

# 基于气相色谱-离子迁移谱技术分析 梅青柚绿茶挥发性成分

陈绮媚<sup>1</sup>, 钟玉鸣<sup>1</sup>, 古艳霞<sup>2</sup>, 钟永辉<sup>2</sup>, 陈翠珍<sup>3</sup>, 李巧芬<sup>3</sup>, 曾劲松<sup>3</sup>, 林尚达<sup>3</sup>, 肖更生<sup>1</sup>, 王琴<sup>1</sup>, 刘祎帆<sup>1\*</sup>  
(1. 仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广东广州 510550) (2. 梅州市梅县区农业科学研究所, 广东梅州 514799) (3. 梅州市珍宝金柚实业有限公司, 广东梅州 514779)

**摘要:** 梅青柚绿茶是由梅州梅县柚子幼果及梅县绿茶制作而成, 该分析利用气相色谱-离子迁移谱技术 (Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry, GC-IMS), 对不同处理方式的梅青柚绿茶的挥发性成分进行了分析比较, 通过主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 有效区分各组样本, 构建挥发性成分的差异图谱及指纹图谱, 并对其进行热图聚类分析。共测定出挥发性成分 55 种, 包括醇类 17 种、酮类 7 种、醛类 12 种、萜烯类 5 种、酯类 7 种、其他 7 种。结果表明, 通过柚子幼果包裹的梅青柚绿茶茶叶比原来的梅县绿茶产生更多的挥发性物质, 而经过应激的柚子幼果包裹的梅青柚绿茶茶叶挥发性物质含量更高, 其中芳樟醇、 $\alpha$ -松油醇、柠檬烯、 $\alpha$ -蒎烯、 $\beta$ -蒎烯、月桂烯、乙酸乙酯等挥发性物质在梅青柚茶挥发性成分中较为突出, 具有独特的香气和功能。该文初步解析梅青柚绿茶中的香气化合物特征, 为后期鉴定其品质提供参考依据, 并促进梅州新产品发展。

**关键词:** 气相色谱-离子迁移谱; 挥发性有机物; 绿茶; 柚子幼果; 梅青柚茶

文章编号: 1673-9078(2025)02-334-344

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.2.0053

## Analysis of Volatile Components of Meiqingyou Green Tea by Gas Chromatography-Ion Migration Spectrometry

CHEN Qimei<sup>1</sup>, ZHONG Yuming<sup>1</sup>, GU Yanxia<sup>2</sup>, ZHONG Yonghui<sup>2</sup>, CHEN Cuizhen<sup>3</sup>, LI Qiaofen<sup>3</sup>,  
ZENG Jinsong<sup>3</sup>, LIN Shangda<sup>3</sup>, XIAO Gengsheng<sup>1</sup>, WANG Qin<sup>1</sup>, LIU Huifan<sup>1\*</sup>

(1.College of Light Industry and Food Science, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510550, China)(2.Meixian District Agricultural Science Research Institute of Meizhou City, Meizhou 514799, China)  
(3.Meizhou Zhenbao Jinyou Industrial Co. Ltd., Meizhou 514779, China)

**Abstract:** Meiqingyou Green Tea is made from young pomelo fruits and green tea in Meixian, Meizhou. In this study, the volatile components of Meiqingyou Green Tea after different treatments were analyzed and compared using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) and were effectively distinguished using principal component analysis

引文格式:

陈绮媚,钟玉鸣,古艳霞,等.基于气相色谱-离子迁移谱技术分析梅青柚绿茶挥发性成分[J].现代食品科技,2025,41(2):334-344.

CHEN Qimei, ZHONG Yuming, GU Yanxia, et al. Analysis of volatile components of meiqingyou green tea by gas chromatography-ion migration spectrometry [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(2): 334-344.

收稿日期: 2024-01-11

基金项目: 梅州市梅县区茶叶现代农业产业园产业科技研发与成果转化项目 (D122207G6); 广东省山区特色农业资源保护与精准利用重点实验室开放基金项目 (2020B121201013)

作者简介: 陈绮媚 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 747869104@qq.com

通讯作者: 刘祎帆 (1990-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 天然产物开发, E-mail: lm\_zkng@163.com

(PCA). Difference maps and fingerprints of volatile components were constructed, and heatmap clustering analysis was performed. A total of 55 volatile components were identified, including 17 alcohols, 7 ketones, 12 aldehydes, 5 terpenes, 7 esters, and 7 others. The results show that Meiqingyou Green Tea leaves wrapped in young pomelo fruits contain more volatile substances than the original Meixian Green Tea leaves. Additionally, Meiqingyou Green Tea leaves wrapped in young pomelo fruits subjected to stress have even higher contents of volatile substances. Specifically, linalool,  $\alpha$ -pineneol, limonene,  $\alpha$ -pinene,  $\beta$ -pinene, myrcene, and ethyl acetate are prominent among the volatile components, providing unique aromas and functions. This study preliminarily analyzes the characteristics of aroma compounds in Meiqingyou Green Tea to provide a reference basis for subsequent research on quality determination and to promote the development of new products in Meizhou.

**Key words:** gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS); volatile organic compounds; green tea; young pomelo fruit; Meiqingyou Green Tea

绿茶作为一种非发酵茶, 已经成为中国销量最大的茶类<sup>[1]</sup>。绿茶富含多酚、多糖等多种活性成分, 具有抗氧化、降血糖等生物活性功效<sup>[2]</sup>, 对人体及精神健康有积极作用<sup>[3]</sup>。绿茶其制作工艺精细, 方法多样, 主要分为炒青法、烘青法、晒青法和蒸青法。梅县绿茶是一种炒青绿茶, 是中国广东客家地区的代表性特产。茶的香味也是评价茶质量的主要指标之一, 而挥发性有机物则是组成茶香味的最主要元素, 不同的芳香物质使茶呈现出不同的香味<sup>[4]</sup>。

金柚是岭南特产水果, 目前在广东省收获颇丰。在种植金柚的过程中, 农民为保证果实的质量而进行人工疏果, 而这些丢弃的柚子幼果不仅能综合利用, 而且缓解了对生态环境的一定压力<sup>[5]</sup>。柚子幼果主要含有纤维、多糖、黄酮等大分子活性物质<sup>[6]</sup>。研究发现, 在未成熟的柑橘类果实组织中发现了较高含量的柚皮苷, 而在成熟果实中发现的类黄酮水平较低<sup>[7]</sup>, 即未成熟柚的柚皮苷含量高于成熟柚。另一个研究表明, 轻度碰伤可改善果实体内柚皮苷的生物合成以对抗氧化应激的损伤<sup>[8]</sup>。合理利用柚子幼果以及梅县绿茶制成产品“梅青柚绿茶”, 为绿茶新产品提供重要依据, 并可推动梅县绿茶产业及柚业的发展。

基于此, 对梅青柚绿茶的挥发性成分进行分析, 有助于了解其香气的特征成分及形成。气相色谱-离子迁移谱(GC-IMS)是一种方便的食物风味化学分析工具, 具有检测速度快、操作方便、设备便携等优点, 这些优点使其在食品的分类、食品新鲜度的鉴定、生产过程的质量控制以及食品中关键香气表征等方面有着广泛的应用<sup>[9]</sup>。本研究运用GC-IMS技术对梅青柚茶绿茶的挥发性成分进行深入剖析, 以揭示其关键香气化合物特征, 为后续评估品质提供有益借鉴, 同时助力梅州地区产品发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

