

海南大叶种复配加工中影响感官品质的因素分析

郭 凯^{1,2#}, 岳兴胜³, 陈诗典⁴, 郑晓燕⁵, 张善英³, 方宗壮^{1*}

(1. 海南省农业科学院三亚研究院(海南省实验动物研究中心), 海南 三亚 571199 中国; 2. 海南大学 食品科学与工程学院, 海南 海口 570228 中国; 3. 海南大学 热带农林学院, 海南 海口 570228 中国; 4. 东方乡村振兴投资有限公司, 海南 东方 572600 中国; 5. 中国热带农业科学院 热带生物技术研究所, 海南 海口 571101 中国)

摘 要: 为探明海南大叶种红茶在复配加工中的品质演变规律, 选取海南大叶种、云南大叶种及其不同比例复配红茶共 9 个样本, 系统分析了复配比例、品种和季节对茶样感官特性, 营养成分含量和挥发性成分的影响。结果表明, 早春海南大叶种红茶在外形、汤色和口感等方面表现最佳(83.02 分)。营养成分包括灰分、可溶性糖、总酚、总黄酮、儿茶素含量等是影响大叶种红茶滋味的重要因素。挥发性成分中芳樟醇、水杨酸甲酯、苯乙醛和 α -紫罗酮等是决定大叶种红茶香气的关键化合物。复配比例、采样季节和品种是影响大叶种红茶成分组成和挥发性成分差异的因素。其中, 20% 海南+80% 云南大叶种春茶复配样(LH6)感官总分(80.46 分)最接近 LH1, 且显著高于其他复配样, 其汤色靛红明亮, 香气兼具蜜糖香、脂香与薄荷清凉感。综上, 海南大叶种早春单品兼具感官优越性与功能成分富集特性, 研究成果可明确海南大叶种在复配中的贡献阈值, 揭示季节与品种对特征风味的调控机制。

关键词: 海南大叶种红茶; 感官评价; 成分组成; 挥发性成分; 相对气味活度值

中图分类号: TS254.58 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7054(2026)02-0184-14

郭凯, 岳兴胜, 陈诗典, 等. 海南大叶种复配加工中影响感官品质的因素分析[J]. 热带生物学报 (中英文), 2026, 17(2): 184–197. DOI: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20250061 CSTR: 32425.14.j.cnki.rdswwb.20250061



海南大叶种茶(*Camellia sinensis* var. *assamica*) 是中国热带茶区的特色资源, 适合制作红茶^[1], 被列为海南地理标志产品。其种质起源于川、滇野生大叶茶种群, 经长期自然选择与人工驯化, 主要分布在五指山高海拔、多云雾的生态环境中。研究表明, 海南大叶种红茶富含茶氨酸、茶多酚、黄酮和咖啡因等多种活性成分^[2], 以及特征挥发性成分(如芳樟醇、水杨酸甲酯)^[1]。茶中的活性成分具有减轻炎症、降脂、降血糖等多种健康功效^[3-7], 而海南大叶种红茶的挥发性成分赋予其“奶蜜香气”。然而, 海南大叶种茶树生长周期长、采摘成本高, 导致其原料价格显著高于云南大叶种(约 3~5 倍), 促使加工企业普遍采用海南与云南大叶种混合加工的方式降低成本。这种“以次混优”的产

业实践降低了生产成本, 却因缺乏科学配比指导, 导致产品品质参差不齐, 甚至稀释了海南大叶种的地域特色, 威胁其地理标志品牌价值。

茶叶品质是品种遗传特性、生态环境与加工工艺共同作用的结果, 其中, 品种与季节对化学成分及香气形成的调控尤为关键^[8]。种质不同主要归因于茶树基因型和次生代谢通路活性显著不同^[9]。例如, 云南大叶种以酚类、有机酸类物质为主^[10], 而海南大叶种因萜烯合酶基因高表达, 芳樟醇及其衍生物含量占比超 40%^[11]。这种代谢差异直接导致二者在滋味强度(涩感)和香气存在差异^[12]。季节影响主要是通过温度变化激活代谢通路而实现的。例如, 春茶因低温胁迫激活苯丙烷代谢通路, 促进黄酮、茶多酚积累^[13], 春秋两季生产的信阳毛尖的汤色和次级代谢物的生物合成途



收稿日期: 2025-04-20

修回日期: 2025-08-24

基金项目: 海南省市县横向课题(WZSKTPXM202202); 海南省重点研发计划(ZDYF2022XDNY198)。

*第一作者: 郭凯(2002—), 男, 海南大学食品科学与工程学院 2023 级硕士研究生。E-mail: 746650641@qq.com

*通信作者: 方宗壮(1991—), 男, 助理研究员。研究方向: 茶和咖啡加工方向研究。E-mail: ckf202218789365925@163.com

径均差异显著^[14]。此外,为了改善茶口感或者降低成本常将不同品种茶叶复配加工,进而改变茶的品质。例如,高多酚品种与高氨基酸品种混合可平衡苦涩感^[3]。然而,关于海南大叶种在混合体系中的贡献阈值缺乏量化数据。

当前,品种差异、采样时间及混合比例对海南大叶种红茶最终品质的影响尚未明晰,制约了海南大叶种红茶的高值化开发。为此,该研究以海南大叶种红茶、云南大叶种红茶及加工中常用复配比例(20%、50%)为对象,结合不同季节原料,系统解析其营养成分(灰分、黄酮、儿茶素等)、挥发性成分及感官品质的关联规律。研究成果可明确海南大叶种在复配中的贡献阈值,揭示季节与品种对特征风味的调控机制,从而为精准优化混合比例、规范采收窗口、保护地理标志品种提供科学依据,助力海南茶产业从“粗放加工”向“品质导向”转型升级。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂 2024年6月于海南五指山采集加工后的大叶种红茶样品,茶的采样等级为一芽两叶,于同一产区不同品种茶树鲜叶加工而成,共选取9个样品,茶样被命名为联合1~9号,简称LH1~LH9,详细信息见表1。

表 1 大叶种红茶基本信息

Tab. 1 Basic information of dayezhong leaf black tea

编号 Number	茶品种名称 Tea cultivar	采样加工时间 Processing time
LH1	纯海南大叶	春季(2月)
LH2	纯海南大叶	春季(3月)
LH3	纯云南大叶	秋季(8月)
LH4	海南大叶20%, 云南大叶80%	秋季(8月)
LH5	海南大叶20%, 云南大叶80%	秋季(9月)
LH6	海南大叶20%, 云南大叶80%	春季(3月)
LH7	海南大叶50%, 云南大叶50%	春季(3月)
LH8	海南大叶20%, 云南大叶50%, 福云30%	春季(3月)
LH9	海南大叶50%, 云南大叶30%, 福鼎大白20%	春季(3月)

儿茶素(catechin, +C)、表没食子儿茶素(epigallocatechin, EGC)、表儿茶素(epicatechin, EC)、表儿茶素没食子酸酯(epicatechin gallate, ECG)、表没食子儿茶素没食子酸酯(epigallocatechin gallate, EGCG)、咖啡碱(caffeine)、癸酸乙酯(ethyl

caprate)等标准品购于上海源叶生物有限公司,其他试剂均为分析纯或色谱纯。

1.2 仪器与设备 LC-20A液相色谱,日本岛津公司;LUKYM冷冻研磨机,广州露卡测序仪器有限公司;H1850R高速冷冻离心机,卢湘仪离心机有限公司;SpectraMax iD3多功能酶标仪,美谷分析仪器有限公司;7697A自动顶空进样器,美国安捷伦有限公司;7890B GC-5977A MS气相色谱质谱联用仪,美国安捷伦有限公司。

1.3 研究方法

1.3.1 感官评价 感官评价参照GB/T23776—2018《茶叶感官审评方法》进行。方法:称取2g茶样加100mL开水,冲泡5min,由20位经验丰富的专业茶评员(年龄范围30~40岁,男性10人,女性10人),独立进行,以百分制进行评定,对外形(25%)、汤色(10%)、香气(25%)、滋味(30%)和叶底(10%)5项因子进行加权计算。

1.3.2 大叶种红茶基础成分的测定 灰分参照GB5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》进行测定,可溶性蛋白含量参照考马斯亮蓝方法进行^[15],可溶性糖含量采用苯酚-硫酸比色法测定^[16],黄酮含量的测定参照分光光度法进行^[17],总酚、儿茶素、咖啡因含量根据GB/T8313—2018《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》进行测量。

