

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第6期

Vol.36 No.6

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊春季气溶胶吸湿性分析	徐彬, 张泽锋, 李艳伟, 秦鑫, 缪青, 沈艳 (1911)
南京北郊秋冬季相对湿度及气溶胶理化特性对大气能见度的影响	于兴娜, 马佳, 朱彬, 王红磊, 严殊祺, 夏航 (1919)
南京北郊冬季霾天 PM _{2.5} 水溶性离子的污染特征与消光作用研究	周瑶瑶, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 王荔 (1926)
京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系	李梦, 唐贵谦, 黄俊, 刘子锐, 安俊琳, 王跃思 (1935)
长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征	莫梓伟, 牛贺, 陆思华, 邵敏, 勾斌 (1944)
贵阳酸雨中溶解态重金属质量浓度及形态分析	朱兆洲, 李军, 王志如 (1952)
北京市火葬场大气污染物排放现状及污染特征	薛亦峰, 闫静, 田贺忠, 熊程程, 李敬东, 吴晓清, 王玮, 朱家昕 (1959)
北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征	胡月琪, 马召辉, 冯亚君, 王琛, 陈圆圆, 何明 (1966)
燃煤电厂湿烟卤降雨成因分析	欧阳丽华, 庄焯, 刘科伟, 陈振宇, 顾鹏 (1975)
Mn-Ce/分子筛的脱汞特性研究	谭增强, 牛国平, 陈晓文, 安振 (1983)
办公室内颗粒物载带溴系阻燃剂的人体呼吸暴露	李岫雯, 曾辉, 倪宏刚 (1989)
森林生物质燃烧烟尘中的有机碳和元素碳	黄柯, 刘刚, 周丽敏, 李久海, 徐慧, 吴丹, 洪蕾, 陈惠雨, 杨伟宗 (1998)
北京市常见落叶树种叶片滞纳空气颗粒物功能	王兵, 王晓燕, 牛香, 张维康, 汪金松 (2005)
气相中乙酸乙酯光解的光子效率: 波长和催化剂的影响	方雪慧, 赵洁, 舒莉, 高永, 叶招莲 (2010)
长江口邻近海域赤潮水体浮游植物光吸收特性分析	刘洋洋, 沈芳, 李秀珍 (2019)
深圳近岸海域全氟化化合物的污染特征	刘宝林, 张鸿, 谢刘伟, 刘国卿, 王艳萍, 王鑫璇, 李静, 董炜华 (2028)
杭州西湖“香灰土”沉积物轻、重有机质组成特征及其环境意义	李静, 朱广伟, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军 (2038)
小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价	黄莹, 李永霞, 高甫威, 徐民民, 孙博, 王宁, 杨健 (2046)
调水型水库藻类对调水氮、磷浓度与水量的响应	万由鹏, 尹魁浩, 彭盛华 (2054)
三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系	张磊, 蔚建军, 付莉, 周川, Douglas G. Haffner (2061)
藻华聚集的环境效应: 对漂浮植物水葫芦光合作用的影响	包先明, 顾东祥, 吴婷婷, 石祖良, 刘国锋, 韩士群, 周庆 (2070)
巢湖沉积物有效磷的原位高分辨分析研究	李超, 王丹, 杨金燕, 王燕, 丁士明 (2077)
贵州施秉白云岩喀斯特区水化学和溶解无机碳稳定同位素特征	肖时珍, 蓝家程, 袁道先, 王云, 杨龙, 敖向红 (2085)
长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义	李广, 章新平, 张立峰, 王跃峰, 邓晓军, 杨柳, 雷超桂 (2094)
元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征	张小娟, 宋维峰, 吴锦奎, 王卓娟 (2102)
植草沟控制道路径流污染效果的现场实验研究	黄俊杰, 沈庆然, 李田 (2109)
Fe/Cu 催化还原降解饮用水中溴氯乙腈的性能研究	丁春生, 马海龙, 傅洋平, 赵世督, 李东兵 (2116)
三维花状结构 α -FeOOH 协同 H ₂ O ₂ 可见光催化降解双氯芬酸钠	许俊鸽, 李云琴, 黄华山, 苑宝玲, 崔浩杰, 付明来 (2122)
UV/H ₂ O ₂ 降解羟苯甲酮反应动力学及影响因素	冯欣欣, 杜尔登, 郭迎庆, 李华杰, 刘翔, 周方 (2129)
钼掺杂 TiO ₂ 光催化降解全氟辛酸	刘晴, 喻泽斌, 张睿涵, 李明洁, 陈颖, 王莉, 匡瑜, 张搏, 朱有慧 (2138)
低频无极灯降解偶氮染料酸性橙 7	吴朋, 吴军, 高士祥, 孙成, 蒋正方 (2147)
纳米 Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ 非均相类 Fenton 体系对 3,4-二氯三氟甲苯的降解	孙正男, 杨琦, 纪冬丽, 郑琳 (2154)
流变相法制备包覆型 CMC-Fe ⁰ 及降解水中 TCE 的研究	樊文井, 成岳, 余淑贞, 范小丰 (2161)
Pd-Fe/石墨烯多功能催化阴极降解 4-氯酚机制研究	祁文智, 王凡, 王辉, 施钦, 逢磊, 卞兆勇 (2168)
锰氧化物改性硅藻土对苯胺的去除动力学与机制	肖少丹, 刘露, 姜理英, 陈建孟 (2175)
铅-十六烷基三甲基氯化铵改性活性炭对水中硝酸盐和磷酸盐的吸附特性	郑雯婧, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (2185)
聚(丙烯酸酰胺-二乙烯基苯)对水溶液中刚果红的吸附	张变变, 廖运文, 高和军, 王忠志, 帅超 (2195)
大型再生水厂不同污水处理工艺的能耗比较与节能途径	杨敏, 李亚明, 魏源送, 吕鑑, 郁达伟, 刘吉宝, 樊耀波 (2203)
污泥水热液化水相产物中氮元素变化规律的研究	孙衍卿, 孙震, 张景来 (2210)
不同接种污泥 ABR 厌氧氨氧化的启动特征	张海芹, 王翻翻, 李月寒, 陈重军, 沈耀良 (2216)
基于微波-过氧化氢-碱预处理的污泥水解影响因素	贾瑞来, 魏源送, 刘吉宝 (2222)
蠡河底泥中反硝化复合菌群富集及菌群结构研究	雍佳君, 成小英 (2232)
不同类型及不同浓度抗生素条件下活性污泥丝状菌种群多样性分析	王润芳, 王琴, 张红, 齐嵘 (2239)
石油降解菌的分离鉴定及 4 株芽胞杆菌种间效应	王佳楠, 石妍云, 郑力燕, 王喆, 蔡章, 刘杰 (2245)
Sheewanella oneidensis MR-1 对针铁矿的还原与汞的生物甲基化	司友斌, 孙林, 王卉 (2252)
根表铁氧化物胶膜对水稻吸收镉的影响	马微, 鲍艳宇 (2259)
不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响	禄兴丽, 廖允成 (2266)
城市区域近地表灰尘及重金属沉降垂向季节变化	李晓燕, 张舒婷 (2274)
中山市农业区域土壤-农产品中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染特征	李彬, 吴山, 梁金明, 梁文立, 陈桂贤, 李拥军, 杨国义 (2283)
经口摄入土壤多溴联苯醚生物可给性变化及影响因素的体外消化模拟	张云惠, 刘伟健, 程芳芳, 熊冠男, 杨笑寒, 王歆, 陶澍, 邢宝山, 刘文新 (2292)
生物炭输入对土壤本底有机碳矿化的影响	陈威, 胡学玉, 陆海楠 (2300)
改良剂对广西环江强酸铅锌污染土壤的修复作用	曾伟铨, 宋波, 袁立竹, 黄宇妃, 伏凤艳 (2306)
蒙脱石-OR-SH 复合体材料对土壤镉的钝化及机制	曾燕君, 周志军, 赵秋香 (2314)
焦岗湖湿地土地利用格局演变及区域可持续性评价	杨阳, 蔡怡敏, 白艳莹, 陈卫平, 杨秀超 (2320)
《环境科学》征订启事 (1965) 《环境科学》征稿简则 (2115) 信息 (1925, 2076, 2084, 2146)	

