

狐尾藻—鲢—铜锈石田螺组合系统对湖泊沉积物磷赋存特征的影响*

陈昊亮, 吴 玮^{**}, 黄天寅, 许晓毅, 庄金龙

(苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009)

摘要: 水生动植物生态系统构建对湖泊磷循环具有重要影响。通过开展微宇宙实验探究狐尾藻—鲢—铜锈石田螺(MHS)组合系统对沉积物磷的去除效果及其作用机制。结果表明:(1)狐尾藻对上覆水及沉积物中磷素的富集是系统去除磷素的主要途径,鲢和铜锈石田螺的协同作用可有效促进狐尾藻生长并强化其对磷的富集,与狐尾藻(M)、狐尾藻—鲢(MH)和狐尾藻—铜锈石田螺(MS)3种系统相比,MHS系统对上覆水及沉积物总磷的去除率分别提高了14.02%~54.53%和2.26%~5.33%。(2)沉积物磷的去除主要取决于植物根系对铁铝结合磷(Fe/Al-P)的吸收,实验周期内MHS系统对沉积物无机磷的总体去除率为13.60%,其中Fe/Al-P占87.83%,可有效降低沉积物磷向上覆水释放的风险。(3)16S rRNA基因测序表明,MHS系统可有效改善微生物生长环境,提高沉积物解磷菌(硫杆菌属(*Thiobacillus*)和假单胞菌属(*Pseudomonas*))的相对丰度,促进沉积物Ca-P向Fe/Al-P转化,提升植物根系对磷的吸收效率。本研究表明狐尾藻—鲢—铜锈石田螺组合系统在沉积物Fe/Al-P含量较高的湖泊中具有较好的应用前景,可有效去除湖泊中的磷污染物,降低湖泊富营养化风险。

关键词: 沉水植物; 水生动物; 沉积物; 磷

Effects of the combined system of *Myriophyllum verticillatum*–*Hypophthalmichthys molitrix*–*Sinotaia aeruginosa* on phosphorus characteristic in lake sediments*

Chen Haoliang, Wu Wei^{**}, Huang Tianyin, Xu Xiaoyi & Zhuang Jinlong

(School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, P.R.China)

Abstract: The construction of aquatic flora and fauna ecosystems significantly affects lake phosphorus cycling. Our investigation focused on the removal effect and mechanism of phosphorus in sediments using the combined system of *Myriophyllum verticillatum*–*Hypophthalmichthys molitrix*–*Sinotaia aeruginosa* (MHS). The experimental results indicated that: (1) The absorption of *Myriophyllum verticillatum* was the primary pathway for phosphorus removal in overlying water and sediments. *Myriophyllum verticillatum*'s growth and its phosphorus enrichment were effectively promoted under the synergistic effect of *Hypophthalmichthys molitrix* and *Sinotaia aeruginosa*. Under the influence of the MHS system, the removal rate of total phosphorus (TP) in overlying water was 14.02%–54.53% higher compared to other systems (*Myriophyllum verticillatum* (M), *Myriophyllum verticillatum*–*Hypophthalmichthys molitrix* (MH), and *Myriophyllum verticillatum*–*Sinotaia aeruginosa* (MS)). Correspondingly, the removal rate of TP in sediments was 2.26%–5.33% higher compared to other systems. (2) The TP removal in sediments depended mainly on the absorption of iron/aluminum bound phosphorus (Fe/Al-P) by *Myriophyllum verticillatum*. The removal rate of inorganic phosphorus (IP) in sediment by the MHS system during the experimental period was 13.60%, with Fe/Al-P accounted for 87.83%, effectively reduced the risk of phosphorus release from sediments to overlying water. (3) 16S rRNA gene analysis showed that the MHS system effectively improved the growth environment of microorganisms, increased the relative abundance of phosphorus solubilizing bacteria (*Thiobacillus* and *Pseudomonas*) in sediment, promoted the conversion of Ca-P to Fe/Al-P in sediment and improved the efficiency of phosphorus absorption by plant roots. The results of this study indicated that the synergistic effect of MHS could effectively remove phosphorus pollutants in overlying water and sediment, and has good application prospects in lakes with high Fe/Al-P con-

* 2024-01-23 收稿; 2024-03-08 收修改稿。

江苏省苏州市水利科技项目(2022001)和苏州市科技计划项目(SS202218)联合资助。

** 通信作者; E-mail: wuwei@usts.edu.cn。

tent. It can provide a practical reference for pollution remediation and eutrophication control of shallow-water lakes.

Keywords: Submerged plant; aquatic fauna; sediment; phosphorus

太湖是苏州和无锡的重要水源地,在长三角地区社会经济发展中有着非常重要的战略地位。自20世纪80年代起,太湖水质开始出现富营养化^[1]。目前,部分湖区水体总磷(TP)浓度依然高于地表水湖库Ⅲ类水标准(0.05 mg/L)^[2],磷仍是太湖水体富营养化的主要限制因子^[3-4]。随着太湖富营养化防治工作不断推进,控源截污及引水调控等治理措施取得显著成效^[5],水体外源性磷输入大幅下降,沉积物的内源释放成为太湖上覆水中磷的主要来源^[6]。降低沉积物中的磷含量并抑制其向上覆水释放,对于控制太湖水体磷浓度、降低藻华风险至关重要。

在湖泊生态修复过程中,沉水植物—水生动物系统之间存在协同作用。研究发现,将黑藻、马来眼子菜和鲢、三角帆蚌共养对水体氮磷营养盐具有更好的去除效果^[7]。Chen等^[8]在东坡湖构建了沉水植物—鱼类—底栖动物修复系统,显著降低了浮游植物密度,增加了沉水植物覆盖度,降低了水体营养物质浓度。苦草—鲢—三角帆蚌的组合对蓝藻的去除效果显著优于单独使用苦草、鲢和三角帆蚌的组合^[9]。在沉水植物与水生动物的组合系统中,沉水植物对水体营养盐的吸收去除具有重要作用。水生动物一方面通过摄食藻类减小沉水植物竞争压力,促进沉水植物的光合作用和生长效应,提升沉水植物的修复效能^[7,10]。另一方面,水生动物可以将有机物重新包装或破碎成更小的颗粒以促进其他微生物的摄入,从而保持沉积物中微生物的生物多样性,改善沉积物环境^[11]。研究表明,苦草、黑藻、菹草等沉水植物与滤食性鱼类和蚌类等水生动物系统重建可显著影响沉积物中磷含量^[12-13]及赋存形态^[14-15],影响磷元素在水—沉积物之间的迁移转化^[16-18]。然而,不同沉水植物—水生动物组合系统对沉积物不同形态磷的去除存在差异^[19-20],如何优化配置沉水植物和水生动物是发挥协同作用的关键。因此,探讨沉水植物—水生动物组合系统对沉积物不同形态磷的去除、磷在动植物体内的赋存以及磷在“沉积物—水—沉水植物—水生动物”系统中的迁移转化,对于富营养化湖泊修复具有实际意义。

狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum*)是一种多年生沉水植物,根茎发达,生态适应性强,广泛应用于富营养化水体修复^[21]。鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)作为典型滤食性鱼类,通过对浮游植物的直接摄食降低藻类密度,并随着鱼类的捕捞将营养盐转移出水体,参与水体磷循环^[22-23]。铜锈石田螺(*Sinotaia aeruginosa*)可以刮食附着藻类作为食物,同时其分泌物可使水体中的悬浮颗粒物沉降,从而提高水体透明度,促进沉水植物的生长^[24]。本研究选取狐尾藻、鲢和铜锈石田螺,构建“沉积物—上覆水—沉水植物—水生动物”微宇宙体系,通过与狐尾藻—鲢(MH)、狐尾藻—铜锈石田螺(MS)、狐尾藻(M)3种实验组比较,研究狐尾藻—鲢—铜锈石田螺(MHS)组合系统对上覆水及沉积物磷的强化去除效果及作用机制,并基于16S rRNA基因测序数据,分析沉积物细菌群落结构对磷迁移转化特性的影响,从而为浅水湖泊控磷策略提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用上覆水和沉积物采集自太湖东部湖区(31°5'29.84"N, 120°14'1.94"E)。沉积物自然风干,去除粗粒及动植物残体,研磨过100目(0.149 mm)筛后,充分混匀作为实验用土。上覆水初始TP、pH和DO浓度分别为(0.108±0.002) mg/L、(7.35±0.33)和(5.7±0.14) mg/L。沉积物初始TP、无机磷(IP)、有机磷(OP)、铁/铝结合态磷(Fe/Al-P)和钙结合态磷(Ca-P)含量分别为(325.94±1.34)、(198.09±1.04)、(124.36±1.62)、(86.12±0.44)和(111.64±1.22) mg/kg。狐尾藻初始株高为(17.25±0.83) cm/株,种植前去除种植株的侧枝或匍匐茎。鲢和铜锈石田螺初始体重分别为(40.12±1.63) g/尾和(2.53±0.52) g/个,实验开始前,将鲢和铜锈石田螺放入经曝气处理的自来水中饥饿3 d,排空肠道备用。

