

提香温度对恩施玉露茶理化品质 及关键呈香成分的影响

饶玉莹^{1,2}, 桂安辉², 刘盼盼², 高士伟², 郑鹏程², 张强³, 叶飞^{2*}, 龚雨顺^{1*}

(1. 湖南农业大学茶学教育部重点实验室, 湖南长沙 410128)(2. 湖北省农业科学院果树茶叶研究所, 湖北武汉 430064)
(3. 恩施土家族苗族自治州农业科学院, 湖北恩施 445002)

摘要: 为探讨提香温度对恩施玉露茶品质影响, 采用感官审评、色差值测定、理化检测和顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱-嗅觉技术(HS-SPME-GC-MS-O), 比较提香时间 15 min 下不同提香温度(90、100、110、120 和 130 °C)所制恩施玉露的感官得分、色泽品质、理化成分和香气品质。研究发现: 随着提香温度升高, 所制恩施玉露干茶色泽由绿变黄($P<0.05$), 茶汤和叶底的亮度提升($P<0.05$); 茶多酚和儿茶素含量降低($P<0.05$), 120 °C 提香所制恩施玉露的水溶性糖和氨基酸含量相对较高且感官评价综合得分最高; 香气成分含量也相对较高, 二甲硫($2.57 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、芳樟醇($0.55 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、壬醛($2.37 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、庚醛($0.74 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、己醛($0.49 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、(+)-柠檬烯($0.39 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)等主要组分含量占其总香气成分含量 80.52%。GC-O 鉴定出香气强度值大于 1 的物质中有呈花香的芳樟醇、壬醛和(+)-顺式-橙花叔醇, 呈甜玉米味的二甲硫以及青味的己醛、庚醛、辛醛等。综合来看, 120 °C 提香有效提高了恩施玉露品质, 可以作为一种提高恩施玉露品质的有效技术手段。

关键词: 恩施玉露茶; 提香温度; 气相色谱-嗅觉技术; 关键呈香成分

文章编号: 1673-9078(2026)2-255-264

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.2.1755

Effects of Temperature on the Physicochemical Qualities and Key Aroma Components of Enshi Yulu Tea

RAO Yuying^{1,2}, GUI Anhui², LIU Panpan², GAO Shiwei², ZHENG Pengcheng²,
ZHANG Qiang³, YE Fei^{2*}, GONG Yushun^{1*}

(1. Key Laboratory of Tea Science of the Ministry of Education, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)
(2. Institute of Fruit and Tea, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China)
(3. Enshi Tujia and Miao Autonomous Prefecture Academy of Agricultural Sciences, Enshi 445002, China)

Abstract: The aroma and quality of Enshi Yulu tea are known to be affected by temperature; thus, sensory evaluation, colorimetry, physicochemical testing, and headspace solid-phase microextraction were coupled with gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS-O) to compare the sensory evaluation, color quality, physicochemical components, and aroma quality of Enshi Yulu tea prepared at different temperatures (90, 100, 110, 120, and 130 °C) for 15 min. The results showed that with the increase of temperature, the color of Enshi Yulu tea changed from green to yellow ($P<0.05$), and the brightness of the tea soup and the bottom of the leaves increased ($P<0.05$). The content of tea polyphenols and catechins decreased ($P<0.05$), and the water-soluble sugar and amino acid content of Enshi Yulu tea prepared at 120 °C was relatively high, and the comprehensive sensory evaluation score was the highest. The content of aroma components was also relatively high, and the main components accounted for 80.52% of the total aroma components, including dimethyl sulfide ($2.57 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), linalool ($0.55 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), nonanal ($2.37 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), heptanal ($0.74 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), hexanal ($0.49 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), (+)-limonene ($0.39 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), etc. GC-O identified substances with aroma intensity values greater than 1, including linalool, nonanal, and (+)-trans-nerolidol, which presented a sweet corn flavor, dimethyl sulfide, and green notes of hexanal, heptanal, and octanal, etc. Overall, 120 °C temperature effectively improved the quality of Enshi Yulu tea, and can be used as an effective technical means to improve the quality of Enshi Yulu tea.

引文格式:

饶玉莹, 桂安辉, 刘盼盼, 等. 提香温度对恩施玉露茶理化品质及关键呈香成分的影响[J]. 现代食品科技, 2026, 42(2): 255-264.

RAO Yuying, GUI Anhui, LIU Panpan, et al. Effects of temperature on the physicochemical qualities and key aroma components of Enshi Yulu tea [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(2): 255-264.

收稿日期: 2024-11-24; 修回日期: 2025-02-21; 接受日期: 2025-02-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1600804); 国家茶叶产业技术体系项目(CARS-19); 湖北省农业农村厅科技研发项目(HBZY2023B00505); 湖北省农业科技成果转化项目(2023BBB071); 湖北省区域创新体系项目(2025EIA046); 湖北省乡村振兴科技示范项目(2025EBA037)

作者简介: 饶玉莹(1998-), 女, 硕士, 研究方向: 茶叶加工与综合利用, E-mail: raoyuying0216@163.com

通讯作者: 龚雨顺(1974-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 茶叶加工与功能成分化学, E-mail: gongyushun@hunau.net; 共同通讯作者: 叶飞(1983-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 茶叶加工与综合利用, E-mail: yf421@163.com

spectrometry-olfactometry (HS-SPME-GC-MS-O) to examine the sensory attributes, color quality, physicochemical components, and aroma quality of tea subjected to different temperatures (90, 100, 110, 120, and 130 °C) for a fixed duration of 15 minutes. The results indicated the increased temperature led to a change in the green color of dry Enshi Yulu tea to yellow ($P<0.05$), an increase in the brightness of the tea infused leaves and dregs ($P<0.05$), and a decrease in the polyphenol and catechin contents ($P<0.05$). In particular, Enshi Yulu tea that was brewed at 120 °C had relatively higher water-soluble sugar and amino acid contents and the highest overall sensory score and aroma component content, with dimethyl sulfide ($2.57 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), linalool ($0.55 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), nonanal ($2.37 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), heptanal ($0.74 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), hexanal ($0.49 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), and (+)-limonene ($0.39 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) accounting for 80.52% of the total. Substances with an aroma intensity value of >1 were identified by GC-O, and included floral aroma compounds such as linalool, nonanal and (+)-*cis*-nerolidol, the sweet corn aroma compound, dimethyl sulfide, and green aroma compounds such as hexanal, heptanal, and octanal. Overall, the aroma enhancement at 120 °C effectively improved the quality of the tea and may thus serve as an effective technique for enhancing the quality of Enshi Yulu tea.

