DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260602002
引用格式: 李华健, 万家明, 张万巧, 等. 基于电子感官技术分析麻栗坡古树晒青绿茶适制性[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(18): 31–40.
Li Huajian, Wan Jiaming, Zhang Wanqiao, et al. Suitability analysis of Malipo ancient tree sun-dried green tea based on electronic sensory [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(18): 31–40. (in Chinese with English abstract).

基于电子感官技术分析麻栗坡古树晒青绿茶适制性

李华健[1], 万家明[2], 张万巧[1], 李玉祥[1], 王春全[1], 滕 娟[1], 杨 青[1], 陆 玲[1*], 陈达菊[1*]
(1. 文山州农业科学院, 文山 663000; 2. 麻栗坡县农业产业发展服务中心, 文山 663000)

摘 要: 目的 探究麻栗坡老山古树晒青绿茶品质特征, 解析理化指标、色泽、电子感官与人工感官的内在关联。**方法** 检测麻栗坡老山古树晒青绿茶水浸出物、茶多酚、游离氨基酸、咖啡碱、儿茶素含量, 并采用色差仪、电子鼻、电子舌分别量化茶汤色泽、香气与滋味特征, 结合人工感官审评, 对茶样进行综合分析。**结果** 所有茶样水浸出物、茶多酚、儿茶素均高于 GB/T 14456.2—2018《绿茶 第 2 部分: 大叶种绿茶》; 酚氨比、a^*及酸涩苦咸类味觉指标变异系数绝对值大于 30%; 主成分分析共提取 5 个主成分, 可整合为理化成分—滋味、理化成分—汤色、挥发性香气 3 个核心评价维度, 以及 2 个次要辅助维度, 可实现对茶样品质的有效判断; 游离氨基酸与甜味、L^*与汤色、a^*与涩味、b^*与苦味均显著正相关(P<0.05); 偏最小二乘回归分析显示, b^*及 W1C、W1W、W3S、涩味、苦味回味、咸味、甜味响应值对人工感官评分贡献突出。**结论** 麻栗坡老山古树晒青绿茶整体品质优良, 酚氨比、a^*及酸涩苦咸类味觉指标是驱动品质差异的核心因子。茶叶品质是水溶性呈味物质、色泽与香气组分协同作用的结果, 可通过主成分分析降维实现品质精准评价。

关键词: 古树茶; 理化成分; 电子鼻; 电子舌; 品质; 主成分分析; 偏最小二乘回归分析
中图分类号: TS207.3; S571.1 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)18–0031–10

Suitability analysis of Malipo ancient tree sun-dried green tea based on electronic sensory

LI Hua-Jian[1], WAN Jia-Ming[2], ZHANG Wan-Qiao[1], LI Yu-Xiang[1], WANG Chun-Quan[1], TENG Juan[1], YANG Qing[1], LU Ling[1*], CHEN Da-Ju[1*]
(1. *Wenshan Academy of Agricultural Sciences*, *Wenshan* 663000, *China*; 2. *Agricultural Industrial Development Service Center of Malipo County*, *Wenshan* 663000, *China*)

ABSTRACT: Objective To explore the quality characteristics of Laoshan ancient tree sun-dried green tea in Malipo and analyze the internal correlations among physicochemical indexes, color, electronic sensory properties and artificial sensory evaluation. **Methods** The content of water extract, tea polyphenols, free amino acids, caffeine and catechins

收稿日期: 2026-06-02
基金项目: 文山州院士专家工作站项目(2024-4); 文山州州级财政资金预算项目(2026WSCZ08); 云南省科技特派员项目(202504BK090598); 文山州 2026 年科技攻关“揭榜挂帅”项目

第一作者: 李华健(1993—), 男, 硕士, 农艺师, 主要研究方向为农产品加工与质量安全。E-mail: 1770825714@qq.com
***通信作者:** 陆玲(1975—), 女, 硕士, 高级农艺师, 主要研究方向为茶树遗传育种。E-mail: 529435847@qq.com
陈达菊(1982—), 女, 硕士, 正高级农艺师, 主要研究方向为食品科学与天然产物利用。E-mail: 67301267@qq.com

were determined in the sun-dried green tea water of ancient trees on the Laoshan of Malipo. A colorimeter, electronic nose and electronic tongue were employed to quantitatively characterize the color, aroma and taste of tea infusions, respectively followed by comprehensive analysis combined with artificial sensory evaluation. **Results** The content of water extract, tea polyphenols and catechins in all samples were higher than the national standard GB/T 14456.2—2018 *Green tea Part 2*: *Dayezhong green tea*. The absolute values of the coefficients of variation for the polyphenol-amino acid ratio, a^* and sour, astringent, bitter and salty taste indicators all exceeded 30%. Principal component analysis extracted 5 principal components, which could be integrated into 3 core evaluation dimensions (physical and chemical constituents-taste, physical and chemical constituents-tea soup color and volatile aroma) and 2 secondary auxiliary dimensions, enabling effective quality discrimination of tea samples. Significantly positive correlations were found between free amino acids and sweetness, L^* and infusion color score, a^* and astringency as well as b^* and bitterness (P<0.05). Partial least squares regression analysis showed that the response values of b^* and W1C, W1W, W3S, astringency, bitter aftertaste, saltiness and sweetness made significant contributions to the artificial sensory score. **Conclusion** Laoshan ancient tree sun-dried green tea in Malipo exhibits excellent overall quality. The polyphenol-amino acid ratio, a^* as well as sour, astringent, bitter and salty taste indicators are the core factors driving quality differences. Tea quality is synergistically determined by water-soluble taste substances, color and aroma components, and precise quality evaluation can be achieved through principal component analysis.

KEY WORDS: ancient tree tea; physicochemical composition; electronic nose; electronic tongue; quality; principal component analysis; partial least squares regression analysis

0 引 言

云南文山州麻栗坡县是茶树起源地之一，地处滇东南喀斯特山区，气候温和湿润、雨量充沛，且土壤有机质含量较高，为原生态古树茶的生长提供了优越环境。古树茶生长周期长，内含物质丰富且协调，具有香气馥郁、滋味醇厚、回甘持久等品质特征，兼具较高的饮用价值与经济价值，是当地极具特色的优势茶资源[1]。

绿茶是世界上最受欢迎的饮料之一，由于其含有多种生物活性成分，具有抗氧化、抗炎、降糖、降脂、改善肠道环境、抑制肥胖等功效，受到消费者的广泛关注[2–3]。晒青绿茶作为普洱茶的原料，其品质特征与适制性研究是当前研究的热点方向[4–5]。同时，古茶树遗传多样性丰富，极具研究与保护价值[6]。近年，在外交部的大力帮扶下，麻栗坡老山古树茶逐渐走上国际舞台[7]。但目前针对老山古树晒青绿茶品质的系统性研究相对较少，缺乏理化指标、茶汤色泽、电子感官与人工感官评分的多维度关联分析，鲜见形成标准化、精准化的品质评价体系。

品质评价是茶叶种质筛选、工艺优化及产品分级的核心环节，传统评价模式以理化检测与人工感官审评为主，存在主观性强、重复性差、评价效率低等问题，难以满足现代化精准评价需求[8]。以电子鼻、电子舌为核心的电子感官技术，可客观、定量表征茶叶香气与滋味轮廓，弥补传统评价方法的缺陷，已在茶叶产地判别、品质分级、真伪鉴定等领域广泛应用[9–10]。

