

淤泥生态浮床的构建及其对富营养化水体净化效果*

胡光济¹, 周 旻¹, 侯浩波¹, 张维昊^{1**}, 陈丹阳²

(1: 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079)

(2: 华中师范大学附属第一中学, 武汉 430223)

摘要: 利用武汉月湖清淤底泥为主要原料, 配以膨胀珍珠岩为轻质材料、灰渣胶凝材料为粘合剂制得淤泥生态浮床, 并考察其对富营养化水体的改善效果. 研究表明, 湖泊淤泥、膨胀珍珠岩、灰渣胶凝材料掺量分别为 60%、15%、25% 时, 浮床模块的密度、抗压强度、抗折强度、吸水率、软化系数达到 797.2 kg/m³、1.02 MPa、0.21 MPa、13.2% 和 85.5%, 满足设计需要. 在为期 32d 的净水试验中, 淤泥生态浮床对富营养化水体净化效果较好, TN、TP、NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P、COD_{Mn}、Chl. a 的去除率最高分别可达 31.1%、38.6%、37.2%、36.9%、39.7% 和 48.8%. 淤泥生态浮床有效解决了湖泊清淤底泥的处置问题, 并且可对富营养化水体取得较好的生态修复效果, 适合推广使用.

关键词: 湖泊淤泥; 淤泥浮床; 抗压耐水性能; 富营养化水体; 净化效果

Construction of sludge floating bed and purification efficiency to eutrophic water body

HU Guangji¹, ZHOU Min¹, HOU Haobo¹, ZHANG Weihao¹ & CHEN Danyang²

(1: School of Resource and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, P. R. China)

(2: No. 1 Middle School Attached to Central China Normal University, Wuhan 430223, P. R. China)

Abstract: A sludge floating bed using dredged sludge from the Lake Yuehu as main material was constructed, and expanded perlite and slag cementitious material also introduced as the light-weight agent and the binding agent. The effect of improvement of the floating bed on eutrophic water quality was investigated. The result showed that the density, compressive strength, flexural strength, water absorption and soften coefficient of the small module of sludge floating bed were 797.2 kg/m³, 1.02 MPa, 0.21 MPa, 13.2% and 85.5%, respectively. When the mixing amount of lake sludge was 60%, and expanded perlite and slag cementitious material was 15% and 25%, respectively, the results of the 32 days' water purification experiment showed that the sludge floating bed had favorable effect on the purification of eutrophic water, and the highest removal rates of TN, TP, NH₄⁺-N, PO₄³⁻-P, COD_{Mn} and Chl. a were 31.1%, 38.6%, 37.2%, 36.9%, 39.7% and 48.8%, respectively. All those show that the sludge floating bed can not only solve the problem of deposition of the dredged sludge efficiently, but also could have favorable performance in the restoration of eutrophic water, thus it is worthy to widely utilization.

Keywords: Lake sludge; sludge floating bed; compressive strength and anti-soften ability; eutrophication water; purification efficiency

水体富营养化是全世界共同面临的一个主要的水污染问题^[1]. 导致湖泊富营养化的氮、磷来源于两个方面: 外源与内源. 外源主要来自工农业废水和城市生活污水排放等^[2]. 内源则来自湖泊沉积物(如湖泊底部淤泥)的释放, 内源污染对上覆水磷的贡献率可达到甚至超过外源水平, 成为湖泊富营养化的主导因子^[3]. 此外, 湖泊底泥还是陆源性入湖污染物的主要蓄积场所, 在湖泊环境发生变化时, 底泥中的污染物会重新释放进入水体^[4]. 目前, 国内治理湖泊底泥污染主要采用环保疏浚技术(如太湖、滇池等), 由于污染底泥中含有各种对环境有害的污染物, 不能直接吹填排放, 必须经过无害化处理或采取防止污染扩散的措施,

* 湖北省自然科学基金项目“轻质微生物载体研究”(2006131014)和武汉大学长江中游地区水环境研究与数据共享平台项目(WERDSPMYR-0606)联合资助. 2009-11-30 收稿; 2010-01-21 收修改稿. 胡光济, 男, 1986 年生, 博士研究生; E-mail: Guangji. Hu@gmail.com.

