张晓磊, 周汉琛, 刘亚芹, 等. 基于代谢组学的不同工艺黄山毛峰茶品质成分分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(13): 324−333. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070286
ZHANG Xiaolei, ZHOU Hanchen, LIU Yaqin, et al. Metabolomics Reveals the Quality Composition of Huangshan Maofeng Tea Produced by Different Manufacturing Processes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(13): 324−333. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070286

· 分析检测 ·

基于代谢组学的不同工艺黄山毛峰茶品质成分分析

张晓磊, 周汉琛, 刘亚芹, 王　辉, 雷攀登*
（安徽省农业科学院茶叶研究所, 安徽黄山 245000）

摘　要: 为探究不同工艺对黄山毛峰茶品质形成的影响，以‘皖茶 4 号’茶树品种一芽一叶鲜叶为原料，采用 5 种加工方式制作黄山毛峰茶：230 ℃ 理条杀青-理条做形（L）、400 ℃ 滚筒杀青-理条做形（GL）、400 ℃ 滚筒杀青-揉捻后理条做形（GRL）、340 ℃ 滚筒杀青-理条做形（G2L）、340 ℃ 滚筒杀青-揉捻后理条做形（G2RL）。通过感官评价、代谢组学技术及多元统计分析方法，系统解析了 5 种黄山毛峰茶的品质特征与代谢物谱差异。感官评价结果显示，GL 综合品质最优，GRL 次之。二者呈现出清香高扬，滋味鲜醇的品质特征。代谢物分析显示，GL 和 GRL 中游离氨基酸总量较高，分别达 63.34±0.80 mg/g 和 65.21±0.47 mg/g；而与苦味涩味相关的代谢物（咖啡碱、原花青素、黄酮苷、酚酸等）含量较低。挥发性代谢物分析显示，5 种黄山毛峰茶中共鉴定出 44 种香气成分，其中醇类化合物占比最高（28%~49%）。利用偏最小二乘判别分析筛选到 11 个差异化合物（VIP 值>1、P<0.05），包括二甲基硫醚、香叶醇、苯甲醇、苯乙醇、顺-3-己烯醇等。其中具有特征性玉米甜香的二甲基硫醚在 GL 和 GRL 中显著富集，可能是二者香气品质较为突出的关键因素。本研究为黄山毛峰茶的优质生产提供了理论基础。

关键词: 黄山毛峰茶, 制作工艺, 品质成分, 挥发性化合物, 代谢组学
中图分类号: TS272　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)13−0324−10
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070286
本文网刊:

Metabolomics Reveals the Quality Composition of Huangshan Maofeng Tea Produced by Different Manufacturing Processes

ZHANG Xiaolei，ZHOU Hanchen，LIU Yaqin，WANG Hui，LEI Pandeng*
（Tea Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Huangshan 245000, China）

Abstract: To investigate the effects of different manufacturing processes on the quality formation of Huangshan Maofeng tea, fresh leaves (one bud and one leaf) from the tea cultivar 'Wancha 4' (*Camellia sinensis* var. *sinensis*) were processed into five types of green tea using distinct manufacturing processes. These included striping fixation at 230 ℃ coupled with striping shaping process (L), rotary fixation at 400 ℃ coupled with striping shaping process (GL), rotary fixation at 400 ℃ followed by rolling and then striping shaping (GRL), rotary fixation at 340 ℃ coupled with striping shaping process (G2L), and rotary fixation at 340 ℃ followed by rolling and then striping shaping (G2RL). A systematic study was conducted on the quality characteristics and differences in metabolite profiles of five types of Huangshan Maofeng tea by sensory evaluation, metabolomics and multivariate statistical analysis. Sensory evaluation results indicated that GL achieved the highest overall quality, followed by GRL, both exhibiting superior refreshing aroma and mellow, umami tastes. Metabolite analysis revealed that the total free amino acids contents in GL and GRL reached 63.34±0.80 mg/g and 65.21±0.47 mg/g, respectively, which were significantly higher than those in others. In contrast, metabolites contributing to bitterness and astringency,

收稿日期: 2025−07−25
基金项目: 国家茶叶产业技术体系（CARS-19）; 安徽省现代农业产业技术体系建设专项（AHCYJSTX-11）。
作者简介: 张晓磊（1994−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 茶叶加工与品质化学, E-mail: 1729752026@qq.com。
*** 通信作者:** 雷攀登（1983−）, 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 茶叶加工与品质化学, E-mail: lpteagle@126.com。

such as caffeine, proanthocyanidins, flavonoid glycosides, and phenolic acids, were lowly concentrated in GL and GRL. Volatile analysis revealed that a total of 44 aroma components were identified in five types of Huangshan Maofeng tea. Among them, alcohols were major volatile classes (28%~49%). 11 differential compounds (VIP value>1, P<0.05) were identified by partial least squares discriminant analysis, including dimethyl sulfide, geraniol, benzyl alcohol, phenylethyl alcohol, (Z)-3-hexen-1-ol, etc. Notably, the content of dimethyl sulfide with corn-like and sweet flavor was significantly higher in GL and GRL, which could be the critical factor leading to their prominent aroma quality. This study provides a theoretical basis for the high-quality production of Huangshan Maofeng tea.

Key words: Huangshan Maofeng tea; manufacturing processes; quality composition; volatiles; metabolomics

绿茶属于不发酵茶类，其初制工艺主要包括杀青、揉捻(做形)及干燥[1]。研究表明，高品质绿茶通常呈现清香、栗香或特殊花香，滋味鲜醇且富有收敛性，这些核心品质特征的形成与茶叶中特定化学成分的含量及比例密切相关[2−3]。绿茶中主要的风味物质包括氨基酸、儿茶素、黄酮苷类、生物碱、以及挥发性有机物等，其含量与组成受到茶树品种、生态环境及制作工艺等多重因素的影响[4−5]。其中，制作工艺通过对风味物质在加工过程中的动态转化施加影响，在塑造最终茶叶品质方面发挥着重要作用[6]。

条形绿茶是我国产量最丰富、分布最广的名优绿茶品类之一，诸如黄山毛峰、信阳毛尖、庐山云雾等代表性茶类，其品质形成的关键环节集中于杀青和做形工序[6−7]。Xue 等[6] 基于代谢组学分析发现，相较于传统滚筒杀青，微波杀青更能有效促进蛋白质降解及 γ-谷氨酰肽的转肽作用，从而显著提升条形绿茶中鲜味和甜味相关代谢物的含量。此外，适当的提高杀青温度可降低茶叶中顺式儿茶素和茶黄素类物质的含量，有助于减弱绿茶的苦味程度[8]。对于条形绿茶而言，杀青后的做形方式及工艺参数同样是影响其外形和内质的关键因素。邱安冬等[9] 通过感官评价比较了不同做形工艺，发现理条做形在塑造干茶条索紧结度与提升综合品质方面表现出更优的效果。陈义[10] 进一步指出，理条温度对绿茶品质影响显著：温度过低易导致加工过程中水分滞留，引发水闷味并促进多酚物质氧化；而温度过高则易产生高火味，不利于绿茶香气品质。尽管已有研究揭示了杀青温度、热传导介质及做形方式对条形绿茶风味品质的影响，然而目前对不同加工工艺下条形绿茶的代谢物谱特征仍缺乏系统性研究。

因此，本研究以黄山毛峰茶制作工艺为基准，选用‘皖茶 4 号’茶树品种鲜叶为原料，采用 5 种不同工艺制成黄山毛峰茶。综合运用茶叶感官评价、主要品质成分分析及非靶向代谢组学技术，系统解析不同加工工艺下黄山毛峰茶的品质特征与代谢物谱差异，以期为优质条形绿茶的生产提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

鲜叶原料　供试茶树品种为国家级良种‘皖茶 4 号’，采摘一芽一叶鲜叶作为原料；游离氨基酸、正构烷烃(C_5~C_{22})　美国 Sigma-Aldrich 公司；茶氨酸　北京百灵威科技有限公司；咖啡碱　北京海岸鸿蒙标准物质技术有限责任公司；儿茶素单体、没食子酸、茶黄素、茶黄素-3-没食子酸酯、茶黄素-3'-没食子酸酯、茶黄素-3,3'-双没食子酸酯　上海源叶生物科技有限公司；原花青素 B1、原花青素 B2、原花青素 B4、牡荆素、槲皮素、槲皮素-3-O-葡萄糖苷、芦丁、山柰酚、山柰酚-3-O-芸香苷、山柰酚-3-O-葡萄糖苷、对香豆酸、β-葡萄糖苷、奎宁酸等标准品　上海麦克林生化科技股份有限公司；β-紫罗兰酮、癸酸乙酯、正辛醇、芳樟醇、香叶醇、庚醛、苯甲醛、正辛醛、苯乙醛、壬醛、香叶基丙酮、月桂烯等　上海阿拉丁生化科技股份有限公司；己酸叶醇酯、己酸己酯、顺茉莉酮、罗勒烯等　梯希爱(上海)化成工业发展有限公司。所有标准品纯度均大于 90%。

