

# 硝酸钙投量对景观水底泥锁磷及水中氮磷的影响

范攀<sup>1,2,3</sup>, 王怡<sup>1</sup>, 王文怀<sup>1,2,3</sup>, 柴宝华<sup>1,2,3</sup>

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 西安建筑科技大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 通过49 d的实验室静态试验,探索了硝酸钙投加量对模拟景观水中底泥锁磷及水质的影响。试验结果表明,硝酸钙可以有效降低上覆水及间隙水中的磷浓度,其最佳投加量为0.2 gN/L湿泥,此时可控制底泥中磷释放并能够最大程度减轻其对上覆水中氮的影响。当硝酸钙投量达到0.6 gN/L湿泥以上时,虽然能有效去除上覆水及间隙水中的磷,但会引起 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 浓度过高的问题。同时,投加硝酸钙还会增加底泥中TN的含量。因此,使用硝酸钙可以有效锁定景观水底泥中的磷,从而控制上覆水中磷浓度的升高,试验中最佳的锁磷剂量为0.2 gN/L湿泥。

**关键词:** 硝酸钙; 底泥; 磷; 氮; 景观水

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)17-0112-06

## Effect of Calcium Nitrate Dosage on Phosphorus Locking in Sediment and Concentration of N and P in Landscape Water

FAN Pan<sup>1,2,3</sup>, WANG Yi<sup>1</sup>, WANG Wen-huai<sup>1,2,3</sup>, CHAI Bao-hua<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Northwest China Key Laboratory of Water Resource and Environment Ecology, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The effects of different calcium nitrate dosage on phosphorus locking in sediment and the concentration of nitrogen and phosphorus in simulated landscape water were investigated through 49 days of static laboratory test. The results showed that calcium nitrate could effectively reduce the phosphorus concentration in the overlying water and interstitial water. The optimal dosage of calcium nitrate was 0.2 gN/L-wet sediment (WS), which could inhibit phosphorus release from sediment and minimize its impact on nitrogen concentration in the overlying water. When the dosage of calcium nitrate was above 0.6 gN/L-WS, it could effectively remove phosphorus from the overlying water and interstitial water, but it would also cause the problem of high  $\text{NO}_x^- - \text{N}$  concentration. At the same time, calcium nitrate would increase the total nitrogen content in the sediment. Therefore, calcium nitrate could effectively lock phosphorus into the sediment and inhibit the increase of phosphorus concentration in the

landscape water. The optimal dosage of calcium nitrate in this experiment was 0.2 gN/L-WS.

**Key words:** calcium nitrate; sediment; phosphorus; nitrogen; landscape water

随着环境污染治理及管理力度的加强,景观水体的外源性污染得到大幅度削减,但其内源性污染仍很难消除。底泥作为最大的内源污染,其中的污染物特别是氮、磷在一定条件下会通过物理、化学和生物交换作用重新进入上覆水,引起水体富营养化<sup>[1]</sup>。因此,控制景观水体的内源污染对水体富营养化的产生至关重要。尽管氮、磷是水体富营养化发生的主要诱因,但有学者认为相比于氮,磷才是引起水体富营养化的主导因子。因此,为了预防富营养化的发生,应尽量降低水体中磷的浓度<sup>[2]</sup>。

目前国内外降低水体中磷浓度的方法主要是铝沉淀法,即向水体中投加硫酸铝、聚合氯化铝(PAC)等铝盐以去除水体中的磷<sup>[3]</sup>。然而,铝盐对水生生物的长期影响使该方法在我国的使用受到限制。另一种方法就是底泥锁磷法,即通过向底泥中投加铁盐或镧盐等控制底泥中磷的释放<sup>[4]</sup>。铁盐在锁磷过程中效果明显,但易受底泥氧化还原作用和pH值的影响。而镧盐在锁磷过程中的主要缺点则是费用较高。有研究表明,硝酸钙在抑制磷释放、消除黑臭和降解有机污染物方面效果明显<sup>[5-6]</sup>。但是,投加硝酸钙后上覆水中的硝酸盐、亚硝酸盐浓度会大幅上升<sup>[7]</sup>,当水体中的硝酸盐、亚硝酸盐浓度长期超过一定水平时,会对水生生物的生长繁殖造成巨大危害,破坏生态系统的平衡。然而,关于硝酸钙锁磷的最佳剂量目前尚未见报道。