** 通讯作者; E-mail: Zhangwh@whu.edu.cn.

对于疏浚工程中产生的湖泊淤积物的运输和处理安排已成为环境疏浚工作中一项重要内容^[5]。

湖泊淤泥疏浚工程量浩大,在可能条件下,宜选择低成本的处理工艺,使污泥处置与综合利用相结合。污泥的物理性质及工程性质比较接近粘性土,但同时也具有含水量高、强度低、腐殖质含量大等特点。采用掺入胶凝材料的化学固结法可使其具有一定的自硬能力,改善强度或承载力从而形成特殊的土工建材,因此可以将湖泊底泥再生资源化并作为填土材料加以综合利用^[6]。目前报道的底泥资源化技术主要有:制造轻质砖、陶粒、水泥以及有机肥料等^[7]。

本课题组前期研究表明:灰渣胶凝材料(由矿渣、脱硫灰渣、石灰、高钙灰等无机工业废料组成,采用球磨工艺深加工而成的水硬性胶凝材料)能代替传统固化基材(如:水泥)对湖泊淤泥进行常温固化处理,固化块的机械性能、抗冻、融性能和耐干、湿性能均满足护坡砖的要求,并且浸出液中重金属离子浓度均显著低于我国(IEPT)与美国(EPA TCLP)相关标准^[8],实现了湖泊淤泥的无害化处理,且灰渣胶凝材料与淤泥中的粘土矿物发生反应,可在一定程度上改变淤泥的物理性能,显著提高抗压强度和耐水性能,降低压缩性,从而使淤泥质软土改良为工程填土,可作为河岸堤坝建筑材料,实现了废物资源化^[9]。在前期研究基础上,本研究进一步利用无害化处理后的湖泊淤泥作为主要原料,制得新型生态浮床,并配以常见挺水植物菖蒲,在人工水池中考察其对中度富营养化水体的改善效果,以期在消减湖泊内源污染的同时,实现清淤底泥的再生资源化,并为富营养化水体的生态修复提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料

淤泥浮床由3种材料组成:湖泊淤泥、膨胀珍珠岩和灰渣胶凝材料;其中,湖泊淤泥来源于武汉市月底泥疏浚工程,黑色,发臭,土质细腻,土芯切面光滑,含较多腐殖质,流塑状,淤泥基本参数为含水率86.36%、密度 $1.58\text{g}/\text{cm}^3$ 、孔隙比1.98、比重2.74、塑性指数26.8、液性指数1.78、压缩系数 1.39MPa^{-1} 。湖泊淤泥过20目筛,去除动植物残骸,筛下泥浆自然晾干至含水率60%–70%备用。闭孔膨胀珍珠岩作为轻质材料以增加淤泥浮床的浮力,购自武汉市华阳保温建材公司,过9目筛。灰渣胶凝材料为自配^[10],胶凝性能指标:密度 $2.96\text{g}/\text{cm}^3$ 、标准稠度26.0%、比表面积 $550\text{m}^2/\text{g}$,3d和28d的抗折强度分别为5.5MPa、10.5MPa,3d和28d的抗压强度分别为21.1MPa、46.2MPa。其 $80\mu\text{m}$ 筛的筛余为0.8%–1.2%,强度可达32.5#水泥水平。浮床上栽种的净水植物菖蒲,为天南星科多年生挺水草本植物,常见于我国南方浅水湿地处,冬季地下茎潜入泥中越冬,具有很好的观赏性和药用价值^[11–12]。菖蒲于4月下旬采集自武汉市中国科学院植物园,选择生长状况良好的幼苗,采集后置于武汉大学苗圃内水沟培养2d,试验前洗净,后置于自来水中预培养2d。

