

## 6种烟熏液的品质及其多环芳烃的毒性比较

王飞<sup>1</sup>, 乔明武<sup>1,2</sup>, 黄现青<sup>1,2,3\*</sup>, 宋莲军<sup>1,2</sup>, 薛桂中<sup>1</sup>, 孟少华<sup>3,4</sup>, 赵建生<sup>3,4</sup>, 马相杰<sup>3,4</sup>

(1. 河南农业大学食品科学技术学院, 河南郑州 450002)

(2. 河南省食品加工与流通安全控制工程技术研究中心, 河南郑州 450002)

(3. 河南省肉品技术创新中心, 河南漯河 462000) (4. 河南双汇投资发展股份有限公司, 河南漯河 462000)

**摘要:** 该研究探讨蒜杆、紫苏、陈皮、梨木、桃木、枣木烟熏液的品质及多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 的含量, 并采用毒性当量因子 (toxic equivalent factors, TEFs) 对烟熏液的毒性风险进行评估。研究表明, 自制烟熏液品质指标差异明显, 密度为 1.01~1.04 g/mL、色泽 L\* 值为 45.01~67.56、a\* 值为 23.06~29.86、b\* 值为 86.68~96.16、可溶性固形物含量为 8.90%~15.77%、pH 值为 2.54~8.65、总酚含量为 1.95~8.18 mg/mL、羰基化合物含量为 2.23~19.81 g/100 mL、总酸含量为 1.53%~12.51%。烟熏液指标间存在较大的相关性, 在正相关中, 密度与可溶性固形物含量相关性最强, 相关系数为 0.998; 在负相关中, 色泽 b\* 值与可溶性固形物含量相关性最强, 相关系数为 -0.986。烟熏液中 16 种 PAHs 均被检测出, 其中苯并[a]芘 (BaP) 含量为 0.13~1.53  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 总 PAHs 含量范围为 123.53~2222.31  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。烟熏液中 PAHs 主要是萘烯, 其中 3 环占比最高, 范围为 60.05%~97.39%。烟熏液中 16 种 PAHs 的毒性当量浓度 TEQ<sub>BaP</sub> (toxic equivalent quantity, TEQ) 分别为梨木 5.00  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、陈皮 4.25  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、市售 3.18  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、紫苏 2.25  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、蒜杆 1.74  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、桃木 1.37  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、枣木 0.64  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。通过对烟熏液相关指标的测定, PAHs 的分布特征及毒性风险, 为烟熏液的安全使用提供参考和依据。

**关键词:** 烟熏液; 多环芳烃; 相关性; 分布情况; 风险评估

文章编号: 1673-9078(2022)04-224-233

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.4.0799

## Comparison of Quality and Toxicity of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Six Kinds of Liquid Smoke

WANG Fei<sup>1</sup>, QIAO Mingwu<sup>1,2</sup>, HUANG Xianqing<sup>1,2,3\*</sup>, SONG Lianjun<sup>1,2</sup>, XUE Guizhong<sup>1</sup>, MENG Shaohua<sup>3,4</sup>, ZHAO Jiansheng<sup>3,4</sup>, MA Xiangjie<sup>3,4</sup>

(1. School of Food science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

(2. Henan Province Engineering Research Center for Food Safety Control of Processing and Circulation, Zhengzhou 450002, China) (3. Henan Technology Innovation Center of Meat Processing and Research, Luohe 462000, China)

(4. Henan Shuanghui Investment Development Co. Ltd., Luohe 462000, China)

**Abstract:** In this paper, the quality and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) content of garlic stick, *Perilla frutescens*, dried tangerine peel, pear wood, peach wood and jujube wood liquid smoke were studied, and toxic equivalent factors (TEFs) was used to evaluate the toxicity risk of liquid smoke. The results showed that there was the significant difference in quality index of liquid smoking, the density was 1.01~1.04 g/mL, the color L\* value was 45.01~67.56, the a\* value was 23.06~29.86, the b\* value was 86.68~96.16, the soluble solid content was 8.90%~15.77%, the pH value was 2.54~8.65, the total phenol content was 1.95~8.18 mg/mL, the carbonyl compound content was 2.23~19.81 g/100 mL, and the total acid content was 1.53%~12.51%. There was a great correlation among the indexes of liquid smoke. In the

引文格式:

王飞, 乔明武, 黄现青, 等. 6种烟熏液的品质及其多环芳烃的毒性比较[J]. 现代食品科技, 2022, 38(4): 224-233

WANG Fei, QIAO Mingwu, HUANG Xianqing, et al. Comparison of quality and toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons in six kinds of liquid smoke [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(4): 224-233

收稿日期: 2021-07-26

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFC1606200)

作者简介: 王飞 (1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养与安全, E-mail: wangfei1440661132@163.com

通讯作者: 黄现青 (1977-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品营养与安全, E-mail: hxq8210@126.com

positive correlation, the density had the strongest correlation with the content of soluble solids, and the correlation coefficient was 0.998; in the negative correlation, color  $b^*$  value had the strongest correlation with soluble solid content, and the correlation coefficient was -0.986. The 16 kinds of PAHs were detected in the liquid smoke, among which the content of benzo(a)pyrene (BaP) was 0.13~1.53  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , and the total PAHs content ranged from 123.53 to 2222.31  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . Acenaphthene was the main PAHs in liquid smoke, and the proportion of 3 rings was the highest, ranging from 60.05% to 97.39%. The toxic equivalent quantity (TEQ) values of 16 kinds PAHs in liquid smoke were 5.00  $\mu\text{g}/\text{kg}$  (pear wood), 4.25  $\mu\text{g}/\text{kg}$  (dried tangerine peel), 3.18  $\mu\text{g}/\text{kg}$  (commercial), 2.25  $\mu\text{g}/\text{kg}$  (*Perilla frutescens*), 1.74  $\mu\text{g}/\text{kg}$  (garlic stick), 1.37  $\mu\text{g}/\text{kg}$  (peach wood) and 0.64  $\mu\text{g}/\text{kg}$  (jujube wood). Through the determination of related indexes, as well as the analysis on distribution characteristics of PAHs and toxicity risks in liquid smoke, it can provide reference and basis for the safe use of liquid smoke.

**Key words:** liquid smoke; PAHs; correlation; distribution; risk assessment

烟熏液是生物质进行热解产生的可凝性气体经冷凝而得到的一种棕红色至棕褐色的混合物, 里面成分复杂, 主要为酚类、有机酸类、醛类、酮类、酯类、醇类等<sup>[1,2]</sup>。近年来, 食品安全问题受到人们的广泛关注, 传统烟熏食品在熏制过程中会受到致癌物(如多环芳烃)的污染, 而烟熏液的使用正好可以弥补这一缺点。烟熏液制备过程中除去大部分的有害物质, 且能赋予食品良好的烟熏风味和色泽, 并且烟熏液的使用方法简便, 可以实现工厂连续化生产。烟熏液可以用于熏肉、熏鱼、熏鸡中, 其中有机成分的种类和含量直接影响其质量, 例如酚类是烟熏液中主要的抑菌成分, 对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、哈维氏弧菌和副溶血性弧菌起抑制作用<sup>[3]</sup>, 且还是主要的烟熏风味物质<sup>[4]</sup>; 烟熏液中羰基化合物可以与食品基质中的氨基化合物发生美拉德反应, 生成诱人的褐色物质, 并且形成一层坚硬表皮, 防止水分散失和细菌的侵入<sup>[5]</sup>。有机酸是烟熏液中次要的抑菌成分, 普遍具有刺激性气味, 作用是加速肉类腌制和熏制过程, 还可以与食品基质相结合从而具有酸辣的风味<sup>[6]</sup>。除此之外, 烟熏液中还有一定量的有害物质, 如多环芳烃。多环芳烃(PAHs)是一类由两个或两个以上的稠合芳香族组成的化合物, 是有机物不完全燃烧或高温热解形成的环状化合物, 具有致癌和致突变性, 是评价烟熏液安全的重要指标<sup>[7]</sup>。

