DOI:10.12441/spyswjs.20250327001　　[文章编号] 1673-1689(2026)03-0033-12

超声-搅拌辅助冷泡绿茶的功能成分与感官评价

何海晏　谈馨忆　王洪新*

(江南大学食品学院,江苏 无锡 214122)

摘要:【目的】制备兼具优良感官和功能活性的冷萃绿茶。【方法】对比超声-搅拌辅助冷泡、常规热泡、常规冷泡3种工艺所得绿茶的理化特性和风味品质。【结果】超声-搅拌辅助冷泡可促进多酚及游离氨基酸(尤其是茶氨酸)的溶出,茶汤酚氨比为1.33,与常规冷泡茶相近;另外,该工艺可显著提升冷泡绿茶的抗氧化能力,其$ABTS^+$、DPPH自由基清除率分别为(72.07±3.04)%、(49.54±1.59)%。挥发性成分分析结果表明,超声-搅拌辅助冷泡工艺提高了茶汤中醛类、酮类、酯类物质的溶出,茶汤香气浓郁。基于OPLS-DA模型分析发现,3种冲泡方式茶汤的挥发性成分具有显著差异,共筛选得到35种VIP>1的差异物质。相较于常规热泡茶,超声-搅拌辅助冷泡能更好地保留绿茶原有的清新香气;相较于常规冷泡茶,其香气物质更加丰富。OAV分析发现,超声-搅拌辅助冷泡茶保留了常规冷泡茶的特征香气属性,提升了1-辛烯-3-醇、壬醛、正辛醇的香气感知,OAV值分别为5.51、3.76、1.52。感官评价结果表明,超声-搅拌辅助冷泡茶具有青草香、花香、果香、焙烤香等绿茶香气特征,可接受度较高。【结论】超声-搅拌辅助冷泡工艺适用于高品质冷萃绿茶的加工,可为冷萃茶的品质提升提供工艺参考。

关键词:冷萃绿茶;超声-搅拌辅助冷泡;挥发性物质;自由基清除能力;感官评价

Functional Components and Sensory Quality of Extracted Green Tea Prepared by Ultrasound-stirring-assisted Cold Brewing

*HE Haiyan　TAN Xinyi　WANG Hongxin**

(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: [**Objective**] This study aimed to prepare cold extracted green tea with good sensory quality and health functions. [**Method**] The physicochemical and flavor characteristics of cold extracted green tea prepared through ultrasound-stirring-assisted cold brewing were compared with those of green tea prepared through conventional hot brewing and conventional cold brewing. [**Result**] Ultrasound-stirring-assisted cold brewing promoted the dissolution of polyphenols and free amino acids (especially theanine), and the tea infusion had a phenol-ammonia ratio (1.33) comparable to that of conventional cold brewed tea. In addition, this process significantly enhanced the antioxidant capacity of cold extracted green tea, which showed the $ABTS^+$ and DPPH radical scavenging rate of (72.07±3.04)% and (49.54±1.59)% , respectively. Determination of volatile components revealed that the ultrasound-stirring-assisted cold brewing process improved the dissolution of aldehydes, ketones, and esters in the tea infusion, which showed a strong aroma. The OPLS-DA model analysis showed significant differences in volatile components between tea infusions brewed with the three methods, and 35 differential compounds with VIP>1 were screened out. Ultrasound-stirring-assisted cold brewing better retained the original freshness and aroma of green tea than conventional hot brewing and endowed the tea infusion with richer aroma compounds than

基金项目:国家“十四五”重点研发计划项目(2022YFD2101104)。

通信作者:王洪新(1964—),男,博士,教授,博士研究生导师,主要从事食药同源资源深度开发利用研究。E-mail:hxwang@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2025-03-27　**修回日期:**2025-04-16

conventional cold brewing. The OAV analysis showed that ultrasound-stirring-assisted cold brewing retained the characteristic aroma attributes of the tea infusion prepared through conventional cold brewing and enhanced the aroma perception of 1-octen-3-ol, nonanal, and 1-octanol, which showed the OAV values of 5.51, 3.76, and 1.52, respectively. The results of sensory evaluation showed that the tea infusion prepared through ultrasound-stirring-assisted cold brewing had the green tea aroma characteristics such as grassy, floral, fruity, and baking aromas, with a degree of acceptability. [**Conclusion**] Ultrasonic-stirring-assisted cold brewing has the potential to prepare high-quality cold extracted green tea, which can provide process guidance for the quality improvement of cold extracted tea.

Keywords: cold extracted green tea; ultrasound-stirring-assisted cold brewing; volatile compound; free radical scavenging capacity; sensory evaluation

绿茶属于未发酵茶，茶汤滋味淡雅清香，具有鲜茶独特的香气和鲜爽滋味[1]。茶叶的常规冲泡方式为热水冲泡，多酚、生物碱等具有苦涩味的物质容易在高温下溶解析出，导致热水冲泡茶汤的苦涩味较重[2]。近年来，冷萃茶作为新型茶饮冲泡方式广受市场青睐，其通常指用常温（25 ℃）及低温的水冲泡得到的茶汤[3]。冷萃茶汤中的多酚、咖啡因、可溶性固形物等的溶出率较低，使得茶汤色泽较浅、苦涩味弱、鲜味强，感官品质较好[4]，同时保留了绿茶丰富的营养物质[5]。

受低温萃取条件限制，冷萃茶中多种活性成分的溶出率偏低，萃取时间较长，一般需萃取 12 h 以上才能达到与热泡茶相当的抗氧化活性[6]。为解决这一问题，研究者利用超声、搅拌等辅助技术提升冷萃茶活性成分的提取效率。Raghunath 等[7]利用超声辅助工艺提高了冷萃红茶生物活性物质的提取效率；Isopescu 等[8]将搅拌辅助工艺应用于普洱茶的萃取，发现普洱茶汤中的总多酚提取率显著提高。但目前相关研究多聚焦于提高活性成分的提取率，鲜有针对冷萃茶感官品质与营养特性的综合评价研究。

作者以冷萃绿茶为研究对象，对其主要活性成分、风味等进行系统分析，并进行感官评价，旨在研发兼具优良感官品质与高营养价值的冷萃绿茶产品。作者将超声辅助和搅拌辅助相结合，对比超声-搅拌辅助冷萃绿茶与常规热泡茶、常规冷泡茶，综合考察超声-搅拌辅助冷萃绿茶的功能特性及风味特性，旨在确定兼顾良好风味和营养价值的冷萃茶高效制备工艺参数，为冷萃茶产品的研发提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

龙井绿茶：嵊州一杯香茶业有限公司；儿茶素（C）、表儿茶素（EC）、表没食子儿茶素（EGC）、表儿茶素没食子酸酯（ECG）、表没食子儿茶素没食子酸酯（EGCG）、没食子儿茶素没食子酸酯（GCG）、咖啡因：均为色谱纯，上海源叶生物科技有限公司；癸酸乙酯内标溶液、正构烷烃标准溶液：均为色谱纯，美国 Sigma-Aldrich 公司；2，2’-叠氮基双（3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸）二铵盐（ABTS）、1，1-二苯基-2-三硝基苯肼（DPPH）：均为分析纯，国药集团化学试剂有限公司；0.22 μm 水系微孔滤膜：常德比克曼生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