1.2 方法

1.2.1 淤泥浮床预试验 在浮床定型之前通过预试验以确定原材料的最佳配比。前期研究显示灰渣胶凝材料在掺量为25%–30%时对淤泥固结效果最佳^[9],且膨胀珍珠岩掺量为15%以上可达到浮水要求,因此设置三组不同原材料配比,1#模块由55%湖泊淤泥、15%膨胀珍珠岩、30%灰渣胶凝材料组成,2#模块由57.5%湖泊淤泥、15%膨胀珍珠岩、27.5%灰渣胶凝材料组成,3#模块由60%湖泊淤泥、15%膨胀珍珠岩、25%灰渣胶凝材料组成。三种材料机械搅拌均匀,分别制成无侧限抗压、抗折试样,静置1d后脱模,在标准养护室(28d,25℃,相对湿度90%)里养护至预定龄期。对三组供试样的密度、抗压强度、抗折强度、吸水率和软化系数进行测定,测定方法依据GB/T15229–2002《轻集料混凝土小型空心砌块》标准方法进行。

1.2.2 淤泥浮床模块制作 通过预实验测试得出原材料最佳配比后,按最佳配比制作淤泥浮床模块。浮床模块尺寸为 $80\text{cm} \times 80\text{cm} \times 8\text{cm}$ (长×宽×高),浮床上共 6×6 (行×列)株植物栽种孔穴,孔径4cm,每个孔穴栽种长势一致的菖蒲幼苗3–4株,并以柔性材料加固,防止菖蒲幼苗滑落。将7只浮床模块(未栽种植物)称重后放置于东湖沿岸水域(武汉市城中湖)中60d(2009年4–6月,期间5次中等强度降雨,水温18–37℃),打捞干燥后再次称重,以检验其在天然湖泊环境中的稳定性。

1.2.3 淤泥浮床净水试验 以2座自建水泥池 $1.8\text{m} \times 1.8\text{m} \times 1.2\text{m}$ (长×宽×高)为测试平台,分别为处理组和对照组,水池中灌入受生活污水污染的星湖湖水,水质指标:TN $2.020\text{mg}/\text{L}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ $0.641\text{mg}/\text{L}$ 、TP $0.101\text{mg}/\text{L}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ $0.018\text{mg}/\text{L}$ 、 COD_{Mn} $10.365\text{mg}/\text{L}$ 、Chl. a $23.660\mu\text{g}/\text{L}$,星湖呈中度富营养化状态。水池

底部铺设 15cm 淤泥层以模拟天然小型水体底泥,内壁标有水位刻度,每日适量补充星湖水至刻度以平衡蒸发水量.水池上方用透明树脂玻璃遮挡,以消除雨水对试验结果的影响,并确保菖蒲和浮游植物的正常光合作用.4月底-5月底期间将种植有菖蒲的淤泥浮床置于处理组水池中 32d(期间水温 20-36℃,pH 值 7.8-8.3),每 4d 两池各取 3 个水样,测定 TN, NH_4^+-N , TP, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$, COD_{Mn} 和 Chl. a 浓度.试验前后两池各取 3 个池底淤泥表层样品(5cm)及人工破碎后的浮床底面样品(剔除珍珠岩后磨碎,过 100 目筛),测定其中烧失量(LOI), TN, TP 含量变化^[13],并对植株平均干重进行测定,以计算相对生长率^[14]

1.2.4 测定项目与方法 TN:过硫酸钾氧化-紫外分光光度法;TP:过硫酸钾氧化-钼锑抗分光光度法; NH_4^+-N :纳氏比色法; $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$:磷钼酸铵分光光度法;COD:高锰酸钾氧化法;Chl. a:丙酮提取-分光光度法;pH 值采用 pH 计测定;各项指标具体测定方法参见《水和废水监测分析方法(第 4 版)》^[15].测定重复 3 次,计算均值和标准偏差($n=3$).去除率计算方法为:去除率(%) = $[(C_{0i}/C_i)-1] \times 100\%$,其中: C_{0i} 为第 i 天对照组浓度, C_i 为处理组浓度.菖蒲的相对生长率计算方法为: $RGR = (W_{t_{32}}/W_{t_0}) - 1$,其中: $W_{t_{32}}$ 为第 32d 菖蒲平均干重, W_{t_0} 为试验前菖蒲平均干重.采用 SPSS 14.0 软件对试验数据进行 ANOVA 分析,以 $P < 0.05$ 为对照组与处理组之间显著性差异的依据.