Key words: Enshi Yulu tea; aroma enhancement temperature; gas chromatography-mass-spectrometry-olfactometry; key aroma components

恩施玉露主要产于湖北省恩施土家族苗族自治州,是中国传统蒸青绿茶的代表。其干茶外形紧细圆直,色泽翠绿油润,汤色绿明,滋味鲜爽,清香持久,叶底绿亮^[1]。这些特征品质与加工工艺密切相关。其主要工艺包括摊青、蒸汽杀青、揉捻、初干、做形、干燥和提香。其中,蒸汽杀青和提香是恩施玉露“清香持久”品质形成的关键工序^[2]。

目前恩施玉露茶的蒸青工艺^[3,4]、做形工艺^[5]、机械化和连续化加工技术^[6]等技术相对成熟,为恩施玉露茶的色泽和外形品质特征奠定了良好的基础。提香工艺对茶叶品质也有重要的影响,有研究表明经过提香处理后的绿茶品质显著提高^[7]。提香的温度、时长、方式等是影响茶叶品质的重要因素,提香过程发生的糖苷类降解、脂肪酸氧化降解和美拉德反应等相关生化反应与提香温度密切相关^[8]。有学者采用变温滚炒结合高温足干提香工艺提高了绿茶香气品质,其中醇类和醛类香气成分相对含量显著增加^[9]。

香气是衡量恩施玉露茶品质的重要指标,目前市场上的恩施玉露茶的香气特征为清香持久,也得到了消费者认可,为了进一步地开拓市场,满足多元化需求,本试验在前期研究的基础上,采用感官审评、色差比较、理化成分测定等方法,并结合顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱-嗅觉技术(HS-SPME-GC-MS-O),比较不同提香温度对于恩施玉露理化品质影响,并筛选关键呈香成分,分析不同提香温度对恩施玉露的感官品质、茶叶色泽、理化品质和主要呈香成分的影响,以期为恩施玉露的定向精准加工提供理论基础和技术支持。

1 材料与方法

1.1 原料

以楮叶齐品种一芽一叶的鲜叶为原料,2024年3月27日采自湖北省恩施州农业科学院茶叶研究所的茶叶基地。

1.2 主要仪器设备

MF-50 水分快速测定仪,深圳深博瑞;UV-2550 紫外可见分光光度计,日本岛津公司;CM-5 色差计,日本柯尼卡美能达公司;2695 高效液相色谱仪、2998 PDA 检测器,美国 Waters 公司;SPME 手动进样器、50/30 μm DVB/CAR/PDMS 固相微萃取头,美国 Supelco 公司;7890A 气相色谱仪,5975C 质谱仪、HB-5MS(30 m $\times$ 0.32 mm,0.25 μm)弹性石英毛细管柱,美国 Agilent 公司;ODP3 闻香仪,德国 Gerstel 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 恩施玉露制备

按照以下流程进行加工:

鲜叶 $\rightarrow$ 摊青 $\rightarrow$ 蒸汽杀青(浙江上洋,汽热杀青机 6CSZ-65) $\rightarrow$ 揉捻(浙江上洋,揉捻机 6CRN-55) $\rightarrow$ 烘二青(浙江上洋,烘干机 6CHB-10) $\rightarrow$ 做形(日本川崎,精揉机 60K-S) $\rightarrow$ 干燥(浙江上洋,烘干机 6CHB-10) $\rightarrow$ 提香(福建佳友,烘焙机 JY-6CHZ-7B)

茶样含水率由水分快速测定仪(深圳深博瑞 MF-50)检测得出,见表 1。根据大生产提香时间与

预实验结果，选定在相同提香时间 15 min 条件下进行了不同的提香温度处理，提香温度分别为 90、100、110、120 和 130 ℃。最后以感官得分、茶叶色泽、理化成分和香气成分进行综合评价。

表 1 恩施玉露加工工序
Table 1 The Enshi Yulu processing procedure

工序	设备名称与型号	温度/℃	时间	含水率/%
摊放	自然摊放 2~4 cm	室温	8~12 h	70~72
蒸汽杀青	汽热杀青机 6CSZ-65	蒸汽温度 125~130, 热风温度 190~200	蒸汽杀青 70~73 s, 热风脱水 123~126 s	62~65
揉捻	揉捻机 6CRN-55	室温	70~90 min	—
烘二青	烘干机 6CHB-10	110~120	10~12 min	45~50
做形	精揉机 60K-S	100~110	40~50 min	10~14
干燥	烘干机 6CHB-10	80~90	40~50 min	8~10
提香	烘焙 JY-6HZ-7B	90~130	15 min	5~6

1.3.2 感官和理化品质分析

茶叶感官品质：采用 GB/T 23776-2018 方法对茶样进行感官审评^[10]，计算公式为：感官得分 = 外形 × 0.25 + 汤色 × 0.10 + 香气 × 0.25 + 滋味 × 0.30 + 叶底 × 0.10；茶多酚和儿茶素含量采用 GB/T 8313-2008 方法检测^[11]；游离氨基酸总量采用 GB/T 8314-2013 方法检测^[12]；可溶性糖含量采用蒽酮比色法；干茶、茶汤和叶底色泽：色差法测定（光源 D65，角度 4°），汤色检测采取 3 g 茶叶加 150 mL 沸水冲泡 4 min，过滤后用专用比色皿测定，获得茶汤色泽属性 L^* 、 a^* 、 b^* 值，分别代表汤色的明亮度、红绿色度、黄蓝色度。

1.3.3 HS-SPME-GC-MS/O 分析

香气成分：采用 HS-SPME-GC-MS 分析测定，首先，先准确称取 1.0 g 茶样放入顶空萃取瓶中并加入 50.0 mL 沸水，再加入 1.00 μL 的内标（0.862 g·mL⁻¹ × 10⁻⁵ 癸酸乙酯），然后将萃取头（试验前在 240 ℃ 下老化 15 min）插入到顶空萃取瓶中，在 60 ℃ 水浴中平衡 10 min，吸附 50 min 后取出并立即插入 GC 的进样口中，解吸附 6 min，同时启动仪器收集数据。

GC 条件：载气为高纯氮气，进样口温度 240 ℃，流量 1.0 mL·min⁻¹。色谱柱（DB-5MS，30 m × 0.25 mm × 0.32 μm）温度以 50 ℃ 保持 5 min，以 3 ℃·min⁻¹ 升至 180 ℃ 保持 2 min，然后以 10 ℃·min⁻¹ 升至 250 ℃ 保持 3 min。

MS 条件：电子电离能量为 70 eV；质量扫描范围为 50~600 u；离子源温度为 230 ℃；四极杆温度为 150 ℃；MS 传输线温度为 280 ℃。

GC-O 分析：载气为高纯氮气，氮气流量 1.45 mL·min⁻¹，加湿器流速为 12 mL·min⁻¹。嗅闻系统输出温度为 220 ℃，嗅闻出口温度为 240 ℃。分析方法：香气强度描述采用 5 点刻度法：0 表示未闻到；1 表示微弱；2 表示中等；3 表示较强；4 表示极强。嗅闻过程中记录保留时间、强度值和呈香描述。

