

孙健, 杨明, 贺珊珊, 等. 沸石和页岩陶粒对沉积物营养盐释放的抑制效果试验[J]. 净水技术, 2023, 42(2):140–146.

SUN J, YANG M, HE S S, et al. Inhibitive effect test of nutrients release from sediments by zeolite and shale ceramsite[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(2):140–146.

沸石和页岩陶粒对沉积物营养盐释放的抑制效果试验

孙 健, 杨 明, 贺珊珊, 蔡世颜, 刘 琪, 刘向荣*

(中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北武汉 430010)

摘 要 为探讨沸石和页岩陶粒对水体沉积物营养盐释放的抑制效果, 设置了沸石、页岩陶粒覆盖沉积物和未覆盖沉积物试验, 定期监测上覆水中 TP、TN、氨氮、COD_{Cr} 和叶绿素 a(Chl. a) 指标, 并对比分析沉积物中微生物群落。结果表明, 覆盖沸石和页岩陶粒能有效抑制沉积物中 N、P 营养盐向上覆水的释放, 但上覆水中 COD_{Cr} 含量上升。沸石和页岩陶粒主要通过吸附作用抑制沉积物中 P 的释放, 通过基质吸附作用和 *Ornatilinea* 与芽孢杆菌属(*Bacillus*) 微生物的脱氮作用抑制沉积物中 N 的释放, 通过促进纤维菌属(*Levilinea*) 和长绳菌属(*Longilinea*) 厌氧微生物对碳水化合物的代谢作用, 引起上覆水中 COD_{Cr} 含量上升。但沸石和页岩陶粒覆盖不能长期维持上覆水中较低的 N、P 含量, 可考虑与沉水植物联合作用进行生态修复。

关键词 沸石 页岩陶粒 沉积物 营养盐 抑制释放 微生物群落分析

中图分类号: X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2023)02-0140-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.02.018

Inhibitive Effect Test of Nutrients Release from Sediments by Zeolite and Shale Ceramsite

SUN Jian, YANG Ming, HE Shanshan, CAI Shiyan, LIU Qi, LIU Xiangrong*

(Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract To investigate the inhibitive effect of nutrients from sediments by zeolite and shale ceramsite, set up zeolite, shale ceramsite-covered sediment and uncovered sediment tests. TP, TN, ammonia nitrogen, COD_{Cr} and Chl. a were monitored regularly in the overlying water. And microbial communities in sediments were analyzed. Results showed that zeolite and shale ceramsite effectively inhibited the release of N and P from sediment to overlying water, but COD_{Cr} content in the overlying water increased. Zeolite and shale ceramsite inhibited P releasing from sediments mainly through adsorption, inhibited N releasing from sediments mainly by adsorption and denitrification by *Ornatilinea* and *Bacillus*. Zeolite and shale ceramsite promoting the metabolism of carbohydrates by *Levilinea* and *Longilinea* led to COD_{Cr} content increasing in overlying water. However, only covering zeolite and shale ceramsite can not maintain low N and P content in overlying water for a long time, so zeolite and shale ceramsite combined with submerged macrophytes can be considered for ecological restoration.

Keywords zeolite shale ceramsite sediment nutrients inhibitive release microbial community analysis

水体富营养化是一种严重的水质污染现象, 给水生态系统和人类健康等带来许多不利影响^[1-2]。外部污染源和内部污染源是水体富营养化的主要原因。污水、工业排放、农业径流等外部污染源含有大量的营养物质^[3-4], 目前已有许多方法来控制外部营养物进入水体^[5]。内部污染源, 即富集的底泥,

可以向水体释放养分, 使水体恶化^[6-7]。

水体底泥的治理方法有底泥疏浚、底泥覆盖、投加药剂以及水动力控制等措施。其中, 底泥覆盖是将一层或多层材料铺设在污染底泥上部, 通过隔断底泥与上覆水以达到阻止或减弱底泥中污染物释放的目的。在实际应用中, 一般将覆盖材料通过表层倾倒或撒布的方式铺设在底泥上。但底泥覆盖需考虑一些以下条件: (1) 水体控源截污已经实施完成; (2) 底泥中污染物的毒性较低且迁移率较慢; (3) 覆盖材料可就近取材; (4) 静止水体或者流速较缓;

