

基于 PCA – EMMA 方法的多环芳烃来源解析

史健婷^{1 2 3}, 邹艳荣¹, 刘千红⁴

(1. 中国科学院广州地球化学研究所 有机地球化学国家重点实验室, 广州 510640;
2. 中国科学院大学, 北京 100039; 3. 黑龙江科技大学 计算机与信息工程学院, 哈尔滨 150022;
4. 广州市地质调查院, 广州 510440)

摘要: 多环芳烃为自然环境中主要有机污染源。为有效控制多环芳烃污染, 以广州李坑垃圾填埋场及其周边为研究区域, 利用浓度对比分析法和端元混合分析(EMMA)法对研究区地下水中多环芳烃的来源分别进行了定性和定量分析, 在端元混合分析中给出了二维主成分空间和三维主成分空间中的端元个数和端元位置。样品 1、13、17 为地下水中多环芳烃来源的 3 个端元, 进而解析了端元的水文地球化学特征。结果表明, 研究区地下水中的多环芳烃主要来自垃圾渗滤液、大气降水以及城市生活污水和工业废水排放。

关键词: 有机污染源; 多环芳烃; 浓度对比分析; 端元混合分析

doi: 10.3969/j.issn.2095-7262.2017.01.020

中图分类号: X523

文章编号: 2095-7262(2017)01-0091-06 **文献标志码:** A

Sources of polycyclic aromatic hydrocarbons based on PCA-EMMA method

Shi Jianting^{1 2 3}, Zou Yanrong¹, Liu Qianhong⁴

(1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;
3. School of Computer & Information Engineering, Heilongjiang University of Science & Technology, Harbin 150022, China; 4. Guangzhou Institute of Geologic Survey, Guangzhou 510440, China)

Abstract: This paper is concerned specifically with a more effective control of Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) the main organic pollution sources in the natural environment in an effort to obtain a better environment protection. The study targeted at Likeng landfill and its surrounding areas in Guangzhou performs a qualitative and quantitative analysis of the sources of PAHs in groundwater using the methods of comparative analysis of concentration and end member mixing analysis (EMMA). The analysis of the numbers and location of end members in the two dimensional principal component space and three dimensional principal component space; a subsequent identification of the three sources of PAHs in the groundwater: sample 1, sample 13, and sample 17; and an ultimate analysis of geochemical characteristics of end members. The results demonstrate that PAHs in groundwater are mainly attributed to landfill leachate, atmospheric precipitation and municipal wastewater & industrial wastewater.

Key words: organic pollution source; polycyclic aromatic hydrocarbons; comparative analysis of concentration; end member mixing analysis

收稿日期: 2016-12-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41273059); 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室创新基金项目 (sklog2012A02)

第一作者简介: 史健婷(1981-), 女, 辽宁省宽甸人, 副教授, 博士研究生, 研究方向: 模式识别、多元统计分析, E-mail: hotmail8194@163.com。

0 引言

多环芳烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons,简称 PAHs)是由两个或两个以上苯环以线状、角状或簇状排列的中性或非极性碳氢化合物^[1]。多环芳烃广泛存在于城市大气和生活垃圾填埋场中,是自然环境中主要的、常见的持久性有机污染物,国际上科学界对此广泛关注^[2]。PAHs 经地表污染水体的补给或渗漏、固体废物处理场地及污染土壤的淋滤等进入地表和水体,对地下水造成严重污染^[3]。为了有效控制 PAHs 污染,保障环境安全,必须掌握地下水中 PAHs 的来源,并进行定量研究^[4-5]。笔者的研究区域是位于广州市白云区太和镇永兴村附近的李坑垃圾填埋场及周边区域。周劲风^[6]、罗定贵^[7]、朱云^[8]等对该地区地下水中的无机污染物进行过研究,但针对该地区地下水中多环芳烃的来源解析尚未见报道。借鉴李加付等^[9-11]所采用的浓度对比分析法、主成分分析(Principal Component Analysis,PCA)等方法进行定性研究,利用基于 PCA 的端元混合分析(End Member Mixing Analysis,EMMA)方法定量分析地下水中多环芳烃的来源。

