邱浩然,高良敏,姚素平,等. 淮南潘一采煤塌陷区土壤–底泥中多氯联苯(PCBs)分布特征[J]. 煤炭学报,2015,40(9):2173–2180. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2015.0556

Qiu Haoran,Gao Liangmin,Yao Suping,et al. Distribution of PCBs in soil and sediment of subsidence water in Panji No. 1 coal mine of Huainan[J]. Journal of China Coal Society,2015,40(9):2173–2180. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2015.0556

淮南潘一采煤塌陷区土壤–底泥中多氯联苯(PCBs)分布特征

邱浩然[1],高良敏[1],姚素平[2],陈晓晴[1],王瑶瑶[1],欧阳卓智[1],陈一佳[1]

(1. 安徽理工大学 地球与环境学院,安徽 淮南 232001;2. 南京大学 地球科学与工程学院,江苏 南京 210093)

摘 要: 采煤塌陷水域因煤炭开采后,地表沉陷积水而成,其原来的陆生环境逐渐演变为水生环境,沉陷前的土壤变为沉陷后水体的底泥,土壤中的污染物也随之发生迁移转换。为了研究 PCBs 在淮南潘一塌陷区土壤和底泥沉积物中的含量和分布特征,在塌陷区不同采样点采集 22 个柱状样品,将处理好的样品在 GC/MS 上分析,结果表明:该塌陷区土壤和底泥沉积物中 14 种 PCB 残留总量范围为 1 581~5 510 ng/kg 和 3 278~5 973 ng/kg,平均值为 2 447 ng/kg 和 4 339 ng/kg(干重)。0~20 cm 范围内,PCB138 未检出,其他 13 种 PCB 含量在不同深度处于同一污染水平。当探讨 PCBs 含量随土壤和底泥深度变化规律时,对每种多氯联苯进行分析,能更好的总结出 PCBs 污染物在纵向的分布规律。

关键词: 采煤塌陷区;底泥沉积物;PCBs;垂向分布

中图分类号: TD88 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253–9993(2015)09–2173–08

Distribution of PCBs in soil and sediment of subsidence water in Panji No. 1 coal mine of Huainan

QIU Hao-ran[1],GAO Liang-min[1],YAO Su-ping[2],CHEN Xiao-qing[1],WANG Yao-yao[1],OUYANG Zhuo-zhi[1],CHEN Yi-jia[1]

(1. *School of Earth and Environment*,*Anhui University of Science and Technology*,*Huainan* 232001,*China*;2. *School of Earth Sciences and Engineering*,*Nanjing University*,*Nanjing* 210093,*China*)

Abstract: The coal mining subsidence water occurs because of surface subsidence after coal mining. The terrestrial environment gradually evolved into an aquatic environment,at the same time,and the soil evolved into substrate sludge. Therefore,the contaminants in the soil migrated and changed along with the evolution. In order to study the distribution of PCBs in the soil and sediment of Huainan Panji No. 1 coal mine subsidence water,22 soil and sediment cores were collected in various locations,and the prepared samples were analyzed on GC/MS. Analysis results show that:the residual concentration of total 14 PCBs in soil and sediment are 1 581–5 510 ng/kg and 3 278–5 973 ng/kg,with average value 2 447 ng/kg and 4 339 ng/kg(dry weight) respectively. PCB138 is not detected,and the content of other 13 kinds PCB in different depths are at the same level. When studying the PCBs variation in soil and sediment,the analysis of each kind of PCB can better summarize the distribution law of PCBs in longitudinal direction.

收稿日期: 2015-04-20 **责任编辑:** 韩晋平

基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目(1508085MD68);国家“十二五”科技支撑计划资助项目(2012BAC10B02);国家大学生创新基金资助项目(201310361003)

作者简介: 邱浩然(1989—),男,安徽阜阳人,硕士研究生。E-mail:doomqhr@163.com。**通讯作者:** 高良敏(1963—),男,安徽寿县人,教授,博士。E-mail:gaolmin@163.com

Key words: subsidence area; sediment deposition; PCBs; vertical distribution

多氯联苯(PCBs)难溶于水，具有亲脂性，它们其中一些被称为二噁英类化合物，二噁英类物质中最毒者的毒性相当于氰化钾的 1 000 倍以上，即使低浓度时也会对生物体造成伤害，具有潜在的致癌性。在 1940s 到 1970s，人类生产了大量的 PCBs[1]，期间中国生产了 10 000 t PCBs 产品，占全球总生产量的 1%[2]。中国主要生产 1 号 PCBs 和 2 号 PCBs，1 号 PCBs 以三氯联苯为主，主要用于生产变压器和电容器；2 号 PCBs 以五氯联苯为主，主要作为油漆添加剂[3]。PCBs 被广泛应用于工业和商业领域，变压器油、电容器、液压油、油漆和印刷油墨均含有 PCBs，人类的生产活动也会带来 PCBs 污染[4-5]。PCBs 迁移过程十分复杂，可以通过大气沉降[6-7]、鸟类迁徙[8-10]、和洋流[11]等方式带到很远的地区。PCBs 经过长距离的迁移之后有 93.1% 进入土壤，3.5% 进入海洋，4.1% 转移进入沉积物[12-13]，最近的一些研究结果[14-18]表明，底泥沉积物是 PCBs 等污染物的源和汇。

