李雪珂, 周巧仪, 马成英, 等. 蝉茶的品质成分及香气特征分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(11): 12−24. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070189
LI Xueke, ZHOU Qiaoyi, MA Chengying, et al. Analysis of Quality Components and Aroma Characteristics of Cicada Tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(11): 12−24. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070189

·特邀主编专栏—茶饮品全产业链生产关键技术研究与应用（客座主编: 尹军峰、张建勇、许勇泉、崔宏春）·

蝉茶的品质成分及香气特征分析

李雪珂[1,2], 周巧仪[1], 马成英[1,3], 梁冬霞[1], 夏红玲[1], 曹藩荣[2,*], 凌彩金[1,*]
（1.广东省农业科学院茶叶研究所, 广东省茶树资源创新利用重点实验室, 广东广州 510640;
2.华南农业大学园艺学院, 广东省南方特色茶工程技术研究中心, 广东广州 510642;
3.广东鸿雁茶业有限公司, 广东清远 513000）

摘　要: 本文以小绿叶蝉刺吸与未刺吸的金萱茶鲜叶为原料，通过系统比较分析其制成的蝉茶产品与对照茶产品（红茶/绿茶）在感官品质特征、主要生化成分及香气物质的差异，并分析其关键香气特征标志物。感官审评结果表明，蝉茶（红/绿茶）均表现出明显的花蜜香特征。生化成分结果表明，蝉绿茶的可溶性糖含量（4.75%~5.54%）均显著（P<0.05）高于对照绿茶（4.41%）；蝉红茶的可溶性糖含量（4.62%~5.49%）均显著（P<0.05）高于对照红茶（4.17%）。蝉绿茶的总黄酮含量（4.88%~5.30%）均显著（P<0.05）高于蝉红茶（3.41%~4.49%）；蝉绿茶的茶多酚含量（24.53%~25.18%）均显著（P<0.05）高于蝉红茶（14.36%~18.92%）。挥发性成分分析共鉴定出 88 种化合物，挥发性成分总量上，蝉茶高于对照茶样；此外，筛选出脱氢芳樟醇、邻伞花烃和苯甲醛为蝉绿茶与对照绿茶的特征香气物质；顺式芳樟醇氧化物（呋喃型）、香叶醇、苯乙醇、水杨酸甲酯、反式芳樟醇氧化物（吡喃型）及 2-（5-甲基-5-乙烯基四氢呋喃-2-基）丙-2-基碳酸酯为区分蝉红茶与对照红茶的特征香气物质。ROAV 分析表明，β-紫罗酮、苯甲醇、邻伞花烃、香叶醇等关键香气成分在蝉茶中的含量显著高于对照茶样（P<0.05），可能是蝉茶具有“蜜香”特征的关键香气成分。本研究解析了蝉茶特征风味的生化基础，可为蝉茶的品质提升提供理论支持。

关键词: 茶小绿叶蝉, 蝉茶, 香气成分, 生化成分, 感官审评
中图分类号: TS272.7　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)11−0012−13
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070189
本文网刊:

Analysis of Quality Components and Aroma Characteristics of Cicada Tea

LI Xueke[1,2], ZHOU Qiaoyi[1], MA Chengying[1,3], LIANG Dongxia[1], XIA Hongling[1], CAO Fanrong[2,*], LING Caijin[1,*]
（1.Guangdong Provincial Key Laboratory of Tea Plant Resources Innovation and Utilization, Tea Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China;
2.Engineering Technology Research Center of Guangdong Southern Characteristic Tea, College of Horticulture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;
3.Guangdong Hongyan Tea Industry Co., Ltd., Qingyuan 513000, China）

Abstract: In this study, fresh leaves of Jinxuan tea, both infested and uninfested with *Empoasca onukii*, were used as raw materials. A systematic comparison was conducted to analyze differences in the sensory quality characteristics, primary biochemical components, and aroma substances of cicada tea products and control tea products (black and green teas), leading

收稿日期: 2025−07−17
基金项目: 广东省省级科技计划项目（2023B0202010013）; 以农产品为单元的广东省现代农业产业技术体系创新团队建设项目（茶叶产业技术体系）（2024CXTD11）; “广东特支计划”省农业农村厅（农业和乡村振兴人才）项目（NYQN2024020）; 广东省驻镇帮镇扶村项目（KTP20240140）; 广东省农业科学院现代种业创新能力提升工程。
作者简介: 李雪珂（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 茶叶品质评价, E-mail: li0309@stu.scau.edu.cn。
*** 通信作者:** 曹藩荣（1963−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 茶叶加工与生化, E-mail: prcao@scau.edu.cn。
凌彩金（1977−）, 女, 硕士, 研究员, 研究方向: 茶叶品质评价, E-mail: lingcaijin@163.com。

to the identification of key aroma compounds. The sensory evaluation results indicated that the cicada tea exhibited distinct nectar-like aroma characteristics. The biochemical composition analysis revealed that the soluble sugar content of cicada green tea (4.75%~5.54%) was significantly higher than that of the control green tea (4.41%) (P<0.05). Similarly, the soluble sugar content of cicada black tea (4.62%~5.49%) was significantly greater than that of the control black tea (4.17%). The total flavonoid content of cicada green tea (4.88%~5.30%) was significantly higher than that of cicada black tea (3.41%~4.49%), whereas the tea polyphenol content of cicada green tea (24.53%~25.18%) was significantly greater than that of cicada black tea (14.36%~18.92%). A total of 88 volatile compounds were identified, with the total volatile components in cicada tea exceeding those in the control tea. Furthermore, dehydrolinalool, o-cymene, and benzaldehyde were identified as the characteristic aroma compounds that distinguished cicada green tea from the control green tea. Additionally, cis-linalool oxide (furan type), geraniol, phenylethanol, methyl salicylate, *trans*-linalool oxide (pyran type), and 2-(5-methyl-5-vinyl tetrahydrofuran-2-yl) propyl-2-yl carbonate were characteristic aromatic substances that differentiated cicada black tea from the control black tea. The relative odor activity value analysis indicated that key aroma components, such as β-ionone, benzyl alcohol, o-cymene, and geraniol, were present at significantly higher levels in the cicada tea than in the control tea (P<0.05), which may contribute to the distinctive "honey aroma" of cicada tea. In this study, the biochemical basis of the distinctive flavor of cicada tea was analyzed, and theoretical support for its quality enhancement was provided.

Key words: tea green leafhopper; cicada tea; aroma components; biochemical components; sensory evaluation

茶叶是全球重要的经济作物，具有悠久的栽培和消费历史。茶是全球三大无酒精饮料之一，其中，红茶是全球消费最广泛的茶类，约占全球茶叶消费量的 75%，绿茶的消费量也在持续增加[1−2]。近年来，随着消费者对特色茶产品的需求不断提升，黄化茶、白化茶以及具有特殊“蜜香”风味的蝉茶等特色茶产品逐渐成为研究热点，为茶产业多元化发展提供了新的方向[3−5]。

蝉茶特指采取茶小绿叶蝉（*Empoasca onukii*）刺吸后的茶树鲜叶加工而成的具有“蜜香”特征的茶产品[6]。茶小绿叶蝉是一种常见的茶园害虫，通过刺吸茶鲜叶会显著改变其代谢特征，并导致夏、秋茶产量损失 10%~30%[7]。研究表明，小绿叶蝉刺吸茶鲜叶后会诱导茶树产生特定的次生代谢产物，一方面帮助茶树抵御昆虫侵害，另一方面又会赋予茶叶独特的香气和滋味，比如 β-罗勒烯、芳樟醇、香叶醇等[8]。在产业应用方面，小绿叶蝉介导的风味形成机制已在乌龙茶中得到成功应用，如中国台湾的“东方美人茶”，福建的“大田美人茶”等，此类特色茶品以其突出的蜂蜜甜香和馥郁花香闻名[9]，其关键香气组分包括 2,6-二甲基-3,7-辛二烯-2,6-二醇、芳樟醇氧化物等萜类化合物与苯甲醇等醇类化合物[10−11]。近年来，基于小绿叶蝉取食效应的特色茶产品开发取得新进展，以广东蝉红茶和蝉绿茶为代表的特色茶产品凭借其独特的“蜜香”品质深受市场青睐。然而，现有研究主要集中于小绿叶蝉刺吸鲜叶后其生化成分与挥发性成分的变化[12−15]，针对蝉红茶、蝉绿茶的风味形成机制、关键品质成分及加工工艺优化的系统性研究仍处于起步阶段，亟待深入研究。

因此，本研究以受小绿叶蝉刺吸与未刺吸的金萱茶鲜叶为原料，系统比较蝉茶（红茶/绿茶）与对照茶产品在感官品质特征、主要生化成分及挥发性香气物质的差异特征，重点解析蝉茶特有的关键香气化合物，以期为广东特色蝉茶的品质评价和加工工艺优化提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

C7~C30 饱和正构烷烃、癸酸乙酯　均为色谱纯，德国 Meker 公司；福林酚试剂、茚三酮、磷酸氢二钠、磷酸二氢钾、碳酸钠、蒽酮等　均为分析纯，阿拉丁试剂公司；甲酸、甲醇、乙腈　均为色谱纯，上海百灵威化学技术有限公司；茶叶样本　由广东省农业科学院茶叶研究所提供，共计 12 份具有代表性的茶叶样品。茶树品种均为“台茶 12 号”（又称金萱），采摘标准为一芽二叶，并于 2024 年 5 月内不同日期完成加工制作；其中，对照红茶（BT）与对照绿茶（GT）采用未经小绿叶蝉刺吸的茶鲜叶为原料加工制成；而蝉红茶 6 份（CB1~CB6），蝉绿茶 4 份（CG1~CG4）则依据团体标准《紫金蝉茶》（T/ZJCY 001-2019）采集受小绿叶蝉叮咬的茶鲜叶为原料制备而成。生产流程如下：对照红茶/蝉红茶：鲜叶→萎凋→揉捻→发酵→烘干；对照绿茶/蝉绿茶：鲜叶→摊青→杀青→揉捻→炒青→辉干。

FB233 型自动内校电子分析天平　上海舜宇恒平科学仪器公司；DVB/CarbonWR/PDMS Smart SPME Arrow 萃取头（1.1 mm, 120/20 μm）、RTC120 多功能自动进样系统　瑞士 CTC Analytics AG 公司；HP-5MS 弹性石英毛细管柱（30 m×0.25 mm, ID 0.25 μm）、8890-5977 B 气相色谱-质谱联用仪、1200 型安捷伦高效液相色谱仪　美国 Agilent 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　感官审评方法　参考国家标准 GB/T 23776-2018《茶叶感官审评方法》，对外形（20%）、汤色（10%）、香气（30%）、滋味（30%）和叶底（10%）进行感官审评。感官审评人员为具有三级评茶员及以上职称的技术人员 3 人。

1.2.2　生化成分测定方法　游离氨基酸总量按

GB/T 8314-2013《茶游离氨基酸总量的测定》采用茚三酮比色法测定; 茶多酚含量按 GB/T8313-2018《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》采用福林酚法测定; 可溶性糖含量测定按 GB/T 36056-2018《林业生物质原料分析方法 可溶性糖的测定》采用蒽酮比色法测定; 总黄酮含量采用亚硝酸钠-硝酸铝-氢氧化钠显色法测定[16]。