S-433D 氨基酸分析仪　德国 Sykam 公司；Chromaster 高效液相色谱仪　日本日立公司；Ultimate 3000 高效液相色谱系统　美国戴安公司；Q-Exactive 高分辨质谱仪　美国赛默飞世尔科技公司；QP2020NX 气相色谱质谱联用仪　日本岛津公司；DB-5 MS 石英毛细管柱(30×0.25 mm×0.25 μm)　美国安捷伦公司；6CLZ60-11 振动理条机、6CST-40 滚筒杀青机、6CR-40 揉捻机　浙江上洋机械有限公司；6CHM-901 电热式烘干机　浙江春江茶叶机械有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　样品制备　鲜叶经室内自然摊放约 7 h 后，随机均分成 5 份。样品 1 采用 230 ℃ 理条机杀青 10 min，下机摊晾 30 min，随后用 160 ℃ 理条做形 15 min，最后干燥制成干茶，标记为 L；样品 2 采用 400 ℃ 滚筒杀青，下机摊晾 30 min，随后采用 180 ℃ 理条做形 5 min，160 ℃ 理条做形 15 min，最后干燥制成干茶，标记为 GL；样品 3 杀青方式同样品 2，下机摊晾后，先进行 5 min 不加压揉捻，随后采用 180 ℃ 理条做形 5 min，160 ℃ 理条做形 15 min，最后干燥制成干茶，标记为 GRL；样品 4 采用 340 ℃ 滚筒杀青，下机摊晾 30 min，随后采用 200 ℃ 理条做形 5 min，160 ℃ 理条做形 15 min，最后干燥制成干茶，标记为 G2L；样品 5 杀青方式同样品 4，下机摊晾后，先进行 5 min 不加压揉捻，随后采用 200 ℃ 理条做形 5 min，160 ℃ 理条做形 15 min，最后干燥制成干茶，标记为 G2RL(图 1)。

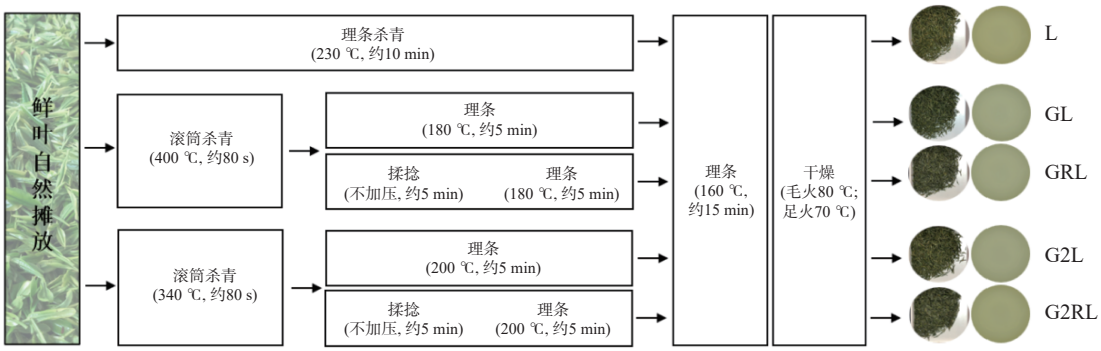


图 1 绿茶样品制作流程

Fig.1 Manufacturing processes of green tea samples

1.2.2 茶叶感官评价 参照国家标准 GB/T 23776-2018《茶叶感官审评方法》对 5 种绿茶样品进行感官评价。称取 3 g 茶样于审评杯中，加入 150 mL 沸水，冲泡 4 min 后，将茶汤倒入审评碗。由五位专业审评人员组成审评小组，以其中一人为主评。审评过程中由主评先评出分数，其他人员根据品质标准对主评出具的分数进行磋商，并最终共同确定每个样品的得分。

总分=外形得分×25%+香气得分×25%+滋味得分×30%+汤色得分×10%+叶底得分×10%

1.2.3 游离氨基酸、儿茶素及咖啡碱含量测定 称取 0.25 g 茶样，加入 25 mL 沸水，于 100 ℃ 水浴中浸提 20 min，隔 10 min 振荡一次；浸提完毕后，冷却，过滤，定容至 25 mL 容量瓶。分别稀释 10 倍和 6 倍后，过滤，上机。每个样品重复 3 次。采用氨基酸分析仪测定样品游离氨基酸含量，高效液相色谱仪测定儿茶素和咖啡碱含量，分析条件同文献 [11] 一致。

1.2.4 多酚类化合物测定 参考文献 [12] 方法分析绿茶样品中多酚类化合物。称取 0.06 g 茶样，加入 1.8 mL 预冷的 80% 甲醇溶液，涡旋，超声 3 min，10000 r/min 离心 10 min，取上清液。重复两次，合并上清液，混匀，过滤，上机。色谱柱为 Poroshell 120 SB-C_{18} column(3×150 mm, 2.7 μm)，柱温 30 ℃。流动相 A 为 0.4% 乙酸水溶液，流动相 B 为乙腈。洗脱程序：0~10 min, 99.9%A、0.1%B；22 min, 93%A、7%B；25 min, 89%A、11%B；30 min, 88%A、12%B；31 min, 86%A、14%B；43 min, 65%A、35%B；45 min, 20%A、80%B；47 min, 99.9%A、0.1%B。流速为 0.5 mL/min。进样量为 10 μL。采用负离子扫描模式，扫描范围 70~900 m/z。

通过标准品、一级质谱、二级质谱及保留时间等信息定性化合物；利用原花青素 B2(30 mg/L)、槲皮素(5 mg/L)、山柰酚-3-O-葡萄糖苷(5 mg/L)、山柰酚-3-O-芸香糖苷(10 mg/L)、对香豆酸(25 mg/L)、*β*-葡萄糖苷(25 mg/L)及奎宁酸(25 mg/L)标准品峰面积与化合物峰面积之比定量儿茶素二聚体、黄酮醇、黄酮单糖苷、黄酮多糖苷、酚酸、可水解单宁及有机酸。

1.2.5 挥发性化合物测定 称取 0.20 g 茶样于萃取瓶中，加入 0.15 g NaCl 和 5 mL 沸水，立即用锡箔纸密封瓶口，平衡 5 min，将 SPME 萃取头(50/30 μm, DVB/CAR/PDMS)插入萃取瓶，于 60 ℃ 水浴顶空吸附 40 min。萃取完成后，采用气相色谱质谱联用仪(GC-MS)进行挥发性成分检测。每个样品重复 3 次。GC-MS 分析条件同文献 [13] 方法。色谱柱为 DB-5 MS 石英毛细管柱(30×0.25 mm×0.25 μm)。进样口温度 250 ℃。升温梯度：40 ℃ 保持 5 min；以 3 ℃/min 上升至 110 ℃，保持 3 min；以 5 ℃/min 上升至 200 ℃，保持 1 min；以 15 ℃/min 上升至 260 ℃，保持 3 min。载气为高纯氦气，流速为 1 mL/min，分流比 5∶1。MS 工作条件：230 ℃ 离子源，0.1 kV 电压；扫描范围 30~600 m/z。

综合质谱库检索比对、计算保留指数(retention index, RI)，并结合已有标准品进行化合物定性；通过将目标化合物峰面积代入标准曲线进行定量分析，部分缺乏标准品的化合物根据癸酸乙酯进行定量。保留指数计算公式如下：

$$RI = 100n + \frac{100\times(T_x - T_n)}{T_{n+1} - T_n}$$

式中：T_x 表示目标化合物的出峰时间，min；n 表示碳原子数；T_n 表示碳原子数为 n 的正构烷烃的出峰时间，min；T_{n+1} 表示碳原子数为 n+1 的正构烷烃的出峰时间，min。

1.3 数据处理

使用 Thermo Xcalibur 4.1 和 TraceFinder 5.0 软件对原始谱图进行峰提取和峰匹配分析；SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析；SMICA 14.1 软件进行偏最小二乘判别分析(partial least squares discrimination analysis, PLS- DA)；TB tools 软件绘制热图；GraphPad Prsim 9 软件绘制柱形图。

2 结果与分析

2.1 感官品质分析

表 1 感官评价结果显示，5 种工艺黄山毛峰茶品质具有显著差异。其中，GL 综合得分最高，GRL 其次。二者在工艺上均采用 400 ℃ 滚筒杀青，总体呈现出清香高扬，滋味鲜醇的品质特征；G2L 和 G2RL

表 1　不同工艺黄山毛峰茶的感官评价

Table 1　Sensory evaluation of Huangshan Maofeng tea with different manufacturing processes

