

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征 邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)

亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征 邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)

亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系 袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)

2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析 廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)

在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究 付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)

PM₁₀可替代源成分谱的建立方法及其应用 陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)

夏季东海和南黄海一氧化碳的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究 王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)

三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征 王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)

浑太水水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性 刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)

深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究 赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)

滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性 熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)

金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价 周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)

西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估 谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)

西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析 袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)

城市不同下垫面降雨径流多环芳烃 (PAHs) 分布及源解析 武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)

粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响 陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)

饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究 杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)

压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究 蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)

基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究 王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)

臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究 曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)

电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究 刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)

铁镧复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(III) 吸附性能研究 张伟, 陈静, 张高生 (4198)

重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究 楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)

光质对蛋白核小球藻 (*Chlorella pyrenoidosa*) 生长特征及生化组成的影响研究 唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)

常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响 任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)

Fe²⁺ 和 Fe³⁺ 对厌氧氨氧化污泥活性的影响 李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)

CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究 阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)

盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N₂O 产生量的影响 王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)

硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析 曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)

利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响 王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)

北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征 苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)

环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响 张俊, 罗方园, 熊浩徽, 焦少俊, 叶波平 (4267)

稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征 刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)

典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义 靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)

变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响 王莲阁, 高若红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)

铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响 刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)

植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究 卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)

不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征 李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)

不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究 李平, 郎漫, 徐向华, 李煜姗, 朱淑娟 (4321)

转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较 潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)

天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集 郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)

1-硝基萘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤 尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)

鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究 卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)

污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究 窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)

上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究 田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)

硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N₂O 产生的影响 卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)

中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究 蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)

泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究 赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)

基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究 张雪莹, 温宗国 (4395)

大气棕色碳的研究进展与方向 闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)

《环境科学》征稿简则(4094) 《环境科学》征订启事(4126) 信息(4243, 4266, 4274, 4328)

CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究

阴方芳¹, 刘文如², 王建芳¹, 吴鹏¹, 沈耀良^{1,3*}

(1. 苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 3. 苏州科技学院江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州 215009)

摘要: 在连续全混反应器(CSTR)中接种 SBR 培养成熟的亚硝化颗粒污泥, 考察反应器构型对亚硝化颗粒污泥生长和运行的影响特性。结果表明, 反应器构型和进水模式变化初期部分颗粒污泥解体, 污泥平均沉速下降; 但随着反应器的进一步运行, CSTR 中实现了亚硝化絮体污泥的快速颗粒化过程; 整个研究过程中, 虽颗粒粒径分布存较大变化, 如粒径 > 2.5 mm 颗粒的减少和粒径 < 0.3 mm 颗粒的增加, 但颗粒态污泥始终是 CSTR 中占优势的污泥形态。另外, 研究表明反应器构型和进水模式的改变对出水中亚硝酸盐累积率(保持在 85% 左右)无显著影响, 并且新生的小粒径颗粒污泥比大粒径颗粒具有更高的比反应活性, 此 CSTR 中污泥的平均活性亦高于接种污泥平均活性。

关键词: CSTR; 亚硝化; 颗粒污泥; 稳定性; 颗粒化

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4230-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.2014.11.027

Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor

YIN Fang-fang¹, LIU Wen-ru², WANG Jian-fang¹, WU Peng¹, SHEN Yao-liang^{1,3}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: In order to investigate the effect of different types of reactors on the nitrosation granular sludge, a continuous stirred-tank reactor (CSTR) was studied, using mature nitrosation granular sludge cultivated in sequencing batch reactor (SBR) as seed sludge. Results indicated that the change of reactor type and influent mode could induce part of granules to lose stability with gradual decrease in sludge settling ability during the initial period of operation. However, the flocs in CSTR achieved fast granulation in the following reactor operation. In spite of the changes of particle size distribution, e. g. the decreasing number of granules with diameter larger than 2.5 mm and the increasing number of granules with diameter smaller than 0.3 mm, granular sludge held the absolute predominance of sludge morphology in CSTR during the entire experimental period. Moreover, results showed that the change of reactor type and influent mode didn't affect the nitrite accumulation rate which was still kept at about 85% in effluent. Additionally, the average activity of the sludge in CSTR was stronger than that of the seed sludge, because the newly generated small particles in CSTR had higher specific reactive activity than the larger granules.