超声波清洗机：NT-1015 型，常州诺泰自动化设备有限公司；风冷式冷水机：KND-02A 型，无锡凯诺德冷暖设备有限公司；搅拌机：LSJB120 型，常州励岸宝机械设备科技有限公司；低速大容量离心机：DL-5-B 型，上海安亭科学仪器厂；超纯水机：Smart-D 型，上海和泰仪器有限公司；电子天平：AR224CN 型，上海奥豪斯仪器有限公司；高效液相色谱仪：Waters e2695 型，美国沃特世公司；气相色谱-高分辨飞行时间质谱仪：Pegasus HRT+4D 型，美国力可公司。

1.3 方法

1.3.1 茶汤的制备

1）超声-搅拌辅助冷泡制备冷萃绿茶：参照 López 等[9]的方法并稍加修改，准确称取 2 g 绿茶置于 250 mL 烧杯中，加入 200 mL 超纯水，将烧杯置于超声波清洗机水槽内，同时将电动搅拌机转头伸入茶汤，设置超声功率 200 W、搅拌速率 180 r/min、提

取时间60 min。萃取完成后，用滤纸过滤茶汤，滤液于5 000 r/min离心10 min，收集上清液，于4 ℃冰箱保存备用。

2）常规热泡茶的制备：参照GB/T 23776—2018[10]中的方法制备常规热泡茶。将2 g绿茶置于烧杯中，加入100 mL的（98±2）℃沸水，冲泡4 min。冲泡完成后，于5 000 r/min离心10 min，所得上清液即为常规热泡茶。

3）常规冷泡茶的制备：将2 g绿茶置于烧杯中，加入100 mL室温超纯水，于4 ℃冰箱静置萃取13 h[3]。萃取结束后，于5 000 r/min离心10 min，所得上清液即为常规冷泡茶。

1.3.2 主要化学成分的测定

参照GB/T 8313—2018[11]中的方法进行总多酚质量浓度的测定；参照GB/T 8314—2013[12]中的方法进行总游离氨基酸质量浓度的测定。

1.3.3 酚氨比的计算

参照许伟等[13]的方法，茶汤中总酚质量浓度与茶汤中总游离氨基酸质量浓度的比值即为样品的酚氨比。

1.3.4 儿茶素和咖啡因的测定

茶汤中咖啡因、主要儿茶素类质量浓度的测定参照王力[14]的方法，共检测6种儿茶素单体。高效液相色谱参数为：选择SB-C18色谱柱（150 mm×4.6 mm×5 μm），柱温25 ℃，流量0.6 mL/min，进样量5 μL，流动相A为体积分数2%的乙酸，流动相B为体积分数100%的乙腈，检测波长为280 nm。洗脱程序为：0~3 min，流动相B体积分数为10%；3~7 min，流动相B体积分数由10%增至15%；7~10 min，流动相B体积分数由15%增至17%；10~19 min，流动相B体积分数为17%；19~20 min，流动相B体积分数由17%增至24%；20~25 min，流动相B体积分数为24%；25~30 min，流动相B体积分数由24%降至10%；25~30 min，流动相B体积分数为10%。

1.3.5 茶氨酸测定

参照Wang等[15]的方法，采用OPA柱前衍生反向高效液相色谱-紫外检测法测定茶氨酸质量浓度。采用外标法将样品的峰面积与标准品的峰面积进行比对，并确定茶汤中的茶氨酸质量浓度。

1.3.6 抗氧化能力测定

1）DPPH自由基清除能力：参照何欢欢等[16]的方法，将茶汤稀释250倍，取0.5 mL稀释液与2.5 mL DPPH-无水乙醇溶液（0.3 mmol/L）混匀，37 ℃避光反应30 min，于517 nm测定吸光度。DPPH自由基清除率按式（1）计算。

$$D=(1-\frac{A_1-A_2}{A_0})\times 100\% \quad (1)$$

式中：

D——DPPH自由基清除率，%；

A_0——DPPH溶液的吸光度；

A_1——样品与DPPH溶液混合的吸光度；

A_2——样品的吸光度。

2）$ABTS^+$自由基清除能力：取1.408 mL K_2SO_8溶液（140 mmol/L）与80 mL ABTS溶液（7 mmol/L）混匀，室温避光静置12 h，将茶汤稀释500倍，取0.5 mL稀释液与2.5 mL ABTS溶液（0.3 mmol/L）混匀，于37 ℃避光反应30 min，于734 nm测定吸光度。$ABTS^+$自由基清除率按式（2）计算。

$$T=(1-\frac{A_4-A_5}{A_3})\times 100\% \quad (2)$$

式中：

T——$ABTS^+$自由基清除率，%；

A_3——ABTS溶液的吸光度；

A_4——样品与ABTS溶液混合的吸光度；

A_5——样品的吸光度。

1.3.7 挥发性物质测定

取5 mL茶汤放入20 mL顶空进样瓶中，加入癸酸乙酯作为内标物，加盖密封。将固相微萃取头插入顶空进样瓶，于60 ℃顶空萃取30 min，随后插入GC-MS进样口解吸5 min。GC条件为：选择MXT-WAX色谱柱（30 m×0.250 mm×0.25 μm），进样口温度250 ℃，载气为氦气，流量为1 mL/min，不分流进样。升温程序为：初始柱温40 ℃并保持5 min，以10 ℃/min的速率升温至230 ℃并保持6 min，总运行时间28 min。MS条件为：EI离子源，离子源温度230 ℃，电离能量70 eV。匹配NIST11谱库相似度≥80%进行定性，计算保留指数（RI）并与正构烷烃保留指数匹配。采用内标法定量，计算化合物与癸酸乙酯的相对峰面积并确定挥发性物质质量浓度。

OAV是特定挥发性化合物的香气强度。通过计算挥发性化合物的OAV值，可以评估它们对样品整体风味的贡献。通常认为OAV值>1的物质

对整体香味的贡献较大，且能被人的嗅觉捕捉到[17]。OAV按式（3）计算。

$$O=\frac{C_1}{T_1} \quad (3)$$

式中：

O——化合物的OAV值；

C_1——化合物的质量浓度，μg/mL；

T_1——化合物的芳香阈值，μg/mL。

1.3.8 感官评价

为比较不同绿茶的感官评价差异，参照GB/T 23776—2018[10]的方法对茶汤香气进行感官评价。感官评定小组由7名男性和8名女性组成，年龄为25~60岁，均有超过5年的感官评定经验。茶汤均为当天新鲜制备，分装在30 mL透明品尝杯中，并用3位随机数字对样品进行编号。将茶汤随机递给小组成员以评估茶汤香气和滋味，小组成员对每个样品进行3次嗅闻及品尝，并通过10分制对各指标进行评分，最终得分以平均值表示，具体评价标准见表1。

