

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

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

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析 ..... 刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈焯鑫,王姝 (3239)

1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析 ..... 刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕 (3247)

瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征 ..... 刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章 (3256)

上海城区PM<sub>2.5</sub>中有机碳和元素碳变化特征及来源分析 ..... 张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳 (3263)

亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布 ..... 王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟 (3271)

无锡市冬季典型天气PM<sub>2.5</sub>中碳组分的污染特征 ..... 云龙,陆钊,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国 (3280)

高炉炼铁工艺细颗粒物PM<sub>2.5</sub>排放特性分析 ..... 范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军 (3287)

重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究 ..... 祁心,郝庆菊,吉东生,张军科,刘子锐,胡波,王跃思,江长胜 (3293)

双组分VOCs的催化氧化及动力学分析 ..... 卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙 (3302)

汽车排放超细颗粒物浓度及粒径谱特征的实验研究 ..... 陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊 (3309)

疏勒河上游地表水水化学主离子特征及其控制因素 ..... 周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲 (3315)

河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量 ..... 陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴 (3325)

大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价 ..... 张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶 (3336)

雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价 ..... 柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力 (3346)

北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析 ..... 李海燕,石安邦,瞿杨晨,岳靖淋 (3352)

黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布 ..... 李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园 (3358)

合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征 ..... 李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤 (3365)

基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究 ..... 刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥 (3373)

杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态 ..... 邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅 (3381)

基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演 ..... 李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅 (3389)

天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例 ..... 高洁,江韬,闫金龙,魏世强,王定勇,卢松,李璐璐 (3397)

利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度 ..... 李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮 (3408)

Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究 ..... 王冉,周雪峰,胡学香,胡春 (3417)

不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究 ..... 李欢旋,王金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅 (3422)

还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸 ..... 周红艺,曾思思,梁思,韩鉴 (3430)

多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较 ..... 宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程 (3436)

不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究 ..... 金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌 (3443)

气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响 ..... 李祥,张大林,黄勇,陈宗炬,袁怡 (3449)

微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究 ..... 刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚炜 (3455)

“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究 ..... 吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶 (3461)

温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析 ..... 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (3466)

污水处理厂尾水细菌群落结构分析 ..... 徐爱玲,任杰,宋志文,吴等等,夏岩 (3473)

沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究 ..... 国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑 (3480)

内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析 ..... 李志华,张芹,白旭丽,刘毅 (3487)

基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析 ..... 李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博 (3492)

S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响 ..... 陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君 (3498)

影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析 ..... 李艳利,李艳粉,徐宗学 (3504)

河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系 ..... 马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿 (3513)

*Fontibacter* sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究 ..... 马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂 (3522)

基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析 ..... 艾建超,王宁,杨净 (3530)

石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究 ..... 杨涵,熊黑钢,陈学刚 (3537)

不同施磷量(KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化 ..... 郭亮,李忠武,黄斌,王艳,张艳 (3546)

硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中的形态影响 ..... 杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集 (3553)

硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响 ..... 刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青 (3564)

再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响 ..... 龚雪,王继华,关键飞,杨雪辰,陈黛慈 (3572)

西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征 ..... 秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平 (3580)

黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ<sup>13</sup>C值的影响 ..... 杜雪莲,王世杰,罗绪强 (3587)

碳底物含量对厌氧条件下水稻土N<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、NO、CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>排放的影响 ..... 陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂, Klaus Butterbach-Bahl (3595)

北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM<sub>2.5</sub>能力研究 ..... 梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂 (3605)

污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响 ..... 刘敬勇,卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹 (3612)

京津冀区域生产和消费CO<sub>2</sub>排放的时空特点分析 ..... 汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉 (3619)

水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究 ..... 任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁 (3632)

《环境科学》征稿简则(3279) 《环境科学》征订启事(3545) 信息(3364,3486,3552,3563)

# 气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响

李祥<sup>1,2</sup>, 张大林<sup>1,2</sup>, 黄勇<sup>1,2\*</sup>, 陈宗姮<sup>1,2</sup>, 袁怡<sup>1,2</sup>

(1. 苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 苏州科技学院环境生物技术研究所, 苏州 215009)

**摘要:** 通过接种厌氧氨氧化污泥研究了气升回流装置在提高进水基质浓度以提高反应器氮负荷过程中对反应器脱氮效能的影响。结果表明, 在气升室中利用厌氧氨氧化反应产生的氮气作为动力可以实现出水自动循环。随着反应器脱氮效能的提高, 气升室回流量也逐步增加, 能够有效稀释进水基质浓度, 缓解其对厌氧氨氧化菌的抑制。经过 183 d 运行, 进水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$  质量浓度分别提高至  $700 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $840 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  质量浓度最高达到  $46.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $53.21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 氮去除速率稳定在  $28.3 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$  左右。说明气升装置所形成的自回流系统能够有效改善传统厌氧氨氧化反应器运行过程中高基质浓度抑制的问题, 同时减少外置回流泵的动力消耗, 是一种经济有效的措施。

