董志强, 彭斯涵, 刘雪平, 等. 生物炭基絮凝剂对河道底泥的脱水效果及应用[J]. 净水技术, 2025, 44(3): 153-158,200.
DONG Z Q, PENG S H, LIU X P, et al. Effect and application of biochar based flocculants on river sediments dewatering[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(3): 153-158,200.

生物炭基絮凝剂对河道底泥的脱水效果及应用

董志强[1,2,3,*],彭斯涵[1],刘雪平[4],李瑾如[5],杨蒙岭[1],何海涛[1]
(1. 中铁上海工程局集团市政环保工程有限公司,上海 200436;2. 同济大学环境科学与工程学院,上海 200092;3. 中国铁路工程集团有限公司,北京 100039;4. 中铁上海工程局集团有限公司,上海 201906;5. 中国铁工投资建设集团有限公司,北京 101300)

摘 要 河道底泥的固化脱水是底泥疏浚过程中的关键步骤。【**目的**】 文章主要探究了生物炭基絮凝剂投加量对河道底泥脱水性能的影响。【**方法**】 通过污泥比阻、污泥压滤液水质检测等试验探究了三氯化铁、聚合氯化铝(PAC)、聚丙烯酰胺(PAM)和污泥基生物炭在不同配比组成下对底泥脱水效果的影响。【**结果**】 最终确定污泥基生物炭具有较好的水质改善效果,且结合成本、脱水效率确定絮凝剂 PAM:PAC:污泥基生物炭最佳投加比例为 0.03%∶1%∶3%。【**结论**】 在此基础上进一步进行实际项目应用,结果表明,投加上述生物炭基絮凝剂后河道底泥的脱水效果得到了明显改善。

关键词 底泥 生物炭 絮凝剂 污泥比阻 脱水固化
中图分类号: X703 **文献标志码**: A **文章编号**: 1009-0177(2025)03-0153-07
DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.03.018

Effect and Application of Biochar Based Flocculants on River Sediments Dewatering

DONG Zhiqiang[1,2,3,*], PENG Sihan[1], LIU Xueping[4], LI Jinru[5], YANG Mengling[1], HE Haitao[1]
(*1. Municipal Environmental Protection Engineering Co., Ltd. of CREC Shanghai Group, Shanghai 200436, China;*
2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. China Railway Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100039, China;
4. Shanghai Civil Engineering Group Co., Ltd. of CREC, Shanghai 201906, China;
5. China Railway Construction Machinery Rental Co., Ltd., Beijing 101300, China)

Abstract The solidification and dewatering of river sludge is a key step in process of sludge dredging. [**Objective**] This paper mainly studied the effect of the dosage of biochar based flocculants on the dewatering performance of river sludge. [**Methods**] Through experiments such as sludge specific resistance and tail water quality detection, the influence of $FeCl_3$, polymerised aluminum chloride, polyacrylamide, and sludge based biochar on the dewatering effect of sludge under different ratios was explored. Finally, it was determined that sludge based biochar has a good water quality improvement effect. [**Results**] Based on cost and dewatering efficiency, the optimal dosage ratio of flocculant PAM ∶ PAC ∶ sludge based biochar was determined to be 0.03% ∶ 1% ∶ 3%. [**Conclusion**] On this basis, further practical project applications are carried out, and the result shows that the dewatering effect of river sludge is significantly improved after the addition of the aforementioned biochar based flocculant.

Keywords sediment biochar flocculant specific resistance dewatering and solidification

河道底泥是经过大气沉降、雨水冲刷、污水排放、动植物尸体沉降等途径长期累积的沉积物。长期的外源输出和内源积累导致各种物质通过吸附、络合、絮凝、沉降等过程聚集于底泥中,若对这些沉积物处理不当,极易对环境造成二次污染[1-2]。因此,河道底泥污染及其有效的处理处置问题已成为环境保护中亟待解决的问题。底泥疏浚是改善水质的主要方法,研究疏浚底泥的固化、脱水是处理底泥污染的实用技术和必经之路[3]。

[收稿日期] 2023-08-17
[基金项目] 中国中铁股份有限公司重大课题(2022-重大-23);上海市青年科技启明星项目资助(23QB1406400)
[通信作者] 董志强(1990—),男,博士研究生,研究方向为水环境治理,E-mail:1710040@tongji.edu.cn。

