

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第10期

Vol.36 No.10

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于细颗粒物来源追踪技术的2013年12月上海市严重污染过程中PM _{2.5} 的源贡献分析·····	李莉, 安静宇, 严茹莎 (3543)
华北地区乡村站点(曲周)夏季PM _{2.5} 中二次无机组分的生成机制与来源解析·····	陈仕意, 曾立民, 董华斌, 朱彤 (3554)
成都市大气PM _{2.5} 中有机磷阻燃剂的污染水平及来源·····	印红玲, 李世平, 叶芝祥, 杨迎春, 梁金凤, 游俊杰 (3566)
不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究·····	黄帅, 黄欣怡, 吴水平, 胡清华, 陈晓秋 (3573)
北京地区大气消光特征及参数化研究·····	陈一娜, 赵普生, 何迪, 董璠, 赵秀娟, 张小玲 (3582)
光助芬顿反应催化降解气体中甲苯·····	郑思灿, 陈天虎, 刘海波, 邹雪华, 朱承驻, 陈冬 (3590)
遗体火化二噁英类排放水平及影响因素·····	尹文华, 于晓巍, 韩静磊, 冯桂贤, 付建平, 杨艳艳, 鞠勇明, 张素坤 (3596)
我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析·····	张妍, 王元刚, 卢志强, 韩萌, 商彬彬, 曹阳, 张君 (3603)
太湖湖表反照率时空特征及影响因子·····	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 肖薇, 肖启涛, 徐家平 (3611)
基于GOCI影像的太湖水体漫滩系数遥感反演·····	王珊珊, 李云梅, 王桥, 吕恒 (3620)
河口盐度梯度下短叶茳苳沼泽湿地土壤间隙水溶解性甲烷时空特征·····	杨平, 张子川, 杜威宁, 黄佳芳, 全川 (3633)
石家庄市土壤水分运移的稳定同位素特征分析·····	陈同同, 陈辉, 韩璐, 邢星, 付阳阳 (3641)
长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素·····	白薇扬, 张成, 唐振亚, 赵铮, 王定勇 (3649)
三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态·····	王晓峰, 袁兴中, 刘红, 张磊, 尉建军, 岳俊生 (3662)
湖泊水-沉积物界面DIC和DOC交换通量及耦合关系·····	王伟颖, 吕昌伟, 何江, 左乐, 颜道浩 (3674)
水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移·····	李邵龙, 陈道毅 (3683)
城市道路径流的排污特征·····	武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 王效科, 陈利顶, 刘刚才 (3691)
杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征·····	段圣辉, 赵钰, 单保庆, 唐文忠, 张文强, 张淑珍, 郎超 (3697)
海水淡化超滤-反渗透工艺沿程溴代消毒副产物变化规律·····	杨哲, 孙迎雪, 石娜, 胡洪管 (3706)
天然有机物和电解质对水中C ₆₀ 凝聚行为的影响·····	方华, 荆洁, 于江华, 王钰葶 (3715)
铅改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果·····	王虹, 林建伟, 詹艳慧, 章喆, 王笛入 (3720)
污水管网中无机氮类营养盐变迁规律·····	金鹏康, 焦丁, 任武昂 (3730)
微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究·····	朱晨, 吴昌永, 周岳溪, 伏小勇, 陈学民, 邱延波, 吴晓峰 (3738)
倒置A ² /O-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染特性·····	王旭东, 马亚斌, 王磊, 杨怡婷, 黄丹曦, 夏四清 (3743)
高氨氮对具有回流的PN-ANAMMOX串联工艺的脱氮影响·····	李祥, 崔剑虹, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 刘忻 (3749)
苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性·····	李姜维, 杨晓永, 胡安谊, 于昌平 (3756)
驯化污泥厌氧还原脱氯促进2,4,6-三氯酚矿化及胞外呼吸脱氯途径·····	宋佳秀, 李玲, 盛凡凡, 郭翠香, 张永明, 李祖元, 王天丽 (3764)
苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响·····	杨朋兵, 李祥, 黄勇, 朱亮, 崔剑虹, 徐彬彬 (3771)
连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化·····	鲁磊, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建, 武勇 (3778)
FNA对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化·····	马娟, 李璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟, 陈永志 (3786)
污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究·····	刘吉宝, 李亚明, 吕鑑, 魏源送, 杨敏, 郁达伟 (3794)
残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响·····	贾瑞来, 刘吉宝, 魏源送, 才兴 (3801)
大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征·····	丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦 (3809)
缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响·····	祁心, 江长胜, 郝庆菊, 李鉴霖 (3816)
三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制·····	吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄 (3825)
坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响·····	冯书珍, 苏以荣, 张伟, 陈香碧, 何寻阳 (3832)
不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响·····	沈冰洁, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 王久荣, 陈明利, 吴晓英, 吴金水 (3839)
有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险·····	纪小凤, 郑娜, 王洋, 刘强, 张静静 (3845)
改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响·····	陈永华, 张富运, 吴晓英, 梁希, 袁斯文 (3852)
菹草乙酸酯组分抑菌活性物质的分离纯化和鉴定·····	孙颖颖, 苏振霞, 浦寅芳, 肖辉, 王长海 (3860)
血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险·····	李昆, 赵高峰, 周怀东, 赵健, 张盼伟, 刘巧娜, 王兴勋, 刘晓茹 (3866)
生物传感细胞ADP1_pWHLux在水环境急性毒性检测中的应用·····	唐慧, 宋一之, 姜博, 陈光玉, 贾建丽, 张旭, 李广贺 (3872)
虹鳟鱼鳃及肝脏多种CYP1基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况·····	高锴, 闫佩, 檀翠玲, 罗彦鹤, 孙静, Maria E. Jönsson, Ingvar Brandt, 唐运平 (3878)
纳米氧化锌对斑马鱼肝脏的毒性效应·····	刘林, 赵群芬, 金凯星, 朱帅旗, 王小飞, 吕佳昀 (3884)
黄连根茎浸提物对隆线蚤的急性毒性作用·····	陈亚楠, 袁玲 (3892)
发酵稻壳对亚铁离子和硫离子的吸附-解吸附特性·····	谢晓梅, 廖敏, 华嘉媛, 陈娜, 张楠, 徐培智, 解开治, 徐昌旭, 刘光荣 (3896)
搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用测定海水中邻苯二甲酸酯·····	高晨晨, 李锋民, 卢伦, 孙玥 (3906)
COD组分分析的实验条件及结果可靠性分析·····	李志华, 张银, 韩杏, 余科, 李汝佳 (3913)
养猪废水和污泥中11种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用·····	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (3918)
土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展·····	邓欢, 薛洪婧, 姜允斌, 钟文辉 (3926)
《环境科学》征订启事 (3553)	
《环境科学》征稿简则 (3589)	
信息 (3705, 3755, 3763, 3800)	

残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化化的影响

贾瑞来¹, 刘吉宝¹, 魏源送^{1,2*}, 才兴³

(1. 中国科学院生态环境研究中心环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院生态环境研究中心鄂尔多斯固体废弃物资源化工程技术研究所, 鄂尔多斯 017000; 3. 沈阳环境科学研究院, 沈阳 110016)

