

北京东南郊污灌区 PAHs 垂向分布规律

何江涛, 金爱芳, 陈素暖, 魏永霞

(中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要:采用 Eijkelpkamp 土壤采样器对北京东南郊污灌区进行了 3 个钻孔剖面采样, 分析了土壤样品的理化参数, 并且采用气相色谱-质谱联用仪对土壤样品的多环芳烃(PAHs)进行了定量分析, 研究了土壤理化参数和 16 种 PAHs 从表层到 5.5 m 深的范围内垂向变化规律. 结果表明, 污灌区表层土壤中有 14 种 PAHs 检出, 检出浓度在 4 ~ 428 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 之间, 表层以下 PAHs 的检出种类显著减少, 主要以 2 环和 3 环的萘、菲、芴、苊烯、二氢苊、荧蒽 6 种为主. 粘粒含量、粘土矿物总量、阳离子交换容量以及总有机碳 4 个理化参数相互之间在垂向变化上具有一致性, 均在 0.05 水平上显著相关. 表层以下粘粒含量与低环 PAHs 在垂向含量变化也有较好的一致性, 粘粒含量高的层位, PAHs 含量也较高. 从剖面 PAHs 含量变化可以判断, 低环 PAHs 较易迁移, 它们的迁移性强弱顺序为: 二氢苊 > 芴 > 萘 > 菲 > 苊烯 > 荧蒽, 其它高环 PAHs 难以迁移, 仅在表层土壤中检出, 说明在长期污灌条件下, 迁移性较好的低环 PAHs 能够迁移到较深的土层中, 有可能导致浅层地下水的污染.

关键词:污水灌溉; 多环芳烃; 垂向剖面

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)05-1260-07

Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing Wastewater Irrigation Area

HE Jiang-tao, JIN Ai-fang, CHEN Su-nuan, WEI Yong-xia

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

Abstract: 3 borehole profiles samples were collected using Eijkelpkamp soil sampler from the wastewater irrigation area of Beijing Southeast suburb. The soil samples were collected from surface to 5.5 m underground every 0.5 m. Physical-chemical properties of the samples such as clay content, total amount of clay minerals, cation exchange capacity (CEC), total organic compounds (TOC), etc. were analyzed. 16 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) defined by the U.S. EPA were also analyzed with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). Results show that 14 PAHs were detected in the surface soil samples. The concentrations of PAHs range from 4 $\mu\text{g}/\text{kg}$ to 428 $\mu\text{g}/\text{kg}$. Under the surface, both species and concentrations of PAHs in soil samples drop very fast. Only 2 rings and 3 rings PAHs were detected, which were naphthalene, phenanthrene, fluorene, acenaphthylene, acenaphthene, and fluoranthene. Clay content, total amount of clay minerals, CEC and TOC have significant correlations at 0.05 level between each other. Under the surface, clay contents also have a relationship with low-rings PAHs concentration. Where the layers have higher clay contents, the PAHs have higher concentrations. The contents of PAHs changing along the profiles also show that, low-rings PAHs are easier to migrate than high-rings PAHs. The sequence of the migration capabilities of low-ring PAHs is acenaphthene > fluorene > naphthalene > phenanthrene > acenaphthylene > fluoranthene. However, high-ring PAHs were only detected in surface soil samples. That means low-rings PAHs can reach the deep layers of the vertical profiles under long-term wastewater irrigation. Therefore, the shallow groundwater has the possibility to be contaminated.

Key words: wastewater irrigation; polycyclic aromatic hydrocarbons; vertical soil profiles

水资源紧缺是导致长期污灌和再生水灌溉的一个重要原因, 这种水资源再利用的方式是否会带来负面环境效应是广大科研工作者所关注的问题. 长期污水灌溉是否会造成地下水污染乃是其中最重要的研究课题. 多环芳烃(PAHs)是一种广泛存在于自然界和人类生活环境的有机污染物, 是最早发现且数量最多的致癌物质^[1~4], 目前已被多数研究证实存在于城市污水和污灌区土壤中^[5~11]. 由于多数 PAHs 组分属于难降解的疏水性有机化合物, 易被吸附截留在土壤-包气带的土层中, 造成土壤和沉积物浅表层污染, 许多关于污灌区土壤耕作层或土壤浅层剖面的调查研究也证实了这一点^[12~14]. 因此, 有

关浅表层土壤和沉积物中 PAHs 的研究受到了广泛重视. 然而关于 PAHs 经土壤-包气带垂向迁移, 在较深层剖面中的迁移规律研究报道较少. 本研究通过对典型污灌区实施精细剖面钻探采样分析, 考察了 PAHs 在土壤-包气带更深层次的垂向剖面分布规律, 为长期污灌是否会造成地下水污染问题的探讨提供基础.

