

蒋鹏飞, 赵甜甜, 史冠莹, 等. 不同饮用水对香椿发酵茶汤品质和抗氧化活性的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(15): 91–99.
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080201

JIANG Pengfei, ZHAO Tiantian, SHI Guanying, et al. Impact of Different Brewing Water on the Quality and Antioxidant Activity of *Toona sinensis* Fermented Tea Infusions[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(15): 91–99. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080201

· 研究与探讨 ·

不同饮用水对香椿发酵茶茶汤品质和抗氧化活性的影响

蒋鹏飞¹, 赵甜甜², 史冠莹¹, 张 乐¹, 赵丽丽¹, 王继红¹, 赵 妍¹, 王赵改^{1,*}

(1. 河南省农业科学院农副产品加工研究中心, 河南郑州 450002;

2. 河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州 450001)

摘 要:水是茶汤品质呈现的介质, 对茶性的发挥至关重要。选用自来水、矿泉水、纯净水冲泡香椿发酵茶, 利用紫外分光光度计、电子舌和气相色谱-质谱联用技术分析 3 种水样茶汤的理化指标、生化成分、抗氧化活性及风味物质, 以期阐明水质对香椿发酵茶茶汤品质的影响机理。结果表明, 不同饮用水对香椿发酵茶茶汤品质和抗氧化活性具有显著影响 ($P < 0.05$)。pH 呈弱酸性、电导率接近于 $1 \mu\text{S}/\text{cm}$ 的纯净水茶汤的茶多酚 (669.45 mg/L)、总黄酮 (645.83 mg/L)、可溶性糖 (731.91 mg/L) 和游离氨基酸 (2738.96 mg/L) 含量最高, 清除 DPPH 自由基能力 (IC_{50} 为 0.17 mg/mL) 和总还原能力最强。自来水茶汤中咖啡碱含量最高 (67.98 mg/L), 清除羟基自由基能力最强 (IC_{50} 为 12.27 mg/mL)。电子舌能够快速区分不同水样冲泡的香椿发酵茶茶汤, 其中纯净水茶汤的味感最为丰富, 与苦味、苦味回味、甜味及丰富度相关。利用 GC-MS 共鉴别出 29 种挥发性物质, 含硫类和醛类是香椿发酵茶茶汤的主体挥发性成分, 占 50% 以上。自来水、矿泉水、纯净水茶汤分别检出 24 种、17 种和 16 种, 其中自来水茶汤的香气组成最为丰富, 纯净水茶汤花果香明显。综合分析纯净水最适宜冲泡香椿发酵茶, 茶汤整体品质最优。本研究初步明确了水质对香椿发酵茶茶汤生化成分、抗氧化活性及风味物质的影响, 为香椿发酵茶的科学冲泡及香椿发酵茶饮品的开发提供理论依据。

关键词:饮用水, 香椿发酵茶, 生化成分, 抗氧化活性, 挥发性成分

中图分类号: TS255.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)15-0091-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080201



本文网刊:

Impact of Different Brewing Water on the Quality and Antioxidant Activity of *Toona sinensis* Fermented Tea Infusions

JIANG Pengfei¹, ZHAO Tiantian², SHI Guanying¹, ZHANG Le¹, ZHAO Lili¹, WANG Jihong¹,
ZHAO Yan¹, WANG Zhaogai^{1,*}

(1. Agricultural Products Processing Center, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China;

2. College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Water is the important medium of the tea infusions, which plays a crucial role in the development of tea quality. *Toona sinensis* (TS) fermented tea was brewed with tap water, mineral water and purified water. The physicochemical indexes, biochemical components, antioxidant activity and flavor compounds of three types tea infusions were analyzed using ultraviolet spectrophotometer, electronic tongue and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) to elucidate the influence of different brewing water on the quality of TS fermented tea infusions. The results demonstrated that the quality and antioxidant activity of TS fermented tea infusions were significant influenced by different brewing water

收稿日期: 2023-08-21

基金项目: 中原科技创新领军人才项目 (234200510004); 河南省农业科学院新兴学科发展专项 (2023XK06); 河南省科技攻关项目 (232102110128, 232102110153)。

作者简介: 蒋鹏飞 (1990-), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: jiangpengfei1028@163.com。

* 通信作者: 王赵改 (1980-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: zgwang1999@126.com。

($P < 0.05$). Among the three samples, the purified water tea infusion with weak acidity and conductivity close to $1 \mu\text{S}/\text{cm}$ exhibited superior characteristics, including the highest levels of tea polyphenols (669.45 mg/L), total flavonoids (645.83 mg/L), soluble sugar (731.91 mg/L) and free amino acids (2738.96 mg/L). Additionally, it demonstrated the strongest scavenging capacity of DPPH free radicals (IC_{50} was 0.17 mg/mL) and total reducing ability. Moreover, tap water tea infusions showed the highest caffeine content (67.98 mg/L) and the significant OH radical scavenging ability with IC_{50} value of 12.27 mg/mL . The electronic tongue effectively discriminated between TS fermented teas prepared using different brewing water, with the tea infusions made from pure water exhibiting the most abundant taste profile characterized by bitterness, bitter aftertaste, sweetness and richness. A total of 29 volatile components were identified using GC-MS, with sulfur-containing compounds and aldehydes were found to be the predominant volatile components in the TS fermented tea infusions, accounts for more than 50% of the total. 24, 17 and 16 volatile components were detected in tap water, mineral water and purified water tea infusions, respectively. The aroma components of tap water tea infusions exhibited the most abundant, and purified water tea infusions displayed obvious floral and fruity aroma. Comprehensive analysis of pure water was deemed most suitable for the TS fermented tea, the tea infusion exhibits an optimal overall quality. The present study elucidated the impact of water quality on the biochemical composition, antioxidant activity and volatile components of TS fermented tea, thereby establishing a theoretical foundation for the scientific brewing of TS fermented tea and the development of TS fermented tea beverages.

