

基于结构方程模型的矮慈姑生长与污染底泥修复的 互作机制

陈 军^{1,2,3}, 吴 琼^{1,2,3}, 周新民⁴, 杜冬阳⁴

(1. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611;

2. 水利部珠江河口治理与保护重点实验室, 广东 广州 510611;

3. 广东省河湖生命健康工程技术研究中心, 广东 广州 510611; 4. 广州市河涌监测中心, 广东 广州 510611)

摘要: 基于结构方程模型考察了矮慈姑对污染底泥的修复效果, 同时研究了不同性质底泥(稻田土、黑臭底泥、硝酸盐处理后底泥和低水位处理后底泥)对矮慈姑生长的影响。结果表明: 种植矮慈姑对于去除底泥中的污染物具有显著的促进作用; 植物生长方面, 黑臭底泥组中极高的硫化物、总氮和总有机碳含量导致组内矮慈姑在试验初期(第 5 天)死亡, 低水位处理组和硝酸盐处理组中的矮慈姑生物量增长量显著高于稻田土组, 经硝酸盐或低水位处理的黑臭底泥比稻田土更适宜矮慈姑生长, 总有机碳、总氮和总磷是影响植物生长的主要因素; 互作机制方面, 沉水植物生长与底泥污染物含量之间具有显著的负向反馈关系, 说明在污染物浓度特定的阈值范围内实施植物修复, 可实现植物生长-底泥净化的协同效应, 但污染物超量时系统平衡将被打破; 总氮、硫化物和总有机碳对于植物的生长抑制影响较大, 而总磷则因为对植物生长抑制影响较小, 在结构方程模型优化过程中已被删除。

关键词: 矮慈姑; 污染底泥; 沉水植物; 污染底泥修复; 结构方程模型

中图分类号: X173

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2025)05-0329-08

Interaction mechanism between the growth of *Sagittaria pygmaea* Miq. and the remediation of contaminated sediment based on the structural equation model//CHEN Jun^{1,2,3}, WU Qiong^{1,2,3}, ZHOU Xinmin⁴, DU Dongyang⁴

(1. Pearl River Water Resources Research Institute, Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou 510611, China; 2. Key Laboratory of the Pearl River Estuary Regulation and Protection of the Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China; 3. Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center for Life and Health of River & Lake, Guangzhou 510611, China; 4. Guangzhou Municipal Waterway Monitoring Center, Guangzhou 510611, China)

Abstract: Taking *Sagittaria pygmaea* Miq. as the research object, this study investigated its remediation effect on contaminated sediment based on the structural equation model, and meanwhile examined the impacts of sediments with different properties (paddy soil, black-odor sediment, nitrate-treated sediment, and low-water-level-treated sediment) on the growth of *Sagittaria pygmaea* Miq.. The results showed that: planting submerged plants significantly promoted the removal of pollutants in sediments; in terms of plant growth, the extremely high concentrations of sulfide, total nitrogen (TN), and total organic carbon (TOC) in the black-odor sediment group led to the death of *Sagittaria pygmaea* Miq. in this group at the early stage of the experiment (on the 5th day). The biomass increment of *Sagittaria pygmaea* Miq. in the low-water-level group and the nitrate group was significantly higher than that in the paddy soil group, indicating that black-odor sediment treated with nitrate or under low water level is more suitable for the growth of *Sagittaria pygmaea* Miq. than paddy soil, with TOC, TN, and total phosphorus (TP) being the main factors affecting plant growth; regarding the interaction mechanism, there was a significant negative feedback relationship between the growth of submerged plants and the pollutant content in sediments, which suggests that implementing phytoremediation within a specific threshold range can achieve a synergistic effect of plant growth and sediment purification. However, the system balance will be disrupted when pollutants exceed the threshold; TN, sulfide, and TOC had the most significant inhibitory effects on plant growth, while TP, due to its relatively weak inhibitory effect on plant growth, was removed during the optimization process of the structural equation model.

基金项目: 广州市水务科技项目 (HCJC-2024-030); 广州市科技计划项目 (2023A04J0879); 国家重点研发计划项目 (2022YFC3202200)

作者简介: 陈军 (1989—), 男, 副高级工程师, 博士, 主要从事水环境治理与水生生态修复研究。E-mail: jun.chen0304@foxmail.com

通信作者: 吴琼 (1982—), 女, 正高级工程师, 博士, 主要从事水环境治理与水生生态修复研究。E-mail: 371368244@qq.com

底泥在河湖生态系统中扮演着双重角色,既是源又是汇^[1]。一方面,健康的底泥作为汇能够持续积累和储存悬浮颗粒、营养物质、重金属及有机污染物等;另一方面,由于长期积累,底泥中碳、氮、磷等生源要素以及各类污染物的含量较上覆水高几个数量级,当水体环境发生变化时,长期沉积的污染底泥将持续释放氮、磷、重金属等污染物,直接影响上覆水的环境质量^[2-4]。近年来,在“绿水青山就是金山银山”理念的引领下,城市河湖的外源截污工程取得了较好成效,水环境质量改善显著,但底泥内源污染问题依然严峻,已成为局部区域水环境污染问题的重要源头之一^[5]。据估算,珠江三角洲地区每年产生疏浚淤泥达 8 000 万 m³,大湾区 2023 年需要疏浚的污染底泥约 1.2 亿 m³;广州市 200 多条城市河流(段)底泥淤积厚度普遍在 0.5 m 以上,最大超过 2.0 m^[6]。

当前针对污染底泥的处理技术主要分为异位处理(如清淤)和原位修复(如人工曝气增氧、外源微生物投加等)。清淤方法不仅成本高、占地广,还可能引发二次污染,破坏河道底质生态,不利于生态修复^[7]。人工曝气增氧技术虽然在经济性、操作性和改善水体景观方面具有明显优势,但其维护成本较高,设备易损,且曝气效果仅局限于小范围,一旦停止运行,底泥会迅速恢复厌氧状态,导致水体黑臭问题复发。外源微生物投加虽具有高效、低成本、环保等特点,但也存在依赖性强和生态风险高等问题。