收稿日期: 2008-07-25; 修订日期: 2008-11-19

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA100205-3); 国家自然科学基金项目(40702060)

作者简介: 何江涛(1974~), 男, 副教授, 主要研究方向为土壤地下水污染控制与修复, E-mail: jithe@cugb.edu.cn

1 材料与方法

1.1 土壤样品的采集

采用 Eijkelpamp 土壤采样器于 2007 年 11 月在次渠镇污灌区实施了 3 个土壤-包气带精细剖面钻探,深度为 5.5 m.为保证采样分析结果的可靠性,3 个采样点布设采用正三角型布点法,间隔为 1 m.取样位置从表土开始,每间隔 0.5 m 采集一个土样,每个剖面取 12 个样.土样编为 A、B、C 3 组,编号按照采样深度确定,编为 A00、A05、A10…….土样采集于棕色磨口玻璃瓶中,用封口膜密封保存,采样当天送回实验室进行前处理.

1.2 土壤样品分析指标及方法

土壤样品分析理化指标及方法见表 1.

表 1 土壤样品测试理化指标和方法

Table 1 Physical-chemical indexes and analysis methods of soil samples	
测试项目	测试方法
土壤含水量	质量法
pH 值	电位法
阳离子交换容量(CEC)	氯化铵-乙酸铵交换法和乙酸铵交换法
总有机碳含量(TOC)	重铬酸钾氧化外加热法
水溶性盐分	电导法
氧化还原电位	电位法
颗粒组成	比重计法
粘土矿物组成	X-ray 衍射法

多环芳烃前处理方法^[15,16]:采集的土壤样品,在阴暗处风干,磨碎过 20 目筛,存放在棕色玻璃瓶中,在 14 d 内完成提取步骤.依据 EPA 方法 3 550,称取 15 g 土壤样品和 3 g 无水硫酸钠置于 40 mL 棕色玻璃瓶,加入 20 mL 的提取溶剂(1:1 的丙酮/正己烷混合溶剂),于 50℃ 在 400 W 功率下超声提取 20 min,将超声后的棕色瓶于 3 000 r/min 下离心 3 min,转移有机相至 100 mL 的磨口玻璃瓶.重复提取 2 次,合并提取液,过无水硫酸钠脱水,而后用 0.4 μm 的 PVDF 滤膜(有机相)过滤.在 35~40℃ 的水浴中旋转蒸发浓缩有机相,当浓缩至约 1 mL 时,转移至弗罗里硅土的 SPE 柱进行净化,洗脱液氮吹至 1 mL,转移至 2 mL 棕色小瓶冷藏保存,留待上机分析.

多环芳烃分析方法:采用气相色谱-质谱联用仪(HP6890/5973, GC-MS)对多环芳烃进行分析.仪器色谱条件为毛细管色谱柱 HP-5MS(50 m×0.25 mm×0.25 μm),进样口温度:250℃,无分流进样,进样量 1 μL,载气为氦气,恒流模式,流速为 1.0 mL/min;色谱柱程序升温条件为始温 80℃ 保持 1 min, 30℃/min 升至 215℃ 保持 1 min, 5℃/min 升至 255℃ 保持 1 min,

1℃/min 升至 263℃ 保持 1 min, 25℃/min 升至 300℃ 保持 3 min;质谱条件为接口温度 280℃,离子源温度 230℃,四级杆温度 150℃,离子源 EI,电子能量 70 eV,电子倍增器电压 1 906 V,溶剂延迟 3 min.该检测方法经过实验室专门研究,满足检测精度要求.

质量控制与保证措施:每批样品(12 个)设置 1 个空白样和 3 个平行样,以检测仪器的稳定性和测试结果的可靠性.

2 结果与讨论

2.1 土壤颗粒组成分析

在对土壤样品颗粒组成结果分析过程中发现,按照《岩土工程勘察规范》对土壤样品命名,绝大部分样品为粘土类,很难将土壤颗粒组成特点区分出来(见表 2).笔者采用三角图方法分别对各样品砂粒(>0.075 mm)、粉粒(0.075~0.005 mm)、粘粒(<0.005 mm)的质量分数进行绘图,结果如图 1, B35、A35、A40 在颗粒组成上相近,砂砾含量较高,而 A15、A20、B15、C10、C15 这 5 个样品粘粒含量较高.从表 2 中可以明显看出,它们分别构成了位于 1~2 m 深处粘粒含量最高的一个夹层,和 3.5~4.0 m 深处砂粒含量最高的一个夹层.尽管 3 个孔距离只有 1 m,剖面组成上还是有微小变化的.

