

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2024. 07. 016

粉煤灰协同水泥、 CaO_2 固化底泥及控制内源污染效果

朱 企, 李大鹏, 刘松琪

(苏州科技大学 环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009)

摘 要: 以城市受污染河道的底泥为研究对象, 首先掺入不同比例的单独固化剂(水泥)和复合固化剂(水泥+ CaO_2)对其进行固定, 检测固化底泥的无侧限抗压强度、静置和降雨冲刷条件下底泥氮磷的释放特征。在此基础上分别挑选两组中固化效果较优的掺量(50%水泥以及50%水泥+10% CaO_2), 进一步加入不同量的粉煤灰, 探究在粉煤灰协同下水泥和 CaO_2 固化底泥的效果。结果表明, 单独水泥固化和水泥+ CaO_2 固化均使底泥成块且具有较强的抗压能力, 并且明显降低了底泥中溶解态无机磷(DIP)向上覆水的释放, 在静置和降雨冲刷条件下均有较好的固化效果。此外, 水泥和 CaO_2 改变了底泥中磷的形态, 但水泥并未促进非磷灰石无机磷(NAIP)向磷灰石无机磷(AP)的转化, 而加入 CaO_2 后促进了NAIP向AP的转化。加入粉煤灰后进一步提高了水泥和 CaO_2 的固化效果, 其中固化剂最优配比为水泥: CaO_2 :粉煤灰=5:1:2, 与对照组相比, 在实验后期(13~20 d)底泥固化后, 上覆水中氨氮去除率为86.33%, DIP去除率为90.5%。水泥、 CaO_2 和粉煤灰的协同固化处理能够有效抑制底泥内源氮磷的释放, 减少底泥对环境的二次污染。

关键词: 底泥固化技术; 粉煤灰; 水泥; CaO_2 ; 内源污染; 氮磷释放

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)07-0105-08

Fly Ash in Coordination with Cement and CaO_2 to Solidify Sediment and Its Performance for Controlling Endogenous Pollution

ZHU Qi, LI Da-peng, LIU Song-qi

(School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: This paper solidified the sediment from urban polluted river by mixing different proportions of single curing agent (cement) and compound curing agent (cement and CaO_2), and then detected the unconfined compression strength of the solidified sediment and the release of nitrogen and phosphorus from the sediment under static and rainfall erosion conditions. On this basis, the dosages of the two groups with better curing performances (50% cement and 50% cement with 10% CaO_2) were selected respectively, and different dosages of fly ash were further added to explore the performance of cement and CaO_2 in coordination with fly ash for sediment solidification. Both the cement curing alone and cement and CaO_2 curing solidified the sediment into blocks and showed strong compression resistance, significantly reduced the release of dissolved inorganic phosphorus (DIP) from the sediment to the overlying water, and demonstrated a good curing performance under static and rainfall erosion conditions.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778393)

通信作者: 朱企 E-mail: 793317013@qq.com

In addition, cement and CaO_2 changed the form of phosphorus in the sediment. However, cement did not promote the conversion of non-apatite inorganic phosphorus (NAIP) to apatite phosphorus (AP), while CaO_2 promoted the conversion of NAIP to AP. The addition of fly ash further improved the curing performance of cement and CaO_2 , in which the optimal proportion of curing agent was cement, CaO_2 and fly ash of 5:1:2. Compared with the control group, the removal rates of ammonia nitrogen and DIP in overlying water after the solidification of the sediment were 86.33% and 90.5% in the later period of the experiment (13–20 days). The collaborative curing of cement, CaO_2 and fly ash effectively inhibited the release of endogenous nitrogen and phosphorus from the sediment and reduced the secondary pollution of the sediment to the environment.

Key words: sediment curing technology; fly ash; cement; calcium peroxide; endogenous pollution; nitrogen and phosphorus release

大量氮磷经地表径流、雨水冲刷等过程进入水环境,最终蓄积在底泥中,不仅导致底泥体积增加,同时使其成为水体中污染物的“源”,底泥污染物的内源释放是影响水质变化的重要因素^[1-2]。目前,国内外处理和修复底泥的方法主要有生物修复技术、电动修复技术、固化稳定技术等。固化是底泥修复的常见方式,也是底泥资源化利用的主要途径之一,其原理是将特定的固化剂与底泥混合,使孔隙水与固化材料发生反应,导致污染物被捕获或者固定在固体结构中,从而减缓或阻碍污染物向上覆水的迁移^[3-4]。固化后的底泥可用于生态护坡、填筑土等工程,实现资源化利用^[5]。固化技术既可以解决泥土堆积问题,减少土地资源浪费,又能减少对外释放的污染物,避免二次清淤带来环境污染,对环境保护和资源再生具有重要作用。

