

基于电子感官系统和GC-IMS技术的大黄饮片基原辨识研究^Δ

杨 硕^{1*},徐中利²,赵新芝³,石典花^{3,4},戴衍朋^{3,4},毕 钰¹,辛义周^{5#}(1.山东中医药大学药学院,济南 250014;2.山东省平邑县中医医院,山东 平邑 273300;3.山东省中医药研究院,济南 250014;4.国家中医药管理局中药蜜制和制炭炮制技术与原理重点实验室,济南 250014;5.山东中医药大学附属医院药学部,济南 250014)

中图分类号 R282.5 文献标志码 A 文章编号 1001-0408(2024)09-1076-06
DOI 10.6039/j.issn.1001-0408.2024.09.09



摘要 目的 探寻不同基原大黄饮片滋味、气味和挥发性有机物的差异,对大黄饮片进行基原辨识。方法 采用电子舌、电子鼻和气相-离子迁移谱(GC-IMS)技术,对不同基原大黄饮片间的滋味、气味和挥发性有机物进行对比分析,运用主成分分析(PCA)、偏最小二乘法判别分析(PLS-DA)、正交偏最小二乘法判别分析(OPLS-DA)、Fisher判别等方法对大黄饮片基原进行辨识研究并建立基原判别标准。结果 3种基原大黄饮片的滋味差异主要表现在苦味、涩味以及苦和涩的回味,气味的差异主要表现在无机硫化物、芳香成分有机硫化物、甲烷等短链烷烃、醇醛酮酯类化合物以及氮氧化合物,差异性挥发性有机物主要为醇醛酮酯类成分,并且8批样品均能很好地聚集为3类。根据差异性挥发物质之间的峰强度比值可有效辨识3种大黄饮片,如当2-乙酰基呋喃峰强度是异丁酸[二聚体]峰强度的3~19倍时为药用大黄。结论 本研究建立的判别模型以及特征挥发性物质峰强度判别标准可用于大黄饮片基原的鉴别。

关键词 大黄饮片;电子舌;电子鼻;气相-离子迁移谱;基原鉴别;特征挥发物

Study on original identification of Rhei Radix et Rhizoma decoction pieces based on electronic sensory system and GC-IMS technology

YANG Shuo¹, XU Zhongli², ZHAO Xinshi³, SHI Dianhua^{3,4}, DAI Yanpeng^{3,4}, BI Yu¹, XIN Yizhou⁵(1. School of Pharmacy, Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250014, China; 2. Pingyi County Hospital of Traditional Chinese Medicine of Shandong Province, Shandong Pingyi 273300, China; 3. Shandong Academy of Chinese Medicine, Jinan 250014, China; 4. The Key Unit for Research of Technique and Principle of Honey-processing and Carbonizing of SATCM, Jinan 250014, China; 5. Dept. of Pharmacy, the Affiliated Hospital of Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250014, China)

ABSTRACT **OBJECTIVE** To investigate the variations in taste, aroma and volatile organic compounds of Rhei Radix et Rhizoma decoction pieces derived from different sources, and to identify their origins. **METHODS** The flavor, odor and volatile organic compounds of Rhei Radix et Rhizoma decoction pieces from different sources were compared and analyzed by using electronic tongue, electronic nose, and gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS). Principal component analysis (PCA), partial least squares-discriminant analysis (PLS-DA), orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA) and Fisher discriminant analysis were employed to identify the origins of Rhei Radix et Rhizoma decoction pieces and establish the basis discrimination criteria. **RESULTS** The differences in taste of Rhei Radix et Rhizoma decoction pieces from 3 origins were primarily characterized by bitterness, astringency, and bitter-astringent aftertaste. In terms of smell, variations were mainly observed in inorganic sulfides, organic sulfides containing aromatic components, methane and other short-chain alkanes, alcohols, ethers, aldehydes and ketones, as well as nitrogen oxides. Differentially volatile organic compounds mainly consisted of alcohols, aldehydes and ketones. Furthermore, the samples from 8 batches could be effectively classified into 3 categories. Three types of Rhei Radix et Rhizoma decoction pieces can be effectively identified based on the peak intensity ratio between volatile substances. For example, when the peak intensity of 2-acetylfuran was 3-19 times that of isobutyric acid [dimer], it was considered as *Rheum*

Δ 基金项目 国家中医药管理局中药炮制传承创新项目(No.GZY-KJS-2022-050);国家中医药管理局中药炮制技术传承基地建设项目(No.国中医药办规财函〔2022〕185号);甘肃省科技计划项目(No.22CX2NK002, No.22CX8NN229);中央引导地方科技发展专项资金项目(No.YDZX2021096)

* 第一作者 硕士研究生。研究方向:临床药学。E-mail: 2414340529@qq.com

通信作者 主任药师,硕士生导师。研究方向:天然药物活性成分与质量控制。E-mail:xyz01010101@163.com

officinale Baill. **CONCLUSIONS** The discriminant models established in this study, along with the criteria for determining the origins based on the peak intensity of characteristic volatile compounds, can be utilized for the identification of Rhei Radix et Rhizoma decoction pieces.

