

# 黄河头道拐段冰体中多环芳烃的分布特征及来源解析

张琦, 裴国霞\*, 李汗青, 刘耕耘

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

**摘要:**采集黄河头道拐断面冰体样品,用毛细管 GC-FID 方法测定了冰体中 EPA 优先控制的 16 种多环芳烃(Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)的残留水平。结果表明,16 种 PAHs 的加标回收率为 80.3%~106.1%,方法检出限的范围为 0.01~0.12 ng·L<sup>-1</sup>,适合该断面冰体样品中 PAHs 的测定。27 个冰体样品中 16 种 PAHs 的含量范围为 0.71~11.04 ng·L<sup>-1</sup>,平均含量为 3.88 ng·L<sup>-1</sup>。其中荧蒽(Fla)和芘(Pyr)为最主要的污染物,检出率分别为 72.7% 和 86.4%。PAHs 的时空分布具有一定的规律性,凌汛期含量较少,初始冰盖形成后达到最大值,当河道内连续冰盖形成后,随冰层厚度的增加呈下降趋势,且下层冰体含量高于上层冰体。运用主成分分析法定量解析其污染来源,从 16 种 PAHs 中提取 3 个主成分,总方差贡献率为 80.5%,主成分的贡献率分别为煤炭燃烧源 36.6%、交通源 36.4%及炼焦和木材燃烧来源 7.5%。

**关键词:**黄河头道拐断面;冰体;多环芳烃;分布特征;来源解析

中图分类号:X592 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)11-2221-07 doi:10.11654/jaes.2014.11.021

## Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Ice of Toudaoguai Section of the Yellow River

ZHANG Qi, PEI Guo-xia\*, LI Han-qing, LIU Geng-yun

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agriculture University, Hohhot 010018, China)

**Abstract:** Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are ubiquitous and carcinogenic in nature. We collected ice samples from Toudaoguai section of the Yellow River and analyzed residual levels of 16 US EPA PAHs using GC-FID. The results showed that overall recoveries were ranged from 80.3%~106.1% with detection limits of 0.01~0.12 ng·L<sup>-1</sup>. The method approved to be fit for the determination of PAHs in ice samples. The concentrations of PAHs were in the ranges of 0.71~11.04 ng·L<sup>-1</sup>, with a mean concentration of 3.88 ng·L<sup>-1</sup>. The detection frequency for major pollutants Fluoranthene (Fla) and Pyrene (Pyr) was 72.70% and 86.40%, respectively. The concentrations of PAHs showed a decline as the thickness of ice increased, and were higher in the lower than in the upper part of ice body. Principal component analysis identified that three sources were the major contributor to PAHs. They were coal combustion (36.6%), traffic source (36.4%), and coking and wood combustion (7.5%).

**Keywords:** Toudaoguai section; ice body; polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH); distribution; source apportionment

多环芳烃 (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是广泛存在于环境中的持久性有机污染物 (Persistent organic pollutants, POPs), 主要来源于人类的活动<sup>[1]</sup>, 大部分具有免疫毒性、致癌性和致突变性<sup>[2]</sup>。美国环保局 (EPA) 列出了 16 种优先控制的 PAHs, 大

多数 PAHs 为无色或黄色晶体, 少数为深色, 其溶液一般具有荧光<sup>[3]</sup>, 随着分子量的增加, 水溶性减弱, 辛醇-水分配系数增大<sup>[4]</sup>。多环芳烃主要经干湿沉降、地表径流等在环境介质间转化, 并通过大气运移在全球范围内分布<sup>[5]</sup>, 甚至在两级地区和喜马拉雅山均有检出<sup>[6-7]</sup>。研究表明在河水冰封期时, 多环芳烃通过干湿沉降和大气流通附着在冰体表面, 在冰体融化时又随冰融水汇入河流中<sup>[8]</sup>。目前对于河流冰封期多环芳烃的研究较少, 尤其是对黄河冰体中多环芳烃还未进行过研究。因此, 研究河流冰封期多环芳烃的赋存水平、

收稿日期: 2014-05-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51169018)