儿茶素类及咖啡碱含量测定: 采用 HPLC 检测法, 以各组分标准品的出峰保留时间定性, 采用外标法绘制标准曲线, 依据峰面积对样品中儿茶素类及咖啡碱进行定量。色谱柱: ZORBAX Elipse XDB-C_{18} 柱(5 μm, 250 mm×4.6 mm); 流动相: A 相为乙酸∶乙腈∶甲醇∶水=0.5∶1∶2∶96.5(V∶V∶V∶V); B 相为乙酸∶乙腈∶甲醇∶水=0.5∶10∶20∶69.5(V∶V∶V∶V); 流量为 1 mL/min; 柱温为 30 ℃; 进样量为 10 μL; 紫外检测波长为 280 nm。梯度洗脱程序如下: 0~30 min, 27.5%~80% B; 30~35 min, 80%~7.5% B; 35~0 min, 27.5% B。

1.2.3 挥发性成分测定方法 茶叶挥发性成分的提取采用顶空固相微萃取技术。将所有茶叶样品在室温(25 ℃)下研磨成粉末, 过筛。精确称取 1.000±0.005 g 样品置于 20 mL 顶空瓶中, 检测前加入 2 μL 内标物(癸酸乙酯的正己烷溶液, 浓度为 100 μg/mL)。萃取时, 先将顶空瓶放入加热振荡器, 在 60 ℃ 条件下平衡 5 min; 随后使用萃取头在 60 ℃ 下萃取 40 min。进样时, 将萃取头置于 GC-MS 进样口解吸附 2 min。

气相色谱条件: 进样口温度设定为 250 ℃, 进样方式为不分流; 载气选用纯度高纯氦气, 流速维持在 1 mL/min; 柱温升温程序为: 初始温度 35 ℃, 恒温 2 min 后, 以 5 ℃/min 的速率升至 250 ℃, 不保持。

质谱条件: 离子源为电子轰击型, 电子能量 70 eV; 传输线及离子源温度均设置为 230 ℃, 四极杆温度 150 ℃; 检测模式为全扫描, 扫描的质荷比范围为 m/z 35~450; 溶剂延迟时间设定为 8 min。

定性与定量分析: 气相色谱-质谱联用仪检测得到的原始数据, 通过 Masshunter 工作站的未知物分析软件进行分析处理。定性分析时, 将原始数据与 NIST17 数据库信息比对, 以质谱匹配度得分超过 70.0 且线性保留指数(LRI)偏差在 10 个单位以内作为化合物确定的依据。化合物的 LRI 按照 Babushok 等[17] 报道的公式(1)计算:

$$LRI = 100 \times n + 100 \times \frac{t_x - t_n}{t_{n+1} - t_n} \quad 式(1)$$

式中: t_x、t_n 和 t_{n+1} 分别为待测物质、含有 n 个碳原子正构烷烃和含有 n+1 个碳原子正构烷烃的保留时间(min)。

化合物的相对含量, 则通过公式(2)由癸酸乙酯内标校正求得。

$$相对含量(ng/g) = \frac{化合物峰面积}{内标峰面积} \times \frac{内标质量(ng)}{样品质量(g)} \quad 式(2)$$

参考 Fang 等[18] 报道的公式计算相对气味活度值(Relative Odor Activity Value, ROAV), 具体见公式(3)。

$$ROAV = \frac{C_i}{OT_i} \quad 式(3)$$

式中: C_i 为化合物相对含量; OT_i 表示化合物的香气阈值。

1.3 数据处理

利用 Graphpad Prism10.1 软件进行均值、标准差计算及单因素方差分析, 并绘制柱状图, P<0.05 表示有显著性差异。采用 TBtools 绘制热图, 利用 SIMCA 14.0 对数据进行分析并作图。通过主成分分析(Orinciple Component Analysis, PCA)和 PCA 载荷图明确挥发性化合物和茶叶样品香气特征之间的关联。正交偏最小二乘法判别分析(Orthogonal Partial Least Squares-Discriminant Analysis, OPLS-DA)筛选组间差异化合物。

2 结果与分析

2.1 蝉茶的感官审评

蝉茶样品的感官审评结果见表 1。由表 1 可知, 蝉红茶与蝉绿茶均表现出花蜜香特征, 其香气浓郁度和滋味丰富度均优于对照茶样, 这可能与小绿叶蝉刺吸茶鲜叶后会诱导茶树产生特定的次生代谢产物, 主要是萜类与醇类, 导致鲜叶产生独特的香气和滋味物质有关[19]。蝉绿茶外形及叶底的色泽较对照绿茶偏黄, 这种特征性色泽变化可能与小绿叶蝉取食胁迫诱导鲜叶黄化, 叶片水分含量降低有关[20]。

表 1 茶叶样品的感官审评结果

Table 1 Sensory review results and scores of tea samples

编号	外形20%		汤色10%		香气30%		滋味30%		叶底10%		总分
	评语	得分	评语	得分	评语	得分	评语	得分	评语	得分	
GT	灰绿	87	黄绿尚明亮	88	栗香尚持久	87	较浓醇	88	嫩绿, 柔软	89	87.6
CG-1	灰黄绿	88	绿黄明亮	89.5	甜香, 花蜜香, 持久	92	尚浓醇, 带花蜜味	89	黄绿, 柔软	88	89.7
CG-2	灰黄绿	88	绿黄明亮	89.5	花蜜香, 炒米香, 尚持久	90	鲜爽, 带花蜜味	92	黄绿, 柔软	88	90.0
CG-3	灰黄绿	88	黄明亮	91	炒米香, 带花蜜香, 尚持久	89	浓醇带涩味, 带花蜜味	89	黄绿, 柔软	88	88.9
CG-4	灰黄绿	88	黄绿明亮	89	花蜜香	88	浓醇带涩味, 带闷, 花蜜味	87	黄绿, 柔软	88	87.8

续表 1

编号	外形20%		汤色10%		香气30%		滋味30%		叶底10%		总分
	评语	得分	评语	得分	评语	得分	评语	得分	评语	得分	
BT	红褐润	90	红亮	90	甜，有青气，有花香	83	醇和	86	红亮，柔软	88	86.5
CB-1	红褐，金毫尚显	89	红明	85	较鲜甜，带花蜜香	88	醇和，蜜香明显	91	红亮，较柔软	86	88.6
CB-2	红褐，金毫尚显	89	尚红亮	87	鲜甜，略带花蜜香	89	醇和，带蜜香，略带酸	89	红亮，较柔软	86	88.5
CB-3	红褐，金毫尚显	89	较红亮	89	鲜甜，略带花蜜香	89	醇和，略酸涩，略带蜜香	86	红亮，较柔软	86	87.8
CB-4	红褐，金毫尚显	89	较红亮	89	较鲜甜，略带花蜜香	87	醇和，略涩，略带蜜香	86	红亮，较柔软	86	87.2
CB-5	红褐，金毫尚显	89	较红亮	89	较鲜甜，略带花蜜香，略有青气	85	较醇和，蜜香浓郁	90	红亮，较柔软	86	87.8
CB-6	红褐，金毫尚显	89	较红亮	89	尚鲜甜，略带花蜜香	86	醇和，带酸味，有蜜香	87	红亮，较柔软	86	87.2

2.2　蝉茶的生化成分分析

2.2.1　蝉茶总黄酮含量分析　黄酮类化合物不仅具备较强的抗氧化功效，还能有效清除自由基，是茶叶发挥保健作用的重要功能性成分[21]，黄酮类物质主要呈现苦涩味[22]。蝉茶与对照组的总黄酮含量结果见图 1。由图 1 可知，茶样中总黄酮含量范围：对照绿茶为 4.78%、蝉绿茶为 4.88%~5.30%；对照红茶为 3.83%、蝉红茶为 3.41%~4.49%。与蝉绿茶样品相比，蝉红茶的总黄酮含量均显著降低（P<0.05）。有研究表明，同种原料加工而成的绿茶总黄酮含量显著高于红茶[23]，这与本研究结果一致。

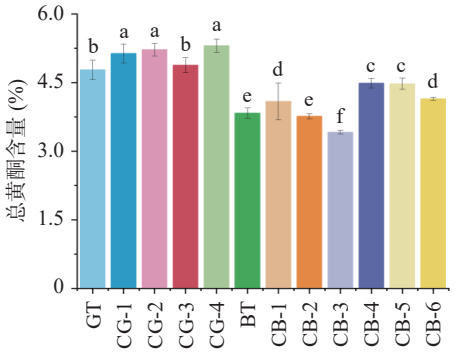


图 1　茶叶样品中总黄酮的含量

Fig.1　Content of total flavonoids in the tea samples

注：不同字母表示差异显著（P<0.05），图 2~图 5 同。

2.2.2　蝉茶游离氨基酸含量分析　氨基酸是茶叶鲜爽滋味的重要贡献物质[24]，蝉茶与对照组的游离氨基酸含量结果见图 2，由图可知茶叶中游离氨基酸含量范围：对照绿茶为 3.33%、蝉绿茶为 2.77%~2.93%；对照红茶为 4.03%、蝉红茶为 2.62%~2.92%。与对照绿茶相比，4 份蝉绿茶样品的游离氨基酸含量均显著降低（P<0.05）；与对照红茶相比，6 份蝉红茶样品的游离氨基酸含量均显著降低（P<0.05）。总体而言，蝉茶中游离氨基酸含量显著低于对照茶样。已有研究指出，茶小绿叶蝉刺吸茶叶后，鲜叶中氨基酸含量下降，是因为小绿叶蝉刺吸茶鲜叶会抑制鲜叶中氨基酸的合成及转运[25]。因此本文推测，蝉茶样品中游离氨基酸含量较低的原因可能源于其原料鲜叶的氨基酸含量已在小绿叶蝉刺吸作用下显著减少，从而导致最终成品蝉茶中的氨基酸含量明显降低。

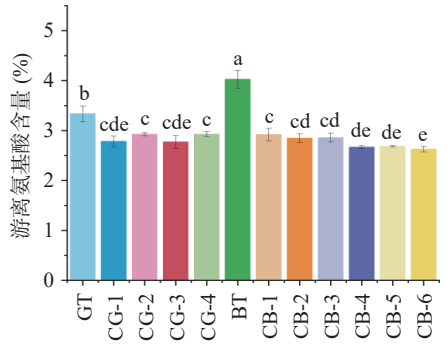


图 2　茶叶样品中游离氨基酸的含量

Fig.2　Content of free amino acids in tea samples

2.2.3　蝉茶茶多酚含量分析　茶多酚是重要的次级代谢物，也是茶汤苦涩味的重要贡献物质[26]。蝉茶与对照组的茶多酚含量结果见图 3。由图 3 可知，茶叶中茶多酚含量范围：对照绿茶为 22.37%、蝉绿茶为 24.53%~25.18%、对照红茶为 16.19%、蝉红茶为 14.36%~18.92%。与蝉绿茶样品相比，蝉红茶的茶多酚含量均显著降低（P<0.05）。已有研究指出，当采用相同鲜叶原料分别加工红茶和绿茶时，绿茶中的茶多酚含量通常高于红茶，原因在于红茶加工过程中内源酶（如多酚氧化酶和过氧化物酶）的酶促作用，导致茶多酚发生氧化聚合，转化为茶黄素、茶红素等氧化产物，从而使其含量下降[27]。这与本研究结果一致。