Key words: drinking water; *Toona sinensis* fermented tea; biochemical components; antioxidant activity; volatile components

茶是我国最具代表性的传统饮品,不仅有益身心健康,还能怡情养性^[1]。红茶是一种全发酵茶,是茶文化中的主要茶品。据联合国粮农组织(FAO)统计,2021年全球茶叶消费量约为640万吨,中国和印度占比60%,红茶销量呈逐年上升趋势。红茶因富含茶多酚、氨基酸、咖啡碱和茶多糖等生物活性成分,具有抗氧化、减肥降脂、防止动脉硬化、降低胆固醇等功效,深受广大消费者的喜爱^[2]。

我国人们日常的饮用水主要是饮用自来水、纯净水、天然矿泉水、天然泉水等,不同来源的饮用水滋味各异、理化性质也存在显著差异^[3]。水是茶汤色香味品质释放和形成的重要载体,是导致茶汤褐变、变味和产生沉淀的重要因素,直接影响茶汤色香味品质的优劣^[4-5]。目前消费者已经普遍认识到水对泡茶的重要性,但仍尚未明晰水质对不同茶汤生化成分、滋味和香气品质的影响机制,对于不同茶叶品种也缺乏相应的用水标准。前期研究表明,茶叶的品质主要受原料品种^[6]、产地产区^[7-8]、采摘季节^[9]以及加工工艺^[10]等因素影响,导致茶叶中所含理化成分不同,对水质以及冲泡条件的要求也各不相同^[11-12]。刘巧灵等^[13]选用4款典型包装饮用水冲泡碣滩绿茶,结果表明纯净水冲泡的茶汤浅黄绿亮,呈现“鲜、醇”的滋味,具有更好的感官特征。龚永新等^[14]研究发现纯净水与软化水更适合茶饮料的生产加工,泡茶用水的顺序依次为泉水>溪水>江水>池塘水>自来水>井水。

香椿发酵茶作为延长香椿产业链条的产品之一,前期研究主要集中在工艺优化、品质检测等方面^[15-16],而饮用水对香椿发酵茶茶汤品质和抗氧化活性影响的研究鲜有报道。基于此,本研究以自来水、矿泉水、纯净水3种常见的泡茶饮用水为研究对象,探究其对香椿发酵茶茶汤的主要理化指标、生化成

分、抗氧化活性及风味物质的影响,阐明水质对冲泡茶汤品质的影响机理,以期对香椿发酵茶日常泡茶用水和香椿发酵茶饮料加工制造用水提供参考,为指导消费者科学饮茶提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

香椿嫩芽 品名为红油香椿,于2022年5月10日采自河南省登封市三一香椿示范基地;自来水 河南省郑州市自来水公司;天然矿泉水 农夫山泉股份有限公司;纯净水 新乡娃哈哈昌盛饮料有限公司;福林酚、咖啡碱、谷氨酸、芦丁 标准品,北京索莱宝生物科技有限公司;没食子酸 标准品,天津市光复精细化工研究所;2-甲基-3-庚酮 标准品,德国DR公司;C5~C30正构烷烃 色谱级,美国Supelco公司;其他试剂均为国产分析纯;水为去离子水。

THW-219型揉捻机 长沙腾汇电子科技有限公司;LHS-100CL型恒温恒湿箱 精度 0.1°C ,上海一恒科学仪器有限公司;Color Quest XE色差仪 美国Hunter Lab公司;H1850R型高速冷冻离心机 湖南湘仪实验仪器开发有限公司;GENESYS10S紫外-可见分光光度计 美国Thermo公司;SA402B型电子舌 日本Insent公司;8890A-5977B型气相色谱-质谱联用仪、HP-5MS石英毛细管色谱($30 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm}, 0.25 \mu\text{m}$) 美国Agilent公司;顶空固相微萃取装置(包括手持式手柄,50/30 μm 二乙烯基苯/羧甲基/聚二甲基硅氧烷(DVB/CAR/PDMS)萃取头) 美国Supelco公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备 香椿发酵茶制备:新鲜香椿嫩芽在采收当天,按照实验室现有的香椿红茶发酵技术制备香椿发酵茶,制作工艺:原料选择—清洗—萎凋—揉

捻—发酵—毛火初烘—足火烘干—摊凉—包装。

茶汤制备: 采用自来水、纯净水、天然矿泉水冲泡香椿发酵茶, 参照 GB/T 23776-2018《茶叶感官审评方法》柱形杯审评法制备茶汤, 取茶叶 3.0 g, 茶水质量比 1:50, 冲泡时间 5 min, 然后茶水与茶叶分离, 茶汤经 0.22 μm 滤膜过滤后待测备用。

1.2.2 理化指标测定 pH 和电导率测定: 参照 GB/T 5750.4-2006《生活饮用水标准检验方法》中玻璃电极法和电极法。

1.2.3 色泽测定 采用色差仪测定茶汤色度值, 记录 L^* 、 a^* 、 b^* 值, 每个样品测定 6 次, 剔除最大值和最小值, 取平均值。其中 L^* 表示黑白(亮暗), 范围从 0(黑)到 100(白); a^* 表示红绿度, 范围从-128(绿色)到+127(红色); b^* 表示黄蓝度, 范围从-128(蓝色)到+127(黄色)。

1.2.4 生化成分测定 茶多酚含量测定: 参照 GB/T 8313-2018《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》中福林酚比色法; 咖啡碱含量测定: 参照 GB/T 8312-2013《茶 咖啡碱测定》中紫外分光光度法; 游离氨基酸总量测定: 参照 GB/T 8314-2013《茶 游离氨基酸总量的测定》中水合茚三酮比色法。

1.2.5 可溶性糖含量测定 采用蒽酮-硫酸比色法^[17], 取 1 mL 适度稀释的样品溶液置于具塞试管中, 在冰水浴中缓慢精密加入蒽酮-硫酸溶液 4.0 mL, 混匀, 置沸水浴中加热 20 min, 冰水冷却至室温, 在 620 nm 波长处测定吸光度。配制葡萄糖标准溶液, 加入试液测定吸光度得标准曲线方程: $y=0.0073x-0.0562$, $R^2=0.9977$ 。测得的样品吸光度代入回归方程计算样品中可溶性糖含量。

1.2.6 总黄酮含量测定 参照 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3\text{-NaNO}_2\text{-NaOH}$ 分光光度法^[16], 取 3 mL 适度稀释的样品溶液置于具塞试管中, 加入 70% 乙醇溶液补到 5 mL, 分别加入 0.3 mL 5% 的 NaNO_2 溶液, 充分振荡摇匀后静置 5 min, 再加入 0.3 mL 10% 的 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 溶液, 摇匀后静置反应 6 min, 再加入 4 mL 1mol/L 的 NaOH 溶液, 摇匀后放置 20 min, 于 510 nm 波长处测定吸光度。配制芦丁标准溶液, 加入试液测定吸光度得标准曲线方程: $y=0.0011x+0.0022$, $R^2=0.9991$ 。测得的样品吸光度代入回归方程计算样品中总黄酮含量。

1.2.7 体外抗氧化活性测定 参照 TSAI 等^[18] 和 WANG 等^[19] 的方法, 适当修改。样品配制成 0.5 mg/mL 的母液, 再用对应的水稀释, 使质量浓度分别为 0.10、0.05、0.025、0.01 mg/mL。DPPH· 和 ·OH 清除能力使用紫外分光光度计分别在波长 517 nm 和 510 nm 下测定样品组(A_s)、对照组(A_c)、空白组(A_b)的吸光度, 清除率计算公式均按式(1)计算。总还原力于 700 nm 处测定吸光度, 用吸光度值表示总还原力大小。

$$\text{清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_s - A_c}{A_b}\right) \times 100$$

式 (1)