作者简介: 张琦 (1988-), 女, 内蒙古锡林浩特人, 博士, 主要从事水环境水污染控制方面研究。E-mail: 15849170898@163.com

\* 通信作者: 裴国霞 E-mail: peiguoxia@126.com

在冰体中的分布特征及来源,对于评价其对生态系统的危害具有重要意义。

黄河内蒙古段地处中上游,西起三盛公断面,东至托克托县蒲滩拐断面,该河段属于干旱半干旱内陆季风气候,冬季长夏季短,1月份平均气温为 $-10\sim-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最低气温达 $-34\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。据统计,黄河内蒙古段排污口共17个(左岸11个,右岸6个),其中乌海市6个,鄂尔多斯市2个,巴彦淖尔市1个,包头市6个,托克托县2个,沿线分布着造纸、焦化等企业,黄河水体受到严重污染。因此,本论文选择黄河头道拐断面( $40^{\circ}16'03''\text{N}$ ,  $111^{\circ}3'45''\text{E}$ )为典型断面,主要研究黄河头道拐断面冰体中多环芳烃的赋存水平及时空分布特征,并对其来源进行初步探讨。

## 1 材料和方法

### 1.1 仪器与试剂

Varian 450 气相色谱仪,配置 FID 检测器;全温振荡仪;SHB-III A 循环水式多用真空泵;SPE 固相萃取装置(SUPELCO);C18 固相萃取柱(购自上海楚定分析仪器有限公司)。分析所用的甲醇、二氯甲烷均为色谱纯,由天津市光复精细化工研究所生产;氯化钠(分析纯)在  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  下烘烤 2 h,冷却后置于干燥器中密封保存备用;浓度为  $0.5\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$  的 EPA 优先控制的 16 种多环芳烃(萘、苊、二氢苊、芴、菲、蒽、荧蒽、芘、苯并[a]蒽、蒾、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、苯并[ghi]芘)标准溶液和浓度为  $2.0\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$  的回收率指示物十氟联苯标准溶液,均购自百灵威公司。

### 1.2 样品采集

选取黄河内蒙古段头道拐断面作为连续监测断

面,分别于 2012 年 1 月上旬(凌汛期)、中旬(冰盖初期)、下旬(冰盖中期)以及 2 月上旬(冰盖后期)、下旬(融冰期),共采集冰样 27 个,采样断面无明显污染源,如图 1 所示。该断面平均河宽为 300 m,根据采样垂线的布设原则<sup>[9]</sup>,共布设左、中、右三条采样垂线。在每条采样垂线上用不锈钢圆形冰钻采集全冰厚样品,将冰芯取出后放在切割板上,现场用冰锯将冰样平均分为上下两层,然后将分层冰样分别放入不锈钢桶中融化。采样过程中要避免有机材料接触样品,样品采集后应避光保存,在 7 d 内进行预处理工作,预处理后的样品应避光于  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下冷藏,在 40 d 内完成分析测试<sup>[9]</sup>。

### 1.3 样品预处理

参照《水质 多环芳烃的测定 液液萃取和固相萃取高效液相色谱法》<sup>[10]</sup>,通过预处理方法优化,最终确定冰样的预处理方法为:将采集的冰样在室温条件下融化,量取 1000 mL 融化后的冰样,经  $0.45\text{ }\mu\text{m}$  的滤膜过滤后,加入 5.00 g 氯化钠、10 mL 甲醇和 20  $\mu\text{L}$  回收率指示物十氟联苯,混合均匀后以  $5\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$  的流速流过已活化好的 C18 柱,富集完毕后用高纯氮气干燥柱床进行 10 min 干燥处理,用 10 mL 二氯甲烷以  $2\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$  的速度洗脱待测组分,收集洗脱液并浓缩,最后准确定容到 1 mL,待上机分析。

### 1.4 样品分析

冰样中多环芳烃用气相色谱仪(Varian 450 GC-FID)测定,色谱柱 CP-Sil 5 CB 为石英毛细管柱( $30\text{ m}\times 0.25\text{ mm}\times 0.39\text{ }\mu\text{m}$ );载气为高纯氮气(99.999%),流速  $29.4\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ;燃气为  $\text{H}_2$ ,流速  $30\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ;助燃气为空气,流速  $300\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ;进样口和检测器温度均为  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;进样量  $1\text{ }\mu\text{L}$ 。升温程序: $80\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow 255\text{ }^{\circ}\text{C}$

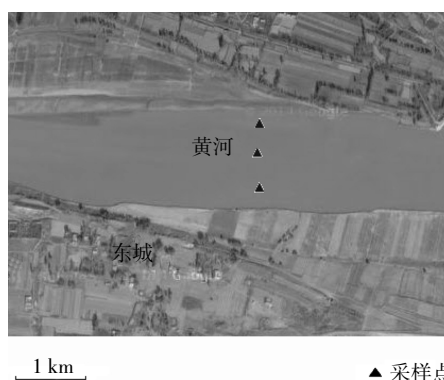


图1 采样点位置示意图

Figure 1 Schematic diagram of sampling sites

(6 °C·min<sup>-1</sup>, 保持 3 min)→265 °C(1 °C·min<sup>-1</sup>, 保持 1 min)→290 °C(2.5 °C·min<sup>-1</sup>, 保持 11 min)。采用内标法峰面积定量。

