

北京东南郊再生水灌区土壤 PAHs 污染特征

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 Eijkelpamp 土壤采样器对北京东南郊再生水灌区进行了 3 个钻孔剖面采样,同时采集了灌溉用水及地下水样品,并采用气相色谱-质谱联用仪对 16 种多环芳烃(PAHs)进行定量分析。结果表明,表层土壤中有 14 种 PAHs 检出,浓度在 $0.4\sim 53.1\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, ΣPAHs 平均含量为 $206.7\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,达到了土壤污染临界值;表层以下 PAHs 的检出种类和含量显著减少,以中、低环的萘、菲、芴、荧蒹、芘为主, ΣPAHs 仅占表层的 3.8%~12.0%,从剖面 PAHs 含量变化可以判断,低环 PAHs 较易迁移,迁移性强弱顺序为萘>菲>芴>芘>荧蒹;污灌区表土中 PAHs 组成与大气降尘接近,但与再生灌区有明显差异,这种差异主要由于灌溉用水不同所造成;再生水灌区表土以下土壤剖面检出的 PAHs 与再生水中的 PAHs 一致,说明再生水灌溉是导致土壤剖面 PAHs 污染的主要原因,同时地下水中检出的 PAHs 种类也与土壤剖面基本一致,但含量较高,可能是早期污水灌溉所造成。

关键词:再生水灌溉;多环芳烃;垂向剖面;污染特征

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)04-0666-08

Distribution Characteristics of Soil PAHs in Reclaimed Water Irrigation Area in the Southeastern Suburb of Beijing

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: Samples of soils, groundwater and reclaimed water were collected from the reclaimed water irrigation area in the southeastern area of Beijing. The soil samples were collected from three borehole profiles by Eijkelpamp soil sampler. The results of GC-MS analyses showed that 14 PAHs were detected in the topsoils and their concentration was in a range of 0.4 to $53.1\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. The average total content of PAHs in the topsoil was $206.7\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, which is very close to the contamination threshold of soil proposed by Maliszewska-Kordybach. Below the topsoil, both species and contents of detected PAHs drop very fast. Only 2 to 4-ring PAHs (i.e., naphthalene, fluorene, phenanthrene, fluoranthene and pyrene) were detected and the total content PAHs was only 3.8%~12.0% of that in the topsoil. The content distribution of PAHs in the soil profiles indicated that PAHs with less rings were easier to migrate than the PAHs with more rings. The sequence of the migration capabilities from strong to weak was naphthalene, fluorene>phenanthrene>fluoranthene, pyrene. The detected PAHs components in topsoils in waste water irrigation area were quite same to those of the dust fall, but different from those in the topsoil of the reclaimed water irrigation area. The difference was mainly caused by the difference of the irrigation waters. However, the detected PAHs compositions in subsoils were consistent to those of the reclaimed waters. This meant that the contamination of soil profiles was mainly caused by reclaimed water irrigation. The detected PAHs in groundwater were also very close to those of the soil profiles, but the contents were slightly higher than those of the reclaimed water, which was probably resulted from the waste water irrigation quite long ago.

Keywords: reclaimed water irrigation; polycyclic aromatic hydrocarbons; vertical soil profiles; contamination

我国污水灌溉开始于上世纪 60 年代,至今已有近 50 年的历史。由于水资源短缺,自上个世纪 70 年代末到 90 年代中期,污水灌溉面积迅速扩大,到

1998 年污灌区面积已达 $361.8\times 10^4\ \text{hm}^2$, 占全国灌溉总面积的 7.3%。污水灌溉在缓解水资源紧张、水肥利用方面起到了积极作用,但也带来诸多问题,如土壤污染、对农作物的影响、对地下水的影响以及对人体健康、环境卫生等方面的影响^[1]。近年来,随着中国城市污水处理率的不断提高,城市再生水回用得到了加强,各项研究及试验示范基地的建设,大大推动了再生水回用农业的研究和利用^[2]。北京地区作为严重水

收稿日期:2009-10-13

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,山东莱西人,副教授,主要从事土壤地下水污染控制与修复研究。E-mail:jthe@cugb.edu.cn

资源匮乏区,也在不断加大再生水灌溉利用的力度。2006年全市再生水农业灌溉利用量为1.99亿 m^3 。到2010年,北京中心城区中水生产能力将达到140万 $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,年再生水利用量将达到6亿 m^3 ,再生水将成为农业灌溉、工业冷却、生态用水等主要水源^[3]。

