

太湖平原城近郊区浅层地下水中多环芳烃污染特征及污染源分析

崔学慧¹, 李炳华², 陈鸿汉²

(1. 中国石油大学(北京)数理系, 北京 102249; 2. 中国地质大学(北京)北京市水资源与环境工程重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为查明苏南太湖平原区浅层地下水水质状况, 在苏南北部(C 区)、东北部(W 区)和东部(S 区)3 个地区共采集 56 组地下水样, 利用气相色谱仪分析样品中 16 种优先控制的多环芳烃组分浓度, 并运用谱系聚类分析法和分子比例法探寻多环芳烃来源. 结果表明, 检出的多环芳烃中以 3~4 苯环组分为主, 总多环芳烃浓度最高达 32.45 $\mu\text{g/L}$, 均值为 4.42 $\mu\text{g/L}$. 多环芳烃分布具有区域分布特征, 高值点多出现在工业区附近. 分子比值法表明, 研究区浅层地下水中多环芳烃来源是化石燃料和石油源叠加的结果. 谱系聚类分析法结果表明, C 区各采样井的苯并(k)荧蒽异常浓度控制该区的聚类结果; W 区各采样井的苯并(a)荧蒽异常浓度控制着该区聚类结果; S 区各采样井的苯并(b)荧蒽异常浓度控制该区的聚类结果. 在 0.05 水平上, C 区的荧蒽、芘、亚二氢芘、菲、苯并(a)芘间的 Pearson 相关系数达到 0.680~0.712; W 区的苯并(g, h, i)芘、苯并(a)蒽和苯并(a)芘间的 Pearson 相关系数到达 0.724~0.773; S 区的亚二氢芘和芘的 Pearson 相关系数为 0.659. 可以推测出各区所列的这几种多环芳烃组分很可能分别来自于各区内同一类型污染源.

关键词: 多环芳烃; 太湖平原; 浅层地下水; 谱系聚类分析
中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)07-1806-05

Contamination Characteristics and Pollutant Sources Analysis on PAHs in Shallow Groundwater in Suburb of Taihu Plain

CUI Xue-hui¹, LI Bing-hua², CHEN Hong-han²

(1. Mathematical Department, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Beijing Key Laboratory for Water Resources and Environmental Engineering, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: To investigate shallow groundwater quality in Taihu plain, south of Jiangsu province, 56 samples were collected in north area (C area), north east area (W area) and east area (S area). The concentrations of priority 16 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) were analyzed by HP 6890-GC. Hierarchical cluster analysis (HCA) and Molecular ratios were used to characterize their possible pollution sources. Concentrations of total priority 16 PAHs in shallow groundwater samples ranged from below method detection limits (< MDLs) to 32.45 $\mu\text{g/L}$ with the average value of 4.42 $\mu\text{g/L}$, which were predominated by three and four-ring PAHs. High contents of PAHs were found in the vicinity of industrial areas. Ratios of specific PAH compounds including phenanthrene/anthracene (Phe/Ant), fluoranthene/pyrene (FL/Py), chrysene/benzo(a)/anthracene (Chr/BaA), low-molecular-weight PAH/high-molecular-weight PAH (LPAH/HPAH) were calculated to evaluate the possible sources of PAH contamination. These ratios reflected a mixed pattern of pyrolytic and petrogenic inputs of PAHs with different proportion in shallow groundwater. Hierarchical cluster analysis (HCA) results showed that the abnormal benzo(k)fluoranthene concentration dominated the HCA results in C area, the abnormal benzo(a)anthracene concentration dominated the HCA results in W area, and the abnormal benzo(b)fluoranthene concentration dominated the HCA results in S area. At level 0.05, FL, AcPy, Acp, Phe and Bap in C area had Pearson correlation between 0.680 and 0.712. BP, BaA and Bap in W area had Pearson correlation between 0.724 and 0.773. AcPy and Flu in S area had Pearson correlation 0.659, which meant that these PAHs listed in each areas might come from the same kind of sources.

