

## 多种气相色谱定量分析方法同步应用于中药制剂中有效成分的测定

彭淑女, 李华敏, 陈招斌, 王翊如\*

厦门大学化学化工学院, 化学国家级实验教学示范中心(厦门大学), 福建 厦门 361005

**摘要:** 本文改进了一个用气相色谱法分离分析中药制剂中五种主要成分桉叶油醇、樟脑、薄荷醇、水杨酸甲酯、丁香酚含量的本科仪器分析实验。提出同时用内标法、外标法、归一化法对同一组数据文件进行定量并判断定量结果的准确性, 使学生能在有限的教学时间内掌握色谱基础的定性定量方法, 了解不同定量分析方法的适用范围, 学会计算理论塔板数及分离度等。本实验将基本的色谱理论知识融入生活用品风油精等中药制剂的主成分分析中, 使学生真切感受学以致用, 且绿色环保, 有利于培养学生分析实验数据的能力。

**关键词:** 气相色谱; 风油精; 仪器分析实验; 定性定量方法

**中图分类号:** G64; O6

## Simultaneous Application of Multiple Quantitative Analysis Methods in Gas Chromatography for the Determination of Active Ingredients in Traditional Chinese Medicine Preparations

Shunü Peng, Huamin Li, Zhaobin Chen, Yiru Wang \*

National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (Xiamen University), College of Chemistry and Chemical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian Province, China.

**Abstract:** This study enhances an undergraduate instrumental analysis experiment focused on the separation and quantification of five principal components—eucalyptol, camphor, menthol, methyl salicylate, and eugenol—in traditional Chinese medicine preparations using gas chromatography. It introduces a simultaneous application of internal standard, external standard, and normalization methods to the same dataset to assess the accuracy of quantitative results. This approach enables students to grasp fundamental chromatographic qualitative and quantitative techniques, understand the applicability of various quantitative methods, and learn to calculate theoretical plate numbers and resolution within a limited teaching timeframe. By integrating basic chromatographic theory with the analysis of main components in everyday items such as wind oil essence, this experiment not only demonstrates the practical application of theoretical knowledge but also promotes environmental sustainability. It effectively cultivates students' capabilities in analyzing experimental data.

**Key Words:** Gas chromatography; Wind oil essence; Instrumental analysis experiment; Qualitative and quantitative methods

外用药油使用历史悠久, 因其携带、使用方便, 深受大众喜欢。中药精油品种繁多, 常见的有风油精、驱风油、白花油、百草油等, 其主要成分大部分含有桉叶油醇、樟脑、薄荷醇、水杨酸甲

收稿: 2024-12-04; 录用: 2025-01-22; 网络发表: 2025-05-22

\*通讯作者, Email: yrwang@xmu.edu.cn

基金资助: 教育部基础学科拔尖学生培养计划2.0 (20222111, 20232023); 福建省本科高校教育教学研究重大项目(FBJY20230270); 国家自然科学基金(32230063)

酯、丁香酚等。具有祛风醒神, 止痛止痒之功效, 用于头痛头晕、晕车晕船、恶心、蚊叮虫咬、皮肤瘙痒、缓解感冒、风湿麻痹痛症状<sup>[1]</sup>。选择家用常见的驱风油、风油精为分析对象, 实验环境比较友好<sup>[2]</sup>。

风油精的处方<sup>[1]</sup>: 桉叶油醇 $30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 樟脑 $30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 薄荷脑 $320\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 水杨酸甲酯 $260\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 丁香酚 $30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

风油精的制法<sup>[1]</sup>: 取薄荷脑、樟脑, 加入液状石蜡适量, 再加入桉叶油醇、水杨酸甲酯、丁香酚、香精 $100\text{ g}$ 、叶绿素适量, 加液状石蜡使成 $1000\text{ g}$ , 混匀, 静置 $24\text{ h}$ , 取澄清液, 分装, 即得。

风油精的质量标准中要求风油精中薄荷脑、水杨酸甲酯应为标示量的 $90.0\%$ – $110.0\%$ ; 含樟脑、桉叶油醇应为标示量的 $85.0\%$ – $115.0\%$ ; 含丁香酚应为标示量的 $90.0\%$ – $120.0\%$ <sup>[1]</sup>, 用内标法监测风油精中五种主要成分的含量。本实验同时用内标法、外标法、归一化法三种方法计算风油精中五种主要成分的含量并对实验结果进行比对<sup>[3]</sup>, 学习各种定量分析方法的特点及适用范围。