[收稿日期] 2021-09-08

[作者简介] 孙健(1989—), 男, 博士, 研究方向为水体生态修复与污染治理, E-mail: sunjian813@163.com。

[通信作者] 刘向荣, 正高级工程师, E-mail: liuxr211@sina.com。

(5)覆盖后水体现状及将来功能的影响较小。而覆盖材料的选择是该方法的关键,因为覆盖材料既能吸附养分,又能稳定沉积物^[8-9]。笔者前期通过设置动态吸附试验和静态吸附试验研究发现,当沸石和页岩陶粒的组合配比为2:1时,对沉积物营养盐吸收效果较好^[10]。

因此,为进一步模拟沸石和页岩陶粒对水体沉积物营养盐释放的抑制效果,本研究设置沸石和页岩陶粒覆盖沉积物的试验,定期监测上覆水中TP、TN、氨氮、COD_{Cr}和叶绿素a(Chl. a)指标,同时在试验结束时对沉积物和基质进行微生物群落分析,旨在为富营养化水体的治理提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 沸石和页岩陶粒

沸石和页岩陶粒用自来水和蒸馏水冲洗3次,然后105℃烘干2h,过筛网孔径为2~4mm,置于干燥器内备用^[11]。沸石和页岩陶粒的物理性质如表1所示。

表1 沸石和页岩陶粒的物理性质
Tab. 1 Physical Properties of Zeolite and Shale Ceramsite

材料	比表面积/ (cm ² ·g ⁻¹)	孔隙率	密度/ (g·cm ⁻³)	有效 粒径/mm
沸石	9.89×10 ⁴	22.86%	2.45	4.20
页岩陶粒	0.92×10 ⁴	13.02%	1.46	4.28

1.1.2 沉积物

沉积物样品采自武汉黄孝河的表层底泥,采集后沉积物过筛(10目)除去杂质,待用。沉积物相关特征如下:氧化还原电位为229.20mV;pH值为7.14;含水量为162.12%;TP、TN、氨氮、总有机碳质量分数分别为(2.57±0.02)、(1.65±0.04)、(0.16±0.01)、(0.65±0.09)mg/g。

1.2 试验方法

试验在体积为200L的PVC桶中进行,共设置2个试验组,每组3个平行试验,试验周期为84d。

(1)沉积物组(C1):在桶内铺设厚为10cm的底泥,缓缓注入深度为50cm的自来水。

(2)沉积物+沸石和页岩陶粒组(C2):在桶内铺设厚度为10cm的底泥,再铺上厚度为10cm的沸石和页岩陶粒,缓缓注入深度为50cm的自来水。

1.3 样品采集与分析

1.3.1 水体水质

水质样品于每周二上午10:00采样1L,用于分析水体中的TP、TN、氨氮、COD_{Cr}和Chl. a水质指标。TP、TN、氨氮和COD_{Cr}的测定均按照国家环保局标准分析方法。Chl. a的测定利用GF/C滤膜(0.45mm)过滤,滤膜用90%丙酮萃取24h后,再用分光光度计测定。

1.3.2 沉积物和基质微生物群落分析

取各试验组的沉积物和基质,迅速地将离心管(EP管)置于液氮冷冻3~4h,然后转移至温度为-80℃的冰箱中保存待测。沉积物和基质每个样品DNA提取2次,然后混合,获得的DNA于-80℃进行保存。随后进行16S rDNA扩增和Illumina MiSeq高通量测序。测序完成后,通过序列(barcode)区分各样本。

1.4 数据分析

使用SPSS统计软件中的单方差分析(One-way ANOVA)对试验组C1和C2中的TP、TN、氨氮和Chl. a数据进行差异分析,三维ANOVA统计分析(Tukey test)用于TP、TN、氨氮、Chl. a均值的多重比较,显著水平设定为P<0.05。沉积物微生物序列分析如下。

(1)覆盖率

Coverage表示各样品文库的覆盖率。Coverage数值越高表示样本中序列没有被测出的概率就越低,通常用来反映本次测序结果是否具有代表性,计算如式(1)。

$$C = \left(1 - \frac{n_1}{N}\right) \times 100\% \quad (1)$$

其中:C——覆盖率;

n_1 ——只含有一条序列的光转换单位(operation taxonomy units, OTU)数目;

N ——抽样中出现的总序列数目。

(2)微生物群落分布丰度

Chao指数经常被用于评价微生物群落分布丰度,计算如式(2)。

$$S_{\text{Chao1}} = S_{\text{obs}} + \frac{n_1(n_1 - 1)}{2(n_2 + 1)} \quad (2)$$

其中: S_{Chao1} ——估计的OTU数目;

