

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析	陈卓,刘峻峰,陶玮,陶澍 (2815)
中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单	刘海彪,孔少飞,王伟,严沁 (2823)
基于长时间序列的北京 PM _{2.5} 浓度日变化及气象条件影响分析	苗蕾,廖晓农,王迎春 (2836)
2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征	
程念亮,李云婷,张大伟,陈添,魏强,孙彤卉,王步英,富佳明,何乐为,程兵芬,皮帅,马立光,崔继宪,孟凡 (2847)	
抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析	
周静博,李治国,路娜,徐曼,杨鹏,高康宁,王建国,靳伟 (2855)	
成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征	蒋燕,贺光艳,罗彬,陈建文,王斌,杜云松,杜明 (2863)
嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析	
沈利娟,王红磊,李莉,吕升,袁婧,张孝寒,章国骏,王翥 (2871)	
泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析	张棕巍,胡恭任,于瑞莲,刘贤荣,胡起超,王晓明 (2881)
城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险:以贵阳市为例	李晓燕,汪浪,张舒婷 (2889)
桂林市酸雨变化特征及来源分析	郭雅思,于爽,黎泳珊,孙平安,何若雪 (2897)
农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH ₃ 和N ₂ O)减排效果比较:以夏玉米季为例	范会,姜姗姗,魏茨,蒋静艳 (2906)
青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤CO ₂ 、CH ₄ 和N ₂ O通量的观测	吴建国,周巧富 (2914)
三峡库区香溪河秋末至中冬CO ₂ 和CH ₄ 分压特征分析	张军伟,雷丹,肖尚斌,张成,穆晓辉,刘佳,李迎晨 (2924)
气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析	张晨,刘汉安,高学平,张文娜 (2932)
三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例	
吴东,黄志霖,肖文发,曾立雄,韩黎阳 (2940)	
入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究:以洱海北部流域为例	项颂,庞燕,储昭升,胡小贞,孙莉,薛力强 (2947)
库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响:以草堂河为例	王晓彤,罗光富,操满,王雨春,汪福顺,邓兵 (2957)
农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析	李如忠,黄青飞,钱靖,殷晓曦,韦林 (2964)
农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究	李强坤,胡亚伟,宋常吉,彭聪 (2973)
三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨	
柴雪思,雷利国,江长胜,黄哲,范志伟,郝庆菊 (2979)	
重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究	刘静,郑丙辉,刘录三,马迎群,林岗璇,汪星,夏阳 (2989)
深圳地区全氟辛酸磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究	崔晓宇,张鸿,罗骥,张若冰 (3001)
柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价	卫亚宁,潘佳钊,宋玉梅,郭鹏然,王毅 (3007)
北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析	陈永娟,胡玮璇,庞树江,王晓燕 (3017)
昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义	王启栋,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁,曹磊 (3026)
甬醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示	廖昱,孙玉川,王尊波,梁作兵,张远瞩 (3034)
漳沱河冲洪积扇地下水中酚酸酯的污染现状与分布特征	昌盛,赵兴茹,刘琰,耿梦娇,肖肖翠 (3041)
雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析	张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,赵瑞一,梁作兵 (3049)
Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制	张翔凌,黄华玲,郭露,陈巧珍,阮聪颖,冷玉洁 (3058)
Ce ³⁺ 与Cu ²⁺ 协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究	张剑桥,迟惠中,宋阳,罗从伟,江进,马军 (3067)
Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究	丁文川,向星光,曾晓岚,厉晓宇,梁国强, M. M. Mian (3073)
石墨烯-TiO ₂ 光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解	徐琪,周泽宇,王洪涛 (3079)
单偶氮染料AY17的光催化降解动力学及机制	阳海,魏宏庆,胡乐天,胡倩,阳立平,刘华杰,易翔,易兵 (3086)
硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性	马航,朱强,朱亮,李祥,黄勇,魏凡凯,杨朋兵 (3094)
膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能	刘春,于长富,张静,陈晓轩,张磊,杨景亮 (3101)
ABR工艺ANAMMOX耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水	吴鹏,张诗颖,宋吟玲,徐乐中,沈耀良,张婷 (3108)
活性污泥厌氧Fe(III)还原氨氧化现象初探	李祥,林兴,杨朋兵,黄勇,刘恒蔚 (3114)
低浓度氨氮废水单级自养脱氮EGSB反应器的快速启动	顾书军,方芳,李凯,刘勇,郭劲松,陈猷鹏,蒋甫阳 (3120)
超低溶解氧条件下的EBPR系统除磷性能	马娟,宋璐,俞小军,李璐,孙雷军,孙洪伟,李光银 (3128)
活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响	何志江,赵媛,张源凯,王洪臣,齐鲁,尹训飞,张晓军 (3135)
山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估	
王菲,吴泉源,吕建树,董玉龙,曹文涛,康日斐,曹见飞 (3144)	
电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征	赵科理,傅伟军,叶正钱,戴巍 (3151)
我国18种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究	冯璞阳,李哲,者渝芸,黄杰,梁东丽 (3160)
流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征	李鑫,杨军,饶伟,王代长,杜光辉,化党领,刘世亮,刘红恩 (3169)
聚羧基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu ²⁺ 、Zn ²⁺ 的吸附特性	朱健,雷明婧,王平,张伟丽,陈仰 (3177)
新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价	王文东,刘荟,张银婷,杨生炯 (3186)
纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附	朱倩,李正魁,张一品,韩华杨,王浩 (3192)
鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中PAHs的生物有效性	
张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,王芳,王代长,蒋新 (3201)	
不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响	景新新,苏志忠,邢红恩,王发园,石兆勇,刘雪琴 (3208)
中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究	王晓南,闫振广,余若祯,王婉华,陈丽红,刘征涛 (3216)
贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响	林文芳,陈胜,万堃,王春明,林惠荣,于鑫 (3224)
不同氨水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响	吕玉,周龙,龙光强,汤利 (3229)
《环境科学》征订启事(3025) 《环境科学》征稿简则(3057) 信息(3072, 3085, 3143)	

低浓度氨氮废水单级自养脱氮 EGSB 反应器的快速启动

顾书军¹, 方芳^{1*}, 李凯¹, 刘勇¹, 郭劲松², 陈猷鹏², 蒋甫阳¹

(1. 重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045; 2. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 401122)