摘要: 前期研究发现, 由于残留过氧化氢的影响, 经过微波-过氧化氢-碱 MW-H₂O₂-OH (pH = 10) 预处理的污泥进行水解酸化时存在产酸滞后期。因此, 本研究通过批量试验, 考察了残留过氧化氢对 MW-H₂O₂-OH (pH = 10 和 pH = 11, MHO10 和 MHO11) 预处理后污泥水解酸化的影响。结果表明, 过氧化氢酶比二氧化锰具有更高效率的过氧化氢分解能力, 能够在 10 min 内完全降解过氧化氢。水解酸化的 8 d 时间内, 四组试验的 SCOD (溶解性 COD) 浓度和总挥发性脂肪酸 (VFA) 浓度均呈现先增加后降低的趋势, 优化水解时间均为 0.5 d; MHO10 组、MHO10 + 过氧化氢酶组 (MHO10C) 和 MHO11 + 过氧化氢酶组 (MHO11C) 的优化水解酸化时间均为 3 d, MHO11 组的优化水解酸化时间为 4 d。残留过氧化氢对 MHO10 预处理后污泥的水解酸化有抑制作用, 存在产酸滞后期。与 MHO10 预处理相比, MHO11 预处理释放的 SCOD 提高了 19.29%, 释放了更多的有机物, 进而显著提高了总 VFA 产量, 5 d 时总 VFA 产量显著提高了 84.80%, 且 MHO11 组可以轻微缩短产酸滞后期。投加 100 mg·L⁻¹ 过氧化氢酶, 明显缩短解除了 MHO10 组和 MHO11 组 0.5 d 的产酸滞后期, 并提高了总 VFA 产量, 3 d 时, MHO10C 组、MHO11C 组的总 VFA 浓度分别比 MHO10 组提高了 23.61%、50.12%。MHO10 组、MHO10C 组和 MHO11C 组 VFA 的主要组分均为乙酸、异戊酸、正丁酸, 而 MHO11 组 VFA 的主要组分为乙酸、丙酸、异戊酸, 在各组的优化水解酸化时间, 3 种主要的 VFA 组分之和均占总 VFA 的 75% 以上, 其中乙酸所占比例均在 41% 以上。

关键词: 微波-过氧化氢-碱; 污泥预处理; 水解酸化; 过氧化氢酶; 二氧化锰; pH

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)10-3801-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.10.032

Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -H₂O₂-Alkaline Process

JIA Rui-lai¹, LIU Ji-bao¹, WEI Yuan-song^{1,2*}, CAI Xing³

(1. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Ordos Institute of Solid Waste Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Ordos 017000, China; 3. Shenyang Academy of Environmental Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: Previous studies have found that in the hydrolysis acidification process, sludge after microwave -H₂O₂-alkaline (MW-H₂O₂-OH, pH = 10) pretreatment had an acid production lag due to the residual hydrogen peroxide. In this study, effects of residual hydrogen peroxide after MW-H₂O₂-OH (pH = 10 or pH = 11) pretreatment on the sludge hydrolysis acidification were investigated through batch experiments. Our results showed that catalase had a higher catalytic efficiency than manganese dioxide for hydrogen peroxide, which could completely degraded hydrogen peroxide within 10 min. During the 8 d of hydrolysis acidification time, both SCOD concentrations and the total VFAs concentrations of four groups were firstly increased and then decreased. The optimized hydrolysis times were 0.5 d for four groups, and the optimized hydrolysis acidification times were 3 d for MW-H₂O₂-OH (pH = 10) group, MW-H₂O₂-OH (pH = 10) + catalase group and MW-H₂O₂-OH (pH = 11) + catalase group. The optimized hydrolysis acidification time for MW-H₂O₂-OH (pH = 11) group was 4 d. Residual hydrogen peroxide inhibited acid production for sludge after MW-H₂O₂-OH (pH = 10) pretreatment, resulting in a lag in acidification stage. Compared with MW-H₂O₂-OH (pH = 10) pretreatment, MW-H₂O₂-OH (pH = 11) pretreatment released more SCOD by 19.29% and more organic matters, which resulted in the increase of total VFAs production significantly by 84.80% at 5 d of hydrolysis acidification time and MW-H₂O₂-OH (pH = 11) group could shorten the lag time slightly. Dosing catalase (100 mg·L⁻¹) after the MW-H₂O₂-OH (pH = 10 or pH = 11) pretreatment not only significantly shortened the lag time (0.5 d) in acidification stage, but also produced more total VFAs by 23.61% and 50.12% in the MW-H₂O₂-OH (pH = 10) + catalase group and MW-H₂O₂-OH (pH = 11) + catalase group, compared with MW-H₂O₂-OH (pH = 10) group at 3d of hydrolysis acidification time. For MW-H₂O₂-OH (pH =

收稿日期: 2015-03-17; 修订日期: 2015-04-21

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07202-005, 2015ZX07203-005); 中国科学院重大突破择优支持项目 (ZDTP20140201)

作者简介: 贾瑞来 (1990 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污泥减量化与资源化, E-mail: jiaruilai.dlut@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: ysw@rcees.ac.cn

10) group, MW-H₂O₂-OH (pH = 10) + catalase group and MW-H₂O₂-OH (pH = 11) + catalase group, the dominant VFAs were acetic, iso-valeric and n-butyric acids. For MW-H₂O₂-OH (pH = 11) group, the dominant VFAs were acetic, propionic and iso-valeric acids. In the optimized hydrolysis acidification time for each group, percentages of the three main acids accounted for more than 75% of total VFAs, and percentages of acetic acid accounted for more than 41% of total VFAs.

Key words: microwave-H₂O₂-alkaline; sludge pretreatment; hydrolysis acidification; catalase; manganese dioxide; pH

厌氧消化是污泥减量化、稳定化、资源化的常用工艺^[1]. 污泥的厌氧消化分为水解、酸化、乙酸化、甲烷化这4个阶段^[2]. 污泥水解酸化过程可以产生大量的溶解性有机物(SCOD)与挥发性脂肪酸(VFAs),这些物质可以为生物反硝化脱氮提供碳源^[3, 4]. 水解是污泥厌氧消化过程的限速阶段^[5, 6],微生物细胞壁阻碍了污泥中有机物的释放与利用,而污泥预处理技术能够很好地实现污泥溶胞,促进污泥中有机物的释放^[1, 7, 8],提高污泥的水解效率,减少水解时间,节省厌氧消化装置的占地面积^[9].

微波辐射技术作为热处理方式之一,具有加热均匀、升温速度快、易于操控、节能高效等优点^[8, 10, 11],逐步受到重视并应用于污泥预处理. 本课题组前期开展了大量常温常压下微波及其组合工艺污泥预处理研究,例如,有研究表明^[12~17],微波-过氧化氢-碱预处理工艺比微波其他组合工艺具有更好的污泥破壁溶胞效果. 但是,前期研究发现,经过MHO10预处理的污泥在水解酸化初期存在产酸滞后期. 这可能是由于经过MHO10预处理后污泥中残留了部分H₂O₂或预处理过程中产生的副产物,这些物质在随后的厌氧消化阶段,很有可能破坏了微生物细胞或者抑制了微生物的新陈代谢等,对水解酸化微生物产生了一定的毒害作用,抑制了初期污泥的水解酸化.

