



文章栏目：环境生物技术

DOI 10.12030/j.cjee.202211010 中图分类号 X52 文献标识码 A

陈妍汐, 查泽宇, 毛鑫羽, 等. 底泥-苦草系统对景观水体氮磷的去除效果及其中微生物群落的结构变化[J]. 环境工程学报, 2023, 17(7): 2391-2401. [CHEN Yanxi, ZHA Zeyu, MAO Xinyu, et al. Nitrogen and phosphorus removal effect of sediment-*Vallisneria natans* system on landscape water and changes of microbial community structure[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(7): 2391-2401.]

底泥-苦草系统对景观水体氮磷的去除效果及其 中微生物群落的结构变化

陈妍汐, 查泽宇, 毛鑫羽, 王迪, 李振轮[✉]

西南大学资源环境学院, 重庆 400715

摘要 底泥-沉水植物-微生物系统在景观水体氮磷消减过程中有关键作用。为缓解底泥氮磷释放压力并探究底泥改造材料的选择与氮磷去除效果之间的联系, 选用石灰石、白云石和蓬莱镇组紫色母岩作为改造材料, 构建水-底泥-苦草系统, 结合水体元素质量浓度和微生物群落结构进行分析。结果表明, 底泥改造联合苦草 (sediment modification combined with *Vallisneria natans*, SMVS) 对上覆水体氮、磷的去除效果相较于未改造处理显著提高 ($P < 0.05$), 蓬莱镇紫色母岩组处理效果最好, 对总磷、总氮的去除率分别达到 87.06%、80.96%。上覆水悬浮态颗粒物中微生物群落结构发生改变, 在门分类水平上, Actinobacteriota、Bacteroidota 丰度在不同改造处理中存在显著差异 ($P < 0.05$); 在属分类水平上, *norank_f_norank_o_Chloroplast*、*Mycobacterium* 为优势菌属, *Mycobacterium* 在不同改造处理中存在显著差异 ($P < 0.05$)。冗余分析结果表明 Ca、Mg 是驱动上覆水氮磷营养盐降低的主要元素。蓬莱镇组紫色母岩作为底泥改造材料对氮、磷的去除效果优于石灰石和白云石, 这与向上覆水中释放微量元素含量不同, 进而改变了微生物群落结构有关。本研究结果可为景观水体污染底泥的治理提供参考。

关键词 底泥改造; 景观水体; 氮磷去除; 微生物群落

景观水体尤其是城市景观水体大多为静态、流动性较差的封闭式缓流水体, 具有水域面积小、水环境容量小、自净能力差、易受污染等特点, 往往面临风险较高的水质恶化等问题^[1-3]。底泥氮磷营养盐的释放是造成水体内部污染的重要因素, 控制景观水体及沉积物内部污染物负荷已成为景观水体治理的关键。

原位处理技术和异位处理技术在景观水体底泥处理中运用广泛。物理方法比如底泥疏浚是最直接、有效的异位内源污染治理技术, 可快速将受污染的沉积物从水体中清除, 增加水体容量、改善水质情况; 但其后续底泥处理量大、运输困难, 工艺流程复杂且资源化利用有限, 在时间空间上具有很大限制, 成本高且不易操控^[4], 还存在破坏水底生态系统平衡, 易造成二次污染等风险。投加化学试剂 (如铁铝盐、过氧化钙、锁磷剂等) 是常见的原位化学方法, 能紧急修复污染水质, 但是有增加水体毒性的可能性^[5-7]。底泥覆盖是常见的原位物理处理技术, 国外已有将覆盖技术成功应用于治理受污水体的案例^[8-10], 我国学者也开展相关研究。在近年研究中, 天然矿物由于具有价格低廉、来源较广等优点, 被广泛应用于实际污染底泥的治理中^[11], 如方解石、沸石、石

收稿日期: 2022-11-02; 录用日期: 2023-03-22

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0404705)

第一作者: 陈妍汐 (2000—), 女, 学士, E-mail: 1439783899@qq.com; ✉通信作者: 李振轮 (1968—), 男, 博士, 教授, E-mail: lizhlun4740@sina.com

灰石、白云石、伊利石、麦饭石等。这些材料应用于覆盖底泥中,对抑制氮、磷释放效果明显,清洁土壤比如红壤也由于良好的絮凝吸附性能、分布较广等优点被逐渐用于水体治理中^[12]。学者普遍认为,底泥中存在着大量的可生物利用的营养物质,这些营养物质可被生物通过生命代谢活动进行吸附、降解、转化,从而促进其生长^[13-14],污染底泥资源化在水生态处理中有良好的运用前景。沉水植物可利用底泥中的N、P营养盐,还可通过影响微生物的代谢来影响营养物质的循环,在稳定生态系统和净化水体方面有特殊作用。

针对水体污染程度、地理位置等情况,选用处理效果好且经济效益高的底泥改造材料很有必要。紫色母岩是一种自然沉积岩,在西南地区广泛分布,矿物成分较砾石复杂,过去的研究大多集中在紫色母岩风化物理颗粒变化和破碎成土^[15-16]、土壤营养肥力^[17]等反面。近年来,对紫色母岩的研究逐渐深入到了其吸附性能方面。黄雪娇等^[18]发现使用重庆地区常见的蓬莱镇组、沙溪庙组、飞仙关组和遂宁组紫色母岩作基质均能有效降低水体氮磷及有机物含量,其中蓬莱镇组效果最佳。石灰石(主要成分CaCO₃)是人工湿地的常用的天然矿物基质,对水体污染物有很好的去除作用^[19]。白云石(主要成分CaMg(CO₃)₂)与石灰石结构相似,被应用于水体治理中,是低成本的除磷材料^[20]。

微生物是水生态环境中重要的组成部分,在氮、磷营养盐消减过程中发挥着重要作用^[21-22],水环境也会影响微生物群落结构或丰度,了解微生物在水体氮磷变化中的分布特征、生态功能和作用等对水环境修复有重要意义。过去许多研究多集中在改造材料提高底泥吸附性能或者对沉水植物的生理生态影响上^[23-25],而结合水环境物化性质变化与微生物群落结构变化的研究较少。为此,本研究选取蓬莱镇紫色母岩、石灰石、白云石作为底泥改造材料,通过阶段性的水质监测分析不同改造材料对水体氮磷去除效果及差异,结合水体元素质量浓度变化和微生物群落结构变化探讨差异的原因,以期评估出低耗高效的底泥改造材料,并在一定程度上丰富底泥改造的应用基础理论,同时为同类型污染水体底泥改造材料的选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

