

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第12期

Vol.35 No.12

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(卷终)

北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征 高敏,仇天雷,贾瑞志,韩梅琳,宋渊,王旭明(4415)

杭州大气颗粒物散射消光特性及霾天气污染特征 徐昶,叶辉,沈建东,孙鸿良,洪盛茂,焦荔,黄侃(4422)

太原市采暖季 PM_{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价 李丽娟,温彦平,彭林,白慧玲,刘凤娴,史美鲜(4431)

成都市城区 PM_{2.5} 中二次水溶性无机离子污染特征 李友平,周洪,张智胜,王启元,罗磊(4439)

北京市臭氧的时空分布特征 王占山,李云婷,陈添,张大伟,孙峰,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,潘丽波(4446)

南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析 安俊琳,朱彬,王红磊,杨辉(4454)

祁连山中段降水化学的环境意义研究 李宗杰,李宗省,田青,宋玲玲,贾冰,郭瑞,宋耀选,苏索南,韩春坛(4465)

中亚热带典型林分不同层次氮硫湿沉降动态变化 孙涛,马明,王定勇,黄礼昕(4475)

本底大气 CO₂ 观测分析过程中 QA/QC 方法的建立与评估 刘立新,周凌晔,夏玲君,王红阳,方双喜(4482)

轻型汽油车 CH₄ 和 N₂O 排放因子研究 何立强,宋敬浩,胡京南,解淑霞,祖雷(4489)

煤燃烧超细微粒粒径谱演变及排放因子的实验研究 孙在,杨文俊,谢小芳,陈秋方,蔡志良(4495)

春、夏季长江口及其邻近海域溶解 N₂O 的分布和海-气交换通量 王岚,张桂玲,孙明爽,任景玲(4502)

珠江口水体组分的吸收特性分析 王珊珊,王永波,扶卿华,尹斌,李云梅(4511)

河流汇合处水体磷素形态特征及紫外光照的影响:以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江交汇为例 闫金龙,江韬,魏世强,李玲,郭念,李璐璐,刘江(4522)

基于太湖微囊藻毒素的叶绿素 a 阈值研究 魏代春,苏婧,纪丹凤,伏小勇,王骥,霍守亮,崔驰飞,唐军,席北斗(4530)

百花湖周边城市近郊小流域氮、磷输出时空特征 冯源嵩,林陶,杨庆媛(4537)

自然光照对淹水条件下三峡库区消落带典型土壤磷释放影响 郭念,江韬,魏世强,闫金龙,梁俭,卢松,高洁(4544)

垂直流人工湿地 LDHs 覆膜改性沸石基质强化除磷效果及其机制 张翔凌,陈俊杰,郭露,陈巧珍,王晓晓(4553)

三峡库区消落带 3 种植物淹水后汞的动态变化及其对水体的影响 张翔,张成,孙荣国,王定勇(4560)

纳米 TiO₂ 对底泥中汞释放及活化的影响 张金洋,李楚娴,王定勇,周雄,孙荣国,张成,梁丽(4567)

首都水源地——洋河流域人为源多环芳烃(PAHs)排放清单估算及其影响分析 高佳佳,罗维,奚晓霞(4573)

石化工业园区有毒废水来源识别研究 杨茜,于茵,周岳溪,陈学民,伏小勇,王淼(4582)

污水处理厂中红霉素抗药性基因的污染特征及选择性因子 李侃竹,吴立乐,黄圣琳,何势,刘振鸿,薛罡,高品(4589)

2 种填料 BAF 深度处理印染废水沿程污染物变化规律研究 刘俊峰,范举红,刘锐,陈吕军,张永明(4596)

硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化菌群驯化及其群落特征 席婧茹,刘素琴,李琳,刘俊新(4602)

MBR 处理腈纶废水的效能及微生物群落结构分析 魏健,宋永会,赵乐(4610)

制革废水的厌氧氨氧化 ABR 脱氮工艺研究 曾国驱,贾晓珊(4618)

生物滤池工艺的数值模拟与运行优化 邹宗森,施汉昌,陈向强,谢小青(4627)

气升装置对厌氧氨氧化污泥形态及性能的影响 李祥,黄勇,袁怡,周呈,陈宗短,张大林(4636)

给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究 王建军,李田,张颖(4642)

北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥的营养含量和重金属污染 白莉萍,齐洪涛,伏亚萍,李萍(4648)

电子垃圾拆解区污染池塘中鱼类多氯联苯及其代谢产物的组织分配及暴露风险 唐斌,罗孝俊,曾艳红,麦碧娴(4655)

广东罗非鱼养殖区水体和鱼体中重金属、HCHs、DDTs 含量及风险评价 谢文平,朱新平,郑光明,马丽莎(4663)

崇明典型水生生物中雌激素含量和分布特征 耿婧婧,叶爱丽,杨毅,刘敏,张婧,周俊良(4671)

啮虫脒光催化降解动力学的优化及其降解产物的分析 周文常,阳海,胡志斌,兰世林(4678)

氮添加对生长季寒温带针叶林土壤有效氮和酸化的影响 陈高起,傅瓦利,罗亚晨,高文龙,李胜功,杨浩(4686)

土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响 李鉴霖,江长胜,郝庆菊(4695)

上海市郊设施大棚次生盐渍化土壤盐分含量调查及典型对应分析 唐冬,毛亮,支月娥,张进忠,周培,柴晓彤(4705)

某铅酸蓄电池污染场地表层土壤重金属 Pb 空间分布预测研究 刘庚,牛俊杰,张朝,赵鑫,郭观林(4712)

