌村
3	扎布	ZB	东河乡扎布村
4	邦坡大箐	BPDQ	文东乡帕赛村
5	水塘	ST	文东乡水塘村
6	县城	XC	勐朗镇大水井社区
7	南段	ND	糯福乡南段村
8	下谷地	XGD	勐朗镇下谷地村
9	小坝	XB	富东乡小坝村
10	芒景	MJ	惠民镇芒景村

1.3　实验方法

1.3.1　GC-MS 检测

采用 GC-MS 仪, 利用标准的 GC-MS 方法, 结合手动固相微萃取(solid-phase microextraction, SPME)提取香气成分。称取粉碎并混匀后的茶样 0.20 g 置于 20 mL 顶空瓶中, 加入氯化钠 0.20 g、70 ℃预热超纯水 1.0 mL 以及内标溶液 10 μL[癸酸乙酯 50 mg/L(甲醇溶解)], 立即加盖密封。在 70 ℃水浴条件下恒温并磁力搅拌平衡 20 min; 随后插入 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 三涂层 SPME 纤维, 于同一温度条件下吸附挥发性成分 40 min。吸附结束后, 将纤维立即插入 GC-MS 进样口, 在 240 ℃条件下热解析 3~5 min 后进样分析。

色谱条件: 色谱柱为 Agilent J&W HP-5MS 毛细管柱(60 m×0.32 mm, 0.25 μm)。载气为高纯氦气(纯度≥99.999%), 流速 2.15 mL/min。进样口温度 240 ℃, 分流比 1:30。柱温程序: 40 ℃保持 3 min; 以 3 ℃/min 升至 70 ℃并保持 2 min; 以 2 ℃/min 升至 110 ℃并保持 1 min; 以 3 ℃/min 升至 170 ℃并保持 3 min; 以 5 ℃/min 升至 190 ℃并保持 1 min; 以 1 ℃/min 升至 192 ℃并保持 2 min; 最后以 10 ℃/min 升至 220 ℃并保持 2 min。

质谱条件: 电离方式为电子轰击电离(electron ionization, EI), 电离能量 70 eV; 离子源温度 250 ℃, 分离器温度 240 ℃; 检测器电压 0.89 kV; 质谱扫描范围 35~500 *m*/*z*。

定性与半定量: 挥发性成分通过 NIST20S 质谱库检索并结合保留指数(retention index, RI)进行定性确认; 采用内标法(癸酸乙酯)结合峰面积归一化进行半定量分析。

1.3.2　电子鼻检测

采用德国 Airsense 公司 PEN 3 便携式电子鼻进行检测, 茶样准备时间为 5 s; 进样流量为 300 mL/min; 清洗通道

200 s，平衡 45 s，测定时间为 60 s，通过预实验确定传感器响应在 57~59 s 达到稳态[相对标准偏差(relative standard deviation，RSD)<5%]，故选取该区间数据。具体电子鼻传感器性能描述见表 2。

香气采集方法：为使结果更具代表性，本研究分别用干茶法、茶汤法、叶底法对茶样香气进行采集。干茶法：每个茶样称取 1 g 置入 150 mL 锥形瓶中，密封静置 30 min 后进行干茶香气的测定。茶汤法：在锥形瓶中注入 50 mL 沸超纯水，将茶汤封口冷却至室温(45 min)后，测定茶汤的香气。叶底法：将茶汤倾倒完全后，将叶底封口 30 min 后进行香气采集。以上每个方法的数据均重复测定 3 次，最后使用 3 次平行数据作为理论支撑。

表 2 Airsense PEN3 电子鼻传感器阵列信息(德国)
Table 2 Sensor information for the Airsense PEN3 electronic nose (Germany)

阵列序号	金属氧化物传感器	性能特点
R1	W1C	对芳香成分、苯类灵敏
R2	W5S	对氮氧化合物很灵敏
R3	W3C	对芳香成分、氨类灵敏
R4	W6S	主要对氢化物灵敏
R5	W5C	对短链烷烃芳香成分灵敏
R6	W1S	对甲基类灵敏
R7	W1W	对硫化物灵敏
R8	W2S	对醇类、醛酮类灵敏
R9	W2W	对芳香成分，有机硫化物灵敏
R10	W3S	对长链烷烃灵敏

1.4 数据处理

实验数据使用 SPSS 27 软件进行统计分析，以评估样本间变异，用 WinMuster1.6.2、Origin 24 和 R 语言等软件进行数据处理与作图。电子鼻数据经标准化后进行主成分分析(principal component analysis, PCA)和载荷分析。

2 结果与分析

2.1 不同地区晒青茶的电子鼻分析

2.1.1 PCA 分析

为比较 3 种获取香气信息的方法对茶样判别的有效性，先行对干茶法、茶汤法与叶底法进行对照。在 3 种获取香气方式的 PCA 对照中，茶汤法(图 1)与叶底法(图 2)虽能反映样品间一定差异(如 ZB 仍表现为相对独立的离群样本)，但整体样品点更趋于聚集、重叠较多，区分效果弱于干茶法。基于此，选用干茶法(图 3)对澜沧不同地区 10 个