Key words: continuous stirred-tank reactor; nitrosation; granular sludge; stability; granulation

高效、稳定的亚硝化技术一直是废水生物脱氮领域的研究热点之一^[1~5], 但因其功能菌(氨氧化细菌, AOB)具有生长速率慢、细胞产率低、对环境变化敏感等特点, 以及系统中亚硝酸盐氧化细菌(NO₂-Oxidizing Bacteria, NOB)影响的频繁出现^[6,7], 使得该亚硝化技术在工程应用中受到很大限制。目前, 亚硝化技术最成功的应用是由荷兰代尔夫特理工大学开发的 SHARON 工艺^[8], 然而, 由于该工艺无污泥截留能力(HRT = SRT)导致的较低运行负荷^[9], 使得亚硝化成为整个脱氮过程的限制性环节^[10,11]。

好氧颗粒污泥工艺由于其具有较高的生物浓度、较强的抗冲击能力、优良的沉降性能以及无需外加填料等特点受到环境领域研究者的青睐^[12]。

以 AOB 为优势种群的好氧颗粒污泥(也称亚硝化颗粒污泥)不仅可以显著改善反应器生物截留能力, 还可大大提升反应器中亚硝化反应速率, 该技术已被众多的研究报道证实^[1,13,14]。然而, 如何快速实现污泥的颗粒化仍是好氧颗粒污泥技术研究和应用的瓶颈之一^[12,15]。

目前, 好氧颗粒污泥的培养大多是在具有较大高径比、运行模式特殊(短时脉冲进水)的柱形 SBR

收稿日期: 2014-04-08; 修订日期: 2014-06-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308367); 江苏省高校自然科学基金研究重大项目(12KJA610002); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ12_0857)

作者简介: 阴方芳(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为废水处理理论与技术, E-mail: yff_123@yeah.net

* 通讯联系人, E-mail: ylshenniu@126.com

中进行^[13],但该反应器构型和运行模式在工程应用中存在诸多限制,如对于连续流污染源需要加设缓冲池或调节池,较高剪切力及短时快速进水对曝气装置及进水装置的性能要求较高且能耗大,大高径比型反应器与现行污水处理构筑物差别较大,研究结果难以用于现存实际工程的升级改造等^[2,16,17];另外,当处理高浓度含氮废水时,短时脉冲进水容易造成如游离氨(FA)、游离亚硝酸(FNA)等基质性抑制现象^[18],而且对于亚硝化工艺的研究表明,SBR 中非稳态的反应过程是导致温室气体 N_2O 释放的重要原因之一^[19].

在实际工程应用中连续流一般是环保工程师的首选工艺模式^[2,15,20].虽然,在连续流反应器中培养硝化颗粒污泥已有成功报道,但以普通活性污泥接种一般历时较长^[21].Wan 等^[1]、Kishida 等^[14]均证实在连续流反应器中以好氧颗粒污泥接种可以大大缩短硝化或亚硝化颗粒污泥的形成时间.因此,先在 SBR 中实现污泥的颗粒化,然后将颗粒接种于连续流反应器,可能是推广颗粒污泥技术应用的途径之一.尽管该途径已有少量的文献报道^[1,2,14],但关于颗粒污泥接种至连续流反应器后的动态变化信息还非常有限.

因此,本研究通过考察将 SBR 中培养成熟的亚硝化颗粒污泥接种至 CSTR 后的动态变化过程,旨在为亚硝化颗粒污泥的工程化应用提供理论基础和经验借鉴.

1 材料与方法

1.1 研究装置及运行条件

实验所用装置为合建式连续流 CSTR 反应器如图 1 所示,由有机玻璃制成,分曝气区和沉淀区两部分,有效容积分别为 1.5 L、0.6 L.曝气区底部装有曝气装置,控制曝气量为 $3.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ (表面上流速 $1.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$),为污泥系统提供溶解氧和剪切力;控制反应器进水氨氮负荷为 $3 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,水力停留时间(HRT)为 4 h;反应器于室温($25 \sim 30^\circ\text{C}$)

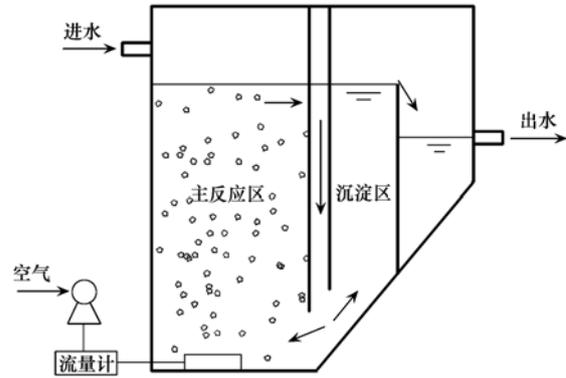


图 1 实验装置及工艺流程示意

Fig. 1 Experimental apparatus and process scheme chart

条件下运行.

1.2 接种污泥及实验用水

接种污泥为实验室 SBR 中已经培养成熟的亚硝化颗粒污泥(见图 2),亚硝化率为 $80\% \sim 85\%$.CSTR 初始接种 MLSS 和 SVI 分别约为 $8.7 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $33 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$.实验用水为人工配制无机含氮废水(见表 1).通过投加碳酸氢钠控制进水 pH 在 $7.8 \sim 8.0$.

