

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第7期

Vol.33 No.7

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

三峡库首秭归地区大气降水硫同位素组成及示踪研究	吴起鑫, 韩贵琳	(2145)
成都春季生物质燃烧和沙尘期间气溶胶散射特征及其重建	岳建华, 陶俊, 林泽健, 朱李华, 曹军骥, 罗磊	(2151)
太湖上空大气气溶胶光学厚度及其特征分析	饶加旺, 马荣华, 段洪涛, 姜广甲, 尚琳琳, 周琳	(2158)
环上海地区干霾气溶胶垂直分布的季节变化特征	徐婷婷, 秦艳, 耿福海, 陈勇航, 张华, 刘琼, 马晓骏	(2165)
南京冬季市区和郊区气溶胶中 PAHs 浓度的昼夜特征及粒径分布	张红亮, 樊曙先, 顾凯华, 朱彬, 范洋, 祖繁, 李红双, 孟庆紫, 何佳宝	(2172)
青岛大气气溶胶水溶性无机离子研究: 季节分布特征	刘臻, 祁建华, 王琳, 陈晓静, 石金辉, 高会旺	(2180)
城市污水处理厂生成的微生物气溶胶的污染特性	邱雄辉, 李彦鹏, 牛铁军, 李美玲, 马智慧, 苗莹, 王湘君	(2191)
基于 WEPS 模型的天津郊区土壤风蚀起尘及对中心城区迁移量估算	陈莉, 韩婷婷, 李涛, 姬亚芹, 白志鹏, 王斌	(2197)
浒苔绿潮与苏北近岸海域营养盐浓度的关系研究	高嵩, 石晓勇, 王婷	(2204)
福建沿海近 10 a 赤潮基本特征分析	李雪丁	(2210)
HSPF 水文水质模型应用研究综述	李兆富, 刘红玉, 李燕	(2217)
城市降雨径流模拟的参数不确定性分析	黄金良, 林杰, 杜鹏飞	(2224)
利用 CDOM 吸收系数估算太湖水体表层 DOC 浓度	姜广甲, 马荣华, 段洪涛	(2235)
嘉善地区水环境敏感点水质影响权重分析及风险等级判定	谢蓉蓉, 逢勇, 张倩, 陈可, 孙明园	(2244)
重庆市盘溪河水质不同季节日变化规律及水质评价	张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强, 张烨	(2251)
南京市湿地水质对城市化影响强度的响应研究	郝敬锋, 刘红玉, 胡和兵, 安静, 张小红	(2259)
宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究	邱小琮, 赵红雪, 孙晓雪	(2265)
影响太子河流域鱼类空间分布的不同尺度环境因子分析	丁森, 张远, 渠晓东, 孔维静, 刘思思, 孟伟	(2272)
大型底栖动物生物评价指数比较与应用	耿世伟, 渠晓东, 张远, 林坤德	(2281)
青藏高原纳木错流域水体总汞的时空分布特征	王康, 康世昌, 郭军明, 张强弓, 黄杰, 郭伟	(2288)
青藏高原纳木错湖水主要化学离子的时空变化特征	郭军明, 康世昌, 张强弓, 黄杰, 王康	(2295)
用物理-生态集成技术局部控制富营养化	李秋华, 夏品华, 吴红, 林陶, 张友春, 李存雄, 陈丽丽, 杨帆	(2303)
太湖氮素出入湖通量与自净能力研究	陈小锋, 揣小明, 曾巾, 刘涛, 杨柳燕	(2309)
富营养湖泊沉积物中磷组分对硫酸盐的响应	袁探, 华玉妹, 朱端卫, 赵建伟, 蔡建波	(2315)
巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究	温胜芳, 单保庆, 张洪	(2322)
南京地区典型有机污染物长距离输送潜力研究	方利江, 吴有方, 丁中原, 马子龙, 柳敏, 高宏	(2330)
东海内陆架沉积物中黑碳分布及其与持久性有机污染物的相关性研究	林田, 方引, 陈颖军, 胡利民, 郭志刚, 张干	(2335)
嘉陵江重庆段表层水体多环芳烃的污染特征	蔡文良, 罗固源, 许晓毅, 杜炯	(2341)
电子废物拆解区河流沉积物中多氯联苯的污染水平、分布及来源	王学彤, 李元成, 缪绎, 张媛, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟	(2347)
基于梯形模糊数的沉积物重金属污染风险评价模型与实例研究	李飞, 黄瑾辉, 曾光明, 唐晓娇, 白兵, 蔡青, 祝慧娜, 梁婕	(2352)
渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响	秦延文, 郑丙辉, 李小宝, 张雷, 时瑶, 曹伟	(2359)
崇明东滩表层沉积物重金属空间分布特征及其污染评价	李雅娟, 杨世伦, 侯立军, 周菊珍, 刘英文	(2368)
白洋淀底泥重金属形态及竖向分布	李必才, 何连生, 杨敏, 孟睿, 袁冬海, 席北斗, 舒俭民	(2376)
西南涌酸挥发硫化物浓度水平及影响因素研究	刘晓冰, 温琰茂, 利锋, 吴昌华, 段志鹏	(2384)
氨氮在饮用水生物滤池内的去除机制	刘冰, 范辉, 余国忠, 于鑫, 赵承美, 李清飞, 张舒婷, 魏博	(2394)
Cu(II) 印迹壳聚糖交联膜的表征及其吸附热力学特性	张玉红, 张爱丽, 周集体, 孙筱雨	(2403)
声电氧化处理扑热息痛的研究	戴启洲, 马文姣, 沈宏, 陈浚, 陈建孟	(2410)
粉煤灰吸附-Fenton 及热再生处理亚甲基蓝废水的特性研究	白玉洁, 张爱丽, 周集体	(2419)
利用双室微生物燃料电池处理模拟废水的产电特性研究	张永娟, 李永峰, 刘春研, 王艺璇, 李龙, 王籽人, 董义兴	(2427)
Zn/Cr 型阴离子黏土的制备、表征及其对活性艳橙 X-GN 的去除性能研究	王小蓉, 吴平霄	(2432)
核电站低放射性废水在封闭水体中的输移规律研究	武国正, 徐宗学	(2438)
A + OSA 污泥减量工艺碳元素平衡与减量机制研究	翟小敏, 高旭, 张曼曼, 贾丽, 郭劲松	(2444)
系列混合碳源在 EBPR 系统颗粒化进程中的影响研究	蒋涛, 孙培德, 徐少娟	(2451)
氧化还原介体催化强化 <i>Paracoccus versutus</i> 菌株 GW1 反硝化特性研究	李海波, 廉静, 郭延凯, 赵丽君, 杜海峰, 杨景亮, 郭建博	(2458)
1 株转座子插入突变菌株 TB34 的筛选及产氢分析	刘洪艳, 王广策, 侍浏洋, 朱大玲	(2464)
蜜环菌漆酶对氯酚类污染物催化降解条件优化	秦仁炳, 朱显峰, 吴珂, 张晶晶, 赵海康	(2470)
双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及品种筛选研究	傅志强, 朱华武, 陈灿, 黄瑛	(2475)
闽江河口短叶茳苳湿地 CH ₄ 和 N ₂ O 排放对氮输入的短期响应	牟晓杰, 刘兴土, 仝川, 孙志高	(2482)
青海三江源地区退化草地土壤全氮的时空分异特征	彭景涛, 李国胜, 傅瓦利, 易湘生, 蓝家程, 袁波	(2490)
不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律	吴凤至, 史志华, 方怒放, 岳本江	(2497)
土壤性质对单一及复合污染下外源镉稳定化过程的影响	吴曼, 徐明岗, 张文菊, 武海雯	(2503)
多氯联苯污染农田土壤的原位生态调控修复效应	潘澄, 滕应, 骆永明, 涂晨, 李秀芬, 马婷婷, 张满云, 李振高, 宋静	(2510)
不同作物根系多环芳烃吸收特征差异的比较研究	梁宵, 占新华, 周立祥	(2516)
废气和废渣协同作用脱钠反应特性及机制研究	伊元荣, 韩敏芳	(2522)
中国第三产业能源碳排放影响要素指数分解及实证分析	卢愿清, 史军	(2528)
《环境科学》征稿简则 (2431)		
《环境科学》征订启事 (2532)		
信息 (2157, 2271, 2367, 2418)		

