

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201811072



可调式覆盖床对富营养化 水体的净化效果

林灿阳, 李涛, 滕腾, 林久洪, 庞子君, 周真明, 苑宝玲

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对活性覆盖材料吸附饱和和失效和沉水植物在光照较弱的水体底部难以生存的问题,在污染底泥沉水植物与活性覆盖材料联合修复技术的基础上,研发一种可调节式富营养化水体污染底泥覆盖床装置,并开展室内静态模拟实验.结果表明:实验历时 25 d,在苦草种植密度为 $30 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$,黑藻种植密度为 $8 \text{ 丛} \cdot \text{m}^{-2}$,沸石和活性炭混合覆盖强度均为 $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的条件下,基于沉水植物(苦草+黑藻)和活性覆盖材料(沸石+活性炭)联合的可调覆盖床系统对水体中氨氮削减率及高锰酸盐指数削减率分别达到 98.78%,51.05%,可有效削减水体中氨氮和有机物的负荷.

关键词: 沉水植物; 活性覆盖材料; 可调式覆盖床; 底泥; 富营养化水体

中图分类号: X 524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2019)04-0522-05

Purification Effect of Adjustable Capping Bed on Eutrophic Water

LIN Canyang, LI Tao, TENG Teng, LIN Jiuhong,
PANG Zijun, ZHOU Zhenming, YUAN Baoling

(School of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Facing with the problems of the saturation and the lack of efficacy of the active capping materials and the low survival rate of submerged macrophytes at the bottom of water where sunlight can barely reach, an adjustable capping bed for eutrophication pollution sediment was developed based on the joint remediation technology of submerged macrophytes and active capping materials, and the static simulation experiment was carried out indoors. The research results show that the simulation experiment, which lasted 25 d, was conducted with the adjustable capping bed device under the conditions that the planting density of vallisneria natans was $30 \text{ clusters} \cdot \text{m}^{-2}$, the planting density of hydrilla verticillata was $8 \text{ clusters} \cdot \text{m}^{-2}$, and the mixed coverage density of zeolite and activated carbon was $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. Under these conditions, the reduction rates of ammonia nitrogen and permanganate index were as high as 98.78% and 51.05% respectively when the adjustable capping bed system consisted of submerged macrophytes (vallisneria natans+hydrilla verticillata) combining with active capping materials (zeolite+activated carbon), which demonstrates that this system can reduce the load

收稿日期: 2018-11-29

通信作者: 周真明(1981-),男,副教授,博士,主要从事水体富营养化控制理论与技术的研究. E-mail: zhenming@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678255, 51878300); 福建省高校产学研合作重大项目(2018Y4101); 福建省泉州市高层次人才创新创业项目(2017Z025); 华侨大学中青年教师科研提升资助计划项目(ZQN-PY313); 华侨大学研究生科研创新基金资助项目(18013086019)

of ammonia nitrogen and organic matter in water effectively.

Keywords: submerged macrophytes; active capping material; adjustable capping bed; sediment; eutrophic water

随着我国工业化和城市化进程的加快,城市河湖污染不断加剧,水体富营养化问题尤为突出,且呈现严重的发展趋势^[1]. 当外源污染得到有效控制时,底泥作为内污染源,在一定条件下会向上覆水体释放氮和磷等营养物质,造成水体富营养化^[2]. 内源污染控制技术包括疏浚^[3]、原位覆盖^[4]、底泥钝化^[5]和生物修复^[6]等. 原位覆盖技术可有效控制底泥氮磷释放,深受国内外学者青睐^[7]. 原位覆盖技术是通过在污染底泥表面铺设一层或多层清洁的覆盖材料,如活性炭^[8]、沸石^[9]、方解石^[10-11]、砂砾等,使污染底泥与上层水体隔离,从而阻止底泥中的污染物向水体迁移. 原位覆盖技术的核心是覆盖材料,但覆盖材料不仅存在污染物吸附量有限、吸附饱和后对氮磷控制失效等问题,还存在覆盖层易被底泥二次覆盖的问题. 近年来,许多沉水植物被运用于生态修复领域中^[12]. 沉水植物如黑藻、苦草等^[13]不仅对污染底泥和水体中氮磷有很好的削减效果,还能有效地抑制底泥再悬浮,但其在生长过程中易受到环境因素的影响,如在富营养化和黑臭水体中,因水体的水质差、透明度不高,沉水植物存活率低或难以生长. 因此,将活性材料覆盖与沉水植物联用,可以弥补彼此的不足^[14]. 本文以沸石和活性炭作为活性覆盖材料,选用苦草和黑藻作为沉水植物,通过室内静态模拟,研究基于沉水植物与活性覆盖材料联合的可调式覆盖床对富营养化水体的净化效果,并分析其削减污染源的作用机理.