国内外专家学者对河流、湖泊、海湾和近海沉积物中 PCBs 有大量的研究[19-25]，但对采煤塌陷区土壤和采煤塌陷水体底泥中多氯联苯等 POPs 的研究极少。潘一塌陷水体为该区最大的塌陷水体，它是由陆生生态环境演变而来，由于形成年限较短，水体的沉积物不是过去历史时期的沉积，而是由周围农田土壤的演变而形成的，仍保留着农田土壤的污染特征。该塌陷水体的特殊性在于，它是因村庄和农田受煤炭开采活动的影响，地表塌陷形成的，既受到煤炭开采活动和居民活动的影响，再者塌陷水体与泥河相连，又受到来自矿业废水的污染。因此研究该塌陷水体 PCBs 的含量特征和分布规律，对研究其他采煤塌陷区的 PCBs 等 POPs 污染具有代表性和重要意义。

1 材料与方法

1.1 样品采集

样品采集所用的棕色玻璃瓶以及实验过程中用到的烧杯、移液管等玻璃器皿均通过碱液(6 g 氢氧化钠溶于 6 mL 水中再加 50 mL 乙醇)润洗，并用自来水冲洗干净，再用蒸馏水润洗 3 遍，超纯水润洗 1～2 遍，置于烘箱中烘干备用。本研究采用专用柱状底泥采样器和专用柱状土壤采样器进行样品采集，将采集的 20 cm 柱状底泥和土壤样，每 5 cm 分 1 层，然后装进棕色玻璃瓶中，并用锡箔纸封口。土壤采样点和底泥采样点共计 22 个，采样点用便携式 GPS 进行定位，采样点布设如图 1 所示，采样时间为 2014 年 8 月，采样后立即送回实验室，-20 ℃保存至分析。

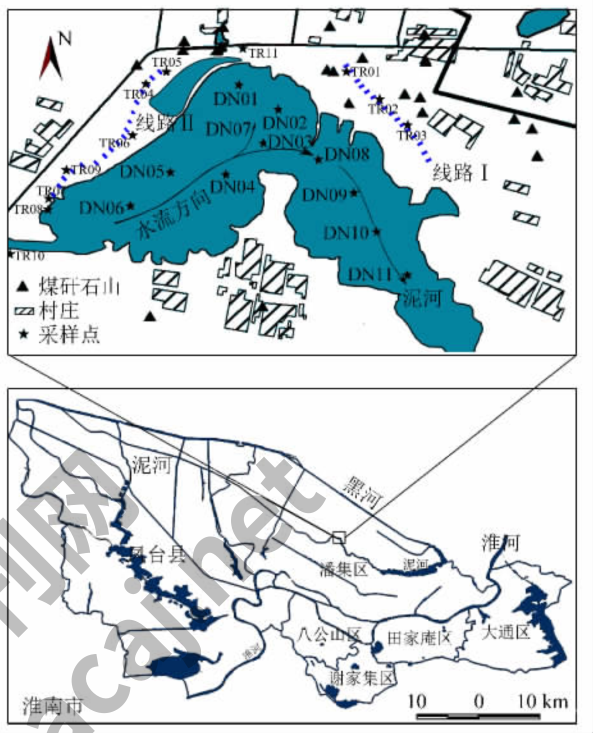

图 1 采样点示意

Fig. 1 Sampling stations

1.2 试剂与材料

有机溶剂正己烷(n-Hexane)和二氯甲烷(Dichloromethane)均为色谱纯，无水硫酸钠(分析纯)，使用之前，在超声振荡器中，用正己烷浸泡超声 30 min，室温下冷却备用，硅胶(试剂纯，100～200 目)在超声振荡器中，用正己烷浸泡超声 30 min，移植蒸发皿，于马弗炉中灼烧(130 ℃)16 h，冷却至室温储存备用，中性氧化铝在超声振荡器中，用正己烷浸泡，超声震荡 30 min，移入蒸发皿，在马弗炉中 450 ℃灼烧 12 h，自然冷却后移入广口密封瓶中，放入干燥器中保存待用。14 种多氯联苯目标化合物混合标准液，回收率指示物标准试剂为 PCB65，内标为 PCB204，混合标准液、回收率指示物和内标均购自美国标准物质研究中心。

1.3 样品提取

土样经过冷冻干燥研磨并过 200 目筛子，准确称取 10 g 土样，然后置于索氏提取器，加入 PCB65 做回收率指示物，用 200 mL 体积比为 1∶1 的二氯甲烷/正己烷混合溶剂于 60 ℃水浴中提取 24 h。提取液经无水硫酸钠过滤后，旋转蒸发至 2～3 mL，过硅胶氧化铝层析柱净化，层析柱(内径 1.5 cm，长 30 cm)由

下往上依次装入无水硫酸钠、中性氧化铝和硅胶，它们的体积比为 1∶ 1∶ 2。最后用 50 mL 体积比为 7∶ 3 的正己烷/二氯甲烷混合液淋洗出 PCBs，再次旋蒸至 1 ~2 mL，最后经高纯氮吹脱至 0. 5 mL，转移到进样瓶中，加内标 PCB204 并定容至 1 mL。

1. 4　样品的分析

PCBs 的分析在 PE 公司生产的 GC/MS 上进行，色谱柱为 PE clarus Elite –5 MS; 色谱柱升温程序为柱温 80 ℃保持 1 min，然后以 30 ℃/min 的速度升温至 160 ℃保持 1 min，再以 3 ℃/min 的速度升温至 265 ℃保持 1 min。样品定性分析采用标样的各色谱峰保留时间对实际样品中的 PCBs 进行定性，并通过 GC/MS 验证，采用内标曲线法定量。

1. 5　质量控制与质量保证

实验过程中采用美国环保署(US EPA) 推荐的质量控制方法，所有数据经过严格的质量控制，每次进样前都进行空白对比，空白样品中未能检出目标物。16 种混合标样的基质加标回收率在 74. 4% ~ 110. 28% ，回收率指示物 PCB65 在底泥样品中的回收率在 70. 14% ~136. 98% ，土壤样品中的回收率在 60. 48% ~141. 12% ，平行样相对标准偏差小于 5% ，符合分析要求。