1.4 数据处理

数据采用 Excel 初步处理，用 SPSS 26 进行单因素方差分析（ANOVA）， $P < 0.05$ 表示有显著差异，用小写字母表示，字母不同表示差异显著。

2 结果与讨论

2.1 不同提香温度处理恩施玉露的感官品质结果

比较不同提香温度处理恩施玉露的感官审评结果（图 1）显示：不同提香温度所制恩施玉露干茶外形均为 84 分，说明提香温度对其干茶外形影响不大；但随着提香温度的升高，干茶色泽得分逐渐降低，表明提香温度会影响干茶色泽品质的形成。提香温度对所制恩施玉露叶底品质影响较小，100、110 和 120 ℃ 提香的试样叶底得分均为 89 分，最低分为 90 ℃ 提香的（88 分）；茶汤色泽品质以 110 ℃ 提香处理的得分最高（92.5 分），100 和 120 ℃ 提香的次之（91.5 分），最低分为 130 ℃ 提香的（88.5 分）；香气和滋味得分先升后降，且都是以 120 ℃ 提香处理的得分最高（91.5 分和 91.5 分）。在加工过程中，高温作用会使茶叶色泽将由绿转黄^[13]，导致所制恩施玉露干茶色泽品质降低，但适当提高提香温度有利于恩施玉露香气和滋味相关成分的形成，改善其香气和滋味品质。综合比较发现：提香工艺以 120 ℃ 处理的恩施玉露感官综合品质最佳且得分最高（89.93 分）。

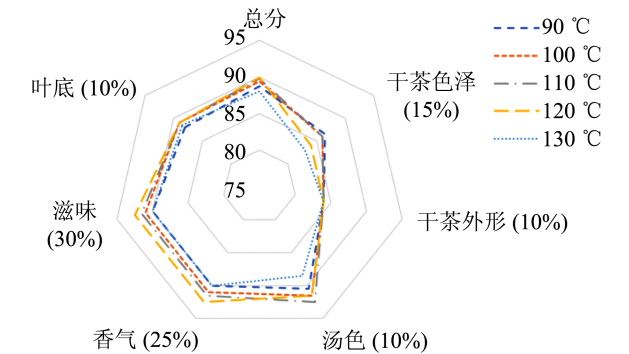


图 1 不同提香温度处理恩施玉露的感官审评结果
Fig.1 Results of sensory evaluation of Enshi Yulu tea at different aroma-enhancing temperature

2.2 不同提香温度处理恩施玉露的色泽品质结果

比较不同提香温度处理茶叶色泽结果（表2）发现：干茶亮度（ L^* ）以110℃提香的试样最高（ $P<0.05$ ），120和130℃提香的次之。恩施玉露色差值（ a/b^* ）为负值，代表黄蓝色度的 b^* 值为正值且逐渐增大（ b^* 值为正值表示颜色偏向黄色，为负值表示偏向蓝色），说明干茶色泽由绿转黄。在茶叶加工过程中，叶绿素a/b在高温作用下会被降解，导致茶叶色泽由绿转黄^[14]。茶汤的亮度以120℃提香的试样亮度最高；叶底色泽无显著性差异，亮度稍有升高，色差值降低，总色差变化不明显。综合色泽品质的检测结果发现，所制恩施玉露干茶色泽以90℃提香处理的最绿，升高提香温度干茶色泽逐渐由绿变黄；汤色以110℃提香所制试样的最佳，120℃提香的次之；叶底色泽以110和120℃提香试样的为佳，这与感官审评结果一致。试验结果表明升高提香温度后，恩施玉露的干茶色泽品质有所下降，但适当升高提香温度可提高其干茶亮度，汤色和叶底的色泽品质也有所提升，以110和120℃提香所制恩施玉露的综合色泽品质为佳。

2.3 不同提香温度处理恩施玉露的理化品质结果

比较不同提香温度处理恩施玉露理化结果发现：随着提香温度的升高，水浸出物和茶多酚含量（图2）总体呈下降趋势（ $P<0.05$ ），分别占干物质总量的32.95%~35.04%和19.15%~20.82%，与其他提香温度所制试样相比，120℃以上提香处理的试样其可溶性糖含量显著增加（ $P<0.05$ ），且氨基酸含量也升高（ $P<0.05$ ），120℃提香所制恩施玉露的氨基酸含量比110℃提香处理的增加了8.05%，且此时的可溶性糖（5.20%）和氨基酸含量（5.10%）最高。可

溶性糖、氨基酸和茶多酚等成分是茶叶滋味品质的重要物质，其中可溶性糖呈甜味，氨基酸是茶汤醇度的重要成分^[15-17]。氨基酸和还原糖在热力作用下会产生美拉德反应，该反应广泛存在于食品的加热或茶叶的加工过程中，对茶叶香气形成和茶汤滋味品质有重要贡献^[18]。咖啡碱呈苦涩味，随着提香温度的升高，所制恩施玉露的咖啡碱含量先显著降低后上升（ $P<0.05$ ），有研究表明部分咖啡碱可与酚类和氨基酸发生化学反应使茶汤鲜爽度增加，可减弱茶汤的苦涩感^[19]。

