

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.7

第40卷 第7期

目次

《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇, 冯涛, 蔡泽林 (2961)
基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟	谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 郑新梅, 胡建林, 刘春蕾, 杨峰 (2967)
郑州市 PM _{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析	杨留明, 王申博, 郝祺, 韩士杰, 李晨, 赵庆炎, 燕启社, 张瑞芹 (2977)
能见度与 PM _{2.5} 浓度关系及其分布特征	王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴, 张碧辉 (2985)
基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征	白红祥, 魏巍, 王雅婷, 任云婷, 臧佳欣, 程水源 (2994)
太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源	李颖慧, 闫雨龙, 李志生, 郝爱胜, 李如梅, 杨帆, 彭林 (3001)
办公楼聚集区空气中 PBDEs 谱分布与污染特征	王琳, 邓雅佳, 廖晓勇, 曹红英, 焦杏春 (3008)
南北水调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征	张柳青, 彭凯, 周蕾, 石玉, 李元鹏, 周永强, 龚志军, 张运林, 杨艳 (3018)
黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征	张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 赵宾华, 柯浩成, 蒋凯鑫 (3030)
基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析	王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富 (3039)
李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响	徐进, 黄廷林, 李凯, 杨尚业, 温成成, 林子深, 李衍庆, 刘雪晴 (3049)
水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价	王霞, 张青琢, 赵高峰, 王晓燕 (3058)
银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价	田大年, 党丽慧, 丁润梅, 蔡倩, 张鹏举, 汪岭, 杨慧芳 (3068)
人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例	谢国文, 杨平恒, 盛婷, 邓书金, 洪爱花 (3078)
漓江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析	唐金平, 张强, 胡漾, 张宇, 聂保伟 (3089)
三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因子分析	付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴 (3099)
降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响	翁传松, 刘德富, 张佳磊, 龚川, 沈旭舟 (3108)
绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征	童雄, 罗沛, 刘锋, 黄敏, 陈哲, 肖润林, 吴金水 (3118)
微藻固定化条件优化及其污水氨氮去除潜力分析	刘祥, 王婧瑶, 吴娟娟, 彭飞, 王凯军 (3126)
钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性	张政, 冯长生, 张晓瑞, 郑建奎, 蒋彩云, 李攀杰, 王玉萍 (3135)
基于缺陷重构的类芬顿光催化剂在降解染料废水中的应用	唐清文, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 李海翔 (3146)
N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBK5 染料废水	于永波, 黄湾, 董正玉, 吴丽颖, 张倩, 洪俊明 (3154)
Cu ²⁺ 对以 NO ₃ ⁻ 为电子受体反硝化过程的影响	买文可, 彭永臻, 吉建涛 (3162)
CANON 中试反应器启动及性能优化	孙庆花, 吴迪, 周家中, 郑志佳 (3169)
好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响	徐林建, 潘杨, 章豪, 冯鑫, 魏攀龙, 尤星怡 (3179)
有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响	刘小博, 袁林江, 陈希, 薛欢婷 (3186)
不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响	吕心涛, 周桐, 田夏迪, 谷鹏超, 杨岸明, 王佳伟, 张树军 (3195)
ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性	张文静, 黄勇, 毕贞, 胡羽婷, 董石语 (3201)
在线 NaClO 反洗对倒置 A ² O-MBR 系统微生物群落的影响	王旭东, 高森, 王莹莹, 杨永哲, 刚家斌, 符国力, 王磊 (3208)
基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价	袁悦, 谭学军, 郑舍予 (3216)
北京市清水与再生水协同利用优化模型	张田媛, 谭倩, 王淑萍 (3223)
N-亚硝胺在不同处理工艺污水处理厂中的分布及其去除	柳王荣, 赵建亮, 杨愿愿, 姚理, 刘有胜, 应光国 (3233)
北京市生活污水中曲马多和芬太尼的赋存	周子雷, 杜鹏, 白雅, 韩胜, 黄红梅, 徐泽琼, 李喜青 (3242)
贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险	杨钊, 李江, 张圣虎, 向福亮, 唐涛涛, 杨娅红 (3249)
紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征	程建华, 唐翔宇, 刘琛 (3257)
四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响	陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖 (3263)
热水解污泥厌氧消化过程中肠球菌抗生素抗性基因与毒力基因的转归	李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 何芙蓉, 杨月婷, 魏源送, 佟娟 (3270)
鸡粪与中药渣共堆肥对抗生素抗性基因的影响	武晋萍, 陈建文, 刘勇, 张红, 李君剑 (3276)
宁武亚高山湖泊细菌群落的时空格局及驱动机制	王雪, 刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明, 赵鹏宇, 暴家兵 (3285)
石家庄市春季景观水体 nirS 型反硝化细菌群落特征分析	张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊 (3295)
磷差异性调控水稻根际 nirK/nirS 型反硝化菌组成与丰度	湛钰, 高丹丹, 盛荣, 魏文学, 秦红灵, 张文钊, 侯海军, 汤亚芳 (3304)
会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较	贾远航, 靳振江, 袁武, 程跃扬, 邱江梅, 梁锦桃, 潘复静, 刘德深 (3313)
湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析	蒋凯, 邓潇, 周航, 龙坚, 李欣阳, 董霞, 王树兵, 刘文辉, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (3324)
改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响	李义纯, 王艳红, 唐明灯, 巫彬芳, 李林峰, 艾绍英, 凌志祥 (3331)
重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应	韩辉, 王晓宇, 蔡红, 姚伦广, 蔡倩迪, 王逸雪, 陈兆进 (3339)
不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异	彭秋, 李桃, 徐卫红, 焦璐琛, 邓继宝 (3347)
添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N ₂ O 排放影响	孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂 (3355)
渭北旱原土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Sompouviset Thongsouk, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年 (3361)
不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征	鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 刘明丽, 王静, 李爽, 姚宏, 孙绍斌 (3369)
西湖景区土壤中邻苯二甲酸酯污染水平、来源分析和空间分布特征	廖健, 邓超, 陈怡, 周文钊, 林春绵, 张辉 (3378)
生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响	李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 负方悦, 杨林, 董胜虎 (3388)
《环境科学》征订启事 (3194)	《环境科学》征稿简则 (3222)
信息 (3256, 3284, 3323)	

基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价

袁悦¹, 谭学军¹, 郑舍予²

(1. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092; 2. 华东理工大学资源与环境工程学院, 上海 200237)