笔者采用硝酸钙作为锁磷剂,探讨硝酸钙投量对模拟景观水底泥及上覆水的影响,并寻求较适合的硝酸钙投量,在控制底泥磷释放的同时避免硝酸钙投加引起的氮二次污染,以期景观水的富营养化控制提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

向编号分别为1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>的4个10 L玻璃反应器中分别加入3 L已均质化处理的西安市护城河湿底泥(WS),该底泥的含水率为89.8%,总磷为1.27 mg/g干泥,无机磷(IP)为1.03 mg/g干泥,TN为8.4 mg/g干泥,TOC为56.12 mg/g干泥,该底泥颜色为黑褐色。根据本课题组前期的试验结果,该试验选取的硝酸钙最小投加量为0.2 gN/L湿泥。

1<sup>#</sup>反应器作为空白,不投加硝酸钙;2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>和4<sup>#</sup>反应器中分别加入5、15和25 g的Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O固体,其按湿泥投量分别为0.2、0.6和1.0 gN/L湿泥,然后通过虹吸方法向4个反应器中缓慢加入纯水至10 L。试验启动前,向4个反应器中均通入氮气使DO<1 mg/L,反应器器壁采用铝箔纸遮光,试验温度为(25±1)℃。

### 1.2 采样与测定方法

试验共历时49 d,采样频次为每间隔7 d采样1次,每次采样均在上午9:00进行。采样时在各反应器同一深度3个不同位置处采集1个样品,3个样品视为平行样。使用虹吸法采集水面下5 cm处的水样作为上覆水样品,用蠕动泵采集表层下3 cm处泥样,在4 000 r/min条件下离心6 min后获取间隙水,离心后的底泥一部分用于测定性质,剩余部分倒回反应器。

水中的TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、TP、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P均采用分光光度计测定;底泥中的TN采用奈氏比色-分光光度法测定,TP采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 硝酸钙投加量对上覆水中氮和磷的影响

#### 2.1.1 对磷的影响

不同硝酸钙投加量条件下,上覆水中磷浓度的历时变化如图1所示。由图1(a)可知,2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>和4<sup>#</sup>反应器的上覆水中TP浓度在第14天分别达到最大值0.67、0.58和0.49 mg/L,均小于1<sup>#</sup>反应器的最大值3.75 mg/L。试验结束时,2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>和4<sup>#</sup>反应器中上覆水的TP浓度分别为0.44、0.39和0.27 mg/L,均小于1<sup>#</sup>反应器的0.76 mg/L。该试验过程中,2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>和4<sup>#</sup>反应器的TP平均浓度分别为0.33、0.29和0.23 mg/L,均小于1<sup>#</sup>反应器的1.37 mg/L。由图1(b)可知,2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>和4<sup>#</sup>反应器的上覆水中PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P浓度在试验过程中较为平稳,最大值分别为0.36、0.28和0.23 mg/L,均小于1<sup>#</sup>的最大值(3.16 mg/L)。试验结束后,2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>和4<sup>#</sup>反应器的上覆水中PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P浓度分别为0.36、0.28和0.17 mg/L,均小于1<sup>#</sup>的0.66 mg/L。试验过程中,2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>和4<sup>#</sup>反应器中上覆水的PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P平均浓度分别为0.20、0.18