本研究以麻栗坡县 7 株古树茶单株制成的晒青绿茶为试验材料，系统测定品质相关指标，结合多元统计方法，解析品质形成规律与核心影响因子，构建古树晒青绿茶客观高效的品质评价方法开展适制性研究，以期为文山古树茶资源保护、优异种质筛选及产业化开发利用提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

供试茶样于春季采自文山州麻栗坡县老山茶区 7 株古树茶单株，原料为一芽二叶鲜叶，采用统一蒸汽杀青、日晒干燥相同工艺制成晒青绿茶，成品于–4 ℃条件下密封避光保存备用。

乙腈、乙酸(色谱纯，天津益仁达化工有限公司)；福林酚(浓度 1 mol/L，北京索莱宝科技有限公司)；儿茶素类单体(分析纯，上海酶联生物科技有限公司)；磷酸氢二钠、磷酸二氢钾(分析纯，天津市瑞金特化学品有限公司)；咖啡碱(纯度≥99%，美国 Sigma 公司)；甲醇、抗坏血酸、乙二胺四乙酸二钠、碳酸钠、苯酚、氯化亚锡、氧化镁、茚三酮(分析纯)、盐酸、氢氧化钠(优级纯)(南京化学试剂股份有限公司)；柠檬酸钠(优级纯，国药集团化学试剂有限公司)；没食子酸(五峰赤诚生物科技股份有限公司)。

1.2 仪器与设备

DHG-9240A 电热鼓风干燥箱、HWS-28 电热恒温水浴锅(上海一恒科学仪器有限公司)；HC-3018R 离心机(安

徽科大创新股份有限公司中佳分公司); 350 mm 玻璃干燥器(广州诚仪诺仪器有限公司); ZW2085N 分析天平(感量 0.00001 g, 上海赞维衡器有限公司); DS-100 色差仪[彩谱科技(浙江)有限公司]; Agilent HPLC 1260 高效液相色谱仪、HC—C_{18} 液相色谱柱(4.6 mm×250 mm, 5 μm)(美国安捷伦公司); FSH-2A 匀浆机(杭州旌斐仪器科技有限公司); KC-18S 超微粉碎机(广州源康鑫实业有限公司); 755B 紫外可见分光光度计(上海菁华科技仪器有限公司); LA8080 超高速全自动氨基酸分析仪(日本日立公司); PEN3 便携式电子鼻(德国 Airsense 公司); SA402B 电子舌(日本 Insent 公司)。

1.3　试验方法

1.3.1　内含成分检测

内含成分检测方法如表 1。

表 1　内含成分的检测方法

Table 1　Detecting methods of internal components

成分	检测方法
水浸出物	GB/T 8305—2013《茶 水浸出物测定》
茶多酚和儿茶素总量	GB/T 8313—2018《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》
咖啡碱	GB/T 8312—2013《茶 咖啡碱测定》
游离氨基酸	GB 5009.124—2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》

1.3.2　感官审评

由 7 名评茶员按照 GB/T 23776—2018《茶叶感官审评方法》分别对汤色、香气、滋味 3 项指标进行评分。

1.3.3　茶汤色泽测定

按感官审评相同方式冲泡后冷却 30 min 至室温过滤, 取 30 mL, 使用色差仪测定茶汤 L^*(亮度值)、a^*(红绿值)、b^*(黄蓝值)色泽参数, 检测前先将仪器黑白校正。

1.3.4　电子感官分析

按感官审评相同方式冲泡后冷却 30 min 至室温过滤, 进行电子感官测定。电子鼻的响应特征如表 2 所示, 配备 10 个传感器阵列, 分别对不同挥发性化合物具有选择性响应, 测试参数为: 进样流速 400 mL/min, 传感器清洗时间 60 s, 准备时间 5 s, 采集时间 120 s, 载气为经过滤的洁净空气, 样品量 2 mL; 电子舌测试前先自检并清洗传感器, 取 35 mL 样品溶液置于样品杯中, 传感器浸入样品溶液 30 s, 分别对酸味、苦味、涩味、苦味回味、涩味回味、鲜味、丰富性、咸味和甜味进行响应。提取稳态响应值进行分析。

1.4　数据处理

数据以平均值±标准偏差表示, 酚氨比以茶多酚含量与游离氨基酸含量比值计算。采用 SPSS 19.0 进行描述性统计、Duncan's 多重比较和主成分分析(principal component analysis, PCA); 采用 OriginPro 2021 软件绘制相关性分析热图; 采用 Unscrambler 9.7 软件进行偏最小二乘回归分析(partial least squares regression, PLSR), 测定平行次数 $n \geqslant 3$。

表 2　电子鼻传感器响应特征

Table 2　Response characteristics of electronic nose sensors

传感器	响应特征
W1C	对芳香成分敏感
W5S	对氮氧化物(广谱)敏感
W3C	对氨气、芳香族化合物敏感
W6S	对氢气敏感
W5C	对烷烃、芳香族化合物敏感
W1S	对甲烷类敏感
W1W	对硫化物敏感
W2S	对醇类敏感
W2W	对芳香族、有机硫化物敏感
W3S	对烷烃类敏感

2　结果与分析

2.1　品质指标描述性统计与变异分析

为明确茶叶样本各项品质指标的整体分布规律与分化特征, 对茶叶各检测指标进行描述性统计与变异分析, 结果如表 3 所示。水浸出物、咖啡碱、L^*、b^*、感官评分和电子鼻响应值的变异系数均小于 10%, 属于弱变异指标, 表明样品基础品质与宏观气味性状稳定性强, 香型风格统一; 儿茶素、游离氨基酸总量和鲜、甜、丰富性味觉指标为中度变异指标, 可用于茶叶品质的精细化区分; 酚氨比、a^*和酸、苦、涩、咸类味觉指标为强变异指标(变异系数绝对值大于 30%), 除 a^*外均呈偏态与尖峰分布, 表明茶样酚氨比、味觉特征分化明显, 是决定茶叶适口性与风味等级的核心差异指标, 茶叶种质资源筛选、加工工艺优化及风味差异化研究应重点关注。汤色、香气、滋味感官评分均值均大于 84 分, 香气与滋味评分更高, 整体品质优良且变异较小。电子感官检测结果显示: 7 个茶样整体 W1W、W1S、W5S 和 W2S 电子鼻气味响应值相对较高, 为样本主体香气的主要识别维度; 鲜、甜和丰富性电子舌正向味觉响应值较高, 酸、苦、涩类负面指标偏低。肖巧梅等[11]的研究也指出 W1W、W1S、W2S 对晒青绿茶香气区分起到主导作用。香气和滋味共同决定了绿茶的风味品质[2]。图 1 香气、滋味轮廓直观展示了麻栗坡古树晒青绿茶香气滋味特征, W1W 和鲜、甜、丰富性风味响应值显著高于其他风味响应值, 具有较高辨识度。说明麻栗坡古树晒青绿茶整体滋味协调、适口性强, 具备鲜甜滋味, 硫化物香气较浓。这可能与麻栗坡古树茶地处高山、降雨量大、云雾缭绕等因素有关[12]。

表 3 古树晒青绿茶各指标描述性统计结果

Table 3 Descriptive statistical results of each index of ancient tree sun-dried green teas

