

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.13.016

# 湖南省水域底泥污染评价及资源化利用分析

杨帆<sup>1</sup>, 何丹丹<sup>2</sup>, 袁隆湖<sup>2</sup>, 刘旭冉<sup>2</sup>, 黎一夫<sup>2</sup>, 王冬波<sup>2</sup>

(1. 中路高科交通科技集团有限公司, 北京 100088; 2. 湖南大学 环境科学与工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 湘江、资江、沅江、澧水和洞庭湖是湖南省主要的饮用水源和纳污水体。城市化进程的加快、工业结构的落后导致这些水域出现了一系列环境问题。为了解湖南省水域底泥污染现状,对省内5大水域底泥进行取样,测试底泥样品的物理参数(pH、含水率)、营养参数(有机质、TCOD、总氮、总磷)和重金属(砷、镉、铬、铜、镍、铅、锌)含量。结果显示,湖南省水域的底泥pH在6.64~8.66之间,含水率为22.5%~41.0%,有机质含量为24.0~137.2 g/kg。采用单项指数法分析底泥重金属沿程空间分布特征发现,底泥重金属污染程度在各水域表现出较大的差异,大多数采样点的污染指数均小于1,污染评价等级属于清洁。然而金属Cd在澧水、沅江、资江、湘江和洞庭湖的平均含量分别为1.16、0.53、1.47、2.34和3.57 mg/kg。湘江和洞庭湖水域中Cd达到中度污染水平,其中洞庭湖水域的富丰肥业采样点Cd含量为标准值的17.72倍,属于高度污染水平。综上,大多数采样点的底泥中有机质含量都属于中低水平,底泥中氮、磷含量丰富,整体状况良好。除Cd以外的被测金属在各采样点均属于清洁或低污染水平,而Cd污染在各水域差异较大。在综合分析底泥物理性参数、营养参数和重金属含量的基础上,提出了针对湖南省污染底泥的资源化途径。

**关键词:** 湖南省; 底泥; 重金属; 资源化

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)13-0097-08

## Assessment of Sediment Pollution and Its Resource Utilization in the Water Areas of Hunan Province

YANG Fan<sup>1</sup>, HE Dan-dan<sup>2</sup>, YUAN Long-hu<sup>2</sup>, LIU Xu-ran<sup>2</sup>, LI Yi-fu<sup>2</sup>,  
WANG Dong-bo<sup>2</sup>

(1. RIOH High Science and Technology Group, Beijing 100088, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The main drinking water sources and receiving waters in Hunan Province include Xiang River, Zi River, Yuan River, Li River and Dongting Lake. The rapid urbanization and unreasonable industrial structure lead to a series of environmental problems in these water areas. To understand the current situation of sediment pollution in the water areas of Hunan Province, this paper sampled sediments in five major water areas in the province, and physical parameters (pH, moisture content), nutritional parameters (organic matter, TCOD, total nitrogen, total phosphorus) and heavy metals (arsenic, cadmium, chromium, copper, nickel, lead, zinc) content of the sediment samples were tested. The pH of the sediment was between 6.64 and 8.66, the moisture content was between 22.5% and 41.0%, and the

通信作者: 王冬波 E-mail: dongbowang@hnu.edu.cn

organic matter content was between 24.0 g/kg and 137.2 g/kg. The spatial distribution of heavy metals in sediment was analyzed by single index method. The heavy metal pollution degree of sediment showed great difference in different water areas. The pollution index of most sampling sites was less than 1, and the pollution evaluation level was clean. However, the average contents of Cd in Li River, Yuan River, Zi River, Xiang River and Dongting Lake were 1.16 mg/kg, 0.53 mg/kg, 1.47 mg/kg, 2.34 mg/kg and 3.57 mg/kg. Cadmium in Xiang River and Dongting Lake reached moderate pollution level, and the content of Cd in the sampling site of Fufeng Fertilizer Company in Dongting Lake was 17.72 times higher than the standard value, which belonged to high pollution level. In summary, the organic matter content in the sediment of most sampling sites was medium or low level, and the sediment was rich in nitrogen and phosphorus, which is in good overall condition. The pollution level of the measured metal at each sampling site was clean or low pollution level, but Cd pollution varied greatly in different water areas. Based on the comprehensive analysis of the physical parameters, nutrient parameters and heavy metal content of the sediment, the paper proposed a resource utilization approach for polluted sediment in Hunan Province.