目前,疏浚污泥的主要研究对象为市政工程中的清淤污泥[4],机械脱水法由于脱水效率高、效果良好且稳定而被广泛应用于淤泥脱水干化[4-6],但由于河道底泥中含有大量有机物,有强亲水性从而难以进行脱水处理[1]。故需要研究一种低成本、高效率的絮凝剂对河道底泥进行预处理,既能提升底泥的脱水性能,又能有效降低底泥中的污染物[7-8]。

研究基于此,着重探究了一种生物炭基絮凝剂[6],其主要成分为聚丙烯酰胺(PAM)、聚合氯化铝(PAC)和底泥就地资源化产物污泥基生物炭。通过进行质量配比、投加等试验研究,结合成本、脱水效率等综合效果比对,最终确定各药剂最佳投加比例,在降低污染的条件下明显改善底泥脱水效率。并且,在此基础上进一步进行实际项目应用,取得了较好的改善效果。

1 材料与方法

1.1 试验地点及供试材料

试验所需底泥采集自广东省某水环境整治项目,在该项目选取 7 个流域位点采用活塞式沉积物采样器(XDB0204)YQ-050-03 定点采样。采集的底泥样品进行机械搅拌和混匀,经重力沉降,弃去上清液后放置于 4 ℃冰箱待用。原污泥性质如表 1 所示。

表 1 试验泥样性质

Tab. 1 Characteristics of River Sediments Sludge Samples

检测项目	检测结果	检出限
pH 值	6.02	/
镉/(mg·kg^{-1})	0.28	0.04
铬/(mg·kg^{-1})	41	4
汞/(mg·kg^{-1})	0.412	0.002
含水率	37.8%	0.01%
镍/(mg·kg^{-1})	20	3
铅/(mg·kg^{-1})	45	10
砷/(mg·kg^{-1})	9.86	0.01
铜/(mg·kg^{-1})	27	1
锌/(mg·kg^{-1})	238	1
总氮(TN)/(mg·g^{-1})	0.054	0.014
总磷(TP)(全 P)/(mg·g^{-1})	1.5	0.003

1.2 试验方法

1.2.1 生物炭的制备

生物炭来自于河道项目所在地的某市政污泥碳化处理厂,主要通过水热炭化法制备[9],其工艺为:将静置 12 h 后的底泥弃去上清液,按质量比 1∶4 加入去离子水,在限氧条件下于高压密闭环境中进行水热炭化反应,反应时间为 4~5 h,热解产物即为生物炭[10]。反应结束后将得到的生物炭用去离子水冲洗 3 次,并放入烘箱于 105 ℃下烘干备用。

厌氧高温热解使得污泥中难以被分离和去除的抗生素等有机物被完全热解,热解后生成的生物炭比表面积大、表面基团丰富且 N、P、K 等元素丰富,是良好的环境修复材料并为植物生长提供一定的养分,可以实现污泥的资源化利用。生物炭的具体性质如表 2 所示。

表 2 生物炭性质

Tab. 2 Characteristics of Biochar

检测项目	检测结果
pH 值	8.71
As/(mg·kg^{-1})	未检出
Cd/(mg·kg^{-1})	1.90
Cr/(mg·kg^{-1})	68.85
Cu/(mg·kg^{-1})	61.39
Ni/(mg·kg^{-1})	15.93
Pb/(mg·kg^{-1})	42.24
Zn/(mg·kg^{-1})	1 911.37
比表面积值/(m^2·g^{-1})	28.97

生物炭能谱(energy dispersive spectrometer, EDS)平面扫描分析如图 1 所示。扫描结果显示,生物炭中主要含有 O、C、Ca、Fe、Si 等元素,其中以 O 元素(38.1%)、C 元素(27.49%)、Ca 元素(21.51%)为主。

