

东平湖表层沉积物中多氯联苯的污染特征

陈丽, 刘衍君, 曹建荣, 杨坤

(聊城大学 环境与规划学院, 山东 聊城 252059)

摘要: [目的] 查明东平湖表层沉积物多氯联苯(PCBs)的污染特征,为东平湖沉积物的污染控制及风险评价提供科学依据。[方法] 于 2015 年 7 月对东平湖 16 个不同点位的表层沉积物进行采样,使用 GC-ECD 检测了 PCBs(PCB28, PCB52, PCB101, PCB118, PCB153, PCB138, PCB180)的含量,对东平湖 PCBs 的空间分布进行分析。运用 EPA 法对东平湖表层沉积物中多氯联苯进行生态风险评价。[结果] 东平湖表层沉积 PCBs 总的含量范围为 $nd \sim 605.9$ ng/kg,均值为 126 ng/kg,标准差为 153。在空间分布上,湖区中部(184.5 ng/kg) $>$ 入湖口(149.9 ng/kg) $>$ 湖区西南部(101.4 ng/kg) $>$ 湖区北部(46.7 ng/kg)。研究区 PCBs 同系物组成以七氯联苯为主,占总量的 66.72%。与其他地区的沉积物相比较,东平湖表层沉积物中 PCBs 处于较低水平,风险评价表明该研究区域生物毒性效应概率远远小于 10%。[结论] 由于水文因素的影响,东平湖表层沉积物中多氯联苯(PCBs)呈现出由大汶河入湖口向西北方向递减的空间分布趋势;东平湖表层沉积物中的多氯联苯属于轻微污染水平,未对水体环境安全造成严重影响,沉积物中 PCBs 的浓度水平对大多数底栖生物无毒性影响。

关键词: 多氯联苯; 表层沉积物; 污染特征; 东平湖

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)06-0042-05

中图分类号: X53, X142

文献参数: 陈丽, 刘衍君, 曹建荣, 等. 东平湖表层沉积物中多氯联苯的污染特征[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 42-46. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.06.007. Chen Li, Liu Yanjun, Cao Jianrong, et al. Pollution characteristics of polychlorinated biphenyls in surface sediments of Dongping Lake[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 42-46.

Pollution Characteristics of Polychlorinated Biphenyls in Surface Sediments of Dongping Lake

CHEN Li, LIU Yanjun, CAO Jianrong, YANG Kun

(College of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059, China)

Abstract: [Objective] The characteristics of polychlorinated biphenyls(PCBs) pollution of surface sediments in Dongping Lake were studied in order to provide the scientific basis for pollution control and risk assessment. [Methods] PCB28, PCB52, PCB101, PCB118, PCB153, PCB138 and PCB180 in 16 different surface sediments samples were monitored in Dongping Lake in July 2015. GC-ECD was used to determine the contents of PCBs. Ecological risk assessment of PCBs in surface sediments of Dongping Lake was conducted by EPA method. [Results] The total content of PCBs was in the range of $nd \sim 605.9$ ng/kg, the mean value was 126 ng/kg, and standard deviation was 153. In terms of spatial distribution, its order was: the central of the lake area(184.5 ng/kg) $>$ entrance of lake area(149.9 ng/kg) $>$ the southwest of the lake area(101.4 ng/kg) $>$ the northern of the lake area(46.7 ng/kg). PCBs homologues were mainly composed of PCB7(66.72%) in the study area. Compared with other regions sediments, PCBs in surface sediments of Dongping Lake were at a lower level. The ecological risk assessment of polychlorinated biphenyls(PCBs) in surface sediments of Dongping Lake using Regulations the United States Environmental Protection Agency (EPA), the probability of biological toxicity was much less than 10%. [Conclusion] Due to influence of hydrological factors, there was a decreasing trend of spatial distribution from the entrance of the Dawen River to the northwest direction of the PCBs in the surface sediments of Dongping Lake. The concentration

收稿日期: 2018-05-22

修回日期: 2018-07-17

资助项目: 山东省自然科学基金项目“东平湖沉积物中 OCPs 的污染特征及迁移规律研究”(ZR2014DQ014)

第一作者: 陈丽(1992—), 女(汉族), 山东省德州市人, 硕士研究生, 研究方向为生态环境。E-mail: ml18865273797_1@163.com.