1.2.8 电子舌测定 准确量取 35.00 mL 茶汤至电子舌专用进样杯, 在室温条件下测定。电子舌检测条件: 各样品溶液和试剂溶液温度保持室温, 味觉传感器和陶瓷参比电极共 210 s, 平衡 30 s, 样品测量 30 s, 回味测量 30 s。电子舌传感器响应类型见表 1。每个样品测定 5 个平行值, 选取中间 3 次测定值作为原始数据, 以减少系统误差。

表 1 电子舌传感器阵列及其性能特点

Table 1 Electronic tongue sensor arrays and corresponding performance characteristics

阵列序号	传感器名称	性能描述
1	CA0	对酸味灵敏, 可测酸味
2	C00	对苦味灵敏, 可测苦味和苦味的回味
3	AE1	对涩味灵敏, 可测涩味和涩味的回味
4	AAE	对鲜味灵敏, 可测鲜味和由鲜味导致的口感浓厚程度
5	CT0	对咸味灵敏, 可测咸味
6	GL1	对甜味灵敏, 可测甜味

1.2.9 挥发性成分测定

1.2.9.1 挥发性成分测定分析 顶空固相微萃取: 准确称取(5.00±0.001)g 茶汤和 31.25 mg/L 2-甲基-3-庚酮标准品于 20 mL 固相微萃取顶空瓶中, 密封后于 60 ℃ 水浴中平衡 15 min, 插入经 250 ℃ 老化后的 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头, 萃取 40 min 后取出萃取头, 插入 GC-MS 进样口 250 ℃ 解吸 5 min, 同时开始采集保留时间和色谱峰强度等相关数据。

GC 条件: HP-5MS 石英毛细管柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm); 载气 He(纯度>99.999%), 柱流速 1 mL/min, 无分流比。程序升温: 初温 40 ℃, 保持 3 min; 以 3 ℃/min 的速率升温至 80 ℃, 保持 2 min; 以 5 ℃/min 升至 150 ℃, 保持 2 min, 以 8 ℃/min 升至 240 ℃, 保持 3 min 后结束^[15,20]。

MS 条件: 四极杆温度 150 ℃, EI 离子源温度 230 ℃; 辅助加热器温度 250 ℃; 扫描方式为全扫描, 质量扫描范围 40~800 u。

1.2.9.2 挥发性成分定性定量分析 将 GC-MS 检测到的挥发性成分质谱图与 GC-MS 仪器内置的 NIST17.LIB 谱库中的质谱图进行比较, 初步确定匹配度≥70% 的化合物。在相同 GC-MS 检测条件下对正构烷烃标准品(C5~C30)进行分析, 根据各正构烷烃的保留时间按式(2)计算相应的保留指数(RI), 并与 NIST 数据库和参考文献中的保留指数进行对比分析, 将经过 RI 值比对后的峰作为确认, 以 2-甲基-3-庚酮为内标, 用内标法按式(3)进行半定量计算。

$$RI = 100 \times \left(n + \frac{t_x - t_n}{t_{n+1} - t_n}\right)$$

式 (2)

式中: t_x 是化合物 x 的保留时间; t_n 和 t_{n+1} 分别是

碳原子数为 n 和 $n+1$ 的正构烷烃保留时间 ($t_n < t_x < t_{n+1}$)。

$$C = \frac{A_x \times C_0 \times V}{A_0 \times m} \quad \text{式 (3)}$$

式中: C 是未知化合物含量, $\mu\text{g/g}$; A_x 是未知化合物的峰面积, $\text{mAu}\cdot\text{s}$; A_0 是内标物峰面积 $\text{mAu}\cdot\text{s}$; C_0 是内标物的质量浓度, $\mu\text{g}/\mu\text{L}$; V 是内标物的体积, μL ; m 是样品质量, g 。

1.3 数据处理

每组试验均重复 3 次, 利用 Microsoft Excel 2017 软件对试验数据进行初步整理, 采用 SPSS 20.0 软件中的 One-way ANOVA 单因素方差分析对试验数据进行显著性分析, 多重比较采用邓肯法, 相关性分析采用双变量分析法, 结果表示为平均值 $\pm$ 标准差。采用 Origin 8.6 软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 水样及茶汤的理化指标结果分析

三种饮用水及茶汤的 pH 和电导率如图 1 所示, 三种饮用水及茶汤的 pH 和电导率均具有显著性差异 ($P<0.05$)。三种水样 pH 在 6.74~8.09 之间, 纯净水呈弱酸性, 天然矿泉水呈弱碱性, 而自来水 pH 最高。茶汤的 pH 在 5.71~6.37 之间, 茶汤的 pH 均比水样低, 可能是因为茶汤中含有氨基酸、酚类和有机酸类等化学物质, 同时茶多酚分子具有酚羟基, 含有游离 H^+ , 对酸碱度敏感^[12]。pH 越低, 茶汤颜色越淡, 但茶汤滋味的鲜爽度和收敛性也会变得越强^[21]。电导率能够反映水中离子化合物的含量, 茶汤电导率越高, 茶汤内含物浸出越多^[20]。三种水样之间电导率差异较大, 其中自来水电导率最高, 是矿泉水的 4.3 倍, 而纯净水最低。与水样相比, 茶汤的电导率均显著升高, 位于 1644.33~1844.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之间, 跨幅差异明显收窄。XU 等^[12] 和 ZHOU 等^[22] 研究表明, 茶叶在冲泡过程中溶释出大量的 K^+ 和 F^- , 导致茶汤电导率增加。

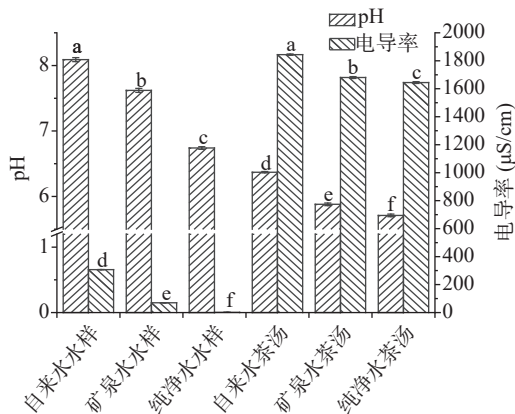


图 1 不同饮用水及茶汤的理化性质

Fig.1 Physicochemical properties of different brewing water and tea infusions

注: 不同小写字母表示组内不同水平之间存在差异显著 ($P<0.05$); 图 2、图 4 同。

2.2 不同饮用水对香椿发酵茶茶汤色泽的影响

不同饮用水对香椿发酵茶茶汤色泽影响见表 2, 不同水质对香椿发酵茶茶汤的 L^* 、 a^* 、 b^* 值均有显著影响 ($P<0.05$), 其中 L^* 表示茶汤的明亮程度, a^* 和 b^* 分别表示红 ($+a^*$)/绿 ($-a^*$) 和黄 ($+b^*$)/蓝 ($-b^*$)^[23]。三种茶汤的 L^* 、 a^* 、 b^* 均为正值, 其中 a^* 和 b^* 值大小依次为矿泉水>自来水>纯净水, 而 L^* 值大小正好相反, 这可能是因为茶红素含有两个羧基, 其阴离子颜色比没有离解的分子状态颜色深, 因此酸性的水茶汤颜色较淡^[21]。由此可以看出, 纯净水茶汤颜色明亮度佳, 而自来水和矿泉水有利于增强茶汤的红黄色度, 但茶汤颜色偏暗。