2 结果与讨论

2.1 淤泥浮床小模块试验结果

选择最佳原材料配比的原则,是尽可能增加湖泊淤泥掺量,减少灰渣胶凝材料与膨胀珍珠岩的用量,以求实现降低浮床制作成本、提高淤泥资源再生量的同时取得较好的物理性能.预实验测定结果表明,灰渣胶凝材料的掺量与小模块密度以及抗压、抗折强度呈正比关系.因膨胀珍珠岩掺量较大,3 组测试模块的密度均较低,可确保栽种植物后能够实现水面漂浮(表 1).在养护 28d 后,测试模块的抗压强度均超过 1.0MPa,对湖泊淤泥达到了较好的固定效果.美国 EPA 建议固化处理后混合物的抗压强度达到 0.35MPa 便可进行有害废弃物的安全处置^[16],本灰渣胶凝材料对淤泥的固化效果是此安全标准的近 3 倍,且固化后的混合物抗压强度还会随龄期增长而稳步提高^[17],因此可将湖泊淤泥中的有害污染物进行有效控制,不会释放入水环境中造成二次污染.

表 1 3 组小模块物理性能测试结果

Tab. 1 Physic-mechanical test results of 3 small models

模块编号	密度(kg/m ³)	抗压强度(MPa)	抗折强度(MPa)	吸水率(%)	软化系数(%)
1 [#]	833.4	1.17	0.26	11.3	90.4
2 [#]	820.7	1.08	0.22	11.7	86.8
3 [#]	797.2	1.02	0.21	13.2	85.5

通常材料的软化系数越大,耐水性越好,经灰渣胶凝材料处理后的淤泥,软化系数达到 85% 以上,具有较好的耐水浸泡性能,可达到岸堤护坡砖标准,因此淤泥浮床可在水体中长期保持完整.同样,材料的吸水率也是评价浮床的一个重要指标,吸水率越低,说明浮床中淤泥的孔隙比较低,模块性能也越稳定.测试模块吸水率都维持在 14% 以下的较低水平,这可能是由于灰渣胶凝材料颗粒较细,对淤泥孔隙产生填充效应,且促使淤泥土颗粒团聚,使得改性淤泥中大孔隙数量减少,故吸水率较低.综合考虑,3[#]模块的原料配比中淤泥含量较大,且物理性能与其他两组模块相当,故按 3[#]模块原料配比制造淤泥浮床.

按预设尺寸制得 7 块淤泥生态浮床平均净重 38.1kg,在天然湖泊中漂浮 60d 后依然结构稳定,表面无明显裂纹或破损,打捞风干后称重 40.2kg,重量的增加包括浮床表面吸水以及水面漂尘、微生物的附着.

2.2 淤泥浮床净水试验结果

2.2.1 氮、磷营养盐去除效果 氮、磷浓度过高是导致水体发生富营养化的主要原因,因此去除水体中的氮、磷对于减轻水体的富营养化具有重要意义.水生植物菖蒲具有很强的耐污、耐贫瘠能力,在不同程度的富营养化水体中均能正常生长,且水体富营养化程度越高,菖蒲长势越好^[18-19].同样,在试验期间淤泥生态浮床上的菖蒲幼苗均正常生长,生物量增加较为明显,相对生长率(RGR)为 0.6.淤泥生态浮床对试验污水中 TN、TP、 NH_4^+-N 、 NO_3^- 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度的影响表明,试验污水中氮、磷营养盐的浓度均随处理时间的延续而降低,对照

