



陈浩冉,冯文宁,刘伟,等. 基于 GC-IMS 与电子感官的不同产地百里香特征风味物质分析[J]. 轻工学报, 2026, 41(4): 13-28.
CHEN H R, FENG W N, LIU W, et al. Analysis of characteristic flavor compounds in *Thymus mongolicus* Ronn. from different origins based on GC-IMS and electronic senses [J]. Journal of Light Industry, 2026, 41(4): 13-28. DOI: 10.12187/2026.04.002

基于 GC-IMS 与电子感官的不同产地百里香特征风味物质分析

陈浩冉¹, 冯文宁², 刘伟², 王刘胜², 李欣燕¹, 李媛媛¹, 赵铭钦¹

1. 河南农业大学 烟草学院, 河南 郑州 450046;
2. 河北中烟工业有限责任公司 技术中心, 河北 石家庄 050051

摘要:【目的】揭示不同产地百里香的风味差异并鉴定其关键香气物质。【方法】采用气相色谱-离子迁移谱(Gas Chromatography-ion Mobility Spectrometry, GC-IMS)结合电子鼻和电子舌技术,对来自河南洛阳、云南昆明、广东广州3个产地的百里香样品挥发性物质进行分析,并结合气味活度值(Odor Activity Value, OAV)筛选特征风味物质。【结果】共鉴定出101种化合物,主要包括醇类23种、醛类19种和酮类19种,其中河南和广东百里香中挥发性物质种类及总含量均高于云南百里香;不同产地样品间特征风味物质含量差异显著,筛选出18种同时满足VIP>1和OAV≥1的共有特征风味物质,主要包括百里香酚、(Z)-2-己烯醛、异戊酸甲酯-D、(E)-2-己烯醛等;云南百里香中醇类、酮类和杂环类化合物的相对含量较高,香味较均衡,河南百里香中酚类、醛类及含硫化合物含量较高,苦涩味较强,广东百里香则富含烯烃类和酯类化合物,鲜味和咸味特征突出;地理及气候条件对特征风味物质含量有显著影响,纬度与(E)-2-己烯醛呈显著正相关,与异丁醛呈显著负相关,年均气温较高则有利于异戊酸甲酯-D累积。【结论】GC-IMS结合电子感官技术能快速区分不同产地的百里香,可为其特征风味物质的溯源与应用开发提供参考。

关键词:百里香;气相色谱-离子迁移谱;电子鼻;电子舌;挥发性物质;气味活度值

中图分类号:TS207.3;O657 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2026)04-0013-16

0 引言

百里香(*Thymus mongolicus* Ronn.)为唇形科百里香属植物,又名地椒、山椒、麝香草等,因其植株具有浓郁的芳香气味而得名。百里香在世界各地分布广泛,在我国主要分布于内蒙古、陕西、辽宁、

河南等地,其叶片小、长势快、抗旱耐寒、耐瘠薄,具有极强的环境适应能力,在环境治理方面具有显著的开发潜力^[1-2]。百里香作为药食两用植物,能够祛风镇痛、止咳化痰、缓解消化不良^[3],其精油还具有抑菌、抗炎、抗病毒等功效^[4-6]。此外,百里香还被广泛用作香料,如可作为食品调味剂,赋予菜肴

收稿日期:2025-12-09;修回日期:2026-02-12;出版日期:2026-08-15

基金项目:河北中烟2024年项目(2024130000340126);中国烟草总公司重大科技项目(110202201036(XJ-07));河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(262102111063)

作者简介:陈浩冉(2001—),女,河南省信阳市人,河南农业大学硕士研究生,主要研究方向为烟草化学与香精香料。E-mail: chenhaoran200103@163.com

通信作者:赵铭钦(1964—),男,河南省新密市人,河南农业大学教授,博士,主要研究方向为烟草化学与香精香料、烟草品质评价与特色烟叶理论。E-mail: zhaomingqin@126.com

清香和草香味^[7]。

目前,对百里香的研究主要集中在化学成分分析、生物活性成分提取、良种培育、生态修复应用等方面^[8-9]。百里香植物资源丰富,关于其挥发性物质的研究相对较多。马风华等^[10]对取自宁夏不同类型草地的百里香各部位干燥、新鲜样品挥发性物质进行了分析,发现气候条件、样品处理及不同部位均对其成分产生一定的影响,其中干燥样品能较好地保持百里香的主要成分。任瑞芬等^[11]采用 GC-MS 技术研究 8 个种源地百里香的挥发性物质差异,发现萜烯类化合物与种源地经纬位置、海拔、生态环境因素及土壤酸碱度显著相关。不同产地百里香受地理环境及气候条件的影响,其特征风味会存在一定的差异。气相色谱-离子迁移谱联用 (Gas Chromatography-ion Mobility Spectrometry, GC-IMS) 技术是利用气相离子的电场迁移速率差异对离子进行分析鉴定,具有分辨率高、灵敏度高、组分分离效果好等优点,多用于香辛料、果蔬、茶类、酒类等产品的风味检测^[12]。刘娟等^[13]采用 GC-IMS 技术研究新鲜百里香花、叶中的挥发性物质差异,发现百里香叶中主要为萜类化合物及其衍生物,花中主要为酸类和杂环类化合物。刘吟等^[14]采用 GC-IMS 技术对百里香和其他 4 种外观易混淆的香辛料成分进行分析,发现根据挥发性物质差异可有效区分上述香辛料。尽管现有研究已对百里香挥发性物质进行了系统的比对分析,但多集中于北方传统产区,针对南方引种栽培百里香风味特征的研究较少^[15],不同产地间的风味差异比较及溯源信息解析尚不充分。

鉴于此,本研究拟选取河南洛阳、云南昆明和广东广州地区百里香为研究对象,采用 GC-IMS 结合电子鼻和电子舌技术对其挥发性物质进行定性和定量分析,通过多元统计分析其特征风味物质差异,并根据气味活度值 (Odor Activity Value, OAV) 确定关键差异香气物质,以期为百里香的产地溯源及

百里香特征风味香料的开发利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜百里香,分别采自河南洛阳 (HN)、云南昆明 (YN)、广东广州 (GD),各地区海拔、经纬度及气候条件见表 1,采摘时间均为 2024 年 7 月 25 日至 8 月 1 日,放置阴凉通风处自然晾干至恒重,经研磨后保存。2-辛醇,上海源叶生物科技有限公司;正构酮 C₄—C₉ 标准品,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;KCl、DL-酒石酸,天津市科密欧化学试剂有限公司;HCl、乙醇,天津富宇精细化工有限公司;KOH,天津市大茂化学试剂厂。以上常用试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

DHG-9203 A 型电热恒温鼓风干燥箱,上海精密实验设备有限公司;PEN 3 型电子鼻,德国 Airsense 公司;SA402 B 型电子舌,日本 Insent 公司;FlavourSpec® 型 GC-IMS 仪,德国 G. A. S. 公司;CTC-PAL 3 型静态顶空自动进样装置,瑞士 CTC Analytics AG 公司;20 mL 顶空瓶,山东海能科学仪器有限公司;MXT-5 型毛细管色谱柱,美国 Restek 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 挥发性物质测定 三地区百里香阴干样品各取 0.5 g 置于顶空瓶中,加入 20 μL 100 μg/mL 的 2-辛醇溶液 (内标),封口,利用 GC-IMS 仪测定各样品 (n=3) 的挥发性物质含量。

顶空进样条件:孵化温度为 80 ℃,孵化时间为 15 min,进样体积为 200 μL,不分流进样,孵化转速为 500 r/min,进样针温度为 105 ℃。

GC 条件:采用 MXT-5 型毛细管色谱柱;柱温为 60 ℃;载气为高纯 N₂;程序升压为初始流量 2 mL/min,保持 2 min,在 8 min 内线性增至 10 mL/min,在 10 min 内线性增至 100 mL/min,保持 40 min;进样口温度为 80 ℃。

表 1 不同产地百里香地理气候条件

Table 1 Geographical and climatic conditions of *Thymus mongolicus* Ronn. from different origins

组别	海拔高度/m	经度/(°)	纬度/(°)	年均温差/℃	年降水量/mm	年日照时长/h
YN	2103	102.937	25.111	12.09	989.84	1 974.5
HN	333	112.433	34.817	10.85	506.48	2 106.8
GD	15	113.299	23.392	10.07	2 422.91	1 647.9

IMS 条件:电离源为氙源(3H);迁移管长度为 53 mm;电场强度为 500 V/cm;迁移管温度为 45 ℃;漂移气为高纯 N₂,流速为 75 mL/min;正负离子模式为正离子。

定性分析:检测 6 种酮(正构酮 C₄—C₉ 标准品)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该物质的保留指数,使用 VOCal 软件内置的 GC 保留指数数据库(NIST 2020)与 IMS 迁移时间数据库进行检索和比对,完成目标物的定性分析。

定量分析:以 2-辛醇为内标物,通过比对百里香化合物与内标物的峰面积,计算各化合物的相对含量,计算公式如下^[16]:

$$W_i = f' \times \frac{A_i \times m_s}{A_s \times m} \times 10^6$$

其中,W_i表示化合物*i*的相对含量/(μg·g⁻¹);A_i表示化合物*i*的峰面积;A_s表示内标的峰面积;m_s表示内标的质量/g;m表示样品的质量/g;f'表示取值为 1 的假设相对校正因子。

