

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.01.017

不同纯生物菌剂对黑臭水体底泥的处理效果

许 峥¹, 陈 宇², 后 志², 王宗平², 张 敏¹, 苗 蕾²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 2. 华中科技大学
环境科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 目前黑臭水体底泥通常采用化学或生物方法进行异位治理,生物法由于简单易操作、处理成本较低而被广泛应用,并能够为后续的底泥资源化利用提供条件。为探究更适宜的生物处理方法,明确生物处理过程中的微生物群落变化规律,分别采用不同种类的纯生物菌剂(硝化细菌、反硝化细菌、光合细菌和芽孢杆菌)对黑臭水体底泥进行异位处理,通过投加不同剂量的纯菌剂,比较反应前后底泥中的总氮、总磷、有机质及含水率的变化。结果表明,在常温(20±5)℃下经过 30 d 的处理,底泥中含水率、总氮和有机质含量都有不同程度的降低。其中,投加量为 35 mg/L 的反硝化细菌试验组处理效果最好,总氮和有机质去除率分别达到 59.90% 和 20.93%。三维荧光光谱分析表明,投加纯生物菌剂处理后,底泥中的大分子有机物浓度降低,小分子物质浓度有不同程度的升高,说明生物菌剂能够提高底泥中微生物的活性,不仅促进了有机物的降解,还为反硝化反应提供了碳源,促进了底泥中总氮的去除。此外,高通量测序也表明,投加菌剂的试验组样本中,都出现了一定丰度的 *Thiobacillus*、*Sulfurovum*、*Sulfuricurvum* 和 *Sulfurimonas*,且在芽孢杆菌试验组和光合细菌试验组中比例较高,四个菌属总比例分别达到 13.24% 和 14.80%。这四个菌属能够参与硫代谢,对于底泥中有机质(如蛋白等)的降解起到重要作用。

关键词: 黑臭水体; 生物降解; 底泥稳定; 异位处理; 微生物种群

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)01-0102-08

Treatment Efficiency of Black and Odorous Water Body Sediment with Different Biological Agents

XU Zheng¹, CHEN Yu², HOU Zhi², WANG Zong-ping², ZHANG Min¹, MIAO Lei²

(1. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 2. School of Environmental Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: At present, chemical or biological methods are usually employed for ectopic treatment of black and odorous water sediment. Biological method is widely applied because of its simplicity and low treatment cost, and it is beneficial to the subsequent utilization of sediment. In order to investigate a suitable biological treatment process and demonstrate the variations of microbial community during the biological treatment process, four types of biological agents (nitrifying bacteria, denitrifying bacteria, photosynthetic bacteria, and bacillus) were used for ectopic treatment of black and odorous water

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51808240); 湖北省自然科学基金资助项目(2018CFB132)
通信作者: 苗蕾 E-mail: miaolei@hust.edu.cn

sediment. Different dosages of biological agents were added, and variations of total nitrogen (TN), total phosphorus, organic matter and water content in the sediment before and after the reaction were compared. After treatment of 30 days at room temperature (20 ± 5) $^{\circ}\text{C}$, water content, total nitrogen, and organic matter in the sediment all decreased to different degrees. Among them, the denitrifying bacteria group with dosage of 35 mg/L had the best treatment efficiency: removal efficiencies of total nitrogen and organic matter reached 59.90% and 20.93%, respectively. Three-dimensional fluorescence spectrum analysis showed that the concentration of macromolecular organic matter in the sediment decreased and the concentration of small molecular matter increased in different degree after adding pure biological agent. This indicated that the biological agents improved the activity of microorganisms in the sediment, not only promoting the degradation of organic matter, but also providing carbon source for denitrification and promoting the removal of total nitrogen in the sediment. Furthermore, high-throughput sequencing also showed that *Thiobacillus*, *Sulfurovum*, *Sulfuricurvum* and *Sulfurimonas* were observed in all experimental groups with addition of biological agents, and the higher proportions in experimental groups with addition of bacillus and photosynthetic bacteria (total proportions of the four genera reaching 13.24% and 14.80%, respectively) were detected. These four genera were related to sulfur metabolism and might play an important role in the degradation of organics, such as proteins, in the sediment.

