

长江三角洲某地区浅层地下水单环芳烃污染特征及其原因分析

李炳华 陈鸿汉 何江涛 刘 菲

(中国地质大学北京市水资源与环境工程重点实验室, 北京 100083)

摘要:本文针对长江三角洲某地区 3 个城市(C 市、W 市、S 市)浅层地下水的单环芳烃进行了研究。根据研究区水样分析数据,总结出该地区单环芳烃的污染特点和分布特征,然后从研究区污染源分布、单环芳烃的挥发性、研究区降水以及包气带的防护性能等角度探讨了浅层地下水单环芳烃污染形成的原因。研究表明,该区浅层地下水单环芳烃污染呈点状分布,污染范围不大;浅层地下水单环芳烃污染相对较轻而地表水污染严重。浅层地下水单环芳烃污染特征与研究区工业企业分布、单环芳烃的挥发特性、降水以及研究区包气带防污性能密切相关。浅层地下水单环芳烃污染和工业企业分布具有很好的一致性,有机污染物高浓度的检出点均分布在污染工厂附近,无明显污染源的地段,其浅层地下水水样无有机污染物检出;各检测单环芳烃组分的亨利常数均大于 $1.01 \times 10^2 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$,所以挥发作用是其主要迁移机理,苯的柱试验表明,苯溶液浓度从 $1079.0 \mu\text{g/L}$ 降低至 $6.9 \mu\text{g/L}$ 仅需 26 天;研究区包气带为河湖三角洲沉积相的淤泥质粘土,粘粒含量大,粘土矿物含量也很高,富含有机质,其含量大都在 1.0% 以上,此类土壤具有高的吸附能力,阻滞了污染物向浅层地下水迁移;降雨时浅层地下水中单环芳烃检出率和检出浓度都较高。4 种因素综合,使得研究区浅层地下水单环芳烃呈现污染程度轻、分布零散、污染分布范围小的特点。

关键词:单环芳烃;浅层地下水;污染;长江三角洲

中图分类号: X131.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2006)05-1124-07

单环芳烃是芳烃中最为简单的一类化合物,其中最常见的组分为苯、甲苯、乙苯和二甲苯,简称 BTEX。单环芳烃作为重要的工业原料,广泛运用于工业生产,包括制药、油漆和油墨制造、皮革鞣制、橡胶加工、合成树脂等。资料表明,单环芳烃对人体健康危害很大,其中苯具有“三致作用”,甲苯和乙苯具有致突变和致畸作用,对泌尿系统及骨骼发育也有损害;二甲苯则有致畸作用,影响肌肉和骨骼的发育,其毒性作用主要表现血小板和白细胞减少^[1-3]。单环芳烃在使用和消耗过程中,可以通过各种途径进入地下水环境中,使地下水系统遭受污染;而地下水资源是人类最主要的饮用水源之一,一旦这些有机污染物进入地下水,人类的健康将受到严重威胁。因此,近年来地下水单环芳烃污染已经引起了国内外学者的广泛关注。

本文根据长江三角洲某地区 3 个城市 (C 市、W 市、S

市)浅层地下水单环芳烃检测结果,对其污染特征进行了分析,并从污染源分布、污染物性质、降水以及研究区的水文及地质条件等方面对单环芳烃污染特征进行研究。

1 研究区浅层地下水单环芳烃检出情况

浅层地下水样中,共检测了 6 种单环芳烃组分,分别是苯、甲苯、乙苯、间对二甲苯、邻二甲苯和异丙苯,每一种组分都有检出(表 1)。129 个浅层地下水样中,6 种单环芳烃组分的检出率范围在 15.0%~21.0%,间对二甲苯的检出率最高,达到 20.16%,异丙苯的检出率最低,为 15.50%;检出浓度最大的为乙苯,达 $105.7 \mu\text{g/L}$,其他 5 种组分浓度的最大值都在 10^1 数量级,除苯少数检出值超过 US.EPA 饮用水标准外,其他组分均未超标。