目前, 国外烟熏液应用广泛, 但在国内还处于推广应用阶段, 品种较单一, 对烟熏液的研究主要集中在抑菌防腐, 测定其挥发性风味物质等方面<sup>[8,9]</sup>, 而对烟熏液中多环芳烃的测定及毒性风险的定量评价几乎没有。为此, 本文选用6种生物质原料制备新型烟熏液, 以国外某品牌市售烟熏液为对照, 对6种自制烟熏液的品质进行研究分析, 以期为优质新型烟熏液的原料筛选奠定基础并为烟熏液的安全使用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

蒜杆、紫苏、陈皮、梨木、桃木、枣木烟熏液, 实验室自制; 市售烟熏液, 漯河双汇提供。

2,6-二氯醌-4-氯亚胺, 上海麦克林生化科技有限公司; 硅藻土, 上海麦克林生化科技有限公司; 乙腈, 天津市四友精细化学品有限公司; 无水硫酸镁, 上海麦克林生化科技有限公司; N-丙基乙二胺(PSA), 上海安谱实验科技股份有限公司; 封尾  $\text{C}_{18}$  固相萃取填料, 上海安谱实验科技股份有限公司; 0.22  $\mu\text{m}$  有机相型微孔滤膜, 天津市津腾实验设备有限公司; 乙腈中16种多环芳烃混标液, 坛墨质检标准物质中心。

### 1.2 仪器与设备

FA/JA\*B型电子分析天平, 上海精科天美科学仪器有限公司; PHS-3C型pH计, 上海浦春计量仪器有限公司; QP2010气质联用仪, 日本岛津公司; CR-5型色彩色差计, 日本柯尼卡美能达控股公司; UV-2100型紫外可见分光光度计, 上海尤尼柯仪器有限公司; WYA-2S数字阿贝折射仪, 上海申光仪器仪表有限公司; KDM型控温电热套, 山东华鲁仪器公司; LHD型热电偶温度计, 江苏九州电热公司; DFY-500型摇摆式高速中药粉碎机; 浙江温岭市林大机械有限公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 烟熏液的制备工艺

参考谷风林等<sup>[10]</sup>的方法, 具体工艺如下:

原料粉碎→干燥→过筛→称量→热解、冷凝→收集粗烟熏液→低温静置→过滤→烟熏液

操作要点:

(1) 原料前处理: 选取无霉变、无灰尘及其它杂质的原料, 用摇摆式高速中药粉碎机进行粉碎处理, 称取500g(精确至0.1g)左右的原料放在不锈钢托盘中, 置于105℃的鼓风干燥箱干燥5h后取出, 放

入干燥器中冷却 0.5 h 后称量。然后放入鼓风干燥箱中继续干燥 1 h, 取出后放入干燥器中冷却 0.5 h 后再次称量。重复以上操作至前后两次质量差不超过 1 g, 即为恒重。

(2) 热解: 将烘干后的原料过 20 目筛, 然后称取筛分好的原料 60 g 置于 500 mL 二口烧瓶中, 斜口上插上热电偶温度计进行温度监测, 连接好冷凝及收集装置, 打开冷却水开关, 打开电热套的电源开关进行热解, 电热套采用控温模式, 控温电压 220 V, 无冷凝液滴下时即为热解终点。

(3) 冷凝: 生物质原料裂解产生的烟雾经过冷凝管, 可凝烟雾被冷凝收集, 即为粗制烟熏液; 不可凝烟雾排出装置。

(4) 低温静置: 热解完成后将粗制烟熏液放置于 -4 °C 冰箱中静置 24 h, 使木焦油等杂质与烟熏液分离, 同时放入冰箱防止烟熏液中水分挥发。

(5) 过滤: 用双层滤纸过滤, 然后进行指标测定。

### 1.3.2 烟熏液 pH 值的测定

烟熏液的 pH 值采用 PHS-3C 酸度计测定。

### 1.3.3 烟熏液密度的测定

参照 GB 5009.2-2016《食品相对密度的测定》<sup>[11]</sup>, 测定采用比重瓶法。

### 1.3.4 烟熏液可溶性固形物含量的测定

参考 NY/T 2637-2014 的方法<sup>[12]</sup>。用蒸馏水对阿贝折射仪进行校准, 然后滴加 3 滴烟熏液样品到棱镜表面, 使其均匀覆盖, 对准光源后调节旋钮使视野分成明暗两部分, 然后记录读数。市售烟熏液则需要稀释, 按下式进行计算。

$$X = P \times \frac{m_0 + m_1}{m_0}$$

式中:

$P$ —样品稀释液的可溶性固形物含量, %;

$m_0$ —样品质量, g;

$m_1$ —样品中加入蒸馏水的质量, g。

### 1.3.5 烟熏液色差的测定

参照郭文等<sup>[13]</sup>的方法, 将色差计放置于洁净干燥的桌面上, 按要求对仪器进行校准。将样品混合均匀后注入石英比色皿中, 然后置于检测池中进行测试, 通过仪器读取 L\*值、a\*值、b\*值。

### 1.3.6 烟熏液中总酚和羰基化合物含量的测定

参照 GB 1886.127-2016《食品添加剂 山楂核烟熏香味料 I 号、II 号》<sup>[14]</sup>, 用修正吉布斯法测总酚含量, 盐酸羟胺法测羰基化合物含量。

### 1.3.7 总酸含量的测定

参考张珊珊等<sup>[15]</sup>的方法, 采用 NaOH 滴定法测定

总酸含量, 并折合成醋酸的质量分数。取 0.5 g 的样品液, 加蒸馏水 100 mL, 使稀释液呈无色或近无色, 加酚酞指示剂 3 滴, 用 0.01 mol/L NaOH 溶液滴定样品中的酸性成分, 滴定至淡红色, 30 s 内不褪色即为滴定终点, 记录 NaOH 溶液的体积数, 并进行空白实验。

$$Y / \% = \frac{c \times (V - V_0) \times 0.060}{m} \times 100\%$$

式中:

$c$ —氢氧化钠标准溶液浓度, mol/L;

$V$ —样品滴定消耗 NaOH 溶液的体积, mL;

$V_0$ —空白滴定消耗的 NaOH 溶液的体积, mL;

0.060—醋酸的换算系数;

$m$ —试样的质量, g。

### 1.3.8 烟熏液中多环芳烃的检测

参考 GB 5009.265-2016《食品中多环芳烃的测定》<sup>[16]</sup>, 并稍作修改。烟熏液中 16 种多环芳烃的测定是通过待测物质标准曲线的绘制, 进行定性和定量的。具体方法步骤如下:

称取 2.00 g 样品于离心管 A 中, 加入 10.0 mL 正己烷涡旋混合 30 s 后, 40 °C 水浴超声 40 min, 吸取上清液于离心管 B 中。下层复提一次, 合并两次上清液, 然后氮吹除去溶剂, 吹至近干。

在离心管 B 中加入 4.0 mL 乙腈复溶, 再加入 0.900 g 硫酸镁、0.100 g PSA 和 0.100 g C<sub>18</sub> 填料, 涡旋混合 30 s 后以 4500 r/min 离心 3 min, 下层用 2.0 mL 乙腈复提一次, 合并提取液于离心管 C 中, 氮吹溶剂至近干, 用乙腈定容至 1.0 mL, 混匀后过 0.22 μm 微孔滤膜, 制得待测液。