样品	外形(25%)		香气(25%)		滋味(30%)		汤色(10%)		叶底(10%)		综合得分
	评语	得分	评语	得分	评语	得分	评语	得分	评语	得分	
L	色绿欠润，较舒直	92	清香	91	较醇，回口稍欠爽	89	浅黄绿，较亮	91	浅黄绿，尚亮	92	90.75
GL	色绿较翠，尚舒直	93	清香高扬	94	鲜醇爽口	93	浅绿，明亮	95	绿匀，亮	95	93.65
GRL	色绿润，舒直	94	清香较高	93	鲜醇	92	浅黄绿，明亮	93	绿匀，亮	95	93.15
G2L	色绿尚润，舒直	93	清尚高	91	较醇	90	浅绿，明亮	94	浅黄绿，亮	93	91.70
G2RL	色绿尚润，顺直	94	尚高	89	尚醇，稍涩	87	浅黄绿，较亮	91	浅绿欠匀，亮	93	90.25

采用 340 ℃ 滚筒杀青再理条，其香气强度和滋味鲜醇度明显下降，内质表现不佳；L 采用理条杀青、做形，内质表现为清香显著，但香气强度和滋味鲜爽度较差。外形方面，5 种干茶总体色绿、条索舒直。其中，L 干茶润度较差，推测是由于长时间高温理条促使叶绿素损失过多导致[13]。汤色方面，GL 得分最高，茶汤浅绿明亮；L 和 G2RL 得分最低，茶汤呈浅黄绿，亮度稍差。茶汤色泽主要与呈色物质有关，如较高浓度的黄酮类、茶黄素等物质会导致茶汤黄度增加，汤色变暗[13]。此外，GRL、G2RL 均经过 5 min 揉捻工序，与未经揉捻样(GL、G2L)相比，条索表现更加润、直。表明适度揉捻有助于紧卷茶条，利于做形。

2.2　主要滋味成分分析

游离氨基酸、儿茶素及咖啡碱作为茶叶中主要滋味成分[14]，对绿茶品质形成具有重要作用。本研究分析了 16 种游离氨基酸的含量差异(表 2)。结果显示，GL、GRL 及 G2RL 中游离氨基酸总量显著高于 L(P<0.05)，G2L 同样呈现出较高的游离氨基酸含量。这主要与不同杀青温度下氨基酸的累积和消耗速率不同有关，而较高的温度能够促进更多的蛋白质水解[10]。谷氨酸、茶氨酸、天冬氨酸属于鲜味氨基

表 2　不同工艺黄山毛峰茶中主要滋味成分含量

Table 2　Content of main taste compounds of Huangshan Maofeng tea with different manufacturing processes

编号	化合物	含量(mg/g)				
		L	GL	GRL	G2L	G2RL
C1	谷氨酸Glu	2.06±0.01^{d}	2.16±0.02^{ab}	2.18±0.02^{a}	2.15±0.00^{b}	2.10±0.01^{c}
C2	茶氨酸Theanine	51.82±0.92^{c}	54.94±0.77^{b}	56.73±0.49^{a}	52.18±0.80^{c}	55.35±0.55^{b}
C3	天冬氨酸Asp	1.27±0.01^{b}	1.34±0.01^{a}	1.35±0.01^{a}	1.24±0.02^{c}	1.27±0.01^{b}
C4	苏氨酸Thr	0.32±0.00^{b}	0.33±0.00^{a}	0.32±0.00^{b}	0.32±0.00^{b}	0.33±0.00^{a}
C5	丝氨酸Ser	0.33±0.00^{a}	0.32±0.01^{b}	0.31±0.00^{c}	0.32±0.00^{b}	0.32±0.00^{ab}
C6	甘氨酸Gly	0.15±0.00^{a}	0.15±0.00^{a}	0.15±0.00^{a}	0.14±0.00^{b}	0.14±0.00^{b}
C7	丙氨酸Ala	0.14±0.00^{a}	0.11±0.00^{d}	0.11±0.00^{c}	0.13±0.00^{b}	0.14±0.00^{a}
C8	脯氨酸Pro	0.12±0.01^{b}	0.11±0.00^{b}	0.12±0.00^{b}	0.12±0.01^{b}	0.15±0.01^{a}
C9	缬氨酸Val	0.20±0.00^{a}	0.20±0.00^{a}	0.19±0.00^{b}	0.20±0.00^{a}	0.20±0.00^{a}
C10	异亮氨酸Ile	0.16±0.01^{a}	0.15±0.00^{ab}	0.15±0.00^{ab}	0.15±0.00^{b}	0.15±0.00^{ab}
C11	亮氨酸Leu	0.24±0.01^{c}	0.25±0.00^{c}	0.26±0.01^{bc}	0.28±0.01^{a}	0.27±0.01^{ab}
C12	酪氨酸Tyr	0.26±0.00^{b}	0.26±0.01^{b}	0.26±0.00^{b}	0.26±0.00^{b}	0.28±0.01^{a}
C13	苯丙氨酸Phe	0.37±0.00^{c}	0.37±0.00^{c}	0.39±0.00^{b}	0.38±0.00^{b}	0.40±0.01^{a}
C14	组氨酸His	0.22±0.00^{bc}	0.23±0.00^{b}	0.24±0.01^{a}	0.21±0.00^{c}	0.21±0.01^{c}
C15	赖氨酸Lys	0.34±0.00^{a}	0.35±0.00^{a}	0.33±0.02^{a}	0.34±0.01^{a}	0.35±0.00^{a}
C16	精氨酸Arg	1.99±0.06^{b}	2.09±0.07^{a}	2.13±0.02^{a}	2.14±0.03^{a}	2.11±0.03^{a}
	游离氨基酸总量Total AA	59.98±0.88^{c}	63.34±0.80^{b}	65.21±0.47^{a}	60.57±0.84^{c}	63.76±0.57^{b}
C17	没食子儿茶素GC	1.14±0.04^{d}	1.03±0.05^{e}	1.48±0.04^{a}	1.38±0.05^{b}	1.25±0.07^{c}
C18	表没食子儿茶素EGC	5.21±0.06^{b}	4.91±0.05^{c}	4.91±0.14^{c}	5.02±0.05^{c}	5.61±0.14^{a}
C19	儿茶素C	0.93±0.01^{cd}	0.97±0.01^{bc}	1.04±0.02^{a}	0.92±0.03^{d}	0.98±0.03^{b}
C20	表儿茶素EC	3.76±0.01^{b}	4.26±0.05^{a}	4.33±0.08^{a}	3.48±0.05^{c}	3.87±0.12^{b}
C21	表没食子儿茶素没食子酸酯EGCG	52.9±0.26^{a}	52.63±0.86^{a}	52.69±0.31^{a}	50.93±0.61^{b}	51.35±0.59^{b}
C22	没食子儿茶素没食子酸酯GCG	4.38±0.04^{b}	4.99±0.18^{a}	4.83±0.13^{a}	4.44±0.06^{b}	4.24±0.05^{b}
C23	表儿茶素没食子酸酯ECG	13.97±0.02^{a}	13.16±0.18^{c}	13.19±0.13^{c}	13.54±0.12^{b}	13.50±0.20^{b}
C24	儿茶素没食子酸酯CG	0.69±0.03^{c}	0.78±0.00^{a}	0.75±0.02^{ab}	0.73±0.02^{b}	0.68±0.00^{c}
	儿茶素总量Total catechin	82.99±0.28^{a}	82.71±0.94^{ab}	83.22±0.63^{a}	80.46±0.53^{c}	81.48±0.96^{bc}
C25	咖啡碱Caffeine	28.13±0.47^{a}	27.55±0.27^{b}	27.93±0.08^{ab}	27.67±0.17^{ab}	27.44±0.07^{b}

注：同行不同小写字母表示样品间存在显著差异(P<0.05)；表4同。

酸，对绿茶滋味的鲜爽度具有重要贡献[15]。本研究中 GL、GRL 中鲜味氨基酸含量显著高于其他三种，推测是其茶汤滋味鲜醇的重要原因。

儿茶素属于多酚类物质，是茶汤具有收敛性的关键风味成分[16]。本研究分析了 8 种儿茶素组分，包括 4 种酯型儿茶素（EGCG、GCG、ECG、CG）和 4 种非酯型儿茶素（GC、EGC、C、EC）。结果显示，L、GL 及 GRL 中儿茶素总量较为接近，显著高于 G2L 和 G2RL（P<0.05）。5 种绿茶中儿茶素组分均以 EGCG 含量最高，其次为 ECG 和 EGC，C、CG 及 GC 含量较低，这与前人研究结果相似[16-17]。EGCG、ECG 及 EGC 属于顺式儿茶素，在杀青过程中 C-2 位置易发生异构化反应形成反式儿茶素如 GCG、CG、GC 等，且杀青温度越高，异构化反应越剧烈[7,10]。本研究中 GL、GRL 中 GCG 和 CG 明显高于其他三种工艺绿茶，也表明了杀青温度与儿茶素异构化之间存在重要关联。