**Key words:** Hunan Province; sediment; heavy metal; resource utilization

湖南地跨长江、珠江两大水系,属于亚热带季风气候,年均降雨量在1 300~1 600 mm之间。充沛的降雨导致湖南省河流密集、河网密布<sup>[1]</sup>。湘江、资江、沅江和澧水的流域面积为240 076 km<sup>2</sup>,位于湖南北部的洞庭湖水系总面积为2 820 km<sup>2</sup>,最大蓄水能力为244.8×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。

近年来,随着湖南省经济的快速发展,水域周边的农业、工业和生活污水大量排入河内造成水体污染。例如,湘江在“四水”中流域面积最广,也被称为湖南省经济走廊,沿途的冶炼厂矿、化工厂矿等重点污染企业排放的工业废水导致湘江重金属超标<sup>[2]</sup>;另一方面,农药与化肥的滥用、生活污水未经处理的排入,导致湘江水质为IV类或V类。

湖南省政府早在2006年就针对环境污染问题签署了污染减排责任书,并在“十二五”期间对湖南省的主要水域展开治理。治理过程中不可避免地会产生大量疏浚底泥,仅洞庭湖疏浚工程就可产生3.4×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>的疏浚底泥<sup>[3]</sup>。底泥含水量高、黏土颗粒多、强度低、运输困难,且往往含有大量的有毒重金属和有机污染物,如果处理不当,很容易造成环境污染,也会影响底泥的资源化利用<sup>[4]</sup>。目前,我国对河湖疏浚底泥的处置方法主要为焚烧或者填埋,这些方法虽然在很大程度上解决了疏浚底泥的出路问题,但是也产生了其他难题。将疏浚底泥稳定化、无害化、减量化处理后进行资源化利用,已成为

一种必然趋势。现阶段,已成熟应用的疏浚底泥资源化方式主要有两种,即土地利用和建筑利用。底泥土地利用投资少、能耗低,有机部分可转化为土壤改良剂,是最有前途的处理方法。疏浚底泥经过适当处理后,制得的产品具有较好的性能,符合行业标准要求,而且减少了建材制造业与其他行业的土壤竞争。因此,为适应水体综合整治的形势,为水体疏浚与管理及水生态环境的建设提供科学依据,有必要开展水体底泥污染评价,以掌握其性质及污染现状,并为后续资源化利用提出指导性建议。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 样品采集及处理

2019年11月,在湖南省主要的5个水域设置取样点,取样范围包括湖南省10个市、1个自治州。将河流分为上、中、下游,按照重要水域适当多布点与一般水域均匀布点相结合的方式以及保证采样点在河涌区段具有代表性的原则设置采样点。澧水设置集中村、任家洲2个采样点;沅江设置辰水、酉水、大杨溪、常德九中4个采样点;资江设置繁荣村、柿子洲、泥湾村3个采样点;湘江设置祁水入江口、白沙洲工业园、朱亭镇政府、湘钢排污口、洩水5个采样点;洞庭湖设置虾趴脑、柳林村、富丰肥业、新墙河进河口4个采样点。每个采样点取底泥20 g。将底泥样品均匀混合后置于具盖四氟乙烯样品瓶中,带回实验室,-4℃保存。采集的河底沉积物样

品经过自然晾干、剔除残杂物、碾磨、过筛(200目)等步骤处理以后待用。

## 1.2 检测指标和方法

疏浚底泥的检测指标包括pH、含水率、有机质、氮、TP、TOC、砷、铬、镉、铅。检测方法参照相关标准及技术规范。其中,测定pH时将底泥加入适量水制成混合液,利用pH计直接测量上清液pH,即为底泥的pH<sup>[5]</sup>。依据《土壤农业化学分析方法》,采用烘干法、重铬酸钾-硫酸消解法、硫酸-高氯酸消煮法分别测定底泥含水率、总氮和总磷;采用重铬酸钾容量法测定底泥中的有机质含量;依据《水和废水监测分析方法》(第4版),采用火焰原子吸收法测定镉、铬、铅、砷等金属离子含量。

## 1.3 重金属污染分布特征

采用单项指数法研究底泥重金属沿程空间分布特征,污染指数按式(1)计算。

$$I_i = C_i/S_i \quad (1)$$

式中: $I_i$ 为底泥中第*i*种金属元素的污染指数,其中 $I_i < 1$ 属于清洁, $1 \leq I_i < 3$ 为低污染, $3 \leq I_i < 4$ 为中污染, $I_i \geq 4$ 为高污染; $C_i$ 为底泥中第*i*种金属元素的实测含量,mg/kg; $S_i$ 为底泥中第*i*种金属元素的评价标准,选用《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)中的二级标准。

## 2 结果与讨论

### 2.1 底泥的物理性质

底泥一般由水和固体部分构成,表1为5个水域不同采样点底泥样品的含水率和pH。可知,底泥pH在6.64~8.66之间,大多数采样点的底泥呈中性(pH为6.5~7.5)及微碱性(pH为7.5~8.5),两者所占的比例分别为55.6%和33.3%。pH<6.5和pH>8.5的样本只占11.1%。澧水、沅江、资江、湘江、洞庭湖底泥的平均含水率分别为30.6%、27.6%、37.3%、31.5%和33.0%,其中富丰肥业采样点的含水率最大,西水采样点的含水率最小。

