

# 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)

汽车排放超细微颗粒物浓度及粒径谱特征的研究 ..... 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)

# “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<sup>1</sup>, 王广启<sup>1,2</sup>, 曹知平<sup>1</sup>, 李中华<sup>1</sup>, 胡玉瑛<sup>1</sup>, 王凯军<sup>1</sup>, 左剑恶<sup>1</sup>

(1. 清华大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100084; 2. 中国建筑西北设计研究院有限公司, 西安 710018)

**摘要:** 采取热水解(70℃)-高温厌氧消化工艺处理高固含率(8%~9%)的剩余污泥(中试)。该工艺利用SRT为3 d的热水解促进细胞溶解以及高温厌氧消化加快污泥消化速率, 有机物去除能力较强, 并获得了较好的污泥稳定化效果。当厌氧消化的SRT在20 d以上时, 总VSS去除率达到42.22%以上, 且VSS去除率与厌氧消化的SRT呈线性正相关, 相关系数达到0.915 3。在实际应用中, 推荐高温厌氧消化的SRT为25 d。当停留时间接近时, 本工艺与运行良好的传统污泥厌氧消化工程(含固率3%~5%)以及采用德国技术的高固消化工程的有机物去除率和甲烷产率相当。

**关键词:** 高含固率; 剩余污泥; 高温厌氧消化; 热水解

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3461-05 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.09.030

## Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content

WU Jing<sup>1</sup>, WANG Guang-qi<sup>1,2</sup>, CAO Zhi-ping<sup>1</sup>, LI Zhong-hua<sup>1</sup>, HU Yu-ying<sup>1</sup>, WANG Kai-jun<sup>1</sup>, ZUO Jian-e<sup>1</sup>

(1. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. China Northwest Architecture Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

**Abstract:** A pilot-scale experiment about the process of “thermal pretreatment at 70°C/thermophilic anaerobic digestion” of waste activated sludge of high solid content (8%-9%) was conducted. The process employed thermal treatment of 3 days to accelerate the hydrolysis and thermophilic digestion to enhance anaerobic reaction. Thus it was good at organic removal and stabilization. When the solid retention time (SRT) was longer than 20 days, the VSS removal rate was greater than 42.22% and it was linearly correlated to the SRT of the aerobic digestion with the  $R^2$  of 0.915 3. It was suggested that SRT of anaerobic digestion was 25 days in practice. VSS removal rate and biogas production rate of the pilot experiment were similar to those of the run-well traditional full-scale sludge anaerobic digestion plants (solid content 3%-5%) and the plant of high solid content using German technique.

**Key words:** high solid content; waste activated sludge; thermophilic anaerobic digestion; thermal treatment

2011年我国污泥产量约2 188万 t, 预估到2015年我国污泥产量将超过3 000万 t, 已成为我国最紧迫的环境问题之一<sup>[1]</sup>。其中接近70%的直接填埋, 15%去向不明, 存在突出的二次污染。厌氧消化是一项广泛应用的污泥稳定化、减量化、无害化、资源化技术, 并且能够回收沼气。欧盟地区50%以上污水厂均采用污泥厌氧消化<sup>[2]</sup>。各国厌氧消化比例: 比利时67%, 丹麦50%, 法国49%, 德国64%, 希腊97%, 意大利56%, 卢森堡81%, 西班牙65%<sup>[3]</sup>。

厌氧消化也是我国鼓励的主要污泥处理技术。国家近年发布的《城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南(试行)》、《“十二五”期间污泥处置建议》和《城镇污水处理厂污泥处理处置及污染防治技术政策(试行)》等均明确提出“大中型厂宜优先选用厌氧消化污泥处理工艺”、“鼓励城镇污水处理厂采用

污泥厌氧消化工艺”等。但目前为止, 全国仅50余家污水厂建有污泥厌氧消化设备, 且40%左右停运<sup>[4]</sup>。全国经过厌氧处理的污泥不足2%。高含固率的污泥厌氧消化(简称高固消化, 进泥含固率8%以上)是近年受到关注的污泥消化新技术<sup>[5~8]</sup>。与传统污泥厌氧消化(进泥含固率3%~5%)相比, 单位投资可减少40%~50%<sup>[9]</sup>, 又明显节省加热量, 故经济优势明显。另一方面, 我国的污泥有机物含量明显低于欧美, 也是厌氧技术推广难的原因之一。考虑到污泥消化的速控步骤是污泥水解, 而我国污泥有机物含量低的情况, 提出了“热水解-高温厌氧

