

城镇水系统研究与应用

孙健, 蔡世颜, 李卿, 等. 沸石和页岩陶粒与穗花狐尾藻对水体生态修复效果[J]. 净水技术, 2025, 44(3): 144–152, 212.

SUN J, CAI S Y, LI Q, et al. Effect of zeolite and shale ceramsite combined with *Myriophyllum spicatum* L. on ecological remediation of water bodies [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(3): 144–152, 212.

沸石和页岩陶粒与穗花狐尾藻对水体生态修复效果

孙 健, 蔡世颜, 李 卿, 刘 琦, 张 婷, 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 【目的】 针对富营养化水体沉积物向水体释放营养盐, 不利于沉水植物恢复的现象, 研究通过底泥覆盖与沉水植物联合措施对水体生态进行修复。【方法】 研究设置了沸石和页岩陶粒覆盖以及种植穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum* L.)不同试验组合, 定期监测上覆水中TP、TN、氨氮、COD_{Cr}和叶绿素a指标, 并探讨沸石和页岩陶粒覆盖对沉水植物生理特征的影响及沉积物中微生物群落的变化。【结果】 沸石和页岩陶粒与穗花狐尾藻联合作用有效控制上覆水中TP、TN、氨氮、COD_{Cr}和叶绿素a含量; 沸石和页岩陶粒覆盖能有效缓解沉积物对沉水植物的环境胁迫, 促进穗花狐尾藻的生物量、株高和叶绿素含量的显著增加, 抗坏血酸、丙二醛和蛋白质含量显著降低; 覆盖沸石和页岩陶粒后增加了沉积物中长绳菌属(*Longilinea*)、史密斯氏菌属(*Smithella*)和< i>Ornatilinea的相对丰度, 降低了沉积物中*Caldisericum*的相对丰度, 增强沉积物中微生物的脱氮功能。【结论】 沸石和页岩陶粒覆盖后种植穗花狐尾藻可降低水体营养盐含量, 促进沉水植物生长, 增加了沉积物中脱氮微生物菌属丰度, 有利于水生态恢复, 可为管理人员利用沸石和页岩陶粒和穗花狐尾藻进行生态修复提供相关技术支持。

关键词 沉积物 生态修复 沸石 页岩陶粒 穗花狐尾藻 水体水质 植物特征 微生物群落

中图分类号: X52 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)03-0144-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.03.017

Effect of Zeolite and Shale Ceramsite Combined with *Myriophyllum spicatum* L. on Ecological Remediation of Water Bodies

SUN Jian, CAI Shiyan, LI Qin, ZHANG Ting, LIU Xiangrong *

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

Abstract [Objective] Enriched sediment can release nutrients to water and is not conducive to the ecological restoration of submerged macrophytes, the water body ecology is restored through a combined measure of sediment coverage and submerged macrophytes in this study. [Methods] Sediment capping with zeolite and shale ceramsite and *Myriophyllum spicatum* L. planting was set to research the water quality, characteristics of plant and microbial community of sediment. [Results] Covering zeolite and shale ceramsite with *Myriophyllum spicatum* L. could effectively remain the low content of TP, TN, ammonia nitrogen, COD_{Cr} and chlorophyll a in overlying water. Covering zeolite and shale ceramsite can effectively alleviate the environmental stress of sediment on *Myriophyllum spicatum* L. in the performance of biomass, height and chlorophyll a of *Myriophyllum spicatum* L. increasing, the content of ascorbic acid, malondialdehyde and protein decreasing. Covering zeolite and shale ceramsite increased the relative abundance of *Levilinea*, *Smithella* and *Ornatilinea* and decreasing the relative abundance of *Ornatilinea*, which may promote waste anaerobic digestion of sediment. [Conclusion] Covering zeolite and shale ceramsite with *Myriophyllum spicatum* L. reduces the nutrients of

[收稿日期] 2023-03-07

[基金项目] 2022年湖北省重点研发计划项目: 长江流域湖泊内源污染控制与湖泊底泥利用技术研究(2022BCA066)

[作者简介] 孙健(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事人工湿地和水体生态修复设计及科研工作, E-mail: sunjian813@163.com。

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

water bodies, promotes the growth of submerged macrophytes, and increases the abundance of denitrifying microbial genera in sediments, which is beneficial to ecological remediation. And it is helpful to offer managers useful information to select zeolite and shale ceramsite and *Myriophyllum spicatum* L. for ecological restoration.

Keywords sediment ecological remediation zeolite shale ceramsite *Myriophyllum spicatum* L. water quality of water body plant characteristics microflora

进入水体的外来污染物经过积累、沉淀和固化作用与水体生物死后沉降共同形成了高污染负荷的沉积物,即水体污染内源。水体污染内源可向水体释放营养物质,是造成淡水富营养化的主要因素之一^[1]。目前,内部污染源的治理方法主要有底泥疏浚^[2-3]、底泥覆盖^[4-5]、底泥曝气^[6]、投加化学药剂^[7]、植物修复^[8-9]等。

底泥覆盖通过在水体沉积物上面覆盖吸附材料,达到水体污染内源缓释或者释放被抑制的目的。其中,吸附材料的选择十分重要^[10-11]。许多吸附材料的研究主要集中在对氮、磷污染物。其中,沸石和页岩陶粒分别对氮、磷有较好的吸附效果^[12-14]。沸石由二氧化硅、铝和氧组成,其主要特征是由大量孔道和孔洞组成的系统结构^[15]。沸石是广泛存在于陆地环境中的低成本矿物。页岩陶粒作为传统的环境材料,具有化学吸附、沉淀或生物吸附等功能,钙、铁、铝等金属量较高^[16-17]。在之前的研究^[18]中发现,沸石和页岩陶粒的质量混合比为2:1时,能通过物理吸附和非特异性化学吸收作用有效地吸附沉积物中的氮、磷。同时建议结合沸石和页岩陶粒以及其他生态方法可能是一种更有利于生态修复的方法。

沉水植物作为一种典型的生态修复方法,具有保持生态系统的完整性和稳定性,降低水体浑浊度,增加水生态系统多样性的功能而得到广泛的工程应用^[8,19-20]。因此,在控源截污的前提下,恢复沉水植物被认为是维持水体清澈状态的有效措施^[21]。然而,受污染沉积物不利于沉水植物的生长繁殖。所以,采取底泥覆盖措施后建立沉水植物群落不仅可以降低受污染沉积物向水体释放氮、磷的风险,而且能为沉水植物提供良好的生长环境。

穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum* L.),小二仙草科,狐尾藻属植物。穗花狐尾藻的适应能力强,在各种水体中均能发育良好,不仅能从水体和底泥中吸收营养盐,而且还能分泌化感物质,抑制藻类生长,是沉水植被修复技术常见的先锋种

之一^[22]。

因此,首次设置了穗花狐尾藻与沸石和页岩陶粒原位修复富营养化沉积物的试验,定期监测上覆水水质。由于目前国内研究沸石和页岩陶粒对沉水植物生长影响的报道较少,研究探讨了沸石和页岩陶粒对沉水植物生理的影响,并对沉积物微生物群落进行了评价。

1 材料与方法

1.1 试验材料

(1) 沉积物

在湖北省武汉市黄孝河(114°28' E, 30°62' N)采集水体沉积物,取0~10 cm的表层底泥过10目筛子,待用。相关特征如表1所示。

表1 沉积物的物化特征

Tab. 1 Physical and Chemical Properties of River Sediments

项目	数值
含水量	265.23%
氧化还原电位/mV	217.2
pH值	7.03
总有机碳/(mg·g ⁻¹)	18.59
TP/(mg·L ⁻¹)	4.76
TN/(mg·L ⁻¹)	4.97
氨氮/(mg·L ⁻¹)	0.12

(2) 沸石和页岩陶粒

选取规格为2~4 mm的沸石和页岩陶粒,用自来水冲洗3次,随后用等体积的超纯水清洗3次,(105±5)℃下烘干,按质量混合比为2:1混合均匀后待用。

(3) 穗花狐尾藻

作为沉水植物的典型物种,穗花狐尾藻采自于湖北省武汉市东湖(30°53' N, 114°38' E)。选取长势良好的植株,并用自来水冲洗植株根部的泥沙和表面的附着物,待用。

1.2 试验设计

共设置4个试验组:沉积物组(C1)、沉积物+

沸石和页岩陶粒组(C2)、沉积物+穗花狐尾藻组(CM1)、沉积物+沸石和页岩陶粒+穗花狐尾藻组(CM2),每组3个平行,在体积为200 L的聚氯乙烯(PVC)桶中进行(图1)。C1内铺10 cm厚底泥,缓缓注入160 L的自来水;与C1相比,C2在底泥上铺10 cm厚的沸石和页岩陶粒(2:1),CM1均匀种植50株穗花狐尾藻(鲜重为180 g,株长为25 cm);与C2相比,CM2均匀种植50株穗花狐尾藻(鲜重为180 g,株长为25 cm)。试验周期为84 d。

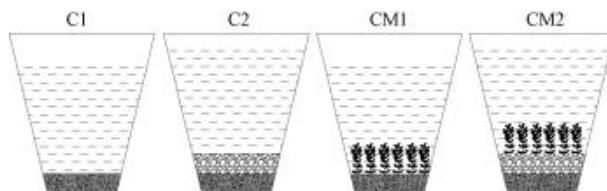


图1 试验设计原理

Fig. 1 Principles of the Experiment Design

2 样品采集与分析

2.1 水体水质

每周二上午10:00采集水样1 L,水样采集后,及时补充1 L自来水。水样中TP、TN、氨氮、COD_{Cr}和叶绿素a的测定参照文献^[23]。

2.2 植物形态与生理特征

采用电子秤和标尺测定穗花狐尾藻的生物量和株高等形态特征。采用考马斯亮蓝G-250染色法测定叶片蛋白质含量^[16]、高效液相色谱法测定丙二醛(MDA)含量^[24]、5%三氯乙酸萃取分光光度法测定抗坏血酸(AsA)的含量^[16]。

2.3 沉积物微生物群落

微生物群落与营养盐的含量有较大关系,沸石和页岩陶粒与穗花狐尾藻的生态修复效果能通过沉积物中微生物群落结构变化得到有效反应。取各试验组的沉积物,液氮冷冻3~4 h后转于-80 ℃环境中保存待测。按照Wang等^[25]描述的方法对每个样本进行脱氧核糖核酸(DNA)提取、聚合酶链式反应(PCR)和高通量16S rRNA测序。

2.4 数据分析

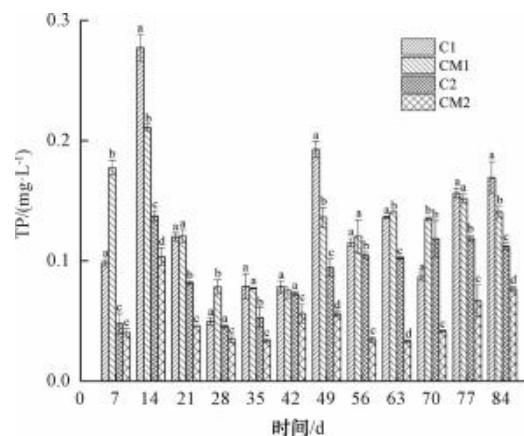
试验组C1、C2、CM1和CM2中的TP、TN、氨氮和叶绿素a的差异分析及TP、TN、氨氮和叶绿素a均值的多重比较均用SPSS统计软件进行^[23],试验组CM1和CM2中的植物形态与生理特征分析方法同水体水质。

3 结果

3.1 水体水质

(1) TP

试验期间,CM2的上覆水TP质量浓度为0.03~0.10 mg/L,CM1的上覆水TP质量浓度为0.08~0.21 mg/L,且CM2的上覆水TP质量浓度均显著低于CM1($P<0.05$)。C1的上覆水TP质量浓度为0.08~0.28 mg/L,C2的上覆水TP质量浓度为0.04~0.14 mg/L,与CM2相比,二者上覆水TP含量表现出长期较高的现象(图2)。说明通过覆盖沸石和页岩陶粒与种植穗花狐尾藻的措施能有效维持上覆水中TP含量处于较低范围。



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

图2 穗花狐尾藻与沸石和页岩陶粒对TP的净化效果

Fig. 2 Purification of *Myriophyllum spicatum* L. with Zeolite and Shale Ceramsite for TP Removal

