

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2021111001

周婕, 刘翠云, 王易扬, 等. 排水管道沉积物-水系统中不同微生物群落下氮的迁移转化[J]. 环境化学, 2023, 42(4): 1357-1365.

ZHOU Jie, LIU Cuiyun, WANG Yiyang, et al. The migration and transformation of nitrogen under different microbial communities in sediment-water system of drainage pipe[J]. Environmental Chemistry, 2023, 42 (4): 1357-1365.

## 排水管道沉积物-水系统中不同微生物群落下氮的迁移转化\*

周 婕<sup>1</sup> 刘翠云<sup>1,2</sup> \*\* 王易扬<sup>1</sup> 刘 琪<sup>1</sup> 吕文科<sup>1</sup> 韦昊东<sup>1</sup> 陶 洋<sup>1</sup>

(1. 南京工业大学城市建设学院, 南京, 211800; 2. 南京工业大学江苏省工业节水减排重点实验室, 南京, 210009)

**摘 要** 为探索微生物群落对排水管道沉积物-水系统中氮迁移转化的作用, 本文研究了干预组、对照组及初始沉积物中的微生物群落, 探索排水管道沉积物-水系统中不同组分氮迁移转化的规律, 并进行了量化计算. 结果表明,  $\gamma$ -变形菌纲和拟杆菌纲在对照组中相对丰度较高, 梭菌纲、互营养菌纲在干预组中更占优势. 在浓度差异和生物作用的共同影响下, 干预组上覆水氨氮含量增加.  $\gamma$ -变形菌纲发生硝化作用导致对照组上覆水氨氮浓度下降, 硝态氮、亚硝态氮含量增加. 高、低浓度下, 沉积物-水系统中的氨氮均由沉积物向上覆水释放, 低浓度下氨氮的释放通量更大, 最高值达到了  $536.76 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ . 系统中, 硝态氮的释放通量很小.

**关键词** 排水管道, 沉积物, 氮, 微生物群落, 迁移, 释放通量.

## The migration and transformation of nitrogen under different microbial communities in sediment-water system of drainage pipe

ZHOU Jie<sup>1</sup> LIU Cuiyun<sup>1,2</sup> \*\* WANG Yiyang<sup>1</sup> LIU Qi<sup>1</sup> LV Wenke<sup>1</sup>  
WEI Haodong<sup>1</sup> TAO Yang<sup>1</sup>

(1. College of Urban Construction, Nanjing Tech University, Nanjing, 211800, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Industrial Water-Conservation & Emission Reduction, Nanjing Tech University, Nanjing, 210009, China)

**Abstract** In order to explore the effect of microbial community on the migration and transformation of nitrogen in the sediment-water system of drainage pipeline, the microbial communities in intervention group, control group and original sediments were studied, the law of nitrogen migration and transformation at different components in the sediment water-system of drainage pipeline was explored and the variation was calculated in this paper. The results showed that the relative abundance of *Gammaproteobacteria* and *Bacteroidia* were greater in the control group, *Clostridia* and *Synergistia* were more dominant in the intervention group. Under the joint influence of concentration difference and biological effects, the concentration of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  increased in overlying water in the intervention group. The nitrification of *Gammaproteobacteria* resulted in the decrease of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  concentration and the increase of  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  and  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  concentration in the overlying water of the control group. At high or low concentrations of overlying water,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  was released from sediment to overlying water. At low concentrations, the release flux of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  was greater, and the

2021年11月10日收稿(Received: November 10, 2021).

\* 国家自然科学基金(51808285)和江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX21-0450)资助.

**Supported by** the National Natural Science Foundation of China (51808285) and Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (SJCX21-0450).

\*\* 通信联系人 **Corresponding author**, Tel: 025-58139655, E-mail: yunduobai@126.com

highest value was  $536.76 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ . In the system, the release flux of  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  was very small.

**Keywords** drain pipe, sediment, nitrogen, microbial community, migration, release flux.

我国的排水管道几乎都存在不同程度的污染物沉积现象,在水流的冲刷下沉积物可能会再次悬浮,部分合流制管道的溢流和分流制雨水管道径流的直接排放<sup>[1-2]</sup>,导致氮、磷进入城市水体<sup>[3]</sup>,加重了水体的富营养化<sup>[4]</sup>.研究污染物在排水管道沉积物-水系统中的迁移转化规律,对评估管道沉积物带来的污染贡献、优化管道的运行具有重要的现实意义.

氮是管道内重点关注的对象之一,目前对排水管道内氮的转化进行了部分研究.有研究发现,包含氮在内,排水管道沉积物中物质转化主要通过3种途径进行:物理污染物沉积、生物转化吸附、生物转化释放.在污水管道中好氧、厌氧的环境交替,存在各种微生物,通过生物群落的代谢,可以实现氮的去除<sup>[5]</sup>,因此污水管道可以作为反应器来研究氮的转化情况.邢贝米等<sup>[6]</sup>发现,污水管道中的微生物以有机氮为氮源时,利用蛋白质作为营养物质,代谢产生有机物,以无机氮作为氮源时,利用氨氮和有机物结合产生有机氮.杨柯瑶<sup>[7]</sup>发现,管道中厌氧环境一定程度上会限制硝化反应,微生物以氨氮为氮源进行细胞合成代谢产生的溶解性代谢产物会释放回水中,导致管道中溶解性有机氮的含量增加.

