

水体颗粒物对有机氮转化的影响

张学青, 夏星辉*, 杨志峰

(北京师范大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875)

摘要:以多泥沙河流黄河为例, 采用微宇宙实验模拟研究自然水体中有机氮的转化过程和添加人工富集的黄河优势菌种条件下的有机氮转化过程. 结果表明, 自然水体条件下颗粒物对有机氮的转化有明显的促进作用, 转化速率常数随颗粒物含量的增加而增加, 用一级动力学拟合有机氮的转化过程发现, 当有机氮的初始浓度为 5 mg/L, 颗粒物含量分别为 0、5、10 g/L 时, 转化速率常数分别为 0.286、0.333、0.538 d⁻¹, 用 Logistic 模型对硝化过程进行模拟, 硝化速率常数 K_4 分别为 0.001 8、0.003 8、0.005 0 L·(d·μmol)⁻¹. 在添加人工富集微生物条件下, 微生物初始数量一致, 体系有机氮的转化速率常数和硝化速率常数 K_4 均随颗粒物含量的增加而增加. 水体颗粒物对有机氮转化的影响机理是: ①颗粒物含量不同的水体其初始微生物数量不同, 颗粒物含量越高, 微生物数量也越大; ②颗粒物对微生物生长有促进作用, 微生物亦主要存在于颗粒物表面, 且颗粒物的存在使水体有机氮主要存在于颗粒相, 有机氮的转化主要发生在水-颗粒物界面; ③颗粒物的存在增加了微生物与有机氮的接触几率, 促进了有机氮的转化.

关键词: 悬浮颗粒物; 有机氮; 氨化作用; 硝化作用

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)09-1954-06

Effect of Suspended Sediment on the Transformation of Organic Nitrogen

ZHANG Xue-qing, XIA Xing-hui, YANG Zhi-feng

(State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Microcosm experiments have been carried out to study the effects of suspended sediment on the transformation of organic nitrogen contaminants under different conditions, including with and without spiking bacteria to the water-sediment system. When with the natural water and sediment as cultivation media and without spiking bacteria to the water system, the presence of sediment could stimulate the transformation of organic nitrogen, and the transformation rates were correlated well with the sediment concentration. When the initial concentration of organic nitrogen in the water system was 5 mg/L, and the suspended sediment content were 0, 5 and 10 g/L, the first-order transformation rate constants of organic nitrogen were 0.286, 0.333 and 0.538 d⁻¹, respectively; the nitrification rate constants (K_4) were 0.001 8, 0.003 8 and 0.005 0 L·(d·μmol)⁻¹, respectively, when fitting the nitrification process with the Logistic kinetics. When spiking the water systems with the same initial bacteria density, the first-order transformation rate constants of organic nitrogen and nitrification rate constants (K_4) increased with the sediment content. With the natural water and sediment as cultivation media, the mechanism regarding the effects of suspended sediment on organic nitrogen transformation includes the following aspects: ① The initial amount of bacteria increased with the sediment content in the water system. ② The growth of bacteria was promoted by the sediments, and bacteria tended to attach to the sediment. In addition, most of organic nitrogen was attached to the sediment phase and the transformation of organic nitrogen in the water system mainly occurred at the sediment/water interface. ③ The presence of sediment increased the contact chances between bacteria and organic nitrogen, thus stimulated the transformation of organic nitrogen contaminants.

Key words: suspended sediment; organic nitrogen; ammonification; nitrification

黄河水体的氮污染问题日益严重, 近年来的水质监测结果表明, 氨氮污染已经成为黄河的首要污染物, 黄河水体中高浓度的氨氮不仅与排污水体中含有较高的氨氮有关, 也与水体中有机氮的转化过程有关. 黄河沿岸的大中城市每日向黄河排放大量的生活污水中含有高浓度的有机氮, 城市垃圾渗沥液引起的 COD 和氮污染问题也十分严重^[1-3]. 黄河属于典型的多沙河流, 悬浮颗粒物易于形成胶体^[4], 对有机氮和氨氮有很强的吸附作用, 泥沙对含氮污染物的蓄积作用使黄河支流底泥中的凯氏氮浓度高

达 3 570 mg/kg^[5], 这对氮的迁移转化和生物降解有着重要影响^[6].