Key words: PAHs; Taihu Plain; shallow groundwater; HCA

多环芳烃(PAHs)是指含有 2 个或 2 个以上苯环的芳香族化合物, 主要来源于石油、煤炭、木材等有机物热解和不完全燃烧, 是迄今最早发现且数量最多的致癌物之一. 自然环境中 PAHs 按其物化性质可分为 2 类: 第 1 类为带有 2~3 个苯环的低分子量的芳烃, 如萘、蒽、菲和蒽等, 这类化合物易挥发, 对水生生物有一定毒性; 第 2 类为带有 4 个及 4 个以上苯环的高分子量芳烃, 如芘、荧蒽、苯并(a)芘

等, 这类化合物沸点高, 不易挥发, 具有遗传毒性^[1, 2]. 一般来说, 随着苯环数量增加, PAHs 的水溶性越低, 遗传毒性和致癌性越强. PAHs 在自然环境中普遍存在, 在大气、水、土壤及生物体内都能被发

收稿日期: 2007-07-04; 修订日期: 2007-10-26
基金项目: 国土资源部项目(200310400046)
作者简介: 崔学慧(1975~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为环境系统正反问题数学模型和软件开发, E-mail: freeexh@126.com

现^[3~5].由于多环芳烃分布广,危害大,引起了各国政府的高度关注,美国和欧盟已经把 16 种多环芳烃写进优先控制的污染物名单中.各国学者对多环芳烃在大气、河流以及土壤/沉积物以及地下水环境中的赋存状态、种类、分布、来源等做了较为深入的研究^[6~20].PAHs 来源识别技术还处于探索与发展阶段,识别方法有定性和半定量方法(包括比值法、轮廓图法、特征化合物法)及定量方法(化学质量平衡法和多元统计法)等,各种方法均存在一定优缺点,有一定的适用范围.

本研究采用分子比值法^[14]和 Q 型聚类分析方法^[15],结合研究区浅层地下水中的多环芳烃污染物检出浓度和分布状况,分析其可能的主要来源及差异,以期为进一步正确评价地下水环境质量、保护太湖流域浅层地下水资源提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于太湖平原,该区地势平坦,河网密布,地下水埋藏浅,一般在 3~5 m 之间,丰水期甚至可达 1.5 m,水力梯度低,水平径流微弱,浅层含水层由一套第四系非承压冲洪积粘土组成,厚度约为 15 m,下覆弱渗透性粉砂层.浅层地下水资源储量丰富,易于开采,大气降水、地表水体以及农田灌溉用水入渗是浅层地下水的主要补给来源.近年来的地下水水质监测资料显示,除局部受“三氮”的轻微污染外,大部分水质较好,可满足一般生活供水的水质要求,具有良好的开发利用前景.

1.2 样品采集

采样井为民用井,分布在太湖平原北部(C 区)、东北部(W 区)和东部(S 区)3 个地区.各地区分别选取 19、21 和 16 口井,共计 56 个样品,井深在 12 m 左右,大多数由砖砌成,未作任何其它防渗措施.为有效查明该区多环芳烃污染状况,采样点布设在不同地段,包括工业区点、农业区点以及无污染的背景点.用容量为 3 L 的聚四氟乙烯材料制成的桶状容器,吊入井中取水,迅速倒入用甲烷清洗后烘干的容量为 1 L 的棕色玻璃瓶,立即用带聚四氟乙烯膜的螺丝密封后放入保温箱,送实验室 4℃ 保存.

1.3 仪器与试剂

气相色谱仪: HP6890-6³ Ni 微电子捕获检测器、HP-5 弹性石英毛细管色谱柱(30 m×0.25 mm i.d.、液膜厚度为 0.25 μm、质量分数为 5% 的二苯基加 95% 的二甲基聚硅氧烷固定相的通用柱).

试剂: 二氯甲烷(农残级纯),异丙醇(农残级纯),甲醇(农残级纯);高纯度氮气(99.9%).

1.4 样品的萃取和净化

活化:取 5 mL 二氯甲烷加入柱管,抽空弃去流出液.再依次加入 5 mL 甲醇、5 mL 水.活化时不允许抽干柱床.上样:在柱管上接储样器.向 50 mL 水中加入 5 mL 异丙醇,充分混合,加到柱上.抽空弃去流出液.这时流速不能超过 10 mL/min(流速太大会降低回收率).淋洗:取 3 mL 甲醇/水(50/50)加入柱子,抽空弃去流出液,甲醇溶液全部流出后维持抽空 30 s.把萃取干燥装置装好,通纯净 N₂ 5 min 干燥.洗脱:在柱子下放一些收集管.往柱子中加入 3 mL 二氯甲烷,抽空,收集洗脱液.浓缩:将 K-D 浓缩器置于水浴锅上,水浴温度 40~70℃.当体积缩小至 0.5~1 mL 时取下 K-D 浓缩器,冷却至室温.用二氯甲烷冲洗玻璃接口并定容至 1 mL,备色谱分析.

