

邹林熹,李丹莉,程康龙,等.改性红土与苦草联合作用控制沉积物中磷释放 [J]. 中国环境科学, 2025,45(5):2780-2791.

Zou L X, Li D L, Cheng K L, et al. Modified red soil combined with aquatic plants to control sediment phosphorus release [J]. China Environmental Science, 2025,45(5):2780-2791.

改性红土与苦草联合作用控制沉积物中磷释放

邹林熹^{1,2},李丹莉^{1,2},程康龙^{1,2},张瑜^{1,2},张雯^{1,2,3*} (1.成都理工大学生态环境学院,四川成都 610059; 2.国家环境保护水土污染协同控制与联合修复重点实验室,四川成都 610059; 3.地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,四川成都 610059)

摘要: 利用天然红土(RC)和 700°C 煅烧的红土(CRC-700)分别联合沉水植物苦草(VS)和金鱼藻(CD)形成处理组,拟探究一种能有效控制沉积物磷(P)释放的处理技术.结果表明,VS+CRC-700 对沉积物 P 的释放和去除效果高于其他处理组,相比如对照组上覆水中溶解性活性磷(SRP)从 1.38mg/L 降至 0.024mg/L,对不同层沉积物 Fe(II)-P 和铁铝态结合磷(CDB-P)分别最多降低 94 和 488.03mg/kg,同时对沉积物 P 固定作用明显,不同层沉积物中 Ca-P 含量最多增加 182.78mg/kg.相比如对照组 VS+CRC-700 能提高沉积物微生物群落丰度,增加 5403.减少变形杆菌和拟杆菌相对丰度,分别减少了 16.56%和 33.33%.这些结果都表明,VS+CRC-700 可视为一种廉价且具有潜力的高效 P 污染水体水质改善技术,应用控制弱水动力条件下水体的沉积物 P 释放.

关键词: 黑臭底泥; 红土; 苦草; 金鱼藻; 磷形态

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)05-2780-12

Modified red soil combined with aquatic plants to control sediment phosphorus release. ZOU Lin-xi^{1,2}, LI Dan-li^{1,2}, CHENG Kang-long^{1,2}, ZHANG Yu^{1,2}, ZHANG Wen^{1,2,3*} (1.College of Ecology and Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2.Key Laboratory of Collaborative Control and Joint Remediation of Soil and Water Pollution in National Environmental Protection, Chengdu 610059, China; 3.State Key Laboratory of Geological Disaster Prevention and Geological Environment Protection, Chengdu 610059, China). *China Environmental Science*, 2025,45(5): 2780~2791

Abstract: This study utilized natural red clay (RC) and 700°C calcined red clay (CRC-700) to form treatment groups combined with submerged macrophytes *Vallisneria spiralis* (VS) and *Ceratophyllum demersum* (CD), aiming to develop a treatment technology effective in controlling sedimentary phosphorus (P) release. The results demonstrated that the VS+CRC-700 treatment group exhibited superior performance in reducing and removing sedimentary P compared to other treatments. Specifically, dissolved reactive phosphorus (SRP) in the overlying water of the VS+CRC-700 group was significantly reduced from 1.38 mg/L to 0.024 mg/L compared to the control group. Additionally, the concentrations of Fe(II)-P and iron-aluminum bound phosphorus (CDB-P) in different sediment layers were maximally decreased by 94 and 488.03 mg/kg, respectively. Meanwhile, the VS+CRC-700 treatment markedly enhanced P immobilization in sediments, with Ca-P content increasing by up to 182.78mg/kg across sediment layers. Furthermore, microbial community analysis revealed that VS+CRC-700 increased sediment microbial abundance by 5403 units, while reducing the relative abundances of Proteobacteria and Bacteroidetes by 16.56% and 33.33%, respectively. These findings collectively suggest that VS+CRC-700 represents a cost-effective and high-efficiency technology for improving water quality in P-polluted systems. Its application demonstrates significant potential in controlling sedimentary P release under weak hydrodynamic conditions.

Key words: black odorous sediment; red soil; *Vallisneria spiralis*; *Ceratophyllum demersum*; phosphorus form

外部磷(P)输入被有效控制后,仍会因沉积物内部复杂的物理、化学和生物过程导致 P 释放.因此切断运输过程和直接清理沉积物能有效控制沉积物内部 P 释放.近年来,针对沉积物的治理广泛应用的技术主要分为异位治理技术和原位治理技术.沉积物疏浚是异位治理技术中的主要形式^[1],该技术较为成熟,清理沉积物彻底,但易对沉积物生态系统造成破坏且长期的有效性会减弱致使沉积物 P 释放风

险反而增加^[2-3].原位治理技术中常用的有原位物理化学治理^[4-6]、原位生物治理技术^[7-10]和原位吸附材

收稿日期: 2024-09-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50578020);国家自然科学基金(42377082);国家环境保护土壤与水污染协同控制与联合修复重点实验室(GHBK006);四川省自然科学基金(2023NSFSC0799);地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(SKLG2023K029);长江联合研究二期项目(2022-LHYJ-02-0201)

* 责任作者, 教授, zhangwen2014@cdut.edu.cn

料覆盖^[11-13].其中化学治理可能造成生态风险^[14],原位生物治理和原位吸附材料覆盖是应用最广泛的技术,原位生物治理中的沉水植物对环境友好且抑制 P 释放效果良好,原位吸附材料覆盖中的吸附材料对 P 进行吸附固定的同时阻断沉积物 P 的运输,通常简单高效.基于此,利用沉水植物联合原位吸附材料覆盖技术因其应用潜力得到了广泛关注^[15].覆盖吸附材料快速去除上覆水 SRP,切断沉积物 P 运输通道的同时增加沉积物吸附 P 的能力^[16].长期作用下,沉水植物根系能有效利用吸附材料中可利用 P 促进沉水植物的生长以增加覆盖率^[17],并延缓吸附材料达到吸附饱和.两者联合作用弥补单一技术难以快速去除 P 或不易控制深层沉积物 P 的不足.联合作用增强对沉积物 P 释放的长期控制.

天然红土(RC)是一种无生物毒性的天然矿物质,通常情况下,RC 富含铁和铝氧化物,P 亲和力强且具有环境友好性^[18],其中氧化铁的低晶体尺寸颗粒能形成强键位点,用于磷酸盐物质的表面络合^[19],使得 RC 具有较强的吸附能力,同时具有廉价和广泛分布的特点.但基于 RC 吸附材料吸附性能有限^[20],本文采用高温煅烧对 RC 进行改性,以提高其吸附能力.高温改性后的 RC(CRC)仍然具备无生物毒性的特点,是联合处理的合适吸附材料.在苦草(VS)、金鱼藻(CD)、轮叶黑藻、狐尾藻等常见沉水植物中,VS 和 CD 应用广泛^[21-22],且具有丰富的根系^[23-24],根部能深入沉积物吸收养分,稳定沉积物的同时改善水质^[25-27],是联合处理的合适沉水植物选择.

综上,本文拟采用沉水植物联合原位吸附材料的技术,实现对沉积物 P 的有效控制.选取 VS 和 CD 作为研究代表旨在探讨 RC 和 CRC-700 与沉水植物对沉积物 P 去除的影响,为水体内部沉积物 P 负荷控制提供可参考数据.研究两种原位覆盖材料与沉水植物对各组分 P 的控制作用并试图探究其去除机制.希望为富营养化水体修复技术的优化选择提供理论支持,为控制富营养化水体的内部营养物质负荷提供科学依据.

1 材料和方法

1.1 研究区域和沉积物采集

选取四川省内江市威远河(长期流速缓慢且受生活污水污染严重的富营养化水体),周边土壤为中

性紫色砂质土壤.采用彼德森抓斗式采泥器采集表层沉积物,将沉积物表面的石块,树叶等硬质杂物去除,装于排除空气的聚乙烯袋中密封罐,避光运回实验室置于冰箱中 4℃ 冷冻保存.对应每一点位采用 Niskin 采水器采集表层 0.5m 处上覆水 50mL,用孔径为 0.45μm 的滤膜(美国 Pall 公司)过滤.上覆水基本参数如 pH 值、溶解氧(DO)等由 YSI 多参数水质分析仪测定.上覆水溶解性活性磷(SRP),采用钼锑抗分光光度法测定.基本理化性质见表 1.上覆水呈现弱酸性,同时 DO 和 TP 都远超地表水环境质量标准 GB3838-2002 中五类水的标准.

