

浸泡条件对文冠果芽绿茶茶汤品质的影响

朱鸿鵬¹, 刘美琪¹, 杨佳弋¹, 刘金菊², 任海伟^{1,3*},
兰园园¹, 赵洪源^{1,3}, 唐 萍⁴

(1. 兰州理工大学生命科学与工程学院, 兰州 730050; 2. 白银矿冶职业技术学院, 白银 730900; 3. 甘肃省食药资源开发与生物制造行业技术中心, 兰州 730050; 4. 甘肃茂群天运文冠果开发有限责任公司, 白银 730600)

摘 要: 为充分了解浸泡条件对文冠果芽绿茶茶汤品质的影响, 该研究采用全因子设计, 设置 5 水平浸泡温度、7 水平浸泡时间, 测定 35 种组合条件下的文冠果芽绿茶茶汤营养品质; 在此基础上, 通过模糊隶属函数法分析筛选较优的浸泡条件, 并利用气相色谱-离子迁移谱、电子鼻和电子舌等技术解析文冠果芽绿茶茶汤的香气和滋味差异。结果表明, 随着浸泡时间的延长, 文冠果芽绿茶茶汤中的茶多酚含量呈现先上升后下降再趋于平缓的趋势, 总游离氨基酸、黄酮和咖啡碱等物质含量总体呈现先上升后下降的趋势。同时, 浸泡温度较高时有助于可溶性糖组分的溶出。结合模糊隶属函数法分析结果, 长时间 (360、720 min) 浸泡不利于茶汤整体品质的提高, 而浸泡时间过短 (5 min) 和温度过低 (50、60 °C) 也无法使文冠果芽绿茶茶汤中营养物质充分溶出, 筛选得到 3 种较优的浸泡条件为: 70 °C 60 min、90 °C 30 min、80 °C 30 min。进一步检测到茶汤中共有 60 种挥发性有机物和 13 种关键呈香物质, 确定了 2-甲基丁醛和 3-甲基丁醛共同为文冠果芽绿茶茶汤贡献烘烤香气味, 辛醛和己醛共同为茶汤贡献新鲜果香气味, 戊醛为茶汤贡献青草气味。同时, 浸泡条件 70 °C 60 min 和 80 °C 30 min 更有利于茶汤中呈香物质的保留, 且能减少苦涩味。最后, 从营养品质、滋味和气味等角度综合考虑, 推荐 80 °C 浸泡 30 min 为文冠果芽绿茶的日常饮用冲泡条件, 也为后续茶饮产品的加工提供了理论基础。

关键词: 文冠果芽绿茶; 化学成分; 隶属函数法; 气相色谱-离子迁移谱; 挥发性有机物

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202512011

中图分类号: TS272.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2026)-12-0366-10

朱鸿鵬, 刘美琪, 杨佳弋, 等. 浸泡条件对文冠果芽绿茶茶汤品质的影响[J]. 农业工程学报, 2026, 42(12): 366-375. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202512011 <http://www.tcsae.org>
ZHU Hongli, LIU Meiqi, YANG Jiayi, et al. Influence of steeping conditions on the green tea infusion quality from *Xanthoceras sorbifolium* bud[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2026, 42(12): 366-375. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202512011 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

文冠果 (*Xanthoceras sorbifolium* Bunge) 为无患子科文冠果属的落叶灌木或小乔木, 别名僧灯毛道^[1]、文官果^[2]、崖木瓜等, 是中国北方特有的木本油料树种, 主要分布于中国北部干旱寒冷地区, 如甘肃、内蒙古、河北等^[3]。据报道, 文冠果种仁含油率高达 60% 左右 (神经酸约 3%~4%), 文冠果芽和叶片中富含皂苷、槲皮素、绿原酸、多酚、黄酮等多种生物活性物质, 具有降血压、降血脂、抗炎、抗氧化应激等功效, 可制成功能代用茶供消费者饮用^[4]。

研究表明, 茶汤核心品质主要体现在滋味和香气两个方面, 二者分别由茶叶中不同特性的内容物决定。茶

汤的滋味特征源于茶叶的营养品质成分, 其中茶多酚、黄酮类物质及咖啡碱是形成茶汤苦涩味的关键成分, 总游离氨基酸为茶汤赋予清爽鲜醇的口感, 而可溶性糖则可以为茶汤增添甘甜, 三者共同塑造了茶汤丰富的滋味^[5]。另一方面, 茶汤的香气特征由茶叶中挥发性有机物主导, 作为衡量茶汤品质的核心指标, 其释放速率在冲泡过程中受水温和时间的显著影响^[6]。陶冬冰等^[7]利用电子舌对不同冲泡条件下六安瓜片茶汤涩味值进行主成分判别分析, 发现浸泡水温越高或浸泡时间越长, 茶汤滋味越涩。YU 等^[8]通过响应面法优化得到兼具香气与滋味的祁门红茶最优冲泡条件为水温 89 °C、时间 6 min、茶水比 1:55。王淑腾等^[9]的研究结果表明: 茶水比是影响青砖茶茶汤香气、汤色的主要因素, 其作用强度大于冲泡时间; 冲泡时间对茶汤滋味的调控效果则显著高于茶水比。ZHANG 等^[10]从化学品质成分与感官条件等角度分别研究了福鼎白茶的冲泡条件, 认为茶水比 1:30、温度 100 °C、时间 7 min 的冲泡条件对化学品质成分最有利, 冲泡条件 100 °C、3 min、茶水比 1:50 时茶汤的感官评分最佳。因此, 针对不同种类的茶汤而言, 深入了解浸泡条件对其营养品质和风味品质的影响至关重要。然而, 目前有关浸泡条件对文冠果芽茶茶汤品质的研究还尚未有报道。

收稿日期: 2025-12-02 修订日期: 2026-05-25

基金项目: 甘肃省技术创新引导计划项目 (24CXNA073); 白银市科技计划项目 (2024-1-27G; 2024-1-5N); 兰州市青年科技人才创新项目 (2024-QN-194); 靖远县科技计划项目 (JYKJ2025-2-07); 甘肃省高校研究生“创新之星”项目 (2026CXZX-608)

作者简介: 朱鸿鵬, 研究方向为西部特色资源开发与功能评价。

Email: 17389498402@163.com

※通信作者: 任海伟, 博士, 教授, 研究方向为生物资源开发利用。

Email: rhw52571119@163.com

鉴于此, 本文以文冠果芽茶(绿茶)为研究对象, 研究浸泡时间和浸泡温度对文冠果芽绿茶茶汤中主要营养成分成分的溶出规律, 并通过模糊隶属函数法进行主成分分析, 筛选确定相对较优的浸泡条件。在此基础上, 利用气相色谱-离子迁移谱(gas chromatography ion mobility spectroscopy, GC-IMS)测定文冠果芽绿茶茶汤中的挥发性有机物, 并通过差异性分析确定关键呈香物质, 进而探究浸泡条件对茶汤风味品质的影响。同时, 利用电子舌测定茶汤滋味, 并分析其与营养成分成分之间的关系, 以期对文冠果芽绿茶的科学饮用和茶饮产品研发提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

文冠果芽绿茶由甘肃茂群天运文冠果开发有限责任公司提供。原料嫩芽采摘自甘肃省白银市靖远县(北纬 36°59'6.57", 东经 105°7'52.63")五合镇文冠果种植园, 经 250~300 °C 杀青 3 min, 将杀青芽重复压成紧密团块, 经翻转、打散再压成团块, 然后在 150 °C 条件下干燥 5 min 制成文冠果芽绿茶。福林酚试剂购于阿拉丁生化科技有限公司; 没食子酸标准品(>98%)、咖啡因标准品(>98%)、芦丁标准品(>98%)、L-谷氨酸标准品(>98%)购于成都迪赛特生物科技有限公司。

52N 紫外可见分光光度计, 上海仪电分析仪器有限公司; TS-5000Z 电子舌, 日本 INSENT 公司; PEN3 电子鼻, 德国 AIRSENSE 公司; FlavourSpec® 气相色谱-离子迁移谱, 德国 G.A.S. 公司; CTC-PAL 3 静态顶空自动进样装置, 瑞士 CTC Analytics AG 公司; MXT-5 毛细管柱, 美国 Reatek 公司。