咖啡碱是绿茶中主要的呈苦物质[18]。4 种采用滚筒杀青工艺的黄山毛峰茶（GL、GRL、G2L 及 G2RL）中咖啡碱含量均低于 L，可能与 L 工艺中的较长时间的热作用有关。研究表明，高温条件能促进氨基酸与羰基化合物（如酮、醛等）发生席夫碱反应，导致生物碱类含量增加[19]。

2.3 基于 UHPLC-Q-Exactive/MS 的其他滋味成分分析

多酚类化合物作为绿茶呈味物质的重要组分，是构成茶汤苦涩味及浓度的关键风味物质[20]。其中，儿茶素类占比显著（50%~70%），其余组分包括黄酮、黄酮苷类、花青素及酚酸等次生代谢物[21]。通过 UHPLC-Q-Exactive/MS 共鉴定出 54 种非挥发性代谢物，包括 15 种儿茶素二聚体、23 种黄酮/黄酮醇苷、10 种酚酸、5 种可水解单宁及 1 种有机酸（表 3）。其中 48 个化合物具有组间显著差异（P<0.05）（图 2A）。

表 3 不同工艺黄山毛峰茶中鉴定出的代谢物

Table 3 Compounds identified in Huangshan maofeng tea of different manufacturing processes

编号	保留时间（min）	化合物	质荷比	VIP值	P值
		儿茶素二聚体Dimeric catechins（15种）			
C1	5.00	（表）没食子儿茶素-（表）没食子儿茶素-1（E）GC-（E）GC-1	609.126	0.55	<0.01
C2	8.80	（表）没食子儿茶素-（表）没食子儿茶素-3（E）GC-（E）GC-3	609.125	0.22	<0.01
C3	11.13	（表）没食子儿茶素-（表）没食子儿茶素-4（E）GC-（E）GC-4	609.125	0.79	<0.01
C4	14.05	儿茶素-表没食子儿茶素C-EGC	593.129	0.65	<0.01
C5	14.75	原花青素B1 Proanthocyanidin B1*	577.134	1.14	<0.01
C6	15.99	（表）没食子儿茶素-（表）没食子儿茶素没食子酸酯（E）GC-（E）GCG	761.135	0.90	0.04
C7	20.72	原花青素B4 Proanthocyanidin B4*	577.134	2.33	<0.01
C8	24.67	原花青素B2 Proanthocyanidin B2*	577.135	1.51	<0.01
C9	28.66	（表）没食子儿茶素-（表）儿茶素没食子酸酯-1（E）GC-（E）CG-1	745.140	0.27	<0.01
C10	30.57	儿茶素-表儿茶素没食子酸酯C-ECG	729.145	1.39	<0.01
C11	32.76	表儿茶素-表儿茶素没食子酸酯EC-ECG	729.145	1.01	<0.01
C12	41.80	茶黄素TF*	563.120	1.14	<0.01
C13	42.52	茶黄素-3-没食子酸酯TF-3-G*	715.130	0.88	<0.01
C14	42.93	茶黄素-3,3'-双没食子酸酯TF-3,3'-DG*	867.140	1.47	<0.01
C15	42.96	茶黄素-3'-没食子酸酯TF-3'-G*	715.130	0.77	<0.01
		黄酮/黄酮醇苷Flavone/flavonol glycosides（23种）			
C16	31.26	芹菜素-6,8-C-二葡萄糖苷6,8-C-diglucosylapigenin	593.151	0.09	<0.01
C17	33.34	杨梅素-3-O-半乳糖酰芸香糖苷Myricetin-3-O-galactosylrutinoside	787.192	0.32	<0.01
C18	34.08	杨梅素-3-O-半乳糖苷Myricetin-3-O-galactoside	479.082	0.48	0.02
C19	34.29	杨梅素-3-O-芸香糖苷Myricetin-3-O-rutinoside	625.140	0.34	<0.01
C20	34.45	杨梅素-3-O-葡萄糖苷Myricetin-3-O-glucoside	479.083	0.51	<0.01
C21	34.53	芹菜素-6-C-葡萄糖酰-8-C-阿拉伯糖苷Apigenin-6-C-glucosyl-8-C-arabinoside	563.140	0.36	<0.01
C22	35.26	槲皮素-3-O-半乳糖酰芸香糖苷Quercetin-3-O-galactosylrutinoside	771.198	0.39	0.03
C23	35.75	槲皮素-3-O-葡萄糖酰芸香糖苷Quercetin-3-O-glucosylrutinoside	771.198	0.54	<0.01
C24	36.10	牡荆素Vitexin*	431.097	0.10	<0.01
C25	36.35	牡荆素-2-O-鼠李糖苷Rhamnosylvitexin	577.157	0.08	<0.01
C26	36.40	芦丁Rutin*	609.145	0.71	<0.01
C27	36.41	山柰酚-3-O-半乳糖酰芸香糖苷Kaempferol-3-O-galactosylrutinoside	755.203	0.52	0.28
C28	36.44	异牡荆素Isovitexin	431.098	0.05	<0.01
C29	36.50	槲皮素-3-O-半乳糖苷Quercetin-3-O-galactoside	463.088	0.48	<0.01
C30	36.84	槲皮素-3-O-葡萄糖苷Quercetin-3-O-glucoside*	463.088	0.31	<0.01
C31	37.15	山柰酚-3-O-葡萄糖酰芸香糖苷Kaempferol-3-O-glucosylrutinoside	755.203	0.60	0.16

续表 3

编号	保留时间（min）	化合物	质荷比	VIP值	*P*值
C32	37.81	山柰酚-3-O-半乳糖苷Kaempferol-3-O-galactoside	447.093	0.69	0.04
C33	37.87	山柰酚-3-O-芸香糖苷Kaempferol-3-O-rutinoside*	593.151	0.30	0.43
C34	38.38	山柰酚-3-O-葡萄糖苷Kaempferol-3-O-glucoside*	447.093	0.29	<0.01
C35	39.36	杨梅素Myricetin	317.030	0.76	<0.01
C36	40.00	槲皮素Quercetin*	301.035	0.51	<0.01
C37	45.46	山柰酚Kaempferol*	285.040	0.35	<0.01
C38	46.42	山柰酚-3-O-二-对香豆酰己糖苷Kaempferol-3-O-di-p-coumaroylhexoside	739.166	1.03	<0.01
		酚酸Phenolic acids（10种）			
C39	1.49	咖啡酰己糖苷Caffeic acid hexoside	341.108	0.12	<0.01
C40	5.21	没食子酸GA*	169.013	1.38	<0.01
C41	6.45	3-O-没食子酰奎宁酸3-O-galloylquinic acid	343.066	1.02	<0.01
C42	11.45	3-咖啡酰奎宁酸3-caffeoylquinic acid	353.087	0.06	0.04
C43	14.59	3-p-对香豆酰奎宁酸3-p-coumaroylquinic acid	337.093	0.34	<0.01
C44	17.11	绿原酸Chlorogenic acid	353.088	0.22	0.02
C45	19.07	4-咖啡酰奎宁酸4-caffeoylquinic acid	353.088	0.09	0.07
C46	26.18	5-p-对香豆酰奎宁酸5-p-coumaroylquinic acid	337.093	1.48	<0.01
C47	26.97	4-p-对香豆酰奎宁酸4-p-coumaroylquinic acid	337.093	0.79	0.01
C48	28.19	对香豆酸p-Hydroxycinnamic acid*	163.039	0.12	<0.01
		可水解单宁Hydrolyzable tannins（5种）			
C49	5.10	*β*-葡萄糖苷*β*-glucogallin*	331.067	2.05	<0.01
C50	8.63	没食子儿茶素葡萄糖苷Gallocatechin-glucoside	467.119	0.30	0.03
C51	18.41	二没食子酰葡萄糖Digalloyl glucose	483.077	2.99	<0.01
C52	21.25	木麻黄素Strictinin	633.073	1.97	0.26
C53	33.95	三没食子酰葡萄糖Trigalloyl glucose	635.088	0.81	0.22
		有机酸Qrganic acids（1种）			
C54	1.47	奎宁酸D-(-)-quinic acid*	191.055	2.40	<0.01

注：*表示化合物经标准品验证；其余化合物通过一级质谱、二级质谱及保留时间等信息进行鉴定；*P*<0.05表示样品间存在显著差异。

2.3.1　儿茶素二聚体类　本研究中 15 种儿茶素二聚体均具有显著差异（*P*<0.05）。儿茶素二聚体主要是由两个黄烷-3-醇结构单体氧化聚合形成[22]，其涩味强度高于单体化合物[23]。如图 2A 所示，大部分二聚体在 L 中呈现较高的含量，而在 GL 和 GRL 中较低，这主要归因于杀青温度不同。研究表明，杀青温度越高氧化酶失活越快，温度较低时残余的氧化酶活性能促进更多的二聚体产生[10]。本研究中 GL 和 GRL 杀青温度明显高于 L，可能是导致二聚体含量有较大差异的重要原因。此外，本研究中 4 种重要茶黄素（TF、TF-3-G、TF-3,3'-DG、TF-3'-G）均在 L、G2L 及 G2RL 中呈现较高含量。茶黄素是酶促氧化的重要特征物质，对茶汤色泽和滋味具有重要作用[24]。