(2) TN

C1中上覆水TN质量浓度为1.19~4.48 mg/L,CM1中上覆水TN质量浓度为1.24~3.27 mg/L,C2中上覆水TN质量浓度为0.43~2.95 mg/L,均显著高于CM2中上覆水TN质量浓度(0.25~2.00 mg/L, $P<0.05$)(图3)。因此,采取覆盖沸石和页岩陶粒与种植穗花狐尾藻的措施能有效保证上覆水TN含量较低。

(3) 氨氮

对沉积物实施沸石和页岩陶粒覆盖与种植穗花狐尾藻后,CM2上覆水氨氮质量浓度为0.16~0.56 mg/L。与C1、CM1和C2对比,除第28 d外,CM2中氨氮含量呈显著性差异(图4)。由此可见,沸石和页岩陶粒与穗花狐尾藻联合作用降低上覆水中氨氮含量。

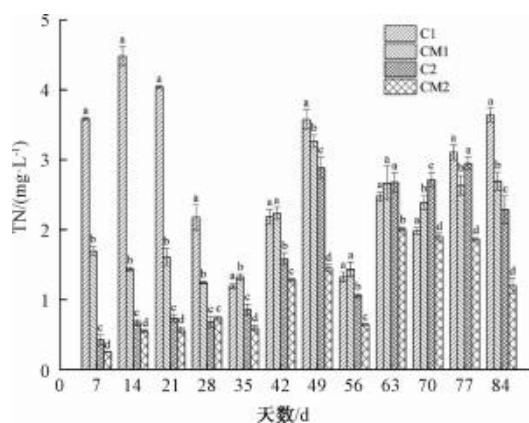


图3 穗花狐尾藻与沸石和页岩陶粒对TN的净化效果

Fig. 3 Purification of *Myriophyllum spicatum* L. with Zeolite and Shale Ceramsite for TN Removal

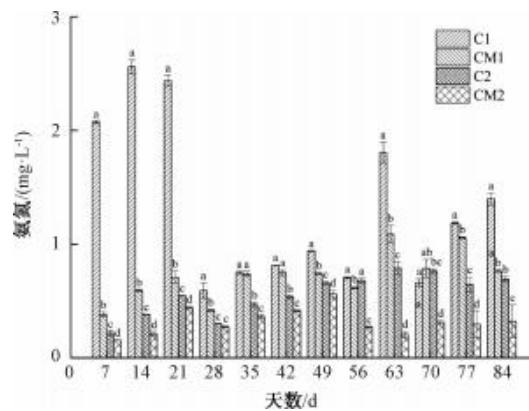


图4 穗花狐尾藻与沸石和页岩陶粒对氨氮的净化效果

Fig. 4 Purification of *Myriophyllum spicatum* L., Zeolite and Shale Ceramsite for Ammonia Nitrogen Removal

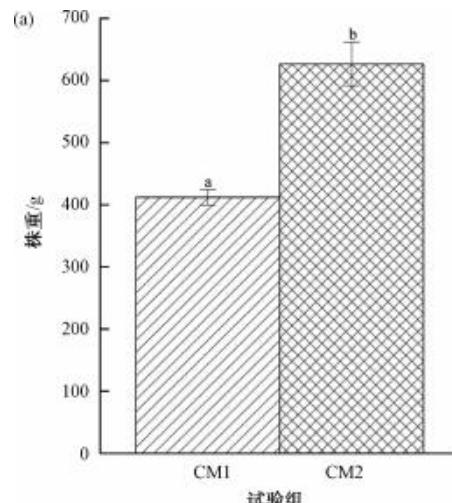


图6 穗花狐尾藻的生物量和株高

Fig. 6 Biomass and Height of *Myriophyllum spicatum* L. at the End of Experiment

能是沸石和页岩陶粒能够为穗花狐尾藻提供良好的生长条件^[26]。

(4) COD_{Cr}

CM2 中上覆水 COD_{Cr} 质量浓度为 11.13 ~ 36.28 mg/L, 呈现先上升后稳定的趋势, 且在 21 ~ 84 d 时, 其含量显著低于 C1、CM1 和 C2 ($P < 0.05$) (图 5)。因此, 沸石和页岩陶粒与穗花狐尾藻联合作用可维持上覆水中低 COD_{Cr} 的状态。

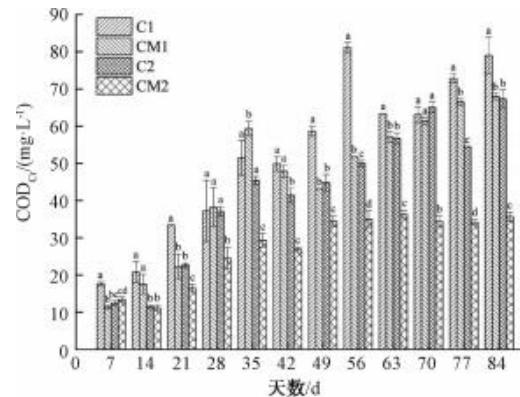


图5 穗花狐尾藻与沸石和页岩陶粒对 COD_{Cr} 的净化效果

Fig. 5 Purification of *Myriophyllum spicatum* L. and with Zeolite and Shale Ceramsite for COD_{Cr} Removal

3.2 植物形态和生理特征

(1) 生物量和株高

试验结束时, CM1 和 CM2 中穗花狐尾藻的生物量分别是 412 g 和 627 g, 株高分别是 49 cm 和 75 cm, 均存在显著性差异 (生物量为 $P < 0.05$; 株高为 $P < 0.05$) (图 6)。这说明覆盖沸石和页岩陶粒促进了穗花狐尾藻的生长, 而产生这一现象的原因可

