

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2019.0010

刘东方,王希越,王伟斌,等.天津市原位生物化学法治理修复黑臭底泥的试验研究[J].南水北调与水利科技,2019,17(1):70-75,97. LIU D F, WANG X Y, WANG W B, et al. Experimental study on in-situ biochemical treatment for remediation of black-odor river bottom sediment in Tianjin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(1): 70-75, 97. (in Chinese)

天津市原位生物化学法治理修复黑臭底泥的试验研究

刘东方¹,王希越¹,王伟斌¹,张庆明²,包迪²

(1.南开大学 环境科学与工程学院,天津 300350;2.天津裕川清林环境科技发展有限公司,天津 300450)

摘要:研究采用室内模拟的方法,探讨了黑臭底泥生物-化学法原位修复中自制生物-化学复合药剂(以“反硝化细菌-硝酸钙”为主要原料)投加量对底泥理化性质变化及上覆水水质变化的影响。综合考虑,最终确定适合底泥致黑臭污染物去除且节约成本的最佳处理剂投加量为2 000 mg/L(以硝酸钙-N计)。以此投加量将底泥处理剂埋入试验用底泥30 d后,上覆水(400 ml)TP由0.50 mg/L降至0.36 mg/L;COD_{Cr}、氨氮、硝态氮、亚硝态氮分别由31、0.10、0.65、0.07 mg/L增加至325、30.27、4.91、13.55 mg/L,底泥AVS由1.31 μmol/g降至0.35 μmol/g;底泥外观疏松膨胀、由黑变黄。判断此投加量下底泥处理剂对黑臭底泥治理情况好,可以此为依据进一步进行天津市某河道黑臭底泥原位修复中试研究,以确定最优投加量。

关键词:黑臭水体;底泥;原位修复;化学药剂法;硝酸钙

中图分类号:X5 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Experimental study on in-situ biochemical treatment for remediation of black-odor river bottom sediment in Tianjin

LIU Dongfang¹, WANG Xiyue¹, WANG Weibin¹, ZHANG Qingming², BAO Di²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China;

2. Tianjin Yuchuan Qinglin Environmental Technology Development Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: In this study, we used the laboratory simulation method to investigate the changes of the physical and chemical properties of bottom sediment and the overlying water quality as a function of the dosage of self-made bio-chemical compounding agent (with "denitrifying bacteria-calcium nitrate" as the main raw material) in the in-situ biochemical remediation of black-odor sediment. Based on comprehensive consideration, we determined that the optimal and cost-saving dosage of treatment agent for the removal of black-odor pollutants should be 2 000 mg/L (calculated as calcium nitrate-N). After burying the sediment treatment agent in the test sediment for 30 days, we found the TP of the overlying water (400 ml) was reduced from 0.50 mg/L to 0.36 mg/L; COD_{Cr}, ammonia nitrogen, nitrate nitrogen, and nitrite nitrogen respectively increased from 31 mg/L, 0.10 mg/L, 0.65 mg/L, and 0.07 mg/L to 325 mg/L, 30.27 mg/L, 4.91 mg/L, and 13.55 mg/L; the sediment AVS was reduced from 1.31 μmol/g to 0.35 μmol/g; the sediment looked loose and expanded, and turned from black to yellow. We judged that this dosage worked well on the treatment of black-odor sediment. It can be used as the basis for further pilot study on the in-situ remediation of black-odor sediment in a river course in Binhai New Area of Tianjin, in order to determine the optimal dosage.

Key words: black-odor water; sediments; in-situ remediation; chemical method; calcium nitrate

收稿日期:2018-09-13 修回日期:2018-12-17 网络出版时间:2018-12-25

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20181221.1437.004.html>

基金项目:2017年天津市生态环境治理科技示范工程项目(17ZXSTSF00100)

作者简介:刘东方(1966—),男,河北人,教授,博士,主要从事再生水处理、废水处理及回用方面研究。E-mail:dongfangl@nankai.edu.cn

通信作者:王希越(1996—),女,天津人,主要从事水污染控制工程方面研究。E-mail:15902286521@163.com

城市中,河流常被人们作为雨污水的直接排放场所。如今,我国各城镇河段污染严重,黑臭河道的污染问题尤其突出^[1]。根据国家 2015 年发布的《水污染防治行动计划》^[2]“水十条”对黑臭水体治理提出的明确要求:到 2020 年,我国地级及以上城市建成区黑臭水体控制在 10% 以内;到 2030 年城市建成区黑臭水体总体得到消除。为达到国家要求,天津市黑臭河道的修复具有必要性和紧迫性。黑臭河道主要体现在黑臭水体和黑臭底泥两方面,颜昌宙^[3]和徐祖信^[4]等认为水体中大量污染物逐渐沉积汇至底泥中,由于水体缺氧导致铁、锰等重金属还原,与水中的硫结合形成易被氧化的硫化亚铁、硫化锰等物质^[5],导致底泥黑臭,同时底泥污染及再悬浮进一步加剧上覆水体黑臭^[6],两者相互影响并对水体周边生态系统及人居环境造成威胁。