1.2 实验设计

研究共设置5个实验组,分别为狐尾藻(M)组、狐尾藻—鲢(MH)组、狐尾藻—铜锈石田螺(MS)组、狐尾藻—鲢—铜锈石田螺(MHS)组以及空白(CK)对照组,每种处理设置3个重复,各实验组动植物配置量如表1所示。

表 1 实验组合设计
Tab.1 Experimental combination design

实验组	组合	动植物配置量 ^[25-27]
M	狐尾藻	20 株/桶
MH	狐尾藻+鲢	狐尾藻 20 株/桶; 鲢 2 尾/桶
MS	狐尾藻+铜锈石田螺	狐尾藻 20 株/桶; 铜锈石田螺 20 个/桶
MHS	狐尾藻+鲢+铜锈石田螺	狐尾藻 20 株/桶; 鲢 2 尾/桶; 铜锈石田螺 20 个/桶
CK	空白	/

实验在室内进行,室温为(15 ± 5)℃,光照强度为8000 lx,光暗比为12 h:12 h。实验装置采用15个上口径62 cm、下口径47 cm、高度73 cm的高密度聚乙烯(HDPE)桶模拟微宇宙系统。实验开始前,各实验系统桶内放入沉积物和上覆水,沉积物深度设置为10 cm,沉积物初始质量为10000 g,上覆水深度设置为50 cm,静置3 d等待扰动平复,选取健康、株高相对一致的植株进行种植,静置1 d后投放形态大小基本一致的鲢和铜锈石田螺,开始进入实验周期,周期为40 d。各实验系统均为封闭系统,无其他外源磷素输入。

1.3 样品采集与指标测定

1.3.1 上覆水及沉积物理化指标测定 实验开始后,每隔5 d采用虹吸管采集液面以下5~10、15~20、25~30 cm处上覆水各50 mL,混匀后作为待测样品,测定pH值、DO和TP浓度。每隔10 d采用活塞式柱状采样器(直径15 mm)采集系统表层沉积物(0~5 cm深度处),混匀后的样品冷冻干燥保存,测定不同形态磷含量。

pH、DO分别通过pH计(上海雷磁PHS-25型数显pH计)和溶氧仪(上海雷磁JPB-607A便携式溶氧测定仪)测定;TP浓度采用钼酸铵分光光度法(GB 11893—1989)测定;沉积物不同形态磷采用SMT(standards measurements and testing)法^[28]测定。

1.3.2 动植物体内磷含量的测定 在实验开始及结束后分别采集动植物样品,测定动植物体内磷含量。

狐尾藻磷含量的测定:植物总磷含量采用钼锑钪比色法测定(NY/T 2421—2013),植物生物量(湿重)采用株高模拟法^[29]进行拟合估算,植物总株高为母株株高和所有分株株高的总和。植物株高与生物量数据的拟合线性关系为:

$$y=0.063x+0.116 \quad (r=0.869, P=0.001) \quad (1)$$

式中,x为植物的单株株高,cm;y为植物的单株生物量,g。

鲢磷含量的测定:研磨机捣碎的鱼体经冷冻干燥后磨碎混匀过筛(孔径为250 μm),称量0.2~0.5 g样品,加入混合酸7 mL(HNO₃:H₂O₂=5:2)微波消解后于加热板(100 ℃)上赶酸30 min,冷却定容至50 mL,采用电感耦合等离子体发射光谱进行磷含量测定^[30]。

铜锈石田螺磷含量的测定:螺在清水中放置24 h以排除其肠合物,并将软组织取出。样品用冷冻干燥机干燥72 h,研磨过筛(孔径为0.149 mm),再经烘箱50 ℃烘48 h后放入离心管中保存。称量前述处理过的样品1.0~2.0 mg放入50 mL比色管中,加入25 mL去离子水并用碱性过硫酸钾溶液定容至50 mL,在高压蒸气灭菌锅中120 ℃消解40 min,以磷酸盐形式测定磷含量^[31]。

1.3.3 沉积物细菌群落的测定 在实验开始第20、40天时采用活塞式柱状采样器采集实验系统表层沉积物(0~5 cm深度处),混匀后的样品放入冰箱保存,测定微生物细菌群落。

通过DNA试剂盒提取沉积物微生物DNA,利用1%琼脂糖凝胶电泳检测DNA的完整性和纯度。使用通用细菌引物16S rRNA的338F:5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3'和806R:5'-GGACTTACHVGGGTWTCTAAT-3'(V3~V4区)对提取的DNA进行PCR扩增。利用Gene Tools Analysis Software(Version 4.03.05.0, SynGene)对PCR产物进行浓度对比之后,按照等质量原则计算各样品所需体积,将PCR产物进行混合。使用E.Z.N.A.[®]GelExtractionKit凝胶回收试剂盒回收PCR混合产物,TE缓冲液洗脱回收DNA片段。后续建库按照NEBNext[®]Ultra[™]DNA Library Prep Kit for Illumina[®]标准流程进行建库操作,完成后以高通量测序平台HiSeq或Miseq进行上机测序。高通量测序服务由广东美格基因科技有限公司提供(广东,中国)。

1.3.4 数据分析方法 实验所得数据采用SPSS 22.0软件进行统计分析。利用one-way ANOVA法分析不同

处理间的差异显著性。对沉积物不同形态磷和上覆水环境因子进行 Pearson 相关分析。用 Canoco5 软件进行冗余分析(RDA), 计算沉积物不同形态磷与沉积物细菌群落组成之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 不同介质中磷的赋存量分析

2.1.1 上覆水及沉积物总磷含量的变化 各实验组沉积物及上覆水 TP 浓度、上覆水 pH 和 DO 浓度变化如图 1 所示。MHS、MH、MS 和 M 四种系统均能有效去除沉积物及上覆水 TP。各实验组相比, 对沉积物 TP 的去除率表现为 MHS 组(11.02%)>MS 组(8.76%)>M 组(6.91%)>MH 组(5.69%), 对上覆水 TP 的去除率表现为 MHS 组(71.96%)>MS 组(57.94%)>M 组(36.79%)>MH 组(17.43%)。其中 MHS 组 pH 值和 DO 浓度显著高于其余实验组($P<0.05$)。