和 0.13 mg/L, 均小于 1<sup>#</sup> 的 1.20 mg/L。

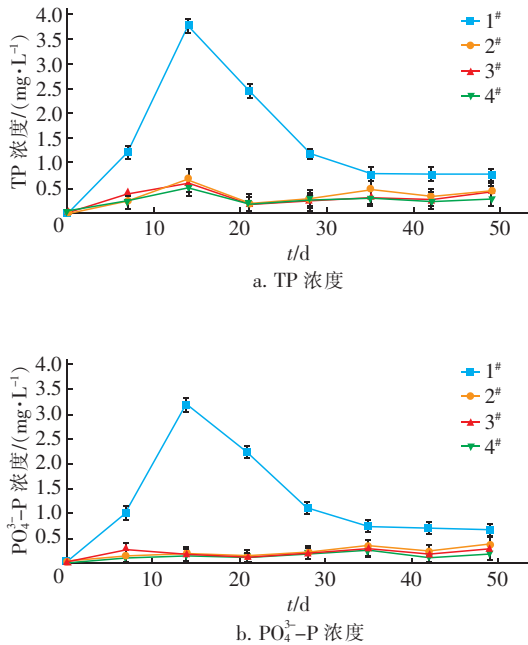


图1 上覆水中磷浓度的历时变化

Fig. 1 Change of phosphorus concentration in overlying water

投加硝酸钙以后, 钙离子与上覆水中的磷酸根结合生成羟基磷灰石、过磷酸钙等难溶性的盐, 吸附在底泥颗粒表面<sup>[8]</sup>。同时, 底泥中的 Fe<sup>2+</sup> 被 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 氧化为 Fe<sup>3+</sup>, 加强了铁氧化物对磷的吸附, 从而减少了 Fe-P 的释放。本试验中, 3 种剂量的硝酸钙均能有效减少上覆水中磷的浓度。当硝酸钙投加量为 0.2、0.6 和 1.0 gN/L 湿泥时, 上覆水中 TP 的降低率依次为 76%、79% 和 83%, 上覆水中 PO<sub>4</sub><sup>3--</sup>P 的降低率依次为 83%、85% 和 89%, 即投加量越大, 对上覆水中磷的降低率越高。

### 2.1.2 对氮的影响

不同硝酸钙投量下, 上覆水中氮浓度的历时变化如图 2 所示。由图 2(a) 和 (c) 可知, 第 7 天时, 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup> 反应器的上覆水中 TN 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度均急剧增大, TN 浓度分别为 88.84、141.15 和 239.11 mg/L, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度分别为 37.31、94.45 和 194.24 mg/L。随着运行时间的延长, 1<sup>#</sup> 反应器的上覆水中 TN 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度维持最低且变化不大, 4<sup>#</sup> 反应器的上覆水中 TN 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度维持较高水平且变化较小, 2<sup>#</sup> 和 3<sup>#</sup> 反应器的上覆水中 TN 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度逐渐降低。该试验过程中, 1<sup>#</sup> 反应器中 TN 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的平均浓度分别为 5.53 和 2.23

mg/L, 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup> 反应器的上覆水中 TN 平均浓度分别为 1<sup>#</sup> 反应器的 3.7、14.4 和 35.3 倍, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 平均浓度分别为 1<sup>#</sup> 反应器的 4.6、27.1 和 80 倍。