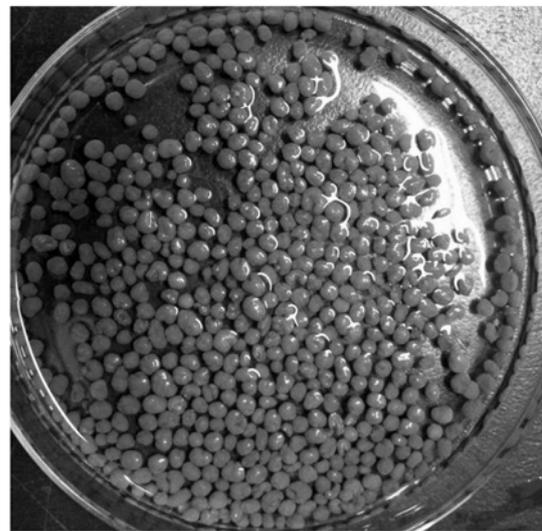


图 2 硝化颗粒污泥形态

Fig. 2 Morphology of nitrifying granules

表 1 人工配制原水的组成

Table 1 Composition of artificially prepared raw water

成分	质量浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	成分	质量浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ (以 N 计)	500	$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.009 6 ~ 0.012
$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ (以 P 计)	4 ~ 6	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.009 6 ~ 0.012
MgSO_4	10	$\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.004 8 ~ 0.006
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.12 ~ 0.15	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.002 4 ~ 0.003
H_3BO_3	0.012 ~ 0.015	KI	0.002 4 ~ 0.003
$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.012 ~ 0.015		

1.3 分析方法

MLSS: 标准重量法; 氨氮: 纳氏试剂比色法; 亚硝态氮: *N*-(1-萘基)-乙二胺光度法; 硝态氮: 紫外分光光度法; DO: HI9146N 便携式溶解氧测定仪; 颗粒污泥沉速分布: 清水静沉测速法.

污泥形态通过 OLYMPUS CX41 型显微镜及数码相机观察, 颗粒污泥粒径分布采用筛分法; 从反应器中随机取出一定量污泥, 清洗后分别通过孔径为 2.5、1.6、0.8、0.3、0.15 mm 的分样筛, 测量留在筛网上的颗粒质量, 然后将各部分相加得到污泥总重, 最终确定每一部分所占质量分数.

2 结果与讨论

2.1 颗粒污泥物理特性和形态变化

接种的亚硝化颗粒污泥为实验室 SBR 中培养

成熟的亚硝化颗粒污泥^[13], 外观为棕黄色, 结构密实, 具有规则的外形和清晰的边缘[图2、图3(a)]. 为了便于考察反应器构型对颗粒污泥的影响特性, CSTR 的初始运行控制参数和 SBR 保持基本一致, 如气体上升流速、进水氮容积负荷、进水基质浓度、MLSS、水力停留时间(HRT)以及温度等. CSTR 运行初期反应器内不断产生絮状污泥, 前两周内出水 SS 呈上升趋势, 在随后的两周内有较大波动(图4); 从图3可以看出 CSTR 中颗粒污泥的完整性出现恶化, 第15 d 时的颗粒污泥外观较接种时呈现明显的模糊、不规则; 图5所示为 CSTR 中颗粒污泥的平均沉降速率变化过程, 从中可见在反应器运行的前一个月内颗粒污泥的平均沉降速率由接种时的 $130 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ 降至 $110 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ 左右. 反应器构型的变化造成了颗粒污泥的解体.