Key words: black and odorous water body; biodegradation; sediment stabilization; ectopic treatment; microbial community

1 研究背景

黑臭水体是我国目前水治理的重点对象之一。黑臭水体中的大量污染物会沉积在底部,引起底泥堆积变厚,部分污染物质会重新释放,再次污染水体^[1],因此,在黑臭水体治理中,底泥的合理处理是必不可少的一部分。

黑臭水体底泥的治理通常分为原位处理和异位处理^[2]。原位处理通常需要较长的时间,易受外界环境影响,效果不稳定^[3],且添加的试剂还可能会对水体造成污染。异位处理法通常是先对底泥进行疏浚,再对疏浚的底泥投加试剂进行单独处理,具有见效快、污染不反复、可操作性强等优势^[4]。

异位处理法主要包括化学处理法和生物处理法。化学法是利用高锰酸钾、双氧水等强氧化剂氧化底泥中的污染物达到去除效果。化学法虽然反应迅速,效果显著,但反应后的底泥形成板结难以再次利用,且处理成本较高,处理过程中产生的二氧化硫会对周围大气环境造成污染^[5-6]。生物法是通过向底泥中投加微生物,利用微生物作用降解底泥中的污染物,实现底泥的稳定化^[7]。相比于化学法,生物法成本较低,二次污染小,且处理后的底泥可被资源化利用^[8]。本研究以华中地区某典型黑臭水体的底泥为研究对象,通过投加不同的纯生物菌剂,强

化底泥中的微生物作用,实现底泥中污染物的降解。通过对比不同浓度下的不同菌种对底泥的处理效果,明确最佳菌种及其最优投加量,并通过对不同菌种处理系统的微生物结构进行分析,明确处理前后微生物种群的变化规律,为黑臭水体底泥的生物处理提供理论支持。

2 材料与方法

2.1 底泥来源与性质

试验所用的底泥取自武汉市内某河段,该河段长期接纳周边居民生活污水,河道黑臭明显,河道底部沉积了约 0.5 ~ 0.7 m 底泥。将底泥取出后,置于聚氯乙烯塑料桶中静置 1 d,分离底泥表面上覆水,将底泥中的石块、树叶、树枝等杂物去除后,混合均匀倒入 2 L 烧杯中,每个烧杯 2 L 底泥。初始底泥的主要成分为:总氮 2.39 mg/g,总磷 2.06 mg/g,有机质 12.52%,含水率 60.76%,铅 0.40 mg/g,镍 0.03 mg/g,铬 0.05 mg/g,镉 0.005 mg/g。

试验在(20 ± 5) $^{\circ}\text{C}$ 、通风条件下的生化培养箱(LRH-150F)中进行,无太阳光光照,光照条件为培养箱内灯光(强度:12 000 lx)。试验过程中,均为敞口非密封条件,利用 YS10200 型便携式溶解氧仪测量底泥溶解氧值,浓度为 0.1 ~ 0.4 mg/L。生化培养箱的湿度在 60% ~ 70%。

2.2 试验过程

试验共采用四种纯生物菌剂,分别为硝化细菌、反硝化细菌、光合细菌和芽孢杆菌。光合细菌为液态菌剂,使用时直接投加;硝化细菌、反硝化细菌、芽孢杆菌均为固体菌剂,所用纯菌剂粉末含量为 5.9×10^{10} CFU/g,使用时先将纯菌剂粉末投加到超纯水中,配制成 1 mg/mL 的菌剂溶液后待用^[9],光合细菌菌剂为液体,试验采用南华千牧公司生产的光合细菌,有效活菌数为 $(100 \sim 120) \times 10^8$ 个/mL。

将底泥与不同种类的菌剂进行均匀混合,每组菌剂设置四个梯度试验,经过预试验后确定的具体投量如表1所示。其中,硝化细菌、反硝化细菌、芽孢杆菌的投加量以固体菌剂粉末计算,光合细菌以菌液量计算。考虑由于投加菌剂剂量的差异,所有分析均以加入菌剂后的指标作为起始值(第0天)。

表1 试验组中投加的菌剂种类与投量

Tab.1 Species and dosage of biological agents added in the test

菌剂名称	硝化细菌/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	反硝化细菌/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	光合细菌/ ($\text{mL} \cdot \text{L}^{-1}$)	芽孢杆菌/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
投量	15	15	5	25
	25	25	10	35
	35	35	30	50
	50	50	60	75

