

# 植物甾醇对卷烟主流烟气中 PAHs 的影响

刘少民<sup>1</sup>, 丁斌<sup>1</sup>, 童红武<sup>1</sup>, 闫向阳<sup>1</sup>,

阮晓明<sup>2</sup>, 徐海涛<sup>2</sup>, 王青海<sup>2</sup>, 岳勇<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 中国科学技术大学烟草与健康研究中心, 合肥市徽州大道 1129 号 230052;

<sup>2</sup> 山东中烟工业公司青岛卷烟厂, 青岛 266101

**摘要:** 运用 GC-MS 法研究了在卷烟烟支中分别加入胆甾醇、麦角甾醇、豆甾醇和  $\beta$ -谷甾醇对主流烟气中 14 种多环芳烃释放量的影响并探讨了甾醇类物质在卷烟燃吸时产生多环芳烃的机理。结果表明: 游离甾醇的总量与主流烟气中多环芳烃的总释放量以及苯并[a]芘的释放量都呈显著正相关, 而不同甾醇类物质对主流烟气中不同的多环芳烃含量的影响是有差异性的, 胆甾醇显著地影响三环多环芳烃的释放量,  $\beta$ -谷甾醇显著地影响四环多环芳烃的释放量, 豆甾醇对于四环、五环、六环多环芳烃的释放量的影响很显著, 麦角甾醇对所有 PAHs 的释放量都有显著的影响。

**关键词:** 植物甾醇; 多环芳烃; 气质联用; 卷烟烟气

中图分类号: TS411.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-5708(2007)05-0010-07

## Influence of phytosterols on PAHs in mainstream smoke

LIU Shao-min<sup>1</sup>, DING Bin<sup>1</sup>, TONG Hong-wu<sup>1</sup>, YAN Xiang-yang<sup>1</sup>, RUAN Xiao-ming<sup>2</sup>,

XU Hai-tao<sup>2</sup>, WANG Qing-hai<sup>2</sup>, YUE Yong<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Research Center of Tobacco and Health, University of Science and Technology of China, Hefei 230052, China;

<sup>2</sup> Qingdao Cigarette Factory, China Tobacco Shandong Industrial Corporation, Qingdao, 266101, China

**Abstract:** Relation between addition levels of cholesterol, ergosterol, stigmasterol, and  $\beta$ -sitosterol into cigarettes and delivery of 14 types of PAHs was studied by GC-MS with standard method. Results showed that there were significant positive correlations between quantity of free phytosterols and the delivery of PAHs and benz[a]pyrene and diverse phytosterols' effects on the delivery of various types of PAHs were different when the addition level changed. The delivery of three-ring PAHs and four-ring PAHs were significantly influenced by cholesterol and  $\beta$ -sitosterol, respectively. The delivery of four, five, six ring PAHs were significantly influenced by stigmasterol, and delivery of all ring PAHs were significantly influenced by ergosterol.

**Key words:** phytosterol; polycyclic aromatic hydrocarbons; GC-MS; cigarette smoke

烟草含有多种植物甾醇, 特别是具有代表性的胆甾醇、豆甾醇和  $\beta$ -谷甾醇(结构见图 1), 而麦角甾醇作为监控烟草是否霉变的重要化学指示物, 也倍受关注。总植物甾醇在烟草中的含量约为 0.2% 左右, 它们在烟草中分别以游离态、酯态和糖苷态形式存在。卷烟燃吸时约 20% ~ 25% 的烟草植物甾醇完整地转移到

烟气中, 这种转移或是通过游离甾醇的蒸馏, 或通过酯类和糖苷类甾醇水解生成的甾醇蒸馏而实现的, 其余的植物甾醇, 无论是游离的还是结合态的, 在卷烟燃吸时均发生各种各样的降解而产生多种产物, 包括气态的烃类和多环芳烃类(PAHs)化合物<sup>[1]</sup>。

卷烟的燃吸过程是处于一个室温至高达 900 °C 的温度范围内, 并且伴随着不同的氧气浓度下燃烧的。这个过程包含了烟叶成分的挥发性转移以及各成分之间的高温裂解合成, 至今尚没有完整的机理来解释这一过程, 使得目前仍然没有统一的模拟裂解装置来真实地体现卷烟燃烧过程。仅有的几篇文献报道了使用

作者简介: 刘少民, 教授、研究生导师, 主要从事烟草化学研究,

Tel 0551-3492147, E-mail liusm@ustc.edu.cn

基金项目: 山东中烟工业公司资助项目(2006-1)

