

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第12期

Vol.33 No.12

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

特别策划:再生水灌溉利用生态风险研究专题

序	陈卫平 (4069)
再生水灌溉利用的生态风险研究进展	陈卫平, 张炜铃, 潘能, 焦文涛 (4070)
绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究	潘能, 侯振安, 陈卫平, 焦文涛, 彭驰, 刘文 (4081)
绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析	潘能, 陈卫平, 焦文涛, 赵忠明, 侯振安 (4088)
再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响	赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4094)
模型模拟再生水灌溉对土壤水盐运动的影响	吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4100)
模型模拟土壤性质和植被种类对再生水灌溉水盐运移的影响	吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4108)
再生水灌溉农田土壤镉累积规律模拟研究	赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4115)
再生水灌溉土壤人工合成麝香累积模型模拟	王美娥, 陈卫平, 焦文涛 (4121)
城市绿化草坪再生水灌溉对地下水水质影响研究	王巧环, 陈卫平, 王效科, 任玉芬, 张烨 (4127)
北京市再生水的公众认知度评估	张炜铃, 陈卫平, 焦文涛 (4133)

研究报告

北京地区臭氧时空分布特征的飞机探测研究	陈鹏飞, 张蕾, 权建农, 高扬, 黄梦宇 (4141)
世博会期间上海市大气挥发性有机物排放强度及污染源研究	王红丽, 陈长虹, 黄海英, 王倩, 陈宜然, 黄成, 李莉, 张钢锋, 陈明华, 楼晟荣, 乔利平 (4151)
贡嘎山本底站大气中 VOCs 的研究	张军科, 王跃思, 吴方堃, 孙杰 (4159)
区域大气环境风险源识别与危险性评估	张晓春, 陈卫平, 马春, 詹水芬, 焦文涛 (4167)
稻草烟尘中正构烷烃和正构脂肪酸的碳同位素	刘刚, 孙丽娜, 李久海, 徐慧 (4173)
汽油轿车 NEDC 循环超细颗粒物排放特性	胡志远, 李金, 谭丕强, 楼狄明 (4181)
城市道路绿化带不同植物叶片附尘对大气污染的磁学响应	隆茜, 周菊珍, 孟颖, 达良俊 (4188)
闽江口养殖塘水-大气界面温室气体通量日进程特征	杨平, 仝川, 何清华, 黄佳芳 (4194)
模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响	刘艳, 陈书涛, 胡正华, 任景全, 沈小帅 (4205)
广西大石围天坑中多环芳烃的大气传输与分异	孔祥胜, 祁士华, 孙蓓, 黄保健 (4212)
松花江流域冰封期水体中多环芳烃的污染特征研究	马万里, 刘丽艳, 齐虹, 白杨, 沈吉敏, 陈忠林, 李一凡 (4220)
温州城市河流中多环芳烃的污染特征及其来源	周婕成, 陈振楼, 毕春娟, 吕金刚, 许世远, 潘琪 (4226)
温州城市河流河岸带土壤中 PAHs 的污染特征与来源	周婕成, 毕春娟, 陈振楼, 王璐, 许世远, 潘琪 (4237)
辽河水系沉积物中 PAHs 的分布特征及风险评估	武江越, 刘征涛, 周俊丽, 高富 (4244)
某炼油厂退役场地土壤与浅层地下水酚类污染特征研究	裴芳, 罗泽娇, 彭进进, 祁士华 (4251)
某大型焦化企业污染场地中多环芳烃空间分布的分异性特征	刘庚, 郭观林, 南锋, 魏文侠, 李发生, 毕如田 (4256)
太原市污灌区有机氯农药垂直分布特征及源解析	廖小平, 张彩香, 赵旭, 向青清, 李佳乐 (4263)
上海市崇明岛农田土壤中多环芳烃分布和生态风险评价	吕金刚, 毕春娟, 陈振楼, 周婕成, 韩景超 (4270)
近 50 年来深圳湾红树林湿地 Hg、Cu 累积及其生态危害评价	李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 贺蓓 (4276)
北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究	张伟, 张洪, 单保庆 (4284)
太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征	秦延文, 张雷, 郑丙辉, 曹伟 (4291)
典型季风型温冰川消融期融水化学日变化特征	朱国锋, 蒲焘, 何元庆, 王培震, 张建龙, 张宁宁, 辛惠娟 (4300)
螺-草水质净化系统氮素环境归趋的实验研究	周露洪, 谷孝鸿, 曾庆飞, 毛志刚, 高华梅, 孙明波 (4307)
固定化果胶酶抑制铜绿微囊藻生长研究	沈清清, 彭谦, 赖泳红, 纪开燕, 韩秀林 (4316)
采用膜污染指数评估天然有机物在低压超滤膜中的污染行为	肖萍, 肖峰, 赵锦辉, 秦潼, 王东升, 冯金荣, 许光 (4322)
水体中甲基汞光化学降解特征研究	孙荣国, 毛雯, 马明, 张成, 王定勇 (4329)
土霉素在乙酸水溶液中的臭氧氧化降解研究	李时银, 李小荣, 朱怡苹, 朱江鹏, 王国祥 (4335)
酰胺咪唑光降解效能与机制及其影响因素研究	陈超, 赵倩, 封莉, 张立秋 (4340)
利用 FeS 去除水中硝基苯的试验研究	王夏琳, 李睿华 (4346)
地下污水管线泄漏原位自动监测模拟实验研究	郭磊, 贾永刚, 付腾飞, 刘晓磊, 赵战坤 (4352)
表面活性剂改性沸石对水中酚类化合物吸附性能研究	谢杰, 王哲, 吴德意, 李春杰 (4361)
抗生素类制药废水厌氧消化产物急性毒性的检测	季军远, 邢雅娟, 郑平 (4367)
废砖块作为人工湿地填料的除磷能力研究	王振, 刘超翔, 李鹏宇, 董健, 刘琳, 朱葛夫 (4373)
基于生物沸石复合滤料的间歇式脱氮水处理	庆承松, 鲍韬, 陈天虎, 陈冬, 谢晶晶 (4380)
硝酸盐对厌氧生物膜和颗粒污泥的同时产甲烷反硝化性能影响研究	钟晨宇, 叶杰旭, 李若愚, 陈胜, 孙德智 (4387)
水平电场作用下活性污泥的脱水研究	季雪元, 王毅力, 冯晶 (4393)
多重环境因子对氟胺磺隆在土壤中降解的影响	宋宁慧, 单正军, 石利利, 郭敏, 许静, 孔德洋 (4400)
碱后处理对互花米草沼渣理化特性的影响研究	陈广银, 郑正, 常志州, 王海芹, 叶小梅 (4406)
含砷废渣高温烧结过程砷的矿物相结构变化与环境释放行为	王兴润, 农泽喜, 王琪 (4412)
国家大气污染物排放标准体系研究	江梅, 张国宁, 张明慧, 邹兰, 魏玉霞, 任春 (4417)
环境基准向环境标准转化的机制探讨	毕岑岑, 王铁宇, 吕永龙 (4422)
对“有毒重金属”实施 2 种总量控制监管方式的利害分析	傅国伟 (4428)
《环境科学》第 33 卷(2012 年)总目录	(4434)
《环境科学》征订启事(4099)	
《环境科学》征稿简则(4166)	
信息(4180, 4219, 4225, 4275)	
专辑征稿通知(4172)	