色谱柱为 SH-Rxi-5ms (30 m×0.25 mm×0.25 μm, 日本岛津公司); 柱温度程序: 初始温度 90 °C, 以 20 °C/min 升温至 220 °C, 再以 5 °C/min 升温至 320 °C, 保持 2 min; 进样口温度 250 °C; 不分流进样, 进样量为 1.0 μL, 2.0 min 后开阀; 载气: 高纯氮, 柱流量 1.0 mL/min; 测定方式为选择离子监测方式; 色谱-质谱接口温度为 280 °C; 离子源温度 230 °C; EI 源, 电离能量 70 eV; 质量扫描范围 50~450 u, 溶剂延迟 3 min。

## 1.4 数据统计

使用 SPSS 24 对数据进行显著性和相关性统计分析, 结果以平均值±标准差表示。

## 2 结果与讨论

### 2.1 烟熏液基本理化性质的差异分析

表1 烟熏液物理指标的测定

Table 1 Determination of physical indexes of liquid smoke

类别	密度/(g/mL)	色泽 L*	色泽 a*	色泽 b*	可溶性固形物含量/%
蒜杆	1.01±0.00 <sup>c</sup>	66.72±0.19 <sup>b</sup>	23.06±0.01 <sup>e</sup>	89.47±0.31 <sup>b</sup>	8.90±0.10 <sup>e</sup>
紫苏	1.02±0.00 <sup>d</sup>	60.41±0.52 <sup>c</sup>	27.98±0.46 <sup>c</sup>	89.97±0.30 <sup>b</sup>	11.40±0.10 <sup>d</sup>
陈皮	1.02±0.00 <sup>d</sup>	67.56±0.22 <sup>a</sup>	25.20±0.25 <sup>d</sup>	96.16±0.06 <sup>a</sup>	8.90±0.10 <sup>e</sup>
梨木	1.04±0.00 <sup>b</sup>	45.82±0.24 <sup>d</sup>	29.09±0.56 <sup>b</sup>	86.68±1.06 <sup>c</sup>	15.53±0.06 <sup>bc</sup>
桃木	1.03±0.01 <sup>c</sup>	45.40±0.26 <sup>de</sup>	28.85±0.72 <sup>b</sup>	87.28±0.63 <sup>c</sup>	15.40±0.10 <sup>c</sup>
枣木	1.04±0.00 <sup>b</sup>	45.01±0.62 <sup>e</sup>	29.86±0.22 <sup>a</sup>	86.87±0.27 <sup>c</sup>	15.77±0.15 <sup>b</sup>
市售(CK 组)	1.15±0.00 <sup>a</sup>	3.10±0.03 <sup>f</sup>	18.79±0.37 <sup>f</sup>	4.88±0.09 <sup>d</sup>	45.6±0.30 <sup>a</sup>

注：同列小写字母不同表示差异显著 ( $p < 0.05$ )，CK 指对照组。表2 同。

表2 烟熏液化学指标的测定

Table 2 Determination of chemical indexes of liquid smoke

类别	pH 值	总酚含量/(mg/mL)	羰基化合物/(g/100 mL)	总酸/%
蒜杆	4.76±0.02 <sup>b</sup>	2.18±0.05 <sup>b</sup>	2.23±0.06 <sup>e</sup>	1.53±0.02 <sup>d</sup>
紫苏	8.65±0.02 <sup>a</sup>	1.95±0.09 <sup>b</sup>	未检出	未检出
陈皮	2.95±0.02 <sup>c</sup>	2.70±0.10 <sup>b</sup>	10.58±0.24 <sup>d</sup>	7.08±0.13 <sup>c</sup>
梨木	2.59±0.01 <sup>f</sup>	8.08±1.19 <sup>a</sup>	16.44±1.37 <sup>c</sup>	10.74±1.28 <sup>b</sup>
桃木	2.54±0.01 <sup>g</sup>	8.02±0.44 <sup>a</sup>	19.81±0.40 <sup>b</sup>	12.51±0.30 <sup>a</sup>
枣木	2.64±0.02 <sup>e</sup>	8.18±0.88 <sup>a</sup>	19.07±0.51 <sup>b</sup>	12.07±0.34 <sup>a</sup>
市售(CK 组)	2.67±0.02 <sup>d</sup>	8.99±1.01 <sup>a</sup>	40.36±0.65 <sup>a</sup>	11.76±0.42 <sup>ab</sup>

### 2.1.1 烟熏液物理指标间的差异分析

在本研究中，6 种自制烟熏液的密度为 1.02~1.04 g/mL，密度最低是蒜杆烟熏液，最高是梨木和枣木烟熏液。其中 6 种自制烟熏液的密度均显著低于对照组 ( $p < 0.05$ )，且梨木和枣木烟熏液的密度无显著性差异 ( $p > 0.05$ )，这两种烟熏液的密度，显著高于其它 4 种自制烟熏液 ( $p < 0.05$ )。以上分析表明，烟熏液的密度在 1.0 g/mL 左右，与 Ketut 等<sup>[17]</sup>的研究结果类似。

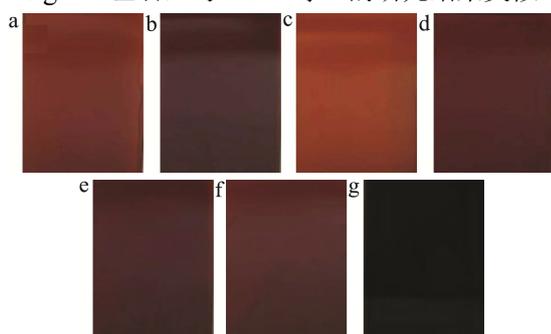


图1 烟熏液的外观

Fig.1 Appearance of liquid smoke samples

注：a：蒜杆；b：紫苏；c：陈皮；d：梨木；e：桃木；f：枣木；g：市售。

明亮度 L\*值描述烟熏液样品的透光率，即色泽的深浅。L\*值越大说明样品的透光率越强，6 种自制烟熏液 L\*值为 45.01~67.56，枣木烟熏液 L\*值最低，陈皮烟熏液 L\*值最高。其中 6 种自制烟熏液的 L\*值显

著高于对照 ( $p < 0.05$ )，这说明自制烟熏液透光率高，而市售烟熏液透光率差，与目测一致。a\*值反应样品的红绿度，正值表示红色，负值表示绿色，6 种自制烟熏液 a\*值为 23.06~29.86，表明烟熏液色泽偏红，蒜杆烟熏液 a\*值最低，枣木烟熏液 a\*值最高。其中 6 种自制烟熏液的 a\*值显著高于对照 ( $p < 0.05$ )。b\*值反应样品的黄蓝度，正值表示黄色，负值表示蓝色，6 种自制烟熏液 b\*值为 86.68~96.16，表明烟熏液色泽偏黄，梨木烟熏液 b\*值最低，陈皮烟熏液 b\*值最高。其中 6 种自制烟熏液的 b\*值显著高于对照 ( $p < 0.05$ )。

可溶性固形物是指液体物质中所有化合物的总称，一定程度上反应烟熏液中有机化合物的含量，6 种自制烟熏液可溶性固形物含量为 8.90%~15.77%，蒜杆和陈皮烟熏液可溶性固形物含量最低，枣木烟熏液可溶性固形物含量最高。其中 6 种自制烟熏液的可溶性固形物含量显著低于对照 ( $p < 0.05$ )。

