DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260123002
引用格式: 姚华开, 王丽, 罗英舰, 等. 不同加工工艺对椒香茶品质的影响研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(9): 324–334.
YAO HK, WANG L, LUO YJ, *et al*. Study on the influence of different processing techniques on the quality of *Zanthoxylum bungeanum* tea [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(9): 324–334. (in Chinese with English abstract).

不同加工工艺对椒香茶品质的影响研究

姚华开, 王　丽, 罗英舰, 罗晓林, 郭群艳, 王　怡, 陈永琦, 黎礼谦*

(遵义市农业科学研究院, 遵义　563000)

摘　要: 目的　筛选椒香茶的最优加工工艺, 明确不同工艺对其品质及营养活性成分的影响机制。**方法**　通过对比红茶、绿茶及白茶 3 种典型加工工艺, 系统评估不同工艺对椒香茶品质特征的差异化影响。**结果**　绿茶工艺在椒香茶加工中综合表现最优: 在感官品质方面, 能完整保留花椒叶的香气与滋味特征, 形成麻而不烈、辛香清新的独特风味; 在营养活性成分方面, 水浸出物(36.00%)、维生素 B_2 (0.46 mg/100 g)、维生素 C (154.00 mg/100 g)及 *β*-胡萝卜素(1.31×10^4 μg/100 g)含量显著提升($P<0.05$); 在功能特性方面, 黄酮类化合物总量达 9254.24 μg/g, 较椒香红茶和椒香白茶分别显著提升了 206.30%和 93.90%, 羟基-*α*/*β*-山椒素等麻味物质保留量亦为最优, 且其含量处于风味与功能的最优阈值范围内, 未产生负面口感效应。上述优势归因于绿茶高温杀青工艺能够快速钝化多酚氧化酶、酰胺水解酶等关键酶类, 有效抑制成分的氧化降解; 而红茶发酵与白茶萎凋工艺因酶活性未被充分抑制, 导致相关成分发生不同程度的转化与降解。**结论**　绿茶加工工艺通过酶活性调控, 实现了椒香茶感官品质、营养活性成分与特色风味物质的高效协同保留, 所制备的椒香茶兼具良好风味与潜在健康活性, 是高品质生产的最优工艺选择, 为花椒叶资源的高值化利用提供了关键技术依据。

关键词: 椒香茶; 加工工艺; 营养成分

Study on the influence of different processing techniques on the quality of *Zanthoxylum bungeanum* tea

YAO Hua-Kai, WANG Li, LUO Ying-Jian, LUO Xiao-Lin, GUO Qun-Yan, WANG Yi, CHEN Yong-Qi, LI Li-Qian*

(*Zunyi Academy of Agricultural Sciences*, *Zunyi* 563000, *China*)

ABSTRACT: Objective　To optimize the processing techniques for *Zanthoxylum bungeanum* tea, elucidate the mechanisms through which different methods influence its quality and bioactive components. **Methods**　Through a comparative analysis of 3 kinds of typical processing techniques for black tea, green tea, and white tea, this study systematically evaluated their distinct impacts on the quality characteristics of *Zanthoxylum bungeanum* tea. **Results**　Among the 3 kinds of processing techniques evaluated, the green tea method exhibited the most favorable

收稿日期: 2026-01-23
基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合服企[2024]008-1 号); 遵义市科技计划项目[遵市科合 HZ 字(2025)223 号]; 遵义市财政科研项目(遵农科财[2025]12 号)

第一作者: 姚华开(1993—), 男, 硕士, 农艺师, 主要研究方向为花椒的品种选育与栽培技术研究。E-mail: Yhk0820@163.com
***通信作者:** 黎礼谦(1977—), 男, 硕士, 高级农艺师, 主要研究方向为花椒的品种选育与栽培技术研究。E-mail: 80847884@qq.com

overall performance for producing *Zanthoxylum bungeanum* tea. Regarding sensory quality, this method effectively preserved the characteristic aroma and flavor profiles of *Zanthoxylum bungeanum* leaves, yielding a unique sensory profile characterized by a mild numbing sensation and a fresh, spicy aroma. In terms of nutritional and bioactive components, the content of water-soluble extracts (36.00%), vitamin B_2 (0.46 mg/100 g), vitamin C (154.00 mg/100 g) and *β*-carotene (1.31×10^4 μg/100 g) were significantly increased ($P<0.05$). Functionally, the green tea method achieved a total flavonoid content of 9254.24 μg/g, which was significantly higher than that of *Zanthoxylum bungeanum* tea (Red) and *Zanthoxylum bungeanum* tea (White) by 206.30% and 93.90%, respectively. Moreover, the retention of numbing compounds, including hydroxy-*α*-sanshool and hydroxy-*β*-sanshool was optimal; their concentrations fell within the desirable threshold range for both flavor and bioactivity, without inducing any negative sensory effects. These advantages were attributable to the high-temperature fixation step inherent to green tea processing, which rapidly inactivated key enzymes such as polyphenol oxidase and amide hydrolase, thereby suppressing oxidative degradation. In contrast, during black tea processing and white tea processing, enzyme activity was not sufficiently inhibited, resulting in varying degrees of constituent transformation and degradation. **Conclusion** Through the modulation of enzyme activity during processing, the green tea method achieves the simultaneous preservation of sensory qualities, bioactive components, and characteristic flavor compounds in *Zanthoxylum bungeanum* tea. The resulting product thus exhibits both desirable flavor attributes and potential health benefits, establishing this method as the optimal approach for high-quality production. These findings provide a crucial technological foundation for the high-value utilization of *Zanthoxylum bungeanum* leaves.

KEY WORDS: *Zanthoxylum bungeanum* tea; processing techniques; nutritional composition

0　引　言

花椒(*Zanthoxylum bungeanum*)作为我国特有的药食同源植物资源, 其果实虽已广泛应用于食品调味和药用领域, 但占植株生物量更大的叶片却长期未被充分利用[1]。研究表明, 花椒叶富含黄酮类化合物、蛋白质、矿物质及独特风味物质[2], 其提取物展现出显著的抗氧化、抗炎、抑菌及抗肿瘤等生物活性, 在降血糖、肝保护、心血管疾病防治等方面具有潜在应用价值[3–8]。这些营养与功能特性, 结合其原料易得的特点, 为开发功能性饮料、保健食品等新型产品提供了重要原料基础, 使花椒叶资源的高值化利用成为食品与医药领域的研究热点。张欢等[9]创新性地将汉源花椒叶应用于曲奇饼干, 开发出兼具椒麻风味与酥脆口感的新型食品; 肖岚等[10]通过配方优化研制出风味协调的花椒叶复合调味膏; 何枫媛[11]则以黄酮提取物为核心开发出具有抗氧化功效的口服液。这些研究不仅为花椒叶的高值化利用提供了新思路, 更凸显其开发优势—采收期长且不影响果实产量, 能有效提升产业附加值。值得注意的是, 花椒叶富含桉叶油醇、*D*-柠檬烯等挥发性成分及生物活性物质, 这些独特的风味物质与功能成分, 为其开发风味茶饮等创新产品奠定了科学基础[12–16]。花椒茶作为融合传统药用价值与现代风味创新的特色茶饮, 其品质特性与加工工艺密切相关。作为新兴茶饮原料, 花椒叶通过加工工艺制成兼具传统茶韵与独特风味的功能性饮品, 不仅丰富了新茶饮市场产品, 更为行业差异化竞争提供了新思路。本研究通过对比红茶、绿茶及白茶 3 种典型加工工艺, 系统分析 3 种椒香茶的综合品质, 旨在筛选能最大化保留椒香茶营养活性成分与特色风味的最优加工工艺, 既为花椒叶茶加工工艺的优化与标准化提供科学依据, 也为花椒叶资源高值化利用及特色功能性茶饮的开发提供新思路与技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验材料