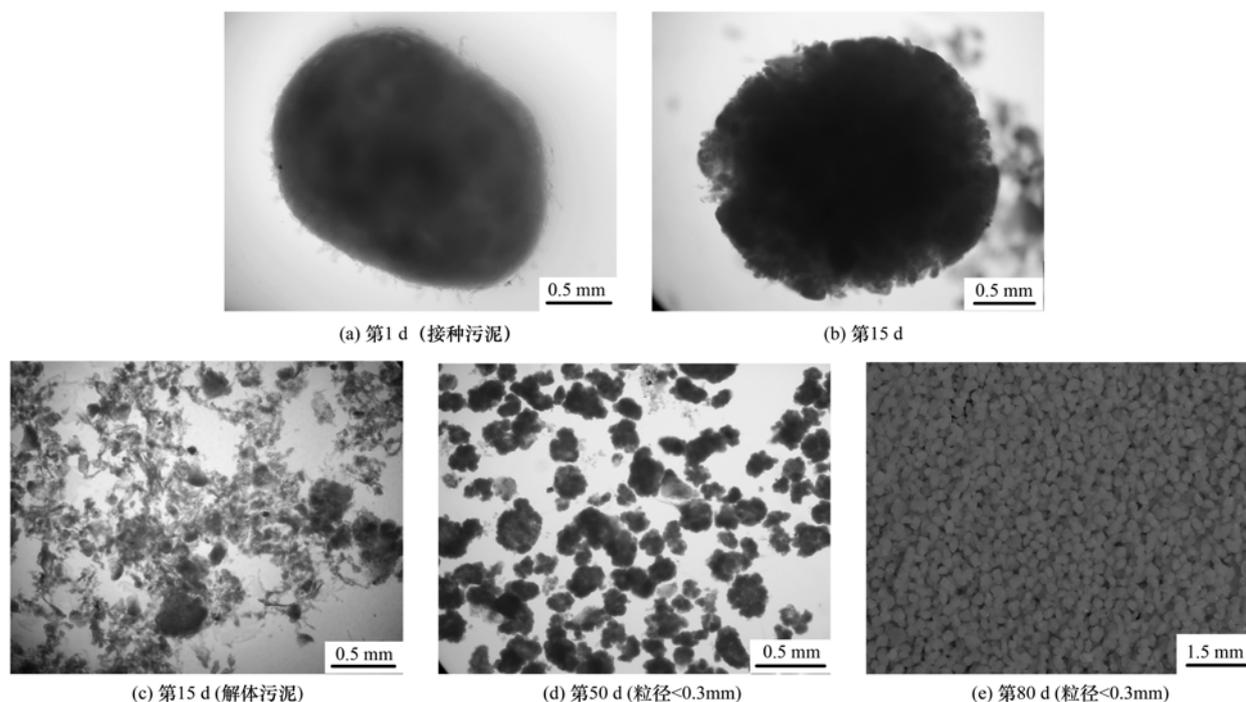


图3 CSTR 中污泥形态变化

Fig. 3 Change of morphology of sludge in CSTR

值得注意的是, 尽管 CSTR 在运行初期出现了颗粒污泥解体现象, 但颗粒态仍是反应器中占绝对优势的污泥形态, 且随着反应器的继续运行解体现象逐渐得到改善.

约从反应器运行的第30 d起, 出水中 SS 开始逐渐降低, 约在第60 d之后基本保持在 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下(图4), 同时颗粒污泥的平均沉降速率也渐渐恢复到 $120 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上(图5). 图6所示为第80 d时 CSTR 内颗粒污泥粒径分布与接种时的对比状

况, 从中可见本研究末期, CSTR 中粒径大于 0.8 mm 的污泥占总污泥的质量分数较接种时有明显降低, 但仍保持在 80% 以上. 同时, 图6还显示出第80 d时 CSTR 中颗粒污泥分布状况与接种时最显著的差异主要在粒径 $>2.5 \text{ mm}$ 的和粒径 $<0.3 \text{ mm}$ 的两部分, 其中, 粒径 $>2.5 \text{ mm}$ 的污泥占总污泥的质量分数由接种时的约 45% 降至第70 d 时的 35% 左右, 而粒径 $<0.3 \text{ mm}$ 的部分则由接种时的不足 1% 升至约 17%. 然而, 需要指出的是图6中粒径 <0.3

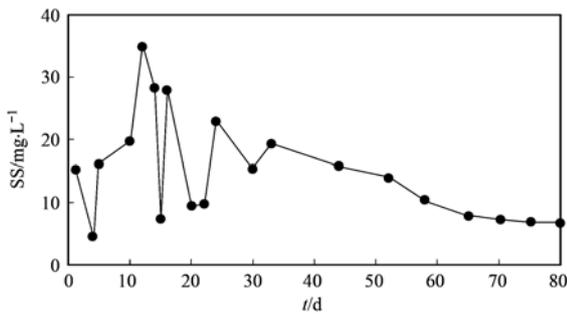


图4 反应器运行过程中出水 SS 的变化

Fig. 4 Variations of MLSS in effluent during the experiment

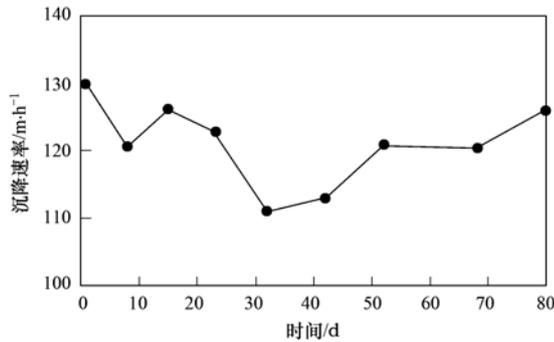


图5 反应器运行过程中颗粒污泥平均沉降速率的变化

Fig. 5 Variations of average settling velocity of granules during the experiment

mm 的污泥与 CSTR 运行初期的絮体污泥[图 3(c)]完全不同,此时粒径 < 0.3 mm 的污泥均呈良好的颗粒形态[图 3(e)].