组中 TN、TP 浓度下降幅度较小(图 1)。通常,富营养化水体中氮的去除主要是通过微生物的硝化、反硝化作用和植物的吸收,而水体中磷主要通过吸附、络合、沉降作用及微生物与植物的吸收作用被去除^[20-21]。在净水试验中,池底淤泥中 TN、TP 含量表明,试验前处理组与对照组池底淤泥中 TN、TP 浓度分别为 1.33、1.53mg/g 和 0.56、0.52mg/g;32d 后两池底淤泥中 TN、TP 浓度略有增加,分别为 1.46、1.63mg/g 和 0.63、0.65mg/g(图 2)。相比之下,浮床基质中 TN、TP 含量基本保持不变,实验前后 TN、TP 浓度分别为 1.72、0.81mg/g 和 1.75、0.83mg/g,因此淤泥浮床对污水中的营养盐无明显吸附作用。32d 时对照组污水中 TN、TP、 NH_4^+-N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度分别为 1.91、0.088、0.605、0.0073mg/g,分别比第 1d 下降了 5.9%、12.9%、5.6% 和 5.5%,这可能是由于对照组污水中微生物增殖消耗以及水池底部淤泥的吸附作用所致。处理组污水中各项营养盐浓度指标与对照组之间差异均较为明显($P < 0.05$),处理组污水中氮、磷营养盐浓度在试验前 28d 下降较快,是因为淤泥浮床上菖蒲植株处于幼苗期,新陈代谢较为旺盛,对氮、磷吸收量较大。污水中 TN、TP、 NH_4^+-N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 在试验期间最低浓度分别为 1.31、0.054、0.38、0.0045mg/g,32d 最高去除率分别为 31.05%、38.64%、37.19%、36.98%(图 3)。由此可知,污水中氮、磷营养盐主要为植物吸收作用去除,因此浮床上栽种的菖蒲表现出良好的净水能力,可在短期内有效去除富营养化水体中过量氮、磷营养盐。

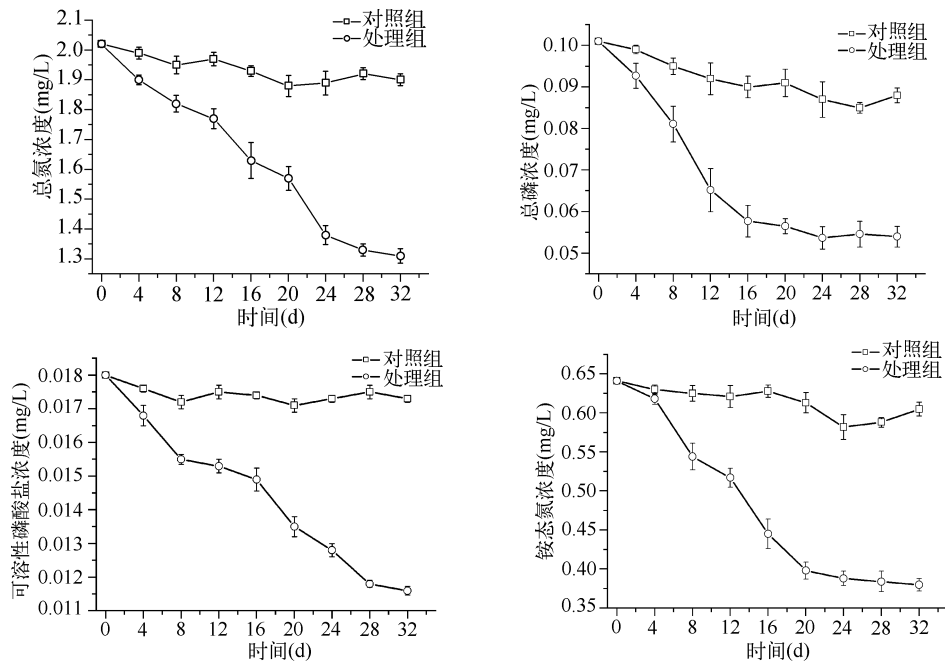


图 1 淤泥生态浮床对富营养化水体中氮、磷的去除效果

Fig. 1 Removal effects of sludge floating bed on nitrogen and phosphorous nutrients in the eutrophic water