S_{obs} ——实际观测的 OTU 数目;

n_2 ——只含 2 条序列的 OTU 数目。

(3) 微生物群落多样性指数计算

Shannon 指数常被用于评价微生物群落多样性,其值越大,说明多样性越高,计算如式(3)。

$$H_{\text{Shannon}} = - \sum_{i=1}^{S_{\text{obs}}} \frac{N_i}{N} \ln \frac{N_i}{N} \quad (3)$$

其中: H_{Shannon} ——Shannon 指数;

N_i ——第 i 个 OTU 包含的序列数;

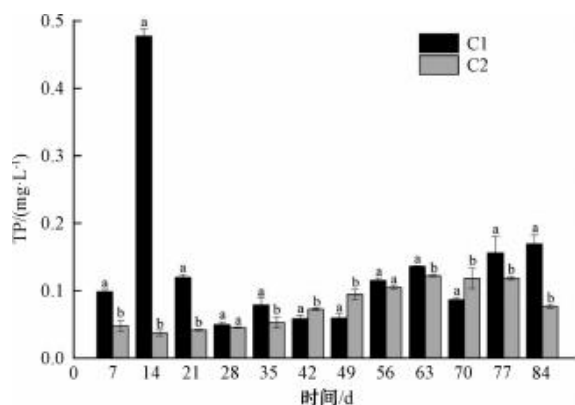
(4) OTU 分类

将多条序列根据序列之间的距离进行聚类,之后再根据序列之间的相似性作为域值分成操作分类。在 97% 的相似水平下 OTU 进行生物信息统计分析。根据 OTU 的聚类结果,获取 OTU 聚类中丰度最高的作为 OTU 代表性序列,然后进行各类的 OTU 分析。同时在大于 5 个样本时,去除只对应一条序列的 OTU。

2 结果

2.1 对 TP 的净化效果

在 84 d 试验周期内,C1 上覆水中 TP 质量浓度为 0.05~0.48 mg/L,C2 上覆水中 TP 质量浓度为 0.04~0.12 mg/L,整体呈逐渐上升趋势。除第 28 d ($P>0.05$) 和第 56 d ($P>0.05$)、第 42 d (C2 高于 C1, $P<0.05$)、第 49 d (C2 高于 C1, $P<0.05$) 和第 70 d (C2 高于 C1, $P<0.05$) 外,C1 上覆水中 TP 含量均显著高于 C2 上覆水中 TP ($P<0.05$) (图 1)。说明覆盖沸石和页岩陶粒能有效抑制沉积物中 TP 向上覆水释放速度。



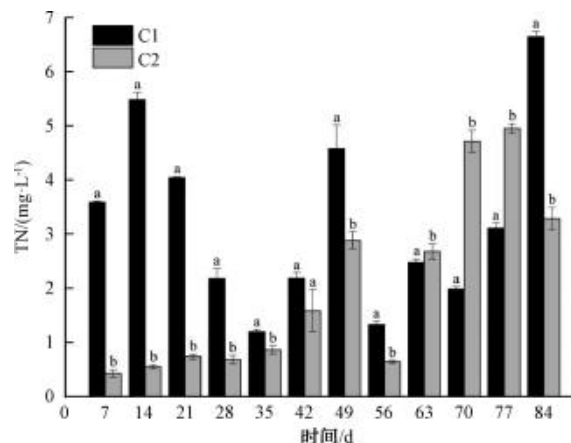
注:a,b 代表在相同时间不同试验组的显著差异 ($P<0.05$), $n=3$ 。

图 1 沸石和页岩陶粒对 TP 的净化效果

Fig. 1 Purification Effect of Zeolite and Shale Ceramsite on TP

2.2 对 TN 的净化效果

试验期间内,C1 上覆水中 TN 质量浓度为 1.19~6.64 mg/L,没有呈现一定变化趋势。C2 上覆水中 TN 质量浓度为 0.43~4.95 mg/L,整体呈上升状态。经 C1 和 C2 对比发现,除第 63~77 d (C1 低于 C2, $P<0.05$) 外,C2 上覆水中 TN 含量均显著低于 C1 上覆水中 TN ($P<0.05$) (图 2)。因此,沸石和页岩陶粒的覆盖能有效缓解沉积物中 TN 释放。