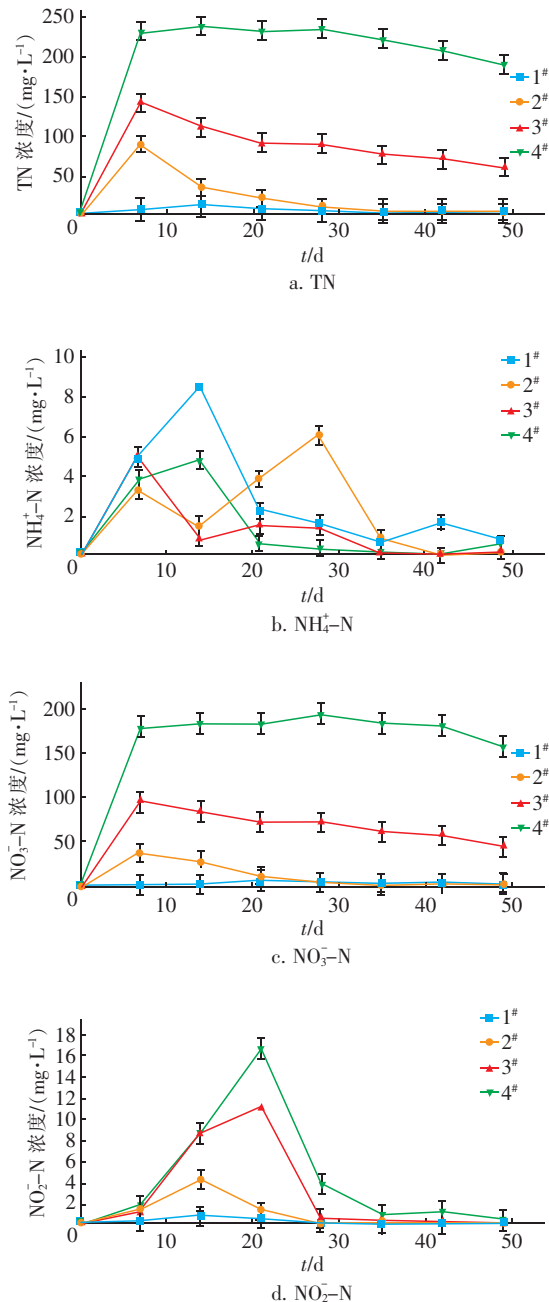


图2 上覆水中氮浓度的历时变化

Fig. 2 Change of nitrogen concentration in overlying water

由图 2(b) 可以看出, 不同反应器的上覆水中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度变化各有不同, 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup> 反应器中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度分别在第 14 天、第 28 天、第 7 天和第 14 天达到最大值, 最大浓度分别为 8.53、6.04、5.09 和 4.79 mg/L。该试验过程中, 1<sup>#</sup> 反应器的上

覆水中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  平均浓度为  $2.58 \text{ mg/L}$ , 分别是 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup> 反应器的 1.3 倍、2.2 倍和 2 倍。由图 2(d) 可以看出, 除 1<sup>#</sup> 反应器外, 2<sup>#</sup> 反应器中  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  在第 14 天, 3<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup> 反应器在第 21 天均达到最大值, 分别为  $4.34$ 、 $11$  和  $16.71 \text{ mg/L}$ , 然后逐渐降低并在试验结束时达到最小值, 分别为  $0.15$ 、 $0.19$  和  $0.61 \text{ mg/L}$ 。在该试验过程中, 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup> 反应器的上覆水中  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  平均浓度分别为 1<sup>#</sup> 反应器的 3.1 倍、9.2 倍和 14.2 倍。

加入硝酸钙后, 部分  $\text{NO}_3^-$  从底泥进入上覆水中, 导致  $\text{TN}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度急剧增加。同时, 底泥中的  $\text{NO}_3^-$  在脱氮微生物反硝化过程中会产生并积累  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ <sup>[9]</sup>。此外, 底泥中的有机物作为反硝化碳源被利用, 减缓了厌氧水解作用, 从而抑制了  $\text{NH}_4^+$  的释放<sup>[10]</sup>。本试验中, 投加硝酸钙后增加了上覆水中  $\text{TN}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度, 但是降低了上覆水中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度。当投加量分别为  $0.2$ 、 $0.6$  和  $1.0 \text{ gN/L}$  湿泥时, 上覆水中  $\text{TN}$  平均浓度为 1<sup>#</sup> 反应器的 2.7、13.4 和 34.3 倍,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  平均浓度为 1<sup>#</sup> 反应器的 3.6、26.1 和 79 倍,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  平均浓度为 1<sup>#</sup> 反应器的 3.1、9.2 和 14.2 倍。在硝酸钙投加量为  $0.6$  和  $1.0 \text{ gN/L}$  湿泥条件下, 上覆水中  $\text{NO}_x^- - \text{N}$  浓度增加明显, 远超水体对其浓度的安全阈值。因此, 在使用硝酸钙作为底泥锁磷剂时, 其较佳投加量为  $0.2 \text{ gN/L}$  湿泥。

