

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 _{2.5} 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 _{2.5} 中碳组分的污染特征	云龙龙,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 _{2.5} 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)
汽车排放超细微粒子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)
疏勒河上游地表水化学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,岳靖冰 (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 ₂ 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,陈宗烜,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,王亚伟 (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 ₂ PO ₄)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 ¹³ 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 ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和CH ₄ 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 _{2.5} 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 ₂ 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)	

微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究

刘吉宝¹, 倪晓棠^{1,2}, 魏源送^{1,3*}, 佟娟¹, 王亚炜¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 中国矿业大学化学与环境工程学院, 北京 100083; 3. 鄂尔多斯固体废弃物资源化工程技术研究所, 鄂尔多斯 017000)

摘要: 为提高剩余污泥的厌氧消化效能和脱水性能, 考察了微波及其组合污泥预处理工艺的强化污泥厌氧消化效果, 同时考察了预处理-厌氧消化过程的污泥理化特征及其脱水性能。结果表明, 微波及其组合工艺可以强化污泥厌氧消化产甲烷, 其中微波-过氧化氢-碱(0.2)的强化效果最为显著, 不仅30 d累计产甲烷量比对照组增加了13.34%, 而且产甲烷速率也得到了提升。与单独微波处理相比, 过氧化氢、碱的投加显著提高了溶解性COD的释放量, 这表明微波、过氧化氢、碱之间的协同作用能有效破碎污泥, 进而强化厌氧消化效果; 微波-酸预处理后的污泥具有良好的脱水性能, 毛细吸水时间(CST)只有9.85 s, 污泥脱水性能的改善与其表面电性、粒径分布的变化密切相关; 不同预处理条件下的污泥经过厌氧消化后, 污泥脱水性能较为接近。

关键词: 微波; 污泥预处理; 厌氧消化; 脱水性能; 理化特征

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3455-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.09.029

Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes

LIU Ji-bao¹, NI Xiao-tang^{1,2}, WEI Yuan-song^{1,3}, TONG Juan¹, WANG Ya-wei¹

(1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 3. Ordos Institute of Solid Waste Technology, Ordos 017000, China)

Abstract: To improve anaerobic digestion and dewatering of sludge, impacts of sludge pretreated by microwave (MW) and its combined processes on sludge anaerobic digestion and dewatering were investigated. The results showed that microwave and its combined processes could effectively enhance anaerobic sludge digestion. Not only the cumulative methane production in the test of the MW-H₂O₂-alkaline (0.2) was increased by 13.34% compared with the control, but also its methane production rate was much higher than that of the control. Compared with the single MW process, the addition of both H₂O₂ and alkaline enhanced the solubilization of particle COD (>0.45 micron), indicating that synergistically generated soluble organics were faster to biodegrade which resulted in the enhancement of anaerobic digestion. The MW-acid process was effective in improving sludge dewaterability, e. g., Capillary Suction Time (CST) at only 9.85 s. The improvement of sludge dewatering was significantly correlated with sludge physical properties such as zeta potential, surface charge density and particle size. Under different sludge pretreatment conditions, the sludge dewatering after anaerobic digestion was similar, though the difference of sludge dewatering to some degrees was observed for pretreated sludge.

Key words: microwave; sludge pretreatment; anaerobic digestion; dewaterability; characteristics

微波(microwave, MW)作为热处理方式之一, 具有加热速度快、加热均匀、过程易于控制等优点, 正逐渐被应用于污泥预处理。近来的研究表明, 微波预处理能有效破碎污泥, 释放污泥EPS和微生物胞内蛋白质、多糖等溶解性有机物。而污泥厌氧消化过程受限于复杂大分子有机物的水解, 微波预处理使污泥溶解性有机物释放, 理论上可以强化污泥厌氧消化性能。Eskicioglu等^[1]利用CEM微波消解仪(MARS-5、0~1250 W、2450 MHz、0~260℃、0~33 bars)处理污泥, 结果表明, 在50~175℃范围内, 单独微波预处理可以在不同程度上提高污泥厌氧消化的沼气产量, 在175℃时能增加31%的沼气产量。此外, 酸、碱、H₂O₂的添加, 能与