摘要: 将单级自养脱氮生物膜污泥作为种泥接种于膨胀颗粒污泥床反应器中, 并对该反应器进行启动。在温度为 $(30 \pm 2)^\circ\text{C}$, pH 值为 7.8~8.2, DO 为 $0.2 \sim 1.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 上升流速为 $2.0 \sim 4.0 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 的条件下, 进行了低浓度氨氮 ($60 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 废水的单级自养脱氮工艺快速启动研究。结果表明, 经过 83 d 的运行, 反应器历经适应期、提高期和稳定期后, 稳定运行阶段 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 去除率分别达到 99.4% 和 80.7%。通过控制回流比和提高进水氨氮负荷维持了稳定的低 DO 状态, 有效抑制了硝化细菌的生长, 而部分亚硝化反应和厌氧氨氧化反应为主导反应并能保持高效、稳定的脱氮效果, 成功实现了在膨胀颗粒污泥床反应器中单级自养脱氮过程的启动。颗粒污泥平均粒径从 $174 \mu\text{m}$ 增大到 $296 \mu\text{m}$ 。扫描电镜显示颗粒污泥表面光滑, 微生物以球菌、短杆菌为主。FISH 结果显示亚硝化细菌分布在颗粒污泥表面, 厌氧氨氧化菌分布在颗粒污泥内部。反应器中构建了稳定的自养脱氮颗粒污泥系统。

关键词: 单级自养脱氮工艺; 低浓度氨氮废水; 启动; 颗粒污泥; 膨胀颗粒污泥床反应器

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-3120-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.08.038

Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia

GU Shu-jun¹, FANG Fang^{1*}, LI Kai¹, LIU Yong¹, GUO Jin-song², CHEN You-peng², JIANG Fu-yang¹

(1. College of Urban Construction & Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 401122, China)

Abstract: Biofilm coming from a reactor in which One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process exists was selected as inoculum in an expanded granular sludge bed reactor. A potential fast start-up procedure was tested in this research. Wastewater with low ammonium concentration between $60\text{--}100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ was applied. The results showed that a One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process was successfully established in 83 days under the following conditions: temperature at $(30 \pm 2)^\circ\text{C}$, pH at 7.8–8.2, dissolved oxygen (DO) at $0.2\text{--}1.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and upflow velocity at $2.0\text{--}4.0 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$. After the 83-day operation, the removal efficiencies of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TN were 99.4% and 80.7%, respectively. By controlling the reflux ratio and increasing the $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ load, the reactor could maintain a stable state of low DO concentration. Nitrification and anaerobic ammonium oxidation became main reactions that maintained efficient and stable nitrogen removal performance. In addition, nitrite-oxidizing bacteria (NOB) were inhibited. In the start-up process, the average particle diameter of granular sludge increased from 174 to $296 \mu\text{m}$. Moreover, scanning electron microscopy showed that the surface of granular sludge was smooth, and most microorganisms were beviobacteria and cocci. Finally, a fluorescence in situ hybridization experiment showed that ammonium oxidation bacteria and anaerobic ammonium oxidation bacteria were distributed on the surface and in the inner space of granular sludge, respectively. The research indicated that a stable autotrophic nitrogen removal granular sludge system was quickly established in the sludge bed.

Key words: one-stage autotrophic nitrogen removal process; low concentration of ammonia wastewater; start-up; granular sludge; expanded granular sludge bed reactor

近年来,污水处理概念厂的理念在污水处理领域获得了广泛关注,其核心之一是使城市污水处理厂成为新型能源工厂,实现能源自给,达到碳中和的运行目标^[1]。传统生物脱氮技术需要投加大量碳源实现污染物的去除,而厌氧氨氧化反应的发现为城市低浓度氨氮污水实现自养脱氮提供了新的思路^[2,3]。目前,国外已有城市污水厂在旁流中成功应用了自养脱氮技术^[4],而在国内的研究报道尚少。

单级自养脱氮工艺是好氧氨氧化菌(ammonia oxidizing bacteria, AOB)与厌氧氨氧化菌(anaerobic-ammonium oxidizing bacteria, AnAOB)共存一个系统

内,通过部分亚硝化反应与厌氧氨氧化反应,完成 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 至 N_2 的自养转化过程^[5]。单级自养脱氮工艺不需要外加碳源,可节省 57.5% 的曝气量,污泥产量少,具有节能、运行费用低等优点^[6]。目前,该工艺主要应用于高浓度氨氮废水的处理^[7,8],而对于氨氮浓度低于 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的废水,面临着低 DO 需求而难以精准控制,AnAOB 世代周期长使得富集

收稿日期: 2016-01-08; 修订日期: 2016-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278509, 51578527)

作者简介: 顾书军(1990~),男,硕士研究生,主要研究方向为废水处理理论与技术, E-mail: shujungu@126.com

* 通讯联系人, E-mail: fangfangcq@cqu.edu.cn

更加困难,亚硝酸盐氧化菌(nitrite oxidation bacteria,NOB)作为AOB最常见的伴生菌种而难以有效淘汰等难题^[9,10].

目前,单级自养脱氮工艺多数采用生物膜法和活性污泥法^[11,12],而颗粒污泥具有沉降性好,单位容积可容纳更多的生物量等优点,是未来污水处理发展的主要方向之一^[13].若能以颗粒污泥的形式富集自养菌,实现低氨氮浓度下AOB和AnAOB有效持留,将会促进该工艺的进一步发展.当前,已有少数学者对单级自养脱氮颗粒污泥的培养进行了探索,如Wang等^[14]控制进水氨氮浓度为 (431.7 ± 25.5) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,经过165 d的连续运行后,颗粒污泥的平均粒径为630 μm .Vázquez-Padín等^[15]在进水氨氮浓度为100~350 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的条件下,经过长达340 d的运行后,成功培养出平均粒径为1 600 μm 的颗粒污泥.这些研究均集中在较高的进水氨氮浓度下培养颗粒污泥,且颗粒污泥的培养时间也很长,而以低浓度氨氮废水培养颗粒污泥的研究还鲜见报道.

因此,本实验在低浓度氨氮废水条件下,进行了单级自养脱氮膨胀颗粒污泥床(expanded granular sludge bed,EGSB)反应器的启动研究,并在启动的过程中培养颗粒污泥,以期为单级自养脱氮工艺应用于低氨氮废水的处理提供参考.