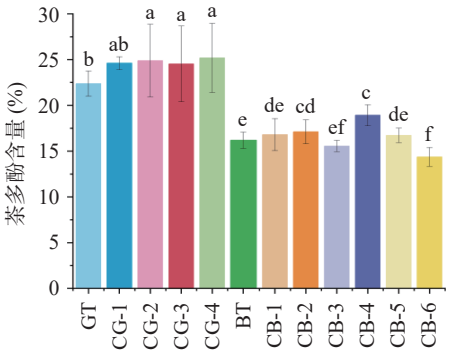


图 3　茶叶样品中茶多酚的含量

Fig.3　Content of tea polyphenols in tea samples

2.2.4　蝉茶可溶性糖含量分析　茶叶中的可溶性糖主要是单糖和双糖，是茶汤甘甜滋味的最主要来源之一[21]。蝉茶与对照组的可溶性糖含量结果见图 4。由图 4 可知，茶叶中可溶性糖含量范围：对照绿茶为

4.41%、蝉绿茶为 4.75%~5.54%；对照红茶为 4.17%、蝉红茶为 4.62%~5.49%。与对照绿茶相比，4 份蝉绿茶样品的可溶性糖含量均显著升高（P<0.05）；与对照红茶相比，6 份蝉红茶样品的可溶性糖含量均显著升高（P<0.05）。总体而言，蝉茶中可溶性糖含量显著高于对照茶样。有研究显示，小绿叶蝉刺吸可导致茶鲜叶中可溶性糖含量升高，并且随着小绿叶蝉刺吸程度加重，所制而成的蝉红茶中的可溶性糖含量亦有提高[28]。该研究与本文结果一致，与对照茶样相比，蝉茶样品中可溶性糖含量的增加，可能是由于茶鲜叶在小绿叶蝉刺吸作用下可溶性糖含量增加，从而使成品蝉茶中可溶性糖含量上升。

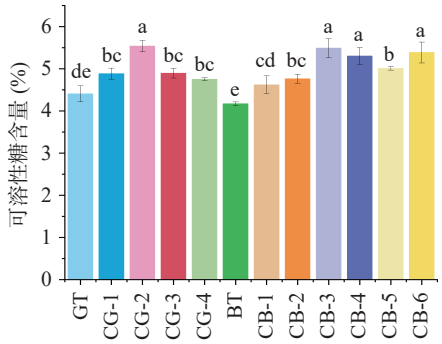


图 4 茶叶样品中可溶性糖的含量

Fig.4 Content of soluble sugar in tea samples

2.2.5 蝉茶咖啡碱含量分析 咖啡碱是最重要的生物碱[29]，生物碱是构成茶汤滋味的重要物质，也是茶叶中主要的生理活性成分。生物碱大多数本身味苦，但与多酚类及其氧化产物形成络合物以后便具有一种鲜爽滋味[30]。蝉茶与对照组的咖啡碱含量结果见图 5。由图 5 可知，茶叶中咖啡碱含量范围：对照绿茶为 25.74 mg/g、蝉绿茶为 24.85~25.19 mg/g；对照红茶为 27.41 mg/g、蝉红茶为 23.40~24.45 mg/g。与对照绿茶相比，CG-1 和 CG-3 蝉绿茶样品的咖啡碱含量均显著降低（P<0.05）；与对照红茶相比，6 份蝉红茶样品的咖啡碱含量均显著降低（P<0.05）。总体而言，蝉茶中咖啡碱含量低于对照茶样。

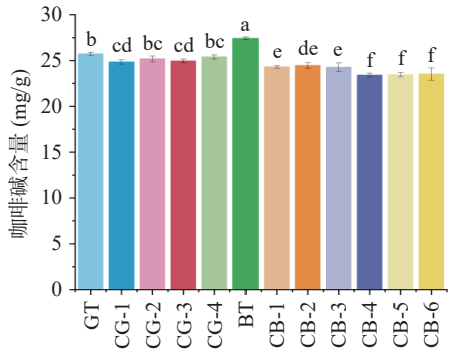


图 5 茶叶样品中咖啡碱的含量

Fig.5 Content of caffeine in tea samples

2.2.6 蝉茶儿茶素含量分析 儿茶素属于多酚类物质中的黄烷醇类，具有强抗氧化活性。儿茶素类物质的含量及其组成情况，与茶叶品质存在密切关联。其中，酯型儿茶素的苦涩味较浓，收敛性强；而简单型儿茶素苦涩味较淡，口感先苦后甘，收敛性较弱，且较为爽口[31]。

蝉茶与对照组的儿茶素组分含量见表 2。由表 2 可见，与对照绿茶相比，蝉绿茶总儿茶素含量显著降低（P<0.05），且 EGCG 含量均显著降低（P<0.05）。EGCG 是绿茶中含量较高的儿茶素类成分，是贡献涩味（收敛感）和苦味的最主要物质[32]，蝉绿茶的 EGCG 含量显著低于对照绿茶（P<0.05），这与感官审评的结果一致，蝉绿茶的苦涩味较对照绿茶明显降低。结合前文，蝉茶中可溶性糖含量的显著提升，可见小绿叶蝉刺吸鲜叶会显著降低绿茶中总儿茶素含量与 EGCG 含量，减轻茶汤苦涩感；同时显著提高可溶性糖含量。二者共同作用，可能是形成蝉茶“蜜香明显、滋味醇和”这一感官特征的重要原因之一。此外，与蝉绿茶样品相比，蝉红茶的总儿茶素含量均显著降低（P<0.05），原因可能在于儿茶素属于多酚类物

表 2 茶叶样品儿茶素组分含量（mg/g）

Table 2 Content of catechin fractions in tea samples (mg/g)

样品编号	GC	EGC	C	EGCG	EC	GCG	ECG	CG	总儿茶素	酯型儿茶素	简单儿茶素
GT	27.10±0.11^{a}	38.97±0.55^{a}	5.27±0.05^{f}	74.98±0.5^{a}	7.20±0.04^{b}	1.17±0.02^{a}	13.50±0.06^{c}	1.59±0.00^{bc}	168.19±1.27^{a}	91.24±0.56^{a}	78.54±0.72^{a}
CG-1	18.39±0.14^{gh}	37.32±0.63^{b}	5.79±0.43^{de}	66.75±0.74^{bc}	8.17±0.10^{a}	1.11±0.01^{ab}	14.35±0.16^{b}	1.57±0.00^{d}	151.88±2.04^{b}	83.78±0.91^{a}	69.67±1.18^{b}
CG-2	18.66±0.26^{fg}	37.23±0.39^{b}	6.42±0.09^{c}	67.16±1.10^{b}	8.21±0.10^{a}	1.05±0.01^{b}	14.90±0.26^{a}	1.59±0.00^{b}	153.63±2.18^{b}	84.70±1.37^{a}	70.53±0.82^{b}
CG-3	18.22±0.10^{h}	37.57±0.23^{b}	5.93±0.47^{d}	66.00±0.20^{c}	8.46±0.51^{a}	1.11±0.02^{ab}	14.18±0.19^{b}	1.58±0.00^{cd}	151.45±0.45^{b}	82.87±0.36^{a}	70.17±0.79^{b}
CG-4	18.70±0.11^{fg}	37.41±0.23^{b}	5.99±0.07^{cd}	66.16±0.35^{c}	8.31±0.05^{a}	1.16±0.10^{ab}	14.81±0.09^{a}	1.71±0.01^{a}	152.55±0.87^{b}	83.84±0.54^{a}	70.42±0.34^{b}
CG样品平均值	18.49±0.25^{gh}	37.38±0.37^{b}	6.03±0.37^{cd}	66.52±0.76^{bc}	8.29±0.25^{a}	1.11±0.06^{ab}	14.56±0.35^{a}	1.61±0.06^{b}	152.38±1.59^{b}	83.8±1.01^{a}	70.20±0.79^{b}
BT	23.44±0.13^{cd}	2.46±0.02^{e}	5.99±0.04^{cd}	7.13±0.05^{f}	1.17±0.01^{fg}	0.39±0.01^{ef}	3.83±0.03^{g}	–	44.41±0.10^{e}	11.35±0.06^{b}	33.07±0.14^{d}
CB-1	25.07±0.23^{b}	2.73±0.01^{e}	7.69±0.06^{a}	9.83±0.09^{d}	3.12±0.01^{e}	0.59±0.06^{e}	7.11±0.07^{d}	–	56.15±0.43^{c}	17.53±0.20^{b}	38.62±0.27^{c}
CB-2	22.98±0.31^{d}	2.08±0.01^{e}	5.68±0.19^{def}	5.45±0.07^{g}	1.64±0.02^{e}	0.35±0.05^{ef}	4.11±0.20^{f}	–	42.29±0.62^{e}	9.91±0.24^{b}	32.38±0.39^{e}
CB-3	20.81±0.42^{e}	2.32±0.78^{e}	4.55±0.36^{g}	4.29±0.09^{hi}	1.15±0.02^{fg}	0.33±0.04^{ef}	2.98±0.07^{i}	–	36.43±1.59^{f}	7.60±0.16^{b}	28.83±1.52^{g}
CB-4	23.80±0.21^{c}	2.32±0.04^{e}	6.97±0.12^{b}	7.92±0.10^{e}	2.56±0.07^{d}	0.55±0.10^{cd}	6.11±0.07^{e}	–	50.22±0.48^{d}	14.58±0.07^{b}	35.64±0.42^{d}
CB-5	20.82±0.13^{e}	2.85±0.77^{e}	5.45±0.40^{ef}	4.78±0.04^{gh}	1.42±0.01^{f}	0.42±0.10^{de}	3.38±0.10^{h}	–	39.12±1.09^{f}	8.58±0.20^{b}	30.54±1.23^{f}
CB-6	18.95±0.58^{f}	2.34±0.61^{e}	3.59±0.26^{h}	3.71±0.08^{i}	0.93±0.03^{g}	0.32±0.02^{f}	2.45±0.08^{j}	–	32.30±1.59^{g}	6.49±0.17^{b}	25.82±1.43^{h}
CB样品平均值	22.07±2.15^{d}	2.44±0.51^{e}	5.66±1.44^{def}	6.00±2.23^{g}	1.80±0.80^{e}	0.43±0.12^{de}	4.36±1.74^{f}	–	42.75±8.43^{e}	10.78±4.08^{b}	31.97±4.44^{e}

注：-表示低于检测限；同列不同字母表示差异显著（P<0.05）。

质，红茶加工过程中内源酶（如多酚氧化酶和过氧化物酶）的酶促作用，导致茶多酚发生氧化聚合，转化为茶黄素、茶红素等氧化产物，从而使其含量下降[27]。

2.3　蝉茶的挥发性成分分析

2.3.1　挥发性成分分类及相对含量　茶叶样品挥发性成分检测结果见图 6 和表 3。结果显示，12 份茶样共鉴定出 88 种挥发性化合物，包括酯类 12 种、醇类 10 种、杂环化合物 3 种、醛类 10 种、烃类 23 种、酮类 7 种、萜类 14 种、含氮化合物 4 种、芳香烃 5 种。绿茶中鉴定出 48~54 种，红茶中鉴定出 65~70 种。其中，茶小绿叶蝉是否刺吸制成的相同种类茶样具有明显差异。蝉绿茶香气总量为 19807.32~33017.63 ng/g，均高于对照绿茶的 18480.13 ng/g。对于红茶，蝉红茶的香气总量为 40701.97~58342.81 ng/g，均高于对照红茶的 31593.87 ng/g。综上，红茶的挥发性化合物种类与数量均高于绿茶茶样。