金柚幼果, 购自梅州市场; 绿茶, 梅州市珍宝金柚实业有限公司; 茶叶的原料为广东梅州梅县的绿茶芽和茶叶; 所有材料均在同一茶园种植, 春季采收并炒制, 在室温(20~25 °C)密封、阴凉干燥条件下保存。正构酮: 2-丁酮、2-戊酮、2-己酮、2-庚酮、2-辛酮和2-壬酮(均为分析纯), 阿拉丁公司; 99.999%氮气; 20 mL顶空瓶, 山东海能科学仪器有限公司; MXT-5毛细管色谱柱(15 m×0.53 mm, 1.0  $\mu$ m), 美国Restek公司。

### 1.2 仪器与设备

FlavourSpec®气相离子迁移谱, G.A.S.公司(德国, Dortmund); CTC-PAL 3静态顶空自动进样装置, CTC Analytics AG公司(瑞士, Zwingen); VOCal数据处理软件(0.4.03), G.A.S.公司(德国, Dortmund)。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 样品处理

梅青柚茶由梅州市梅县区省级茶叶现代农业产业园加工生产, 所用到的幼果为梅县金柚幼果, 茶叶为梅州梅县的春茶, 具体制作方法如下: 采集大小相近的(每个约150 g)、表面无明显腐败现象的柚子幼果, 将柚果分为应激幼果组、无应激幼果组。应激幼果组的幼果是在模拟碰撞条件下进行应激, 将幼果从1 m的高度自由掉落, 重复进行5次<sup>[8]</sup>。用工具将柚子果肉内部的囊掏空。经过清洗和干燥过程后, 将绿茶放入幼果内部中。将样品置入烘箱, 起始温度设定为50 °C, 随后以每小时10 °C的速率

逐步升高,直至达到 100 ℃。当达到 100 ℃后,保持该温度不变,加热持续 4 h。完全晾干,在室温下密封保存,梅青柚茶成品如图 1。取三种茶叶进行实验:无任何处理的对照绿茶组 (Eg)、应激幼果绿茶组 (Yg)、无应激幼果绿茶组 (Ng)。



图 1 梅青柚茶成品

Fig.1 Finished product of Meizhou green pomelo fruitlets tea

### 1.3.2 GC-IMS测试条件

顶空进样条件:准确称取 Eg、Yg、Ng 样品 1 g 置于 20 mL 顶空瓶中,40 ℃ 孵育 15 min 后进样,每个样品测定 3 组平行。进样体积:500 μL,用 GC-IMS 仪 FlavourSpec® 进行测试,不分流进样;孵化转速:500 r/min;进样针温度:85 ℃。

GC 条件:MXT-5 色谱柱类型,色谱柱温度:60 ℃;载气:高纯氮气(纯度≥99.999%);程序升压:初始流量 2.00 mL/min 保持 2 min,在 8 min 内线性增至 10.00 mL/min,在 10 min 内线性增至 100.00 mL/min,在 10 min 内线性增至 150.00 mL/min。色谱运行时间:30 min;进样口温度:80 ℃。

IMS 条件:漂移管长度 98 mm;漂移管温度 45 ℃;漂移气为 N<sub>2</sub>(纯度≥99.999%);漂移气流量 150 mL/min;β 射线,3H 为放射源;正离子化模式。

### 1.3.3 数据处理

检测 6 种酮的混标,建立保留时间和保留指数的校准曲线,随后通过目标物的保留时间计算出该物质的保留指数,使用 VOCal 软件内置的 GC 保留指数 (NIST 2020) 数据库和 IMS 迁移时间数据库检索和比对,对目标物进行定性分析。

利用 VOCal 数据处理软件中的 Reporter、Gallery Plot 和 Dynamic PCA 等插件分别生成挥发性成分的三维谱图、二维谱图、差异谱图、指纹图谱及 PCA 图,用于样品间挥发性有机物的对比。用 Excel 和 SPSS 25.0 进行数据处理,Origin 2018 64Bit 进行作图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 挥发性成分主成分分析

主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 作为多元统计分析的降维算法,具备强大的数据简化功能,并能够深入挖掘各变量间的内在联系。在食品加工领域,该方法已广泛应用于品质差异分析<sup>[10]</sup>。利用 Dynamic PCA 插件进行主成分分析。如图 2 所示,主成分 1 和 2 的方差贡献率分别为 80% (PC1) 和 14% (PC2),PC1 和 PC2 的累计贡献率为 94%。从图 2 可知,3 个样品平行组之间差异较小,且样品得到了较好的分离,可以直观地区分 3 组样品。

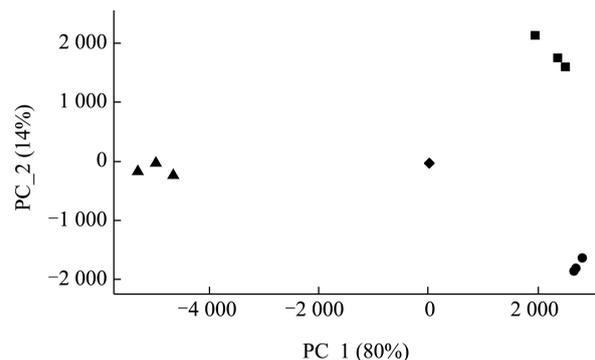


图 2 三种绿茶样本中挥发性成分的 PCA 图

Fig.2 PCA maps of volatile components in three green tea samples

在主成分分析 (PCA) 图中,样本之间的近距离表示差异较小,而远距离则表示差异显著。如图 2 所示,同一样本的三个平行组之间差异较小,而经三种不同处理的绿茶样本区域无重叠,各自区分明显。Eg 和 Yg、Ng 的挥发性有机物存在明显差异。

### 2.2 不同处理方法的绿茶中挥发性成分谱图对比分析

图 3 为 GC-IMS 的三维谱图,三个坐标轴分别表示迁移时间 (X 轴)、保留时间 (Y 轴) 和信号峰强度 (Z 轴),从图中可以直观地观察到不同样品中的挥发性有机物种类和峰体积存在显著差异。由于观察不便,因此选择俯视图进行差异对比。图 4 展示了三种绿茶样品中挥发性化合物的二维谱图。横坐标和纵坐标分别代表离子迁移时间和保留时间。在 RIP 峰 (1.0 处) 两侧的每个点均代表一种挥发性有机物。颜色用以表示物质的峰强度,由蓝色至

红色，颜色越深，表明峰强度越高。图4可以看出，Eg样品挥发性化合物与Ng、Yg样品有明显差异。

为了能更直观地比较三种不同的绿茶样品之间的挥发性化合物差异，利用软件自带的差异模式，以Eg样品的谱图作为参考谱图，比较其不同谱图之间的差异，如图5所示，红色代表该化合物的浓度高于参考样品，蓝色表示该化合物的浓度低于参考样品，而浓度相同的物质颜色相互抵消后呈白色。总体来看，经过两种不同处理的梅青柚绿茶在差异对比图中红色部分明显大于蓝色部分。三种绿茶样品挥发性成分在Rt(0~200 s)内相似，而Yg、Ng组在Rt(200~800 s)内红色点明显增多，而这些点也是Yg、Ng组区别于对照组的物质，说明经处理后的梅青柚绿茶其挥发性组成和含量与对照组差异明显，其大部分挥发性香气成分含量较无处理的绿