收稿日期: 2007-05-29

裂解方式研究甾醇对卷烟烟气中 PAHs 释放量影响的工作,而且研究结果并不完全一致。Freudenthal 等<sup>[2]</sup>和 Schepartz 等<sup>[3]</sup>研究认为含有大量甾醇的烟草己烷萃取物是卷烟烟气 PAHs 的主要前体物,卷烟烟气中 61% 的苯并[a]芘(BaP)是由它裂解产生的。Johnstone 等<sup>[4]</sup>和 Stedmar<sup>[5]</sup>的研究表明豆甾醇在 750 °C 下热解可以生成苯并[a]芘;在 Badger 等<sup>[6]</sup>的研究工作中表明,在豆甾醇的裂解过程中,可能主要是发生了甾醇骨架的一系列单分子反应后形成了菲、蒽等 PAHs,他们认为其形成是依赖于甾醇的多环骨架的;在 Britt 等<sup>[7]</sup>的研究工作中表明使用闪式真空裂解法,豆甾醇和豆甾醇酯在 700 °C 下生成菲、蒽等的原因可能是因为缺乏双分子反应产生的。

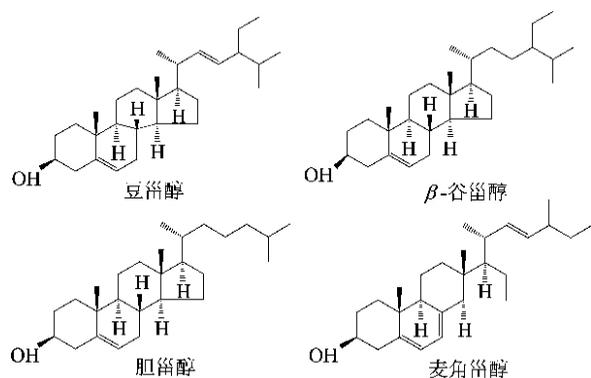


图 1 植物甾醇结构式

在热解模式研究基础上,本文尝试通过外加法来研究卷烟中特定烟气组分的形成机理和相关前体物对烟气成分的影响。试验以游离态的胆甾醇、豆甾醇、谷甾醇和麦角甾醇为研究对象,按照一定的添加量介入到卷烟烟丝中,考察卷烟烟气中 PAHs 释放量的变化,研究甾醇对卷烟主流烟气中 PAHs 释放量的影响,探讨并推测 PAHs 的形成机理。

## 1 材料和方法

### 1.1 主要试剂和仪器

胆甾醇、麦角甾醇、豆甾醇和  $\beta$ -谷甾醇及 14 种多环芳烃(萘,二氢萘,苊,菲,蒽,荧蒽,苯并[a]蒽,屈,苯并[b]荧蒽,苯并[k]荧蒽,苯并[a]芘,茚并[1,2,3-cd]芘,二苯并[a,h]蒽及苯并[g,h,i]芘)的标准物均购自 Sigma 公司,纯度均大于 97%;1,2-二(9-蒽基)乙烷(I.S.)(>97%,自制); $5\alpha$ -胆甾醇(Sigma 公司);环己烷、甲醇和二氯甲烷(色谱纯,美国 TEDIA 公司);去离子水;其他化学试剂均为分析纯。

CQX25-06 超声波清洗器(上海必能信超声有限公司);固相萃取小柱(Bond Elut Jr.Si 美国 Varian 公司);HP6890-5973MSD 型气相色谱-质谱联用仪(Agilent Technologies, USA);HP6890NGC(配 HP768 自动进样器和 FID 检测器)(Agilent Technologies, USA)。

### 1.2 卷烟烟丝中游离甾醇的测定

#### 1.2.1 甾醇的萃取

准确称取 1.0 g 烟样置于一洁净干燥具塞玻璃瓶中,加入 200  $\mu$ g  $5\alpha$ -胆甾醇(内标)和 20 mL 二氯甲烷萃取溶剂,超声 40 min,于 2000 r/min 速率下离心 3 min,取上层清液过 0.45  $\mu$ m 有机滤膜,旋转浓缩萃取液至 1 mL。