### 1.5 质量保证与质量控制(QA/QC)

为了保证实验数据的准确性,需要对实验进行严格的质量保证和质量控制,内容包括方法检出限、试剂空白、加标回收率及重现性。用二氯甲烷稀释 PAHs 标准储备液,配制一系列不同浓度的标准溶液。实验中以峰面积定量,保留时间定性,图 2 为 PAHs 的毛细管柱 GC-FID 色谱图。以峰面积为纵坐标,PAHs 浓度为横坐标,绘制每一种 PAHs 的标准曲线。实验过程中每批试剂均分析试剂空白并用超纯水做空白实验,16 种 PAHs 的方法检出限的范围为 0.01~0.12 ng·L<sup>-1</sup>(以 3 倍信噪比计算),加标回收率为 80.3%~106.1%,满足 70%~110%<sup>[10]</sup>的要求,方法的相对标准偏差 RSD 范围为 1.2%~4.9%,满足上限 10%的要求<sup>[10]</sup>。

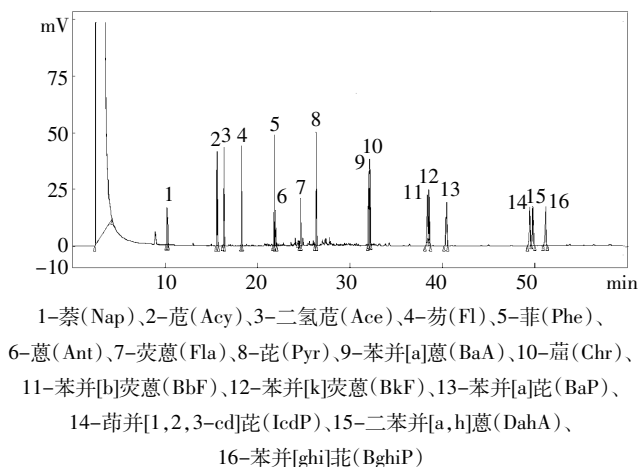


图 2 PAHs 的 GC-FID 色谱图

Figure 2 Chromatogram of PAHs obtained with GC-FID

## 2 结果与讨论

### 2.1 PAHs 残留水平

对头道拐断面冰体中 16 种 PAHs 组分进行分析,结果表明冰体中 PAHs 左岸、中泓及右岸之间 PAHs 的浓度值无显著性差异。 $\Sigma 16\text{PAHs}$  的总量为 0.71~11.04 ng·L<sup>-1</sup>,平均含量为 3.88 ng·L<sup>-1</sup>,与青藏高原祁连山七一冰川(31.19 ng·L<sup>-1</sup>)、东昆仑山玉珠峰冰川(60.57 ng·L<sup>-1</sup>)、唐古拉山小冬玛底冰川(20.45 ng·L<sup>-1</sup>)、古仁河口冰川(24.59 ng·L<sup>-1</sup>)中 PAHs 平均含量<sup>[11]</sup>,朝鲜图们江冰体中 PAHs 平均含量(87.1 ng·L<sup>-1</sup>)<sup>[12]</sup>及南极冰盖中 PAHs 平均含量(10 ng·L<sup>-1</sup>)<sup>[5]</sup>相比,

均处于较低水平。根据浓度和检出率可知,Fla 和 Pyr 为最主要的污染物,检出率分别为 72.7%和 86.4%。Bap 的浓度范围为 ND~0.08 ng·L<sup>-1</sup>,平均浓度为 0.01 ng·L<sup>-1</sup>,小于国家地面水环境质量标准(GB 3838—2002)规定的集中式生活饮用水地表水源地特定项目标准限值 2.8 ng·L<sup>-1</sup>。

由表 1 可知,研究区域中 2~6 环 PAHs 的平均含量比例顺序为 4 环>5 环>3 环>2 环>6 环。3~5 环 PAHs 共占总量的 96.41%,为头道拐断面冰体中 PAHs 的主要成分。

表 1 27 个冰体样品中 PAHs 各组分含量  
Table 1 Concentrations of various PAHs in 27 ice samples