尽管相对于污水来说,再生水水质得到了很大改观,但在灌溉过程中仍然可能出现对作物生长影响、对土壤质量影响、对地下水质量影响等问题^[2,4-5],尤其是那些在环境中长期存在的持久性有机污染物(POPs),广泛受到关注。多环芳烃(PAHs)作为持久性有机污染物中的一类,是最早发现且数量最多的致癌物质^[6-9],目前已被多数研究证实存在于城市污水和污灌区土壤中^[10-16]。那么再生水灌溉是否也会造成土壤PAHs的污染和积累,它的基本特征是什么?为回答此问题,本文选择北京东南郊区次渠镇垛子村一带的再生水灌区为研究对象,通过实施精细剖面钻探采样分析,以及对灌溉用再生水采集分析,研究了PAHs在土壤-包气带垂向剖面分布规律及污染特征。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及样品的采集

研究区位于北京市东南郊区次渠镇垛子村一带,通惠灌渠干渠自北向南穿过本区,其多条引水支渠为本区提供了农业灌溉的再生水水源(图1)。通惠灌渠始建于1958年,北端起源于高碑店湖,南端截止到凉水河,早期主要引用通惠河城市污水对东南郊区进行农业灌溉。1993年高碑店污水处理厂一期工程建成后,开始接纳污水处理厂的再生水,1999年高碑店二期工程建成通水后,处理量达到了100万 $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,通惠河及通惠灌渠水质逐年得到改善。



图1 采样点位置示意图

Figure 1 Location of sampling points

采用Eijkelkamp土壤采样器于2008年3月在研究区实施了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D、E、F3组,编号按照采样深度确定,编为D00、D05、D10……。同时,对通惠灌渠、支渠再生水以及地下水进行了水样采集,采样点位置见图1。

1.2 样品分析方法

土样多环芳烃前处理方法^[17-18]:采集的土壤样品,在阴暗处风干,磨碎过20目筛,存放于棕色玻璃瓶中,在14 d内完成提取步骤。依据EPA方法3550,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 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 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。

水样前处理方法:依据EPA方法3510,用APFF玻璃纤维滤膜过滤水样,量取1 L水样放入分液漏斗中,再加入20 mL环己烷,液液萃取10 min,静置10 min,转移有机相。重复萃取两次,合并有机相。有机萃取相过无水硫酸钠脱水。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 $\times$ 0.25 mm $\times$ 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 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$;色谱柱程序升温条件为:始温80℃保持1 min,30℃ $\cdot\text{min}^{-1}$ 升至215℃保持1 min,5℃ $\cdot\text{min}^{-1}$ 升至255℃保持1 min,1℃ $\cdot\text{min}^{-1}$ 升至263℃保持1 min,25℃ $\cdot\text{min}^{-1}$ 升至300℃保持3 min。质谱条件为接口温度280℃,离子源温度230℃,四极杆温度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(土样 3 批,水样 1 批)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 表层土壤 PAHs 污染特征

在表层土壤中 PAHs 除二氢萘和苯并[a]蒽外,其余 14 种多环芳烃均有检出,其中荧蒹的含量最高,其次为苯并(g,h,i)芘、苯并(b)荧蒹、屈和苯并(a)芘,其余的 7 种 PAHs 含量均小于 $20 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, (图 2)。D、E、F 3 个剖面表层 PAHs 总量的平均值为 $206.7 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。根据 Barbara Maliszewska-Kordybach 建议的 PAHs 污染与非污染土壤的临界值为 $200 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ [19],再生水灌区的含量与临界值相当,其土壤质量安全已存在一定程度威胁。但是,与研究区南面凉水河污灌区相比,PAHs 不仅总量上差异明显,组成上也有明显

差异。凉水河污灌区表土 PAHs 总量平均值为 $726.0 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 3)。可以看出,再生水灌区表土中、高环的 PAHs 含量明显高于低环 PAHs,污灌区表土中、低环 PAHs 含量明显高于中、高环 PAHs。为对比污灌区和再生水灌区表土 PAHs 特征,本文按照不同环数 PAHs 含量占总 PAHs 含量的百分比采用三角图法进行表示(图 4)。

据张树才等报道,北京东南郊区大气降尘中 2~3 环 PAHs 含量占 60%~90%,4 环 PAHs 含量占 10%~40%,5~6 环 PAHs 含量均在 5%以下[20]。图 4 显示,污灌区和再生水灌区表土 PAHs 组成和降尘中 PAHs 的组成存在一定差异,污灌区表土中的 PAHs 以 2~3 环的低环 PAHs 为主,与降尘中 PAHs 的组成相对比较接近,但在再生水灌区表土中,2~3 环、4 环、5~6 环 PAHs 的相对含量相差不大,与降尘中 PAHs 组成差异较大。由于污灌区和再生水灌区距离较近,两个采