1.2.2 污泥比阻(SRF)试验

SRF 是表示污泥过滤性能的综合性指标,能反映同一污泥或不同污泥加入絮凝剂后的过滤性能[11-12]。SRF 越大,脱水性能越差,反之,脱水性能越好[11]。

本试验装置由真空泵、稳压瓶、具塞量筒、抽气接管、真空表、布氏漏斗等组成。取 40 mL 经重力沉降后底泥于 100 mL 的烧杯中,按不同配比投加絮凝剂并进行搅拌。将经絮凝剂调理过的污泥混合样均匀后倒入古氏漏斗,静置 1 min 直至漏斗底部不再有滤液流出。开启真空泵,到额定真空度(0.05 MPa)时,开始每隔 15 s 记录 1 次滤液体积,

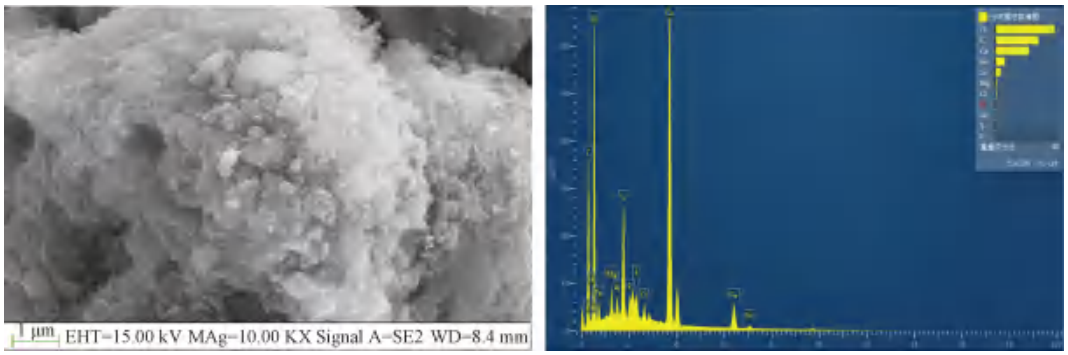

图 1 生物炭 EDS 平面扫描分析图

Fig. 1 EDS Plane Scanning Analysis of Biochar

直至漏斗中污泥层出现裂缝,即真空被破坏为止。根据记录所得数据测定 SRF。所取污泥于 4 ℃以下保存,并于 48 h 内使用。

本试验使用氯化铁($FeCl_3$)、PAM、PAC 及污泥基生物炭作为絮凝剂,絮凝剂的添加量如表 3 所示。

表 3 絮凝剂添加量

Tab. 3 Flocculants Dosages

试验序号	PAM	PAC	$FeCl_3$	污泥基生物炭
1	0.03%	0.5%	/	/
2	0.03%	0.5%	0.5%	/
3	0.03%	0.5%	1.0%	/
4	0.03%	0.5%	2.0%	/
5	0.03%	0.5%	1.0%	1%
6	0.03%	0.5%	1.0%	3%
7	0.03%	0.5%	/	3%
8	0.03%	1.0%	/	/
9	0.03%	1.0%	/	3%

1.2.3 分析方法

本试验中通过 SRF 试验测试 $FeCl_3$、PAM、PAC 等复配污泥基生物炭调理剂的投加比例对污泥脱水性能的影响,并对 SRF 试验后产生的污泥压滤液水质进行定性分析,测定其总悬浮物(TSS)、色度、浑浊度、化学需氧量(COD_{Cr})、氨氮、TP 等参数,再结合光谱分析探究不同投加比例下的复配污泥基生物炭调理剂对泥饼性质的影响。

2 结果与讨论

2.1 复配污泥基生物炭对 SRF 值的影响

本试验通过分析河湖底泥的 SRF 来评价不同调理剂对污泥脱水性能的影响,经过多次试验的 SRF 数据如表 4 所示。

分析表 4 中试验序号 1~4 可知,在 PAM、PAC 投加量分别为 0.03%和 0.5%时,$FeCl_3$ 投加量从 0 增至 2%,SRF 值从 9.39×10^{10} 先增至 1.17×10^{11} 后降至 7.30×10^{10}。即少量投加 $FeCl_3$ 时,污泥脱水性