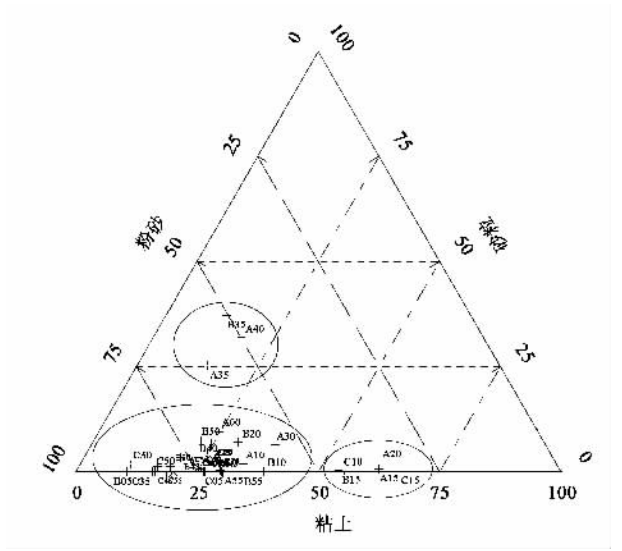


图 1 土壤样品颗粒组成三角图

Fig.1 Soil samples texture

2.2 土壤理化参数垂向变化

分别对土壤理化参数 pH、Eh、含水率(%)、含盐量、粘粒含量(<0.005 mm 的质量分数)、粘土矿物总量(%)、总有机碳(TOC 质量分数)、阳离子交换容量(CEC)绘制剖面图,见图 2.从中可以看出,A、B、C

表 2 土壤样品命名¹⁾

Table 2 Denomination of soil samples

剖面深度/m	A 剖面	B 剖面	C 剖面
0	粉质重亚粘土	粉质中亚粘土	粉质重亚粘土
0.5	粉质中亚粘土	粉质亚砂土	粉质重亚粘土
1.0	粉质轻粘土	粉质轻粘土	粉质轻粘土
1.5	重粘土	粉质轻粘土	重粘土
2.0	重粘土	粉质重亚粘土	粉质重亚粘土
2.5	粉质重亚粘土	粉质中亚粘土	粉质重亚粘土
3.0	粉质轻粘土	粉质重亚粘土	粉质轻亚粘土
3.5	含砂轻亚粘土	含砂轻亚粘土	粉质轻亚粘土
4.0	含砂中亚粘土	粉质重亚粘土	粉质重亚粘土
4.5	粉质重亚粘土	粉质中亚粘土	粉质中亚粘土
5.0	粉质重亚粘土	粉质重亚粘土	粉质中亚粘土
5.5	粉质重亚粘土	粉质轻粘土	粉质中亚粘土

1)表中黑体字部分分别对应于 1.0~2.0 m 处粘粒含量和 3.5~4.0 m 处砂粒含量最高的夹层

3 个剖面在整个采样深度上 pH 值变化并不是很大,并且剖面各层位之间的 pH 值亦无明显变化,均在 7.7 左右;A、B、C 3 个剖面的 Eh 值变化趋势基本一致,3 组剖面 Eh 值在 2.0~2.5 m 达到整个剖面的最高值,在 5.5 m 处 Eh 降到最小值;A、B、C 3 组剖面的含水率主要集中在 20%~40% 之间;可溶盐含量在 3 组剖面上未出现明显变化,基本都在 20 μ S/cm

左右,3 组剖面的含水率变化趋势基本一致.总体来说,这 8 个理化指标在 3 个剖面中的一致性较好,垂向变化规律基本一致.除此之外,粘粒含量、粘土矿物总量、CEC 以及总有机碳 4 个指标相互之间在垂向变化趋势上也有较好的一致性,分别在表层数值较高,0.5 m 处降为低值,1~2 m 深处数值又明显上升,然后又下降.采用 SPSS 软件对这 4 个指标进行两两相关性分析,结果见表 3.说明除 CEC 与 TOC 之间相关性稍差,其他指标之间在 0.01 水平上均为显著相关.