海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究 孙约兵,王朋超,徐应明,孙扬,秦旭,赵立杰,王林,梁学峰(4720)

盐碱区不同开发年限水田温室气体排放规律及影响因素 汤洁,方天儒,侯克怡,赵仁竹,梁爽(4727)

不同热解温度生物炭对 Cd(II) 的吸附特性 王震宇,刘国成,Monica Xing,李锋民,郑浩(4735)

碱土金属钙沉积对 Mn-Ce/TiO₂ 低温 SCR 催化剂脱硝性能的影响 周爱奕,毛华峰,盛重义,谭月,杨柳(4745)

国内外水泥工业大气污染物排放标准比较研究 江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4752)

我国水泥工业大气污染物排放标准的修订历程与思考 江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4759)

《环境科学》第35卷(2014年)总目录 (4767)

《环境科学》征订启事(4617) 《环境科学》征稿简则(4654) 信息(4474, 4529, 4536, 4744)

气升装置对厌氧氨氧化污泥形态及性能的影响

李祥^{1,2}, 黄勇^{1,2}, 袁怡^{1,2}, 周呈^{1,2}, 陈宗姮^{1,2}, 张大林^{1,2}

(1. 苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215011; 2. 苏州科技学院环境生物技术研究所, 苏州 215011)

摘要: 通过接种粒径小于 0.9 mm 的厌氧氨氧化污泥, 启动具有气升装置的上流式厌氧反应器. 利用厌氧氨氧化过程产生的氮气作为动力, 研究了气升回流系统在厌氧反应器中对厌氧氨氧化污泥形态和性能的影响. 结果表明, 在反应器启动初期, 反应器脱氮速率较低, 产气量很小, 导致厌氧氨氧化污泥易于凝聚. 当脱氮速率达到 $3.4 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时, 气升产生的回流量明显, 反应器自回流系统形成. 经过 183 d 运行, 污泥颗粒中 MLVSS 含量随着污泥粒径增加而不断增长, 粒径分布主要集中在 1.6 ~ 2.5 mm, 占污泥总体积的 53.2%. 与外置回流泵相比, 气升装置具有同样功能, 产生的回流有利于厌氧氨氧化反应器内污泥的颗粒化, 同时减少回流泵所需要的动力消耗和设备费用.

关键词: 厌氧氨氧化; 脱氮速率; 气升装置; 颗粒污泥; 性能

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)12-4636-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.12.029

Effect of Gas-lift Device on the Morphology and Performance of ANAMMOX Sludge

LI Xiang^{1,2}, HUANG Yong^{1,2}, YUAN Yi^{1,2}, ZHOU Cheng^{1,2}, CHEN Zong-heng^{1,2}, ZHANG Da-lin^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China; 2. Institute of Environmental Biotechnology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: The upflow reactor with gas-lift device was started up by inoculating ANAMMOX sludge granules of less than 0.9 mm. The effects of gas lift device system on the morphology and performance of ANAMMOX sludge were studied by using the nitrogen gas produced in ANAMMOX to drive the effluent circulation in the reactor. The results showed that, the airlift circulation function was not clear in the startup stage of the reactor, because the nitrogen gas production was very low. At the same time, the ANAMMOX granular sludge was easy to condensate. When the load rate of nitrogen removal reached $3.4 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, the function of gas lift was significant, resulting in gradually increased effluent self-circulation, and the granules were dispersed and grew gradually. After 183d of operation, the granular sludge was dominated by the granules with sizes of 1.6-2.5 mm, which accounted for 53.2% of the total sludge volume. The MLVSS content increased with the increase of sludge particle size. The gas lift device had the same function as the external reflux pump, and was helpful for sludge granulation in the ANAMMOX reactor, while reducing power consumption and the cost of the equipment.

Key words: ANAMMOX; nitrogen removal efficiency; gas-lift device; granular sludge; performance

厌氧氨氧化是指在厌氧的条件下, 厌氧氨氧化菌利用 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 进行生化反应, 最终将它们转化为氮气的生物脱氮过程. 厌氧氨氧化过程不仅无需溶解氧和有机物的参与, 同时具有较高的脱氮速率, 在高氨氮低碳废水的脱氮处理方面显示出独特的优势^[1~3]. 因此, 近几十年来受到研究者的广泛青睐.

虽然厌氧氨氧化菌在不同的厌氧装置 (UASB、ASBR、CSTR 和 MBR) 中获得富集^[4~7], 但是研究者常常发现厌氧氨氧化污泥在富集培养过程中易流失. 同时厌氧氨氧化菌倍增时间较长, 即使少量的流失, 对于反应器脱氮速率提高而言也是巨大的挑战^[8,9]. 因此, 如何改造传统的反应器, 使厌氧氨氧化菌高效快速地富集, 是目前厌氧氨氧化由实验向工程推广过程中面对的最大挑战.