该研究使用的花椒鲜芽叶原料于 2025 年 4 月采自贵州省遵义市汇川区团泽镇遵义市农业科学研究院花椒试验基地。采摘时选取一芽一叶至一芽二叶的嫩芽, 该原料均为同期、同地块、同树龄的标准化采摘样品, 确保原料基础品质均一。随后采用红茶、绿茶和白茶 3 种加工工艺对原料进行处理, 制得 3 种不同风味的椒香茶样品, 分别命名为: 椒香茶(红)、椒香茶(绿)和椒香茶(白)。

1.2　仪器与试剂

QTRAP 6500+液相色谱-质谱联用仪(美国赛默飞世尔科技公司); Agilent 1260 高效液相色谱仪(美国安捷伦科技有限公司); 5424R 离心机(艾本德股份公司); AS 60/220.R2 分析电子天平(感量 0.01 mg, 瑞德威仪器有限公司); MM400 球磨仪(莱驰科技有限公司); MIX-200 多管涡旋振荡器(上海净信实业发展有限公司); KQ5200E 超声清洗仪(昆山市超声仪器有限公司)。

盐酸、氢氧化钠、冰醋酸、石油醚、无水乙醇、无水

硫酸钠、磷酸二氢钾、磷酸氢二钠、氢氧化钾(分析纯)、水合茚三酮(纯度≥99%)、甲醇、正己烷、乙腈、甲酸(色谱纯)、维生素 B_2 标准品(纯度≥98%)、β-胡萝卜素标准品(纯度≥95%)、L(+)-抗坏血酸标准品(纯度≥99%)(国药集团化学试剂有限公司); 黄酮类标准品(纯度≥98%, 上海皓元医药股份有限公司); 氨基酸标准品(纯度≥98%)、脂肪酸甲酯混合标准品(纯度≥95%)、羟基-$\alpha/\beta/\gamma/\varepsilon$-山椒素标准品(纯度≥98%)[西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司]; 内标物槲皮素-d3(纯度≥98%, 加拿大 CDN Isotopes 公司); Waters ACQUITY UPLC HSS T3 C_{18} 柱(100 mm × 2.1 mm, 1.8 μm, 美国沃特世公司)。

1.3 椒香茶加工工艺

椒香茶(红): 采摘鲜叶→自然萎凋 20 h(摊叶厚度≤3 cm, 环境通风)→揉捻 1.5 h→发酵(温度 40 ℃, 相对湿度≥90%, 发酵 6 h)→干燥(100 ℃烘 1 h, 成品含水率降至 5%~6%)。参考 GB/T 35810—2018《红茶加工技术规范》。

椒香茶(绿): 采摘鲜叶→摊青(摊叶厚度≤3 cm, 避光通风, 时长 6~8 h, 鲜叶含水量降至 65%~70%)→杀青(温度 220~280 ℃, 时间 7~8 min)→揉捻 5 min→干燥(128 ℃烘 30 min, 成品含水率≤6.5%)。参考 GB/T 26530—2011《绿茶加工技术规程》。

椒香茶(白): 采摘鲜叶→自然萎凋(温度 25~32 ℃, 相对湿度 70%~80%, 时长 36~60 h, 鲜叶含水量降至 60%~70%, 芽叶柔软、青气消退)→机械干燥(分 2~3 次烘干, 初次 90~100 ℃烘 5 min, 复烘 70~80 ℃烘 10 min, 摊叶厚度 4~5 cm, 成品含水率≤7%)。参考 GB/T 32743—2016《白茶加工技术规范》执行。

1.4 指标测定

本研究所有营养活性成分(水浸出物、维生素 B_2、维生素 C、β-胡萝卜素、游离氨基酸、脂肪酸、黄酮类化合物、麻味物质)的检测对象均为干制椒香茶成品样品, 检测前均经真空冷冻干燥、球磨仪研磨成粉末状, 保证检测的均一性与准确性; 感官审评则采用干制椒香茶样品按标准方法冲泡后进行。

1.4.1 感官审评方法

按 GB/T 23776—2018《茶叶感官审评方法》并参照文献[17]的方法进行修改, 来自遵义市农业科学研究院的 10 名训练有素的感官评价员(年龄 25~45 岁, 5 名女性和 5 名男性)对椒香茶的感官品质进行审评。各项审评因子权重分别为: 外形 10%、汤色 20%、香气 30%、滋味 40%。简而言之, 将 3 g 茶叶样品分别放入专用评茶杯中, 用 95 ℃的 150 mL 超纯水冲泡 5 min。然后立即将茶汤倒入茶碗中, 审评员对茶汤的色泽、滋味和气味进行审, 感官评价标准如表 1。

表 1 感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria

评分项	等级	椒香茶(红)	椒香茶(绿)	椒香茶(白)
外形 (10%)	甲 (90~99 分)	色乌黑油润或棕褐油润, 匀整, 净度好	色泽嫩绿或翠绿, 匀整, 净度好	芽毫肥壮, 白毫显露, 匀整, 净度好
	乙 (80~89 分)	乌润, 匀整, 净度较好	色泽墨绿或黄绿, 尚匀整, 净度较好	色泽银绿, 白毫显, 尚匀整, 净度尚好
	丙 (70~79 分)	尚乌润, 尚匀整, 净度尚好	色泽暗褐或偏黄, 较匀整, 净度尚好	色泽暗褐或红褐, 较整, 净度尚好
汤色 (20%)	甲 (90~99 分)	橙红明亮或红明亮	嫩绿明亮或绿明亮	嫩黄明亮、浅白明亮
	乙 (80~89 分)	尚红亮	尚绿明亮或黄绿明亮	尚绿黄明亮或黄绿明亮
	丙 (70~79 分)	尚红欠亮	深黄或浑浊	深黄或泛红或浑浊
香气 (30%)	甲 (90~99 分)	高爽或高鲜、纯正、嫩茶香	高爽有栗香或有嫩香或带花香	嫩香或清香、毫香显
	乙 (80~89 分)	较高爽、较高鲜	清香、尚高爽	清香、尚有毫香
	丙 (70~79 分)	尚纯、老火或青气	尚纯、熟闷、老火	尚纯、或有酵气或有青气
滋味 (40%)	甲 (90~99 分)	醇厚鲜爽, 麻感协调, 甜麻香融合	醇厚鲜爽、辛香清新, 麻而不烈	甘和鲜爽, 微麻悠长, 喉韵清凉
	乙 (80~89 分)	浓厚、尚醇厚、尚鲜爽, 麻感突兀	清爽、尚醇厚, 辛香刺激或寡淡	醇厚较鲜爽, 麻感时有时无
	丙 (70~79 分)	尚醇、青涩, 麻感缺失或灼舌	尚醇、青涩, 苦涩麻混杂	尚醇、青涩, 麻感怪异

1.4.2　黄酮类化合物测定

(1)样本前处理

将样品真空冷冻干燥, 利用球磨仪研磨(30 Hz, 1.5 min)至粉末状, 称取 20 mg 的粉末, 加入含内标的 500 μL 70%的甲醇溶液, 内标终质量浓度为 0.4 mg/L, 超声 30 min, 4 ℃条件下离心(转速 12000 r/min, 5 min), 吸取上清液, 用 0.22 μm 滤膜过滤样品, 并保存于进样瓶中, 用于液相色谱-质谱仪分析。

(2)色谱质谱条件

色谱条件: 色谱柱: Waters ACQUITY UPLC HSS T3 C_{18} 柱(100 mm×2.1 mm, 1.8 μm); 流动相梯度洗脱程序: 流动相 A 为 0.05%甲酸水溶液; 流动相 B 为 0.05%的甲酸/乙腈(85:15, *V*:*V*)溶液; 梯度洗脱程序: 0~1.0 min, 90% A; 1.0~9.0 min, 80% A; 9.0~12.5 min, 30% A; 12.5~13.5 min, 5% A; 13.5~13.6 min, 5% A; 13.6~16.0 min, 90% A; 16.0 min, 90% A。流速: 0.35 mL/min; 柱温: 40 ℃; 进样量: 2 μL。质谱条件: 电喷雾离子源温度 550 ℃, 正离子模式下质谱电压 5500 V, 负离子模式下质谱电压–4500 V, 气帘气 35 psi。