硝酸盐对厌氧生物膜和颗粒污泥的同时产甲烷反硝化性能影响研究

钟晨宇¹, 叶杰旭², 李若愚¹, 陈胜^{1*}, 孙德智¹

(1. 北京林业大学环境科学与工程学院, 北京市污染水体源控制技术重点实验室, 北京 100083; 2. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 城市水资源与环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090)

摘要: 为了研究硝酸盐对厌氧生物膜系统同时产甲烷反硝化反应的影响及其机制, 拓展生物膜工艺在高氮有机废水中的应用, 采用生物膜-污泥厌氧复合反应器和上流式厌氧污泥床培养具备同时产甲烷反硝化反应的功能微生物系统, 并以间歇实验方法, 对比研究硝酸盐对厌氧生物膜和颗粒污泥的同时产甲烷反硝化性能的影响。结果表明, 硝酸盐对生物膜和颗粒污泥系统去除 COD 和反硝化反应均有影响, 但硝酸盐浓度变化对颗粒污泥系统的影响比生物膜系统更大, 生物膜表现出更强的降解能力和更高的耐性阈值。随着硝酸盐浓度从 $75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 颗粒污泥对 COD 的降解速率从 $273.26 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$ 降到 $0.1 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$, 而生物膜从 $95 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$ 降至 $1.7 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$; 同时, 生物膜和颗粒污泥对硝酸盐的降解速率分别从 21.43 、 $22.31 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$ 增加到 83.72 、 $61.06 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$, 随着硝酸盐的降解, 生物膜表现出更强的恢复能力, 最大值为 $712.44 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$ 。研究还发现亚硝酸盐积累是影响生物膜和颗粒污泥同时脱氮除碳功能的主要原因, 在相同的硝酸盐浓度下, 生物膜中亚硝酸盐的最大积累量仅为颗粒污泥的 $1/10$ 。因此, 生物膜-污泥厌氧复合反应器可以作为高浓度含氮有机废水实现同时产甲烷反硝化工艺反应器一种重要选择。

关键词: 同时产甲烷反硝化; 生物膜; 颗粒污泥; 硝酸盐; 亚硝酸盐

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)12-4387-06

Influence of Nitrate on the Simultaneous Methanogenesis and Denitrification Reaction of Anaerobic Biofilm and Granular Sludge

ZHONG Chen-yu¹, YE Jie-xu², LI Ruo-yu¹, CHEN Sheng¹, SUN De-zhi¹

(1. Beijing Key Laboratory for Source Control Technology of Water Pollution, College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The aims of this study are to further investigate the impact mechanism of nitrate on the simultaneous methanogenesis and denitrification (SMD) process of anaerobic biofilm, and to extend the application of the biofilm process in the treatment of high nitrogen and COD concentration organic wastewater. The SMD reactions were successfully carried out in a hybrid anaerobic biofilm and sludge reactor (HABSR) and an up-flow anaerobic sludge blanket (UASB), and the influence of nitrate on the performance of simultaneous carbon and nitrogen removal in biofilm and granular sludge were investigated using batch tests. The results showed that the nitrate concentration could obviously affect the carbon and nitrogen removal in both biofilm and granular sludge, and the increase of nitrate concentration had more serious impact on the granular sludge, and the biofilm presented higher COD and nitrogen removal efficiency and stronger resistance to toxic materials than the granular sludge. As the nitrate concentration was increased from 75 to $600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the COD removal rates were reduced from 273.26 to $0.1 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$ in granular sludge and reduced from 95 to $1.7 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$ in biofilm. At the same time, the denitrification rate of biofilm and granular sludge were increased from 21.43 and $22.31 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$ to 83.72 and $61.06 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$, respectively. The biofilm recovered the COD degradation rate more quickly and easily than the granular sludge, and the maximum COD removal rate reached $712.44 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$. The nitrite accumulation was observed to be the major cause that affected the simultaneous carbon and nitrogen removal of biofilm and granular sludge. It's found that the maximum nitrite accumulation in biofilm was only one tenth of that of the granular sludge at the same nitrate concentration. The HABSR was proved to be an important alternative for SMD reaction employed in the treatment of high nitrogen and COD concentration organic wastewater.

