

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.19.016

负载氧纳米气泡铝改性沸石对黑臭水体的修复效果

郭超¹, 彭燕¹, 谢琼¹, 于斯斯¹, 曹祎璇¹, 周欣桐¹,
魏雨露²

(1. 杨凌职业技术学院 建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 陕西省土地工程建设集团
自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安 710075)

摘要: 通过搭建投加负载氧纳米气泡的铝改性沸石并种植水生植物(植物+钝化剂组)、仅种植水生植物(纯植物组)、未种植水生植物也未加钝化剂(对照组)3套试验装置,考察了不同处理方式对黑臭水体的修复效果。结果表明,投加负载氧纳米气泡的铝改性沸石可抑制底泥中氮、磷的释放。70 d时,对照组和纯植物组中TP浓度与植物+钝化剂组的差异最大,比植物+钝化剂组分别提高260.14%和218.23%;40 d时,对照组和纯植物组中溶解性活性磷(SRP)浓度与植物+钝化剂组的差异最大,比植物+钝化剂组分别提高122.97%和74.32%。70 d后,植物+钝化剂组TP的平均浓度比对照组和纯植物组分别降低了71.23%和58.40%;40 d后,植物+钝化剂组SRP的平均浓度比对照组和纯植物组分别降低了54.40%和38.71%。70 d时,对照组和纯植物组中TN浓度与植物+钝化剂组的差异最大,比植物+钝化剂组分别提高了41.42%和65.29%;60 d时,对照组和纯植物组中 NH_4^+-N 浓度与植物+钝化剂组的差异最大,比植物+钝化剂组分别提高了96.17%和83.82%。投加负载氧纳米气泡的铝改性沸石可显著提高上覆水体的透明度、降低叶绿素a含量,并对上覆水中的氮、磷浓度略有降低作用。植物+钝化剂组水体的透明度比对照组提高了130.77%,比纯植物组提高了58.73%。植物+钝化剂组的叶绿素a浓度比对照组降低了55.56%,比纯植物组降低了50%。

关键词: 铝改性沸石; 氧纳米气泡; 黑臭水体; 修复

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)19-0102-07

Al-modified Zeolite Loaded with Oxygen Nanobubbles for Remediation of Black and Odorous Water

GUO Chao¹, PENG Yan¹, XIE Qiong¹, YU Si-si¹, CAO Yi-xuan¹,
ZHOU Xin-tong¹, WEI Yu-lu²

(1. Department of Civil Engineering, Yangling Vocational & Technical College, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering <Ministry of Natural Resources>, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group, Xi'an 710075, China)

Abstract: The effects of various treatment approaches on black and odorous water were explored by establishing three sets of experimental apparatuses: adding Al-modified zeolite loaded with oxygen

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2023-YBSF-454); 陕西省重点产业创新链项目(2022ZDLSF06-04); 杨凌职业技术学院省部级课题培育项目(SJ2023-003)

通信作者: 郭超 E-mail: GCLRF@163.com

nanobubbles and cultivating aquatic plants (plant and passivator group), cultivating aquatic plants solely (pure plant group), and neither cultivating aquatic plants nor applying passivator (control group). The release of nitrogen and phosphorus in the sediment was effectively inhibited through the addition of Al-modified zeolite loaded with oxygen nanobubbles. On Day 70, the TP in the control group and the pure plant group showed the most significant difference from the plant and passivator group, and increased by 260.14% and 218.23%, respectively, compared with the plant and passivator group. On Day 40, the concentration of dissolved active phosphorus (SRP) in the control group and the pure plant group exhibited the most significant difference from that in the plant and passivator group, being 122.97% and 74.32% higher respectively than that in the plant and passivator group. After Day 70, the average TP in the plant and passivator group decreased by 71.23% compared with the control group and by 58.40% compared with the pure plant group, respectively. After Day 40, the average concentration of SRP in the plant and passivator group was reduced by 54.40% compared with the control group and by 38.71% compared with the pure plant group, respectively. On Day 70, TN in the control group and the pure plant group showed the most significant difference from the plant and passivator group, and increased by 41.42% and 65.29%, respectively, compared with the plant and passivator group. On Day 60, the concentration of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in the control group and the pure plant group exhibited the most significant difference from that in the plant and passivator group, being 96.17% and 83.82% higher respectively than that in the plant and passivator group. The addition of Al-modified zeolite loaded with oxygen nanobubbles conspicuously enhanced the transparency of overlying water, decreased the content of chlorophyll a, and marginally reduced the concentration of nitrogen and phosphorus in overlying water. The water transparency of the plant and passivator group was 130.77% higher than that of the control group and 58.73% higher than that of the pure plant group. The concentration of chlorophyll a in the plant and passivator group was decreased by 55.56% compared with the control group and by 50% compared with the pure plant group.