通过本实验, 学生能够阐述气相色谱仪的工作原理、基本结构和应用范围; 掌握气相色谱仪的使用方法 & 气相色谱手动进样技术; 掌握保留值定性方法, 学会计算理论塔板数及分离度; 掌握内标法、外标法、归一化法三种定量方法, 并了解不同定量分析方法的适用范围。实验分组: 4–6人一组, 每2人共同使用一台仪器。实验课时: 4个学时。实验采用小组轮转模式。

## 1 仪器与试剂

### 1.1 实验仪器

- (1) GC-2014 C气相色谱仪, 配置氢火焰离子化检测器(岛津仪器(苏州)有限公司)。
- (2) 色谱柱: Inert Cap-5 ( $30\text{ m}\times 0.53\text{ mm}\times 5\text{ }\mu\text{m}$ ) (技尔(上海)商贸有限公司)。
- (3) 气体发生器: GCA-580A低噪音空气泵, GCN-580A高纯氮发生器, GH-1000高纯氢发生器(厦门科分科技有限公司)。

### 1.2 试剂及耗材

- (1) 标准试剂: 桉叶油醇(阿拉丁试剂有限公司, 上海,  $99\%$ ), 樟脑(吉至生化科技有限公司, 上海,  $98.0\%$ ), 薄荷醇(绿茵试剂玻仪有限公司, 厦门,  $99\%$ ), 水杨酸甲酯(源叶生物科技有限公司, 上海,  $98\%$ ), 丁香酚(阿拉丁试剂有限公司, 上海,  $99\%$ )。

标准储备液: 根据风油精质量标准<sup>[1]</sup>配制 $10\text{ mL}$ 混标储备液, 乙醇(国药集团化学试剂有限公司, AR)为溶剂, 五种标准物质的浓度分别为: 桉叶油醇 $15\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 樟脑 $15\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 薄荷脑 $160\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 水杨酸甲酯 $130\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 丁香酚 $15\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

- (2) 标准溶液的配制。分别移取混标储备液 $1\text{ mL}$ 、 $2\text{ mL}$ 、 $3\text{ mL}$ 、 $4\text{ mL}$ 于4个 $10\text{ mL}$ 容量瓶, 分别加入内标物环己酮(西陇科学股份有限公司, AR)  $200\text{ }\mu\text{L}$ , 用乙醇定容。

- (3) 风油精试样溶液的配制。风油精(漳州水仙药业股份有限公司, 批号: 100551), 斧标驱风油(梁介福广东药业有限公司, 批号: A061185)。准确称取风油精样品 $1.00\text{ g}$ , 置于 $10\text{ mL}$ 的容量瓶, 加入环己酮(内标)  $200\text{ }\mu\text{L}$ , 用乙醇定容。

- (4)  $1\text{ }\mu\text{L}$ 、 $5\text{ }\mu\text{L}$ 或 $10\text{ }\mu\text{L}$ 微量进样器。

## 2 实验步骤

- (1) 编辑方法文件<sup>[4]</sup>。气化室温度:  $280\text{ }^\circ\text{C}$ ; 程序升温: 初始温度为 $130\text{ }^\circ\text{C}$ , 保持 $10\text{ min}$ 后, 以 $40\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率升温到 $200\text{ }^\circ\text{C}$ , 保持 $3\text{ min}$ 。

载气: 高纯氮气, 载气线速度恒定 $45\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 燃气: 氢气, 流量为 $40\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ; 助燃气: 空气, 流量为 $400\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。分流模式, 分流比 $10:1$ ; 隔垫吹扫:  $3\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ; 尾吹气:  $30\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