注:a,b 代表在相同时间不同试验组的显著差异 ($P<0.05$), $n=3$ 。

图 2 沸石和页岩陶粒对 TN 的净化效果

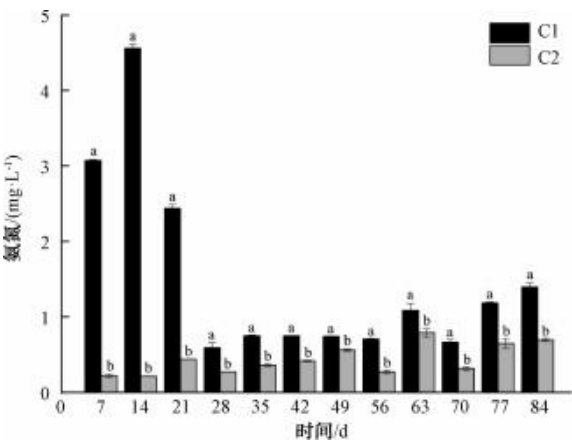
Fig. 2 Purification Effect of Zeolite and Shale Ceramsite on TN

2.3 对氨氮的净化效果

试验期间,C1 上覆水中氨氮质量浓度为 0.59~4.56 mg/L,在前 28 d 内先上升后下降,然后整体呈逐渐上升。C2 上覆水中氨氮质量浓度为 0.21~0.79 mg/L,整体逐渐上升。C1 和 C2 两者相比,C2 上覆水中氨氮含量显著低于 C1 ($P<0.05$) (图 3)。所以,沸石和页岩陶粒能有效缓解沉积物中氨氮向上覆水的释放速度。

2.4 对 COD_{Cr} 的净化效果

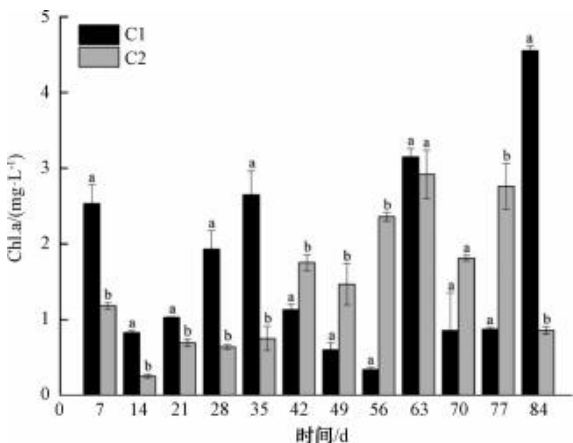
C1 上覆水中 COD_{Cr} 质量浓度为 17.65~129.00 mg/L,随着试验进行呈上升趋势。C2 上覆水中 COD_{Cr} 质量浓度为 12.67~145.05 mg/L,从第 14 d 开始整体呈上升趋势。对比 C1 和 C2 发现,第 14~21 d,C1 上覆水中 COD_{Cr} 含量显著高于 C2 ($P<0.05$);第 28~42 d,C1 和 C2 中上覆水 COD_{Cr} 含量无显著差异 ($P>0.05$);第 49~77 d,C1 上覆水中 COD_{Cr} 含量显著低于 C2 ($P<0.05$) (图 4)。这说明沸石和页岩陶粒覆盖后,上覆水中 COD_{Cr} 含量逐渐上升,且高于未覆盖沸石和页岩陶粒。



注:a,b 代表在相同时间不同试验组的显著差异 ($P < 0.05$), $n = 3$ 。

图 3 沸石和页岩陶粒对氨氮的净化效果

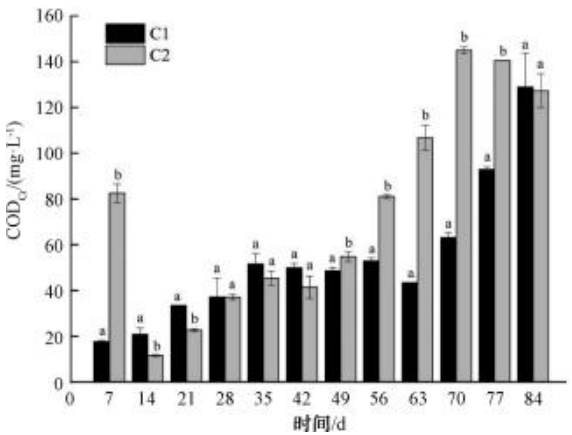
Fig. 3 Purification Effect of Zeolite and Shale Ceramsite on Ammonia Nitrogen



注:a,b 代表在相同时间不同试验组的显著差异 ($P < 0.05$), $n = 3$ 。

图 5 沸石和页岩陶粒对 Chl. a 的净化效果

Fig. 5 Purification Effect of Zeolite and Shale Ceramsite on Chl. a



注:a,b 代表在相同时间不同试验组的显著差异 ($P < 0.05$), $n = 3$ 。

图 4 沸石和页岩陶粒对 COD_{Cr} 的净化效果

Fig. 4 Purification Effect of Zeolite and Shale Ceramsite on COD_{Cr}

2.5 对 Chl. a 的净化效果

试验期间,C1 上覆水中 Chl. a 质量浓度为 0.34~4.55 mg/L,C2 上覆水中 Chl. a 质量浓度为 0.25~2.92 mg/L。C1 和 C2 上覆水 Chl. a 含量变化幅度较大,且二者并没有表现出一定的高低趋势(图 5)。