蠡河底泥中反硝化复合菌群富集及菌群结构研究

雍佳君, 成小英*

(江南大学环境与土木工程学院, 无锡 214122)

摘要: 从无锡市滨湖区蠡河底泥中富集培养反硝化复合菌群, 研究其在不同富集培养阶段 TN、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N 和 COD 动态变化, 分析反硝化过程中气体释放总量、释放速率和成分, 通过构建全长 16S rDNA 克隆文库研究其菌落结构. 结果表明, 反硝化复合菌群富集在阶段 4 时脱氮效果最佳, 仅在 9 h 内, $330 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 TN 负荷下, TN 去除率达 90.9%, NO_3^- -N 去除率达 100%, 中间产物 NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 积累量最少, 分别为 $3.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $16.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 去除率达 85%; 释放气体 260 mL, 气体主要成分为 N_2 , 同时还有少量的 CH_4 和 CO_2 等. 富集培养反硝化复合菌群细菌属于 Pseudomonadaceae 科和 Rhodocyclaceae 科, 为 Proteobacteria 门, OUT 丰度分别为 57.8% 和 31.6%, Pseudomonadaceae 科是优势类群.

关键词: 富集培养; 反硝化复合菌群; 脱氮; 气体释放; 16S rDNA 克隆文库

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)06-2232-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.06.042

Enrichment and Characterization of A Denitrifying Bacteria Consortium from Lihe River's Sediment

YONG Jia-jun, CHENG Xiao-ying*

(School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: A denitrifying bacteria consortium was enriched from Lihe River's sediment, the dynamics of total nitrogen (TN), nitrate (NO_3^- -N), nitrite (NO_2^- -N), ammonium (NH_4^+ -N) and COD at different enrichment cultivation stages were studied, and the total volume, the releasing rates and the composition of gas released during the denitrification process were analyzed. The full-length 16S rDNA clone library was constructed, enclosing the diversity of the denitrifying bacteria consortium. The results showed, in the enrichment phase 4, under the load of TN $330 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the best nitrogen removal effect was obtained, which the TN and NO_3^- -N removal rates reached 90.9% and 100% within 9 hours, respectively. The accumulation amounts of NO_2^- -N and NH_4^+ -N were merely $3.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $16.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. And the COD removal rate was 85%. The process released 260 mL of the compound gas, in which the main ingredient was N_2 associated with a small quantity of CH_4 and CO_2 . The denitrifying bacteria consortium consisted of the family Pseudomonadaceae and the family Rhodocyclaceae, belonging to Proteobacteria phylum, in which the OUT abundances were 57.8% and 31.6%, respectively. The family Pseudomonadaceae was the predominant group.

Key words: enrichment; a denitrifying bacteria consortium; nitrogen removal; gas releasing; 16S rDNA clone library

目前,氮污染是水体中最常见的一类污染,是导致水体富营养化主要因素之一,脱氮是改善水环境质量和控制水环境污染的重要研究内容^[1,2]. 针对无锡市滨湖区蠡河氮污染问题,本研究从蠡河底泥中富集培养反硝化复合菌群,利用固定化后的土著反硝化复合菌群修复蠡河水体是具有优势的^[3~5],这为蠡河生态修复提供了技术和理论支持.

近年来,国内外学者进行了一些关于反硝化细菌分离和富集的研究,王兆阳等^[6]以传统的微生物分离方法从垃圾渗滤液活性污泥中分离到 1 株好氧反硝化细菌;Kampman 等^[7]从生活污水活性污泥中富集出了能代谢甲烷的反硝化细菌;王弘宇等^[8]从武汉市东湖深层底泥中分离出 1 株铁基质自养反硝化细菌. 但这些研究多是从活性污泥中分离富集反硝化细菌,而且多为纯菌培养,而关于从天然水体中富集反硝化复合菌群的研究很少.

本研究的目的是从蠡河底泥中富集反硝化复合菌群,探讨其脱氮效率,分析中间产物 NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 浓度动态变化,以及释放气体的体积、速率和成分. 通过构建 16S rDNA 克隆文库研究得到反硝化复合菌群的菌落构成.

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 底泥

底泥样品采集于无锡市滨湖区蠡河中游处 ($31^\circ 31.605' \text{N}$, $120^\circ 19.853' \text{E}$).

收稿日期: 2014-11-22; 修订日期: 2015-01-14

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX0701-013-04)

作者简介: 雍佳君 (1988 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境微生物, E-mail: aizixuan881120@163.com

* 通讯联系人, E-mail: 439174716@qq.com

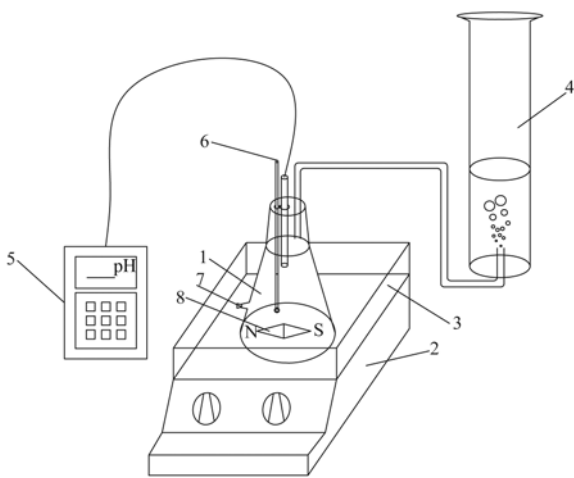
1.1.2 富集培养基及克隆文库实验材料

反硝化细菌培养基^[9]: KNO₃ 2.0 g·L⁻¹, 柠檬酸钾 11.4 g·L⁻¹, MgSO₄·7H₂O 0.2 g·L⁻¹, KH₂PO₄ 1 g·L⁻¹, 微量元素溶液 2 mL, 去离子水 1 L, pH 7.0 ~ 7.5. 微量元素: EDTA·2Na 57.1 g·L⁻¹, ZnSO₄·7H₂O 3.9 g·L⁻¹, CaCl₂·2H₂O 7 g·L⁻¹, MnCl₂·4H₂O 5.1 g·L⁻¹, FeSO₄·7H₂O 5.0 g·L⁻¹, (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O 1.1 g·L⁻¹, CuSO₄·5H₂O 1.6 g·L⁻¹, CoCl₂·6H₂O 1.6 g·L⁻¹ (药品均为国药分析纯), pH 6.0.