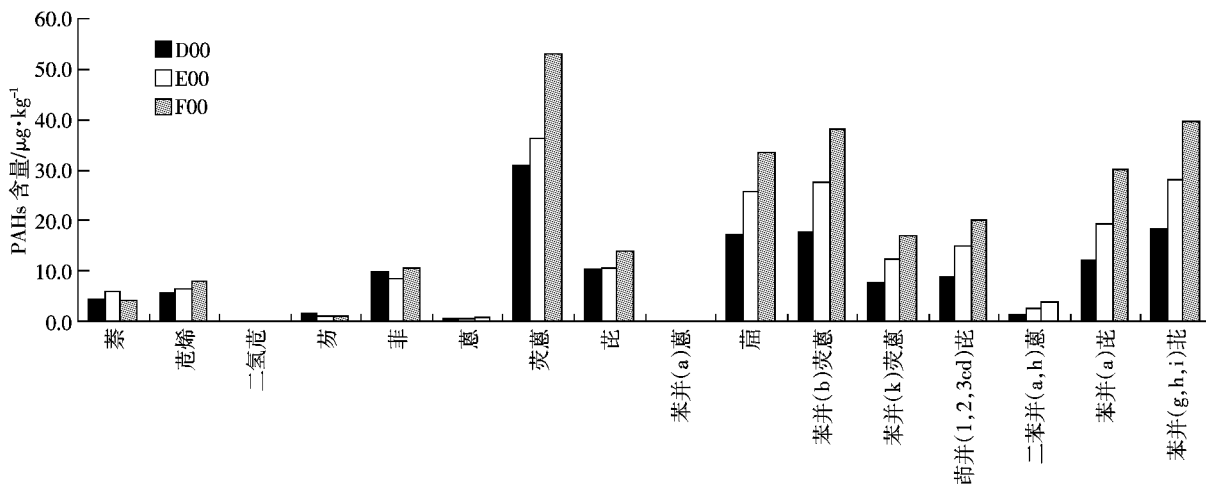


图 2 再生水灌区表土 PAHs 检出情况

Figure 2 Detected PAHs of top soils in reclaimed water irrigation area

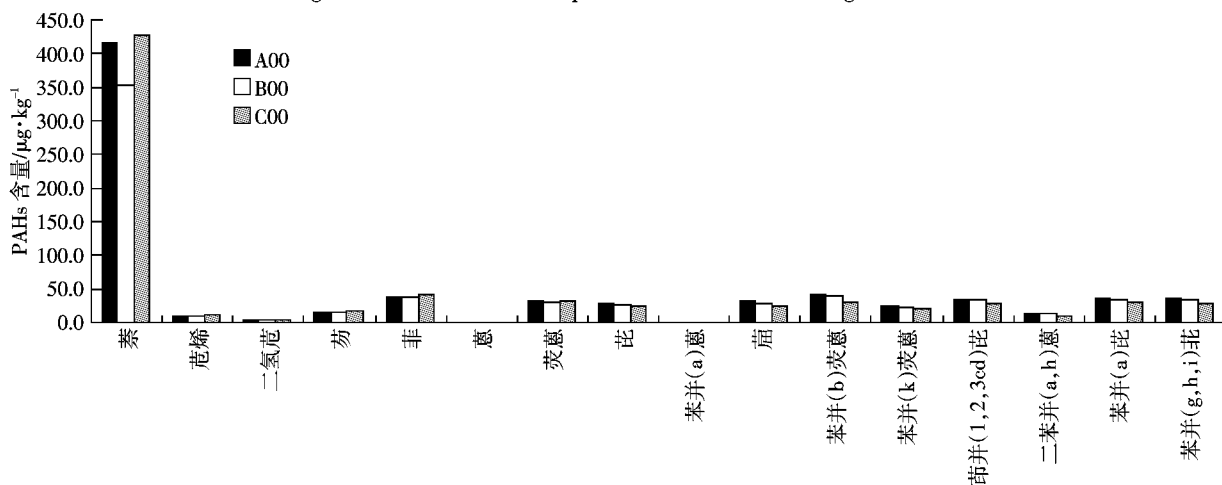
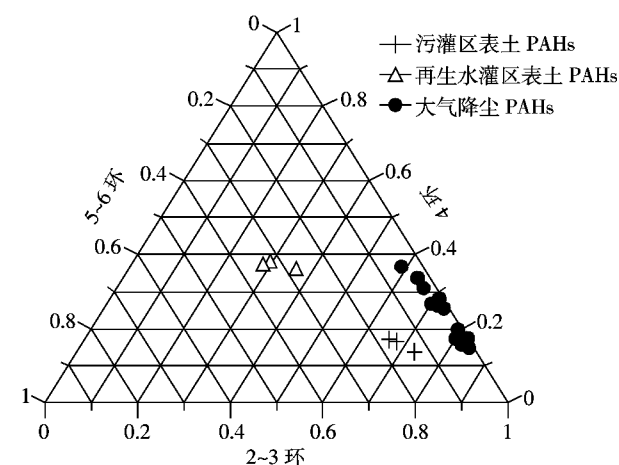


