



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.04.014

李琼, 张海欧, 和利钊, 等. 吉林市排污河底泥的污染状况及其生态风险评价[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4): 79-86. LI Qiong, ZHANG Hai ou, HE Li zhao, et al. Pollution and Ecological Risk Assessment of Contaminants in Sediments from Jilin Sewage received River[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(4): 79-86. (in Chinese)

# 吉林市排污河底泥的污染状况及其生态风险评价

李 琼<sup>1</sup>, 张海欧<sup>1</sup>, 和利钊<sup>1</sup>, 董小龙<sup>1</sup>, 郑子健<sup>1</sup>, 黄锦孙<sup>1</sup>, 王学东<sup>2</sup>

(1. 广西博世科环保科技股份有限公司, 南宁 530007; 2. 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048)

**摘要:** 以吉林市排污河中底泥为主要研究对象, 布置 12 个监测断面 35 个代表性采样点, 采集并分析了河道内底泥样品中 8 种重金属及 16 种 USEPA 优先控制的多环芳烃的含量, 并分别采用地质累积指数法( $I_{geo}$ )、潜在生态风险评价法(PERI)、沉积物质量基准法(SQGs)对排污河底泥中污染物进行了生态风险评价。结果表明, 该排污河底泥中重金属及多环芳烃均不同程度超过松花江水系沉积物背景值, 其中 Hg、Pb、Cu、As、NAP、ANT 超标倍数分别为 87.5、10.2、6.18、5.90、115.6 和 228.5;  $I_{geo}$  显示 Hg 的生态风险最大,  $I_{geo}$  达到了 5.82, 而 Cd 和 Ni 的风险较小, 这与 PERI 中 Hg 风险最大的结果一致; SQGs 评价结果表明由重金属及多环芳烃引起的污染会产生生物毒性, 且不利生物毒性将频繁发生; (3) 以上结果说明, 该排污河呈现以 Hg 为主要风险因子的重金属与多环芳烃复合污染现象, 在今后应加强底泥监测和定期清淤, 从而推动区域生态环境的治理与恢复。

**关键词:** 底泥; 重金属; 多环芳烃; 生态风险评价; 汞

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2017)04-0079-08

## Pollution and Ecological Risk Assessment of Contaminants in Sediments from Jilin Sewage received River

LI Qiong<sup>1</sup>, ZHANG Hai ou<sup>1</sup>, HE Li zhao<sup>1</sup>, DONG Xiao long<sup>1</sup>, ZHENG Zi jian<sup>1</sup>, HUANG Jin sun<sup>1</sup>, WANG Xue dong<sup>2</sup>

(1. Guangxi BOSCH Environmental Protection Polytron Technologies Inc, Nanning 530007, China;

2. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** Jilin is one of the most important chemical industry cities located in the Northeastern old industrial base. Heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) have been detected in sediments from different regions in China, but little is known about Jilin sewage received river, whose pollution was very severe owing to long time industrial and municipal wastewater. The aim of this study was to investigate pollution of heavy metals and PAHs in sediments and to assess their ecological risks. A total of 35 sediment samples from 12 monitoring sections along this sewage received river were collected for determining the concentrations of 8 heavy metals (Hg, Pb, As, Cu, Zn, Cr, Cd, Ni) and 16 EPA priority pollutant PAHs. Geoaccumulation index, H<sub>2</sub>kanson potential ecological risk index and sediment quality guidelines (SQGs) were respectively used to assess the pollution and potential ecological risks of these contaminants in the sediments. The concentrations of heavy metals and PAHs were higher than the background values, especially Hg, Pb, Cu, As, NAP, ANT. The geoaccumulation index indicated that ecological risk degrees of heavy metals in the sediments ranged from high to light levels, with Hg > Pb > As > Cu > Zn > Cr > Cd > Ni, while that of H<sub>2</sub>kanson potential ecological risk index was Hg > As > Cd > Pb > Cu > Ni > Zn > Cr, SQGs indicated that adverse benthic impacts would occur frequently. The sediment was polluted by heavy metals and PAHs, mainly related to Hg.

**Key words:** sediment; heavy metal; PAHs; ecological risk assessment; Hg

收稿日期: 2016-04-28 修回日期: 2016-07-26 网络出版时间:

网络出版地址:

基金项目: 国家自然科学基金(21007042); 北京市教委科技发展研究计划(KM201610028012)

Funds: National Natural Science Foundation of China(21007042); Research Project of Beijing City Board of Education Science and Technology Development(KM201610028012)

作者简介: 李 琼(1984), 男, 山东茌平人, 博士, 主要从事环境污染修复研究。E-mail: liq1130@163.com

通讯作者: 王学东(1979), 男, 河北康保人, 副教授, 博士, 主要从事土壤重金属污染与风险评价研究。E-mail: xdwangcnu@163.com

底泥一般指河流、湖泊、水库和海湾等水体底部长期沉积的沉积物,是水环境的重要组成部分。它不仅是水体中各种污染物(营养盐、重金属、难降解有机污染物等)的主要蓄积场所,也是对水质有潜在影响的次生污染源<sup>[3]</sup>,因此,底泥的污染状况不仅可以反映水体的污染程度,也可对水体产生重要影响。底泥的污染状况和底栖生物的分布、生长和种群组成也有密切关系<sup>[4]</sup>,基于此,开展底泥污染状况调查及生态风险评价研究具有十分重要意义<sup>[5-6]</sup>。