1.3.9 数据处理

使用SIMCA软件对挥发性物质进行正交偏最小二乘判别分析（OPLS-DA），采用Origin 2024绘图，采用TB Tool v2.210绘制热图。

2 结果与讨论

2.1 茶汤中功能因子分析

2.1.1 茶汤中基本功能因子分析

由表2可知，冷萃绿茶因受低温限制，总多酚溶出低于热泡绿茶，而游离氨基酸因水溶性更强[18]，其质量浓度更高。3种茶汤中的主要游离氨基酸均为茶氨酸，其中超声-搅拌辅助组质量浓度最高，有助于提升茶汤的鲜爽味和营养价值[19-20]。冷萃绿茶的酚氨比显著低于热泡绿茶，表明其鲜爽度更高、苦涩味更低。超声-搅拌协同辅助组的酚氨比略高于常规冷泡组，可兼顾涩味与鲜味的协同口感。综上，热泡有利于多酚的溶出，但酚氨比较高，苦涩味较重；超声-搅拌辅助组在游离氨基酸和茶氨酸溶出上优势明显，酚氨比较低，口感鲜爽柔和，同时保

表1 描述性感官评价标准

Table 1 Descriptive sensory evaluation criteria

一级指标	二级指标	描述性感官评价标准	得分/分
香气	青草香	几乎闻不出该类香气	0~3
		能够感知该香气	4~6
		能够较为明显感受到该香味	7~10
	焙烤香	几乎闻不出该类香气	0~3
		能够感知该香气	4~6
		能够较为明显感受到该香气	7~10
	花香	几乎闻不出该类香气	0~3
		能够感知该香气	4~6
		能够较为明显感受到该香气	7~10
	果香	几乎闻不出该类香气	0~3
		能够感知该香气	4~6
		能够较为明显感受到该香气	7~10
	香气总体强度	几乎没有闻到香气	0~3
		有能够感知的香气	4~6
		香气较强，易被感知	7~10
滋味	苦味	苦味过重	0~3
		苦味较重	4~6
		苦味适中，恰到好处	7~10
	涩味	涩味过重	0~3
		涩味较重	4~6
		涩味适中，恰到好处	7~10
	甜味	完全没有甜味	0~3
		甜味较轻	4~6
		甜味适中，恰到好处	7~10
	鲜味	完全没有鲜味	0~3
		鲜味较轻	4~6
		鲜味适中，恰到好处	7~10
	滋味接受度	浓涩，接受度不佳	0~3
		清爽，浓尚醇，接受度尚可	4~6
		甘鲜，鲜醇，接受度良好	7~10

表2 不同茶汤中基本功能因子比较

Table 2 Comparison of basic functional factors in different tea infusions

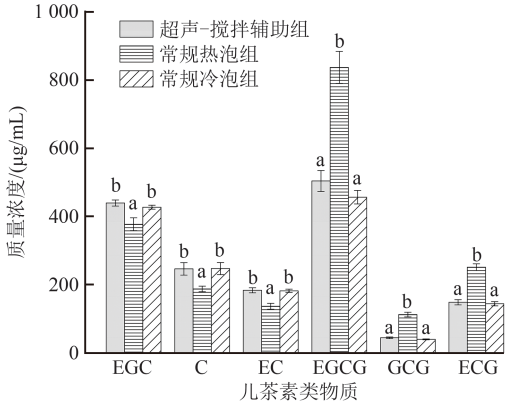
组别	总多酚质量浓度/（mg/mL）	总游离氨基酸质量浓度/（mg/mL）	茶氨酸质量浓度/（mg/mL）
超声-搅拌辅助组	1.29±0.01^b	0.97±0.00^c	0.54±0.01^c
常规热泡组	1.67±0.03^c	0.86±0.01^a	0.44±0.01^a
常规冷泡组	1.17±0.01^a	0.92±0.00^b	0.49±0.01^b

注：同列不同字母表示差异显著，$P<0.05$。

留了冷萃工艺的低咖啡因优势。因此，超声-搅拌辅助工艺制备的冷萃绿茶品质更佳，可大幅缩短萃取时间。

2.1.2　茶汤中儿茶素类物质分析

由图1可知，常规热泡组中儿茶素类物质质量浓度高于常规冷泡组，与总多酚分析结果一致。其中，非酯型儿茶素（C、EC、EGC）在冷泡组（尤其是超声-搅拌辅助组）中的质量浓度更高，而酯型儿茶素（EGCG、GCG）在常规热泡组中更高，表明酯型儿茶素因结构复杂、疏水性强，在低温下溶出率较低[21]，苦涩味更重，与其他研究结果一致[22-24]。超声-搅拌辅助组与常规冷泡组的儿茶素组成相似，但超声-搅拌辅助组的EGCG质量浓度提升至502.72 μg/mL，较常规冷泡组提升了10.98%，这可能是由超声空化引起的局部升温及辅助水化溶解作用引起的[25]。因此，超声-搅拌辅助冷泡既保留了茶汤的清爽风味，又提升了关键儿茶素类物质质量浓度；而常规冷泡提取效率较低，不利于儿茶素类物质充分释放。



同一物质不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。

图1　不同茶汤中儿茶素类物质质量浓度

Fig. 1　Mass concentrations of catechins in different tea infusions

2.2　不同茶汤的抗氧化能力分析

自由基清除能力是评价产品抗氧化能力的重要指标之一[26]。作者以ABTS$^+$自由基清除率和DPPH自由基清除率为评价指标，分析3种茶汤的抗氧化能力，见图2。结果表明，常规热泡组的抗氧化能力最强，这可能是由于其EGCG质量浓度更高。EGCG具有多个酚羟基，可以作为氢供体与自由基反应，从而清除自由基、减少氧化损伤[27]。另外，超声-搅拌辅助组比常规冷泡组具有更强的抗氧化活性，这可能与超声-搅拌辅助作用对儿茶素类物质尤其是具有更强抗氧化活性的酯型儿茶素具有辅助提取效果，从而增强了其抗氧化能力。