样本中黄酮的含量计算见式(1):

$$X = \frac{c \times V \times \mathrm{MW}}{10^9 \times m} \quad (1)$$

式中: *X* 为样本中黄酮的含量, μg/g; *c* 为样本的积分峰面积比值代入标准曲线得到的样本浓度值, nmol/L; *V* 为提取时所用溶液的体积, μL; *m* 为称取的样本质量, g; MW 为分子量, g/mol; 10^9 为单位换算系数, 用于将 nmol/L×μL×g/mol 的单位组合, 统一换算为 μg/g。

(3)样品提取

称取 0.5 g 粉碎试样于 15 mL 棕色离心管, 加入 5 mL 甲醇, 振荡器充分混匀 1 min, 室温超声 30 min, 4000 r/min 离心 10 min, 转移上清液于新的棕色离心管中, 重复上述操作两次, 合并 3 次上清液, 涡旋混匀。氮吹干, 用 0.5 mL 50%乙腈水复溶, 取上清液过 0.22 μm 滤膜, 待测定。

(4)色谱条件

检测器:可变波长检测器(variable wavelength detector, VWD); 色谱柱: Thermo GOLD C_{18} (250 mm× 4.6 mm, 5 μm); 柱温: 40 ℃; 进样量: 20 μL; 流速: 1 mL/min; 波长: 270 nm; 流动相: 乙腈:1%冰醋酸水=40:60 (*V*:*V*); 等度洗脱。

(5)标准溶液配制

称取一定量各个标准品于 5 mL 棕色容量瓶中, 加入适量甲醇超声溶解后用水定容至刻度线, 使之成为 1 mg/mL 的单标储备液, –20 ℃保存。再移取各个单标储备液 0.5 mL 于 5 mL 棕色容量瓶中, 用 50%乙腈水溶液定容至刻度线, 摇匀, 使之成为 0.1 mg/mL 的混合标准中间液, –20 ℃保存。标准工作曲线溶液用 50%乙腈水溶液配制。

1.4.3　其他含量测定方法

水分含量的测定按 GB/T 8304—2013《茶 水分测定》执行; 水浸出物的测定按 GB/T 8305—2013《茶 水浸出物测定》执行; 维生素 B_2 的测定按 GB 5009.85—2016《食品安全国家标准 食品中维生素 B_2 的测定》执行; 维生素 C 的测定按 GB 5009.86—2016《食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定》执行; *β*-胡萝卜素的测定按 GB 5009.83—2016《食品安全国家标准 食品中胡萝卜素的测定》执行; 游离氨基酸的测定按 GB/T 8314—2013《茶 游离氨基酸总量的测定》执行; 脂肪酸的测定按 GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》执行。

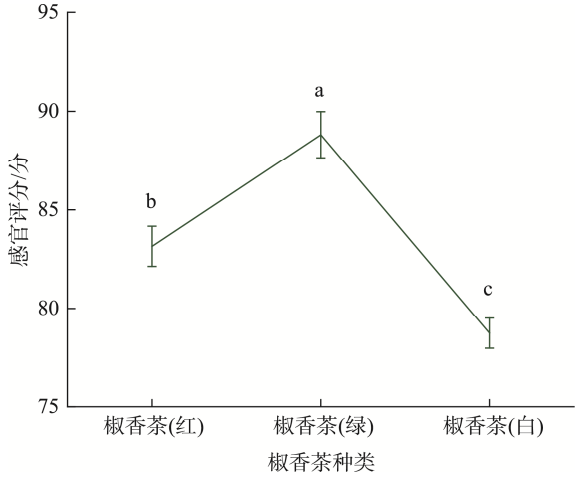
1.5　数据分析

使用 Excel 2010、DPS (v20.00)软件进行数据统计分析, 通过 Origin 2021 软件绘图。数据为 3 次重复试验的平均值, 以平均数±标准偏差表示, $P<0.05$ 表示差异显著。

2　结果与分析

2.1　不同加工工艺对椒香茶感官评分的影响

通过对椒香茶样品的茶叶外形、茶汤色泽、茶汤气味和茶汤滋味属性进行审评。如图 1 所示, 不同加工工艺对椒香茶感官品质的影响存在显著差异, 椒香茶(红)、椒香茶(绿)、椒香茶(白)的感官综合评分分别为 83.15、88.81、78.74 分。绿茶加工中, 杀青、干燥等工艺能较好保留茶叶内源香气物质(如萜烯类、醛类)与滋味物质(如茶多酚、氨基酸), 使香气鲜爽、滋味醇和, 从而获得高感官评分; 红茶加工(如发酵工艺)虽能产生独特的甜香, 但香气浓郁度、滋味协调性易受发酵程度影响, 导致评分略低于绿茶; 白茶加工(如萎凋、干燥)对香气物质的保留与转化能力较弱, 香气淡薄、滋味平淡(麻感怪异), 因此评分最低。



注: 不同字母表明样品组间存在显著的差异($P<0.05$)。下图同。

图 1　不同加工工艺对椒香茶感官评分的影响

Fig.1　Effects of different processing techniques on sensory scores of *Zanthoxylum bungeanum* tea

2.2 不同加工工艺对椒香茶理化品质及营养活性成分的影响

(1)水浸出物与营养活性成分

茶叶水浸出物(含茶多酚、氨基酸、咖啡碱等可溶性物质)是衡量品质的关键指标, 其含量越高, 茶汤越醇厚。如表 2 所示, 椒香茶(绿)和椒香茶(白)的水浸出物含量显著高于椒香茶(红)(P<0.05)。经过加工后, 椒香茶(白)水分含量(6.47%)也高于椒香茶(绿)(4.62%)和椒香茶(红)(1.53%), 这与工艺差异密切相关: 绿茶杀青工艺抑制多酚氧化酶活性, 保留更多水溶性物质并蒸发部分水分[18]; 白茶仅经萎凋与干燥, 保留更多原始水分; 而红茶发酵过程促使多酚类聚合为不溶性复合物, 导致水浸出物减少。

茶叶中维生素 B_2(核黄素)含量显著影响其营养价值, 一般为 0.1~0.5 mg/100 g。如表 2 所示, 椒香茶(绿)含量最高(0.46 mg/100 g), 得益于杀青工艺抑制氧化酶活性, 减少核黄素降解; 椒香茶(白)最低(0.28 mg/100 g), 因长时间萎凋导致损失, 该维生素对维持视网膜功能及皮肤黏膜修复至关重要。此外, 椒香茶(绿)维生素 C 含量达 154.00 mg/100 g, 较椒香茶(红)和椒香茶(白)分别显著提升 122.87%和 164.15%, 这归因于高温杀青钝化酶活性, 赋予其更强抗氧化能力; 而红茶发酵和白茶萎凋工艺分别因氧化酶作用及长时间暴露导致维生素 C 大量降解。

(2)功能性成分对比

β-胡萝卜素作为茶叶中的重要脂溶性抗氧化物质, 其含量直接影响茶叶的营养价值与保健功能。椒香茶(绿)的 β-胡萝卜素含量(1.31×10^4 μg/100 g)显著高于椒香茶(红)(3.19×10^3 μg/100 g)和椒香茶(白)(3.58×10^3 μg/100 g)(P<0.05), 分别提升 3.11 倍和 2.66 倍。这一差异源于加工工艺: 绿茶杀青工艺保留叶绿体结构, 而红茶发酵与白茶萎凋分别导致类胡萝卜素氧化降解和光氧化损失。β-胡萝卜素作为脂溶性抗氧化剂, 可转化为维生素 A 以维护视觉功能, 并与茶多酚协同发挥抗衰老作用。研究表明, 绿茶工艺能最大限度保留该成分, 显著提升茶叶的营养活性与功能特性。