Key words: Al-modified zeolite; oxygen nanobubble; black and odorous water; remediation

随着工农业生产的不断发展和城市化进程的不断加快,越来越多的城市河道遭到不同程度的污染。河流变得发黑、发臭,对居民生活和周围环境产生了严重影响。黑臭水体作为水污染的一种极端现象,不仅造成了生态破坏,而且严重制约了城市发展。黑臭水体整治已成为当今水环境治理中最热门、也是最难解决的问题之一。许多黑臭水体治理工程因重治理轻保持、重短期轻长效而陷入“年年治理,年年黑臭”的怪现象。因此,在当前黑臭水体治理过程中,如何选择适宜的黑臭水体治理技术并优化集成是亟待解决的问题^[1]。此外,治理黑臭水体后,如何有效防止治理效果反复,取得良好水质长效保持的目标是实现城市黑臭水体彻底消除的关键。现阶段,城市河道黑臭水体整治工作

所面临的主要技术瓶颈是河道底泥内源污染治理与健康河道生态系统的修复重建。

天然沸石是自然界中广泛存在的一种硅铝酸盐矿物,主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 及铁氧化物,其来源广、储量丰富,具有独特的孔状结构、比表面积大、表面吸附性和离子交换性强等特点,因此被广泛应用于氨氮及重金属离子的吸附。然而,天然沸石的矿物孔道内富含沸石水及杂质,孔道间连通性差,易堵塞,在水处理过程中存在吸附能力差、污染物去除率低等问题。此外,天然沸石的硅氧四面体内部具有负电性,对磷酸根等阴离子的去除效果并不理想,且受温度、覆盖厚度、粒径等多种因素的影响。因此,用不同方法对天然沸石进行改性,可以有效增加磷酸根等阴离子的去除率。Lin等^[2]的研

究表明,天然沸石/盐酸改性沸石与方解石复合盖层可以有效减少沉积物氮磷释放,投加量越大,钝化剂颗粒越小,磷钝化效果越好,且先投加沸石的磷钝化效果优于先加方解石^[3-4]。Gibbs等^[5-6]研究并对比了改性沸石 Z2G1(铝盐改性的沸石)、phoslock(稀土元素镧改性的膨润土)、alum(用碳酸氢钠缓冲溶液处理后的明矾)及 allophane(脲基甲酸,水铝石英,是一种富含铝硅酸盐和铁的天然矿物)四种钝化剂的沉积物磷钝化效果,结果显示 Z2G1 可以有效抑制沉积物磷释放,且不会向水体释放重金属离子等污染物。由于大部分河道底泥中的氧气被水体中还原性物质所消耗,到达沉积物-水界面氧气量很小。Shi等^[7]将氧纳米气泡(直径小于1 μm)加载到沸石微孔上并投加至沉积物中,发现可以减少沉积物中由藻类引起的缺氧状态,氧纳米气泡可能为微生物活动提供氧源。因此,氧纳米气泡具有稳定性好、氧传质速率高等优点,为河道底泥沉积物-水界面精准增氧技术研发提供了可能。

笔者采用盐酸-硫酸铝对天然沸石进行改性,制备了铝改性沸石,利用醇-水替换法加载氧纳米气泡,探索负载氧纳米气泡的铝改性沸石对河道黑臭底泥污染物的控制效果,并应用水生植物进行修复,旨在为城市河道黑臭水体整治提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置