常用的固化剂是以水泥、石灰、飞灰等为主的无机碱性材料,同时辅以硫酸盐类、无机盐类、表面活性剂、膨胀剂等物质,不同种类的固化剂及其投加量对固化效果的影响较大。由于水泥和石灰成本低廉、简单易得,被广泛应用于固化技术中。储诚富等^[6]发现当加入10%水泥、10%电石渣和60%铁尾砂时,可显著提高底泥的固化强度。然而,水泥和石灰的使用会产生大量二氧化碳,不利于碳减排,且在建筑工程的长期使用过程中存在较大劣势(如容易开裂、呈强碱性等),因此研究者开始考虑研发其他材料^[7-8]。由于兼具氧化性和释氧性,且使用过程中基本不产生二次污染, CaO_2 是目前常用的环境友好型固化材料之一。 CaO_2 固化底泥的主要作用机理是羟基自由基的化学氧化和氢氧化钙的

吸附作用,使其能够与底泥中的污染物形成难溶沉淀物。张钟慧^[9]的实验表明,添加 CaO_2 后对底泥的氮磷释放有明显抑制作用。然而,水泥和 CaO_2 对底泥氮磷等营养盐的复合固化效果及机理尚不十分清晰。

粉煤灰作为一种工业废渣,能够有效吸附水中污染物,被广泛应用于废水治理和固化技术中^[10]。粉煤灰的二次产物会不断填充到水泥浆体中,减少氢氧化钙晶体的数量,从而密实固化土,使得固化土进一步硬化,不仅能减少其内源污染物质的浸出,同时对上覆水中悬浮物质也有一定的去除效果^[11-12]。目前,在固化技术方面主要集中在对固化土的抗压强度和重金属的浸出毒性探究,而针对河道底泥氮磷等营养盐释放的研究相对较少,尤其是水泥、 CaO_2 、粉煤灰复合固化剂对河道底泥氮磷的固化研究鲜有报道。

笔者以某市河道底泥为研究对象,以 CaO_2 和水泥为添加剂协同粉煤灰固化底泥,以抗压强度和底泥污染物浸出浓度为指标,确定固化的最佳材料投加量。通过降雨冲刷模拟实验对固化后的底泥浸出液进行研究,比较固化效果,探讨固化机理,为受污染底泥的安全处置提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 河道底泥的采集及前处理

实验底泥取自某市受污染较为严重的河道,2021年3月利用大口径柱状沉积物采样器(直径为90 mm,高为500 mm)于该河道采集表层底泥(0~100 mm),同时采集相应的上覆水(10 L)。采样结束后立即运回实验室,运输过程中避光且尽量不扰

动柱状底泥。静置 2 d 使其自然风干,再将底泥过 100 目筛后置于 4 °C 冰箱保存待用。上覆水 pH 为 7.73, DO、NH₄⁺-N、TN、TP、COD 的浓度分别为 7.73、7.31、8.27、0.18 和 11 mg/L。底泥含水率为 70.06%,有机质含量为 73.75%,TN 和 TP 的含量分别为 1 132.87 和 1 327.32 mg/kg。实验用水泥为 32.5# 普通硅酸盐水泥,所用粉煤灰的 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO、Na₂O 含量分别为 58%、30%、4.3%、1.5%、2.8%、3.2%。

1.2 实验方法

实验主要分为两部分:①通过改变 CaO₂、水泥的掺入比例,考察底泥的抗压强度和氮磷固化效果,确定最佳投加量;②在此基础上投加粉煤灰,检验材料对底泥固化的改善效果,确定最佳配比。

1.2.1 水泥、CaO₂对底泥的固化实验

① 无侧限抗压强度(UCS)

将不同配比的固化材料分为水泥组(10%、20%、30%、40%、50%,掺量定义为加入物质占底泥干质量的百分比,下同)和复合组(水泥+CaO₂,在水泥组分别加入 10% CaO₂),分别与底泥混合搅拌,整个过程在水泥净浆搅拌机中进行,对照组为未添加固化材料的底泥。制作样品时采用直径为 39 mm、高为 80 mm 的圆形模具,制样前在其内部涂抹凡士林。搅拌均匀后,将混合好的样品分 3 层加入到模具中,每次加入后反复振动以去除其中的气泡,待浆体振动压实至无塌陷后,采用刮土刀刮平试样表面。养护 24 h 后脱模,而后在室温条件下养护至实验龄期(7 d),使用 YSH-2 型石灰土无侧限压力仪进行抗压强度测试。