2.3.2　黄酮/黄酮醇苷类　黄酮/黄酮醇苷类化合物是茶叶中关键多酚类物质，通常以糖苷形式存在，其极低的味觉阈值（0.00115~19.8 μmol/L）使其成为绿茶苦涩味的重要呈味成分[18]。本研究中有 20 种黄酮类化合物呈现显著差异（*P*<0.05）。其中 GL 和 GRL 中大部分黄酮苷含量低于 L、G2L 或 G2RL，这与 GL 和 GRL 感官评价中滋味鲜醇特征有重要关联。高浓度的黄酮苷如槲皮素-3-O-葡萄糖酰芸香糖苷、芦丁等会抑制茶汤鲜爽味呈现[25]，适当调控黄酮类物质含量可有效降低茶汤苦涩味，提升茶汤鲜味甜味品质[26]。此外，黄酮苷类化合物多含有羟基、酮基及共轭双键等不稳定基团，其热敏感性显著高于黄酮苷元[7,25]。因此，GL 和 GRL 中较低浓度的黄酮类物质可能归因于加工过程中较高的杀青温度引发的热降解作用。

2.3.3　酚酸及其衍生物　酚酸是一类具有羟基与羧基的芳香族化合物，其高水溶性直接影响茶汤酸涩呈味特性，并能协同其他滋味成分增强整体苦涩感[27−28]。尤其是对香豆酰奎宁酸和咖啡酰奎宁酸类化合物具有较高的生物活性和滋味调控功能[26,29]。本研究中，除绿原酸外的 8 种显著差异酚酸物质均在 L 中呈现较高含量，推测与杀青工艺中持续机械理条处理引发的叶细胞结构破损有关，该过程加剧了内含物质向叶表面浸出[30]。此外，奎宁酸作为有机酸类重要呈味物质，其含量在 L 和 G2L 中明显高于 GL、GRL 及 G2RL。该化合物不仅是绿茶饮料贮藏时间的标志物，更与茶汤苦涩强度呈显著正相关[31]。*β*-葡萄糖苷、没食子儿茶素葡萄糖苷及二没食子酰葡萄糖均属于可水解单宁。其中，*β*-葡萄糖苷在 L、GL 及 GRL 中含量较高；二没食子酰葡萄糖则在 GRL、G2L 及 G2RL 中含量较高。研究表明，没食子酰葡萄糖类可作为绿茶品质分级的潜在化学标记物[32]，对绿茶滋味特性同样具有重要作用。

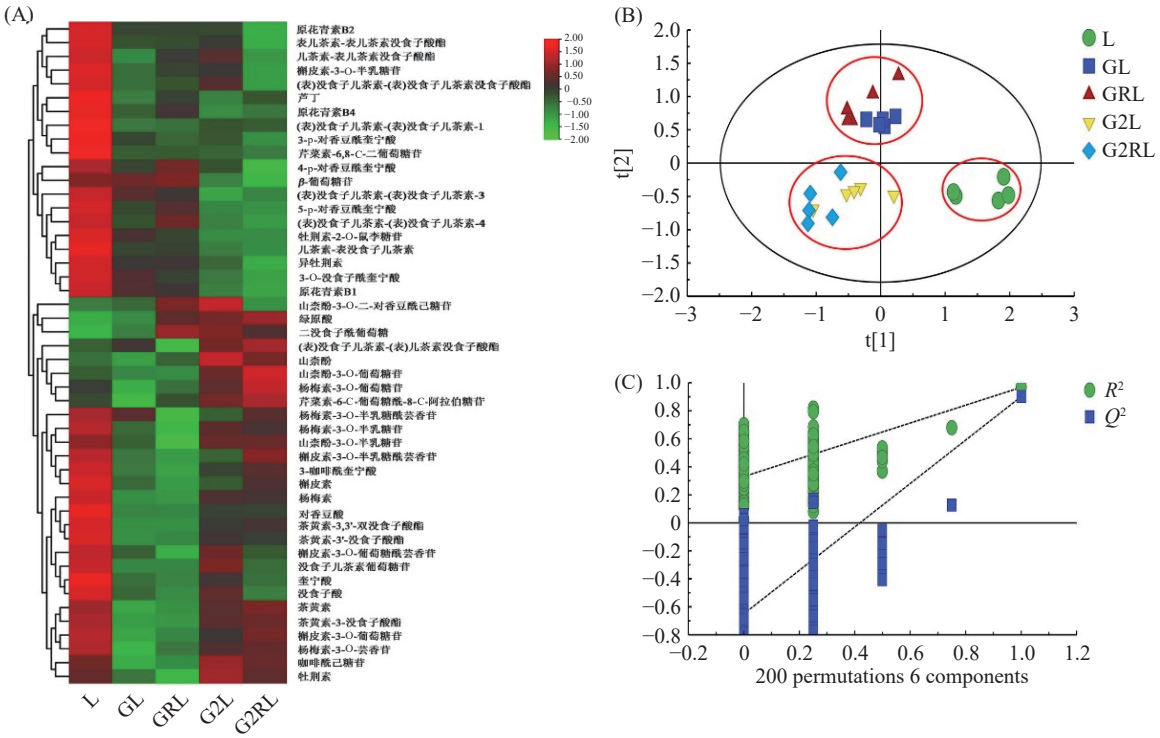


图 2 差异化合物热图(A)、PLS-DA 得分图(B)和置换检验图(C)

Fig.2 Heatmap of differential compounds (A), PLS-DA score plot (B), and cross-validation (C)

2.3.4 组间差异的关键化合物 通过 PLS-DA 对鉴定出的代谢物进行分析。图 2B 得分图(R^2X=0.923, R^2Y=0.909)显示,5 种工艺的黄山毛峰茶可分成三类:L 集中于第四象限为一类;GL 和 GRL 集中于 Y 轴两侧(第一、二象限)为一类;G2L 和 G2RL 则集中于第三象限为一类。经 200 次置换检验,Q^2 回归线负向截距(0,−0.65),表明 PLS-DA 模型可靠,无过度拟合现象(图 2C)。基于 VIP 值>1、P<0.05 筛选到 14 个组间差异的关键化合物,分别为原花青素 B1、原花青素 B2、原花青素 B4、C-ECG、EC-ECG、茶黄素、茶黄素-3,3'-双没食子酸酯、没食子酸、3-O-没食子酰奎宁酸、5-p-对香豆酰奎宁酸、奎宁酸、β-葡萄糖苷、二没食子酰葡萄糖及山柰酚-3-O-二-对香豆酰己糖苷。其中包括 7 个儿茶素二聚体类化合物,且均在 L 中呈现出较高含量。该类物质多为酶促氧化合成,即其含量高低与杀青环节氧化酶失活速率有关[33]。表明本研究中杀青温度对不同工艺黄山毛峰茶中的代谢物特征具有重要影响。

2.4 挥发性成分分析

通过 GC-MS 对 5 种工艺黄山毛峰茶中挥发性成分进行检测分析,共鉴定出 44 种化合物,包括 14 种醇类、12 种醛类、6 种酯类、5 种酮类、3 种烃类及 4 种其他类物质(表 4)。其中,醇类化合物含量高达 713.57±39.40~1437.35±83.22 μg/L,占总挥发物含量的 28%~49%。L 中醇类占比达 49%(图 3A),明显高于 GL(28%)和 GRL(32%),可能归因于杀青温度不同。已有研究表明,高温杀青能促进芳樟醇、香叶醇等挥发性糖苷物质积累[34−35],并通过体外模拟发现高温条件下香叶醇糖苷类合成量显著高于低温。本研究中 L 杀青温度最低,GL 和 GRL 杀青温度最高。从表 4 中可看出,L 中易形成挥发性糖苷的化合物如芳樟醇、香叶醇等含量显著高于 GL 和 GRL(P<0.05),这也从侧面验证了杀青温度与挥发性糖苷之间存在重要关联。

表 4 不同工艺黄山毛峰茶中挥发性成分含量

Table 4 Content of volatile compounds of Huangshan Maofeng tea with different manufacturing processes

