沙土覆盖和沉水植物措施对污染沉积物氮磷释放的影响

包 先 明

(淮北师范大学 生命科学学院, 安徽 淮北 235000)

摘 要: 采用沙土覆盖和疏浚疏松以改善疏浚表泥紧实度。研究了沉水植物重建和沙土覆盖等表层改良方式对污染湖泊底泥营养盐释放的组合控制效果。结果发现,对于未种植菹草处理,不同泥沙掩蔽方式在短期内均能显著降低沉积物中氮磷营养盐的释放速率,但随着时间的延长,氮磷释放速率有回复增加的趋势;而沉积物泥沙掩蔽后(表层覆盖 5 cm 土,表层覆盖 5 cm 细沙),同时进行菹草种植后发现,与未种植菹草空白相比较,氮磷释放速率均有明显的降低;不同改良方式间的比较结果发现,疏浚疏松后进行菹草种植对沉积物营养盐的释放控制效果最佳。

关键词: 沙土覆盖; 沉水植物; 沉积物; 氮磷释放

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2011)01-0022-06 **中图分类号**: X522

Influences of Sand Mulching and Submerged Plant Recovery on Nitrogen and Phosphorus Release from Sediments

BAO Xian-ming

(*College of Life Sciences, Huaibei Normal University, Huaibei, Anhui* 235000, *China*)

Abstract: Two methods including tillage, sand and soil mulching were applied to reduce surface compaction of dredged sediment. The combining effects of submerged plant restoration and surface covering were tested in terms of controlling the release of the inner-loaded nutritional salts from contaminated lake sediment. The results show that different sand and soil coverage notably reduced nitrogen and phosphate release rates at the beginning of the experiments, but the release rates bounced back after a extended time period. With comparison of the control, the treatment of combining surface covering and plant restoration(growing *Potamogeton crispus*) significantly retarded release rates of nitrogen and phosphate. However, the treatment of combining tillage and plant restoration provided the superb release rate of inner-loaded nutrients.

Keywords: **soil and sand mulching; submerged plants; sediments; release of nitrogen and phosphate**

污染底泥沉积于水底,对上层水体一直是一个潜在威胁,如何控制水体底泥污染,一直是人们在解决水体污染时需要考虑的主要问题之一。经过多年的实践,对污染底泥的治理已取得一定的效果,常用的方法包括物理修复,化学修复,尤其是近年来生物技术的应用,使污染底泥的修复获得了飞速的发展。

底泥掩蔽是种常见的物理法,即在污染的底泥上投放一层或多层覆盖物,使污染底泥与水体隔离,防止底泥污染向水体迁移。采用的覆盖物主要有未污染的底泥、土、沙或一些复杂的人造地基材料等。最早的掩蔽技术是 1978 年在美国进行研究的,随后其它几个国家也相继使用。日本(1983 年)、挪威(1992 年)以及加拿大(1995 年)都采用了这一技术。相比别的修复技术,掩蔽花费小,适合有机、无机处理,对环境潜在危害小,现在已得到普遍的运用。大量的实验结果表明,掩盖能有效防止底泥中营养盐,PCBs, PAH 及重金属进入水体而造成二次污染,对水质有明显的改善作用。国外对污染严重的底泥,已多次采用了掩蔽技术,许多已取得显著的效果,其中比较成功的有日本的 Kihanma Inner 湖和 Akanoi 海湾。研究发现,覆盖 20 cm 厚细沙使水体营养物质的释放速率明显降低,水质得到改善。华盛顿 Denny 海湾和 Eagle 海湾,利用覆盖 0.79～0.9 m 左右厚的沙性沉积物使沉积物中 PCBs, PAH 以及木焦油的释放得到很好控制[1-2]。但是单一的底泥掩蔽技术在一定条件下往往并不能完全达到预期的效果。

收稿日期:2010-05-18 **修回日期**:2010-07-06

资助项目:"十一五"科技重大专项"国家水体污染控制与治理"(2008ZX07103-003); 国家自然基金项目"浅水湖聚藻区显黑质粒的物化特征及稳定性机制"(50979102)