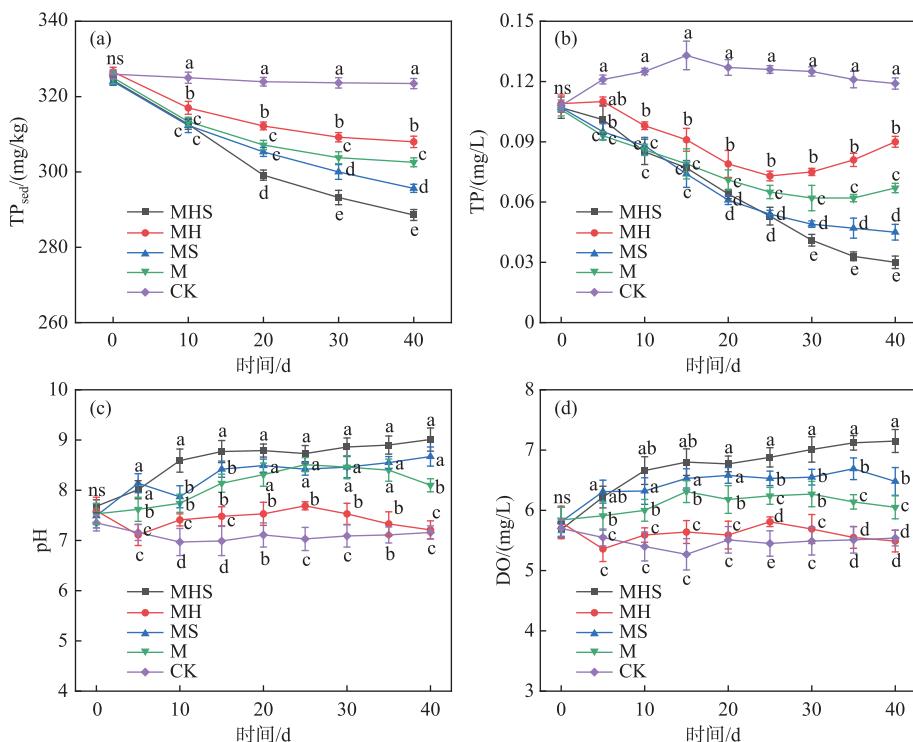


图 1 各实验组沉积物 TP 浓度(a), 上覆水 TP 浓度(b)、pH(c) 和 DO 浓度(d) 变化
(不同小写字母表示各组之间的差异达到显著水平($P<0.05$), 下同)

Fig.1 Changes in TP content in sediment (a), TP concentration (b), pH (c), and DO concentration (d) in overlying water in each experimental group (The different lowercase letters indicate significant differences among groups ($P<0.05$), the same below)

2.1.2 不同介质中磷的赋存量分析 各实验组磷元素平衡归趋如表 2 所示, MHS 组、MH 组、MS 组和 M 组沉积物和上覆水中减少的磷素总量分别为 368.75、188.65、293.00 和 230.35 mg, 与沉水植物和水生动物体内磷素的增加量基本一致。各系统狐尾藻生物量差异显著($P<0.05$), 表现为 MHS 组(76.18 g)>MS 组(70.56 g)>M 组(60.74 g)>MH 组(50.65 g), 狐尾藻生物磷含量增量表现为 MHS 组(0.75 mg/g)>MS 组(0.51 mg/g)>MH 组(0.26 mg/g)>M 组(0.23 mg/g)。鲢和铜锈石田螺生物量、生物磷含量和磷变化量无显著性差异。MHS 组中狐尾藻、鲢和铜锈石田螺分别富集了 76.93%、11.58% 和 5.46% 的 TP, 表明狐尾藻对磷素的富集是系统除磷的主要途径。虽然鲢和铜锈石田螺自身富集的磷素含量较少, 但其协同作用促进了狐尾藻生物量

增加,进而促进了狐尾藻对磷的富集。与单一沉水植物系统相比,狐尾藻—鲢—铜锈石田螺组合系统中狐尾藻平均生长速率增加了34.38%。

表2 各实验组生物量、生物磷含量和不同介质中的磷变化量^{*}

Tab.2 Biomass, phosphorus content and the variation of phosphorus in different media in each experimental group

实验组	时间	生物量/g			生物磷含量/(mg/g)			磷变化量/mg				
		M	H	S	M	H	S	M	H	S	Sed	O
MHS	0 d	17.35	80.56	50.61	3.85	2.18	1.03	+283.69	+42.71	+20.14	-357.20	-11.55
	40 d	76.18	98.74	70.38	4.60	2.21	1.03					
MH	0 d	16.79	80.70	—	3.80	2.16	—	+137.97	+39.34	—	-185.80	-2.85
	40 d	50.65	97.46		4.06	2.19						
MS	0 d	17.81	—	50.79	3.88	—	0.96	+240.67	—	+24.81	-283.70	-9.30
	40 d	70.56		72.98	4.39		1.02					
M	0 d	16.96	—	—	3.92	—	—	+185.66	—	—	-224.50	-5.85
	40 d	60.74			4.15							
CK	0 d	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-24.70	+1.65
	40 d											

* M 代表狐尾藻, H 代表鲢, S 代表铜锈石田螺, Sed 代表沉积物, O 代表上覆水; +、- 分别代表介质中增加、减少的磷含量; — 表示该实验组中没有对应物质的生物量、生物磷含量以及磷变化量。

2.2 沉积物不同形态磷变化特征

沉积物磷形态可分为 OP 和 IP, 其中 IP 又可细分为 Fe/Al-P 和 Ca-P。与实验初始时刻相比, MHS 组沉积物 Fe/Al-P 在 IP 中的占比下降了 8.45%, OP 在 TP 中的占比上升了 2.67%。各实验组比较, Fe/Al-P 占 IP 的比值表现为 MHS 组(34.98%)<MS 组(37.42%)<M 组(39.70%)<MH 组(42.22%)(图 2a)。实验结束时各实验组沉积物不同形态磷的去除率均高于 CK 组, 其中 MHS 组 TP、IP、Fe/Al-P 和 Ca-P 去除率分别为 11.02%、13.60%、30.40% 和 3.25%, 显著高于其余实验组($P<0.05$) (图 2b)。

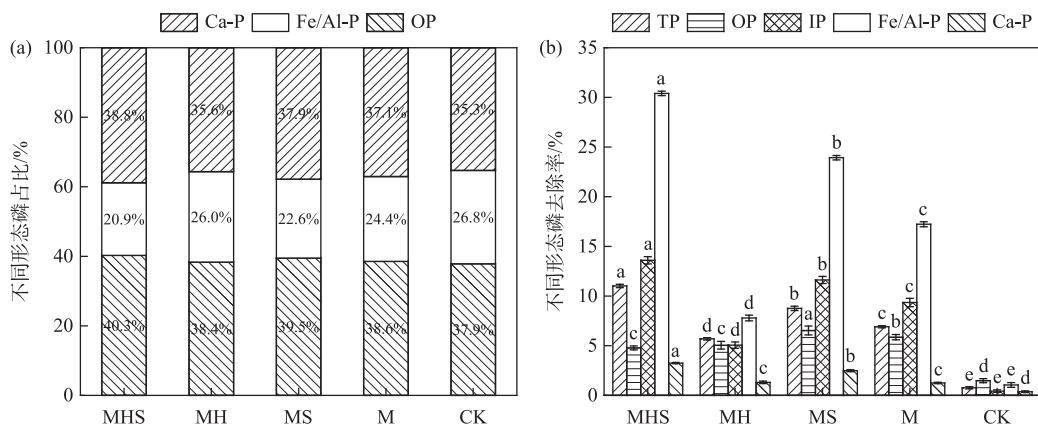


图2 各实验组沉积物不同形态磷占比(a)和TP、OP、IP、Fe/Al-P、Ca-P去除率(b)

Fig.2 The proportion of different forms of phosphorus (a) and the removal rates of TP, OP, IP, Fe/Al-P and Ca-P from sediment (b) in each experimental group

2.3 沉积物不同形态磷赋存浓度的影响因素

2.3.1 环境因子对沉积物不同形态磷赋存含量的影响分析 为探究沉水植物—水生动物组合作用下沉积物不同形态磷含量与环境因子间的关系, 对沉积物 TP、IP、OP、Fe/Al-P 和 Ca-P 与上覆水 pH、DO 和狐尾藻生

物量变化进行 Pearson 相关分析(表 3)。结果表明, pH 与 TP、IP、OP 和 Fe/Al-P 含量呈极显著负相关, 与 Ca-P 含量呈显著负相关, DO 与 TP、IP、OP 和 Fe/Al-P 含量呈显著负相关, 与 Ca-P 含量相关性不显著, 狐尾藻生物量与沉积物不同形态磷含量呈极显著负相关, 因此 pH 值和狐尾藻生物量的增加均能减少沉积物中的磷含量。其中 MHS 组 pH 和狐尾藻生物量均显著高于其余实验组($P<0.05$) (图 1c, 表 2), 这与前文所述 MHS 组对系统中磷素的去除效果最佳相一致。