类别	名称	均值	标准偏差	偏度	峰度	最小值	25%分位数	中位数	75%分位数	最大值	变异系数/%
理化指标	水浸出物/%	46.55	2.14	–0.92	–0.98	43.37	43.70	47.23	48.40	48.63	4.60
	茶多酚/%	21.87	2.26	–0.56	–1.45	18.63	19.17	22.87	23.80	24.40	10.33
	咖啡碱/%	4.12	0.40	–0.07	2.87	3.43	4.10	4.10	4.20	4.80	9.61
	儿茶素总量/%	16.60	3.21	0.54	–0.81	12.49	14.08	16.07	20.41	21.35	19.35
	游离氨基酸/%	1.83	0.30	–2.25	5.59	1.17	1.86	1.90	1.97	2.09	16.52
	酚氨比	12.48	3.84	2.30	5.68	9.52	10.32	11.18	12.29	20.91	30.78
色差	L^*	51.66	0.63	0.55	0.29	50.80	51.29	51.41	52.02	52.74	1.22
	a^*	2.09	0.75	–0.15	–1.78	1.08	1.37	2.24	2.67	3.06	35.86
	b^*	12.88	1.22	0.05	1.50	10.89	12.22	13.07	13.39	14.91	9.49
感官评分	汤色/分	84.16	4.37	0.01	–1.84	78.71	79.43	83.57	88.57	89.71	5.20
	香气/分	90.04	4.20	1.24	0.60	86.43	86.86	89.29	93.71	97.71	4.67
	滋味/分	89.27	3.44	0.58	0.41	84.57	87.14	88.43	91.71	95.14	3.85
电子鼻	W1C	1.68	0.05	1.09	–0.48	1.63	1.66	1.66	1.75	1.77	3.06
	W5S	4.80	0.13	0.38	–1.09	4.64	4.69	4.82	4.91	5.01	2.81
	W3C	1.32	0.04	–0.17	0.61	1.25	1.30	1.31	1.35	1.38	3.27
	W6S	1.19	0.04	–0.57	–1.20	1.13	1.15	1.21	1.23	1.24	3.51
	W5C	1.54	0.06	–0.50	–0.50	1.44	1.49	1.56	1.61	1.62	4.13
	W1S	5.82	0.24	1.17	–0.80	5.62	5.67	5.70	6.14	6.19	4.15
	W1W	8.83	0.24	–0.87	–0.60	8.42	8.61	8.94	9.05	9.05	2.73
	W2S	4.10	0.16	0.00	–1.87	3.89	3.96	4.08	4.24	4.31	3.95
	W2W	2.39	0.11	–1.03	2.95	2.17	2.36	2.40	2.44	2.55	4.70
	W3S	1.92	0.04	–1.61	2.74	1.84	1.90	1.93	1.96	1.96	2.15
电子舌	酸味	–0.56	1.76	2.13	4.94	–1.83	–1.77	–1.05	–0.47	3.23	–311.95
	苦味	–1.92	2.32	2.49	6.39	–3.46	–3.10	–2.69	–2.31	3.26	–120.56
	涩味	2.01	1.42	2.05	4.44	1.05	1.08	1.41	2.29	5.04	70.99
	苦味回味	–1.51	1.61	1.79	3.62	–2.89	–2.71	–1.93	–1.10	1.82	–106.44
	涩味回味	1.59	1.21	2.14	4.83	0.77	0.88	1.01	1.81	4.20	76.27
	鲜味	12.90	2.15	–2.48	6.36	8.10	13.23	13.63	13.82	14.40	16.66
	丰富性	11.28	2.03	–2.00	4.46	6.96	10.90	11.75	12.72	12.96	18.03
	咸味	3.35	1.60	1.69	3.42	1.87	2.15	3.35	3.59	6.64	47.81
	甜味	11.33	2.65	–1.91	4.24	5.75	11.10	11.91	12.99	13.78	23.37

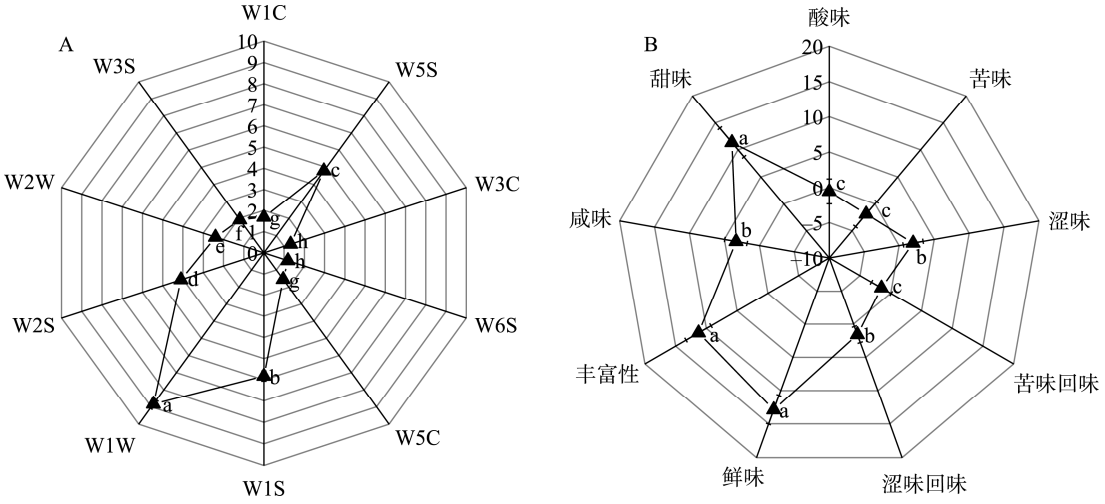
2.2 不同茶样品质差异及适制性分析

如表 4 所示, 不同茶样除在电子鼻 W5S、W1W 响应值上无显著差异外, 其余指标均存在不同程度差异。电子鼻其他 8 个传感器响应值在不同组茶叶间虽存在细微差异, 但变幅也较小, 说明氮氧化物、硫化物为 7 组茶样共有的主体挥发性香气骨架物质, 茶样间主体香型趋同, 但香气组分相对占比、物质浓度与细节层次有细微分化, 进一步体现电子鼻在茶叶香气细微差异客观甄别上的技术优势。

在 7 组茶样中, 5 号茶样综合品质表现最优, 风味协调度最佳, 具有较高感官评分, 表现为高游离氨基酸含量, 低 a^*, 酚氨比和酸苦涩味适宜, 滋味丰富鲜甜; 7 号茶样水浸出物、茶多酚、儿茶素总量、酚氨比偏高, L^*较高, 正向鲜、甜、丰富性适口味觉指标显著劣于其他茶样(P<0.05), 酸、涩、苦类负向味觉指标显著高于其他茶样(P<0.05), 苦涩感突出、适口性较差。可见理化成分与感官规律高度耦合, 高游离氨基酸、酚氨比适宜的茶样香气馥郁、滋味鲜爽, 多酚与儿茶素过高, 酚氨比失调偏高, 则苦涩感强, 感官接受度下降。同时也证明电子舌可对茶汤滋味进行有效评价, 而色度参数可作为茶样外观品质快速鉴别与加工程度判别的客观量化指标。胡善国等[13]也表明: 游离氨基

酸是影响绿茶汤色、香气、滋味的重要指标。

所有样品水浸出物(≥36%)、茶多酚(≥16%)、儿茶素(≥11%)都高于 GB/T 14456.2—2018《绿茶 第 2 部分: 大叶种绿茶》, 均具绿茶适制性。张钺[14]曾指出古茶树具有高茶多酚、高游离氨基酸的特征。丰富的内含物质表明麻栗坡古树茶具有较高品质, 产品可塑性强, 具有较大的开发空间。而麻栗坡老山晒青绿茶品质的差异, 可能主要由遗传多样性决定。蒋会兵等[15]指出, 文山州地区茶树资源遗传多样性丰富, 品质变异水平较高。酚氨比是评判绿茶滋味品质优劣的重要指标, 酚氨比越低, 茶汤的滋味品质越高[16]。苏凡等[17]的研究表明, 酚氨比小于 8 时具有典型绿茶适制性, 8~15 之间红绿茶均适制, 大于 15 时则更具红茶加工优势。推测 7 号茶样可能更具备红茶加工优势, 而 1~6 号茶样鲜爽滋味突出, 可能红绿茶均适制。



