

晋江市九十九溪流域河道底泥污染特征分析与风险评价*

郦建锋¹ 马骏超^{1*} 李华斌¹ 崔喜博¹ 盛 晟² 陈奋飞¹ 叶更强¹

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122;

2. 中国电建集团华东勘测设计研究院(郑州)有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要 以晋江市九十九溪流域4条主要河道23处典型河段作为研究对象, 分上、中、下3层对底泥进行检测和分析, 总结其污染特征, 探讨时空分布特征, 并对污染程度进行风险评价, 为后续底泥污染综合防治和处置工程提供科学依据。研究结果表明: (1) 重金属污染时空分布不均, 位于下游河道的底泥重金属富集较严重; 除九十九溪老河道因上游来水削减导致底泥中层重金属污染最严重之外, 其余3条河道重金属含量均随底泥深度增加而降低; (2) 营养盐均呈重度污染态势, 上、中层底泥内梅罗综合污染指数接近且明显高于下层, 同时九十九溪干流和潘湖支流的下层底泥污染程度显著偏高; (3) 重金属主要源于周边工农业废水废气; (4) 九十九溪老河道和潘湖支流底泥重金属综合生态风险总体为中风险, 应重视底泥处理, 同时针对底栖动物存在危害的重金属(Zn和Pb), 应加强河道周边废水废气排放管控。

关键词 河道底泥 污染特征 时空分布特征 污染源分析 风险评价

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2021.08.015

Risk assessment and contamination characteristics of river sediment in Jiushijiuxi River Basin, Jinjiang LI Jianfeng¹, MA Junchao¹, LI Huabin¹, CUI Xibo¹, SHENG Sheng², CHEN Fenfei¹, YE Gengqiang¹. (1. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou Zhejiang 311122; 2. PowerChina Huadong Engineering Corporation (Zhengzhou) Limited, Zhengzhou Henan 450000)

Abstract: This study focused on 23 typical sites of 4 main rivers in Jiushijiuxi River Basin, Jinjiang. Through the analysis of three layers (upper, middle and lower layers) of river sediment, the contamination characteristics were summarized, temporal-spatial distribution characteristics were discussed and potential risk were assessed, which provided scientific suggestions for future comprehensive prevention and disposal treatment of sediment. Results showed that: (1) the heavy metals contents presented uneven for temporal-spatial distribution, and the heavy metal contents of rivers located in the lower reaches of Jiushijiuxi River Basin were higher; the heavy metal contents decreased with the increase of sediment depth, except for the Jiushijiuxi old river, which showed most serious pollution in middle layer due to the decrease of upstream inflow; (2) nutrients in sediments were seriously polluted and Nemerow comprehensive indexes of upper and middle layers were obviously higher than that in lower layer; besides, the Nemerow comprehensive pollution indexes of lower layer in Jiushijiuxi main stream and Panhu tributary were extremely higher; (3) the heavy metals in sediments were mainly from the waste water and gas produced by surrounding factories and farmland; (4) Jiushijiuxi old river and Panhu tributary presented moderate ecological risk in general. Therefore, attention should be paid to these sediments. Considering the negative impact of Zn and Pb towards zoobenthos, it was necessary to strengthen the control and treatment of waste water and gas.

Keywords: river sediment; contamination characteristics; temporal-spatial distribution characteristics; pollution source analysis; risk assessment

底泥是由陆地地表物质经过长期的物理、化学、生物作用而沉积于河流底部的沉积物, 与陆地土壤具有同源性^[1]。近年来, 由于经济发展和人口增长, 大量陆源污染物进入水体, 通过吸附、絮凝、沉降等作用, 从水体进入底泥中, 使得底泥中污染物含量显

著增加。同时, 沉积在底泥中的污染物在一定环境条件下, 通过溶解等作用又可从底泥中释放出来, 再次进入水体。因此, 底泥既是污染物的汇集地, 又是对水体产生二次污染的潜在污染源, 河道底泥的污染程度与水质环境质量存在密切关系^[2], 不同深度的

第一作者: 郦建锋, 男, 1982年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事生态环境治理研究。* 通讯作者。

