

我国东南某海湾底泥重金属污染评价及分析

王 晓

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 对我国东南沿海某封闭海湾底泥中7种重金属(Cd、Pb、Cr、Cu、Zn、As、Hg)污染现状进行评价:表层底泥Cd、Pb、Cr、Cu、Zn、As单一污染物潜在生态风险系数(E_{ir})评价均为低生态风险,Hg单一污染物潜在生态风险系数(E_{ir})评价为低至重生态风险;多种重金属污染物潜在生态风险系数(RI)评价结果均为低至中等生态风险。同时,研究发现,重金属垂向浓度分布随着采样深度的增加逐渐降低。经分析,底泥重金属污染主要为沿岸入湾河流污染和雨季排口溢流污染。最终,根据重金属污染特征和评价结果,对该封闭海湾底泥分区疏浚以及疏浚后底泥就地消纳等资源化利用的可行性路径进行了探讨。该研究为封闭海湾重金属污染表征、底泥疏浚和疏浚后底泥资源化利用提供了技术支撑。

关键词: 封闭海湾;重金属;单一污染物潜在生态风险系数;多种重金属污染物潜在生态风险系数;资源化利用路径

中图分类号: X703.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)08-0347-06

Assessment and Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediment of a Bay in Southeast China

WANG Xiao

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: The pollution status of seven heavy metals (Cd, Pb, Cr, Cu, Zn, As and Hg) in the sediment of a closed bay in the southeast coast of China is assessed. The potential ecological risk coefficient (E_{ir}) of the single pollutants Cd, Pb, Cr, Cu, Zn and As in the surface sediment is evaluated as low ecological risk. The potential ecological risk coefficient (E_{ir}) of a single pollutant in Hg is evaluated as low to severe ecological risk. The potential ecological risk coefficient (RI) evaluation results of multiple heavy metal pollutants are all low to moderate ecological risks. Meanwhile, the research shows that the vertical concentration distribution of heavy metals gradually decreases with the increase of sampling depth. After analysis, the main sources of heavy metal pollution in the sediment are the pollution from the rivers flowing into the bay along the coast and the overflow pollution from the discharge outlets during the rainy season. Finally, based on the characteristics and evaluation results of heavy metal pollution, the feasible paths for resource utilization of the sediment in the closed bay are discussed, including zoning and quality dredging, and on-site consumption of dredged sediment. The study provides the technical support for the characterization of heavy metal pollution in closed bays, the sediment dredging, and the resource utilization of dredged sediment.

Keywords: closed bay; heavy metals; potential ecological risk coefficient of single pollutant; potential ecological risk coefficient of multiple heavy metal pollutants; resource utilization path

0 引 言

本研究以我国东南沿海某封闭海湾为例,基于底泥污染特征调查,探讨底泥疏浚后资源化利用路径。该海湾水深0~5 m,为典型浅水湾区,有6条河流汇入,流域集水面积209.3 km²。上游产生的污染物通过入湾河流和环湾地表径流不断汇入该湾区,

同时,湾区水动力差,污染不断聚集累积,底泥表层呈现缺氧状态,导致底泥污染程度加剧。目前已有许多关于内陆湖泊底泥重金属污染的分析研究^[1-4],但关于封闭海湾的底泥污染分布特征、成因分析及疏浚后底泥就地资源化利用路径等研究鲜有报道。

本研究对整个湾区底泥重金属进行平面和垂向分布进行分析,探究封闭海湾平面和垂向污染分布特征,并进行污染成因分析,旨在为探究封闭海湾重金属污染分布特征、底泥疏浚和疏浚后底泥资源化利用路径提供技术支撑。

收稿日期: 2024-11-21

作者简介: 王晓(1990—),女,工学硕士,工程师,从事排水和水环境治理设计工作。

1 材料和方法

1.1 采样点布设和样品采集

本研究结合初勘点位,对部分确定为低污染的区域设置 500 m×500 m 的网格取样。考虑到本湾区为不规则形状,其他区域按照 250 m×250 m 的网格取样。初勘底泥检测分别按照 30 cm/层和 50 cm/层采样,合计 46 个采样点,底泥采样深度 1.8~3.0 m,根据分层取样。底泥柱样采集采用柱状底泥采样器,每层样品取具有代表性的混合样,装进自封袋内,带回实验室分析。