1.3.3 大叶种红茶挥发性成分的测定 采用全自动顶空固相微萃取(headspace solid phase microextraction, HS-SPME)进行样本萃取。挥发性成分测定参照Wang等^[18]的方法进行,方法略有修改。将0.4g使用冷冻研磨机研磨的茶样品放入20mL顶空进样瓶中,用2mL沸水冲泡,加入1200 μ L 0.9%氯化钠溶液,加入10 μ L 0.02mg \cdot mL⁻¹癸酸乙酯标准品作为内标化合物,在60 $^{\circ}$ C恒温条件下,震荡5min,然后将老化后的固相萃取针(50/30 μ m, DVB/CAR/PDMS)插入样品瓶进行30min的顶空萃取。

将萃取针插入连接HP5柱(30m \times 0.32mm \times 0.25 μ m)的安捷伦气相色谱-质谱仪检测。色谱条件:烘箱温度初始温度为50 $^{\circ}$ C,保持3min;以10 $^{\circ}$ C \cdot min⁻¹升至150 $^{\circ}$ C保持3min;10 $^{\circ}$ C \cdot min⁻¹升至250 $^{\circ}$ C,保持10min。质谱条件:电子轰击离子源(EI),离子源温度230 $^{\circ}$ C,四级杆温度220 $^{\circ}$ C,质谱接口温度280 $^{\circ}$ C,电子能量70eV,扫描的质荷

比范围为 35 ~ 500 m/z。基于色谱图结果根据匹配的峰保留时间和质谱相似性,使用 NIST 11 库鉴定挥发性成分,并根据癸酸乙酯的浓度计算挥发性成分的相对浓度。相对气味活度值(relative odor activity values, ROAV)的计算参照梁剑锋等^[9]的方法进行。

1.4 数据处理 在进行各项测定(感官评价、基础成分、儿茶素、挥发性成分)时均设置 ≥ 3 次重复,数据结果为重复的平均值 \pm 标准差。使用 IBM SPSS 25 软件进行单因素方差分析,使用 Origin 2018 绘制柱状图和 PCA 主成分分析图, TBtool 绘制热图。

2 结果与分析

2.1 感官评审结果 茶的外观是判断茶品质的重要因素,将 9 个样品进行冲泡之后,茶的外观如图 1 所示,其他感官指标如表 2 所示。不同的茶样茶叶形状、颜色和所泡茶汤有所差异。LH1 和 LH2 的茶底均较紧实,其他茶样茶底则是呈紧实和舒展混合状态。9 个样品的茶汤颜色有所差异,LH1 和 LH6 呈靛红色,LH2 和 LH5 茶汤颜色偏橘红色,而 LH3、LH4、LH7、LH8 和 LH9 呈棕红色,所有茶汤均明亮带金圈。并且与之前的研究结果类似,大叶种红茶的香气均浓郁带蜜糖香和花果香^[12]。此外,大叶种红茶的滋味均较浓厚,其中 LH1 和 LH2 的滋味最浓厚。所有样品的总分如表 2 所示,排序顺序为 LH1 > LH2 > LH3 > LH6 > LH4 > LH5 > LH9 > LH8 > LH7。复配茶样中 LH6 总分(80.46)最接近得分最高的纯海南早春茶(LH1: 83.02),显著高于其他复配茶(如 LH7: 78.78),其汤色靛红明

亮,香气兼具蜜糖香、脂香与薄荷清凉感(表 2)。

2.2 不同海南大叶种红茶样品成分含量分析 为了明确不同茶样基础化合物的含量,对 9 个样品所含的主要化学成分,包括灰分、可溶性蛋白、总酚、可溶性糖、茶碱和黄酮含量进行了测定,结果如图 2 所示。9 个样品灰分含量为 3.77% ~ 4.11%,除了 LH5(4.11%)和 LH9(4.01%)所含灰分较高之外,其他样品之间差异并不显著,表明茶样之间所含的无机成分均较低。9 个样品可溶性蛋白的含量为 1.06 ~ 1.26 mg·g⁻¹,除了 LH3(1.26 mg·g⁻¹)所含可溶性蛋白较高,LH6(1.06 mg·g⁻¹)含量较低,其他样品之间无显著性差异。

该研究中所有样品总酚含量为 94.85 ~ 147.59 mg·g⁻¹, LH6 总酚含量最高(147.59 mg·g⁻¹),而 LH2(94.85 mg·g⁻¹)和 LH5(98.99 mg·g⁻¹)总酚含量最低。因此,LH6 茶口感更涩一些,且随着海南大叶种红茶比例的增加 LH6 中总酚含量增加。

在可溶性糖含量方面,9 个样品的含量存在一定差异。其中,LH1 的可溶性糖含量最高,为 14.66 mg·g⁻¹,其次是 LH2(13.13 mg·g⁻¹)和 LH3(13.53 mg·g⁻¹),表明春季海南大叶种红茶可溶性糖含量高于秋季样品及海南大叶种红茶样品。此外,混合样品中 LH6(12.49 mg·g⁻¹)的可溶性糖含量高于秋季样品 LH5(9.7 mg·g⁻¹),其他混合品种(如 LH7、LH8、LH9)的可溶性糖含量相对较低。结果表明,品种、季节变化及复配比例对红茶的可溶性糖含量有显著影响,

如图 2 所示,9 个茶样所含咖啡因的含量为 0.405 ~ 0.525 mg·g⁻¹,其中 LH9(0.518 mg·g⁻¹)茶样

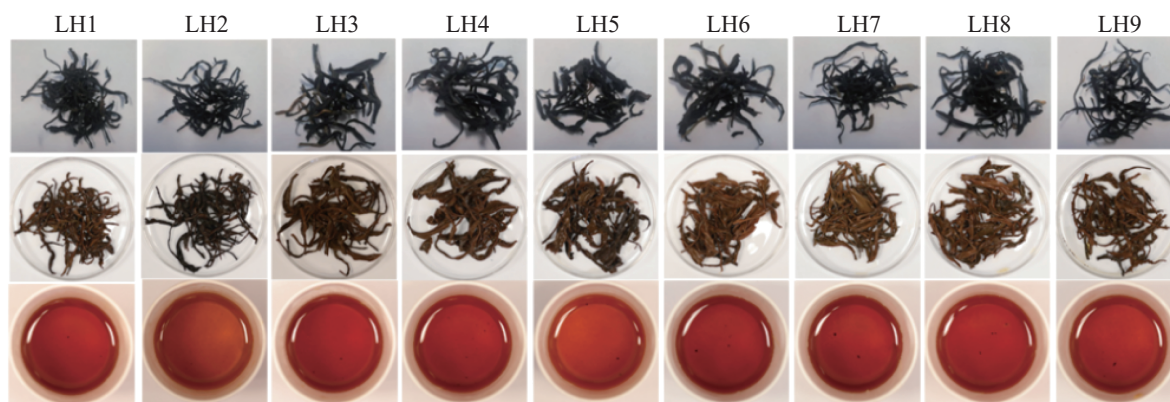


图 1 9 个茶样外观(第一行,干茶形态;第二行,浸泡后叶底形态;第三行,茶汤颜色)

Fig. 1 Appearance of 9 tea samples (Row 1, Dry tea morphology; Row 2, Leaf bottom after infusion; Row 3, Tea infusion color)

表 2 9 种红茶感官评价结果

Tab. 2 Sensory evaluation of 9 kinds of black tea

样品 Sample	外形 Appearance	分值 Score	汤色 Infusion color	分值 Score	香气 Aroma	分值 Score	滋味 Taste	分值 Score	叶底 Lea bottom	分值 Score	总分 Total
LH1	紧结稍弯、靛红带毫匀净	93.8	靛红色、明亮带金圈	95.1	辛香浓郁带蜜糖香、花果香	93.2	浓厚、稍涩、回甘	89.2	棕红较软亮	87.2	83.02±0.81 ^a
LH2	紧结稍弯、靛红带毫匀净	93.6	橘红色、明亮带金圈	88.9	较辛香浓郁带蜜糖香、花果香	92.4	浓厚、稍涩、回甘	87.3	暗红色较紧俏	86.4	81.58±0.49 ^b
LH3	较紧稍弯、靛红带毫、较匀净	89.8	棕红色、明亮带金圈	93.8	辛香、较浓郁带蜜糖香、花果香	91.8	浓厚、涩、回甘	86.1	褐棕色较紧俏	88.1	80.61±0.21 ^c
LH4	较紧稍弯、靛红带毫、匀净	90.3	棕红色、明亮带金圈	91.9	浓郁带糖香、青草香	90.3	较浓厚、稍涩、回甘	84.8	褐棕色较紧俏	89.2	79.78±0.33 ^d
LH5	较紧结稍弯、靛红带毫、较匀净	89.3	橘红色、明亮带金圈	90.3	较浓郁带蜜糖香、青草香、花香	89.3	较浓厚、稍涩、回甘	84.7	褐棕色较紧俏	88.3	79.09±1.21 ^d
LH6	较紧结稍弯、靛红带毫、较匀净	89.1	靛红色、明亮带金圈	91.4	浓郁带蜜糖香、脂香、薄荷香气	94.3	稍浓厚、涩、回甘	84.9	棕红较软亮	88.9	80.46±0.57 ^c
LH7	较紧结稍弯、靛红带毫、较匀净	88.2	靛红色、明亮带金圈	90.2	较浓郁带蜜糖香、果香	88.7	较浓厚、稍涩、回甘	85.1	棕红较软亮	89.1	78.77±0.93 ^d
LH8	较紧结稍弯、靛红带毫、较匀净	89.9	棕红色、明亮带金圈	90.3	较浓郁带蜜糖香、花香	88.2	稍浓厚、稍涩、回甘	84.2	棕红较软亮	89.5	78.81±0.77 ^d
LH9	紧结稍弯、靛红带毫、较匀净	90.1	棕红色、明亮带金圈	89.3	较浓郁带蜜糖香、果香	87.9	较浓厚、稍涩、回甘	85.2	褐棕色较软亮	88.4	78.99±1.01 ^d