在陕西地建集团富平中试基地搭建3个长×宽×高为2 m×1 m×1 m的铁皮水箱。水箱底部铺设黑臭底泥(取自陕西省富平县石川河),厚度约为10 cm,底泥上加注20 cm自来水(自来水放置10 d左右,以排出水中的氯气),静置1周。1号水箱中先种植美人蕉和香蒲等水生植物,后投加负载氧纳米气泡的铝改性沸石(粒径为1~2 mm),厚度约为2 mm,简称植物+钝化剂组;2号水箱仅种植美人蕉和香蒲,简称纯植物组;3号水箱作为对照组。

1.2 沸石改性和氧纳米气泡制备方法

取1.5 kg直径为1~2 mm的天然沸石,用3 mol/L的盐酸浸泡10 h,去除孔隙中的杂质,洗净后在110℃下烘干。再用0.2 mol/L的硫酸铝浸泡6 h,洗净后在110℃下烘干,得到铝改性沸石。然后在室温(20℃)下将氧气通入甲醇(纯度>99.9%)中,通气速率为100 mL/min,通气时长为60 min,得到氧饱

和的甲醇溶液。取上述溶液置于3 L的烧杯中,加入制备好的铝改性沸石浸润。缓慢加入超纯水,利用超纯水替换甲醇(醇/水比为1:9),由于甲醇中氧气过饱和,故沸石颗粒表面将生成一定浓度的氧纳米气泡。2 h后取出沸石,室温下自然阴干沸石表面的水汽,负载氧纳米气泡的铝改性沸石制备完成。

1.3 样品采集与检测方法

试验装置运行稳定后采集上覆水和底泥,水样取自表层以下5 cm处,底泥取自表层以下2 cm以内。取样时测定环境温度、底泥温度和上覆水温度,结果见表1。每次样品采集完毕后,在采样点补充铝改性沸石。前期每隔10 d在3个水箱中采集一次水样和底泥,后期每隔15或20 d采集一次水样和底泥,采集的样品在-4℃下保存,并于一周内检测完毕。底泥检测指标包括NH₄⁺-N、TN、TP、溶解性活性磷(SRP),上覆水检测指标包括COD、NH₄⁺-N、TN、TP、SRP、透明度、叶绿素a,均采用国标法测定。

表1 取样温度

Tab.1 Sampling temperature

取样时间/d	环境温度/℃	底泥温度/℃	上覆水温度/℃
0	25.6	16.6	18.4
10	28.3	17.3	19.9
20	31.7	20.2	22.1
30	33.6	21.6	23.3
40	35.4	22.5	24.6
50	36.8	23.3	25.2
60	37.2	25.2	28.3
70	38.5	27.4	30.2
80	38.7	27.2	30.0
90	34.9	25.9	28.2
105	36.2	24.3	26.8
130	33.9	24.1	25.3
145	26.8	18.4	20.2
165	20.5	15.2	16.8
185	18.6	15.1	16.2
205	14.6	13.4	14.1
225	12.7	11.8	12.3

2 结果与分析

2.1 底泥中氮和磷浓度的变化

底泥中氮和磷浓度的变化如图1所示。可以看出,底泥中TP和SRP整体呈先增加后减小的趋势,对照组和纯植物组始终保持较高水平的TP和SRP浓度,均大于植物+钝化剂组,且70 d时对照组和纯植物组的TP浓度与植物+钝化剂组的差异最大,对