**关键词:** 厌氧氨氧化; 脱氮效能; 气升装置; 高基质浓度; 抑制

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3449-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.09.028

## Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor

LI Xiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Da-lin<sup>1,2</sup>, HUANG Yong<sup>1,2</sup>, CHEN Zong-heng<sup>1,2</sup>, YUAN Yi<sup>1,2</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Institute of Environmental Biotechnology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

**Abstract:** The effect of air-lift device on the nitrogen removal efficiency of ANAMMOX reactor was studied by increasing the substrate concentration to improve nitrogen load rate and inoculate ANAMMOX sludge. The results showed that the effluent recirculation was achieved by using nitrogen gas produced from the ANAMMOX process as power in the air-lift room. With the increase of nitrogen removal rate, the rate of effluent recirculation was increased, which diluted influent substrate concentration and alleviated the inhibition of ANAMMOX bacteria. After 183 d operation, the effluent  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  concentrations were increased to  $46.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  and  $53.21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , and the nitrogen removal rate was kept stable at  $28.3 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ , when the influent  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  concentrations were increased to  $700 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  and  $840 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , respectively. The effluent recirculation system formed by gas-lift devices is an economic and effective solution to the inhibition caused by high substrate concentration in traditional reactor, meanwhile, the power consumption of the external reflux pump was reduced.

**Key words:** ANAMMOX; nitrogen removal efficiency; gas-lift device; high substrate concentration; inhibition

厌氧氨氧化是指在厌氧的状态下厌氧氨氧化菌利用  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  作为电子供体,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  作为电子受体, 通过氧化还原反应产生  $\text{N}_2$  的生化反应过程。相比传统的生物脱氮反应, 厌氧氨氧化过程无需有机碳源和溶解氧的参与, 因此在高  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、低碳废水处理方面显示出极大地优势<sup>[1,2]</sup>。目前, 厌氧氨氧化已经广泛运用于污泥消化液<sup>[3,4]</sup>、垃圾渗滤液<sup>[5,6]</sup> 和化工行业废水<sup>[7-9]</sup> 的小试或者中试研究。

虽然众多研究者成功启动了各种类型的厌氧氨氧化反应器, 并运用于实际废水的研究, 但是在启动过程中普遍发现, 过高浓度的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$  易使厌氧氨氧化菌活性受到抑制, 并且在较长的时间内得不到快速恢复<sup>[10-12]</sup>。最终导致反应器脱氮效能不能以提高基质浓度方式实现。但是, 有些工业废水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度极高, 有的几乎上千  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。即使采用物化法进行资源回收, 在考虑到回收成本的情

况下, 废水中剩余  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度也要达到  $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以上。为了避免抑制现象的出现, 很多研究者对高  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的工业废水进行稀释, 这种做法增加了动力消耗和未来工程中的基建费用。

针对高基质浓度的抑制问题, 本研究在上流式厌氧氨氧化反应器内增加气升装置。依据厌氧氨氧化过程产气量大的特点, 利用  $\text{N}_2$  将出水进行气提, 实现出水自循环, 从而对进水进行稀释。研究通过提高基质浓度方式提高反应脱氮效能过程中, 气升装置所产生的回流对反应器脱氮效能的影响, 旨在为以后厌氧氨氧化装备选取上提供一些参考。

收稿日期: 2014-01-11; 修订日期: 2014-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51008202); 江苏省环保厅重大项目(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

\* 通讯联系人, E-mail: yhuang@mail.usts.edu.cn

## 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)、三相分离装置、沉淀区和气升室组成(如图 1). 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,通过导气管与回流管在气升室实现出水气提,最终将出水回流至反应器底部.

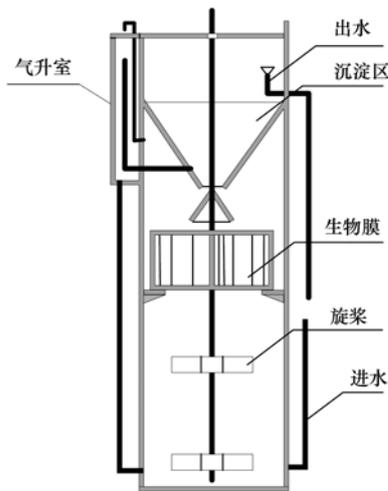


图 1 厌氧氨氧化反应器示意

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上块状污泥. 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. 接种污泥量 15 L,取 5 mL 污泥测定物理特性. 颗粒直径分布在 0 ~ 0.9 mm, MLVSS/MLSS 为 0.73. 在厌氧氨氧化污泥接种入反应器后,向反应器内投加 1 kg  $\text{CaSO}_4$  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  $7.0 \pm 0.2$ ,通过  $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  HCl 调节. 机械搅拌速度设定为  $50 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,以保证颗粒化区污泥基本处于流化状态.