② 固化底泥的氮磷释放分析

实验装置见图 1。材料采用高为 150 mm、内径为 84 mm 的有机玻璃,用橡胶塞密封底部,固化土实验配比方案如上所述。将固化土分别投入对应编号的柱状玻璃管中,按液固比为 10:1 的比例加入 800 mL 去离子水,顶部用保鲜膜密封,曝入氮气使其处于厌氧条件(DO<0.5 mg/L),浸泡 5 d 后,测定固化土浸出液中营养盐的释放情况。实验周期为 30 d,每隔 1 d 测定上覆水中氨氮、溶解态无机磷(DIP)的浓度。取样结束后,以虹吸的方式添加原水,使装置中的上覆水体积保持为 800 mL。DIP、氨氮分别采用钼锑抗分光光度法、纳氏试剂分光光度法测定。实验结束后,收集表层底泥,将其在烘箱

中以 105 °C 干燥至恒质量,碾碎过 100 目筛网后放在阴凉干燥处,通过不同磷形态的分析方法(SMT 法)分析底泥中的非磷灰石无机磷(NAIP)、磷灰石无机磷(AP),探究固化剂对底泥中磷形态的影响。

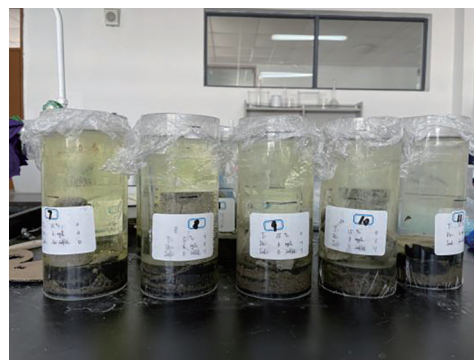


图 1 实验装置

Fig.1 Experimental device

③ 降雨对固化底泥氮磷释放的影响

为探究上述实验优选出的材料(50%水泥和 50%水泥+10% CaO₂)的固化效果是否符合实际降雨的要求,本实验利用花洒与蠕动泵替代自然条件降雨,并根据某市的降雨强度设置雨水流速。共设置了 3 处雨量监测站点,采用 SL3-1 型翻斗式雨量计(雨量传感器范围为 0.1~4 mm/min,精度为±4%,分辨率为 0.2 mm),实时采集、记录监测点位的雨量数据。由站点降雨参数统计概率分布可知,降雨频率相对较高的强度为 0~10 mm/h,因此本研究根据其降雨相对集中的强度模拟实际降雨。

图 2 为室内淋滤实验装置,用于探究实际降雨对固化后底泥污染物释放情况的影响。

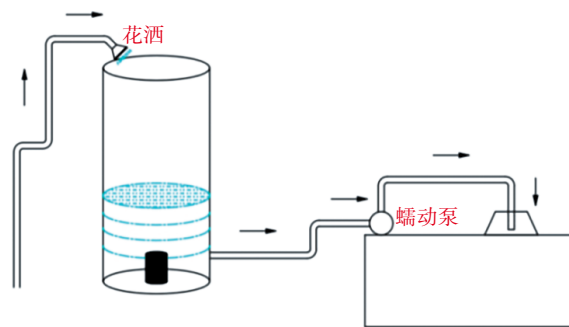


图 2 淋滤装置

Fig.2 Leaching device

本实验的流速以降雨强度为 4 mm/h 作为参照,将固化后的块状底泥静置在圆柱有机玻璃管内,顶部用花洒持续喷射去离子水,收集底泥浸出液。所有装置处于(25±1) °C 的环境中,实验持续 36 h。淋

滤期间,在1、3、6、12、24、36 h收集适量的浸出液完成对氨氮、DIP的测试。

1.2.2 粉煤灰协同水泥、 CaO_2 对底泥的固化实验

在优选出的50%水泥+10% CaO_2 和50%水泥的固化配比下,进一步探究加入粉煤灰(50%水泥+10% CaO_2 +10%粉煤灰、50%水泥+10% CaO_2 +20%粉煤灰、50%水泥+10% CaO_2 +30%粉煤灰、50%水泥+10%粉煤灰、50%水泥+20%粉煤灰、50%水泥+30%粉煤灰)对底泥的固化效果。共设6个实验组和1个对照组,实验装置及条件与 CaO_2 、水泥对底泥的固化实验相同。实验周期为20 d,每隔1 d测定上覆水中氨氮、DIP的浓度。

1.3 数据统计分析

使用Excel 2013、Origin 2019等软件进行数据处理和绘图。实验结束后采用SPSS 20.0.0进行数据统计分析;使用最小显著性差异法(LSD)和方差分析法检验实验组和对照组之间各特征指标差异的显著性。