照组和纯植物组的TP浓度比植物+钝化剂组分别提高了260.14%和218.23%。40 d时对照组和纯植物组的SRP浓度与植物+钝化剂组的差异最大,对照组和纯植物组的SRP浓度比植物+钝化剂组分别提高了122.97%和74.32%。说明随着底泥温度的升高,底泥中的磷向周围水体释放,而投加负载氧纳米气泡的铝改性沸石可抑制这种现象。70 d后,TP的平均浓度由对照组和纯植物组的0.577、0.399 mg/L降低至植物+钝化剂组的0.166 mg/L,植物+钝化剂组比对照组和纯植物组分别降低了71.23%和58.40%。40 d后,SRP的平均浓度由对照组和纯植物组的0.125、0.093 mg/L降低至0.057 mg/L,植物+钝化剂组比对照组和纯植物组分别降低了54.40%和38.71%。分析原因,夏季温度较高,底泥中的微生物活动强烈,对氧气的消耗量较大,使得底泥内部呈厌氧状态,底泥中的铁结合态磷还原溶解,形成大量SRP,导致底泥中的磷强烈释放^[8]。加入负载氧纳米气泡的改性沸石后,不断释放的氧气使底泥形成局部好氧环境,将底泥中 $\text{Fe}(\text{Fe}^{2+})$ 氧化为铁氧化物(Fe^{3+}),形成铁氧化物钝化层,将磷固定在底泥中,有效降低了底泥磷的释放。同时沸石具有较大的比表面积,吸附性较强。另外,天然沸石经铝盐改性后含有丰富的 Al^{3+} , Al^{3+} 可水解形成表面带正电荷的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 胶体,对吸附水体中的 PO_4^{3-} 具有重要作用,其不仅可以减少沉积物中的磷向上覆水体释放,而且可改善上覆水体水质,达到控制内源磷污染和防止上覆水体富营养化的双重目的。通过水生植物吸收,致使底泥中的磷得到有效去除。这种底泥原位钝化+植物修复技术具有除磷效率高、经济成本低、环保美观等优点。

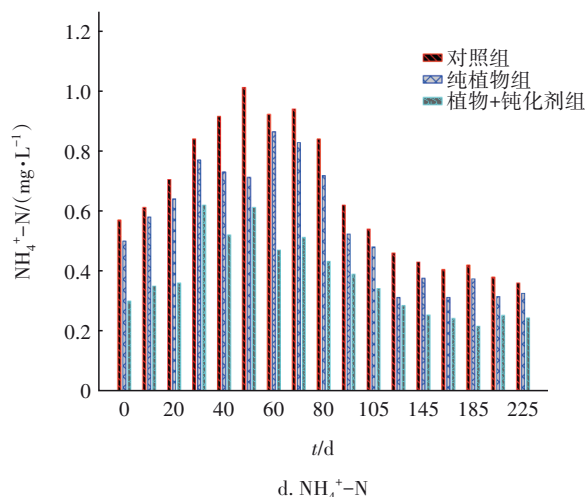
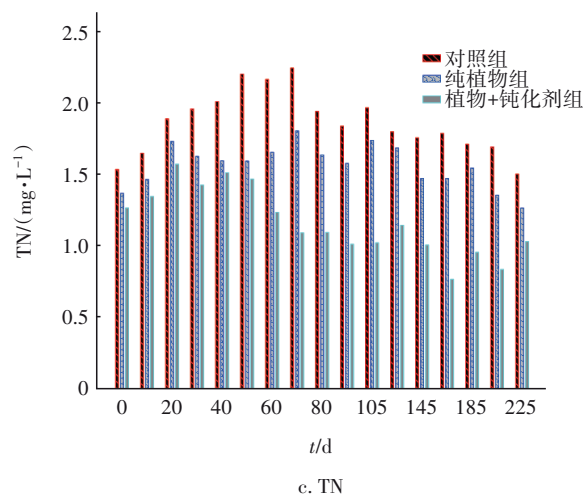
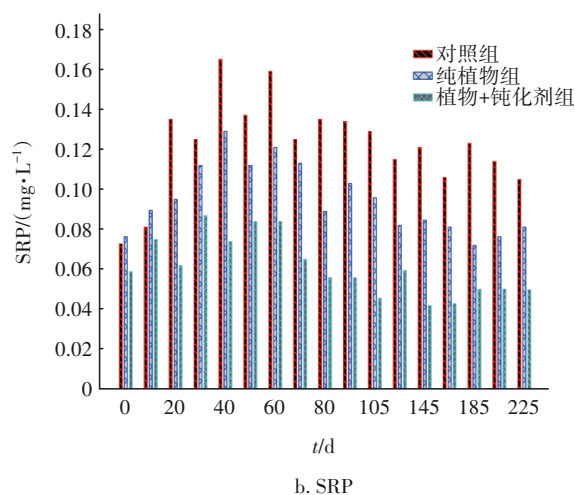
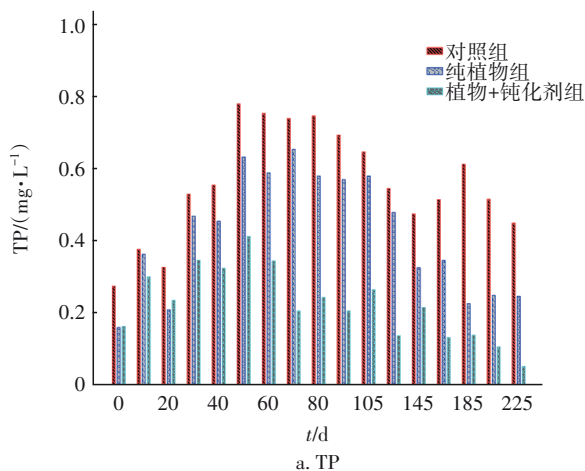