1.3.2 关键香气物质检测 OAV 可评估对样品香气有贡献的化合物,当 0.1≤OAV<1 时,表示此物质对总体香气有修饰作用,当 OAV≥1 时,表示其为样品的关键香气物质,即 OAV 越大,对样品的风味贡献越大。OAV 计算公式如下^[17-18]:

$$OAV = \frac{m_i}{OT_i}$$

其中,m_i表示物质*i*的相对含量/(mg·kg⁻¹);OT_i表示物质*i*的嗅觉阈值/(mg·kg⁻¹)。

1.3.3 电子鼻测定 样品处理:取 0.3 g 不同产地百里香阴干样品,装入顶空瓶,密封;室温放置 30 min 后采用电子鼻进行测定。

测定条件:传感器自清洗时间 60 s;样品进样时间 5 s;进样流量 400 mL/min;分析采样时间 80 s;每个样品重复测试 3 次。电子鼻传感器性能描述见表 2。

1.3.4 电子舌测定 样品处理:取 10 g 不同产地百里香阴干样品,按 *m*(百里香/g):*V*(去离子水/mL)=1:20 的比例添加去离子水,充分混匀溶解,于 3000 r/min 条件下离心 10 min,过滤,上机检测。每

组样品重复测试 3 次,结果取平均值。使用参比溶液(REF)模拟人工唾液,作为味觉检测的基准零点(无味点),咸味的无味点为-6,酸味的无味点为-13,其他味的无味点为 0,样品味觉检测结果以参比溶液为基准进行校正。

标准溶液配制:参比溶液为 30 mmol/L KCl+0.3 mmol/L 酒石酸;负极清洗液为 100 mmol/L HCl+30%(若无特殊说明,百分数均指体积分数)乙醇;正极清洗液为 10 mmol/L KOH+100 mmol/L KCl+30%乙醇。

电子舌传感器性能描述见表 3。
1.3.5 感官评价 感官评价由 8 名经过培训的小组人员(男性 4 名,女性 4 名,年龄 24~45 岁)进行,对各产地百里香的香气及滋味进行评定。

嗅闻评价:于通风良好且无交叉气味干扰的环境中进行。取适量百里香阴干样品置于洁净烧杯内,采用手部扇动法引导挥发性气味分子逸散,操作者将鼻尖靠近杯口上方进行嗅闻。

表 2 电子鼻传感器性能描述
Table 2 Performance description of the electronic nose sensors

传感器编号	传感器名称	敏感物质
1	W1C	芳烃化合物
2	W5S	氮氧化合物
3	W3C	氨、芳香分子
4	W6S	氢化物
5	W5C	烯烃、芳族、极性分子
6	W1S	烷类
7	W1W	硫化合物
8	W2S	醇类、部分芳香族化合物
9	W2W	芳烃化合物、硫的有机化合物
10	W3S	烷类、脂肪族

表 3 电子舌传感器性能描述
Table 3 Performance description of the electronic tongue sensors

传感器	对应的味觉	味觉信息	
		先味	回味
C00	酸性苦味	苦味	酸性苦味回味
AE1	涩味	涩味	涩味回味
CA0	酸味	酸味	—
CT0	咸味	咸味	—
AAE	鲜味	鲜味	丰富度

注:—表示无味觉。

滋味评价:取3 g百里香阴干样品,用150 mL的冷水于25 ℃室温下冷泡1.5 h后,过滤品尝^[19-20]。评价员采用5分制对香韵(木香、辛香、药草香、花果香、青香、蔬菜香)和口感(涩味、苦味、鲜味)进行打分,评分标准如下:0~1分表示感官强度为无或微弱,2~3分表示稍强至尚强,4~5分表示较强至强。分值越高,表示香韵或口感的感官强度越大。各项评分取平均值,并绘制感官雷达图。

1.4 数据处理

利用 VOCal 数据处理软件中的 Reporter 和 Gallery Plot 插件生成挥发性物质的三维图谱、二维图谱、差异图谱和指纹图谱。通过 Excel 2021 对数据进行归纳整理,采用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析(ANOVA),并利用最小差异显著法(LSD)进行多重比较($P<0.05$)。采用 SIMCA 14.1 软件进行主成分分析(PCA)、正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)、置换检验等。采用 Origin 2021 软件绘制电子鼻、电子舌的雷达图和 PCA 图。

2 结果与讨论

2.1 不同产地百里香挥发性物质差异对比结果分析

图1为不同产地百里香挥发性物质三维图谱、二维图谱和差异图谱,其中从左到右依次为云南、河南和广东,三维图谱中每个点表示检出的每种挥发性物质,信号峰的峰面积越大、颜色越红、三维突起越高,表示对应物质的相对含量越高^[21];差异图谱中,以云南百里香图谱为参比,其他两产地百里香图谱中蓝色区域表示对应物质相对含量低于参比地区,蓝色越深,相对含量越低,红色区域表明对应物质相对含量高于参比地区,红色越深,相对含量越高,白色区域则表明对应物质相对含量与参比地区相同。由图1a)和b)可知,挥发性物质的信号峰光斑大多在保留时间150~1400 s、迁移时间1.5 ms内出现,3个地区的信号峰分布模式较接近,但部分信号峰的分布存在差异,如保留时间约250 s,迁移时间约1.5 ms。由图1c)可知,红色方框内(保留时间150~800 s,迁移时间1.0~1.7 ms)可见物质相对含量差异较大;河南和广东百里香图谱中出现

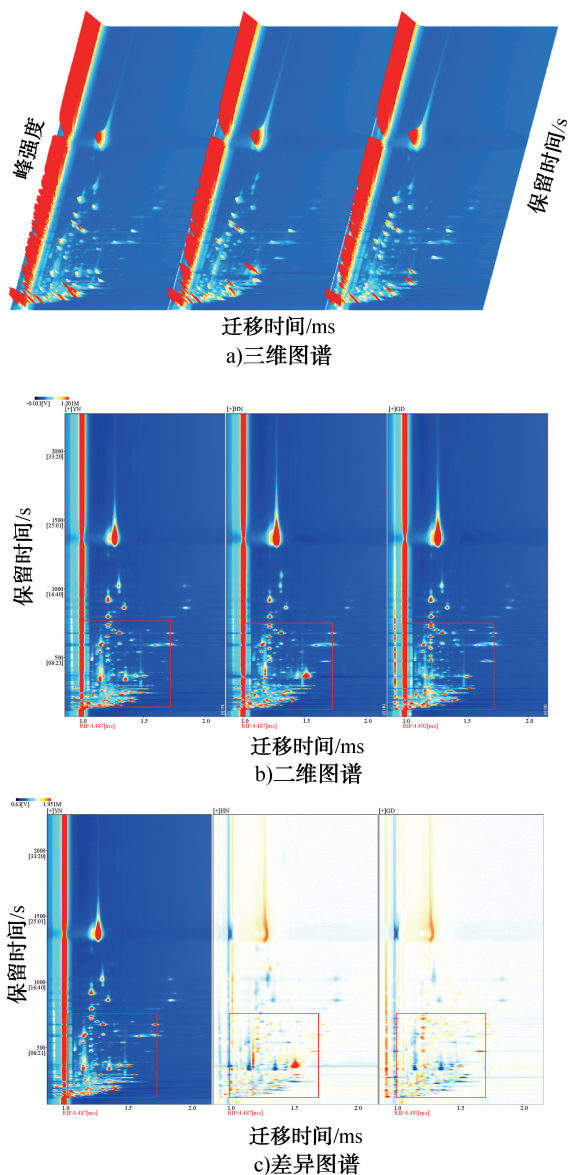


图1 不同产地百里香挥发性物质三维图谱、二维图谱和差异图谱

Fig. 1 Three-dimensional spectrum, two-dimensional spectrum and difference comparison map of volatile compounds in *Thymus mongolicus* Ronn. from different regions

了较多的红色光斑及蓝色光斑;当保留时间为800~1400 s、迁移时间为1.0~1.7 ms时,河南和广东百里香图谱中白色区域较多,说明物质相对含量差异不大,需对其进行定性、定量后再作其他分析。

2.2 不同产地百里香挥发性物质定性定量分析

基于 GC-IMS 检测结果,采用峰面积归一化法计算各挥发性物质相对含量,详细数据未在文中展示。不同产地百里香挥发性物质种类和含量桑基

图见图 2。由图 2 可知,共检测出 101 种已知挥发性物质(包括单体和二聚体)及 22 种未知挥发性物质。已定性物质中含酯类 12 种,烯炔类 14 种,杂环类 7 种,酮类 19 种,醛类 19 种,醇类 23 种,醚类 3 种,酚类、酸类、烷烃类和含硫类化合物各 1 种。不同产地各类化合物数量相差不大,均以醇类、醛类、酮类为主。刘娟等^[13]研究也证实,在百里香花、叶各类挥发性物质中,醇类、醛类、酮类数量较多。从化合物含量来看,云南、河南和广东百里香中挥发性物质总含量分别为 244.40 $\mu\text{g/g}$ 、292.65 $\mu\text{g/g}$ 和 280.72 $\mu\text{g/g}$,均以酚类化合物含量最高,分别占物质总含量的 38.56%、45.41%和 46.16%,醇类化合物次之。韩峰等^[22]对 3 种百里香的挥发油成分进行分析,发现酚类(32.05%~37.88%)化合物相对含量也较高。酚类及烯炔类化合物相对含量以河南百里香(132.90 $\mu\text{g/g}$ 、19.12 $\mu\text{g/g}$)、广东百里香(129.57 $\mu\text{g/g}$ 、25.01 $\mu\text{g/g}$)较高,醇类、