不同微生物群落对排水管道中氮的转化也产生重要影响.研究表明,变形菌门、厚壁菌门、拟杆菌门的3种菌群在排水管道中的相对丰度较高<sup>[8-9]</sup>,且都属于发酵菌群<sup>[10]</sup>.同时,管道中较为常见的梭菌纲、 $\beta$ -变形菌纲、拟杆菌纲、互营养菌纲都可以促进有机物的分解<sup>[11]</sup>,而 $\gamma$ -变形菌纲、绿弯菌门、硝化螺旋菌门都属于硝化细菌<sup>[12-13]</sup>,可以分解氨氮,转化为硝态氮、亚硝态氮.艾海男等<sup>[14]</sup>通过模拟排水管道试验发现C/N较高时,会抑制氨氧化菌的产生,不利于硝化反应的进行.Zhang等<sup>[11]</sup>发现,总氮含量较高时,互营养菌纲和 *Caldisericia* 纲的相对丰度也较高.黄帅辰等<sup>[15]</sup>调查北京地区的管道沉积物时发现,管道中总氮含量与甲烷微菌纲、互营养菌纲呈正相关,与 $\gamma$ -变形菌纲、 $\delta$ -变形菌纲呈负相关.

已有研究在排水管道内物质转化过程及微生物作用方面有一些成果.在排水管道沉积物-水系统内不同组分(上覆水、间隙水和沉积物)中,氮生物转化规律及量化计算,以及生物群落的作用少有研究.本研究模拟排水管道内环境,分析管道内生物群落的差异对于氮在沉积物-水系统中迁移转化的影响,初步计算氮在沉积物-水系统间的释放通量.研究有助于预测排水管道中沉积物-水之间氮的交换过程,为掌握管道沉积物中污染物对下游水体的污染负荷量提供理论依据.

## 1 材料与方法(Materials and methods)

### 1.1 试验装置

本试验进行静态试验模拟排水管道中的沉积物-水系统.试验所用沉积物取自于真实污水管道,将取得的沉积物均匀混合,去除树枝等杂物后分为两份,一部分在托盘中均匀铺开,在30℃下烘5h后使用紫外照射72h(中间翻动数次),称为“干预沉积物”,另一部分不作处理,称为“原沉积物”.

上述两种沉积物分别放入12个1000 mL烧杯中(每个烧杯约500 mL沉积物),再加入500 mL上覆水,放置干预沉积物和原沉积物的烧杯分别称为“干预组”和“对照组”.上覆水浓度参考不同地区的污水浓度,采用高、低两种浓度的人工配水,污染物浓度见表1.

表1 上覆水配水成分<sup>[7,16-17]</sup>

Table 1 Composition of overlying water

指标 Index	高浓度上覆水/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) High concentration overlying water	低浓度上覆水/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) Low concentration overlying water
化学需氧量	430	120
氨氮	46	20
硝态氮	5	0.5
总磷	10	2

干预组中,6个烧杯倒入高浓度上覆水,另外6个倒入低浓度上覆水,对照组亦是如此.因此,试验共分为4组,分别是“干预组沉积物+高浓度上覆水”、“干预组沉积物+低浓度上覆水”、“对照组沉积

物+高浓度上覆水”、“对照组沉积物+低浓度上覆水”, 每组 6 个烧杯. 试验中, 干预组烧杯使用紫外灯持续照射, 见图 1. 为了模拟污水管道内情况, 使用 PVC 保鲜膜覆盖烧杯口, 但留有缝隙与大气相通. 在试验阶段, 测得各实验组中溶解氧浓度基本相同, 约为  $0.41\text{—}0.92\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 另外, 除了紫外灯照射外, 装置全程处于黑暗环境中.

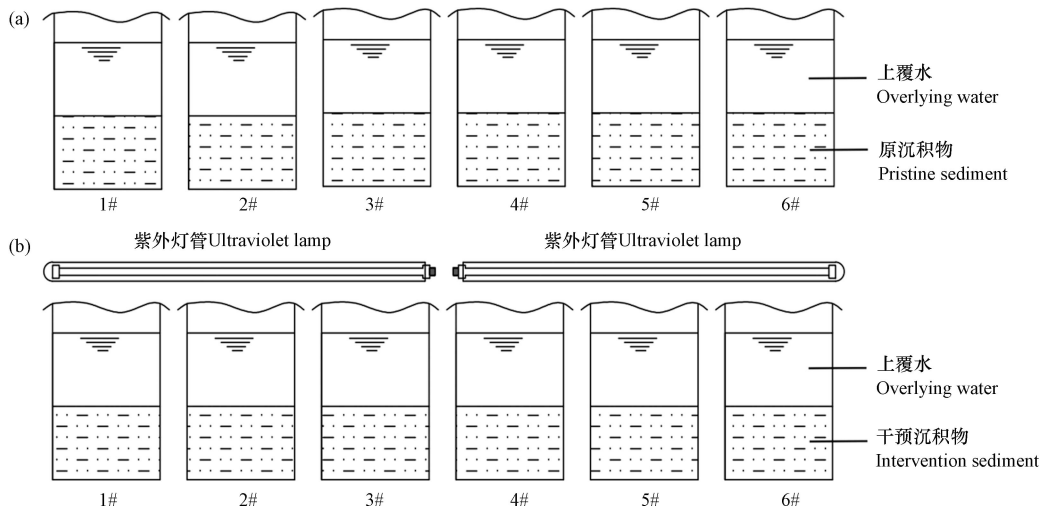


图 1 模拟试验装置

(a)对照组; (b)干预组

Fig.1 Simulation test device

(a) Control group; (b) Intervention group

## 1.2 取样及测定

4 组试验中, 第 0 天在 1#烧杯取样, 第 4 天在 2#烧杯取样, 以此类推, 第 20 天在 6#烧杯取样. 取样时, 在烧杯中取上覆水 60—80 mL, 沉积物样品 100—120 mL. 沉积物的取样区域为沉积物-水界面以下 0—20 mm 的近底层固体区域<sup>[18]</sup>.

上覆水各形态氮的测定方法采用《水和废水检测分析方法》(第四版)中的方法: 氨氮、亚硝态氮、硝态氮分别采用纳氏试剂分光光度计法、N-(1-萘基)-乙二胺二酸盐分光光度计法、紫外分光光度法进行测定.

将沉积物样品在  $5000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  条件下离心 20 min, 得到上清液, 再过  $0.45\text{ }\mu\text{m}$  滤膜, 同样用上述方法进行测定.

