

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.13.014

芽孢杆菌降解黑臭河道底泥的实验研究

林 秀, 张凤娥, 刘亚清, 潘浩奇, 张亚倩
(常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164)

摘 要: 为研究芽孢杆菌投加到黑臭水体中不同位置对河道水体的修复效果,以某黑臭河道底泥和水体为研究对象,利用芽孢杆菌生物降解技术,分别将芽孢杆菌投加至底泥、泥水分界面、上覆水体3个不同位置,并测定相应指标进行分析。结果表明:芽孢杆菌投加至不同位置对黑臭水体均有修复效果,其中将芽孢杆菌投加至泥水分界面时对黑臭底泥和水体的修复效果最佳,此时对水体中氨氮、总氮、TP和COD的去除率分别为63.65%、42.71%、39.14%和63.13%,对底泥中氨氮、总氮、TP和有机质的去除率分别为59.88%、65.99%、59.07%和57.07%,底泥颜色由黑变黄,厚度下降18%,底泥生物降解能力增强。

关键词: 黑臭河道; 芽孢杆菌; 底泥; 泥水分界面

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)13-0083-05

Degradation of Sediments by *Bacillus* in Black and Odorous River

LIN Xiu, ZHANG Feng-e, LIU Ya-qing, PAN Hao-qi, ZHANG Ya-qian
(School of Environment & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: Effects of adding *Bacillus* at different locations in a black and odorous river on sediment degradation were investigated. *Bacillus* was added to the sediment, sediment-water interface and overlying water, respectively, and corresponding indexes were determined and analyzed. Adding *Bacillus* at different locations all had remediation effects on black and odorous river. The best remediation performance was achieved when *Bacillus* was added to the sediment-water interface, the removal efficiencies of $\text{NH}_3 - \text{N}$, TN, TP and COD in the water were 63.65%, 42.71%, 39.14% and 63.13%, respectively, and the removal efficiencies of $\text{NH}_3 - \text{N}$, TN, TP and organic matter in the sediment were 59.88%, 65.99%, 59.07% and 57.07%, respectively. The color of the sediment changed from black to yellow, its thickness decreased by 18%, and its biodegradability also increased.

Key words: black and odorous river; *Bacillus*; sediment; sediment-water interface

微生物修复底泥技术主要通过直接利用自然环境中的土著微生物,或是人为投加经驯化的外源微生物来实施,进而在微生物的代谢作用下转化、降解和去除污染物。芽孢杆菌是一类好氧微生物,含有丰富的蛋白酶、脂肪酶等,能有效分解碳系、氮系、磷

系、硫系污染物和有机物,在水环境中能形成优势菌群,进而降低水体黑臭风险^[1]。目前微生物原位修复黑臭河道技术已有成功案例,但将芽孢杆菌用于降解黑臭底泥的研究却不多。本实验拟将芽孢杆菌分别投加至黑臭底泥、泥水分界面及上覆水体,通过

各个指标比对来确定芽孢杆菌的最佳投加位置。

河道底泥中含有各种形式的氮,其中含量最多的是离子交换态氮,离子交换态氮主要是氨氮。芽孢杆菌降解氮主要有两种途径:一方面,芽孢杆菌协同其他微生物通过硝化、反硝化作用降解和转化氮素^[2];另一方面,芽孢杆菌可以吸收含氮有机物用以合成自身所需物质,如蛋白质等。

黑臭河道中的磷主要来源于水体原本富含的磷、底泥有机磷或非溶解性无机态磷转化而来的可溶性磷以及底泥脱附而释放出的溶解性磷。磷在底泥-水体的循环受底泥吸附、释放以及间隙水扩散3种作用的控制。芽孢杆菌可以将有机磷分解为无机磷,而且能将底泥中难溶性磷转化为可溶性磷^[3]。芽孢杆菌还能与底泥和水体中的微生物产生协同作用,且有机质可为芽孢杆菌及其他微生物提供电子受体,促进这些微生物对磷的降解。

黑臭底泥中的有机质是水体生物的主要营养源,主要由底泥中原来的有机污染物和底泥中含有的微生物两部分组成^[4]。芽孢杆菌能利用有机质作为碳源而获得能量。底泥中有机质浓度越低,其矿化程度越高、厚度越小^[5]。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

芽孢杆菌主要成分为枯草芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌,活菌数 $\geq 1.0 \times 10^{11}$ 个/g。

实验原水和底泥均取自某黑臭河道,水体属劣V类。其中,底泥中氨氮为34.92 mg/kg、TN为48.34 mg/kg、TP为100.08 mg/kg、有机质为89.04 g/kg、底泥生物的降解能力(G 值)为 3×10^{-3} kg/(kg·h);水体中氨氮为6.52 mg/L、TN为9.71 mg/L、TP为3.73 mg/L、COD为57.23 mg/L;底泥厚度为15 cm。

