

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.3
第40卷 第3期

目次

2014~2017北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估	尹晓梅, 李梓铭, 熊亚军, 乔林, 邱雨露, 孙兆彬, 寇星霞 (1011)
利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对 APEC 期间北京空气质量的影响	李颖若, 汪君霞, 韩婷婷, 王焱, 何迪, 权维俊, 马志强 (1024)
京津冀郊区站点秋冬季大气 PM _{2.5} 来源解析	王彤, 华阳, 许庆成, 王书肖 (1035)
四川省典型工业行业 PM _{2.5} 成分谱分析	冯小琼, 陈军辉, 熊文朋, 梅林德, 徐雪梅, 尹寒梅, 范武波, 姜涛, 钱骏, 叶宏 (1043)
典型物流城市 2016 年冬季 2 次污染过程 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	赵雪艳, 杨文, 王静, 刘盈盈, 白雯宇, 徐艳萍, 王歆华, 白志鹏 (1052)
沈阳市采暖期与非采暖期空气 PM _{2.5} 污染特征及来源分析	张显, 田莎莎, 刘盈盈, 赵雪艳, 余浩, 张辉, 陈莉, 王歆华 (1062)
新乡冬季 PM _{2.5} 中金属元素与水溶性离子年际变化及其来源解析	闫广轩, 雷豪杰, 张靖雯, 唐明双, 张佳羽, 曹治国, 李云蓓, 王跃思, 樊静, 李虎 (1071)
烟台市环境受体 PM _{2.5} 四季污染特征与来源解析	刘童, 王晓军, 陈倩, 温杰, 黄渤, 朱红霞, 田瑛泽, 冯银厂 (1082)
常州市冬季 PM _{2.5} 中类腐殖质昼夜特征分析	顾远, 李清, 黄爱倩, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲 (1091)
西北某电子垃圾拆解厂室内外重金属污染特征及暴露风险	曹红梅, 赵留元, 穆熙, 李尧捷, 毛潇萱, 黄韬, 马建民, 高宏 (1101)
京津冀一次污染过程的星地同步动态监测分析	邱昀, 李令军, 姜磊, 王新辉, 赵文慧, 张立坤, 鹿海峰 (1111)
中国城市 O ₃ 浓度时空变化特征及驱动因素	黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 宋永永 (1120)
基于卫星和地面观测的 2013 年以来我国臭氧时空分布及变化特征	张倩倩, 张兴赢 (1132)
舟山市臭氧污染分布特征及来源解析	王俏丽, 董敏丽, 李素静, 吴成志, 王刚, 陈必新, 李伟, 高翔, 叶荣民 (1143)
中国建筑涂料使用 VOCs 排放因子及排放清单的建立	高美平, 邵霞, 聂磊, 王海林, 安小桂 (1152)
异戊二烯和甲苯二次有机硫踪物的臭氧非均相氧化	黄亚娟, 曹罡, 朱荣淑, 欧阳峰 (1163)
兰州市农牧业源氨排放清单及其时空分布特征	栗世学, 郭文凯, 何昕, 朱玉凡, 陈强 (1172)
成都降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析	胡月, 刘国东, 孟玉川, 张文江, 夏成城 (1179)
基于 TBL 模型的闽江口围垦养虾塘水-大气界面 CO ₂ 扩散通量估算	张逸飞, 杨平, 赵光辉, 李玲, 谭立山, 全川 (1188)
渤海和北黄海有色溶解有机物 (CDOM) 的分布特征和季节变化	刘兆冰, 梁文健, 秦礼萍, 唐建辉 (1198)
思林水库荧光溶解性有机质的特征、来源及其转化动力学	劳心宇, 原杰, 刘瑜, Khan M. G. Mostofa (1209)
厦门湾海滩微塑料污染特征	刘启明, 梁海涛, 锡桂莉, 胡欣, 葛健 (1217)
高分辨率监测下的漓江省里断面生物地球化学特征分析	王奇岗, 肖琼, 赵海娟, 王健力, 郭永丽, 张清华 (1222)
鲜水河断裂带拉沁盆地断面地下水化学特征及控制因素	何锦, 张幼宽, 赵雨晴, 韩双宝, 刘元晴, 张涛 (1236)
成都市锦江表层水和沉积物中有机磷酸酯的污染特征	吴迪, 印红玲, 李世平, 王增武, 邓旭, 罗怡, 罗林 (1245)
丹江口库区表层浮游细菌群落组成与 PICRUS1 功能预测分析	张菲, 田伟, 孙峰, 陈彦, 丁传雨, 庞发虎, 姚伦广, 李玉英, 陈兆进 (1252)
蓝藻水华对太湖水柱反硝化作用的影响	刘志迎, 许海, 詹旭, 朱广伟, 秦伯强, 张运林 (1261)
基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价	苏瑶, 许育新, 安文浩, 王云龙, 何振超, 楼颖雯, 沈阿林 (1270)
生物炭添加对湿地植物菖蒲根系通气组织和根系泌氧的影响	黄磊, 梁根坤, 梁岩, 罗星, 陈玉成 (1280)
城市不同材料屋面径流的污染负荷特性	何湖滨, 陈诚, 林育青, 严晗璐, 董建玮, 陈求稳 (1287)
BiOCl-(NH ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ 复合光催化剂制备及其光催化降解污染物机制	张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (1295)
微米铁复合生物碳源对地下水中 1,2-二氯乙烷的高效去除	吴乃瑾, 宋云, 魏文侠, 王海见, 孙仲平 (1302)
鸟粪石天然沸石复合材料对水中铅离子的去除	邓曼君, 王学江, 成雪君, 景焕平, 赵建夫 (1310)
Ca/Mg 负载改性沼渣生物炭对水中磷的吸附特性	易蔓, 李婷婷, 李海红, 黄巧, 杨金娥, 陈玉成, 杨志敏 (1318)
两种生物炭的制备及其对水溶液中四环素去除的影响因素	程扬, 沈启斌, 刘子丹, 杨小莹, 张太平, 廖志钟 (1328)
静止和水动力扰动状态下铅改性沸石添加对河道底泥磷迁移转化的影响	俞阳, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 吴小龙, 王艳, 赵钰颖, 林莹, 刘鹏茜 (1337)
4 种磺胺类药物及乙酰化代谢物在污水处理厂的去除及机制	王大鹏, 张烟, 颜昌宙 (1347)
以膜分离为主的物化法对城市污水中污染因子的去除特性分析	徐婷, 李勇, 朱怡嘉, 薛梦娜, 汤同欢 (1353)
进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响	李冬, 曹美忠, 郭跃利, 梅宁, 李帅, 张杰 (1360)
除磷亚硝化颗粒工艺启动及性能恢复	李海玲, 李冬, 张杰, 刘博 (1367)
CAST 工艺高温短程硝化的实现及其除磷性能	马娟, 杨蕊春, 俞小军, 周猛, 陈永志 (1375)
不同曝气量 and 好氧时间下 SPNDPR 系统处理低 C/N 城市污水的脱氮除磷性能	袁梦飞, 于德爽, 巩秀珍, 王晓霞, 陈光辉, 杜世明, 甄建国 (1382)
ABR 除碳-亚硝化耦合厌氧氨氧化处理城市污水	李田, 曹家炜, 谢凤莲, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (1390)
室温低氨氮基质单级自养脱氮颗粒污泥启动效能与污泥特性	谢璐琳, 王建芳, 钱飞跃, 张泽宇, 沈耀良, 齐泽坤 (1396)
不同种泥的厌氧氨氧化反应器的启动及动力学特征	任君怡, 陈林艺, 李慧春, 秦玉洁, 曹雁, 王桐屿, 周少奇 (1405)
降温过程中生物膜 CANON 反应器的运行特征	付昆明, 廖敏华, 周厚田, 付巢, 姜娜, 仇付国, 曹秀芹 (1412)
IEM-UF 同步分离反硝化系统脱氮特性及种群结构分析	刘子奇, 张岩, 马翔山, 张博康, 曹孟京, 曹昌明 (1419)
温度对硝化杆菌 (Nitrobacter) 活性动力学影响	于雪, 孙洪伟, 李维维, 祁国平, 马娟, 陈永志, 吕心涛 (1426)
零价铁和微波预处理组合强化污泥厌氧消化	牛雨彤, 刘吉宝, 马爽, 李亚明, 解立平, 魏源送, 孟晓山 (1431)
牛粪堆肥系统环境因子对抗性基因的影响	彭磊, 王科, 谷月, 王爱杰 (1439)
环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响	张彦军, 郭胜利 (1446)
三峡库区典型林分土壤呼吸及其组分对模拟酸雨响应	李一凡, 王玉杰, 王彬, 王云琦 (1457)
三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响	王甜, 黄志霖, 曾立雄, 肖文发, 宋文梅 (1468)
长期施肥下水稻根际和非根际土壤微生物碳源利用特征	宁赵, 程爱武, 唐海明, 葛体达, 邓扬悟, 苏以荣, 陈香碧 (1475)
不同碳负荷梯度下稻田土壤有机碳矿化特征	童瑶瑶, 王季斐, 祝贞科, 邓扬悟, 陈珊, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1483)
桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征	徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 张德楠, 孙英杰, 张中峰, 周龙武, 段春燕 (1491)
缙云山 4 种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征	王富华, 吕盛, 黄容, 高明, 王子芳, 徐畅 (1504)
大气污染对居民健康影响研究进展	秦耀辰, 谢志祥, 李阳 (1512)
《环境科学》征订启事 (1042)	《环境科学》征稿简则 (1162)
信息 (1208, 1235, 1286)	

