

引江济淮输水通道派河沉积物重金属形态分布特征及生态风险评价

刘刚¹, 范博博², 王育来³, 杨长明² (1. 巢湖管理局环境保护监测站, 安徽巢湖 238000; 2. 同济大学长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092; 3. 安徽工业大学能源与环境学院, 安徽马鞍山 243002)

摘要 利用电热板消解和连续提取法(BCR)对“引江济淮”重要输水通道派河 11 个表层沉积物样品中 Cr、Cd、As、Ni、Cu 和 Pb 的总量和形态进行调查, 并根据地累积指数法和次生相与原生相比值法(RSP)对派河沉积物中 6 种重金属的污染程度及潜在生态风险进行评价。结果表明: 派河河段大部分采样点沉积物 Cd 和 Cu 浓度值均超出背景值, I_{geo} 值 ≥ 1 , 污染风险强; 仅派河中间河段 Cr 的浓度值超出背景值, 但 I_{geo} 值 = 1, 污染风险低; 派河沉积物中 As、Ni 和 Pb 含量均低于背景值, I_{geo} 值 = 0, 无污染风险。巢湖口沉积物 Cr、Cu、Ni、As 4 种元素的次生相的比例最高, 中间河段次之, 上游河段及下游河段最低, 存在二次释放的生态风险; 大部分采样点沉积物 Cd 的 RSP 均远大于 3, 潜在生态风险极高; Pb 元素则在上中游河段存在一定的生态风险。

关键词 调水工程; 沉积物; 地累积指数; 连续提取法; 潜在生态风险

中图分类号 X 834 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2019)04-0090-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.04.024



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Heavy Metal Speciation Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment in Sediments from Pai River Leading Water from Yangtze to Huaihe River

LIU Gang¹, FAN Bo-bo², WANG Yu-lai³ et al (1. Environmental Protection Monitoring Station of Chaohu Lake Administration, Chaohu, Anhui 238000; 2. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092; 3. School of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243002)

Abstract The total amount and fractions of Cr, Cd, As, Ni, Cu and Pb in 11 surface sediments from Pai River as an important water conveyance passage Leading Water from Yangtze to Huaihe River in Hefei, were investigated by using the digestion and sequential extraction procedure. The pollution degrees and potential ecological risks of 6 heavy metals in the sediments were calculated according to the geo-accumulation indexes and the ratios secondary phase and primary phase of elements. The results showed that the concentrations of Cd and Cu in the most sampling sites from the Pai River were higher than their background values, and the pollution risk was intense ($I_{geo} \geq 1$); The concentration of Cr in the middle of the river exceeded the background value, but its I_{geo} was 1, which suggested it was of low pollution risk; and As, Ni and Pb contents in the river sediments were lower than the background values ($I_{geo} = 0$), and no pollution risk was found for them. The secondary phase's mass fraction of Cr, Cu, Ni and As were the highest at entrance of Chaohu Lake, lowest in the upper and the lower, next was the middle of river, which exist the ecological risk of releasing from sediment into water. The RSP of Cd in the sediments was far greater than 3, and its potential ecological risk was very high; there was potential ecological risk in the upper and middle river for Pb element.

Key words Water diversion project; Sediment; Geo-accumulation index; Sequential extraction procedure; Potential ecological risk

河流湖泊沉积物是环境污染物的自然沉降物, 易受环境污染的影响^[1], 所以水体沉积物的污染程度可以作为环境污染的指示^[1-2]。进入到环境中的重金属由于难以被微生物利用降解, 水体中的重金属通过迁移、吸附、络合及沉降等方式进入沉积物中, 导致水体沉积物受到重金属污染^[3]。由于其具有毒性、持久性和易被生物富集的特点, 使得水体沉积物重金属污染问题受到越来越多的重视^[4]。

以往经常将重金属总量作为评判重金属污染程度和生态风险的指标, 随着对重金属污染机理的深入探索, 认识到重金属的生物有效性和迁移特征受到重金属形态的影响^[5], 仅仅依靠重金属总量势必夸大重金属污染程度和生态风险的指标。同时, 不同重金属形态对环境的影响和作用机制也不尽相同^[6]。因此, 除了将沉积物重金属总量作为判断重金属污染程度的重要指标之外, 势必需要考虑重金属形态特征, 进而科学、全面地评价沉积物重金属的潜在生态风险。重金属形态分级常用的方法是 BCR 法(即 3 步提取法)^[5], 通过 BCR 法分级得到的重金属形态包括: 可交换态和弱酸