微波在污泥预处理中发挥协同作用, 强化微波对污泥的溶胞效果^[2]。与单独微波预处理可以提高污泥厌氧消化性能相比, 微波与酸、碱、H₂O₂组合工艺虽能显著强化污泥溶胞效果, 但对污泥厌氧消化性能的强化作用却不尽相同。Jang等^[3]用CEM微波消解仪(MARS、0~1600 W、2450 MHz、0~330℃、0~10 MPa)将污泥加热到135℃, 并与NaOH组合(20 meq·L⁻¹)预处理污泥, 在不同厌氧消化

收稿日期: 2014-01-22; 修订日期: 2014-03-23

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07020-005)

作者简介: 刘吉宝(1988~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为污泥减量化与资源化, E-mail: liujibaoneu@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yswwei@rcees.ac.cn

SRT 下,每天产气量均有明显提高. Eskicioglu 等^[4]在利用微波(MARS-5、0~1 250 W、2 450 MHz、0~260℃、0~33 bars)将污泥加热到 100℃,与 H₂O₂ 组合强化污泥厌氧消化研究中,却发现在 H₂O₂/TS (质量比,H₂O₂ 浓度 100% V/V)=1 的 H₂O₂ 投加量下,预处理后单位污泥投加量的累计产甲烷量相比于对照组降低了 25%,MW-H₂O₂ 预处理虽然促进了污泥非溶解性有机物的释放,污泥厌氧消化过程反而受到抑制. 针对上述 H₂O₂ 投加量过多导致处理后污泥厌氧消化受抑制,Eskicioglu 建议未来研究中需进一步降低 H₂O₂ 的投加量至 0.5 g·g⁻¹ (H₂O₂/TS,下同)及其以下. Shahriari 等^[5]在研究 MW-H₂O₂ 预处理强化城市有机固体废物厌氧消化时,利用 CEM 微波消解仪(MARS-5、0~1 200 W、2 450 MHz、0~250℃、0~3.45 MPa)将污泥加热到 85℃,添加 H₂O₂ 0.66 g·g⁻¹,也发现了厌氧消化过程受到抑制的现象. 导致上述现象的发生可能是因为 H₂O₂ 过量投加(>0.5 g·g⁻¹),残留的 H₂O₂ 抑制了厌氧消化,或者 H₂O₂ 在微波加热作用下,生成·OH,发生高级氧化(advanced oxidation process, AOP)作用,生成了对厌氧消化微生物菌群有毒性抑制作用的副产物.

此外,目前国内外学者在微波预处理污泥研究中,大多采用密闭微波消解仪,进行高温高压污泥预处理. 但由于密闭加压系统较为复杂,高压、高温的操作条件也存在一定的安全隐患,实际工程应用困难. 有研究者已考察了大量常温常压下微波及其组合工艺进行污泥预处理时碳、氮、磷的释放特征^[6-9],并据此对不同组合工艺进行了优化. 所以,在此基础上,本研究基于常温常压下的微波预处理,考察和比较了低剂量 H₂O₂ (≤0.2 g·g⁻¹) 投加策略^[9,10]下的 MW-H₂O₂-碱、MW 和 MW-酸这 3 种微波及其组合工艺对污泥厌氧消化的强化效果,并对预处理后污泥脱水性能等进行了比较和分析,以期在探求强化污泥厌氧消化的同时改善污泥脱水性能.

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验采用的微波设备为自主研制的微波反应器(JWIFY-1T,定制于巨龙微波能设备公司),频率为 2 450 MHz,磁控管最大输出功率和温度分别为 1 kW,100℃. 反应容器为容积 2 L 的塑料容器,容器上部敞开,配备了搅拌桨均质和热电偶温度传感器实时监测温度.

1.2 试验方法

试验所用污泥为北京小红门污水处理厂厌氧消化进泥,污泥取回后过筛(18 目)除去大颗粒杂质,依据文献[6,7,9]优化后的微波及其组合工艺操作条件,按表 1 进行污泥预处理,其中 MW-H₂O₂-OH 预处理工艺选取 0.06 g·g⁻¹和 0.2 g·g⁻¹两个 H₂O₂ 投加剂量. 预处理后污泥的 pH 调节近中性(6.8~7.5),厌氧消化产甲烷潜势(BMP)采用产甲烷活性(specific methanogenic activity, SMA)测试系统(AMPTS I, bioprocess control, 瑞典). 650 mL 的反应器装入厌氧污泥和基质,有效体积为 400 mL. 污泥厌氧消化产甲烷潜势(BMP)测试的污泥接种比(inoculum to substrate, I/S)通常为 2 左右^[11],因此,本研究以未处理污泥(接种泥):处理污泥(基质)=7:3 的体积比混合后作为试验组(保证污泥接种比接近 2),以未经处理的厌氧消化进泥为对照组,在 38℃ 恒温水浴锅中厌氧消化 30 d,对照组和试验组分别为 3 个平行.