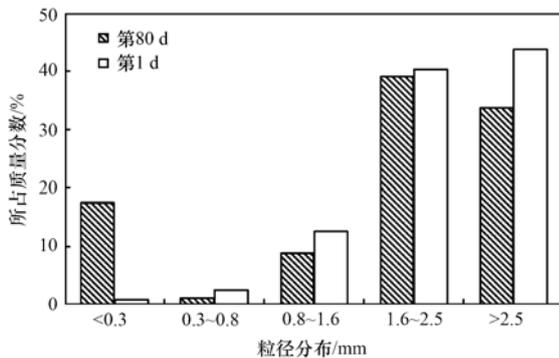


图6 第80 d 时 CSTR 中污泥粒径分布

Fig. 6 Size distribution of sludge in CSTR on day 80

反应器构型对包括水流模式、剪切力大小和方向、传质效率及基质在流体中的分布等水力因素产生重要影响^[12]. 研究发现完全混合式反应器与柱状上流式反应器呈现不同的水力动力学形态^[22,23]. Kishida^[24]指出由于反应器构型和污泥混合条件的改变造成反应器内水力流态和剪切力发生变化,从而在很大程度上影响了颗粒污泥表面微生物的剥

离. 颗粒污泥粒径较大时,需要的水力流态和剪切力也较高,而当剪切力下降时颗粒粒径也会减小,最终,颗粒污泥粒径和剪切力达到平衡状态. 高景峰等^[25]针对普通好氧颗粒污泥的研究证实,连续进水方式造成的低底物浓度梯度不利于颗粒污泥的稳定维持,并指出胞外聚合物(EPS)的分泌量以及空间分布对好氧颗粒污泥的形成及其稳定维持起着至关重要的作用. 本研究针对以自养微生物为优势种群的亚硝化颗粒污泥进行,硝化细菌不但生长速率缓慢,而且有研究^[26]证实其具有相对较低的 EPS 产率,加之研究过程中始终没有发现丝状菌的产生,可见与高景峰等^[25]研究不同. 也许正如 Torà 等^[2]分析,连续进水造成的低底物浓度梯度对自养型颗粒污泥的影响并没有像对普通好氧颗粒污泥如此显著. 同样本研究尽管采用了无较大高径比、无较强选择压的 CSTR 反应器,而这些在普通好氧颗粒污泥形成和稳定维持方面发挥重要作用的因素对于以慢速生长型细菌为优势种群的硝化颗粒污泥似乎并不重要^[13,27];另外,关于生物膜的研究表明水力流态或剪切力的作用和微生物的比生长速率相关,对于快速生长型微生物形成光滑的生物膜一般需要较高的水力冲刷作用,而对于低比生长速率生物膜所需剪切力应当适当减小^[28]. 然而,本研究除反应器构型(CSTR)和进水模式与颗粒污泥接种前所处的(SBR)不同之外,其他主要运行控制参数基本保持一致,据此可以得出反应器的构型和进水模式的改变确实造成了亚硝化颗粒污泥的解体(尤其粒径 > 2.5 mm 部分),而对于颗粒污泥解体的机制还有待深入研究.

对于反应器运行中出现的絮体是否完全来源于颗粒污泥的解体本研究尚难以证实,但从 CSTR 中 MLSS 的变化(由接种时的 $8.7 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降至第 40 d 的 $5.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)可以证明颗粒污泥的解体是造成部分污泥随出水流失的重要原因,这与 Kishida 等^[14]研究结论一致. 但污泥流失的问题并没有一直恶化下去,随着反应器的运行絮体污泥逐渐转化为小粒径颗粒污泥[图 3(e)],出水中悬浮物稳定在较低水平(图 4). 高景峰等^[25]对于研究后期好氧颗粒污泥的稳定归结为反应器中仍然存在的底物浓度梯度和颗粒污泥较高的 EPS 产率; Kishida 等^[14]就 CSTR 中粒径分布状况的改变和小粒径污泥的产生解释为进水水质的变化和水力流态的变化两种可能,并认为小粒径部分比例的增加是原来大颗粒污泥粒径减小的直接结果. 加之,以上报道^[14,25]均没

有明确小粒径部分污泥的具体形态. 然而, 本研究发现粒径 $< 0.3 \text{ mm}$ 的污泥不仅在数量上发生了由少到多的逐渐积累, 而且在形态上经历了由运行前期的以絮体为主到中后期的基本完全颗粒化的变化过程. 可见, 与有关研究不同^[14,25], 本研究中蕴含了 CSTR 中硝化颗粒污泥的培养过程, 并且该过程所用时间(少于 2 个月)远低于一般硝化颗粒污泥的培养过程^[21,29]. 分析认为虽然硝化细菌的 EPS 产生能力较低, 但是由于接种的成熟亚硝化颗粒污泥内已经含有较高的 EPS^[30,31], 在颗粒污泥解体后 EPS 分散于絮体污泥中, 从而加速了絮体污泥的颗粒化, 正如 Tsuneda 等^[26]通过投加异养微生物产生的 EPS 强化硝化生物膜快速形成的研究报道.