作者简介:包先明(1978—),男(汉族),安徽省青阳县人,博士,副教授,主要从事水污染治理方面的研究。E-mail:xmbao96@126.com。

通过前面的研究发现,疏浚虽可控制底泥释放,但有很明显的污染回复现象;水草对底泥内源释放虽有控制作用,但植物扎根较为困难,通常仅在 0～5 cm 深度内,若在实际水体中受环境(如风浪)等影响,将会难以存活。因此从改善沉水植物种植基底而言也需要采用辅助性措施,促使水生植物在疏浚底泥中扎根和生长。本文拟从集成的角度将疏浚覆盖和植物措施结合起来,研究其对底泥内源控制作用,以及沉积物中的生物地球化学作用。

1　材料与方法

1.1　样品采集与制备

于 2005 年 7 月 31 日用有机玻璃管大口径柱状采样器(Rigo, φ=11.0 cm,管长 100 cm)在五里湖未疏浚样点连续采集表层平整,深度不少于 80 cm 厚度柱状泥样,用 0.3 mm 厚不锈钢切板在现场按表层 60 cm 厚度对其中约 60 根分别进行样管对接顶托法进行切除,使得高度为 50 cm 柱状玻璃管中保留切除后沉积物样品垂直深度 20 cm 左右。所有柱状样上下两端用橡皮塞塞紧,垂直放置,小心带回实验室。同时在现场用若干 25 L 加仑桶采集样点处湖水,一并带回实验室。

实验所用的土直接取之于五里湖的岸边,自然风干后研磨过 20 目筛备用,细沙取之于湖岸的建筑工地,然后过 20 目的筛备用。菹草的种子直接采集于东五里湖,然后晒干保存备用,在实验前 1 个月左右放入培养箱中进行菹草种子发芽实验,挑选发芽良好的菹草幼苗作为本实验的实验物种。

1.2　实验组设计

未疏浚沉积物和疏浚沉积物作为实验对照,第 2 组和第 4 组用土覆盖的目的是通过土层的覆盖来掩蔽沉积物内源的释放,同时改善疏浚沉积物的基底,促进沉积物疏浚后水生植物的扎根和生长。选择 5 cm 作为覆盖的厚度,一方面考虑覆盖的厚度再增加会加重实际操作过程中的难度和费用,另一方面覆盖的厚度太低会达不到预期的掩蔽沉积物内源释放的效果。对于疏浚疏松的处理,最主要的目的就是改善疏浚沉积物表层的紧实度,为水生植物的恢复创造有利条件(如表 1 所示)。

实验分 6 个处理,每种处理 3 次重复,每种处理破坏性取样 8 次,共 144 个柱状培养样。

1.3　实验方法

选用太湖中常见的沉水植物菹草(*Potamogeton crispus*)作为实验物种,将已经发芽的菹草种子按每个实验柱 4 棵移种到柱状实验管中。对采集的大桶水样通过 25 号浮游生物网过滤后制得上覆水,按 3 L 体积将制得的上覆水分别缓慢注入各种处理的柱状样中,放在湖边露天实验场进行沉水植物生长培养实验,遇到烈日或风暴等用大棚遮蔽。

表 1　泥沙覆盖的处理

覆盖材料	未疏浚			疏浚(60 cm)		
	无	土	沙	无	土	沙
1 处理	√		5 cm			
2 处理		5 cm				
3 处理				√		
4 处理					5 cm	
5 处理						5 cm
6 处理				疏松 5 cm①		

注:①指用金属铁丝将表层划松,深度约 5 cm。

全过程的培养进行 43 d(2005 年 8 月 1 日—9 月 12 日),于第 1,6,12,18,24,30,36,43 d 时各取出不同处理实验柱状培养样 1 组,先现场测定水温,pH 值,Eh 等。然后各抽取距沉积物—水界面 5 cm 处上覆水 200 ml,用于测定氨态氮、硝态氮、亚硝态氮、总氮、磷酸根磷、总磷等项目。

水草取样是将柱状底泥从有机玻璃管的上部取出,小心将水草植株根部与沉积物剥离。取出的水草尽快分别测定湿重、长度以及用烘干法(80 ℃)烘干至恒重测定水草干重。沉积物按 0～1,1～2,2～3,3～4,4～5 cm 间隔分离,用离心机(LD4-2)在 5 000 r/min 下离心 20 min,取上清液过滤(φ=0.45 μm)得滤后间隙水,酸化后低温保存,测定氨态氮、总氮、磷酸根磷、总磷,检测方法采用《湖泊富营养化调查规范》[3]方法进行。