Murphy 等^[7]对硝化过程的研究比较全面. Pauer 等^[8]研究发现沉积物界面的硝化反应比水体快. Strauss 等^[9]分析了含水沉积物中有机碳以及氮的生

收稿日期: 2006-08-28; 修订日期: 2006-10-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(40571138); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2006CB403303)

作者简介: 张学青(1972~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为环境模拟与污染控制, E-mail: zhangxq1234@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xiash@bnu.edu.cn

物有效性等因素对硝化作用的影响。何洁等^[10]研究了沙粒、活性炭和沸石等 3 种载体上生物膜对有机氮的转化规律, 沙粒上的反应速率最小, 沸石相对最大。徐星凯等^[11]研究了土壤中有机氮的矿化方面的特性, 认为吸附在固体颗粒物上的有机氮转化速度要比水中慢的多, 泥沙对有机氮的吸附将使其在环境中的停留时间增长, 使其潜在危害增加。但余晖等^[12]有关水体颗粒物对氨氮硝化作用的影响研究表明水体颗粒物的存在促进了氨氮的硝化作用。迄今为止, 有关自然水体中悬浮颗粒物对有机氮转化作用的相关研究较少。本研究采用微宇宙的方法分析了有机氮在黄河泥沙上的吸附和生物降解规律, 讨论了悬浮颗粒物对有机氮转化的影响, 对分析和预测黄河有机氮和氨氮在水沙体系中的迁移转化规律有重要意义。

1 材料与方法

1.1 样品采集

模拟实验选取黄河干流较具代表性的花园口站为研究对象, 所采水样和颗粒物均取自花园口段河中央, 将含有悬浮颗粒物的原状水静置沉淀得到水体颗粒物和黄河清水, 然后按照实验要求用黄河清水配制不同含沙量的实验用水。采样时间为 2004-10。

1.2 有机氮吸附解吸实验

分别将不等有机氮含量的蛋白胨标准溶液加入 6 个 150 mL 的烧杯中, 用颗粒物含量相等的黄河水样稀释至 50 mL, 加入 0.1% 的 NaN_3 抑制细菌生长, 有机氮初始浓度依次为 0、0.5、1、2、5 和 10 mg/L。在恒温培养箱中(20℃)加磁力搅拌, 使其充分作用, 90 min 达吸附平衡后取出, 静置沉淀, 取上清液离心测定水相有机氮含量。弃去前述达到吸附平衡的液相, 再向各烧杯中加入 50 mL 黄河清水, 进行解吸实验, 并加磁力搅拌 90 min, 静置沉淀, 取上清液测定其有机氮含量。

1.3 微生物的富集培养实验

根据文献[13]的方法配制氨化细菌、亚硝化细菌和硝化细菌的培养基, 将黄河原状水中的微生物接种到制备好的培养基中, 于 20~25℃ 条件下培养 7~10 d 后, 再将其接种到新制备的培养基中培养, 如此反复培养 4~6 代后, 完成纯化阶段; 对于纯化培养的微生物培养液, 氨化细菌每周向培养液中加入 1 mL 10% 的蛋白胨, 亚硝化细菌加 1 mL 10% 的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 硝化细菌加富培养用 5 mL 10% 的 NaNO_2 , 如此再培养 1~2 个月后即可得到高浓度的