图 3 污灌区表土 PAHs 检出情况

Figure 3 Detected PAHs of top soils in wastewater irrigation area



图中污灌区表土 PAHs 为次渠镇样田村凉水河污灌区样品分析结果;再生水灌区为次渠镇垛子村通惠灌渠再生水灌区样品分析结果;大气降尘 PAHs 为北京市东南郊大气降尘样品分析结果^[20]。

图 4 不同灌区表土及大气颗粒 PAHs 组成分布三角图
Figure 4 Detected PAHs of top soils and dust-falls distribution triangle

样点直线距离仅有 3.9 km,均为农田,所以可以近似认为大气降尘对表土 PAHs 的贡献差异不大。由此可以推断,灌溉用水的差异是造成污灌区和再生水灌区表土中 PAHs 组成差异的主要原因。

2.2 垂直剖面 PAHs 的污染特征

图 5 是 D、E、F 3 个剖面垂向 Σ PAHs 及单组分 PAHs 的变化。可以看出, Σ PAHs 在地表的检出含量最高,最高含量为 F 剖面的表土层位,可达 273.88 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。随着深度的增加 Σ PAHs 急剧下降,表层以下检出 Σ PAHs 仅为表层的 3.8%~12.0%。表层以下 3 个剖面检出的 PAHs 的个数和种类相同,分别是萘、菲、芴、荧蒹、芘,与表层土壤相比检出的 PAHs 减少了 9 种。从图 5 中单组分 PAHs 垂向变化规律看,萘和芴表层以下检出含量较高,与表层土壤含量相差不

大。菲表层以下检出含量降低明显,占表层含量 17.8%~41.5%,平均 28.0%。荧蒹和芘表层以下含量降低更为明显,仅占表层含量的 1.1%~7.2%和 2.1%~18.6%,平均分别为 2.6%和 7.2%。这一现象说明,荧蒹和芘垂向上难以迁移,相对而言,菲较容易,而萘和芴是最容易的。这与污灌区得出的结论基本一致^[21]。

图 6 是 D、E、F 3 个剖面各环 PAHs 的分布情况。由图 6 可以看出,3 个剖面各环 PAHs 随深度变化规律一致。在 3 个剖面的地表层位上,4 环以上的 PAHs 占总 PAHs 的比例达到了 60%以上,是主要污染物。在 0.5 m 以下的层位上,2 环的 PAHs 所占比例急剧增加,3 环的 PAHs 所占比例基本保持不变。4 环的 PAHs 所占比例相对于地表层位所占比例有较大幅度下降。5 环和 6 环的 PAHs 在 3 个剖面中所占的比例减小到 0。可见 2、3 环 PAHs 易于迁移,是剖面地表层位以下的主要污染物。

2.3 再生水及地下水中的 PAHs 特征

表 1 是高碑店污水处理厂二级出水及再生水灌区采样孔周边再生水灌渠中的水样分析结果。表 1 中数据显示,再生水中仅检出了萘、芴、菲、荧蒹、芘 5 种物质,与土壤剖面表层以下所检出的 PAHs 完全一致,而与表层土壤中检出的 PAHs 种类差异很大。图 7 采用三角图法分析了再生水灌区剖面以及再生水中的 2、3、4 环 PAHs 组成比例关系。从图 7 可以看出,剖面表层以下土壤和再生水中 PAHs 组成有很好的-一致性,但与表层土壤却不一致。分析认为,该再生水灌区历史上曾是污灌区,再生水灌溉历史仅有 10 年左右,早期污灌很有可能是导致表层土壤中、高环 PAHs 主要来源,由于中、高环 PAHs 难以迁移且不易降解,导致其在表层土壤积累(图 1)。改用再生水灌溉后,水中中、高环 PAHs 大量减少,而低环 PAHs 相

表 1 再生水中 PAHs 的检出情况($\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)
Table 1 Detected PAHs in reclaimed water($\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)

采样地点	样品编号	萘	芴烯	二氢芴	芴	菲	蒽	荧蒽	芘
高碑店污水处理厂二级出水	08-5	41.2	<2.5	<3.0	3.87	9.31	7.45	<2.0	<2.0
	08-6	5 092	401	<63	967	3 512	579	143	220
	08-7	3 635	292	386	686	2 653	423	147	181
	08-9	7 008	30	85	58	62	6.57	4.3	2.9
	08-10	1 557	18	8.4	316	1 116	1 119	91.4	39.8
再生水灌渠	ZSB-1	29.96	<2.5	<3.0	<2.0	8.33	<2.0	<2.0	<2.0
	ZSB-2	35.74	<2.5	<3.0	8.13	18.96	<2.0	6.99	<2.0
	ZSB-3	38.31	<2.5	<3.0	5.39	18.60	<2.0	11.71	7.72
	ZSB-4	21.29	<2.5	<3.0	14.92	22.83	<2.0	12.87	9.10