氨氮在饮用水生物滤池内的去除机制

刘冰^{1,2}, 范辉¹, 余国忠^{1*}, 于鑫², 赵承美¹, 李清飞¹, 张舒婷², 魏博²

(1. 信阳师范学院城市与环境科学学院, 信阳 464000; 2. 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361021)

摘要: 为探讨饮用水生物滤池对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除机制, 测定生物滤池进出水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、高锰酸盐指数、总磷、单质氮(N_2)、温度和溶解氧(dissolved oxygen, DO)等指标, 并采集生物滤池不同层高(0、10、20、40、60 cm)活性炭生物填料, 应用分子生物学技术, 对样品中的细菌种群进行研究. 结果表明, 根据进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分为3个阶段, 第一、二和三阶段都发生了“氮亏损”现象(出水无机氮之和小于进水无机氮之和), 氮亏损的量(出水无机氮之和与进水无机氮之和的差值)分别为0.94、0.32和0.15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 氮亏损的量与进水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度有很好的正相关性, 但与进水中高锰酸盐指数浓度没有线性关系. 第一阶段水中 N_2 的平均浓度随着生物滤池填料层高度呈上升趋势, 进水中 N_2 平均浓度是14.04 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水 N_2 平均浓度为14.67 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 测序结果显示活性炭上生物膜中氨氧化细菌(ammonia-oxidizing bacteria, AOB)全部归为3个常见属: *Nitrosococcus*、*Nitrosomonas*和*Nitrospira*. 当生物滤池进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度较高时, 生物滤池中发生的“氮亏损”现象是由AOB的作用.

关键词: 饮用水生物滤池; 氮亏损现象; 分子生物学; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除; 氮气

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)07-2394-09

Mechanism of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ Removal in Drinking Water Biofilter

LIU Bing^{1,2}, FAN Hui¹, YU Guo-zhong¹, YU Xin², ZHAO Cheng-mei¹, LI Qing-fei¹, ZHANG Shu-ting², WEI Bo²

(1. School of Urban and Environmental Science, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China; 2. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to explore the mechanism of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal in drinking water biofilter, water quality parameters, such as $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, total phosphorus, permanganate index, nitrogen gas, temperature and dissolved oxygen etc., were determined in the inflow and outflow of biofilter. Samples of granular activated carbon (GAC) at different height (0, 10, 20, 40, 60 cm) of the biofilter media were collected and analyzed for the bacterial community with molecular biology techniques. The bacterial diversity in the activated carbon biofilm sample was studied based on the phylogenetic analysis of sequences. The results showed that there were three stages according to the $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration in the influent. The “nitrogen loss” phenomenon (total inorganic nitrogen in the effluent was less than that in the influent) occurred at the first, second and third stages and the amount of nitrogen loss were 0.94, 0.32 and 0.15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The amount of nitrogen loss had a good positive correlation with the $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration in the influent, but not a linear relationship with the concentration of the permanganate index in the influent. The average concentrations of N_2 increased gradually with the height of media in the biofilter, with values of 14.04 and 14.67 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in the influent and the effluent, respectively. Based on the sequencing results, the ammonia-oxidizing bacteria (AOB) in the activated carbon biofilm were classified into three common genera: *Nitrosococcus*, *Nitrosomonas* and *Nitrospira*. When the $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration in the influent was relatively high, the “nitrogen loss” phenomenon in biofilter was caused by the AOB.

Key words: drinking water biofilter; nitrogen loss phenomenon; molecular biology; removal of $\text{NH}_4^+\text{-N}$; nitrogen gas

随着生活水平的提高, 人们对饮用水水质的要求也越来越高. 然而, 微污染原水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 可以引起饮用水味道等感官指标的下降^[1]. 另外, 如果 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 不能在出厂前被有效去除, 它还可能作为电子供体在管网中引发硝化细菌的二次生长, 形成生物膜, 造成饮用水微生物学安全性的下降^[2, 3], 影响人们正常的生活. 因此, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除已成为饮用水处理中的重要问题. 一般认为, 饮用水生物滤池对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除主要是通过生物膜中硝化细菌的硝化作用转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ^[4]. 但是, 1 mg $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 通过硝化作用转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 消耗 4.57 mg O_2 , 需要供应大

量氧气. 最近, 文献[5, 6]在生产规模、小试规模饮用水生物滤池中发现进水的“无机氮之和”比出水的“无机氮之和”高出 1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 生物滤池内发生了明显的“氮亏损”现象, 有一部分无机态氮通过非硝化作用的途径被去除.

收稿日期: 2011-09-20; 修订日期: 2011-12-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(50408026, 51078343); 信阳师范学院博士科研启动基金项目(91231); 省部共建黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室开放基金项目(GTYR2011006); 信阳师范学院青年骨干教师资助计划项目(120511); 河南省科技计划项目(122102310365)

作者简介: 刘冰(1979~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为饮用水处理原理与技术, E-mail: liubing_982002@163.com

* 通讯联系人, E-mail: ygz1966@163.com

近年来,南方某城市工业迅速发展,地表饮用水源受到严重污染, NH_4^+ -N和高锰酸盐指数超标严重.出厂水中的 NH_4^+ -N往往通过折点加氯的方法去除,在折点加氯的过程中就提高了液氯的使用量,过量液氯会与有机物发生加成和取代反应生成多种对人体有毒有害的卤代有机物,如三卤甲烷(trihalomethanes, THMs)、卤代乙酸(haloacetic acids, HAAs)等,从而导致致癌、致畸性、致突变“三致”消毒副产物水平的上升,以及饮用水遗传毒理学安全性的下降^[7, 8].因此,如果原水中部分 NH_4^+ -N可以通过非硝化途径去除,不但可以降低氧气的消耗量,而且供氧设备也可以相应的压缩.因此,本研究对南方某市饮用水厂的生物滤池进出水中无机氮的变化进行初步调查,探讨了 NH_4^+ -N在饮用水生物滤池中去除的机制,以期为更好地去除微污染原水中 NH_4^+ -N和控制管网中水质的稳定性提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究对象

研究对象为某地面水厂工艺流程中的活性炭-石英砂双层生物滤池,生物滤池的尺寸为600 cm × 220 cm × 350 cm,其中填料层高100 cm(活性炭层高70 cm,石英砂层高30 cm),承托层高30 cm.生物滤池运行时,填料表面上水深150 cm,不曝气,滤速为6.8 m·h⁻¹左右,工作周期为24 h,反冲洗时控制整个填料层膨胀率为20%~30%,反冲时间5~6 min.生物滤池为下向流.

1.2 测定方法

化学需氧量(高锰酸盐指数):高锰酸盐指数(酸法)^[9]; NH_4^+ -N:水杨酸-次氯酸盐光度法^[9]; NO_2^- -N:*N*-(1-萘基)-乙二胺光度法^[9]; NO_3^- -N:紫外分光光度法^[9]; 总磷:钼酸氨分光光度法^[9]; 溶解氧和温度:pH/DO HQ40 便携式溶解氧测定仪(Hach,美国).

