

感潮河流沉积物中溶解氧对硝化细菌垂向分布的影响*

杨旭楠, 林兴锐, 符诗雨, 吴群河, 张仁铎
(中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275)

摘要: 该文以污染严重的珠江广州河段为研究对象, 分析了感潮河段沉积物中的理化性质(机械组成、碳氮、溶解氧)和硝化细菌数量的垂向分布, 并利用当地菌种, 设计溶解氧浓度梯度培养硝化细菌, 探讨溶解氧对硝化细菌的影响。结果表明, 沉积物中的溶解氧在0~10 cm间由0.26 mg/L降低到0.02 mg/L, 这主要与粉砂为主的机械组成和底栖动物的活动有关; 沉积物中的硝化细菌主要受溶解氧浓度的影响, 室内培养与野外实验结果对照显示, 沉积物中的硝化细菌在低溶解氧条件下处于抑制状态, 并导致氨氮的积累; 在溶解氧浓度低于0.03 mg/L时氨氧化细菌的数量比亚硝酸氧化细菌高。

关键词: 沉积物; 溶解氧; 硝化细菌; 垂向分布

中图分类号: X14 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2013)05-0091-06

Effect of Dissolved Oxygen on the Vertical Distribution of Nitrifying Bacteria in Tidal River Sediment

YANG Xunan, LIN Xingrui, FU Shiyu, WU Qunhe, ZHANG Renduo

(School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The aim of this study was to investigate the effect of dissolved oxygen (DO) on nitrifying bacterial abundance and vertical distribution in sediment of Pearl River (Guangzhou section). Vertical distributions of sediment physical-chemical properties (grain size distribution, concentrations of total organic carbon, total nitrogen, nitrate, ammonium, DO) and nitrifying bacteria abundance were characterized using sediment cores. The experiments were conducted to cultivate bacteria using local bacteria and different DO concentrations. The results showed that DO concentrations decreased from 0.26 to 0.02 mg · L⁻¹ within sediment depths of 0 to 10 cm, which was attributable to the sandy sediment and perturbation of benthic macrofauna. The nitrifying bacteria were inhibited by low DO condition, resulting in ammonium accumulation in subsurface sediment. With DO < 0.03 mg · L⁻¹, the abundance of ammonia oxidizing bacteria was greater than that of nitrite oxidizing bacteria.

Key words: sediment; DO; nitrifying bacteria; vertical distribution

沉积物是水体的重要组成部分, 在河水-沉积物系统中, 沉积物是各种污染物的库和源, 在一定条件下污染物可以从沉积物中释放, 形成次生污染^[1]。特别是在感潮河段, 特殊的水动力条件使水团趋于停滞, 相对于在上游河段, 污染物更容易

在此沉积汇集, 如营养盐的存留使富营养化污染事件频发^[2]。氮是水体富营养化的限制因子之一, 主要通过硝化-反硝化过程从水中去除^[3]。其中硝化反应是转化氨化反应产生的氨氮及提供反硝化基质(硝氮)的关键环节^[4]。硝化反应是一个由

* 收稿日期: 2013-05-26

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2009ZX07211-002-01); 国家自然科学基金资助项目(51039007, 51179212)

作者简介: 杨旭楠(1986年生), 男; 研究方向: 水环境化学等; 通讯作者: 吴群河; E-mail: eeswqh@mail.sysu.edu.cn

硝化细菌促成的好氧过程, 沉积物的溶解氧 (DO) 浓度直接影响到硝化细菌的丰度及其中氨氧化细菌 (AOB) 和亚硝酸盐氧化细菌 (NOB) 的比例, 进而影响氮在沉积物中的存在形态和消除率。

珠江广州河段位于珠江经济发达区, 多年来工业发展和密集的人口使水体承受严重的污染, 同时又是感潮河段, 沉积物中的氨氮比其他水系的高^[5]。然而目前对高氨氮污染条件下的河流生态系统的氨去除细菌了解很少^[6], 特别是沉积物硝化细菌的垂向分布及其受 DO 浓度的影响。因此, 本研究以珠江广州河段沉积物为研究对象, 探索沉积物中 DO 浓度对硝化细菌的数量及其中 AOB 与 NOB 的比例的影响。