表 3 4 个理化指标的相关性分析¹⁾

Table 3 Correlation analysis of 4 physical-chemical indexes

相关系数	粘粒含量	粘土矿物总量	CEC	TOC
粘粒含量	1	0.851 **	0.744 **	0.579 **
粘土矿物总量	0.851 **	1	0.822 **	0.591 **
CEC	0.744 **	0.822 **	1	0.341 *
TOC	0.579 **	0.591 **	0.341 *	1

1)相关分析的样本数 N = 36, * * 表示在 0.01 水平显著相关, * 表示在 0.05 水平显著相关

2.3 土壤中多环芳烃的检出

在表层土壤中 PAHs 除蒽和苯并[a]蒽外,其余 14 种多环芳烃均有检出,其中萘的浓度最高,为 428 μ g/kg,剩余的 13 种多环芳烃均在 50 μ g/kg 以下,

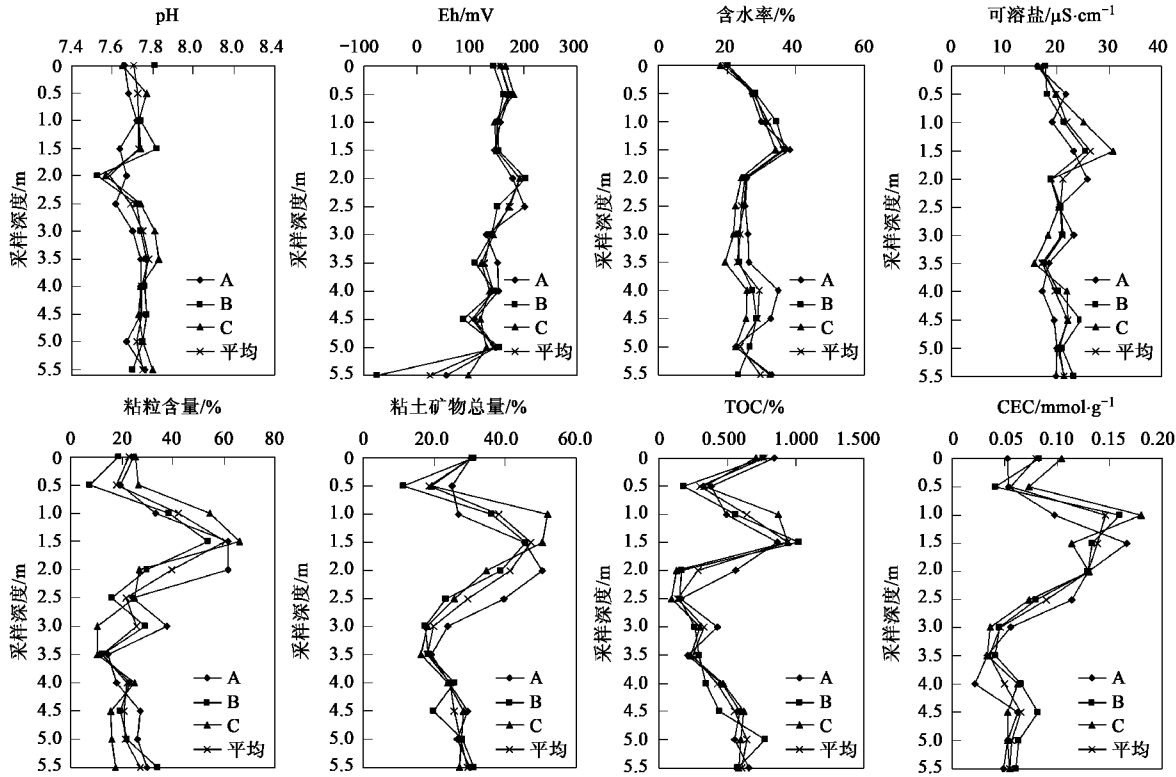


图 2 8 个理化参数在 3 个垂向剖面中变化规律

Fig.2 Changing curve along the depth of 8 physical-chemical indexes in 3 profiles

浓度最低的二氢萘为 4 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (图 3)。

从 0.5 m 层位开始,多环芳烃的检出种类显著减少,普遍检出的为萘、芘烯、二氢萘、芴、菲、荧蒹。对 A、B、C 3 个剖面主要检出多环芳烃做剖面垂向变化图(见图 4),由于粘粒含量、粘土矿物总量、CEC 以及总有机碳 4 个指标间有比较明显的相关性,这里选择粘粒含量作为代表与 PAHs 在剖面垂向上的变化作对比。

从 A、B、C 3 个剖面 PAHs 含量随深度变化情况看,表层基本上是各种检出 PAHs 含量高的分布区,这与许多文献报道相一致^[1, 2, 13, 17~20],确实说明