### 1.3 废水组成

采用人工配制废水,主要由  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (按需配制),  $\text{NaNO}_2$  (按需配制),  $\text{NaHCO}_3$   $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{KHCO}_3$   $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$   $27 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$   $136 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$   $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 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  $5000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{FeSO}_4$   $5000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 微量元素浓缩液 II 组分为: EDTA  $5000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$   $430 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$   $240 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$   $990 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$   $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$   $220 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$   $190 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NaSeO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$   $210 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_4$   $14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 废水进入反应器前未经过高纯  $\text{N}_2$  除氧.

### 1.4 测定方法

水质指标测定方法均按照文献[13]的方法.  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用纳氏分光光度法;  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺分光光度法;  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 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; 温度由水银温度计测定; 颗粒污泥粒度分布采用水力分筛测定.

## 2 结果与讨论

### 2.1 反应器运行初期 HRT 变化对脱氮效能的影响

为了避免高  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度对厌氧氨氧化菌产生抑制,在反应器运行初期(0 ~ 47 d),设定进水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度分别为  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和  $120 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,设定初始水力停留时间(HRT)为 9.17 h. 前期实验研究表明,在厌氧氨氧化反应器脱氮效能的提高过程中,固定基质浓度缩短 HRT 比固定 HRT 提高基质浓度更有利于反应器脱氮效能的提高<sup>[14]</sup>,该结论也得到众多研究者肯定<sup>[15,16]</sup>. 同时,启动初期反应器脱氮效能低,依靠产气产生的回流量不明显,为了保持一定上升流速,有利于污泥颗粒化,因此采用逐步缩短 HRT 方式提高反应器氮容积负荷. 反应器进出水氮素变化如图 2 所示. 由于接种污泥为厌氧氨氧化污泥,所以在反应器启动初期就出现明显的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 去除和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 生成. 在反应器运行的前 16 d,出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度快速下降,出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度分别降低到  $10.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和  $12.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 当反应器运行到 47 d 时, HRT 逐步缩短至 1.2 h,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度基本得到去除,出水浓度均稳定在  $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,去除率均保持在 90%. 反应器氮去除速率从运行初期的  $0.14 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 上升至  $3.91 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ . 该结果进一步说明,在反应器启动初期采用低基质浓度,缩短 HRT 更有利于厌氧氨氧化反应器脱氮效能的提高.

### 2.2 提高基质浓度对反应器脱氮效能的影响

在反应器运行 47 d 后,保持 HRT(1.2 h)不变,

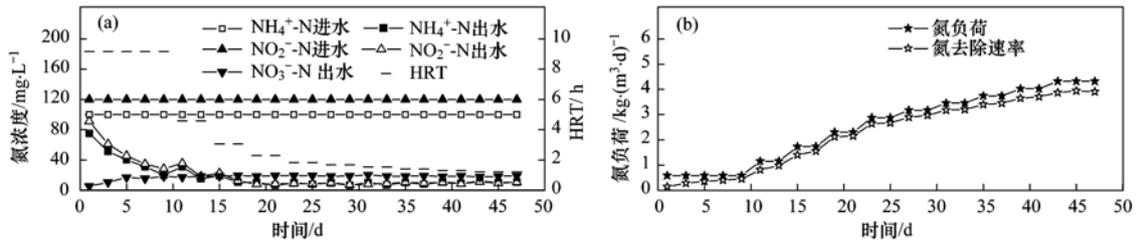


图2 缩短 HRT 过程中厌氧氨氧化反应器脱氮性能变化

Fig. 2 Change of nitrogen removal efficiency in ANAMMOX reactor when HRT was decreased

通过逐步提高进水  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N 浓度的方式提高反应器的氮容积负荷, 探讨具有出水回流的情况下, 提高进水  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N 浓度变化对反应器脱氮效能的影响. 进水  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N 的增加幅度分别为  $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 反应器氮素变化如图 3 所示. 随着进水基质浓度的不断提高, 反应器脱氮效能不断增加. 当反应器运行至 183 d 时, 进水  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N 浓度分别提高至  $700 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $840 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 反应器氮容积负荷由  $4.32$

$\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$  增加至  $30.2 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ . 此时  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 出水浓度略有升高并最终稳定在  $46.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $53.21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 氮去除率一直保持在 90% 以上, 氮去除速率逐步升高并稳定在  $28.3 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$  左右. 此时出水  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度也呈逐步上升态势, 最高达到  $118.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右. 因此, 提高基质浓度以提高反应器氮负荷过程中  $\text{NO}_3^-$ -N 的处理也将是厌氧氨氧化后续处理工艺所要面对的问题.