1.2 样品分析

重金属采用《土壤和底泥 12 种金属元素的测定王水提取-电感耦合等离子体质谱法》(HJ 803—2016)分析,总汞采用《海洋监测规范第 5 部分底泥分析》(GB 17378.5—2007)第 5.1 节中的原子荧光法分析,砷采用《海洋监测规范第 5 部分底泥分析》(GB 17378.5—2007)第 11.1 节中的原子荧光法分析。

1.3 底泥重金属评价分析方法

(1)潜在生态危害指数法

底泥的重金属污染底泥鉴别评估标准参照 Hakanson (1980)提出的底泥中金属污染物的潜在生态危害指数法^[5]。具体评价方法如下:

单个污染物潜在风险指数计算公式为:

$$C_f^i = \frac{C_D^i}{C_R^i} \tag{1}$$

$$E_r^i = T_r^i \otimes C_f^i \tag{2}$$

对于多种金属潜在生态风险评价,采用 Hakanson 潜在生态危害指数法,计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \tag{3}$$

式(1)(2)(3)中: C_f^i 为土壤中污染物*i*的单项污染指数; C_D^i 为土壤中污染物*i*的实测数据; C_R^i 为污染物*i*的评价标准,为单一污染物潜在生态风险系数; T_r^i 为单个污染物的毒性响应参数;RI 为多种金属的潜在生态风险指数。

潜在生态风险指数计算所需的底泥毒性参数及其污染等级划分见表 1、表 2。

2 结果与讨论

2.1 底泥重金属平面分布特征

对重金属的平面分布研究发现:表层底泥重金属 Cd 含量在 0.09~0.51 mg/kg 水平,平均含量 0.14 mg/kg,

表 1 计算潜在生态风险指数所需的重金属毒性响应参数

元素	沉积学毒性参数
Hg	40
Cd	30
As	20
Pb	5
Cu	5
Zn	1
Cr	2

表 2 污染指标和潜在生态风险指标等级划分

单一污染物污染系数 C_f^i		单一污染物潜在生态风险系数 E_r^i		潜在生态风险指数 RI	
阈值区间	程度分级	阈值区间	程度分级	阈值区间	程度分级
$C_f^i < 1$	低污染	$E_r^i < 40$	低风险	$RI < 150$	低风险
$1 \leq C_f^i < 3$	中等污染	$40 \leq E_r^i < 80$	中风险	$150 \leq RI < 300$	中风险
$3 \leq C_f^i < 6$	较高污染	$80 \leq E_r^i < 160$	较高风险	$300 \leq RI < 600$	高风险
$C_f^i \geq 6$	很高污染	$160 \leq E_r^i < 320$	高风险	$600 \leq RI < 1\ 200$	很高风险
		$E_r^i \geq 320$	很高风险	$RI \geq 1\ 200$	极高风险

东侧和北侧海湾区域含量较高;表层底泥重金属 Pb 含量在 21~70 mg/kg 水平,平均含量 46.87 mg/kg,东侧海湾区域含量较高;表层底泥重金属 Cr 含量在 24~143 mg/kg 水平,平均含量 52.37 mg/kg,北侧和东侧海湾区域含量较高;表层底泥重金属 Cu 含量在 8.6~152 mg/kg 水平,平均含量 30.94 mg/kg,东侧海湾区域含量最高;表层底泥重金属 Zn 含量在 62~858 mg/kg 水平,平均含量 166.72 mg/kg,北侧和东西两侧海湾区域含量较高;表层底泥重金属 As 含量在 3.26~14.60 mg/kg 水平,平均含量 6.49 mg/kg,东侧和北侧海湾区域含量较高;表层底泥重金属 Hg 含量在 0.01~0.89 mg/kg 水平,平均含量 0.14 mg/kg,北侧和东西两侧海湾区域含量较高。底泥表层重金属含量分析见图 1。