2　结果和讨论

淮南潘一矿于 1983 年建成投产[26]，其境内潘一杨庄塌陷水域(研究区域) 地理坐标为 E116. 817° ~ E116. 819°，N32. 801° ~ N32. 816°。塌陷水域面积约为 4 km^2，平均水深 3. 6 m，20 a 左右沉陷覆水时间，整个水域为失地农户渔网分割养鱼，但无饵料添加，为自然散养型[27]。

采样点 TR01，TR02，TR03，TR04 及 TR05 为农田土壤样; TR06 采样点位于当地堆积已久的覆土煤矸石山腰上，并进行了柱状采样，只采集了 0 ~15 cm 的样品，表层为土壤样，余下为碎屑状煤样，另外又在附近采集了一个煤矸石样; TR07 和 TR08 为塌陷水域岸边样，被杂草覆盖，TR07 距岸边 20 cm 左右，由于采样前两天，采样区域处于阴雨天气，TR08 被雨水淹没 5 cm 左右，但并未与水体直接相连; TR09 为槐树林土壤样，TR10 为泥河入口岸边土壤样; TR11 为公路附近采样点(不慎遗失 15 ~20 cm 土样) ，由于煤炭运输和附近煤矸石的堆积，土壤中夹杂煤屑和细碎煤矸石，土壤整体呈现煤黑色。DN01，DN02，DN08，DN09，DN10 及 DN11 水深在 3. 5 m 左右，其余底泥采样点水深在 4 ~6 m，深度较大。

由于 TR06，TR11，DN03，DN06 和 DN08 采的样品土壤和沉积物层数不全，并未将这 5 个点土壤和沉积物中的 PCBs 含量纳入统计范围。为了便于比较，底泥样、土壤样以及煤和煤矸石中的 PCBs 含量分别统计。

2. 1　PCBs 的含量特征

PCB18， PCB28， PCB31， PCB44， PCB52 和 PCB118，检出率达 100% ，呈现出面污染，底泥和土壤样品中均未检测出 PCB138，高氯代联苯 PCB101，105，149，153，174，180 和 194 呈点状污染。

由图 2 可以看出，各采样点主要以三氯联苯和五氯联苯同系物为主，这与我国主要生产和使用 1 号 PCBs 与 2 号 PCBs 是相符合的。土壤和底泥中 PCBs 含量残留范围为 1 581 ~ 5 510 ng/kg 和 3 278 ~ 5 973 ng/kg，平均值为 2 447 ng/kg 和 4 339 ng/kg(干重) ，低于淮河淮南段 6 340 ng/kg[28]。7 种指示性 PCBs[29 –31] 常被用来研究 PCBs 的污染状况，土壤和底泥中 7 种指示性 PCBs 的平均含量为 800 ng/kg 和 1 516 ng/kg，污染比较严重，而且底泥的污染程度要大于土壤。为了进一步研究 PCBs 污染状况，将其与国内外其他水体沉积物及土壤中 PCBs 的含量做比较，结果见表 1，2。与表 1 其他地区相比较知，塌陷区水体底泥沉积物多氯联苯污染处于较轻污染水平，与表 2 其他地区相比较知，塌陷区土壤中 PCBs 含量水平处于世界土壤背景范围内，与其他研究相比处于较低水平。加拿大环境委员会，制定了沉积物环境质量标准(CA –SQG) [42]，规定的沉积物环境质量标准参考值 ISQG(interim sediment quality guideline) 为 34 100 ng/kg，研究区域底泥沉积物中 PCBs 含量未超过 ISQG 值，对暴露的生物体威胁尚可接受，极少产生生物负面效应。荷兰规定 7 种指示性 PCBs 的土壤修复目标值和干预值分别为 20 000 ng/kg 和 10^6 ng/kg[43]，而研究区域土壤中 7 种指示性 PCBs 平均含量

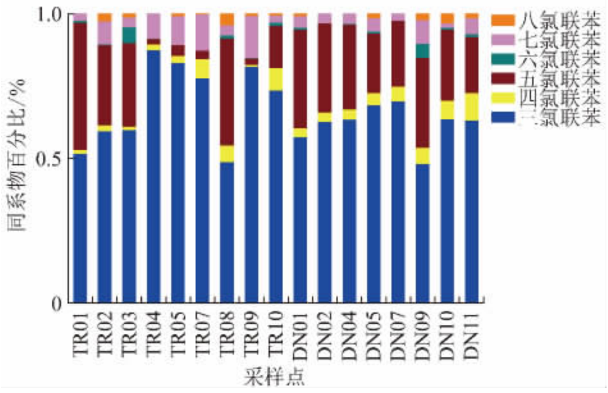

图 2　各采样点同系物组成

Fig. 2　Composition of PCBs homologs in every sampling station

为 800 ng/kg,低于土壤修复目标值,更远低于干预值,因此该采煤塌陷区土壤污染水平较低,不需要进行土壤修复。

表 1 国内外其他水体沉积物中 PCBs 的质量含量

Table 1 Comparison of PCBs concentrations in different areas

地点	多氯联苯种类	多氯联苯含量/(ng·kg^{-1})	参考文献
Busan Bay,韩国	22	5 710 ~ 199 000	[23]
Lerma River,墨西哥	7	54 000 ~ 123 000	[32]
Marseille Bay,法国	7	14 200 ~ 88 100	[33]
白洋淀	41	5 960 ~ 29 610	[34]
太湖	56	1 350 ~ 13 800	[35]
汾河	123	ud ~ 126 490	[36]
本文	14	3 278 ~ 5 973	

