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

2020
Vol.41 No.7
第41卷 第7期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第7期
2020年7月15日

目 次

中国钢铁行业大气环境影响 …… 汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 贾敏, 郭静, 田军, 黄满堂, 崔维庚, 王彤, 李时蓓, 敬红, 甄瑞卿, 孙露, 成国庆(2981)
华北地区大气细颗粒物($PM_{2.5}$)年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应 …… 杨伟, 姜晓丽(2995)
郑州市民运会期间大气 $PM_{2.5}$ 改善效果评估 …… 王申博, 娄亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹(3004)
成都夏冬季 $PM_{2.5}$ 中水溶性无机离子污染特征 …… 冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 刘琴, 张巍, 张建强(3012)
川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析 …… 雷雨, 张小玲, 康平, 王浩霖, 青泉, 欧奕含, 卢宁生, 邓中慈(3021)
四川省典型行业挥发性有机物源成分谱 …… 徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 王继钦, 王波(3031)
成都市工业挥发性有机物排源成分谱 …… 周子航, 邓也, 周小玲, 吴柯颖, 谭钦文, 尹代娟, 宋丹林, 陈秋宇, 曾文虢(3042)
郑州市典型工业企业 VOCs 排放特征及风险评估 …… 齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 杨艺, 韩丽岩, 李博伟(3056)
阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响 …… 牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 高千卓, 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 吴婧, 彭林(3066)
典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性 …… 景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 彭亚荣, 李英杰, 王倩, 沈建东, 王红丽(3076)
华北地区典型重工业城市夏季近地面 O_3 污染特征及敏感性 …… 欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 姚森, 周志博, 关攀博, 段文娇, 姚诗音(3085)
稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性 …… 顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 田世丽, 王彦君, 吕雪梅, 倪雪, 孙杰, 吴电明, 方运霆(3095)
苏州市大气中汞的形态分布特征及来源分析 …… 卢仁杰, 吴也正, 张晓婕, 沈莹, 吴福全, 薛媛媛, 邹强, 麻春艳(3102)
轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征 …… 谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 王怡然, 王日超, 张立航, 余飞, 钟庄敏, 白莉, 黄江荣, 刘俊文, 郑君瑜(3112)
非超低与超低排放煤电机组启动过程 NO_x 排放特征对比分析 …… 李辉, 朱法华, 孙雪丽, 王宗爽, 王圣, 裴杰, 谭玉菲, 薛峰, 郭敏, 郑桂博(3121)
邢台市区道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别 …… 宋怡, 卢新卫, 周潇, 葛子赫(3130)
叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响 …… 魏文俊, 王兵, 牛香(3136)
关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源 …… 赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 司炳成(3148)
岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析 …… 田永著, 韩志伟, 赵然, 李耕, 曾祥颖, 黄家琰(3157)
木沥河流域氮素污染及其污染源解析 …… 齐冉, 徐菲菲, 杨帆, 颜昌宙(3165)
辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析 …… 齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾(3175)
鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应 …… 王朔月, 高扬, 陆瑶, 贾珺杰, 李兆喜, 马明真, 温学发(3186)
象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析 …… 王磊, 汪文东, 刘懂, 李刚, 于红梅, 黄沙, 徐耀阳(3194)
乐安河河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献 …… 张慧, 王世亮, 余杨(3204)
连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征 …… 李征, 高春梅, 杨金龙, 吴立珍, 张硕, 刘艳华, 靳迪迪(3212)
茅洲河流域民用井中耐药基因的分布特征与健康风险 …… 吴黛灵, 邹海燕, 何璐茜, 高方舟, 应光国, 何良英(3222)
金盆水库沉积物铁锰释放规律 …… 路林超, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 张晗, 王晨旭, 司凡(3231)
城市湖泊沉积物微塑料污染特征 …… 王璇, 牛司平, 宋小龙, 饶竹, 战楠(3240)
西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析 …… 刘晓丹, 黄毅, 王永花, 汪贝贝, 吴兵, 陆光华(3249)
海水中的红霉素与营养盐对微藻的复合影响 …… 王娜, 赵卫红, 苗辉(3257)
梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律 …… 温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟(3266)
宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析 …… 徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 王洋, 程军蕊, 王侃(3275)
分层型水库藻类垂向演替的水质与细菌种群调控 …… 闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 贾竞宇, 刘凯文, 苗雨甜, 宗容容(3285)
长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响 …… 毕薇薇, 叶胜, 于建全, 杨玉龙, 陈晨, 李青松, 马晓雁(3297)
供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型 …… 刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 杨玉龙, 李青松, 马晓雁(3307)
碱和磁复合改性小麦秸秆生物炭对水体中镉的吸附特性及机制 …… 崔志文, 任艳芳, 王伟, 张黎明, 张陆云, 王曦玥, 何俊瑜(3315)
弱磁场强化氧化石墨烯负载纳米零价铁(GO-nFe^0/WMF)对水中Cr(Ⅵ)的去除特性及机制 … 计盟, 鲍建国, 朱晓伟, 杜江坤, 郑汉(3326)
一硫代砷在针铁矿上的吸附及影响因素 …… 廖丹雪, 单慧媚, 张进贤, 彭三曦, 黄健, 陈辉, 赵超然, 曾春芽(3337)
生物滤池快速启动 ANAMMOX 运行策略及菌群特征 …… 王晓曈, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍(3345)
低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响 …… 张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 金鑫, 石烜, 金鹏康(3356)
羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响 …… 邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 郭劲松, 申渝, 晏鹏, 方芳, 陈猷鹏(3365)
低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性 …… 高春娣, 张娜, 韩徽, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻(3373)
我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化 …… 董滨, 高君, 陈思思, 杨殿海, 戴晓虎(3384)
城镇河流 CO_2 及 CH_4 排放与市政排水管网污水输入的关联影响 …… 李磊, 陈浩, 朱弈, 王宇晖, 聂云汉, 赵昕, 贾其隆, 叶建锋(3392)
控释尿素对黄河故道沙性潮土 N_2O 排放的影响 …… 姜右锦, 袁俊吉, 丁维新, 刘阳, 张松林(3402)
我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放 …… 张芬, 程泰鸿, 陈新平, 王孝忠(3410)
不同母质发育土壤 Cd 环境行为对水分管理模式的响应差异 …… 黄敬, 李欣阳, 文沙, 蒋凯, 龙坚, 彭佩钦, 侯红波(3418)
锰基改性生物炭对弱碱性 Cd 污染土壤团聚体结构以及 Cd 含量特征的影响 …… 孙彤, 付宇童, 李可, 徐应明, 孙约兵(3426)
钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响 …… 曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 郭晓, 黄洋(3434)
叶面喷施 2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响 …… 杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波(3441)
《环境科学》征订启事(3011) 《环境科学》征稿简则(3084) 信息(3174, 3185, 3391)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第7期 2020年7月
Vol.41, No.7 Jul., 2020