注: 字母a, b, c, d表示显著性差异, $P < 0.05$ 。下同。

Note: Lowercase letters, a, b, c and d, indicate significant difference at the level of $P < 0.05$. Similarly hereinafter.

咖啡因含量最高, LH2($0.425 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)咖啡因含量最低, LH1($0.477 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)、LH2($0.405 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)和LH3($0.431 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)分别为不同时间采摘和不同品种的茶样, 咖啡因含量为 LH1 > LH3 > LH2, 表明采摘时间和种类是影响大叶种红茶咖啡因含量的因素。

该研究中 9 个茶样所含黄酮为 $23.46 \sim 89.86 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 其中, LH4 黄酮含量最高($89.86 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), LH5 黄酮含量最低($23.46 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)。该研究中, LH1 属于早春茶, LH2 属于晚春茶, 而 LH1($70.49 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)所含黄酮高于 LH2($39.67 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)。进一步分析发现, 早春茶(如 LH1)的黄酮和总酚含量较高, 表明其具有更强的抗氧化潜力; 而混合比例较高的茶样(如 LH4 和 LH8)在黄酮和咖啡因含量上表现优异, 苦涩感适中且风味丰富。这表明, 大叶种红茶的品质衍变规律与季节、比例和种类密切相关, 早春茶和特定混合比例的茶样在营养成分和口感上具有显著优势。

2.3 不同海南大叶种红茶样品儿茶素含量 为了明确不同比例海南大叶种红茶中儿茶素的含量, 对 9 个样品中+C、EGC、EC、ECG 和 EGCG 含量进行了测定, 结果如表 3 所示。EGC 含量为 $1.23 \sim$

$2.29 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, +C 含量为 $0.76 \sim 2.94 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, ECG 含量为 $2.32 \sim 4.44 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, EC 含量为 $1.2 \sim 2.95 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, EGCG 含量为 $1.10 \sim 2.25 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。所有样品中 ECG 含量最高, 占总含量的 30.11%, 表明其是茶中涩味的主要来源。在 9 个样品中, LH4 所含 5 种儿茶素总量最高, 为 $12.32 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 其次是 LH8($12.10 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)、LH3($11.22 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)、LH6($10.88 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)和 LH9($10.48 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), 含量均大于 $10 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。秋季生产的红茶(如 LH3、LH4、LH5)儿茶素含量普遍高于春季样品, 纯云南大叶红茶(LH3)在 EGCG 含量上表现最佳, 而高比例复配茶样(如 LH8 和 LH9)儿茶素含量也较高。以上结果表明, 大叶种红茶中儿茶素含量受季节、品种和混合比例的综合影响, 而茶叶复配后因引入福云或福鼎大白种, 儿茶素总量较高, 苦涩感稍强。

2.4 不同海南大叶种红茶样品挥发性物质特征分析 为了进一步研究与大叶种红茶香气相关的挥发性成分, 利用气相色谱质谱联用仪对挥发性成分进行了检测, 如图 3 所示。所有样品中共检出 154 种物质, 包括 49 种烃类、20 种醛类、18 种醇类、18 种酮类、17 种酯类、9 种苯类、6 种苯酚类、萘类 3 种、呋喃类 3 种、醚类 3 种、含氮化合物 1

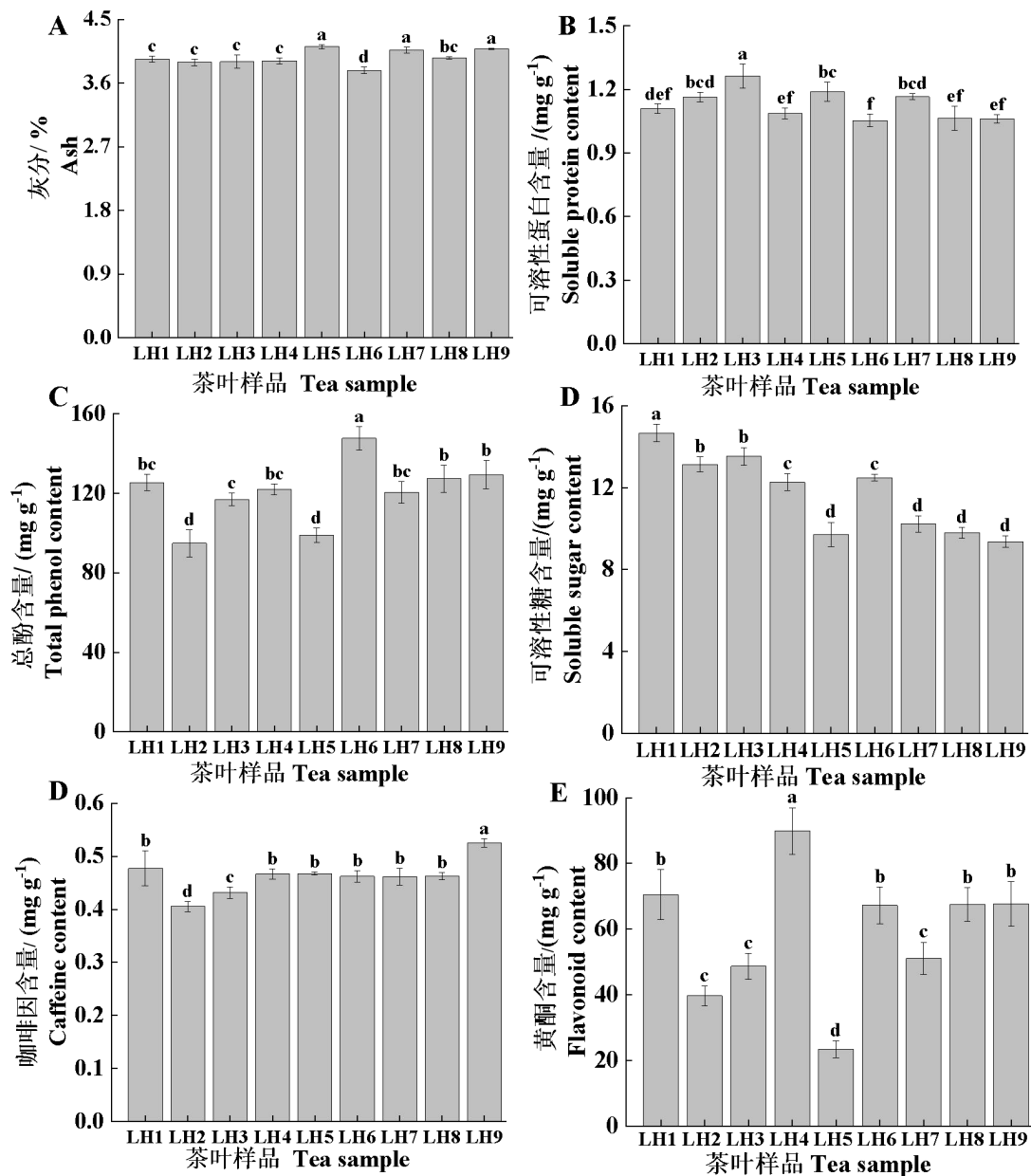


图2 大叶种红茶中基础成分含量

Fig. 2 Content of basic components in assamica black tea

种。所有茶样品挥发性成分均以烃类为主(27.71%~33.66%),其次是醛类(13.73%~19.28%)、醇类(8.82%~15.05%)、酮类(11.11%~15.69%)和酯类(4.76%~9.38%)。具体而言,浓度最高的前15种挥发性成分包括芳樟醇、水杨酸甲酯、乙基-2-(5-甲基-5-乙炔基四氢咪喃-2-基)丙烷-2-基碳酸酯、苯甲醛、(3R,6S)-2,2,6-三甲基-6-乙炔基四氢-2H-吡喃-3-醇、咖啡因、4-(2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-基)-3-丁烯-2-酮、十四烷、5,6,7,7a-四氢-4,4,7a-三甲基-2(4H)-苯并咪喃酮、十六烷、1,3-二甲基-苯、