溶解态、Fe-Mn 氧化物结合态、有机物及硫化物结合态和残渣态^[7]。其中前 3 种形态为有效态, 可反映沉积物中重金属的污染危害程度^[8]。当前, 国内外评价沉积物中重金属污染与风险评价的常用方法有基于重金属总量的, 如潜在生态风险指数法和地累积指数法等^[9]; 也有基于重金属形态的评价方法, 如次生相与原生相分布比值法(RSP)和风险评估指数法(RAC)等^[10]。可综合利用沉积物重金属的总量和形态特征数据综合分析沉积物中重金属的污染和潜在生态风险^[11]。

“引江济淮”作为一项连通长江、巢湖和淮河流域的大型跨流域调水工程, 不仅为工业和城市供水, 也可进行农业灌溉补水。派河是“引江济淮”工程中“江淮沟通”唯一通道。该研究以“江淮沟通”水道——派河为研究对象, 采集派河表层沉积物, 比较分析不同河段主要重金属(Cu、Zn、Cd、Ni、Cr、As)总量及其形态特征, 以为“引江济淮”工程水环境安全和潜在生态风险评估提供基础数据, 也为大型水利工程的生态风险评估提供新思路。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况 派河(117°9'21.27"~117°17'39.20"E, 31°39'21.74"~31°44'29.89"N)流域位于安徽省合肥市肥西县境内, 是巢湖的八大入湖河流之一。当“江淮沟通”工程实施

基金项目 国家水污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07603-003, 2014ZX07303-003)。

作者简介 刘刚(1971—), 男, 安徽巢湖人, 高级工程师, 从事环境监测与管理工作。

收稿日期 2018-10-07

后,派河水流方向改变,成为“江淮沟通”工程的唯一通道(图1)。派河是合肥市肥西县主要的收纳水体,水质较差,其污染程度会直接影响“引江济淮”工程水生态安全。派河流域人口密集区主要集中在研究河段的上中游,包括工、农业;而人口稀少区主要在研究河段的下游,主要为村庄和农田。分析派河沉积物中的重金属总量和赋存形态可全面了解派河重金属的污染程度和对生态环境潜在的影响,据此综合评价“江淮沟通”工程水道沉积物重金属的污染状况。

1.2 样品采集及处理 派河表层沉积物(0~25 cm)于2017

年5月采集于派河干流(自岳小河入派河口至派河入巢湖河口)(图1)。共选择11个采样点,其中P₀₁~P₀₃位于派河上游,以林地和和农业种植为主;P₀₄~P₀₈位于派河中游,以城镇化区域为主;P₀₉~P₁₁位于派河下游,靠近入湖河口,以湿地和农田为主。采用抓斗式采泥器,每个采样站点采集3个平行样,现场混合均匀,去除较大石头、树枝等,并装袋密封冷藏于保温箱中带回实验室进行后续分析。沉积物样品经冷冻干燥过筛(0.107 mm),放阴凉处保存备用。



图1 派河研究区域及采样点分布

Fig.1 Study area and distribution of sampling sites from Pai River

1.3 样品的预处理与测定 沉积物样品中的Cu、Zn、Cd、Ni、Cr、As 6种重金属的总量和赋存形态、预处理和测定方法如下。

1.3.1 重金属总量。采用电热板消解的方法:准确称取0.5 g 烘干后的沉积物样品于30 mL 体积的聚四氟乙烯消解罐中。加入5 mL HNO₃后将消解罐置于电热板上以150 °C加热至液体近干。取下消解罐再加入5 mL HNO₃、5 mL HF、3 mL HClO₄,盖上盖子保持150 °C加热至固体消失。打开盖子继续加热赶酸,直至液体变至黏稠并近干。冷却后用2% HNO₃将消解样定容至25 mL。然后将溶液转移到50 mL 聚乙烯瓶内,放入冰箱(4 °C)冷藏保存以备分析。