1.5 气相色谱分析过程

采取固相微萃取技术提取水样中的多环芳烃,在样品预处理过程中未用内标.水样分析气化室温度控制在 250℃,柱烘箱温度为 80℃ 保持 1 min,以 15℃/min 升到 255℃ 保留 1 min,再以 1℃/min 升到 265℃ 保留 1 min,再以 2.5℃/min 升到 295℃ 保留 1 min.检测器温度 300℃,柱流量 1.0 mL/min,无分流手动注射器进样,一次进样量均为 1 μL.根据标准色谱图各组分的保留时间,确定被测试样中出现的组分数目和组分名称;用气相色谱仪的工作站进行数据处理,以浓度对峰高或峰面积进行数据积分,得到各组分的标准曲线图,然后气相色谱仪工作站自动从校准曲线上查出相应的待测物浓度.

1.6 质量保证

在纯净水空白溶剂中加入相同量的标准溶液,分别配制 7 份,依次进行固相微萃取、气相色谱测定,7 次实验结果的相对标准偏差控制在 2.58%~12.3%,完全达到 US EPA 标准 RSD<30% 的要求,可以达到气相色谱法的分析要求;基质加标回收率控制在 71.5%~99.7%,US EPA 标准(70%~130%);当气相色谱仪仪器灵敏度最大时,以仪器信号/噪音比 3 倍时所对应的浓度作为仪器的检出限.本方法要求仪器灵敏度不低于 10⁻¹¹ g.

2 结果与讨论

2.1 浅层地下水中多环芳烃检出率和检出浓度
浅层地下水样品 56 个,实验室检测了各样品中 16 种多环芳烃组分(表 1),这些组分均已列入 US

EPA 优先控制的名单^[17], 具体为: 萘、二氢萘、苊、芘、菲、蒽、荧蒽、芘、苯并(a)蒽、苯并(b)蒽、苯并(k)蒽、苯并(a)芘、二并苯(a, h)蒽、苯并(g, h, i)芘、茚(1, 2, 3-cd)芘。除茚(1, 2, 3-cd)芘无检出外, 其它 15 种多环芳烃组分均有不同程度的检出, 其中苯并(a)蒽检出率最大, 为 66.07%, 其次为苯并(b)蒽, 检出率达 53.57%, 最小为苯并(a)芘, 检出率达 3.57%; 大多组分检出率在 30.0% 左右, 总多环芳烃的检出率高达 96.43%, 从检出浓度看, 苊的浓度区间最小, 为 0.007 ~ 0.13 μg/L, 苯并(k)蒽的浓度区间最大, 达到 0.13 ~ 26.82 μg/L。

表 1 PAHs 检出率、浓度区间及其中值¹⁾(n = 56)

Table 1 Detectable rate, concentration range and mean value of PAHs (n = 56)

多环芳烃组分	检出率 /%	浓度区间 /μg·L ⁻¹	浓度中值 /μg·L ⁻¹
萘	25.0	0.004 ~ 0.480	0.12
二氢萘	33.93	0.015 ~ 2.70	0.3
苊	25.0	0.007 ~ 0.13	0.041
芘	30.36	0.004 ~ 0.81	0.024
菲	39.29	0.017 ~ 1.95	0.11
蒽	30.36	0.003 ~ 0.34	0.052
荧蒽	35.71	0.002 ~ 2.76	0.1
芘	42.86	0.014 ~ 2.01	0.096
苯并(a)蒽	66.07	0.24 ~ 6.00	1.05
	30.36	0.022 ~ 0.57	0.15
苯并(b)蒽	53.57	0.063 ~ 9.66	1.49
苯并(k)蒽	10.71	0.13 ~ 26.82	14.26
苯并(a)芘	8.93	0.30 ~ 1.92	1.03
二并苯(a, h)蒽	8.93	0.043 ~ 0.14	0.063
苯并(g, h, i)芘	3.57	0.43 ~ 2.58	ND
茚(1, 2, 3-cd)芘	ND	ND	ND
总多环芳烃	96.43	0.004 ~ 32.449	2.281

