

嫩度与足火温度对‘中黄1号’工夫红茶香气及挥发性组分的影响

陈九江¹, 王波¹, 石保旭¹, 蒋剑¹, 贾婷婷¹, 万华兰¹, 曾浩¹, 郝心愿^{2*}, 叶阳^{2*}

(1. 旺苍县茶产业技术研究所 四川旺苍 628200) (2. 中国农业科学院茶叶研究所 浙江杭州 310008)

摘要: 为解析‘中黄1号’工夫红茶的香气特征, 探明原料嫩度与足火温度对其品质及挥发性组分的影响, 本文以不同嫩度(一芽一叶至一芽三叶)原料, 设置不同足火温度(60~120℃)加工茶样, 结合感官审评、固相微萃取-气相色谱-质谱联用(SPME-GC-MS)以及气味活度值(OAV)对不同样品的香气进行了系统分析。结果表明, ‘中黄1号’红茶主体呈甜香, 在90℃足火温度下香气品质最佳, 随温度升高火工味逐渐增强。基于此最佳工艺(90℃), 样品共检出124种挥发性成分, 并筛选出9种受原料嫩度显著影响的关键差异成分, 分别为2,3-辛二酮、癸醛、2,4-二甲基苯甲醛、2-羟基苯甲酸乙酯、异丙烯基吡嗪、2-乙酰基-5-甲基呋喃、苯乙醇、D-柠檬烯和 β -月桂烯。其中, 一芽一叶甜香突出, 与癸醛、2,4-二甲基苯甲醛及苯乙醇的相对富集密切相关; 一芽三叶则因2,3-辛二酮和异丙烯基吡嗪的显著作用, 呈现“甜带果香”的风味。此外, 高温足火促使异丙烯基吡嗪和2-乙酰基-5-甲基呋喃含量增加, 构成了火工味增强的物质基础。本研究为‘中黄1号’工夫红茶的加工工艺优化和品质提升提供了理论依据。

关键词: ‘中黄1号’; 工夫红茶; 香气; 足火温度

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.6.0004

Effects of Leaf Tenderness and Final Drying Temperature on Aroma and Volatile Components of 'Zhonghuang 1' Gongfu Black Tea

CHEN Jiujiang¹, WANG Bo¹, SHI Baoxu¹, JIANG Jian¹, JIA Tingting¹, WAN Hualan¹, ZENG Hao¹,
HAO Xinyuan^{2*}, YE Yang^{2*}

(1. Wangcang Tea Industry Technology Research Institute, Wangcang 628200, China)

(2. Tea Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310008, China)

Abstract: To elucidate the aroma characteristics of 'Zhonghuang 1' Gongfu black tea and investigate the effects of leaf tenderness and final drying temperature on its aroma quality and volatile components, tea samples were processed using raw materials of varying tenderness (one bud with one leaf to one bud with three leaves) at different final drying temperatures (60~120℃). The aroma of different samples was systematically analyzed using sensory evaluation, solid-phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry (SPME-GC-MS), and odor activity value (OAV). The results showed that the dominant aroma of 'Zhonghuang 1' black tea was sweet, and the best aroma quality was achieved at a 90℃ final drying temperature, with higher temperatures intensifying the fire flavor. Based on this optimal process (90℃), 124 volatile components were detected, and 9 key differential components significantly affected by raw material tenderness were screened out, namely 2,3-octanedione, decanal, 2,4-dimethylbenzaldehyde, ethyl salicylate, 2-isopropenylpyrazine, 2-acetyl-5-methylfuran, phenylethyl alcohol, D-limonene, and β -myrcene. Specifically, the sample with one bud and one leaf exhibited a prominent sweet aroma, which was closely related to the relative enrichment of decanal, 2,4-dimethylbenzaldehyde, and phenylethyl alcohol; meanwhile, the sample with one bud and three leaves presented a "sweet and fruity" flavor due to the significant contributions of 2,3-octanedione and 2-isopropenylpyrazine. Furthermore, high final drying temperatures promoted an increase in the contents of 2-isopropenylpyrazine and 2-acetyl-5-methylfuran, forming the material basis for the enhanced fire flavor. This study provides a theoretical basis for optimizing the processing technology and improving the

收稿日期: 2026-01-03; 修回日期: 2026-06-15; 接受日期: 2026-06-15

基金项目: 省科技项目(四川省区域创新合作 2025YFHZ0331)

作者简介: 陈九江(1990-), 男, 本科, 农艺师, 研究方向: 茶叶生产与加工技术, E-mail: 364115973@qq.com; 共同第一作者: 王波(1991-), 男, 硕士研究生, 农艺师, 研究方向: 茶树栽培与管理, E-mail: 1403878669@qq.com

通讯作者: 郝心愿(1983-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 茶树育种, E-mail: haoxy@tricaas.com; 共同通讯作者: 叶阳(1962-), 男, 学士, 研究员, 研究方向: 茶叶加工, E-mail: yeyang@tricaas.com

quality of 'Zhonghuang 1' Gongfu black tea.

Keywords: 'Zhonghuang 1'; Gongfu black tea; aroma; final drying temperature

红茶是世界范围内消费最广泛的茶叶类型, 占世界茶叶产量的 75%^[1]。工夫红茶是我国最主要的红茶品类, 经萎凋、揉捻、发酵、干燥等工序形成其独特的品质特征。以往研究多关注红茶的发酵过程, 特别是酶促反应条件下儿茶素类向茶黄素、茶红素的转化^[2], 发酵程度一度被认为是控制红茶质量的关键节点^[3]。然而, 近年研究发现红茶发酵结束后与干燥后样品的风味成分存在显著差异, 表明干燥阶段对于红茶品质形成同样具有重要贡献^[4]。干燥不仅能通过高温钝化酶活以终止发酵^[5], 更是促使美拉德反应及各类热降解发生的核心阶段, 直接决定了新挥发性风味物质的形成^[6]。然而, 干燥过程中香气物质的转化方向与效率, 高度依赖于鲜叶原料中所富含的香气前体物质(如氨基酸、糖类等), 而这些前体的丰度又与茶树品种及采摘嫩度密切相关。