2　结果与分析

2.1　实验上覆水和沉积物的基本性质

为了保证实验体系上覆水适应菹草生长和防止悬浮颗粒物对实验结果的干扰,本实验全部采用了过滤后原五里湖水体,其主要营养物初始含量见表 2。由 TN 和 TP 含量可见,已超出国家地面水环境质量Ⅴ类标准(GB3838-2002)。

表 2　实验水体主要营养物初始含量　mg/L

指标	NH_4^+—N	PO_4^{3-}—P	TN	TP
初始含量	0.659±0.013 8	0.021 9±0.001 0	2.552±0.044 6	0.102±0.004 7

2.2 泥沙覆盖对菹草生长的影响

图1是菹草在实验期间内生物量的变化情况。由图1可见，菹草在实验时间内生物量均有明显的增加。在各组实验中，疏浚＋沙和疏浚＋疏松处理的沉积物，实验结束后菹草生物量增加的最大，分别增加了13.8和13.2 g；而疏浚＋土和未疏浚＋土2种处理的菹草生物量增加最小，实验结束后分别增加了6.2和7.3 g。

对于疏浚疏松处理的沉积物，由于疏松后沉积物比较松软，且养分含量丰富，所以菹草生长旺盛。而对于覆盖土壤的沉积物，由于土层相对结实，稳定的根系系统不容易形成，且养分相对贫瘠，所以菹草生长相对缓慢，生物量较小。

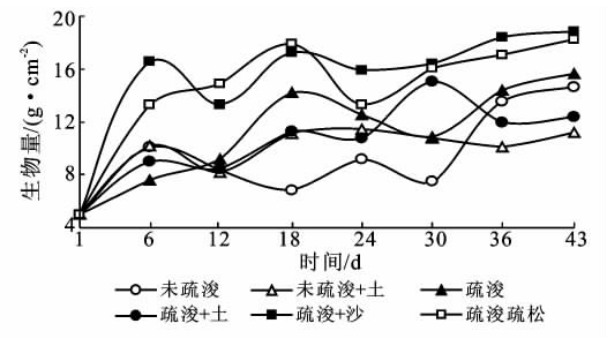


图1 菹草生物量随时间的变化

从图1中可以看出，菹草在开始阶段各处理组生长都比较迅速，这主要是开始上覆水体中营养盐含量丰富，而且温度、生长空间比较适宜。但是认真比较发现，疏浚＋沙和疏浚＋疏松2种处理在实验初期第6 d就已达到很高的生物量，分别达到全实验期(42 d)生物量的89%和74%。说明底质疏松程度对生物生长初期生物量的影响非常明显，对植物快速扎根产生主要性影响。在10～30 d，许多处理组开始经历一个缓慢增长期，主要是因为菹草受生长空间的限制，实验期间为盛夏，光热条件均能满足菹草生长。

2.3 泥沙覆盖对菹草生长抑制底泥氮释放的影响

2.3.1 *泥沙覆盖对底泥氮释放的抑制作用* 图2表示不同处理沉积物 NH_4^+—N 释放速率随实验时间的变化情况。从图2看出，未疏浚沉积物空白对照的释放速率在整个实验期内，一直维持在一个比较高的释放水平，而疏浚沉积物空白对照和疏浚疏松处理则在一开始释放速率特别的高。这主要由于在疏浚60 cm深度后，新生界面直接将面对上覆水，结果形成界面两边的高浓度梯度，释放速率迅速增大，随后释放速率逐渐降低，并趋于稳定。未疏浚＋土，疏浚＋土和疏浚＋沙3组处理的空白对照在开始阶段 NH_4^+—N 的释放速率相对于未疏浚和疏浚空白对照都有明显的降低，说明泥沙覆盖处理在本实验开始阶段能有效降低沉积物中内源 NH_4^+—N 的释放，随后释放速率一直增大，直至实验结束(43 d)。到实验结束时，NH_4^+—N 的释放速率与未疏浚以及疏浚对照相比较几乎相当，均维持在25 mg/(m²·d)左右。这说明在本实验中，泥沙覆盖并不能长久抑制沉积物的内源氮的释放，出现氮内源回复的现象。其原因主要是，在开始阶段，由于覆盖了5 cm的泥和沙，改变了原有的沉积物—水界面释放平衡关系，阻碍了原有沉积物间隙水中 NH_4^+—N 的释放，使 NH_4^+—N 的释放速率明显降低。随实验时间的延长，新的沉积物—水界面逐渐达到平衡，NH_4^+—N 释放随之逐渐增加。在实验过程中，未种植菹草泥沙覆盖沉积物中的pH值随实验时间的延长而逐渐增加，而当上覆水中pH值增加较多时，使间隙水中的pH值略有改变，进而刺激微生物的活性，使沉积物中有机N在微生物作用下生成大量的氨。沉积物中N的释放除微生物的作用外还包含化学过程。一般情况下，释放出的 NH_4^+ 首先进入间隙水中，逐步扩散到沉积物表面，进而向上覆水混合扩散。间隙水中pH值变化打破沉积物中N释放与固定的动态平衡，加快了间隙水中 NH_4^+ 向上覆水的扩散。