### 2.1.2 烟熏液化学指标间的差异分析

烟熏液通常是酸性的，pH 值范围大致在 1.5~5.5 之间<sup>[18]</sup>。6 种自制烟熏液除紫苏烟熏液外，其余烟熏液均呈酸性，pH 值为 2.54~4.76；烟熏液呈酸性主要是由较高含量的乙酸所导致，生物质在开始热分解时，不稳定结构首先分解生成乙酸，随着温度的上升，大分子结构进一步发生裂解和解聚，生成甲酸、乙酸、丙酸等小分子酸性化合物，此外热解生成的酚类化合

物也能解离的  $H^+$ ，它们共同作用导致烟熏液 pH 值进一步降低<sup>[19]</sup>。紫苏烟熏液呈碱性，pH 值为 8.65。Vitt 等<sup>[20]</sup>报道了一种市售烟熏液，pH 值为 7.3~8.1，与紫苏烟熏液均呈碱性。紫苏烟熏液呈碱性可能是因为紫苏中含有丰富的氨基酸、生物碱等含氮碱性化合物<sup>[21]</sup>，热解后生成的碱性物质大于酸性物质，从而使溶液显碱性。

酚类化合物是烟熏液中主要的一类抗菌物质，它们能破坏细菌的膜系统从而导致细胞质泄露，因此对细菌及一些病原体具有抑制和杀灭作用<sup>[22]</sup>，并且酚类物质被认为是主要的烟熏风味成分<sup>[23]</sup>。6 种自制烟熏液总酚含量为 1.95~8.18 mg/mL，紫苏烟熏液总酚含量最低，枣木烟熏液总酚含量最高。其中 6 种自制烟熏液中，蒜杆、紫苏和陈皮烟熏液的总酚含量显著低于对照 ( $p < 0.05$ )，梨木、桃木和枣木与对照组无显著性差异 ( $p > 0.05$ )。蒜杆、紫苏和陈皮烟熏液的总酚含量无显著性差异 ( $p > 0.05$ )，梨木、桃木和枣木烟熏液的总酚含量无显著性差异 ( $p > 0.05$ )，且两类生物质原料总酚含量相差较大，原因可能是梨木、桃木、枣木是天然硬木，其木质素含量远高于蒜杆、紫苏、陈皮等草本科植物，而木质素是由愈创木基、紫丁香基、对羟苯基三个基本单元构成，通过 C-C 键和 C-O 键连接而成的立体结构，热解中化学键断裂生成小分子化合物，进而生成愈创木基酚、紫丁香基酚、对羟苯基酚等酚类化合物，从而导致烟熏液中酚类含量偏高<sup>[24,25]</sup>。

羰基化合物是烟熏液品质的重要指标，包括醛类化合物、酮类化合物和羧酸类化合物，被认为是烟熏液的

呈色物质<sup>[26]</sup>，并且羰基化合物可以与食品基质中的氨基发生美拉德反应，生成褐色物质，羰基化合物含量不同会导致烟熏食品颜色存在差异<sup>[27]</sup>。6 种自制烟熏液羰基化合物含量为 2.23~19.81 g/100 mL，蒜杆烟熏液羰基化合物含量最低，桃木烟熏液羰基化合物含量最高。其中紫苏烟熏液中羰基化合物未检出，其余 5 种自制烟熏液的羰基化合物含量显著低于对照 ( $p < 0.05$ )。

烟熏液中酸性物质主要是小分子量的酸，如乙酸、丙酸、丁酸等，它们均具有强烈的刺激性气味，是一类重要的风味物质<sup>[28]</sup>。6 种自制烟熏液总酸含量为 1.53%~12.51%，蒜杆烟熏液总酸含量最低，桃木烟熏液总酸最高。其中紫苏烟熏液中总酸未检出，其余 5 种自制烟熏液中蒜杆和陈皮的总酸含量显著低于对照 ( $p < 0.05$ )，梨木、桃木和枣木烟熏液的总酸含量与对照组相比无显著性差异 ( $p > 0.05$ )。

## 2.2 烟熏液品质指标的相关性分析

本研究采用 Pearson 相关系数分析烟熏液 9 个品质指标之间相关性，相关系数越大，说明指标间的相关性越强，相关系数大于 0.9，说明其相关性较好，结果见表 3。

烟熏液密度与主要品质成分可溶性固形物、总酚、羰基化合物、总酸均呈正相关，其中与可溶性固形物含量的相关性最强，相关系数为 0.998，这是因为可溶性固形物是指烟熏液中所有化合物的总称，包括酚类、羰基化合物和酸类，而化合物的总量直接影响密度的大小。

表 3 烟熏液品质指标间的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of quality indexes in liquid smoke

品质指标	密度	色泽 L*	色泽 a*	色泽 b*	可溶性固形物	pH 值	总酚	羰基化合物	总酸
密度	1								
色泽 L*	-0.969**	1							
色泽 a*	-0.636**	0.470*	1						
色泽 b*	-0.981**	0.924**	0.756**	1					
可溶性固形物	0.998**	-0.973**	-0.645**	-0.986**	1				
pH 值	-0.315	0.405	0.068	0.238	-0.317	1			
总酚	0.593**	-0.772**	0.186	-0.452*	0.599**	-0.695**	1		
羰基化合物	0.948**	-0.971**	-0.379	-0.877**	0.941**	-0.643**	0.777**	1	
总酸	0.490*	-0.634**	0.330	-0.324	0.476*	-0.939**	0.877**	0.735**	1

注：\*\*代表在 0.01 水平（双侧）上显著相关，\*代表在 0.05 水平（双侧）上显著相关。

烟熏液的色差值与主要品质成分可溶性固形物、总酚、羰基化合物、总酸存在一定的联系。色泽 L\* 值与可溶性固形物含量相关性最高，相关系数为 -0.973，这是由于色泽 L\* 值反应液体的透光率，可溶性固形物含量反应液体中有机物质的含量，其测定原

理是折射定律，有机物质含量越多，对光线的折射能力就越强，光线透过介质的能力变弱，从而导致透光率变差。色泽 a\* 值与色泽 b\* 值均与可溶性固形物的相关性最强，相关系数分别为 -0.645 和 -0.986，且烟熏液的 a\* 值与 b\* 值均为正值，这表明烟熏液中的可溶性固

形物以红色和黄色为主。

烟熏液的 pH 值与主要品质成分总酚、羰基化合物、总酸均呈极显著负相关 ( $p < 0.01$ ), 与可溶性固形物含量无显著相关性 ( $p > 0.05$ )。其中 pH 值与总酸的相关性最强, 相关系数为-0.939, 这是因为 pH 值反应

烟熏液中  $H^+$  的浓度, pH 值越低则  $H^+$  浓度越高, 而解离出的  $H^+$  主要由酸性物质提供, 导致 pH 值与总酸呈完全相反的趋势。