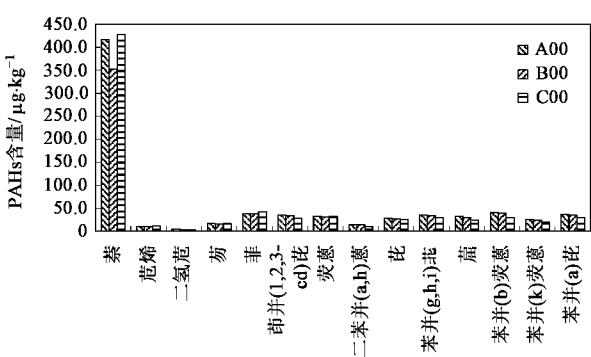


图 3 表层土壤中多环芳烃检出浓度

Fig.3 Concentration of detected PAHs of surface soil samples

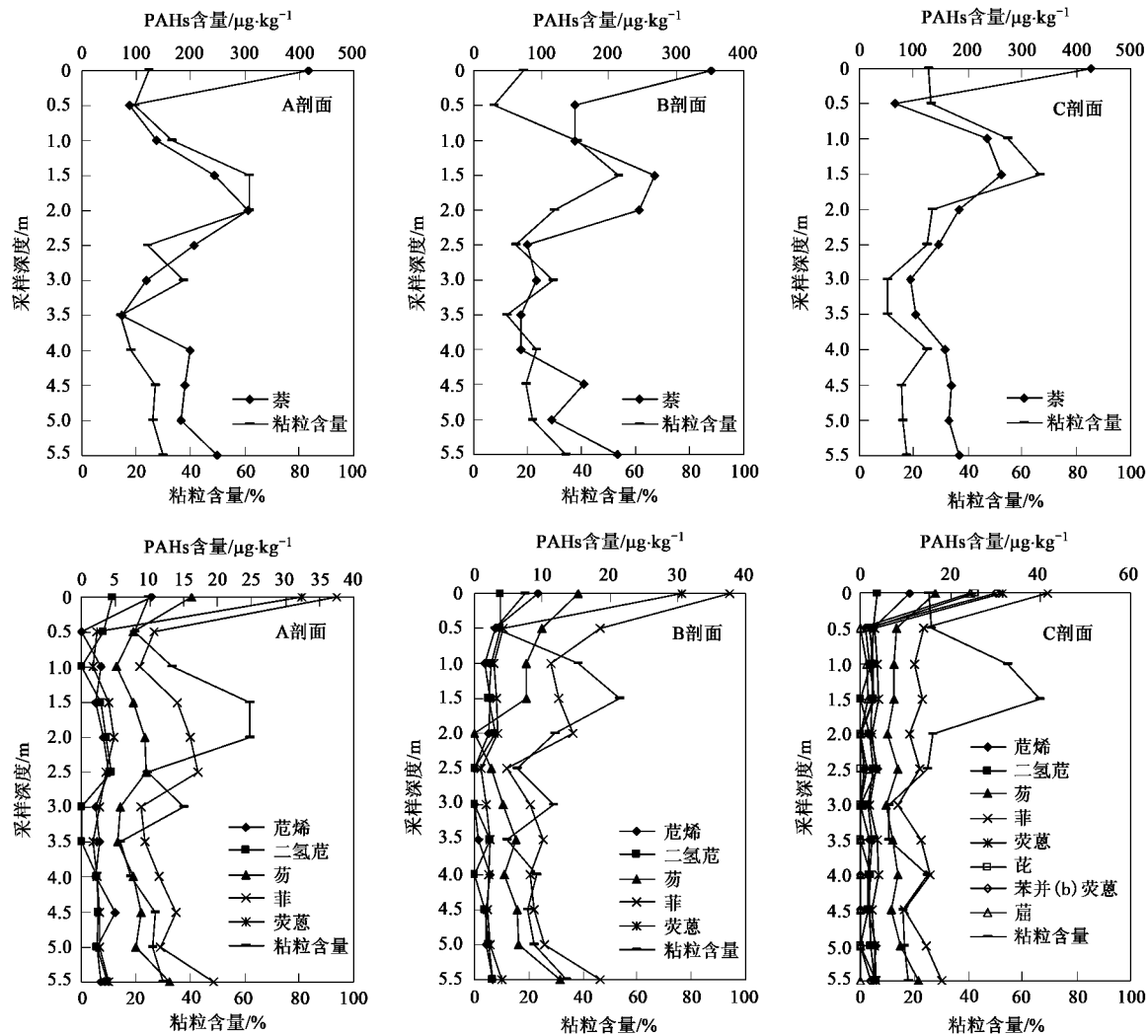


图 4 检出的多环芳烃在 3 个剖面中的垂向变化

Fig.4 Concentrations of detected PAHs vs depth in 3 profiles

PAHs 易被土壤吸附难以迁移,但是也可以看到表层以下,到 5.5 m 的采样深度仍有多种低环的 PAHs 检出。由于采样区灌溉主要引用的是北京市东南郊区

的排污河(凉水河)水,自 20 世纪 60、70 年代起就一直采用污水灌溉,污灌历史较长,所以尽管该地区土壤包气带岩性主要为粘土和亚粘土,防污性能良好,

但相对较易迁移的低环 PAHs 仍能向下迁移到较深的包气带土层中.

从剖面上还可以看出位于 1.0 ~ 2.0 m 的深度范围内,粘粒含量、粘土矿物总量、CEC 以及总有机碳 4 个指标数值均较高(图 2),相应的此地段 PAHs 的含量也出现了一个较为明显的峰值.按照一般的吸附理论认为,疏水性有机化合物会优先吸附在土壤当中的有机质中,显然该地段 TOC 数值较高能够较好地证实这一点,但其贡献份额尚不能确定,因为粘粒含量、粘土矿物总量、CEC 以及总有机碳 4 个指标本身之间是存在一定相关关系的,而这种相关关系目前也不能确定和量化.同样,位于 0.5 m 和 3.5 m 深度左右的范围内,粘粒含量、粘土矿物总量、CEC 以及总有机碳 4 个指标数值出现了较低数值,部分 PAHs 也显现出了含量变低的现象.