1.3.2 重金属形态。采用BCR 3步连续提取法进行预处理^[7],第I步可交换态及碳酸盐结合态(酸提取态):准确称取烘干沉积物样品约0.8 g(记数值为W₁)置入50 mL 离心管中,加入0.11 mol/L 醋酸溶液32 mL,以180~200 r/min 的速率室温下振荡16 h。然后以6 000 r/min 的速率离心10 min,将上清液转移入聚乙烯小瓶中,加入1 mL 浓硝酸4 °C 冷藏保存。在装有残渣的离心管中加入15 mL 去离子水,手摇动使残渣再悬浮,振荡器振荡15 min,6 000 r/min 离心10 min,弃去上清液。

第II步Fe、Mn 氧化物结合态(可还原态):取32 mL 0.5 mol/L 盐酸羟氨溶液加入到步骤I 提取后的离心管中,手摇动使残渣再悬浮。以下操作与步骤I 相同。

第III步有机物及硫化物结合态(可氧化态):取8 mL 300 mg/g 过氧化氢溶液加入步骤II 提取后的离心管中,间歇

振荡,室温消解1 h。再在(85±2) °C 水浴下消解1 h,前30 min 用手间歇振荡。继续加热使溶液减为2 mL 左右,再加入8 mL 该浓度的过氧化氢溶液,依上述步骤将体积缩减为1 mL 左右,冷却后加入32 mL 1.0 mol/L 醋酸铵溶液。以下操作与步骤I 相同。

第IV步残渣态:将离心管中剩余的残渣以60 °C 烘至恒重,准确称取0.5 g 烘干后的沉积物样品于聚四氟乙烯消解罐中,以下操作与重金属总量处理方法相同。

每个样品重金属总量和形态分析均设置3个平行,预处理得到的溶液采用ICP-MS 方法测定各种重金属的浓度。

1.3.3 不同采样点重金属生态风险评价。通过ICP-MS 方法分析测定得到重金属总量和形态含量数据,采用生态风险评价方法评价其污染特征和潜在风险。该研究从沉积物重金属总量和形态角度出发,分别采用的方法是地积累指数法(I_{geo})和次生相与原生相分布比值法(RSP)。

1.3.3.1 地积累指数(I_{geo})。Muller^[12]提出的地质累积指数(I_{geo})被广泛用于讨论沉积物中外源重金属的污染程度,通过分析重金属元素总含量与元素地球化学背景值之间的关系,并通过以下公式计算:

$$I_{geo} = \log_2(C_i/1.5B_i) \quad (1)$$

式中: C_i 为沉积物样品中某种重金属浓度, i 指重金属类型,单位为mg/kg; B_i 为元素地球化学背景值, i 指重金属类型;Pb、Cd、Cu、Ni、As、Cr 的背景值参考安徽土壤背景值,分别为32.0、0.026、12.1、42.7、11.2 和40.9 mg/kg;1.5 为背景值的变异系数,常用 k 表示^[12]。

通过上述公式计算得到各采样点重金属的污染等级,地积累指数法等级划分如表1所示。

1.3.3.2 次生相与原生相分布比值法(RSP)。此方法是基于重金属形态的风险评价法,其可对派河沉积物中重金属进行

表1 地积累指数等级^[13-14]

Table 1 The grades of geo-accumulation index

I_{geo}	污染等级 Pollution level	污染程度 Pollution degree
$I_{geo} \leq 0$	0级	无污染
$0 < I_{geo} \leq 1$	1级	无污染到中污染
$1 < I_{geo} \leq 2$	2级	中污染
$2 < I_{geo} \leq 3$	3级	中污染到强污染
$3 < I_{geo} \leq 4$	4级	强污染
$4 < I_{geo} \leq 5$	5级	强污染到极强污染
$I_{geo} > 5$	6级	极强污染

