

## 淫羊藿醇提物及其热裂解产物的挥发性成分研究\*

刘凌润<sup>1</sup>, 田时玲<sup>2</sup>, 吴昌健<sup>3</sup>, 陈蕊<sup>3</sup>, 叶远青<sup>3</sup>,  
秦艳华<sup>3</sup>, 殷志琦<sup>2</sup>, 曹毅<sup>3\*\*</sup>, 张健<sup>1\*\*</sup>

(1. 南京中医药大学第三临床医学院, 南京 210028; 2. 中国药科大学中药学院, 南京 210009;  
3. 江苏中烟工业有限责任公司, 南京 210019)

**摘要** 目的: 研究淫羊藿醇提物的香味成分以及对淫羊藿醇提物进行热裂解产物分析。方法: 采用电子鼻对淫羊藿醇提物挥发性成分进行分析; 通过正交试验优化淫羊藿醇提工艺; 采用热重-气质联用分析仪(TG-GC-MS), 模拟卷烟燃烧过程, 分析淫羊藿醇提物浸膏在氮气环境中的裂解产物, 并对其裂解机制进行推测。结果: 各浓度乙醇提取的淫羊藿醇提物共检测出 22 个挥发性成分, 60% 浓度的乙醇提取的淫羊藿优于其他浓度; 淫羊藿浸膏裂解产物在 150、300、450 °C 共鉴定出 78 个化合物, 包括醛、酮、醇、酚、呋喃类化合物及芳香族化合物等香气成分。结论: 淫羊藿醇提物本身含有许多香味挥发性成分, 在热裂解后产生大量酮、醇、酚、呋喃类等挥发性香气化合物。

**关键词:** 淫羊藿; 电子鼻; 挥发性成分; 正交实验; 热重-气质联用; 热裂解

中图分类号: R 917 文献标识码: A 文章编号: 0254-1793(2024)09-1485-12  
doi: 10.16155/j.0254-1793.2024-0136

## Study on the volatile components of *Epimedium* extract and its pyrolysis products\*

LIU Ling-run<sup>1</sup>, TIAN Shi-ling<sup>2</sup>, WU Chang-jian<sup>3</sup>, CHEN Rui<sup>3</sup>,  
YE Yuan-qing<sup>3</sup>, QIN Yan-hua<sup>3</sup>, YIN Zhi-qi<sup>2</sup>, CAO Yi<sup>3\*\*</sup>, ZHANG Jian<sup>1\*\*</sup>

(1. School of Third Clinical Medicine, Nanjing University of Chinese Medicine, Nanjing 210028, China; 2. School of Traditional Chinese Pharmacy, China Pharmaceutical University, Nanjing 210009, China; 3. China Tobacco Jiangsu Industrial Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

**Abstract Objective:** To investigate the flavor components of *Epimedium* extract and analyze pyrolysis products of the extracts from *Epimedium*. **Methods:** Ultra fast gas phase electronic nose was adopted to analyze volatile components in ethanol extracts of *Epimedium* and the alcohol extracting process of *Epimedium* was optimized by orthogonal experiment. *Epimedium* extract was pyrolysed to simulate cigarette smoking by TG-GC-MS. The lysates of *Epimedium* extract were analysed in a nitrogen environment, and the possible lysate mechanism of the products was reasonably speculated. **Results:** 22 volatile components were detected in the ethanol extracts of *Epimedium* at different concentrations. Concentration of *Epimedium* extracted with 60% ethanol was superior than others. Analyzing pyrolysis products of *Epimedium* extract, 78 compounds were identified at 150, 300 and 450 °C,

\* 江苏中烟工业有限责任公司科技项目(H202203)

\*\* 通信作者 张健 Tel:13815863503; E-mail: zhangjian@jsatcm.com

曹毅 Tel:13814037412; E-mail: caoyi@jszygs.com

第一作者 Tel:15751374177; E-mail: llr975234021llr@163.com

including aldehydes, ketones, alcohols, phenols, furans and benzene series. **Conclusion:** Ethanol extraction of *Epimedium* contains many aromatic volatile components. A large number of ketones, alcohols, phenols, furans and other volatile aroma compounds are produced after pyrolysis of *Epimedium* extract.

**Keywords:** *Epimedium*; e-nose; volatile components; orthogonal experiment; TG-GC-MS; pyrolysis

淫羊藿为小檗科植物淫羊藿(*Epimedium brevicornu* Maxim.)、箭叶淫羊藿(*Epimedium sagittatum* (Sieb. et Zucc.) Maxim.)、柔毛淫羊藿(*Epimedium pubescens* Maxim.)和朝鲜淫羊藿(*Epimedium koreanum* Nakai)<sup>[1]</sup>的干燥叶,味辛、甘、温,归肝、肾经。淫羊藿的药用历史悠久,具有补肾阳、强筋骨、祛风湿的功效。李时珍在《本草纲目》中记载其有“益精气、坚筋骨、补腰膝、强心力”之功效<sup>[2]</sup>。现代研究表明,淫羊藿含有黄酮类、多糖、木脂素类、生物碱和其他人体必需的微量元素等多种化学成分<sup>[3]</sup>,具有提高免疫功能、抗骨质疏松、抗氧化、抗炎、抗肿瘤、降血糖、抗抑郁等多种药理作用<sup>[4]</sup>。

淫羊藿具有广泛的生理活性功能,其相关制品在临床使用、药品开发以及保健品等领域不断拓宽。与淫羊藿相关的研发产品大多用于抗衰老、促进骨骼生长、预防骨质疏松以及增强自身免疫力<sup>[5]</sup>。比如具有增加骨密度功能的淫羊藿洋参胶囊、淫羊藿蜂蜜保健饮料<sup>[6]</sup>、益肾保健酒<sup>[7]</sup>等。此外,也有研究将淫羊藿粉末添加至卷烟滤嘴中制成淫羊藿复合滤嘴来降低烟气中的有害成分<sup>[8]</sup>,将淫羊藿多糖添加至烟丝中,改善烟气醇和度和香味<sup>[9]</sup>。然而,关于淫羊藿在卷烟中的应用研究仅限于淫羊藿减害增香的实际效果,未见对淫羊藿挥发性香味物质及热裂解研究的相关报道。

本研究通过电子鼻对不同乙醇浓度提取的淫羊藿醇提物的香味成分进行分析,用乙醇回流提取的方法,在单因素试验的基础上再利用正交试验进一步筛选出最佳提取工艺,同时利用热重-气质联用分析仪(TG-GC-MS)分析淫羊藿醇提物受热裂解后产生的致香成分,并对其裂解产物产生机制进行推测,以期为淫羊藿作为卷烟增香剂的实际应用提供理论支撑。

## 1 材料

### 1.1 实验材料与试剂

淫羊藿叶(批号 2105015)购自安徽亳州万珍中药饮片场;乙醇(分析纯,国药集团化学试剂有限公

司);超纯水(18.2 MΩ·cm,实验室纯水仪自制);正构烷烃 nC6 ~ nC16 混合标品(美国 RESTEK 有限公司)。

### 1.2 实验仪器

Heracles Neo 型超快速气相电子鼻(配备 PALRSI 型全自动顶空进样器、MXT-5 非极性毛细管柱、MXT-1701 中极性毛细管柱,Alpha Mos 公司);TGA/DSC 3+型热重分析仪、IST16 热分析联用系统(Mettler-Toledo 公司);6890N-5975C 型气相-质谱联用仪(Agilent 公司);XP205 电子分析天平(感量 0.00001g, Mettler-Toledo 公司);旋转蒸发仪(Buchi 公司);Milli-Q Reference 超纯水系统(Millipore 公司)。