由于湖南省水域底泥pH多在6.8以上,因此有利于重金属保持结合状态而不溶出,降低重金属污染的风险<sup>[6]</sup>。除资江以外,其他水域均有采样点pH高于8.0的情况,这将无法满足直接农业利用的要求。各水域底泥含水量均较低,西水的含水率最低,分析原因可能是此处补给水泥沙含量高,经过水体的流动,悬浮的小颗粒和黏土状的低密度固体

流出,大颗粒的泥沙沉积下来,导致水分含量低。同时,黏土含量较低的底泥导致保持土壤持水量的能力较差<sup>[7]</sup>,从而不利于植物的生长发育,但疏浚底泥中的大粒径砂石较少,可保持一定的机械强度,宜应用于建筑行业或作为填方材料。

表1 底泥的物理性质

Tab.1 Physical properties of sediment

项 目	含水率/%	pH	
澧水	集中村	22.8 ± 1.5	7.14 ± 0.36
	任家洲	38.3 ± 2.1	8.66 ± 0.41
沅江	辰水	32.6 ± 1.6	7.97 ± 0.35
	西水	22.5 ± 1.4	7.87 ± 0.42
	大杨溪	30.4 ± 1.9	6.64 ± 0.35
	常德九中	24.8 ± 1.4	8.35 ± 0.34
资江	繁荣村	37.6 ± 1.3	6.92 ± 0.38
	柿子洲	35.8 ± 1.4	6.89 ± 0.40
	泥湾村	38.5 ± 1.9	7.26 ± 0.39
湘江	祁水入江口	28.6 ± 1.8	7.23 ± 0.36
	白沙洲工业园	28.4 ± 1.1	7.20 ± 0.43
	朱亭镇政府	39.2 ± 1.9	7.00 ± 0.43
	湘钢排污口	35.5 ± 1.6	8.14 ± 0.37
	洩水	25.7 ± 1.1	7.09 ± 0.33
洞庭湖	虾趴脑	28.8 ± 1.5	8.35 ± 0.42
	柳林村	30.6 ± 1.2	8.54 ± 0.32
	富丰肥业	41.0 ± 2.0	7.42 ± 0.36
	新墙河进河口	31.5 ± 1.8	7.61 ± 0.36

### 2.2 底泥营养成分分析

底泥中营养成分的含量是决定其是否可以农用的重要指标,各采样点底泥的测试结果见表2。可知,湖南省水域底泥中有机质含量范围为24.0~137.2 g/kg,澧水、沅江、资江、湘江和洞庭湖的有机质含量平均值分别为32.1、40.6、70.8、43.2和57.4 g/kg。TOC含量范围为13.9~79.6 g/kg。底泥中的有机质和TOC含量均较高,接近园林用地水平,约为土壤背景值的2倍<sup>[8]</sup>。土壤养分含量分级标准显示,有机质含量水平属于丰富的采样点占33.33%,属于较丰富的采样点占44.44%,属于中等水平的采样点只占22.22%。

湖南省水域底泥中的氮、磷含量也较高,且各采样点的差异较大。底泥中总氮含量主要集中在丰富水平(总氮>1.5 g/kg)。总磷达丰富(总磷>1.5 g/kg)、较丰富(0.75 g/kg<总磷≤1.5 g/kg)、中等(总磷≤0.75 g/kg)的比例分别为55.56%、33.33%、11.11%。分析原因,这可能与水体环境中生物的代

谢有关,一般底栖生物和藻类在春季进行繁殖,夏季生物量达到最大,此时动植物代谢旺盛,消耗大量有机物,而秋季气温的降低导致动植物逐渐死亡,释放大量有机物至底泥中,致使底泥受到的有机污染较为严重,底泥富营养化程度较高。

表2 各采样点底泥中营养物质的含量

Tab.2 Nutrient content in sediment at each sampling site  $g \cdot kg^{-1}$ 

项目	有机质	TOC	总氮	总磷	
澧水	集中村	28.5±1.4	16.5±0.8	1.19±0.06	0.87±0.29
	任家洲	35.7±1.8	20.7±1.0	2.63±0.13	1.10±0.08
沅江	辰水	37.5±1.9	21.8±1.1	2.72±0.14	1.56±0.05
	酉水	52.6±2.6	30.5±1.5	4.55±0.23	2.00±0.19
	大杨溪	40.1±2.0	23.2±1.2	3.98±0.20	2.16±0.08
	常德九中	32.0±1.6	18.6±0.9	2.08±0.10	1.20±0.20
资江	繁荣村	137.2±6.9	79.6±4.0	7.48±0.37	5.70±0.17
	柿子洲	35.6±1.8	20.6±1.0	2.37±0.12	1.65±0.07
	泥湾村	39.7±2.0	23.0±1.2	3.33±0.17	2.04±0.11
湘江	祁水入江口	32.6±1.6	18.9±0.9	2.29±0.11	1.41±0.06
	白沙洲工业园	26.1±1.3	15.1±0.8	0.94±0.05	0.48±0.04
	朱亭镇政府	31.8±1.6	18.4±0.9	1.39±0.07	0.90±0.06
	湘钢排污口	101.4±5.1	58.8±2.9	4.61±0.23	3.70±0.03
	洑水	24.0±1.2	13.9±0.7	2.72±0.14	1.45±0.08
洞庭湖	虾脑	26.3±1.3	15.3±0.8	1.03±0.05	0.57±0.10
	柳林村	33.4±1.7	19.4±1.0	2.36±0.12	1.54±0.07
	富丰肥业	129.1±6.5	74.9±3.7	5.28±0.26	4.09±0.02
	新墙河进河口	40.9±2.0	23.7±1.2	4.2±0.21	3.44±0.10