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料:原水和底泥分别取自华侨大学厦门校区白鹭湖中的湖水和底泥,底泥采用 Haps 手动柱状采泥器(丹麦 KC-Denmark 公司)取得;覆盖材料为沸石和椰壳活性炭,粒径为 1~2 mm;沉水植物选用苦草和黑藻,两种沉水植物为土培苗,经除土洗净后,移植到试验水体中;试验水箱材料为透明有机玻璃. 上覆水水质参数:溶解氧(DO)的质量浓度为 8.06 mg · L⁻¹;氨氮质量浓度为 9.21 mg · L⁻¹;高锰酸盐指数为 14.42 mg · L⁻¹;pH 值为 6.88;温度为 21.8 °C.

1.2 可调式覆盖床设计

可调节式覆盖床主要由主体框架、沉水植物种植床和勾夹 3 部分构成. 其中,主体框架由立柱、支撑架、土工布层、弯管、三通等连接件组成,如图 1 所示;沉水植物种植床设置种植孔、浮标、沟孔,并具有独立的勾夹和活性覆盖材料,如图 2 所示.

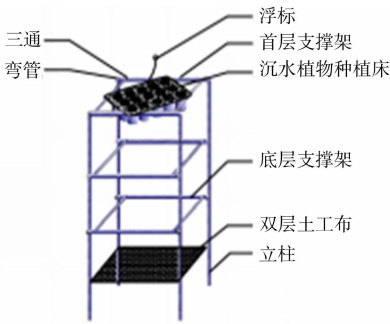


图 1 可调式覆盖床框架图
Fig. 1 Frame diagram of adjustable overburden bed

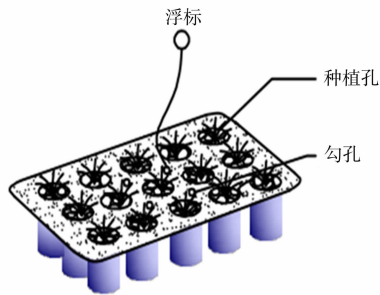


图 2 沉水植物种植床示意图
Fig. 2 Schematic diagram of submerged macrophytes bed

可调节式覆盖床中主体框架主要由直径为 15 mm 的普通聚氯乙烯材料(PVC)给水管拼接而成,连接构件为普通的 PVC 弯管和三通,土工布层由两层土工布平行叠放而成,内置活性覆盖材料. 沉水植物种植床中的种植孔布置密度根据所种植沉水植物种类的不同进行选择,实验选用的苦草和黑藻种植密度分别为 30 株 · m⁻², 8 丛 · m⁻², 沉水植物种植床的勾孔直径为 20 mm. 土工布层使用活性覆盖材料可选择沸石^[9]、生物沸石^[15]、活性炭^[8]、锁磷剂^[16]、煅烧改性净水厂污泥^[17-18]等一种或几种组合,文中选

用沸石和活性炭组合,两种活性覆盖材料混合强度为 $1\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$.

1.3 试验方法

在体积为 210 L 的透明有机玻璃缸中进行试验,有机玻璃缸长 \times 宽 \times 高为 $60\text{ cm}\times 50\text{ cm}\times 70\text{ cm}$. 使用 2 个有机玻璃缸进行试验,编号为 1#,2#. 其中,1# 为对照组,未放置可调式覆盖床;2# 为覆盖组,放置可调式覆盖床. 试验有以下 3 个操作步骤. 1) 将底泥均匀放置于有机玻璃缸底部,底泥厚度为 5 cm,体积约为 15 L. 2) 制备可调式覆盖床,将混合覆盖密度为 $1\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 的沸石和椰壳活性炭均匀放置于双层土工布中,在种植床上种植苦草(种植密度为 $30\text{ 株}\cdot\text{m}^{-2}$)和黑藻(种植密度为 $8\text{ 丛}\cdot\text{m}^{-2}$),将可调式覆盖床放置于 2# 有机玻璃缸中. 3) 利用虹吸原理,通过塑料软管将原水分别沿缸壁缓慢流入有机玻璃缸中,上覆水的体积均约为 100 L,水深约为 34 cm.