表 4 河道底泥 SRF 数据

Tab. 4 SRF Data of River Sediments

试验序号	PAM	PAC	$FeCl_3$	污泥基生物炭	SRF	含水率
CK	/	/	/	/	3.20×10^{11}	45.8%
1	0.03%	0.5%	/	/	9.39×10^{10}	38.2%
2	0.03%	0.5%	0.5%	/	1.17×10^{11}	56.9%
3	0.03%	0.5%	1.0%	/	7.90×10^{10}	58.7%
4	0.03%	0.5%	2.0%	/	7.30×10^{10}	47.9%
5	0.03%	0.5%	1.0%	1%	7.82×10^{10}	47.7%
6	0.03%	0.5%	1.0%	3%	4.53×10^{10}	42.9%
7	0.03%	0.5%	/	3%	1.18×10^{11}	45.8%
8	0.03%	1.0%	/	/	7.30×10^{10}	45.9%
9	0.03%	1.0%	/	3%	5.96×10^{10}	49.6%

注:CK 代表空白对照组,即不加任何药剂。

能有所下降,但随着 $FeCl_3$ 投加量的增加,污泥脱水性能随之得到显著提升。其原理主要是通过投加 $FeCl_3$,利用吸附电中和作用使其脱稳,聚集成能够沉淀的大颗粒的矾花,从而提高沉淀速度和处理效果。但对比试验序号 3、4 可知,在 $FeCl_3$ 投加量达到 1.0%后随其投加量的增大 SRF 值降幅缓慢,因此从经济角度考虑,可认为 $FeCl_3$ 的最佳投加量为 1.0%。

分析试验序号 1、6、7 可知,在保持 PAM、PAC 投加量分别为 0.03%和 0.5%时,只加入 3%污泥基生物炭,SRF 值从 9.39×10^{10} 增至 1.18×10^{11},污泥脱水性能下降;但在此基础上再加入 1.0% $FeCl_3$,SRF 值从 1.18×10^{11} 降至 4.53×10^{10},污泥脱水性能显著提升。对比试验序号 5、6,污泥基生物炭投加量从 1%增至 3%时,SRF 值从 7.82×10^{10} 降至 4.53×10^{10},污泥脱水性能显著提升,可认为污泥基生物炭的最佳投加量为 3%。

分析试验序号 1、8、9 可知,保持 PAM 投加量为 0.03%时,PAC 投加量从 0.5%增至 1.0%,SRF 值从 9.39×10^{10} 降至 7.30×10^{10},污泥脱水性能有所提升;在此基础上加入 3%污泥基生物炭,SRF 值持续降至 5.96×10^{10},污泥脱水性能得到进一步提升。这可能是由于污泥基生物炭具有丰富且合适的孔隙结构,能够保证在后续污泥脱水过程为水流提供通道,并能够在脱水过程中对污泥絮体起到支撑作用,避免组成絮体的有机物在受压脱水过程中变形导致空隙堵塞,从而提高污泥的脱水效率。

对比试验序号 6、9,虽然当调理剂 PAM∶PAC∶$FeCl_3$∶污泥基生物炭投加比例为 0.03%∶0.5%∶1.0%∶3%时,SRF 值最小,为 4.53×10^{10};但当 PAM∶PAC∶污泥基生物炭比例调整为 0.03%∶1.0%∶3%时,SRF 值略升高至 5.96×10^{10},SRF 值变幅较小,效果差距不大。另外,从经济性分析,目前市场上工业用的 PAC 价格为 1 000~2 000 元/t,而 $FeCl_3$ 一般为 2 500~4 000 元/t,$FeCl_3$ 价格为 PAC 价格的 2.0~2.5 倍,由此可知采用 PAC 更为经济有效。除此之外,在现场应用方面,选用 3 种配方较 4 种配方而言加药装置更少,操作更简便。因此,从经济、操作可行等角度可认为絮凝剂的最佳投加比例为 0.03%PAM∶1%PAC∶3%污泥基生物炭。

2.2 污泥压滤液水质分析

污泥压滤液水质检测结果如表 5 所示。

表 5 污泥压滤液水质悬浮物、色度、浑浊度、COD_{Cr}、氨氮、TP 检测结果

Tab. 5 Determination Results of SS, Chroma, Turbidity, COD_{Cr}, Ammonia Nitrogen and TP in Sludge Filtrate Water