通讯作者: 曹建荣(1977—), 男(汉族), 山东省安丘市人, 博士, 副教授, 主要从事土壤污染与修复、水体污染与源解析方面的研究。E-mail: caojianrong@lcu.edu.cn.

of PCBs in sediments has no serious effect on the environmental safety of water, and it has no toxic effect on most benthic organism.

Keywords: PCBs; surface sediments; pollution characteristics; Dongping Lake

东平湖(35°30′—36°20′N, 116°00′—116°30′E)是山东省第 2 大淡水湖泊,也是中国东部地区典型的浅水型湖泊,总面积 627 km²,由老湖和新湖 2 部分组成。老湖区常年积水,湖盆平坦,面积约 209 km²,多年平均水深 1~2 m,为典型的浅水型湖泊。在黄河不滞洪的条件下,大汶河是东平湖唯一的入湖河流。东平湖是南水北调东线的主要调节湖和山东省西水东调的水源地,其水质状况直接关系到调水工程受水区的水质安全问题^[1]。近年来,随着工农业的迅速发展和居民人口的大量增加,东平湖受人类活动的干扰和影响越来越大^[2]。目前为止,已有大量的学者以东平湖为研究对象进行生态的探究^[3-6],研究发现,东平湖尤其是入湖口的水质还没有达到南水北调东线工程水质要求^[7],并且东平湖表层沉积物已经普遍受到 Cd, Cu 和 Zn 的污染^[2],而影响东平湖水质和沉积物中污染物富集的原因很可能是由于大汶河河水带来的污染物^[8]。但有关东平湖表层沉积物中多氯联苯(PCBs)的相关研究鲜见报道。

持久性物质(persistent substance, POPs)是指化学稳定性强,难于降解转化,在环境中不易消失,能长时间滞留的物质^[9]。多氯联苯(PCBs)是国际上极为关注的《斯德哥尔摩公约》中首批受控的持久性有机污染物之一。它具有较强的化学惰性和热稳定性,易于在环境介质中积累,尤其是表层土壤^[10],并且极易在生物体内累积造成全球性环境的污染^[11]。在沉积物中由于低温、缺氧等特殊环境 PCBs 很难降解,因此半衰期很长^[12]。人为或自然的扰动会使沉积物中充氧,加速硫等的氧化,从而改变沉积物的 pH 值及还原环境,使微生物活动加剧,加速 PCBs 的降解或释放^[13],研究结果表明,自然界中真正能去除的 PCBs 仅是一小部分,吸附于沉积物颗粒中的大部分 PCBs 都参与到再循环过程中去^[14],水体沉积物作为区域生态环境系统的组成部分,由于污染引起的环境质量变化将不可避免地对其他环境组成部分产生深刻影响。本研究探究了东平湖表层沉积物中多氯联苯的污染特征,以期对东平湖沉积物的污染控制及风险评价提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品的采集与保存

从入湖口至出湖口,按辐射状并兼顾均匀性原则对东平湖进行布点。通过手持 GPS 现场定位,每个

采样点先测量水深,在此基础上,于 2015 年 7 月通过抓斗式采泥器(CN-100)采集 0—5 cm 的表层沉积物混合获得混合样品(图 1),并且详细记录采样点周围的环境状况(表 1)。采集的沉积物样品放入聚乙烯密封袋带回实验室,进行除杂,冷冻干燥,均匀混合后,过 100 目尼龙网筛,称取部分样品进行有机质含量、盐度及相关的沉积物理化性质测定,其余部分用于测定多氯联苯(PCBs)的含量。