潜在生态风险评价,计算方式如下:

$$RSP = M_{sec} / M_{prim} \quad (2)$$

式中,RSP为污染程度; M_{sec} 为沉积物中次生相的重金属含量; M_{prim} 为沉积物中原生相的重金属含量。

另外沉积物次生相以前3步提取的总量计算,即I+II+III;原生相以残渣态含量来计算,即IV。表2中为RSP的等级划分情况^[15]。

2 结果与分析

2.1 派河表层沉积物重金属总量分布特征 派河中游(P_{05} 、 P_{06} 、 P_{07})Cr、Cd、Ni、Cu的总量均高于其他点位的含量(图2)。派河中游Cr的平均含量值可达80~110 mg/kg,是其他采样点位的1.5~5.0倍;Cd的平均含量值可达0.3~0.7 mg/kg,明显高于其他采样点;Ni和Cu的平均浓度值分别可达40~50 mg/kg和40~55 mg/kg。Pb、Cd、Cu、Ni、As和Cr的安徽

省土壤背景值分别为32.0、0.026、12.1、42.7、11.2和40.9 mg/kg。除了 P_{04} 、 P_{10} 和 P_{11} 采样点的Cd总量低于背景值; P_{01} 、 P_{02} 、 P_{09} 、 P_{10} 和 P_{11} 采样点的Cr总量低于背景值之外,其余点位Cd、Cr元素的含量值均超出或接近背景值;各点位As和Cu元素浓度值均高于背景值,Cd、Cr、Cu3种重金属在中下游表现出显著或较明显的累积效应^[14]。Ni元素除了 P_{05} 、 P_{06} 和 P_{07} 点位表现出一定的累积效应之外,其余各点位均表现正常。

表2 次生相与原生相分布比值法等级划分

Table 2 The classification by ratios of secondary phase and primary phase

序号 No.	RSP	污染程度 Pollution degree
1	≤ 1	无污染
2	$1 < RSP \leq 2$	轻度污染
3	$2 < RSP \leq 3$	中度污染
4	> 3	重度污染

Cu、Cr、Ni、Pb5种元素在不同点位离散程度较大以及周边有人类活动区域分布,说明派河沉积物中这5种金属元素可能已经受到人类生产生活的影响或干扰,即人类活动和工业废水的排放是该区域中部分河段重金属含量较高的原因。而11个采样点的As和Pb元素含量均低于背景值,且采样区域内As元素浓度离散程度小,说明人类活动及排放的废水中As元素含量低。目前As和Pb在派河中并没有明显的累积效应。

2.2 派河表层沉积物重金属形态分布特征 派河表层沉积物重金属形态(包括残渣态、可氧化态、可还原态和酸提取态)分布特征如图3所示。由图3可知,Cd元素除了 P_{09} 点位仅存在17.8%质量百分比的残渣态、 P_{04} 和 P_{11} 未检出之外,其