对比该封闭海湾前期底泥重金属含量研究,重金属 Cd、Pb、Cr、Cu、Hg 含量均高于十年前底泥重金属含量^[6],其原因为近十年海湾上游的支流沿岸分布了一些电子电气生产企业,支流沿岸溢流污染严重。目前支流正在逐步开展截污和河道生态整治,随着支流整治工作完成,湾区底泥污染沉积将有所降低。

对比我国东南沿海其他海湾:该湾区底泥重金属 Cd 和 Pb 平均含量位于兴化湾和泉州湾之间,高于湄洲湾;重金属 Cr 平均含量与泉州湾基本一致,低于

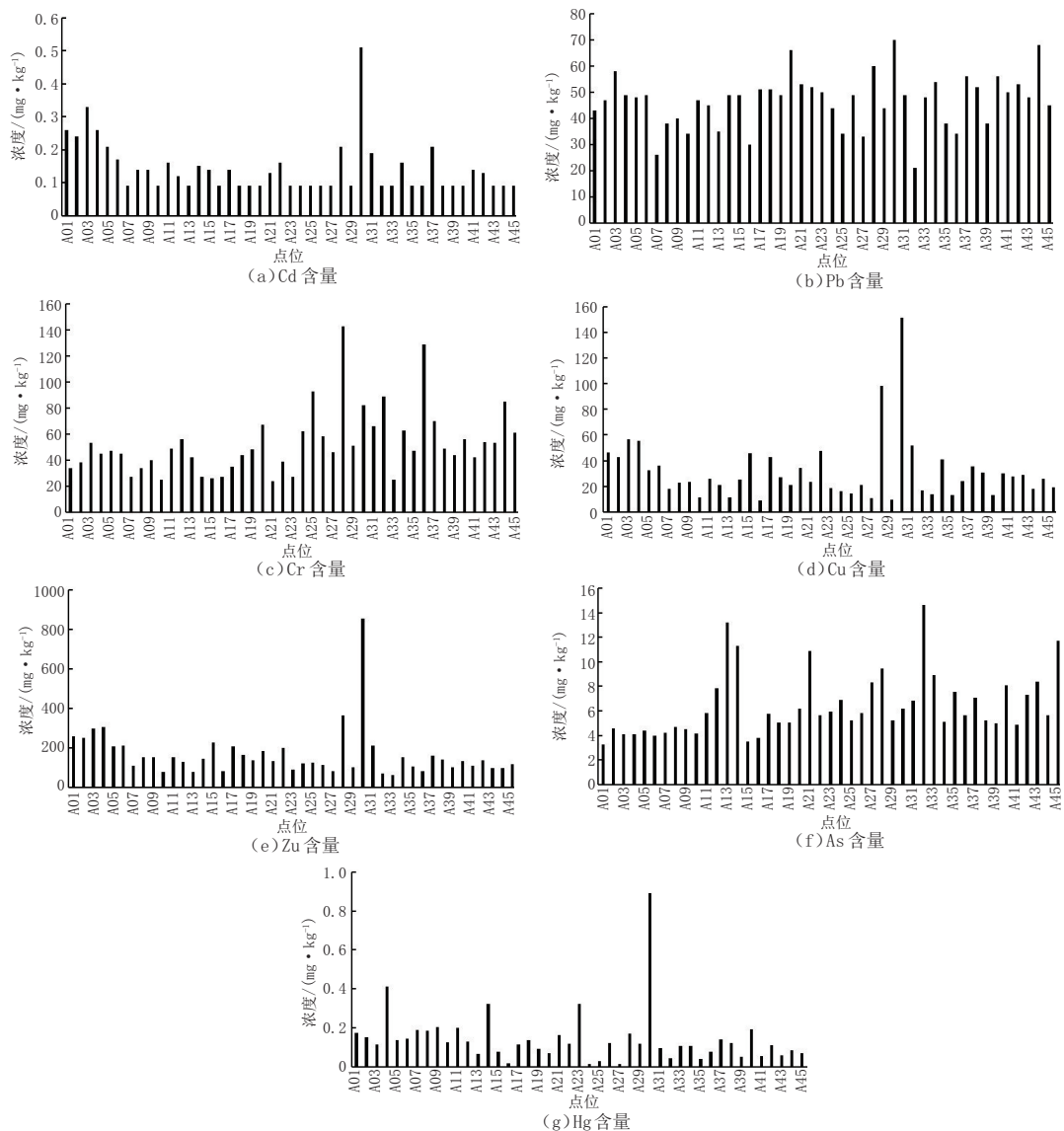


图1 底泥表层重金属含量分析图

兴化湾;重金属 Cu 平均含量与泉州湾和厦门西海域基本一致,高于兴化湾;重金属 Hg 平均含量高于上述海湾;重金属 Zn 平均含量高于厦门西海域、泉州湾等海湾^[6-8]。综上,该湾区表层底泥重金属 Hg 和 Zn 平均含量处于我国东南部海湾高水平含量,可能与该湾区入湾河流沿岸分布一些电子电气产品生产企业有关。该海湾表层底泥重金属含量见表3。

表3 海湾表层底泥重金属含量表 单位:mg/kg

海湾名称	Cd	Pb	Cr	Cu	Hg	Zn
该海湾	0.14	46.87	52.37	30.94	0.140	166.72
泉州湾	0.33	64.00	52.00	31.00	0.073	121.00
湄洲湾	0.09	41.50	52.00	17.50	—	76.00
厦门西海域	0.70	77.20	—	30.20	—	144.00
兴化湾	0.11	33.00	73.00	20.00	0.063	90.00

注:—为无参考数据。

2.2 底泥重金属垂向分布特征

分别针对北侧、东西两侧海湾区域和中心湾区进行重金属垂向分布特征分析。

(1) 北侧海湾区域