黄河水体优势菌种。

1.4 自然条件下的模拟实验

本组实验用微生物为黄河原状水所含的自然条件下的微生物。水样运回实验室后, 分别取不同颗粒物含量(含沙量为 0、5、10 g/L)的水样约 400 mL 于培养瓶中, 然后在每个培养瓶中加入等量的蛋白胨标准液, 使有机氮浓度约为 5 mg/L, 并用 8 层纱布封住瓶口, 以防止外界细菌的进入。将培养瓶放入恒温(20℃)培养箱中培养, 并进行磁力搅拌以保证泥沙充分混匀和有充足的溶解氧。每个水样均制备 1 个平行样, 在同一条件下进行恒温培养, 每日测定水相和颗粒相的有机氮浓度以及水相的无机三氮浓度。有机氮和氨氮在水体的总浓度包括水相和颗粒相浓度, 其中氨氮颗粒相浓度可根据水相浓度用吸附等温式求出。文中所用数据为平行样的平均值。

1.5 人工条件下的模拟实验

本组实验用微生物为经过富集纯化的黄河水体优势菌种。考察颗粒物含量不同对有机氮转化作用的影响, 实验设置 3 种颗粒物含量不同的水体(含沙量为 0、0.5、5 g/L)、水沙均经高温灭菌后加入相同数量的黄河优势菌种, 有机氮初始浓度为 5 mg/L 左右, 氨化细菌、亚硝化细菌和硝化细菌的数量分别为 10^7 、 10^5 、 10^5 个/mL, 其他条件同 1.4。

1.6 化学和生物分析

土壤粒径组成分析方法为比重计法, 土壤有机质的测定为高温外热重铬酸钾氧化-容量法(即电热板重铬酸钾法)^[13]。有机氮用凯氏定氮仪测定得到凯氏氮数据, 然后与氨氮相减得到相应的有机氮值(实验用蛋白胨作为有机氮的标准溶液, 蛋白胨易于降解, 能用凯氏氮方法准确测定)。所用仪器为北京通润源机电技术公司的 KXL-1010 控温消煮炉和 KDY-9820 型凯氏定氮仪, 蒸馏得到的铵吸收液、氨氮和亚硝酸盐氮均采用经典比色法测定, 所用仪器为德国 WTW 公司 Photolabs12 水质分析仪。硝酸盐氮用紫外分光光度法测定, 所用测量仪器为美国 WARRY 公司 CARY50 型紫外可见分光光度计。

定期取出各培养瓶中的水样和泥沙样测其氨化细菌、亚硝化细菌及硝化细菌数量, 各类菌均采用 MPN 法^[14]测定。每个水样做 4~5 个 10 倍稀释度, 每一稀释度做 3 个平行样。

2 结果与分析

2.1 模拟实验用颗粒物理化特征分析

用于模拟实验的黄河花园口颗粒物粒径组成如

表 1, 有机质含量约 0.84%, 有机氮含量约为 0.72 mg/g. 根据笔者先前的研究, 所采集的花园口黄河水体颗粒物上的本底有机氮在模拟自然条件下的转化很慢, 由有机氮氧化产生的硝态氮浓度 5 d 只增加了 0.16 mg/L, 说明颗粒物本底所含的有机氮对实验数据影响较小. 因此, 在本研究中, 水-沙体系中有有机氮浓度的变化反映的是所添加蛋白胨的转化速率.

表 1 黄河悬浮泥沙颗粒物粒径组成质量分数/%

Table 1 Distribution of particle diameter/%					
粒径/mm	0.10~0.05	0.05~0.025	0.025~0.01	0.01~0.005	<0.005
质量分数	17	24.4	27.1	9.3	21.1

2.2 有机氮在颗粒物上的吸附解吸特征分析

以含沙量为 5 g/L 的水体为例, 进行有机氮的吸附和解吸实验, 在有机氮浓度小于 10 mg/L 范围内, 其吸附和解吸曲线都符合 Henry 方程, 吸附等温式方程如式(1):

$$Q = 0.1072c \quad (R^2 = 0.9908) \quad (1)$$

解吸等温式方程如式(2):

$$Q = 1.7742c \quad (R^2 = 0.9863) \quad (2)$$

式中, Q 为固相吸附量(mg/g); c 为液相有机氮的平衡浓度(mg/L).