收稿日期:2006-01-13;改回日期:2006-06-22

基金项目:中国地质调查局地质大调查项目(200310400046)资助。

作者简介:李炳华,男,1975 年生,博士生,主要研究方向为地下水污染控制与治理;E-mail:libinghua75@163.com。

表 1 浅层地下水主要单环芳烃检出结果

Table 1 Statistical analysis of MAH in the shallow groundwater

有机组分	检测样点数	检出点数	检出率 (%)	最大值 ($\mu\text{g/L}$)
苯	129	23	17.83	8.05
甲苯	129	21	16.28	8.98
乙苯	129	23	17.83	105.7
间对二甲苯	129	26	20.16	19.36
邻二甲苯	129	21	16.28	11.19
异丙苯	129	20	15.50	15.60

表 2 S 市典型地段垂直于排污沟剖面水样的单环芳烃检出结果

Table 2 Concentrations of MAH in the water samples from the section perpendicular to a drain ditch in S City

取样点位置	距排污沟距离(m)	苯	甲苯	乙苯	二甲苯
排污沟	0	331.90	ND	ND	ND
S22P1D	0.5	7.49	ND	ND	ND
S22P2D	1.0	5.23	ND	ND	ND
S22P3D	2.0	ND	ND	ND	ND
S22P4D	3.5	ND	ND	ND	ND
S22P5D	6.5	ND	ND	ND	ND

注:ND 为未检出;单位为 $\mu\text{g/L}$ 。

2 主要单环芳烃在研究区的空间污染特征

根据研究区浅层地下水取样位置和检测结果,从平面和垂向分布规律角度,分析研究区浅层地下水单环芳烃的空间污染特征。

2.1 平面分布特征

以 C 市为例,其浅层地下水单环芳烃检出点分散,但相对集中在东南郊区,且检出浓度高值点均位于此,反映该地段污染程度较为严重。和 C 市相比,W 市和 S 市的浅层地下水单环芳烃污染较轻,但污染平面分布规律和 C 市相同,均为点状分布,仅某些地段污染较为严重。W 市污染较为严重的地段为郊区某镇印染厂和某化工厂附近,S 市污染较重的区域则在西北郊某化工厂附近。

取 S 市典型地段垂直于排污沟剖面水样的单环芳烃检测结果(表 2),可以看到排污沟水样苯的含量高达 $331.90 \mu\text{g/L}$,但距排污沟仅 0.5 m 土孔内,水样中的苯含量急剧降低到 $7.49 \mu\text{g/L}$,1.0 m 以远则无苯检出;W 市典型地段垂直于排污沟剖面水样的乙苯含量也呈现类似规律(图

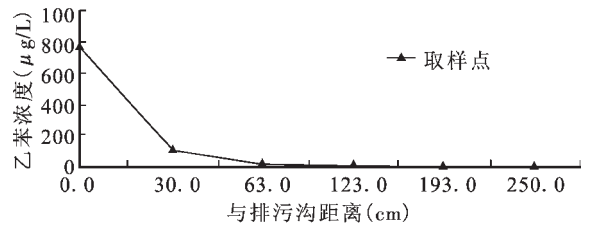


图 1 W 市典型地段垂直于排污沟剖面水样中乙苯检出情况
Fig.1 Concentrations of phenylethane in the water samples from the section perpendicular to a drain ditch in W City

1);即随着距排污沟的水平距离的增大,水样中各种单环芳烃浓度迅速的降低。

依据上述分析可以得出研究区浅层地下水单环芳烃污染平面分布特征:呈点状分布,且较为零散,仅在少数地段相对集中,污染范围不大,查明的其主要污染源为化工、印染、制漆等。

2.2 垂向变化规律

研究区城近郊区浅层地下水水井多为大口井,仅有极少数水泵井。大口井的深度一般为 5~8 m,且井壁为青砖或红砖砌成,没有防渗措施,浅层潜水以最短的水力路径渗入水井中,所以,大口井中所取水样多为潜水;而水泵井的深度较大,一般为 12~15m,井管多为塑料管,只在井管底部设置滤水孔,成井工艺较好,上部潜水很难渗到井管底部滤水孔位置,因此,抽出的水大多来自于深部。表 3 为 C 市某柴油机厂外不同深度的浅层地下水样单环芳烃检出结果。