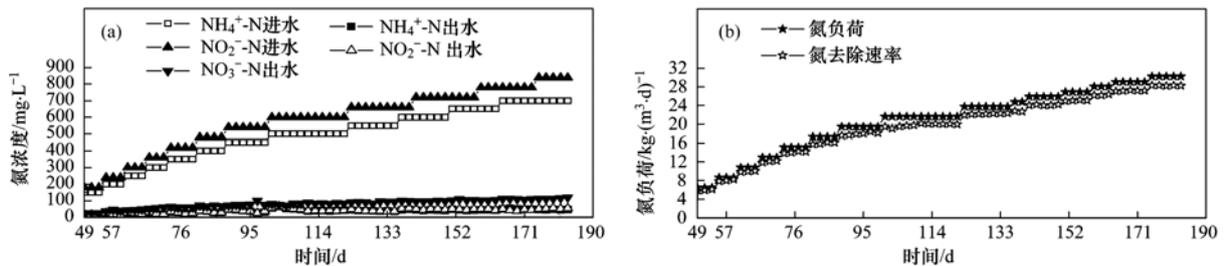


图3 提高基质浓度对厌氧氨氧化反应器脱氮性能影响

Fig. 3 Effect of increased substrate concentration on the nitrogen removal efficiency in ANAMMOX reactor

### 2.3 反应器内氮数转化比

Strous 等<sup>[17]</sup> 最早报道厌氧氨氧化过程中  $\text{NO}_2^-$ -N 与  $\text{NH}_4^+$ -N 理论转化比为 1.32,  $\text{NO}_3^-$ -N 生成量与  $\text{NH}_4^+$ -N 转化量比为 0.26, 并将其作为厌氧氨氧化反应器启动成功的标志之一. 由于接种污泥为成熟的厌氧氨氧化污泥, 所以反应器运行初期就表现出明显的厌氧氨氧化特性. 反应器中  $\text{NO}_2^-$ -N 去除量、 $\text{NO}_3^-$ -N 生成量和  $\text{N}_2$  生成量与  $\text{NH}_4^+$ -N 消耗量具有明显的线性关系, 如图 4 所示. 整个运行期间,  $\text{NO}_2^-$ -N 与  $\text{NH}_4^+$ -N 的消耗量比围绕在 1.17 附近波动, 略低于 Strous 的转化比. Li 等<sup>[18]</sup> 发现亚硝化菌与厌氧氨氧化菌能够在同一系统中共生, 同时亚硝化菌能够消耗溶解氧为厌氧氨氧化菌解毒. 本实验未对进水进行任何除氧措施, 反应器内可能存在亚硝化菌利用携带的氧进行部分亚硝化反应, 从而导致转化比略低于文献报道的理论值.  $\text{NO}_3^-$ -N 生成量一直随着进

水  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度的提高而不断上升, 最终出水  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度达到  $118.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右.  $\text{NO}_3^-$ -N 生成量与  $\text{NH}_4^+$ -N 转化量比初期稳定在 0.2 (数值未显示), 随着氮去除速率的提高, 其比值略有下降, 最终围绕在

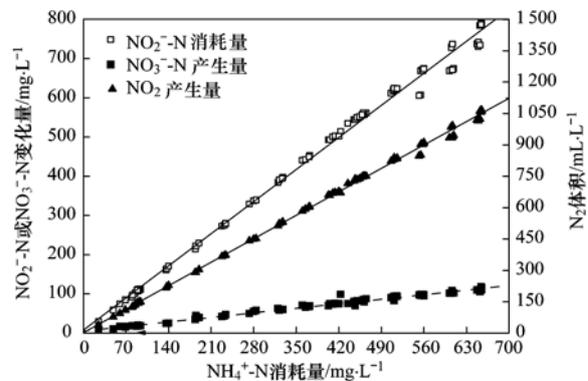


图4 反应器内氮数转化比随时间变化

Fig. 4 Changes of nitrogen conversion ratio with time in ANAMMOX reactor

0.17 附近波动(见表 1). 其转化比也明显低于 Strous 所报道的转化比.