MHO10预处理后确实残留了大量的过氧化氢^[13, 15],同时研究表明^[15],提高MW-H₂O₂-OH预处理过程中的pH,可以有效地降低过氧化氢的残留量. 因此,为了弄清经过MHO10预处理的污泥在水解酸化初期存在产酸滞后期的原因,以及探索缩短解除产酸滞后期的方法,本研究通过向MHO10或MHO11预处理后的污泥中添加过氧化氢催化剂,考察残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响,并优化微波预处理后污泥的水解酸化条件,以期为后续的污泥高效资源化利用提供技术支撑.

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验所用微波设备为自主研发的微波反应器

JWIFY-1T(定制于巨龙微波能设备有限公司),频率为2 450 MHz,磁控管最大输出功率为1 kW,可进行无级调节,最高温度为100℃. 反应器配有搅拌装置和热电偶温度传感器,可实时监测温度.

过氧化氢酶(Sigma)和MnO₂(国药)的催化H₂O₂分解速率试验采用JJ-4A六连同步自动升降搅拌机(国华电器有限公司).

水解酸化试验采用全自动甲烷潜力测试系统(AMPTS II, Bioprocess Control),玻璃反应器容积为0.65 L,反应器采用水浴加热方式并配有搅拌装置,搅拌速度为80 r·min⁻¹.

1.2 试验方法

剩余污泥取自北京清河污水处理厂,取回后静置浓缩并置于4℃保存. 接种污泥为北京小红门污水处理厂中温(35℃)厌氧消化出泥. 试验所用污泥试验前过18目标准筛以除去大颗粒杂质. 试验采用MW-H₂O₂-OH预处理工艺^[12~17],其操作条件如下:加入5 mol·L⁻¹ NaOH溶液,调节样品pH至10或11,600 W微波功率,辐射样品,升温至80℃,然后按H₂O₂/总固体浓度TS=0.2(质量比)加入30%的过氧化氢溶液,继续辐射升温至100℃,结束. 试验所用污泥的主要性质列于表1. 剩余污泥经过MW-H₂O₂-OH预处理后,添加分解过氧化氢催化剂,混合完全,搅拌一定时间之后,按照I/S(inoculum to substrate,挥发性固体浓度VS/Vs)为0.07的比例进行接种污泥接种. 根据已有相关研究成果,高温更利于污泥水解^[18~21],可以得到较大产酸量^[21~23]. 因此,本批次试验采用55℃作为水解酸化温度. 反应器中污泥混合液总量为0.4 L,取样时间设置为0、0.5、1、1.5、2、3、4、5、6、7、8 d.

1.3 分析方法

TS、VS按照标准方法^[24, 25]测定;pH采用pH计测定;污泥经8 000 r·min⁻¹离心20 min后,上清液过0.45 μm或0.22 μm醋酸纤维滤膜,滤液用来测定H₂O₂、SCOD、VFA. H₂O₂采用TiCl₄比色法进行测定^[13, 26]. TCOD(污泥混合液总COD)和SCOD采用DR2800 HACH分光光度计(HACH)测定;C₂~C₅的VFA组分(乙酸、丙酸、异丁酸、正丁酸、异戊酸、正戊酸)采用气相色谱(Agilent 6890N)进行

表 1 试验所用污泥的主要性质¹⁾

Table 1 Main characteristics of sludge used in the experiment

参数	剩余污泥	接种污泥	MHO10	MHO11
TS/g·L ⁻¹	25.60(0.28)	21.21(0.13)	29.01(0.33)	29.15(0.36)
VS/g·L ⁻¹	19.49(0.27)	11.89(0.18)	21.18(0.25)	20.85(0.26)
VS/TS 比值	0.76	0.56	0.73	0.72
pH	6.71	7.23	7.87	8.84
TCOD/mg·L ⁻¹	27 100	21 900	30 750	31 000
SCOD/mg·L ⁻¹	270	231	9 540	11 380
总 VFA(以 COD 计,下同)/mg·L ⁻¹	100.96(10.48)	0(0)	266.18(9.43)	302.52(3.59)
残留 H ₂ O ₂ /mg·L ⁻¹	—	—	2 294.32(24.04)	353.80(4.81)

1) 括号内数值为标准偏差

测量,检测器为火焰离子化检测器 FID (flame ionization detector),色谱柱为 HP-FFAP 毛细管柱 (25 m×0.25 mm). 为了测定 VFA 组分,滤液要用 2 mol·L⁻¹ HCl 调至 pH 2.0 以下,然后转移到 1.5 mL 的气相色谱进样瓶中. VFA 组分通过以下转换因子转换成 COD 浓度:1.07 g·g⁻¹ (COD/乙酸), 1.51 g·g⁻¹ (COD/丙酸),1.82 g·g⁻¹ (COD/正丁酸或异丁酸), 2.04 g·g⁻¹ (COD/正戊酸或异戊酸)^[27]. 总 VFA 的含量按照各 VFA 组分的加和计算得出. 所有样品均测量两到三次,取平均值并给出标准偏差.

2 结果与讨论

2.1 分解过氧化氢催化剂的选择

过氧化氢酶和二氧化锰都是常用的过氧化氢催化剂. 王亚炜^[13]的研究表明,在约3 300 mg·L⁻¹的过氧化氢溶液中,100 mg·L⁻¹的过氧化氢酶可以在 10 min 内将过氧化氢完全降解,而同样浓度的二氧化锰,需要 90 min 才能将过氧化氢降解完全,然而提高二氧化锰的浓度至 443 mg·L⁻¹之后,过氧化氢也在 10 min 内被完全降解.

本研究选用相似浓度的过氧化氢酶和二氧化锰作为催化剂,在 MHO10 预处理后的污泥中进行了过氧化氢分解试验,如图 1 所示. 结果表明,二氧化锰浓度在 100 mg·L⁻¹时的催化效果最差,提高至 400 mg·L⁻¹时,催化效果有所提高,但仍很不理想. 然而 100 mg·L⁻¹的过氧化氢酶可以在 10 min 内将过氧化氢完全降解. 这主要是由于酶具有高效率的催化能力,其效率是一般无机催化剂的 10⁷~10¹³ 倍,同时酶具有专一性,过氧化氢酶只针对过氧化氢进行反应,而二氧化锰则能与 MHO10 预处理后污泥中的多种物质发生反应. 因此,后续研究选用过氧化氢酶作为分解残留过氧化氢的催化剂,投加过

氧化氢酶的浓度均为 100 mg·L⁻¹.