两次的取样分析结果表明:大口井中检出有机污染组分较多,且其有机污染组分的浓度值一般都高于水泵井,其他地点大口井和水泵井的检测数据也反应了此种特征。由此可以推出,在垂向上随着深度的增大,浅层地下水受污染程度将减轻,从而使研究区单环芳烃污染表现出浅部较深部地下水污染重的特点。

3 研究区浅层地下水单环芳烃污染特征的影响因素分析

影响浅层地下水污染特征的因素很多,包括污染源的分布,污染物的排放形式,污染物的物理化学性质,气象、水文条件,包气带的岩性、结构、厚度等。下面重点从污染源分布,污染物挥发性能,包气带防污性能以及降水特征对研究区浅层地下水单环芳烃污染特征的影响进行探讨。

3.1 污染源分布

分析单环芳烃检出的井点位置,C 市检出点最多,占总检出点的 60.0%以上,而且三市单环芳烃检出点绝大多数都位于工业区。根据实地踏勘,C 市分布有许多污染型企业,重

表 3 大口井和水泵井中单环芳烃组分浓度

Table 3 Concentrations of MAH in the water samples from large-diameter wells and pumping wells

取样时间	井类型	苯	甲苯	乙苯	间对二甲苯	邻二甲苯	异丙苯
2003 年 1 月 11 日	大口井	3.34	1.37	1.63	1.07	3.35	2.19
	水泵井	ND	0.87	1.11	1.06	1.43	2.25
2003 年 3 月 15 日	大口井	4.17	3.52	5.98	4.31	4.56	4.72
	水泵井	ND	ND	ND	ND	ND	ND

注:ND 表示未检出,单位为 $\mu\text{g/L}$ 。

表 4 W 市和 S 市典型地段地表水和浅层地下水水样单环芳烃检出情况

Table 4 Concentrations of MAH in the water samples from surface and shallow groundwater in typical sites of W and S cities

取样点号	水样类型	苯	甲苯	乙苯	间对二甲苯	异丙苯	邻二甲苯
W01	B	ND	8.19	9.97	19.83	12.47	12.08
	D	ND	ND	ND	ND	ND	ND
W09	B	42.24	26.86	7.6	ND	ND	ND
	D	ND	ND	ND	ND	ND	ND
W92	B	ND	9.11	776.20	23.51	9.45	18.29
	D	ND	ND	105.70	ND	ND	ND
W95	B	11.1	31.21	ND	ND	ND	ND
	D	ND	ND	ND	ND	ND	ND
S22	B	585.40	7.44	ND	ND	ND	ND
	D	7.49	ND	ND	ND	ND	ND
S09	B	4.30	3.07	4.80	8.63	5.58	7.66
	D	ND	ND	2.91	ND	ND	ND

注:ND 为未检出,B 为地表水,D 为地下水,单位为 $\mu\text{g/L}$ 。

点污染地段位于东南郊区,此处污染型工业密集,分布有大量的印染厂、塑料厂和制药厂等企业。一些企业将部分未经处理的污染废水直接排入附近河道中,造成河流地表水严重污染,污染物随地表水入渗至地下,进而污染地下水。W 市和 S 市由于市区规划较好,浅层地下水单环芳烃检出率小。但是在郊区,随处可见的小企业任意排放污水。W 市重点污染地段在西南郊区的某镇印染厂和东北郊某化工厂附近地段,此处有大量的印染、化工企业分布;S 市重点污染地段在西北郊,此处分布有制药厂、化工厂和机械厂等。