酮类化合物相对含量以云南百里香(51.93 $\mu\text{g/g}$ 、30.31 $\mu\text{g/g}$)较高。

不同产地百里香挥发性物质指纹图谱见图 3。由图 3 可知,A 区化合物在云南百里香中相对含量较高,主要包括樟脑、苯甲醛、2-甲氧基-3-异丁基吡嗪等;B 区化合物在河南百里香中相对含量较高,主要包括(*E*)-2-己烯醛、(*Z*)-2-己烯醛、二甲基硫等;C 区化合物在广东百里香中相对含量较高,主要包括 α -松油烯、 γ -松油烯、苯乙醛等;D 区化合物在各产地百里香中相对含量相似,即 3 个产地百里香的共有化合物及其相对含量相差不大,包括(-)-苅醇(M、D)、正丁醇(M、D)、1-辛烯-3-醇(M、D)、冰片等,上述差异化合物可能是区分不同产地百里香的特征物质。其中,各产地百里香中相对含量最高的化合物均为百里香酚(94.24~132.90 $\mu\text{g/g}$),其具有浓烈的辛香兼具清新草本气息,是百里香精油中的主要成分^[23]。除百里香酚外,1,8-桉叶素-

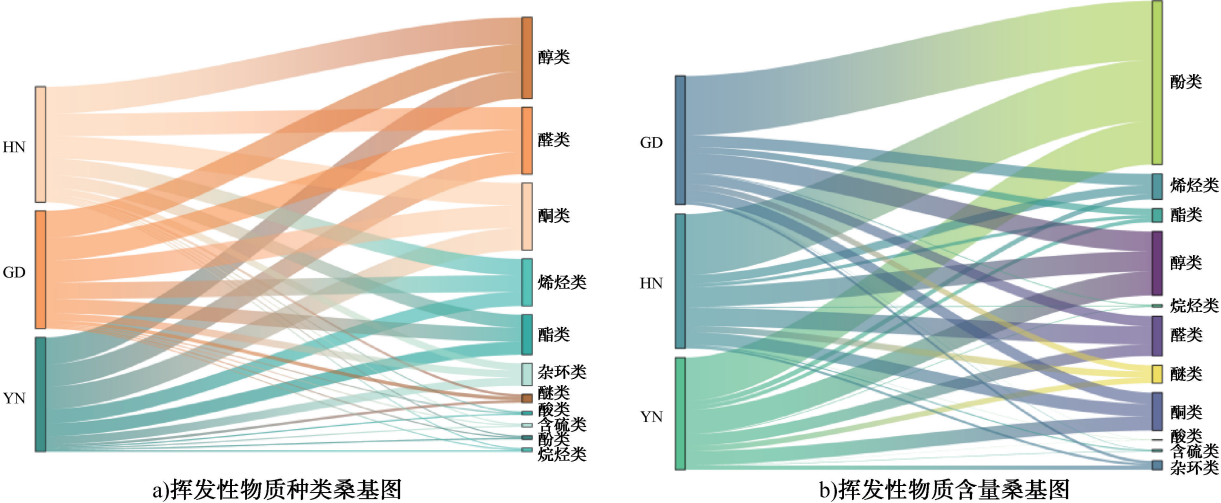


图 2 不同产地百里香挥发性物质种类和含量桑基图

Fig. 2 Types and content of volatile compounds in *Thymus mongolicus* Ronn. from different regions

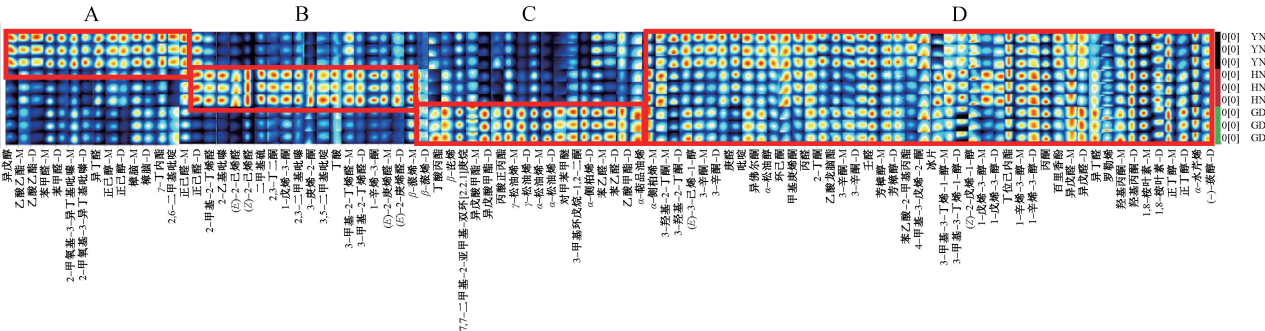


图 3 不同产地百里香挥发性物质指纹图谱

Fig. 3 Fingerprints of volatile compounds in *Thymus mongolicus* Ronn. from different regions

M(8.75~9.73 μg/g), (-)-蒎醇-M(6.05~7.24 μg/g)、芳樟醇-M(5.68~6.25 μg/g)等化合物相对含量也较高, 可视百里香的主要挥发性物质。H. Mumivand 等^[24]研究也证实, 百里香酚和芳樟醇是百里香不同生长阶段相对含量较高的化合物。

以上结果表明, 3 个产地百里香挥发性物质种类均以醇类、醛类、酮类为主, 含量以酚类化合物相对最高。河南和广东百里香挥发性物质数量及总含量高于云南百里香, 且百里香酚、1,8-桉叶素-M 等相对含量较高。云南百里香的(-)-蒎醇-M 和芳樟醇-M 化合物相对含量较高。挥发性物质会影响百里香整体风味的形成, 它们通过气味分子间的互补与叠加实现风味融合, 最终呈现不同产地百里香的独特风味特征。

2.3 不同产地百里香关键挥发性物质分析

采用多元统计分析进一步探究不同地区百里香的挥发性物质差异, 结果见图 4。由图 4a) 可知, PC1 和 PC2 的贡献率分别为 53.1% 和 40.6%, 累计贡献率为 93.7%, 说明 PC1 和 PC2 能够较好地反映大部分的样品信息。不同产地百里香样品点之间无重叠, 表明样品的整体区分度较好, 组内信号点较集中, 重复性较好。由图 4b) 可知, OPLS-DA 模

型参数 $R^2X=0.978, R^2Y=0.998, Q^2=0.997, R^2$ 和 Q^2 均大于 0.5, 说明模型具有较好的区分效果且拟合性良好。由图 4c) 可知, 经 200 次置换检验后, $R^2=0.212, Q^2=-0.730$, 图中最右侧 R^2, Q^2 点均高于最左侧点, Q^2 回归线与纵轴的交点 <0 , 说明模型不存在过拟合, 拟合准确性较高, 模型稳定可靠^[25]。变量投影重要性(VIP)可以反映风味物质对模型分类的重要程度, VIP 越大, 贡献程度越大, 以 $VIP>1$ 为指标可筛选关键挥发性物质。由图 4d) 可知, 共有 20 种挥发性物质的 $VIP>1$, 包括百里香酚(5.19)、(Z)-2-己烯醛(3.33)、异戊酸甲酯-D(2.43)、(E)-2-己烯醛(2.23)、3-羟基-2-丁酮-D(1.63)、 α -侧柏烯-D(1.61)、异丁醇-D(1.49)、2-甲氧基-3-异丁基吡嗪-D(1.46)、 α -松油烯-M(1.38)、 γ -松油烯-M(1.30)、丙醛(1.26)、苯乙醛-M(1.22)、异戊醇(1.22)、二甲基硫(1.17)、正己醛-D(1.16)、正丁醇-D(1.08)、1-辛烯-3-醇-M(1.05)、异丁醛(1.02)、 β -蒎烯-M(1.01)和樟脑-M(1.00)。其中, 百里香酚的 VIP 最大; (Z)-2-己烯醛、异戊酸甲酯-D、(E)-2-己烯醛、3-羟基-2-丁酮-D 和 α -侧柏烯-D 的 VIP 均大于 1.5, 对产地分类贡献较大, 上述物质可作为区分不同地区百里香的关键挥发性物质。

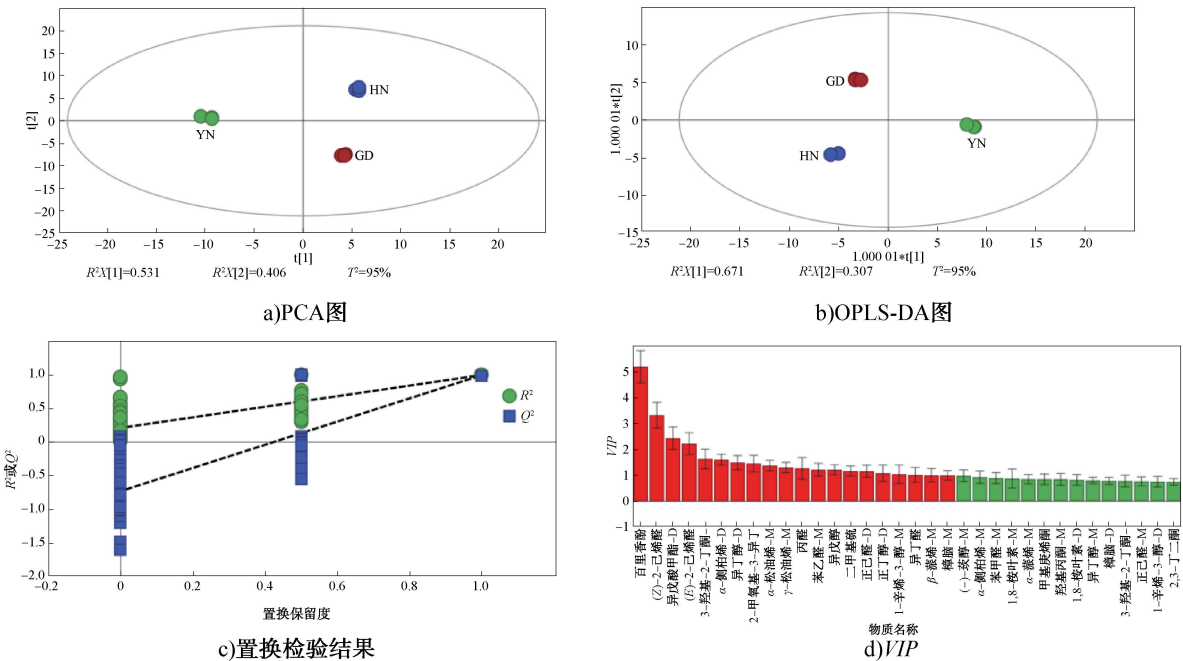


图 4 不同产地百里香挥发性物质的 PCA、OPLS-DA、置换检验和 VIP

Fig. 4 PCA score plot, OPLS-DA score plot, permutation test and VIP of volatile compounds in *Thymus mongolicus* Ronn. from different origins