茶要丰富。而Yg和Ng两组绿茶的挥发性物质组成相似，但有个别成分在含量组成上有所差别。

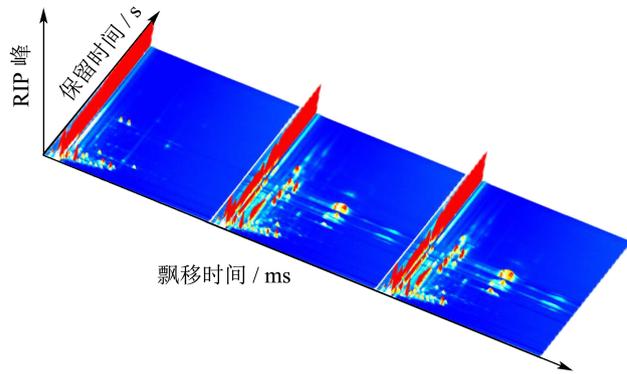


图3 三种绿茶样本中挥发性化合物 GC-IMS 三维谱图  
Fig.3 Three-dimensional GC-IMS spectra of volatile compounds in three green tea samples

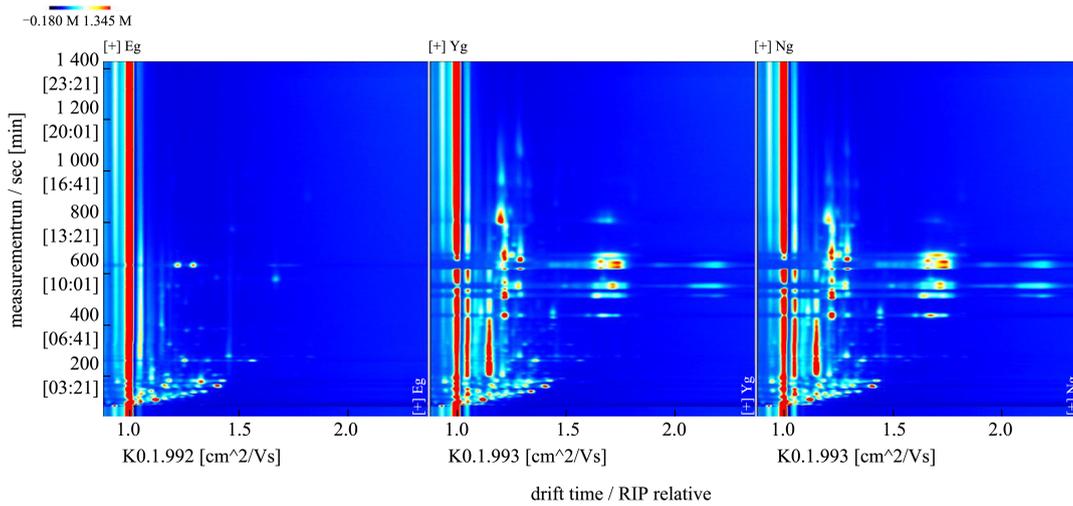


图4 三种绿茶样本中挥发性化合物 GC-IMS 二维谱图

Fig.4 Two dimensional GC-IMS spectra of volatile compounds in three green tea samples

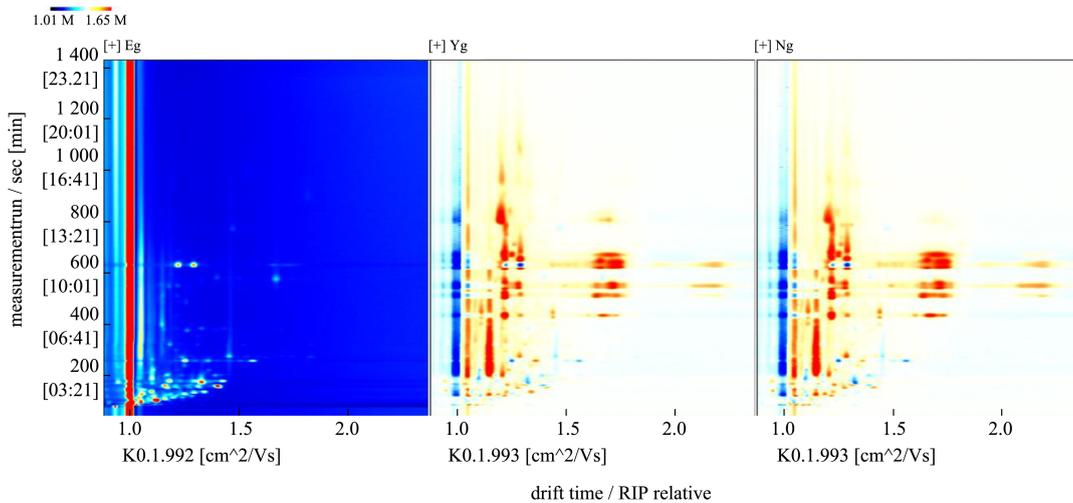


图5 三种绿茶样本中挥发性化合物 GC-IMS 差异图

Fig.5 Difference of volatile compounds GC-IMS in three green tea samples

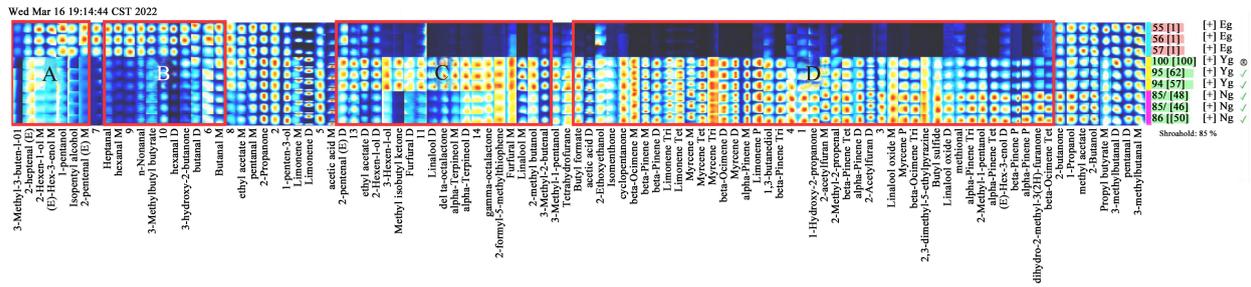


图 6 三种绿茶样本中挥发性物质指纹图谱

Fig.6 Fingerprint of volatile substances in three green tea samples

2.3 不同处理方法的绿茶样本中挥发性成分指纹图谱比对分析

本研究运用系统自带的 Gallery Plot 插件，生成了不同处理的绿茶样品挥发性物质的指纹图谱，高效地揭示不同处理绿茶挥发性成分的差异，如图 6 所示。各行代表绿茶样品中各挥发性有机物的信号峰。各列代表同一种挥发性有机物在不同绿茶样品中的信号峰。部分挥发性化合物因浓度较高，可能产生多个信号，分别呈现为单体 (M)、二聚体 (D) 和多聚体 (P) 等形式。