* 水体污染控制与治理科技重大专项(No.2017ZX07602-002); 中电建华东院重大科技计划(201计划)项目(No.KY2019-ZD-03)。

底泥往往包含了不同时期河流环境特点及污染情况等真实信息^[5]。因此研究不同深度河流底泥的污染情况,对于河流生态环境质量的时空变化分析和后续治理具有重要意义。

目前,常见的河道底泥污染物特征分析与风险评价主要是采集河道不同河段同一深度的底泥,采用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法、地累积指数法等对污染物进行分析,利用多元统计分析和地统计分析对污染物来源进行解析,应用生态风险指数法、生物毒性不利影响指数法等对污染物进行风险评价,并提出相应的综合性治理指导意见^{[4]1443},鲜有研究涉及对不同深度河道底泥的对比。

晋江市九十九溪流域万亩田园风光区域为典型的工农业区域,汽车配件、陶瓷、建材等相关产业逐年发展。区域内主要水系有九十九溪干流、潘湖支流、九十九溪老河道及沿江支流,其中,潘湖支流为新开挖河道,原九十九溪干流均沿九十九溪老河道流出。由于河道周边产业类型及比例不同,受环境影响的时间不同,宜进行不同深度底泥污染特征分析与风险评价。

本研究选取九十九溪干流、潘湖支流、九十九溪老河道及沿江支流 4 条主要河道 23 处不同河段的底泥作为研究对象,分 3 层采集底泥样品,重点研究不同深度底泥的污染特征及其对河流环境质量时空变化的反映情况、污染来源和相应的风险评价,全面深入分析该区域的河流污染空间分布情况,探讨有效的治理策略,为后续底泥污染综合防治和处置提供科学依据。

1 采样方法

1.1 研究区概况

九十九溪流域地处福建省东南沿海的南安市与晋江市境内,是晋江市的主要河流。流域在晋江市境内长 27 km,流域面积为 137 km²,主河道平均坡降为 0.16‰^[5]。流域上游属中低山地,中下游地势低洼平坦,沟渠纵横交错,河网密集。流域位于亚热带海洋性季风气候区,多年平均蒸发量为 1 997.1 mm,年降水量为 1 000~1 400 mm^[6]。

研究区域为九十九溪流域下游的万亩田园风光区域,该区域以农业工业用地为主,总占地面积约 7.2 km²,研究河道为九十九溪干流、九十九溪老河道、沿江支流及潘湖支流,长度分别为 4.37、2.02、2.43、1.47 km。

1.2 样品采集

于 2019 年 8 月共采集 23 处河道底泥。河道底泥采集采用均匀布点法,每个采样点间距为 300~500 m(采样点位置见图 1)。底泥采集采用人工方式进行,在风浪较小、环境条件较好的河段中心位置,采用抓斗式采泥器进行采样。每个采样点根据淤泥厚度,分上、中、下 3 层(分别记为 A、B、C 层)采集底泥样品(A 层 0.1~0.2 m,B 层 0.2~0.5 m,C 层 0.5~1.0 m)。采集的底泥样品置于 1 L 的聚乙烯袋中密封,装于泡沫盒中,检测前冷冻干燥保存。

1.3 样品测定

检测指标主要包括:pH、Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn、TN、TP 共 11 项。检测方法参照《城市污水处理厂污泥检测方法》(CJ/T 221—2005)和《土壤检测》(NY/T 1121.2—2006)。

2 评价方法

2.1 污染程度评价

2.1.1 重金属污染程度评价



图 1 采样点分布
Fig.1 Distribution of sampling sites

采用地累积指数(I_{geo})进行重金属污染程度评价,地累积指数是评价底泥中重金属污染的常用参数,不仅考虑了自然地质过程造成的背景值影响,也充分注意了人为活动对重金属污染的影响^[7]。本研究以福建省自然土壤背景值作为污染评价参考值: Cd(0.054 mg/kg)、Hg(0.081 mg/kg)、As(5.78 mg/kg)、Pb(34.9 mg/kg)、Cr(41.3 mg/kg)、Cu(21.6 mg/kg)、Ni(13.5 mg/kg)、Zn(82.7 mg/kg)^{[8]70}。

单一重金属的污染程度分级为: ≤ 0 , 无污染; $>0 \sim 1$, 轻污染; $>1 \sim 2$, 偏中度污染; $>2 \sim 3$, 中度污染; $>3 \sim 4$, 偏重度污染; $>4 \sim 5$, 重度污染; >5 , 极重度污染。