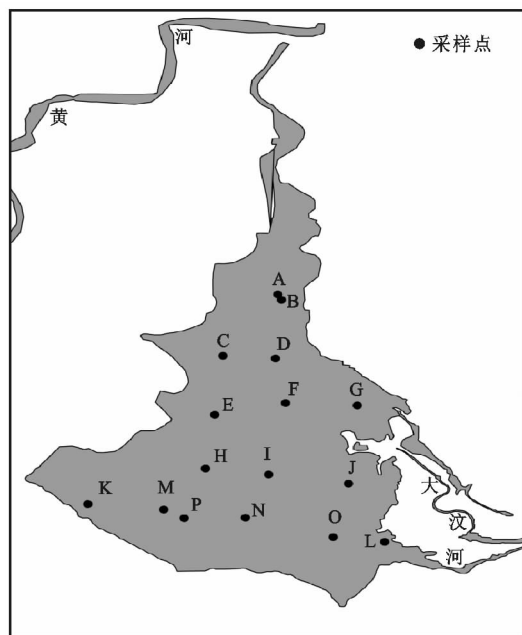


图 1 研究区样点分布

表 1 研究区样点周围环境状况

样点编号	水深/m	温度/°C	溶解氧/(mg·kg ⁻¹)	采样点描述
A	0.63	33.4	17.08	有水草、网箱
B	0.67	32.2	12.00	有水草、网箱
C	1.65	28.7	0.68	无水草、网箱
D	1.90	30.5	13.52	无水草、网箱
E	1.90	28.0	7.07	无水草、网箱
F	2.03	29.5	9.46	无水草、网箱
G	1.10	31.2	8.10	有水草、无网箱
H	1.75	28.6	6.66	无水草、靠近湿地
I	1.83	30.4	8.03	无水草、网箱
J	1.33	30.7	10.17	无水草、靠近湿地
K	0.86	29.0	7.29	有水草、无网箱
L	0.43	31.0	10.8.0	有水草、靠近湿地
M	1.62	29.0	9.59	有水草(水清)、无网箱
N	1.74	29.8	9.30	无水草、有网箱
O	1.35	30.3	8.05	少数水草、有网箱
P	1.53	29.7	13.34	有水草、网箱

1.2 样品处理与分析

利用快速溶剂萃取仪(步琪 E-916),准确称取 10.0 g 待测土壤样品,与 3.0 g 石英砂混匀后,置于 20 ml 提取池中,提取温度 100 ℃,压力 1.20×10^4 kPa,提取时间为 10 min,利用体积比为 1:1 的正己烷和丙酮混合溶液循环提取 2 次,在 30 ℃ 下用旋转蒸发器将抽提液浓缩至 1 ml 左右。首先将浓缩后的提取液用 98% 浓硫酸净化,再用硅胶层析柱分离净化。净化柱为 25 cm × 1 cm 内径的玻璃柱,采用湿法装柱,依次装入玻璃棉,1 cm 高无水硫酸钠,1.5 cm 高的硅胶,1 cm 无水硫酸钠。样品上柱前,先用 5 ml 的正己烷和冲洗净化柱。样品上柱后,用 20 ml 正己烷洗脱,收集洗脱液,旋转蒸发浓缩至近干,后用正己烷定容至 1.0 ml,待上机测定。毒性较大的 PCB28, 52,101,118,138,153,180 被规定为欧洲食品污染标准中 7 种 PCBs 指示性同系物^[15],本研究测量这 7 种 PCBs 指示性同系物。样品采用 Agilent 7890 GC- μ ECD 气相色谱仪进行测定,色谱柱为 HP-5(30 m × 0.25 mm × 0.25 μ m)检测器,进样口温度为 220 ℃,检测器温度为 280 ℃,升温程序:初始温度 60 ℃,保持 1 min,然后以 20 ℃/min 速度升至 140 ℃,再以 12 ℃/min 速度升至 260 ℃,保持 3 min,至样品完全流出色谱柱。进样量为 1 μ l,采用不分流进样。载气为 N₂,纯度 >99.999%,柱流量为 2 ml/min。定量方法为单点外标法定量。

1.3 质量控制与保证

称取 10.0 g 清洁的表层土壤样品棕色玻璃瓶中,设空白样,添加已知浓度的 PCBs 标准溶液,摇匀,24 h 后,按照上述操作进行提取、纯化、测定。在计算回收率时扣除空白样中含量。7 种 PCBs 的回收率为 73.2%~96.3%,符合微量有机污染物分析要求。

