

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

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

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估 ..... 李晓晓,张强,邓建国,蒋靖坤,郝吉明(3095)

钢铁工业排放颗粒物中碳组成的特征 ..... 张进生,吴建会,马威,冯银厂(3102)

常州市大气 PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 污染特征及来源解析 ..... 顾爱军,刘佳澍,罗世鹏,毕承路,苏亚兰,叶招莲,盖鑫磊(3110)

兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源 ..... 尉媛丽,刘攀亮,于周锁,高宏,毛潇萱,马建民,黄韬(3120)

株洲市大气降尘中元素特征及来源分析 ..... 王世豪,张凯,柴发合,钟学才,周广柱,杨晴,柯馨姝(3130)

传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征 ..... 徐敏,何万清,聂磊,韩力慧,潘涛,石爱军(3139)

基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征 ..... 史纯珍,郝雪薇,申现宝,曹鑫悦,张伟,吴辉,姚志良(3146)

基于 wavelet-SVM 的 PM<sub>10</sub> 浓度时序数据预测 ..... 王平,张红,秦作栋,姚清晨,耿红(3153)

广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算 ..... 黄学良,张洲,杨威强,李晟,朱明,方华,何俊杰,陈俊文,万承浩,张艳利,刘国光,黄祖照,王宇骏,王新明(3162)

沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响 ..... 李鸿涛,祁建华,董立杰,高冬梅(3169)

典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价 ..... 芦会杰(3178)

杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征 ..... 张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,陈金汉,余波,周姗,张伟(3185)

黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征 ..... 聂明华,晏彩霞,杨毅,周俊良,刘敏(3192)

漓江地表水体有机碳来源 ..... 赵海娟,肖琼,吴夏,刘凡,苗迎,蒋勇军(3200)

夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响 ..... 吴飞红,蒲俊兵,李建鸿,张陶,李丽,黄思宇(3209)

城市不同功能区地表水重金属污染特性比较:以宁波为例 ..... 徐美娟,童桂华,孙丹,李建新,虞效益(3218)

地下水主要组分水化学异常识别方法对比:以柳江盆地为例 ..... 张小文,何江涛,彭聪,张昌延,倪泽华(3225)

人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析 ..... 李如忠,叶舟,高苏蒂,郑悦(3235)

长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义 ..... 刘军,臧家业,冉祥滨,赵晨英,刘季花,王小静(3243)

三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系 ..... 陈成龙,高明,木志坚,倪九派,祁乐(3254)

黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估:以羊圈沟坝系流域为例 ..... 鄂馨卉,汪亚峰,高扬,陈利顶,陈世博,陈维梁(3264)

新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制 ..... 李欢,李正魁,李爱民,周庆,王莹,潘咏(3273)

藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响 ..... 张大为,徐慧,王希,门彬,王东升,段晋明(3281)

汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析 ..... 向蓉,李巧玉,喻毅,张洪波,董聪聪,施军琼,吴忠兴(3290)

石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析 ..... 宋云龙,张金松,郭小雅,朱佳,王丽,陶益,张丽(3302)

不同湿地模型中根系微生物的多样性 ..... 王林,李冰,余家辉,朱加宾,朱健(3312)

北海湖微生物群落结构随季节变化特征 ..... 张雅洁,李珂,朱浩然,张洪勋(3319)

基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析 ..... 张海耿,宋红桥,顾川川,单建军,张宇雷,倪琦(3330)

高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析 ..... 孟婷,杨宏(3339)

基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理 ..... 韩松芳,金文标,涂仁杰,陈洪一(3347)

生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果 ..... 王愿珠,程鹏飞,刘德富,刘天中(3354)

微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水 ..... 刘春,周洪政,张静,陈晓轩,张磊,郭延凯(3362)

pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响 ..... 于德爽,周同,李津,王晓霞,吴国栋,王晓静(3369)

酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性 ..... 周正,林兴,王凡,顾澄伟,沈婧,袁砚,金润(3377)

模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性 ..... 康乃馨,朱能武,郭雯颖,何志心(3385)

采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程 ..... 王利君,李志华,韩冬,张天宇,杨成建(3393)

CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动 ..... 张婷,吴鹏,沈耀良,闫刚,徐乐中, Samwine Thomas(3399)

硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径 ..... 完颜德卿,黄勇,毕贞,刘沂,姚鹏程,张文静(3406)

不同 TOC/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响 ..... 王凡,刘凯,林兴,周正,李祥,黄勇(3415)

盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响 ..... 谭潇,黄靓,杨平,涂弈州(3422)

CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略 ..... 孙延芳,韩晓宇,张树军,李星,曹相生(3429)

胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛烷磺酸(PFOS)的影响 ..... 刘鑫彤,尹华,彭辉,李浩榕,杨萍萍,曹雅娟(3435)

不同施肥方式下紫色土 N<sub>2</sub>O 与 NO<sub>x</sub> 的排放特征 ..... 胡磊,刘韵,朱波(3442)

地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响 ..... 张凯莉,郝庆菊,冯迪,石将来,石孝均,江长胜(3451)

模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响 ..... 张翠景,沈菊培,孙翼飞,王军涛,杨中领,韩红艳,张丽梅,万师强,贺正(3463)

长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征 ..... 徐白璐,钟文辉,黄欠如,秦红益,邓欢,韩成(3473)

施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响 ..... 郭安宁,段桂兰,赵中秋,唐仲,王杨扬,王伯勋(3483)

水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应 ..... 魏亮,汤珍珠,祝贞科,蔡观,葛体达,王久荣,吴金水(3489)

凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素 ..... 张彦军(3497)

西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义 ..... 王新,夏敦胜,王博,陈红,刘浩(3507)

小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物炭及其吸附 Cd<sup>2+</sup> 活性 ..... 张如玉,刘海波,邹雪华,庆承松,李梦雪,陈冬,陈天虎(3519)

交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响 ..... 汪婷,丁锐,黄丹妮,祝子逸,章军,叶怀庄,徐迎春,金永堂(3529)

外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响 ..... 杨萍萍,尹华,彭辉,唐少宇,卢妙,刘皓(3536)

中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价 ..... 刘巍,田金平,陈吕军(3544)

《环境科学》征稿简则(3280) 《环境科学》征订启事(3301) 信息(3353, 3472, 3535)

# 盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响

谭潇, 黄靓, 杨平\*, 涂弈州

(四川大学建筑与环境学院, 成都 610065)

**摘要:** 高盐废水通常含有高 COD 浓度, 难以处理, 引用具有耐盐性能的生物反应器处理高盐废水成为必要. 使用模拟高盐废水在  $3.267 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  的 COD 容积负荷下, 将  $\text{Cl}^-$  浓度逐步从 0 提升至  $10\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 研究盐度对膨胀颗粒污泥床 (expanded granular sludge bed, EGSB) 反应器的影响. 结果表明,  $\text{Cl}^-$  浓度小于  $7\,500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 对微生物的抑制作用较低;  $\text{Cl}^-$  浓度为  $7\,500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 反应器的 COD 去除率能保持在 98.1% 左右, 容积产气率能够基本保持在  $1.3 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  以上, 大粒径的厌氧颗粒污泥仍然占据体系的主体; 当  $\text{Cl}^-$  浓度为  $10\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 反应器中的厌氧颗粒污泥受到严重影响. 采用高通量测序技术对 0 和  $5\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  两个  $\text{Cl}^-$  浓度下的厌氧颗粒污泥的微生物菌群结构进行分析, 结果表明, 盐度影响了微生物的种群分布, 在  $5\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{Cl}^-$  浓度下, 主要的优势菌属由  $\text{Cl}^-$  浓度为 0 时的 *Methanoregula* 与 *Longilinea* 变为 *Methanobacterium*、*Methanospirillum*、*Methanotrix* 和 *Paludibacter*.