2.6 对微生物的影响

2.6.1 种群丰度和多样性分析

如表 2 所示,3 个样品总产生 283 133 个有效序列,每个样品都产生了超过 82 000 个序列用于后续分析。在 97%的相似水平下,3 个样品总产生 9 097 个 OTU。每个样品的 OTU 在 2 654~3 321,这说明微生物群落结构复杂。Coverage 指数 $\geq 98.67\%$,说

明每个微生物样品的 OTUs 都具有代表性,可以很好地反映微生物样品信息。通过比较 C1S、C2S 的 Chao1 指数和 Shannon 指数发现二者数值比较接近,说明二者微生物丰富度和微生物多样性相似。C2Z 的 Shannon 指数大于 C1S、C2S,但其 Chao1 指数小于 C1S 和 C2S,说明沸石和页岩陶粒中微生物多样性高于沉积物,而微生物丰富度小于沉积物(表 2)。

表 2 沉积物中微生物群落的丰度和多样性指数

Tab. 2 Richness and Diversity Indices of Microbial Communities in Sediment

样品	序列数	OTU 数	Shannon 指数	Chao1 指数	Coverage 指数
C1S	108 542	3 321	4.95	4 411.69	98.90%
C2S	92 482	3 122	5.06	4 416.46	98.67%
C2Z	82 109	2 654	6.02	3 169.98	99.23%

注:C1S 表示 C1 中的沉积物样品;C2S 表示 C2 中的沉积物样品;C2Z 表示 C2 中的沸石和页岩陶粒样品。

2.6.2 群落差异性分析

以高通量测序数据为基础,通过 Venn 图反映 C1S、C2S、C2Z 中微生物群落结构的差异。C1S、C2S 和 C2Z 共有 OTU 数目分别占各自 14.78%、15.73%、18.50%(图 6)。说明 C1S、C2S 和 C2Z 中各自的微生物组成虽然有一定的相似度,但仍存在一些特异性的微生物类群。

2.6.3 群落组成分析

获得各样品中门和属水平的微生物组成和相对丰度如图 7 所示。

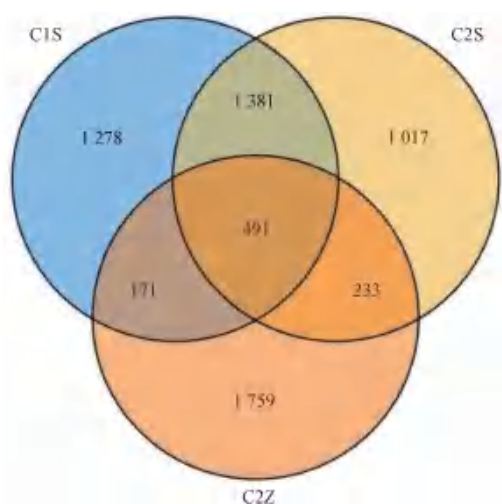


图 6 C1S、C2S 和 C2Z 的 Venn 图

Fig. 6 Venn of C1S, C2S and C2Z

(1) 门水平微生物组成及相对丰度

由图 7(a)可知,C1S、C2S 和 C2Z 这 3 组样品各有 45 种菌门,并且出现的大部分菌门较为相似,但三者的相对丰度不一样。例如,绿弯菌门(Chloroflexi)、变形菌门(Proteobacteria)和厚壁菌门(Firmicutes)在 C1S 中的相对丰度分别为 27.27%、15.68%和 14.71%,低于 C2S (38.11%、17.06%和 19.96%)。但 C1S 中的嗜热丝菌门(Caldiserica)和拟杆菌门(Bacteroidetes)相对丰度分别为 15.78%和 11.17%,高于 C2S 中的 Caldiserica (6.89%)和 Bacteroidetes (4.14%)。C2Z 中的 Proteobacteria、Chloroflexi、放线菌门(Actinobacteria)、浮霉菌门(Planctomycetes)和 Firmicutes 分别为 32.61%、27.88%、6.92%、6.88%和 5.96%。