1)ND 表示未检出或低于检出限, 下同

从苯环数量看, 3 环和 4 环的多环芳烃组分检出最多, 5 环以上的组分除苯并(b)蒽外, 其它组分检出率较少, 均小于 11%。研究区浅层地下水中多环芳烃含量较低, 与太湖沉积物中多环芳烃含量相比, 研究区浅层地下水的相应组分含量要低几个数量级; 德国西部某空军基地地下水中发现多种多环芳烃, 其中苊的浓度达到 24.0 μg/L, 是研究区浅层地下水中苊的最大浓度的 200 多倍; 德国西南部内卡山谷地下水中 2 ~ 4 个苯环的多环芳烃浓度介于 0.03 ~ 213.07 mg/L 之间, 约大于研究区的相应组分浓度的 3 个数量级, 然而 5 ~ 6 苯环的多环芳烃检出水平两地大致相同, 均为较少检出^[14, 15, 19]。

2.2 主要检出组分空间分布特征

表 2 为主要检出多环芳烃组分在太湖平原区分布情况, 可以看出, 不同地区多环芳烃的分布存在较

大的差别: 北部地区(C 区)多环芳烃检出组分最多, 东北部地区(W 区)次之, 东部地区(S 区)最少。16 种多环芳烃组分中, C 区有 14 种被检出, S 区只有 9 种被检出, 而且各区的主要污染物也有所不同, C 区主要污染组分为萘, 苊, 二氢萘, 菲、蒽、荧蒽、苯并(a)芘; W 区的主要污染物为菲、芘、苯并(a)蒽和苯并(b)蒽; S 区的主要污染物为芘、苯并(b)蒽和二并苯(a, h)蒽。从多环芳烃最大浓度点位置看, 有 10 个分布在 C 区, 3 个分布在 W 区, 其它 2 个在 S 区。进一步分析可发现, 工业区附近的取样点中多环芳烃浓度比非工业区取样点的大, 总多环芳烃的高值点在 C143、C154、C158、C160、C162 和 W133, 其浓度变化在 11.54 ~ 32.45 μg/L 之间, 平均值达到 17.85 μg/L, 此平均值大于未污染地段的 3 个数量级。导致那些地段多环芳烃出现高值的原因可能是工业废水随意排放以及附近化工企业产生的与多环芳烃有关物质的干湿沉降。因此, 在研究区多环芳烃分布具有明显的地区特征; 3 个地区的浅层地下水多环芳烃污染程度由大到小的顺序为: C 区 > W 区 > S 区。

表 2 太湖平原 3 个地区的 PAHs 的分布

Table 2 Distribution of PAHs in three areas of the Taihu Plain, Jiangsu

多环芳烃组分	各地区污染物检出数			
	C 区	W 区	S 区	总检出数
萘	14	ND	ND	14
二氢萘	13	ND	6	19
苊	13	ND	1	14
芘	6	1	10	17
菲	13	9	ND	22
蒽	12	3	3	18
荧蒽	19	1	ND	20
芘	10	13	1	24
苯并(a)蒽	17	20	ND	37
	2	9	6	17
苯并(b)蒽	8	14	8	30
苯并(k)蒽	4	ND	2	6
苯并(a)芘	4	1	ND	5
二并苯(a, h)蒽	ND	ND	5	5
苯并(g, h, i)芘	1	1	ND	2
茚(1, 2, 3-cd)芘	ND	ND	ND	ND

2.3 研究区浅层地下水中多环芳烃污染源分析

2.3.1 应用污染源指示物分析污染特征

不同来源的多环芳烃具有不同的种类和不同的分布特征, 因而可以根据污染源指示物来判断多环芳烃的来源。多环芳烃的污染源指示物主要有菲、蒽、荧蒽、芘、/苯并(a)蒽以及低分子多环芳烃含量/高分子多环芳烃含量等。这些比值通常通过单个多环芳烃组分浓度计算而来。一般来说, 高菲/蒽的比值常出现在石油源污染, 而低菲/蒽反映的是高温热解源。当菲/蒽 > 10 时, 多环芳烃污染源主要为石油污染, 而菲/蒽

< 10 时,其污染源主要为高温热解源,即主要来自机动车、工业生产和煤的燃烧.苯并(a)芘/ 越接近于 1 或大于 1 时,石油源的因素越少.