零价铁和微波预处理组合强化污泥厌氧消化

牛雨彤^{1,2}, 刘吉宝², 马爽³, 李亚明³, 解立平^{1*}, 魏源送^{2*}, 孟晓山²

(1. 天津工业大学环境科学与工程学院, 天津 300387; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 3. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100192)

摘要: 以中温(100℃)常压的微波预处理结合零价铁投加为对象, 考察了低投加量 5.19~41.51 g·kg⁻¹ (以 TS 计)、高投加量 83.35~853.46 g·kg⁻¹ (以 TS 计) 下的零价铁对微波预处理污泥厌氧消化的进一步强化作用. 结果表明, 微波预处理与零价铁组合可使污泥厌氧消化产甲烷潜势提升 17%~23%. 零价铁对微波预处理后污泥厌氧消化具有一定的促进作用, 且提升了厌氧消化初期(1~4 d)产甲烷速率, 零价铁投加量为 31.13 g·kg⁻¹ (以 TS 计) 时, 产甲烷潜势提升了 7.42%, 反应第 2 d 的产甲烷速率提高了 11.02%. 高投加量的零价铁并未表现出更好的强化效果. 零价铁促进了厌氧消化初期溶解性有机物的释放, 投加量为 31.13 g·kg⁻¹ (以 TS 计) 时, 溶解性蛋白质较单独预处理组提高 21.16%, 并且零价铁投加加快了乙酸、异丁酸、异戊酸的消耗. 零价铁的投加, 导致上清液中的磷酸根和硫酸根浓度降低, 相应地, 上清液中铁元素的浓度反而下降, 说明零价铁的形态转化后, 易与磷酸盐、硫反应形成沉淀, 这可能是铁投加作用效果不明显的重要原因.

关键词: 零价铁; 微波预处理; 剩余污泥; 厌氧消化; 产甲烷潜势

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)03-1431-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201806079

Enhancement for Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge Based on Microwave Pretreatment Combined with Zero Valent Iron

NIU Yu-tong^{1,2}, LIU Ji-bao², MA Shuang³, LI Ya-ming³, XIE Li-ping^{1*}, WEI Yuan-song^{2*}, MENG Xiao-shan²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Beijing Drainage Group Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: In this study, we investigated the enhanced performance after addition of zero valent iron (ZVI) under different dosages (low range of 5.19–41.51 g·kg⁻¹ TS and high range of 83.35–853.46 g·kg⁻¹ TS), combined with microwave (MW) pretreatment for anaerobic digestion (AD) of waste activated sludge (WAS). The results demonstrated that the methane production potential of WAS could be increased by 17%–24% with the addition of ZVI combined with MW pretreatment, and especially the methane production rate was enhanced in the initial days (1–4d). ZVI addition could further improve the enhanced performance of AD under MW pretreatment. Compared with the performance of AD with only MW pretreatment, the methane production potential was increased by 7.42%, and methane production flow rate at 2 d was increased by 11.02% with 31.13 g·kg⁻¹ TS of ZVI addition. However, the higher dosage of added ZVI did not show further enhanced performance. It was concluded that ZVI addition promoted the release of dissolved organics at the initial stage of AD. For instance, soluble proteins were increased by 21.16% with the ZVI addition of 31.13 g·kg⁻¹ TS compared with pretreated WAS without ZVI addition. Furthermore, ZVI addition accelerated the degradation of acetic acid, iso-butyric acid, and iso-valeric acid, and led to a significant reduction of orthophosphate and sulfate in the supernatant of the digested sludge. The concentration of iron in the supernatant decreased even with a high dosage of ZVI. Thus, the formation of precipitate that occurred due to reactions between iron and orthophosphate or sulfate, may be the main reason for the lack of enhanced performance even with high dosage of ZVI addition.

Key words: zero valent iron; microwave pretreatment; waste activated sludge; anaerobic digestion; biochemical methane potential (BMP)

厌氧消化是实现污泥减量化、稳定化、资源化的关键技术之一。然而, 剩余污泥由于有机物束缚于胞外聚合物以及微生物细胞中, 其在厌氧消化初期不易被微生物利用, 水解成为污泥厌氧消化的限速步骤^[1,2]。因此, 通过预处理的手段使剩余污泥中的有机物溶解释放, 多年来一直是该领域的重要研究内容。但是, 高温热水解预处理过程中的高温(160~170℃)、高压(0.5~0.6 MPa)条件, 一方面需要较高的能耗, 同时, 也容易产生大量的难降解

有机物, 这为后续的厌氧消化污泥脱水滤液的处理处置带来一定的困难。而低温(100℃)常压的微波(microwave, MW)预处理结合酸、碱、H₂O₂等化学

收稿日期: 2018-06-08; 修订日期: 2018-09-19

基金项目: 天津市自然科学基金重点项目(18JCZDJC10070); 中国博士后科学基金会与中国科学院联合资助优秀博士后项目(2017LH040); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51808539); 北京市自然科学基金项目(8182053)

作者简介: 牛雨彤(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污泥减量化与资源化, E-mail: 2438536319@qq.com

* 通信作者, E-mail: yswei@cees.ac.cn; xielp991@tjpu.edu.cn

试剂的投加^[3-5], 能够有效地使污泥中有机物释放, 强化污泥厌氧消化, 但是, 与高温热水解相比, 其强化作用效果有待进一步提升。

零价铁在环境领域一直备受关注, 其在处理难降解污染物^[6,7]、土壤修复^[8], 消减抗生素^[9]等方面应用广泛。近年来, 大量研究报道了零价铁 (zero valent iron, ZVI) 投加对污泥厌氧消化的影响^[10-12]。Zhang 等^[13]研究零价铁 (200 μm) 对污泥 (VSS = 57.3 g·L⁻¹) 厌氧消化影响, 当零价铁投加量为 10 g·L⁻¹ 时, 污泥甲烷产量提高 14.46%。Feng 等^[14]的研究表明, 投加 20 g·L⁻¹ 零价铁时, 可使剩余污泥产甲烷量提高 43.5%。而郭广寨等^[15]发现投加 0.1% 的零价铁 (800 目) 反而使污泥累积产甲烷量降低 12.5%。上述研究结果表明, 不同研究中报道的零价铁投加量以及对厌氧消化的影响仍存在较大差异。与此同时, 零价铁与预处理工艺组合能否进一步提升厌氧消化的强化效果, 则鲜有报道。

综上, 低温常压的微波预处理虽对污泥厌氧消化具有一定的强化作用, 但效果仍需进一步提升, 在不提高处理温度、处理时长的情况下, 结合适量的零价铁投加, 有可能进一步提升微波预处理对污泥厌氧消化的强化效果。为此, 本研究目的是在低温 (100℃) 常压微波预处理的基础上, 考察零价铁投加对微波预处理污泥厌氧消化的强化作用, 结合厌氧消化有机物分解特征、零价铁的迁移转化, 探讨其对厌氧消化影响的机制, 以期为开发低耗高效的

的强化污泥厌氧消化技术提供支撑。

1 材料与方法

1.1 实验材料

为了考察不同零价铁投加量对厌氧消化强化作用差异, 分别开展了两批次的产甲烷潜势 (biochemical methane potential, BMP) 测试实验。剩余污泥先后取自北京某污水处理厂浓缩池出泥, 厌氧消化接种污泥取自北京某污水处理厂的中温厌氧消化污泥, 4℃ 下静置沉淀 24 h 并过 18 目筛。剩余污泥、厌氧消化污泥的基本特征如表 1 所示。实验所用微米级零价铁为 Aladdin 公司生产的还原铁粉 (AR, 100 目)。