表 1 上覆水和沉积物的理化性质

Table 1 Overlying water and sediment physicochemical properties

上覆水		沉积物	
指标	数值	指标	数值
pH 值	6.37	pH 值	7.22
水温(℃)	18.4	有机质(OM)	6.87
DO(mg/L)	1.08	含水率(%)	52.55
TP(mg/L)	1.44	氧化还原电位(mV)	-72.17
SRP(mg/L)	1.18	粘粒<4μm	9.88
EC(mS/cm)	486.56	粉粒 4~63μm	53.83
		砂粒>63μm	36.29
		D50	47.36

1.2 材料的制备

实验中所使用的红土取自于四川省成都市龙泉驿区.在去除较大颗粒后,原料经自然风干,并通过粉碎机粉碎成直径为 3~5cm 的颗粒.经过马弗炉 700℃ 高温煅烧 2h 处理后,制得 CRC-700.沉水植物 VS 和 CD 采自湖北荆州,在采集到长势良好且新鲜的 VS 和 CD 后,将其冲洗干净,移除无脊椎食草动物,并在实验室中培育 7d,再将其均剪至 12cm 的长度以符合实验的高度要求.

1.3 实验设计

1.3.1 底泥 P 释放 在实验桶(聚丙烯材质的塑料收纳桶,内径 20cm,高 40cm)内底部覆盖 10cm 厚的沉积物,桶壁上留有取样孔.设置 9 组大桶作为实验单位(图 1),每组包括 3 个平行容器.所有塑料收纳桶均放置室外,用纸箱遮盖住沉积物及以下防止阳光的直晒.(1)对照组 S,沉积物完整且未经处理;(2)A 组,在沉积物上覆盖厚 5cm 的 RC;(3)a 组,在沉积物上覆盖厚 5cm 的 CRC-700;(4)B 组,在沉积物上均匀移植

12株CD;(5)b组,在沉积物上均匀移植12株VS;(6)C组,在沉积物上覆盖5cm的RC并均匀移植12株CD;(7)c组,覆盖高度及生物量同上;(8)D组,在沉积物上覆盖5cm的CRC-700并移植12株CD;(9)d组,覆盖高度及生物量同上.实验进行42d,在实验过程中,保持水位在30cm(不包括沉积物高度),平衡后使用Rhizon采样器,在预制孔中置于沉积物-水界面下的1、2、3和4cm深度以收集孔隙水且在室温下取样.每隔3d,收集3mL上覆水,并测量SRP的浓度.每隔3.5d,使用Rhizon采样器采集5mL孔隙水,并测定SRP的浓度.取样过后,等量的河水被补充到反应器中,以继续反应42d.

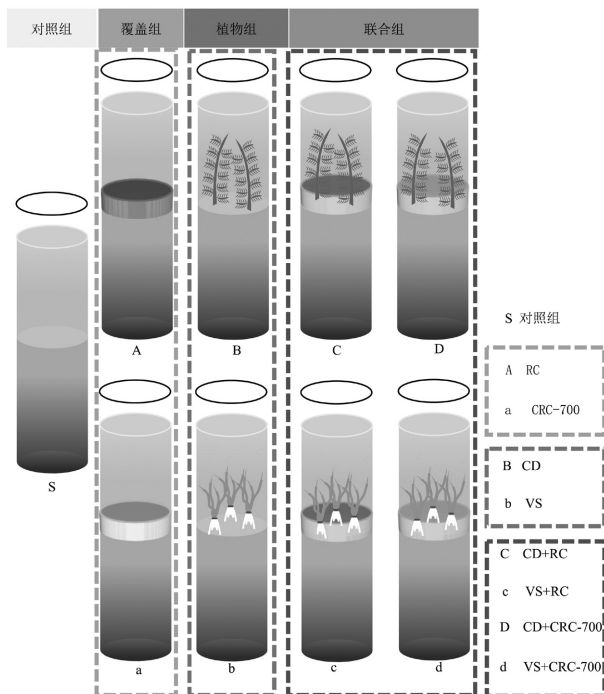


图1 处理组示意

Fig.1 Treatment group schematic diagram

1.3.2 沉积物中P形态测定 实验进行42d后,将上覆水抽出,并收集各层沉积物.使用改进的SEDEX方法(图2),按照P形态提取方法,分别提取沉积物中的Loosely-bound-P(弱吸附态磷)、Fe(II)-P、CDB-P、Ca-P(钙结合磷)和O-P(有机磷).金属氧化物结合的CDB-P和Fe(II)-P通常被认为具有潜在的移动性和生物可利用性,而碳酸钙沉淀的Ca-P则具有很高的化学和生物稳定性.根据分类进行分析检测,测定每个实验组沉积物中P形态的含量.所有分析均基于3个重复,未添加沉积物作

为空白对照组.

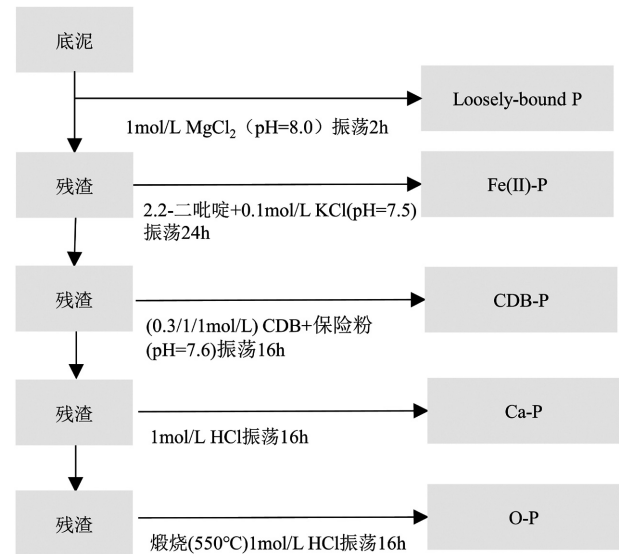


图2 SEDEX法提取沉积物各形态磷示意

Fig.2 Schematic diagram of extracting various forms of phosphorus from sediments by SEDEX method

1.4 表征方法

采用全自动比表面积及孔径分析仪(ASAP2460)表征RC和CRC-700比表面积、孔体积和平均孔径;采用扫描电子显微镜(SEM,JSM-5610LV)表征观察RC和CRC-700的表面形貌特征及微观结构;采用X射线粉末衍射仪(PANalyticalX'PertP)表征RC和CRC-700晶体物相;在实验进行42d后,每个处理组收集表面沉积物(0~2cm)样品用于微生物群落组成分析,采用高通量测序技术检测不同修复技术中样品的微生物群落结构,16S扩增子高通量测序(16SrDNA amplicon sequencing, 16SrRNA gene amplicon sequencing).实验前后分别测量苦草和金鱼藻的根长、鲜重、茎长和叶长、鲜重、茎长.

水体的pH值、温度和电导率通过YSI多参数水质分析仪进行现场测定;沉积物的氧化还原电位使用电极法;上覆水用0.45 μ m滤膜过滤后测SRP浓度,使用过硫酸钾进行消解测TP,通过紫外-可见分光光度计(UV-2102PCS;上海的Unico仪器有限公司,中国)测定沉积物P形态的含量.所有分析均基于3个重复.各组对P的去除量(q)和去除效率(R)由方程式计算:

$$q_e = \frac{(c_0 - c_e)V}{m} \quad (1)$$

$$R(\%) = \frac{(c_0 - c_e)V}{c_e} \times 100\% \quad (2)$$

式中, q_e 为吸附容量,mg/g; V 为实验水样体积,mL; m 为改性材料质量,g; R 为磷酸盐的去除率,%; C_0 为磷酸盐的初始浓度,mg/L; C_e 为磷酸盐平衡浓度,mg/L.

1.5 分析方法

采用 SPSS 18.0 进行统计分析,进行单因素方差分析(ANOVA)以检验显著差异,各组间显著性差异的阈值为 $P < 0.05$.