## 2 方法

### 2.1 Heracles Neo 型超快速气相电子鼻分析

取干燥的淫羊藿叶,粉碎过 40 目筛,准确称取粉末 10 g,按料液比 1:15(g/mL)加入不同浓度(50%、60%、70%、80%、90%)的乙醇水溶液,在 85 °C 下水浴回流提取 2 h,提取 1 次,过滤,上清液备用。

进样条件:采用顶空进样实验,将样品及对照品按照表 1 的进样条件和参数进样检测。

### 2.2 淫羊藿醇提工艺考察

取干燥的淫羊藿叶,粉碎,称取粉末 5 g,依据电子鼻分析结果筛选乙醇水溶液的适宜浓度,固定乙醇水溶液浓度,固定提取温度 85 °C,提取时间 2 h,提取次数 1 次,考察不同料液比(1:9、1:12、1:15、1:18、1:21)对淫羊藿醇提物出膏率的影响;固定提取温度 85 °C,料液比 1:18,提取次数 1 次,考察不同提取时间(1、1.5、2、2.5、3 h)对淫羊藿醇提物出膏率的影响;固定提取温度 85 °C,料液比 1:18,提取时间 2.5 h,考察不同提取次数(1、2、3、4 次)对淫羊藿醇提物出膏率的影响。

精密量取过滤后的 5 mL 醇提液干燥至恒重(前后 2 次称量误差≤0.3 mg)的蒸发皿中,在水浴锅上挥干溶剂后,于 105 °C 烘箱中干燥 5 h,置干燥器中冷却 30 min,精密称量至恒重,平行 3 次,并按下列

表1 气相色谱电子鼻实验参数

Tab. 1 Experimental parameters of gas chromatography electronic nose

条件(condition)	参数(parameter)
样品瓶(sample bottle)	20 mL
样品量(sample size)/ $\mu\text{L}$	200
进样体积(injection volume)/ $\mu\text{L}$	2.500
孵化温度(incubation temperature)/ $^{\circ}\text{C}$	40
孵化时间(incubation time)/min	20
注射速度(injection speed)/ $\mu\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	125
注射持续时间(injection duration)/s	25
进样口温度(injection port temperature)/ $^{\circ}\text{C}$	200
进样口压力(injection port pressure)/kPa	10
捕集温度(capture temperature)/ $^{\circ}\text{C}$	40
捕集阱分流速度(capture trap diversion speed)/ $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$	10
捕集阱持续时间(capture duration)/s	30
捕集阱最终温度(capture trap final temperature)/ $^{\circ}\text{C}$	240
柱温初始炉温(column initial furnace temperature)/ $^{\circ}\text{C}$	40
初始温线(initial temperature line)/s	10
采集时间(collection time)/s	270
检测器温度(detector temperature)/ $^{\circ}\text{C}$	260
FID增益(FID gain)	12
程序升温(program heating)	$1^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 至 $80^{\circ}\text{C}$ ,保持20 s(to $80^{\circ}\text{C}$ at $1^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ ,keeping 20 s); $1^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 至 $250^{\circ}\text{C}$ ,保持30 s(to $250^{\circ}\text{C}$ at $1^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ ,keeping 30 s)

公式计算出膏率。

$$\text{出膏率} = \frac{\text{干浸膏总质量}}{\text{药材总质量}} \times 100\%$$

在单因素试验的基础上,以淫羊藿醇提物的出膏率为指标,选择料液比、提取时间、提取次数进行三因素三水平的正交试验,试验设计见表2。

### 2.3 热重分析

按确定的最佳工艺条件制备淫羊藿醇提物,减压浓缩至浸膏状,称取淫羊藿浸膏约5 mg于氧化铝坩埚中,使用热重分析仪对样品进行热重分析。裂解氛围: $\text{N}_2$ ;气体流量: $50 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ;裂解升温程序:初始温度 $40^{\circ}\text{C}$ ,以 $20^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升到 $1000^{\circ}\text{C}$ ,保持5 min。

### 2.4 TG-GC-MS分析

分析方法参考文献[10]。分别称取约5 mg淫羊藿醇提浸膏于坩埚中,使用IST16联用系统将TGA与GC-MS进行连接,选择单定量环阀进样模式,从TGA曲线中找出质量损失较大时对应的温度,将此温度下对应的时间设定为阀门打开捕集TG气体时间,定量环容积 $120 \mu\text{L}$ ,取样时间10 s,GC-MS采用外部设备直接进样模式,气质色谱条件如下:

表2 正交试验因素水平表

Tab. 2 Orthogonal experimental factor level table

水平 (level)	A 料液比 (solid-liquid ratio)/(g·mL <sup>-1</sup> )	B 提取时间 (extraction time)/h	C 提取次数 (extraction times)/次	D 空白列 (blank column)
1	1:15	2	1	1
2	1:18	2.5	2	2
3	1:21	3	3	3

色谱条件:DB-5MS毛细管色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25  $\mu\text{m}$ );进样口温度: $250^{\circ}\text{C}$ ;载气:He;流速: $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ;分流比:2:1;升温程序:初始温度 $40^{\circ}\text{C}$ ,保持3 min,以 $10^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升至 $260^{\circ}\text{C}$ ,保持10 min。

质谱条件:传输线温度 $280^{\circ}\text{C}$ ,MS电离方式EI,电离能量70 eV;离子源温度 $230^{\circ}\text{C}$ ,四极杆温度 $150^{\circ}\text{C}$ ,扫描范围35~550 amu,溶剂延迟1.8 min。

### 2.5 数据处理

根据Kovats保留指数定性,在Arochembase数据库中对电子鼻数据进行定性分析。利用安捷伦

GC-MS谱图处理软件Enhanced Data Analysis,通过NIST 17.L质谱数据库进行化合物检索定性,保留正向匹配度(Match)和反向匹配度(R.Match)大于800的化合物,采用峰面积归一化法对裂解产物进行半定量分析。通过Excel对热重分析数据和气质TIC数据进行处理,运用Origin 2022、ChemDraw20.0进行作图。