2.2 氮转化特性的变化

反应器构型的改变不但致使颗粒污泥的理化特性发生显著变化, 而且还对污泥的硝化性能具有一定影响. 图 7 所示为亚硝化颗粒污泥接种至 CSTR 后的整体运行状况, 从中可以看出, 在 CSTR 运行前期(前一个月) $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除效果呈现较大波动, 出水中 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度亦随之变化难稳. 研究证实与絮体污泥不同, 成熟的硝化颗粒污泥一般具有独特的微生物种群分布规律^[31,32], 然而, 反应器构型的变化引起部分颗粒污泥的解体, 其微生物种群的分布规律也随之被打破, 絮体污泥在不断产生的同时亦随出水不断流失(图 4), 加之反应器中蕴含的絮体污泥的颗粒化过程, 因此, 在上述各过程达到动态平衡之前硝化反应亦难以稳定. 当 CSTR 运行至

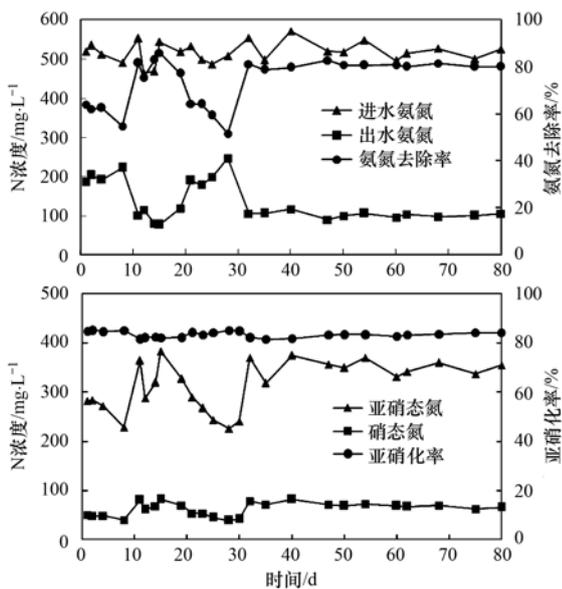


图 7 CSTR 运行概况

Fig. 7 General behavior of CSTR

约 30 d 时, 出水中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 开始趋于稳定, 并在随后的运行中一直保持. 正如 2.1 节中所述, 在 CSTR 运行的中后期反应器中污泥的形态与运行前期显著不同, 较大粒径颗粒污泥的沉降性能逐渐改善(图 5), 粒径 $< 0.3 \text{ mm}$ 的部分逐渐实现颗粒化[图 3(d)和 3(e)], 且出水 SS 也趋于稳定(图 4), 说明反应器中微生物逐渐构建了新的微生物生态平衡系统, 保证了 CSTR 稳定的硝化性能.

本研究还考察了实验末期 CSTR 中不同粒径颗粒污泥的活性以及与接种污泥的活性对比, 如图 8 所示. 从中可以看出粒径 $< 0.8 \text{ mm}$ 的颗粒污泥活性远高于粒径 $> 0.8 \text{ mm}$ 的活性, 各自的氨氮比去除速率 $\mu(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 和亚硝酸盐比累积速率 $\mu(\text{NO}_2^- \text{-N})$ 分别约为 $35 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 、 $30 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $13 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 、 $12.5 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ [图 8(a)]; 同时, 正是因为 CSTR 中小粒径颗粒污泥比例的增加(图 6)及其较高活性, 第 80 d 时 CSTR 中污泥的平均活性高于接种污泥(第 1 d 时)的活性[图 8(b)]. 当然, 对于不利于亚硝酸盐累积的亚硝酸盐氧化过程也呈现出相似的规律, 即颗粒粒径 $< 0.8 \text{ mm}$ 污泥比粒径 $> 0.8 \text{ mm}$ 污泥具有较高的硝酸盐比产生速率 $\mu(\text{NO}_3^- \text{-N})$ [图 8(a)], 第 80 d 时 CSTR 内污泥的 $\mu(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 也高于接种污泥的 $\mu(\text{NO}_3^- \text{-N})$, 见图 8(b).