收稿日期: 2014-02-23; 修订日期: 2014-03-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51061130555); 教育部清华大学自主科研计划资助项目(20121087922); 长江学者和创新团队发展计划项目

作者简介: 吴静(1974~), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为厌氧生物处理和水质预警, E-mail: Wu\_jing@tsinghua.edu.cn

消化”的高固污泥处理工艺. 该工艺的主要特点包括:①采用 70℃ 热水解作为预处理来促进细胞溶解;②采用高温厌氧消化来加快消化. 目前高固消化的研究还不够充分,尤其缺乏设计和实际运行经验. 本研究具有较好的参考价值.

## 1 材料与方 法

### 1.1 工艺流程

本中试在广州市某水质净化厂进行,共持续 9 个多月. 中试的工艺流程见图 1. 进泥在水解罐中水解,之后用泵打入高温厌氧罐. 热水解罐和高温罐的有效容积分别为 0.6 m<sup>3</sup> 和 2.0 m<sup>3</sup>,前者的反应温度为 70℃ ± 1℃,后者为 55℃ ± 1℃. 热水解的固体停留时间(solid retention time, SRT)为 3 d.

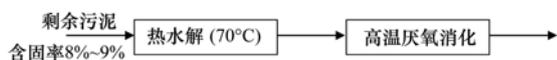


图 1 工艺流程示意

Fig. 1 Process flowchart

### 1.2 接种污泥和处理的污泥

接种污泥为中温厌氧消化污泥,接种挥发性悬浮固体(volatile suspended solid, VSS)浓度为 17.01 g·L<sup>-1</sup>,有机物含量为 57%. 试验所用进泥为污水厂的脱水剩余污泥配制,含固率为 8% ~ 9%,有机物含量为 59.76% ~ 69.94%,VSS 为 52.95 ~ 58.45 g·L<sup>-1</sup>,SCOD 为 1 268 ~ 3 443 mg·L<sup>-1</sup>,氨氮 60 ~ 336 mg·L<sup>-1</sup>. 该污水厂进水中工业废水约占 70% 左右.

### 1.3 有机物去除率

有机物去除率以 VSS 去除率表示,其计算是基于相同 SRT 下的稳定运行阶段的物料平衡得出:

$$\eta_{\text{MB}} = \frac{\text{VSS}_F - \text{VSS}_P}{\text{VSS}_F} \times 100 \quad (1)$$

式中,  $\eta_{\text{MB}}$ : 平均 VSS 去除率,%;  $\text{VSS}_F$ : 平均进泥 VSS 浓度, g·L<sup>-1</sup>;  $\text{VSS}_P$ : 平均出泥 VSS 浓度, g·L<sup>-1</sup>.

### 1.4 测试方法

pH 采用精密 pH 试纸测量,含水率、VSS 采用重量法测量, COD 采用快速消解分光光度法(兰州连华环保科技有限公司, 5B-1B)测量,碱度采用溴甲酚绿-甲基红指示剂滴定法测量,氨氮采用纳氏比色法测量,沼气含量采用甲烷测定仪(北京恒奥德仪器仪表有限公司, HA80-CH4)测量,沼气产量采用湿式流量计(长春汽车滤清器有限责任公司, LMF-1)测量.

## 2 结果与讨论

试验从 2011 年 10 月底持续至次年 7 月,时长近 9 个月.

### 2.1 热水解

试验期间,热水解进泥的平均 VSS 为 55.78 g·L<sup>-1</sup>,出泥为 44.87 g·L<sup>-1</sup>,平均去除率为 19.6%. SCOD 由进泥的 4 565 mg·L<sup>-1</sup> 增加至 19 969 mg·L<sup>-1</sup>,增加 337.4%. 这些显示出热水解在溶解细胞方面有明显效果.

热水解的去除率与进泥的 VSS/SS 有一定关系,当 VSS/SS 在 50.0% ~ 59.9% 范围内,平均为 57.1% 时,热水解的平均 VSS 去除率为 13.3%,而 VSS/SS 在 60% 以上,则差异不明显, VSS/SS 为 60% ~ 64.9%、65.0% ~ 69.9% 和 70% 以上的污泥热水解的平均 VSS 去除率分别为 20.50%、21.20% 和 17.63%.