注: ud 表示未检出

表 2 其他国家和地区土壤中 PCBs 的质量含量水平

Table 2 Levels of soil PCBs in other countries

地点	多氯联苯种类	多氯联苯含量/(ng·kg^{-1})	参考文献
世界土壤背景值	9	26 ~ 96 900	[37]
巴基斯坦奇纳布河土壤	33	700 ~ 30 500	[38]
波兰城市固废垃圾填埋场	7	2 471 ~ 12 062	[39]
上海城区土壤	74	232 ~ 11 325	[40]
山东省农田土壤	—	1 460 ~ 19 200	[41]
本文	14	1 581 ~ 5 510	

2.2 PCBs 的垂向分布特征

潘一采煤塌陷水域,形成年限相对较短,水体底泥沉积物是农田土壤转化而来,有别于沉积年代久远的河流、湖泊、海湾和近海等地区的沉积物。图 3 表明各采样点总 PCBs 含量随深度的变化规律不明显,总体上讲,0 ~ 20 cm 范围内,自下而上,PCBs 含量有逐渐减少的趋势。当以所检出的 13 种 PCB 做统计,分析其在深度上的变化规律时,由图 4 得出,13 种 PCB 含量在不同深度上处于同一污染水平。可见当以总 PCBs 平均含量做统计时,并不能很好的得出 PCBs 含量随深度的变化规律,若是单独计算每种 PCB 平均含量,可以较好的得出 PCBs 含量随深度的变化规律,这种差异的原因可能是高氯联苯迁移性差,易于富集在污染源附近导致的,这也与实际检测结果相符。13 种 PCB 含量在不同深度上处于同一污染水平,这是因为塌陷水域在沉陷积水以前作为农用耕地,0 ~ 20 cm 的土壤被不断的翻耕,使不同种类的 PCBs 混合均匀。马召辉等[44]对太湖沉积物中 PCBs 研究结果显示,在 0 ~ 15 cm,PCB118 含量随深度增加而明显降低,但 15 cm 以下则无明显变化。而本研究中 PCB118 并不呈现出上述变化规律,可见土地的原始利用类型对采煤塌陷水体中 PCBs 的分布有重要影响。采煤塌陷水体底泥沉积物中 PCBs 的分布有其独特的规律。

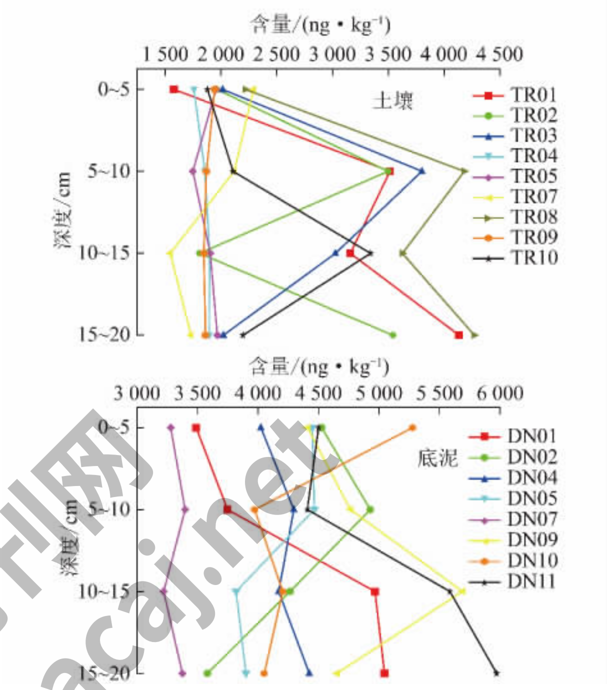

图 3 土壤和底泥中 13 种 PCB 总含量随深度的变化

Fig. 3 Total PCBs concentrations in soils and sediments along with depth

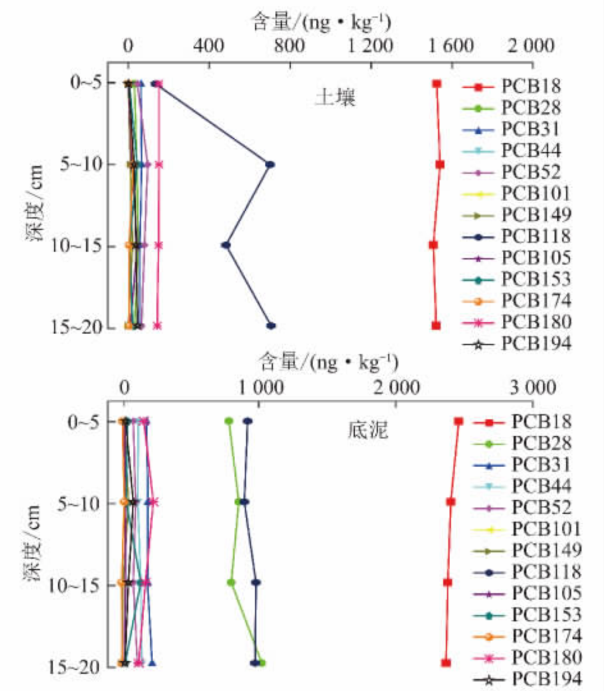

图 4 土壤和底泥中每种 PCB 含量随深度的变化

Fig. 4 Every PCB concentration in soils and sediments along with depth

2.3　PCBs 的横向分布特征

如图 1 所示，线路Ⅰ上分布着 TR01，TR02 和 TR03 采样点，线路Ⅱ上分布着 TR04，TR05，TR06，TR07 和 TR09 采样点。由图 5 可以看出，线路Ⅰ上的采样点(TR01，TR02 和 TR03) 13PCBs 平均总含量高于线路Ⅱ(TR04，TR05，TR07 和 TR09) 上的采样点。线路Ⅰ和线路Ⅱ上的采样点均为农田土壤样，所处环境基本相同，差异较大的是线路Ⅰ两侧遍布煤矸石山，因此可以推测，线路Ⅰ上的采样点 13PCBs 平均总含量高于线路Ⅱ上的采样点，其最可能的原因是由于煤矸石堆置引起的。