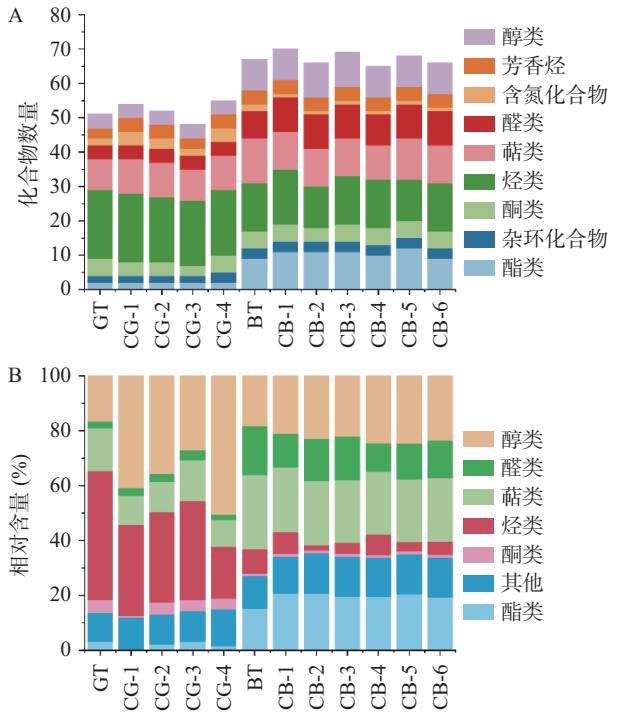


图 6　茶叶样品的化合物数量柱状图（A）及相对含量百分比柱状图（B）

Fig.6　Number histogram (A) and relative content percentage histogram (B) of compounds in tea samples

注：其他类包括芳香烃、含氮化合物与杂环化合物。

图 6 结果可见，红茶与绿茶之间、蝉茶与对照茶叶之间挥发性化合物的数量与含量均不相同。具体而言，醇类、烃类是绿茶中相对含量较高的挥发性组分，其次是萜类与其他类（包含芳香烃、杂环化合物与含氮化合物），其中蝉绿茶的醇类物质占比（27%~50%）显著高于（P<0.05）对照绿茶（17%），烃类物质占比显著低于（P<0.05）对照绿茶，其他类物质占比变化不明显。在红茶中，醇类、萜类与酯类物质占比相对较高，且蝉红茶与对照红茶之间的相对含量占比差异不显著。蝉红茶与蝉绿茶之间，萜类与酯类物质占比在蝉红茶中显著高于蝉绿茶（P<0.05）。这可能由于红茶发酵过程中茶叶脱水引发的酶促反应（如糖苷水解、脂质氧化）密切相关[33]。

2.3.2　不同茶类挥发性成分分析

2.3.2.1　主成分分析　PCA 是一种去除随机变量间相关性的线性变换，形成主成分（Principal Component, PC）变量，以展示数据特征的方法[34−35]。将所有挥发性成分进行 PCA，生成 5 个主成分，验证 Significance 结果均为 R1（结果显著），模型累计解释率 R^2X（cum）达到 0.968，整体预测能力 Q^2（cum）为 0.841，表明模型拟合度高，具有一定预测能力，PC1~5 解释率 R^2X 分别为 0.628、0.208、0.0807、0.0333、0.0196，每个 PC 预测能力 Q^2 值分别为 0.476、0.411、0.279、0.988、0.207。如图 7A 所示，每份茶样实现了较好地区分，且组内重合度较好。在 PCA 载荷图中，距离中心点越远的香气成分认为对样本分类贡献越大。如图 7B 所示，脱氢芳樟醇（P1=0.470, P2=0.800）、（3E）-4,8-二甲基-1,3,7-壬三烯（P1=0.255, P2=0.153）、苯乙腈（P1=0.071, P2=0.023）等香气物质对蝉绿茶区别于其他样本贡献较大；同理，正十二烷（P1=0.083, P2=−0.119）、正十一烷（P1=0.182, P2=−0.237）对于对照绿茶区别于其他样本贡献较大；而香叶醇（P1=−0.395, P2=0.293）、顺式芳樟醇氧化物（呋喃型）（P1=−0.331, P2=0.138）、水杨酸甲酯（P1=−0.312, P2=0.178）、苯甲醛（P1=−0.258, P2=0.198）、芳樟醇（P1=−0.221, P2=0.134）等对蝉红茶区别于其他样本贡献较大，对照红茶离中心点最近。

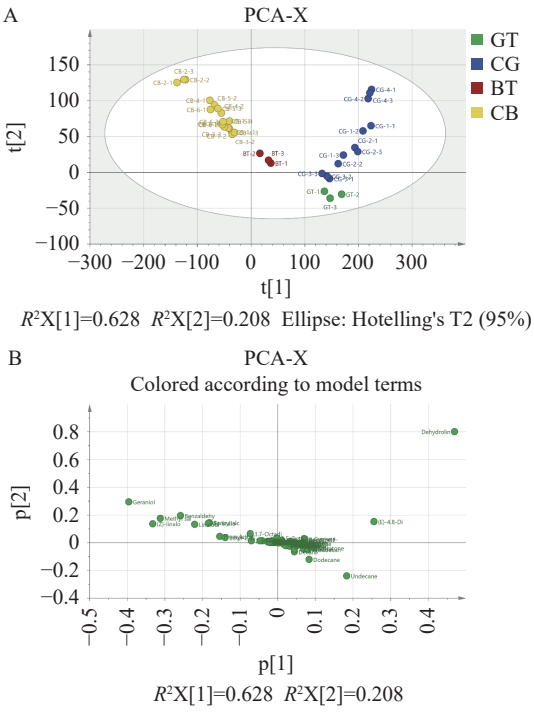


图 7　茶叶样品的 PCA 图（A）及 PCA 载荷图（B）

Fig.7　PCA diagram (A) and PCA load diagram (B) of tea samples

表 3　茶叶样品挥发性成分检测结果

Table 3　Results of volatile components of tea samples

物质	相对含量(ng/g)											
	GT	CG-1	CG-2	CG-3	CG-4	BT	CB-1	CB-2	CB-3	CB-4	CB-5	CB-6
水杨酸甲酯	75.27±3.58^{e}	202.19±15.49^{e}	185.21±62.36^{e}	195.28±0.25^{e}	180.56±5.38^{e}	1589.95±184.37^{d}	3401.23±116.46^{b}	4444.34±70.25^{a}	2904.04±101.51^{c}	3707.3±519.14^{b}	3419.95±359.05^{b}	3296.01±313.19^{bc}
2,2,4-三甲基戊二醇异丁酯	512.51±122.84^{a}	227.54±62.7^{cd}	426.43±182.66^{ab}	421.57±71.37^{ab}	357.87±74.41^{bc}	183.98±9.03^{d}	197.63±8.15^{d}	266±12.32^{cd}	204.76±14.24^{d}	179.75±47.97^{d}	254.45±29.62^{cd}	295.08±55.65^{cd}
对叔丁基苯甲酸甲酯	–	–	–	–	–	9.17±0.88^{d}	15.08±0.29^{c}	23.05±0.6^{a}	14.78±0.81^{c}	16.67±2.34^{bc}	16.47±2.03^{bc}	18.84±2.43^{b}
己酸己酯	–	–	–	–	–	–	53.84±2.99^{b}	62.74±4.27^{a}	42.31±1.15^{c}	–	24.41±2.45^{d}	–
己酸叶醇酯	–	–	–	–	–	137.93±18.09^{e}	396.99±21.64^{bc}	473.68±37.41^{a}	308.49±12.22^{d}	411.13±55.04^{abc}	434.57±45.1^{ab}	354.5±57.36^{cd}
反式-2-己烯基己酸酯	–	–	–	–	–	102.95±12.9^{cd}	154.73±6.8^{b}	184.73±11.35^{a}	120.3±10.33^{c}	86.96±14.89^{de}	95.6±12.24^{de}	78.79±13.99^{e}
2-(5-甲基-5-乙烯基四氢呋喃-2-基)丙-2-基碳酸酯	–	–	–	–	–	2494.96±209.64^{d}	4132.83±77.82^{bc}	5854.75±48.9^{a}	3925.08±175.06^{c}	4549.96±643.29^{b}	4519.95±298.05^{b}	4237.08±244.82^{bc}
顺式-3-己烯醇 2-甲基丁酸酯	–	–	–	–	–	–	194.16±16.58^{b}	230.27±19.57^{a}	145.9±6.99^{c}	140.08±18.53^{c}	131.31±12.07^{cd}	105.43±12.76^{d}
异戊酸叶醇酯	–	–	–	–	–	87.36±17.18^{cd}	134.55±9.81^{b}	157.07±12.71^{a}	106.67±3.19^{c}	70.68±11.99^{d}	66.45±5.74^{d}	–
丁酸叶醇酯	–	–	–	–	–	104.44±16.53^{d}	225.72±12.77^{a}	223.97±15.74^{a}	142.38±3.26^{c}	–	195.61±19.03^{b}	149.37±13.09^{c}
丁酸反-2-己烯基酯	–	–	–	–	–	123.9±22.84^{a}	144.84±5.21^{a}	128.24±12.68^{a}	77.04±3.47^{b}	80.16±15.72^{b}	60.24±9.77^{bc}	46.35±7.11^{c}
乙酸叶醇酯	–	–	–	–	–	–	–	–	–	71.4±13.27^{a}	50.13±7.99^{b}	–
橙花醚	–	–	–	–	71.98±6.76^{cd}	37.04±4.73^{e}	56.2±1.57^{d}	94.11±2.5^{a}	67.89±4.76^{cd}	79.72±14.54^{bc}	76.29±4.51^{cd}	84.28±7.33^{b}
2-戊基呋喃	556.8±60.32^{ab}	707.56±135.76^{a}	718.29±130.99^{a}	714.78±40.66^{a}	710.33±51.74^{a}	362.29±50.7^{c}	527.43±29.53^{b}	692.75±0.79^{a}	523.77±39.85^{b}	545.77±74.1^{b}	540.15±48.55^{b}	514.1±13.22^{b}
反式芳樟醇氧化物（吡喃型）	217.76±12.81^{e}	194.1±36.98^{e}	231.5±39.37^{e}	258.7±20.79^{e}	240.75±27.45^{e}	925.91±97.81^{d}	1278.35±31.68^{c}	2041.69±46.64^{a}	1447.46±93.45^{bc}	1572.36±260.25^{b}	1577.07±138.68^{b}	1624.6±83.42^{b}
甲基庚烯酮	405.65±69.92^{b}	558.41±129.62^{a}	599.63±124.81^{a}	598.89±30.48^{a}	583.34±21.86^{a}	85.55±8.29^{d}	128.3±3.42^{cd}	191.01±3.61^{c}	127.5±8.11^{cd}	149.5±29.68^{cd}	150.03±15.25^{cd}	132.23±3.4^{cd}
苯乙酮	71.46±1.08^{b}	–	–	–	148.29±8.37^{a}	–	–	–	–	–	–	–
3-十一酮	49.96±11.26^{ab}	69.46±25.82^{a}	69.66±23.8^{a}	49.26±20.26^{ab}	44.16±2.82^{abc}	40.68±5.92^{bc}	36.35±5.45^{bc}	–	20.01±3.2^{cd}	40.31±4.54^{bc}	6.39±1.64^{d}	31.52±4.87^{bcd}
异丙叉丙酮	232.41±30.36^{b}	348.86±98.05^{ab}	348.93±15.86^{ab}	–	374.72±19.4^{a}	–	–	–	–	–	–	–
3,5-辛二烯-2-酮	99.85±17.57^{ef}	194.54±28.51^{ab}	182.83±40.05^{abc}	134.8±7.72^{de}	165.08±6.03^{bcd}	77.62±6.87^{f}	153.36±7.27^{cd}	205.9±3.11^{a}	138.15±6.87^{de}	167.58±31.81^{abcd}	165.47±14.03^{bcd}	162.88±18.91^{bcd}
橙化基丙酮	–	–	–	–	–	28.16±1.88^{d}	49.94±1.99^{c}	75.69±4^{a}	50.85±3.95^{bc}	62.93±12.11^{abc}	60.39±8.42^{abc}	67.14±14.78^{ab}
6-甲基-5-乙基-3-庚烯-2-酮	–	–	–	–	–	33.28±3.17^{c}	84.82±12.26^{b}	117.77±2.73^{a}	84.55±7.14^{b}	99.09±26.73^{ab}	89.66±11.09^{b}	93.86±5.73^{b}
5-甲基十一烷	38.93±7.08^{ab}	46.95±15.6^{a}	41.29±7^{abc}	31.04±3.8^{bcd}	–	29.45±5.73^{bcd}	27.22±3.58^{bcde}	–	12.54±1.3^{e}	26.31±5.32^{cde}	–	16.26±1.04^{de}
3-甲基十一烷	204.53±29.87^{ab}	262.25±70.19^{a}	250.38±61.29^{ab}	213.09±41.08^{ab}	140.35±21.22^{b}	–	–	–	–	–	–	–
正十一烷	2813.53±449.57^{ab}	3613.42±725.08^{a}	3546.41±749.54^{ab}	2637.77±744.31^{bc}	2000.46±175.19^{cd}	1542.6±338.94^{de}	1604.31±163.72^{de}	–	805.51±131.49^{ef}	1510.23±157.1^{de}	433.53±170.6^{f}	828.27±127.51^{ef}
3-甲基十三烷	257.7±30.95^{ab}	310.03±46.85^{a}	323.29±68.29^{a}	209.94±48.05^{c}	232.87±31.94^{bc}	109.17±12.16^{d}	103.74±10.45^{d}	36.85±8.22^{e}	65.89±11.3^{de}	119.42±20.44^{d}	41.42±5.8^{e}	75.99±7.65^{de}
正十四烷	380.75±46.42^{ab}	425.62±55.85^{a}	402.72±67.28^{ab}	317.92±36.2^{c}	347.1±52.71^{bc}	140.52±18.72^{d}	134.74±13.39^{d}	96.8±15.03^{d}	101.07±10.85^{d}	146.59±20.97^{d}	94.49±7.22^{d}	111.52±18.3^{d}
3-甲基十五烷	92.6±17.82^{a}	93.24±8.82^{a}	105.7±24.1^{a}	84.45±6.2^{a}	104.03±17.56^{a}	28.17±1.2^{b}	21.18±2.29^{b}	24.02±1.74^{b}	20.95±3.13^{b}	29.27±8.63^{b}	21.56±0.4^{b}	19.35±2.64^{b}