Key words: simultaneous methanogenesis and denitrification; biofilm; granular sludge; nitrate; nitrite

将厌氧产甲烷和缺氧反硝化反应在厌氧条件下耦合在同一个反应器中可以实现同步去除 COD 和硝酸盐氮。自 Chen 等^[1] 1993 年提出关于颗粒污泥实现反硝化菌和产甲烷菌耦合的设想至今, 同步产

收稿日期: 2012-02-14; 修订日期: 2012-08-03

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2007AA06Z328)

作者简介: 钟晨宇 (1988 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染防治控制理论与技术, E-mail: hit627102zcy@yahoo.cn

* 通讯联系人, E-mail: hitchensheng@126.com

甲烷反硝化已经逐渐的被用于解决部分工程实践问题并表现出了良好的处理效果^[2,3]。目前实现耦合的主要手段是培养同时产甲烷反硝化的颗粒污泥和生物膜。Hendriksen 等^[4]采用含 VFA 和硝酸盐的合成废水在单个上流式厌氧颗粒污泥床反应器中实现了厌氧反硝化和产甲烷耦合。Hanaki 等^[5]以甲醇和硝酸盐为基质在上流式滤池内实现同步产甲烷反硝化。但研究表明反硝化细菌和产甲烷细菌对生活环境的要求有很大的不同,同时含氮化合物对于产甲烷反应存在竞争和毒害抑制作用^[6]。其中,反硝化细菌脱氮过程的中间产物(氮氧化物)对产甲烷菌有着一定的毒害作用^[7~9],从而使得脱碳过程受阻。另外,反应器运行过程也表现出同步产甲烷反硝化的颗粒污泥的强度较单独产甲烷的要小^[10],甚至会出现硝氮负荷增加导致污泥解体现象^[11]。为了进一步了解耦合后 2 种微生物对 C 和 N 的去除过程,更好地实现产甲烷细菌和反硝化细菌的耦合,目前众多研究就颗粒污泥的形成机制、工艺条件、微观结构、微生物组成等多个方面做出了深入探讨,并利用传统微生物学和现代分子生物学的方法对其分层结构进行研究^[12~17]。但对于生物膜的研究却少有涉及。由于生物膜的特殊结构更有利于创造产甲烷细菌和反硝化细菌共存的微环境,使得生物膜系统可能具有更高的反应性能和更好的稳定性。本课题组曾自主研发了一种将生物填料和污泥于一体的生物膜-污泥厌氧复合反应器(hybrid anaerobic biofilm and sludge reactor, HABSR)^[18],成功用于处理高浓度苯胺废水,并实现了同时产甲烷反硝化反应^[3]。为了进一步研究硝酸盐对生物膜和颗粒污泥系统同时产甲烷反硝化性能的影响及其机制,本研究采用 HABSR 和上流式厌氧污泥床(up-flow anaerobic sludge blanket, UASB)分别培养具有同步脱碳除氮性能生物膜和颗粒污泥,并通过间歇实验重点考察反应体系中硝酸盐对生物膜和颗粒污泥脱氮除碳性能的影响。

1 材料与方法

1.1 生物膜和颗粒污泥

实验中所用颗粒污泥和生物膜分别取自于长期稳定运行的 UASB 和 HABSR 反应器中,其中, HABSR 是将自主开发的中空圆柱聚乙烯悬浮填料引入传统 UASB 反应器中,形成上部为生物填料床和下部为污泥床的复合型反应器,反应器可以在轻微机械或者气流搅拌下形成移动床或流化床。两个

反应器进水水质完全一致(进水 COD 为 5 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_3^- -N 为 75 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),反应温度与压力相同。稳定运行时,对 COD 及 NO_3^- -N 的去除率基本保持一致,都在 90% 以上。生物膜生长在中空圆柱聚乙烯生物填料内表面,生物量为每颗 27.31 ~ 29.62 mg,颗粒污泥生物量为 41.92 ~ 46.13 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.2 间歇实验用水

实验用水采用人工配水,配水 COD 浓度为 50 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,以蔗糖作为有机基质,同时 1 L 配水中加入 1 mL 营养母液和 1 mL 微量元素,调节 pH 在 7.0。其中,营养母液成分主要为每升溶液含 $\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 8 g、 $\text{MgSO}_4\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 9 g、 KH_2PO_4 37 g;微量元素主要成分为每升溶液含 $\text{FeCl}_3\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 2 000 mg、 $\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 2 000 mg、 $\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 500 mg、 $\text{CuCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 30 mg、 ZnCl_2 50 mg、 H_3BO_3 50 mg、 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ 90 mg、 Na_2SeO_3 100 mg、 $\text{NiCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 50 mg、EDTA 1 000 mg、36% HCl 1 mL。同时,配制 9.107 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaNO_3 母液备用。

1.3 间歇实验

间歇实验用来考察 HABSR 和 UASB 中的生物膜和颗粒污泥分别在 6 个不同 NO_3^- -N 浓度下的脱氮除碳性能,每个浓度梯度同时做 3 个平行实验。6 个 NO_3^- -N 浓度分别设定为 0、75、150、300、450、600 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其中浓度为 0 的实验为空白实验。具体操作分为颗粒污泥和生物膜 2 批完成,每批实验包括 6 组 3 个平行。选取 18 个 150 mL 血清瓶,分别加入 10 mL 实验模拟用水母液(50 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,以 COD 计),再依次加入 0、5、10、20、30、40 mL NaNO_3 母液,加入磷酸盐缓冲溶液,之后加适量蒸馏水并将 pH 调至 7.5 左右,加水标定至 100 mL。使用高纯氮气吹脱 5 min 以去除废水中溶解氧,投加 10 颗长有生物膜的填料(颗粒污泥实验组中加入 10 mL 厌氧颗粒污泥),并加入 100 μL 的 Na_2S 的饱和溶液,密封后置于 35℃ 恒温水浴振荡器中,在转速 90 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下进行培养。取出不同反应时间的上清液样品对其 COD、硝酸盐以及亚硝酸盐含量进行测定,3 个平行样的数据平均值作为该时刻该浓度梯度下的测量值,并以单位时间内单位生物量去除或降解 COD 及硝酸盐量作为评价污泥和生物膜脱氮除碳性能的指标。

1.4 分析方法

COD:重铬酸钾法^[19];悬浮固体(SS)和挥发性悬浮固体(VSS):标准重量法^[19]; NO_3^- -N:酚二磺酸分光光度法^[19],紫外-可见分光光度计^[19] Thermo

evolution 300 uv-vis; NO₂⁻-N: *N*-(1-萘基)-乙二胺分光光度法^[19], 722S 可见分光光度计。

2 结果与讨论

2.1 生物膜和颗粒污泥对 COD 的去除影响

如图 1 所示, 颗粒污泥和生物膜对 COD 的去除趋势基本是一致的。硝酸盐加入后, COD 的去除在最初的 2 h 内不受影响, 以较快的速度迅速降解。但在 2 h 左右开始受到抑制, COD 缓慢降解, 且抑制持续的时间出现了差异性, 颗粒污泥的抑制从 2 h