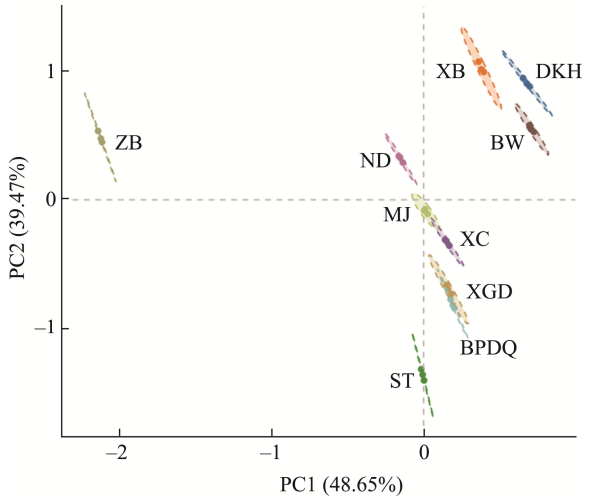


图 1 茶汤 PCA 得分图
Fig.1 PCA score plot of tea infusions

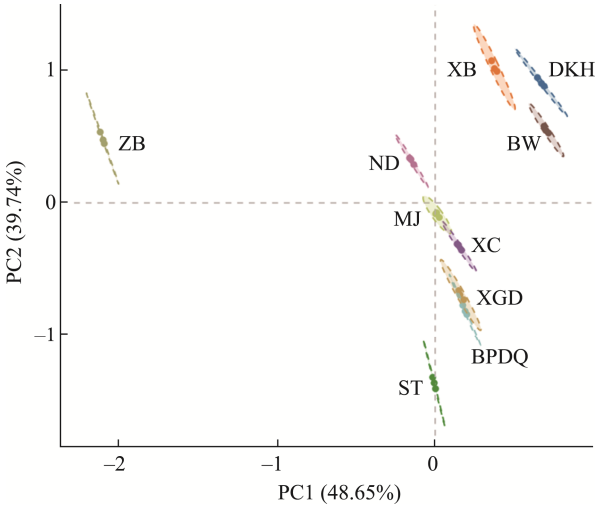


图 2 叶底 PCA 得分图
Fig.2 PCA score plot of infused leaves

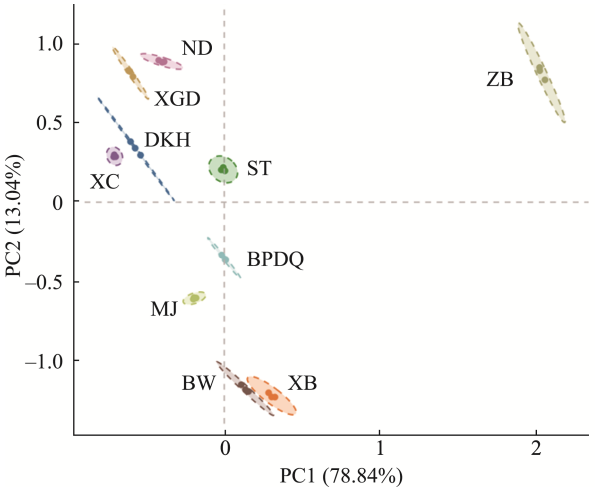


图 3 干茶 PCA 得分图
Fig.3 PCA score plot of dry tea

晒青茶的香气谱进行判别分析。干茶法基于相关性矩阵 M 下，主成分贡献率累计 91.88%, PC1 贡献率为 78.84%, PC2 贡献率为 13.04%，两主成分能表征茶样的主要信息特征，PCA 区分度亦达到 91.88%，说明该方法对不同地区晒青茶香气具有较高判别力。茶样在 PCA 空间分布中, ZB 明显远离样本群，说明其香气组分与其他茶样差异显著；BW 与 XB 相互靠近，表明二者香气表达高度相似；XGD 与 ND、XC 与 DKH、MJ 与 BPDQ 分别呈近邻关系，说明显示相似的香气特征。

2.1.2　载荷分析

载荷分析显示，传感器 W1W(硫化物)、W2W(芳香、有机硫化物)与 W3S(长链烷烃类)对 PC1 方向上的载荷较为突出，而 W1S(甲基类)、W2S(醇、醛酮类)等传感器在 PC2 方向上的载荷相对较大(图 4)，表明在不同地区茶样香气区分中甲基类化合物、芳香成分、醇类和醛酮类等化合物起到核心作用。需要指出的是, PEN3 为金属氧化物传感器阵列，存在一定交叉敏感性，传感器响应更适合作为“指纹信号”进行区分与提示，其具体化学来源仍需结合 GC-MS 结果进一步验证[19]。进一步分析载荷得分情况(图 5), ZB 在雷达图中显示“外突”，可能是其传感器 W1W、W2W、W3S、W5S 组分协同升高所致，而 W1C、W5C 与 W6S 传感器并未出现同等幅度的响应增强。这表明 ZB 茶样的主要区别并非源自短链烃或氨类等化合物的变化，而更可能与含硫化合物、脂肪族氧化产物以及烷烃等成分的差异有关。结合 PCA 的载荷方向，这些传感器恰好是拉动 PC1、PC2 的主力，因此 ZB 在得分图上被显著分离。

2.2　GC-MS 分析

2.2.1　挥发性风味化合物组成分析

茶叶香气由多种挥发性成分协同贡献，不同香型的感知主要取决于不同类别及含量的芳香化合物对嗅觉的综

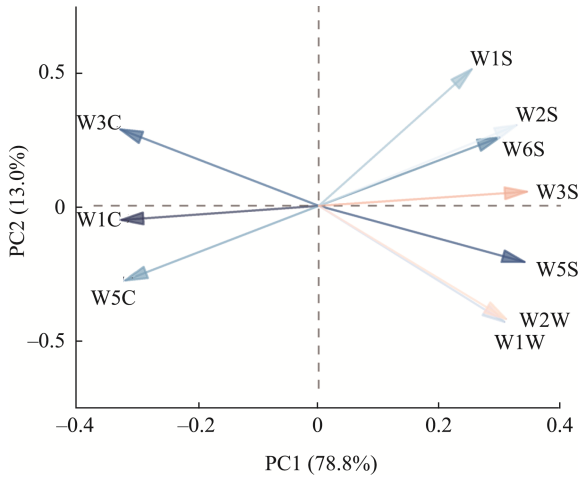


图 4　晒青茶载荷分析图

Fig.4　Loading analysis plot of sun-dried green tea

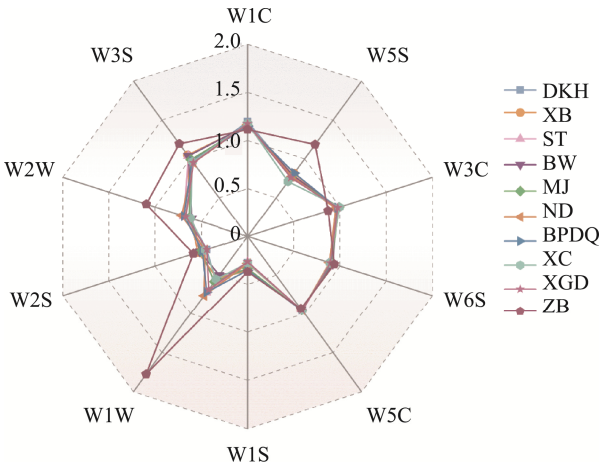


图 5　载荷雷达图

Fig.5　Radar chart of load

合作用。已有研究在各类茶样中共鉴定出 700 余种挥发性成分，涵盖醇、醛、酮、酸、酯、酚及杂环等类别[20]。本研究基于 GC-MS 技术，在来自 10 个产地的晒青茶中共检出 100 种挥发性物质，主要为醇、醛、烃、酮和酯类等。其中包括烃类 34 种、醇类 20 种、醛类 13 种、酮类 12 种、酯类 8 种，以及杂氧化合物 8 种和含氮化合物 5 种。各茶样具有明确气味注释的化合物数量分别为：BW 38 种、DKH 44 种、ZB 53 种、BPDQ 44 种、MJ 54 种、ST 50 种、XC 39 种、ND 42 种、XGD 46 种、XB 52 种(表 3)。