但是,由于 0.5 m 处紧邻表层 PAHs 高含量区,3.5 m 处各种 PAHs 含量都比较低而使得这种变化没有 1.0 ~ 2.0 m 高值区变化明显.尽管如此,还是能够说明 PAHs 在垂向剖面中的分布与粘粒含量、粘土矿物总量、CEC 以及总有机碳 4 个指标是有明显的相关关系的.这与许多学者报道的土壤中 PAHs 含量与有机碳含量密切相关相一致^[4,21,22].

需要说明的是,在污水灌溉过程中,污水中的 PAHs 在入渗过程中不断被吸附到土壤层,因此不同深度的起始溶液中 PAHs 含量也不同,如果整个剖面是均质的,则 PAHs 在土壤中含量随深度变化是一条呈指数形式衰减的曲线,所以不宜直接对 TOC 和土壤中 PAHs 含量进行二元相关分析,同样对于

粘粒含量也是如此.

从 A、B、C 3 个剖面 5.5 m 深度范围内检出的 PAHs 来看,垂向较易迁移的主要是蔡、萘、萘烯、芴、菲、荧蒹 6 种,其他 8 种[芘、苯并(b)荧蒹、苯并(k)荧蒹、苯并(a)芘、茚并(1,2,3-c,d)芘、二苯并(a,h)蒽、苯并(ghi)芘]仅在表层土壤中检测到,表层以下很少检测到.考察影响 16 种 PAHs 的迁移理化性质(见表 4), K_{ow} 是辛醇-水分配系数,该数值越大说明这种有机化合物疏水性越强,越容易吸附到有机质当中,表 4 中列出了 16 种 PAHs 的 K_{ow} 数值及其排序,一般来说排序越靠前的越容易迁移.水中溶解度同样也能够反映有机化合物的迁移难易程度,一般来说,溶解度大的相对要容易迁移.但由于影响 PAHs 的因素很多,且很复杂,因此实际迁移能力的强弱并非完全按照 K_{ow} 或溶解度大小顺序排列.对照表 4 中参数可以看出,相对容易迁移的 6 种 PAHs 均是具有 2 个或 3 个苯环的 PAHs(蒽和苯并[a]蒽在整个剖面中没有检出),其他超过 3 个苯环的 PAHs 均难以迁移.