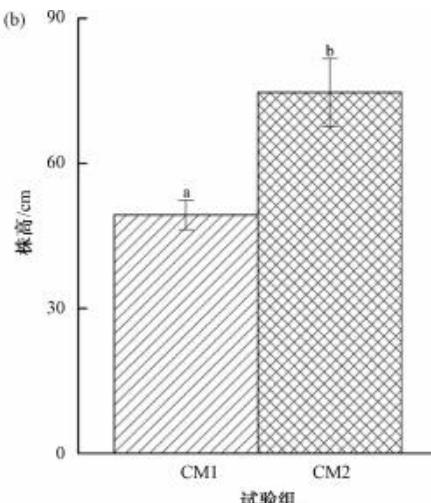
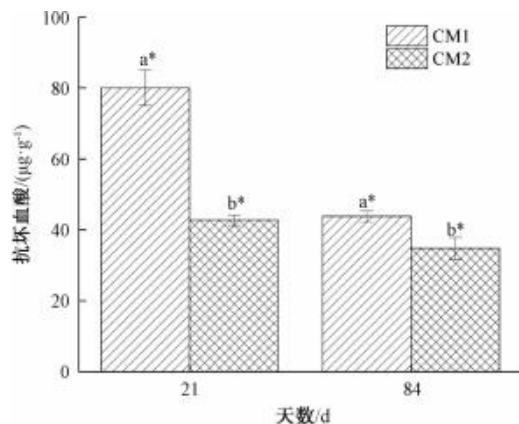


图6 穗花狐尾藻的生物量和株高

(2) AsA

覆盖沸石和页岩陶粒后, 穗花狐尾藻中 AsA

质量分数在第 21 d 和第 84 d 分别为 42.76 $\mu\text{g/g}$ 和 34.79 $\mu\text{g/g}$, 均显著低于未覆盖沸石和页岩陶粒中穗花狐尾藻的 AsaA 含量 ($P<0.05$)。说明通过覆盖沸石和页岩陶粒能有效降低穗花狐尾藻中 AsaA 含量。同时, 随着时间的延续, CM1 和 CM2 中 AsaA 含量均呈显著降低趋势 ($P<0.05$) (图 7)。



注:a、b 代表在相同时间不同试验组植物 AsaA 的显著差异 ($P<0.05$), * 代表相同试验组植物在不同时问中 AsaA 的显著差异 ($P<0.05$), $n=3$ 。

图 7 穗花狐尾藻的 AsaA 含量

Fig. 7 Ascorbic Acid Content of *Myriophyllum spicatum* L.

(3) MDA

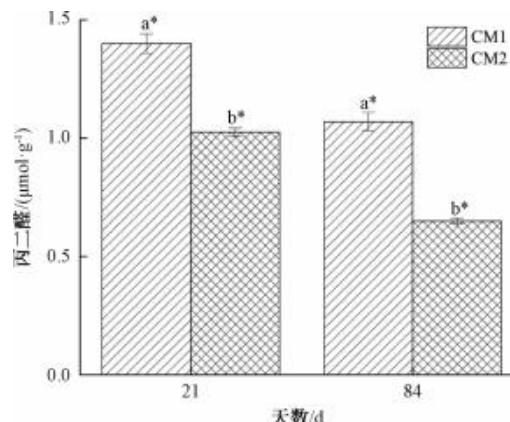
覆盖沸石和页岩陶粒后, 穗花狐尾藻 (CM1) 中 MDA 在第 21 d 和第 84 d 分别为 1.02 $\mu\text{mol/g}$ 和 0.65 $\mu\text{mol/g}$, 与未覆盖沸石和页岩陶粒相比, 得到显著性降低 ($P<0.05$)。随着试验的进行, CM1 和 CM2 中 MDA 含量均呈显著降低趋势 ($P<0.05$) (图 8)。

(4) 蛋白质

覆盖沸石和页岩陶粒后, CM2 中穗花狐尾藻蛋白质质量分数 (第 21 d 为 0.06 mg/g; 第 84 d 为 0.04 mg/g) 均显著低于未覆盖沸石和页岩陶粒 (CM1) (第 21 d 为 0.42 mg/g; 第 84 d 为 0.07 mg/g) ($P<0.05$)。无论是否采取覆盖沸石和页岩陶粒措施, 穗花狐尾藻中蛋白质含量在试验结束时都存在显著性降低 (图 9)。

(5) 叶绿素

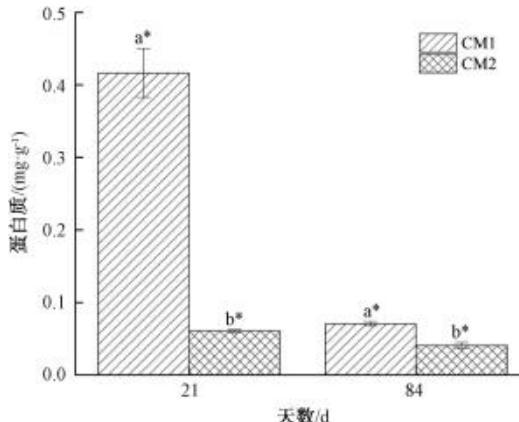
覆盖沸石和页岩陶粒对沉水植物叶绿素的影响主要从叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素展开分析。在第 21 d, 覆盖沸石和页岩陶粒 (CM2) 叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素质量分数分别为 54.25、21.50 mg/g 和 12.80 mg/g, 显著高于未覆



注:a、b 代表在相同时间不同试验组植物 MDA 的显著差异 ($P<0.05$), * 代表相同试验组植物在不同时问中 MDA 的显著差异 ($P<0.05$)。

图 8 穗花狐尾藻的 MDA 含量

Fig. 8 MDA Content of *Myriophyllum spicatum* L.



注:a、b 代表在相同时间不同试验组植物蛋白质的显著差异 ($P<0.05$), * 代表相同试验组植物在不同时问中蛋白质的显著差异 ($P<0.05$)。

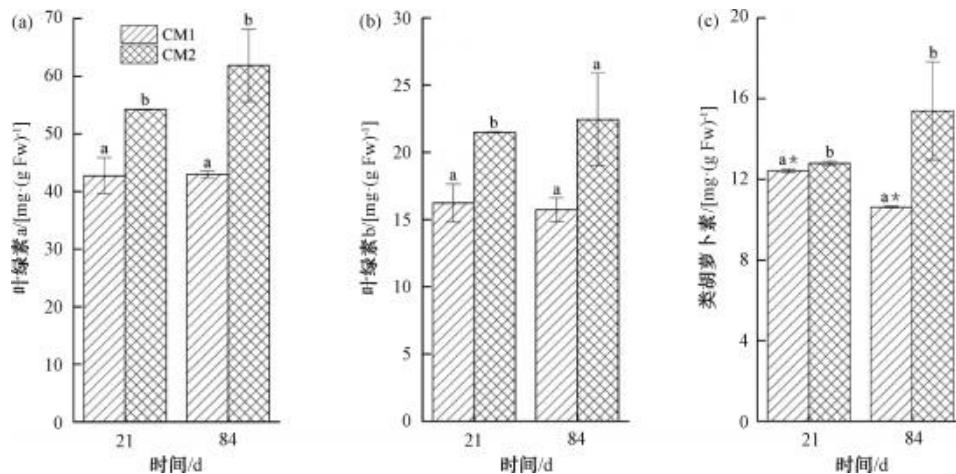
图 9 穗花狐尾藻的蛋白质含量

Fig. 9 Protein Content of *Myriophyllum spicatum* L.