1.3 水样中 N_2 测定

取不同填料层高的水样,缓慢地加入到长10 cm,直径1 cm的玻璃试管中;立即向玻璃试管中加入配制的 ZnCl_2 (50%)溶液1 mL,保证试管中没有气泡,用橡胶塞密封;送到中国科学院南京地理与湖泊研究所碳/氮循环实验室,使用溶解气体质谱仪测定.

1.4 分子生物学试验

1.4.1 生物填料的取样与保存

取饮用水生物滤池中不同层高填料(0、10、

20、40、60 cm)活性炭填料, -80℃冷冻保藏.

1.4.2 样品中DNA提取

取生物滤池不同层高5 g活性炭填料样品(每个层高活性炭生物填料做两个平行).分别加入裂解液5 mL和0.5 g脱脂牛奶,超声波(198 W)振荡开3 s停10 s,40次;放进液氮(-100℃)5 min,取出加热100℃溶解,反复3次;取1 mL裂解液加入到2 mL离心管,加4 μL Lys,水浴37℃,30 min;加入4 μL蛋白酶,振荡;55℃水浴30 min,间断振荡;加入170 μL NaCl,140 μL CTAB,34 μL SDS,振荡;65℃水浴10 min;1 300 r·min⁻¹ 4℃离心10 min;小心轻取上清液,放入新的2 mL离心管;加入同等体积酚:氯仿:异戊醇(25:24:1),小心倾斜加入离心管,轻轻摇晃几下,4℃离心10 min,吸取上清液加入新2 mL离心管(若沉淀多,重复上步骤);加入同体积氯仿:异戊醇(24:1)小心倾斜加入离心管,轻轻摇晃几下,4℃离心10 min;取上清液加入新管1.5 mL,加入0.6倍体积异丙醇,混匀, -20℃沉淀1 h,1 400 r·min⁻¹离心10 min;倒上清液,加75%乙醇洗涤,使沉淀悬浮;1 400 r·min⁻¹离心10 min,倒掉乙醇,开盖,挥发剩余乙醇;加40 μL TE溶解沉淀; -20℃保存.

1.4.3 PCR扩增

20 μL PCR反应体系如下: H_2O 14.65 μL, Buffer 2 μL, dNTP 1.2 μL, 引物1 0.5 μL, 引物2 0.5 μL, *Taq* 酶0.15 μL, DNA 1 μL(此过程在冰上操作,使用PCR管超净台中配制).扩增条件为95℃预变性5 min;接下来是95℃变性1 min,50℃退火30 s,72℃延伸50 s,35个循环;72℃延伸10 min,停止于8℃.

1.4.4 电泳

将抽提所得DNA溶液经过1.0%琼脂糖凝胶电泳,电泳具体操作如下:1 mL 6 × loading Buffer中加1.2 μL荧光染料,混合均匀;配1.0%琼脂糖凝胶;将2 μL PCR产物与1.5 μL loading Buffer混在一起,混匀于封口膜上;将混合液点入膜孔,将膜放入电泳槽;加60~80 V电压;PCR产物以DNA凝胶回收纯化试剂盒纯化.

1.4.5 测序结果

把PCR产物直接送到上海美季生物技术有限公司进行测序,测序仪为ABI3730.

2 结果与讨论

2.1 研究期间饮用水生物滤池进出水水质

2008-07-06~2008-12-15对饮用水生物滤池的

进水水质进行测定,并按照进水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分为3个阶段,如图1所示.第一阶段: $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和高锰酸盐指数平均浓度分别为 $4.39\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $6.57\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; DO 平均浓度和平均温度分别为 $7.14\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 28.7°C ;第二阶段: $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和高锰酸盐指

数平均浓度分别为 $2.68\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5.99\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; DO 平均浓度和平均温度分别为 $10.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 16.2°C ;第三阶段: $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和高锰酸盐指数平均浓度分别为 $1.65\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5.31\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; DO 平均浓度和平均温度分别为 $13.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 6.3°C .

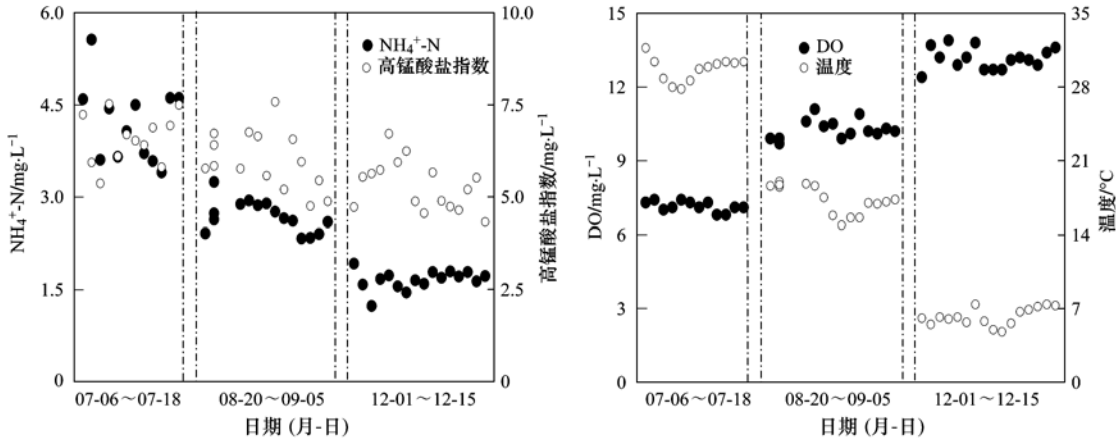


图1 进水水质

Fig. 1 Characteristics of the influent

2 研究期间生物滤池进出水中无机氮、高锰酸盐指数变化和“氮亏损”现象

从图2可以知道,进水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和高锰酸盐指数平均浓度分别为 4.39 、

0.366 、 1.36 和 $6.57\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和高锰酸盐指数平均浓度分别为 2.52 、 0.087 、 2.57 和 $5.89\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;进出水中无机氮之和平均浓度分别为 $6.11\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5.17\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均氮亏损的量为 $0.94\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

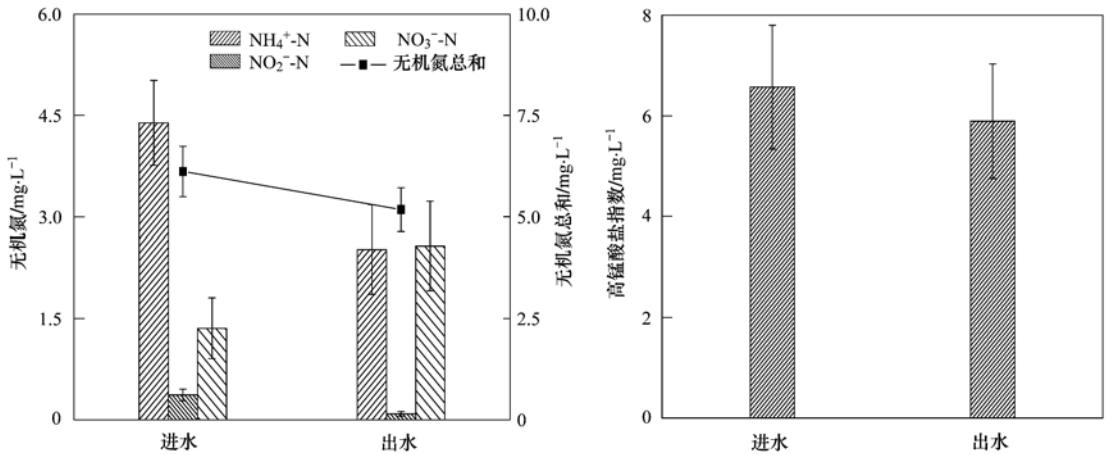


图2 第一阶段无机氮、高锰酸盐指数变化

Fig. 2 Variations of inorganic nitrogen and permanganate index at the first stage