底泥中重金属 Pb、Cr、Cu、Zn、As 在 01、04、07、11 号点位含量随采样深度增加分层现象明显,Pb、Cr、Cu 在 04、07、11 号点位体现出了明显的重金属表面富集现象,重金属 Hg 含量随采样深度增加分层现象明显,各点位重金属分布均体现出了明显的表面富集现象。

(2) 西侧海湾区域

底泥中重金属 Cd 在 20、37、41 号点位含量随采样深度增加分层现象明显,重金属 Pb、Cr 在 28、31、37 号点位含量随采样深度增加分层现象明显,重金属 Cu、Zn 在 28 号点位含量随采样深度增加分层现象明显,重金属 Hg 在 28、37 号点位含量随采样深度增加分层现象明显,重金属分布均体现出了明显的表面富集现象。

象。重金属As在31号点位含量随采样深度增加分层现象明显,各点位重金属分布表面富集现象不明显。

(3) 中部区域

底泥中重金属Pb、Cu、Zn在23、29、34、38号点位含量随采样深度增加分层现象明显,重金属Hg在29、34、38号点位含量随采样深度增加分层现象明显,各点位重金属分布均体现出了明显的表面富集现象。同样,重金属Cr在34、38号点位含量随采样深度增加分层现象明显,重金属As在23、29号点位含量随采样深度增加分层现象明显,体现出了明显的重金属表面富集现象。

(4) 东侧海湾区域

底泥中重金属Cd、Cu、Zn、Hg在30号点位含量随采样深度增加分层现象明显,重金属Pb、As在32号点位含量随采样深度增加分层现象明显,重金属Cr在20、30、32号点位含量随采样深度增加分层现象明显,上述点位均体现出了明显的重金属表面富集现象。

(5) 南部海堤区域

底泥中重金属Cd、Cu、Zn在45、42号点位(除表层外)各层均低于检出限,重金属Pb、Cr在45号点位含量随采样深度增加分层现象明显,除42号点位外,上述点位均体现了明显的重金属表面富集现象。重金属As、Hg在42、45号点位分层和表面富集现象不明显。

以北侧海湾为例,重金属垂向分布特征见图2。

2.3 重金属评价结果

针对封闭海湾底泥重金属污染程度的评价结果显示:

重金属Cd、Pb、Cr、Cu、Zn、As单一污染物潜在生态风险系数 E_i 评价结果均为低生态风险。其中,重金属Cd生态风险系数为5.4~30.6,重金属Pb生态风险系数为0.8~16.6,重金属Cr生态风险系数为0.1~4.8,重金属Cu生态风险系数为0.6~25.3,重金属Zn生态风险系数为0.3~10.7,重金属As生态风险系数为0.1~13.1。

重金属Hg单一污染物潜在生态风险和多种重金属污染物潜在生态风险分析见图3。其中:表层为0~0.3 m或0~0.5 m,中层为0.6~0.9 m或1~1.5 m,底层为1.2~1.5 m或2~2.5 m。

重金属Hg单一污染物潜在生态风险系数为0.4~199,评价结果为低至重生态风险(见图4)。其中,北侧和东侧海湾部分点位重金属Hg评价结果为低至重生态风险,其他均为低至中等生态风险。

多种重金属污染物潜在生态风险系数RI评价结

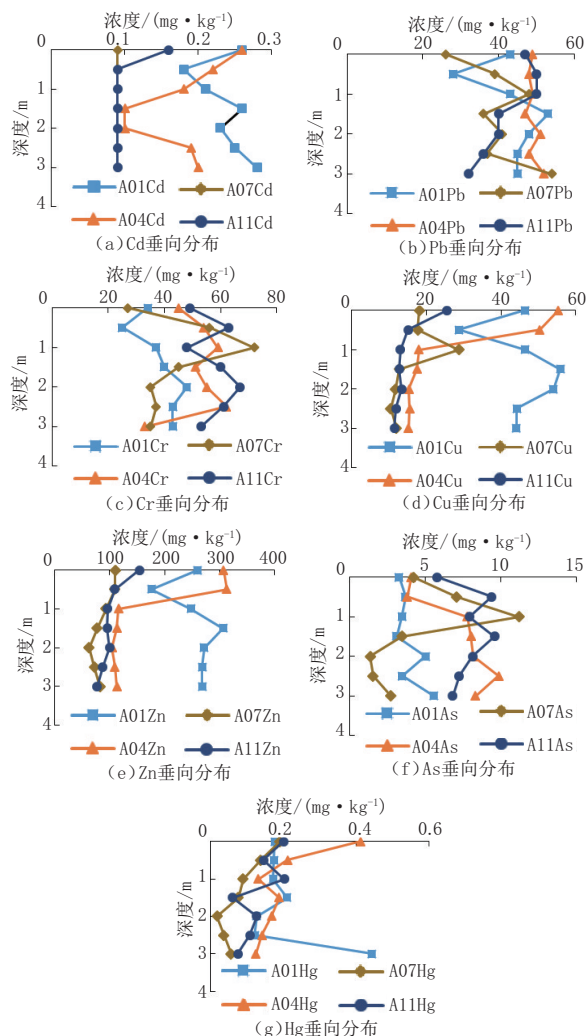


图2 重金属垂向分布特征图(以北侧海湾为例)

果显示,所有点位均为低至中等生态风险(见图5)。其中,仅东侧海湾区域少部分点位多种重金属污染物潜在生态风险系数为3~271,为低至中等生态风险,其他均为低生态风险。

2.4 污染成因分析

湾区重金属的污染物含量受水体中重金属负荷、泥水界面情况、底泥自身性质等因素影响,同时,湾区底泥中相关氧化物、氢氧化物通过共沉淀或吸附作用导致重金属积累^[9]。该湾区底泥表层重金属含量表明,北侧和东侧海湾区域污染物含量明显高于中心区域,环湾区域底泥污染程度高于中心区域。以重金属Hg为例,其在北侧和东侧海湾区域含量明显增高,主要源于早期该湾区承接北侧入湾河流域和周边汇水区生活污水、工业废水、库区内水产养殖污水,现状该湾区周边电子电气产品工业废水的排放,雨季排口溢流污染,同时也与自然沉积过程引起的金属元素循环及再分配有关。