由式(1)和式(2)可以看出, 颗粒物对有机氮有较强的吸附能力, 而有机氮在颗粒物上的解吸能力相对较弱, 有机氮固相吸附量是液相初始浓度的约

37%, 而黄河清水对有机氮的解吸率只有 10%, 说明有机氮在颗粒物上非可逆吸附的成分占很大比重.

2.3 水体颗粒物对有机氮转化速率的影响

自然水体微生物条件下的模拟实验结果如图 1 所示, 颗粒物对水体有机氮的转化有明显的促进作用, 并随着水体含沙量的增加, 有机氮的转化速率增加. 在没有颗粒物存在的水体中, 有机氮从 4.06 mg/L 降低至 0.56 mg/L 用了 8 d 时间, 平均氨化速率(以体系有机氮的消失量计算)为 0.44 mg/(L·d). 而含沙量分别为 5 和 10 g/L 的水体, 水沙体系中有有机氮初始浓度分别为 4.97 和 5.08 mg/L, 在培养 6 d 后有机氮分别降低至 0.47 和 0.5 mg/L, 其相应的氨化速率分别为 0.64 和 0.86 mg/(L·d), 显著高于不含颗粒物的水体. 在有机氮转化过程中, 体系氨氮的浓度同时受有机氮的氨化过程和氨氮的硝化过程控制, 氨氮浓度随有机氮的转化而累积, 随硝化过程的进行而逐渐降低. 含沙水体(以 10 g/L 为例)中, 氨氮在 2~3 d 达到最大值(1.78 mg/L), 4~6 d 亚硝态氮达到最大值, 7~8 d 硝态氮浓度达到最大值; 而不含沙水体完成硝化过程用了 17~18 d, 且累积的氨氮和亚硝态氮也都高于含沙水体, 分别达 2.25 和 2.60 mg/L. 这与水体颗粒物对氨氮硝化过程影响的规律一致, 即含沙量越高, 硝化反应越快^[15].