表 2 不同饮用水冲泡香椿发酵茶茶汤的色泽
Table 2 Color of TS fermented tea infusions in different brewing water

茶汤样品	L^*	a^*	b^*
自来水	29.73 $\pm$ 0.10 ^b	2.42 $\pm$ 0.10 ^b	1.83 $\pm$ 0.08 ^b
矿泉水	29.19 $\pm$ 0.10 ^c	2.76 $\pm$ 0.06 ^a	2.05 $\pm$ 0.02 ^a
纯净水	32.30 $\pm$ 0.20 ^a	1.91 $\pm$ 0.14 ^c	1.51 $\pm$ 0.12 ^c

注: 同列不同小写字母表示存在显著差异 ($P<0.05$)。

2.3 不同饮用水对香椿发酵茶茶汤主要生化成分的影响

不同饮用水冲泡香椿发酵茶茶汤中主要生化成分含量如图 2 所示, 不同水质对香椿发酵茶茶汤中咖啡碱、茶多酚、总黄酮、可溶性糖、游离氨基酸等主要生化成分存在显著影响 ($P<0.05$)。自来水冲泡的香椿发酵茶茶汤中咖啡碱含量最高 (67.98 $\pm$ 0.52 mg/L), 矿泉水和纯净水冲泡的茶汤中咖啡碱含量显著低于自来水 ($P<0.05$)。茶多酚、总黄酮、可溶性糖及游离氨基酸含量由高到低依次是纯净水>矿泉水>自来水, 纯净水冲泡的香椿发酵茶茶汤中四者含量分别为 669.45 $\pm$ 7.04、645.83 $\pm$ 10.16、731.91 $\pm$ 17.63、2738.96 $\pm$ 14.75 mg/L 。茶多酚、总黄酮、可溶性糖、游离氨基酸含量随水样和茶汤的 pH 和电导率增大而降低, 总黄酮和可溶性糖含量的变化与尹军峰

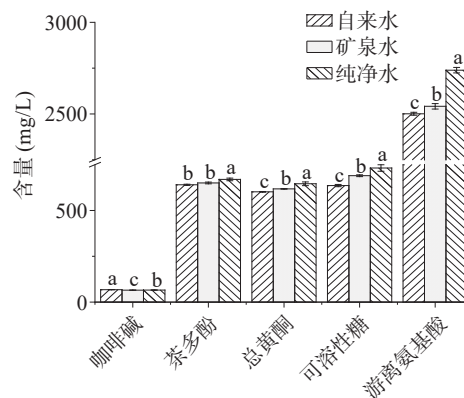


图 2 不同饮用水冲泡香椿发酵茶茶汤中生化成分含量

Fig.2 Contents of biochemical components of TS fermented tea infusions in different brewing water

等^[24]研究一致,茶多酚含量变化可能是由于水样 pH 的差异会对茶多酚类物质的浸出效率产生影响造成的^[25],氨基酸易与重金属离子发生螯合反应,其浓度会随水样总离子浓度的增加而呈下降趋势。

2.4 饮用水理化指标和茶汤生化成分相关性分析

不同饮用水理化指标和茶汤生化成分间相关性分析见表 3,咖啡碱含量与水样和茶汤的 pH 及电导率呈正相关,而茶多酚、总黄酮、可溶性糖、游离氨基酸含量均与其呈负相关,其中茶多酚、总黄酮、可溶性糖含量与其呈极显著负相关($P<0.01$)。而游离氨基酸含量与水样和茶汤的 pH 呈极显著负相关($P<0.01$),而与电导率呈显著负相关($P<0.05$)。由此可知,水样的理化指标与茶汤中生化成分存在一定的相关性,当水样的 pH 或电导率越大,茶汤中茶多酚、总黄酮、可溶性糖和游离氨基酸含量越低,而咖啡碱含量越高。

表 3 不同饮用水理化指标和茶汤生化成分相关性分析
Table 3 Correlation analysis of biochemical components in tea infusions and physicochemical components of water samples

项目	咖啡碱含量	茶多酚含量	总黄酮含量	可溶性糖含量	游离氨基酸总量
水样pH	0.640	-0.915**	-0.948**	-0.930**	-0.969**
水样电导率	0.913**	-0.812**	-0.850**	-0.935**	-0.777*
茶汤pH	0.896**	-0.830**	-0.859**	-0.944**	-0.798**
茶汤电导率	0.929**	-0.809**	-0.829**	-0.932**	-0.749*

注: **在0.01水平(双侧)上显著相关; *在0.05水平(双侧)上显著相关。

2.5 不同饮用水对香椿发酵茶茶汤抗氧化活性的影响

不同饮用水冲泡香椿发酵茶茶汤对 DPPH·和·OH 的清除能力见图 3,不同饮用水冲泡香椿发酵茶茶汤对 DPPH·和·OH 的清除能力用 IC_{50} 值表示, IC_{50} 指当抗氧化剂对自由基清除率达到 50% 时的质量浓度,常作为筛选抗氧化能力的手段, IC_{50} 值越低,抗氧化剂清除自由基的能力越强。DPPH·清除能力的 IC_{50} 值大小依次为矿泉水茶汤>自来水茶汤>纯净水茶汤,表明纯净水茶汤清除 DPPH·能力最强,可能是因为自来水和矿泉水中含有较多的离子,导致多酚

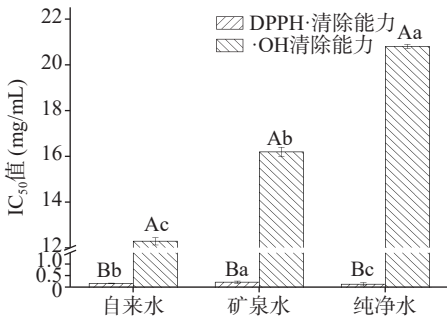


图 3 不同饮用水对茶汤 DPPH·和·OH 清除能力的 IC_{50} 值

Fig.3 IC_{50} of DPPH· and ·OH scavenging activity of tea infusions with different brewing water

注: 不同小写字母表示同一指标不同样品间差异显著,不同大写字母表示同一样品不同指标间差异显著($P<0.05$)。

类物质氧化降解从而降低其清除能力^[26]。·OH 清除能力的 IC_{50} 值却是纯净水茶汤>矿泉水茶汤>自来水茶汤,且纯净水茶汤(20.50 ± 0.09 mg/mL)是矿泉水茶汤(16.05 ± 0.19 mg/mL)的 1.28 倍,是自来水茶汤(12.27 ± 0.16 mg/mL)的 1.67 倍,结果表明自来水茶汤清除·OH 能力最强。由此可知,三种茶汤对 DPPH·和·OH 都有一定的清除能力,同一茶汤对不同自由基清除能力均为 DPPH·>·OH,而且清除能力具有显著性差异($P<0.05$)。