2 结果与讨论

2.1 水泥和 CaO_2 固化效果及对氮磷释放的影响

2.1.1 无侧限抗压强度实验

无侧限抗压强度(UCS)是评价固化性能的重要指标,不同水泥掺量和养护时间下试块的UCS如图3(a)所示。可知,试块的UCS随着水泥掺量和养护时间的增加而提高,当添加50%的水泥、养护28 d时,UCS可达4.95 MPa。《原位利用疏浚泥建设生态护岸技术标准》(DG/TJ 08—2331—2020)中规定当Ⅱ型固化土28 d的UCS>2 MPa时,底泥固化材料可以进行资源化利用^[13]。本研究固化底泥的主要目的是用于生态护坡,所以将28 d的UCS>2 MPa作为标准。因此,当水泥掺量为30%时基本可以满足抗压强度要求,即水泥掺量>30%的固化底泥可以进行生态护坡等资源化利用,之前的研究^[14]也得到了相似的结论。

图3(b)为向水泥添加10% CaO_2 的固化土强度。可知,添加 CaO_2 和单独投加水泥相比,前者的固化土强度明显提高(单独投加30%水泥28 d的UCS为1.89 MPa,而加入10% CaO_2 后升高为2.31 MPa)。造成上述结果的主要原因是 CaO_2 中的钙离子可以置换出底泥中的低价离子,从而提高固化强度。本研究的主要目的之一是通过添加水泥等材料使底泥

固化,实现资源化利用。结果表明,50%水泥+10% CaO_2 可使底泥固化强度最高即6.40 MPa。

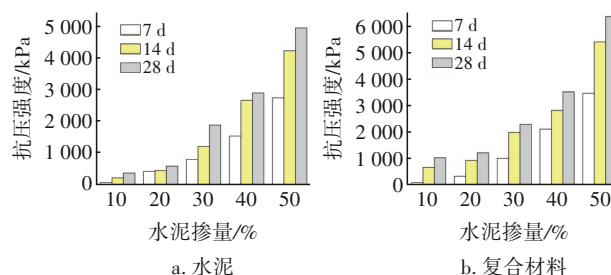


图3 不同材料掺量和养护时间下试块的抗压强度

Fig.3 Compressive strength of the test block under different material doping and maintenance time

2.1.2 水泥+ CaO_2 对上覆水中氮磷污染物的影响

图4为复合材料(水泥+ CaO_2)固化底泥对上覆水中DIP、氨氮的影响。

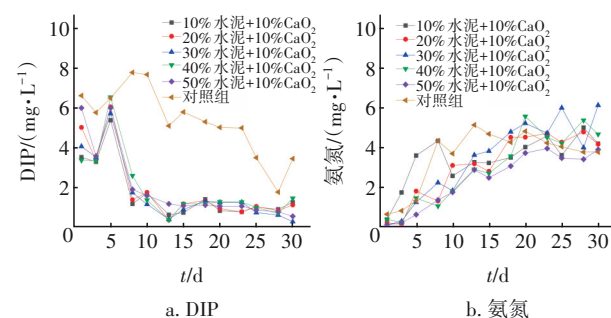


图4 上覆水中DIP、氨氮浓度变化

Fig.4 Change of DIP and ammonia nitrogen concentrations in overlying water

由图4(a)可知,复合材料的投加对底泥中DIP的释放有很大影响。上覆水DIP浓度表现为先升高,这是因为 CaO_2 先对底泥中的有机物进行氧化,特别是促进有机磷向无机磷转化,从而促进了内源磷释放。之后 CaO_2 可适当减缓底泥中DIP的释放,其中50%水泥+10% CaO_2 组第30天的上覆水DIP浓度为0.52 mg/L。这是因为水泥与 CaO_2 制备的复合固化剂可以提供更多的钙离子与磷酸根发生反应,生成沉淀,反应时间更为迅速,接触面积更加广泛,可以增强对底泥中磷的固定,更大程度上降低上覆水的磷浓度。DO和 Ca^{2+} 浓度与上覆水中TP的去除关系显著^[15]。水体溶解氧浓度是磷释放的关键因素,好氧条件促进了底泥中的 Fe^{2+} 向 Fe^{3+} 转化, Fe^{3+} 可以通过形成絮凝体或螯合物,使得溶解态磷转化为结合态磷。 CaO_2 使得固化体表层被氧化,上覆水中溶解氧浓度升高,金属离子处于氧化状态,促进了