## 2.2 硝酸钙投加量对间隙水中氮和磷的影响

### 2.2.1 对磷的影响

不同硝酸钙投量条件下, 间隙水中磷浓度的历时变化如图 3 所示。由图 3(a) 可知, 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup> 反应器的间隙水中  $\text{TP}$  浓度均从初始的  $4.30 \text{ mg/L}$  急剧下降, 试验结束时  $\text{TP}$  浓度分别为  $1.29$ 、 $0.38$  和  $0.59 \text{ mg/L}$ , 均小于 1<sup>#</sup> 反应器的  $5.11 \text{ mg/L}$ 。该试验过程中, 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup> 反应器的  $\text{TP}$  平均浓度分别为  $1.29$ 、 $1.07$  和  $1.14 \text{ mg/L}$ , 均小于 1<sup>#</sup> 反应器的  $3.48 \text{ mg/L}$ 。由图 3(b) 可以看出, 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup> 反应器的间隙水中  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  浓度均从初始的  $3.74 \text{ mg/L}$  急剧下降, 试验结束时  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  浓度分别为  $1.06$ 、 $0.31$  和  $0.43 \text{ mg/L}$ , 均小于 1<sup>#</sup> 反应器的  $4.52 \text{ mg/L}$ 。该试验过程中, 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup> 反应器中间隙水的  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  平均浓度分别为  $0.86$ 、 $0.78$  和  $0.73 \text{ mg/L}$ , 均小于 1<sup>#</sup> 反应器的  $2.44 \text{ mg/L}$ 。

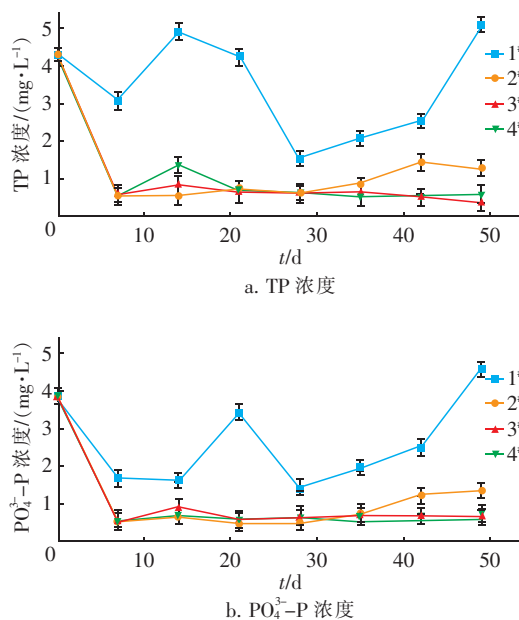


图3 间隙水中磷浓度的历时变化

Fig. 3 Change of phosphorus concentration in interstitial water

与 1<sup>#</sup> 反应器相比, 3 种剂量的硝酸钙均能有效降低间隙水中的磷浓度, 投加量为  $0.2$ 、 $0.6$  和  $1.0 \text{ gN/L}$  湿泥时, 间隙水中  $\text{TP}$  的降低率分别为  $63\%$ 、 $69\%$  和  $67\%$ , 间隙水中  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  的降低率分别为  $65\%$ 、 $68\%$  和  $70\%$ 。因此, 3 种投量的硝酸钙均能有效降低间隙水中的磷浓度, 且投加剂量越大, 对间隙水中磷的降低率越高。