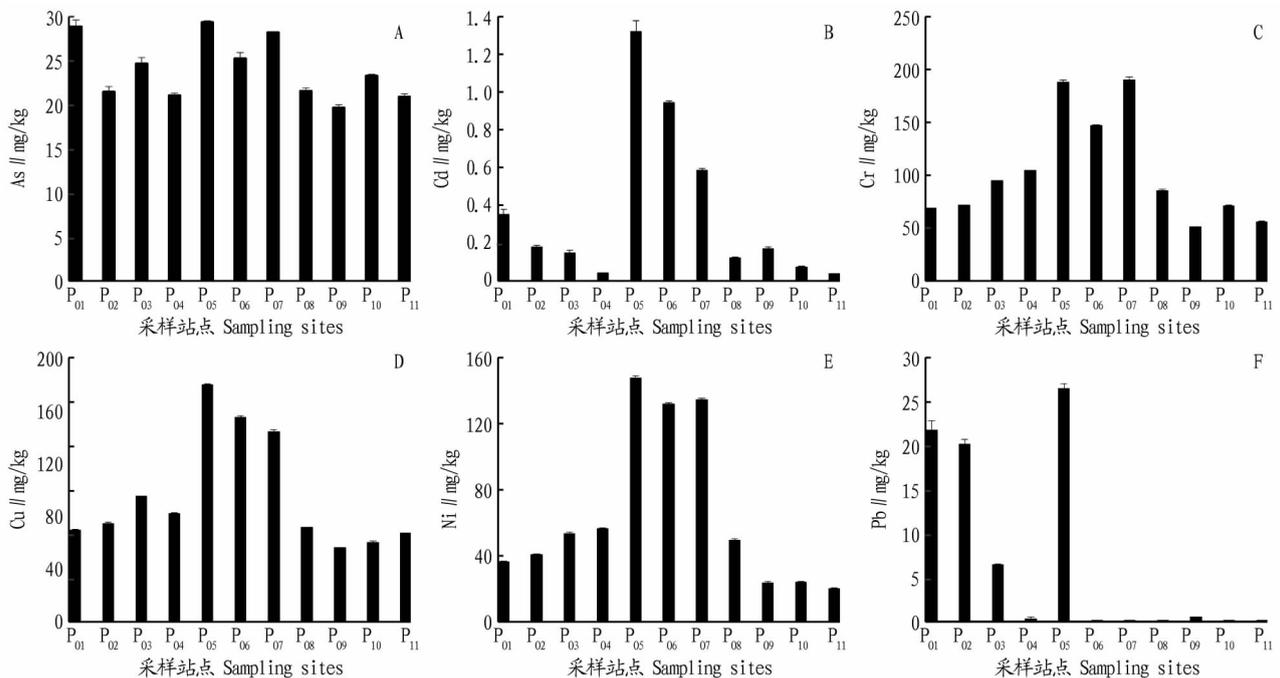


图2 派河各采样点沉积物中重金属总量

Fig.2 Total amounts of heavy metals in sediments of different sampling sites from Pai River

余各点均是可提取态;Cr、As、Ni、Cu 4 种元素的可提取态在 P₁₁ 采样点存在明显异常,所占质量百分比均达到 87.4%~100%,其余采样点从上游到中游再到下游呈现先增后减的趋势,有效态质量分数最高的位置均在 P₀₆ 采样点的位置,4

种元素有效态所占质量百分数分别达到 35.3%~98.4%、19%~97.6%、46.6%~100%和 60.0%~87.4%;Pb 元素在 P₀₄、P₀₆、P₀₇、P₀₈、P₁₀、P₁₁ 点位未检出之外,其余点位有效态所占质量百分比可达到 60%~100%。