1.2 实验方法

取 300 mL 静置后的剩余污泥进行微波-碱预处理, 通过 5 mol·L⁻¹ NaOH 溶液将 pH 调节至 11, 600 W 功率下微波 (上海新仪微波化学科技有限公司, MAS-II) 加热, 经过 7 min 左右, 温度达到 100℃, 立即停止加热。厌氧消化实验前, 通过 5 mol·L⁻¹ HCl 溶液将污泥 pH 调节至 7 左右。微波预处理后污泥基本特征如表 1 所示。

产甲烷潜势分析 (BMP) 采用全自动甲烷潜势测试系统 (AMPTS II, Bioprocess Control), 由 15 个反应瓶 (体积 600 mL) 构成, 有效体积为 400 mL, 反应前通氮气 2 min, 接种污泥与剩余污泥的接种比为 1.05。所有实验组为 2 个平行。

表 1 原污泥、预处理污泥、接种污泥基本特征

Table 1 Characteristics of raw sludge, pretreated sludge and inoculum sludge

指标	零价铁低投加量下的 BMP 实验			零价铁高投加量下的 BMP 实验		
	原污泥	预处理污泥	接种污泥	原污泥	预处理污泥	接种污泥
TS/%	3.38 ± 0.02	3.74 ± 0.01	4.54 ± 0.02	3.54 ± 0.00	4.42 ± 0.00	5.36 ± 0.00
VS/%	2.23 ± 0.02	2.29 ± 0.01	2.54 ± 0.01	2.12 ± 0.00	2.51 ± 0.00	2.96 ± 0.00
VS/TS	0.66	0.61	0.56	0.60	0.57	0.55
pH	7.09 ± 0.23	10.90 ± 0.17	8.42 ± 0.45	7.21 ± 0.18	11.01 ± 0.21	9.03 ± 0.37
碱度/mg·L ⁻¹	432.5 ± 9.6	887.5 ± 49.0	5400 ± 74.46	233 ± 21.92	439.50 ± 54.45	6987.50 ± 17.68
SCOD/mg·L ⁻¹	580 ± 7.07	7105 ± 77.78	3790 ± 28.28	175 ± 28.28	7090 ± 183.85	3635 ± 63.64
氨氮/mg·L ⁻¹	93 ± 4.24	28 ± 2.83	1369 ± 97.58	59 ± 8.49	15 ± 1.41	840 ± 50.91
蛋白质/mg·L ⁻¹	80.36 ± 2.94	2729.44 ± 36.60	1142.57 ± 74.87	27.18 ± 1.47	2960.08 ± 119.64	1075.81 ± 62.81
多糖/mg·L ⁻¹	28.02 ± 1.00	799.52 ± 22.87	427.98 ± 30.76	52.24 ± 4.21	946.85 ± 54.57	583.44 ± 0.00

1.3 实验设计

为全面考察零价铁投加对厌氧消化的强化作用, 本实验设计了低/高投加量的零价铁。零价铁低投加量 (以 TS 计) 为 5.19、10.38、20.76、31.13 和 41.51 g·kg⁻¹; 高投加量 (以 TS 计) 为 85.35、256.04、426.73、597.41 和 853.46 g·kg⁻¹。

1.4 分析方法

TS、VS 通过重量法^[16]测定。污泥离心上清液经 0.45 μm 滤膜后测定其他理化指标。碱度通过试

剂盒 (TNT870, HACH) 测定, 溶解性 COD (SCOD) 通过试剂盒 (2125915, HACH) 测定, 正磷酸盐采用钼锑抗分光光度法测得, 溶解性蛋白质和多糖分别用修正的 Lowry^[17] 和 Dubious^[18] 分光光度法测定。挥发性脂肪酸 (volatile fatty acids, VFAs) 通过气相色谱法测定, 色谱仪 (Shimazu, 2014) 配备 FID 检测器、DB-FFAP 毛细色谱柱 (30 m × 0.32 μm × 0.25 μm), 进样口温度为 220℃, 检测器温度为 250℃。硫酸根采用离子色谱 (ICS-1000, 美国戴安) 测定。

污泥及上清液经 Mars6 微波消解仪(美国 CEM 公司)消解后,分别通过电感耦合等离子体光谱仪(ICP-OES, OPTIMA 8300, 美国珀金埃尔默)和电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, 7500a, 美国安捷伦)测定铁元素含量. Gompertz 拟合方程^[19]为:

$$P_{\text{CH}_4}(t) = P \cdot \exp[-\exp(R_m \cdot e/P(\lambda - t) + 1)] \quad (1)$$

式中, P 为最大产甲烷潜势 ($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 以 VS 计), t 为反应时间 (d), R_m 为最大产甲烷速率 [$\text{mL} \cdot (\text{d} \cdot \text{g})^{-1}$, 以 VS 计], λ 为厌氧消化迟滞时间 (d), e 取 2.718 3.

2 结果与讨论

2.1 厌氧消化的强化效果

如图 1(a) 显示,与对照组相比,单独预处理组单位 VS 累积产甲烷量提高 13.87%, 而低投加量零价铁和预处理组合实验组分别提高 17.06%、16.96%、16.45%、21.29% 和 20.14%. 利用 Gompertz 方程[式(1)]对实验组累积产甲烷曲线进行拟合得到最大产甲烷潜势 P [$\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$, (以 VS 计)] 分别为 156.62、160.1、161.07、160.25、167.79 和 162.95 (对照组为 136.80), 零价铁较优投加量为 $31.13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (以 TS 计), 在预处理基础上产甲烷潜势进一步提升 7.42%. 而在高投加量[图 1(b)]下,与对照组相比,单独预处理组单位 VS 累积产甲烷量提高 17.69%, 铁高投加量和预处理组合实验组分别提升 19.60%、19.70%、23.04%、21.39% 和 14.45%. Gompertz 方程拟合 P [$\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$, (以 VS 计)] 分别为 154.79、157.26、157.96、161.8、159.93 和 150.72 (对照组为 133.87), 铁较优投加量为 $426.73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (以 TS 计), 产甲烷潜势进一步提升 5.35%. 采用 F 检验单因素方差分析(显著性水平 0.05)表明,零价铁

投加组与单独微波预处理组具有显著性差异(低投加量下, P 值为 0.000、0.321、0.005、0.022 和 0.002; 高投加量下, P 值为 0.029、0.001、0.003、0.000 和 0.070). 同时投加零价铁也会加快产甲烷速率, 如图 2 所示, 在厌氧消化的 1~4 d, 铁的加入进一步加快了产甲烷速率. 在厌氧消化的第 2 d, 低投加量下, 产甲烷速率比单独预处理组分别提高 9.95%、7.98%、2.92%、11.02% 和 5.11%. 而在高投加量下, 厌氧消化第 4 d, 产甲烷速率比单独预处理组分别提高 2.84%、6.09%、8.26%、7.81% 和 -2.31%.

本研究中,高投加量的零价铁并未对厌氧消化产生明显的强化作用,这一结果不同于以往研究中报道的零价铁对污泥厌氧消化的强化效果. 据 Hao 等^[20]的研究表明,零价铁降低 ORP 以及析氢腐蚀对产甲烷的提升作用微乎其微,其间接地推测铁的加入对厌氧消化过程中电子传递效率的促进作用,可能是提升产甲烷量的重要原因. 如图 2 所示,本研究中,零价铁的影响主要在厌氧消化的快速产甲烷阶段(1~4 d),这种影响可能同样是由于电子传递效率受到促进的结果,但是,由于污泥经过预处理后,污泥中溶解性有机物得到释放,本身加速了厌氧消化过程中微生物的代谢活性,即有机物降解过程的电子传递速率得到加快,在此情况下,零价铁的加入对厌氧消化过程的电子传递效率的影响可能有限. 而 Zhang 等^[21]的研究发现,零价铁可提高经过热处理或碱处理后剩余污泥的厌氧消化(未有接种污泥)微生物代谢活性,在零价铁投加量为 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下,产甲烷迟滞期被显著缩短,累积产甲烷量相对于对照组提升 91.5%. 因此,在未有预处理或厌氧消化微生物代谢活性较低的情况下,电子传递效率较慢,零价铁对代谢过程中电子传递效率的促进作用可能是使厌氧消化得以显著强化的重