摘要: 污泥预处理方法包括机械法、化学法和生物法, 选择上述方法中具有代表性的超声波 20 kHz、pH 10 和厌氧 70℃ 分别预处理污泥, 从有机物释放情况和经济性评价不同预处理方法。结果表明, 污泥经过预处理后, 液相中有机物释放量均增多, 但经过 pH 10 和厌氧 70℃ 预处理后能释放更多的有机物, 反应结束时其总溶解性蛋白质和多糖由预处理前的 418.9 mg·L⁻¹ (以 COD 计, 下同) 分别增加到 7 516.0 mg·L⁻¹ 和 7 892.5 mg·L⁻¹, DNA 浓度由预处理前的 18.1 mg·L⁻¹ 依次增加到 1 343.3 mg·L⁻¹ 和 1 766.1 mg·L⁻¹; 通过流式细胞术鉴定细胞形态得出预处理结束时污泥细胞死亡率从高到低为 61.6% (pH 10)、59.9% (厌氧 70℃) 和 34.5% (超声波 20 kHz), 相比预处理前分别提高 45.6%、43.9% 和 18.5%; 预处理结束时污泥有机物去除率依次为 19.1% (pH 10)、13.8% (厌氧 70℃) 和 7.6% (超声波 20 kHz); 单位体积污泥经 pH 10 预处理比超声-20kHz 和厌氧 70℃ 分别多节约 28.5% 和 124.1%。基于本研究中污泥有机物释放量和经济性, 污泥预处理方法宜选择化学法 (pH 10)。

关键词: 污泥; 超声波 20 kHz; pH 10; 厌氧 70℃; 有机物释放; 经济性

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)07-3216-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201810193

Evaluation of Organic Matter Release and Economy for Various Pretreatments of Sewage Sludge

YUAN Yue¹, TAN Xue-jun¹, ZHENG She-yu²

(1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 2. School of Resource and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Mechanical, chemical, and biological methods are always used to pretreat sewage sludge. To determine which pretreatment can release more organic matter from sewage sludge, and therefore, make it more economical, mechanical pretreatment (ultrasonic treatment at 20 kHz), chemical pretreatment (pH 10), and biological pretreatment (anaerobic conditions at 70℃) were compared. Results showed that all three pretreatments increased the organic matter release of sewage sludge; the initial total soluble protein and carbohydrate concentration of which was only 418.9 mg·L⁻¹ (cal. as COD) and the DNA content was 18.1 mg·L⁻¹. However, the pH 10 and anaerobic (70℃) pretreatments resulted in a greater organic release than the ultrasonic (20 kHz) pretreatment, with total soluble protein and carbohydrate concentrations of 7 516.0 mg·L⁻¹ and 7 892.5 mg·L⁻¹, and DNA contents of 1 343.3 mg·L⁻¹ and 1 766.1 mg·L⁻¹, respectively. Flow cytometry was adopted to assess cell morphology. The cell mortality rates of sludge after pretreatment accounted for 61.6%, 59.9%, and 34.5% respectively, which was improved by 45.6% (at pH 10), 43.9% (under anaerobic conditions at 70℃), and 18.5% (with ultrasonic pretreatment at 20 kHz) compared with raw sewage sludge. At the same time, organic matter removal ratios of sludge after pretreatment were 19.1% (at pH 10), 13.8% (under anaerobic conditions at 70℃), and 7.6% (with ultrasonic pretreatment at 20 kHz). Moreover, the pretreatment of per liter sludge at pH 10 saved 28.5% and 124.1% more than ultrasonic pretreatment (20 kHz) and anaerobic (70℃) pretreatment. Taking both organic matter release and economic analysis into consideration, the chemical method of pretreatment (at pH 10) was identified as the best option.

Key words: sewage sludge; ultrasonic 20 kHz; pH 10; anaerobic 70℃; organic matter release; economic analysis

我国城镇污水处理厂大多采用活性污泥法处理污水, 然而该方法会产生大量的污泥。污泥含有大量有机质, 若不加以处理, 会对环境造成污染。厌氧消化技术是实现污泥减量化、资源化和稳定化的有效手段之一。

污泥厌氧消化过程包括水解、产酸和产甲烷, 水解被认为是整个厌氧消化过程的限制性阶段^[1-4]。污泥稳定性指污泥通过机械、化学或生物处理, 使处理产物达到不易腐败发臭、控制病原体等要求, 其中厌氧消化处理后污泥稳定控制指标值包括有机物去除率大于 40%^[5], 也就是说污泥中有机物释放越彻底, 厌氧消化时有机物去除率才会

越高, 相应地污泥也才越具有稳定性。因此, 无论厌氧消化水解还是污泥稳定性, 均与污泥有机物释放有关。有研究表明当污泥经过预处理后, 有机物将大量释放出来, 一般地, 污泥预处理方法包括机械法、化学法和生物法^[6-9]。Liu 等^[10]通过超声联合碱试剂预处理污泥时发现有机物水解效率显著提高, 高达 60.2% ~ 61.6%。Kim 等^[11]采用 NaOH 预

收稿日期: 2018-10-25; 修订日期: 2019-02-01

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07403002); 中国博士后科学基金项目 (2017M621514)

作者简介: 袁悦(1988~), 女, 博士, 主要研究固体废弃物资源化利用, E-mail: yuanyue_1006@126.com

处理污泥时发现有机物释放量较不预处理提高 39.8%。Zhang 等^[12]研究了污泥与餐厨垃圾中温厌氧预处理,结果表明两者预处理 24 h 后水解效率提高 20%。显然,上述研究中污泥经过不同方法预处理后,其有机物释放量均得到提高,但是从有机物释放情况和经济性两方面对不同预处理方法的评价几乎没有,这对于实际工程应用至关重要。

污泥中的有机物分布在微生物细胞内外,即胞外聚合物(EPS)和胞内物质,胞内有机物是否释放需根据细胞是否破损以及破损程度来确定。目前鉴定细胞形态的方法主要采用 LIVE/DEAD BacLight 染色试剂盒,即先用 SYTO® 9 和 PI 两种染料进行染色,再用显微镜拍照统计不同形态的细胞数量^[13, 14];然而显微镜观察样品时易出现重叠现象,将会导致统计结果存在误差。流式细胞术则采用相同的方法染色,通过流式细胞仪进行计算、检测每

个细胞的形态,因此比 LIVE/DEAD BacLight 染色试剂盒更具准确性。

本文分别采用机械法(超声波 20 kHz)、化学法(pH 10)和生物法(厌氧 70℃)预处理污泥,首先探讨未预处理污泥、预处理中污泥和预处理后污泥的有机物释放情况;然后采用流式细胞术鉴定污泥中的细胞形态,揭示释放的有机物的来源途径;最后比较分析不同预处理方法的经济性,通过确定高效经济且使污泥水解效率更高、更具稳定性的预处理方法,以期为实际工程应用提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