1 实验材料与方法

1.1 研究区概况

李坑垃圾填埋场始建于 20 世纪 90 年代初,于 1992 年 2 月建成投入使用,2004 年 3 月底正式封场。根据资料统计,李坑垃圾填埋场运营 12 年,填埋面积达到 23 万 m²,生活垃圾的实际填埋总量约为 884.6 万 m³^[12]。目前该场已完成封场和生态恢复工程建设,但垃圾堆体内仍有大量的渗滤液。研究区地下水主要有:第四系孔隙水、基岩裂隙水和岩溶水。

1.2 样品采集与处理

根据地表水和地下水的总体径流特征追踪污染分布范围,即以李坑填埋场为基准点沿西北和北部两条线布控采样点,调查以第四系孔隙水和基岩裂隙水为主。2013 年 12 月—2014 年 7 月进行了枯水期和丰水期的野外采样。枯水期和丰水期各采集水样 18 个,包括岩溶背景水和板岩背景水样 4 个(L17、L18、F17、F18 样本点),垃圾填埋场渗滤液处理前后样品各 1 个(L9 和 L10 样本点),地表水样 4 个(L15、L16、F15、F16 样本点)。采样点分布情况

见图 1,未标出的大部分丰水期采样点是与枯水期相对应的同一地点。

美国环保署(EPA)规定了 16 种优先控制 PAHs。此次实验测定其中 15 种多环芳烃:萘(Nap)、蒽(Any)、芘(Ace)、芴(Flu)、菲(Phe)、蒽(Ant)、荧蒽(Fla)、芘(Pyr)、苯并[a]蒽(BaA)、蒽(Chr)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[a]芘(BaP)、茚并[1,2,3-cd]芘(Ind)、二苯并[a,h]蒽(Dib)、苯并[g,h,i]花(B[g,h,i]P)。采集后的样品在标准实验条件下,利用气相色谱质谱联用仪(GC-MS)进行色谱分析,最终获得采样点多环芳烃的浓度。

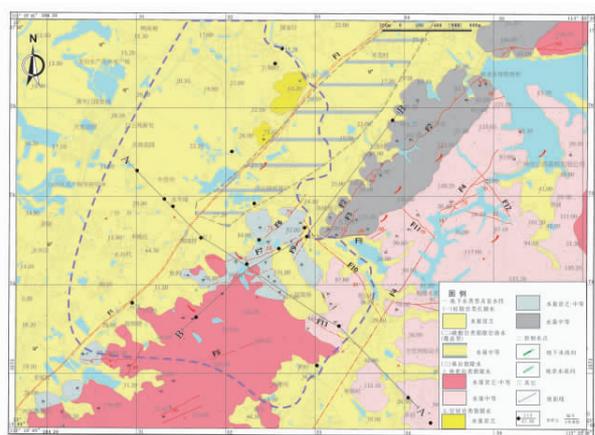


图 1 采样点分布

Fig. 1 Geological background and sampling sites

1.3 端元混合分析(EMMA)方法

不同采样点的地下水呈现出不同的水文地球化学特征,但大多数采样点的化学成分是由相对独立的组分来源混合而成。基于这种思想,可以利用端元混合分析方法来分析和验证地下水中化学组分的来源。端元混合分析是一种定量的研究方法。基于 PCA 方法建立的端元混合模型,可以看做是 PCA 方法的一种发展,寻找合理的独立组分(端元),并对地下水中主要的水文地球化学特征给出合理的端元解析。20 世纪 90 年代起,国外学者将 EMMA 方法应用于地表水、河流中主离子成分的混合研究中^[13],但利用 EMMA 方法进行地下水中多环芳烃的研究尚未见报道。笔者尝试应用 EMMA 方法对地下水中多环芳烃进行来源解析,多环芳烃浓度数据如表 1 所示。考虑到渗滤液并非直接进入地下水中,可能经历其他地球化学过程,因此渗滤液(L9 样本)和处理后的渗滤液(L10 样本)没有参与 EMMA 计算。