供试底泥改造材料蓬莱镇组紫色母岩采自重庆市巴南区界石镇附近的倒置低山区,于通风干燥处风干后去除其中树枝、落叶等杂质,过60目筛备用;石灰石与白云石均购自于灵寿县北堤下村矿工厂,经干燥后磨碎,过60目筛备用。改造材料基本性状见表1。矮生苦草(*Vallisneria natans* (Lour.) Hara)为实验室养殖,挑选长势良好并相近的植株使用去离子水清洗表面杂质,每10株一组备用。底泥和试验用水取自西南大学崇德湖,供试底泥基本性质为全氮2.69 g·kg⁻¹、全磷11.75 g·kg⁻¹、pH6.9。

表1 改造材料基本性状

Table 1 Basic properties of sediment and modified materials

材料	TN/(g·kg ⁻¹)	TP/(g·kg ⁻¹)	有机质/(g·kg ⁻¹)	SiO ₂ /(g·kg ⁻¹)	Al ₂ O ₃ /(g·kg ⁻¹)	Fe ₂ O ₃ /(g·kg ⁻¹)	CaO/(g·kg ⁻¹)	MgO/(g·kg ⁻¹)	pH
石灰石	0.12	2.55	0.57	40.2	9.7	2.1	524.2	9.6	8.3
白云石	0.10	2.07	0.85	6.4	2.7	1.9	575.5	470.3	8.6
蓬莱镇组母岩	0.58	9.43	11.36	653.6	138.1	20.1	27.3	5.8	8.0

1.2 实验设计

采用5 L斗抓式底泥采样器(购于绍兴市上虞区亦晨仪器经营部)于西南大学崇德湖采取底泥,静置至底泥与上层水体分离,倒去表面水体,过0.25 cm网筛去除底泥沉积物中的石块、腐叶

等杂物。加入 8 cm 底泥至聚乙烯圆桶 (上口口径:下口径:高=45.5 cm:34.2 cm:56.4 cm) 内, 分别铺设 2 cm 石灰石 (T2)、白云石 (T3) 与蓬莱镇紫色母岩 (T4), 以不加任何底泥改造材料作为对照 (T1), 加水略微淹没后静置 24 h, 待上覆水澄清后将 10 株长势相同的矮生苦草均匀种植于各桶内, 加入 200 L 混合湖水至桶高 40 cm 左右。每组设置 3 个平行处理。

待沉水植物生长稳定后 (35 d) 进行换水, 倒出桶内水体, 再平稳加入实验水体进行水质监测。每一次换水后在每天上午 9:00 室外静水条件下采用虹吸法于水面下 20 cm、30 cm 处混合取样进行为期 5 d 的水质监测, 共监测 4 次。再按公式 (1) 计算氮、磷的去除率。

$$E = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: A_0 表示上覆水氮、磷初始质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, A_t 表示氮、磷浓度测定值, E 代表去除率。

在室外静水条件下连续监测 (5 d), 通过对水质变化的分析确定分别在 0 h、12 h、36 h、60 h、84 h、108 h 按照上述相同方法取样, 水体初始 TN 为 $(3.67\pm 0.09)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、初始 TP 为 $(0.46\pm 0.02)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、初始 $\text{NH}_4^+ -\text{N}$ 为 $(0.65\pm 0.03)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、初始 pH 为 (7.74 ± 0.03) 。分析认为 36 h 时的处理情况值得进一步研究, 故对该时刻数据进行详细分析测定。采用虹吸法在沉水植物叶片周围 1~2 mm 处少量多次采集混合水样, 进行元素质量浓度测定和细菌 16S rRNA 测定。

1.3 指标测定方法

水质指标均按照地表水水质指标分析国家标准进行测定。总磷测定采用钼酸铵分光光度法 (GB 11893-89), 总氮采用碱性过硫酸钾紫外分光光度法, 氨氮使用靛酚蓝比色法, pH 测定采用玻璃电极法 (GB 6920-86)。

水体元素质量浓度使用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-3000) 进行测定。取 2 L 水样采用 $0.22\ \mu\text{m}$ 孔径聚碳酸酯滤膜进行抽滤 (每次抽滤前装置用一级纯水反复清洗), 使用第 2 次抽滤后的水体进行元素测定。

在抽滤完成后, 将滤膜置于 $-80\ ^\circ\text{C}$ 低温保存, 之后进行微生物组总 DNA 提取, 目标片段 PCR 扩增。使用 DNA 试剂盒 (Omega Bio-tek, Norcross, GA, USA) 从样本中提取基因组 DNA。DNA 提取液在 1% 琼脂糖凝胶上进行检测, 并使用 NanoDrop 2000 UV-vis 分光光度计 (Thermo Scientific, Wilmington, USA) 测定 DNA 浓度和纯度。细菌基因使用引物对 338F (5'ACTCCTACGGGAGGCAGCAG3') 和 806R (5'GGACTACHVGGGTWTCTAAT3') 通过 ABI GeneAmp®9700 PCR 热循环器 (ABI, CA, USA) 进行扩增。16S rRNA 高通量测序在上海美吉生物医药科技有限公司进行, 数据分析基于该公司所提供的云服务进行 (www.majorbio.com)。

1.4 数据处理与分析

Office excel 2010 用于实验数据整理并制图; SPSS 25.0 用于单因素方差分析 (One-Way ANOVA) 和最小显著性差异检验 (LSD), 用 Origin2019b 绘图。

2 结果与讨论

2.1 重复监测上覆水氮磷去除率的变化

在沉水植物生长稳定后的第 10、20、35 和 55 天分别以 5 d 为 1 个周期, 进行了 4 次氮磷去除率的监测。如图 1 和图 2 所示, 由于测定时间不同, 各个周期不同处理的去除率均有一定波动。这可能是由于气候变化引起的, 但整体来看各周期内不同处理间的氮、磷去除率趋势较一致, 这说明系统效果比较稳定。各处理对氮、磷的去除率均有一定提高, 除了底泥吸附的作用外, 苦草可通过直接吸收、过滤吸附等作用去除水体的氮磷^[26]。不同底泥改造处理间有差异, T2、T3、T4 处理在监测周期内的监测时间对 TP 的去除率均明显高于 T1。在第 5 天时, 除 T1 外, 对 TP 的去除率均能达到 80% 以上, T4 处理对 TP 的去除率最高。T1 对 TN 的去除率在各个