### 2.3 重金属含量分析

河湖底泥既可以为水体中的各类生物提供营养物质,又可以贮藏有毒有害物质<sup>[9]</sup>。大多数重金属进入水体后首先被悬浮颗粒物吸附,经过一段时间的絮凝沉淀,最终积累在底部沉积物中<sup>[10]</sup>。然而,吸附在沉积物中的重金属可通过一系列物理、化学和生物反应而释放出来,造成水环境的“二次污染”。该过程不仅会降低水体的功能,还会产生生物毒性作用<sup>[11-12]</sup>。因此,河流湖泊沉积物中的重金属含量常作为判断水环境质量的重要参考指标<sup>[13]</sup>。

湖南省主要水域底泥中重金属含量见表3。可知,As含量主要介于0.11~28.25 mg/kg之间,均值为9.64 mg/kg,最大值为最小值的256.82倍,分别出现在富丰肥业取样点和大杨溪取样点;重金属Cd含量为0.25~10.63 mg/kg,平均值为1.93 mg/kg,最大值为最小值的42.5倍,变化较大。Cr含量为12.69~26.69 mg/kg,平均值为20.85 mg/kg。Cu含量为8.15~45.13 mg/kg,平均值为18.16 mg/kg。Ni的平均含量为10.5 mg/kg,最大值仅为最小值的2.22倍。重金属Pb含量为10.03~44.31 mg/kg,平均值为22.60 mg/kg,最小值的采样点为虾脑,最大值取样点为富丰肥业。Zn含量为49.19~248.07 mg/kg,平均值为127.07 mg/kg,最大值为最小值的5.04倍。

表3 湖南省主要水域底泥中重金属含量

Tab.3 Heavy metal content of sediment in main water areas of Hunan Province  $mg \cdot kg^{-1}$ 

项目	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	
澧水	集中村	未检出	1.31±0.08	20.50±1.07	14.02±0.70	11.69±0.58	20.94±0.79	93.38±8.55
	任家洲	6.09±0.38	1.01±0.08	20.49±0.63	17.14±0.86	9.74±0.61	17.81±2.22	180.21±3.92
沅江	辰水	7.05±0.08	0.63±0.04	25.94±1.33	19.11±0.96	12.07±0.68	17.85±1.63	197.70±3.99
	酉水	1.30±0.29	0.44±0.22	22.69±0.68	8.15±0.41	11.04±0.53	17.94±1.97	81.25±2.46
	大杨溪	0.11±1.41	0.56±0.12	21.31±1.23	13.91±0.70	9.75±0.43	22.82±1.63	54.88±8.39
	常德九中	1.50±0.97	0.48±0.15	12.69±1.05	20.88±1.04	8.31±0.45	14.94±1.35	49.19±9.92
资江	繁荣村	1.94±0.22	1.46±0.06	24.69±1.04	45.13±2.26	17.23±0.48	17.81±1.49	99.78±12.40
	柿子洲	1.54±0.31	0.94±0.53	12.94±1.30	12.15±0.61	7.75±0.55	11.68±0.50	59.88±9.14
	泥湾村	5.88±0.35	2.01±0.07	19.56±1.01	18.28±0.91	8.88±0.60	11.88±0.89	49.25±4.06
湘江	祁水入江口	16.25±0.07	4.44±0.01	25.13±0.81	17.63±0.88	9.63±0.39	32.69±1.05	167.75±10.33
	白沙洲工业园	26.08±0.30	2.31±0.10	26.69±1.03	17.07±0.85	8.94±0.49	27.06±1.07	89.13±9.89
	朱亭镇政府	20.81±1.04	3.06±0.02	13.69±1.23	11.94±0.60	8.04±0.42	29.81±0.75	79.75±4.67
	湘钢排污口	7.54±0.08	0.25±0.02	20.13±1.30	11.42±0.57	9.58±0.86	32.63±0.89	206.63±9.01
	洑水	19.38±0.10	1.64±0.03	24.64±1.13	21.89±1.09	13.54±0.49	39.36±0.90	248.07±4.46
洞庭湖	虾脑	4.37±0.81	0.75±0.07	21.08±0.65	11.34±0.57	10.65±0.44	10.03±1.14	182.72±2.74
	柳林村	6.26±1.30	1.23±0.05	20.86±0.98	30.25±1.51	11.58±0.48	15.85±0.89	198.32±2.46
	富丰肥业	28.25±0.01	10.63±0.05	26.05±1.26	17.44±0.87	12.13±0.58	44.31±0.58	171.00±4.99
	新墙河进河口	未检出	1.66±0.03	16.25±1.02	19.13±0.96	8.56±0.45	21.40±0.59	78.45±2.99