近年来, 随着创新红茶品类、优化茶产业结构的需求日益增长, 具备特殊理化特性的叶色变异(黄化/白化)茶树品种引发了广泛关注^[7,8]。相比于常规品种, '中黄 1 号'、'白叶 1 号'等品种具备“高氨基酸、低茶多酚”的显著优势^[9,10]。特别是其丰富的游离氨基酸, 能在红茶足火干燥的高温驱动下, 深度参与美拉德反应与 Strecker 降解, 进而生成突出的甜香与花果香物质^[6,9,10]。作为特色黄化品种的典型代表, '中黄 1 号'目前全国推广面积已逾 10 万亩^[11], 其高水浸出物、高氨基酸水平和高多酚氧化酶活性, 为其创制高香型工夫红茶提供了天然的物质基础。然而, 目前关于'中黄 1 号'红茶加工的系统性研究鲜有报道。原料嫩度直接决定了氨基酸等前体物质的初始丰度, 而足火温度则是驱动特异性物质体系发生热化学转化的核心热动力。在这两个关键加工参数的交互作用下, 其香气轮廓如何演变尚不清晰。因此, '中黄 1 号'工夫红茶的关键特征香气物质构成, 以及原料嫩度与足火温度协同驱动其特征风味代谢的内在机制, 正是当前亟待解析的核心科学问题。

鉴于此, 本文聚焦于原料嫩度与足火温度这两个关键加工参数。通过比较不同嫩度(一芽一叶至一芽三叶)'中黄 1 号'鲜叶制成的工夫红茶香气风味特征, 利用固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术(SPME-GC-MS)结合气味活度值(OAV)及化学计量学方法, 筛选导致风味差异的关键香气化合物, 并深入剖析其在不同足火温度梯度(60~120 °C)下的动态转化规律。本研究旨在阐明'中黄 1 号'工夫红茶风味形成的物质基础与工艺转化机制, 以期为该品种红茶的高品质加工与精准干燥技术提供科学理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试剂与设备

正构烷烃混合物(C7~C40), 购自上海源叶生物科技有限公司, 癸酸乙酯(≥99%), 购自阿拉丁有限公司, 其他所有试剂均为分析纯购自国药集团。实验中使用的去离子水由默克公司的 IQ 7000 纯化系统制备获得。6CR-45 型揉捻机, 购自长沙湘丰智能装备股份有限公司; JY-6CHF-7 型多层发酵, 6CHT-16 型茶叶烘焙提香机, 购自福建省佳友机械智能科技有限公司; Comprehensive two-dimensional gas chromatography time-of-flight mass spectrometry (GC×GC-TOFMS) 仪器, 购自美国明尼苏达州 LECO 公司。

1.2 样品制备

鲜叶原料为'中黄 1 号'品种, 分别按照一芽一叶、一芽二叶、一芽三叶成熟度标准采摘, 所有鲜叶原料于 2024 年 7 月采摘自旺苍县高阳碧峰茶业有限公司基地。工夫红茶样品采用 Zhu 等^[12]使用的方法, 依次通过萎凋、揉捻、发酵和干燥加工制作而成, 具体加工参数如下:

萎凋: 将采收的茶树鲜叶(含水率 75%左右)均匀摊放在竹匾上, 在 28 °C、相对湿度 70%的条件下经 14 h 萎凋, 叶片含水率达到 60%左右。

揉捻: 将萎凋后的茶叶放入 6CR-45 型揉捻机中, 按照“轻-中-重-轻”的施压顺序, 以 45 rpm 的速度揉捻 75 min。

发酵: 揉捻后的茶叶经解块后, 放入发酵机中发酵 2.5 h, 茶堆厚度 20 cm 左右, 温度设定 28 °C、相对湿度 90%。

干燥: 发酵好的茶叶转入烘焙提香机中进行干燥, 毛火在 120 °C 条件干燥 20 min 左右, 然后将样品分别在

60、75、90、105、120 ℃条件下进行足火干燥, 至含水率 $\leq 7.0\%$ 。

将一芽一叶、一芽二叶、一芽三叶三种原料按照 60、75、90、105、120 ℃条件足火干燥获得的 15 个工夫红茶样品, 分别标记保存于干净、无异味的-4 ℃冰箱, 用于后续分析。

1.3 实验方法

1.3.1 感官审评

茶叶样品的感官审评根据 GB/T 23776-2018《茶叶感官审评方法》进行, 主要对红茶的香气特征和品质进行综合评价, 采用百分制评分。具体方法为: 准确称取 3.0 g 茶样置于审评杯内, 用 150 mL 沸水计时冲泡 5 min (确保每个样品冲泡时间相同), 然后将茶汤顺审评杯锯齿状出口倒入审评碗内。依次通过热嗅、温嗅、冷嗅审评杯中红茶香气类型、高低、纯正、持久性进行评价, 判别香气质量。

1.3.2 茶叶中挥发性香气成分检测

将茶样在液氮保护条件下研磨粉碎后, 准确称取 0.5 g 研磨后的茶叶样品, 放入含有 6 mL 癸酸乙酯溶液 (100 mg L^{-1}) 的顶空瓶中, 立即用螺旋盖密封顶空瓶, 并将顶空瓶转移至自动进样器中, 设定孵育条件为 60 ℃, 5 min。然后采用 SPME 萃取头在 60 ℃条件下萃取挥发性香气成分 60 min, 将纤维头插入 GC-MS 进样口, 在 250 ℃条件下解析 5 min, 以释放所有萃取的挥发性香气成分。

GC-MS 检测条件: GC 进样口、气体接口温度均设定 250 ℃, 载气为高纯氮气 ($>99.999\%$), 流速为 1.5 mL min^{-1} , 分流比为 4:1, 升温过程设定初始温度为 40 ℃, 保持 5 min, 且以 $5 \text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ 的速率升温至 250 ℃, 然后保持 10 min; 质谱仪设定离子源温度 230 ℃, 四级杆温度 150 ℃, 电离能 70 eV, 采用全扫描模式, 扫描范围为 35~550 m/z 。

1.3.3 挥发性化合物表征及 OAV 分析

使用安捷伦 MassHunter 工作站 B.0 8.01 软件对检测的挥发性成分的质谱信息与 NIST 和 Wiley 数据库中的质谱进行比对, 结合保留指数对挥发性成分进行初步鉴定。保留指数 (RI) 通过分析正构烷烃 (C7~C40) 在相同色谱条件下的保留时间进行计算, 以相似度指数高于 800 且保留指数差值低于 10 作为筛选依据, 对挥发性化合物进行定性。进一步的, 以癸酸乙酯作为内标物, 通过比较每种挥发性化合物与内标物的峰面积进行定量分析, 计算公式如 (1) 中所示:

$$C_i = \frac{C_{is} \times A_i}{A_{is}} \quad (1)$$

式中:

C_i ——为检测的挥发性化合物的质量浓度 ($\mu\text{g L}^{-1}$);

