



胡双明,艾仄宜,穆兵,等. 基于电子鼻与 HS-SPME-GC-MS 技术的江苏红茶香气特征研究[J]. 南京农业大学学报,2024,47(4):760-771.  
HU Shuangming, AI Zeyi, MU Bing, et al. Study on aroma characteristics of black tea in Jiangsu Province based on electronic nose and HS-SPME-GC-MS technology[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2024, 47(4): 760-771.

## 基于电子鼻与 HS-SPME-GC-MS 技术的 江苏红茶香气特征研究

胡双明<sup>1,2</sup>, 艾仄宜<sup>2</sup>, 穆兵<sup>2</sup>, 代祥<sup>2</sup>, 杨亦扬<sup>1,2\*</sup>

(1.南京农业大学园艺学院,江苏南京 210095;2.江苏省农业科学院休闲农业研究所/  
江苏省高效园艺作物遗传改良重点实验室,江苏南京 210014)

**摘要:** [目的] 本文旨在探究江苏主要产区红茶的特征香气成分与不同产区的关键差异香气组分。 [方法] 利用电子鼻 (E-nose) 结合顶空固相微萃取与气相色谱-质谱联用 (HS-SPME-GC-MS) 技术对江苏主要产区的代表性红茶样品进行香气成分分析。 [结果] 电子鼻分析表明萜烯类、芳香环类物质是江苏红茶香气最主要的挥发性成分,宜兴产区红茶的醇类、酮类、醛类、硫化物、萜烯类含量显著高于句容和金坛产区。 HS-SPME-GC-MS 分析表明醇类物质是所有江苏红茶中比例最高的挥发性化合物,占挥发物总量的 62.06%~75.66%;以相对气味活度值 (ROAV) 大于 1.00 为标准,共筛选出 12 种关键呈香物质,其中芳樟醇、香叶醇、柠檬醛、反式- $\beta$ -紫罗兰酮、癸醛、二甲基硫醚是江苏红茶中最关键的呈香物质 (ROAV>10.00)。正交偏最小二乘判别分析 (OPLS-DA) 表明,不同产区的红茶香气成分之间存在一定的差异,以变量权重 (VIP) 值大于 1.00 为标准筛选出 7 种差异成分,其中果香型的 2-甲基丁醛、苯乙醛与木质香型的反式氧化芳樟醇 (呋喃类) 是区分金坛产区与宜兴、句容产区的关键香气成分,花香型的顺式茉莉酮是区分句容产区与金坛、宜兴产区的关键香气成分,这些物质是造成产区间香气差异的关键因素。推测香叶醇与芳樟醇约为 1:1 的含量比是江苏红茶区别于其他名优红茶的重要原因之一。 [结论] 本研究通过 HS-SPME-GC-MS 和电子鼻技术明确了江苏红茶的特征香气成分,探明了不同产区的江苏红茶的差异香气组分,该结果为丰富我国红茶香气理论奠定了基础。

**关键词:** HS-SPME-GC-MS; 电子鼻 (E-nose); 江苏红茶; 香气特征; 相对气味活度值 (ROAV)

中图分类号: TS272.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-2030(2024)04-0760-12

## Study on aroma characteristics of black tea in Jiangsu Province based on electronic nose and HS-SPME-GC-MS technology

HU Shuangming<sup>1,2</sup>, AI Zeyi<sup>2</sup>, MU Bing<sup>2</sup>, DAI Xiang<sup>2</sup>, YANG Yiyang<sup>1,2\*</sup>

(1.College of Horticulture,Nanjing Agricultural University,Nanjing 210095,China;  
2.Institute of Leisure Agriculture/Jiangsu Key Laboratory for Horticulture Crop Genetic Improvement,  
Jiangsu Academy of Agriculture Sciences,Nanjing 210014,China)

**Abstract:** [Objectives] The paper aimed to investigate the characteristic aroma components of black tea from the main production areas in Jiangsu Province and distinguish the key difference components in different main production areas. [Methods] The aroma composition of representative Jiangsu black tea samples from the main production areas was analyzed using electronic nose (E-nose) and headspace solid phase microextraction gas chromatography mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) technology. [Results] The electronic nose analysis showed that terpenoids and aromatic ring substances were the main volatile components in the aroma of Jiangsu black tea, and the contents of alcohols, ketones, aldehydes, sulfur components and terpenoids were significantly higher in Yixing production area than those in Jurong and Jintan production areas. HS-SPME-GC-MS analysis showed that alcohols were the volatile compounds with the highest proportion in all Jiangsu black teas, accounting for 62.06%–75.66% of the total volatile. With relative odor activity value (ROAV) greater than 1.00 as the criterion, a total of 12 key aroma presenting substances were screened out, and linalool, geraniol, citral, *trans*- $\beta$ -ionone, decanal, dimethyl sulfide might be the most critical aroma components in Jiangsu black tea (ROAV>10.00). Orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA) showed that there were some differences

收稿日期: 2023-10-30

基金项目: 江苏省现代种业振兴“揭榜挂帅”项目 (JBGS[2021]085); 江苏省农业科技自主创新基金项目 [CX(22)2008]; 江苏现代农业 (茶叶) 产业技术体系项目 (JATS[2023]250)

\* 通信作者: 杨亦扬, 副研究员, 博士, 研究方向为茶树营养生理与栽培技术, E-mail: yiyangyang@jaas.ac.cn.

between the aroma components of black tea from different production areas. Seven variance components were screened using variable importance in projection (VIP) values greater than 1.00 as a criterion. Among them, 2-methyl-butanal and phenylacetaldehyde in fruity aroma and *trans*-linalool oxide (furans) in woody aroma were the key aroma components that distinguished the Jintan production area from Yixing and Jurong production areas, and *cis*-jasmone in floral aroma was the key aroma component that distinguished the Jurong production area from the Jintan and Yixing production areas, which were the key factor causing the aroma difference among production areas. In addition, the ratio of geraniol to linalool content in the main production areas of Jiangsu black tea was about 1:1, which was presumed to be one of the important reasons for the difference between Jiangsu black tea and other famous black teas. [Conclusions] In this study, the characteristic aroma components of Jiangsu black tea were clarified by combining HS-SPME-GC-MS and electronic nose technology, and the different aroma components of Jiangsu black tea from different production areas were explored, and the results laid a foundation for enriching the aroma theory of black tea in China.

**Keywords:** HS-SPME-GC-MS; electronic nose (E-nose); Jiangsu black tea; aroma characteristics; relative odor activity value (ROAV)

红茶作为全发酵茶,是世界上生产量最多、消费量最大的茶类<sup>[1]</sup>。江苏作为我国古代贡茶发源地之一,气候环境适宜,植茶历史悠久,文化底蕴深厚,历史上芙蓉茶场、茅麓茶场、前锋茶场曾经承担着出口红碎茶的重任。然而,从20世纪80年代后期开始伴随名优绿茶的兴起,江苏红茶迅速消退,除宜兴等个别区域一直维持制作红茶外,其他地方红茶难觅踪影。近年来,随着红茶市场的逐步升温,宜兴、句容、金坛等地区大力推进区域品牌建设,企业开展“绿配红”模式生产,2022年“宜兴红”入选农业农村部农业品牌精品培育计划<sup>[2]</sup>,宜兴茶产业总产值达4.9亿元。江南茶区句容红、金坛红等新产品也陆续被开发出来。江苏红茶因其乌黑油润的外形、黄红透亮的汤色、甜而持久的香气、顺滑醇厚的滋味、红艳明亮的叶底,越来越受广大消费者的认可与喜爱。

香气是决定红茶品质的重要因素之一,明确红茶香气成分和特征对红茶的加工和生产具有重要意义。传统的红茶香型以花香、果香、甜香为主<sup>[3]</sup>。红茶中已检测出400多种呈香成分<sup>[4]</sup>,主要成分为酯类、醇类、酮类和醛类物质<sup>[5]</sup>。目前有关红茶香气的研究主要集中在名优红茶方面。例如,Kang等<sup>[6]</sup>鉴定了世界四大红茶的香气成分;Huang等<sup>[7]</sup>鉴别了不同萎凋处理后祁门红茶的香气成分变化等。江苏红茶香气馥郁,特征显著,以往并未对江苏红茶香气成分进行深入研究,导致江苏红茶香气成分不明确,这极大制约了江苏红茶产业的发展。