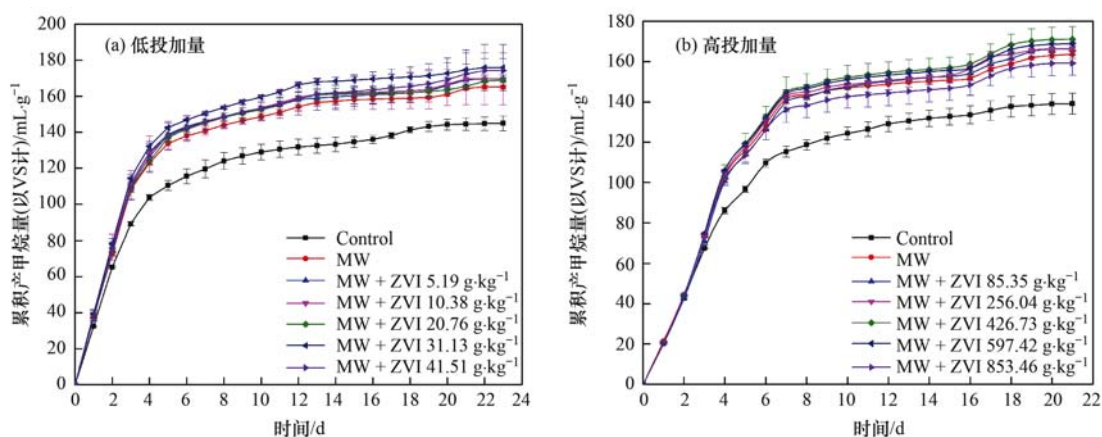


图1 零价铁低投加量和高投加量下的单位 VS 累积产甲烷量

Fig. 1 Cumulative methane production after low and high ZVI dosages

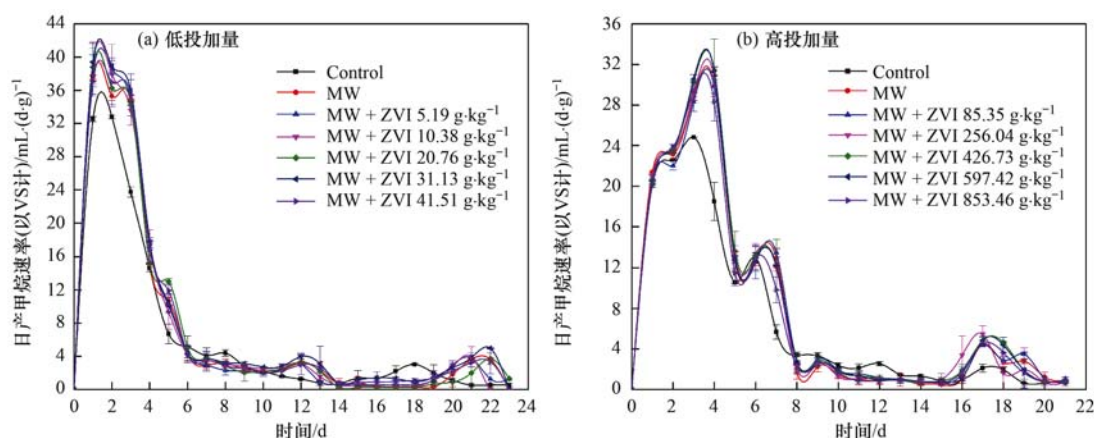


图2 零价铁低投加量和高投加量下的日产甲烷速率

Fig. 2 Daily methane production rate after low and high ZVI dosages

要原因。

2.2 有机物的变化

如图3所示,微波预处理导致污泥中有机物明显地溶解释放,而零价铁投加具有进一步促进该过程的作用。在厌氧消化初期(第1 d),在低零价铁投加量下,SCOD分别为5 535、6 035、5 950、5 665和5 735 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (单独预处理组 SCOD 为5 459 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。高投加量下 SCOD 分别为6 645、6 620、6 466、6 595和6 360 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (单独预处理组 SCOD 为6 280 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。其中,厌氧消化初期(第1 d)的溶解性蛋白质释放得到加强,溶解性多糖受到的影响则较小(图4)。低零价铁投加量下溶解性蛋白质浓度较单独预处理组分别提高了6.56%、18.86%、16.79%、21.16%和17.48%。而高投加量下,分别提高了4.71%、0.64%、4.71%、15.10%和14.24%。Zhen等^[22]的研究同样发现,铁屑(ZVSI)投加量为1 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ (以VSS计)时,水解酸化阶段(第12 d)的SCOD由对照组的178.2 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 增加到199.2 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (以VSS计),其中溶解性蛋白质的释放得到加强。

在厌氧消化的第1 d,零价铁加快了VFAs的降

解速率,在高的零价铁投加量下,随着零价铁投加量的提高,VFAs浓度降低(图5)。其中,零价铁的投加主要加速了乙酸、异丁酸、异戊酸的降解。VFAs的快速降解消耗,与零价铁对厌氧消化初期产甲烷速率的提升作用相吻合。Van Den Berg等^[23]的研究表明,铁可提高嗜乙酸产甲烷菌的相对丰度,从而加快乙酸等挥发性脂肪酸的消耗,提升产甲烷速率。

通过上述分析,零价铁对微波预处理后污泥的厌氧消化强化作用主要表现在以下2个方面:①在厌氧消化初期(1~4 d),零价铁能较为明显地提高产甲烷速率,但是,高剂量的零价铁投加,并无进一步的作用效果;②结合厌氧消化过程中有机物的分析,在厌氧消化初期,零价铁加速了溶解性有机物的释放,提升了产甲烷阶段对挥发性脂肪酸消耗速率以及甲烷的产生速率。

2.3 零价铁对正磷酸盐、硫酸盐的影响

零价铁对厌氧消化的强化作用与其自身的迁移转化可能有着密切联系,零价铁在厌氧消化过程中可能发生的物化及生物反应过程包括:①零价铁失去电子,生成 Fe^{2+} ,而 Fe^{3+} 因厌氧消化过程中氧化还原电位非常低,难以稳定存在;②产生的 Fe^{2+} 与

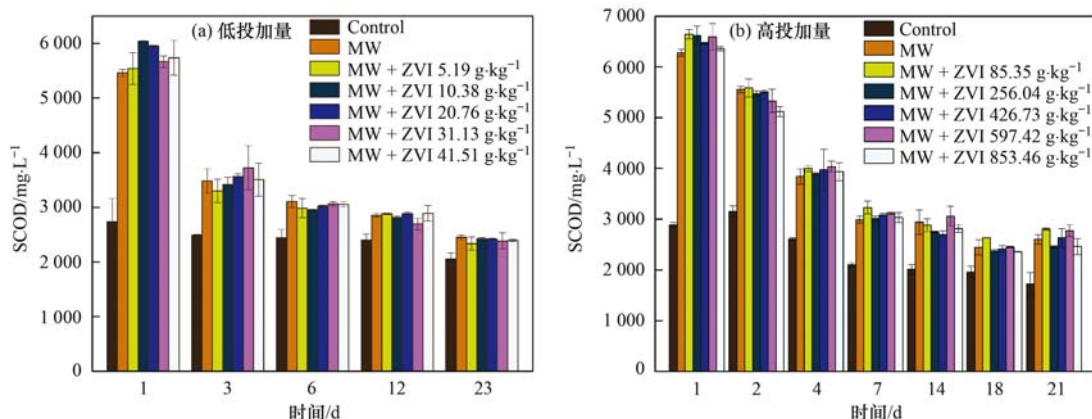


图3 零价铁低投加量和高投加量下厌氧消化过程SCOD变化

Fig. 3 Variation of SCOD after low and high ZVI dosages during anaerobic sludge digestion