**关键词:** 盐度; 膨胀颗粒污泥床反应器; COD 去除率; 容积产气率; 厌氧颗粒污泥; 高通量测序

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3422-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201701147

## Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge

TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping\*, Tu Yi-zhou

(College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** The existence of high concentrations of salinity and organics would have a great impact on the microorganisms when using bioreactors to treat wastewater. Thus, it is necessary to find bioreactors resistant to high concentrations of salinity. The effect of salinity on an expanded granular sludge bed reactor (EGSB) was studied by increasing the  $\text{Cl}^-$  concentration from 0 to  $10\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  using simulated high salinity wastewater with a COD volume loading of  $3.267 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ . The results show no obvious inhibitory effect of  $\text{Cl}^-$  on the microorganism when the concentration of  $\text{Cl}^-$  was below  $7\,500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . Above  $1.3 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  volumetric gas production rate was maintained and COD removal rate could achieved 98.1% when the  $\text{Cl}^-$  concentration up to  $7\,500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  while the large particle size of anaerobic granular sludge occupying the majority of of the system. The anaerobic granular sludge was seriously affected when the  $\text{Cl}^-$  concentration as  $10\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . The community structure of the anaerobic granular sludge was analyzed using high-throughput sequencing when the  $\text{Cl}^-$  concentration was 0 and  $5\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . The results show that the salinity stress produced different dominant groups. The dominant species were *Methanobacterium*, *Methanospirillum*, *Methanotrix*, and *Paludibacter* when the  $\text{Cl}^-$  concentration was  $5\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , but *Methanoregula* and *Longilinea* were the dominant species when the  $\text{Cl}^-$  concentration was 0.

**Key words:** salinity; expanded granular sludge bed reactor (EGSB); COD removal rate; volumetric gas production rate; anaerobic granular sludge; high-throughput sequencing

高含盐废水的种类很多,石油、页岩气开采,电镀、制药、印染、发酵工业、海产品加工废水等都含有较高浓度的无机盐组分如  $\text{Cl}^-$  等<sup>[1-3]</sup>. 生物处理方法是目前广泛采用的高盐废水处理<sup>[4]</sup>,虽然高含盐废水中较高的盐度会影响生物处理的效果,但若采用其他的方法,如膜分离等技术则成本较高<sup>[5]</sup>,所以生物处理仍是首选的处理方法<sup>[6]</sup>. 盐度影响生物处理效果的主要原因在于:在生物处理方法中,主要是利用活性污泥或生物膜、颗粒污泥中微生物的新陈代谢来吸附降解废水中的污染物,而高盐度会引起高渗透压,使微生物细胞脱水,同时也会抑制微生物降解有机物的反应效率<sup>[7,8]</sup>,从而影响生物处理方法的效果. 因此,在处理高含盐废水

时应当选择能够耐受高盐度影响的生物反应器.

迄今为止,已进行过盐度影响实验研究的生物反应器有膜生物反应器、移动床生物膜反应器、升流式厌氧污泥床 (up-flow anaerobic sludge blanket, UASB) 反应器、上流式厌氧生物滤池反应器、EGSB 反应器等<sup>[9-13]</sup>,由于颗粒污泥在盐度负荷冲击下能够体现出更高的适应能力<sup>[14]</sup>,UASB 等能够培养出厌氧颗粒污泥的生物反应器得以在处理高含盐废水时有更多的应用研究,但同时从反应器处理效果和

收稿日期: 2017-01-17; 修订日期: 2017-03-18

基金项目: 四川省科技厅科技支撑计划项目(2015SZ0009)

作者简介: 谭潇(1992~),女,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制, E-mail: heishihe@163.com

\* 通信作者, E-mail: yping63@163.com

微生物角度分析研究较少. EGSB 是在 UASB 基础上发展起来的第三代厌氧反应器, 与 UASB 相比有更好的运行效果<sup>[15]</sup>. 本次研究利用模拟的高盐度废水, 从盐度影响下 EGSB 反应器的运行效果和厌氧颗粒污泥两个方面进行分析比较, 并对厌氧颗粒污泥做高通量测序, 以期 EGSB 反应器应用于高含盐工业废水的实际处理提供实验数据.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

实验用 EGSB 反应器由圆筒形有机玻璃制成, 总高 1.4 m, 内径 0.12 m, 总容积为 15.52 L, 有效容积为 15.18 L. 回流口在距反应器底部 1.19 m 的位置, 三相分离器圆环挡板距离顶部 0.16 m, 三相分离器集气罩呈圆锥形, 底部直径 0.1 m, 顶部直径 0.03 m, 高 0.08 m, 排气通道高 0.07 m, 集气罩、排气通道和 EGSB 反应器上盖密闭. 投加颗粒污泥于反应器中, 进水和回流分别通过蠕动泵从反应器底部进入. 颗粒污泥、沼气、废水三相在反应器中混合, 随着水流上升至三相分离器, 沼气进入集气罩, 而大部分废水通过集气罩与挡板间的缝隙进入出水区, 颗粒污泥由于重力作用, 在遇到挡板和集气罩壁后, 下降至污泥层, 因此能很好地实现气、液、固的三相分离.