目前,茶叶品质评价的主要手段仍是茶叶感官审评,无法避免主观性对审评结果的影响。电子鼻(E-nose)作为一种模拟生物嗅觉的仿生检测仪器,可以从感官模拟层面来获得样品中所有挥发性物质的信息<sup>[8]</sup>,已经在酒类、果蔬等领域广泛应用。电子鼻传感器阵列对茶叶香气具有良好的响应能力,可以进行茶叶香气的无损检测,因此电子鼻在茶叶审评领域中具有良好的应用前景。顶空-固相微萃取(HS-SPME)克服了传统样品前处理技术的缺陷,集采样、萃取、浓缩、进样于一体,能快速、高效分离和富集复杂样品基质中的挥发性和非挥发性分析物,常与气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)联用,是目前最常用、最普遍的检测复杂成分的方法之一,已广泛运用于茶叶香气提取和分析中<sup>[9]</sup>。将电子鼻与HS-SPME-GC-MS联用可以取长补短,对茶叶中的挥发性成分进行精准鉴定和分析。

本研究通过电子鼻和HS-SPME-GC-MS技术对江苏代表性红茶样品进行香气成分的检测分析,明确江苏红茶的特征香气成分,为江苏红茶产品的分类鉴别和香气品质评价提供参考,也为丰富我国红茶香气理论、提高红茶香气品质提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验样品来自江苏省常州市金坛区、句容市、宜兴市3个产区,共计14个茶样。所有红茶样品的加工均参照《江苏红茶加工技术规程:T/JAASS 54—2022》进行,主要工艺流程:萎凋—揉捻—发酵—干燥,将制成的干茶样品通过粉碎机粉碎后用食品级无色透明自封袋密封,保存在4℃的冰箱中备用。

### 1.2 仪器与设备

正构烷烃C8—C21标准品购于美国O2si公司;65 μm二甲基硅氧烷/二乙烯基苯(PDMS/DVB)萃取纤维头购于默克公司;TSQ8000EVO气相色谱-质谱联用仪购于美国Thermo Fisher Scientific公司;粉碎机购于永康市速锋工贸有限公司;PEN3电子鼻购于德国Airsense Analytics公司。

### 1.3 茶叶感官品质审评

茶叶感官品质由3位经过训练的专家参照国家标准《茶叶感官审评方法:GB/T 23776—2018》对茶叶样品进行审评,并经过专家的统一协商后进行综合打分。审评评分采用百分制,品质权重按照外形25%、香气25%、汤色10%、滋味30%、叶底10%进行计算,将各项因子分数乘以各自的品质权重并相加,即为茶样的品质总分。

### 1.4 电子鼻测定

**1.4.1 样品前处理** 准确称取每个红茶样品2.00 g于(专用)纸杯中,用保鲜膜覆盖静置5 h,待香气富集完毕后开始检测,重复2次。

**1.4.2 电子鼻条件** 样品的挥发性气体通过样品注射器针头泵入传感器室,分析传感器信号80 s,采样流量为300 mL·min<sup>-1</sup>,采样间隔1 s,零点微调时间10 s,重采样时间5 s。每次样品分析后且在下一次样品注入之前,用过滤空气吹扫系统80 s,以重新建立仪器基线。电子鼻传感器阵列由10个金属氧化物半导体型化学传感器组成,每种类型的传感元件相对应的主要敏感物质如表1所示。

表1 电子鼻传感器阵列内传感器的敏感物质

Table 1 Sensor sensitivities within the sensor array of the E-nose

编号 No.	传感器名称 Sensor name	敏感化合物 Sensitive components
R1	W1C	芳香族化合物 Aromatic components
R2	W5S	范围较广的氮氧化物 Broad range oxynitride
R3	W3C	芳烃及其衍生物和氨 Aromatic components, ammonia
R4	W6S	氢气 Hydrogen
R5	W5C	极性低的芳香族成分和碳氢化合物 Aromatic components, hydrocarbon
R6	W1S	甲烷 Methane
R7	W1W	硫类、有机化合物、萜烯类 Sulfurs, organic components, terpenes
R8	W2S	醇、醛、酮 Alcohol, aldehyde, ketone
R9	W2W	芳香环结构的化合物、含硫有机化合物 Aromatic ring components, organosulfur
R10	W3S	长链烷烃 Long chain alkanes

### 1.5 气相色谱-质谱测定

**1.5.1 样品前处理** 采用HS-SPME法提取茶叶香气组分。具体处理如下:准确称取2.00 g样品放入20 mL顶空瓶中,加入沸水15 mL后迅速密封;将顶空瓶放进60℃恒温水浴锅中,平衡3 min后将固相微萃取进样针插入顶空瓶中,水浴萃取1 h后手动进样,解吸附3 min后进行检测。

**1.5.2 气相色谱-质谱条件** 气相色谱条件:色谱柱为TG-5MS(30 m×0.25 mm×0.25 μm)弹性石英毛细管柱;载气为高纯氮气(纯度99.999%);载气流速为1.2 mL·min<sup>-1</sup>;采用不分流进样;进样口温度为250℃。程序升温:初始温度35℃保持2 min,然后以4℃·min<sup>-1</sup>升到180℃,保持2 min,再以15℃·min<sup>-1</sup>升到280℃,保持1 min。

质谱条件:离子源为EI源;传输线温度为280℃;离子源温度为300℃;电子能量为70 eV;扫描范围(*m/z*)为45~500 amu,全扫描采集模式。

### 1.6 定量与相对气味活度值(ROAV)计算

挥发性化合物的定性定量:首先将得到的挥发物质谱图与NIST标准谱库进行检索与匹配,结合化合物的保留时间、匹配度等参数进行初步鉴定,然后参照刘雅芳等<sup>[10]</sup>的方法,在相同的色谱条件下分析正构烷烃(C8—C21)的标准品,根据不同碳原子数的保留时间,计算各挥发性化合物对应的保留指数(RI),并与NIST谱库中报告的RI相比,去除偏差范围较大(±20)的挥发性物质。采用各色谱峰面积与总峰面积比值的面积归一化计算红茶各香气组分的相对含量<sup>[11]</sup>。

采用徐梦婷等<sup>[12]</sup>的方法,以气味阈值确定3个产区中的关键香气成分,按下式计算各成分的ROAV:

$$ROAV_i = (C_i/C_{\max}) / (T_{\max}/T_i) \times 100,$$

式中: $C_i$ 为茶叶组分的相对含量(%); $T_i$ 为组分*i*在水中的香气阈值(μg·kg<sup>-1</sup>); $C_{\max}$ 与 $T_{\max}$ 为对样品总体风味贡献最大组分的相对含量(%)和香气阈值(μg·kg<sup>-1</sup>)。

在一定范围内,ROAV越大,则该成分对总体香气的贡献度越大。ROAV≥1.00的组分被确定为茶叶中的活性香气化合物,0.10<ROAV<1.00的组分被认为对样品的总体风味具有重要的修饰作用;并且规定对样品风味贡献最大的组分ROAV<sub>max</sub>=100.00,故ROAV>100的全部按100.00表示。

### 1.7 正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)建模

对电子鼻传感器响应值与红茶香气成分含量进行 OPLS-DA 多元统计分析,通过建模图形中各类指标来判断不同组间样品的分离程度与拟合情况( $R^2X$ :模型对  $X$  矩阵的解释率; $R^2Y$ :模型对  $Y$  矩阵的解释率; $Q^2$ :模型的预测能力)。通常情况下  $R^2$  和  $Q^2$  高于 0.5(50%)较好,高于 0.4 即可接受,且两者差值不应过大<sup>[13]</sup>。此外,为筛选对红茶香气具有突出贡献的传感器与挥发性成分,引入了 OPLS-DA 模型量的变量权重(variable importance in projection, VIP)值,以 VIP 值>1.00 为标准筛选对差异代谢物贡献度较大的传感器编号<sup>[14]</sup>。

### 1.8 统计分析与可视化

采用 IBM SPSS Statistics 26 软件对数据进行显著性分析,其中显著性差异是基于 LSD(least significant difference)检验下的单因素方差分析;采用 Origin 2019 软件绘制雷达图,采用 SIMCA 14.1 进行主成分分析与多元统计分析,采用 Excel 2018 软件计算均值和标准差,并绘制表格。