盖沸石和页岩陶粒 (CM1) (叶绿素 a 为 42.72 mg/g, $P<0.05$; 叶绿素 b 为 16.24 mg/g, $P<0.05$; 胡萝卜素为 12.43 mg/g, $P<0.05$)。在第 84 d, CM2 中叶绿素 a (61.87 mg/g)、叶绿素 b (22.45 mg/g) 和类胡萝卜素 (15.40 mg/g) 质量分数均显著高于 CM1 (叶绿素 a 为 42.99 mg/g, $P<0.05$; 叶绿素 b 为 15.74 mg/g, $P<0.05$; 类胡萝卜素为 10.62 mg/g, $P<0.05$)。试验期间, CM1 叶绿素 a 和叶绿素 b 含量没有表现出显著性差异 (叶绿素 a 为 $P>0.05$; 叶绿素 b 为 $P>0.05$), 类胡萝卜素含量则显著性下降 ($P<0.05$)。CM2 叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量均有所上升, 但无显著性

差异(叶绿素 a 为 $P>0.05$, 叶绿素 b 为 $P>0.05$,

类胡萝卜素为 $P>0.05$) (图 10)。



注:a、b 代表在相同时间不同试验组植物叶绿素的显著差异 ($P<0.05$), * 代表相同试验组植物在不同时间中叶绿素的显著差异 ($P<0.05$)。

图 10 穗花狐尾藻的叶绿素含量

Fig. 10 Chlorophyll Content of *Myriophyllum spicatum* L.

3.3 沉积物微生物

1) 门水平微生物组成及相对丰度

由图 11(a)可知, CM1S、CM2S 和 CM2Z 各有 45 种菌门, 虽然三者的大部分菌门相似, 但相对丰度有所差别。CM1S 和 CM2S 中均有绿弯菌门 (Chloroflexi)、变形菌门 (Proteobacteria)、厚壁菌门 (Firmicutes)、嗜热丝菌门 (Caldisericia) 和拟杆菌门 (Bacteroidetes), 相对丰度分别为 39.27%、17.66%、14.80%、7.62% 和 4.35% 及 44.67%、18.44%、15.77%、3.58% 和 3.56%。CM2Z 中的 Chloroflexi、Proteobacteria、Firmicutes、Bacteroidetes 和浮霉菌门 (Planctomycetes) 分别为 16.54%、22.25%、13.47%、10.10%、7.29%。

2) 属水平微生物组成及相对丰度

CM1S 中的优势菌属为 *Caldisericum*、纤绳菌属 (*Levilinea*)、长绳菌属 (*Longilinea*)、史密斯氏菌属 (*Smithella*) 和 *Ornatilinea*, 其相对丰度分别是 7.62%、16.35%、8.20%、4.82% 和 3.18%。CM2S 中的优势菌属为 *Caldisericum*、*Levilinea*、*Longilinea*、*Smithella* 和 *Ornatilinea*, 其相对丰度分别是 3.58%、16.45%、9.91%、5.60% 和 5.90%。比较 CM1S 和 CM2S 发现, CM2S 中 *Caldisericum* 的相对丰度降低, *Longilinea*、*Smithella* 和 *Ornatilinea* 的相对丰度升高。CM2Z 中的优势菌属为 *Longilinea*、*Terrimonas*, 其相对丰度分别是 3.04% 和 3.24% [图 11(b)]。

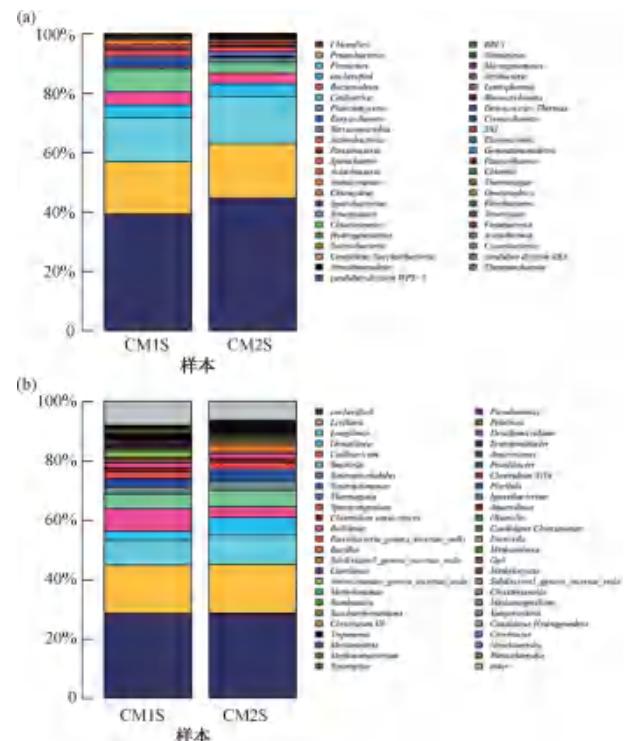


图 11 CM1S、CM2S 和 CM2Z 样本在(a)门;
(b)属水平上群落结构分布

Fig. 11 Community Structure Distribution at (a) Phylum Level; (b) Genus Level from CM1S, CM2S and CM2Z Samples

4 讨论

4.1 净化效果分析

覆盖沸石和页岩陶粒与穗花狐尾藻能有效维持

上覆水中 TP、TN、氨氮和 COD_{Cr} 含量处于较低范围。表明沸石和页岩陶粒从沉积物中吸附营养物质,减缓沉积物中的营养物质向水中释放。这一结论与孙健等^[23]和刘磐等^[27]研究一致,且穗花狐尾藻可对营养物质的利用进一步削减水体中的营养物^[28]。