图1 底泥中氮和磷浓度的变化

Fig.1 Change of nitrogen and phosphorus in sediment

由图1还可以看出,对照组和纯植物组中TN和 NH_4^+-N 浓度也是总体上呈先增加后减小的趋势,且植物+钝化剂组对TN和 NH_4^+-N 浓度的影响较大。植物+钝化剂组中TN和 NH_4^+-N 浓度明显小于纯植

物组和对照组。70 d时,对照组和纯植物组中TN浓度与植物+钝化剂组的差异最大,对照组和纯植物组的TN浓度比植物+钝化剂组分别提高了41.42%和65.29%;60 d时, NH_4^+-N 浓度与植物+钝化剂组的差异最大,比植物+钝化剂组分别提高了96.17%和83.82%。

从上述分析可以看出,随着时间的增加,对照组和纯植物组底泥中的氮向周围水体发生了释放,而投加负载氧纳米气泡的铝改性沸石以后抑制了这种现象的发生。有研究表明,在纳米气泡气液界面存在负电荷,可以与水体中带正电荷的污染物相互作用,当其破裂时产生的自由基和振动波能够促进污染物的去除^[9]。因此,城市面源污染向城市河湖水体排放的污染物可以通过底泥原位改性沸石+植物技术进行修复,既能够达到污染物控制效果,也可以起到美化城市的作用,是目前较为有效的技术手段。

2.2 上覆水中污染物浓度的变化

上覆水中污染物浓度的变化如图2所示。

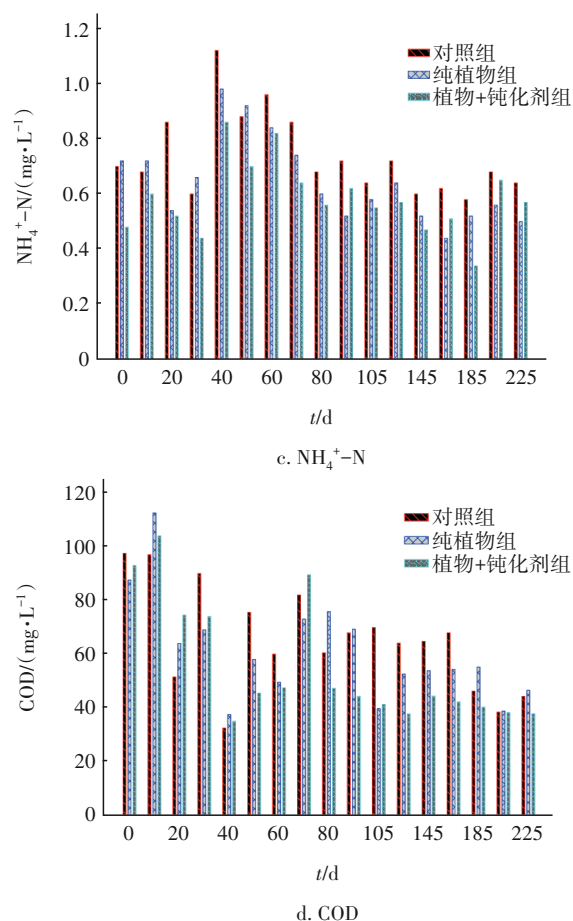
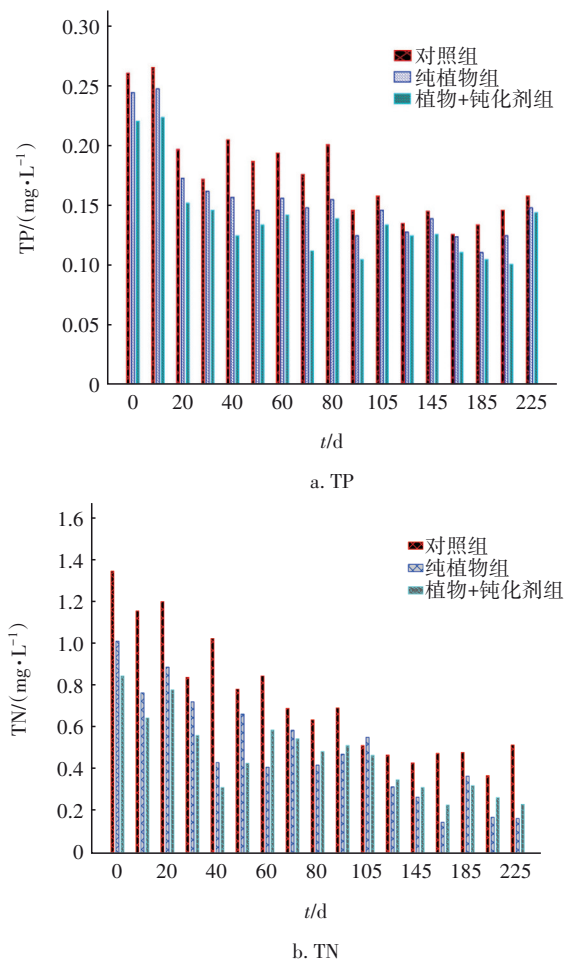