### 2.2.2 对氮的影响

在不同硝酸钙投加量条件下, 间隙水中氮浓度的历时变化如图 4 所示。由图 4(a) 和 (c) 可知, 第 7 天时 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup> 反应器的间隙水中  $\text{TN}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度急剧增加至最大值。随着运行时间的延长, 1<sup>#</sup> 反应器中上覆水的  $\text{TN}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度维持较低且变化不大, 4<sup>#</sup> 反应器的间隙水中  $\text{TN}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度维持较高水平, 2<sup>#</sup> 和 3<sup>#</sup> 反应器的间隙水中  $\text{TN}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度逐渐降低。该试验中, 1<sup>#</sup> 反应器间隙水的  $\text{TN}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  平均浓度分别为  $13.92$  和  $0.85 \text{ mg/L}$ , 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup> 反应器的间隙水中  $\text{TN}$  平均浓度分别为 1<sup>#</sup> 反应器的 1.7、5.2 和 14.2 倍,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  平均浓度分别为 1<sup>#</sup> 反应器的 7.1、46.4 和 165 倍。

由图 4(b) 可以看出, 不同反应器的间隙水中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度均整体呈现降低的趋势。该试验过程中, 2<sup>#</sup> 反应器的间隙水中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  平均浓度为  $9.07$

mg/L, 小于1<sup>#</sup>反应器的 10.78 mg/L, 3<sup>#</sup>和4<sup>#</sup>反应器的间隙水中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  平均浓度分别为1<sup>#</sup>反应器的1.4倍和1.7倍。由图4(d)可知, 1<sup>#</sup>反应器的间隙水中  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度全程稳定, 且保持在较低水平, 2<sup>#</sup>反应器在第14天, 3<sup>#</sup>反应器在第21天, 4<sup>#</sup>反应器在第42天的  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  分别达到最大值 3.68、7.11 和 15.93 mg/L, 然后逐渐降低并在试验结束时达到最小值, 分别为 0.03、0.08 和 1.56 mg/L。