2 结果和讨论

2.1 RC 和 CRC-700 形态特征

表 2 RC 和 CRC-700 的比表面积和孔结构

Table 2 The specific surface area and pore structure of RC and CRC - 700

样品	BET 比表面积(m ² /g)	external 比表面积(m ² /g)	孔体积(cm ³ /g)	BJH 平均孔径(nm)
RC	5.02	6.59	0.0259	16.05
CRC-700	14.84	15.12	0.0313	8.84

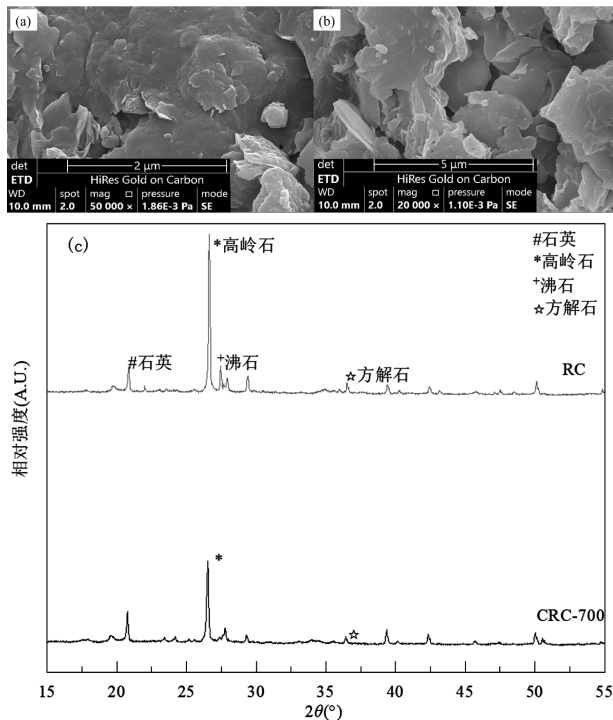


图 3 SEM 表面形貌图和 X 射线衍射图

Fig.3 SEM surface morphology and XRD patterns

a:RC 扫描图, b:CRC-700 扫描图, c:RC 和 CRC-700 的衍射图

经过高温煅烧后制得的 CRC-700 比表面积增加至 RC(5.02m²/g) 的 3 倍(14.84m²/g),说明煅烧改性

后 RC 的微观结构发生改变,从而使得比表面积显著提高(表 2).高温煅烧可以去除红土内部的吸附水以及部分结晶水,其他有机成分可以通过煅烧作用热分解,从而表面变得松散多孔同时增强红土的孔隙率^[28],可以提供更多的活性位点,有效增强了吸附效果.同时煅烧后红土呈现的不规则和许多细小的颗粒和不明显的洞也可以说明比表面积的增大(图 3 (a) (b)).孔体积从 RC 的 0.025cm³/g 到改性后 0.031cm³/g,也为 CRC-700 对磷酸盐的吸附提供了更广阔的空间,有利于提高其吸附能力.

RC 的主要晶相为石英(quartz)、高岭石(kaolinite)、方解石(calcite)等(图 3 (c)),RC 主要由针铁矿和赤铁矿组成,嵌在高岭石和石英的骨架中.通过对比,CRC-700 的峰强度比 RC 的主衍射峰更低,峰形变弱,在经过高温改性后由于结构水的去除,在高岭石的部分峰降低,随着煅烧温度的升高,石英晶体的峰值几乎保持不变,表明石英的结晶度受到温度的影响相对较小,而方解石也有所分解,能够促进一些氧化钙等新矿物的形成^[29].

2.2 RC 和 CRC-700 对沉积物 P 释放和 P 形态的影响

在未做处理的对照组 S 中(图 4),上覆水和间隙水 SRP 都呈现逐渐上升的趋势,在实验结束时达到峰值.间隙水 SRP 随深度的增加而升高(图 4 (b) (c) (d)),这可能是因为氧化还原电位降低,铁氢氧化物的还原作用,使 SRP 克服了沉积物的吸附而溶入间隙水中,促使了间隙水中 P 含量的增高^[30],且对照组 S 上覆水 SRP(图 4 (a))与 3-4cm 间隙水 SRP(图 4 (d))存在明显 P 浓度差(1.38 和 3.46mg/L),存在高浓度向低浓度扩散的趋势^[31],表明具有较大的释放风险.

沉积物磷释放到上覆水主要有两个途径:一个是从沉积物中扩散到间隙水中,另一个是溶解态 P 通过分子扩散从沉积物-水界面输送到上覆水体^[32],因此间隙水中 P 分布特征与湖泊内源负荷有直接关系^[33].RC 和 CRC-700 上覆水和浅层间隙水(1~2cm)SRP 均呈下降的趋势(图 4(a)(b)),与对照组 S 存在显著组间差异,CRC-700 上覆水 SRP 在初期就能有效降低且保持相对较低浓度,与 RC 存在明显组间差异($P < 0.05$)(图 4 (a)).两组处理组中深层间隙水 SRP 有明显降低,但整体却呈波动上升的趋势,且两组之间没有统计学差异(图 4 (c) (d)).这表明

RC 和 CRC-700 覆盖治理在针对上覆水和表层间隙水的 SRP 等直接接触的介质上具有较强的控制

力,而对于未直接接触的深层间隙水的 SRP 的控制力有限.

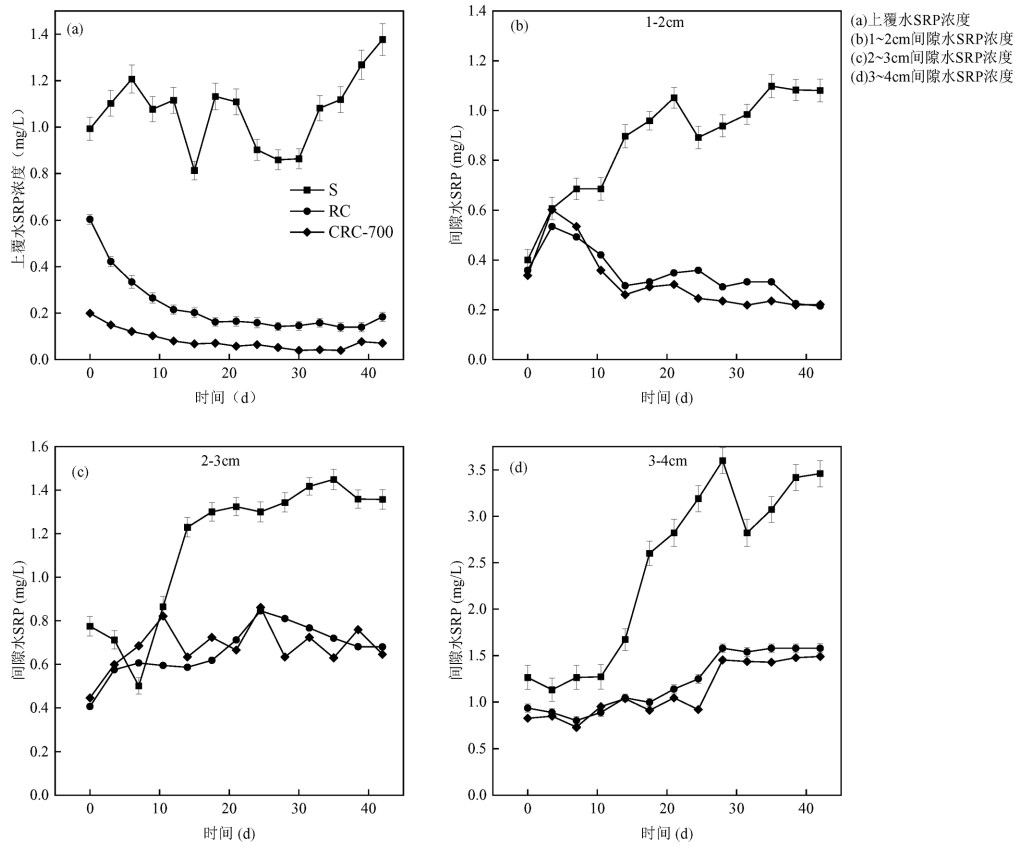


图4 RC 和 CRC-700 对上覆水 SRP 和间隙水 SRP 的影响

Fig.4 The effects of RC and CRC-700 on SRP in overlying water and interstitial water