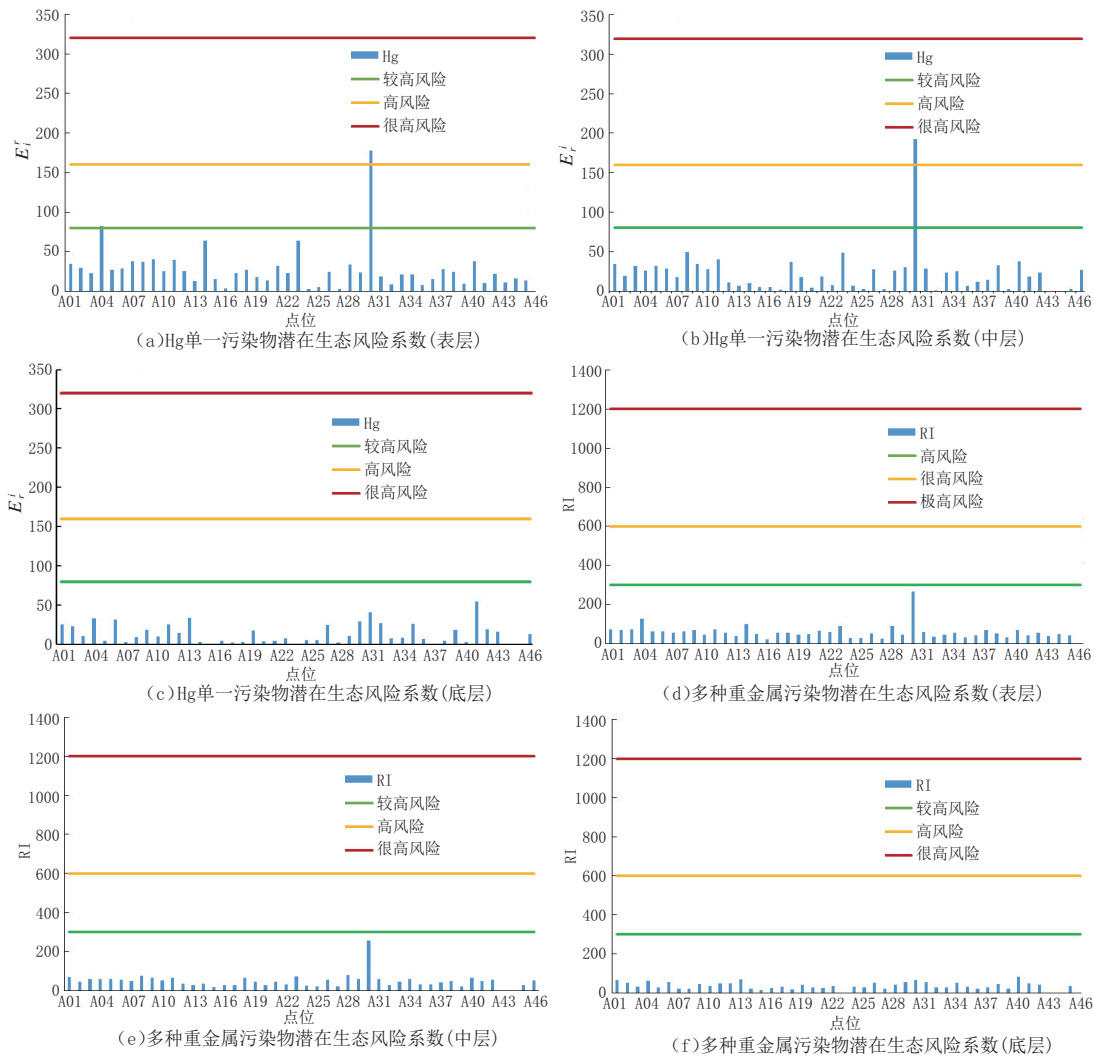


图3 重金属Hg单一污染物潜在生态风险和多种重金属污染物潜在生态风险分析

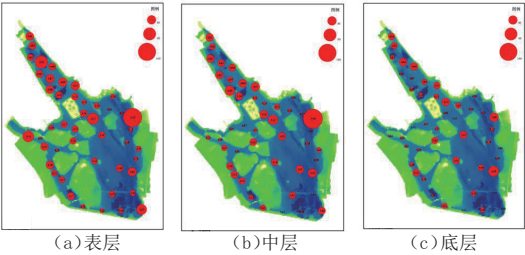


图4 重金属Hg单一污染物潜在生态风险分析图

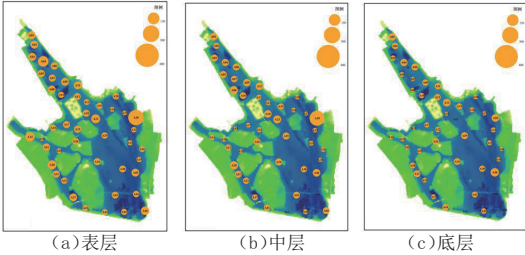


图5 多种重金属污染物潜在生态风险分析图

2.5 底泥资源化利用路径探讨

目前,关于底泥资源化利用的路径主要包括还田、还林、建设用地、湖滨带修复、建筑和水处理净化材料制备、底泥就地消纳等^[10]。我国对水体底泥环

境质量基准的研究尚属起步阶段,本研究结合底泥的资源化利用相关要求对底泥污染程度和处置方式的适用性进行评价。该海湾底泥有机质含量在0.97%~15.40%水平,TN在410~3 031 mg/kg水平,TP在176~2 470 mg/kg水平,根据泥质检测结果和重金属污染情况,采取合理的方式和措施对底泥进行分质分类处置。

(1)还田利用

疏浚底泥的资源化利用主要影响因素为有机质以及重金属含量,须经无害化处理才能用于农业生产。对照《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018),按照该标准规定的农用地土壤污染风险筛选值11项指标进行疏浚底泥检测分析。重金属检测结果表明,30号点位重金属Cu超过了农用地土壤污染风险筛选值,01、02、03、04、28、30号点位重金属Zn超过了农用地土壤污染风险筛选值,21、30、36号点位重金属Cd超过了农用地土壤污染风险筛选值,30号点位的重金属Hg超