### 2.2 高温厌氧消化

2011 年 10 月底,用接种污泥直接将高温厌氧罐充满,然后每天按有机负荷(以 COD 计) 2 kg·(m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup> 投加葡萄糖,促进厌氧细菌的活性恢复. 当沼气产量达到理论值 70% ~ 80% 时,逐步减少葡萄糖的投加量,同时增加污泥量,经过 3 周左右的时间,葡萄糖的投加量为零,至此启动结束. 启动期间,污泥的 SRT 为 20 d, pH 维持在 7.0 左右,进泥的 VSS 为 12.86 g·L<sup>-1</sup>, VSS/SS 为 52.43%.

待反应器启动结束后,将进泥的含固率提高到 8% ~ 9%,依次进行了厌氧 SRT 分别为 40 d、35 d、25 d、20 d、15 d 的试验. 每个 SRT 试验的测试结果都是在反应器完成一个完整的 SRT 运行后,且稳定运行以后的平均值,结果如下.

#### 2.2.1 有机物去除率

当高温厌氧消化的 SRT 为 15 d、20 d、25 d、30 d、35 d 和 40 d 时, VSS 去除率分别为 27.5%、32.5%、29.8%、34.6%、25.3% 和 42.3%,有机负荷(以 VSS 计)分别为 3.16、2.36、1.84、1.58、1.15、1.18 kg·(m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup>. SRT 为 35 d 时,去除率较低. 在这期间,污水厂的剩余污泥的 VSS/SS 由 70% 左右下降至 50% 左右. 污泥性质不稳定可能是去除率较低的主要原因.

#### 2.2.2 VSS/SS

稳定化是污泥处理的重要目标之一. 王凯军等<sup>[10]</sup>指出,污泥稳定化是有机物矿化的过程. 朱英等<sup>[11]</sup>推荐 VSS 去除率、不稳定物质去除率、腐殖质

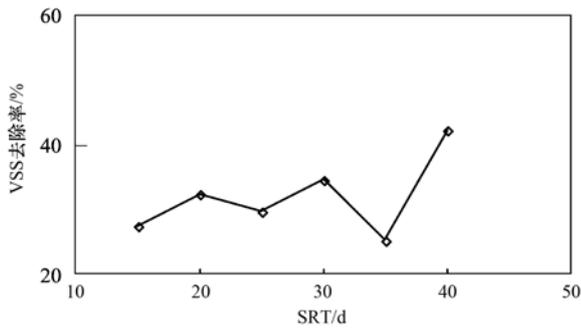


图2 高温厌氧消化的有机物去除率与 SRT

Fig. 2 VSS removal rate of thermophilic anaerobic digestion vs. SRT

含量和植物毒性等作为污泥稳定化指标,而朱明权等<sup>[12]</sup>认为厌氧消化后污泥的有机酸含量可很好地衡量污泥的稳定化程度.通常,有机物去除率越高,污泥稳定化越好,而污泥有机物含量(VSS/SS)越高,污泥就越不稳定,因此可以采用VSS去除率和消化污泥的VSS/SS评价污泥稳定化程度.大量工程运行数据表明,稳定程度较好的污泥VSS去除率在40%以上,VSS/SS多在45%±5%.

当高温厌氧消化的SRT为15 d、20 d、25 d、30 d、35 d和40 d时,高温消化污泥的VSS/SS分别为47.49%、57.98%、54.00%、47.15%、52.93%和55.70%.SRT为20 d、25 d、35 d和40 d时,消化污泥的VSS/SS超过50%,这主要是因为进泥的有机物含量较高导致的.由图3可知,消化污泥的VSS/SS与进泥的VSS/SS是相关的.拟合结果表明,线性相关系数 $R^2$ 达到0.9168.

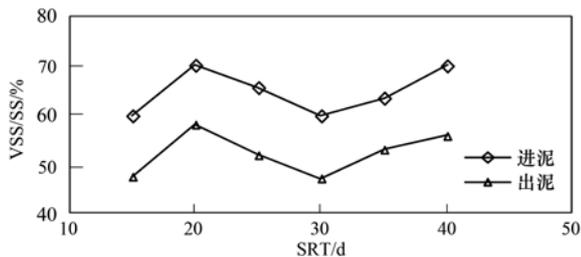


图3 高温消化污泥 VSS/SS 与 SRT 的关系

Fig. 3 VSS/SS of sludge vs. SRT

### 2.2.3 甲烷产率

甲烷产率是评价厌氧消化回收能源的重要指标.由图4可知,当SRT为25~40 d时,甲烷产率(以 $\text{CH}_4/\text{VSS}_{\text{add}}$ 计)变化不大,为 $0.20 \sim 0.24 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ;当SRT为15 d、20 d时,甲烷产率下降,为 $0.12 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.17 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ .这表明当SRT在20 d以下时,污泥有机物的消化还不够彻底.综合甲烷产率以及前文的有机物去除率等结果,在实际

