

挂膜沸石覆盖层持续抑制底泥氨氮释放的影响因素研究

徐金兰, 张 晶, 刘爱萍, 李 凯

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 通过多轮底泥修复实验研究了沸石类型、覆盖密度及上覆水氨氮浓度对挂膜沸石覆盖层持续抑制底泥氨氮释放、改善水质的影响。结果表明: 沸石类型直接决定挂膜沸石覆盖层能否持续有效抑制底泥氨氮释放, 孔径在 8 nm 左右的沸石 F1 表面才能附着有效降解氨氮的微生物, 从而具有较强的原位再生能力, 通过不断削减底泥氨氮(各轮底泥氨氮削减量为 23~30 mg)和上覆水氨氮(削减量达 18 mg)来持续抑制底泥氨氮释放, 将上覆水氨氮浓度控制在 0.4 ~0.8 mg/L, 达到地表水 III 类水体水质标准。挂膜沸石能否持续抑制底泥氨氮释放也与沸石覆盖密度和上覆水氨氮浓度有关, 当覆盖密度大于 1.46 kg/m² 时、上覆水氨氮浓度低于 4.28 mg/L 时, 覆盖挂膜沸石 F1 能够持续抑制底泥氨氮释放, 使水体氨氮浓度满足地表水 III 类水体水质标准。

关键词: 沸石类型; 底泥氨氮释放; 持续抑制; 覆盖密度; 沸石原位再生

中图分类号: X55

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)04-0579-06

Sustainable inhibition of ammonium release from sediments by capping of bio-zeolite

XU Jinlan, ZHANG Jing, LIU Aiping, LI Kai

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. &Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: The effect of zeolite type, coverage density and ammonium concentration of overlying water on sustainable inhibition of ammonium release from sediments and improvement of water quality by capping bio-zeolites were studied. The results showed that the sediment ammonium release can be sustainably inhibited depending on zeolite types directly. The surface of zeolite F1 whose aperture was at around 8 nm was conducive to adsorption of microorganism which can degrade ammonium efficiently, so bio-zeolite F1 has strong ability of regeneration in situ. Through continuous cutting sediment ammonium (sediment ammonium reduction amount of each round was 23~30 mg) and overlying water ammonium (reduction amount was up to 18 mg), bio-zeolite F1 can suppress the sediment ammonium release sustainably so that the concentration of ammonium in the overlying water was 0.4 mg/L ~0.8 mg/L in capping bio-zeolite F1 system, to meet surface water quality standard of class III. In addition, the sustainable inhibition of ammonium release by bio-zeolite F1 was affected by coverage density and ammonium concentration of overlying water. The release of ammonium was inhibited sustainably so the concentration of ammonium in the overlying water met the surface water quality standard of class III when the coverage density of bio-zeolite F1 was greater than 1.46 kg/m² and ammonium concentration of overlying water was lower than 4.28 mg/L.

Key words: zeolite type; sediment ammonium release; sustainable inhibition; coverage density; zeolite regeneration in situ

河流湖泊等水体底泥中氨氮的释放是导致水体富营养化最重要的内因之一^[1-3], 原位覆盖法是将砂子、砾石、红土等覆盖材料覆盖在底泥表层, 控制内源污染物释放, 修复水体的原位净化技术, 是目前最具应用前景的技术之一^[4-7]。

当前以沸石为覆盖材料的原位覆盖法是研究的热点。Jacobs 等^[9]使用天然和改性沸石作为覆盖底泥、控制内源污染物释放的活性掩蔽体系 (ABS), 指出沸石能够吸附底泥释放的氨氮等污染物, 改善水质; 林建伟等^[10]研究了天然沸石覆盖层控制底泥氮磷释放的影响因素, 结果表明: 天