各类营养成分的含量差异, 核心源于不同工艺对氧化酶(抗坏血酸氧化酶、多酚氧化酶)的调控不同: 绿茶高温杀青快速钝化所有氧化酶, 从根本上阻止维生素 C/B_2、β-胡萝卜素的酶促氧化与降解, 同时高温破坏细胞结构, 提升水溶性物质溶出性; 红茶发酵中氧化酶持续高活性, 导致维生素大量降解、水溶性成分聚合为不溶性物质; 白茶萎凋的慢氧化过程, 使营养成分发生渐进式降解, 最终含量显著低于绿茶, 该规律与茶叶加工中通过杀青保留有效成分、发酵促进物质转化的结论相一致[18]。

2.3 不同加工工艺对椒香茶中游离氨基酸的影响

游离氨基酸是决定茶叶风味与营养功能的关键成分, 其含量直接影响茶汤鲜爽度与香气类型, 游离氨基酸可分为鲜味、甜味和苦味氨基酸。由表 3 可知, 白茶加工工艺显著促进鲜味氨基酸(天门冬氨酸 2.66 g/100 g)和甜味氨基酸(脯氨酸 1.93 g/100 g)的积累, 氨基酸总量(20.33 g/100 g)与绿茶(20.37 g/100 g)相当, 且显著高于红茶(19.24 g/100 g) (P<0.05); 绿茶因杀青工艺保留较多苦味氨基酸(赖氨酸 1.62 g/100 g、亮氨酸 1.80 g/100 g) (P<0.05), 而红茶发酵导致鲜味组分(谷氨酸 2.34 g/100 g)部分降解。具体来看, 白茶因萎凋工艺促进蛋白质水解, 显著提升鲜味、甜味氨基酸(如天门冬氨酸、脯氨酸), 同时降低苦味组分, 形成鲜醇主导的滋味特征[19]; 绿茶杀青工艺固化了较高氨基酸含量, 但苦味氨基酸及儿茶素导致酚氨比偏高, 需优化摊青时间[20]; 红茶发酵则造成鲜味氨基酸显著损耗。研究表明白茶氨基酸含量最高(自然萎凋保留鲜味物质), 其次为绿茶(高温杀青部分损失), 红茶最低(酶促反应降解)[21]。综上, 绿茶因未经发酵处理, 茶多酚含量最高, 呈现出强烈的苦涩味和浓厚口感; 白茶经过轻微发酵, 滋味浓醇甘爽, 带有轻微苦味; 红茶经过完全发酵, 茶多酚大量转化为茶黄素等物质, 形成浓醇厚实、甜感突出的风味特征, 回味甘甜且苦味极弱。氨基酸差异受蛋白酶活性调控主导: 白茶萎凋的温湿度为蛋白酶提供了适宜催化环境, 促进蛋白质水解为游离氨基酸, 尤其鲜味/甜味氨基酸; 绿茶杀青高温直接钝化蛋白酶, 氨基酸保留鲜叶原始水平; 红茶发酵的酸性环境抑制蛋白酶活性, 同时部分氨基酸在转氨酶作用下转化为胺类, 总量最低, 该机制与普通茶叶加工中氨基酸的转化规律高度契合[20–21]。

2.4 不同加工工艺对椒香茶中脂肪酸含量的影响

脂肪酸的含量与组成直接影响茶叶的香气品质、滋味特征及贮藏稳定性, 其含量高低显著影响滋味特征, 适量饱和脂肪酸能增强茶汤醇厚度, 并具有调节血脂、延缓衰老等健康功效; 但过量不饱和脂肪酸氧化会导致酸败味[22]。由表 4 可知, 3 种加工工艺显著影响椒香茶脂肪酸组成:

表 2 不同加工工艺对椒香茶理化品质及营养活性成分的影响

Table 2 Effects of different processing techniques on the physicochemical quality and nutrient bioactive components of *Zanthoxylum bungeanum* tea

加工工艺	水分含量/%	水浸出物/%	维生素 B_2/(mg/100 g)	维生素 C/(mg/100 g)	β-胡萝卜素/(μg/100 g)
椒香茶(红)	1.53±0.08^c	26.30±0.14^b	0.36±0.05^b	69.10±0.25^b	3.19×10^3±0.55^b
椒香茶(绿)	4.62±0.13^b	36.00±0.21^a	0.46±0.06^a	154.00±0.33^a	1.31×10^4±0.43^a
椒香茶(白)	6.47±0.14^a	35.40±0.17^a	0.28±0.03^c	58.30±0.22^b	3.58×10^3±0.62^b

注: 不同字母表明样品组间存在显著的差异(P<0.05), 下表 3~5、7 同。

表 3　不同加工工艺对椒香茶游离氨基酸组成及含量的影响

Table 3　Effects of different processing techniques on the composition and content of free amino acids in *Zanthoxylum bungeanum* tea

滋味	化合物	含量/(g/100 g)		
		椒香茶(红)	椒香茶(绿)	椒香茶(白)
鲜味	天门冬氨酸	2.03±0.05^{c}	2.25±0.05^{b}	2.66±0.04^{a}
	谷氨酸	2.34±0.07^{b}	2.57±0.08^{a}	2.25±0.07^{b}
	总量	4.37±0.14^{c}	4.82±0.16^{b}	4.91±0.22^{a}
甜味	丙氨酸	1.18±0.03^{a}	1.19±0.11^{a}	1.08±0.05^{b}
	丝氨酸	1.17±0.04^{b}	1.38±0.10^{a}	1.24±0.11^{b}
	甘氨酸	1.19±0.11^{a}	1.18±0.06^{a}	1.08±0.07^{b}
	脯氨酸	1.29±0.07^{b}	1.14±0.07^{c}	1.93±0.12^{a}
	苏氨酸	1.04±0.10^{a}	1.06±0.04^{a}	1.01±0.03^{a}
	总量	5.87±0.16^{b}	5.95±0.21^{b}	6.34±0.25^{a}
苦味	精氨酸	1.26±0.05^{a}	1.25±0.12^{a}	1.30±0.05^{a}
	组氨酸	0.52±0.03^{a}	0.56±0.07^{a}	0.51±0.02^{a}
	苯丙氨酸	1.06±0.06^{b}	1.10±0.11^{ab}	1.18±0.12^{a}
	酪氨酸	0.69±0.05^{ab}	0.72±0.03^{a}	0.68±0.06^{b}
	亮氨酸	1.76±0.12^{ab}	1.80±0.07^{a}	1.61±0.14^{b}
	异亮氨酸	1.08±0.11^{a}	1.10±0.08^{a}	1.02±0.09^{a}
	蛋氨酸	0.29±0.02^{a}	0.25±0.03^{b}	0.20±0.01^{c}
	缬氨酸	1.17±0.07^{a}	1.20±0.05^{a}	1.19±0.06^{a}
	赖氨酸	1.17±0.05^{c}	1.62±0.12^{a}	1.39±0.11^{b}
	总量	9.00±0.24^{b}	9.60±0.26^{a}	9.08±0.27^{b}
氨基酸总量		19.24±0.32^{b}	20.37±0.35^{a}	20.33±0.29^{a}

表 4　不同加工工艺对椒香茶脂肪酸组成及含量的影响

Table 4　Effects of different processing techniques on the fatty acid composition and content of *Zanthoxylum bungeanum* tea