试验序号	PAM	PAC	污泥基生物炭	悬浮物/(mg·L^{-1})	色度/度	COD_{Cr}/(mg·L^{-1})	氨氮/(mg·L^{-1})	TP/(mg·L^{-1})	浑浊度/NTU
1	0.03%	0.5%	0	22.36	203.87	19.18	13.51	0.999	18.14
2	0.03%	0.5%	3%	15.63	139.53	17.52	9.25	0.947	15.41
3	0.03%	1.0%	0	68.43	615.21	21.78	11.22	0.511	59.88
4	0.03%	1.0%	3%	42.38	364.05	16.15	7.39	0.322	37.85

分别对比试验 1、3 和 2、4 可知,污泥基生物炭的添加有效降低了污泥压滤液中悬浮物的含量。当 PAM 投加量为 0.03%、PAC 投加量为 0.5%时,污泥基生物炭投加量由 0 增至 3%,污泥压滤液悬浮物含量下降了 30.1%,色度下降了 31.6%,浑浊度下降了 15.0%;当 PAM 投加量为 0.03%、PAC 投加量为 1.0%时,污泥基生物炭投加量由 0 增至 3%,污泥压滤液悬浮物含量下降了 38.1%,色度下降了 40.8%,浑浊度下降了 36.8%。

从 COD_{Cr}、氨氮、TP 的检测结果可以看出,加入 3%污泥基生物炭后,COD_{Cr} 和 TP 含量均有一定程度的下降。当 PAM 投加量为 0.03%、PAC 投加量为 0.5%时,污泥基生物炭投加量由 0 增至 3%,污泥压滤液 COD_{Cr} 含量下降了 8.7%,氨氮含量下降了 31.5%,TP 含量下降了 5.2%;当 PAM 投加量为 0.03%、PAC 投加量为 1.0%时,污泥基生物炭投加量由 0 增至 3%,污泥压滤液 COD_{Cr} 含量下降了 25.8%,氨氮含量下降了 34.1%,TP 含量下降了 37.0%。

上述研究表明,污泥基生物炭的投加对改善水质有明显作用,这是由于其表面具有发达的孔隙结构、较大的比表面积,对于污废水中的悬浮物质、有机物质及有色物质等有着很好的吸附效果[13-15],并且 PAM 和 PAC 的投加进一步增添了污泥基生物炭

的孔隙度,提高了污泥生物炭的吸附效率。上述研究还表明,当 PAM 投加量为 0.03%、PAC 投加量为 1.0%时,污泥基生物炭的吸附能力得到更大提升,因此可再次确认絮凝剂 PAM∶PAC∶污泥基生物炭的最佳投加比例为 0.03%∶1.0%∶3%。

2.3 现场应用

该生物炭基絮凝剂已成功用于施工现场,底泥处理场设置污泥存放区、絮凝剂搅拌区、污泥脱水作业区、出泥区,如图 2 所示。底泥处理场主要配备设备:格栅 1 套,筛机 2 套,絮凝搅拌设备 3 套,压滤机 2 套。

压滤机疏浚泥浆经管道、泥罐车输送至淤泥处理场存放区,并采用格栅机拦污、粗颗粒自行沉淀后,即可将泥浆用渣浆泵送至配浆池,在输送管道中添加比例为 0.03%(PAM)∶1%(PAC)∶3%(污泥基生物炭)的调理剂;用渣浆泵将配浆池中的泥浆送入脱水固结设备,淤泥脱水固结后含水率控制在 40%以内,泥饼经晾晒至含水率为 30%以内,可用作工程用土。

在现场应用中,污泥压滤液主要去向为:一部分作为循环水回用至储泥槽,用于稀释泥浆以便顺利泵出;另一部分用于一体化设备的生化处理过程。因此,污泥压滤液的净化有利于减少后端处理的负荷,PAM∶PAC∶污泥基生物炭投加比例为 0.03%∶1%∶3%的絮凝剂在实际工程运用中具有重要意义。