1.4 数据处理与分析

运用 SPSS 20.0 对数据进行处理与分析。利用 Origin 8.5 对 Σ 7 PCBs 单体进行组成特征分析。

2 结果与分析

2.1 东平湖表层沉积物中 PCBs 的浓度水平

本研究测定了东平湖表层沉积物中 7 种 PCBs,由表 2 可以看出,东平湖表层沉积物中 Σ 7 PCBs 含量范围为 nd~605.9 ng/kg,均值为 126 ng/kg。结合图 1 对东平湖表层沉积物中多氯联苯的含量水平作比较,最高点出现在位于湖区中部 I 点,其附近有大量网箱存在,东平湖存在采用围网养殖鱼类等水产品,加之渔民、游客等进行划船、捕捞等人类活动,水

体及沉积物受人类活动影响比较大;最低点出现位于湖区中部 E 点,虽然最高值和最低值均出现在湖区中部,但两点的水文条件,生态环境具有一定差异,E 点位于湖心岛附近,船只等交通工具的出现频次较少,受水动力干扰较弱,受人类活动影响相对较小;其次相对于 I 点距离大汶河入河口较远以及大汶河水注入流向偏离较远。进而说明在湖区中部的多氯联苯在浓度水平上存在明显差异性。PCB28, PCB52, PCB180 的检出率相对较高,分别为 93.75%, 81.25% 和 93.75%,以三氯联苯、四氯联苯和七氯联苯为主。

表 2 东平湖表层沉积物中 PCBs

组分	组分统计特征					ng/kg
	最大值	最小值	均值	标准差	变异系数 CV/%	检出率/%
PCB28	22	nd	15	7	44.39	93.75
PCB52	87	nd	14	22	163.08	81.25
PCB101	3	nd	nd	1	236.90	18.75
PCB153	26	nd	6	7	120.72	75.00
PCB138	12	nd	2	3	209.37	37.50
PCB180	48.6	nd	89	123	137.99	93.75
Σ 7 PCBs	605.9	nd	126	153	121.89	85.71

注:nd 表示未检出。

与国内其他研究相比较(表 3),东平湖湖区表层沉积物中多氯联苯含量低于与本研究区纬度相近的黄河中下游、青岛近海、南四湖沉积物含量,与滴水湖、辽宁大伙房水库、珠江入海口等检测 PCBs 种类相同的地区相比较,东平湖表层沉积物中 PCBs 含量仍处于较低轻度污染水平。多氯联苯没有自然来源,其主要来源于工农业,尤其是工业发达,特别是电子产业发达的地区,一些电子产品的随意拆解造成 PCBs 的泄漏,随地表径流污染湖泊等水体环境,多氯联苯的含量会相对较高^[24]。由于东平湖位于内陆,周围以农业为主,工业远没有青岛近海、珠江入海口等发达,因而 PCBs 含量相对其他地区较低,处于较低轻度污染水平。虽然东平湖表层沉积物中多氯联苯的含量不高,东平湖近年来污染物输入量增大,尤其是大汶河作为东平湖的入湖河流,其河道成为城市污水和工矿企业的排污通道^[7],导致东平湖水质不容乐观,加上多氯联苯具有富集性并且在环境中可以长期残留,其潜在生态风险是不容忽视,但需要有关部门予以重视,以免对周围居民及生物的健康产生影响。

表 3 其他地区表层沉积物中 PCBs 含量

地点	PCBs 种类	PCBs 范围
南四湖 ^[16]	12	7.84~42.80
太湖 ^[17]	56	1.35~13.80
滴水湖 ^[18]	7	0.65~16.41
东平湖(本研究)	7	nd~0.60
黄河中下游 ^[19]	—	nd~5.98
辽宁大伙房水库 ^[20]	7	1.46~3.52
三沙湾 ^[21]	16	0.24~3.05
青岛近海 ^[22]	7	1.53~36.66
珠江入海口 ^[23]	7	6.58~47.46

2.2 东平湖表层沉积物中 PCBs 的空间分布

由图 2 可以看出,在东平湖表层沉积物中多氯联苯的空间分布呈现为:湖区中部(184.5 ng/kg) > 入湖口(149.9 ng/kg) > 湖区西南部(101.4 ng/kg) >