萘、壬醛、十五烷和苯乙醇。样品间成分数量差异显著,LH3(104种)、LH5(102种)、LH6(101种)及LH4(100种)位列前四,LH1、LH2、LH7、LH8和LH9分别含有96、93、81、83和84种挥发性成分。以上研究表明,大叶种红茶的挥发性成分主要由醛类、醇类、酮类及酯类等关键成分组成,其种类与含量受采收季节(春/秋)调控。

利用聚类热图进一步对9个样品所含的挥发性成分进行分析,结果如图4所示。LH7与LH8和LH9聚为一类,其聚类特征源于挥发性成分整

表 3 大叶种红茶儿茶素含量

Tab. 3 Catechin content of assamica black tea

样品 Sample	儿茶素含量 Catechin content/(mg·g ⁻¹)					
	EGC	+C	ECG	EC	EGCG	总量 Total
LH1	2.04±0.09 ^c	1.1±0.02 ^e	2.76±0.06 ^d	1.54±0.16 ^e	1.54±0.05 ^f	8.98±0.22 ^f
LH2	2.27±0.06 ^a	0.76±0.03 ^g	2.32±0.06 ^e	2.27±0.05 ^{bc}	2.22±0.05 ^{ab}	9.84±0.20 ^d
LH3	2.28±0.05 ^a	1.68±0.09 ^c	2.9±0.13 ^d	2.11±0.14 ^{cd}	2.25±0.09 ^a	11.22±0.38 ^b
LH4	2.29±0.09 ^a	2.08±0.05 ^b	2.85±0.05 ^d	2.95±0.09 ^a	2.15±0.02 ^b	12.32±0.16 ^a
LH5	1.79±0.03 ^d	1.04±0.01 ^e	3.19±0.04 ^e	1.71±0.01 ^e	1.74±0.02 ^{dc}	9.47±0.11 ^e
LH6	1.23±0.07 ^e	1.34±0.09 ^d	4.44±0.3 ^a	1.95±0.11 ^d	1.92±0.11 ^c	10.88±0.68 ^e
LH7	1.26±0.02 ^e	0.9±0.03 ^f	3.29±0.09 ^{bc}	1.2±0.06 ^f	1.1±0.03 ^g	7.75±0.22 ^g
LH8	2.17±0.02 ^b	2.94±0.02 ^a	2.8±0.01 ^d	2.32±0.12 ^b	1.87±0.03 ^{cd}	12.10±0.18 ^a
LH9	2.29±0.02 ^a	1.33±0.04 ^d	3.47±0.07 ^b	1.59±0.03 ^e	1.8±0.03 ^e	10.48±0.15 ^e

注: 总量 = EGC + +C + ECG + EC + EGCG

Note: Total = EGC + +C + ECG + EC + EGCG

体含量较低, 如雪松醇、苯乙醇、己醛、异佛尔酮及邻苯二甲酸二乙酯等关键物质丰度显著下降, 且 LH8、LH9 存在多种成分未被有效检出的现象。LH4 与 LH3 和 LH5 聚为一类, 其聚类归因于癸基-己烷、 α -松油醇、苯乙醇、2,4-二甲基-苯甲醛、邻苯二甲酸二乙酯及 3-甲酰基-4,5-二甲基吡咯等成分的富集。LH6 与其他样品所含挥发性成分差异显著, 特征表现为烷烃类物质(如十四烷、十六烷)的高比例存在, 以及芳樟醇、松油烯-4-醇、邻苯二甲酸二丁酯、水杨酸甲酯、对甲基异丙基苯、2,4-二叔丁基苯酚和萘等标志性成分的突出贡献。进一步分析表明, 样品间差异的核心驱动

因素为特定挥发性成分的绝对含量及检出状态, 例如春茶 LH6 因含有更高丰度的芳樟醇及其衍生物、多类型烷烃而呈现独特香气特征, 而秋茶 LH5/LH4 则通过 α -松油醇等物质维持香气稳定性。上述结果印证了红茶香气品质由挥发性成分的种类、含量及组合模式共同决定, 且采收时间(春/秋)及品种复配比例(如 LH6 为 20% 海南大叶+80% 云南大叶)是调控这些参数的关键因素。

2.5 挥发性成分的主成分分析 该研究在 9 个海南大叶种红茶样品中挥发性物质的基础上建立了 PCA 三维模型。由图 5 可知, PC1、PC2 和 PC3 的贡献率分别为 16.4%、23.4% 和 14.1%, 累计贡献率为 53.9%, 9 个样品之间的风味在图中显示可以完全分开。但是 LH2、LH7、LH8 和 LH9 之间的距离较近, 风味上相近, 这可能主要源于它们均以春季原料为主, 且海南大叶种比例或引入了其他品种(福云、福鼎), 导致其与纯海南早春茶(LH1)及特定复配比例茶样(LH6)在关键香气物质上产生差异。LH3 和 LH5 之间的风味较为接近, 而 LH4 和 LH6 及它们与其他样品之间的距离均较远, 表明 LH4 和 LH6 在挥发性成分的组成上差异显著, 同时反映了季节(秋 vs 春)对相同复配比例样品挥发性成分的显著影响(如 LH4 秋和 LH6 春之间呈现的差异)。

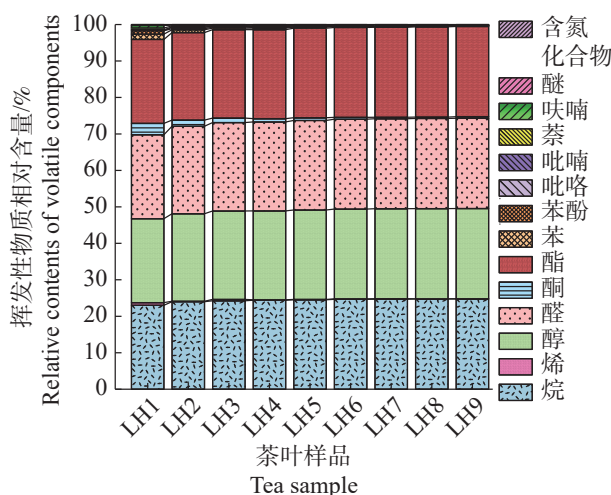


图 3 不同大叶种红茶样品挥发性成分类型相对含量

Fig. 3 Relative contents of volatile components of different assamica black tea samples