1 材料与方法

1.1 实验装置

EGSB实验装置如图1所示.EGSB反应器由有机玻璃制成,三相分离器顶部不加盖,与空气连通.反应器高130 cm,内径为5 cm,总容积5.0 L.其中,反应区高100 cm,有效容积2.0 L.反应器外部设置水浴区,维持反应器内水温为 (30 ± 2) $^{\circ}\text{C}$.为避免启动初期污泥流失过多,将砂芯曝气头设于反应区上部曝气,并通过转子流量计调节曝气量.三相分离器顶部上清液经回流泵回流至反应器底部.

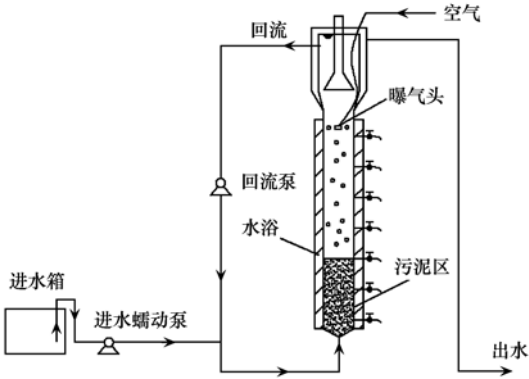


图1 EGSB反应器实验装置示意
Fig. 1 Schematic diagram of test equipment of EGSB reactor

1.2 实验用水与接种污泥

实验用水为人工配制的低浓度氨氮废水.在自来水中加入适量的 NH_4HCO_3 ,使氨氮浓度控制在60~100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,加入适量的 KH_2PO_4 和 NaHCO_3 ,调节pH值至7.8~8.2.配制微量元素贮备液^[16],微量元素贮备液按1 $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 溶液加入反应器.人工配水水质见表1.

Table 1 人工配水水质 Composition of the synthetic wastewater			
NH_4^+-N / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NO_3^--N / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	COD / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	pH
58.1~102.0	<3.0	<20.0	7.8~8.2

接种污泥为稳定运行的单级自养脱氮生物膜反应器絮状污泥,MLSS为4 500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,接种量为1 L.

1.3 启动方案

EGSB反应器采用连续进出水的方式运行,进水量为5.0 $\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$,回流量为100~200 $\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$,HRT为24 h,水温为 (30 ± 2) $^{\circ}\text{C}$,反应器水流上升流速为2.0~4.0 $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$.反应器连续运行了83 d,根据TN去除情况将启动过程分为适应期、提升期和稳定期这3个阶段,各阶段实验方案见表2.

Table 2 EGSB反应器启动阶段实验方案 Test scheme for start-up of EGSB reactor							
阶段	时间 /d	进水 NH_4^+-N / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NLR ¹⁾ / $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$	污泥区DO / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	上升流速 / $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$	供氧方式	回流比
适应期	1~19	59.2~61.4	59.2~61.4	0.9~1.1	2.0~3.0	曝气,回流	(20~30):1
提高期	20~53	58.1~102.0	58.1~102.0	0.4~0.6	4.0	停止曝气,回流	40:1
稳定期	54~83	99.4~101.7	99.4~101.7	0.2~0.4	4.0	停止曝气,回流	40:1

1)表示进水总氮容积负荷

1.4 分析方法

NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 和MLSS等均采用国

家环境保护总局发布的标准方法^[17],TN为 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 和 NO_3^--N 浓度之和.COD采取重铬酸钾-硫

酸银氧化法, DO 采用 YSI Professional ODO™ 便携式溶氧仪测定, pH 采用 YSI pH100 便携式 pH 计测定. 污泥平均粒径通过 Microtrac S3500 激光粒度仪测定. 扫描电镜通过日立 S-3400N 型扫描电镜仪测定. 荧光原位杂交 (FISH): 污泥样品经戊二醛固定、OCT 包埋剂包埋、切片以及乙醇梯度脱水等步骤后, 再进行原位杂交, 在温度为 46℃ 的条件下杂交 2 h, 样品洗涤晾干后在奥林巴斯 FV1200 激光共聚焦显微镜 (CLSM) 上扫描成像观察. 杂交探针采用 CY3 (红色) 标记的 AMX820 探针和 FITC (绿色) 标记的 NSO1225 探针, 其序列如表 3 所示.

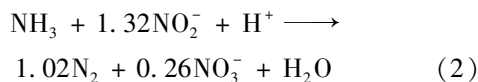
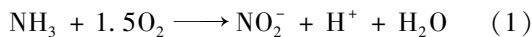
表 3 FISH 探针序列

Table 3 Probes of FISH

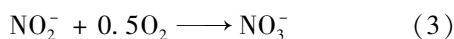
细菌	FISH 探针	序列
AnAOB	AMX820	5'-AAAACCCCTCTACTTAGTGCCC-3'
AOB	NSO1225	5'-CGCCATTGTATTACGTGTGA-3'

1.5 氨氮的转化途径计算

在单级自养脱氮工艺中, 进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的理论转化途径主要为部分亚硝化及厌氧氨氧化反应, 反应方程式如式(1)和式(2)所示.



实际上, 进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 经部分亚硝化反应转化为 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 后, 生成的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 不仅会参加厌氧氨氧化反应, 还可能被 NOB 利用, 通过硝化反应将 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 反应方程式如式(3)所示.



若忽略反应器中的反硝化及同化作用, 则根据氮元素守恒, 可得进出水的总氮损失 ΔN , 计算如式(4)所示.

$$\Delta\text{N} = (\text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{inf}}) - [(\text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{eff}}) + (\text{NO}_2^-\text{-N}_{\text{eff}}) + (\text{NO}_3^-\text{-N}_{\text{eff}})] \quad (4)$$

式中, $\text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{inf}}$ 为进水氨氮浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), $\text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{eff}}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}_{\text{eff}}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}_{\text{eff}}$ 分别为出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

为考察 AnAOB 对进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的转化比例, 以 P_{AnAOB} 表示经厌氧氨氧化反应转化的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的比值, 根据式(2)和式(4)可得:

$$P_{\text{AnAOB}} = \frac{\Delta\text{N}}{\text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{inf}}} \times 100\% = \frac{\frac{\Delta\text{N}}{2.04}}{\text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{inf}}} \times 100\% \quad (5)$$

为考察 AOB 对进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的比例, 以 P_{AOB} 表示经过部分亚硝化反应转化的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的比值, 根据式(1)、式(2)和式(4)可得:

$$P_{\text{AOB}} = \left(1 - \frac{\frac{\Delta\text{N}}{1.02 \times 2} + \text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{eff}}}{\text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{inf}}} \right) \times 100\% = \left(1 - \frac{\frac{\Delta\text{N}}{2.04} + \text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{eff}}}{\text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{inf}}} \right) \times 100\% \quad (6)$$

为考察进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 经全程硝化反应转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的比例, 以 P_{NOB} 表示经过全程硝化反应生成的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的比值, 根据式(1)~(4)可得:

$$P_{\text{NOB}} = \frac{(\text{NO}_3^-\text{-N}_{\text{eff}}) - \frac{\Delta\text{N}}{1.02 \times 2} \times 0.26}{\text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{inf}}} \times 100\% = \frac{(\text{NO}_3^-\text{-N}_{\text{eff}}) - \frac{\Delta\text{N}}{1.02} \times 0.13}{\text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{inf}}} \times 100\% \quad (7)$$

2 结果与讨论

2.1 EGSB 反应器的启动

反应器出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 去除率变化如图 2 所示, P_{AOB} 、 P_{AnAOB} 和 P_{NOB} 的变化如图 3 所示.