克隆文库实验材料: Ezup 柱式细菌基因组 DNA 抽提试剂盒 (上海生工), Dream Taq-TM DNA Polymerase (MBI), SanPrep 柱式 DNA 胶回收试剂盒 (上海生工), DNA Ladder Mix maker (上海生工), 通用引物^[10] 7F (5'-CAGAGTTTGATCCTGGCT-3') 和 1540R (5'-AGGAGGTGATCCAGCCGCA-3') (上海生工), pMD® 18-t Vector 连接试剂盒 (Takara), SanPrep 柱式质粒 DNA 小量抽提试剂盒 (上海生工) 等.

1.1.3 实验仪器

图 1 为反硝化复合菌群厌氧富集反应装置, 由厌氧富集反应器和气体收集器两部分组成. 厌氧富集培养反应器中有温度计和搅拌子, 反应器下部侧壁设有采样口. 3310 数字式 pH 计 (WTW, 德国), 2720 thermal cycler PCR 仪 (Applied Biosystems, 美国), 3730XL 测序仪 (Applied Biosystems, 美国), DYCP-31DN DNA 电泳槽 (北京六一仪器厂, 中国), FR980 凝胶成像仪 (上海复日科技仪器有限公司, 中国), TH2-C 恒温摇床 (太仓市科教器材厂, 中国),



1. 厌氧富集培养反应器; 2. 恒温磁力搅拌器; 3. 水浴槽; 4. 气体收集器; 5. 便携式 pH 计; 6. 温度计; 7. 取样口; 8. 磁力搅拌子

图 1 反硝化复合菌群富集厌氧反应装置示意

Fig. 1 Enrichment reactor of a denitrifying bacteria consortium

DHP-9162 恒温培养箱 (太仓市实验设备厂, 中国), HC-2518R 冷冻高速离心机 (BBI, 美国), GC-2014 气相色谱仪 (岛津, 日本).

1.2 实验方法

1.2.1 指标检测方法

表 1 为指标的检测方法.

表 1 检测方法¹⁾

Table 1 Methods for determination	
指标	检测方法 ^[11]
NO ₃ ⁻ -N	酚二磺酸分光光度法
TN	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法
NO ₂ ⁻ -N	N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法
NH ₄ ⁺ -N	纳氏试剂分光光度法
COD	重铬酸钾法
气体检测方法	气相色谱法

1) 气相色谱检测法运行条件是: 运行前 DINJ1 设置温度为 180℃, 柱温为 100℃, DTCD1 设置温度和电流为 180℃ 和 0 mA, 待升温完成后, 柱温设置改为 50℃, DTCD1 电流改为 50 mA, 柱温下降至 50℃ 后走基线

1.2.2 反应器富集实验

(1) 缺氧富集反硝化复合菌群 4 个阶段

反硝化复合菌群富集反应器中接种样品底泥, 于恒温与定时搅拌下运行. 富集培养条件, 温度 30℃, pH 7.2 ± 0.2, 搅拌间隔 6 h. 富集实验分 4 个阶段 (阶段 1 至阶段 4), 阶段 1 和阶段 2 富集培养时间是 240 h, 阶段 3 与阶段 4 富集时间为 72 h. 当每个富集阶段结束时, 离心培养液, 去上清液, 再将富集出沉淀反硝化复合菌群接种于装有新鲜培养液反应器中再次进行富集培养.

在实验过程中, 检测分析每个阶段 NO₂⁻-N、NH₄⁺-N 积累和转化, 及 TN、NO₃⁻-N 和 COD 浓度变化和去除率. 去除率公式 (R):

$$R = [(c_0 - c)/c_0] \times 100\%$$
 (1)

式中, R 为去除率 (%), c₀ 和 c (mg·L⁻¹) 为初始浓度和最终浓度.

(2) 气体收集实验

反应器上部使用氩气充气以去除空气, 计数与分析 4 个培养阶段气体释放体积与速率, 按时间节点采集反应器释放气体, 检测分析阶段 4 不同时段气体成分及所占浓度.

1.2.3 16S rDNA 克隆文库构建

为分析反硝化复合菌群菌群多样性, 构建 16S rDNA 克隆文库.

(1) 反硝化复合菌群 DNA 提取

DNA 提取于反硝化复合菌群富集培养阶段 4,

DNA 抽提步骤按 Ezup 柱式细菌基因组 DNA 抽提操作说明进行^[12].

(2) PCR 扩增

反硝化复合菌群细菌用引物 7F 和 1540R 扩增^[13]. PCR 反应体系如表 2 所示.

表 2 PCR 反应体系

Table 2 Reaction system of PCR

试剂	体积/ μL
Template(基因组 DNA 20 ~ 50 $\text{ng}\cdot\mu\text{L}^{-1}$)	0.5
10 $\times$ Buffer(with Mg^{2+})	2.5
dNTP(各 2.52.5 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	1
酶	0.2
F(10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.5
R(10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.5
加双蒸 H_2O 至	25

PCR 循环反应:94℃ 预变性 9 min,94℃ 变性 45 s,55℃ 退火 45 s,72℃ 延伸 1 min,72℃ 修复延伸 10 min. 1% 琼脂糖凝胶电泳检测 PCR 产物结果,150 V、100 mA 和 20 min 电泳观察.

(3) PCR 产物纯化回收

采用 SanPrep 柱式 DNA 胶回收试剂盒纯化^[14].

(4) PCR 产物链接

按 pMD[®] 18-t Vector 连接试剂盒操作说明进行链接.

(5) 16S rDNA 基因序列系统发育分析

由上海生工生物有限公司完成测序反应,将测序后结果在 GenBank 中 Blast 进行比对. 利用软件 MEAG6 中邻位连接法(Neighbor-Joining)构建反硝化细菌和产甲烷菌系统发育树^[15].

2 结果与讨论

2.1 富集培养 4 阶段

缺氧富集反硝化复合菌群实验分 4 个阶段,检测每个阶段 TN、 NO_3^- -N 和 COD 值变化及其去除率,同时分析中间产物 NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 浓度积累变化,如图 2 所示.

反硝化复合菌群富集实验 4 个阶段 TN 起始浓度均在 320 ~ 350 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间. 图 2(a) 说明,富集反硝化复合菌群在阶段 1 和阶段 2 时,216 h 内,TN 分别去除 59.25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 231.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率为 21.24% 和 73.23%; 当实验进行至阶段 3 和阶段 4 时,仅经过 12 h,TN 分别去除 289 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 316.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率达 86.01% 和 90.9%. 这说明在阶段 4 时 TN 去除率达到最大值,阶段 4 得到最大活性反硝化复合菌群. 阶段 3 和阶段 4 在相同且最短

时间内 TN 去除率接近,说明富集培养反硝化复合菌群在阶段 4 已近进入稳定时期,此时复合菌群活性最大,TN 去除率稳定.