由于 3 个地区的主要污染物及污染程度不同,需要采用不同的比值来推导其可能的污染源.C 区的菲/蒽比值 < 10,表明多环芳烃的输入主要来源于化石燃料的燃烧,而且 C 区的蒽/芘比值在 1.43 ~ 16.24 之间,这个比值同样表明 C 区多环芳烃主要来源于化石燃烧.W 区的蒽/芘比值 < 0.11,这说明 W 区的多环芳烃污染和石油源有关.除 W116 号井点外,W 区其它井点中 /苯并(a)蒽比值均在 0.047 ~ 0.617 之间,从这个比值也可以推导以上所作的结论,即 W 区浅层地下水多环芳烃污染源主要来自于石油源.尽管菲/蒽以及 /苯并(a)蒽的比值可以说明 C 区和 W 区的浅层地下水多环芳烃污染来源,但是从低分子多环芳烃含量/高分子多环芳烃含量比值看,得出的结果有所不同.石油污染源中低分子多环芳烃占有优势,而高分子多环芳烃在高温裂解源中含量较大,C、W、S 3 个地区的低分子多环芳烃含量/高分子多环芳烃含量比值分别为 0.17、0.06 和 0.43.这些比值反映出高分子多环芳烃在 3 个地区的浅层地下水中占据主导地位,进而可以推断出 3 个地区的多环芳烃污染源很大部分来自高温裂解和化石燃烧.不同比值产生的矛盾可以这样理解,低分子多环芳烃易受到生物光化学降解的影响,在环境中的稳定性弱,因此在使用这个比值时需小心.

2.3.2 应用 Q 型聚类分析方法分析污染特征

系统聚类法在对物质分类,判断物质的来源方面是一个非常有效的数学工具.研究的思路是按照样品的相似性进行分类,根据分类结果找出主要污染物和污染源空间分布的相似性,故只使用 Q 型聚类分析方法,而没有使用 R 型聚类分析方法.运用此种方法对 C、W、S 3 个地区的多环芳烃污染样品测试结果进行 Q 型聚类分析.每个地区共采用 5 种聚类分析方法:类平均法、重心法、最小距离法、Ward 方法和密度估计法,将数据标准化后,应用 SAS 软件进行计算.根据聚类结果,发现密度估计法不适用研究的分析过程,所以综合前 4 种聚类分析结果进行分析.通过各种分类方法的比较,发现分成 5 类具有较大的一致性.再结合依据物化性质,按苯环数将 PAHs 分成 2 类的结果,能够进一步发现研究区的 PAHs 的污染特征和可能的污染源.

(1)C 区污染样品聚类分析 4 种聚类分析结果相同,分类如下: {C146, C155, C159, C163, C156,

C150, C157, C144, C145, C147, C151, C149, C148, C143}; {C154, C162}; {C158}; {C160}; {C161}.

依据分类结果,可以得出 C 区各采样井的苯并(k)荧蒽异常浓度控制该区的聚类结果.C158 井苯并(k)荧蒽的浓度为 9.43 $\mu\text{g/L}$; C154 与 C162 井的苯并(k)荧蒽的浓度分别为 14.26 $\mu\text{g/L}$ 和 16.85 $\mu\text{g/L}$; C160 井苯并(k)荧蒽的浓度为 26.82 $\mu\text{g/L}$; C161 井苯并(b)荧蒽浓度为 5.55 $\mu\text{g/L}$ (最高),苯并(k)荧蒽低于检出线;而其余各井的苯并(k)荧蒽的浓度均低于检出限.

从空间位置上看,C154 与 C162 两个采样点分别位于 C 区西部和东部的远郊区并远离京杭运河; {C158}地处化工、石化、制药和毛纺等工业的中心地带且靠近京杭运河; {C161}位于南部远郊区; {C160}位于东部远郊区并远离京杭运河,但该处水系发达;其余取样点都靠近京杭运河,为近郊的工业发达区.C 区东南郊样品间关系非常大,验证了这一地段地下水主要受工业的影响,而且此地样品 Pearson 相关系数也表明:在 0.05 水平上,这一地段样品相关系数很大.