将指纹图谱分为 A、B、C、D 四个区域。由整体指纹图谱可以看出，无处理绿茶组 Eg 与两组处理组的挥发性成分差异明显。A 区域物质为 Eg 无处理绿茶组检出而 Yg 和 Ng 组无检出的 7 种物质，其中包括 3-甲基-3-丁烯-1-醇、2-庚烯醛 (E)、2-己烯-1-醇 M、(E)-己-3-烯醇 M、1-戊醇、异戊醇、2-戊烯醛 (E)M。而经过柚子包裹处理的两种绿茶的挥发性成分略为相似，有两种物质只有在 Yg 组中出现，分别是甲基异丁基酮、糠醛。B 区域物质以醛类为主，Eg 组在这部分物质的含量相对 Yg 和 Ng 的多，说明经柚子幼果处理后茶叶的醛类物质明显下降。C 区域物质能看出，这部分 Yg 的物质总体比 Ng 的含量要高，其中  $\alpha$ -松油醇、芳樟醇、辛内酯相对较高。D 区域中 Ng 的物质总体比 Yg 含量高，其中萜烯类物质较为明显，包括  $\beta$ -罗勒烯、 $\alpha$ -蒎烯、 $\beta$ -蒎烯、柠檬烯、月桂烯，除此以外还有 (E)-己-3-烯醇、1,3-丁二醇、2-甲基-1-戊醇、1-羟基-2-丙酮、2,3-二甲基-5-乙基吡嗪、2-乙酰基呋喃、2-甲基-2-丙烯醛、丁基硫醚、二氢-2-甲基-3(2H)-呋喃酮、氧化芳樟醇、甲硫基丙醛。

2.4 基于GC-IMS分析不同处理方法的绿茶样本中挥发性成分

通过 GC-IMS 软件内置的 NIST 数据库和 IMS

数据库，对三种茶叶样品中的挥发性化合物进行定性分析。共鉴定出 88 种物质，其中 19 种化合物在单体和多聚体形式均被检测到，因此，共检出已知挥发性组分 55 种，具体如表 1 所示，包括醇类 17 种、酮类 7 种、醛类 12 种、萜烯类 5 种、酯类 7 种、其他 7 种。醇类、酮类、醛类、酯类及杂环类化合物均为绿茶的关键挥发性成分，它们是绿茶独特风味形成的不可或缺元素。以样品 Eg 作为对照组，从化合物的含量及其分类上对比 Yg 组和 Ng 组，如图 7 所示，经过处理的两组茶叶其醇类、萜烯类、酯类及其他类物质相对含量明显比对照组高，而部分酮类、醛类物质相对含量与对照组无较大差异。Yg 组与 Ng 组相比，其醇类物质相对丰富，占比为 53.55%；其次为酯类物质，占比为 48.85%。而 Ng 组的萜烯类物质相对较高，其占比为 50.18%。为对比样品不同挥发性物质含量的差异，所有数据通过归一化处理，并根据挥发性化合物的峰值强度进行热图聚类分析，如图 8 所示。

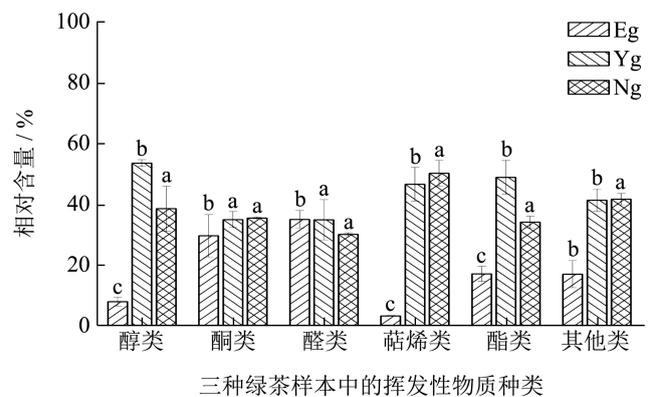


图 7 三种绿茶样本中不同类别挥发性物质的相对含量

Fig.7 Comparison of peak intensity of different types of volatile substances in three green tea samples

注：同一组标注小写字母表示无差异显著 ( $P > 0.05$ )，标注无相同小写字母表示有显著差异 ( $P < 0.05$ )。

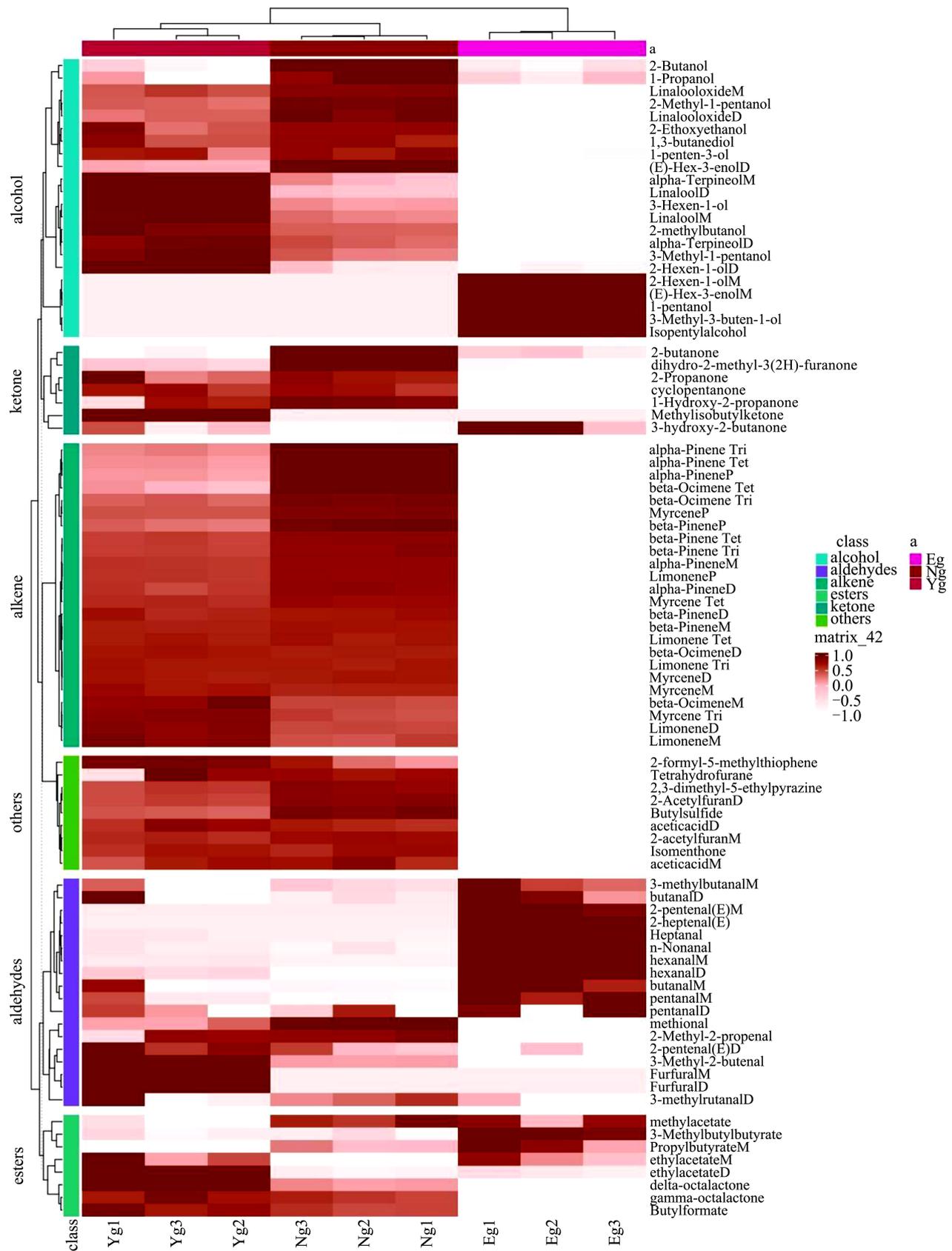


图 8 三种绿茶样本中挥发性物质相对含量热图

Fig.8 Heat map of relative contents of volatile substances in three green tea samples