我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化

董滨, 高君, 陈思思*, 杨殿海, 戴晓虎
(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 我国剩余污泥厌氧转化率显著低于发达国家,泥质是影响污泥厌氧消化性能的重要因素,而我国剩余污泥泥质相比于发达国家的典型差异主要体现在3个方面,即污泥龄长、微细砂含量高和金属离子含量高. 因此,系统性研究了泥龄、微细砂和金属离子对剩余污泥厌氧消化性能的影响,进行量化比较,并进行有针对性的强化研究. 结果表明,微细砂对VS降解率的消极影响并不明显,而泥龄和金属离子是主要的抑制因素,泥龄的抑制程度显著高于金属离子($P<0.05$),且随着泥龄的增加,金属离子的抑制作用呈进一步增强的趋势,因而总结得出长泥龄为限制我国污泥厌氧消化性能的最主要因素. 经高温热水解预处理(160℃, 0.55 MPa, 30 min)后,长泥龄污泥的累积产甲烷量和VS降解率显著提升,接近于泥龄为5 d时的值,因此高温热水解具有突破长泥龄所致的污泥厌氧产甲烷瓶颈的潜力.

关键词:剩余污泥; 微细砂; 金属离子; 泥龄; 厌氧消化; 热水解
中图分类号: X705 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)07-3384-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201912054

Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China

DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si*, YANG Dian-hai, DAI Xiao-hu
(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The anaerobic conversion efficiency of excess sludge in China is significantly lower than that in developed countries. Sludge characteristics are important influencing factors in the anaerobic degradability of sludge. The typical differences between excess sludge in China and in developed countries are mainly reflected in three aspects: long sludge age, high content of micro-sized grits, and high content of metal ions. Therefore, the effects of sludge age, micro-sized grits (represented by silica particles), and metal ions on the anaerobic digestion (AD) of excess sludge were studied systematically. Quantified comparison and targeted enhancement research were also carried out. The results showed that the negative effect of grit in the influent on VS reduction of sludge during AD was not obvious, while sludge age and metal ions were the main inhibitory factors. In addition, the inhibition level of sludge age was significantly higher than that of metal ions ($P<0.05$). With an increase in sludge age, the inhibition level of metal ions showed a further strengthening trend. Therefore, it could be concluded that long sludge age was the most important factor limiting the degradability of excess sludge. Moreover, with thermal hydrolysis pretreatment (160℃, 0.55 MPa, 30 min), the cumulative methane yield and VS reduction of sludge with long sludge age (40 d) almost increased to the values of sludge with a sludge age of 5 d. That is, thermal hydrolysis pretreatment has the potential to break through the bottleneck of degradability of sludge caused by long sludge age.

Key words: excess sludge; grits; metal ions; sludge age; anaerobic digestion; thermal hydrolysis

自2015年国务院发布实施《水污染防治行动计划》[1]以来,全国水环境质量持续改善,截止到2018年底,全国城镇建成运行污水处理厂4332座,污水处理能力1.95亿 $m^3 \cdot d^{-1}$[2]. 在污水处理力度和成效加强的同时,产生了大量的剩余污泥,年产量已达4000万t,污泥中通常含有大量的有毒、有害和对环境产生负面影响的物质,包括有毒有害有机物、重金属、病原菌和寄生虫卵等,具有较大的二次污染风险[2],因此对其进行无害化处理处置迫在眉睫. 此外,污泥中还含有碳、氮、磷和硫等营养元素,在全球资源短缺的今天,对其进行资源回收是可持续发展的重要举措. 厌氧消化在去除污泥中有机物的同时能够回收生物质能源(沼气),是目前最普遍的污泥减量化、稳定化与资源化技术之一[3~6]. 然而在我国,剩余污泥厌氧消化推广应用程度明显低于发达国家水平,主要由于我国剩余污泥的厌氧降解率(20%~50%)显著低于发达国家(50%~70%)[3]. 且经文献调研与归纳,发现我国剩余污泥的泥质与发达国家相比,在3个方面具有显著差异,即微细砂含量(50%~65%)高于发达国家(25%~30%)、金属离子如 Ca^{2+}、Fe^{3+}、Al^{3+} 和 Mg^{2+} 等的含量高于发达国家、污泥泥龄(10~30 d)显著长于发达国家(5~10 d)[7].

目前,已有研究报道了以上因素对污泥厌氧消化性能的影响. Bolzonella 等[8]的研究发现污泥的甲烷产率随泥龄的增加呈现减小的趋势,并将原因阐述为高泥龄下对污泥絮体的好氧生物降解程度较

收稿日期: 2019-12-08; **修订日期**: 2020-01-18
基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1900905); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07403002)
作者简介: 董滨(1978~),男,博士,教授,主要研究方向为固废处理与资源化,E-mail:dongbin@tongji.edu.cn
* 通信作者,E-mail:chensisi@tongji.edu.cn

高,从而导致污泥中残留的有机物可生化性能下降,之后在 Xu 等[9]的研究中将泥龄的影响机制进一步阐述为胞外有机物含量随泥龄增加而增加,其空间稳定结构使生物降解性能恶化,导致净累积甲烷产量减少; 吉芳英等[10]的研究发现无机砂体积平均粒径在 100 μm 以上时,其最主要的去向是淤积在反应池底而不是通过剩余污泥排出,Dai 等[11]的研究发现在进水中加入微细砂(3 ~ 50 μm)后,剩余污泥的净累积产甲烷量会降低,且发现 EPS 中蛋白质是与微细砂结合的主要物质,这种结合作用会对污泥有机质的厌氧降解造成影响; Suanon 等[12]的研究发现金属通常通过分馏与污泥絮体中的有机物结合,之后在 Xu 等[13]的研究中认为污泥中的有机结合金属可能是污泥絮体稳定性的基础,将会影响污泥的厌氧消化效率. 然而,这些因素在不同量化条件下的影响、其影响程度的量化比较以及针对性的强化措施仍缺乏研究.

目前为止大量学者开发了一系列预处理措施如酸碱预处理[14,15]、超声预处理[16,17]、生物预处理[18]和热水解预处理[19~22]等改善有机组分的溶出性能以强化污泥的厌氧消化效率. 在以上强化措施中,效果尚可且较容易工程推广的技术为高温热水解技术,尽管这一技术对污泥厌氧消化性能的强化作用得到了大量的文献报道与工程验证[19,23,24],然而由于污泥泥质的较大差异和强化机制研究的缺乏,其对不同污泥样本的促进效率也存在着较大的差异[20,24~26],高温热水解在突破我国剩余污泥厌氧消化瓶颈上是否具有关键性作用也亟待研究.