NO_3^- -N 是富集培养时添加唯一氮源,同时也是反硝化细菌生长代谢营养物质,检测分析 NO_3^- -N 能更好地说明反硝化复合菌群富集培养效果. 如图 2(b) 所示, NO_3^- -N 在阶段 1 和阶段 2 去除率均未达到最大值,但在阶段 3 和阶段 4 时, NO_3^- -N 去除率分别在 12 h 和 9 h 达到最大值,为 99.01% 和 100%. 这进一步说明反硝化复合菌群富集实验在阶段 4 时进入稳定阶段. 这比 Yao 等^[16] 在硝态氮起始浓度仅为 70 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (阶段 4 NO_3^- -N 起始浓度为 297 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 下,富集培养且优化培养条件后得到的反硝化复合菌群,运行 9 h 的 NO_3^- -N 100% 去除率脱氮效果要好. 同时,这也比李涵^[17] 筛选的 2 株好氧反硝化细菌 ADB4A 和 ADB7 培养 4 d 后 NO_3^- -N 去除率均达 95% 以上的脱氮效果要好.

在反硝化过程中,中间产物积累很大程度上影响脱氮效果,跟踪中间产物形成与转化能更好解释与解决生物脱氮系统运行状况^[18],因此实验检测分析反硝化过程中 NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 的动态变化规律. 如图 2(c) 所示,在富集实验阶段 1, NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 都是持续在积累,但积累量不大,分别为 2.57 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 9.31 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 但在阶段 2 后期,富集培养反应器内 NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 出现大量积累,最终积累量达 28.25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 22.15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 阶段 3 和阶段 4 中 NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 浓度变化趋势均在各时间点近似,积累量较阶段 2 明显减少,而且富集时间仅为 72 h,阶段 4 中 NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 最终积累量分别为 3.39 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 16.64 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,这与 Yang 等^[19] 获得纯种反硝化细菌 *Pseudomonas stutzeri* D6 优化培养后中间产物 NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 积累量接近,说明反硝化复合菌群富集实验获得很好效果^[20]. 阶段 2、阶段 3 和阶段 4 NO_2^- -N 浓度发生明显起伏,阶段 3 和阶段 4 NO_2^- -N 最大积累浓度发生在富集反应 3 h,浓度分别达 36.24 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 29.77 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在随后富集实验中又开始下降. 这可能是因为富集反应实验各个阶段后期,反硝化细菌可利用营养物质浓度减少,积累后 NO_2^- -N 再次被其利用代谢.

碳源是异养反硝化细菌生长代谢利用营养物质,是异养反硝化细菌实现脱氮过程中电子转移系统电子供体^[21~23]. 有报道指出,反硝化细菌对柠檬酸钠利用效果最好,能实现最大脱氮率和最少中间产物积

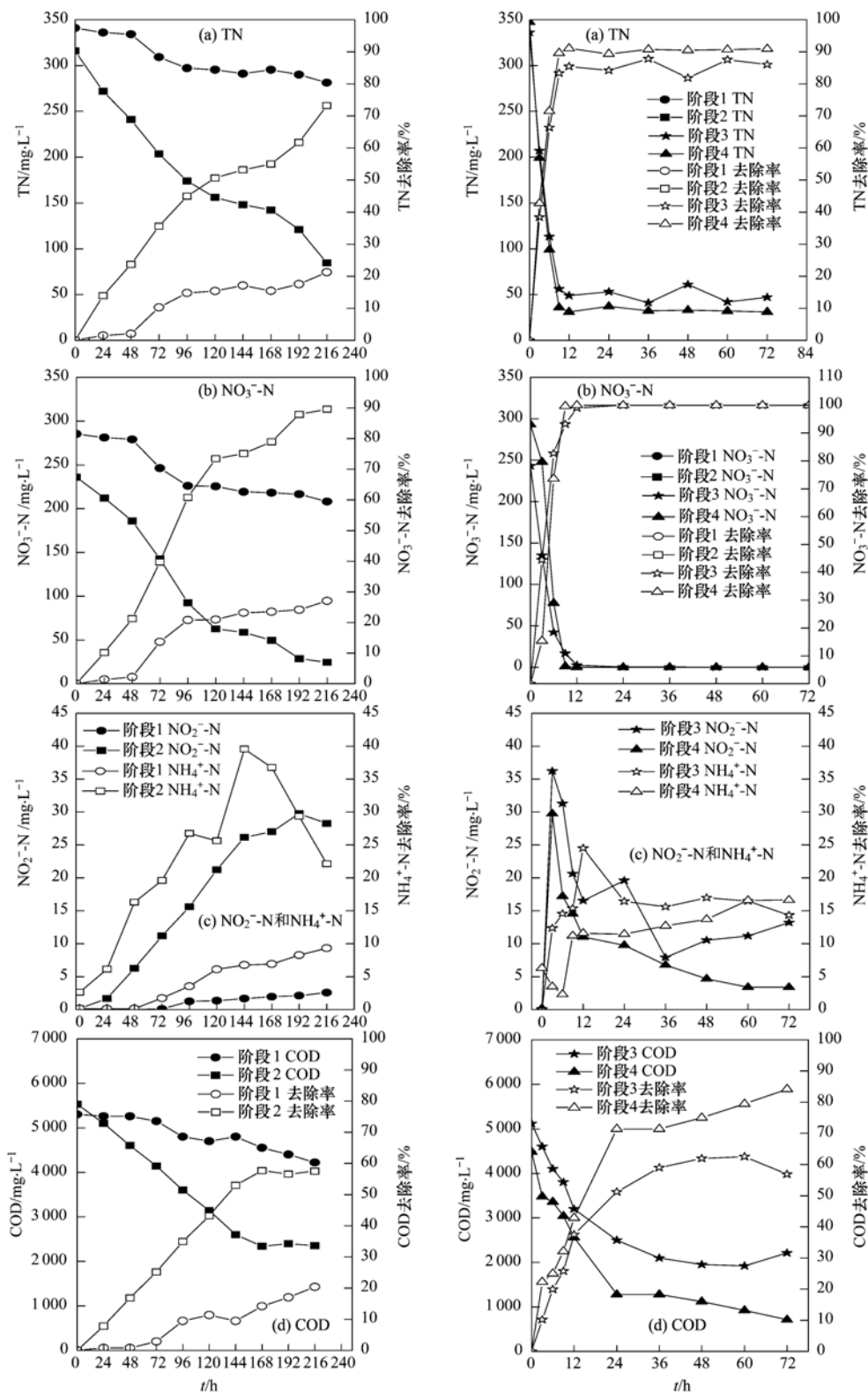


图2 反硝化复合菌群富集实验 TN、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、NH₄⁺-N 和 COD 动态变化

Fig. 2 Dynamics of total nitrogen, nitrate, nitrite, ammonium, COD during the enrichment of the denitrifying bacteria consortium

累^[24]。因此,实验采用柠檬酸钠作为唯一碳源供给。如图2(d)所示,阶段1与阶段2 COD去除率低,阶段2去除率仅为57.5%,然而在阶段4 COD去除率达到

85%,这也比阶段3 COD的去除率要高。

2.2 反硝化过程中气体释放

反硝化复合菌群在富集培养中释放气体,释放

体积和速率在不同富集阶段存在差异,而且同一阶段不同时间释放不同气体成分比例也存在差异. 本研究分析了反硝化复合菌群在富集培养中气体释放体积和释放速率.