4.2 植物生理特征分析

AsA 在植物细胞对氧化胁迫的抵抗、细胞分裂和伸长、植物细胞氧化还原平衡的调节、酶活性调节等发挥着重要作用^[29]。本研究中,沸石和页岩陶粒覆盖后种植的穗花狐尾藻中 AsA 含量显著降低,这是由于 AsA 一般与植物的抗逆性呈正相关^[30-31],沸石和页岩陶粒覆盖后为沉水植物生长提供了较好的生长环境,导致植物体内 AsA 含量降低。

MDA 主要引起膜脂质过氧化,破坏细胞膜的结构和渗透率,从而影响一系列的生理生化反应^[16,32]。MDA 能有效反映植物遭受逆境伤害的程度,并且移动范围内的 MDA 含量与受伤害程度呈正相关^[33]。本研究中沸石和页岩陶粒覆盖能有效降低穗花狐尾藻中 MDA 含量,说明沸石和页岩陶粒覆盖能缓解植物受胁迫压力程度。

在逆境条件下,植物通常积累大量的细胞内活性蛋白以提升耐受性^[34-35]。本研究中未覆盖沸石和页岩陶粒种植的穗花狐尾藻中蛋白质含量显著升高,加速了植物体内可溶性蛋白质的合成,这可能是植物为了减少细胞的渗透势通过蛋白的生成而做出的对环境胁迫的响应。

叶绿素对植物完成光合作用发挥着至关重要的作用,植物体内的叶绿素含量在受到环境胁迫时出现下降趋势^[36-38]。本研究中,覆盖沸石和页岩陶粒后种植穗花狐尾藻的叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素均显著高于未覆盖沸石和页岩陶粒的穗花狐尾藻。这说明沉积物会对植物体内叶绿素合成产生阻碍效应,通过覆盖沸石和页岩陶粒利于植物体内叶绿素的合成。

另外,随着试验的进行,穗花狐尾藻中 AsA、MDA 和蛋白质含量均呈降低趋势,说明植物在生长过程中会逐渐适应环境,抗逆性降低。

4.3 微生物群落分析

覆盖沸石和页岩陶粒后,种植穗花狐尾藻的沉积物中 *Caldisericum* 的相对丰度降低, *Longilinea*、

Smithella 和 *Ornatilinea* 的相对丰度升高。

Caldisericum 是一种典型的水解酸化菌属,在石油和含酚等废水降解方面得到较多研究^[39-40]。同时, *Caldisericum* 喜高温厌氧环境^[41]。因此,沸石和页岩陶粒覆盖后,通过隔绝作用降低了沉积物的温度,这可能导致沉积物中 *Caldisericum* 相对丰度降低。

Longilinea 属于厌氧菌属,沸石和页岩陶粒覆盖后削减了水中溶解氧向沉积物的传输速度和传输量,不利于该菌属的生长繁殖。同时,袁雅姝等^[42]通过研究发现,啤酒废水厌氧处理阶段的微生物, *Longilinea* 为系统中的细菌优势菌属,并且废水的 COD_{Cr} 去除率超过 70%。这就说明覆盖沸石和页岩陶粒并种植穗花狐尾藻后,沉积物中 *Longilinea* 相对丰度的升高能有效去除 COD_{Cr}。

Ornatilinea 属于反硝化菌属,具有较强的脱氮功能^[43-44]。覆盖沸石和页岩陶粒并种植穗花狐尾藻后,促进了 *Ornatilinea* 的繁殖生长,增加反硝化脱氮效率,使 TN 含量降低。Sun 等^[45]及王霖等^[46]研究提出 *Smithella* 的出现与硝酸盐反硝化过程有关。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 *Smithella* 的繁殖生长,使脱氮效率增大。这一结论与文献^[47-48]中的结论“*Ornatilinea*、*Smithella* 增加了废水的厌氧脱氮效率”相似。

因此,沸石和页岩陶粒与穗花狐尾藻联合作用可促进沉积物中具有代谢碳水化合物功能和脱氮功能的菌群,削减沉积物中相关的营养盐,达到减少向上覆水释放营养盐的目的。

5 结论

(1) 沸石和页岩陶粒与穗花狐尾藻联合作用有效控制上覆水中 TP、TN、氨氮、COD_{Cr} 和叶绿素 a 含量。

(2) 沸石和页岩陶粒覆盖能有效缓解沉积物对沉水植物的环境胁迫,穗花狐尾藻的生物量、株高和叶绿素含量均显著增加,植物体内 AsA、MDA 和蛋白质含量均显著降低。且植物在生长过程中会逐渐适应环境,抗逆性降低,植物体内 AsA、MDA 和蛋白质含量均呈降低趋势。