植物修复技术是一种经济、绿色且易被大众接受的河湖污染底泥原位修复方法,能够通过植物对污染物的吸收、富集、降解等作用降低底泥中的污染物含量^[8-9]。例如,超富集植物常被选择用于修复重金属污染较为严重的底泥,其中已被报道的超富集植物至少有 721 种^[10];种植黑麦草后,底泥中的有机污染物分子量明显降低,经过 2 季种植后,其总量降低了 72.6%;不同沉水植物对污染底泥的修复效果不同,矮慈姑系统表层底泥(0~10 cm)中,酸可挥发性硫化物、亚铁和氨氮的去除率分别达到 80.57%、67.43%和 72.48%,而轮叶黑藻系统中亚铁和氨氮的去除率仅为 24.75%和 61.41%,且酸可挥发性硫化物上升了 13.6%^[9]。

沉水植物是指扎根于底泥、长期沉于水面以下的一类水生植物,是修复污染底泥常用的植物种类。沉水植物与底泥存在互作关系。一方面,沉积物营养含量是决定沉水植物生长与分布的重要限制因

子,植物的形态特征、生物量等都会对沉积物营养含量作出响应;另一方面,底泥中有机质含量过高时,易导致底层出现缺氧状态,产生 NO₂⁻、S²⁻ 等有毒物质,对沉水植物根系造成毒害作用,同时还会通过内源释放作用间接促进浮游藻类的增殖,对沉水植物形成遮蔽效应,抑制其生长^[3,11-12]。

底泥的污染状况会影响沉水植物的生长、形态特征及生理、生化指标,导致其在不同性质的底泥中呈现不同的生长策略。但现阶段关于沉水植物与污染底泥的研究多为单向研究,即或关注沉水植物对污染底泥内源污染的削减效果^[9],或聚焦污染底泥对沉水植物生长的影响^[12]。因此,在考察沉水植物种植对污染底泥修复效果的同时,探究底泥性质对沉水植物生长的影响机制,对于深入理解植物修复在污染底泥修复领域的应用具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验设计

以矮慈姑为研究对象,考察矮慈姑对污染底泥的修复效果,同时研究不同性质底泥对矮慈姑生长的影响。吴琼等^[6]研究认为,低水位运行和硝酸盐可作为修复黑臭底泥的有效手段之一,但修复后的底泥是否适合植物生长尚未可知。

因此,本文在选择稻田土和黑臭底泥作为目标底质的基础上,进一步采集了低水位运行及硝酸盐处理后的底泥作为研究对象,以全面评估不同底质对矮慈姑生长的影响。为模拟矮慈姑的自然生长环境,试验将不同性质的底泥分别置于专门设计的玻璃试验水槽中,并以自来水作为上覆水体,种植生长状态一致的矮慈姑,构建微宇宙试验系统。根据底泥的不同性质,共设置 4 组试验组,分别为稻田土组、黑臭底泥组、硝酸盐处理组以及低水位运行处理组。每个试验组均设置 3 个平行样,且设置 6 组微宇宙,其中 5 组种植沉水植物,1 组不种植植物作为空白对照组。微宇宙装置的具体设置条件如下:每个试验组底泥厚度为 40 cm,上覆水深为 30 cm,种植 3 株生长状态一致的矮慈姑;空白对照组除不种植植物外,其余条件与试验组保持一致。为避免光照对底泥性质的影响,每个微宇宙的底泥覆盖处均在玻璃水槽外用锡纸包裹,防止目标底泥被阳光直射。所有试验组均置于温室大棚实验室中,以确保植物充足的光照,通风环境下适宜的温度和湿度,以及各试验组之间外部环境条件的一致。

1.2 样品采集

在搭建微宇宙的当天,分别采集稻田土、黑臭底泥,以及硝酸盐和低水位处理后的底泥,作为 T_0 时刻目标底泥样品;同时在装置内种植矮慈姑后,留取生长状态一致的矮慈姑,作为 T_0 时刻的植物样品。整个试验共持续 45 d,除 T_0 时刻外,共采集 5 次底泥样品和植物样品,分别为 T_1 (第 3 天)、 T_2 (第 5 天)、 T_3 (第 15 天)、 T_4 (第 30 天) 和 T_5 (第 45 天)。采集的植物样品用去离子水冲洗干净,测量体长、根长和生物量,分为地上部分(茎叶)和地下部分(根部)进行相关生理、生化指标检测。

1.3 指标检测

a. 底泥检测指标。除常规的 pH 值、含水率、总有机碳(TOC)之外,还包括硫化物、酸可挥发性硫化物(AVS)、总磷(TP)和总氮(TN)等常见污染物,各污染物检测采用的方法为:①AVS,参考刘景春等^[13]的方法;②pH 值,NY/T 1121.2—2006《土壤检测 第 2 部分:土壤 pH 的测定》;③含水率,HJ 613—2011《土壤 干物质和水分的测定 重量法》;④TOC,HJ 695—2014《土壤 有机碳的测定 燃烧氧化-非分散红外法》;⑤硫化物,HJ 833—2017《土壤和沉积物 硫化物的测定 亚甲基蓝分光光度法》;⑥TP,HJ 632—2011《土壤 总磷的测定 碱熔-钼锑抗分光光度法》;⑦TN,HJ 717—2014《土壤质量全氮的测定 凯氏法》。

b. 植物的生理、生化指标。茎叶的检测指标包括超氧化物歧化酶(SOD)、丙二醛(MDA)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、游离脯氨酸(PRO)、叶绿素 α 、叶绿素 β 和叶绿素;根部检测指标包括 SOD、MDA、CAT 和 POD。植物样品的所有相关指标检测均采用微量法试剂盒测定,检测工作委托南京建成生物工程研究所完成。