不同饮用水冲泡香椿发酵茶茶汤对总还原能力的影响见图 4,随着茶汤浓度增加,自来水茶汤、矿泉水茶汤、纯净水茶汤的总还原能力呈线性增加。不同饮用水的总还原能力呈显著性差异($P<0.05$),总还原能力大小依次为纯净水茶汤>矿泉水茶汤>自来水茶汤。前期研究表明茶多酚和总黄酮含量是影响茶叶抗氧化的重要因素,两者之间具有一定的量效关系^[27],纯净水冲泡香椿发酵茶茶汤中茶多酚和总黄酮含量最高,抗氧化活性较强。

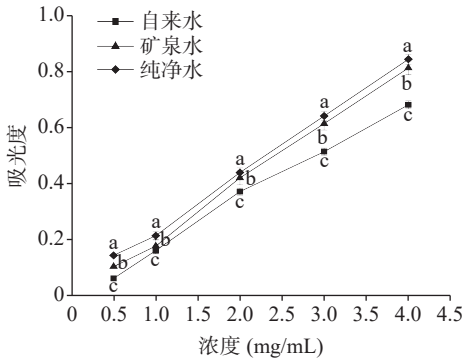


图 4 不同饮用水冲泡香椿发酵茶茶汤的总还原能力

Fig.4 Total reducing power of TS fermented tea infusions in different brewing water

2.6 不同饮用水冲泡香椿发酵茶茶汤电子舌结果分析

电子舌是利用机器模拟人的舌头对待测样品进行分析、识别和判断,实现对样品中酸、苦、咸、鲜、涩、甜等滋味物质进行测定分析。在本次测试中,对于参考溶液,酸味无味点为-13,咸味无味点为-6,其他味道的无味点为 0。数值大小反映了味道的强弱,数值越大,认为味觉越强。三种饮用水冲泡香椿发酵茶茶汤的电子舌测定结果如图 5 所示,茶汤的呈味是各滋味物质间协同作用的结果,三种饮用水冲泡香椿发酵茶茶汤的滋味存在一定相似性,其中自来水冲泡的茶汤酸味和涩味最强,苦味适中,鲜味、咸味和甜味最弱;矿泉水茶汤苦味和涩味最弱,酸味、鲜味、咸味和甜味适中;纯净水茶汤苦味、鲜味、咸味和甜味最强,酸味最弱,涩味适中。酸味值低于无味点-13,矿泉水和纯净水涩味值低于无味点 0,这与实际味道分析结果一致,没有味觉上的不适。丰富度用来表征样品鲜味的持久性,大小依次为纯净水茶汤>矿泉水茶汤>自来水茶汤。从整体来看,香椿发酵茶的苦味和鲜味更加明显,这可能与香椿发酵茶中多酚类物质

和鲜味氨基酸含量较高有关。茶汤的苦味、涩味多与多酚类、黄酮类、咖啡碱等物质有关,蛋白质水解形成的多肽、游离氨基酸等各种风味物质是茶汤鲜味和丰富度的主要贡献来源,如谷氨酸、天冬氨酸等^[28-30]。

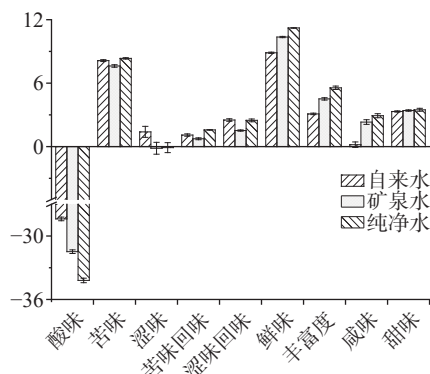


图5 不同饮用水冲泡香椿发酵茶茶汤电子舌测定结果
Fig.5 Results of E-tongue of TS fermented tea infusions in different brewing water

主成分分析显示了各滋味与不同水样茶汤之间的关联性。由图6可知,第一主成分贡献率PC1为57.52%,第二主成分贡献率PC2为31.82%,累计方差贡献率达到89.34%,能够较好地展示样品的大部分信息。三种水样茶汤分布在不同象限中,说明样品之间存在明显差异。自来水与酸味、涩味及涩味回味相关,矿泉水与鲜味和咸味相关,纯净水与苦味、苦味回味、甜味和丰富度相关,这表明电子舌能够快速区分不同水质冲泡香椿发酵茶茶汤样品。根据上述结果,三种样品的滋味特点分别是:自来水茶汤样品较为苦涩,纯净水茶汤样品醇厚顺滑、略带苦味,矿泉水茶汤样品偏鲜爽。

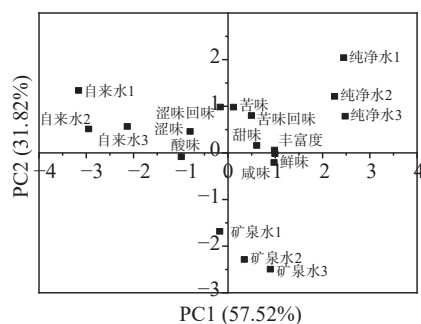


图6 不同饮用水冲泡香椿发酵茶茶汤的PCA分析
Fig.6 PCA analysis of E-tongue of TS fermented tea infusions in different brewing water

2.7 不同饮用水冲泡香椿发酵茶茶汤 GC-MS 结果分析

香气作为决定茶汤品质的重要因素之一,是由多种挥发性物质按照不同比例所构成的。由图7和表4所示,三种水样茶汤样品共鉴定出29种挥发性物质,主要包含含硫类4种、烃类7种、醛类8种、酯类2种、醇类1种和7种其他物质。自来水茶汤

样品鉴定出24种挥发性成分,含量为349.36 μg/kg,以含硫类(25.06%)、烃类(9.71%)、醛类(36.27%)及其他类(22.32%)等物质为主;矿泉水茶汤样品鉴定出17种挥发性成分,含量为237.86 μg/kg,以醛类(44.73%)、酯类(12.75%)、其他类(30.30%)等物质为主;纯净水茶汤样品鉴定出16种挥发性成分,含量为215.25 μg/kg,以含硫类(15.17%)、醛类(50.90%)、其他类(19.94%)等物质为主。含硫类和醛类是香椿发酵茶茶汤的主体挥发性成分,自来水和纯净水茶汤样品中含硫类和醛类物质含量高于矿泉水。前期研究表明,不同饮用水中的Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻易与茶汤的滋味物质氨基酸、可溶性糖、咖啡碱等物质反应,从而影响茶汤香气成分的挥发量^[7,21]。