2.6 大叶种红茶中关键香气成分 ROAV 分析 通

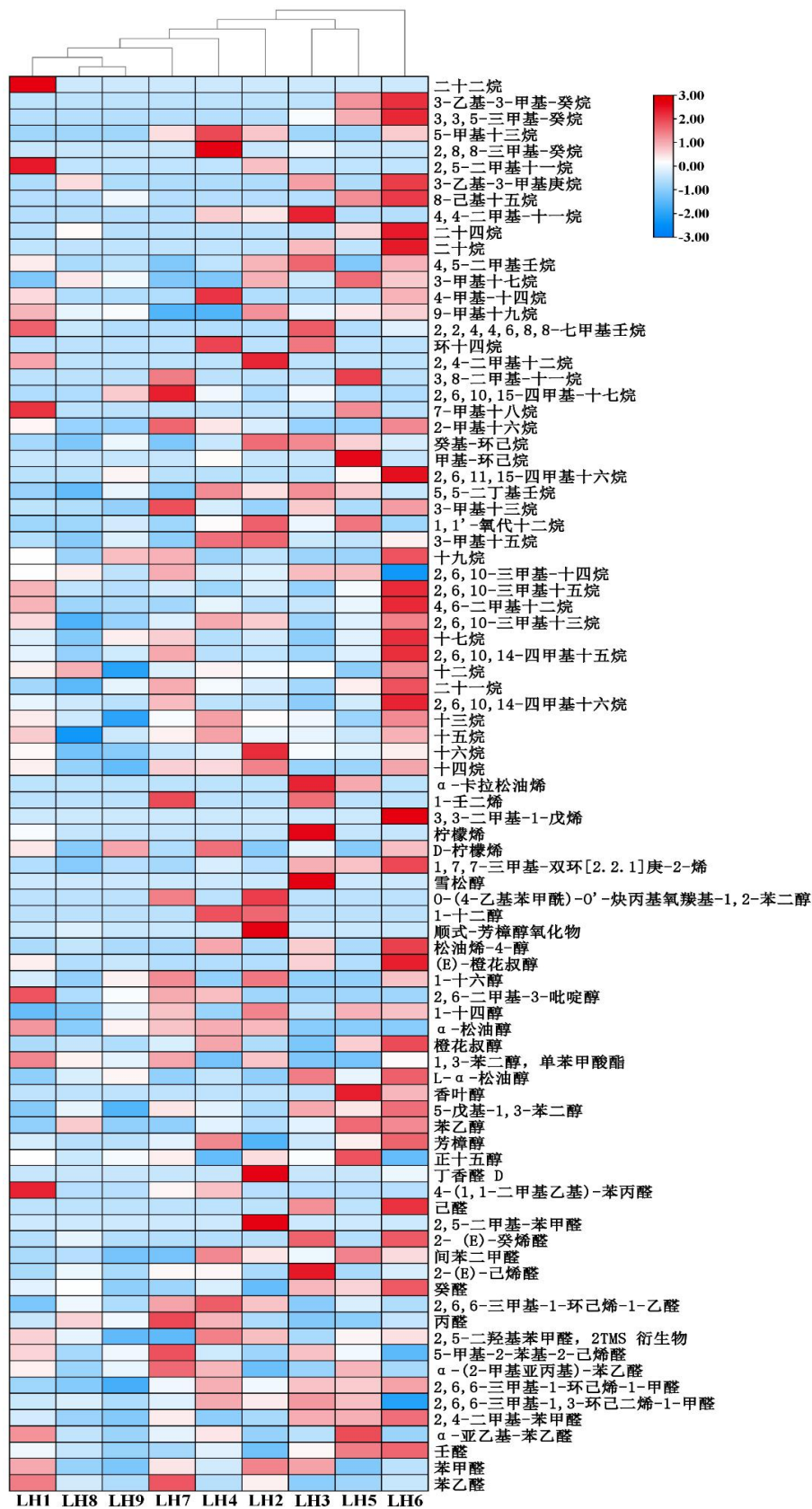


图 4 海南大叶种红茶中挥发性物质热图

Fig. 4 Heat map of volatile substances in black tea of Hainan assamica black tea

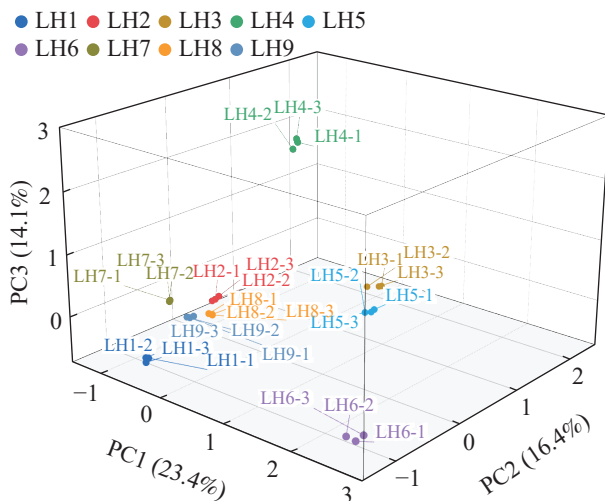


图 5 9 个海南大叶种红茶挥发性成分主成分分析
Fig. 5 Principal component analysis of volatile components of 9 Hainan assamica black tea

过阈值^[12, 20]对 9 个样品中的挥发性成分进行 ROAV 计算和分析,结果如表 4 所示。所有样品中 ROAV>1 的挥发性成分共 7 种,包括芳樟醇、水杨酸甲酯、苯乙醛、苯甲醛、壬醛、 α -紫罗兰酮和癸醛。此外,苯乙醇、香叶醇、D-柠檬烯、香叶基丙酮、丙醛、橙花叔醇、异佛尔酮和顺式-芳樟醇氧化物等成分在不同样品中 ROAV 均大于 1,这些化合物赋予大叶种红茶花香、果香、木香和坚果香等特征香气。该研究中茶样的关键香气成分与五指山区三种红茶的特征香气有所差异,这可能归因于季节和品种^[12]。

进一步分析表明,橙花叔醇和异佛尔酮在海南春茶中活性较高,赋予独特木香与青草香,而香叶醇和 D-柠檬烯在云南种主导的样品(如 LH3、LH5)中贡献提升,呈现玫瑰香与果香。早春茶(LH1)芳樟醇含量($229.99 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)显著高于晚春

茶(LH2)芳樟醇含量($52.25 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。LH4~LH6 均为 20% 海南+80% 云南大叶种茶复配,海南种的芳樟醇与云南种的香叶醇协同作用(LH6 芳樟醇含量 $481.11 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,香叶醇 ROAV=4.84),形成 LH4~LH6 茶样的复杂香气层次。

2.7 营养物质和挥发性成分对大叶种红茶香气与滋味的影响 挥发性物质与大叶种茶香气与滋味之间的冗余分析(RDA)模型如图 6-A 所示,RDA1 和 RDA2 轴特征值的贡献率分别为 96.54% 和 3.46%,表明第一轴香气评分显著区分所有挥发性物质与各大叶种茶样品。并且不同挥发性成分对大叶种茶香气的影响不同,其中,水杨酸甲酯、芳樟醇、苯乙醇、香叶醇、壬醛等 33 种挥发性成分与大叶种茶香气评分呈正相关,苯乙醛、苯甲醛、2,5-二甲基苯甲醛、顺式-芳樟醇氧化物等 7 种挥发性成分与大叶种茶香气评分呈负相关,其中水杨酸甲酯、芳樟醇、苯乙醇、香叶醇、苯乙醛、苯甲醛是影响大叶种茶香气评分的重要挥发性成分。

营养物质与大叶种茶香气与滋味之间的 RDA 模型如图 6-B 所示,RDA1 和 RDA2 轴特征值的贡献率分别为 61.19% 和 38.81%,表明营养物质与大叶种茶香气与滋味的评分变化密切相关。大叶种茶滋味评分与茶可溶性糖、灰分呈正相关,与总酚、黄酮、EGC、EC、EGCG 等 9 种营养物质呈负相关。

3 讨论

茶的感官评价是通过外观、香气、滋味和汤色判断茶叶品质的重要手段。本研究中 9 个茶样汤色均明亮带金圈但有所差异。儿茶素作为红茶中主要多酚类物质,在加工过程中经酶催化转化为

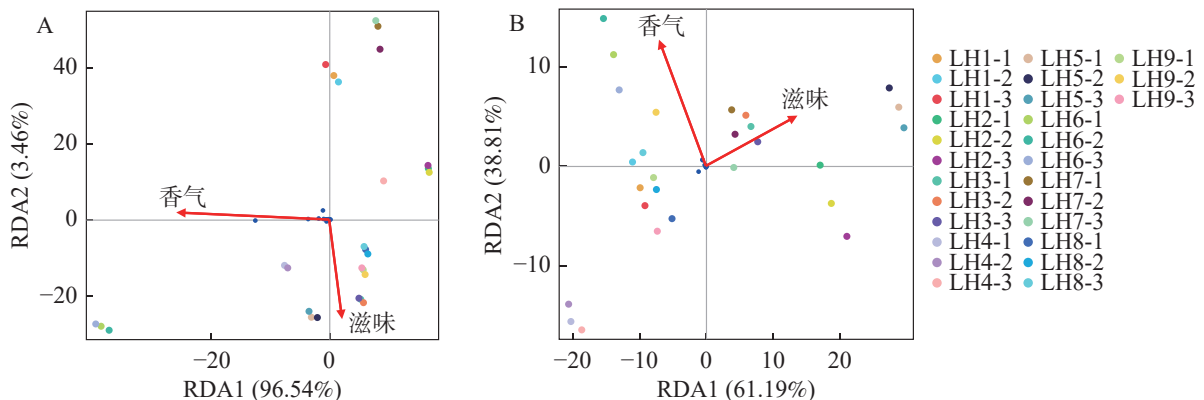


图 6 海南大叶种红茶营养物质含量(A)和挥发性成分(B)与香气和滋味的 RDA 分析

Fig. 6 RDA analysis of nutrient contents (A), volatile components (B), aroma, and taste in Hainan assamica black tea