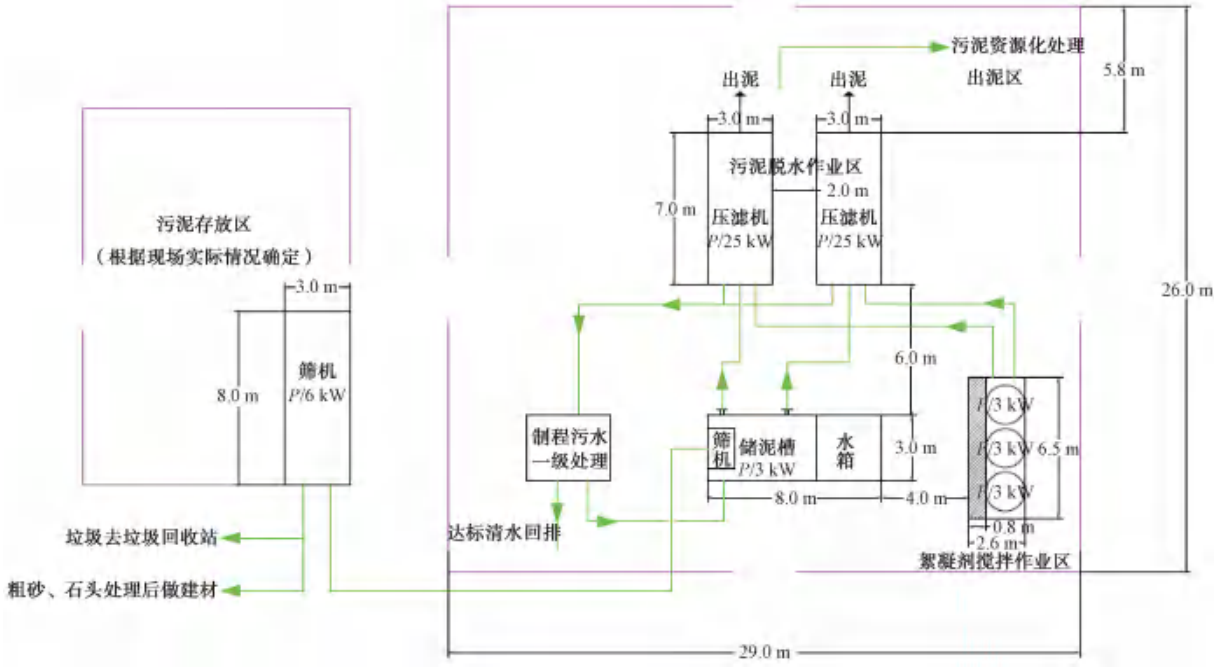

图 2 底泥处置场现场布置图

Fig. 2 Layout of River Sediments Disposal Plant

3 成本分析

本工程清淤规模约为 16 万 m^3,采用直接外运处理,需要合适消纳场地,约为 112 元/m^3(含场地处置费,不含清淤施工)。如采用干化脱水(板框脱水)为 90 元/m^3(含干化后外运,不含清淤施工),平均每方节省费用 22 元,共计节省约 352 万元,能有效控制二次污染,环境效应好。

4 结论

(1) 以污泥为主要原料,采用碳酸氢钠($NaHCO_3$)作为活化剂制备高性能生物炭,活化过程中污泥中的有机物以及活化剂 $NaHCO_3$ 逐渐分解,释放产生气体,促进了生成的碳质生成孔隙结构,对污染物有较强的吸附潜质。

(2) 当 PAM 投加量为 0.03%、PAC 投加量为 1.0%时,污泥基生物炭的吸附能力得到更大提升,水质改善效果明显。

(3) 结合成本、脱水效率等综合效果比对,最终可确定絮凝剂的最佳投加比例为 0.03%(PAM)∶1%(PAC)∶3%(污泥基生物炭)。

(4) 从现场应用效果来看,投加比例为 0.03%

(PAM):1%(PAC):3%(污泥基生物炭)的生物炭基絮凝剂针对于河道底泥有较好的脱水效果,脱水固结后含水率控制在40%以内,可用于工程用土。

参考文献

[1] 赵颜昌. 河道清淤底泥脱水干化调控技术分析[J]. 水利科技与经济, 2023, 29(2): 69-73.
ZHAO Y C. Analysis of regulation technology for desilting and drying of sediment in river channel dredging [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2023, 29(2): 69-73.

[2] 邓银, 沈霞娟, 杨林鹏, 等. 河道清淤底泥脱水干化调控技术研究[J]. 给水排水, 2021, 47(s2): 200-205, 232.
DENG Y, SHEN X J, YANG L P, et al. Study on regulation and control technology for dewatering and drying of river sediments [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(s2): 200-205, 232.