### 2.3 烟熏液中 PAHs 含量的差异分析

表 4 烟熏液中多环芳烃的含量

Table 4 Concentrations of PAHs in liquid smoke

序号	PAHs/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	蒜杆	紫苏	陈皮	梨木	桃木	枣木	市售(CK 组)
1	萘	14.61 $\pm$ 3.52 <sup>b</sup>	9.13 $\pm$ 1.9 <sup>b</sup>	37.10 $\pm$ 9.23 <sup>a</sup>	36.24 $\pm$ 3.77 <sup>a</sup>	34.23 $\pm$ 3.90 <sup>a</sup>	42.14 $\pm$ 5.16 <sup>a</sup>	5.71 $\pm$ 1.17 <sup>b</sup>
2	芘烯	166.56 $\pm$ 14.64 <sup>c</sup>	167.94 $\pm$ 38.45 <sup>c</sup>	1586.45 $\pm$ 86.05 <sup>a</sup>	27.8 $\pm$ 2.52 <sup>d</sup>	68.09 $\pm$ 3.61 <sup>cd</sup>	50.52 $\pm$ 14.33 <sup>cd</sup>	393.64 $\pm$ 9.80 <sup>b</sup>
3	芘	88.88 $\pm$ 16.30 <sup>cd</sup>	118.41 $\pm$ 19.28 <sup>c</sup>	294.57 $\pm$ 53.88 <sup>a</sup>	38.43 $\pm$ 10.96 <sup>de</sup>	14.84 $\pm$ 3.04 <sup>e</sup>	30.33 $\pm$ 3.75 <sup>e</sup>	182.65 $\pm$ 9.90 <sup>b</sup>
4	芴	60.69 $\pm$ 8.53 <sup>c</sup>	76.13 $\pm$ 1.80 <sup>c</sup>	169.80 $\pm$ 19.33 <sup>b</sup>	6.71 $\pm$ 0.21 <sup>d</sup>	10.79 $\pm$ 4.09 <sup>d</sup>	29.98 $\pm$ 3.23 <sup>cd</sup>	438.64 $\pm$ 46.53 <sup>a</sup>
5	菲	24.12 $\pm$ 4.35 <sup>b</sup>	73.11 $\pm$ 13.48 <sup>a</sup>	61.62 $\pm$ 6.12 <sup>a</sup>	0.60 $\pm$ 0.23 <sup>c</sup>	2.02 $\pm$ 1.32 <sup>c</sup>	4.20 $\pm$ 1.41 <sup>c</sup>	32.54 $\pm$ 7.85 <sup>b</sup>
6	蒽	23.81 $\pm$ 4.25 <sup>b</sup>	55.92 $\pm$ 6.91 <sup>a</sup>	60.41 $\pm$ 5.98 <sup>a</sup>	0.64 $\pm$ 0.31 <sup>c</sup>	1.59 $\pm$ 0.49 <sup>e</sup>	1.42 $\pm$ 0.66 <sup>e</sup>	26.06 $\pm$ 2.38 <sup>b</sup>
7	荧蒽	2.53 $\pm$ 0.26 <sup>b</sup>	0.99 $\pm$ 0.29 <sup>b</sup>	24.00 $\pm$ 6.81 <sup>a</sup>	0.10 $\pm$ 0.04 <sup>b</sup>	0.64 $\pm$ 0.14 <sup>b</sup>	0.45 $\pm$ 0.12 <sup>b</sup>	3.30 $\pm$ 0.13 <sup>b</sup>
8	苊	1.69 $\pm$ 0.40 <sup>b</sup>	2.07 $\pm$ 0.77 <sup>b</sup>	11.83 $\pm$ 4.00 <sup>a</sup>	0.18 $\pm$ 0.05 <sup>b</sup>	0.44 $\pm$ 0.13 <sup>b</sup>	0.17 $\pm$ 0.07 <sup>b</sup>	2.46 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>
9	苯并[a]蒽	0.72 $\pm$ 0.06 <sup>bc</sup>	0.29 $\pm$ 0.06 <sup>c</sup>	1.05 $\pm$ 0.34 <sup>ab</sup>	0.43 $\pm$ 0.16 <sup>c</sup>	0.59 $\pm$ 0.18 <sup>bc</sup>	0.28 $\pm$ 0.09 <sup>e</sup>	1.61 $\pm$ 0.47 <sup>a</sup>
10	蒾	0.18 $\pm$ 0.02 <sup>c</sup>	15.94 $\pm$ 5.20 <sup>b</sup>	21.49 $\pm$ 0.06 <sup>a</sup>	0.28 $\pm$ 0.05 <sup>c</sup>	0.52 $\pm$ 0.08 <sup>e</sup>	0.39 $\pm$ 0.18 <sup>e</sup>	1.87 $\pm$ 0.15 <sup>c</sup>
11	苯并[b]荧蒽	0.24 $\pm$ 0.00 <sup>cd</sup>	0.24 $\pm$ 0.03 <sup>cd</sup>	0.30 $\pm$ 0.10 <sup>bc</sup>	0.99 $\pm$ 0.09 <sup>a</sup>	0.46 $\pm$ 0.12 <sup>b</sup>	0.10 $\pm$ 0.03 <sup>d</sup>	0.41 $\pm$ 0.06 <sup>bc</sup>
12	苯并[k]荧蒽	0.38 $\pm$ 0.00 <sup>b</sup>	0.37 $\pm$ 0.09 <sup>b</sup>	0.45 $\pm$ 0.05 <sup>b</sup>	1.87 $\pm$ 0.44 <sup>a</sup>	0.45 $\pm$ 0.15 <sup>b</sup>	0.13 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	0.54 $\pm$ 0.06 <sup>b</sup>
13	苯并[a]苊	0.36 $\pm$ 0.05 <sup>c</sup>	0.32 $\pm$ 0.08 <sup>cd</sup>	0.32 $\pm$ 0.00 <sup>cd</sup>	1.53 $\pm$ 0.13 <sup>a</sup>	0.62 $\pm$ 0.14 <sup>b</sup>	0.13 $\pm$ 0.06 <sup>d</sup>	0.39 $\pm$ 0.03 <sup>c</sup>
14	茚并[1,2,3-c,d]苊	0.50 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	0.46 $\pm$ 0.11 <sup>b</sup>	0.51 $\pm$ 0.06 <sup>b</sup>	2.96 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	0.23 $\pm$ 0.06 <sup>c</sup>	0.16 $\pm$ 0.05 <sup>e</sup>	0.48 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>
15	二苯并[a,h]蒽	0.59 $\pm$ 0.01 <sup>c</sup>	0.62 $\pm$ 0.19 <sup>c</sup>	0.69 $\pm$ 0.09 <sup>c</sup>	2.70 $\pm$ 0.09 <sup>b</sup>	0.42 $\pm$ 0.24 <sup>e</sup>	0.26 $\pm$ 0.03 <sup>e</sup>	1.14 $\pm$ 0.39 <sup>a</sup>
16	苯并[g,h,i]苊	0.50 $\pm$ 0.02 <sup>bc</sup>	0.44 $\pm$ 0.08 <sup>bc</sup>	0.56 $\pm$ 0.04 <sup>b</sup>	2.07 $\pm$ 0.13 <sup>a</sup>	0.34 $\pm$ 0.14 <sup>cd</sup>	0.18 $\pm$ 0.02 <sup>d</sup>	0.47 $\pm$ 0.06 <sup>bc</sup>
17	PAH4	1.38 $\pm$ 0.30 <sup>c</sup>	16.86 $\pm$ 3.70 <sup>b</sup>	23.42 $\pm$ 0.12 <sup>a</sup>	3.21 $\pm$ 0.44 <sup>c</sup>	2.18 $\pm$ 0.36 <sup>e</sup>	0.90 $\pm$ 0.25 <sup>e</sup>	4.08 $\pm$ 0.74 <sup>c</sup>
18	PAH16	372.06 $\pm$ 25.34 <sup>d</sup>	476.42 $\pm$ 83.29 <sup>c</sup>	2222.31 $\pm$ 31.83 <sup>a</sup>	123.53 $\pm$ 3.87 <sup>e</sup>	136.23 $\pm$ 2.65 <sup>e</sup>	160.82 $\pm$ 18.58 <sup>e</sup>	1101.91 $\pm$ 58.38 <sup>b</sup>

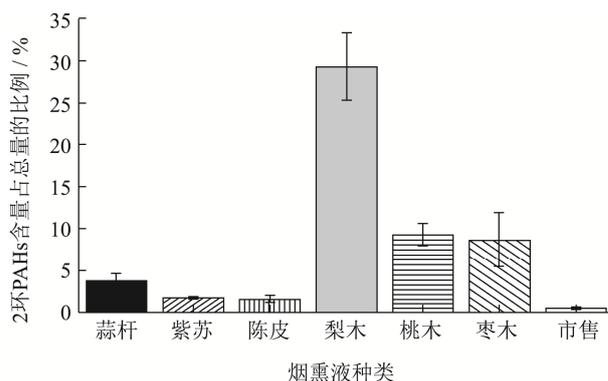
注: 同行小写字母不同表示差异显著 ( $p < 0.05$ ), CK 指对照组。