磷从上覆水迁移到底泥中,进一步降低了上覆水的磷浓度^[16]。

复合材料固化底泥对上覆水氨氮的影响见图 4(b)。固化组上覆水氨氮浓度持续升高,实验结束时(第 30 天)与对照组相比并未出现抑制底泥氨氮释放的显著效果。氮污染物的释放主要取决于含氮化合物分解的难易程度,相较于对照组,底泥经过固化材料的改性,其微生物活性受到影响,大量微生物不能及时分解浸泡液和底泥中的有机质,因此上覆水氨氮浓度略有下降可归因于有机质分解作用的减弱,且氨氮在碱性条件下容易以氨气形式释放到空气中^[17-19]。相比较而言,50% 水泥+10% CaO₂的复合组,在 1~25 d 对上覆水中氨氮的去除效果较为明显。

2.1.3 固化材料对底泥中磷形态的影响

图 5 对比了不同比例的固化材料对底泥中磷形态分布的影响。

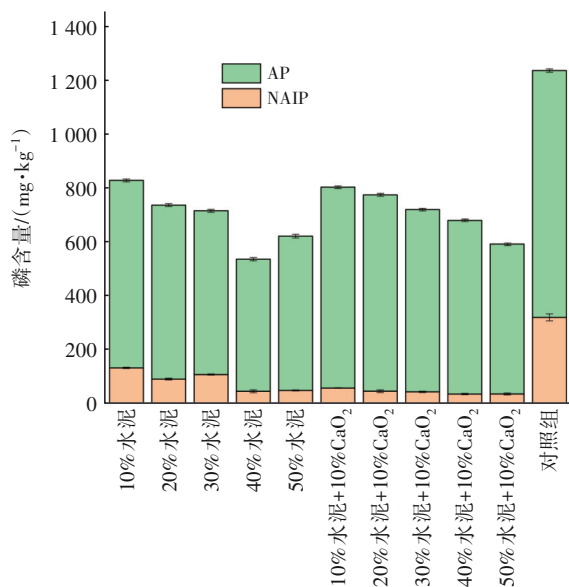


图 5 底泥中无机磷形态分布

Fig.5 Morphological distribution of inorganic phosphorus in sediment

由图 5 可知,与对照组相比,由于固化材料的投加,所有实验组的底泥中 NAIP 含量均降低。水泥组底泥中 NAIP 含量随着水泥投加量的增加呈减小趋势,最低值为 42.35 mg/kg(40% 水泥组),占总磷含量的 8.01%,明显低于对照组(330.12 mg/kg)。但水泥组中 AP 含量并未随水泥投加量的增加而增加,说明投加水泥并不能促进 NAIP 向 AP 转化,不能强化内源磷在底泥中的固定。因此水泥对底泥磷

的固化作用主要是通过物理作用,即水泥能紧紧包裹在固化土表面,填充孔隙,最大程度上阻止污染物的释放,而非促进了底泥中不同形态磷的转化。

对水泥+CaO₂组而言,由于额外添加了 10% 的 CaO₂,所有实验组底泥的 AP 含量比单独投加水泥组高,说明 CaO₂的投加部分程度上能够促进 NAIP 向 AP 的转化,强化了内源磷在底泥中的固定,且 Ca²⁺浓度的增加也有利于钙结合态磷的形成。

2.1.4 降雨冲刷模拟实验

图 6 为降雨强度为 4 mm/h 时底泥浸出液中氨氮、DIP 浓度变化。由图 6(a)可知,虽然对照组浸出液的氨氮浓度在 3~24 h 下降明显(从 1 h 的 1.21 mg/L 迅速降低至 24 h 的 0.70 mg/L),但在整个降雨冲刷模拟实验中,浸出液的氨氮浓度一直处于较高水平。与对照组相比,固化组中浸出液的氨氮浓度显著降低($p < 0.001$)。与 2.1.2 节类似,50% 水泥固化组也表现出氨氮浓度先降低再升高的趋势,随着时间的延长,浸出液中氨氮浓度在 36 h 时达到最大值 0.36 mg/L。而 50% 水泥+10% CaO₂组的氨氮浓度一直处于较低水平,平均浓度为 0.06 mg/L。

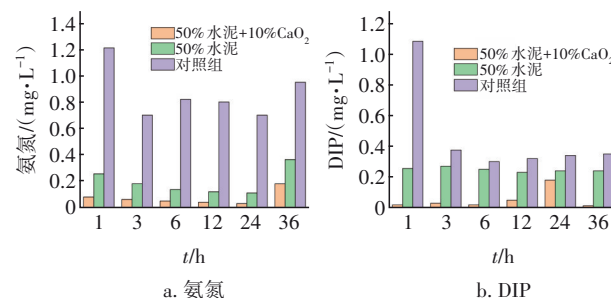


图 6 浸出液中氨氮、DIP 浓度变化

Fig.6 Change of ammonia nitrogen and DIP concentrations in leachate

由图 6(b)可知,与对照组相比,50% 水泥组和 50% 水泥+10% CaO₂组中 DIP 浓度显著降低($p < 0.001$),后者的浸出液中 DIP 浓度更低,在 36 h 时降至 0.014 mg/L,达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的 II 类标准。