持续到 16 h 左右, 而生物膜的抑制现象从 2 h 持续到 8 h 左右就结束了。经历一段时间的抑制后, 颗粒污泥和生物膜 COD 去除开始恢复, 降解速度加快, 但都没有达到抑制前的水平。为了更清晰地分析硝酸盐介入对 COD 去除的影响, 本研究将该过程分为 3 个阶段, 分别描述为初始阶段、抑制阶段、恢复阶段(颗粒污泥的 3 个阶段分别为 0~2 h、2~16 h、16~50 h, 生物膜的 3 个阶段分别为 0~2 h、2~8 h、8~50 h), 并对每个阶段单位生物量的 COD 降解速率进行了对比研究。

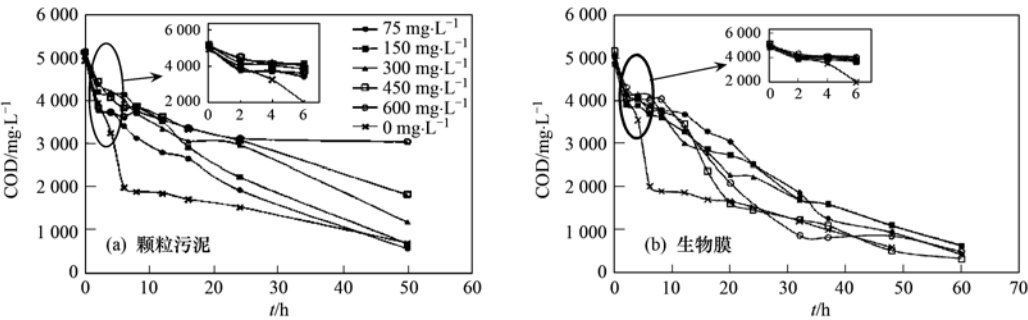


图 1 不同硝酸盐浓度下 COD 的降解情况
Fig. 1 COD removal at different nitrate concentration

表 1 是 3 个阶段中颗粒污泥和生物膜的 COD 降解速率。从中可以看出, 在初始阶段, 无论是颗粒污泥还是生物膜体系, COD 的降解速率基本不受硝酸盐的浓度影响, 保持在 1 000~1 100 mg·(h·g)⁻¹ 之间(以 COD 计, 下同), 说明生物膜和颗粒污泥从反应器中接种到血清瓶后均没有受到外界太大影响。进入抑制阶段后, COD 的降解速率迅速降低到 300 mg·(h·g)⁻¹ 以下, 并且 COD 降解速率随着硝酸盐浓度的增高而降低, 当硝酸盐浓度增至 600

mg·L⁻¹ 时, 生物膜和颗粒污泥的 COD 降解速率降到最低, 分别为 1.7 mg·(h·g)⁻¹ 和 0.1 mg·(h·g)⁻¹。当反应进入恢复阶段后, 生物膜和颗粒污泥对 COD 的降解速率快速回升, 且随着硝酸盐浓度的增加, 颗粒污泥对 COD 的降解速率逐渐降低, 而生物膜对 COD 的降解速率在硝酸盐浓度为 300 mg·L⁻¹ 达到最大值, 为 712.40 mg·(h·g)⁻¹。当硝酸盐浓度 >300 mg·L⁻¹ 时, 生物膜对 COD 的去除速率显著高于同浓度下的颗粒污泥。

表 1 不同浓度下生物膜和颗粒污泥的 COD 降解速率/mg·(h·g)⁻¹

NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	初始阶段		抑制阶段		恢复阶段	
	颗粒污泥	生物膜	颗粒污泥	生物膜	颗粒污泥	生物膜
75	1 113.24	1 042.61	237.26	95.17	402.72	262.20
150	1 089.73	1 032.34	182.08	42.60	235.98	185.17
300	1 123.72	1 087.51	107.19	28.04	171.59	712.40
450	1 067.86	1 169.33	19.32	17.04	108.30	482.59
600	1 065.25	1 085.44	0.11	1.71	97.66	218.07

上述实验表明, 硝酸盐在进入厌氧产甲烷系统后, 并未立即抑制产甲烷过程, 而是先经历了一个相对稳定的初始阶段, 进入抑制阶段后, 生物膜和颗粒污泥的除碳功能均受到抑制, 并且随着硝酸盐浓度的增加, 抑制作用增强。表 1 中数据表明硝酸盐为 75~450 mg·L⁻¹ 时, 颗粒污泥对 COD 的降解速率都

比生物膜要高, 两者的差值分别为 142.10、139.47、79.15、2.2 mg·(h·g)⁻¹, 呈逐渐变小的趋势, 最终在硝酸盐浓度为 600 mg·L⁻¹ 时生物膜对 COD 的降解速率超过了颗粒污泥。在低硝酸盐浓度下, 颗粒污泥表现出较生物膜稍强的硝酸盐抵御能力, 主要原因可能是血清瓶中接种的颗粒污泥量要大于生物

膜量(本实验组中颗粒污泥接种量约为 419 mg,生物膜接种量约为 273 mg)。同时,颗粒污泥体系中微生物聚集成颗粒状存在,将更少的微生物暴露在硝酸盐中,因此对于低浓度的硝酸盐颗粒污泥具有更强的抵御能力。短暂的抑制阶段后生物膜和颗粒污泥都进入恢复阶段,但表现出不同的恢复规律。颗粒污泥对 COD 降解速率随着硝酸盐浓度的增高而逐渐变小。而生物膜 COD 降解速率却随着硝酸盐浓度的增加呈现出先降低后升高再降低的规律,在硝酸盐浓度为 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 COD 降解速率达到最大,为 $712.40 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$ 。从抑制阶段和恢复阶段生物膜和颗粒污泥的表现来看,颗粒污泥对低浓度的硝酸盐具有更好的抵御能力,但随着硝酸盐浓度的增加,这种优越性逐渐减弱,并且恢复能力也逐渐变弱。生物膜在低浓度硝酸盐受到的抑制相对较大,但随硝酸盐浓度增强,抵御毒性物质的能力比颗粒污泥显著增强。也就是说,颗粒污泥在低浓度硝酸盐负荷下更有优势,而生物膜可能更适合于高浓度的硝酸盐负荷下脱碳和脱氮功能的耦合。

