

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

**2017**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化 ..... 姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)

海西城市群 PM<sub>2.5</sub> 中重金属元素的污染特征及健康风险评估 ..... 陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)

岷泗地区大气 PM<sub>2.5</sub> 中汞形态污染及其与碳组分的关系 ..... 程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)

泰山夏季 PM<sub>2.5</sub> 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源 ..... 孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)

南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估 ..... 张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)

长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响 ..... 尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)

南京城市交通甲烷排放特征 ..... 张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)

2003~2014年东北三省气溶胶光学厚度变化分析 ..... 张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)

基于增强回归树的城市 PM<sub>2.5</sub> 日均值变化分析: 以常州为例 ..... 葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)

重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量 ..... 张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)

几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响 ..... 付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)

养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征 ..... 高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)

百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征 ..... 吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)

岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化 ..... 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)

三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素 ..... 张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)

分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应 ..... 邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)

淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响 ..... 林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)

湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根 ..... 蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)

高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制 ..... 王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)

改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制 ..... 吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)

几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用 ..... 姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)

模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学 ..... 何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)

TiO<sub>2</sub>/膨润土复合材料对 Hg<sup>2+</sup> 的吸附性能研究 ..... 唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)

氨氮及 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响 ..... 王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)

配水管网细菌活性影响因素 ..... 王晓丹, 赵新华 (622)

施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复 ..... 朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)

臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制 ..... 侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)

单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N<sub>2</sub>O 的产生特性 ..... 郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)

有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能 ..... 管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)

完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析 ..... 王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)

颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究 ..... 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)

游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响 ..... 戴晓虎, 何进, 严寒, 李宁, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)

利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻 ..... 顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)

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 ..... 魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)

沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评估 ..... 王静, 刘明丽, 张士超, 鲁垠涛, 姚宏 (703)

河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险 ..... 陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)

外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用 ..... 杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)

微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应 ..... 叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)

沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响 ..... 罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)

再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响 ..... 邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭道宇 (743)

矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响 ..... 贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)

稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征 ..... 刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)

不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响 ..... 赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)

复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响 ..... 聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)

秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析 ..... 成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)

1株氯苯高效降解菌的分离鉴定及降解特性 ..... 叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)

1株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性 ..... 谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)

连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响 ..... 孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)

施氮对小麦(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响 ..... 陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)

长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体砷累积与生物转化的影响 ..... 李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)

不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用 ..... 马锋锋, 赵保卫 (837)

《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)

# 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

魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品\*

(东华大学环境科学与工程学院, 国家环境保护纺织工业污染防治工程技术中心, 上海 201620)

**摘要:** 为研究污泥高温厌氧消化过程中零价铁( $\text{Fe}^0$ )对抗生素抗性基因的消减影响, 采用荧光定量 PCR 方法定量检测了 7 种四环素抗性基因(TC-ARGs, 包括 *tetA*、*tetC*、*tetG*、*tetM*、*tetO*、*tetW* 和 *tetX*)及第一类整合子 *intI1* 基因在厌氧消化过程中的丰度变化, 同时检测分析了挥发性脂肪酸(VFAs)的质量浓度变化, 并探讨了目标基因与 VFAs 之间的相关关系. 结果表明, 适量  $\text{Fe}^0$  (如  $0.10 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 以  $\text{Fe}^0/\text{VSS}$  计)不仅可以强化污泥厌氧消化进程, 显著提高总 VFAs 和乙酸的产生量, 而且能够增强 TC-ARGs 和 *intI1* 基因的消减效果. 尽管如此, 过量  $\text{Fe}^0$  (如  $1.17 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 以  $\text{Fe}^0/\text{VSS}$  计)对污泥高温厌氧消化过程中 TC-ARGs 和 *intI1* 基因消减的增强效果并不显著, 推测可能是由于基因水平转移的发生所导致的. 通过相关性分析可知, TC-ARGs (除 *tetO* 基因外)和 *intI1* 基因与乙酸之间存在显著负相关性, 表明乙酸可能对 TC-ARGs 和 *intI1* 基因的消减具有促进作用.

**关键词:** 零价铁; 高温厌氧消化; 四环素抗性基因; 第一类整合子; 挥发性脂肪酸

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0697-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201607235

## Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge

WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, LI Xiang, LIU Zhen-hong, XUE Gang, GAO Pin\*