然沸石覆盖层在短期内 (一轮试验) 可以控制底泥氨氮释放、降低磷的释放速率; Gibbs 等^[8]对改性沸石磷钝化剂 (Z2G1) 覆盖技术削减富营养化湖泊氮、磷负荷的效果进行了研究, 实验结果表明 Z2G1 覆盖技术也在短期内 (一轮试验) 抑制了底泥中氮、磷的释放, 削减了部分上覆水体中的氮、磷; 课题组前期^[11]对挂膜沸石覆盖削减扬州古运河氮负荷进行了研究, 结果表明挂膜沸石覆盖技术可有效抑制底泥氮释放, 并且利用生物硝化反硝化反应去除沸石吸附的部分氨氮, 可使沸石得到一定程度的生物再生。

但这些技术能否长期有效抑制底泥氨释放尚不清楚,目前国内外关于影响沸石覆盖技术持续抑制底泥氨氮释放有效性的研究也鲜见报道.为此,本研究采用多轮底泥修复实验来考察沸石类型、覆盖密度及上覆水氨氮浓度对挂膜沸石覆盖层持续抑制底泥氨氮释放的影响,以期为原位控制底泥内源污染、防治水体富营养化提供理论与技术指导.

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用硝化菌 WGX10、WGX18 为芽孢杆菌属 (*Bacillus sp*),反硝化菌 HF3、HF7 为不动杆菌属 (*Acinetobactor sp*)^[12].实验选用的四种沸

石分别为 F1 (海宇沸石); F2 (奥林沸石); F3 (天然沸石); F4 (钙沸石),粒径均在 1~2 mm 之间.四种沸石的化学组成和孔径列于表 1 中,由表 1 可知四种沸石 Al₂O₃ 的含量存在差异,沸石 F1 和 F2 中的 Al₂O₃ 含量为 13.0%~14.0%、15.0%~16.0%,高于沸石 F3 和 F4 (11.8%、12.1%),沸石 F1 和 F2 中 Fe₂O₃ 的含量也略高于沸石 F3 和 F4,四种沸石孔径差异明显(沸石 F1、F2、F3 和 F4 分别为 8.26 nm、35.13 nm、97.86 nm 和 111.74nm).4 种挂膜沸石的制备过程与参考文献^[13]中生物载体的制备方法相同.实验所用底泥取自扬州古运河,底泥中有机物含量为 3.14%,总氮含量为 1.24 mg/kg (见表 2).

表 1 四种沸石的化学组成及孔径

Tab. 1 Chemical constituents and aperture of four zeolite

沸石 类型	化学组成 / %								孔径/nm
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	NaO	H ₂ O	
F1	67.0~68.0	13.0~14.0	1.0~1.8	1.7~2.2	0.9~1.9	1.5~4.0	0.5~1.5	1.8	8.26
F2	65.0~66.0	15.0~16.0	1.7	4.2	1.2	3.4	4.2	2.0	35.13
F3	70.8	11.8	0.6	3.2	1.1	2.2	0.6	1.2	97.86
F4	68.4	12.1	0.8	4.7	0.1	0.9	1.3	4.5	111.74

表 2 底泥性质

Tab. 2 Characteristics of sediments

底泥来源	底泥性质				
	含水率 / %	干物质 / %	有机物 / %	总氮 / (mg·kg ⁻¹)	pH
扬州古运河	60.50	36.36	3.14	1.24	6.62

1.2 实验方法

由于经过一段时间后(约 30 d),反应器中的底泥氨氮释放量极低,为了验证沸石具有持续抑制氨氮释放的效果,此时更换新泥开始新一轮的覆盖实验,本实验中采用多轮(5 轮)挂膜沸石层抑制底泥氨氮释放实验来验证持续抑制效果.具体方法为:覆盖实验在体积为 5.8 L (内径 17.5 cm、高 24 cm) 的广口瓶中进行,先铺设厚度为 4 cm 的底泥(约 300 g),在底泥上均匀覆盖一层挂膜沸石,缓慢加入 5 L 上覆水,泥水比为 0.06 g/mL, pH 为 6.79, DO 约为 3 mg/L,自然复氧状态下进行抑制底泥氨氮释放实验.30 d 后更换新泥,将上一轮试验中的挂膜沸石取出、洗净后重新均匀平铺在新换的底泥表面开始新一轮的覆盖实验,实验在常温下(22~26 ℃)进行,每一轮均作不覆盖沸石的空白试验,测定底泥氨氮释放量.