1.2 实验方法

准备4个5 000 mL的烧杯(分别记为1#~4#),底部填有1 500 mL底泥,并用虹吸法加入3 000 mL黑臭废水,避免扰动底泥。1#烧杯为空白,2#~4#烧杯则分别在底泥、泥水分界面以及上覆水体投加0.3 g/m³芽孢杆菌,操作方式如下:当投加到水体时,将芽孢杆菌活化后直接注入上覆水体;当投加到泥水分界面时,先将底泥填充至烧杯中,然后在底泥表面注入芽孢杆菌,10 min后用虹吸法加入水体;当投加到底泥时,先将芽孢杆菌注入底泥中,再用虹吸法加

入水体。实验时间设为30 d,每隔3 d检测水体及底泥中氨氮、TN、TP、COD或有机质含量及底泥厚度、 G 值。实验过程中补水取自原河道固定点水体。

实验时间为9月,水温在25℃左右,水体初始pH值为7.88,符合芽孢杆菌的生长条件。芽孢杆菌是好氧菌,因此实验需进行曝气以使得水体保持好氧状态。

2 结果与讨论

实验结果表明,芽孢杆菌投加到不同位置对底泥和水体中各指标均有去除效果,但不同位置的去除效果不同。空白组中底泥和水体的各指标也有一定下降,原因是底泥和水体本身含有土著微生物,存在降解和转化作用,但各指标去除率相对较低。

2.1 芽孢杆菌对氨氮和TN的降解

图1反映了芽孢杆菌对氨氮和TN的降解效果。可以看出,芽孢杆菌投加至不同位置对水体中氨氮、TN的去除效果排序为:投加至泥水分界面>投加至水体>投加至底泥,对底泥中氨氮、TN的去除效果排序为:投加至泥水分界面>投加至底泥>投加至水体。

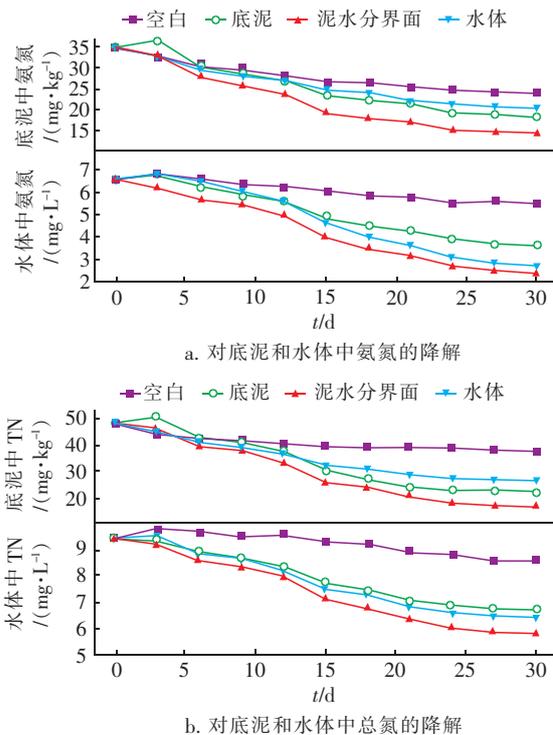


图1 芽孢杆菌投加至不同位置时对底泥和水体中氨氮、总氮的降解

Fig. 1 Degradation of NH₃-N and TN in sediment and water by *Bacillus* at different locations

当芽孢杆菌投加至泥水分界面时,对水体中氨氮、TN 的去除率分别为 63.65%、42.71%,对底泥中氨氮、TN 的去除率分别为 59.88%、65.99%。

底泥中的氨氮与底泥结合疏松,容易释放,使底泥中氮含量下降。投加的芽孢杆菌能协同其他细菌发生硝化/反硝化作用,降低底泥和水体中的氮。芽孢杆菌和其他细菌首先以有机物为电子受体、 NH_4^+ 为电子供体,将 NH_4^+ 氧化为 NO_2^- 或 NO_3^- ,并在厌氧的条件下,以有机物为电子供体、 NO_2^- 或 NO_3^- 为电子受体,将其还原为氮气而释放出去。芽孢杆菌还能吸收底泥和水体中的氮合成自身所需物质,如蛋白质等。