[3] 胡迪, 赵勇胜, 马俊. 河道底泥脱水固化处理处置技术的研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2020, 1(14): 82-86.
HU D, ZHAO Y S, MA J. Research on treatment technology of dewatering and solidification of river sediment [J]. Leather Manufacture and Environmental Technology, 2020, 1(14): 82-86.

[4] 杨洁, 吕永鹏, 王海霞. 高效高干度脱水处理工艺在某河底泥清淤工程中的应用[J]. 净水技术, 2020, 39(s1): 272-275, 282.
YANG J, LÜ Y P, WANG H X. Application of high efficiency and high dryness dewatering technology in a river bottom mud dredging project[J]. Water Purification Technology, 2020, 39(s1): 272-275, 282.

[5] 焦启兵, 向代刚. 城市污泥机械脱水技术分析及减量化处理工艺应用研究[J]. 清洗世界, 2022, 38(12): 29-31.
JIAO Q B, XIANG D G. Analysis of mechanical dewatering technology for urban sludge and application research of reducing treatment process[J]. Cleaning World, 2022, 38(12): 29-31.

[6] 严晓威, 柳忠现, 王盛, 等. 3种污泥机械脱水方式的工程应用[J]. 净水技术, 2022, 41(s2): 100-105.
YAN X W, LIU Z X, WANG S, et al. Engineering application of three mechanical dewatering methods of sludge [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(s2): 100-105.

[7] 安淼. 生物炭净化废水中重金属机理[J]. 净水技术, 2020, 39(3): 71-81.
AN M. Mechanism of biochar purification process for heavy metals removal in wastewater [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(3): 71-81.

[8] 陈浩宇, 段友丽. 不同生物炭对水中氨氮的吸附特性及影响因素对比[J]. 净水技术, 2022, 41(6): 71-78, 95.
CHEN H Y, DUAN Y L. Contrast of adsorption property and influencing factors of different biochar for ammonia nitrogen removal in water[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(6): 71-78, 95.

[9] 孙东晓, 董志强, 刘学明, 等. 污泥基生物炭的制备技术及环境应用与研究热点[J]. 净水技术, 2021, 40(8): 16-25.
SUN D X, DONG Z Q, LIU X M, et al. Research hotspot and preparation technology and environmental application for sludge biochar[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(8): 16-25.

[10] 娄欢, 王苏玲, 于红艳. 养殖底泥制备腐植酸和生物炭及其氨氮吸附性能研究[J]. 化学与生物工程, 2020, 37(9): 50-54.
LOU H, WANG S L, YU H Y. Preparation of humic acid and biochar from aquacultural sedimentand their adsorption properties for ammonia nitrogen[J]. Chemistry & Bioengineering, 2020, 37(9): 50-54.

[11] 陈晓东, 王丹凤, 陈秋, 等. PAM-AA与金属离子复合絮凝剂的合成及其在污泥脱水中的应用[J]. 吉林大学学报(理学版), 2021, 59(6): 1569-1576.
CHEN X D, WANG D F, CHEN Q, et al. Synthesis of PAM-AA and metal lon composite flocculant and its application in sludge dewatering [J]. Jilin University (Science Edition), 2021, 59(6): 1569-1576.

[12] 罗章, 石鸿韬. 城市湖泊疏浚泥浆污泥比阻测试方法技术改进[C]. 天津:中国环境科学学会2021年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场, 2021.
LUO Z, SHI H T. Technical improvement on specific resistance test method of dredged mud and sludge in urban lakes [C]. Tianjin: 2021 Science and Technology Annual Meeting of the Chinese Society of Environmental Sciences - Environmental Engineering Technology Innovation and Application Branch, 2021.

[13] 胡瑶, 戴取秀, 马丽萍. 污泥基生物炭在污水处理中的应用[C]. 南昌: 中国环境科学学会2022年科学技术年会, 2022.
HU Y, DAI Q X, MA L P. The application of sludge based biochar in sewage treatment [C]. Nanchang: 2022 Annual Conference of the Chinese Society of Environmental Sciences on Science and Technology, 2022.