目前,对于黑臭河道治理修复的研究很多,但大部分将重点放在研究直接去除水体中有机物及营养盐等物质的有效方法,而多忽略了底泥中已累积污染物质的释放对水体产生的长久性恶劣影响。国内对黑臭底泥修复的相关研究主要集中在疏浚等异位修复法,或曝气的物理原位修复法。但钟继承^[7]等人的研究表明,底泥疏浚的效果目前存在很大争议,其对湖泊水的控制具有时效性,其中疏浚方式、疏浚深度、疏浚时令等均是疏浚工程应注意的问题,工程繁琐。且疏浚工程造价高、难度大,极易造成地下水和土壤的二次污染^[8]并破坏底栖生物多样性,存在诸多问题。物理曝气原位修复由于用电问题同样存在工程难度大、成本高等问题。近几年有研究发现,采取化学原位修复法,利用化学药剂的投加治理修复黑臭底泥有显著效果且工程造价低,易于实现,但此方法针对性较强,而不同水环境下底泥理化性质差异较大,因此需对特定水体进行相关研究。本研究在化学法原位修复的基础上,将反硝化细菌混入化学药剂,采用原位“生物-化学”法治理修复黑臭底泥,以与目标治理河道黑臭底泥理化性质相似的试验底泥为研究对象,向其中投加主要成分为“反硝化细菌+硝酸钙”的自制黑臭底泥处理剂,旨在加强改善底泥的氧化还原环境及底泥黑臭现象,同时在底泥表面形成一层保护膜,防止污染物的再次释放^[9],为天津市某河道黑臭底泥原位修复治理工作提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验底泥取自天津市某废弃养鱼池池底黑臭底

泥(理化性质与天津市某河道黑臭底泥相似),其理化指标为:AVS 1.31 $\mu\text{mol/g}$,外观呈深黑色,结构紧实;上覆水取自南开大学校园内河道水,其水质为:TP 0.50 mg/L; COD_{Cr} 31 mg/L;氨氮 0.10 mg/L;硝态氮 0.65 mg/L;亚硝态氮 0.07 mg/L。试验底泥处理剂采用以反硝化细菌及硝酸钙为主要原料,与活性污泥等物质按一定比例混合的方法自制的黑臭底泥处理药剂。

1.2 试验方法

于 1 L 烧杯中加入 400 ml 底泥,注入 400 ml 上覆水(其中底泥为天津某废弃养鱼池池底黑臭底泥,由于养鱼池水被抽干,选择南开大学校园内河道水为上覆水),向底泥中加入不同底泥处理剂 0(空白)、500、1 000、1 500、2 000、2 500、3 000 mg/L(以 N 计)。空白及六个质量浓度梯度均设两次平行试验,对应试验组别及参考指标见表 1。

表 1 试验各组别底泥处理剂投加量及本研究参考指标
Tab. 1 Dosage of sediment treatment agent and reference indexes in this study

组别	底泥处理剂投加量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	参考指标
0-1	0-2	0
1-1	1-2	500
2-1	2-2	1 000
3-1	3-2	1 500
4-1	4-2	2 000
5-1	5-2	2 500
6-1	6-2	3 000

上覆水: TP
 COD_{Cr}
氨氮
硝态氮
亚硝态氮
底泥: 酸挥发性
硫化物
(AVS)

试验通过测定上覆水 TP、 COD_{Cr} 、氨氮、硝态氮、亚硝态氮,同时测定底泥中 AVS 含量,并观察底泥外观变化,判断底泥污染物释放情况,最终确定最优黑臭底泥处理剂投加量。