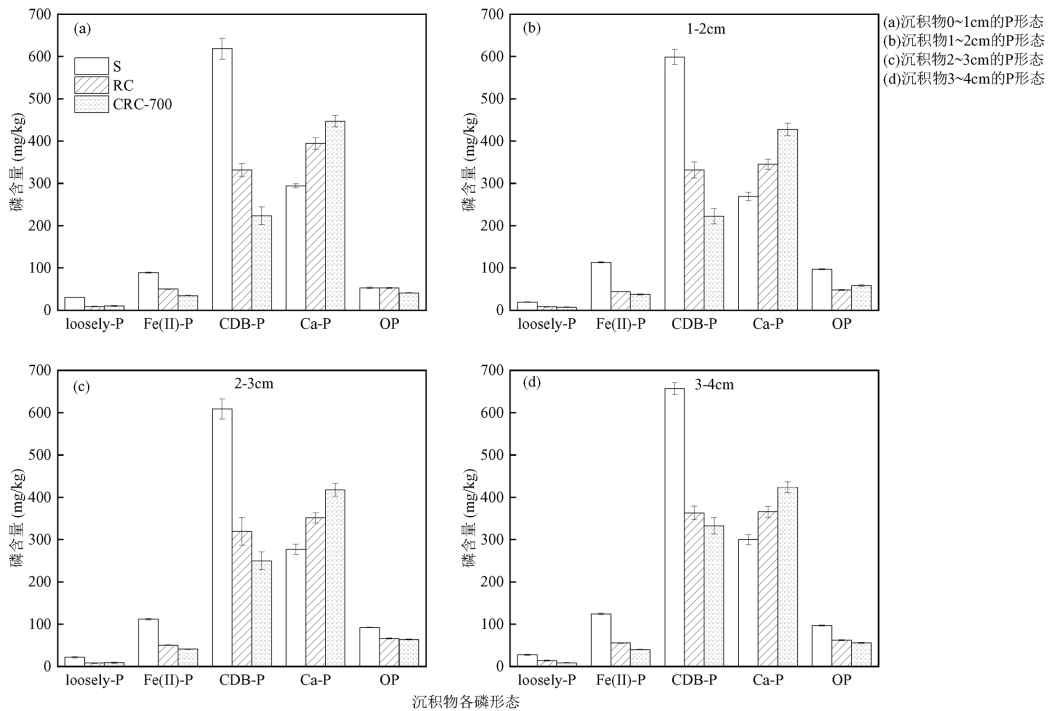


图5 RC 和 CRC-700 对沉积物 P 形态的影响

Fig.5 Effect of RC and CRC-700 on sediment P speciation

对照组 S 沉积物中的 P 形态以 CDB-P(57%)为主(图 5 (a)),活跃态的磷(loosely-P、Fe(II)-P、CDB-P 和 O-P 的总和)占 TP 的 73%,易从沉积物中释放^[34],活跃态的磷也是水体中 SRP 的主要来源^[35],这都表明沉积物内部 P 负荷不稳定,P 释放的潜在风险较大。相比对照组 S,RC 和 CRC-700 中的 CDB-P 含量都显著降低($P<0.05$),RC 和 CRC-700 中 CDB-P 含量分别减少了 286.41mg/kg(减少了 46.32%)和 395mg/kg(减少了 63.88%),而 Ca-P 含量分别增加了 99.67mg/kg(增加了 33.86%)和 152.67mg/kg(增加了 51.87%),表明覆盖后沉积物的 P 形态从不稳定的 CDB-P 转化为惰性的 Ca-P,因此减少了沉积物向上覆水中释放 P 的潜力。不同层 P 形态总体占比相似,RC 和 CRC-700 均能降低 CDB-P 并增加 Ca-P,且两组的组间差异明显($P<0.05$)(图 5)。对照组 S 中总磷(TP)分别为 1097.16、1112.15g 和 1205.88mg/kg(图 5 (b) (c) (d)),明显随深度增加而增加,且各形态 P 都

有所增加,CDB-P 含量最高(657.4mg/kg)。这些可移动 P 是水体内源磷的重要来源,这可能是实验期间对照组 S 中 SRP 不断升高的原因(图 4)。

2.3 沉水植物对沉积物 P 释放和 P 形态的影响

对比对照组 S,VS 和 CD 中上覆水 SRP(图 6 (a))整体趋势相似且都呈现逐渐下降的趋势,但在最后都略有上升。对比 RC 和 CRC-700,在实验结束后 VS 和 CD 中上覆水 SRP 均高于 RC 和 CRC-700,相差在 0.158~0.287mg/L 之间。

对照组 S 中各深度间隙水中 SRP 都呈现逐渐上升的趋势(图 6 (b) (c) (d)),而 VS 和 CD 中无论是 1~2cm、2~3cm 还是 3~4cm 的间隙水中的 SRP 在实验进行的过程中波动都不大(图 6 (b) (c) (d)),这可能是因为沉水植物的根系深入沉积物不同深度从而增大了植物根系和间隙水中 SRP 的接触,提高了对间隙水 SRP 的利用。VS 和 CD 在针对不同间隙水 SRP 的治理都表现出较为稳定的效果。

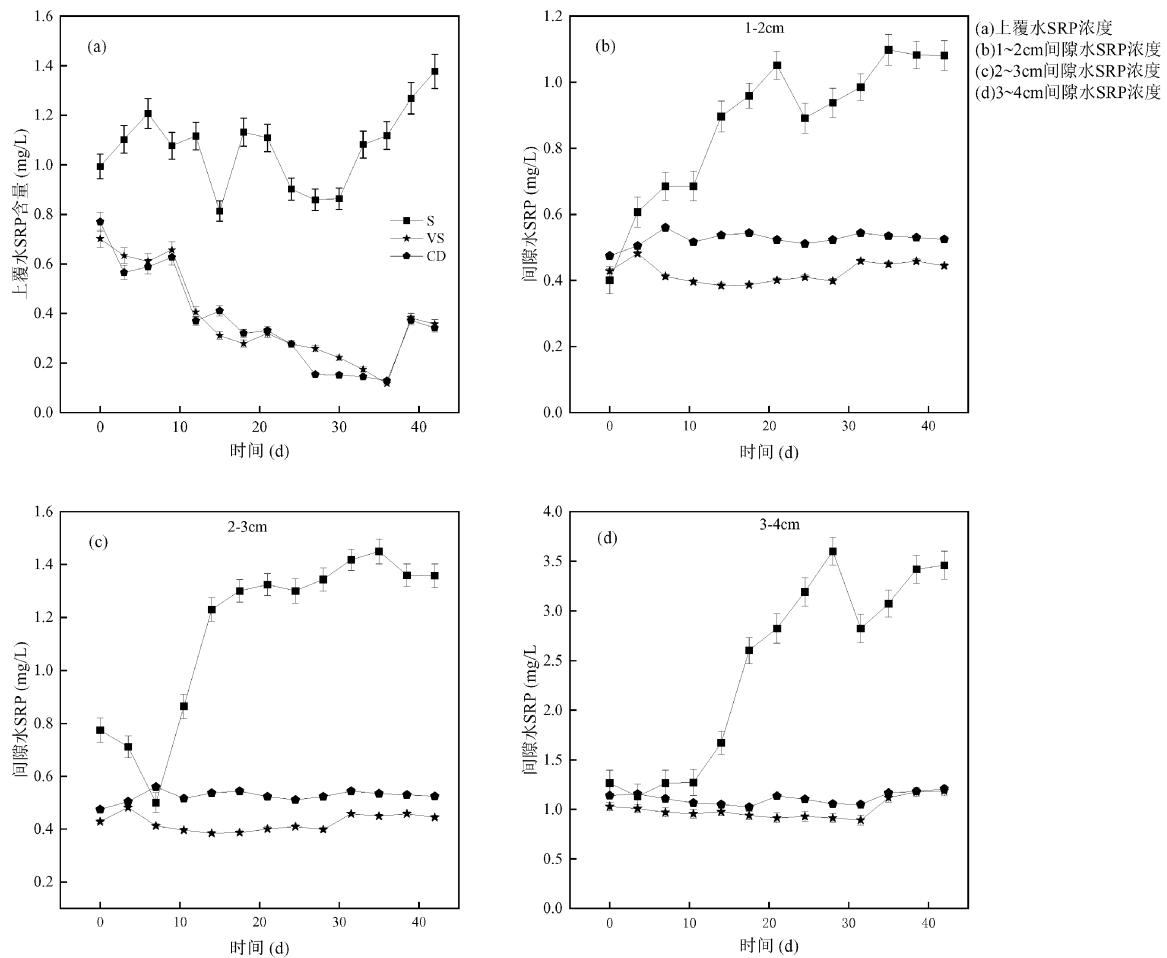


图 6 VS 和 CD 对上覆水 SRP 和间隙水 SRP 的影响

Fig.6 The effects of VS and CD on SRP in overlying water and interstitial water

相比对照组 S(图 7 (a)),VS 和 CD 中的 CDB-P 含量显著降低($P<0.05$),分别降低了 165.07(减少了 26.69%)和 193.63mg/kg(减少了 31.31%),同时 loosely-P、Fe(II)-P 都有不同程度的减少.但 VS 和 CD 中 Ca-P 含量增加不明显,这可能是沉水植物可以将一部分沉积物中磷转化为生物利用磷(如 Ex-P)或吸收 Ex-P 和 Fe(II)-P,以满足自身生长

的需要^[36-37].VS 和 CD 中各层不同形态的 P 均有降低,两组的组间差异明显($P<0.05$),VS 优于 CD.VS 中随深度增加 TP、CDB-P、Ca-P 和 OP 都逐渐降低,分别降低了 123.5、90.91、41.23 和 12.68mg/kg(图 7 (b) (c) (d)).这也验证 VS 根系能深入沉积物并利用了一部分 P 作为营养元素来满足自身生长需要.