图 3(a)为反硝化复合菌群培养 4 个阶段气体释放总量变化. 阶段 1 总量为 28 mL,阶段 2 总量为 190 mL,阶段 1 和阶段 2 气体释放最大速率分别为 $0.13 \text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $1.75 \text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}$,最大速率分别出现在第 144 ~ 168 h 和第 72 ~ 96 h 内,如图 3(c)所示. 这说明阶段 2 富集培养效果优于阶段 1. 阶段 4 气体释放总量比阶段 3 高,达到最大的 260 mL,但阶段 3 在 0 ~ 3 h 培养时间内,气体释放速率最高,即 $12 \text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}$,这比阶段 4 在 3 ~ 6 h 内的最大气体释放速率 $9.3 \text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}$ 出现的早且速率高,如图 3(d)所示,出现这种现象的原因可能是初始 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度不同,也可能是阶段 4 的实验结果较阶段 3 存在波动性.

富集实验阶段 4 在不同培养时间内气体释放总

量不同,气体成分也不同. 通过分析图 3(b)可知,气体主要在 0 ~ 24 h 内释放,约占气体总量 86%. 通过分析阶段 4 释放气体成分,得到了气体主要是由 N_2 、 CH_4 、 CO_2 和未知气体组成,其中 N_2 是整个富集培养阶段主要产物,然而随着培养时间增加, CH_4 和 CO_2 释放比例逐渐增加,这说明富集培养过程中有产甲烷菌的出现,以及好氧呼吸发生. 其中未知气体可能是准备实验阶段充气-氩气和少量残余空气中氧气组成.

2.3 16S rDNA克隆文库构建

实验获得反硝化细菌 34 个克隆(8 OTUs)和产甲烷菌 4 个克隆(2 OTUs),产甲烷菌克隆的获得解释了在富集阶段 3 释放气体中甲烷出现的现象. 表 3 为富集反硝化复合菌群与产甲烷复合菌群 16S rDNA 克隆文库. 反硝化复合菌群细菌分别属 Rhodocyclaceae 科和 Pseudomonadaceae 科,属于 Proteobacteria 门. 产甲烷菌复合菌群属 Spirochaetaceae 科和 Porphyromonadaceae 科,分别属

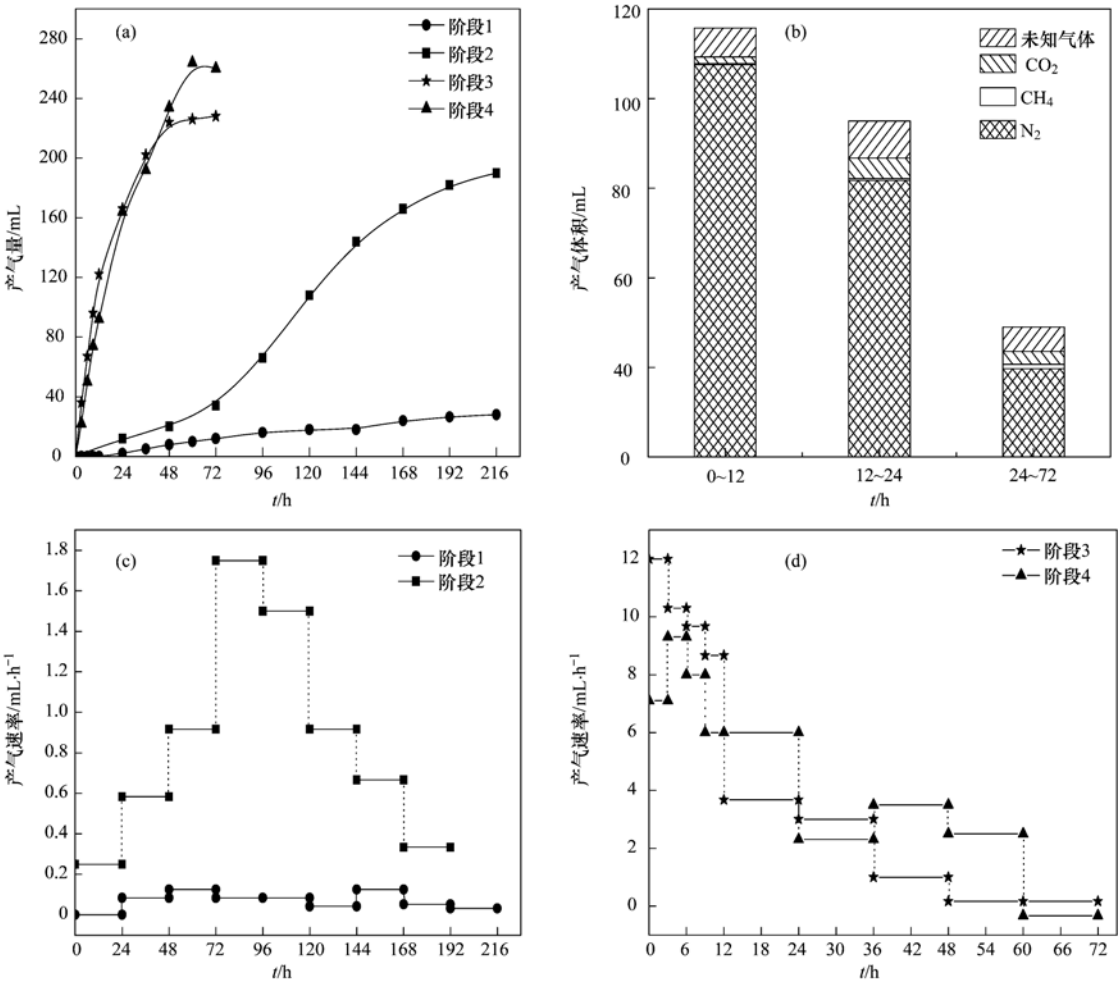


图 3 反硝化复合菌群富集培养中气体释放总量气体成分和气体释放速率

Fig. 3 Total volume, composition, rate of gas releasing during the enrichment process of the denitrifying bacteria consortium

于 Spirochaetes 门和 Bacteroidetes 门. 以上各种细菌类群的脱氮和产甲烷能力均有研究报道^[25~28]. 图 4 为富集培养蠡河底泥中反硝化复合菌群和产甲烷菌群系统发育树.

如表 3 所示, DN-1 反硝化细菌克隆数为 3 个, 占 38 个总阳性克隆数(总克隆数为 50)的比例是 7.9%, DN-2 和 DN-6 有克隆数为 4, 各占总阳性克隆比例均为 10.5%, DN-3 克隆数为 5 个, 所占比例

为 13.2%, DN-4 和 DN-5 分别有 8 个和 6 个克隆, 分别占 21% 和 15.8% 的比例, 为复合菌群中的优势类群. ME-1 和 ME-2 是产甲烷菌均有 2 个克隆, 各占阳性克隆比例均为 5.3%. Pseudomonadaceae 科为富集培养反硝化复合菌群优势菌群, OUT 丰度为 57.8%, Rhodocyclaceae 科 OUT 丰度为 31.6%, Spirochaetaceae 科和 Porphyromonadaceae 科 OTU 丰度各为 5.3%.