(3) 沸石和页岩陶粒覆盖与种植穗花狐尾藻可引起沉积物中 *Caldisericum* 的相对丰度降低,

Longilinea、*Smithella* 和 *Ornatilinea* 的相对丰度升高。

参考文献

- [1] 刘海, 赵国红. 霍邱县城湖泊沉积物营养盐分布及污染评价 [J]. 环境科学, 2023, 44(5): 2583–2591.
- LIU H, ZHAO G H. Distibution and pollution assesment of nutrients in the surtiace sediments of Lakein Huoqiu County [J]. Environmental Science, 2023, 44(5): 2583–2591.
- [2] CHEN M S, CUI J Z, LIN J, et al. Successful control of internal phosphorus loading after sediment dredging for 6 years: Afield assessment using high-resolution sampling techniques [J]. Science of the Total Environment, 2018, 616/617: 927–936. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.227.
- [3] 张建华, 殷鹏, 张雷, 等. 底泥疏浚对太湖内源及底栖生物恢复的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(2): 828–838.
- ZHANG J H, YIN P, ZHANG L, et al. Effects of sediment dredging on the reduction in sediment internal loading of lake Taihu and the self-recovery ability of benthic organism [J]. Environmental Science, 2023, 44(2): 828–838.
- [4] 孙健, 曾磊, 贺珊珊, 等. 国内城市黑臭水体内源污染治理技术研究进展[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.
- [5] LABIANCA C, GISI S D, TODARO F, et al. A review of the in-situ capping amendments and modeling approaches for the remediation of contaminated marine sediments[J]. Science of the Total Environment, 2022, 806: 151257. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151257.
- [6] 杨兆华, 何连生, 姜登岭, 等. 黑臭水体曝气净化技术研究进展[J]. 水处理技术, 2017, 43(10): 49–53.
- YANG Z H, HE L S, JIANG D L, et al. Research progress of aeration purification technology for black and odorous water body [J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(10): 49–53.
- [7] 薄涛, 季民. 内源污染控制技术研究进展[J]. 生态环境学报, 2017, 26(3): 514–521.
- BO T, JI M. The advance of control techniques for internal pollution[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26 (3): 514–521.
- [8] HAN J L, YIN Y, XU D, et al. Growth inhibition and oxidative damage of *Microcystis aeruginosa* induced by aqueous extract of different submerged macrophytes[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28: 53224–53238. DOI: 10.1007/s11356-021-14459-4.
- [9] WANG H, ZHANG X L, SHAN H, et al. Biodiversity buffers the impact of eutrophication on ecosystem functioning of submerged macrophytes on the Yunnan-Guizhou Plateau, Southwest China [J]. Environmental Pollution, 2022, 314: 120210. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.120210.
- [10] GAO M R, SUN Q, WANG J H, et al. Investigation of the combined use of capping and oxidizing agents in the immobilization of arsenic in sediments[J]. Science of the Total Environment, 2021, 782: 146930. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146930.
- [11] ZHU B L, LI S W, LIN C Y, et al. The effect of secondary capping on the control of phosphorus release from sediment by activated thin-layer capping with Al-PIA [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28: 18062 – 18069. DOI: 10.1007/s11356-020-11828-3.
- [12] ELRYS A S, EL-MAATI M F A, ABDEL-HAMED E M W, et al. Mitigate nitrate contamination in potato tubers and increase nitrogen recovery by combining dicyandiamide, moringa oil and zeolite with nitrogen fertilizer [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 209: 111839. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.111839.
- [13] WANG C X, REN D Z, HARLE G, et al. Ammonia removal in selective catalytic oxidation: Influence of catalyst structure on the nitrogen selectivity[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 416: 125782. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125782.
- [14] ZHANG Q, YANG Y Q, CHEN F R, et al. Effects of hydraulic loading rate and substrate on ammonium removal in tidal flow constructed wetlands treating black and odorous water bodies[J]. Bioresource Technology, 2021, 321: 124468. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124468.
- [15] AMEN T W M, ELJAMAL O, KHALIL A M E, et al. Biochemical methane potential enhancement of domestic sludge digestion by adding pristine iron nanoparticles and iron nanoparticles coated zeolite compositions [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2017, 5: 5002. DOI: 10.1016/j.jece.2017.09.030.
- [16] LIN Q W, HE F, MA J M, et al. Impacts of residual aluminum from aluminate flocculant on the morphological and physiological characteristics of *Vallisneria natans* and *Hydrilla verticillata*[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 145: 266–273. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.07.037.
- [17] WANG H X, SUN J T, XU J L, et al. Study on clogging mechanisms of constructed wetlands from the perspective of wastewater electrical conductivity change under different substrate conditions [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 292: 112813. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112813.
- [18] SUN J, YANG M, ZENG L, et al. Adsorption performance on sediment nutrients by different proportions of zeolite and shale ceramicsite (ZSC) [J]. Polish of Journal Environmental Studies, 2020, 29(3): 2365–2372.
- [19] BAI G L, ZHANG Y, YAN P, et al. Spatial and seasonal variation of water parameters, sediment properties, and submerged macrophytes after ecological restoration in a long-term