1.3 分析方法

本研究以 TP、COD、氨氮、硝态氮、亚硝态氮作为试验主要考察的水质指标,以 AVS 作为底泥黑臭程度的参考指标。各分析指标的测定方法见表 2。

表 2 各分析指标及其测定方法
Tab. 2 Analytical indicators and their determination methods

分析指标	测定方法
总磷(TP)	钼酸铵分光光度法(GB 11893—89)
化学需氧量(COD)	重铬酸盐法(HJ 828—2017)
氨氮	纳氏试剂分光光度法(HJ 535—2009)
硝态氮	紫外分光光度法(HJ/T 346—2007)
亚硝态氮	分光光度法(GB 7493—87)
AVS	底泥中酸性挥发硫及同步浸提金属的测定 ^[10]

2 结果与讨论

2.1 药剂投加量对底泥上覆水各水质指标的影响

室内模拟试验通过测定 400 mL 上覆水中各水质指标的变化,判断底泥中有关污染物质含量的变化情况。试验考察指标为:TP、COD_{Cr}、氨氮、硝态氮及亚硝态氮。

2.1.1 TP

底泥磷的释放会提高上覆水的总磷含量,而磷是藻类生长的重要影响因素之一,因此底泥磷的释放很容易造成水体富营养化,发生水华。一般认为,厌氧条件更有利于底泥磷的释放,黑臭底泥均处于厌氧状态,若不加以处理,将常年持续释放磷进入水体,对水处理造成不便。

本试验通过投加底泥处理剂,引入大量反硝化细菌,同时硝酸钙提供反硝化电子受体,底泥中有机物在异养反硝化作用下被矿化成 CO₂ 气体,离开底泥,产生大量气泡,使底泥疏松膨胀,改善底泥原有的厌氧条件,底泥中发生二价铁的氧化反应,生成三价铁离子继而与磷酸盐结合形成不溶性磷酸铁^[11],另外还有氢氧化铁胶体吸附水中的游离性磷,两进程均可使底泥有效吸附含磷污染物而抑制磷的释放,本试验投加底泥处理剂 30 d 内上覆水 TP 变化情况见图 1。

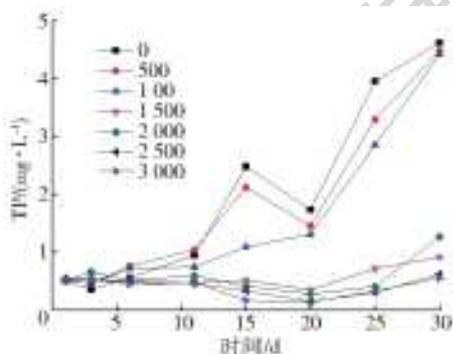


图 1 不同药剂投加量 30 d 内上覆水 TP 变化

Fig. 1 TP changes in overlying water within 30 days with different dosages of sediment treatment agent

由图 1 可以看出,当底泥处理剂投加量为 0~1 000 mg/L 时,底泥中的磷随时间不断释放到上覆水中,使上覆水 TP 质量浓度持续上升。试验进行到第 30 d,底泥处理剂投加量为 0、500、1 000 mg/L 时,400 ml 上覆水中 TP 质量浓度分别达到 4.62、4.48、4.42 mg/L,且底泥颜色依然呈黑色,处于厌氧状态。当底泥处理剂投加量增至 1 500 mg/L 时,全试验周期中上覆水中 TP 变化不明显,试验进行

到第 30 d 时,上覆水 TP 由 0.50 mg/L 增加至 0.91 mg/L,增量仅为 0.41 mg/L,底泥疏松膨胀、颜色由黑色变为黄色,可以判断此时由于底泥处理剂的作用,底泥的厌氧环境逐渐被改善,有效抑制了磷的释放,降低了水体富营养化的风险。继续增加底泥处理剂投加量,上覆水中 TP 质量浓度变化与投加量为 1 500 mg/L 时无明显差别,因此确定改善底泥原有厌氧环境、抑制 TP 释放的底泥处理剂最优投加量为 1 500 mg/L。此时底泥释放磷 0.41 mg/L。

2.1.2 COD_{Cr}

黑臭底泥中有机物污染的来源可能是农药、化工厂、有机肥料等,它们被底泥吸附而沉积下来,若不加以处理,将在今后若干年内对水生生物造成持久的毒害作用,厌氧发酵产生的甲烷气体导致底泥上浮也是水体黑臭的原因之一^[12]。底泥中有机物持续释放入水体,使上覆水有机物含量增加,而化学需氧量(COD_{Cr})往往作为衡量水中有机物质含量多少的指标,因此本试验中通过测定上覆水 COD_{Cr} 的变化判断底泥有机物的释放情况。图 2 为底泥处理剂不同投加量条件下,随着时间的推移,上覆水中 COD_{Cr} 的变化。