本研究对晒青茶中挥发性香气物质的系统分析表明，其风味特征源于多类关键化合物的组合效应与协同作用。所有茶样均检出多种醇类(以芳樟醇及其氧化物等为主)、醛类及萜烃、烃类(如 β-紫罗酮、柠檬烯)，共同构成共有香气基底。相对含量最高的 5 种成分为芳樟醇(19.62%~42.89%)、植物醇(5.78%~20.85%)、α-松油醇(0%~11.11%)、香叶醇(1.82%~8.34%)和脱氢芳樟醇(0%~4.17%)。这与 WU 等[21]研究中鉴定出晒青茶的挥发性化合物以醇、醛、酮类为主的结果一致。同时，不饱和烃较饱和烃具有更重要的风味功能[22]。其中芳樟醇为丰度最高的单体，赋予清新花香、薰衣草和柑橘气息，与 NIU 等[23]提出的芳樟醇是绿茶中清新花香的核心成分的结果一致。对检测出的 100 种挥发性化合物进行嗅觉归类，共注释 99 种具备明确气味的成分。主导香型为花香、果香和木香(清香)。花香类以芳樟醇(清新花香，薰衣草与柑橘调)、橙花醇(清新花香，橙花和柑橘)、苯乙醛(花香-蜂蜜香)、α-紫罗酮(紫罗兰花香)、β-紫罗酮(更浓郁紫罗兰花香)、吲哚(茉莉香)、大马士酮(玫瑰、蜂蜜甜香)等 24 种物质为主，芳樟醇总体占比最高，呈现玫瑰、茉莉、紫罗兰与橙花等典型花香并辅以蜂蜜、药草等复合气息。且芳樟醇与 β-紫罗酮在所有茶样中稳定存在，被证实为花香核心分子；由晒青工艺显著提高芳樟醇含量，其本身及其氧化物共同强化花香、柑橘和松木气息[23–24]。果香类以柠檬烯(强柑橘)、罗勒烯(青草-热带果)、金合欢烯(青苹果、未熟果)等 12 种物

表 3 澜沧晒青茶样香气成分相对含量

Table 3 Relative content of aroma compounds in sun-dried green tea samples from Lancang County

类别	名称	气味描述	茶样名称									
			BW	DKH	ZB	BPDQ	MJ	ST	XC	ND	XGD	XB
醛类/%	反式-2-己烯醛	青草香、绿叶香	-	0.57	0.50	0.48	0.21	0.59	0.39	0.22	0.34	0.51
	苯甲醛	杏仁香、樱桃香	0.50	0.25	0.40	0.49	0.76	1.57	0.48	0.76	0.64	0.46
	己醛	青草香、绿叶香	1.27	1.19	0.87	1.28	1.12	1.57	1.34	1.25	1.07	0.96
	庚醛	脂肪香、柑橘香	0.64	1.12	0.95	0.46	0.37	0.78	0.66	0.72	0.46	0.51
	庚二烯醛	脂肪香、青草香	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.10
	辛醛	柑橘香、脂肪香	-	-	-	-	-	-	-	-	0.27	0.12
	(*E*)-2-庚烯醛	脂肪香、青草香	-	-	0.48	-	0.08	-	-	-	-	-
	反式-2-辛烯醛	脂肪香、青草香	1.30	0.30	-	-	-	-	-	-	-	-
	苯乙醛	花香、蜂蜜香	1.17	0.69	1.10	1.23	3.35	1.23	-	0.78	1.27	1.86
	藏花醛	花香、药草香	0.82	0.80	0.70	0.88	1.15	0.92	1.63	1.43	0.98	0.41
	β-环柠檬醛	柑橘香、药草香	0.49	0.43	0.32	0.36	0.38	0.38	0.55	0.37	0.38	0.34
	2,4-癸二烯醛	脂肪香、油炸香	-	-	-	-	-	1.08	-	-	-	-
	4-甲基-3-戊烯醛	青草香、绿叶香	-	-	-	-	-	-	-	-	0.21	-
总计	种类数量		7	8	8	7	8	8	6	7	9	9
	相对含量/%		6.19	5.35	5.32	5.18	7.42	8.12	5.05	5.53	5.41	5.27
醇类/%	脱氢芳樟醇	清新花香, 柑橘和松木气味	3.31	4.16	2.69	3.48	3.87	3.18	-	4.17	3.62	1.65
	苯甲醇	微弱花香, 类似茉莉	-	-	0.13	-	-	-	-	-	-	-
	糠醇	焦糖、烘焙咖啡香气	-	-	-	-	0.07	0.29	0.16	-	0.27	0.81
	香叶基芳樟醇	花香与柑橘的混合香气	-	-	-	-	0.11	-	-	-	-	0.15
	香叶基香叶醇	类似玫瑰和天竺葵	-	-	-	-	-	-	-	-	0.48	0.29
	芳樟醇	清新花香, 薰衣草和柑橘	38.02	42.89	34.62	30.33	22.15	36.32	19.62	33.87	29.08	25.85
	4-乙基环己醇	木质香气	-	-	-	-	-	0.32	-	-	-	-
	6E-合金欢醇	清新花香, 铃兰和柑橘气味	-	-	-	-	-	-	-	-	0.12	-
	苯乙醇	浓郁花香, 玫瑰和蜂蜜气味	-	-	0.02	-	0.25	-	-	1.05	-	0.68
	橙花醇	清新花香, 橙花和柑橘气味	0.56	0.48	3.03	2.04	-	-	-	-	-	-
	橙花叔醇	花香与木质香气	0.39	0.46	-	-	-	-	-	-	-	-
	α-松油醇	清新花香	10.28	11.11	9.72	-	7.39	7.47	4.90	7.56	10.09	8.39
	1-辛烯-3-醇	蘑菇、泥土香气	1.30	1.00	0.83	9.42	0.61	0.60	0.65	1.22	0.55	0.31
	香叶醇	清新花香, 玫瑰和天竺葵香气	4.46	5.75	3.49	2.63	4.95	8.34	1.82	7.41	7.19	7.04
	4-萜烯醇	清新花香, 紫丁香和柑橘香气	-	-	0.66	0.82	0.62	-	-	-	-	-
	柏木脑	柏木和松木香气	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.11
	植物醇	青草、绿叶香气	11.95	5.78	16.03	16.18	17.34	16.63	19.07	10.77	9.49	20.85
	异植物醇	青草、绿叶香气	-	-	0.13	0.12	0.15	0.09	-	-	-	-
	异植醇	青草、绿叶香气	-	-	-	-	-	-	-	-	0.10	0.14
	松油烯-4-醇	紫丁香和柑橘香气	0.77	0.66	-	-	-	-	-	-	-	-
总计	种类数量		9	9	11	8	11	9	6	7	10	12
	相对含量/%		71.04	72.29	71.35	65.02	57.51	73.24	46.22	66.05	60.99	66.27
酮类/%	2,2,6-三甲基环己酮	樟脑、薄荷混合木质香	0.49	0.31	-	0.33	0.20	0.19	-	-	-	-
	α-紫罗酮	紫罗兰花香	-	-	0.10	0.20	0.21	0.17	0.31	-	-	0.21
	β-紫罗酮	更浓郁紫罗兰花香	1.01	0.73	0.84	1.33	1.25	1.25	2.07	0.98	1.19	1.58
	香叶基丙酮	青草、柑橘混合花香	-	-	-	0.16	0.17	-	0.78	0.23	0.22	0.13
	2-(1-甲基乙基)-2-环己烯-1-酮	松木、薄荷混合焦糖甜香	-	-	0.63	-	-	-	-	-	-	-
	4-羟基-6-甲基-2-吡喃酮	焦糖、烤面包香气	-	-	0.74	-	-	-	-	-	-	-
	橙化基丙酮	橙花、柑橘混合青草香	-	-	0.09	-	0.21	-	-	-	-	-
	大马士酮	玫瑰、蜂蜜甜香	-	0.12	-	0.18	0.21	0.32	0.52	0.24	0.44	0.22
	顺-茉莉酮	茉莉花香	-	0.53	0.45	-	-	0.43	-	0.51	0.75	0.28
	植酮	青草、茶叶混合微弱花香	0.93	0.45	0.92	1.61	1.00	0.68	2.34	0.60	0.87	1.17
	1-庚烯-3-酮	青草、蘑菇混合油脂氧化气息	-	-	-	0.18	-	-	-	-	-	-
	D-樟脑	强烈樟脑香	0.18	0.23	0.36	0.36	0.22	0.41	0.74	-	-	-
总计	种类数量		4	6	8	8	8	7	6	5	5	6
	相对含量/%		2.61	2.37	4.13	4.35	3.47	3.45	6.76	2.56	3.47	3.59