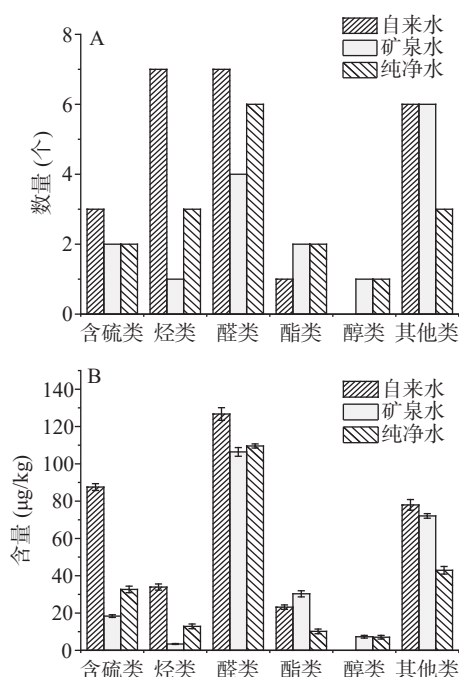


图7 样品各类挥发性成分种类与含量
Fig.7 Types and contents of volatile components of TS fermented tea infusions in different brewing water

维恩图能够很好地展现不同样品挥发性成分间的相关性,由图8和表4可知,自来水、矿泉水、纯净水冲泡的香椿发酵茶茶汤中有9种共有组分,分别占各自总风味组分的56.36%、76.14%和73.08%,自来水茶汤样品共有组分占总风味组分的含量最低,矿泉水和纯净水样品相差不大。自来水、矿泉水和纯净水茶汤样品各自独有的组分分别为9、0、1种,分别占各自总风味组分的29.74%、0、2.92%,这说明了自来水茶汤样品风味物质更为丰富。自来水、矿泉水和纯净水茶汤样品共有组分中二甲基硫醚(10.35±1.37、7.97±0.30、25.57±4.57 μg/kg), (E)-2-己烯醛(19.04±0.23、16.03±0.73、13.09±1.79 μg/kg)、苯乙醛(56.74±0.41、63.48±1.63、53.71±1.35 μg/kg)、对甲基苯甲醛(23.14±1.19、22.2±0.19、19.54±1.87 μg/kg)、邻苯二甲酸二丁酯(23.18±1.19、16.8±1.58、4.73±0.48 μg/kg)、对丙烯基茴香醚(32.64±2.16、25.74±

表 4 不同饮用水冲泡香椿发酵茶挥发性成分 GC-MS 分析

Table 4 GC-MS analysis of volatile components of TS fermented tea infusions in different brewing water

保留时间(min)	中文名称	化学式	CAS	含量(μg/kg)			RI(计算/理论)
				自来水	矿泉水	纯净水	
	含硫类			87.56±1.83	18.38±0.72	32.66±1.73	
1.465	二甲基硫醚	C ₂ H ₆ S	000075-18-3	10.35±1.37	7.97±0.30	25.57±4.57	521/521
9.629	3,4-二甲基噻吩	C ₆ H ₈ S	000632-15-5	2.99±0.55	—	—	902/908
12.056	1-乙硫基-2-甲基-1-丙烯	C ₆ H ₁₂ S	027482-14-0	74.21±1.05	—	—	952/
14.330	2-噻吩甲醛	C ₅ H ₄ OS	000098-03-3	—	10.42±0.82	7.10±1.14	1000/1008
	烃类			33.93±1.65	3.41±0.23	12.87±1.24	
23.837	1-甲基-3-(1-甲基乙基)环己烯	C ₁₀ H ₁₈	013828-31-4	5.65±0.22	—	—	1191/
29.154	α-萜荳茄油烯	C ₁₅ H ₂₄	017699-14-8	2.71±0.21	—	—	1349/1349
31.18	β-石竹烯	C ₁₅ H ₂₄	000087-44-5	13.42±1.88	—	5.93±0.92	1419/1419
32.856	右旋-大根香叶烯	C ₁₅ H ₂₄	023986-74-5	2.337±0.57	—	—	1481/1481
33.582	(Z)-γ-红没药烯	C ₁₅ H ₂₄	013062-00-5	3.01±0.27	—	—	1507/1506
34.095	δ-杜松烯	C ₁₅ H ₂₄	000483-76-1	4.11±0.65	—	3.98±0.55	1525/1525
36.865	1,1-二苯基丁烷	C ₁₆ H ₁₈	000719-79-9	2.69±0.25	3.41±0.23	2.96±0.38	1628/-
	醛类			126.70±3.40	106.39±2.34	109.57±1.09	
2.491	2-甲基丁醛	C ₅ H ₁₀ O	000096-17-3	—	—	6.28±0.76	655/656
4.260	(E)-2-戊烯醛	C ₅ H ₈ O	001576-87-0	11.57±0.68	—	12.79±0.88	750/754
7.551	(E)-2-己烯醛	C ₆ H ₁₀ O	006728-26-3	19.04±0.23	16.03±0.73	13.09±1.79	850/850
16.416	苯乙醛	C ₈ H ₈ O	000122-78-1	56.74±0.41	63.48±1.63	53.71±1.35	1038/1038
17.724	对甲基苯甲醛	C ₈ H ₈ O	000104-87-0	23.14±1.19	22.2±0.19	19.54±1.87	1063/1072
19.913	壬醛	C ₉ H ₁₈ O	000124-19-6	5.25±0.67	—	—	1103/1102
24.084	藏红花醛	C ₁₀ H ₁₄ O	000116-26-7	5.66±0.18	—	—	1197/1197
26.923	α-亚乙基-苯乙醛	C ₁₀ H ₁₀ O	004411-89-6	5.31±0.83	4.67±0.44	4.17±0.44	1278/1281
	酯类			23.18±1.19	30.32±1.64	10.17±1.26	
41.361	邻苯二甲酸二异丁酯	C ₁₆ H ₂₂ O ₄	000084-69-5	—	13.51±1.44	5.44±2.06	1873/1874
42.721	邻苯二甲酸二丁酯	C ₁₆ H ₂₂ O ₄	000084-74-2	23.18±1.19	16.8±1.58	4.73±0.48	1968/1968
	醇类			0	7.29±0.73	7.05±0.97	
38.874	金合欢醇	C ₁₅ H ₂₆ O	004602-84-0	—	7.29±0.73	7.05±0.97	1723/1721
	其他类			77.99±2.87	72.07±1.24	42.93±2.05	
13.569	苯甲腈	C ₇ H ₅ N	000100-47-0	9.33±0.06	12.03±0.63	—	984/989
24.897	3-苯基呋喃	C ₁₀ H ₈ O	013679-41-9	5.75±1.17	4.45±0.59	—	1219/1224
27.162	对丙烯基茴香醚	C ₁₀ H ₁₂ O	004180-23-8	32.64±2.16	25.74±0.20	16.05±1.16	1284/1285
29.385	丁香酚	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	000097-53-0	23.82±1.62	20.78±1.24	17.5±0.91	1357/1358
32.975	β-紫罗酮	C ₁₃ H ₂₀ O	000079-77-6	4.38±0.43	3.04±0.12	—	1485/1485
33.693	2,4-二叔丁基苯酚	C ₁₄ H ₂₂ O	000096-76-4	—	6.02±0.30	9.38±2.13	1511/1513
42.061	正十六烷酸	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	000057-10-3	2.08±0.38	—	—	1959/1964