因此,本文旨在从污泥龄、微细砂含量和金属离子等 3 个主要差异性因素出发,通过 A/O 工艺培养的活性污泥,分别研究这 3 个因素对污泥厌氧消化性能的影响,并进行系统性的量化对比,以鉴别影响我国剩余污泥厌氧消化性能的主要因素,从源头上明晰影响我国剩余污泥厌氧转化性能的重要因素. 然后,针对主要影响因素进一步探究高温热水解预处理手段对其进行改善的可行性,以期为我国剩余污泥厌氧消化性能的改善与厌氧消化技术的推广提供理论基础与数据支撑.

1　材料与方法

1.1　试验材料

为了排除其他影响因素的干扰,本研究使用的污泥是由模拟生活污水经 A/O 工艺培养得到的模型剩余污泥,培养过程中采用 10 个完全混合式反应装置(如图 1),分别编号 1 ~ 10. 装置有效运行体积为 10 L,运行方案为进水→厌氧(3.5 h)→曝气(7.5 h)→静置出水(1 h)模式,每天 2 个周期,每个周期 12 h(水力停留时间为 11 h),每个周期进出水 8 L. 根据所研究的影响因素设置不同条件,从而培养出不同性质的污泥供试验使用.

1.1.1　不同泥龄污泥的培养

控制 1 ~5 号反应装置每天分别出泥 2.0、1.0、0.5、0.33 和 0.25 L,使污泥龄(SRT)分别为 5、10、

(a)反应装置; (b)每日出泥

图 1　污泥培养反应装置与每日出泥

Fig. 1　Reactors for sludge cultivation and the discharge of sludge

20、30 和 40 d. 所得污泥分别编号 1-1、1-2、1-3、1-4 和 1-5,经静置沉淀后去除上清液,所得污泥泥质特征见表 1.

1.1.2 含微细砂污泥的培养

控制 6 ~ 10 号反应装置每天均出泥 1 L,使污泥龄(SRT)为 10 d. 其中 6 号不添加微细砂, 7 ~ 10 号在第 1 ~ 50 d 内每日添加微细砂(以 SiO_2 模拟, 300 目,体积平均粒径为 30 μm)1.2、2.4、3.6 和 4.8 g,第 50 ~ 100 d 内根据污泥的实际 VSS/TSS 值和目标值调整加砂量. 所得污泥分别编号 2-1、2-2、2-3、2-4、2-5、2-6、2-7 和 2-8,经静置沉淀后去除上清液,所得污泥泥质特征见表 1.

1.1.3 含金属离子污泥的培养

1 ~ 10 号装置中污泥培养的后期,在进水时添加金属离子 Ca^{2+}、Fe^{3+}、Al^{3+} 和 Mg^{2+},浓度的选择参考 Xu 等[13]的研究,使 10 种模型剩余污泥中金属离子的浓度达到我国实际剩余污泥的金属离子含量,其占污泥干重的质量分数分别为 Ca^{2+}:(3.4 ± 0.6)%、Fe^{3+}:(2.7 ± 0.4)%、Al^{3+}:(1.0 ± 0.1)% 和 Mg^{2+}:(1.0 ± 0.2)%. 不同含砂量污泥添加金属离子后所得污泥分别编号 3-1、3-2、3-3、3-4 和 3-5,不同泥龄污泥添加金属离子后所得污泥分别编号 3-6、3-7、3-8、3-9 和 3-10,经静置沉淀后去除上清液,所得泥质特征见表 1.

表 1 基质泥质、试验设计与分组

Table 1 Characteristics of substrate and the design of the experiment

分组	基质	泥龄/d	TS/%	VS/TS/%	基质 VS 添加量/g	接种比
不同泥龄污泥	污泥 1-1	5	3.02 ± 0.04	90.62 ± 0.11	2.00	1.9
	污泥 1-2	10	4.91 ± 0.03	88.91 ± 0.13	2.03	1.9
	污泥 1-3	20	3.64 ± 0.03	89.18 ± 0.15	2.05	1.9
	污泥 1-4	30	4.07 ± 0.07	89.46 ± 0.17	2.07	2.0
	污泥 1-5	40	3.50 ± 0.02	86.74 ± 0.19	2.02	1.9
不同含砂量污泥	污泥 2-1(无砂)	10	4.00 ± 0.05	90.46 ± 0.21	2.02	1.9
	污泥 2-2	10	2.30 ± 0.04	79.98 ± 0.14	1.92	1.8
	污泥 2-3	10	3.00 ± 0.02	69.54 ± 0.17	1.95	1.9
	污泥 2-4	10	6.60 ± 0.08	64.71 ± 0.15	2.00	1.9
	污泥 2-5	10	2.00 ± 0.02	56.03 ± 0.21	2.03	1.9
	污泥 2-6	10	6.40 ± 0.07	52.35 ± 0.19	2.02	1.9
	污泥 2-7	10	6.10 ± 0.04	44.70 ± 0.23	2.03	1.9
	污泥 2-8	10	6.20 ± 0.02	33.36 ± 0.17	1.98	1.8
不同含砂量污泥 + 金属离子	污泥 3-1	10	4.41 ± 0.01	90.36 ± 0.14	2.05	2.0
	污泥 3-2	10	2.26 ± 0.08	79.76 ± 0.19	2.04	2.0
	污泥 3-3	10	5.67 ± 0.05	69.21 ± 0.21	2.08	2.1
	污泥 3-4	10	5.24 ± 0.12	56.45 ± 0.13	2.04	2.0
	污泥 3-5	10	5.12 ± 0.03	32.96 ± 0.19	2.03	2.0
不同泥龄污泥 + 金属离子	污泥 3-6	5	3.12 ± 0.03	90.42 ± 0.21	2.02	2.0
	污泥 3-7	10	4.87 ± 0.05	88.81 ± 0.12	2.04	2.0
	污泥 3-8	20	3.75 ± 0.04	89.67 ± 0.14	2.03	2.0
	污泥 3-9	30	4.13 ± 0.08	89.52 ± 0.23	2.05	2.1
	污泥 3-10	40	3.49 ± 0.03	85.01 ± 0.21	2.01	2.0

1.2 厌氧产甲烷试验

厌氧产甲烷试验装置为 Bioprocess 甲烷潜势仪(AMPTSII, Bioprocess Control, Sweden),如图 2 所示. 本研究所采用的接种泥取自实验室培养的已不再产气的污泥厌氧消化反应器,接种泥的 TS 为(0.90 ± 0.02)%,VS/TS 为(56.99 ± 0.21)%,每个样品瓶中添加 200 g 接种泥,接种泥 VS 总量为1.06 g.