1.3 分析方法

TS、VS、碱度按标准方法^[12,13]测定;TCOD(污泥混合液总 COD)、SCOD(上清液溶解性 COD)采用 DR2800 HACH 分光光度计(HACH, USA)测定;糖类、蛋白质、腐殖酸分别采用 Dubois 法^[14]和修正 Lowry 法^[15]测定;污泥经 6 000 r·min⁻¹离心 10 min 后上清液过 0.45 μm 醋酸纤维滤膜,滤液用来测定 SCOD,溶解态糖类、蛋白质;毛细吸附时间(capillary suction time, CST)采用 Triton type 304M

表 1 微波及其组合工艺污泥预处理操作条件^[2]

Table 1 Operation conditions of sludge pretreated by microwave and its combined processes

工艺	操作参数
微波	常压,600 W 微波功率,辐射样品,升温至 100℃,结束
微波-酸	加入 5 mol·L ⁻¹ 盐酸,调节样品 pH 至约 2.5,其余同“微波”方法
微波-H ₂ O ₂ -OH(0.06)	加入 5 mol·L ⁻¹ NaOH 溶液,调节样品 pH 至 10,600 W 微波功率,辐射样品,升温至 80℃,按 H ₂ O ₂ /TS=0.06(质量比)的比例加入 30% 的过氧化氢溶液,继续辐射升温至 100℃ 结束
微波-H ₂ O ₂ -OH(0.2)	按 H ₂ O ₂ /TS=0.2(质量比)的比例加入 30% 的过氧化氢溶液,其余同“微波-H ₂ O ₂ -碱(0.06)”

CST(triton electronics, UK)测定仪测定;污泥粒径用 Malvern Mastersizer 2000(UK)测定;表面电荷密度采用胶体滴定法^[16]测定;Zeta 电位用 Malvern Zetasizer 2000(UK)测定.

2 结果与讨论

2.1 有机物释放

污泥经微波及其组合工艺处理前后 TCOD、SCOD、蛋白质、多糖、腐殖酸的变化情况见表 2. 由于微波促使污泥中 EPS 和微生物细胞破解,蛋白质、多糖等有机物得到释放,污泥溶解性 COD 增加. 与原污泥相比,经 MW、MW-H、MW-H₂O₂-OH (0.06)、MW-H₂O₂-OH (0.2)处理后,SCOD 分别增加了 454.12%、328.24%、869.41%、1 142.35%,其中 MW-H₂O₂-OH 工艺污泥溶胞效果最好,且随着 H₂O₂ 投加量的增加,有机物释放量越高. 不同预处理过程,蛋白质、多糖、腐殖酸等有机物的释放情况与 SCOD 的结果相一致. 此外,从污泥预处理前后上清液 SCOD 与泥水混合液 TCOD 的比值变化情

况可以看出, MW-H₂O₂-OH 处理后污泥上清液 SCOD 相对于 TCOD 的释放率最高,两种 H₂O₂ 投加量剂量下,SCOD/TCOD 分别达到 0.148、0.139,相对于原污泥提高了 14 倍以上,说明 TCOD 中一部分有机物溶解释放了. 以上结果表明,对于污泥有机物的溶解释放,微波、H₂O₂、碱的组合处理效果要优于单独微波预处理,可能是三者之间存在协同作用,在已有的相关研究^[17,18]中,普遍认为 H₂O₂ 在微波作用下,会分解产生·OH,从而发生高级氧化(AOP)过程. Eskicioglu 等^[4]明确指出,H₂O₂ 通过催化作用,会分解产生强氧化性的·OH,而可以起到催化作用的方式包括 O₃/H₂O₂、UV/H₂O₂、H₂O₂/超声以及 H₂O₂/加热,其研究表明,微波和 H₂O₂ 组合能够显著提高溶解性有机物的释放量,这说明微波和 H₂O₂ 组合能够发挥协同作用,因此该过程也被称为 MW/H₂O₂-AOP. 在本研究中,利用优化后的 H₂O₂ 投加策略^[9],不但实现了较高的污泥有机物释放率,同时相比于其他研究,大幅降低了 H₂O₂ 的投加量.