1 材料与方法

1.1 采样

考虑到珠江广州河段的水文水质特点, 本研究在有丰富陆源污染汇入的二沙岛河道采样。具体采样地点 (113°17'1.66"E, 23°6'50.41"N) 为二沙岛第二码头湾, 曾经设有排污口, 沉积物碳氮含量丰富^[5], 距左岸 100 m, 河宽 135 m, 水深 2.2 m。水面活动不影响沉积物采样。

实验全程实行无菌操作。采用自制改良柱状采样器在采样点采集 6 柱沉积物样 (直径 7 cm, 长约 50 cm), 采样后一部份 (3 柱) 立即用溶氧仪 (SensiON 6 Portable DO Meter, HACH) 测量其垂直方向上的 DO 浓度, 另一部分 (3 柱) 密封, 并立刻置于低温 (4 °C) 保存, 运回实验室。

1.2 指标分析

1.2.1 理化性质的测定 对沉积柱进行切割, 1.2 cm 为一层, 取其中 4 层进行下一步操作。4 层分别为: 0.6 (0 ~ 1.2 cm); 3.0 (2.4 ~ 3.6 cm); 6.6 (6.0 ~ 7.2 cm); 10.2 (9.6 ~ 10.8 cm)。切割时所用的工具与容器预先进行灭菌处理。所采沉积物样一部分立刻置于低温 (4 °C) 保存, 用于氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、亚硝氮 ($\text{NO}_2^- - \text{N}$)、硝氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) 以及泥样细菌数量的测定。另一部分在室温下风干, 剔除砾石及动植物残体等外来侵入物, 用木棍将自然风干的泥样研磨过 10 目、20 目, 再用四分法取样, 用研钵研磨, 过 100 目筛, 用于测定 pH、总有机碳 (TOC)、总氮 (TN)^[7]。沉积物中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 通过 KCl 浸提, 并分别采用纳氏试剂比色法、萘乙二胺分光光度法、紫外分光光度法测定^[8]。

1.2.2 硝化细菌数量的测定 对沉积柱进行切割,

分 7 层。7 层分别为: 0 cm (水土界面); 1 (0.5 ~ 1.5 cm); 2 (1.5 ~ 2.5 cm); 3 (2.5 ~ 3.5 cm); 5 (3.5 ~ 6.5 cm); 8 (6.5 ~ 9.5 cm); 10 (9.5 ~ 10.5 cm)。用 MPN 法^[9]测定 AOB 和 NOB 的数量。

1.2.3 DO 梯度实验 称取原底泥柱表层泥样 1 g (含水率 54%), 加入到装有 99 mL、pH = 7.2 磷酸缓冲液的 150 mL 烧杯中, 用超声波发生器 (频率为 200 Hz) 超声振荡 1 min, 以分散包埋在菌胶团中的细菌。用 pH = 7.2 磷酸缓冲液作逐级稀释, 从 10^{-3} 稀释到 10^{-7} 。将上述不同稀释度的样品液各 10 mL, 分别接种于含 100 mL 经修改的 Buhospagckud 培养基 (硝化细菌培养基) 的锥形瓶中, 每一稀释度重复接种 5 瓶。按 DO 浓度分为 5 组, 0 ~ 1, 1 ~ 2, 2 ~ 4, 4 ~ 6, 6 ~ 8 mg/L, 每组 5 个上述重复。28 °C 培养 14 d。每 12 h 用溶氧仪测量 DO, 通入 N_2 以维持其 DO 浓度在确定范围内, 并用保鲜膜封住锥形瓶口以减慢 DO 的恢复。14 d 后, 用 MPN 法^[9]测算锥形瓶中硝化细菌的总数、氨氧化细菌和亚硝化氧化细菌数。

2 结果

2.1 沉积物的理化性质的垂向分布

上覆水和沉积物 (表层 10 cm) 中的 DO 分布如图 1, 其中沉积物深度指水土界面以下的尺度。DO 随上覆水、沉积物深度逐渐下降。在上覆水中 (3 ~ 0 cm) DO 由 0.36 下降到 0.26 mg/L。在沉积物中 DO 下降由快到慢, 表层下降最快由 0 cm 处 (水土界面) 的 0.26 mg/L 到 1 cm 的 0.08 mg/L; 然后随深度加深 DO 递减率逐渐下降, 到达 10 cm 处已下降到 0.02 mg/L 趋于稳定。表层沉积物的 DO 浓度范围在 0.02 mg/L 到 0.23 mg/L。