名称	环数	最小值/ ng·L <sup>-1</sup>	最大值/ ng·L <sup>-1</sup>	平均值/ ng·L <sup>-1</sup>	标准偏差/ ng·L <sup>-1</sup>	检出 率/%	不同环数 PAHs 的 总含量/%
Nap	2	ND	2.29	0.07	0.49	9.1	3.32
Acy	2	ND	0.49	0.02	0.06	9.1	
Ace	3	ND	0.07	0.01	0.03	13.6	8.61
Fl	3	ND	5.93	0.65	0.55	40.9	
Phe	3	ND	0.05	0.01	0.07	13.6	
Ant	3	ND	0.31	0.01	0.29	13.6	
Fla	4	ND	7.07	2.21	3.01	72.7	75.74
Pyr	4	ND	2.08	0.81	0.59	86.4	
BaA	4	ND	1.07	0.05	0.03	9.1	
Chr	4	ND	6.38	0.83	0.53	45.5	
BbF	5	ND	3.29	0.13	0.04	9.1	12.06
BkF	5	ND	2.04	0.11	2.09	13.6	
BaP	5	ND	0.08	0.01	0.02	9.1	
IcdP	6	ND	0.04	0.01	0.02	9.1	0.27
DahA	6	ND	0.08	0.01	0.06	9.1	
BghiP	6	ND	0.95	0.04	0.04	9.1	

### 2.2 PAHs 时空分布特征

根据黄河河道特征及水流因素,河流结冰过程可以分为凌汛期、冰封期及融冰期三个阶段<sup>[13]</sup>,为了研究 PAHs 浓度与冰厚的关系,可将冰封期分为初、中、后三个时期,对 PAHs 在研究区域的时空分布特征进行分析,结果见图 3、图 4。

进入秋冬季后,河流流量减小,水体冷却形成流凌,此时冰体中 PAHs 含量较少,当流凌冰块相互碰撞聚集形成初始冰盖后,冰体中 PAHs 浓度达到最大值。这是由于流凌期河道里的冰凌对水流的阻力作用引起涨水现象<sup>[14]</sup>,水流量的突然增加造成冰面破裂、河水漫溢产生层冰层水现象,将带有 PAHs 的水夹冻在冰体内。当河道内形成连续冰盖后,随冰层厚度的

增加 PAHs 浓度呈下降趋势。这是由于在冰盖形成初期,温度骤降,冰的生长速率迅速增加,水中的 PAHs 以类似于盐包<sup>[14]</sup>的形式会被俘获在纯净的冰体里,当温度继续降低,随着冰厚的增加,冰体和大气之间的热交换作用减弱,致使冰生长速率减小<sup>[15]</sup>,PAHs 的俘获量下降。在冰盖后期,冰体逐渐融化,存在于冰晶空隙中的 PAHs 会迅速被释放到水体中,造成 PAHs 含量逐渐降低,在融冰期达到最小值。由图 4 可知,在连续冰盖形成之后,PAHs 在下层冰体中含量高于上层。这是由于水体通过冰盖传导与大气进行热交换<sup>[16]</sup>,冰盖从表层向下冻结,PAHs 在水结晶过程中不断被排出,以保持纯度<sup>[17]</sup>,但由于结冰过程较快,致使部分 PAHs 保存在冰晶间<sup>[18]</sup>,故上层冰体中也会有 PAHs 检出。

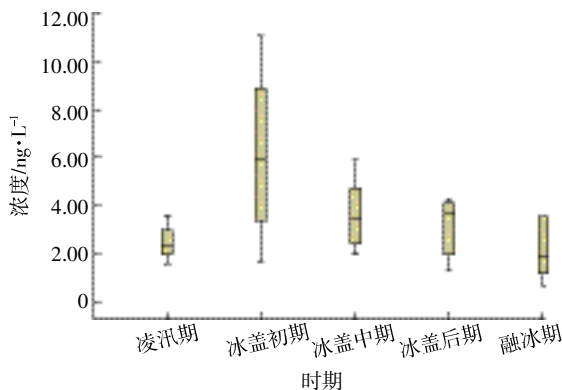


图3 冰体中 PAHs 总浓度的时间分布特征

Figure 3 Temporal changes of concentrations of total PAHs in ice body

### 2.3 PAHs 来源解析

环境中 PAHs 的来源主要分为自然源和人为源<sup>[1]</sup>。自然源产生的 PAHs 较少,人为污染是 PAHs 的主要来源,包括燃烧源和石油源。燃烧源是指化石燃料的燃烧、热解及机动车尾气排放等,石油源是指原油在开采、运输、生产和使用过程中的泄漏及排污<sup>[19-20]</sup>。目前常用的 PAHs 来源解析的方法有比值法、主成分分析及聚类分析<sup>[21]</sup>。