目前的研究表明, 通过外置回流泵将部分出水回流不仅可以缓解进水基质浓度对厌氧氨氧化菌的抑制, 同时也可以提高反应器内上升流速, 有利于厌氧氨氧化污泥颗粒化, 防止微生物流失^[10,11]. 相比传统脱氮工艺, 脱氮速率高是厌氧氨氧化过程一个重要特征, 产生的氮气量也十分巨大. 同时, 气升式环流反应器具有结构简单、造价低、能耗低和混合好的优势而被广泛运用于化工、生物化工和环保工程^[12,13]. 因此在传统的厌氧氨氧化反应器中设置气升装置, 利用厌氧氨氧化过程产生的氮气作为动力使部分出水回流, 可能会达到于回流泵同样的效

收稿日期: 2014-05-19; 修订日期: 2014-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51008202); 江苏省环境保护厅重大项目 (201104)

作者简介: 李祥 (1984 ~), 男, 硕士, 实验师, 主要研究方向为废水脱氮处理理论及工艺, E-mail: lixiang@mail.usts.edu.cn

果,同时还减少购置回流泵的设备费和动力消耗。

为此,本研究在传统厌氧反应器中设置了气升装置,分析了利用厌氧氨氧化反应过程中产生的气体作为动力使部分出水回流至厌氧氨氧化反应器底部,探讨了气升装置产生的回流液增强反应器流化状态的可行性,以及观察气升装置对污泥形态及性能的影响。

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验装置选用上流式厌氧反应器(专利申请号:201220057182.2),由圆柱形有机玻璃制成,总体积 70.65 L,有效容积为 55 L。反应器本体由污泥颗粒化区、生物膜区(直径 24 cm,高 40 cm 的圆柱形纤维膜)、污泥沉淀区和气升室组成(如图 1)。在反应器中设置导气管将集气室与气升室相连。同时气升室内的回流管与污泥沉淀区相连,气升室外回流管与反应器底部相连通。在反应器的运行过程中,厌氧氨氧化反应产生的气体收集在集气室,然后通过气升将出水回流至反应器底部。

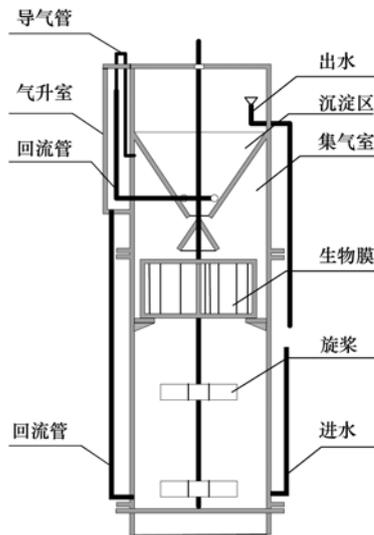


图 1 厌氧氨氧化反应器示意

Fig. 1 Schematic of the ANAMMOX reactor

1.2 接种泥源和控制参数

接种污泥为实验室长期运行的上流式生物膜反应器中生物膜表层块状污泥。为了增强污泥与基质的接触面和良好的流化状态,所以在接种入反应器前通过 40 目筛网挤压,使其粉碎。接种湿污泥量 15 L,取 5 mL 污泥测定性状。颗粒直径分布在 0~0.9 mm,MLVSS/MLSS 为 0.73。同时向反应器内投加 1 kg CaSO_4 固体,作为颗粒污泥重新凝聚的载体。

控制参数:温度 $30^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$,通过进水加热维持;进水 pH 值 7.0 ± 0.2 ,通过 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl 调节。

1.3 废水组成

采用人工配制废水,主要由 NH_4Cl (按需配制), NaNO_2 (按需配制), NaHCO_3 $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, KHCO_3 $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, KH_2PO_4 $27 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $136 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 微量元素 I $1 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 和微量元素 II $1.25 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 。微量元素浓缩液组分为 I: EDTA $5000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, FeSO_4 $5000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 微量元素浓缩液 II 组分为: EDTA $5000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $430 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $240 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ $990 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $220 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $190 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NaSeO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ $210 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, H_3BO_4 $14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。废水进入反应器前未经过氮气除氧。

1.4 测定方法

水质指标测定方法均按照文献[14]。 NH_4^+-N 采用纳氏分光光度法; NO_2^--N 采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺分光光度法; NO_3^--N 采用紫外分光光度法; pH 值采用哈纳 pH211 型酸度计; MLSS/MLVSS 采用重量法; 温度有水银温度计测定; 污泥图片采用索尼单反相机对污泥表面进行原倍拍摄。

颗粒污泥粒度分布采用水力分筛测定:即将含有不同粒径污泥样品放入一组具有孔径层的筛网组(孔径从下往上不断增加)中,为了避免干燥等因素影响微生物活性和颗粒尺寸,同时便于分离,将这组筛网放入水中不断振荡,使得污泥通过重力在液体中分离进入不同筛网层。

产气速率计算:采用湿式气体流量计 LMF-2 累计日产气量,除以计量时间得到相应的产气速率,即产气速率($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$) = 一段时间内收集的气体量(mL)/单位时间(min)。

颗粒污泥微观 SEM 观察:首先按照 Alphenaar 的处理方法进行预处理^[15]。污泥样品放置在 2.5% 的戊二醛和 2% 多聚甲醛溶液中进行 48 h 固定,然后利用 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的磷酸缓冲液进行 3 次清洗,每次时间 15 min。然后再利用 10% 锇酸固定。利用不同梯度浓度的酒精溶液进行脱水。然后样品通过临界点干燥仪进行干燥后,利用 SEM(S-570,日本日立)扫描电镜进行观察。

厌氧氨氧化颗粒污泥活性测定:将 2 g 不同等级粒径的厌氧氨氧化颗粒污泥接种入带有螺旋盖密封的 100 mL 玻璃试管中,进入 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 浓度

分别为 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $130 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的营养液,放入恒温振荡器(32°C)中经过 24 h 培养后测定进出水氮素变化,通过计算氮去除速率表征其活性大小,计算如公式(1)所示.

$$\text{SAA} = (\text{TN}_{\text{in}} - \text{TN}_{\text{ef}}) / \text{HRT} \quad (1)$$

式中, SAA 为厌氧氨氧化污泥脱氮速率, $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$; TN_{in} 为进水总氮浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; TN_{ef} 为出水总氮浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; HRT 为水力停留时间, d.