注:表中高碑店污水处理厂数据为不同月份采样数据,再生水灌渠为沿渠道不同地点采样结果(采样地点见图 1)。

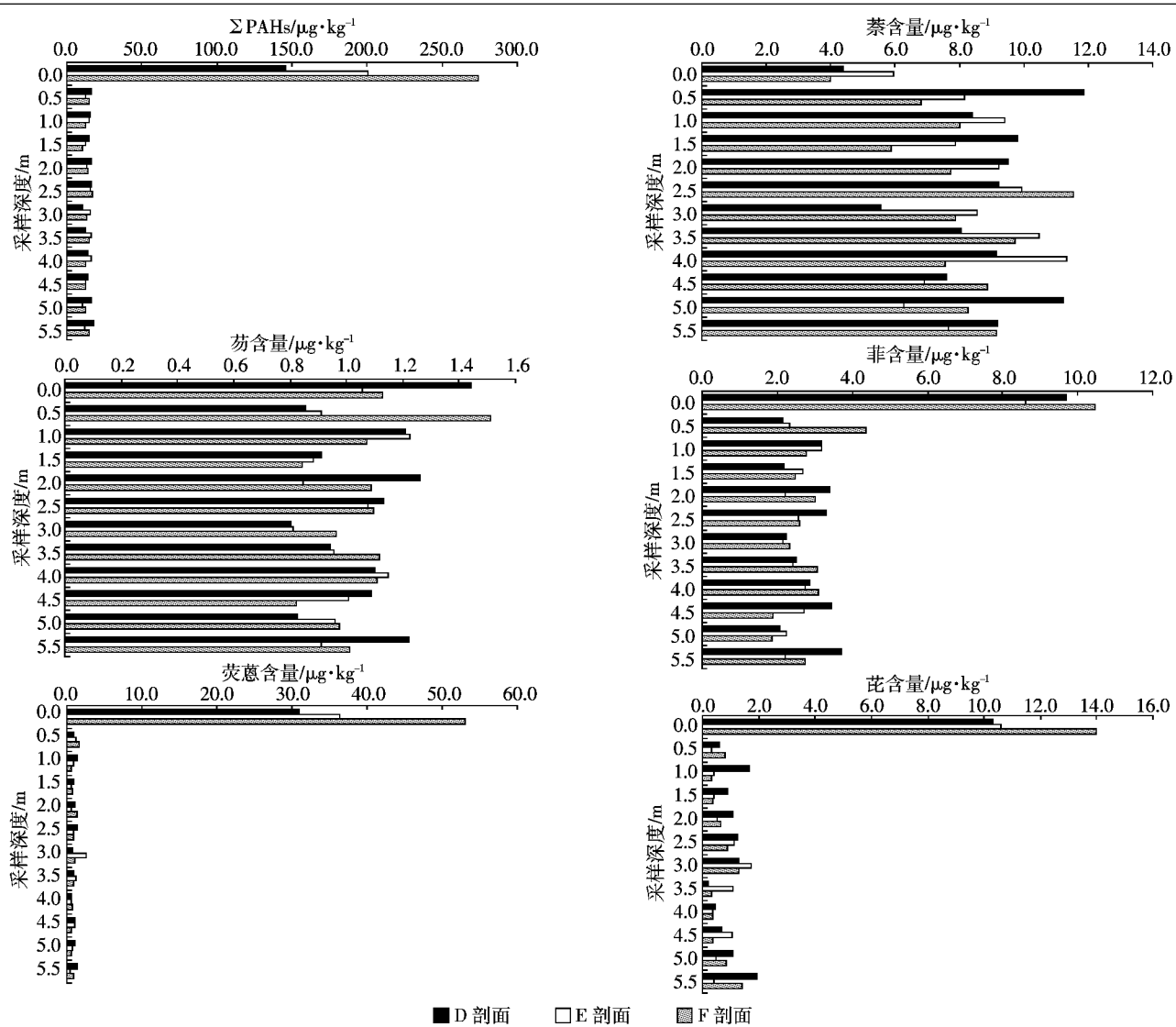


图 5 Σ PAHs、萘、芴、菲、荧蒽、芘在 D、E、F 剖面中的垂向分布

Figure 5 Vertical distributions of Σ PAHs, Nap, Fl, Phe, Flu and Pyr in soil profiles

对容易迁移,因此导致表层以下土壤中检出的主要是中、低环 PAHs, 且和再生水水中检出的 PAHs 相一致,说明再生水灌溉是导致剖面中 PAHs 分布规律形成的主要原因。

从图 7 还可以看出,沿灌渠再生水流动方向,再生水水中 PAHs 组成也有比较明显的变化,结合表 2 数据可以看出,再生水沿渠道流动过程中,2 环的萘含量变化不大,芴的含量有所降低,3 环的菲、荧蒽及