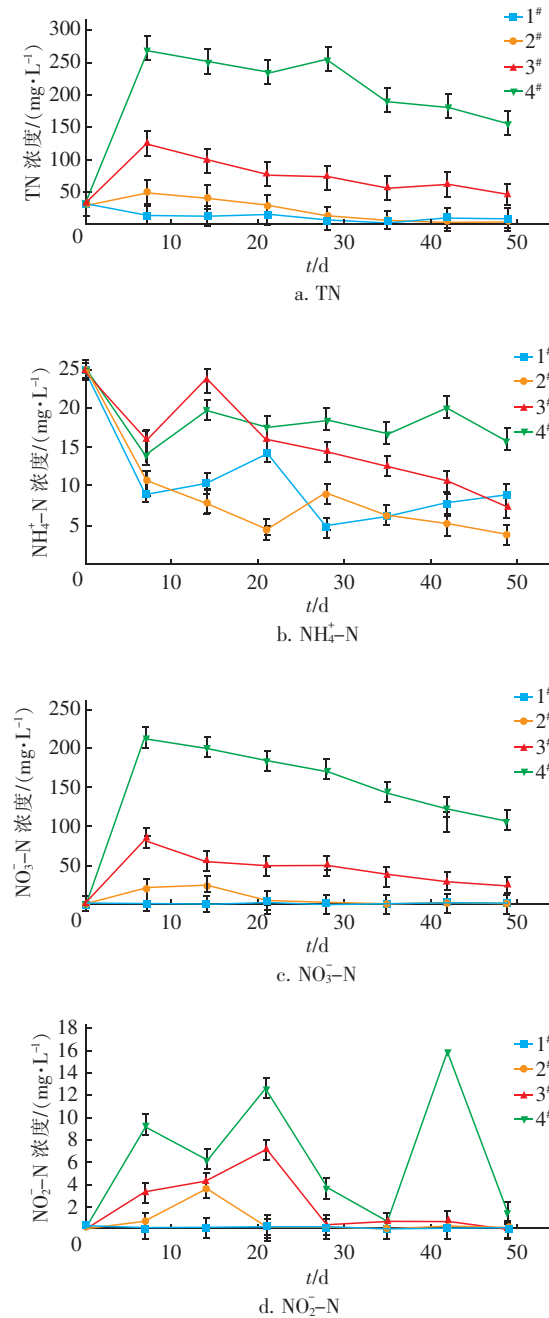


图4 间隙水中氮浓度的历时变化

Fig. 4 Change of nitrogen concentration in interstitial water

与上覆水类似, 投加硝酸钙也增加了间隙水中  $\text{TN}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的浓度, 并对氨氮浓度有一定的降低作用。当硝酸钙投加量为 0.2、0.6 和 1.0 gN/L 湿泥时, 间隙水中  $\text{TN}$  平均浓度分别为 1<sup>#</sup>反应器的 1.7、5.2 和 14.2 倍,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  平均浓度为 1<sup>#</sup>反应器的 7.1、46.4 和 165 倍,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  平均浓度为 1<sup>#</sup>反应器的 15.1、52.1 和 157.3 倍。相比而言, 硝酸钙投加量为 0.2 gN/L 湿泥时, 底泥的间隙水中  $\text{NO}_x^- - \text{N}$  浓度增加较小。

### 2.3 硝酸钙投加量对底泥中 $\text{TN}$ 和 $\text{TP}$ 含量的影响

不同硝酸钙投加量条件下, 底泥中  $\text{TN}$  含量为 8.40 mg/g 干泥, 除 1<sup>#</sup>反应器[结束时  $\text{TN}$  含量为 7.84 mg/g 干泥, 过程均值( $n=6$ )为  $(7.99 \pm 0.24)$  mg/g 干泥]外, 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>和 4<sup>#</sup>反应器中底泥的  $\text{TN}$  含量在结束时均大于起始值, 分别为 7.84、8.68、9.24 和 9.80 mg/g 干泥, 同时其过程均值分别为  $(8.51 \pm 0.32)$  mg/g 干泥(显著性差异  $P=0.03$ )、 $(8.93 \pm 0.43)$  mg/g 干泥( $P=0$ )和  $(9.26 \pm 0.58)$  mg/g 干泥( $P=0$ ), 分别是 1<sup>#</sup>反应器的 1.07、1.12 和 1.16 倍。然而, 所有反应器中底泥的  $\text{TP}$  含量在结束时均小于起始值(1.27 mg/g 干泥), 表明使用硝酸钙没有改变底泥中  $\text{TP}$  含量降低的趋势。与 1<sup>#</sup>反应器[结束时  $\text{TP}$  含量为 1.02 mg/g 干泥, 过程均值( $n=6$ )为  $(1.04 \pm 0.24)$  mg/g 干泥]相比, 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>和 4<sup>#</sup>反应器中底泥的  $\text{TP}$  含量在结束时均有一定增大, 其  $\text{TP}$  含量分别为 1.10、1.18 和 1.18 mg/g 干泥, 过程均值分别为  $(1.18 \pm 0.11)$  mg/g 干泥( $P=0.05$ )、 $(1.24 \pm 0.12)$  mg/g 干泥( $P=0.01$ )和  $(1.27 \pm 0.12)$  mg/g 干泥( $P=0.04$ ), 分别是 1<sup>#</sup>反应器的 1.13、1.19 和 1.22 倍。

以上结果表明, 投加硝酸钙可使  $\text{NO}_3^-$  进入间隙水而被底泥微生物同化利用, 从而增加了底泥中  $\text{TN}$  含量, 且随着硝酸钙投量的增加, 底泥中  $\text{TN}$  含量也随之增加。但是, 无论是否投加硝酸钙, 底泥中  $\text{TP}$  含量均随时间的增加而下降, 只是与对照反应器相比, 硝酸钙的投加略微减少了底泥中  $\text{TP}$  的释放, 钙离子与磷酸盐结合生成沉淀吸附在底泥颗粒表面, 随着硝酸钙投量的增加, 底泥中  $\text{TP}$  含量的降低减小, 这与以前的研究一致<sup>[11]</sup>。因此, 当使用硝酸钙锁磷时, 为有效减少底泥中磷的释放并避免过大增加底泥中氮含量而造成底泥内源污染的加重, 确定硝酸钙投量为 0.2 gN/L 湿泥。