作为一个城市重要的排洪泄污通道,城市排污河在城市发展过程中发挥着重要作用,然而随着城市化进程不断加快,城市居住人口的逐步增多,城市排污河在长期的生活污水和工业废水排放的影响下,水环境质量已不断下降,严重影响到周围居民的生活质量<sup>[7]</sup>。同时,排污河底泥中的污染物含量通常较高,当外界环境条件发生变化时,污染物极有可能重新释放回水体,对当地水质甚至下游受纳水体水质产生威胁<sup>[8]</sup>。因此探明城市排污河底泥的污染状况,明确污染特征及污染物分布,划定底泥生态风险等级,对城市水环境保护有着重要意义。

目前许多国家和地区已出台水体沉积物相关标准和评价方法,如沉积物环境质量标准<sup>[1,9-10]</sup>、地质累积指数法<sup>[11]</sup>、沉积物质量基准法<sup>[12]</sup>、潜在生态风险评价法<sup>[13]</sup>、污染负荷指数法<sup>[14]</sup>、次生相与原生相分布比值法<sup>[15]</sup>、脸谱图法<sup>[16]</sup>、回归过量分析法<sup>[17]</sup>等。许多学者利用这些方法进行了底泥沉积物等的深入研究<sup>[18-19]</sup>,但很少同时涉及重金属和有机污染物的评价分析。基于此,本研究选取东北老化工城市吉林省吉林市某排污河为研究对象,分析检测其底泥中重金属和多环芳烃质量分数,在此基础上采用  $I_{geo}$ 、PERI、SQGs 对污染物生态风险进行评价,以探明该排污河污染物的空间分布特征和污染物生态风险水平,为后续综合治理和生态功能恢复提供理论依据和数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

该城市排污河位于东北老工业城市吉林省吉林市龙潭区,自东向西汇入松花江,流域面积 13.5 km<sup>2</sup>,河道长 6.65 km(图 1)。该河流经龙潭区城乡结合部,河道两岸多为居民区及化工厂,自二十世纪五十年代始,作为城市主要纳污水体,该河接收了大量生活污水和工业污水。长期的污水排放已导致污染物沉积、水质下降,不断威胁着河道水生态环境及周边居民的生活环境质量。

### 1.2 样品采集及地理位置

在龙潭区排污河各重点路桥设置监测断面 12 个,位置见图 1。利用土钻每 50 cm 深度采集一个底泥混合样品,直至河道底部,通常采集深度在 50~200 cm。12 个监测断面共计采集 35 个底泥样品(表 1)。样品采集后装入玻璃材质的土壤瓶中密封,低温运至实验室用于重金属和多环芳烃分析检测。

表 1 采样点位置、编号、深度

采样点位置	编号	深度/cm
物流公司	B1	0~50、50~100
再生资源中心	B2	0~50、50~100、100~150、150~200
再生资源中心与农药厂区间	B3	0~50、50~100、100~150、150~200
农药厂	B4	0~50、50~100、100~150
农药厂与新工四条区间	B5	0~50、50~100、100~150
新工四条	B6	0~50、50~100、100~150
新工一条	B7	0~50、50~100、100~150
职业技术学院	B8	0~50、50~100
汉阳街	B9	0~50、50~100
民乐桥	B10	0~50、50~100、100~150
胜利桥	B11	0~50、50~100、100~150
吉林石化化肥厂	B12	0~50、50~100、100~150

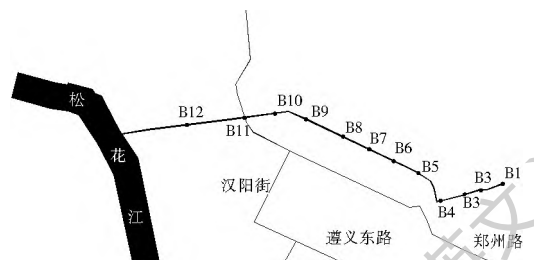


图 1 采样位置

Fig. 1 Sampling sites

### 1.3 样品处理与分析

底泥样品经冷冻干燥后剔除砾石及动植物残体,用玛瑙研钵研磨后过 100 目尼龙筛,以备分析测试用。样品检测指标包括 8 种常见重金属(Cu、Cr、Ni、Zn、Pb、Cd、As、Hg)和 USEPA 规定的 16 种多环芳烃,即萘(NAP)、蒽(ANT)、芘(PYR)、苯并(a)蒽(BaA)\*、世(CHR)\*、苯并(b)荧蒽(BbF)\*、苯并(k)荧蒽(BkF)\*、苯并(a)芘(BaP)\*、茚并(1,2,3-cd)芘(IPY)\*、二苯并(a,h)蒽(DBA)\*、苯并(g,h,i)芘(BPE),其中\*号物质具有致癌性。

重金属的消解及测定: Cu、Zn、Cr、Ni、Pb、Cd 的消解采用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸全分解法, As、Hg 采用王水消解, Cu、Zn、Cr、Ni、Pb 和 Cd 采用火焰原子吸收分光光度法, As、Hg 采用原子荧光法。

多环芳烃的提取及测定: 准确称取 10 g 沉积物样品加 5 g 无水硫酸钠, 用二氯甲烷/丙酮溶液提取 24 h, 并脱硫。萃取液干燥后继续淋洗萃取后浓缩定容, 冷藏待测。采用的仪器为 Agilent 7890A-5795C 气相色谱-质谱联用仪, 色谱柱为 HP-5MS 30 × 0.25 mm × 0.25 μm。

### 1.4 质量控制

重金属的测定采用国家标准河流沉积物样品 (GBW 08301) 进行分析质量控制。平行样相对误差 < 20%, 标准物重金属回收率在 95% ~ 120% 之间。多环芳烃的平行样相对误差 < 35%, 加标回收率在 85% ~ 116% 之间。分析中采用 3 个平行样, 试验用水均为超纯水, 所用试剂均为优级纯。玻璃及塑料器皿在使用前均采用的 HNO<sub>3</sub> 浸泡 24 h 以上。