表 3 实验系统沉积物不同形态磷与环境因子之间的 Pearson 相关系数
Tab.3 Pearson correlation coefficients for the relationship between different forms of phosphorus in sediment and environmental factors in the experimental system

	TP	IP	OP	Fe/Al-P	Ca-P
pH	-0.780 **	-0.779 **	-0.697 **	-0.837 **	-0.540 *
DO	-0.637 *	-0.641 *	-0.538 *	-0.653 *	-0.383
狐尾藻生物量	-0.886 **	-0.883 **	-0.849 **	-0.890 **	-0.832 **

* 表示相关性在 0.05 水平显著, ** 表示相关性在 0.01 水平显著。

2.3.2 沉积物细菌群落结构对不同形态磷赋存浓度的影响分析 (1) 细菌群落组成分析

各实验组沉积物细菌群落 α 多样性指数如表 4 所示。沉积物样品的 Goods coverage 指数均接近 1, 说明样品中物种种类的覆盖率高, 测序结果能反映样品中微生物的真实情况。MHS 组、MH 组、MS 组和 M 组相对于 CK 组 Chao1 指数分别提高了 133.81%、54.95%、138.55% 和 29.94%, Shannon 指数分别提高了 35.95%、12.39%、40.18% 和 4.53%。实验结束时, 各实验组沉积物细菌群落丰富度和多样性均表现为 MHS 组>MH 组>MS 组>M 组>CK 组。这表明, 在生态系统中投放草、鱼、螺能够增强底部微生物的丰富度及细菌群落的多样性, 提高微生物结构稳定性。其中 MHS 组的提升效果显著高于其余实验组($P<0.05$)。

细菌群落共检测到 58 门 128 纲 246 目 275 科 405 属的细菌种类。各实验组沉积物细菌门水平上排名前 10 的优势物种的相对丰度如图 3 所示。结果表明, 变形菌门 (*Proteobacteria*) 为各实验组沉积物中的绝对优势菌门。实验第 20 天, MHS 组、MH 组、MS 组和 M 组沉积物变形菌门相对丰度与 CK 组相比分别高了 13.46%、12.52%、10.78% 和 1.66%。其中 MHS 组和 MS 组沉积物绿弯菌门 (*Chloroflexi*) 占比较高, 分别为 9.11% 和 8.76%。M 组沉积物厚壁菌门 (*Firmicutes*) 占比较高 (为 25.25%)。实验第 40 天, CK 组沉积物蓝细菌门 (*Cyanobacteria*) 占比由 0.19% 提升至 1.31%, MH 组和 M 组沉积物酸杆菌门 (*Acidobacteria*) 占比分别由 1.73%、3.32% 提升至 10.15%、19.81%, MHS 组沉积物拟杆菌门 (*Bacteroidetes*) 占比由 4.72% 提升至 11.64%。从整体上看, MHS 组沉积物 *Proteobacteria* 占比始终高于其余实验组。

实验第 20 天及 40 天时, 各实验组沉积物主要菌属相对丰度如表 5 所示。实验第 20 天, 假单胞菌属 (*Pseudomonas*) 和硫杆菌属 (*Thiobacillus*) 为 MHS 组和 MS 组沉积物优势菌属, *Sulfuricurvum* 为 MH 组沉积物优势菌属, 芽孢杆菌属 (*Bacillus*) 为 M 组和 CK 组沉积物优势菌属。其中 MHS 组沉积物 *Pseudomonas* 和 *Thiobacillus* 的相对丰度分别为 5.29% 和 5.10%, 与其余实验组相比分别提高了 1.72%~4.97% 和 1.33%~4.83%。实验第 40 天时, MHS 组沉积物 *Pseudomonas* 和 *Thiobacillus* 仍为优势菌属, 且相对丰度分别进一步提高至 6.37% 和 6.23%, 而其余实验组沉积物优势菌属均变为共生杆菌属 (*Symbiobacterium*)。

表 4 各实验组 α 多样性指数

Tab.4 Alpha diversity index in each experimental group

实验组	实验时间	Chao1	Shannon	Goods coverage
CK	20 d	1959.8	6.62	0.995
MHS		4582.3	9.00	0.990
MH		3036.7	7.44	0.992
MS		4675.2	9.28	0.991
M		2546.6	6.92	0.993
CK	40 d	2046.2	6.84	0.994
MHS		4283.4	8.77	0.990
MH		3728.6	8.03	0.992
MS		3403.5	7.50	0.991
M		2267.5	7.03	0.995

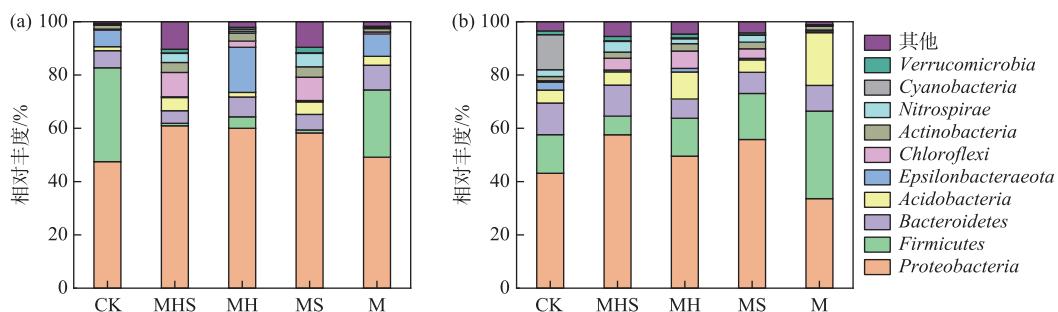


图3 实验第 20 天(a)和第 40 天(b)各实验组沉积物细菌门水平上排名前 10 的优势菌门的相对丰度

Fig.3 The relative abundance of the top 10 dominant bacterial at the phylum level in sediment in each experimental group on the day of 20th(a) and 40th(b)

表 5 各实验组沉积物主要菌属相对丰度变化

Tab.5 Changes in the relative abundance of major bacterial genera in sediment in each experimental group

优势菌属	相对丰度/%									
	第 20 天					第 40 天				
	MHS	MH	MS	M	CK	MHS	MH	MS	M	CK
<i>Pseudomonas</i>	5.29	1.26	3.57	1.50	0.32	6.37	0.63	4.12	2.13	0.47
<i>Thiobacillus</i>	5.10	1.84	3.77	2.21	0.27	6.23	1.44	4.28	2.07	0.53
<i>Symbiobacterium</i>	0.22	0.35	0.19	0.98	7.69	5.63	12.44	15.54	27.57	13.39
<i>Geobacter</i>	0.41	0.73	0.52	1.81	1.09	3.58	0.57	0.40	0.81	0.31
OLB12	0.26	1.45	0.48	0.53	0.20	3.20	0.69	2.76	0.30	3.76
<i>Massilia</i>	0.64	3.65	1.97	1.11	3.88	0.56	0.75	1.51	0.11	0.37
<i>Sulfuricurvum</i>	0.25	10.21	0.46	8.66	3.89	0.55	1.17	0.48	0.59	2.87
<i>Bacillus</i>	0.11	1.45	0.15	18.83	9.90	0.12	0.14	0.09	2.26	0.33

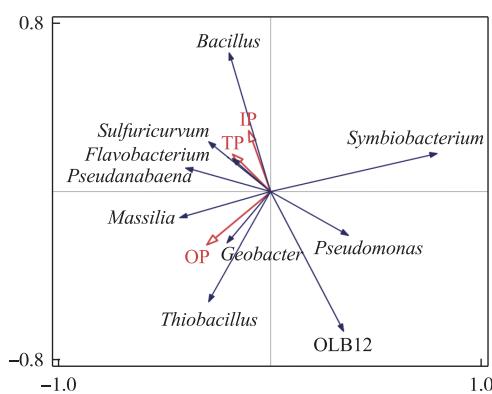


图 4 基于属水平细菌群落相对丰度与沉积物不同形态磷的 RDA 分析

Fig.4 Redundancy analysis(RDA) of the relative abundance of bacterial communities at genera level and different forms of phosphorus in sediment

