

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.01.008

纳米 Fe₃O₄ 覆盖对沉积物-水界面钴和镍的吸附试验研究

何翔宇¹,徐 瑶²,游 洋³,张 洋⁴,王晓惠⁴,陈 翔¹,燕文明¹

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098; 2. 江苏省水利科教中心,江苏 南京 210029; 3. 江苏省水利厅水资源处,江苏 南京 210029; 4. 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司,江苏 南京 211102)

摘要: 为揭示纳米材料原位覆盖对表层沉积物重金属的影响规律,开展室内培养原位沉积物柱试验,利用微界面分析技术、高分辨率平衡式间隙水采集技术(HR-Peeper)和薄膜扩散梯度技术(DGT),探究纳米 Fe₃O₄ 原位覆盖对表层沉积物中 Co、Ni 释放的影响机制。试验结果表明:在纳米 Fe₃O₄ 覆盖下沉积物 pH 值较对照组逐渐增大,Eh 值先减小后增大;纳米 Fe₃O₄ 覆盖可有效吸附间隙水中的溶解态 Co 和 Ni,间隙水中的溶解态 Co 和 Ni 最大有效吸附率分别为 27.07% 及 26.42%,有效影响深度分别为 30 mm 和 10 mm;纳米 Fe₃O₄ 覆盖有效抑制了沉积物中有效态 Co 和 Ni 向间隙水和上覆水扩散,沉积物中有效态 Co 和 Ni 含量分别降低了 50.26% 和 15.31%。

关键词: 纳米 Fe₃O₄; 覆盖; 沉积物-水界面; 钴; 镍

中图分类号:TB383;X703 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2022)01-0052-07

Study on the adsorption of cobalt and nickel at the sediment-water interface by nano-Fe₃O₄ overlay

HE Xiangyu¹, XU Yao², YOU Yang³, ZHANG Yang⁴, WANG Xiaohui⁴, CHEN Xiang¹, YAN Wenming¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Water Resources Science and Education Center of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China;
3. Water Conservancy Department of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China;
4. China Energy Engineering Group Jiangsu Power Design Institute Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: To reveal the effect of in-situ coverage of nano materials on heavy metals in surface sediments, the incubation experiments of in-situ sediment columns were carried out. Using micro-interface analysis technique, the high-resolution dialysis (HR-Peeper) technique and the diffusive gradients in thin films (DGT), the influence mechanisms of in-situ coverage of Fe₃O₄ nanoparticles on the release of Co and Ni from surface sediments were dissected. The results shows that the pH of the sediment covered by the nano-Fe₃O₄ gradually increased compared to that of the control group, while the Eh value decreased first and then increased. The coverage of nano-Fe₃O₄ can effectively adsorb the dissolved Co and the dissolved Ni in the pore water, and the maximum effective adsorption rates of dissolved Co and dissolved Ni in the pore water were 27.07% and 26.42%, respectively, with effective effect depths of 30 mm and 10 mm, respectively. The coverage of nano-Fe₃O₄ effectively inhibit the diffusion of labile Co/ Ni in sediments to overlying water and reduced the content of labile Co/Ni in sediments by 50.26% and 15.31%, respectively.

Key words: nano-Fe₃O₄; coverage; sediment-water interface; cobalt; nickel

沉积物中的重金属离子具有环境积累性和生物积累性,过量的金属离子容易对水生动植物的生命安全造成威胁^[1]。有研究表明,水体中 Co 和 Ni 含量较高会影响鱼类的生存繁殖^[2-3],亦可抑制植物生长甚至导致植物死亡^[4]。近年来沉积物中 Co 和 Ni 的分布特征逐渐受到关注^[5-7],若在高 Co 和高 Ni 环境下生长的动植物进入食物链则会威胁人类的健康,如人体摄入 Co 含量超过 60mg/d 可能导致食欲不振、呕吐、腹泻等,

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0405205);湖南省水利基金(XSKJ201908142);中央高校科研业务费实验室日常管理专项(B200205026)

作者简介: 何翔宇(1997—),男,硕士研究生,主要从事环境水文及水环境保护研究。E-mail:hxy12@hhu.edu.cn

通信作者: 燕文明(1982—),女,高级实验师,博士,主要从事环境水文及水环境保护研究。E-mail:ywm0815@163.com

引用本文: 何翔宇,徐瑶,游洋,等. 纳米 Fe₃O₄ 覆盖对沉积物-水界面钴和镍的吸附试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):52-58.

HE Xiangyu, XU Yao, YOU Yang, et al. Study on the adsorption of cobalt and nickel at the sediment-water interface by nano-Fe₃O₄ overlay[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(1):52-58.