图2 上覆水中污染物浓度的变化

Fig.2 Change of pollutants concentration in overlying water

从图2(a)可以看出,上覆水中TP浓度的排序为植物+钝化剂组<纯植物组<对照组,说明投加改性沸石虽然会引起底泥中磷的释放,但不会增加上覆水中磷浓度。主要是由于改性沸石颗粒通过表面吸附作用可快速吸附水体中的溶解性活性磷。有研究表明,改性沸石中铝离子水解形成表面带正电荷的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 胶体,能够强烈吸附水体中带负电荷的细菌和离子^[10],如 PO_4^{3-} 。同时, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 悬浮物质量较轻,不易沉淀, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 吸附水体中离子后可增加其质量,并逐渐沉降到水底,减少再悬浮的可能。另外,水解产物 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 可通过吸附架桥作用去除水中悬浮物。 Al^{3+} 经水解反应形成具有线性结构的高分子聚合物,可以与相距较远的微粒通过高分子吸附架桥作用使颗粒逐渐变大。随着 Al^{3+} 吸附的胶体增加,逐渐向水体底部移动,并在下沉过程中吸附悬浮颗粒物。胶体沉降到底泥表面后,在沉积物表层形成覆盖层以阻止底泥中磷向上覆水中释放。

从图2(b)、(c)可以看出,上覆水中TN浓度呈下降趋势, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 整体上呈先增加后减小的趋势。植物+钝化剂组的TN和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均小于对照组。40 d时,植物+钝化剂组与对照组TN浓度的差异最大,分别为0.315和1.028 mg/L,植物+钝化剂组比对照组TN浓度降低了69.36%。20 d时,植物+钝化剂组和对照组 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的差异最大,分别为0.520和0.860 mg/L,植物+钝化剂组比对照组 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度降低了39.53%。主要是沸石对氨氮具有吸附作用,降低了上覆水中氮浓度。此外,水生植物对有效氮的吸收作用也可降低水体中氮浓度。因此,使用改性沸石修复底泥中污染物时,需辅助种植水生植物,吸收底泥和水体中的污染物。

由图2(d)可以看出,改性沸石对上覆水中COD的影响较小,试验前期,3组装置上覆水中COD无明显差异,后期植物+钝化剂组和纯植物组的COD浓度略小于对照组,可能是植物吸收水体中可溶性有机污物导致的。因此,施加改性沸石对黑臭水体COD浓度无明显改善作用。