1.2 试验方法

1.2.1 文冠果芽绿茶茶汤的制备

采用全因子设计(温度×时间), 结合日常饮茶习惯, 着重考虑浸泡温度和时间对茶汤品质的影响。按照国际标准化组织 ISO 3103:2019 规定方法, 固定茶水比为 1:50 (g/g), 温度设置 5 个水平(90、80、70、60、50 °C), 时间设置 7 个水平(5、10、30、60、180、360、720 min), 共 35 种茶汤浸泡试验组合, 并在透明茶杯中开展研究。

1.2.2 茶汤中营养品质成分的测定

茶多酚参照 GB/T 8313-2018《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量测定方法》测定; 总游离氨基酸参照 GB/T 8314-2013《茶 游离氨基酸总量的测定》测定; 可溶性糖采用 3,5-二硝基水杨酸(DNS)比色法测定^[11]; 总黄酮采用三氯化铝-亚硝酸钠比色法测定^[12]; 咖啡碱参照 GB/T 8312-2013《茶 咖啡碱测定》中分光光度法测定。

1.2.3 文冠果芽绿茶茶汤品质的综合评价

由于单一指标无法全面反映茶汤的综合营养价值, 故采用模糊隶属函数法对 35 组不同浸泡条件下的茶汤营养成分指标进行综合评价。根据全倩等^[13]方法计算茶汤综合指标隶属函数值、综合指标权重和综合得分 D 值。

茶汤所测各指标相关隶属值计算如式(1):

$$U(X_j) = \frac{X_j - X_{\min}}{X_{\max} - X_j}, (j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

各主成分权重计算如式(2):

$$W_j = \frac{P_j}{\sum_{j=1}^n P_j} \quad (2)$$

综合评价得分 D 值计算如式(3):

$$D = \sum_{j=1}^n [U(X_j) \cdot W_j] \quad (3)$$

式中 $U(X_j)$ 代表第 j 个茶汤指标的隶属值, X_j 代表第 j 个茶汤指标的测量值; $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 为所测茶汤某一指标的最大值和最小值; P_j 表示不同浸泡条件下茶汤第 j 个综合指标的贡献率; W_j 为相应的主成分权重。

1.2.4 茶汤中挥发性有机物测定

采用 FlavourSpec® 气相色谱-离子迁移谱(GC-IMS)系统和 MXT-5 毛细管柱(15 m × 0.53 mm, 1.0 μm)分析挥发性有机物。

GC 条件: 色谱柱温度 60 °C; 载气: 高纯氮气(纯度 ≥99.999%); 程序升压: 初始流量 2.0 mL/min 保持 2 min, 在 8 min 内线性增至 10.0 mL/min, 在 10 min 内线性增至 100.0 mL/min, 在 10 min 内线性增至 150.0 mL/min。色谱运行时间 30 min; 进样口温度 80 °C。

IMS 条件: 电离源: 氙源(3H); 迁移管长度: 53 mm; 电场强度: 500 V/cm; 迁移管温度: 45 °C; 漂移气: 高纯氮气(纯度 ≥99.999%); 流速: 75 mL/min; 所有数据均在正离子化模式下采集。

1.2.5 电子鼻测定茶汤香气

取 10 g 茶汤于 100 mL 样品杯(双层保鲜膜封口), 室温(23~25 °C)下静置 30 min 后上机测试, 直接将进样针头插入含样品的密封烧杯中, 利用 PEN3 电子鼻对茶汤香气特征进行测定。测定条件: 采样时间 1 s; 传感器自清洗时间 80 s; 传感器归零时间 5 s; 样品准备时间 5 s; 进样流量 400 mL/min; 分析采样时间 80 s。

1.2.6 电子舌测定茶汤滋味

使用 TS-5000Z 电子舌对茶汤滋味特征进行测定^[14]。茶汤经纱布过滤后, 将滤液置于冷水中急冷降温 5 min, 室温(23~25 °C)下上机检测。测定条件: 预试验中发现 30 s 后信号趋于平稳, 因此取 30 s 测试值作为传感器信号输出值。每份样品按上述流程测试 4 次, 取后 3 次数据进行分析。

1.2.7 相对气味活性值(ROAV)计算

采用相对气味活性值(relative odor activity value, ROAV)方法评估挥发性有机物对茶汤的贡献度^[15]。

$$ROAV = \frac{C_A \times T_{\max}}{C_{\max} \times T_A} \times 100$$

式中 C_A (%) 和 T_A (mg/kg) 分别表示每种挥发性有机物的相对含量和阈值, $C_{\max}$ (%) 和 $T_{\max}$ (mg/kg) 表示对整体风味贡献最大的化合物的相对含量和阈值。当 $ROAV \geq 1.0$ 时, 认为该物质对挥发性风味特征的贡献显著, 是关键呈香物质。

1.3 数据处理

数据利用 Excel 2019 软件整理, 采用 SPSS 软件进行单因素方差分析、皮尔逊相关分析、隶属函数法主成分分析 (principal component analysis, PCA), 并使用最小显著差异法 (least significant difference, LSD) 和 Waller-Duncan 法进行检验。使用 Origin 2024 软件生成柱状图、

雷达图、热图和 PCA 图。

2 结果与分析

2.1 浸泡条件对茶汤营养品质成分的影响

如图 1a 所示, 茶汤中的茶多酚含量随浸泡时间延长而呈现先上升后下降再趋于平缓的趋势。

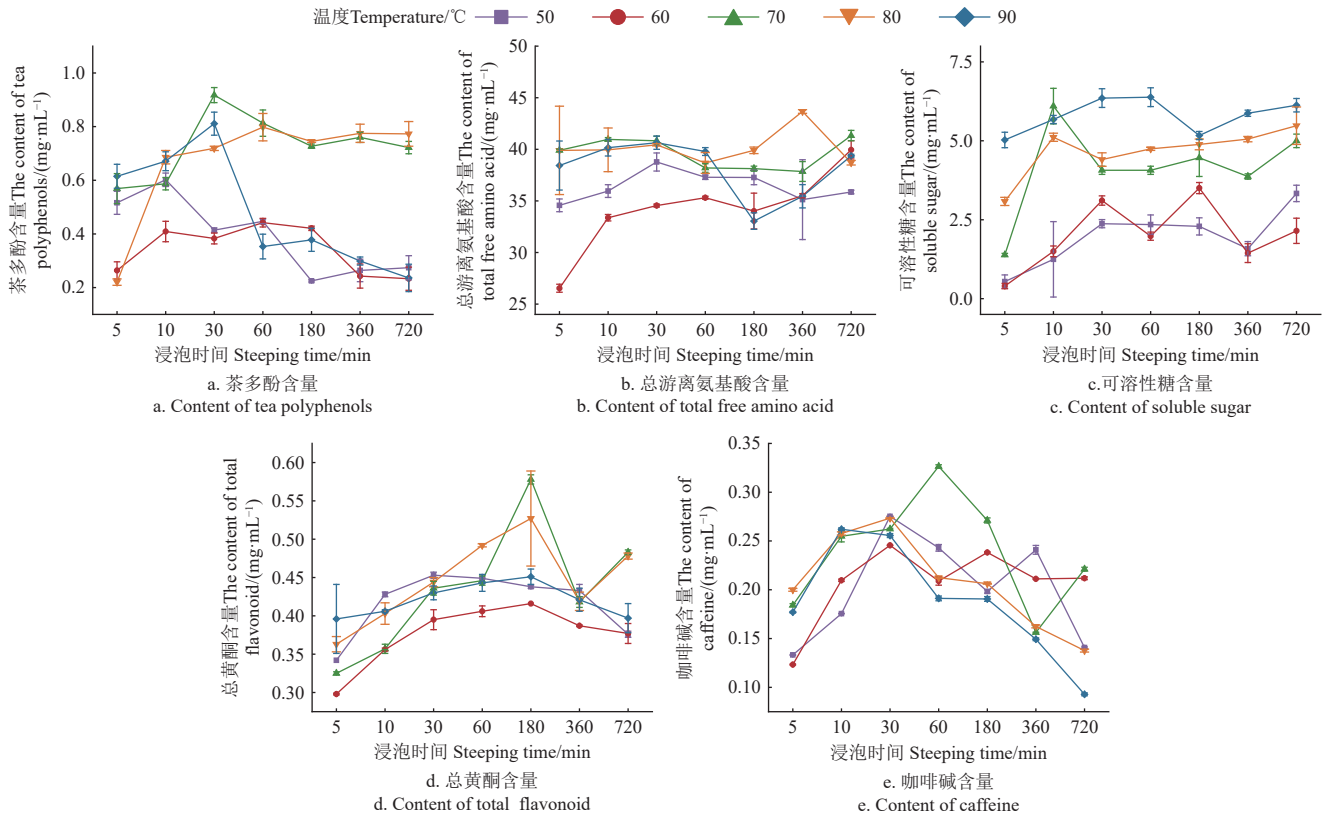


图 1 不同浸泡条件下茶汤中的营养品质成分变化规律

Fig.1 Variation patterns of nutritional quality components in tea infusion under different steeping conditions