为判断本次采样污灌区中低环 PAHs 的迁移性,假设固相中的 PAHs 含量是与液相中 PAHs 含量吸附平衡时的数值,假设 PAHs 在迁移的过程中除了吸附作用外不存在降解作用^[23~25],这样可以分别采用某一层位的含量占表层含量的百分数(质量分数)进行对比,百分含量随深度降低越快,说明其越容易被吸附到土层中,迁移性就越差,由此可以判断 PAHs 的迁移性.对 A、B、C 3 个剖面数据处理绘图(见图 5).从图 5 中可以判断在本污灌区中,低环

表 4 16 种多环芳烃的物理化学性质

Table 4 Physical-chemical properties of 16 PAHs					
出峰顺序	名称	水中溶解度/mg·L ⁻¹	K_{ow}	K_{ow} 顺序	苯环数
1	蔡	3.2	2 300	1	2
2	萘	3.4 (25℃)	21 000	4	2
3	萘烯	3.93	12 000	2	2
4	芴	1.9	15 000	3	2
5	菲	1.0 ~ 1.3 (25℃)	29 000	6	3
6	蒽	0.05 ~ 0.07 (25℃)	28 000	5	3
7	荧蒹	0.26 (25℃)	340 000	8	3
8	芘	0.14 (25℃)	2 × 10E5	7	4
9	苯并(a)蒽	0.01 (25℃)	4 × 10E5	9	4
10		0.002 (25℃)	4 × 10E5	10	4
11	苯并(b)荧蒹	—	4 × 10E6	13	4
12	苯并(k)荧蒹	—	7 × 10E6	14	4
13	苯并(a)芘	0.003 8 (25℃)	1 × 10E6	11	5
14	茚并(1,2,3-c,d)芘	—	5 × 10E7	16	5
15	二苯并(a,h)蒽	0.000 5 (25℃)	1 × 10E6	12	5
16	苯并(ghi)芘	0.000 26 (25℃)	1 × 10E7	15	6

PAHs 的迁移性能由强至弱为:二氢萘>芴>萘>菲>萘烯>荧蒹.

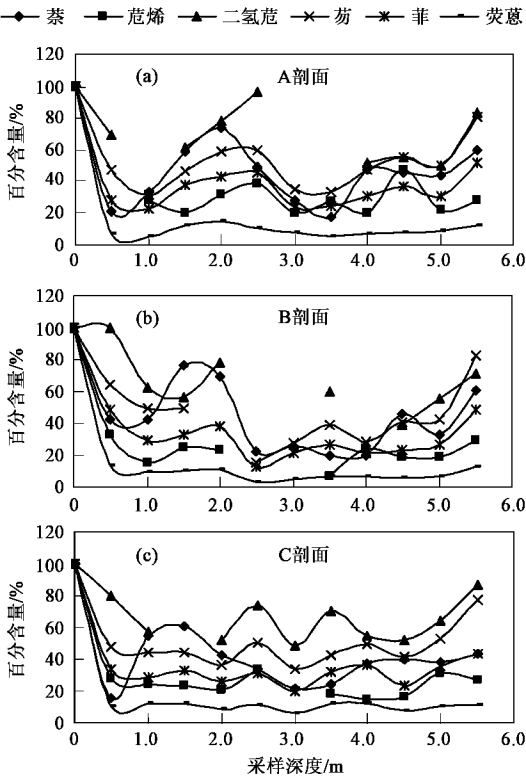


图5 不同深度 PAHs 含量占表层 PAHs 百分含量对比
Fig.5 PAHs of different layer samples in the percentage of surface samples

3 结论

(1)综合 3 个剖面来看,PAHs 中二环芳烃和三环芳烃是主要的污染物,其代表物分别是萘、菲、芴、萘烯、二氢萘、荧蒹,萘是浓度最高的首要污染物,最高检出值达到 428 $\mu\text{g}/\text{kg}$.

(2)粘粒含量、粘土矿物总量、CEC 以及总有机碳 4 个指标相互之间在垂向变化上存在显著的相关性,表层以下 PAHs 含量变化与这 4 个指标变化也显示出了相关性,粘粒含量较高的层位,PAHs 含量也较高,相反,粘粒含量较低的层位,PAHs 含量也较低.

(3)表土是 PAHs 的主要累积层位,PAHs 含量整体随采样深度加深而明显下降.低环 PAHs 在整个采样深度均有检出,具备一定的迁移性,迁移性能由强至弱为二氢萘>芴>萘>菲>萘烯>荧蒹,说明长期污灌能够导致其迁移到较深的土层中,而高环 PAHs 仅在表土累积,迁移性较弱.

参考文献:

[1] 陈静,王学军,陶澍. 天津地区土壤有机碳和粘粒对 PAHs 纵

向分布的影响[J]. 环境科学研究,2005,18(4):79-83.

[2] 肖汝,汪群慧,杜晓明,等. 典型污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布特征[J]. 环境科学研究,2006,19(6):49-53.