C_{is} ——为癸酸乙酯的质量浓度 ($\mu\text{g L}^{-1}$);

A_i ——为检测的挥发性化合物的峰面积;

A_{is} ——为癸酸乙酯的色谱峰面积。

气味活性值 (OAV) 用于评估单个化合物对食品整体香气特征的贡献。OAV 值越大, 表明对食品香气的贡献越大, 研究显示 OAV >1 的化合物被视为对茶叶香气特征有重要贡献的关键香气化合物。OAV 值等于茶叶浸出物中的挥发性化合物的实际浓度与该化合物在水中的气味阈值之比, 计算公式如 (2) 中所示。

$$\text{OAV}_i = \frac{C_i}{\text{OT}_i} \quad (2)$$

式中:

C_i ——为检测的挥发性化合物的质量浓度 ($\mu\text{g L}^{-1}$);

OT_i ——为挥发性化合物在水中的香气阈值 ($\mu\text{g L}^{-1}$)。

1.4 数据处理

偏最小二乘判别分析 (PLS-DA) 用于分析不同原料嫩度、不同足火干燥温度下红茶挥发性成分动态变化, 结合 VIP 变量贡献筛选出关键差异挥发性成分。SIMCA-P 14.1 软件用于执行 PLS-DA, 其中模型拟合有效性和预

2 结果与讨论

2.1 不同样品的香气感官审评

不同采摘嫩度及足火温度处理下，‘中黄 1 号’工夫红茶的干茶、汤色及叶底如图 1 所示。整体而言，随原料嫩度增加，茶汤红度加深；而随足火温度升高，茶汤红度略降且亮度微增。由于本研究以 6%~8%含水量为干燥终点，导致高温下实际热反应时间较短，故未出现高温导致汤色变暗的现象。在香气品质方面，感官审评分与评语（表 1）表明，‘中黄 1 号’工夫红茶整体以甜香为主。其中，较高温度 105 ℃，120 ℃干燥会产生火工味，这与高温条件下美拉德反应过程多种杂环类化合物的形成有关；而相对低温干燥 60 ℃，75 ℃会使样品带有青气，这多与茶叶中低级脂肪醛等物质未能充分转化有关^[13]。相比之下，90 ℃足火处理的各嫩度茶样均获得了最高的香气评分（表 1），表现出显著的高甜特征。对比不同嫩度的感官结果（表 1）发现，一芽一叶红茶的香气品质最优，甜香突出；而一芽三叶红茶在 90 ℃下呈现出“甜带果香”风味。上述结果表明，通过精准把控原料嫩度与足火温度，‘中黄 1 号’具备定向开发“高甜”或“甜带果香”等特色工夫红茶的潜力。

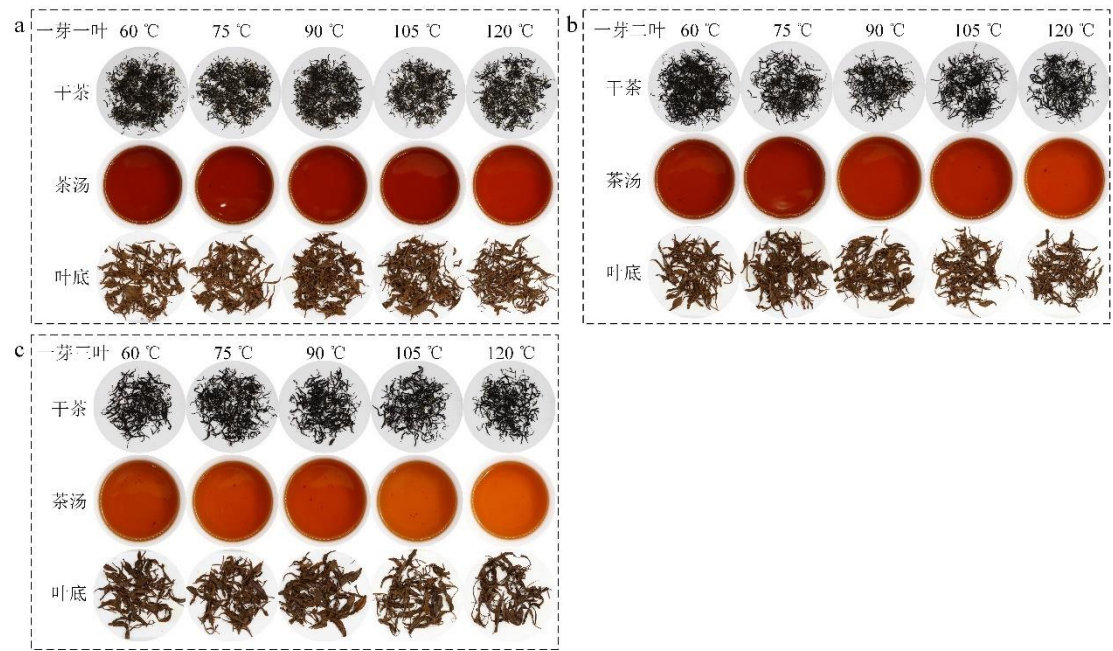


图1 样品干茶、茶汤和叶底图像

Fig.1 Images of dry tea, tea infusion, and infused leaves from different samples

注：（a）一芽一叶工夫红茶；（b）一芽二叶工夫红茶；（c）一芽三叶工夫红茶。

表 1 不同处理样品香气感官评价

Table 1 Aroma Sensory evaluation on different tea samples

足火干燥 温度/℃	一芽一叶		一芽二叶		一芽三叶	
	评语	得分	评语	得分	评语	得分
60	较清甜、微青	89.5	有甜香、略青	88.0	有甜香、略粗、略青	87.0
75	较清甜、微青	90.5	有甜香、微青	89.0	有甜香、微粗、微青	88.0
90	高甜	92.0	较高甜	91.0	较高甜、微有果香	90.5
105	高甜、微有火工	92.0	高甜、微火工	91.0	较高甜、微有火工	90.0
120	高甜、略有火工	91.0	高甜、略火工	90.5	较高甜、有火工	89.0