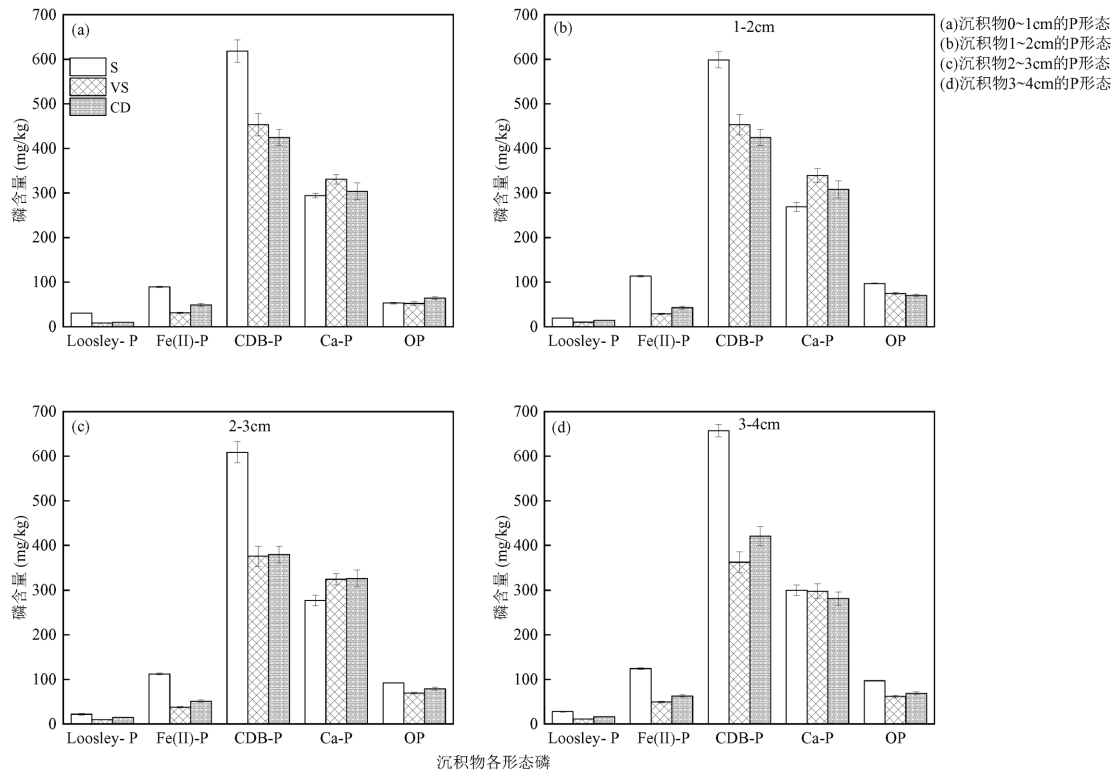


图 7 VS 和 CD 对沉积物 P 形态的影响

Fig.7 Effect of VS and CD on sediment P speciation

2.4 联合处理对沉积物 P 释放和 P 形态的影响

与对照组 S 相比,联合处理组都能有效降低上覆水和间隙水中 SRP 并且维持在一个较低的浓度(图 8).含有 CRC-700 的联合处理组中,上覆水 SRP 在初期大幅度降低,并且持续稳定地保持低浓度.VS+CRC-700 中上覆水 SRP 平均最低,与其他三组差异明显($P<0.05$),比其他三组处理组分别低 0.059~0.106mg/L.

含有 CRC-700 的处理组在不同层间隙水中与含有 RC 的处理组存在明显的差异($P<0.05$),明显优于后者.且在 2~3cm 和 3~4cm 处 VS+CRC-700 与 CD+CRC-700 组间差异明显($P<0.05$).2~3cm 和 3~4cm 处 VS+CRC-700 间隙水 SRP 呈现逐渐下降的趋势,同时在 25d 后保持稳定.其他三组联合处理组

也能减低间隙水 SRP,但整体趋势波动较大(图 8 (b) (c)).在所有的处理组中,上覆水和间隙水 SRP 浓度差都在逐渐减少(图 8 (a) (d)),VS+CRC-700 上覆水和深层间隙水 SRP 最终浓度差最小(0.222mg/L).

四组联合处理组中 CDB-P 均有效降低,降低范围在 289~426.03mg/kg,而 Ca-P 均有小幅度增加,增加范围在 84.16~159.14mg/kg(图 9(a)).VS+CRC-700 的 Ca-P 含量增加最为显著($P<0.05$),含量为 453.46mg/kg,是对照组 S 的 1.5 倍,占了沉积物总磷的 62%.各处理组不同层 P 形态总体仍是相似,并且四组联合处理随深度增加 TP、CDB-P、Ca-P 和 OP 都有不同程度的降低,VS+CRC-700 中各层 TP、CDB-P、Ca-P 和 OP 基本都为四组处理组中最低(图9).

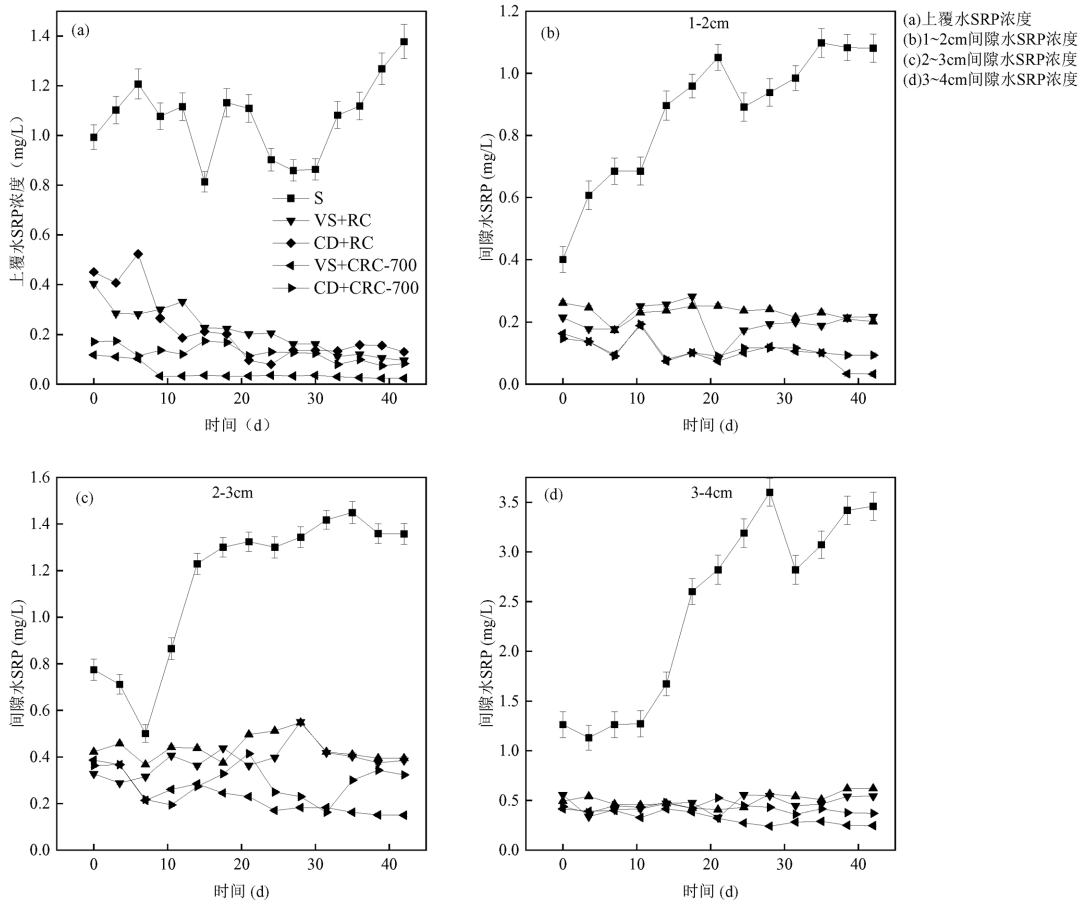


图 8 联合处理对上覆水 SRP 和间隙水 SRP 的影响

Fig.8 The effects of combined treatment on SRP in overlying water and interstitial water