这是由于浸泡初始阶段的茶多酚分子热运动较快, 有利于其溶出, 故茶多酚含量上升; 随着浸泡时间的延长, 茶多酚含量下降, 一方面由于水温的自然下降, 分子热运动减慢, 同时文冠果芽中富含 Ca、Mg 等离子, 可能与其发生络合作用并使其含量下降^[16]。另一方面长时间浸泡会使茶多酚被氧化成茶黄素和茶红素^[7]。

从图 1b 可知, 总游离氨基酸含量总体呈现先上升后下降的趋势 (除个别组外), 且高水温 (70~90 °C) 浸泡条件下的总游离氨基酸含量高于低水温 (50~60 °C) 条件。茶叶中可溶性糖主要包括单糖、双糖和部分低聚糖, 其释放过程受到扩散动力学和酶促反应双重调控作用的影响^[17]。由图 1c 可知, 茶汤中可溶性糖含量随浸泡时间延长在一定范围内波动变化, 且浸泡温度愈高其溶出浓度愈高。就总黄酮含量而言 (图 1d), 在浸泡初期黄酮类物质持续溶出, 含量逐渐上升; 但长时间浸泡反而使可浸出的黄酮含量降低, 故其含量变化亦整体呈现先上升后下降趋势, 这可能与发生氧化、聚合等反应有关, 王承福等^[18]的研究结果也证明了这一点。如图 1e 所示, 茶汤中的咖啡碱含量随时间延长呈现先上升后快速下降趋势, 这可能与浸泡时间延长茶汤冷却, 咖啡碱

与多酚类物质及其氧化产物络合等因素有关^[19-20]。

2.2 茶汤营养品质成分的主成分分析

针对 35 种浸泡条件下的茶汤营养品质进行主成分分析, 将特征值大于 1 的主成分作为综合指标, 有效代替原始指标所含信息, 各主成分中指标的特征向量绝对值最大为该主成分中代表指标^[21]。由表 1 可知, 主成分 1 的特征值为 2.569, 可视作茶汤品质评价的综合指标, 其贡献率达 51.381%, 表明所有指标的变异信息中, 有 51.381% 的变异信息可以用主成分 1 来表示。主成分 2 的特征值为 0.940, 所产生的贡献值为 18.806%, 其中咖啡碱的绝对值最大, 说明成分 2 的代表指标为咖啡碱, 由于咖啡碱主要影响茶汤苦味, 故主成分 2 可以被认为是苦味因子。成分 3 的特征值为 0.640, 所产生贡献值为 12.797%, 黄酮的绝对值最大, 说明成分 3 的代表指标为黄酮。SCHARBERT 等^[22]认为黄酮醇苷类物质对大吉岭红茶的涩味有贡献, 可以增强咖啡碱在茶汤中的苦味, 故主成分 3 被认为是苦味增强因子。主成分 4 的特征值为 0.509, 所产生的贡献值为 10.184%, 茶多酚的绝对值最大, 说明成分 4 的代表指标为茶多酚, 由于茶多酚主要影响茶汤中的涩味^[23], 故主成分 4 被认为是涩味因子。

表 1 主成分的特征向量、特征值、贡献率和累积贡献率
Table 1 Eigenvectors, eigenvalues, contribution rates and cumulative contribution rates of principal components

指标 Index	主成分 Principal component			
	1	2	3	4
茶多酚 Tea polyphenols X_1	0.489	0.075	0.154	-0.828
游离氨基酸 Free amino acids X_2	0.488	-0.256	0.526	0.203
可溶性糖 Soluble sugars X_3	0.455	-0.536	-0.113	0.356
黄酮 Flavonoids X_4	0.452	0.155	-0.794	0.037
咖啡碱 Caffeine X_5	0.333	0.786	0.237	0.381
特征值 Eigenvalue	2.569	0.940	0.640	0.509
贡献率 Variance contribution/%	51.381	18.806	12.797	10.184
累积贡献率 Cumulative variance contribution/%	51.381	70.187	82.984	93.168

由表 2 可知，浸泡 70 ℃ 60 min 时的茶汤品质综合得分最高，为 0.844；浸泡 90 ℃ 30 min 和 80 ℃ 30 min 条件下的综合得分基本接近，分别为 0.794 和 0.793。由此可见，当浸泡时间过长（360、720 min）或过短（5 min），或浸泡温度过低（50、60 ℃），都会导致茶汤品质的综合得分相对较低，表明长时间（360、720 min）浸泡不利于茶汤整体品质的提高，而浸泡时间过短（5 min）和温度过低（50、60 ℃）也无法使茶汤中的营养成分充分溶出，因此选择适当的浸泡时间和浸泡温度才能得到较高品质的茶汤。利用模糊隶属函数法分析筛选出茶汤品质较好的 3 个浸泡条件，依次为 70 ℃ 60 min（YL-1）、90 ℃ 30 min（YL-2）和 80 ℃ 30 min（YL-3）。

2.3 三种初选浸泡条件下茶汤的挥发性有机物分析

图 2a 和 2b 分别为 3 种初选浸泡条件茶汤的挥发性有机物热图和三维谱图。由图 2a 中可知，70 ℃ 60 min 与 80 ℃ 30 min 条件下的茶汤香气成分较为相似，而 90 ℃ 30 min 条件下的部分挥发性有机物含量明显高于另外两种条件，说明高温浸泡确实有助于挥发性成分的释放。由图 2b 可知，浸泡条件为 70 ℃ 60 min 和 80 ℃ 30 min 时的挥发性有机物种类和峰体积差异不显著，但与浸泡条件为 90 ℃ 30 min 相比差异显著。