(2) 沉积物不同形态磷赋存浓度与细菌群落结构的相关性分析

对沉积物不同形态磷浓度与属水平上(相对丰度前10)的细菌群落相对丰度进行 RDA 分析。由于环境因子间存在较强的共线性,因此在进行 RDA 分析前先采用方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)分析过滤掉 VIF 值大于 10 的环境因子^[32], 分析结果如图 4 所示。图中第一与第二主轴分别解释了沉积物细菌群落相对丰度变异的 28.75% 和 20.64%。沉积物 *Thiobacillus*、OLB12 和 *Pseudomonas* 与 TP、IP 含量呈显著负相关,其中 *Pseudomonas* 和 *Thiobacillus* 对沉积物难溶性磷向可溶性磷的转化起着重要作用^[33]。实验第 20 天和第 40 天时, MHS 组沉积物 *Pseudomonas* 和 *Thiobacillus* 占比均高于其余实验组,表明 MHS 组合系统能改善沉积物中微生物的群落结构,有效促进沉积物 Ca-P 向 Fe/Al-P 转化,从而强化系统对沉积物磷的去除。

3 讨论

3.1 狐尾藻—鲢—铜锈石田螺组合系统对不同介质中磷赋存量的影响

沉水植物需要吸收磷用以合成蛋白质、酶、核酸等活性大分子有机物,从而满足自身生理需求^[12]。本实验系统相对封闭,无其他外源性磷素输入,因此各实验组沉水植物在生长过程中富集的磷均来自系统内部。狐尾藻—鲢—铜锈石田螺组合系统能够有效强化上覆水和沉积物磷的去除效果,其对上覆水和沉积物 TP 的去除率分别为 71.96% 和 11.02%。相关研究表明,苦草、黑藻、微齿眼子菜等单一沉水植物系统以及金鱼藻—鲫、苦草—背角无齿蚌等组合系统对水体中 TP 的去除率约为 35.79% ~ 70.8%^[34-38]。本研究将狐尾藻、鲢和铜锈石田螺进行组合,组合系统对上覆水 TP 去除效果显著。在狐尾藻—鲢—铜锈石田螺组合系统中,狐尾藻 TP 富集量占比为 76.93%,远高于鲢和铜锈石田螺 TP 富集量(分别为 11.58% 和 5.46%),说明沉水植物仍然是系统修复的核心。滤食性的鲢可通过摄食浮游植物,减小沉水植物的竞争压力^[8,39],铜锈石田螺可以通过刮食沉水植物叶片表面的固着藻类^[40],并影响水体和底泥的营养盐含量,从而促进沉水植物的生长^[41]。本研究中鲢和铜锈石田螺直接富集的 TP 量较少,但其协同作用可有效促进狐尾藻的生长,增强狐尾藻对磷的富集能力,强化系统对磷素的去除效果。

本研究并未探究沉水植物在衰亡期对上覆水的影响,而沉水植物在衰亡分解后,体内的磷可能会被重新释放进入上覆水中,造成二次污染,增加磷的内循环^[42]。在生态修复过程中,避免沉水植物衰亡变成二次污染源、引起水质恶化是保障修复效果的要点。对沉水植物采取合理管控,如根据沉水植物的生长状况适时进行收割、搭配种植不同生长期的沉水植物等^[43],能减少沉水植物体内磷的再释放。

3.2 狐尾藻—鲢—铜锈石田螺组合系统对沉积物不同形态磷释放的影响

大型水生植物特别是沉水植物可以有效改善水体生境条件。实验结果表明,MHS 组、MS 组和 M 组均能显著提升上覆水 pH 值和 DO 浓度。上覆水 pH 值能够影响磷与 Fe/Al 和 Ca 等金属的结合,是沉积物磷释放或吸附的重要影响因素之一^[44-45]。pH 值降低会导致 CaCO_3 结合态磷再溶解,使沉积物 Ca-P 趋于向上覆水释放^[46]。Fe/Al-P 对高 pH 值较敏感,这主要是由于在配体交换反应下 OH^- 可以取代正磷酸盐,有研究指出在 pH 值升高时,Fe/Al-P 的释放会增加^[47]。本研究中,狐尾藻—鲢—铜锈石田螺组合系统显著提高了上覆水 pH,会抑制沉积物 Ca-P 的释放,同时也可能增加沉积物 Fe/Al-P 的释放。另一方面,狐尾藻—鲢—铜锈石田螺组合系统显著增加上覆水 DO 浓度,而较高的 DO 浓度则会对沉积物磷释放产生抑制作用^[48]。因此,沉积物磷的释放同时受到上覆水 pH 和 DO 影响,且 DO 对沉积物磷释放的抑制作用强于 pH 升高对 Fe/Al-P 释放的促进作用^[49],综合作用的结果导致系统对沉积物磷的释放起抑制作用。

植物根系对沉积物中磷的吸收效率与磷的结合形态密切相关^[50],Fe/Al-P 是沉积物中相对活跃、易于被沉水植物吸收利用的无机磷的主要形态^[51]。本研究中,MHS 组对沉积物 Fe/Al-P 的去除率(30.40%)显著高于其余各形态磷(3.25% ~ 11.02%),系统对沉积物 Fe/Al-P 的吸收是导致 TP 降低的主要原因,而鲢和铜锈石田螺的协同作用有效提升了 MHS 系统中狐尾藻生物量,显著促进狐尾藻根系发育,提高了根系对沉积物 Fe/Al-P 的吸收效率。另一方面,沉积物磷的赋存形态会影响磷向水体释放。沉积物中 Ca-P 主要以磷灰石形态存在,化学性质比较稳定,向上覆水释放风险较低^[52],而 Fe/Al-P 则易于向上覆水释放^[53],因此 Fe/Al-P 在 IP 中的占比(Fe/Al-P:IP)可作为预测湖泊富营养化风险的重要指标^[54-55]。相关研究表明,沉积物中较高的 Fe/Al-P:IP 是增加太湖沉积物磷释放风险的重要因素之一^[47]。在本研究中,狐尾藻—鲢—铜锈石田螺组合系统对沉积物 Fe/Al-P 有较为显著的去除效果(Fe/Al-P 从 85.98 mg/kg 降低至 59.84 mg/kg, Fe/Al-P:IP 从 43.43% 降低至 34.98%),表明狐尾藻—鲢—铜锈石田螺组合系统对抑制太湖沉积物磷释放、降低富营养化风险具有积极意义。

3.3 狐尾藻—鲢—铜锈石田螺组合系统对沉积物不同形态磷转化的影响

Proteobacteria、*Chloroflexi* 是湖泊生态系统中的优势菌群,参与湖泊生态系统中生物地球化学循环过程^[56]。本研究中 MHS 组沉积物 *Proteobacteria*、*Chloroflexi* 占比与其他实验组相比均有所提升,说明狐尾藻—鲢—铜锈石田螺组合系统有助于改善沉积物微生物环境,促进沉水植物生长^[57-58]。

RDA 分析表明,作为解磷菌最主要菌属之中的 *Pseudomonas* 和 *Thiobacillus* 与 TP 含量呈负相关。在实

验期间,MHS 组沉积物 *Pseudomonas* 和 *Thiobacillus* 占比均较高,说明狐尾藻-鲢-铜锈石田螺组合系统为解磷菌的生长创造了更适宜的条件,而解磷菌可通过自身代谢、改变环境条件等方式将沉积物中难溶性的磷化合物转化为易被植物吸收利用的可溶性磷^[59-60],从而降低了沉积物 TP 含量。