2.3 上覆水中透明度和叶绿素a浓度的变化

上覆水中透明度和叶绿素a浓度的变化如图3所示。从图3(a)可以看出,0~40 d,不同组别上覆水透明度的大小变化规律不明显;40 d后,上覆水透明度的排序为植物+钝化剂组>纯植物组>对照组。其中,70 d时,植物+钝化剂组上覆水的透明度与对照组的差异最大,分别为30和13 cm,植物+钝化剂组上覆水的透明度比对照组提高了130.77%。185 d时,植物+钝化剂组上覆水的透明度与纯植物组的差异最大,分别为30和18.9 cm,植物+钝化剂组上覆水的透明度比纯植物组提高了58.73%。因此,投加负载氧纳米气泡的铝改性沸石对水体具有显著的净化作用。从图3(b)可知,上覆水中叶绿素a浓度总体呈先升高后下降最后趋于稳定的趋势,30 d后上覆水中叶绿素a浓度明显增加,40 d时3个组别叶绿素a浓度均达到最大值,并且试验期间植物+钝化剂组上覆水的叶绿素a浓度均小于对照组和纯植物组。分析原因,试验于5月底开始,30 d后温度较高,试验装置内除了生长绿色植物外,还有较多的原核蓝绿藻(蓝菌)和真核的藻类,其通过光合作用合成有机物,将光能转化为化学能,从而增加了水体中叶绿素a浓度。80 d后植物+钝化剂组上覆水的叶绿素a浓度明显小于纯植物组和对照组,且

130 d时植物+钝化剂组上覆水的叶绿素a浓度与对照组和纯植物组的差异最大,此时植物+钝化剂组叶绿素a浓度分别比对照组和纯植物组减小55.56%和50%。可见,投加改性沸石可降低水体中叶绿素a浓度。130 d后植物+钝化剂组上覆水的叶绿素a浓度逐渐趋于稳定。分析原因,投加负载氧纳米气泡的铝改性沸石后,底泥中的磷得到了有效控制(氮得到一定程度的控制),磷和氮成为藻类生长的限制因子,抑制了藻类的繁殖速率,因此,植物+钝化剂组上覆水的叶绿素a浓度小于纯植物组和对照组。

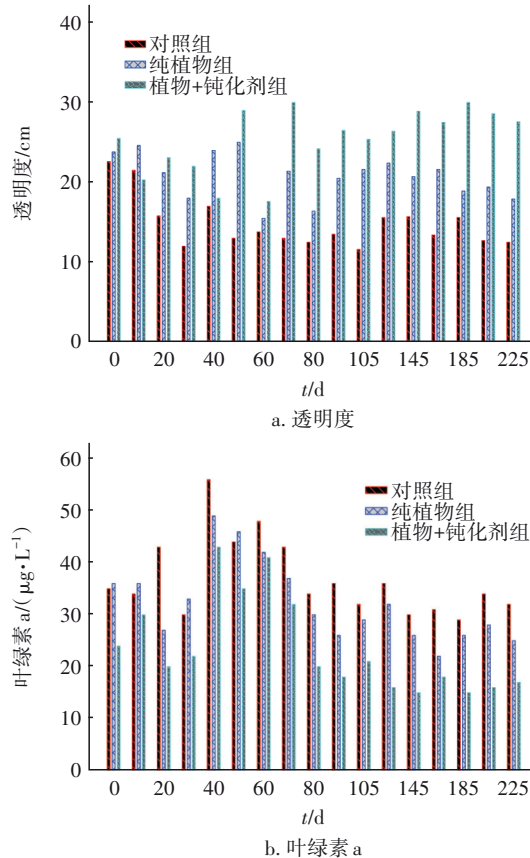


图3 上覆水中透明度和叶绿素a的变化

Fig.3 Change of transparency and chlorophyll a in overlying water

3 结论

① 随着温度的升高,黑臭水体底泥中的氮、磷向周围水体的释放量有所增加,投加负载氧纳米气泡的铝改性沸石能抑制磷的释放,并且效果明显。70 d时,对照组和纯植物组中TP浓度与植物+钝化剂组的差异最大,比植物+钝化剂组分别提高了260.14%和218.23%;40 d时,对照组和纯植物组

中SRP浓度与植物+钝化剂组的差异最大,比植物+钝化剂组分别提高了122.97%和74.32%。70 d时,对照组和纯植物组中TN浓度与植物+钝化剂组的差异最大,比植物+钝化剂组分别提高了41.42%和65.29%;60 d时,对照组和纯植物组中 NH_4^+-N 浓度与植物+钝化剂组的差异最大,比植物+钝化剂组分别提高了96.17%和83.82%。