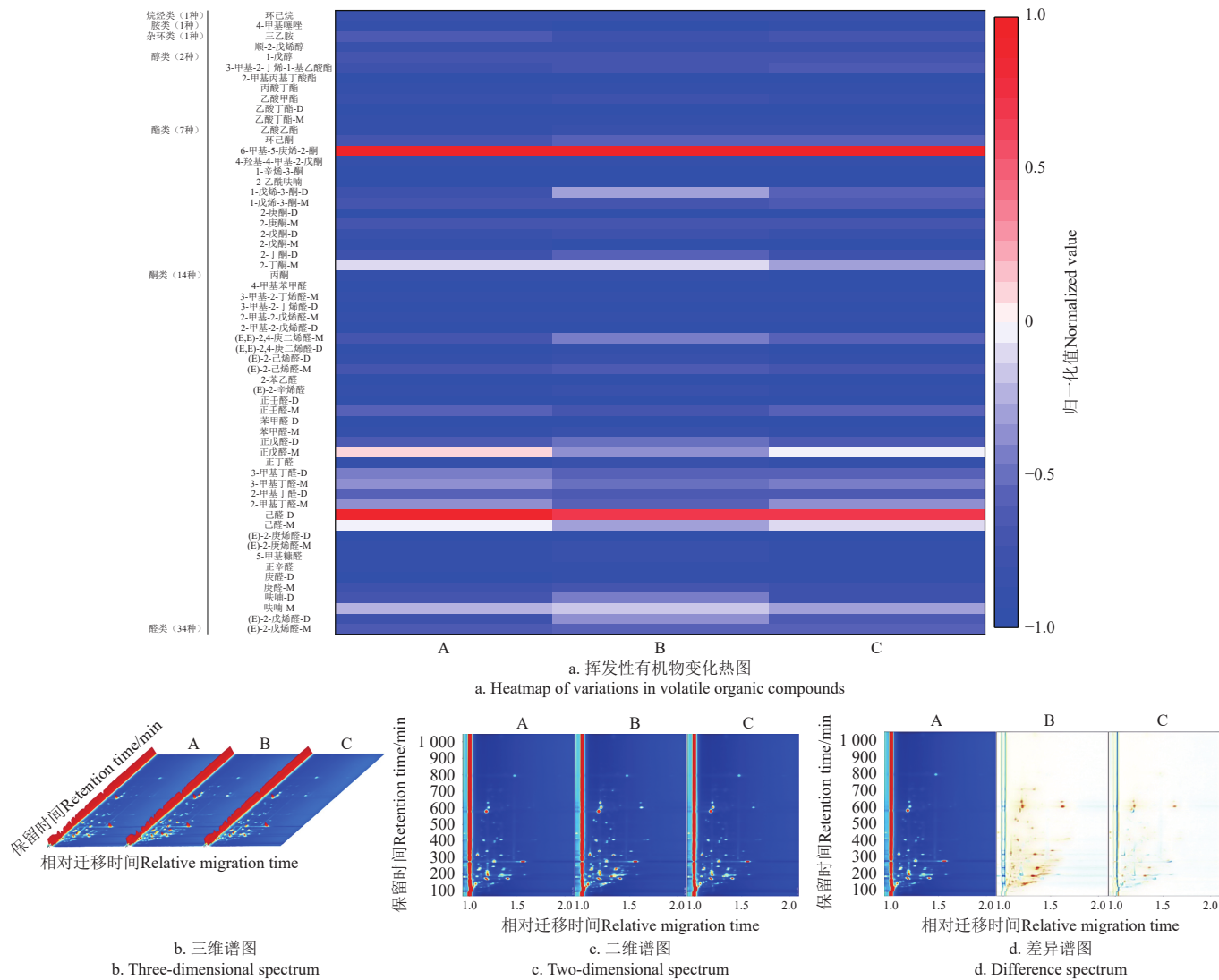
为便于观察，选取图 2 中二维俯视图和其对应的差异谱图进行分析。图 2c 横坐标 1.0 处红色竖线为 RIP 峰（经归一化处理后的反应离子峰），RIP 峰两侧的每一个点均代表一种挥发性有机物，颜色代表物质的峰强度，从蓝色到红色，颜色越深表示峰强度越大。图 2d 选取浸泡条件 70 ℃ 60 min 作为空白参比，白色为扣减后的背景，代表目标样品与 70 ℃ 60 min 的物质浓度相同，图中红色表示该物质浓度在此条件下高于参比，蓝色表示该物质浓度在此条件下低于参比。由图可知，浸泡条件为 90 ℃ 30 min 下的红色部分明显多于蓝色部分，说明 90 ℃ 水温有助于提升茶汤香气浓郁度，而 80 ℃ 30 min 与 70 ℃ 60 min 浸泡条件下的挥发性有机物浓度差异不大，这与图 2a 结果相吻合。

表 2 不同浸泡条件下茶汤的营养品质综合评价结果
Table 2 Comprehensive evaluation results for the nutritional quality of tea infusions under different steeping conditions

编号 No.	浸泡条件 Steeping conditions		隶属值 Membership value				综合得分 Synthesis score
	温度 Temperature/ ℃	时间 Time/min	U1	U2	U3	U4	
A	70	60	0.912	1.000	0.622	0.495	0.844
B	90	30	0.962	0.565	0.666	0.527	0.794
C	80	30	0.891	0.756	0.639	0.562	0.793
D	70	30	0.931	0.744	0.720	0.221	0.787
E	70	180	1.000	0.867	0.000	0.527	0.784
F	90	10	0.861	0.613	0.733	0.680	0.774
G	70	10	0.803	0.511	0.931	0.822	0.764
H	80	10	0.834	0.638	0.742	0.597	0.756
I	70	720	0.930	0.553	0.449	0.487	0.740
J	50	30	0.698	0.905	0.507	0.820	0.727
K	80	180	0.941	0.564	0.197	0.380	0.701
L	80	60	0.891	0.598	0.302	0.270	0.683
M	80	360	0.871	0.279	0.744	0.288	0.671
N	90	60	0.756	0.338	0.405	1.000	0.650
O	50	60	0.642	0.826	0.423	0.642	0.649
P	60	720	0.511	0.630	0.751	0.898	0.610
Q	60	30	0.530	0.795	0.492	0.721	0.599
R	80	5	0.513	0.521	0.771	0.949	0.597
S	60	180	0.563	0.770	0.376	0.668	0.590
T	90	5	0.694	0.394	0.588	0.428	0.590
U	50	360	0.490	0.883	0.364	0.789	0.584
V	80	720	0.826	0.292	0.247	0.149	0.565
W	70	5	0.505	0.582	1.000	0.255	0.561
X	50	180	0.515	0.659	0.367	0.833	0.559
Y	70	360	0.693	0.435	0.496	0.061	0.545
Z	60	60	0.504	0.745	0.467	0.466	0.543
AA	60	360	0.405	0.757	0.525	0.722	0.527
AB	90	180	0.585	0.539	0.096	0.708	0.522
AC	50	10	0.537	0.697	0.411	0.103	0.505
AD	90	360	0.564	0.290	0.243	0.811	0.492
AE	60	10	0.377	0.779	0.582	0.420	0.491
AF	90	720	0.558	0.000	0.427	0.852	0.460
AG	50	720	0.414	0.391	0.470	0.628	0.440
AH	50	5	0.317	0.568	0.633	0.000	0.376
AI	60	5	0.000	0.637	0.388	0.124	0.195

注：多个原始理化指标经 PCA 降维，提取出 4 个有效主成分，因此拆分出 U1、U2、U3、U4（分别为主成分 1、2、3、4 的隶属得分）
Note: Principal component analysis (PCA) was performed on multiple original physicochemical indicators, and four valid principal components were extracted. U1, U2, U3 and U4 correspond to the membership scores of the first, second, third and fourth principal components.

如图 3 所示，通过对挥发性有机物进行定性与定量分析，共得出 86 个峰和 60 个物质，包含 34 种醛类、14 种酮类、7 种酯类、2 种醇类、1 种杂环化合物、1 种胺类化合物和 1 种烷烃类化合物。具体地，3 种初选浸泡条件下的挥发性有机物中占比最大的是醛类物质，为文冠果芽绿茶茶汤贡献了丰富多元的香气轮廓。其中，90 ℃ 30 min 和 80 ℃ 30 min 浸泡条件下的挥发性有机物差异较大。进一步对 3 种浸泡条件下的茶汤挥发性有机物进行指纹图谱分析（图 4），发现图中 I 区域物质在 90 ℃ 30 min 时浓度更高，主要包括戊酮、戊醛、庚醛、1-辛烯-3-酮、3-甲基-2-丁烯醛、(E)-2-庚烯醛等，说明较高水温（90 ℃）可以促使香气物质浓度达到较为浓郁的状态。图 4 中 II 区域物质在 80 ℃ 30 min 时浓度更高，主要包括壬醛、4-羟基-4-甲基-2-戊酮（温和）、3-甲基-2-丁烯-1-基乙酸酯（梨醇酯）（果香）、丙酸丁酯（泥土，甜玫瑰香）等。壬醛是 B 区域中的关键呈香物质，其阈值低，强度高，易挥发^[24]，具有玫瑰、柑橘、脂肪等香气特征，被认为是一种助香成分^[25]。



注：图 d 选取浸泡条件 70 °C 60 min 作为空白参比，白色为扣减后的背景，代表目标样品与 70 °C 60 min 的物质浓度相同，图中红色表示该物质浓度在此条件下高于参比，蓝色表示该物质浓度在此条件下低于参比。颜色代表物质的峰强度，从蓝色到红色，颜色越深表示峰强度越大。
Note: In Figure d, the soaking condition of 70 °C for 60 min was selected as the blank reference. White represents the background after subtraction, indicating that the concentration of the target sample is the same as that at 70 °C for 60 minutes. Red in the figure indicates that the concentration of the substance is higher than the reference under this condition, while blue indicates that it is lower. The color represents the peak intensity of the substance, with the intensity increasing from blue to red as the color deepens.