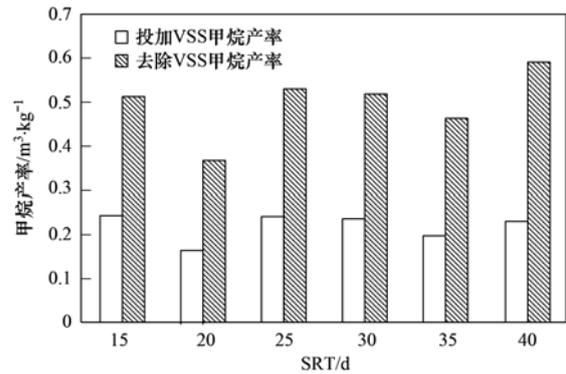


图4 甲烷产率

Fig. 4 Methane production rate

工程中,本工艺的高温厌氧消化的SRT可取25 d.

### 2.2.4 氨氮

氨氮是厌氧反应的抑制物质之一,而高固污泥消化的氨氮抑制风险要明显高于传统污泥厌氧消化.Hashimoto<sup>[13]</sup>研究发现,对于未经驯化的中温和高温厌氧反应器,当pH约为7.2时,氨氮浓度 $2500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的抑制就很明显.而对于经过驯化的高温厌氧反应器,氨氮浓度达到 $4000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时才会产生抑制.Angelidaki等<sup>[14]</sup>也认为 $4000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 是氨氮抑制现象发生的临界值.在试验中,进泥的平均氨氮为 $284 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,厌氧的氨氮浓度平均为 $983 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,低于文献报道的氨氮抑制浓度 $4000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[14,15]</sup>.

### 2.3 总体运行情况

工艺的总VSS去除率见图5.从中可知,当高温厌氧消化的SRT为15 d、20 d、25 d、30 d、35 d和40 d时,总VSS去除率分别为39.07%、42.22%、42.69%、45.31%、44.70%和47.87%,总去除率( $\eta_{\text{MB}}$ )与SRT线性正相关(式2),相关系数达到0.9153.厌氧消化的SRT在20 d以上时,总VSS去除率在40%以上,完全满足《城镇污水处理厂污染物排放标准(GB 18918-2002)》中污泥稳定的要求.

$$\eta_{\text{MB}} = 0.0031 \text{ SRT} + 0.3515$$

$$(R^2 = 0.9153) \quad (2)$$

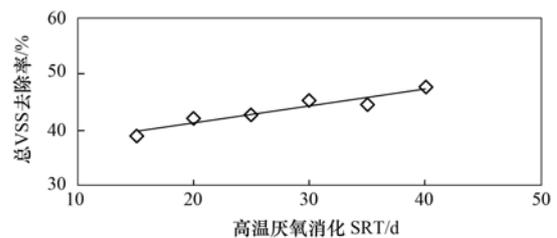


图5 总VSS去除率

Fig. 5 Total VSS removal rate

热水解和高温厌氧消化对总 VSS 去除的贡献见图 6。由图可知,当高温厌氧消化的 SRT 为 15 d、20 d、25 d、30 d、35 d 和 40 d 时,热水解的贡献比例分别为 51.92%、46.45%、63.52%、44.77%、60.66% 和 42.68%,而厌氧消化的贡献比例分别为 48.08%、53.55%、36.48%、55.23%、39.34% 和 57.32%,表明热水解和高温厌氧消化去除 VSS 的贡献大致相当。尽管热水解的 SRT 只有 3 d,仅占总 SRT 的 6.98%~16.67%,但对总 VSS 去除率的贡献明显。

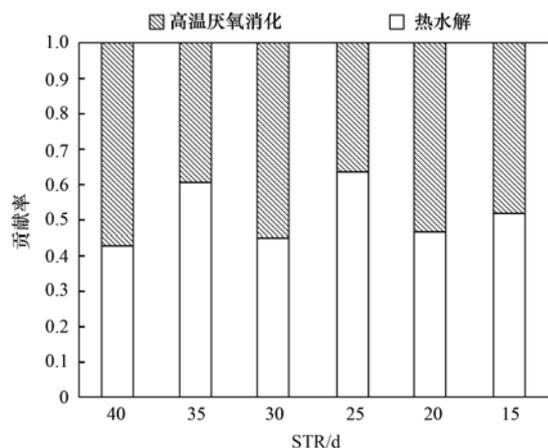


图 6 热水解和高温厌氧消化对 VSS 去除的贡献

Fig. 6 Contributions of thermal treatment and thermophilic digestion to VSS removal rate