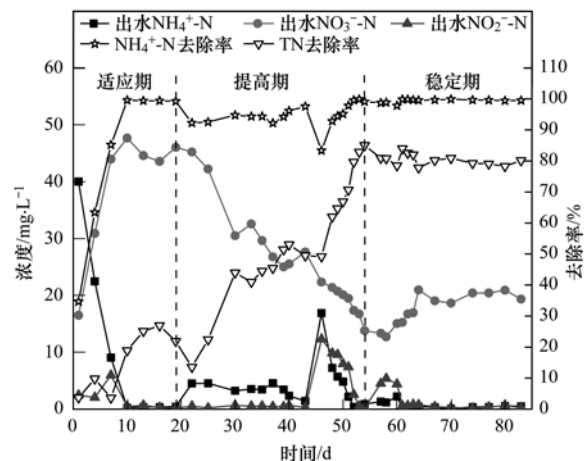


图 2 EGSB 反应器启动过程含氮物质浓度及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 去除率变化

Fig. 2 Variations of nitrogen-bearing matter and $\text{NH}_4^+\text{-N}$,

TN removal efficiencies during the start-up stage in EGSB reactor

2.1.1 适应期

第 1~19 d 为适应期. 进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为 $60.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 污泥区 DO 为 $(1.0 \pm 0.1) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 上

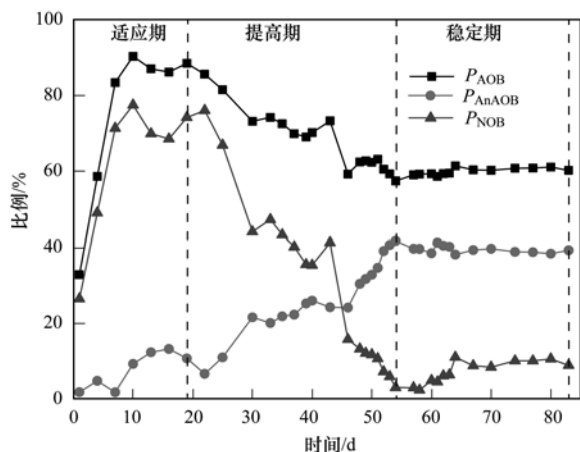


图3 EGSB 反应器启动过程中 P_{AOB} 、 P_{AnAOB} 和 P_{NOB} 的变化

Fig. 3 Variations of P_{AOB} , P_{AnAOB} and P_{NOB} during the start-up stage in EGSB reactor

升流速为 $2.0 \sim 3.0 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$. 第 1 ~ 10 d, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 从 $40.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐渐下降至 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 维持在 $6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 从 $16.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐渐上升至 $47.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 去除率呈上升趋势, 分别从 34.6%、3.7% 上升至 99.6%、18.9%. 这表明反应器启动后, AOB 和 AnAOB 逐渐适应了新的生长环境, P_{AOB} 和 P_{AnAOB} 也从 32.8% 和 1.8% 逐渐上升至 87.0% 和 9.3%, 提高了进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的转化比例. 在此期间, P_{NOB} 逐渐从 26.5% 上升至 77.5%, 表明经部分亚硝化反应生成的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$, 大部分再经硝化反应转化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$.

第 11 ~ 19 d, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 趋于稳定, 平均浓度分别为 0.4 、 0.4 和 $44.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 平均去除率分别为 99.0%、25.0%. 显然, 反应器的进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 已被大部分转化, 而 TN 去除率较低. 这可能是由于反应器 DO 较高, 为 $(1.0 \pm 0.1) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 厌氧氨氧化反应所需的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 不足, 使得 TN 去除率较低. 秦宇等^[18]研究发现, 在单级自养脱氮工艺中, 高 DO 有利于 AOB、NOB 的生存, 同时也将对 AnAOB 产生抑制. 当 EGSB 反应器保持较高的污泥区 DO 时, P_{AOB} 和 P_{AnAOB} 的平均比例分别为 87.2% 和 12.1%, 表明 AOB 将进水中大部分的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 转化为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$, 造成 AnAOB 所需 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 不足. 与此同时, 厌氧氨氧化反应及硝化反应均需要共同的基质 $\text{NO}_2^- - \text{N}$, 污泥区较高的 DO 有利于硝化反应的进行. 此期间 P_{NOB} 平均比例为 72.5%, 表明大部分 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 转化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 造成参与厌氧氨氧化反应的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 不足. 由此推测

在适应期, EGSB 反应器污泥区 DO 偏高, 造成厌氧氨氧化反应所需的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 不足, AnAOB 活性较低, 反应器的脱氮效果较差. 因此为提高 TN 去除率, 需降低污泥区的 DO.

2.1.2 提高期

第 20 ~ 53 d 为提高期. EGSB 反应器启动第 20 d, 反应器停止曝气, 回流泵将反应器顶部上清液回流至底部污泥区, 回流比提高为 40:1, 污泥区 DO 降低至 $(0.5 \pm 0.1) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 略有升高, 平均浓度为 $3.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 保持稳定, 平均浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 从 $45.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐渐下降至 $27.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率略有下降, 但仍然稳定在 90.0% 左右, TN 去除率逐渐上升, 从 13.6% 上升至 49.5%. 这是由于降低反应器污泥区 DO 后, 污泥内部为 AnAOB 的富集和生长提供了厌氧的微环境, 而 AOB 和 NOB 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 转化率的降低, 则为厌氧氨氧化反应提供了基质, AnAOB 可以利用较多的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 进行厌氧氨氧化反应, 使得 TN 去除率逐渐升高. 第 20 ~ 43 d, P_{AOB} 、 P_{NOB} 分别从 85.6%、76.0% 下降至 73.3%、41.2%, 且 P_{AOB} 与 P_{AnAOB} 的比值从 12.88 降低到 3.02, 接近式 (2) 中 $\Delta \text{NO}_2^- - \text{N} / \Delta \text{NH}_4^+ - \text{N} = 1.32$ 的化学计量关系, 表明降低 DO 后, 提高了 AOB 和 AnAOB 的协同脱氮效果, 但由于 TN 去除率仅为 49.5%, 需要进一步降低 DO, 淘汰 NOB, 提高 TN 去除率.