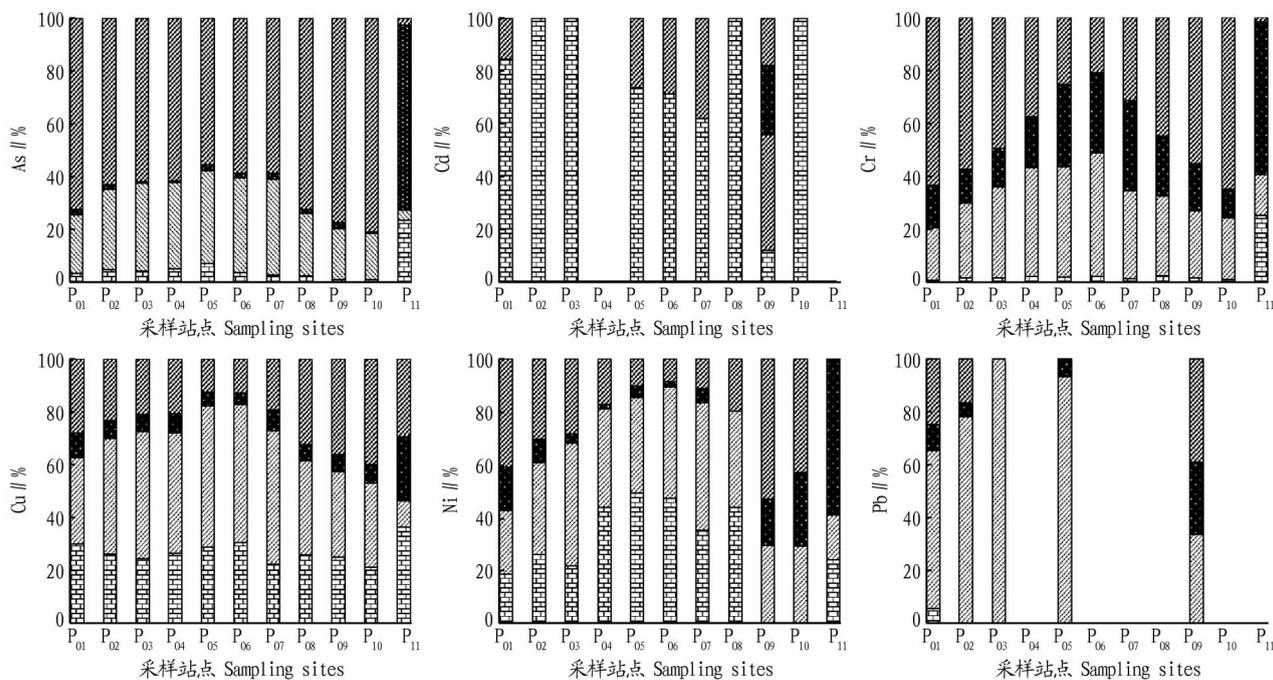


图3 派河各采样点沉积物中重金属形态分布

Fig.3 Distribution of heavy metals fractions in sediments of different sampling sites from Pai River

由此可见采样点不同,重金属总量不同,其有效态和稳定态所占比例也有所差异,但是有效态和总量变化趋势相同,都与采样点位有关。有效态含量较多的采样点均集中在上中游位置,这可能是受到人类活动及工业生产的影响,其沉积物中的重金属对环境的毒性较大,受到 pH 条件的影响有二次释放的可能性,并通过迁移、食物链富集影响生物及人体健康^[16-17]。

2.3 派河表层沉积物重金属污染程度评价

2.3.1 从重金属总量角度评价污染程度。采用地积累指数法计算各采样点重金属元素的污染程度(表3)。派河表层沉积物中重金属污染程度大小依次为 Cd、Cu、Cr、As、Ni、Pb。其中,Cd 为主要污染物,在中间河段达到“强污染到极强污染”的污染程度,而在采样的上游河段达到“无污染到中污染”或者“中污染到强污染”的污染程度;Cu 除了在进入巢湖附近河段没有污染之外,其余各点达到“无污染到中污染”或者“中污染”的程度;Cr 则是在中间河段,即 P₀₅、P₀₆、P₀₇ 的位置处有“中污染”的风险,其余各采样点均无风险;而依据地积累指数法 As、Ni、Pb 3 种元素均无污染风险。该研究中采用地积累指数得到的污染级别与各重金属的含量呈现很好的对应关系,可说明 6 种重金属的污染状况^[18]。然而,由于不同形态的重金属的毒性和影响不同,该研究进一步采用 RSP 法进一步分析派河沉积物重金属潜在生态风险^[19-20]。

2.3.2 从重金属形态角度评价潜在风险。采用次生相与原生相分布比值(RSP)对派河 11 个样点表层沉积物中重金属

表3 派河沉积物重金属的地累积指数级别

Tab.3 The geo-accumulation index of heavy metals in sediments from Pai River

采样点 Sampling sites	Cr	Cd	As	Cu	Ni	Pb
P ₀₁	0	3	0	1	0	0
P ₀₂	0	1	0	1	0	0
P ₀₃	0	1	0	1	0	0
P ₀₄	0	0	0	1	0	0
P ₀₅	1	5	0	2	0	0
P ₀₆	1	4	0	2	0	0
P ₀₇	1	3	0	2	0	0
P ₀₈	0	1	0	1	0	0
P ₀₉	0	1	0	0	0	0
P ₁₀	0	0	0	0	0	0
P ₁₁	0	0	0	1	0	0

的潜在生态风险进行评价(表4)。RSP 与重金属各有效态质量分数呈正相关,即 RSP 值呈随重金属有效态含量先增加后降低的趋势,除了 P₁₁ 点位的异常情况。如 Cr、As、Cu、Ni 的次生相与原生相的比值均呈现先增加后降低的现象,Cr 对派河所研究河段的潜在生态风险的趋势是“无污染—轻度污染—中度污染—重度污染—中度污染—轻度污染—无污染”,其他 3 种元素的潜在生态风险存在同样的变化趋势。而 Cd 和 Pb 的潜在生态风险相比于其他 4 种元素更强,除了个别采样点的沉积物未检测出 Cd 和 Pb 元素之外,大部分点位沉积物中的重金属的 RSP 值均较大或者为无穷大,可以更