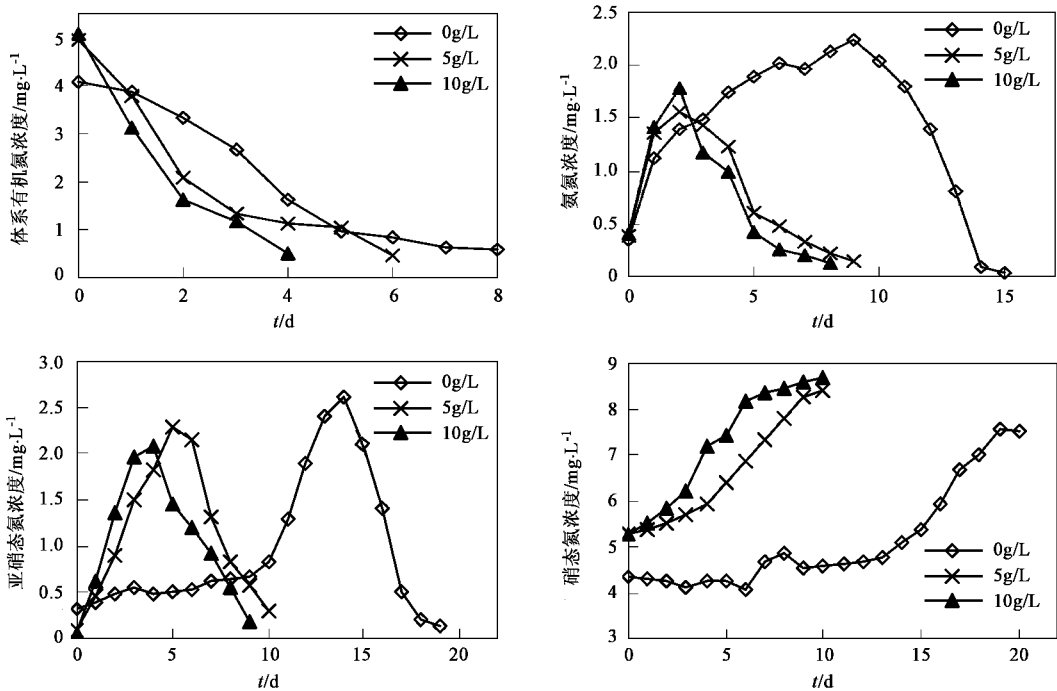


图 1 有机氮转化过程中各形态氮的变化曲线

Fig.1 Accumulation curves of nitrogen species during the transformation of organic nitrogen

有机氮的转化符合一级动力学方程(以体系有机氮的消失速率计):

$$c = c_0 e^{-kt} \tag{3}$$

式中, c 为有机氮浓度; c_0 为有机氮初始浓度; k 为有机氮的降解速率常数; t 为反应时间.

用式(3)拟合有机氮的转化过程发现,当颗粒物含量分别为 0.5、10 g/L 时,转化速率常数 k 分别为 0.286、0.333、0.538 d^{-1} . 用 Logistic 模型^[16](式 4 和式 5)对硝态氮数据反向拟合反应物的硝化过程发现,硝化速率常数 K_4 分别为 0.001 8、0.003 8 和 0.005 $\text{L} \cdot (\text{d} \cdot \mu\text{mol})^{-1}$, 因此,随含沙量的增加, K_4 值也随之增加,说明有机氮转化成硝酸盐的速率常数随颗粒物含量的增加而增加. Logistic 动力学方程:

$$-dS/dt = K_4 S (S_0 + X_0 - S) \tag{4}$$

$$K_4 = \mu_{\max} / K_s \tag{5}$$

式中, S 为底物浓度; S_0 为底物在 0 时刻的浓度; X_0 为微生物在 0 时刻的浓度; K_4 为硝化速率常数; $\mu_{\max}$ 为最大比生长速率; K_s 为微生物生长半饱和常数.

2.4 微生物的增长曲线和在固液两相的分布

自然条件下有机氮转化模拟实验中微生物的数量变化及其在固液两相的分布见图 2 和图 3. 从图 2 可以看出,当含沙量为 0 和 5 g/L 时,氨化细菌初始数量分别为 200 和 4.5×10^6 个/mL,亚硝化细菌初始数量分别为 10 和 540 个/mL,硝化细菌初始数量分别为 40 和 90 个/mL,水体中颗粒物含量越高,对应的微生物数量越大,这主要是由于微生物易于吸附在颗粒物表面,颗粒物含量越高,携带的微生物数量也越大,这从 0 时刻各体系微生物的数量差异即可看出. 另外,有颗粒物存在的水体中,氨化细菌、亚硝化细菌和硝化细菌分别在培养的第 3、3~6、6~9 d 达到最大值,而不含颗粒物的水体 3 种微生物分别在第 6、12、12~15 d 达到最大值,这说明颗粒物的存在促进了微生物的生长,使得含沙水体中的微生物增长高于不含沙水体,3 种微生物均存在此现象. 在颗粒物含量为 0 的水体中,3 种微生物的生长速度均落后于含沙水体,这说明颗粒物的存在有利于微生物的生长.