编号	化合物	CAS号	RI[a]	RI[b]	质量浓度(μg/L)				
					L	GL	GRL	G2L	G2RL
	醇类化合物(14种)				1437.35±83.22[a]	713.57±39.40[d]	842.07±53.05[c]	1158.71±4.53[b]	1428.45±36.61[a]
C1	正戊醇1-Pentanol*	71-41-0	768	774	63.29±2.42[c]	83.08±2.60[a]	71.59±2.46[b]	83.14±1.56[a]	70.95±7.72[b]
C2	顺-3-己烯醇(Z)-3-hexen-1-ol*	928-96-1	858	856	27.95±3.34[d]	36.41±0.87[c]	43.11±2.65[b]	51.48±1.08[a]	46.64±3.43[b]
C3	1-辛烯-3-醇1-Octen-3-ol*	3391-86-4	986	980	6.30±0.15[b]	7.57±0.80[a]	5.04±0.73[c]	5.26±0.39[c]	5.03±0.47[c]
C4	苯甲醇Benzyl alcohol*	100-51-6	1032	1028	219.22±8.10[bc]	188.93±4.00[c]	209.68±26.54[bc]	234.81±17.09[b]	292.24±21.66[a]
C5	(2Z)-2-辛烯-1-醇(Z)-2-octen-1-ol	26001-58-1	1066	1063	1.71±0.13[ab]	1.79±0.10[a]	1.44±0.12[c]	1.45±0.06[c]	1.57±0.14b[c]
C6	芳樟醇氧化物Ⅱ trans-Linalool oxide (furanoid)	34995-77-2	1065	1065	6.07±0.33[a]	3.07±0.11[c]	3.09±0.15[c]	5.10±0.56[b]	6.25±0.26[a]

续表 4

编号	化合物	CAS号	RI[a]	RI[b]	质量浓度(μg/L)				
					L	GL	GRL	G2L	G2RL
C7	正辛醇1-Octanol*	111-87-5	1068	1067	15.16±1.75^{a}	12.95±0.44^{b}	13.28±1.25^{ab}	13.55±0.25^{ab}	15.05±0.46^{a}
C8	芳樟醇氧化物Ⅰ Cis-Linalool oxide (furanoid)	5989-33-3	1080	1083	7.71±0.54^{b}	3.35±0.32^{c}	3.63±0.18^{c}	6.97±0.66^{b}	8.71±0.27^{a}
C9	芳樟醇Linalool*	78-70-6	1101	1098	54.92±1.72^{a}	19.82±0.99^{d}	21.72±1.10^{d}	38.61±0.66^{c}	50.19±0.63^{b}
C10	苯乙醇Phenylethyl Alcohol*	60-12-8	1114	1097	238.41±31.19^{ab}	146.36±22.91^{d}	202.87±20.07^{bc}	197.8±3.01^{c}	267.68±16.31^{a}
C11	芳樟醇氧化物Ⅲ Cis-linalool oxide (pyranoid)	14009-71-3	1175	1164	1.55±0.15^{b}	1.29±0.03^{c}	1.37±0.06^{bc}	1.46±0.05^{bc}	1.87±0.15^{a}
C12	芳樟醇氧化物Ⅳ trans-linalool oxide (pyranoid)	39028-58-5	1169	1169	3.83±0.40^{b}	3.41±0.16^{b}	3.64±0.39^{b}	3.63±0.32^{b}	5.65±0.33^{a}
C13	α-松油醇α-Terpineol	98-55-5	1190	1191	7.82±0.59^{a}	3.89±0.06^{c}	4.19±0.16^{c}	6.27±0.28^{b}	6.56±0.44^{b}
C14	香叶醇Geraniol*	106-24-1	1221	1236	783.39±37.37^{a}	201.64±11.30^{e}	257.42±7.16^{d}	509.18±18.31^{c}	650.06±22.35^{b}
	醛类化合物(12种)				389.59±11.69^{ab}	381.89±21.74^{ab}	368.77±10.41^{b}	411.2±20.24^{a}	374.79±12.87^{b}
C15	2-甲基丁醛2-Methylbutanal*	96-17-3	688	681	32.37±1.48^{a}	24.62±1.14^{bc}	22.13±1.54^{c}	25.93±1.53^{b}	23.13±1.45^{c}
C16	戊醛Pentanal*	110-62-3	698	699	49.56±5.33^{c}	75.82±3.19^{a}	60.87±1.13^{b}	74.16±5.20^{a}	52.52±8.34^{bc}
C17	己醛Hexanal*	66-25-1	800	799	150.04±3.67^{a}	159.8±12.93^{a}	157.35±7.95^{a}	165.19±13.18^{a}	158.10±7.99^{a}
C18	庚醛Heptanal*	111-71-7	901	906	54.17±3.64^{b}	54.88±2.51^{b}	56.52±3.16^{ab}	60.55±1.59^{a}	56.09±2.72^{ab}
C19	(E)-2-庚烯醛(E)-2-heptenal	18829-55-5	956	957	1.49±0.12^{a}	1.53±0.10^{a}	1.24±0.03^{b}	1.43±0.09^{a}	1.24±0.06^{b}
C20	苯甲醛Benzaldehyde*	100-52-7	961	960	3.39±0.25^{bc}	3.05±0.07^{c}	2.97±0.19^{c}	4.15±0.17^{a}	3.80±0.35^{ab}
C21	正辛醛Octanal*	124-13-0	1004	1001	2.91±0.20^{a}	2.44±0.02^{b}	2.59±0.15^{b}	2.61±0.11^{b}	2.66±0.11^{b}
C22	苯乙醛Benzeneacetaldehyde*	122-78-1	1043	1036	44.48±6.59^{a}	20.12±6.20^{c}	20.07±2.00^{c}	34.11±1.02^{b}	30.81±3.82^{b}
C23	反-2-辛烯醛(E)-2-octenal	2548-87-0	1052	1052	1.33±0.09^{a}	1.13±0.04^{b}	1.11±0.11^{b}	1.22±0.06^{ab}	1.16±0.07^{b}
C24	壬醛Nonanal*	124-19-6	1089	1091	43.91±4.42^{a}	34.1±1.98^{c}	38.88±2.31^{bc}	36.23±2.12^{bc}	39.61±1.05^{ab}
C25	癸醛Decanal	112-31-2	1195	1171	2.89±0.35^{a}	2.93±1.08^{a}	3.47±0.05^{a}	3.31±0.40^{a}	3.06±0.20^{a}
C26	(E)-柠檬醛(E)-citral	141-27-5	1267	1256	3.06±0.15^{a}	1.48±0.04^{d}	1.57±0.06^{d}	2.31±0.07^{c}	2.61±0.11^{b}
	酯类化合物(6种)				51.69±2.33^{a}	34.82±1.18^{d}	36.2±0.83^{d}	41.79±0.72^{c}	45.68±1.79^{b}
C27	顺-3-己烯基丁酯(Z)-3-hexenyl butanoate*	16491-36-4	1186	1182	4.15±0.30^{a}	4.21±0.19^{a}	4.12±0.12^{a}	4.04±0.06^{a}	4.23±0.21^{a}
C28	水杨酸甲酯Methyl salicylate*	119-36-8	1193	1187	34.55±1.06^{a}	18.69±0.52^{d}	18.13±0.57^{d}	25.04±0.29^{c}	26.28±0.71^{b}
C29	香叶酸甲酯Methyl geranate	1189-09-9	1301	1302	1.90±0.23^{a}	1.74±0.15^{a}	1.96±0.07^{a}	1.8±0.07^{a}	1.96±0.11^{a}
C30	己酸叶醇酯(Z)-3-hexenyl hexanoate*	31501-11-8	1369	1375	8.46±1.00^{bc}	7.88±0.95^{c}	9.50±0.26^{ab}	8.38±0.37^{bc}	10.16±0.71^{a}
C31	己酸己酯Hexyl hexanoate*	6378-65-0	1385	1381	1.27±0.18^{ab}	1.05±0.15^{b}	1.20±0.06^{b}	1.16±0.05^{b}	1.47±0.08^{a}
C32	苯甲酸叶醇酯Cis-Hexenyl-3-benzoate	25152-85-6	1568	1567	1.36±0.05^{b}	1.24±0.09^{b}	1.29±0.08^{b}	1.37±0.05^{b}	1.57±0.04^{a}
	酮类化合物(5种)				99.75±5.28^{b}	87.47±6.78^{c}	96.95±5.13^{bc}	99.94±6.71^{b}	119.36±2.31^{a}
C33	4-甲基-3-戊烯-2-酮 4-Methyl-3-penten-2-one	141-79-7	798	797	1.93±0.03^{a}	1.56±0.02^{b}	1.42±0.02^{c}	1.38±0.04^{c}	1.42±0.07^{c}
C34	甲基庚烯酮6-Methyl-5-hepten-2-one*	110-93-0	986	984	6.59±1.22^{d}	10.12±0.26^{a}	9.16±1.02^{ab}	8.65±0.33^{bc}	7.51±0.03^{cd}
C35	顺茉莉酮Cis-Jasmone*	488-10-8	1391	1387	82.78±3.94^{b}	71.32±6.06^{c}	80.01±2.53^{b}	84.47±5.13^{b}	103.35±1.92^{a}
C36	香叶基丙酮Geranylacetone*	689-67-8	1456	1439	6.33±2.36^{a}	3.18±0.35^{b}	4.54±2.01^{ab}	3.8±0.84^{ab}	5.04±0.72^{ab}
C37	β-紫罗兰酮trans-β-Ionone*	79-77-6	1470	1474	2.11±0.26^{a}	1.29±0.44^{b}	1.82±0.14^{ab}	1.64±0.70^{ab}	2.04±0.16^{ab}
	烃类化合物(3种)				15.34±0.58^{a}	7.82±0.34^{d}	9.13±0.31^{c}	11.75±0.44^{b}	15.72±0.74^{a}
C38	月桂烯β-Myrcene	123-35-3	988	989	9.15±0.25^{b}	5.33±0.32^{e}	6.21±0.32^{d}	7.48±0.33^{c}	9.91±0.35^{a}
C39	(E)-β-罗勒烯trans-β-Ocimene	3779-61-1	1041	1033	2.03±0.08^{a}	1.26±0.11^{b}	1.3±0.11^{b}	1.85±0.02^{a}	2.05±0.16^{a}
C40	罗勒烯β-Ocimene*	13877-91-3	1044	1042	4.15±0.36^{a}	1.23±0.15^{c}	1.62±0.10^{c}	2.43±0.10^{b}	3.76±0.40^{a}
	其他化合物(4种)				946.93±149.38^{c}	1350.19±54.37^{a}	1287.71±192.38^{ab}	1012.08±57.7^{c}	1096.83±51.85^{bc}
C41	二甲基硫醚Dimethyl sulfide*	75-18-3	500	487	939.73±148.43^{c}	1345.75±54.20^{a}	1282.47±192.33^{ab}	1007.56±58.02^{c}	1091.34±51.79^{bc}
C42	茶吡咯Tea pyrrole	2167-14-8	1039	1040	2.62±1.04^{a}	—	—	—	—
C43	吲哚Indole	120-72-9	1290	1283	3.18±0.12^{b}	3.06±0.16^{b}	3.75±0.15^{a}	3.10±0.25^{b}	3.87±0.07^{a}
C44	2,4-二叔丁基酚2,4-Di-tert-butylphenol	96-76-4	1502	1494	1.40±0.01^{b}	1.38±0.02^{b}	1.48±0.05^{b}	1.42±0.10^{b}	1.62±0.04^{a}
	总量				2940.65±206.91^{ab}	2575.76±118.12^{c}	2640.82±220.09^{c}	2735.47±58.44^{bc}	3080.83±22.13^{a}