(State Environmental Protection Engineering Center for Pollution Treatment and Control in Textile Industry, College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** To investigate the effects of zero valent iron ( $\text{Fe}^0$ ) on the decline of antibiotic resistance genes during thermophilic anaerobic digestion of sludge, the abundances of seven tetracycline resistance genes (TC-ARGs, including *tetA*, *tetC*, *tetG*, *tetM*, *tetO*, *tetW*, and *tetX*) and class 1 integron gene (*intI1*) were quantified by quantitative PCR (qPCR). Also, the concentrations of volatile fatty acids (VFAs) were determined. The correlations between the abundances of TC-ARGs and *intI1* gene and the concentrations of VFAs were discussed. The results showed that appropriate dose of  $\text{Fe}^0$  such as  $0.10 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  VSS could enhance the anaerobic digestion process of sludge, and the production of total VFAs and acetic acid increased significantly. The decrease in the abundances of TC-ARGs and *intI1* gene was also enhanced. However, excessive  $\text{Fe}^0$  such as  $1.17 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  VSS could not further improve the reduction in the abundances of TC-ARGs and *intI1* gene, probably resulted from the occurrence of horizontal gene transfer. The abundances of TC-ARGs except *tetO* gene, as well as *intI1* gene exhibited significant negative correlation with the concentration of acetic acid, indicating that acetic acid probably had an enhanced effect on the decline of TC-ARGs and *intI1* gene during thermophilic anaerobic digestion of sludge.

**Key words:** zero valent iron; thermophilic anaerobic digestion; tetracycline resistance genes; class 1 integrons; volatile fatty acids

近年来, 抗生素抗性基因( ARGs)作为一种新型污染物<sup>[1]</sup>, 在环境水体、土壤、大气尘粒等环境介质中被频繁检出<sup>[2~6]</sup>, 已成为生态环境安全和人体健康领域的一个关注热点. 污水处理厂被认为是环境中 ARGs 的一个重要污染源<sup>[7]</sup>, 而活性污泥作为细菌微生物的聚集体, 为 ARGs 的演变和转移提供了良好的场所, 同时也为其提供了集中去除的机会<sup>[8]</sup>.

有研究表明<sup>[9]</sup>, 厌氧消化可以有效地削减污泥中的 ARGs, 并且温度越高, 污泥中四环素抗性基因(TC-ARGs)包括 *tetA*、*tetO*、*tetW* 和 *tetX*, 及第一类整合子 *intI1* 基因丰度下降越显著. 此外, 污泥厌氧

消化工艺操作参数和环境条件对 ARGs 的消长行为同样具有较大影响, 如污泥停留时间<sup>[10]</sup>、pH<sup>[11]</sup>, 以及抗生素和重金属<sup>[12~14]</sup>等选择性因子. Feng 等<sup>[15]</sup>研究发现, 零价铁( $\text{Fe}^0$ )能够强化污泥的厌氧消化, 促进乙酸的生成和污泥的减量. 然而, 目前关于  $\text{Fe}^0$  在增强污泥厌氧消化过程中对 ARGs 的消减影响还鲜见报道.

收稿日期: 2016-07-31; 修订日期: 2016-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208086); 东华大学“励志计划”项目

作者简介: 魏欣(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制及水质安全, E-mail: 1300071039@qq.com

\* 通信作者, E-mail: pingao@dhu.edu.cn

本研究考察了  $Fe^0$  对污泥高温厌氧消化过程的作用影响,采用荧光定量 PCR (qPCR) 分析方法对 TC-ARGs 和 *intI1* 基因进行定量检测,考察了  $Fe^0$  对目标基因消减行为特征的影响,并探讨了挥发性脂肪酸(VFAs)与目标基因之间的相关关系,以期为污泥厌氧消化强化去除 ARGs 的工艺技术提供数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 接种污泥与反应底物

接种污泥取自上海松江污水处理厂二沉池剩余污泥,在室温下沉降 4 h 后倒去上清液,沉降污泥 VSS 质量浓度约为  $8.55 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。采用剩余污泥和餐厨垃圾的混合物作为厌氧消化反应底物,其中餐厨垃圾取自东华大学松江校区学生食堂,混合底物中餐厨垃圾: 剩余污泥 = 2.79:1 (干物质比),混合后 VSS 质量浓度约为  $37.8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,混合液溶解性有机物(SCOD)质量浓度约为  $25.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

### 1.2 厌氧消化体系的建立及运行

厌氧消化装置为圆柱体反应器,容积为 1 L,混合底物加入量约为 30.3 g (以干物质计),共 3 组,分别标记为 AD-1、AD-2 和 AD-3,其中 AD-1 为对照组,AD-2 和 AD-3 中添加有  $Fe^0$  (粒径 10 ~ 40  $\mu\text{m}$ ,购自国药集团化学试剂有限公司),投加量(以  $Fe^0$ /VSS 计,下同)分别为  $0.10 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $1.17 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。采用机械连续搅拌方式,搅拌速度为  $120 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,反应温度通过水浴加热控制在  $(50 \pm 1)^\circ\text{C}$ ,pH 值为 7.1 ~ 7.6。厌氧消化反应周期为 12 d,每隔

2 d 进行采样检测分析,每组样品设 3 个平行样。

## 1.3 检测分析方法

### 1.3.1 DNA 提取

取一定量反应底物,采用 TIANamp Siol DNA Kit (TIANGEN) 进行 DNA 提取,提取步骤参照试剂盒操作说明书,所提取的 DNA 使用 1% 琼脂糖凝胶电泳和 Qubit 2.0 核酸蛋白测定仪 (Invitrogen) 检测其纯度和浓度。