表 2 显示了冰体中 Nap、Acy、Ant、BbF 和 BaP、Chr、IcdP、DahA 和 BghiP 均具有极显著的相关性,可见冰体中这几种组分在来源上有很好的相似性。

#### 2.3.1 定性解析

低分子量与高分子量 PAHs 的比值(L/H)及物理化学性质相似的同分异构体的比例变化可以定性反映其污染来源特征,L/H 大于 1.00 为石油源,小于 1.00 为燃烧源<sup>[22]</sup>。Baumard 等<sup>[23]</sup>研究发现,在机动车尾气排放和原油、柴油、煤炭、焦炉、木材燃烧过程产生的物质中 Ant/(Phe+Ant) 比值均大于 0.1,该比值小于 0.1 的为石油源;石油中 Fla/(Fla+Pyr) 的比值小于 0.5,燃料燃烧产生的物质中 Fla/(Fla+Pyr) 的比值大于 0.5;IcdP/(BghiP+IcdP) 比值小于 0.2 为石油源,0.2~0.4 之间为机动车尾气排放污染,0.4~0.5 为原油、柴油燃烧污染,木材和煤炭的燃烧产物中该比值大于 0.5;BaA/(Chr+BaA) 比值小于 0.2 为石油源,0.2~0.35 之间表示原油燃烧源,大于 0.35 为木材或煤炭燃烧污染。本研究冰体样品中 L/H 值 (0.04~0.46) 均小于 1.00, Ant/(Phe+Ant) 值(0.13~0.34) 均大

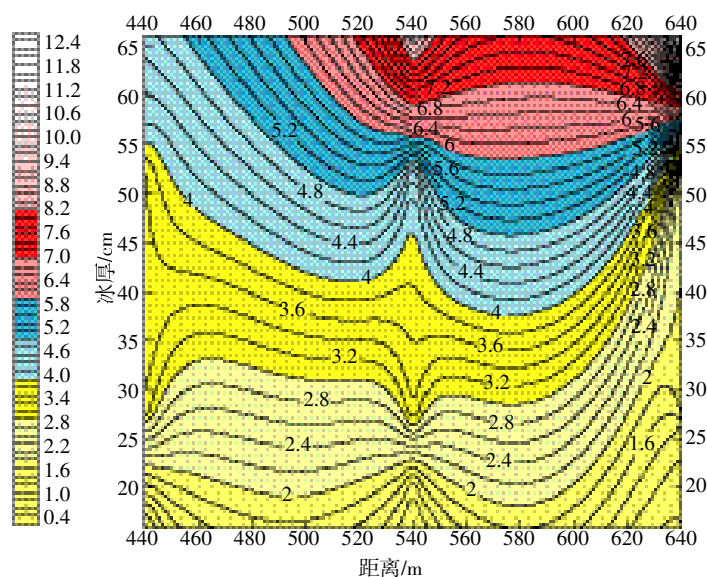


图4 冰体中 PAHs 总浓度的纵向分布特征

Figure 4 Longitudinal distribution characteristics of total PAHs in ice body

表2 冰样中 PAHs 的 Person 相关系数

Table 2 Person coefficients of PAHs in ice body

PAHs	Nap	Acy	Ace	Fl	Phe	Ant	Fla	Pyr	BaA	Chr	BbF	BkF	BaP	IcdP	DahA	BghiP
Nap	1.000	0.837**	-0.039	-0.036	-0.127	1.000**	0.011	-0.235	-0.046	-0.038	1.000**	1.000**	1.000**	-0.038	-0.038	-0.038
Acy		1.000	-0.162	0.026	-0.019	0.837**	-0.053	-0.267	-0.142	-0.089	0.837**	0.837**	0.837**	-0.089	-0.089	-0.089
Ace			1.000	-0.045	-0.181	-0.039	-0.078	-0.097	-0.098	-0.068	0.837**	-0.039	-0.039	-0.068	-0.068	-0.068
Fl				1.000	0.091	-0.036	-0.004	-0.144	-0.011	-0.050	-0.036	-0.036	-0.036	-0.050	-0.050	-0.050
Phe					1.000	-0.127	-0.049	-0.102	-0.090	-0.035	-0.127	-0.127	-0.127	-0.035	-0.035	-0.035
Ant						1.000	0.011	-0.253	-0.046	-0.038	1.000**	1.000**	1.000**	-0.038	-0.038	-0.038
Fla							1.000	-0.012	0.925**	0.985**	0.011	0.011	0.011	0.985**	0.985**	0.985**
Pyr								1.000	0.050	0.003**	-0.253	-0.253	-0.253	0.003	0.003	0.003
BaA									1.000	0.911**	-0.046	-0.046	-0.046	0.911**	0.911**	0.911**
Chr										1.000	-0.038	-0.038	-0.038	1.000**	1.000**	1.000**
BbF											1.000	1.000**	1.000**	-0.038	-0.038	-0.038
BkF												1.000	1.000**	-0.038	-0.038	-0.038
BaP													1.000	-0.038	-0.038	-0.038
IcdP														1.000	1.000**	1.000**
DahA															1.000	1.000**
BghiP																1.000