表 1 枯水期 + 丰水期多环芳烃质量浓度
Table 1 Concentration of PAHs in dry season and wet season

样本	Nap	Any	Ace	Flu	Phe	Ant	Fla	Pyr	BaA	Chr	BbF	BaP	Ind	Dib	Bghip
L1	4.070	0.679	0.564	1.038	0.283	0.269	0.162	0.168	0.190	0.176	0.177	0.352	0.306	0.368	0.314
L2	0.566	0.190	0.258	0.239	0.255	0.246	0.156	0.163	0.186	0.171	0.174	0.349	0.302	0.365	0.310
L3	0.723	0.271	0.342	0.426	0.204	0.254	0.173	0.193	0.196	0.178	0.184	0.356	0.308	0.370	0.315
L4	0.580	0.438	0.392	0.638	0.273	0.249	0.159	0.164	0.185	0.170	0.173	0.348	0.301	0.364	0.309
L5	0.401	0.180	0.247	0.201	0.190	0.237	0.152	0.160	0.185	0.170	0.171	0.349	0.301	0.363	0.309
L6	0.426	0.178	0.241	0.190	0.183	0.240	0.157	0.167	0.195	0.181	0.184	0.360	0.312	0.375	0.321
L7	0.396	0.176	0.240	0.199	0.181	0.236	0.150	0.159	0.185	0.171	0.172	0.349	0.301	0.365	0.309
L8	0.467	0.180	0.244	0.213	0.257	0.241	0.157	0.162	0.184	0.170	0.172	0.349	0.301	0.373	0.308
L11	0.389	0.174	0.242	0.188	0.210	0.237	0.156	0.162	0.186	0.173	0.175	0.350	0.303	0.365	0.310
L12	0.391	0.175	0.239	0.186	0.166	0.235	0.148	0.160	0.184	0.170	0.172	0.349	0.301	0.363	0.309
L13	0.386	0.174	0.239	0.182	0.139	0.233	0.143	0.153	0.183	0.167	0.171	0.347	0.300	0.363	0.308
L14	0.441	0.179	0.243	0.199	0.188	0.238	0.152	0.163	0.184	0.168	0.172	0.349	0.301	0.363	0.309
L15	0.469	0.176	0.241	0.190	0.156	0.235	0.148	0.157	0.184	0.169	0.173	0.348	0.301	0.364	0.309
L16	0.423	0.177	0.240	0.189	0.159	0.234	0.149	0.157	0.184	0.169	0.172	0.348	0.301	0.363	0.309
L17	0.435	0.176	0.240	0.189	0.148	0.234	0.147	0.156	0.183	0.168	0.171	0.348	0.300	0.363	0.308
L18	0.452	0.182	0.240	0.186	0.164	0.235	0.151	0.159	0.184	0.169	0.172	0.348	0.301	0.363	0.309
F1	3.270	0.340	0.334	0.469	0.194	0.254	0.170	0.179	0.208	0.195	0.197	0.376	0.330	0.401	0.341
F2	0.482	0.184	0.245	0.193	0.162	0.239	0.151	0.162	0.187	0.172	0.177	0.355	0.310	0.372	0.317
F3	0.528	0.187	0.243	0.197	0.160	0.238	0.150	0.163	0.186	0.173	0.173	0.350	0.303	0.366	0.311
F4	0.502	0.183	0.249	0.204	0.172	0.241	0.153	0.165	0.187	0.172	0.174	0.352	0.306	0.369	0.312
F5	0.517	0.180	0.241	0.188	0.151	0.235	0.147	0.157	0.185	0.169	0.172	0.349	0.301	0.364	0.309
F6	0.501	0.180	0.242	0.190	0.152	0.235	0.147	0.159	0.184	0.170	0.172	0.349	0.302	0.364	0.310
F7	0.482	0.181	0.243	0.192	0.160	0.235	0.149	0.159	0.184	0.168	0.172	0.348	0.301	0.364	0.309
F8	0.586	0.182	0.244	0.199	0.165	0.236	0.149	0.159	0.184	0.170	0.174	0.349	0.302	0.365	0.310
F11	0.575	0.184	0.255	0.222	0.178	0.257	0.162	0.173	0.188	0.173	0.174	0.349	0.302	0.364	0.310
F12	0.461	0.177	0.241	0.188	0.151	0.235	0.146	0.158	0.184	0.168	0.171	0.348	0.300	0.364	0.309
F13	0.565	0.187	0.263	0.282	0.249	0.386	0.207	0.221	0.189	0.173	0.173	0.349	0.301	0.363	0.309
F14	0.463	0.186	0.252	0.213	0.180	0.268	0.169	0.227	0.186	0.171	0.172	0.349	0.302	0.364	0.310
F15	0.487	0.179	0.243	0.196	0.164	0.236	0.148	0.159	0.184	0.168	0.171	0.347	0.301	0.363	0.309
F16	0.488	0.181	0.242	0.191	0.160	0.236	0.151	0.161	0.184	0.170	0.171	0.348	0.302	0.365	0.310
F17	0.769	0.245	0.332	0.671	0.894	1.231	0.772	0.816	0.226	0.205	0.191	0.358	0.307	0.368	0.313
F18	0.472	0.224	0.289	0.394	0.404	0.647	0.295	0.304	0.193	0.176	0.193	0.352	0.306	0.365	0.311
F19	0.460	0.179	0.242	0.190	0.152	0.234	0.147	0.156	0.183	0.167	0.171	0.347	0.301	0.363	0.308
F20	0.545	0.181	0.241	0.189	0.162	0.236	0.149	0.158	0.184	0.168	0.171	0.348	0.301	0.363	0.308