### 3 讨论

#### 3.1 重金属污染评价

图1为底泥中As、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn和Cd的污染指数分布。可以看出,As在湘江和洞庭湖水域的污染指数变化较大,在其他水域采样点的变化不大。白沙洲工业园和富丰肥业采样点的As含量超过了《土壤环境质量标准》二级标准(25 mg/kg),在富丰肥业采样点的污染指数最大,高达1.13。Cr和Pb的污染指数变化不大,在所有采样点的含量都未超过标准值(300 mg/kg),最大污染指数分别为0.09和0.15,表明湖南主要水域受Cr和Pb的污染不显著。Cu和Ni的变化相似,在辰水、繁荣村和洩水出现轻微上升,且在繁荣村采样点均达到最大值。Zn污染的分布不规律,波动性较大,污染指数最大可达0.99,最小为0.20,在某些采样点的检测值很大,但都未超过标准值(250 mg/kg),属于轻微污染。

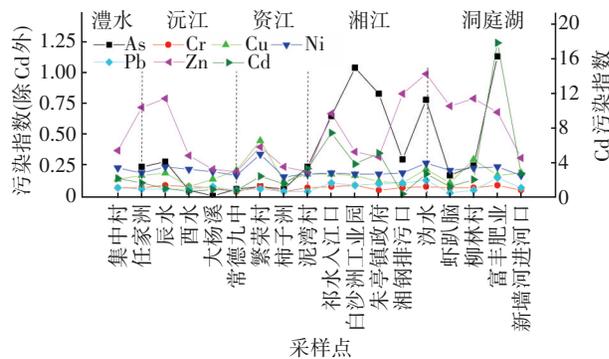


图1 底泥中As、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn和Cd的污染指数分布

Fig.1 Pollution index distribution of As, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn and Cd in sediments

Cd在各采样点底泥中的含量均很高,77.78%的采样点Cd污染指数>1,即14个采样点Cd含量超出标准值(0.6 mg/kg),且在富丰肥业采样点达到最大值10.63 mg/kg,为标准值的17.72倍。整体来看,Cd在澧水、沅江、资江的变化较平缓,差异不大,在湘江和洞庭湖区域污染指数呈波动状态,分布不规则。

从采样点来看,各水域底泥中Cr、Pb、Zn含量较大,但Cd的超标情况最严重。Cd在澧水、沅江、资江、湘江和洞庭湖的平均含量分别为1.16、0.53、1.47、2.34和3.57 mg/kg,分别为标准值的1.93倍、0.88倍、2.45倍、3.9倍和5.95倍,污染等级分布分别为低污染、清洁、低污染、中污染、中污染。可以看出,洞庭湖水域污染严重,其中富丰肥业采样

点的Cd超标情况最为严重,这可能与此采样点邻近的湖南省富丰肥业有限公司有关。该企业以生产和研发无机肥、有机肥和复合肥等化工产品为主,污染物排放量大,排放到水体中的重金属由于不可降解只能被迁移,聚集在底泥中,故该采样点Cd超标比较严重。湖南省水域底泥中As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn的平均污染指数分别为0.41、3.22、0.07、0.18、0.21、0.08、0.51,可见底泥中重金属污染程度排序为Cd>Zn>As>Ni>Cu>Pb>Cr。澧水、沅江、资江、湘江和洞庭湖水域底泥的金属污染指数平均值为0.45、0.27、0.49、0.83、1.11,可以发现,水域污染程度排序为洞庭湖>湘江>资江>澧水>沅江,且污染程度在各水域间的差异较大。

#### 3.2 污染现状

湘江、资江、沅江、澧水和洞庭湖及其支流贯穿湖南省各市县,其污染源主要是沿江农业用水、养殖废水、工业废水和部分城市生活污水。由于污染源的不同和地理条件的差异,造成各水域的污染情况和程度也有所不同。各水域中除个别采样点外,66.66%采样点底泥中的有机质含量都处于中低水平,底泥中氮、磷含量丰富,整体状况良好。Pb、Cr、As、Ni、Zn、Cu在各采样点均属于清洁或低污染水平,但是Cd污染在各水域差异较大。湘江和洞庭湖水域中Cd污染达到中度污染水平,其中洞庭湖水域富丰肥业采样点Cd含量严重超出标准值,属于高度污染水平。与中国其他河流底泥重金属含量对比,湖南省主要水域底泥中的As含量比义乌江、闽江、珠江的高,主要是由于湖南为中国主要的有色金属开采区。