污泥取自上海市曲阳污水处理厂污泥浓缩池,其主要成分如表 1 所示。

表 1 试验用污泥特性¹⁾/mg·L⁻¹
Table 1 Characteristics of the sludge/mg·L⁻¹

项目	TSS	VSS	SCOD	TCOD	SCFAs	SC	SP	DNA
参数值	28 436.1	20 895.1	1 987.3	25 461.1	82.2	43.7	173.4	18.1

1)TSS 表示污泥中固体浓度, VSS 表示污泥中挥发性固体浓度, SCOD 表示可溶性 COD, TCOD 表示总 COD, SCFAs 表示短链脂肪酸, SC 表示可溶性多糖, SP 表示可溶性蛋白质

1.2 试验方法

污泥搅拌均匀后,等体积(400 mL)投加到各预处理方法对应的装置中。Carrère 等^[6]对污泥经过机械法、化学法和生物法预处理后的可降解情况进行了综述,结果表明当污泥可降解性最优时,对应的超声波预处理工况为 20 kHz、200 W、0.5 h,碱试剂预处理工况为 45 meq·L⁻¹(以 NaOH 计)、55℃、4 h,厌氧预处理工况为 70℃、48 h,3 种工况预处理后的污泥厌氧消化产气率比空白分别提高 138%、88% 和 28%^[15~17]。考虑到上述碱试剂预处理工况涉及温度的作用,为了单独考察碱试剂的影响,本试验根据已有相关研究对其工况进行了调整^[2],如图 1 所示。

超声波 20 kHz 预处理试验在超声细胞破碎仪(JY88-IIIN,新芝,中国)中进行,污泥置于破碎仪配套烧杯中,为防止超声过程中污泥温度升高,烧杯置于冰浴中,破碎仪每超声 5 s 便停歇 5 s,强度 80%,功率 200 W,反应共进行 1 h。pH 10 和厌氧 70℃两种预处理试验装置采用可密封式耐热玻璃瓶,反应均进行 48 h。其中,pH 10 对应的试验用 5 mol·L⁻¹的 NaOH 溶液调节 pH 到 10,室温下(15℃)进行;厌氧 70℃对应的试验装置吹氮气 3 min,去除反应器中的溶解氧,密封置于 70℃恒温

箱。3 种预处理方法的取样周期分别为 15 min(超声波 20 kHz)、12 h(pH 10)、12 h(厌氧 70℃),均取 4 次样品。取出的泥样在转速为 4 000 r·min⁻¹的离心机中离心 10 min,然后用 0.45 μm 的滤膜抽滤,滤液用来分析各项指标,过滤后的水样立即测定。各反应结束时,取 5 mL 泥样用于鉴定污泥细胞形态。

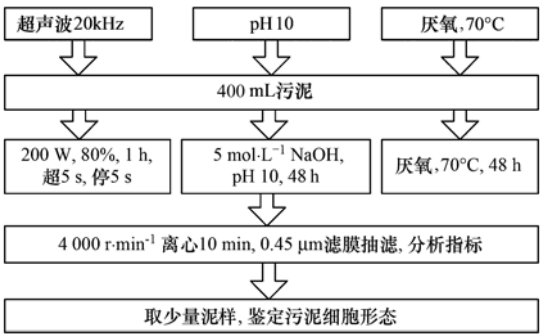


图 1 预处理过程示意

Fig. 1 Procedures of the sludge pretreatments

1.3 分析方法

TSS、VSS 采用称重法测定;TCOD、SCOD 采用 5B-3(B)型 COD 快速测定仪;SC 采用苯酚-硫酸比色法,对应的 COD 当量是 1.07;SP 采用 Lowry-Folin 试剂法,对应的 COD 当量是 1.5;DNA 采用

NanoDrop2000 分光光度计 (Thermo Scientific, 美国) 快速测定; pH 值和温度采用 WTWpH/Oxi340i 测定仪测定; SCFAs 采用岛津 GC-2014 气相色谱仪测定, FID 检测器, 色谱柱型号及尺寸: Restek StabilWax-DA (30 m × 0.32 mm × 0.25 μm), 色谱柱采用程序升温, 初始温度为 80℃, 升温速率为 10℃·min⁻¹, 终止温度为 200℃, 保留时间 2 min, N₂ 为载气, 进样口温度 250℃, 进样体积 0.5 μL, 本试验中 SCFAs 包括 6 种短链脂肪酸, 分别为乙酸、丙酸、正丁酸、异丁酸、正戊酸和异戊酸, 对应的 COD 当量依次是 1.07、1.51、1.82、1.82、2.04 和 2.04。

细胞形态的鉴定先采用 LIVE/DEAD BacLight 染色试剂盒染色, 然后通过流式细胞仪计算不同形态下的细胞数量。鉴定原理: LIVE/DEAD BacLight 染色试剂盒包括 SYTO® 9 和碘化丙啶 (PI) 两种染色剂, SYTO® 9 染色剂结合所有细胞的核酸并将其染成绿色, 而 PI 只能进入细胞膜受损的细胞, 与核酸结合并将其染成红色, 当两种染料共同染色时, 活性细胞为绿色, 死亡细胞为红色。具体步骤如下: ①反应结束时, 取 5 mL 污泥, 离心去除上清液, 并用磷酸缓冲液 (PBS, 20 nmol·L⁻¹, pH 7.0) 清洗两次, 倒掉上清液, 加入 PBS 缓冲液稀释污泥浓度至 2 000 mg·L⁻¹, ②取 2 mL 稀释污泥进行超声 (130 W, 20 Hz, 30 s), 并用 0.5% 六偏磷酸钠清洗两次, 倒掉上清液, 加入 PBS 缓冲液进行稀释, 最终使得活性污泥菌液浓度为 300 ~ 500 mg·L⁻¹; ③将污泥菌液经过 20 μm 的细胞过滤器过滤去除大颗粒 (防止流式细胞仪被堵塞), 并将 1 mL 菌液注入 FALCON 试管里; ④将 SYTO® 9 和 PI 两种染色剂按 1:1 制备, 取 1 μL 注入菌液, 并与菌液混合均匀, 染色后的混合液在室温下孵育 15 min; ⑤对流式细胞仪 (BD FACSCalibur) 的荧光波长进行设定, SYTO® 9 荧光染料激发波长 495 nm、发射波长 525 nm, PI 荧光染料激发波长 536 nm, 发射波长 617 nm; ⑥孵育后的菌液上机测量即可求得活性细菌和死亡细菌的数量。

2 结果与讨论

2.1 蛋白质和多糖释放

图 2(a) 和 2(b) 分别为不同预处理方法下, 溶解性蛋白质 (SP) 和溶解性多糖 (SC) 随时间的变化情况。从图中可以看出, 尽管预处理方法不同, SP 和 SC 的变化趋势基本相同, 均呈现增长趋势, 不过随着反应的进行, 增长速率均降低。这可以用 SP、SC 的释放速率和被转化利用速率解释, 当释放