加直观地反映重金属形态的含量特征,以此分析得出派河采样点最下游点中间重金属污染的潜在风险最强,中间河段次之,上游和下游潜在生态风险最低。

表4 派河沉积物重金属次生相与原生相比值

Table 4 The ratios of secondary phase and primary phase of heavy metals in sediments from Pai River

采样点 Sampling sites	Cr	Cd	As	Cu	Ni	Pb
P ₀₁	0.58	*	0.38	2.57	1.42	3.07
P ₀₂	0.75	*	0.59	3.28	2.28	5.10
P ₀₃	1.02	*	0.61	3.71	2.50	*
P ₀₄	1.67	—	0.63	3.80	4.80	—
P ₀₅	2.98	*	0.80	6.90	8.51	*
P ₀₆	3.78	*	0.70	6.72	10.61	—
P ₀₇	2.18	*	0.70	4.21	7.95	—
P ₀₈	1.24	*	0.38	2.08	3.99	—
P ₀₉	0.81	4.62	0.29	1.77	0.87	1.57
P ₁₀	0.55	—	0.24	1.49	1.32	—
P ₁₁	62.87	*	40.76	2.39	*	—

注:“—”代表次生相与原生相数值均为0,“*”代表原生相为0,而次生相非0

Note:— stands for ratios of secondary phase and primary phase were both 0; * stands for ratio of primary phase was 0, but ratio of secondary phase wasn't 0

3 结论

以“引江济淮”工程中“江淮沟通”唯一水道——派河为研究对象,从沉积物重金属总量和形态层面综合分析其污染程度,科学评价了沉积物重金属的潜在生态风险为“引江济淮”工程水生态安全和潜在生态风险科学评价提供参考。

(1) 基于沉积物重金属总量分析和地积累指数评价法,派河河段除了下游 P₀₉、P₁₀、P₁₁ 采样点沉积物中 Cd 和 Cu 以及 P₀₄ 点的 Cd 浓度低于背景值之外,其余各点的 Cd 和 Cu 浓度值均超出背景值(I_{geo} 值 ≥ 1),对环境存在不同程度的污染风险;而 Cr 与 Cd、Cu 的相同点在于仅在派河中间河段的浓度值超出背景值,但 Cr 的污染程度较低(I_{geo} 值 = 1);派河沉积物中虽然含有 As、Ni 和 Pb 元素,但是其含量均低于背景值(I_{geo} 值 = 0),无污染风险。

(2) 基于重金属形态特征和次生相与原生相的比值(RSP)法分析可知,派河沉积物中中游河段 Cr、Cu、Ni、As 4 种元素的次生相(有效态)值含量明显高于上游和下游(下游 P₁₁ 点除外),中间河段次之,上游河段及下游河段最少,但除 As 及 Cr 上下游的 RSP < 1 之外,其余河段及元素均有不同程度潜在生态风险;除了 P₀₄ 和 P₁₀ 点位未检测出 Cd 之外,其