KEYWORDS Rhei Radix et Rhizoma decoction pieces; electronic tongue; electronic nose; GC-IMS; original identification; characteristic volatile compounds

大黄始载于《神农本草经》,为蓼科植物掌叶大黄 *Rheum palmatum* L.、唐古特大黄 *Rheum tanguticum* Maxim. ex Balf. 或药用大黄 *Rheum officinale* Baill. 的干燥根和根茎^[1],主要含蒽醌类、蒽酮类、芪类、鞣质类、苯丁酮类等成分,具有泻下、抗炎、保肝、利尿、抗肿瘤等药理作用^[2]。研究发现,唐古特大黄、掌叶大黄、药用大黄中各类成分含量存在差异,唐古特大黄中蒽酮、鞣质及黄烷醇类成分含量均高于药用大黄及掌叶大黄,掌叶大黄的游离蒽醌类成分含量普遍高于唐古特大黄及药用大黄,提示不同基原大黄饮片的主治功能可能不同^[3]。2020年版《中国药典》(一部)收录的含大黄及其炮制品的中成药制剂有100多种,不同基原大黄饮片对中医临床、中成药组方及其疗效均有一定影响,因此有效辨识大黄基原对指导大黄临床精准应用具有重要意义。

目前,国内外有关大黄基原鉴定的主要方法包括原植物外观鉴定^[4]、性状鉴定^[5]、高效液相色谱指纹图谱鉴定^[6]、分子生物学鉴定^[7]等。其中,性状和显微鉴定对大黄植物或药材特征完整性要求较高,需依靠长期经验积累才能进行有效鉴别,而经过深加工的大黄饮片及中成药,形态特征被破坏使得鉴定难度明显增加。有研究证明,叶绿体基因间隔区 *rps16-trnQ*、*psaA-ycf3* 等均可作为特异DNA条形码用于大黄基原的鉴定^[8],但此法操作及分析复杂。

近年来随着电子舌、电子鼻等电子感官系统以及气相-离子迁移谱(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)的应用,对药品滋味及气味的评判逐渐准确化^[9]。研究报道显示,电子鼻技术已被用于不同基原郁金饮片气味特征的分析与鉴别^[10],电子舌技术已被用于川牛膝滋味的分析与鉴别^[11],GC-IMS技术结合化学计量学方法可证明当归酒洗品、酒浸品、酒炙品中的挥发性成分存在差异^[12]。基于此,本研究采用电子感官系统和GC-IMS技术分析不同基原大黄饮片滋味、气味以及挥发性有机物差异,建立快速辨识大黄饮片基原的方法,为大黄饮片基原辨识和质量控制提供新方法和思路。

1 材料

1.1 主要仪器

本研究所用的主要仪器包括SA-402B型电子舌(日本 Insent 公司)、PEN3 型电子鼻(德国 Aairsense 公司)、FlavourSpec®型风味分析仪(德国 G.A.S. 公司)、XS205 10⁻⁵DU 型电子天平[梅特勒托利多仪器(上海)有限公司]、KQ-200VDE 型三频数控超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司)、FW-80 型高速万能粉碎机(北京市永光明医疗仪器有限公司)等。

1.2 主要药品与试剂

大黄饮片共8批(所选的样本均是大黄主产地甘肃、湖北的代表性样本^[13]),经济南市中药协会宋希贵主任药师鉴定分别为蓼科植物掌叶大黄 *R. palmatum* L.、唐古特大黄 *R. tanguticum* Maxim. ex Balf. 或药用大黄 *R.*

officinale Baill. 的干燥根和根茎。3种基原大黄饮片的样品信息见表1。

表1 样品信息

样品编号	大黄饮片基原	产地
YY1	药用大黄	湖北省恩施土家族苗族自治州利川市
YY2	药用大黄	湖北省恩施土家族苗族自治州利川市
YY3	药用大黄	湖北省恩施土家族苗族自治州恩施市
ZY1	掌叶大黄	甘肃省陇南市
ZY2	掌叶大黄	甘肃省陇南市
ZY3	掌叶大黄	甘肃省陇南市
TGT1	唐古特大黄	甘肃省甘南藏族自治州合作市
TGT2	唐古特大黄	甘肃省甘南藏族自治州合作市