湖区北部(46.7 ng/kg),湖区北部远低于湖区西南部、湖区中部、入湖口地区。导致这种现象的原因是表层沉积物受到东平湖水文因素的影响,大汶河是东平湖唯一入湖河流,由于大汶河沿岸人口增加、城镇快速发展,所需要排除的生活废水及工业废水都会有所增加^[1];其次沿岸废弃物燃烧、工业液体泄露等活动产生污染物通过大汶河流入东平湖。这与张菊等^[1]研究东平湖表层沉积物中重金属的空间分布特征相一致。入湖口和湖区中部易受大汶河河道携带污染物影响,划船、养殖等人类活动在湖区中部频繁;湖区西南部受人类活动较小,湖区北部受黄河的影响较大,沉积物中有机质含量相对较低,含沙量相对较高。不利于多氯联苯吸附于沉积物中,因而东平湖表层沉积物中多氯联苯(PCBs)呈现出由大汶河入湖口向西北方向递减的空间分布趋势。

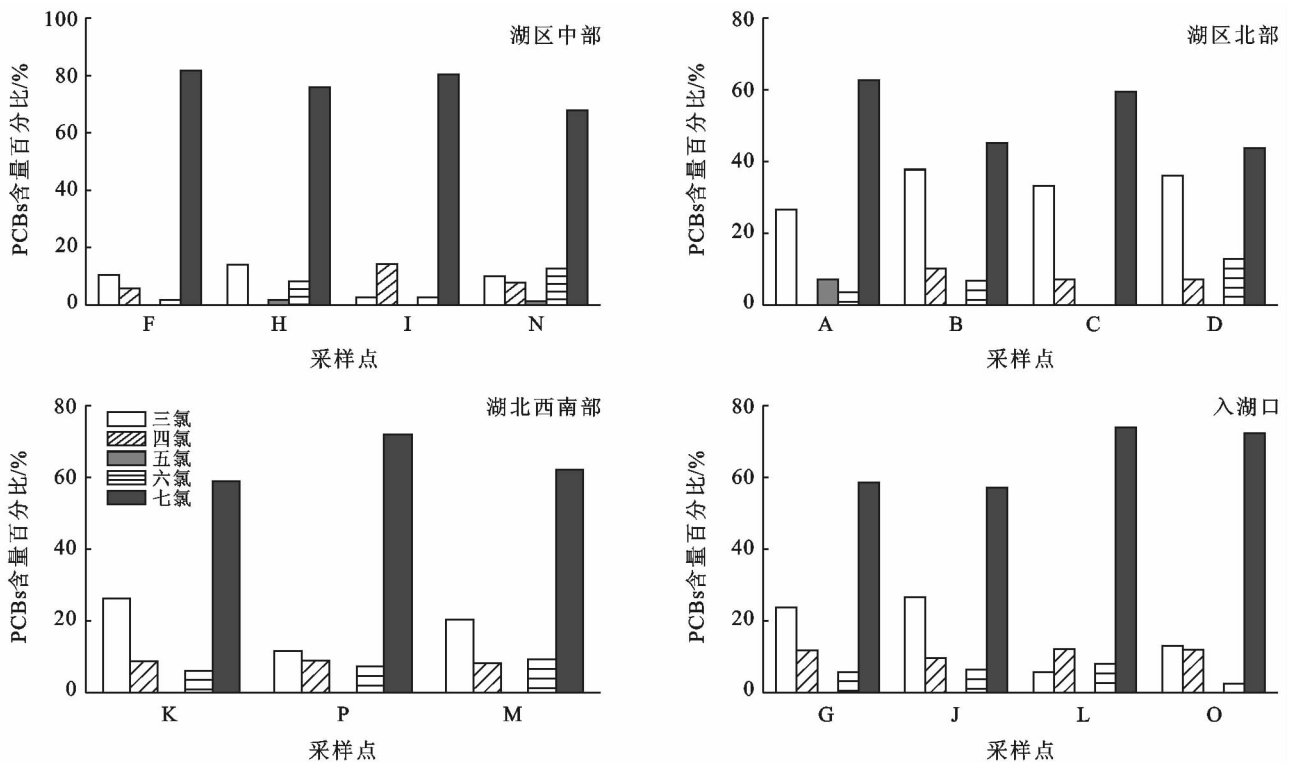


图 2 平湖表层沉积物 PCBs 同系物组成 (%)