分类	化合物	含量/(g/100 g)		
		椒香茶(红)	椒香茶(绿)	椒香茶(白)
饱和脂肪酸	十四碳酸(豆蔻酸)	0.0042±0.00^{a}	0.0052±0.00^{a}	0.0043±0.00^{a}
	十六碳酸(棕榈酸)	0.3230±0.04^{b}	0.4620±0.03^{a}	0.3390±0.08^{b}
	十八碳酸(硬脂酸)	0.0327±0.01^{a}	0.0346±0.01^{a}	0.0276±0.01^{b}
	二十二碳酸(山嵛酸)	未检出	0.0069±0.00^{a}	未检出
	总量	0.3599±0.04^{b}	0.5087±0.04^{a}	0.3709±0.05^{b}
单不饱和脂肪酸	顺-9-十六碳一烯酸	0.0036±0.00^{b}	0.0055±0.00^{a}	未检出
	顺-9-十八碳一烯酸(油酸)	0.0253±0.00^{b}	0.0337±0.00^{a}	0.0242±0.00^{b}
	总量	0.0289±0.01^{b}	0.0392±0.02^{a}	0.0242±0.01^{b}
多不饱和脂肪酸	顺, 顺-9, 12-十八碳二烯酸(亚油酸)	0.1970±0.03^{b}	0.3850±0.06^{a}	0.1780±0.04^{b}
	顺, 顺, 顺-9, 12, 15-十八碳三烯酸(α-亚麻酸)	0.4460±0.05^{b}	1.2000±0.06^{a}	0.3400±0.03^{c}
	顺, 顺-11, 14-二十碳二烯酸	未检出	0.0036±0.00^{a}	未检出
	顺-11, 14, 17-二十碳三烯酸	未检出	0.0079±0.00^{a}	未检出
	总量	0.6430±0.03^{b}	1.5965±0.03^{a}	0.5180±0.04^{b}
脂肪酸总量		1.0318±0.05^{b}	2.1444±0.09^{a}	0.9131±0.08^{b}

椒香茶(绿)中棕榈酸等饱和脂肪酸含量达 0.4620 g/100 g, 其总量及单不饱和脂肪酸含量均显著高于其他两组, 表明高温杀青工艺有效抑制了脂肪酸氧化降解; 特别值得注意的是, 椒香茶(绿)中 α-亚麻酸(1.2000 g/100 g)和亚油酸(0.3850 g/100 g)等多不饱和脂肪酸含量突出, 使总脂肪酸含量达到 2.1444 g/100 g, 显著高于红茶与白茶(P<0.05), 这表明了绿茶加工工艺更有利于脂肪酸积累的特性, 相关研究也发现茶叶中长链多不饱和脂肪酸, 以 α-亚麻酸和亚油酸为代表[23]。整体而言, 绿茶加工工艺显著优化了椒香茶脂肪酸组成: 高温杀青有效保留 α-亚麻酸和亚油酸等多不饱和脂肪酸, 表明该工艺能最大限度保留茶叶原始营养成分, 为茶叶的健康功效提供物质基础。脂肪酸的保留差异核心与脂氧合酶活性相关: 绿茶高温杀青快速钝化脂氧合酶, 抑制棕榈酸、α-亚麻酸等的氧化分解, 同时使脂肪酶失活, 避免脂肪酸水解; 红茶发酵中脂氧合酶催化多不饱和脂肪酸氧化为挥发性物质, 白茶萎凋则发生慢氧化, 二者均导致脂肪酸含量下降, 此为茶叶脂肪酸加工转化的通用机制[22–23]。

2.5 不同加工工艺对椒香茶中黄酮类化合物含量的影响

黄酮类化合物是植物代谢的关键活性成分, 兼具抗氧化、抗炎及抗癌等生物活性, 同时显著影响茶叶的呈色与风味品质[24–26]。椒香茶作为富含黄酮类化合物的传统饮品, 其生物活性成分的组成差异与加工工艺密切相关。该研究采用靶向代谢组学技术, 系统解析了不同加工工艺对椒香茶黄酮类化合物组成的影响规律。由表 5 可知, 共检测出 60 种黄酮类化合物, 分别为黄酮醇、黄酮、二氢黄酮、苯甲酸及其衍生物、苯丙酸、二氢黄酮醇、黄烷醇和其他黄酮类化合物。椒香茶加工工艺通过调控酶活性和氧化程度, 显著影响黄酮类化合物的合成与转化, 导致其含量及种类呈现显著差异。由图 2 可知, 3 种椒香茶的黄酮类化合物组成存在显著差异。其中黄酮醇(37.59%~66.41%)和苯丙酸类(6.13%~21.10%)为主要成分, 其次为黄酮(2.24%~10.40%)、苯甲酸及其衍生物(0.73%~9.87%)和黄烷酮类(0.92%~13.97%)。值得注意的是, 椒香茶(红)的黄酮、黄酮醇及其二氢黄酮类化合物占比均显著高于其他两种椒香茶。由图 3 可知, 椒香茶(绿)的黄酮类化合物总量显著高于其他两类, 达 9254.24 μg/g (P<0.05), 分别较椒香茶(红)和椒香茶(白)提升 206.30%和 93.90%。其芦丁、槲皮素-3-O-桑布双糖苷和槲皮苷等主要成分含量优势明显; 而椒香茶(红)在槲皮素、山茶苷 A 等成分上保留更佳。

表 5 不同加工工艺对椒香茶中黄酮类化合物分类含量的影响

Table 5 Effects of different processing techniques on the content of classified flavonoids in *Zanthoxylum bungeanum* tea

序号	物质	物质类别	含量/(μg/g)		
			椒香茶(红)	椒香茶(绿)	椒香茶(白)
1	芦丁	黄酮醇	21.75±4.25^{b}	31.96±5.23^{a}	16.64±3.72^{c}
2	槲皮素-3-O-桑布双糖苷	黄酮醇	1.05±0.23^{c}	8.07±2.12^{a}	2.69±0.34^{b}
3	山茶苷 A	黄酮醇	14.81±2.81^{a}	13.62±2.61^{b}	11.82±3.11^{c}
4	银锻苷	黄酮醇	0.53±0.03^{b}	3.81±0.34^{a}	0.23±0.02^{c}
5	槲皮素-3-O-葡萄糖醛酸苷	黄酮醇	159.67±17.26^{c}	949.41±67.26^{a}	482.63±47.27^{b}
6	异鼠李素-3,7-O-二葡萄糖苷	黄酮醇	1.20±0.12^{c}	2.32±0.65^{a}	1.56±0.43^{b}
7	槲皮素-7-O-*β*-*D*-葡萄糖苷	黄酮醇	5.95±0.52^{c}	35.40±5.33^{a}	16.11±1.22^{b}
8	金丝桃苷	黄酮醇	50.93±8.35^{c}	109.71±16.87^{a}	83.98±11.72^{b}
9	瑞诺苷	黄酮醇	19.50±3.64^{c}	60.29±8.35^{a}	47.48±6.76^{b}
10	槲皮素	黄酮醇	106.31±12.65^{a}	74.30±9.22^{b}	33.54±5.23^{c}
11	槲皮苷	黄酮醇	1508.92±187.27^{b}	2142.16±216.24^{a}	1636.38±168.87^{b}
12	异鼠李素	黄酮醇	2.67±0.36^{a}	1.36±0.27^{c}	2.42±0.27^{b}
13	丁香亭-3-O-葡萄糖苷	黄酮醇	4.97±0.87^{c}	45.05±5.32^{a}	17.98±2.18^{b}
14	异鼠李素-3-O-葡萄糖苷	黄酮醇	3.17±0.21^{a}	1.63±0.30^{b}	1.50±0.21^{b}
15	杜鹃黄素	黄酮醇	1.49±0.21^{b}	ND	3.15±0.45^{a}
16	三叶豆苷	黄酮醇	103.41±12.76^{a}	ND	ND
		总量	2006.34±162.27^{c}	3479.10±226.27^{a}	2358.11±176.28^{b}
17	香叶木素	黄酮	1.36±0.34^{a}	0.16±0.02^{c}	0.68±0.03^{b}
18	芹菜素-6,8-二-C-葡萄糖苷	黄酮	233.28±25.87^{a}	183.71±20.18^{b}	222.89±18.38^{a}
19	木犀草素	黄酮	16.85±3.87^{b}	4.42±0.64^{c}	28.30±5.42^{a}
20	水仙苷	黄酮	15.48±3.71^{a}	9.70±1.28^{c}	11.64±2.11^{b}
21	地奥司明	黄酮	32.86±5.27^{a}	8.17±2.18^{c}	19.42±4.86^{b}
22	香叶木素-7-葡萄糖苷	黄酮	0.85±0.04^{a}	0.37±0.01^{c}	0.77±0.02^{b}