(2)W 区污染样品聚类分析 4 种聚类方法除 Ward 方法外,其余 3 种方法有差异不明显,结合 W 区实际,选取重心法的聚类结果: {W119, W128, W113, W136, W117, W132, W121, W129, W115, W120, W131}; {W114, W127, W118, W124, W130, W123, W125}; {W122}; {W126}; {W133}.

依据分类结果,W 区各采样井点的苯并(a)蒽异常浓度控制着该区采样点的聚类结果.除 W127 井外,第 1 类各井点的苯并(a)蒽浓度均小于 1.0 $\mu\text{g/L}$;第 2 类各井点的苯并(a)蒽浓度在 4.0 $\mu\text{g/L}$ 左右;W122 井的苯并(a)蒽浓度为 6.0 $\mu\text{g/L}$ 、苯并(a)芘浓度为 1.92 $\mu\text{g/L}$,分别为所有 W 区井点对应指标的最大值;W126 井的苯并(a)蒽浓度为 4.61 $\mu\text{g/L}$,且检出污染指标最少;W133 井的苯并(b)荧蒽浓度为 9.66 $\mu\text{g/L}$,是 W 区井点中该指标的最大值.

空间上,第 1 类点分布松散,一个显著的特点是大部分在远郊区,工业污染源相对较少;第 2 类点主要分布在东北部乡镇周围,污染源较为复杂;W122 井位于西南城郊,其东北部有一钢铁厂,已有 30 多年的历史;W126 井点位于东北远郊,据调查该处曾有一钢铁厂,现已搬迁;W133 位于东南远郊,不远处是油车间,为农村居民榨取食用油的地方,一般来说,菜籽等原料装入设备之前需要炒熟,因此需要用到煤等化石燃料.

(3)S 区污染样品聚类分析 类平均法、重心法和最小距离法聚类结果相同,故选择如下聚类结果: {S77, S81, S70, S72, S78, S71, S75 S80, S74, S76, S65}; {S66, S68}; {S69}; {S67}; {S79}.

依据分类结果,可以得出 S 区各采样井的苯并(b)荧蒹异常浓度控制该区的聚类结果.

S79、S67 和 S69 井的苯并(b)荧蒹浓度依次为 9.26 $\mu\text{g/L}$ (最大)、6.58 $\mu\text{g/L}$ 和 2.76 $\mu\text{g/L}$; S66 与 S68 井的苯并(b)荧蒹浓度分别为 1.41 $\mu\text{g/L}$ 与 1.16 $\mu\text{g/L}$;其余各井的苯并(b)荧蒹浓度均小于 1.0.

空间上,由于 S 区发展相对于 C 区和 W 区快,市内居民绝大多数用上自来水,难于找到合适井点,所以采样井点基本布置在城郊及周围乡镇,对照现场调查资料, S79、S69、S68、S67、S66 点附近均有一定的污染源,而第 1 类点多位于远郊且周围无明显污染源.

从各区不同组分的 Pearson 相关系数看,在 0.05 水平上, C 区荧蒹、苊、亚二氢苊、菲、苯并(a)芘间的相关系数达到 0.680 ~ 0.712; W 区的苯并(g, h, i)芘、苯并(a)蒽和苯并(a)芘间的相关系数为 0.724 ~ 0.773; S 区的亚二氢苊和芴相关系数达到 0.659. 可以推测出各区所列组分很可能分别来自各区内同一类型污染源.

综合以上所述,由于采用不同的聚类方法, C 区的聚类结果一致,说明该区的污染特征显著,污染源的相似性程度高; W 区的聚类结果差异相对于 C、S 区较大,说明该区存在叠加污染; S 区的聚类结果基本一致,也说明该区的污染特征显著,污染源的相似性程度高. 对于 W 区和 S 区第 1 大类样品而言,大多数分布在郊区,浅层地下水中高分子多环芳烃比例较小,这表明,这些地段受煤或其它燃料的燃烧影响较大.

3 结论

(1)太湖流域城近郊区 3 地浅层地下水中主要多环芳烃组分及污染程度不同,然而 3 地的共同点是 3 环和 4 环的检出较多.

(2)多环芳烃的空间分布具有明显的地段性,工业区附近浅层地下水多环芳烃浓度高于非工业区.