1.4 分析方法

a. 结构方程模型(structural equation model, SEM)。SEM 分析植物生长与底泥中各污染物含量的关系,并结合方差分析、回归分析、路径分析和因子分析,能够有效地处理多因多果的联系和潜在变量的关系。在 SEM 中变量间的依赖关系通常以箭头表示:图形框架中,单向箭头代表从预测变量指向响应变量的关系,而双向箭头则表示变量间的双向或不确定的因果联系,箭头上的数字代表变量间的统计关系强度^[14]。

b. 冗余分析(redundancy analysis, RDA)。冗余分析是一种多元统计方法,主要用于探索解释变量(环境因子)与响应变量(沉水植物生长)之间的线性关系。通过约束排序技术,将沉水植物生长的

变异分解为环境因子解释部分和未解释的残差部分,从而揭示二者间的关联模式。冗余分析基于 R 语言平台实现,采用 vegan 程序包执行计算与可视化。

c. 方差分析。方差分析是一种用于比较 3 个或以上独立样本均值差异显著性的参数检验方法,即将总变异分解为组间变异和组内变异,构建 F 统计量以检验组间均值的等价性。本文方差分析基于 R 语言平台实现,采用 vegan 程序包执行计算与可视化,用于分析各试验组间的差异性。

2 结果与讨论

矮慈姑是常见的稻田杂草类沉水植物,高帅强等^[15]指出,矮慈姑及其根系对污染底泥具有非常强的耐受性。但随着试验的推进,黑臭底泥试验组中的矮慈姑叶片逐渐变黄、枯萎;在第 5 天时,黑臭底泥试验组中所有的矮慈姑均已死亡。观察发现,矮慈姑根部发黑、腐烂,说明黑臭底泥污染严重,若不进行初步治理,无法直接种植矮慈姑等沉水植物。黑臭底泥试验组的底泥样品和植物样品采集了 2 次(T_0 和 T_1)。

2.1 基础参数监测结果与分析

对每次采集底泥样品的 pH 值、含水率和 TOC 进行监测,结果见表 1。4 组试验组及其对应的空白对照组底泥中的 pH 值、含水率和 TOC 在试验周期内并没有发生显著变化。其中,稻田土组、硝酸盐处理组、低水位运行处理组以及黑臭底泥组的 pH 值分别稳定在 7.15 ± 0.03 (T_3) ~ 7.56 ± 0.05 (T_0)、 7.22 ± 0.05 (T_3) ~ 7.69 ± 0.07 (T_2)、 6.92 ± 0.07 (T_3) ~ 7.53 ± 0.06 (T_3) 和 7.54 ± 0.13 (T_0) ~ 7.60 ± 0.10 (T_1) 范围内,同时这 4 个试验组的 TOC 分别稳定在 $0.76 \% \pm 0.02 \%$ (T_2) ~ $0.94 \% \pm 0.01 \%$ (T_5)、 $0.85 \% \pm 0.04 \%$ (T_4) ~ $1.16 \% \pm 0.01 \%$ (T_2)、 $1.12 \% \pm 0.05 \%$ (T_0) ~ $1.39 \% \pm 0.10 \%$ (T_5) 和 $4.64 \% \pm 0.19 \%$ (T_0) ~ $4.70 \% \pm 0.09 \%$ (T_5),说明矮慈姑种植对于底泥 pH 值和 TOC 的改变影响甚微。

2.2 矮慈姑对污染底泥的修复效果

因黑臭底泥组的植物在第 5 天时已死亡,样品数量较少,故后续分析只针对稻田土组、低水位运行处理组和硝酸盐处理组。各试验组及其对应空白组的硫化物、AVS、TP 和 TN 的监测结果见图 1。硫化物、AVS 和 TP 在不同试验组中 T_0 时质量分数从小到大的排序为稻田土组、硝酸盐处理组、低水位运行处理组,而 TN 则为稻田土组、低水位运行处理组、硝酸盐处理组,说明利用硝酸盐介导的底泥修复技术比低水位运行的底泥修复技术对污染底泥中的硫

表 1 底泥中基础参数监测结果

Table 1 Monitoring results of basic parameters in the sediment

试验组	采样时间	pH 值		含水率/%		AVS 质量分数/%	
		试验组	空白组	试验组	空白组	试验组	空白组
稻田土组	T_0	7.56±0.05	7.56±0.05	31.0±0.26	31.0±0.26	0.89±0.01	0.89±0.01
	T_1	7.55±0.01	7.60±0.11	30.5±0.26	30.2±2.64	0.89±0.02	0.88±0.03
	T_2	7.43±0.01	7.59±0.11	27.0±0.81	30.7±2.11	0.76±0.02	0.90±0.03
	T_3	7.15±0.03	7.54±0.09	29.6±0.81	29.7±1.14	0.83±0.02	0.87±0.02
	T_4	7.35±0.03	7.64±0.12	30.7±1.09	28.6±1.02	0.87±0.01	0.89±0.02
	T_5	7.25±0.04	7.54±0.09	29.2±0.36	29.2±1.50	0.94±0.01	0.88±0.02
硝酸盐处理组	T_0	7.63±0.04	7.63±0.04	27.5±0.65	27.5±0.65	0.99±0.07	0.99±0.07
	T_1	7.62±0.03	7.59±0.09	27.4±0.83	27.6±1.96	0.99±0.03	0.99±0.06
	T_2	7.69±0.07	7.68±0.04	26.3±0.92	28.6±2.00	1.16±0.01	1.01±0.03
	T_3	7.22±0.05	7.61±0.07	27.9±0.46	28.2±1.56	0.98±0.04	1.08±0.03
	T_4	7.31±0.02	7.68±0.12	26.9±1.21	29.7±1.52	0.85±0.04	1.04±0.03
	T_5	7.34±0.12	7.54±0.06	26.3±1.03	28.4±2.32	0.95±0.05	0.99±0.04
低水位运行处理组	T_0	7.15±0.04	7.15±0.04	27.6±0.76	27.6±0.76	1.12±0.04	1.12±0.04
	T_1	7.21±0.03	7.64±0.12	27.9±1.00	27.7±1.67	1.17±0.04	1.29±0.03
	T_2	7.36±0.07	7.62±0.04	30.9±0.92	27.1±2.00	1.39±0.01	1.28±0.03
	T_3	6.92±0.07	7.54±0.12	26.8±0.62	27.9±1.37	1.12±0.05	1.22±0.08
	T_4	7.53±0.06	7.68±0.03	26.8±0.83	29.3±0.14	1.29±0.08	1.16±0.03
	T_5	7.31±0.11	7.57±0.07	29.9±1.26	28.2±0.33	1.39±0.10	1.25±0.03
黑臭底泥组	T_0	7.54±0.13	7.54±0.13	42.8±1.20	42.8±1.20	4.64±0.19	4.64±0.19
	T_1	7.60±0.10	7.61±0.15	42.3±1.34	38.3±0.89	4.70±0.09	4.24±0.07