速率远大于被转化利用的速率时, SP、SC 浓度呈现增长趋势且增长速率快; 当释放速率略大于被转化利用的速率时, 仍呈现增长趋势但增长速率降低。SP 和 SC 是产酸菌生成 SCFAs 需要的主要基质^[1]。

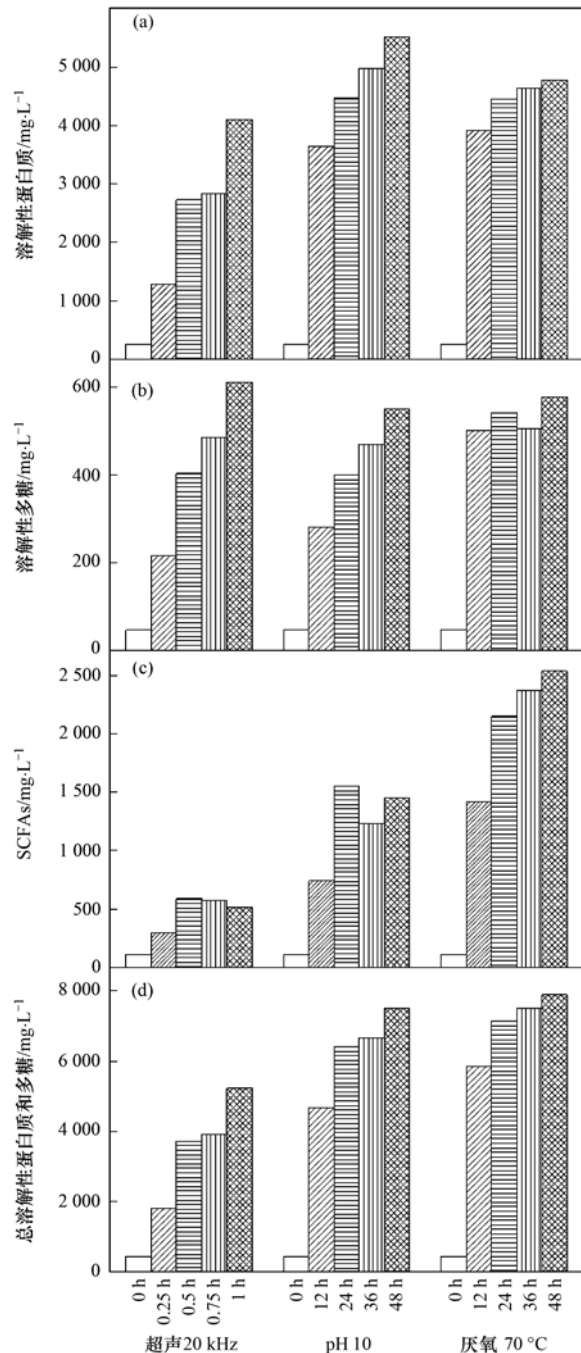


图 2 不同预处理方法时的溶解性蛋白质、溶解性多糖、SCFAs 和总溶解性蛋白质多糖浓度

Fig. 2 Soluble protein, carbohydrate, SCFAs, and total soluble protein and carbohydrate in sludge after the different pretreatments

图 2(c) 为各反应器中 SCFAs 积累情况。随着反应的进行, 超声波 20 kHz 和厌氧 70℃ 中的 SCFAs 增长后基本维持稳定, 而 pH 10 中的 SCFAs 在反应后期略有下降, 这可能是因为少量的 SCFAs 被转化生成了甲烷。有研究报道污泥碱性厌氧发酵

时产甲烷菌仍存在, 且可生成少量的甲烷^[2, 18]. 整个反应过程 SCFAs 积累浓度排序为厌氧 70℃ > pH 10 > 超声波 20 kHz. 污泥预处理后总溶解性蛋白质和多糖量包括两部分: 反应器中 SP 和 SC 的净含量与被转化生成 SCFAs 的 SP 和 SC, 如图 2(d) 所示. 反应结束时, 各反应器中总溶解性蛋白质和多糖的量(以 COD 计, 下同)分别为 5 525.4 mg·L⁻¹ (超声波 20 kHz)、7 516.0 mg·L⁻¹ (pH 10) 以及 7 892.5 mg·L⁻¹ (厌氧 70℃), 与预处理前污泥相比, 总溶解性蛋白质和多糖的量分别增加了 11.5 倍、16.9 倍和 17.8 倍, 显然 pH 10 和厌氧 70℃ 下的释放量更多. 徐慧敏等^[19] 在超声联合低温热水解促进剩余污泥破解和厌氧消化的研究中, 采用超声 20 kHz 和厌氧-80℃ 预处理污泥, 得出预处理后的溶解性蛋白质和多糖浓度比原污泥的分别增加了 318%、326% 和 375%、382%, 厌氧-80℃ 较超声 20 kHz 对有机质释放效果更好. 袁光环等^[20] 研究了酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化, 结果表明污泥经过 pH 10 预处理 2 d 后, 溶解性 SCOD 较初始增加了 44.9 倍. 已有研究表明预处理导致污泥细胞破壁, 胞内和胞外聚合物中有机质由固相向液相转移, 使得溶解性蛋白质、溶解性多糖和挥发性有机酸等浓度不断增加^[21], 本研究与已有研究的结论一致. 假设总溶解性蛋白质和多糖全部可用作产 SCFAs 的基质, pH 10 和厌氧 70℃ 预处理后的污泥更有利于产酸阶段 SCFAs 大量积累.

2.2 DNA 释放

图 3 为不同预处理方法污泥中 DNA 浓度变化情况. 显然, 随着反应的进行, 3 种预处理方法下的 DNA 浓度均呈现增长的趋势, 特别地, 污泥经过 pH 10 和厌氧 70℃ 预处理后, DNA 浓度更高, 反应结束时, DNA 浓度分别达到 1 343.3 mg·L⁻¹ (pH 10) 和 1 766.1 mg·L⁻¹ (厌氧 70℃), 分别是超声 20 kHz 的 3 倍和 4 倍. Guo 等^[22] 在研究超声法和碱试剂法提取 EPS 时, 得出采用 1 mol·L⁻¹ NaOH 处理污泥时的 DNA 释放浓度高于超声波法的, 这与本

试验的研究结果一致.