通常,沉积物 OP 多数以磷酸脂、磷酸、核酸、磷蛋白和磷酸糖类及一些未知的化合物等形态出现。磷酸脂主要是指肌醇六磷酸,这种磷酸是沉积物 OP 的重要形态,可被矿化为 IP,而微生物的矿化作用是引发 OP 向 IP 转化的主要生物驱动因素^[61]。本研究实验开始和结束时 MHS 组沉积物 OP 含量存在一定差异,表明实验期间微生物具有一定的矿化作用。

图 5 所示为狐尾藻-鲢-铜锈石田螺组合系统中磷元素的迁移转化路径。在自然水体中,沉积物中的磷会向上覆水释放并被藻类吸收利用,从而导致水体富营养化。在狐尾藻-鲢-铜锈石田螺组合系统中,狐尾藻一方面可以抑制沉积物再悬浮,使上覆水中颗粒态的磷重新沉降至底部,另一方面狐尾藻根系可以直接吸收沉积物中的 Fe/Al-P,降低沉积物中的 IP 含量,减小沉积物磷向上覆水释放的风险。鲢和铜锈石田螺分别可以通过滤食和刮食作用摄入水中的藻类,将部分磷素储存在体内^[24,62],同时鲢和铜锈石田螺可以促进狐尾藻生长,强化狐尾藻对磷素的吸收。此外,狐尾藻-鲢-铜锈石田螺组合系统通过改善沉积物微生物环境,为沉积物中解磷菌 (*Pseudomonas* 和 *Thiobacillus*) 的生长提供良好条件,促进沉积物中难溶的 OP、Ca-P 向易被植物吸收利用的 Fe/Al-P 转化,提高植物根系对沉积物 IP 的吸收效率。

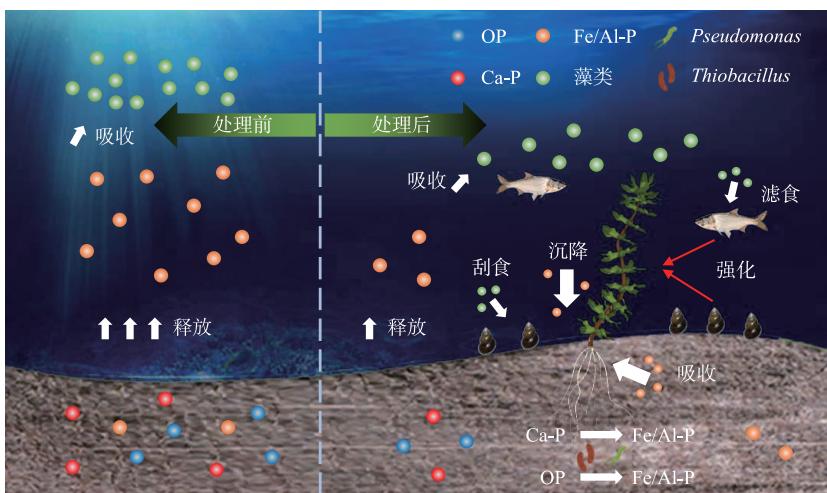


图 5 MHS 组合系统中磷元素迁移转化路径

Fig.5 Pathways of phosphorus migration and transformation in MHS combination system

本研究以太湖东部湖区上覆水及沉积物为处理对象,通过室内微宇宙实验研究了不同沉水植物-水生动物组合对沉积物磷赋存特征的影响,但实际湖泊野外自然条件与室内受控实验条件存在一定差异,后期应加强沉水植物与水生动物组合的原位实验研究,并考虑植物衰亡、季节温度变化、风浪条件等因素对系统修复效果的影响,以期为富营养化湖泊生态修复提供科学依据。

4 结论

1) 在狐尾藻-鲢-铜锈石田螺组合系统中,狐尾藻对沉积物及上覆水中磷素的富集是系统去除磷素的主要途径,鲢和铜锈石田螺的协同可显著改善水体生境条件,促进狐尾藻的生长,强化狐尾藻对磷的富集能力。与狐尾藻-狐尾藻-鲢、狐尾藻-铜锈石田螺系统相比,狐尾藻-鲢-铜锈石田螺组合系统对上覆水与沉积物中的 TP 去除效果有显著提升。

2) 沉积物磷的去除主要取决于植物根系对 Fe/Al-P 的吸收,沉积物去除的 IP 中 85% 以上为 Fe/Al-P。狐尾藻-鲢-铜锈石田螺组合系统对沉积物 Fe/Al-P 有较好的去除效果,在太湖等沉积物 Fe/Al-P 含量较高

的浅水湖泊中具有较好的应用前景,能够有效降低湖泊富营养化风险。

3) 狐尾藻—鲢—铜锈石田螺组合系统提升了沉积物细菌群落丰富度和多样性,提高了 *Pseudomonas* 和 *Thiobacillus* 的相对丰度,并且 *Pseudomonas* 和 *Thiobacillus* 均与 TP 含量呈显著负相关,是影响沉积物磷迁移转化的主要功能菌。*Pseudomonas* 和 *Thiobacillus* 相对丰度的增加可有效促进沉积物中难溶的 OP、Ca-P 向易被植物吸收利用的 Fe/Al-P 转化。

5 参考文献

- [1] Zhang YL, Qin BQ, Zhu GW. Long-term changes in physical environments and potential implications for the eco-environment of Lake Taihu in the past four decades. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1348-1359. DOI: 10.18307/2020.0503. [张运林, 秦伯强, 朱广伟. 过去 40 年太湖剧烈的湖泊物理环境变化及其潜在生态环境意义. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1348-1359.]
- [2] Zhang YL, Zhang YB, Zhou YQ et al. Ecological environment changes of lakes in middle and lower reaches of Yangtze River since ecological civilization construction implementation. *Yangtze River*, 2023, **54**(1): 14-23. [张运林, 张毅博, 周永强等. 生态文明建设以来长江中下游湖泊水生态环境变化. 人民长江, 2023, **54**(1): 14-23.]
- [3] Liu ZS, Zhang Y, Yan P et al. Synergistic control of internal phosphorus loading from eutrophic lake sediment using MMF coupled with submerged macrophytes. *Science of the Total Environment*, 2020, **731**: 138697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138697.
- [4] Shan K, Wang XX, Yang H et al. Use statistical machine learning to detect nutrient thresholds in *Microcystis* blooms and microcystin management. *Harmful Algae*, 2020, **94**: 101807. DOI: 10.1016/j.hal.2020.101807.
- [5] Zhu GW, Qin BQ, Zhang YL et al. Fluctuation of phosphorus concentration in Lake Taihu in the past 70 years and future control strategy. *J Lake Sci*, 2021, **33**(4): 957-973. DOI: 10.18307/2021.0401. [朱广伟, 秦伯强, 张运林等. 近 70 年来太湖水体磷浓度变化特征及未来控制策略. 湖泊科学, 2021, **33**(4): 957-973.]
- [6] Qin BQ. Shallow lake limnology and control of eutrophication in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1229-1243. DOI: 10.18307/2020.0501. [秦伯强. 浅水湖泊湖沼学与太湖富营养化控制研究. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1229-1243.]
- [7] Gao HL, Qian X, Wu HF et al. Combined effects of submerged macrophytes and aquatic animals on the restoration of a eutrophic water body—A case study of Gonghu Bay, Lake Taihu. *Ecological Engineering*, 2017, **102**: 15-23. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.01.013.
- [8] Chen ZQ, Zhao D, Li ML et al. A field study on the effects of combined biomanipulation on the water quality of a eutrophic lake. *Environmental Pollution*, 2020, **265**(Pt A): 115091. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115091.
- [9] Cheng H, Han CM, Lin C et al. Study on control effect of submerged plant-filter feeder combination on cyanobacteria growth. *Technology of Water Treatment*, 2022, **48**(1): 95-98. [程花, 韩翠敏, 林超等. 沉水植物-滤食动物联合抑制蓝藻效果研究. 水处理技术, 2022, **48**(1): 95-98.]
- [10] Wang DS, Gan XY, Wang ZQ et al. Research status on remediation of eutrophic water by submerged macrophytes: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, **169**: 671-684. DOI: 10.1016/j.psep.2022.11.063.
- [11] Cheng S, Tan S, Li Z. Ecological interaction between submerged macrophytes and zoobenthos. *J Earth Sci Environ Studies*, 2017, **2**: 173-182. DOI: 10.15436/JESES.2.2.2.
- [12] Lin QW, Fan MJ, Peng X et al. Response of *Vallisneria natans* to aluminum phytotoxicity and their synergistic effect on nitrogen, phosphorus change in sediments. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **400**: 123167. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123167.
- [13] Zhang Y, Shen RJ, Gu XH et al. Simultaneous increases of filter-feeding fish and bivalves are key for controlling cyanobacterial blooms in a shallow eutrophic lake. *Water Research*, 2023, **245**: 120579. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120579.
- [14] Shen XX, Yuan NN, Wang CH. The bioturbation effect of the snail *Bellamya aeruginosa* on phosphorus immobilisation by drinking water treatment residue in sediment: A long-term continuous flow test. *Journal of Environmental Management*, 2020, **266**: 110579. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110579.
- [15] Wu QL, Xie CX, Zhao F et al. Effects of *Vallisneria natans* on the occurrence characteristic of phosphorus fractions in sediment. *J Lake Sci*, 2014, **26**(2): 228-234. DOI: 10.18307/2014.0209. [吴强亮, 谢从新, 赵峰等. 沉水植物苦草 (*Vallisneria natans*) 对沉积物中磷赋存形态的影响. 湖泊科学, 2014, **26**(2): 228-234.]
- [16] Jiao Y, Yang C, He W et al. The spatial distribution of phosphorus and their correlations in surface sediments and pore water in Lake Chao-hu, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(26): 25906-25915. DOI: 10.1007/s11356-018-2606-x.
- [17] Xing XL, Chen MS, Wu YX et al. The decomposition of macrozoobenthos induces large releases of phosphorus from sediments. *Environmental Pollution*, 2021, **283**: 117104. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117104.
- [18] Wang LZ, Dong S, Song HL et al. Effects of alternating growth of declining *H. verticillata* and growing *P. crispus* on phosphorus migration in water. *Ecological Science*, 2020, **39**(3): 160-171. [王立志, 董彬, 宋红丽等. 衰亡期黑藻与生长期菹草交替生长对水体磷迁移的影响. 生态科学, 2020, **39**(3): 160-171.]
- [19] Yan ZW, Wu L, Lv T et al. Response of spatio-temporal changes in sediment phosphorus fractions to vegetation restoration in the degraded river-lake ecotone. *Environmental Pollution*, 2022, **308**: 119650. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119650.
- [20] Yang Y, Chen W, Yi ZY et al. The integrative effect of periphyton biofilm and tape grass (*Vallisneria natans*) on internal loading of shallow