表 3(续)

类别	名称	气味描述	茶样名称									
			BW	DKH	ZB	BPDQ	MJ	ST	XC	ND	XGD	XB
酯类/%	二氢猕猴桃内酯	甜润果香	0.70	-	0.67	2.37	1.37	1.90	3.01	1.10	1.76	-
	茉莉酸甲脂	茉莉花香	-	-	-	-	-	0.17	-	-	-	-
	棕榈酸甲酯	微弱蜡质香	-	-	-	-	-	-	-	0.19	-	-
	亚油酸甲酯	微弱油脂香	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.13
	亚麻酸甲酯	弱油脂香	-	0.20	0.13	-	0.05	-	-	0.17	0.17	0.21
	水杨酸甲酯	冬青油、薄荷香气	-	0.61	-	-	0.30	-	-	-	-	-
	丙酸香茅酯	清新玫瑰、柑橘香	-	-	0.07	-	-	0.09	-	-	-	0.07
	异丁酸香茅酯	甜润花香(玫瑰、天竺葵)	-	-	-	-	-	0.21	-	-	-	-
总计	种类数量		1	2	3	1	3	4	1	3	2	3
	相对含量/%		0.70	0.81	0.87	2.37	1.72	2.37	3.01	1.46	1.93	0.41
烃类/%	1,7,7-三甲双环[2.2.1]庚-2-烯	-	-	-	-	-	-	-	-	0.17	-	-
	月桂烯	青草、柑橘皮香气	0.92	0.76	0.45	-	-	1.00	0.65	0.80	0.55	0.47
	(+)柠檬烯	强烈柑橘香(橙子、柠檬)	0.70	0.86	0.77	0.95	0.73	0.66	0.63	0.67	0.55	0.53
	罗勒烯	青草、热带水果香	0.75	0.65	0.63	0.78	0.54	1.02	1.23	0.86	0.90	0.61
	(*E*)-B-罗勒烯	青草、热带水果香	0.25	0.24	0.18	0.19	0.12	0.15	0.19	0.20	0.17	0.16
	茶香螺烷	茶叶、干草香气	0.18	0.23	0.26	0.14	0.13	0.65	1.15	-	-	-
	紫罗烯	紫罗兰花香	-	-	0.07	-	0.10	0.27	0.33	0.14	-	-
	3-蒈烯	松木、柑橘皮香气	2.03	2.20	1.77	1.60	-	1.72	0.27	1.54	2.49	2.09
	α-法呢烯	青苹果、未成熟水果香气	-	-	-	-	-	-	-	0.10	-	-
	β-石竹烯	辛辣木香(黑胡椒、丁香)	0.24	0.22	-	-	0.12	0.18	-	0.98	-	0.24
	香树烯	松木、柑橘皮香气	-	-	0.11	-	0.16	0.27	-	0.20	0.34	0.18
	α-依兰油烯	依兰依兰花香	-	0.11	-	-	-	-	-	-	-	-
	V-依兰油烯	依兰依兰花香	-	0.28	0.13	0.26	0.54	0.19	0.41	0.28	0.48	-
	荜澄茄油烯	辛辣木香	-	-	-	0.35	-	-	-	-	-	-
	1-辛烯	脂肪、柑橘皮香	-	-	-	-	-	0.15	-	-	-	-
	2-茨烯	松节油、樟脑清凉香	0.54	0.30	-	0.51	-	-	-	-	-	-
	α-蒎烯	松针、松脂清新香	-	0.13	0.27	-	0.15	-	-	-	-	-
	α-萜品烯	柠檬、柑橘混合松木香	-	-	-	-	-	-	-	-	0.17	-
	亚联苯	蜡质、石油溶剂气息	-	-	-	-	-	-	-	-	0.19	-
	Y-松油烯	清新柑橘、柠檬皮香	-	-	0.08	0.09	0.26	-	-	-	-	-
	Y-杜松烯	温暖木质香(雪松、檀香)	-	-	0.09	-	-	-	-	-	-	0.14
	δ-杜松烯	干燥木质香(松木、柏木)	-	-	-	-	-	0.24	0.36	0.44	0.56	0.15
	金合欢烯	青苹果、未成熟水果香气	-	-	-	-	-	0.15	0.18	0.63	0.92	0.69
	榄香烯	松木、柑橘皮香气	-	-	-	-	-	-	-	-	0.22	-
	可巴烯	松木、柑橘皮香气	-	-	-	-	0.17	-	-	-	-	-
	十六烷	微弱蜡香	-	-	-	-	-	-	0.39	-	-	-
	十八烷	微弱蜡香	-	-	-	-	0.35	-	0.26	-	-	-
	十九烷	微弱蜡香	0.26	-	0.10	0.12	0.11	-	0.54	0.13	-	0.15
	二十烷	微弱蜡香	0.75	0.12	0.16	0.44	0.49	0.05	2.13	0.10	0.18	0.27
	二十七烷	微弱蜡香	0.33	-	-	-	-	-	-	-	-	0.13
	二十九烷	微弱蜡香	0.46	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2,4-二甲基庚烷	微弱蜡香	0.39	0.28	0.72	0.24	0.10	-	-	-	-	-
	对伞花烃	柑橘皮、松木香气	-	-	0.08	0.17	0.08	0.41	0.24	-	-	-
	1,1,6 三甲基-1,2 二氢萘	微弱烟熏香	-	-	-	-	-	-	-	-	0.24	-
总计	种类数量		13	13	16	13	16	15	15	15	14	13
	相对含量/%		7.80	6.38	5.87	5.84	4.15	7.11	8.96	7.24	7.96	5.81
杂氧类/%	1,2,3-三甲氧基苯	微弱甜香(类似香草)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.36
	1,8-桉树脑	混合松木和药草气息	-	-	0.13	0.16	0.10	-	-	-	-	-
	顺式芳樟醇氧化物(呋喃)I	花香与柑橘的清新香气	1.08	1.44	0.83	1.28	2.58	0.84	1.15	1.40	1.42	1.27
	反式芳樟醇氧化物(呋喃)II	清新花香, 柑橘和松木气味	2.38	4.79	1.83	2.57	4.74	2.14	2.01	3.22	2.34	2.11
	芳樟醇氧化物(顺式吡喃型)III	花香与柑橘的清新香气	0.70	0.50	0.32	0.73	1.26	0.63	0.73	0.69	0.86	0.41
	芳樟醇氧化物(反式吡喃型)IV	清新花香, 柑橘和松木气味	3.20	1.91	1.58	2.65	4.05	2.28	1.84	2.40	3.88	1.58
	2-正戊基呋喃	青草香气	-	-	-	-	0.75	-	-	-	-	-
	2,3-二氢苯并呋喃	花香与木质香气	-	-	-	-	-	0.37	-	-	-	-