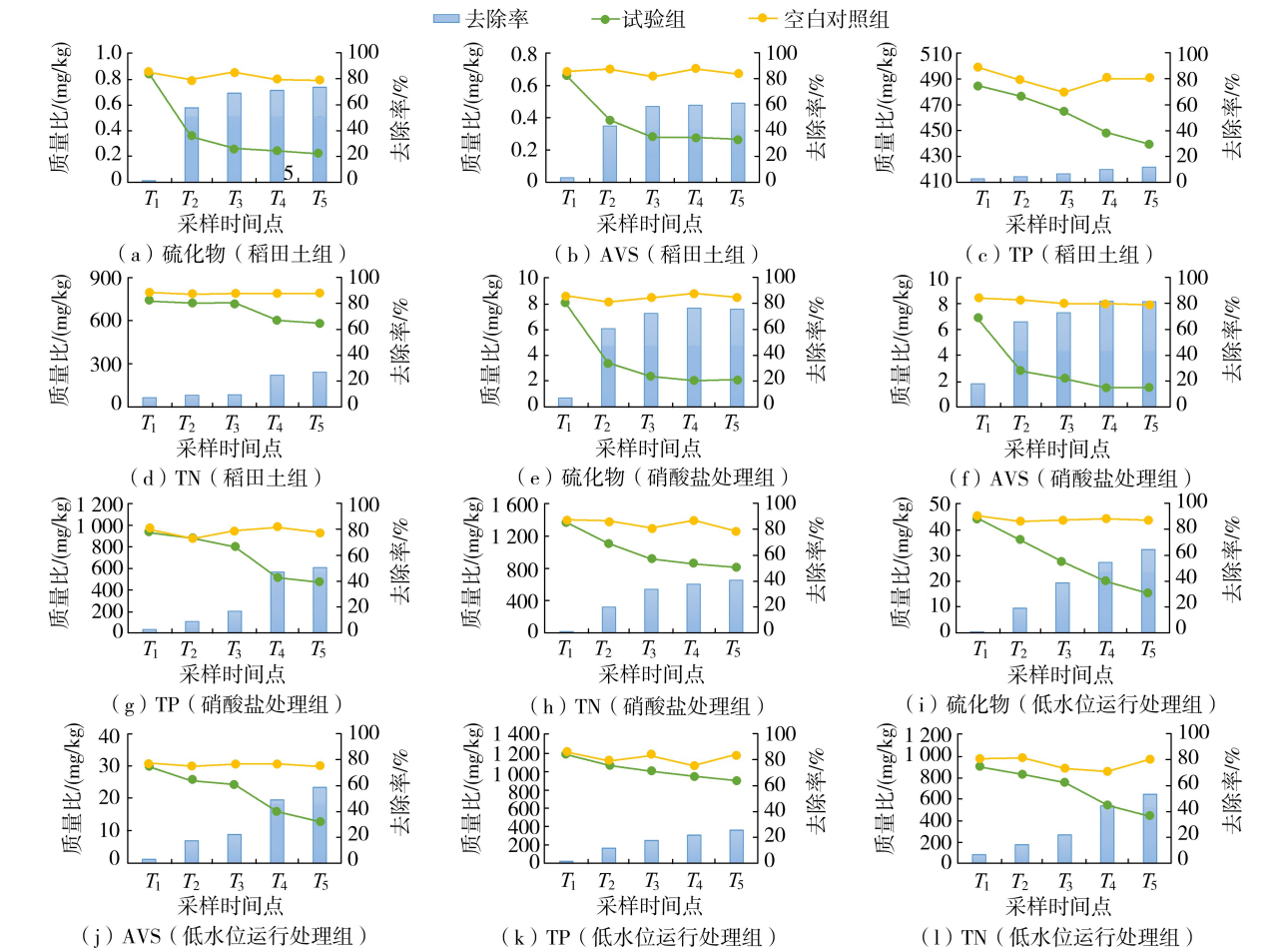


图 1 底泥中硫化物、AVS、TP 和 TN 的监测结果

Fig. 1 Monitoring results of sulfide, acid volatile sulfide, TP and TN in the sediment