## 2 结果与分析

### 2.1 江苏红茶香气的感官评价分析

江苏红茶的感官审评结果如表 2 所示,其中宜兴产区是江南茶文化发祥地,产茶历史悠久,茶叶企业数量庞大,故所选样品数量相较于其他 2 个产区多。各产区的感官审评总得分均在 90 分以上,表明江苏红茶的品质较优秀,就香气单项得分而言,宜兴产区的红茶香气最佳,8 个样品的香气得分均在 24 分以上,其中 YX1 的香气得分最高,达到 24.75 分,而金坛产区样品的香气得分相对较低,其中 JR1 的香气得分仅为 22.5 分。

表 2 不同产区江苏红茶感官审评得分

Table 2 Sensory evaluation scores of Jiangsu black tea from different production areas

编号 No.	外形 Appearance	汤色 Liquor color	滋味 Taste	香气 Aroma	叶底 Appearance of waste leaves	总计 Total
JT1	23.50	9.60	28.50	22.50	9.10	93.20
JT2	23.90	9.10	27.00	23.75	9.30	93.05
JR1	23.75	9.60	27.90	24.00	9.30	94.55
JR2	24.65	8.50	25.80	24.25	9.70	92.90
JR3	22.35	9.40	28.20	23.75	9.20	92.90
YX1	23.80	9.70	29.70	24.75	9.20	97.15
YX2	24.75	9.50	28.20	24.50	9.70	96.65
YX3	24.65	9.50	28.50	24.25	9.70	96.60
YX4	24.65	9.80	27.00	24.50	9.50	95.45
YX5	23.55	9.80	27.00	24.25	9.30	93.90
YX6	23.85	9.10	27.30	24.25	9.30	93.80
YX7	23.30	8.80	27.30	24.25	9.30	92.95
YX8	23.75	8.90	26.40	24.00	9.70	92.75
YX9	23.90	8.70	25.50	23.00	8.90	90.00

注:JT:金坛 Jintan;JR:句容 Jurong;YX:宜兴 Yixing. 下同 The same as follows.

### 2.2 江苏红茶香气的电子鼻分析

红茶样品挥发物的电子鼻响应值如图 1 所示,响应值大于 1 的传感器包括 R1、R2、R6、R7、R8、R9,这与多数文献中的茶叶对电子鼻传感器响应种类一致<sup>[15-17]</sup>。3 个产区样品中均是 R7、R9 传感器响应值最高,表明江苏红茶中含有较高的萜烯类、芳香环结构的化合物以及一些有机硫成分。显著性分析结果表明,江苏不同产区的红茶挥发物含量之间存在显著差异,其中金坛与宜兴产区的氮氧化合物含量显著高于句容产区,宜兴产区的醇、酮、醛类含量显著高于金坛与句容产区,宜兴产区的硫化物、萜烯类含量显著高于句容和金坛产区( $P<0.05$ )。

### 2.3 江苏红茶的 HS-SPME-GC-MS 分析

从江苏省 3 个不同产区的红茶中共筛选出 140 余种挥发物,通过 NIST 标准谱库比对与保留指数验证,最终共鉴定出 91 种香气成分,主要包含 27 种醇类物质,18 种醛类物质,6 种酮类物质,13 种酯类物质,7 种芳香烃类物质,4 种酸类物质,5 种含氮氧杂环类物质,8 种烯烃类物质以及 3 种醚类物质。江苏红茶各类香气成分的相对含量如图 2 所示,江苏所有产区的样品中,相对含量比例最高的均为醇类物质,主

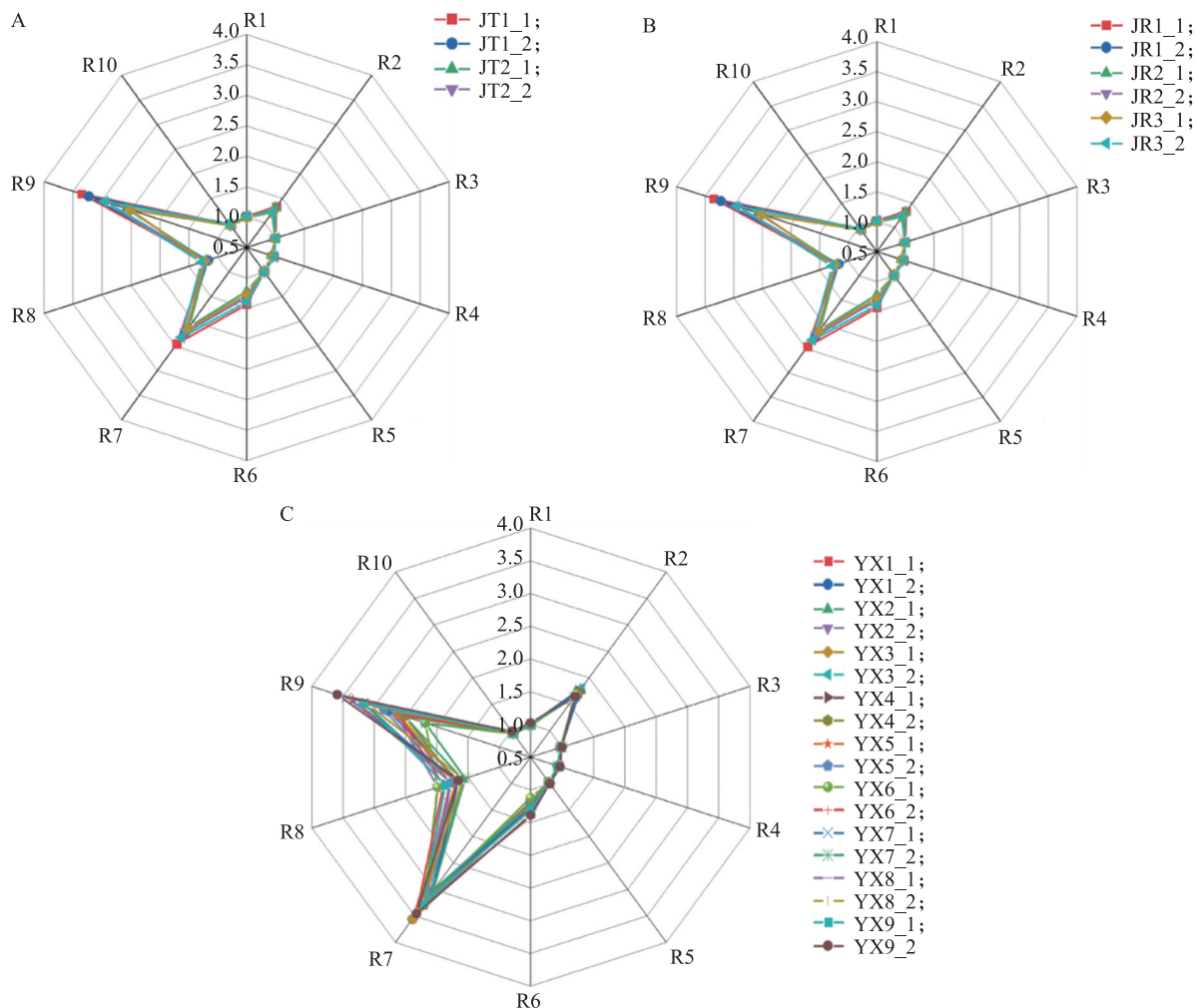


图1 不同产区江苏红茶挥发物电子鼻响应值的雷达图

Fig. 1 Radar plots of electronic nose response values of volatile from different production areas of Jiangsu black tea

A.金坛 Jintan; B.句容 Jurong; C.宜兴 Yixing.

R1—R10 传感器对应的主要敏感物质同表 1。The main sensitive substances corresponding to the R1—R10 sensors are the same as Table 1.