表 1 厌氧氨氧化过程中氮素转化比拟合

Table 1 Fitting conversion ratio of nitrogen in the ANAMMOX process

氮素比	拟合线性方程	相关系数 (R)	拟合的标准差 (SD)	数据点数目 (N)	概率值 (P)
亚硝氮与氨氮去除量转化比	$Y = 7.8 + 1.17X$	0.998	17.06	92	<0.000 1
硝态氮生成量与氨氮去除量比	$Y = 5.08 + 0.17X$	0.997	3.94	92	<0.000 1
氮气产生量与氨氮去除量比	$Y = 1.60X + 2.18$	0.999	13.3	92	<0.000 1

目前在实验中很少有研究者对厌氧氨氧化过程中气体进行收集. Tang 等<sup>[19]</sup>在研究中发现  $N_2$  产生量与  $NH_4^+$ -N 转化量比为  $1.66 L \cdot g^{-1}$ , 略低于理论计算量  $1.69 L \cdot g^{-1}$ . 而本实验对反应器气体进行收集测定后发现, 厌氧氨氧化过程中气体生成量与氨氮消耗量基本在  $1.60 L \cdot g^{-1}$  左右波动, 也低于 Strous 报道的理论值(见表 1).

#### 2.4 回流缓解 FA、 $NO_2^-$ -N 浓度对厌氧氨氧化脱氮效能的影响

$NH_4^+$ -N、 $NO_2^-$ -N 是厌氧氨氧化的主要营养基质, 但是过高的浓度又会对厌氧氨氧化菌产生抑制作用. 目前的研究表明, FA 和  $NO_2^-$ -N 是厌氧氨氧化基质的主要抑制形态<sup>[20,21]</sup>. Jung 等<sup>[22]</sup>发现当进水中 FA 浓度达到  $1.7 mg \cdot L^{-1}$  就会对厌氧氨氧化过程产生抑制, 当 FA 浓度达到  $32 mg \cdot L^{-1}$  时厌氧氨氧化反应将会完全终止. Jaroszynski 等<sup>[23]</sup>通过序批实验研究了 FA 浓度变化对厌氧氨氧化菌活性的影响, 结果表明当 FA 浓度达到  $2 mg \cdot L^{-1}$  时就会对厌氧氨氧化菌活性产生影响. Fernández 等<sup>[24]</sup>在研究 FA 对厌氧氨氧化活性影响时却发现, 当环境中 FA 浓度突然达到  $38 mg \cdot L^{-1}$  时, 厌氧氨氧化菌活性被抑制 50%; 而长期处于 FA 浓度为  $35 \sim 40 mg \cdot L^{-1}$  的环境时, 厌氧氨氧化反应会变得极不稳定, 反应速率甚至可能降到  $0 mg \cdot L^{-1}$ . Bettazzi<sup>[25]</sup>等通过批式实验证明在短期内环境中  $NO_2^-$ -N 浓度达到  $60 mg \cdot L^{-1}$  时, 厌氧氨氧化氮去除速率下降 25%, 长期处于  $NO_2^-$ -N 浓度达到  $30 mg \cdot L^{-1}$  的环境就会抑制厌氧氨氧化活性. Egli<sup>[26]</sup>等报道当进水  $NO_2^-$ -N 浓度达到  $185 mg \cdot L^{-1}$  时厌氧氨氧化菌活性将会完全受到抑制. Ni 等<sup>[27]</sup>却发现厌氧氨氧化菌活性产生抑制时  $NO_2^-$ -N 进水浓度为  $280 mg \cdot L^{-1}$ , 并且进一步研究发现当  $NO_2^-$ -N 浓度超过  $140 mg \cdot L^{-1}$  时就开始产生抑制. 说明在提高进水基质浓度以提高反应器容积负荷的过程中, 基质浓度对厌氧氨氧化的抑制是一个不可忽略的问题. 从进水 FA 浓度变化看, 本实验最高进水 FA 浓度达到  $28 mg \cdot L^{-1}$ , 但反应器内 FA 浓

度仅保持在  $5 mg \cdot L^{-1}$  左右(见图 5). 最高进水  $NO_2^-$ -N 浓度达到  $840 mg \cdot L^{-1}$  时, 出水  $NO_2^-$ -N 浓度仍保持在  $53.21 mg \cdot L^{-1}$ , 均未对厌氧氨氧化菌产生抑制. 说明采用气升装置所形成的出水回流功能有很好的稀释作用. 使得厌氧氨氧化反应器能够承受更高的进水基质浓度.