2 结果与讨论

2.1 反应器内脱氮速率与产气速率变化

在反应器运行初期,设定进水氨氮和亚硝氮浓度分别为 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $120 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,设定水力停留时间(HRT)为 9.17 h,反应器脱氮速率仅 $0.2 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,产生的气体仅 $5 \text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$ 左右,气体量少导致气升室回流的功能并不明显. 为了保证反应器内的污泥与基质很好地接触,所以设定机械搅拌

速度为 $50 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,保证流化区污泥基本处于流化状态. 同时采用缩短 HRT 提高反应器内液体的上升流速. 经过 47 d 的运行,反应器进水流量由 $100 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 上升到 $750 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,HRT 缩短到 1.2 h,脱氮速率上升到 $3.9 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,气体产生速率由最初的 $3.9 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 上升到 $107 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ (图 2). 同时气升室间歇气升回流频率逐渐增加. 从反应器运行的 48 d 开始以提高进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度的方式逐步提高反应氮容积负荷. 当反应器运行到 183 d 时,进水氨氮和亚硝氮浓度逐步提高至 $700 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $840 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,氮容积负荷增加到 $30.2 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. 相应出水氨氮和亚硝氮浓度分别为 $46.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $53.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,脱氮速率达到 $28.3 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. 此时,反应器内气体产生速率增加到 $800 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,气升室内的气升回流十分明显. 因气升回流间隙运行,其频率与回流量与产气量相关,是一个不断变化的过程,所以未能准确测定回流量.

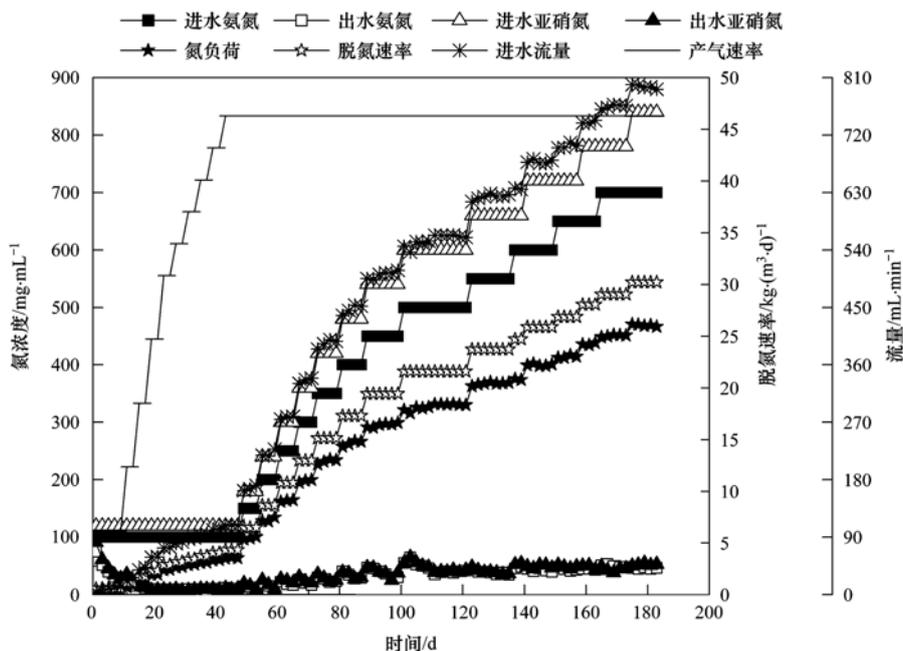


图 2 进水流量和产气速率随脱氮速率的变化

Fig. 2 Changes of the water flow rate and gas production rate with the nitrogen removal efficiency

2.2 反应器内污泥颗粒粒径分布的变化

污泥颗粒的粒径增大一般存在两方面的可能:一方面是微生物增长所致;另一方面是由颗粒之间重新聚集形成新的颗粒污泥. 厌氧氨氧化污泥接种入反应器前经过 40 目筛子挤压粉碎,颗粒污泥当量直径均小于 0.9 mm . 经过 46 d 的运行,反应器内颗粒污泥粒径分布变化如图 3 所示. 经过 46 d 培养后,最大颗粒污泥直径未超过 2 mm ,粒径主要分布

在小于 0.9 mm 和 $0.9 \sim 1.25 \text{ mm}$ 的区域,分别占到污泥总体积的 35.3% 和 46.6%. 说明厌氧氨氧化污泥的粒径出现快速的的增长. 但是通过 MLVSS 和 MLSS 含量测定后发现 MLVSS/MLSS 比随着污泥粒径增加而增加较小,基本处于 50.2% ~ 55.4% 之间,这与启动初期厌氧氨氧化污泥的 MLVSS/MLSS 比值相一致. 最近众多研究者发现,厌氧氨氧化微生物不同于一般的自养微生物,其表面具有高浓度

的胞外聚合物 (extracellular polymeric substances, EPS), 并且随着脱氮速率的提高而增加^[16~18]. EPS 的存在使颗粒污泥之间存在着较强的吸附能力, 有再次聚合成新颗粒污泥的可能. 另一方面, 厌氧氨氧化菌倍增时间较长^[19]. 因此, 在反应器运行初期的 46 d, 出现厌氧氨氧化污泥粒径的快速增加可能是因为机械搅拌的强度低、气升回流作用很小, 不能使得反应器内污泥充分分散, 增加了其相互凝聚的机会.