图 2 三种初选茶汤的挥发性有机物气相色谱离子迁移谱测试结果

Fig.2 Gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) test results of volatile organic compounds in three initially selected tea infusions

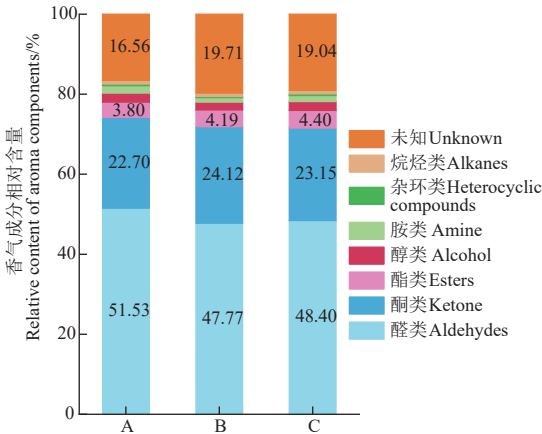


图 3 三种初选茶汤的呈香物质相对含量堆积柱状图

Fig.3 Stacked bar chart of the relative contents of aroma substances in three initially selected tea infusions

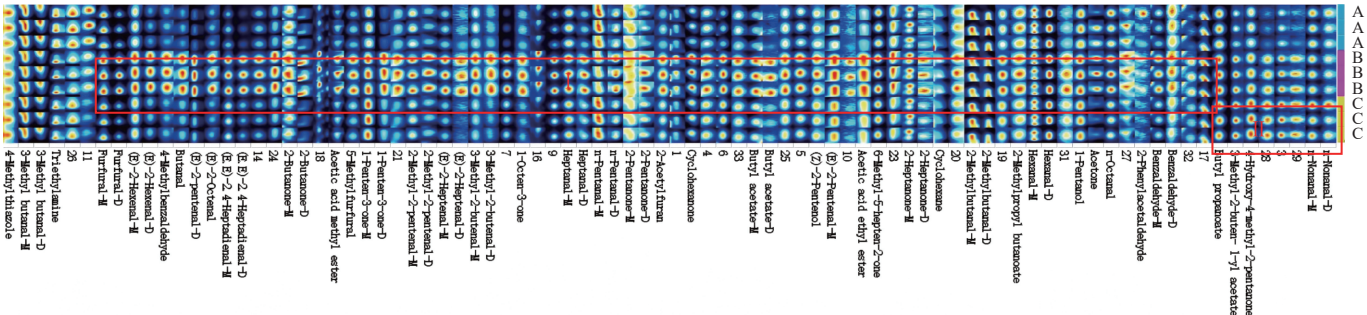
2.4 三种初选浸泡条件茶汤香气中的关键呈香物质

基于挥发性有机化合物的不同特性和阈值，采用气味活度值 (relative odor activity value, ROAV) 评估 3 种初选茶汤的挥发性有机化合物对整体香气的贡献度。ROAV ≥ 1.0 的化合物对茶叶整体香气形成有贡献^[26]，认为 ROAV ≥ 10.0 的化合物对茶叶整体香气形成有显著影响。如表 3 所示，13 种关键香气物质 (ROAV ≥ 1.0) 对文冠果芽绿茶茶汤的特征香气有贡献，包括 11 种醛类和 2 种酮类。具体地，在 70 °C 60 min 和 80 °C 30 min 条件下对香气贡献最大的化合物是 2-甲基丁醛-M (ROAV = 21.60 和 ROAV = 22.41)，在 90 °C 30 min 条件下对香气贡献最大的化合物是 1-戊烯-3-酮-D (ROAV=12.94)。可见，70 °C 60 min 和 80 °C 30 min 两种浸泡条件下的 ROAV 值十分接近，与 90 °C 30 min 则有明显差异，这

可能是由于关键呈香物质在高温条件下快速挥发或热降解等因素所导致^[27]。

醛类物质中 2-甲基丁醛-M 在 3 种初选茶汤中的 ROAV 值均大于 10，对文冠果芽绿茶茶汤的整体香气形成有显著影响，其香气特征主要表现为烘烤味中的苦杏仁味、可可和麦芽味。裴子莹等^[28]发现 2-甲基丁醛是黄大茶特征“锅巴香”的关键呈香物质，具有麦芽味。文

冠果芽绿茶茶汤中的烘烤香气味由 2-甲基丁醛与 3-甲基丁醛共同贡献，2-甲基丁醛由异亮氨酸 Strecker 降解产生，3-甲基丁醛由亮氨酸 Strecker 降解产生^[29]。文冠果芽绿茶茶汤中新鲜果香的气味由辛醛与己醛共同贡献，戊醛是芽绿茶中主要青草气味的关键呈香物质^[30]。酮类物质中，1-戊烯-3-酮是关键呈香物质，具有刺激性气味，可能是由于浸泡时的脂肪降解产生所致^[31]。



注：横轴标注的数字编号代表未完成标准品定性、仅通过迁移/保留时间检出的未知挥发性组分，带有化合物名称的横坐标为匹配标准品数据库完成定性的已知风味物质。图中 I 区域物质在 90 °C 30 min 时浓度更高，主要包括壬醛、戊醛、庚醛、1-辛烯-3-酮、3-甲基-2-丁烯醛、(E)-2-庚烯醛等，II 区域物质在 80 °C 30 min 时浓度更高，主要包括壬醛、4-羟基-4-甲基-2-戊酮、3-甲基-2-丁烯-1-基乙酯、丙酸丁酯等。
Note: The numerical labels on the horizontal axis represent unidentified volatile components tentatively detected only via migration/retention time without standard substance confirmation; horizontal axis labels with compound names correspond to known flavor substances qualitatively identified by matching standard databases. Compounds in Region I exhibit higher concentrations at 90 °C for 30 min, mainly including pentanone, pentanal, heptanal, 1-octen-3-one, 3-methyl-2-butenal, (E)-2-heptenal, etc. Substances in Region II show higher concentrations at 80 °C for 30 min, primarily consisting of nonanal, 4-hydroxy-4-methyl-2-pentanone, 3-methyl-2-buten-1-yl acetate, butyl propionate, and others.

图 4 三种初选茶汤的挥发性有机物 GC-IMS 指纹图谱
Fig.4 GC-IMS fingerprint spectra of volatile organic compounds in three initially selected tea infusions

表 3 三种初选茶汤的 13 种关键呈香物质的相对气味活度值（ROAV）

Table 3 Relative odor activity values (ROAV) of 13 key aroma substances in three initially selected tea infusions

编号 No.	挥发性有机物 Volatile organic compound		气味描述 Odor description	阈值 Threshold value/ (mg·kg ⁻¹)	相对气味活度值 ROAV		
	中文 Chinese	英文 English			A	B	C
1	正辛醛	n-Octanal	醛、蜡味、柑橘、橙子、果香、脂肪	0.000 7	5.82	3.47	5.41
2	己醛-M	Hexanal-M	青草、脂肪味、水果味	0.007 5	4.08	2.11	4.23
3	己醛-D	Hexanal-D	青草、脂肪味、水果味	0.007 5	8.23	4.88	8.15
4	2-甲基丁醛-M	2-Methyl butanal-M	苦杏仁味、可可、麦芽	0.001 0	21.60	10.09	22.41
5	2-甲基丁醛-D	2-Methyl butanal-D	苦杏仁味、可可、麦芽	0.001 0	14.40	8.73	14.26
6	3-甲基丁醛-M	3-Methyl butanal-M	巧克力、脂肪味	0.008 0	2.57	1.35	2.41
7	3-甲基丁醛-D	3-Methyl butanal-D	巧克力、脂肪味	0.008 0	2.43	1.21	2.05
8	正戊醛-M	n-Pentanal-M	青草气味，带微弱香蕉味，味刺激	0.008 0	4.50	1.73	4.26
9	正戊醛-D	n-Pentanal-D	青草气味，带微弱香蕉味，味刺激	0.008 0	1.63	1.31	1.54
10	正壬醛-M	n-Nonanal-M	玫瑰，柑橘等香气，有强的油脂气味	0.015 0	0.90	0.48	1.02
11	(E)-2-辛烯醛	(E)-2-Octenal	新鲜黄瓜，脂肪，青香草药，香蕉，青香叶子	0.003 0	0.88	1.07	0.95
12	1-戊烯-3-酮-M	1-Penten-3-one-M	强烈刺激性气味	0.001 2	7.52	5.25	10.60
13	1-戊烯-3-酮-D	1-Penten-3-one-D	强烈刺激性气味	0.001 2	7.08	12.94	13.87

注：后缀 M、D 分别为同一个物质的单体、二聚体。
Note: The suffixes M and D represent the monomer and dimer of the same substance respectively.