表 3(续)

类别	名称	气味描述	茶样名称									
			BW	DKH	ZB	BPDQ	MJ	ST	XC	ND	XGD	XB
总计	种类数量	-	4	4	5	5	6	5	4	4	4	5
	相对含量/%	-	7.36	8.64	4.69	7.39	13.48	6.26	5.73	7.71	8.50	5.73
含氮化合物/%	吲哚	低浓度时花香(茉莉、橙花)	-	0.34	0.59	0.33	0.23	0.96	-	-	0.53	0.40
	3,5-二甲基吡唑	微弱药草香	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.27
	咖啡因	几乎无味	-	-	0.19	0.33	0.41	0.46	0.99	-	1.37	1.02
	N-乙基吡咯	青草、坚果香气	-	-	-	-	-	-	-	0.17	-	0.15
	茶吡咯	干草、红茶、烟熏木香	-	0.38	-	-	-	-	-	-	-	-
总计	种类数量		-	2	2	2	2	2	1	1	2	4
	相对含量/%		-	0.72	0.78	0.66	0.64	1.42	0.99	0.17	1.90	1.84

注: -代表未检测出, 香气描述通过 Perflavory Information System 查询。

质为主, 突出柑橘、热带水果与青苹果等清新调, 并常伴绿叶气息。木香(清香)类涵盖反式-2-己烯醛、植物醇、松油烯-4-醇、β-石竹烯与 3-蒈烯等 29 种物质, 表现青草、绿叶、松柏等自然清香及樟脑、薄荷等清凉木质调, 部分带辛辣或干燥气质。3 类合计 65 种, 其余化合物主要赋予焦糖、蜡质或轻烟香等次级风格。

各产地晒青茶呈现可辨识的香气构型, 体现出关键挥发物组合的差异主导其感官特征。ZB 物种数较多(53 种), 可与其他茶样清晰区分; 其花香类总相对含量为 63.17%, 仅次于 DKH (72.15%)与 MJ (68.94%)。其中芳樟醇占比 34.62%, 主要贡献花香, α-松油醇(9.72%)、香叶醇(3.49%)与橙花醇(3.03%)同提升橙花-柑橘样清新花香。橙花醇含量为其余产地的约 4~60 倍, 构成 ZB“橙花-青草”香型, 而 2-(1-甲基乙基)-2-环己烯-1-酮的独特存在带来松木-焦糖式柔和底韵, 并因缺少反式-2-辛烯醛而几乎无油脂感。这与贺志荣等[25]指出遮光处理可显著提升橙花叔醇等花香物质, 间接佐证 ZB 茶样高橙花醇可能与其高海拔(约 2100 m)林下微生态环境相关。MJ 中果香类总占比最高(17.5%), 以高含量的苯乙醛(3.35%)与香叶醇(4.95%), 呈现“蜂蜜熟果-清新柑橘木香”复合蜜香。这一特征恰是芒景村作为景迈山世界遗产核心区, 其林茶共生生态与茶祖文化在茶叶风味上的直接印证[26–28]。XB 中木香(清香)类总量为 2.77%, 其中特有的柏木脑(0.11%), 揭示其与木质类香气相关成分存在差异; 具体感官贡献需进一步验证。XB 中植物醇含量最高(20.85%), 奠定青草-新鲜绿叶基调, 并与 1,2,3-三甲氧基苯(0.36%)共同带来轻甜回味, 呈现“清新青香-柔和木甜”香型, 这与其高海拔(2000~2400 m)、原始林保存良好、干扰度低的古茶园生态条件可能相关。BW 以高含量的反式-2-辛烯醛, 呈现青草与脂肪香; DKH 以高含量的芳樟醇(42.89%), 呈薰衣草-柑橘花香; BPDQ 中 1-辛烯-3-醇(9.42%)与二氢猕猴桃内酯偏高, 赋予“菌菇、潮湿木质”香; ST 样中香叶醇(8.34%)与苯甲醛(1.57%)均为最高, 表现玫瑰香叠加杏仁甜香, 并以 β-石竹烯(0.18%)勾勒微辛辣木香; XC 具最高木香总量(4.33%), 含 δ-杜松烯(0.36%), 呈厚重松木香调; ND 中香叶醇(7.41%)与苯乙醇(1.05%)带来玫瑰-蜂蜜与清凉木质印象(β-石竹烯 0.98%); XGD 中金合欢烯(0.92%)带青苹果般青脆果香。上述结果与阳景阳等[29]关于晒青绿茶中 30 种关键呈香成分(如芳樟醇、β-紫罗酮)对花香、果香贡献显著的结论一致; 亦与王绍梅等[30]关于芳樟醇及其氧化物、香叶醇、β-紫罗酮等在花香型茶中占比高、对花香构成贡献显著的结果相吻合。综合前人研究[31–32]与本研究结果, 芳樟醇氧化物、芳樟醇、香叶醇与 β-紫罗酮等在花香型茶样中显著富集, 并通过协同效应共同塑造花香与甜香等核心感官特征; 同时, 各产地茶样的特征性成分组合与其呈现的香型存在显著相关性, 具有潜在的原产地识别价值[33]。

2.2.2 GC-MS 层次聚类环形热图分析

基于 GC-MS 挥发物谱及层次聚类环形热图分析(图 6), 10 个晒青茶的香气差异主要沿一条由高丰度萜烯醇(如芳樟醇)和降异戊二烯类(如 β-紫罗酮)主导的共变轴展开, 并受少量烃、醛、酮协同调节。该轴呈现由高扬花香-柑橘气息逐步过渡到草本、木质-蜡质基调的连续梯度, 而非离散分离。聚类结果显示, DKH 与 BPDQ 形成独立分支, 表达其特殊的香气组分。BW、ND、ST、ZB、XGD 形成核心群, 在芳樟醇、α-松油醇、香叶醇等“花香-柑橘”条带上同步高丰度, 并与 β-紫罗酮、β-大马酮协同放大花香, 这与宁静等[34]报道的醇类物质(芳樟醇、香叶醇、α-松油醇), 协同呈现花香-柑橘调的结论相吻合; MJ、XB 与其近缘, 但苯乙醛和植物醇更突出, 呈花粉-蜂蜜样甜香并带轻微油润口感。DKH、BPDQ 和 XC 则表现出个性化偏移。其中, DKH 因高芳樟醇及其他物质协同呈“高扬花香-柑橘”香型。BPDQ 因 1-辛烯-3-醇和二氢猕猴桃内酯富集, 呈“菌菇、湿木与熟果甜润”的底香。1-辛烯-3-醇是典型“蘑菇醇”, 带菌菇、潮湿木质和林下泥土气息, 而类胡萝卜素裂解来源的内酯带来熟果、奶油与柔和木质尾韵。这与其高海拔(2000~2200 m)、林下遮蔽、黄沙土、低干扰的古茶园生态