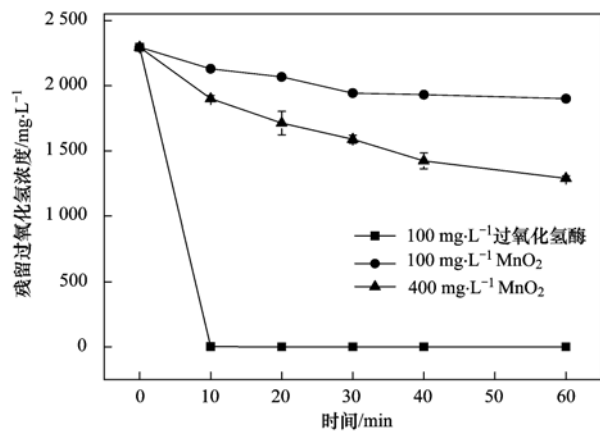


图 1 过氧化氢酶以及 MnO₂ 催化 H₂O₂ 分解速率

Fig. 1 H₂O₂ decomposition effect of catalase and MnO₂

2.2 残留过氧化氢对 SCOD 的影响

水解程度的变化可以表示为 SCOD 浓度的变化^[9, 28]. 本研究的 SCOD 浓度均呈现先增加后降低的趋势(见图 2),与文献[28]一致. 四组试验在最初的 0.5 d 内 SCOD 浓度均大幅度提高,这主要是由于在污泥水解的作用下,固相有机物,比如蛋白质、糖类和脂肪等逐渐释放,由固相转移到液相,使 SCOD 浓度升高. MHO10 组 SCOD 浓度在 2 d 时达到最大值,为11 360 mg·L⁻¹,投加过氧化氢酶之后, MHO10C 组的 SCOD 浓度也在 2 d 时达到最大值,为12 100 mg·L⁻¹,MHO10C 组比 MHO10 组提高了 6.51%. MHO10 组和 MHO10C 组的 SCOD 浓度在 0.5 d 时,分别为10 520 mg·L⁻¹和11 580 mg·L⁻¹,分别占 2 d 时最大值的 92.61% 和 95.70%,均在 92% 以上. 由于水解时间的延长,将增加工程实践中反应器的体积,增加占地和成本,因此两组优化的水解时间均为 0.5 d,与 Xiong 等^[18]的研究结果比较一致. MHO10 组和 MHO10C 组的 SCOD 浓度在 2~5 d 之间相对稳定,从 5 d 以后开始大幅度下降.

SCOD 浓度的升高或是降低,主要取决于 SCOD 的产生速率以及 SCOD 的消耗速率. 如果产生速率大于消耗速率,则表现为 SCOD 浓度的升高,反之,则为 SCOD 浓度的下降. 而 SCOD 浓度的降低主要是因为水解酸化产生的 VFA 在厌氧环境中进一步分解产生 CH_4 、 CO_2 等. 因此,从第 5 d 开始污泥开始大幅度地产生 CH_4 、 CO_2 等,消耗了 SCOD,导致 SCOD 浓度下降. 而 MHO10C 组的 SCOD 浓度在 8 d 的水解酸化时间内均高于 MHO10 组.

MHO11 组的 SCOD 浓度在 0.5 d 内也大幅度提高,优化的水解时间也为 0.5 d,此时其 SCOD 浓度为 $12\,020\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,与 Xiong 等^[18]的研究结果比较一致. 从表 1 可以看出,MHO11 预处理后的 SCOD 浓度比 MHO10 预处理后提高了 19.29%. 从图 2 可以看出,在 0.5 d 时,MHO11 组的 SCOD 浓度比 MHO10 组提高了 14.26%,说明 MHO11 预处理相对于 MHO10 预处理具有更好的溶胞效果,能够释放更多的 SCOD,同时经过 0.5 d 的水解后,MHO11 组的 SCOD 浓度仍远远高于 MHO10 组,一直到第 8 d,MHO11 组的 SCOD 浓度均高于 MHO10 组. MHO11 组的 SCOD 浓度在 0.5 ~ 7 d 均保持相对稳定,仅在第 8 d 小幅度下降,这可能是由于 MHO11 组残留的过氧化氢以及预处理后的高 pH 对产甲烷菌有一定的抑制,导致 SCOD 浓度一直维持相对稳定.

从图 2 可知,MHO10C 组和 MHO11 组的 SCOD 浓度相对于 MHO10 组均大幅度提高,但综合水解酸化 8 d 内的 SCOD 浓度来看,MHO11 组的效果优于 MHO10C 组,也就是说提高 pH 的效果优于投加过氧化氢酶.

MHO11C 组的优化水解时间也为 0.5 d,与其他三组及 Xiong 等^[18]的研究结果比较一致,此时其 SCOD 浓度为 $12\,860\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,比 MHO10C 组提高了 11.05%,比 MHO11 组提高了 6.99%,水解程度最高,效果最佳. MHO11C 组的 SCOD 浓度在 0.5 ~ 3 d 之间相对稳定,3 d 以后开始缓慢下降,5 d 以后大幅度下降,与 MHO10 和 MHO10C 组的结果相似.

2.3 残留过氧化氢对总 VFA 及其组分的影响

从图 3 可知,四组试验在 8 d 的水解酸化时间内,总 VFA 浓度均呈现先增加后降低的趋势,与文献^[29, 30]一致. MHO10 组的总 VFA 浓度在第 4 d 达到最大值($5\,559.97\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),投加过氧化氢酶之后,MHO10C 组在第 5 d 达到最大值($7\,622.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),比 MHO10 组提高了 37.09%. 在 8 d 的水

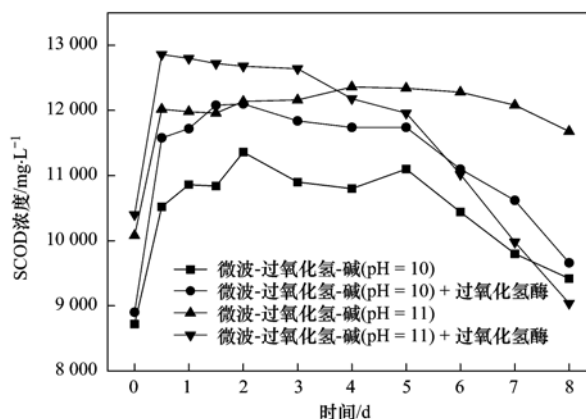


图 2 不同处理组的 SCOD 浓度随水解酸化时间的变化

Fig. 2 SCOD concentrations from different sludge supernatants with the hydrolysis acidification time under different conditions

解酸化时间内,MHO10C 组的总 VFA 浓度一直高于 MHO10 组. 3 d 时 MHO10 组、MHO10C 组的总 VFA 分别为 $5\,466.77\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $6\,757.46\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,分别占最大值的 98.32%、88.66%,均在 88% 以上,MHO10C 组的总 VFA 浓度比 MHO10 组提高了 23.61%. 因此两组优化的水解酸化时间均为 3 d. 在最初的 1 d 内,MHO10 组的总 VFA 浓度基本不变,有一个相对较长的产酸滞后期(图 3),这主要是因为经过 MHO10 预处理后污泥中残留了大量的 H_2O_2 ,在随后的厌氧消化阶段,残留 H_2O_2 很有可能破坏了微生物细胞或者抑制了微生物的新陈代谢等,对水解酸化微生物产生了一定的毒害作用,抑制了初期污泥的水解酸化.