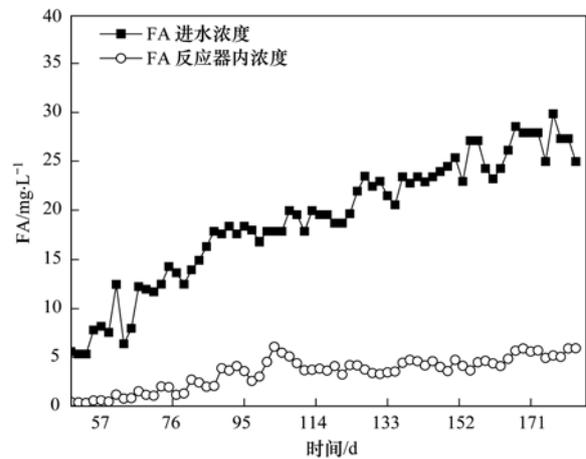


图 5 进出水 FA 浓度变化

Fig. 5 Change of FA from influent to effluent

### 3 气升对厌氧氨氧化污泥富集培养的影响

目前, 众多工业废水中  $NH_4^+$ -N 含量极高, 即使通过物化处理, 其浓度也有上千  $mg \cdot L^{-1}$ . 面对高  $NH_4^+$ -N 废水, 研究者一般采用稀释的方式解决, 这就需要在工艺前端增设调节池或者利用出水回流. 将目前研究者所采用的厌氧氨氧化反应器进行列表分析后可知(如表 2), 在无回流的情况下, 传统的 SBR、UASB、ABF 都不能满足高氨氮废水的厌氧氨氧化处理.

Jim 等<sup>[16]</sup>研究表明, 通过反应器外设回流泵能够很好地解决高基质浓度对厌氧氨氧化的抑制, 本课题组前期研究也进一步证实, 通过出水回流不仅可以有效避免基质浓度对厌氧氨氧化活性的影响, 同时也可以增加反应器内上升流速, 有助于污泥与底物的接触<sup>[34]</sup>. 厌氧氨氧化反应不同于传统的生

表 2 基质浓度对不同厌氧氨氧化反应器启动的影响

Table 2 Effect of substrate concentration on the startup of different ANAMMOX reactors

反应器类型	接种污泥	抑制时浓度		最大氮去除速率 /kg·(m <sup>3</sup> ·d) <sup>-1</sup>	回流比	文献
		最高进水浓度 /mg·L <sup>-1</sup>	抑制或最高出水浓度 /mg·L <sup>-1</sup>			
UASB	厌氧氨氧化生物膜	310/320	150/100	1.26	—	[27]
UBF	厌氧颗粒污泥	320/380	179/149	1.2	—	[28]
STAR	厌氧氨氧化颗粒泥	200/180	150/100	2.9	—	[29]
AnRBC	普通厌氧污泥	270/290	90/100	3	—	[30]
ABF	厌氧氨氧化污泥	350/300	210/110	3	—	[31]
Biofilm	厌氧氨氧化污泥	300/280	120/76	6.9	—	[32]
EGSB	厌氧氨氧化污泥	868.86/844.79	108.5/110.7	22.51	6:1	[33]
EGSB	厌氧氨氧化污泥	237.3/247.7	20/25.5	16.5	1:1	[16]

物脱氮反应,其脱氮效能最高能够达到 76.8 kg·(m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup>[35],远远高于传统的生物脱氮反应,因此其产气量也将十分可观.若将这部分气体作为动力,将极大地节省机械回流的动力消耗.本实验采用的反应器正是利用这一特点,将产生的气体收集在集气室,通过导气管将气体引入气升室,通过气升的作用将出水回流至反应器底部与进水混合.由实验结果表明,当进水总氮达到1 100 mg·L<sup>-1</sup>时,反应器氮去除率达到 90% 以上,出水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N浓度也分别只有 40~50 mg·L<sup>-1</sup>,反应器脱氮效能达到 28.3 kg·(m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup>.在同样规模的反应器中,如此高的进水氮浓度和脱氮效能并不多见,进一步说明气升回流装置实现的自回流功能有效避免了高基质浓度对厌氧氨氧化的影响.

#### 4 结论

(1)厌氧氨氧化反应器启动初期采用低基质浓度进水,缩短 HRT 方式更有利于厌氧氨氧化反应器脱氮效能提高.经过 47 d 培养,HRT 由 9.17 h 缩短到 1.2 h,反应器脱氮效能由 0.14 kg·(m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup>增加到 3.91 kg·(m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup>.