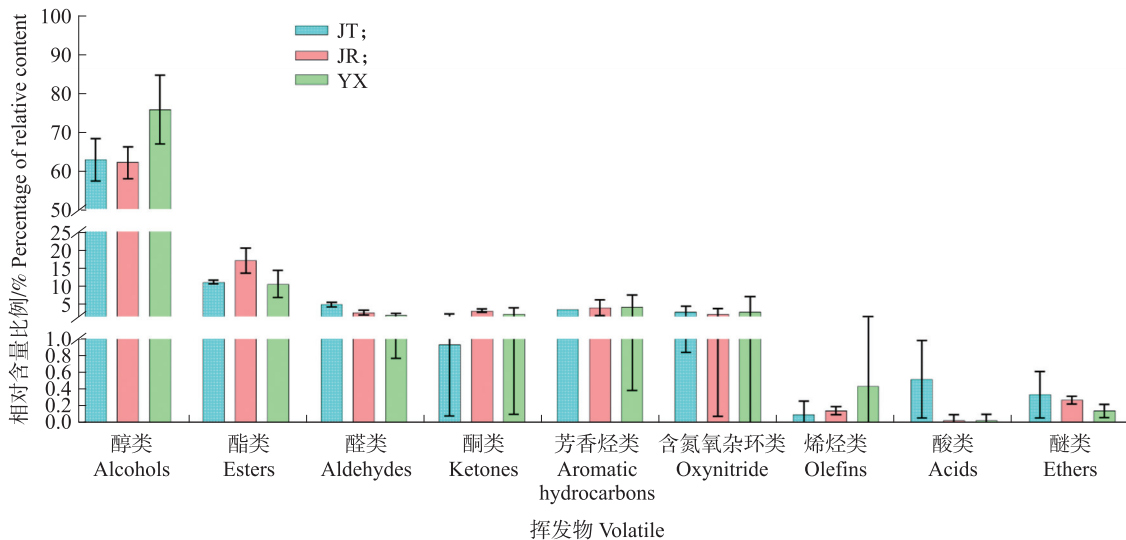


图2 江苏省3个不同产区红茶挥发物总量分析

Fig. 2 Analysis of the total volatile of black tea in three different production areas in Jiangsu Province

要为萜烯醇类、脂肪族醇类及芳香族醇类,占挥发物总量的62.06%~75.66%,这与多数文献结果相一致<sup>[18-20]</sup>,表明醇类是构成江苏红茶香气品质最主要的特征成分,其中芳樟醇与香叶醇含量比例最高,分别为23.07%~33.65%和29.80%~32.68%。酯类物质在各类香气成分中排第二,相对含量比例为10.31%~16.99%,其次是醛类物质,总体含量不高,为1.31%~4.48%,但其种类较为丰富,仅次于醇类物质。而酮类、芳香烃类、氮氧杂环类、烯炔类、酸类、醚类的含量比例均较低,6类物质的总体含量比例为7.58%~8.73%。

3个产区中,宜兴产区醇类的相对含量比例最高,为75.66%,而金坛与句容产区较为相似,醇类含量比例约为62%。句容产区的酯类含量比例最高,为7.97%~17.87%,而金坛产区的醛类含量比例最高,为4.48%,产生差异的原因主要是由于2-甲基丁醛与苯乙醛这2个物质的相对含量高于其他2个产区。就酮类而言,句容产区的相对含量最高,总含量比例为2.37%~3.13%,以顺式茉莉酮为主要含量。

醚类仅检测出3种物质,其中金坛产区醚类相对总含量最高,其独有的二甲基硫醚与二甲基二硫醚的总含量比例为0.24%~0.54%。烯炔类物质在宜兴产区中相对含量比例最高,均值为0.45%,以反式- $\beta$ -罗勒烯、 $\delta$ -己二烯、 $\alpha$ -法呢烯为主;而含氮氧杂环类物质在句容产区相对含量比例最低,只检测出咖啡碱一种物质,比例为0.39%~3.13%;苯环类、酚类等具有较高芳香阈值的芳香烃类物质在3个产区中的相对含量并无太大差异,比例均为3.22%~3.79%,以脞-甲氧基苯基、丁基化羟基甲苯为主。酸类在茶叶中常常以不愉悦的气味出现,此次金坛产区的酸类相对含量略高于其他2个产区,以壬酸、香叶酸等为主。

#### 2.4 江苏红茶香气成分的ROAV分析

江苏红茶3个主要产区的香气种类如图3所示,可以看出宜兴产区的香气成分种类最丰富,达到76种,高于句容、金坛产区的61种和50种。除在3个产区均能检测到的35种香气成分外,金坛与句容还有2种相同的香气成分,金坛与宜兴产区有6种相同的香气成分,而句容与宜兴产区最多,有18种共有香气成分,这些成分主要包含8种C6—C9醇类及衍生出来的醛酮类。

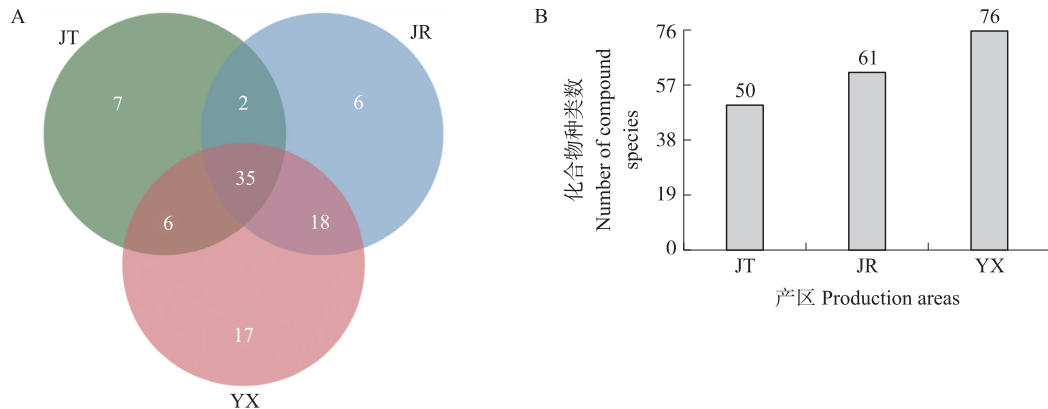


图3 江苏红茶3个产区红茶挥发物韦恩图分析

Fig. 3 Wayne diagram analysis of black tea volatile in three production areas of Jiangsu Province

A. 3个产区韦恩图 Three production areas of Wayne diagram; B. 3个产区化合物种类数 Number of compound species in three production areas.

通过查阅文献以及比较数据库中各个香气成分在水中的香气阈值,对3个产区35种共有成分进行ROAV分析。由表3可见:对江苏红茶香气形成具有重要贡献( $ROAV \geq 1.00$ )的香气成分共有12种,其中对江苏红茶香气起到决定性作用的香气成分共有6种( $ROAV > 10.00$ ),包含4种花香型(芳樟醇、香叶醇、反式- $\beta$ -紫罗兰酮、癸醛)、1种果香型(柠檬醛)与1种玉米香型(二甲基硫醚)的香气物质(以2个产区的ROAV同时大于10.00作为筛选标准)。芳樟醇、香叶醇、柠檬醛、反式- $\beta$ -紫罗兰酮在所有产区中的ROAV均极显著高于其他香气成分,表明这4种物质是江苏红茶中最为关键的共有呈香物质。而 $1.00 \leq ROAV < 10.00$ 的香气成分共有6种,以花果香型的醛酯类(水杨酸甲酯、苯甲醛、3-甲基丁醛等)为主,这些物质同样对江苏红茶香气的形成具有较大的贡献。此外,还有10种香气物质的 $0.10 \leq ROAV < 1.00$ ,如苯甲醛、反式氧化芳樟醇(呋喃类)等,这些物质可能在红茶香气形成中起到一定的修饰作用。

表3 3个产区江苏红茶共有挥发性成分的ROAV( $\bar{x}\pm SD$ )

Table 3 The ROAV of common volatile components of black tea in three production areas of Jiangsu Province