空白试验为加入等量体积的去离子水。每组试验均在 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 下进行。纯生物菌剂试验进行30 d,取样频率为前5天1次/d,第6~20天为1次/3 d,第20天之后为1次/5 d。

2.3 检测方法

2.3.1 理化指标测定

底泥的含水率通过烘干前后的质量差来测定。底泥中的总氮(TN)通过将烘干的污泥消解后,采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定。另取约3.0 g底泥放于100 mL坩埚中,在 450°C 的马福炉内焚烧3 h。通过焚烧质量差法检测底泥有机质含量。取0.2 g焚烧后的物质于离心管中,加入40 mL浓度为 3.5 mol/L 盐酸,将离心管置于摇床上振荡16 h,经过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后采用钼酸铵分光光度法测定总磷(TP)含量。将底泥在 105°C 条件下烘干并研磨后,经过100目筛网筛分,取下0.5 g筛下物,与50 mL去离子水混合后在摇床上振荡24 h,经过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后,由总有机碳分析仪(德国Analytikjenn multi N/C 2100)测定可计算出底泥中

的溶解性有机物(DOM)^[10]。DOM成分采用三维荧光分光光度计(日本岛津F-4600)进行检测。在试验过程中,使用PHS-3C型便携式pH计测量底泥pH值,使用YSID0200型便携式溶解氧仪测量底泥溶解氧值(DO)。

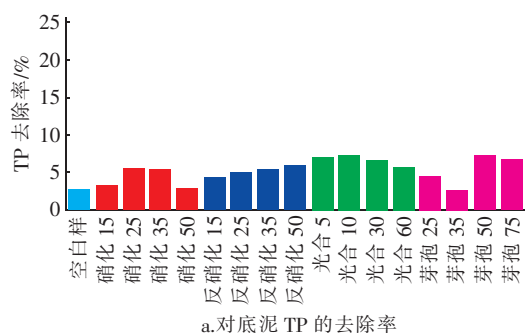
2.3.2 微生物种群结构分析

对于各处理系统内的微生物种群结构,采用MiSeq高通量测序方法进行测定分析。DNA通过E. Z. N. A.® soil试剂盒(Omega Bio-tek, Norcross, GA, U. S.)进行抽提。采用338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3')和806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')引物对V3-V4可变区进行PCR扩增。使用2%琼脂糖凝胶回收PCR产物,利用AxyPrep DNA Gel Extraction Kit(Axygen Biosciences, Union City, CA, USA)进行纯化后,利用QuantiFluor™-ST(Promega, USA)进行定量检测。根据Illumina MiSeq平台(Illumina, San Diego, USA)标准操作规程将纯化后的扩增片段构建成PE 2 * 300的文库。