W 市和 S 市典型地段的 13 个地表水样检测结果表明,地表水体已经受到单环芳烃严重污染,尤其是苯和甲苯,检出率分别为 50%、80%。W 市东北郊某化工厂附近地表水体乙苯浓度最高,为 $776.2 \mu\text{g/L}$;S 市西北郊区的某化工厂附近地表水体苯含量最高,达到 $585.4 \mu\text{g/L}$ 。同期的 W 市和 S 市浅层地下水样检测结果表明,W 市东北郊某化工厂排污沟附近的地下水样乙苯的检出浓度为 $105.7 \mu\text{g/L}$,S 市西北郊某化工厂附近浅层地下水样中苯的检出浓度达到 $7.49 \mu\text{g/L}$ 。对比表 4 典型地段的浅层地下水样和地表水样单环芳烃检

出结果,可以发现两者存在着很大的相关性。由此可以初步推断浅层地下水中单环芳烃的污染来源主要是工业企业,企业排出的废水首先污染其周围地表水,进而污染其附近的浅层地下水,因此在地表水体单环芳烃污染严重的地段,其浅层地下水也已经受到一定程度的污染。

3.2 单环芳烃的挥发性

有机化合物进入环境后,会迅速发生一系列的物理和化学变化以及生物化学反应,如分配、吸附、挥发等。为定量描述有机化合物在环境中的行为,运用普通有机化学的一些性质或原理,提出一些专门描述有机化合物在环境中的行为参数,包括亨利常数(K_H),辛醇-水分配系数(K_{ow}),有机碳-水分配系数(K_{oc}),蒸气压(P_v),生物富集系数(BCF)等。亨利常数(K_H)是有机化合物迁移的一个重要参数,能够描述有机化合物从溶液中挥发出去的难易程度,一般认为, $K_H > 1.01 \times 10^2 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ 时,挥发作用是有机化合物的主要迁移机理^[9]。在包气带或饱水带中,当溶解的有机污染物或 LNAPL 与气相接触时,会发生挥发作用,形成气体污染羽状体。包气带中残余的单环芳烃及其气体污染羽状体可能通过

溶解作用进入水相,从而使地下水受到污染。

检测的 6 种单环芳烃组分的亨利常数都大于 $1.01 \times 10^2 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$,因此挥发作用是其迁移的主要机理。实验室进行了苯溶液挥发作用的柱试验,得到的结果如图 2。

苯溶液的挥发速度在最初的大约 2 天时间内最大,从初始的 $1079.0 \mu\text{g/L}$ 迅速降到 $780.0 \mu\text{g/L}$ 左右;此后挥发速度逐渐变慢,到 26 天左右的时候,苯溶液的浓度仅有大约 $10.0 \mu\text{g/L}$ (图 2)。由此可以得出挥发作用对苯在水体中的迁移有重要影响。文献资料也表明,在模拟河流及湖泊中,其由挥发引起的半衰期分别为 1 小时及 3.5 天;在土壤中,苯的迁移性也较大,可以很快从较干燥的土壤表层经挥发作用进入大气中去。

3.3 包气带防污性能

包气带的防污性能与其岩性、结构、厚度、渗透性能以及地形坡度等有着密切的关系。土层为粘土时,包气带的渗透性能降低,而且粘土具有较大的比表面积,可以吸附污染物,因此阻滞了有机污染物向地下水中迁移,且包气带的厚度越大,污染物越难以迁移进入地下水。

文献表明粘土和粉质粘土的渗透系数非常低,其中粘土的渗透系数小于 10^{-7} cm/s ,粉质粘土的渗透系数为 $10^{-5} \sim 10^{-6}$

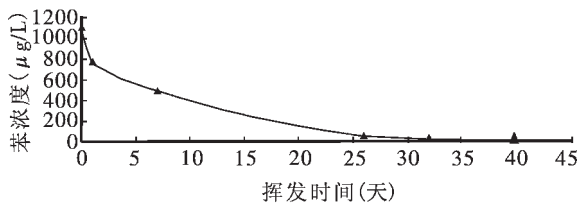


图 2 苯溶液的浓度随时间的变化

Fig.2 Change of concentration of the benzene solution with time

表 5 土样甲醇浸泡检测的主要单环芳烃吸附量

Table 5 The amount of MAH in the soil soaked by methanol

土样位置	深度(cm)	甲苯	乙苯	间对二甲苯
包气带	7.5	217.07	158.97	ND
	18.5	339.38	490.25	204.47
	25.5	324.35	202.83	220.31
	32.5	219.53	421.18	1069.53
	39.0	204.83	505.90	484.63
	46.5	311.53	292.08	461.94
地下水	55.5	151.02	499.47	1031.55
	60.0	680.40	3194.40	3949.20