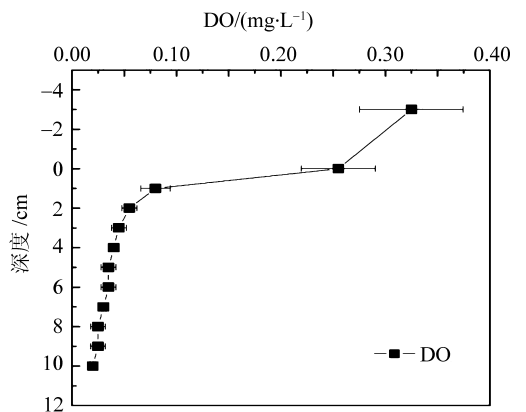


图 1 沉积物中溶解氧的垂向分布

Fig. 1 Vertical distribution of dissolved oxygen in sediment

pH 值则随深度变化不大，从上覆水 (3 ~ 0 cm) 的 7.11 轻微下降到 10 cm 的 6.99。

如图 2 所示，沉积物以粉砂 (0.002 ~ 0.2 mm) 为主，占 67.4% ~ 74.6%。最表层 (0 ~ 1.2 cm) 的黏粒 (<0.002 mm) 较多，为 32.6%，下面各层差异不大 (25.4% ~ 26.9%)。

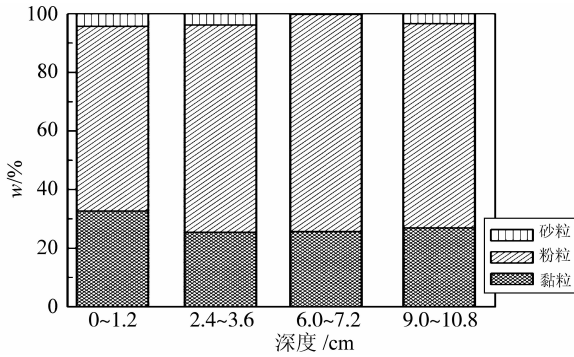


图 2 沉积物的机械组成

Fig. 2 Grain size distribution of sediment core

图 3 呈现了沉积物中 TOC、TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的垂向分布。可见 TOC 与 TN 随深度的分布相似，有较高的相关性 ($R = 0.936$, $\text{Sig.} = 0.064$)。碳氮比的范围则在 8.8 ~ 1.0 之间。沉积物中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度远高于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度，且分布规律存在差异。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在沉积物最上层的浓度较低，到次表层 (2.4 ~ 3.6 cm) 则明显增高，然后随深度轻微增加；相比之下 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的垂向变化不大 (0.22 ~ 0.35 mg/kg)。 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 在本沉积物中低于检出限。

2.2 硝化细菌的垂向分布

硝化细菌分为 AOB 和 NOB，其垂向分布如图 4。AOB：在 0 cm 处为次峰值 9.8×10^4 MPN/g；1 ~ 5 cm 下降到较低数量；在 8 cm 时明显增高达到峰值；总的数量范围为 $0.8 \times 10^4 \sim 33.6 \times 10^4$ MPN/g。NOB：在 0 cm 处出现峰值 65.2×10^4 MPN/g；1 cm 后下降到较低数量 $1.8 \times 10^4 \sim 8.8 \times 10^4$ MPN/g；在 2 ~ 5 cm 中数量均比 NOB 高，但到 8 cm AOB 数量显著增加时，NOB 数量没有显著变化。

2.3 DO 梯度硝化细菌培养实验

AOB 和 NOB 的数量与 DO 的关系如图 5。当 DO 在 0 ~ 2 mg/L 的范围内，AOB 和 NOB 的数量均较少，其中当 $\text{DO} < 1$ mg/L 时，AOB 的数量为 NOB 的 8 倍，而 $\text{DO} > 1$ mg/L 时，则是 NOB 多于 AOB。DO 在 2 ~ 6 mg/L 范围内，AOB 和 NOB 的数