4 环的芘含量均减少。与高碑店污水处理厂二级出水检测情况相比,不仅 PAHs 的种类明显减少,含量也大幅度降低。说明再生水沿渠道流动长距离输水过程中,水质可以得到明显改善,部分 PAHs 可以得到有效去除。

基于不同 PAHs 比值的差异作为识别 PAHs 来源的方法,被广泛应用于土壤沉积物中 PAHs 的源识别^[22-25]。本文也尝试采用比值法探讨研究区 PAHs 的

表 2 再生水灌区表土样品 PAHs 的比值

Table 2 Isomeric ratios of PAHs in top soils of reclaimed water irrigation area

样品	$\rho(\text{蒽})/\rho(\text{蒽}+\text{菲})$	$\rho(\text{荧蒽})/\rho(\text{荧蒽}+\text{芘})$	$\rho(\text{芘并}(1,2,3\text{-cd})\text{芘})/\rho(\text{芘并}(1,2,3\text{-cd})\text{芘}+\text{苯并}(g,h,i)\text{芘})$
再生水灌区 D00	0.04	0.75	0.32
再生水灌区 E00	0.07	0.77	0.35
再生水灌区 F00	0.08	0.79	0.34

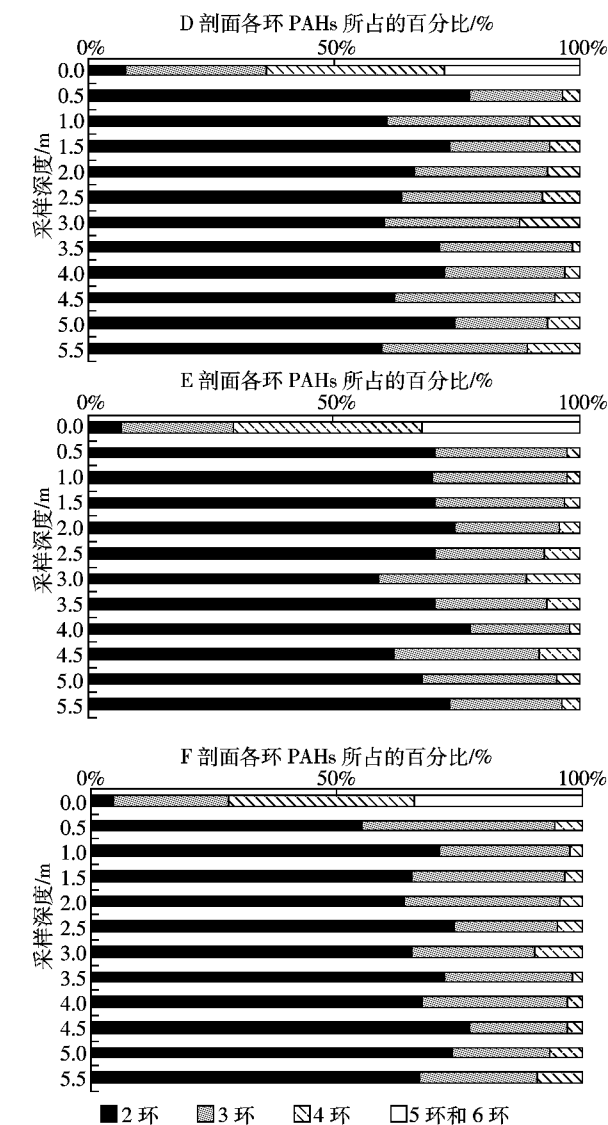


图 6 各环 PAHs 在 D、E、F 剖面中的分布情况

Figure 6 Percentage of different ring PAHs distributions in soil profiles

来源。由于苯并(a)蒽在研究区没有检出,对 $\rho(\text{苯并(a)蒽})/\rho(\text{苯并(a)蒽}+\text{蒽})$ 无法采用。其余 3 种比值计算结果见表 2。据文献报道, $\rho(\text{蒽})/\rho(\text{蒽}+\text{菲}) < 0.1$ 表明为石油来源, $\rho(\text{荧蒽})/\rho(\text{荧蒽}+\text{芘}) > 0.5$ 表明为生物