2.1.2 营养盐污染程度评价

鉴于目前中国尚没有专门针对底泥营养盐污染程度的评价方法,本研究参考文献[9],采用内梅罗综合污染指数法对底泥中氮、磷的污染程度进行评价,评价标准值参考《中新天津生态城污染水体沉积物修复限值》(DB12/499—2013)中河道底泥营养盐管理目标值(TN为1500 mg/kg、TP为400 mg/kg)。

2.2 风险评价

2.2.1 潜在生态风险评价

重金属潜在生态风险指数(RI)综合考虑重金属含量、毒性水平、水体对金属的敏感性等多元素协同作用等,综合评估多种重金属对底泥的潜在生态危险程度^[10],计算方法见式(1)。

$$RI = \sum T_i \times \frac{C_i}{C_b} \quad (1)$$

式中: C_i 为底泥中重金属 i 的实测值, mg/kg; C_b 为重金属 i 的标准限值, mg/kg, 采用《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中水田土壤污染风险筛选值, Cd 0.8 mg/kg、Hg 1 mg/kg、As 20 mg/kg、Pb 240 mg/kg、Cr 350 mg/kg、Cu 100 mg/kg、Ni 190 mg/kg、Zn 300 mg/kg; T_i 为重金属 i 的毒性响应系数, 参考文献[9], Cd 取 30、Hg 取 40、As 取 10、Pb 取 5、Cr 取 2、Cu 取 5、Ni 取 5、Zn 取 1。

根据重金属潜在生态风险指数, 潜在生态风险评价分级为: ≤ 55 , 低风险; $>55 \sim 110$, 中风险; $>110 \sim 220$, 高风险; >220 , 极高风险。

2.2.2 生物毒性不利影响评价

采用生物毒性不利影响综合评价河道底泥中多种重金属的混合生物效应^{[4]1444}, 计算方法见式(2)。

$$Q = \frac{\sum \frac{C_i}{PEC_i}}{n} \quad (2)$$

式中: n 为底泥中重金属的种类数; Q 为平均可能影响浓度商; PEC_i 为底泥中重金属 i 的可能效应浓度, mg/kg, 取 Cd 4.98 mg/kg、Hg 1.06 mg/kg、As 33 mg/kg、Pb 128 mg/kg、Cr 111 mg/kg、Cu 149 mg/kg、Ni 486 mg/kg、Zn 459 mg/kg^{[4]1445}。

根据平均可能影响浓度商, 将生物毒性分为 4 个等级^{[4]1445}: ≤ 0.1 , 产生生物毒性效应的可能性 $< 14\%$; $>0.1 \sim 1.0$, $15\% <$ 产生生物毒性效应的可能性 $\leq 29\%$; $>1.0 \sim 5.0$, $33\% <$ 产生生物毒性效应的可能性 $\leq 58\%$; >5.0 , $75\% <$ 产生生物毒性效应的可能性 $\leq 81\%$ 。

3 结果与讨论

3.1 底泥 pH 变化特征

河道底泥 pH 检测结果见图 2, 呈弱碱性, 与福建省泉州市耕地土壤 pH(5.46)差异较大^[11], 可能因为耕地长期施化肥, 导致耕地土壤酸化, 而研究区域河道周边分布较多汽修厂, 排放碱性含油废水^{[12]47}, 长期积累导致河道底泥 pH 较耕地土壤高。

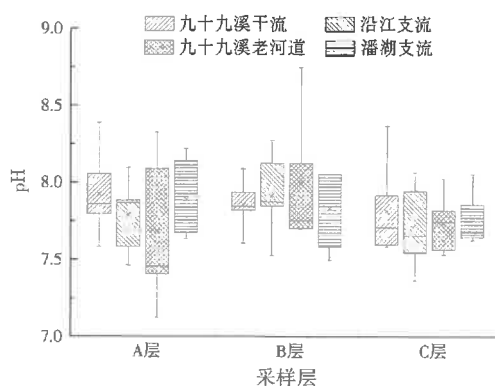


图2 河道底泥 pH 分布

Fig.2 Distribution of pH of river sediment

3.2 河道底泥污染物特征分析

与福建省自然土壤背景值^{[8]70}相比, 研究区域河道底泥中绝大部分重金属含量超标, 存在不同程度的污染。其中, Cd 为中度、偏重度污染, Zn 为偏中度污染, Hg、Pb、Cr、Cu、Ni 为轻度污染, 仅 As 不存在污染现象。重金属含量偏高主要是受周边工业废水、生活污水、农业生产废水的影响, 重金属随悬浮物沉降进入底泥, 造成其含量较自然土壤背景值偏高^{[13]1876}。