2.4 不同产地百里香特征香气物质确定和差异分析

基于 OPLS-DA 判别分析和 OAV 分析结果,对同时满足 $VIP>1$ 和 $OAV\geq 1$ 的香气物质进行筛选,结果见表 4。由表 4 并结合 2.2 定性定量结果可知,共筛选出 18 种导致不同产地百里香香气风格差异的共有特征香气物质,其中, α -侧柏烯-D 和异丁醇-D 被排除,这 2 种化合物虽对产地区分有一定贡献($VIP>1$),但其相对含量未达到嗅觉阈值($OAV<1$),对实际香气感知的贡献较弱。

醛类化合物为氢过氧化物降解产物,其嗅觉阈值较低,香气浓烈,通常具有花香、草香、果香等^[26]。广东百里香中异丁醛和苯乙醛-M 相对含量均较高,分别为 $3.21\text{ }\mu\text{g/g}$ 和 $3.33\text{ }\mu\text{g/g}$,前者具有香蕉、甜瓜和微弱坚果气味,后者呈现风信子香气和水果甜香。丙醛在云南百里香中相对含量最高,为 $4.33\text{ }\mu\text{g/g}$,占挥发性物质总量的 1.77% ,主要呈现青草香气。(Z)-2-己烯醛、(E)-2-己烯醛和正己

醛-D 具有青香、果香和脂肪香,在河南百里香中的相对含量显著高于其他地区,分别为 $15.35\text{ }\mu\text{g/g}$, $6.29\text{ }\mu\text{g/g}$ 和 $1.75\text{ }\mu\text{g/g}$ 。

烃类化合物主要由脂肪酸中烷氧自由基均裂产生,饱和烷烃嗅觉阈值较高,无特殊风味,不饱和烷烃嗅觉阈值较低^[27]。本研究中百里香挥发性烃类化合物多为烯烃类,其嗅觉阈值较低,香味贡献大。 α -松油烯-M 和 γ -松油烯-M 主要呈现柑橘香气,并伴有草本、木香和辛香香气,以广东百里香相对含量最高,为 $4.63\text{ }\mu\text{g/g}$ 和 $4.35\text{ }\mu\text{g/g}$ 。 β -蒎烯-M 呈现树脂香和草木香,在河南百里香中的相对含量($2.79\text{ }\mu\text{g/g}$)稍高于广东百里香($2.28\text{ }\mu\text{g/g}$)。

醇类化合物可分为饱和醇和不饱和醇,饱和醇嗅觉阈值较高,不饱和醇嗅觉阈值相对较低,萜醇类多以青果、花香和蜜香香气为主^[28]。1-辛烯-3-醇-M 主要来源于脂氧合酶花生四烯酸的氧化和过氧化亚油酸的降解,呈现蘑菇、薰衣草、玫瑰和干草香气,其在云南、河南和广东 3 个产地百里香中的相

表 4 不同产地百里香挥发性物质的 OAV
Table 4 OAV of volatile compounds in *Thymus mongolicus* Ronn. from different origins

序号	化合物名称	CAS [#]	风味描述	嗅觉阈值 ^[31] / (mg·kg ⁻¹)	OAV		
					YN	HN	GD
1	百里香酚	89-83-8	草本、百里香、樟脑味	0.188	501.26±8.37 ^b	706.94±8.93 ^a	689.19±9.41 ^a
2	2-甲氧基-3-异丁基吡嗪-D	24683-00-9	青椒香气	0.000 038	168 527.87±3 135.82 ^a	82 793.05±457.43 ^c	118 511.71±859.78 ^b
3	樟脑-M	464-49-3	清凉、刺鼻并带有药味	1.36	3.94±0.07 ^a	2.78±0.08 ^c	3.13±0.06 ^b
4	苯乙醛-M	122-78-1	风信子香气、水果甜香	0.006 3	396.90±3.13 ^b	277.56±3.44 ^c	529.25±3.77 ^a
5	γ -松油烯-M	99-85-4	木质柠檬味	1	2.16±0.10 ^c	3.06±0.04 ^b	4.35±0.12 ^a
6	α -松油烯-M	99-86-5	木本、柠檬、柑橘味	0.085	25.56±0.68 ^c	37.92±0.72 ^b	54.43±1.53 ^a
7	1-辛烯-3-醇-M	3391-86-4	蘑菇、薰衣草和干草香气	0.001 5	3 819.86±84.00 ^a	3 523.60±12.98 ^b	2 921.52±94.09 ^c
8	β -蒎烯-M	127-91-3	树脂香、木香	0.14	8.77±0.63 ^c	19.96±0.27 ^a	16.25±0.63 ^b
9	(E)-2-己烯醛	6728-26-3	青香、香蕉、脂肪气味	0.088 7	17.64±1.21 ^b	70.97±4.06 ^a	10.92±0.59 ^c
10	(Z)-2-己烯醛	16635-54-4	青香、香蕉、脂肪气味	0.019 2	105.64±2.68 ^c	799.24±9.66 ^a	216.33±9.17 ^b
11	异戊酸甲酯-D	556-24-1	强烈苹果味、菠萝味	0.044	22.74±1.02 ^c	38.10±3.9 ^b	163.58±2.04 ^a
12	正己醛-D	66-25-1	青香、脂肪味、水果味	0.005	240.06±12.2 ^b	349.71±4.17 ^a	64.33±4.25 ^c
13	丙醛	123-38-6	刺激性气、青草气味	0.015 1	286.95±18.46 ^a	247.22±6.33 ^b	157.73±10.10 ^c
14	二甲基硫	75-18-3	卷心菜、硫磺、汽油	0.000 12	7 295.13±329.11 ^b	19 623.3±541.88 ^a	7 609.78±141.76 ^b
15	异丁醛	78-84-2	香蕉味、甜瓜味、坚果气味	0.001 5	2 063.77±98.20 ^a	1 373.31±45.13 ^b	2 142.15±86.14 ^a
16	正丁醇-D	71-36-3	红酒味	0.459 2	13.93±0.56 ^a	10.94±0.07 ^b	13.79±0.57 ^a
17	异戊醇	123-51-3	威士忌酒香、香蕉果香	0.004	686.26±7.13 ^a	168.01±2.48 ^c	186.27±7.02 ^b
18	3-羟基-2-丁酮-D	513-86-0	黄油味、奶油味	0.014	437.57±20.25 ^a	295.80±2.95 ^b	175.64±19.43 ^c

注:同行不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

对含量分别为 5.73 $\mu\text{g/g}$ 、5.29 $\mu\text{g/g}$ 和 4.38 $\mu\text{g/g}$ 。异戊醇和正丁醇-D 主要呈现酒香和果香,二者均在云南百里香中相对含量(2.75 $\mu\text{g/g}$ 、6.40 $\mu\text{g/g}$)较高,广东百里香(0.75 $\mu\text{g/g}$ 、6.33 $\mu\text{g/g}$)次之。

酮类化合物主要由不饱和脂肪酸氧化和氨基酸降解产生,其嗅觉阈值高于醛类化合物,且性质稳定,香气持久,主要呈现果香、青草香、花香等。3-羟基-2-丁酮-D 和樟脑-M 在云南百里香中相对含量较高,分别为 6.13 $\mu\text{g/g}$ 和 5.35 $\mu\text{g/g}$,占挥发性物质总量的 2.51% 和 2.19%,前者主要呈现黄油味和奶油味,后者主要呈现清凉感、药香和木香。

酯类化合物一般通过酯化反应和脂肪氧化酶代谢产生^[29],通常具有芳香和水果香气。异戊酸甲酯-D 具有强烈的苹果味和菠萝味,在广东百里香中相对含量(7.20 $\mu\text{g/g}$)最高。含硫类化合物多呈卷心菜、硫磺或汽油样气味特征,容易辨别,与其他物质混合后能形成独特的香味^[28]。河南百里香中二甲基硫的相对含量(2.35 $\mu\text{g/g}$)显著高于其他地区,而云南百里香(0.88 $\mu\text{g/g}$)与广东百里香(0.91 $\mu\text{g/g}$)无显著差异。

杂环类化合物主要由糖类与氨基酸发生美拉德反应所得,吡嗪类化合物是一种重要的风味化合物,具有较强的感官特性。2-甲氧基-3-异丁基吡嗪-D 在云南百里香中相对含量较高,为 6.40 $\mu\text{g/g}$,占挥发性物质总量的 2.62%。酚类化合物嗅觉阈值由其结构决定,本研究中所测百里香酚均为各产地相对含量最高的挥发性物质,占挥发性物质总量的 38.56%~46.16%,以河南百里香最高,且 OAV (706.94)较大,对百里香整体风味具有较大贡献。