化物、AVS 和 TP 去除效果更佳,而低水位运行的底泥修复技术对污染底泥中 TN 的修复效果要优于硝酸盐介导的底泥修复技术。

种植矮慈姑后,各试验组底泥中的硫化物、AVS、TP 和 TN 含量均有一定程度的降低。相比于 T_0 时刻,在种植矮慈姑 45 d 后,硫化物、AVS、TP 和 TN 的去除率稻田土组分别为 $74.03\% \pm 2.03\%$ 、 $61.37\% \pm 4.28\%$ 、 $11.88\% \pm 7.80\%$ 和 $26.89\% \pm 1.22\%$;硝酸盐处理组分别为 $75.71\% \pm 1.15\%$ 、 $81.76\% \pm 1.20\%$ 、 $50.92\% \pm 1.12\%$ 和 $41.14\% \pm 2.36\%$;低水位运行处理组分别为 $65.39\% \pm 2.03\%$ 、 $58.60\% \pm 3.18\%$ 、 $25.87\% \pm 4.15\%$ 和 $54.01 \pm 1.93\%$;而 3 类底泥对应的空白对照组中,各污染物含量均未明显降低,表明种植矮慈姑对去除底泥中的污染物具有显著的促进作用,这一结论与高帅强等^[15]的研究结果一致。其研究指出,矮慈姑生长使得底泥中还原性物质浓度大幅下降,与初始底泥相比,种植矮慈姑 180 d 后,其根系所及的底泥区域中,典型还原性物质亚铁($\text{Fe}(\text{II})$)和 AVS 含量分别下降了 92.6% 和 96.3%。沉水植物也可通过根部吸收底泥中的氮、磷作为自身生长所需的营养物质,从而降低底泥中 TN 和 TP 的含量^[16]。例如,吴强亮等^[17]研究认为,苦草降低沉积物中 TP 的含量可能主要通过促进有机磷的矿化向水柱和间隙水中释放磷的方式,在快速生长期则转化吸收高活性磷并固定于植株体内;在缓慢生长阶段会促进水体中的磷转化为沉积物中难分解态的磷,从而积极促进磷的沉降。

不同性质底泥条件下,各试验组对不同污染物的去除率存在显著性差异。如图 2 所示(不同字母代表试验组间差异性显著, $p<0.05$):①对硫化物的去除率,硝酸盐处理组和稻田土组显著高于低水位运行处理组;②对 AVS 和 TP 的去除率,硝酸盐处理组显著高于稻田土组和低水位运行处理组;③对 TP 的去除率,低水位运行处理组显著高于稻田土组;④对 TN 的去除率,低水位运行处理组显著高于硝

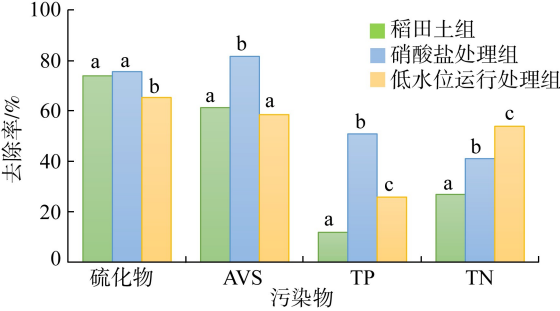


图 2 不同试验组对污染物的去除率

Fig. 2 Removal rates of pollutants for different experimental groups

酸盐处理组和稻田土组,且硝酸盐处理显著高于稻田土组。

2.3 底泥性质对矮慈姑生长的影响

不同性质底泥中矮慈姑的生长情况存在显著差异性,不同试验组其样品的生物量及相应增长量见表 2;试验结束时(第 45 天)各试验组植物长势见图 3。以试验结束时间为节点进行分析,对于矮慈姑的根长增长量,低水位运行处理组显著高于硝酸盐处理组和稻田土组($p<0.05$);对于矮慈姑的体长增长量和生物量增长量,低水位运行处理组和硝酸盐处理组均显著高于稻田土组($p<0.05$)。矮慈姑是常见的稻田杂草类沉水植物,但试验结果却显示低水位运行处理组和硝酸盐处理组中的矮慈姑生物量增长量显著高于稻田土组,说明黑臭底泥经过恰当的处理后比稻田土更适合矮慈姑的生长,这可能与底泥中碳、氮、磷等营养元素的组分含量及其比例有关。

表 2 不同试验组矮慈姑根长、体长和生物量增长量
Table 2 Growth amounts of root length, body length and biomass of *Sagittaria pygmaea* Miq. in different experimental groups

试验组	采样时间	根长增长量/cm	体长增长量/cm	生物量增长量/g
稻田土组	T_0	0.17 ± 0.06	0.33 ± 0.06	0.15 ± 0.01
	T_1	0.22 ± 0.02	0.43 ± 0.04	0.17 ± 0.02
	T_2	0.37 ± 0.15	2.83 ± 1.10	0.20 ± 0.04
	T_3	1.23 ± 0.35	1.77 ± 0.83	0.33 ± 0.17
	T_4	1.37 ± 0.12	0.97 ± 0.29	0.98 ± 0.21
	T_5	1.47 ± 0.40	0.63 ± 0.12	4.08 ± 0.37
硝酸盐处理组	T_0	0.33 ± 0.08	0.40 ± 0.07	0.14 ± 0.04
	T_1	0.43 ± 0.15	0.50 ± 0.17	0.18 ± 0.11
	T_2	0.63 ± 0.12	0.57 ± 0.12	0.38 ± 0.05
	T_3	0.73 ± 0.15	0.73 ± 0.23	0.45 ± 0.08
	T_4	1.13 ± 0.29	1.53 ± 0.29	1.47 ± 0.15
	T_5	1.57 ± 0.15	1.83 ± 0.23	5.26 ± 0.31
低水位运行处理组	T_0	0.23 ± 0.07	0.31 ± 0.10	0.25 ± 0.09
	T_1	0.27 ± 0.06	0.37 ± 0.15	0.28 ± 0.03
	T_2	1.37 ± 0.12	1.03 ± 0.12	0.54 ± 0.05
	T_3	1.50 ± 0.35	1.23 ± 0.35	0.65 ± 0.07
	T_4	1.77 ± 0.29	1.70 ± 0.50	2.40 ± 0.52
	T_5	2.63 ± 0.92	1.97 ± 0.40	5.18 ± 0.33
黑臭底泥组	T_0	0.17 ± 0.06	0.40 ± 0.35	0.38 ± 0.07
	T_1	0.19 ± 0.03	0.44 ± 0.15	0.43 ± 0.03

为了探索底泥环境因子(pH 值、含水率、TOC、硫化物、AVS、TP 和 TN)对植物生长(根长、体长和生物量)的影响,进行了冗余分析。冗余分析结果显示,前两轴分别解释了植物生长的 42.68% 和 6.65%(共 49.33%),表明已捕捉到植物生长与环境因子间的显著关系,其中 TOC、TN 和 TP 是影响植物生长的主要因子(图 4),进一步证实了底泥中碳、氮、磷等营养元素的组分含量及其比例对植物生