2.3.2 *菹草生长对泥沙覆盖抑制底泥氮释放的影响*

从图2中可以看出，相对于未种植菹草的空白对照，种植菹草沉积物中 NH_4^+－N 释放速率都有显著的降低。除了未疏浚＋土降低程度较低外，其它处理均有较大幅度的降低，特别是对于疏浚＋疏松处理的沉积物，在实验43 d后，种植菹草后释放速率下降的幅度最大，释放速率为0.43 mg/(m²·d)。其次是疏浚，未疏浚，疏浚＋土，疏浚＋沙和未疏浚＋土，下降幅度分别为1.13，1.29，1.78，1.86和17.7 mg/(m²·d)。比较不同的结果可以看出，相对于空白未种植菹草处理，沉积物在疏浚疏松后再进行沉水植物种植，能更有效地控制沉积物 NH_4^+—N 释放，这主要是因为疏浚＋疏松处理的沉积物易于菹草的扎根和生长，生物量也最大(图1)。同时该处理使水体中氧化还原电位Eh值的增加也最大，达到57.6 mV(图4)，Eh值的增加使硝化作用增强，对 NH_4^+—N 的释放受到抑制。从该分析可以看出，改善基底后进行水生植物的恢复能加强对内源负荷的控制。

2.4 泥沙覆盖对菹草生长抑制底泥磷释放的影响

2.4.1 *泥沙覆盖对底泥磷释放的抑制作用* 图3是不同泥沙覆盖处理对沉积物 PO_4^{3-}—P 释放速率随实验时间的变化情况。就总体而言，空白对照 PO_4^{3-}—P 释放速率随实验时间的延长，释放速率均有增加的趋

势,但不同处理间 PO_4^{3-}—P 释放速率有一定的差异。未疏浚空白沉积物在实验时间内 PO_4^{3-}—P 释放速率变化较小,0～30 d 有所增加,随后逐渐降低。未疏浚空白＋土、疏浚空白、疏浚＋沙空白和疏浚＋土空白 4 种处理沉积物 PO_4^{3-}—P 释放速率在开始都有极大的降低,分别在开始的 0～10 d 出现了负 PO_4^{3-}—P 释放,说明泥沙覆盖处理在开始阶段能有效地控制沉积物内源磷负荷。但随实验时间的延长,释放速率逐渐增加,在实验 43 d 后,都已经超过空白未疏浚处理沉积物 PO_4^{3-}—P 释放速率 0.25 mg/(m^2 · d),分别达到了 0.56, 0.43, 0.48 和 0.39 mg/(m^2 · d)。这说明未疏浚＋土、疏浚、疏浚＋沙和疏浚＋土 4 种处理方式,在短期内能很好地控制 PO_4^{3-}—P 释放,但随时间的延长 PO_4^{3-}—P 释放速率有恢复增加的可能。疏浚＋沙处理的沉积物 PO_4^{3-}—P 释放一直缓慢地增加。比较不同的处理对 PO_4^{3-}—P 释放速率的影响,发现各种处理都只能短期内控制 PO_4^{3-}—P 释放,并不能达到一个长效的结果。未种植菹草泥沙覆盖处理的沉积物中磷释放出现逐渐增大回复的趋势,其主要原因是,一方面,随时间的延长,上覆水中的 Eh 值有逐渐减小的趋势,而 Eh 的降低对于沉积物中磷的释放有增强的作用,另一方面,实验过程中,pH 值有逐渐增大趋势,pH 值升高时,体系中 OH^- 可与无定型铁铝胶合体的磷酸根发生交换。沉积物中磷释放量增加是水合氧化物负电荷数量增加以及 OH^- 和 HPO_4^{2-} 竞争吸附点位两者综合作用的结果使磷的释放量增加[4-5]。