### 1.3.2 TC-ARGs 检测

本研究共选取 7 种在污泥中被频繁检出的 TC-ARGs<sup>[9,16]</sup> 作为研究对象,分别为 *tetA*、*tetC*、*tetG*、*tetM*、*tetO*、*tetW* 和 *tetX* 基因,其中 *tetA*、*tetC* 和 *tetG* 为外排泵基因,*tetM*、*tetO* 和 *tetW* 为核糖体保护基因,而 *tetX* 则属于酶修饰基因<sup>[17]</sup>。此外,本研究同样检测了第一类整合子 *intI1* 基因,其能够捕获外源性基因以表达出多重抗药性特征<sup>[18]</sup>,对抗生素抗性基因的水平转移具有重要作用。

目标基因使用 qPCR 进行定量检测分析,所用扩增引物序列、扩增子大小和退火温度见表 1。qPCR 反应体系总体积为 20  $\mu\text{L}$ ,包括: FastStart Essential DNA Green Master (Roche) 10  $\mu\text{L}$ ,上下游引物 ( $4 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 各 1.5  $\mu\text{L}$ ,DNA 模板 1  $\mu\text{L}$ ,ddH<sub>2</sub>O 6  $\mu\text{L}$ 。qPCR 热循环反应程序如下:  $95^\circ\text{C}$  预变性 10 min,  $95^\circ\text{C}$  变性 10 s,共 40 个循环,退火 20 s,  $72^\circ\text{C}$  延伸 30 s,同时利用溶解曲线分析扩增产物的特异性。每组样品 3 个平行样,使用无菌水作为阴性对照。

表 1 qPCR 反应所使用的基因引物信息

Table 1 Sequences of primers used for qPCR reactions

目标基因	引物	引物序列	扩增子大小/bp	退火温度/ $^\circ\text{C}$	文献
<i>tetA</i>	F	GCTACATCCTGCTTGCCTTC	210	65	[19]
	R	CATAGATCGCCGTGAAGAGG			
<i>tetC</i>	F	CTTGAGAGCCTTCAACCCAG	418	63	[19]
	R	ATGGTCGTCATCTACCTGCC			
<i>tetG</i>	F	GCTCGGTGGTATCTCTGC	468	60	[19]
	R	AGCAACAGAATCGGGAAC			
<i>tetM</i>	F	GTGGACAAAGGTACAACGAG	406	63	[19]
	R	CGGTAAAGTTGCTCACACAC			
<i>tetO</i>	F	AACTTAGGCATTCTGGCTCAC	515	60	[19]
	R	TCCCACTGTTCCATATCGTCA			
<i>tetW</i>	F	GAGAGCCTGCTATATGCCAGC	168	57	[20]
	R	GGGCGTATCCACAATGTTAAC			
<i>tetX</i>	F	CAATAATTGGTGGTGGACCC	468	60	[19]
	R	TTCTTACCTTGGACATCCCG			
<i>intI1</i>	F	CCTCCCGCACGATGATC	280	60	[21]
	R	TCCACGCATCGTCAGGC			

目标基因标准品委托生工生物工程(上海)有限公司合成,按梯度稀释( $10^{-1} \sim 10^{-6}$ )后进行 qPCR 反应可得各基因的标准曲线,所有 qPCR 反应扩增效率为 88% ~ 101%,相关系数  $r^2 > 0.99$ .

### 1.3.3 VFAs 测定

VFAs 采用 7900 型气相色谱(天美)检测,使用氢火焰离子化检测器(FID),色谱条件如下: TM-FFAP 毛细管柱,载气为氮气,流速为  $60 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ,分流比为 10:1,进样口和检测器温度为  $250^\circ\text{C}$ . 采用程序升温模式,在起始温度  $100^\circ\text{C}$  下保持 2 min,再以  $10^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  升温速率升至  $190^\circ\text{C}$  维持 1 min,然后以  $30^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  升温速率升至  $220^\circ\text{C}$ ,保持 5 min.

### 1.4 数据分析

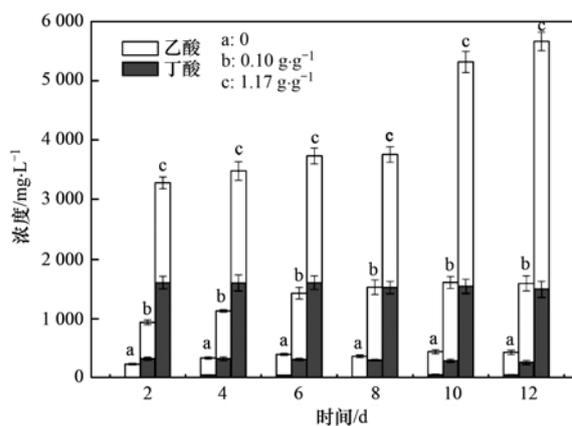
数据分析运用 Origin 8.0 和 SPSS 19.0 统计软件进行处理,计算因变量和自变量之间的皮尔逊相关系数( $r$ )和  $P$  值,设置规定的统计检验显著性水平  $P = 0.05$ ,若  $P < 0.05$  认为具有显著相关性,反之则认为相关性不显著.