注:ND为未检出,单位为 mg/kg。

cm/s 。根据研究区的水文地质资料^[7-9],该地区的包气带土层普遍都由粘土和亚粘土层组成,厚度一般为 10~15 m,局部地段大于 20 m。因而地表的污染物难于下渗迁移,从而使研究区呈现地表水污染严重,而浅层地下水污染程度较轻的特点。

除了包气带土壤渗透性影响污染物迁移外,研究区的土壤粘粒和有机质对污染物的吸附作用也不容忽视。土壤越细小,单位体积土体中土粒的总表面积越大,所以粘粒具有很强的吸附能力。本区采集的土样中,多属于上更新统棕黄色粘土,在许多文献^[9-10]中又称为古土壤层,是河漫滩沉积和成土交替作用的产物。古土壤层发生了粘化作用,生成粘粒,且粘粒含量较高。根据研究区所取包气带土样的测试结果,土样中的粘粒含量非常高,小于 0.005 mm 的含量处于 45.2%~84.6%,较高的粘粒含量增加了粘土矿物的比表面积,并由此增大了污染物在矿物质表面的吸附能力。

经室内试验检测,研究区土壤有机质含量基本在 1.0% 以上,在 C 市某制药厂排污沟附近垂直剖面取样孔中发现有黑色泥炭层,其中有机质的含量高达 12.2%,有机碳的含量为 7.07%,W 市也发现泥炭的存在。由于土样中有机碳的含量较高,入渗水中的有机污染组分在分配作用的驱使下会大量进入土壤的有机质中,从而减少了浅层地下水的污染。

为了验证土壤是否截留了单环芳烃,进行了土壤甲醇浸泡的室内试验(表 5)。

测试结果表明:每千克土样吸附量高达数百甚至上千毫克,但是由于吸附和挥发等诸多因素的共同作用,使得包气带不同深度的土层吸附量呈现出稳定的波动变化。在浅层地下水水面以上较浅的深度内,包气带土壤湿度低,甲苯、乙苯和间对二甲苯挥发作用较为强烈,但在浅层地下水水面以下,各组分的吸附量呈现急剧增加的变化趋势。这种变化趋势,一方面,可能与单环芳烃组分的挥发性在地下水水面以下受到抑制有关,另一方面,由于在饱水的情况下,土层中有机碳的含量在吸附中占主导地位,在某段时间内,可能吸附了浅部地下水中大量的甲苯、乙苯和间对二甲苯,导致吸附量急剧增加。

由此可以得出,研究区包气带表现出良好防污性能,使得单环芳烃组分在垂直入渗过程中,绝大部分被包气带土层的粘土矿物和有机质所吸附,仅有少部分进入到浅层地下水中,所以,研究区浅层地下水单环芳烃检出率较高,但检出浓度偏低,污染并不严重。同样的,在地下水中的水平迁移扩散过程中,含水层介质与包气带土层相似,也限制了有机污染物迁移扩散,使得浅层地下水有机污染物水平迁移扩散范围非常有限,从而表现出单环芳烃污染范围不大的特征。

3.4 降水的影响

研究区地处太湖平原,水力梯度小,水平径流缓慢,垂向上的降水入渗、蒸发蒸腾和人工开采是浅层地下水交替循环的主要方式^[4]。根据对地下水中氢氧同位素的研究表明,研究区浅层地下水是从现代大气降水入渗中获得补给,直接参与