- (2) 仪器空白。用微量进样器取 $1\text{ }\mu\text{L}$ 乙醇进样分析, 检查仪器空白, 采集完整的色谱图。

- (3) 标准溶液。用微量进样器取 $1\text{ }\mu\text{L}$ 混合标准溶液, 从低浓度到高浓度依次进样分析, 采集完整

的色谱图。

(4) 试样溶液。在相同的色谱条件下，用微量进样器取1  $\mu\text{L}$  试样溶液进样分析，采集完整的色谱图。

### 3 数据处理与分析讨论

从图1可以看出五种组分分离良好，标准品2#色谱图与试样色谱图基本重合，说明标准品2#的五种组分浓度含量跟试样中的浓度接近。

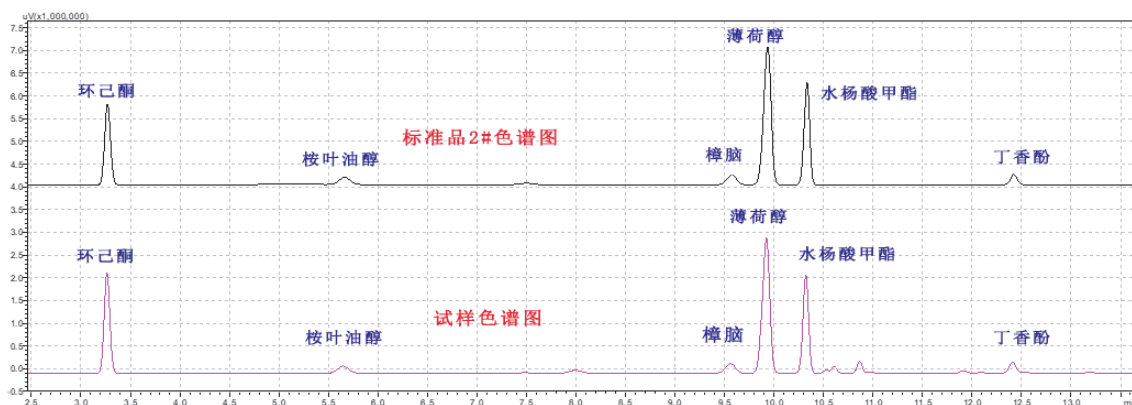


图1 混合标准溶液及试样色谱图比较

#### 3.1 计算理论塔板数及理论塔板高度

可以根据色谱峰的保留时间及峰宽来评价色谱柱的分离效能。例如，薄荷醇的出峰时间为9.94 min，峰底宽0.20 min，柱长30 m，则以薄荷醇为参照物计算得到的理论塔板数 $n$ 和理论塔板高度 $H$ 分别为：

$$n = 16 \left( \frac{t_R}{W} \right)^2 = 16 \times \left( \frac{9.94}{0.20} \right)^2 = 39521 \quad (1)$$

$$H = \frac{L}{n} = \frac{30}{39521} = 7.6 \times 10^{-4} \text{ m} = 0.76 \text{ mm} \quad (2)$$

使用塔板理论计算时，需注意是采用什么物质来计算的，因为不同物质在同一色谱柱上分配系数不同，所以同一色谱柱对不同物质的柱效能是不同的。另外，塔板理论的应用是有假设前提的，它将载气看成脉动间歇过程，假设在每一个平衡过程间隔内，平衡可以迅速达到，每次分配的分配系数相同，且试样沿色谱柱方向的扩散可忽略。风油精的质量标准中要求塔板数大于10000，如果气相色谱法理论塔板数达不到10000，表明柱效达不到检测要求，则需要更换色谱柱或者优化色谱分离条件。

#### 3.2 计算薄荷醇和樟脑的分离度

色谱峰的分离状况可以采用分离度 $R$ 来表征， $R$ 值等于相邻两色谱峰保留时间之差与两色谱峰峰底宽的平均值的比值，如公式3所示：

$$R = \frac{t_{R2} - t_{R1}}{\frac{W_2 + W_1}{2}} = \frac{2(t_{R2} - t_{R1})}{W_2 + W_1} \quad (3)$$

在实验中，薄荷醇与樟脑比较难分离，两个物质的色谱峰比较靠近(见图1)，所以选择计算薄荷醇和樟脑两个物质的分离度。樟脑的保留时间为9.56 min，峰底宽为0.17 min；薄荷醇的保留时间为9.94 min，峰底宽为0.21 min，代入公式(3)进行计算，得到

$$R = \frac{2 \times (9.94 - 9.56)}{0.17 + 0.21} = 2.0$$

相邻两色谱峰的保留时间的差值反映了色谱分离的热力学性质, 可以通过优化色谱柱的控温程序等进行调节<sup>[5]</sup>; 色谱峰的宽度则反映了色谱过程的动力学因素, 与固定液的厚度等因素有关, 当进样量过大, 浓度梯度造成的分子扩散和待测组分在载气和固定液两相之间的质量的传递不能瞬间达到平衡, 是造成色谱峰扩展、柱效能下降的原因。理想的色谱峰应是峰形对称且尖锐, 若 $R=1$ , 两峰分离达98%; 若 $R=1.5$ , 两峰分离达99.7%, 可以认为相邻两峰完全分离。