[14] 龚迎莉, 孙煜璨, 杨婷. 污泥基生物炭改性及重金属吸附性能研究进展[C]. 南昌: 中国环境科学学会2022年科学技术年会—环境工程技术创新与应用分会场, 2022.

(下转第200页)

polychlorobiphenyls and their effects on aquatic organisms:" Academic Seminar on Zoology in Seven Northern Provinces and Cities of the Chinese Zoological Society" [C]//Acta Zoologica Sinica, 2005: 222-226.

[2] 联合国环境规划署, 世界卫生组织. 多氯联苯和多氯三联苯[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1987.
United Nations Environment Programme, World Health Organization. Polychlorinated biphenyls and polychlorinated triphenyls[M]. Beijing: China Environmental Press, 1987.

[3] 王超群. 不同前处理对水中多氯联苯含量的影响[J]. 供水技术, 2024, 18(2): 51-55.
WANG C Q. Effect of different pretreatment on polychlorinated biphenyls in water[J]. Water Technology, 2024, 18(2): 51-55.

[4] 巩俐彤, 李倩, 王海云, 等. 基于大体积固相萃取富集净化生活饮用水中18种多氯联苯[J]. 首都公共卫生, 2021, 15(2): 78-81.
GONG L T, LI Q, WANG H Y, et al. Enrichment of 18 polychlorinated biphenyls(PCBs) in purified drinkingwater based on the method of large volume solid phase extraction(SPE)[J]. Capital Journal of Public Health, 2021, 15(2): 78-81.

[5] 陆一夫, 依力哈木·扎依尔, 胡小键, 等. 气相色谱—质谱法测定生活饮用水中多氯联苯[J]. 环境卫生学杂志, 2021, 11(2): 205-210.
LU Y F, YILIHAMU Z, HU X J, et al. Determination of polychlorinated biphenyls in drinking water by GC-MS[J]. Journal of Environmental Hygiene, 2021, 11(2): 205-210.

[6] 秦明友, 张新申, 康莉,等. 全自动固相萃取分子筛脱水气质联用法测定水中多氯联苯[J]. 分析化学, 2013, 41(1): 76-82.
QIN M Y, ZHANG X S, KANG L, et al. Determination of polychlorinated biphenyls in water samples using automated solid phase extraction and molecular sieve dehydration coupled with gas chromatography/mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2013, 41(1): 76-82.

[7] 张付海, 胡雅琴, 田丙正, 等. 全自动固相萃取-GC-MS/MS法测定水中多氯联苯[J]. 环境监测管理与技术, 2019, 31(4): 49-52.
ZHANG F H, HU Y Q, TIAN B Z, et al. Determination of PCBs in water by auto solid phase extraction gas chromatography-triple quadrupole mass spectrometry[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2019, 31(4): 49-52.

[8] 中华人民共和国生态环境部. 水质 多氯联苯的测定 气相色谱-质谱法: HJ 715—2014[S]. 北京: 中国环境出版集团, 2014.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Water quality-determination of polychlorinated biphenyls (PCBs)-gas chromatography mass spectrometry: HJ 715—2014[S]. Beijing: China Environment Publishing Group, 2014.

[9] 王加官, 李华. 气相色谱-质谱法测定水中多氯联苯的方法验证[J]. 广州化工, 2022, 50(20): 151-155, 162.
WANG J G, LI H. Validation of gas chromatography-mass spectrometry method for determination of polychlorinated biphenyls in water[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2022, 50(20): 151-155, 162.

[10] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 生活饮用水标准检验方法: 第8部分 有机物指标: GB/T 5750.8—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Standards examination methods for drinking water: Part 8 Organic indices: GB/T 5750.8—2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.

(上接第158页)

GONG Y L, SUN Y C, YANG T. Research progress on the modification of sludge based biochar and its heavy metal adsorption performance[C]. Nanchang: 2022 Science and Technology Annual Meeting of the Chinese Society of Environmental Sciences-Environmental Engineering Technology Innovation and Application Branch, 2022.

[15] 邵一如, 朱于红, 杜耀. 污泥基生物炭制备与改性[J]. 新型工业化, 2022, 12(8): 206-208, 212.
SHAO Y R, ZHU Y H, DU Y. Preparation and modification of sludge based biochar[J]. The Journal of New Industrialization, 2022, 12(8): 206-208, 212.