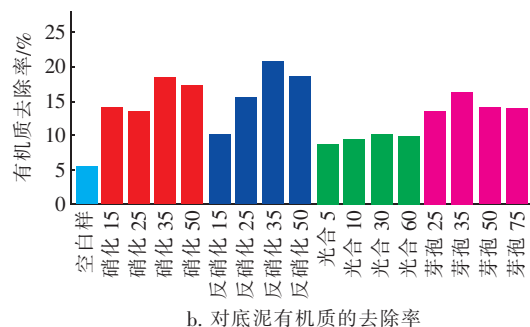
3 结果与讨论

3.1 不同纯菌剂处理底泥效果分析

不同纯菌剂对底泥的处理效果如图1所示。由于投加的纯生物菌剂对重金属的去除并无明显作用,因此各试验组处理前后底泥中的重金属含量没有明显变化。



a. 对底泥TP的去除率



b. 对底泥有机质的去除率

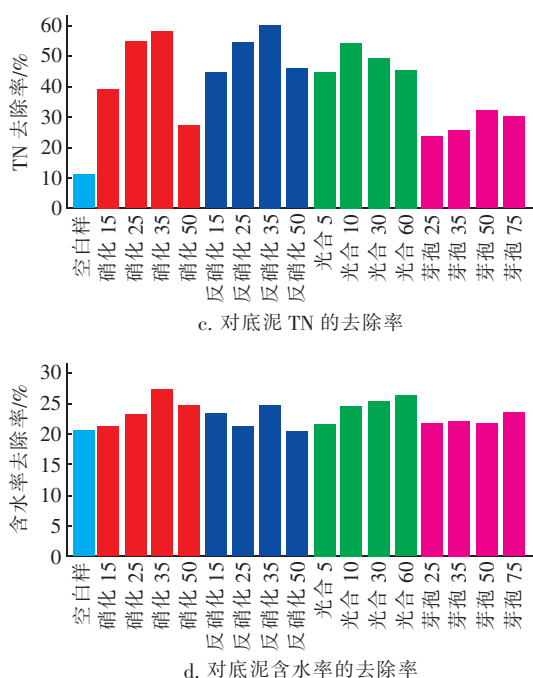


图 1 不同纯生物菌剂对底泥的处理效果

Fig. 1 Treatment effect of different pure biological agents on sediment

由图 1 可以看出,反应过程中不论是试验组还是空白组,TP 去除效果均不明显,多在 2%~5% 之间。这是由于整个试验过程未添加化学试剂也未进行排泥,少量的磷仅随取样过程中的间隙水带出,故 TP 有较低的去除率。在含水率的去除方面,空白试验组的含水率去除率达到 20.66%,而试验组与空白对照组相比相差不大,其中以硝化细菌投加量为 35 mg/L 试验组含水率去除效果最好,为 27.52%。这表明底泥中含水率的下降主要原因为间隙水的蒸发作用,但试验组含水率去除有少量提高,可能是由于加入菌剂后促进了微生物的分解作用,使得底泥中的结合水释放并蒸发,从而在一定程度上提高了含水率的去除率^[11]。

投加生物菌剂对 TN 和有机质的去除有较明显的改善。空白组的 TN 去除率仅为 11.35%,投加生物菌剂后试验组的 TN 去除率都有提高,其中投加量为 35 mg/L 的反硝化细菌试验组的 TN 去除率最高,达到了 59.90%。空白组的有机质去除率仅为 5.44%,而投加生物菌剂后有机质的去除率得到明显提高,其中效果最好的仍然是投加量为 35 mg/L 的反硝化细菌试验组,有机质去除率达到 20.93%。这可能是由于投加的反硝化细菌促进了底泥中的大

分子有机物质向小分子有机物质的转换,不仅促进了有机质的降解,还为脱氮提供了必要的碳源,从而实现了有机质和总氮的同步去除^[12]。对比同一菌种不同浓度下的试验组可以看出,TN 和有机质的去除率整体趋势是随着投加菌剂的量增加而增加,当投加量达到一定值(35 mg/L)时,菌剂投加量的增加反而不能提高去除率。

综上,所有试验组对 TP 均无明显去除效果,对 TN 和有机质去除效果最优的是投加量为 35 mg/L 的反硝化细菌试验组,对含水率去除最优的是投加量为 35 mg/L 的硝化细菌组。去除率整体趋势是随着投加菌剂的量增加而增加,当投加量达到一定值(35 mg/L)时,菌剂投加量的增加反而不能提高去除率。可能是低投加量时,限制去除效果的主要因素为微生物含量;当投加过多的微生物时,微生物之间竞争关系占据了主导地位,使得去除率降低^[13]。

3.2 DOM 去除效果分析

各种类菌剂处理底泥过程中的 DOM 去除率如图 2 所示。由图 2 可见,DOM 去除率的总体趋势与有机质、TN 去除率接近,投加菌剂后 DOM 去除率比空白组有了不同程度的提高。其中,DOM 去除率最高的同样为投加 35 mg/L 反硝化细菌试验组,达到了 29.97%。

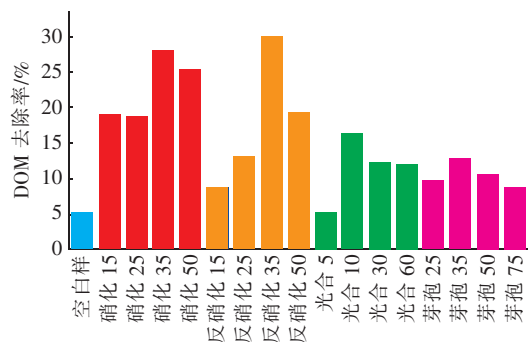


图 2 各种类菌剂处理底泥过程中 DOM 去除率

Fig. 2 DOM removal rate of different pure biological agents in the process of sediment treatment