#### 3.3 污染控制

湖南省的水污染主要来源于业污染、生活污染和农业污染。工业污染主要来源于湘江的衡阳至株洲流域,全省的冶炼厂矿、化工厂矿等重点污染企业都集中在此,部分大型企业在较长时间里都采用粗放式管理模式,日排放污水量可达4000 m<sup>3</sup>,且所排污水中重金属含量丰富<sup>[14]</sup>。流域沿岸居民生活中所产生的垃圾、粪便和污水等未经处理就排放,会对水体造成严重污染,这也是水体中氮、磷污染的主要来源<sup>[15]</sup>。农业污染的来源主要是化肥、农药、禽畜粪便,其中农药和化肥的滥用加剧了农业污染。

针对不同污染类型的水体底泥治理有不同的

方法,根据底泥处理的位置,主要包括原位处理和异位处理。实际工程中,由于原位处理持续时间长、效果不显著、常需要与其他技术相结合、易受环境条件影响等缺点,这使异位处理(底泥疏浚)成为一种经济、彻底的有效方法,也是发达国家修复有毒物质污染沉积物的重要方法。环境疏浚对底泥的处理效果明显,但在疏浚过程中,会不可避免地产生大量疏浚底泥。疏浚底泥经妥善处理,不仅不会对环境造成二次污染,而且能作为资源应用到多个领域中。

### 3.4 疏浚底泥资源化处理途径

疏浚底泥是一种极具开发价值的潜在资源。为了充分利用这一资源,减少对环境的危害,各国都在大力发展疏浚底泥利用技术。因为疏浚底泥的成分复杂,根据疏浚地区的差异、受污染情况的不同,资源化处理的途径也有所差异。针对湖南省疏浚底泥的特点,提出了底泥资源化利用途径,如图 2 所示,其中金属阈值①、②和③分别指的是《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018)、《绿化种植土壤》(CJ/T 340—2010)、《城镇污水处理厂污泥处置 制砖用泥质》(GB/T 25031—2010)中规定的金属含量限值。对于疏浚底泥的处理处置,脱水减量化是前提,资源利用是最终目标。疏浚底泥资源化利用应遵循无害、稳定、可靠的原则。利用过程应结合底泥性质、污染类型、污染程度,按照不同的方法进行资源化利用,以取得最优的经济效益。当疏浚底泥有机质含量较高且含盐量较低时,宜经过简单改良后应用于农业土地;当疏浚底泥有机质含量较低时,可采用免烧工艺制备砖瓦;而对于有毒有机物与重金属污染严重的底泥,可经过干化、添加混凝材料改性处理后作为回填土用于道路填方。

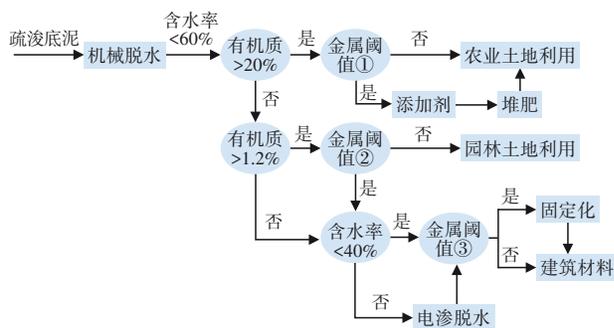


图 2 湖南省疏浚底泥资源化途径

Fig.2 Approaches to resource recycling of dredged sediment in Hunan Province

根据疏浚底泥的污染情况和资源化途径,比较和选择适宜的资源化处理技术是有必要的。针对本研究各采样点提出的疏浚底泥资源化建议见表 4。

表 4 采样点疏浚底泥资源化建议

Tab.4 Suggestions for resource recycling of dredged sediments at each sampling site

采样点	污染情况	资源化途径
繁荣村、湘钢排污口、富丰肥业	有机质含量高、重金属含量低	农业土地利用
西水、大杨溪、常德九中	有机质含量较低、重金属含量低	公园、学校、居民区绿化土地利用
辰水、柿子洲、虾趴脑	有机质含量较低、重金属含量高	绿化带、绿地、防护林土地利用
集中村、任家洲、泥湾村、祁水入江口、白沙洲工业园、朱亭镇政府、洩水、柳林村、新墙河进河口	有机质含量低、重金属含量高	建筑材料