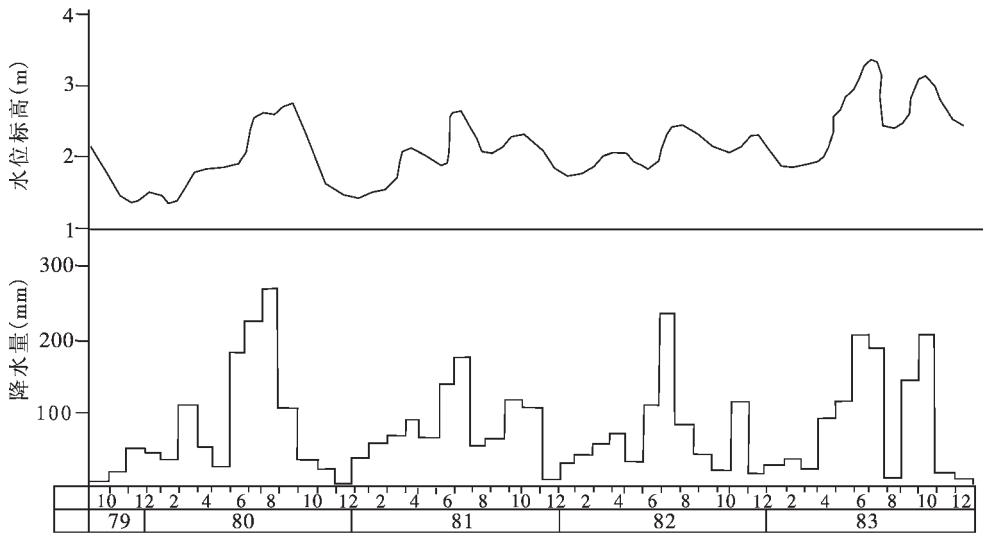


图 3 太湖平原降水与浅层地下水位历时曲线图

Fig.3 Relation of precipitation and shallow groundwater level in the Taihu Lake plain

当地的水循环,更新周期较短,并且现代大气降水直接入渗补给地下水的深度也仅限于浅层地下水。浅层地下水水位受控于降水的变化,其水位历时曲线与降水量大小相吻合:随着每年春季降水量的逐渐增加水位上升,至7-9月份出现高值,而低值出现在枯水期1-2月份,并且呈多年周而复始的特点(图3) [9]。

对C市某湖区23个浅层地下水的水位分别在平水期、枯水期和丰水期进行了统测。从3次测量的结果可以得出,平水期水位高于枯水期的水位,二者水位差均为正值,所有采样点水位平均降幅为22 cm,说明在平水期过渡到枯水期时,由于降水量很少,垂向入渗量减少,蒸发和蒸腾作用,加上人工开采和利用,浅层地下水水位呈现出整体降低的趋势。从枯水期过渡到丰水期时,由于面状的降水入渗补给,浅层地下水水位呈现出整体抬升的趋势,整体水位的平均上升幅度为32 cm左右。自平水期—枯水期—丰水期,水位经历了先降后升的变化过程。由此可以进一步证实,浅层地下水的水位变化确实是受到降水入渗的控制作用。

降水或地表水入渗,会携带地表或滞留于土壤中有有机污染物进入含水层中,造成浅层地下水不同程度的污染。降水初期,地表有机污染物直接随着雨水入渗进入浅层地下水中;而土壤中的有机污染物,一部分通过淋滤冲洗进入浅层含水层中,另一部分则是经过解吸作用而随降水向下迁移。此时取浅层地下水检测,水样中的有机污染物检出组分和浓度一般较高。2003年从C市采集的36个浅层地下水样品,均为降水雨后取得的,其检测结果见(表6)为6种单环芳烃组分的检出率都较高,38.9%~61.1%,浓度在2.00~10.00 μg/L,其中仅

表 6 雨后浅层地下水单环芳烃检出组分情况

Table 5 Statistics of MAH detected in the shallow groundwater of C City after rain

有机组分	取样点 数(个)	检出点 数(个)	检出率 (%)	最大值 (μg/L)	U.S.EPA (μg/L)
苯	36	20	55.6	8.05	5.00
甲苯	36	14	38.9	7.52	1000.00
乙苯	36	15	41.7	5.98	700.00
间对二甲苯	36	22	61.1	6.99	10000.00
邻二甲苯	36	19	52.8	9.43	
异丙苯	36	16	44.4	6.06	/