表 1 三种绿茶样本中挥发性成分定性及定量分析

Table 1 Qualitative and quantitative analysis of volatile components in three green tea samples

序号	保留时间/s	中文名称	化合物	CAS#	分子式	相对含量/%			
						Eg	Yg	Ng	
1	206.7	3-甲基-3-丁烯-1-醇	3-Methyl-3-buten-1-ol	C763326	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	0.25 ± 0.02	—	—	
2	112.51	2-丁醇	2-Butanol	C78922	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	0.93 ± 0.02	0.29 ± 0.01	0.36 ± 0.01	
3	227.16	2-甲基丁醇	2-methyl butanol	C137326	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	—	0.11 ± 0.00	0.08 ± 0.00	
4	275.83	1,3-丁二醇	1,3-butanediol	C107880	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	0.09 ± 0.02	0.07 ± 0.01	0.07 ± 0.00	
5	213.22	2-乙氧基乙醇	2-Ethoxyethanol	C110805	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	—	0.05 ± 0.01	0.05 ± 0.00	
6	178.71	1-戊烯-3-醇	1-penten-3-ol	C616251	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	0.97 ± 0.09	0.44 ± 0.02	0.46 ± 0.01	
7	326.56	2-己烯-1-醇 M	2-Hexen-1-ol M	C2305217	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	0.24 ± 0.02	—	—	
	321.62	2-己烯-1-醇 D	2-Hexen-1-ol D	C2305217	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	0.06 ± 0.00	0.04 ± 0.00	0.02 ± 0.00	
8	277.28	(E)-己-3-烯醇 M	(E)-Hex-3-enol M	C928972	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	0.26 ± 0.03	—	—	
	277.46	(E)-己-3-烯醇 D	(E)-Hex-3-enol D	C928972	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	0.07 ± 0.01	0.04 ± 0.00	0.05 ± 0.00	
醇类	9	243.28	1-戊醇	1-pentanol	C71410	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	0.1 ± 0.01	—	—
	10	205.11	异戊醇	Isopentyl alcohol	C123513	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	0.16 ± 0.01	—	—
11	119.83	1-丙醇	1-Propanol	C71238	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	0.15 ± 0.00	0.05 ± 0.00	0.05 ± 0.00	
12	335.63	3-己烯-1-醇	3-Hexen-1-ol	C928961	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	—	0.24 ± 0.01	0.14 ± 0.01	
13	969.83	$\alpha$ -松油醇 M	alpha-Terpineol M	C98555	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	0.37 ± 0.03	0.91 ± 0.02	0.52 ± 0.06	
	965.11	$\alpha$ -松油醇 D	alpha-Terpineol D	C98555	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	—	0.28 ± 0.01	0.22 ± 0.01	
14	813.03	芳樟醇 M	Linalool M	C78706	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	—	4.16 ± 0.05	2.73 ± 0.12	
	808.76	芳樟醇 D	Linalool D	C78706	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	—	0.73 ± 0.01	0.3 ± 0.02	
15	714.29	氧化芳樟醇 M	Linalool oxide M	C60047178	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	—	0.13 ± 0.01	0.16 ± 0.00	
	713.34	氧化芳樟醇 D	Linalool oxide D	C60047178	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	—	0.03 ± 0.00	0.04 ± 0.00	
16	278.72	2-甲基-1-戊醇	2-Methyl-1-pentanol	C105306	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	—	0.3 ± 0.01	0.41 ± 0.00	
17	324.65	3-甲基-1-戊醇	3-Methyl-1-pentanol	C589355	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	0.1 ± 0.03	0.11 ± 0.00	0.08 ± 0.00	
18	178.39	3-羟基-2-丁酮	3-hydroxy-2-butanone	C513860	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	1.6 ± 0.50	0.33 ± 0.09	0.22 ± 0.01	
19	108.68	2-丙酮	2-Propanone	C67641	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	4.97 ± 0.26	1.87 ± 0.08	1.91 ± 0.01	
20	277.1	二氢-2-甲基-3(2H)-呋喃酮	dihydro-2-methyl-3(2H)-furanone	C3188009	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	0.06 ± 0.01	0.03 ± 0.00	0.06 ± 0.00	
酮类	21	132.53	2-丁酮	2-butanone	C78933	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	0.43 ± 0.03	0.12 ± 0.01	0.18 ± 0.00
	22	240.7	环戊酮	cyclopentanone	C120923	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	—	0.09 ± 0.01	0.09 ± 0.01
23	167.57	1-羟基-2-丙酮	1-Hydroxy-2-propanone	C116096	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	—	0.15 ± 0.07	0.22 ± 0.00	
24	191.69	甲基异丁基酮	Methyl isobutyl ketone	C108101	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	—	0.03 ± 0.00	—	