试验于 2017 年 10 月 15 日开始进行,2017 年 11 月 8 日结束,历时 25 d. 在实验室室温下进行试验,有机玻璃缸上部敞开,不控制上覆水的 DO 的质量浓度,定期取 50 mL 水样,分别测定水样中的氨氮质量浓度和高锰酸盐指数,每个水样有 3 个平行样,求其平均值,取水样后,用原水补充至原刻度线.

1.4 测试方法

水温 and DO 的质量浓度采用 HQ30d 型便携式溶解氧测定仪(美国 HACH 公司)测定;pH 值采用 STARTER3100 型便携式 pH 计(上海奥豪斯仪器有限公司)测定;上覆水体中,氨氮质量浓度和高锰酸盐指数分别采用纳氏试剂光度法^[19]和酸性法测定^[19].

1.5 数据处理

上覆水体中,氨氮质量浓度和高锰酸盐指数削减率(P)的计算式为

$$P=\frac{\rho_{R_i}-\rho_{C_i}}{\rho_{R_i}}\times 100\%.$$

上式中: ρ_{C_i} 为取样时覆盖组中氨氮质量浓度或高锰酸盐指数, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; ρ_{R_i} 为取样时对照组中氨氮质量浓度或高锰酸盐指数, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; i 为取样次数.

采用 Origin Pro 8.5 软件分析覆盖组与对照组之间氨氮质量浓度和高锰酸盐指数削减率的差异.

2 结果与分析

2.1 可调式覆盖床对氨氮的去除效果

在历时 25 d 的试验过程中,对照组和覆盖组的水温变化范围为 $17.4\sim 22.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,pH 值变化范围为 $6.10\sim 6.92$. 对照组和覆盖组中,氨氮的质量浓度($\rho(\text{NH}_4^{+}\text{-N})$)随时间(t)的变化情况,如图 3 所示.

由图 3 可知:对照组上覆水中氨氮质量浓度波动幅度较大,主要原因为水体在进行自净作用和底泥向上覆水中持续释放氨氮,释放氨氮和削减氨氮之间呈动态关系;覆盖组上覆水中氨氮质量浓度在前 5 d 大幅度下降,在第 5 d 时,氨氮的削减率达到 78.38%,在试验第 5~25 d 时,氨氮的削减率保持在 78.00% 及以上,氨氮质量浓度较为稳定,说明可调式覆盖床不仅可以抑制底泥向上覆水释放氨氮,还可以有效地去除上覆水中的氨氮物质;试验历时 25 d 之后,覆盖组上覆水中氨氮质量浓度仅为 $0.033\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其削减率达到 98.78%,说明可调式覆盖床对氨氮有很好地削减效果,可有效控制底泥中氨氮的释放.

2.2 可调式覆盖床对有机物的去除效果

在相同的试验条件下,对照组和覆盖组中的高锰酸盐指数($\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$)随时间(t)的变化情况,如图 4 所示.

由图 4 可知:对照组上覆水中高锰酸盐指数较高,在第 10 d 时,对照组上覆水中高锰酸盐指数达到

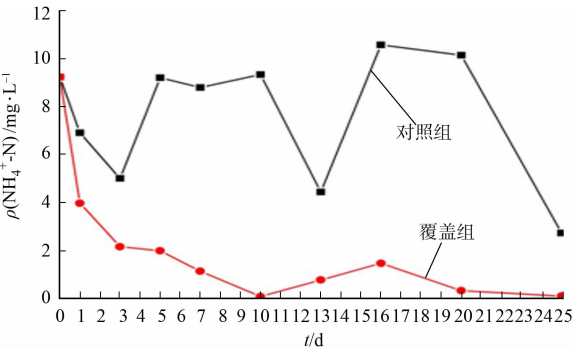


图 3 各组上覆水中氨氮质量浓度的变化
Fig. 3 Changes of ammonia nitrogen concentration in overlying water of each group