注：感官审评术语中的“微”代表程度很轻微；“略”代表程度不深；“较”代表两者相比有一定差距。

2.2 挥发性香气物质检测

前期感官审评结果表明 90 °C 干燥样品呈现出最佳的香气风味, 本节将该最适温度作为探究高品质红茶香气的基准, 利用 GC-MS 结合 SPME 重点对该条件下的样品进行全谱挥发性成分的深度解析, 探明高品质目标风味的物质基础及嫩度差异。结果显示, 在一芽一叶样品中, 初步鉴定出 124 种挥发性化合物, 这些化合物可分为 7 类, 包括 18 种酯类、27 种醛类、10 种杂环化合物、14 种醇类、15 种酮类、1 种酸类和 39 种其他化合物 (主要是烯烃、烷烃等) (图 2a)。相比之下, 一芽二叶和一芽三叶茶样中鉴定出的挥发性化合物数量依次减少, 分别为 99 种和 89 种 (图 2a)。在 90 °C 足火条件下, 三种不同嫩度样品中共有的挥发性化合物有 47 种, 其中除“其他类”化合物外, 酯类、醛类、杂环化合物是主要的挥发性成分类别 (图 2b)。

“其他类”化合物主要包括烷烃、烯烃等短链挥发性成分, 前者主要来自于脂肪酸或酯类物质的降解, 后者来自于糖类物质水解产生的对香气具有重要贡献的萜烯类成分诸如月桂烯、罗勒烯等^[4]。如图 2c 所示, 随着原料成熟度的升高, “其他类”化合物的数量占比从 31.5% 降至 28.1%, 这可能与叶片成熟度增加导致脂肪酸及糖苷类等前体物质含量减少有关。与此相反, 醛类和酯类成分的占比则随成熟度的增加表现出明显的上升趋势 (图 2c)。研究表明, 红茶中醛类物质的占比通常最大, 其气味差异与形成途径有关: 部分来源于脂氧合酶介导的脂质氧化 (赋予柑橘味和青草气), 而另一部分则最有可能来源于与美拉德反应相关的 Strecker 降解 (产生麦芽、蜂蜜、脂肪和坚果等香气)^[4,15]。酯类通常源于脂肪酸的水解或氧化, 被认为与茶叶中具有高风味稀释因子的甜香、果香和花香密切相关^[16]。此外, 杂环类化合物 (如吡嗪、呋喃、吡咯等) 的数量占比随成熟度增加而减少 (图 2c), 表明与美拉德反应相关的挥发性成分形成路径受到一定程度的削弱。杂环化合物虽然含量较低, 但香气活性极高, 是赋予茶叶烘烤味和焦糖香的重要成分^[17]。

结合感官审评结果可知, 90 °C 干燥的样品中一芽三叶具有一定的果香特征, 这可能与具有较多的醛类、酯类物质有关, 而一芽一叶更突出的甜香特征与其杂环类以及烷烃、烯烃类成分有关。

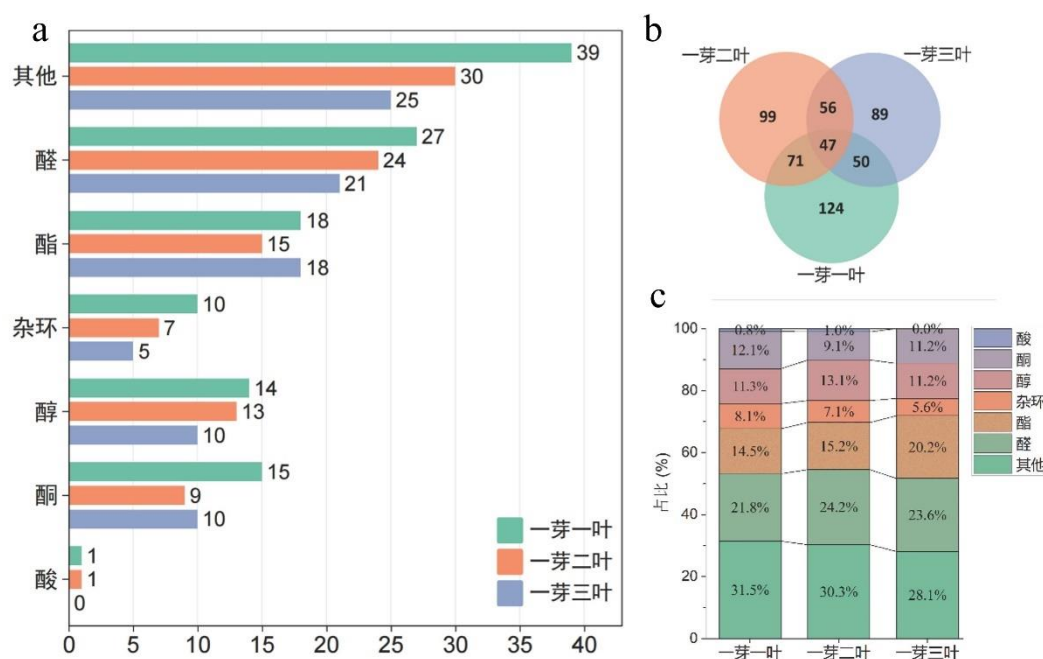


图 2 90 °C 足火温度下不同嫩度红茶挥发性成分差异

Fig.2 Differences in volatile components of black tea with varying tenderness at 90 °C final drying

注: (a) 组成与数量; (b) 共有与差异成分; (c) 各类别占比。

2.3 不同嫩度原料挥发性成分差异比较

为探究在 90 °C 足火干燥条件下, 不同成熟度鲜叶所制红茶样品中挥发性化合物的差异, 本研究采用偏最小二乘判别分析 (PLS-DA) 这一常用于差异物质筛选的多元统计方法, 对上述茶样进行分析^[18]。如图 3a 所示, 三类原料制作的样品被清晰的区分开来, 总方差 (R^2X) 为 97.2%, 这表明三种样品中的挥发性化合物存在显著差异。可以发现, 从右到左的茶叶样品对应着从一芽一叶到一芽三叶的成熟度处理, 这意味着对第一主成分起主要贡献

作用的变量会随着原料成熟度的升高呈现梯度变化。该 PLS-DA 模型的 R^2Y 值为 0.982、 Q^2 值为 0.954，表明基于挥发性成分的属性，该模型对不同成熟度样品具有良好的区分能力。本研究通过 200 次迭代的置换检验进一步评估 PLS-DA 模型的性能，结果显示置换模型的 R^2 比 Q^2 值更低，且 Q^2 回归线的截距小于 0（图 3b），这充分说明该 PLS-DA 模型未出现过拟合，可靠性强。基于此模型，本研究采用变量重要性投影（VIP）>1.0 作为筛选关键差异物质的指标。如图 3c 所示，蓝色柱状图标记的物质（VIP>1.0）即为筛选出的关键差异挥发性成分，而绿色部分（VIP<1.0）对样品分类的贡献有限。最终，在三种不同嫩度茶样中共筛选出 22 种关键差异化合物（图 3c），主要涵盖醛类、酯类及杂环类物质。从相对含量的分布趋势来看，一芽一叶茶样中癸醛、2,4-二甲基苯甲醛及苯乙醇等具有花甜香属性的成分显著富集；而随着原料成熟度增加，2,3-辛二酮等物质的相对含量则呈现差异性变化，这与红茶从“甜香”向“甜带果香”演变的感官规律高度吻合。