2 结果与讨论

2.1 地下水中多环芳烃浓度

目前对于地下水中多环芳烃污染程度的判定, 在实际工作中常用采样点水样与背景值或对照值对

比的方法(比值法) 进行定性评价。背景值是指地下水各组分的天然含量范围, 对照值是指地表环境污染相对较轻地区地下水有关组分的含量范围。根据广州市环境监测资料, 帽峰山水库入口处的地表水(第 15 号样本) 水质较好, 可以作为对照样。

对枯水期和丰水期样本, 分别以相应的对照样

L15 和 F15 为基准 (F15 与 L15 的浓度基本一致), 计算枯水期和丰水期其他样本分别与 L15 和 F15 的浓度比值, 以 5% 作为误差范围, 比值达到或超过 1.05 时认为有明显增加, 初步判定其受到了污染。按照这一标准, 研究区枯水期有 4 个采样点的多环芳烃总量是对照样样的 1.06 ~ 2.34 倍, 分别是 L1、L2、L3 和 L4 样本点, 可以初步判定这 4 个样本点是受污染点。丰水期有 5 个样本点初步判定受到了污染, 分别是 F1、F11、F13、F17 和 F18。

受污染程度极低和极高的水样很可能是 (或最接近) 端元混合分析 (EMMA) 中的端元, 因此, 采用浓度对比分析方法得出: 枯水期 4 个污染点 (L1、L2、L3、L4) 和丰水期的 5 个污染点 (F1、F11、F13、F17、F18) 以及对照样 (L15 和 F15) 可视多环芳烃污染来源。为此, 初步判定这些采样点很可能是后续端元混合分析中的端元。

2.2 地下水中多环芳烃的端元混合分析

为了较全面地揭示多环芳烃的来源与混合特征, 对枯水期和丰水期的多环芳烃综合进行了端元混合分析。因没有明确已知的多环芳烃端元, 故尝试在所有样本数据中寻找具有近似独立性质的多环芳烃浓度样本来代表端元。根据端元混合分析原理, 文中的端元混合分析过程如下:

(1) 将表 1 中的多环芳烃浓度数据构造一个 34 行 17 列的原始数据矩阵, 之后对原始数据矩阵进行标准差标准化处理。经过处理的数据符合标准正态分布, 即均值为 0, 标准差为 1。其转化函数为

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}}{S}$$

式中: Z_{ij} ——标准化之后的数据;

X_{ij} ——样本观测值;

\bar{X} ——所有样本的均值;

S ——标准差。

标准化数据之后, 计算其相关系数矩阵。

(2) 对第一步所得的相关系数矩阵进行主成分分析, 提取该矩阵的特征值和特征向量, 计算各个主成分的方差贡献率和累积方差贡献率。

(3) 由主成分分析的特征值从大到小的排序结果和累积方差贡献率, 确定有效的主成分个数, 进而判定多环芳烃来源的独立组分 (端元) 个数。根据 EMMA 原理, 利用相关系数矩阵进行主成分分析时, 端元个数为主成分个数 + 1^[13]。