从图3可以知道,进水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和高锰酸盐指数平均浓度分别为 2.68 、 0.341 、 1.63 和 $5.99\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和高锰酸盐指数平均浓度分别为 1.55 、 0.151 、 2.63 和 $5.28\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;进出水中无机氮之和平均浓度分别为 $4.65\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $4.33\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均氮亏损的量为 $0.32\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

从图4可以知道,进水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和高锰酸盐指数平均浓度分别为 1.65 、 0.21 、 3.25 和 $5.31\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和高锰酸盐指数平均浓度分别为 0.41 、 0.01 、 4.56 和 $4.69\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;进出水中无机氮之和平均浓度分别为 $5.12\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $4.97\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均氮亏损的量为 $0.15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

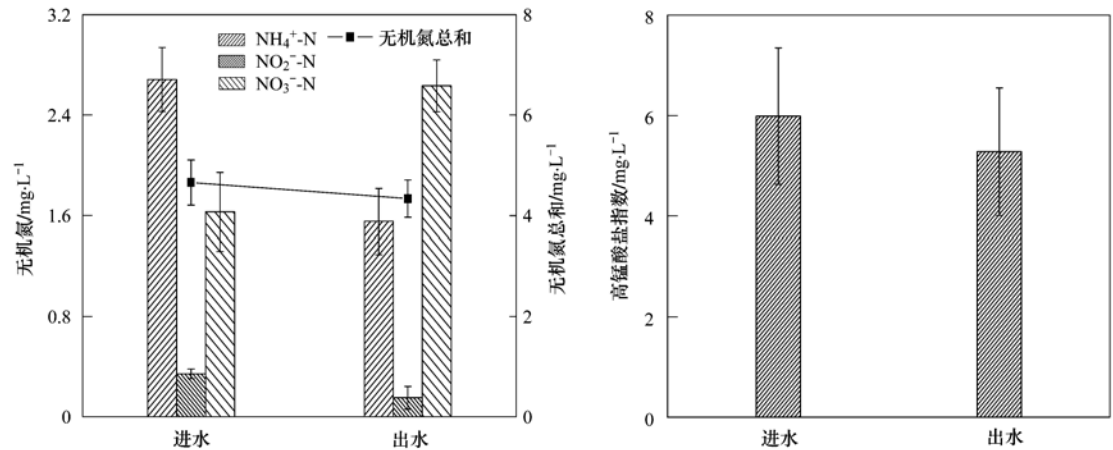


图3 第二阶段无机氮、高锰酸盐指数变化

Fig. 3 Variations of inorganic nitrogen and permanganate index at the second stage

2.3 进水NH₄⁺-N、高锰酸盐指数与氮亏损量的关系

如图5所示,进水中NH₄⁺-N浓度与氮亏损量具有较好的线形关系, $R^2 = 0.94$,说明进水中NH₄⁺-N浓度与氮亏损量具有正相关性,氮亏损的量随进水中NH₄⁺-N浓度增加而增加.进水中高锰酸盐指数浓

度与氮亏损量没有线性关系($R^2 = 0.30$),两者不具有正相关性,说明进水中高锰酸盐指数浓度对氮亏损的量没有影响.因此可以知道,氮亏损的量只与进水中NH₄⁺-N浓度有关.

2.4 生物滤池不同填料层高水中单质氮(N₂)浓度

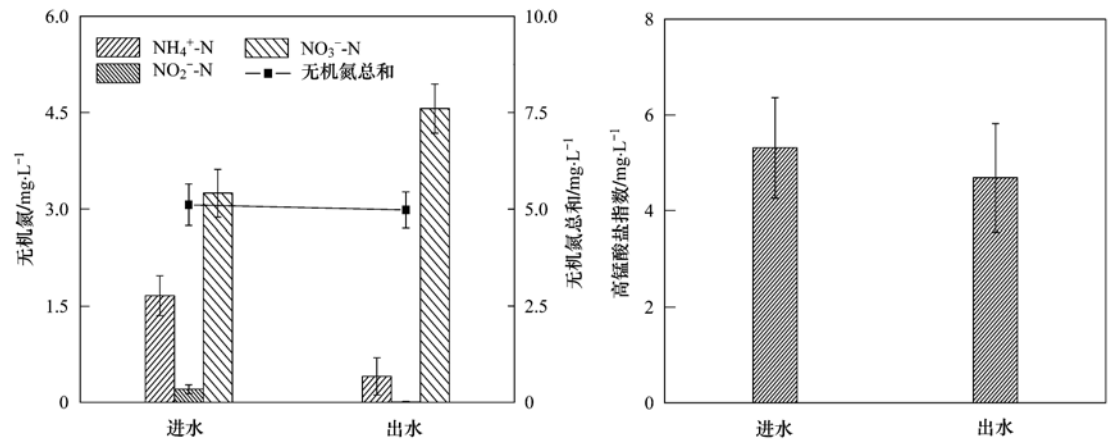


图4 第三阶段无机氮、高锰酸盐指数变化

Fig. 4 Variation of inorganic nitrogen and permanganate index at the third stage

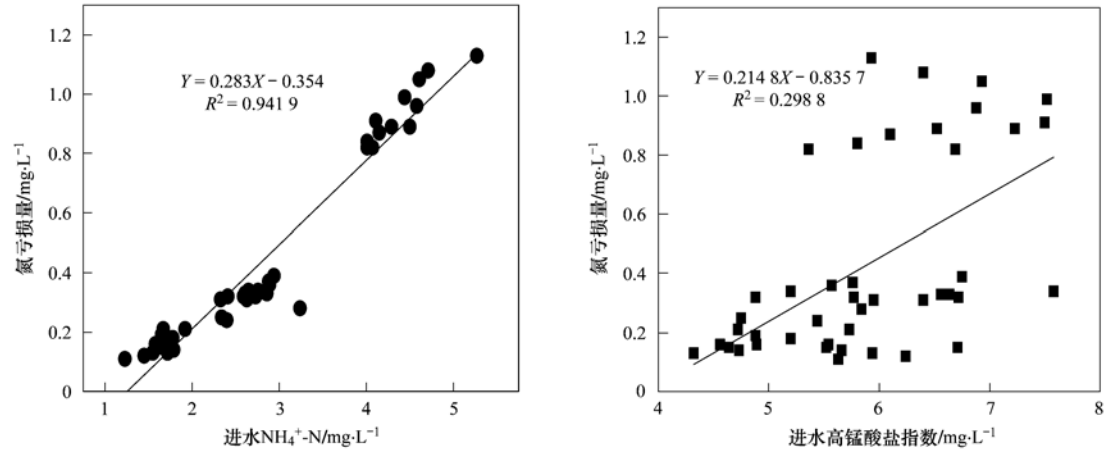


图5 进水NH₄⁺-N和高锰酸盐指数浓度与氮亏损量的关系

Fig. 5 Linear relationship of nitrogen loss and NH₄⁺-N, permanganate index

在第一阶段,水中 N_2 的平均浓度随着生物滤池填料层高的变化如图 6 所示. 从中可以看出, N_2 的平均浓度呈上升趋势, 进水中 N_2 平均浓度是 $14.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 N_2 平均浓度为 $14.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 特别在填料层前端 20 cm 的范围内 (0 ~ 20 cm) N_2 浓度的增加速度最快, 从 $14.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $14.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 这说明生物滤池中有 N_2 生成, 特别是在填料层 0 ~ 20 cm, N_2 浓度的增加速度最快, 同时也可推测第一阶段生物滤池内无机氮转化生成 N_2 使得无机氮量的亏损.