17.442 mg · L⁻¹, 其主要原因为底泥向上覆水中不断释放有机物质; 在试验前 15 d 时, 覆盖组上覆水中高锰酸盐指数均低于对照组, 说明可调式覆盖床能够有效抑制底泥中的有机物向上覆水迁移, 同时, 沉水植物能够吸收水中的有机物质; 在实验第 16~20 d 时, 覆盖组高锰酸盐指数升高且高于对照组, 这可能是由少量沉水植物死亡腐烂而引起的; 试验历时 25 d 之后, 覆盖组上覆水中高锰酸盐指数仅为 7.056 mg · L⁻¹, 其削减率达到 51.05%, 说明可调式覆盖床对有机物有一定的去除效果。

2.3 氨氮和有机物的削减机理

2.3.1 氨氮的削减机理 上覆水体中, 氨氮的削减途径主要包括掩蔽作用、吸附作用和吸收作用。1) 掩蔽作用. 沸石和活性炭作为活性覆盖材料, 通过物理遮掩等作用, 将上覆水与污染底泥隔开, 从而抑制污染底泥中氨氮向上覆水迁移。2) 吸附作用. 沸石通过物理吸附和化学吸附(离子交换)作用, 有效地削减上覆水中的氨氮^[18]。3) 吸收作用. 沉水植物在生长过程中, 通过吸收同化水体中的营养物质, 转化为自身的组织结构, 可对上覆水及底泥中的氨氮起到削减作用^[14]。

2.3.2 有机物的削减机理 上覆水体中, 有机物的削减途径主要有物理掩蔽和吸附。1) 掩蔽作用. 沸石和活性炭作为活性覆盖材料, 通过物理遮掩等作用, 将上覆水与污染底泥隔开, 从而抑制污染底泥中有机物向上覆水迁移。2) 吸附作用. 活性炭具有巨大的比表面积和丰富的内部微孔结构, 且表面具有各种官能团, 对有机物有很好的吸附能力, 易吸附水中的非极性 or 弱极性有机物; 沸石具有发达的孔隙, 且带有金属离子, 对极性有机物具有较强的吸附能力^[20]。

3 结论

通过室内静态模拟, 研究活性覆盖材料(沸石+活性炭)与沉水植物(苦草+黑藻)联合的可调式覆盖床, 研究其削减水体中氨氮和高锰酸盐指数的效果, 可以得到以下 3 个结论。

1) 污染底泥可调节覆盖床装置可使污染底泥活性覆盖材料与沉水植物联用修复技术在实际工程中易于实施与推广应用。

2) 在试验条件下, 基于沉水植物(苦草+黑藻)和活性覆盖材料(沸石+活性炭)联合的可调式覆盖床系统, 对水体中氨氮质量浓度的削减率达 98.78%, 对高锰酸盐指数削减率达 51.05%, 可有效削减水体中氨氮和有机物的负荷。

3) 后续需要开发货源广、经济高效、可回收与再生的活性覆盖材料, 同时, 需要进一步研究沉水植物与活性覆盖材料削减污染物的作用机制, 并优化技术参数。

参考文献:

[1] WANG Junli, FU Zishi, QIAO Hongxia, *et al.* Assessment of eutrophication and water quality in the estuarine area of Lake Wuli, Lake Taihu, China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 650:1392-1402. DOI:10.1016/j.scitotenv.2018.09.137.

[2] 周成, 杨国录, 陆晶, 等. 河湖底泥污染物释放影响因素及底泥处理的研究进展[J]. 环境工程, 2016, 34(5):113-117. DOI:10.13205/j.hjgc.201605025.

[3] YU Juhua, DING Shiming, ZHONG Jicheng, *et al.* Evaluation of simulated dredging to control internal phosphorus release from sediments: Focused on phosphorus transfer and resupply across the sediment-water interface[J]. Science of the Total Environment, 2017, 592:662-673. DOI:10.1016/j.scitotenv.2017.02.219.

[4] 唐艳, 胡小贞, 卢少勇. 污染底泥原位覆盖技术综述[J]. 生态学杂志, 2007, 26(7):1125-1128. DOI:10.13292/j.1000-4890.2007.0201.