表 4 大叶种红茶中挥发性成分香气贡献度

Tab. 4 Aroma contribution of volatile components in assamica black tea

化学物质分配 唯一编号 CAS	挥发性成分 Volatile components	阈值/ $(\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$ Threshold	相对香气值 ROAV									香气类型 Type of fragrance	
			LH1	LH2	LH3	LH4	LH5	LH6	LH7	LH8	LH9		
78-70-6	芳樟醇	6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	花香、果香
119-36-8	水杨酸甲酯	40	12.56	7.61	10.2	8.99	11.62	20.85	5.13	11.37	11.81		杏仁香、果香
122-78-1	苯乙醛	4	171.1	545.52	77.15	46.89	59.71	45.52	173.05	121.36	102.71		坚果香、蜜甜香、花香
100-52-7	苯甲醛	3	81.74	384.09	89.24	30.39	32.13	25.64	66	57.35	49.82		苦杏仁气味
124-19-6	壬醛	1	69	169.43	79.91	34.42	75.9	50.67	48.19	71.39	57.21		玫瑰香、柑橘香
60-12-8	苯乙醇	45	<0.1	2.1	1.22	0.6	2.6	1.46	<0.1	2.69	<0.1		玫瑰香
96-76-4	2,4-二叔丁基苯酚	500	<0.1	0.43	0.13	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	0.1	0.11		果香
23 726-93-4	(E)-大马士革酮	300	0.13	0.29	0.16	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1		玫瑰香、果香
106-24-1	香叶醇	7.5	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	15.91	4.84	<0.1	<0.1	<0.1		玫瑰香
5989-27-5	D-柠檬烯	10	2.68	<0.1	1.9	2.51	<0.1	1.6	0.76	<0.1	4.55		果香
689-67-8	香叶基丙酮	60	0.16	1.05	0.47	0.2	0.35	0.24	0.29	0.22	0.28		青香、果香、木香
127-41-3	α -紫罗兰酮	5.7	2.21	12.54	5.54	1.67	2.85	1.54	2.71	1.99	1.28		木香、紫罗兰香
123-38-6	丙醛	10	1.25	4.34	0.64	1.29	0.5	0.58	3.2	2.65	1.96		甜木香
85 611-33-2	橙花叔醇	10	0.61	2.94	0	1.43	1.67	1.8	1.11	1.13	0.82		木香、橙花香
112-31-2	癸醛	0.1	115.52	222.35	176.43	58.21	113.2	199.61	74.2	156.85	85.89		甜橙或柑橘香
112-72-1	十四醇	300	<0.1	0.22	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1		脂香
108-88-3	甲苯	140	0.13	0.13	0.05	0.03	<0.1	0.04	<0.1	0.03	0.05		苦杏仁味
3913-81-3	(E)-2-癸烯醛	17	<0.1	<0.1	0.95	<0.1	<0.1	0.43	<0.1	0.25	0		脂香、坚果香
309-286-4	(E)-橙花叔醇	10	0.42	<0.1	0.58	<0.1	<0.1	0.62	<0.1	<0.1	0.11		木香、橙花香
138-86-3	柠檬烯	200	0.02	<0.1	0.11	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1		果香
78-59-1	异佛尔酮	11	0.11	1.47	0.5	0.4	0.13	<0.1	<0.1	<0.1	0.16		青草香、果香
66-25-1	己醛	4.5	<0.1	<0.1	1.54	0	0	1.03	<0.1	<0.1	<0.1		果香、清香
5989-33-3	顺式-芳樟醇氧化物	6	<0.1	6.38	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.12	<0.1		木香、花香
112-53-8	十二醇	16	<0.1	0.87	<0.1	0.11	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1		花香、脂香

注: 阈值数据来自文献[20]。

Note: The threshold data were obtained from Reference [20].

茶黄素、茶红素及茶褐素等化合物,共同决定了红茶的色泽、香气与滋味^[21]。LH1~LH9 红茶样品汤色有差异,可能主要由茶黄素、茶红素与茶褐素的含量比例决定,这与红茶茶汤化学成分研究结论吻合^[22],且符合春季采摘的发酵型工夫红茶茶黄素含量规律^[23]。大叶种红茶的香气均浓郁带蜜糖香和花果香,滋味较浓厚^[12],其中 LH1 和 LH2 的滋味最浓厚,表明海南大叶种红茶具有独特的香

气和滋味。复配茶样中 LH6 总分最高,表明 20% 海南大叶和 80% 云南大叶春茶复配感官品质更优。

红茶的风味特征由其呈味物质与功能性成分的协同作用共同决定,其中可溶性蛋白虽含量不高,但对茶汤醇厚感有积极影响,且是氨基酸(尤其是鲜甜味)的重要来源^[13];可溶性糖主要贡献甜度并增加茶汤的醇厚度和鲜爽度^[24];多酚赋予茶苦味

和涩味;咖啡因是形成特定口味的重要生物碱及品质决定成分^[25];黄酮类化合物则是影响口感与品质的关键代谢物^[26]。春季海南大叶种红茶(LH1)的总酚、可溶性糖、咖啡因和黄酮均高于秋季海南大叶种红茶(LH2)及云南大叶种红茶(LH3);不同复配比样品中, LH6 因组分互补效应呈现较高营养均值,表明 LH1 和 LH6 比其他茶样口感更涩且风味丰富,与表 2 感官评价结果一致。早春(LH1)和晚春(LH2)采集的茶叶样品中黄酮等物质代谢合成差异显著,口感不同^[27],早春低温胁迫激活苯丙烷代谢通路促进黄酮、多酚的积累^[31],赋予了早春海南大叶种红茶更高的抗氧化潜力。光照和温度在不同收获季节甚至相邻月份之间存在显著差异,进而改变茶的感官和味道^[28, 29]。福鼎大白和福云作为中国重要的茶树品种,其化学成分对红茶风味有显著贡献。研究表明,福鼎大白茶富含儿茶素(如 EGCG 和 ECG),赋予较强的涩味和抗氧化活性^[30],这可能解释 LH9(含 20% 福鼎大白)较高的儿茶素总量($10.48 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)及其稍强的苦涩感。福云系列品种(如福云 6 号)因高含量的芳樟醇和苯乙醇等挥发性成分,常表现出花果香特征^[31],这使 LH8(含 30% 福云)在感官评价中具有更突出的花香。综上,品种、季节变化及复配比例对红茶的营养成分含量有显著影响,海南大叶种春茶(LH1)在呈味物质丰度与功能成分活性上具有显著优势,而科学复配(如 LH6)可作为特定风味需求的补充策略,这为基于代谢组学靶向调控红茶品质提供了理论框架。

儿茶素类化合物是茶中主要多酚类物质,包括单体和聚合衍生物,具有显著的抗氧化作用及健康益处,其中,酯型儿茶素(EGCG、ECG)因 C 环没食子酰基化显著增强涩味强度^[32]。本研究中,9 个样品的 ECG 含量均最高,其与 EGCG 的协同作用主导茶汤涩味感知。早春采摘的海南大叶红茶(LH1)因酯型儿茶素(ECG 和 EGCG)总和较低,茶的口感更好,这与茶采摘时间越早,口感越好的研究结论一致^[33]。进一步解析产地与复配效应发现,云南大叶种因 EGCG 含量($2.25 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)较海南种($1.54 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)高 46%,赋予其典型苦味基调;而高比例复配茶样(如 80% 云南+20% 海南)通过调控 EGCG/ECG 比值($1.32\rightarrow 1.05$)平衡苦涩比,但感官综合评分仍低于单一海南春茶(LH1)。不

同品种的红茶的苦涩味特征主要源于儿茶素类物质,尤其是贡献苦味 EGCG 和涩味的 ECG 含量较高^[22, 33]。儿茶素类物质的季节积累受光温调控的苯丙氨酸解氨酶代谢网络驱动,而品种间 C 环酰基转移酶(SCPL-AT)活性差异是酯型儿茶素分化的分子基础^[34]。因此,优化早春原料采收以降低酯型儿茶素占比,并基于代谢标记辅助筛选低 EGCG/ECG 比值的品种,可定向改善红茶适口性,同时维持其抗氧化功能,该途径为多维度品质调控提供了分子靶点与工艺路径。

可溶性糖、总酚、黄酮、EGC、EC 和 EGCG 赋予茶叶口味、涩味和收敛味^[35]。大叶种茶香气评分与总酚、黄酮、可溶性糖、ECG 含量呈正相关,与 EGC、EC、+C 等 7 种物质呈负相关。营养物质含量是改变大叶种茶香气与滋味的直接因素,不同的营养物质对大叶种茶香气与滋味评分的影响不同^[36]。如糖类物质在加工过程中发生美拉德反应或焦糖化反应,可以生成焦糖香、甜香等多种愉悦的香气成分。此外,它们也能平衡茶多酚带来的苦涩感,使整体风味更协调^[37]。这与本研究中 RDA 分析黄酮和多酚等营养物质对大叶种茶香气和滋味影响的结果一致。