2.3 东平湖表层沉积物中 PCBs 组成分布特征

东平湖表层沉积物 PCBs 同系物组成如图 2 所示,湖区北部(A, B, C, D)、湖区西南部(K, M, P)、湖区中部(E, F, H, I, N)和入湖口(G, J, L, O)表层沉积物均以七氯联苯(高氯联苯)为主,占 7 种 PCBs 总量范围分别为 43.72%~62.69%, 58.82%~72.02%, nd~81.66%, 57.13%~73.95%, 七氯联苯占东平湖表层沉积物中 PCBs 同系物质量达 66.72%。相较其他 3 个湖区来说,湖区中部中七氯联苯含量湖区北部

相对较高,而湖区北部、湖区西南部、入湖口的三氯联苯相对与湖区中部略高,范围为 26.57%~36.18%, 11.60%~26.22%, 5.86%~26.64%, 湖区中部三氯联苯的范围为 nd~14.04%。三氯联苯在整个湖区分布相对均匀,而五氯联苯仅在湖区北部和湖区中部以点源形式存在。由于多氯联苯会随氯原子的个数增多其亲水性会减弱,同时在水体中的迁移能力会减弱^[25],由于大汶河是东平湖唯一的入湖河流,东平湖受大汶河携带的污染物影响较大,因此高氯代联苯在

入湖口及湖区中部分布相对较高;而低氯联苯由于其疏水亲脂性较弱,因而其在研究区中的分布相对均匀。

2.4 东平湖表层沉积物中 PCBs 生态风险评价

沉积物是有机污染物的“汇”^[26],同时有机污染物在沉积环境也会出现二次释放的现象。对沉积物中 PCBs 进行生态风险评价显得尤为重要,但是目前为止,我国还没有对多氯联苯在沉积物中的环境评价标准。通过北美海岸和河口沉积物的数据,美国学者 Long 等进行了大量的统计工作和生物毒性试验,建立起美国环境保护署法(EPA 法)从而可以对沉积物中有机污染物进行生态风险评价^[11]。本研究运用 EPA 法对东平湖表层沉积物中多氯联苯进行生态风险评价,当效应区间低值(ERL 值)($ERL = 22.7 \text{ ng/g}$)高于沉积物中 PCBs 含量,指示其生物毒性效应概率 $< 10\%$ ^[27],从图 3 可以看出,东平湖表层沉积物 PCB 含量最高点出现在 I 点, I 点的含量远远低于 ERL 值,整体而言,说明东平湖生物毒性效应概率远远小于 10% ,属于轻微污染,东平湖表层沉积物 PCBs 的生态风险很低。

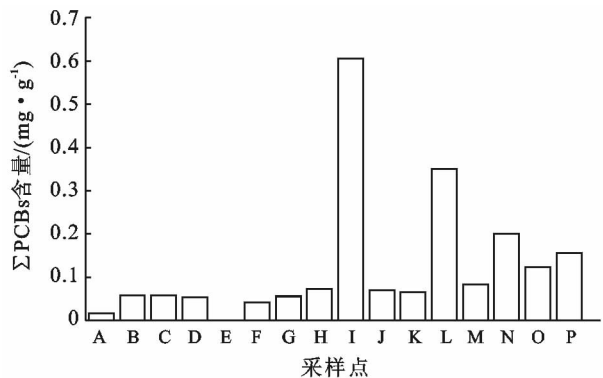


图 3 东平湖表层沉积物 PCBs 生态风险评价

3 讨论与结论

(1) 东平湖 16 个采样点表层沉积物中 PCBs 的浓度范围为 $nd \sim 605.9 \text{ ng/kg}$,平均值为 126 ng/kg ;通过与国内其他地区的多氯联苯(PCBs)含量进行比较,东平湖表层沉积物中多氯联苯的含量相对较低,本研究区工业产生的污染相对于其他地区较少。由于水文因素和人类活动的差异,在空间上分布上,东平湖表层沉积物中多氯联苯的含量呈现出由大汶河入湖口向西北方向递减的分布趋势。