## 2 结果与讨论

### 2.1 $\text{Fe}^0$ 对污泥厌氧消化过程中 VFAs 生成的影响

在整个污泥厌氧消化过程中,共检出 2 种不同的 VFAs,包括乙酸和丁酸(正丁酸和异丁酸). 从图 1 可以看出,AD1 装置中 VFAs 生成过程相对稳定,从厌氧消化第 2 ~ 12 d 时, VFAs 质量浓度由  $237.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  逐步提高至  $436.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,其中乙酸质量浓度由  $237.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  升高至  $377.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,占 VFAs 总量比例达 86.3% 以上,表明本研究中污泥厌氧消化过程以乙酸型和丁酸型发酵为主. 有研究显示<sup>[22]</sup>,乙酸型和丁酸型发酵属于严格厌氧过程,反应体系氧化还原电位(ORP)较低,而丙酸型发酵属于兼氧过程,反应体系 ORP 通常不宜低于  $-278 \text{ mV}$ ,否则不利于有机质转化为丙酸. 在本研究中,污泥厌氧消化过程 ORP 经测定在  $-400 \sim -300 \text{ mV}$  之间,由此可推测丙酸型发酵过程受到抑制,反应环境条件有利于乙酸和丁酸的生成,这与厌氧消化上清液中 VFAs 检测结果是一致的.

由图 1 分析可知,当  $\text{Fe}^0$  投加量分别为  $0.10 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  (AD2) 和  $1.17 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  (AD3) 时,厌氧消化上清液 VFAs 质量浓度在第 2 d 时分别约为  $940.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $3277.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,到第 12 d 时则分别高达  $1594.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $5657.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,与 AD1 相比分别提高了约 2.6 和 12.0 倍. 其中,乙酸质量浓度升高显著,到第 12 d 时分别高达  $1326.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和



图中数据为 3 个平行样取平均值,下同

图 1  $\text{Fe}^0$  对污泥厌氧消化过程中 VFAs 生成的影响

Fig. 1 Effect of  $\text{Fe}^0$  on VFAs production during sludge anaerobic digestion

$4159.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,表明  $\text{Fe}^0$  的加入不仅可以加快污泥厌氧消化进程,而且可以大幅度提高 VFAs 的生成量,这主要是因为  $\text{Fe}^0$  是一种性能优良的还原材料<sup>[23]</sup>,可以快速降低反应体系的 ORP,增强污泥有机质的厌氧消化. Feng 等<sup>[15]</sup>研究同样发现,当加入质量浓度为  $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{Fe}^0$  时,污泥厌氧消化体系 VFAs 产量提高了 37.3%,其中乙酸质量浓度由未投加  $\text{Fe}^0$  的  $759.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  提高至  $1303.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

### 2.2 污泥厌氧消化过程中 TC-ARGs 和 *intI1* 基因的变化特征

图 2 为 7 种不同的 TC-ARGs 和 *intI1* 基因丰度在污泥厌氧消化过程中的变化情况. 从中可以看出,在厌氧消化周期 12 d 内,所有 TC-ARGs 丰度均呈现出逐渐降低的变化趋势,其中 *tetO* 基因降幅最小,约 0.6 个数量级,而 *tetC* 基因降幅最大,达 3 个数量级,表明高温厌氧消化可以有效地降低污泥中的 TC-ARGs,这与 Ma 等<sup>[10]</sup>的研究结果相似. 与此同时,TC-ARGs 在第 8 d 时已基本降至最低,继续延长反应时间对 TC-ARGs 的消减影响并不显著( $P > 0.05$ ). 分析原因推测可知,在污泥高温厌氧消化过程前期,携带有 TC-ARGs 的细菌微生物进行新陈代谢逐渐消亡,从而导致 TC-ARGs 丰度的降低. 此外,质粒消除和转座过程的发生也有可能是其下降的原因之一<sup>[9]</sup>. 活性污泥本身成分复杂,微生物量丰富,细菌细胞之间相互接触紧密,并且含有多种可导致 ARGs 产生、增殖和传播的选择性因子,能够增强细菌细胞通过基因水平转移获得 ARGs,从而改变 ARGs 在厌氧消化过程中的变化行为<sup>[8]</sup>. 因此,当携带有 TC-ARGs 的细菌微生物消亡速率与其通过基因水平

转移转入其他细菌遗传因子的速率达到平衡时, TC-ARGs 丰度可基本维持在较为稳定的水平.

此外, *intI1* 基因在污泥厌氧消化过程中同样呈

现出逐渐降低的趋势, 到第 12 d 时降幅可达 2.2 个数量级, 去除率高达 99.4%, 表明高温厌氧过程可以有效地削减 *intI1* 基因的丰度.