- eutrophic lakes. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(2): 1773-1783. DOI: 10.1007/s11356-017-0623-9.
- [21] Wu XM, Ye MF, Wu FL et al. Accumulation, subcellular distribution, and chemical forms of copper in *Myriophyllum spicatum* L. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, **43**(5): 1114-1122. [吴晓梅, 叶美锋, 吴飞龙等. 铜在狐尾藻中的积累及亚细胞分布和化学形态. 农业环境科学学报, 2024, **43**(5): 1114-1122.]
- [22] Yang JJ, Guo LG, Yin CJ et al. Preliminary evaluation of ecological effects of silver and bighead carps to control cyanobacterial blooms in the early eutrophication lakes. *J Lake Sci*, 2019, **31**(2): 386-396. DOI: 10.18307/2019.0208. [杨姣姣, 过龙根, 尹成杰等. 富营养化初期湖泊放养鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)控藻生态效果的初步评估. 湖泊科学, 2019, **31**(2): 386-396.]
- [23] Zhu SH, Hu HJ, Jia J et al. Phosphorus cycle of silver carp feeding on different algae and its effect on the water nutrient cycle. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, **48**(5): 744-752. [朱思婳, 胡红娟, 贾佳等. 鲢滤食不同藻类的磷吸收及排泄过程研究. 水生生物学报, 2024, **48**(5): 744-752.]
- [24] Yang L, He H, Guan BH et al. Mesocosm experiment reveals a strong positive effect of snail presence on macrophyte growth, resulting from control of epiphyton and nuisance filamentous algae: Implications for shallow lake management. *Science of the Total Environment*, 2020, **705**: 135958. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135958.
- [25] Lin QQ, Zeng DQ, Guo TY et al. Filter-feeding fish(*Hypophthalmichthys molitrix*) mediated phosphorus recycling versus grazing pressure as drivers of the trophic cascade in large enclosures subsidized by allochthonous detritus. *Water Research*, 2021, **204**: 117579. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117579.
- [26] Zhang H, Luo X, Li Q et al. Response of the submerged macrophytes *Vallisneria natans* to snails at different densities. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **194**: 110373. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.110373.
- [27] Tu X, Feng Z, Zhu HT et al. Effect of planting density on water purification efficiency of four submerged macrophytes. *Environmental Protection Science*, 2022, **48**(6): 102-109. [涂茜, 冯志, 朱海涛等. 种植密度对4种沉水植物净化富营养化水体效果的影响. 环境保护科学, 2022, **48**(6): 102-109.]
- [28] Loh PS, Ying CY, Alnoor HIM et al. Comparative study on the elucidation of sedimentary phosphorus species using two methods, the SMT and SEDEX methods. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2020, **2020**(1): 8548126. DOI: 10.1155/2020/8548126.
- [29] Li ZQ, He L, Zhang H et al. Climate warming and heat waves affect reproductive strategies and interactions between submerged macrophytes. *Global Change Biology*, 2017, **23**(1): 108-116. DOI: 10.1111/gcb.13405.
- [30] Wang CG, Zhu L, Huang LL et al. Ecological stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in fishes from Beibu Gulf, southern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(10): 4226-4241. DOI: 10.5846/stxb202207051916. [王才广, 朱亮, 黄亮亮等. 北部湾鱼类碳、氮、磷生态化学计量特征. 生态学报, 2023, **43**(10): 4226-4241.]
- [31] Cai YJ, Xue QJ, Xu J et al. Widespread natural intraspecific variation in tissue stoichiometry of two freshwater molluscs: Effect of nutrient enrichment. *Ecological Indicators*, 2016, **66**: 583-591. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.02.022.
- [32] Zhang J, Shang YM, Xie JY et al. Geographic distribution and co-occurrence characteristics of soil bacterial and archaeal community in the five largest freshwater lake wetlands in China. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**(12): 4131-4139. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202012.038. [张杰, 尚妍萌, 谢钧宇等. 我国五大淡水湖泊湿地土壤细菌和古菌群落的地理分布及其共现性特征. 生态学杂志, 2020, **39**(12): 4131-4139.]
- [33] Chi JL, Hao M, Wang ZX et al. Advances in research and application of phosphorus-solubilizing microorganism. *Journal of Microbiology*, 2021, **41**(1): 1-7. DOI: 10.3969/j.issn.1005-7021.2021.01.001. [池景良, 郝敏, 王志学等. 解磷微生物研究及应用进展. 微生物学杂志, 2021, **41**(1): 1-7.]
- [34] Chen SW, Jiang L, Ma SZ et al. Response of a submerged macrophyte(*Vallisneria natans*) to water depth gradients and sediment nutrient concentrations. *Science of the Total Environment*, 2024, **912**: 169154. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169154.
- [35] Li Y, Wang LG, Chao CX et al. Submerged macrophytes successfully restored a subtropical aquacultural lake by controlling its internal phosphorus loading. *Environmental Pollution*, 2021, **268**(Pt B): 115949. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115949.
- [36] Jin SQ, Zhou JB, Bao WH et al. Comparison of nitrogen and phosphorus uptake and water purification ability of five submerged macrophytes. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 156-161. DOI: 10.13227/j.hjkx.201606135. [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. 环境科学, 2017, **38**(1): 156-161.]
- [37] Li P, Zhang XF, Mo SQ et al. Effects of mussel (*Anodonta woodiana*), submerged macrophyte (*Vallisneria natans*) and their coexistence on water. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(6): 1589-1594. DOI: 10.13292/i.1000-4890.201606.028. [李萍, 张修峰, 莫树青. 背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)、苦草(*Vallisneria natans*)及其共存对水质的影响. 生态学杂志, 2016, **35**(6): 1589-1594.]
- [38] Wang XP, Wang YB, Yang GJ et al. The effects of different fish species on growth of submerged macrophytes. *J Lake Sci*, 2016, **28**(6): 1354-1360. DOI: 10.18307/2016.0621. [王晓平, 王玉兵, 杨桂军等. 不同鱼类对沉水植物生长的影响. 湖泊科学, 2016, **28**(6): 1354-1360.]
- [39] Liu ZW, Hu JR, Zhong P et al. Successful restoration of a tropical shallow eutrophic lake: Strong bottom-up but weak top-down effects recorded. *Water Research*, 2018, **146**: 88-97. DOI: 10.1016/j.watres.2018.09.007.
- [40] Luo CQ, Jiang DL, Lei C et al. *Bellamya aeruginosa* promote the growth of *Vallisneria natans* and improve water quality in high nutrient en-