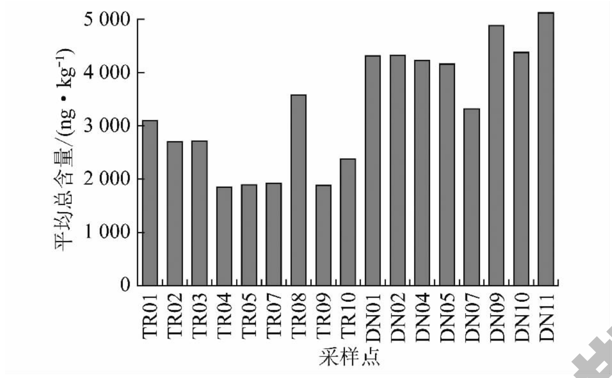

图 5　各采样点 13 种 PCB 的平均总含量

Fig. 5　Average total 13PCBs concentrations in every station

对工业经济发达地区土壤及沉积物中 PCBs 含量[25,45-49]，以及世界背景值[37]进行分析研究，经过总结，PCB138 和 PCB153 在工业经济发达地区，均有较高的残留水平和检出率，且总 PCBs 含量处于高水平，而研究区域并未检出 PCB138，作为 PCB138 同系物的 PCB149 和 PCB153 含量很低，且塌陷区土壤和底泥中总 PCBs 含量处于较低水平，在检测样本中高氯联苯 PCB101，PCB149，PCB105，PCB153，PCB174 和 PCB194 呈点状污染，再加上研究区域相对封闭[26]，因此研究区域中土壤和底泥沉积物中 PCBs 的主要来源不是工业污水及生活污水的排放，泥河河水的补给对采煤塌陷水域中 PCBs 的含量影响不大。

研究区域地表，因采煤挖空逐渐沉降，形如漏斗，成为雨水的汇集之地。多氯联苯能随着水土流失进行迁移[50]，采煤塌陷塘的底泥由农田土壤直接演化而成，同时还有部分农田土壤流失沉积而成，根据张瑞等[51]研究结果，农业土壤中多氯联苯的输入是底泥沉积物中多氯联苯的重要来源，图 5 的结果表明底泥中多氯联苯的含量普遍高于周围土壤样中的含量，与上述研究相符合，农田土壤的水土流失，会增加底泥沉积物中 PCBs 的含量。从图 5 中可以发现，土壤中多氯联苯含量的峰值出现在 TR08，土壤采样点 TR08，地势低洼，雨水在此处汇集，属于即将淹没区，从图 5 可以发现采样点 TR08 处土壤中的 PCBs 含量高于其他土壤采样点，这恰能有力的说明农田土壤的流失，最终会导致底泥中 PCBs 含量的增加。底泥中多氯联苯含量的峰值出现在 DN11 采样点，沿着河流流向(图 1) 观察，再结合图 5 可以发现，DN09，DN10 和 DN11 的 13PCBs 平均总含量高于其他底泥采样点。在实际采样过程中，DN08，DN09，DN10 和 DN11 河水深度较浅，河床位置较高，由于河床的阻碍作用，河水停留时间较长再加上河水流速减缓，水中的悬浮物和颗粒物等在此处的沉降量增加，有文献研究[52-54]指出颗粒物和悬浮物中含有大量的 PCBs，因此悬浮物和颗粒物沉降量的增加可能是导致 DN09，DN10 和 DN11 的 13PCBs 平均总含量较高的原因。

2.4　煤矸石中 PCBs 的赋存

图 6 的结果表明，煤和煤矸石中含有大量的 PCBs，是土壤平均含量的 3 倍多，矸石山表层土壤(TR06) 中 PCBs 的含量亦高于土壤平均含量，煤和煤矸石中 7 种指示性 PCBs 的含量为 5 872 ng/kg 和 7 728 ng/kg，远低于荷兰规定的 7 种指示性 PCBs 干预值，不需要采取干预措施。TR11 采样点，0 ~ 5，5 ~ 10，10 ~ 15 cm 的含量分别为 5 510，4 944，4 577 ng/kg，峰值出现在 0 ~ 5 cm 表层土壤，也是所检测土壤样中 PCBs 含量的最大值，TR11 平均 PCBs 含量将近为土壤平均含量的 2 倍，再结合 TR11 的采样点信息可以判断，TR11 采样点土壤 PCBs 含量较高，应当是煤灰和煤矸石污染引起的。非邻位的 PCBs(PCB 77，81，126，169) 是在燃煤、有色金属冶炼及再生、工业与市政废弃物燃烧等高温过程中产生的特征产物[55-56]，研究区域遍布煤矸石山，且农村有焚烧生活垃圾的习惯，再加上有用煤作为燃料的历史，应加强对 PCB77，81，126，169 的检测，以便评估煤炭开采对塌陷区环境的影响。

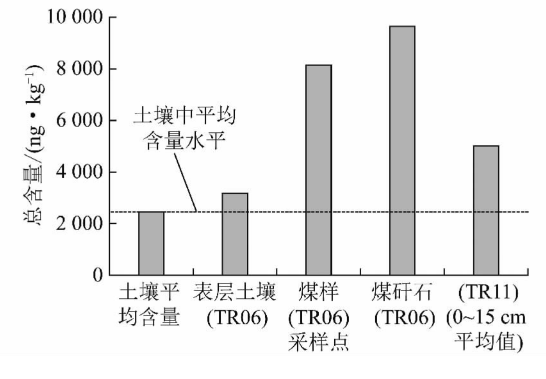

图 6　煤和煤矸石中 13PCBs 的总含量

Fig. 6　Total 13PCBs concentrations in coal and gangue

3 结论与展望

(1) 淮南潘一采煤塌陷水域周围农田土壤和底泥中,除 PCB138 未检出,其他 13 种多氯联苯总量变化范围为 1 581 ~ 5 510 ng/kg 和 3 278 ~ 5 973 ng/kg,平均值为 2 447 ng/kg 和 4 339 ng/kg(干重),三氯联苯和五氯联苯为其主要污染特征,与我国多氯联苯生产和使用历史相符合。