续表 3

物质	相对含量(ng/g)											
	GT	CG-1	CG-2	CG-3	CG-4	BT	CB-1	CB-2	CB-3	CB-4	CB-5	CB-6
十五烷	39.15±12.86^{a}	–	–	29.69±11.36^{ab}	31.83±3.53^{ab}	–	15.22±1.16^{c}	24.09±1.06^{bc}	10.91±0.08^{c}	–	24.76±1.79^{bc}	–
正十六烷	78.41±27.34^{a}	46.26±5.23^{cd}	68.6±21.53^{ab}	58.81±5.96^{bc}	56.87±5.23^{bc}	28.11±1.83^{cd}	21.87±3.31^{d}	27.62±0.96^{cd}	16.11±0.82^{d}	20.07±4.69^{d}	30.76±2.33^{cd}	16.46±3.7^{d}
2,6,11-三甲基十二烷	72.64±13.82^{a}	60.58±11.38^{ab}	58.4±10.35^{ab}	56.88±7.07^{ab}	44.4±9.08^{b}	–	–	–	–	–	–	–
正十二烷	800±187^{a}	946.08±204.76^{a}	909.02±162.11^{a}	622.22±148.83^{b}	562.83±94.31^{b}	392.86±87.07^{bc}	400.62±51.04^{bc}	–	204.15±34.58^{c}	425.57±79.65^{bc}	–	275.57±10.57^{c}
4-乙基癸烷	26.34±2.82^{a}	33.19±11.13^{a}	32.92±9.97^{a}	25.46±5.13^{a}	20.93±2.27^{a}	–	–	–	–	–	–	–
2-甲基癸烷	76.75±8.43^{a}	–	89.39±25.49^{a}	77.19±17.43^{ab}	–	62.55±11.28^{ab}	67.94±10.63^{ab}	49.89±3.67^{b}	–	–	–	–
正癸烷	276.83±13.18^{ab}	335.12±90.91^{a}	312.83±65.69^{ab}	274.26±16.54^{abc}	193.63±26.26^{cd}	244.1±60.53^{bc}	241.05±39.5^{bc}	–	113.78±14.55^{de}	210.55±24.24^{e}	70.7±36.13^{e}	118.23±26.57^{de}
壬基环戊烷	42.89±7.98^{ab}	50.79±7.96^{ab}	53.83±12.47^{a}	40.06±6.6^{b}	43.06±5.58^{ab}	17.89±2.1^{c}	20.12±1.49^{c}	15.02±1.07^{c}	15.46±2.69^{c}	25.68±4.48^{c}	–	17.64±1.59^{c}
(3E,5E)-2, 6-二甲基-1,3,5,7-辛四烯	62.25±11.85^{c}	328.07±86.38^{a}	201.66±20.5^{b}	–	306.88±30.55^{c}	40.81±9.29^{c}	43.4±7.4^{c}	41.4±4.3^{c}	26.64±0.45^{c}	50.94±9.54^{c}	45.01±3.56^{c}	31.67±1.68^{c}
5-乙基癸烷	57.87±13.66^{a}	79.46±26.4^{a}	88.34±7.29^{a}	69.44±12.53^{a}	–	–	–	–	–	–	–	–
2,6,10-三甲基十三烷	74.37±13.67^{a}	65.92±5.52^{a}	65.18±9.26^{a}	62.03±14.83^{a}	68.05±14.05^{a}	22.85±2.55^{b}	18.25±1.73^{b}	20.9±1.66^{b}	13.71±0.67^{b}	15.88±3.81^{b}	18.96±0.45^{b}	11.46±5.46^{b}
2,6-二甲基-2,4,6-辛三烯	–	81.79±21.18^{b}	–	–	96.43±7.25^{c}	27.99±3.28^{e}	32.09±1.1^{de}	47.4±2.32^{c}	32.46±2.15^{de}	49.13±3.42^{c}	41.07±5.51^{cd}	45.45±0.45^{cd}
1,1,4,5-四甲基茚满e	–	77.84±13.75^{a}	52.17±6.09^{b}	–	77.38±12.18^{a}	–	–	–	–	–	–	–
1-十二烯	40.43±7.97^{a}	49.97±13.96^{a}	48.22±11.2^{a}	38.01±7.02^{a}	31.72±1.19^{a}	–	–	–	–	–	–	–
对薄荷-1,3,8-三烯	34.74±2.38^{b}	61.2±12.67^{a}	–	35.91±7.31^{b}	55.57±3.74^{a}	–	–	–	–	–	–	–
(3E)-4,8-二甲基-1,3,7-壬三烯	3206.02±664.35^{a}	2606.33±692.01^{ab}	2239.61±266^{b}	2254.42±187.21^{b}	1826.18±257.93^{b}	–	434.51±62.27^{c}	456.77±85.97^{c}	–	596.09±37.09^{c}	405.68±44.59^{e}	294.92±25.4^{c}
A-罗勒烯	–	–	–	–	–	123.44±13.58^{e}	239.44±19.2^{bc}	263.88±22^{bc}	178.08±2.46^{d}	336.37±30.76^{a}	269.39±19.41^{b}	233.45±4.52^{c}
罗勒烯	973.75±222.62^{a}	842.8±252.47^{a}	760.97±98.5^{a}	720.81±62.73^{a}	771.81±102.43^{a}	–	–	–	–	–	–	–
β-石竹烯	183.72±31.95^{a}	133.63±15.44^{b}	135.77±29.54^{b}	139.42±26.16^{b}	146.57±26.67^{b}	60.31±9.03^{c}	62.69±2.6^{c}	88.02±4.32^{c}	60.77±5.32^{c}	73.06±20.54^{c}	68.32±4.12^{c}	50.54±13.11^{c}
α-松油醇	69.55±4.55^{de}	96.35±17.98^{abc}	89.24±16.93^{bcd}	84.32±4.75^{bcde}	113.96±6.54^{a}	67.12±7.76^{e}	64.95±1.8^{e}	99.7±0.82^{ab}	65.96±3.94^{e}	83.4±14.75^{bcde}	77.86±9.77^{cde}	82.29±6.86^{bcde}
A-二去氢菖蒲烯	28.73±2.11^{bcd}	37.23±5.05^{b}	35.23±6.9^{b}	29.41±4.6^{bc}	46.5±6.36^{a}	16.41±1.39^{e}	18.79±0.82^{e}	29.8±0.64^{bc}	20.1±0.67^{e}	23.7±5.1^{cde}	24.34±2.45^{cde}	21.85±4.96^{cd}
β-紫罗酮	150.48±17.21^{bc}	192.11±22.51^{ab}	170.84±35.62^{abc}	150.36±7.81^{bc}	169.12±11.97^{abc}	151.82±7.18^{bc}	138.69±6.61^{c}	211.05±3.37^{a}	148.05±9.5^{bc}	155.43±25.3^{bc}	165.56±21.69^{bc}	186±33.4^{ab}
(+/-)-反式-菖蒲烯	103.5±8.37^{a}	99.27±12.56^{a}	98.86±22.47^{a}	99.55±21.86^{a}	124.1±22.66^{a}	40.48±5.68^{c}	48.91±1.14^{bc}	72.45±3.79^{b}	50.55±2.4^{bc}	57.19±14.21^{bc}	59.65±5.28^{bc}	46.96±12.3^{bc}
芳樟醇	1137.86±57.74^{d}	1124.54±196.13^{d}	1204.46±273.41^{d}	1353.62±98.3^{d}	1273.33±28.02^{d}	3929.64±360.18^{ab}	3587.64±80.36^{c}	3991.64±50.77^{a}	2890.95±80.36^{c}	3653.88±417.77^{ab}	2951.12±267.5^{c}	2946.28±127.26^{c}
香叶醇	140.01±15.09^{e}	233.48±43.59^{e}	227.44±64.34^{e}	269.89±14.03^{e}	153.85±14.07^{e}	3694.94±349.16^{d}	5776.58±124.55^{bc}	8331.01±30.36^{a}	5484.28±352.61^{c}	6209.59±904.12^{b}	6294.82±722.2^{b}	6306.66±614.66^{b}
(+)-柠檬烯	81.76±3.08^{de}	217.2±51.72^{b}	160.95±21.18^{c}	98.39±2.84^{d}	259.28±22.96^{a}	50.51±1.67^{e}	–	–	–	–	51.16±6.73^{e}	51.51±0.92^{e}
3-萜烯	–	94.09±25.55^{b}	58.74±14.16^{b}	–	166.31±12.57^{a}	–	–	–	–	–	–	–
大马士酮	–	–	–	–	–	58.78±8.86^{c}	59.05±8^{c}	88.66±2.01^{a}	70.25±5.08^{bc}	67.45±7.87^{bc}	66.37±11.11^{bc}	76.5±5.54^{b}
茶螺烷	–	–	–	–	–	332.29±44.75^{b}	378.46±13.93^{b}	499.54±22.9^{a}	335.01±3.98^{b}	377.82±60.12^{b}	359.59±34.33^{b}	322.51±29^{b}
橙花醇	–	–	–	–	–	121.02±11.65^{c}	160.83±3.63^{b}	237.12±5.41^{a}	160.93±15.93^{b}	179.45±37.18^{b}	173.25±18.37^{b}	185.59±20.12^{b}
反式-橙花叔醇	–	–	–	–	–	14.77±1.11^{c}	21.37±0.73^{b}	31.57±2.03^{a}	20.72±2.22^{b}	–	18.92±1.75^{b}	–
β-环柠檬醛	141.85±16.27^{a}	147.22±25.31^{ab}	141.37±24.29^{ab}	126.04±4.68^{b}	147.46±7.26^{ab}	70.23±6.15^{cd}	62.32±2.75^{d}	93.36±1.93^{c}	64.73±2.66^{d}	71.32±14.46^{cd}	72.43±7.08^{cd}	73.65±8.33^{cd}