表 1 河道底泥重金属地累积指数
Table 1 I_{geo} of heavy metals in river sediment

重金属	九十九溪干流			沿江支流			九十九溪老河道			潘湖支流		
	A 层	B 层	C 层	A 层	B 层	C 层	A 层	B 层	C 层	A 层	B 层	C 层
Cd	2.65	2.50	1.39	2.54	2.17	2.54	3.60	4.24	3.08	4.14	2.24	0.57
Hg	-0.41	-0.66	-0.64	-0.55	-1.13	-1.34	0.04	-0.33	-0.88	-0.36	-0.76	-1.15
As	-0.67	-0.81	-1.27	-0.94	-1.38	-1.42	-0.78	-1.28	-1.47	-1.10	-1.41	-1.32
Pb	0.76	0.52	0.04	0.95	0.52	0.04	0.97	0.73	0.32	0.89	0.36	-0.07
Cr	-0.17	-0.32	-0.83	-0.32	-0.77	-0.98	-0.14	-0.08	-0.83	-0.04	-0.34	-0.56
Cu	-0.88	-1.10	-1.61	-0.93	-1.36	-1.69	-0.13	-0.51	-1.42	-0.22	-0.94	-1.43
Ni	-0.78	-0.97	-1.56	-0.69	-1.13	-1.38	-0.59	-0.81	-1.28	-0.50	-0.68	-0.84
Zn	0.97	0.76	0.32	1.29	0.93	0.65	1.45	1.35	0.79	1.41	0.92	0.51

同时,研究区域内不同河道不同深度的底泥重金属污染程度不同。其中,沿江支流、九十九溪老河道和潘湖支流由于位于下游,上游陶瓷厂等工业废水中富含的重金属^{[12]47}富集沉积,致使这 3 条河道污染较九十九溪干流严重。此外,潘湖支流为近年新开挖河道,原先上游河水均从九十九溪干流流至九十九溪老河道再流出,因此九十九溪老河道底泥 B 层部分重金属地累积指数较高,污染较表层和底层严重,与其他河道重金属含量随底泥深度增加而降低的大趋势不同(见表 1)。

此外,研究区域内河道底泥中 TN、TP 含量均明显高于河道底泥营养盐管理目标值,呈重度污染态势(见图 3),应通过工程措施及时控制营养盐含量。内梅罗综合污染指数在 A 层和 B 层中的数值较为接近,但明显高于 C 层,表明从 B 层沉积期开始,区域内一直持续存在稳定的营养盐汇入污染。对比不同河道 C 层底泥的内梅罗综合污染指数发现,九十九溪干流和潘湖支流深层底泥均已严重污染,结合河道环境条件,推测九十九溪干流受营养盐污染时间久远,而潘湖支流开挖前该区域土壤已受营养盐污染。

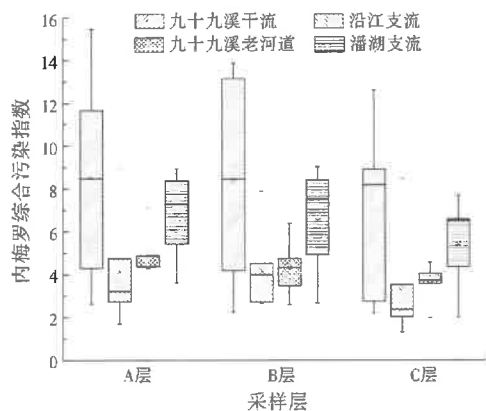


图 3 河道底泥营养盐内梅罗综合污染指数
Fig.3 Nemerow comprehensive pollution index of nutrients in river sediment

造成 4 条河道底泥营养盐污染程度不同的原因主要为周边用地类型随时空变化明显。九十九溪干流和潘湖支流的北侧均为居住区,用地面积随时间推移而扩张,但沿河硬质化的驳岸和排口致使城镇点源、面源污染直接汇入河道,因而底泥中营养盐逐年富集,污染愈发严重。而沿江支流和九十九溪老河道周边则以农田为主,河道两岸存在 50 m 以上的植被缓冲带,可削减部分农业面源污染,减少对河道造成的污染。