### 3 结果与分析

#### 3.1 基于Heracles Neo超快速气相电子鼻分析淫羊藿醇提物香气成分

3.1.1 淫羊藿醇提物挥发性成分定性分析 基于Heracles Neo超快速气相电子鼻分析给出淫羊藿醇提物所含有的化合物及气味信息,其结果见表3。

表 3 淫羊藿醇提取物中的主要化合物  
Tab.3 Main compounds in *Epimedium* extract

序号 (No.)	RI/ MXT-5	RI/ MXT-1701	化合物 (compound)	气味感官描述 (smell sensory description)	A	B	C	D	E
1	405	459	甲酸甲酯(methyl formate)	/	-	+	-	-	-
2	419	459	三甲胺(trimethyl amine)	辛辣(piquancy)	+	+	+	+	+
3	479	630	2-甲基-2-丙醇(tert-butanol)	/	-	-	-	-	+
4	488	519	戊烷(pentane)	薄荷香(mint)	-	+	-	-	-
5	551	670	正丙醇(1-propanol)	酒香,辛辣(aroma, piquancy)	-	+	-	-	-
6	614	681	乙酸乙酯(ethyl acetate)	焦糖甜香(caramel sweet)	-	+	-	-	-
7	632	691	丙酸甲酯(methyl propionate)	果香(fruity)	-	+	-	-	-
8	726	769	正丁硫醇(butanethiol)	/	-	+	-	-	-
9	799	867	丁酸乙酯(ethyl butyrate)	焦糖甜香(caramel sweet)	-	+	-	-	-
10	816	815	反式-2-辛烯(trans-2-octene)	/	-	-	-	-	+
11	982	1 029	月桂烯(myrcene)	柠檬气息,木香(lemony, costus)	-	+	-	-	-
12	1 143	1 182	反式-玫瑰氧化物(trans-rose oxide)	玫瑰花香(rose)	+	-	-	+	+
13	1 144	1 295	3-羟基-2-甲基-4-吡喃酮(3-hydroxy-2-methyl-4-pyrone)	焦糖甜香(caramel sweet)	-	-	+	-	-
14	1 258	1 395	橙花醛(neral)	柠檬气息(lemony)	-	+	-	-	-
15	1 316	1 295	十三烷(tridecane)	桔子香气(orange)	-	-	-	+	+
16	1 420	1 626	丁位壬内酯(deltanonalactone)	椰子香(coconut)	+	+	+	+	+
17	1 500	1 500	十五烷(pentadecane)	茶香(tea)	-	-	+	-	-
18	1 500	1 644	肉桂酸乙酯(ethyl cinnamate)	肉桂,蜂蜜(cinnamon, honey)	-	+	-	-	-
19	1 524	1 689	肉豆蔻醚(myristicin)	辛辣,木香(piquancy, costus)	+	-	-	+	+
20	1 525	1 644	桂酸异丙酯(cinnamic acid, isopropyl ester)	琥珀香,果香(amber, fruity)	-	+	-	-	-
21	1 599	1 599	正十六烷(hexadecane)	果香(fruity)	-	-	+	-	-
22	1 789	1 877	十四酸乙酯(ethyl myristate)	鸢尾油香气(iris oil)	-	+	-	-	-

注(note):“+”表示检出成分(indicates the detected component);“-”表示未检出成分(indicates the component is not detected);A~E分别代表50%~90%乙醇提取的淫羊藿(represent 50%~90% ethanol extraction of *Epimedium*)

表 3 结果表明,各浓度乙醇提取的淫羊藿醇提取物共检测出 22 个化合物,这 22 个化合物大多为香味成分,如乙酸乙酯具有焦糖香甜气息,月桂烯具有柠檬香气。50%~90%各浓度乙醇提取的淫羊藿在 22 个化合物中分别包含 4、14、5、5、7 个化合物,60%乙醇提取的淫羊藿包含的化合物远远超过其他浓度乙醇提取的淫羊藿,因此极易将 60%乙醇提取的淫羊藿与其他浓度进行区分。而 60%醇提取物中所含化合物大都具有香味特征,如乙酸乙酯、丁酸乙酯具有焦糖甜香,月桂烯、橙花醛具有柠檬香气等。

**3.1.2 主成分分析** 将通过 Heracles Neo 超快速气相色谱峰面积为变量进行主成分分析,乙醇浓度分别为 50% (YYH50)、60% (YYH60)、70% (YYH70)、80% (YYH80)、90% (YYH90),结果如图 1 所示。横、纵坐标分别表示通过主成分分析(PCA)转换得

到的第 1 主成分(PC1)和第 2 主成分(PC2)的贡献率,PC1 与 PC2 累积贡献率为 99.9%,能够较好地反映所测样品中使用不同乙醇浓度提取的淫羊藿。

50%乙醇浓度提取完全包含于 70%乙醇浓度提取,说明两者成分比较相似。使用 60%提取的淫羊藿可以与其他乙醇浓度提取的淫羊藿进行明显区分,说明超快速气相电子鼻可以将 60%乙醇浓度提取与其他乙醇浓度提取进行区分。

### 3.2 淫羊藿醇提工艺优化

**3.2.1 单因素实验结果** 由图 2-A 可知随着料液比的增加,淫羊藿醇提取物出膏率呈现先增加后减小的趋势。当料液比达到 1:18 时,出膏率达最大,再加大料液比出膏率反而下降。其原因可能是溶剂量超过一定量,对于大分子量成分的溶出速度变慢,小分子化合物溶出速度加快,导致整体出膏率下降。综合考虑,选择料液比 1:15、1:18、1:21 进行正交试验。

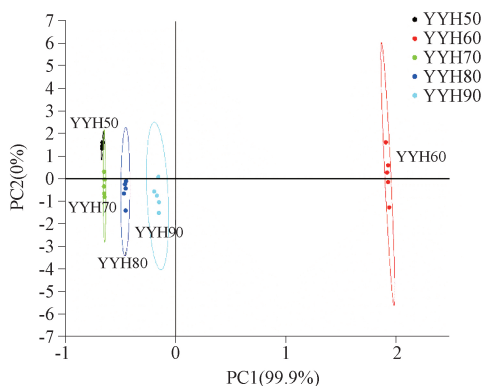


图1 不同乙醇浓度提取的淫羊藿 PCA 图

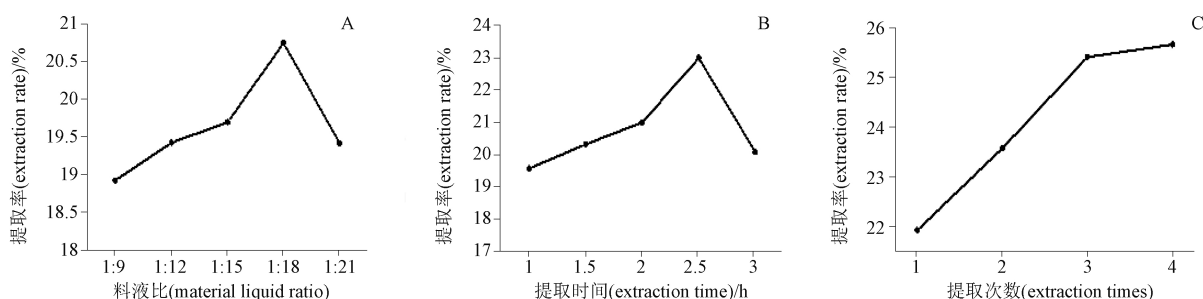
Fig. 1 PCA plot of *Epimedii* extracted with ethanol with different concentrations

图2 料液比(A)、提取时间(B)、提取次数(C)对淫羊藿醇提取物出膏率的影响

Fig. 2 Effects of material liquid ratio(A), extraction time(B) and extraction times(C) on the extraction rate of *Epimedii* extract

**3.2.2 正交实验结果** 根据单因素实验的结果,选取料液比、提取时间和提取次数进行三因素三水平的正交试验,每组试验平行测定3次,正交试验表与结果见表4。

由表4极差结果分析,所考察的各因素对淫羊藿醇提取物出膏率影响的主次顺序为提取次数、料液比、提取时间。正交试验结果表明,淫羊藿醇提工艺的最佳组合为 $A_3B_2C_3$ ,即:料液比1:21,提取时间2.5 h,提取次数3次。方差分析结果表明(表5),提取次数对淫羊藿醇提取物出膏率具有极显著影响( $P < 0.05$ ),料液比( $P > 0.05$ )和提取时间( $P > 0.05$ )对醇提取物出膏率影响差异不显著,这与极差分析的结果一致。