② 投加负载氧纳米气泡的铝改性沸石虽然会引起底泥中磷的释放,但不会增加上覆水中磷浓度,上覆水中TP浓度的排序为植物+钝化剂组<纯植物组<对照组。40 d时,植物+钝化剂组与对照组TN的差异最大;20 d时,植物+钝化剂组与对照组 NH_4^+-N 的差异最大。投加改性沸石对上覆水中COD的影响不大,试验前期3组装置中COD浓度差异较小,试验后期植物+钝化剂组和纯植物组的COD浓度略小于对照组。

③ 投加改性沸石并种植水生植物可显著提高上覆水的透明度,40 d后,植物+钝化剂组的透明度与对照组和纯植物组的差异越来越明显,透明度的排序为植物+钝化剂组>纯植物组>对照组。投加改性沸石并种植水生植物可降低上覆水中叶绿素a浓度。80 d后植物+钝化剂组上覆水的叶绿素a浓度明显小于纯植物组和对照组。

参考文献:

- [1] 孟令鑫,胡天媛,宫政,等. 超磁混凝/接触氧化/稳定塘工艺应急处理黑臭水体[J]. 中国给水排水, 2018, 34(16):93-96.
MENG Lingxin, HU Tianyuan, GONG Zheng, *et al.* Treatment of black-odorous river by super-magnetic coagulation/contact oxidation/stabilization pond process [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(16): 93-96 (in Chinese).
- [2] LIN J W, ZHAN Y H, ZHU Z L. Evaluation of sediment capping with active barrier systems (ABS) using calcite/zeolite mixtures to simultaneously manage phosphorus and ammonium release [J]. Science of the Total Environment, 2011, 409(3):638-646.
- [3] SHAHMANSOURI A A, BENGAR H A, AZARIFAFARI H. Life cycle assessment of eco-friendly concrete mixtures incorporating natural zeolite in sulfate-aggressive environment [J]. Construction and

Building Materials, 2021, 268:121136.

- [4] MESSAADI C, GHRIB T, GHRIB M, *et al.* Investigation of the percentage and the compacting pressure effect on the structural, optical and thermal properties of alumina-zeolite mixture [J]. Results in Physics, 2018, 8:422-428.
- [5] GIBBS M, OZKUNDAKCI D. Effects of a modified zeolite on P and N processes and fluxes across the lake sediment-water interface using core incubations [J]. Hydrobiologia, 2011, 661:21-35.
- [6] GIBBS M M, HICKEY C W, OZKUNDAKCI D. Sustainability assessment and comparison of efficacy of four P-inactivation agents for managing internal phosphorus loads in lakes: sediment incubations [J]. Hydrobiologia, 2011, 658:253-275.
- [7] SHI W Q, PAN G, CHEN Q W, *et al.* Hypoxia remediation and methane emission manipulation using surface oxygen nanobubbles [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(15):8712-8717.
- [8] 余萍萍. 氧纳米气泡改性颗粒对深水沉积物-水界面的增氧效果及环境效应研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2019.
YU Pingping. Study on the Oxygenation and Environmental Effects of ONBMMs on the SWI in Deep Water [D]. Guiyang: Guizhou University, 2019 (in Chinese).
- [9] 李诗月,冯丽娟,武华杰,等. 氧纳米气泡改性活性炭在河道底泥氮氮治理中的应用[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(19):8283-8289.
LI Shiyue, FENG Lijuan, WU Huajie, *et al.* Application of oxygen nanobubble modified activated carbon in treatment of ammonia nitrogen in river sediment [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(19): 8283-8289 (in Chinese).
- [10] HAN C, DING S M, YAO L, *et al.* Dynamics of phosphorus-iron-sulfur at the sediment-water interface influenced by algae blooms decomposition [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 300:329-337.

作者简介:郭超(1985-),女,陕西榆林人,博士,高级工程师,主要从事与海绵城市有关的水污染与土壤污染防治研究。

E-mail:GCLRF@163.com

收稿日期:2022-03-14

修回日期:2022-07-14

(编辑:任莹莹)