综上所述,18 种百里香特征风味物质中,醛类、烯炔类和醇类化合物数量较多。冯雨萌等^[30]研究发现,烯炔类和醇类化合物是百里香不同器官挥发性差异化的主要影响因素,影响其香气风格。图 5 为不同产地百里香特征风味物质的相对含量。由图 5 并结合表 4 可知,不同产地百里香中特征风味物质相对含量有所差异,云南百里香中醇类(14.88 $\mu\text{g/g}$)、酮类(11.48 $\mu\text{g/g}$)和杂环类(6.40 $\mu\text{g/g}$)化合物相对含量较高,其中正丁醇-D、1-辛烯-3-醇-M、3-羟基-2-丁酮-D、樟脑-M、2-

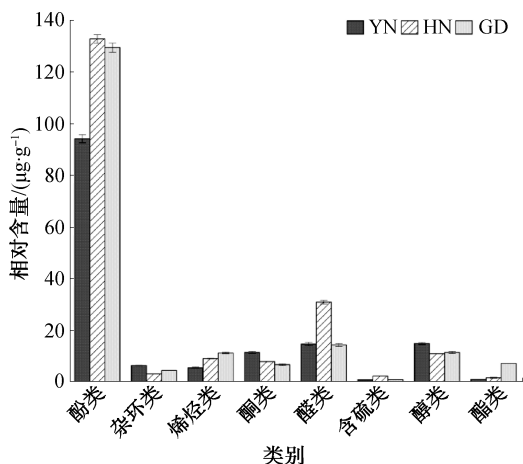


图 5 不同产地百里香特征风味物质的相对含量
Fig. 5 Relative contents of characteristic flavor compounds in *Thymus mongolicus* Ronn. from different origins

甲氧基-3-异丁基吡嗪-D、丙醛、异戊醇等化合物相对含量高于其他产地;河南百里香中酚类(132.90 $\mu\text{g/g}$)、醛类(30.93 $\mu\text{g/g}$)和含硫类(2.35 $\mu\text{g/g}$)化合物相对含量较高,其中百里香酚、(Z)-2-己烯醛、(E)-2-己烯醛、正己醛-D、二甲基硫和 β -蒎烯-M 高于其他产地;广东百里香中烯炔类(11.26 $\mu\text{g/g}$)和酯类(7.20 $\mu\text{g/g}$)化合物相对含量较高,其中 α -松油烯-M、 γ -松油烯-M、异丁醛、异戊酸甲酯-D 和苯乙醛-M 高于其他产地。这些特征香气物质的相对含量与组成差异,形成了各地百里香的独特风味。

2.5 不同产地百里香电子感官结果分析

利用电子鼻的 10 个传感器对不同产地百里香挥发性物质的响应值进行比较,结果见图 6。由图 6a)可知,各产地百里香电子鼻雷达图轮廓相似,但响应值存在差异,其中 W1W 传感器响应值差异明显,河南百里香中二甲基硫相对含量显著高于其他产地,且硫化物响应值较高,香气较浓郁。由图 6b)可知,PC1 和 PC2 的累积贡献率为 97.3%,表明其已经包含样品差异的主要信息,可以反映 3 个产地百里香的整体香气信息。

电子舌能够通过电子传感器模拟人类的味觉来感知待测物的味觉特征,可应用于质量控制和味觉化合物描述^[32]。采用电子舌探究不同产地百里香之间的滋味差异,对百里香的酸、苦、涩、咸、鲜 5 个基本味及酸性苦味回味、涩味回味、丰富度 3 个回味进行测定,结果见图 7。由图 7a)可知,3 个产地百里香各滋味均有显著差异,广东百里香咸、鲜、

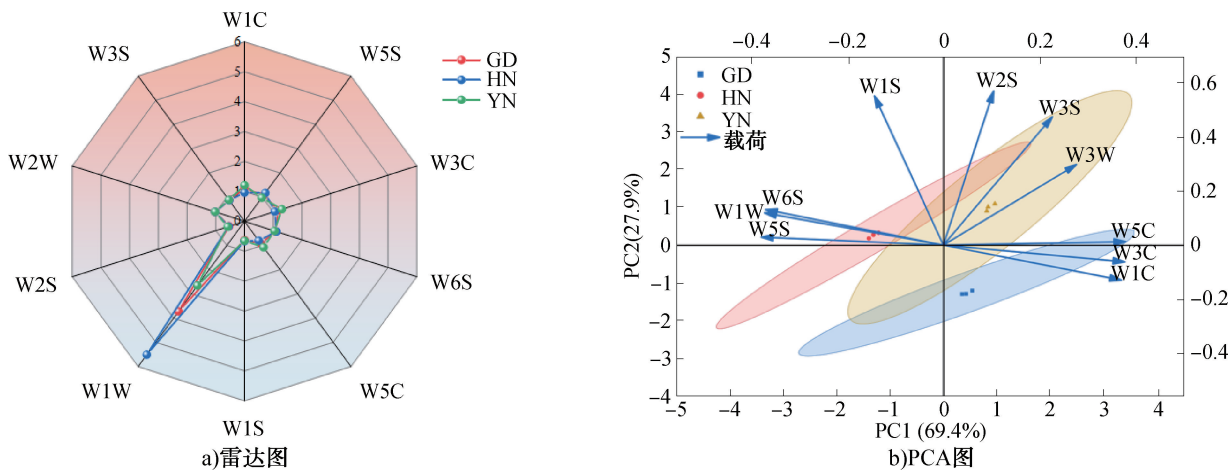


图 6 不同产地百里香电子鼻雷达图及 PCA 图

Fig. 6 Radar chart and PCA score plot of electronic nose data for *Thymus mongolicus* Ronn. from different origins

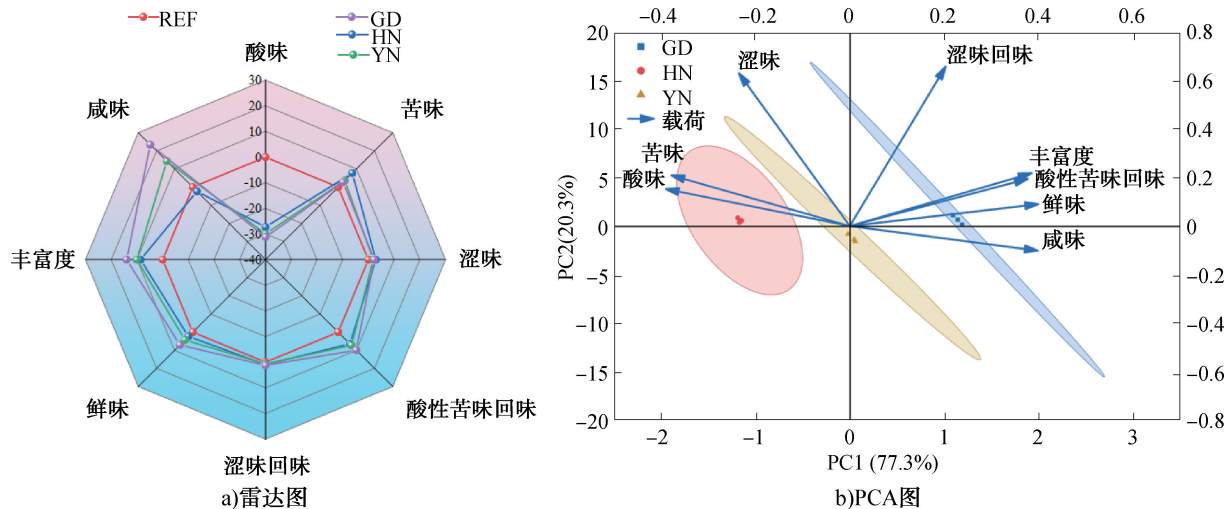


图 7 不同产地百里香电子舌雷达图及 PCA 图

Fig. 7 Radar chart and PCA score plot of electronic tongue data for *Thymus mongolicus* Ronn. from different origins

丰富度、涩味回味和酸性苦味回味响应值较大,河南百里香涩味和苦味响应值较大,云南百里香味觉响应值居中。由图 7b)可知,PC1 和 PC2 方差贡献率分别为 77.3%和 20.3%,累积贡献率为 97.6%,说明 PC1 和 PC2 基本包含了样品的所有信息,能够反映 3 个产地百里香样品的整体滋味。3 个产地样品数据在图中特定分布且互不重叠,可见其在滋味上存在明显差异,其中,河南与广东距离最远,两地百里香滋味差异最大,与电子舌雷达图结果一致。

将百里香特征香气物质含量与电子感官结果进行相关性分析并绘制可视化热图,结果见图 8,其中 * 表示差异显著 ($P \leq 0.05$), ** 表示差异极显著 ($P \leq 0.01$)。由图 8 可知,百里香酚、 β -蒎烯-M、(Z)-2-己烯醛、(E)-2-己烯醛和二甲基硫与 W5S

和 W6S 均呈正相关,与 W1C、W3C 和 W5C 均呈负相关。2-甲氧基-3-异丁基吡嗪-D、樟脑-M、异丁醛、正丁醇-D 和异戊醇与 W1C、W3C 和 W5C 均呈正相关,与 W5S 和 W6S 均呈负相关。其中,2-甲氧基-3-异丁基吡嗪-D 与 W5C 呈极显著正相关,与 W5S 呈显著负相关。W2S、W2W 和 W3S 与 2-甲氧基-3-异丁基吡嗪-D、樟脑-M、3-羟基-2-丁酮-D、丙醛、1-辛烯-3-醇-M、异戊醇均呈正相关,与其他物质均呈负相关或弱相关。其中,樟脑-M 与 W3S 呈显著正相关。W1S 和 W1W 与 (E)-2-己烯醛、(Z)-2-己烯醛和二甲基硫均呈正相关,W1S 与正己醛-D 呈显著正相关,与苯乙醛-M 呈显著负相关。挥发性物质的化学结构影响其香气特征,其经样品基质扩散至电子鼻传感器表面,传感器与其官