### 3.3 定量分析

对同一组数据, 分别用内标法、外标法和归一化法进行定量。

#### 3.3.1 内标法

风油精的质量标准中采用内标法, 以环己酮为内标, 用待测组分与内标物的峰面积比( $A_i/A_s$ )对待测组分与内标物的浓度比( $C_i/C_s$ )作图, 拟合出内标工作曲线, 再计算风油精试样中五种主成分的含量。

$$f_{is} = \frac{f_i}{f_s} = \frac{m_i A_s}{m_s A_i} \quad (4)$$

$$\frac{A_i}{A_s} = \frac{C_i}{C_s} \cdot \frac{1}{f_{is}} \quad (5)$$

其中,  $f_{is}$ 为待测组分与内标物环己酮的相对校正因子,  $f_i$ 、 $m_i$ 、 $A_i$ 和 $C_i$ 分别为待测组分的绝对校正因子、质量、色谱峰面积和浓度,  $f_s$ 、 $m_s$ 、 $A_s$ 和 $C_s$ 分别为内标物环己酮的绝对校正因子、质量、色谱峰面积和浓度。

拟合出五种标准物质的内标工作曲线及用内标法测定风油精中五种主成分的含量, 并计算其与处方用量比值, 结果如表1所示。

表1 内标工作曲线及内标法测定风油精中五种主成分的含量

序号	物质名称	内标工作曲线 (线性范围1.5-64.0 g·L <sup>-1</sup> )	拟合度 (R <sup>2</sup> )	含量/(g·L <sup>-1</sup> )	与处方用量 比值/%	重现性RSD/% (n=3)
1	桉叶油醇	$Y = 1.129X - 0.009$	0.9986	27.10	90.3	3.4
2	樟脑	$Y = 1.335X - 0.034$	0.9930	29.66	98.9	2.9
3	薄荷醇	$Y = 1.202X - 0.167$	0.9970	339.60	106.1	2.3
4	水杨酸甲酯	$Y = 0.755X - 0.040$	0.9988	264.25	101.6	1.5
5	丁香酚	$Y = 1.027X - 0.017$	0.9965	34.78	115.9	2.3

从表1可以看出, 标准样品中五种物质的内标工作曲线拟合度良好, 相对标准偏差比较小, 用内标法测出的风油精的五种成分的含量与处方用量比值均在质量标准要求范围内。内标法适用于复杂体系中待测组分的分析, 其优点是定量准确, 进样量及色谱仪器的微小变化对定量结果影响不大, 特别是在样品前处理(如浓缩、萃取、衍生化等)前加入内标物, 再进行样品前处理, 可以部分补偿待测组分在样品前处理过程中的损失。若要获得更高精度的实验结果时, 可以加入数种内标物, 以提高定量分析的准确度。

#### 3.3.2 外标法

以浓度为横坐标, 峰面积为纵坐标, 用峰面积对浓度作图, 采用最小二乘法拟合可以得到线性回归方程, 拟合出外标工作曲线。在相同的实验条件下取未知试液进行色谱分析, 将待测物的峰面积带入线性回归方程中, 计算风油精试样中五种成分的含量。

拟合出五种标准物质的外标工作曲线及用外标法测定风油精中五种主成分的含量, 并计算其与处方用量比值, 结果如表2所示。

表2 外标工作曲线及外标法测定风油精中五种主成分的含量

序号	物质名称	外标工作曲线 (线性范围1.5-64.0 g·L <sup>-1</sup> )	拟合度 (R <sup>2</sup> )	含量/(g·L <sup>-1</sup> )	与处方用量比值/%	重现性RSD/% (n = 3)
1	桉叶油醇	$Y = 2155349X - 196186$	0.9981	26.04	86.3	3.5
2	樟脑	$Y = 2545866X - 1139908$	0.9994	28.60	95.3	2.0
3	薄荷醇	$Y = 2293279X - 4639153$	0.9995	326.69	102.1	2.5
4	水杨酸甲酯	$Y = 1440201X - 557715$	0.9986	253.40	97.5	4.6
5	丁香酚	$Y = 1959552X - 515440$	0.9998	33.54	111.8	1.3