随着反应器脱氮速率的提高, 产气速率也快速上升, 气升装置产生的回流液逐渐增多 (数据未显示, 主要是因为反应器构造及气升室间歇运行导致流量无法准确测定), 流化区的上升流速也获得增强. 当反应器运行至 183 d 时, 厌氧氨氧化颗粒污泥的泥量和粒径增速明显, 最大颗粒污泥粒径达到 3.2 mm, 粒径分布主要集中在 1.6 ~ 2.0 mm 和 2.0 ~ 2.5 mm, 分别占污泥总体积的 28.2% 和 25% (如图 3). 随着污泥颗粒粒径的增加, 颗粒中 MLVSS 含量在不断的增加, MLVSS/MLSS 比从 60.4% 增加到 87%. 说明此阶段厌氧氨氧化污泥的粒径增大主要是由于微生物的生长所贡献.

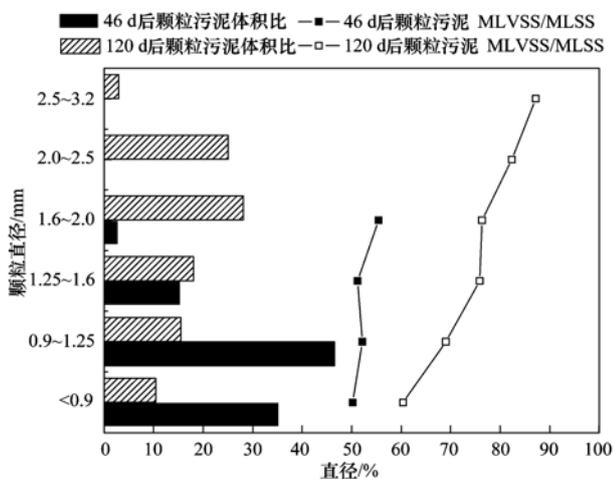


图 3 反应内污泥颗粒形态及性能随时间的变化

Fig. 3 Changes of particle morphology and performance of sludge with time

2.3 厌氧氨氧化污泥的活性测定

厌氧氨氧化污泥具有较高的 EPS, 随着污泥颗粒粒径的增加, 细胞外的 EPS 含量增多. 若没有良好的流化状态, 易使颗粒污泥孔隙不发达, 导致基质不能够顺利地进入细胞, 同时气泡也不能顺利排出, 导致颗粒污泥上浮. Ni 等^[20]的研究表明, 厌氧氨氧化污泥颗粒的最佳粒径为 1.0 ~ 1.3 mm; 当粒径大于 1.5 mm 时, 基质难以输送至颗粒中心, 脱氮速率

将受到影响. Lu 等^[21]研究表明厌氧氨氧化颗粒污泥粒径应控制在 2.2 mm 以内, 以避免颗粒过大产生污泥上浮流失.

将经过 183 d 培养后的不同粒径厌氧氨氧化污泥进行批式实验测定其活性, 结果如表 1 所示. 当厌氧氨氧化污泥颗粒粒径增加到 2.0 mm 时, 污泥的活性不断增加, 最高达到 $1.53 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$. 当厌氧氨氧化污泥颗粒增大到 2.5 ~ 3.2 mm 时, 厌氧氨氧化污泥的活性并未随着颗粒粒径的增大而减小, 表明气升装置驯化出的厌氧氨氧化颗粒内部传质良好. 其脱氮速率远高于文献所报道的一般范围 $0.1 \sim 0.5 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ [22].

表 1 不同粒径的厌氧氨氧化颗粒污泥脱氮速率

Table 1 Nitrogen removal efficiency of ANAMMOX sludge with different particle size

粒径分布	氨去除量 /mg	VSS /mg	脱氮速率 / $\text{kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$
<0.9 mm	203.3	141.3	1.40
0.9 ~ 1.25 mm	197.4	137.5	1.48
1.25 ~ 1.6 mm	215.7	141.1	1.53
1.6 ~ 2.0 mm	216	140.8	1.53
2.0 ~ 2.5 mm	220.6	146.6	1.50
2.5 ~ 3.2 mm	214.4	141.5	1.52

2.4 厌氧氨氧化颗粒污泥表观性状变化

厌氧氨氧化污泥在接种入反应器前经过筛网粉碎, 粒径非常小, 如图 4(a) 所示, 污泥外观具有厌氧氨氧化菌独特的红色. 经过 183 d 培养后污泥颗粒粒径增长十分明显, 如图 4(b) 所示. 进一步说明具有气升装置的厌氧氨氧化反应器非常适合厌氧氨氧化污泥颗粒化.

将运行 183 d 后的厌氧氨氧化颗粒污泥进行电镜扫描发现, 颗粒污泥表面微生物主要是球状、短杆状、丝状微生物 [如图 4(c)], 说明颗粒表面还出现其它菌种, 这些丝状微生物可能为厌氧氨氧化污泥颗粒的形成提供重要的保障. 而厌氧氨氧化颗粒内部微生物排列十分致密, 主要是以不规则的球状为主 [如图 4(d)], 表面不平整, 符合厌氧氨氧化菌的外观特征, 与文献 [23, 24] 发现的比较相符.