Eskicioglu 等^[31]的研究也发现,除了 MW-100℃ 组,其余各组的 MW 与 MW- H_2O_2 的最终甲烷产量 ($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$, CH_4/VS) 相近,但是 MW- H_2O_2 组的一级中温生物降解速率常数低于对照组和 MW 组. Shahriari 等^[32]的研究表明,微波与过氧化氢联合处理市政有机废物,并没有对市政有机废物的稳定化和沼气产量的提高产生积极的影响. 所有经过过氧化氢处理的实验组产气均显示出一个较长的滞后期,同时累积沼气产量大多都低于仅微波处理的实验组;并且对于 SWA20,对照组和 115℃ 低温微波预处理组的基于一级 CBP (cumulative biogas productions) 模型的反应速率常数分别为 0.252 和 0.251,然而过氧化氢组、过氧化氢与 85℃ 微波联合处理组的反应速率常数分别仅为 0.088 和 0.083. Shahriari 等^[32]推测可能是因为化学氧化过程中残留的过氧化氢或者副产物导致了急性生物抑制,在开始阶段抑制了微生物活性以及沼气的产生. 也可

能是接种物没有充足的时间适应样品中残留的过氧化氢或者过氧化氢处理过程中产生了能够急性抑制厌氧微生物的物质。

过氧化氢对酶活性以及微生物的代谢有一定的毒害作用。过氧化氢能够破坏生物体内的蛋白质、油脂、DNA 组分等。因此过氧化氢常用来抑制致病细菌的生长^[33]。外源性 H_2O_2 能够透过细胞膜迅速扩散,对细胞强加急性应激^[34]。 H_2O_2 也被用作遗传毒性试剂,通过产生羟基自由基接近 DNA 分子,破坏 DNA 链。暴露于氧化应激下的 DNA 会发生超过 20 种类型的碱基损伤以及细胞膜透化和膜流动性的改变并诱发细胞死亡^[31]。有报道指出^[35],仅 $1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的胞内过氧化氢,就能破坏胞内的 DNA 和特定的酶,比如脱水酶。

经历了一段产酸滞后期之后,残留过氧化氢产生的抑制被解除,水解酸化微生物活性恢复,从第 1 d 开始总 VFA 浓度大幅度提升,然而投加过氧化氢酶之后,仅在优化的水解时间 0.5 d 内,总 VFA 浓度变化不大,但从 0.5 d 开始便大幅度提升。这说明向 MHO10 预处理后的污泥投加过氧化氢酶可以明显缩短 0.5 d 的产酸滞后期,同时可以提高总 VFA 产量,水解酸化效果更好。

MHO11 组和 MHO10 组在最初 3 d 内产生的总 VFA 相差不多,MHO11 组稍高。在第 3~5 d, MHO10 组的总 VFA 浓度保持稳定,而 MHO11 组的继续升高,至第 5 d 后两组的总 VFA 浓度才均逐步下降,第 5 d 时 MHO11 组的总 VFA 浓度最高为 $9\,821.48\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,比 MHO10 组提高了 84.80%。在 8 d 的水解酸化时间内,MHO11 组的总 VFA 浓度一直高于 MHO10 组。

MHO11C 组的总 VFA 浓度在第 4 d 达到最大值($8\,947.59 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),虽然 MHO11 组的最大总 VFA 浓度高于 MHO11C 组,但是水解酸化时间被延长了。水解酸化的前 6 d, MHO11C 组的总 VFA 浓度高于 MHO10C 组。水解酸化的前 4 d, MHO11C 组的总 VFA 浓度一直高于 MHO11 组;而第 4 d 以后 MHO11 组的总 VFA 浓度高于 MHO11C 组。第 4 d 以后 MHO11 组的总 VFA 浓度仍大幅度提高,可能是因为 MHO11 组残留的过氧化氢以及预处理后的高 pH 对产甲烷菌有一定的抑制,需要更长的时间适应,导致 4 d 以后总 VFA 继续积累,这与 MHO11 组的 SCOD 浓度变化相一致。4 d 时 MHO11C 组、MHO11 组和 MHO10C 组的总 VFA 浓度分别为 $8\,947.59$ 、 $8\,185.59$ 、 $7\,227.27 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, MHO11C 组

的总 VFA 浓度比 MHO11 组提高了 9.31%,比 MHO10C 组提高了 23.80%。4 d 时 MHO11 组的总 VFA 浓度占最大值的 83.34%。3 d 时 MHO11C 组的总 VFA 浓度为 $8\,206.75 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,占最大值的 91.72%,比 4 d 时 MHO11 组的总 VFA 浓度还要高 0.26%。因此,MHO11 组的优化水解酸化时间确定为 4 d,而 MHO11C 组的优化水解酸化时间确定为 3 d,显而易见投加过氧化氢酶缩短了 1 d 的优化水解酸化时间。

在优化水解酸化时间条件下,MHO11 组在第 4 d 的总 VFA 浓度比 MHO10 组在 3 d 时的总 VFA 浓度提高了 49.73%;而 MHO11C 组在第 3 d 的总 VFA 浓度比 MHO10C 组在第 3 d 时提高了 21.45%,比 MHO10 组在 3 d 时的总 VFA 浓度提高了 50.12%。这主要是因为同 MHO10 预处理相比,MHO11 预处理具有更好的溶胞效果,能够释放更多的有机物,并可显著提高水解酸化产生的 VFA 产量。同样的,MHO11C 组和 MHO10C 组在最初的 2 d 内产生的总 VFA 也相差不多。在 2 d 以后 MHO10C 组的总 VFA 浓度缓慢上升,而 MHO11C 组的总 VFA 浓度继续大幅度提升。MHO10C 组的总 VFA 浓度 5 d 后开始下降,而 MHO11C 组的总 VFA 浓度 4 d 后开始小幅度下降,5 d 后开始大幅度下降,5 d 时 MHO11C 组的总 VFA 浓度比 MHO10C 组提高了 12.89%。

MHO11 组也存在一个相对较长的产酸滞后期(图 3),原因与 MHO10 组相似。但是由于 MHO11 预处理后残留的过氧化氢浓度远低于 MHO10 预处

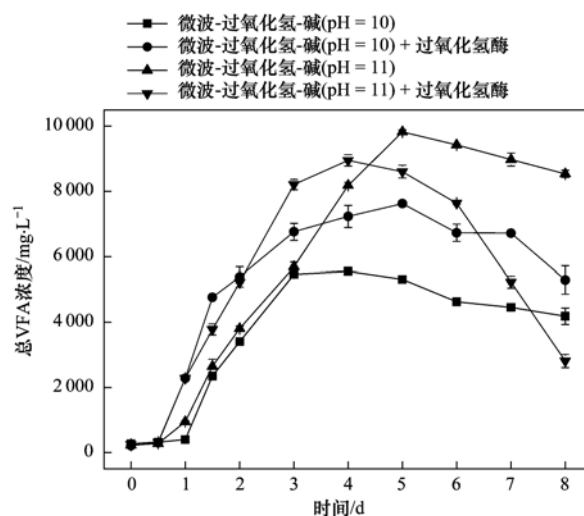


图 3 不同处理组的总 VFA 浓度随水解酸化时间的变化

Fig. 3 Total VFAs concentrations from different sludge supernatants with the hydrolysis acidification time under different conditions