高度吻合，揭示风土决定了挥发物的富集表达。XC 在长链内酯区整体增强，呈乳香、椰甜与奶油式底韵。整体来看，茶样差异并非由单一峰决定，而是由相邻挥发物构成的功能“香气条带”(如芳樟醇同系带、降异戊二烯带、脂肪酸裂解/内酯带)共同塑形，形成以花果香为骨架、向蜜甜与油润质感延展并随产地产生定向偏移的谱系化香气结构。该结果为晒青茶的风味分型、产地判别和工艺溯源提供化学依据，以维持萜烯醇与降异戊二烯的生成，并调控长链内酯与 C8 醇(如 1-辛烯-3-醇)香气丰度，从而实现定向风味优化与可解释的地溯源。

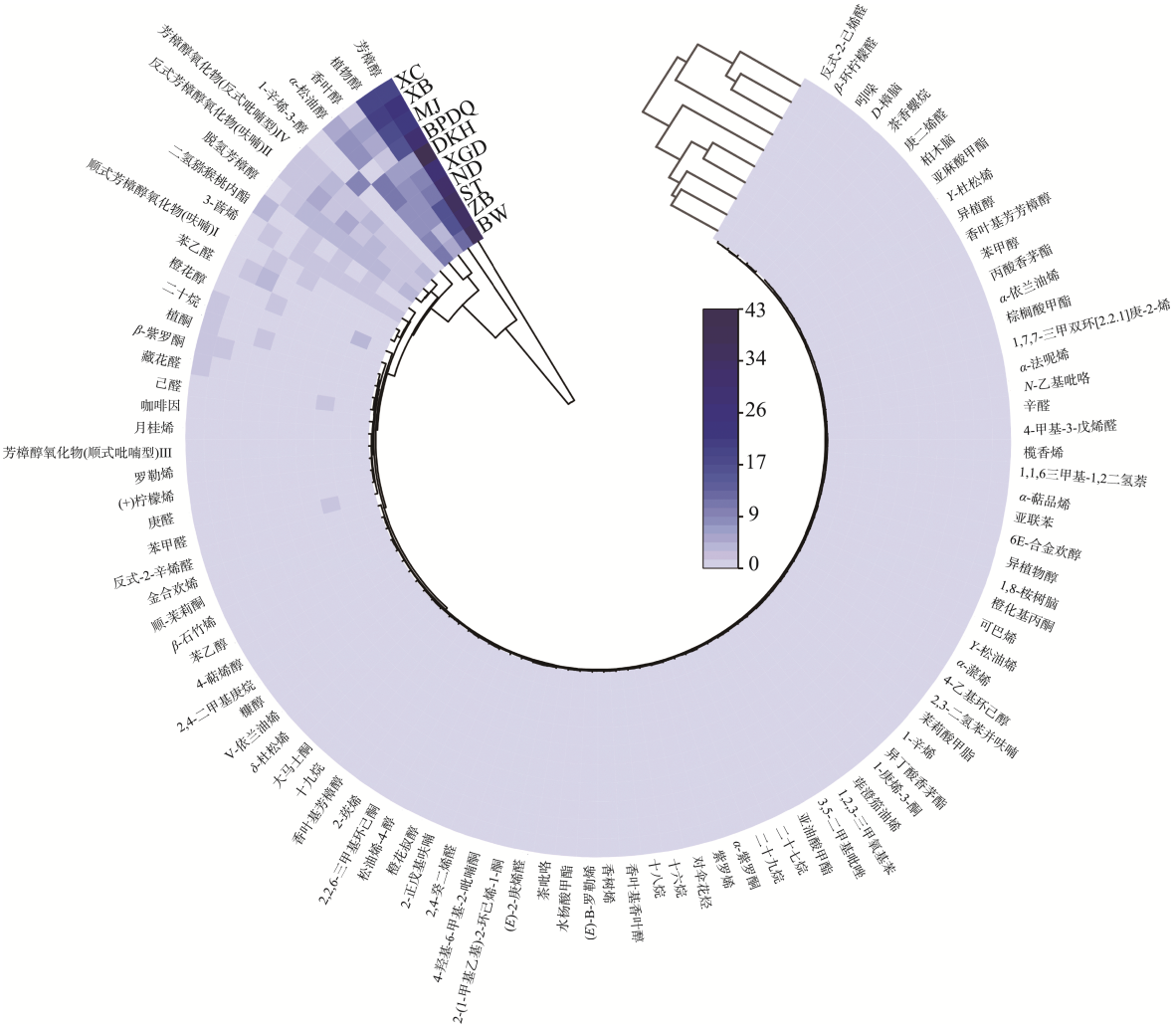


图 6　晒青茶挥发性化合物聚类环形热图

Fig.6　Circular heatmap with hierarchical clustering of volatile compounds in sun-dried green tea

3　讨论与结论

本研究联合电子鼻与 GC-MS 对澜沧县 10 个产地晒青茶进行解析，结果表明样品挥发性组分丰富，且在多变量空间中呈现可辨识的区域分化。PCA 结果显示，ZB 样品在主成分空间中明显偏离其余样本群，提示其挥发物组成与传感器响应模式均存在更强的差异性；BW 与 XB 在得分图中相对接近，说明二者在整体挥发物谱系与电子鼻整体响应上具有更高相似度。载荷分析表明，传感器 W1W(硫化物)、W1S(甲基类)、W2S(醇、醛酮类)、W2W(芳香、有机硫化物)与 W3S(长链烷烃类)为晒青茶香气的核心贡献。尽管 ZB 在 W1W 响应显著，GC-MS 却未检测到对应高丰度硫化物，推测与常规 GC-MS 对痕量含硫成分检出灵敏度有限，以及传感器的交叉响应或挥发物间的相互掩蔽有关[35]。

晒青茶的香气组成复杂多样，其风味特征与地域特征密切相关。GC-MS 检测结果表明，晒青茶的香气组成具高度复杂性与地域相关性，其中以芳樟醇、香叶醇、*β*-紫罗酮等萜类为主导的香气成分构建了花香—柑橘香的基本香型框架，这与宁静等[34]和 SHEN 等[36]研究的醇类物质(芳樟醇、香叶醇、*α*-松油醇)，协同呈现花香-柑橘调的结论相吻合；同时，各产地样品通过关键香气分子的协同偏移，呈现出独特的区域指纹。值得注意的是，香气差异的形成并非由单一化合物决定，而是由多个具有结构相关性的“香气功能条带”共同作用的结果，这种谱系化表达形态