采用钟立香等<sup>[19]</sup>的连续分级提取方法, 分析测定沉积物中的各形态氮. 采用茚三酮比色法测定沉积物中的氨基酸态氮 (Amino acid nitrogen, AAN), 用氯化钾溶液提取沉积物中的氨氮、亚硝态氮、硝态氮后, 采用与上覆水相同的方法进行测定.

## 1.3 微生物群落结构测定

在第 20 天时, 在干预组和对照组中分别取 3 个沉积物样品进行高通量测序分析. 对沉积物进行基因组 DNA 抽提, 通过细菌通用引物 338F-806R 扩增细菌 16SrRNA 基因的 V3+V4 区域, 利用 ABI GeneAmp® 9700 型 PCR 仪完成 PCR 反应, 将 PCR 产物用 QuantiFluor™ -ST 蓝色荧光定量系统进行检测定量, 用 Illumina MiSeq 技术平台进行高通量测序.

# 2 结果与讨论 (Results and discussion)

## 2.1 微生物群落结构分析

为了探索微生物在氮迁移转化中的作用, 分析氮的变化与微生物群落结构之间的关联性, 测定了不同阶段、不同组别中沉积物的微生物群落结构. 图 2 分别将初始沉积物与 20 d 后对照组、干预组沉积物中的微生物群落在“纲”水平上进行两两对比. 20 d 后, 干预组和对照组中沉积物的微生物群落结构显示出差异性, 两组沉积物中的梭菌纲 (*Clostridia*) (\*\* $P\leq 0.001$ )、 $\gamma$ -变形菌纲 (*Gammaproteobacteria*)

(\*0.01 <  $P \leq 0.05$ )、拟杆菌纲(*Bacteroidia*) (\*0.01 <  $P \leq 0.05$ )、互营养菌纲(*Synergistia*) (\*0.01 <  $P \leq 0.05$ )、*Syntrophia* 纲 (\*\* $P \leq 0.001$ )、*Caldisericia* 纲 (\*0.01 <  $P \leq 0.05$ )、脱硫菌纲(*Desulfobulbia*) (\*\* $P \leq 0.001$ )的相对丰度存在显著性差异(图 2a)。

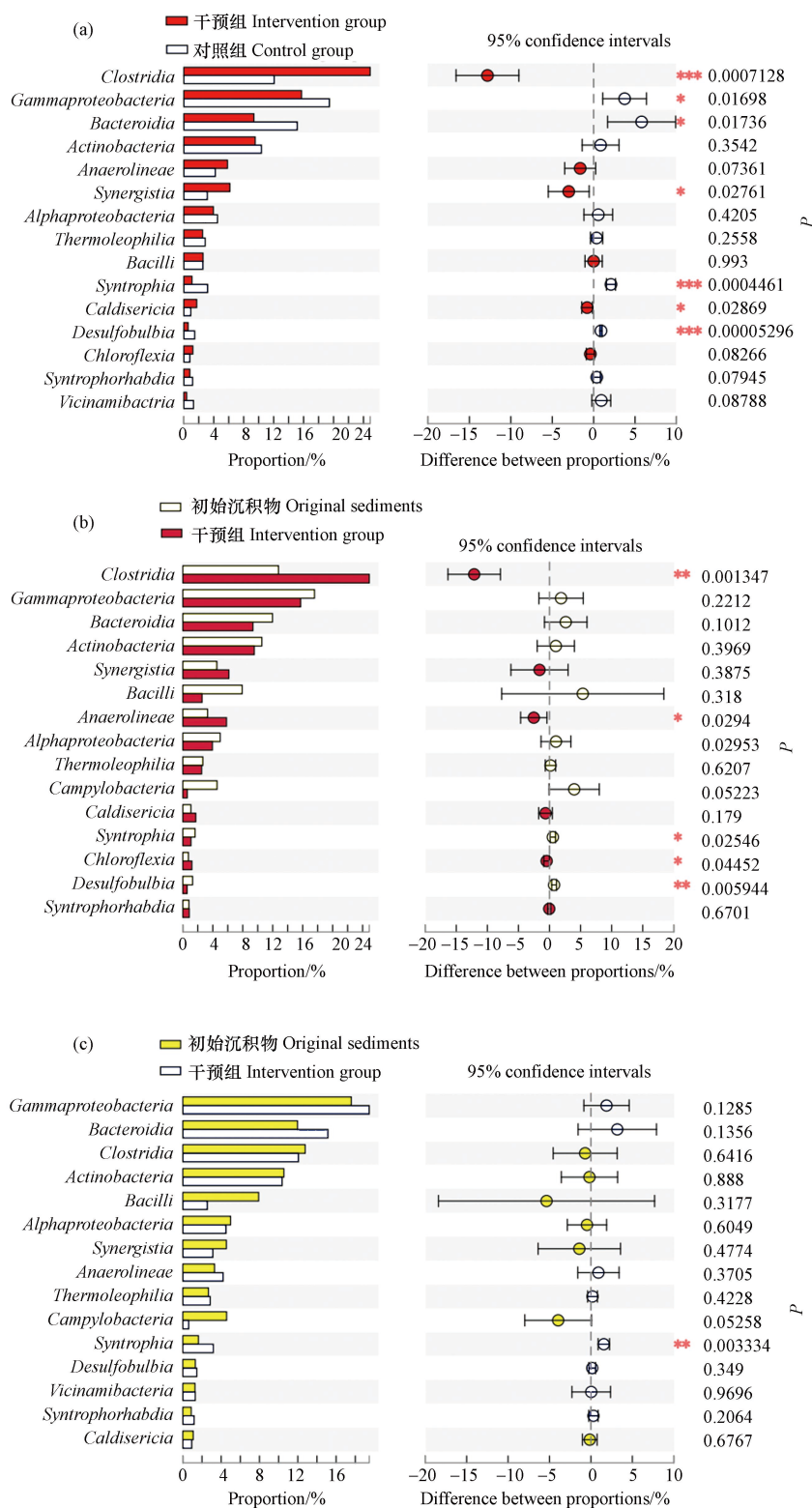


图 2 沉积物中微生物组成在“纲”水平上的比较

(a) 干预组与对照组 (b) 初始沉积物与干预组 (c) 初始沉积物与对照组 (\* 0.01 <  $P \leq 0.05$ , \*\* 0.001 <  $P \leq 0.01$ , \*\*\*  $P \leq 0.001$ )