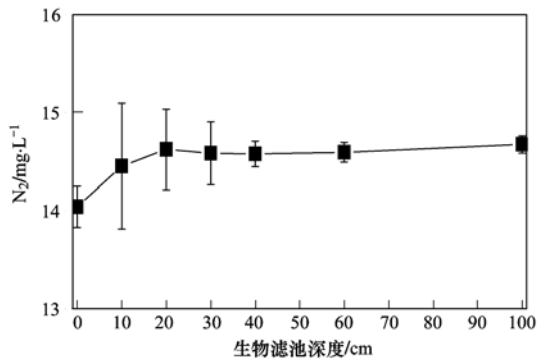


图 6 不同滤料层高的水中氮气浓度

Fig. 6 Profile of N_2 concentrations at different height of the media

2.5 “氮亏损”现象机制探讨

在污水生物处理工艺中,生物脱氮是一个重要研究内容,其机制对饮用水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的脱除具有重要的参考价值. 一般情况下,生物处理过程对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 非硝化作用去除有以下 4 种机制:① 同化作用. 微生物必须从环境中吸收营养物质,通过新陈代谢将其转化成自身新的细胞物质或代谢产物,并从中获取生命活动必需的能量. 构成微生物细胞的物质基础是各种化学元素,有 C、O、H、N、P 和其它微量元素等^[10]. ② 缺氧反硝化. 缺氧反硝化作用是反

硝化细菌在缺氧条件下,以有机物为电子供体, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 或 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 为电子受体,释放出 NO 、 N_2O 和 N_2 的过程^[11]. ③ 厌氧氨氧化 (Anammox) 细菌的作用. 该作用主要由 *Brocadia anammoxidans* 和 *Kuenenia stuttgartiensis* 等厌氧氨氧化细菌作用,以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为电子供体, NO_2^- 或 NO_3^- 为电子受体,主要生成 N_2 , 能够实现完全自养生物脱氮 (氮)^[12~17]. ④ 氨氧化细菌 (AOB) 的作用. 研究发现, AOB 具有超乎寻常的代谢多样性. 分布于生物膜表层的 *Nitrosomonas europaea* 等自养型 AOB 在 DO 受到限制时将部分 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 氧化成 $\text{NO}_2^- - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 通过扩散作用进入生物膜内层; 在生物膜内部缺氧部位,同一细菌再以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 作为电子供体把 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 还原为 N_2 ^[18~23].

2.5.1 同化作用和反硝化作用

图 7 所示,生物滤池三个阶段进出水中 P 平均浓度为 $0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, P 的去除量为 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 由细菌细胞分子式 $\text{C}_{60}\text{H}_{87}\text{N}_{12}\text{O}_{23}\text{P}$ 组成可以知道,其中 C、N、P 所占的百分数分别为 52.40%、12.20%、2.30%,即 C、N、P 的比例约为 20:5:1. 如果按照 $\text{N}:\text{P}=5:1$ 计算细菌的生物合成反应,同化作用去除 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的量为 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,远小于第一阶段氮亏损的量.

反硝化反应是以有机物为电子供体, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 或 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为电子受体. 还原 1 g $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 需要 2.86 g 高锰酸盐指数,如果氮亏损现象完全是反硝化作用的作用,则氮亏损的量与生物滤池中高锰酸盐指数去除量成正相关. 如图 7 所知,氮亏损的量与生物滤池中高锰酸盐指数去除量不具有正相关性 ($R^2 = 0.05473$),所以氮亏损现象并不完全是反硝化的作用. 从上面可以知道,在第一阶段生物滤池内发生的“氮亏损”现象并不

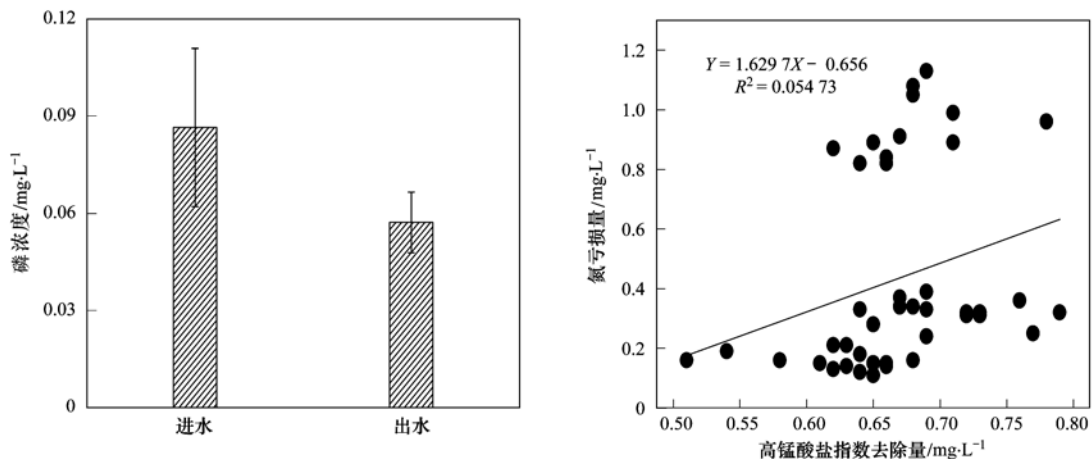


图 7 生物滤池进出水中磷和高锰酸盐指数浓度

Fig. 7 Concentrations of phosphor and permanganate index in the influent and the effluent of the biofilter

完全是由同化作用和反硝化作用产生的.

2. 5. 2 厌氧氨氧化(Anammox)细菌的作用

本试验中,把在第一阶段生物填料提取的 DNA 用 Anammox 细菌的 16S rDNA 引物进行扩增,引物采用 Pla46F 和 AMX381(见表 1),扩增长度约为 335 bp^[24]. 使用 Peltier Thermal Cycle-200 PCR 仪(MJ research, Bio-Rad Laboratories, USA)完成.

表 1 Anammox 细菌的 16S rDNA 引物

Table 1 Primers used in PCR amplification of 16S rDNA

from anammox bacteria	
项目	序列
Pla46F	5'-GAC TTG CAT GCCTAATCC-3'
AMX381	5'-L-AAGG GTG ACGAAGCGACGCC-3'

将抽提所得 DNA 溶液经过 1.0% 琼脂糖凝胶电泳,在 335 bp 左右出现条带(图 8 中箭头所指),

表明已经成功获得目标片段.

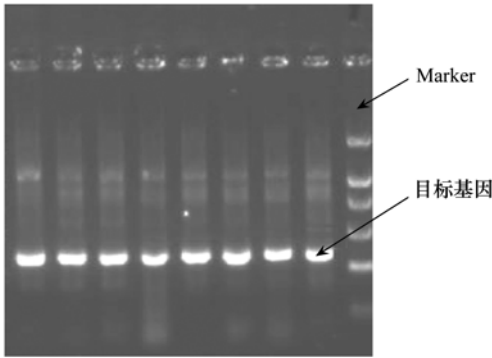


图 8 琼脂糖电泳检测结果图

Fig. 8 Gel electrophoresis of the amplified 16S rDNA

把测序的结果利用常用系统发育树构建软件 PHYLIP 做系统发育树(图 9),不同层高的活性炭填



图 9 测序结果系统发育树

Fig. 9 Phylogenetic tree of the sequencing results

料上生物膜中 DNA 用厌氧氨氧化细菌 16S rDNA 引物扩增后测序发现,生物膜中并没有厌氧氨氧化细菌. 由系统发育树可以看出,扩增出来的细菌都是亚硝酸盐氧化细菌(nitrite-oxidizing bacteria, NOB) 中的 *Nitrospira* 属. 从测序结果可推断第一阶段饮用水生物滤池内的“氮亏损”现象并不是厌氧氨氧化(Anammox) 细菌的作用.