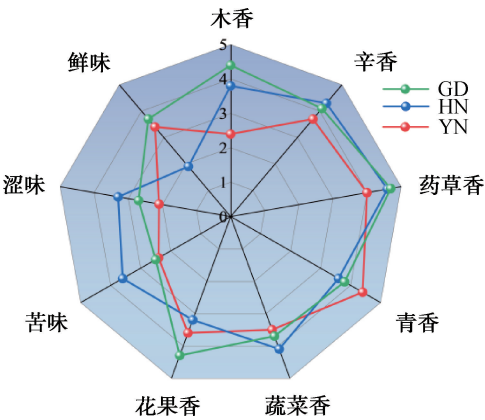


图 9 不同产地百里香感官评价雷达图

Fig. 9 Sensory radar map of *Thymus mongolicus* Ronn. from different origins

质的影响,后者具有更高水平的木香和花果香,风味层次偏甜润,可能是受 α -松油烯-M、 γ -松油烯-M(木香)、苯乙醛-M(花香与水果甜香)、异戊酸甲酯-D(鲜明果香)等香气物质的共同作用。口感方面,河南百里香苦味和涩味(3.6和3.3)尚强,广东地区鲜味(3.7)尚强,与电子舌结果相对应。上述部分化合物与特定传感器响应值存在显著关联,进一步证实其是构成百里香风味差异的关键物质基础。

2.6 特征香气物质与地理气候条件的关联性分析

植物次生代谢产物的形成与其生长发育密切相关,并受降水、温湿度、海拔等环境因素的调控。在海拔地区,经纬度可显著影响温度和降水,进而间接影响植物的生长环境及代谢产物的合成与累积,最终导致香气在感官特征上产生显著差异^[37]。对百里香的特征香气物质与大致地理位置及气候条件进行关联性分析,结果见图 10,其中相关系数大于 0.8 为正相关,小于 -0.8 为负相关。由图 10 可知,百里香特征香气物质中杂环类、酮类及醇类化合物相对含量与海拔高度均呈正相关,与经度均呈负相关。其中,2-甲氧基-3-异丁基吡嗪-D、樟脑-M、3-羟基-2-丁酮-D、1-辛烯-3-醇-M、异戊醇等化合物相对含量与海拔高度均呈正相关,与经度均呈负相关。酚类、烯烃类化合物相对含量与海拔高度均呈负相关,与经度均呈正相关。其中,百里香酚、 γ -松油烯-M、 α -松油烯-M 及 β -蒎

烯-M 相对含量与海拔高度均呈负相关,与经度均呈正相关。杨晓娟等^[38]对广西地区水松叶挥发性物质相对含量与地理环境因子进行相关性分析,发现烯烃类化合物相对含量与经度呈显著正相关。任瑞芬等^[11]研究发现,百里香中 β -蒎烯相对含量与种源地经度位置呈显著正相关,与海拔高度呈负相关,本研究结果与之相似。百里香中大部分醛类、含硫类化合物相对含量与纬度均呈正相关,如 (E)-2-己烯醛、(Z)-2-己烯醛、正己醛-D 及二甲基硫等,但苯乙醛-M、异丁醛及正丁醇-D 相对含量则与纬度均呈负相关。年均气温与烯烃类、酯类化合物相对含量均呈正相关, γ -松油烯-M、 α -松油烯-M、苯乙醛-M 及异戊酸甲酯-D 相对含量与年均气温均呈正相关。其中,松油烯为萜烯类化合物,温度的高低会影响其向大气中释放的速率,一定范围内,挥发性物质释放速率随温度的升高而增大^[39-40]。异戊酸甲酯-D 的合成主要以氨基酸和果胶代谢为核心,其合成途径中的酶活性可能受温度影响^[39]。年降水量和年日照时长会影响特征香气物质中部分醛类、酯类化合物相对含量,其中,苯乙醛-M、异戊酸甲酯-D 的相对含量与年降水量均呈正相关,与年日照时长均呈负相关;正己醛-D、丙醛及 1-辛烯-3-醇-M 含量与年日照时长均呈正相关,与年降水量均呈负相关。

综上所述,地理位置及气候条件会对百里香差异性香味物质的相对含量造成一定影响,从显著性上分析,纬度与 (E)-2-己烯醛呈显著正相关,与异丁醛呈显著负相关,年均气温与异戊酸甲酯-D 呈显著正相关。

本研究在样品前处理及分析测试环节,采用常温 2-辛醇溶液作为样品的分析介质,主要是基于物质检测对样品基质的要求,以保证仪器检测数据的可比性及可重复性,但百里香在实际烹饪应用中,通常以水、油等为介质或受到高温热处理,这会影

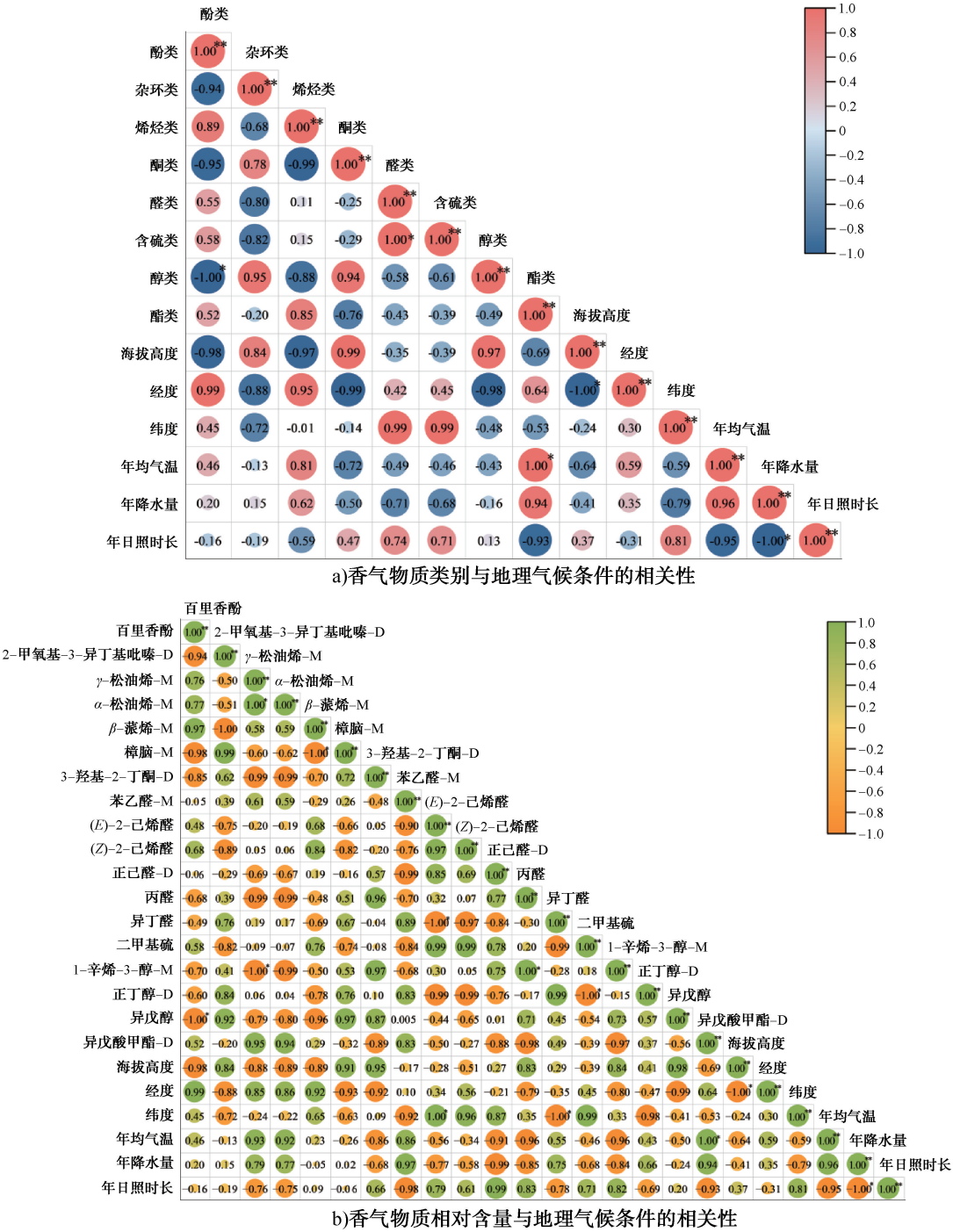


图 10 香气物质类别及相对含量与地理气候条件的相关性

Fig. 10 Correlations of volatile compound classes and individual compounds with geographical and climatic conditions

具有一定影响。周菁等^[43]研究发现,加热温度会对桂花食用品质造成一定影响,温度升高,苦味加重,涩味先减后增,特征香气物质种类减少。综上可知,本研究获得的风味特征数据是标准化分析条件下的比较结果,结论的外推需保持审慎,有待后续多介质、多温度模拟真实烹饪条件的系统研究予以验证。

3 结论

本研究采用 GC-IMS 结合电子感官技术对河南洛阳、云南昆明、广东广州 3 个产地的百里香挥发性物质进行分析,探究造成其风味差异的特征香气物质。结果表明,GC-IMS 共鉴定出 101 种化合物,含