#### 1.2.2 标准曲线的建立

用二氯甲烷为溶剂分别配制 4 种甾醇的系列浓度溶液,胆甾醇、麦角甾醇、豆甾醇和  $\beta$ -谷甾醇的浓度分别为 40, 80, 160, 320, 640  $\mu$ g/mL,所有溶液中均加入等量 50  $\mu$ g/mL 的  $5\alpha$ -胆甾醇作为内标。

#### 1.2.3 色谱条件

毛细管柱为 HP-5(30 m  $\times$  0.32 mm i. d. 0.25  $\mu$ m; 美国 J&W 公司)。进样口温度 270 °C;氦火焰离子化检测器的温度 290 °C;载气为氮气,流速 1.0 mL/min;空气流速 400 mL/min,  $H_2$  流速 30 mL/min;柱升温程序为:250 °C(10 min)  $\xrightarrow{2\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}}$  260 °C(30 min);分流比 15:1,进样量 1  $\mu$ L。

质谱检测器采用 EI 轰击离子源,离子源温度为 200 °C,色谱和质谱接口温度为 270 °C。其他的色谱条件参照 GC-FID 的参数设定。质谱检测器各参数如下:扫描范围 50 ~ 600 m/z,扫描速度 1.1 scans/s,电子轰击能量 70 eV,EM 为 2000 V。

### 1.3 卷烟样品的制备

由市场上购置某烤烟型卷烟,拆开包装取出烟支,将烟支放在温度  $22 \pm 1$  °C 和湿度  $60\% \pm 2\%$  下平衡 48 h,挑选在平均质量  $\pm 0.02$  g 范围内的烟支为实验所用烟支。根据甾醇组分在烟丝中的含量,称取一定量固体或液体试剂溶于乙醇或乙醚中,用微量注射器吸取 100  $\mu$ L,均匀地注入试验烟支中,胆甾醇、豆甾醇和  $\beta$ -谷甾醇分别以其平均含量的 0.5、1.0、1.5、2.0 倍量添加,麦角甾醇以霉变卷烟样品平均含量的 0.5、1.0、1.5、2.0 倍量添加,然后在上述相同环境下平衡 48 h 以上备用。对照烟样为注入 100  $\mu$ L 乙醇或乙醚的烟支。

## 1.4 卷烟主流烟气中 PAHs 的测定

### 1.4.1 样品前处理

卷烟抽吸采用 ISO4387 :2000 方法。将捕集了主流烟气气相物的剑桥滤片用 60.00 mL 环己烷浸泡并加入 100  $\mu$ L 1,2-二(9-蒎基)乙烷(内标物)超声提取 40 min。依次用甲醇和环己烷淋洗 SPE 小柱,至柱填料全部透明,准确移取 10.00 mL 提取液于 SPE 柱内,加压过柱后,用 5 mL  $\times$  3 环己烷淋洗,收集全部流出液及洗脱液,于 50~60  $^{\circ}$ C 水浴、抽真空旋转浓缩至约 1 mL,取 1  $\mu$ L 进样用 GC-MS 分析,每个样品均平行测定 3 次。

### 1.4.2 色谱条件

GC-MS 条件如下:色谱柱为 DB-5MS 型,30 m  $\times$  0.25 mm  $\times$  0.25  $\mu$ m 高分辨率毛细管柱, J&W Scientific (Folsom, CA)。载气为氦气,恒流速 1.5 mL/min。程序升温为 50  $^{\circ}$ C 保持 1.0 min,以 25  $^{\circ}$ C/min 升至 150  $^{\circ}$ C;以 4  $^{\circ}$ C/min 升至 280  $^{\circ}$ C,保持 15.0 min;再以 5  $^{\circ}$ C/min 升至 290  $^{\circ}$ C,保持 10.0 min。进样口温度为 270  $^{\circ}$ C,进样量 1  $\mu$ L,分流比为 5:1。

质谱检测器采用 EI 轰击离子源,离子源温度为 200  $^{\circ}$ C,色谱和质谱接口温度为 270  $^{\circ}$ C。质谱检测器各参数如下:扫描范围 50~600 amu,扫描速度 1.1 scans/s,电子轰击能量 70 eV,EM 为 2000 V。

### 1.4.3 标准曲线的建立

将含有 14 种 PAHs 的标样用环己烷稀释到 20  $\mu$ g/mL,配制成 6 个系列浓度的混合标样(内标浓度均为 1.0  $\mu$ g/mL)。以标样与内标的峰面积比为纵坐标,标样与内标的浓度比为横坐标,计算出 14 种 PAHs 的标准曲线和线性范围。在线性范围内,GC/MS 在 SIM 模式下对 PAHs 组分的响应具有良好的线性特征,置信度大于 0.999。