注: 各指标间不同小写字母表示具有显著性差异(P<0.05)。

图 1　电子鼻(A)和电子舌(B)传感器响应雷达图

Fig.1　Radar plots of sensor responses for electronic nose (A) and electronic tongue (B)

表 4　不同古茶树晒青绿茶品质差异分析

Table 4　Analysis of quality differences in sun-dried green teas from different ancient tea trees

类别	名称	1 号茶样	2 号茶样	3 号茶样	4 号茶样	5 号茶样	6 号茶样	7 号茶样
理化指标	水浸出物/%	48.63±0.15^{a}	47.23±0.15^{bc}	43.70±0.10^{d}	43.37±0.25^{e}	47.03±0.06^{c}	47.47±0.06^{b}	48.40±0.20^{a}
	茶多酚/%	22.87±0.06^{c}	21.20±0.10^{d}	18.63±0.06^{f}	19.17±0.06^{e}	23.00±0.00^{c}	23.80±0.17^{b}	24.40±0.40^{a}
	咖啡碱/%	4.80±0.10^{a}	4.10±0.26^{b}	4.10±0.20^{b}	4.20±0.10^{b}	4.13±0.06^{b}	4.10±0.36^{b}	3.43±0.25^{c}
	儿茶素总量/%	20.41±0.04^{b}	16.31±0.01^{c}	12.49±0.03^{g}	14.08±0.02^{f}	16.07±0.06^{d}	15.47±0.09^{e}	21.35±0.12^{a}
	游离氨基酸/%	1.86±0.01^{c}	1.90±0.04^{c}	1.96±0.04^{b}	1.86±0.02^{c}	2.09±0.04^{a}	1.97±0.03^{b}	1.17±0.01^{d}
	酚氨比	12.29±0.04^{b}	11.18±0.26^{c}	9.53±0.20^{e}	10.32±0.06^{d}	11.02±0.19^{c}	12.10±0.17^{b}	20.91±0.26^{a}
色差	L^{*}	51.38±0.17^{a}	50.64±0.02^{ab}	46.46±0.39^{c}	49.66±1.40^{ab}	51.23±1.83^{a}	49.18±0.59^{b}	51.40±0.05^{a}
	a^{*}	1.74±0.12^{d}	3.31±0.03^{b}	3.84±0.08^{a}	2.94±0.170^{c}	1.40±0.34^{e}	1.92±0.08^{d}	3.06±0.06^{bc}
	b^{*}	13.59±0.14^{e}	15.91±0.32^{bc}	15.19±0.19^{cd}	16.41±0.66^{ab}	16.74±0.76^{a}	14.06±0.27^{e}	14.91±0.37^{d}
感官评分	汤色/分	87.00±3.87^{abc}	83.57±4.08^{bcd}	78.71±6.45^{d}	82.14±5.34^{cd}	89.71±3.04^{a}	88.57±2.64^{ab}	79.43±5.71^{d}
	香气/分	86.86±3.58^{c}	89.29±1.38^{c}	93.71±2.56^{b}	86.43±3.05^{c}	97.71±1.25^{a}	87.00±5.60^{c}	89.29±2.98^{c}
	滋味/分	90.14±3.24^{b}	91.71±5.22^{ab}	87.14±5.52^{bc}	87.71±3.15^{bc}	95.14±4.22^{a}	88.43±3.05^{bc}	84.57±3.78^{c}
电子鼻	W1C	1.63±0.03^{b}	1.66±0.04^{b}	1.66±0.04^{b}	1.77±0.04^{a}	1.67±0.04^{b}	1.66±0.04^{b}	1.75±0.08^{a}
	W5S	4.69±0.19^{a}	4.69±0.19^{a}	4.82±0.20^{a}	5.01±0.21^{a}	4.91±0.20^{a}	4.85±0.20^{a}	4.64±0.22^{a}
	W3C	1.30±0.02^{cd}	1.30±0.02^{d}	1.34±0.02^{bc}	1.31±0.02^{cd}	1.25±0.01^{e}	1.38±0.02^{a}	1.35±0.03^{b}
	W6S	1.21±0.01^{b}	1.23±0.01^{ab}	1.24±0.01^{a}	1.21±0.01^{b}	1.15±0.01^{d}	1.18±0.01^{c}	1.13±0.01^{d}
	W5C	1.56±0.03^{bc}	1.44±0.02^{e}	1.49±0.03^{de}	1.62±0.03^{a}	1.56±0.03^{bc}	1.53±0.03^{cd}	1.61±0.02^{ab}
	W1S	6.19±0.27^{a}	5.67±0.24^{b}	5.70±0.24^{b}	5.62±0.24^{b}	6.14±0.27^{a}	5.70±0.24^{b}	5.69±0.07^{b}
	W1W	9.04±0.42^{a}	8.61±0.39^{a}	8.76±0.40^{a}	8.98±0.41^{a}	9.05±0.42^{a}	8.94±0.41^{a}	8.42±0.24^{a}
	W2S	4.31±0.17^{a}	4.24±0.17^{ab}	4.08±0.16^{abc}	3.96±0.15^{bc}	4.00±0.16^{bc}	4.24±0.17^{ab}	3.89±0.14^{c}
	W2W	2.40±0.07^{ab}	2.44±0.08^{ab}	2.40±0.07^{ab}	2.40±0.07^{ab}	2.55±0.08^{a}	2.36±0.07^{b}	2.17±0.09^{c}
	W3S	1.92±0.05^{ab}	1.96±0.05^{a}	1.90±0.05^{ab}	1.95±0.05^{a}	1.96±0.05^{a}	1.93±0.05^{a}	1.84±0.01^{b}

表 4(续)

类别	名称	1 号茶样	2 号茶样	3 号茶样	4 号茶样	5 号茶样	6 号茶样	7 号茶样
电子舌	酸味	–1.51±0.13^{de}	–1.05±0.16^{cd}	–1.77±0.12^{e}	–0.55±0.19^{bc}	–0.47±0.20^{b}	–1.83±0.11^{e}	3.23±0.66^{a}
	苦味	–3.10±0.04^{d}	–2.31±0.08^{b}	–3.46±0.01^{e}	–2.45±0.07^{b}	–2.69±0.06^{c}	–2.71±0.06^{c}	3.26±0.30^{a}
	涩味	1.05±0.29^{c}	2.05±0.35^{b}	2.29±0.36^{b}	1.41±0.31^{c}	1.08±0.29^{c}	1.13±0.29^{c}	5.04±0.54^{a}
	苦味回味	–2.89±0.05^{e}	–2.71±0.06^{e}	–1.40±0.14^{bc}	–1.10±0.16^{b}	–1.93±0.11^{cd}	–2.37±0.08^{de}	1.82±0.90^{a}
	涩味回味	1.81±0.34^{b}	0.88±0.28^{d}	1.01±0.29^{bc}	0.77±0.27^{d}	0.92±0.28^{d}	1.54±0.32^{bc}	4.20±0.96^{a}
	鲜味	13.23±1.03^{a}	14.4±1.11^{a}	13.82±1.07^{a}	13.72±1.06^{a}	13.39±1.04^{a}	13.63±1.06^{a}	8.10±0.52^{b}
	丰富性	11.47±0.93^{ab}	10.9±0.89^{b}	11.75±0.94^{ab}	12.96±1.02^{a}	12.22±0.97^{ab}	12.72±1.00^{ab}	6.96±1.41^{c}
	咸味	2.41±0.37^{c}	1.87±0.34^{c}	3.59±0.44^{b}	3.35±0.43^{b}	2.15±0.36^{c}	3.45±0.44^{b}	6.64±0.81^{a}
	甜味	11.91±0.95^{bc}	12.63±1.00^{abc}	11.10±0.90^{c}	11.12±0.90^{c}	13.78±1.07^{a}	12.99±1.02^{ab}	5.75±0.93^{d}