Fig.2 Comparison of microbial composition in sediments at the "class" level

(a) Intervention group and control group (b) Original sediments and intervention group (c) Original sediments and control group (\* 0.01 <  $P \leq 0.05$ , \*\* 0.001 <  $P \leq 0.01$ , \*\*\*  $P \leq 0.001$ )

与初始沉积物相比, 20 d 后干预组中梭菌纲占比明显增加 (\*\* $0.001 < P \leq 0.01$ ), 由 12.29% 增至 24.86%,  $\gamma$ -变形菌纲、拟杆菌纲和 *Syntrophia* 占比有所减少 (图 2b); 对照组中的  $\gamma$ -变形菌纲和拟杆菌纲占比都有所增加 (图 2c). 总的来说, 梭菌纲、拟杆菌纲和  $\gamma$ -变形菌纲在三组沉积物中均属于优势菌群, 从功能上说, 梭菌纲、拟杆菌纲都可以促进有机物的分解, 转化为氨氮<sup>[5, 20]</sup>, 而  $\gamma$ -变形菌纲可以发生硝化作用, 分解氨氮转化为硝态氮、亚硝态氮<sup>[21]</sup>, 这些微生物对氮在沉积物-水系统中的迁移转化起着重要作用.

## 2.2 沉积物-水系统中不同组分氮的浓度变化分析

### 2.2.1 上覆水中氮的浓度变化

图 3 显示了对照组、干预组中不同形态氮在上覆水中的浓度变化情况. 在前期 (0—8 d), 两组氨氮都呈现逐渐上升的趋势, 推测由于上覆水与间隙水之间存在浓度差, 氨氮可以从间隙水向上覆水迁移. 中后期 (8—20 d), 干预组氨氮浓度继续上升, 对照组有所下降, 由于干预组中存在的梭菌纲相对丰度较高 (图 3), 能够分解水中的有机氮转化为氨氮<sup>[5]</sup>; 而对照组中相对丰度较高的  $\gamma$ -变形菌纲属于硝化细菌<sup>[12]</sup> (图 3), 可以发生硝化作用<sup>[21]</sup>, 将氨氮转化为硝态氮和亚硝态氮, 因而系统中的硝态氮和亚硝态氮浓度均有所上升. 干预组的硝态氮和亚硝态氮浓度波动较小, 硝化过程不太明显. 另外, 上覆水初始浓度较高时, 20 d 内各形态氮的浓度依然更高.

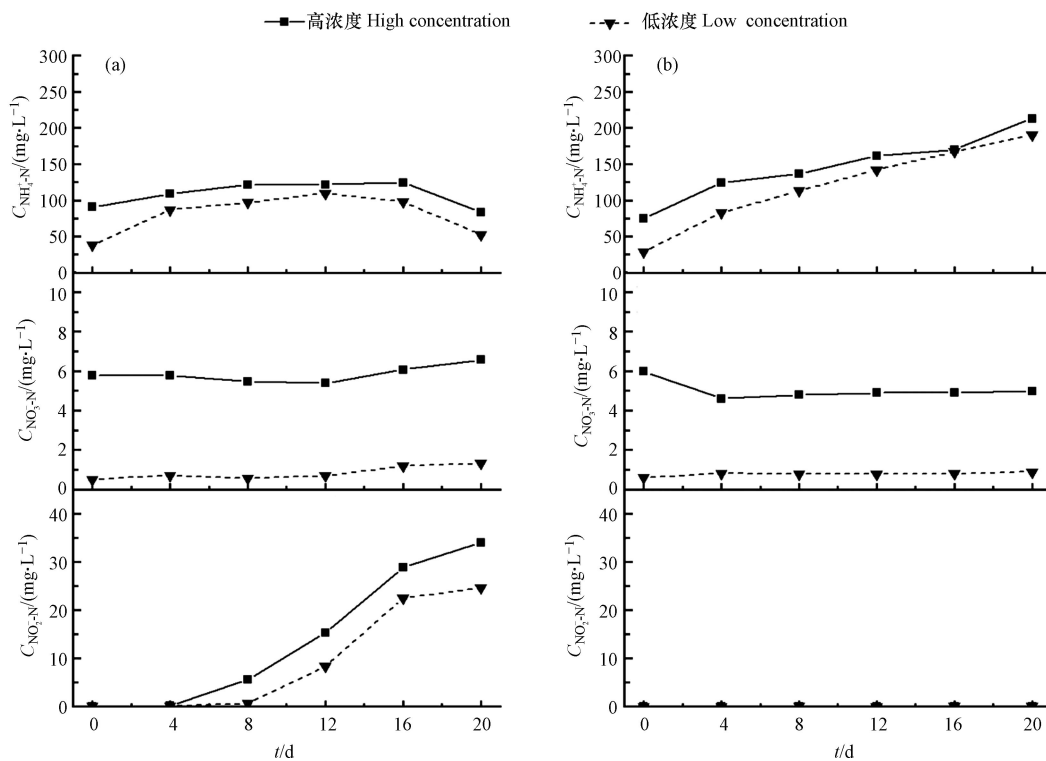


图 3 上覆水中不同形态氮浓度变化  
(a) 对照组; (b) 干预组

Fig.3 Concentration changes of different forms of nitrogen in overlying water  
(a) Control group; (b) Intervention group