### 1.5 底泥中污染物的生态风险评价方法

#### 1.5.1 地质累积指数法

地质累积指数法 (Index of Geoaccumulation, I<sub>geo</sub>) 是德国学者 Müller 于 1969 年提出的一种用于评价底泥中重金属污染程度的重要方法<sup>[11]</sup>。计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 \left[ \frac{C_n}{k \times B_n} \right]$$

式中: C<sub>n</sub> 是指元素 n 在沉积物中的含量 (× 10<sup>-6</sup>); B<sub>n</sub> 为沉积岩中的地球化学背景值; k 为考虑到成岩作用可能会引起背景值的变动而取的系数 (一般取值为 1.5)。地积累指数共分为 7 级, 0~6 级表示污染程度由无至极强, 具体见表 2。

表 2 地质累积指数与底泥污染程度评价

Tab. 2 Index geoaccumulation and

contamination grade assessment of heavy metal in sediments

级别	0	1	2	3	4	5	6
I <sub>geo</sub>	≤ 0	> 0 - ≤ 1	> 1 - ≤ 2	> 2 - ≤ 3	> 3 - ≤ 4	> 4 - ≤ 5	> 5
污染程度	清洁	轻度污染	偏中等污染	中度污染	偏重污染	重污染	严重污染

#### 1.5.2 潜在生态风险评价法

潜在生态风险指数法 (The Potential Ecological Risk Index, PERI) 是一种计算沉积物中重金属污染程度的方法, 该方法通过计算单项污染物潜在生态风险因子 E<sub>r</sub><sup>i</sup> 与综合潜在生态风险指数 RI 对水体沉积物中重金属的污染程度进行评价。该方法可反

映表层沉积物金属的浓度、金属污染物的种类数、金属的毒性水平、水体对金属污染的敏感性<sup>[20]</sup>。计算公式如下:

$$C_f^i = C_d^i / C_r^i, C_d = \sum_{i=1}^m C_f^i, E_f^i = T_f^i \times C_f^i, RI = \sum_{i=1}^m E_f^i$$

式中: C<sub>f</sub><sup>i</sup> 为金属 i 污染系数; C<sub>d</sub><sup>i</sup> 为金属 i 实测浓度; C<sub>r</sub><sup>i</sup> 为现代工业化以前沉积物中第 i 种重金属的最高背景值, 本文选择松花江水系沉积物中重金属元素背景值为参考 (表 4); C<sub>d</sub> 为多金属污染度; T<sub>f</sub><sup>i</sup> 为金属 i 的生物毒性系数, Cu、Zn、Ni、Pb、Cd、Cr、Hg 和 As 的生物毒性系数分别为 5、1、5、5、30、2、40、10<sup>[13, 21]</sup>; E<sub>r</sub><sup>i</sup> 为金属 i 的潜在生态风险因子; RI 为多金属潜在生态风险指数, E<sub>r</sub><sup>i</sup>、RI 等级划分标准见表 3。

表 3 重金属生态风险评价指数与分级标准

Tab. 3 Ecological risk index and classification of risk intensity

E <sub>r</sub> <sup>i</sup>	单项污染物生态风险等级	RI	综合潜在生态风险等级
E <sub>r</sub> <sup>i</sup> < 40			
40 ≤ E <sub>r</sub> <sup>i</sup> < 80	轻微生态风险	RI < 150	轻微生态风险
80 ≤ E <sub>r</sub> <sup>i</sup> < 160	中等生态风险	150 ≤ RI < 300	中等生态风险
160 ≤ E <sub>r</sub> <sup>i</sup> < 320	强生态风险	300 ≤ RI < 600	强生态风险
320 ≤ E <sub>r</sub> <sup>i</sup> < 640	很强生态风险	RI ≥ 600	极强生态风险
E <sub>r</sub> <sup>i</sup> ≥ 640	极强生态风险		

#### 1.5.3 沉积物质量基准法

沉积物质量基准法 (Sediment Quality Guidelines, SQGs) 可快速评价污染沉积物的生物毒性<sup>[12]</sup>, 该方法不仅可用于评价底泥中重金属的污染程度, 也可用于评价有机污染物的污染程度。目前影响最大的 SQGs 是 Long 等人<sup>[22]</sup> 由北美沉积物生物效应数据库 (The Biological Effects Database For Sediments, BEDS) 导出的效应范围低值 (Effects Range Low, ERL) 和效应范围中值 (Effects Range Median, ERM), 当污染物质量分数低于 ERL 时, 不利生物毒性效应很少发生, 当污染物质量分数高于 ERM, 不利生物毒性效应将频繁发生。此外, 纽约环境保护局 (NYSDEC)<sup>[9]</sup> 和新泽西环保局 (NJDEP)<sup>[10]</sup> 以 MacDonald 等人<sup>[23]</sup> 和 Persaud 等人<sup>[24]</sup> 所得出的最低效应阈值 (Lowest Effects Levels, LELs) 和严重效应阈值 (Severe Effects Levels, SELs) 为基础, 设立沉积物生态筛选标准。当污染物质量分数低于 LEL 时表示表明污染物对大部分底栖生物没有负效应, 高于 SEL 时则说明底泥沉积物已受到严重污染并且会影响底栖生物的健康。该方法不仅可以评价重金属的生态风险, 同样可以评价有机物污染的生态风险。ERL/ERM、LEL/SEL 相关数值见表 7。