## 2.4 与实际工程的对比

文献报道的国外的大型污泥消化工程的运行数据比较少,使用的经典设计手册可以反映工程的实际情况。美国《污水处理厂设计手册》中明确指出污泥厌氧消化的有机物去除率应在 38% 以上,沼气产率的范围为  $0.5 \sim 0.75 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  (以沼气/VSS<sub>add</sub> 计) 和  $0.75 \sim 1.12 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  [16] (以沼气/VSS<sub>rem</sub> 计)。沼

气中的甲烷含量一般为 50%~70%,按平均 60% 计算,折算后的甲烷产率分别为  $0.30 \sim 0.45 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  (以  $\text{CH}_4/\text{VSS}_{\text{add}}$  计) 和  $0.45 \sim 0.67 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  (以  $\text{CH}_4/\text{VSS}_{\text{rem}}$  计)。中试研究结果表明,热水解-高温厌氧消化工艺处理高含固率的剩余污泥时,有机物去除率完全可以达到美国设计手册的要求,但甲烷产率低于推荐值。

截止目前,我国建成并运行良好的污泥厌氧消化设施主要有大连东泰夏家河污泥处理厂、北京小红门污水处理厂污泥消化工程、青岛麦岛污水处理厂污泥消化工程、上海白龙港污水处理厂污泥处理处置工程和郑州王新庄污水处理厂污泥消化工程等。本中试的试验结果与国内运行良好的部分实际工程运行对比结果见表 1。

由于我国城镇污水处理厂污泥的有机物含量普遍较低,已建成运行的污泥厌氧消化设施,甲烷产率大多为  $0.18 \sim 0.24 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  (以  $\text{CH}_4/\text{VSS}_{\text{add}}$  计) [17], 因此本工艺的甲烷产率要优于一般的消化工程。由表 1 可知,当停留时间接近时,高含固率的污泥厌氧消化的有机物去除率与运行良好传统的污泥厌氧消化工程(含固率 3%~5%)相当。由于高固消化与相同停留时间的传统消化相比,反应器的容积要缩小 50% 左右,加热的污泥体积缩小 40%~60%,抵消了大部分高温多耗的能量,因此运行费也未明显增加。这显示出本工艺具有明显的经济优势。

与同为高固消化的大连夏家河污泥处理厂相比,本中试的有机物去除率和甲烷产率基本相同。夏家河污泥处理厂的进料除了城市污泥外,还有部分过期食品,这些物料有机物含量高,产气率也高。夏家河厂采用了德国技术。

本工艺采用了 70℃ 热水解和高温消化,在降低污泥的卫生风险方面要明显优于中温消化。

表 1 中试与实际消化工程的对比

Table 1 Comparison between pilot experiment and full-scale digesters

序号	名称	含固率 /%	有机物含量 /%	温度 /℃	停留时间 /d	有机物去除率 /%	甲烷产率 (以 $\text{CH}_4/\text{VSS}_{\text{rem}}^{-1}$ 计) / $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
1	大连夏家河污泥处理厂 <sup>[18]</sup>	10	60	35 ± 1	22	40~45	0.42 <sup>1)</sup>
2	北京小红门污水处理厂 <sup>[19]</sup>	3~4	68	35	20	51.60	0.56 <sup>2)</sup>
3	上海白龙港污水处理厂 <sup>[20]</sup>	3~4	60	33~35	24.3	40~45	0.51~0.54 <sup>3)</sup>
4	本中试 <sup>4)</sup>	8~9	60~70	55 ± 1	28	42.69	0.50
					23	42.22	0.39

1) 为实际运行值,其他污水处理厂的容积甲烷产率均为设计值; 2) 为实际运行值,由沼气产率  $0.93 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  和平均甲烷含量 60% 计算; 3) 为设计值,由沼气产率  $0.85 \sim 0.90 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  (以沼气/VSS<sub>rem</sub> 计) 和平均甲烷含量 60% 计算; 4) 本中试的停留时间为热水解和厌氧消化的总停留时间