表 2 污泥微波预处理前后的主要理化特征¹⁾

Table 2 Physicochemical characteristics of sludge pretreated by MW and its combined processes

参数	对照(原污泥)	MW	MW-H	MW-H ₂ O ₂ -OH (0.06)	MW-H ₂ O ₂ -OH (0.2)
TS/g·L ⁻¹	25.14	25.40	25.97	23.66	25.38
VS/g·L ⁻¹	17.17	16.61	18.25	14.86	16.01
VS/TS	0.68	0.65	0.70	0.63	0.63
碱度(以 CaCO ₃ 计)/mg·L ⁻¹	6 867.99(3.68)	1 823.05(5.52)	910.875(184.02)	2 836.73(36.80)	2 791.18(101.21)
TCOD/mg·L ⁻¹	45 800	34 350	39 550	27 900	37 900
SCOD/mg·L ⁻¹	425	2 355	1 820	4 120	5 280
SCOD/TCOD	0.009	0.069	0.046	0.148	0.139
溶解性蛋白质/mg·L ⁻¹	134.38(4.03)	560.98(9.32)	191.40(8.69)	1 725.89(83.86)	2 081.53(4.66)
溶解性多糖/mg·L ⁻¹	16.23(2.37)	171.68(8.52)	151.98(10.6)	521.63(24.28)	548.56(22.03)
溶解性腐殖酸/mg·L ⁻¹	385.35(8.66)	774.67(14.42)	483.94(108.1)	1 947.75(57.71)	1 662.15(86.56)

1) 括号内为标准偏差

2.2 强化厌氧消化效果

为便于比较,本研究将累计产甲烷量归一化为单位 VS 的累计产甲烷量. 从图 1 可知,与对照组相比,经微波及其组合工艺处理后,污泥厌氧消化后的 30d 累计产甲烷量和产甲烷速率均有所提高. 按照 30 d 累计产甲烷量衡算,MW-H₂O₂-OH (0.2)的强化污泥厌氧消化效果最为显著,30 d 累计产甲烷量比对照组增加了 13.34%. 虽然 MW-H 处理后上清液溶解性 COD 释放效果不佳,但 30 d 累计产甲烷量却高于 MW 处理,略低于 MW-H₂O₂-OH(0.06). 这说明 MW-H 条件下,除上清液含有的溶解性有机物外,固相中存在着易于生物降解

的有机物. 依据污泥厌氧消化三阶段理论,水解阶段为污泥厌氧消化的限速步骤. 经微波及其组合工艺处理后的污泥,溶解性有机物的释放,提高了污泥中有机物的水解速率. 与 Eskicioglu 等^[4]、Shahriari 等^[5]的研究结果相比,本研究的低剂量(H₂O₂/TS=0.2 g·g⁻¹)H₂O₂ 投加,未对污泥厌氧消化过程产生抑制作用. 这是因为在本研究的 H₂O₂ 投加策略下,H₂O₂ 的有效利用效率高,减少了残余 H₂O₂ 量. Xiao 等^[9]分析指出,H₂O₂ 的利用效率与污泥中过氧化氢酶活性以及 H₂O₂ 分解产生·OH效率密切相关. 将污泥 pH 调节到 10,并加热到 80℃,可以有效抑制污泥中的过氧化氢酶活

性,避免 H_2O_2 被分解为 H_2O 和 O_2 ,同时,在碱性条件和加热环境中,加速了 H_2O_2 转化产生 $\cdot\text{OH}$ 和 $\text{O}_2\cdot^-$ 速率,进而提高了 H_2O_2 的有效利用率.此外, NaOH 通过与微生物细胞膜发生皂化反应,改变了细胞膜的通透性和流动性,促进了微生物细胞的破解^[19].因此,本研究结果清楚地表明,通过在

$\text{MW-H}_2\text{O}_2$ 污泥预处理过程中改善 H_2O_2 投加策略和降低 H_2O_2 投加量,不但能提高溶解性有机物的释放效率,而且极大地降低了 H_2O_2 残留量,消除了大量残留的 H_2O_2 对厌氧消化过程微生物的抑制作用,进而很好地强化了污泥的厌氧消化产甲烷效能.