由表 4 可知, 7 种烟熏液中 16 种多环芳烃均被检测到。不同烟熏液中的 PAHs 差别较大, 含量范围为 0.10~1586.45  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。其中 PAHs 的代表物苯并[a]苊的含量范围是 0.13~1.53  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 梨木和桃木烟熏液中的苯并[a]苊含量显著高于对照组 ( $p < 0.05$ ), 陈皮和枣木烟熏液中的苯并[a]苊含量显著低于对照组 ( $p < 0.05$ ), 蒜杆和紫苏烟熏液中的苯并[a]苊含量与对照组相比无显著性差异 ( $p > 0.05$ )。PAH4 包括苯并[a]蒽、蒾、苯并[b]荧蒽、苯并[a]苊, 它们具有较强的致癌毒性, 因此欧盟对 PAH4 总量的限量标准为 12  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[29]</sup>。紫苏和陈皮烟熏液的 PAH4 含量显著高于其它 5 种烟熏液 ( $p < 0.05$ ), 且蒜杆、梨木、桃木、枣木、市售烟熏液的 PAH4 含量无显著性差异 ( $p > 0.05$ )。美国环境保护署 (EPA) 将 16 种 PAHs 列为优先控制污染物<sup>[30]</sup>。PAH16 含量范围是 123.53~2222.31  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 陈皮烟熏液的 PAH16 含量显著高于市售烟熏液 ( $p < 0.05$ ), 其余 5 种自制烟熏液显著低于市售烟熏液 ( $p < 0.05$ )。

烟熏液中 16 种多环芳烃含量普遍较高的是芘烯。

蒜杆、紫苏、陈皮、桃木、枣木烟熏液中含量最高的多环芳烃均是芘烯, 并且蒜杆、紫苏、桃木、枣木烟熏液中的芘烯含量显著低于陈皮烟熏液中芘烯含量。梨木烟熏液中含量最高的多环芳烃是芘, 其次是芘烯; 市售烟熏液中含量最高的是芴, 其次是芘烯。Enayat 等<sup>[31]</sup>对 3 家企业的 11 种商用烟熏液的多环芳烃进行测定, 其中 9 种烟熏液中芘烯含量最高, 这与本实验结果一致。

### 2.4 烟熏液中 PAHs 的组成特征



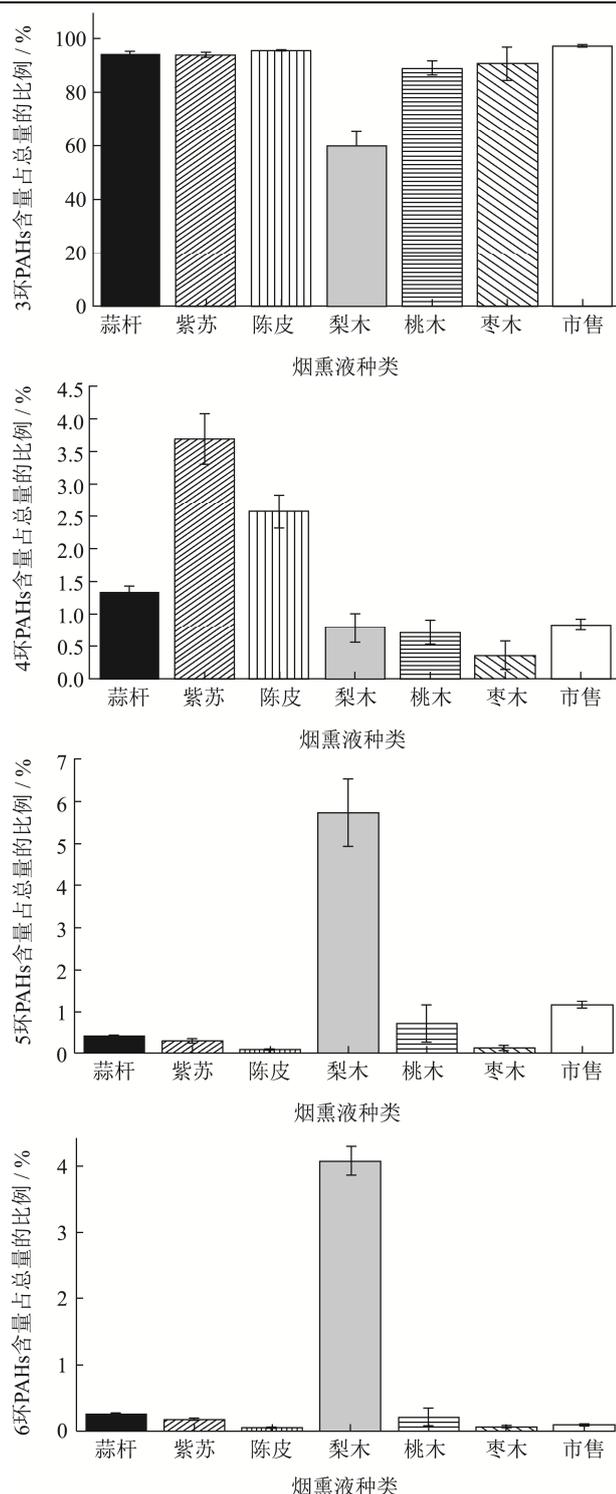


图2 烟熏液中多环芳烃的环数分布

Fig.2 The composition patterns of PAHs by ring size in liquid smoke samples

PAHs 根据其分子量可分为轻环 (2~3 环)、中环 (4 环) 和重环 (5~6 环), 通过分析 PAHs 的组成特征可以反应不同烟熏液的差异性和相似性<sup>[32]</sup>。图 2 为 7 种烟熏液中不同环数 PAHs 含量占总含量的百分比。烟熏液中 3 环的多环芳烃分别占总多环芳烃的 94.23% (蒜杆)、94.09% (紫苏)、95.67% (陈皮)、60.05%

(梨木)、89.05% (桃木)、90.78% (枣木)、97.39% (市售), 这表明七种生物质在热解过程中, 烟熏液的多环芳烃主要以 3 环为主。梨木烟熏液中 2 环 (29.34%)、5 环 (5.74%)、6 环 (4.07%) 的占比远高于其余 6 种烟熏液。

7 种烟熏液中 2 环的 PAHs 占比范围是 0.52%~29.34%; 3 环的 PAHs 占比范围是 60.05%~97.39%; 4 环的 PAHs 占比范围是 0.36%~3.69%; 5 环的 PAHs 占比范围是 0.08%~5.74%; 6 环的 PAHs 占比范围是 0.05%~4.07%; 它们之间的占比相差较大, 原因可能是不同的生物质具有不同的结构, 它们是由纤维素、半纤维素和木质素组成的高分子结构, 在高温热解的条件下会发生化学键的断裂和重新聚合, 在这个过程中也会产生多环芳烃及其它化合物, 原料和热解方式的不同会影响烟熏液中多环芳烃的含量和组成。

## 2.5 烟熏液中 PAHs 的毒性风险评估

综上分析烟熏液的基本组分及多环芳烃的分布。这些丰富的功效成分赋予烟熏食品良好的风味及品质, 但也存在一些有害物质, 例如致癌物 PAHs 带来的风险不容忽视, 因此对烟熏液的毒性风险评估至关重要。