EGSB 反应器启动第 44 d, 将进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度从 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提高为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 进水氨氮负荷从 $60 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 提高为 $100 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, 反应器供氧由回流液提供, 污泥区 DO 降低至 $(0.3 \pm 0.1) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 均呈逐渐下降的趋势. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 去除率逐渐上升并在第 53 d 时分别达到 99.9%、82.8%. 提高进水氨氮负荷后, 部分亚硝化反应消耗的 DO 增多, 而污泥区 DO 进一步降低, 从而更强烈地抑制了 NOB, 在此期间, P_{NOB} 从 15.8% 逐渐下降至 5.9%, P_{AnAOB} 从 24.1% 逐渐上升至 40.6%. 另一方面, 提高进水氨氮负荷后, 进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 转化为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的比例稳定在合适的范围内, 平均比例为 61.4%, P_{AnAOB} 逐渐上升, AnAOB 可以利用更多的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 参与厌氧氨氧化反应. 在提高进水氨氮负荷后, 至第 53 d 时, P_{AOB} 与 P_{AnAOB} 的比值为 1.46, 与第 20 ~ 43 d 相比, 更加接近公式 (2) 中 $\Delta \text{NO}_2^- - \text{N} / \Delta \text{NH}_4^+ - \text{N} = 1.32$ 的化学计量关系, 表明 AOB、AnAOB 发挥了良好的协同脱氮作用.

2.1.3 稳定期

第 54 ~ 83 d 为稳定期. 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 保持稳定, 平均浓度分别为 0.7、1.4 和 17.4 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 去除率平均为 99.4%、80.7%, 非常接近张小玲等^[19] 在进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 60 ~ 100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下成功启动单级自养脱氮工艺的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率 98.7% 和 TN 去除率 80.9%, 也与 Liang 等^[20] 控制进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 400 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 成功启动反应器的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率 95.0% 和 TN 去除率 83.1% 类似, 但高于 Daverey 等^[21] 在进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 183 ~ 200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下成功启动单级自养脱氮工艺的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率 60% ~ 95% 和 TN 去除率 40% ~ 60%. 在此期间, EGSB 反应器通过停止曝气, 提高进水氨氮负荷的方式进一步消耗了 DO, 反应器的供氧主要由回流液提供, 污泥区可保持稳定的低 DO 环境, 部分亚硝化与厌氧氨氧化反应保持了高效的协同脱氮作用, TN 去除率稳定在较高的水平. 对反应器中进水氨氮的转化途径进行分析可以得到, P_{NOB} 、 P_{AOB} 和 P_{AnAOB} 的平均比例分别为 7.0%、59.8% 和 39.6%, P_{AOB} 与 P_{AnAOB} 的比值稳定在 1.32 左右, 仅有 7% 左右的进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 由全程硝化反应

转化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 表明 EGSB 反应器中部分亚硝化反应及厌氧氨氧化反应占据主导并能保持高效、稳定的脱氮效果, 成功快速启动了单级自养脱氮工艺.

2.2 颗粒污泥的培养

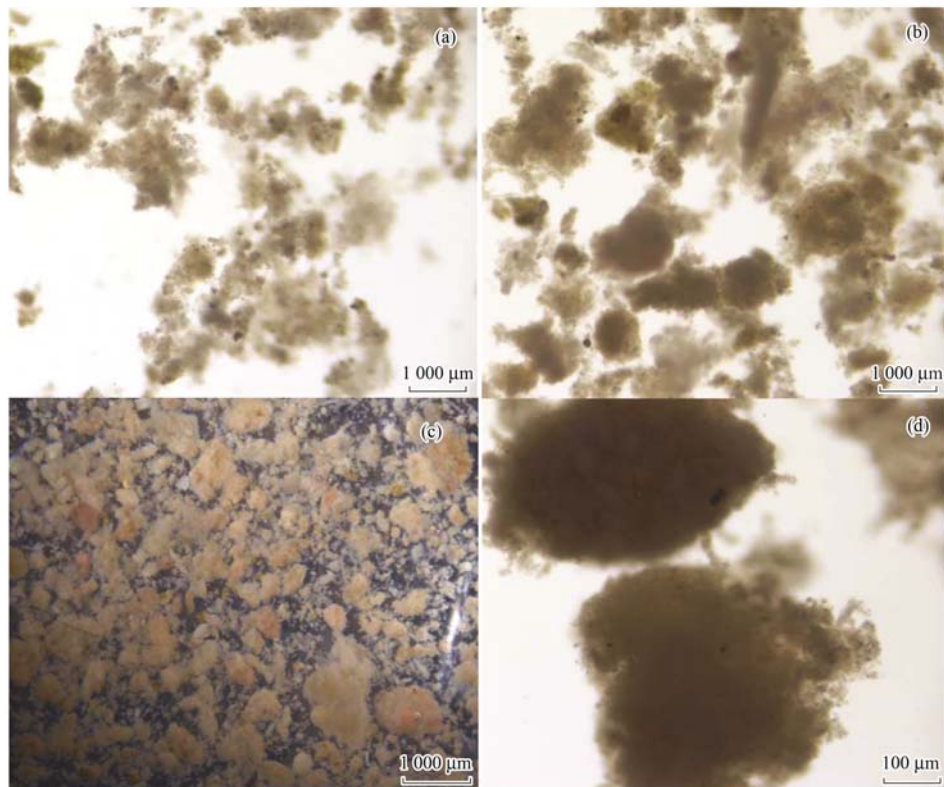
2.2.1 污泥形态变化

EGSB 反应器污泥形态变化如图 4 所示. 第 0 d 时, 污泥为絮状污泥, 结构疏松、形状不规则、污泥之间无明显分界. 第 53 d 时, 絮状污泥初步聚集, 出现小颗粒污泥, 结构较紧密, 形状呈现为规则的椭圆、圆形, 边界较明显. 由图 4(c) 以及将其局部放大 10 倍后的图 4(d) 可知, 与第 53 d 相比, 第 70 d 的颗粒污泥粒径进一步增大, 结构更加致密, 形状规则, 呈圆形或椭圆形, 边界明显, 颗粒污泥外部为黄色, 内部呈红色.