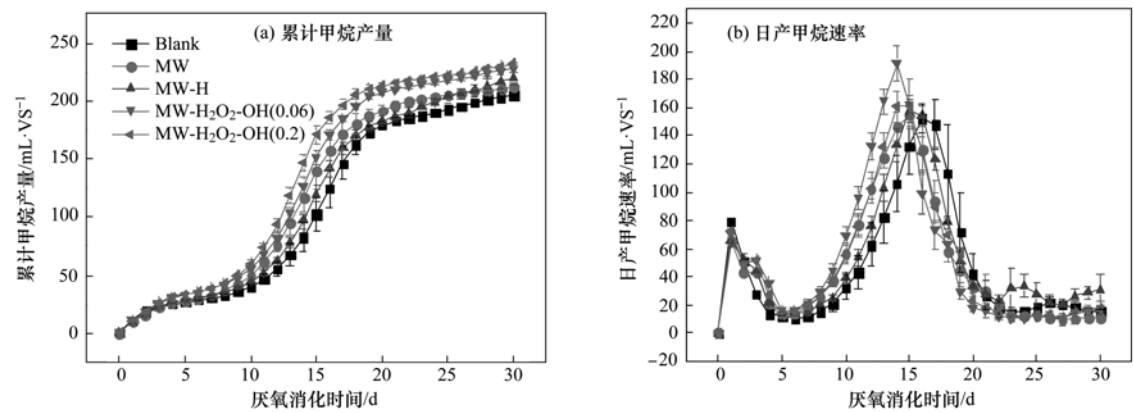


图1 污泥厌氧消化累计甲烷产量和日产甲烷速率

Fig. 1 Cumulative biogas methane production and flow rate during anaerobic sludge digestion

如表 3 所示,经过厌氧消化后,污泥中 VS、COD 得到削减,对照组、MW、MW-H、MW- H_2O_2 -OH(0.06)、MW- H_2O_2 -OH(0.2) 试验组的污泥 VS 削减率分别为 35.67%、35.46%、39.03%、36.68%、37.26%. 尽管单因素方差分析结果表明,不同预处理条件[MW、MW-H、MW- H_2O_2 -OH(0.06)、MW- H_2O_2 -OH(0.2)]下

污泥厌氧消化 VS 的削减率与对照组之间,不具有显著性差异(P 为 1.00、0.36、0.99、0.86),但通过数据对比,厌氧消化后污泥 VS 的削减率是略高于对照组,这同 30 d 累计产甲烷量的提高幅度相对应.因此,为了更好地强化污泥厌氧消化效果,需要进一步深入研究基于微波预处理的强化污泥厌氧消化工艺.

表 3 污泥厌氧消化前后有机物变化情况

Table 3 Changes in organic fraction of sludge before and after anaerobic digestion

参数	Blank	MW	MW-H	MW- H_2O_2 -OH (0.06)	MW- H_2O_2 -OH (0.2)
$\Delta\text{TS}^1/\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	-6.15	-6.35	-6.98	-5.99	-6.46
$\Delta\text{VS}/\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	-6.12	-6.02	-6.82	-6.04	-6.26
$\Delta\text{VS}/\text{TS}$	-0.10	-0.09	-0.11	-0.11	-0.11
$\Delta\text{TCOD}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	-17 550.00	-13 315.00	-17 925.00	-14 130.00	-15 230.00
$\Delta\text{SCOD}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	862.00	256.00	-78.50	-207.50	-609.50
Δ 溶解性蛋白质/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	241.64	117.84	242.97	-207.63	-349.46
Δ 溶解性多糖/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	11.19	-33.14	-27.52	-130.22	-135.16
Δ 溶解性腐殖酸/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	561.15	479.74	545.95	231.77	319.67

1) $\Delta\text{TS} = \text{TS}_{\text{BMP后}} - \text{TS}_{\text{BMP初始}}$,其他指标同理

2.3 污泥理化特征及脱水性能

污泥脱水是污泥处理处置的关键环节,直接影响到污泥后续运输及处置的难易程度,因此,本研究考察了微波及其组合工艺处理污泥厌氧消化前后的脱水性能.经过处理后,污泥粒径分布、表面电性等理化特性发生改变,进而影响到污泥的脱水性能.如图 2 所示,经 MW-H 处理后, $d_{0.5}$ 为 134.74 μm ,相