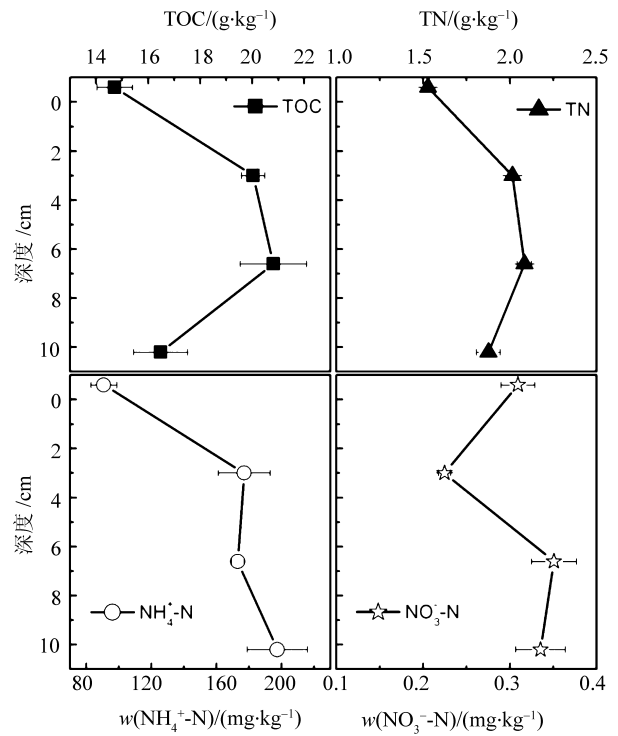


图 3 沉积物中 TOC、TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的垂向分布

Fig. 3 Vertical distributions of TOC, TN, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ in sediment core

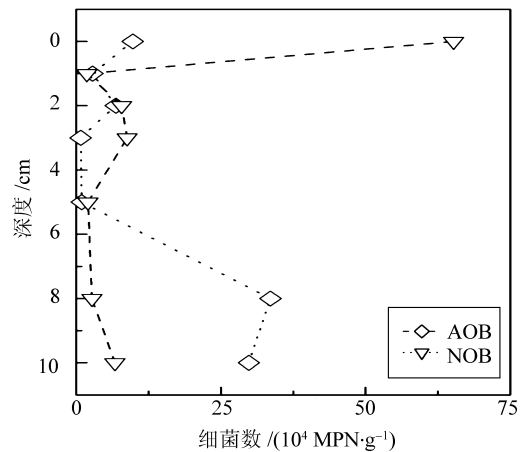


图 4 沉积物中氨氧化细菌与亚硝酸盐氧化细菌的垂向分布

Fig. 4 Vertical distributions of ammonia oxidizing bacteria and nitrite oxidizing bacteria in sediment core

量都达到培养的最大值，其中 NOB 明显占优势，为 AOB 的 14 倍。当 DO 值为 6 ~ 8 mg/L 时，AOB 与 NOB 的数量相当，且都有所下降。总体来说，NOB 在 DO 小于 3 mg/L 时，受 DO 的影响比 AOB 更大。

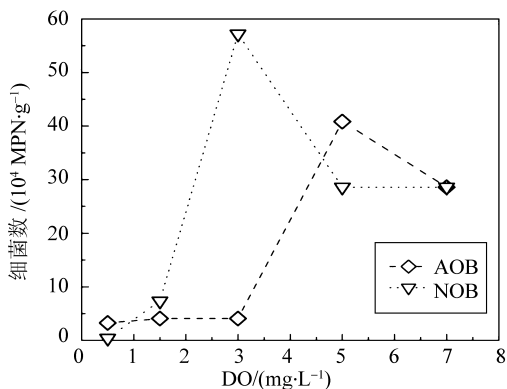


图 5 溶解氧梯度下硝化细菌的数量

Fig. 5 Abundance of nitrifying bacteria under various dissolved oxygen concentration gradient

3 讨论

一般而言, DO 浓度在沉积物 5 cm 深时已降为零^[10], 然而本研究点在垂向深达 10 cm 仍然有 DO 的存在 (图 1)。其主要原因与沉积物的机械组成和水体底栖动物的活动有关。Haußels 等^[11] 在英国 Severn 河口的研究表明, DO 可通过砂质沉积物的多孔结构向下输送。而本文的沉积物表层 (0 ~ 10 cm) 以粉砂为主 (图 2), 粉砂的粒径较大 (0.002 ~ 0.2 mm), 有利于 DO 的垂向平流输送。另外, Satoh 等^[12] 的研究发现底层水生动物的洞穴在沉积物氧传导中起重要作用。本文沉积物中即栖息了大量颤蚓^[13], 其活动深度可达 15 cm, 其洞穴的存在可使水中 DO 直接接触较深层的沉积物。如此, DO 的垂向传输, 为硝化细菌的生存提供了条件。如图 3 可见除水-沉积物交界层有大量的硝化细菌外, 在 8 cm 深度也出现了 AOB 的数量峰。Satoh 等^[12] 发现大型底栖动物洞穴壁上的 AOB 数量可与沉积物表层相比。Dollhopf^[14] 认为潜在硝化速率与大型底栖动物的丰度及活性有强烈的正相关。