2.2.2 化学需氧量去除效果 化学需氧量(COD)是反映水体中还原物质污染程度的综合,评价水体的有机污染程度一般采用 COD_{Mn} 指标。淤泥生态浮床对污水中 COD_{Mn} 的去除效果表明,试验期间,对照组中 COD_{Mn} 含量在波动中微降,处理组表现出明显差异($P < 0.05$)(图 4a),污水中 COD_{Mn} 从 10.37mg/g 降至 6.38mg/g,第 32d 去除率可达 35.7%(图 3)。第 24d COD 去除率最高达 40.1%,最低浓度为 5.95mg/g,此后 8d 内处理组污水中 COD_{Mn} 出现回升现象,有研究表明浮床上的植物在生长过程中,部分老根死亡腐烂,新根生长缓慢均会导致净水试验后期水体中有机物含量回升^[22]。淤泥浮床上菖蒲幼苗在前 24d 生长速率较快,对水体中营养盐的吸收量大,对 COD_{Mn} 去除率也同样较高,而后 8d 幼苗植株生长速率放缓,出现部分老根死亡和老叶脱落,因此造成污水中 COD_{Mn} 浓度上升。因此,在实际工程应用中,应及时地更换浮床上的水生植物,以保持较高的水体净化效率,同时减少水体中有机物含量增加的现象。此外,烧失量(LOI)是湖泊底泥中有机质的量度,试验前对照组与处理组水池底部淤泥 LOI 分别为 6.3% 和 6.5%,32d 后 LOI 无明显变化(近

6.6%)。这说明在较短时间内,池底浅层淤泥对水中有机物的吸附作用并不明显,污水中有机物浓度的下降同样主要为植物的同化作用所致。

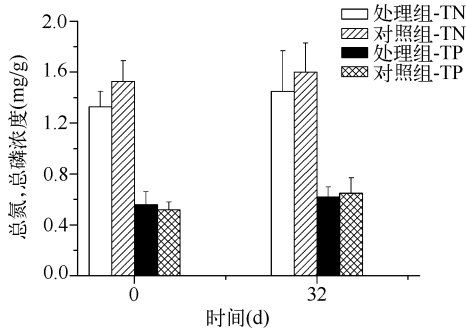


图2 试验水池底部淤泥总氮、总磷浓度变化
Fig. 2 The variation of TN, TP concentration in pool sediment

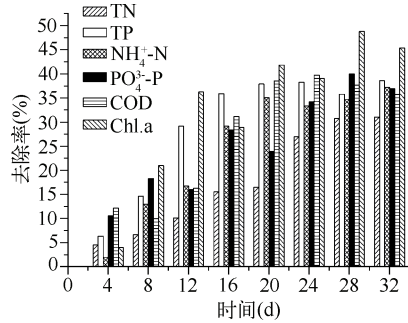


图3 淤泥生态浮床对富营养化水体各项指标的去除率
Fig. 3 Removal of sludge floating bed on various water indices of eutrophic water

2.2.3 叶绿素 a 去除效果 富营养化水体中藻类危害巨大,消除水体中过量藻类对于生态安全具有重要意义. Chl. a 作为评价富营养化的指标,也是估算浮游植物(藻类)生物量的重要指标. 对照组中 Chl. a 浓度上升较快,32d 最高浓度可达 90.5 μg/L. 而处理组中 Chl. a 增长率得到明显抑制 ($P < 0.05$), Chl. a 的去除率随试验时间增长而上升,最高去除率为 48.8%,浓度控制在 49.4 μg/L(图 4b). 生态浮床对治理水体中 Chl. a 的控制除了水生植物的截留作用外,水生植物生长和生物膜代谢对营养盐的需求也可形成对浮游藻类的竞争,进而抑制其生长^[23]. 有报道称当 TN、TP 分别达到 2.0 和 0.2 mg/L 时,浮游藻类会爆发性增殖^[24], 32d 净水试验后水中 TN、TP 浓度为 1.91 mg/L、0.088 mg/L,因此可防止浮游藻类过度增长. 淤泥生态浮床面积为 0.64 m²,试验水池面积为 3.24 m²,浮床占据水面面积近 1/5,因而减少透光率,影响浮游藻类的光合作用,也会抑制藻类的生长. 还有研究显示,菖蒲能够对铜绿微囊藻、水华鱼腥藻、蛋白核小球藻等多种水华藻类产生较强的化感抑制作用,这也是淤泥生态浮床有效控制 Chl. a 浓度的一项重要因素^[25-26].