2.5 气升回流对厌氧氨氧化污泥颗粒化的影响

在厌氧系统中促使污泥颗粒化的主要因素包括: 基质浓度和剪切力 (HRT、机械搅拌和气泡剪切), 其中剪切力是污泥颗粒化的最重要因素^[25]. Gao 等^[26]研究表明机械搅拌的搅拌强度较难控制, 并不利于厌氧氨氧化污泥颗粒化, 有时甚至因强度较大导致颗粒破碎. 而缩短 HRT 可以使得上升流

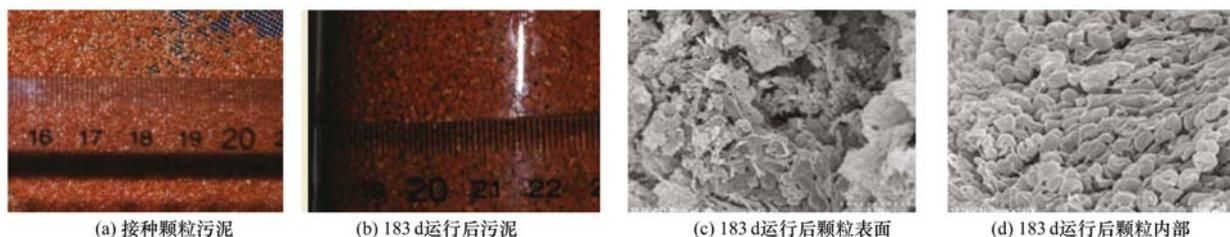


图4 厌氧氨氧化颗粒污泥外观及电镜扫描照片

Fig. 4 Appearance and SEM photos of ANAMMOX sludge

速逐渐增加,水流剪切力也逐渐增大,较大的水流剪切力使得污泥在反应器中更加分散以及处于良好流化状态,有利于颗粒污泥的形成,同时还可以提高污泥的EPS含量和细胞疏水性.例如,丛岩等^[24]通过反应器外设回流泵控制反应器内上升流速,经过80d的培养快速驯化出成熟的厌氧氨氧化颗粒污泥,平均粒径0.556 mm.但是外设回流泵不仅需要大量的动力消耗,而且上升流速不能随反应器内颗粒污泥的增加而自动调节,增加控制难度.同时过高的上升流速反而使得较小的颗粒污泥和絮状污泥随出水流出,不利于污泥颗粒化初期的污泥截留.

本反应器通过设置气升装置利用厌氧氨氧化过程产生的氮气作为动力使出水自动回流,以提升反应器内的上升流速.在启动初期接种污泥为颗粒污泥,因气升回流功能不强,仅通过机械搅拌使污泥刚好处于流化状态,导致部分颗粒污泥相互聚集.随着反应器脱氮速率的提高,氮气产气量逐渐增多,气升室所产生的回流量也随之逐步增加,完全满足颗粒污泥增长过程中对上升流速的要求.反应器内污泥一直处于流化状态,污泥粒径及生长量增长明显,但机械转速仍然维持在 $50 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$.进一步说明气升装置所产生的回流在污泥流化中起到了重要的作用,出水回流量的增加使得污泥在翻倍增长过程中也无需调高机械搅拌强度.因此该装置不仅适应不同时期污泥颗粒化对回流量的需求,同时也省去外设回流泵的动力消耗.

3 结论

(1) 依靠厌氧氨氧化过程产生的气体作为动力,利用气升装置使部分出水体外自循环可以促进污泥的颗粒化.回流量随着反应器脱氮速率增长而增长,经过183 d的运行,脱氮速率达到 $28.3 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,气体产生速率增加到 $800 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,颗粒污泥粒径主要分布在 $1.6\sim 2.5 \text{ mm}$,占污泥总体积的53.2%,污泥处于良好的流化状态.

(2) 经气升回流装置驯化的厌氧氨氧化颗粒污泥粒径在 2 mm 以内时,其活性随着粒径增大而增大;颗粒粒径处于 $2\sim 3.2 \text{ mm}$ 时,未见颗粒污泥活性随颗粒粒径增大而减小.表明气升装置驯化出的厌氧氨氧化颗粒内部传质良好.

参考文献:

- [1] Magri A, Béline F, Dabert P. Feasibility and interest of the ANAMMOX process as treatment alternative for anaerobic digester supernatants in manure processing-An overview [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, **131**: 170-184.
- [2] Wang D, Wang G W, Zhang G Q, *et al.* Using graphene oxide to enhance the activity of ANAMMOX bacteria for nitrogen removal [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **131**: 527-530.
- [3] 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.
- [4] Tang C J, Zheng P, Chai L Y, *et al.* Characterization and quantification of ANAMMOX start-up in UASB reactors seeded with conventional activated sludge [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2013, **82**: 141-148.
- [5] Bagchi S, Biswas R, Nandy T. Start-up and stabilization of an ANAMMOX process from a non-acclimatized sludge in CSTR [J]. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 2010, **37**(9): 943-952.
- [6] Suneethi S, Joseph K. ANAMMOX process start up and stabilization with an anaerobic seed in Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR) [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102** (19): 8860-8867.
- [7] 陈胜, 孙德智, 遇光禄. 填充床快速启动厌氧氨氧化反应器及其脱氮性能研究[J]. *环境科学*, 2010, **31** (3): 691-696.
- [8] Chen J W, Ji Q X, Zheng P, *et al.* Flootation and control of granular sludge in a high-rate ANAMMOX reactor [J]. *Water Research*, 2010, **44**(11): 3321-3328.
- [9] Dapena-Mora A, Campos J L, Mosquera-Corral A, *et al.* Stability of the ANAMMOX process in a gas-lift reactor and a SBR [J]. *Journal of Biotechnology*, 2004, **110**(2): 159-170.
- [10] 姬玉欣, 诸美红, 陈辉, 等. 高负荷厌氧氨氧化反应器的研究进展[J]. *化工进展*, 2013, **32**(8): 1914-1920, 1928.
- [11] Tang C J, Zheng P, Qaisar M. The shear force amendments on