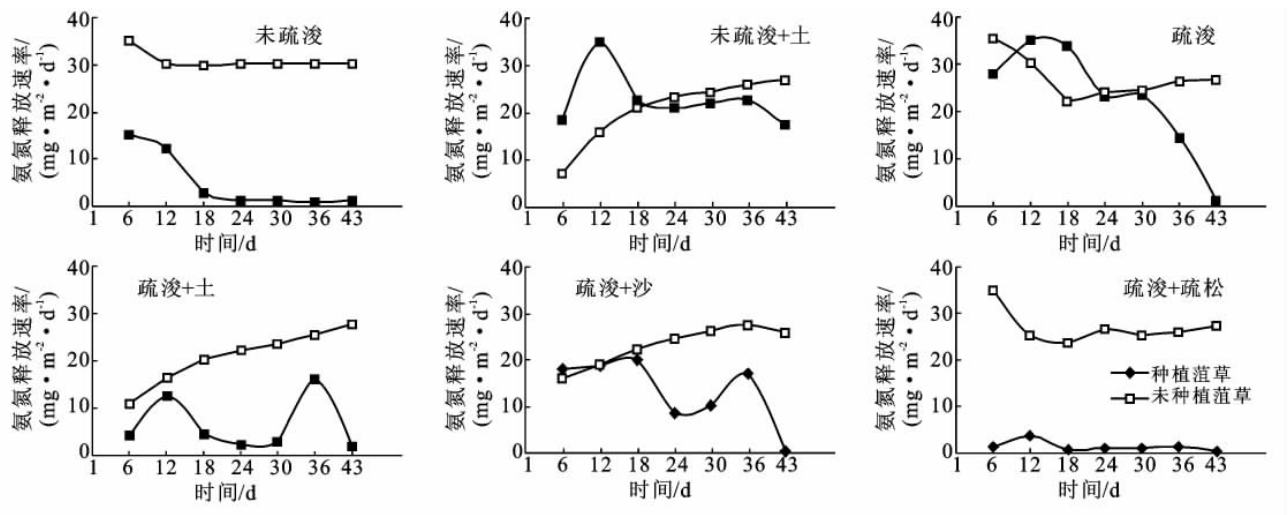


图 2　NH_4^+ — N 释放速率随时间的变化

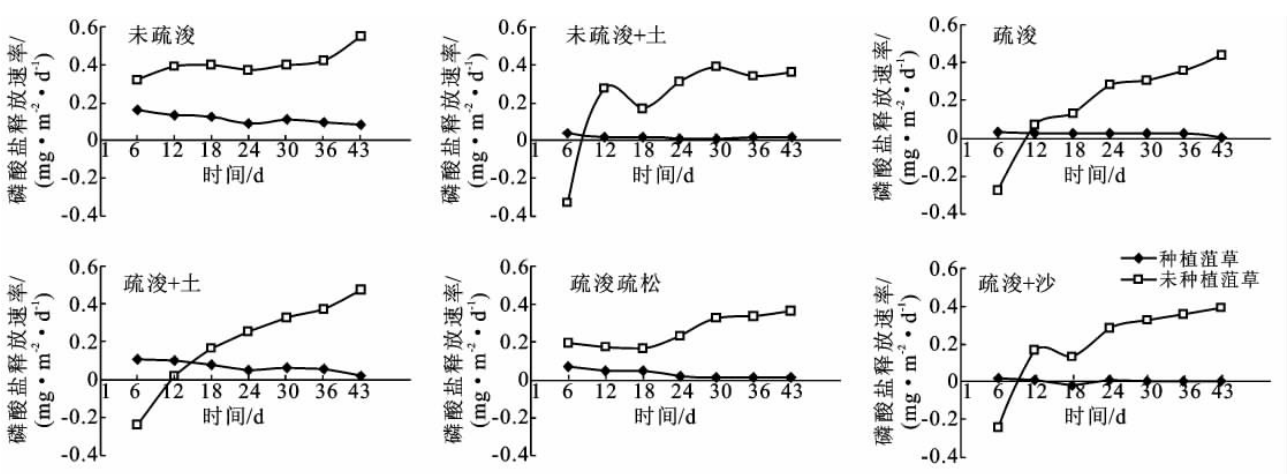


图 3　PO_4^{3-} — P 释放速率随时间的变化

2.4.2　*菹草生长对泥沙覆盖底泥磷释放的影响*　从图 3 中可以看出,与未种植菹草的各种空白对照相比,种植菹草的不同处理沉积物中磷酸根的释放速率显著降低。总的趋势是,种植菹草沉积物 PO_4^{3-}—P 释放速率随实验时间的延长而逐渐降低,说明种植菹草可以很好地控制泥沙覆盖沉积物中 PO_4^{3-}—P 释放。加强单一泥沙覆盖处理效果的保持,这与前面已经讨论过的菹草生长可以加强不同疏浚深度沉积物

内源控制效果相一致，说明单一的物理处理控制沉积物内源释放往往达不到预期的效果或效果不能长久地保持，而当与生物处理相集成后则能保持和强化物理处理的效果。