(2) 东平湖表层沉积物中多氯联苯(PCBs)以七氯联苯为主,达 66.72% ;其次是三氯联苯,达 11.11% 。东平湖表层沉积物中多氯联苯(PCBs)的组成特征来看,高氯联苯的含量远远高于低氯联苯,

造成这现象是由于东平湖表层沉积物中多氯联苯(PCBs)来源和性质的差异造成的,但是东平湖表层沉积物中多氯联苯(PCBs)的具体来源有待进一步分析。

(3) 运用美国环境保护署法(EPA 法)从而对沉积物中有机污染物进行生态风险评价,东平湖表层沉积物中多氯联苯(PCBs)含量远远低于 ERL 值说明东平湖生物毒性效应概率远远小于 10% ,研究区域属于轻微污染,东平湖表层沉积物 PCBs 的生态风险很低。

[参 考 文 献]

- [1] 张菊,何振芳,董杰,等. 东平湖表层沉积物重金属的空间分布及污染评价[J]. 生态环境学报, 2016, 25(10): 1699-1706.
- [2] 宋立明,李艳琴. 东平湖表层沉积物的理化特性及分布特征研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(12): 7425-7427.
- [3] 张菊,邓焕广,吴爱琴,等. 东平湖菹草腐烂分解及其对水环境的影响[J]. 环境科学学报, 2013, 33(9): 2590-2596.
- [4] 田忠志,邢友华,姜瑞雪,等. 东平湖表层沉积物中磷的形态分布特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(6): 719-723.
- [5] 于少鹏,孙广友,窦素珍,等. 东平湖水生植物的衰退及南水北调工程对其影响[J]. 中国环境科学, 2005, 25(2): 200-204.
- [6] 毛伟兵,庞清江,符连申. 水土流失对东平湖水质的影响研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(5): 27-29.
- [7] 侯慧平,葛颜祥,潘娜. 东平湖水质评价及水污染防治对策[J]. 人民黄河, 2013(12): 43-46.
- [8] 王有良,齐建国,李玉石,等. 东平湖水质现状分析与评价[J]. 山东农业大学学报:自然科学版, 2018(3): 44.
- [9] 任仁.《斯德哥尔摩公约》禁用的 12 种持久性有机污染物[J]. 大学化学, 2003, 18(3): 37-41.
- [10] 滕应,郑茂坤,骆永明,等. 长江三角洲典型地区农田土壤多氯联苯空间分布特征[J]. 环境科学, 2008, 29(12): 3477-3482.
- [11] Long E R, Macdonald D D, Smith S L, et al. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments[J]. Environmental Management, 1995, 19(1): 81-97.
- [12] Sinkkonen S, Paasivirta J. Degradation half-life times of PCDDs, PCDFs and PCBs for environmental fate modeling[J]. Chemosphere, 2000, 40(9): 943-949.
- [13] Eggleton J, Thomas K V. A review of factors affecting the release and bioavailability of contaminants during sediment disturbance events[J]. Environment International, 2004, 30(7): 973-980.