另外, 更值得关注的是在本研究的整个过程中出水亚硝酸盐累积率(即亚硝化率)始终保持在

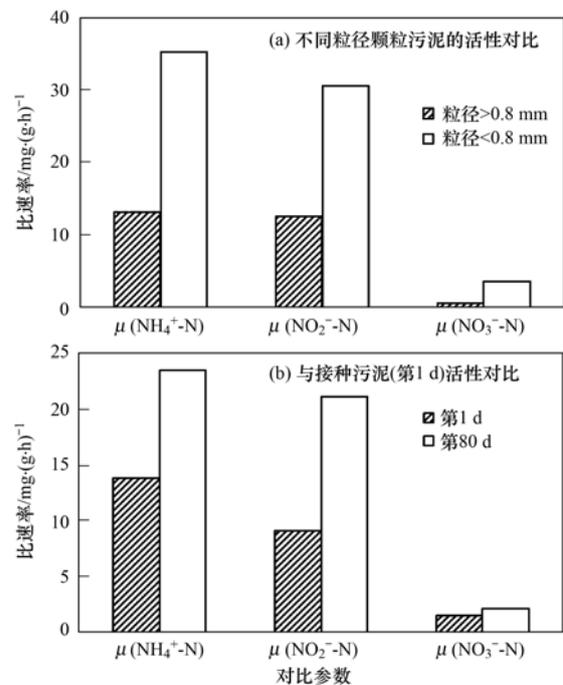


图 8 第 80 d 时 CSTR 中污泥活性对比

Fig. 8 Comparison of sludge activity in CSTR on day 80

85%左右(图7),即反应器构型的改变对亚硝化率没有显著影响。本研究认为其原因可能有以下几个方面:首先,接种污泥具有良好的亚硝化效果(亚硝化率在80%~85%),保证了初始CSTR中较低的NOB数量;其次类似于SHARON工艺的控制策略^[8],尤其在CSTR运行的前期,较低的HRT(4h)致使絮体污泥不断被洗脱,降低了反应器中NOB累积的几率;另外,大量的研究已经证实AOB比NOB更易在颗粒化污泥中成为优势种群^[1,31,33,34],在CSTR运行的中后期颗粒污泥性能的不断改善以及絮体污泥逐渐实现颗粒化,重新形成了利于AOB为种群优势的污泥形态,保证了出水中亚硝酸盐累积率的稳定。

3 结论

(1)从SBR到CSTR的反应器构型和进水模式的变化造成了部分亚硝化颗粒污泥的解体,运行约1个月后,解体现象开始得到改善;CSTR中颗粒污泥变化最显著的是粒径>2.5mm颗粒的减少和粒径<0.3mm颗粒的增加,但整个研究过程中,始终保持了颗粒态污泥是CSTR中占绝对优势的污泥形态。

(2)CSTR中实现了亚硝化絮体污泥的快速颗粒化,所用时间少于2个月,接种颗粒污泥中含有的较高量EPS和反应器较低的HRT对该过程有重要贡献。

(3)反应器构型和进水模式的改变对出水中亚硝酸盐累积率无显著影响,始终保持在85%左右;新生的小粒径颗粒污泥较大粒径颗粒污泥具有更高的活性,同时此CSTR中污泥的平均活性高于接种颗粒污泥活性,包括氨氮比去除速率 $\mu(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、亚硝酸盐比累积速率 $\mu(\text{NO}_2^--\text{N})$ 以及硝酸盐比产生速率 $\mu(\text{NO}_3^--\text{N})$ 。

参考文献:

- [1] Wan C L, Sun S, Lee D J, *et al.* Partial nitrification using aerobic granules in continuous-flow reactor: rapid startup [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **142**: 517-522.
- [2] Torà J A, Moliné E, Carrera J, *et al.* Efficient and automated start-up of a pilot reactor for nitrification of reject water: from batch granulation to high rate continuous operation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, **226**: 319-325.
- [3] Bartrolí A, Peérez J, Carrera J. Applying ratio control in a continuous granular reactor to achieve full nitrification under stable operating conditions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(23): 8930-8935.
- [4] 杨洋, 左剑恶, 卜德华, 等. 好氧颗粒污泥亚硝化工艺的启动与运行特性研究 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(11): 2462-2466.
- [5] 金仁村, 阳广凤, 马春, 等. 逆流湍动床短程硝化反应器的运行性能及基质抑制动力学模型 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(1): 217-224.
- [6] Sinha B, Annachhatre A P. Partial nitrification-operational parameters and microorganisms involved [J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2007, **6**(4): 285-313.
- [7] Rittmann B E, McCarty R L, 著, 文湘华, 王建龙译. *环境生物技术: 原理与应用* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 405-408.
- [8] Hellinga C, Schellen A A J C, Mulder J W, *et al.* The SHARON process: an innovative method for nitrogen removal from ammonium-rich waste water [J]. *Water Science and Technology*, 1998, **37**(9): 135-142.
- [9] Jaroszynski L W, Oleszkiewicz J A. Autotrophic ammonium removal from reject water: partial nitrification and anammox in one-reactor versus two-reactor systems [J]. *Environmental Technology*, 2011, **32**(3): 289-294.
- [10] Fux C, Bohler M, Huber P, *et al.* Biological treatment of ammonium-rich wastewater by partial nitritation and subsequent anaerobic ammonium oxidation (anammox) in a pilot plant [J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, **99**(3): 295-306.
- [11] 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.
- [12] 王建龙, 张子健, 吴伟伟. 好氧颗粒污泥的研究进展 [J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(3): 449-473.
- [13] 刘文如, 阴方芳, 丁玲玲, 等. 选择性排泥改善颗粒污泥亚硝化性能的研究 [J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(2): 396-402.
- [14] Kishida N, Saeki G, Tsuneda S, *et al.* Rapid start-up of a nitrifying reactor using aerobic granular sludge as seed sludge [J]. *Water Science & Technology*, 2012, **65**(3): 581-588.
- [15] Show K Y, Lee D J, Tay J H. Aerobic granulation: advances and challenges [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2012, **167**(6): 1622-1640.
- [16] de Kreuk M K, de Bruin L M M, van Loosdrecht M C M. Aerobic granular sludge-from idea to pilot plant [A]. In: *Aerobic granular sludge* [M]. London: IWA Publishing, 2005. 111-124.
- [17] de Bruin L M M, de Kreuk M K, van der Roest H F, *et al.* Aerobic granular sludge technology: an alternative to activated sludge? [J]. *Water Science & Technology*, 2004, **49**(11-12): 1-7.
- [18] Bassin J P, Kleerebezem R, Rosado A S, *et al.* Effect of different operational conditions on biofilm development, nitrification, and nitrifying microbial population in moving-bed biofilm reactors [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(3): 1546-1555.