**3.2.3 工艺验证** 为验证 $L_9(3^4)$ 正交试验优化淫羊藿醇提工艺的可靠性,分别称取3份淫羊藿药材各150 g,按上述最佳提取工艺条件进行提取,测定淫羊藿出膏率,验证工艺的可行性。测定淫羊藿醇提取物出膏率为24.76%,RSD为0.54%,实验结果表明,本实验优选的淫羊藿醇提工艺稳定可靠,提取率较高。

由图2-B可知,随着提物时间的增加,淫羊藿醇提取物出膏率逐渐增加。当提取时间大于2.5 h,出膏率反而下降,原因可能是随着提取时间增加,过程中可能会有物质析出,在过滤后滤出导致出膏率下降。故选择提取时间2、2.5、3 h进行正交试验。

由图2-C可以看出,提取次数越多,淫羊藿醇提取物出膏率越高,但是提取4次时与提取3次相比增幅不明显。说明提取3次时,提取的物质成分就已接近全部溶出。随着提取次数的增加,时间成本增加,因此提取次数选取3次为最佳,故选择提取次数1、2、3次进行正交试验。

### 3.3 淫羊藿浸膏的热失重分析

由60%乙醇水溶液提取所得的淫羊藿浸膏的TG曲线和DTG曲线如图3,由图可知,淫羊藿浸膏在热裂解过程中出现了3个明显的失重区间。

第一阶段,从初始温度到120℃,推测为淫羊藿浸膏内部含有的游离水和结合水蒸发及小部分易挥发的成分挥发的过程。

第二阶段,从120℃开始一直持续到500℃,是淫羊藿浸膏的主要质量损失阶段。伴随着浸膏中挥发性成分挥发、各种化学反应的发生和化学键的断裂,产生大量的挥发性成分。在这个失重区间,发现了3个失重速率较大的温度点,分别在150、300、450℃。

第三阶段,主要是残渣的碳化过程,当温度达到800℃时,淫羊藿浸膏已失重70.87%。

### 3.4 不同热裂解温度对淫羊藿浸膏裂解产物的影响

淫羊藿浸膏在150、300、450℃下的裂解产物总离子流图见图4-A、B、C。所得裂解产物的质谱图经与NIST谱库的标准质谱图比对,分别鉴定出17、34、41个化合物,详细结果见表7。

表 4 正交实验因素水平及实验结果

Tab. 4 Factors levels and results of the orthogonal experiment

序号 (No.)	A 料液比 (solid - liquid ratio)	B 提取时间 (extraction time)/h	C 提取次数 (extraction times)	出膏率 (paste yield)/%
1	1	1	1	18.01
2	1	2	2	21.00
3	1	3	3	23.13
4	2	1	2	21.95
5	2	2	3	24.20
6	2	3	1	19.78
7	3	1	3	24.63
8	3	2	1	20.17
9	3	3	2	22.05
K1	62.14	64.59	57.95	
K2	65.93	65.37	65.00	
K3	66.85	64.96	71.97	
k1	20.71	21.53	19.32	
k2	21.98	21.79	21.67	
k3	22.28	21.65	23.99	
R	1.57	0.26	4.67	

表 5 淫羊藿醇提物方差分析

Tab. 5 Analysis of variance of ethanol extract of *Epimedium*

方差来源 (source of variance)	离差平方和 (sum of squares of deviation)	自由度 (degree of freedom)	均方 (mean square)	F	P
A	4.15	2.00	2.08	15.90	0.06
B	0.10	2.00	0.05	0.39	0.72
C	32.73	2.00	16.36	125.28	0.01
D(误差)	0.26	2.00	0.13		

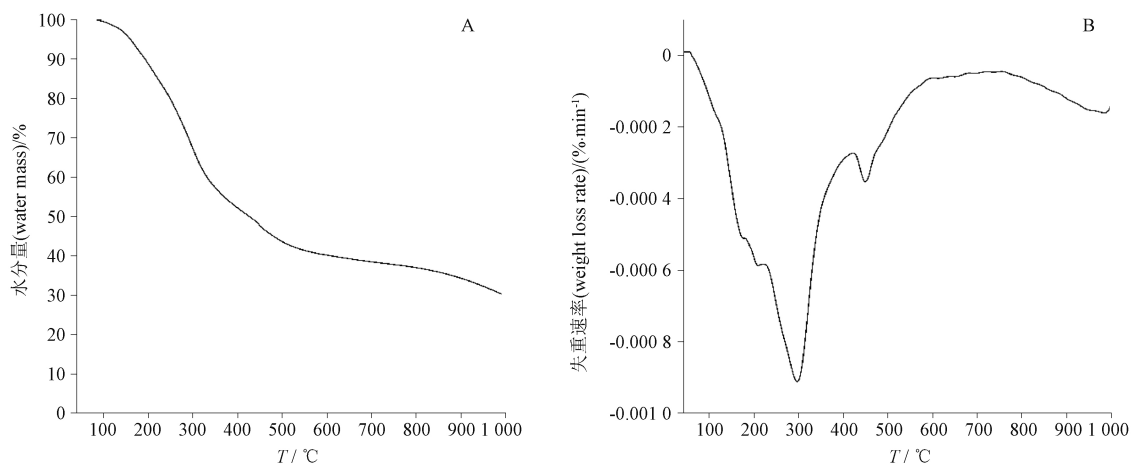
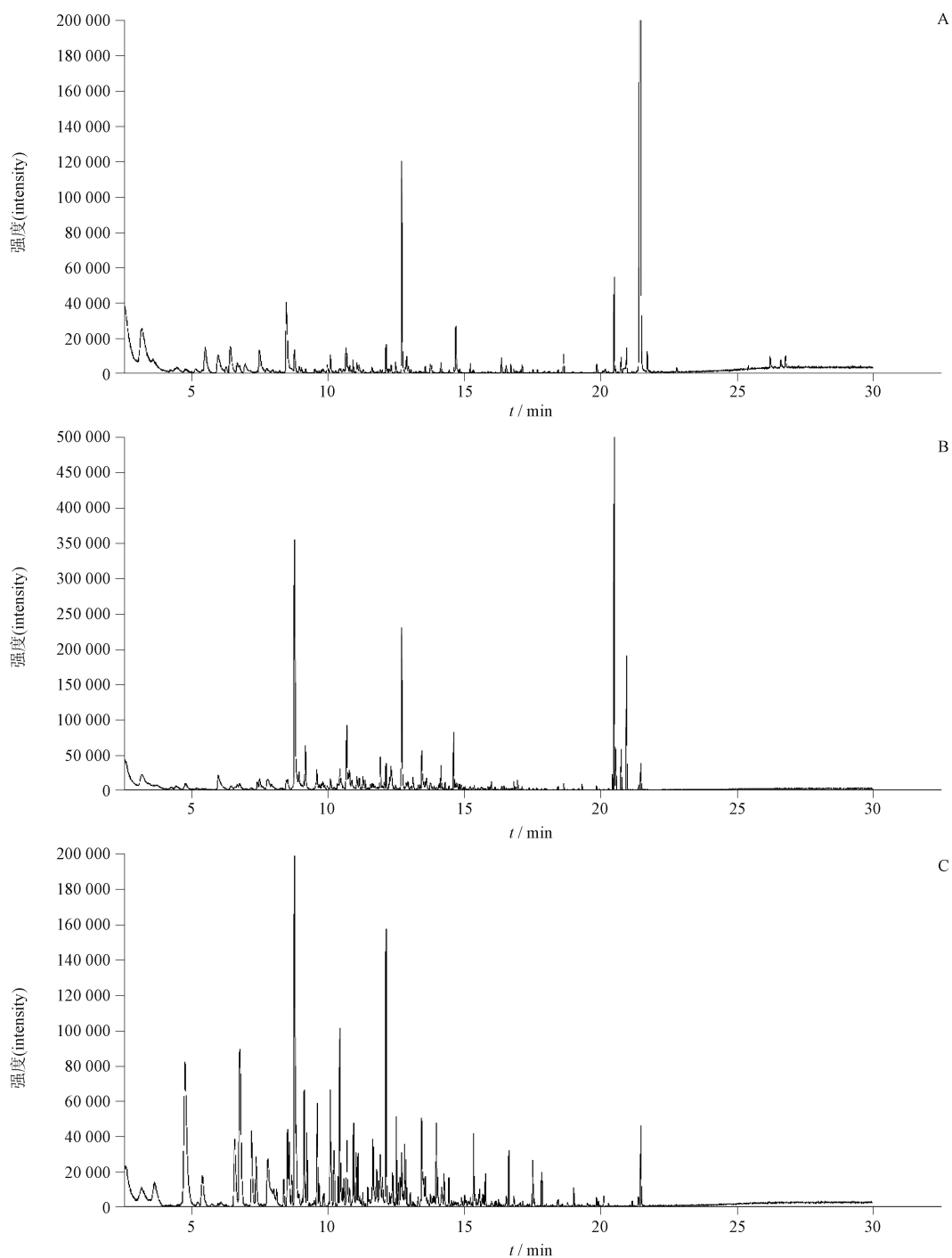