3.3 河道底泥重金属污染源相关性分析

采用聚类分析^[14]对底泥重金属来源进行分析,标准化处理重金属含量,去除异常值后运用层次聚类法绘制得到树状图(见图 4)。根据聚类距离将底泥重金属归为两大类,其中 Cu、Zn、Cd、Hg、Pb 属于 I 类,As、Cr、Ni 为 II 类。I 类又可具体分为 3 类: I₁类(Cu 和 Zn)、I₂类(Cd)、I₃类(Hg 和 Pb); II 类又可具体分为 2 类: II₁类(As 和 Cr)、II₂类(Ni)。

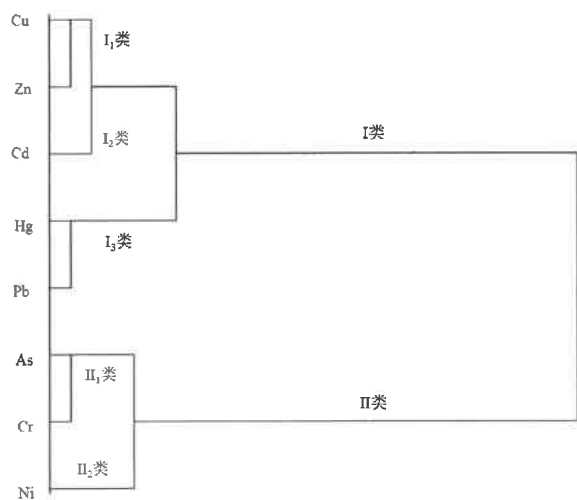


图 4 8 种重金属聚类分析树状图
Fig.4 Dendrogram results of the hierarchical cluster analysis of eight heavy metals

通过主成分分析,识别底泥中重金属来源^[15]。

利用 KMO 检验和巴特利球度检验 ($KMO=0.822>0.7, P<0.05$), 发现 8 种重金属间相关性较强, 适合进行主成分分析。采用 Kaiser 标准化的正交旋转法提取因子, 利用最大方差法对因子载荷矩阵进行正交旋转 (结果见表 2)。主成分分析法提取出 2 个主成分, 共解释 72.69% 的方差。

第 1 主成分贡献率为 38.86%, Cd、Hg、Pb、Cu、Zn 的因子载荷较高, 聚类为 I 类。相关研究证明, Cd、Hg、Pb、Cu、Zn 主要受人类活动影响, 由人类活动产生而进入河道底泥中^[16]; I₁ 类主要源于汽车制造业, Zn 是汽车轮胎生产过程中的重要添加剂, 具有润滑、抗氧化和清洁作用; Cu 来自车辆散热器和车辆制动系统。I₂ 类源于农业, Cd 是农业复合肥料中的重要成分, 可以作为农业活动的标识元素。I₃ 类主要源于燃煤排放, Hg 和 Pb 可通过燃煤排放产生, 并在大气中具有较强的稳定性和移动性, 通过大气干湿沉降进入河道底泥中。

结合地累积指数分析, 区域污染最为严重的是 Cd 和 Zn, 推测污染源主要为周边大面积农田施用的化肥/农药和沿河分布的汽修厂汽车轮胎维修保养产生的废液。而现状汽修厂规模较小, 业务以维修为主, 因此同源汽车制造业的 Cu 却属于轻度污染。此外, 河道上游陶瓷厂、水泥厂数量较少, 煤炭使用量较低, 致使 Hg、Pb 属于轻度污染。

表 2 8 种重金属主成分分析结果
Table 2 Principal component analysis of eight heavy metals

项目	主成分	
	1	2
Cd	0.848	-0.035
Hg	0.609	0.540
As	0.220	0.783
Pb	0.717	0.477
Cr	0.418	0.806
Cu	0.788	0.302
Ni	-0.015	0.895
Zn	0.812	0.176
特征值	3.11	2.71
方差贡献率/%	38.86	33.83
累积贡献率/%	38.86	72.69

第 2 主成分贡献率为 33.83%, As、Cr、Ni 的因子载荷较高, 聚类为 II 类。相关研究证明^[17], Cr 和 Ni 主要源于成土母质, 受人为影响较小, 仅九十九溪老河道和潘湖支流的部分中下层底泥中 Cr 和 Ni 含量略微超过自然土壤背景值, 处于轻度污染状态,