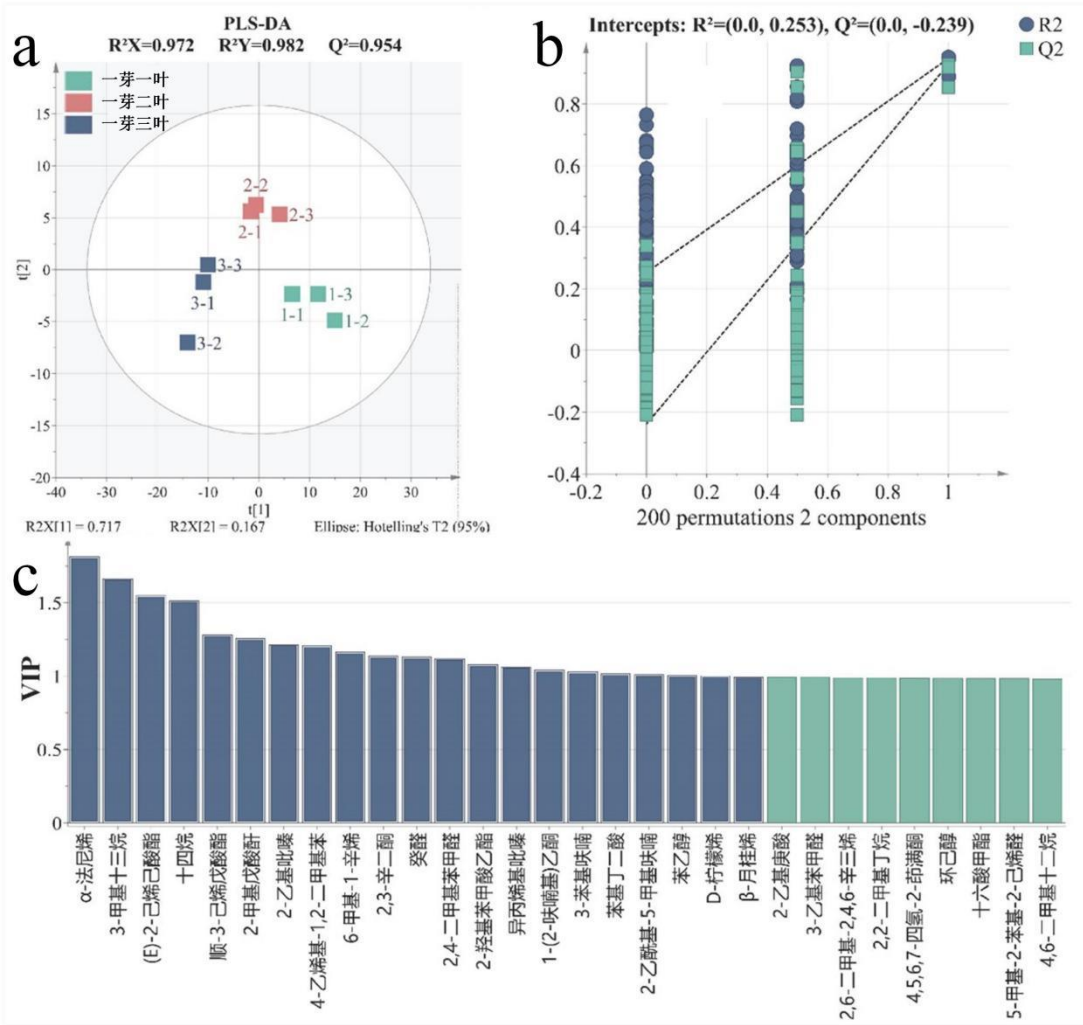


图 3 90 °C 足火下不同嫩度茶样挥发性成分 PLS-DA

Fig.3 PLS-DA of volatile components in tea samples with varying tenderness at 90 °C final drying

注：(a) 得分图；(b) 200 次置换检验；(c) VIP 值排序。

挥发性成分对整体香气的贡献不仅取决于其浓度，还受其感官阈值的制约。因此，本研究进一步计算了气味活度值（OAV）以评估这 22 种关键差异物质的实际气味活性^[19]。结果显示，有 9 种挥发性物质的 OAV>1（表 2），对香气特征具有显著贡献，包括 2,3-辛二酮，癸醛，2,4-二甲基苯甲醛，2-羟基苯甲酸乙酯，异丙基吡嗪，2-乙酰基-5-甲基呋喃，苯乙醇，D-柠檬烯， β -月桂烯。其中，2-乙酰基-5-甲基呋喃（OAV=47 612）与异丙基吡嗪（OAV=517.9）的活度值极高，在区分不同嫩度茶样中发挥着重要作用。值得注意的是，2-乙酰基-5-甲基呋喃呈现出极高的理论 OAV，这主要与其极低的水中香气阈值有关。但在真实的茶叶冲泡与品饮过程中，考虑到茶叶复杂的基质效应及香气物质间的拮抗或协同作用，其对整体香气的实际贡献需谨慎评估。推测该物质并非发挥单一的的决定性作用，而是与异丙基吡嗪等其他杂环类美拉德反应产物发生协同，共同赋予了红茶“甜香”及高温干燥

下的“火工味”特征。整体而言，一芽一叶茶样中关键挥发物的 OAV 总值更高，甜香特征更为突出，这与感官审评结果一致。结合感官审评（表 1）与成分占比（图 3c）分析，90 ℃干燥下的一芽三叶呈现出“微有果香”的特征。这表明除了 2,3-辛二酮和异丙烯基吡嗪外，随着原料成熟度增加而占比上升的其他酯类（如具果香属性的(E)-2-己酸己烯酯等）和特定醛类物质，可能通过阈值叠加与协同作用，共同构成了该阶段果香形成的物质基础。从风味形成的物质基础来看，不同嫩度原料的香气表型差异主要源于前体物质（如氨基酸、脂肪酸及糖苷类化合物）积累水平的不同。‘中黄 1 号’作为高氨基酸特异性品种，其高嫩度鲜叶中通常富集了更高水平的芳香族氨基酸及脂质前体。在发酵阶段的脱羧和氧化降解作用下，极易大量生成苯乙醇、2,4-二甲基苯甲醛等甜花香属性的挥发物；而随着成熟度增加，部分糖苷水解酶活性发生改变，促使糖苷结合态香气前体释放，从而驱动了 2,3-辛二酮及部分酯类等果香物质的富集^[9,10]。