2 方法

2.1 电子舌技术测定大黄饮片滋味信息

将大黄饮片粉碎过四号筛,精密称取大黄饮片粉末4 g,精密加入去离子水100 mL,超声(功率100 W,频率45 kHz)提取30 min,取上清液,作为待测样品溶液。将电子舌传感器(AAE、CT0、CA0、C00、AE1)与参比电极分别于基准液(30 mmol/L 氯化钾+0.3 mmol/L 酒石酸)和3.33 mol/L 氯化钾溶液中活化24 h后安装,用参比溶液校正,于室温25℃下测定样品鲜味、咸味、酸味、苦味、涩味以及丰富度。传感器C00和AE1经参比溶液简单清洗,测定残留的滋味(即苦味回味和涩味回味)。数据采集时间30 s,采集4个周期,第1个周期数据波动较大,为了提高数据精度,数据分析时删除第1个周期数据,使用第2~4个周期的测量数据。利用电子舌自带分析软件Taste analysis application作雷达图对比分析;使用Origin 2021软件作传感器响应值柱状图分析并建立判别因子分析(discriminant factor analysis, DFA)鉴别模型;使用SIMCA软件建立主成分分析(principal component analysis, PCA)鉴别模型;使用SPSS软件建立Fisher判别模型。

2.2 电子鼻技术测定大黄饮片气味信息

将大黄饮片粉碎过四号筛,精密称取大黄饮片粉末5 g于分析小瓶中,密封后在80℃水浴中孵育15 min,再将进样针头插入分析小瓶中进行气味数据采集。测定条件为:传感器自清洗时间60 s,样品准备时间5 s,分析时间120 s,进样流量400 mL/min。每个样品重复测定3次。利用电子鼻系统自带软件进行Loading分析;使用Origin 2021作颜色映射瀑布图分析;使用SIMCA软件作偏最小二乘法判别分析(partial least squares-discriminant analysis, PLS-DA)、正交偏最小二乘法判别分析(orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA),并进行变量重要性投影值(variable importance in projection, VIP)分析。

2.3 GC-IMS 技术检测大黄饮片中挥发性有机物信息

将大黄饮片粉碎过四号筛,精密称取粉末1.0 g,置于20 mL顶空瓶中,80℃水浴孵育15 min后进样测定。采用FlavourSpec®型风味分析仪进行分析,根据前期中

药测定的常规经验参数及优选结果确定检测条件。IMS检测条件如下:温度45℃,漂移管长度5 cm,管内线性电压400 V/cm;漂移气为N₂(纯度≥99.999%),流速150 mL/min。GC检测条件如下:色谱柱为MXT-WAX柱(30 m×0.53 mm,1.0 μm),分析时间30 min,柱温60℃;载气为N₂(纯度≥99.999%),流速2 mL/min(0~2 min)、2~10 mL/min(2~5 min)、10~100 mL/min(5~25 min)、100 mL/min(25~30 min)。进样条件如下:进样体积100 μL;进样针温度85℃;孵化转速500 r/min。通过仪器配套分析软件Vocal及其插件,分别作二维俯视图和指纹图谱;使用SIMCA 14.1软件进行PCA、PLS-DA分析。

3 结果

3.1 电子舌滋味测定结果

由于TGT1样品各滋味值和丰富度均较高,故本研究以TGT1为参比得到其余样品味觉值,正值表示滋味值比TGT1强,负值表示滋味值比TGT1弱。由雷达图和柱状图(图1A、图1B)可见,唐古特大黄的涩味(astringency)及涩的回味(aftertaste-A)最强,掌叶大黄次之,药用大黄最弱;掌叶大黄的苦味(bitterness)及苦的回味(aftertaste-B)最强,药用大黄次之,唐古特大黄最弱。由PCA、DFA图(图1C、图1D)可见,药用大黄、掌叶大黄和唐古特大黄各自聚集在一起,说明不同基原大黄饮片间滋味差异大,同基原间相似度较高,可较好区分不同基原大黄饮片。

根据3种基原大黄饮片的滋味数据,利用SPSS软件建立Fisher判别模型^[14],观察值 X_1 为酸味值、 X_2 为苦味值、 X_3 为涩味值、 X_4 为苦味回味值、 X_5 为涩味回味值、 X_6 为鲜味值、 X_7 为丰富度、 X_8 为咸味值、 Y_1 、 Y_2 表示判别函数值。建立的判别函数为 $Y_1=52.671+2.452X_1+0.06X_2+0.411X_3-1.135X_4+2.460X_5-4.317X_6+5.667X_7-3.644X_8$ 、 $Y_2=-57.078+1.403X_1+1.788X_2+0.272X_3-2.50X_4+1.087X_5+9.608X_6-9.516X_7+1.144X_8$ 。其中,唐古特大黄饮片检测数据代入后判别函数值 $Y_1>0$ 、 $Y_2>0$,药用大黄饮片检测数据代入后判别函数值 $Y_1<0$ 、 $Y_2<0$,掌叶大黄饮片检测数据代入后判别函数值 $Y_1<0$ 、 $Y_2>0$ 。因此,可通过根据电子舌检测数据建立的Fisher判别模型对大黄饮片基原进行快速辨识。