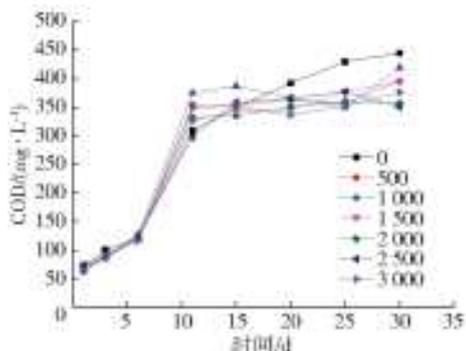


图 2 不同药剂投加量 30 d 内上覆水 COD_{Cr} 变化

Fig. 2 COD_{Cr} changes in overlying water within 30 days with different dosages of sediment treatment agent

由图 2 可知,试验开始 10 d 内,上覆水 COD_{Cr} 明显增加且投加底泥处理剂组别增长速率均大于空白组,10 d 后投加底泥处理剂各组别上覆水 COD_{Cr} 基本保持不变,而空白组持续增长。试验进行到第 30 d 时,空白组上覆水 COD_{Cr} 达到 445 mg/L,投加底泥处理剂各组别上覆水 COD_{Cr} 基本分布在 350~395 mg/L,均低于空白组,表明投加底泥处理剂对底泥有机污染物的持续释放具有一定抑制作用,但其投加量对底泥有机物的释放无明显影响。

2.1.3 氨氮

在酸性、还原条件下,氨氮从底泥中释放,造成

上覆水氨氮质量浓度升高,河道中藻类由于水体营养物质含量高而过量繁殖,形成水华。这些藻类在生长初期给水体补充氧气,在死亡后分解矿化形成耗氧有机物和氨氮,导致季节性水体黑臭现象并产生极其强烈的腥臭味道,给水环境周边居民造成不良的感官体验。本研究通过投加底泥处理剂,改善底泥原有的厌氧环境,并使底泥氨氮更快且充分地得到释放。图3为不同药剂投加量30 d内上覆水氨氮的变化。

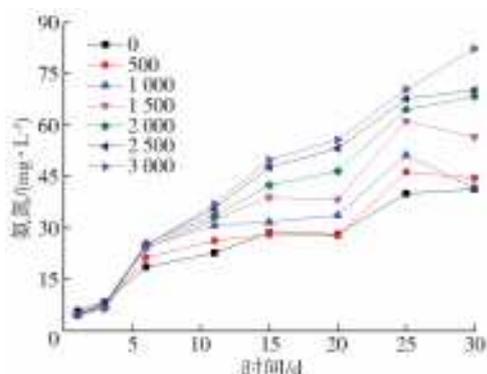


图3 不同药剂投加量30 d内上覆水氨氮变化

Fig. 3 Changes of ammonia nitrogen in overlying water within 30 days with different dosages of sediment treatment agent

由图3可知,不同底泥处理剂投加量下,30 d试验周期内上覆水氨氮质量浓度整体均呈上升趋势,且投加底泥处理剂后上覆水氨氮增加速率均大于空白组,表明在投加底泥处理剂的情况下氨氮得到了更快的释放。涂玮灵^[1]等人的研究还表明,在底泥—水界面之间,易降解有机氮在异氧微生物的作用下将发生氨化作用,转化为氨氮,这与试验中上覆水氨氮浓度大幅升高的结果相符。当底泥处理剂投加量为0~1 000 mg/L时,虽氨氮释放速率较空白组有所提高,但上覆水30 d氨氮质量浓度与空白组无明显差别。投加量增加至1 500 mg/L时,30 d氨氮质量浓度较空白组开始出现明显差异,继续增加处理剂投加量至2 000 mg/L时,试验进行到第30 d,上覆水氨氮由0.10 mg/L增加至68.35 mg/L,其增量已达到空白组增量的1.65倍,可见此时底泥处理剂的投加对底泥氨氮的释放起到了显著促进作用。继续增大投加量,上覆水氨氮增量提升不明显。综合考虑氨氮的释放程度、有机氮的氨化作用及经济因素,选择2 000 mg/L作为适合氨氮释放的黑臭底泥处理剂最佳投加量。此时底泥释放氨氮68.25 mg/L。

2.1.4 硝态氮及亚硝态氮

硝酸盐可被多数细菌作为电子受体进行反硝化作用,降解底泥中的有机物。何清溪^[13]等人的研究表明,黑臭底泥中氮含量很高,其中有机氮含量占总

氮的95%以上,同时无机氮中氨氮占比95%~96%,由此可知黑臭底泥中原有硝态氮及亚硝态氮总量极低,对反硝化进程存在抑制作用。本试验自制黑臭底泥处理剂中存在大量反硝化细菌,及硝酸盐氮,促进反硝化过程的进行,降解底泥中的有机物。