表 2 筛选出的关键挥发物香气阈值、香气特征、OAV 值

Table 2 Odor thresholds, odor characteristics, and OAV values of the screened key volatile compounds

编号	挥发物名称	CAS	阈值/(mg kg ⁻¹)	香气描述	OAV		
					一芽一叶	一芽二叶	一芽三叶
1	α -法尼烯	502-61-4	0.087	花香，清香	--	--	0.24
2	3-甲基十三烷	6418-41-3	--	脂肪香	--	--	--
3	(E)-2-己酸己烯酯	53398-86-0	0.86	清香，果香	0.10	0.090	0.36
4	十四烷	629-59-4	1.00	脂肪香	0.04	0.030	0.030
5	顺-3-己烯戊酸酯	35852-46-1	0.056	清香，甜	0.70	0.22	0.94
6	2-甲基戊酸酐	63169-61-9	--	油脂香	--	--	--
7	2-乙基吡嗪	13925-00-3	144.96	坚果、烘焙香	0.060	0.000 70	--
8	4-乙烯基-1,2-二甲基苯	27831-13-6	--	甜香，花香	--	--	--
9	6-甲基-1-辛烯	18719-24-9	--	--	--	--	--
10	2,3-辛二酮	585-25-1	0.02	奶香，坚果香	--	--	3.42
11	癸醛	112-31-2	0.10	橘香，清香	2.18	0.14	0.16
12	2,4-二甲基苯甲醛	15764-16-6	0.22	杏仁味	2.32	0.17	--
13	2-羟基苯甲酸乙酯	118-61-6	0.084	甜香，花香	13.60	1.37	--
14	异丙烯基吡嗪	3149-68-6	0.002 0	焦糖香	--	--	517.90
15	1-(2-呋喃基)乙酮	1192-62-7	10.00	甜香，烘焙香	0.47	0.010	--
16	3-苯基呋喃	32462-26-3	--	甜香	--	--	--
17	苯基丁二酸	635-51-8	--	--	--	--	--
18	2-乙酰基-5-甲基呋喃	1193-79-9	0.000 10	甜香，坚果香	47 612.00	1 953.40	716.40
19	苯乙醇	60-12-8	0.14	玫瑰香气	24.52	8.19	4.23
20	D-柠檬烯	5989-27-5	0.034	清新橘子香	22.06	6.07	3.39
21	β -月桂烯	123-35-3	0.67	甜橘香	4.26	0.66	0.33
22	2-乙基庚酸	1184-72-1	--	轻微脂肪香	--	--	--

注：部分化合物因文献中缺乏可靠香气阈值而未计算 OAV；部分单元格为“--”表示在该处理下低于检测限；挥发性物质的阈值信息来源于网站 <https://www.vcf-online.nl>

2.4 不同足火干燥温度关键挥发性差异成分比较

为了进一步揭示足火温度对这些核心品质标志物的定向影响，利用 GC-MS 进一步分析了不同足火温度下，3 种原料制备的工夫红茶中关键挥发性成分的相对含量差异（图 4）。结果表明，2,3-辛二酮和异丙烯基吡嗪在一芽三叶茶样中相对含量更高，而其他几种关键挥发性成分则在一芽一叶样品中更为富集。2,3-辛二酮茶叶中普遍存在的一类酮类香气成分，较高浓度时具有“泥土、油脂”味，低浓度可呈现“奶香、坚果香”特征^[20]。研究显示，高品质桂花绿茶中 2,3-辛二酮相对含量显著高于普通桂花绿茶，其含量是提升评判桂花绿茶香气的关键参数指标^[21]。本研究中，一芽三叶所制工夫红茶表现出的略带果香特征与 2,3-辛二酮较高相对含量具有密切联系。异丙烯基吡

嗪是美拉德反应衍生的一类杂环香气化合物,通常具有较低的香气活性阈值^[4],同时也是正山小种红茶中关键香气成分^[22],其形成主要受足火温度的影响,较高温度下推动葡萄糖异构与氨基酸结合形成葡糖胺类物质,进而推动美拉德反应的发展。因此,本研究中异丙烷基吡嗪相对含量随足火温度的升高而显著增加,而高嫩度样品中相对含量较低可能与相关糖类成分相对较少有关。结合感官变化来看,当足火温度升高至 105 °C 和 120 °C 时,样品呈现出显著的“火工味”(表 1),这与异丙烷基吡嗪等杂环化合物在高温下的大量激增形成了高度一致的对应关系;相反,在 60 °C 和 75 °C 干燥样品中保留的“青气”,则主要归因于较低温度下美拉德反应受限及低沸点脂肪族成分未完全挥发或热降解。

癸醛被报道是四川红茶、江苏红茶等多种红茶甜香的关键成分,主要通过茶叶中脂肪酸的氧化降解产生^[23]。一芽一叶中较高含量的脂质成分是癸醛形成的重要前体物质,高温作用下的热降解进一步加强了其形成过程^[24]。因此,一芽一叶样品中癸醛相对含量较高,同时提高的足火干燥温度进一步促进了其前体的降解与转化。较高含量的 2,4-二甲基苯甲醛是工夫红茶甜花香的特征的重要来源与组成^[25],其表现出在一芽一叶中更高的相对含量,且随温度升高相对含量下降的趋势更加明显。2-羟基苯甲酸乙酯也称为水杨酸乙酯,是红茶中甜香的重要组成成分^[26]。本实验中,一芽一叶中的水杨酸乙酯含量远高于一芽二叶,在一芽三叶中未检测到该类物质。不同原料中水杨酸及相关代谢物的差异,可能是导致不同红茶样品中水杨酸乙酯含量差异的重要原因。上述成分(癸醛、2,4-二甲基苯甲醛、2-羟基苯甲酸乙酯)在一芽一叶中的高相对含量,共同构成了该嫩度红茶突出的“甜香”物质基础。2-乙酰基-5-甲基呋喃是一类含氧杂环化合物,是食品中广泛存在的美拉德反应衍生的香气物质,可作为咖啡等食品烘焙程度等关键参数指标^[27]。本研究中,2-乙酰基-5-甲基呋喃相对含量在一芽一叶样品中随着足火温度的升高而显著提升,且只有高于 90 °C 足火温度条件下才会产生,这与美拉德反应发生的条件严格对应^[28]。2-乙酰基-5-甲基呋喃具有甜香特征以及极低的香气阈值,很可能是构成样品中茶叶甜香的重要组分。