而持续摄入 Ni 过量,则可能导致脑、肝等器官功能退化^[8]。因此,必须加强对水环境中 Co 和 Ni 污染物的控制,探究行之有效的削减技术。

原位覆盖技术因投入低、影响小而被广泛用于修复重金属污染的沉积物^[9-11],通过降低重金属的溶解度、迁移率和生物利用度,使重金属的暴露风险最小化^[10,12]。在众多用于原位覆盖的材料中,纳米 Fe₃O₄及其合成材料因环境友好性、吸附能力较强、比表面积较大以及磁性强便于回收等优势得到许多研究者的青睐^[13-14],已成功应用于去除废水中的 Co 和 Ni^[15-20]。而关于纳米 Fe₃O₄作为覆盖剂对沉积物中 Co 和 Ni 的治理效果研究则鲜有报道。本文以富营养化的表层沉积物为研究对象,借助微界面分析技术、高分辨率平衡式间隙水采集技术(HR-Peeper)和薄膜扩散梯度技术(DGT),探究纳米 Fe₃O₄在去除沉积物中 Co 和 Ni 方面的可行性,为原位覆盖生态修复技术提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况和沉积物采集

选取梅梁湾表层底泥作为研究对象。梅梁湾位于太湖北部,表面积为 123 km²,渔业资源丰富且为饮用水水源地之一。由于经济发展和人口密集等原因,湖泊水环境受到人类活动的影响,出现了藻类泛滥、重金属污染等问题^[6-7]。样品采集于初秋季节,采样点位于梅梁湾湖滨处(31°30′31.1″N,120°10′31.0″E),使用柱状重力取芯器(长 50 cm、内径 9 cm)采集沉积物柱样并收集上覆水。样品采集完毕后放入保温箱立即送到实验室,开展室内培养试验。

1.2 试验设计

将所采集沉积物按 2 cm 间隔进行分层,将同一层的沉积物混匀,并过 0.6 mm 孔径的筛网去除大颗粒物,最后将沉积物按从深层到表面的顺序重新装填回沉积物柱中(长 30 cm、内径 9 cm),沉积物高 20 cm。对每个重新装填的沉积物柱样上方注入约高度为 10 cm 过滤后的湖水,最后将所有柱样放入水箱中淹没静置培养 14 d。培养完成后将沉积物柱样分为两组各 4 根,分别为纳米 Fe₃O₄组(nFe₃O₄组)和对照组,使用注射器向纳米 Fe₃O₄组柱样中沉积物-水界面处添加 2 mL(约 2 mg)的纳米 Fe₃O₄溶液(购自 Advanced Materials Supplier,中国南京),对照组柱样不做处理。分别选取两组柱样中各 1 根柱样在沉积物-水界面处安装 1 根溶液取样器 Rhizon(购自 Easy Sonser Ltd,中国南京)用于采集上覆水。

1.3 样品采集

取样时间分为 3 个时段,分别为加入纳米 Fe₃O₄溶液后的第 4 天、第 20 天和第 44 天。每次取样时,分别在两组中各取 1 个柱样(非装 Rhizon 柱样),先用微电极系统(oxo -50, Unisense, 丹麦)测量两组柱样的 Eh 值和 pH 值,然后向所取柱样投入 DGT 装置(Easy Sonser Ltd, 中国)和 HR-Peeper 装置(Easy Sonser Ltd, 中国),分别用于采集间隙水有效态和溶解态的 Co、Ni。DGT 装置稳定 24 h 后取出,擦拭干净后切片 2 mm,用 1mol HNO₃提取;HR-Peeper 装置稳定 48 h 后取出,擦拭干净后立即用移液枪收集 HR-Peeper 腔室内的样品。DGT 和 HP-Peeper 收集到的样品均经 3% 的 HNO₃稀释后用 ICP-MS(NEXION350 X, PerkinElmer, 美国)测定有效态以及溶解态 Co、Ni 的浓度。试验开始后,每隔 4 d 用注射器从装有 Rhizon 的柱中取 3mL 上覆水,检测上覆水中 Co 和 Ni 的含量。