有苯检出值超出 US.EPA 饮用水标准(5.0 μg/L),其最大值为 8.05 μg/L。

2004 年对 C 市浅层地下水再次取样(取样之前长时间未降水),此次所取 39 个样品中包括全部第一次取样点,水样中 6 种单环芳烃均无检出。

因此,对比不难看出,C 市城近郊区浅层地下水的两次采样分析测试结果表现出显著的差异性。究其原因,由于 C 市城近郊区浅层地下水的水平循环交替程度很微弱,地下水的主要补给来源为大气降水。第一次采样时的浅层地下水的水位较降水前普遍高出 30~50 cm,地下水水位显著抬升。在降水入渗补给浅层地下水的过程中,大气、地表和滞留于包气带中的单环芳烃组分经雨水携带进入地下水中,故浅层地

下水中各单环芳烃组分的样点检出率较高。而第二次采样前,长时间内未发生降水,单环芳烃组分主要吸附于包气带土层中,致使浅层地下水中的单环芳烃组分无检出。

4 结 论

(1) 检测结果表明,研究区浅层地下水已受到单环芳烃组分的污染,6 种单环芳烃的检出率均在 20%左右,检出浓度在 $10^0 \mu\text{g/L}$ 数量级;浅层地下水单环芳烃污染成点状分布,仅在某些地段相对集中,且污染范围有限。

(2) 研究区浅层地下水单环芳烃污染分布特征和化工、印染以及制漆企业分布具有很好的相关性。污染企业密集的地段,浅层地下水单环芳烃污染较严重,如 C 市东南郊区印染工业区。

(3) 6 种单环芳烃的亨利常数都大于 $1.01 \times 10^2 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$,属于易挥发性物质,挥发作用对其迁移有着重要的影响。苯溶液的柱试验表明,苯溶液浓度从 $1079.0 \mu\text{g/L}$ 降低到 $6.9 \mu\text{g/L}$ 的时间仅需 26 天。

(4) 研究区包气带岩性为富含有机质的粘性土壤,对有机污染物具有很强的吸附作用。甲醇浸泡土样实验显示,每千克土壤吸附的单环芳烃重量高达数百甚至上千毫克,证实了研究区包气带具有较强的防污性能。

(5) 在降水入渗补给浅层地下水的过程中,大气、地表和滞留于包气带中的单环芳烃组分经雨水携带进入地下水中,故浅层地下水中各单环芳烃组分的样点检出率较高。

参考文献(References):

- [1] EPA 822 -R -02 -038, 2002 Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories, Office of Water U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, 2002.
- [2] 王晓燕, 尚伟. 水体有毒有机污染物的危害及优先控制污染物[J]. 首都师范大学学报(自然科学版),2002,23(3):74~77.
Wang Xiaoyan, Shang Wei. The harm of organic micropollutants on water body and priority pollutants [J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2002,23 (3):74~77 (in Chinese with English abstract).
- [3] 张亦军. 直接与间接接触苯系物职工健康状况分析[J]. 中国工业医学杂志, 2004,17(3):195~196.