续表 1

序号	保留时间/s	中文名称	化合物	CAS#	分子式	相对含量/%			
						Eg	Yg	Ng	
醛类	25	385.99	庚醛	Heptanal	C111717	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	0.13 ± 0.02	0.02 ± 0.00	0.01 ± 0.00
	26	261.23	己醛 M	hexanal M	C66251	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	1.17 ± 0.08	0.11 ± 0.00	0.1 ± 0.00
		261.88	己醛 D	hexanal D	C66251	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	0.78 ± 0.03	0.1 ± 0.01	0.05 ± 0.00
	27	123.67	丁醛 D	butanal D	C123728	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	0.24 ± 0.03	0.06 ± 0.02	0.06 ± 0.00
		122.64	丁醛 M	butanal M	C123728	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	0.59 ± 0.07	0.12 ± 0.04	0.1 ± 0.00
	28	182.62	戊醛 M	pentanal M	C110623	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	1.26 ± 0.07	0.33 ± 0.03	0.3 ± 0.01
		183.13	戊醛 D	pentanal D	C110623	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	1.02 ± 0.11	0.3 ± 0.02	0.3 ± 0.02
	29	224.58	2-戊烯醛 (E) D	2-pentenal (E) D	C1576870	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	0.08 ± 0.01	0.03 ± 0.00	0.03 ± 0.00
		224.9	2-戊烯醛 (E) M	2-pentenal (E) M	C1576870	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	0.36 ± 0.06	—	—
	30	773.62	正壬醛	n-Nonanal	C124196	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	0.24 ± 0.01	0.04 ± 0.00	0.04 ± 0.00
	31	488.02	2-庚烯醛 (E)	2-heptenal (E)	C18829555	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O	0.16 ± 0.00	—	—
	32	378.66	甲硫基丙醛	methional	C3268493	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> OS	0.12 ± 0.02	0.06 ± 0.00	0.08 ± 0.00
	33	338.39	糠醛 M	Furfural M	C98011	C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	—	0.23 ± 0.01	—
		335.39	糠醛 D	Furfural D	C98011	C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	—	0.05 ± 0.00	—
	34	163.82	3-甲基丁醛 M	3-methylbutanal M	C590863	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	1.87 ± 0.10	0.54 ± 0.03	0.55 ± 0.00
		161.42	3-甲基丁醛 D	3-methylbutanal D	C590863	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	2.57 ± 0.18	0.89 ± 0.18	0.92 ± 0.02
	35	126	2-甲基-2-丙烯醛	2-Methyl-2-propenal	C78853	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O	0.19 ± 0.06	0.16 ± 0.04	0.19 ± 0.00
	36	261.93	3-甲基-2-丁烯醛	3-Methyl-2-butenal	C107868	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	0.52 ± 0.12	0.5 ± 0.02	0.36 ± 0.00
	37	677	β-罗勒烯 D	beta-Ocimene D	C13877913	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	—	0.65 ± 0.00	0.64 ± 0.00
		677	β-罗勒烯 M	beta-Ocimene M	C13877913	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	—	1.3 ± 0.06	1.07 ± 0.01
		676.35	β-罗勒烯 Tri	beta-Ocimene Tri	C13877913	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	—	1.89 ± 0.05	2.56 ± 0.02
		673.73	β-罗勒烯 Tet	beta-Ocimene Tet	C13877913	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	—	0.14 ± 0.02	0.28 ± 0.00
		436.95	α-蒎烯 M	alpha-Pinene M	C80568	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	—	1.85 ± 0.02	2.11 ± 0.00
	38	437.74	α-蒎烯 D	alpha-Pinene D	C80568	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	—	0.3 ± 0.01	0.34 ± 0.00
		437.74	α-蒎烯 P	alpha-Pinene P	C80568	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	—	0.23 ± 0.01	0.41 ± 0.00
		437.25	α-蒎烯 Tri	alpha-Pinene Tri	C80568	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	—	0.13 ± 0.00	0.21 ± 0.00
438		α-蒎烯 Tet	alpha-Pinene Tet	C80568	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	—	0.62 ± 0.02	1.06 ± 0.00	
519.13		β-蒎烯 M	beta-Pinene M	C127913	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	0.26 ± 0.02	2.48 ± 0.01	2.57 ± 0.01	
39	520.18	β-蒎烯 D	beta-Pinene D	C127913	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	—	0.4 ± 0.01	0.42 ± 0.01	
	513.9	β-蒎烯 P	beta-Pinene P	C127913	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	—	0.48 ± 0.02	0.69 ± 0.01	
	516.51	β-蒎烯 Tri	beta-Pinene Tri	C127913	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	—	1.06 ± 0.01	1.25 ± 0.02	
	516.78	β-蒎烯 Tet	beta-Pinene Tet	C127913	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	—	0.71 ± 0.01	0.84 ± 0.00	
	637.11	柠檬烯 M	Limonene M	C138863	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	2.47 ± 0.02	1.78 ± 0.03	1.59 ± 0.03	
40	636.45	柠檬烯 D	Limonene D	C138863	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	2.56 ± 0.06	1.97 ± 0.02	1.78 ± 0.00	
	634.49	柠檬烯 P	Limonene P	C138863	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	—	1.51 ± 0.01	1.72 ± 0.01	
	639.72	柠檬烯 Tri	Limonene Tri	C138863	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	0.56 ± 0.02	2.33 ± 0.02	2.33 ± 0.02	
	639.72	柠檬烯 Tet	Limonene Tet	C138863	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	0.5 ± 0.01	3.94 ± 0.05	4.01 ± 0.06	
	553.41	月桂烯 M	Myrcene M	C123353	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	0.41 ± 0.03	1.52 ± 0.02	1.48 ± 0.01	
41	553.72	月桂烯 D	Myrcene D	C123353	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	—	1.32 ± 0.02	1.33 ± 0.01	
	551.6	月桂烯 P	Myrcene P	C123353	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	—	1.36 ± 0.01	1.75 ± 0.01	
	553.37	月桂烯 Tri	Myrcene Tri	C123353	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	—	0.52 ± 0.01	0.43 ± 0.01	
	554.43	月桂烯 Tet	Myrcene Tet	C123353	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	—	2.29 ± 0.02	2.49 ± 0.01	

续表 1

序号	保留时间/s	中文名称	化合物	CAS#	分子式	相对含量/%			
						Eg	Yg	Ng	
酯类	42	142.54	乙酸乙酯 M	ethyl acetate M	C141786	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	1.02 ± 0.07	0.34 ± 0.04	0.26 ± 0.00
		141.51	乙酸乙酯 D	ethyl acetate D	C141786	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	0.89 ± 0.06	0.59 ± 0.04	0.26 ± 0.01
	43	1086.2	δ-辛内酯	delta-octalactone	C698760	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	—	0.87 ± 0.04	0.51 ± 0.02
	44	947.72	γ-辛内酯	gamma-octalactone	C104507	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	—	0.18 ± 0.01	0.16 ± 0.01
	45	205.33	甲酸丁酯	Butyl formate	C592847	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	—	0.51 ± 0.03	0.44 ± 0.01
	46	117.88	醋酸甲酯	methyl acetate	C79209	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	0.5 ± 0.02	0.14 ± 0.01	0.16 ± 0.00
	47	378.51	丁酸丙酯 M	Propyl butyrate M	C105668	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	0.34 ± 0.04	0.08 ± 0.00	0.09 ± 0.00
48	585.84	丁酸异戊酯	3-Methylbutyl butyrate	C106274	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	0.32 ± 0.04	0.05 ± 0.01	0.05 ± 0.01	
49	690.13	丁基硫醚	Butyl sulfide	C544401	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> S	—	0.4 ± 0.01	0.53 ± 0.01	
50	740.03	2-醛基-5-甲基噻吩	2-formyl-5-methylthiophene	C13679704	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> OS	—	0.03 ± 0.00	0.03 ± 0.00	
其他	51	440.57	2-乙酰基呋喃 M	2-acetylfuran M	C1192627	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	—	0.71 ± 0.01	0.77 ± 0.00
		439.12	2-乙酰基呋喃 D	2-Acetylfuran D	C1192627	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	—	0.48 ± 0.01	0.59 ± 0.00
	52	806.56	异门冬酰胺	Isomenthone	C491076	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	—	0.19 ± 0.01	0.2 ± 0.01
	53	138.76	四氢呋喃	Tetrahydrofurane	C109999	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	0.31 ± 0.07	0.23 ± 0.07	0.25 ± 0.00
	54	752.28	2,3-二甲基-5-乙基吡嗪	2,3-dimethyl-5-ethylpyrazine	C15707343	C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> N <sub>2</sub>	—	0.18 ± 0.01	0.22 ± 0.00
55	135.18	乙酸 M	acetic acid M	C64197	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	61.79 ± 7.04	32.77 ± 1.16	33.89 ± 0.97	
	139.47	乙酸 D	acetic acid D	C64197	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	5.99 ± 1.67	17.33 ± 1.09	16.66 ± 0.37	