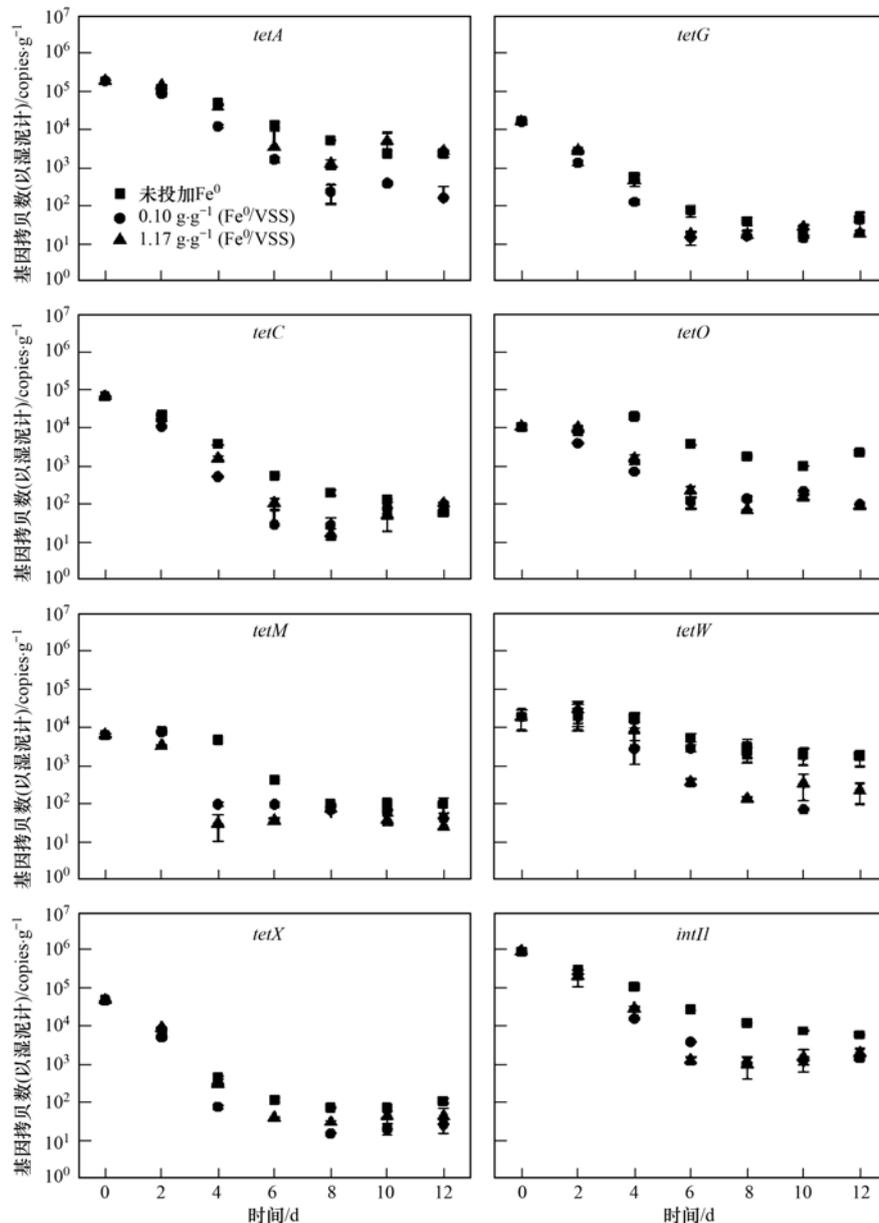


图 2 TC-ARGs 和 *intI1* 基因丰度在污泥厌氧消化过程中的变化情况

Fig. 2 Absolute quantities of TC-ARGs and *intI1* genes during sludge anaerobic digestion

从图 2 分析可知,  $\text{Fe}^0$  的加入不仅加快了 TC-ARGs 和 *intI1* 基因的消减速率, 而且增强了其消减效果. 当  $\text{Fe}^0$  投加量为  $0.10 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  (AD2) 时, 各目标基因丰度降幅达 2.0 (*tetO*) ~ 4.3 (*tetW*) 个数量级. 与未投加  $\text{Fe}^0$  的 AD1 系统相比, AD2 中 *tetA*、*tetG*、*tetO* 和 *tetW* 基因丰度降低显著 ( $P < 0.05$ ), 降幅分别提高了 1.2、1.6、1.4 和 3.2 个数量级. 尽管如此, 当  $\text{Fe}^0$  投加量为  $1.17 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  (AD3) 时, 各目标基因丰度降幅为 1.6 (*tetM*) ~ 3.1 (*tetX*) 个数量级. 与

AD2 系统相比, AD3 系统中所有目标基因丰度降幅变小 (*tetO* 基因除外, 基本维持不变), 且 *tetA*、*tetG* 和 *tetW* 基因丰度降幅显著 ( $P < 0.05$ ), 分别达 1.2、1.3 和 2.3 个数量级, 表明过量的  $\text{Fe}^0$  对污泥厌氧消化过程中 TC-ARGs 和 *intI1* 基因消减的增强效果并不显著, 推测可能是因为过量  $\text{Fe}^0$  体系中细菌微生物胞外电子传递过程较为频繁, 从而强化促进了 TC-ARGs 的基因水平转移, 具体机制过程还需进一步探讨研究.