2.5 三种初选浸泡条件茶汤风味与挥发性有机物的相关性分析

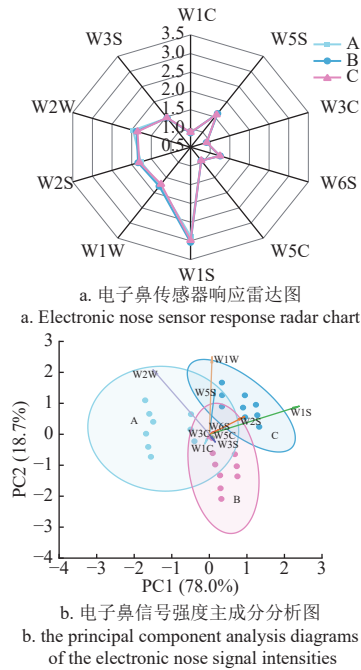
如图 5a 所示，3 种初选茶汤在电子鼻传感器响应雷达图中的变化趋势基本一致，但响应强度略有差异，W1S、W1W、W2S、W2W 传感器的响应值明显高于其他传感器，其他传感器在整个测试过程中的响应值均在 1.0 左右。

具体地，茶汤呈香物质的变化主要是由短链烷烃类化合物、无机硫化物、芳香成分、醇类、醛类、酮类引发。从图 5b 电子鼻信号强度的主成分分析发现，主成分 1 和主成分 2 的贡献率之和达到 95% 以上，第一主成分占比 78.0%，第二主成分贡献率是 18.7%。从图 5b 还发现，对主成分 1 贡献率最大的是 W1S 传感器，其次是 W2S 传感器；对主成分 2 贡献率较大的是 W5S 传感器、W1W 传感器和 W2W 传感器。由此可见，浸泡条件对茶汤香

气成分的影响主要集中在甲烷等短链烷烃、醇醚醛酮类化合物、氮氧化合物、无机硫化物、有机硫化物等。

如图 6 所示，对 13 种关键呈香物质与 10 种电子鼻传感器的响应值进行相关性分析，发现 W5S 与己醛-D、W1W 与辛醛呈现极显著正相关。

由于己醛、辛醛均为茶汤中关键呈味物质（ROAV>1，表 3），说明 W5S 和 W1W 这两个电子鼻传感器对 ROAV 值较高的挥发性有机物具有很好的敏感性。因此，挥发性有机物对茶汤香气的贡献度可通过 ROAV 值大小来进行判断^[32]。另一方面，电子鼻传感器阵列产生的信号值变化的核心驱动因素为关键呈香物质变化，在茶饮开发过程中，可以利用电子鼻实现对关键呈香物质的实时快速检测，进而建立高效监控茶汤香气成分的检测系统。

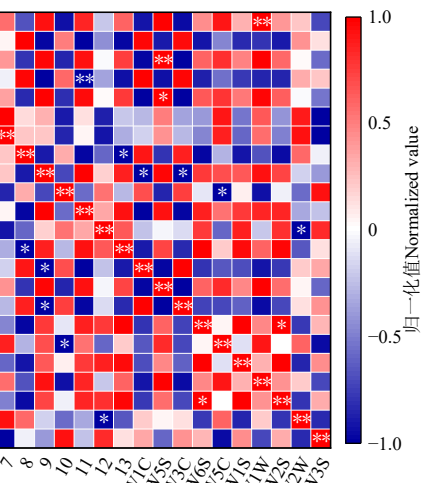
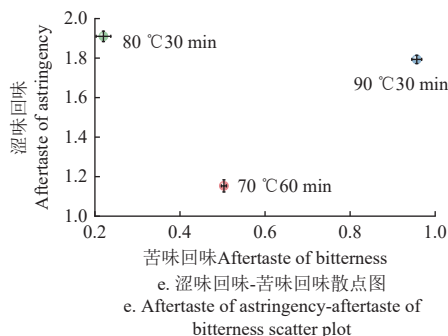
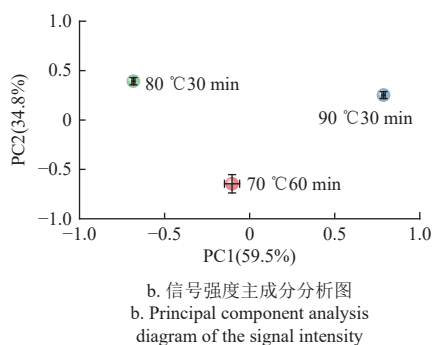
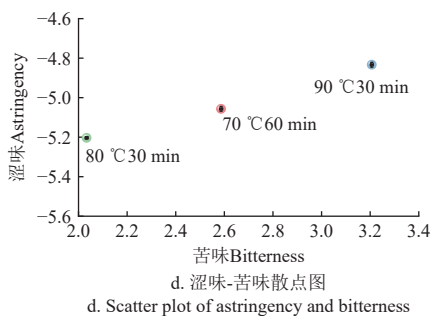
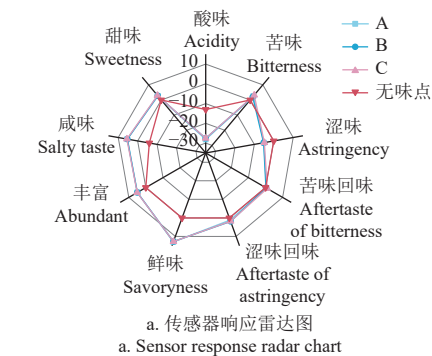


注: W1C 传感器对芳香成分和苯类灵敏; W5S 传感器对氮氧化物很灵敏; W3C 传感器对氨水和芳香成分灵敏; W6S 传感器主要对氢气有选择性; W5C 传感器对烷烃芳香成分敏感; W1S 传感器对甲烷等短链烷烃灵敏; W1W 传感器对无机硫化物灵敏; W2S 传感器对醇醚醛酮类灵敏; W2W 传感器对有机硫化物灵敏; W3S 传感器对烷烃类灵敏。下同。

Note: Sensor W1C is sensitive to aromatic components and benzenes; sensor W5S responds strongly to nitrogen oxides; sensor W3C is sensitive to ammonia and aromatic compounds; sensor W6S shows high selectivity toward hydrogen; sensor W5C is susceptible to alkanes and aromatic constituents; sensor W1S is sensitive to short-chain alkanes such as methane; sensor W1W is responsive to inorganic sulfides; sensor W2S detects alcohols, ethers, aldehydes and ketones; sensor W2W is sensitive to organic sulfides; sensor W3S responds to alkane compounds. The same below.

图 5 三种初选茶汤的电子鼻感官分析

Fig.5 Electronic nose sensory analysis of three initially selected tea infusions



注: 蓝色表示负相关, 红色表示正相关; *表示显著相关 ($P<0.05$), **表示极显著相关 ($P<0.01$)。

Note: Blue indicates negative correlation, red indicates positive correlation; * indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

图 6 13 种关键呈香物质与 10 种电子鼻传感器响应值相关性热力图

Fig.6 Correlation heatmap of 13 key aroma substances and 10 sensor response values of the electronic nose

2.6 三种初选浸泡条件茶汤滋味与营养品质成分的相关性分析

从图 7a 风味指标的雷达图可知, 3 种初选茶汤的酸味和涩味均在无味点以下, 其他味觉指标均在无味点以上, 3 种茶汤滋味表现出一定的相似性。进一步对电子舌数据矩阵进行主成分分析, 如图 7b、7c 所示。主成分 1 解释了方差贡献率的 59.5%, 主成分 2 解释了方差贡献率的 34.8%, 3 种初选茶汤之间的差异主要来自于苦味、苦味回味、涩味、涩味回味和酸味。

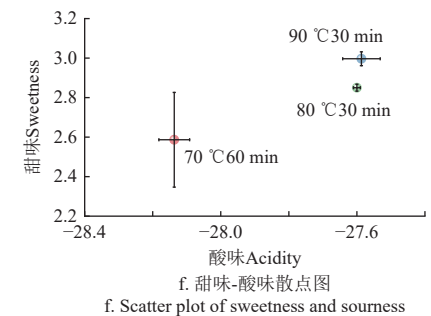
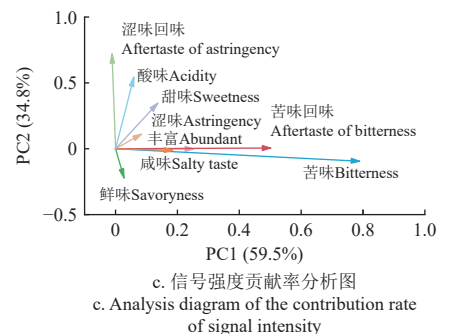