(2) 与国内外研究相比,该塌陷水域土壤和底泥沉积物中多氯联苯污染处于轻度水平,塌陷水域土壤中,7 种指示性 PCBs 含量较低,不需要进行土壤修复;当探讨采煤塌陷水域周围农田土壤和底泥中 PCBs 随深度变化规律时,对每种 PCB 进行分析,能更好的总结出 PCBs 的垂向分布规律;采煤塌陷塘的底泥由农田土壤直接演化而成,区别于河流、湖泊、海湾和近海等地区的沉积物,在 0 ~ 20 cm 范围内,潘一采煤塌陷水域中土壤和底泥中 14 种 PCB 含量处于相同水平,尤其是呈面状检出且含量较高的 PCB18。

(3) 采煤塌陷水域周围农田土壤中 PCBs 的输入,是淮南潘一采煤塌陷水域底泥 PCBs 含量增加的重要原因,塌陷水域是其周围农田土壤中 PCBs 等污染物的汇。研究区域煤矸石中 PCBs 含量较高,但煤矸石中 7 种指示性 PCBs 含量远低于荷兰规定的 7 种指示性 PCBs 干预值,不需要采取干预措施,煤矸石山的堆置,对周围土壤中 PCBs 含量有重要影响,会使土壤中 PCBs 含量增加。

(4) 此次研究,仅仅从含量方面,研究了潘一采煤塌陷水域土壤和底泥沉积物中 PCBs 分布特征,而温度、pH、有机质、水体悬浮物和氧化还原条件的改变等对 PCBs 在环境中行为的影响尚未涉及,尤其是采煤塌陷区中 PCBs,在含煤有机质介导下 PCBs 迁移转化特征和降解环境条件等尚不清楚,有待进一步加强这些方面的研究。鉴于 PCB77,81,126,169 是燃煤和工业活动等过程中产生的,应当加强对 PCB77,81,126,169 的检测,以便确定煤炭开采活动和煤矸石堆置,对塌陷区 PCBs 含量的影响和贡献大小,还应当扩大检测范围和多氯联苯检测种类,为多氯联苯污染源解析做好准备。

参考文献:

[1] Loganathan B G,Masunaga S. PCBs,dioxins and furans: Human exposure and health effects [A]. Handbook of Toxicology of Chemical Warfare Agents (Second Edition) [C]. 2015: 239 - 247.

[2] Zheng X,Chen D,Liu X,et al. Spatial and seasonal variations of organochlorine compounds in air on an urban-rural transect across Tianjin,China [J]. Chemosphere,2009,78(2): 92 - 98.

[3] Wang X,Xi B,Huo S,et al. Polychlorinated biphenyls residues in surface sediments of the eutrophic Chaohu Lake (China): Characteristics,risk,and correlation with trophic status [J]. Environmental Earth Sciences,2014,71(2): 849 - 861.

[4] Erickson M D,Kaley II R G. Applications of polychlorinated biphenyls [J]. Environmental Science and Pollution Research,2011,18(2): 135 - 151.

[5] Net S,El-Osmani R,Prygiel E,et al. Overview of persistent organic pollution (PAHs,Me-PAHs and PCBs) in freshwater sediments from Northern France [J]. Journal of Geochemical Exploration,2015,148: 181 - 188.

[6] Ali U,Syed J H,Mahmood A,et al. Influential role of black carbon in the soil-air partitioning of polychlorinated biphenyls (PCBs) in the Indus River Basin,Pakistan [J]. Chemosphere,2015,134: 172 - 180.

[7] Yoonki M,Jongwon H,Meehye L. Determination of toxic congeners of 17 PCDDs/PCDFs and 12 dl - PCBs using polyurethane foam passive air samplers in ten cities around Seoul [J]. Science of the Total Environment,2014,491: 17 - 27.

[8] Olenycz M,Sokołowski A,Niewińska A,et al. Comparison of PCBs and PAHs levels in European coastal waters using mussels from the Mytilus edulis complex as biomonitors [J]. Oceanologia,2015,57(2): 196 - 211.

[9] Luzardo O P,Ruiz-Suárez N,Henríquez-Hernández L A,et al. Assessment of the exposure to organochlorine pesticides,PCBs and PAHs in six species of predatory birds of the Canary Islands,Spain [J]. Science of The Total Environment,2014,472: 146 - 153.

[10] Yu L H. Organohalogen contamination in passerine birds from three metropolises in China: Geographical variation and its implication for anthropogenic effects on urban environments [J]. Environmental Pollution,2014,188: 118 - 123.

[11] Li Y F,Macdonald R W. Sources and pathways of selected organochlorine pesticides to the arctic and the effect of pathway divergence on HCH trends in biota: A review [J]. Science of The Total Environment,2005,342(1): 87 - 106.

[12] Oida T,Barr J R,Kimata K,et al. Photolysis of polychlorinated biphenyls on octadecylsilylated silica particles [J]. Chemosphere,1999,39(11): 1795 - 1807.

[13] Harrad S J,Sewart A P,Alcock R,et al. Polychlorinated biphenyls (PCBs) in the British environment: Sinks,sources and temporal trends [J]. Environmental Pollution,1994,85(2): 131 - 146.