编号 No.	化合物 Compound	香气特征 Aroma characteristics	水中阈值/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) Threshold in water	ROAV			3个产地的 平均ROAV Average ROAV of three production areas
				金坛 Jintan	句容 Jurong	宜兴 Yixing	
1	芳樟醇 Linalool	花香、铃兰香 Floral, lily of the valley	0.22 <sup>[21]</sup>	100.00±0.00	100.00±0.00	100.00±0.00	100.00±0.00
2	香叶醇 Geraniol	玫瑰花香 Rose like	7.5 <sup>[21]</sup>	100.00±0.00	100.00±0.00	100.00±0.00	100.00±0.00
3	柠檬醛 Citral	柠檬香、柑橘香 Lemon, citrus	0.05 <sup>[22]</sup>	100.00±0.00	100.00±0.00	70.42±10.97	90.14±13.94
4	反式- $\beta$ -紫罗兰酮 <i>trans</i> - $\beta$ -ionone	紫罗兰香、木香 Violet, woody	0.09 <sup>[22]</sup>	38.22±35.37	100.00±0.00	51.04±5.75	63.09±26.62
5	癸醛 Decanal	花果香 Floral and fruity	0.1 <sup>[22]</sup>	8.23±7.35	24.48±16.89	18.88±11.65	17.20±6.74
6	二甲基硫醚 Dimethyl sulfide	玉米、含硫味 Corn, sulfurous odour	0.3 <sup>[22]</sup>	17.70±17.36	13.83±4.45	8.15±4.04	13.23±3.92
7	2-甲基丁醛 2-methyl-butanal	可可、果味、霉味 Cocoa, fruity, musty	1 <sup>[22]</sup>	16.55±15.59	2.34±1.52	6.46±6.20	8.45±5.97
8	水杨酸甲酯 Methyl salicylate	花香 Flowers	40 <sup>[23]</sup>	2.63±2.46	5.68±2.13	6.05±2.53	4.79±1.53
9	苯乙醛 Benzeneacetaldehyde	果香、甜香 Fruity, sweet	4 <sup>[22]</sup>	3.26±3.16	2.38±0.78	0.70±1.28	2.11±1.06
10	3-甲基丁醛 3-methyl-butanal	苹果香 Apple-scented	1.5 <sup>[22]</sup>	3.18±3.05	2.01±1.04	0.74±1.05	1.96±1.22
11	顺式茉莉酮 <i>cis</i> -jasmone	茉莉花香 Jasmine	7 <sup>[22]</sup>	0.10±0.00	3.96±2.58	0.31±0.39	1.46±1.77
12	$\beta$ -环柠檬醛 $\beta$ -cyclocitral	苦杏仁、果香 Bitter almonds, fruity	3 <sup>[24]</sup>	0.08±0.00	1.89±0.00	1.42±0.00	1.13±0.77
13	3-己烯-1-醇 ( <i>Z</i> )-3-hexen-1-ol	绿叶、清香 Green leaves, fragrant	3.9 <sup>[21]</sup>	0.56±0.54	1.44±0.55	0.45±0.61	0.82±0.44
14	苯甲醛 Benzaldehyde	苦杏仁香 Bitter almond aroma	3.5 <sup>[22]</sup>	0.60±0.57	0.91±0.13	0.18±0.21	0.56±0.30
15	反式氧化芳樟醇(呋喃类) <i>trans</i> -linalool oxide(furans)	泥土气味、木质 Earthy, woody	60 <sup>[21]</sup>	0.91±0.86	0.67±0.52	0.37±0.53	0.65±0.22
16	己醛 Hexanal	青气 Grassy flavor	4.5 <sup>[22]</sup>	0.28±0.24	0.57±0.45	0.19±0.24	0.35±0.16
17	1-辛烯-3-醇 1-octen-3-ol	金属、青气 Metallic, Grassy flavor	1 <sup>[25]</sup>	0.41±0.37	0.73±0.26	0.18±0.24	0.44±0.23
18	( <i>Z</i> )-己酸-3-己烯酯 ( <i>Z</i> )-hexanoic acid-3-hexenyl ester	果香、甜香 Fruity, sweet	16 <sup>[22]</sup>	0.26±0.24	0.59±0.29	0.44±0.92	0.43±0.13
19	苯乙醇 Phenylethyl alcohol	玫瑰花香 Rose like	45 <sup>[22]</sup>	0.01±0.01	0.72±0.57	0.35±0.72	0.36±0.29
20	庚醛 Heptanal	果香、坚果香 Fruity, nutty	3 <sup>[25]</sup>	0.17±0.15	0.48±0.09	0.18±0.27	0.28±0.14
21	棕榈酸甲酯 Hexadecanoic acid, methyl ester	轻微果香 Slightly fruity	4 <sup>[22]</sup>	0.15±0.14	0.67±0.42	0.12±0.17	0.31±0.25
22	反式-2-己烯醛 ( <i>E</i> )-2-hexenal	甜杏仁、果味 Sweet almond, fruity	110 <sup>[7]</sup>	0.28±0.24	0.57±0.45	0.19±0.24	0.35±0.16
23	$\beta$ -月桂烯 $\beta$ -myrcene	花香、柠檬香、木香 Floral, lemon, woody	42 <sup>[21]</sup>	0.05±0.05	0.07±0.05	0.02±0.02	0.05±0.02
24	反式香叶丙酮 <i>trans</i> -geranylacetone	青甜香、微玫瑰香 Green sweet fragrance, slight rose fragrance	60 <sup>[21]</sup>	≤0.01	0.03±0.01	≤0.01	0.01±0.01
25	苯甲醇 Benzyl alcohol	蜜甜、果香 Sweet, fruity	10 000 <sup>[21]</sup>	≤0.01	≤0.01	≤0.01	0.00±0.00
26	植物醇 Phytol	花香、脂香 Floral, fatal	640 <sup>[26]</sup>	≤0.01	≤0.01	≤0.01	0.00±0.00
27	橙花醛 Neral	甜柠檬、柠檬皮 Sweet lemon, lemon zest	1 000 <sup>[7]</sup>	≤0.01	≤0.01	≤0.01	0.00±0.00
28	6-甲基-5-庚烯-2-酮 6-methyl-5-hepten-2-one	柠檬草、柑橘香 Lemongrass, citrus aroma	50 <sup>[27]</sup>	≤0.01	≤0.01	≤0.01	0.00±0.00
29	咖啡因 Caffeine			nf	nf	nf	nf
30	反式芳樟醇 3,7-氧化物 <i>trans</i> -linalool 3,7-oxide			nf	nf	nf	nf

续表 3 Table 3 continued

编号 No.	化合物 Compound	香气特征 Aroma characteristics	水中阈值/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) Threshold in water	ROAV			3 个产地的 平均 ROAV Average ROAV of three production areas
				金坛 Jintan	句容 Jurong	宜兴 Yixing	
31	肟-甲氧基苯基 Oxime-methoxy-phenyl	不愉快的气味 Unpleasant smell		nf	nf	nf	nf
32	丁基化羟甲苯 Butylated hydroxytoluene			nf	nf	nf	nf
33	2,4-二叔丁基苯酚 2,4-di-tert-butylphenol	类似苯酚的气味 Phenol-like odor		nf	nf	nf	nf
34	2,5-二叔丁基-1,4-苯醌 2,5-di-tert-butyl-1,4-benzoquinone			nf	nf	nf	nf
35	$\alpha$ -亚乙基苯乙醛 $\alpha$ -ethylidene-benzeneacetaldehyde	蜜糖、可可 Honey, cocoa		nf	nf	nf	nf

注:表中部分数据为单个数值的代表在该产区的所有样品中香气成分只出现过 1 次。nf:挥发物在水中气味阈值未被查询,故无法计算 ROAV。

Note: Some of the data in the table are representative of a single value that occurs only once in all the samples. nf: The ROAV can not be calculated because the aroma thresholds for volatile in water are not accessed.