### 3 结论

① 硝酸钙可以有效降低上覆水和间隙水中的磷浓度,并且其投加剂量越大锁磷的效率越高。在本试验中,控制磷释放的较佳硝酸钙投加量为 0.2 gN/L 湿泥。

② 当硝酸钙投量为 0.2 gN/L 湿泥时,其对上覆水中 TP 和  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  的降低率分别为 76% 和 83%,且不会引起上覆水和间隙水中氮浓度的显著升高。

③ 硝酸钙的使用没有改变底泥中 TP 含量降低的趋势,但明显增加了底泥中 TN 的含量,且投加剂量越大,TN 增加越明显。

### 参考文献:

- [1] Huang L D, Li Z X, Bai X L, *et al.* Laboratory study of phosphorus retention and release by eutrophic lake sediments: Modeling and implications for P release assessments[J]. *Ecol Eng*, 2016, 95: 438 – 446.
- [2] Schindler D W. The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes [J]. *Proc Biol Sci*, 2012, 279 (1746): 4322 – 4333.
- [3] 孟顺龙, 裴丽萍, 陈家长, 等. 污水化学沉淀法除磷研究进展[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(35): 264 – 268.  
Meng Shunlong, Qiu Liping, Chen Jiazhang, *et al.* The research process of chemistry precipitation method in phosphorus removal in wastewater [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(35): 264 – 268 (in Chinese).
- [4] 王虹, 林建伟, 詹艳慧, 等. 锆改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果[J]. *环境科学*, 2015, 36(10): 3720 – 3729.  
Wang Hong, Lin Jianwei, Zhan Yanhui, *et al.* Efficiency of sediment amendment with zirconium-modified kaolin clay to control phosphorus release from sediments in heavily polluted rivers [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(10): 3720 – 3729 (in Chinese).
- [5] Wang G B, Wang Y, Zhang Y. Combination effect of sponge iron and calcium nitrate on severely eutrophic urban landscape water: an integrated study from laboratory to fields[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2018, 25 (9): 8350 – 8363.
- [6] Liu X N, Tao Y, Zhou K Y, *et al.* Effect of water quality improvement on the remediation of river sediment due to the addition of calcium nitrate [J]. *Sci Total Environ*, 2017, 575: 887 – 894.
- [7] Liu T, Yuan J, Dong W, *et al.* Effects on inorganic nitrogen compounds release of contaminated sediment treatment with in situ calcium nitrate injection [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2015, 22(2): 1250 – 1260.
- [8] 赵振. 氧化试剂(硝酸钙)控制黑臭底泥营养盐释放的效果研究[J]. *环境科技*, 2010, 23(4): 17 – 19.  
Zhao Zhen. Effect of calcium nitrate on control of nutrient salt release from black and odorous sediment [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 23 (4): 17 – 19 (in Chinese).
- [9] 陈磊, 王凌云, 刘树娟, 等. 硝酸钙对深圳河底泥臭味及生物化学特性的影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2013, 45(6): 107 – 113.  
Chen Lei, Wang Lingyun, Liu Shujuan, *et al.* Effect of calcium nitrate on odor and properties of chemistry in sediment of Shenzhen River [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2013, 45(6): 107 – 113 (in Chinese).
- [10] Yamada T M, Sueitt A P E, Beraldo D A S, *et al.* Calcium nitrate addition to control the internal load of phosphorus from sediments of a tropical eutrophic reservoir: microcosm experiments [J]. *Water Res*, 2012, 46(19): 6463 – 6475.
- [11] Wang G B, Wang Y, Zhang Y. Combination effect of sponge iron and calcium nitrate on severely eutrophic urban landscape water: an integrated study from laboratory to fields[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2018, 25 (9): 8350 – 8363.



作者简介: 范攀(1993 – ), 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 主要研究方向为景观水体水质的净化。

E-mail: 774808053@qq.com

收稿日期: 2019-03-22