### 1.5 贡献率的计算

对于每种甾醇(除了麦角甾醇)而言,分别测定每个添加水平(0 倍,0.5 倍,1.0 倍,1.5 倍,2.0 倍)所对应产生的 PAHs 的释放量。以甾醇在烟草中的百分含量为横坐标,所对应的 PAHs 释放量为纵坐标,作出回归曲线。以甾醇在零含量时的 PAHs 释放量相对于空白样品中 PAHs 释放量的降低率定义为贡献率<sup>[8]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 甾醇及 PAHs 的定量分析

取对照卷烟样品,在相同条件下进行平行处理,重复 5 次平行测定,得出烟丝中各游离甾醇含量和主流烟气中 PAHs 的释放量,结果见表 1 和表 2,其中植物甾醇

的测定中,麦角甾醇是采用同种卷烟的霉变样品测定。

表 1 对照卷烟样品烟丝中游离态植物甾醇的测定结果

植物甾醇	平均含量 ( $\mu$ g/g)	回收率 /%	RSD /%
胆甾醇	100	95.8	1.5
豆甾醇	270	98.3	3.0
$\beta$ -谷甾醇	220	97.4	1.9
麦角甾醇(霉变样品)	90	102.5	1.1

表 2 对照卷烟样品主流烟气中 PAHs 组分的测定结果

PAHs	环数	平均含量 (ng/cig)	回收率 /%	RSD /%
芘	3	141.5	88.1	5.9
二氢芘		24.3	85.4	2.1
芴		135.7	89.7	3.4
菲		161.6	104.3	2.7
蒽		83.8	92.9	1.9
荧蒽	4	66.2	94.5	4.8
苯并[a]蒽		34.6	101.8	2.3
屈		37.8	90.6	3.2
苯并[b]蒽	5	9.3	92.7	4.7
苯并[k]蒽		1.8	104.3	5.4
苯并[a]芘		12.4	90.1	4.4
二苯并[a,h]蒽		9.8	103.6	5.7
茚并[1,2,3-cd]芘	6	9.4	75.2	9.8
苯并[g,h,i]芘		7.1	94.7	4.1

### 2.2 卷烟中总游离甾醇和 PAHs 总量的比较分析

按试验方法,比较研究了市售 8 种国产烤烟型卷烟中 PAHs 与总游离甾醇含量的关系,结果见表 3。由表 3 可以看出,随着总游离甾醇含量的增加,总 PAHs 和苯并[a]芘都是呈现显著的相关性。游离态总甾醇和总 PAHs 的相关性系数为  $r = 0.939$ ,  $P < 0.001$ ;游离态总甾醇和苯并[a]芘的相关性系数为  $r = 0.933$ ,  $P < 0.0001$ 。

表 3 卷烟中游离总甾醇和 PAHs 总量的分析结果

卷烟	总游离甾醇 ( $\mu$ g/支)	总 PAHs (ng/支)	苯并[a]芘 (ng/支)
1	891	808.6	12.7
2	848	775.4	12.4
3	806	735.3	12.4
4	754.5	708.4	10.9
5	717.1	686.5	9.8
6	801	725.6	11.8
7	660.3	676.3	9.3
8	605.2	615.8	9.0

### 2.3 不同甾醇的添加量与主流烟气中 PAHs 的释放量及其贡献率

烟主流烟气中 PAHs 的释放量,按照实验 1.5 的方法计算出贡献率。结果分别见表 4~7 和图 2。

按试验方法,分别测定了由实验 1.3 中制备的卷

表 4 胆甾醇的添加量与主流烟气中 PAHs 的释放量及其贡献率

胆甾醇	不同添加量时 PAHs 的释放量/(ng/cig)				贡献率*/%
	50 $\mu\text{g/g}$	100 $\mu\text{g/g}$	150 $\mu\text{g/g}$	200 $\mu\text{g/g}$	
芘	164.5	189.7	214.1	254.1	41.4
二氢芘	28.4	32.6	36.5	43.5	40.5
芴	150.6	165.5	176.2	189.9	18.9
菲	185.3	210.1	233.9	250.7	27.2
蒽	84.0	88.5	87.4	89.1	3.3
荧蒽	66.1	68.4	69.3	71.2	4.8
苯并[a]蒽	33.7	34.9	34.5	34.0	0
屈	37.4	39.7	38.9	38.1	0
苯并[b]荧蒽	8.7	8.9	9.8	9.4	6.5
苯并[k]荧蒽	1.7	1.5	1.8	1.6	0
苯并[a]芘	12.0	12.1	12.6	11.9	0
二苯并[a,h]蒽	9.7	10.1	9.9	9.4	-2
茚并[1,2,3-cd]芘	9.3	9.9	9.6	9.5	0
苯并[g,h,i]芘	6.9	7.2	7.3	7.1	0