3.2 电子鼻气味信息测定结果

电子鼻10个传感器对不同的化合物敏感,Loading分析结果(图2A)显示,不同基原大黄饮片气味差异成分主要是S7(无机硫化物)、S9(芳香成分有机硫化物)、S6(甲烷等短链烷烃)、S8(醇醚醛酮类)、S2(氮氧化合物)。选取差异最大的S7(无机硫化物)120 s内的实时响应值绘制颜色映射瀑布图(图2B),结果显示,3种基原大黄饮片存在明显差异。PLS-DA、OPLS-DA(图2C、图2D)结果显示:在PLS-DA中,主成分1占比为98.2%,主成分2占比为1.21%,可信度为95%;在OPLS-DA中,主成分1占比为97.50%,主成分2占比为1.03%,可信度

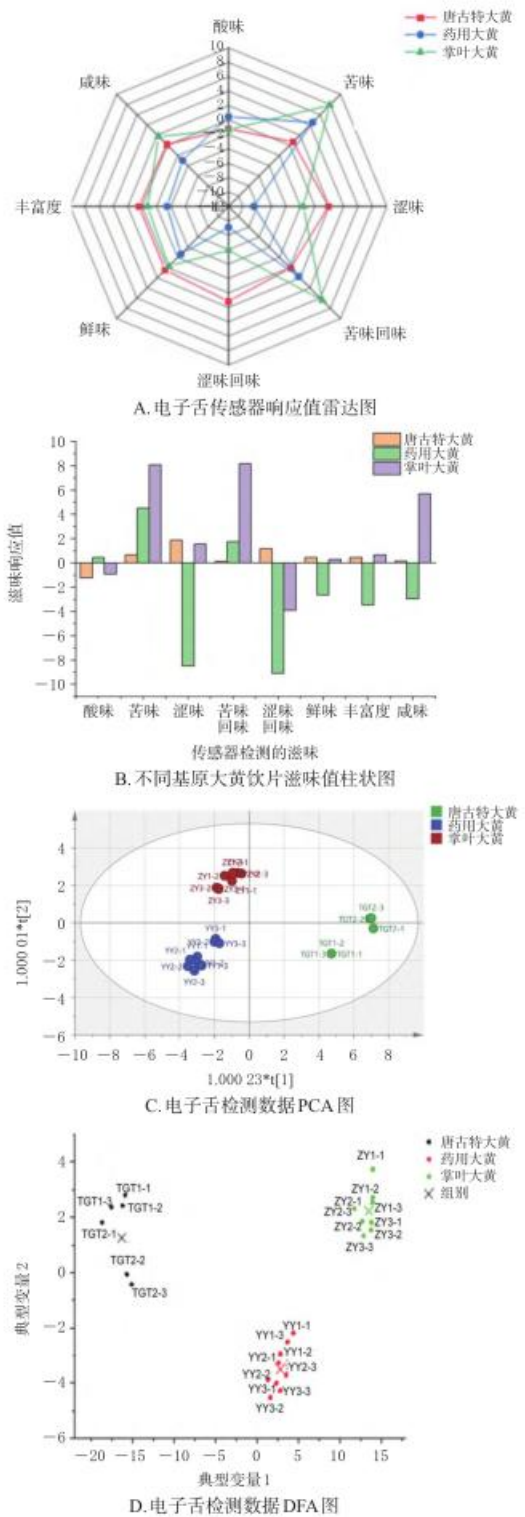


图1 电子舌滋味检测数据分析结果

为95%;图中不同基原大黄饮片间无重叠,聚集在不同区域,说明不同基原大黄饮片气味差异明显。同时对模型进行验证,设定检验数为200次, R^2 和 Q^2 为该模型评价指标(分别代表其可解释度和预测能力),结果(图2E)左边的 R^2 点和 Q^2 点均低于右边,表明未产生过拟合,模型可靠。根据VIP筛选3种基原大黄差异性气味成分,其中VIP大于1的表明对差异贡献大,反之则表明对差异贡献小^[15]。结果(图2F)显示,3种基原大黄饮片差异

主要来自S7(无机硫化物)、S9(芳香成分有机硫化物)、S6(甲烷等短链烷烃)、S8(醇醚醛酮类),而S1(芳香成分,苯类)、S2(氮氧化合物)、S3(氨水,芳香成分)、S4(氢气)、S5(烷烃芳香成分)、S10(长链烷烃类)的影响小,与Loading分析结果一致。