从表2可以看出,用外标法做出的五种物质标准工作曲线拟合度良好,相对标准偏差比较小,外标法测出的风油精五种成分的含量与处方用量比值均在质量标准合理范围内。

外标法的操作和计算都简便,不必用校正因子,但要求实验操作条件稳定,进样重复性好,否则对分析结果影响较大。采用微量注射器吸取样品溶液时须反复排去针内气泡,且抽吸溶液时须慢些,以免过快操作导致吸入的试液量不足,影响到进样量。对于进样体积不可视的微量注射器,例如1  $\mu\text{L}$ 或5  $\mu\text{L}$ 的微量注射器,进样操作时尤其需要注意实验操作技能。

为了判断外标法的计算结果与内标法的计算结果是否存在显著性差异,首先用F检验法进行判断<sup>[6]</sup>。

$$\text{以薄荷醇为例, } S_{\text{内标}} = 2.4\%, \quad S_{\text{外标}} = 2.6\%, \quad F_{\text{计算}} = \frac{S_{\text{大}}^2}{S_{\text{小}}^2} = \frac{2.6\%^2}{2.4\%^2} = 1.2。$$

式中,  $S_{\text{大}}$ 和 $S_{\text{小}}$ 分别代表两组数据中标准偏差大的数值和小的数值。当 $F_{\text{计算}} < F_{\text{表}}$ 时,再继续用t检验法判断 $\bar{x}_1$ 和 $\bar{x}_2$ 是否存在显著性差异。

当测定次数 $n_1 = n_2 = 3$ ,可以计算得到合并标准偏差

$$S_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} = \sqrt{\frac{(3 - 1) \times 2.4\%^2 + (3 - 1) \times 2.6\%^2}{3 + 3 - 2}} = 2.5\%$$

进一步根据公式

$$t_{\text{计算}} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_p} \sqrt{\frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}} = \frac{106.1\% - 102.1\%}{2.5\%} \sqrt{\frac{3 \times 3}{3 + 3}} = 1.96$$

用外标法的计算结果与用内标法的计算结果进行比对,结果如表3所示。查表 $F_{0.05}(2,2) = 19.0$ ,五种主成分的 $F_{\text{计算}}$ 均小于 $F_{\text{表}}$ ,说明用外标法与内标法所获得实验结果的精密度不存在大的差别。查表 $t_{0.05,4} = 2.776$ ,除了薄荷醇外,用外标法分析桉叶油醇、樟脑、水杨酸甲酯、丁香酚的含量与用内标法分析的结果不存在显著性差异。由于本科实验课时有限,仅重复测量3次。事实上,采用t检验时,需增加测定次数。

表3 外标法和内标法计算结果的比较

序号	物质名称	$F_{\text{计算}}$	$t_{\text{计算}}$
1	桉叶油醇	1.04	1.42
2	樟脑	2.27	1.78
3	薄荷醇	1.13	1.96
4	水杨酸甲酯	8.01	1.53
5	丁香酚	3.29	2.34

### 3.3.3 归一化法

采用归一化法计算五种成分的含量时,定义薄荷醇相对校正因子 $f_{is}$ 为1,再分别计算标准品中其他四种主成分相对于薄荷醇的相对校正因子,并定义其他未知物质的相对校正因子为1。用归一化法计算时须注意手动去掉乙醇溶剂和环己酮内标的峰面积。

相对校正因子计算公式如下:

$$f_{is} = \frac{f_i}{f_s} = \frac{m_i A_s}{m_s A_i}$$

式中, $m_i$ 、 $f_i$ 、 $A_i$ 分别表示标准溶液中各组分的质量、绝对校正因子和色谱峰面积, $m_s$ 、 $f_s$ 、 $A_s$ 分别表示标准溶液中薄荷醇的质量、绝对校正因子和色谱峰面积。

再根据下式计算各组分的含量。

$$W_i = \frac{f_{is} A_i}{\sum_{i=1}^n (f_{is} A_i)} \times 100\%$$

其中, $W_i$ 、 $A_i$ 为试样中各组分的质量分数和色谱峰面积。

以桉叶油醇标准曲线其中一个点为例计算

$$f_{is} = \frac{m_i A_s}{m_s A_i} = \frac{1.270 \times 68742043}{16.05 \times 5304377} = 1.025$$