对于主要污染物是有机物的疏浚底泥,由于底泥中含有大量的营养物质,常被用于提高土地肥力,只需对疏浚后的底泥进行脱水固化处理,以满足土地利用相关标准的要求即可。对于有机质含量>20%的底泥,金属含量符合《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018)规定的阈值,则可直接应用在耕地、果林、牧草地等农业用地中。例如,繁荣村和湘钢排污口采样点的底泥可混以猪粪等物质提高有机质含量后直接进行土地利用;富丰肥业采样点的底泥有机质含量虽高,但其中 Cd 含量超标,针对这种底泥可以添加少量农业废物,比如稻草、菜叶、麸皮等,作为膨胀剂进行堆肥以降低重金属的生物有效性,钝化底泥中的重金属<sup>[16-17]</sup>。

对于有机质含量介于 1.2%~20%的底泥,根据《绿化种植土壤》(CJ/T 340—2010)规定的重金属含量阈值判定其所属等级。例如,根据该标准,西水、大杨溪、常德九中采样点的底泥属于 II 级,可作为公园、学校、居民区等与人接触较为密切的园林绿化土地利用,辰水、柿子洲、虾趴脑处的底泥为 III 级,可作为道路绿化带、工厂附属绿地等有潜在污染源的绿地或防护林等与人接触较少的绿化用地。

对于重金属含量高且有机质含量低的底泥,重金属的稳定和固定是前提。这种类型的底泥可经过有效的前处理使其脱水,确保含水率在 40% 以

下。按照《城镇污水处理厂污泥处置 制砖用泥质》(GB/T 25031—2010)规定的金属含量判断该底泥是否可以作为建筑材料的原料进行利用,若存在底泥金属超标的情况,可先进行固定化等前处理稳定重金属后再用于制备建筑材料。

对于含有新兴污染物、有毒有害污染物的疏浚底泥,需要在资源化利用前对这些污染物进行处理。Zheng等<sup>[18]</sup>的研究表明,经过20 d有氧堆肥,掺有20%蘑菇残渣的底泥中壬基酚含量从21.1 mg/kg降至6 mg/kg,降解率为71.6%,适当延长通风时间可以提高降解率。Maturro等<sup>[19]</sup>发现,经过70 d的厌氧生物处理,在原始海洋沉积物中检测到的最具代表性的两种多氯联苯同系物及其混合物的浓度分别降低了32.5%、23.8%和46.7%。

#### 4 结论

① “一湖四水”的污水污泥治理是湖南省“两型社会”建设工作的重要内容,而污泥治理具有复杂性与综合性。湘江、洞庭湖污染问题较为严重,工业废水、农业污水和生活污水是导致湘江水污染的三大因素。由于污染源的不同和地理条件差异,造成各水域底泥污染情况有所不同。

② 除个别采样点外,各水域底泥中的有机质含量属于中低水平,底泥中氮、磷含量丰富,重金属含量除个别区域受Cd污染外,其余区域金属污染情况为清洁或低污染水平。

③ 由于疏浚底泥量大、性质与土壤接近,且营养丰富,因此土地利用是疏浚底泥资源化的重要途径。将底泥用于农业和园林,可通过培育作物产生一定的经济效益。综合考虑,疏浚底泥应以回归土地为主的大规模资源化利用方式为主,以建筑材料等资源化利用方式为辅,并结合疏浚底泥的污染类型、污染程度,按照不同的方法参照相关规定进行资源化利用,以带来最优的经济效益。

#### 参考文献:

[1] 祁剑青. 湖南传统民居的地域类型及其对自然地理环境的适应性[J]. 华中建筑, 2020, 38(8): 109-112.  
 QI Jianqing. The regional types of traditional dwellings and adaptability to natural geographical environment in Hunan Province[J]. Huazhong Architecture, 2020, 38(8): 109-112(in Chinese).

[2] 严艺琪. 浅析湘江流域水污染的治理现状[J]. 中国

资源综合利用, 2019, 37(23): 36-38.

YAN Yiqi. Analysis on the status quo of water pollution control in Xiangjiang River basin [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(23): 36-38 (in Chinese).

[3] 谭岚. 基于DEA的洞庭湖河湖疏浚投入产出效率分析[J]. 中国农村水利水电, 2012(7): 83-86, 90.

TAN Lan. Input-output efficiency analysis of Dongting Lake dredging based on DEA model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(7): 83-86, 90 (in Chinese).

[4] 王振雷, 桑洛滨, 柳志国, 等. 河道底泥处理技术和资源化利用研究进展[J]. 广州化工, 2019, 47(22): 41-42, 52.

WANG Zhenlei, SANG Luobin, LIU Zhiguo, et al. Research progress on treatment technology and resource utilization of river sediment [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2019, 47(22): 41-42, 52(in Chinese).

[5] 李印霞, 刘碧波, 付景保, 等. 模拟酸雨对巢湖底泥营养盐和重金属释放及其影响[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(7): 1612-1618.

LI Yinxia, LIU Bibo, FU Jingbao, et al. Effects of simulated acid rain on the distribution and transformation of pollutants in sediment of Lake Chaohu [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(7): 1612-1618(in Chinese).

[6] 林振波, 何少华, 凌静, 等. 底泥吸附及释放重金属的研究[J]. 山东化工, 2012, 41(12): 20-23.