由于底泥处理剂中含较高浓度的硝酸钙,投加底泥处理剂向底泥中引入了大量硝态氮,因此,图4、5中各组别硝态氮及亚硝态氮均有不同程度的升高。由图4可知,当底泥处理剂投加量为2 500 mg/L和3 000 mg/L时,上覆水硝态氮质量浓度大幅升高,这与试验中引入的大量硝态氮有关。而当投加量为2 000 mg/L及以下时,虽引入大量硝态氮,但上覆水硝态氮质量浓度在试验周期前20 d内平稳保持在较低浓度,且与空白组浓度相近,说明此投加量下,20 d内,底泥中引入的硝态氮极大程度被用于反硝化。由此判断适合底泥反硝化降解有机物的最优底泥处理剂投加量为2 000 mg/L。

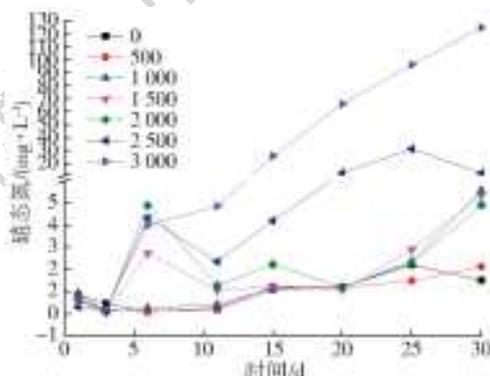


图4 不同药剂投加量30 d内上覆水硝态氮变化

Fig. 4 Changes of nitrate nitrogen in overlying water within 30 days with different dosages of sediment treatment agent

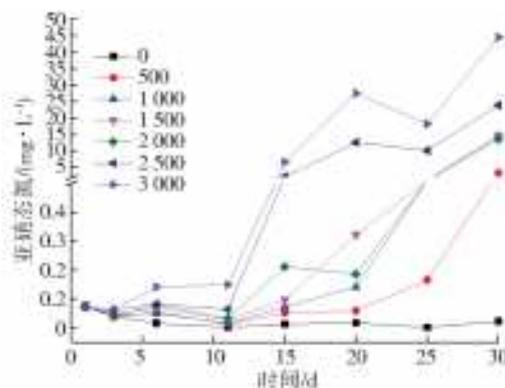


图5 不同药剂投加量30 d内上覆水亚硝态氮变化

Fig. 5 Changes of nitrite nitrogen in overlying water within 30 days with different dosages of sediment treatment agent

2.2 不同底泥药剂投加量对底泥AVS的影响

河流底泥黑臭主要原因是在厌氧环境下,铁锰含量很高,形成硫化铁、硫化锰等不溶物,加上底泥中含有大量腐殖质会吸附整合污染物,造成底泥

发黑;同时在厌氧条件下硫酸盐还原菌易成为优势菌群,产生硫化氢、硫醇类恶臭物质导致水体发臭。可见硫化物是形成黑臭底泥的重要因素之一,而 AVS(酸挥发性硫化物)是硫化物中活性最高的部分^[14],因此本试验通过检测底泥中 AVS 的质量浓度,判断底泥硫化物去除情况。

图 6 为试验进行到第 30 d,各投加量组别底泥 AVS 的情况,由图可知,当底泥处理剂投加量小于

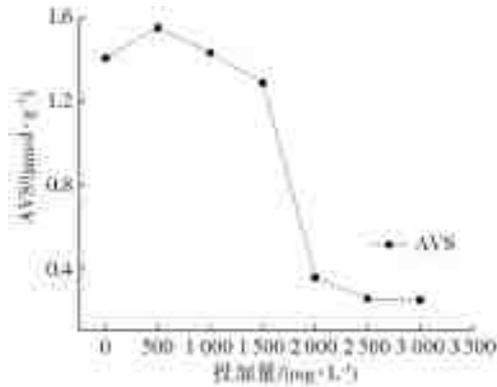


图 6 不同药剂投加量下试验 30 d 后各组别底泥 AVS
Fig. 6 AVS of sediment groups after 30 days of test under different dosages of sediment treatment agent