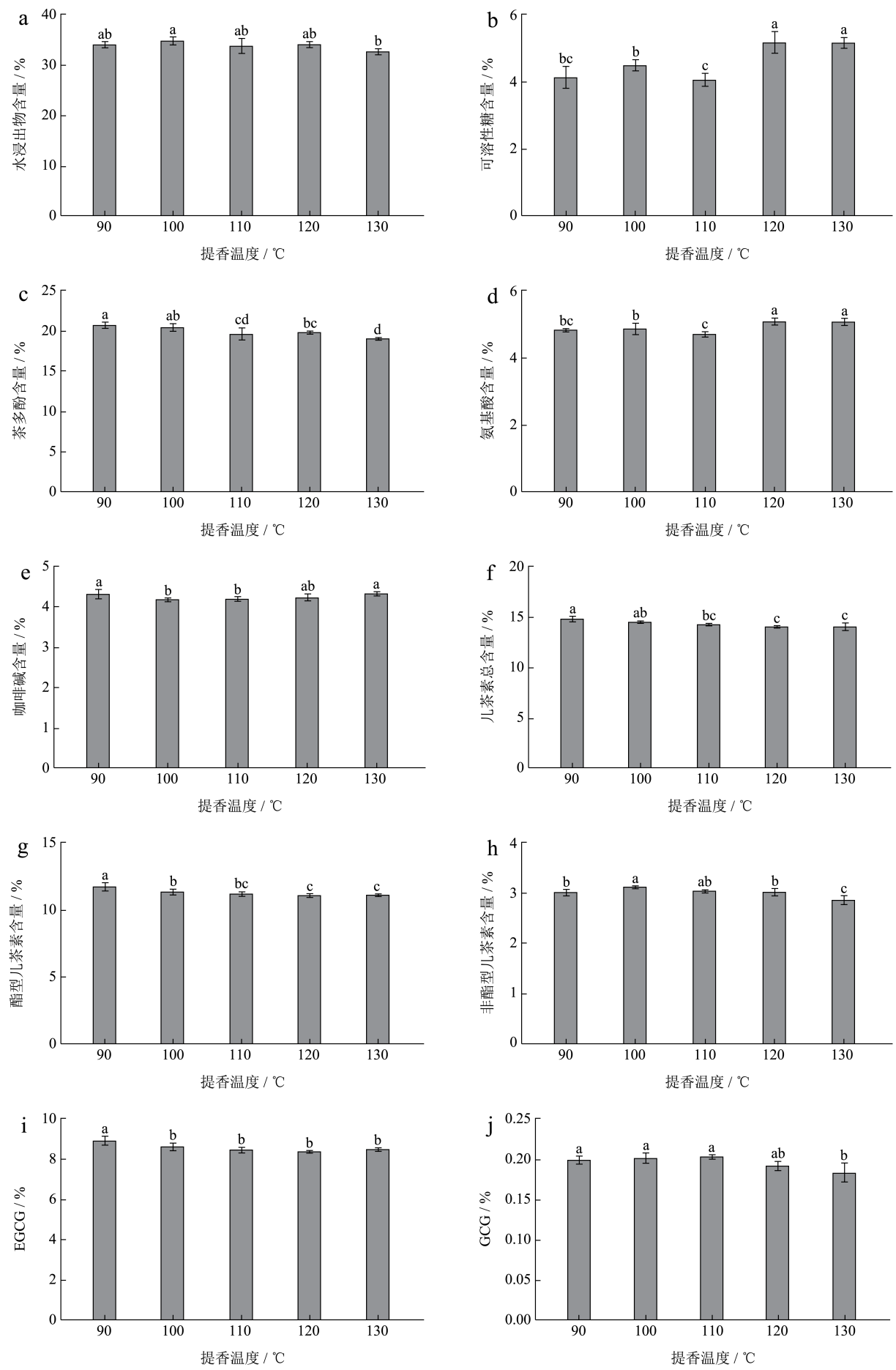
儿茶素是茶多酚类的主体物质，其中酯型儿茶素（EGCG、GCG、ECG和CG）苦涩味较强，非酯型儿茶素（EGC、GC、EC和C）滋味更醇和^[20,21]。比较提香试验的儿茶素结果，发现儿茶素总量（图2）明显减少（ $P<0.05$ ），升高提香温度降低了酯型儿茶素含量，非酯型儿茶素先升后降，其各成分含量变化如图2，其中GC和C等非酯型儿茶素明显下降（ $P<0.05$ ），EGCG和ECG等酯型儿茶素含量下降明显（ $P<0.05$ ）。酯型儿茶素呈苦涩味，其含量减少有利于提升恩施玉露醇和爽口的滋味。Guo等^[22]研究发现茶中多酚的形成和降解与儿茶素的非酶反应有关，包括酯型儿茶素的聚合和水解，最终影响茶叶内含物质和挥发物的形成。在茶叶加工过程中，儿茶素氧化产物邻醌能与半胱氨酸和谷胱甘肽类物质中的巯基结合，使茶中多酚类含量适量降低，茶汤滋味变得醇和，此外，儿茶素初级氧化产物邻醌可与氨基酸发生偶联氧化等反应能形成挥发性的香气成分，从而影响茶叶的香气品质^[23]。

综合以上结果表明，随着提香温度的升高，所制恩施玉露的可溶性糖含量显著增加，氨基酸含量先降后升，茶多酚和儿茶素总量减少，这些成分的含量变化直接影响茶汤的滋味品质。综合比较发现以120℃提香处理的恩施玉露品质相对较好，茶汤滋味品质得到改善，这与感官审评的结果相一致。

表 2 不同提香温度处理对恩施玉露茶叶色泽的影响

Table 2 Effects of different aroma-enhancing temperature on the color of Enshi Yulu tea									
处理 /℃	干茶色泽			茶汤色泽			叶底色泽		
	L^*	a/b^*	DE^*	L^*	a/b^*	DE^*	L^*	a/b^*	DE^*
90	26.00±0.33 ^c	-0.13±0.004 7 ^c	27.94±0.38 ^c	95.58±0.12 ^a	-0.22±0.001 4 ^{ab}	97.06±0.12 ^{ab}	42.73±0.37 ^a	-0.015±0.009 5 ^a	51.18±0.28 ^a
100	27.20±0.21 ^a	-0.12±0.005 3 ^{bc}	29.22±0.27 ^a	95.36±0.25 ^{ab}	-0.23±0.001 7 ^b	96.77±0.23 ^c	43.21±0.54 ^a	-0.017±0.002 0 ^a	51.10±1.06 ^a
110	27.23±0.15 ^a	-0.12±0.002 6 ^{bc}	29.26±0.15 ^a	95.31±0.055 ^b	-0.21±0.006 4 ^{ab}	96.91±0.059 ^{abc}	42.71±0.16 ^a	-0.013±0.001 4 ^a	51.02±0.27 ^a
120	26.30±0.60 ^{bc}	-0.11±0.012 ^b	28.31±0.66 ^{bc}	95.60±0.095 ^a	-0.22±0.016 ^{ab}	97.15±0.092 ^a	42.92±0.23 ^a	-0.017±0.0 ^a	51.80±0.20 ^a
130	26.71±0.06 ^{ab}	-0.077±0.003 7 ^a	28.87±0.16 ^{ab}	95.40±0.075 ^b	-0.21±0.003 1 ^a	96.85±0.051 ^{bc}	42.81±0.22 ^a	-0.005±0.003 8 ^a	51.40±0.35 ^a