续表 3

物质	相对含量(ng/g)											
	GT	CG-1	CG-2	CG-3	CG-4	BT	CB-1	CB-2	CB-3	CB-4	CB-5	CB-6
藏红花醛	42.62±2.68^{e}	74.13±13.27^{b}	72.56±14.67^{b}	48.56±2.95^{c}	105.86±4.98^{a}	31.54±1.9^{d}	18.6±0.45^{d}	29.26±0.17^{d}	–	27.6±4^{d}	21.2±3.61^{d}	21.1±5.21^{d}
苯甲醛	251.75±31.21^{e}	553.04±145.3^{e}5	490.11±110.2^{e}6	539.34±15.5^{e}	391.15±5.55^{e}	2085.81±192.91^{d}	2493.55±51.34^{c}	4360.32±98.32^{a}	3221.72±179.66^{b}	2494.3±463.02^{c}	2989.6±277.46^{b}	3103.48±130.36^{b}
β–环高柠檬醛	23.11±2.12^{bc}	27.35±5.42^{bc}	26.99±4.88^{bc}	23.23±1.71^{bc}	26.67±1.22^{bc}	28.03±2.26^{b}	21.35±1.09^{c}	33.38±0.15^{a}	24.41±0.43^{bc}	24.74±4.42^{bc}	26±1.96^{bc}	26.66±2.5^{bc}
正壬醛	–	–	–	–	–	630.65±94.44^{a}	109.8±10.13^{a}	154.78±5.64^{a}	134.48±13.76^{a}	104.92±27.1^{a}	124.81±12.72^{a}	121.28±8.04^{a}
己醛	–	–	–	–	–	97.85±6.8^{e}	122.59±0.69^{d}	199.93±3.59^{a}	165.52±8.9^{b}	85.86±11.91^{e}	144.13±15.49^{c}	135.4±4.67^{cd}
α–柠檬醛	–	–	–	–	–	55.91±4.71^{d}	134.26±1.16^{bc}	187.98±6.9^{a}	133.96±7.23^{bc}	129.87±24.57^{c}	162.4±20.49^{ab}	160.7±26.62^{ab}
苯乙醛	–	–	–	–	–	2291.64±142.38^{b}	1551.73±69.42^{cd}	2591.01±44.9^{a}	1773.39±103.81^{c}	1267.25±322.09^{d}	1411.17±125.34^{d}	1487.41±132^{cd}
反-2-辛烯醛	–	–	–	–	–	–	30.53±1.95^{d}	44.59±3.06^{a}	38.92±3.48^{b}	–	36.89±2.83^{ab}	32.18±2.04^{cd}
反-反-2, 4-庚二烯醛	–	–	–	–	–	318.13±31.58^{d}	848.38±30.83^{bc}	1202.43±67.14^{a}	876.89±56.13^{bc}	756.3±160.44^{c}	929.97±73.19^{b}	915.12±82.74^{b}
茶吡咯	–	292.35±56.85^{a}	185.69±29.77^{b}	79.59±6.93^{c}	256.14±10.9^{a}	78.36±3.23^{c}	–	–	–	–	–	–
吲哚	578.31±115.07^{a}	364.25±70.85^{c}	–	436.21±28.59^{ab}	505.05±39.21^{bc}	–	–	–	–	–	–	–
2-乙酰吡咯	12.69±1.14^{c}	125.5±24.41^{a}	58.8±12.58^{b}	–	152.86±10.86^{a}	–	–	–	–	–	–	–
苯乙腈	–	324.74±93.96^{b}	260.26±62.91^{c}	–	459.85±34.15^{a}	98.4±9.6^{d}	149.07±6.4^{c}	203.32±4.02^{c}	135.03±6.24^{c}	129.06±27.32^{c}	118.28±10.77^{c}	114.14±12.01^{c}
反式芳樟醇氧化物(呋喃型)	–	–	337.69±126.88^{b}	429.36±20.12^{a}	–	–	–	–	–	–	–	–
邻伞花烃	118.67±8.35^{de}	367.13±82.95^{b}	280.59±42.39^{c}	156.62±9.13^{d}	685.87±25.03^{a}	78.58±12.59^{de}	68.83±2.83^{f}	105.17±5.08^{def}	76.87±2.24^{de}	109.89±14.61^{def}	107.21±14.97^{def}	94.28±4.27^{def}
1,1,6-三甲基-1,2-二氢萘	–	41.07±7.44^{b}	–	–	98.65±13.07^{a}	34.77±5.57^{b}	10.67±0.73^{c}	16.44±0.99^{c}	12.33±1.06^{c}	13.85±2.33^{c}	17.29±1.72^{c}	13.08±2.03^{c}
1-异丙烯基-3-甲基苯	133.31±6.01^{de}	396.95±76.41^{b}	302.97±46.69^{c}	181.66±5.65^{d}	680.93±79.1^{a}	108.77±21.34^{e}	98.31±5.72^{e}	137.64±2.74^{de}	98.66±3.26^{e}	145.61±22.48^{de}	133.44±14.68^{de}	120.67±3.55^{de}
顺式芳樟醇氧化物(呋喃型)	333.71±12.83^{e}	539.35±60.97^{e}	525.24±154.14^{e}	–	529.31±49.07^{e}	2020.63±169.48^{d}	3719.29±77.52^{bc}	5327.42±44.03^{a}	3576.02±161.93^{c}	4110.42±580.9^{b}	4054.77±284.59^{b}	3817.16±223.71^{bc}
脱氢芳樟醇	2674.6±112.21^{e}	11287.86±2446.6^{b}	9086.49±1617.07^{c}	4752.28±303.57^{d}	16103.67±684.78^{a}	1939.24±174.86^{e}	2407.9±71.35^{e}	3167.96±72.77^{de}	2151.91±126.15^{e}	3288.86±584.2^{de}	3102.42±265.19^{e}	2471.81±128.3^{e}
苯甲醇	63.32±2.23^{e}	88.01±17.96^{e}	86.29±14.56^{e}	77.33±3.81^{e}	97.25±2.78^{e}	573.31±53.33^{d}	1105.87±26.5^{c}	1740.94±28.31^{a}	1177.23±77.3^{c}	1336.03±190.19^{b}	1383.54±123.19^{b}	1399.21±95.48^{b}
2-(4-甲基苯基)丙-2-醇	177.52±3.12^{cd}	206.93±31.65^{bc}	217.42±44.41^{abc}	251.15±11.8^{a}	233±18.71^{ab}	88.4±9.54^{g}	124.62±2.18^{fg}	186.91±0.64^{cde}	121.95±7.34^{fg}	156.54±29.72^{def}	151.62±14.69^{ef}	155.77±16.04^{def}
2,6-二甲基-3,7-辛二烯-2,6-二醇	160.89±16.4^{cd}	189.11±20.95^{cd}	232.1±51.86^{cd}	271.98±21.24^{c}	201.46±15.08^{cd}	148.73±11.16^{d}	368.45±21.43^{c}	598.09±48.34^{a}	383.53±66.08^{c}	440.25±108.72^{bc}	447.2±68.04^{bc}	480.75±50.38^{b}
苯乙醇	–	–	–	–	–	2077.9±183.85^{d}	4063.96±82.5^{c}	6089±74.51^{a}	4084.61±302.4^{c}	5146.08±879.16^{b}	4878.28±451.33^{b}	4848.58±364.09^{b}
反式-3-己烯-1-醇	–	–	–	–	–	347.06±26.27^{d}	558.82±23.43^{bc}	755±33.73^{a}	471.63±20.53^{c}	715.48±139.14^{a}	600.13±35.6^{b}	536.76±39.16^{bc}
异香叶醇	–	–	–	–	–	19.16±0.25^{c}	53.87±1.9^{b}	72.82±3.2^{a}	52.21±2.81^{b}	54.85±4.08^{b}	62.74±9.06^{b}	58.45±8.39^{b}
反式-2-己烯醇	–	–	–	–	–	391.78±29.87^{b}	319.56±14.01^{c}	453.22±21^{a}	294.57±11.08^{b}	321.27±59.57^{b}	288.41±19.44^{b}	275.05±20.9^{b}
正辛醇	–	–	–	–	–	–	–	70.87±1.41^{a}	47.65±1.78^{b}	–	–	–
正己醇	–	–	–	–	–	205.22±17.01^{b}	201.21±4.36^{b}	268.03±23.67^{a}	188.6±12.72^{b}	180.65±48.74^{b}	195.12±12.3^{b}	189.24±19.01^{b}

注: 表中数值为平均值±标准差, –表示未检出, 同行不同字母表示差异显著(P<0.05)。

2.3.2.2　香气特征成分筛选　为了进一步明确茶小绿叶蝉是否刺吸制成的不同种类茶样之间的差异香气成分，对 GT 与 CG、BT 与 CB、CG 与 CB 分别进行 OPLS-DA 分析（P<0.05，VIP>1），分别筛选出 5、15 和 13 个差异香气成分。

如图 8A 所示，蝉绿茶中的脱氢芳樟醇（花草香气）、邻伞花烃（果香）与苯甲醛（焦糖香）等香气成分含量均高于对照绿茶。

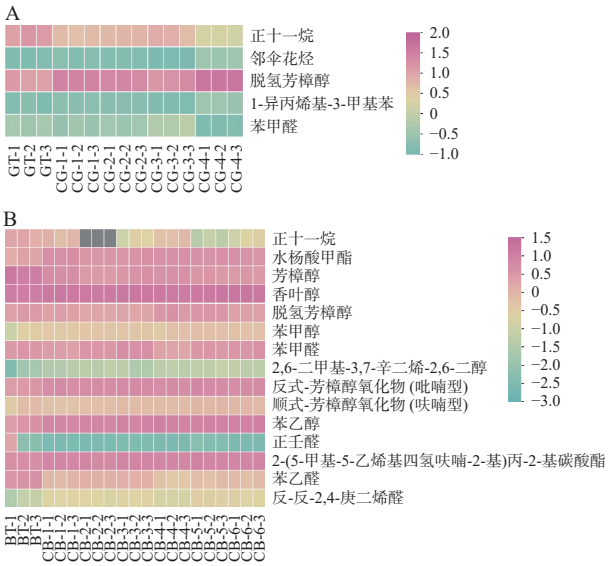


图 8　对照绿茶与蝉绿茶（A）、对照红茶与蝉红茶（B）的 VIP 热图

Fig.8　VIP heatmap of conventional green tea vs. cicada green tea (A), conventional black tea vs. cicada black tea (B)