注: 同行上标小写字母不同表示差异显著(P<0.05)。

2.3 主成分分析

为明确茶样品质指标整体差异与内在关联, 对理化指标、色差、感官评分、电子鼻、电子舌分析数据标准化处理后, 进行主成分分析(表 5)。以特征值大于 1 为筛选原则, 共提取 5 个主成分, 累计方差贡献率达 96.988%, 有效涵盖各项指标的大部分信息, 可全面反映茶样综合品质特征。以|载荷|≥0.80 为高度关联, 0.50≤|载荷|<0.80 为中度关联, |载荷|<0.50 为弱关联, 载荷系数正负分别代表指标与主成分呈正或负相关, 分析指标间的协同或拮抗关系。

PC1 方差贡献率为 54.935%, 是区分茶样品质差异的首要维度。其中, 游离氨基酸、甜味、鲜味、丰富性、W2W、W3S 指标呈现高度关联正载荷; 酚氨比、b^*、苦味、涩味、酸味、咸味、苦味回味及涩味回味表现为高度关联负载荷。赵苗苗等[18]对云南省澜沧县不同产区晒青茶的电子鼻响应值载荷分析显示, 传感器 W1W、W2W 与 W3S 对 PC1 的载荷较突出, 与本研究结果一致, 说明不同茶样香气区分中, 硫化物、烷烃、芳香化合物起到主要作用。但在 PC1 中理化成分-滋味品质的关系更紧密, 主要反映茶叶滋味风味的分化特征, 氨基酸、甜味、鲜味等鲜爽类物质与苦涩、酸涩及不良回味物质呈现明显的拮抗关系。相关研究表明, 游离氨基酸与绿茶鲜味呈显著正相关(P<0.05), 并可增强甜味感知[19]。而多酚类物质会增加绿茶苦涩味[20–21]。唐榕等[22]也指出高含量的茶多酚与滋味浓、涩有关, 而高游离氨基酸含量则有利于形成鲜爽滋味。可将 PC1 定义为理化成分—滋味响应维度。随着 PC1 得分升高, 茶样氨基酸积累量提升, 酚氨比降低, 鲜甜味与口感丰富度增强, 苦涩、收敛性及刺激性味觉特征减弱, 黄度降低, 感官品质整体提升。

PC2 方差贡献率为 19.199%, 累计方差贡献率 74.134%, 为茶样品质差异的第二关键维度。水浸出物、茶多酚、L^*为高度关联正载荷, 儿茶素总量、汤色评分、W1S 响应值表现为中度关联正载荷, a^*、W6S 响应值呈中度关联负载荷特征。体现茶叶内含物质溶出水平与汤色的协同变化规律, 可归纳为理化成分—汤色关联维度。PC2 得分越高, 茶叶水浸出物、茶多酚、儿茶素等多酚类内含物质越丰富, 而茶汤明亮度越高, 红度越低, 汤色感官评价越好。王腾飞等[23]的研究显示毛建茶感官评分与水浸出物含量和 L^*呈显著正相关, 与 a^*和 b^*呈显著负相关。Xu 等[24]认为多酚类物质是形成茶汤色泽和滋味的主要成分之一。霍华珍等[25]也指出茶叶中水溶性成分的含量与组成不同, 会表现出不同汤色、滋味品质特征。说明多酚类物质适度积累可改善茶汤透亮程度, 降低红色调富集。

PC3 方差贡献率 11.331%, 累计方差贡献率达 85.465%, 主要由电子鼻传感器响应值主导, W1C、W5S、W5C 响应值为中度关联正载荷, W2S 响应值呈中度关联负载荷, 侧重反映挥发性香气组分种类与浓度差异, 与理化成分、基础滋味相互独立, 定义为挥发性香气特性维度, 是区分茶样香气风格的重要补充。

PC4、PC5 方差贡献率分别为 7.005%、4.518%, 对整体品质解释能力有限。其中 PC4 仅香气感官评分达到中度关联负载荷水平, W3C 和 W5C 响应值为中度关联正载荷, PC5 中各指标载荷值均为弱关联。二者仅能够解释茶样小众香气组分细微波动的个体化差异, 作为茶样综合品质差异的次要补充维度。

根据杨群等[26]、王欢欢等[27]的方法得到各主成分函数及各茶样综合评价函数。各主成分函数表达如公式(1)~(5)如下:

$$Y_1=-0.240X_1-0.351X_2+\cdots+0.970X_{31} \quad (1)$$

$$Y_2=0.869X_1+0.868X_2+\cdots+0.093X_{31} \quad (2)$$

$$Y_3=-0.394X_1-0.093X_2+\cdots+0.015X_{31} \quad (3)$$

$$Y_4=-0.039X_1+0.121X_2+\cdots-0.049X_{31} \quad (4)$$

$$Y_5=0.125X_1+0.317X_2+\cdots+0.216X_{31} \quad (5)$$

综合评价函数如公式(6):

$$Z=0.5494Y_1+0.1920Y_2+0.1133Y_3+0.0701Y_4+0.0452Y_5 \quad (6)$$

以标准化数据带入函数(6)计算得到每个茶样综合评价值 5 号茶样(8.822)>1 号茶样(5.600)>6 号茶样(3.410)>2 号茶样(2.060)>4 号茶样(0.604)>3 号茶样(–0.282)>7 号茶样(–20.215)。

综上, 通过 PCA 将茶样品质指标降维整合为 3 个核心独立维度, 分别对应理化成分—滋味、理化成分—汤色、挥发性香气, 及 2 个次要辅助维度, 有效消除了多指标间

共线性干扰, 揭示了茶样品质分化的物质基础与感官表现差异, 可为茶叶品质评价、风味物质调控及资源差异化利用提供理论依据。在所研究的 7 个古树茶样中, 5 号茶样综合表现最好。若生产滋味鲜爽型茶叶, 可重点关注 PC1 中游离氨基酸高、酚氨比低的种质。氨基酸是鲜味的主体成分, 酚氨比可综合判断鲜叶品质属性和成茶品质优劣, 决定茶汤的回甘生津度[28]。苏凡等[17]的研究也将茶氨酸和酚氨比归在同一主成分, 指出开发鲜爽风味茶叶需氨基酸和酚氨比协调。