2.2 芽孢杆菌对 TP 的降解

图 2 反映了芽孢杆菌对 TP 的降解效果。可以看出,芽孢杆菌投加至不同位置对水体中 TP 的去除效果排序为:投加至泥水分界面 > 投加至底泥 > 投加至水体。芽孢杆菌投加至泥水分界面时,对水体中 TP 的去除率为 39.14%,对底泥中 TP 的去除率为 59.07%。由于表层底泥是整个水体中生化活动最频繁的地方^[6],芽孢杆菌协同其他细菌能有效降解 TP,因此投加至泥水分界面的芽孢杆菌对 TP 的去除效果最好。加入水体中的芽孢杆菌的除磷效果不佳有两方面原因:一方面,投加芽孢杆菌,使水体中带入了更多的污染基质,提高了 TP 的本底值,削弱了 TP 的降解效率;另一方面,只有少量的芽孢杆菌能对底泥产生作用,不能有效降解底泥中的磷。

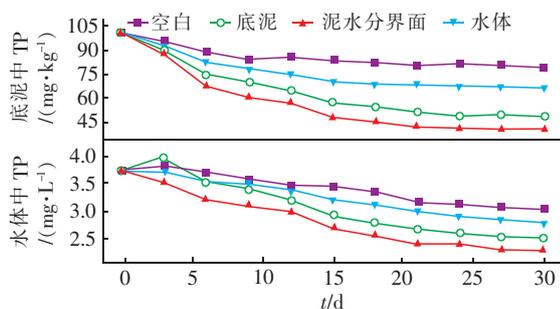


图 2 芽孢杆菌投加至不同位置对底泥和水体中 TP 的降解

Fig. 2 Degradation of TP in sediment and water by *Bacillus* at different locations

2.3 芽孢杆菌对水体中 COD 的降解

图 3 反映了芽孢杆菌对水体中 COD 的降解效果。芽孢杆菌投加至不同位置对水体中 COD 的去除效果排序为:投加至泥水分界面 > 投加至底泥 > 投加至水体。芽孢杆菌投加至泥水分界面时对

COD 的去除率达到 63.13%。芽孢杆菌刚投入时,给水体带入了基质,因此刚开始时水体中的 COD 浓度增大,经过一段时间驯化后,COD 浓度开始下降。

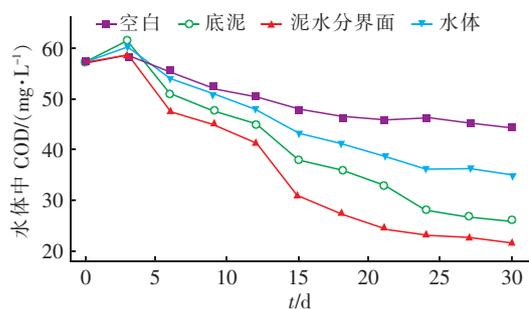


图 3 芽孢杆菌投加至不同位置时对水体中 COD 的降解

Fig. 3 Degradation of COD in water by *Bacillus* at different locations

2.4 芽孢杆菌对底泥中有机质的降解

芽孢杆菌的主要功能是降解底泥,图 4 反映了芽孢杆菌投加至不同位置对底泥中有机质降解效果的影响。可以看出,芽孢杆菌投加至不同位置时对底泥中有机质的去除效果排序为:投加至泥水分界面 > 投加至底泥 > 投加至水体。芽孢杆菌投加至泥水分界面时,对有机质的最大去除率为 57.07%。芽孢杆菌投加至底泥时对有机质的降解效果低于芽孢杆菌投加至泥水分界面时,这是因为芽孢杆菌投加至底泥后,底泥中的微生物数量迅速增加,以致有机物增长速度大于芽孢杆菌的降解速度,使得芽孢杆菌无法大量分解有机质^[7]。芽孢杆菌投加至泥水分界面时,底泥中有机物为芽孢杆菌及其他微生物提供了充足的营养物质,底泥的矿化过程加快、削减速率快,30 d 内底泥厚度下降了 18%。

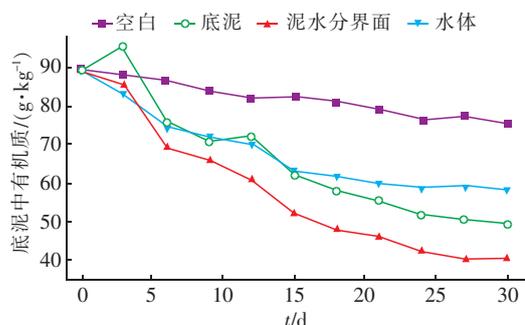


图 4 芽孢杆菌投加至不同位置时对底泥中有机质的降解

Fig. 4 Degradation of organic matter in sediment by *Bacillus* at different locations

2.5 G 值的变化

G 值是评定底泥中微生物活性的重要指标,能

直接反映底泥的生物修复效果,体现底泥生物氧化有机污染物的能力。从图 5 不同实验组的 G 值可以看出, G 值排序为:投加至泥水分界面 > 投加至底泥 > 投加至水体。芽孢杆菌注入至泥水分界面时, G 值最大,说明在此条件下泥水环境中的微生物密度适中,微生物更适宜生长繁殖。芽孢杆菌注入底泥时,带入的大量基质在一定程度上抑制了微生物的同化,使有机物去除变缓。