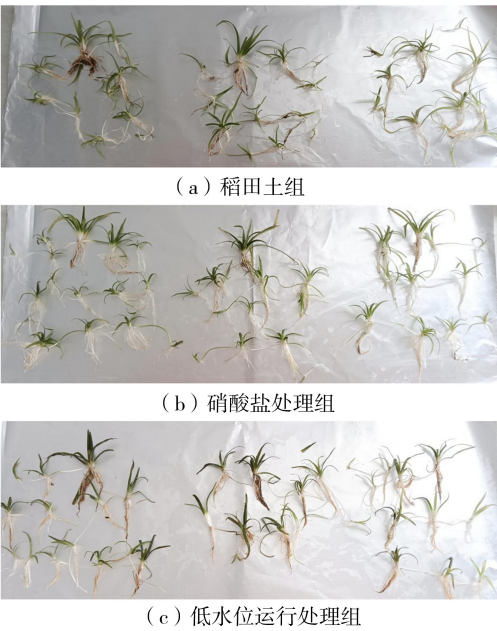


图 3 第 45 天不同试验组矮慈菇长势对比
Fig. 3 Comparison of the growth of *Sagittaria pygmaea* Miq. in different experimental groups on the 45th day

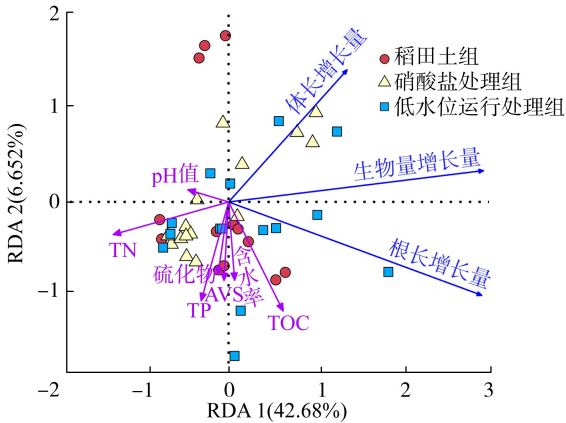


图 4 冗余分析结果
Fig. 4 Analysis result of redundancy analysis

长的影响。一方面,碳、氮、磷是植物生长发育最主要的营养元素和限制性元素,是植物体的重要组成部分,对植物生长和各生理机能的调节有重要的作用,这些元素及其化学计量比是影响生态系统中植物生长的主要因素^[18]。另一方面,底泥养分转化与植物根际微生物间存在密切关联,根际微生物不仅能介导植物生理和代谢的调节,还可与植物根系互动,进而影响植物生长发育,增强抗性等^[19-21]。例如,磷元素含量已被证明对植物的生长至关重要^[18],适宜浓度的磷添加能显著促进植物生长(包括根长、体长和生物量),且还可以通过调节根际土壤微生物群落丰度与代谢功能促进植物生长^[22]。低水位运行处理组和硝酸盐处理组中的 TP 含量均高于稻田土组,丰富的磷肥可能是促进植物生长的关键因素之一。

2.4 植物生长与污染底泥修复的互作机制

为解析多潜变量交互机制,采用 SEM 进行系统分析。SEM 通过最大似然估计法同时处理测量误差与潜变量关系,其全局拟合优度(比较适配指数为 0.959,近似均方根误差为 0.013)满足模型接受标准^[23]。基于探索性因子分析结果,叶片生理指标筛选出 MDA、CAT 和叶绿素含量作为氧化损伤与光合能力的核心表征;根部生理指标则整合 SOD、CAT、POD 和 MDA,以反映根系抗氧化系统的综合响应。通过逐步优化模型,移除统计不显著路径($p>0.05$)后,最终保留的污染因子包括 TN、硫化物和 TOC;pH 值、含水率、AVS 和 TP 因标准化系数小于 0.30 被剔除^[24],该筛选过程使模型 AIC 值降低了 17.3%,证明优化后的模型具有更强的解释力与简约性。

SEM 分析结果见图 5。基于 SEM 分析,揭示了沉水植物生长与底泥污染物含量之间显著的负向反馈关系(影响系数为 -0.95 , $p<0.01$),即植物的持续生长对底泥中污染物含量具有显著负向影响($p<0.01$);同时,以本文污染物含量为基准值,底泥中污染物浓度越高,也会对植物的生长产生显著的抑制作用($p<0.01$)。由于植物根系与底泥直接接触,因此底泥污染物含量与根部生理、生化指标之间的双向影响更为显著(影响系数为 -0.79),明显高于与叶片生理、生化指标之间的双向影响(影响系数为 -0.19)。具体表现为:植物通过吸收底泥中的氮、磷等营养元素实现生物量积累,从而显著降低底泥中污染物浓度;同时,底泥中过高的污染物(尤其是 TN、硫化物和 TOC)通过干扰根系的代谢活动,对植物生长产生抑制作用(影响系数为 -0.79 , $p<0.01$)。这种双向互作机制表明,在污染物浓度处于特定阈值范围内时,植物修复可实现植物生长-底泥净化的协同效应,但当污染物浓度过高时,系统原

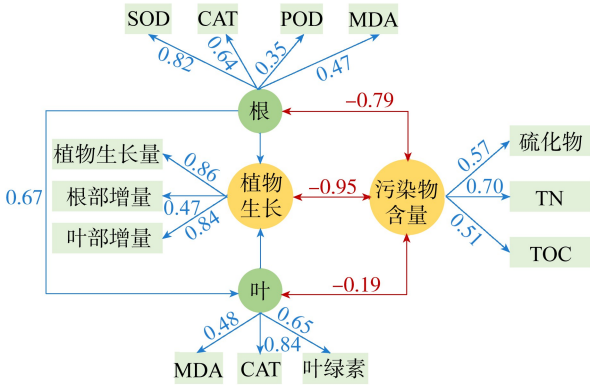


图 5 植物生长与污染底泥修复的 SEM 分析结果
Fig. 5 SEM analysis results of plant growth and polluted sediment remediation