DO 的梯度对硝化细菌有着显著的影响^[15]。由图 5 可见, 在低 DO 情况下 (其他条件相同), AOB 和 NOB 都处于抑制状态, 未能达到生长顶峰。由此可知硝化细菌在沉积物和在水层 (DO 较沉积物高) 中有着不一样的活性。在类似于沉积物环境的低 DO 条件下 (0 ~ 1 mg/L), AOB 比 NOB 呈现出更高的丰度。其原因是 AOB 的氧饱和常数 ($K_N = 0.04 \sim 0.48$ mg/L) 小于 NOB 的氧饱和常数 ($K_N = 0.7 \sim 5.3$ mg/L)^[16]。当系统处于低 DO 浓度中, 低 DO 对 NOB 的抑制更加明显, DO

与 NOB 的垂向分布显著相关 ($R = 0.958$, $\text{Sig.} < 0.001$)。傅金祥等^[17] 也做过相类似的控制实验, 其结果显示低 DO 浓度 (0.84 mg/L) 会促使 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 降解仍然符合一级反应规律, DO 的降低没有影响 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除; 表明降低 DO 刺激了 AOB 的活性, 与本文研究的结果相同; 并认为控制在低 DO 条件下有利于实现短程硝化反硝化脱氮。Laanbroek 等^[18] 的研究做出了同样的结果, 当控制培养在低氧水平时, *Nitrosomonas europaea* (AOB) 比 *Nitrobacter winogradskyi* (NOB) 表现出更高氧亲和力, 同时数量也更多。

在实际沉积物环境中同样存在着相似的规律, 从图 6 可见, DO 接近为零时, AOB 的数量多于 NOB 的数量。自然和人工生态系统中, 硝化细菌直接受到氧含量的限制, 所以硝化细菌各种群必然会为氧而相互竞争^[19], 由此可知, AOB 和 NOB 有不同的适应 DO 浓度, 当 DO 浓度高于 0.03 mg/L 时更有利于 NOB 的生长; 与此相反当 DO 氧含量低于 0.03 mg/L 时则更有利于 AOB 的生长。Itokawa 等^[20] 研究表明, 低 DO 下, AOB 增殖速率加快, 补偿了由于缺氧造成的代谢活动下降, 使得整个硝化阶段中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 氧化未受到明显抑制。Bollmann 和 Laanbroek^[21] 研究进一步表明在缺氧状态下, 亚硝酸大量积累是由于 AOB 对 DO 的亲和力较 NOB 强。

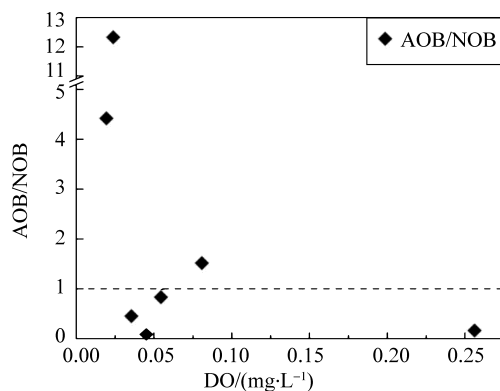


图 6 各溶解氧浓度下氨氧化细菌与亚硝酸盐氧化菌的数量比

Fig. 6 Ratios of ammonia oxidizing bacteria and nitrite oxidizing bacteria abundance under various dissolved oxygen concentration