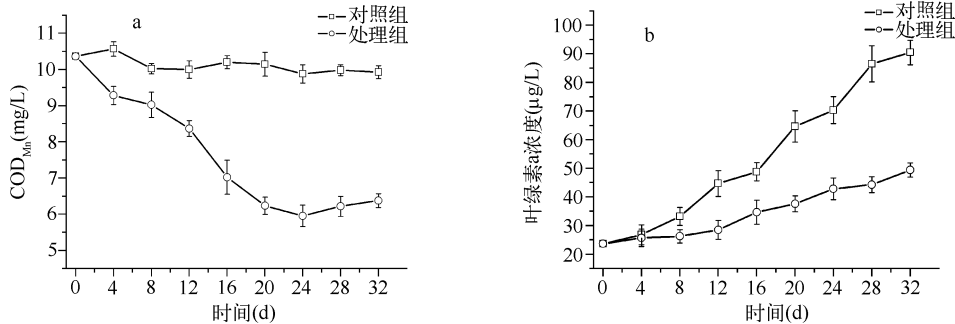


图4 淤泥生态浮床对富营养化水体中化学需氧量(a)和叶绿素 a 浓度(b)的去除效果
Fig. 4 Removal effects of sludge floating bed on COD_{Mn} (a) and Chl. a (b) in the eutrophic water

3 结论

(1) 利用湖泊清淤底泥为基质,掺入适当比重的膨胀珍珠岩及灰渣胶凝材料可制得淤泥生态浮床. 其中当湖泊淤泥、膨胀珍珠岩和灰渣胶凝材料比重分别为 60%、15%、25% 时,可实现淤泥的最大资源化利用,且浮床具有较好的抗压耐水性能,抗压强度、抗折强度、吸水率、软化系数分别为 1.02 MPa、0.21 MPa、13.2% 和 85.5%.

(2) 淤泥浮床对富营养化水体取得了较好的净化效果. 在 32d 的净水试验中,对 TN、TP、NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P、COD_{Mn}、Chl. a 的去除率最高分别可达 31.1%、38.6%、37.2%、36.9%、39.7% 和 48.8%,其中对 Chl. a

的去除效果最好,这与淤泥浮床对营养盐的净化,对透光率的影响以及菖蒲的化感抑藻作用有关。

(3) 本研究将固体废弃物处理处置技术与水体生态修复技术相结合,为湖泊清淤底泥的处置提供新途径,同时为富营养化水体治理提供技术支持。淤泥浮床上栽种的净水植物菖蒲来源广泛,收获后可做药物原料,且淤泥浮床具有较好的抗压耐水性能,在废弃后可用于岸堤填土。因此,该浮床具有较好的实用价值,适合推广使用。