理后残留的,因此,虽然 MHO11 组在优化的水解时间 0.5 d 内,总 VFA 浓度基本不变,但 0.5 ~ 1 d 的总 VFA 浓度略高于 MHO10 组,轻微缩短了产酸滞后期. 经历了一段产酸滞后期之后,残留过氧化氢产生的抑制被解除,水解酸化微生物活性恢复,从第 1d 开始总 VFA 浓度大幅度提高. 虽然投加过氧化氢酶和提高 pH 均可在不同程度上消除残留过氧化氢对微波预处理污泥水解酸化的抑制,但综合来看 MHO10C 组不仅比 MHO11 组提前解除抑制,而且在前 3 d,其总 VFA 浓度一直高于 MHO11 组,这说明投加过氧化氢酶的效果优于提高 pH 值. 但是 MHO11 预处理之后投加过氧化氢酶,仅在优化的水解时间 0.5 d 内,总 VFA 浓度变化不大,从 0.5 d 开始便大幅度提高,明显缩短解除了 0.5 d 的产酸滞后期,同时总 VFA 产量也得到了显著提高,水解酸

化效果最佳.

不同种类的 VFA 对氮磷去除效率会有不同的影响^[36],如果将污泥的水解酸化产物用于外加碳源,那么每种 VFA 组分的含量分布便十分重要. 四组试验的 VFA 组分与含量随水解酸化时间的变化如图 4 所示. MHO10 组、MHO10C 和 MHO11C 组 VFA 的主要组分均为乙酸、异戊酸、正丁酸,这与之前的研究结果相一致^[8, 18, 37],但是主要组分的排序稍有差异,其中第 3 d 时 3 种主要 VFA 组分之和分别占总 VFA 的 78.32%、77.31%、75.56%,乙酸所占比例分别为 42.46%、41.44%、43.77%. MHO11 组 VFA 的主要组分为乙酸、丙酸、异戊酸,这与之前的研究结果相一致^[1, 8, 38-41],但是主要组分的排序稍有差异,其中 4 d 时这 3 种主要 VFA 组分之和占总 VFA 的 77.48%,乙酸所占比例为 42.17%.

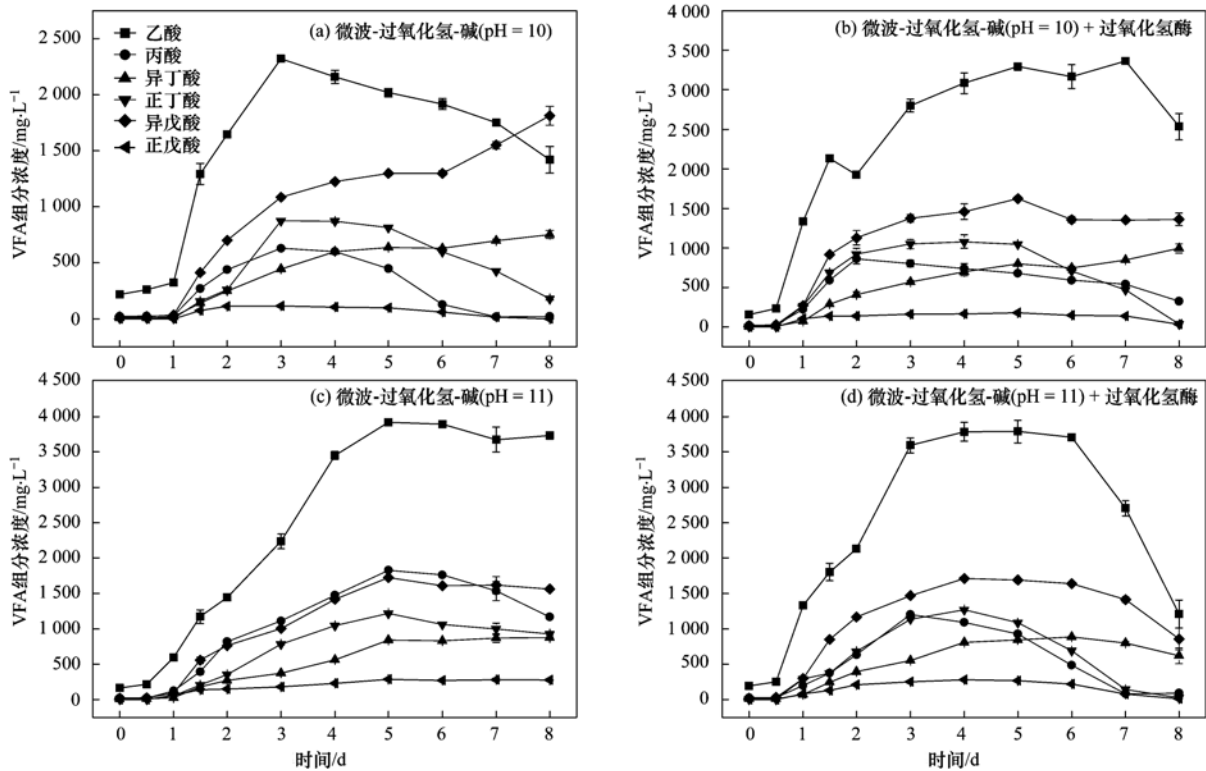


图 4 不同处理组,各 VFA 组分浓度随水解酸化时间的变化

Fig. 4 Individual VFA concentrations from different sludge supernatants with the hydrolysis acidification time under different conditions

3 结论

(1) $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的过氧化氢酶比 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的二氧化锰对过氧化氢具有更高的过氧化氢分解能力,能够在 10 min 内将残留的过氧化氢完全分解.

(2) 水解酸化的 8 d 时间内,四组试验的 SCOD

浓度均呈现先增加后降低的趋势. 在 0.5 d 内,四组试验的 SCOD 浓度均大幅度提高,优化水解时间均为 0.5 d.

(3) 水解酸化的 8 d 时间内,四组试验的总 VFA 浓度均呈现先增加后降低的趋势. 残留过氧化氢对 MHO10 预处理后污泥的水解酸化有抑制作用,存在产酸滞后期. 与 MHO10 预处理相比, MHO11 预处

理释放的 SCOD 提高了 19.29%, 释放了更多的有机物, 进而显著提高了总 VFA 产量, 5 d 时总 VFA 产量显著提高了 84.80%, 且 MHO11 组可以轻微缩短产酸滞后期。投加 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 过氧化氢酶, 明显缩短了 MHO10 组和 MHO11 组 0.5 d 的产酸滞后期, 并提高了总 VFA 产量, 3 d 时, MHO10C 组、MHO11C 组的总 VFA 浓度分别比 MHO10 组提高了 23.61%、50.12%。MHO10 组、MHO10C 组和 MHO11C 组的优化水解酸化时间均为 3 d。MHO11 组的优化水解酸化时间为 4 d。MHO11 预处理后投加过氧化氢酶, 可以缩短 1 d 的优化水解酸化时间。