(4) 确定端元位置。在相关系数矩阵经主成分分析后所定义的 U 空间中, 端元是投影到该 U 空间

中能够包围绝大多数样本点投影的凸多边形的顶点。

(5) 根据端元的个数和位置, 进行多环芳烃的水文地球化学特征端元解析, 验证端元的有效性和合理性。

2.2.1 PCA 结果与端元的确定

按照上述端元混合分析过程, 在对枯水期和丰水期数据进行标准化处理后, 进行主成分分析计算, 结果见表 2。

表 2 主成分特征值和方差贡献率

Table 2 Eigenvalue and variance contribution rate of PCs

主成分	特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
PC1	8.255	55.033	55.033
PC2	3.759	25.060	80.093
PC3	2.510	16.732	96.825
PC4	0.224	1.491	98.316
PC5	0.112	0.745	99.061
PC6	0.072	0.479	99.540
PC7	0.034	0.227	99.768
PC8	0.014	0.094	99.862
PC9	0.007	0.049	99.911
PC10	0.004	0.029	99.940
PC11	0.003	0.023	99.963
PC12	0.003	0.018	99.981
PC13	0.001	0.010	99.991
PC14	0.001	0.006	99.998
PC15	0	0.002	100.000

从表 2 中可以看出, 第一、第二、第三主成分的方差贡献率分别是 55.033%、25.060% 和 16.732%。对于主成分个数的选择, 一般是根据主成分的累积方差贡献率进行判定, 主成分的累积方差贡献率越高 (90% 以上), 主成分个数的可靠性和有效性越高。当然, 此时的主成分个数也不宜过多, 否则, 达不到有效的降维目的。根据计算结果, 如果选择前两个主成分, 其累积方差贡献率为 80.093%。多环芳烃样本点在二维主成分构成的 U 空间中的分布情况如图 2 所示。图 2 中横坐标 U_1 和纵坐标 U_2 分别代表第一和第二主成分, 为了和图 3 进行清晰地比较分析, 图 2 的样本点集仅标注了 L1、L13、F1 和 F17 四个样本点。从图 2 中可以看出, 由 L13、F1 和 F17 样本点所构成的三角形包围

了所有其他样本点,因此,L13、F1 和 F17 样本点可视为相对独立的样本组分,即所要寻找的 3 个端元。

因前两个主成分的累积方差贡献率刚刚达到 80% (略低),故考虑利用前三个主成分。由于前三个主成分的累积方差贡献率为 96.825% (超过了 90%),为此,可初步判定有效的主成分个数为 3,从而可判定多环芳烃的端元个数为 4 (主成分个数 + 1)。多环芳烃样本点在三维主成分构成的 U 空间中的分布情况如图 3 所示,图 3 显示,由 L1、L13、F1 和 F17 样本点所构成的四面体包围了大部分其他样本点,因此 L1、L13、F1 和 F17 是要寻找的 4 个端元。对比图 2 和图 3, U' 是平行于图 2 中 U_1 和 U_2 组成的 U 空间。图 3 中 L1、L13、F1 和 F17 这四个端元在二维 U 空间的投影正如图 2 所示,L1' 是 L1 在 U' 上的投影,对应图 2 中标注为 L1 的样本点,落在了由 L13、F1 和 F17 样本点所构成的三角形内,并且位于所有样本数据的中心附近位置,说明了如果图 2 中找不到一个合适的端元集,图 3 中增加一个端元 L1 所构成的新端元集将可能是一个可行的替代方案。