### 2.2.2 间隙水中氮的浓度变化

图 4 对比了两组间隙水中不同形态氮的浓度变化情况. 对照组和干预组氨氮均有所波动, 但总体变化不明显. 一方面间隙水中部分氨氮发生迁移进入上覆水, 另一方面对照组中的优势菌群为拟杆菌纲和  $\gamma$ -变形菌纲, 干预组中则为梭菌纲和  $\gamma$ -变形菌纲, 拟杆菌纲和梭菌纲都能发生氨化作用<sup>[20]</sup>, 产生氨氮, 而  $\gamma$ -变形菌发生硝化反应, 消耗氨氮, 多方面作用下使得氨氮有所波动, 但干预组高浓度下氨氮略有上升. 高浓度下硝态氮由上覆水向间隙水迁移, 低浓度迁移方向相反, 上覆水浓度会影响间隙水中硝态氮的迁移方向. 另外, 推测两组均存在部分反硝化作用<sup>[22]</sup>, 使得硝态氮浓度少量下降. 对照组亚硝态氮含量上升, 上覆水与间隙水之间存在较大浓度差, 部分亚硝态氮从上覆水迁移至间隙水中, 而干预组中亚硝态氮含量较低.

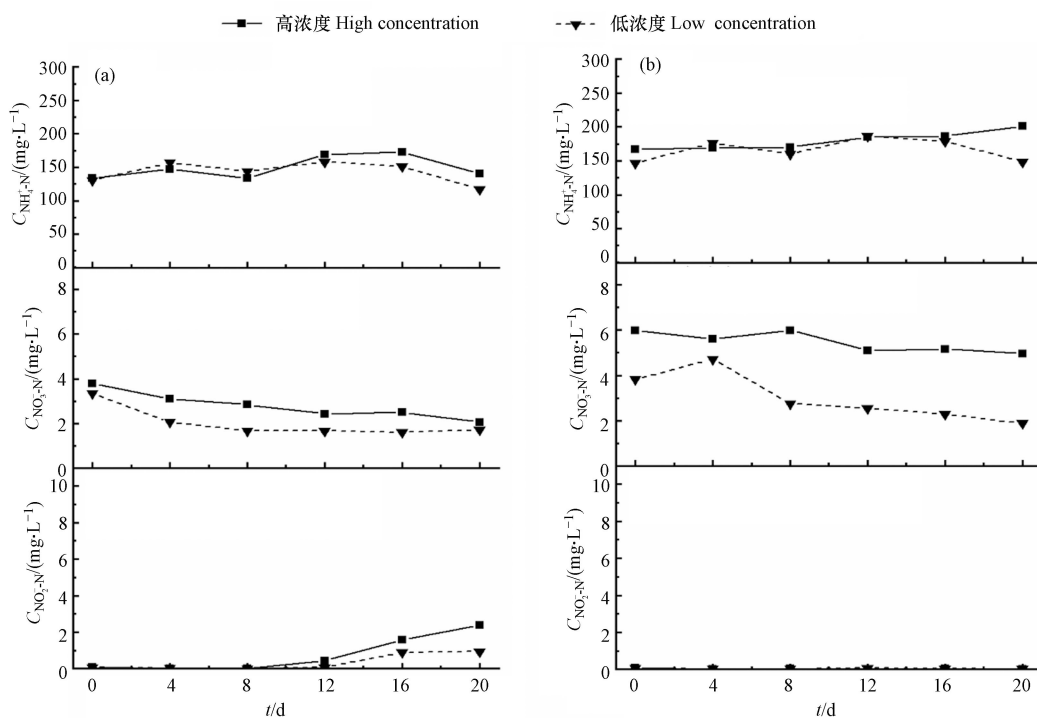


图 4 间隙水中不同形态氮浓度变化

(a) 对照组; (b) 干预组

Fig.4 Concentration changes of different forms of nitrogen in interstitial water

(a) Control group ; (b) Intervention group

## 2.2.3 沉积物中氮的浓度变化

对照组、干预组沉积物中不同形态氮的浓度变化情况如图 5 所示。

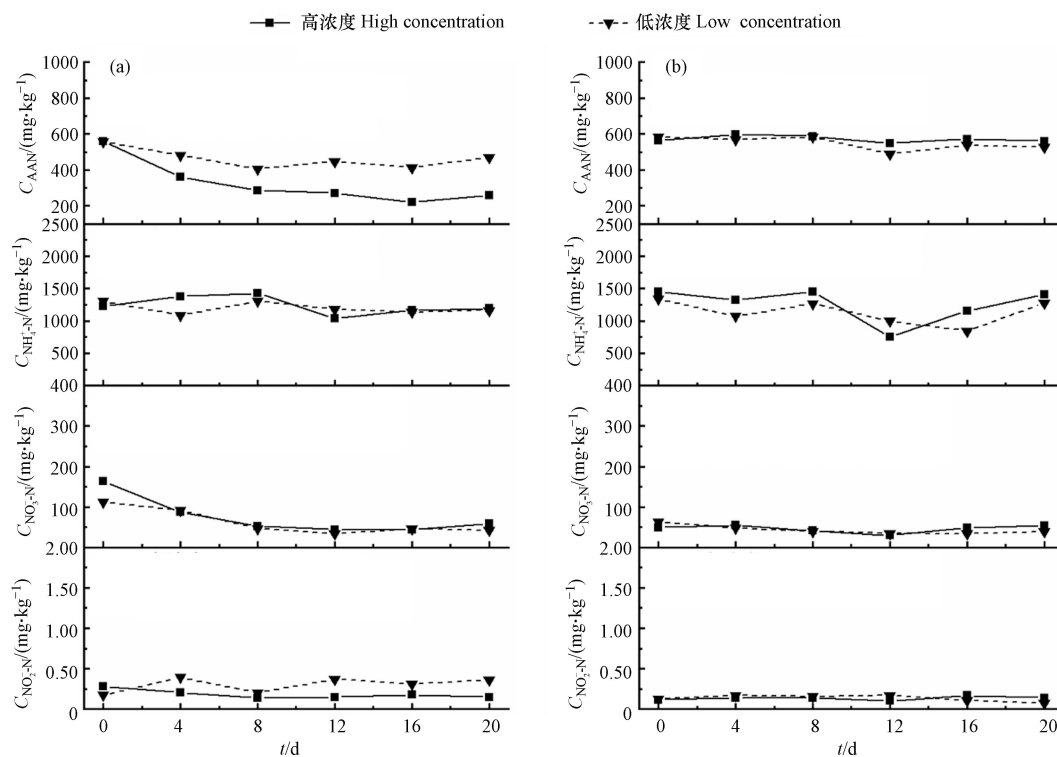


图 5 沉积物中不同形态氮浓度变化

(a) 对照组; (b) 干预组

Fig.5 Concentration changes of different forms of nitrogen in sediments

(a) Control group ; (b) Intervention group

对照组中氨基酸态氮、硝态氮呈现较为明显的下降趋势, 干预组 4 种物质浓度变化不大.  $\gamma$ -变形菌纲、拟杆菌纲在对照组中相对丰度较高, 而梭菌纲、互营养菌纲在干预组中更占优势, 拟杆菌纲、梭菌纲和互营养菌纲均可以促进氨基酸态氮的分解<sup>[11]</sup>, 微生物群落结构的差异导致两组中氮的变化趋势有所不同. 对照组中, 较高上覆水浓度下, 氨基酸态氮下降更明显.

### 2.3 沉积物-水系统中氮释放通量的量化分析

沉积物-水界面中各形态氮的释放通量采用公式(1)<sup>[23]</sup>进行计算:

$$F = \frac{\Delta CV}{At} \quad (1)$$

式中,  $F$ 为氮(氨氮、硝态氮)的释放通量,  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ;  $\Delta C$ 为第  $n$  天上覆水中氮与第 0 天时的浓度差,  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $V$ 为烧杯中上覆水的体积,  $\text{m}^3$ ;  $A$ 为烧杯的横截面面积,  $\text{m}^2$ ;  $t$ 为培养时间,  $\text{d}$ . 计算结果若为正值, 表示氮由沉积物向上覆水释放; 若为负值, 表示氮由上覆水往沉积物迁移.