1.4 数据分析

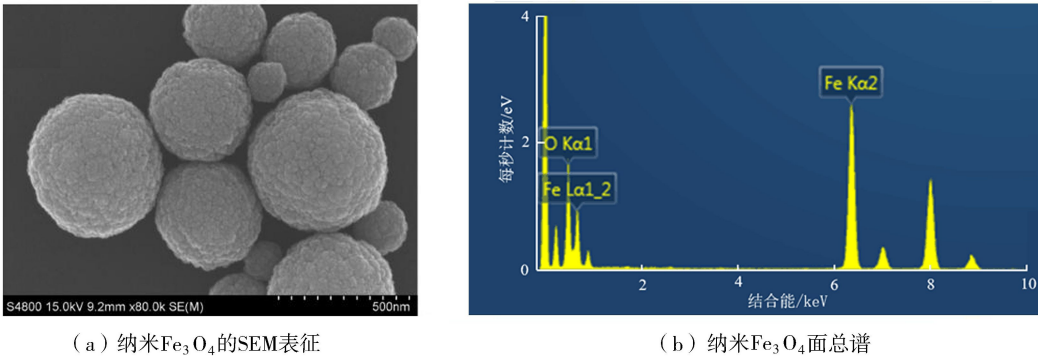
利用单因素方差分析对纳米 Fe₃O₄组和对照组 Eh 值、pH 值在不同观测阶段进行差异性分析,并对同阶段纳米 Fe₃O₄组和对照组上覆水溶解态 Co、Ni,沉积物间隙水溶解态 Co、Ni,间隙水有效态 Co、Ni 含量的差异性进行分析,在 $p<0.05$ 的条件下认为差异显著, $p<0.01$ 差异极显著。通过对纳米 Fe₃O₄组和对照组沉积物中 Co、Ni 含量对比,分析纳米 Fe₃O₄对于沉积物 Co、Ni 的去除率。利用 SPSS. 25 (IBM SPSS, USA) 和 Excel 对数据进行统计分析,Origin2017 用于绘制图形。

2 结果与讨论

2.1 纳米 Fe₃O₄表征

图 1(a) 和(b) 分别为纳米 Fe₃O₄的扫描电镜图像及面总谱图,采用的纳米 Fe₃O₄粒子呈球状,较为分散,

外表面粗糙。直径主要集中在 100 ~ 300 nm,其中 Fe 和 O 的质量分数分别为 65.52%、34.48%,Fe 和 O 原子百分比分别为 35.25%、64.75%。



(a) 纳米Fe₃O₄的SEM表征 (b) 纳米Fe₃O₄面总谱

图1 纳米 Fe₃O₄ 的 SEM 表征和面总谱

Fig.1 SEM characterization and score chart of nano-Fe₃O₄ particles

2.2 沉积物中 Eh 值和 pH 值剖面变化

沉积物-水界面中 Eh 值和 pH 值的剖面变化特征如图 2 所示(引自 Chen 等^[21])。在加入纳米 Fe₃O₄后的第 4 天(图 2(a))及第 20 天(图 2(b)),纳米 Fe₃O₄组的 Eh 值分别在 0 ~ -4 mm 和 0 ~ -11 mm 深度处高于同期对照组。在加入纳米 Fe₃O₄后的第 44 天(图 2(c)),纳米 Fe₃O₄组的 Eh 值相比于对照组显著提高。不同阶段 Eh 值有着显著差异($p < 0.05$),试验初期,纳米 Fe₃O₄组中由于 Fe₃O₄具有还原性而 Eh 值保持较低,而对照组中由于上覆水氧气的存在使得 Eh 值较高。随着试验的进行,Fe₃O₄与氧气逐渐消耗,纳米Fe₃O₄组 Eh 值略有提升,而对照组下降^[14]。