对于原污泥($d_{0.5} = 96.64 \mu\text{m}$)增大了 39.2%.而 MW、MW- H_2O_2 -OH(0.06)、MW- H_2O_2 -OH(0.2) 处理后的污泥 $d_{0.5}$ 分别为 107.55、97.33、83.61 μm .单因素方差分析检验结果表明,经过 MW、MW-H、MW- H_2O_2 -OH(0.06)、MW- H_2O_2 -OH(0.2) 预处理后的污泥粒径与原污泥的粒径具有显著性差异(P 为 0.021、0.000、0.866、0.008),其中 MW-H 处理

后的污泥粒径显著增大, MW-H₂O₂-OH(0.2) 处理后的污泥粒径显著减小. MW-H 处理后, 污泥粒径的增大可能与污泥释放的蛋白质、多糖等高分子有机物的絮凝团聚有关. 污泥胞外聚合物(extracellular polymer substances, EPS)中含有的蛋白质、多糖等高分子有机物,具有一定的絮凝能力^[20]. 污泥经微波及其组合工艺处理后,虽然都释放了蛋白质、多糖等高分子有机物,但从预处理后污泥胶体颗粒表面电性(图3)的变化情况来看,除 MW-H 外,其它预处理后污泥胶体颗粒表面负电性增强,而 MW-H 处理后,污泥胶体颗粒表面负电性反而削弱,这降低了胶体颗粒间的静电斥力,促进了释放的蛋白质、多糖等高分子有机物的絮凝团聚. MW-H 条件下,污泥表面电负性的降低,可能与释放的蛋白质、多糖等有机物的等电点密切相关^[21]. 此外,预处理后原污泥 EPS 中起桥接作用的 Ca²⁺、Mg²⁺ 离子也得到释放,在 MW-H 处理后,溶液中 Ca²⁺、Mg²⁺ 离子释放浓度要远远高于其它处理条件^[22]. 而这些阳离子可通过架桥和电中和作用与释放的有机物(带负电荷)进行结合、凝聚,降低了胶体表面负电性. 但为何 MW-H 处理的 Ca²⁺、Mg²⁺ 离子浓度仍远高于其它处理,以及这是否是 Ca²⁺、Mg²⁺ 的选择性释放,仍有待深入研究.

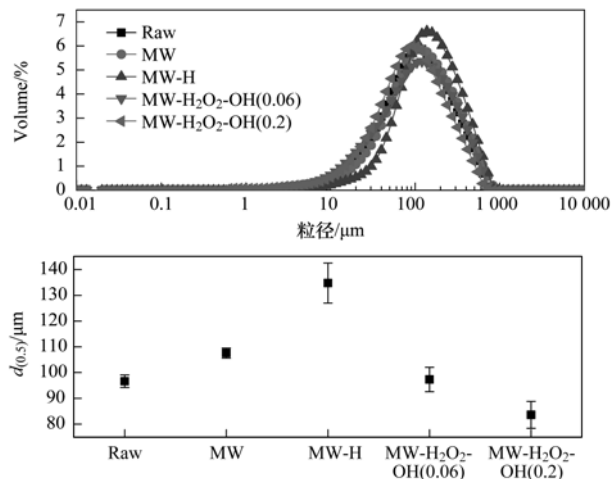


图2 微波及其组合工艺预处理前后的污泥粒径分布

Fig. 2 Sludge particle size distribution of sludge pretreated by MW and its combined processes

不同预处理方式下,污泥理化特征发生了不同变化,污泥脱水性能也由此不同. 如图4所示,经过 MW、MW-H、MW-H₂O₂-OH 处理后, MW-H 处理明显改善了污泥脱水性能, MW、MW-H₂O₂-OH 都严重恶化了污泥脱水性能. 在 MW-H 条件下,污泥 CST 只有 9.85 s,远低于原污泥(51.20 s)以及单独

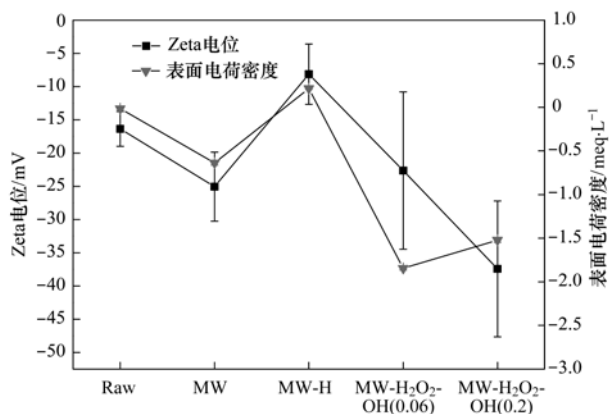


图3 微波及其组合工艺预处理后的污泥表面电性变化

Fig. 3 Changes in zeta potential and surface charge density of sludge pretreated by MW and its combined processes