### 2.3 相关性分析

由表2数据分析可知,在AD1系统中,除 *tetO* 基因外,其余 TC-ARGs 和 *intI1* 基因与乙酸之间存在显著负相关性 ( $-0.833 > r > -0.975$ ,  $P < 0.05$ ),表明污泥厌氧过程中乙酸的质量浓度变化对 TC-ARGs 和 *intI1* 基因的消减具有较大影响. Ghosh 等<sup>[24]</sup>研究同样发现,两段式高温/中温厌氧消化过程对 *tetX* 和 *intI1* 基因去除效果显著,但对 *tetO* 基因的消减影响稍差. 然而,有研究显示<sup>[25]</sup>,乙酸可与钙、镁等二价阳离子进行结合形成配合物,从而提高四环素分子的微生物可利用性,增强 TC-ARGs 的抗性表达,表明乙酸可以间接地影响 TC-

ARGs 的变化特征. 因此,针对污泥厌氧消化过程中乙酸的存在和变化对 TC-ARGs 及 *intI1* 基因的消减影响及内在作用机制还有待继续深入探讨.

此外,从表2还可以发现,AD2系统中乙酸与 *tetO* 基因之间存在显著负相关性,表明  $Fe^0$  的加入可以强化对 *tetO* 基因的消减. 尽管如此,在AD3系统中并未发现乙酸与目标 TC-ARGs 和 *intI1* 基因之间存在显著相关性,这与上述  $Fe^0$  对 TC-ARGs 和 *intI1* 基因丰度变化特征结果是相一致的. 与乙酸相比,污泥厌氧消化过程中丁酸与 TC-ARGs 和 *intI1* 基因之间相关性并不显著 ( $P > 0.05$ ),表明丁酸的产生和变化对 TC-ARGs 和 *intI1* 基因的消减影响较小.

表2 污泥厌氧消化过程中 VFAs 与 TC-ARGs 和 *intI1* 基因相关性分析<sup>1)</sup>

类型	Fe <sup>0</sup> 投加量/g·g <sup>-1</sup>	VFAs			乙酸			丁酸		
		0	0.10	1.17	0	0.10	1.17	0	0.10	1.17
<i>tetA</i>	<i>r</i>	-0.122	<b>-0.845</b>	-0.538	<b>-0.975</b>	<b>-0.832</b>	-0.544	0.184	0.542	0.552
	<i>P</i>	0.818	<b>0.034</b>	0.271	<b>0.001</b>	<b>0.040</b>	0.264	0.728	0.267	0.256
<i>tetC</i>	<i>r</i>	-0.435	-0.793	-0.482	<b>-0.875</b>	-0.779	-0.487	-0.149	0.486	0.476
	<i>P</i>	0.389	0.060	0.333	<b>0.023</b>	0.068	0.327	0.778	0.329	0.340
<i>tetG</i>	<i>r</i>	-0.387	<b>-0.821</b>	-0.511	<b>-0.895</b>	-0.808	-0.516	-0.097	0.518	0.510
	<i>P</i>	0.448	<b>0.045</b>	0.300	<b>0.016</b>	0.052	0.294	0.855	0.293	0.302
<i>tetM</i>	<i>r</i>	0.039	-0.773	-0.451	<b>-0.970</b>	-0.760	-0.455	0.262	0.472	0.432
	<i>P</i>	0.941	0.071	0.370	<b>0.001</b>	0.080	0.365	0.616	0.345	0.393
<i>tetO</i>	<i>r</i>	0.736	<b>-0.851</b>	-0.506	-0.641	<b>-0.839</b>	-0.512	<b>0.909</b>	0.560	0.507
	<i>P</i>	0.095	<b>0.031</b>	0.305	0.170	<b>0.037</b>	0.300	<b>0.012</b>	0.248	0.305
<i>tetW</i>	<i>r</i>	0.141	-0.245	-0.551	<b>-0.974</b>	-0.267	-0.557	0.437	0.469	0.557
	<i>P</i>	0.789	0.640	0.257	<b>0.001</b>	0.610	0.251	0.386	0.349	0.251
<i>tetX</i>	<i>r</i>	-0.508	-0.778	-0.458	<b>-0.833</b>	-0.765	-0.463	0.233	0.480	0.448
	<i>P</i>	0.303	0.068	0.361	<b>0.040</b>	0.077	0.356	0.657	0.335	0.372
<i>intI1</i>	<i>r</i>	-0.274	-0.807	-0.500	<b>-0.942</b>	-0.793	-0.504	0.027	0.503	0.495
	<i>P</i>	0.599	0.052	0.313	<b>0.005</b>	0.060	0.308	0.960	0.309	0.318

1) 黑体字表示具有显著相关性 ( $P < 0.05$ )

### 3 结论

(1) 在污泥高温厌氧消化系统中加入  $Fe^0$  不仅能够加快消化反应进程,同时可以大幅度提高总 VFAs 和乙酸的产生量,并且随着  $Fe^0$  投加量的增大而升高.