图 3 淫羊藿浸膏的 TG 曲线(A)和 DTG 曲线(B)

Fig. 3 TG(A) and DTG(B) curves of *Epimedium* extract



A. 150 °C B. 300 °C C. 450 °C

图 4 不同温度下淫羊藿浸膏的热裂解产物总离子流图

Fig. 4 TG – GC – MS TICs of *Epimedium* extract at 150, 300 and 450 °C respectively

由图 4 可知,随着裂解温度的提高,裂解产物越来越复杂,从 150 °C 时的 17 个化合物增加至 450 °C 的 41 个化合物(表 6)。低温条件下,淫羊藿浸膏的主要裂解产物是呋喃类和醛酮类化合物。在 150 °C 时,主要

裂解产物为糠醇、四氢吡喃酮、丙酮醇、丙二酸、5 - 甲基呋喃醛、2, 3 - 二氢苯并呋喃等物质。300 °C 时主要增加了甲乙酐、2 - 环戊烯酮、苯酚、愈创木酚、对苯二酚、紫丁香醇、1,2 - 环己二酮等酮类酚类以及部分杂

环类化合物。随着温度上升,在较高温度下,热裂解更加剧烈,裂解产物主要为酮类、酚类、苯及其同系化合物。当温度升高至 450 °C 时,芳香族类物质明显增多,

如甲苯、乙苯、对二甲苯、苯醌、间乙基甲苯、正丙苯、1, 2, 4-三甲基苯等,此外,在 450 °C 时,开始检测到萘类等稠合度较高的化合物。

表 6 不同温度下的淫羊藿浸膏的热裂解产物

Tab. 6 Pyrolysis products of Epimedium extract at different temperature

保留时间 (retention time)/min	化合物 (compound)	物质数字 识别号 (CAS)	正向 匹配度 (Match)	反向 匹配度 (R. Match)	相对含量 (relative content)/%		
					150 °C	300 °C	450 °C
2.075	环丙基甲醇(cyclopropyl carbinol)	2516-33-8	814	845	/	/	7.639
2.522	丙二酸(propanedioic acid)	141-82-2	812	832	13.289	/	/
2.534	甲乙酐(anhydride with formic acid acetic acid)	2258-42-6	842	855	/	4.632	/
3.169	丙酮醇(1-hydroxy 2-propanone)	116-09-6	834	864	5.366	1.160	/
4.751	甲苯(toluene)	108-88-3	933	933	/	/	9.130
5.387	正辛烷(1-octane)	111-65-9	835	838	/	/	1.403
5.492	四氢吡喃酮(4H-pyran-4-one, tetrahydro-)	29943-42-8	800	800	2.036	/	/
5.975	2-环戊烯酮(2-cyclopenten-1-one)	930-30-3	813	835	/	2.176	/
6.410	糠醇(2-furanmethanol)	98-00-0	901	932	2.257	/	/
6.581	乙苯(ethylbenzene)	100-41-4	936	954	/	/	2.404
6.763	对二甲苯(1,4-xylene)	106-42-3	953	962	/	/	6.546
7.363	壬烷(n-nonane nonane nonyl hydride)	111-84-2	912	925	/	/	1.311
7.398	甲基环戊烯醇酮(2-methyl-2-cyclopenten-1-one)	1120-73-6	842	856	/	0.554	/
7.492	4-羟基丁酸内酯(butyrolactone)	96-48-0	854	874	1.503	/	/
7.775	苯醌(1,4-benzoquinone)	106-51-4	817	836	/	1.532	2.324
8.375	正丙苯(propyl-benzene)	103-65-1	915	936	/	/	0.628
8.475	5-甲基呋喃醛(5-methyl-2-furancarboxaldehyde)	620-02-0	914	943	4.094%	/	/
8.510	间乙基甲苯(1-ethyl-3-methyl-benzene)	620-14-4	904	924	/	/	1.535
8.575	4-乙基甲苯(1-ethyl-4-methyl-benzene)	622-96-8	915	937	/	/	1.274
8.920	苯酚(phenol)	108-95-2	861	886	0.839	14.043	6.869
9.122	均三甲苯(mesitylene)	108-67-8	924	936	/	/	2.388
9.175	1,2-环己二酮(1,2-cyclohexanedione)	765-87-7	912	949	/	2.275	/
9.228	癸烷(decane)	124-18-5	916	936	/	/	1.124
9.592	3-甲基环戊烷-1,2-二酮(3-methyl-1,2-cyclopentanedione)	765-70-8	868	877	/	0.915	/
9.604	1,2,4-三甲基苯(1,2,4-trimethylbenzene)	95-63-6	840	840	/	/	1.970
9.681	4-异丙基甲苯(4-isopropyltoluene)	99-87-6	864	869	/	/	0.399
10.086	2-甲酚(2-methylpheno)	95-48-7	922	945	/	/	2.301
10.092	4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)呋喃酮(furaneol)	3658-77-3	883	898	0.526	/	/
10.222	1,3-二乙基苯(1,3-diethylbenzene)	141-93-5	820	836	/	/	1.079
10.375	1-甲基-2-丙基苯(1-methyl-2-propyl-benzene)	1074-17-5	876	889	/	/	0.490
10.463	对甲基苯酚(p-cresol)	106-44-5	823	853	/	1.056	3.051
10.545	4-乙基邻二甲苯(4-ethyl-1,2-dimethyl-benzene)	934-80-5	803	826	/	/	0.300
10.592	1,3-二甲苯-4-乙基苯(1-ethyl-2,4-dimethyl-benzene)	874-41-9	868	887	/	/	0.392
10.686	愈创木酚(guaiacol)	90-05-1	889	900	/	2.710	/
10.921	3,7-二甲基-1,6-辛二烯-3-醇甲酸酯(1,6-octadien-3-ol,3,7-dimethyl-formate)	115-99-1	835	857	0.292%	/	/
10.933	十一烷(undecane)	1120-21-4	905	921	/	/	1.413
11.033	2,6-二甲基苯酚(2,6-dimethylphenol)	576-26-1	825	725	/	/	1.044