- Zhang Yijun. The analysis of the effect of different styles of benzene exposure on employee health [J]. Chinese J Ind Med, 2004,17(3): 195~196(in Chinese with English abstract).
- [4] 江苏省地质调查研究院. 基于 GMS 平台的苏锡常地区地下水流模型研究报告[R]. 南京:江苏省地质调查院,2003.
Geological Survey of Jiangsu Province. The Model of Groundwater Flow Based on GMS in the Region of Suzhou Wuxi Changzhou[R]. Nanjing: Geological Survey of Jiangsu Province,2003(in Chinese).
- [5] 江苏省地质工程勘察院. 江苏省苏锡常地区浅层地下水资源保护与开发利用研究报告[R]. 南京:江苏省地质工程勘察院, 2003.
Geo-engineering Investigation Institute of Jiangsu Province. The Research of Protection and Exploitation of the Shallow Groundwater in the Region of Suzhou Wuxi Changzhou, Jiangsu Province [R]. Nanjing: Geo-engineering Investigation Institute of Jiangsu Province,2003(in Chinese).
- [6] 金相灿. 有机化合物污染化学[M]. 北京:清华大学出版社,1990.
Jin Xiangcan. The Chemistry of Organic Pollutants [M]. Beijing: Tsinghua University Press,1990.(in Chinese).
- [7] 李从先, 闵秋宝, 孙和平. 长江三角洲南翼全新世地层和海侵[J]. 科学通报, 1986,31(21):1650~1653.
Li Congxian, Min Qiubao, Sun Heping. Holocene strata and transgression at the Southern Flank of the Yangtze Delta [J]. Chinese Science Bulletin, 1986,(21):1650~1653(in Chinese).
- [8] 江苏省地质调查研究院. 地面沉降与地裂缝调查研究报告[R]. 南京:江苏省地质调查研究院,2003.
Geological Survey of Jiangsu Province. The Survey of Land Subsidence and Fissure in Jiangsu Province [M]. Nanjing: Geological Survey of Jiangsu Province,2003(in Chinese).
- [9] 李萍, 孙和平. 长江三角洲地区晚更新世地层中的古土壤特征[J]. 上海地质,1991,(1):16~23.
Li Ping, Sun Heping. The feature of ancient soils in the late Pleistocene paleosols of the Yangtze Delta area [J]. Shanghai Geology, 1991,(1):16~23(in Chinese).
- [10] 刘宝柱, 李从先, 业治铮. 长江三角洲晚更新世末期古土壤与古环境[J]. 青岛海洋大学学报, 1997,27(3):397~404.
Liu Baozhu, Li Congxian, Ye Zhizheng. Late Pleistocene paleosols and soil-forming environment in the Yangtze Delta [J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1997,27 (3):397~404 (in Chinese with English abstract).

Characteristics and cause of monocyclic aromatic hydrocarbon contamination in shallow groundwater in an area of the Yangtze River delta

LI Bing-hua, CHEN Hong-han, HE Jiang-tao, LIU Fei

(Key Laboratory of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The paper deals with the study of monocyclic aromatic hydrocarbon (MAH) in shallow groundwater in three cities (C, W and S) in an area of the Yangtze River delta. Based on the data of water samples, the authors summarize the contamination features and distribution characteristics of MAH and then discuss the cause of MAH contamination in shallow groundwater in terms of the distribution of contamination sources, MAH volatility, precipitation and anti-pollution performance of the aeration zone in the study area. Study indicates that the MAH contamination in shallow groundwater is of point distribution within a small scope and not so serious, while the MAH contamination in surface water is serious. The characteristics of MAH contamination in shallow groundwater of the study area are closely related to the distribution of factories, volatile features of MAH, precipitation and anti-pollution performance of the aeration zone in the study area. The contamination shows good consistency with the distribution of factories. The detection points of organic pollutants with a high concentration are all distributed near polluted factories, while no organic pollutants have been detected from shallow groundwater samples in places without marked contamination sources. Henry's constants of various MAH components detected are all $>1.01 \times 10^2 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$, so volatilization is its main migration mechanism. The column test of benzene indicates that it only takes 26 days for the concentration of the benzene solution to decrease from $1079.0 \mu\text{g/L}$ to $6.9 \mu\text{g/L}$. The aeration zone in the study area is composed of sludge clay of fluviolacustrine deltaic facies. It contains plenty of clay granules and clay minerals and is rich in organic matter ($>1.0\%$). Therefore the soils have a high adsorptivity to stop the pollutants from migrating to shallow groundwater. When it rains, both the detected MAH rate and concentration are high. The combination of the above-mentioned four factors makes the shallow groundwater in the study area have the following features: the pollution degree is low, MAH is of sporadic distribution and the pollution scope is small.

Key words: MAH; shallow groundwater; pollution; Yangtze River delta

About the first author: LI Bing-hua, male, born in 1975, PhD candidate, specializes in the technique of groundwater pollution control and treatment; E-mail: libinghua75@163.com.