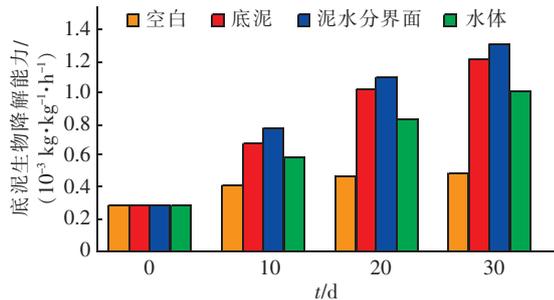


图 5 芽孢杆菌投加至不同位置时 G 值变化

Fig. 5 Effect of *Bacillus* at different locations on G value

2.6 底泥的生物多样性分析

Chao 指数和 Ace 指数反映样品中群落的丰富度,主要针对群落中物种的数量。Shannon 指数和 Simpson 指数反映群落的多样性受样品群落中物种丰富度和均匀度的影响,可较全面地说明生物多样性的情况,物种丰富度相同的情况下,群落中各物种具有的均匀度越大,则认为群落具有的多样性越好^[8-9]。各组底泥中微生物多样性指数见表 1。

表 1 各组底泥中微生物多样性指数

Tab. 1 Microbial diversity index for each group of sediments

项 目	Simpson	Chao	Ace	Shannon
空白	0.992 630	2 070.00	2 123.73	9.23
投加至水体	0.993 898	2 135.25	2 343.36	9.74
投加至泥水分界面	0.997 827	2 549.90	2 711.35	10.45
投加至底泥	0.994 601	2 243.06	2 492.21	10.02

从表 1 可以看出,将芽孢杆菌投加至泥水中不同位置都能够增加微生物群落的丰富度和多样性,而将芽孢杆菌投加至泥水分界面时,微生物种类相较于其他实验组高,也间接证明了芽孢杆菌投加位置的重要性。

3 结论

① 将芽孢杆菌投加至不同位置对黑臭底泥以及水体的修复效果不同,总体而言投加至泥水分界

面时修复效果最佳,然后是投加至底泥,最后是投加至水体。

② 投加至泥水分界面的芽孢杆菌对水体中各指标均有明显的去除作用,对水体中氨氮、总氮、TP、COD 的去除率分别为 63.65%、42.71%、39.14%、63.13%。芽孢杆菌投加至泥水分界面后,底泥中各指标也均有明显下降,对底泥中氨氮、总氮、TP、有机质的去除率分别为 59.88%、65.99%、59.07%、57.07%,底泥厚度下降了 18%,底泥生物降解能力增强。

③ 芽孢杆菌投加至不同位置均能增加底泥中微生物群落的丰富度和多样性,而将芽孢杆菌投加至泥水分界面时,底泥中的微生物多样性最好。

参考文献:

[1] 郑喜春. 脱氮除磷芽孢杆菌菌株的筛选及其应用效果 [D]. 保定:河北农业大学,2012.
Zheng Xichun. Screening and Application of *Bacillus* Strains with the Effect of Removing Nitrogen and Phosphorus [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2012 (in Chinese).

[2] 吴丽红,李晓惠,杨芳,等. 蜡状芽孢杆菌生物强化反硝化脱氮研究[J]. 中国给水排水,2016,32(3):89-92,96.
WU Lihong, LI Xiaohui, YANG Fang, et al. Bioaugmentation of denitrification with *Bacillus cereus* [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(3): 89-92, 96 (in Chinese).

[3] ECKERT W, NISHRI A, PARPAROVA R. Factors regulating the flux of phosphate at the sediment-water interface of a subtropical calcareous lake: a simulation study with intact sediment cores[J]. Water, Air and Soil Pollution, 1997, 99(1):401-409.

[4] 刘成. 生物促生剂联合微生物菌剂修复城市黑臭河道底泥实验研究[D]. 南宁:广西大学,2012.
LIU Cheng. Experimental Research on the Remediation of Sediment in Black-odorous Rural River by Using Biostimulant and Microbial Agent [D]. Nanning: Guangxi University, 2012 (in Chinese).

[5] 涂玮灵. 反硝化菌剂对黑臭河道底泥的修复效果及条件优化研究[D]. 南宁:广西大学,2014.
TU Weiling. Studies on the Remediation and Optimization of Sediment in Black-odorous River by Denitrifying Bacteria Agent [D]. Nanning: Guangxi University, 2014

(下转第 91 页)