## 2 结果与讨论

### 2.1 底泥重金属及 PAHs 质量分数

表 4 中列出了该排污河底泥中 8 种重金属和 16 种多环芳烃的质量分数水平、不同监测断面各污染物质量分数均值。从表 4 可以看出,底泥样品中重金属和多环芳烃质量分数变化较大,8 种重金属变异系数在 0.41~1.07 之间,其中 Cd、Cu 质量分数变化最为显著,最大值与最小值之间分别相差 69.67、55.30 倍,这表明不同点位重金属富集情况不同。有机污染物的变异系数在 0.33~2.86 之间, NAP、PHE、ANT 的质量分数变化最为明显,最大值与最小值相差倍数分别达到 2 784.23、1 166.32、1 105.10 倍。可能原因是这 3 种多环芳烃均为低环,易挥发和生物降解<sup>[25]</sup>,从而导致沉积物中质量分数差别较大。同余中盛等<sup>[26]</sup>、聂海峰等<sup>[27]</sup>对排污河底泥背景值调查结果比较,取样点重金属及多环

芳烃均不同程度超过背景值,8 种重金属平均值超标倍数在 0.30~87.47 之间,多环芳烃超标倍数在 0.04~228.45 之间,其中 Hg、Pb、Cu、As、NAP、ANT 等平均值已分别超背景值 87.47、10.21、6.18、5.90、115.55、228.45 倍,这表明多年的污水排放已导致上述物质在沉积物中大量累积。具有致癌效应的 BaP 在 35 个样品中检出率达 65.71%,平均值超背景值 1.05 倍。从污染物的沿程分布来看,8 种重金属在不同位置的富集情况不同,质量分数最高点主要集中在 B8、B7 和 B4,这可能与排污河两侧的化工企业排污历史相关。在 20 世纪 50 年代至 80 年代,该排污河是吉化染料厂和吉化电石厂两个企业的排污渠道,直至 20 世纪 80 年代初吉化公司才建成污水处理厂。但 20 世纪 80 年代后居民产生的生活污水仍旧直排入该河道,故其接纳污水来源广,污染成分复杂。

表 4 吉林市龙潭区排污河底泥中各污染物含量

Tab 4 Containment contents and distribution in different sampling section

污染物	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	平均值	变异系数	背景值 <sup>[26,27]</sup>
As	20.11	16.01	19.59	85.74	30.21	36.99	126.12	51.54	37.61	36.27	25.95	53.64	44.16	0.98	6.4
Cd	0.07	0.20	0.37	1.38	0.81	0.60	1.64	2.48	0.42	0.57	0.42	0.87	0.77	1.07	0.39
Cr	48.59	64.05	70.68	89.08	102.78	123.06	100.70	105.82	88.21	151.79	119.57	188.00	104.26	0.46	45
Cu	12.84	22.60	36.63	380.47	257.16	173.04	261.17	376.24	88.92	167.67	92.61	196.15	165.08	1.02	23
Pb	22.52	25.97	41.99	119.21	131.71	111.60	69.69	232.83	44.84	157.69	114.30	116.67	95.28	0.89	8.5
Hg	0.48	0.64	1.94	4.61	4.74	3.58	2.89	5.79	1.79	4.89	5.41	4.29	3.36	0.79	0.033
Ni	9.12	26.03	20.40	27.28	28.07	29.33	22.18	28.52	25.52	37.63	25.97	43.63	27.27	0.41	21
Zn	185.38	199.91	689.67	1113.81	393.76	658.36	938.75	688.48	579.21	663.39	677.39	671.17	623.27	0.74	119
NAP	0.86	0.25	—	157.12	108.05	47.21	25.00	214.84	1.86	7.32	6.50	15.48	54.78	1.92	0.47
ANY	—	—	—	—	—	—	—	0.23	—	0.36	—	1.52	0.70	1.01	0.07
ANA	—	0.10	—	1.45	0.73	2.67	0.32	0.69	—	1.33	—	2.03	1.26	0.79	0.08
FLU	0.40	—	—	1.43	0.78	3.61	0.45	0.89	—	1.74	—	1.75	1.51	0.79	0.10
PHE	0.70	0.30	0.23	3.03	1.20	6.76	39.80	2.76	20.58	4.44	5.90	2.54	7.09	2.86	0.08
ANT	0.20	0.16	0.18	4.65	2.57	3.46	20.25	67.80	5.70	13.44	13.80	5.52	11.47	2.07	0.05
FLT	0.81	0.36	0.50	3.22	1.19	3.17	1.88	2.19	2.41	3.74	—	3.78	2.02	0.84	0.72
PYR	0.55	0.25	0.35	2.29	0.85	2.06	1.43	1.32	1.86	2.43	6.59	3.07	1.89	1.00	0.63
BaA*	0.43	0.29	0.22	1.73	0.92	1.23	1.06	1.82	1.42	1.62	3.99	0.68	1.30	0.93	0.62
CHR*	0.44	0.27	0.26	1.86	0.83	1.16	1.15	0.94	1.31	1.78	4.94	1.03	1.34	1.07	0.52
BbF*	0.20	0.29	0.27	1.63	1.03	1.00	0.88	1.02	1.97	1.85	3.96	1.16	1.26	0.97	0.50
BkF*	0.12	0.22	0.25	1.21	0.37	—	0.74	0.40	1.20	0.77	2.07	0.42	0.70	0.95	0.73
BaP*	0.31	0.41	0.24	1.04	0.65	—	0.47	0.86	1.42	1.33	3.12	0.67	1.05	0.95	0.51
IPY*	0.19	0.19	0.15	0.20	0.46	—	0.30	0.56	—	0.96	2.16	0.63	0.65	0.96	0.21
DBA*	—	—	—	—	—	—	0.14	—	—	0.32	—	0.26	0.26	0.33	0.06
BPE	0.17	0.25	0.19	0.65	0.43	—	0.31	0.46	—	0.87	1.79	0.90	0.69	0.86	0.20
ΣPAHs	4.96	1.87	2.54	178.66	119.55	68.42	84.82	296.66	33.01	43.93	53.42	34.07	69.59	1.52	5.53