- vironment. *Environmental Ecology*, 2020, **2**(6) : 27-33. [罗丛强, 蒋东利, 雷澄等. 富营养化水体中铜锈环棱螺促进苦草生长和水质改善研究. 环境生态学, 2020, **2**(6) : 27-33.]
- [41] Li W, Hu SF, Chen N et al. Effects of different densities of *Bellamya aeruginosa* on growth of submerged macrophytes and water quality. *Water Resources Protection*, 2022, **38**(3) : 198-204. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2022.03.027. [李威, 胡淑芳, 陈楠等. 不同密度铜锈环棱螺对沉水植物生长和水质的影响. 水资源保护, 2022, **38**(3) : 198-204.]
- [42] Wang LZ, Liu QJ, Hu CW et al. Phosphorus release during decomposition of the submerged macrophyte *Potamogeton crispus*. *Limnology*, 2018, **19**(3) : 355-366. DOI: 10.1007/s10201-018-0538-2.
- [43] Hu A, Li YH, Yang YJ et al. Effects of different growth form submerged macrophyte assemblages on biomass accumulation and water purification. *J Lake Sci*, 2022, **34**(5) : 1484-1492. DOI: 10.18307/2022.0527. [胡傲, 李宇辉, 杨予静等. 不同生长型沉水植物配置对生物量积累和水质净化效果的影响. 湖泊科学, 2022, **34**(5) : 1484-1492.]
- [44] Kim LH, Choi E, Stenstrom MK. Sediment characteristics, phosphorotypes and phosphorus release rates between river and lake sediments. *Chemosphere*, 2003, **50**(1) : 53-61. DOI: 10.1016/s0045-6535(02)00310-7.
- [45] Huang W, Liu X, Zhao L et al. Release characteristics of phosphorus in sediment from Daihai Lake. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(9) : 2094-2102. DOI: 10.13198.j.issn.1001-6929.2020.04.17. [黄威, 刘星, 赵丽等. 岱海沉积物内源磷释放特征的研究. 环境科学研究, 2020, **33**(9) : 2094-2102.]
- [46] Huser BJ, Egemoose S, Harper H et al. Longevity and effectiveness of aluminum addition to reduce sediment phosphorus release and restore lake water quality. *Water Research*, 2016, **97** : 122-132. DOI: 10.1016/j.watres.2015.06.051.
- [47] Jin XC, Wang SR, Pang Y et al. Phosphorus fractions and the effect of pH on the phosphorus release of the sediments from different trophic areas in Taihu Lake, China. *Environmental Pollution*, 2006, **139**(2) : 288-295. DOI: 10.1016/j.envpol.2005.05.010.
- [48] Zhang Q, Liu YP, Luo FL et al. Does species richness affect the growth and water quality of submerged macrophyte assemblages? *Aquatic Botany*, 2019, **153** : 51-57. DOI: 10.1016/j.aquabot.2018.11.006.
- [49] Wang LZ, Wang GX, Yu ZF et al. Influence of submerged macrophytes on phosphorus transference between sediment and overlying water in the growth period. *Environmental Science*, 2012, **33**(2) : 385-392. DOI: 10.13227/j.hjkx.2012.02.001. [王立志, 王国祥, 俞振飞等. 沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响. 环境科学, 2012, **33**(2) : 385-392.]
- [50] Wang LZ, Wang GX, Yu ZF et al. Effects of *Vallisneria natans* on sediment phosphorus fractions and transfer during the growth period. *J Lake Sci*, 2011, **23**(5) : 753-760. DOI: 10.18307/2011.0513. [王立志, 王国祥, 俞振飞等. 苦草(*Vallisneria natans*)生长期对沉积物磷形态及迁移的影响. 湖泊科学, 2011, **23**(5) : 753-760.]
- [51] Yuan FS, Li HW, Kakarla R et al. Variability of sedimentary phosphorus fractions in the western and Sandusky Basins of Lake Erie. *Journal of Great Lakes Research*, 2020, **46**(4) : 976-988. DOI: 10.1016/j.jglr.2020.05.013.
- [52] Jin XD, He YL, Kirumba G et al. Phosphorus fractions and phosphate sorption-release characteristics of the sediment in the Yangtze River Estuary reservoir. *Ecological Engineering*, 2013, **55** : 62-66. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.02.001.
- [53] Gao L, Zhou JM, Yang H et al. Phosphorus fractions in sediment profiles and their potential contributions to eutrophication in Dianchi Lake. *Environmental Geology*, 2005, **48**(7) : 835-844. DOI: 10.1007/s00254-005-0005-3.
- [54] Kaiserli A, Voutsas D, Samara C. Phosphorus fractionation in lake sediments—Lakes Volvi and Koronia, N. Greece. *Chemosphere*, 2002, **46**(8) : 1147-1155. DOI: 10.1016/s0045-6535(01)00242-9.
- [55] Penn MR, Auer T, Van Orman EL et al. Phosphorus diagenesis in lake sediments: Investigations using fractionation techniques. *Marine and Freshwater Research*, 1995, **46**(1) : 89. DOI: 10.1071/mf9950089.
- [56] Zhang JX, Yang YY, Zhao L et al. Distribution of sediment bacterial and archaeal communities in plateau freshwater lakes. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, **99**(7) : 3291-3302. DOI: 10.1007/s00253-014-6262-x.
- [57] He RJ, Zeng J, Zhao DY et al. Contrasting patterns in diversity and community assembly of *Phragmites australis* root-associated bacterial communities from different seasons. *Applied and Environmental Microbiology*, 2020, **86**(14) : e00379-e00320. DOI: 10.1128/AEM.00379-20.
- [58] Wang P, Chen B, Zhang H. High throughput sequencing analysis of bacterial communities in soils of a typical Poyang Lake wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(5) : 1650-1658. DOI: 10.5846/stxb201510052000. [王鹏, 陈波, 张华. 基于高通量测序的鄱阳湖典型湿地土壤细菌群落特征分析. 生态学报, 2017, **37**(5) : 1650-1658.]
- [59] Li H, Song CL, Yang L et al. Phosphorus supply pathways and mechanisms in shallow lakes with different regime. *Water Research*, 2021, **193** : 116886. DOI: 10.1016/j.watres.2021.116886.
- [60] Song CL, Cao XY, Zhou YY et al. Different pathways of nitrogen and phosphorus regeneration mediated by extracellular enzymes in temperate lakes under various trophic state. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(31) : 31603-31615. DOI: 10.1007/s11356-018-3144-2.
- [61] Joshi SR, Kukkadapu RK, Burdige DJ et al. Organic matter remineralization predominates phosphorus cycling in the mid-bay sediments in the Chesapeake Bay. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(10) : 5887-5896. DOI: 10.1021/es5059617.
- [62] Peng GG, Zhou XJ, Xie B et al. Ecosystem stability and water quality improvement in a eutrophic shallow lake via long-term integrated bio-manipulation in Southeast China. *Ecological Engineering*, 2021, **159** : 106119. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2020.106119.