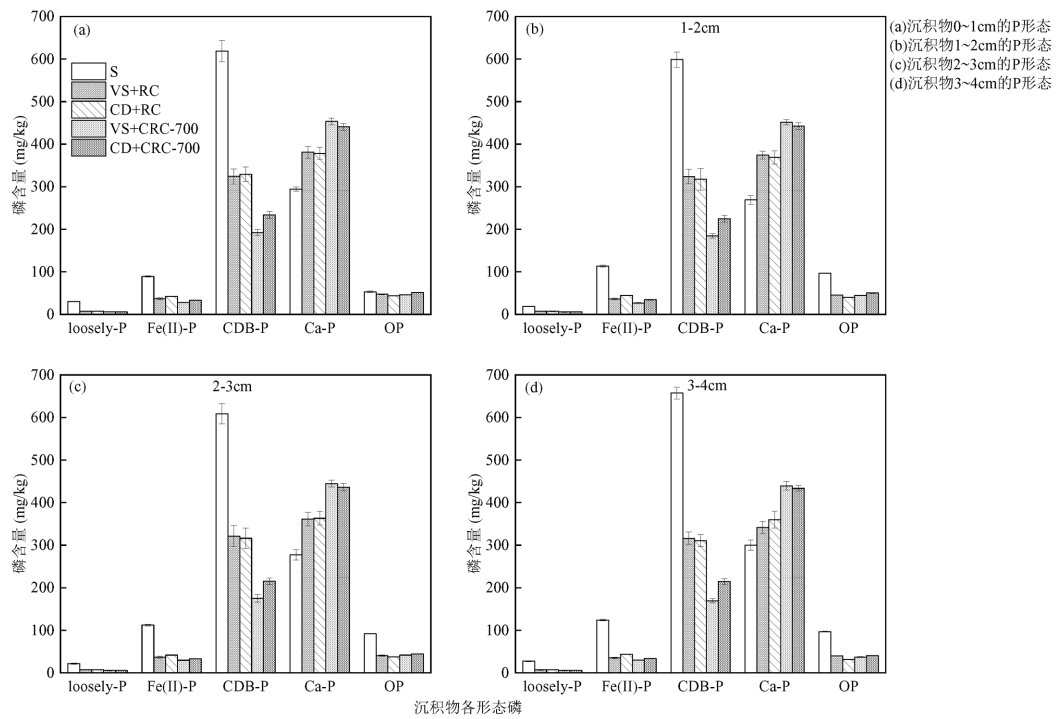


图 9 联合处理对沉积物 P 形态的影响

Fig.9 Effect of combined treatment on sediment P speciation

综上,单一覆盖能吸附上覆水 SRP 和表层沉积物向上释放的P^[13],被覆盖材料吸附的P以更稳定的Ca-P形式存在,其中CRC-700显著优于RC,但单一覆盖都表现出对深层沉积物P控制有限的问题.单一沉水植物对上覆水SRP的控制效果显著弱于单一覆盖,但单一沉水植物针对间隙水SRP控制效果十分稳定,VS优于CD和单一覆盖.厌氧条件下,更易引起沉积物P释放^[38].单一覆盖难以深入未接触的深层沉积物吸附P,且无法改变体系氧化还原条件^[39],主要作用在沉积物-水界面及以上.沉水植物通过根系吸收沉积物中P并增加溶氧以促进P循环^[40-41],主要作用在沉积物-水界面及以上,这是它们之间差异明显的主要原因.这一差异现象也同样发生在其他研究中^[42].联合处理综合了材料覆盖的优势在初期有效降低上覆水和表层间隙水中的SRP,同时固定沉积物中不稳定P,联合沉水植物能有效降低材料难以接触到的深层间隙水中的P,其中抑制沉积物P释放效果最佳的是VS+CRC-700.

2.5 微生物生态学及沉水植物表观分析

Alpha多样性是用于微生物多样性和丰度的工具^[43](表3),CRC-700的微生物丰度明显高于RC,因为CRC-700具有的较大的比表面积和表面结构的疏松多孔(表2),提供了更多的吸附位点,为微生物的生长提供了庇护场所^[44].VS和CD在多样性和丰度没有统计学差异,但高于材料覆盖组,沉水植物丰富的根系结构能创造更多氧气条件,从而提供微生物生长环境.所有处理组中VS+CRC-700多样性和丰度最高,OUT、Chao1、Shannon和PD分别为(5864±16)、(8197±10)、7.4和391.6.

从门分类上不同微生物组成的丰度进行了比较(图10),各处理组微生物在总体结构上相似,但它们的相对丰度上存在异质性.有研究表明变形杆菌(Proteobacteria)在水华期间比休眠期丰富,同时与潜在磷释放指标成正比,则丰度减少在一定程度上表明藻类生长存在抑制并且P释放潜力降低^[45],在含有CRC-700的两个联合处理组中变形杆菌丰度明显减少.同时观察到在含有CRC-700的联合处理组中,拟杆菌(Bacteroidetes)的丰度减少,有研究显示拟杆菌门部分菌属能够分解代谢河流中有机质,且与SRP可用性相关^[46],则拟杆菌丰度减少可能表明可利用的有机质和SRP在降低.拟杆菌在一些高pH值

的富营养化水库和湖区中被发现且占主导地位^[46],而VS+CRC-700中酸杆菌(Acidobacteria)的丰度增加,同时pH值越小变形杆菌和酸杆菌丰度比越小也印证了体系pH值下降^[47],实验结果与上述富营养化水库和湖区均呈现相反结果.VS+CRC-700中沉积物的变形杆菌和拟杆菌的丰度与S中沉积物相比,变形杆菌和拟杆菌丰度分别减少了16.56%和33.33%.同时观察到,VS+CRC-700中变形杆菌和拟杆菌丰度均略低于CD+CRC-700.这些结果表明,VS+CRC-700在去除沉积物P协同效果上较优,且可降低水体富营养化程度.

表3 基于97%OTU聚类估算沉积物微生物群落的Alpha多样性和丰富度

Table 3 Estimating alpha diversity and richness of sediment microbial communities based on 97% OTU clustering

样品	Observed species	Chao1 ^b	Shannon ^a	PD ^a
S	2466±20	2794±11	6.4	190.1
RC	2546±17	2899±19	6.5	194.6
CRC-700	3595±10	4522±13	6.8	245.1
VS	3975±15	4698±20	6.9	250.9
CD	3865±15	4562±10	6.9	252.2
VS+RC	4421±11	5331±14	7.1	290.5
CD+RC	4474±13	5265±13	7.0	289.3
VS+CRC-700	5864±16	8197±10	7.4	391.6
CD+CRC-700	4537±11	5645±12	7.2	321.9

注:数值代表三个重复的平均值±标准差.a表明细菌群落多样性b表示细菌群落丰度.

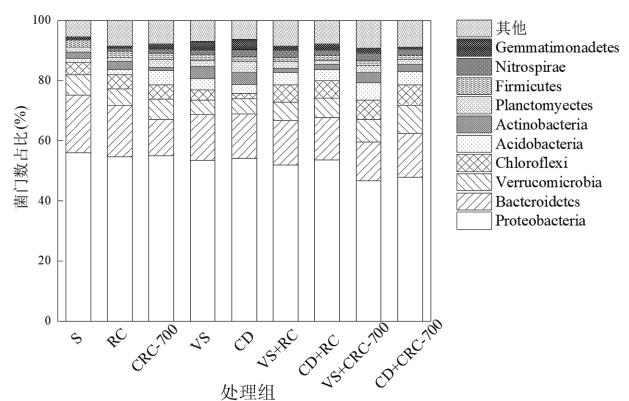


图10 基于相对丰度的门水平沉积微生物群落组成
Fig.10 Community composition of sedimentary microbiota at phylum level based on relative abundance

实验结束后,VS+CRC-700中相比于前期VS高度、生物量和根长的VS增加了24.90cm、6.4g和3.84cm,相比于后期VS分别增加了5.52cm、2.86g

和 1.06cm(图 11).VS+RC 中相比于前期 VS 高度、生物量和根长的 VS 增加了 17.41cm、4.10g 和 3.21cm,相比于后期 VS 高度降低 1.97cm,生物量和根长分别增加 0.76g 和 0.43cm.而 CD+RC 和 CD+CRC-700 对比后期 CD 增长不明显.联合修复 VS+CRC-700、CD+RC 和 CD+CRC-700 都能在一定程度上促进沉水植物生长,VS+CRC-700 中 CRC-700 促进沉水植物生长的效果更好.这可能是 CRC-700 的表面较 RC 更疏松,其更多的孔隙结构更有利于营养物质的附着和微生物的繁殖,利于沉水植物的生长生根,VS+CRC-700 中沉积物 P 含量最低且 VS 长势最好也印证了这一推测.