注：*表示目标化合物通过标准曲线进行精准定量，其余化合物则通过癸酸乙酯进行定量分析；“—”表示化合物含量低于检测限；RI[a]数值源于NIST数据库(https://webbook.nist.gov/chemistry/)，以DB-5 MS色谱柱为基准；RI[b]表示通过正构烷烃出峰时间计算得出的化合物RI值。

进一步通过 PLS-DA 对鉴定出的挥发性成分进行分析，图 3B 得分图(R^2X=0.992，R^2Y=0.967)显示，5 种工艺的黄山毛峰茶可分成两类：GL 和 GRL 集中于 Y 轴左侧为一类；L、G2L 及 G2RL 集中于 Y 轴右侧为一类。经 200 次置换检验，Q^2 回归线负向截距(0，−0.61)，表明 PLS-DA 模型可靠，无过度拟合现象(图 3C)。基于 VIP 值>1、P<0.05 筛选到 11 个差异化合物，分别为二甲基硫醚、香叶醇、苯甲醇、苯乙醇、顺-3-己烯醇、正戊醇、戊醛、己醛、顺茉莉酮、庚醛及苯乙醛。这些化合物大多数呈花香、果香或甜香风味，已被多项研究鉴定为名优绿茶中重要的特征香气组分[36−37]。本研究中二甲基硫醚含量高达

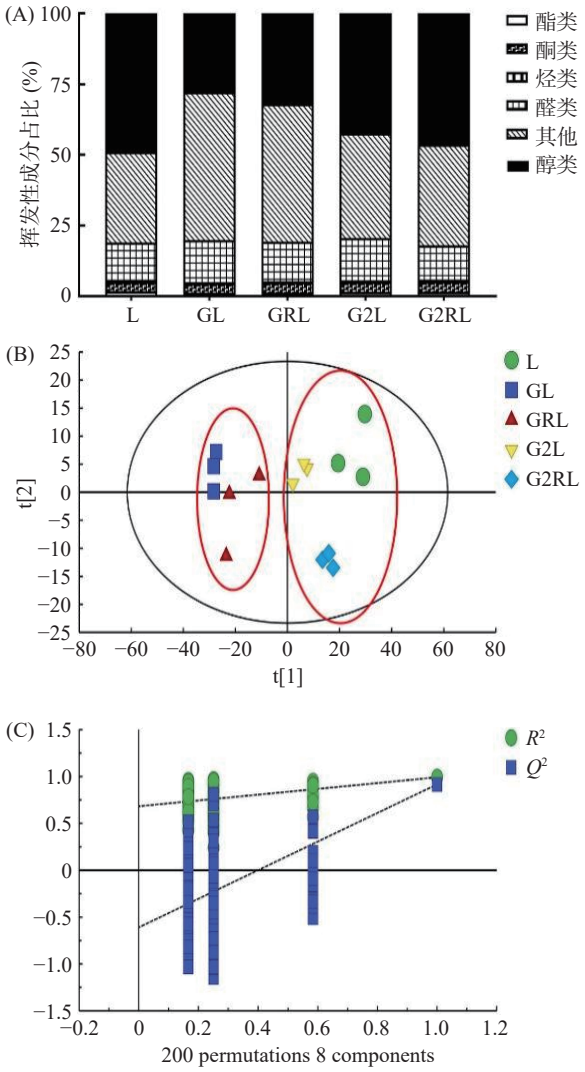


图 3 挥发性成分占比(A)、PLS-DA 得分图(B)和置换检验图(C)

Fig.3 Proportion of volatile compounds (A), PLS-DA score plot (B), and cross-validation (C)

939.73±148.43~1345.75±54.20 μg/L, 是重要的呈香物质。该硫醚化合物具有独特的玉米甜香风味, 对高品质绿茶的新茶香、清香具有重要贡献[16,38]。从表 4 可看出, GL 和 GRL 中二甲基硫醚的含量显著高于其他三种工艺绿茶(P<0.05), 可能与二者较高的杀青温度促进更多含硫氨基酸降解有关[17,39]。

3 结论

本研究综合运用感官评价、主要品质成分定量分析及代谢组学技术, 系统比较了 5 种不同工艺黄山毛峰茶的风味特征与代谢物谱差异。结果显示, 经 400 ℃ 滚筒杀青后理条制作的黄山毛峰茶(GL、GRL)综合品质更优。其干茶外形色泽绿润、条索舒直; 内质总体呈现出清香高扬, 滋味鲜醇的品质特征。非挥发性代谢物分析表明, 相较于其他三种工艺黄山毛峰茶, GL 和 GRL 中游离氨基酸(尤其是鲜味氨基酸)和儿茶素类含量较高, 而与苦味涩味相关的代谢物(如咖啡碱、原花青素、黄酮苷及酚酸等)含量较低, 这一代谢物谱特征为二者突出的鲜醇滋味提供了物质基础。挥发性代谢物分析表明, 5 种工艺黄山毛峰茶中香气成分均以醇类化合物为主(占挥发性成分总量的 28%~49%), 其相对含量与杀青温度间呈现出一定的负相关性, 即随着杀青温度升高, 其相对占比呈现下降趋势。具有特征性玉米甜香的二甲基硫醚, 其含量变化与醇类物质表现出相反趋势。该硫醚物质在 GL 和 GRL 中含量显著高于其他三种工艺绿茶, 可能是二者香气品质优势的重要原因。本研究初步揭示了制作工艺与黄山毛峰茶风味品质及代谢物累积之间的关联, 但由于化学成分在风味呈现与加工转化中的复杂性, 所筛选出的关键化合物在其动态变化机制及呈香呈味协同作用方面仍需进一步深入探究。本研究结果为黄山毛峰茶加工工艺的优化与标准化提供了理论基础。

© The Author(s) 2026. 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] YIN P, KONG Y S, LIU P P, et al. A critical review of key odorants in green tea: Identification and biochemical formation pathway[J]. Trends in Food Science& Technology, 2022, 129: 221−232.
[2] LIU N F, SHEN S S, HUANG L F, et al. Revelation of volatile contributions in green teas with different aroma types by GC–MS and GC–IMS[J]. Food Research International, 2023, 169: 112845.
[3] XU Y Q, ZHANG Y N, CHEN J X, et al. Quantitative analyses of the bitterness and astringency of catechins from green tea[J]. Food Chemistry, 2018, 258: 16−24.
[4] FENG W Z, ZHOU H, XIONG Z C, et al. Exploring the effect of different tea varieties on the quality of Lu'an Guapian tea based on metabolomics and molecular sensory science[J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101534.
[5] HAN Z, RANA M M, LIU G, et al. Green tea flavour determinants and their changes over manufacturing processes[J]. Food Chemistry, 2016, 212: 739−748.
[6] XUE J J, LIU P P, FENG L, et al. Insights into the effects of fixation methods on the sensory quality of straight-shaped green tea and dynamic changes of key taste metabolites by widely targeted metabolomic analysis[J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 100943.
[7] 刘跃云, 黄立, 赵先明. 不同杀青处理对条形"宜宾早茶"品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(7): 176−180. [LIU Y Y, HUANG L, ZHAO X M, et al. Effect of different fixing treatments on the quality of long-shape Yibin early tea[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022, 50(7): 176−180.]
[8] SHAN X J, DENG Y L, NIU L C, et al. The influence of fixation temperature on Longjing tea taste profile and the underlying non-volatile metabolites changes unraveled by combined analyses of metabolomics and E-tongue[J]. LWT, 2024, 191: 115560.
[9] 邱安冬, 武世华, 陈玉琼, 等. 不同做形方式对湖北条形绿茶品质的影响[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(6): 195−202. [QIU A D, WU S H, CHEN Y Q, et al. Effects of shaping methods on quality of strip famous green tea of Hubei Province[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(6): 195−202.]
[10] 陈义. 杭制信阳毛尖秋茶加工工艺研究[J]. 河南农业科学, 2016, 45(3): 148−151. [CHEN Y. Study on machine-processing technology of autumn Xinyang Maojian tea[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2016, 45(3): 148−151.]