此外,对 DOM 的成分进行了三维荧光光谱分析(见图 3)。可见,相较于空白对照组,所有试验组的蛋白质类酪氨酸(I)与蛋白质类色氨酸(II)^[14-15]均有不同程度的降低,其中以反硝化细菌对大分子有机物削减效果最明显,在对大分子有机物(蛋白质类酪氨酸、蛋白质类色氨酸)产生削减作用的同时,还产生了大量的小分子有机物[富里

酸类物质(Ⅲ)与腐殖酸类物质(Ⅴ)],这能够为反

硝化过程提供碳源,促进 TN 的去除。

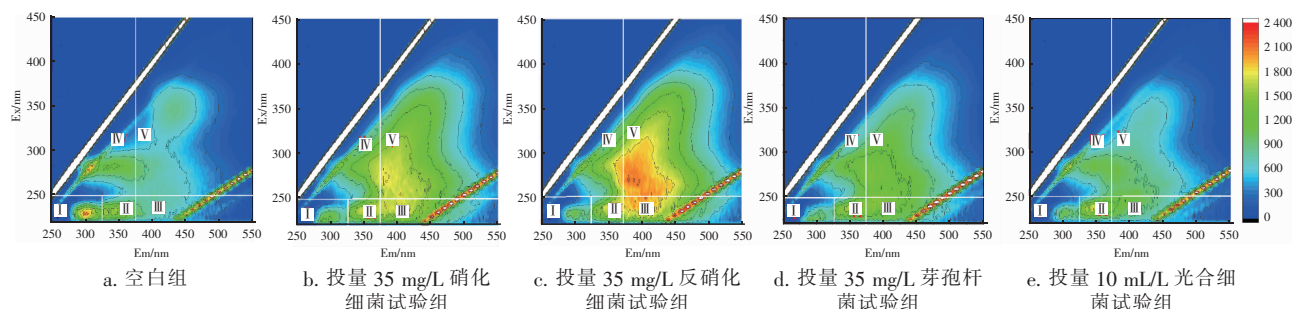


图3 经过30 d反应后不同菌剂试验组中DOM的三维荧光光谱

Fig. 3 Three-dimensional fluorescence spectrum of DOM in different biological agents test after 30 days reaction

3.3 纯菌剂处理底泥系统的微生物种群结构

3.3.1 微生物种群多样性评价

采用硝化细菌、反硝化细菌、光合细菌和芽孢杆菌处理底泥时,最佳浓度分别为35 mg/L、35 mg/L、60 mL/L、40 mg/L,因此对最优处理系统的污泥样本及空白样本进行了高通量测序分析。在分析中,未处理的底泥样本命名为 control-1,空白对照组中经过30 d处理后的底泥样本命名为 control-30,采用硝化细菌(35 mg/L)处理30 d后的污泥样本命名为 ni_35,采用反硝化细菌(35 mg/L)处理30 d以后的污泥样本命名为 deni_35,采用光合细菌(60 mL/L)处理30 d以后的污泥样本命名为 PSB_60,采用芽孢杆菌(40 mg/L)处理30 d以后的污泥样本命名为 bac_40。

采用不同菌种处理底泥系统的 Venn 图如图4所示。

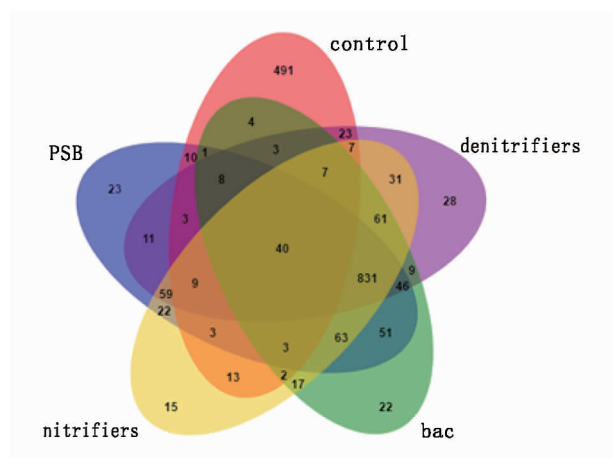


图4 不同菌种处理底泥系统的 Venn 图

Fig. 4 Venn diagram of sediment treatment system with different biological agents