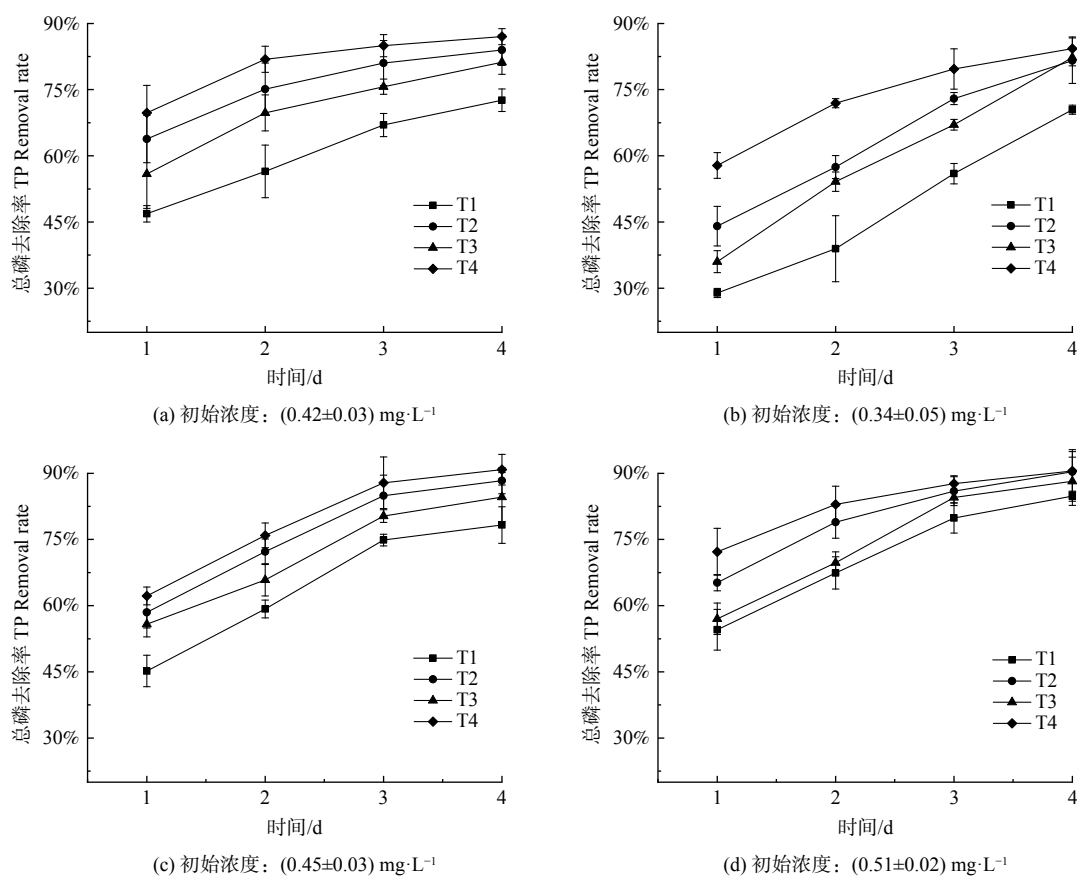


图1 SMVS对TP去除率的影响

Fig. 1 Effect of SMVS on the removal rate of TP

监测周期内也明显低于其余3组, T3对TN的去除效果最好。这是由于除了苦草的作用外, 底泥覆盖能抑制底泥中氮、磷营养盐的释放, 同时对上覆水中氮、磷悬浮物颗粒吸附作用较强^[11]。

2.2 SMVS对上覆水体氮磷的净化效果

水体中的磷主要依靠植物直接吸收、植物体吸附过滤和物理化学沉淀等途径去除^[27]。各系统对磷的去除在108 h内有相似的变化趋势(图3(a))。除T1外, 各处理水体中的总磷均能降至 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 达到《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) IV类水标准。不同的底泥改造材料对磷的去除效果不同, T4在实验周期内对磷的去除效果最好, 达到87.02%, 与T1具有极显著差异($P < 0.01$), T1为72.60%, T2、T3与T1有显著差异($P < 0.05$)。在36 h时, T2、T4与T1均具有显著差异($P < 0.05$)。

水体中氮的去除除了磷的去除途径外, 还存在氮的挥发、微生物固氮、脱氮、氨化、硝化等生命活动等途径^[28-29]。各系统总氮和氨氮质量浓度均在36 h时表现出显著差异(图3(b)和(c))。TN在84 h后趋于稳定。在108 h时, T4对总氮的去除效果最佳, 达到了80.96%, T1为71.26%。在36 h时T3对氮的去除效果最好, TN去除率达到71.49%, 而T1仅有58.00%。在12~36 h, 各系统对TN去除率与T1相比均有显著差异($P < 0.05$)。在60 h时, T3、T4与T1有显著差异($P < 0.05$)。在84 h后, 各系统间均无显著差异。 $[\text{NH}_4^+ - \text{N}]$ 在36 h时骤降, 之后在一定范围内波动, 这是由于氨氮受环境影响较大, 在 $\text{pH} > 7.0$ 时容易挥发^[18], 微生物硝化作用和沉水植物作用均会影响水体 $[\text{NH}_4^+ - \text{N}]$ 。T1、T2、T3、T4的 $[\text{NH}_4^+ - \text{N}]$ 分别为: $(0.10 \sim 0.13) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(0.05 \sim 0.08) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(0.04 \sim 0.09) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(0.08 \sim 0.10) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在36 h时, T3对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率最高, 达到了92.81%。