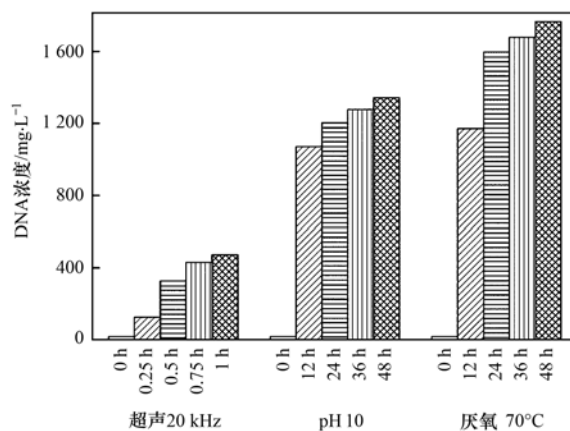


图 3 不同预处理方法时的 DNA 释放情况

Fig. 3 DNA release after the different pretreatments

2.3 有机物释放来源分析

综合蛋白质、多糖和 DNA 释放量, pH 10 和厌氧 70℃ 预处理后的污泥有机物释放量较超声波预处理多, 也即预处理后的污泥也更具有稳定性. 污泥中有机物分布在细胞内和细胞外, 细胞外主要是 EPS. 有研究表明超声波所产生的剪切力和空穴形成的压力可冲击而剥离 EPS^[22, 23]; 碱性 pH 能分离 EPS 中的酸性基团, 导致带负电荷的 EPS 彼此排斥, 增加 EPS 溶解性; 厌氧加热使污泥结构变松散, 且加剧分子运动, 增大 EPS 各成分的可溶性. 因此得出, 3 种预处理方法下释放的有机物来源途径之一是 EPS. 然而, 胞内有机物是否释放需根据细胞是否破损以及破损程度来确定.

为了考察细胞破损情况, 采用流式细胞术对各反应结束时的细胞形态进行了鉴定分析. 图 4 为不同细胞形态的分区, 根据荧光信号强度, 将细胞划分成 4 个区域, Q1 表示死亡细胞, 细胞膜已破损, Q2 和 Q3 表示活性细胞, Q4 为无生命杂质.

污泥经过预处理后的细胞形态分布情况, 如图 5 所示. 从中可以看出, 超声波 20 kHz、pH 10 和厌氧 70℃ 预处理后污泥中死亡细胞率依次为 34.5%、61.6% 和 59.9%, 比预处理前污泥 (16.0%) 分别

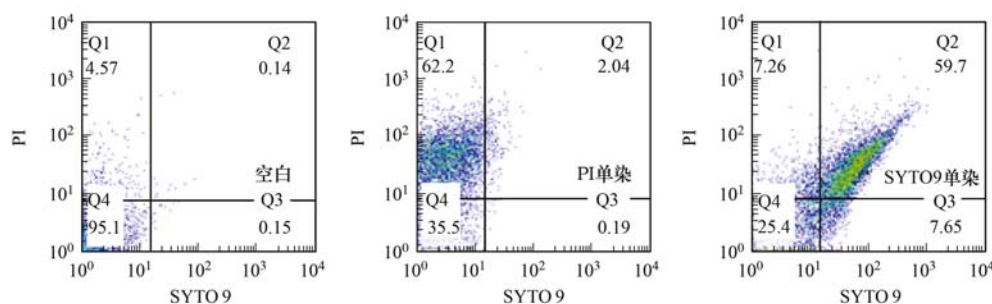


图 4 不同细胞形态的划分

Fig. 4 Four regions used to distinguish live cells and dead cells

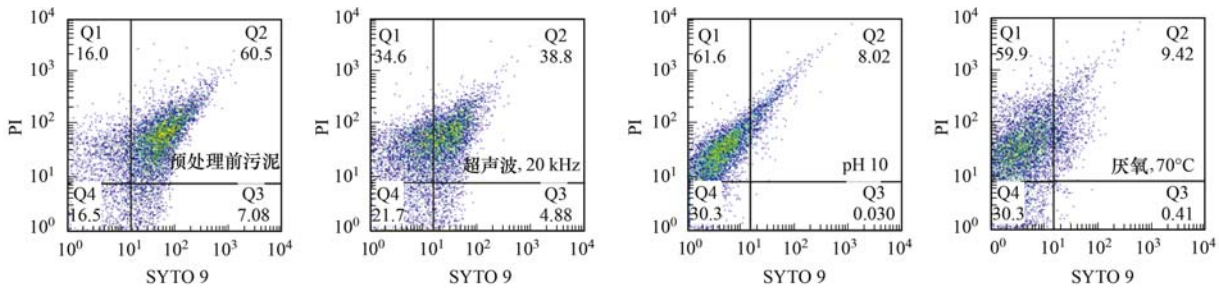


图5 污泥预处理前后不同细胞的比例

Fig. 5 Ratios of different cells in sludge after the pretreatments

提高 18.5%、45.6% 和 43.9%。这是因为超声波、碱性 pH 和厌氧 70℃ 超出了大多细菌的生存环境，当其耐受不住外界环境影响时，细胞壁和细胞膜被破损。

图 5 数据还表明不同预处理方法下的细胞膜破损程度不同，pH 10 和厌氧 70℃ 较强，而超声波较弱。有研究表明污泥中 DNA 浓度越高，死亡细胞也越多^[24~26]，图 3 显示 pH 10 和厌氧 70℃ 下的 DNA 浓度高于超声 20 kHz 的，这与通过流式细胞术鉴定不同预处理方法下的细胞死亡率高基本一致。基于细胞破损情况，说明 3 种预处理方法下污泥胞内有机物均进行了释放。肖本益等^[27]研究了污泥碱处理过程中的微生物细胞结构损伤，结果也表明在污泥的碱处理过程中，污泥微生物细胞结构会随着碱处理值的升高而受到损伤，导致细胞物质的释放，当 pH 在 10.0~12.5 之间，污泥微生物细胞壁和细胞膜的损伤速率最大。

2.4 预处理后污泥稳定性分析

文献[5]中指出，厌氧消化后污泥稳定控制指标及限值为：有机物去除率大于 40%，粪大肠杆菌菌值大于 0.5×10^{-6} 。作为厌氧消化的一部分，预处理后污泥有机物去除率大小将影响厌氧消化后污泥的稳定性。表 2 为不同预处理方法下污泥有机物去除率，污泥经过 pH 10 预处理后的有机物去除率达 19.1%，紧接着其后的是厌氧 70℃，而超声-20kHz 预处理后的污泥有机物去除率仅有 7.6%，这与其蛋白质、多糖和 DNA 的释放量多少（图 2 和图 3）一致。因此，就污泥稳定性而言，pH 10 预处理污泥更具稳定性，可为后续厌氧消化后污泥稳定性做出贡献。杨洁等^[28]研究污泥碱解和超声破解预处理的效果时，同样得出碱解时污泥 VSS 最大减少率（NaOH/TS=0.04）比超声（1 h）高。