BaP 致癌性强、性质稳定、检测灵敏度高, 与其它 PAHs 具有较强相关性等特点, 因此采用 BaP 作为毒性当量 (toxic equivalent quantity, TEQ) 来评价烟熏液中 PAHs 的毒性风险。Nisbet 等<sup>[33]</sup>通过毒理学实验测定不同 PAHs 相对于 BaP 的毒性当量因子 (toxic equivalent factors, TEFs), 提出以毒性最强的 BaP 为参考, 设其 TEF 值为 1, 其它 15 种多环芳烃折算成相对应的毒性效应, 具体数值见表 5。烟熏液中单个多环芳烃与其对应的 TEF 相乘后累加, 即为毒性当量浓度 TEQ<sub>BaP</sub>, 具体公式如下:

$$TEQ_{BaP} = \sum_{i=1}^n C_i \times TEF_i$$

式中:

$C_i$ —第 i 个 PAHs 的实际浓度, 单位  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ;

$TEF_i$ —第 i 个 PAHs 的毒性当量因子;

$TEQ_{BaP}$ —基于 BaP 的当量浓度, 单位  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

由表 5 可知, 六种自制烟熏液 TEQ<sub>BaP</sub> 分别为: 蒜杆 1.74  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、紫苏 2.25  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、陈皮 4.25  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、梨木 5.00  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、桃木 1.37  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、枣木 0.64  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ; 市售烟熏液为 3.18  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。截至目前, 没有关于烟熏液中多环芳烃的限量标准。烟熏液通常作为烟熏风味增强剂添加到肉中, 添加方式根据产品的类型分为浸渍、注射、涂抹等, 赋予产品烟熏风味, 从而替代传统烟

熏。而 GB 2762-2017《食品中污染物限量》关于熏、烧、烤肉类中 BaP 的限量标准为 5  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，因此，烟熏液中多环芳烃的带入以及热加工过程中产生的多环芳烃之和应低于该标准。六种自制烟熏液和市售烟熏液

相比，梨木烟熏液的毒性风险最高，枣木烟熏液的毒性风险最低，因此，可以选择合适的原料制备安全的烟熏液。

表 5 烟熏液中 PAHs 的毒性当量

Table 5 Toxic equivalents of PAHs at different liquid smoke

序号	PAHs 种类	TEFs	TEQ <sub>BaP</sub> ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )						
			蒜杆	紫苏	陈皮	梨木	桃木	枣木	市售(CK 组)
1	苯	0.001	0.02	0.01	0.04	0.04	0.03	0.04	0.01
2	萘	0.001	0.17	0.17	1.59	0.03	0.07	0.05	0.39
3	苊	0.001	0.09	0.12	0.30	0.04	0.02	0.03	0.18
4	芴	0.001	0.06	0.08	0.17	0.01	0.01	0.03	0.44
5	菲	0.001	0.02	0.07	0.06	0.00	0.00	0.00	0.03
6	蒽	0.01	0.24	0.56	0.60	0.01	0.02	0.01	0.26
7	荧蒽	0.001	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
8	芘	0.001	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
9	苯并[a]蒽	0.1	0.07	0.03	0.11	0.04	0.06	0.03	0.16
10	蒾	0.01	0.00	0.16	0.22	0.00	0.01	0.00	0.02
11	苯并[b]荧蒽	0.1	0.02	0.02	0.03	0.10	0.05	0.01	0.04
12	苯并[k]荧蒽	0.1	0.04	0.04	0.05	0.19	0.05	0.01	0.05
13	苯并[a]芘	1	0.36	0.32	0.32	1.53	0.62	0.13	0.39
14	茚并[1,2,3-c,d]芘	0.1	0.05	0.05	0.05	0.30	0.02	0.02	0.05
15	二苯并[a,h]蒽	1	0.59	0.62	0.69	2.70	0.42	0.26	1.14
16	苯并[g,h,i]芘	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01
17	$\Sigma$ PAHs		1.74	2.25	4.25	5.00	1.37	0.64	3.18

### 3 结论

3.1 本实验选取 6 种生物质原料，利用自制生物质热解反应器制备烟熏液，测定其基本理化指标和 16 种多环芳烃的含量、分布及毒性风险评估，并与市售烟熏液作对比。烟熏液外观及挥发性成分存在显著性差异。烟熏液呈棕褐色，蒜杆烟熏液的 L\*值最大，说明其最明亮，透光率较高；烟熏液的 a\*值和 b\*值均为正值，说明烟熏液色泽偏向红色和黄色；烟熏液通常呈酸性，仅紫苏烟熏液呈弱碱性，pH 值为 8.65。三种果木烟熏液的可溶性固形物、总酚、羰基化合物、总酸显著高于蒜杆、紫苏、陈皮烟熏液，这主要是由于热解原料不同所导致的。

3.2 烟熏液的品质指标存在一定的相关性。其中密度与色泽 L\*值、色泽 b\*值、可溶性固形物含量、羰基化合物；色泽 L\*值与色泽 b\*值、可溶性固形物含量、羰基化合物；色泽 b\*值与可溶性固形物含量；可溶性固形物含量与羰基化合物；pH 值与总酸含量的相关系数均在 0.9 以上，这表明烟熏液的化学成分与物理指标联系密切，其中的酚类、羰基化合物、总酸含量决

定烟熏液的品质。

3.3 烟熏液中 16 种 PAHs 均被检测到。烟熏液中 PAHs 以轻环为主，主要是萘和苊，且七种烟熏液 3 环 PAHs 占比最高。采用 BaP 的毒性当量因子对 7 种烟熏液进行毒性风险评估，研究表明，自制和市售烟熏液均具有一定的毒性，毒性大小依次为：梨木>陈皮>市售>紫苏>蒜杆>桃木>枣木。

### 参考文献

- [1] Leviani R A, Kurniasih R A, Swastawati F. Application of liquid smoke for *Chikuwa tilapia* [C]// IOP Publishing: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 246(1): 012084
- [2] Mathew S, Zakaria Z A. Pyrolytic acid - the smoky acidic liquid from plant biomass [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, 99(2): 611-622
- [3] Swastawati F, Boesono H, Wijayanto D. Antimicrobial activity of corncob liquid smoke and its application to smoked milkfish (*Chanos chanos* Forsk) using electric and mechanical oven [J]. International Proceedings of Chemical,