2.4　Spearman 相关性分析

采用 Spearman 相关分析法对茶叶理化组分、色泽参数、感官品质、电子鼻及电子舌指标进行关联解析, 结果(图 2)显示: 水浸出物与儿茶素总量、酚氨比、涩味回味呈显著正相关($P<0.05$, $P<0.01$, $P<0.05$), 茶多酚、儿茶素总量均与酚氨比呈显著正相关($P<0.05$, $P<0.01$)。苏凡等[17]、岩嘎等[29]的研究指出, 儿茶素是茶多酚的主体成分, 是构成茶汤滋味浓厚、苦涩和收敛性强的主要因子。表明多酚类物质是驱动酚氨比和水浸出物含量升高的核心因子, 水浸出物含量高的样品虽然物质丰富度高, 但也可能伴随涩感留存风险。游离氨基酸与甜味呈显著正相关($P<0.05$), 证实游离氨基酸是茶汤鲜甜风味的关键物质基础。色泽与感官关联紧密, L^*与汤色评分、甜味呈显著正相关($P<0.001$, $P<0.05$), a^*与汤色评分和甜味呈显著负相关、与涩味呈显著正相关($P<0.05$), b^*与苦味呈显著正相关($P<0.05$), 说明色泽参数可反映出茶汤感官适口性与苦涩强度, 外观明亮度越高的样品, 汤色感官接受度与鲜甜风味越优, 红调特征过强可能伴随汤色暗沉与涩感加剧, 黄色调越深可能苦味越强。

人工感官与智能感官契合度较高, 汤色评分与滋味评分和甜味呈显著正相关($P<0.05$, $P<0.01$)、与涩味呈显著负相关($P<0.05$), 滋味评分与甜味呈显著正相关、与咸味呈显著负相关($P<0.01$)。Shan 等[19]也指出, 甜味与绿茶的等级和品质呈正相关。说明甜味是提升滋味适口性的核心正向因子, 汤色清亮样品通常滋味协调且涩感弱。电子鼻 W1W 响应值与咖啡碱、a^*及涩味负面风味, W2S 响应值与茶汤苦味残留程度存在联动变化规律, W1W 响应值与咖啡碱呈显著正相关、与 a^*及涩味呈显著负相关($P<0.01$, $P<0.05$, $P<0.01$), W2S 响应值与苦味回味呈显著负相关($P<0.001$)。咖啡碱与涩味呈显著负相关($P<0.05$), 推测可能与样本中咖啡碱和其他呈味物质的协同作用有关, 咖啡碱与儿茶素类物质容易形成氢键络合物, 从而增强茶汤的鲜爽味, 减轻苦味和涩味, 使滋味更加醇和[14,26]。

2.5　PLS2 相关性分析

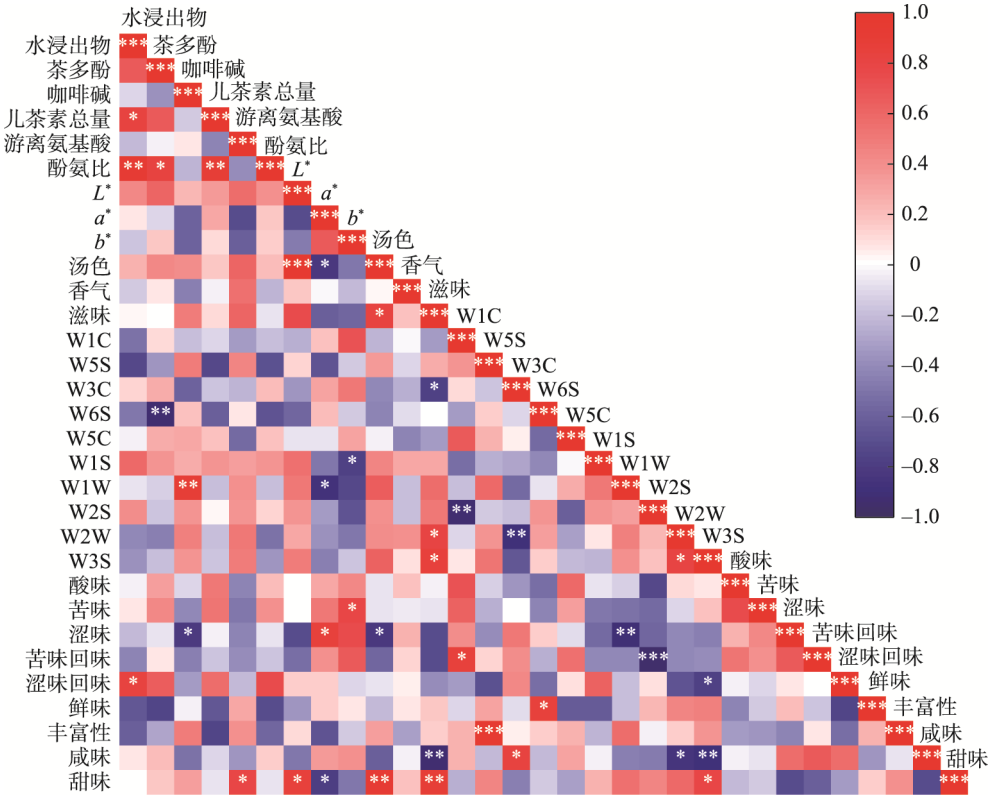
PLSR 可克服数据样本小、解释变量较多、变量间多重共线等问题, 具备 PCA 从解释变量提取信息的思路, 同时还解决了 PCA 分析中所忽略的自变量对因变量的解释问题, 包含 PLS1 和 PLS2 两种分析模型, 其中 PLS2 分析可提取变量对多因变量的最佳解释变量[30]。为探究理化成分、色泽、电子感官对人工感官评价的影响, 将各指标与感官评价建立 PLS2 模型(图 3)。仅 b^*及 W1C、W1W、W3S、涩味、苦味回味、咸味、甜味响应值产生显著影响($P<0.05$)。

表 5　PCA 载荷值与方差贡献率

Table 5　Loading values and variance contribution rates of PCA

类别	名称	载荷值				
		PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
理化指标	水浸出物	–0.240	0.869	–0.394	–0.039	0.125
	茶多酚	–0.351	0.868	–0.093	0.121	0.317
	咖啡碱	0.789	0.154	–0.263	0.284	–0.450
	儿茶素总量	–0.543	0.721	–0.257	0.081	–0.268
	游离氨基酸	0.977	–0.090	0.077	–0.055	0.124
	酚氨比	–0.921	0.381	–0.047	0.035	0.032
色差	L^*	0.366	0.852	0.319	0.032	0.192
	a^*	–0.689	–0.562	–0.260	–0.288	–0.150
	b^*	–0.801	–0.291	0.229	–0.051	0.423
感官评分	汤色	0.616	0.701	0.116	0.185	0.278
	香气	0.188	0.139	0.446	–0.739	0.026
	滋味	0.739	0.445	0.199	–0.418	0.052
电子鼻	W1C	–0.599	–0.360	0.580	0.239	–0.072
	W5S	0.478	–0.345	0.739	0.299	0.127
	W3C	–0.421	–0.285	–0.445	0.515	0.434
	W6S	0.515	–0.680	–0.470	–0.002	–0.215
	W5C	–0.415	0.217	0.619	0.543	–0.320
	W1S	0.397	0.775	0.068	–0.084	–0.434
	W1W	0.796	0.228	0.304	0.420	–0.169
	W2S	0.588	0.195	–0.766	0.146	0.076
	W2W	0.917	0.056	0.253	–0.297	–0.027
	W3S	0.909	–0.015	0.159	–0.049	0.129
电子舌	酸味	–0.907	0.215	0.284	–0.138	–0.067
	苦味	–0.962	0.204	0.092	–0.065	0.055
	涩味	–0.961	–0.078	–0.061	–0.254	–0.014
	苦味回味	–0.931	–0.095	0.331	–0.030	–0.049
	涩味回味	–0.912	0.356	–0.131	0.100	–0.042
	鲜味	0.944	–0.290	–0.104	–0.016	0.077
	丰富性	0.904	–0.223	0.188	0.291	0.104
	咸味	–0.945	–0.074	0.096	0.184	0.048
	甜味	0.970	0.093	0.015	–0.049	0.216
方差贡献率	解释方差的贡献率/%	54.935	19.199	11.331	7.005	4.518
	累积解释方差的贡献率/%	54.935	74.134	85.465	92.469	96.988