注: “-”表示未检出; 理论RI值查阅美国国家标准技术研究院(NIST)化学数据库, 其中部分挥发性成分不存在此检测条件下的理论RI值。

0.20、16.05±1.16 μg/kg)、丁香酚(23.82±1.62、20.78±1.24、17.5±0.91 μg/kg)等物质的含量较高, 二甲基硫醚具有青气、奶油味和轻微薄荷味, (E)-2-己烯醛具有青香和水果香, 对甲基苯甲醛具有温和的花香和杏仁香味, 苯乙醛具有水果的甜香, 丁香酚具有甜香和丁香花香, 这些物质是赋予香椿发酵茶花香及果香的风味特征和丰富浓郁的香味层次的主要化合物^[15-16]。在各自独有的风味组分中, 自来水茶汤样品中含量较高的为 1-乙硫基-2-甲基-1-丙烯(74.21±1.05 μg/kg)、壬醛(5.25±0.67 μg/kg)、藏红花醛(5.66±0.18 μg/kg)等物质, 赋予自来水茶汤木香和辛香香气; 纯净水茶汤样品中仅检出具有咖啡和可可香气的 2-甲基丁醛(6.28±0.76 μg/kg)^[15], 矿泉水未检出, 这些特有的风味组分赋予了样品独特的风味。由

此可以得出, 香椿发酵茶茶汤风味不是某一类物质单独作用的结果, 而是这些挥发性物质成分间的相互作用才使得香椿发酵茶的风味丰富和协调^[31-32]。

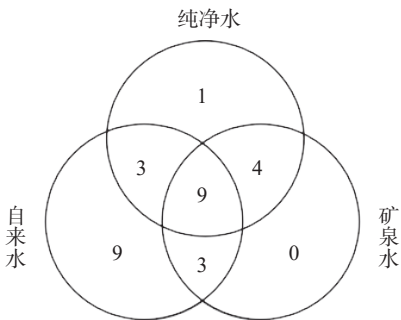


图 8 各样品挥发性物质种类维恩图

Fig.8 Venn diagram of volatile components in each sample

3 结论

本研究选用自来水、矿泉水和纯净水冲泡香椿发酵茶,通过测定水样与茶汤的理化指标,对比分析不同茶汤的色泽、主要生化成分、抗氧化活性及挥发性成分,阐明水质对香椿发酵茶茶汤品质的影响机理。结果表明:纯净水呈弱酸性、矿泉水呈弱碱性,自来水的 pH 最高;自来水的电导率最高,是矿泉水的 4.3 倍,纯净水电导率最低;与水样相比,对应茶汤的 pH 均减小,而电导率均显著增加。除咖啡碱外,纯净水茶汤中茶多酚、总黄酮、可溶性糖、游离氨基酸含量最高,分别为 669.45、645.83、731.91 和 2738.96 mg/L,相关性分析表明 pH 和电导率与主要生化成分具有显著相关性。抗氧化活性结果表明纯净水冲泡的茶汤清除 DPPH·能力和总还原力最强,自来水冲泡的茶汤清除·OH 能力最强。电子舌结果表明自来水茶汤与酸味、涩味和涩味回味相关,矿泉水茶汤与鲜味和咸味相关,纯净水茶汤与苦味、苦味回味、甜味和丰富度相关,同时电子舌能够快速区分不同水质冲泡的香椿发酵茶茶汤。利用 GC-MS 共鉴别出 29 种挥发性物质,含硫类和醛类是香椿发酵茶茶汤的主体挥发性成分,自来水和纯净水茶汤样品中的含硫类和醛类物质含量高于矿泉水样品。

综上所述,pH 呈弱酸性、电导率接近于 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的纯净水适宜冲泡香椿发酵茶,泡出的茶汤具有口感醇厚顺滑、回味略带苦味、滋味协调性好、生化成分含量高、抗氧化活性强等特点,整体品质最优。本研究不仅为香椿发酵茶日常泡茶用水和香椿发酵茶饮料加工制造用水提供参考,而且为指导消费者科学饮茶提供理论依据。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 刘珏. 饮茶与健康[J]. 食品科学, 2001(11): 97-99. [LIU J. Tea and health[J]. Food Science, 2001(11): 97-99.]
- [2] 范捷, 王秋霜, 秦丹丹, 等. 红茶品质及其相关生化因子研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(3): 246-253. [FAN J, WANG Q S, QIN D D, et al. Recent progress in black tea quality and related biochemical factors[J]. Food Science, 2020, 41(3): 246-253.]
- [3] 尹军峰. 日常主要饮用水及其特性[J]. 中国茶叶, 2018, 40(4): 21-25. [YIN J F. Main drinking water and its characteristics[J]. China Tea, 2018, 40(4): 21-25.]
- [4] YIN J F, ZHANG Y N, DU Q Z, et al. Effect of Ca^{2+} concentration on the tastes from the main chemicals in green tea infusions[J]. Food Research International, 2014, 62: 941-946.
- [5] ZHANG H H, JIANG Y L, LÜ Y J, et al. Effect of water quality on the main components in Fuding white tea infusions[J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54(5): 1206-1211.
- [6] 周金伟, 陈雪, 易有金, 等. 不同类型茶叶体外抗氧化能力的比较分析[J]. 中国食品学报, 2014, 14(8): 262-269. [ZHOU J W, CHEN X, YI Y J, et al. Comparative analysis of antioxidant capacities of different types of fermented teas *in vitro*[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(8): 262-269.]
- [7] 吕世懂, 吴远双, 姜玉芳, 等. 不同产区乌龙茶香气特征及差异分析[J]. 食品科学, 2014, 35(2): 146-153. [LÜ S D, WU Y S, JIANG Y F, et al. Comparative analysis of aroma characteristics of Oolong tea from different geographical regions[J]. Food Science, 2014, 35(2): 146-153.]
- [8] ZHENG F L, GAN S Y, ZHAO X Y, et al. Unraveling the chemosensory attributes of Chinese black teas from different regions using GC-IMS combined with sensory analysis[J]. LWT, 2023(184): 114988.
- [9] 马原, 任小盈, 马存强, 等. 不同采制季节信阳白茶品质成分的比较分析[J]. 现代食品科技, 2022, 38(7): 217-224, 315. [MA Y, REN X Y, MA C Q, et al. Comparative analysis of the quality components in Xinyang white teas collected and processed in different seasons[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(7): 217-224, 315.]
- [10] 夏益民, 王近近, 袁海波. 后发酵工艺对夏秋红茶品质形成的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(13): 180-189. [XIA Y M, WANG J J, YUAN H B. Effect of post-fermentation process on the quality of summer-autumn black tea[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(13): 180-189.]
- [11] LIU Y, LUO L Y, LIAO C X, et al. Effects of brewing conditions on the phytochemical composition, sensory qualities and antioxidant activity of green tea infusion: A study using response surface methodology[J]. Food Chemistry, 2018, 269: 24-34.
- [12] XU Y Q, ZOU C, GAO Y, et al. Effect of the type of brewing water on the chemical composition, sensory qualities and antioxidant activity of Chinese teas[J]. Food Chemistry, 2017, 236: 142-151.
- [13] 刘巧灵, 牛丽, 卫艺炜, 等. 不同类型包装饮用水对绿茶茶汤品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(11): 216-220. [LIU Q L, NIU L, WEI Y W, et al. Effects of different types of packaged drinking water on the green tea infusions[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(11): 216-220.]
- [14] 龚永新, 蔡烈伟, 黄启亮. 三峡茶区不同水质泡茶效果的研究[J]. 湖北农学院学报, 2002, 22(2): 131-134. [GONG Y X, CAI L W, HUANG Q L. The effect of tea-making with different kinds of water in tea area in three Gorges region[J]. Journal of Hubei Agricultural College, 2002, 22(2): 131-134.]
- [15] 赵甜甜, 张国治, 王赵改, 等. 两种市售香椿茶主要活性成分、抗氧化活性及挥发性成分的对比较分析[J]. 轻工学报, 2023, 38(3): 35-45. [ZHAO T T, ZHANG G Z, WANG Z G, et al. Comparative analysis of main active components, antioxidant activity and volatile compounds of two commercial *Toona sinensis* tea[J]. Journal of Light Industry, 2023, 38(3): 35-45.]
- [16] 蒋鹏飞, 高海东, 赵丽丽, 等. 不同采收期香椿茶发酵前后活性成分、降糖活性及其挥发性成分比较分析[J]. 食品科学, 2021, 42(2): 262-270. [JIANG P F, GAO H D, ZHAO L L, et al. Comparative analysis of bioactive ingredients, hypoglycemic activity and volatile components of unfermented and fermented tea made from *Toona sinensis* buds at different harvest periods[J]. Food Science, 2021, 42(2): 262-270.]
- [17] 秦俊哲, 刘凯利, 黄亚亚, 等. 茯砖茶人工接种发酵过程主要功效成分的变化[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(12): 90-93. [QIN J Z, LIU K L, HUANG Y Y, et al. Evolution of the main functional components of Fuzhuan tea artificially inoculated with *Eurotium cristatum* during fermentation[J]. Food and Fermentation Industries