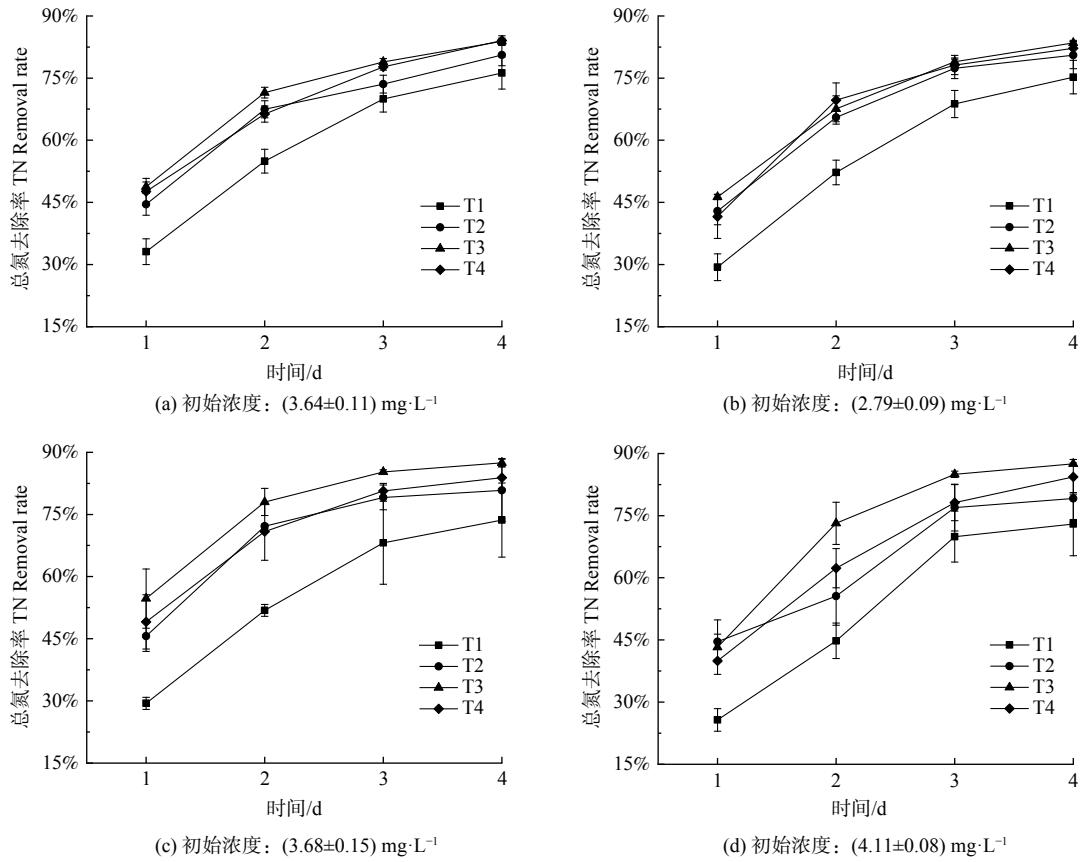
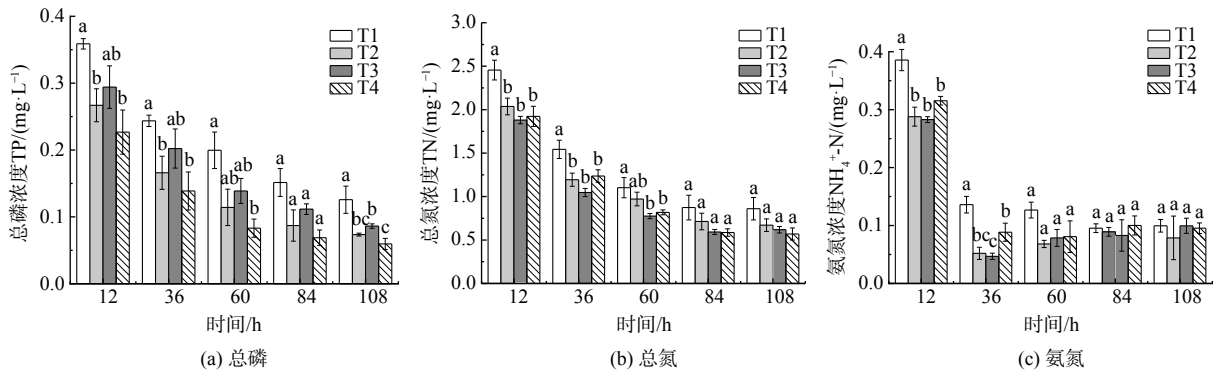


图 2 SMVS 对 TN 去除率的影响

Fig. 2 Effect of SMVS on the removal rate of TN



注：不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 3 TP、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 等指标的变化

Fig. 3 Changes of the concentration of TP(a), TN(b), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (c)

已有研究表明蓬莱镇组紫色母岩作为底泥覆盖材料对氮、磷的吸附的效果优于石灰石。这是由于母岩具有团粒结构，表面蓬松，相较于矿物具有更多的吸附位点^[30]。石灰石和白云石组成相似，但白云石对磷素的理论饱和吸附量比石灰石低^[31-32]，与本实验研究结果相似，而对氮的吸附效果白云石优于石灰石。推测除了吸附作用外，还与其他因素有关。

2.3 上覆水体元素含量分析

为进一步分析不同处理间氮磷去除率差异的原因，探究了上覆水体中的元素指标及其变化。表 2 表明，各组处理上覆水体中砷 (As)、镉 (Cd)、铜 (Cu)、铁 (Fe)、锰 (Mn)、钼 (Mo) 元素的质量

表2 上覆水体元素含量

Table 2 Elemental content of overlying water bodies

处理	As/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	Cd/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	Co/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	Cu/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	Fe/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	Hg/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	Mn/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	Ni/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	Mo/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	B/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	K/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Ca/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Mg/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
T1	15.53±	13.06±	8.33±	5.40±	2.40±	15.50±	3.17±	18.50±	13.37±	89.40±	4.11±	22.95±	10.13±
	10.25a	10.57a	3.03a	2.79a	1.90a	8.41a	1.08a	1.27ab	2.33a	17.29a	0.13a	0.02b	0.06b
T2	12.47±	15.34±	0.63±	4.23±	2.50±	—	3.50±	13.63±	11.63±	92.97±	4.24±	23.57±	10.89±
	6.52a	13.33a	0.63b	1.19a	0.50a	—	1.71a	3.75ab	2.24a	4.66a	0.06a	0.27ab	0.26a
T3	14.03±	7.62±	5.50±	5.93±	—	—	4.00±	10.13±	8.33±	89.43±	4.13±	23.55±	11.19±
	5.05a	7.62a	0.55ab	3.02a	—	—	1.97a	4.66b	2.20a	15.73a	0.10a	0.06ab	0.09a
T4	15.87±	—	6.47±	3.80±	1.70±	—	3.30±	23.17±	7.53±	80.83±	4.37±	24.28±	10.90±
	6.29a	—	2.47ab	3.31a	0.80a	—	1.15a	1.24a	3.82a	5.07a	0.05a	0.45a	0.07a

注：同行不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

浓度无明显差异。不同处理间钙(Ca)、镁(Mg)的质量浓度具有显著差异 ($P<0.05$)，T4中Ca的质量浓度显著高于T1，T1中的Mg的质量浓度显著低于其余各组。这与不同改造材料的元素浸出能力不同有关^[33]。Ca、Mg不仅通过沉淀吸附促进N、P去除，也通过影响微生物群落强化生物脱氮除磷过程。这是由于Ca、Mg等活性物质可与水体中可溶性磷酸盐通过配位体交换作用发生吸附和沉淀作反应^[32]。沉水植物也通过光合作用所形成的微环境促进钙、磷的共沉淀过程^[34]。水体中的 Mg^{2+} 能与铵根离子(NH_4^+)、磷酸根离子(HPO_4^{2-})反应生成难溶性的鸟粪石沉淀，从而消除水体中的氮、磷营养盐^[35]。同时，作为除磷反应中酶促剂的重要组成成分参与整个生物除磷过程，有利于强化生物除磷过程^[36]。