各种处理间对沉积物 PO_4^{3-}—P 释放的控制有一定的差异，试实验 43 d 结束后，PO_4^{3-}—P 释放速率大小分别为：未疏浚〔0.082 mg/(m² · d)〕＞疏浚＋土〔0.019 mg/(m² · d)〕＞未疏浚＋土〔0.015 mg/(m² · d)〕＞疏浚＋沙〔0.011 mg/(m² · d)〕＞疏浚〔0.007 7 mg/(m² · d)〕＞疏浚＋疏松〔0.001 6 mg/(m² · d)〕。

从图 3 中可以看出，疏浚疏松和疏浚后直接种植菹草能更好地控制沉积物中 PO_4^{3-}—P 释放。结合前面对氮的分析结果发现，疏浚＋疏松处理同时进行菹草的种植对于控制污染沉积物内源的氮磷释放效果最佳。

3 讨 论

3.1 Eh 值变化对氮磷释放的影响

图 4 为不同处理沉积物表层上覆水中 Eh 值随时间的变化情况。从图 4 中可以看出，除疏浚＋沙外，所有未种植菹草实验组底泥中，随时间的延长上覆水体的 Eh 值呈缓慢下降趋势，表明实验体系由于处于盛夏季节，上覆水体污染物降解或生物作用产生了水体氧含量的减少，使得 Eh 值下降。