## 2.2 底泥中污染物的生态风险评价

### 2.2.1 地质累积指数法

为真实反映该排污河底泥重金属的积累及变化,选择余中盛等<sup>[24]</sup>测得的松花江水系沉积物地球化学背景值计算了 12 个监测断面的地质累积指数并分级,结果列于表 5。8 种重金属中, Hg 的  $I_{geo}$  平均值最高(5.82), 污染等级在 4~6 之间, 处于偏重-严重污染水平。其次为 Pb(2.64), 污染等级在 1~5 之间, B4~B6、B10~B12 两段处于偏重污染水平。As 的  $I_{geo}$  平均值为 1.96, 污染等级在 1~4 之间, 处于轻度-偏重污染水平。Cu 的  $I_{geo}$  平

均值为 1.72, 污染等级在 0~4 之间, 处于清洁-偏重污染水平, B4、B8 位置为偏重污染。Zn、Cr、Cd 的大部分点位处于轻度-中度污染水平。Ni 的  $I_{geo}$  平均值为 -0.31, 为清洁状态。8 种重金属  $I_{geo}$  的均值排序为  $Hg(5.82) > Pb(2.64) > As(1.96) > Cu(1.72) > Zn(1.63) > Cr(0.54) > Cd(-0.04) > Ni(-0.31)$  的特征。这表明, 该排污河底泥 Hg 的生态风险最大, Cd 和 Ni 的风险较小。Hg 的严重污染可能与排污河沉积物中有机物累积较多相关, Hg 易于富集在有机相以有机结合态沉降滞留于底泥中<sup>[28]</sup>。

表 5 排污河底泥中重金属污染地质累积指数及其分级

Tab. 5  $I_{geo}$  and rank of heavy metal pollution in sediment in sewage received river

采样点	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg	Ni	Zn
	$I_{geo}/R$	$I_{geo}/R$	$I_{geo}/R$	$I_{geo}/R$	$I_{geo}/R$	$I_{geo}/R$	$I_{geo}/R$	$I_{geo}/R$
B1	1.07/2	-3.16/0	-0.47/0	-1.43/0	0.82/1	3.31/4	-1.79/0	0.05/1
B2	0.74/1	-1.58/0	-0.08/0	-0.61/0	1.03/2	3.74/4	-0.28/0	0.16/1
B3	1.03/2	-0.67/0	0.07/1	0.09/1	1.72/2	5.34/6	-0.63/0	1.95/2
B4	3.16/4	1.24/2	0.40/1	3.46/4	3.22/4	6.59/6	-0.21/0	2.64/3
B5	1.65/2	0.46/1	0.61/1	2.90/3	3.37/4	6.63/6	-0.17/0	1.14/2
B6	1.95/2	0.04/1	0.87/1	2.33/3	3.13/4	6.22/6	-0.10/0	1.88/2
B7	3.72/4	1.49/2	0.58/1	2.92/3	2.45/3	5.91/6	-0.51/0	2.39/3
B8	2.42/3	2.09/3	0.65/1	3.45/4	4.19/5	6.91/6	-0.14/0	1.95/2
B9	1.97/2	-0.47/0	0.39/1	1.37/2	1.81/2	5.22/6	-0.30/0	1.70/2
B10	1.92/2	-0.03/0	1.17/2	2.28/3	3.63/4	6.67/6	0.26/1	1.89/2
B11	1.43/2	-0.48/0	0.82/1	1.42/2	3.16/4	6.82/6	-0.28/0	1.92/2
B12	2.48/3	0.57/1	1.48/2	2.51/3	3.19/4	6.48/6	0.47/1	1.91/2

### 2.2.2 潜在生态风险评价法

采用余中盛等<sup>[26]</sup>人测得的松花江水系沉积物地球化学背景值计算了排污河重金属的生态风险, 评价结果见表 6。8 种重金属  $E_i^r$  均值排序为  $Hg > As > Cd > Pb > Cu > Ni > Zn > Cr$ 。研究区域中 Hg 的  $E_i^r$  平均值最高(4 145.78), 范围在 575.76~7 016.06 之间, 均处于极强生态风险级别。其次为 As 和 Cd, 其  $E_i^r$  平均值分别为 70.28 和 62.96, 生态风险级别在轻微生态风险与很强生态风险之间。Pb 和 Cu 的  $E_i^r$  平均值分别为 58.29 和 37.42, 风险级别均在轻微生态风险-强生态风险之间。Ni、Zn、Cr 的  $E_i^r$  平均值分别为 6.42、5.22、4.64, 均属于轻微生态风险级别。从多种重金属综合生态风险(RI)角度来看, RI 值范围为 634.16~7 523.77, 均处于极强生态风险水平, 原因是 Hg 的单因子生态风险极高, 对 RI 值产生显著影响。从空间分布来看, 8 种重金属的潜在生态风险等级在监测断面