3.3 GC-IMS挥发性有机物测定结果

8批大黄饮片中共检测出83个挥发性有机物信息,包括醛类成分22个、酯类成分14个、酮类成分14个、醇类成分14个、酸类成分7个、萜烯类成分6个以及其他类成分6个。GC-IMS俯视图(图3)中横坐标处红色竖线为RIP峰(反应离子峰),RIP峰两侧的每个点代表1种挥发性有机物。颜色代表物质的浓度,白色表示浓度较小,红色表示浓度较大,颜色越深表示浓度越大。结果显示,药用大黄饮片中的挥发性有机物浓度明显小于其他2种基原饮片,并且唐古特大黄饮片在保留时间200~400 s之间的出峰数量以及峰强度均多/高于其他2种基原饮片,掌叶大黄饮片在保留时间600~700 s之间的峰强度高于其他2种基原饮片,这为后续鉴别不同基原的大黄饮片提供了可能。

依据特征峰选取原则,通过GC-IMS将选取的不同基原大黄饮片中不同挥发性有机物对应的特征峰区域进行排序对照,得到指纹图谱(图4),可直观快速地看出

挥发性有机物在不同基原大黄饮片中的特异性以及样品之间的差异。结果显示,药用大黄饮片中含有高于其他2种基原饮片的主要特征物质有2-乙酰基呋喃、正己酸乙酯等;掌叶大黄饮片中含量高于其他2种基原饮片的主要特征物质有4-甲基-3戊烯-2-酮[二聚体]、乙酸甲酯[二聚体]等;唐古特大黄饮片中含量高于其他2种基原的主要特征物质有1-戊醇、叔丁醇[单体]、庚醛[单体]等。通过分析,计算不同基原大黄饮片的所有挥发性物质峰强度信息,建立大黄饮片基原的判别标准:当2-乙酰基呋喃峰强度是异丁酸[二聚体]峰强度的3~19倍时为药用大黄饮片;当4-甲基-3戊烯-2-酮[二聚体]是四氢呋喃[二聚体]峰强度的2~9倍、3-羟基-2-丁酮[二聚体]峰强度是四氢呋喃[二聚体]峰强度的5~14倍时为掌叶大黄饮片;当2-己烯醛[单体]峰强度是仲丁醇[单体]峰强度的5~11倍、正戊醛[二聚体]峰强度是仲丁醇[单体]峰强度的13~21倍、1-戊醇峰强度是仲丁醇[单体]峰强度的5~9倍、1-戊烯-3-酮峰强度是仲丁醇[单体]峰强度的8~17倍时为唐古特大黄饮片。

对不同基原大黄饮片挥发性有机物峰强度信息进行PCA和PLS-DA,结果(图5)显示,药用大黄、掌叶大黄和唐古特大黄各自聚集,说明不同基原大黄饮片间气味差异大,相同基原间相似度较高,可较好地地区分不同基原大黄饮片。