再算出另外三个浓度的 $f_{is}$ ,最后算平均值 $\overline{f_{is}}$ 。

采用归一化法测定风油精中五种主成分的含量,并计算其与处方用量比值,结果如表4所示。

表4 归一化法计算风油精中五种主成分的含量

序号	物质名称	$\overline{f_{is}}$	含量/%	与处方用量 比值/%	重现性RSD/% (n=3)
1	桉叶油醇	1.037	3.5	117.2	1.8
2	樟脑	0.995	3.8	127.5	0.4
3	薄荷醇	1.000	44.0	137.5	1.4
4	水杨酸甲酯	1.513	34.0	131.0	4.5
5	丁香酚	1.201	4.6	151.9	3.1

从表4可以看出,用归一化法计算得到的重现性较好,五种主成分含量的计算结果是以百分含量表示。当试样中所有组分都能流出色谱柱,且检测器对所有组分都有响应产生信号,可以采用归一化法,这个方法比较简便,定量结果与进样量无关(在色谱柱不超载的范围内),操作条件变化对结果影响较小,经常用作高含量有机合成产品纯度检测、精油含量检测等。

用内标法的计算结果与用归一化法的计算结果进行比对,结果如表5所示。从 $F$ 检验来看,樟脑的 $F_{\text{计算}} > F_{\text{表}}$ 说明樟脑用内标法与归一化法所获得实验结果的精密度存在比较大的差别。从 $t$ 检验来看,归一化法的计算结果与内标法存在显著性差异。事实上,风油精样品配方里还有加了石蜡油及香精、叶绿素等,其中石蜡油与叶绿素在气相色谱上出不了峰,而归一化法的原则是需要所有的组分都能在气相色谱上出峰,故归一化法不适合用于测定风油精中五种成分的含量。

## 4 结语

(1) 气相色谱仪器分析实验涉及的知识点比较多,气相色谱条件的摸索和设置也比较复杂。本实验内容翔实,设计课时为4学时,可以根据实际情况增减实验内容。

(2) 实验普适性强,如果分析目标物改用驱风油、白花油、百草油、清凉油等相似对象,只需略微修改色谱条件及调整1-2个标准品即可分析。实验对象为常用中药制剂,学生兴趣浓厚,实验难度

表5 归一化法与内标法测定结果的比较

序号	物质名称	$F_{\text{计算}}$	$t_{\text{计算}}$
1	桉叶油醇	2.20	12.48
2	樟脑	28.71	16.93
3	薄荷醇	0.64	17.53
4	水杨酸甲酯	14.02	8.32
5	丁香酚	0.32	11.56

可调, 有利于多层次提升学生分析与解决问题的能力。

(3) 本实验创新点在于通过一组进样数据, 选择三种不同的计算方法, 作标准工作曲线及计算风油精中五种成分的含量。引导学生如何用外标法、内标法、归一化法三种方法测定商品化风油精中五种主要成分的含量。对比三种方法的差异, 讨论这三种分析方法的适用性。本实验将基本的色谱理论知识融入仪器分析实验教学中, 让学生真切感受学以致用, 丰富了实验内容, 更加有利于培养学生分析数据的素质与能力。即使学生由于进样技术掌握不好导致外标法计算结果不准确时, 也能通过内标法计算达到理想的计算结果。

(4) 本实验根据风油精质量标准配制与测试风油精组分含量相近比例的标准溶液, 实验结果显得更加合理及适用。文中风油精试样直接用乙醇稀释10倍, 风油精中的液体石蜡和香精等高沸点物质在色谱柱中不会出峰。完成一学期的实验教学后, 色谱峰重现性好, 不影响色谱柱的分离效果。事实上, 原卫生部的标准方法也是直接进样。一学期实验教学结束后, 可以清洗玻璃衬管以及高温老化色谱柱对气相色谱仪进行有效维护。

#### 参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国卫生部药典委员会. 中华人民共和国卫生部药品标准: 中药成方制剂(第九分册). 标准编号: WS3-B-1708-94. 北京: 人民卫生出版社, 1994: 9-42.
- [2] 李爱峰, 贾文丽, 王蕾, 刘静文. 大学化学, **2019**, *34* (3), 16.
- [3] 李璟明, 丁博文, 李楠, 努尔古丽. 大学化学, **2024**, *39* (8), 263.
- [4] 姚金凤, 张瑞锋. 实验室研究与探索, **2009**, *28* (10), 42.
- [5] 钱俊红, 胡坪, 周蕾, 张文清, 邹冬璇, 王燕. 大学化学, **2020**, *35* (3), 61.
- [6] 华东理工大学分析化学教研组、四川大学工科化学基础课程教学基地. 分析化学. 第6版. 北京: 高等教育出版社, 2009.