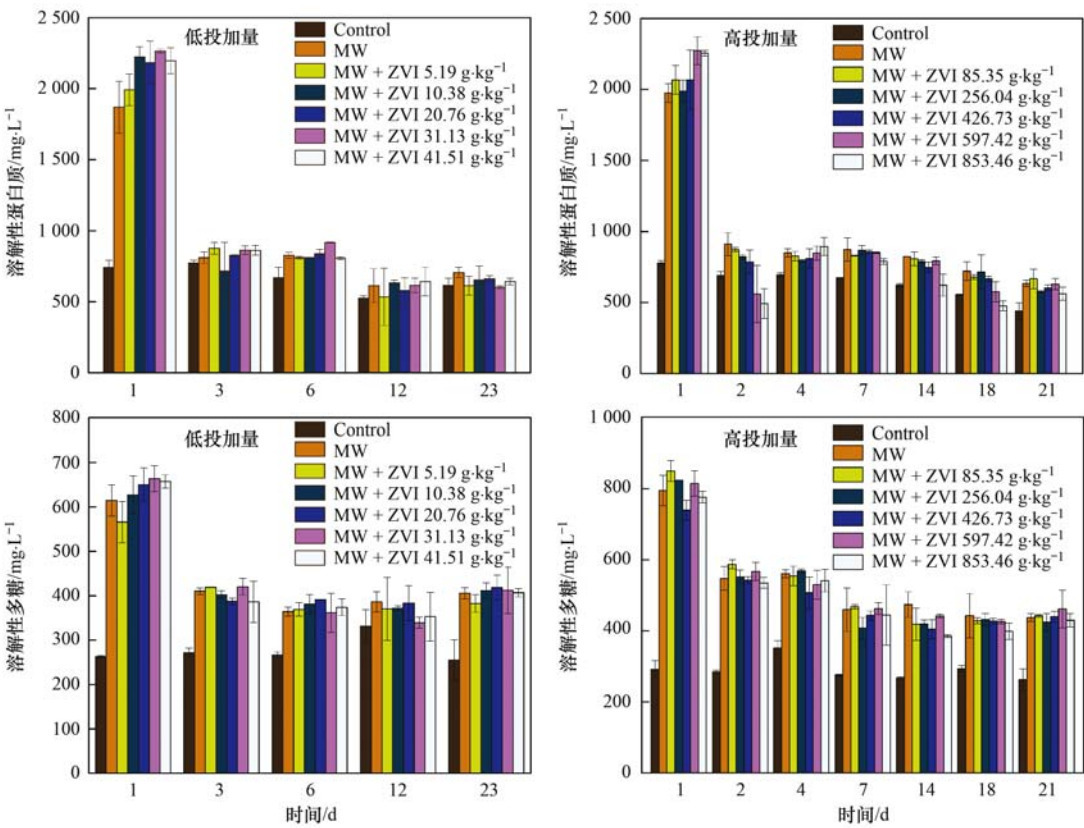


图 4 零价铁低投加量和高投加量下的溶解性蛋白质和多糖变化
Fig. 4 Variation of soluble protein and carbohydrate after low and high ZVI dosages

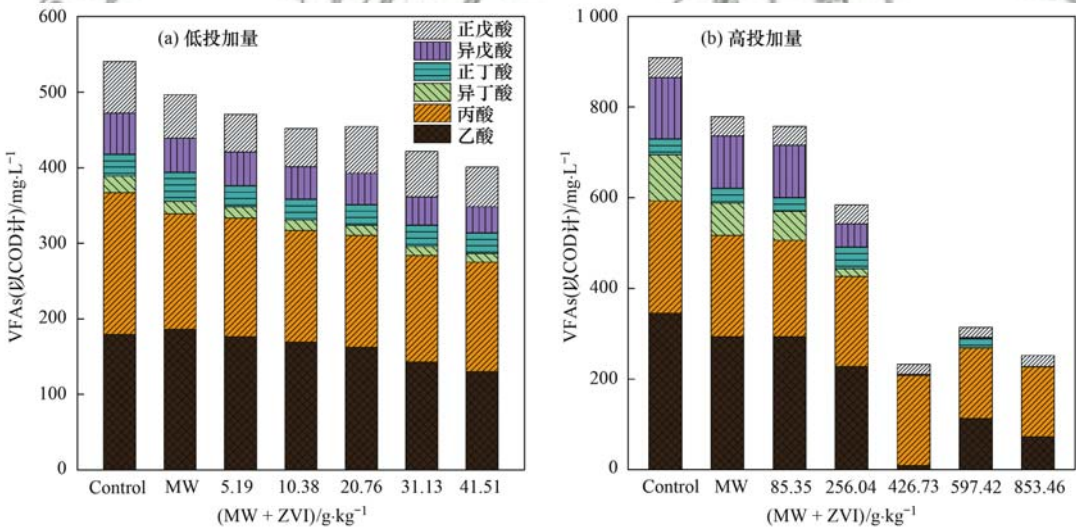


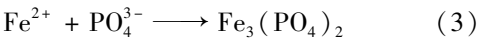
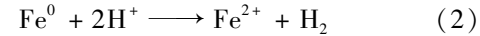
图 5 零价铁低投加量和高投加量下的 VFAs 变化 (第 1 d)
Fig. 5 Variation of VFAs after low and high ZVI dosages (the first day)

S^{2-} 、 PO_4^{3-} 反应产生沉淀；③铁元素是微生物生理必需的重要元素，释放的 Fe^{2+} 有可能被微生物利用，成为厌氧消化过程微生物代谢活性得以加强的重要因素。

2.3.1 正磷酸盐

如图 6 所示，在厌氧消化的前 3 d，所有实验组正磷酸盐快速释放，此阶段零价铁的影响较小，但是，随着厌氧消化的进行，正磷酸盐浓度呈逐渐降低的趋势，并且，零价铁的投加，能够进一步降低

其浓度。在高的投加量下，零价铁对正磷酸盐浓度的影响越明显。Puyol 等^[24]的研究发现，向 TSS 为 $23 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的剩余污泥中投加 $\text{ZVI } 2.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，磷酸根浓度从 $22 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 降到 $3.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。零价铁在水中腐蚀产生 Fe^{2+} ，可与磷酸根通过化学反应产生沉淀[见式(2)和(3)]，一些铁氢氧化物可与磷酸根发生共沉淀作用^[25]，导致磷酸盐浓度的降低。



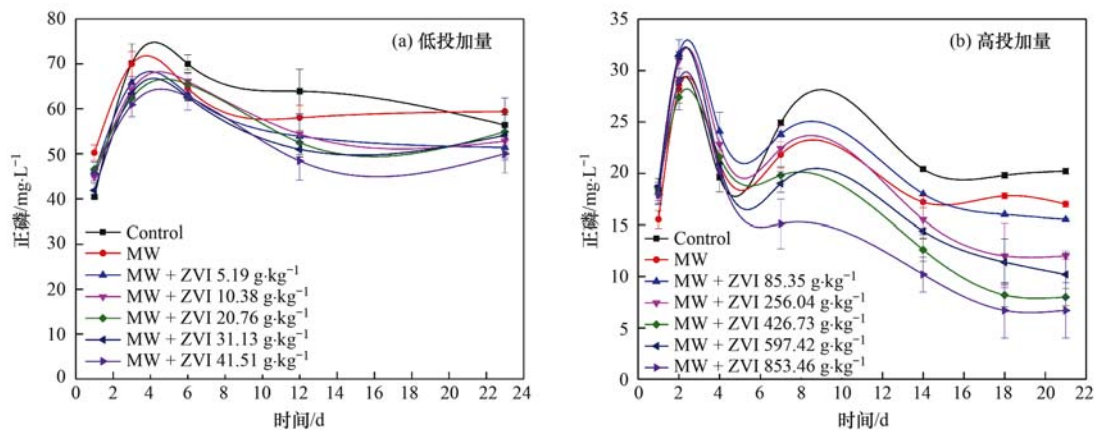


图6 零价铁低投加量和高投加量下正磷的变化

Fig. 6 Variation of orthophosphate after low and high ZVI dosages

2.3.2 硫酸盐

表2为BMP结束后污泥上清液中硫酸盐浓度.与正磷酸盐浓度的变化类似,零价铁降低了硫酸根离子浓度,这与Karri等^[26]的研究结果一致,其向污泥[1.5 g·L⁻¹(以VSS计)]中投加46.6 g·L⁻¹的零价铁(325目),硫酸根去除率达到72.5%.本研究中,低零价铁投加量下,硫酸根浓度与未加零价铁预处理实验组相比最高降低46.17%.高投加量下,最高降低53.47%.如式(4)和(5)所示,在厌氧环境中,零价铁可与硫酸

根反应,将其转化为S²⁻,S²⁻与Fe²⁺反应生成FeS沉淀,降低硫酸根浓度,与此同时,该反应也降低了H₂S的生成,降低其对产甲烷菌的毒害作用.并且,零价铁导致硫酸根浓度的降低,可能进一步对硫酸根还原菌(SRB)代谢活性产生不利影响,郝晓地等^[27]指出,铁的投加可以减少SRB与产甲烷菌对有机物以及电子供体的竞争,这更有利于产甲烷菌代谢活性的提高.