### 1.2 实验用水

人工配置的模拟高盐废水用于本次实验, 通过进水中逐渐增加的盐度对 EGSB 反应器进行驯化. 人工配水主要由葡萄糖、 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 、 $\text{NaHCO}_3$ 、 $\text{NaCl}$  和营养液配制而成, 葡萄糖、 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$  分别作为人工配水中微生物生长代谢所必须的 C、N、P 源, 三者的投加量比例为 C:N:P = 250:5:1, 后期调整为 125:5:1. 采用  $\text{NaCl}$  提供人工配水中的盐度, 对微生物进行盐度驯化, 其投加量逐渐由 0 增加到  $7\,500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 营养液中包含微生物生长所需要的微量元素, 其组成成分详见表 1.

表 1 营养与组成成分

Table 1 Composition of the nutrients

化学成分	浓度 / $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	化学成分	浓度 / $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
$\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	6.985	$\text{MnSO}_4\cdot \text{H}_2\text{O}$	1.067
$\text{CuCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.075	$\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.263
$\text{H}_3\text{BO}_3$	0.125	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.125
$\text{NiCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.250	$\text{CoSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.443

### 1.3 分析项目及方法

COD 采用快速测定法, 测定仪器为 5B-3(C) 型

COD 快速测定仪(中国连华科技); 湿式气体流量计用于计量沼气产量; 颗粒污泥粒径分布用湿式筛分法测定; 颗粒污泥沉降速度采用重量沉降法.

厌氧颗粒污泥高通量测序: 按照 OMEGA 公司的 E. Z. N. ATM Mag-Bind Soil DNA Kit 试剂盒说明书中的步骤提取厌氧颗粒污泥微生物中的 DNA, 用琼脂糖凝胶检测 DNA 完整性. 细菌 PCR 扩增采用引物为 341F: CCCTACACGACGCTCTTCCGATCTG (barcode) CCTACGGGNGGCWGCAG, 805R: GACTG GAGTTCCTTGGCACCCGAGAATTCCAGACTACHVG GGTATCTAATCC. 古菌引用槽式 PCR 扩增有三轮, 第一轮使用引物为 340F: CCCTAYGGGGY GCASCAG, 1000R: GGCCATGCACYWCYTCTC, 第二轮引物为 349F: CCCTACACGACGCTCTTCCGATCTN (barcode) GYGCASCA G KCGMGA AW, 806R: GAC TGGAGTTCCTTGGCACCCGAGAATTCCAGGACTACV SGGGTATCTAAT, 第三轮扩增, 引入 Illumina 桥式 PCR 兼容引物. PCR 结束后, 将 PCR 产物进行琼脂糖电泳检测, DNA 纯化回收, 利用 Qubit2.0 DNA 检测试剂盒对回收的 DNA 精确定量, 以方便按照 1:1 的等量混合后测序. 委托生工生物工程(上海)股份有限公司进行 Illumina MiSeq 高通量测序, 测序数据通过质量控制预处理, 去除嵌合体及靶区域外序列后, 在 OTU 聚类结果的基础上进行 RDP 分析. 预处理采用的软件为 Prinseq (版本 0.20.4) 与 FLASH (版本 1.2.3), 去除嵌合体及靶区域外序列采用的软件为 Mothur (版本 1.30.1), 分类采用的软件为 RDP classifier.