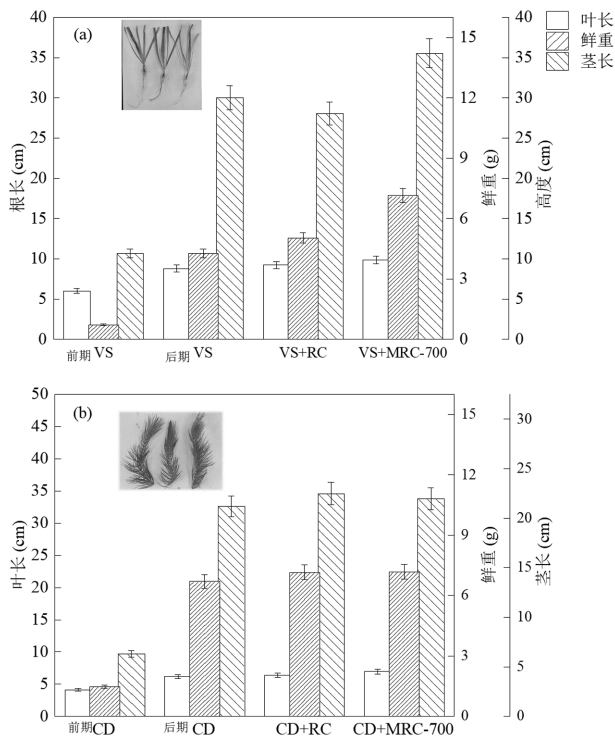


图 11 RC 和 CRC-700 对 VS 和 RC 生长的影响

Fig.11 Effects of RC and CRC-700 on the growth of VS and RC

2.6 VS+CRC-700 应用可行性和展望

VS+CRC-700 系统控制沉积物磷释放示意图,CRC-700 可以在应用初期有效吸附上覆水中 SRP 并持续稳定上覆水 SRP 在一个较低的浓度,稳步降低表层间隙水中的 SRP 并将沉积物中活跃态磷转化为 Ca-P.深层沉积物中的 P 被 VS 根系吸收利用,有效降低上覆水和间隙水 SRP 浓度差.CRC-700 的松散多孔结构和 VS 丰富根系为微生物提供庇护场所^[44],增加微生物丰度,两者协同作用促进 VS 生

长,降低沉积物磷浓度,有效控制沉积物磷释放.

然而,自然水体环境复杂(风浪扰动、沉水动植物活动^[48]、底栖生物活动)再悬浮的沉积物易覆盖吸附材料,致使吸附效果下降和成本升高,虽沉水植物能在一定条件下能降低沉积物再悬浮但作用有限^[49].底栖生物活动对沉积物 P 迁移起着关键影响^[50-51],在一定程度上能降低 P 的释放速率^[52].吸附材料的添加会降低沉积物氧通量,大剂量甚至改变体系 pH 值进而影响底栖生物活动和生境,而合适剂量添加在短期对底栖生物影响不大^[53].因此未来在实际湖泊河流应用时,CRC-700 剂量应当确定更为精确的量,避免高剂量对底栖生物生存造成破坏以及不同扰动带来的吸附材料被覆盖^[54],并通过吸附材料重复添加最小化和环境因素的相互影响.

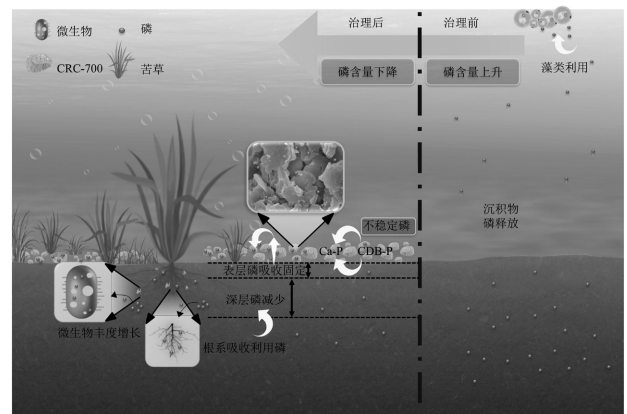


图 12 VS+CRC-700 应用可行示意

Fig.12 Schematic diagram of the application feasibility of VS + CRC - 700

3 结论

3.1 联合处理对沉积物 P 的去除效果均高于单独应用,其中 VS 和 CRC-700 的协同去除 P 作用优于其他处理组.

3.2 VS+CRC-700 对上覆水 SRP、沉积物 Loosely-P、Fe(II)-P、CDB-P 的去除率分别达到 98.3%、79.8%、68.4%和 68.9%.沉积物不稳定 P 向惰性的 Ca-P 转化,Ca-P 比例增加到 62%.

3.3 VS+CRC-700 增加了微生物群落丰度,同时降低了变形杆菌和拟杆菌丰度.这些结果都表明 VS+CRC-700 联合处理降低了沉积物 P 释放风险,可以应用于污染底泥 P 负荷处理.

参考文献:

- [1] Yu J, Ding S, Zhong J, 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.
- [2] Li Y, Wang L, Yan Z, et al. Effectiveness of dredging on internal phosphorus loading in a typical aquacultural lake [J]. *Science of the Total Environment*, 2020,744.
- [3] 吴沛沛,刘劲松,胡晓东,等. 漏湖北部底泥疏浚的生态效应研究 [J]. *水生态学杂志*, 2015,36(2):32-38.
- Wu P P, Liu J S, Hu X D, et al. Ecological effects of dredging on aquatic ecosystem in Northern Gehu Lake [J]. *Journal of Hydroecology*, 2015,36(2):32-38.
- [4] Devesa-Rey R, Fernandez N, Cruz J M, et al. Optimization of the dose of calcium lactate as a new coagulant for the coagulation-flocculation of suspended particles in water [J]. *Desalination*, 2011,280(1-3):63-71.
- [5] Egemose S, Reitzel K, Andersen F O, et al. Chemical lake restoration products: Sediment stability and phosphorus dynamics [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010,44(3):985-991.
- [6] Lewandowski J, Schauser I, Hupfer M. Long term effects of phosphorus precipitations with alum in hypereutrophic Lake Susser See (Germany) [J]. *Water Research*, 2003,37(13):3194-3204.
- [7] Human L R D, Snow G C, Adams J B, et al. The role of submerged macrophytes and macroalgae in nutrient cycling: A budget approach [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2015,154:169-178.
- [8] Luo P, Liu F, Zhang S, et al. Nitrogen removal and recovery from lagoon-pretreated swine wastewater by constructed wetlands under sustainable plant harvesting management [J]. *Bioresource Technology*, 2018,258:247-254.
- [9] Wang L, Sun J, Zheng W, et al. Effects of a Combined Biological Restoration Technology on Nitrogen and Phosphorus Removal from Eutrophic Water [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2018, 27(5):2293-2301.
- [10] 孔祥龙,叶春,李春华,等. 苦草对水-底泥-沉水植物系统中氮素迁移转化的影响 [J]. *中国环境科学*, 2015,35(2):539-549.
- Kong X L, Ye C, Li C H, et al. Effect on nitrogen transfer and migration by *Vallisneria natans*(Lour.) Hara in water-sediment-submerged macrophytes system [J]. *China Environmental Science*, 2015,35(2):539-549.
- [11] Xiong C, Wang D, Tam N F, et al. Enhancement of active thin-layer capping with natural zeolite to simultaneously inhibit nutrient and heavy metal release from sediments [J]. *Ecological Engineering*, 2018,119:64-72.
- [12] Xu D, Ding S, Sun Q, et al. Evaluation of in situ capping with clean soils to control phosphate release from sediments [J]. *Science of the Total Environment*, 2012,438:334-341.
- [13] Yin H, Yang C, Yang P, et al. Contrasting effects and mode of dredging and in situ adsorbent amendment for the control of sediment internal phosphorus loading in eutrophic lakes [J]. *Water Research*, 2021, 189(17):116644.
- [14] Huser B J, Egemose S, Harper H, et al. Longevity and effectiveness of aluminum addition to reduce sediment phosphorus release and restore lake water quality [J]. *Water Research*, 2016,97:122-132.
- [15] Wang C, Liu Z, Zhang Y, et al. Synergistic removal effect of P in sediment of all fractions by combining the modified bentonite granules and submerged macrophyte [J]. *Science of the Total Environment*, 2018,626:458-467.
- [16] Meis S, Spears B M, Maberly S C, et al. Assessing the mode of action of Phoslock® in the control of phosphorus release from the bed sediments in a shallow lake (Loch Flemington, UK) [J]. *Water Research*, 2013,47(13):4460-4473.
- [17] Liu Z, Zhang Y, Yan P, et al. Synergistic control of internal phosphorus loading from eutrophic lake sediment using MMF coupled with submerged macrophytes [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 731:138697.
- [18] Wang Q, Liao Z, Yao D, et al. Phosphorus immobilization in water and sediment using iron-based materials: A review [J]. *Science of the Total Environment*, 2020,767(1):144246.
- [19] Markovic S, Liang A, Watson S B, et al. Biogeochemical mechanisms controlling phosphorus diagenesis and internal loading in a remediated hard water eutrophic embayment [J]. *Chemical Geology*, 2019,514:122-137.
- [20] Khataee A R, Pakdehi S G. Removal of sodium azide from aqueous solution by Fenton-like process using natural laterite as a heterogeneous catalyst: Kinetic modeling based on nonlinear regression analysis [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2014,45(5):2664-2672.
- [21] Dai Y, Wu S, Chang J, et al. Effects of *Ceratophyllum demersum* L. restoration on phosphorus balance at water-sediment interface [J]. *Ecological Engineering*, 2012,44:128-132.
- [22] Gao J, Xiong Z, Zhang J, et al. Phosphorus removal from water of eutrophic Lake Donghu by five submerged macrophytes [J]. *Desalination*, 2009,242(1-3):193-204.
- [23] Ajmal Z, Muhmood A, Usman M, et al. Phosphate removal from aqueous solution using iron oxides: Adsorption, desorption and regeneration characteristics [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018,528:145-155.
- [24] Li Y, Wang L, Chao C, et al. Submerged macrophytes successfully restored a subtropical aquacultural lake by controlling its internal phosphorus loading [J]. *Environmental Pollution*, 2021,268:115949.
- [25] Horppila J, Nurminen L. Effects of submerged macrophytes on sediment resuspension and internal phosphorus loading in Lake Hiidenvesi (southern Finland) [J]. *Water Research*, 2003,37(18):4468-4474.
- [26] Sand-Jensen K, Bruun H H, Baastrup-Spohr L. Decade-long time delays in nutrient and plant species dynamics during eutrophication and re-oligotrophication of Lake Fure 1900-2015 [J]. *Journal of Ecology*, 2017,105(3):690-700.
- [27] Soana E, Naldi M, Bartoli M. Effects of increasing organic matter loads on pore water features of vegetated (*Vallisneria spiralis* L.) and plant-free sediments [J]. *Ecological Engineering*, 2012,47:141-145.
- [28] GB 3838-2002 地表水环境质量标准 [S].
GB 3838-2002 Environmental quality standards for surface water [S].
- [29] Sarikaya Y, Sevinç I, Akinç M. The effect of calcination temperature on some of the adsorptive properties of fine alumina powders obtained by emulsion evaporation technique [J]. *Powder Technology*, 2001,116 (1):109-114.
- [30] Yin H, Ren C, Li W. Introducing hydrate aluminum into porous