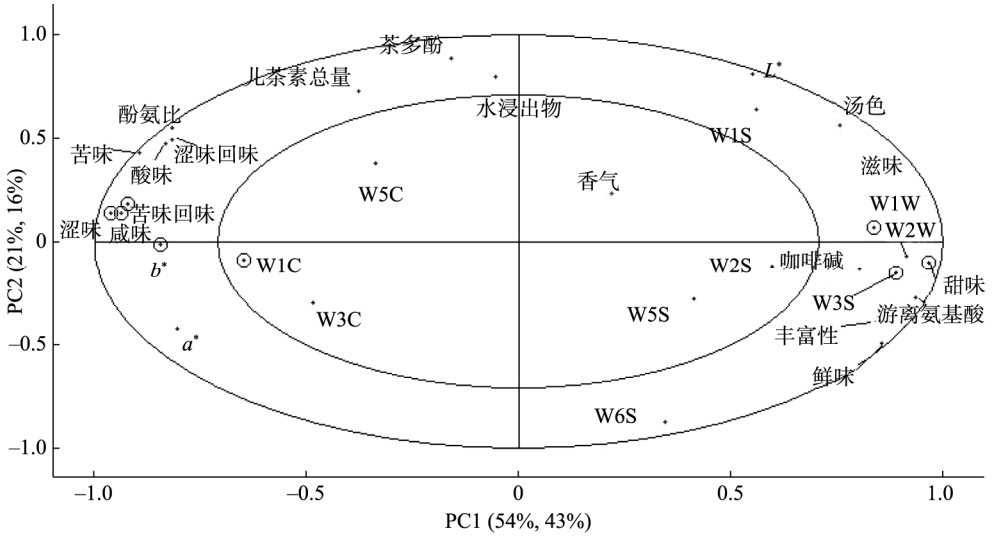
说明色差仪及电子鼻、电子舌参数可较好反映人对茶叶汤色、香气、滋味的感知，茶汤黄色调深浅，电子鼻 W1C、W1W 和 W3S 感应的挥发性风味物质及电子舌涩味、苦味回味、咸味、甜味是影响人对汤色、香气、滋味感官评分的核心因子。感官评分与 W1W、W3S 和甜味响应值位于 PC1 正半轴，呈正相关性，而 b^*、W1C、涩味、苦味回味、咸味响应值位于 PC1 负半轴，与感官评分呈负相关性。说明 W1W、W3S 和甜味响应值越高，b^*、W1C、涩味、苦味回味、咸味响应值越低的茶样，汤色、香气、滋味综合感官评分越高。



注: *表示显著相关(P<0.05); **表示极显著相关(P<0.01); ***表示强极显著相关(P<0.001)。

图 2 各指标 Spearman 相关性分析热图

Fig.2 Spearman correlation analysis heat map of each index



注: 内外椭圆分别为 50%和 100%的解释方差; 小圆圈为显著相关(P<0.05)。

图 3 理化成分、色泽、电子感官与感官评价的 PLS2 载荷图

Fig.3 PLS2 loading plot of physicochemical composition, color, electronic sensory and artificial sensory evaluation

3 结　论

麻栗坡古树晒青绿茶整体品质优良, 感官与风味协调性较高, 具备良好的商品开发与适制加工基础。酚氨比、a^*及酸苦涩咸味相关指标是驱动其品质分化的关键强变异因子, 为麻栗坡老山古树茶风味分化与品质分级的核心标志物。PCA 可将复杂品质指标有效降维为理化成分—滋味、理化成分—汤色、挥发性香气 3 个独立核心维度, 及 2 个次要辅助维度, 达到品质综合评价目的, 为古树茶品质简化评价提供了科学依据, 证实茶叶品质是呈味物质、色泽特征与香气组分协同作用的结果。筛选滋味鲜爽茶树种质资源可重点关注高游离氨基酸含量、低酚氨比的茶树资源。方差分析及 PCA 结果均显示所研究的茶样中 5 号茶样综合表现优异, 表现为高游离氨基酸含量, 低 a^*, 滋味丰富鲜甜, 酸苦涩味弱, 具备较高开发潜力。Spearman 相关性与 PLS2 分析进一步证实, 色差仪、电子鼻、电子舌智能感官技术在产地同质古树茶细微品质区分中具有良好适用性, 可替代传统感官审评实现古树茶品质的客观快速评价, b^*及 W1C、W1W、W3S、涩味、苦味回味、咸味、甜味响应值为影响人工感官的重要因子。但本研究仍存在一定局限: (1)仅以春季一芽二叶为材料, 未涉及不同季节、不同成熟度原料的品质规律; (2)仅从品质指标层面开展关联分析, 且检测指标有限, 未充分检测各内含物质含量, 深入探究内含物、基因型、土壤因子、气候条件等对古树茶品质形成的调控机制; (3)相关性和 PLS2 分析的普适性有待扩大样本进一步检验。未来可围绕古树茶品质形成的生理生态机制、不同加工工艺对风味的调控效应、多产地大样本建模验证等方向展开, 推动文山古树茶从资源保护走向精准利用与标准化生产。

参考文献

[1] Xu Jiayi, Deng Xiujuan, Wu Yamin, et al. Characteristic changes and potential markers of flavour in raw Pu-erh tea with different ageing cycles analysed by HPLC, HS-SPME-GC-MS, and OAV [J]. Foods, 2025, 14(5): 829–847.

[2] Zan Jiezhong, Chen Wenxue, Yuan Haibo, et al. Evaluation of key taste components in Huangjin green tea based on electronic tongue technology [J]. Food Research International, 2025, 201: 115569.

[3] 倪尔冬, 吴雨芯, 操君喜, 等. 广西浦北本土茶树资源绿茶适制性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(24): 327–335.
Ni Erdong, Wu Yuxin, Cao Junxi, et al. Study on the adaptability of green tea from local tea plant resources in Pubei, Guangxi [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(24): 327–335.

[4] 肖雪. 临沧东北部茶区不同地域晒青茶品质研究[D]. 昆明: 云南农业大学, 2024: 1–7.
Xiao Xue, Study on the quality of sun-dried green tea from different regions in the northeastern tea area of Lincang [D]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2024: 1–7.

[5] 杨丹, 陆安霞, 王玮轶, 等. 临沧地区不同古树单株晒青茶香气特征分析[J]. 茶叶通讯, 2025, 52(3): 344–355.
Yang Dan, Lu Anxia, Wang Weiyi, et al. Analysis of aroma characteristics of Sun-dried green tea of different individual ancient trees in Lincang Region [J]. Journal of Tea Communication, 2025, 52(3): 344–355.

[6] 李友勇, 方成刚, 孙雪梅, 等. 滇南古树晒青茶品质化学成分特征研究[J]. 西南农业学报, 2014, 27(5): 1874–1883.
Li Youyong, Fang Chenggang, Sun Xuemei, et al. Study on characteristics of quality chemical components of Sun-dried tea of ancient tea plants in south Yunnan [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2014, 27(5): 1874–1883.