注:\*\*表示在0.01水平上显著相关。

于0.1,大部分 Fla/(Fla+Pyr)值(0.50~0.92)大于0.5,表明 PAHs 主要来源于煤燃烧、机动车尾气排放及木材燃烧。这与该研究区域生活、工业、交通污染源实际排放情况相符。

### 2.3.2 定量解析

用 SPSS 统计分析软件对黄河头道拐断面冰体中 PAHs 各组分浓度数据进行因子分析,采用主成分分析法<sup>[21]</sup>提取因子并结合方差极大旋转法提取特征值大于1的因子,判断其来源。

2012年冰封期头道拐断面冰体中原有16个变

量反应的信息可由3个因子来反映,这3个因子分别解释了总方差的36.56%、36.38%及7.53%,方差累积贡献率达到80.47%,三个因子荷载如图5。因子1在 Fla、BaA、Chr、DahA、IcdP 及 BghiP 上的因子荷载较高,这些均是典型的煤炭燃烧过程中生成的污染物<sup>[24]</sup>,因此因子1代表了煤燃烧源的影响;因子2在 BbF、BaP、NaP、Ant 及 BkF 上的荷载较高,研究表明 BbF 和 BaP 为汽油不完全燃烧的指示物<sup>[25]</sup>,因此因子2代表交通源的污染;因子3在 Fl 上荷载较高,代表了炼焦过程和木材燃烧来源<sup>[26]</sup>。

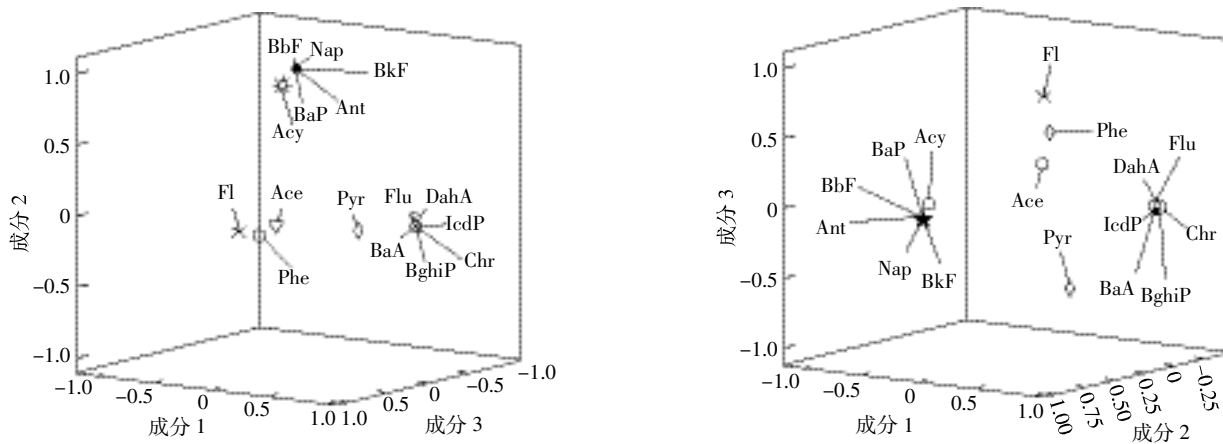


图5 PAHs 三维主成分分析结果

Figure 5 Three-dimensional plot of factor loadings for PAHs

### 3 结论及展望

#### 3.1 结论

(1) 16种 PAHs 的加标回收率为 80.3%~106.1%，方法检出限的范围为 0.01~0.12 ng·L<sup>-1</sup>。适合该断面冰体样品中 PAHs 的测定。