可见,在空白样本和采用纯生物菌剂处理底泥

后的样本中,空白样本检测到的 OTU 数量最少,仅为627,而采用纯生物菌剂处理底泥的系统中,OTU数均大大增加,其中投加硝化细菌和光合细菌的系统中 OTU 数量达到1 183,反硝化细菌和芽孢杆菌系统的相差不大,分别为1 176和1 168,这表明添加纯菌剂处理底泥后,微生物种群的多样性得到了显著提升。

3.3.2 微生物种群结构分析

经过高通量测序分析,得到了所有样本在各分类水平下的丰度。图5为门水平下各样本的微生物种群结构。可见,对于处理前的空白样本(control-1),*Firmicutes* 的含量最高,达到了44.69%,其次分别为 *Proteobacteria* (25.96%) 和 *Bacteroidetes* (15.39%),经过30 d的空白处理(control-30),*Firmicutes* 的含量略微增加至45.38%,*Proteobacteria* 大幅度下降至11.71%,*Bacteroidetes* 大幅度增加至26.80%。对于投加菌剂的试验组,样本中丰度最高的门均为 *Proteobacteria*,其中芽孢杆菌组(bac_40)和光合细菌组(PSB_60)中的 *Proteobacteria* 丰度最高,分别达到50.11%和49.55%,硝化细菌组(ni_35)和反硝化细菌组(deni_35) *Proteobacteria* 丰度也分别达到21.91%和32.03%。*Proteobacteria* 中含有大量的硝化细菌和反硝化细菌,有利于底泥中含氮化合物的去除^[16]。除 *Proteobacteria*、*Firmicutes*、*Bacteroidetes*、*Chloroflexi* 和 *Actinobacteria* 的丰度也较高,但在不同菌剂的试验组中丰度各有不同。相比于空白样本,试验组中 *Chloroflexi* 和 *Actinobacteria* 的丰度均有显著增加;*Chloroflexi* 中含有大量的反硝化细菌,而 *Actinobacteria* 也能够参与有机物的降解过程^[17],这为底泥中有机物和含氮化合物的有效去除提供了保障。

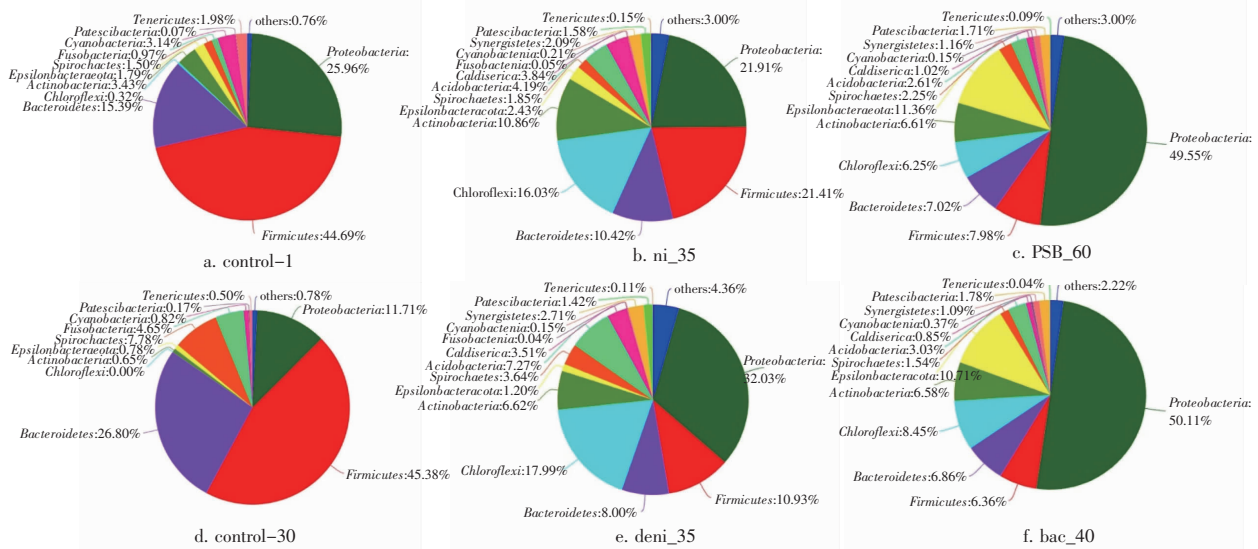


图 5 门水平下不同菌种处理底泥系统中的微生物种群结构

Fig. 5 Microbial community structure of sediment system treated by different biological agents at the phylum level