### 2.5 江苏红茶的关键香气差异成分筛选

为强化地方特色,明确香气特征差异,筛选不同产区间红茶的关键香气成分变得尤为重要。对江苏红茶所有的挥发性香气成分进行 OPLS-DA 建模,图 4-A 中色点代表不同产区的样品,点与点之间的距离表示样品之间特征差异的大小,江苏 3 个产区样品的色点分别落在不同象限,表明不同产区的红茶香气成分之间也存在一定的差异。经过 200 次交叉验证, $Q^2$  回归线与纵轴的相交点小于 0,说明模型不存在过拟合,模型验证有效(图 4-B),认为该结果可用于茶叶香气的产区鉴别分析。

以 OPLS-DA 模型中  $VIP > 1.00$  为标准,共筛选出 11 种标志性成分,其中  $ROAV > 1.00$  的香气成分有 7 种(表 4),它们是影响 3 个产区江苏红茶的关键标志性香气成分。这 7 种香气成分在 3 个产区中的平均

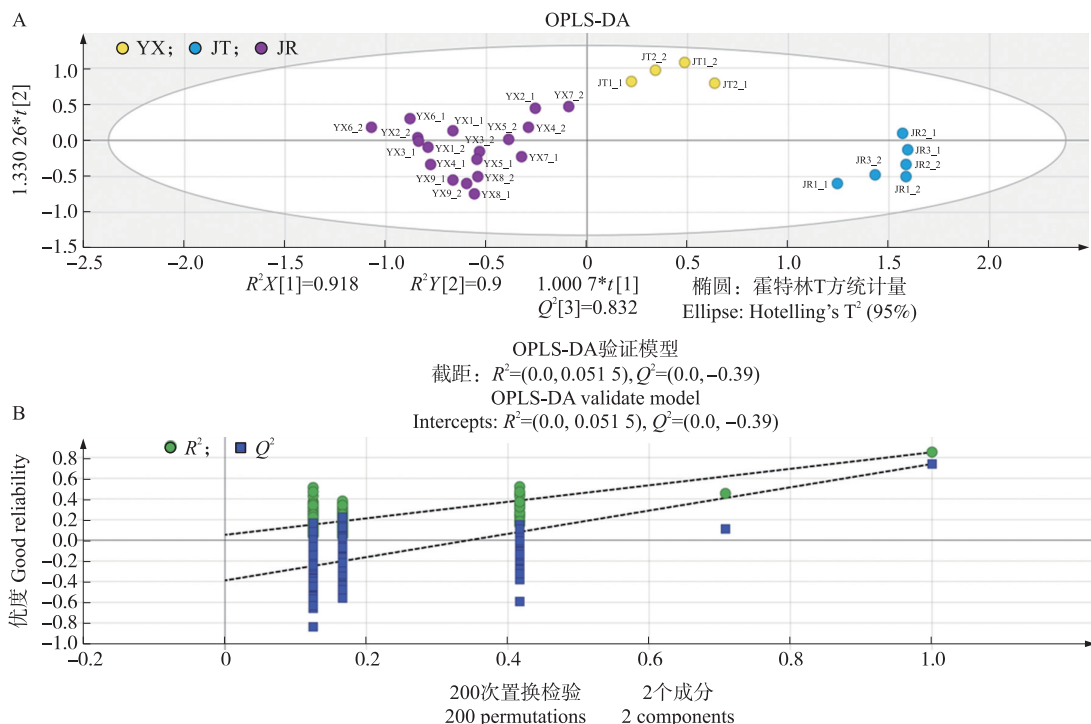


图 4 3 个产区江苏红茶挥发物相对含量的正交偏最小二乘判别分析

Fig. 4 Orthogonal partial least squares discriminant analysis of relative volatile content of black tea in three production areas in Jiangsu Province

A. OPLS-DA 得分散点图 OPLS-DA scatter point diagram; B. OPLS-DA 交叉验证结果 OPLS-DA cross-validation results.

$R^2 X$ ,  $R^2 Y$ ,  $R^2$  和  $Q^2$  分别代表所建模型对  $X$  矩阵的解释率,所建模型对  $Y$  矩阵的解释率,所建模型的可解释性和模型的预测能力。 $R^2 X$ ,  $R^2 Y$ ,  $R^2$  and  $Q^2$  represent the explanatory rate of the model to the  $X$  matrix, the explanatory rate of the model to the  $Y$  matrix, the interpretability of the model, and the prediction ability of the model, respectively.

相对含量如图 5-A 所示,尽管芳樟醇、香叶醇、水杨酸甲酯的 *VIP* 值较高,但是不同产区的平均相对含量和 *ROAV* 均差异不显著。金坛产区中带有果香、甜香的 2-甲基丁醛和苯乙醛的相对含量与 *ROAV* 均明显高于其他 2 个产区;带有木质香的反式氧化芳樟醇(呋喃类)的 *ROAV* 明显高于其他产区,因此推测这 3 种物质是金坛产区区别于其他 2 个产区的关键香气成分。茉莉花香型的顺式茉莉酮在句容产区的 *ROAV* 也明显高于金坛与宜兴产区。此外,香叶醇与芳樟醇具有最高的相对含量比例、*ROAV* (*ROAV*=100.00) 与 *VIP* 值。进一步研究发现,3 个产区中香叶醇的相对含量都略高于芳樟醇,但 3 个产区各样品中这 2 种香气成分的含量比例都约为 1:1,如金坛产区所有红茶样品中芳樟醇和香叶醇的平均含量分别为 23.07% 和 32.68% (图 5-B),句容产区的平均含量分别为 27.11% 和 29.80% (图 5-C),而宜兴产区的平均含量分别为 33.65% 和 34.10% (图 5-D)。由此推测,芳樟醇和香叶醇 1:1 的含量比例是江苏红茶香气的关键特征之一。

表 4 3 个产区江苏红茶的关键差异呈香物质

Table 4 Key different aroma components of Jiangsu black tea in three production areas

编号 No.	香气化合物 Aroma components	<i>ROAV</i>			<i>VIP</i> 值 <i>VIP</i> value
		金坛 Jintan	句容 Jurong	宜兴 Yixing	
1	芳樟醇 Linalool	100.00±0.00	100.00±0.00	100.00±0.00	3.19
2	香叶醇 Geraniol	100.00±0.00	100.00±0.00	100.00±0.00	2.92
3	水杨酸甲酯 Methyl salicylate	2.63±2.46	5.68±2.13	6.05±2.53	1.96
4	2-甲基丁醛 2-methyl-butanal	16.55±15.59	2.34±1.52	6.46±6.20	1.44
5	顺式茉莉酮 <i>cis</i> -jasmone	0.10±0.00	3.96±2.58	0.31±0.39	1.12
6	苯乙醛 Benzeneacetaldehyde	3.26±3.16	2.38±0.78	0.70±1.28	1.03
7	反式氧化芳樟醇(呋喃类) <i>trans</i> -linalool oxide (furans)	0.91±0.86	0.39±0.36	0.37±0.53	1.94

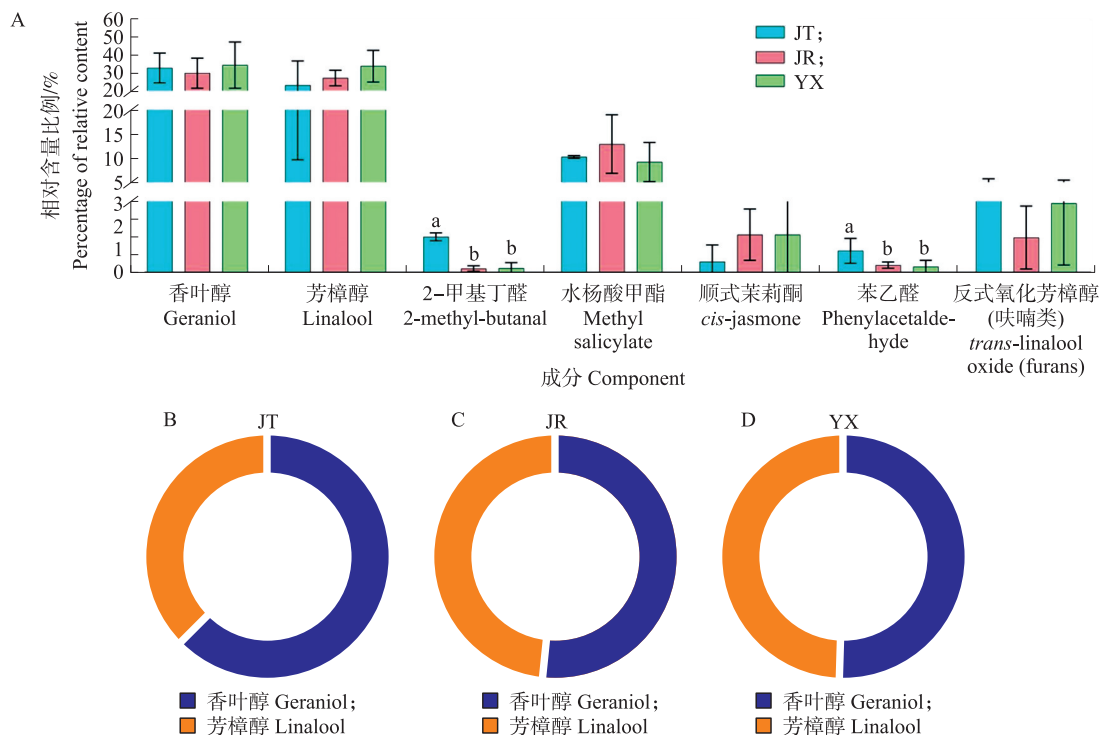


图 5 3 个产区的江苏红茶关键香气成分相对含量

Fig. 5 Relative contents of key aroma components of Jiangsu black tea in three production areas

A. 各产区 7 种关键香气成分的相对含量比例 Relative content percentage of the seven key aroma components in each production area; B—D. 不同产区芳樟醇与香叶醇的含量比 The ratio of linalool to geraniol in different production areas.