为了研究沸石类型、覆盖密度及上覆水氨氮浓度对挂膜沸石层持续抑制底泥氨氮释放的影响,进行了三部分实验:(1)沸石类型的影响:在上覆水 g/m² 条件下,分别覆盖挂膜沸石(F1、F2)进行 5

轮沸石层抑制底泥氨氮释放的实验(因为扫描电镜证明沸石 F3 和 F4 表面不能附着微生物,因此后续实验没有使用沸石 F3 和 F4).(2)覆盖密度的影响:当上覆水初始氨氮浓度为 3.91 mg/L 时,覆盖挂膜沸石 F1,分别在覆盖密度为 0.21 kg/m²、0.63 kg/m²、1.05 kg/m²、1.46 kg/m²、1.89 kg/m² 条件下进行 5 轮抑制底泥氨氮释放的实验.(3)上覆水体氨氮浓度的影响:覆盖挂膜沸石 F1,分别在两组不同初始氨氮浓度(4.28 mg/L 和 14.55 mg/L) 条件下进行 5 轮抑制底泥氨氮释放的实验,定期测定上覆水氨氮、硝氮、亚硝氮浓度,并计算各轮试验中的底泥氨氮和上覆水氨氮削减量,待 5 轮试验结束后将挂膜沸石取出,解析沸石中残留的氨氮.

1.3 测试及分析方法

氨氮测定采用纳氏试剂光度法,硝氮测定采用紫外分光光度法,亚硝氮测定采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法^[14](均采用紫外分光光度计 DR5000,美国哈希公司),DO 测定采用 HQ30d 溶氧仪(美国哈希公司),pH 测定采用 pHS-3c pH 计(上海精密科学仪器有限公司).4 种沸石挂膜过程完成后

取适量挂膜沸石使用扫描式电子显微镜(JSM-6510LV,日本)进行电镜扫描(喷金时间2min,电流20 mA,放大倍数为50 000)。5轮试验结束后取出挂膜沸石进行解析实验。解析前,用无水乙醇悬浮洗涤挂膜沸石,离心之后弃去上清液,然后进行物理解析和化学解析。物理解析:加入2 mol/L的CaCl₂溶液,在25℃下振荡24 h后离心,测定上清液中的氨氮含量,这部分氨氮为挂膜沸石的物理解析量。化学解析:根据沸石对K⁺比NH₄⁺的选择吸附能力强,添加K⁺置换沸石中的NH₄⁺,完成物理解析后,分别加入2 mol/L的KCl溶液,在25℃下振荡24 h后离心,测定上清液中的氨氮含量,该部分氨氮即为挂膜沸石的化学解析量。物理解析量和化学解析量之和为沸石内氨氮残留量。氨氮的去除总量减去沸石内氨氮残留量即为生物再生量(原位再生量)。

1.4 数据处理

对底泥中和上覆水中氨氮削减量以下式计算:

当上覆水中氨氮浓度大于上覆水初始氨氮浓度时,底泥中氨氮削减量采用公式(1)计算;当上覆水中氨氮浓度低于上覆水初始氨氮浓度时,底泥中氨氮削减量采用公式(2)计算:

$$R_n = V(C_n^0 - C_n) \quad (1)$$

$$R_n = V(C_n^0 - C_0) \quad (2)$$

上覆水氨氮削减量采用公式(3)计算:

$$W_n = V(C_0 - C_n) \quad (3)$$

上覆水氨氮削减率采用公式(4)计算:

$$E_n = (C_0 - C_n) / C_0 \quad (4)$$

其中: R_n 为第 n 轮试验中挂膜沸石对底泥中氨氮的削减量(mg), W_n 为第 n 轮试验中挂膜沸石对上覆水氨氮的削减量(mg), V 为反应器中上覆水的体积(L), C_n 为第 n 轮试验进行到最后一天时挂膜沸石组上覆水的氨氮浓度(mg/L), C_n^0 为第 n 轮试验进行到最后一天时空白对照组上覆水的氨氮浓度(mg/L), C_0 为上覆水初始氨氮浓度(mg/L), E_n 为上覆水氨氮削减率(%).挂膜沸石生物再生量采用公式(5)计算:

$$m_0 = m - m_1 \quad (5)$$

式中: m_0 为单位质量挂膜沸石的生物再生量(mg/g), m 为单位质量挂膜沸石去除的氨氮总量(mg/g)(挂膜沸石对氨氮的去除总量除以反应器中沸石的质量), m_1 为单位质量挂膜沸石物理解析量和化学解析量之和(mg/g)(沸石内残留氨氮量)。

2 结果与分析

2.1 沸石类型对持续抑制底泥氨氮释放的影响

2.1.1 四种沸石的挂膜情况分析

本实验研究挂膜沸石类型对持续抑制底泥氨氮释放的影响,实验选取四种沸石进行挂膜,沸石F1、F2、F3、F4挂膜前表面特征差异较大(图1),沸石F1和F2表面粗糙、富有大量空穴和孔道,平均孔径分别为8.26 nm和35.13 nm(见表1),挂膜后,可在其表面观察到大量球状菌,而F3、F4表面较光滑,平均孔径分别为97.86 nm和111.74 nm,挂膜前后基本没有变化。因此后续实验选取挂膜沸石F1、F2进行抑制底泥氨氮释放的研究。

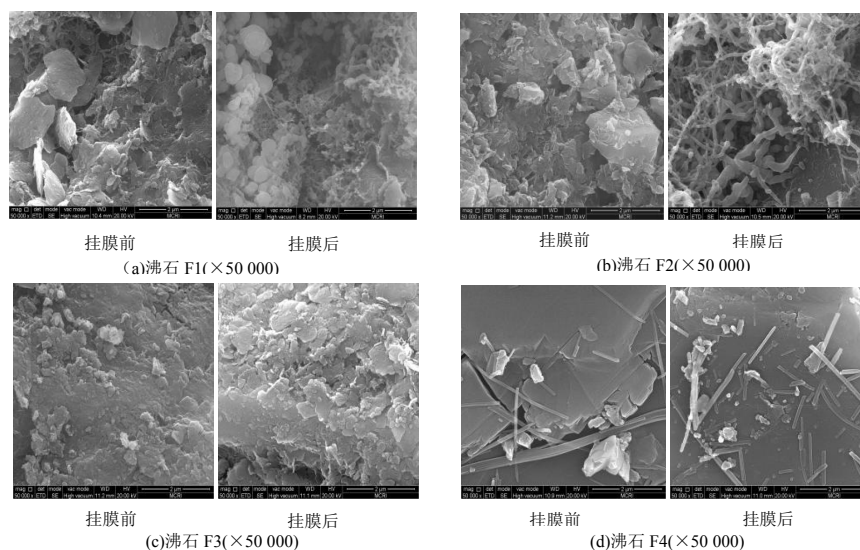


图1 四种沸石挂膜前后SEM图对比图

Fig. 1 The SEM photos of four zeolite before and after hanging membrane

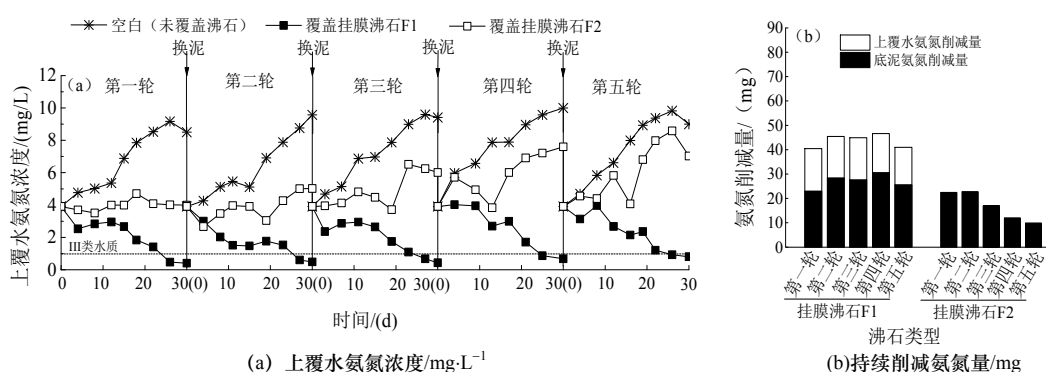
2.1.2 覆盖挂膜沸石持续抑制底泥氨氮释放的研究

图2给出了挂膜沸石F1、F2持续抑制底泥氨氮释放的情况。覆盖挂膜沸石F1后,前3轮抑制实验中均可将上覆水氨氮浓度控制在 0.5mg/L 以下,达到地表水II类水体水质标准($0.15\text{mg/L} < \text{NH}_4^+-\text{N} < 0.5\text{mg/L}$);后2轮实验中,上覆水氨氮浓度略有升高,氨氮浓度为 $0.7\sim 0.8\text{mg/L}$,满足地表水III类水体水质标准($0.5\text{mg/L} < \text{NH}_4^+-\text{N} < 1.0\text{mg/L}$) (图2a)。从图2(a)还可以看出挂膜沸石F2效果没有F1好,5轮实验中上覆水氨氮浓度高达 $4.0\sim 7.6\text{mg/L}$,略低于不加沸石的空白对照组(10.5mg/L),超出地表水V类水质标准($\text{NH}_4^+-\text{N} < 2.0\text{mg/L}$)。可见,只有覆盖挂膜沸石F1可以持续抑制底泥氨氮释放,使上覆水达到地表水II-III类水体水质标准。林建伟等^[9]采用 100g 沸石和 100g 方解石混合覆盖层(反应器 1L ,底泥厚度 4cm)