注：图中灰色部分为未在样品中检出，图 9 同。

如图 8B 所示，与对照红茶相比，蝉红茶中多种甜香型香气成分的相对含量显著较高，包括顺式芳樟醇氧化物（呋喃型）、苯甲醇、苯乙醇、2,6-二甲基-3,7-辛二烯-2,6-二醇、苯甲醛。此外，蝉红茶中还检出多种其他香型的挥发性成分，其含量也高于对照红茶，如水杨酸甲酯（薄荷香）、2-(5-甲基-5-乙烯基四氢呋喃-2-基)丙-2-基碳酸酯（果香）、香叶醇（花香）以及反式芳樟醇氧化物（吡喃型）（木质香）。

2.3.2.3　茶叶样品的 ROAV 比较　采用 ROAV 将各香气成分的浓度与感觉阈值相结合，评估不同香气成分对整体香气的贡献程度，进而确定关键香气成分[36−37]。普遍认为 ROAV>1 的化合物对香气具有重要贡献；若 0.10≤ROAV<1.00 时，则认为该香气成分对茶样香气具有重要修饰作用[38]。ROAV 计算结果表明，所有绿茶样品中 ROAV 大于 1 的物质有 21 种（表 4），其中对照绿茶与蝉绿茶 VIP>1 的物质有 3 种，脱氢芳樟醇、邻伞花烃与苯甲醛。

所有红茶样品中 ROAV 值大于 1 的物质有 38 种（表 4），其中对照红茶与蝉红茶 VIP>1 的物质有 7 种，香叶醇、顺式芳樟醇氧化物（呋喃型）、苯乙醇、水杨酸甲酯、反式芳樟醇氧化物（吡喃型）、苯甲醇与 2-(5-甲基-5-乙烯基四氢呋喃-2-基)丙-2-基碳酸酯。

综上所述，脱氢芳樟醇、邻伞花烃与苯甲醛可作为区分对照绿茶与蝉绿茶的潜在化学标记物，同样，顺式芳樟醇氧化物（呋喃型）、苯甲醇、苯乙醇、2,6-二甲基-3,7-辛二烯-2,6-二醇、苯甲醛。香叶醇、水杨酸甲酯、2-(5-甲基-5-乙烯基四氢呋喃-2-基)丙-2-基碳酸酯、反式芳樟醇氧化物（吡喃型）可作为区分对

表 4　茶叶样品中 ROAV>0.1 的主要挥发性化合物

Table 4　Major volatile compounds in tea samples with ROAV>0.1

物质	香气	香气阈值（ng/g）	GT	CG	BT	CB
大马士酮	蜂蜜、甜香、木香、玫瑰	0.002	–	–	29391.82	35688.78
β-紫罗酮	紫罗兰香、木香、花香，甜味，果味	0.007	21497.24	24372.29	21688.01	23923.30
吲哚	茉莉花香味	0.04	14457.70	10879.27	–	–
橙花醚	花香	0.1	–	719.76	370.42	764.16
茶螺烷	红茶香气，味甜，兼有果香、木香	0.2	–	–	1661.46	1894.11
藏红花醛	草本，木本、藏红花	0.3	142.08	250.93	105.12	75.65
反-2-辛烯醛	黄瓜、香草、香蕉叶	0.3	–	–	–	122.08
反，反-2，4-庚二烯醛	坚果，紫罗兰，西瓜，青草	0.36	–	–	883.71	2559.77
橙花醇	玫瑰和橙花的香气	1.1	–	–	110.02	166.24
正壬醛	新鲜、橙子、果皮	1.1	–	–	573.32	113.65
异香叶醇	甜香，花香	1.1	–	–	17.42	53.78
苯甲醇	甜香、花香、三叶草、蜂蜜	2	27.93	38.48	252.93	598.74
β-环柠檬醛	番红花、草药、甜、果味	3	47.28	46.84	23.41	24.32
茶吡咯	花香、玫瑰、香脂	3.7	–	54.99	21.18	–
邻伞花烃	柑橘香、柠檬香	4	29.67	93.14	19.65	23.43
苯乙醛	强烈的风信子香气和绿叶似的青香香气	4	–	–	572.91	420.08
己醛	青草气及苹果香味	4.5	–	–	21.74	31.61
2-戊基呋喃	具有豆香、果香、泥土、青香及类似蔬菜香韵	4.8	116.00	148.49	75.48	116.11
正己醇	清香、绿叶、果味	5.6	–	–	36.65	36.39
芳樟醇	花香、甜、玫瑰	6	189.64	206.50	654.94	556.15

续表 4

物质	香气	香气阈值（ng/g）	GT	CG	BT	CB
顺式芳樟醇氧化物(呋喃型)	甜味, 草本	6	55.62	88.55	336.77	683.47
香叶醇	玫瑰香	6.6	21.21	33.51	559.84	969.77
D-柠檬烯	柠檬, 甜橙皮, 甘草	10	8.18	18.40	5.05	5.13
橙化基丙酮	有香茅香气, 并略有药香香韵	10	–	–	2.82	6.12
对薄荷-1,3,8-三烯	松节油、樟脑、草本木质	15	2.32	3.39	–	–
β-环高柠檬醛	木质、浆果、鸢尾花	19	1.22	1.37	1.48	1.37
乙酸叶醇酯	青草味	31	–	–	–	1.31
丁酸叶醇酯	清香、甜香、果香	31	–	–	3.37	6.05
罗勒烯	柑橘、木质。草本	34	28.64	22.77	–	–
水杨酸甲酯	冬青油香、薄荷香	40	1.88	4.77	39.75	88.22
苯乙醇	玫瑰香、蜂蜜香	45	–	–	46.18	107.82
甲基庚烯酮	新鲜的青香并伴有柑橘香韵	68	5.97	8.60	1.26	2.15
脱氢芳樟醇	有花草香气, 并有辛香和熏衣草似的香味	100	26.75	103.08	19.39	27.65
反式-2-己烯醇	绿叶、绿豆、草本、水仙	100	–	–	3.92	3.25
反式-3-己烯-1-醇	青草味	110	–	–	3.16	5.51
正辛醇	甘甜的脂蜡香气	190	–	–	–	0.21
己酸叶醇酯	玫瑰、薰衣草、苹果香	200	–	–	0.69	1.98
苯甲醛	杏仁气味、焦糖甜香	300	0.84	1.64	6.95	10.37
α-松油醇	有松木和丁香似的香气	300	0.23	0.32	0.22	0.26
反式芳樟醇氧化物(呋喃型)	花卉	320	–	1.20	–	–
反式芳樟醇氧化物(吡喃型)	木质	320	0.68	0.72	2.89	4.97
异丙叉丙酮	泥土、土豆	450	0.52	0.79	–	<0.1
α-柠檬醛	花朵、橙子、甜味	460	–	–	0.12	0.33
3-蒈烯	柑橘、草药、松树、木本	770	–	0.14	–	–
苯乙腈	木质、香醋、茴香	1200	–	0.29	<0.1	0.12

注: –表示低于检测线; 香气描述与香气阈值数据来源于网站A: https://www.thegoodscentscompany.com; B: https://www.femaflavor.org/flavor-library; 访问时间2025年4月9日。

照红茶与蝉红茶的潜在化学标记物。

2.3.3 不同种类蝉茶挥发性化合物差异分析 蝉绿茶与蝉红茶的差异性成分结果见图 9。结果可见, 蝉绿茶中主要具有青草香的甲基庚烯酮、具有花草香气的脱氢芳樟醇与正十一烷的相对含量高于蝉红茶。在蝉红茶中检测到两种特有挥发性物质, 分别是 2-(5-甲基-5-乙烯基四氢呋喃-2-基)丙-2-基碳酸酯(果香)与苯乙醇(玫瑰香蜂蜜香), 其他 8 个差异挥发性化合物在蝉红茶中的相对含量均高于蝉绿茶。

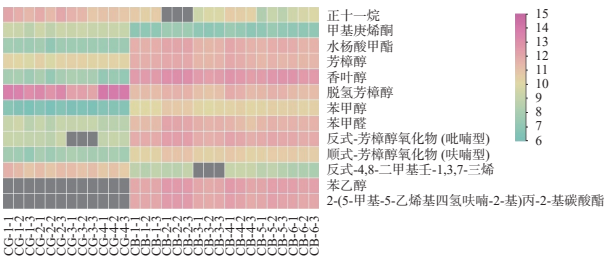


图 9 蝉红茶与蝉绿茶的 VIP 热图

Fig.9 VIP heat map of cicada black tea and cicada green tea

蝉红茶与蝉绿茶的差异挥发性化合物主要包括脱氢芳樟醇、香叶醇、水杨酸甲酯等。值得注意的是, 水杨酸甲酯和苯甲醇的产生已被证实与植物应激反应有关, 包括茶小绿叶蝉刺吸[8]。此外, 芳樟醇及其氧化物的含量与茶小绿叶蝉刺吸程度有关[39], 并且被确定为蝉红茶香气轮廓的关键组分, 其低香气阈值(例如芳樟醇在水中为 0.006 mg/kg)对蝉红茶的花香与果香特征产生核心贡献。

在本研究中, 由同品种(金萱)制成的红绿茶样品分析表明, 茶小绿叶蝉刺吸后制成的蝉红绿茶比对照红绿茶总挥发性成分更高, 香气物质含量也有所提升。在 ROAV 大于 1 的关键香气活性物质中, *β*-紫罗酮、苯甲醇、邻伞花烃、2-戊基呋喃、顺式芳樟醇氧化物(呋喃型)、香叶醇、水杨酸甲酯、甲基庚烯酮、脱氢芳樟醇、苯甲醛在所有样品中均检出, 且蝉茶中含量显著高于对照茶叶。这些物质的高相对含量, 赋予蝉茶更加浓郁的甜香、花香与果香, 本研究推测这是使其香气更加浓郁的重要基础。

另外, 蝉红茶中检测到特有挥发性物质 2-(5-甲基-5-乙烯基四氢呋喃-2-基)丙-2-基碳酸酯。之前的研究表明, 该化合物在东方美人乌龙茶(原料同样被小绿叶蝉刺吸)中的含量较对照乌龙茶显著提高[11], 且在萎凋工序后检出。尽管目前尚无该化合物香气活性阈值的公开报道, 但鉴于其在蝉红茶中的高相对含量, 研究推测该物质对蝉红茶具有不同于对照红茶的独特香气特征(特别是果香)有潜在的重要贡献。

3 结论

本研究系统探究了小绿叶蝉刺吸对金萱茶树鲜

叶原料加工适应性的影响，并阐明了其在红茶与绿茶产品中关键香气成分的差异变化。感官评价结果表明，蝉茶在香气与滋味上均表现出独特的花蜜香特征。生化成分分析显示，与对照茶样相比，蝉茶中的可溶性糖含量显著升高，而游离氨基酸含量显著降低；蝉红茶中的咖啡碱含量显著低于常规红茶，蝉绿茶的总黄酮与茶多酚含量则显著高于蝉红茶。挥发性组分分析进一步表明，蝉茶中挥发性物质总量显著高于对照茶。通过 PCA 与 OPLS-DA 分析，明确了蝉绿茶与对照绿茶之间的关键差异化合物包括脱氢芳樟醇、邻伞花烃和苯甲醛；而蝉红茶与对照红茶之间的特征差异物质主要包括顺式芳樟醇氧化物（呋喃型）、香叶醇、苯乙醇、水杨酸甲酯、反式芳樟醇氧化物（吡喃型）以及 2-（5-甲基-5-乙烯基四氢呋喃-2-基）丙-2-基碳酸酯。

综上所述，本研究比较了小绿叶蝉刺吸处理后所制红茶和绿茶与对照茶在生化成分及关键香气成分方面的差异，初步揭示了蝉茶特征花蜜香形成的物质基础。然而，小绿叶蝉胁迫影响茶叶代谢物变化的分子调控机制仍有待深入探索。本研究可为广东特色蝉茶的生产与品质控制提供参考依据。

© 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］ 刘黎，张锡友，胡春学，等. 中国绿茶国际市场分析及提升绿茶产业的对策[J]. 蚕桑茶叶通讯，2010(4)：21−23. ［LIU Li, ZHANG Xiyou, HU Chunxue, et al. Analysis on the international market of green tea in China and countermeasures for promoting green tea industry[J]. Newsletter of Sericulture and Tea, 2010(4): 21−23.］

［2］ XU Yongmei, QIAO Fangbin, HUANG Jikun. Black tea markets worldwide: Are they integrated?[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2022, 21(2): 552−565.