- [19] Desloover J, Vlaeminck S E, Clauwaert P, *et al.* Strategies to mitigate N₂O emissions from biological nitrogen removal systems [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2012, **23**(3): 474-482.
- [20] Juang Y C, Adav S S, Lee D J, *et al.* Stable aerobic granules for continuous-flow reactors; Precipitating calcium and iron salts in granular interiors[J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(21): 8051-8057.
- [21] Tsuneda S, Nagano T, Hoshino T, *et al.* Characterization of nitrifying granules produced in an aerobic upflow fluidized bed reactor[J]. *Water Research*, 2003, **37**(20): 4965-4973.
- [22] Liu Y, Tay J H. The essential role of hydrodynamic shear force in the formation of biofilm and granular sludge [J]. *Water Research*, 2002, **36**(7): 1653-1665.
- [23] Dangcong P, Bernet N, Delgenes J P, *et al.* Aerobic granular sludge-a case report[J]. *Water Research*, 1999, **33**(3): 890-893.
- [24] Kishida N, Tsuneda S, Sakakibara Y, *et al.* Real-time control strategy for simultaneous nitrogen and phosphorus removal using aerobic granular sludge[J]. *Water Science & Technology*, 2008, **58**(2): 445-450.
- [25] 高景峰, 苏凯, 陈冉妮, 等. 连续进水对好氧颗粒污泥稳定维持的影响[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(7): 1377-1383.
- [26] Tsuneda S, Park S, Jung H, *et al.* Enhancement of nitrifying biofilm formation using selected EPS produced by heterotrophic bacteria[J]. *Water Science & Technology*, 2001, **43**(6): 197-204.
- [27] Liu Y Q, Wu W W, Tay J H, *et al.* Formation and long-term stability of nitrifying granules in a sequencing batch reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(9): 3919-3922.
- [28] van Loosdrecht M C M, de Kreuk M K, Heijnen J J. The unity of biofilm structures [A]. In: *Aerobic Granular Sludge* [M]. London: IWA Publishing, 2005. 1-6.
- [29] Shi X Y, Sheng G P, Li X Y, *et al.* Operation of a sequencing batch reactor for cultivating autotrophic nitrifying granules [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(9): 2960-2964.
- [30] 罗远玲, 杨朝晖, 徐峥勇, 等. 亚硝化颗粒污泥对温度变化的响应特性研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(2): 511-517.
- [31] Matsumoto S, Katoku M, Saeki G, *et al.* Microbial community structure in autotrophic nitrifying granules characterized by experimental and simulation analyses [J]. *Environmental Microbiology*, 2010, **12**(1): 192-206.
- [32] Ni B J, Yu H Q, Sun Y J. Modeling simultaneous autotrophic and heterotrophic growth in aerobic granules [J]. *Water Research*, 2008, **42**(6-7): 1583-1594.
- [33] 高景峰, 周建强, 彭永臻. 处理实际生活污水短程硝化好氧颗粒污泥的快速培养[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(10): 1604-1611.
- [34] Vázquez-Padín J R, Figueroa M, Campos J L, *et al.* Nitrifying granular systems: a suitable technology to obtain stable partial nitrification at room temperature[J]. *Separation and Purification Technology*, 2010, **74**(2): 178-186.

CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM ₁₀	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoadsorbent for As(III) Removal from Aqueous Solutions	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe ²⁺ and Fe ³⁺ on the Activity of ANAMMOX	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N ₂ O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis(<i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryI _{Ac} Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N ₂ O Releases from Bioreactor Landfill	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

《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)

2014年11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行