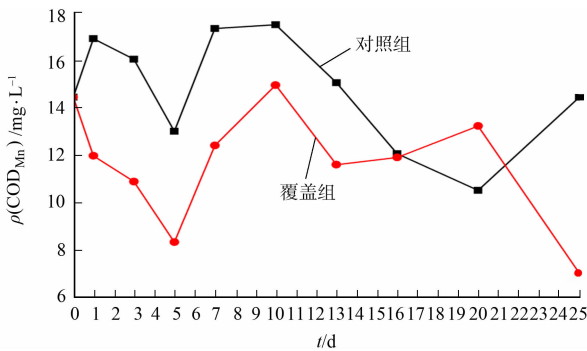


图 4 各组上覆水中高锰酸盐指数的变化
Fig. 4 Changes of permanganate index in overlying water of each group

[5] 贾陈蓉,吴春芸,梁威,等. 污染底泥的原位钝化技术研究进展[J]. 环境科学与技术,2011,34(7):118-122. DOI:10.3969/j. issn. 1003-6504. 2011. 07. 028.

[6] PAN Baozhu, YUAN Jianping, ZHANG Xinhua, *et al.* A review of ecological restoration techniques in fluvial rivers [J]. International Journal of Sediment Research, 2016, 31(2): 110-119. DOI: 10. 1016/j. ijsrc. 2016. 03. 001.

[7] 郭赞,赵秀红,黄晓峰,等. 原位活性覆盖抑制河道底泥营养盐释放的效果研究及工程化应用[J]. 环境工程,2018,36(6):6-11. DOI:10.13205/j. hjgc. 201806002.

[8] BONAGLIA S, RÄMÖ R, MARZOCCHI U, *et al.* Capping with activated carbon reduces nutrient fluxes, denitrification and meiofauna in contaminated sediments[J]. Water Research, 2019, 148: 515-525. DOI: 10. 1016/j. watres. 2018. 10. 083.

[9] FAN Yi, LI Yiwen, WU Deyi, *et al.* Application of zeolite/hydrous zirconia composite as a novel sediment capping material to immobilize phosphorus[J]. Water Research, 2017, 123: 1-11. DOI: 10. 1016/j. watres. 2017. 06. 031.

[10] DING Shiming, CHEN Musong, CUI Jingzhen, *et al.* Reactivation of phosphorus in sediments after calcium-rich mineral capping: Implication for revising the laboratory testing scheme for immobilization efficiency[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 331: 720-728. DOI: 10. 1016/j. cej. 2017. 09. 010.

[11] YIN Hongbin, KONG Ming. Reduction of sediment internal P-loading from eutrophic lakes using thermally modified calcium-rich attapulgite-based thin-layer cap[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 151: 178-185. DOI: 10. 1016/j. jenvman. 2015. 01. 003.

[12] GAO Hailong, SHI Qianyun, QIAN Xin. A multi-species modelling approach to select appropriate submerged macrophyte species for ecological restoration in Gonghu Bay, Lake Taihu, China[J]. Ecological Modelling, 2017, 360: 179-188. DOI: 10. 1016/j. ecolmodel. 2017. 07. 003.

[13] LI Chunhua, WANG Bo, YE Chun, *et al.* The release of nitrogen and phosphorus during the decomposition process of submerged macrophyte (*Hydrilla verticillata* Royle) with different biomass levels[J]. Ecological Engineering, 2014, 70: 268-274. DOI: 10. 1016/j. ecoleng. 2014. 04. 011.

[14] 刘彤. 沉水植物与活性覆盖材料联合控制底泥氮磷释放效果研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2017.

[15] ZHOU Zhenming, HUANG Tinglin, YUAN Baoling. Nitrogen reduction using bioreactive thin-layer capping (BTC) with biozeolite: A field experiment in a eutrophic river[J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, 42: 119-125. DOI: 10. 1016/j. jes. 2015. 07. 005.

[16] DING Shiming, SUN Qin, CHEN Xiang, *et al.* Synergistic adsorption of phosphorus by iron in lanthanum modified bentonite (Phoslock®): New insight into sediment phosphorus immobilization[J]. Water Research, 2018, 134: 32-43. DOI: 10. 1016/j. watres. 2018. 01. 055.

[17] 刘敏迪,周真明,张红忠,等. 煅烧改性净水厂污泥制备除磷材料工艺参数优化[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2018, 39(1): 51-56. DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 201704049.

[18] 黄华山,杨志敏,周真明,等. 净水厂污泥覆盖控制底泥氮磷释放效果[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2016, 37(3): 347-351. DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 2016. 03. 0347.

[19] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[20] 邓慧萍,吴国荣,张玉先. 沸石和活性炭除氮、有机物的互补作用[J]. 中国给水排水, 2004, 20(5): 50-52. DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-4602. 2004. 05. 015.

(编辑: 李宝川 责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)