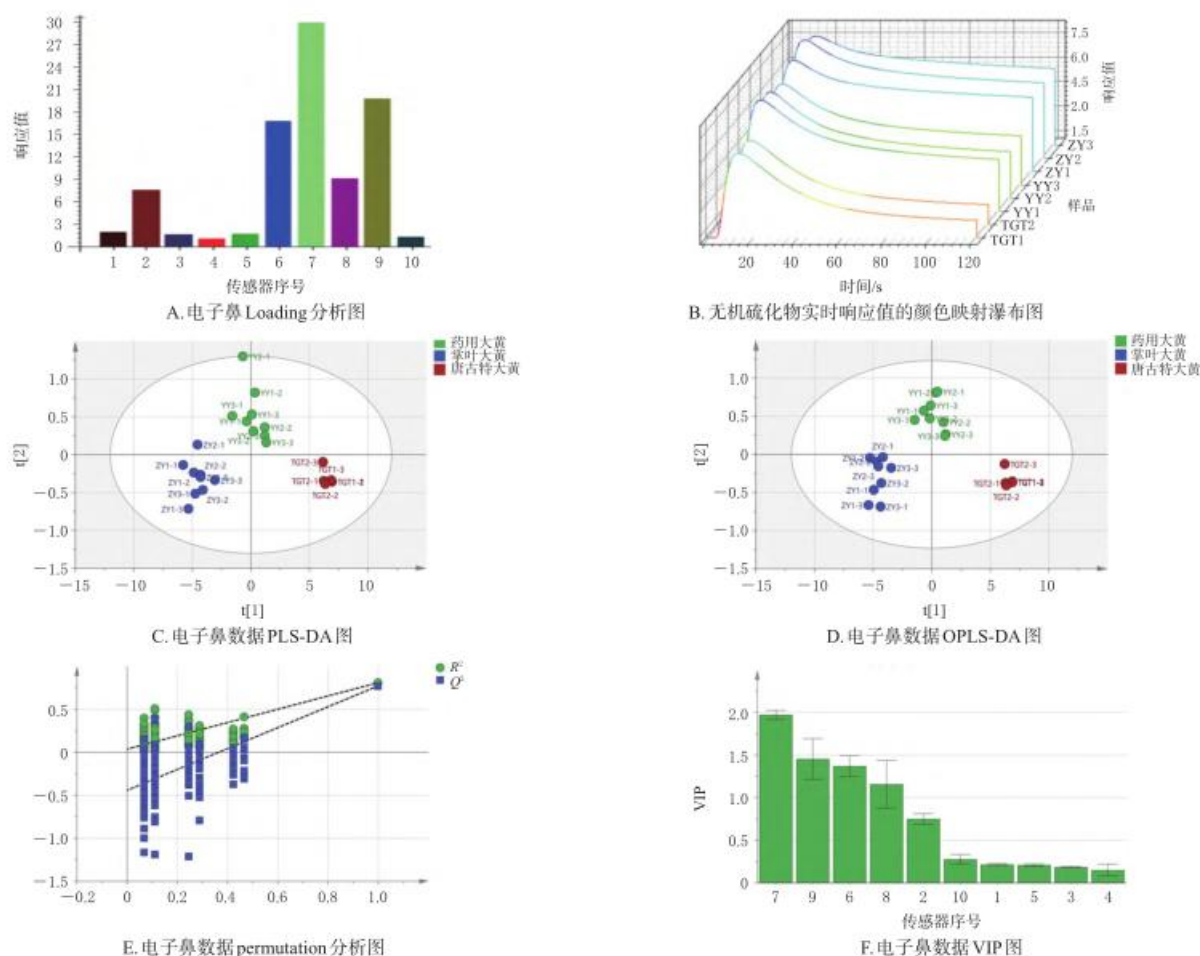


图2 电子鼻气味检测数据分析结果

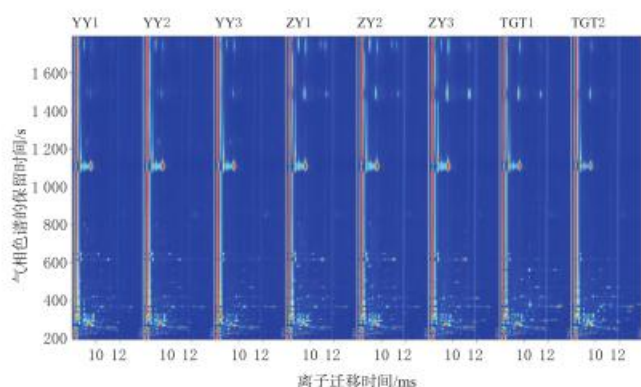


图3 不同基原大黄饮片 GC-IMS 俯视图谱

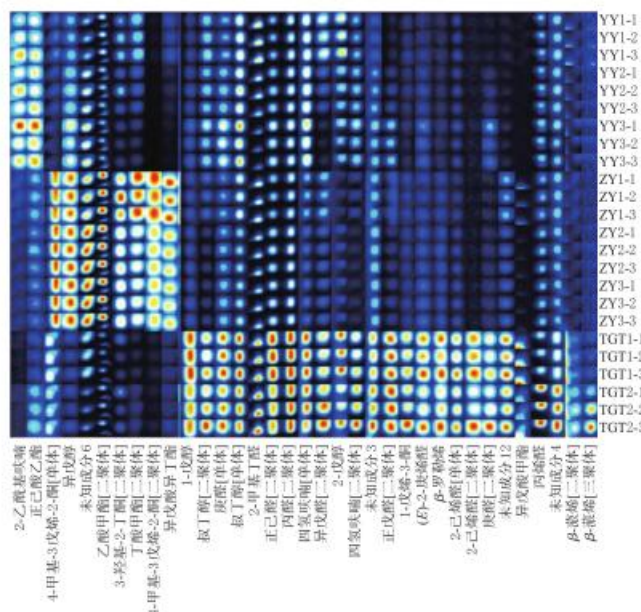


图4 不同基原大黄饮片 GC-IMS 指纹图谱

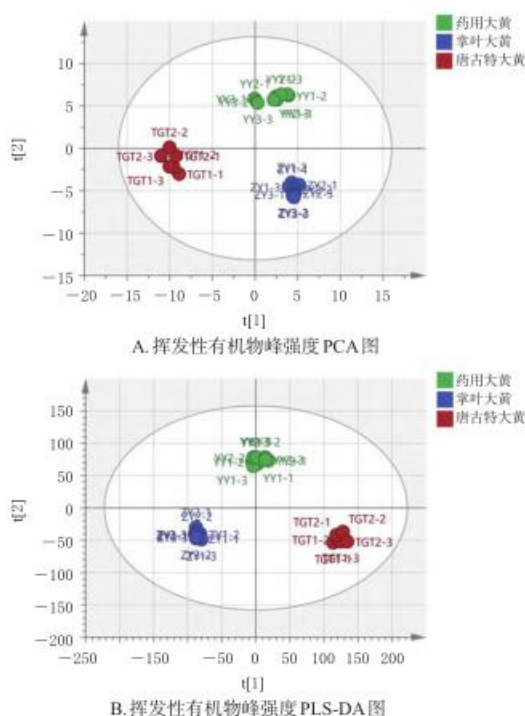


图5 挥发性有机物峰强度 PCA 和 PLS-DA 图

4 讨论

电子舌检测结果表明,不同基原大黄饮片滋味差异主要表现在苦味、涩味及苦和涩的回味,且唐古特大黄饮片涩味最强,掌叶大黄饮片苦味最强。文献研究表明,涩味差异的产生与鞣质类成分含量相关,而苦味差异的产生与其蒽醌类、萜类、生物碱类成分含量相关^[16]。另有研究证实,唐古特大黄的鞣质类成分含量高于药用大黄及掌叶大黄,而掌叶大黄的游离蒽醌类成分含量高于唐古特大黄及药用大黄。因此电子舌检测结果将上述研究报道进行了有效串联,也进一步证实了不同基原大黄饮片所含化学成分存在明显差异,提示其临床应用应有所区分。

电子鼻检测发现,不同基原大黄饮片气味差异成分主要是无机硫化物、芳香成分有机硫化物、甲烷等短链烷烃、醇醚醛酮类化合物;而 GC-IMS 检测发现,不同基原大黄饮片的差异挥发性气味物质主要是醇醛酮酸类成分,表明 GC-IMS 与电子鼻检测结果具有较强相关性,同时也进一步说明了醇醛酮类成分是 3 种基原大黄饮片间的主要差异气味物质。

综上,本研究采用的电子舌、电子鼻及 GC-IMS 技术可有效分析 3 种不同基原大黄饮片的滋味差异、气味组成及挥发性物质差异,并结合化学计量学分析建立了多种大黄饮片基原鉴别模型以及基原判别标准,可用于快速区分大黄饮片的基原,为丰富和发展大黄饮片传统经验鉴别增添了新的思路。但由于 GC-IMS 定性分析软件内置的 NIST、IMS 数据库中化合物数量有限,有 12 个信号峰尚未定性表征,下一步可以结合气相色谱质谱联用技术对其数据库进行扩充,进一步完善大黄饮片不同基原的气味差异,为大黄饮片基原精准鉴定及临床使用提供更多数据支撑。

参考文献

- [1] 韩思琪, 哈伟, 师彦平. 大黄及其有效成分抗炎作用的研究进展[J]. 中草药, 2023, 54(1): 303-316.
HAN S Q, HA W, SHI Y P. Research progress on anti-inflammatory effect of Rhei Radix et Rhizoma and its active components[J]. Chin Tradit Herb Drugs, 2023, 54(1): 303-316.
- [2] CAO Y J, PU Z J, TANG Y P, et al. Advances in bioactive constituents, pharmacology and clinical applications of rhubarb[J]. Chin Med, 2017, 12: 36.
- [3] 张桥, 陈艳琰, 乐世俊, 等. 大黄炮制的历史沿革及对化学成分、传统药理作用影响的研究进展[J]. 中国中药杂志, 2021, 46(3): 539-551.
ZHANG Q, CHEN Y Y, YUE S J, et al. Research progress on processing history evolution as well as effect on chemical compositions and traditional pharmacological effects of Rhei Radix et Rhizoma[J]. China J Chin Mater Med, 2021, 46(3): 539-551.