(3)菲/蒽, 荧蒹/芘, /苯并(a)蒽比值表明, W 区多环芳烃主要来源于石油类, S 区多环芳烃和高温裂解具有很大的关系,然而 3 地的低分子多环芳烃/高分子多环芳烃比值中值均较低,表明 3 地的多环芳烃很可能来自高温裂解,其原因需进一步分析.

(4)系统聚类法表明, C 区各采样井的苯并(k)

荧蒹异常浓度控制该区的聚类结果,该区污染源的相似性程度高; W 区各采样井的苯并(a)蒽异常浓度控制该区的聚类结果,该区存在叠加污染源; S 区各采样井的苯并(b)荧蒹异常浓度控制该区的聚类结果,该区污染源的相似性程度也比较高. C 区二氢苊、苊、菲、苯并(a)蒽可能来自同一类型污染源; W 区苯并(g, h, i)芘、苯并(a)蒽, 苯并(a)芘可能来自同一类型污染源; S 区的二氢苊和芴可能来自同一类型污染源.

参考文献:

- [1] 蹇兴超. 多环芳烃(PAH)的污染[J]. 环境保护, 1995, 10: 31-33.
- [2] 段小丽, 魏复盛, 杨洪彪, 等. 不同工作环境人群多环芳烃的日暴露总量[J]. 中国环境科学, 2004, 24(5): 515-518.
- [3] 张树才, 张巍, 王开颜, 等. 北京东南郊大气 TSP 中多环芳烃浓度特征与影响因素[J]. 环境科学, 2007, 28(3): 460-465.
- [4] 孙娜, 陆晨刚, 高翔, 等. 青藏高原东部土壤中多环芳烃的污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2007, 28(3): 664-668.
- [5] 冯精兰, 牛军峰. 长江武汉段不同粒径沉积物中多环芳烃(PAHs)分布特征[J]. 环境科学, 2007, 28(7): 1572-1577.
- [6] 朱利中, 陈宝梁. 多环芳烃在水/有机膨润土间的分配行为[J]. 中国环境科学, 2000, 20(2): 119-123.
- [7] 李咏梅, 王郁, 林逢凯, 等. 多环芳烃在天然水体中的自净机理研究[J]. 中国环境科学, 1997, 17(3): 208-211.
- [8] 余运波, 汤鸣皋, 钟佐荣, 等. 煤矸石堆放对水环境的影响[J]. 地学前缘, 2001, 8(1): 163-168.
- [9] 罗锡明, 刘永刚, 何江涛, 等. 气相色谱法测定地下水多环芳烃准确度的保证措施[J]. 地学前缘, 2005, 12(增刊): 193-198.
- [10] 张建立, 潘懋, 钟佐荣, 等. 山东淄博煤矿区环境中多环芳烃的初步研究[J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30(2): 7-8.
- [11] 巩宗强, 李培军, 王新, 等. 污染土壤中多环芳烃的共代谢降解过程[J]. 生态学杂志, 2000, 19(6): 40-45.
- [12] 陶雪琴, 党志, 卢桂宁, 等. 污染土壤中多环芳烃的微生物降解及其机理研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(4): 357-360.
- [13] 袁东星, 杨东宁, 陈猛, 等. 厦门西港及闽江口表层沉积物中多环芳烃和有机氯污染物的含量及分布[J]. 环境科学学报, 2001, 21(1): 107-112.
- [14] 陈明, 刘晓端, 魏连伟, 等. 永定河上游水体与底泥中污染物的分布规律[J]. 岩矿测试, 2001, 20(2): 131-135.
- [15] 高惠璇. 应用多元统计分析[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005. 216-262.
- [16] 平立凤, 骆永明. 有机质对多环芳烃环境行为影响的研究进展[J]. 土壤, 2005, 37(4): 362-369.
- [17] National Recommended Water Quality Criteria[R]. U. S. EPA-822-R-02-047, 2002.
- [18] Dong R A, Lin Y T. Characterization and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon contaminations in surface sediment and water from Gao-ping River, Taiwan[J]. Water Research, 2004, 38: 1733-1744.
- [19] Saether O M, Storroe G, Segar D, et al. Contamination of soil and groundwater at a former industrial site in Trondheim, Norway[J]. Applied Geochemistry, 1997, 12: 327-332.
- [20] Jarsjö J, Bayer-Raich M, Ptak T. Monitoring groundwater contamination and delineating source zones at industrial sites: Uncertainty analyses using integral pumping tests [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2005, 79: 107-134.