2.2.2 颗粒污泥的平均粒径

EGSB 反应器启动过程中对第 0 d(接种污泥)、第 53 d 和第 70 d 的污泥粒径进行了 3 次测量, 其结果如图 5 所示.

由图 5 可知, 接种絮状污泥的平均粒径为 174 μm , 这与普通的活性污泥絮体^[22] 的平均粒径相近, 经过 EGSB 反应器的连续培养至第 53 d 和第 70 d 时, 污泥的平均粒径分别为 260 μm 和 296 μm , 污泥



(a) 第 0 d(接种污泥); (b) 第 53 d; (c) 第 70 d; (d) 第 70 d(放大 10 倍)

图 4 EGSB 反应器污泥形态变化

Fig. 4 Evolution of morphological observation of sludge in EGSB reactor

粒径不断增大,逐渐向颗粒污泥转化.

EGSB 反应器具有较高的上升流速、较大的高径比等特点,可为自养颗粒污泥的形成提供合适的微生物选择压及水力剪切作用,有助于微生物分泌胞外聚合物,污泥絮体凝聚,促进颗粒污泥形成. 已有研究认为,好氧颗粒污泥的最小平均粒径需超过 $200\text{ }\mu\text{m}$ ^[23,24]. 本实验在低浓度氨氮废水的条件下,在启动第 70 d 时,培养平均粒径为 $296\text{ }\mu\text{m}$ 的自养颗粒污泥. 蔡庆等^[25]控制进水氨氮浓度为 $190\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下培养单级自养脱氮颗粒污泥,经过 165 d 后,颗粒污泥的平均粒径为 $630\text{ }\mu\text{m}$. Vázquez-Padín 等^[15]经过 340 d 的连续运行,成功培养出平均粒径为 $1\,600\text{ }\mu\text{m}$ 的单级自养脱氮颗粒污泥. 相比较而言,本实验培养的颗粒污泥平均粒径相对较小,可能存在以下两方面的原因:一方面是由于 AnAOB 世代周期长,而反应器启动周期短,AnAOB 的培养时间不足;另一方面,较低的进水氨氮浓度也会造成 AOB、AnAOB 生长所需的基质不足. 因此,后期可以通过逐步提高进水氨氮负荷的方式增大颗粒污泥的粒径.

2.2.3 颗粒污泥的扫描电镜分析

第 70 d 时 EGSB 反应器颗粒污泥电镜扫描如

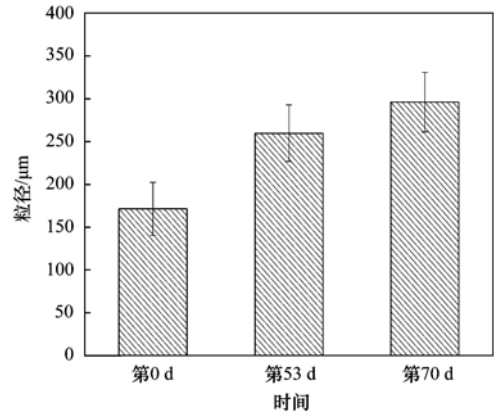


图5 EGSB 反应器污泥平均粒径分布

Fig. 5 Average particle diameter distribution of sludge in EGSB reactor

图 6 所示. 颗粒污泥整体结构密实,呈球形或椭球形,表面光滑. 颗粒污泥的表面的孔道可为营养物质和气体提供通道. 由图 6(c)、6(d)可以观察到,颗粒污泥表面分布有大量的球菌以及少量的短杆菌,球菌之间相互聚集、成簇聚生.

污水处理中亚硝化菌主要为亚硝化球菌属和亚硝化单胞菌属,其形态分别为球状和短杆状,厌氧氨氧化菌形态为球形和椭球形^[26]. 在单级自养脱氮工艺颗粒污泥中,AOB 多在颗粒污泥表面,而