(4) 投加过氧化氢酶和提高 pH 均可在不同程度上消除残留过氧化氢对预处理污泥水解酸化的抑制, 但以 SCOD 浓度为评价指标时, 提高 pH 的效果更明显; 以总 VFA 浓度为评价指标时, 则投加过氧化氢酶的效果更突出。MHO11C 组, 不仅可以提高 SCOD 浓度, 优化水解时间 0.5 d 时, 其 SCOD 浓度比 MHO10C 组提高了 11.05%, 比 MHO11 组提高了 6.99%, 而且可以明显缩短解除 0.5 d 的产酸滞后期, 显著提高总 VFA 产量, 3 d 时, MHO11C 组的总 VFA 浓度比 MHO10 组提高了 50.12%, 缩短了 1 d 的优化水解酸化时间, 因此, MHO11C 组效果最佳。

(5) MHO10 组、MHO10C 组和 MHO11C 组的 VFA 主要组分均为乙酸、异戊酸、正丁酸, 而 MHO11 组 VFA 的主要组分为乙酸、丙酸、异戊酸。在各组的优化水解酸化时间, 3 种主要的 VFA 组分之和均占总 VFA 的 75% 以上, 乙酸所占比例均在 41% 以上。

参考文献:

- [1] 袁光环, 周兴求, 伍健东. 酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(6): 1918-1922.
- [2] 陆颖文, 代瑞华, 刘燕, 等. 污泥厌氧水解/酸化的影响因素及研究进展[J]. 化学通报, 2012, **75**(6): 489-495.
- [3] Gali A, Dosta J, Mata-álvarez J. Use of hydrolyzed primary sludge as internal carbon source for denitrification in a SBR treating reject water via nitrite[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2006, **45**(22): 7661-7666.
- [4] Kampas P, Parsons S A, Pearce P, et al. An internal carbon source for improving biological nutrient removal[J]. Bioresource Technology, 2009, **100**(1): 149-154.
- [5] Eastman J A, Ferguson J F. Solubilization of particulate organic-carbon during the acid phase of anaerobic-digestion[J]. Journal Water Pollution Control Federation, 1981, **53**(3): 352-366.
- [6] Eliosov B, Argaman Y. Hydrolysis of particulate organics in activated-sludge systems[J]. Water Research, 1995, **29**(1): 155-163.
- [7] 李晓玲, 彭永臻, 柴同志, 等. 提高污泥碱性发酵挥发酸积累的新技术[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2658-2663.
- [8] Yang Q, Yi J, Luo K, et al. Improving disintegration and acidification of waste activated sludge by combined alkaline and microwave pretreatment[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2013, **91**(6): 521-526.
- [9] Kang X R, Zhang G M, Chen L, et al. Effect of Initial pH Adjustment on Hydrolysis and Acidification of Sludge by Ultrasonic Pretreatment[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, **50**(22): 12372-12378.
- [10] Jones D A, Lelyveld T P, Mavroidis S D, et al. Microwave heating applications in environmental engineering—a review[J]. Resources, conservation and recycling, 2002, **34**(2): 75-90.
- [11] Chang C J, Tyagi V K, Lo S L. Effects of microwave and alkali induced pretreatment on sludge solubilization and subsequent aerobic digestion[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(17): 7633-7640.
- [12] Wang Y W, Wei Y S, Liu J X. Effect of H_2O_2 dosing strategy on sludge pretreatment by microwave- H_2O_2 advanced oxidation process[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **169**(1-3): 680-684.
- [13] 王亚伟. 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.
- [14] 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.
- [15] Xiao Q C, Yan H, Wei Y S, et al. Optimization of H_2O_2 dosage in microwave- H_2O_2 process for sludge pretreatment with uniform design method[J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, **24**(12): 2060-2067.
- [16] 肖庆聪, 魏源送, 王亚伟, 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.
- [17] Wang Y W, Gui C M, Ni X T, et al. Multivariate analysis of sludge disintegration by microwave-hydrogen peroxide pretreatment process[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, **283**: 856-864.
- [18] Xiong H L, Chen J L, Wang H, et al. Influences of volatile solid concentration, temperature and solid retention time for the hydrolysis of waste activated sludge to recover volatile fatty acids[J]. Bioresource Technology, 2012, **119**: 285-292.
- [19] Zhang P, Chen Y G, Zhou Q. Waste activated sludge hydrolysis and short-chain fatty acids accumulation under mesophilic and thermophilic conditions; Effect of pH[J]. Water Research, 2009, **43**(15): 3735-3742.
- [20] Ahn Y H, Speece R E. Elutriated acid fermentation of municipal primary sludge[J]. Water Research, 2006, **40**(11): 2210-2220.
- [21] Song Y C, Kwon S J, Woo J H. Mesophilic and thermophilic temperature co-phase anaerobic digestion compared with single-stage mesophilic-and thermophilic digestion of sewage sludge[J]. Water Research, 2004, **38**(7): 1653-1662.
- [22] 许振田. 水解酸化技术用于污泥减量与强化脱氮除磷[J]. 辽宁化工, 2011, **40**(6): 586-589.

- [23] McIntosh K B, Oleszkiewicz J A. Volatile fatty acid production in aerobic thermophilic pre-treatment of primary sludge[J]. *Water science and technology*, 1997, **36**(11): 189-196.
- [24] CJT 221-2005. 城市污水处理厂污泥检验方法[S]. 2005.
- [25] 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.
- [26] 高迎新. Fenton 体系氧化吸附机理研究及在采油污水处理中的应用[D]. 北京:中国科学院生态环境研究中心, 2003.
- [27] 卓英莲. 污水厂剩余污泥水解酸化产挥发性脂肪酸的试验研究[D]. 广州:华南理工大学, 2010.
- [28] 陈灿, 孙秀云, 黄诚, 等. 烷基多苷促进污泥水解产酸的研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 1009-1015.
- [29] Luo K, Yang Q, Li X M, *et al.* Novel insights into enzymatic-enhanced anaerobic digestion of waste activated sludge by three-dimensional excitation and emission matrix fluorescence spectroscopy[J]. *Chemosphere*, 2013, **91**(5): 579-585.
- [30] Luo K, Yang Q, Yu J, *et al.* Combined effect of sodium dodecyl sulfate and enzyme on waste activated sludge hydrolysis and acidification[J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(14): 7103-7110.
- [31] Eskicioglu C, Prorot A, Marin J, *et al.* Synergetic pretreatment of sewage sludge by microwave irradiation in presence of H_2O_2 for enhanced anaerobic digestion[J]. *Water Research*, 2008, **42**(18): 4674-4682.
- [32] 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.
- [33] Zhao Z H, Sakagami Y, Osaka T. Toxicity of hydrogen peroxide produced by electroplated coatings to pathogenic bacteria[J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 1998, **44**(5): 441-447.
- [34] Jang S, Imlay J A. Micromolar intracellular hydrogen peroxide disrupts metabolism by damaging iron-sulfur enzymes [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2007, **282**(2): 929-937.
- [35] Imlay J A. Cellular defenses against superoxide and hydrogen peroxide [J]. *Annual Review of Biochemistry*, 2008, **77**: 755-776.
- [36] Moser-Engeler R, Udert K M, Wild D, *et al.* Products from primary sludge fermentation and their suitability for nutrient removal[J]. *Water Science and Technology*, 1998, **38**(1): 265-273.
- [37] Su G Q, Huo M X, Yuan Z G, *et al.* Hydrolysis, acidification and dewaterability of waste activated sludge under alkaline conditions; Combined effects of NaOH and $Ca(OH)_2$ [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **136**: 237-243.
- [38] Yan Y Y, Feng L Y, Zhang C J, *et al.* Ultrasonic enhancement of waste activated sludge hydrolysis and volatile fatty acids accumulation at pH 10.0[J]. *Water Research*, 2010, **44**(11): 3329-3336.
- [39] Zhuo G H, Yan Y Y, Tan X J, *et al.* Ultrasonic-pretreated waste activated sludge hydrolysis and volatile fatty acid accumulation under alkaline conditions; Effect of temperature[J]. *Journal of biotechnology*, 2012, **159**(1-2): 27-31.
- [40] Zhou A J, Yang C X, Kong F Y, *et al.* Improving the short-chain fatty acids production of waste activated sludge stimulated by a bi-frequency ultrasonic pretreatment [J]. *Journal of Environmental Biology*, 2013, **34**(2 Sep No): 381-389.
- [41] Wu H Y, Gao J Y, Yang D H, *et al.* Alkaline fermentation of primary sludge for short-chain fatty acids accumulation and mechanism[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, **160**(1): 1-7.