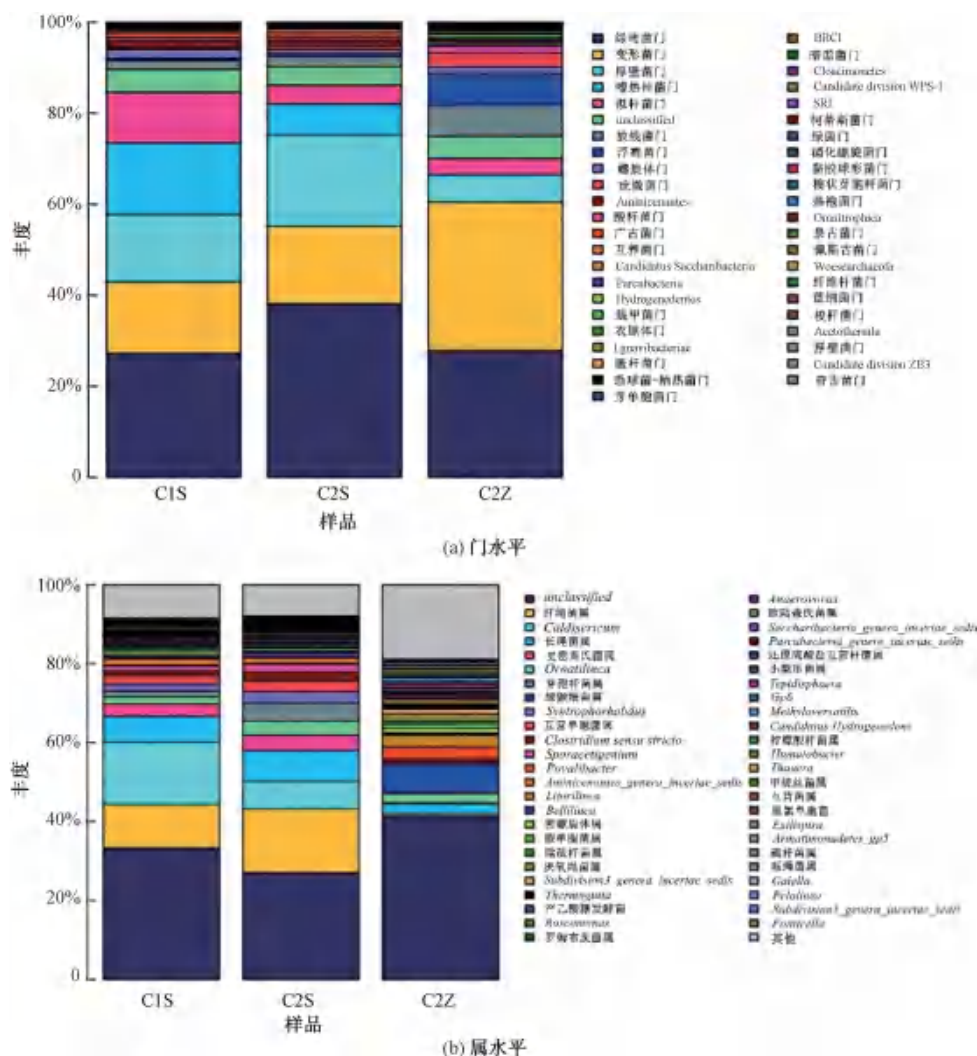


图 7 C1S、C2S 和 C2Z 样本的群落结构分布图

Fig. 7 Community Structure Distribution Map of C1S, C2S and C2Z Samples

(2) 属水平微生物组成及相对丰度

采用高通量测序获得各样品中属水平的微生物组成和相对丰度如图 7(b) 所示。属水平的高通量测序结果表明: C1S 中的优势菌属为 *Caldisericum*、*Levilinea*、*Longilinea*、*史密斯氏菌属* (*Smithella*)、*Ornatilinea*、*芽孢杆菌属* (*Bacillus*), 其相对丰度分别是 15.78%、10.94%、6.54%、3.18%、1.78%、1.51%。C2S 中的优势菌属为 *Caldisericum*、*Levilinea*、*Longilinea*、*Smithella*、*Ornatilinea* 和 *Bacillus*, 其相对丰度分别是 6.89%、16.18%、7.88%、3.93%、3.54% 和 4.57%。通过对比 C1S 和 C2S 发现, 沸石和页岩陶粒覆盖后, C2S 沉积物中 *Caldisericum* 的相对丰度降低, *Levilinea*、*Longilinea*、*Ornatilinea* 和 *Bacillus* 的相对丰度升高。