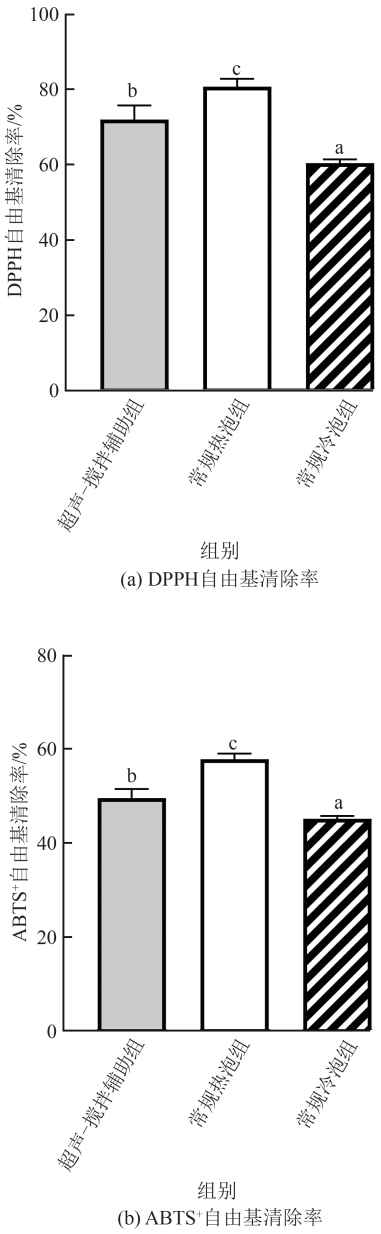


图2　不同茶汤的抗氧化能力比较

Fig. 2　Comparison of antioxidant capacity of different tea infusions

2.3　茶汤中挥发性物质分析

2.3.1　茶汤中挥发性物质质量浓度比较

超声-搅拌辅助组、常规热泡组、常规冷泡组的茶汤中分别检测到45、41、43种发挥性物质，见表3。不同组别的挥发性物质数量及质量浓度见图3。从挥发性物质的质量浓度来看，超声-搅拌辅助制

备的冷泡绿茶具有更高质量浓度的酯类化合物和醛类化合物。此外，超声-搅拌辅助组检测出的化合物种类最多，表明超声-搅拌辅助制备的冷泡绿茶香气丰富度更好。

表3 不同茶汤的挥发性物质质量浓度与气味阈值

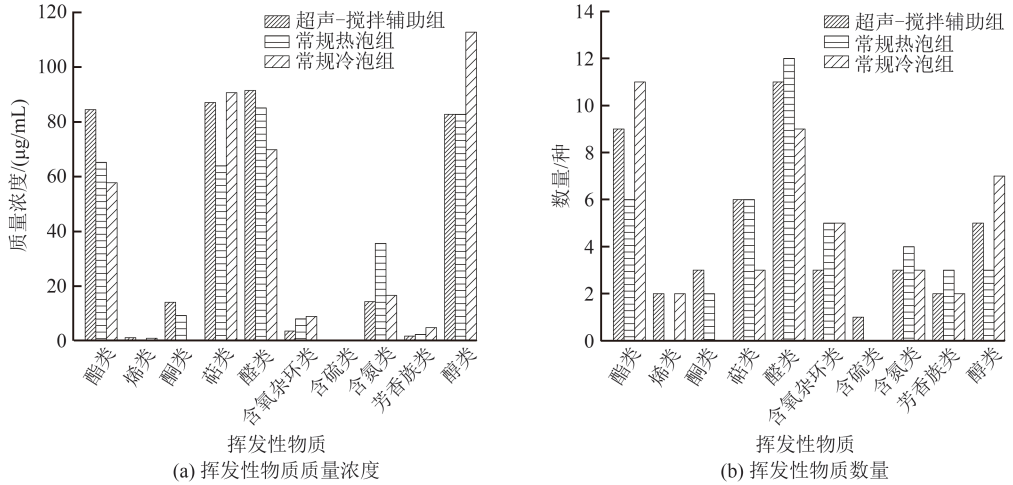
Table 3 Mass concentrations and odor thresholds of volatile compounds in different tea infusions

化合物种类	化合物名称	CAS号	RI	质量浓度/(μg/mL)			气味阈值/(μg/mL)
				超声-搅拌辅助组	常规热泡组	常规冷泡组	
酯类	乙酸乙酯	141-78-6	N/A	7.82±0.99	N.D.	19.89±5.42	10
	癸酸甲酯	110-42-9	1 579	5.04±0.64	N.D.	N.D.	N.F.
	水杨酸甲酯	119-36-8	1 735	2.21±0.13	1.01±0.14	1.16±0.50	60
	棕榈酸甲酯	112-39-0	N/A	6.87±0.89	4.34±1.34	N.D.	4 000 000
	乙酸叶醇酯	3681-71-8	1 295	7.86±0.70	N.D.	4.73±1.58	750
	正戊酸-(*Z*)-3-己烯酯	35852-46-1	1 454	8.37±3.05	17.92±5.26	8.29±1.32	60
	顺-3-己烯基丁酯	16491-36-4	1 444	9.41±2.93	13.04±6.37	1.68±0.10	500
	4-己烯-1-己酸酯	88552-98-1	1 640	3.22±0.26	N.D.	1.05±0.21	N.F.
	正己酸乙烯酯	3050-69-9	1 303	33.40±17.51	15.01±1.80	10.79±1.16	N.F.
	己酸叶醇酯	31501-11-8	1 640	N.D.	13.67±1.30	5.84±1.80	195
	乙酸甲酯	79-20-9	N/A	N.D.	N.D.	2.21±0.50	5
	乙酸丁酯	123-86-4	1 050	N.D.	N.D.	0.46±0.21	200
	2-戊酸甲酯	2177-77-7	1 681	N.D.	N.D.	1.44±0.17	N.F.
烯类	苯乙烯	100-42-5	1 224	0.58±0.27	N.D.	0.60±0.16	120
	螺[2.4]庚-4,6-二烯	765-46-8	1 009	0.55±0.05	N.D.	0.30±0.10	N.F.
酮类	*β*-紫罗兰酮	79-77-6	1 907	5.90±0.56	8.82±0.78	N.D.	N.F.
	1-辛烯-3-酮	4312-99-6	1 278	4.33±0.56	N.D.	N.D.	10
	3,5-辛二烯-2-酮	30086-02-3	1 491	3.80±0.35	3.39±0.26	N.D.	N.F.
萜类	芳樟醇	78-70-6	1 531	78.64±5.48	58.77±4.18	88.25±5.36	10
	反式-橙花叔醇	40716-66-3	N/A	3.36±1.27	1.06±0.14	1.25±0.13	N.F.
	茚澄茄油烯	29837-12-5	1 754	0.52±0.07	0.29±0.05	N.D.	N.F.
	柠檬烯	5989-27-5	1 154	3.01±0.21	2.13±0.33	N.D.	34
	异长叶烯	19912-67-5	N/A	0.24±0.01	0.13±0.00	N.D.	N.F.
	α-紫罗酮	127-41-3	1 821	1.02±0.16	1.37±0.13	N.D.	N.F.
	β-罗勒烯	13877-91-3	1 230	N.D.	N.D.	0.86±0.11	34 000
醛类	2-甲基丁醛	96-17-3	N/A	3.12±0.76	4.06±0.39	12.36±2.29	16
	己醛	66-25-1	1 054	25.45±1.80	22.11±1.35	22.92±11.38	20
	壬醛	124-19-6	1 371	15.98±2.52	10.22±2.39	6.72±1.35	4.25
	苯甲醛	100-52-7	1 481	6.49±0.56	7.37±0.67	3.35±1.31	50
	β-环柠檬醛	432-25-7	1 587	1.33±0.11	0.94±0.07	0.36±0.13	3 000
	异戊醛	590-86-3	N/A	2.39±0.35	2.57±0.23	2.02±0.80	8
	3-糠醛	498-60-2	1 428	0.38±0.04	0.37±0.09	0.32±0.06	N.F.
	(*Z*)-2-庚烯醛	57266-86-1	1 293	8.44±0.65	N.D.	N.D.	150
	(*E*)-2-辛烯醛	2548-87-0	1 399	4.84±0.92	6.63±0.97	N.D.	61
	2,2-二甲基戊醛	14250-88-5	1 039	0.09±0.01	N.D.	0.02±0.01	N.F.
	2,4-二甲基苯甲醛	15764-16-6	1 691	N.D.	0.20±0.02	N.D.	N.F.
	正戊醛	110-62-3	944	22.68±3.27	7.87±0.80	20.07±1.46	8
	庚醛	111-71-7	1 149	N.D.	9.04±0.70	N.D.	33
	(*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛	4313-03-5	1 434	N.D.	13.45±1.24	N.D.	3.2
	异丁醛	78-84-2	N/A	N.D.	N.D.	1.27±0.37	0.7