[3] Yin C Q, Jiang X, Yang X L, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils in the vicinity of Nanjing, China[J]. Chemosphere, 2008, 73: 389-394.

[4] Chen L G, Yong R, Xing B S, et al. Contents and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in vegetable soils of Guangzhou, China[J]. Chemosphere, 2005, 60: 879-890.

[5] Guo W, He M C, Yang Z F, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in water, suspended particulate matter and sediment from Daliao River watershed, China[J]. Chemosphere, 2007, 68: 93-104.

[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]. Wat Res, 2004, 38: 3558-3568.

[7] Blanchard M, Teil M J, Ollivon D, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorobiphenyls in wastewaters and sewage sludges from the Paris area (France) [J]. Environmental Research, 2004, 95: 184-197.

[8] Pham T T, Proulx S. PCBs and PAHs in the Montreal urban community (Quebec, Canada) wastewater treatment plant and in the effluent plume in the ST Lawrence River[J]. Wat Res, 1997, 31(8): 1887-1896.

[9] Nasir F A, Batarseh M I. Agricultural reuse of reclaimed water and uptake of organic compounds: Pilot study at Mutah University wastewater treatment plant, Jordan[J]. Chemosphere, 2008, 72: 1203-1214.

[10] Chen Y, Wang C X, Wang Z J. Residues and source identification of persistent organic pollutants in farmland soils irrigated by effluents from biological treatment plants[J]. Environment International, 2005, 31: 778-783.

[11] Gourlay-Francé C, Lorgeoux C, Tusseau-Vuillemin M H. Polycyclic aromatic hydrocarbon sampling in wastewaters using semipermeable membrane devices: Accuracy of time-weighted average concentration estimations of truly dissolved compounds[J]. Chemosphere, 2008, 73: 1194-1200.

[12] 宋玉芳,常士俊,李利,等. 污灌土壤中多环芳烃(PAHs)的积累与动态变化研究[J]. 应用生态学报,1997,8(1):93-98.

[13] 张枝焕,陶澍,沈伟然,等. 天津地区表层土中芳香烃污染物化学组成及分布特征[J]. 环境科学研究,2003,16(6):29-34.

[14] Ping L F, Luo Y M, Zhang H B, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in thirty typical soil profiles in the Yangtze River Delta region, east China[J]. Environ Pollut, 2007, 147: 358-365.

[15] 崔艳红,朱雪梅,郭丽青,等. 天津污灌区土壤中多环芳烃的提取、净化和测定[J]. 环境化学,2002,21(4):392-396.

[16] Bossio J P, Harry J, Kinney C A. Application of ultrasonic assisted extraction of chemically diverse organic compounds from soils and sediments[J]. Chemosphere, 2008, 70: 858-864.

[17] 王喜龙,徐福留,李本纲,等. 天津污灌区苯并(a)芘、荧蒹和菲生态毒性的风险表征[J]. 城市环境与城市生态, 2002, 15 (4): 10-12.

- [18] 陈静,王学军,陶澍,等. 天津地区土壤多环芳烃在剖面中的纵向分布特征[J]. 环境科学学报,2004,**24**(2): 286-290.
- [19] Trapido M. Polycyclic aromatic hydrocarbons in Estonian soil contamination and profiles[J]. Environ Pollut, 1999, **105**: 67-74.
- [20] Krauss M, Wilcke W, Zech W. Polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in forest soils: depth distribution as indicator of different fate[J]. Environ Pollut, 2000, **110**: 79-88.
- [21] Wang L L, Niu J F, Yang Z F, *et al*. Effects of carbonate and organic matter on sorption and desorption behavior of polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediments from Yangtze River[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **154**: 811-817.
- [22] Nam J J, Thomas G O, Jaward F M, *et al*. PAHs in background soils from Western Europe: Influence of atmospheric deposition and soil organic matter[J]. Chemosphere, 2008, **70**: 1596-1602.
- [23] Ian T C, Bondi G, Kwinn C J. Measuring and modeling the vertical distribution of semi-volatile organic compounds in soil. I: PCB and PAH soil[J]. Chemosphere, 1999, **39**(14): 2507-2518.
- [24] Maxin C, Kogel K I. Partitioning of PAH to DOM: implications on PAH mobility in soils[J]. Environ Soil Sci, 1995, **46**: 193-204.
- [25] Bogan B W, Sullivan W R. Physicochemical soil parameters affecting sequestration and mycobacterial biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil[J]. Chemosphere, 2003, **52**: 1717-1726.