2.4 SMVS对上覆水微生物群落的影响

2.4.1 对微生物群落结构的影响

SMVS使上覆水悬浮态颗粒物中的微生物群落结构发生改变。对36h不同SMVS系统中细菌群落组成进行分析，结果表明细菌种类共注释到9个门、12个纲、24个目、28个科、46个属和48个种。如图4(a)所示，在门的分类水平上，各处理细菌组成相似，但相对丰度存在差异。变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteriota)、蓝藻门(Cyanobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidota)是占比较大的菌门，相对丰度分别为34.7%~42.3%、25.0%~36.8%、9.5%~14.0%、9.2%~18.4%；异常球菌门(Deinococcota)、厚壁菌门(Firmicutes)、绿弯菌门(Chloroflexi)和疣微菌门(Verrucomicrobia)占比较低，相对丰度为0.20%~5.6%、1.4%~2.8%、0.55%~5.1%和0.65%~1.0%；浮霉菌门(Patescibacteria)占比小于1%。通过克氏秩和检验(Kruskal-Wallis H test)对不同处理下细菌比例是否发生显著变化进行分析，结果显示底泥改造后放线菌门、拟杆菌门、厚壁菌门、绿弯菌门相对丰度在各处理间存在显著差异 ($P<0.05$)，不同底泥改造条件下上覆水微生物相对丰度在门水平上发生了变化(图5(a))。放线菌门在T3中占比高于其余3组，T1中拟杆菌门占比低于其余各组，而厚壁菌门在T1中占比最高。放线菌门能吸收水体中的营养物质作为氮源，在降解氮素营养盐过程中发挥重要作用^[37]，结合使用白云石作为底泥改造材料对氮的去除效果最好，推测以白云石作为改造材料有利于提高放线菌门丰度，促进水体氮的去除。拟杆菌门是一类复杂碳水化合物多产降解者，能将纤维素转化成可溶性糖类，可参与到腐败植物组织分解的碳循环中^[38]。大多数厚壁菌门是一类在污水厌氧处理中起到重要作用的微生物^[39]，当水体中厚壁菌门占比较大时，水体已经受到较为严重的污染，能说明在本实验条件下底泥改造后可缓解水体污染情况。

在属水平上，各处理优势菌属相同，但较优势菌属存在差异。叶绿菌目未定属(*norank_f_norank_o_Chloroplast*)、分枝杆菌属(*Mycobacterium*)、根瘤菌科未定属(*norank_f_Rhizobiales_Incertae_Sedis*)、

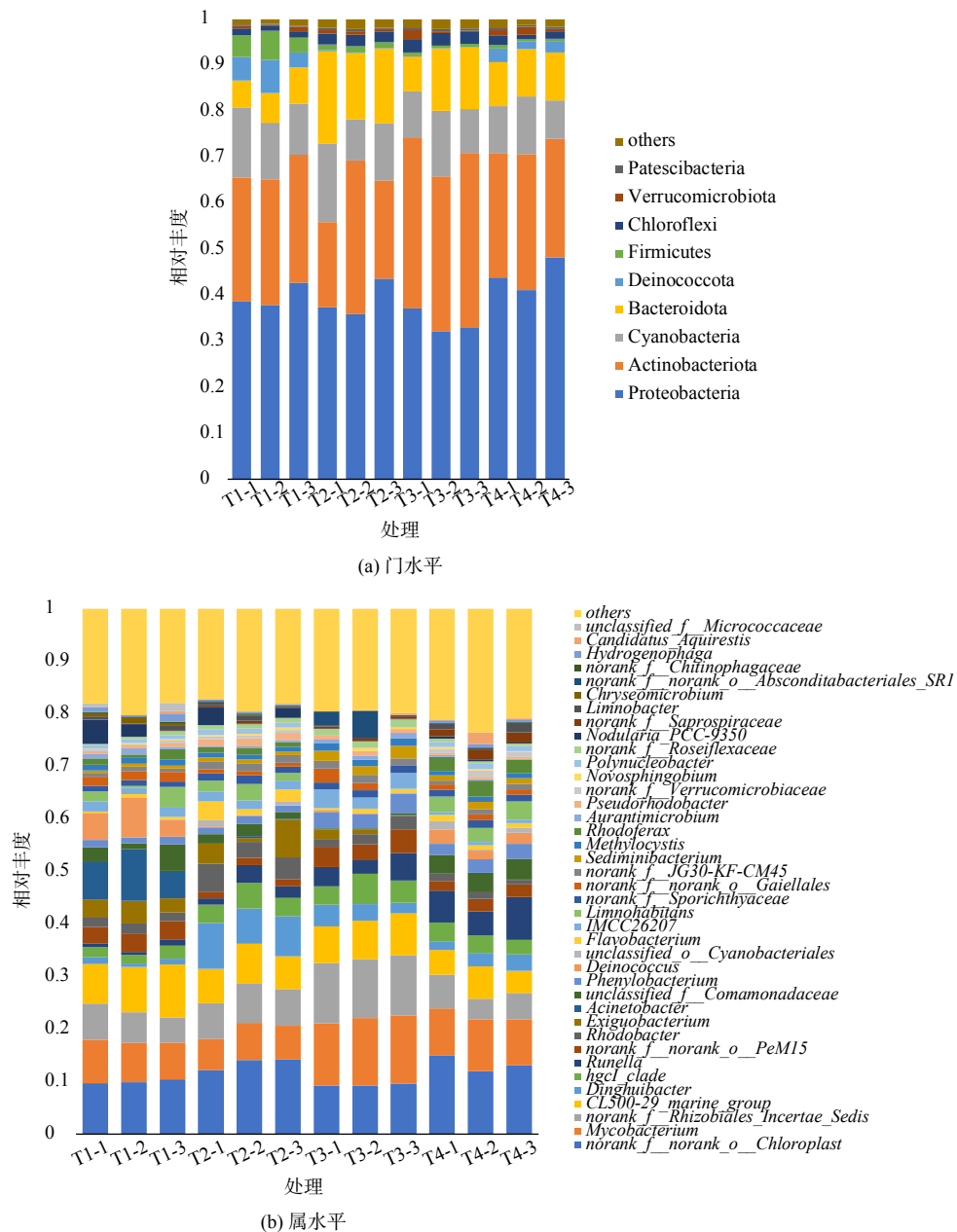
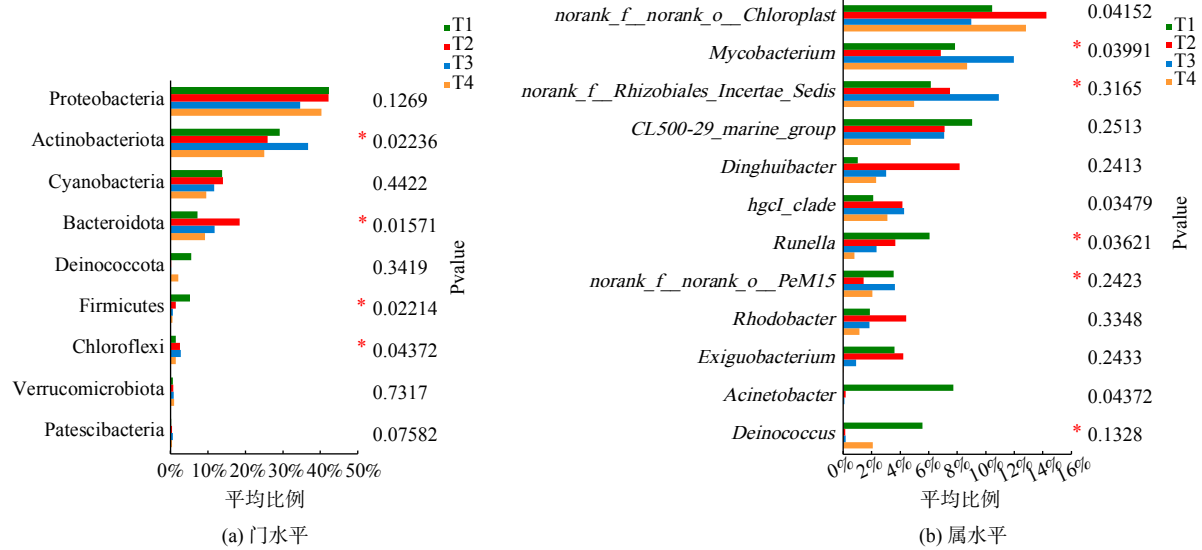