图 7 三种初选茶汤的电子舌传感器响应

Fig.7 Electronic tongue sensor response radar chart of three initially selected tea infusions

茶汤味觉指标散点图如图 7d、7f 所示, 90 °C 30 min 浸泡条件下的苦味 (3.21)、涩味 (-4.83) 和苦味回味值 (0.96) 最大, 且明显高于另外二者; 80 °C 30 min 和 90 °C 30 min 条件下的涩味回味 (1.91、1.79) 均较大, 且二者相接近; 70 °C 60 min 条件下的涩味回味 (1.15) 是三者中最小的。因此, 90 °C 30 min 条件下茶汤的苦味、涩味最强, 回味也很大, 80 °C 浸泡 30 min 时的苦味 (2.03)、涩味 (-5.2) 和苦味回味 (0.22) 最小, 涩味回味较大, 70 °C 60 min 条件下茶汤的涩味回味最小。由图 7f 还可看出, 3 种初选茶汤在酸味和甜味方面存在一定差异, 其中 70 °C 60 min 茶汤的酸味 (-28.14) 和甜味 (2.59) 最小, 与另外二者差异很大; 80 °C 30 min 与 90 °C 30 min 茶汤在酸味方面表现出一定的相似性, 在甜味方面差异不大。

3 结 论

1) 采用全因子设计和模糊隶属函数法, 初选确定了 70 °C 60 min、90 °C 30 min、80 °C 30 min 三种营养品质较高的茶汤浸泡条件。

2) 电子鼻和电子舌分析发现 70 °C 60 min 浸泡时的茶汤涩味回味 (1.15) 小; 80 °C 30 min 时的苦味 (2.03)、涩味 (-5.2) 和苦味回味 (0.22) 小, 90 °C 30 min 时的苦味、涩味强; 尤其前二者浸泡条件更有利于呈香物质的保留。采用气相色谱离子迁移谱 (gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS) 技术筛选出 13 种关键呈香物质, 其中 2-甲基丁醛-M 对文冠果芽绿茶香气形成具有显著影响, 并贡献了烘烤味中的苦杏仁味、可可和麦芽味。

3) 综合营养物质溶出和滋气味表现, 推荐文冠果芽绿茶的适宜浸泡条件为 80 °C 30 min, 此时可获得营养品质高, 苦味、涩味低且香气较为浓郁的文冠果芽绿茶茶汤。

〔参 考 文 献〕

- [1] 王红斗. 文冠果的化学成分及综合利用研究进展[J]. 中国野生植物资源, 1998, 17 (1): 13-16.
WANG Hongdou. Research progress on chemical constituents and comprehensive utilization of *Xanthoceras sorbifolium*[J]. Chinese Wild Plant Resources, 1998, 17(1): 13-16. (in Chinese with English abstract)
- [2] 邓红, 仇农学, 孙俊, 等. 超声波辅助提取文冠果籽油的工艺条件优化[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 249-254.
DENG Hong, QIU Nongxue, Sun Jun, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction technology of oil from *Xanthoceras sorbifolia* Bunge seeds[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(11): 249-254. (in Chinese with English abstract)
- [3] 张宇, 张明楠, 孟繁祎, 等. 基于 LF-2D-NMR 的文冠果含水含油率检测方法[J]. 农业工程学报, 2024, 40(21): 295-304.
ZHANG Yu, ZHANG Mingnan, MENG Fanyi, et al. Detection of the moisture and oil contents of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge using LF-2D-NMR[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(21): 295-304. (in Chinese with English abstract)
- [4] NA T, LISHA A, ERDUNDULENG E, et al. Metabolomics analysis reveals amelioration effects of yellowhorn tea extract on hyperlipidemia, inflammation, and oxidative stress in high-fat diet-fed mice[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2023, 10: 1087256.
- [5] 刘忠英, 杨婷, 戴宇樵, 等. 基于分子感官科学的茶叶滋味研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(4): 337-343.
LIU Zhongying, YANG Ting, DAI Yuqiao, et al. Research progress of tea taste based on molecular sensory science[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(4): 337-343. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李季, 肖凌, 陆昌琪, 等. 溶剂辅助风味蒸发-气相色谱-质谱联用法分析普洱茶干茶与茶汤的挥发性成分[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(6): 2238-2245.
LI Ji, XIAO Ling, LU Changqi, et al. Analysis of volatile components of tea leaves and infusion from Pu-erh tea by solvent-assisted flavor evaporation combined with gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2017, 8(6): 2238-2245. (in Chinese with English abstract)
- [7] 陶冬冰, 高雪, 张旋, 等. 不同冲泡条件下六安瓜片茶汤涩味值和茶多酚含量的相关性研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(19): 13-16.
TAO Dongbing, GAO Xue, ZHANG Xuan, et al. Correlation between the astringency value and the content of tea polyphenols in Lu'an Guapian tea soup by different brewing conditions[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(19): 13-16. (in Chinese with English abstract)
- [8] YU J Y, LIU Y, ZHANG S R, et al. Effect of brewing conditions on phytochemicals and sensory profiles of black tea infusions: A primary study on the effects of geraniol and β -ionone on taste perception of black tea infusions[J]. *Food Chemistry*, 2021, 354: 129504.
- [9] 王淑腾, 朱奥婕, 张又月, 等. 不同冲泡条件对青砖茶茶汤品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(14): 170-177.
WANG Shuteng, ZHU Aojie, ZHANG Youyue, et al. Effects of different brewing conditions on quality of Qingzhuang tea soup[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(14): 170-177. (in Chinese with English abstract)
- [10] ZHANG H H, LI Y L, LV Y J, et al. Influence of brewing conditions on taste components in Fuding white tea infusions[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(9): 2826-2833.
- [11] 杨眷俪, 许雪蓉, 张振军, 等. 文冠果芽茶与叶茶主要营养成分成分分析及抗氧化活性评价[J]. 食品工业科技, 2022, 43 (15): 366-373.
YANG Juanli, XU Xuerong, ZHANG Zhengjun, et al. Main nutritional and functional ingredients and antioxidant evaluation of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge bud tea and leaf tea [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(15): 366-373. (in Chinese with English abstract)
- [12] 刘文强, 董壮壮, 孙庆, 等. 桑叶茶中多酚, 黄酮含量与抗氧化作用的相关性研究[J]. 食品科技, 2023, 48(2): 239-245.
LIU Wenqiang, DONG Zhuangzhuang, SUN Qing, et al. Correlation between the contents of active substances in Mulberry leaf tea and their antioxidant activities[J]. *Food Science and Technology*, 2023, 48(2): 239-245. (in Chinese with English abstract)
- [13] 全倩, 施明, 贺建勋, 等. 5 种葡萄砧木耐旱性评价及鉴定指标的筛选[J]. 核农学报, 2018, 32(9): 1814-1820.