(2)在反应器运行的过程中,当进水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N浓度由 100 mg·L<sup>-1</sup>和 120 mg·L<sup>-1</sup>提升到 700 mg·L<sup>-1</sup>和 840 mg·L<sup>-1</sup>时,厌氧氨氧化菌活性未产生抑制,出水浓度相应维持在 50 mg·L<sup>-1</sup>左右.说明通过气升装置利用厌氧氨氧化反应产生的氮气能够实现出水自回流,有效稀释进水基质浓度,缓解抑制现象,有利于反应器脱氮效能提高.

#### 参考文献:

[1] 王元月,魏源送,张树军.厌氧氨氧化技术处理高浓度氨氮工业废水的可行性分析[J].环境科学学报,2013,33(9):2359-2368.

[2] 李祥,黄勇,袁怡,等.亚硝化的实现及与厌氧氨氧化联合

工艺研究[J].水处理技术,2011,37(12):10-14.

- [3] Zhang L, Yang J C, Furukawa K J. Stable and high-rate nitrogen removal from reject water by partial nitrification and subsequent ANAMMOX [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2010, 110(4): 441-448.
- [4] Galí A, Dosta J, van Loosdrecht M C M, et al. Two ways to achieve an anammox influent from real reject water treatment at lab-scale: Partial SBR nitrification and SHARON process [J]. Process Biochemistry, 2007, 42(4): 715-720.
- [5] 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.
- [6] Zhu L, Liu J X. Landfill leachate treatment with a novel process: Anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) combined with soil infiltration system [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 151(1): 202-212.
- [7] Tang C J, Zheng P, Chen T T, et al. Enhanced nitrogen removal from pharmaceutical wastewater using SBA-ANAMMOX process [J]. Water Research, 2011, 45(1): 201-210.
- [8] 陈旭良,郑平,金仁村,等.味精废水厌氧氨氧化生物脱氮的研究[J].环境科学学报,2007,27(5):747-750
- [9] 李祥,黄勇,朱莉,等.蚀刻液废水厌氧氨氧化脱氮性能研究[J].中国环境科学,2011,32(12):2199-2204
- [10] Dapena-Mora A, Fernández I, Campos J L, et al. Evaluation of activity and inhibition effects on ANAMMOX process by batch tests based on the nitrogen gas production [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2007, 40(4): 859-865.
- [11] Puyol D, Carvajal-Arroyo J M, Sierra-Alvarez R, et al. Nitrite (not free nitrous acid) is the main inhibitor of the anammox process at common pH conditions [J]. Biotechnology Letters, 2014, 36(3):547-551.
- [12] Ni S Q, Meng J. Performance and inhibition recovery of ANAMMOX reactors seeded with different types of sludge [J]. Water Science and Technology, 2011, 63(4): 710-718.
- [13] 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.
- [14] 李祥,黄勇,袁怡.生物膜反应器厌氧氨氧化脱氮效能研究