[14] Hu G,Luo X,Li F,et al. Organochlorine compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediment from Baiyangdian Lake,North China: Concentrations,sources profiles and potential risk [J]. Journal of Environmental Sciences,2010,22(2): 176 - 183.

[15] Edgar P J,Davies I M,Hursthouse A S,et al. The biogeochemistry of polychlorinated biphenyls (PCBs) in the clyde: Distribution and source evaluation [J]. Marine Pollution Bulletin,1999,38(6): 486 - 496.

[16] Ameur W B,Trabelsi S,Bedoui B E,et al. Polychlorinated Biphenyls in Sediments from Ghar El Melh lagoon,Tunisia [J]. Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology,2011,86(5): 539 - 544(6).

[17] Vane C H, Harrison I, Kim A W. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediments from the Mersey Estuary, UK [J]. Science of the Total Environment, 2007, 374(1): 112 – 126.

[18] Hu G, Luo X, Li F, et al. Organochlorine compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediment from Baiyangdian Lake, North China: Concentrations, sources profiles and potential risk [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(2): 176 – 183.

[19] Yu Y, Li Y, Shen Z, et al. Occurrence and possible sources of organochlorine pesticides (OCPs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) along the Chao River, China [J]. Chemosphere, 2014, 114(22): 136 – 143.

[20] Squadrone S, Mignone W, Abete M C, et al. Non-dioxin-like polychlorinated biphenyls (NDL-PCBs) in eel, trout, and barbel from the River Roya, Northern Italy [J]. Food Chemistry, 2015, 175: 10 – 15.

[21] Martinez A, Norström K, Wang K, et al. Polychlorinated biphenyls in the surficial sediment of Indiana Harbor and Ship Canal, Lake Michigan [J]. Environment International, 2010, 36(8): 849 – 854.

[22] Hiller E, Zemanová L, Sirotiak M, et al. Concentrations, distributions, and sources of polychlorinated biphenyls and polycyclic aromatic hydrocarbons in bed sediments of the water reservoirs in Slovakia [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 173(1 – 4): 883 – 897.

[23] Hong S H, Yim U H, Shim W J, et al. Congener-specific survey for polychlorinated biphenlys in sediments of industrialized bays in Korea: Regional characteristics and pollution sources [J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(19): 7380 – 7388.

[24] Gómez-Lavín S, Gorri D, Irabien Á. Assessment of PCDD/Fs and PCBs in sediments from the Spanish northern Atlantic coast [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2011, 221(1 – 4): 287 – 299.

[25] Ali U, Syed J H, Mahmood A, et al. Influential role of black carbon in the soil-air partitioning of polychlorinated biphenyls (PCBs) in the Indus River Basin, Pakistan [J]. Chemosphere, 2015, 134: 172 – 180.

[26] **刘劲松, 严家平, 徐良骥, 等. 淮南矿区不同塌陷年龄积水区环境效应分析 [J]. 环境科学与技术**, 2009, 32(9): 140 – 143.
Liu Jinsong, Yan Jiaping, Xu Liangji, et al. Water environment in different subsidence pools of Huainan Coal-mining area investigation and evaluation [J]. Environmental Science & Technology (China), 2009, 32(9): 140 – 143.

[27] **谢 凯, 张雁秋, 易齐涛, 等. 淮南潘一矿塌陷水域沉积物中磷的赋存和迁移转化特征 [J]. 中国环境科学**, 2012, 32(10): 1867 – 1874.
Xie Kai, Zhang Yanqiu, Yi Qitao, et al. Phosphorus fractions and migration in the sediments of a subsided water area in Panyi Coal Mine of Huainan [J]. China Environmental Science, 2012, 32(10): 1867 – 1874.

[28] **王子健, 黄圣彪, 马 梅, 等. 水体中溶解有机物对多氯联苯在淮河水体沉积物上的吸附和生物富集作用的影响 [J]. 环境科学学报**, 2005, 25(1): 39 – 43.
Wang Zijian, Huang Shengbiao, Ma Mei, et al. Infuences of dissolved organic carbon on the partitioning and bioconcentration oif polychlorinated biphenyls (PCBs) in Huaihe River [J]. Journal of Environmental Sciences, 2005, 25(1): 39 – 44.

[29] Kim M, Kim S, Yun S, et al. Comparison of seven indicator PCBs and three coplanar PCBs in beef, pork, and chicken fat [J]. Chemosphere, 2004, 54(10): 1533 – 1538.

[30] Net S, El-Osmani R, Prygiel E, et al. Overview of persistent organic pollution (PAHs, Me-PAHs and PCBs) in freshwater sediments from Northern France [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015, 148: 181 – 188.

[31] Mourier B, Desmet M, Metre P C V, et al. Historical records, sources, and spatial trends of PCBs along the Rhône River (France) [J]. Science of The Total Environment, 2014, 476: 568 – 576.

[32] Brito E M S, De la Cruz Barrón M, Caretta C A, et al. Impact of hydrocarbons, PCBs and heavy metals on bacterial communities in Lerma River, Salamanca, Mexico: Investigation of hydrocarbon degradation potential [J]. Science of The Total Environment, 2015, 521: 1 – 10.

[33] Tiano M, Tronczyński J, Harmelin-Vivien M, et al. PCB concentrations in plankton size classes, a temporal study in Marseille Bay, Western Mediterranean Sea [J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 89(1): 331 – 339.

[34] Dai G, Liu X, Liang G, et al. Distribution of organochlorine pesticides (OCPs) and poly chlorinated biphenyls (PCBs) in surface water and sediments from Baiyangdian Lake in North China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(10): 1640 – 1649.