挥发性成分是构成茶叶香气的关键因素,不同种类和含量的挥发性物质赋予茶叶不同的香气类型。本研究中共检测到 154 种挥发性成分,其中烃类、醛类和醇类等是检出种类较多的物质,其中 101 种化合物分别在不同样品中单独或者共同存在,可能是造成大叶种红茶风味不同的原因^[38]。尽管烃类检出种类最多、嗅觉阈值较高,但香气贡献较低,对茶的香气影响较小,核心呈香物质集中于醛类、醇类、酮类及酯类(如水杨酸甲酯)^[39]。该结论与白茶中醛类、酯类及酮类协同呈香机制结论一致^[27, 40]。茶的香气由多种复杂的挥发性成分构成,其中仅少量挥发性成分对茶香气起关键作用,称为“关键挥发性成分”。依据与挥发性成分阈值相关的相对气味活度值(ROAV)可判断其是否对茶的香气起到关键决定作用^[41], $\text{ROAV} \geq 1$ 被认为是重大贡献者, $0.1 < \text{ROAV} < 1$ 起修饰作用^[38],此方法可用于筛选茶加工调控的特征香气关键成分(汝毛白茶)^[33, 42]。此外,不同茶类的关键香气成分存在差异,主要归因于品种、产地和季节的不同^[43]。例如,春绿茶的特征挥发性化合物为苯乙

醇、香叶醇和 β -紫罗兰酮等;夏绿茶中的关键挥发性化合物包括2-甲基呋喃、吡啶、1-辛醇和D-柠檬烯等;秋绿茶中主要的差异性挥发性化合物是2,4,6-三甲基苯乙烯^[44]。芳樟醇、松油烯-4-醇、邻苯二甲酸二丁酯、水杨酸甲酯等是9个样品中检出含量较多的挥发性成分,其组合模式形成大叶种红茶的花果香(芳樟醇)、木香(雪松醇)与清凉感(异佛尔酮)等复合香型。与本研究不同的是, β -紫罗兰酮、水杨酸甲酯、芳樟醇等是参香和枣香六堡茶的关键化合物^[19],反式-2-壬醛、棕榈酸甲酯和芳樟醇等12种挥发性化合物是白茶的关键化合物^[40]。芳樟醇作为本研究所有茶样共有的关键成分,其普适性特征与五指山茶区三种红茶的研究结论相一致^[12],含量呈明显的季节性动态变化特征,且其衍生化合物之一的8-羟基芳樟醇叶对海南大叶种红茶迷人香气的形成有重要贡献。

样品间差异的核心驱动因素为特定挥发性成分的绝对含量及检出状态,例如春茶LH6因含有更高丰度的芳樟醇及其衍生物、多类型烷烃而呈现独特香气特征,而秋茶LH5/LH4则通过 α -松油醇等维持香气稳定性。上述结果印证了红茶香气品质由挥发性成分的种类、含量及组合模式共同决定,且采收时间及品种复配比例是调控这些参数的关键因素。此外,雪松醇、香叶醇、松油烯-4-醇等挥发性成分能够提供木香和土香,己醛、2-戊基呋喃可提供绿色香草气味,壬醛、癸醛等具有脂肪香味,水杨酸甲酯、异佛尔酮则可为茶提供清凉和薄荷香气^[45],苯甲醛具有独特的樱桃香气,苯乙醇具有玫瑰香气^[38],其他的挥发性成分均可为茶提供甜香和果香,共同构成了大叶种红茶特殊的风味。同时,RDA分析结果也表明水杨酸甲酯、芳樟醇、苯乙醇、香叶醇、苯乙醛、苯甲醛是影响大叶种茶的香气评分的重要成分。

4 结论

该研究以海南大叶种红茶、云南大叶种红茶及不同复配比例的9种红茶样品为对象,系统解析了品种、季节和复配比例对海南大叶种红茶感官品质、化学成分及挥发性物质的影响,为高品质海南红茶产品开发提供了理论依据。研究创新性揭示三因素梯度影响规律:(1)品种差异直接调控基础代谢物分布,如海南大叶种芳樟醇含量为云

南种的2.3倍,而云南种 α -松油醇含量高19%;(2)采收时间效应通过光温条件驱动次级代谢,早春茶总酚、黄酮及芳樟醇含量较晚春海南大叶种红茶提升18%~26%,且特征香气物质种类多15%;(3)复配比例通过成分互补性(如20%海南+80%云南复配茶中芳樟醇与 α -松油醇比值优化)部分提升香气协调性,但单一海南早春茶仍保有感官与营养品质峰值。结论表明,海南大叶种早春红茶单品凭借高活性成分与特征香气物质富集,可作为高端红茶核心原料;针对特定风味需求,复配加工可通过品种互补(如引入云南大叶种强化木香基调)增强香气层次,但需优先保障春茶原料新鲜度与加工时效以减少成分损耗。

5 展望

未来研究可在以下方面进一步深入研究:(1)扩大样本量和产地范围,验证本研究结论的普适性;(2)结合代谢组学和转录组学技术,深入探究海南大叶种特征香气物质(如高芳樟醇)形成的分子调控机制,特别是季节(温度、光照)调控的代谢通路;(3)探索更精细的复配梯度(如海南种比例10%~40%),并结合消费者偏好测试,建立感官品质、化学成分与消费喜好的预测模型,实现基于市场需求的精准复配;(4)研究复配原料的加工适应性(如萎凋、发酵程度)对最终产品风味稳定性的影响,优化复配加工工艺;(5)定量评估高附加值海南大叶种春茶单品与科学复配产品的经济效益,为产业政策制定和地理标志保护提供数据支撑。

参考文献:

- [1] Guo D Z, Li D L, Wang J Z, et al. Genome resequencing reveals an independently originated *Camellia sinensis* variety-Hainan tea [J]. *Agrobiodiversity*, 2024, 1(1): 3-12. <https://doi.org/10.48130/abd-0024-0003>
- [2] 苟志辉,杜尚嘉,符生波,等.五指山野生大叶茶叶片代谢物鉴定和特征分析[J]. *热带生物学报*, 2024, 15(4): 400-406. <https://doi.org/10.15886/j.cnki.rdswwb.20240018>
- [3] Fu Z P, Chen L Y, Zhou S J, et al. Analysis of differences in the accumulation of tea compounds under various processing techniques, geographical origins, and harvesting seasons [J]. *Food Chemistry*, 2024, 430: 137000. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137000>
- [4] 陈爽直,王希,张骋,等.茶多酚通过线粒体质量控制改善衰老2型糖尿病模型大鼠肌肉衰减[J]. *卫生研究*, 2024, 53(4): 540-546. <https://doi.org/10.19813/j.cnki>