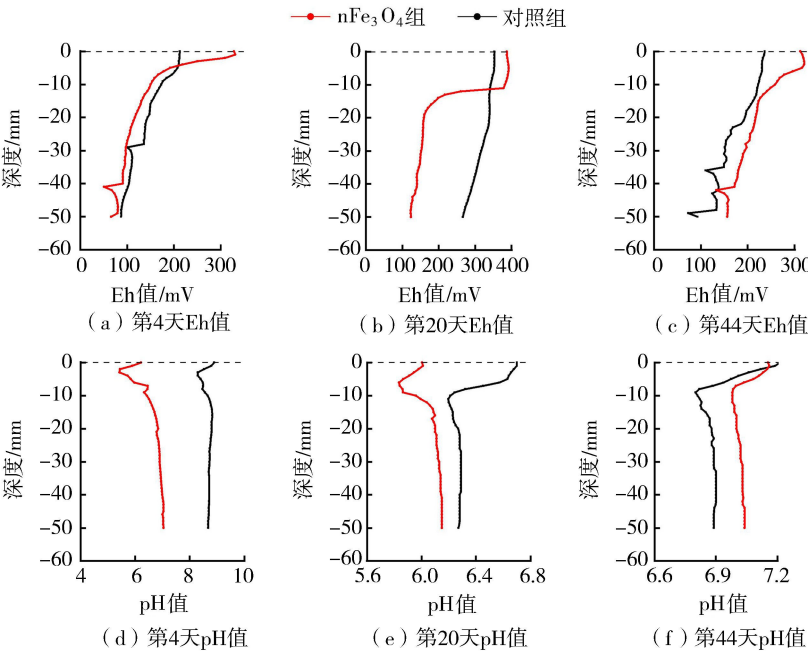


图2 不同取样阶段沉积物中 Eh 值和 pH 值的变化

Fig.2 Changes of Eh and pH in sediments at different sampling stages

不同阶段 pH 值变化差异显著($p < 0.05$)。在加入纳米 Fe₃O₄后的第 4 天(图 2(d))及第 20 天(图 2(e)),纳米 Fe₃O₄覆盖降低了沉积物中重金属 pH 值。与对照组相比,pH 平均值分别降低了 23% 和 4%。但是,在第 44 天(图 2(f)),纳米 Fe₃O₄覆盖增加了沉积物间隙水的 pH 值。溶解的铁离子水解以及 Fe-OH 基团与其他金属离子的络合释放出 H⁺是 pH 值降低的主要原因^[22-23]。随着试验的进行,Fe-OH 基团的再生可能导致 pH 值升高^[14]。在沉积物中添加纳米 Fe₃O₄封盖后,pH 值范围为 5.43 ~ 7.16。可以看出,纳米 Fe₃O₄封盖沉积物-水界面会导致沉积物酸化或呈弱碱性^[9,22]。

2.3 上覆水中溶解态 Co 和溶解态 Ni 的变化特征

沉积物间隙水中重金属离子含量与上覆水中重金属离子含量处于动态平衡状态。对上覆水中溶解态 Co 和溶解态 Ni 进行分析,变化特征如图 3 所示,两元素在纳米 Fe₃O₄组与对照组中均存在极显著差异 ($p<0.01$)。试验数据显示,相较于对照组,纳米 Fe₃O₄组中 Co 和 Ni 质量浓度均有明显降低。在第 16 天,Co 质量浓度达到最低,随后有微弱增大趋势。上覆水中溶解态 Co 的最大减少量(82.9%)出现在第 12 天,且在第 4 天至第 28 天时间段内 Co 的减小量均保持在 50% 以上。第 28 天之后取样数据中,对照组 Co 质量浓度均略高于纳米 Fe₃O₄组。以上结果表明,纳米 Fe₃O₄的覆盖可有效控制沉积物中 Co 向上覆水扩散。

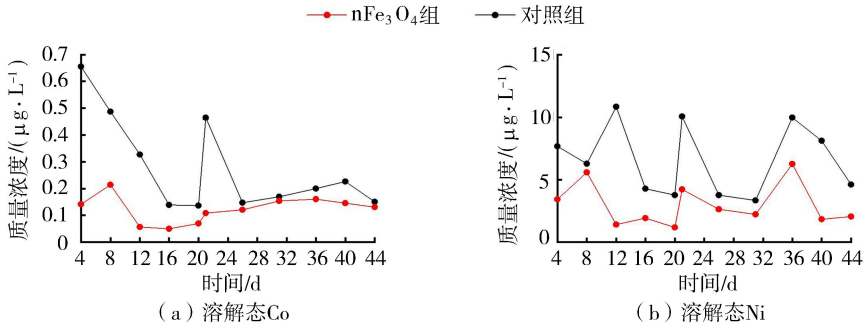


图 3 不同取样阶段上覆水溶解态 Co 和溶解态 Ni 质量浓度的变化

Fig. 3 Mass fraction changes of dissolved Co and Ni in overlying water at different sampling stages

上覆水中溶解态 Ni 和 Co 的变化特征总体相似,随着试验进行,Ni 最大减小量(86.93%)在出现在第 12 天。从第 16 天开始,纳米 Fe₃O₄组与对照组质量浓度变化趋势呈平行状态,有效去除率变化区间稳定维持在 40% ~ 60%。以上结果显示,纳米 Fe₃O₄能有效减小上覆水中 Co 和 Ni 的质量浓度,且随着试验进行,上覆水中并未出现 Co 和 Ni 质量浓度显著增加的现象,说明沉积物中的 Co 和 Ni 并未明显扩散到上覆水中,纳米 Fe₃O₄覆盖对于沉积物中的 Co 和 Ni 释放具有一定的抑制作用。

2.4 间隙水中溶解态 Co 和溶解态 Ni 的变化特征

图 4 为垂向间隙水中溶解态 Co 和溶解态 Ni 的质量浓度变化特征,不同阶段的纳米 Fe₃O₄组与对照组均有着极显著差异($p<0.01$)。在第 4 天(图 4(a)),纳米 Fe₃O₄覆盖使沉积物-水界面以下 30 mm 沉积物中溶