不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level.

### 3 讨论

本研究表明,3 个产区江苏红茶共有 35 种香气成分,这些香气成分多以花香味、果香味为主,青草味、玉米味为辅。*ROAV* > 10.00 的香气成分为芳樟醇、香叶醇、癸醛、反式- $\beta$ -紫罗兰酮、柠檬醛、二甲基硫醚这

6种物质,以花香型香气为主,推测这些物质是构成江苏红茶香气最关键的物质组分,而  $ROAV > 1.00$  的一些组分主要为花香、果香型的醛酯类(水杨酸甲酯、苯乙醛、3-甲基丁醛等),这些物质同样是关键的香气成分。这些香气成分在其他地区的名优红茶中均有报道,例如3-甲基丁醛、香叶醇和反式- $\beta$ -紫罗兰酮被认为是大吉岭红茶最常见香气成分<sup>[28]</sup>。Ma等<sup>[29]</sup>发现苯乙醛、芳樟醇、香叶醇是形成滇红典型花香和焦糖气味的关键芳香化合物;水杨酸甲酯被认为是锡兰红茶<sup>[6]</sup>、宁红茶<sup>[10]</sup>的关键香气成分;芳樟醇、香叶醇、苯乙醛、芳樟醇及其氧化物被认为是祁门红茶的关键成分<sup>[30]</sup>,苯乙醛是信阳红茶的关键香气成分<sup>[31]</sup>;Yin等<sup>[20]</sup>在研究湖南红茶时同样发现香叶醇、苯乙醛、芳樟醇、反式橙花叔醇等为主要香气成分。研究表明,苯乙醛、芳樟醇、香叶醇、反式- $\beta$ -紫罗兰酮、己醛这些物质是鉴别世界四大红茶(祁门红茶、阿萨姆红茶、大吉岭红茶和锡兰红茶)的通用性和确定性物质<sup>[6]</sup>,本研究结果与之一致。而癸醛、柠檬醛、二甲基硫醚、2-甲基丁醛在其他地区中并不常见的物质可能是江苏红茶区别于其他红茶的重要原因之一。

萜烯类物质作为红茶香气成分中含量最高的关键成分,一直是红茶香气研究的热点。本研究发现,江苏红茶中比例最高的香气成分也是萜烯类物质,其中芳樟醇和香叶醇的相对含量、 $ROAV$ 和 $VIP$ 值中均显著高于其他香气成分。香叶醇与芳樟醇的比例也是影响红茶香气品质的关键因素,如Yun等<sup>[18]</sup>发现香叶醇与芳樟醇的比例是识别红茶地理产地的有效准确方法。而Su等<sup>[32]</sup>根据红茶中挥发性成分的含量比例将红茶分为3种香气类型:1)以芳樟醇和芳樟醇氧化物为主的花香和木香;2)以芳樟醇和香叶醇为主的中间体;3)以香叶醇为主的玫瑰香味。祁门红茶因其较高的香叶醇含量而具有浓郁的玫瑰香味<sup>[33]</sup>,香气类型属于第3类,而四川红茶是以芳樟醇为主要香气成分的第1类香气类型。不同于祁门红茶和四川红茶,江苏红茶香叶醇与芳樟醇的含量比均约为1:1,表明江苏红茶的香气类型属于第2类,是以芳樟醇和香叶醇为主的中间体,是玫瑰香与馥郁花香的综合香型,因此推测这2种香气成分的含量比是江苏红茶区别于其他名优红茶的重要原因之一。此外,由于不同香气成分对每个产区红茶香气贡献度不一,经OPLS-DA筛选后发现果香型的2-甲基丁醛与苯乙醛和木质香型的反式氧化芳樟醇(呋喃类)是区分金坛产区与宜兴、句容产区红茶的关键香气成分,花香型的顺式茉莉酮是区分句容产区与金坛、宜兴产区红茶的关键香气成分,这些物质是造成产区间红茶香气差异的关键因素。

在香气成分含量比例中,宜兴产区中醇类含量比例略高于句容与金坛产区;在进行电子鼻传感器响应值分析时,同样发现宜兴产区中S7(萜烯类)响应值高于其他2个产区,萜烯类物质中宜兴产区又以香叶醇、芳樟醇含量最高,这很好将电子鼻与GC-MS两者数据相对应。此外,结合感官审评的结果,宜兴产区红茶的香气得分普遍较高,更加印证了萜烯类化合物对红茶香气品质的影响。在R2(氮氧化合物)传感器中,句容产区的响应值比其他2个产区低,仅仅检测出1种含量较低的咖啡碱。造成不同产区红茶香气差异的原因可能是所选品种、加工环节时的参数、茶叶存储过程等因素的不同所致。

电子鼻与GC-MS连用也有一些弊端,电子鼻主要用于获取样品中所有挥发性物质的整体信息,因此很难与GC-MS检测出的所有挥发性物质一一对应。除了获取样品整体信息外,电子鼻通常用来区分不同样品间的信息<sup>[34-35]</sup>,因此未来可以扩大地域样本,收集江苏省内其他产区的红茶样品,总结地域香气差异优势,并对比不同名优红茶的香气特征,进一步探究江苏红茶香气品质形成的机制。

#### 参考文献 References:

- [1] 宛晓春. 茶叶生物化学[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2003:39.  
Wan X C. Tea Biochemistry[M]. 3rd ed. Beijing:China Agriculture Press,2003:39(in Chinese).
- [2] 2022年农业品牌精品培育计划名单公示[EB/OL]. (2022-10-11) [2023-09-30]. [http://www.aqsc.agri.cn/xwzx/202210/t20221012\\_411735.htm](http://www.aqsc.agri.cn/xwzx/202210/t20221012_411735.htm).  
2022 Agricultural Brand Excellence Cultivation Program List Announced[EB/OL]. (2022-10-11) [2023-09-30]. [http://www.aqsc.agri.cn/xwzx/202210/t20221012\\_411735.htm](http://www.aqsc.agri.cn/xwzx/202210/t20221012_411735.htm).
- [3] Kumazawa K, Wada Y, Masuda H. Characterization of epoxydecenal isomers as potent odorants in black tea (*Dimblea*) infusion[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(13):4795-4801.
- [4] 张娅楠, 欧伊伶, 覃丽, 等. 红茶中香气物质的形成及工艺对其影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(11):351-357.  
Zhang Y N, Ou Y L, Qin L, et al. Research progress on the formation of aroma substances and its influence of processes in black tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(11):351-357(in Chinese with English abstract).
- [5] 杨延, 陆多林, 查银娟. 红茶品质影响因素研究进展[J]. 农业技术与装备, 2021(2):12-13.  
Yang Y, Lu D L, Zha Y J. Research progress on influence factors of black tea quality[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2021(2):12-13