#### 2.3.1 氨氮释放通量

图 6 显示了高、低浓度下上覆水中氨氮从初始阶段到每个取样时间点的释放通量. 高、低浓度下, 两个组别中氨氮的释放通量均为正值, 说明氨氮由沉积物向上覆水释放, 这与 Yang 等<sup>[24]</sup>在湖泊沉积物释放方面的研究结论类似. 高、低浓度下, 干预组的释放通量先减小, 在第 8 天后趋于稳定, 而对照组则持续减小. 部分原因为干预组中的梭菌纲将沉积物中的有机氮转化为氨氮, 使得沉积物具有持续地释放氨氮的能力, 而对照组中相对丰度较高的  $\gamma$ -变形菌纲发生硝化作用, 消耗了沉积物中部分氨氮, 使得通量迅速减小. 高、低浓度下, 对照组和干预组中氨氮的释放通量均在 0—4 d 达到最大值, 其中, 干预组释放通量分别达到  $489.19 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  和  $536.76 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ , 试验初期上覆水氨氮浓度的升高主要是因为沉积物-水系统之间的浓度差<sup>[25]</sup>, 而且研究表明, 沉积物中氨氮的溶出速率会随时间先增大后趋于稳定<sup>[26]</sup>. 相同组别中, 低浓度下氨氮的释放通量更大, 这与高、低浓度下上覆水与间隙水之间氨氮的浓度差有关. 以干预组为例, 高、低浓度下的上覆水氨氮的浓度分别为  $74.71\text{—}212.94 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $29.12\text{—}205.59 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (图 3b), 间隙水的浓度范围分别是  $167.35\text{—}201.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $146.76\text{—}186.47 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (图 4b), 低浓度下上覆水与间隙水之间的浓度差更大, 导致低浓度下沉积物向上覆水释放的氨氮更多.

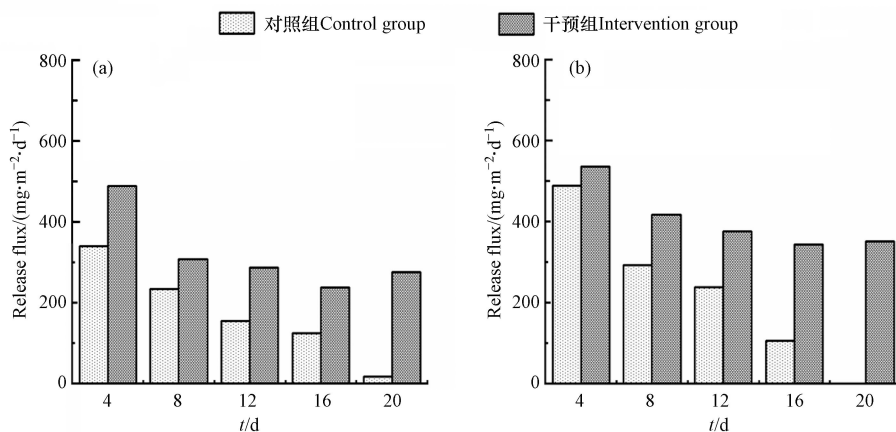


图 6 氨氮的释放通量  
(a)高浓度上覆水; (b)低浓度上覆水

Fig.6 Release flux of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$

(a) High concentration overlying water; (b) Low concentration overlying water

#### 2.3.2 硝态氮释放通量

不同浓度下上覆水硝态氮释放通量随时间的变化情况如图 7 所示. 由图 7 可以看出, 沉积物-水系统中硝态氮的释放通量很小, 没有明显的迁移方向, 文献中亦多有报道, 沉积物中的氮主要以氨氮的形式向上覆水释放<sup>[25, 27-28]</sup>.