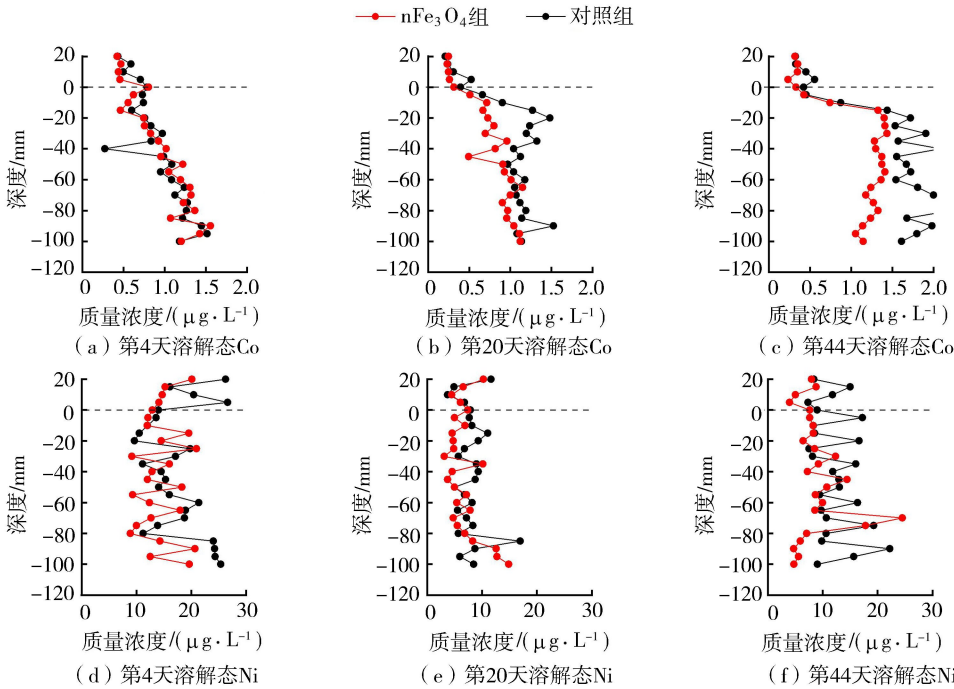


图 4 不同取样阶段间隙水中溶解态 Co 和溶解态 Ni 质量浓度的变化

Fig. 4 Mass fraction changes of dissolved Co and Ni in sediments at different sampling stages

解态 Co 质量浓度减小,随后增大。在第 20 天(图 4(b))和第 44 天(图 4(c)),纳米 Fe_3O_4 组溶解态 Co 质量浓度明显小于对照组。溶解态 Co 质量浓度的最大减少量(27.07%)出现在第 20 天(图 4(b)),且在第 44 天(图 4(c)),有效吸附作用影响深度达到沉积物-水界面以下 100 mm。以上结果表明,随着时间的推移,纳米 Fe_3O_4 覆盖对沉积物中溶解态 Co 的吸附作用逐渐增强,有效影响深度和范围逐渐扩大。

沉积物中溶解态 Ni 的变化与溶解态 Co 的变化趋势并不相同。在第 4 天(图 4(d)),与对照组相比,纳米 Fe_3O_4 组中沉积物-水界面以下 10 mm 和 60~100 mm 处溶解态 Ni 质量浓度明显减少,10~60 mm 沉积物中溶解态 Ni 质量浓度变化不明显。在第 20 天(图 4(e))和第 44 天(图 4(f)),纳米 Fe_3O_4 组中溶解态 Ni 质量浓度在沉积物-水界面以下 30 mm 和 20 mm 处减少,随后变化不明显。溶解态 Ni 质量浓度的最大减少量(26.42%)出现在第 44 天(图 4(f))。纳米 Fe_3O_4 覆盖沉积物-水界面对溶解态 Ni 的最大有效影响深度(30 mm)出现在第 20 天(图 4(e)),随后逐渐减小。

纳米 Fe_3O_4 组中对溶解态 Co(0~-30 mm)和 Ni(0~-10 mm)的有效去除率见表 1。由表 1 可知,纳米 Fe_3O_4 覆盖对溶解态 Co 在沉积物-水界面以下 30 mm 的吸附率呈先增后减的趋势,最大有效去除率(37.99%)发生在第 20 天。纳米 Fe_3O_4 覆盖对溶解态 Ni 在沉积物-水界面以下 10 mm 的吸附率呈逐渐增大的趋势,最大有效去除率(31.87%)发生在第 44 天。由以上结果可知,纳米 Fe_3O_4 覆盖对溶解态 Co 的吸附效果比对溶解态 Ni 的吸附效果好,且有效影响深度较大。

2.5 沉积物中有效态 Co 和有效态 Ni 的变化特征

沉积物中有效态 Co 和有效态 Ni 的质量浓度垂向变化特征如图 5 所示,不同阶段内,纳米 Fe_3O_4 组与对照组均有着极显著差异($p<0.01$)。在第 4 天(图 5(a)),纳米 Fe_3O_4 覆盖下的沉积物中有效态 Co 质量浓度与对照组没有明显差别,但随着试验进行,Co 质量浓度开始出现变化。在第 20 天(图 5(b)),纳米 Fe_3O_4 覆盖下的沉积物中 Co 质量浓度较对照组明显减少,随着深度增加,Co 去除率基本保持稳定(43.98%),且有效影响深度达到了沉积物以下 100 mm。在第 44 天(图 5(c)),结果与第 20 天(图 5(b))相似,说明吸附效果稳定,有效去除率为 50.26%。