表 6(续)

保留时间 (retention time)/min	化合物 (compound)	物质数字 识别号 (CAS)	正向 匹配度 (Match)	反向 匹配度 (R. Match)	相对含量 (relative content)/%		
					150 °C	300 °C	450 °C
11.063	麦芽醇(maltol)	118-71-8	809	849	/	0.629	/
11.104	2-甲基苯并呋喃(2-methylbenzofuran)	4265-25-2	905	932	/	/	0.840
11.286	1,2,4,5-四甲苯(1,2,4,5-tetramethylbenzene)	95-93-2	910	921	/	/	0.222
11.292	5-乙酰基二氢-2(3H)-呋喃酮[5-acetyldihydro-2(3H)-furanone]	29393-32-6	876	889	/	0.677	/
11.651	2,4-二甲基苯酚(2,4-dimethylphenol)	105-67-9	862	894	/	/	1.653
11.921	对乙基苯酚( <i>p</i> -ethylphenol)	123-07-9	876	888	/	1.061	0.283
12.127	3-薹烯(3-carene)	13466-78-9	801	821	/	0.813	3.703
12.133	丁二酸二乙酯(butanedioic acid diethyl ester)	123-25-1	936	952	0.646	/	/
12.316	邻苯二酚(pyrocatechol)	120-80-9	826	845	/	1.438	/
12.480	乙酸烯丙酯(allyl acetate)	591-87-7	843	857	0.306	/	/
12.510	十二烷(dodecane)	112-40-3	862	885	/	/	1.101
12.651	5,6-二甲基苯并咪唑(5,6-dimethylbenzimidazole)	582-60-5	814	846	/	/	0.567
12.710	2,3-二氢苯并呋喃(2,3-dihydro-benzofuran)	496-16-2	844	854	5.341	6.513	/
12.810	4,7-二甲基苯并呋喃(4,7-dimethyl-benzofuran)	28715-26-6	854	874	/	/	0.853
12.886	3,7-二甲基-7-辛烯醇[3,7-dimethyl,(s)-7-octen-1-ol]	6812-78-8	822	846	0.531	/	/
13.021	4-乙基苯甲醚(1-ethyl-4-methoxy-benzene)	1515-95-3	819	847	/	/	0.300
13.380	3-甲基-4-羟基苯甲醛(3-methyl-4-hydroxy-benzaldehyde)	57295-30-4	804	837	/	0.173	/
13.439	对苯二酚(hydroquinone)	123-31-9	886	897	/	2.183	1.831
13.610	3,4-二羟基苯乙酮(3,4-dihydroxyacetophenone)	1197-09-7	840	858	/	0.405	/
13.974	正十三烷(tridecane)	629-50-5	833	855	/	/	1.017
14.027	2-甲基萘(2-methylnaphthalene)	91-57-6	860	876	/	/	0.441
14.139	对乙烯基愈疮木酚(2-methoxy-4-vinylphenol)	7786-61-0	843	856	0.259	0.874	/
14.298	2,6-二羟基苯甲酸(2,6-dihydroxybenzoic acid)	303-07-1	840	862	/	0.307	/
14.445	甲酸茴香酯(1-formate,4-methoxy-benzenemethanol)	122-91-8	807	821	/	0.169	/
14.615	紫丁香醇(2,6-dimethoxyphenol)	91.10.1	927	945	/	1.968	/
14.892	对丁基苯乙酮[1-(4-butylphenyl)ethan-1-one]	37920-25-5	851	875	/	0.202	/
15.345	十四烷(tetradecane)	629-59-4	886	890	/	/	0.830
15.557	1,5-二甲基萘(1,5-dimethylnaphthalene)	571-61-9	817	847	/	/	0.360
15.780	2,6-二甲基萘(2,6-dimethylnaphthalene)	581-42-0	901	934	/	/	0.428
15.998	异丁香酚[2-methoxy-4-(1-propenyl)phenol]	97-54-1	853	874	/	0.317%	/
16.368	3,7-二甲基-6-辛烯醇丁酸酯(citronellyl butyrate)	141-16-2	813	835	0.431	/	/
16.639	十五烷(pentadecane)	629-62-9	902	938	/	/	0.640
16.815	2,2-二(2-呋喃基)丙烷[2,2'-(1-methylethylidene)bis-furan]	17920-88-6	852	868	/	0.270%	/
16.956	4-羟基-3-甲氧基苯丙酮[1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-2-propanone]	2503-46-0	883	899	/	0.351	/
17.509	2,3,5-三甲基萘(2,3,5-trimethyl-naphthalene)	2245-38-7	925	937	/	/	0.625
18.650	β-桉叶醇(beta-eudesmol)	473-15-4	813	829	0.416	0.351	/
19.856	安息香酸苄酯(benzyl benzoate)	120-51-4	854	879	/	0.139	/
20.503	新植二烯(neophytadiene)	504-96-1	917	923	2.031	12.625	/
20.568	3,7,11,15-四甲基-2-十六碳烯(3,7,11,15-tetramethyl-2-hexadecene)	2437-93-6	899	899	/	1.277	/
20.956	叶绿醇(3,7,11,15-tetramethyl-2-hexadecen-1-ol)	7541-49-3	900	905	/	4.463	/
21.392	苯乙酸苯乙酯(phenethyl phenylacetate)	102-20-5	869	889	/	/	0.154

这些结果显示,随着温度不断升高,裂解的复杂程度也随之升高,由小分子的醛酮类化合物逐步向杂环类芳香族化合物过渡,当温度升高至一定程度时,这些芳香烃进一步发生聚合和缩合反应,形成更为稳定的稠环芳烃,符合化学反应的一般规则<sup>[11]</sup>。

### 3.5 裂解产物中的致香成分

由表 7 可知,裂解产物包括醇、酚、酮、醛、酸、杂环类、苯及其同系物等多种化合物,其中绝大部分物质都具有特殊的香味,可以提升卷烟的风味和抽吸品质。

醇类和有机酸类物质在卷烟中起到保润、改善烟香的作用,在高温环境中可以产生果甜香气味<sup>[12]</sup>,调节主流烟气中的 pH,减少对喉部的刺激,提高感官舒适度<sup>[13]</sup>。

酚类化合物在高温下可以产生丰富的药草香气味,是烟丝和主流烟气中常见的加香类物质<sup>[14]</sup>。如邻甲酚可以增加烟气、丰、甜润的特征<sup>[15]</sup>,愈创木酚具有烟熏、辛香、药香香气<sup>[16]</sup>,异丁香酚具有柔和甜清的辛香<sup>[18]</sup>。

酮类物质能够产生花香和甜香<sup>[20]</sup>,协调香气,掩盖杂气从而改善卷烟抽吸品质,如苯乙酮具有山楂香气<sup>[22]</sup>,2-甲基四氢呋喃-3-酮具有焦糖及奶油气味<sup>[16]</sup>。

杂环类化合物,如糠醛、吡啶、糠醇、2-甲基呋喃、2,3-二氢苯并呋喃、四氢吡喃酮、5-羟甲基糠醛等化合物是卷烟主流烟气中的主要香味物质,这类物质在卷烟中可以增强烟气的烤烟香及焦糖香<sup>[23]</sup>,特别是糠醛的加香效果最为显著。