注：小写字母表示 Duncan's 新复极差（SSR）在 $P<0.05$ 水平下的差异显著性，字母不同表示差异显著。



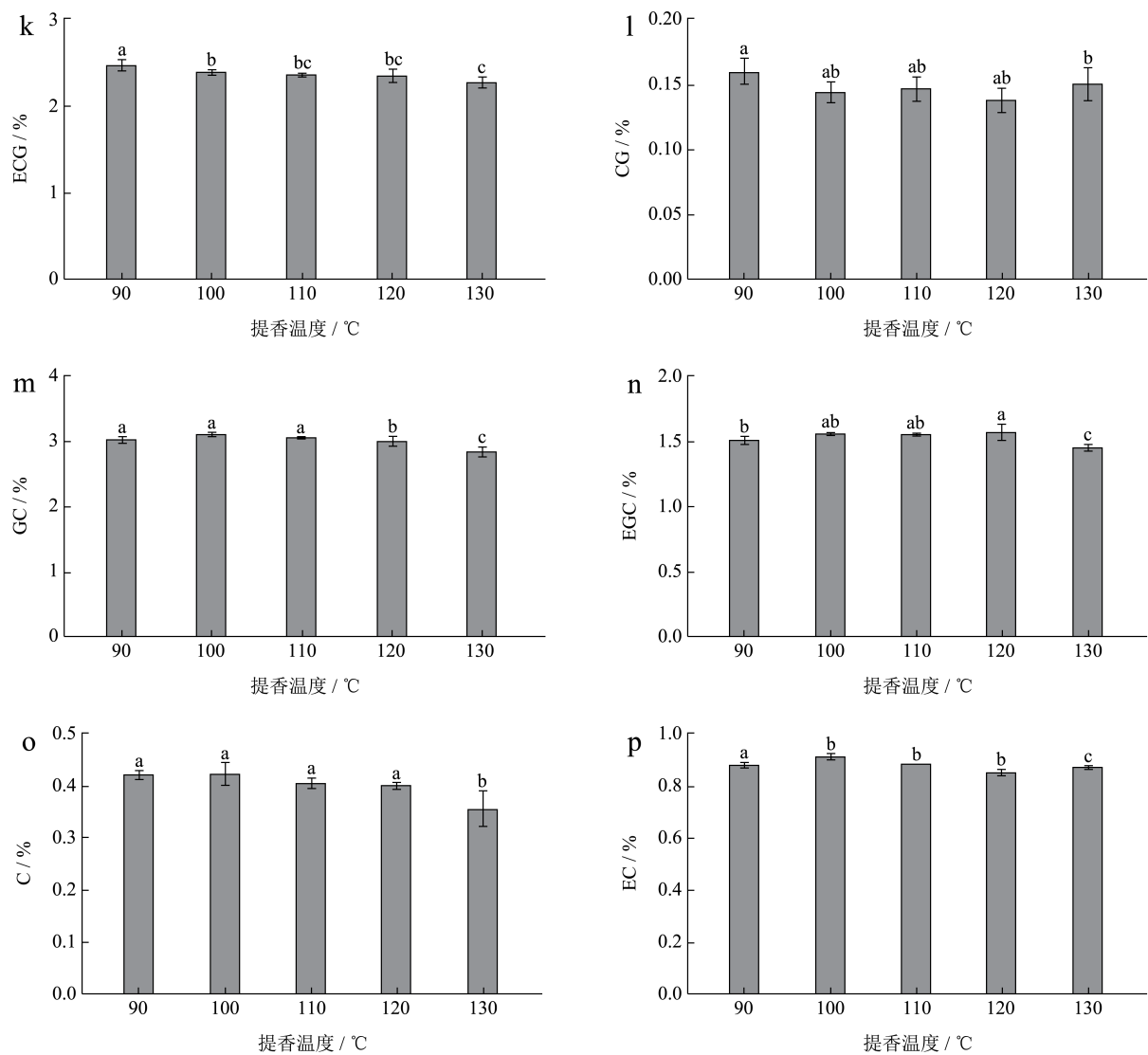


图2 不同提香温度处理恩施玉露各理化成分含量的变化

Fig.2 Variation of the physicochemical quality of Enshi Yulu tea at different aroma-enhancing temperature

2.4 不同提香温度处理恩施玉露的呈香成分分析

绿茶香气由多种挥发性化合物组成，这些化合物的种类和比例决定了绿茶的香气风味与品质，使其呈现出花香、果香、清香等风味特征。已有研究表明，蒸青绿茶的主要香气成分包括二甲硫、 β -紫罗兰酮、顺式茉莉酮、芳樟醇、壬醛、庚醛、异戊醛和(Z)-3-己烯醇等^[24]。部分研究^[25]发现恩施玉露的主要香气成分有芳樟醇、二甲硫、 β -紫罗兰酮、壬醛、萘、香叶醇、(Z)-3-己烯醇和(Z)-3-己酸己烯酯等。

本研究采用GC-MS技术分析不同提香温度所制试样，根据现有的研究结果^[26-28]，将主要香气成分分为醇类、醛类、酮类、烃类及其他类五大类。所制试样的总离子色谱图如图3所示，随着提香温度的升高，所制恩施玉露挥发性化合物存在一定变化，五个

样品之间的香气成分种类差异较小，但相对含量存在明显差异。不同提香温度处理试样的各香气种类相对含量如图4a~4e所示，醛类(47.55%~54.59%)、醇类(7.78%~10.70%)、酮类(3.28%~4.17%)、烃类(9.90%~13.93%)和其他类(17.18%~29.08%)，其中醛类、醇类和其他类相对含量较高，所制试样中醛类物质主要含呈青味的挥发性化合物，与不同提香温度所制其他试样相比，90 °C提香所制试样的醛类物质相对含量较高(54.59%)，120 °C提香的较低(47.55%)；醇类主要含有呈花香和甜味香气物质，其相对含量以110 °C提香试样的最高(10.70%)；其他类主要是含硫化化合物二甲硫，与其他所制试样相比，含硫化化合物相对含量以提香120 °C所制试样的较高(29.08%)。醛类和醇类中芳樟醇和壬醛呈花香且阈值较低，对茶叶香气品质有重要作用^[29]。其他类主要是被定义为绿茶

新茶香的二甲硫, 呈甜玉米气味^[30]。

在本次试验中, 所制恩施玉露试样的 GC-MS 结果显示其主要香气成分 20 种, 包括醇类 4 种、醛类 7 种、酮类 2 种、烃类 6 种及其他类 1 种 (表 3)。其中, 呈甜香和花香且含量较高的主要香气成分有芳樟醇、壬醛、二甲硫、 β -环柠檬醛和 (+)-顺式-橙花叔醇。芳樟醇含量在以 100 和 120 $^{\circ}\text{C}$ 提香时最高 ($0.55\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 壬醛 ($2.37\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、二甲硫 ($2.57\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、 β -环柠檬醛 ($0.11\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 (+)-顺式-橙花叔醇 ($0.21\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 的含量在提香 120 $^{\circ}\text{C}$ 时最高。在所制恩施玉露主要香气成分中, 醛类化合物中壬醛 (玫瑰花香)、庚醛 (青草味) 和 β -环柠檬醛 (柠檬香) 含量先升后降, 癸醛 (果香、青香) 和辛醛 (青味) 含量降低; 醇类物质中芳樟醇 (柑橘香、花香) 和雪松醇 (雪松木香) 的含量先升后降, 香梣醇 (蜂蜜气味) 含量相对较少, 沸点较低, 对香气贡献较小; 酮类中的 β -紫罗兰酮 (木香、果香) 是绿茶栗香特征成分之一, 其含量先升后降, 以 120 $^{\circ}\text{C}$ 提香的试样最高 ($0.20\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$); 其他类主要是含硫化合物二甲硫, 其含量也是先升后降, 在 120 $^{\circ}\text{C}$ 提香时含量最高 ($2.57\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)。随着提香温度的升高, 不同香气物质在提香过程中发生复杂的热化学反应, 醛类和酮类等挥发性物质含量显著增加。所制试样主要香气成分总含量先升高后降低 (图 4f), 120 $^{\circ}\text{C}$ 提香所制恩施玉露香气成分总含量最高, 其中二甲硫 ($2.57\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、芳樟醇 ($0.55\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、壬醛 ($2.37\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、庚醛 ($0.74\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、己醛 ($0.49\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、(+)-柠檬烯 ($0.39\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 等主要组分含量占其总香气成分含量的 80.52%。在茶叶加工过程中, 温度是调控形成茶叶香型的重要因素, 低沸点具青草或不愉快气味等香气成分在高温下因挥发而减少, 具有花香和烘炒香的香气物质增加^[31]。试验表明适当提高提香温度, 甜香型挥发性物质二甲硫和花香型芳樟醇、壬醛、 β -紫罗兰酮等香气成分含量增加, 提高了恩施玉露香气品质。