- thermally-treated calcium-rich attapulgite to enhance its phosphorus sorption capacity for sediment internal loading management [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018,348:704-712.
- [31] 翁焕新,刘云峰.滨海沉积物和间隙水中的磷研究——以美国墨西哥湾为例 [J]. *环境科学学报*, 1997,17(2):148-153.
- Weng H X, Liu Y F. Research on phosphorus in coastal sediments and interstitial water—A case study of the gulf of Mexico in the United States [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1997,17(2):148-153.
- [32] 胡俊,刘永定,刘剑彤.滇池沉积物间隙水中氮、磷形态及相关性的研究 [J]. *环境科学学报*, 2005,25(10):1391-1396.
- Hu J, Liu Y K, Liu J T. Studying on the form and the relativity of nitrogen and phosphorus in the pore water of sediment in Dianchi Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005,25(10):1391-1396.
- [33] 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,(1):12-15,36.
- Gao L, Yang H, Zhou J M. Research progress on phosphorus release on phosphorus release from lake sediment [J]. *Soils*, 2004,(1):12-15,36.
- [34] 范成新,杨龙元,张路.太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布及相互关系分析 [J]. *湖泊科学*, 2000,(4):359-366.
- Fang C X, Yang L Y, Zhang L. The vertical distributions of nitrogen and phosphorus in the sediment and interstitial water in Taihu lake and their interrelations [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2000,(4):359-366.
- [35] Zhang L, Hong S, He J, et al. Adsorption characteristic studies of phosphorus onto laterite [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2011, 25(1-3):98-105.
- [36] Gu B W, Hong S H, Lee C G, et al. The feasibility of using bentonite, illite, and zeolite as capping materials to stabilize nutrients and interrupt their release from contaminated lake sediments [J]. *Chemosphere*, 2019,219:217-226.
- [37] Barko J W, Gunnison D, Carpenter S R. Sediment interactions with submersed macrophyte growth and community dynamics [J]. *Aquatic Botany*, 1991,41(1-3):41-65.
- [38] Zhou Y Y, Li J Q, Fu Y Q. Effects of submerged macrophytes on kinetics of alkaline phosphatase in Lake Donghu - I. Unfiltered water and sediments [J]. *Water Research*, 2000,34(15):3737-3742.
- [39] Sondergaard M, Bjerring R, Jeppesen E. Persistent internal phosphorus loading during summer in shallow eutrophic lakes [J]. *Hydrobiologia*, 2013,710(1):95-107.
- [40] 章喆,林建伟,詹艳慧,等.赭改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响 [J]. *环境科学*, 2016,37(4):1427-1436.
- Zhang Z, Lin J W, Zhan Y H, et al. Effect of zirconium modified kaolin-based cap on migration and transformation of phosphorus between sediment and overlying water [J]. *Environmental Science*, 2016,37(4):1427-1436.
- [41] Chao C, Wang L, Li Y, et al. Response of sediment and water microbial communities to submerged vegetations restoration in a shallow eutrophic lake [J]. *Science of the Total Environment*, 2021,801:149701.
- [42] Zhang X, Zhen W, Jensen H S, et al. The combined effects of macrophytes (*Vallisneria denseserrulata*) and a lanthanum-modified bentonite on water quality of shallow eutrophic lakes: A mesocosm study [J]. *Environmental Pollution*, 2021,277:116720.
- [43] Li Y, Liu Y, Wang H, et al. In situ remediation mechanism of internal nitrogen and phosphorus regeneration and release in shallow eutrophic lakes by combining multiple remediation techniques [J]. *Water Research*, 2023,229:119394.
- [44] Chen L, Tsui M M P, Lam J C W, et al. Contamination by perfluoroalkyl substances and microbial community structure in Pearl River Delta sediments [J]. *Environmental Pollution*, 2019,245:218-225.
- [45] 刘子森,张义,王川,等.改性膨润土和沉水植物联合作用处理沉积物磷 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(2):10.
- Liu Z S, Zhang Z S, Wang C, et al. Synergistic removal of sediment P by combining the modified bentonite and *Vallisneria spiralis* [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(2):10.
- [46] Huang W, Dong X, Tu C, et al. Response mechanism of sediment endogenous phosphorus release to functional microorganisms and its cyanobacterial growth and disappearance effects [J]. *Science of the Total Environment*, 2024,906:167676.
- [47] De Figueiredo D R, Pereira M J, Moura A, et al. Bacterial community composition over a dry winter in meso- and eutrophic Portuguese water bodies [J]. *Fems Microbiology Ecology*, 2007,59(3):638-650.
- [48] Prakash O, Pushkar P, Mungray A K, et al. Effect of geometrical position of a multi-anode system in power output and nutritional variation in benthic microbial fuel cells [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018,6(1):1558-1568.
- [49] Qin B, Gao G, Zhu G, et al. Lake eutrophication and its ecosystem response [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013,58(9):961-970.
- [50] Li C, Yu H, Tabassum S, et al. Effect of calcium silicate hydrates coupled with *Myriophyllum spicatum* on phosphorus release and immobilization in shallow lake sediment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018,331:462-470.
- [51] Nicholas R, Lukwambe B, Zhao L, et al. Bioturbation of blood clam *Tegillarca granosa* on benthic nutrient fluxes and microbial community in an aquaculture wastewater treatment system [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2019,142:73-82.
- [52] Zhao L, Zheng Y, Nicholas R, et al. Bioturbation by the razor clam *Sinonovacula constricta* affects benthic nutrient fluxes in aquaculture wastewater treatment ecosystems [J]. *Aquaculture Environment Interactions*, 2019,11:87-96.
- [53] Lewandowski J, Hupfer M. Effect of macrozoobenthos on two-dimensional small-scale heterogeneity of pore water phosphorus concentrations in lake sediments: A laboratory study [J]. *Limnology and Oceanography*, 2005,50(4):1106-1118.
- [54] Yin H, Douglas G B, Cai Y, et al. Remediation of internal phosphorus loads with modified clays, influence of fluvial suspended particulate matter and response of the benthic macroinvertebrate community [J]. *Science of the Total Environment*, 2018,610:101-110.
- [55] Egemose S, Reitzel K, Andersen F O, et al. Resuspension-mediated aluminium and phosphorus distribution in lake sediments after aluminium treatment [J]. *Hydrobiologia*, 2013,701(1):79-88.

作者简介: 邹林熹(1999-),男,四川成都人,成都理工大学硕士研究生,主要从事湖泊水库底泥污染污染物释放研究.发表论文 1 篇. 1565302307@qq.com.