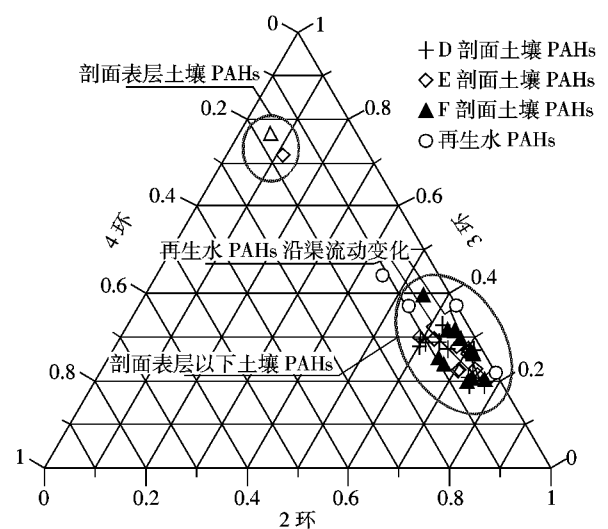


图 7 再生水及剖面中 2、3、4 环 PAHs 组成分布三角图

Figure 7 2, 3, 4 ring PAHs in reclaimed water and soil profiles distribution triangle

和煤炭燃烧来源, $\rho[\text{茚并(1,2,3-cd)芘}]/\rho[\text{茚并(1,2,3-cd)芘}+\text{苯并(g,h,i)芘}]$ 在 0.2 和 0.5 之间表明源于液体化石燃料燃烧^[22]。据此可以粗略判断研究区 PAHs 的来源包括石油产品燃料油燃烧来源。由前述分析可知大气降尘和再生水灌溉是研究区表层土壤 PAHs 污染的主要来源。由于再生水沿渠道流动过程中,PAHs 会得到明显去除,其含量、组成均会发生明显变化,所以这种依据 PAHs 组分间的比值判断其来源,在本研究区没有太大的实际意义。

为了研究土壤剖面中的 PAHs 的垂向迁移是否污染了地下水,对再生水灌区的地下水进行了 3 次采集,并分析了 16 种 PAHs,结果见表 3。

由表 3 可以看出,地下水中仅检出了蒽、芴、菲、荧蒽、芘、蒾。其中二氢蒾和蒾仅在第二次取样过程中检出 1 次,偶然性较大。此外,芘在第一次取样和第二次取样两个不同井中分别检出 1 次,可靠性也较低。其余 4 种 PAHs 3 次基本均检出,比较可靠。从检出 PAHs 的种类来看,与土壤剖面检出的 PAHs 基本种

表 3 再生水灌区地下水中 PAHs 的检出情况($\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)

Table 3 Detected PAHs in groundwater($\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)

采样编号	采样日期	蒽	二氢蒾	芴	菲	荧蒽	芘	蒾
ZSJ-1	2008-04-06	11.27	<3.0	3.08	3.27	<2.0	<2.0	<2.0
ZSJ-2	2008-04-06	9.73	<3.0	5.62	7.53	2.10	2.11	<2.0
ZSJ-1	2008-08-29	47.78	<3.0	23.43	57.07	28.66	16.62	5.85
ZSJ-2	2008-08-29	487.38	83.37	347.04	33.99	7.99	<2.0	<2.0
ZSJ-1	2008-11-17	15.39	<3.0	<2.0	18.95	18.12	<2.0	<2.0
ZSJ-2	2008-11-17	122.72	<3.0	563.61	298.49	21.65	<2.0	<2.0

类一致。说明再生水长期灌溉条件下,虽然土壤包气带介质可以截留吸附大部分 PAHs 污染组分,但仍有部分 PAHs 会随垂向入渗水分向下迁移,造成地下水污染。从检出浓度来看,地下水中的 PAHs 浓度多数情况下比灌区中再生水的含量还要高。分析其原因认为,该地区早期以污水灌溉为主,表层土壤中积累了含量较高的各环 PAHs,改用再生水灌溉后,由于灌溉水中以中、低环 PAHs 为主,且原来蓄积在表层土壤中的中、低环 PAHs 相对容易迁移,不断淋失进入下层土壤和地下水中,造成土壤剖面和地下水的污染,出现地下水中 PAHs 含量比再生水还高的现象。高环 PAHs 由于较难迁移,会继续留在土壤表层,最终形成表层土壤高环 PAHs 含量较高的特点。

由于再生水灌区土壤剖面主要为粉质粘土,上下变化差异不大,且土壤表层以下 PAHs 含量变化差异也不大(图 5),本文未对土壤理化参数对 PAHs 的垂向分布规律影响进行探讨。

3 结论

(1)北京东南郊再生水灌区表土是 PAHs 的主要累积层位,ΣPAHs 平均值为 $206.7 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,与污染土壤临界值相当,但与附近污灌区相比,污染程度不及其 1/3,且 PAHs 组成上存在明显差异,中、高环的 PAHs 含量明显高于低环 PAHs。

(2)北京东南郊污灌区表土 PAHs 组成与大气降尘中 PAHs 组成差异不大,以 2~3 环的低环 PAHs 为主,但再生水灌区表土中各环 PAHs 之间相对含量相差不大,与前两者差异较大,分析认为,灌溉用水的差异是造成表土中 PAHs 组成差异的主要原因。

(3)研究区表土以下仅检出萘、菲、芴、荧蒽、芘 5 种 PAHs,ΣPAHs 占表层的 3.8%~12.0%,由于剖面介质差异不大,表层以下各层位 PAHs 含量变化不大。5 种 PAHs 中,萘和芴较容易向下迁移,菲中等,荧蒽和芘较难。

(4)研究区灌渠再生水中检出的 PAHs 种类及组成与剖面表层以下检出的 PAHs 一致,说明再生水灌溉是导致土壤剖面中 PAHs 污染的主要原因。地下水中检出 PAHs 种类与剖面中的也基本一致,但含量较高,可能是早期污水灌溉所造成。

参考文献:

[1] 王桂宾. 污水灌溉问题分析[J]. 黑龙江水专学报, 2007, 34(1): 92-94.