2.2 生物膜和颗粒污泥对硝酸盐的去除影响

实验同时考察了不同硝酸盐浓度下生物膜和颗

粒污泥对硝酸盐去除影响和亚硝酸盐积累情况,以进一步探讨二者对硝酸盐介入的不同表现。

图 2 中可以看出,在颗粒污泥和生物膜两个体系中硝酸盐在加入后都被迅速去除,随着硝酸盐初始浓度的升高,硝酸盐完全去除的时间延长。两个体系中不同硝酸盐浓度下硝酸盐的降解速率如图 3 所示,随着硝酸盐浓度的增加,生物膜和颗粒污泥对硝酸盐的降解速率都在增大,当硝酸盐浓度由 $75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,生物膜和颗粒污泥对硝酸盐的降解速率(以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 计,下同)由相近的 21.42 、 $22.31 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$ 分别增大到 83.72 、 $61.07 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$ 。在相同的硝酸盐浓度下,生物膜对硝酸盐的降解速率要大于颗粒污泥,且生物膜降解速率的增长速度要大于颗粒污泥。这说明生物膜不但表现出更高的处理效率,而且能处理更高浓度的硝酸盐。文献[20~23]研究认为生物膜是一层致密而薄的细胞层,内部形成较大的孔隙,在孔隙中可以存在对流和扩散两种传质方式,相对于颗粒污泥来说,更有利于传质,造成了生物膜更高的底物和产物的运输能力。生物膜中,底物硝酸盐更快地进入到生物膜内部,使其具有较高的硝酸盐降解能力。

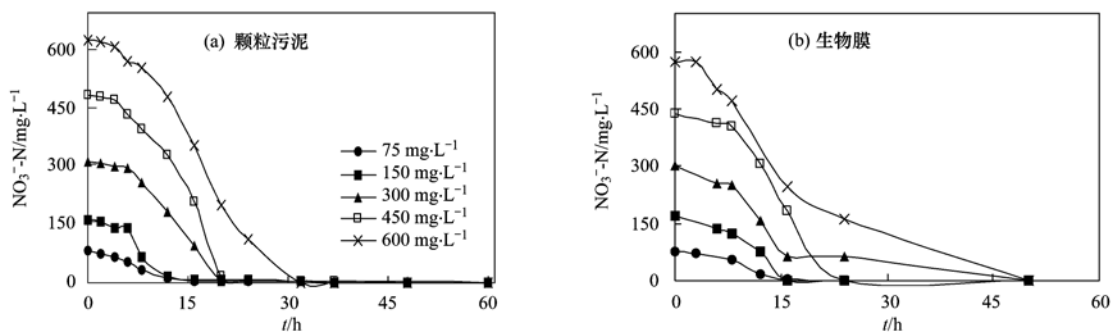


图 2 颗粒污泥和生物膜对硝酸盐的降解情况

Fig. 2 Nitrate removal of biofilm and granular sludge

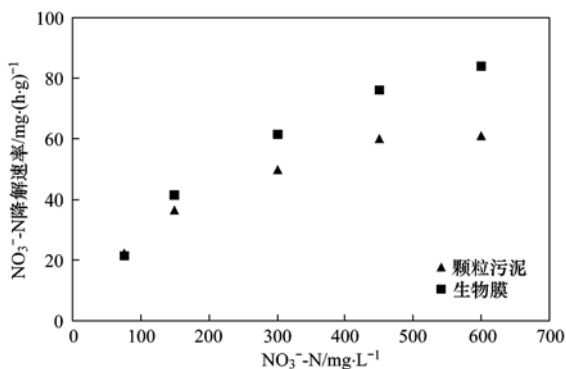


图 3 颗粒污泥和生物膜对硝酸盐的降解速率

Fig. 3 Nitrate removal rate of biofilm and granular sludge

而产物亚硝酸盐也能更快地传输到降解功能菌中,有助于生物膜具有更高的亚硝酸盐降解速率。相比之下,颗粒污泥中传质速率慢成为亚硝酸盐积累原因之一,进而使颗粒污泥的活性受到抑制。

2.3 颗粒污泥和生物膜体系中的亚硝酸盐积累情况

图 4 和图 5 是不同硝酸盐浓度下颗粒污泥和生物膜反应体系中亚硝酸盐的积累情况。从图 4 可以看出,颗粒污泥反应体系在 8 h 时开始出现亚硝酸盐积累现象,积累的时间从 16~42 h 不等,亚硝酸盐积累的最大值从 $43.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $237.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。从图 5 可以看出,在生物膜反应体系中,也出现了亚硝酸盐积累现象,但是积累的时间比颗粒

污泥短, 积累量也远远低于颗粒污泥. 其中, 最大积累时间和积累浓度出现在硝酸盐浓度为 $600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 24 h 附近, 最大积累量为 $28.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 积累量仅为该硝酸盐浓度下颗粒污泥反应体系中的 1/10. 亚硝酸盐是反硝化过程的中间产物, 积累量为产生量和去除量的差. 出现亚硝酸盐积累说明两个体系中硝酸盐的还原速率都要高于亚硝酸盐的还原速率. 对比两个体系中的亚硝酸盐积累现象发现, 颗粒污泥体系中亚硝酸盐的还原速率与硝酸盐的还原速率相差更多.