2. 5. 3 氨氧化细菌(AOB)的作用

本试验中,把在第一阶段生物填料提取的 DNA 用 AOB 的功能基因 *amoA* 引物进行扩增,引物采用 *amoA*-1F 和 *amoA*-2R (见表 2), 扩增长度约为 485 bp^[25]. 使用 Peltier Thermal Cycle- 200 PCR 仪(MJ research, Bio-Rad Laboratories, USA) 完成.

表 2 AOB 的功能基因引物

Table 2 Primers used in the PCR amplification of functional genes from AOB

项目	序列
<i>amoA</i> -1F	GGGCTTTCTACTGGTGGT
<i>amoA</i> -2R	CCCCTCTGCAAAGCCTTCTTC

将抽提所得 DNA 溶液经过 1. 0% 琼脂糖凝胶电泳,在 485 bp 附近获得亮度较高的目标片段(图 10 箭头所指),说明 PCR 成功扩增了 AOB 的 *amoA* 基因片段.

测序的结果利用常用系统发育树构建软件

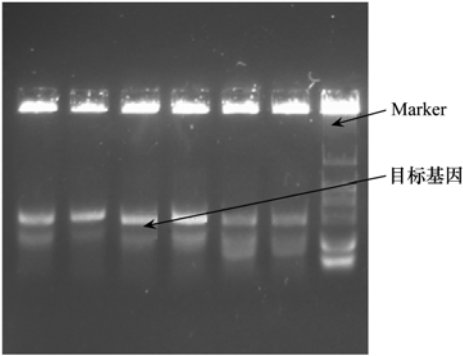


图 10 琼脂糖电泳检测结果图

Fig. 10 Gel electrophoresis of the amplified functional genes

MrBayes 做系统发育树(图 11). 由 AOB 功能基因 *amoA* 引物得到的 PCR 产物测序结果得知,不同层高活性炭上生物膜中都有 AOB,它们全部归为 3 个常见属: *Nitrosococcus*, *Nitrosomonas* 和 *Nitrospira*.

Bock 等^[26] 试验发现,在培养基中 DO 受到限制时, AOB 在纯培养和混合培养时都能利用 H₂ 和 NH₄⁺-N 作为电子供体进行 NO₂⁻-N 的还原反应. Kuai 等^[18] 认为,在限制 DO 的条件下, AOB 以 O₂ 为电子受体,把部分 NH₄⁺-N 氧化为 NO₂⁻-N; 再以 NH₄⁺-N 作为电子供体,把 NO₂⁻-N 还原为 N₂. 从文献[27 ~ 30] 中可以知道, AOB 也能使得 NH₄⁺-N 部分转化为 N₂ 而产生“氮亏损”现象.

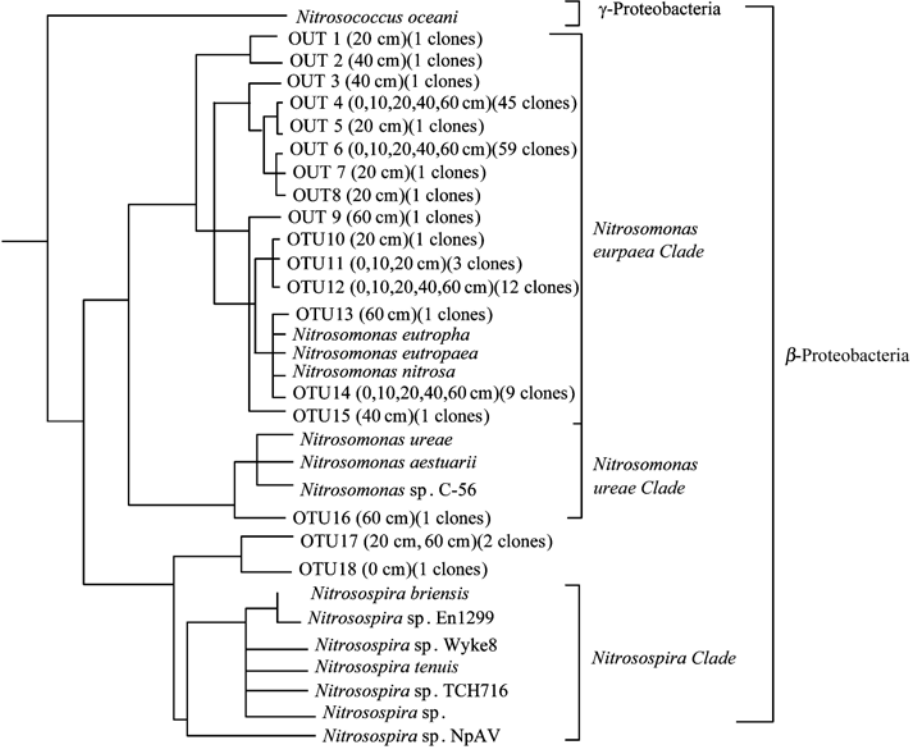


图 11 测序结果系统发育树

Fig. 11 Phylogenetic tree of the sequencing results

前面研究发现,在饮用水生物滤池中,不同进水阶段氮亏损的量分别为 0.94、0.32 和 0.15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,氮亏损的量随着进水中 NH_4^+ -N浓度增加而增加,与进水中高锰酸盐指数浓度无关。这可能因为作为研究对象的饮用水生物滤池没有曝气,消耗的 DO 主要是来自水体。当 NH_4^+ -N浓度较低时(第三阶段),DO 相对充足,使得大部分 NH_4^+ -N氧化为 NO_3^- -N,没有 N_2 生成;而当 NH_4^+ -N浓度较高时(第一阶段),DO 相对不充足,在 AOB 作用下,部分 NH_4^+ -N氧化为 NO_2^- -N,同时 NH_4^+ -N与 NO_2^- -N反应生成 N_2 生成,造成比较明显的“氮亏损”现象。因此,可以推断在第一阶段饮用水生物滤池内发生明显的“氮亏损”现象是 AOB 的作用。

3 结论

(1) 生产规模饮用水生物滤池中存在“氮亏损”现象,三个阶段氮亏损的量分别为 0.94、0.32 和 0.15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,氮亏损的量随着进水中 NH_4^+ -N浓度增加而增加,而与进水中高锰酸盐指数浓度无关。

(2) 在第一阶段,水中 N_2 的平均浓度随着生物滤池填料层高呈上升趋势,进水中 N_2 平均浓度是 14.04 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水 N_2 平均浓度为 14.67 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,生物滤池中有 N_2 生成。

(3) 生物滤池对 P 元素和有机物的利用与氮亏损的量没有线性关系,说明第一阶段氮亏损并不完全由同化作用和缺氧反硝化作用的。

(4) 通过应用分子生物学技术对生物膜中微生物的种群分析可以推测,当进水中 NH_4^+ -N浓度较高时,生物滤池内 AOB 的作用引起第一阶段比较明显的“氮亏损”现象。

参考文献:

- [1] 王占生,刘文君. 微污染源饮用水处理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1999.
- [2] Szwedzyk U, Szwedzyk R, Manz W, *et al.* Microbiological safety of drinking water[J]. Annual Review of Microbiology, 2000, **54**: 81-127.
- [3] Csanady M. Nitrite formation and bacteriological deterioration of water-quality in distribution networks[J]. Water Science and Technology: Water Supply, 1992, **10**(3): 39-43.
- [4] Van der Aa L T J, Kors L J, Wind A P M, *et al.* Nitrification in rapid sand filter: phosphate limitation at low temperatures[J]. Water Science and Technology: Water Supply, 2002, **2**(1): 37-46.
- [5] Yu X, Qi Z H, Zhang X J, *et al.* Nitrogen loss and oxygen paradox in full-scale biofiltration for drinking water treatment[J]. Water Research, 2007, **41**(7): 1455-1464.
- [6] 于鑫,叶林,李旭东,等. 饮用水生物处理小试工艺中 NH_4^+ -N的非硝化去除途径分析[J]. 环境科学, 2008, **29**(4): 909-914.
- [7] Krasner S W, Weinberg H S, Richardson S D, *et al.* Occurrence of a new generation of disinfection byproducts[J]. Environmental Science Technology, 2006, **40**(23): 7175-7185.
- [8] Lee K J, Kim B H, Hong J E, *et al.* A study on the distribution of chlorination by-products (CBPs) in treated water in Korea[J]. Water Research, 2001, **35**(12): 2861-2872.
- [9] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [10] 沈萍. 微生物学[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [11] 郑平,徐向阳,胡宝兰. 新型生物脱氮理论与技术[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [12] Driil M, Bodik I, Tölgyessy J. Influence of combined suspended and fixed-film biomass in anoxic reactor on nitrification-denitrification process[J]. Water Science and Technology, 1992, **25**(4-5): 403-408.
- [13] Driil M, Tölgyessy J, Bodik I. Simultaneous nitrification-denitrification in activated sludge process combined with biofilm cultivation[J]. Studies in Environmental Science, 1991, **42**: 65-69.
- [14] Van de Graaf A A, Mulder A, De Bruijn P, *et al.* Anaerobic oxidation of ammonium is a biologically mediated process[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1995, **61**(4): 1246-1251.
- [15] Van der Star W R L, Van de Graaf M J, Kartal B, *et al.* Response of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria to hydroxylamine[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2008, **74**(14): 4417-4426.
- [16] Wyffels S, Boeckx P, Pynaert K, *et al.* Nitrogen removal from sludge reject water by a two-stage oxygen-limited autotrophic nitrification denitrification process[J]. Water Science and Technology, 2004, **49**(5-6): 57-64.
- [17] Vlaeminck S E, Terada A, Smets B F, *et al.* Nitrogen removal from digested black water by one-stage partial nitrification and anammox[J]. Environmental Science and Technology, 2009, **43**(13): 5035-5041.
- [18] Kuai L P, Verstraete W. Ammonium removal by the oxygen-limited autotrophic nitrification-denitrification system[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1998, **64**(11): 4500-4506.
- [19] Pynaert K, Sprengers R, Laenen J, *et al.* Oxygen-limited nitrification and denitrification in a lab-scale rotating biological contactor[J]. Environmental Technology, 2002, **23**(3): 353-362.
- [20] Pynaert K, Wyffels S, Sprengers R, *et al.* Oxygen-limited nitrogen removal in a lab-scale rotating biological contactor treating an ammonium-rich wastewater[J]. Water Science and Technology, 2002, **45**(10): 357-363.
- [21] Philips S, Wyffels S, Sprengers R, *et al.* Oxygen-limited

- autotrophic nitrification/denitrification by ammonia oxidisers enables upward motion towards more favourable conditions[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2002, **59**(4-5): 557-566.
- [22] Pynaert K, Smets B F, Beheydt D, *et al.* Start-up of autotrophic nitrogen removal reactors via sequential biocatalyst addition[J]. Environmental Science and Technology, 2004, **38**(4): 1228-1235.
- [23] Hippen A, Rosenwinkel K H, Baumgarten G, *et al.* Aerobic deammonification: a new experience in the treatment of wastewaters [J]. Water Science and Technology, 1997, **35**(10): 111-120.
- [24] Van der Star W R L, Abma W R, Blommers D, *et al.* Startup of reactors for anoxic ammonium oxidation: experiences from the first full-scale anammox reactor in rotterdam [J]. Water Research, 2007, **41**(18): 4149-4163.
- [25] Siripong S, Rittmann B E. Diversity study of nitrifying bacteria in full-scale municipal wastewater treatment plants [J]. Water Research, 2007, **41**(5): 1110-1120.
- [26] Bock E, Schmidt I, Stüven R, *et al.* Nitrogen loss caused by denitrifying *Nitrosomonas* cells using ammonium or hydrogen as electron donors and nitrite as electron acceptor[J]. Archives of Microbiology, 1995, **163**(1): 16-20.
- [27] Kampschreur M J, Van der Star W R L, Wielders H A, *et al.* Dynamics of nitric oxide and nitrous oxide emission during full-scale reject water treatment[J]. Water Research, 2008, **42**(3): 812-826.
- [28] Shrestha N K, Hadano S, Kamachi T, *et al.* Dinitrogen production from ammonia by *Nitrosomonas europaea* [J]. Applied Catalysis A: General, 2002, **237**(1-2): 33-39.
- [29] Ahn Y H. Sustainable nitrogen elimination biotechnologies: a review[J]. Process Biochemistry, 2006, **41**(8): 1709-1721.
- [30] Schmidt I, Van Spanning R J M, Jetten M S M. Denitrification and ammonia oxidation by *Nitrosomonas europaea* wild-type, and NirK- and NorB-deficient mutants[J]. Microbiology, 2004, **150**(12): 4107-4114.