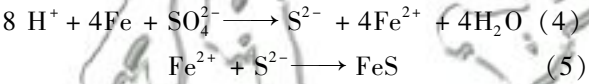


表2 不同零价铁投加量的上清液中硫酸根浓度

Table 2 Sulfate concentration in the supernatant after different ZVI dosages

零价铁低投加量 (ZVI以TS计)	上清液SO ₄ ²⁻ /mg·L ⁻¹	零价铁高投加量 (ZVI以TS计)	上清液SO ₄ ²⁻ /mg·L ⁻¹
MW	212.71 ± 9.50	MW	38.59 ± 3.30
MW + ZVI 5.19 g·kg ⁻¹	131.14 ± 7.32	MW + ZVI 85.35 g·kg ⁻¹	32.80 ± 3.71
MW + ZVI 10.38 g·kg ⁻¹	196.79 ± 9.95	MW + ZVI 256.04 g·kg ⁻¹	20.31 ± 1.32
MW + ZVI 20.76 g·kg ⁻¹	189.93 ± 12.74	MW + ZVI 426.73 g·kg ⁻¹	17.96 ± 1.60
MW + ZVI 31.13 g·kg ⁻¹	152.30 ± 9.52	MW + ZVI 597.42 g·kg ⁻¹	23.52 ± 2.03
MW + ZVI 41.51 g·kg ⁻¹	114.51 ± 8.28	MW + ZVI 853.46 g·kg ⁻¹	23.66 ± 2.07

2.4 铁元素的分布

BMP结束后铁元素在上清液及污泥中的浓度如表3所示,因Fe²⁺在厌氧环境中不易被氧化,故认为测得的铁元素为Fe²⁺总和^[20].在污泥上清液中,与未投加零价铁的实验组相比,零价铁的投加未增加铁元素的浓度,反而使其浓度降低,只有在

较高的零价铁投加量下[597.42 g·kg⁻¹和853.46 g·kg⁻¹(以TS计)],上清液中铁元素浓度会有所升高.而在污泥中,随着零价铁投加量的增加,铁元素含量增加,但是污泥容纳铁的能力有限,零价铁投加过多时,污泥中铁元素含量增加幅度减弱.结合正磷酸盐、硫酸根浓度的分析表明,零价铁释放

表3 不同投加量零价铁下的铁元素分布

Table 3 Distribution of iron after different dosages of ZVI addition

零价铁低投加量 (ZVI以TS计)	上清液 /mg·L ⁻¹	污泥 /g·kg ⁻¹	零价铁高投加量 (ZVI以TS计)	上清液 /mg·L ⁻¹	污泥 /g·kg ⁻¹
MW	34.05 ± 2.01	23.14 ± 0.41	MW	34.63 ± 2.82	20.01 ± 0.78
MW + ZVI 5.19 g·kg ⁻¹	23.06 ± 1.30	24.32 ± 0.96	MW + ZVI 85.35 g·kg ⁻¹	22.52 ± 1.85	31.45 ± 2.25
MW + ZVI 10.38 g·kg ⁻¹	24.86 ± 1.05	26.64 ± 0.36	MW + ZVI 256.04 g·kg ⁻¹	22.82 ± 2.60	38.97 ± 2.78
MW + ZVI 20.76 g·kg ⁻¹	23.98 ± 2.12	27.73 ± 1.50	MW + ZVI 426.73 g·kg ⁻¹	25.60 ± 1.41	35.52 ± 1.62
MW + ZVI 31.13 g·kg ⁻¹	28.21 ± 2.38	35.87 ± 0.49	MW + ZVI 597.42 g·kg ⁻¹	42.00 ± 3.85	28.30 ± 2.56
MW + ZVI 41.51 g·kg ⁻¹	25.20 ± 1.58	37.47 ± 0.68	MW + ZVI 853.46 g·kg ⁻¹	30.92 ± 1.27	39.85 ± 3.72

的 Fe^{2+} , 极有可能与磷酸盐、 S^{2-} 反应生成沉淀, 并沉积在污泥絮体当中, 这可能是铁投加对微波预处理后污泥厌氧消化的强化作用效果不明显的重要原因。此外, Hao 等^[20] 同样发现了污泥厌氧消化过程中对铁元素的消耗, 这可能是因为铁作为微生物细胞以及关键酶的组成元素, 溶解态的 Fe^{2+} 被微生物吸收利用。因此, 微波预处理以及零价铁在电子传递等方面的作用, 加速了厌氧消化微生物的代谢活性, 更多的微生物量以及相关功能酶, 摄取了更多的溶解态铁元素, 导致了上清液中溶解态铁元素浓度的降低。

3 结论

(1) 零价铁和微波预处理组合可提升污泥的产甲烷潜势及产甲烷速率, 并且零价铁具有进一步地促进作用, 主要表现在产甲烷潜势的进一步提升(最大提升幅度为 7.42%) 和厌氧消化初期(1~4 d) 产甲烷速率的提高。但是, 高的零价铁投加量并未有最佳的促进作用。

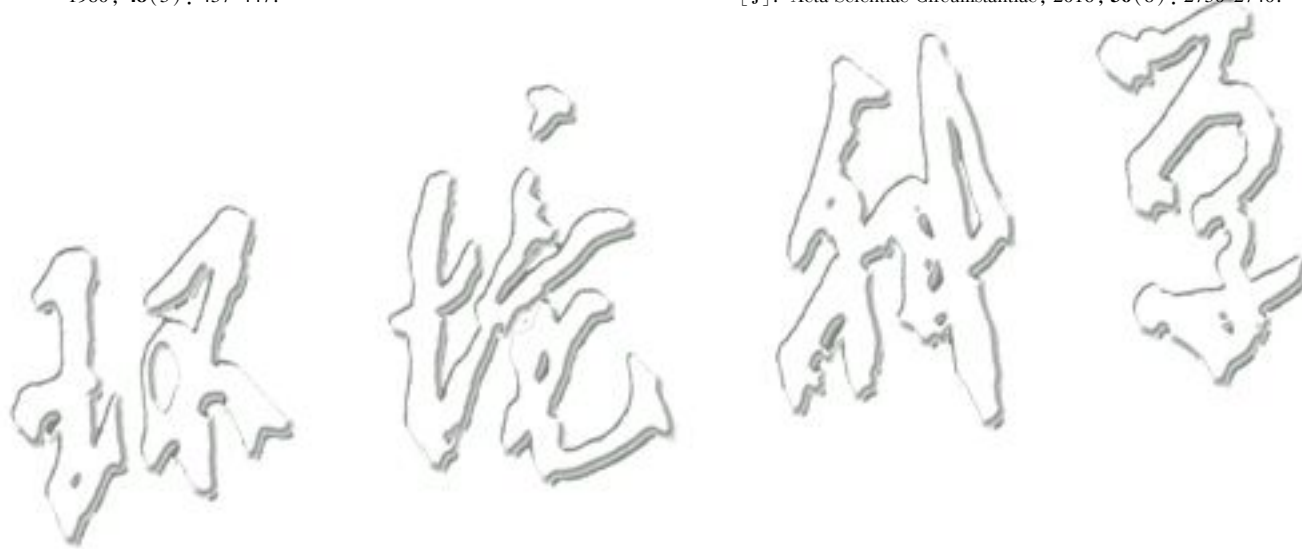
(2) 零价铁的作用主要在厌氧消化初期提高了溶解性蛋白质类有机物的释放, 加速了乙酸、异丁酸、异戊酸类挥发性脂肪酸的消耗, 结合产甲烷速率的提升, 表明零价铁对污泥厌氧消化过程中有机物溶解释放阶段以及产甲烷阶段都有促进作用。

(3) 投加的零价铁在厌氧消化过程中, 会发生相应的物理、化学、生物方面的迁移转化, 其中, 磷酸根、硫酸根浓度的明显降低说明释放的 Fe^{2+} 可能发生了 $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$ 、 FeS 的沉淀反应, 这可能是零价铁对微波预处理后污泥厌氧消化的强化作用有限的重要原因。

参考文献:

- [1] 刘吉宝, 倪晓棠, 魏源送, 等. 微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(9): 3455-3460.
Liu J B, Ni X T, Wei Y S, *et al.* Enhancement for anaerobic digestion of sewage sludge pretreated by microwave and its combined processes[J]. Environmental Science, 2014, **35**(9): 3455-3460.
- [2] 陈汉龙, 严媛媛, 何群彪, 等. 温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 629-634.
Chen H L, Yan Y Y, He Q B, *et al.* Effects of mild thermal pretreatment on anaerobic digestibility of sludge with low organic content[J]. Environmental Science, 2013, **34**(2): 629-634.
- [3] 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.
- [4] Liu J B, Tong J, Wei Y S, *et al.* Microwave and its combined processes: An effective way for enhancing anaerobic digestion and dewaterability of sewage sludge? [J]. Journal of Water Reuse and Desalination, 2015, **5**(3): 264-270.
- [5] 刘吉宝. 微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化及改善脱水性能研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
Liu J B. Application of microwave and its hybrid processes for enhancing sludge anaerobic digestion and dewatering [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [6] 周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 等. 零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V)[J]. 环境科学, 2017, **38**(11): 4623-4631.
Zhou Z M, Deng W N, Yang Y L, *et al.* Zero-valent iron (ZVI) activation of persulfate (PS) for oxidation of arsenic (V) form aqueous solutions[J]. Environmental Science, 2017, **38**(11): 4623-4631.
- [7] 周欣, 张进忠, 邱昕凯, 等. 零价铁去除废水中的汞[J]. 环境科学, 2013, **34**(11): 4304-4310.
Zhou X, Zhang J Z, Qiu X K, *et al.* Removal of Hg in wastewater by zero-valent iron [J]. Environmental Science, 2013, **34**(11): 4304-4310.
- [8] O'Carroll D, Sleep B, Krol M, *et al.* Nanoscale zero valent iron and bimetallic particles for contaminated site remediation [J]. Advances in Water Resources, 2013, **51**: 104-122.
- [9] 魏欣, 薛顺利, 杨帆, 等. 零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(2): 697-702.
Wei X, Xue S L, Yang F, *et al.* Effect of zero valent iron on the decline of tetracycline resistance genes and class 1 integrons during thermophilic anaerobic digestion of sludge [J]. Environmental Science, 2017, **38**(2): 697-702.
- [10] 魏静. 废铁屑强化剩余污泥厌氧消化产甲烷机理研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2016.
Wei J. Study on the mechanisms of anaerobic digestion of excess sludge for methane production enhanced by waste iron scrap [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2016.
- [11] Suanon F, Sun Q, Li M Y, *et al.* Application of nanoscale zero valent iron and iron powder during sludge anaerobic digestion: Impact on methane yield and pharmaceutical and personal care products degradation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, **321**: 47-53.
- [12] 冯应鸿. 零价铁强化剩余污泥厌氧消化的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
Feng Y H. Research of enhanced anaerobic digestion of waste activated sludge by addition of zero valent iron [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [13] Zhang Y B, Feng Y H, Yu Q L, *et al.* Enhanced high-solids anaerobic digestion of waste activated sludge by the addition of scrap iron[J]. Bioresource Technology, 2014, **159**: 297-304.
- [14] Feng Y H, Zhang Y B, Quan X, *et al.* Enhanced anaerobic digestion of waste activated sludge digestion by the addition of zero valent iron[J]. Water Research, 2014, **52**: 242-250.
- [15] 郭广寨, 苏良湖, 孙旭, 等. 不同粒径零价铁(ZVI)对污水污泥 H_2S 和 CH_4 释放速率的影响[J]. 环境工程学报, 2012, **6**(5): 1693-1698.
Guo G Z, Su L H, Sun X, *et al.* Effect of different particle sizes of zero-valent iron (ZVI) on H_2S and CH_4 emission in sewage sludge [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, **6**(5): 1693-1698.
- [16] CJT 221-2005, 城市污水处理厂污泥检验方法[S]. 2005.
- [17] Frølund B, Griebe T, Nielsen P H. Enzymatic activity in the activated-sludge floc matrix [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1995, **43**(4): 755-761.
- [18] Dubois M, Gilles K A, Hamilton J K, *et al.* Colorimetric method for determination of sugars and related substances[J]. Analytical

- Chemistry, 1956, **28**(3): 350-356.
- [19] Carvajal A, Peña M, Pérez-Elvira S. Autohydrolysis pretreatment of secondary sludge for anaerobic digestion [J]. Biochemical Engineering Journal, 2013, **75**: 21-31.
- [20] Hao X D, Wei J, Van Loosdrecht M C M, *et al.* Analysing the mechanisms of sludge digestion enhanced by iron [J]. Water Research, 2017, **117**: 58-67.
- [21] Zhang Y B, Feng Y H, Quan X. Zero-valent iron enhanced methanogenic activity in anaerobic digestion of waste activated sludge after heat and alkali pretreatment [J]. Waste Management, 2015, **38**: 297-302.
- [22] Zhen G Y, Lu X Q, Li Y Y, *et al.* Influence of zero valent scrap iron (ZVSI) supply on methane production from waste activated sludge [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, **263**: 461-470.
- [23] Van Den Berg L, Lamb K A, Murray W D, *et al.* Effects of sulphate, iron and hydrogen on the microbiological conversion of acetic acid to methane [J]. Journal of Applied Microbiology, 1980, **48**(3): 437-447.
- [24] Puyol D, Flores-Alsina X, Segura Y, *et al.* Exploring the effects of ZVI addition on resource recovery in the anaerobic digestion process [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, **335**: 703-711.
- [25] 张怡萍, 赵泉林, 崔立莉, 等. 零价铁在污水脱氮除磷方面的研究进展 [J]. 工业水处理, 2016, **36**(12): 22-26.
Zhang Y P, Zhao Q L, Cui L L, *et al.* Research progress in zero-valent iron (ZVI) applied to wastewater denitification and dephosphorization [J]. Industrial Water Treatment, 2016, **36**(12): 22-26.
- [26] Karri S, Sierra-Alvarez R, Field J A. Zero valent iron as an electron-donor for methanogenesis and sulfate reduction in anaerobic sludge [J]. Biotechnology & Bioengineering, 2005, **92**(7): 810-819.
- [27] 郝晓地, 魏静, 曹达啟. 废铁屑强化污泥厌氧消化产甲烷可行性分析 [J]. 环境科学学报, 2016, **36**(8): 2730-2740.
Hao X D, Wei J, Cao D Q. Feasibility analysis of enhancing anaerobic digestion for methane production by waste iron scrap [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(8): 2730-2740.