因此推测除了自然来源外, 还受周边工业污染影响^{[13]1880}。河道底泥中 As 整体呈无污染状态, 由于 As 变异系数较低, 因此推测底泥中的 As 主要来源于成土母质。

3.4 河道底泥重金属风险评价

3.4.1 潜在生态风险评价结果

九十九溪流域河道底泥中重金属的潜在生态风险评价结果见图 5。九十九溪干流和沿江支流各层底泥的重金属潜在生态风险指数均小于 55, 表明这两条河道的重金属综合生态风险为低风险, 重金属不易从底泥中释放, 对河道的生态危害较小^[18]。九十九溪老河道底泥 B 层底泥的重金属潜在生态风险指数高于 110, A 层和 C 层底泥的重金属潜在生态风险指数介于 55~110, 表示九十九溪老河道底泥中重金属总体处于中风险水平, 应重视该河道的底泥处理, 特别是 0.2~0.5 m 深的底泥处理, 可选用生态清淤的方式将深度小于 1.0 m (C 层及以上) 的底泥从河道中移除, 从而减轻污染底泥中重金属对水生生物的生态影响^[19]。潘湖支流底泥中 A 层和 B 层底泥的重金属潜在生态风险指数大于 55, 同处于中风险水平, 但 C 层总体属于低风险, 应通过生态清淤的方式清除深度小于 0.5 m (B 层及以上) 的底泥, 减轻重金属释放的潜在风险。

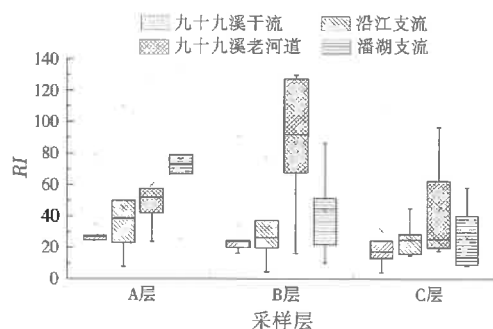


图 5 潜在生态风险评价结果

Fig.5 Potential ecological risk assessment result

3.4.2 生物毒性不利影响评价结果

九十九溪流域 4 条河道底泥的平均可能影响浓度商均处于 0.1~0.5 (见图 6), 表明由于个别重金属 (Zn 和 Pb) 污染, 区域河道底泥对底栖动物产生生物毒性效应的可能性为 15%~29%。此外, 平均可能影响浓度商基本随底泥深度的增加而降低, 可见底泥中重金属的生物毒性不利影响主要发生在近几年。因此, 建议严格管控河道周边工业废水废气的排放, 特别是汽修汽配厂和建材厂, 以减轻 Zn、Pb

等重金属对河道底栖动物的危害。

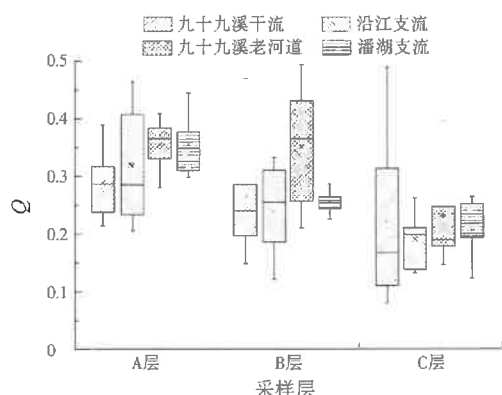


图6 生物毒性不利影响评价结果

Fig.6 Assessment result of adverse effects of biotoxicity

4 结论与建议

(1) 通过对晋江市九十九溪流域万亩田园风光区域4条主要河道23处河道底泥进行分层检测,发现河道底泥偏碱性,与沿河分布汽修厂有较大关系。

(2) 与福建省自然土壤背景值相比,河道底泥中绝大部分重金属含量超标,存在不同程度的污染,其中Cd为中度、偏重度污染,Zn为偏中度污染,Hg、Pb、Cr、Cu、Ni为轻度污染,仅As不存在污染现象。受周边工业分布情况影响,不同河道不同深度的重金属污染程度不同。其中,沿江支流、九十九溪老河道和潘湖支流底泥中重金属污染较严重。同时,重金属含量基本随底泥深度的增加而降低,仅九十九溪老河道因不同时期汇入水量不同,导致中层底泥重金属污染比表层和底层严重。此外,底泥TN、TP含量均明显高于河道底泥营养盐管理目标值,全部呈重度污染的态势,应通过工程措施及时控制营养盐含量。