### 3 结论

中试结果表明,含固率 8% ~ 9% 的剩余污泥进行“热水解(70℃)-高温厌氧消化(55℃)”具有较好的有机物去除效果和污泥稳定化效果,能满足《城镇污水处理厂污染物排放标准(GB 18918-2002)》的要求.与此同时,高固消化污泥含固率较高,反应器小,投资较少,而运行能耗未明显增加,值得推广.从有机物去除率和沼气产率来综合考虑,推荐的参数为:热水解 SRT = 3 d,高温厌氧消化的 SRT = 25 d.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 傅涛,肖琼,成杨. 污泥处理处置市场的困惑与徘徊[EB/OL]. 中国固废网: [http://news.solidwaste.cn/view/id\\_43551](http://news.solidwaste.cn/view/id_43551), 2013-06-25.
- [ 2 ] 国家环境保护部. 污水处理厂污泥处理处置最佳可行技术导则[S]. 2009. 21-22.
- [ 3 ] 李琳. 污泥厌氧消化技术发展应用现状及趋势[J]. 中国环保产业, 2013, (8): 57-60.
- [ 4 ] 吴静,姜洁,周红明,等. 我国城市污水厂污泥厌氧消化系统的运行现状[J]. 中国给水排水, 2008, 24(22): 21-24.
- [ 5 ] Fujishima S, Miyahara T, Noike T. Effect of moisture content on anaerobic digestion of dewatered sludge: ammonia inhibition to carbohydrate removal and methane production[J]. Water Science and Technology, 1999, 41(3): 119-127.
- [ 6 ] Nges I A, Liu J. Effects of solid retention time on anaerobic digestion of dewatered-sewage sludge in mesophilic and thermophilic conditions[J]. Renewable Energy, 2010, 35(10): 2200-2206.
- [ 7 ] Duan N N, Dong B, Wu B, *et al.* High-solid anaerobic digestion of sewage sludge under mesophilic conditions; Feasibility study [J]. Bioresource Technology, 2012, 104: 150-156.
- [ 8 ] 刘晓玲,李十中,刘建双,等. 应用高固体浓度厌氧消化工艺转化污泥产沼气研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(5): 955-963.
- [ 9 ] Guendouz J, Bufufou P, Cacho J, *et al.* High-solids anaerobic digestion: comparison of three pilot scales[J]. Water Science & Technology, 2008, 58(9): 1757-1763.
- [ 10 ] 王凯军,王晓惠,李宝林. 城市污水污泥稳定性问题和试验方法探讨[J]. 给水排水, 2002, 28(5): 5-8.
- [ 11 ] 朱英,赵由才,李鸿江,等. 厌氧消化污泥稳定化评价指标综述[J]. 有色冶金设计与研究, 2007, 28(2-3): 233-236.
- [ 12 ] 朱明权,周冰莲. 污水厂污泥稳定方法及稳定化程度的评价指标[J]. 给水排水, 1997, 23(10): 5-10.
- [ 13 ] Hashimoto A G. Ammonia inhibition of methanogenesis from cattle wastes[J]. Agriculture Wastes, 1986, 17(4): 241-261.
- [ 14 ] Angelidaki I, Ahring B K. Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste: the effect of ammonia[J]. Applied Microbiology Biotechnology, 1993, 38(4): 560-564.
- [ 15 ] McCarty P L. Anaerobic waste treatment fundamentals III [J]. Public Works, 1964, 95: 91-94.
- [ 16 ] WEF, ASCEE, WRI. Design of Municipal Wastewater Treatment Plants (5th ed.) [M]. Alexandria: Water Environment Federation Press, 2009.
- [ 17 ] 王广启,吴静,左剑恶,等. 城市污泥高固体浓度厌氧消化的研究进展[J]. 中国沼气, 2013, (6): 9-12.
- [ 18 ] 陈海,王玥,刘东海. 大连市夏家河污泥处理厂的工艺设计与运行经验[J]. 中国给水排水, 2010, 26(12): 42-44, 47.
- [ 19 ] 宋晓雅,杨向平,王东生. 大型污泥厌氧消化系统的启动与运行调控[J]. 给水排水, 2011, 37(3): 32-34.
- [ 20 ] 王丽花,查晓强,邵钦. 白龙港污水处理厂污泥厌氧消化系统的设计和调试[J]. 中国给水排水, 2012, 28(4): 43-45, 48.

## 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