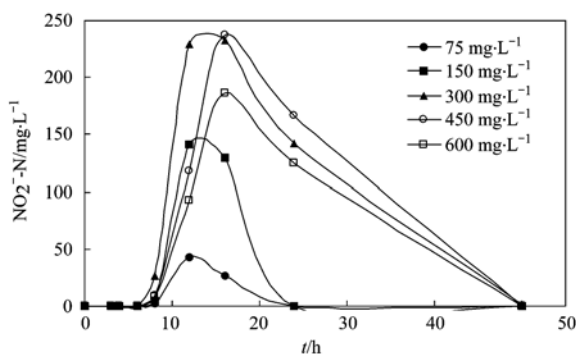


图 4 颗粒污泥反应系统中亚硝酸盐积累

Fig. 4 Nitrite accumulation in the granular sludge system

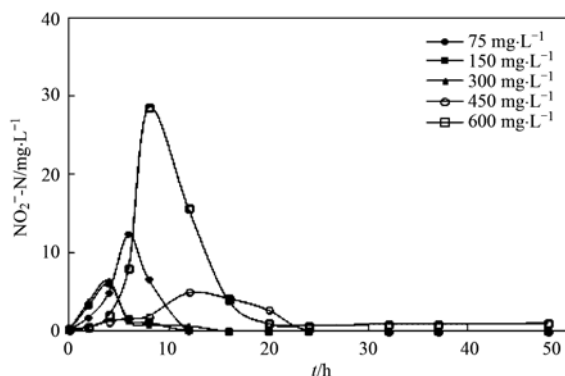


图 5 生物膜反应体系中亚硝酸盐积累

Fig. 5 Nitrite accumulation in the biofilm system

图 6 为硝酸盐浓度为 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时硝酸盐和亚硝酸盐的浓度变化情况. 可以看出, 在硝酸盐浓度为 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 生物膜和颗粒污泥反应体系对硝酸盐的去除率基本一致, 而颗粒污泥体系中的亚硝酸盐积累量却远大于生物膜. 这直接说明, 颗粒污泥中严重的亚硝酸盐积累现象是源于其低的亚硝酸盐降解速率. 究其原因, 主要是由于生物膜的生物结构特点和丰富的生物多样性. 研究表明颗粒污泥内部生物结构一般按照基质和溶解氧浓度分布形成分层结构^[11], 而生物膜表面生物分布不均匀, 是一个功能化的有机体^[24], 不同种功能菌种之间很接

近. 生物膜的结构特点使得上级反应的产物快速传递到下级反应的功能菌种, 使系列反应按顺序快速进行. 也有研究表明^[25], 产甲烷反应的基质不同时, 对亚硝酸盐抑制程度也是不同的. 对比于以乙酸为产甲烷反应基质的体系, 亚硝酸盐的去除在以氢气为产甲烷反应基质的体系中的较慢, 进而产生更高的亚硝酸盐积累^[25,26]. 生物膜和颗粒污泥中的结构不同, 生物组成也存在差异性, 两种体系很可能具有不同的发酵类型, 为产甲烷反应提供不同的基质, 进而造成了两者亚硝酸盐利用能力上的不同. 另外, 生物膜特殊的水力剪切条件以及较长的世代时间等使得其内部物种多样性高, 可能存在更多的亚硝酸盐还原菌或还原能力更强的亚硝酸盐还原菌.

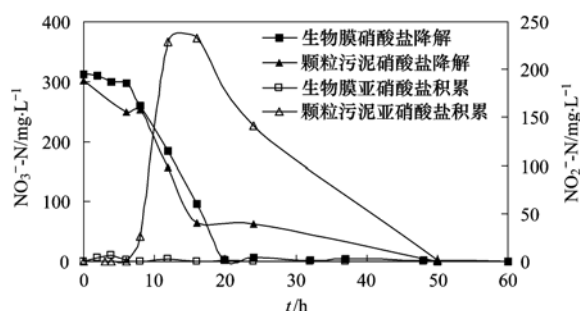


图 6 生物膜和颗粒污泥中硝酸盐、亚硝酸盐浓度变化曲线

Fig. 6 Variations of NO_3^- -N and NO_2^- -N in the biofilm system and the granular sludge system

结合上述 COD 和硝酸盐降解情况以及亚硝酸盐的积累情况, 可以得出亚硝酸盐的积累和抑制作用是生物膜与颗粒污泥产生不同表现的主要原因, 而导致亚硝酸盐的积累主要是生物膜与颗粒污泥中不同的结构特征及生物相. 一方面, 厌氧颗粒污泥中微生物按照基质的浓度梯度沿纵线呈层次性分布^[11], 颗粒污泥的这种结构能很好地保护内层微生物, 使其在低浓度的硝酸盐作用时表现出比生物膜高的 COD 降解速率. 但同时也导致了中间有毒产物传递的不及时, 造成了严重的亚硝酸盐积累, 使得颗粒污泥在高浓度硝酸盐作用下 COD 降解速率快速下降到比生物膜更低的水平, 并进一步造成颗粒污泥较弱的恢复能力. 而厌氧生物膜分层现象不明显, 内部形成大空隙, 种群分布功能化, 使得在硝酸盐还原中间产物快速传递, 并迅速被微生物降解, 减少了中间产物对有机物去除功能系统的破坏. 另一方面, 两者在生物相组成上也可能有一定的差别, 水解和产酸发酵的类型可能不同, 生物膜中可能存在数量更多或降解能力更强的亚硝酸盐降解菌.

3 结论

(1)硝酸盐浓度对生物膜和颗粒污泥的同时脱氮除碳功能产生重要影响,但生物膜体系对硝酸盐的处理能力更强。

(2)生物膜和颗粒污泥体系对硝酸盐的抵御和恢复能力不同。颗粒污泥在低浓度的硝酸盐负荷下表现出更好的抵御能力和恢复能力,而生物膜则更适合于高浓度硝酸盐负荷下脱碳功能和脱氮功能的耦合。

(3)亚硝酸盐积累是影响生物膜和颗粒污泥体系同时脱氮除碳性能的主要因素。同等情况下,颗粒污泥体系中亚硝酸盐积累量远远高于生物膜体系,最大量可达 10 倍。因此,HABSR 反应器可以作为高硝酸盐条件的同时产甲烷反硝化反应器。

参考文献:

- [1] Chen K C, Lin Y F. The relationship between denitrifying bacteria and methanogenic bacteria in a mixed culture system of acclimated sludge[J]. *Water Research*, 1993, **27**(12): 1749-1759.
- [2] Peng Y Z, Zhang S J, Zeng W, *et al.* Organic removal by denitrification and methanogenesis and nitrogen removal by nitrification from landfill leachate[J]. *Water Research*, 2008, **42**(4-5): 883-892.
- [3] Chen S, Sun D Z, Chung J S. Simultaneous methanogenesis and denitrification of aniline wastewater by using anaerobic-aerobic biofilm system with recirculation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **169**(1-3): 575-580.
- [4] Hendriksen H V, Ahring B K. Integrated removal of nitrate and carbon in an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor: operating performance [J]. *Water Research*, 1996, **30**(6): 1451-1458.
- [5] Hanaki K, Polprasert C. Contribution of methanogenesis to denitrification with an upflow filter[J]. *Water Pollution*, 1989, **61**(9-10): 1604-1611.
- [6] Stams A J M, Oude Elferink S J W H, Westermann P. Metabolic interactions between methanogenic consortia and anaerobic respiring bacteria [J]. *Advances in Biochemical Engineering*, 2003, **81**: 31-56.
- [7] Xie L, Chen J R, Zhou Q. A review on anaerobic simultaneous denitrification and methanogenesis[J]. *CIESC Journal*, 2011, **62**(3): 589-597.
- [8] Tugtas A E, Pavlostathis S G. Inhibitory effects of nitrogen oxides on a mixed methanogenic culture [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2007, **96**(3): 444-455.
- [9] Roy R, Conrad R. Effect of methanogenic precursors (acetate, hydrogen, propionate) on the suppression of methane production by nitrate in anoxic rice field soil [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 1999, **28**(1): 49-61.
- [10] Chi W T, Jiang H, Wang K J. Simultaneous denitrification and methanogenesis in an anaerobic suspended granular sludge reactor [J]. *China Biogas*, 2007, **25**(3): 10-13.
- [11] Chen L L, Zuo J E, Lou Y, *et al.* Study on simultaneous methanogenesis and denitrification in a UASB reactor[J]. *China Biogas*, 2006, **24**(2): 3-7.
- [12] Ruiz G, Jeison D, Chamy R. Development of denitrifying and methanogenic activities in USB reactors for the treatment of wastewater: effect of COD/N ratio [J]. *Process Biochemistry*, 2006, **41**(6): 1338-1342.
- [13] Wu J H, Liu W T, Tseng I C, *et al.* Characterization of microbial consortia in a terephthalate-degrading anaerobic granular sludge system[J]. *Microbiology*, 2001, **147**(2): 373-382.
- [14] Liu W T, Chan O C, Fang H H P. Characterization of microbial community in granular sludge treating brewery wastewater[J]. *Water Research*, 2002, **36**(7): 1767-1775.
- [15] Sun Y J, Zuo J E, Chen L L. Microbial community structure in simultaneous methanogenesis and denitrification granular sludge [J]. *China Environmental Science*, 2007, **27**(1): 44-48.
- [16] Sun Y J, Zuo J E, Chen L L, *et al.* Eubacteria and Archaea community of simultaneous methanogenesis and denitrification granular sludge[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, **20**(5): 626-631.
- [17] Lin Y F, Chen K C. Denitrification and methanogenesis in a co-immobilized mixed culture system [J]. *Water Research*, 1995, **29**(1): 35-43.
- [18] 孙德智, 陈胜, 郑钟植. 一种用于处理高浓度有机废水的高效复合式厌氧反应器[P]. 中国专利: CN1935698.
- [19] 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.
- [20] De Beer D, Schramm A. Micro-environments and mass transfer phenomena in biofilms studied with microsensors [J]. *Water Science and Technology*, 1999, **39**(7): 173-178.
- [21] De Beer D, Stoodley P, Lewandowski Z. Liquid flow and mass transport in heterogeneous biofilms[J]. *Water Research*, 1996, **30**(11): 2761-2765.
- [22] Lewandowski Z, Webb D, Hamilton M, *et al.* Quantifying biofilm structure[J]. *Water Science and Technology*, 1999, **39**(7): 71-76.
- [23] Zhou L, Li G, Li T, *et al.* Research progress on mass transfer in biofilms for wastewater treatment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(8): 1580-1586.
- [24] 刘雨, 赵庆良, 郑兴灿. 生物膜法污水处理技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. 73-82, 101-110.
- [25] Banihani Q, Sierra-Alvarez R, Field J A. Nitrate and nitrite inhibition of methanogenesis during denitrification in granular biofilms and digested domestic sludges [J]. *Biodegradation*, 2009, **20**(6): 801-812.
- [26] Tugtas A E, Pavlostathis S G. Inhibitory effects of nitrate reduction on methanogenesis in the presence of different electron donors[J]. *Water Science and Technology*, 2008, **57**(5): 693-698.