表 2 预处理后污泥有机物去除率

指标	超声 20 kHz	pH 10	厌氧 70℃
VSS 去除率/%	7.6	19.1	13.8

2.5 经济性分析

为比较不同污泥预处理方法的经济性，表 3 列出了 3 种预处理方法不同项目的产出/消耗情况（不考虑时间因素）。首先，污泥预处理后的总溶解性蛋白质和多糖的释放量（以 COD 计，下同）分别为 $5.5 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$ （超声波 20 kHz）、 $7.5 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$ （pH 10）和 $7.9 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$ （厌氧 70℃），同样假设总溶解性蛋白质和多糖全部用作产 SCFAs，则分别相当于 6.6、9.1 和 9.2 元的甲醇。鉴于 3 种预处理方法均需要输入能量，分析经济性时，能量消耗也被考虑在内。超声波破碎仪功率 200 W，工作 1 h（超 5 s、停 5 s）消耗的电量是 0.1 kW·h，电价约 $1 \text{ 元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ ，则能源消耗是 0.1 元；为控制 pH 为 10，pH 10 预处理试验共消耗 10.5 mL 的 $5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaOH 溶液，即 2.1 g NaOH，折合人民币 0.042 元（NaOH 分析纯片状 500 g，市场价约 10 元）；厌氧 70℃ 试验中使用的恒温箱功率为 1040 W，根据热量计算公式得出该恒温箱开始将温度从室温 15℃ 加热到 70℃ 的电量消耗为 3.2 kW·h，由于恒温箱的保温作用，恒温箱后续维持 70℃ 的工作时间约 8 h，电量消耗约 8.2 kW·h，电价约 $1 \text{ 元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ ，得出能源消耗是 11.4 元。最终，单位体积污泥经 pH 10 预处理时可节约成本 22.8 元，比超声 20 kHz 和厌氧 70℃ 分别多节约了 28.5% 和 124.1%。

表 3 不同污泥预处理方法的经济分析¹⁾

指标	超声 20 kHz	pH 10	厌氧 70℃
污泥预处理量/L	0.4	0.4	0.4
总蛋白质和多糖释放量/ $\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$	5.5	7.6	7.7
甲醇/元	6.6	9.1	9.2
成本输入/元	0.1	0.042	11.4
总成本节约/ $\text{元} \cdot \text{L}^{-1}$	16.3	22.8	-5.5

1) 甲醇的价格为 $3 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，有机物释放总量对应的 COD 按甲醇计；总成本节约 = (产出甲醇价值 - 能量消耗)/污泥预处理量

3 结论

(1) 与超声波 20 kHz 相比，pH 10 和厌氧 70℃

预处理后的污泥能释放较多的有机物, 有机物去除率分别为 19.1% 和 13.8%, 因此污泥也更具稳定性。

(2) 超声波 20 kHz、pH 10 和厌氧 70℃ 预处理后的污泥细胞死亡率比预处理前分别提高 18.5%、45.6% 和 43.9%, 3 种预处理方法下释放的有机物来源既有 EPS 又有胞内有机物。

(3) 单位体积污泥经 pH 10 预处理比超声 20 kHz 和厌氧 70℃ 分别多节约 28.5% 和 124.1%, 污泥采用 pH 10 预处理更具经济性。

(4) 基于本研究中污泥有机物释放量和经济性, 预处理污泥时宜选择化学法(pH 10)。

参考文献:

- [1] Chen Y G, Jiang S, Yuan H Y, *et al.* Hydrolysis and acidification of waste activated sludge at different pHs[J]. *Water Research*, 2007, **41**(3): 683-689.
- [2] Yuan Y, Wang S Y, Liu Y, *et al.* Long-term effect of pH on short-chain fatty acids accumulation and microbial community in sludge fermentation systems[J]. *Bioresource Technology*, 2015, **197**: 56-63.
- [3] Liu H, Wang J, Liu X L, *et al.* Acidogenic fermentation of proteinaceous sewage sludge: Effect of pH[J]. *Water Research*, 2012, **46**(3): 799-807.
- [4] Kim M, Gomec C Y, Ahn Y, *et al.* Hydrolysis and acidogenesis of particulate organic material in mesophilic and thermophilic anaerobic digestion[J]. *Environmental Technology*, 2003, **24**(9): 1183-1190.
- [5] CJ/T 510-2017, 城镇污水处理厂污泥处理 稳定标准[S]. CJ/T 510-2017, Standard for sludge stabilization treatment of municipal wastewater treatment plant[S].
- [6] Carrère H, Dumàs C, Battimelli A, *et al.* Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: a review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **183**(1-3): 1-15.
- [7] 贾瑞来, 魏源送, 刘吉宝. 基于微波-过氧化氢-碱预处理的污泥水解影响因素[J]. *环境科学*, 2015, **36**(6): 2222-2231.
Jia R L, Wei Y S, Liu J B. Influencing factors for hydrolysis of sewage sludge pretreated by microwave-H₂O₂-alkaline process[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 2222-2231.
- [8] 代勤, 张文哲, 于潘芬, 等. 热、热碱处理对污泥溶胞和溶解性有机物的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2283-2288.
Dai Q, Zhang W Z, Yu P F, *et al.* Effects of heat and heat-alkaline treatments on disintegration and dissolved organic matter in sludge[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2283-2288.
- [9] 何品品, 王颖, 胡洁, 等. 应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4317-4325.
He P J, Wang Y, Hu J, *et al.* Biological pre-treatment of surplus sludge using the protease-secreting bacteria[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4317-4325.
- [10] Liu X L, Liu H, Chen J H, *et al.* Enhancement of solubilization and acidification of waste activated sludge by pretreatment[J]. *Waste Management*, 2008, **28**(12): 2614-2622.
- [11] Kim J, Park C, Kim T H, *et al.* Effects of various pretreatments for enhanced anaerobic digestion with waste activated sludge[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2003, **95**(3): 271-275.
- [12] Zhang J X, Li W L, Lee J, *et al.* Enhancement of biogas production in anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge by biological co-pretreatment[J]. *Energy*, 2017, **137**: 479-486.
- [13] 袁悦. 剩余污泥碱性厌氧发酵强化城市生活污水脱氮除磷[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
Yuan Y. Enhanced nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater via waste activated sludge alkaline fermentation[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017.
- [14] Lee W H, Pressman J G, Wahman D G. Three-dimensional free chlorine and monochloramine biofilm penetration: correlating penetration with biofilm activity and viability[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(4): 1889-1898.
- [15] Onyeché T I, Schläfer O, Bormann H, *et al.* Ultrasonic cell disruption of stabilised sludge with subsequent anaerobic digestion[J]. *Ultrasonics*, 2002, **40**(1-8): 31-35.
- [16] Heo N H, Park S C, Lee J S, *et al.* Solubilization of waste activated sludge by alkaline pretreatment and biochemical methane potential (BMP) tests for anaerobic co-digestion of municipal organic waste[J]. *Water Science & Technology*, 2003, **48**(8): 211-219.
- [17] Skiadas I V, Gavala H N, Lu J, *et al.* Thermal pre-treatment of primary and secondary sludge at 70℃ prior to anaerobic digestion[J]. *Water Science & Technology*, 2005, **52**(1-2): 161-166.
- [18] Zheng X, Su Y L, Li X, *et al.* Pyrosequencing reveals the key microorganisms involved in sludge alkaline fermentation for efficient short-chain fatty acids production[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(9): 4262-4268.
- [19] 徐慧敏, 何国富, 戴晓虎, 等. 超声联合低温热水解促进剩余污泥破解和厌氧消化的研究[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(9): 2703-2708.
Xu H M, He G F, Dai X H, *et al.* The effects of combined ultrasound and low temperature thermal pretreatments on disintegration and anaerobic digestion of waste activated sludge[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(9): 2703-2708.
- [20] 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.
Yuan G H, Zhou X Q, Wu J D. Enhancement of anaerobic digestion of excess sludge by acid-alkali pretreatment[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(6): 1918-1922.
- [21] Dhar B R, Nakhla G, Ray M B. Techno-economic evaluation of ultrasound and thermal pretreatments for enhanced anaerobic digestion of municipal waste activated sludge[J]. *Waste Management*, 2012, **32**(3): 542-549.
- [22] Guo X S, Liu J X, Xiao B Y. Evaluation of the damage of cell wall and cell membrane for various extracellular polymeric substance extractions of activated sludge[J]. *Journal of Biotechnology*, 2014, **188**(1): 130-135.
- [23] Salama Y, Chennaoui M, Sylla A, *et al.* Characterization, structure, and function of extracellular polymeric substances (EPS) of microbial biofilm in biological wastewater treatment systems: a review[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, **57**(35): 16220-16237.
- [24] Frølund B, Palmgren R, Keiding K, *et al.* Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin[J]. *Water Research*, 1996, **30**(8): 1749-1758.
- [25] Liu H, Fang H H P. Extraction of extracellular polymeric