气相色谱-嗅觉测量技术 (GC-O) 是将气相色谱法与嗅觉检测相结合的气味鉴别技术, 主要用于鉴别特定气味活性化合物, 其鉴别出的挥发性物质通常被认定为该样品的关键香气成分。由表 4 可知, 通过 GC-O 嗅闻出所制恩施玉露的关键香气物质有 9 种, 其中花香 3 种, 青香 5 种, 甜香 1 种, 分别为芳樟醇 (柑橘香、花香)、(+)-顺式-橙花叔醇 (温和花香)、壬醛 (玫瑰花香)、己醛 (青味)、庚醛 (青草味)、辛醛 (青味)、癸醛 (青味)、(-)- α -萜荭茄油烯 (草本气味) 以

及二甲硫 (甜玉米味)。

其中香气成分含量及呈香强度较高的主要有芳樟醇、壬醛和二甲硫, 且随着提香温度的升高, 芳樟醇和壬醛的呈香强度先升高后降低, 在 110 和 120 $^{\circ}\text{C}$ 提香时呈香强度相对较高; 二甲硫呈香强度先降后升再降, 以 130 $^{\circ}\text{C}$ 提香试样的呈香强度最低。二甲硫具有类似甜玉米的气味, 是绿茶中重要的呈香成分, 在 120 $^{\circ}\text{C}$ 提香所制试样中的含量最高 (表 3) 且呈香强度最强, 对恩施玉露香气的形成具有显著贡献, 但二甲硫在高温条件下容易发生化学反应, 如分解或与其他化合物发生反应, 导致其在茶叶中的含量降低, 呈香强度减弱^[32]。芳樟醇是本次所制恩施玉露香气组分中呈香强度最高的挥发性物质, 具有明显的柑橘香、花香。壬醛主要呈玫瑰花香, 是呈香强度仅次于芳樟醇的花香型挥发性物质, 呈香强度随着温度的升高先升高后降低。现有相关研究表明茶叶中青味挥发性物质的含量会随加工温度升高挥发, 花香型挥发性物质含量增加, 但过高的温度也可能导致壬醛等香气成分的挥发或降解, 从而降低其含量影响其呈香强度^[33]。

综合以上结果发现, 恩施玉露在提香处理过程中, 主要呈青味的辛醛和癸醛呈香强度随着提香温度升高逐渐减弱, 呈青草味的庚醛呈香强度升高; 有类似甜玉米气味的二甲硫的呈香强度在以 90、100 和 120 $^{\circ}\text{C}$ 提香时相对较高; 呈现花香的芳樟醇、壬醛和 (+)-顺式-橙花叔醇等挥发性物质呈香强度先升后降, 且以 120 $^{\circ}\text{C}$ 提香所制恩施玉露的呈香强度相对较高。这些呈青味、甜香以及花香等多种香气活性物质, 共同赋予了恩施玉露清香带花香的气味特征。

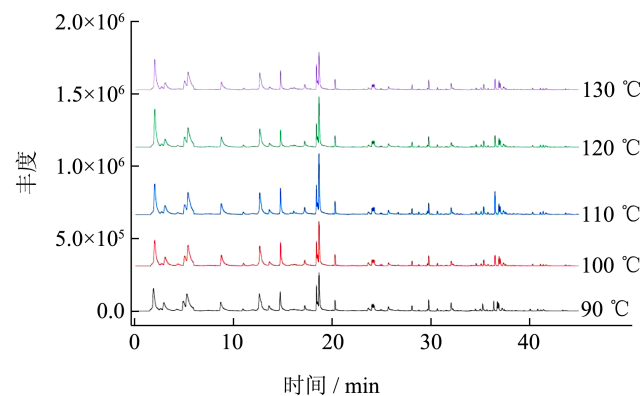


图 3 基于 SPME-GC-MS 不同提香温度处理恩施玉露的总离子流图

Fig.3 Total ion chromatogram of Enshi Yulu based on SPME-GC-MS at different aroma-enhancing temperature

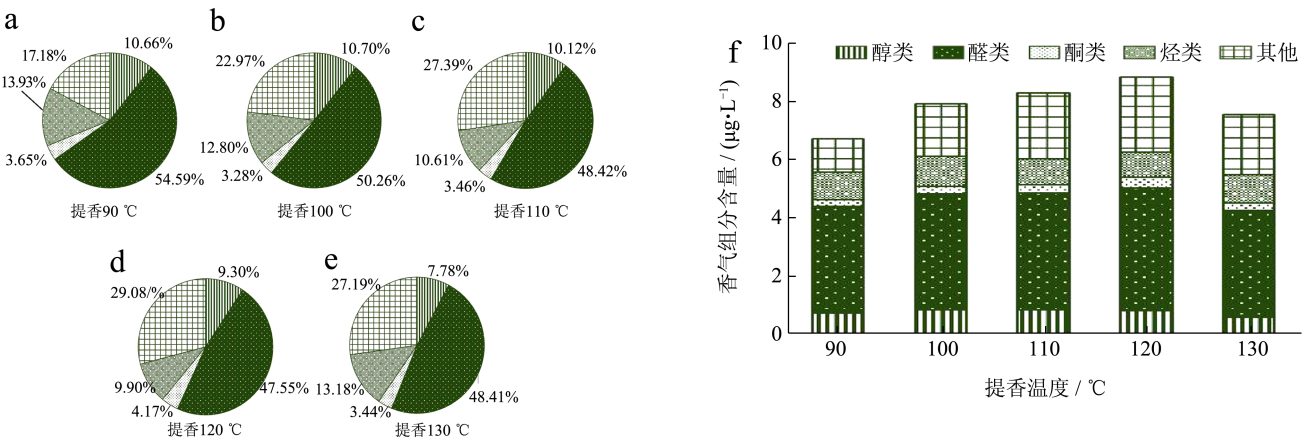


图 4 恩施玉露主要香气成分总含量及相对含量

Fig.4 Total and relative content of major aroma components in Enshi Yulu

表3 恩施玉露香气组分GC-MS定性定量结果

Table 3 Qualitative and quantitative results of aroma components in Enshi Yulu by GC-MS