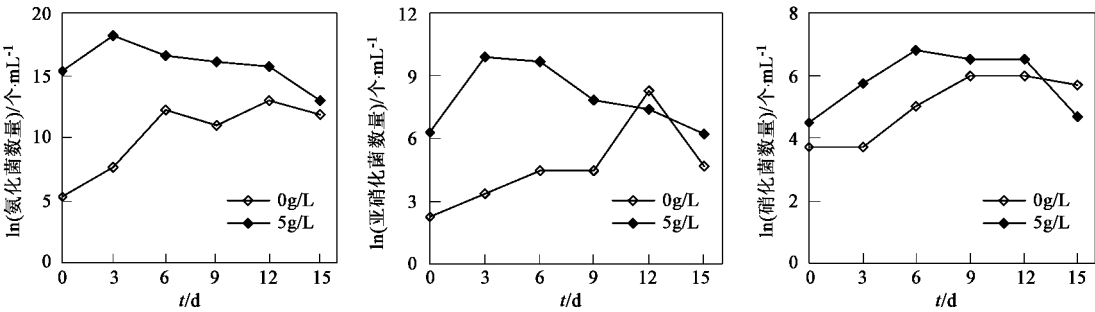


图 2 不同颗粒物含量水体中氨化细菌和硝化细菌生长曲线

Fig.2 Growth curves of ammonifying bacteria and nitrobacteria in water system with different suspended sediment content

从图 3 可以看出(以颗粒物含量为 5 g/L 的水体为例),3 种微生物都表现为颗粒相上的微生物数量明显的高于水相. 颗粒相 3 种微生物 0 时刻的数量

均高于相应的水相数量,而且随着反应的进行,颗粒相数量进一步增加,在培养的第 6 d,颗粒相氨化细菌、亚硝化细菌和硝化细菌的数量分别达到 $1.5 \times$

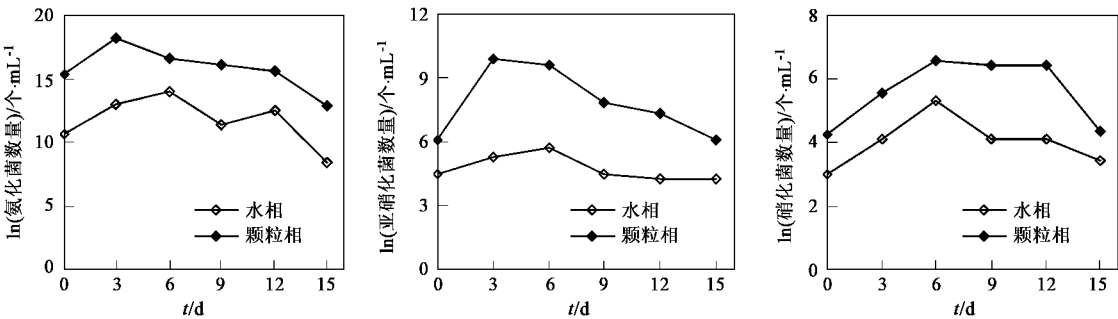


图 3 固相与液相上氨化细菌、亚硝化细菌和硝化细菌对照

Fig.3 Comparison of ammonifying bacteria, nitrosobacteria and nitrobacteria between liquid and solid phases

10^7 、 1.5×10^4 、710 个/mL, 占体系总量的 92%, 98%, 78%。颗粒相微生物很快达到最大值, 而液相微生物数量变化相对迟缓, 所能达到的最大值也远远小于固相。对于氨化细菌而言, 由于有机氮多吸附在颗粒物表面, 从而为氨化细菌的生长提供了较多的接触界面, 促进了氨化细菌在固相的生长; 而氨氮也易于吸附在颗粒相, 同样为亚硝化菌和硝化细菌生长提供界面, 使其在颗粒相数量增加。

2.5 人工富集微生物条件下颗粒物对有机氮转化的影响

添加人工富集微生物的模拟实验结果如图 4 所示, 在微生物数量一致情况下, 颗粒物含量越高, 有

机氮转化速率越快。在有颗粒物的体系中, 有机氮浓度迅速降低, 而没有颗粒物的水体转化速率相对缓慢。用一级动力学拟合有机氮的转化过程发现, 当含沙量为 0、0.5、5 g/L 时, 转化速率常数分别为 0.341、0.574、0.744 d^{-1} , 用 Logistic 模型对硝态氮数据反向拟合反应物的硝化过程发现, 硝化速率常数 K_4 分别为 0.002 8、0.003 5 和 0.004 $\text{L} \cdot (\text{d} \cdot \mu\text{mol})^{-1}$ 。由此可见, 在体系微生物初始数量相同的条件下, 随颗粒物含量的增加, 有机氮转化成硝酸盐的速率常数随之增加。可见, 颗粒物的存在增加了水-沙微界面数量, 增加了微生物和含氮化合物接触的机会, 促进了反应的进行。