续表

化合物种类	化合物名称	CAS号	RI	质量浓度/(μg/mL)			气味阈值/(μg/mL)
				超声-搅拌辅助组	常规热泡组	常规冷泡组	
含氧杂环类	二氢芳樟醇	29957-43-5	1 589	N.D.	N.D.	5.43±0.80	110
	氧化芳樟醇(吡喃)	39028-58-5	1 740	1.10±0.06	1.06±0.03	0.86±0.15	N.F.
	氧化芳樟醇	5989-33-3	1 422	1.01±0.11	N.D.	0.83±0.08	100
	2-戊基呋喃	3777-69-3	1 205	1.43±0.20	5.34±0.56	1.22±0.14	1 000
	2-乙基呋喃	3208-16-0	920	N.D.	1.04±0.10	0.53±0.16	N.F.
	2-丁基呋喃	4466-24-4	1 100	N.D.	0.24±0.02	N.D.	N.F.
	2-(2-戊烯基)呋喃	70424-14-5	1 277	N.D.	0.29±0.02	N.D.	N.F.
含硫类	二甲基硫	75-18-3	N/A	0.09±0.01	N.D.	N.D.	0.3
含氮类	2-乙基-5-甲基吡嗪	13360-64-0	1 364	1.90±0.08	2.72±0.05	N.D.	10
	3-乙基-2,5-甲基吡嗪	13360-65-1	1 420	8.09±1.04	26.24±8.50	7.18±0.52	25
	茶吡咯	2167-14-8	1 571	4.25±0.56	4.27±0.35	4.43±0.69	6 500
	吲哚	120-72-9	N/A	N.D.	2.23±0.08	4.93±0.48	500
芳香族类	苯酚	108-95-2	1 960	N.D.	N.D.	0.14±0.01	5 500
	去氢白菖烯	483-77-2	1 801	1.44±0.13	1.37±0.02	N.D.	N.F.
	二去氢菖蒲烯	21391-99-1	1 881	0.27±0.03	0.28±0.03	N.D.	N.F.
	1-甲基萘	90-12-0	1 804	N.D.	0.67±0.07	N.D.	N.F.
	萘	91-20-3	1 694	N.D.	N.D.	4.65±0.18	50
醇类	正戊醇	71-41-0	1 241	2.47±0.40	2.23±0.22	3.56±0.28	400
	2-乙基己醇	104-76-7	1 475	9.70±2.96	N.D.	8.28±3.20	N.F.
	正辛醇	111-87-5	1 543	32.35±2.89	39.97±3.60	24.82±2.12	22
	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	1 435	27.54±2.60	18.47±1.09	31.93±2.12	5
	正己醇	111-27-3	1 340	10.44±1.25	N.D.	39.35±2.26	200
	1-丁醇	71-36-3	1 128	N.D.	N.D.	3.33±1.03	2 000
	(*Z*)-3-己烯-1-醇	928-96-1	1 366	N.D.	N.D.	1.16±0.26	50

注：N. D. 表示未检出；N/A表示未计算得到相关RI；N. F. 表示未从香气描述数据库中得到该化合物的香气阈值。



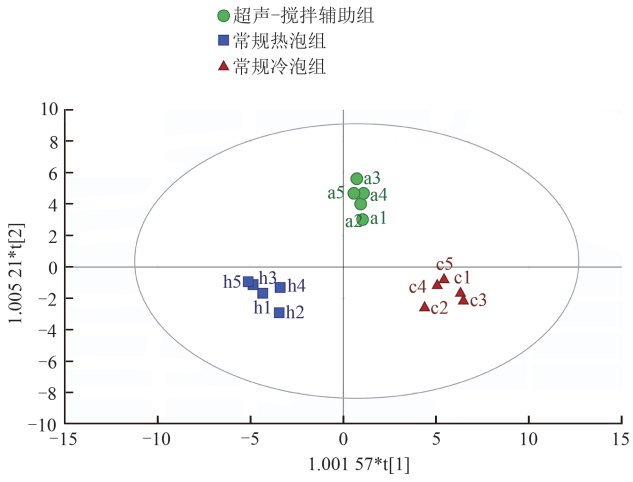
(a) 挥发性物质质量浓度　(b) 挥发性物质数量

图3　不同茶汤中挥发性物质质量浓度与数量

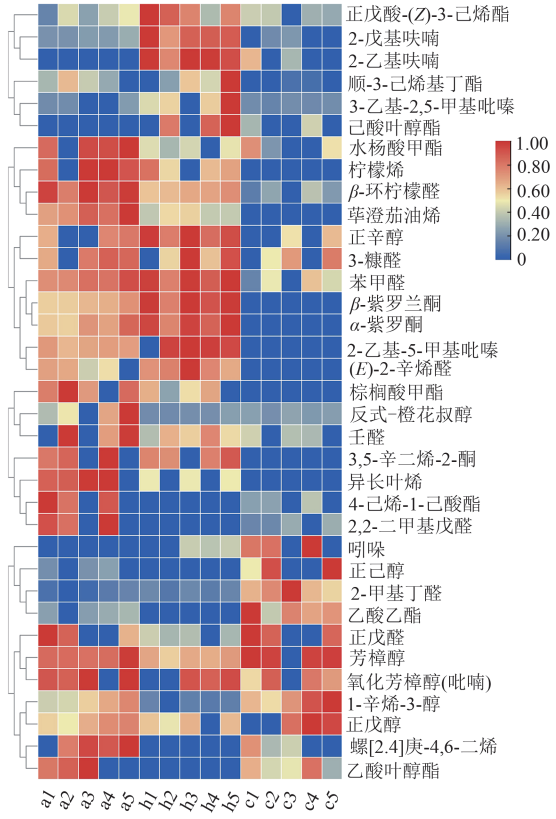
Fig. 3　Mass concentrations and number of volatile compounds in different tea infusions