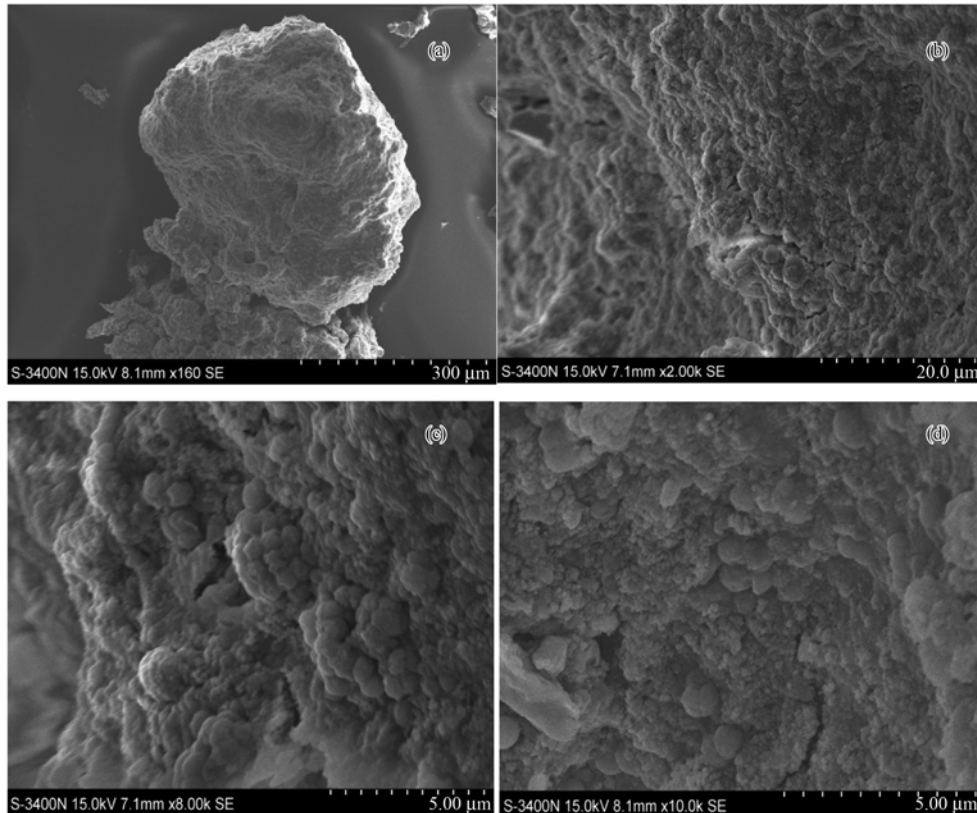


图6 EGSB 反应器第 70 d 时颗粒污泥电镜扫描

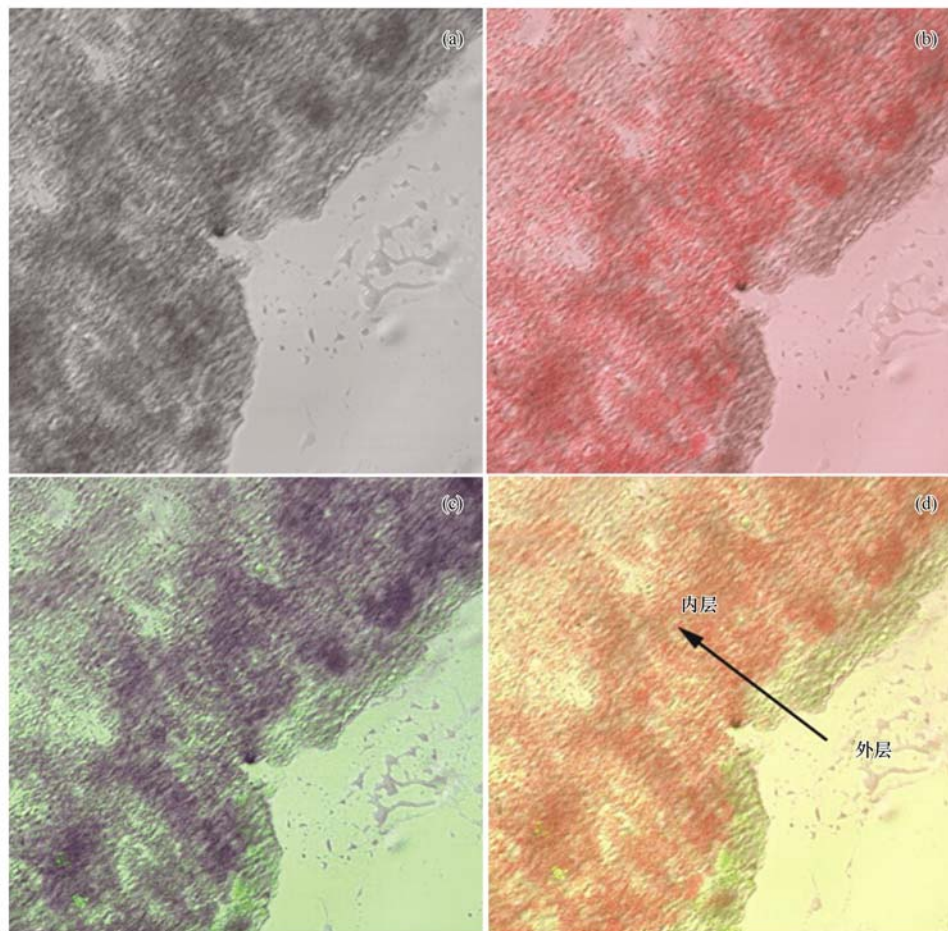
Fig. 6 SEM images of granule sludge in EGSB reactor on the 70th day

AnAOB 则分布在颗粒污泥的内部^[27]. 因此,扫描电镜显示的颗粒污泥表面的部分球菌可能为亚硝化球菌属,部分短杆菌可能为亚硝化单胞菌属. 另外,颗粒污泥表面的球菌呈成簇聚生的结构,这可能是由于 EGSB 反应器接种污泥后,为适应较高的上升流速,污泥可能会分泌大量的胞外聚合物来维持自身的稳态结构,球菌之间相互黏附,形成成簇聚生的结构.

2.2.4 颗粒污泥的空间分布

运用荧光原位杂交技术对颗粒污泥功能微生物

的空间分布进行研究,结果如图 7 所示. 图 7(a)为明场下约四分之一颗粒污泥的激光共聚焦显微镜图像. 由图 7(b)~7(d)可知,颗粒污泥存在着 AOB 和 AnAOB 两种功能微生物. AOB 为好氧菌,主要分布在颗粒污泥的外侧,AnAOB 为厌氧菌,分布在颗粒污泥的内部,这与其他学者的研究是一致的^[28]. 处于外侧的 AOB 可以利用 DO 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 进行部分亚硝化反应,由于氧传质限制,颗粒污泥内部为厌氧状态, AnAOB 可以利用 AOB 生成的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 进行厌氧氨氧化反应,实现 TN 的去除.



(a)明场; (b)CLSM 成像图(红色,CY3)

(c)CLSM 成像图(绿色,FITC); (d)CLSM 合成成像图

图 7 单级自养脱氮颗粒污泥 FISH 结果(放大倍数 10×10)

Fig. 7 FISH images of one-stage autotrophic nitrogen removal granular sludge(magnification 10×10)

3 结论

(1)以单级自养脱氮生物膜絮状污泥为接种污泥,进行了低浓度氨氮($60 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)废水的启动研究,经过 83 d 的连续运行后,成功启动了 EGSB 单级自养脱氮反应器. 在稳定期内,通过控制温度为 $(30 \pm 2)^\circ\text{C}$, pH 为 $7.8 \sim 8.2$, 上升流速为 4

$\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$,污泥区 DO 为 $0.2 \sim 0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率达到 99.4%, TN 去除率达到 80.7%,反应器内部分亚硝化及厌氧氨氧化反应占据主导并保持高效、稳定的脱氮效果.