有的平衡将被打破。

目前关于营养物质对沉水植物生长影响机制的研究仍存在分歧。Yan 等^[25]认为,氮的添加会减少沉水植物菹草的生物量,而磷的添加则有助于提高其生物量;但 Jeppesen 等^[26]研究发现,TP 浓度的降低能够促进大型沉水植物的丰度、覆盖率、栖息植物量或深度分布量的增加,从而进一步改善水质并提升生物多样性。氮和磷均为植物生长所必需的营养元素,而本文的分析结果表明,在植物生长抑制方面,氮的作用远大于磷。SEM 结果显示,TN 对植物生长的抑制作用最为显著,影响系数达 0.70,而 TP 对植物生长的抑制作用较弱,在 SEM 优化过程中已被删除。另外,硫化物和 TOC 对于植物生长的抑制作用也可忽视,其影响系数分别为 0.57 和 0.51。黑臭底泥组中极高的硫化物质量比((291±8.06)mg/kg)、TN 质量比((27311±21.8)mg/kg)和 TOC 质量分数((4.64±0.19)%)可能是该组矮慈姑在试验初期死亡的关键因素,即沉水植物地上部分 TN 含量与底泥碱解氮含量呈显著正相关关系,而碳氮比与底泥 TN 含量呈负相关关系,表明氮素过量可能通过改变植物化学计量特征引发代谢失衡。此外,硫化物和 TOC 的抑制作用可能与缺氧环境下硫化物毒性增强及碳氮代谢耦合失调有关。对于硫化物、TN 和 TOC 含量较高的污染底泥,为了促使沉水植物更好地生长,建议在种植沉水植物前进行针对性的预处理,使抑制沉水植物生长的关键因子含量处于适宜水平。

3 结 论

- a. 矮慈姑对污染底泥的修复具有显著的增效作用。在 45 d 修复周期内,对于底泥关键污染物去除率,硫化物为 65.39%~75.71%,AVS 为 58.60%~81.76%,TP 为 11.88%~50.92%,TN 为 26.89%~54.01%,且修复效率显著高于无植物对照组。
- b. 植物生长响应表明,低水位运行处理组与硝酸盐处理组生物量增长量较稻田土组显著提高,说明经预处理的黑臭底泥可转化为适生基质;冗余分析进一步揭示 TOC、TN、TP 是驱动矮慈姑生长的关键环境因子(累计解释率 49.33%)。
- c. SEM 分析结果表明,TN、硫化物和 TOC 对植物生长的抑制作用最大,而 TP 则影响较小,且在污染物浓度处于特定阈值范围内时,植物修复可实现植物生长-底泥净化的协同效应,但污染物超量时系统平衡将被打破。

参考文献:

[1] 李勇,单雅洁,程浩,等. 城市重污染河流沉积物营养

盐和重金属分布及潜在生态风险[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):31-38. (LI Yong, SHAN Yajie, CHENG Hao, et al. Distribution and potential ecological risks of nutrient elements and heavy metals in sediments of a heavily polluted urban river[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3): 31-38. (in Chinese))

[2] 尘义,李龙国,白婷,等. 沱江流域成都段水/沉积物污染现状评价与相关性分析[J]. 环境工程,2024,42(7):144-152. (CHEN Yi, LI Longguo, BAI Ting, et al. Evaluation and correlation analysis of water/sediment pollution status in Chengdu section of the Tuojiang River Basin[J]. Environmental Engineering, 2024, 42(7): 144-152. (in Chinese))

[3] 刘佳豪,李艳,申东方,等. 浅水湖泊沉积物生源要素与浮游藻类和沉水植物的关系[J]. 水生态学杂志,2024,45(4):19-27. (LIU Jiahao, LI Yan, SHEN Dongfang, et al. Relationship of biogenic substances in sediments with phytoplankton and submerged macrophytes in shallow lakes[J]. Journal of Hydroecology, 2024, 45(4): 19-27. (in Chinese))

[4] 毛新伟,仵荟颖,徐枫. 太湖底泥主要营养物质污染特征分析[J]. 水资源保护,2020,36(4):100-104. (MAO Xinwei, WU Huiying, XU Feng. Analysis of pollution characteristics of main nutrients in Taihu Lake sediment[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 100-104. (in Chinese))

[5] 魏祥龙,陆卫安,唐洪武,等. 上海感潮河网水质劣化机理研究[J]. 水资源保护,2025,41(5):319-328. (WEI Xianglong, LU Weian, TANG Hongwu, et al. Study on the mechanisms of water quality deterioration in Shanghai City urban tidal river networks [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5): 319-328. (in Chinese))

[6] 吴琼,陈文龙,陈军. 基于低水位运行的城市河流污染底泥中微生物群落特征及影响因素[J]. 水资源保护,2024,40(2):126-133. (WU Qiong, CHEN Wenlong, CHEN Jun. Characteristics and influencing factors of microbial communities in polluted sediment of urban rivers under low water level operation [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 126-133. (in Chinese))

[7] 乔海兵,李桂荣,彭枫,等. 沉水植物耦合底栖动物去除水体底泥污染物性能研究[J]. 环境工程,2024,42(12):73-78. (QIAO Haibing, LI Guirong, PENG Feng, et al. Performance of submerged plants coupled with benthic animals in removing pollutions from water body sediments [J]. Environmental Engineering, 2024, 42(12): 73-78. (in Chinese))

[8] 张冬冬,肖长来,梁秀娟,等. 植物修复技术在水环境污染控制中的应用[J]. 水资源保护,2010,26(1):63-65. (ZHANG Dongdong, XIAO Changlai, LIANG Xiujuan, et al. Application of phytoremediation in water