不同方法制备茶汤的挥发性物质的OPLS-DA得分见图4。模型的R_X^2=0.679、R_Y^2=0.952、Q^2=0.843，可信度高。依据变量投影重要性(VIP)>1[27]共筛选出35种差异挥发性物质。VIP>1的化合物

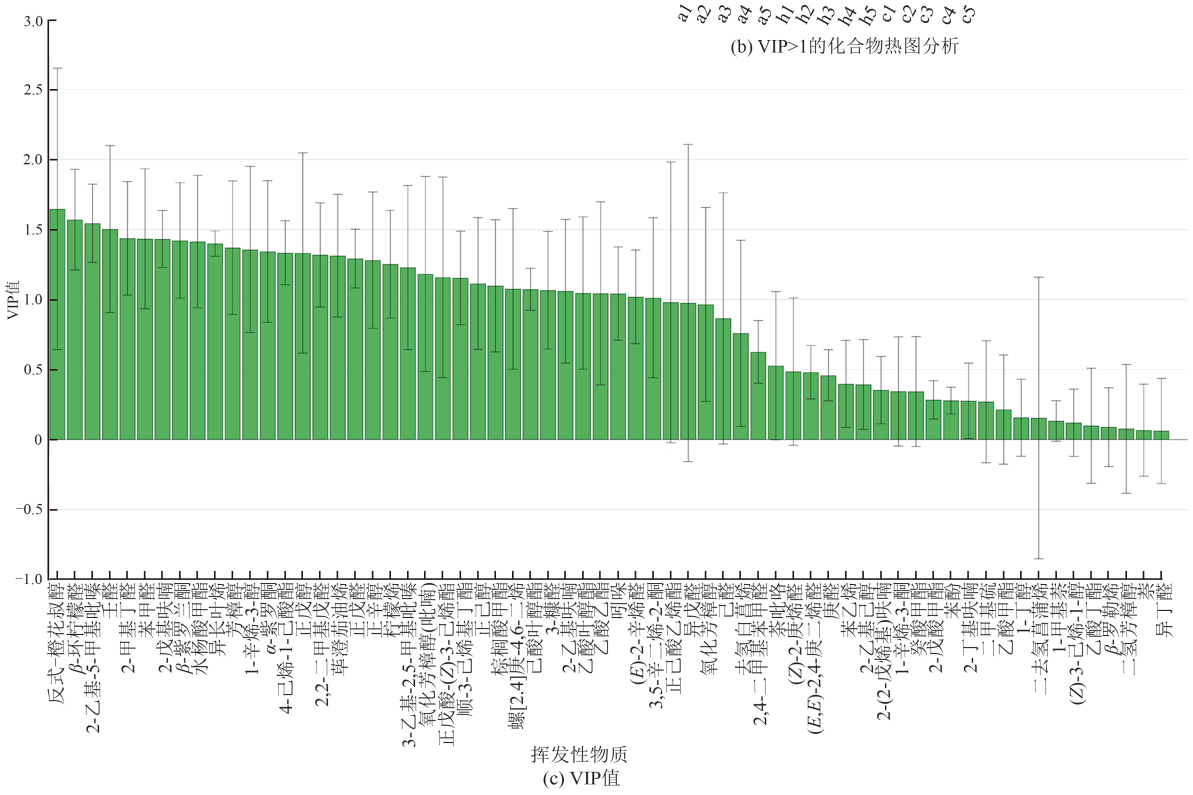
热图分析见图4(b),其中常规热泡组中含氧杂环类(如2-戊基呋喃等)质量浓度较高,这可能是源于高温下的多糖分解和美拉德反应[28];超声-搅拌辅助组中不饱和键化合物(如异长叶烯、反式-橙花叔醇、壬醛等)质量浓度较高,避免了高温氧化[29]。与常规热泡组相比,常规冷泡组富含低相



(a) OPLS-DA得分图



(b) VIP>1的化合物热图分析



(c) VIP值

图 4　不同茶汤中挥发性物质的OPLS-DA结果

Fig. 4　OPLS-DA results of volatile compounds in different tea infusions

对分子质量的青草香化合物（如正己醇、正戊醛等）[30]，但也伴随着不良风味物质（2-甲基丁醛、吲哚）的产生；超声-搅拌辅助组则含有更高质量浓度的酯类、醛类、酮类等，这得益于超声促进脂质氧化降解及机械辅助提取[31]。综上，超声-搅拌辅助冷萃既规避了高温对特征香气物质的氧化破坏，又避免了长时间冷泡导致的不良风味积累，赋予了茶汤更丰富的花香与果香。

2.3.2　OAV值比较

茶汤的香气不仅受各挥发性物质质量浓度的影响，还受其OAV值的影响，通常认为OAV>1的挥发性物质对茶汤香气具有显著贡献。3组茶汤中OAV>1的挥发性物质及其香气描述见表4。超声-搅拌辅助组、常规热泡组和常规冷泡组中分别有6、7、7种挥发性物质的OAV值>1。另外，这些挥发性物质可被分为三大香气，即青草香、果香和花香；通过将挥发性物质按香型分类可以更好地区别各冲泡方式下的茶汤香气特征。结果表明，3组茶汤中青草香均较明显，但冷泡组（尤其是超声-搅拌辅助组）中1-辛烯-3-醇的OVA值更高，这是由于低沸点热敏性化合物在低温下更容易保留[32]。在果香挥发性物质方面，乙酸乙酯仅见于常规冷泡组，正戊醛存在于2组冷萃组中，而壬醛在超声-搅拌辅助组中具有更高的OAV值，表明其果香感知更强。在花香挥发性物质方面，芳樟醇在2组冷萃组中感知更强，说明冷泡能有效保留绿茶的花香属性。此外，焙烤香仅出现在常规热泡组，这是由于高温下样品会发生美拉德反应[33]。综上，超声-搅拌辅助冷泡制备的冷萃茶保留了常规冷泡茶的特征香气，且增强了部分香气化合物（如1-辛烯-3-醇、壬醛、正辛醇等）的感知。

表4　不同茶汤中OAV值>1的挥发性物质

Table 4　Volatile compounds with OAV values>1 in different tea infusions

香型	化合物名称	OAV值			香气描述
		超声-搅拌辅助组	常规热泡组	常规冷泡组	
青草香	1-辛烯-3-醇	5.51^{b}	3.69^{a}	6.39^{b}	青草香、蘑菇香
	己醛	1.27^{a}	1.11^{a}	1.15^{a}	叶香、青草香、果香
果香	乙酸乙酯	<1	<1	1.99	菠萝香、甜香、果香
	壬醛	3.76^{c}	2.40^{b}	1.58^{a}	柑橘香、青柠香
	正戊醛	2.85^{a}	<1	2.51^{a}	浆果香、麦芽香
花香	正辛醇	1.52^{b}	1.82^{c}	1.13^{a}	玫瑰香、青草香
	芳樟醇	7.86^{b}	5.88^{a}	8.83^{b}	玫瑰香、青草香
焙烤香	(*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛	<1	4.20	<1	榛子香、肉桂香
	3-乙基-2,5-甲基吡嗪	<1	1.05	<1	烘烤香、坚果香