加入水泥和 CaO₂后,底泥固化成块,其中的氮磷等营养物质被包裹、固定,使其在物理形态上更为稳定;而对照组由于未添加固化剂,底泥结构较为松散。因此,在雨水的冲刷下,对照组浸出液中氨氮和 DIP 的浓度较高,而固化组仍能保持较好的固化效果。雨水的不断滴落可能会对固化块表面造成破坏,但在本次实验中并未出现这一现象。这

可能是因为固化块具有一定的抗压强度,即使受到雨水冲刷其结构也能保持稳定。自然条件下,可溶性污染物的释放是造成水体污染的主要原因,而在降雨环境中,大部分污染物以可溶性离子的方式存在。雨水冲刷对固化土不同深度的磷形态影响不同,后续需要进一步探究其详细的固化机制。

2.2 粉煤灰协同水泥、 CaO_2 对污染物释放的影响

2.2.1 对上覆水氨氮的影响

在之前的研究中,水泥与 CaO_2 固化底泥可以达到一定的抗压强度,对底泥中磷的固定效果较好,但是对氨氮释放的抑制效果并不显著。综合UCS、静置和冲刷条件下底泥氮磷释放的实验结果,选择50%水泥和50%水泥+10% CaO_2 作为单独水泥固化组和复合固化组的较优投量,在此基础上添加一定量的粉煤灰,对比加入粉煤灰后的固化效果,结果见图7。

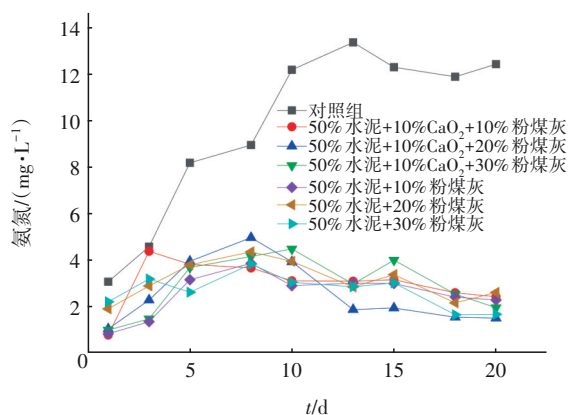


图7 粉煤灰投加量对上覆水中氨氮的影响

Fig.7 Effect of fly ash addition on ammonia nitrogen in overlying water

由图7可知,随着时间的延长,固化组上覆水氨氮浓度呈先上升后下降趋势,但整体均明显低于对照组($p < 0.001$)。虽然在实验前10 d,投加粉煤灰后各固化组之间无明显差别,但从第13天开始,50%水泥+10% CaO_2 +20%粉煤灰组的上覆水氨氮浓度明显降低至1.86 mg/L,而其他固化组在实验后期的氨氮平均浓度基本为2.29~2.86 mg/L,说明50%水泥+10% CaO_2 +20%粉煤灰组对底泥氨氮固化的效果相对较好。在此投量下,实验后期上覆水中氨氮平均浓度为1.71 mg/L(对照组为12.51 mg/L),去除率达到86.33%。结合之前的实验结果可知,水泥组和复合材料组在未添加粉煤灰时,上覆水中氨氮浓度均呈上升趋势,并没有达到理想的固化效果,

而添加粉煤灰后,各固化组的氨氮浓度明显低于对照组,且并未随时间的推移而升高,说明粉煤灰促进了底泥中氮的稳定。

2.2.2 对上覆水DIP的影响

粉煤灰投加量对上覆水中DIP的影响见图8。

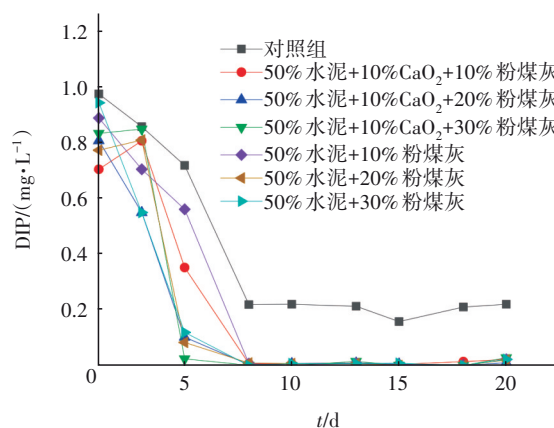


图8 粉煤灰投加量对上覆水中DIP的影响

Fig.8 Effect of fly ash addition on DIP in overlying water

随着时间的延长,各实验组上覆水中DIP浓度发生了显著变化($p < 0.001$)。GB 3838—2002中规定Ⅰ类水的 $\text{TP} \leq 0.02 \text{ mg/L}$ 。从第8天起,所有实验组中上覆水的DIP浓度处于相对稳定的状态,并且不同比例材料投加组的DIP浓度无明显差别(0.02 mg/L),此时对照组的DIP平均浓度为0.21 mg/L,去除率达到90.5%。说明在固化材料中加入粉煤灰,使固化块抑制底泥中内源磷释放的效果更为显著。