提示晒青茶风味具可溯源性。茶样在 GC-MS 指纹中呈现的系统性差异，与电子鼻传感器的响应模式在主成分分析中表现出较强对应性，验证了两类检测手段在风味解析上的互补价值。该结果为晒青茶的风味分型与产地判别提供了化学依据，未来可通过工艺溯源来调控关键香气条带，以实现定向风味塑造与可解释的产地溯源。各茶样均以醇类为主，但比例差异塑造了独特香型，ZB 呈“橙花-青草”复合香型；XB 以“清新青香-柔和木甜”为主；MJ 呈“蜂蜜熟果-清新柑橘木香”复合蜜香；DKH 则具“高扬花香-柑橘”香型；BPDQ 呈现“菌菇、湿木与熟果甜润”的底香。上述差异揭示澜沧晒青茶具有明显的产地指纹，可为原产地识别与品质评价提供依据。由于本研究未开展气相色谱-嗅觉测定联用(gas chromatography-olfactometry, GC-O)、香气重组/缺失实验或系统感官评价，且 GC-MS 数据为半定量层面的单次测定结果，本研究结论主要聚焦于“挥发物指纹差异与产地可区分性”，对具体香型归因与阈值贡献将作为后续研究重点进一步验证。虽然本研究未直接测定环境因子，但香气谱的区域分化提示其形成可能与当地生态条件密切相关。已有研究表明，茶园土壤微生物数量显著高于周边林地，土壤微生态可能参与香气前体的合成与转化；而海拔、气候、土壤理化性质及根际微生物群落均可共同影响香气物质的积累[37−39]。因此，推测不同地区晒青茶的香气特征很是其特定生态环境的代谢反映。

基于本研究获得的多组分香气化合物数据与电子鼻传感器响应特征，晒青茶在产地间表现出稳定的可区分性，为构建风味驱动的原产地识别模型提供了坚实的数据基础。未来研究可结合模式识别与多变量建模技术：如偏最小二乘判别分析支持向量机等，探索多变量特征向量与产地标签的映射关系，构建具判别力的可解释性模型。同时，可进一步融合代谢组、微生物组与感官评价等多组学数据，深入揭示茶树生长环境、香气前体代谢与终端风味特征间的系统互作机制，为区域特色茶品质的形成机制解析、标准化控制与原产地认证提供理论支撑与技术路径。

参考文献

[1] 曾凡艳, 李光秀. 云南澜沧县茶产业现状、问题与发展建议[J]. 农业工程技术, 2021, 41(35): 15–16.
ZENG FY, LI GX. Present situation, problems and development suggestions of tea industry in Lancang County, Yunnan Province [J]. Agricultural Engineering Technology, 2021, 41(35): 15–16.

[2] 邓子璇. 景迈山古茶林文化景观的形成历史、遗产价值与保护利用研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2024.
DENG ZX. Research on the formation history, heritage value, and protection and utilization of cultural landscape of old tea forests of the Jingmai mountain [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2024.

[3] 陈杖洲, 陈培钧. 丰富的古茶树资源是世界茶树原产地的最好证明[J]. 农业考古, 2007(5): 257–267.
CHEN ZZ, CHEN PJ. The abundant resources of ancient tea trees are the best proof of the origin of tea trees in the world [J]. Agricultural Archaeology, 2007(5): 257–267.

[4] 李姣丽. “一带一路”背景下中国茶文化的国际传播[J]. 福建茶叶, 2024, 46(8): 11–13.
LI JL. International spread of Chinese tea culture in the context of “The Belt and Road Initiative” [J]. Tea in Fujian, 2024, 46(8): 11–13.

[5] 王永斌. 澜沧县茶产业绿色发展的对策与思考[J]. 农业与技术, 2019, 39(18): 161–163.
WANG YB. Countermeasures and thoughts on green development of tea industry in Lancang County [J]. Agriculture and Technology, 2019, 39(18): 161–163.

[6] 王庆华, 罗慧, 刘春艳, 等. 云南主产茶区晒青茶品质差异分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(4): 345–351.
WANG QH, LUO H, LIU CY, *et al*. Comparative analysis on quality of sun-dried tea from main tea production areas of Yunnan [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(4): 345–351.

[7] 黄东竹, 李梦茹, 陈琪, 等. 绿茶香气及茶叶中香气物质提取与检测方法研究进展[J]. 茶叶通讯, 2021, 48(4): 589–597, 605.
HUANG DZ, LI MR, CHEN Q, *et al*. Research progress on aroma of green tea and extraction and detection methods of aroma substances in green tea [J]. Journal of Tea Communication, 2021, 48(4): 589–597, 605.

[8] 李彩虹. 用主成分分析法探究茶叶香气物质的特征与品质相关性[J]. 福建茶叶, 2024, 46(8): 28–30.
LI CH. Principal component analysis was used to explore the correlation between the characteristics and quality of tea aroma substances [J]. Tea in Fujian, 2024, 46(8): 28–30.

[9] 蒋会兵, 唐一春, 陈林波, 等. 云南省古茶树资源调查与分析[J]. 植物遗传资源学报, 2020, 21(2): 296–307.
JIANG HB, TANG YC, CHEN LB, *et al*. Survey and analysis of ancient tea plant resources in Yunnan Province, China [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2020, 21(2): 296–307.

[10] 邓静, 王远兴, 毛雪金, 等. 固相微萃取(SPME)在茶叶香气分析中的应用[J]. 食品工业科技, 2014, 35(2): 346–349, 353.
DENG J, WANG YX, MAO XJ, *et al*. Research progress in solid phase microextraction (SPME) in tea aroma analysis [J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(2): 346–349, 353.

[11] 刘盼盼, 龚自明, 高士伟, 等. 茶叶香气质量评价方法研究进展[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(16): 4085–4089, 4092.
LIU PP, GONG ZM, GAO SW, *et al*. Research progress in aroma quality evaluation of tea [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(16): 4085–4089, 4092.

[12] PANG XM, ZI Y, ZOU JX, *et al*. Combined analysis of grade differences in lapsang souchong black tea using sensory evaluation, electronic nose, and HS-SPME-GC-MS, based on Chinese national standards [J]. Foods, 2024, 13(21): 3433.

[13] HOU ZW, CHEN ZY, LI L, *et al*. Comparison of volatile compounds in Jingshan green tea scented with different flowers using GC-IMS and GC-MS analyses [J]. Foods, 2024, 13(17): 2653.

[14] 林莉, 董玮, 严红光, 等. 基于电子鼻和 GC-MS 技术对红酸汤特征香气成分的研究[J]. 中国调味品, 2025, 50(3): 184–191.
LIN L, DONG W, YAN HG, *et al*. Study on characteristic aroma components of red sour soup based on electronic nose and GC-MS [J]. China Condiment, 2025, 50(3): 184–191.

[15] 田怀香, 李凤华, 吴艳. 利用电子鼻分析不同品种的桂花香气[J]. 林业科技开发, 2014, 28(4): 93–96.
TIAN HX, LI FH, WU Y. Fragrance identification for three cultivars of *Osmanthus fragrans* by electronic nose [J]. Journal of Forestry Engineering, 2014, 28(4): 93–96.

[16] 杨尚威, 刘传菊, 汤尚文, 等. 基于气相离子迁移谱和电子鼻技术分析核桃挥发性风味物质[J]. 中国油脂, 2021, 46(12): 127–135.

YANG SW, LIU CJ, TANG SW, *et al*. Analysis of volatile flavor compounds in walnut by gas chromatography-ion mobility spectrometry and electronic nose [J]. China Oils and Fats, 2021, 46(12): 127–135.

[17] 安比芳, 陈创业, 宋凯洋, 等. 基于 GC-MS 和电子鼻探究不同方法提取的玫瑰精油挥发性香气成分[J]. 中国调味品, 2024, 49(10): 153–160.
AN BF, CHEN CY, SONG KY, *et al*. Investigation of volatile aroma components of rose essential oil extracted by different methods based on GC-MS and electronic nose [J]. China Condiment, 2024, 49(10): 153–160.