- substances (EPS) of sludges [J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, **95**(3): 249-256.
- [26] Sheng G P, Yu H Q, Li X Y, *et al.* Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: a review [J]. *Biotechnology Advances*, 2010, **28**(6): 882-894.
- [27] 肖本益, 张志渊, 张晓红, 等. 污泥碱处理过程中的微生物细胞结构损伤 [A]. 见: 2014 中国环境科学学会学术年会论文集 [C]. 成都: 中国环境科学学会, 2014. 1-9.
- [28] 杨洁, 季民, 韩育宏, 等. 污泥碱解和超声破解预处理的效果研究 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(4): 1002-1006.
- Yang J, Ji M, Han Y H, *et al.* Effect of alkaline and ultrasonic pretreatment on the sludge disintegration [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(4): 1002-1006.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性, 论点明确, 文字精炼, 数据可靠. 全文不超过 8 000 字 (含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明 (在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站 (www.hjks.ac.cn) 进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为: 题目; 作者姓名; 作者工作单位、地址、邮政编码; 中文摘要; 关键词; 中图分类号; 英文题目; 作者姓名及单位的英译名; 英文摘要; 关键词; 正文; 致谢; 参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容, 一般不超过 20 字, 少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字, 以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果 (包括主要数据) 和结论, 重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应, 注意人称、时态和语言习惯, 以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作 (引文即可) 和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简, 同一内容不得用图表重复表达, 要有中英文对照题目. 图应大小一致, 曲线粗于图框, 图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示, 如 mg (毫克), m (米), h (小时) 等. 科技名词术语用国内通用写法, 作者译的新名词术语, 文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式, 左起顶格书写, 3 级以下标题可用 (1), (2)……表示, 后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写, 正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称, 括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献, 可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:
期刊: 作者 (外文也要姓列名前). 论文名 [J]. 期刊名, 年, 卷 (期): 起页-止页.

图书: 作者. 书名 [M]. 出版地: 出版社, 年. 起页-止页.

会议文集: 作者. 论文名 [A]. 见 (In): 编者. 文集名 [C]. 出版地: 出版社 (单位), 年. 起页-止页.

学位论文: 作者. 论文名 [D]. 保存地: 保存单位, 年份.

报告: 作者. 论文名 [R]. 出版地: 出版单位, 出版年.

专利: 专利所有者. 专利题名 [P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.

11. 来稿文责自负, 切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知, 可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址, 邮编, 电话号码, 电子邮箱等. 编辑部邮政地址: 北京市 2871 信箱; 邮编: 100085; 电话: 010-62941102, 010-62849343; 传真: 010-62849343; E-mail: hjks@cees.ac.cn; 网址: www.hjks.ac.cn