图 4 微生物群落在门水平和属水平上相对丰度

Fig. 4 Relative abundance of microbial communities at the Phylum level and Genus level

CL500-29_marine_group 为优势菌属，分别占比 9.0%~14.3%、6.9%~12.0%、5.0%~10.9%、4.7%~9.0%。T1 以不动杆菌属 (*Acinetobacter*)、古字状菌属 (*Runella*) 和异常球菌属 (*Deinococcus*) 为较优势菌属，分别占比 7.7%、6.0%、5.6%；T2 以林土鼎湖杆菌属 (*Dinghuibacter*)、微小杆菌属 (*Exiguobacterium*)、*hgcl_clade* 占比较大，分别占比 8.2%、4.2%、4.1%；T3 则以 *hgcl_clade*、*PeM15*、林土鼎湖杆菌属 (*Dinghuibacter*) 为较优势菌种，分别占比 4.3%、3.6%、3.0%；T4 以 *hgcl_clade*、林土鼎湖杆菌属 (*Dinghuibacter*)、异常球菌属 (*Deinococcus*) 占比相对较大，分别为 3.1%、2.3%、2.1%。不动杆菌属在 T1 占比较大，而在其余 3 组中占比均小于 0.2%；红细菌属 (*Rhodobacter*) 在 T2 中占比相对最高，为 4.4%，在其余 3 组中占比均小于 1.2%。如图 5(b) 所示，在属水平上，叶绿菌目未定属、分枝杆菌属、不动杆菌属、*hgcl_clade*、*Runella* 在不同处理中的相对丰度发生了显著性变化。分枝杆



注：“*”表示不同组间微生物所占比例差异达到显著性水平 ($P < 0.05$)

图 5 微生物相对丰度分别在门水平和属水平上的变化

Fig. 5 Changes in relative microbial abundance at the Phylum level and Genus level

菌属、*norank_f_Rhizobiales_Incertae_Sedis* 在 T3 中相对丰度最高；*norank_f_norank_o_Chloroplast* 在 T2、T4 中占比高于 T1；*hgcI_clade* 在 T1 中占比显著低于其余 3 组 ($P < 0.05$)。值得注意的是，不动杆菌属被认为是除磷能力较强的微生物，然而在 T1 中占比最高，显著高于其余 3 组 ($P < 0.05$)。GAO 等^[40]发现不动杆菌属广泛存在于污水排放的产生富营养化河段，结合本研究结果说明未进行底泥改造上覆水磷含量高更趋向于水体富营养化，适宜不动杆菌属生长。分枝杆菌属具有脱氮与分解有机物的功能^[41-42]，这也进一步解释了 T3 中氮素营养盐去除较快的原因。*hgcI_clade* 对碳水化合物和富氮化合物有较强的吸收能力^[43]，通过参与上覆水体中的碳氮循环以达到对去除氮素营养盐效果。与 T1 相比，改造底泥有利于提高脱氮微生物占比。叶绿菌目未定属可利用光合作用吸收水体中的营养物质，促进上覆水磷的去除^[44]，故在 T2、T4 中磷含量较低。

2.4.2 SMVS 对上覆水微生物多样性的影响

微生物多样性指数是反映微生物群落结构特征的重要指标，SMVS 影响了微生物多样性。在 97% 相似度水平下对细菌群落进行多样性分析，主要研究丰富度指数 Chao1 及多样性指数 Shannon 和 Simpson。表 3 表明，进行底泥改造后上覆水细菌群落多样性明显升高，总体呈现群落多样性 $T4 > T2 > T3 > T1$ 。这可能与改造材料本身含有微生物有关，使用蓬莱镇紫色母岩作为改造材料明显提高了上覆水微生物群落多样性。

表 3 细菌群落多样性指数 (OTU 水平)

Table 3 Diversity index of bacterial communities (OTU level)

群落编号	Chao1	Shannon	Simpson
T1	460	3.83	0.085 6
T2	838	5.14	0.013 4
T3	898	5.01	0.017 8
T4	935	5.17	0.014 5

2.4.3 上覆水微生物群落与环境因子之间的关系

进行 VIF 方差膨胀因子分析排除共线性较强的环境因子，选择 TP、TN、As、B、Cu、Mo、Mn、Ni、Ca、Mg、Simpson 在门水平和属水平上进行冗余分析 (RDA)。如图 6(a) 所示，第一、第二排序轴分别解释总变量的 40.87% 和 16.93%，环境因子对不同处理中细菌门类分布的影响较大。

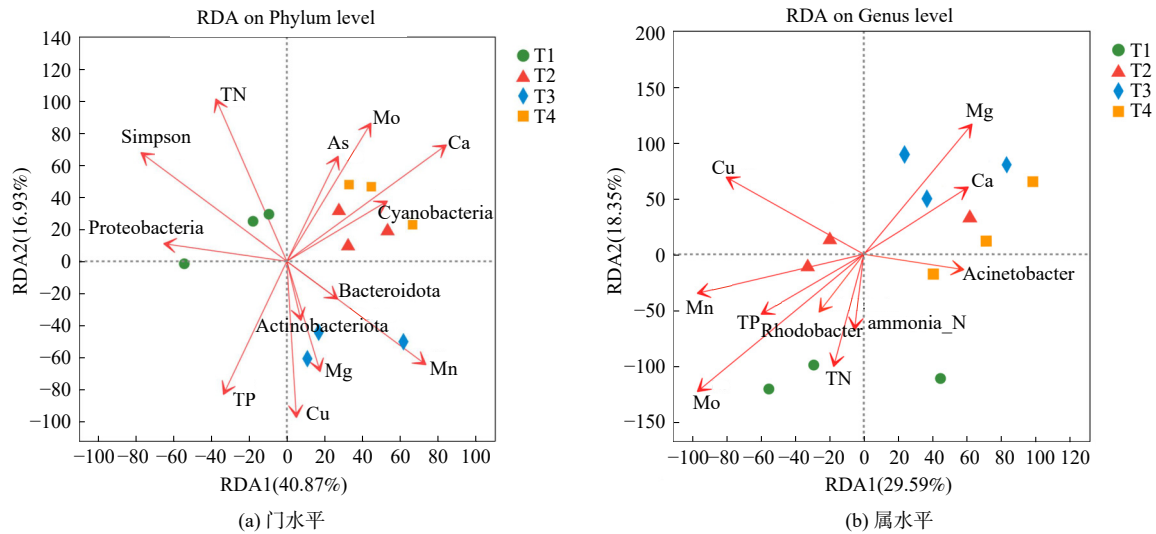


图 6 细菌群落与环境变量在门水平和属水平上的冗余分析

Fig. 6 Redundancy analysis of bacterial communities and environmental variables on Phylum level and Genus level