### 1.4 实验方法

实验通过调整 EGSB 反应器进水中  $\text{Cl}^-$  的浓度来增加反应器盐度负荷, 在 0 盐度下连续启动反应器后分 4 个阶段逐步提高进水中  $\text{Cl}^-$  的浓度, 各阶段进水中  $\text{Cl}^-$  浓度依次为 2 000、3 500、5 000 和 7 500  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 在每个阶段测定反应器的进出水 COD 值、容积产气率、厌氧颗粒污泥的粒径分布和沉降速度. 对  $\text{Cl}^-$  浓度为 0 和 5 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  两个阶段的厌氧颗粒污泥进行高通量测序和宏基因组分析.

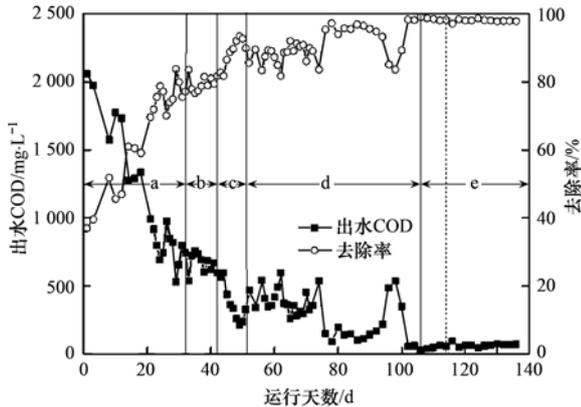
接种的厌氧颗粒污泥来自于某饮料生产企业的污水处理站 UASB 反应器中形成的颗粒污泥, 接种颗粒污泥体积占 EGSB 反应器总容积的 50%. 反应器水力停留时间 (hydraulic retention time, HRT) 为 24 h, 回流比  $R$  为 6:1, 反应器温度使用电阻丝温控器控制在  $(35\pm 2)\text{ }^\circ\text{C}$ , 进水 pH 值维持在 6.8~7.2,

进水 COD 浓度维持在  $3267 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , COD 容积负荷为  $3.267 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ .

## 2 结果与讨论

### 2.1 盐度对 COD 降解的影响

EGSB 反应器在控制进水 COD 浓度、进水 COD 容积负荷、pH 等因素基本不变的运行条件下受不同盐度(以  $\text{Cl}^-$  浓度计)影响, COD 降解效率的变化情况如图 1 所示.



图中 a、b、c、d、e 这 5 个部分的进水  $\text{Cl}^-$  浓度依次为 0、2 000、3 500、5 000、7 500  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 在反应器启动后的 114 d  $\text{Cl}^-$  浓度曾调整为 10 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 随即停止进水, 3 d 后又恢复到 7 500  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (图中以虚线标示), 下同

图 1 COD 降解效率的变化

Fig. 1 Variations in concentrations of COD removal efficiency

$\text{Cl}^-$  浓度低于  $7500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时 EGSB 反应器的 COD 降解效率受到的影响不大, 适当地提高盐度更能促进 COD 的降解, 这一点与刘峰等<sup>[11]</sup>的上流式厌氧生物滤池实验结果相似. 反应器完成启动后, COD 平均去除率为 76.2%, 出水的 COD 平均浓度为  $699.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 当进水的  $\text{Cl}^-$  浓度为  $2000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , COD 去除率略有降低, 但与前一阶段相比仍有升高, 且仍然呈增长趋势, 平均去除率为 79.2%, 出水的 COD 平均浓度为  $678.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 当进水的  $\text{Cl}^-$  浓度提升到  $3500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 反应器的 COD 去除率未受到显著影响, 持续升高, 平均去除率达到 87.7%, 出水的 COD 平均浓度为  $401.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 反应器在  $2500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $3000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $\text{Cl}^-$  浓度下 COD 去除率都能保持较快的增长速率, 并且在  $3500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $\text{Cl}^-$  浓度下去除率增长比前一阶段更快. 反应器运行的第 51 d 开始, 进水的  $\text{Cl}^-$  浓度增加到  $5000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 反应器 COD 去除率有所降低, 但仍然能维持在 80% 以上, 整个阶段中 COD 去除率在波动中逐渐上升, COD 平均去除率为