类别	香气组分	保留时间/ min	香气组分含量/(μg·L ⁻¹)					气味特征 ^[26-33]
			90 °C	100 °C	110 °C	120 °C	130 °C	
醇类	芳樟醇	18.43	0.45 ± 0.10 ^b	0.55 ± 0.01 ^a	0.54 ± 0.09 ^a	0.55 ± 0.05 ^a	0.42 ± 0.00 ^c	柑橘香、花香
	(+)-顺式-橙花叔醇	25.73	0.17 ± 0.04 ^b	0.18 ± 0.06 ^b	0.17 ± 0.01 ^b	0.21 ± 0.01 ^a	0.12 ± 0.00 ^c	温和花香
	雪松醇	40.32	0.06 ± 0.02 ^{ab}	0.07 ± 0.02 ^a	0.07 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.01 ^{ab}	0.05 ± 0.00 ^b	雪松木香
	香榧醇	41.69	0.04 ± 0.00 ^a	0.05 ± 0.01 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	—	—	蜂蜜气味
醛类	戊醛	2.78	0.19 ± 0.09 ^b	0.32 ± 0.15 ^a	0.13 ± 0.02 ^d	0.16 ± 0.03 ^c	0.15 ± 0.02 ^{cd}	发酵面包味
	己醛	5.14	0.51 ± 0.06 ^a	0.36 ± 0.15 ^b	0.49 ± 0.12 ^a	0.49 ± 0.09 ^a	0.50 ± 0.02 ^a	青味
	庚醛	8.84	0.38 ± 0.14 ^d	0.63 ± 0.24 ^c	0.75 ± 0.04 ^a	0.74 ± 0.08 ^a	0.70 ± 0.16 ^b	青草味
	辛醛	13.69	0.27 ± 0.01 ^a	0.19 ± 0.07 ^c	0.21 ± 0.03 ^{bc}	0.23 ± 0.03 ^b	0.21 ± 0.06 ^{bc}	青味
	壬醛	18.69	2.09 ± 0.25 ^c	2.25 ± 0.04 ^b	2.24 ± 0.04 ^b	2.37 ± 0.03 ^a	1.88 ± 0.05 ^d	玫瑰花香
	癸醛	23.71	0.15 ± 0.03 ^a	0.14 ± 0.02 ^{ab}	0.10 ± 0.00 ^{cd}	0.09 ± 0.02 ^d	0.12 ± 0.03 ^{bc}	果香、青香
	β-环柠檬醛	24.07	0.08 ± 0.00 ^b	0.08 ± 0.02 ^b	0.09 ± 0.01 ^b	0.11 ± 0.01 ^a	0.09 ± 0.01 ^b	柠檬香
酮类	反式-5-丁基-4-甲基二氢呋喃-2(3H)-酮	24.15	0.11 ± 0.03 ^a	0.10 ± 0.02 ^a	0.11 ± 0.02 ^a	0.10 ± 0.02 ^a	0.11 ± 0.01 ^a	青味
	β-紫罗兰酮	35.37	0.14 ± 0.01 ^d	0.16 ± 0.01 ^c	0.18 ± 0 ^b	0.20 ± 0.03 ^a	0.15 ± 0.02 ^a	木香、果香
烃类	(+)-柠檬烯	14.83	0.59 ± 0.03 ^b	0.62 ± 0.28 ^d	0.44 ± 0.1 ^a	0.39 ± 0.25 ^c	0.56 ± 0.06 ^c	柠檬果香
	α-柏木烯	32.69	—	—	0.02 ± 0.01 ^a	0.02 ± 0.00 ^a	0.02 ± 0.00 ^a	木质香
	(-)-α-萜蒎烯	29.81	0.18 ± 0.01 ^b	0.19 ± 0.01 ^b	0.18 ± 0.01 ^b	0.23 ± 0.02 ^a	0.19 ± 0.01 ^b	草本气味
	Δ-杜松烯	36.9	0.12 ± 0.00 ^b	0.15 ± 0.05 ^b	0.17 ± 0.02 ^a	0.18 ± 0.01 ^a	0.17 ± 0.03 ^a	木质香
	α-二去氢蒎烯	37.6	—	0.02 ± 0.01 ^a	0.03 ± 0.01 ^a	0.03 ± 0.00 ^a	0.03 ± 0.00 ^a	木质香
	正十九烷	26.71	0.04 ± 0.02 ^a	0.04 ± 0.00 ^a	0.04 ± 0.00 ^a	0.03 ± 0.00 ^a	0.03 ± 0.00 ^a	清淡气味
其他	二甲硫	2.07	1.45 ± 0.14 ^c	2.08 ± 0.24 ^c	2.27 ± 0.13 ^b	2.57 ± 0.27 ^a	2.05 ± 0.02 ^d	甜玉米味

注：“—”表示未检出挥发性成分；小写字母表示 Duncan’s 新复极差 (SSR) 在 $P<0.05$ 水平下的差异显性，字母不同表示差异显著。

表 4 基于GC-O嗅闻恩施玉露香气结果

Table 4 GC-O-based analysis of aroma components and odor intensity of Enshi Yulu

序号	保留时间/min	香气组分	香气强度值 (AI)					气味特征 ^[26-33]
			90 ℃	100 ℃	110 ℃	120 ℃	130 ℃	
1	2.07	二甲硫	2	2	1.75	2	1.5	甜玉米味
2	5.14	己醛	1	1	1	1	1	青味
3	8.84	庚醛	1	1.5	2	2	2	青草味
4	13.69	辛醛	2	1.5	1.5	1	0	青味
5	18.43	芳樟醇	2.5	3	3	3.25	2	柑橘香、花香
6	18.69	壬醛	1.5	1.5	2	2	1.5	玫瑰花香
7	23.71	癸醛	2	2	1.5	1	1	青味
8	25.73	(+)-顺式-橙花叔醇	1	1.5	2	2	1.5	温和花香
9	29.81	(-)- α -萜澄茄油烯	1.5	1.25	1.5	1.25	0	草本气味

注：“0”表示未嗅出该挥发性成分。

3 结论

本文采用楮叶齐鲜叶为原料，在提香时间 15 min 下，比较分析了不同提香温度（90、100、110、120 和 130 ℃）对试制恩施玉露样品的感官－理化品质和呈香成分。结果发现，随着提香温度的升高，恩施玉露试制样的感官评审得分呈先升高后下降趋势，茶叶色泽由绿变黄，儿茶素总量和茶多酚含量明显下降，在 120 ℃提香时可溶性糖和氨基酸含量最高，形成滋味鲜醇的恩施玉露感官品质。提香温度不仅会影响所制恩施玉露的理化品质，还会影响其挥发性香气成分的形成。与其他所制试样相比 120 ℃提香所制恩施玉露中的花香型和甜香型香气含量相对较高，如芳樟醇、壬醛、 β -环柠檬醛、(+)-顺式-橙花叔醇、 β -紫罗酮和二甲硫等，且具有较强花香的芳樟醇、壬醛和(+)-顺式-橙花叔醇等呈香强度较高，有利于形成恩施玉露清香带花香的香气特征。综上可见，120 ℃提香所制恩施玉露茶的感官、理化和香气的评价最高，可以作为有效提高恩施玉露品质的工艺技术手段。

参考文献

[1] 刘盼盼,高士伟,郑鹏程,等.冲泡条件对恩施玉露绿茶茶汤品质的影响[J].食品工业科技,2016,37(20):138-144.