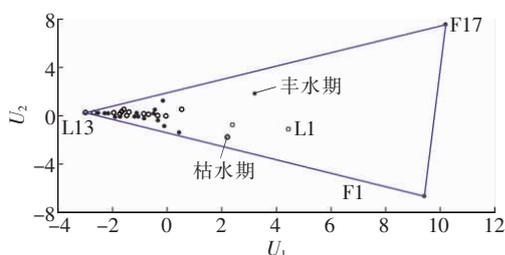


图 2 主成分分析后的二维 U 空间中的样本点

Fig. 2 Samples in two-dimensional U space defined by PCA

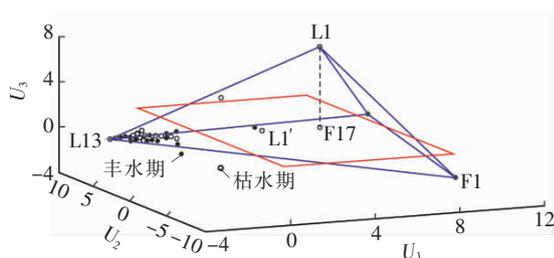


图 3 主成分分析后的三维 U 空间中的样本点

Fig. 3 Samples in three-dimensional U space defined by PCA

2.2.2 端元解析

根据图 2 和 3,进行多环芳烃水文地球化学特征的端元解析。L1 和 F1 样本的采样点位置(见图 1)紧邻李坑垃圾填埋场。由于 L1 和 F1 样本中萘

的含量很高,可以看出,该处水样为垃圾填埋场渗滤液污染的基岩裂隙水,L1 和 F1 样本从本质上讲都是来源于渗滤液。这样,图 2 所呈现出来的 3 个端元和图 3 呈现的 4 个端元是一致的,即 L1 和 F1 代表的是同一个渗滤液来源,只不过由于枯水期和丰水期受渗滤液污染的水样可能经历了不同的地球化学过程,L1 和 F1 多环芳烃的组分含量存在差异,表面上呈现出不同性质,其他样本很可能包含了 L1 和 F1 的再次混合。

在丰水期,广州市大气和雨水中的多环芳烃具有芬、菲、葱和荧葱质量浓度相对较高的特点,与颗粒物中多环芳烃分布差异较大。因此,丰水期的 F17 采样点(位于陈田花园)和 F18 采样点(位于聚龙山庄矿泉水厂)地下水多环芳烃异常很可能是受市区大气降水影响的结果。图 2 和图 3 中的 F17 端元代表了多环芳烃的大气降雨来源,与丰水期多环芳烃浓度的对比分析中 F17 的结果相一致。

L13 采样点位置周边工厂较多,距离生活区也较近,从图 2 和图 3 可见,大部分样本点逐渐向 L13 靠近。L13 所代表的端元主要是受石油化工厂、家具厂、汽车修理行和烤漆房等工业污染和生活污染的第四系孔隙水。

综上所述,广州市李坑垃圾填埋场周边地区地下水中的多环芳烃主要来源为受李坑垃圾填埋场渗滤液污染的基岩裂隙水、大气降雨以及受工业污染和生活污染的第四系孔隙水。此结果与研究区的地理位置、水文地质、气候等自然概况相吻合。

3 结 论

利用浓度对比法和端元混合分析法对李坑垃圾填埋场附近地下水中多环芳烃的来源进行了解析。通过对研究区 PAHs 的数据采样,实验室浓度测定和端元分析,确定了地下水中多环芳烃的种类、范围、污染程度和污染途径,为李坑垃圾填埋场污染控制与修复提供了科学依据。主要结论如下:

(1) 李坑垃圾填埋场周围地下水中的多环芳烃主要来自垃圾渗滤液、大气降水、城市生活污水和工业废水排放。生活污水和工业废水排放是多环芳烃一个很重要的来源,故需要加强研究区内污水排放的监管。

(2) 根据枯水期和丰水期 PAHs 化学组分的浓度分析可以初步判定 PAHs 污染程度和可能的污染来源。利用 EMMA 定量方法得出的端元,与定性的浓度对比分析方法基本一致,从而验证了 PCA -

EMMA 方法的有效性。

(3) 在多环芳烃源解析研究中,端元混合分析(EMMA)结合主成分分析结果,选择合适的主成分个数,可以减少主观和经验的影响,进一步综合研究区的自然状况等已知条件,可以提高污染源解析的有效性和合理性。

参考文献:

- [1] Simcik M F, Offenber J H. Persistent organic pollutants in the great lakes[J]. Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2005, 5N(9): 307-353.
- [2] 刘伟亚. 长三角典型城市多环芳烃排放清单与多介质归趋模拟[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.
- [3] Vella N, Martinez Mench M, Navarro G, et al. Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) from groundwater by heterogeneous photo-catalysis under natural sunlight [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2012, 232: 32-40.
- [4] Simcik M F, Eisenreich S J, Liyo P J. Source apportionment and source/sink relationships of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the coastal atmosphere of Chicago and Lake Michigan [J]. Atmos Environ, 1999, 33(30): 5071-5079.
- [5] 陈 锋, 孟凡生, 王业耀, 等. 基于主成分分析-多元线性回归的松花江水体中多环芳烃源解析[J]. 中国环境监测, 2016, 32(4): 48-53.