苯乙醇在多种茶类中均有分布,普遍认可其具有柔和的玫瑰花香气,并伴随轻微的蜜甜香特征^[29]。一般来说,绿茶(如龙井、碧螺春)和乌龙茶(如铁观音)中的苯乙醇含量相对高于红茶,这与发酵过程中苯乙醇在酶促作用下的氧化有关。同时,高温作用下苯乙醇能通过氧化作用转化成苯乙醛、苯乙酮等,从而表现出含量的下降^[14]。一芽一叶原料通常含有更丰富的苯乙醇前体物苯丙氨酸,因而在其茶样中表现出更高的苯乙醇含量。D-柠檬烯和 β -月桂烯均是萜烯类化合物,多以葡萄糖苷结合的形式存在于茶树鲜叶中,在红茶加工过程中,通过酶促与热作用引发糖苷水解,转变为游离态萜烯类化合物,散发出典型的甜香或花果香特征^[30]。因此,可以看到本研究中 D-柠檬烯和 β -月桂烯具有较强的足火温度依赖特征,即高温足火条件下样品中含量会相对更高。此外,研究显示萜烯类糖苷化合物随着采摘期的推迟,其含量会显著下降,这也很好地解释了本研究中一芽一叶样品具有更高含量的 D-柠檬烯和 β -月桂烯。D-柠檬烯存在于多种花香型、甜香型红茶中,川红工夫早白尖红茶中其含量仅有 $0.02 \mu\text{g g}^{-1}$,远低于本研究中红茶样品的含量;但是白尖红茶样品中柠檬醛含量可达到 $2.23 \mu\text{g g}^{-1}$ ^[31],这可能与柠檬烯氧化形成柠檬醛有关。嗅辨分析结果显示, β -月桂烯在红茶的香型贡献中既具有甜香特征,又具有花香特征,而且具有最高的香气强度。此外,Xiao 等^[32]也发现了与本研究相似的结果,即 β -月桂烯在不同嫩度原料红茶样品间存在显著的含量差异。

综上所述,本研究系统阐明了‘中黄 1 号’工夫红茶香气形成的物质基础,以及原料嫩度与足火温度对香气品质的协同影响,为生产实践提供了科学参考。结果表明,将足火温度控制在 90 °C 可充分发挥茶叶高甜香特性,同时避免低温带来的青气或高温产生的火工味;不同嫩度原料呈现差异化风味,一芽一叶适宜制备高甜香产品,而一芽三叶可开发甜带果香型产品,实现原料高值化利用;此外,筛选出的关键挥发性标志物如 2-乙酰基-5-甲基呋喃和苯乙醇可为数字化烘焙和在线风味监测提供参数依据。

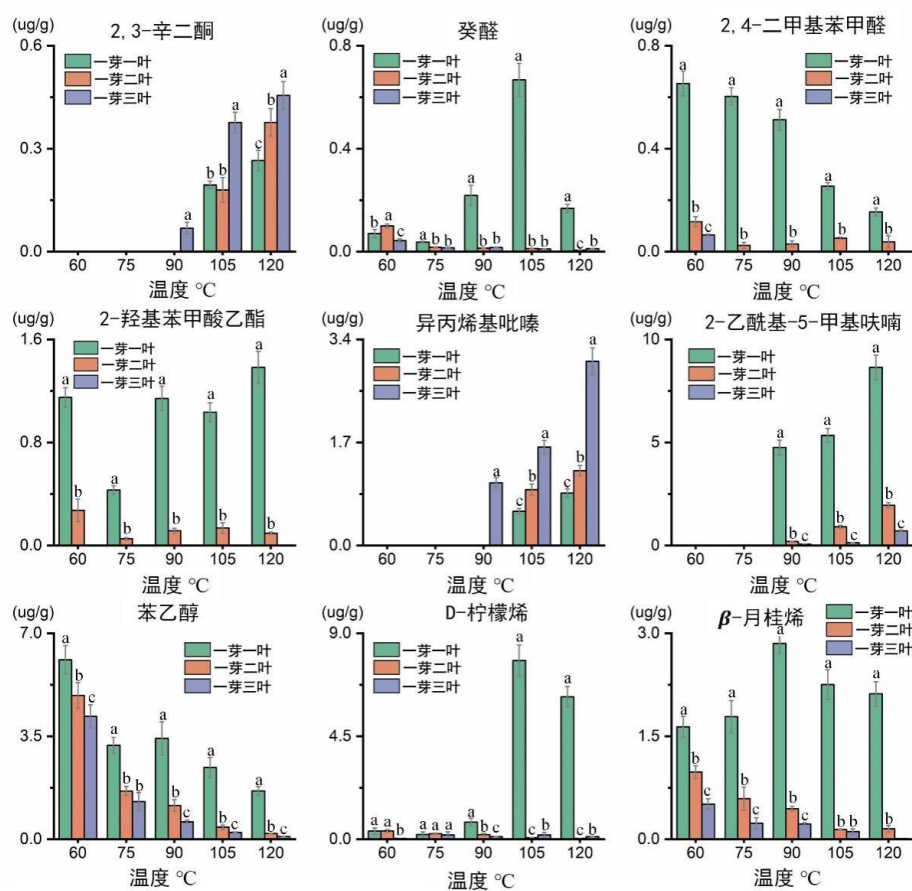


图4 不同足火温度下一芽一叶、一芽二叶、一芽三叶差异香气化合物的含量变化

Fig.4 Changes in the content of differential aroma compounds in one bud with one leaf, one bud with two leaves, and one bud with three leaves under different final drying temperature

注：图中不同字母表示相同足火干燥温度下不同鲜叶等级的关键挥发性物质含量存在显著差异 ($P < 0.05$)。

3 结论

本研究系统解析了‘中黄 1 号’工夫红茶的香气品质特征及其物质基础，明确了原料嫩度与足火温度对红茶风味的协同驱动作用。结果表明，“一芽一叶”鲜叶结合“90 °C 足火”为最优工艺参数组合，可赋予红茶最高的感官品质及突出的“高甜”特征；在该最适温度下，“一芽三叶”原料则展现出独特的“甜带果香”风味。挥发性成分分析揭示，高嫩度茶样中癸醛、2,4-二甲基苯甲醛、苯乙醇和 β -月桂烯等成分的高水平积累，构成了其甜香的核心物质基础；而随着原料成熟度增加，2,3-辛二酮及部分酯类物质的定向富集则是促成微量果香的关键。此外，足火温度的过度升高会显著加剧美拉德反应，导致异丙烯基吡嗪和 2-乙酰基-5-甲基呋喃等杂环化合物大量增加，这也是引发高温处理组出现“火工味”的直接原因。综上所述，本研究不仅确立了‘中黄 1 号’高品质红茶化加工的最佳参数，也为该品种红茶的精准定向加工与品质提升提供了坚实的理论支撑。