［3］ 游小妹，韩奥迪，李鑫磊，等. 黄化茶树新品种'茗冠'多茶类品质差异分析[J]. 食品工业科技，2023，44(23)：287−297. ［YOU Xiaomei, HAN Aodi, LI Xinlei, et al. Analysis of metabolites difference of the albino tea tree variety 'Ming Guan'[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(23): 287−297.］

［4］ 杨洪志远，肖风怡，武珊珊，等. ‘黄金芽’及其白化子代茶树品种春秋季超微绿茶粉品质评价[J]. 食品工业科技，2026，47(5)：348−358. ［YANG Hongzhiyuan, XIAO Fengyi, WU Shanshan, et al. Quality evaluation of ultra-fine green tea powder made from 'huangjinya' and its albino offspring in spring and autumn[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(5): 348−358.］

［5］ 杨子银，吴淑华，辜大川. 茶小绿叶蝉侵害对茶树生长和茶叶品质影响的研究进展[J]. 茶叶通讯，2022，49(1)：1−11. ［YANG Ziyin, WU Shuhua, GU Dachuan. Research progress on effects of tea green leafhopper infestation on tea plant growth and tea leaf quality[J]. Tea Communication, 2022, 49(1): 1−11.］

［6］ 河源市农业农村局. 蝉茶种植技术规程 DB4416/T 33-2025[S]. 2025：2025-02-18. ［Heyuan Municipal Bureau of Agriculture and Rural Affairs. Technical regulation of cultivation of Cicada tea DB4416/T 33-2025[S]. 2025: 2025-02-18.］

［7］ 张汉鹏. 中国茶树害虫及其无公害治理[M]. 合肥：安徽科学技术出版社，2006：183. ［ZHANG H H. Tea tree pests and their pollution-free management in China[M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 2006: 183.］

［8］ SCOTT E R, LI X, WEI J P, et al. Changes in tea plant secondary metabolite profiles as a function of leafhopper density and damage[J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 636.

［9］ 钟秋生，吕海鹏，林智，等. 东方美人茶和铁观音香气成分的比较研究[J]. 食品科学，2009，30(8)：182−186. ［ZHONG Qiusheng, LÜ Haipeng, LIN Zhi, et al. Comparison of aroma constituents between oriental beauty tea and tieguanyin tea[J]. Food Science, 2009, 30(8): 182−186.］

［10］ CHO J Y, MIZUTANI M, SHIMIZU B I, et al. Chemical profiling and gene expression profiling during the manufacturing process of Taiwan oolong tea "oriental beauty"[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2007, 71(6): 1476−1486.

［11］ LI Mingjin, ZHANG Yunzhi, YAN Jiawei, et al. Comparative metabolomic analysis reveals the differences in nonvolatile and volatile metabolites and their quality characteristics in beauty tea with different extents of punctured leaves by tea green leafhopper[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(43): 16233−16247.

［12］ 王芬，喻佩，翟媛，等. 茶树应答茶小绿叶蝉为害的蛋白质组分析[J]. 福建农业学报，2024，39(10)：1179−1188. ［WANG Fen, YU Pei, ZHAI Yuan, et al. Proteomics of tea plant in response to infestation by *Empoasca vitis*[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2024, 39(10): 1179−1188.］

［13］ 穆丹. 茶树挥发性信息素调控假眼小绿叶蝉及叶蝉三棒缨小蜂行为的功效[D]. 北京：中国农业科学院，2011. ［MU Dan. Studies on efficacy of volatile infochemicals from tea plants regulating behaviours of tea green leafhopper and its egg parasitoid *Stethynium empoascae*[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011.］

［14］ 任倩倩，庄明珠，蔡晓明，等. 小贯小绿叶蝉取食诱导抗、感茶树品种挥发物的释放[J]. 茶叶科学，2020，40(6)：795−806. ［REN Qianqian, ZHUANG Mingzhu, CAI Xiaoming, et al. The release of volatiles in resistant and susceptible tea cultivars under *Empoasca onukii* feeding[J]. Journal of Tea Science, 2020, 40(6): 795−806.］

［15］ 金珊，孙晓玲，张新忠，等. 8 个茶树品种生化成分分析及抗性成分的初步鉴定[J]. 应用昆虫学报，2016，53(3)：516−527. ［JIN Shan, SUN Xiaoling, ZHANG Xinzhong, et al. Chemical analysis of 8 tea cultivars with different levels of resistance to *Empoasca vitis* Gothe and a preliminary identification of the chemical basis of this resistance[J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2016, 53(3): 516−527.］

［16］ 王丽丽，林清霞，宋振硕，等. 分光光度法测定茶叶中总黄酮含量[J]. 茶叶学报，2021，62(1)：1−6. ［WANG Lili, LIN Qingxia, SONG Zhenshuo, et al. Spectrophotometric determination of total flavonoids in tea[J]. Tea Science and Technology, 2021, 62(1): 1−6.］

［17］ BABUSHOK V I, LINSTROM P J, ZENKEVICH I G. Retention indices for frequently reported compounds of plant essential oils[J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 2011, 40(4): 043101.

［18］ FANG Xin, XU Wencan, JIANG Guangxian, et al. Monitoring the dynamic changes in aroma during the whole processing of Qingzhuan tea at an industrial scale: From fresh leaves to finished

tea[J]. Food Chemistry, 2024, 439: 137810.
[19] 林进龙. 小绿叶蝉刺吸对多茶类品质的影响研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2024. [LIN Jinlong. Study on the effect of green leafhopper sucking on the quality of many teas[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2024.]
[20] 赵小曼. 多组学技术探究茶树响应小绿叶蝉吸食的防御反应[D]. 福州: 福建农林大学, 2019. [ZHAO Xiaoman. The defense response of tea plants to green leafhopper infestation: A multi-omics study[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019.]
[21] 周琼琼, 孙威江, 叶艳, 等. 不同年份白茶的主要生化成分分析[J]. 食品工业科技, 2014, 35(9): 351−354,359. [ZHOU Qiongqiong, SUN Weijiang, YE Yan, et al. Study on the main biochemical components of white tea stored at different years[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(9): 351−354,359.]
[22] 岳翠男, 王治会, 毛世红, 等. 茶叶主要滋味物质研究进展[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(1): 219−224. [YUE Cuinan, WANG Zhihui, MAO Shihong, et al. The main taste substances in tea research progress[J]. Food Research and Development, 2017, 38(1): 219−224.]
[23] 陈元杰, 徐静, 刘常涛, 等. 7 种海南特色茶抗氧化活性及总多酚、总黄酮含量的测定[J]. 热带作物学报, 2024, 45(6): 1244−1251. [CHEN Yuanjie, XU Jing, LIU Changtao, et al. Determination of antioxidant activity, total polyphenol and total flavonoid content of seven Hainan specialty tea[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2024, 45(6): 1244−1251.]
[24] YU Penghui, HUANG Hao, ZHAO Xi, et al. Dynamic variation of amino acid content during black tea processing: A review[J]. Food Reviews International, 2023, 39(7): 3970−3983.
[25] 孙逸超. 茶树对小贯小绿叶蝉侵染的形态、生理生化及分子响应[D]. 广州: 华南农业大学, 2018. [SUN Yichao. Morphological, physiological, biochemical and molecular responses of tea (*Camellia sinensis*) leaves to tea green leafhopper(E. (M.) onukii infestation)[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2018.]
[26] 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.
[27] 杨伟丽, 肖文军, 邓克尼. 加工工艺对不同茶类主要生化成分的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2001, 27(5): 384−386. [YANG Weili, XIAO Wenjun, DENG Keni. Effects of processing technology of different teas on the main biochemistry components[J]. Journal of Hunan Agricultural University, 2001, 27(5): 384−386.]
[28] 王敏. 小绿叶蝉不同为害程度对茶叶品质的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2016. [WANG Min. Study on the effect of different leafhopper biting on tea leaves[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.]
[29] DAI Yuqiao, YANG Ting, LUO Jinglong, et al. Changes in alkaloids and their related metabolites during the processing of 'Qiancha 1′ white tea based on transcriptomic and metabolomic analysis[J]. LWT, 2025, 218: 117435.
[30] 陈敏星, 郭雅玲, 郭晓娜. 茶叶中色泽与滋味有效成分的研究态势[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(6): 1818−1823. [CHEN Minxing, GUO Yaling, GUO Xiaona. The research situation of tea color and flavor constituents[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2014, 5(6): 1818−1823.]
[31] 吴玲玲, 梁光志, 冯红钰, 等. 花香型金萱红茶加工过程中主要理化成分动态变化[J]. 食品研究与开发, 2024(4): 74−80. [WU Lingling, LIANG Guangzhi, FENG Hongyu, et al. Dynamic changes of main components in flowery Jinxuan black tea during processing[J]. Food Research and Development, 2024(4): 74−80.]
[32] 张英娜, 嵇伟彬, 许勇泉, 等. 儿茶素呈味特性及其感官分析方法研究进展[J]. 茶叶科学, 2017, 37(1): 1−9. [ZHANG Yingna, JI Weibin, XU Yongquan, et al. Rewiew on taste characteristic of catechins and its sensory analysis method[J]. Journal of Tea Science, 2017, 37(1): 1−9.]
[33] ZHOU Jingtao, YU Xinlei, HE Chang, et al. Withering degree affects flavor and biological activity of black tea: A non-targeted metabolomics approach[J]. LWT, 2020, 130: 109535.
[34] WANG Baoyi, CHEN Huimin, QU Fengfeng, et al. Identification of aroma-active components in black teas produced by six Chinese tea cultivars in high-latitude region by GC–MS and GC–O analysis[J]. European Food Research and Technology, 2022, 248(3): 647−657.
[35] ZHAO Feng, CHEN Mingjie, JIN Shan, et al. Macro-composition quantification combined with metabolomics analysis uncovered key dynamic chemical changes of aging white tea[J]. Food Chemistry, 2022, 366: 130593.
[36] HUANG Wenjing, FANG Shimao, WANG Jing, et al. Sensomics analysis of the effect of the withering method on the aroma components of Keemun black tea[J]. Food Chemistry, 2022, 395: 133549.
[37] FENG Zhihui, LI Ming, LI Yifan, et al. Characterization of the key aroma compounds in infusions of four white teas by the sensomics approach[J]. European Food Research and Technology, 2022, 248(5): 1299−1309.
[38] SU Dan, HE Jiaojiao, ZHOU Yanzhu, et al. Aroma effects of key volatile compounds in Keemun black tea at different grades: HS-SPME-GC-MS, sensory evaluation, and chemometrics[J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131587.
[39] XIAO Yangyang, TAN Haibo, HUANG Haitao, et al. Light synergistically promotes the tea green leafhopper infestation-induced accumulation of linalool oxides and their glucosides in tea (*Camellia sinensis*)[J]. Food Chemistry, 2022, 394: 133460.