可将上覆水氨氮控制在 0.7mg/L 左右,本研究与其研究结果一致。

2.1.3 覆盖挂膜沸石削减氨氮的分析

为了探究覆盖挂膜沸石持续抑制底泥释放的原因,计算上覆水和底泥氨氮的削减量,结果见图2(b)所示。从图2(b)可以看出覆盖挂膜沸石F1的各轮试验中,底泥中的氨氮持续削减,氨氮削减量较大,为 $23\sim 30\text{mg/L}$ 。同时上覆水氨氮也大量削减($16\sim 18\text{mg/L}$),削减了上覆水中 $79\%\sim 90\%$ 的氨氮,表明挂膜沸石F1可以持续有效削减底泥和上覆水中的氨氮,这也是覆盖挂膜沸石F1后体系中上覆水氨氮浓度满足地表水II-III类水的主要原因。而挂膜沸石F2对底泥氨氮的削减量则由第1轮的 23mg 下降至第5轮的 10mg ,不能持续削减底泥中的氨氮,因此上覆水中的氨氮浓度超出地表水V类水质标准。



(a) 上覆水氨氮浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

图2 覆盖挂膜沸石F1和F2持续修复底泥的实验结果

Fig.2 Reduction amount of sediment ammonia and reduction amount of overlying water ammonia

2.1.4 挂膜沸石原位再生能力分析

为了探究不同类型的挂膜沸石持续削减底泥氨氮存在显著差异的原因,于5轮试验结束后取出2种挂膜沸石进行物理解析、化学解析后,计算生物作用去除的氨氮量。由图3可知单位质量的F1挂膜沸石去除的氨氮总量为 $6.21\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,其中依靠生物作用去除的氨氮量为 $4.68\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,沸石原位再生率为 75.45% ,达到了较好的原位再生效果,所以F1能够持续抑制氨氮释放。F2去除的氨氮总量为 $2.39\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,生物去除量为 $0.72\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,原位再生率为 30.21% ,原位再生能力没有F1强,可能与挂膜沸石F2表面富集的微生物并不是有效降解氨氮的微生物种类有关。结果表明,孔径在 8nm 左右的沸石表面才会附着有效降解氨氮的微生物,从而具有的原位再生能力,这是挂膜沸石F1(孔径 8.26nm)能够持续抑制底泥氨氮释放的主要原因。