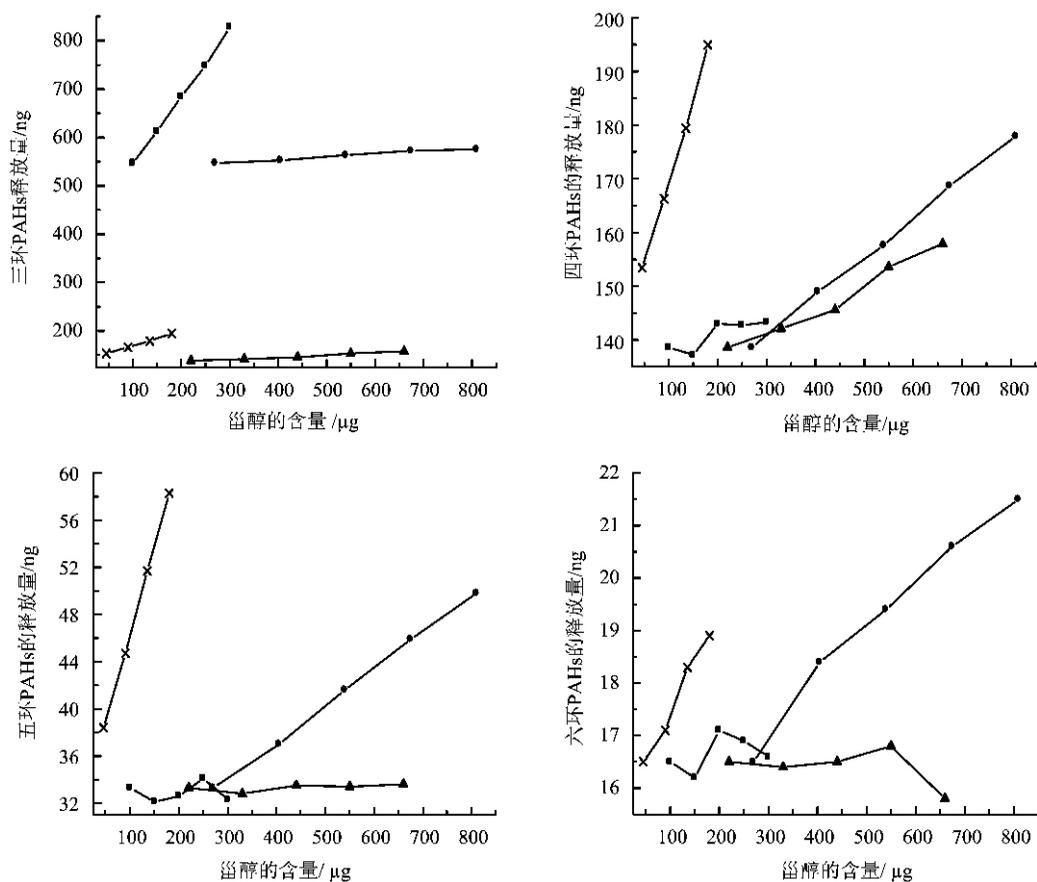
注:\* 贡献率的计算方法:以胆甾醇对芘的贡献率为例。以胆甾醇在烟丝中的百分含量为横坐标,烟气中芘的释放量为纵坐标,作出回归曲线,得回归方程  $Y = 82.86 + 0.55X$  ( $R = 0.9933$ ),当胆甾醇含量为 0 时,芘的释放量为 82.86,空白样芘的释放量为 141.5,以胆甾醇在零含量时芘的释放量相对于空白样品中芘释放量的增长率定义为贡献率,即贡献率  $= [(141.5 - 82.8)/141.5] \times 100 = 41.4\%$ 。