[18] 陈耀华, 王孺杰. 千年传承林茶共生举世瞩目人地和谐探访世界遗产普洱景迈山古茶林文化景观[J]. 中国民族, 2023(9): 92–99.
CHEN YH, WANG RJ. Millennium inheritance: Forest-tea symbiosis draws worldwide attention in a harmonious exploration of the world heritage Pu'er Jingmai mountain ancient tea forest cultural landscape [J]. China's Ethnic Groups, 2023(9): 92–99.

[19] LI H, WANG Q, HAN L, *et al*. Quality characterization of tobacco flavor and tobacco leaf position identification based on homemade electronic nose [J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 19229.

[20] 沈力飞, 刘更生, 张聪, 等. 茶叶香气的形成及检测研究进展[J]. 农产品加工(学刊), 2014(21): 58–61.
SHEN LF, LIU GS, ZHANG C, *et al*. Research progress on the formation and detection of tea aroma [J]. Farm Products Processing (Academic Journal), 2014(21): 58–61.

[21] WU Y, LV S, WANG C, *et al*. Comparative analysis of volatile differences 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: 11.

[22] 吕世懂, 孟庆雄, 徐咏全, 等. 普洱茶香气分析方法及香气活性物质研究进展[J]. 食品科学, 2014, 35(11): 292–298.
LU SD, MENG QX, XU YQ, *et al*. Recent progress in aroma analysis methods and aroma-active compounds in Pu-erh tea [J]. Food Science, 2014, 35(11): 292–298.

[23] NIU X, AO C, YU J, *et al*. GC-MS combined with proteomic analysis of volatile compounds and formation mechanisms in green teas with different aroma types [J]. Foods, 2024, 13(12): 1848.

[24] 王奕, 罗红玉, 袁林颖, 等. 不同干燥方式对夏季绿茶香气品质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(9): 1–9.
WANG Y, LUO HY, YUAN LY, *et al*. Effects of drying methods on volatile components of summer green tea [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(9): 1–9.

[25] 贺志荣, 项威, 徐燕, 等. 茶树挥发性萜类物质及其糖苷化合物生物合成的研究进展[J]. 茶叶科学, 2012, 32(1): 1–8.
HE ZR, XIANG W, XU Y, *et al*. Progress in the research of biosynthesis of volatile terpenoids and their glycosides in tea plant [J]. Journal of Tea Science, 2012, 32(1): 1–8

[26] 王秀青, 李永梅, 谢瑾, 等. 古茶园和现代茶园土壤养分与微生物数量的研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(10): 43–50.
WANG XQ, LI YM, XIE J, *et al*. Study on soil nutrients and microbial quantities in ancient and modern tea gardens [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2015, 37(10): 43–50.

[27] 文化新观察. 景迈山上, 茶香千年-新华网[EB/OL]. (2023-09-17) [2025-10-27]. https://www. news.cn/2023-09/17/c_1129868221.htm
Cultural New Observation. A thousand-year tea aroma on Jingmai mountain-Xinhuanet [EB/OL]. (2023-09-17) [2025-10-27]. https://www. news.cn/2023-09/17/c_1129868221.htm

[28] 北京大学城市与环境学院. 千年茶林, 世界守护——城市与环境学院陈耀华讲述"普洱景迈山古茶林文化景观"申遗历程[EB/OL]. (2023-10-30) [2025-10-27]. https: //www.ues.pku.edu.cn/xyxw/9cf9802568ef49f79d82dadf3f380e6b.htm
Peking University College of Urban and Environmental Sciences. "Millennium tea forest, world guardian": Chen yaohua narrates the world heritage application process of puer Jingmai mountain ancient tea forest cultural landscape [EB/OL]. (2023-10-30) [2025-10-27]. https://www.ues.pku.edu.cn/xyxw/9cf9802568ef49f79d82dadf3f380e6b.htm

[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 JY, CHEN YQ, LIANG XZ, *et al*. HS-SPME-GC-MS coupled with OAV to evaluate the aroma of flowery-aroma black tea made from Oolong tea varieties [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(6): 315–324.

[30] 王绍梅, 宋文明, 冷燕, 等. 花香型古树滇红茶挥发物质气相色谱分析[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(4): 1010–1015.
WANG SM, SONG WM, LENG Y, *et al*. Gas chromatographic analysis of volatile compounds in flowery-aroma type ancient-tree Dianhong tea [J]. Journal of Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 37(4): 1010–1015.

[31] 尤秋爽, 石亚丽, 朱荫, 等. 加工工艺对绿茶关键呈香成分的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(8): 194–200.
YOU QS, SHI YL, ZHU Y, *et al*. Effect of different processing technologies on the key aroma-active compounds of green tea [J]. Food Science, 2023, 44(8): 194–200.

[32] LIU N, SHEN S, HUANG L, *et al*. Revelation of volatile contributions in green teas with different aroma types by GC-MS and GC-IMS [J]. Food Research International, 2023, 169: 112845.

[33] 肖巧梅, 张晓宇, 王娟, 等. 勐海县不同乡镇晒青茶香气组分的差异分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(13): 332–339.
XIAO QM, ZHANG XY, WANG J, *et al*. Comparative analysis of aromatic components of sun-dried green tea from different townships in Menghai County [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(13): 332–339.

[34] 宁静, 李健权, 刘本英, 等. 云南大叶种晒青茶发花前后主要风味成分的变化研究[J]. 茶叶科学, 2021, 41(2): 213–227.
NING J, LI JQ, LIU BY, *et al*. Study on the changes of main flavor components of Yunnan large-leaf sun-dried green tea before and after fungal fermentation [J]. Journal of Tea Science, 2021, 41(2): 213–227.

[35] WARD RJ, RAHMAN S, WUERGER S, *et al*. Predicting the crossmodal correspondences of odors using an electronic nose [J]. Heliyon, 2022, 8(4): e09284.

[36] SHEN S, WU H, LI T, *et al*. Formation of aroma characteristics driven by volatile components during long-term storage of a tea [J]. Food Chemistry, 2023, 411: 135487.

[37] 王登良, 张灵枝, 毛明辉. 不同光照强度晒青对单枞茶香气成分的影响[J]. 园艺学报, 2005(4): 669–672.
WANG DL, ZHANG LZ, MAO MH. Effects of different light intensities of sun-drying on aroma components of Dancong tea [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2005(4): 669–672.

[38] 赵杏. 不同植茶年限土壤碳氮养分、胞外酶活性及微生物多样性对极端气候的响应[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
ZHAO X. Responses of carbon and nitrogen nutrients, enzyme activities and microbial communities to extreme climate in various cultivation ages of tea orchards [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2016.

[39] 范惠贞. 茶叶香气保持提升的创新策略研究[J]. 食品安全导刊, 2023(34): 148–150.
FAN HZ. Research on innovative strategies for maintaining and improving tea aroma [J]. China Food Safety Magazine, 2023(34): 148–150.

(责任编辑: 蔡世佳　冯东慧)