(2) 在头道拐冰封期冰体中，16种 PAHs 组分的总量为 0.71~11.04 ng·L<sup>-1</sup>，平均含量为 3.88 ng·L<sup>-1</sup>，检出率在 9.1%~86.4%之间。其中 Fla 和 Pyr 为主要的污染物，三、四、五环为头道拐断面冰体中 PAHs 的主要成分，占总量的 96.41%。

(3) 通过对头道拐断面冰封期冰体样品分析检测结果表明：凌汛期冰体中 PAHs 含量较少，初始冰盖形成后 PAHs 含量达到最大值，当河道内连续冰盖形成后，其浓度随冰层厚度的增加呈下降趋势，且下层冰体含量高于上层；冰盖后期，冰体 PAHs 含量逐渐降低，在融冰期达到最小值。

(4) 对黄河头道拐断面冰体中 PAHs 各组分浓度数据进行因子分析，得到 3 个主成分，方差累积贡献率达到 80.5%，三个因子分别代表了煤炭燃烧源、交通源及炼焦和木材燃烧来源的污染，这与该研究区域生活、工业、交通污染源实际排放情况相符。

#### 3.2 展望

目前，有关黄河中 PAHs 的研究相对广泛、成熟，但是这些研究往往集中在气、水、悬浮物和沉积物之间的迁移转化上，而在冰、水混合介质中输移规律的研究报道较少。本研究可以为了解我国寒冷地区多泥沙河流 PAHs 的污染状况提供数据支持，为黄河污染控制及流域污染治理提供理论依据。本论文由于研究时间和条件的限制，尚存在不足之处，在今后的研究中可以对黄河整个内蒙古段不同断面冰体中 PAHs 分布展开研究，以提供更加丰富的资料。

#### 参考文献：

- [1] Moon H B, Kannan K, Lee S J, et al. Atmospheric deposition of polycyclic aromatic hydrocarbons in an urban and a suburban area of Korea from 2002 to 2004[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2006, 51(4):494-502.
- [2] Nesnow S, Beck S, Ball L M, et al. Morphological transformation of C3H10T1/2CL8 cells by cyclopenta-fused derivatives of benzo[a]pyrene and benzo[e]pyrene[J]. *Cancer Lett*, 1933, 74(1-2):25-30
- [3] Valero-Navarro A, Fernández-Sánchez J F, Medina-Castillo A L, et al. A rapid, sensitive screening test for polycyclic aromatic hydrocarbons applied to Antarctic water[J]. *Chemosphere*, 2007, 67(5):903-910.
- [4] 杜 娟. 重庆主城两江水体与沉积物中邻苯二甲酸酯和多环芳烃污染水平及特征[D]. 重庆大学, 2012.
- [5] DU Xian. Levels and characteristics of phthalate esters and polycyclic aromatic hydrocarbons in the Yangtze River and Jialing River from Chongqing's Urban Areas[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [6] Chen B L, Xuan X D, Zhu L Z, et al. Distributions of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface waters, sediments and soils of Hangzhou City, China[J]. *Water Research*, 2004, 38(16):3558-3568.
- [7] Nemirovskaya I A. Organic compounds in the snow-ice cover of Eastern Antarctica[J]. *Geochemistry International*, 2006, 44(8):824-834.
- [8] Mark D Loewen, Subodh Sharma, Gregg Tomy, et al. Long range atmospheric transport and deposition of persistent organic pollutants and mercury in the Himalaya[J]. *Aquatic Ecosystem Health and Management Society*, 2005, 8(1):223-233.
- [9] Wania F, Hoff J T, Jia C Q, et al. The effects of snow and ice on the environmental behavior of hydrophobic organic chemicals[J]. *Environmental Pollution*, 1998, 102(1):25-41.
- [10] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [11] State Environmental Protection Administration. Water and exhausted water monitoring analysis method[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [12] HJ 478—2009, 中华人民共和国国家环境保护标准—水质 多环芳烃的测定 液液萃取和固相萃取高效液相色谱法[S].
- [13] HJ 478—2009, Water quality—Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons by liquid-liquid extraction and solid-phase extraction—High performance liquid chromatography[S].
- [14] 李全莲, 王宁练, 武小波, 等. 青藏高原冰川雪中多环芳烃的分布特征及其来源研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(10):1399-1409.
- [15] LI Quan-lian, WANG Ning-lian, WU Xiao-bo, et al. Sources and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons of different glaciers over the Tibetan Plateau[J]. *Sci China Earth Sci*, 2010, 40(10):1399-1409.
- [16] Cong L L. Ice phase as an important factor on the seasonal variation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Tumen River[D]. Yanji: Yanbian University, 2010.
- [17] 茅泽育, 吴剑疆, 余云童. 河冰生消演变及其运动规律的研究进展[J]. *水力发电学报*, 2002(增刊1):153-161.
- [18] MAO Ze-yu, WU Jian-jiang, SHE Yun-tong. River ice processes[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2002(Suppl1):153-161.
- [19] Week W F, Ackley S F. The growth, structure and properties of sea ice [M]. *The Geophysics of Sea Ice*, 1989:9-164.
- [20] Wang X P, Xu B Q, Kang S C, et al. The historical residue trends of DDT, hexachlorocyclohexanes and polycyclic aromatic hydrocarbons in an ice core from Mt. Everest, Central Himalayas, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(27):6699-6709.
- [21] 王 军. 河冰形成和演变分析[D]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2004.
- [22] WANG Jun. The river ice formation and evolution analysis [D]. Hefei: Hefei University of Technology Publishing House, 2004.
- [23] Gox G F N, Weeks W F. Numerical simulations of the profile properties of undeformed first-year sea ice during the growth season[J]. *Journal of*