表 5 豆甾醇的添加量与主流烟气中 PAHs 的释放量及其贡献率

豆甾醇	不同添加量时 PAHs 释放量/(ng/cig)				贡献率*/%
	135 $\mu\text{g/g}$	270 $\mu\text{g/g}$	405 $\mu\text{g/g}$	540 $\mu\text{g/g}$	
芘	142.8	145.7	147.0	148.9	2.8
二氢芘	24.9	26.0	26.4	26.9	5.3
芴	136.6	139.2	139.9	137.8	0
菲	165.7	169.9	174.5	177.8	5.1
蒽	82.7	82.9	84.3	84.2	1.4
荧蒽	72.9	79.5	85.1	89.8	17.1
苯并[a]蒽	36.7	38.6	40.5	43.1	12.1
屈	39.4	41.6	43.1	45.0	9.8
苯并[b]荧蒽	9.4	9.7	9.9	10.3	6.4
苯并[k]荧蒽	1.7	2.0	2.6	3.1	53.3
苯并[a]芘	14.9	17.3	19.7	21.5	35.5
二苯并[a,h]蒽	11.0	12.6	13.7	14.9	26.5
茚并[1,2,3-cd]芘	9.8	10.3	10.9	11.2	10.6
苯并[g,h,i]芘	8.6	9.1	9.7	10.3	15.5

表6  $\beta$ -谷甾醇的添加量与主流烟气中 PAHs 的释放量及其贡献率

$\beta$ -谷甾醇	不同添加量时 PAHs 释放量/(ng/cig)				贡献率/%
	110 $\mu\text{g/g}$	220 $\mu\text{g/g}$	330 $\mu\text{g/g}$	440 $\mu\text{g/g}$	
萵	147.1	152.8	158.4	162.7	7.4
二氢萵	25.7	26.7	28.1	29.8	11.1
芴	162.8	192.2	205.1	203.7	20.0
菲	203.5	245.6	288.3	336.1	54.5
蒽	84.2	85.5	86.4	87.2	2.4
荧蒽	68.1	71.4	75.8	82.7	14.5
苯并[a]蒽	36.3	38.0	39.7	41.1	9.2
屈	37.7	36.2	38.1	34.1	-5.0
苯并[b]荧蒽	9.2	9.3	9.4	9.1	0
苯并[k]荧蒽	1.6	1.9	1.5	1.7	0
苯并[a]䓛	12.3	12.4	12.7	13.1	4.4
二苯并[a,h]蒽	9.7	9.9	9.8	9.7	0
茚并[1,2,3-cd]䓛	9.3	9.4	9.6	9.0	1.5
苯并[g,h,i]䓛	7.1	7.1	7.2	6.8	-2.2



图中■ - 胆甾醇 ● - 豆甾醇 ▲ -  $\beta$ -谷甾醇, x - 麦角甾醇

图2 甾醇对不同环数 PAHs 总量的影响趋势

表 7 麦角甾醇的添加量与主流烟气中 PAHs 的释放量

麦角甾醇	不同添加量时 PAHs 释放量/(ng/cig)			
	45 $\mu\text{g/g}$	90 $\mu\text{g/g}$	135 $\mu\text{g/g}$	180 $\mu\text{g/g}$
苊	145.6	149.1	154.2	159.6
二氢苊	26.8	28.2	29.4	30.5
芴	140.3	146.6	152.7	159.2
菲	176.1	189.2	204.5	210.3
蒽	85.3	87.7	88.9	90.1
荧蒽	70.5	74.8	79.7	85.2
苯并[a]蒽	40.2	43.7	47.1	50.3
屈	42.7	47.8	52.6	59.4
苯并[b]荧蒽	9.7	10.5	11.2	12.1
苯并[k]荧蒽	1.9	2.3	2.7	2.8
苯并[a]芘	15.8	19.5	23.1	27.2
二苯并[a,h]蒽	11.0	12.4	14.7	16.2
茚并[1,2,3-cd]芘	9.4	9.7	9.6	9.8
苯并[g,h,i]芘	7.1	7.4	8.7	9.1

实验结果表明,对于胆甾醇,随着添加量的增加,卷烟主流烟气中三环 PAHs(苊、二氢苊、芴和菲)的释放量明显增大,而四环、五环、六环的 PAHs 释放量则没有明显的变化; $\beta$ -谷甾醇随其添加量的增加,卷烟主流烟气中三环、四环 PAHs 的释放量增大,而对五环、六环的 PAHs 的释放量没有明显的影响;豆甾醇添加量的增加,使得四环、五环和六环的 PAHs 均有不同程度的增加,特别是对于荧蒽、苯并[k]荧蒽、苯并[a]芘和二苯并[a,h]蒽的贡献比较明显,但对三环的 PAHs 贡献并不显著,随着麦角甾醇添加量的增加,除了茚并[1,2,3-cd]芘之外,主流烟气中的 PAHs 均呈现一定的增长趋势,特别是苯并[a]蒽、屈、苯并[a]芘和二苯并[a,h]蒽都有很大幅度的增长。