微波(104.10 s)处理. 随着 MW-H₂O₂-OH(0.06) 处理,溶解性有机物释放量增加,负电性增强,污泥脱水性能相比 MW 单独处理进一步恶化. 但是与 MW-H₂O₂-OH(0.06) 相比,将 H₂O₂ 投加量增加到 0.2 g·g⁻¹, CST 反而下降,脱水性能相对变好. 该现象与 Abelleira 等^[23]的研究结果相一致,在加热-H₂O₂ 组合处理污泥时,污泥脱水性能随着加热温度(>130℃)和 H₂O₂ 的投加量的提高而得到明显改善. 这可能是由于 H₂O₂ 投加量的增加,强化了有机胶体粒子(organic colloidal fraction, 1~100 μm^[24])水解为小分子有机物,特定分子量下有机胶体粒子数量的减少导致污泥脱水性能的改善^[25]. 预处理后的污泥经过厌氧消化,污泥脱水性能趋于一致,未处理、MW 处理、MW-H 处理、MW-H₂O₂-OH(0.06) 处理、MW-H₂O₂-OH(0.2) 处理的污泥经厌氧消化后的 CST 分别为 43.60、50.83、28.57、48.60、45.90 s,其中 MW-H 处理后的污泥脱水性能

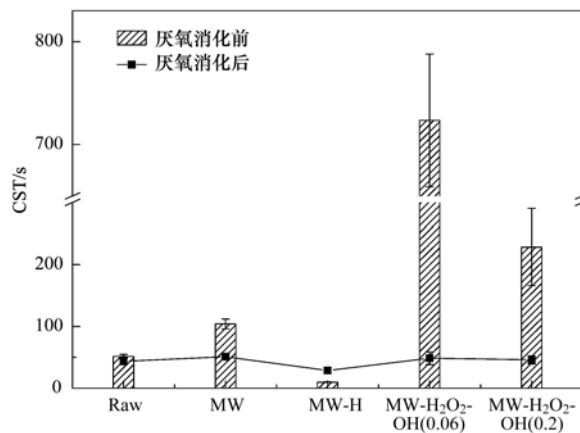


图4 微波预处理污泥厌氧消化前后脱水性能变化

Fig. 4 Changes in dewaterability of pretreated sludge before and after anaerobic digestion

能仍优于其他条件。经过 MW、MW-H₂O₂-OH 处理后释放的不利于污泥脱水的特定有机物,如络氨酸、色氨酸类蛋白质^[26],经过厌氧消化的生物降解,污泥脱水性能又重新得到了恢复。

3 结论

(1)微波-H₂O₂-OH 组合工艺预处理污泥,低剂量投加 H₂O₂($\leq 0.2 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$)可以很好地强化污泥厌氧消化产甲烷效能,并且优于其他预处理工艺。

(2)MW-H 处理后的污泥脱水性能得到了明显改善,而其他预处理工艺都恶化了污泥的脱水性能,污泥脱水性能的改变与处理后污泥的表面电性、粒径分布的变化密切相关。

参考文献:

- [1] Eskicioglu C, Kennedy K J, Droste R L. Enhanced disinfection and methane production from sewage sludge by microwave irradiation[J]. *Desalination*, 2009, **248**(1-3): 279-285.
- [2] 肖庆聪,魏源送,王亚炜,等. 微波及其组合工艺的污泥溶胞效果比较研究[J]. *中国给水排水*, 2012, **28**(11): 61-64.
- [3] Jang J H, Ahn J H. Effect of microwave pretreatment in presence of NaOH on mesophilic anaerobic digestion of thickened waste activated sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **131**: 437-442.
- [4] Eskicioglu C, Prorot A, Marin J, *et al.* Synergetic pretreatment of sewage sludge by microwave irradiation in presence of H₂O₂ for enhanced anaerobic digestion[J]. *Water Research*, 2008, **42**(18): 4674-4682.
- [5] Shahriari H, Warith M, Hamoda M, *et al.* Anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste combining two pretreatment modalities, high temperature microwave and hydrogen peroxide[J]. *Waste Management*, 2012, **32**(1): 41-52.
- [6] 程振敏. 微波辐射技术应用于城市污水处理厂污泥磷回收的研究[D]. 北京:中国科学院生态环境研究中心, 2008.
- [7] 阎鸿. 微波及其组合工艺在污泥预处理中的比较研究[D]. 北京:中国科学院生态环境研究中心, 2010.
- [8] 王亚炜. 微波-过氧化氢协同处理剩余污泥的效能与机理研究[D]. 北京:中国科学院生态环境研究中心, 2009.
- [9] Xiao Q C, Yan H, Wei Y S, *et al.* Optimization of H₂O₂ dosage in microwave-H₂O₂ process for sludge pretreatment with uniform design method[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(12): 2060-2067.
- [10] Wang Y W, Wei Y S, Liu J X. Effect of H₂O₂ dosing strategy on sludge pretreatment by microwave-H₂O₂ advanced oxidation process[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **169**(1-3): 680-684.
- [11] Raposo F, De la Rubia M A, Fernández-Cegrí V, *et al.* Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2012, **16**(1): 861-877.
- [12] 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.
- [13] CJT 221-2005. 城市污水处理厂污泥检验方法[S]. 2005.
- [14] Dubois M, Gilles K A, Hamilton J K, *et al.* Colorimetric method for determination of sugars and related substances[J]. *Analytical Chemistry*, 1956, **28**(3): 350-356.
- [15] Fr/olund B, Griebel T, Nielsen P H. Enzymatic-activity in the activated-sludge floc matrix[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1995, **43**(4): 755-761.
- [16] Jin B, Wilén B M, Lant P. A comprehensive insight into floc characteristics and their impact on compressibility and settleability of activated sludge[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2003, **95**(1-3): 221-234.
- [17] Lo K V, Chan W W I, Yawson S K, *et al.* Microwave enhanced advanced oxidation process for treating dairy manure at low pH[J]. *Journal of Environmental Science and Health Part B-Pesticides Food Contaminants and Agricultural Wastes*, 2012, **47**(4): 362-367.
- [18] Wong W T, Chan W I, Liao P H, *et al.* A hydrogen peroxide/microwave advanced oxidation process for sewage sludge treatment[J]. *Journal of Environmental Science and Health Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 2006, **41**(11): 2623-2633.
- [19] Erdinciler A, Vesilind P A. Effect of sludge cell disruption on compactibility of biological sludges[J]. *Water Science and Technology*, 2000, **42**(9): 119-126.
- [20] Yu G H, He P J, Shao L M. Characteristics of extracellular polymeric substances (EPS) fractions from excess sludges and their effects on bioflocculability[J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(13): 3193-3198.
- [21] Raynaud M, Vaxelaire J, Olivier J, *et al.* Compression dewatering of municipal activated sludge: Effects of salt and pH[J]. *Water Research*, 2012, **46**(14): 4448-4456.
- [22] 肖庆聪. 微波及其组合工艺在污泥磷回收及减量中的应用研究[D]. 北京:中国人民大学, 2012.
- [23] Abelleira J, Pérez-Elvira S I, Portela J R, *et al.* Advanced thermal hydrolysis: optimization of a novel thermochemical process to aid sewage sludge treatment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(11): 6158-6166.
- [24] Higgins M J, Novak J T. The effect of cations on the settling and dewatering of activated sludges: laboratory results[J]. *Water Environment Research*, 1997, **69**(2): 215-224.
- [25] Novak J T. The role of organic colloids in dewatering[J]. *Drying Technology*, 2010, **28**(7): 871-876.
- [26] Zhen G Y, Lu X Q, Wang B Y, *et al.* Synergetic pretreatment of waste activated sludge by Fe(II)-activated persulfate oxidation under mild temperature for enhanced dewaterability[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **124**: 29-36.

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 ₂ and CH ₄ 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 _{2.5} 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 _{2.5} During Typical Winter Days in Wuxi City	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i> (3280)
Emission Characteristics of PM _{2.5} 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 ₂ 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 ²⁺ 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 (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 (3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang (3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH ₂ PO ₄	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 ¹³ 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 (3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ 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 _{2.5}	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 ₂ 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@ 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

国内外公开发行人