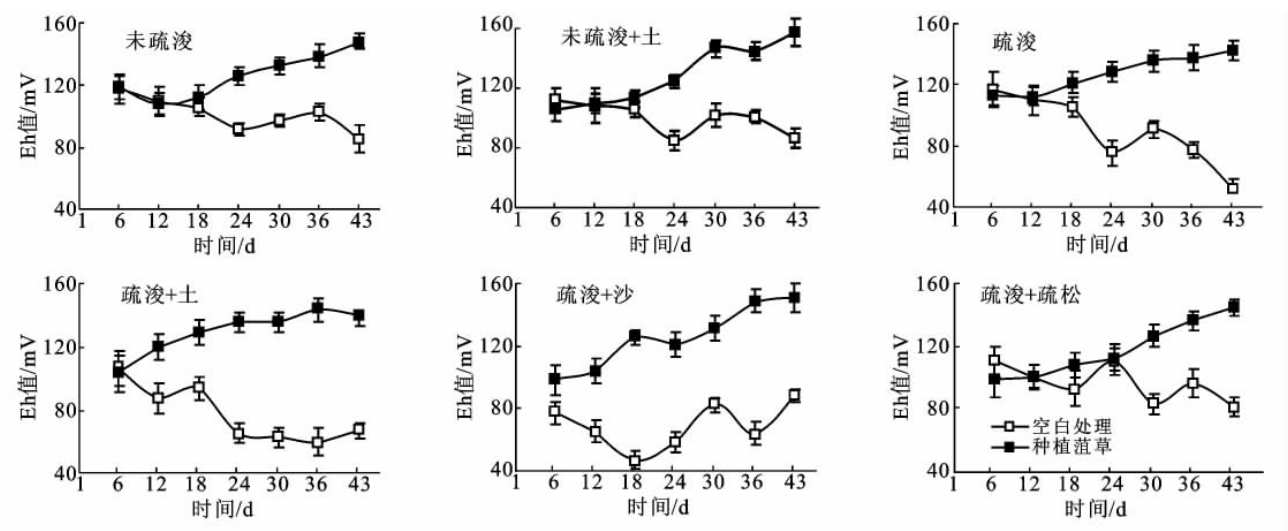


图 4 实验沉积物上覆水中氧化还原电位 Eh 的变化

当表层沉积物氧化还原电位(Eh)较高时，易对底泥物质释放产生不利影响。此时 Fe^{3+} 与磷酸盐结合成不溶的磷酸铁，可溶性磷也被氢氧化铁所吸附而逐渐沉淀。而当 Eh 较低时，有助于 Fe^{3+} 向 Fe^{2+} 转化，使铁及被吸附的磷酸盐转化成溶解态而析出，且不溶的氢氧化铁转化成可溶性的氢氧化亚铁，沉积物中磷释放量增加[6]。影响氧化还原电位的因子(如电子接受体)影响着沉积物中磷的释放，水中溶解氧含量对沉积物磷的释放起着决定性的作用，厌氧环境可大大促进磷在沉积物中的迁移与释放。另外高的 NO_3^-—N 浓度使铁处于氧化状态从而增加表层沉积物对磷酸根的吸附能力[7]。

由于种植沉水植物直接吸收水体和沉积物中的营养盐，同时由于植物的生长使水体中溶氧增加，氧化还原电位升高，从而使沉积物中氮、磷酸盐的释放很明显地受到抑制。所以种植沉水植物是控制内源污染的有效途径。

3.2 pH 值变化对氮磷释放的影响

图 5 是种植菹草后，验沉积物上覆水中 pH 值随时间的变化情况。从图 5 中可以看出，对于种植菹草各沉积物组，水体的 pH 值随生物量的增加而呈上升趋势，除疏浚＋土和疏浚＋沙是在实验后期 pH 值才高于对照外，其它处理种植菹草后 pH 值有较明显增加。在实验结束的 43 d 后，6 种处理的沉积物上覆水中 pH 值分别达到了 8.79±0.16(未疏浚)，9.14±0.21(未疏浚＋土)，9.97±0.19(疏浚)，9.96±0.24(疏浚＋土)，9.71±0.29(疏浚＋沙)，9.39±0.31(疏浚疏松)。

从 6 种处理的 pH 值变化发现，各种疏浚后进行泥沙覆盖处理沉积物的 pH 值比未疏浚的处理高。据黄清辉[8]的研究发现，五里湖沉积物垂直方向 Fe—P 在表层要高于下层。对于未疏浚沉积物，由于种植菹草后水体中 Eh 的明显升高，Fe^{2+} 很容易被氧化成 Fe^{3+}，Fe^{3+} 很容易于水体中的 OH^- 作用形成 $Fe(OH)_3$ 沉淀下来，导致水体中 pH 值的降低。而

疏浚后的沉积物表层 Fe—P 相对要低,通过 Fe^{3+} 来络合的 OH^- 少,所以出现疏浚处理的沉积物上覆水体比未疏浚处理的高。

另一方面可能与菹草的生长和生物量有关。从图 1 中可以看出,未疏浚 2 种处理的生物量相对也较低。宋碧玉等[9]在武汉东湖利用围隔进行沉水植物恢复实验发现,围隔中 pH 值达到 9.5 左右,而围隔外为 7.9。

沉水植物的生长使实验沉积物上覆水中的 pH 值有增大的趋势,pH 值的增大则可能导致沉积物氮磷营养盐的释放速率增加。但是在实际情况中,氮磷的释放速率随着沉水植物的生长反而逐渐降低,这主要是由于沉水植物通过直接吸收作用有效地降低了营养盐和悬浮颗粒物的含量,减少了间隙水与上覆水中营养盐的浓度差。同时沉水植物还能有效地抑制底栖动物的扰动作用,这一功能对沉积物释放有一定的抑制作用[10]。