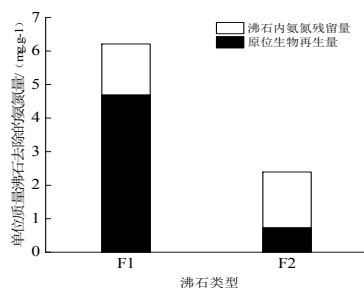


图3 挂膜沸石F1和F2的原位再生能力

Fig.3 Regeneration in situ of bio-zeolite F1 and F2 较强

2.2 覆盖密度对持续抑制底泥氨氮释放的影响

图4(a)为挂膜沸石F1在五种覆盖密度条件下上覆水体氨氮浓度变化曲线。由图2(a)可知,当覆盖密度高于 1.46kg/m^2 时(1.46kg/m^2 、 1.89kg/m^2),挂膜沸石F1才能在5轮试验中均将上覆水氨氮浓度控制在较低水平($0.4\sim 0.8\text{mg/L}$),5轮试验中挂膜沸石覆盖层对底泥氨氮的削减量均为 $23\sim 30\text{mg}$ (图4b),并且可以削减上覆水中 16mg

~18mg 的氨氮(上覆水氨氮削减率为 79%~93%),符合地表水 III 类水体水质标准(空白对照组为 10.0mg/L),表明覆盖密度高于 1.46 kg/m²时挂膜沸石 F1 能够持续有效抑制氨氮释放.而沸石覆盖密度较低时(1.05 kg/m²),上覆水氨氮浓度上升为 5.1~7.9 mg/L,远超出地表水 V 类水质标准,覆盖密度更低时(0.21 kg/m²、0.63 kg/m²),已与空白

对照组基本无差异;此外发现覆盖密度低于 1.46kg/m²时各轮试验中氨氮削减量较低、并且下降较快,分别由第 1 轮的 3.5 mg、6.5 mg 和 17.0 mg 下降为第 5 轮的 0 mg、0.3 mg 和 5.6 mg,不能持续削减底泥氨氮.结果表明挂膜沸石 F1 覆盖密度高于 1.46 kg/m²时,才能够持续有效抑制底泥氨氮释放,使上覆水水质达到地表水 III 类水质标准.

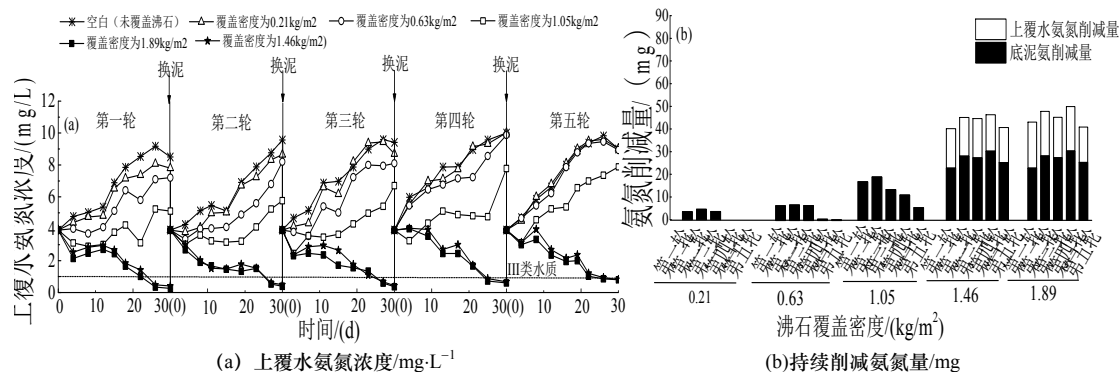


图4 挂膜沸石 F1 覆盖密度不同时持续修复底泥的实验结果

Fig.4 Experiment results of repairing the sediment with different coverage density of bio-zeolite F1