［11］ 张晓磊, 周汉琛, 刘亚芹, 等. 基于代谢组学分析低温烘焙对白化品种绿茶风味品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(17): 352−362. ［ZHANG X L, ZHOU H C, LIU Y Q, et al. Metabolomics analysis of effects of low-temperature baking on the flavor of albino green tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(17): 352−362.］
［12］ ZHUANG J H, DAI X L, ZHU M Q, et al. Evaluation of astringent taste of green tea through mass spectrometry-based targeted metabolic profiling of polyphenols[J]. Food Chemistry, 2020, 305: 125507.
［13］ SHENG C Y, LU M X, ZHANG J X, et al. Metabolomics and electronic-tongue analysis reveal differences in color and taste quality of large-leaf yellow tea under different roasting methods[J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101721.
［14］ 张英娜, 陈根生, 刘阳, 等. 烘青绿茶苦涩味及其滋味贡献物质分析[J]. 茶叶科学, 2015, 35(4): 377−383. ［ZHANG Y N, CHEN G S, LIU Y, et al. Analysis of the bitter and astringent taste of baked green tea and their chemical contributors[J]. Journal of Tea Science, 2015, 35(4): 377−383.］
［15］ ZHAO Y L, YAN L S, CHEN L Y, et al. Enhancing the flavor profile of strong-flavored green tea from Sichuan: Evaluation and optimization study[J]. LWT, 2024, 204: 116447.
［16］ 宛晓春. 茶叶生物化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 33−34,224−229. ［WAN X C. Tea biochemistry[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003: 33−34,224−228.］
［17］ 陈德权, 任杨梅, 何梦迪, 等. 基于感官评价和代谢组学技术解析紫阳绿茶风味特征和生化成分差异[J]. 茶叶科学, 2024, 44(2): 316−328. ［CHEN D Q, REN Y M, HE M D, et al. Analysis of flavor characteristics and biochemical composition differences of Ziyang green tea based on sensory evaluation and metabolomics techniques[J]. Journal of Tea Science, 2024, 44(2): 316−328.］
［18］ 金孝芳, 罗正飞, 童华荣. 绿茶茶汤中主要滋味成分及滋味定量描述分析的研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(7): 343−346. ［JIN X F, LUO Z F, TONG H R, et al. Study on main taste compounds and quantitative descriptive analysis of taste in green tea infusion[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(7): 343−346.］
［19］ 罗红玉, 王奕, 谷雨, 等. 干燥工艺对重庆沱茶及其毛茶风味品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(22): 259−266. ［LUO H Y, WANG Y, GU Y, et al. Effect of drying process on the flavor quality of Chongqing Tuo tea and crude tea for making it[J]. Food Science, 2022, 43(22): 259−266.］
［20］ ZHONG N, ZHAO X, YU P H, et al. Characterization of the sensory properties and quality components of Huangjin green tea based on molecular sensory-omics[J]. Foods, 2023, 12(17): 3234.
［21］ LI N, XU J R, ZHAO Y Q, et al. The influence of processing methods on polyphenol profiling of tea leaves from the same large-leaf cultivar (*Camellia sinensis* var. *assamica* cv. Yunkang-10): Nontargeted/targeted polyphenomics and electronic sensory analysis[J]. Food Chemistry, 2024, 460: 140515.
［22］ 张慧文, 张玉, 马超美. 原花青素的研究进展[J]. 食品科学, 2015, 36(5): 296−304. ［ZHANG H W, ZHANG Y, MA C M, et al. Progress in procyanidins research[J]. Food Science, 2015, 36(5): 296−304.］
［23］ HANNA P, KARLNE G, PASCAL S, et al. Bitterness and astringency of flavan-3-ol monomers, dimers and trimers[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1999, 79: 1123−1128.
［24］ LI M J, ZHU Y Y, YUAN Y W, et al. Exploring the relationship between color and taste: Unveiling critical color and taste compounds of Qingxiang Tieguanyin tea infusion[J]. LWT, 2024, 205: 116456.
［25］ LIU F, WANG Y, CORKE H, et al. Dynamic changes in flavonoids content during congou black tea processing[J]. LWT, 2022, 170: 114073.
［26］ WANG Z H, LIANG Y L, WU W W, et al. The effect of different drying temperatures on flavonoid glycosides in white tea: A targeted metabolomics, molecular docking, and simulated reaction study[J]. Food Research International, 2024, 190: 114634.
［27］ 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.
［28］ 张燕红. 典型酚酸类化合物的呈味特性及对绿茶茶汤苦涩味的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019. ［ZHANG Y H. The taste characteristies of typical phenolic acids and their effects on the bitterness and astringency of green tea infusion[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019.］
［29］ WEN M C, HAN Z S, CUI Y Q, et al. Identification of 4-O-p-coumaroylquinic acid as astringent compound of keemun black tea by efficient integrated approaches of mass spectrometry, turbidity analysis and sensory evaluation[J]. Food Chemistry, 2022, 368: 130803.
［30］ ZHOU H C, LIU Y Q, WU Q, et al. The manufacturing process provides green teas with differentiated nonvolatile profiles and influences the deterioration of flavor during storage at room temperature[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101371.
［31］ HE C X, JIANG Z D, WANG X, et al. Targeted and nontargeted metabolomics analysis for determining the effect of different aging time on the metabolites and taste quality of green tea beverage[J]. LWT, 2023, 187(15): 115372.
［32］ ZOU Y S, TANG C, YANG X Y, et al. Discovery and flavor characterization of high-grade markers in baked green tea[J]. Molecules, 2023, 28(6): 2462.
［33］ OUYANG W, NING J J, ZHU X Z, et al. UPLC-ESI-MS/MS analysis revealed the dynamic changes and conversion mechanism of non-volatile metabolites during green tea fixation[J]. LWT, 2024, 198: 116010.
［34］ 于帅, 许继业, 胡争艳, 等. 基于代谢组学的绿茶热加工过程中化学成分变化规律解析[J]. 食品科学, 2024, 45(12): 165−175. ［YU S, XU J Y, HU Z Y, et al. Metabolomics analysis of variations in chemical components of green tea during thermal processing[J]. Food Science, 2024, 45(12): 165−175.］
［35］ LI P L, ZHU Y, LU M L, et al. Variation patterns in the content of glycosides during green tea manufacturing by a modification-specific metabolomics approach: enzymatic reaction promoting an increase in the glycosidically bound volatiles at the pan firing stage[J]. Food Chemistry, 2018, 279: 80−87.
［36］ 尹洪旭, 杨艳芹, 姚月凤, 等. 基于气相色谱-质谱技术与多元统计分析对不同栗香特征绿茶判别分析[J]. 食品科学, 2019, 40(4): 192−198. ［YIN H X, YANG Y Q, YAO Y F, et al. Discrimination of different characteristics of chestnut-like green tea based on gas chromatography-mass spectrometry and multivariate statistical data analysis[J]. Food Science, 2019, 40(4): 192−198.］
［37］ 尤秋爽, 石亚丽, 朱荫, 等. 加工工艺对绿茶关键呈香成分的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(8): 194−200. ［YOU Q S, SHI Y L, ZHU Y, et al. Effect of different processing technologies on the key aroma-active compounds of green tea[J]. Food Science, 2023, 44(8): 194−200.］
［38］ 舒畅. 龙井茶特征香气成分分析与鉴定研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2016. ［SHU C. Characterization of aroma-active components of Longjing tea[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2016.］
［39］ ZHAI X T, WANG J, WANG H, et al. Formation of dimethyl sulfide from the decomposition of S-methylmethionine in tea (*Camellia sinensis*) during manufacturing process and infusion brewing[J]. Food Research International, 2022, 162: 112106.