- TONG Qian, SHI Ming, HE Jianxun, et al. Evaluating of drought tolerance and screening the identification indexes among five grape rootstock varieties[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(9): 1814-1820. (in Chinese with English abstract)
- [14] CHENG L Z, WANG Y F, ZHANG J R, et al. Integration of non-targeted metabolomics and E-tongue evaluation reveals the chemical variation and taste characteristics of five typical dark teas[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 150: 111875.
- [15] ZHANG H Y, HUANG D, PU D D, et al. Multivariate relationships among sensory attributes and volatile components in commercial dry porcini mushrooms (*Boletus edulis*)[J]. *Food Research International*, 2020, 133: 109112.
- [16] 何若彤, 李梦璐, 阳策瑶, 等. 低共熔溶剂提取金银花多酚的工艺优化及其活性分析[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(17): 339-348.
- HE Ruotong, LI Menglu, YANG Ceyao, et al. Process optimization of polyphenols extracted from *Lonicera japonica* Thunb. by deep eutectic solvents and analysis of biological activity[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2025, 41(17): 339-348. (in Chinese with English abstract)
- [17] 耿丽晶, 周围, 郭雪, 等. 不同生产工艺条件对速溶普洱茶中主要成分含量的影响[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(24): 265-270.
- GENG Lijing, ZHOU Wei, GUO Xue, et al. Effect of the different process conditions on the main components content of instant Pu'er tea[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013, 34(24): 265-270. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王承福, 陆廷祥, 曾欢, 等. 响应面法优化青钱柳茶不同冲泡工艺总黄酮含量比较[J]. *广东化工*, 2024, 51(19): 169-171, 162.
- WANG Chengfu, LU Tingxiang, ZENG Huan, et al. Comparison of total flavonoids content of *Cyclocarya paliurus* tea in different brewing processes by response surface methodology[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2024, 51(19): 169-171, 162. (in Chinese with English abstract)
- [19] 魏丹. 黄秋葵叶茶品质评价及其生物活性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- WEI Dan. Quality Evaluation and Study of Biological Activity of Okra Leaf Tea [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [20] 余泽恩, 丁仕华, 梁青青, 等. 绿茶“陕茶1号”中主要品质成分的溶出规律研究[J]. *西南农业学报*, 2018, 31(8): 1682-1688.
- YU Ze'en, DING Shihua, LIANG Qingqing, et al. Study on dissolving rules of main quality components in green tea 'Shanchayihao'[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(8): 1682-1688. (in Chinese with English abstract)
- [21] 温璐, 马小红, 马海霞, 等. 宁夏不同播期胡萝卜品种综合评价[J]. *江西农业大学学报*, 2023, 45(5): 1166-1182.
- WEN Lu, MA Xiaohong, MA Haixia, et al. Comprehensive evaluation of carrot varieties with different sowing dates in Ningxia[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2023, 45(5): 1166-1182. (in Chinese with English abstract)
- [22] SCHARBERT S, HOFMANN T. Molecular definition of black tea taste by means of quantitative studies, taste reconstitution, and omission experiments[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, 53(13): 5377-5384.
- [23] 陈冬, 马涛, 伞惟林, 等. 优质祁门红茶滋味特征分析[J]. *食品科学*, 2017, 38(18): 168-174.
- CHEN Dong, MA Tao, SAN Weilin, et al. Taste characteristics of Keemun black tea[J]. *Food Science*, 2017, 38(18): 168-174. (in Chinese with English abstract)
- [24] WANG J Q, GAO Y, FENG Z H, et al. Chemometrics and sensomics-assisted identification of key odorants responsible for rector odor in shelf-stored green tea infusion: A case study of Biluochun[J]. *Food Research International*, 2024, 195: 114953.
- [25] SHEN S S, ZHANG J X, SUN H R, et al. Sensomics-assisted characterization of fungal-flowery aroma components in fermented tea using Eurotium cristatum[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(48): 18963-18972.
- [26] HUANG W J, FANG S M, WANG J, et al. Sensomics analysis of the effect of the withering method on the aroma components of Keemun black tea[J]. *Food Chemistry*, 2022, 395: 133549.
- [27] 尹鹏, 卫艺炜, 王静, 等. 清香型信阳毛尖茶关键呈香成分鉴定[J]. *食品科学*, 2024, 45(21): 222-228.
- YIN Peng, WEI Yiwei, WANG Jing, et al. Identification of the key odorants in clean aroma-type Xinyang Maojian green tea[J]. *Food Science*, 2024, 45(21): 222-228. (in Chinese with English abstract)
- [28] 裴子莹, 赫桂影, 刘彧辰, 等. 黄大茶特征“锅巴香”的关键呈香物质鉴定[J]. *食品科学*, 2023, 44(12): 289-297.
- PEI Ziyang, HE Guiying, LIU Yuchen, et al. Characterization of the key aroma-active compounds responsible for the rice cruse-like aroma of large-leafed yellow tea (*Camellia sinensis*)[J]. *Food Science*, 2023, 44(12): 289-297. (in Chinese with English abstract)
- [29] MACLEOD H P, MORGAN M E. Leucine metabolism of *Streptococcus lactis* var. maltigenes. I. Conversion of alpha-ketoisocaproic acid to leucine and 3-methylbutanal[J]. *Journal of Dairy Science*, 1955, 38(11): 1208-1214.
- [30] 姚岚航, 李文林, 朱程, 等. 微波非热效应对浓香茶籽油风味形成的影响[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(9): 290-297.
- YAO Lanhang, LI Wenlin, ZHU Cheng, et al. Impacts of microwave non-thermal effect on the aroma formation of fragrant rapeseed oil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2025, 41(9): 290-297. (in Chinese with English abstract)
- [31] 查旻昱, 吴悠, 张梁. 茶叶中挥发性香气物质研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(13): 4298-4303.
- ZHA Minyu, WU You, ZHANG Liang. Research advances on volatile aroma compounds of tea [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2020, 11(13): 4298-4303. (in Chinese with English abstract)
- [32] 牛智有, 王伟霞, 耿婕, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 的肉粉 VOCs 分析与表征新鲜度的关键 VOCs 筛选[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(14): 340-350.
- NIU Zhiyou, WANG Weixia, GENG Jie, et al. Analysis of meat meal VOCs based on HS-SPME-GC-MS and selection of key VOCs for freshness characterization[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2025, 41(14): 340-350. (in Chinese with English abstract)

Influence of steeping conditions on the green tea infusion quality from *Xanthoceras sorbifolium* bud

ZHU Hongli¹, LIU Meiqi¹, YANG Jiayi¹, LIU Jinju², REN Haiwei^{1,3✉},
LAN Yuanyuan¹, ZHAO Hongyuan^{1,3}, TANG Ping⁴

(1. School of Life Science and Engineering, Lanzhou University of Science and Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Baiyin Vocational College of Mining And Metallurgy, Baiyin 730900, China; 3. Gansu Food and Drug Resources Development and Biomanufacturing Industry Technology Center, Lanzhou 730050, China; 4. Gansu Maoqun Tianyun Xanthoceras Sorbifolia Development Co., Ltd. Bai Yin 730600, China)

Abstract: *Xanthoceras sorbifolium* Bunge, belonging to the Sapindaceae family, has been one of the most potential promising woody oil species in northern China. *X. sorbifolium* can play the important ecological roles, including desert greening, windbreak, and sand fixation, also providing for the edible and medicinal value among plant resources. Furthermore, *X. sorbifolia* can be used as nature food for health protection and disease prophylaxis in recent years, such as for tea, due to its high concentration of unsaturated fatty acids, especially neuroprotective nervonic acid. The leaves and buds of *X. sorbifolium* also share the nourishing ingredients and bioactive substances, including amino acids, proteins, soluble sugars, polyphenols, flavonoids, and saponins. In this study, a full-factor design was adopted with five levels of steeping temperature and seven levels of steeping time. Nutritional quality of the tea infusions was evaluated under 35 combinations. A systematic investigation was conducted to fully clarify the influence of brewing conditions on the quality of the tea infusions with the *Xanthoceras sorbifolium* bud green tea (XBT). Fuzzy A fuzzy membership function was used to screen the optimal brewing parameters. The aroma and taste of the tea infusions with XBT were characterized by gas chromatography-ion mobility spectrometry, electronic nose, and electronic tongue. The results showed that the content of tea polyphenols in the tea infusions of XBT first increased, then decreased, and finally tended to be stable, with the extension of steeping time. While the contents of total free amino acids, flavonoids, and caffeine generally showed a trend of first increasing and then decreasing. At the same time, a higher brewing temperature was conducive to the dissolution of soluble sugar components. Fuzzy The fuzzy membership function also showed that the long-term brewing (360, 720 min) was not conducive to the overall quality of the tea infusions, while short brewing time (5 min) together with low temperature (50, 60 °C) failed to fully dissolve the nutrients in the tea infusions of XBT. Three optimal combinations of steeping parameters were obtained: 70 °C for 60 min, 90 °C for 30 min, and 80 °C for 30 min. A total of 60 volatile organic compounds and 13 key aroma substances were detected in the tea infusions. 2-methylbutyraldehyde and 3-methylbutyraldehyde jointly contributed to the roast aroma of tea infusions, while both octanal and hexanal contributed to the fresh fruit aroma of the tea infusions, and pentanal contributed to the grassy aroma of the tea infusions. The brewing conditions of 70 °C for 60 min and 80 °C for 30 min were more benefits beneficial to the retention of aroma substances in the tea infusions, thereby reducing the bitterness and astringency. According to the nutritional quality, taste, and aroma, the optimal combination of 80 °C for 30 min was recommended as the daily drinking brewing for XBT. The finding can also provide a theoretical basis for the subsequent processing of tea beverages. In short, the bud can be expected to serve as a tea products for the high economic value of *Xanthoceras sorbifolium*.

Keywords: *Xanthoceras sorbifolium* bud green tea(XBT); chemical composition; subordinate function; gas chromatography ion mobility spectroscopy (GC-IMS); volatile organic compounds