[2] 湖北省市场监督管理局,恩施玉露生产与加工技术规程.DB42/T 610-2023 [S].武汉:湖北省市场监督管理局,2023.

[3] 叶飞,桂安辉,龚自明,等.杀青方式对机采绿茶理化品质的影响[J].热带作物学报,2019,40(2):396-402.

[4] 赵瑶,倪德江.恩施玉露典型鲜叶蒸汽杀青工艺研究[J].中国茶叶,2013,35(9):13-15.

[5] 周洋,张强,崔清梅,等.恩施玉露滚筒式整形上光机的研制与试验[J].中国农机化学报,2019,40(1):56-60.

[6] 张文旗.恩施玉露复兴之路[M].武汉:湖北科学技术出版社,

2021.

[7] 邓余良,尹军峰,许勇泉,等.恒温远红外提香技术在绿茶加工中的应用研究[J].茶叶科学,2013,33(4):336-344.

[8] 丁凤娇,柳紫琼,闫佳伟,等.变温烘焙技术对美人茶品质的影响[J].食品科学,2025,46(9):263-274.

[9] 黎娜,唐睿,钟兴刚,等.变温滚炒与高温足干提香结合对秋季炒青绿茶品质的影响[J].茶叶通讯,2023,50(3):344-351.

[10] GB/T 23776-2018,茶叶感官审评方法[S].

[11] GB/T 8313-2008,茶叶中茶多酚和儿茶素含量的检验方法[S].

[12] GB/T 8314-2013,茶游离氨基酸总量的测定[S].

[13] 李梦桥,万状,宋玉杰,等.烘焙对夏秋绿茶色泽变化的影响[J].广东农业科学,2021,48(3):160-166.

[14] 叶禹彤,艾仄宜,李荣林,等.杀青方式对秋季黄金芽绿茶品质的影响[J].现代食品科技,2022,38(9):245-253.

[15] JIANG X F, ZHAO H, GUO F, et al. Transcriptomic analysis reveals mechanism of light-sensitive albinism in tea Plant *Camellia sinensis* ‘Huangjinju’ [J]. BMC Plant Biology, 2020, 20(1): 216.

[16] HAN Z S, WEN M C, ZHANG H W, et al. LC-MS based metabolomics and sensory evaluation reveal the critical compounds of different grades of Huangshan Maofeng green tea [J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131796.

[17] LU L, WANG L, LIU R Y, et al. An efficient artificial intelligence algorithm for Predicting the sensory quality of green and black teas based on the key chemical indices [J]. Food Chemistry, 2024, 441: 138341.

[18] CUI L, WANG X, HE C, et al. Effect of puffing treatment on volatile components of green tea explored by gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-olfactometry [J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101746.

[19] KE P J, LAI G, HAN Z, et al. Formation and characterization of theanine-flavonol glycoside adduct and its quantitative analysis during the processing of green tea [J]. Food Research International, 2025, 202: 115734.

[20] CHEN Y H, ZHANG Y H, CHEN G S, et al. Effects of phenolic acids and quercetin-3-O-rutinoside on the bitterness and astringency of green tea infusion [J]. NPJ Science of Food, 2022, 6(1): 8.

- [21] LIU Z Y, RAN Q S, LI Q, et al. Interaction between major catechins and umami amino acids in green tea based on electronic tongue technology [J]. *Journal of Food Science*, 2023, 88(6): 2339-2352.
- [22] GUO X, HO C T, SCHWAB W, et al. Effect of the roasting degree on flavor quality of large-leaf yellow tea [J]. *Food Chemistry*, 2021, 347: 129016.
- [23] 宛晓春. 茶叶生物化学(第3版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [24] QIN M, ZHOU J, LUO Q, et al. The key aroma components of steamed green tea decoded by sensomics and their changes under different withering degree [J]. *Food Chemistry*, 2024, 439, Article 138176.
- [25] MA Z, CHEN Y, WANG E, et al. Analysis of volatile compounds in Enshi Yulu tea by solid-Phase Micro-extraction and GC-MS[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(9): 249-253.
- [26] WANG H J, YU Y Y, OUYANG W, et al. Assessment of variations in round green tea volatile metabolites during manufacturing and effect of second-drying temperature via nontargeted metabolomic analysis [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 877132.
- [27] SUI M, WANG L, XUE R, et al. The aroma formation from fresh tea leaves of Longjing 43 to finished Enshi Yulu tea at an industrial scale [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2024, 105(1): 244-254.
- [28] WANG M Q, MA W J, SHI J, et al. Characterization of the key aroma compounds in Longjing tea using stir bar sorptive extraction (SBSE) combined with gas chromatography mass spectrometry (GC-MS), gas chromatography olfactometry (GC-O), odor activity value (OAV), and aroma recombination [J]. *Food Research International*, 2020, 130: 108908.
- [29] JIANG G X, XUE R, XIANG J, et al. Dynamic changes in the aroma profiles and volatiles of Enshi Yulu tea throughout its industrial processing [J]. *Food Chemistry*, 2024, 458: 140145.
- [30] LIU P P, ZHENG P C, GONG Z M, et al. Comparing characteristic aroma components of bead-shaped green teas from different regions using headspace solid-Phase microextraction and gas chromatography mass spectrometry/olfactometry combined with chemometrics [J]. *European Food Research and Technology*, 2020, 246 (9): 1703-1714.
- [31] ZHANG H Y, LEI D P, DING Y, et al. Uncovering characteristic and enantiomeric distribution of volatile components in Huangshan Maofeng and Zhejiang baked green teas [J]. *Food Chemistry*, 2025, 465(P2): 142001.
- [32] 廖雪利. 玉米香型绿茶特征香气化合物鉴定及其在加工、贮藏过程中的变化[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [33] WANG Q J, TANG M B, GAO Y, et al. Impact of heat treatment on the flavor stability of Longjing green tea beverages: Metabolomic insights and sensory correlations [J]. *Food Research International*, 2024, 193: 114867.