随后在属水平下对空白组和投加菌剂试验组中微生物种群结构进行了进一步分析,结果见图 6。

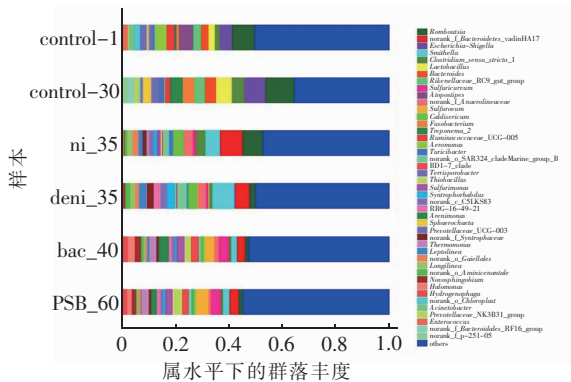


图 6 属水平下不同菌种处理底泥系统中的微生物种群结构

Fig. 6 Microbial community structure of the sediment system treated by different biological agents at the genus level

可见,投加菌剂的试验组中微生物种群结构与空白组相差较大。在底泥样本(control-1)中,优势菌属主要为 *Romboutsia*、*Atopostipes*、*Escherichia-Shigella* 以及 *Aeromonas*; 经过 30 d 的空白处理后(control-30), *Romboutsia* 和 *Escherichia-Shigella* 有一定的增长,且依然是空白样本中的优势菌属,然而 *Atopostipes* 和 *Aeromonas* 丰度明显降低, *Lactobacillus*、*Clostridium_sensu_stricto_1*、*Fusobacterium* 和 *Treponema_2* 的丰度有明显的增加。对于投加菌剂的试验组样本,尽管优势菌属各不相同,但都含有一定丰度的 *Thiobacillus*、*Sulfurovum*、*Sulfuricurvum* 和 *Sulfurimonas*,且在芽孢杆菌组和光

合细菌组中出现的比例较高,四个菌属总比例分别达到 13.24% 和 14.80%。*Thiobacillus*、*Sulfurovum*、*Sulfuricurvum* 和 *Sulfurimonas* 能够参与硫代谢^[18],对于底泥中有机质的降解也起到重要作用。然而在空白样本(control-1 和 control-30)中,以上四种菌属的丰度比例均为 0。

4 结论

采用四种常见的纯生物菌剂(硝化细菌、反硝化细菌、光合细菌和芽孢杆菌)对黑臭水体底泥进行了处理。在常温(20 ± 5)℃下经过 30 d 的处理后,黑臭水体底泥的含水率、TN 和有机质等去除率都有了不同程度的提高,但 TP 的去除率基本没有变化。其中投加量为 35 mg/L 的反硝化细菌试验组处理效果最好,对底泥中 TN 和有机质的去除率分别达到 59.90% 和 20.93%。分子生物学分析表明,投加纯生物菌剂后,底泥中的微生物种群发生明显变化,各试验组都检测到能够参与硫代谢的 *Thiobacillus*、*Sulfurovum*、*Sulfuricurvum* 和 *Sulfurimonas* 等菌属,这对于底泥中有机质的降解起到重要作用,不仅有利于大分子有机物降解为小分子物质,还能够为底泥的脱氮提供碳源。本研究明确了处理黑臭底泥的最佳菌种及其最优投加量,为黑臭水体底泥的生物处理提供了理论支持。

参考文献:

[1] 王莉君,吴思麟. 南京黑臭河道底泥污染特征及评价

- [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(3): 117 - 122.
- WANG Lijun, WU Silin. Pollution characteristics and contamination assessment of sediment from black-odor rivers in Nanjing [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(3): 117 - 122 (in Chinese).
- [2] 顾鹏飞. 城市黑臭河流的原位化学修复研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- GU Pengfei. Research on In-situ Chemical Remediation of Urban Black and Odorous Rivers [D]. Jinan: Shandong University, 2018 (in Chinese).
- [3] MAJONE M, VERDINI R, AULENTA F, *et al.* In situ groundwater and sediment bioremediation: barriers and perspectives at European contaminated sites [J]. New Biotechnology, 2015, 32(1): 133 - 146.
- [4] 冯焱. 利用生物-生态修复技术治理城市污染河道[J]. 环境与发展, 2018, 30(6): 82, 84.
- FENG Yao. Using biological-ecological restoration techniques to treat urban polluted river courses [J]. Environment and Development, 2018, 30(6): 82, 84 (in Chinese).
- [5] MARTINEZ-SANTOSA M, LANZENBCD A, UNDA-CALVOA J, *et al.* Links between data on chemical and biological quality parameters in wastewater-impacted river sediment and water samples [J]. Data in Brief, 2018, 19: 616 - 622.
- [6] 姚宸朕, 徐志婧, 杨杰, 等. 固定化微生物技术原位削减河道黑臭底泥的中试研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(3): 122 - 128.
- YAO Chenzhen, XU Zhiqiang, YANG Jie, *et al.* Pilot-scale study on in-situ reduction of black and odorous sediment in river channel by immobilized microorganism technology [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(3): 122 - 128 (in Chinese).
- [7] 涂玮灵, 胡湛波, 梁益聪, 等. 反硝化细菌修复城市黑臭河道底泥试验研究[J]. 环境工程, 2015, 33(10): 5 - 9, 25.
- TU Weiling, HU Zhanbo, LIANG Yicong, *et al.* Experimental study on remediation of sediments in urban black-odorous rivers by denitrifying bacteria [J]. Environmental Engineering, 2015, 33(10): 5 - 9, 25 (in Chinese).
- [8] OVEZ B, MERGAERT J, SAGLAM M. Biological denitrification in drinking water treatment using the seaweed *Gracilaria verrucosa* as carbon source and biofilm carrier [J]. Water Environment Research, 2006, 78(4): 430 - 434.
- [9] JIN X C, WANG S R, 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 [J]. Environmental Pollution, 2006, 139(2): 288 - 295.
- [10] 李伟光, 王科, 邹锦林, 等. 污泥高温好氧发酵有机质降解动力学研究[J]. 中国给水排水, 2011, 27(17): 101 - 104.
- LI Weiguang, WANG Ke, ZOU Jinlin, *et al.* Study on dynamics of organic matter degradation in sludge thermophilic aerobic fermentation [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(17): 101 - 104 (in Chinese).
- [11] 霍敏波, 郑冠宇, 梁剑茹, 等. 生物沥浸处理中微生物菌群和胞外聚合物对城市污泥脱水性能的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 34(9): 2199 - 2204.
- HUO Minbo, ZHENG Guanyu, LIANG Jianru, *et al.* Influence of microbial flora and extracellular polymeric substances on municipal sewage sludge dewaterability enhanced by bioleaching process [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(9): 2199 - 2204 (in Chinese).
- [12] 唐千, 刘波, 王文林, 等. 城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(6): 2171 - 2178.
- TANG Qian, LIU Bo, WANG Wenlin, *et al.* Effect of carbon and nitrogen forms on decomposition of organic matter in sediments from urban polluted river [J]. Environmental Science, 2016, 37(6): 2171 - 2178 (in Chinese).
- [13] 李君剑, 刘峰, 周小梅. 矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(5): 1836 - 1841.
- LI Junjian, LIU Feng, ZHOU Xiaomei. Effects of different reclaimed scenarios on soil microbe and enzyme activities in mining areas [J]. Environmental Science, 2015, 36(5): 1836 - 1841 (in Chinese).
- [14] 李晓洁, 高红杰, 郭冀峰, 等. 三维荧光与平行因子研究黑臭河流 DOM [J]. 中国环境科学, 2018, 38(1): 311 - 319.
- LI Xiaojie, GAO Hongjie, GUO Jifeng, *et al.* Analyzing DOM in black and odorous water bodies using excitation-emission matrix fluorescence with PARAFAC [J]. China Environmental Science, 2018, 38(1): 311 - 319 (in Chinese).

(下转第113页)