CONTENTS

Isotopic Composition and Isotope Tracing of Sulfur in Atmospheric Precipitation at the Head Area of the Three Gorges Reservoir, China	WU Qi-xin, HAN Gui-lin (2145)
Characterization and Reconstruction of Aerosol Light Scattering Coefficient at Chengdu During Biomass Burning and Dust Storm Period in Spring	YUE Jian-hua, TAO Jun, LIN Ze-jian, <i>et al.</i> (2151)
Aerosol Optical Thickness of the Atmospheric Aerosol over Taihu Lake and Its Features; Results of In-site Measurements	RAO Jia-wang, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao, <i>et al.</i> (2158)
Seasonal Variations in the Vertical Distribution of Aerosols During Dry Haze Periods in Regions Around Shanghai	XU Ting-ting, QING Yan, GENG Fu-hai, <i>et al.</i> (2165)
Size Distributions and Diurnal Variations in the Concentrations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Winter in Urban and Suburban Nanjing, China	ZHANG Hong-liang, FAN Shu-xian, GU Kai-hua, <i>et al.</i> (2172)
Seasonal Distribution of Water-Soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol in Qingdao	LIU Zhen, QI Jian-hua, WANG Lin, <i>et al.</i> (2180)
Pollution Characteristics of Microbial Aerosols Generated from a Municipal Sewage Treatment Plant	QIU Xiong-hui, LI Yan-peng, NIU Tie-jun, <i>et al.</i> (2191)
Estimation of the Effect Derived from Wind Erosion of Soil and Dust Emission in Tianjin Suburbs on the Central District Based on WEPS Model	CHEN Li, HAN Ting-ting, LI Tao, <i>et al.</i> (2197)
Variation of Nutrient Concentrations at the Inshore Coastal Area of Northern Jiangsu Province and the Occurrence of Green Tide Caused by <i>Enteromorpha prolifera</i>	GAO Song, SHI Xiao-yong, WANG Ting (2204)
Analysis on Characteristics of Red Tide in Fujian Coastal Waters During the Last 10 Years	LI Xue-ding (2210)
Review on HSPF Model for Simulation of Hydrology and Water Quality Processes	LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Yan (2217)
Parameter Uncertainty Analysis for Urban Rainfall Runoff Modelling	HUANG Jin-liang, LIN Jie, DU Peng-fei (2224)
Estimation of DOC Concentrations Using CDOM Absorption Coefficients; A Case Study in Taihu Lake	JIANG Guang-jia, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao (2235)
Weight Parameters of Water Quality Impact and Risk Grade Determination of Water Environmental Sensitive Spots in Jianshan	XIE Rong-rong, PANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (2244)
Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality in Different Seasons of Panxi River in Chongqing	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (2251)
Responses of Wetland Water Quality to Influence the Strengthness of Urbanization in Nanjing, China	HAO Jing-feng, LIU Hong-yu, HU He-bing, <i>et al.</i> (2259)
Studies on Relationship of Phytoplankton and Water Environmental Factors in Shahu Lake	QIU Xiao-cong, ZHAO Hong-xue, SUN Xiao-xue (2265)
Influence on the Spatial Distribution of Fish in Taizi River Basin by Environmental Factors at Multiple Scales	DING Sen, ZHANG Yuan, QU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2272)
Comparison and Application of Biological Indices of Macroinvertebrates in River Health Assessment	GENG Shi-wei, QU Xiao-dong, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2281)
Spatial and Temporal Distribution of Total Mercury (T-Hg) in Different Water Bodies of Nam Co, Tibetan Plateau	WANG Kang, KANG Shi-chang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (2288)
Temporal and Spatial Variations of Major Ions in Nam Co Lake Water, Tibetan Plateau	GUO Jun-ming, KANG Shi-chang, ZHANG Qiang-gong, <i>et al.</i> (2295)
Eutrophication Control in Local Area by Physic-ecological Engineering	LI Qiu-hua, XIA Pin-hua, WU Hong, <i>et al.</i> (2303)
Nitrogenous Fluxes and Its Self-Purification Capacity in Lake Taihu	CHEN Xiao-feng, CHUAI Xiao-ming, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2309)
Response of Phosphorus Components in Sediments from Eutrophic Lake to External Sulfate	YUAN Tan, HUA Yu-mei, ZHU Duan-wei, <i>et al.</i> (2315)
Spatial Distribution Character of Phosphorus Fractions in Surface Sediment from Chaohu Lake	WEN Sheng-fang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong (2322)
Long-range Transport Potential of Typical Organic Pollutants in Nanjing	FANG Li-jiang, WU You-fang, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (2330)
Distribution of Black Carbon in the Surface Sediments of the East China Sea and Their Correlations with Persistent Organic Pollutants	LIN Tian, FANG Yin, CHEN Ying-jun, <i>et al.</i> (2335)
Contamination Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Water from Jialing River in Chongqing	CAI Wen-liang, LUO Gu-yuan, XU Xiao-yi, <i>et al.</i> (2341)
Levels, Distribution and Possible Sources of Polychlorinated Biphenyls in River Sediments from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, MIAO Yi, <i>et al.</i> (2347)
Assessment Model for Heavy Metal Pollution in Sediment Based on Trapezoidal Fuzzy Numbers and Case Study	LI Fei, HUANG Jin-hui, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (2352)
Impact of Coastal Exploitation on the Heavy Metal Contents in the Sediment of Bohai Bay	QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (2359)
Spatial Distribution and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Intertidal Surface Sediments of Eastern Chongming	LI Ya-juan, YANG Shi-lun, HOU Li-jun, <i>et al.</i> (2368)
Speciation and Vertical Distribution of Heavy Metals in Sediments of Baiyangdian Lake	LI Bi-cai, HE Lian-sheng, YANG Min, <i>et al.</i> (2376)
AVS Concentrations in Xinan Creek and the Influencing Factors	LIU Xiao-bing, WEN Yan-mao, LI Feng, <i>et al.</i> (2384)
Mechanism of NH_4^+ -N Removal in Drinking Water Biofilter	LIU Bing, FAN Hui, YU Guo-zhong, <i>et al.</i> (2394)
Characterization and Thermodynamic Properties of Cu(II) Imprinted Chitosan Crosslinked Membrane	ZHANG Yu-hong, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti, <i>et al.</i> (2403)
Studies on the Degradation of Paracetamol in Sono-electrochemical Oxidation	DAI Qi-zhou, MA Wen-jiao, SHEN Hong, <i>et al.</i> (2410)
Study on Treatment of Methylene Blue Wastewater by Fly Ash Adsorption-Fenton and Thermal Regeneration	BAI Yu-jie, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti (2419)
Electricity Generation Performance of Two-Chamber Microbial Full Cell in the Treatment of Simulated Wastewater	ZHANG Yong-juan, LI Yong-feng, LIU Chun-yan, <i>et al.</i> (2427)
Preparation and Characterization of Zn/Cr-LDHs and Their Removal Performances of Reactive Brilliant Orange X-GN	WANG Xiao-rong, WU Ping-xiao (2432)
Transport Processes of Low-level Radioactive Liquid Effluent of Nuclear Power Station in Closed Water Body	WU Guo-zheng, XU Zong-xue (2438)
Analysis of Carbon Balance and Study on Mechanism in Anoxic-Oxic-Settling-Anaerobic Sludge Reduction Process	ZHAI Xiao-min, GAO Xu, ZHANG Man-man, <i>et al.</i> (2444)
Effect of Mixed Carbon Sources in the Granulation Process of EBPR System	JIANG Tao, SUN Pei-de, XU Shao-juan (2451)
Biocatalyst of Redox Mediators on the Denitrification by <i>Paracoccus versutus</i> Strain GW1	LI Hai-bo, LIAN Jing, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (2458)
Isolation of a High Hydrogen-producing Mutant TB34 Generated by Transposon Insertion and Analysis of Hydrogen Production	LIU Hong-yan, WANG Guang-ce, SHI Liu-yang, <i>et al.</i> (2464)
Condition Optimization for Degradation of Chlorophenols Using Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	QIN Ren-bing, ZHU Xian-feng, WU Ke, <i>et al.</i> (2470)
Characterization of CH_4 , N_2O Emission and Selection of Rice Cultivars in Double Cropping Rice Fields	FU Zhi-qiang, ZHU Hua-wu, CHEN Can, <i>et al.</i> (2475)
Short-term Effects of Exogenous Nitrogen on CH_4 and N_2O Effluxes from <i>Cyperus malaccensis</i> Marsh in the Min River Estuary	MOU Xiao-jie, LIU Xing-tu, TONG Chuan, <i>et al.</i> (2482)
Temporal-spatial Variations of Total Nitrogen in the Degraded Grassland of Three-River Headwaters Region in Qinghai Province	PENG Jing-tao, LI Guo-sheng, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2490)
Temporal Variations of Clay Content in Eroded Sediment Under Different Rainfall Condition	WU Feng-zhi, SHI Zhi-hua, FANG Nu-fang, <i>et al.</i> (2497)
Effects of Soil Properties on the Stabilization Process of Cadmium in Cd Alone and Cd-Pb Contaminated Soils	WU Man, XU Ming-gang, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (2503)
<i>In-situ</i> Remediation of Polychlorinated Biphenyls Polluted Soil by Ecological Controlling Measures; A Field Trial	PAN Cheng, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2510)
Characterization Comparison of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Uptake by Roots of Different Crops	LIANG Xiao, ZHAN Xin-hua, ZHOU Li-xiang (2516)
Characteristics and Mechanism of Sodium Removal by the Synergistic Action of Flue Gas and Waste Solid	YI Yuan-rong, HAN Min-fang (2522)
Decomposition Model of Energy-Related Carbon Emissions in Tertiary Industry for China	LU Yuan-qing, SHI Jun (2528)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年7月15日 33卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 7 Jul. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人