- Biological and Environmental Engineering, 2014, 67: 109-113
- [4] Pino J A. Characterisation of volatile compounds in a smoke flavouring from rice husk [J]. Food Chemistry, 2014, 153: 81-86
- [5] Maga J A. Smoke in Food Processing [M]. Crc Press, 2018
- [6] 杨峥.腌熏肉制品的烟熏风味与着色[J].肉类研究,1988,1: 8-10  
YANG Zheng. Smoked flavor and coloring of cured bacon products [J]. Meat Research, 1988, 1: 8-10
- [7] 薛桂中,乔明武,黄现青,等.烧烤肉制品加工中多环芳烃和杂环胺形成途径及其防控方法研究进展[J].食品与发酵工业,2022,48(2):293-301  
XUE Guizhong, QIAO Mingwu, HUANG Xianqing, et al. Progress of polycyclic aromatic hydrocarbons and heterocyclic amines generation and preventions in grilled meat [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(2): 293-301
- [8] 韩明,郑玉玺,董蕾,等.龙眼木烟熏液的精制及其挥发性风味物质成分分析[J].中国食品添加剂,2018,2:94-97  
HAN Ming, ZHENG Yuxi, DONG Lei, et al. Purification and volatile flavor components analysis of longan wood smoke liquid [J]. China Food Additives, 2018, 2: 94-97
- [9] 王维君,张义,王稳航.3种烟熏液的成分分析及其对肠衣性能的影响[J].食品研究与开发,2016,37(6):161-165  
WANG Weijun, ZHANG Yi, WANG Wenhang. Composition analysis of three liquid smokes and its effects on properties [J]. Food Research and Development, 2016, 37(6): 161-165
- [10] 谷凤林,宋丽,朱秋劲,等.一种胡椒烟熏液及其制备方法[P].海南省:CN110463893A, 2019-11-19  
GU Fenglin, SONG Li, ZHU Qiujin, et al. One kind of preparation method of pepper liquid smoke [P]. Hainan Province: CN110463893A, 2019-11-19
- [11] GB 5009.2-2016.食品安全国家标准 食品相对密度的测定 [S]  
GB 5009.2-2016. National Food Safety Standard - Determination of Relative Density in Food [S]
- [12] ISO 2173-2003.水果和蔬菜制品可溶性固形物含量的测定 [S]  
ISO 2173-2003. Fruit and Vegetable Products - Determination of Soluble Solids Content [S]
- [13] 郭文,黎玉茗,赵瑞峰,等.色差仪在烟用香精色泽检测中的应用[J].烟草科技,2020,53(10):9  
GUO Wen, LI Yuming, ZHAO Ruifeng, et al. Application of colorimeter in color detection for tobacco flavors [J]. Tobacco Science and Technology, 2020, 53(10): 9
- [14] GB 1886.127-2016.食品安全国家标准 食品添加剂 山植核烟熏香味料 I 号、II 号[S]  
GB 1886.127-2016. National Food Safety Standard - Food Additives -Hawthorn Nuclear Fumigation Flavor I and II [S]
- [15] 张珊珊.核桃壳木醋液的生物活性与化学成分研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2010  
ZHANG Shanshan. Biological activities and chemical profiles of pyrolytic acids from *walnut* shell [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2010
- [16] GB 5009.265-2016.食品安全国家标准 食品中多环芳烃的测定[S]  
GB 5009.265-2016. National Food Safety Standard Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Food [S]
- [17] Ketut B, Arnim, Yetti M, et al. Liquid smoke production quality from raw materials variation and different pyrolysis temperature [J]. International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology, 2016, 6(3): 306-315
- [18] Toth L, Potthast K. Chemical aspects of the smoking of meat and meat products [J]. Advances in Food Research, 1984, 29: 87-158
- [19] 王才威,张守玉,杨东杰,等.木醋液制备及形成机理研究进展[J].化工进展,2020,39(9):3723-3738  
WANG Caiwei, ZHANG Shouyu, YANG Dongjie, et al. Research advance in preparation and formation mechanism of wood vinegar [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(9): 3723-3738
- [20] Vitt S M, Himelbloom B H, Crapo C A. Inhibition of *Listeria innocua* and *L. monocytogenes* in a laboratory medium and cold-smoked salmon containing liquid smoke [J]. Journal of Food Safety, 2001, 21(2): 111-125
- [21] 毛祈萍,何明珍,黄小方,等.基于超高效液相色谱和飞行时间质谱联用的紫苏化学成分鉴定[J].现代食品科技,2021, 37(1):282-291,259  
MAO Qiping, HE Mingzhen, HUANG Xiaofang, et al. Analysis of chemical constituents of *Perilla frutescens* by different methods of drying and freeze drying based on ultra high performance liquid chromatography-quadrupole/ time of flight mass spectrom (UHPLC-Q/TOF MS) [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(1): 282-291
- [22] Faith N G, Yousef A E, Luchansky J B. Inhibition of *Listeria monocytogenes* by liquid smoke and isoeugenol, a phenolic

- component found in smoke [J]. Journal of Food Safety, 1992, 12(4): 303-314
- [23] Petzold G, Gianelli M P, Bugueño G, et al. Encapsulation of liquid smoke flavoring in ca-alginate and ca-alginate-chitosan beads [J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(1): 183-190
- [24] 王则祥,李航,谢文鑫,等.木质素基本结构、热解机理及特性研究进展[J].新能源进展,2020,8(1):6-14  
WANG Zexiang, LI Hang, XIE Wenlun, et al. Progress in basic structure, pyrolysis mechanism and characteristics of lignin [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2020, 8(1): 6-14
- [25] 陈冰玉,邸明伟.木质素解聚研究新进展[J].高分子材料科学与工程,2019,35(6):157-164  
CHEN Bingyu, DI Mingwei. Progress on research of depolymerization of ligin [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2019, 35(6): 157-164
- [26] Budaraga I K, Amim M Y, Bulanin U. Antioxidant properties of liquid smoke production variation of pyrolysis temperature raw and different concentration [J]. International Journal of Pharm Tech Research, 2016, 9(6): 370
- [27] Yusnaini Y, Soeparno S, Suryanto E, et al. Physical, chemical and sensory properties of kenari (*Canarium indicum* L.) shell liquid smoke-immersed-beef on different level of dilution [J]. Journal of the Indonesian Tropical Animal Agriculture, 2012, 37(1): 27-33
- [28] 宋丽,陈星星,谷风林,等.GC-MS 与电子感官结合对烟熏液风味物质的分析[J].食品科学,2020,41(16):193-201  
SONG Li, CHEN Xingxing, GU Fenglin, et al. Flavor components of liquid smoke analyzed by GC-MS combined with electronic sensory systems [J]. Food Science, 2020, 41(16): 193-201
- [29] Zachara A, Galkowska D, Juszczak L. Contamination of smoked meat and fish products from Polish market with polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. Food Control, 2017, 80: 45-51
- [30] Jiao W, Wang T, Khim J S, et al. PAHs in surface sediments from coastal and estuarine areas of the northern Bohai and Yellow Seas, China [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2012, 34(4): 445-456
- [31] Gomaa E A, Gray J I, Rabie S, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in smoked food products and commercial liquid smoke flavourings [J]. Food Additives & Contaminants, 1993, 10(5): 503-521
- [32] Ma X, Han X, Jiang Q, et al. Historical records and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons over the past 100 years in Dianchi Lake, a plateau lake in southwest China [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2018, 75(2): 187-198
- [33] Nisbet I C T, Lagoy P K. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 1992, 16(3): 290-300

---

(上接第 259 页)

- [18] Cuntang Wang, Dai Cheng, Jiankang Cao, et al. Antioxidant capacity and chemical constituents of Chinese jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) at different ripening stages [J]. Food Science and Biotechnology, 2013, 22: 639-644
- [19] Q Zhang, L Wang, Z Wang, et al. Variations of the nutritional composition of jujube fruit (*Ziziphus jujuba* Mill.) during maturation stages [J]. International Journal of Food Properties, 2020, 23(1): 1066-1081
- [20] J Reche, M S Almansa, F Hernández, et al. Physicochemical and antioxidant capacity of jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) at different maturation stages [J]. Agronomy, 2021, 11(1): 132
- [21] Q H Gao, P T Wu, J R Liu, et al. Physico-chemical properties and antioxidant capacity of different jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) cultivars grown in loess plateau of China [J]. Scientia Horticulturae, 2011, 130(1): 67-72
- [22] 周晓明,苏敏,汤永东,等.不同产区红枣天然苯甲酸含量调查与分析[J].新疆农业科学,2017,54(9):1707-1712  
ZHOU Xiaoming, SU Min, TANG Yongdong, et al. Investigation and analysis of natural benzoic acid content of jujube in different production areas [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2017, 54(9): 1707-1712
- [23] 张青云,姜竹茂.食品中天然苯甲酸的溯源分析及本底调查[J].中国食品添加剂,2020,31(2):178-181  
ZHANG Qingyun, JIANG Zhumao. Traceability analysis and background value investigation of natural benzoic acid in food [J]. China Food Additives, 2020, 31(2): 178-181