T2、T4 与 Ca 相关性较高，T3 与 Mg 相关性高。放线菌门与 T3 有明显的正相关性，且与 TN 呈明显负相关关系，放线菌门受 Mg 影响大。这说明使用白云石为底泥改造材料可能通过影响上覆水 Mg 含量进而促进放线菌门生长，从而提高 TN 去除率。Ca 质量浓度与 TP 有明显的负相关关系。Simpson 多样性指数与 TN 呈线性相关，微生物多样性越高，Simpson 指数越低，TN 越低。这说明提高微生物多样性有利于 TN 去除，与 PRATT 等^[45]的研究结果相反，这说明 TN 还受其他因素共同影响。如图 6(b) 所示，2 个排序轴对细菌属类分布差异的解释度总共为 47.97%。T1 与 T2、T3、T4 的分布有明显差异，这说明底泥改造对上覆水体细菌群落结构影响较大。Ca、Mg 对各处理均有影响，与 TP、TN 具有明显的负相关关系。

对比以往的研究，使用底泥改造材料协同沉水植物比使用单一底泥改造材料对氮、磷的去除率在短时间内有所提高^[46]。这可能是由于沉水植物的增效作用。相关研究表明，在水体氮、磷去除中沉水植物通过吸附、改善生境提高水体微生物转化等而产生的净水增效作用贡献率明显大于对氮、磷的直接吸收。相反，在底泥-沉水植物-微生物构建的体系中，微生物在水体 N、P 的削减中起到了较大的净化作用^[47]。本研究发现氮、磷去除效果的差异与底泥改造影响上覆水微生物群落有关。微生物与植物协同作用具有较强的净化能力，然而对于沉水植物的增效作用如何对微生物产生影响以及相互作用机制尚不清楚，有待进一步研究。

3 结论

1) SMVS 能提高水体氮磷营养盐的去除效率，在污染频率较高的水体的治理中具有很好的应用前景，研究结果可为景观水体短期水质危机提供解决思路。2) 使用蓬莱镇母岩作为底泥改造材料协同沉水植物对上覆水体的氮磷营养盐净化效果最佳，对磷素营养盐尤为明显，在景观水体底泥中作为改造材料稳定水体质量方面具有良好的应用前景。3) SMVS 提高了上覆水 Ca、Mg 的质量浓度，驱动上覆水体微生物群落结构发生改变，强化了与脱氮除磷微生物的联系，促进水体氮磷的去除。