底泥中磷的释放受较多因素影响,比如温度、pH、溶解氧等。在本实验中,上覆水DIP维持在较低水平,可能是投加固化材料后,大部分磷酸根离子与钙离子、铁离子形成了较为稳定的磷酸钙和磷酸铁沉淀^[20-21];也有可能是由于碱度升高,粉煤灰中的 Al_2O_3 、 SiO_2 和 MgO 在碱的激发下活性提高,能够相互反应生成硅酸盐类等物质,一方面填充底泥部分孔隙,降低了孔隙量,另一方面减小了底泥孔隙的平均孔径,起到支撑孔隙的作用。粉煤灰能够实现磷的吸附,不仅因为其具有物理吸附作用,而且未完全燃烧的粉煤灰中的碳粒能够通过化学作用实现对磷的固定。结果表明,固化后疏浚泥污染物的浸出量大大低于原泥,说明固化可以减少疏浚泥中污染物释放对周围环境的二次污染。综合来看,各实验组的固化材料对抑制内源磷的释放无明显差异,效果均较为显著。

3 结论

① 向河道底泥中投加复合固化剂(10%~50%水泥+10% CaO₂)后,底泥均可发生明显固化,且固化块的抗压强度随着水泥掺量和养护时间的增加而提高;复合固化剂可有效减少静态条件下底泥中DIP向上覆水的释放,但对氨氮的固化效果不显著。

② 投加固化剂后明显改变了底泥中磷的形态,不同的是,投加水泥并不能促进NAIP向AP的转化,说明水泥对底泥磷的固化主要是通过物理作用;而水泥+CaO₂能够促进NAIP向AP的转化,Ca²⁺浓度的增加也有利于钙结合态磷的形成,强化了内源磷在底泥中的固定。

③ 模拟降雨冲刷36 h后,对照组中浸出液的氨氮和DIP浓度分别为0.95和0.35 mg/L,而氨氮在50%水泥和50%水泥+10% CaO₂组中的浓度分别为0.36和0.18 mg/L,DIP浓度分别为0.24和0.014 mg/L,表明即使在降雨冲刷条件下,固化底泥仍能较好地抑制污染物释放。

④ 添加粉煤灰后明显促进了固化效果,整体而言,50%水泥+10% CaO₂+20%粉煤灰组在实验后期(13~20 d)对底泥的固化效果最佳,与对照组相比,上覆水中氨氮、DIP的去除率分别为86.33%和90.5%。

参考文献:

[1] 赵玉慧. 氨基甲酸酯类农药的海洋沉积物上吸附行为的研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2005.
ZHAO Yuhui. Studies on Sorption Behaviors of Carbamate Pesticides on Marine Sediments in Seawater [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005 (in Chinese).

[2] 钟文珏, 曾毅, 祝凌燕. 水体沉积物质量基准研究现状[J]. 生态毒理学报, 2013, 8(3): 285-294.
ZHONG Wenjue, ZENG Yi, ZHU Lingyan. Current research status of sediment quality criteria [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2013, 8 (3): 285-294 (in Chinese).

[3] CONNER J R, HOFFNER S L. A critical review of stabilization/solidification technology [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 1998, 28(4): 397-462.

[4] WILES C C. A review of solidification/stabilization technology [J]. Journal of Hazardous Materials, 1987,

14(1): 5-21.

[5] CHEN L, LIN D F. Stabilization treatment of soft subgrade soil by sewage sludge ash and cement [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 162 (1): 321-327.

[6] 储诚富, 王利娜, 李小春, 等. 水泥电石渣固化淤泥-铁尾矿渣的强度试验 [J]. 工业建筑, 2015 (5): 81-86.
CHU Chengfu, WANG Lina, LI Xiaochun, et al. Strength test on the solidification for dredged silt mixed with iron tailings by cement by cement and cement and carbide slags [J]. Industrial Construction, 2015(5): 81-86 (in Chinese).

[7] TEO E A L, LIN G, LIM L J W. Energy-related CO₂ emissions from the manufacturing and transportation of cement [J]. International Journal of Sustainable Society, 2010, 2(4): 327-340.