- 因探讨[J]. 工程地质学报, 2005, 13(3): 305-309.
- [8] 白世彪, 闫国年, 盛业华, 等. 基于 GIS 的长江三峡库区滑坡影响因子分析[J]. 山地学报, 2005, 23(1): 63-70.
- [9] 乔建平, 朱阿兴, 吴彩燕, 等. 采用本底因子贡献率法的三峡库区滑坡危险度区划[J]. 山地学报, 2006, 24(5): 569-573.
- [10] Wang Xianmin, Niu Ruiqing. Spatial forecast of landslides in Three Gorges based on spatial data mining [J]. Sensors, 2009, 9(3): 2035-2061.
- [11] 李雪, 李井冈山, 刘小利, 等. 三峡库首区滑坡空间分布特征分析及危险性评价[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(7): 630-634.
- [12] 张俊, 殷坤龙, 王佳佳, 等. 三峡库区万州区滑坡灾害易发性评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 284-296.
- [13] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [14] 范大波. 三峡库区香溪河段滑坡发育特征及水库蓄水对岸坡稳定性的影响研究[D]. 四川 成都: 成都理工大学, 2011.
- [15] 杜俊, 丁文峰, 任洪玉. 四川省不同类型山洪灾害与主要影响因素的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(11): 1977-1983.
- [16] 刘惠英, 任洪玉, 张平仓, 等. 香溪河流域近 60 年来降雨量变化趋势及突变分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(4): 282-286.
- [17] 万荣荣, 杨桂山. 流域土地利用/覆被变化的水文效应及洪水响应[J]. 湖泊科学, 2004, 16(3): 258-264.
- [18] 李雪转, 樊贵盛. 土壤有机质含量对土壤入渗能力及参数影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 188-190.
- [19] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 不同黏粒含量土壤水分入渗能力模拟试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 71-77.
- [20] 杜俊, 师长兴, 周园园. 长江上游侵蚀产沙格局及其控制因素[J]. 山地学报, 2010, 28(6): 22-29.
- [21] 黄润秋, 李为乐. 汶川大地震触发地质灾害的断层效应分析[J]. 工程地质学报, 2009, 17(1): 21-30.
- [22] 王孔伟, 张帆, 邱殿明. 三峡库区黄陵背斜形成机理及与滑坡群关系[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2015, 45(4): 1142-1154.
- [23] 吴昌广, 林德生, 周志翔, 等. 三峡库区降水量的空间插值方法及时空分布[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(7): 752-758.
- [24] 赵良军, 陈冬花, 李虎, 等. 基于二元逻辑回归模型的新疆果子沟滑坡风险区划[J]. 山地学报, 2017, 35(2): 203-211.
- [25] 曹洪洋, 郝东恒, 白聚波. 区域滑坡灾害地形地貌因子敏感性分析研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(11): 3-7.

(上接第 46 页)

- [14] 翟志勇. 水体沉积物中多氯联苯的研究进展[J]. 安徽科技, 2016(8): 41-43.
- [15] 陈晓荣, 王洋, 刘景双, 等. 吉林市城郊蔬菜土壤中多氯联苯残留特征及生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(6): 1127-1133.
- [16] 李红莉, 李国刚, 杨帆, 等. 南四湖沉积物中有机氯农药和多氯联苯垂直分布特征[J]. 环境科学, 2007, 28(7): 1590-1594.
- [17] 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.
- [18] 王薛平, 黄星, 毕春娟, 等. 滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价[J]. 环境科学, 2016, 37(6): 2121-2130.
- [19] 孙艳, 何孟常, 杨志峰, 等. 黄河中下游表层沉积物中多氯联苯的污染特征[J]. 环境化学, 2005, 24(5): 590-594.
- [20] 林田, 秦延文, 张雷, 等. 辽宁大伙房水库沉积物中有机氯农药和多氯联苯的分布、来源及风险评价[J]. 环境科学, 2011, 32(11): 3294-3299.
- [21] 黄磊, 孙桂华, 袁晓婕. 三沙湾表层沉积物中有机污染物的含量及风险评价[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(8): 63-69.
- [22] 王江涛, 谭丽菊, 张文浩, 等. 青岛近海沉积物中多环芳烃、多氯联苯和有机氯农药的含量和分布特征[J]. 环境科学, 2010, 31(11): 2713-2722.
- [23] 李秀丽, 赖子尼, 穆三姐, 等. 珠江入海口表层沉积物中多氯联苯残留与风险评价[J]. 生态环境学报, 2013, 22(1): 135-140.
- [24] 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.
- [25] Lakshmanan D, Howell N L, Rifai H S, et al. Spatial and temporal variation of polychlorinated biphenyls in the Houston Ship Channel[J]. Chemosphere, 2010, 80(2): 100-112.
- [26] 徐磊, 刘莎, 秦庆东, 等. 太湖竺山湾及入湖河流沉积物中多氯联苯单体分布及源解析[J]. 中国环境科学, 2017, 37(11): 4333-4341.
- [27] 聂海峰, 赵传冬, 刘应汉, 等. 松花江流域河流沉积物中多氯联苯的分布、来源及风险评价[J]. 环境科学, 2012, 33(10): 3434-3442.