在试验过程中,所研究影响因素为污泥龄时,使用污泥 1-1 ~ 1-5 进行厌氧产甲烷试验,设置 3 个平行样,共 15 个样本; 所研究影响因素为微细砂时,厌氧产甲烷试验基质为污泥 2-1 ~ 2-8,设置 3 个平行样本,共 24 个样本; 所研究因素为金属离子时,使用污泥 3-1 ~ 3-10 进行厌氧产甲烷试验,设置 3 个平行样,共 30 个样本. 3 组试验接种比(基质 VS: 接种泥 VS)均为 2/1,每组加入基质与接种泥之后,统一用蒸馏水将样品瓶中的混合物定容至 380 g. 每次加样后充 2 min 氮气,水浴温度 37℃. 另外,设置了 2 个仅加接种泥的空白对照样本. 基质性质及试验设计与分组见表 1.

1.3 热水解强化试验

将表 1 中编号 1-5 的长泥龄污泥(SRT = 40 d)进行热水解预处理,试验设备采用水浴式高温高压反应釜(E500,世纪森朗,北京),装置采用电加热,容积 500 mL. 将 1-5 的长泥龄污泥在 160℃, 0.55 MPa 条件下处理 30 min,计时以升至设定温度为起始时刻,以加热停止为终止时刻,得到热水解污泥

图 2　厌氧产甲烷试验装置示意

Fig. 2　Equipment for anaerobic digestion

1-5，其 TS 为(3.42 ± 0.01)%，VS/TS 为(85.81 ± 0.12)%. 按 2.2 节中的试验方案进行厌氧消化试验. 所得结果与表 1 中未热水解污泥 1-5 进行对比.

2　结果与讨论

2.1　泥龄对污泥厌氧消化性能的影响

污泥 1-1 ~ 1-5 在厌氧产甲烷试验中每添加 1 g VS 的累积产甲烷量如图 3 所示，其产甲烷量与 VS 降解率如表 2 所示.

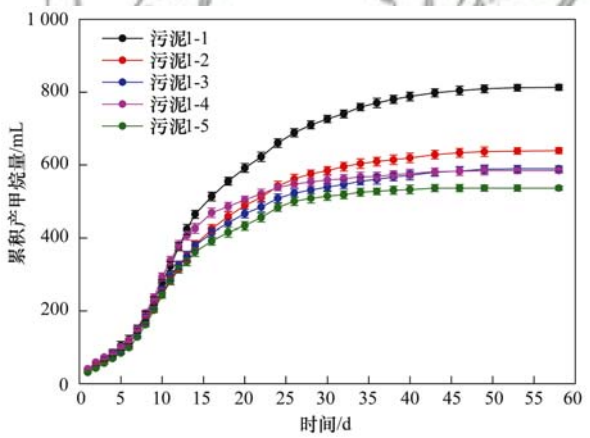


图 3　不同泥龄污泥累积厌氧产甲烷量

Fig. 3　Methane production of sludge with different sludge ages

表 2　不同泥龄污泥的产甲烷量与 VS 降解率

Table 2　Methane production and VS reduction of sludge with different sludge ages

分组	基质	泥龄/d	每添加 1 g VS 的累积产甲烷量/mL·g^{-1}	VS 降解率/%
1	污泥 2-1	5	406.5 ± 3.1	73.5 ± 0.5
2	污泥 2-2	10	314.6 ± 2.6	63.9 ± 0.3
3	污泥 2-3	20	287.3 ± 2.9	59.4 ± 0.3
4	污泥 2-4	30	282.1 ± 2.7	59.6 ± 0.5
5	污泥 2-5	40	265.3 ± 2.4	54.7 ± 0.4

由图 3 和表 2 可知，随着泥龄从 5 d 增加到 40 d，每添加 1 g VS 的累积产甲烷量降低了 34.7%［由(406.5 ± 3.1) mL·g^{-1} 逐渐降低至(265.3 ± 2.4) mL·g^{-1}］，VS 降解率降低了 25.6%［由(73.5 ± 0.5)%逐渐降低至(54.7 ± 0.4)%)］. 可见，污泥厌氧产甲烷性能随着污泥龄的增长呈下降趋势，且从 5 d 增加到 10 d 时，污泥厌氧产甲烷性能下降尤为明显. 这一结果与 Bolzonella 等[8] 的研究趋势基本一致，即泥龄为 5 d 时厌氧消化性能最强，泥龄从 5 d增加到 20 d 时厌氧消化性能显著下降(呈指数型)，但从 20 d 增加到 40 d 时下降趋势趋于平缓. 然而，在 Bolzonella 等[8] 的研究中，其数据来自于其调研所得的小试、中试或大型污泥处理系统的数据，泥质之间有着较大的差异，产气与降解率的波动较大，本研究在同一进水条件下，通过控制相应条件得到的污泥更适合作为研究基质，更能合理地反映泥龄对污泥厌氧消化性能的影响.

2.2　进水中微细砂对污泥厌氧消化性能的影响

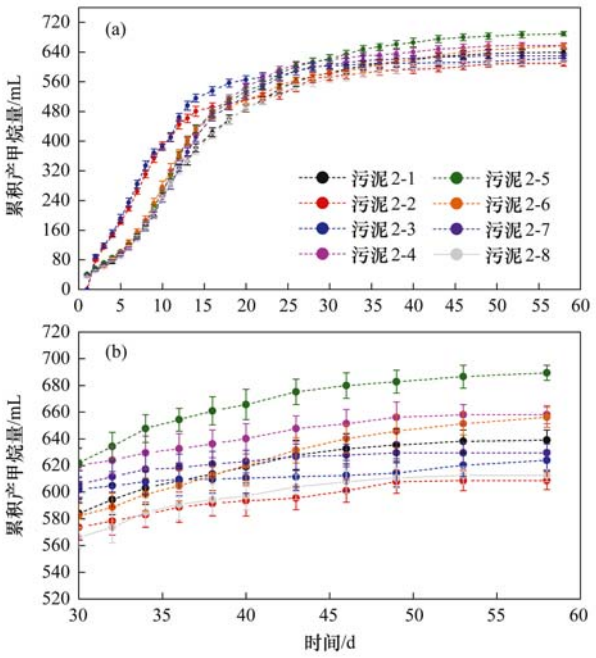
污泥 2-1 ~ 2-8 在厌氧产甲烷试验中每添加 1 g VS 的累积产甲烷量如图 4 所示，产甲烷量与 VS 降解率如表 3 所示.