B1、B2 位置低于其他监测断面, B4、B7、B8、B10 则明显高于其他监测断面。

### 2.2.3 沉积物质量基准法

ERL/ERM、LEL/SEL 相关数值及 35 个底泥样品的 SQGs 评价结果列于表 7。除 Cd 以外, 其余重金属的 ERL 超标率均高于 60%, LEL 超标率均高于 80%, 可能因为重金属质量分数的地区差异导致部分背景值已高于 ERL 和 LEL, 且重金属质量分数实测值较高。生物毒性较大的 Hg 的 ERM 和 SEL 超标率已超过 60%, 说明由 Hg 引起的不利生物效应应频繁发生, 底泥已受到严重污染并且影响底栖生物的健康。16 种 PAHs 也不同程度超 ERL、LEL、ERM, ANY 和 ANA 超过 SEL, 这是因为与 ERM 相比, SEL 标准值过高, 两者最大相差已达 924 倍(BaA)。从空间分布来看, Hg、Zn 在 B3~B12 的平均质量分数均超过 ERM, 说明在上述断面由 Hg、Zn 引起的不利生物毒性效应应频繁发生。

表 6 排污河底泥中重金属潜在生态风险评价

Tab. 6 Potential ecological risk assessment results in sediments in sewage received river

采样点	$E_i^p$								RI
	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg	Ni	Zn	
B1	31.43	5.05	2.16	2.79	13.25	575.76	2.17	1.56	634.16
B2	25.02	15.01	2.85	4.91	15.28	778.79	6.20	1.68	849.73
B3	30.60	28.22	3.14	7.96	24.70	2354.55	4.86	5.80	2459.83
B4	133.96	105.95	3.96	82.71	70.12	5589.90	6.50	9.36	6002.46
B5	47.20	61.98	4.57	55.90	77.47	5747.68	6.68	3.31	6004.80
B6	57.80	46.23	5.47	37.62	65.65	4335.35	6.98	5.53	4560.63
B7	197.07	126.09	4.48	56.78	41.00	3503.03	5.28	7.89	3941.60
B8	80.53	191.14	4.70	81.79	136.96	7016.06	6.79	5.79	7523.77
B9	58.77	32.56	3.92	19.33	26.37	2169.70	6.08	4.87	2321.59
B10	56.68	44.10	6.75	36.45	92.76	5921.21	8.96	5.57	6172.48
B11	40.54	32.35	5.31	20.13	67.24	6557.58	6.18	5.69	6735.03
B12	83.81	66.84	8.36	42.64	68.63	5199.80	10.39	5.64	5486.10

As、Hg 在 B4-B12 的平均质量分数超过 SEL。  
NAP、ANA、FLU、PHE、ANT 在 B4-B12 的平均质量分数已超 ERM, BaP 在 B11 的平均质量分数超过

ERM。SQGs 分析结果表明,该排污河底泥的生态风险主要由 Hg 引起和多环芳烃引起,其不利生物毒性将频繁发生。

表 7 ERL/ERM、LEL/SEL 相关数值及 SQGs 评价

Tab. 7 ERL/ERM、LEL/SEL values and evaluation results according to sediment quality guidelines

污染物	标准值/(mg·kg <sup>-1</sup> )				超标率(%)				最大超标倍数			
	ERL	ERM	LEL	SEL	ERL	ERM	LEL	SEL	ERL	ERM	LEL	SEL
As	8.2	70	6	33	100.00	17.14	100.00	40.00	27.77	2.37	38.32	6.15
Cd	1.2	9.6	0.6	10	17.14	0.00	45.71	0.00	2.53	—	6.07	—
Cr	81	370	26	110	60.00	0.00	100.00	40.00	2.39	—	9.56	1.50
Cu	34	270	16	110	74.29	20.00	94.29	48.57	16.80	1.24	36.83	4.50
Pb	46.7	218	31	250	71.43	8.57	82.86	5.71	7.87	0.90	12.37	0.66
Hg	0.15	0.71	0.2	2	100.00	80.00	94.29	62.86	66.33	13.23	49.50	4.05
Ni	20.9	51.6	16	75	74.29	5.71	94.29	0.00	2.17	0.28	3.14	—
Zn	150	410	120	820	85.71	57.14	94.29	31.43	10.33	3.15	13.17	1.07
NAP	0.16	2.1	—	—	74.29	60.00	—	—	2592.75	196.62	—	—
ANY	0.044	0.64	0.044	0.64	8.57	2.86	8.57	2.86	33.77	1.39	33.77	1.39
ANA	0.016	0.5	0.016	0.5	42.86	34.29	42.86	34.29	255.88	7.22	255.88	7.22
FLU	0.019	0.54	0.19	160	42.86	31.43	42.86	0.00	269.53	8.52	26.05	—
PHE	0.24	1.5	0.56	950	85.71	54.29	71.43	0.00	487.83	77.21	208.50	—
ANT	0.0853	1.1	0.22	370	77.14	51.43	65.71	0.00	1412.48	108.61	547.05	—
FLT	0.6	5.1	0.75	1020	68.57	8.57	68.57	0.00	9.90	0.28	7.72	—
PYR	0.665	2.6	0.49	850	68.57	25.71	77.14	0.00	9.90	1.79	13.80	—
BaA*	0.261	1.6	0.32	1480	71.43	17.14	68.57	0.00	17.39	2.00	14.00	—
CHR*	0.384	2.8	0.34	460	68.57	11.43	68.57	0.00	15.33	1.24	17.44	—
BbF*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
BkF*	—	—	0.24	1340	—	—	54.29	0.00	—	—	10.42	—
BaP*	0.43	1.6	0.37	1440	45.71	11.43	51.43	0.00	8.79	1.63	10.38	—
IPY*	—	—	0.2	320	—	—	40.00	0.00	—	—	11.75	—
DBA*	0.0634	0.26	0.06	130	11.43	5.71	11.43	0.00	4.36	0.31	4.67	—
BPE	—	—	0.17	320	—	—	54.29	0.00	—	—	14.59	—
ΣPAHs	4.022	44.792	4.0	10000	80.00	42.86	80.00	0.00	110.46	9.01	111.08	—