有酯类 12 种, 烯炔类 14 种, 杂环类 7 种, 酮类 19 种, 醛类 19 种, 醇类 23 种, 醚类 3 种, 酚类、酸类、烷炔类和含硫类化合物各 1 种; 百里香中挥发性物质以醇类、醛类、酮类化合物为主, 酚类化合物相对含量最高。河南和广东百里香的挥发性物质数量及总含量高于云南百里香, 且百里香酚、1,8-桉叶素-M 等主要香气物质相对含量较高, 云南百里香中(-)-苌醇-M、芳樟醇-M 相对含量较高。不同产地百里香挥发性物质种类差异显著, 在此基础上筛选出 18 种区分不同产地百里香的共有特征香气物质($VIP>1$ 且 $OAV\geq 1$), 以醛类、醇类、烯炔类物质为主, 主要包括百里香酚、(Z)-2-己烯醛、异戊酸甲酯-D、(E)-2-己烯醛等。其中, 云南百里香中醇类、酮类和杂环类化合物相对含量较高, 河南百里香中酚类、醛类和含硫类化合物相对含量较高, 广东百里香中烯炔类和酯类化合物相对含量较高, 这些化合物是造成不同产地百里香风味特征差异的主要原因。河南百里香的苦涩味明显, 广东百里香的鲜味及咸味较突出, 云南百里香的香味较均衡。地理位置及气候条件会影响百里香差异性香味物质的相对含量, 纬度与(E)-2-己烯醛呈显著正相关, 与异丁醛呈显著负相关, 年均气温较高则有利于异戊酸甲酯-D 的累积。

需要强调的是, 本研究的结论主要反映标准化分析条件下的风味物质组成特征, 后续研究可进一步探索不同加工介质及热力条件对百里香风味释放规律及感官的影响, 从而为食品工业应用提供更具备普适性的科学依据。

参考文献:

[1] 迟媛,郑皓,米文韬,等. 我国北方百里香功能性状与环境的适应性研究[J]. 中国草地学报,2025,47(2): 21-29.

CHI Y,ZHENG H,MI W T,et al. Study on the adaptation of functional traits of thymus mongolicus to the environment in northern China[J]. Chinese Journal of Grassland,2025,47(2):21-29.

[2] KAMYAB A, SAMSAMPOUR D. How thyme thrives under drought: insights into photosynthetic and membrane-protective mechanisms[J]. BMC Biotechnology, 2025, 25 (1):95.

[3] 夏光辉,梅双喜. 百里香精油的生物活性及其在动物生产中的应用[J]. 饲料研究,2022,45(12):148-151.

XIA G H,MEI S X. Biological activity of thyme essential oil and its application in animal production[J]. Feed Research,2022,45(12):148-151.

[4] HERMOSILHA D, TRIGO G, COELHO M, et al. Valorization of thyme combined with phytocannabinoids as anti-inflammatory agents for skin diseases[J]. Pharmaceutics,2025,17(10):1291.

[5] MARAL H, OĞUZ M, TÜRKMEN M, et al. Chemical profile and bioactivity of essential oils from five Turkish thyme species against white mold fungal disease agent *Sclerotinia sclerotiorum* [J]. Scientific Reports, 2025, 15:35699.

[6] OUAKOUAK H, BENARFA A, MESSAOUDI M, et al. Biological properties of essential oils from *Thymus algeriensis* boiss[J]. Plants,2021,10(4):786.

[7] HAMMOUDI HALAT D,KRAYEM M,KHALED S,et al. A focused insight into thyme: biological, chemical, and therapeutic properties of an indigenous Mediterranean herb[J]. Nutrients,2022,14(10):2104.

[8] 于帅,魏忠宝,李丽,等. 百里香的化学成分、药理作用及应用研究进展[J]. 人参研究,2023,35(3):51-53.

YU S,WEI Z B,LI L,et al. Research progress on chemical composition, pharmacological action and application of thyme [J]. Ginseng Research,2023,35(3):51-53.

[9] SALEHI B, MISHRA A P, SHUKLA I, et al. Thymol, thyme, and other plant sources: health and potential uses [J]. Phytotherapy Research,2018,32(9):1688-1706.

[10] 马风华,胡海英,李爱华,等. 宁夏不同类型草地百里香挥发性有机物的组成及其差异[J]. 草业科学, 2023,40(11):2800-2811.

MA F H,HU H Y,LI A H,et al. Analysis on composition and difference of volatile organic compounds in thyme from different types of grassland in Ningxia[J]. Pratacultural Science,2023,40(11):2800-2811.

[11] 任瑞芬,杨秀云,刘涛. 种源差异对百里香挥发性物质种类和含量的影响[J]. 西北林学院学报, 2023, 38 (1):139-145.

REN R F, YANG X Y, LIU T. Effects of provenance difference on the type and content of volatile compounds in thymus mongolicus leaves [J]. Journal of Northwest Forestry University,2023,38(1):139-145.

[12] 袁海彬,董平,唐万婷,等. 基于智能感官结合 GC-IMS 技术探究不同品种食醋风味特征[J]. 中国调味品, 2025,50(8):102-109.

YUAN H B, DONG P, TANG W T, et al. Exploration of flavor characteristics of different varieties of vinegar based on intelligent senses and GC-IMS[J]. China Condiment, 2025,50(8):102-109.

[13] 刘娟,赵欢蕊,付咪咪,等. 基于气相色谱-离子迁移谱

- 对百里香挥发性成分的分析[J]. 中国调味品, 2021, 46(4): 153-156, 164.
- LIU J, ZHAO H R, FU M M, et al. Analysis of volatile components of thymus vulgaris based on GC-IMS technique [J]. China Condiment, 2021, 46(4): 153-156, 164.
- [14] 刘吟, 邵佩, 陈琳, 等. 气相色谱-离子迁移谱法分析 5 种外观易混淆香辛料挥发性成分差异[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(17): 176-184.
- LIU Y, SHAO P, CHEN L, et al. Differential analysis of volatile components in 5 kinds of easily confused spices with appearance by gas chromatography-ion mobility spectroscopy[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(17): 176-184.
- [15] 尹思, 梁明霞, 屈宇, 等. 我国百里香属植物资源研究[J]. 中国野生植物资源, 2020, 39(10): 78-84.
- YIN S, LIANG M X, QU Y, et al. Genetic resources of thymus in China [J]. Chinese Wild Plant Resources, 2020, 39(10): 78-84.
- [16] 罗俊华, 龙勇, 汪雪娇, 等. 基于香气强度和活度值的贵州烟叶蜜甜香特征风味成分分析[J]. 分析测试学报, 2025, 44(6): 1055-1065.
- LUO J H, LONG Y, WANG X J, et al. Analysis of flavour components of honey-sweet aroma characteristics of Guizhou tobacco based on aroma intensity and activity value[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2025, 44(6): 1055-1065.
- [17] 陈菊, 黄裕兵, 王雪雅, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 解析糟辣椒发酵过程中关键香气物质变化[J]. 中国酿造, 2025, 44(7): 91-98.
- CHEN J, HUANG Y B, WANG X Y, et al. Changes of key aroma substances during Zaolajiao fermentation process based on HS-SPME-GC-MS[J]. China Brewing, 2025, 44(7): 91-98.
- [18] 侯智勇, 易宇文, 张浩, 等. 不同浸提加工处理对八角茴香风味化合物释出规律的影响[J]. 保鲜与加工, 2025, 25(6): 138-147.
- HOU Z Y, YI Y W, ZHANG H, et al. Effects of different extraction and processing treatments on the release patterns of flavor compounds from star anise[J]. Storage and Process, 2025, 25(6): 138-147.
- [19] 华夏, 李晓梅, 李丽泓, 等. 黄茶闷黄过程中电化学变化与品质的关系[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(22): 84-91.
- HUA X, LI X M, LI L H, et al. Study on the relationship between electrochemical changes and quality of yellow tea in the process of yellowing[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(22): 84-91.
- [20] 魏飞, 罗舒, 宋怡, 等. 基于电子舌和非靶向代谢组学比较不同冲饮方式下参灵茶滋味差异[J]. 现代食品科技, 2024, 40(12): 339-350.
- WEI F, LUO S, SONG Y, et al. Comparison of flavor differences in ginseng tea prepared with different brewing methods using electronic tongue and non-targeted metabolomics[J]. Modern Food Science & Technology, 2024, 40(12): 339-350.
- [21] 黄梅华, 梁晓君, 何全光, 等. 基于 GC-IMS 技术的不同产地红蓝草特征挥发性成分分析[J]. 中国食品学报, 2025, 25(7): 317-329.
- HUANG M H, LIANG X J, HE Q G, et al. Analysis of volatile compounds in *Peristrophe bivalvis* (Linnaeus) Merrill from different regions based on gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(7): 317-329.
- [22] 韩峰, 孙耀文, 马迎梅, 等. 三种百里香挥发油成分、抑菌活性和对人体肝癌细胞毒性研究[J]. 天然产物研究与开发, 2023, 35(10): 1708-1715.
- HAN F, SUN Y W, MA Y M, et al. Components, bacteriostatic activity and cytotoxicity on human hepatoma cells of three thyme essential oils [J]. Natural Product Research and Development, 2023, 35(10): 1708-1715.
- [23] 陈品品, 马晓娟, 刘靓, 等. 阔叶百里香鲜、干茎叶精油成分及其抑菌效果[J]. 亚热带植物科学, 2021, 50(1): 15-20.
- CHEN P P, MA X J, LIU L, et al. Component analysis and comparison of antibacterial activity of essential oil from fresh and dry leaves and stems of thymus pulegioides[J]. Subtropical Plant Science, 2021, 50(1): 15-20.
- [24] MUMIVAND H, SHAYGANFAR A, HASANVAND F, et al. Antimicrobial activity and chemical composition of essential oil from thymus daenensis and thymus fedtschenkoi during phenological stages [J]. Journal of Essential Oil Bearing Plants, 2021, 24(3): 469-479.
- [25] 安比芳, 陈创业, 宋凯洋, 等. 基于 GC-MS 和电子鼻探究不同方法提取的玫瑰精油挥发性香气成分[J]. 中国调味品, 2024, 49(10): 153-160.
- AN B F, CHEN C Y, SONG K Y, et al. Exploration of volatile aroma components of rose essential oils extracted by different methods based on GC-MS and electronic nose [J]. China Condiment, 2024, 49(10): 153-160.
- [26] 曹伟峰, 张悦妍, 向情儒, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和 GC-IMS 结合电子鼻分析真空冷却对酱牛肉风味的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(9): 341-348.
- CAO W F, ZHANG Y Y, XIANG Q R, et al. Analysis of the effect of vacuum cooling on the flavor of sauce beef based on HS-SPME-GC-MS and GC-IMS combined with electronic nose [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(9): 341-348.
- [27] 余远江, 庞一扬, 袁桃静, 等. 基于电子鼻、HS-GC-IMS 和 HS-SPME-GC-MS 分析五种水产原料的风味特征[J]. 食品工业科技, 2021, 42(19): 106-117.
- YU Y J, PANG Y Y, YUAN T J, et al. Analysis of flavor characteristics of five aquatic raw materials based on electronic nose, HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS [J].

- Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(19): 106–117.
- [28] 陆宽,王雪雅,孙小静,等. 电子鼻结合顶空 SPME-GC-MS 联用技术分析贵州不同品种辣椒发酵后挥发性成分[J]. 食品科学, 2018, 39(4): 199–205.
- LU K, WANG X Y, SUN X J, et al. Analysis of the volatile components of fermented hot pepper from different varieties grown in Guizhou by electronic nose combined with SPME-GC-MS[J]. Food Science, 2018, 39(4): 199–205.
- [29] 李瑞丽,赵俊俊,戴水平,等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和电子鼻技术分析烘焙温度对菊苣根提取物挥发性成分的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(8): 311–321.
- LI R L, ZHAO J J, DAI S P, et al. Effect of roasting temperature on volatile components of chicory root extract analyzed by HS-SPME-GC-MS and electronic nose[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(8): 311–321.
- [30] 冯雨萌,杨露露,杨帆,等. 百里香盛花期不同器官挥发物的分布特性[J/OL]. 草业科学, 2024–09–25. <https://link.cnki.net/urlid/62.1069.S.20240925.1418.004>.
- FENG Y M, YANG L L, YANG F, et al. Distribution characteristics of volatiles in different organs of thyme in full bloom[J/OL]. Pratacultural Science, 2024–09–25. <https://link.cnki.net/urlid/62.1069.S.20240925.1418.004>.
- [31] 范海默特. 化合物嗅觉阈值汇编[M]. 李智宇,王凯,冒德寿,等,译. 2 版. 北京:科学出版社, 2018.
- VAN GEMERT L J. Compilation of odor thresholds of chemical compounds [M]. Translated by LI Z Y, WANG K, MAO D S, et al, transl. (2nd ed). Beijing: Science Press, 2018.
- [32] 王思捷,李昶甫,袁灿,等. 基于 GC-IMS、电子鼻和电子舌联用技术分析不同加工工艺辣椒对烧椒酱风味特性的影响[J]. 中国调味品, 2025, 50(8): 184–191, 202.
- WANG S J, LI C F, YUAN C, et al. Analysis of effect of chili processed by different processing techniques on flavor characteristics of roasted chili sauce based on GC-IMS, electronic nose and electronic tongue combination technology [J]. China Condiment, 2025, 50(8): 184–191, 202.
- [33] 田怀香,郑国茂,于海燕,等. 气味与滋味间相互作用对食品风味感知影响研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(9): 259–269.
- TIAN H X, ZHENG G M, YU H Y, et al. Research progress on the effect of the interaction between odor and taste on food flavor perception[J]. Food Science, 2023, 44(9): 259–269.
- [34] LIU Z Y, WEI S, XIAO N Y, et al. Insight into the correlation of key taste substances and key volatile substances from shrimp heads at different temperatures [J]. Food Chemistry, 2024, 450: 139150.
- [35] HE R Q, WAN P, LIU J, et al. Characterisation of aroma-active compounds in Guilin Huaqiao white sufu and their influence on umami aftertaste and palatability of umami solution[J]. Food Chemistry, 2020, 321: 126739.
- [36] 付燕梦,邹雅倩,田星. 基于电子舌和 HS-SPME-GC-MS 技术的不同产地青钱柳茶风味特征及其生物活性成分分析[J/OL]. 食品工业科技, 2025–10–23. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025070013>.
- FU Y M, ZOU Y Q, TIAN X. Analysis of flavor characteristics and bioactive components of *Cyclocarya paliurus* tea from different habitats based on electronic tongue and HS-SPME-GC-MS technology[J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 2025–10–23. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025070013>.
- [37] DE FLAVIIS R, SANTARELLI V, SACCHETTI G, et al. An insight into the impact of climate factors associated with altitude on wheat volatiles' fingerprints at harvest using multivariate statistical analysis [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(13): 6664–6679.
- [38] 杨晓娟,刘世男,邓必玉,等. 不同地理分布水松叶挥发性成分差异[J]. 热带作物学报, 2025, 46(2): 440–446.
- YANG X J, LIU S N, DENG B Y, et al. Differences in volatile components of *Glyptostrobus pensilis* leaves from different geographic distributions[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2025, 46(2): 440–446.
- [39] 王菁菁,郝文芳,张继文,等. 艾叶挥发性成分对气候因子的响应研究[J]. 中国中药杂志, 2018, 43(15): 3163–3170.
- WANG J J, HAO W F, ZHANG J W, et al. Response of volatiles of *Artemisiae Argyi Folium* to climatic factors [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2018, 43(15): 3163–3170.
- [40] WU Y H, ZHUO Z H, QIAN Q Q, et al. Chemotaxonomic variation of volatile components in *Zanthoxylum Bungeanum* peel and effects of climate on volatile components [J]. BMC Plant Biology, 2024, 24(1): 793.
- [41] 徐少青. 辛香风味精油纳米乳液体系稳定机制研究[D]. 天津:天津科技大学, 2021.
- XU S Q. Study on the stability mechanism of spicy flavor essential oil nanoemulsion system [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2021.
- [42] 刘欢,赵巨堂,罗海涛,等. 提取方法对百里香精油化学成分和抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(19): 331–339.
- LIU H, ZHAO J T, LUO H T, et al. Effect of extraction methods on chemical constituents and antioxidant activity of essential oil from *thymus vulgaris* L. [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(19): 331–339.

[43] 周菁,崔朝林,岳彭伟,等. 不同热处理温度对桂花食用品质的影响[J]. 食品科学,2023,44(15):10-18.
ZHOU J, CUI C L, YUE P W, et al. Effects of different

heat treatment temperatures on eating quality of sweet-scented *Osmanthus* flowers [J]. Food Science, 2023, 44(15):10-18.

Analysis of characteristic flavor compounds in *Thymus mongolicus* Ronn. from different origins based on GC-IMS and electronic senses

CHEN Haoran¹, FENG Wenning², LIU Wei², WANG Liusheng², LI Xinyan¹, LI Yuanyuan¹, ZHAO Mingqin¹

1. College of Tobacco, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China;

2. Technology Center, China Tobacco Hebei Industrial Co., Ltd., Shijiazhuang 050051, China

Abstract: **[Objective]** To elucidate the flavor differences of *Thymus mongolicus* Ronn. from different origins and identify their key aroma compounds. **[Methods]** Gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) combined with electronic nose and electronic tongue was used to analyze the volatile compounds in *Thymus mongolicus* Ronn. samples from three origins: Luoyang (Henan), Kunming (Yunnan), and Guangzhou (Guangdong). Odor activity values (*OAV*) were then employed to screen the characteristic aroma compounds. **[Results]** A total of 101 compounds were identified, predominantly alcohols (23), aldehydes (19), and ketones (19). Both the number and total content of volatile compounds in *Thymus mongolicus* Ronn. from Henan and Guangdong were higher than those from Yunnan. Significant differences in the contents of characteristic aroma compounds were observed among samples from different origins. Eighteen common characteristic aroma compounds meeting both *VIP* > 1 and *OAV* ≥ 1 were identified, notably thymol, (*Z*)-2-hexenal, methyl isovalerate-D, and (*E*)-2-hexenal. Yunnan samples showed higher relative contents of alcohols, ketones, and heterocyclic compounds, with a relatively balanced aroma; Henan samples had the highest contents of phenols, aldehydes, and sulfur-containing compounds, accompanied by pronounced bitterness and astringency; Guangdong samples were rich in alkenes and esters, exhibiting prominent umami and saltiness. Geographical and climatic conditions significantly influenced the contents of characteristic flavor compounds. A significant positive correlation was found between latitude and (*E*)-2-hexenal, whereas a significant negative correlation was observed between latitude and isobutyraldehyde. In addition, higher temperatures promoted the accumulation of methyl isovalerate-D. **[Conclusion]** GC-IMS combined with electronic sensory techniques can rapidly discriminate *Thymus mongolicus* Ronn. from different origins, offering a valuable reference for the traceability and further application of its characteristic flavor compounds.

Key words: *Thymus mongolicus* Ronn.; gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS); electronic nose; electronic tongue; volatile compounds; odor activity value (*OAV*)

[责任编辑: 王晓波 李波]