2.3 氨氮浓度对持续抑制底泥氨氮释放的影响

由图 5(a)知,初始上覆水氨氮浓度较低时(4.28mg/L),覆盖挂膜沸石 F1 后,5 轮实验中上覆水中氨氮浓度始终维持在 0.7~1.0 mg/L,满足地表水 III 类水体水质标准,然而当上覆水初始氨氮浓度提高为 14.55 mg/L 时,前 2 轮实验中上覆水氨氮浓度迅速升高为 2.6~3.9 mg/L,超出地表水 V 类水质标准;到后 3 轮实验中上覆水氨氮浓度已上升至 11~15.5 mg/L,与空白对照组接近(19.0 mg/L),沸石已近失效.对于初始上覆水氨氮浓度为 4.28mg/L 的覆盖体系,5 轮试验中各轮底泥氨氮削减量均为 22.3~31.0 mg 如图 5(b),并且对上覆水中的氨氮削减量为 16.3~18.0 mg,削减率为

76%~84%.而初始上覆水氨氮浓度较高时(14.55 mg/L),前 2 轮实验中沸石就吸附了上覆水中 80%左右的氨氮如图 5(b),表明上覆水中过高的氨氮浓度会使挂膜沸石覆盖层快速吸附上覆水中大量氨氮而饱和,无法持续削减底泥中的氨氮.因此,上覆水初始氨氮浓度低于 4.28 mg/L 时,覆盖挂膜沸石 F1 可以持续有效抑制底泥氨氮释放,这些结果说明在氨氮释放强度低的春、秋、冬三个季节(1~5 mg/L)^[15]或对释放强度低的河流而言,覆盖挂膜沸石 F1 可以持续抑制底泥氨氮释放、满足 III 类水质要求,但在底泥氨氮释放严重的夏季其峰值高达 10.2 mg/L^[15]或释放强度高的河流则持续抑制效果有限.

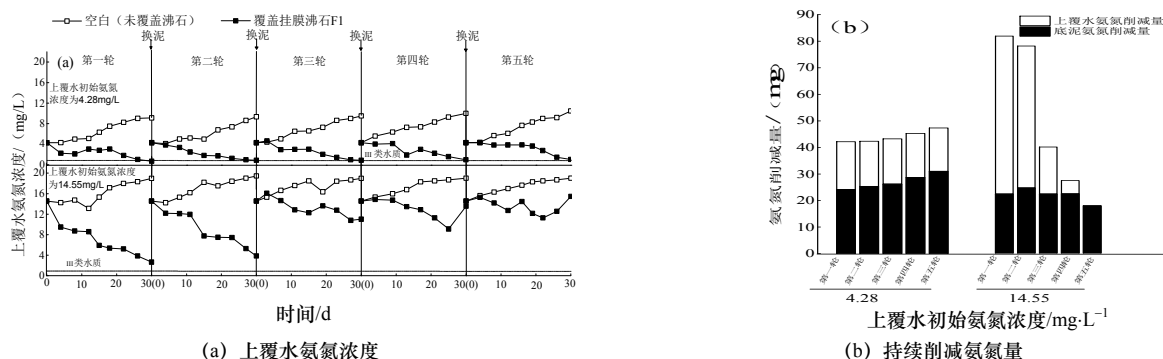


图5 上覆水初始氨氮浓度不同时挂膜沸石 F1 持续修复底泥的实验结果

Fig.5 Experiment results of repairing the sediment with different ammonium concentration of overlying water

3 结论

(1) 多轮底泥修复实验结果表明沸石孔径是影

响挂膜沸石覆盖层能否持续有效抑制底泥氨氮释放的关键因素,孔径为 8 nm 左右的沸石(挂膜沸石 F1)表面会附着大量微生物,利用底泥释放的氨

氮进行原位再生,原位再生能力高达 75.45%,对底泥和上覆水氨氮削减量分别高达 23~30 mg 和 16~18 mg,可将上覆水氨氮浓度持续控制在 0.4~0.8 mg/L,达到地表水 III 类水质标准。