- [J]. 环境科学与技术, 2010, **33**(11): 133-137.
- [15] 魏琛, 陆天友, 钟仁超, 等. HRT 及氮素负荷对厌氧氨氧化系统的影响 [J]. 环境科学学报, 2010, **30**(4): 749-755.
- [16] Jin R C, Yang G F, Ma C, *et al.* Influence of effluent recirculation on the performance of Anammox process [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, **200-202**: 176-185.
- [17] Strous M, Kuenen J G, Jetten M S M, *et al.* Key physiology of anaerobic ammonia oxidation [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, **65**(7): 3248-3250.
- [18] Li H S, Zhou S Q, Ma W H, *et al.* Fast start-up of ANAMMOX reactor: Operational strategy and some characteristics as indicators of reactor performance [J]. Desalination, 2011, **286**: 436-441.
- [19] Tang C J, Zheng P, Wang C H, *et al.* Granulation and characteristics of extracellular polymers of ANAMMOX sludge in high-load EGSB reactor [J]. CIESC Journal, 2010, **61**(3): 732-739.
- [20] Kimura Y, Isaka K, Kazama F, *et al.* Effects of nitrite inhibition on anaerobic ammonium oxidation [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, **86**(1): 359-365.
- [21] Cema G, Plaza E, Surmacz-Gorska J, *et al.* Study on evaluation of kinetic parameters for ANAMMOX process [A]. In: IWA 2005 Proceeding Specialty Conference [C]. Krakow, Poland, 2005.
- [22] Jung J Y, Kang S H, Chung Y C, *et al.* Factors affecting the activity of ANAMMOX bacteria during start up in the continuous culture reactor [J]. Water Science and Technology, 2007, **55**(1): 459-468.
- [23] Jaroszynski L W, Cicek N, Sparling R, *et al.* Impact of free ammonia on ANAMMOX rates (anoxic ammonium oxidation) in a moving bed biofilm reactor [J]. Chemosphere, 2012, **88**(2): 188-195.
- [24] Fernández I, Dosta J, Fajardo C, *et al.* Short-and long-term effects of ammonium and nitrite on the ANAMMOX process [J]. Journal of Environmental Management, 2012, **95**: 170-174.
- [25] Bettazzi E, Caffaz S, Vannini C, *et al.* Nitrite inhibition and intermediates effects on ANAMMOX bacteria: A batch-scale experimental study [J]. Process Biochemistry, 2010, **45**(4): 573-580.
- [26] Egli K, Fanger U, Alvarez P J J, *et al.* Enrichment and characterization of an ANAMMOX bacterium from a rotating biological contactor treating ammonium-rich leachate [J]. Archives of Microbiology, 2001, **175**(3): 198-207.
- [27] Ni S Q, Lee P H, Fessehaie A, *et al.* Enrichment and biofilm formation of ANAMMOX bacteria in a non-woven membrane reactor [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(6): 1792-1799.
- [28] Tang C J, Zheng P, Qaisar M, *et al.* Start-up and inhibition analysis of the ANAMMOX process seeded with anaerobic granular sludge [J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2009, **36**(8): 1093-1100.
- [29] Li Z G, Ma Y G, Hira D, *et al.* Factors affecting the treatment of reject water by the ANAMMOX process [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(10): 5702-5708.
- [30] Lv Y T, Wang L, Wang X D, *et al.* Macroscale and microscale analysis of ANAMMOX in anaerobic rotating biological contactor [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, **23**(10): 1679-1683.
- [31] Isaka K, Sumino T, Tsuneda S. High nitrogen removal performance at moderately low temperature utilizing anaerobic ammonium oxidation reactions [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2007, **103**(5): 486-490.
- [32] Zekker I, Rikmann E, Tenno T, *et al.* ANAMMOX bacteria enrichment and phylogenetic analysis in moving bed biofilm reactors [J]. Environmental Engineering Science, 2012, **29**(10): 946-950.
- [33] Chen T T, Zheng P, Shen L D, *et al.* Dispersal and Control of ANAMMOX granular sludge at high substrate concentrations [J]. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 2012, **17**(5): 1093-1102.
- [34] 李祥, 黄勇, 周呈, 等. 增设回流提高厌氧氨氧化反应器脱氮效能 [J]. 农业工程学报, 2013, **32**(9): 178-183.
- [35] Tang C J, Zheng P, Wang C H, *et al.* Performance of high-loaded ANAMMOX UASB reactors containing granular sludge [J]. Water Research, 2011, **45**(1): 135-144.

## CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region .....	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i>	(3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years .....	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i>	(3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> at Mount Waliguan, China .....	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i>	(3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM <sub>2.5</sub> in Shanghai Urban Area .....	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i>	(3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China .....	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i>	(3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM <sub>2.5</sub> During Typical Winter Days in Wuxi City .....	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i>	(3280)
Emission Characteristics of PM <sub>2.5</sub> from Blast Furnace Iron Making .....	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i>	(3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing .....	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i>	(3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis .....	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i>	(3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles .....	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i>	(3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls .....	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i>	(3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir .....	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i>	(3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China .....	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i>	(3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments .....	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i>	(3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park .....	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i>	(3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River .....	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i>	(3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China .....	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i>	(3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation .....	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i>	(3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland .....	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i>	(3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation .....	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i>	(3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River .....	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i>	(3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas .....	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i>	(3408)
Synthesis of Cu <sub>2</sub> O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol .....	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i>	(3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7 .....	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i>	(3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation .....	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i>	(3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland .....	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i>	(3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process .....	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i>	(3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor .....	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes .....	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i>	(3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content .....	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i>	(3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community .....	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i>	(3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant .....	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i>	(3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater .....	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i>	(3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration .....	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i>	(3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map .....	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i>	(3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd <sup>2+</sup> on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i> .....	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i>	(3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales .....	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue, <i>et al.</i>	(3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai .....	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i>	(3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(III) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2 .....	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i>	(3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model .....	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing, <i>et al.</i>	(3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City .....	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang, <i>et al.</i>	(3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> .....	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i>	(3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice ( <i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil .....	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i>	(3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape .....	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i>	(3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms .....	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i>	(3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China .....	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i>	(3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ <sup>13</sup> C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province .....	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang, <i>et al.</i>	(3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, NO, CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition .....	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i>	(3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM <sub>2.5</sub> .....	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i>	(3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process .....	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO <sub>2</sub> Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region; an Economic Input-Output Analysis .....	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i>	(3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry .....	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i>	(3632)

# 《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9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 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@reeces. 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@reeces. 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