- the slugging behavior of upflow ANAMMOX granular sludge bed reactor [J]. *Separation and Purification Technology*, 2009, **69** (3): 262-268.
- [12] 汤立新, 吕效平, 孔黎明. 气升式环流反应器研究与应用进展[J]. *化工进展*, 2002, **21**(11): 814-819.
- [13] 席仁荣, 吴振强. 搅拌气升式生物反应器的研究进展[J]. *化工进展*, 2008, **27**(2): 218-222.
- [14] 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. 258-282.
- [15] Alphenaar P A, Groeneveld N, van Aelst A C. Scanning electron microscopical method for internal structure analysis of anaerobic granular sludge [J]. *Micron*, 1994, **25**(2): 129-133.
- [16] Adav S S, Lee D J, Tay J H. Extracellular polymeric substances and structural stability of aerobic granule [J]. *Water Research*, 2008, **42**(6-7): 1644-1650.
- [17] Meswain B S, Lrvine R L, Hausner M, *et al.* Composition and distribution of extracellular polymeric substances in aerobic flocs and granular sludge [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, **71**(2): 1051-1057.
- [18] 唐崇俭, 郑平, 汪彩华, 等. 高负荷厌氧氨氧化 EGSB 反应器的运行及其颗粒污泥的 EPC 特性 [J]. *化工学报*, 2010, **61**(3): 732-739.
- [19] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, *et al.* The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1998, **50**(5): 589-596.
- [20] Ni B J, Chen Y P, Liu S Y, *et al.* Modeling a granule-based anaerobic ammonium oxidizing (ANAMMOX) Process [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2009, **103**(3): 490-499.
- [21] Lu H F, Ji Q X, Ding S, *et al.* The morphological and settling properties of ANAMMOX granular sludge in high-rate reactors [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **143**: 592-597.
- [22] Kieling D D, Reginatto V, Schmidell W, *et al.* Sludge wash-out as strategy for ANAMMOX process start-up [J]. *Process Biochemistry*, 2007, **42**(12): 1579-1585.
- [23] Kuenen J G. ANAMMOX bacteria: from discovery to application [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2008, **6**(4): 320-326.
- [24] 丛岩, 黄晓丽, 王小龙, 等. 厌氧氨氧化颗粒污泥的快速形成 [J]. *化工学报*, 2014, **65**(2): 664-671.
- [25] Trigo C, Campos J L, Garrido J M, *et al.* Start-up of the ANAMMOX process in a membrane bioreactor [J]. *Journal of Biotechnology*, 2006, **126**(4): 475-487.
- [26] Gao Y N, Liu Z J, Liu F X, *et al.* Mechanical shear contributes to granule formation resulting in quick start-up and stability of a hybrid ANAMMOX reactor [J]. *Biodegradation*, 2012, **23**(3): 363-372.