过了农用地土壤污染风险筛选值。因此,该底泥不适用于还田。

(2) 还林利用

按照《绿化种植土壤》(GJ/T 340—2016)对绿化种植用地的规定指标进行检测分析。重金属检测结果表明:疏浚点位01、02、28、30号点位重金属Zn超过了绿化种植土Ⅱ级标准,其他重金属指标均未超过绿化种植土Ⅱ级标准;01、02号点位重金属Zn仅表层轻微超标绿化种植土Ⅱ级标准(其中,01号点位表层pH=6.37,重金属Zn含量260 mg/kg;02号点位表层pH=6.49,重金属Zn含量251 mg/kg)。进一步对土壤含盐量进行检测,其中盐碱地耐盐植物种植含盐量应 ≤ 1.5 g/kg,经检测,该海湾底泥含盐量在3.7~11.21 g/kg,无法满足还林绿化对土壤的盐度要求。

(3) 用于建设用地

按照《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600—2018)中建设用地土壤污染风险的筛选值和管制值,对底泥中重金属、有机物等进行了检测,结果表明其底泥基本可用于城市建设中的第一类用地。

(4) 护岸、水质净化材料制备

底泥经无害化处理后,若满足相关建材行业标准,可用于护岸材料、道路填料、建筑材料、水质净化吸附材料等^[11]。

(5) 就地消纳

底泥资源化利用路径还包括构建湖滨缓冲带、河口湿地、生物栖息^[7],本研究重点考虑底泥用于构建湖滨缓冲带、河口湿地、生物栖息地等就地消纳路径。上述就地消纳的资源化利用路径关键要解决底泥就地利用的污染防控问题^[12]。

本研究提出利用底泥构建深潭、浅滩交替的多样化栖息生境,并通过修复与底泥利用相结合的手段,实现栖息地构建和底泥资源化利用的双重目标。研究基于底泥污染程度,提出分质利用和就地消纳路径:

重点通过以下路径实现底泥就地消纳。中度和重度污染底泥(底泥污染物浓度 $1\ 000\text{ mg/kg} \leq \text{TN} \leq 2\ 100\text{ mg/kg}$, $600\text{ mg/kg} \leq \text{TP} < 1\ 060\text{ mg/kg}$)用于栖息地底层,轻污染底泥(污染物浓度 $1\ 000\text{ mg/kg} \leq \text{TN} \leq 2\ 100\text{ mg/kg}$, $500\text{ mg/kg} \leq \text{TP} < 600\text{ mg/kg}$ 底泥)用于栖息地表层,并进行表层污染防控。栖息地污染防控是目前底泥就地消纳备受关注的的问题,本研究栖息地污染防控采用生物、物理、化学相结合手段,具体通过天然和人工材料强化净化与湿地生态净化相结合手段实现。其中,人工材料强化净化技术包括底

泥原位覆盖技术和铁盐、钙盐、铝盐、镧改性材料等底泥总磷污染释放控制材料^[13-14]。本研究推荐采用物理、化学和生物相结合手段:首先,底部重中度污染底泥与表层轻度污染底泥之间覆盖土壤或者细沙形成物理隔绝,表层轻污染底泥敷设小粒径沸石等底泥原位覆盖材料;其次,辅助敷设表层除磷材料进行强化处理,形成初期稳定的泥水界面;最后,通过栖息地地形塑造,构建深潭、浅滩交替的生境,恢复挺水、沉水植物,进行栖息地污染净化和生态修复。同时,在底泥污染就地消纳周边,构建生态软围隔,保证底泥污染防控和水生植物初期恢复效果。

3 结 语

该封闭海湾污染底泥重金属分布特征主要受入湾支流和环湾污染汇入的影响,须结合有机质、氮磷等进行污染分析,实施湾区底泥环保清淤。基于工程疏浚后底泥的外运困难等实际问题,可参考本研究提供的清淤后污染底泥就地消纳和污染防控方案,进一步进行现场中试试验研究。最后,为实现湾区水质长治久清,需要同步加快推进环湾面源污染整治。

参考文献:

- [1] 向莹,张鸿涛,高宏洲,等.九江市琵琶湖底泥环境特征与生态清淤工程[J].中国给水排水,2021,37(14):142-150.
- [2] 李长志,邹勇军,李贤飞,等.上犹江水库(崇义段)底泥重金属分布特征及环境等级评价[J].东华理工大学学报(自然科学版),2019,42(4):381-384.
- [3] 吕拥军,时永生.武汉新区六湖水系湖泊底泥污染特性及潜在危害评估[J].给水排水,2016,52(S1):177-180.
- [4] 陈路锋,潘钰,曹梦西,等.武汉城市湖泊表层底泥汞分布、风险评价及影响因素[J].地球与环境,2022,50(3):388-396.
- [5] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control—A sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [6] 马丽,李吉鹏,陆志强.厦门杏林湾表层底泥重金属污染特征及潜在生态风险评价[J].生态科学,2013,32(2):212-217.
- [7] 李军,张原,龚香宜,等.福建省兴化湾表层底泥中重金属污染与评价[J].环境科学与技术,2008,31(1):125-128.
- [8] 王恩康,丰爱平,张志卫,等.兴化湾海域水体和表层底泥中重金属分布及其源解析[J].海洋科学进展,2019,37(4):696-708.
- [9] 陈守莉,王平祖,秦明周,等.太湖流域典型湖泊底泥中重金属污染的分布特征[J].江苏农业学报,2007,23(2):124-130.
- [10] 魏博娴.疏浚底泥资源化利用研究进展及展望[J].资源节约与环保,2012(6):31-32.
- [11] 魏佳明,张晓艺,李婉,等.湿地清淤底泥资源化处置现状与前景[J].湿地科学与管理,2019,15(2):66-69.
- [12] 顾竹珩,陈夷萍,冯嘉萍,等.城市河道底泥基于固化/稳定化处置技术的发展瓶颈与可持续利用途径[J].净水技术,2017(6):30-37.
- [13] 孙宁宁,陈蕾.底泥磷污染的修复方法研究进展[J].应用化工,2020,5(49):1284-1287.
- [14] 喻阳华.厌氧条件下深谷型湖泊底泥覆盖效果研究[J].环境工程,2015,2(2):53-57.