(2)在低浓度氨氮废水启动单级自养脱氮工艺中,EGSB 反应器通过控制回流比和进水氨氮负荷实现了污泥区较为稳定的低 DO 状态,在启动稳定

期内,仅有 7% 左右的进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 由全程硝化反应转化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,有效抑制了 NOB 的生长。

(3)EGSB 反应器在 83 d 的启动期内,成功培养平均粒径为 296 μm 的颗粒污泥。颗粒污泥整体边界明显,结构密实,形状为椭球形,表面光滑、致密,颜色为黄红色。颗粒污泥表面以球菌、短杆菌为主,并形成了外部好氧层为 AOB,内部厌氧层为 AnAOB 的空间结构。

参考文献:

- [1] 曲久辉,王凯军,王洪臣,等. 建设面向未来的中国污水处理概念厂[N]. 中国环境报, 2014-01-07(010).
- [2] Kuypers M M M, Slikers A O, Lavik G, *et al.* Anaerobic ammonium oxidation by anammox bacteria in the Black Sea[J]. *Nature*, 2003, **422**(6932): 608-611.
- [3] Kartal B, Kuenen J G, van Loosdrecht M C M. Sewage treatment with anammox[J]. *Science*, 2010, **328**(5979): 702-703.
- [4] Liu S T, Horn H, Müller E. A systematic insight into a single-stage deammonification process operated in granular sludge reactor with high-loaded reject-water: characterization and quantification of microbiological community [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2013, **114**(2): 339-351.
- [5] Liu T, Li D, Zhang J, *et al.* Effect of temperature on functional bacterial abundance and community structure in CANON process [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2016, **105**: 306-313.
- [6] Li K, Fang F, Guo J S, *et al.* Performance of one-stage autotrophic nitrogen removal in a biofilm reactor with low C/N ratio[J]. *Environmental Technology*, 2015, **36**(14): 1819-1827.
- [7] Liu J, Zuo J E, Yang Y, *et al.* An autotrophic nitrogen removal process: short-cut nitrification combined with ANAMMOX for treating diluted effluent from an UASB reactor fed by landfill leachate[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(5): 777-783.
- [8] Qiao S, Yamamoto T, Misaka M, *et al.* High-rate nitrogen removal from livestock manure digester liquor by combined partial nitrification-anammox process[J]. *Biodegradation*, 2010, **21**(1): 11-20.
- [9] Lotti T, Kleerebezem R, Abelleira-Pereira J M, *et al.* Faster through training: the anammox case[J]. *Water Research*, 2015, **81**: 261-268.
- [10] Liang Y H, Li D, Zhang X J, *et al.* Stability and nitrite-oxidizing bacteria community structure in different high-rate CANON reactors[J]. *Bioresource Technology*, 2015, **175**: 189-194.
- [11] Chen Y P, Li S, Ning Y F, *et al.* Start-up of completely autotrophic nitrogen removal over nitrite enhanced by hydrophilic-modified carbon fiber [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2012, **166**(4): 866-877.
- [12] Hubaux N, Wells G, Morgenroth E. Impact of coexistence of flocs and biofilm on performance of combined nitrification-anammox granular sludge reactors[J]. *Water Research*, 2015, **68**: 127-139.
- [13] van Loosdrecht M C M, Brdjanovic D. Anticipating the next century of wastewater treatment [J]. *Science*, 2014, **344**(6191): 1452-1453.
- [14] Wang L, Zheng P, Chen T T, *et al.* Performance of autotrophic nitrogen removal in the granular sludge bed reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **123**: 78-85.
- [15] Vázquez-Padín J R, Pozo M J, Jarpa M, *et al.* Treatment of anaerobic sludge digester effluents by the CANON process in an air pulsing SBR[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **166**(1): 336-341.
- [16] 方芳,杨国红,郭劲松,等. DO 和曝停比对单级自养脱氮工艺影响试验研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(9): 1975-1980.
- [17] 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. 258-280.
- [18] 秦宇,郭劲松,方芳,等. 溶解氧及曝停比对单级自养脱氮系统微生物群落结构的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(2): 493-498.
- [19] 张小玲,邓杨帆,冯继贵,等. 基于 SBBR 的单级自养脱氮快速启动[J]. *环境工程学报*, 2015, **9**(7): 3252-3258.
- [20] Liang Y H, Li D, Zhang X J, *et al.* Performance and influence factors of completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) process in a biofilter packed with volcanic rocks[J]. *Environmental Technology*, 2015, **36**(8): 946-952.
- [21] Daverey A, Su S H, Huang Y T, *et al.* Partial nitrification and anammox process: a method for high strength optoelectronic industrial wastewater treatment[J]. *Water Research*, 2013, **47**(9): 2929-2937.
- [22] 邱光磊,宋永会,曾萍,等. 连续流膜生物反应器中好氧颗粒污泥的形成及机制探讨[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(3): 476-484.
- [23] de Kreuk M K, van Loosdrecht M C. Formation of aerobic granules with domestic sewage [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2006, **132**(6): 694-697.
- [24] de Kreuk M K, Kishida N, van Loosdrecht M C. Aerobic granular sludge-state of the art [J]. *Water Science & Technology*, 2007, **55**(8-9): 75-81.
- [25] 蔡庆,张代钧,丁佳佳. 全自养脱氮颗粒污泥的培养及脱氮性能的恢复与强化[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(11): 2805-2812.
- [26] Slikers A O, Haaijer S, Schmid M, *et al.* Nitrification and anammox with urea as the energy source [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2004, **27**(3): 271-278.
- [27] Vázquez-Padín J, Mosquera-Corral A, Campos J L, *et al.* Microbial community distribution and activity dynamics of granular biomass in a CANON reactor[J]. *Water Research*, 2010, **44**(15): 4359-4370.
- [28] Winkler M K H, Kleerebezem R, van Loosdrecht M C M. Integration of anammox into the aerobic granular sludge process for main stream wastewater treatment at ambient temperatures [J]. *Water Research*, 2012, **46**(1): 136-144.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China	CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)
Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China	LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)
Diurnal Variation of PM _{2.5} Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date	MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)
Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)
Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang	ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)
Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain	JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)
Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaxing City	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)
Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)
Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case	LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)
Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin	GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)
Assessment of Gaseous Nitrogen (NH ₃ and N ₂ O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation	FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)
Soil CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons	WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)
Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)
Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir	ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)
Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)
Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai	XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)
Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River	WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)
Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream	LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)
Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979)
Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area	LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)
Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region	CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China	WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River	CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)
Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland	WANG Qi-dong, SONG Jin-ning, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)
Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)
Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)
Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)
Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)
Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce ³⁺ and Cu ²⁺ Ions	ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)
Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor	DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073)
Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol	XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)
Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO ₂ in Aqueous Solution	YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)
Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)
Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater	LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)
Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)
Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment	LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)
Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia	GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)
Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)
Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid	HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)
Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province	WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics	ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)
Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties	FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)
Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method	LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)
Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu ²⁺ , Zn ²⁺ Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions	ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)
Preparation and NH ₄ ⁺ -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges	WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)
Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions	ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)
Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)
Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization	JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)
Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance	LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)
Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils	LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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)

2016年8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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