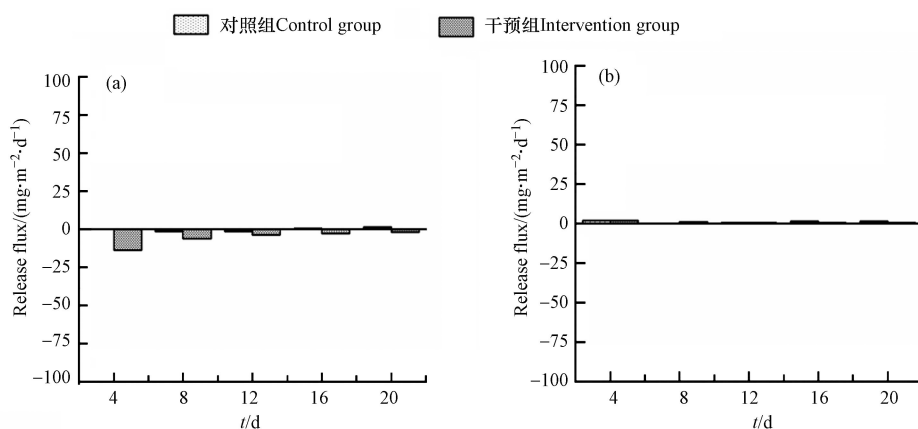


图7 硝态氮的释放通量  
(a)高浓度上覆水; (b)低浓度上覆水

Fig.7 Release flux of  $\text{NO}_3\text{-N}$

(a) High concentration overlying water; (b) Low concentration overlying water

### 3 结论(Conclusion)

(1)通过高通量测序发现,梭菌纲、拟杆菌纲和 $\gamma$ -变形菌纲在3组沉积物中均属于优势菌群。 $\gamma$ -变形菌纲和拟杆菌纲在对照组中相对丰度较高,梭菌纲、互营养菌纲在干预组中更占优势。

(2)干预组上覆水中氨氮含量有所增加,这与迁移作用和梭菌纲的氨化作用有关,对照组中的 $\gamma$ -变形菌纲导致上覆水中氨氮浓度下降,硝态氮、亚硝态氮含量增加。高、低浓度下沉积物-水系统中的氨氮均由沉积物向上覆水释放,低浓度下释放通量更大,最高值达到了 $536.76 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ,但通量随时间逐渐减小。

(3)干预组和对照组中,不同上覆水浓度影响间隙水中硝态氮的迁移方向,同时,反硝化作用使得间隙水中硝态氮含量有所减少。相对于氨氮,系统中硝态氮的释放通量均很小。

#### 参考文献 (References)

- [ 1 ] EDWARDS A C, WITHERS P J A. Transport and delivery of suspended solids, nitrogen and phosphorus from various sources to freshwaters in the UK [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 350(3/4): 144-153.
- [ 2 ] van DAAL P, GRUBER G, LANGEVELD J, et al. Performance evaluation of real time control in urban wastewater systems in practice: Review and perspective [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2017, 95: 90-101.
- [ 3 ] LEWIS W M, WURTSBAUGH W A, PAERL H W. Rationale for control of anthropogenic nitrogen and phosphorus to reduce eutrophication of inland waters [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(24): 10300-10305.
- [ 4 ] 李立青,尹澄清.雨、污合流制城区降雨径流污染的迁移转化过程与来源研究 [J]. *环境科学*, 2009, 30(2): 368-375.  
LI L Q, YIN C Q. Transport and sources of runoff pollution from urban area with combined sewer system [J]. *Environmental Science*, 2009, 30(2): 368-375(in Chinese).
- [ 5 ] LI W K, ZHENG T L, MA Y Q, et al. Current status and future prospects of sewer biofilms: Their structure, influencing factors, and substance transformations [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 695: 133815.
- [ 6 ] 邢贝米,王湧,刘鹤蒙,等.城市污水管网中有机与无机氮源对水质转化的影响作用 [J]. *环境化学*, 2018, 37(9): 1978-1986.  
XING B M, WANG Y, LIU H M, et al. The influence of organic and inorganic nitrogen sources on water quality transformation in urban sewer pipe [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, 37(9): 1978-1986(in Chinese).
- [ 7 ] 杨柯瑶.城市污水管网氮类营养物的迁变规律[D].西安:西安建筑科技大学,2016.  
YANG K Y. Nitrogen nutrient transformation in sewer networks[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016(in Chinese).
- [ 8 ] 孙光溪.城市污水管网中微生物群落分布特性研究[D].西安:西安建筑科技大学,2016.  
SUN G X. Distribution characteristics of microbial communities in urban sewer system[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016(in Chinese).
- [ 9 ] 艾海男,张青,何强,等.重力流排水管道内流态对生物膜菌落结构的影响 [J]. *环境工程学报*, 2017, 11(5): 2845-2850.  
AI H N, ZHANG Q, HE Q, et al. Impact of flow pattern of drainage pipe on structure of biofilm colonies [J]. *Chinese Journal of*