CONTENTS

Contribution Assessment of Meteorology Conditions and Emission Change for Air Quality Improvement in Beijing During 2014-2017	YIN Xiao-mei, LI Zi-ming, XIONG Ya-jun, <i>et al.</i>	(1011)
Using Multiple Linear Regression Method to Evaluate the Impact of Meteorological Conditions and Control Measures on Air Quality in Beijing During APEC 2014	LI Ying-ruo, WANG Jun-xia, HAN Ting-ting, <i>et al.</i>	(1024)
Source Apportionment of PM _{2.5} in Suburban Area of Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	WANG Tong, HUA Yang, XU Qing-cheng, <i>et al.</i>	(1035)
Fine Particulate Matter Source Profile of Typical Industries in Sichuan Province	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, XIONG Wen-peng, <i>et al.</i>	(1043)
Source Apportionment and Pollution Characteristics of PM _{2.5} During the Two Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2016 in a Typical Logistics City	ZHAO Xue-yan, YANG Wen, WANG Jing, <i>et al.</i>	(1052)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Heating and Non-heating Periods in Shenyang	ZHANG Xian, TIAN Sha-sha, LIU Ying-ying, <i>et al.</i>	(1062)
Interannual Variation of Metal Elements and Water-Soluble Ions in PM _{2.5} During Wintertime in Xinxiang and Their Source Apportionment	YAN Guang-xuan, LEI Hao-jie, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i>	(1071)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Ambient PM _{2.5} During Four Seasons in Yantai City	LIU Tong, WANG Xiao-jun, CHEN Qian, <i>et al.</i>	(1082)
Day-night Characteristics of Humic-like Substances in PM _{2.5} During Winter in Changzhou	GU Yuan, LI Qing, HUANG Wen-qian, <i>et al.</i>	(1091)
Pollution Characteristics and Occupational Exposure Risk of Heavy Metals in Indoor and Outdoor Ambient Particles at a Scaled Electronic Waste Dismantling Plant, Northwest China	CAO Hong-mei, ZHAO Liu-yuan, MU Xi, <i>et al.</i>	(1101)
Analysis of a Pollution Process in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Satellite and Surface Observations	QIU Yun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(1111)
Spatial-temporal Variation of Ozone Concentration and Its Driving Factors in China	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1120)
Ozone Spatial-temporal Distribution and Trend over China Since 2013: Insight from Satellite and Surface Observation	ZHANG Qian-qian, ZHANG Xing-ying	(1132)
Characteristics of Ozone Pollution Distribution and Source Apportionment in Zhoushan	WANG Qiao-li, DONG Min-li, LI Su-jing, <i>et al.</i>	(1143)
Establishment of VOCs Emissions Factor and Emissions Inventory from Using of Architectural Coatings in China	GAO Mei-ping, SHAO Xia, NIE Lei, <i>et al.</i>	(1152)
Heterogeneous Oxidation of Secondary Organic Tracers of Isoprene and Toluene by Ozone	HUANG Ya-juan, CAO Gang, ZHU Rong-shu, <i>et al.</i>	(1163)
Inventory and Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emission from Agriculture and Animal Husbandry in Lanzhou City	LI Shi-xue, GUO Wen-kai, HE Xin, <i>et al.</i>	(1172)
Analysis of Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Characteristics and Vapor Sources of Event-based Precipitation in Chengdu	HU Yue, LIU Guo-dong, MENG Yu-chuan, <i>et al.</i>	(1179)
Diffusive CO ₂ Flux Across the Water-air Interface of Reclaimed Shrimp Ponds in the Minjiang River Estuary Based on the TBL Model	ZHANG Yi-fei, YANG Ping, ZHAO Guang-hui, <i>et al.</i>	(1188)
Distribution and Seasonal Variations of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in the Bohai Sea and the North Yellow Sea	LIU Zhao-bing, LIANG Wen-jian, QIN Li-ping, <i>et al.</i>	(1198)
Sources, Characteristics and Transformation Dynamics of Fluorescent Dissolved Organic Matter in the Silin Reservoir	LAO Xin-yu, YUAN Jie, LIU Yu, <i>et al.</i>	(1209)
Microplastic Pollution of the Beaches in Xiamen Bay, China	LIU Qi-ming, LIANG Hai-tao, XI Gui-li, <i>et al.</i>	(1217)
Biogeochemical Characteristics in Shengli Site of Lijiang River Under the High Resolution Monitoring	WANG Qi-gang, XIAO Qiong, ZHAO Hai-juan, <i>et al.</i>	(1222)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of Groundwater in the Xialatuo Basin Section of the Xianshui River	HE Jin, ZHANG You-kuan, ZHAO Yu-qing, <i>et al.</i>	(1236)
Pollution Characteristics of OPEs in the Surface Water and Sediment of the Jinjiang River in Chengdu City	WU Di, YIN Hong-ling, LI Shi-ping, <i>et al.</i>	(1245)
Community Structure and Predictive Functional Analysis of Surface Water Bacterioplankton in the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Fei, TIAN Wei, SUN Feng, <i>et al.</i>	(1252)
Influence of Cyanobacterial Blooms on Denitrification Rate in Shallow Lake Taihu, China	LIU Zhi-ying, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i>	(1261)
Assessment of Ecosystem Health of an Urban River Based on the Microbe Index of Biotic Integrity (M-IBI)	SU Yao, XU Yu-xin, AN Wen-hao, <i>et al.</i>	(1270)
Influences of Biochar Application on Root Aerenchyma and Radial Oxygen Loss of <i>Acorus calamus</i> in Relation to Subsurface Flow in a Constructed Wetland	HUANG Lei, LIANG Yin-kun, LIANG Yan, <i>et al.</i>	(1280)
Pollution Load Characteristics of Runoff from Urban Roofs of Different Materials	HE Hu-bin, CHEN Cheng, LIN Yu-qing, <i>et al.</i>	(1287)
Preparation of BiOCl-(NH ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ Photocatalyst and a Mechanism for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>	(1295)
High Efficiency Removal of 1,2-Dichloroethane from Groundwater by Microscale Zero-valent Iron Combined with Biological Carbon Source	WU Nai-jin, SONG Yun, WEI Wen-xia, <i>et al.</i>	(1302)
Removal of Lead Ions from Water by Struvite Natural Zeolite Composite	DEND Man-jun, WANG Xue-jiang, CHENG Xue-jun, <i>et al.</i>	(1310)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution By Ca/Mg-Loaded Biogas Residue Biochar	YI Man, LI Ting-ting, LI Hai-hong, <i>et al.</i>	(1318)
Preparation of Two Kinds of Biochar and the Factors Influencing Tetracycline Removal from Aqueous Solution	CHENG Yang, SHEN Qi-bin, LIU Zi-dan, <i>et al.</i>	(1328)
Effect of Zirconium-Modified Zeolite Addition on Migration and Transformation of Phosphorus in River Sediments Under Static and Hydrodynamic Disturbance Conditions	YU Yang, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1337)
Removal Efficiencies and Mechanism Research on Four Sulfonamides and Their Acetyl Metabolites in a Wastewater Treatment Plant	WANG Da-peng, ZHANG Xian, YAN Chang-zhou	(1347)
Assessing Performance of Pollutant Removal from Municipal Wastewater by Physical and Chemical Methods Based on Membranes	XU Ting, LI Yong, ZHU Yi-jia, <i>et al.</i>	(1353)
Effect of Influent Ammonia Concentration on a Biological Phosphorus Removal Granules System	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(1360)
Start-up and Performance Recovery of Granular Sludge for Phosphorus Removal and Nitrification	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1367)
Realization of Short-cut Nitrification in a CAST Process at High Temperature and Its Phosphorus Removal Performance	MA Juan, YANG Rui-chun, YU Xiao-jun, <i>et al.</i>	(1375)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Low C/N Municipal Wastewater Treated by a SPNDPR System with Different Aeration and Aerobic Times	YUAN Meng-fei, YU De-shuang, GONG Xiu-zhen, <i>et al.</i>	(1382)
ABR Decarbonization-Nitrosation Coupled with ANAMMOX to Treat Municipal Wastewater	LI Tian, CAO Jia-wei, XIE Feng-lian, <i>et al.</i>	(1390)
Start-up Performance and Sludge Characteristics of Single-stage Autotrophic Nitrogen Removal System with Granular Sludge at Low Ammonia Nitrogen Concentration at Room Temperature	XIE Lu-lin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(1396)
ANAMMOX Reactor with Two Kinds of Inoculated Sludge: Start-up and Kinetics Characteristics	REN Jun-yi, CHEN Lin-yi, LI Hui-chun, <i>et al.</i>	(1405)
Operation Characteristics of the Biofilm CANON Reactor During the Temperature Reduction Process	FU Kun-ming, LIAO Min-hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i>	(1412)
Nitrogen Removal Characteristics and Analysis of Microbial Community Structure in an IEM-UF Simultaneous Separation and Denitrification System	LIU Zi-qi, ZHANG Yan, MA Xiang-shan, <i>et al.</i>	(1419)
Effect of Temperature on the Activity Kinetics of <i>Nitrobacter</i>	YU Xue, SUN Hong-wei, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(1426)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge Based on Microwave Pretreatment Combined with Zero Valent Iron	NIU Yu-tong, LIU Ji-bao, MA Shuang, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Environmental Factors on Tetracyclines and Macrolides Resistance Genes in Cattle Manure Composting Systems	PENG Jing, WANG Ke, GU Yue, <i>et al.</i>	(1439)
Effect of Environmental Factors on Variation Characteristics of Soil Microbial Respiration and Its Temperature Sensitivity	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li	(1446)
Response of Soil Respiration and Its Components to Simulated Acid Rain in a Typical Forest Stand in the Three Gorges Reservoir Area	LI Yi-fan, WANG Yu-jie, WANG Bin, <i>et al.</i>	(1457)
Effects of Fertilization on the Nitrogen Residual Amounts and Leaching from Citrus Orchard Soil in the Three Gorges Reservoir Area	WANG Tian, HUANG Zhi-lin, ZENG Li-xiong, <i>et al.</i>	(1468)
Microbial Carbon Source Metabolic Profile in Rice Rhizosphere and Non-rhizosphere Soils with Different Long-term Fertilization Management	NING Zhao, CHENG Ai-wu, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(1475)
Characterization of Soil Organic Carbon Mineralization Under Different Gradient Carbon Loading in Paddy Soil	TONG Yao-yao, WANG Ji-fei, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(1483)
Soil Organic Carbon Distribution and Components in Different Plant Communities Along a Water Table Gradient in the Huixian Karst Wetland in Guilin	XU Guang-ping, LI Yan-qiong, SHEN Yu-yi, <i>et al.</i>	(1491)
Distribution of Organic Carbon in Soil Aggregates from Four Kinds of Forest Vegetation on Jinyun Mountain	WANG Fu-hua, LÜ Sheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(1504)
Review of Research on the Impacts of Atmospheric Pollution on the Health of Residents	QIN Yao-chen, XIE Zhi-xiang, LI Yang	(1512)