参考文献

- [1] HUANG S, GUO Q H. Research review on effects of urban landscape pattern changes on water environment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(12): 3142-3150.
- [2] 胡洪营, 孙迎雪, 陈卓, 等. 城市水环境治理面临的课题与长效治理模式[J]. *环境工程*, 2019, 37(10): 6-15.
- [3] WANG W H, WANG Y, SUN L Q, et al. Research and application status of ecological floating bed in eutrophic landscape water restoration[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 704: 135434.
- [4] 范成新, 钟继承, 张路, 等. 湖泊底泥环保疏浚决策研究进展与展望[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(5): 1254-1277.
- [5] 张玥, 徐栋, 张义, 等. 引水工程絮凝剂余铝对杭州西湖水体、底泥铝盐分布的影响[J]. *湖泊科学*, 2017, 29(4): 796-803.
- [6] BANALA U K, DAS N P, INDRADYUMNA, et al. Microbial interactions with uranium: Towards an effective bioremediation approach[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2020: 101254.
- [7] ZHANG X M, ZHEN W, JENSEN H S. . 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.
- [8] LYONS T, ICKES J A, MAGAR V S, et al. Evaluation of contaminant resuspension potential during cap placement at two dissimilar sites[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2006, 132(4): 505-514.
- [9] SADEGHI S, HUA G H, MIN K, et al. Phosphorus and cyanobacteria precipitation and sediment capping in lake water using alum and natural minerals[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2020, 146(1): 04019095.
- [10] BONAGLIA S, RĂMÔ R, MARZOCCHI U, et al. Capping with activated carbon reduces nutrient fluxes, denitrification and meiofauna in contaminated sediments[J]. *Water Research*, 2019, 148: 515-525.
- [11] 申粤, 聂煜东, 张贤明, 等. 底泥原位覆盖材料选择及应用研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2021, 43(7): 898-903.
- [12] 李雪菱, 张雯, 李知可, 等. 红壤原位覆盖对河流底泥氮污染物释放的抑制研究[J]. *环境污染与防治*, 2018, 40(1): 28-32.
- [13] ZHANG Y, LABIANCA C, CHEN L, et al. Sustainable ex-situ remediation of contaminated sediment: A review[J/OL][J]. *Environmental Pollution*, 2021, 287: 117333.
- [14] 郑杰. 城市湖泊清淤工程的探讨[J]. *中国农村水利水电*, 2010(9): 43.
- [15] 冉卓灵, 钟守琴, 刘波, 等. 紫色页岩发育土壤的颗粒特性及其对抗剪强度的作用机制[J]. *土壤*, 2019, 51(1): 127-134.
- [16] 赵吉霞, 邓利梅, 陆传豪, 等. 模拟酸雨淋溶对紫色页岩风化土特征的影响研究[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(11): 151-161.
- [17] 唐将, 李勇, 邓富银, 等. 三峡库区土壤营养元素分布特征研究[J]. *土壤学报*, 2005, 42(3): 473-478.
- [18] 黄雪娇, 刘晓晨, 李振轮, 等. 不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响[J]. *环境科学*, 2015, 36(5): 1639-1647.
- [19] 付新喜, 吴晓芙, 奚成业, 等. 农户型组合人工湿地系统生活污水处理效果分析[J]. *给水排水*, 2017, 53(7): 25-30.
- [20] ŽIBIENĚ G, DAPKIENĚ M, KAZAKEVIČIENĚ J, et al. Phosphorus removal in a vertical flow constructed wetland using dolomite powder and chippings as filter media[J]. *Journal of Water Security*, 2015, 1: 46-52.
- [21] ZHANG J B, WU P X, HAO B, et al. Heterotrophic nitrification and aerobic denitrification by the bacterium *Pseudomonas stutzeri* YZN-001[J]. *Bioresour Technol*, 2011, 102(21): 9866-9869.
- [22] LIU Z, IQBAL M, ZENG Z, et al. Comparative analysis of microbial community structure in the ponds with different aquaculture model and fish by high-throughput sequencing[J/OL][J]. *Microbial Pathogenesis*, 2020, 142: 104101.
- [23] 陈重军, 潘钰伟, 谢嘉玮, 等. 河流污染底泥原位覆盖材料及其应用研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(1): 100-109.
- [24] 王磊, 胡效卿, 张卓伦, 等. 不同水深和基质下苦草(*Vallisneria spiralis*)的生理生态适应策略[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(8): 2421-2430.
- [25] 韩帆, 刘子森, 严攀, 等. 硅酸盐矿物麦饭石对沉水植物生理生态的影响[J]. *水生生物学报*, 2019, 43(6): 1352-1361.
- [26] 张之浩, 吴晓芙, 李威. 沉水植物在富营养化水体原位生态修复中的功能[J/OL][J]. *中南林业科技大学学报*, 2018, 38(3): 115-121.
- [27] SUNIL K R, LOREN G, GUNAWAN G, et al. A Comprehensive review of phosphorus removal technologies and processes[EB/OL][J]. *Journal of Macromolecular Science, Part A*, 2014, 51: 6,538-545.
- [28] SRIVASTAVA J K, CHANDRA H, KALRA S J S, et al. Plant-microbe interaction in aquatic system and their role in the management of water quality: A review[J]. *Applied Water Science*, 2017, 7(3): 1079-1090.
- [29] KUYPERS M M, HANNAH M K, BORAN K. The microbial nitrogen-cycling network[J]. *Nature Reviews. Microbiology*, 2018, 16(5): 263-276.
- [30] 黄雪娇, 李振轮, 冯密, 等. 高效复合处理剂的微观结构及其去除景观水体氮磷的机制[J]. *土壤学报*, 2020, 57(1): 100-107.
- [31] 赵桂瑜. 人工湿地除磷基质筛选及其吸附机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [32] 柯德峰. 人工湿地基质的筛选及其除磷机理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016: 28-29.
- [33] 黄雪娇, 冯密, 李振轮, 等. 紫色母岩作基质或覆盖材料对景观水体氮磷去除效果研究[J]. *土壤学报*, 2019, 56(2): 363-373.
- [34] CHRISTIANSEN N H, ANDERSEN F, JENSEN H S. Phosphate uptake kinetics for four species of submerged freshwater macrophytes measured by a ³³P phosphate radioisotope technique[J]. *Aquatic Botany*, 2016, 128: 58-67.
- [35] 刘小宁, 贾博宇, 申锋, 等. 金属元素改性生物炭应用于磷酸盐吸附的研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(11): 2375-2386.
- [36] CHENG C, ZHANG J, XU J, et al. Enhanced removal of nutrients and diclofenac by birnessite sand vertical flow constructed wetlands[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 46: 102656.
- [37] 甄茜, 蔡婕, 郭行, 等. 微藻在废水脱氮除磷中的应用[J]. *水处理技术*, 2017, 43(8): 7-12.
- [38] 胡愈妍, 张静, 黄杰, 等. 长江流域河流和湖库的浮游细菌群落差异[J]. *环境科学*, 2022, 43(3): 1414-1423.
- [39] 吴晓斐, 何源, 黄治平, 等. 不同处理梯度污水对细菌群落和酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(9): 2026-2035.
- [40] GAO Y, WANG C C, ZHANG W G, et al. Vertical and horizontal assemblage patterns of bacterial communities in a eutrophic river receiving domestic wastewater in southeast China[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 230: 469-478.
- [41] 张雪梅, 余跃惠, 黄金凤, 等. 大庆油田聚合物驱后油藏微生物多样性研究[J]. *应用与环境生物学报*, 2008(5): 668-672.
- [42] 李建柱, 侯杰, 张鹏飞, 等. 空心菜浮床对鱼塘水质和微生物多样性的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(10): 3071-3080.
- [43] GHYLIN T W, GARCIA S L, MOYA F, et al. Comparative single-cell genomics reveals potential ecological niches for the freshwater actinobacteria lineage[J]. *ISME Journal*, 2014, 8(12): 2503-2516.
- [44] 程豹, 望雪, 徐雅倩, 等. 澜沧江流域浮游细菌群落结构特征及驱动因

- 子分析[J]. 环境科学, 2018, 39(8): 3649-3659.
- [45] PRATT B, RIESEN R, JOHNSTON C G. PLFA analyses of microbial communities associated with PAH-contaminated riverbank sediment[J]. *Microbial Ecology*, 2012, 64(3).
- [46] HAN M F, WANG Y W, ZHANG Y H, et al. Efficiency and mechanism for the control of phosphorus release from sediment by the combined use of hydrous ferric oxide, calcite and zeolite as a geo-engineering tool[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 428: 131360.
- [47] 金树权, 周金波, 包薇红, 等. 5种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较[J]. 环境科学, 2017, 38(1): 156-161.
- (责任编辑: 靳炜)

Nitrogen and phosphorus removal effect of sediment-*Vallisneria natans* system on landscape water and changes of microbial community structure

CHEN Yanxi, ZHA Zeyu, MAO Xinyu, WANG Di, LI Zhenlun*

College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract The sediment-Submerged macrophytes-Microbial system plays a key role in the reduction of nitrogen and phosphorus in the nitrogen and phosphorus reduction process of in landscape water. In order to alleviate the nitrogen and phosphorus release pressure of sediment and explore the relationship between the selection of sediment transformation materials and the effect of nitrogen and phosphorus removal, limestone, dolomite and purple parent rock of Penglaizhen Formation were selected as the transformation materials to construct a water-sediment- *Vallisneria natans* system, which was analyzed by combining the mass concentration of water elements and microbial community structure. The results showed that the removal effect of sediment modification combined with *Vallisneria natans* (SMVS) was significantly higher than that of the overlying water body ($P<0.05$), and the treatment effect of Penglaizhen Formation was the best with the removal rates of TP and TN at 87.06% and 80.96%, respectively. The microbial community structure in the overlying aqueous suspended particulate matter had changed, and the abundance of Actinobacteriota and Bacteroidota was significantly different in different modification treatments at the taxonomic level ($P<0.05$). At the genus taxonomic level, there were significant differences between *norank_f_norank_o_Chloroplast* and *Mycobacterium* in different modification treatments ($P<0.05$). The results of redundancy analysis showed that Ca and Mg were the main elements driving the reduction of N and P of overlying. The removal effect of purple parent rock in Penglaizhen Formation as a sediment modification material was better than that of limestone and dolomite, which was related to the release of trace elements in upward overlying water and the change of microbial community structure. The research results can provide reference for the treatment of sediment polluted by landscape water.

Keywords sediment modification; landscape water; nitrogen and phosphorus removal; microbial communities