如图 4 和表 3 所示，随着污泥的 VS/TS 值由(90.46 ± 0.21)% 下降到(33.36 ± 0.17)%，每添加 1g VS 的累积产甲烷量和 VS 降解率由(316.2 ± 2.5) mL·g^{-1}和(64.2 ± 0.4)% 开始呈现出先上升后下降的趋势，且在 VS/TS 值为(56.03 ± 0.21)% 时达到峰值(339.1 ± 2.4) mL·g^{-1} (增加了 7.2%) 和(69.4 ± 0.8)% (增加了 8.1%). 即进水中一定范围内的微细砂添加量会使得污泥 60 d 内的产甲烷量和 VS 降解率提高，而随着 VS/TS 值从 56.03% ± 0.21% (峰值) 下降到 33.36% ± 0.17%，污泥的累积产甲烷量和 VS 最大降解率开始下降，但较无砂的 2-1 污泥并未明显减少，即当进水中的微细砂添加量超过一定范围时，这种强化作用会减弱但不会产生明显的抑制作用.

表 3 不同含砂量污泥的产甲烷量与 VS 降解率

Table 3 Methane production and VS reduction of sludge with differed silica content

分组	基质	VS/TS/%	每添加 1 g VS 的累积产甲烷量 /mL·g^{-1}	VS 最大降解率 /%
1	污泥 2-1(无砂)	90.46 ±0.21	316.2 ±2.5	64.2 ±0.4
2	污泥 2-2	79.98 ±0.14	317.4 ±2.7	64.5 ±0.5
3	污泥 2-3	69.54 ±0.17	320.2 ±3.3	65.5 ±0.6
4	污泥 2-4	64.71 ±0.15	329.4 ±2.4	66.0 ±0.7
5	污泥 2-5	56.03 ±0.21	339.1 ±2.4	69.4 ±0.8
6	污泥 2-6	52.35 ±0.19	325.4 ±2.7	67.1 ±0.7
7	污泥 2-7	44.70 ±0.23	310.2 ±3.1	64.2 ±0.7
8	污泥 2-8	33.36 ±0.17	309.5 ±3.0	64.0 ±0.5



(b)为(a)的局部放大

图 4 不同含砂量污泥的累积产甲烷量

Fig. 4 Methane production of sludge with different silica content

通过本试验结果可以发现,尽管微细砂含量的不同是国内外污泥性质的主要差异之一,但由于其为惰性物质,在本质上并不会对污泥的厌氧消化产生明显的抑制作用. 之前的研究中有发现添加微细砂抑制了污泥的厌氧消化性能,但大多未考虑对泥龄和其他因素的控制或直接采用污水厂剩余污泥(泥龄及其他因素不清晰)进行研究[11,27]. 通过 3.1 节的试验结果可知泥龄的改变会对污泥的厌氧消化性能带来显著的影响,这会对本研究结果造成一定程度的干扰.

2.3 金属离子对污泥厌氧消化性能的影响

污泥 3-1 ~3-10 在厌氧产甲烷试验过程中每添加 1 g VS 的累积产甲烷量如图 5 所示,其产甲烷量与 VS 降解率如表 4 所示.

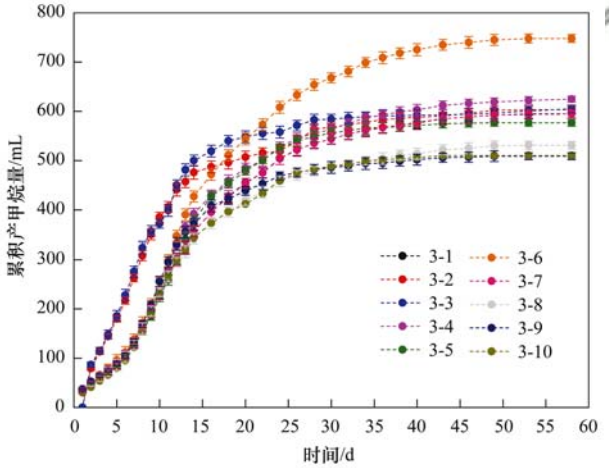


图 5 不同金属离子含量污泥的累积产甲烷量

Fig. 5 Methane production of sludge with different metal ions content

表 4 不同金属离子含量污泥的产甲烷量与 VS 降解率

Table 4 Methane production and VS reduction of sludge with different metal iron content

分组	基质	SRT/d	VS/TS/%	每添加 1 g VS 的累积产甲烷量 /mL·g^{-1}	VS 降解率/%	VS 降解率增量[1)] /%
1	污泥 3-1	10	90.36 ±0.14	297.6 ±2.8	60.3 ±0.3	−6.0
2	污泥 3-2	10	79.76 ±0.19	301.5 ±1.5	61.3 ±0.2	−5.0
3	污泥 3-3	10	69.21 ±0.21	300.8 ±2.9	61.6 ±0.4	−6.0
4	污泥 3-4	10	56.45 ±0.13	312.0 ±3.1	63.8 ±0.4	−8.0
5	污泥 3-5	10	32.96 ±0.19	288.5 ±2.6	59.7 ±0.3	−7.0
6	污泥 3-6	5	90.42 ±0.21	373.5 ±3.6	67.6 ±0.9	−8.0
7	污泥 3-7	10	88.81 ±0.12	297.8 ±2.9	60.8 ±0.6	−5.3
8	污泥 3-8	20	89.67 ±0.14	264.0 ±3.5	54.1 ±0.7	−8.9
9	污泥 3-9	30	89.52 ±0.23	253.8 ±2.1	53.6 ±0.3	−10.0
10	污泥 3-10	40	85.01 ±0.21	235.9 ±2.7	48.7 ±0.5	−11.0

1) VS 降解率增量 = $\frac{\text{添加金属离子后污泥的 VS 降解率}}{\text{未添加金属离子时的 VS 降解率}} \times 100\% - 100\%$,负值表示金属离子造成 VS 降解率下降

如图 5 和表 4 所示，进水中金属离子的添加对不同 VS/TS 值和不同泥龄的污泥的厌氧消化性能都有着明显的抑制作用，这说明金属离子对污泥厌氧消化性能的抑制作用具有普遍性，在本研究所涉及到的条件下抑制程度在 5.0% ~ 11.0% 之间. 目前，金属离子对污泥厌氧转化的影响机制已有一定数量的明确报道，即污泥中有机结合态金属能够增加污泥关键有机质溶出的能量势垒，与酶分子争夺污泥颗粒的表面结合位点，从而限制其厌氧消化性能[13].