3 讨论

本研究模拟沸石和页岩陶粒覆盖对黑臭水体沉积物营养盐释放的影响, 并分析沉积物中微生物群落的变化。

在沉积物上覆盖沸石和页岩陶粒后, 总体上, 上覆水中 TP、TN 和氨氮含量显著降低, 但 COD_{Cr} 和 Chl. a 无影响。沸石(又称为吸氨石)能有效吸附水溶液中的氨氮; 页岩陶粒对水溶液中的 P 也表现出较强的吸附效果。二者按一定比例混合覆盖后, 通过物理吸收和非特异性化学吸收作用, 对 N、P 起到较好的吸附效果^[10]。

沸石和页岩陶粒除了能通过吸附作用抑制沉积物 N、P 向上覆水释放, 覆盖后还可能改变沉积物中微生物群落分布而影响生物脱氮除磷。通过对沉积物和沸石和页岩陶粒进行高通量测序, 结果显示沸石和页岩陶粒覆盖的沉积物中 *Caldisericum* 的相对丰度降低, *Levilinea*、*Longilinea*、*Ornatilinea* 和 *Bacillus* 的相对丰度升高。

Caldisericum 为水解酸化菌属, 可降解杂环化合物, 目前的研究主要集中在石油和含酚等废水降解上^[12-13]。另外, *Caldisericum* 属于嗜热丝菌属, 是一种异养的厌氧高温丝状菌^[14]。因此, 通过覆盖沸石和页岩陶粒降低了沉积物的温度, 这可能是沸石和页岩陶粒覆盖的沉积物中 *Caldisericum* 相对丰度降低的主要原因。*Levilinea* 和 *Longilinea* 属于厌氧菌属, 覆盖沸石和页岩陶粒后可阻碍水体中溶解氧向沉积物中传输, 从而促进这 2 种菌属的生长繁殖。

同时, *Levilinea* 和 *Longilinea* 能代谢多种碳水化合物, 生成有机酸等物质, 释放进入上覆水^[15]。这就导致 C2 中上覆水 COD_{Cr} 含量较高。*Ornatilinea* 属于反硝化菌属, 对硝酸盐和亚硝酸盐等具有较强的反硝化脱氮功能^[16-17]。覆盖沸石和页岩陶粒后, 沉积物形成了一定的缺氧/厌氧微环境, 促进 *Ornatilinea* 的繁殖生长, 增加反硝化脱氮效率。*Bacillus* 属于异养硝化和好氧反硝化菌^[18], 具有脱氮功能。所以, 覆盖沸石和页岩陶粒后沉积物中 *Ornatilinea* 和 *Bacillus* 相对丰度的升高, 增加沉积物中的脱氮效率, 减少 N 营养盐向上覆水的释放。

然而, 沸石和页岩陶粒覆盖沉积物后, 上覆水中 TP 和 TN 有时会出现高于未覆盖沸石和页岩陶粒的现象, 分析原因可能与沸石和页岩陶粒基质中 N、P 营养盐的释放有关, 说明只采取生态基质覆盖并不能达到稳定效果, 建议采取生态基质与沉水植物对沉积物的联合生态修复措施。

4 结论

(1) 沸石和页岩陶粒的覆盖能有效抑制沉积物中 N、P 营养盐向上覆水的释放, 但会导致上覆水中 COD_{Cr} 含量上升, 对上覆水 Chl. a 无影响。

(2) 沸石和页岩陶粒抑制沉积物中 P 的释放主要是基质吸附作用; 抑制沉积物中 N 的释放主要是基质吸附作用和 *Ornatilinea*、*Bacillus* 微生物的脱氮作用。

(3) 沸石和页岩陶粒引起上覆水中 COD_{Cr} 含量上升原因主要是 *Levilinea* 和 *Longilinea* 厌氧微生物的代谢作用。

(4) 沸石和页岩陶粒的覆盖偶尔会引起上覆水 N、P 营养盐含量上升, 建议生态基质与沉水植物联合作用进行生态修复。

参考文献

- [1] DITHMER L, NIELSEN U G, LÜRLING M, et al. Responses in sediment phosphorus and lanthanum concentrations and composition across 10 lakes following applications of lanthanum modified bentonite[J]. Water Research, 2016, 97: 101-110. DOI: 10.1016/j.watres.2016.02.011.
- [2] MOAL M L, GASCUEL-ODOUX C, MÉNESGUEN A, et al. Eutrophication: A new wine in an old bottle? [J]. Science of the Total Environment, 2019, 651: 1-11. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.139.
- [3] FUNES A, MARTÍNEZ F J, ÁLVAREZ-MANZANEDA I, et al.