表 1 不同取样阶段纳米 Fe_3O_4 覆盖对溶解态 Co 和溶解态 Ni 的有效去除率

Table 1 Effective removal rate of dissolved Co and Ni adsorbed by nano- Fe_3O_4 coverage at different sampling stages

时间/d	0~-30 mm 溶解态 Co 有效去除率/%	0~-10 mm 溶解态 Ni 有效去除率/%
4	11.99	6.77
20	37.99	18.82
44	15.30	31.87

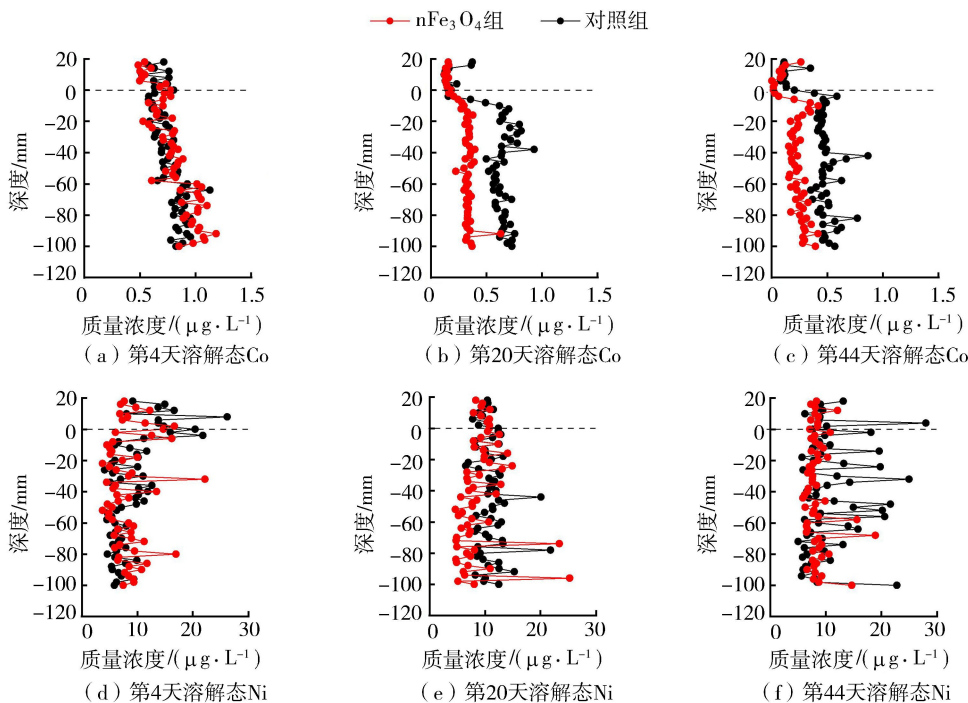


图 5 不同取样阶段沉积物中有效态 Co 和有效态 Ni 的变化

Fig. 5 Changes of labile Co and Ni in sediments at different sampling stages

沉积物中有效态 Ni 质量浓度的动态变化较 Co 更为活跃。与对照组相比,纳米 Fe₃O₄组在第 4 天(图 5(d)),沉积物-水界面以下 50 mm 附近,Ni 质量浓度出现减小,而在沉积物-水界面 60 mm 以下,Ni 质量浓度并未出现显著变化。在第 20 天(图 5(e))和第 44 天(图 5(f)),在沉积物-水界面以下 30 ~ 70 mm 范围内,Ni 质量浓度均出现了不同程度的降低,其中最大减少量出现在第 20 天(图 5(e))(19.87%),第 44 天(图 5(f))有效吸附率为 15.31%。以上结果表明,纳米 Fe₃O₄对于沉积物中的 Co 和 Ni 均有吸附作用,且吸附 Co 的效果较 Ni 更佳。

2.6 纳米 Fe₃O₄覆盖沉积物-水界面控制 Co 和 Ni 释放机制

吸附剂比表面积、静电相互作用和铁-氧-重金属络合物的形成可能是纳米 Fe₃O₄吸附 Co 和 Ni 的有效机制^[13,16-18]。纳米 Fe₃O₄具有较高的比表面积,吸附点位较多,Co 和 Ni 离子直接吸附于 Fe₃O₄的表面^[24]。研究表明,pH 值对纳米 Fe₃O₄吸附能力起决定性作用^[13,15-17]。在沉积物-水界面添加纳米 Fe₃O₄覆盖后,上覆水和沉积物间隙水中的 Co 和 Ni 均呈现减小的趋势,pH 值的变化范围为 5.43 ~ 7.16,且溶解态 Co 和溶解态 Ni 的有效去除率均在第 44 天达到最大,有效态 Co 吸附率最大值出现在第 44 天,而有效态 Ni 在第 20 天出现最大值。随着 pH 值的增大,纳米 Fe₃O₄表面因去质子化而带的负电荷数增加,静电吸引力增强,Co²⁺和 Ni²⁺与纳米 Fe₃O₄结合形成 Fe₃O₄-OC⁺和 Fe₃O₄-ONi⁺^[17]。此外,随着 Eh 值的增大,形成 Fe-OH 基团的数量增加,与 Co²⁺和 Ni²⁺离子络合生成 Fe-OC⁺(OH)和 Fe-ONi(OH),导致 Co 和 Ni 减少^[16]。