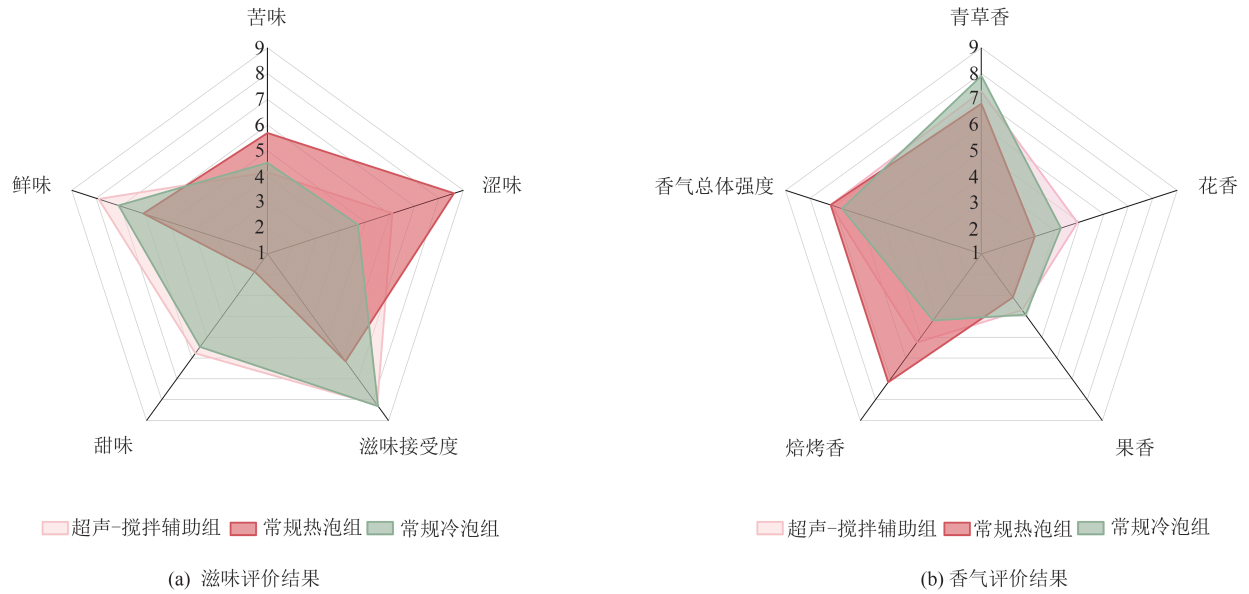
注：同行不同字母表示差异显著，$P<0.05$。

2.4　感官评价分析

不同茶汤的感官评价结果见图5。在滋味上，超声-搅拌辅助组的苦味、涩味明显弱于常规热泡组，这是因为常规热泡组的多酚和咖啡因质量浓度较高，使其苦涩味较重，降低了其接受度[34]；而超声-搅拌辅助组通过协调多酚、游离氨基酸和咖啡因的质量比，获得更高的总体可接受度。与常规冷泡组相比，超声-搅拌辅助组的儿茶素和涩味较重，但游离氨基酸质量浓度同步提高，酚氨比保持平衡，总体可接受度与常规冷泡组相当。

在香气上，超声-搅拌辅助组在青草香、花香、果香方面显著优于热泡茶，与OAV分析结果一致。热泡茶虽有较高质量浓度的芳樟醇等特征香气物质，但苦涩味会抑制其香气感知[35]，且焙烤香更明显。与常规冷泡组相比，超声-搅拌辅助组的香气总体强度更高，并保留了冷泡茶的青草香、花香、果香特征，同时因超声辅助促进了水溶性较低的焙烤香化合物（如氧化芳樟醇、2-乙基-5-甲基吡嗪）的溶出，导致焙烤香也较强。

综上，超声-搅拌辅助冷萃绿茶在滋味上平衡



(a) 滋味评价结果　　(b) 香气评价结果

图 5　不同茶汤的感官评价结果

Fig. 5　Sensory evaluation results of different tea infusions

性及接受度更高，在香气上兼具冷泡茶特征，感官品质较优。

3　结论

作者基于超声-搅拌辅助工艺研发出一种兼具优良感官和功能活性的冷萃绿茶。结果表明，超声-搅拌辅助工艺提高了多酚、游离氨基酸和茶氨酸质量浓度，保留了常规冷泡茶低酚氨比的优势。超声-搅拌辅助制备的冷萃绿茶中各类儿茶素的分布与常规冷泡茶相当，且提高了 EGCG 质量浓度。抗氧化能力结果表明，超声-搅拌辅助提取得到的冷萃绿茶具有更强的抗氧化能力。通过 GC-TOF-MS 和 OPLS-DA 模型分析，共得到 35 种 VIP>1 的挥发性物质。另外，超声-搅拌辅助冷泡茶相较于常规热泡茶保留了原有的清新香气，而相较于常规冷泡茶丰富了其酯类、醛类、酮类物质，使茶汤具有更强的花香、果香特征，也降低了长时间低温冲泡后一些风味不佳化合物（如 2-甲基丁醛、吲哚等）的积累。另外，超声-搅拌辅助得到的冷萃绿茶保留了常规冷泡茶的特征香气属性，并增强了部分香气化合物（如 1-辛烯-3-醇、壬醛、正辛醇等）的香气感知。感官评价表明，该工艺得到的冷萃绿茶具有更佳的感官属性。本研究采用超声-搅拌辅助冷泡制备的冷萃绿茶具有良好的应用前景，为高品质冷萃茶的高效制备提供了参考。

参考文献

[1] 范霞，杨恒明，陈荣顺. 基于顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用法、电子鼻和电子舌技术分析绿茶饮料的风味物质[J]. 南京农业大学学报，2023，46(5)：960-974.
FAN X，YANG H M，CHEN R S. Analysis of flavor substances in green tea beverages detected by HS-SPME/GC-MS coupled with electronic nose and electronic tongue technology [J]. Journal of Nanjing Agricultural University，2023，46(5)：960-974.(in Chinese)

[2] 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.(in Chinese)

[3] SONG Y C，BI X F，ZHOU M，et al. Effect of combined treatments of ultrasound and high hydrostatic pressure processing on the physicochemical properties，microbial quality and shelf-life of cold brew tea[J]. International Journal of Food Science & Technology，2021，56(11)：5977-5988.

[4] LIN S D，YANG J H，HSIEH Y J，et al. Effect of different brewing methods on quality of green tea[J]. Journal of Food Processing and Preservation，2014，38(3)：1234-1243.

[5] MONOBE M. Health functions of compounds extracted

in cold-water brewed green tea from *Camellia sinensis* L.[J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 2018, 52(1):1-6.