注: 物质后缀 M、D、Tri、Tet、P 分别为同一个物质的单体、二聚体、三聚体、四聚体、五聚体。

醇类化合物是茶叶中的关键化合物, 其产生主要是加工过程中内源性糖苷酶释放以及游离脂肪酸代谢, 大部分具有愉悦的花香及水果香气<sup>[11,12]</sup>。无处理的绿茶对照组检出 11 种醇类化合物, 而两组处理组共检出 14 种。其中, 1-戊烯-3-醇、α-松油醇、芳樟醇为主要的醇类成分。α-松油醇具有柑橘、茴香和薄荷香味; 芳樟醇是自然界中分布最广泛的风味化学物质之一, 具有强烈的花香, 类似薰衣草, 带有一些柑橘的味道<sup>[13,14]</sup>, 芳樟醇在 Yg 样品中含量较高, 而在 Eg 组中无检出, 由此可以推测芳樟醇来自柚子幼果的挥发性成分。以往研究报道称茶叶中的儿茶素能产生 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 并诱导芳樟醇含量增加, 且随着 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度的增加, 芳樟醇的含量会先增加后下降<sup>[15]</sup>; 而柚子幼果通过应激碰撞会使 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量增加<sup>[8]</sup>, 从图 8 可以看出 Yg 组芳樟醇含量相对 Ng 更多, 由此可推测轻度碰撞使柚子幼果产生更多 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 从而使芳樟醇含量增加。

酮类化合物共检出 7 种, 我们发现 Yg 和 Ng 两组处理组的酮类挥发性成分含量均略高于对照组, 包括二氢-2-甲基-3(2H)-呋喃酮、2-丁酮、环戊酮、1-羟基-2-丙酮、甲基异丁基酮等。经过处理后, Ng

组的二氢-2-甲基-3(2H)-呋喃酮和 2-丁酮的含量显著高于对照组。二氢-2-甲基-3(2H)-呋喃酮形成与美拉德反应有关, 双脱氧葡萄糖苷是美拉德反应中产生的关键中间体, 可以与脱氧葡萄糖苷相互转化, 而双脱氧葡萄糖苷经过脱水和环化后可转化为呋喃酮, 这类酮类化合物具有甜香、焦糖味、果味<sup>[16]</sup>。Yg 组中测出少量甲基异丁基酮, 这种酮类化合物具有令人愉快的酮类香味, 且仅在 Yg 组中检出, 推测是由幼果撞后氨基酸的降解或微生物代谢从而产生的<sup>[17]</sup>。

醛类化合物共检出 12 种, 三种样品主要醛类挥发物为己醛、戊醛、3-甲基丁醛、3-甲基-2-丁烯醛等。氧化作用引起的脂质降解是茶叶中醛类产生的原因<sup>[18]</sup>。在对照组中测有部分含有不愉快气味的醛类挥发物, 如戊醛、丁醛, 由图 7 可看出, 经过处理后的样品其这部分醛类明显降低, 这可能是加工过程中受热挥发或是幼果吸附作用产生的。另外, 在 Yg 组测出糠醛, 另外两组均无测出, 糠醛具有特殊香气, 可能是由轻度碰撞引起的幼果果皮成分的分解而产生的。

萜烯类化合物共检出 5 种, 分别是 β-罗勒烯、

$\alpha$ -蒎烯、 $\beta$ -蒎烯、柠檬烯以及月桂烯。柚子果皮中含有丰富的精油,尤其在柚子精油中,萜烯类物质的含量较高。其中柠檬烯具有清新果香与柠檬香气,月桂烯则呈现出果香、香脂味以及草药香,这两种成分均具备抗氧化特性<sup>[19,20]</sup>;  $\alpha$ -蒎烯和 $\beta$ -蒎烯属双键的位置异构,具有樟脑香和松木香,是松节油的主要成分,具有强烈驱虫、抑菌效果。蒎烯拥有诸多重要的功能活性成分,不但能够有效抑制酒精诱导的肝细胞损伤,促进肝细胞修复,而且能抑制炎症细胞因子生成、减轻炎症反应的作用<sup>[21]</sup>。 $\beta$ -罗勒烯作为一种具有花香的植物通讯信号分子,近年来在植物学领域备受关注,它具有显著的生物活性,能够诱导离体叶片中与水杨酸有关的防御基因的表达。从表中可看出处理组中能检出大量的萜烯类化合物,由此可以推测出检出的大部分萜烯类物质来源于贮藏过程中茶叶吸收的柚子幼果香气。Yg组的萜烯类物质相对含量比Ng组低,可以推测应激后的柚子幼果其果皮破损导致其果皮精油流失,使萜烯类物质比无应激的柚子幼果香气成分要少,从而Yg的萜烯类挥发物含量比Ng的挥发物含量少。

酯类化合物共检出7种,主要有乙酸乙酯、 $\delta$ -辛内酯、 $\gamma$ -辛内酯、甲酸丁酯,酯类化合物系由无机酸或有机酸与醇类物质经酯化反应缩水而成,该过程生成具有果香与甘甜特性的酯类成分。乙酸乙酯作为脂肪酯,具有水果般的芳香与白兰地酒的香气,广泛应用于香料行业,作为制造菠萝、葡萄、草莓等水果香精的关键成分,同时也是制作威士忌、奶油等香料的主要原料; $\delta$ -辛内酯、 $\gamma$ -辛内酯、甲酸丁酯均呈水果味。茶叶在热加工情况下发生物理化学变化、酶促反应、氧化、焦糖化等作用,以此改变茶叶的香气<sup>[22]</sup>。经过加热烘焙,这些含有花香、水果清香的酯类物质含量显著增多,且在Yg组中含量更为显著,由此可以推测水果味来源于柚子幼果,应激后的柚子幼果的香气挥发物含量更多,可能是碰伤使柚子幼果释放更多的香气。

其他杂环类化合物和酸类物质等共检出7种挥发性物质,主要为乙酸、丁基硫醚、2-乙酰基咪喃、2,3-二甲基-5-乙基吡嗪。乙酸呈果香味,处理组中乙酸的含量是所有化合物中最高,与对照组差异明显;丁基硫醚呈清新绿叶味道,2-乙酰基咪喃为可可、香脂的味道,2,3-二甲基-5-乙基吡嗪呈爆米花的香甜味,这三种物质均在处理组中检出。茶叶中

其他杂环类化合物主要是加工过程中焦糖化和美拉德反应产生的<sup>[23]</sup>,从而呈现焦糖甜香的味道。

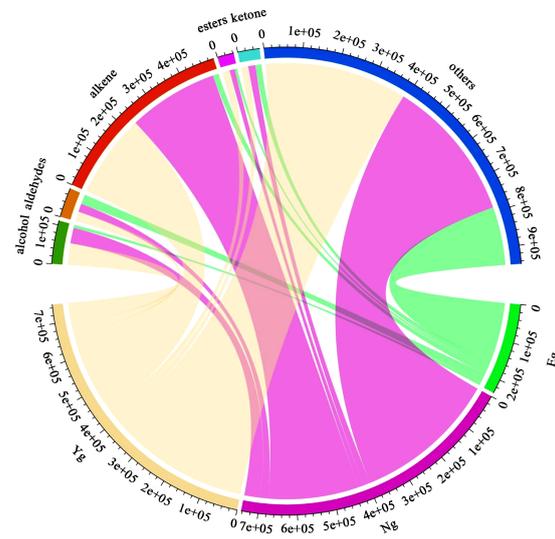


图9 三种绿茶样本挥发性物质分布弦图

Fig.9 Chord diagram of the distribution of volatile substances in three green tea samples