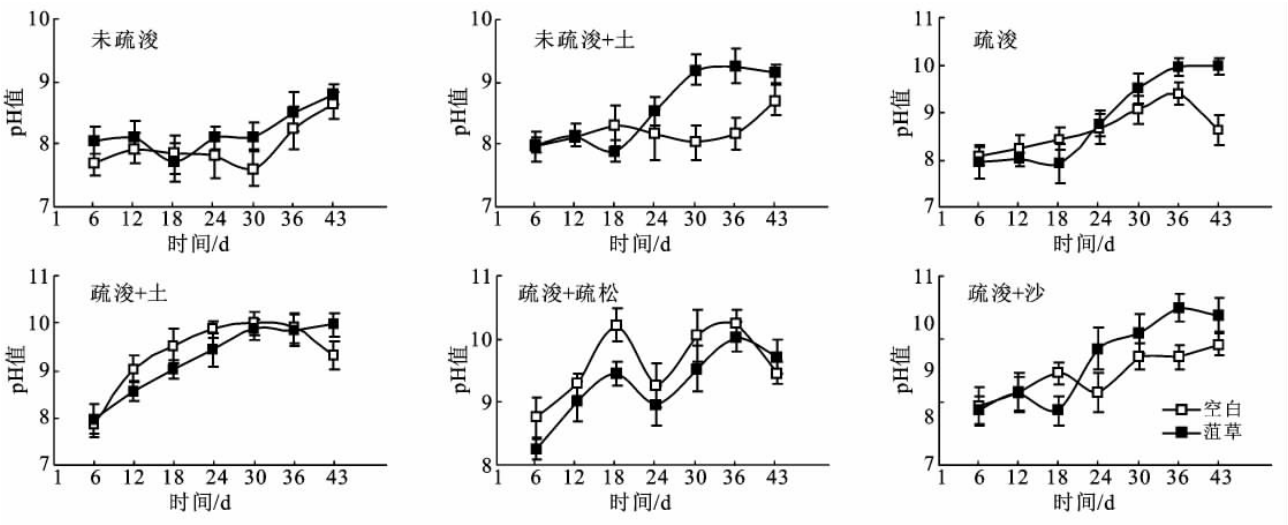


图 5　不同处理实验沉积物上覆水中 pH 值的变化

4　结 论

(1) 对于未种植沉水植物的沉积物,不同泥沙掩蔽方式在短期内都能显著地降低沉积物中氮磷营养盐的释放速率;但随时间的延长,氮磷释放速率有回复增加的趋势。比较不同的表层改良方式发现,对于氮磷释放速率的控制效果,疏浚+疏松方式的效果要好于其它改良方式。

(2) 在不同处理沉积物上种植菹草后发现,与未种植菹草的处理相比较,氮磷释放速率都明显地降低,内源负荷得到很好的控制;不同改良方式间的比较发现,疏浚疏松直接种植菹草处理能更好地控制沉积物中 NH_4^+—N 和 PO_4^{3-}—P 的释放。

(3) 结合菹草的生长情况,发现在沉积物疏浚后进行一些机械的疏松和覆沙,可以使沉水植物能够快速地在沉积物表层扎根,同时能很好地控制沉积物中内源营养盐的释放。

[参 考 文 献]

[1] Petticrew E L, Arocena J M. Evaluation of iron-phosphate as a source of internal lake phosphorus loadings [J]. The Science of the Total Environment, 2001,266:87-93.

[2] Petersson K. Mechanisms for internal loading of phosphorus in lakes[J]. Hydrobiologia, 1998,373:1-3.

[3] 金相灿. 湖泊富营养化调查规范[M]. 2 版. 北京:中国环境科学出版社,1990.

[4] Bostrom B, jansson M, Forsberg C. Phosphorus release from the sediment [J]. Arch. Hyarobiol., 1982,18:55-59.

[5] Andersen J M. Influuence of pH on release of phosphorus from lake sediment [J]. Arch. Hydrobiol., 1975,76:411-419.

[6] Pant H K, Reddy K R. Phosphorus sorption characteristics of estuarine sediments under different redox conditions[J]. J. Environ. Qual., 2001,30:1474-1480.

[7] 高丽,杨浩,周健民. 湖泊沉积物中磷释放的研究进展[J]. 土壤,2004,36(1):12-15.

[8] 黄清辉. 浅水湖泊内源释放及其生物有效性[D]. 北京:中国科学院,2005.

[9] 宋碧玉. 利用人工围隔研究沉水植被恢复的生态效应[J]. 生态学杂志,1999,18(5):21-24.

[10] 王雨春,万国江,尹澄清,等. 红枫湖、百花湖沉积物全氮、可交换态氮和固定铵的赋存特征[J]. 湖泊科学,2002,14(4):301-309.