表 5(续)

序号	物质	物质类别	含量/(μg/g)		
			椒香茶(红)	椒香茶(绿)	椒香茶(白)
23	芹菜素	黄酮	1.79±0.42[a]	0.61±0.05[c]	1.21±0.38[b]
24	假荆芥属苷	黄酮	4.15±0.28[b]	ND	5.00±0.34[a]
25	橙皮素-5-O-葡萄糖苷	黄酮	7.53±0.76[a]	ND	5.59±0.38[b]
		总量	314.16±28.26[a]	207.14±20.19[b]	295.50±26.81[a]
26	枸橘苷	二氢黄酮	1.33±0.21[b]	6.03±0.37[a]	0.98±0.05[c]
27	橙皮素	二氢黄酮	4.38±0.31[a]	0.23±0.01[c]	1.47±0.08[b]
28	桃苷	二氢黄酮	0.78±0.04[c]	5.74±0.28[b]	7.33±0.33[a]
29	异柚葡糖苷	二氢黄酮	5.68±0.76[c]	10.03±1.38[a]	7.90±0.87[b]
30	橙皮苷	二氢黄酮	132.20±15.82[a]	65.83±9.18[c]	86.94±12.17[b]
31	橙皮素-7-O-葡萄糖苷	二氢黄酮	3.28±0.47[a]	1.94±0.48[b]	1.13±0.64[c]
		总量	147.65±15.87[a]	89.79±9.37[c]	105.76±11.87[b]
32	2,4-二羟基苯甲酸	苯甲酸及其衍生物	14.56±3.81[a]	5.88±0.76[b]	3.81±0.52[c]
33	没食子酸	苯甲酸及其衍生物	9.44±0.81[c]	24.59±5.92[b]	133.23±12.98[a]
34	原儿茶酸	苯甲酸及其衍生物	73.25±12.81[b]	17.45±4.39[c]	239.16±21.87[a]
35	水杨酸	苯甲酸及其衍生物	43.32±7.23[a]	5.28±0.87[c]	9.74±1.27[b]
36	香草酸	苯甲酸及其衍生物	78.01±9.12[a]	13.97±3.18[c]	49.99±6.28[b]
37	2,5-二羟基苯甲酸	苯甲酸及其衍生物	1.80±0.26[b]	0.46±0.08[c]	2.85±0.37[a]
38	对羟基苯甲酸	苯甲酸及其衍生物	28.56±5.23[a]	ND	27.71±5.12[a]
39	丁香酸	苯甲酸及其衍生物	8.54±0.87[a]	ND	4.53±0.67[b]
		总量	257.48±26.28[b]	67.63±11.82[c]	471.03±40.82[a]
40	咖啡酸	苯丙酸	7.15±0.87[b]	19.34±3.23[a]	7.37±0.69[b]
41	对香豆酸	苯丙酸	27.10±3.81[a]	17.00±2.11[b]	7.15±0.76[c]
42	绿原酸	苯丙酸	146.68±22.87[c]	1915.93±220.86[a]	630.25±61.28[b]
43	阿魏酸	苯丙酸	4.32±0.21[a]	ND	ND
		总量	185.24±28.13[c]	1952.26±422.87[a]	644.77±137.82[b]
44	二氢山柰酚	二氢黄酮醇	1.25±0.21[a]	0.14±0.01[c]	0.62±0.02[b]
45	花旗松素	二氢黄酮醇	0.16±0.01[c]	1.78±0.26[a]	0.33±0.02[b]
46	落新妇苷	二氢黄酮醇	4.01±0.38[c]	15.92±3.18[a]	6.32±0.76[b]
		总量	5.42±0.47[c]	17.84±2.81[a]	7.27±0.87[b]
47	没食子儿茶素没食子酸酯	黄烷醇	20.20±3.82[b]	738.08±47.34[a]	2.89±0.72[c]
48	(-)-表儿茶素	黄烷醇	5.98±0.87[c]	532.94±32.98[a]	183.49±20.88[b]
49	儿茶素没食子酸酯	黄烷醇	1.46±0.43[b]	14.12±0.98[a]	0.05±0.00[c]
50	没食子儿茶素	黄烷醇	0.11±0.01[c]	7.80±0.47[a]	0.68±0.02[b]
		总量	27.75±3.81[c]	1292.93±217.27[a]	187.11±16.27[b]
51	香兰素	芳香醛	2.47±0.32[a]	ND	1.32±0.18[b]
52	木犀草素-3',7-二-O-葡糖苷	异黄酮	5.17±0.72[b]	10.71±0.87[a]	5.84±0.67[b]
53	原花青素 B_2	原花青素	28.60±4.18[c]	2072.14±187.28[a]	628.42±37.28[b]
54	水杨甙	糖苷	1.50±0.37[a]	ND	1.32±0.08[b]
55	鞣花酸	鞣质	1.63±0.22[b]	5.12±0.76[a]	ND
56	7-羟基香豆素	香豆素	20.93±4.38[b]	40.97±4.92[a]	43.24±5.38[a]
57	柚皮素查尔酮	查尔酮	1.21±0.26[c]	1.73±0.46[a]	1.39±0.37[b]
58	异荭草素	黄酮碳糖苷	11.70±1.82[b]	11.46±2.12[b]	19.41±3.92[a]
59	荭草苷	黄酮碳糖苷	ND	5.42±0.27[a]	ND
60	松柏醛	酚酸	4.09±0.65[a]	ND	2.28±0.37[b]
		其他类总量	77.29±18.28[c]	2147.55±176.28[a]	703.22±76.18[b]
		黄酮类化合物总量	3021.33±172.68[c]	9254.24±258.23[a]	4772.77±231.28[b]

注: ND 表示未检出。

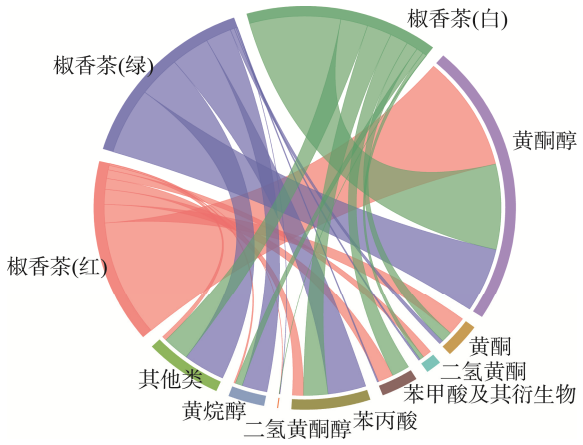


图 2 不同加工工艺对椒香茶中黄酮类化合物各分类占比弦图

Fig.2 Scatter plot of the proportion of each flavonoid subclass in *Zanthoxylum bungeanum* tea according to different processing techniques

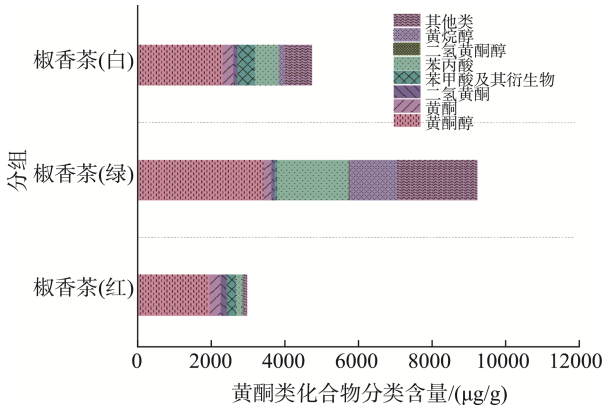


图 3 不同加工工艺对椒香茶中黄酮类化合物分类含量分布

Fig.3 Distribution of flavonoid compounds in *Zanthoxylum bungeanum* tea by different processing techniques