CONTENTS

Source Contribution Analysis of the Fine Particles in Shanghai During a Heavy Haze Episode in December, 2013 Based on the Particulate Matter Source Apportionment Technology	LI Li, AN Jing-yu, YAN Ru-sha (3543)
Transformation Mechanism and Sources of Secondary Inorganic Components in PM _{2.5} at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer	CHEN Shi-yi, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (3554)
Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne PM _{2.5} in Chengdu City	YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (3566)
Simulation Study of the Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sugar Alcohols from Biomass Burning	HUANG Shuai, HUANG Xin-yi, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (3573)
Characteristics and Parameterization for Atmospheric Extinction Coefficient in Beijing	CHEN Yi-na, ZHAO Pu-sheng, HE Di, <i>et al.</i> (3582)
Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction	ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (3590)
Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors	YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei, <i>et al.</i> (3596)
Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kitchen Waste in China	ZHANG Yan, WANG Yuan-gang, LU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3603)
Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3611)
Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images	WANG Shan-shan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3620)
Porewater Dissolved Methane in <i>Cyperus malaccensis</i> Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary	YANG Ping, ZHANG Zi-chuan, DU Wei-ning, <i>et al.</i> (3633)
Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City	CHEN Tong-tong, CHEN Hui, HAN Lu, <i>et al.</i> (3641)
Seasonal Variations in Vertical Profile of Hg Species and the Influential Factors in Changshou Reservoir	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, TANG Zhen-ya, <i>et al.</i> (3649)
Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, <i>et al.</i> (3662)
Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes	WANG Wei-ying, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (3674)
Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance	LI Shao-long, CHEN Dao-yi (3683)
Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater	WU Jun-liang, REN Yu-fen, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (3691)
Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou	DUAN Sheng-hui, ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (3697)
Formation and Variation of Brominated Disinfection By-products in A Combined Ultrafiltration and Reverse Osmosis Process for Seawater Desalination	YANG Zhe, SUN Ying-xue, SHI Na, <i>et al.</i> (3706)
Effect of Natural Organic Matter and Electrolytes on the Aggregation of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, JING Jie, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (3715)
Efficiency of Sediment Amendment with Zirconium-Modified Kaolin Clay to Control Phosphorus Release from Sediments in Heavily Polluted Rivers	WANG Hong, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (3720)
Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network	JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang (3730)
Application of Micro-aerobic Hydrolysis Acidification in the Pretreatment of Petrochemical Wastewater	ZHU Chen, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3738)
Efficacy of A ² /O-MBR Combined Process in Wastewater Treatment and the Characteristics of Membrane Fouling	WANG Xu-dong, MA Ya-bin, WANG Lei, <i>et al.</i> (3743)
Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitrification-ANAMMOX Process with Reflux System	LI Xiang, CUI Jian-hong, YUAN Yan, <i>et al.</i> (3749)
Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures	LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, <i>et al.</i> (3756)
2,4,6-Trichlorophenol Mineralization Promoted by Anaerobic Reductive Dechlorination of Acclimated Sludge and Extracellular Respiration Dechlorination Pathway	SONG Jia-xiu, LI Ling, SHENG Fan-fan, <i>et al.</i> (3764)
Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	YANG Peng-bing, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3771)
Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage	LU Lei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (3778)
Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3786)
Performance and Factors Analysis of Sludge Dewatering in Different Wastewater Treatment Processes	LIU Ji-bao, LI Ya-ming, LÜ Jian, <i>et al.</i> (3794)
Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -H ₂ O ₂ -Alkaline Process	JIA Rui-lai, LIU Ji-bao, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3801)
Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain	DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, <i>et al.</i> (3809)
Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain	QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (3816)
Control of Soil Nutrient Loss of Typical Reforestation Patterns Along the Three Gorges Reservoir Area	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3825)
Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China	FENG Shu-zhen, SU Yi-rong, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3832)
Effects of Different Plantation Type on the Abundance and Diversity of Soil Microbes in Subtropical Red Soils	SHEN Bing-jie, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (3839)
Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment	JI Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, <i>et al.</i> (3845)
Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants	CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu, <i>et al.</i> (3852)
Isolation, Purification and Identification of Antialgal Activity Substances of Ethyl Acetate Extracts from the Submerged Macrophytes <i>Potamogeton crispus</i>	SUN Ying-ying, SU Zhen-xia, PU Yin-fang, <i>et al.</i> (3860)
Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3866)
Application of Whole-cell Biosensor ADPI _p WHlux for Acute Toxicity Detection in Water Environment	TANG Hui, SONG Yi-zhi, JIANG Bo, <i>et al.</i> (3872)
Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring	GAO Kai, YAN Pei, TAN Cui-ling, <i>et al.</i> (3878)
Toxic Effect of Nano-ZnO in Liver of Zebrafish	LIU Lin, ZHAO Qun-fen, JIN Kai-xing, <i>et al.</i> (3884)
Acute Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to <i>Daphnia carinata</i>	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (3892)
Adsorption-desorption Characteristics of Fermented Rice Husk for Ferrous and Sulfur Ions	XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUA Jia-yuan, <i>et al.</i> (3896)
Application of Stir Bar Sorptive Extraction and Gas Chromatograph Mass Spectrometer to the Phthalic Acid Esters Analysis in Seawater	GAO Chen-chen, LI Feng-min, LU Lun, <i>et al.</i> (3906)
Experimental Conditions and Reliability Analysis of Results of COD Components	LI Zhi-hua, ZHANG Yin, HAN Xing, <i>et al.</i> (3913)
Method for Simultaneous Determination of 11 Veterinary Antibiotics in Piggery Wastewater and Sludge and Its Application in Biological Treatment	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (3918)
Research Progress in Technology of Using Soil Micro-organisms to Generate Electricity and Its Potential Applications	DENG Huan, XUE Hong-jing, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (3926)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年10月15日 第36卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 10 Oct. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行