余各点 Cd 的 RSP 均远大于 3,潜在生态风险极高;Pb 元素则在上中游河段存在一定的生态风险。

参考文献

- ADAMS W J, KIMERLE R A, BARNETT J W, Jr. Sediment quality and aquatic life assessment [J]. Environmental science and technology, 1992, 26 (10): 1864-1875.
- 胡宁静, 石学法, 黄朋, 等. 渤海辽东湾表层沉积物中金属元素分布特征 [J]. 中国环境科学, 2010, 30(3): 380-388.
- 栢建坤, 李潮流, 康世昌, 等. 雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价 [J]. 环境科学, 2014, 35(9): 3346-3351.
- PARWEEN M, RAMANATHAN A L, RAJU N J. Waste water management and water quality of river Yamuna in the megacity of Delhi [J]. International journal of environmental science & technology, 2017, 14(1): 2109-2124.
- XIAO L, GUAN D S, PEART M R, et al. The respective effects of soil heavy metal fractions by sequential extraction procedure and soil properties on the accumulation of heavy metals in rice grains and brassicas [J]. Environmental science & pollution research, 2017, 24(3): 2558-2571.
- SHIKAZONO N, TATEWAKI K, MOHIUDDIN K M, et al. Sources, spatial variation, and speciation of heavy metals in sediment of the Tamagawa River in Central Japan [J]. Environmental geochemistry & health, 2012, 34 (1): 13-26.
- 杨长明, 张芬, 徐琛. 巢湖市环城河沉积物重金属形态及垂直分布特征 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(9): 1404-1410.
- 黄莹, 李永霞, 高甫威, 等. 小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价 [J]. 环境科学, 2015, 36(6): 2046-2053.
- 陈明, 蔡青云, 徐慧, 等. 水体沉积物重金属污染风险评价研究进展 [J]. 生态环境学报, 2015, 24(6): 1069-1074.
- 毕斌, 卢少勇, 于亚军, 等. 湖泊沉积物重金属赋存形态研究进展 [J]. 科技导报, 2016, 34(18): 162-169.
- 李飞鹏, 陈玲, 张海平, 等. 巢湖市河流表层沉积物重金属污染和风险评价 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(12): 1852-1856.
- MULLER G. The heavy metal pollution in the sediment of the Neckar river and its tributaries: A review [J]. Chem. Zeit., 1981, 105: 157-164.
- SULIEMAN M M, ELFAKI J T, ADAM M M, et al. Assessment of heavy metals contamination in the Nile River water and adjacent sediments: A case study from Khartoum City and Nile River State, Sudan [J]. Eurasian journal of soil science, 2017, 6(3): 285-294.
- 陈春霄, 姜霞, 战玉柱, 等. 太湖表层沉积物中重金属形态分布及其潜在生态风险分析 [J]. 中国环境科学, 2011, 31(11): 1842-1848.
- LIU H Q, LIU G J, WANG J, et al. Fractional distribution and risk assessment of heavy metals in sediments collected from the Yellow River, China [J]. Environmental science & pollution research, 2016, 23(11): 11076-11084.
- 张鹏岩, 康国华, 庞博, 等. 宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价 [J]. 环境科学, 2017, 38(5): 2125-2135.
- 宁增平, 肖青相, 蓝小龙, 等. 都柳江水系沉积物镉等重金属空间分布特征及生态风险 [J]. 环境科学, 2017, 38(7): 2784-2792.
- CANUTO F A B, GARCIA C A B, ALVES J P H, et al. Mobility and ecological risk assessment of trace metals in polluted estuarine sediments using a sequential extraction scheme [J]. Environmental monitoring & assessment, 2013, 185(7): 6173-6185.
- 张菊, 陈明文, 鲁长娟, 等. 东平湖表层沉积物重金属形态分布特征及环境风险评价 [J]. 生态环境学报, 2017, 26(5): 850-856.
- 曹金萍, 宫永波, 黄乾. 山东省基于财政补贴的农业阶梯水价改革探讨 [J]. 中国水利, 2014(14): 54-58.
- 葛丽燕. 流域阶梯式生态补偿标准研究及应用 [D]. 郑州: 郑州大学, 2012.
- 张婷, 曾维华. 构建滇池流域生态补偿机制探讨 [C] // 中国环境科学学会, 环境保护部环境规划院, 哈尔滨工业大学, 等. 2013 年水资源生态保护与水污染控制研讨会论文集. 北京: 中国环境科学学会, 2013: 4.
- 张守平. 国内外涉水生态补偿机制研究综述 [J]. 人民黄河, 2011(5): 54-56, 59.
- 毛显强, 钟瑜, 张胜. 生态补偿的理论探讨 [J]. 中国人口·资源与环境, 2002, 12(4): 38-41.
- 如何加快建立生态补偿机制? [J]. 中国生态文明, 2016(6): 86.

(上接第 80 页)

- 李彩虹. 水源地生态保护成本核算与外溢效益评估研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
- 邓明翔. 滇池流域生态补偿机制研究 [D]. 昆明: 云南财经大学, 2012.
- LAZARUS R J. The making of environmental law [M]. Chicago: The University of Chicago Press, 2004: 199-215.
- 陈迅, 魏世红. 中国个人所得税税率的优化 [J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2002, 25(11): 19-21.
- 王淑云, 耿雷华, 黄勇, 等. 饮用水水源地生态补偿机制研究 [J]. 中国水土保持, 2009(9): 5-7.
- 姜文来. 农业水价合理分担研究 [J]. 中国市场, 2012(16): 45-51.