- Determining major factors controlling phosphorus removal by promising adsorbents used for lake restoration: A linear mixed model approach[J]. *Water Research*, 2018, 141: 377–386. DOI: 10.1016/j.watres.2018.05.029.
- [4] 章智勇, 司马勤, 聂俊英, 等. 海绵城市建设中的黑臭水体长效治理案例分析[J]. *净水技术*, 2021, 40(9): 113–118. ZHANG Z Y, SIMA Q, NIE J Y, et al. Case analysis of long-term remediation for black and odorous water body in sponge city construction[J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(9): 113–118.
- [5] CONLEY D J, PAERL H W, HOWARTH R W, et al. Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus [J]. *Science*, 2009, 323: 1014–1015. DOI: 10.1126/science.1167755.
- [6] WANG L J, PAN G, SHI W Q, et al. Manipulating nutrient limitation using modified local soils: A case study at Lake Taihu (China)[J]. *Water Research*, 2016, 101: 25–35. DOI: 10.1016/j.watres.2016.05.055.
- [7] 孙健, 曾磊, 贺珊珊, 等. 国内城市黑臭水体污染源治理技术研究进展[J]. *净水技术*, 2020, 39(2): 77–80, 97. SUN J, ZENG L, HE S S, et al. Research progress on internal pollution control technology for urban black and odorous water body at home[J]. *Water Purification Technology*, 2020, 39(2): 77–80, 97.
- [8] ZHANG C, ZHU M Y, ZENG G M, et al. Active capping technology: A new environmental remediation of contaminated sediment[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23: 4370–4386. DOI: 10.1007/s11356-016-6076-8.
- [9] ZHANG Y, WANG C, HE F, et al. In-situ adsorption-biological combined technology treating sediment phosphorus in all fractions [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 29725. DOI: 10.1038/srep29725.
- [10] SUN J, YANG M, ZENG L, et al. Adsorption performance on sediment nutrients by different proportions of zeolite and shale ceramicsite (ZSC)[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2020, 29(3): 2365–2372. DOI:10.15244/pjoes/111238.
- [11] ZHAO J H, ZHAO Y Q, XU Z H, et al. Highway runoff treatment by hybrid adsorptive media-baffled subsurface flow constructed wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 91: 231–239. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.02.020.
- [12] 陈春茂, 刘知远, 吴百春, 等. 泥炭土强化厌氧生物处理含酚废水研究[J]. *工业水处理*, 2019, 39(12): 19–23, 54. CHEN C M, LIU Z Y, WU B C, et al. Improving the anaerobic treatment of phenolic wastewater by using peat soil[J]. *Industrial Water Treatment*, 2019, 39(12): 19–23, 54.
- [13] CHEN C M, LIANG J H, YOZA B A, et al. Evaluation of an up-flow anaerobic sludge bed (UASB) reactor containing diatomite and maifanite for the improved treatment of petroleum wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 243: 620–627. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.06.171.
- [14] 杨梓亨, 宋卫锋, 程亚杰, 等. ABR 反应器处理苯胺黑药废水及其微生物种群结构[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(9): 1448–1454. YANG Z H, SONG W F, CHENG Y J, et al. Treatment of aniline aerofloat wastewater using anaerobic baffled reactor and analysis of activated sludge community [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(9): 1448–1454.
- [15] 李慧星, 杜风光, 薛刚. 高通量测序研究酒精废水治理中厌氧活性污泥的微生物菌群[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(11): 4112–4119. LI H X, DU F G, XUE G. Microbial community analysis of anaerobic activated sludge in the process of alcohol wastewater treatment using high throughput sequencing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(11): 4112–4119.
- [16] VANDEWALLE J L, GOETZ G W, HUSE S M, et al. *Acinetobacter*, *Aeromonas* and *Trichococcus* populations dominate the microbial community within urban sewer infrastructure[J]. *Environmental Microbiology*, 2012, 14(9): 2538–2552. DOI: 10.1111/j.1492-2920.2012.02757.x.
- [17] 张燕伟, 程方, 李奕辉, 等. 低碳氮比下 MABR 同步硝化反硝化过程的构建[J]. *工业水处理*, 2020, 40(5): 70–76. ZHANG Y W, CHENG F, LI Y H, et al. Construction of simultaneous nitrification and denitrification process in membrane-aerated biofilm reactor under low C/N ratio [J]. *Industrial Water Treatment*, 2020, 40(5): 70–76.
- [18] ZHAO B, HE Y L, ZHANG X F. Nitrogen removal capability through simultaneous heterotrophic nitrification and aerobic denitrification by *Bacillus* sp. LY [J]. *Environmental Technology*, 2010, 31(4): 409–416. DOI: 10.1080/09593330903508922.