由图 2 的统计结果进一步分析表明:在相同施加倍数的情况下,麦角甾醇对于各种 PAHs(除三环外)的贡献率最高,其次是豆甾醇和  $\beta$ -谷甾醇。胆甾醇仅对三环 PAHs 释放量有特别大的影响,在所有甾醇中其贡献率最高。

#### 2.4 机理探讨

烟草烟气是不断变化的非常复杂的化学物质混合物,它是在烟草制品抽吸期间不完全燃烧形成的,而烟草本身就是大约 3800 种化学成分的复杂混合物。抽吸期间烟草制品暴露于高达约 850~900 $^{\circ}\text{C}$  的温度下和不断变化的氧气浓度下,产生了超过 4800 种化学物质。

目前认为存在于卷烟烟气中的 PAHs 是由烟草中的萜烯、植物甾醇、蜡质、糖、氨基酸、纤维素和碳氢的有机化合物等组分通过卷烟燃吸时的热裂解和高温热合成反应形成并包括通过各种初级烷基自由基反应形成的。由上述的实验结果表明随着甾醇添加量的增加,胆甾醇和  $\beta$ -谷甾醇更倾向于对小环 PAHs 的贡献(包括 2~3 环),可能是因为在它们的燃烧过程中,PAHs 更多地倾向于发生脱氢反应碎裂为较小的碎片如乙烯基、乙炔和 1,3-丁二烯,然后发生小分子的加成以及成环反应。整个过程中热裂解可能是其主导反应过程<sup>[9]</sup>。

而豆甾醇和麦角甾醇除了对小环的 PAHs 有一定的贡献外,对于大环的 PAHs 贡献率更大,即影响更为显著。我们推测其形成 PAHs 的机理是先发生单分子的均裂反应(见图 3),然后发生协同反应或者芳香化反应,但是整个过程可能更多地倾向于发生高温热合成反应过程<sup>[10]</sup>。

从实验结果还可以看出,麦角甾醇和豆甾醇对于 PAHs 的贡献要比胆甾醇和  $\beta$ -谷甾醇高出许多。这可能是因为 C17 烷基键的断裂后,它们自身具有的双键更容易形成多共轭的烯炔自由基,有助于之后的自由基加成反应和成环反应。而麦角甾醇之所以对于大环多环芳烃的贡献率比豆甾醇的贡献更高,则可能是因为其结构中 B 环上面比豆甾醇多一个双键,更容易发生芳香化反应而形成大环的多环芳烃。即证实了 PAHs 的形成一定程度上是依赖于植物甾醇自身结构的不同,特别是对于自身结构中的双键相当敏感。

### 3 结论

本文采用外加烟草特定组分方法来研究植物甾醇对于主流烟气中 PAHs 的影响。试验考察了烟丝中添加不同植物甾醇对烟气中 PAHs 贡献率的大小,并尝试对 PAHs 的产生机理和变化规律做了进一步的探讨性解释。试验结果表明,研究涉及的 4 种甾醇均对卷烟烟气中 PAHs 的形成有重要影响,此结果与文献报道的热解实验结果基本一致,建立的实验模型同样适用于卷烟烟气的研究。此外,研究表明主流烟气中 PAHs 的形成在一定程度上依赖于植物甾醇的自身结构。研究工作可为卷烟烟气中 PAHs 的形成机理和选择性降低某些致癌性的多环芳烃提供参考。