- (6 year) study in Hangzhou West Lake in China: Submerged macrophyte distribution influenced by environmental variables [J]. Water Research, 2020, 186: 116379. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116379.
- [20] YU G, HUANG S Z, LUO X Z, et al. Single and combined toxicity effects of nanoplastics and bisphenol F on submerged the macrophyte *Hydrilla verticillata* [J]. Science of the Total Environment, 2020, 703: 152564. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152564.
- [21] LI Y, WANG L G, CHAO C X, et al. Submerged macrophytes successfully restored a subtropical aquacultural lake by controlling its internal phosphorus loading [J]. Environmental Pollution, 2021, 268: 115949. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115949.
- [22] 张忠海, 杨桐, 王昊, 等. 洱海四种沉水植物对弱光环境的适应性比较[J]. 湖泊科学, 2021, 33(4): 1196–1208.
ZHANG Z H, YANG T, WANG H, et al. Comparative study on the adaptability of four submerged macrophytes to low light environment in Lake Erhai[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(4): 1196–1208.
- [23] 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.
- [24] SUN J, WANG L, MA L, et al. Determinants of submerged macrophytes palatability to grass carp *Ctenopharyngodon idellus* [J]. Ecological Indicators, 2018, 85: 657–663. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.11.023.
- [25] WANG C, LIU S Y, ZHANG Y, et al. Bacterial communities and their predicted functions explain the sediment nitrogen changes along with submerged macrophyte restoration [J]. Microbial Ecology, 2018, 76(3): 625–636.
- [26] LIU Y L, HAN F, BAI G L, et al. The promotion effects of silicate mineral maifanite on the growth of submerged macrophytes *Hydrilla verticillata* [J]. Environmental Pollution, 2020, 267: 115380. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115380.
- [27] 刘磐, 刘永军, 刘兴社, 等. 天然沸石对高浓度 NH_4^+ 吸附机理研究[J]. 工业水处理, 2023, 43(2): 68–75.
LIU P, LIU Y J, LIU X S, et al. Study on adsorption mechanism of natural zeolite to high concentration ammonium [J]. Industrial Water Treatment, 2023, 43(2): 68–75.
- [28] 徐盼盼, 何培民, 何文辉. 人工沉床对富营养化河道净化效果及水体微生物群落的影响[J]. 生态学杂志, 2023, 42(10): 2410–2418.
XU P P, HE P M, HE W H. Effects of constructed submerged plant bed on purification effect of eutrophic river and microbial community in water body [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(10): 2410–2418.
- [29] 陈坤明, 宫海军, 王锁民. 植物抗坏血酸的生物合成、转运及其生物学功能[J]. 西北植物学报, 2004, 24(2): 329–336.
CHEN K M, GONG H J, WANG S M. Biosynthesis, transport and function of ascorbate in plants [J]. Acta Botanica Borealioccidentalia Sinica, 2004, 24(2): 329–336.
- [30] HUANG M, XU Q, DENG X X. l-Ascorbic acid metabolism during fruit development in an ascorbate-rich fruit crop chestnut rose (*Rosa roxburghii* Tratt) [J]. Journal of Plant Physiology, 2014, 171(14): 1205–1216.
- [31] 俞乐, 刘拥海, 袁伟超, 等. 植物抗坏血酸积累及其分子机制的研究进展[J]. 植物学报, 2016, 51(3): 396–410.
YU L, LIU Y H, YUAN W C, et al. Recent advances in the study of accumulation of ascorbic acid and its molecular mechanism in plants [J]. Bulletin of Botany Bull Bot, 2016, 51(3): 396–410.
- [32] 张义, 刘云利, 刘子森, 等. 植物生长调节剂的研究计应用进展[J]. 水生生物学报, 2021, 45(3): 700–708.
ZHANG Y, LIU Y L, LIU Z S, et al. The research and application progress of plant growth regulators [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2021, 45(3): 700–708.
- [33] 赵凤斌, 王丽卿, 季高华. 盐胁迫对3种沉水植物生物学指标及叶片中丙二醛含量的影响[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(10): 40–44.
ZHAO F B, WANG L Q, JI G H. Effects of NaCl stress on plant biology indicators and MDA content of 3 submerged plants [J]. Environmental Pollution & Control, 2012, 34(10): 40–44.
- [34] 马建敏, 靳同霞, 成水平, 等. Hg^{2+} 、 Cd^{2+} 及其复合胁迫对苦草的毒害[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(6): 78–81.
MA J M, JIN T X, CHENG S P, et al. Stress of Hg^{2+} and Cd^{2+} on *Vallisneria natans* [J]. Environmental Science and Technology, 2008, 31(6): 78–81.
- [35] 饶本强, 张列宁, 吴沛沛, 等. 集球藻对盐胁迫的生理适应及细胞结构变化[J]. 水生生物学报, 2012, 36(2): 329–338.
RAO B Q, ZHANG L Y, WU P P, et al. Changes on cellular structures and physiological adaptation of *Palmelloccoccus* sp. subjected to salt stress [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2012, 36(2): 329–338.
- [36] 刘文竹, 蓝于倩, 骆梦, 等. 6种沉水植物对盐胁迫的生理响应及耐盐性评价[J]. 中国农学通报, 2019, 35(12): 54–62.
LIU W Z, LAN Y Q, LUO M, et al. 6 submerged plants: The physiological response to salt stress and salt tolerance evaluation [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(12): 54–62.
- [37] 简敏菲, 汪斯琛, 余厚平, 等. Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 胁迫对黑藻 (*Hydrilla verticillata*) 的生长及光合荧光特性的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(6): 1719–1727.

(下转第 212 页)

2023.

State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, National Standardization Commission of the People's Republic of China. Standard test methods for drinking water-Part 8 Organic indicators: GB/T 5750.8—2023 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.

- [21] United States. Environmental Protection Agency Office of Water Office of Science and Technology Engineering and Analysis

Division. Method 1694: pharmaceuticals and personal care products in water, soil, sediment, and biosolids by HPLC/MS/MS [S]. Washington DC, 2001.

- [22] 刘玉学,王拯,李彭,等. 我国污水处理厂中典型抗生素的分布及处理研究[J]. 中国给水排水,2023,5(39):23-30.
LIU Y X, WANG Z, LI P, et al. Study on the distribution and treatment of typical antibiotics in sewage treatment plants in China [J]. China Water & Wastewater, 2023,5(39): 23-30.

(上接第 152 页)

JIAN M F, WANG S T, YU H P, et al. Influence of Cd²⁺ or Cu²⁺ stress on the growth and photosynthetic fluorescence characteristics of *Hydrilla verticillata* [J]. Acta Ecological Sinica, 2016, 36(6): 1719-1727.

- [38] 林海,殷文慧,董颖博,等. 沉水植物对逆境胁迫的响应研究进展[J]. 环境科技, 2019, 32(1): 63-68.

LIN H, YIN W H, DONG Y B, et al. Advances in response of submerged macrophytes to stress[J]. Environmental Science and Technology, 2019, 32(1): 63-68.

- [39] CHEN C, LIANG J, YOZA BA, 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.

- [40] 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.
CHEN C M, LIU Z Y, BAI B C, et al. Improving the anaerobic treatment of phenolic wastewater by using peat soil[J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(12): 19-23.

- [41] 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.

- [42] 袁雅妹,张丽伟,杨佳蓉,等. UASB 处理低磷啤酒废水的微生物群落特性[J]. 中国给水排水, 2022, 38(11): 98-103.
YUAN Y S, ZHANG L W, YANG J R, et al. Microbial community characteristics of UASB for low-phosphorus brewery wastewater treatment[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38

(11): 98-103.

- [43] VANDEWALLE J L, GOETZ G W, HUSW 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.

- [44] 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.

- [45] SUN W, CUPPLES A M. Diversity of five anaerobic toluene-degrading microbial communities investigated using stable isotope probing[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2012, 78(4): 972-980.

- [46] 王霖,种云霄,余光伟,等. 黑臭底泥硝酸钙原位氧化的温度影响及微生物群落结构全过程分析[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(6): 1187-1195.
WANG L, ZHONG Y X, YU G W, et al. Temperature effect on and microbial community structure dynamics during in-situ oxidation of black and odorous sediment by calcium nitrate[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34 (6): 1187-1195.

- [47] SUN M C, ZHANG Z H, LÜ M, et al. Enhancing anaerobic digestion performance of synthetic brewery wastewater with direct voltage[J]. Bioresource Technology, 2020, 315: 123764. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123764.

- [48] HE Q C, DASI E A, CHENG Z, et al. Wood and sulfur-based cyclic denitrification filters for treatment of saline wastewaters [J]. Bioresource Technology, 2021, 328: 124848. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.124848.