[8] CHANG I, IM J, CHO G. Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally-friendly and sustainable geotechnical engineering [J]. Sustainability, 2016, 8(3): 251 (in Chinese).

[9] 张钟慧. CaO₂控制沉积物-水界面内源氮磷释放的微生物群落响应机制研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2020.
ZHANG Zhonghui. Microbial Community Response Mechanism of CaO₂ Controlling the Release of Endogenous Nitrogen and Phosphorus from Sediment-Water Interface [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020(in Chinese).

[10] CHEN Q, KE Y, ZHANG L, et al. Application of accelerated carbonation with a combination of Na₂CO₃ and CO₂ in cement-based solidification/stabilization of heavy metal-bearing sediment [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 166(1): 421-427.

[11] 林灼杰, 尹健, 李益进. 水泥-粉煤灰复合胶凝材料水化特性研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2005 (6): 80-86.
LIN Zhuojie, YIN Jian, LI Yijin. Study on hydration characteristics of cement-fly ash composite cementitious material [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2005(6): 80-86(in Chinese).

[12] HORPIBULSUKE, PHETCHUAY C, CHINKULKIWIWAT A. Soil stabilization by calcium carbide residue and fly ash [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24(2): 184-193.

[13] 田旭, 董家晏. 一种利用疏浚泥原位固化制备海绵土

- 生态护坡的方法;201810615004.9[P]. 2020-08-04.
- TIAN Xu, DONG Jiayan. A Method for Preparing Sponge Soil Ecological Slope Protection by in Situ Solidification of Dredging Mud; 201810615004.9 [P]. 2020-08-04 (in Chinese).
- [14] 杨小玲. 淤泥水泥基复合固化剂配比试验及固化土性能研究[D]. 南宁:广西大学, 2019.
- YANG Xiaoling. Study on the Mixture Ratio of Silt Cement Based Composite Curing Agent and Properties of Solidified Soil [D]. Nanning: Guangxi University, 2019 (in Chinese).
- [15] 李大鹏, 黄勇, 袁砚, 等. 城市重污染河道底泥对外源磷的吸附和固定机制[J]. 环境科学, 2011, 32(1): 96-101.
- LI Dapeng, HUANG Yong, YUAN Yan, *et al.* Mechanism of phosphorus adsorption and immobility by sediments in inner-city heavily polluted canal [J]. Environmental Science, 2011, 32 (1) : 96-101 (in Chinese).
- [16] RYDIN E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment [J]. Water Research, 2000, 34 (7) : 2037-2042.
- [17] 梁子豪, 罗建中, 王慧娟, 等. 珠江涌表层沉积物中不同形态氮的赋存特征[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(1): 101-105.
- LIANG Zihao, LUO Jianzhong, WANG Huixian, *et al.* Deposit characteristics of different forms of nitrogen in surface sediments of Zhujiang brook [J]. Environmental Pollution & Control, 2019, 41 (1) : 101-105 (in Chinese).
- [18] BONIN P. Anaerobic nitrate reduction to ammonium in two strains isolated from coastal marine sediment: a dissimilatory pathway [J]. FEMS Microbiology Ecology, 1996, 19(1): 27-38.
- [19] 孙菱翎, 霍建利, 秦佳欢, 等. 粉煤灰吸附废水中氨氮的研究[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2019, 35(4): 38-41.
- SUN Lingling, HUO Jianli, QIN Jiahuan, *et al.* Study on adsorption of ammonia nitrogen in wastewater by fly ash [J]. Journal of Chifeng University (Natural Science), 2019, 35(4): 38-41 (in Chinese).
- [20] 余光伟, 雷恒毅, 刘广立, 等. 重污染感潮河道底泥释放特征及其控制技术研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(9): 1476-1484.
- YU Guangwei, LEI Hengyi, LIU Guangli, *et al.* Research on the characteristics of sediment release in a heavily polluted tidal river and control technologies [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27 (9) : 1476-1484 (in Chinese).
- [21] 潘浩奇, 张亚倩, 龙跃升, 等. 碳酸钙/高岭土复合材料对底泥释磷与组分的影响[J]. 中国给水排水, 2022, 38(9): 100-105.
- PAN Haoqi, ZHANG Yaqian, LONG Yuesheng, *et al.* Effect of calcium carbonate/kaolinite composite on phosphorus composition released from sediment [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38 (9) : 100-105 (in Chinese).

作者简介: 朱企(1996-), 女, 江苏靖江人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为水体修复。

E-mail: 793317013@qq.com

收稿日期: 2022-05-22

修回日期: 2022-07-03

(编辑: 沈靖怡)

环境就是民生, 青山就是美丽, 蓝天也是幸福