黄酮类化合物的含量受茶叶品种、地理环境、采收季节及加工工艺共同影响[27]。不同加工工艺通过调控酶促反应路径显著改变黄酮组成：绿茶工艺的高温杀青可有效抑制氧化酶活性，保留槲皮素-7-O-*β*-*D*-葡萄糖苷等热稳定性成分，但造成杜鹃黄素部分损失；红茶渥堆发酵过程促进槲皮素等苷元积累，却导致银锻苷等糖苷类显著降解；白茶自然萎凋工艺通过水解反应增加木犀草素含量，但长时间处理会引发山茶苷 A 等不稳定成分的损失。综上表明不同加工工艺对椒香茶黄酮类化合物含量影响显著。绿茶工艺因发酵程度较低，能更好保留黄酮类物质，其含量显著高于红茶和白茶。这主要源于化合物结构特性差异及加工过程中的化学反应稳定性不同。因此，优化加工工艺是提升椒香茶黄酮类化合物含量的关键。黄酮类化合物的差异主要源于多酚氧化酶与黄酮糖苷酶的双重调控。在绿茶加工中，杀青工艺使这两类酶失活，既抑制了黄酮的氧化降解，也阻止了糖苷类黄酮的水解，从而实现了黄酮类物质总量的最大化保留。在红茶发酵过程中，多酚氧化酶催化黄酮与茶多酚发生共聚反应，同时糖苷酶水解糖苷类黄酮，导致黄酮总量显著下降。白茶加工采用萎凋工艺，在缓慢氧化和缓慢水解的共同作用下，其黄酮含量介于绿茶与红茶之间。该结果与茶叶黄酮类成分的加工调控研究结论一致[24,27–29]。

2.6 不同加工工艺对椒香茶中麻味物质含量的影响

由表 6 可得，4 种椒香茶的麻味物质的浓度与峰面积呈良好的线性关系，并且各回归方程的相关系数(r)均为 0.9999。这表明椒香茶的麻味物质线性关系较好，通过测定出峰面积归一后即可根据该方程得到对应的椒香茶麻味物质的含量，且高效液相色谱法能将花椒麻味物质与其他物质较好地分离，是一种准确有效且快速的方法[30]。

表 6 4 种麻味物质标准曲线线性回归方程

Table 6 Standard curve linear regression equations of 4 kinds of hemp flavor compounds

名称	线性回归方程	相关系数
羟基-*α*-山椒素	Y=64.376X–6.3503	0.9999
羟基-*β*-山椒素	Y=23.293X–5.9219	0.9999
羟基-*γ*-山椒素	Y=30.628X–6.2458	0.9999
羟基-*ε*-山椒素	Y=142.73X–7.5334	0.9999

如表 7 所示，3 种椒香茶麻味物质含量存在显著差异(P<0.05)。椒香茶(绿)的羟基-*α*-山椒素含量达 16.7572 μg/g，分别是椒香茶(红)的 47.8 倍和椒香茶(白)的 5.0 倍，其羟基-*β*-山椒素含量也显著高于其他两类。这一差异主要源于不同加工工艺对酰胺水解酶活性的调控。在绿茶加工中，高温杀青能够快速钝化酰胺水解酶，从而彻底抑制羟基-*α*/*β*-山椒素的水解降解。红茶发酵过程中，酰胺水解酶保持较高活性，促使麻味物质大量水解生成无麻味产物。白茶加工采用萎凋工艺，其缓慢水解使得麻味物质降解速率低于红茶。该机制与花椒叶及茶叶中酰胺类、萜烯类风味物质的加工保留规律相一致。

本研究中椒香茶(绿)麻味物质的高保留量并非绝对越多越好，而是该含量处于椒香茶风味与功能的最优阈值范围，且未对口感产生负面影响，原因如下：(1)产品定位上，椒香茶作为花椒叶特色茶饮，麻味是其区别于普通茶叶的核心风味标识，含量过低[如椒香茶(红)]会导致椒香特征缺失、茶汤滋味平淡，丧失特色辨识度；(2)口感阈值上，麻味物质(羟基-*α*/*β*-山椒素)呈味存在明确阈值，过量(如鲜花椒叶直接冲泡，含量超 50 μg/g)会麻感灼舌、掩盖茶汤鲜爽与辛香，而本研究绿茶工艺保留的羟基-*α*-山椒素 16.7572 μg/g(总麻味物质约 24.57 μg/g)，经 10 名专业感官评价员实测，呈现“麻而不烈、辛香清新”的特征，与氨基酸、茶多酚协同形成醇爽口感，无麻感突兀、灼舌等问题，且与椒香茶(绿)感官综合评分最高(88.81 分)的实测结果

表 7　3 种椒香茶麻味物质质量分数

Table 7　Mass fraction of 3 kinds of *Zanthoxylum bungeanum* tea hemp flavor compounds

样品名称	含量/(μg/g)			
	羟基-*ε*-山椒素	羟基-*α*-山椒素	羟基-*β*-山椒素	羟基-*γ*-山椒素
椒香茶(红)	0.6730±0.05^{c}	0.3503±0.04^{c}	0.7885±0.06^{b}	0.2905±0.02^{c}
椒香茶(绿)	1.9736±0.26^{b}	16.7572±1.72^{a}	4.0409±0.87^{a}	1.7987±0.32^{a}
椒香茶(白)	2.0318±0.29^{a}	3.3310±0.43^{b}	0.4269±0.04^{c}	1.3010±0.31^{b}

一致; (3)功能价值上, 羟基-*α*/*β*-山椒素兼具特征风味与生物活性, 其含量与镇痛、抗炎、调节胃肠功能的活性呈正相关, 本研究的高保留量在保证口感的前提下, 最大化保留了其生物功能, 实现风味与功能的双重兼顾。

3　结　论

本研究系统比较了红茶、绿茶及白茶 3 种加工工艺对椒香茶品质的影响。综合感官评价与成分分析表明, 绿茶工艺在保留花椒叶特征风味与活性成分方面表现最优: 其水浸出物、维生素 B_2、维生素 C 及 *β*-胡萝卜素等营养活性成分含量显著高于红茶和白茶工艺制备的椒香茶(P<0.05); 黄酮类化合物总量达 9254.24 μg/g, 分别是香茶(红)和椒香茶(白)的 3.06 倍和 1.94 倍, 且芦丁、槲皮素-3-O-桑布双糖苷、槲皮苷等主要黄酮类化合物含量也显著较高; 羟基-*α*/*β*-山椒素等麻味物质保留量亦显著优于其他工艺, 且该保留量处于椒香茶麻而不烈、辛香协调的最优口感阈值, 既保证了椒香茶的核心风味特征, 未对饮用口感产生负面影响, 又最大化保留了麻味物质的生物功能, 表明绿茶高温杀青工艺能精准实现麻味物质的适宜保留。综上所述, 绿茶加工工艺在制备椒香茶中展现出显著优势: 既能完整保留花椒叶的特征风味与活性成分, 又能全面提升茶叶品质。这一研究成果可为优化加工工艺及产业化应用提供重要理论依据。

参考文献

[1] 孟资宽, 任元元, 邹育, 等. 花椒副产物的研究现状及展望[J]. 食品与发酵科技, 2021, 57(3): 140–144.
MENG ZK, REN YY, ZUO Y, *et al*. Summary of the research status and future prospects of *Zanthoxylum bungeanum* by-products [J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2021, 57(3): 140–144.

[2] 姚丽. 我国花椒加工技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(15): 127–135.
YAO L. Research progress in processing technology of *Zanthoxylum bungeanum* in China [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(15): 127–135.

[3] HWANG KA, KWON JE, NOH YH, *et al*. Effects of *Zanthoxylum piperitum* ethanol extract on osteoarthritis inflammation and pain [J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2018, 105(10): 481–490.

[4] WEI WJ, CHEN XH, GUO T, *et al*. A review on classification and biological activities of alkaloids from the *Genus Zanthoxylum* species [J]. Mini Reviews in Medicinal Chemistry, 2021, 21(3): 336–361.