1 500 mg/L 时,各组别底泥 AVS 无明显差异;当投加量由 1 500 mg/L 增加至 2 000 mg/L 时,AVS 出现大幅度降低,由 1.28 μmol/g 降低至 0.35 μmol/g 且继续增加投加量,AVS 去除效果基本保持不变,投加量为 2 000 mg/L 时,AVS 去除率约为 73.3%。从经济适用性的角度考虑,确定底泥 AVS 去除的最佳处理剂投加量为 2 000 mg/L。可以看出,此时由于黑臭底泥处理剂的投加向底泥中引入了大量反硝化细菌及硝酸盐,使底泥中自养反硝化菌氧化硫化物,底泥 AVS 降低,从而抑制了硫化铁等致黑物质的生成,同时厌氧环境得到改善抑制了硫化氢等恶臭气体的生成,缓解水体发臭^[15]。

2.3 不同底泥药剂投加量底泥外观变化

试验分别在底泥处理剂投加第 1 d、第 4 d 及第 20 d 对各试验组别底泥外观进行拍摄,以对底泥颜色等外观变化进行对比,进一步确定最优底泥处理剂投加量。

图 7 中各试验组别顺序由左至右分别为 0-1、0-2、1-1、1-2、2-1、2-2、3-1、3-2、4-1、4-2、5-1、5-2、6-1、6-2。

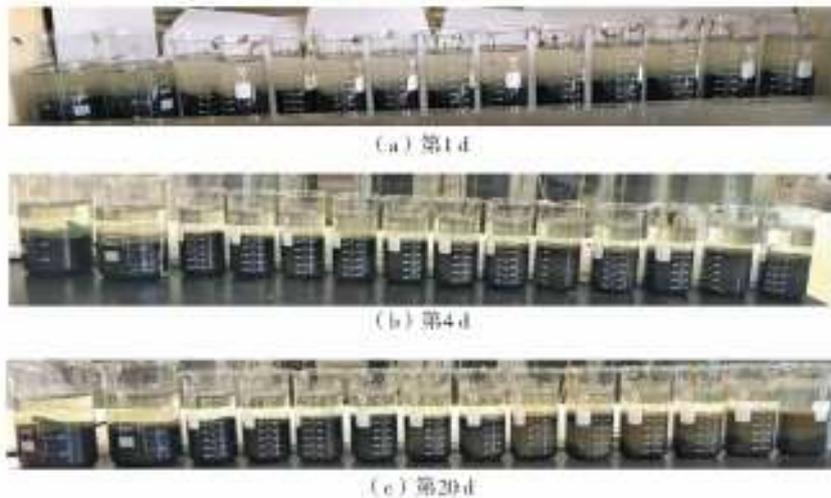


图 7 试验第 1 d、4 d、20 d 各组别底泥外观
Fig. 7 The appearance of each group of sediment on day 1, day 4, and day 20

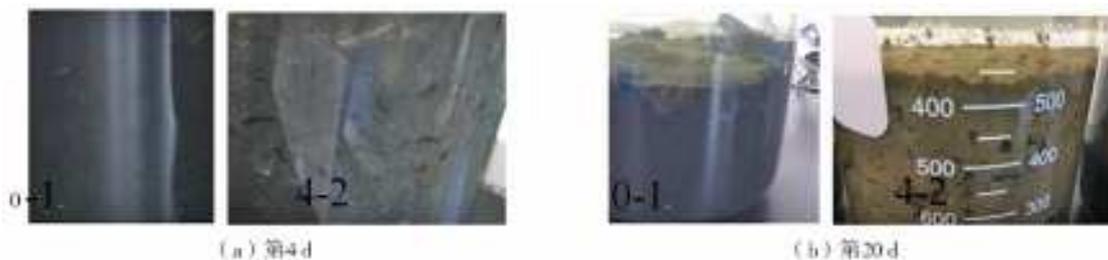


图 8 试验第 4 d、第 20 d 底泥外观对比
Fig. 8 Comparison of the appearance of sediment on day 4 and day 20

由图 7、8 可知,未投加底泥处理剂时,底泥颜色均为黑色,且呈密实状态。底泥处理剂投加第 4 d,

各投加量组别底泥颜色微微变浅,较高投加量组别底泥被产生的气体充满而膨胀、疏松。底泥处理剂

投加后第 20 d,各投加量组别底泥颜色均有不同程度的改善,且存在明显差异。随着投加量的增加,底泥中黄色部分比例增大,当投加量增加至 2 000 mg/L 时,底泥几乎完全由黑色变为黄色,且疏松膨胀,可判断此时底泥已极大程度地恢复活性。继续增加投加量,底泥外观状态较投加量为 2 000 mg/L 时无明显差异,因此确定使底泥恢复活性,颜色由黑变黄的最优底泥处理剂投加量为 2 000 mg/L。