- Geophysical Research*, 1988, 93(C10):12449-12460.
- [18] Heger D, Jirkovský J, Klán P. Aggregation of methylene blue in frozen aqueous solutions studied by absorption spectroscopy[J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2005, 109(30):6702-6709.
- [19] Baek S O, Field R A, Goldstone M E, et al. A review of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: Sources, fate and behaviors[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1991, 60(3-4):279-300.
- [20] Hites R A, LaFlumme R E, Farrington J W. Sedimentary polycyclic aromatic hydrocarbons: The historical report[J]. *Science*, 1997, 198(4319):829-831.
- [21] Mai B. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in the coastal region of Macao, China: Assessment of input sources and transport pathways using compositional analysis[J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, 37(21):4855-4863.
- [22] Soclo H H, Garrigues P H, Ewald M. Origin of polycyclic aromatic hydrocarbons in coastal marine sediments: Case studies in Cotonou (Benin) and Aquitaine (France) Areas[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 40(5):387-396.
- [23] Baumard P, Budzinski H, Michon Q, et al. Origin and bioavailability of PAHs in the Mediterranean sea from mussel and sediment records[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 1998, 47(1):77-90.
- [24] Matt F Simcik, Steven J Eisenreich, Paul J Lioy. Source apportionment and source/sink relationships of PAHs in the coastal atmosphere of Chicago and Lake Michigan[J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(30):5071-5079.
- [25] 许云竹. 松花江吉林市江段水体中多环芳烃源解析研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- XU Yun-zhu. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in aquatic environment of Songhua River[D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [26] Zuo Q, Duan Y H, Yang Y, et al. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil in Tianjin, China[J]. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 2007, 147(2):303-310.

## 《保鲜与加工》杂志 2015 年征订征稿启事

中国科技核心期刊  
中国北方优秀期刊  
中国学术刊物光盘版收录期刊  
美国《化学文摘》(CA)收录期刊  
英国《国际农业与生物科学研究中心》(CABI)收录期刊

主管:天津市农业科学院  
主办:国家农产品保鲜工程技术研究中心(天津)  
国际标准连续出版物号:ISSN1009-6221  
国内统一连续出版物号:CN12-1330/S  
邮发代号:6-146 双月刊,逢单月 10 日出版,单价 10 元,全年 60 元。

《保鲜与加工》杂志是我国农产品采后技术研究领域的科技核心期刊,据中国知网的最新统计结果,复合影响因子为 0.983。本刊主要报道农产品保鲜与加工相关领域基础理论、新技术、新工艺、新设备、新材料的研究成果及国内外相关行业的动态与信息。主要设置专家论坛、保鲜研究、加工研究、检测分析、专题论述、技术指南、行业资讯、科普沙龙、科技前沿、政策法规等栏目。适于科技人员、农业技术推广人员、相关企业管理和技术人员、大专院校师生及广大从事保鲜与加工技术研发领域的人士参阅。

欢迎在全国各地邮局(所)或本编辑部订阅,欢迎广大读者踊跃投稿,并诚邀刊登各类相关广告。

通信地址:天津市西青区津静公路 17 公里处,国家农产品保鲜工程技术研究中心(天津)《保鲜与加工》编辑部,邮编:300384  
电话:022-27948711,联系邮箱:bxyjg@163.com,投稿平台:www.bxyjg.com