- [6] 周劲风, 李耀初. 广州李坑垃圾填埋场水环境污染调查[J]. 上海环境科学, 1999, 18(2): 94-95.
- [7] 罗定贵, 张庆合, 张鸿郭, 等. 李坑垃圾填埋场渗滤液中 COD 在包气带运移模拟研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2009, 45(5): 868-874.
- [8] 朱 云, 尧文元. 李坑生活垃圾填埋场对周边地区地表水环境影响的调查[J]. 广东科技, 2011, 12(52): 87-89.
- [9] 李加付, 刘少鹏, 刘相敏, 等. 渤海及邻近海域表层沉积物中多环芳烃的来源解析[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(3): 337-342.
- [10] Liu L Y, Wang J Z, Wei G L, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) in continental shelf sediment of China: implications for anthropogenic influences on coastal marine environment [J]. Environmental Pollution, 2012, 167: 155-162.
- [11] 龚香宜, 何炎志, 孙云雷. 江汉平原四湖流域上区地下水中多环芳烃分布特征与源解析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(3): 789-796.
- [12] 褚红榜. 广州市垃圾填埋场渗滤液及其周围水体与土壤中的多环芳烃和邻苯二甲酸酯初探[D]. 广州: 广州大学, 2009.
- [13] Christopherson N, Hooper R P. Multivariate analysis of stream water chemical data: the use of principal components analysis for the end-member mixing problem [J]. Water Resources Research, 1992, 28: 99-107.

(编辑 晁晓筠 校对 王 冬)

(上接第 76 页)

矿难生命搜救、非接触生命探测中有显著的优势。研究基于超宽带信号检测矿井塌方体下生命体的方法,首先构建了脉冲超宽带信号检测模型,基于 ICA-R 与 EMD 联合算法,抑制矿井下起伏杂波,之后提取超宽带天线感兴趣回波信号,并重构目标生命体信号波形。仿真结果表明算法易于实现,可以有效提取非平稳呼吸、心跳信号。通过对课题项目进一步的研究,升级现有的软硬件系统,可以实现在矿井复杂环境下,检测目标生命体的距离及活动信息。

参考文献:

- [1] Lagunas M. High performance SVD-like procedure for spectral estimation using rayleigh function estimates [J]. Progress In Electromagnetics Research, 1998(1): 29-48.
- [2] 曾昭发, 刘四新, 王者江, 等. 探地雷达方法原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [3] Deadana F S, Gutierrez O. Efficient time-domain ray tracing tech-

- nique for the analysis of ultra-wide band indoor environments including lossy materials and multiple effects [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2009, 23(1): 78-83.
- [4] 闫 述, 陈明生. 瞬变电磁场资料的联合时-频分析解释[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1): 203-208.
- [5] 陈 洁, 方广有, 李 芳. 时域波束形成在超宽带穿墙成像雷达中的应用[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(6): 1341-1344.
- [6] Verma P, Gaikwad A. Analysis of clutter reduction techniques for through wall imaging in UWB Range [J]. Progress In Electromagnetics Research, 2009(7): 229-248.
- [7] 王 艳, 马弘舸, 曹学军, 等. 墙体对微波脉冲的衰减特性[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(8): 1277-1280.
- [8] 王 宏, 周正欧. 基于改进 EEMD 的穿墙雷达目标微多普勒特性分析[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(6): 1355-1360.
- [9] Lin Qiuhua, Zheng Yongrui, Yin Fullan G, et al. A fast algorithm for one-unit ICA-R [J]. Information Sciences, 2007, 177(5): 1265-1275.

(编辑 晁晓筠 校对 李德根)