参考文献

- [1] 乐婷,王伟伟,王蔚,等.不同等级红茶的抗氧化活性及关键成分比较分析[J].现代食品科技,2022,38(8):97-104.
- [2] VARGAS R, VECCHIETTI A. Influence of raw material moisture on the synthesis of black tea production process [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 173: 76-84.
- [3] GHOSH A, BAG A K, SHARMA P, et al. Monitoring the fermentation process and detection of optimum fermentation time of black tea using an electronic tongue [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15 (11): 6255-6262.
- [4] LI L, ZAN J, CHEN W, et al. Maillard reaction inducing amino acids degradation can adjust the flavour characteristic of black tea [J]. Food Research International, 2025, 201: 115685.

- [5] TEMPLE S J, TEMPLE C M, BOXTEL A J B, et al. The effect of drying on black tea quality [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2001, 81(8): 764-772.
- [6] ZHANG W, ZHANG B, YE Y, et al. Methylglyoxal-hydroimidazolones (MG-Hs) instead of Nε-(carboxymethyl)-L-lysine (CML) is the major advanced glycation end-product during drying process in black tea [J]. Food Chemistry, 2020, 333: 127499.
- [7] 滑金杰,袁海波,江用文.我国红茶产业现状、加工进展及前景展望[J].华中农业大学学报,2022,41(5):16-23.
- [8] 徐梦婷,邵淑贤,陈静,等.不同茶树品种工夫红茶挥发性成分及其关键香气成分分析[J].现代食品科技,2023,39(1):281-290.
- [9] CHEN L, SHI Y X, SUN J Y, et al. Deciphering the flavor profile and seasonal variation of black tea processed from cultivar 'Baiye 1' [J]. Food Research International, 2025, 208: 116181.
- [10] CHEN L, SHI Y X, PAN J Y, et al. Lipid and volatile dynamics shape sweet potato and honey aroma in 'Baiye 1' black tea [J]. Food Chemistry: X, 2025, 29: 102823.
- [11] 张宜静,唐茜,邹瑶.不同扦插时间、扦插密度对黄 1 号茶苗繁育的影响[J].四川农业科技,2024,1:26-29.
- [12] ZHU H, NIU L, ZHU L, et al. Contents of α -dicarbonyl compounds in commercial black tea and affected by the processing [J]. Food Research International, 2024, 178: 113876.
- [13] 郭丽,潜卫东,李强,等.中黄 1 号鲜叶适制绿茶滋味特征及工艺优化[J].浙江农业科学,2021,62(10):2063-2066.
- [14] HO C, ZHENG X, LI S. Tea aroma formation [J]. Food Science and Human Wellness, 2015, 4(1): 9-27.
- [15] YANG Y, HUA J J, DENG Y L, et al. Aroma dynamic characteristics during the process of variable-temperature final firing of Congou black tea by electronic nose and comprehensive two-dimensional gas chromatography coupled to time-of-flight mass spectrometry [J]. Food Research International, 2020, 137: 109656.
- [16] LIU H, XU Y, WEN J, et al. A comparative study of aromatic characterization of Yingde black tea infusions in different steeping temperatures [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 143: 110860.
- [17] ZHAI X, ZHANG L, GRANVOGL M, et al. Flavor of tea (*Camellia sinensis*): A review on odorants and analytical techniques [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2022, 21 (5): 3867-3909.
- [18] LIU F, WANG Y, CORKE H, et al. Dynamic changes in flavonoids content during Congou black tea processing [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 170: 114073.
- [19] GU H W, YIN X L, MA Y X, et al. Differentiating grades of Xihu Longjing teas according to the contents of ten major components based on HPLC-DAD in combination with chemometrics [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 130: 109688.
- [20] 尤秋爽,刘建平,何卫中,等.惠明茶香气品质的化学成分分析[J].食品科学,2023,44(24):253-261.
- [21] 王振康,林馨颖,王秀萍,等.不同窈制工艺对桂花绿茶品质的影响[J].茶叶学报,2023,64(3):33-41.
- [22] 卢艳,杜丽平,肖冬光.正山小种红茶挥发性成分分析[J].食品工业科技,2015,36(2):57-60.
- [23] 程超,夏兰欣,杜芬妮,等.基于 9 种风味物质的利川红 SPME 优化及 PLS-DA 风味识别[J].食品科学,2021,42(6):215-222.
- [24] 刘飞,叶阳,李春华,等.工夫红茶加工过程中类胡萝卜素成分的动态变化[J].食品科学,2022,43(4):231-240.
- [25] 杨娟,陈善敏,王杰,等.不同海拔南川大树茶红茶挥发性物质特征分析[J].食品与发酵工业,2024,50(23):321-330.
- [26] YIN X, HUANG J A, HUANG J, et al. Identification of volatile and odor-active compounds in Hunan black tea by SPME/GC-MS and multivariate analysis [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 164: 113656.
- [27] OBANDO A M, FIGUEROA J G. Effect of roasting level on the development of key aroma-active compounds in coffee [J]. Molecules, 2024, 29(19): 4723.
- [28] MARTINS S I F S, JONGEN W M F V, BOEKEL M A J S. A review of Maillard reaction in food and implications to kinetic modelling [J]. Trends in Food Science & Technology, 2000, 11(9): 364-373.
- [29] 李璐,温明椿,张海伟,等.茶叶香气成分研究进展[J].中国茶叶加工,2025,2:5-21.
- [30] 蒋宾,罗学平,刘琨毅,等.不同产地工夫红茶风味品质比较研究[J].食品科技,2024,49(11):56-65.
- [31] 潘婉舒,胡先强,张正义,等.基于 HS-SPME-GC-MS 和 PLS-DA 分析不同季节早白尖红茶挥发性风味物质[J].食品工业科技,2023,44 (1):277-283.
- [32] XIAO Y B, TIAN R, SHEN Y Y, et al. Aroma profiling by HS-SPME/GC-MS of black tea produced from different leaf grades [J]. LWT-Food Science and Technology, 2025, 229: 118223.