CONTENTS

Concentration and Size Distribution of Bioaerosols at Non-haze and Haze Days in Beijing	GAO Min, QIU Tian-lei, JIA Rui-zhi, <i>et al.</i> (4415)
Light Scattering Extinction Properties of Atmospheric Particle and Pollution Characteristics in Hazy Weather in Hangzhou	XU Chang, YE Hui, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (4422)
Characteristic of Elements in PM _{2.5} and Health Risk Assessment of Heavy Metals During Heating Season in Taiyuan	LI Li-juan, WEN Yan-ping, PENG Lin, <i>et al.</i> (4431)
Pollution Characteristics of Secondary Water-soluble Inorganic Ions of PM _{2.5} in Urban Chengdu, China	LI You-ping, ZHOU Hong, ZHANG Zhi-sheng, <i>et al.</i> (4439)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Ozone in Beijing	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, CHEN Tian, <i>et al.</i> (4446)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Northern Suburb of Nanjing	AN Jun-lin, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4454)
Environmental Significance of Wet Deposition Composition in the Central Qilian Mountains, China	LI Zong-jie, LI Zong-xing, TIAN Qing, <i>et al.</i> (4465)
Dynamics of Nitrogen and Sulfur Wet Deposition in Typical Forest Stand at Different Spatial Levels in Simian Mountain, Mid-subtropical Region	SUN Tao, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4475)
Establishment and Assessment of QA/QC Method for Sampling and Analysis of Atmosphere Background CO ₂	LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (4482)
An Investigation of the CH ₄ and N ₂ O Emission Factors of Light-duty Gasoline Vehicles	HE Li-qiang, SONG Jing-hao, HU Jing-nan, <i>et al.</i> (4489)
Experimental Study on the Size Spectra and Emission Factor of Ultrafine Particle from Coal Combustion	SUN Zai, YANG Wen-jun, XIE Xiao-fang, <i>et al.</i> (4495)
Distributions and Air-Sea Fluxes of Dissolved Nitrous Oxide in the Yangtze River Estuary and Its Adjacent Marine Area in Spring and Summer	WANG Lan, ZHANG Gui-ling, SUN Ming-shuang, <i>et al.</i> (4502)
Spectral Absorption Properties of the Water Constituents in the Estuary of Zhujiang River	WANG Shan-shan, WANG Yong-bo, FU Qing-hua, <i>et al.</i> (4511)
Characteristics of Phosphorus Forms and the Effects of UV Light in the Confluences Water of Qujiang-Jialing River and Fujiang-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4522)
Research on the Threshold of Chl-a in Lake Taihu Based on Microcystins	WEI Dai-chun, SU Jing, JI Dan-feng, <i>et al.</i> (4530)
Temporal and Spatial Characteristic of Nitrogen and Phosphorus Output in the Suburb Watershed Around the Baihua Lake	FENG Yuan-song, LIN Tao, YANG Qing-yuan (4537)
Effects of Light Irradiation on Phosphorous Releases from Typical Submerged Soils of Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoirs Areas	GUO Nian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4544)
Analysis on the Removal Efficiency and Mechanisms of Phosphorus by Modified Zeolites Substrates Coated with LDHs Reacted by Different Metal Compounds in Laboratory-Scale Vertical-Flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, CHEN Jun-jie, GUO Lu, <i>et al.</i> (4553)
Mercury Dynamics of Several Plants Collected from the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area During Flooding and Its Impact on Water Body	ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (4560)
Effect of Nano-TiO ₂ on the Release and Activation of Mercury in Sediment	ZHANG Jin-yang, LI Chu-xian, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4567)
Estimation Inventory of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Anthropogenic Sources and Its Impacts within the Yanghe Watershed, an Important Water-Source Site of Beijing, China	GAO Jia-jia, LUO Wei, XI Xiao-xia (4573)
Source Identification of Toxic Wastewaters in a Petrochemical Industrial Park	YANG Qian, YU Yin, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (4582)
Investigation of Pollution Characteristics of Erythromycin Resistance Genes in a Sewage Treatment Plant and the Relevant Selective Factors	LI Kan-zhu, WU Li-le, HUANG Sheng-lin, <i>et al.</i> (4589)
Variation of Pollutants Along the Height of Two Media BAF During Advanced Treatment of Dyeing Wastewater	LIU Jun-feng, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4596)
Acclimatization and Characteristics of Microbial Community in Sulphate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XI Jing-ru, LIU Su-qin, LI Lin, <i>et al.</i> (4602)
Capability and Microbial Community Analysis of a Membrane Bioreactor for Acrylic Fiber Wastewater Treatment	WEI Jian, SONG Yong-hui, ZHAO Le (4610)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX ABR Process in Tannery Wastewater Treatment	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan (4618)
Numerical Simulation and Operation Optimization of Biological Filter	ZOU Zong-sen, SHI Han-chang, CHEN Xiang-qiang, <i>et al.</i> (4627)
Effect of Gas-lift Device on the Morphology and Performance of ANAMMOX Sludge	LI Xiang, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4636)
Water Treatment Residual as a Bioretention Media Amendment for Phosphorus Removal	WANG Jian-jun, LI Tian, ZHANG Ying (4642)
Nutrient Contents and Heavy Metal Pollutions in Composted Sewage Sludge from Different Municipal Wastewater Treatment Plants in Beijing Region	BAI Li-ping, QI Hong-tao, FU Ya-ping, <i>et al.</i> (4648)
Polychlorinated Biphenyls and Their Methylsulfonyl Metabolites in Fish from an Electronic Waste Recycling Site in South China: Tissue Distribution and Human Dietary Exposure	TANG Bin, LUO Xiao-jun, ZENG Yan-hong, <i>et al.</i> (4655)
Residues and Health Risk Assessment of HCHs, DDTs and Heavy Metals in Water and <i>Tilapia</i> s from Fish Ponds of Guangdong	XIE Wen-ping, ZHU Xin-ping, ZHENG Guang-ming, <i>et al.</i> (4663)
Concentration and Distribution Characteristics of Estrogen in Aquatic Organism from Chongming Island	GENG Jing-jing, YE Ai-li, YANG Yi, <i>et al.</i> (4671)
Photocatalytic Degradation of Acetamiprid by TiO ₂ and Xe Lamp: Kinetics and Degradation Intermediates	ZHOU Wen-chang, YANG Hai, HU Zhi-bin, <i>et al.</i> (4678)
Effects of Nitrogen Addition on Available Nitrogen Content and Acidification in Cold-temperate Coniferous Forest Soil in the Growing Season	CHEN Gao-qi, FU Wa-li, LUO Ya-chen, <i>et al.</i> (4686)
Impact of Land Use Type on Stability and Organic Carbon of Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Jian-lin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4695)
Investigation and Canonical Correspondence Analysis of Salinity Contents in Secondary Salinization Greenhouse Soils in Shanghai Suburb	TANG Dong, MAO Liang, ZHI Yue-e, <i>et al.</i> (4705)
Spatial Distribution Prediction of Surface Soil Pb in a Battery Contaminated Site	LIU Geng, NIU Jun-jie, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4712)
Immobilization Remediation of Cd and Pb Contaminated Soil: Remediation Potential and Soil Environmental Quality	SUN Yue-bing, WANG Peng-chao, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (4720)
Rules and Impact Factors of Greenhouse Gases Emission in the Saline-Alkali Paddy Fields in Different Years	TANG Jie, FANG Tian-ru, HOU Ke-yi, <i>et al.</i> (4727)
Adsorption of Cd(II) Varies with Biochars Derived at Different Pyrolysis Temperatures	WANG Zhen-yu, LIU Guo-cheng, Monica Xing, <i>et al.</i> (4735)
Poisoning Effect of Ca Depositing Over Mn-Ce/TiO ₂ Catalyst for Low-temperature Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	ZHOU Ai-yi, MAO Hua-feng, SHENG Zhong-yi, <i>et al.</i> (4745)
A Comparative Study on Domestic and Foreign Emission Standards of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4752)
Revision Process and Thinking of Emission Standard of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4759)

《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12月15日 第35卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 12 Dec. 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