- (in Chinese with English abstract).
- [6] Kang S, Yan H, Zhu Y, et al. Identification and quantification of key odorants in the world's four most famous black teas[J]. *Food Research International*, 2019, 121: 73-83.
- [7] Huang W J, Fang S M, Wang J, 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.
- [8] 颜廷宇, 林洁鑫, 朱建新, 等. 电子鼻和 GC-MS 结合化学计量学应用于高香红茶与传统工夫红茶香气特征的研究[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(18): 252-261.
- Yan T Y, Lin J X, Zhu J X, et al. Analysis of E-nose and GC-MS combined with chemometrics applied to the aroma characteristics of high aroma black tea and traditional congou black tea[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(18): 252-261 (in Chinese with English abstract).
- [9] 舒心, 高彦祥. 茶叶挥发性成分提取及其香气特征分析研究进展[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(15): 469-480.
- Shu X, Gao Y X. Research progress on extraction of volatile compounds and analysis of aroma characteristics in tea[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(15): 469-480 (in Chinese with English abstract).
- [10] 刘雅芳, 滕杰, 刘洋, 等. SBSE-GC-MS 分析不同等级宁红茶的差异香气成分[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(11): 254-264.
- Liu Y F, Teng J, Liu Y, et al. SBSE-GC-MS analysis the differential aroma components of Ning black teas at different quality levels[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(11): 254-264 (in Chinese with English abstract).
- [11] 梁剑锋, 李亚, 宾月景, 等. HS-SBSE-GC/MS 结合 ROAV 法分析六堡茶关键香气成分[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(2): 156-161.
- Liang J F, Li Y, Bin Y J, et al. Analysis of the key aroma components of Liupao tea using a combination of HS-SBSE-GC/MS and ROAV[J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(2): 156-161 (in Chinese with English abstract).
- [12] 徐梦婷, 邵淑贤, 陈静, 等. 不同茶树品种工夫红茶挥发性成分及其关键香气成分分析[J]. *现代食品科技*, 2023, 39(1): 281-290.
- Xu M T, Shao S X, Chen J, et al. Analysis of volatile and key aroma components in congou black tea varieties[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2023, 39(1): 281-290 (in Chinese with English abstract).
- [13] 欧阳红军, 刘义军, 袁源, 等. HS-SPME-GC-MS 结合 OPLS-DA 分析提取方法对牛油果油挥发性香气化合物的影响[J]. *南方农业学报*, 2021, 52(3): 779-788.
- Ouyang H J, Liu Y J, Yuan Y, et al. HS-SPME-GC-MS coupled with OPLS-DA to analyze the effects of extraction methods on volatile aroma compounds of avocado oil[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2021, 52(3): 779-788 (in Chinese with English abstract).
- [14] 李远彬. 基于色谱联用技术的沉香标志性差异成分分析研究[D]. 广州: 广州中医药大学, 2017.
- Li Y B. Application of GC-MS and LCMS for screening and identification of different markers in agarwood [D]. Guangzhou: Guangzhou University of Chinese Medicine, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [15] 马会杰, 蒋宾, 潘玉兰, 等. 电子鼻对不同产地名优绿茶和红茶香气特征的判别研究[J]. *食品科技*, 2019, 44(1): 336-344.
- Ma H J, Jiang B, Pan Y L, et al. Identification of aroma characteristics of famous green tea and black tea from various regions by electronic nose[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(1): 336-344 (in Chinese with English abstract).
- [16] 武珊珊, 李芬, 熊昌云, 等. 基于电子鼻技术的云南不同茶区晒青毛茶香气分析[J]. *茶叶通讯*, 2022, 49(1): 88-95, 107.
- Wu S S, Li F, Xiong C Y, et al. Analysis of aroma of Sun-dried green tea in different areas of Yunnan Province based on electronic nose technology[J]. *Journal of Tea Communication*, 2022, 49(1): 88-95, 107 (in Chinese with English abstract).
- [17] 陈慧敏, 李晓晗, 王漪, 等. 基于电子鼻分析提香工艺对红茶香气特征的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(18): 234-237, 242.
- Chen H M, Li X H, Wang Y, et al. Effect of aroma-improving processing on aroma characteristics of black tea based on electronic nose analysis[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(18): 234-237, 242 (in Chinese with English abstract).
- [18] Yun J, Cui C J, Zhang S H, et al. Use of headspace GC/MS combined with chemometric analysis to identify the geographic origins of black tea[J]. *Food Chemistry*, 2021, 360: 130033.
- [19] 岳翠男, 秦丹丹, 李文金, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和 OAV 鉴定浮梁红茶关键呈香物质[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(9): 251-258.
- Yue C N, Qin D D, Li W J, et al. Identification of key aroma components in Fuliang black tea based on HS-SPME-GC-MS and OAV[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(9): 251-258 (in Chinese with English abstract).
- [20] Yin X, Huang J A, Huang J, et al. Identification of volatile and odor-active compounds in Hunan black tea by SPME/GC-MS and multivariate analysis[J]. *LWT*, 2022, 164: 113656.
- [21] Guo X Y, Schwab W, Ho C T, et al. Characterization of the aroma profiles of oolong tea made from three tea cultivars by both GC-MS and GC-IMS[J]. *Food Chemistry*, 2021, 376: 131933.
- [22] van Gemert L J. 化合物嗅觉阈值汇编(原书第二版)[EB/OL]. [2023-10-15]. <https://book.sciencereading.cn/shop/book/Booksimple/show.do?id=B730C7F618F0D87F9E053020B0A0A5FDA000>.
- van Gemert L J. Compendium of Olfactory Thresholds for Chemical Compounds(second edition of the original book)[EB/OL]. [2023-10-15]. <https://book.sciencereading.cn/shop/book/Booksimple/show.do?id=B730C7F618F0D87F9E053020B0A0A5FDA000>.
- [23] Leffingwell & Associates[EB/OL]. <http://www.leffingwell.com/>.
- [24] Xu J Y, Zhang Y, Yan F, et al. Monitoring changes in the volatile compounds of tea made from summer tea leaves by GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. *Foods*, 2022, 12(1): 146.
- [25] Yang Y Q, Qian M C, Deng Y L, et al. Insight into aroma dynamic changes during the whole manufacturing process of chestnut-like aroma green

- tea by combining GC-E-Nose, GC-IMS, and GC×GC-TOFMS[J]. *Food Chemistry*, 2022, 387: 132813.
- [26] Xie J L, Wang L L, Deng Y L, et al. Characterization of the key odorants in floral aroma green tea based on GC-E-Nose, GC-IMS, GC-MS and aroma recombination and investigation of the dynamic changes and aroma formation during processing[J]. *Food Chemistry*, 2023, 427: 136641.
- [27] 李俊, 祝愿, 方舒婷, 等. 基于固相微萃取气质联用对贵州红茶香气成分特征的研究[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(13): 304–316.  
Li J, Zhu Y, Fang S T, et al. Study on aroma composition characteristics of Guizhou black tea by solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(13): 304–316 (in Chinese with English abstract).
- [28] Schuh C, Schieberle P. Characterization of the key aroma compounds in the beverage prepared from Darjeeling black tea: quantitative differences between tea leaves and infusion[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, 54(3): 916–924.
- [29] Ma L J, Gao M M, Zhang L Q, et al. Characterization of the key aroma-active compounds in high-grade Dianhong tea using GC-MS and GC-O combined with sensory-directed flavor analysis[J]. *Food Chemistry*, 2022, 378: 132058.
- [30] 运晶. 祁门红茶的关键性香气成分及红茶产地溯源方法研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020.  
Yun J. Research on key aroma components of Keemun black tea and the method of geographical origin traceability of black tea[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [31] Yao H B, Su H, Ma J Y, et al. Widely targeted volatileomics analysis reveals the typical aroma formation of Xinyang black tea during fermentation[J]. *Food Research International*, 2023, 164: 112387.
- [32] Su D, He J J, Zhou Y Z, 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.
- [33] 王秋霜, 陈栋, 吴华玲. 红茶香气研究进展[J]. *广东农业科学*, 2011, 38(18): 86–88.  
Wang Q S, Chen D, Wu H L. Research progress on aroma of black tea[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, 38(18): 86–88 (in Chinese).
- [34] 范霞, 杨恒明, 陈荣顺. 基于顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用法、电子鼻和电子舌技术分析绿茶饮料的风味物质[J]. *南京农业大学学报*, 2023, 46(5): 960–974. DOI: 10.7685/jnau.202204004.  
Fan X, Yang H M, Chen R S. Analysis of flavor substances in green tea beverages detected by HS-SPME/GC-MS coupled with electronic nose and electronic tongue technology[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2023, 46(5): 960–974 (in Chinese with English abstract).
- [35] 李大龙, 郭潇雨, 李铁梅, 等. 利用电子鼻评价树莓果实香气[J]. *东北农业大学学报*, 2022, 53(7): 78–87.  
Li D L, Guo X Y, Li T M, et al. Evaluation of aroma in raspberry fruit by electronic nose[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2022, 53(7): 78–87 (in Chinese with English abstract).

责任编辑: 范雪梅