- environmental pollution control [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(1): 63-65. (in Chinese))
- [9] 谢孟颖, 李鑫宇, 陈桂珠, 等. 典型的草甸和冠层型沉水植物对内源污染物削减效果研究[J]. 广东农业科学, 2023, 50(5): 73-82. (XIE Mengying, LI Xinyu, CHEN Guizhu, et al. Study on the reduction effect of typical meadow and canopy type submerged plants on endogenous pollutants [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2023, 50(5): 73-82. (in Chinese))
- [10] 沈佳怡, 臧学轲, 章长松, 等. Cd 污染河道底泥修复植物优选[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2024, 30(1): 86-93. (SHEN Jiayi, ZANG Xueke, ZHANG Changsong, et al. Optimal selection of remediation plants for Cd contaminated river sediment [J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2024, 30(1): 86-93. (in Chinese))
- [11] 赵明涛, 王超群, 梁美琪, 等. 银川平原湿地典型沉水植物群落物种多样性对底泥的响应[J]. 干旱区研究, 2023, 40(11): 1815-1823. (ZHAO Mingtao, WANG Chaoqun, LIANG Meiqi, et al. Response of species diversity of typical submerged plant communities to sediment in Yinchuan Plain wetlands [J]. Arid Zone Research, 2023, 40(11): 1815-1823. (in Chinese))
- [12] 燕文明, 麻林, 向龙, 等. 沉积物-水界面中可交换态氮对不同菹草密度的响应[J]. 水资源保护, 2016, 32(2): 119-122. (YAN Wenming, MA Lin, XIANG Long, et al. Effects of different densities of *Potamogeton crispus* L. on exchangeable nitrogen at sediment-water interface [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2): 119-122. (in Chinese))
- [13] 刘景春, 严重玲, 胡俊. 水体沉积物中酸可挥发性硫化物(AVS)研究进展[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 812-818. (LIU Jingchun, YAN Chongling, HU Jun. A review on the studies of acid-volatile sulfide in aquatic sediments [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(4): 812-818. (in Chinese))
- [14] 马元植, 覃小林, 凌红波, 等. 1991—2020 年新疆中小湖泊面积变化时空特征及趋势分析[J]. 干旱区研究, 2024, 41(6): 905-916. (MA Yuanzhi, QIN Xiaolin, LING Hongbo, et al. Spatio-temporal characteristics and trends of area changes in the small and medium-sized lakes in Xinjiang, China, from 1991 to 2020 [J]. Arid Zone Research, 2024, 41(6): 905-916. (in Chinese))
- [15] 高帅强, 陈志远, 李锋民, 等. 沉水植物矮慈姑对重污染底泥的耐受及其中主要污染物的去除[J]. 环境科学学报, 2019, 39(7): 2182-2189. (GAO Shuaiqiang, CHEN Zhiyuan, LI Fengmin, et al. Tolerance of *Sagittaria pygmaea* Miq. to heavily polluted sediments and its removal of major pollutants [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(7): 2182-2189. (in Chinese))
- [16] 胡俊, 丰民义, 吴永红, 等. 沉水植物对沉积物中磷赋存形态影响的初步研究[J]. 环境化学, 2006, 25(1): 28-31. (HU Jun, FENG Minyi, WU Yonghong, et al. Study on submerged macrophyte effect on phosphorus pools in the sediment [J]. Environmental Chemistry, 2006, 25(1): 28-31. (in Chinese))
- [17] 吴强亮, 谢从新, 赵峰, 等. 沉水植物苦草(*Vallisneria spiralis*)对沉积物中磷赋存形态的影响[J]. 湖泊科学, 2014, 26(2): 228-234. (WU Qiangliang, XIE Congxin, ZHAO Feng, et al. Effects of *Vallisneria spiralis* on the occurrence characteristic of phosphorus fractions in sediment [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(2): 228-234. (in Chinese))
- [18] 李德文, 周文玲, 季倩如, 等. 不同林型农田防护林植物与土壤理化指标及功能基因差异[J]. 中国水土保持, 2023(7): 41-46. (LI Dewen, ZHOU Wenling, JI Qianru, et al. Differences in plant and soil physicochemical properties and functional genes across forest types of farmland shelterbelts [J]. Soil and Water Conservation in China, 2023(7): 41-46. (in Chinese))
- [19] 季生连, 杨沐, 段国珍, 等. 组学技术在根际微生物中的研究进展[J]. 青海农林科技, 2024(3): 44-50. (JI Shenglian, YANG Mu, DUAN Guozhen, et al. The research progress of omics technologies in rhizospheric microorganisms [J]. Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry, 2024(3): 44-50. (in Chinese))
- [20] 李亚楠. PET 和 Cu^{2+} 对沉水植物菹草生长及其根际细菌的影响[D]. 镇江: 江苏大学, 2024.
- [21] 韩天伦, 王万忠, 鲍美君, 等. 苦草-镧改性凹土控制富营养化湖泊沉积物磷释放的根际效应研究[J]. 中国环境科学, 2025, 45(8): 4501-4512. (HAN Tianlun, WANG Wanzhong, BAO Meijun, et al. Study on rhizosphere effect in controlling internal phosphorus using *Vallisneria spiralis* combined with La modified attapulgite [J]. China Environmental Science, 2025, 45(8): 4501-4512. (in Chinese))
- [22] 谷沅政. 磷添加对川黄槿幼苗生长和根际土壤微环境的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2024.
- [23] KLINE B, TAMER E. Bayesian inference in a class of partially identified models [J]. Quantitative Economics, 2016, 7(2): 329-366.
- [24] HAIR J F, RISHER J J, SARSTEDT M, et al. When to use and how to report the results of PLS-SEM [J]. European Business Review, 2019, 31(1): 2-24.
- [25] YAN Zhiwei, WANG Qiuyue, LI Yang, et al. Combined effects of warming and nutrient enrichment on water properties, growth, reproductive strategies and nutrient stoichiometry of *Potamogeton crispus* [J]. Environmental and Experimental Botany, 2021, 190: 104572.
- [26] JEPPESEN E, SØNDERGAARD M, JENSEN J P, et al. Lake responses to reduced nutrient loading-an analysis of contemporary long-term data from 35 case studies [J]. Freshwater Biology, 2005, 50(10): 1747-71.

(收稿日期: 2025-05-12 编辑: 胡新宇)