3 结 论

(1)针对黑臭河道底泥,投加自制以反硝化细菌及硝酸钙为主要原料的黑臭底泥处理剂,对底泥进行生物化学原位修复治理,改善底泥氧化还原环境,对底泥活性的恢复有明显效果。

(2)通过室内模拟试验,测定试验上覆水 TP、氨氮等各水质指标及底泥 AVS 的变化,最终确定自制黑臭底泥处理剂最优投加量为 2 000 mg/L(以硝酸钙-N 计),此时黑臭底泥中致黑臭污染物释放情况好,有利于改善底泥黑臭现象。

参考文献(References):

- [1] 涂玮灵. 反硝化菌剂对黑臭河道底泥的修复效果及条件优化研究[D]. 南宁:广西大学,2014. (TU W L. Study on the remediation effect and condition optimization of denitrifying bacteria on black stinky river sediment[D]. Nanning:Guangxi University,2014. (in Chinese)) DOI:10.7666/d.D524337.
- [2] 水污染防治行动计划[N]. 中国环境报,2015-04-17(002). (Water Pollution Prevention Action Plan[N]. China Environment News,2015-04-17(002). (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1006-5377.2015.05.001.
- [3] 颜昌宙,范成新,杨建华,等. 湖泊底泥环保疏浚技术研究展望[J]. 环境污染与防治,2004(3):189-192,243. (YAN C Z, FAN C X, YANG J H, et al. Prospects of environmental dredging technology for lake sediments [J]. Environmental Pollution and Control, 2004(3): 189-192, 243. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-3865.2004.03.010.
- [4] 徐祖信,张锦平,廖振良,等. 苏州河底泥对上复水水质污染影响[J]. 城市环境与城市生态,2005(6):1-3. (XU Z X, ZHANG J P, LIAO Z L, et al. Influence of Suzhou River bottom mud on water quality pollution of Shangfu Water[J]. Urban Environment & Urban Ecology,2005(6):1-3. (in Chinese))
- [5] 于玉彬,黄勇. 城市河流黑臭原因及机理的研究进展[J]. 环境科技,2010,23(S2):111-114. (YU Y B, HUANG Y. Research progress on the causes and mechanisms of black odor in urban rivers[J]. 环境科技,2010,23(S2):111-114. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1674-4829.2010.z2.037.
- [6] 应太林,张国莹,吴芯芯. 苏州河水体黑臭机理及底质再悬浮对水体的影响[J]. 上海环境科学,1997(1):23-26. (YING T L, ZHANG G Y, WU X X. The mechanism of black odor in Suzhou River water body and the effect of sediment resuspension on water body [J]. Shanghai Environmental Science, 1997(1): 23-26. (in Chinese)) DOI:10.1007/BF02951625.
- [7] 钟继承,范成新. 底泥疏浚效果及环境效应研究进展[J]. 湖泊科学,2007(1):1-10. (ZHONG J C, FAN C X. Research progress on dredging effect and environmental effects of sediments [J]. Journal of Lake Science, 2007(1): 1-10. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1003-5427.2007.01.001.
- [8] 毕磊,邱凌峰. 污染底泥修复治理技术[J]. 中国环保产业,2010(11):32-35. (BI L, QIU L F. Remediation technology of contaminated sediment [J]. China Environmental Protection Industry, 2010(11): 32-35. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-5377.2010.11.009.
- [9] GERLINDE W, THOMAS G, KLAUS K, et al. Sediment treatment with a nitrate-storing compound to reduce phosphorus release [J]. Water Research, 2004, 39(2). DOI:10.1016/j.watres.2004.10.017.
- [10] 林玉环,郭明新,庄岩. 底泥中酸性挥发硫及同步浸提金属的测定[J]. 环境科学学报,1997(3):97-102. (LIN Y H, GUO M X, ZHUANG Y. Determination of acidic volatile sulfur and simultaneous extraction of metals in sediment [J]. Acta Scientiae Sinica Sinica Sinica, 1997(3): 97-102. (in Chinese)) DOI: 10.1007/BF02951625.
- [11] Phosphorus sorption-desorption characteristics of ditch sediments from different land uses in a small headwater catchment in the central Sichuan basin of China [J]. Journal of Mountain Science, 2012, 9(3): 441-450. DOI:10.1007/s11629-009-2207-8.
- [12] 熊跃辉. 我国城市黑臭水体成因与防治技术政策 [N]. 中国环境报,2015-06-11(002). (XIONG Y H. The cause of formation and prevention and control technology of urban black and odorous water in China [N]. China Environment News, 2015-06-11(002). (in Chinese))
- [13] 何清溪,张穗,方正信,等. 大亚湾沉积物中氮和磷的地球化学形态分配特征 [J]. 热带海洋,1992(2):38-45. (HE Q X, ZHANG S, FANG Z X, et al. Characteristics of geochemical forms of nitrogen and phosphorus in sediments from Daya Bay [J]. Tropical Ocean, 1992(2): 38-45. (in Chinese)) DOI: 10.1007/BF02677081.