- [Environmental Engineering](#), 2017, 11(5): 2845-2850 (in Chinese).
- [10] JIN P K, WANG B, JIAO D, et al. Characterization of microflora and transformation of organic matters in urban sewer system [J]. [Water Research](#), 2015, 84: 112-119.
- [11] ZHANG L, LI X C, FANG W K, et al. Impact of different types of anthropogenic pollution on bacterial community and metabolic genes in urban river sediments [J]. [Science of the Total Environment](#), 2021, 793: 148475.
- [12] PJEVAC P, SCHAUBERGER C, POGHOSYAN L, et al. *AmoA*-targeted polymerase chain reaction primers for the specific detection and quantification of comammox *Nitrospira* in the environment [J]. [Frontiers in Microbiology](#), 2017, 8: 1508.
- [13] DAIMS H, LÜCKER S, WAGNER M. A new perspective on microbes formerly known as nitrite-oxidizing bacteria [J]. [Trends in Microbiology](#), 2016, 24(9): 699-712.
- [14] 艾海男, 马瑞祥, 何强, 等. 不同C/N条件下排水管道生物膜中氮分布特性 [J]. [中国环境科学](#), 2017, 37(12): 4549-4555.  
AI H N, MA R X, HE Q, et al. The distribution characteristics of nitrogen element in biofilm on drainage pipe under different C/N conditions [J]. [China Environmental Science](#), 2017, 37(12): 4549-4555 (in Chinese).
- [15] 黄帅辰, 左剑恶, 陈磊, 等. 排水管道沉积物微生物群落及环境因子分析 [J]. [中国环境科学](#), 2020, 40(12): 5369-5374.  
HUANG S C, ZUO J E, CHEN L, et al. Analysis of microbial communities and environmental factors in sewer sediments [J]. [China Environmental Science](#), 2020, 40(12): 5369-5374 (in Chinese).
- [16] AHYERRE M, CHEBBO G, SAAD M. Sources and erosion of organic solids in a combined sewer [J]. [Urban Water](#), 2000, 2(4): 305-315.
- [17] 卞晓峥. 城市污水管网污染物沉积与冲刷特性及水质变化规律研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.  
BIAN X Z. A study on characteristics of pollutants deposition and erosion release and water quality variation rules in sewer networks [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015 (in Chinese).
- [18] 桑浪涛, 石焯, 张彤, 等. 城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律 [J]. [环境科学](#), 2017, 38(5): 1965-1971.  
SANG L T, SHI X, ZHANG T, et al. Law of pollutant erosion and deposition in urban sewage network [J]. [Environmental Science](#), 2017, 38(5): 1965-1971 (in Chinese).
- [19] 钟立香, 王书航, 姜霞, 等. 连续分级提取法研究春季巢湖沉积物中不同结合态氮的赋存特征 [J]. [农业环境科学学报](#), 2009, 28(10): 2132-2137.  
ZHONG L X, WANG S H, JIANG X, et al. Speciation characteristics of different combined nitrogen in the spring sediments of Chaohu Lake by sequential extraction methods [J]. [Journal of Agro-Environment Science](#), 2009, 28(10): 2132-2137 (in Chinese).
- [20] SCHWEIGER P F. Nitrogen isotope fractionation during N uptake via arbuscular mycorrhizal and ectomycorrhizal fungi into grey alder [J]. [Journal of Plant Physiology](#), 2016, 205: 84-92.
- [21] XIAO H F, GRIFFITHS B, CHEN X Y, et al. Influence of bacterial-feeding *Nematodes* on nitrification and the ammonia-oxidizing bacteria (AOB) community composition [J]. [Applied Soil Ecology](#), 2010, 45(3): 131-137.
- [22] 赵树林, 王海燕, 杨慧芬, 等. PCR-DGGE研究臭氧耦合ASBR/SBR控氮磷污泥减量化工序中的细菌多样性 [J]. [环境工程技术学报](#), 2011, 1(2): 123-130.  
ZHAO L L, WANG H Y, YANG H F, et al. Bacterial diversity of the combined ozonation-ASBR/SBR sludge reduction with simultaneous nitrogen and phosphorus removal process using PCR-DGGE [J]. [Journal of Environmental Engineering Technology](#), 2011, 1(2): 123-130 (in Chinese).
- [23] 牛凤霞, 吉芳英, 赵良, 等. 龙景湖沉积物的细菌群落垂直向分布特征 [J]. [中国环境科学](#), 2017, 37(6): 2322-2331.  
NIU F X, JI F Y, ZHAO G, et al. Vertical distribution of bacterial communities in sediments of Longjing Lake [J]. [China Environmental Science](#), 2017, 37(6): 2322-2331 (in Chinese).
- [24] YANG Z P, WANG L Q, LIANG T, et al. Nitrogen distribution and ammonia release from the overlying water and sediments of Poyang Lake, China [J]. [Environmental Earth Sciences](#), 2015, 74(1): 771-778.
- [25] 陈红, 卓琼芳, 许振成, 等. 排水管道沉淀物氮释放特性的研究 [J]. [环境科学](#), 2015, 36(8): 2918-2925.  
CHEN H, ZHUO Q F, XU Z C, et al. Nitrogen release performance of sediments in drainage pipeline [J]. [Environmental Science](#), 2015, 36(8): 2918-2925 (in Chinese).
- [26] 徐强强, 李阳, 马黎, 等. 城市雨水管道沉积物氮磷污染溶出特性试验研究 [J]. [环境科学研究](#), 2021, 34(3): 646-654.  
XU Q Q, LI Y, MA L, et al. Experimental study on leaching characteristics of nitrogen and phosphorus in urban rainwater pipeline sediment [J]. [Research of Environmental Sciences](#), 2021, 34(3): 646-654 (in Chinese).
- [27] 余光伟, 雷恒毅, 刘广立, 等. 重污染感潮河道底泥释放特征及其控制技术的研究 [J]. [环境科学学报](#), 2007, 27(9): 1476-1484.  
YU G W, LEI H Y, LIU G L, et al. Research on the characteristics of sediment release in a heavily polluted tidal river and control technologies [J]. [Acta Scientiae Circumstantiae](#), 2007, 27(9): 1476-1484 (in Chinese).
- [28] 郭建宇, 卢少勇, 金相灿, 等. 低溶解氧状态下河网区不同类型沉积物的氮释放规律 [J]. [环境科学学报](#), 2010, 30(3): 614-620.  
GUO J N, LU S Y, JIN X C, et al. Regularity of nitrogen release under low oxygen conditions from various sediments in a river network [J]. [Acta Scientiae Circumstantiae](#), 2010, 30(3): 614-620 (in Chinese).