CONTENTS

Health Benefit Evaluation for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in China	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (2961)
Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing	XIE Fang-jian, SHI Zhi-hao, LI Jing-yi, <i>et al.</i> (2967)
Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Zhengzhou	YANG Liu-ming, WANG Shen-bo, HAO Qi, <i>et al.</i> (2977)
Relationship Between Atmospheric Visibility and PM _{2.5} Concentrations and Distributions	WANG Ji-kang, ZHANG Heng-de, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (2985)
Characteristics of VOCs Emitted from the Rubber Tire Manufacturing Industry Based on the Inverse-Dispersion Calculation Method	BAI Hong-xiang, WEI Wei, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (2994)
Stable Carbon Isotope Compositions and Source Apportionments of Volatile Aromatic Compounds in the Urban Atmosphere of Taiyuan, China	LI Ying-hui, YAN Yu-long, LI Zhi-sheng, <i>et al.</i> (3001)
Spectral Distribution and Pollution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Air of an Office Building Clustered Area	WANG Lin, DENG Ya-jia, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3008)
Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter in Key Lakes in the Middle Reaches of the East Route of the South-North Water Diversion Project	ZHANG Liu-qing, PENG Kai, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (3018)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Different Water Bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau	ZHANG He-hui-zi, YU Kun-xia, LI Zhan-bin, <i>et al.</i> (3030)
Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes	WANG Cong-feng, HU Zi-long, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (3039)
Pollution Sources and the Stratification Effects on Water Quality in Lijiahe Reservoir	XU Jin, HUANG Ting-lin, LI Kai, <i>et al.</i> (3049)
Distribution and Potential Risk of Organochlorine Pesticides in the Soil of a Submerged Area Around Miyun Reservoir	WANG Xia, ZHANG Qing-zhuo, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3058)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Waters of the Yinchuan Wetlands	TIAN Da-nian, DANG Li-hui, DING Run-mei, <i>et al.</i> (3068)
Comparison of the Geochemical Characteristics of Karst Springs of a Vertically Zoned Climate Region under Human Activity: A Case of Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain Area, Chongqing	XIE Guo-wen, YANG Ping-heng, SHENG Ting, <i>et al.</i> (3078)
Groundwater Chemical Characteristics and Analysis of Their Controlling Factors in an Alluvial Fan of Jianjiang River	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (3089)
Dynamics of Epilithic Algae Communities and Their Relationship with Environmental Factors During Storage and Non-storage Periods in the Three Gorges Reservoir	FU Jun-ke, LIU Li, HE Xin-yu, <i>et al.</i> (3099)
Influence of Rainfall on the <i>in situ</i> Growth of Dominant Algae Species in Xiangxi River	WENG Chuan-song, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (3108)
Decomposition of <i>Myriophyllum aquaticum</i> and the Associated Release of Nitrogen and Phosphorus	TONG Xiong, LUO Pei, LIU Feng, <i>et al.</i> (3118)
Optimization of the Parameters for Microalgae Immobilization and Analysis of Its Recovery Potential for Ammonia Nitrogen in Wastewater	LIU Xiang, WANG Jing-yao, WU Juan-juan, <i>et al.</i> (3126)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Titanate Nanotubes	ZHANG Zheng, FENG Chang-sheng, ZHANG Xiao-nui, <i>et al.</i> (3135)
Application of Fenton-like Photocatalysts Based on Defect Reconstruction in Degradation of Dye Wastewater	TANG Qing-wen, AN Xiao-qiang, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (3146)
Degradation of RBK5 with Peroxymonosulfate Efficiently Activated by N-Doped Graphene	YU Yong-bo, HUANG Wan, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (3154)
Effect of Cu ²⁺ on Denitrification Using NO ₂ ⁻ as an Electron Acceptor	MAI Wen-ke, PENG Yong-zhen, JI Jian-tao (3162)
Start-up and Performance Optimization of a CANON Pilot Reactor	SUN Qing-hua, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (3169)
Effects of Aerobic Carbon Sources on Biofilm with Simultaneous Phosphate Removal and Enrichment	XU Lin-jian, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Organic Characteristics on Sludge Settability in an AAO System	LIU Xiao-bo, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (3186)
Effect of Free Nitrous Acid on the Activity of Nitrifying Bacteria in Different Sludge Concentrations Under Anoxic Conditions	LÜ Xin-tao, ZHOU Tong, TIAN Xia-di, <i>et al.</i> (3195)
Stability of ZVI-dependent Autotrophic Denitrification by ANAMMOX Bacteria	ZHANG Wen-jing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3201)
Effect of On-line NaClO Backwashing on Microbial Communities in an Inverted A ² O-MBR System	WANG Xu-dong, GAO Miao, WANG Ying-ying, <i>et al.</i> (3208)
Evaluation of Organic Matter Release and Economy for Various Pretreatments of Sewage Sludge	YUAN Yue, TAN Xue-jun, ZHENG She-yu (3216)
Model-based Optimization for the Coordinated Supply of Clear and Reclaimed Water in the Central Districts of Beijing, China	ZHANG Tian-yuan, TAN Qian, WANG Shu-ping (3223)
Occurrence and Removal of N-nitrosamines in the Wastewater Treatment Plants Using Different Treatment Processes	LIU Wang-rong, ZHAO Jiang-liang, YANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3233)
Occurrence of Tramadol and Fentanyl Use in Domestic Wastewater in Beijing	ZHOU Zi-lei, DU Peng, BAI Ya, <i>et al.</i> (3242)
Pollution Level and Ecological Risk of Typical Antibiotics in Guiyang Wastewater Treatment Plants	YANG Zhao, LI Jiang, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Various Livestock Feedlot Soils of the Hilly Purple Soil Region	CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, LIU Chen (3257)
Effects of Tetracycline on Microbial Communities and Antibiotic Resistance Genes of Vermicompost from Dewatered Sludge	CHEN Jing-yang, XIA Hui, HUANG Kui, <i>et al.</i> (3263)
Fate of Antibiotic Resistance Genes and Virulence Genes in Enterococci During Anaerobic Digestion Process of Thermal Hydrolyzed Sludge	LI Hui-li, PEI Yuan-mei, LI Shan, <i>et al.</i> (3270)
Effect of Co-composting of Chicken Manure with Chinese Medicinal Herbal Residues on Antibiotic Resistance Genes	WU Jin-ping, CHEN Jian-wen, LIU Yong, <i>et al.</i> (3276)
Spatio-temporal Patterns of Microbial Communities and Their Driving Mechanisms in Subalpine Lakes, Ningwu, Shanxi	WANG Xue, LIU Jin-xian, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (3285)
Community Structure Characteristics of <i>nirS</i> Denitrifying Bacteria of Spring Typical Parkland Waterbodies in Shijiazhuang City	ZHANG Yi-ran, LI Zai-xing, SUN Yue, <i>et al.</i> (3295)
Differential Responses of Rhizospheric <i>nirK</i> - and <i>nirS</i> -type Denitrifier Communities to Different Phosphorus Levels in Paddy Soil	ZHAN Yu, GAO Dan-dan, SHENG Rong, <i>et al.</i> (3304)
Comparison of Soil Bacterial Community Structure Between Paddy Fields and Dry Land in the Huixian Karst Wetland, China	JIA Yuan-hang, JIN Zhen-jiang, YUAN Wu, <i>et al.</i> (3313)
Cd Balance Analysis of a Typical Rice Paddy System in Central Hunan	JIANG Kai, DENG Xiao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3324)
Effects of an Amendment on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, WANG Yan-hong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (3331)
Isolation of Heavy Metal Immobilizing and Plant Growth-Promoting Bacteria and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Wheat	HAN Hui, WANG Xiao-yu, CAI Hong, <i>et al.</i> (3339)
Differences in the Cadmium-Enrichment Capacity and Subcellular Distribution and Chemical Form of Cadmium in Different Varieties of Pepper	PENG Qiu, LI Tao, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (3347)
Effect of Phosphorus Addition on N ₂ O Emissions from Rice-Rapeseed Rotation Soils	SUN Zheng, SU Rong-lin, XU Peng, <i>et al.</i> (3355)
Impact of Land Use Type on the Stability and Organic Carbon Content of Soil Aggregates in the Weibei Dryland	LIU Jie, MA Yan-ting, WANG Xian-ling, <i>et al.</i> (3361)
Vertical Distribution Characteristics of PAHs in Soils with Different Land Use Types During Rapid Urbanization	LU Yin-tao, XIANG Xin-xin, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (3369)
Pollution Levels, Sources, and Spatial Distribution of Phthalate Esters in Soils of the West Lake Scenic Area	LIAO Jian, DENG Chao, CHEN Yi, <i>et al.</i> (3378)
Impact of Biochar on Soil Bulk Density and Aggregates of Lou Soil	LI Qian-qian, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (3388)