此外，在本研究中污泥金属离子含量较高，与实际剩余污泥类似的条件下，金属离子对污泥 VS 降解率的抑制程度随着污泥 VS/TS 值的变化并未发生明显波动，在 5.0% ~ 8.0% 之间；而泥龄为 20 ~ 40 d(8 ~ 10 组)时，金属离子对污泥 VS 降解率的抑制程度却显著高于泥龄为 5 ~ 10 d (1 ~ 7 组)时($P < 0.05$). 这可能是由于泥龄延长后，污泥中的胞外蛋白质的结构变得更稳定，内部氢键作用力变得更强，这一变化会对金属离子与有机质之间的桥联作用有进一步的强化[13].

2.4　3 种因素对污泥厌氧产甲烷性能影响的比较

基于以上研究结果，对污泥龄、微细砂和金属离子这 3 个影响因素对污泥厌氧消化性能影响程度进行了系统性的比较分析. 对于微细砂的影响程度，将添加不同含量微细砂的污泥样本作为试验组，未添加微细砂的样本作为对照组；对于泥龄的影响程度，将泥龄为 10、20、30 和 40 d 的样本作为试验组，泥龄为 5 d 的污泥样本作为对照组；对于金属离子的影响程度，将添加金属离子的污泥样本作为试验组，未添加金属离子的污泥样本作为对照组. 3 种因素的影响程度均以 VS 降解率的变化率($r_{试验组}/r_{对照组}$)表征. 对比分析的结果用箱型图表征如图 6 所示.

由图 6 可知，微细砂对 VS 降解率的影响基本是积极的，VS/TS 值由(90.36 ± 0.14)% 逐渐降至(32.96 ± 0.19)% 过程中，VS 降解率的变化率在 1.0 ~ 1.08 之间；金属离子对 VS 降解率的影响是消极的，进水中的较高浓度的金属离子对污泥后续厌氧消化性能的影响与污泥的 VS/TS 值和泥龄没有显著的相关性($P > 0.05$)，当泥质发生较大变化[VS/TS 值在(90.36 ± 0.14)% ~ (32.96 ± 0.19)% 之间变化，泥龄在 5 ~ 40 d 之间变化]时，VS 降解率的变化率在 0.89 ~ 0.95 之间(抑制率为 5.0% ~ 11.0%)；泥龄对 VS 降解率的影响也是消极的，泥龄从 5 d 增加到 40 d，VS 降解率的变化率在 0.87 ~ 0.75 之间(抑制率达 13.0% ~ 26%).

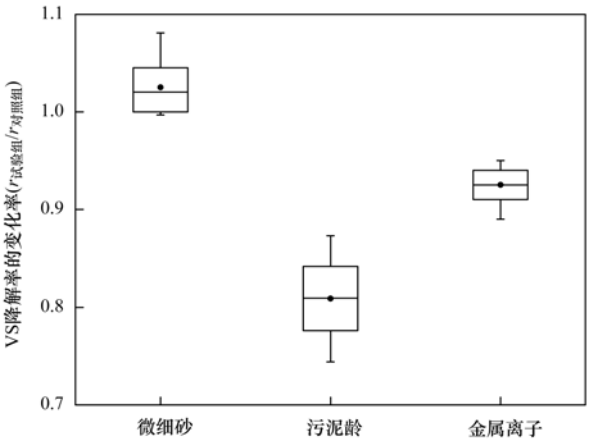


图 6　微细砂、泥龄和金属离子对污泥 VS 降解率影响的对比

Fig. 6　Comparison of the effects of silica particles, sludge age, and metal ions on the VS reduction of sludge during AD

因此，在 3 个因素中，泥龄和金属离子被鉴定为两个主要的抑制因素，且泥龄的抑制程度显著高于金属离子($P < 0.05$)；而随着泥龄的增加，金属离子的抑制作用呈进一步增强的趋势. 综上，总结得出长泥龄为限制污泥厌氧产甲烷性能的最主要因素.

2.5　热水解对长泥龄模型污泥厌氧消化性能的改善作用

污泥龄是抑制产甲烷性能的最主要因素，因而针对长泥龄污泥，采用热水解预处理手段研究其在改善污泥厌氧产甲烷性能方面的作用.

热水解前后长泥龄模型污泥厌氧消化试验中的累积产甲烷量如图 7 所示. 结果显示，经热水解预处理后，每添加 1 g VS 的累积产甲烷量由(265.3 ± 2.4) $mL \cdot g^{-1}$ 提升至(367.3 ± 2.6) $mL \cdot g^{-1}$，VS 降解率由(54.7 ± 0.4)% 提升至(70.6 ± 1.1)%. 即经强化后长泥龄(40 d)污泥的厌氧产甲烷性能接近泥龄为 5 d 时的厌氧产甲烷性能. 由此推断热水解具有突破长泥龄所致的污泥厌氧产甲烷瓶颈的潜力.

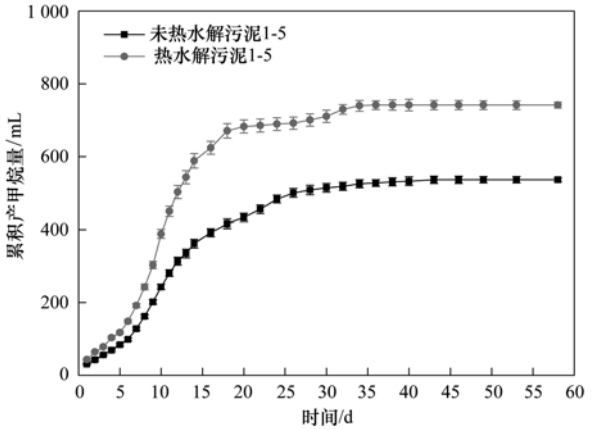


图 7　热水解前后两组污泥累积厌氧产甲烷量对比

Fig. 7　Methane production of sludges 1-5 with and without thermal hydrolysis

3 结论

本文研究了泥龄、微细砂和金属离子这 3 类典型国内外泥质差异性因素对剩余污泥厌氧产甲烷性能的影响. 结果表明,微细砂对 VS 降解率的消极影响并不明显,泥龄和金属离子是主要的抑制因素,通过对影响程度的系统性量化比较发现,长泥龄为限制污泥厌氧产甲烷性能的最主要因素,即对污水处理过程中较短泥龄的控制将从源头上有效改善我国剩余污泥后续的厌氧消化性能. 采用高温热水解(160℃, 0.55 MPa, 30 min)对长泥龄(40 d)污泥进行预处理后,其累积产甲烷量和 VS 降解率都有显著提高,接近于泥龄为 5 d 时的值,即高温热水解预处理具有突破长泥龄所致的污泥厌氧转化瓶颈的潜力,能够显著强化我国较长泥龄的剩余污泥的厌氧转化效率.