## 2.2.4 评价结果比较

综合比较  $I_{geo}$ 、PERI、SQGs 三种方法,结果均显示 Hg 是主要的风险因子,一方面是因为 Hg 的背景值较低,另一方面是因为其生物毒性系数极高,是 Ni 的 8 倍, Cr 的 20 倍。

$I_{geo}$  和 PERI 中 8 种重金属的生态风险级别排序有所不同,这是因为  $E_f^i$  值不仅与背景值有关,还与重金属的种类和生物毒性效应有关,比如  $I_{geo}$  的排序结果中 Cd 处于第 7 位,而在  $E_f^i$  结果中 Cd 处于第 3 位。PERI 考虑了 Cd 的生物毒性效应,且其生物毒性系数较大,仅次于 Hg,致使其排序发生前移。

两套 SQGs(ERL/ERM 和 LEL/SEL)的结果均表明该排污河底泥中多环芳烃质量分数已超 ERL 和 LEL,多环芳烃已经开始对底泥产生不良影响,需要对其生态风险进行关注。

## 3 结论

(1) 该排污河底泥中 8 种重金属及 16 种多环芳烃均不同程度超松花江沉积物环境背景值。重金属污染物在监测断面 B4、B7、B8、B12 的质量分数较高,4 环及以上多环芳烃多集中于监测断面 B11。

(2)  $I_{geo}$  评价结果显示,不同重金属污染程度按  $I_{geo}$  从大到小排序为 Hg> Pb> As> Cu> Zn> Cr> Cd> Ni。PERI 结果显示,各重金属生态风险危害依次为 Hg> As> Cd> Pb> Cu> Ni> Zn> Cr,两种评价结果均显示 Hg 的生态风险最高,底泥呈现出以 Hg 为主的多种重金属复合污染特征。SQGs 评价结果显示,重金属及多环芳烃均不同程度超过 ERL、LEL,说明污染物已经开始对底泥产生不良影响。

(3) 该排污河底泥中 Hg 的风险水平远高于其它元素,是构成了潜在的生态危害的主要因素。在今后区域生态环境的治理与恢复工程中,应特别关注 Hg 对生态环境影响。

### 参考文献:

[1] 陈静生,洪松,范文宏,等. 各国水体沉积物重金属质量基准的差异及原因分析[J]. 环境化学, 2001, 20(5): 417-424. (CHEN Jing sheng, HONG Song, FAN Wen hong, et al. The difference and the cause analyses of the aquatic sediment quality guidelines for heavy metals[J]. Environment Chemistry, 2001, 20(5): 417-424. DOI: 10.3321/j.issn: 0254-6108. 2001.05.001. (in Chinese))

[2] 张伯镇,雷沛,潘延安,等. 重庆主城区次级河流表层沉积物重金属污染特征及风险评价[J]. 环境科学学报, 2015, 35(7): 2185-2192. (ZHANG Bo zhen, LEI Pei, PAN Yan an, et al. pollution and ecological risk assessment of heavy metals in the

surface sediments from the tributaries in the main urban districts, Chongqing City[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(7): 2185-2192. (in Chinese)) DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0935.

- [3] 陈文松,宁寻安,李萍,等. 底泥污染物的环境行为研究进展[J]. 水资源保护, 2007, 23(4): F5. (CHEN Wen song, NING Xun an, LI Ping, et al. Environmental behavior of pollutants in sediments[J]. Water Resources Protection, 2007, 23(4): F5. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2007.04.001.
- [4] 王健康,高博,周怀东,等. 三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1693-1699. (WANG Jiar kang, GAO Bo, ZHOU Hua dong, et al. Heavy metals pollution and its potential ecological risk of the sediments in three gorges reservoir during its impounding period[J]. Environmental Science, 2012, 33(5): 1693-1699. (in Chinese)) DOI: 10.13227/j.hjx.2012.05.047.
- [5] Hu C, Deng Z M, Xie Y H, et al. The Risk Assessment of Sediment Heavy Metal Pollution in the East Dongting Lake Wetland[J]. Journal of Chemistry, 2015, 2015(15): F8.
- [6] Liang T, Jia Z B, Lan K, et al. Study on Heavy Metal Contamination and Potential Ecological Risk in Hong Kong Rivers[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1997, 33(4): 485-492.
- [7] 吴光红,朱兆洲,刘二保,等. 天津城市排污河道沉积物中重金属含量及分布特征[J]. 环境科学, 2008, 29(2): 2413-2420. (WU Guang hong, ZHU Zhao zhou, LIU Er bao, et al. Concentrations and distribution of heavy metals in urban sewage discharge channel of Tianjin[J]. Environmental Science, 2008, 29(2): 2413-2420. (in Chinese)) DOI: 10.13227/j.hjx.2008.02.021.
- [8] 朱程,马陶武,周科,等. 湘西河流表层沉积物重金属污染特征及其潜在生态毒性风险[J]. 生态学报, 2010, 30(15): 3982-3993. (ZHU Cheng, MA Tao wu, ZHOU Ke, et al. Pollution characteristics and potential ecotoxicity risk of heavy metals in surface river sediments of western Hunan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(15): 3982-3993. (in Chinese))
- [9] New York State Department of Environment Conservation, Division of Fish, Wildlife and Marine Resources, Bureau of Habitat. Screening and Assessment of Contaminated Sediment[EB/OL]. [2014-06-24]. [http://www.dec.ny.gov/docs/fish\\_marine\\_pdf/screenassessedfn.pdf](http://www.dec.ny.gov/docs/fish_marine_pdf/screenassessedfn.pdf)
- [10] The New Jersey Department of Environmental Protection, Site Remediation Program(SRP), Environmental Toxicology and Risk Assessment(ETRA)Unit. Ecological Screening Criteria(ESC)[EB/OL]. [2009-03-10]. <http://www.nj.gov/dep/srp/guidance/ecoscreening/>
- [11] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geojournal, 1969, 2(3): 108-118.
- [12] 范文宏,张博,陈静生,等. 锦州湾沉积物中重金属污染的潜在生物毒性风险评价[J]. 环境科学学报, 2006, 26(6): 1000-1005. (FAN Wen hong, ZHANG Bo, CHEN Jing sheng, et al. Pollution and potential biological toxicity assessment using heavy metals from surface sediments of Jinzhou Bay[J]. Acta

- Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(6): 1000-1005. (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:0253-2468.2006.06.021
- [13] H kanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A Sediment ecological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [14] 徐争启, 倪师军, 张成江, 等. 应用污染负荷指数法评价攀枝花地区金沙江水系沉积物中的重金属[J]. 四川环境, 2004, 23(3): 64-67. (XU Zheng qi, NI Shi jun, ZHANG Cheng jiang, et al. Assessment on heavy metals in the sediments of Jinsha River in Panzhihua area by pollution load index[J]. Sichuan Environment, 2004, 23(3): 64-67. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1001-3644.2004.03.019.
- [15] Zhu H N, Yuan X Z, Zeng G M, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Xiawan Port based on modified potential ecological risk index[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(6): 1470-1477. DOI: 10.1016/S1003-6326(11)61343-5.
- [16] 贾振邦, 汪安, 吴平, 等. 用脸谱图对太子河本溪市段河沉积物中重金属污染进行评价的研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 1993, 29(6): 736-744. (JIA Zhen bang, WANG An, WU Ping, et al. Use the faces graph to evaluate heavy metal pollution in sediment at Benxi section of Taizi River[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1993, 29(6): 736-744. DOI: 10.13209/j.0479-8023.1993.097 (in Chinese))
- [17] 贾振邦, 于澎涛. 应用回归过量分析法评价太子河沉积物中重金属污染的研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 1995, 31(4): 451-459. (JIA Zhen bang, YU Peng tao. Using excess after regression analysis(ERA) method to evaluate heavy metal pollution in the Taizi River of Benxi City[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1995, 31(4): 451-459. (in Chinese) DOI: 10.13209/j.0479-8023.1995.059
- [18] 贾振邦, 霍文毅, 赵智杰, 等. 应用次生相富集系数评价柴河沉积物重金属污染[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2000, 36(6): 808-812. (JIA Zhen bang, HUO Wen yi, ZHAO Zhi jie, et al. Secondary phase enrichment factor for evaluation of heavy metal pollution of sediment in the Chai River[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2000, 36(6): 808-812. (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:0479-8023.2000.06.012.
- [19] 胡彦兵, 赵海峰, 许庆, 等. 沂河小埠东橡胶坝蓄水段表层沉积物中重金属的分布及生态风险评价[J]. 环境科学研究, 2012, 25(3): 304-310. (HU Yan bing, ZHAO Hai feng, XU Qing, et al. distribution and ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediment of Xiaobudong Rubber Dam in the Yihe River[J]. Research of environment Sciences, 2012, 25(3): 304-310. (in Chinese) DOI: 10.13198/j.res.2012.03.63.huyb.013.
- [20] 周家义, 陈静生. 中国水环境重金属研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992: 168-169. (ZHOU Jia yi, CHEN Jing sheng. Research on heavy metals in water ecological environment[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1992: 168-169. (in Chinese))
- [21] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112-115. (XU Zheng qi, NI Shi jun, TUO Xian guo, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(2): 112-115. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1003-6504.2008.02.030.
- [22] 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.
- [23] Macdonald D D, Ingersoll C G, Berger T A. Development and evaluation of consensus based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems[J]. Archives of Environmental Contamination & Toxicology, 2000, 39(1): 20-31.
- [24] Persaud D, Jagumagi R, Hayton A. Guidelines for the protection and management of aquatic sediment quality in Ontario[J]. International & Comparative Law Quarterly, 1969(2): 494-495.
- [25] Mackay D, Shiu W Y, Ma K C, et al. Polynuclear Aromatic Hydrocarbons(PAHs) and Related Aromatic Hydrocarbons [M], Mackay D, Shiu W Y, Ma K C, et al. Handbook of Physical-Chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemicals. Second Edition. America: CRC Press, 2006, 620-900.
- [26] 余中盛, 王晓君, 刘玉青, 等. 松花江水系沉积物中重金属元素背景值[M]//中国科学院. 松花江流域环境问题研究. 北京: 科学出版社, 1992: 67-74. YU Zhong-sheng, WANG Xiao-jun, LIU Yu-qing, et al. Research on background value of Songhua River[M]//Chinese Academy of Science. Environmental Problems of Songhua River. Beijing: Science Press, 1992: 67-74.
- [27] 聂海峰, 李括, 彭敏, 等. 松花江底积物中多环芳烃生态风险评价[J]. 中国地质, 2011, 38(4): 1102-1110. (NIE Hai feng, LI Kuo, PENG Min, et al. A discussion on ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in some bottom sediments of the Songhua River[J]. Geology in China, 2011, 38(4): 1102-1110. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-3657.2011.04.028
- [28] Chen, C W, Kao, C M, Chen, C F, et al. Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan[J]. Chemosphere, 2007, 66(8): 1431-1440. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2006.09.030.