WANG Gui-bin. Analysis on problems of sewage irrigation[J]. *Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College*, 2007, 34(1): 92-94.

[2] 师荣光, 刘凤枝, 赵玉杰, 等. 中国城市再生水安全回用农业的对策研究[J]. 中国农业科学, 2008, 41(8): 2355-2361.

SHI Rong-guang, LIU Feng-zhi, ZHAO Yu-jie, et al. Research on safe utilization of reclaimed municipal wastewater in agriculture in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(8): 2355-2361.

[3] 刘培斌. 北京市再生水开发利用问题与对策[J]. 中国水利, 2007, 6: 37-39.

LIU Pei-bin. Development of recycled water and measures in the city of Beijing[J]. *China Water Resources*, 2007, 6: 37-39.

[4] 吴文勇, 刘洪禄, 郝仲勇, 等. 再生水灌溉技术研究现状与展望[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 302-306.

WU Wen-yong, LIU Hong-lu, HAO Zhong-yong, et al. Review and perspectives of research status on reclaimed wastewater irrigation technologies[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(5): 302-306.

[5] 张克强, 张洪生, 宁安荣, 等. 国内外城市再生水灌溉绿地的研究与应用[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊): 384-388.

ZHANG Ke-qiang, ZHANG Hong-shen, NING An-rong, et al. Application and development of green land irrigation by municipal reclaimed water at home and abroad[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(sup): 384-388.

[6] 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.

CHEN Jing, WANG Xue-jun, TAO Shu. The influences of soil total organic carbon and clay content on PAHs vertical distributions in soils in Tianjin area[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, 18(4): 79-83.

[7] 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.

XIAO Ru, WANG Qun-hui, DU Xiao-ming, et al. Vertical distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbon in typical wastewater irrigated soils[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, 19(6): 49-53.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.
- [14] Nasir F A, Batarseh M I. Agricultural reuse of reclaimed water and up-take of organic compounds; Pilot study at Mutah University wastewater treatment plant, Jordan[J]. *Chemosphere*, 2008, 72:1203-1214.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
CUI Yan-hong, ZHU Xue-mei, GUO Li-qing, et al. Mesurement of PAHs in soil samples from wastewater irrigated soil from Tianjin[J]. *Environmental Chemistry*, 2002, 21(4):392-396.
- [18] 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.
- [19] Maliszewska-Kordybach B. Polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Poland; Preliminary proposals for criteria to evaluate the level of soil contamination[J]. *Applied Geochemistry*, 1996, 11:121-127.
- [20] 张树才, 王开颜, 沈亚婷, 等. 北京东南郊大气降尘中的多环芳烃[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4):1568-1574.
ZHANG Shu-cai, WANG Kai-yan, SHEN Ya-ting, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in dustfall in the southeastern suburb of Beijing, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4):1568-1574.
- [21] 何江涛, 金爱芳, 陈素暖, 等. 北京东南郊污灌区 PAHs 垂向分布规律[J]. 环境科学, 2009, 30(5):1260-1266.
HE Jiang-tao, JIN Ai-fang, CHEN Su-nuan, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil profiles in southeast suburb of Beijing wastewater irrigation area[J]. *Environment Science*, 2009, 30(5): 1260-1266.
- [22] Jiang Y F, Wang X T, Wang F, et al. Levels, composition profiles and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soil of Shanghai, China[J]. *Chemosphere*, 2009, 75:1112-1118.
- [23] 王淑兰, 柴发合, 张远航, 等. 大气颗粒物中多环芳烃的污染特征及来源识别[J]. 环境科学研究, 2005, 18(2):19-22.
WANG Shu-lan, CHAI Fa-he, ZHANG Yuan-hang, et al. Pollution characterization and source identification and apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) in airborne particulates[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, 18(2):19-22.
- [24] Pies C, Hoffmann B, Petrowsky J, et al. Characterization and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) in river bank soils[J]. *Chemosphere*, 2008, 72:1594-1601.
- [25] Zhang H B, Luo Y M, Wong M H, et al. Distributions and concentrations of PAHs in Hong Kong soils[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 141: 107-114.