tries, 2016, 42(12): 90–93.]

[18] TSAI S Y, HUANG S J, MAU J L. Antioxidant properties of hot water extracts from *Agrocybe cylindracea*[J]. *Food Chemistry*, 2006, 98(4): 670–677.

[19] WANG X, XIE K L, ZHUANG H N, et al. Volatile flavor compounds, total polyphenolic contents and antioxidant activities of a China ginkgo wine[J]. *Food Chemistry*, 2015, 182(9): 41–46.

[20] 曹学娇, 兰亚琼, 徐为民, 等. 不同饮用水对惠明茶茶汤品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(3): 68–76. [CAO X J, LAN Y Q, XU W M, et al. Influence of different brewing water on the quality of Huiming tea infusions[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(3): 68–76.]

[21] 马春华, 林志奎, 朱雪芬, 等. 不同水质泡茶对武夷岩茶品质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(15): 235–240. [MA C H, LIN Z L, ZHU X F, et al. Effect of different tea quality on Wuyi rock tea quality[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2020, 48(15): 235–240.]

[22] ZHOU D R, CHEN Y Q, NI D J. Effect of water quality on the nutritional components and antioxidant activity of green tea extracts[J]. *Food Chemistry*, 2009, 113(1): 110–114.

[23] 刘亚芹, 王辉, 周汉琛, 等. 冲泡模式对祁门红茶主要生化成分及抗氧化能力的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(7): 2552–2560. [LIU Y Q, WANG H, ZHOU H C, et al. Effects of brewing modes on quality components and antioxidant capacity of Keemun black tea[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2021, 12(7): 2552–2560.]

[24] 尹军峰, 许勇泉, 陈根生, 等. 不同类型饮用水对西湖龙井茶风味及主要品质成分的影响[J]. *中国茶叶*, 2018, 40(5): 21–26. [YIN J F, XU Y Q, CHEN G S, et al. Effects of different types of drinking water on flavor and main quality components of West Lake Longjing tea[J]. *China Tea*, 2018, 40(5): 21–26.]

[25] LAKSHI P B, PABAN B, SANTANU 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.

[26] 王丽, 刘青青, 许灿坤. 不同冲泡水质对武夷岩茶品质和抗氧化活性的影响[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(3): 136–140.

[WANG L, LIU Q Q, XU C K. Effects of different types of water on the antioxidant activity and quality of Wuyi rock tea[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(3): 136–140.]

[27] 罗冬兰, 黎晓燕, 曹森, 等. 贵州不同种类茶叶的几种抗氧化成分及其抗氧化能力分析[J]. *食品研究与开发*, 2019, 49(17): 35–41. [LUO D L, LI X Y, CAO S, et al. Comparison on several antioxidant components and activity for different kinds of Guizhou tea[J]. *Food Research and Development*, 2019, 49(17): 35–41.]

[28] 陆晨浩, 王曦如, 仲梦涵, 等. 基于 GC-MS 和电子感官技术分析发芽对黑麦茶风味的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(10): 192–197. [LU C H, WANG X R, ZHONG M H, et al. Effects of germination on the flavor of rye tea as evaluated by GC-MS and electronic sensor techniques[J]. *Food Science*, 2020, 41(10): 192–197.]

[29] GOHAIN B, BORCHETIA S, BHORALI P, et al. Understanding Darjeeling tea flavour on a molecular basis[J]. *Plant Molecular Biology*, 2012, 78(6): 577–597.

[30] 马园园, 曹青青, 高一舟, 等. 绿茶苦味研究进展[J]. *茶叶科学*, 2023, 43(1): 1–16. [MA Y Y, CAO Q Q, GAO Y Z, et al. Research progress on the bitterness of green tea[J]. *Journal of Tea Science*, 2023, 43(1): 1–16.]

[31] 刘倩, 袁越, 张杰, 等. 不同菌种发酵对诺丽果酵素的抗氧化性及风味物质的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(4): 129–137. [LIU Q, YUAN Y, ZHANG J, et al. Effects of different fermentation strains on the antioxidant activities and flavor substances of *Morinda citrifolia* L. (noni) fruit Jiaosu[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(4): 129–137.]

[32] CHEN X H, CHEN D J, JIANG H, et al. Aroma characterization of Hanzhong black tea (*Camellia sinensis*) using solid phase extraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry and olfactometry and sensory analysis[J]. *Food Chemistry*, 2019, 274(15): 130–136.