(下转第 97 页)

- SWAT: model use, calibration, and validation [J]. Transactions of the Asabe, 2012, 55(4): 1345-1352.
- [6] ARNOLD J G, ALLEN P M, MUTTIAH R, et al. Automated base flow separation and recession analysis techniques[J]. Groundwater, 2010, 33(6): 1010-1018.
- [7] 葛怀凤, 秦大庸, 周祖昊, 等. 基于污染迁移转化过程的海河干流天津段污染关键源区及污染类别分析[J]. 水利学报, 2011, 42(1): 61-67. (GE H F, QIN D Y, ZHOU Z H, et al. Analysis of key source areas and pollution type in the lower Haihe River based on pollution loading movement and transformation[J]. 2011, 42(1): 61-67. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2011.01.002.
- [8] 张楠, 张占庞, 周祖昊, 等. 基于 SWAT 的天津市非点源污染分布特性分析[J]. 人民黄河, 2008, 30(4): 60-61. (ZHANG N, ZHANG Z P, ZHOU Z H. Analysis of distribution characteristics of non-point source pollution in Tianjin based on SWAT[J]. Yellow River, 2008, 30(4): 60-61 (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2008.04.028.
- [9] 李丹, 薛联青, 郝振纯. 基于 SWAT 模型的流域面源污染模拟影响分析[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(3): 4-7. (LI D, XUE L Q, HAO Z C. SWAT simulation of effect of stream water quality on non-point source pollution[J]. Environmental Pollution and Control, 2008, 30(3): 4-7. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-3865.2008.03.003.
- [10] NEITSCH S L, ARNOLD J G, KINIRY J R, et al. Soil and water assessment tool: Theoretical documentation, version 2000 [R]. Texas: Texas Water Resources Institute, 2002.
- [11] WILLIAMS J R. Sediment routing for agriculture watersheds[J]. Water Resource, 2010, 11(5): 965-974.
- [12] NEITSCH S L, ARNOLD J G, KINIRY J R, et al. Soil and water assessment tool user's Manual Version 2000 [D]. Agriculture Research Service and Blackland Research Center, 2001.
- [13] 武淑霞. 我国农村畜禽养殖业氮磷排放变化特征及其对农业面源污染的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2005. (WU S X. Characteristics of nitrogen and phosphorus emissions from livestock and poultry farming in China's rural areas and their effects on agricultural non-point source pollution[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2005. (in Chinese)) DOI: 10.7666/d.Y756604.
- [14] JASMEET, LAMBA, ANITA, et al. Effect of best management practice implementation on sediment and phosphorus load reductions at subwatershed and watershed scale using SWAT model[J]. International Journal of Sediment Research, 2016, 31(4): 386-394.
- [15] DAVID R. LEGATES, GREGORY J. MCCABE JR. Evaluating the use of "goodness-of-fit" Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation[J]. Water Resources Research, 1999, 35(1): 233-241.
- [16] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles[J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290.

(上接第 75 页)

- [14] 刘景春, 严重玲, 胡俊. 水体沉积物中酸可挥发性硫化物(AVS)研究进展[J]. 生态学报, 2004(4): 812-818. (LIU J C, YAN Z L, HU J. Research progress of acid volatile sulfide (AVS) in water sediments[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004(4): 812-818. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2004.04.024.
- [15] 杨旭楠, 潘汉平, 许玫英, 等. 一种修复黑臭河道底泥的环保型硝酸钙缓释颗粒及其制备方法[P]. 广东: CN105800899A, 2016-07-27. (YANG X N, PAN H P, XU M Y, et al. An environmentally friendly calcium nitrate slow release granule for repairing black mud river bottom sediment and its preparation method [P]. Guangdong: CN105800899A, 2016-07-27. (in Chinese))