- weishengyanjiu.2024.04.004
- [5] Xu R F, Yang K, Li S, et al. Effect of green tea consumption on blood lipids: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Nutrition Journal*, 2020, 19(1): 48. <https://doi.org/10.1186/s12937-020-00557-5>
- [6] 满子意, 凤怡, 吴祥庭. 儿茶素单体 EGC 对胰脂肪酶的抑制作用及其机理研究[J]. *茶叶科学*, 2022, 42(6): 863–874. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-369X.2022.06.010>
- [7] Wei K, Wei Y, Wang Y F, et al. Amelioration effects and regulatory mechanisms of different tea active ingredients on DSS-Induced colitis [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(44): 16604–16617. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c04524>
- [8] He L M, Luo J, Niu S Z, et al. Population structure analysis to explore genetic diversity and geographical distribution characteristics of wild tea plant in Guizhou Plateau [J]. *BMC Plant Biology*, 2023, 23(1): 255. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04239-2>
- [9] 谢晨昕, 林雨, 胡文娇, 等. 白茶滋味与色泽化学特征的品种差异[J]. *现代食品科技*, 2024, 40(8): 302–310. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.8.0897>
- [10] 施丽娟. 云南大叶种茶的酚类和有机酸类成分质谱定量分析与滋味特征研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022. <https://doi.org/10.27200/d.cnki.gkmlu.2022.000468>
- [11] Zhou Y, He W, He Y C, et al. Formation of 8-hydroxylinalool in tea plant *Camellia sinensis* var. *Assamica* 'Hainan dayezhong' [J]. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 2023, 6: 100173. <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2023.100173>
- [12] 熊梦钊, 鲁倩, 陈泽文, 等. HS-SPME-GC-MS 技术结合 ROAV 分析五指山茶区三种红茶的关键香气物质[J]. *现代食品科技*, 2025, 41(1): 251–261. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.1.1542>
- [13] Huang X X, Tang Q, Chen C J, et al. Combined analysis of transcriptome and metabolome provides insights into nano-selenium foliar applications to improve summer tea quality (*Camellia sinensis*) [J]. *LWT*, 2023, 175: 114496. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114496>
- [14] 孔亚帅, 卫艺炜, 万亚欣, 等. 基于非靶向代谢组学技术的不同季节信阳白茶品质分析[J]. *食品科技*, 2024, 49(5): 50–56. <https://doi.org/10.13684/j.cnki.spkj.2024.05.001>
- [15] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding [J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72(1/2): 248–254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- [16] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 34-45.
- [17] 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. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-4872.2021.01.002>
- [18] Wang X X, Xiong H R, Wang S L, et al. Physicochemical analysis, sensorial evaluation, astringent component identification and aroma-active compounds of herbaceous Peony (*Paeonia lactiflora* Pall) black tea [J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 193: 116159. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.116159>
- [19] 梁剑锋, 李亚, 宾月景, 等. HS-SBSE-GC/MS 结合 ROAV 法分析六堡茶关键香气成分[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(2): 156–161. <https://doi.org/10.12161/j.issn.1005-6521.2023.02.023>
- [20] Van Gemert L J. Odour thresholds: compilations of odour threshold values in air, water and other media[M]. Oliemans Punter, 2011.
- [21] 丁其欢, 武珊珊, 熊昌云, 等. 工夫红茶研究进展[J]. *热带农业科学*, 2021, 41(4): 110–116. <https://doi.org/10.12008/j.issn.1009-2196.2021.04.019>
- [22] Bhuyan L P, Borah P, Sabhapondit S, et al. Spatial variability of theaflavins and thearubigins fractions and their impact on black tea quality [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(12): 7984–7993. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1968-z>
- [23] Jiang Y W, Hua J J, Wang B, et al. Effects of variety, season, and region on theaflavins content of fermented Chinese Congou black tea [J]. *Journal of Food Quality*, 2018, 2018: 5427302. <https://doi.org/10.1155/2018/5427302>
- [24] Sun Y J, Yuan X S, Luo Z J, et al. Metabolomic and transcriptomic analyses reveal comparisons against liquid-state fermentation of primary dark tea, green tea and white tea by *Aspergillus cristatus* [J]. *Food Research International*, 2023, 172: 113115. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113115>
- [25] Wang H F, Teng J W, Huang L, et al. Determination of the variations in the metabolic profile and sensory quality of Liupao tea during fermentation through UHPLC–HR–MS metabolomics [J]. *Food Chemistry*, 2023, 404: 134773. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134773>
- [26] Huang W J, Fang S M, Su Y L, et al. Insights into the mechanism of different withering methods on flavor formation of black tea based on target metabolomics and transcriptomics [J]. *LWT*, 2023, 189: 115537. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115537>
- [27] Xiao H S, Yong J, Xie Y J, et al. The molecular mechanisms of quality difference for Alpine Qingming green tea and Guyu green tea by integrating multi-omics [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2023, 9: 1079325. <https://doi.org/10.3389/FNUT.2022.1079325>
- [28] Liu J W, Zhang Q F, Liu M Y, et al. Metabolomic analyses reveal distinct change of metabolites and quality of green tea during the short duration of a single spring season [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64(16): 3302–3309. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b00404>

- [29] Yu P H, Zhao X, Cai Y J, et al. Variation in the taste quality and metabolites of black teas produced in early and late spring [J]. *Food Research International*, 2025, 216: 116553. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116553>
- [30] Xu Y Q, Zhang Y N, Chen J X, et al. Quantitative analyses of the bitterness and astringency of catechins from green tea [J]. *Food Chemistry*, 2018, 258: 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.03.042>
- [31] 侯彦双, 高红. 不同茶树品种加工的梵净山翠峰茶品质系比较研究[J]. *农业技术与装备*, 2022(6): 10–12. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-887X.2022.06.003>
- [32] 杨晨曦, 付静, 刘佳, 等. 汉中茶区 5 个茶树品种夏秋季白茶品质差异分析[J]. *食品工业科技*, 2025, 46(13): 260–270. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024070264>
- [33] Zhang L, Cao Q Q, Granato D, et al. Association between chemistry and taste of tea: a review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 101: 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.05.015>
- [34] Chen X X, Zhang X, Zhao Y, et al. Deactivating mutations in the catalytic site of a companion serine carboxypeptidase-like acyltransferase enhance catechin galloylation in *Camellia* plants [J]. *Horticulture Research*, 2025, 12(3): uhae343. <https://doi.org/10.1093/hr/uhae343>
- [35] Li W, Zhang Z B, Chen R H, et al. Metabolomics-based analysis of the effects of differences in soluble sugars on the sweetness quality of six major tea types in China [J]. *Food & Function*, 2025, 16(9): 3707–3720. <https://doi.org/10.1039/D5FO00232J>
- [36] 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. <https://doi.org/10.16429/j.1009-7848.2023.02.027>
- [37] 刘飞, 王云, 张厅, 等. 红茶加工过程香气变化研究进展[J]. *茶叶科学*, 2018, 38(1): 9–19. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-369X.2018.01.002>
- [38] Dong R J, Sheng X H, Xie Q T, et al. Aroma formation and transformation during sealed yellowing process of Pingyang yellow tea [J]. *Food Research International*, 2023, 165: 112535. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112535>
- [39] 戴浩民, 张灵枝, 梁轶琳, 等. 乌龙茶茶树品种制白茶的风味特征及特征组分分析[J]. *食品科学*, 2024, 45(2): 229–239. <https://doi.org/10.7506/spkx1002-6630-20230303-035>
- [40] Guo X Y, Schwab W, Ho C T, et al. Characterization of the aroma profiles of oolong tea made from three tea cultivars by both GC-MS and GC-IMS [J]. *Food Chemistry*, 2022, 376: 131933. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2021.131933>
- [41] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法: “ROAV”法[J]. *食品科学*, 2008, 29(7): 370–374. <https://doi.org/10.3321/j.issn:1002-6630.2008.07.082>
- [42] Chen G H, Zhu G M, Xie H, et al. Characterization of the key differential aroma compounds in five dark teas from different geographical regions integrating GC-MS, ROAV and chemometrics approaches [J]. *Food Research International*, 2024, 194: 114928. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114928>
- [43] Liu H C, Xu Y J, Wu J J, et al. GC-IMS and olfactometry analysis on the tea aroma of Yingde black teas harvested in different seasons [J]. *Food Research International*, 2021, 150: 110784. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110784>
- [44] Wang J, Li X H, Wu Y, et al. HS-SPME/GC-MS reveals the season effects on volatile compounds of green tea in high-latitude region [J]. *Foods*, 2022, 11(19): 3016. <https://doi.org/10.3390/foods11193016>
- [45] Ma W J, Zhu Y, Ma S C, et al. Aroma characterisation of Liu-pao tea based on volatile fingerprint and aroma wheel using SBSE-GC-MS [J]. *Food Chemistry*, 2023, 414: 135739. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135739>

Analysis of factors influencing sensory quality in the blended processing of Hainan assamica black tea (*Camellia sinensis* var. *assamica*)

Guo Kai^{1,2#}, Yue Xingsheng³, Chen Shidian⁴, Zheng Xiaoyan⁵,
Zhang Shanying³, Fang Zongzhuang^{1*}

(1. Sanya Research Institute of Hainan Academy of Agricultural Sciences (Hainan Laboratory Animal Research Center), Sanya, Hainan 571199, China; 2. School of Food Science and Engineering, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 3. School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 4. Dongfang Rural Revitalization Investment Co., Ltd., Dongfang, Hainan 572600, China; 5. Institute of Tropical Bioscience and Biotechnology, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China)

Abstract: Nine tea samples, including Hainan assamica black tea (*Camellia sinensis* var. *assamica*), Yunnan assamica black tea and their blended black tea at different ratios, were selected to investigate the quality evolution pattern of Hainan assamica black tea in the blended processing process. The effects of tea variety, harvesting season, and blending ratio on volatile compounds, sensory attributes, and nutrient components were analyzed. Results demonstrated that early-spring Hainan assamica black tea exhibited optimal performance in appearance, infusion color, and taste (83.02 score). Key nutritional determinants of tea flavor included ash content, soluble sugars, total phenols, total flavonoids, and catechin levels. Volatile profiling identified linalool, methyl salicylate, phenylacetaldehyde, and α -ionone as characteristic aroma compounds. Multivariate analysis revealed that blending ratio, harvesting season, and tea variety constituted principal factors influencing compositional differences. The tea sample LH6 (20% Hainan assamica black tea + 80% Yunnan assamica black tea) had the highest sensory score (80.46 score), which was closest to that of the tea sample LH1 and significantly higher than those of the other blended samples. Its infusion color was bright indigo red, and its aroma was honey-like, fat, and minty refreshing. It is concluded that early-spring Hainan assamica black tea combines superior sensory attributes with functional component enrichment. The research results can clarify the contribution threshold of Hainan assamica variety in blending, and reveal the regulatory mechanism of season and variety on its characteristic flavor.

Keywords: Hainan assamica black tea; sensory attribute; composition; volatile component; relative odor activity value

(责任编辑:张 瑁)