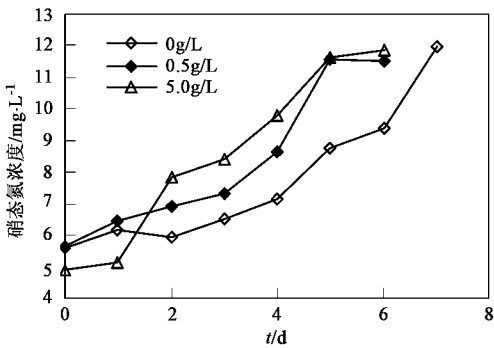
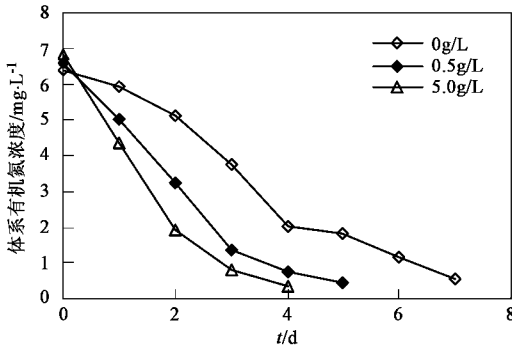


图 4 颗粒物含量对有机氮转化的影响
Fig. 4 Effects of suspended sediment content on the transformation of organic nitrogen

3 讨论

由前述的研究结果得出, 在模拟自然水体条件下, 水体有机氮的转化随悬浮颗粒物含量的增加而增加。有关水体悬浮颗粒物的影响机理可以从以下 3 点来分析: ①颗粒物含量不同的水体其初始微生物数量不同, 颗粒物含量越高, 微生物数量也越多, 因此, 有机氮的转化速率随颗粒物含量的增加而增加; ②微生物易于附着在水-颗粒物界面, 颗粒物的存在促进了微生物的生长, 使得含沙水体中的微生物增长高于不含沙水体。如对于含沙量为 0 的水体, 有机氮转化过程中氨化细菌, 亚硝化细菌, 硝化细菌所达到的最大数量分别为 4.5×10^5 、 4×10^3 、 1.5×10^2 个/mL, 而在含沙量为 5 g/L 的水体中, 3 种微生物所达到的最大数量依次为 7.5×10^7 、 2×10^4 、 9.1×10^2 个/mL, 后者远远高于前者; ③颗粒物对有机氮有较强的吸附能力, 使有机氮多存在于颗粒物表面, 微生物也主要分布于颗粒相, 而且颗粒物含量越高, 所附着的微生物数量越多, 有机氮的转化速率也越快, 由此说明, 有机氮的转化主要发生在水-颗粒物界

面。进一步添加人工富集微生物的试验结果表明, 在微生物数量相同的条件下, 颗粒物含量越高, 反应速率也越快, 这就证明了有机氮的转化速率增加与颗粒物提供了更多的微界面有直接的关系, 颗粒物的存在增加了含氮化合物和微生物接触的机会, 促进了有机氮的转化。

4 结论

(1) 在培养条件一致的情况下, 自然水体颗粒物对有机氮转化有明显的促进作用, 当颗粒物含量分别为 0、5、10 g/L 时, 有机氮的转化速率常数分别为 0.286、0.333、0.538 d^{-1} , 硝化速率常数分别为 0.001 8、0.003 8 和 0.005 $\text{L} \cdot (\text{d} \cdot \mu\text{mol})^{-1}$, 随含沙量的增加, 有机氮的转化速率常数和硝化速率常数均随之增加, 说明有机氮转化成硝酸盐的速率随颗粒物含量的增加而增加。向体系添加人工富集的黄河优势菌种, 在微生物数量一致情况下, 颗粒物含量越高, 有机氮转化速率越快, 当含沙量为 0、0.5、5 g/L 时, 有机氮的转化速率常数分别为 0.341、0.574、0.744 d^{-1} , 硝化速率常数分别为 0.002 8、0.003 5 和