表 3 反硝化复合菌群与产甲烷复合菌群16S rDNA克隆文库

Table 3 16S rDNA clone library of the denitrifying bacteria and methanogens consortium					
OTU	克隆数	所占比例/%	科	近源菌(登录号)	相似性/%
DN-1	3	7.9	Rhodocyclaceae	<i>Thauera</i> sp. R-24450(AM231040)	93
DN-2	4	10.5	Pseudomonadaceae	<i>Pseudomonas</i> sp. ZN-1-L(JX867253)	99
DN-3	5	13.2	Rhodocyclaceae	Uncultured bacterium clone R1B-23(FJ167460)	99
DN-4	8	21	Pseudomonadaceae	<i>Pseudomonas</i> sp. (KF171339)	100
DN-5	6	15.8	Pseudomonadaceae	<i>Pseudomonas stutzeri</i> A1501(NR_074829)	99
DN-6	4	10.5	Pseudomonadaceae	<i>Pseudomonas stutzeri</i> (KF171338)	99
DN-7	2	5.3	Rhodocyclaceae	<i>Thauera</i> sp. SD-K(AB908108)	99
DN-8	2	5.3	Rhodocyclaceae	Uncultured β -Proteobacterium clone DFAW-034(AY823978)	95
ME-1	2	5.3	Spirochaetaceae	Bacterium enrichment culture clone E33_A(JQ771482)	93
ME-2	2	5.3	Porphyromonadaceae	Unculture bacterium clone EUB_3(FJ189524)	98

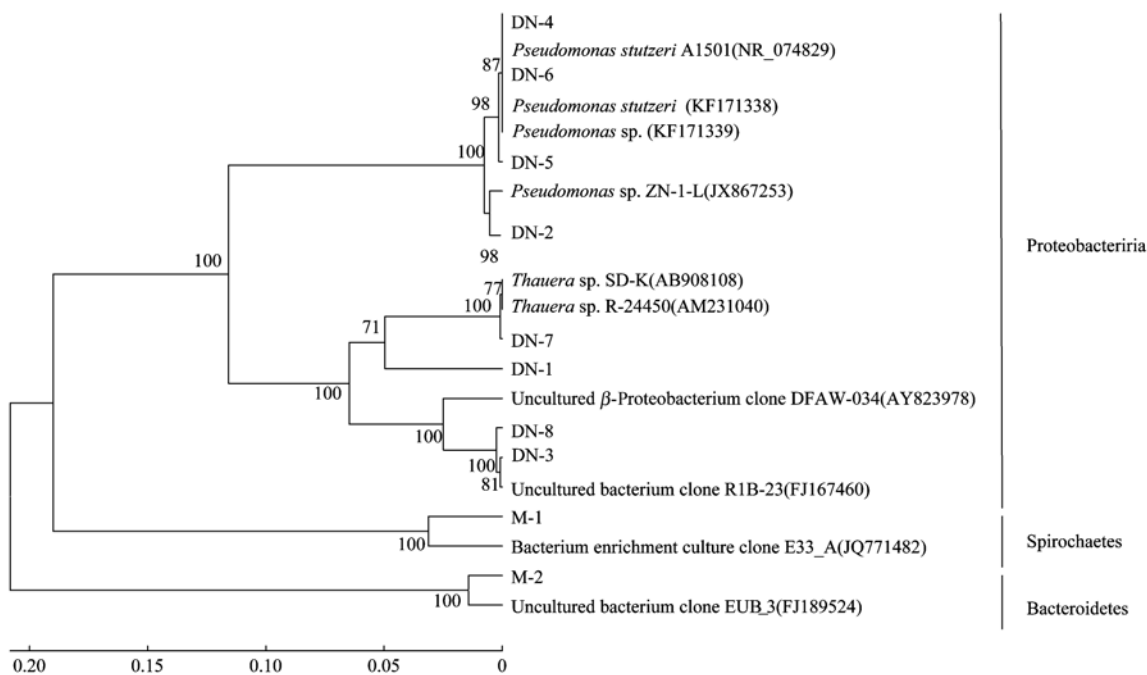


图 4 富集培养蠡河底泥中反硝化细菌和产甲烷菌系统发育树

Fig. 4 Phylogenetic tree of denitrifiers and methanogens enriched from Lihe River's sediment

3 结论

(1)通过分析反硝化复合菌群富集培养 4 个阶段的脱氮效果,结果表明阶段 4 脱氮效果最好,反应 9 h 后, TN 去除率达 90.9%, NO₃⁻-N 去除率达

100%, 中间产物 NO₂⁻-N 和 NH₄⁺-N 积累量最少, 分别为 3.39 mg·L⁻¹ 和 16.64 mg·L⁻¹, 反硝化复合菌群活性最大, 脱氮效果最好.

(2)反硝化复合菌群富集培养在阶段 4 出现最大气体释放体积, 为 260 mL. 然而在富集培养阶段

3 的 0 ~ 3 h 内, 出现最大释放气体速率为 12 mL·h⁻¹. 阶段 4 释放气体主要成分是 N₂, 同时还有少量的 CH₄ 和 CO₂ 等.

(3) 通过构建 16S rDNA 克隆文库分析, 富集培养的反硝化复合菌群细菌分 Pseudomonadaceae 科和 Rhodocyclaceae 科, OTUs 丰度分别为 57.8% 和 31.6%.

参考文献:

- [1] 吴雅丽, 许海, 杨桂军, 等. 太湖水体氮素污染状况研究进展[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(1): 19-28.
- [2] Zhong J C, Fan C X, Liu G F, *et al.* Seasonal variation of potential denitrification rates of surface sediment from Meiliang Bay, Taihu Lake, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, **22**(7): 961-967.
- [3] Lautenschlager K, Hwang C, Ling F Q, *et al.* Abundance and composition of indigenous bacterial communities in a multi-step biofiltration-based drinking water treatment plant [J]. Water Research, 2014, **62**: 40-52.
- [4] Jiao Y, Zhao Q L, Jin W B, *et al.* Bioaugmentation of a biological contact oxidation ditch with indigenous nitrifying bacteria for in situ remediation of nitrogen-rich stream water [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(2): 990-995.
- [5] 郜玉楠. 土著菌群对生物增强活性炭系统的稳定运行研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010. 1-133.
- [6] 王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 等. 1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2341-2348.
- [7] Kampman C, Temmink H, Hendrickx T L, *et al.* Enrichment of denitrifying methanotrophic bacteria from municipal wastewater sludge in a membrane bioreactor at 20°C [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, **274**: 428-435.
- [8] 王弘宇, 杨开, 张倩, 等. 1 株铁基质自养反硝化菌的脱氮特性[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1437-1442.
- [9] 苏俊峰, 马放, 高珊珊, 等. 异养型同步硝化反硝化处理氨氮废水及菌群落结构分析[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2007, **33**(6): 685-690.
- [10] 申圆圆. 土壤中石油污染物行为特征及植物根际修复研究[D]. 西安: 长安大学, 2012. 1-132.
- [11] 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. 1-836.
- [12] Osaka T, Shiroani K, Yoshie S, *et al.* Effects of carbon source on denitrification efficiency and microbial community structure in a saline wastewater treatment process [J]. Water Research, 2008, **42**(14): 3709-3718.
- [13] Zhang M, Zhang T, Shao M F, *et al.* Autotrophic denitrification in nitrate-induced marine sediment remediation and *Sulfurimonas denitrificans*-like bacteria [J]. Chemosphere, 2009, **76**(5): 677-682.
- [14] Isaka K, Kimura Y, Yamamoto T, *et al.* Complete autotrophic denitrification in a single reactor using nitrification and anammox gel carriers [J]. Bioresource Technology, 2013, **147**: 96-101.
- [15] Saitou N, Nei M. The neighbor-joining method: a new method for reconstructing phylogenetic trees [J]. Molecular Biology and Evolution, 1987, **4**(4): 406-425.
- [16] Yao S, Ni J R, Chen Q, *et al.* Enrichment and characterization of a bacteria consortium capable of heterotrophic nitrification and aerobic denitrification at low temperature [J]. Bioresource Technology, 2013, **127**: 151-157.
- [17] 李涵. 好氧反硝化细菌的脱氮机理及其絮凝特性的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013. 1-63.
- [18] Zhao B, He Y L, Hughes J, *et al.* Heterotrophic nitrogen removal by a newly isolated *Acinetobacter calcoaceticus* HNR [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(14): 5194-5200.
- [19] Yang X P, Wang S M, Zhou L X. Effect of carbon source, C/N ratio, nitrate and dissolved oxygen concentration on nitrite and ammonium production from denitrification process by *Pseudomonas stutzeri* D6 [J]. Bioresource Technology, 2012, **104**: 65-72.
- [20] 杨新萍, 钟磊, 周立祥. 有机碳源及 DO 对好氧反硝化细菌 AD6 脱氮性能的影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(6): 1633-1639.
- [21] Shen Z Q, Zhou Y X, Wang J L. Comparison of denitrification performance and microbial diversity using starch/poly(lactic acid) blends and ethanol as electron donor for nitrate removal [J]. Bioresource Technology, 2013, **131**: 33-39.
- [22] Sun F Q, Wu S W, Liu J J, *et al.* Denitrification capacity of a landfilled refuse in response to the variations of COD/NO₃⁻-N in the injected leachate [J]. Bioresource Technology, 2012, **103**(1): 109-115.
- [23] Wu G X, Zhai X F, Jiang C G, *et al.* Effect of ammonium on nitrous oxide emission during denitrification with different electron donors [J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, **25**(6): 1131-1138.
- [24] 杨新萍. 污水处理中脱氮功能微生物特性及固定化应用研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009. 1-119.
- [25] Hirschler-Réa A, Cravo-Laureau C, Casalot L, *et al.* Methanogenic octadecene degradation by syntrophic enrichment culture from brackish sediments [J]. Current Microbiology, 2012, **65**(5): 561-567.
- [26] Xu K W, Liu H, Li X F, *et al.* Typical methanogenic inhibitors can considerably alter bacterial populations and affect the interaction between fatty acid degraders and homoacetogens [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, **87**(6): 2267-2279.
- [27] Heylen K, Gevers D, Vanparys B, *et al.* The incidence of nirS and nirK and their genetic heterogeneity in cultivated denitrifiers [J]. Environmental Microbiology, 2006, **8**(11): 2012-2021.
- [28] Ginige M P, Keller J, Blackall L L. Investigation of an acetate-fed denitrifying microbial community by stable isotope probing, full-cycle rRNA analysis, and fluorescent *in situ* hybridization-microautoradiography [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, **71**(12): 8683-8691.