2.7 纳米 Fe₃O₄作为覆盖材料的应用前景

在磁性吸附材料的研究中,常用借助外加磁场对材料进行回收的方法^[25]。本文以纳米 Fe₃O₄作为覆盖材料,纳米 Fe₃O₄具有较好的磁化性质及一定的磁化强度。运用磁铁检验的方法,通过外加磁场的作用^[26-27],可将纳米 Fe₃O₄进行回收,而对于纳米 Fe₃O₄回收工序的优化以及循环使用次数有待进一步研究。纳米 Fe₃O₄作为覆盖材料去除污染物离子具有较好的应用前景。

3 结 论

a. 纳米 Fe₃O₄覆盖沉积物-水界面可有效降低沉积物间隙水中溶解态 Co、Ni 以及沉积物中有效态 Co、Ni,且对 Co 的去除效果较 Ni 更佳。纳米 Fe₃O₄覆盖会导致沉积物酸化或呈弱碱性,随着试验的进行,纳米 Fe₃O₄表面因去质子化而带负电荷以及 Fe-OH 基团数量增多,与 Co²⁺和 Ni²⁺离子络合形成络合物,导致 Co 和 Ni 的减少。

b. 纳米 Fe₃O₄集环境友好、比表面积大、可有效去除沉积物-水界面中的 Co 和 Ni 等优势,利用纳米 Fe₃O₄覆盖沉积物-水界面可以修复底泥重金属污染。

参考文献:

[1] ZHANG Hong,ZHANG Linglei,LI Jia ,et al. Comparative study on the bioaccumulation of lead,cadmium and nickel and their toxic effects on the growth and enzyme defence strategies of a heavy metal accumulator,Hydrilla verticillata (L. f.) Royle[J]. Environmental Science and Pollution Research,2020,27(9) :9853-9865.

[2] 史若馨. 济南市湿沉降中砷、镉、铬、镍、铅的污染特征及其对斑马鱼生物毒性的研究[D]. 济南:山东大学,2017.

[3] 卢辰华. 两种重金属钴和镍对两种泥鳅的毒性效应[D]. 新乡:河南师范大学,2016.

[4] 罗泽姣,夏梦帆,黄唯怡. 钴在土壤和植物系统中的迁移转化行为及其毒性[J]. 生态毒理学报:2019,14(2) :81-90. (LUO Zejiao,XIA Mengfan,HUANG Weiyi. The migration and transformation of cobalt in soil-plant system and its toxicity[J],Asian Journal of Ecotoxicology,2019,14(2) :81-90. (in Chinese))

[5] 王漫漫,陆昊,李慧明,等. 太湖流域典型河流重金属污染和生态风险评估[J]. 环境化学,2016,35(10) :2025-2035. (WANG Manman,LU Hao,LI Huiming,et al. Pollution level and ecological risk assessment of heavy metals in typical rivers of Taihu Basin[J]. Environmental Chemistry,2016,35(10) :2025-2035. (in Chinese))

[6] 孟翠,侯艳红,郑磊. 太湖梅梁湾湖口表层沉积物中氮磷、重金属的风险评价[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2019,50(2) :297-303. (MENG Cui,HOU Yanhong,ZHENG Lei. Risk assessment of nitrogen,phosphorus and heavy metals in surface sediment of MeiLiang Bay Estuary, Taihu Lake [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition) 2019,50(2) :297-303. (in Chinese))

[7] 孙恬,王延华,叶春,等. 太湖北部小流域沉积物重金属污染特征与评价[J]. 中国环境科学,2020,40(5) :2196-2203.