[35] **陈燕燕, 尹 颖, 王晓蓉, 等. 太湖表层沉积物中 PAHs 和 PCBs 的分布及风险评价 [J]. 中国环境科学**, 2009, 29(2): 118 – 124.
Chen Yanyan, Yin Ying, Wang Xiaorong, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyl in surface sediments of Taihu Lake: The distribution, sources and risk assessment [J]. China Environmental Science, 2009, 29(2): 118 – 124.

[36] Li W H, Tian Y Z, Shi G L, et al. Source and risk assessment of PCBs in sediments of Fenhe reservoir and watershed, China [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2012, 14(4): 1255 – 1262.

[37] Meijer S N, Ockenden W A, Sweetman A, et al. Global distribution and budget of PCBs and HCB in background surface soils: Implications for sources and environmental processes [J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(4): 667 – 672.

[38] Mahmood A, Syed J H, Malik R N, et al. Polychlorinated biphenyls (PCBs) in air, soil, and cereal crops along the two tributaries of River Chenab, Pakistan: Concentrations, distribution, and screening level risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2014, 481: 596 – 604.

[39] Melnyk A, Dettlaff A, Kuklińska K, et al. Concentration and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in surface soil near a municipal solid waste (MSW) landfill [J]. Science of the Total Environment, 2015, 530: 18 – 27.

[40] Jiang Y, Wang X, Zhu K, et al. Polychlorinated biphenyls contamination in urban soil of Shanghai: Level, compositional profiles and source identification [J]. Chemosphere, 2011, 83(6): 767 – 773.

[41] Zhu Z C,Chen S J,Zheng J,et al. Occurrence of brominated flame retardants (BFRs),organochlorine pesticides (OCPs),and polychlorinated biphenyls (PCBs) in agricultural soils in a BFR-manufacturing region of North China[J]. Science of The Total Environment,2014,481:47-54.

[42] Canadian Council of Ministers of Environment. Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life[S]. Canada,2002:2.

[43] Ministry of Housing,Spatial Planning and Environment. Circular on target values and intervention values for soil remediation[R]. Netherlands,2000:10.

[44] 马召辉,金 军,亓学奎,等. 太湖沉积物中多溴联苯醚和类二英多氯联苯的水平垂直分布[J]. 环境科学,2013,34(3):1136-1141.
Ma Zhaohui,Jin Jun,Qi Xuekui,et al. Vertical distribution of PBDEs and DL-PCBs in sediments of Taihu Lake[J]. Environmental Science,2013,34(3):1136-1141.

[45] 刘敏霞,杨玉义,李庆孝,等. 中国近海海洋环境多氯联苯(PCBs)污染现状及影响因素[J]. 环境科学,2013,34(8):3309-3315.
Liu Minxia,Yang Yuyi,Li Qingxiao,et al. Status and influencing factors of polychlorinated biphenyls (PCBs) pollution in the coastal areas in China[J]. Environmental Science,2013,34(8):3309-3315.

[46] 安 琼,董元华,王 辉,等. 长江三角洲典型地区农田土壤中多氯联苯残留状况[J]. 环境科学,2006,27(3):528-532.
An Qiong,Dong Yuanhua,Wang Hui,et al. Residues of PCBs in agricultural fields in the Yangtze Delta,China[J]. Environmental Science,2006,27(3):528-532.

[47] 张雪莲,骆永明,滕 应,等. 长江三角洲某电子垃圾拆解区土壤中多氯联苯的残留特征①[J]. 土壤,2009,41(4):588-593.
Zhang Xuelian,Luo Yongming,Teng Ying,et al. Residue characters of PCBs in soils of typical polluted areas in Yangtze River Delta Region[J]. Soils,2009,41(4):588-593.

[48] 王晓峰,楼晓明,韩关根,等. 浙江省电子垃圾拆解地区环境中多氯联苯污染特征研究[J]. 卫生研究,2011,40(5):583-586.
Wang Xiaofeng,Lou Xiaoming,Han Guangen,et al. Pollution characteristics of PCBs in electronic waste dismantling areas of Zhejiang Province[J]. Journal of Hygiene Research,2011,40(5):583-586,590.

[49] Devi N L,Yadav I C,Shihua Q,et al. Distribution and risk assessment of polychlorinated biphenyls (PCBs) in the remote air and soil of Manipur,India[J]. Environmental Earth Sciences,2014,72(10):3955-3967.

[50] Konat J,Kowalewska G. Polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediments of the southern Baltic Sea—trends and fate[J]. Science of the Total Environment,2001,280(1):1-15.

[51] Zhang R,Zhang F,Zhang T,et al. Historical sediment record and distribution of polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediments from tidal flats of Haizhou Bay,China[J]. Marine pollution bulletin,2014,89(1):487-493.

[52] Balasubramani A,Howell N L,Rifai H S. Polychlorinated biphenyls (PCBs) in industrial and municipal effluents: Concentrations,congener profiles,and partitioning onto particulates and organic carbon[J]. Science of the Total Environment,2014,473:702-713.

[53] Men B,He M,Tan L,et al. Distributions of polychlorinated biphenyls in the Daliao River estuary of Liaodong Bay,Bohai Sea (China)[J]. Marine Pollution Bulletin,2014,78(1):77-84.

[54] Quesada S,Tena A,Guillén D,et al. Dynamics of suspended sediment borne persistent organic pollutants in a large regulated Mediterranean river (Ebro,NE Spain)[J]. Science of the Total Environment,2014,473:381-390.

[55] Chi K H,Chang M B,Kao S J. Historical trends of PCDD/Fs and dioxin-like PCBs in sediments buried in a reservoir in Northern Taiwan[J]. Chemosphere,2007,68(9):1733-1740.

[56] Nieuwoudt C,Quinn L P,Pieters R,et al. Dioxin-like chemicals in soil and sediment from residential and industrial areas in central South Africa[J]. Chemosphere,2009,76(6):774-783.