参考文献:

[1] 国务院. 国务院关于印发水污染防治行动计划的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content_9613.htm, 2015-04-16.

[2] 长江商报. 生态环境部公布 2018 年度《水污染防治行动计划》重点任务实施情[EB/OL]. http://www.changjiangtimes.com/2019/07/597847.html, 2019-07-25.

[3] 戴晓虎. 我国城镇污泥处理处置现状及思考[J]. 给水排水, 2012, **38**(2): 1-5.

[4] Appels L, Baeyens J, Degrève J, *et al*. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2008, **34**(6): 755-781.

[5] Mata-Alvarez J, Macé S, Llabrés P. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives[J]. Bioresource Technology, 2000, **74**(1): 3-16.

[6] Duan N N, Dong B, Wu B, *et al*. High-solid anaerobic digestion of sewage sludge under mesophilic conditions: feasibility study [J]. Bioresource Technology, 2012, **104**: 150-156.

[7] 陈思思, 杨殿海, 庞维海, 等. 我国剩余污泥厌氧转化的主要影响因素及影响机制研究进展[J]. 化工进展. https://kns.cnki.net/KCMS/detail/11.1954.TQ.20190925.1551.017.html, 2019-09-26.
Chen S S, Yang D H, Pang W H, *et al*. Main influencing factors and influencing mechanisms of anaerobic transformation of excess sludge in China [J]. Chemical Industry and Engineering Progress. https://kns.cnki.net/KCMS/detail/11.1954.TQ.20190925.1551.017.html, 2019-09-26.

[8] Bolzonella D, Pavan P, Battistoni P, *et al*. Mesophilic anaerobic digestion of waste activated sludge: influence of the solid retention time in the wastewater treatment process[J]. Process Biochemistry, 2005, **40**(3-4): 1453-1460.

[9] Xu Y, Lu Y Q, Dai X H, *et al*. Spatial configuration of extracellular organic substances responsible for the biogas conversion of sewage sludge[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, **6**(7): 8308-8316.

[10] 吉芳英, 何小玲, 何莉, 等. 细微泥沙对污水生化处理系统的影响及其归趋特性[J]. 环境工程学报, 2014, **8**(3): 801-806.
Ji F Y, He X L, He L, *et al*. Effect of fine sediment on wastewater treatment biochemical system and its fate characteristics [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, **8**(3): 801-806.

[11] Dai X H, Xu Y, Dong B. Effect of the Micron-Sized Silica Particles (MSSP) on biogas conversion of sewage sludge[J]. Water Research, 2017, **115**: 220-228.

[12] Suanon F, Sun Q, Mama D, *et al*. Effect of nanoscale zero-valent iron and magnetite (Fe_3O_4) on the fate of metals during anaerobic digestion of sludge[J]. Water Research, 2016, **88**: 897-903.

[13] Xu Y, Lu Y Q, Dai X H, *et al*. The influence of organic-binding metals on the biogas conversion of sewage sludge[J]. Water Research, 2017, **126**: 329-341.

[14] Devlin D C, Esteves S R R, Dinsdale R M, *et al*. The effect of acid pretreatment on the anaerobic digestion and dewatering of waste activated sludge[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(5): 4076-4082.

[15] Cai M L, Liu J X, Wei Y S. Enhanced biohydrogen production from sewage sludge with alkaline pretreatment[J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(11): 3195-3202.

[16] 牛雨彤, 刘吉宝, 马爽, 等. 零价铁和微波预处理组合强化污泥厌氧消化[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1431-1438.
Niu Y T, Liu J B, Ma S, *et al*. Enhancement for Anaerobic digestion of waste activated sludge based on microwave pretreatment combined with zero valent iron[J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1431-1438.

[17] Tiehm A, Nickel K, Zellhorn M, *et al*. Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization[J]. Water Research, 2001, **35**(8): 2003-2009.

[18] Parawira W. Enzyme research and applications in biotechnological intensification of biogas production[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2012, **32**(2): 172-186.

[19] Bougrier C, Delgenès J P, Carrère H. Impacts of thermal pre-treatments on the semi-continuous anaerobic digestion of waste activated sludge[J]. Biochemical Engineering Journal, 2007, **34**(1): 20-27.

[20] Wilson C A, Novak J T. Hydrolysis of macromolecular components of primary and secondary wastewater sludge by thermal hydrolytic pretreatment[J]. Water Research, 2009, **43**(18): 4489-4498.

[21] Chen S S, Li N, Dong B, *et al*. New insights into the enhanced performance of high solid anaerobic digestion with dewatered sludge by thermal hydrolysis: organic matter degradation and methanogenic pathways [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, **342**: 1-9.

[22] Donoso-Bravo A, Pérez-Elvira S, Aymerich E, *et al*. Assessment of the influence of thermal pre-treatment time on the macromolecular composition and anaerobic biodegradability of sewage sludge[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(2): 660-666.

[23] 李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 等. 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[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 3270-3275.
Li H L, Pei Y M, Li S, *et al*. Fate of antibiotic resistance genes and virulence genes in enterococci during anaerobic digestion process of thermal hydrolyzed sludge [J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 3270-3275.

[24] Pilli S, Yan S, Tyagi R D, *et al*. Thermal pretreatment of sewage sludge to enhance anaerobic digestion: a review[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2015, **45**(6): 669-702.

[25] Carrère H, Bougrier C, Castets D, *et al*. Impact of initial

biodegradability on sludge anaerobic digestion enhancement by thermal pretreatment[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2008, **43**(13): 1551-1555.

[26] Bougrier C, Delgenès J P, Carrère H. Effects of thermal treatments on five different waste activated sludge samples solubilisation, physical properties and anaerobic digestion[J]. Chemical Engineering Journal, 2008, **139**(2): 236-244.

[27] Duan N N, Dai X H, Dong B, *et al*. Anaerobic digestion of sludge differing in inorganic solids content: performance comparison and the effect of inorganic suspended solids content on degradation[J]. Water Science & Technology, 2016, **74**(9): 2152-2161.