[5] 赵慧娟, 和法涛, 张一鸣, 等. 花椒萃取物对腐败希瓦氏菌的抑菌作用机制[J]. 食品工业科技, 2026, 47(7): 196–202.
ZHAO HJ, HE FT, ZHANG YM, *et al*. Antibacterial mechanism of *Zanthoxylum bungeanum* extract against *Shewanella putrefaciens* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(7): 196–202.

[6] JING NN, WANG MY, GAO ML, *et al*. Color sensory characteristics, nutritional components and antioxidant capacity of *Zanthoxylum bungeanum* Maxim. as affected by different drying methods [J]. Industrial Crops and Products, 2020, 160: 113167.

[7] JI Y, LI SM, HE ZT. Chemical composition, sensory properties and application of Sichuan pepper (*Zanthoxylum genus*) [J]. Food Science and Human Wellness, 2019, 8(2): 115–125.

[8] ZHANG YL, WANG MM, DONG HH, *et al*. Anti-hypoglycemic and hepatocyte-protective effects of hyperoside from *Zanthoxylum bungeanum* leaves in mice with high-carbohydrate/high-fat diet and alloxan-induced diabetes [J]. International Journal of Molecular Medicine, 2018, 41(1): 77–86.

[9] 张欢, 梁晶晶, 刘阳, 等. 花椒叶在椒盐曲奇饼干制作工艺中的应用研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(14): 103–109.
ZHANG H, LIANG JJ, LIU Y, *et al*. Study on the application of *Zanthoxylum bungeanum* leaves in the processing of salt and pepper cookies [J]. Food Research and Development, 2018, 39(14): 103–109.

[10] 肖岚, 安攀宇, 唐英明, 等. 响应面法优化花椒叶复合调味膏配方的研究[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(6): 117–125.
XIAO L, AN PY, TANG YM, *et al*. Optimization of formulation of chinese red pepper leaf compound flavoring paste by response surface methodology [J]. Storage and Process 2019, 19(6): 117–125.

[11] 何枫媛. 花椒叶抗氧化功能口服液的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
HE FY. The study of *Zanthoxylum Bungeanum* leaves functional oral solution [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.

[12] 罗爱国, 杨奇秦, 李智博, 等. 花椒叶挥发油的提取工艺优化及抗氧化活性[J]. 食品工业, 2021, 42(6): 57–60.
LUO AIG, YANG QQ, LI ZB, *et al*. Optimization of extraction process and antioxidant activity of volatile oil from *Zanthoxylum* L. leaves [J]. The Food Industry, 2021, 42(6): 57–60.

[13] 焦鑫阳, 李军, 孙立秋, 等. 花椒叶化学成分研究[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2022, 38(3): 60–62, 66.
JIAO XY, LI J, SUN LQ, *et al*. Chemical constituents from leaves of *Zanthoxylum bungeanum* Maxim [J]. Journal of Qiqihar University (Natural Science Edition), 2022, 38(3): 60–62, 66.

[14] 杨璟璟, 印敏, 雍旭红, 等. 不同月份竹叶花椒叶挥发性成分比较[J]. 植物资源与环境学报, 2023, 32(2): 98–100.
YANG JJ, YIN M, YONG XH, *et al*. Comparison on volatile components from leaves of *Zanthoxylum armatum* in different months [J]. Journal of

Plant Resources and Environment, 2023, 32(2): 98–100.

[15] 王安娜, 王赟, 彭小伟, 等. 不同干燥方式对竹叶花椒叶品质的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(18): 3655–3669.
WANG ANN, WANG Y, PENG XW, *et al*. Effects of different drying methods on the quality characteristics of dried *Zanthoxylum armatum* leave [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(18): 3655–3669.

[16] 王莉, 钱桂鸿, 杨娜. 花椒叶茶生产工艺的研制[J]. 食品工业, 2022, 43(3): 73–76.
WANG L, QIAN GH, YANG N. Study on production technology of *Zanthoxylum bungeanum* leaf tea [J]. The Food Industry, 2022, 43(3): 73–76.

[17] 李娜, 胡斌, 周希成, 等. 绿茶型花椒叶茶加工技术研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(22): 155–162.
LI N, HU B, ZHOU XC, *et al*. Research on processing technology of green tea-type *Zanthoxylum bungeanum* leaf tea [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(22): 155–162.

[18] 张素芬. 分析茶叶的生物活性成分与生物学作用[J]. 福建茶叶, 2021, 43(4): 78–79.
ZHANG SF. Analyze the bioactive components and biological effects of tea [J]. Tea in Fujian, 2021, 43(4): 78–79.

[19] 岳文杰, 洪翠云, 赵峰, 等. 基于代谢组学分析两种萎凋方式对白茶萎凋过程代谢物与品质的影响[J]. 亚热带植物科学, 2021, 50(6): 430–438.
YUE WJ, HONG CY, ZHAO F, *et al*. Effects of two withering methods on metabolites and quality during withering process of white tea based on metabolomics technology [J]. Subtropical Plant Science, 2021, 50(6): 430–438.

[20] 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 LC, WANG JJ, HUANG CY, *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.

[21] 杨双旭, 周炎花, 朱元培, 等. 漳州野生茶不同茶类加工工艺及品质分析[J]. 热带农业科学, 2020, 40(5): 83–87.
YANG SX, ZHOU YH, ZHU YP, *et al*. Analysis of processing technology and quality of wild tea in Zhangzhou [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2020, 40(5): 83–87.

[22] TANG DD, DI CH, CHENG BJ, *et al*. Comparative fatty acids and nutritional components and transcriptomic analysis of fatty acids accumulation in seed oils from different tea varieties [J]. LWT, 2025, 222. DOI: 10.1016/j.lwt.2025.117637

[23] WU QY, ZHOU ZW, HE JH, *et al*. Analysis of aroma precursors in Jinmudan fresh tea leaves and dynamic change of fatty acid volatile during black tea processing [J]. Food Chemistry: X, 2024, 21(00). DOI: 10.1016/j.fochx.2024.101155

[24] GORNIAK RKJ. Comprehensive review of antimicrobial activities of plant flavonoids [J]. Phytochemistry Reviews: Proceedings of the Phytochemical Society of Europe, 2019, 18(1). DOI: 10.1007/s11101-018-9591-z

[25] EKALU A, DAMA J. Flavonoids: Isolation, characterization, and health benefits [J]. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences, 2020, 9(45). DOI: 10.1186/s43088-020-00065-9

[26] ZHU J, XU Q, ZHAO S, *et al*. Comprehensive co-expression analysis provides novel insights into temporal variation of flavonoids in fresh leaves of the tea plant (*Camellia sinensis*) [J]. Plant Science: An International Journal of Experimental Plant Biology, 2020: 290. DOI: 10.1016/j.plantsci.2019.110306

[27] CHEN D, SUN Z, GAO J, *et al*. Metabolomics combined with proteomics provides a novel interpretation of the compound differences among Chinese tea cultivars (*Camellia sinensis* var. sinensis) with different manufacturing suitabilities [J]. Food Chemistry, 2022, 377: 131976.

[28] 李倩, 邵金良, 尹本林, 等. 不同加工方式的云南大叶种茶生物活性成分差异分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(18): 37–46.
LI Q, SHAO JL, YIN BL, *et al*. Difference analysis of bioactive components of yunnan large-leaf tea by different processing technologies [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(18): 37–46.

[29] 王丽丽, 林清霞, 宋振硕, 等. 分光光度法测定茶叶中总黄酮含量[J]. 茶叶学报, 2021, 62(1): 1–6.
WANG LL, LIN QX, SONG ZS, *et al*. Spectrophotometric determination of total flavonoids in tea [J]. Acta Tea Sinica, 2021, 62(1): 1–6.

[30] 罗英舰, 杨玉霞, 张付豪, 等. 9 种花椒麻味物质比较分析[J]. 耕作与栽培, 2023, 43(4): 17–24.
LUO YJ, YANG YX, ZHANG FH, *et al*. Comparative analysis of spicy components in nine varieties of *Zanthoxylum bungeanum* [J]. Tillage and Cultivation, 2023, 43(4): 17–24.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)