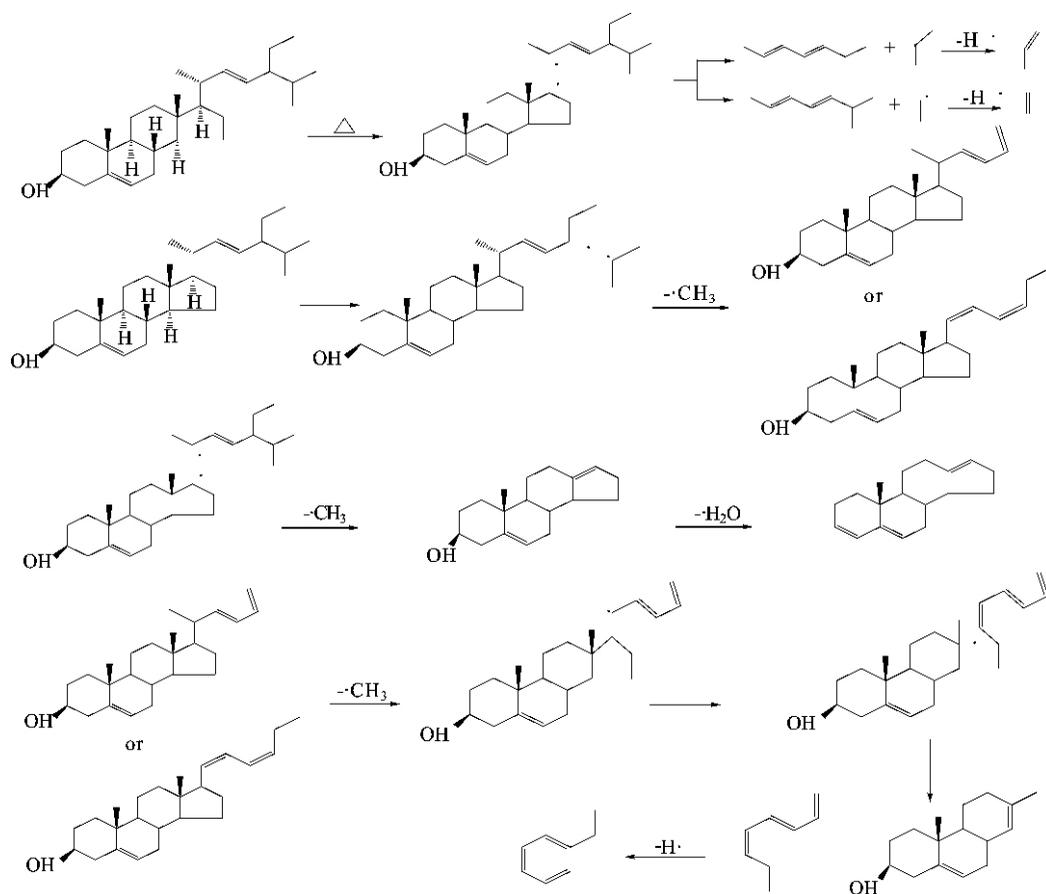


图3 豆甾醇在 600°C下裂解的自由基均裂反应途径

### 参考文献

- [1] 戴维斯, 尼尔森. 烟草 - 生产, 化学和技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 403.
- [2] Freudenthal R I, Jones P W. Carcinogenesis [M]. New York: Raven Press, 1976: 225.
- [3] Schepartz A I, Ellington J J, Schlotzhauer W S. Destruction of precursors of polynuclear aromatic hydrocarbons in tobacco by treatment with ozone [J]. Tobacco science, 1980, 24: 55-58.
- [4] Johnstone R A W, Plimmer J R. The chemical constituents of tobacco and tobacco smoke [J]. Chemical Review, 1959, 59: 885-936.
- [5] Stedman R L. The chemical composition of tobacco smokes [J]. Chemical Review, 1968, 68(2): 153-207.
- [6] Badger G M, Kimber R W L, Spotswood T M. Mode of Formation of 3, 4-Benzopyrene in Human Environment [J]. Nature, 1960, 187: 663-665.
- [7] Britt P F, Buchanan A C, Kidder M M, et al. Mechanistic investigation into the formation of polycyclic aromatic hydrocarbons from the pyrolysis of plant steroids [J]. Fuel, 2001, 80(12): 1727-1746.
- [8] Torikai K, Uwano Y, Nakamori T, et al. Study on tobacco components involved in the pyrolytic generation of selected smoke constituents [J]. Food and Chemical Toxicology, 2005, 43: 559-568.
- [9] Righter H, Grieco W J, Howard J B. Formation mechanism of polycyclic aromatic hydrocarbons and fullerenes in premixed benzene flames [J]. Combustion and Flame, 1999, 119(1/2): 1-22.
- [10] Britt P F, Buchanan A C, Kidder M K, et al. Influence of steroid structure on the pyrolytic formation of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. Journal of Analytical Applied Pyrolysis, 2003, 66: 71-95.