(2) 高温厌氧消化可以有效地降低污泥中 TC-ARGs 和 *intI1* 基因丰度,且适量的  $Fe^0$  可以强化目标基因的进一步消减,但过量的  $Fe^0$  对目标 TC-ARGs 和 *intI1* 基因去除效果的增强不显著,推测可能是由于基因水平转移的发生所导致的.

(3) 由相关性分析结果可知,TC-ARGs(除 *tetO* 基因外)和 *intI1* 基因与乙酸之间存在显著负相关

性,表明乙酸浓度的升高对 TC-ARGs 和 *intI1* 基因的消减具有促进作用. 相比之下,丁酸对 TC-ARGs 和 *intI1* 基因的消减影响较小.

#### 参考文献:

- [1] Pruden A, Pei R T, Storteboom H, et al. Antibiotic resistance genes as emerging contaminants: studies in Northern Colorado [J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(23): 7445-7450.
- [2] Ling A L, Pace N R, Hernandez M T, et al. Tetracycline resistance and class 1 integron genes associated with indoor and outdoor aerosols [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(9): 4046-4052.
- [3] Luo Y, Mao D Q, Rysz M, et al. Trends in antibiotic resistance genes occurrence in the Haihe river, China [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(19): 7220-7225.
- [4] Gao P, He S, Huang S L, et al. Impacts of coexisting

- antibiotics, antibacterial residues, and heavy metals on the occurrence of erythromycin resistance genes in urban wastewater [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, **99**(9): 3971-3980.
- [ 5 ] 张俊, 罗方园, 熊浩徽, 等. 环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4267-4274.  
Zhang J, Luo F Y, Xiong H H, *et al.* Effect of environmental factors on the formation of several typical tetracycline resistance genes in soil[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4267-4274.
- [ 6 ] 何势, 顾超超, 魏欣, 等. 低浓度环丙沙星对曝气生物滤池生物膜硝化过程及硝化微生物的作用影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 308-314.  
He S, Gu C C, Wei X, *et al.* Effect of low-concentration ciprofloxacin on the nitrification and nitrifying microorganisms of biofilms in biological aerated filter[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 308-314.
- [ 7 ] Rizzo L, Manaia C, Merlin C, *et al.* Urban wastewater treatment plants as hotspots for antibiotic resistant bacteria and genes spread into the environment: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **447**: 345-360.
- [ 8 ] Calero-Cáceres W, Melgarejo A, Colomer-Lluch M, *et al.* Sludge as a potential important source of antibiotic resistance genes in both the bacterial and bacteriophage fractions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(13): 7602-7611.
- [ 9 ] Diehl D L, Lapara T M. Effect of temperature on the fate of genes encoding tetracycline resistance and the integrase of class I integrons within anaerobic and aerobic digesters treating municipal wastewater solids [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(23): 9128-9133.
- [ 10 ] Ma Y J, Wilson C A, Novak J T, *et al.* Effect of various sludge digestion conditions on sulfonamide, macrolide, and tetracycline resistance genes and class I integrons[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(18): 7855-7861.
- [ 11 ] 钱燕云, 徐莉柯, 苏超, 等. 初始 pH 对厌氧环境下污泥中抗生素抗性基因行为特征的影响[J]. *生态毒理学报*, 2015, **10**(5): 47-55.  
Qian Y Y, Xu L K, Su C, *et al.* Effect of initial pH on antibiotic resistance genes behavior during anaerobic treatment of sludge [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2015, **10**(5): 47-55.
- [ 12 ] 佟娟, 王元月, 魏源送. 城市污泥中温厌氧消化过程中厌氧耐药菌的分布与去除研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(10): 3814-3820.  
Tong J, Wang Y Y, Wei Y S. Distribution and removal of anaerobic antibiotic resistant bacteria during mesophilic anaerobic digestion of sewage sludge[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(10): 3814-3820.
- [ 13 ] 李侃竹, 吴立乐, 黄圣琳, 等. 污水处理厂中红霉素抗药性基因的污染特征及选择性因子[J]. *环境科学*, 2014, **35**(12): 4589-4595.  
Li K Z, Wu L L, Huang S L, *et al.* Investigation of pollution characteristics of erythromycin resistance genes in a sewage treatment plant and the relevant selective factors [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4589-4595.
- [ 14 ] 任佳, 姚宏, 刘苗苗, 等. 厌氧和好氧处理过程中四环素抗药基因的丰度[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(1): 268-275.  
Ren J, Yao H, Liu M M, *et al.* Characteristics of tetracycline resistance genes in the anaerobic and aerobic treatment of tetracycline production wastewater [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(1): 268-275.
- [ 15 ] 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**(4): 242-250.
- [ 16 ] Gao P, Munir M, Xagorarakis I. Correlation of tetracycline and sulfonamide antibiotics with corresponding resistance genes and resistant bacteria in a conventional municipal wastewater treatment plant[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **421-422**: 173-183.
- [ 17 ] 黄圣琳, 何势, 魏欣, 等. 污水处理厂中四环素类抗生素残留及其抗性基因污染特征研究进展[J]. *化工进展*, 2015, **34**(6): 1779-1785.  
Huang S L, He S, Wei X, *et al.* Pollution characteristics of tetracycline residues and tetracycline resistance genes in sewage treatment plants: a review [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2015, **34**(6): 1779-1785.
- [ 18 ] Mazel D. Integrons: agents of bacterial evolution [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2006, **4**(8): 608-620.
- [ 19 ] Ng L K, Martin I, Alfa M, *et al.* Multiplex PCR for the detection of tetracycline resistant genes [J]. *Molecular and Cellular Probes*, 2001, **15**(4): 209-215.
- [ 20 ] Aminov R I, Garrigues-Jeanjean N, Mackie R I. Molecular ecology of tetracycline resistance: development and validation of primers for detection of tetracycline resistance genes encoding ribosomal protection proteins [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, **67**(1): 22-32.
- [ 21 ] Bass L, Liebert C A, Lee M D, *et al.* Incidence and characterization of integrons, genetic elements mediating multiple-drug resistance, in Avian *Escherichia coli* [J]. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 1999, **43**(12): 2925-2929.
- [ 22 ] Wang L, Zhou Q, Li F T. Avoiding propionic acid accumulation in the anaerobic process for biohydrogen production[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2006, **30**(2): 177-182.
- [ 23 ] Sun Y K, Li J X, Huang T L, *et al.* The influences of iron characteristics, operating conditions and solution chemistry on contaminants removal by zero-valent iron: a review [J]. *Water Research*, 2016, **100**: 277-295.
- [ 24 ] Ghosh S, Ramsden S J, LaPara T M. The role of anaerobic digestion in controlling the release of tetracycline resistance genes and class I integrons from municipal wastewater treatment plants [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2009, **84**(4): 791-796.
- [ 25 ] Zhang Y J, Boyd S A, Teppen B J, *et al.* Organic acids enhance bioavailability of tetracycline in water to *Escherichia coli* for uptake and expression of antibiotic resistance [J]. *Water Research*, 2014, **65**: 98-106.

## CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing .....	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> ( 423 )
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China .....	CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> ( 429 )
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in Shengsi Region .....	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> ( 438 )
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM <sub>2.5</sub> from Mt. Taishan .....	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> ( 445 )
Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing .....	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> ( 453 )
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region .....	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> ( 461 )
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing .....	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> ( 469 )
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014 .....	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> ( 476 )
Variation Analysis of Daily PM <sub>2.5</sub> Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou .....	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> ( 485 )
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing .....	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> ( 495 )
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong .....	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> ( 502 )
Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations .....	GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> ( 510 )
Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century .....	WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> ( 517 )
Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge .....	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> ( 527 )
Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors .....	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> ( 535 )
Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer .....	QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> ( 547 )
Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone .....	LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> ( 555 )
Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water .....	JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> ( 563 )
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO .....	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> ( 572 )
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland .....	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> ( 580 )
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants .....	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> ( 589 )
Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir .....	HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> ( 600 )
Experimental Research of Hg <sup>2+</sup> Removal by TiO <sub>2</sub> /Bentonite Composite .....	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> ( 608 )
Impact of Ammonia and H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> on Bromate and Disinfection By-products Control .....	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> ( 616 )
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks .....	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> ( 622 )
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite .....	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> ( 629 )
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation .....	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> ( 640 )
Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes .....	GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> ( 647 )
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources .....	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> ( 654 )
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System .....	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> ( 665 )
Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance .....	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> ( 672 )
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge .....	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> ( 679 )
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i> .....	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> ( 688 )
Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge .....	WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> ( 697 )
Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City .....	WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> ( 703 )
Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China .....	CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> ( 711 )
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes .....	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> ( 721 )
Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil .....	YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> ( 728 )
Effects of <i>Rhodospseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure .....	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> ( 735 )
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment .....	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> ( 743 )
Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas .....	HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> ( 752 )
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils .....	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> ( 760 )
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances .....	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> ( 769 )
Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity .....	NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> ( 783 )
Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain .....	CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> ( 792 )
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics .....	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> ( 802 )
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain .....	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> ( 809 )
Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat .....	SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> ( 815 )
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat .....	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> ( 825 )
Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure .....	LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> ( 832 )
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures .....	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, <i>et al.</i> ( 837 )

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

## 环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2017年2月15日 第38卷 第2期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行

ISSN 0250-3301



9 770250 330172