CONTENTS

Preface	CHEN Wei-ping (4069)
Ecological Risks of Reclaimed Water Irrigation: A Review	CHEN Wei-ping, ZHANG Wei-ling, PAN Neng, <i>et al.</i> (4070)
Study on Soil Enzyme Activities and Microbial Biomass Carbon in Greenland Irrigated with Reclaimed Water	PAN Neng, HOU Zhen-an, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4081)
Soil Salinity in Greenland Irrigated with Reclaimed Water and Risk Assessment	PAN Neng, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4088)
Effect of Reclaimed Water Irrigation on Soil Properties and Vertical Distribution of Heavy Metal	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4094)
Simulation of Effect of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Water-Salt Movement by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4100)
Simulation of Effects of Soil Properties and Plants on Soil Water-salt Movement with Reclaimed Water Irrigation by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4108)
Modeling the Cd Accumulation in Agricultural Soil Irrigated with Reclaimed Water	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4115)
Model Simulation of the Transportation, Transformation and Accumulation of Synthetic Musk in Soils Input Through Recycle Water Irrigation	WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4121)
Impacts of Reclaimed Water Irrigation of Urban Lawn on Groundwater Quality	WANG Qiao-huan, CHEN Wei-ping, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (4127)
Public Awareness Assessment of Water Reuse in Beijing	ZHANG Wei-ling, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4133)
Temporal and Spatial Distribution of Ozone Concentration by Aircraft Sounding over Beijing	CHEN Peng-fei, ZHANG Qiang, QUAN Jian-nong, <i>et al.</i> (4141)
Emission Strength and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Shanghai During 2010 EXPO	WANG Hong-li, CHEN Chang-hong, HUANG Hai-ying, <i>et al.</i> (4151)
Study on Atmospheric VOCs in Gongga Mountain Base Station	ZHANG Jun-he, WANG Yue-si, WU Fang-kun, <i>et al.</i> (4159)
Regional Atmospheric Environment Risk Source Identification and Assessment	ZHANG Xiao-chun, CHEN Wei-ping, MA Chun, <i>et al.</i> (4167)
Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanes and <i>n</i> -Alkanoic Acids in the Smoke from Combustion of Rice Straw	LIU Gang, SUN Li-na, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (4173)
Research on NEDC Ultrafine Particle Emission Characters of a Port Fuel Injection Gasoline Car	HU Zhi-yuan, LI Jin, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4181)
Magnetic Response of Street Tree Leaves to Particulate Pollution in Shanghai	LONG Qian, ZHOU Ju-zhen, MENG Jie, <i>et al.</i> (4188)
Diurnal Variations of Greenhouse Gas Fluxes at the Water-Air Interface of Aquaculture Ponds in the Min River Estuary	YANG Ping, TONG Chuan, HE Qing-hua, <i>et al.</i> (4194)
Effects of Simulated Warming on Soil Respiration in a Cropland Under Winter Wheat-Soybean Rotation	LIU Yan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (4205)
Transport and Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Air from Dashiwei Karst Sinkholes in Guangxi, China	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, SUN Qian, <i>et al.</i> (4212)
Pollution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water of Songhua River Basin During the Icebound Season	MA Wan-li, LIU Li-yan, QI Hong, <i>et al.</i> (4220)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (4226)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Riparian Soils Along Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4237)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Partial Surface Sediments of Liaohe River	WU Jiang-yue, LIU Zheng-tao, ZHOU Jun-li, <i>et al.</i> (4244)
Phenols Pollutants in Soil and Shallow Groundwater of a Retired Refinery Site	PEI Fang, LUO Ze-jiao, PENG Jin-jin, <i>et al.</i> (4251)
Heterogeneous Characteristic of PAHs' Spatial Distribution in a Large Coking Site of China	LIU Geng, GUO Guan-lin, NAN Feng, <i>et al.</i> (4256)
Vertical Distribution and Source Analysis of Organochlorine Pesticides in Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LIAO Xiao-ping, ZHANG Cai-xiang, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (4263)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soil of the Chongming Island in Shanghai	LÜ Jin-gang, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4270)
Mercury and Copper Accumulation During Last Fifty Years and Their Potential Ecological Risk Assessment in Sediment of Mangrove Wetland of Shenzhen, China	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (4276)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in the Sediments from Shahe Reservoir, the Upper Reach of the North Canal River	ZHANG Wei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (4284)
Speciation and Pollution Characteristics of Heavy Metals in the Sediment of Taihu Lake	QIN Yan-wen, ZHANG Lei, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (4291)
Chemical Composition and Daily Variation of Melt Water During Ablation Season in Monsoonal Temperate Glacier Region: A Case Study of Baishui Glacier No. 1	ZHU Guo-feng, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (4300)
Experimental Study on the Environmental Fate of Nitrogen in Snail-Macrophyte Ecosystem for Water Purification	ZHOU Lu-hong, GU Xiao-hong, ZENG Qing-fei, <i>et al.</i> (4307)
Growth Inhibition Effect of Immobilized Pectinase on <i>Microcystis aeruginosa</i>	SHEN Qing-qing, PENG Qian, LAI Yong-hong, <i>et al.</i> (4316)
A Novel Approach of Using Fouling Index to Evaluate NOM Fouling Behavior During Low Pressure Ultrafiltration Process	XIAO Ping, XIAO Feng, ZHAO Jing-hui, <i>et al.</i> (4322)
Characteristics of Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	SUN Rong-guo, MAO Wen, MA Ming, <i>et al.</i> (4329)
Degradation of Oxytetracycline with Ozonation in Acetic Acid Solvent	LI Shi-yin, LI Xiao-rong, ZHU Yi-ping, <i>et al.</i> (4335)
Photodegradation Performance and Mechanisms of Carbamazepine and Its Impact Factors	CHEN Chao, ZHAO Qian, FENG Li, <i>et al.</i> (4340)
Investigation of Nitrobenzene Removal by Iron Sulfide (FeS)	WANG Xia-lin, LI Rui-hua (4346)
Experimental Research on <i>In-Situ</i> Auto-Monitoring for Underground Sewage Pipeline Leakage	GUO Lei, JIA Yong-gang, FU Teng-fei, <i>et al.</i> (4352)
Adsorption of Phenol Chemicals by Surfactant-Modified Zeolites	XIE Jie, WANG Zhe, WU De-yi, <i>et al.</i> (4361)
Acute Toxicity of Antibiotics and Anaerobic Digestion Intermediates in Pharmaceutical Wastewaters	JI Jun-yuan, XING Ya-juan, ZHENG Ping (4367)
Study on Phosphorus Removal Capability of Constructed Wetlands Filled with Broken Bricks	WANG Zhen, LIU Chao-xiang, LI Peng-yu, <i>et al.</i> (4373)
Denitrification Water Treatment with Zeolite Composite Filter by Intermittent Operation	QING Cheng-song, BAO Tao, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (4380)
Influence of Nitrate on the Simultaneous Methanogenesis and Denitrification Reaction of Anaerobic Biofilm and Granular Sludge	ZHONG Chen-yu, YE Jie-xu, LI Ruoyu, <i>et al.</i> (4387)
Study on Dewatering of Activated Sludge Under Applied Electric Field	JI Xue-yuan, WANG Yi-li, FENG Jing (4393)
Effects of Multiple Environmental Factors on Trifluorsulfuron-methyl Degradation in Soils	SONG Ning-hui, SHAN Zheng-jun, SHI Li-li, <i>et al.</i> (4400)
Effect of Alkaline Post-Treatment on Physicochemical Property of Digested <i>Spartina alterniflora</i>	CHEN Guang-yin, ZHENG Zheng, CHANG Zhi-zhou, <i>et al.</i> (4406)
Structural Changes in Mineral Phases and Environmental Release Behavior of Arsenic During Sintering of Arsenic-containing Waste	WANG Xing-run, NONG Ze-xi, WANG Qi (4412)
Study on Emission Standard System of Air Pollutants	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZHANG Ming-hui, <i>et al.</i> (4417)
Mechanism for Transformation of Environmental Criteria into Environmental Standards in China	BI Cen-cen, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long (4422)
Effect Analysis on the Two Total Load Control Methods for Poisonous Heavy Metals	FU Guo-wei (4428)

《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12月15日 33卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 12 Dec. 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