- [4] 李冉郡,辛天怡,宋良科,等. 大黄产业链基原物种鉴定研究进展[J]. 中国中药杂志, 2021, 46(5): 1060-1066.
LI R J, XIN T Y, SONG L K, et al. Research progress in original species identification in industry chain of Rhei Radix et Rhizoma[J]. China J Chin Mater Med, 2021, 46(5): 1060-1066.
- [5] 刘书斌,杨晓玲,李喜香,等. 基于性状鉴别与灰色关联法对不同规格大黄饮片质量比较研究[J]. 甘肃中医药大学学报, 2022, 39(2): 1-6.
LIU S B, YANG X L, LI X X, et al. Comparative study on quality of Rhei Radix et Rhizoma decoction pieces with different specifications based on macroscopic identification and grey relational analysis[J]. J Gansu Univ Chin Med, 2022, 39(2): 1-6.
- [6] 荣晓惠,刘艳,王秋茹,等. 不同产区掌叶大黄酒蒸前后指纹图谱的建立及3种差异性成分的含量测定[J]. 中国药房, 2022, 33(3): 280-286.
RONG X H, LIU Y, WANG Q R, et al. Establishment of fingerprint and content determination of 3 differential components in *Rheum palmatum* before and after steaming with wine derived from different producing areas[J]. China Pharm, 2022, 33(3): 280-286.
- [7] ZHOU Y X, NIE J, XIAO L, et al. Comparative chloroplast genome analysis of rhubarb botanical origins and the development of specific identification markers[J]. Molecules, 2018, 23(11): 2811.
- [8] 李冉郡,武立伟,辛天怡,等. 大黄药材基原物种叶绿体基因组分析与特异DNA条形码开发[J]. 药学学报, 2022, 57(5): 1495-1505.
LI R J, WU L W, XIN T Y, et al. Analysis of chloroplast genomes and development of specific DNA barcodes for identifying the original species of Rhei Radix et Rhizoma[J]. Acta Pharm Sin, 2022, 57(5): 1495-1505.
- [9] 冯韵鸾,佟明慧,李清,等. GC-IMS在食品药品检测方面的研究进展[J]. 沈阳药科大学学报, 2023, 40(1): 115-123.
FENG Y L, TONG M H, LI Q, et al. Research progress of GC-IMS in food and drug testing[J]. J Shenyang Pharm Univ, 2023, 40(1): 115-123.
- [10] 李铭轩,秦宇雯,李昱,等. 基于Heracles Neo超快速气相电子鼻对不同基原郁金饮片的快速识别及差异标志物研究[J]. 中国中药杂志, 2023, 48(6): 1518-1525.
LI M X, QIN Y W, LI Y, et al. Rapid identification and differential markers of Curcumae Radix decoction pieces of different sources based on heracles neo ultra-fast gas phase electronic nose[J]. China J Chin Mater Med, 2023, 48(6): 1518-1525.
- [11] 王斌,刘维,裴瑾,等. 电子舌技术在鉴别川牛膝中的应用[J]. 中国药房, 2017, 28(36): 5126-5130.
WANG B, LIU W, PEI J, et al. Application of the electronic tongue in the identification of *Cyathula officinalis* [J]. China Pharm, 2017, 28(36): 5126-5130.
- [12] 林秀敏,岳丽丹,张振凌,等. GC-IMS法比较不同方法炮制酒当归特异气味成分差异[J]. 中草药, 2020, 51(17): 4464-4472.
LIN X M, YUE L D, ZHANG Z L, et al. Using GC-IMS to compare difference of specific odor components of *Angelicae Sinensis Radix* by different yellow wine processing methods[J]. Chin Tradit Herb Drugs, 2020, 51(17): 4464-4472.
- [13] 赵文龙,景志贤,张娟,等. 中药大黄生境适宜性分布研究[J]. 中国现代中药, 2020, 22(11): 1787-1792.
ZHAO W L, JING Z X, ZHANG J, et al. Study on distribution of habitat suitability for Rhei Radix et Rhizoma[J]. Mod Chin Med, 2020, 22(11): 1787-1792.
- [14] 刘泓,郭玉杰,陈永凯,等. 基于电子舌检测快速判别不同物种畜禽骨蛋白肽[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 127-134.
LIU H, GUO Y J, CHEN Y K, et al. Rapid discrimination of bone peptides from different livestock and poultry species using electronic tongue[J]. Food Sci, 2022, 43(4): 127-134.
- [15] 梁慧,潘晓君,吕渭升,等. 不同基原藁本药材的指纹图谱建立及其化学计量学分析[J]. 中国药房, 2021, 32(19): 2358-2362.
LIANG H, PAN X J, LYU W S, et al. Fingerprint establishment of *Rhizoma Ligustici* from different origins and their chemometrics analysis[J]. China Pharm, 2021, 32(19): 2358-2362.
- [16] 白杰,高利利,张志勤,等. 电子舌技术的原理及在中药领域的应用[J]. 中南药学, 2021, 19(1): 78-84.
BAI J, GAO L L, ZHANG Z Q, et al. Application and related mechanism of electronic tongue technology in traditional Chinese medicine[J]. Cent South Pharm, 2021, 19(1): 78-84.

(收稿日期:2023-10-13 修回日期:2024-03-16)

(编辑:林 静)