- (SUN Tian,WANG Yanhua,YE Chun,et al. Characteristics and assessment of heavy metals pollution in the sediments from a small catchment in northern Taihu Basin,2020,40(5):2196-2203. (in Chinese))
- [8] 李青仁,苏斌,李胜钊. 微量元素钴、镍与人体健康[J]. 广东微量元素科学,2008(1):60-70. (LI Qingren,SU Bin,LI Shengchuan. Trace element cobalt,nickel and human health[J]. Guangdong Trace Elements Science,2008(1):60-70. (in Chinese))
- [9] YI Yuanjie,WEN Jia,ZENG Guangming,et al. A comparative study for the stabilisation of heavy metal contaminated sediment by limestone,MnO₂ and natural zeolite[J]. Environmental Science and Pollution Research,2017,24(1):795-804.
- [10] 黄艳虹,高凡,郭伟,等. 基于梯度扩散薄膜技术(DGT)的氨基生物炭覆盖沉积物-水界面铜、铅释放研究[J]. 湖泊科学,2020,32(1):58-69. (HUANG Yanhong,GAO Fan,GUO Wei,et al. Release of copper and lead from the sediment-water interface under in-situ coverage of amino biochar via Diffusive Gradients in Thin-films (DGT)[J]. Journal of Lake Sciences,2020,32(1):58-69. (in Chinese))
- [11] KHAN F,KHAN M J,SAMAD A,et al. In-situ stabilization of heavy metals in agriculture soils irrigated with untreated waste water[J]. Journal of Geochemical Exploration,2015,159:1-7.
- [12] IGDER A,FAZLAVI A,ALLAHKARAMI E,et al. Optimization of Ni(II) & Co(II) removal from wastewater and statistical studies on the results of experimental designs[J]. Geosystem Engineering,2019,22(2):91-100.
- [13] LI Xuecheng,YANG Zhongzhu,ZHANG Chang,et al. Effects of different crystalline iron oxides on immobilization and bioavailability of Cd in contaminated sediment[J]. Chemical Engineering Journal,2019,373:307-317.
- [14] 展思辉,张宇,朱丹丹,等. 磁性 Fe₃O₄ 纳米颗粒的制备及在水处理中的应用[J]. 环境工程学报,2016,10(1):1-11. (ZHAN Sihui,ZHANG Yu,ZHU Dandan,et al. Preparation of magnetic Fe₃O₄ nanoparticles and their application in water treatment[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2016,10(1):1-11. (in Chinese))
- [15] ALLAHKARAMI E,IGDER A,FAZLAVI A,et al. Prediction of Co(II) and Ni(II) ions removal from wastewater using artificial neural network and multiple regression models[J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing,2017,53(2):1105-1118.
- [16] GAUTAM R K,GAUTAM P K,BANERJEE S,et al. Removal of Ni(II) by magnetic nanoparticles[J]. Journal of Molecular Liquids,2015,204:60-69.
- [17] SINGH S,BARICK K C,BAHADUR D. Surface engineered magnetic nanoparticles for removal of toxic metal ions and bacterial pathogens[J]. Journal of Hazardous Materials,2011,192(3):1539-1547.
- [18] TANG S C N,LO I M C. Magnetic nanoparticles:essential factors for sustainable environmental applications[J]. Water Research,2013,47(8):2613-2632.
- [19] EL-SHAMY O A,EL-AZABAWY R E,EL-AZABAWY O E,et al. Synthesis and characterization of magnetite-alginate nanoparticles for enhancement of nickel and cobalt ion adsorption from wastewater[J]. Journal of Nanomaterials,2019,2019:1-8
- [20] CHEN Musong,DING Shiming,ZHANG Liping,et al. An investigation of the effects of elevated phosphorus in water on the release of heavy metals in sediments at a high resolution[J]. Science of the Total Environment,2017,575:330-337.
- [21] CHEN Xiang,LIU Ling,YAN Wenming,et al. Effects of nFe₃O₄ capping on phosphorus release from sediments in a eutrophic lake[J]. Environmental Science and Pollution Research,2021,28(34):1-10
- [22] LEE S M,LALDAWGLIANA C,TIWARI D. Iron oxide nano-particles-immobilized-sand material in the treatment of Cu(II), Cd(II) and Pb(II) contaminated waste waters[J]. Chemical Engineering Journal,2012,195:103-111.
- [23] ZHOU Dongmei,JIN Shengyang,WANG Yujun,et al. Assessing the impact of iron-based nanoparticles on pH,dissolved organic carbon,and nutrient availability in soils[J]. Soil & Sediment Contamination,2012,21(1):101-114.
- [24] LIU Jingfu,ZHAO Zongshan,JIANG Guibin. Coating Fe₃O₄ magnetic nanoparticles with humic acid for high efficient removal of heavy metals in water[J]. Environmental Science & Technology,2008,42(18):6949-6954.
- [25] RASHID M,PRICE N T,PINILLA M,et al. Effective removal of phosphate from aqueous solution using humic acid coated magnetite nanoparticles[J]. Water Research,2017,123:353-360.
- [26] FUNES A,DE VICENTE J,CRUZ-PIZARRO L,et al. Magnetic microparticles as a new tool for lake restoration;a microcosm experiment for evaluating the impact on phosphorus fluxes and sedimentary phosphorus pools[J]. Water Research,2016,89:366-374.
- [27] FUNES A,DEL ARCO A,ÁLVAREZ-MANZANEDA I,et al. A microcosm experiment to determine the consequences of magnetic microparticles application on water quality and sediment phosphorus pools[J]. Science of the Total Environment,2017,579:245-253.