然而, 自然环境中除了受 DO 影响同时也会受到其他环境因子的影响, 如温度、盐度、pH、基质浓度、有机碳活性及碳氮比等^[22-23]。由图 3 可

见本沉积物的 TOC 和 TN 有较高的相关性以及有较高的碳氮比, 可见外源污染严重^[24]。在水土界面由于有较高的 DO, 好氧细菌活跃, 污染物容易被降解去除, 此层污染物累积不高。但在 1~5 cm 沉积物中, DO 成为限制因子, 但丰富的营养致使异养细菌活跃, 而硝化细菌属自养细菌, 故在沉积物层对营养和 DO 的竞争处于劣势, 数量比表层低。随着深度的增加, DO 浓度继续下降, 能耐受厌氧环境的 AOB 在竞争中体现优势, 数量渐增。另外, 由于硝化反应是酶促反应, 其反应活性直接受到底物有效性的影响^[20], 而 pH 则通过影响 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的有效性来影响硝化反应活性^[25]。虽然本沉积物随深度 pH 轻微下降, 但 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度较高, 也促使了 AOB 的增殖。尽管如此, AOB 仍处于抑制状态, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 累积, 造成沉积物亚表层的高氨污染现象。此外, 在深度 8~10 cm 沉积物中, NOB 的数量并未如 AOB 相应增长, 这与 NOB 氧亲和性低有关; 然而, 此处 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 低于检出限, 推测在较深层的氮去除可能与短程硝化反硝化有关, 有待进一步研究。本研究的结果提示, 提高沉积物多孔性有利于 DO 垂向输送, 从而提高 AOB 的优势, 提高氨氮的去除; 高氨氮沉积物中可能存在短程反硝化功能菌群, 是工程菌的潜在来源。

4 结 论

1) DO 浓度在沉积物中随深度降低, 达 10 cm 处仍有 0.02 mg/L, 主要与沉积物的机械组成和底栖动物的活动有关; 此深度仍有硝化细菌存在。

2) 硝化细菌的垂向分布主要受 DO 影响, 其中 NOB 与 DO 的垂向分布显著相关; AOB 比 NOB 的氧亲和性高, 在深处低 DO 条件下 AOB 的数量比 NOB 大。

3) 在沉积物的低 DO 条件下, 硝化细菌处于抑制状态, 硝化作用受限制, 致使沉积物亚表层 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的累积。

4) 在较深层沉积物中, 虽然 AOB 数量比 NOB 大, 但 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 并未累积。

参考文献:

- [1] 牛红义, 吴群河, 陈新庚. 珠江(广州河段)表层沉积物中营养物质的分布特征及肥力评价[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(4): 348-351.
- [2] HUANG X P, HUANG L M, YUE W Z. The characteristics of nutrients and eutrophication in the Pearl River estuary, South China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2003, 47(1/2/3/4/5/6): 30-36.
- [3] JENKINS M C, KEMP W M. The coupling of nitrification and denitrification in two estuarine sediments [J]. Limnology and Oceanography, 1984, 29(3): 609-619.
- [4] VEJMEJKOVA D, SOROKIN D Y, ABBAS B, et al. Analysis of ammonia-oxidizing bacteria dominating in lab-scale bioreactors with high ammonium bicarbonate loading [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2012, 93(1): 401-410.
- [5] YANG X, HUANG S, WU Q, et al. Nitrate reduction coupled with microbial oxidation of sulfide in river sediment [J]. Journal of Soils and Sediments, 2012, 12(9): 1435-1444.
- [6] 王超, 单保庆. 子牙河水系水和沉积物好氧氨氧化微生物分布特征[J]. 环境科学学报, 2012, 32(12): 2943-2950.
- [7] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [8] 王圣瑞, 金相灿, 焦立新. 不同污染程度湖泊沉积物中不同粒径可转化态氮分布[J]. 环境科学研究, 2007, 20(3): 52-57.
- [9] 李振高, 骆永明, 滕应. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [10] ALTMANN D, STIEF P, AMANN R, et al. In situ distribution and activity of nitrifying bacteria in freshwater sediment [J]. Environmental Microbiology, 2003, 5(9): 798-803.
- [11] HAUBELS R, KLENKE T, KROPP J, et al. Investigations on the influence of pore-space geometry on concentration patterns and transportation properties of dissolved oxygen in a bioactive sandy sediment by a lattice Boltzmann automaton model [J]. Hydrological Processes, 2001, 15(1): 81-96.
- [12] SATOH H, NAKAMURA Y, OKABE S. Influences of infaunal burrows on the community structure and activity of ammonia-oxidizing bacteria in intertidal sediments [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2007, 73(4): 1341-1348.
- [13] 蒋万祥, 赖子尼, 彭松耀, 等. 珠江广州段底栖动物群落结构初步研究[J]. 中国环境监测, 2011, 27(5): 69-72.
- [14] DOLLHOFF, S L, HYUN J H, SMITH A C, et al. Quantification of ammonia-oxidizing bacteria and factors controlling nitrification in salt marsh sediments [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, 71(1): 240-246.
- [15] BELLUCCI M, OFITERU I D, GRAHAM D W, et al. Low-dissolved-oxygen nitrifying systems exploit ammonia-oxidizing bacteria with unusually high yields [J].