《环境科学》连续 8 次荣获“中国最具国际影响力学术期刊”称号

2019 年 10 月 28 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2019 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2019 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 8 次获此殊荣. 评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5%(Top5%)的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 41 No. 7

Jul. 15, 2020

CONTENTS

Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China ····· TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, *et al.* (2981)

Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change ····· YANG Wei, JIANG Xiao-li (2995)

Evaluation of the Reduction in $PM_{2.5}$ Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou ····· WANG Shen-bo, LOU Ya-min, XU Yi-fei, *et al.* (3004)

Pollution Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Chengdu in Summer and Winter ····· FENG Yan-peng, ZHANG Jun-ke, HUANG Xiao-juan, *et al.* (3012)

Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province ····· LEI Yu, ZHANG Xiao-ling, KANG Ping, *et al.* (3021)

Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan ····· XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, HAN Li, *et al.* (3031)

Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu ····· ZHOU Zi-hang, DENG Ye, ZHOU Xiao-ling, *et al.* (3042)

Emission Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds from Typical Factories in Zhengzhou ····· QI Yi-jin, NI Jing-wei, ZHAO Dong-xu, *et al.* (3056)

Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan ····· NIU Yue-yuan, LIU Zhuo-cheng, LI Ru-mei, *et al.* (3066)

Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode ····· JING Sheng-ao, YE Xu-hong, GAO Ya-qin, *et al.* (3076)

Pollution Characteristics and Sensitivity of Surface Ozone in a Typical Heavy-Industry City of the North China Plain in Summer ····· OU Sheng-ju, WEI Wei, WANG Xiao-qi, *et al.* (3085)

Source Apportionment of Atmospheric Ammonia: Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language ····· GU Meng-na, PAN Yue-peng, HE Yue-xin, *et al.* (3095)

Distribution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Mercury Speciation in Suzhou ····· LU Ren-jie, WU Ye-zheng, ZHANG Xiao-jie, *et al.* (3102)

Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode ····· XIE Yan, LIAO Song-di, ZHU Man-ni, *et al.* (3112)

Comparative Analysis of NO_x Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process ····· LI Hui, ZHU Fa-hua, SUN Xue-li, *et al.* (3121)

Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City ····· SONG Yi, LU Xin-wei, ZHOU Xiao, *et al.* (3130)

Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter ····· WEI Wen-jun, WANG Bing, NIU Xiang (3136)

Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain ····· ZHAO Ming-hua, LU Yan-wei, Rachana Heng, *et al.* (3148)

Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin ····· TIAN Yong-zhu, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, *et al.* (3157)

Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin ····· QI Ran, XU Fei-fei, YANG Fan, *et al.* (3165)

Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohe Estuary and the Related Influencing Factors ····· QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, *et al.* (3175)

Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake ····· WANG Shuo-yue, GAO Yang, LU Yao, *et al.* (3186)

Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed ····· WANG Lei, WANG Wen-dong, LIU Dong, *et al.* (3194)

Concentrations of Typical Perfluoroalkyl Acids and Contributions of Their Precursors in the Water of the Le'an River in China ····· ZHANG Hui, WANG Shi-liang, YU Yang (3204)

Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang ····· LI Zheng, GAO Chun-mei, YANG Jin-long, *et al.* (3212)

Profiles and Risk of Antibiotic Resistance Genes in Domestic Wells in the Maozhou River Basin ····· WU Dai-ling, ZOU Hai-yan, HE Lu-xi, *et al.* (3222)

Release Mechanisms of Iron and Manganese from Sediments in Jinpen Reservoir ····· LU Lin-chao, HUANG Ting-lin, LI Nan, *et al.* (3231)

Characterization of Microplastic Pollution of Sediments from Urban Lakes ····· WANG Xuan, NIU Si-ping, SONG Xiao-long, *et al.* (3240)

Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet ····· LIU Xiao-dan, HUANG Yi, WANG Yong-hua, *et al.* (3249)

Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater ····· WANG Na, ZHAO Wei-hong, MIAO Hui (3257)

Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River ····· WEN Jia-qi, WANG Hao-ran, CHEN Yong-can, *et al.* (3266)

Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo ····· XU Yu-jie, GONG Yue-min, BI Jun-peng, *et al.* (3275)

Water Quality and Bacterial Population Driving Mechanism of Algae Vertical Succession in Stratified Reservoir ····· YAN Miao-miao, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, *et al.* (3285)

Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems ····· BI Wei-wei, YE Sheng, YU Jian-quan, *et al.* (3297)

Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water ····· LIU Jun-ping, CHEN Jing-ji, SONG Ya-li, *et al.* (3307)

Adsorption Characteristics and Mechanism of Cadmium in Water by Alkali and Magnetic Composite Modified Wheat Straw Biochar ····· CUI Zhi-wen, REN Yan-fang, WANG Wei, *et al.* (3315)

Enhanced Chromate (Ⅵ) Removal Characteristics and Mechanism Using Graphene Oxide Immobilized Nanoscale Zero-Valent Iron Coupled with a Weak Magnetic Field (GO-nFe^0/WMF) ····· JI Meng, BAO Jian-guo, ZHU Xiao-wei, *et al.* (3326)

Characteristics and Influencing Factors of Monothioarsenate Adsorption on Goethite ····· LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, ZHANG Jin-xian, *et al.* (3337)

Fast Start-Up ANAMMOX Operation Strategy and Flora Characteristics of a Biofilter ····· WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, *et al.* (3345)

Effects of Aeration Strategy on Denitrifying Performance of Activated Sludge Processes in Treating Low-Carbon-Source Municipal Wastewater ····· ZHANG Xin-rui, CHI Yu-lei, WANG Qian, *et al.* (3356)

Effect of Hydroxylamine on Community of ANAMMOX Sludge ····· XING Chong-yang, FAN Yu-chen, CHEN Xuan, *et al.* (3365)

Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature ····· GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, *et al.* (3373)

Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China ····· DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si, *et al.* (3384)

Relationship Between CO_2 and CH_4 Emissions in Urban Rivers and Sewage Discharging from a Municipal Drainage Network ····· LI Lei, CHEN Hao, ZHU Yi, *et al.* (3392)

Effects of Controlled-Release Urea Application on N_2O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil ····· JIANG You-jin, YUAN Jun-ji, DING Wei-xin, *et al.* (3402)

Greenhouse Gas Emissions for Typical Open-Field Vegetable Production in China ····· ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, *et al.* (3410)

Effects of Water Management on Soil Properties and Cd Behavior of Typical Paddy Soils ····· HUANG Jing, LI Xin-yang, WEN Sha, *et al.* (3418)

Effect of Mn-Modified Biochar on the Characteristics of Aggregate Structure and the Content of Cd in Weakly Alkaline Cd-Contaminated Soil ····· SUN Tong, FU Yu-tong, LI Ke, *et al.* (3426)

Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai ····· CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu, *et al.* (3434)

Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings ····· YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, *et al.* (3441)