CONTENTS

Hygroscopic Properties of Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing in Spring	XU Bin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Relative Humidity and Aerosol Physicochemical Properties on Atmospheric Visibility in Northern Suburb of Nanjing	YU Xing-na, MA Jia, ZHU Bin, <i>et al.</i> (1919)
Pollution Characteristics and Light Extinction Effects of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter Hazy Days at North Suburban Nanjing ...	ZHOU Yao-yao, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1926)
Characteristics of Winter Atmospheric Mixing Layer Height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Their Relationship with the Atmospheric Pollution	LI Meng, TANG Gui-qian, HUANG Jun, <i>et al.</i> (1935)
Process-based Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Paint Industry in the Yangtze River Delta, China	MO Zi-wei, NIU He, LU Si-hua, <i>et al.</i> (1944)
Concentrations and Speciation of Dissolved Heavy Metal in Rainwater in Guiyang, China	ZHU Zhao-zhou, LI Jun, WANG Zhi-ru (1952)
Situation and Characteristics of Air Pollutants Emission from Crematories in Beijing, China	XUE Yi-feng, YAN Jing, TIAN He-zhong, <i>et al.</i> (1959)
Emission Characteristics of Water-Soluble Ions in Fumes of Coal Fired Boilers in Beijing	HU Yue-qi, MA Zhao-hui, FENG Ya-jun, <i>et al.</i> (1966)
Analysis on Mechanism of Rainout Carried by Wet Stack of Thermal Power Plant	OUYANG Li-hua, ZHUANG Ye, LIU Ke-wei, <i>et al.</i> (1975)
Removal Characteristics of Elemental Mercury by Mn-Ce/molecular Sieve	TAN Zeng-qiang, NIU Guo-ping, CHEN Xiao-wen, <i>et al.</i> (1983)
Indoor Exposure to Particle-Bound BFRs via Inhalation	LI Xiu-wen, ZENG Hui, NI Hong-gang (1989)
Organic Carbon and Elemental Carbon in Forest Biomass Burning Smoke	HUANG Ke, LIU Gang, ZHOU Li-min, <i>et al.</i> (1998)
Atmospheric Particle Retaining Function of Common Deciduous Tree Species Leaves in Beijing	WANG Bing, WANG Xiao-yan, NIU Xiang, <i>et al.</i> (2005)
Photonic Efficiency of Ethyl Acetate Photolysis in Gas Phase: Dependence on Wavelength and Catalyst	FANG Xue-hui, ZHAO Jie, SHU Li, <i>et al.</i> (2010)
Phytoplankton Light Absorption Properties During the Blooms in Adjacent Waters of the Changjiang Estuary	LIU Yang-yang, SHEN Fang, LI Xiu-zhen (2019)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Offshore Marine Area of Shenzhen	LIU Bao-lin, ZHANG Hong, XIE Liu-wei, <i>et al.</i> (2028)
Composition and Environmental Effects of LFOM and HFOM in "Incense-Ash" Sediments of West Lake, Hangzhou, China	LI Jing, ZHU Guang-wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (2038)
Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from the Heavily Polluted Area of Xiaoqing River	HUANG Ying, LI Yong-xia, GAO Fu-wei, <i>et al.</i> (2046)
Response of Algae to Nitrogen and Phosphorus Concentration and Quantity of Pumping Water in Pumped Storage Reservoir	WAN You-peng, YIN Kui-hao, PENG Sheng-hua (2054)
Temporal and Spatial Variation of Nutrients and Chlorophyll a, and Their Relationship in Pengxi River Backwater Area, Three Gorges Reservoir	ZHANG Lei, WEI Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2061)
Environmental Effects of Algae Bloom Cluster: Impact on the Floating Plant Water Hyacinth Photosynthesis	BAO Xian-ming, GU Dong-xiang, WU Ting-ting, <i>et al.</i> (2070)
<i>In Situ</i> High-Resolution Analysis of Labile Phosphorus in Sediments of Lake Chaohu	LI Chao, WANG Dan, YANG Jin-yan, <i>et al.</i> (2077)
Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon Stable Isotope of Shibing Dolomite Karst Area in Guizhou Province	XIAO Shi-zhen, LAN Jia-cheng, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2085)
Stable Isotope Characteristics in Different Water Bodies in Changsha and Implications for the Water Cycle	LI Guang, ZHANG Xin-ping, ZHANG Li-feng, <i>et al.</i> (2094)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes of Soil Water in the Water Source Area of Yuanyang Terrace	ZHANG Xiao-juan, SONG Wei-feng, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2102)
Performance of Grass Swales for Controlling Pollution of Roadway Runoff in Field Experiments	HUANG Jun-jie, SHEN Qing-ran, LI Tian (2109)
Performance Study of Bromochloroacetonitrile Degradation in Drinking Water by Fe/Cu Catalytic Reduction	DING Chun-sheng, MA Hai-long, FU Yang-ping, <i>et al.</i> (2116)
Catalytic Degradation of Diclofenac Sodium over the Catalyst of 3D Flower-like α -FeOOH Synergized with H ₂ O ₂ Under Visible Light Irradiation	XU Jun-ge, LI Yun-qin, HUANG Hua-shan, <i>et al.</i> (2122)
Degradation of Organic Sunscreens 2-hydroxy-4-methoxybenzophenone by UV/H ₂ O ₂ Process: Kinetics and Factors	FENG Xin-xin, DU Er-deng, GUO Ying-qing, <i>et al.</i> (2129)
Photocatalytic Degradation of Perfluorooctanoic Acid by Pd-TiO ₂ Photocatalyst	LIU Qing, YU Ze-bin, ZHANG Rui-han, <i>et al.</i> (2138)
Efficient Photolysis of Acid Orange 7 Using Low-frequency Electrodeless Lamp	WU Peng, WU Jun, GAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (2147)
Degradation of 3,4-Dichlorobenzotrifluoride by Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ Heterogeneous Fenton-Like Systems	SUN Zheng-nan, YANG Qi, JI Dong-li, <i>et al.</i> (2154)
Preparation of Coated CMC-Fe ⁰ Using Rheological Phase Reaction Method and Research on Degradation of TCE in Water	FAN Wen-jing, CHENG Yue, YU Shu-zhen, <i>et al.</i> (2161)
Degradation Mechanism of 4-Chlorophenol on a Pd-Fe/graphene Multifunctional Catalytic Cathode	QI Wen-zhi, WANG Fan, WANG Hui, <i>et al.</i> (2168)
Removal Kinetics and Mechanism of Aniline by Manganese-oxide-modified Diatomite	XIAO Shao-dan, LIU Lu, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (2175)
Adsorption Characteristics of Nitrate and Phosphate from Aqueous Solution on Zirconium-Hexadecyltrimethylammonium Chloride Modified Activated Carbon	ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2185)
Removal Congo Red from Aqueous Solution Using Poly (AM-co-DVB)	ZHANG Luan-luan, LIAO Yun-wen, GAO He-jun, <i>et al.</i> (2195)
Energy Consumption Comparison and Energy Saving Approaches for Different Wastewater Treatment Processes in a Large-scale Reclaimed Water Plant	YANG Min, LI Ya-ming, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (2203)
Transformation Regularity of Nitrogen in Aqueous Product Derived from Hydrothermal Liquefaction of Sewage Sludge in Subcritical Water	SUN Yan-qing, SUN Zhen, ZHANG Jing-lai (2210)
Start-up Performance of ANAMMOX Enrichment with Different Inoculated Sludge in Anaerobic Baffled Reactor	ZHANG Hai-qin, WANG Fan-fan, LI Yue-han, <i>et al.</i> (2216)
Influencing Factors for Hydrolysis of Sewage Sludge Pretreated by Microwave-H ₂ O ₂ -OH Process	JIA Rui-lai, WEI Yuan-song, LIU Ji-bao (2222)
Enrichment and Characterization of a Denitrifying Bacteria Consortium from Lihe River's Sediment	YONG Jia-jun, CHENG Xiao-ying (2232)
Investigation for Filamentous Bacteria Community Diversity in Activated Sludge Under Various Kinds and Concentration Conditions of Antibiotics	WANG Run-fang, WANG Qin, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2239)
Isolation and Identification of Petroleum Degradation Bacteria and Interspecific Interactions Among Four <i>Bacillus</i> Strains	WANG Jia-nan, SHI Yan-yun, ZHENG Li-yan, <i>et al.</i> (2245)
Effects of Dissimilatory Reduction of Goethite on Mercury Methylation by <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1	SI You-bin, SUN Lin, WANG Hui (2252)
Effect of Root Iron Plaque on Norfloxacin Uptake by Rice	MA Wei, BAO Yan-yu (2259)
Effects of Tillage on Soil Respiration and Root Respiration Under Rain-Fed Summer Corn Field	LU Xing-li, LIAO Yun-cheng (2266)
Seasonal Provincial Characteristics of Vertical Distribution of Dust Loadings and Heavy Metals near Surface in City	LI Xiao-yan, ZHANG Shu-ting (2274)
Characteristics of Phthalic Acid Esters in Agricultural Soils and Products in Areas of Zhongshan City, South China	LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (2283)
Variations and Influencing Factors of Oral Bioaccessibility of Polybrominated Diphenyl Ethers in Soils Using an <i>In-vitro</i> Gastrointestinal Model	ZHANG Yun-hui, LIU Wei-jian, CHENG Fang-fang, <i>et al.</i> (2292)
Impacts of Biochar Input on Mineralization of Native Soil Organic Carbon	CHEN Wei, HU Xue-yu, LU Hai-nan (2300)
Effects of Remedies on the Remediation of Typical Pb and Zn-contaminated soil in Huanjiang, Guangxi	ZENG Wei-quan, SONG Bo, YUAN Li-zhu, <i>et al.</i> (2306)
Mechanism Study of the Smectite-OR-SH Compound for Reducing Cadmium Uptake by Plants in Contaminated Soils	ZENG Yan-jun, ZHOU Zhi-jun, ZHAO Qiu-xiang (2314)
Land Use Pattern Change and Regional Sustainability Evaluation of Wetland in Jiaogang Lake	YANG Yang, CAI Yi-min, BAI Yan-ying, <i>et al.</i> (2320)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年6月15日 第36卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 6 Jun. 15, 2015

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: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行