- Applied and Environmental Microbiology, 2011, 77 (21): 7787 - 7796.
- [16] BLACKBURNE R, YUAN Z, KELLER J. Partial nitrification to nitrite using low dissolved oxygen concentration as the main selection factor [J]. Biodegradation, 2008, 19(2): 303 - 312.
- [17] 傅金祥, 韩晋英, 齐建华, 等. 常温下低 DO 和高 pH 短程硝化过程研究[J]. 水处理技术, 2008, 34(12): 19 - 23.
- [18] LAANBROEK H J, GERARDS S. Competition for limiting amounts of oxygen between *Nitrosomonas europaea* and *Nitrobacter winogradskyi* grown in mixed continuous cultures [J]. Archives of Microbiology, 1993, 159 (5): 453 - 459.
- [19] SLIEKERS A O, HAAIJER S C M, STAFSNES M H, et al. Competition and coexistence of aerobic ammonium and nitrite-oxidizing bacteria at low oxygen concentrations [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2005, 68(6): 808 - 817.
- [20] ITOKAWA H, HANAKI K, MATSUO T. Nitrous oxide production in high-loading biological nitrogen removal process under low COD/N ratio condition [J]. Water Research, 2001, 35(3): 657 - 664.
- [21] BOLLMANN A, LAANBROEK H J. Influence of oxygen partial pressure and salinity on the community composition of ammonia-oxidizing bacteria in the Schelde estuary [J]. Aquatic Microbial Ecology, 2002, 28(3): 239 - 247.
- [22] KIM J H, GUO X, PARK H S. Comparison study of the effects of temperature and free ammonia concentration on nitrification and nitrite accumulation [J]. Process Biochemistry, 2008, 43(2): 154 - 160.
- [23] 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.
- [24] SAMPEI Y, MATSUMOTO E. C/N ratios in a sediment core from Nakaumi Lagoon, southwest Japan-usefulness as an organic indicator [J]. Geochemical Journal, 2001, 35(3): 189 - 205.
- [25] ISNANSETYO A, THIEN N D, SEGUCHI M, et al. Nitrification potential of mud sediment of the Ariake Sea tidal flat and the individual effect of temperature, pH, salinity and ammonium concentration on its nitrification rate [J]. Research Journal of Environmental and Earth Sciences, 2011, 3(5): 587 - 599.

~~~~~  
(上接第 90 页)

- [6] KARBAUSKAITĖ R, KURASOVA O, DZEMYDA G. Selection of the number of neighbors of each data point for the locally linear embedding algorithm [J]. Information Technology and Control, 2007, 36: 359 - 364.
- [7] VALENCIA-AGUIRRE J, ÁLVAREZ-MESA A, DAZA-SANTACOLOMA G. Automatic choice of the number of nearest neighbors in locally linear embedding [C]// CIARP, 2009: 77 - 84.
- [8] WEN G, JIANG L, WEN J, et al. Performing locally linear embedding with adaptable neighborhood size on manifold [C]// 9th Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence, Springer Verlag, 2006: 985 - 989.
- [9] WU S, QUAN X W, CHEN X C. CN-isomap algorithm for nonlinear dimensionality reduction of sparse data [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2010, 17(40): 182 - 188.
- [10] SONG X, YE S W. Data dimensionality reduction algorithm when source data is sparse [J]. Computer Engineering and Application, 2007, 43(28): 181 - 183.
- [11] ZHAN D C, ZHOU Z H. Neighbor line-based locally linear embedding [J]. PAKDD, Springer Verlag, 2006: 806 - 815.
- [12] SANDWELL D T. Biharmonic spline interpolation of GEOS-3 and SEASAT altimeter data [J]. Geophysical Research Letters, 1987, 2: 139 - 142.
- [13] ZHANG T H, TAO D C, LI X L. A unifying framework for spectral analysis based dimensionality reduction [C]// International Joint Conference Neural Networks, 2008: 1670 - 1677.
- [14] WANG Y T, DONG L F, NI K. Image morphing algorithm based on Biharmonic spline interpolation and its implementation [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(12): 2189 - 2194.