(3) 河道底泥中重金属主要来自两类:人类活动汇入和自然成土母质发育。其中,Cu和Zn主要源于河道周边的汽修厂;Hg和Pb主要源于上游零星陶瓷厂、水泥厂的燃煤排放;Cd主要源于周边农业施用的化肥农药;Cr和Ni主要受成土母质以及周边工业生产活动影响;As则主要源于成土母质。

(4) 河道底泥重金属风险评价结果显示,九十九溪干流和沿江支流的底泥重金属综合生态风险为低风险,重金属不易从底泥中释放,生态危害较小;九十九溪老河道和潘湖支流的底泥则总体处于中风险,应重视底泥处理,可选用生态清淤的方式进行处理,九十九溪老河道清理深度小于1.0 m的底泥,潘湖支流清理深度小于0.5 m的底泥,以减轻底泥中

重金属释放对河道水生态的影响。此外,4条河道底泥受Zn、Pb等重金属污染,对底栖动物产生生物毒性效应的可能性为15%~29%。为防止河道底泥重金属继续富集累积,加剧对底栖动物的危害,建议加强管控河道周边工农业废水废气的排放,严格控制污染入河。

参考文献:

- [1] 刘永杰,胡振华,刘永兵,等.海南岛河流底泥肥力和重金属污染特征及其风险评价[J].中国水土保持科学,2017,15(3):131-138.
- [2] 王勇.底泥中营养物质及其他污染物释放机理综述[J].工业安全与环保,2006,32(9):27-29.
- [3] 薛天翼,王红亚.湖泊(水库)沉积物分析在土壤侵蚀研究中的运用[J].地理科学进展,2018,37(7):890-900.
- [4] 边博,周燕,张琴.太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价[J].环境科学,2017,38(4).
- [5] 蔡炯毅.九十九溪晋江段水环境状况分析评价[J].水资源保护,2002(2):41-43.
- [6] 张昶,王成,孙睿霖,等.城市化地区河岸带植物多样性特征及其与滨河用地性质的关系——以晋江市九十九溪为例[J].福建农林大学学报(自然科学版),2015,44(5):520-526.
- [7] 滕彦国,虞先国,倪师军,等.应用地质累积指数评价沉积物中重金属污染:选择地球化学背景的影响[J].环境科学与技术,2002,25(2):7-9.
- [8] 陈振金,陈春秀,刘用清,等.福建省土壤环境背景值研究[J].环境科学,1992,13(4).
- [9] 陈姗,许凡,谢三桃,等.合肥市十八联圩湿地表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价[J].环境科学,2019,40(11):4932-4943.
- [10] 张家泉,田倩,许大毛,等.大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价[J].环境科学,2017,38(6):2355-2363.
- [11] 张世昌.福建耕地土壤pH空间分布及动态分析[J].中国农技推广,2019,35(2):49-51.
- [12] 陈少宝.九十九溪中上游流域环境现状和综合整治措施探索[J].海峡科学,2008(7).
- [13] 郭晓东,孙岐发,赵勇胜,等.珙县盆地农田重金属分布特征及源解析[J].农业环境科学学报,2018,37(9).
- [14] 秦先燕,李运怀,孙跃,等.环巢湖典型农业区土壤重金属来源解析[J].地球与环境,2017,45(4):455-463.
- [15] 杨彦,李良忠,于云江,等.基于统计分析的太湖流域某市农业活动区重金属污染特征及来源[J].环境科学研究,2012,25(12):1319-1327.
- [16] 李伟迪,崔云霞,曾撑撑,等.太湖流域农田土壤重金属污染特征与来源解析[J].环境科学,2019,40(11):5073-5081.
- [17] 周艳,陈楷,邓绍坡,等.西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价[J].环境科学,2018,39(6):2884-2892.
- [18] 徐晨,王沛芳,陈娟,等.望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价[J].环境科学,2019,40(11):4914-4923.
- [19] 毛志刚,谷孝鸿,陆小明,等.太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J].环境科学,2014,35(1):186-193.

编辑:胡翠娟 (收稿日期:2020-12-28)