[7] 汪正艳. “老山茶”品牌国际化 带动麻栗坡县域经济高质量发展的创新实践[J]. 创造, 2026, 34(1): 68–72.
Wang Zhengyan. Innovative practice of “old *Camellia*” brand internationalization driving high-quality development of Malipo county economy [J]. Creation, 2026, 34(1): 68–72.

[8] 刘鹏. 基于机器视觉技术的茶叶品质在线评价系统[D]. 南昌: 江西农业大学, 2020: 1–5.
Liu Peng. Online evaluation system of tea quality based on machine vision technology [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2020: 1–5.

[9] 邹光宇. 基于电子鼻和电子舌技术的茶叶品质检测研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2019: 1–5.
Zou Guangyu. Quality detection of Xinyang Maojian tea based on electronic nose and electronic tongue [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2019: 1–5.

[10] 张明, 李熠桓, 方惟依, 等. 茶叶主要化学成分的检测方法及应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(22): 175–183.
Zhang Ming, Li Yihuan, Fang Weiyi, et al. Research progress on the detection methods and application of main chemical components in tea [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(22): 175–183.

[11] 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 Qiaomei, Zhang Xiaoyu, Wang Juan, et al. Comparative analysis on 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.

[12] 陈宏宇, 陈金华, 熊立瑰, 等. 不同海拔云南大叶种晒青茶感官品质及主要生化成分差异分析[J]. 中国食品学报, 2023, 23(2): 276–287.
Chen Hongyu, Chen Jinhua, Xiong Ligui, et al. Analysis of the difference in sensory quality and main biochemical components of Yunnan large leaf sun-dried green tea at different altitudes [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(2): 276–287.

[13] 胡善国, 刘亚芹, 王辉, 等. 不同摊放处理对茶鲜叶游离氨基酸的影响[J]. 中国茶叶加工, 2021(4): 27–33.
Hu Shanguo, Liu Yaqin, Wang Hui, et al. Effects of different spreading treatments on free amino acids in fresh tea leaves [J]. China Tea Processing, 2021(4): 27–33.

[14] 张钺. 安顺市岩腊乡及周边区域古茶树资源调查及其适制性评价[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021: 1–8.
Zhang Yue. Investigation of ancient tea tree resources and evaluation of their suitability for processing in Yanla Township and surrounding areas of Anshun City [D]. Guiyang: Guizhou University, 2021: 1–8.

[15] 蒋会兵, 宋维希, 矣兵, 等. 云南茶树种质资源的表型遗传多样性[J]. 作物学报, 2013, 39(11): 2000–2008.

Jiang Huibing, Song Weixi, Yi Bing, et al. Genetic diversity of tea germplasm resources in Yunnan Province based on phenotypic characteristics [J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(11): 2000–2008.

[16] 沈强, 张小琴, 李燕, 等. 不同时期不同黔茶 1 号茶产品品质评价[J]. 食品工业, 2022, 43(8): 106–110.
Shen Qiang, Zhang Xiaoqin, Li Yan, et al. Quality evaluation of different tea products from Qiancha 1 variety in different periods [J]. The Food Industry, 2022, 43(8): 106–110.

[17] 苏凡, 赵雅琦, 胡云彬, 等. 海南大叶茶种质资源品质性状的多样性分析[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2025, 6(4): 103–110.
Su Fan, Zhao Yaqi, Hu Yunbin, et al. Quality traits diversity analysis of *Camellia* Sinensis var. assamica in Hainan germplasm resources [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization (Chinese and English), 2025, 6(4): 103–110.

[18] 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 Miaomiao, Yin Xiangyan, Yan Liang, 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.

[19] Shan Xujiang, Jiang Yongwen, Zhang Shan, et al. Key umami taste contributors in Longjing green tea uncovered by integrated means of sensory quantitative descriptive analysis, metabolomics, quantification analysis and taste addition experiments [J]. Food Chemistry, 2024, 453: 139628.

[20] Liu Zhongying, Ran Qiansong, Li Qin, et al. Interaction between major catechins and umami amino acids in green tea based on electronic tongue technology [J]. Journal of Food Science, 2023, 88(6): 2339–2352.

[21] 张英娜, 嵇伟彬, 许勇泉, 等. 儿茶素呈味特性及其感官分析方法研究进展[J]. 茶叶科学, 2017, 37(1): 1–9.
Zhang Yingna, Ji Weibin, Xu Yongquan, et al. Rewiew on taste characteristic of catechins and its sensory analysis method [J]. Journal of Tea Science, 2017, 37(1): 1–9.

[22] 唐榕, 罗义菊, 瞿靖, 等. 新平县古茶树加工不同茶类的适制性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(22): 130–137.
Tang Rong, Luo Yiju, Qu Jing, et al. Study on the suitability of ancient tea trees for processing different tea types in Xinping County [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(22): 130–137.

[23] 王腾飞, 裴淑芳, 杨佳丽, 等. 毛建茶茶汤色差与感官品质的相关性分析[J]. 中国食品学报, 2024, 24(3): 298–305.
Wang Tengfei, Pei Shufang, Yang Jiali, et al. Correlation analysis between color difference and sensory quality of *Dracocephalum rupestre* hance tea soup [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(3): 298–305.

[24] Xu Yongquan, Zhang Yingna, Chen Jianxin, et al. Quantitative analyses of the bitterness and astringency of catechins from green tea [J]. Food Chemistry, 2018, 258: 16–24.

[25] 霍华珍, 郭春雨, 蔡爱华, 等. 广西本地群体种选育的不同茶树品系绿茶适制性研究[J]. 食品工业科技, 2026, 47(13): 237–252.
Huo Huazhen, Guo Chunyu, Cai Aihua, et al. Suitability of different strains of locally bred tea plant populations in Guangxi for green tea production [J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(13): 237–252.

[26] 杨群, 张熙敏, 代修娣, 等. 不同茶树品种岳西翠兰适制性比较分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(17): 185–192.
Yang Qun, Zhang Ximin, Dai Xiudi, et al. Comparative analysis of Yuexi Cuilan processing suitability of different tea cultivars [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(17): 185–192.

[27] 王欢欢, 袁丽萍, 雷震东, 等. 基于多元统计分析评价不同茶树品种的绿茶适制性[J]. 食品科学, 2024, 45(3): 9–15.
Wang Huanhuan, Yuan Liping, Lei Zhendong, et al. Evaluation of suitability for green tea processing of different tea cultivars based on multivariate statistical analysis [J]. Food Science, 2024, 45(3): 9–15.

[28] 王欣雨, 吴婷, 鲁倩, 等. 云南双江 4 个山头晒青茶品质比较分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(5): 243–250.
Wang Xinyu, Wu Ting, Lu Qian, et al. Comparative quality analysis of Sun-dried tea from 4 hills in Shuangjiang, Yunnan [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(5): 243–250.

[29] 岩嘎, 杨艳芬, 杨梓泰, 等. 景迈山古茶园与生态茶园晒青茶品质特征的研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(19): 346–354.
Yan Ga, Yang Yanfen, Yang Zitai, et al. Quality characteristics of Sun-dried green tea from ancient tea gardens and ecological tea gardens in Jingmai mountain [J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(19): 346–354.

[30] 李勇, 赵艳桃. PLS2 回归计算顾客满意度指数[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2006, (1): 115–118.
Li Yong, Zhao Yantao. Computing customer satisfaction indices by PLS2 regression [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology), 2006, (1): 115–118.

(责任编辑: 范彩旭 曹岱琳)