### 3.6 裂解产物生成机制

在不同裂解温度下,淫羊藿浸膏产生了大量裂解产物包括醇、酚、酮、醛、酸、杂环类、苯及其同系物等多种化合物,其中含量相对较高的有糠醛、愈创木酚、糠醇、3-糠醛、2,3-二氢苯并呋喃、苯酚、对苯二酚、2-环戊烯酮、2,4-二甲基苯酚、羟基丙酮、对二甲苯等物质,主要为醛酮类化合物、呋喃类化合物以及芳香族化合物。

酚类化合物主要是由于木脂素的降解,随着温度不断上升,木脂素间各种化合建如  $\beta-5'$ ,  $\beta-\beta$  等键断裂产生各种中间体,中间体再通过脱水、去甲基化、去甲氧基化、缩合重排产生各种酚类化合物,如苯酚、对甲基苯酚、2,3-二氢苯并呋喃、愈创木酚、2-甲酚等<sup>[25]</sup>。

醛酮类化合物主要是由半纤维素类裂解产生,随着温度的升高,经过环裂形成开口链中间体再以不同排列方式环化形成醛酮类化合物<sup>[25]</sup>。

呋喃类化合物主要由纤维素类物质裂解产生,其中,淫羊藿浸膏在裂解后产生糠醛相对较多,推测糠醛才是产生烤烟香和焦糖香的主要物质。根据 Chu 等<sup>[26]</sup>的研究,糠醛的产生主要有两种途径:直接生成途径和间接生成途径。热裂解生成糠醛反应较为复杂,主要是在高温下发生 1,4-糖苷键的断裂,随后经过一系列脱水重排等步骤生成各种复杂中间体,最终形成糠醛。

芳香族化合物的产生则是随着裂解温度的升高,裂解的复杂程度也随之升高,由小分子的醛酮类化合物逐步向芳香族化合物过渡,裂解产物中苯环自由基或较短的芳基自由基进一步缩合聚合形成萘等稠环化合物,这与本文的实验结果相似。

综合上述分析推测,在 150~300 °C 时,淫羊藿提取物中的纤维素、半纤维素类物质由于发生糖苷键的断裂和脱水重排形成了大量的醛酮类、呋喃类化合物,而淫羊藿中的一些木脂素类化合物以及含脂肪链等基团的化合物易产生苯酚、对苯二酚等化合物,这部分裂解成分在 450 °C 时又通过缩合聚合形成萘等稠环芳烃。

## 4 讨论

电子鼻技术具有响应时间短、检测速度快、重复性好、操作简单等优点,可用于食品的质量监控,香味物质的评价分析等<sup>[27]</sup>。本研究首次利用电子鼻分析不同浓度乙醇提取的淫羊藿醇提物的挥发性香味成分差异,60% 浓度乙醇提取所得的淫羊藿提取物所含香味成分显著多于其他浓度组,如月桂烯、橙花醛等具有柠檬香气,乙酸乙酯等具有焦糖气息。这些物质多数均已文献报道能够明显改善卷烟抽吸品质。

基于将淫羊藿醇提物作为卷烟的香味添加剂的目的,醇提液乙醇浓度不宜过高,因此先通过电子鼻技术确定提取淫羊藿的乙醇浓度,再对其余因素进行优化,这与杨茹等<sup>[28]</sup>的淫羊藿醇提工艺将乙醇浓度作为单因素进行工艺优化有所不同。根据电子鼻分析的结果,以 60% 浓度的乙醇为标准,再进行单因素实验和正交实验筛选出最佳提取工艺,最终确定最佳提取工艺条件。先确定主要因素再进行传统工艺优化的方式为中药材投入于烟草行业的应用提供

了一定程度的理论基础。

TG-GC-MS 常用于模拟燃烧过程挥发性物质的释放规律。以往有关中草药热裂解研究均在固定温度下进行,如闫克玉、于静等<sup>[29]</sup>分别在 300、600、900 °C 下裂解金银花挥发油,然而卷烟燃烧是 1 个连续动态的过程,固定温度的热裂解无法真实反映添加物在卷烟中的实际变化。本研究通过 TG-GC-MS 所得 TG 曲线、DTG 曲线分析淫羊藿醇提物失重速率变化,分析得出淫羊藿醇提物在高温条件下裂解反应的关键温度节点为 150、300、450 °C,再分析淫羊藿浸膏在这 3 个温度下的挥发性香味成分,其结果更接近于实际情况。

本研究仍存在一些不足之处,一是虽然对淫羊藿热裂解产物产生机制进行了推测,但并未将电子鼻所得的淫羊藿醇提物热裂解前的香味成分与热裂解后的产物联系起来,二是对淫羊藿醇提物的热裂解是单独进行的,当淫羊藿醇提物添加于卷烟烟丝,在卷烟燃烧过程中,或有可能与烟丝中的成分发生反应继而产生新物质,这有待于进一步深入研究。

综上所述,淫羊藿香味物质中含有较多致香化学成分,是一种理想的天然烟用原料。本研究通过对淫羊藿醇提物挥发性香味成分的电子鼻分析以及对淫羊藿醇提物热裂解产物的研究及其产物产生的机制推测,为其在卷烟中的应用提供一定的理论依据。