4 参考文献

- [1] Ruban V, López-Sánchez JF, Pardo P *et al.* Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments—A synthesis of recent works. *Fresenius J Anal Chem*, 2001, **370**: 224-228.
- [2] Kaiserli A, Voutsas D, Samara C. Phosphorus fraction in lake sediment-Lakes Volvi and Koronia, N. Greece. *Chemosphere*, 2002, **46**:1155-1174.
- [3] Penn MR, Auer MT, Doerr SM *et al.* Seasonality in phosphorus release rates from sediments of a hypereutrophic lake under a matrix of pH and redox conditions. *Can J Fish Aquat Sci*, 2000, **57**: 1033-1041.
- [4] 颜昌宙,范成新,杨建华等. 湖泊底泥环保疏浚技术研究展望. 环境污染与防治,2004,**26**(3):189-193.
- [5] 刘鸿亮,金相灿,荆一凤. 湖泊底泥环境疏浚工程技术. 中国工程科学,1999,(1):81-84.
- [6] 三木博史. 土の流動化処理工法の各種用途への利用技術. 土木技术资料,1995,**37**(9):32-37.
- [7] 梁启斌,周俊,王焰新. 利用湖泊底泥和粉煤灰制备瓷砖. 中国地质大学学报,2004,**29**(3):347-351.
- [8] Ma JL, Zhao YC, Wang JM *et al.* Effect of magnesium oxychloride cement on stabilization/solidification of sewage sludge. *Construction and Building Materials*, 2010, **24**: 79-83.
- [9] Hou HB, Zhang DJ, Zhou M *et al.* Solidification of heavy metal sludge using HAS as solidified binder. Proceedings of the China Association for Science and Technology. Beijing: Science Press,2006: 474-479.
- [10] 侯浩波. HAS 耐水土壤固化剂及其应用. 新技术新工艺,1999,**18**(5):30-31.
- [11] 赵家荣,秦八一. 水生观赏植物. 北京: 化学工业出版社, 2003: 147-148.
- [12] Lee JY, Yun BS, Hwang BK. Antifungal activity of β -asarone from rhizomes of *Acorus gramineus*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, **52**: 776-780.
- [13] 谭镇,钟萍,应文晔等. 惠州西湖底泥中氮磷特征的初步研究. 生态科学, 2005, **24**(4): 318-321.
- [14] Gao JQ, Xiong ZT, Zhang JD *et al.* Phosphorus removal from water of eutrophic Lake Donghu by five submerged macrophytes. *Desalination*, 2009, **242**(1-3): 193-204.
- [15] 国家环境保护局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社,2002.
- [16] Rachana M, Rubina C. Factors affecting hazardous waste solidification/stabilization: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, **B137**: 267-276.
- [17] 周旻,侯浩波,张大捷等. 湖泊底泥改性固化的强度特性和微观结构. 岩土力学,2008,**29**(4):1010-1014.
- [18] 吴小刚,杨旻,周连凤等. 不同磷浓度下菖蒲的生长状况及净化作用研究. 广州环境科学,2007,**22**(3):25-29.
- [19] 吴小刚,张维昊,方涛等. 菖蒲对不同程度富营养化水体的适应性研究. 长江大学学报(自然科学版),2006,**3**(2):183-187.
- [20] Harris JA, Hobbs RJ. Clinical practice for ecosystem health: the role of ecological restoration. *Ecosystem Health*, 2001, **7**(4): 195-202.
- [21] Davis KA. "Restoration"—a misnomer. *Science*, 2000, **287**(5456): 1203.
- [22] 战丽如,胡绵华,袁菊红等. 生态浮床-简易湿地组合系统对富营养化水体净化效果研究. 安徽农业科学,2009,**37**(16):7642-7644.
- [23] 李伟,李先宁,曹大伟等. 组合生态浮床技术对富营养化水源水质的改善效果. 中国给水排水,2008,**24**(3): 34-38.
- [24] 陈守煜,熊德琪. 湖泊富营养化评价模糊集理论与模式. 湖泊科学,1993,**5**(2):144-152.
- [25] Zhang WH, Hu GJ, He W *et al.* Allelopathic effects of emergent macrophyte, *Acorus calamus* L. on *Microcystis aeruginosa* Kuetzing and *Chlorella pyrenoidosa* Chick. *Allelopathy Journal*, 2009, **24**(1): 157-168.
- [26] 丁惠君,张维昊,王超等. 菖蒲对几种常见藻类的化感作用研究. 环境科学与技术,2007,**30**(6):20-22.