0.004 L•(d•μmol)⁻¹,说明颗粒物的存在增加了水-沙微界面数量,增加了微生物和含氮化合物接触的机会,促进了反应的进行.

(2)水体悬浮颗粒物对有机氮转化的影响机理主要包括:微生物易于附着在颗粒物表面,颗粒物含量高的水体中微生物数量也较多;颗粒物的存在促进了微生物的生长,使得含沙水体中的微生物增长高于不含沙水体,而且微生物也主要分布于颗粒相;黄河水体悬浮颗粒物对有机氮有较强的吸附能力,使有机氮多存在于颗粒物表面,水-颗粒物界面增加了有机氮和微生物的接触机会,促进了有机氮的转化.

参考文献:

[1] 夏立江,许立孝,温小乐,等. 城市垃圾渗沥液引起地下水氮污染的研究[J]. 农业环境保护,2001,20(2):108 ~ 110.

[2] 王鹏,刘伟藻,方汉平. 垃圾渗沥液中氨氮的电化学氧化[J]. 中国环境科学,2000,20(4):289 ~ 291.

[3] 刘疆鹰,徐迪民,赵由才,等. 大型垃圾填埋场渗滤水氨氮衰减规律[J]. 环境科学学报,2001,21(3):323 ~ 327.

[4] Sigleo A C, Macko S A. Carbon and nitrogen isotopes in suspended particles and colloids, Chesapeake and San Francisco estuaries, USA [J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2002, 54 (4): 701 ~ 711.

[5] 高宏,暴维英,张曙光,等. 多沙河流污染化学与生态毒理研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2001.

[6] Turner A, Millward G E. Suspended Particles: Their Role in Estuarine Biogeochemical Cycles Estuarine[J]. Coastal and Shelf Science, 2002, 55: 857 ~ 883.

[7] Murphy D V, Recous S, Stockdale E A, et al. Gross nitrogen fluxes in soil: theory, measurement and application of ¹⁵ N pool dilution techniques[J]. Advances in Agronomy, 2003, 79: 69 ~ 118.

[8] Pauer J J, Auer M T. Nitrification in the water column and sediment of a hypereutrophic lake and adjoining river system[J]. Water Research, 2000, 34(4): 1247 ~ 1254.

[9] Strauss E A, Mitchell N L, Lamberti G A. Factors regulating nitrification in aquatic sediments: effects of organic carbon, nitrogen availability, and pH[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2002, 59(3):554 ~ 563.

[10] 何洁,刘长发,吴钰. 三种载体上生物膜硝化作用动力学初步研究[J].应用与环境生物学报,2003,9(5):546 ~ 548.

[11] 徐星凯,周礼恺, Oswald V C. 脲酶抑制剂/硝化抑制剂对土壤中尿素氮转化及形态分布的影响[J]. 土壤学报,2000, 37(3): 339 ~ 345.

[12] 余晖,张学青,夏星辉,等. 黄河水体颗粒物对硝化过程的影响研究[J].环境科学学报,2004,24(4):601 ~ 606.

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.

[14] 王家玲,臧向莹,王志通. 环境微生物学实验[M]. 北京:高等教育出版社,1988.

[15] 张学青,杨志峰,夏星辉. 黄河水体硝化过程的模拟实验研究[J].环境化学,2005,24(3):245 ~ 249.

[16] Simkins S, Alexander M. Models for mineralization kinetics with the variables of substrate concentration and population[J]. Appl Environ Microbiol, 1984, 47: 1299 ~ 1306.