(2) 覆盖密度高于 1.46 kg/m² 时,挂膜沸石覆盖层对底泥和上覆水中氨氮削减量分别高达 30 mg、18 mg 左右,满足地表水 III 类水质标准。

(3) 上覆水氨氮浓度较低时(低于 4.28 mg/L),挂膜沸石覆盖层可持续削减底泥氨氮量(高达 22~31 mg),同时削减上覆水中 16~18 mg 的氨氮,在河流春秋和冬季能够持续抑制底泥氨氮释放,满足地表水 III 类水质标准。

参考文献 References

- [1] 张锡辉. 水环境修复工程学原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
ZHANG Xihui. Engineering principle and application of the water environment restoration[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [2] 金相灿,徐南妮,张雨田. 沉积物污染化学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.
JIN Xingcan, XU Nanni, ZHANG Yutian. Sediment pollution chemistry[M]. Beijing: China environmental Science Press, 1992.
- [3] 吴根福,吴雪昌,金承涛. 杭州西湖底泥释磷的初步研究[J]. 中国环境: 科学, 1998, 18(2): 107-110.
WU Genfu, WU Xuechang, JIN Chengtao. The preliminary research on the hangzhou west lake sediment phosphorus release[J]. China Environmental Science, 1998, 18(2): 107-110.
- [4] 祝凌燕,张子种,周启星. 受污染沉积物原位覆盖材料研究进展[J]. 生态学杂志, 2008, 27(4): 645-651.
ZHU Linyan, ZHANG Zizhong, ZHOU Qixing. A review on cover material in situ of contaminated sediments[J]. Ecology magazine, 2008, 27(4): 645-651.
- [5] MURPHY T P, LAWSON A, KUMAGAI M, et al. Review of emerging issues in sediment treatment[J]. Aquatic Ecosystem Health & Management, 1999, 2(4): 419-434.
- [6] PALERMO M R. Design considerations for in-situ capping of contaminated sediments[J]. Water Science and Technology, 1998, 37(6): 315-321.
- [7] REIBLE D D, LAMPERT D J. Processes, assessment and remediation of contaminated sediments [M]. New York: Springer, 2014, 325-363.
- [8] Gibbs M, özkundakci D. Effects of a modified zeolite on P and N processes and fluxes across the lake sediment - water interface using core incubations[J]. Hydrobiologia, 2011, 661(1): 21-35.
- [9] JACOBS P H, Förstner U. Concept of subaqueous capping of contaminated sediments with active barrier systems (ABS) using natural and modified zeolites[J]. Water Research, 1999, 33(9): 2083-2087.
- [10] 林建伟,朱志良,赵建夫. 天然沸石覆盖层控制底泥氮磷释放的影响因素[J]. 环境科学, 2006, 27(5): 880-884.
LIN Jianwei, ZHU Zhiliang, ZHAO Jianfu. The influence factors of natural zeolite layer controlling sediment nitrogen and phosphorus release[J]. Environmental science, 2006, 25(7): 880-884.
- [11] HUANG T L, ZHOU Z M, XU J L, et al. Biozeolite capping for reducing nitrogen load of the ancient canal in Yangzhou city[J]. Water Science & Technology, 2012, 66(2): 336-344.
- [12] 周真明. 城市河湖污染沉积物原位生物/物化组合修复技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
ZHOU Zhenming. Research on urban lakes contaminated sediment in-situ biological/chemical combination repair technology[D]. Xian: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.
- [13] 徐金兰, 黄廷林, 蔡道健. 挂膜沸石覆盖技术修复富营养化水体的研究[J]. 中国给水排水, 2010(19): 37-40.
XU Jinlan, HUANG Tinglin, CAI Daojian. Research on repair eutrophication of water body by covering bio-zeolites[J]. China Water&Wastewater, 2010(19): 37-40.
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration. Analytical method of water and waste water[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [15] 董玉华. 覆盖活性沸石消减扬州古运河沉积物氮污染负荷试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
DONG Yuhua. Research on covering the activated zeolite cut yangzhou ancient canal sediment nitrogen pollution load[D]. Xian: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012.

(编辑 沈波)