LIN Zhenbo, HE Shaohua, LING Jing, et al. Adsorption-release of heavy metals in sediment research [J]. Shandong Chemical Industry, 2012, 41(12): 20-23(in Chinese).

[7] 王向辉, 周鑫, 吴高蓉, 等. 美舍河清淤底泥分析评价及土地资源化利用[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(15): 360-364.

WANG Xianghui, ZHOU Xin, WU Gaorong, et al. Analysis, evaluation and resource utilization of bottom muddies in Meishe River [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(15): 360-364(in Chinese).

[8] 杨宁, 杨满元, 姜琳, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复过程中土壤可矿化碳库特征[J]. 草地学报, 2019, 27(2): 320-325.

YANG Ning, YANG Manyuan, JIANG Lin, et al. Properties of mineralizable carbon (MC) pool during re-vegetation on sloping-land with purple soils in Hengyang, Hunan Province [J]. Acta Agrestia Sinica,

- 2019, 27(2):320-325(in Chinese).
- [9] 郭曼,郭帅,李志能. 广州市黑臭河涌底泥污染特征分析与评价[J]. 河北环境工程学院学报, 2020, 30(5): 85-89.  
GUO Man, GUO Shuai, LI Zhineng. Analysis and evaluation of sediment pollution characteristics of black and odorous river substrate sludge in Guangzhou [J]. Journal of Hebei University of Environmental Engineering, 2020, 30(5): 85-89(in Chinese).
- [10] 秦延文, 韩超南, 张雷, 等. 湘江衡阳段重金属在水体、悬浮颗粒物及表层沉积物中的分布特征研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(11): 2836-2844.  
QIN Yanwen, HAN Chaonan, ZHANG Lei, *et al.* Distribution of heavy metals among surface water, suspended solids and surface sediments in Hengyang section of Xiangjiang River [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32 (11) : 2836-2844 (in Chinese).
- [11] PULATSÛ S, TOPÇU A. Review of 15 years of research on sediment heavy metal contents and sediment nutrient release in inland aquatic ecosystems, Turkey [J]. Journal of Water Resource and Protection, 2015, 7(2): 85-100.
- [12] 朱青青, 王中良. 中国主要水系沉积物中重金属分布特征及来源分析[J]. 地球与环境, 2012, 40(3): 305-313.  
ZHU Qingqing, WANG Zhongliang. Distribution characteristics and source analysis of heavy metals in sediments of the main river systems in China [J]. Earth and Environment, 2012, 40(3): 305-313(in Chinese).
- [13] 郑丙辉, 秦延文, 张雷, 等. 重金属污染沉积物质量评价研究——以太湖为例[J]. 中国环境科学, 2012, 32(10):1860-1866.  
ZHENG Binghui, QIN Yanwen, ZHANG Lei, *et al.* Quality assessment technology of sediment polluted by heavy metals of the Taihu Lake [J]. China Environmental Science, 2012, 32(10): 1860-1866 (in Chinese).
- [14] 彭翠英, 李志良, 黄微, 等. 湘江中游衡阳—株洲段沉积物几种典型重金属的污染特征及其生态风险评价[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2019, 33(4): 89-96.  
PENG Cuiying, LI Zhiliang, HUANG Wei, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and potential ecological risk assessment of sediments of in Hengyang-Zhuzhou section of Xiangjiang River [J]. Journal of University of South China (Science and Technology), 2019, 33(4): 89-96(in Chinese).
- [15] 彭亚辉, 周科平, 蒋俊伟. 湘江流域长株潭段水污染负荷时空分布规律及成因[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(9): 108-116.  
PENG Yahui, ZHOU Keping, JIANG Junwei. The spatial-temporal distribution and causes of water pollution loads on Xiangjiang River basin in Changzhutan [J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23 (9): 108-116(in Chinese).
- [16] FARRELL M, JONES D L. Use of composts in the remediation of heavy metal contaminated soil [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 175 (1/3) : 575-582.
- [17] ROSEN V, CHEN Y. The influence of compost addition on heavy metal distribution between operationally defined geochemical fractions and on metal accumulation in plant [J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, 14: 713-720.
- [18] ZHENG G D, CHEN T B, YU J, *et al.* Impact of composting strategies on the degradation of nonylphenol in sewage sludge [J]. Ecotoxicology, 2015, 24 (10) : 2081-2087.
- [19] MATTURRO B, UBALDI C, GRENNI P, *et al.* Polychlorinated biphenyl (PCB) anaerobic degradation in marine sediments: microcosm study and role of autochthonous microbial communities [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23:12613-12623.

作者简介:杨帆(1986-),男,湖南长沙人,硕士,助理研究员,主要从事交通运输行业环境保护方面的研究工作。

E-mail:496312166@qq.com

收稿日期:2020-08-11

修回日期:2020-11-24

(编辑:任莹莹)