[6] CHIANG S H, TSOU M F, CHANG C Y, et al. Physicochemical characteristics, sensory quality, and antioxidant properties of Paochung tea infusion brewed in cold water[J]. International Journal of Food Properties, 2020,23(1):1611-1623.

[7] RAGHUNATH S, MALLIKARJUNAN K. Optimization of ultrasound-assisted extraction of cold-brewed black tea using response surface methodology[J]. Journal of Food Process Engineering,2020,43(11):e13540.

[8] ISOPESCU R D, JOSCEANU A M, MINCA I I, et al. Optimised Pu-erh tea infusion by experimental design and response surface methodology[J]. Revista de Chimie, 2018,69(2):310-317.

[9] LÓPEZ G G, BROUSSE M M, LINARES A R. Kinetic modelling of total phenolic compounds from *Ilex paraguariensis* (St. Hil.) leaves: conventional and ultrasound assisted extraction[J]. Food and Bioproducts Processing,2023,139:75-88.

[10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 茶叶感官审评方法:GB/T 23776—2018[S]. 北京:中国标准出版社,2018.

[11] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. 茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法:GB/T 8313—2018[S]. 北京:中国标准出版社,2018.

[12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 茶 游离氨基酸总量的测定:GB/T 8314—2013[S]. 北京:中国标准出版社,2018.

[13] 许伟,彭影琦,张拓,等. 绿茶加工中主要滋味物质动态变化及其对绿茶品质的影响[J]. 食品科学,2019,40(11):36-41.
XU W,PENG Y Q,ZHANG T,et al. Dynamic change of major taste substances during green tea processing and its impact on green tea quality[J]. Food Science,2019,40(11):36-41.(in Chinese)

[14] 王力. 适合工业化制备茶叶儿茶素EGCG的方法及提高EGCG生物利用度的研究[D]. 无锡:江南大学,2021.

[15] WANG L,XU R J,HU B,et al. Analysis of free amino acids in Chinese teas and flower of tea plant by high performance liquid chromatography combined with solid-phase extraction[J]. Food Chemistry, 2010, 123(4): 1259-1266.

[16] 何欢欢,宋静茹,卢凤来,等. 干燥方法对罗汉果多糖结构及抗氧化活性的影响[J]. 食品与发酵工业,2025,51(17):223-231.
HE H H, SONG J R, LU F L, et al. Effects of drying methods on structure and antioxidant activities of polysaccharides extracted from *Siraitia grosvenorii*[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(17): 223-231.(in Chinese)

[17] 梁轶琳,张灵枝,戴浩民,等. HS-SPME-GC-MS分析武夷岩茶呈香挥发性物质[J]. 食品与生物技术学报,2024,43(5):110-121.
LIANG Y L,ZHANG L Z,DAI H M,et al. Analysis of aroma volatile compounds in Wuyi rock tea based on HS-SPME-GC-MS[J]. Journal of Food Science and Biotechnology,2024,43(5):110-121.(in Chinese)

[18] CASTIGLIONI S, DAMIANI E, ASTOLFI P, et al. Influence of steeping conditions (time, temperature, and particle size) on antioxidant properties and sensory attributes of some white and green teas[J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2015, 66(5): 491-497.

[19] 吕毅,郭雯飞,倪捷儿,等. 茶氨酸的生理作用及合成[J]. 茶叶科学,2003,23(1):1-5.
LU Y, GUO W F, NI J E, et al. The bioactivities and synthesis of theanine[J]. Journal of Tea Science, 2003, 23(1):1-5.(in Chinese)

[20] 江秀琴,陈双林,凡莉莉,等. 茶园中苦竹扩张对茶树生长和茶叶品质的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2025,49(4):152-160.
JIANG X Q, CHEN S L, FAN L L, et al. The variation characteristics of tea leaf quality during the expansion of *Pleioblastus amarus* into tea plantations[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2025,49(4):152-160.(in Chinese)

[21] ZHOU J T, TIAN Q Q, MA Y Z, et al. Lipase-catalyzed selective esterification of catechin[J]. Materials Express, 2021,11(6):995-1000.

[22] LABBÉ D, TREMBLAY A, BAZINET L. Effect of brewing temperature and duration on green tea catechin solubilization: Basis for production of EGC and EGCG-enriched fractions [J]. Separation and Purification Technology,2006,49(1):1-9.

[23] YANG D J, HWANG L S, LIN J T. Effects of different steeping methods and storage on caffeine, catechins and gallic acid in bag tea infusions [J]. Journal of Chromatography A,2007,1156(1/2):312-320.

[24] RICHARD B，TOUBAL M，LE PAGE J F，et al. Ultrasound tests in a stirred vessel to evaluate the reconstitution ability of dairy powders[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies，2012，16：233-242.

[25] YASHIN A，YASHIN Y，XIA X Y，et al. Antioxidant activity of spices and their impact on human health：a review[J]. Antioxidants，2017，6(3)：70.

[26] WANG M L，ZHANG H L，YI L Z，et al. Stability and antioxidant capacity of epigallocatechin gallate in Dulbecco's modified eagle medium [J]. Food Chemistry，2022，366：130521.

[27] 吕永轩，刘华，陈星光，等. 市售纯米酒与大吟酿清酒风味品质差异分析[J]. 食品与生物技术学报，2024，43(8)：84-93.
LYU Y X，LIU H，CHEN X G，et al. Analysis of the flavor quality between commercial daiginjo and Junmai sake[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2024，43(8)：84-93.(in Chinese)

[28] JIN Y，ZHAO J，KIM E M，et al. Comprehensive investigation of the effects of brewing conditions in sample preparation of green tea infusions[J]. Molecules，2019，24(9)：1735.

[29] PELUCCHI M，RANZI E，FRASSOLDATI A，et al. Alkyl radicals rule the low temperature oxidation of long chain aldehydes[J]. Proceedings of the Combustion Institute，2017，36(1)：393-401.

[30] AN H M，OU X C，CHEN J H，et al. Preliminary exploration of acceptance and emotional responses to the key floral volatile compounds of Pu'er crude tea[J]. Food Frontiers，2024，5(4)：1765-1775.

[31] OLIVER SIMANCAS R，DÍAZ-MAROTO M C，ALAÑÓN PARDO M E，et al. Effect of power ultrasound treatment on free and glycosidically-bound volatile compounds and the sensorial profile of red wines [J]. Molecules，2021，26(4)：1193.

[32] YANG C，WANG Z J，XU M H，et al. The chemical basis of aroma/taste and color formation in green tea infusion during cold brewing revealed by metabolomics analysis[J]. Food Chemistry，2025，479：143788.

[33] FENG Z H，LI Y F，LI M，et al. Tea aroma formation from six model manufacturing processes[J]. Food Chemistry，2019，285：347-354.

[34] 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.

[35] GONÇALVES L，JESUS M，BRANDÃO E，et al. Interactions between beer compounds and human salivary proteins：insights toward astringency and bitterness perception[J]. Molecules，2023，28(6)：2522.