总体挥发性物质相互作用如图9弦图所示,上半部分代表测出的挥发性物质种类,下部分为三种绿茶样本,弦越宽证明关系越显著。由图可得梅青柚绿茶的挥发性成分比对照组梅县绿茶要丰富,主要是加工过程中梅州金柚幼果与茶叶进行发酵作用。结合上图7可得,经过应激碰撞处理的梅青柚绿茶其挥发性物质较为丰富,主要表现在醇类、酯类、萜烯类及其他类化合物,这些挥发性物质为梅青柚绿茶带来了独特的风味和生物活性,而活性物质对人体健康具有显著的促进作用,如提高免疫力、降低血压、预防心血管疾病等。

### 3 结论

本文利用气相色谱-质谱联用技术(GC-IMS)对梅州绿茶以及经过不同处理的梅青柚绿茶样品进行了挥发性成分分析。结果表明,样品中总共鉴定出58种挥发性成分,包括醇类17种、酮类7种、醛类12种、萜烯类5种、酯类7种、其他7种。醇类、酯类、萜烯类化合物是梅青柚茶挥发性成分的主体部分。相比于无应激幼果绿茶组,应激幼果绿茶组的茶叶挥发物含量较高,其醇类、酯类物质含量相对较高,而萜烯类物质相对较低,主要呈现果香及花香的风味特征。主成分分析表明梅县绿茶与处理后的梅青柚绿茶香气成分差异较大,与其挥发性成

分及加工工艺不同有关。经过应激碰撞处理的梅青柚绿茶其挥发物相对较多,说明轻度碰撞使柚子幼果使其内部发生应激反应,从而生成气味独特的挥发性化合物,使茶叶在储藏中形成不同的化合物类型。关于梅青柚绿茶的研究仍处于初步阶段,进一步探索发酵过程中挥发性物质的生成规律、变化趋势以及与茶叶品质之间的关系,以期对梅青柚绿茶的加工提供更加科学合理的指导。

### 参考文献

- [1] DENG S J, ZHANG G, ALUKO O O, et al. Bitter and astringent substances in green tea: composition, human perception mechanisms, evaluation methods and factors influencing their formation [J]. *Food Research International*, 2022, 157: 111262.
- [2] LIU Z B, CHEN Q, ZHANG C, et al. Comparative study of the anti-obesity and gut microbiota modulation effects of green tea phenolics and their oxidation products in high-fat-induced obese mice [J]. *Food Chemistry*, 2022, 367: 130735.
- [3] SUGITA Y, FURUKAWA T. Effect of green tea and tea catechin on the visual motion processing for optokinetic responses in mice br [J]. *Neuroscience*, 2022, 501: 42-51.
- [4] WANG B Y, QU F F, WANG P Q, et al. Characterization analysis of flavor compounds in green teas at different drying temperature [J]. *Lwt-Food Science and Technology*, 2022, 161: 113394.
- [5] 黎珂欣.柚子落果果胶及柚皮苷的提取改造及其在酸乳加工中的应用[D].南昌:南昌大学,2023.
- [6] 林诺怡.基于线粒体功能紊乱角度探究柚子幼果多糖对石斑鱼的保肝作用[D].广州:仲恺农业工程学院,2022.
- [7] JOURDAN P S, MCINTOSH C A, Mansell R L. Naringin levels in citrus tissues: II. quantitative distribution of naringin in citrus paradisi macfad [J]. *Plant Physiology*, 1985, 77(4): 903-908.
- [8] LIU H, LIANG C, MA L, et al. Analysis of antioxidant response in pomelo fruitlets subjected to external injury stress: Significance of naringin biosynthesis [J]. *LWT-Food Science*, 2021, 150: 111908
- [9] WANG S Q, CHEN H T, SUN B G. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) [J]. *Food Chemistry*, 2020, 315: 126158.
- [10] GEWERS F L, FERREIRA G R, ARRUDA H F, et al. Principal component analysis: A natural approach to data exploration [J]. *Acm Computing Surveys*, 2021, 54(4): 34.
- [11] WANG D, KURASAWA E, YAMAGUCHI Y, et al. Analysis of glycosidically bound aroma precursors in tea leaves. 2. Changes in glycoside contents and glycosidase activities in tea leaves during the black tea manufacturing process [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, 49(4): 1900-1903.
- [12] YANG Z Y, BALDERMANN S, WATANABE N. Recent studies of the volatile compounds in tea [J]. *Food Research International*, 2013, 53(2): 585-599.
- [13] WEN S, SUN L L, ZHANG S W, et al. The formation mechanism of aroma quality of green and yellow teas based on GC-MS/MS metabolomics [J]. *Food Research International*, 2023, 172: 113137.
- [14] YANG T, ZHU Y, SHAO C Y, et al. Enantiomeric analysis of linalool in teas using headspace solid-phase microextraction with chiral gas chromatography [J]. *Industrial Crops and Products*, 2016, 83: 17-23.
- [15] 汪洁琼.儿茶素氧化产生的H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>诱导茶叶香气成分变化研究[D].重庆:西南大学,2020.
- [16] LIU J, WAN P, XIE C, et al. Key aroma-active compounds in brown sugar and their influence on sweetness [J]. *Food Chemistry*, 2020, 345(9): 128826.
- [17] 马杰,周建中,张婷,等.基于GC-IMS结合感官评价法对植物基杏仁酸奶挥发性风味物质的表征及分析[J].*食品与发酵工业*,2023,49(20):280-287.
- [18] HO C T, ZHENG X, LI S, et al. Tea aroma formation [J]. *Food Science*, 2015, 4(1): 9-27.
- [19] 谭艳,王国庆,吴锦铸,等.基于GC-MS与GC-IMS技术对四种柚皮精油挥发性风味物质的检测[J].*食品工业科技*,2021,42(15):256-268.
- [20] LAN W J, WANG S Y, CHEN M R, et al. Developing poly(vinyl alcohol)/chitosan films incorporate with D-limonene: Study of structural, antibacterial, and fruit preservation properties [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 145: 722-732.
- [21] ZHANG B, WANG H, YANG Z, et al. Protective effect of alpha-pinene against isoproterenol-induced myocardial infarction through NF- $\kappa$ B signaling pathway [J]. *Human Experimental Toxicology*, 2020, 39(12): 1596-1606.
- [22] 毛阿静.焙火工艺对茶叶营养及风味特征成分的影响[D].合肥:安徽农业大学,2019.
- [23] ZAMORA R, HIDALGO F J. Formation of heterocyclic aromatic amines with the structure of aminoimidazoarenes in food products [J]. *Food Chemistry*, 2020,313: 126128.