#### 参考文献

- [1] 中华人民共和国药典 2020 年版. 一部[S]. 2020: 327  
ChP 2020. Vol I [S]. 2020: 327
- [2] 熊平源, 郭凯文, 唐朝辉, 等. 淫羊藿对小鼠免疫功能的调节作用[J]. 数理医药学杂志, 2007, 20(1): 50  
XIONG PY, GUO KW, TANG CH, et al. The adjustive effect of the *Epimedium koreanum* Nakai on the immune fuction in mice [J]. J Math Med, 2007, 20(1): 50
- [3] 李莉, 王嘉瑞, 王晶, 等. 淫羊藿的主要化学成分、药理作用研究进展及质量标志物的预测分析[J]. 中华中医药学刊, 2023, 41(11): 143  
LI L, WANG JR, WANG J, et al. Research progress on main chemical components and pharmacological effects of Yinyanghuo (*Epimedium brevicornu* Maxim.) and predictive ananalysis on its quality marker[J]. Chin Arch Tradit Chin Med, 2023, 41(11): 143
- [4] LI HF, GUAN XY, YANG WZ, et al. Antioxidant flavonoids from *Epimedium wushanense*[J]. Fitoterapia, 2011, 83(1): 44
- [5] 黄岩, 张钧. 淫羊藿的发展现状、存在问题及建议[J]. 河南农业, 2022(28): 55
- HUANG Y, ZHANG J. The development status, existing problems, and suggestions of *Epimedium* [J]. Agric Henan, 2022 (28): 55
- [6] 侯丽丽, 陈洪海. 淫羊藿蜂蜜保健饮料的研制[J]. 农产品加工(学刊), 2014(6): 12  
HOU LL, CHEN HH. Development of *Epimedium koreanum* Nakai and honey health beverage [J]. Acad Period Farm Prod Process, 2014(11): 12
- [7] 陈彦和, 胡杨, 李先芝, 等. 高效液相色谱法同时测定益肾保健酒中 9 种有效成分[J]. 化学分析计量, 2023, 32(8): 80  
CHEN YH, HU Y, LI XZ, et al. Simultaneous determination of 9 active components in Yishen health wine by HPLC [J]. Chem Anal Meter, 2023, 32(8): 80
- [8] 李晓, 姚二民, 晋照普, 等. 淫羊藿滤嘴降低卷烟烟气中的有害成分研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(8): 87  
LI X, YAO EM, JIN ZP, et al. Study on reducing the harmful constituents of cigarette smoking by *Epimedium* herb filter [J]. Sci Technol Food Ind, 2011, 32(8): 87
- [9] 彭国岗, 龚荣岗, 白晓莉, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 萃取淫羊藿多糖及其在卷烟中的应用[J]. 食品工业, 2014, 35(5): 65  
PENG GG, GONG RG, BAI XL, et al. The extraction of polysaccharides from *Epimedium sagittatum* (S. et Z.) Maxim. with supercritical CO<sub>2</sub> and its application in cigarette [J]. Food Ind, 2014, 35(5): 65
- [10] 朱龙杰, 曹毅, 秦艳华, 等. 甘油施加比例对加热卷烟薄片热性能及热解产物的影响[J]. 中国烟草学报, 2022, 28(5): 8  
ZHU LJ, CAO Y, QIN YH, et al. Effect of glycerol addition ratio on thermal properties and pyrolysis products of tobacco sheet of heated cigarette [J]. Acta Tab Sin, 2022, 28(5): 8
- [11] 罗昌荣, 赵震毅, 刘涵刚, 等. β-胡萝卜素裂解温度对其裂解产物的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2003, 22(3): 67  
LUO CR, ZHAO ZY, LIU HG, et al. Effect of pyrolytic temperature of β-carotene on the pyrolytic product [J]. J Food Sci Biotechnol, 2003, 22(3): 67
- [12] 殷全玉, 王霞, 杨铁钊, 等. 叶面分泌物和中性香气物质在不同烤烟品种(系)和地区间的变化及其与常规化学成分的关系[J]. 中国烟草学报, 2010, 16(3): 17  
YIN QY, WANG X, YANG TZ, et al. Studies on leaf cuticular extraction and neutral aroma components in flue-cured tobacco genotypes and regions and its relation to routine chemical components [J]. Acta Tab Sin, 2010, 16(3): 17
- [13] 顾永波, 肖作兵, 刘强, 等. 卷烟主流烟气 pH 值的测定及其与感官呼吸的相关性研究[J]. 食品工业, 2011, 32(2): 97  
GU YB, XIAO ZB, LIU Q, et al. Determination of pH in cigarette mainstream smoke and the correlation with sensory quality [J]. Food Ind, 2011, 32(2): 97
- [14] 张献忠. 废次烟末中烟草香味物质提取、应用及生物活性 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013  
ZHANG XZ. Extraction of Tobacco Flavor Compounds from Discarded Tobacco Leaves and Their Application in Cigarettes and

- in Vitro* Bioactivities[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013
- [15] 戴建国, 李永杰, 张鹏, 等. 枇杷叶浸膏的热裂解行为研究[J]. 轻工学报, 2015, 30(1): 30  
DAI JG, LI YJ, ZHANG P, *et al.* Study on the pyrolysis behavior of loquat leaf extract[J]. *J Light Ind*, 2015, 30(1): 30
- [16] 田丽梅, 缪恩铭, 曾婉俐, 等. 金银花热裂解产物的 GC-MS 分析[J]. 中国农学通报, 2017, 33(5): 116  
TIAN LM, MIAO EM, ZENG WL, *et al.* Pyrolysis products analysis of honeysuckle by gas chromatography-mass spectrometer[J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2017, 33(5): 116
- [17] 吴亿勤, 杨柳, 孟昭宇, 等. 桂叶油热解产物的 GC/MS 分析[J]. 烟草科技, 2007(7): 36  
WU YQ, YANG L, MENG ZY, *et al.* Analysis of pyrolysis products of cinnamon leaf oil by gas chromatography/mass spectrometer[J]. *Tob Sci Technol*, 2007(7): 36
- [18] 廖惠云, 吴洋, 孙海平, 等. 固相萃取净化-双填料反萃取-GC/MS 法分析卷烟烟气中甲基丁香酚[J]. 烟草科技, 2021, 54(4): 66  
LIAO HY, WU Y, SUN HP, *et al.* Analysis of methyleugenol in mainstream cigarette smoke by solid phase extraction-double packing reverse extraction coupled with GC/MS[J]. *Tob Sci Technol*, 2021, 54(4): 66
- [19] 王花俊, 荆晓艳, 刘利锋, 等. 众香子叶油挥发性成分分析及其在卷烟中的应用[J]. 河南农业科学, 2013, 42(3): 143  
WANG HJ, JING XY, LIU LF, *et al.* Analysis of volatile components in *Pimenta dioica* leaf oil and its application in cigarette[J]. *J Henan Agric Sci*, 2013, 42(3): 143
- [20] ABATJOGLU AG, MILLER DJ. Aldehydes. in Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2011: 1
- [21] HWANG YL, BEDARD TC. Ketones. in Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2001
- [22] 刘晓庚, 陈优生. 香料 2-甲基四氢呋喃-3-酮的合成研究[J]. 食品科学, 2005, 26(5): 165  
LIU XG, CHEN YS. Study on synthesis of 2-methyltetrahydrofuran-3-one from ethyl lactate and methyl acrylate [J]. *Food Sci*, 2005, 26(5): 165
- [23] 刘欢, 楚桂林, 任周营, 等. 多糖的保润增香机制研究及其在卷烟中的应用[J]. 食品工业, 2022, 43(7): 39  
LIU H, CHU GL, REN ZY, *et al.* Study on the moisturizing and flavor-increasing mechanism of polysaccharides and its application in cigarettes[J]. *Food Ind*, 2022, 43(7): 39
- [24] 杨振民, 伊勇涛, 胡军, 等. 巴戟天水溶性多糖热裂解产物研究[J]. 中草药, 2011, 42(4): 656  
YANG ZM, YI YT, HU J, *et al.* Pyrolysates of water-soluble polysaccharide in *Morinda officinalis* [J]. *Chin Tradit Herb Drugs*, 2011, 42(4): 656
- [25] KAUR R, TARUN KV, KRISHNA BB, *et al.* Characterization of slow pyrolysis products from three different cashew wastes [J]. *Bioresour Technol*, 2023, 376: 128859
- [26] 楚桂林. 多糖的热裂解性质分析及其在卷烟中的应用[D]. 南昌:南昌大学, 2023  
CHU GL. Analysis of Pyrolytic Properties of Polysaccharides and its Application in Cigarette[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023
- [27] 殷飞. 中式卷烟清香型风格特征剖析及修饰强化[D]. 无锡: 江南大学, 2019.  
YIN F. Analysis and Modifications of Faint-Scent Aroma of Chinese Cigarettes[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019
- [28] 杨茹. 淫羊藿总黄酮提取、纯化工艺优化及其肠溶粘附胶囊制剂成型的初步研究[D]. 南京:南京中医药大学, 2020  
YANG R. Optimization for Extraction and Purification of Total Epimedium Flavones and Preliminary Study on the Formation of Enteric-Adhesive Capsules[D]. Nanjing: Nanjing University of Chinese Medicine, 2020
- [29] 闫克玉, 于静. 金银花挥发油的提取及在卷烟中的应用[J]. 轻工学报, 2008, 25(5): 24  
YAN KY, YU J, *et al.* Extraction of the essential oil in *Flos Lonicera* and its application in cigarette [J]. *J Light Ind*, 2008, 25(5): 24

(本文于 2024 年 3 月 2 日收到)