90.5%, 出水 COD 平均浓度为  $307.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 考虑到出水 COD 浓度波动较大, COD 去除率应有进一步提高的空间, 在反应器运行第 91 d 对进水条件做出调整, 将进水中 N、P 浓度增加一倍, 为反应器中微生物增加氮源磷源的供应. 当进水的  $\text{Cl}^-$  浓度进一步调整到  $7500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 反应器的 COD 平均去除率为 98.1%, 没有明显波动, 出水的 COD 平均值为  $61.08 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 因为 COD 去除率在  $7500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的进水  $\text{Cl}^-$  浓度下没有受到影响, 在反应器启动的第 114 d 曾一度将进水  $\text{Cl}^-$  浓度提升到  $10000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 但在调整次日 EGSB 反应器中的厌氧颗粒污泥即出现了严重的上浮流失现象, 随即停止进水, 2 d 后又将进水  $\text{Cl}^-$  浓度恢复为  $7500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 由于调整及时, 在此期间的 COD 降解并未受到很大影响, 反应器也很快恢复如前. 在  $5000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $\text{Cl}^-$  浓度下, EGSB 反应器经过接近 2 个月的驯化后 COD 的降解能力还能进一步提高,  $\text{Cl}^-$  浓度达到  $7500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 反应器的 COD 去除率能够不受影响稳定维持在最高水平.

### 2.2 盐度对容积产气率的影响

容积产气率主要反映了厌氧反应器的产沼气情况, 其在很大程度上反映了厌氧反应器的有机物降解情况<sup>[16]</sup>.

当进水  $\text{Cl}^-$  浓度在  $7500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下时, 反应器的容积产气率随盐度的提升会在出现一定的波动后逐渐提升, 最终稳定维持在一个较高水平. 从图 2 可以看出, 在 a、b 段, 反应器的容积产气率都比较稳定, 没有太大变化, 平均为  $0.91 \text{ m}^3\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ . 42 d 后, 随着  $\text{Cl}^-$  浓度增大到  $3500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 容积产气率波动很大, 但整个阶段的平均值比前一阶段有增长, 为  $1.19 \text{ m}^3\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ ; 结合同阶段

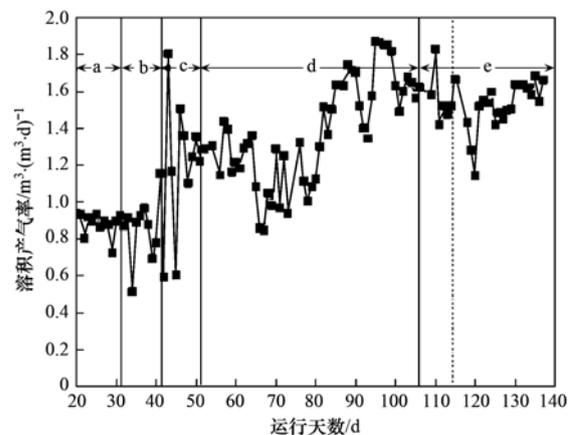


图 2 容积产气率的变化

Fig. 2 Variation of the volumetric gas production rate

COD 去除率的变化可见,与整体的厌氧消化过程相比,产甲烷过程对盐度的变化更敏感. 当  $\text{Cl}^-$  浓度为  $5\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 反应器的容积产气率在初期有下降趋势,在延长驯化时间并调整进水 N、P 浓度后,容积产气率又逐渐上升,整个阶段的平均值为  $1.39\text{ m}^3\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ ; 这个阶段的变化趋势与 COD 去除率的变化相近. 在图中 e 段,反应器的容积产气率在  $7\,500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $\text{Cl}^-$  浓度下略有下降,经过一段时间驯化后,反应器的容积产气率又逐渐恢复到原来的水平,维持在  $1.63\text{ m}^3\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$  左右.

反应器的容积产气率受到盐度影响的变化情况与 COD 降解的变化情况比较相似,在盐度提升时会受一定影响,而持续驯化一段时间后又逐渐恢复并能在原有水平上进一步提高;不同的是盐度变化对产气的影响更大,在图 2 中容积产气率的数据波动很大,不如 COD 降解率的变化平稳.

### 2.3 盐度对厌氧颗粒污泥的影响

在反应器运行的不同阶段分别取样测定了反应器中厌氧颗粒污泥的粒径分布与沉降速度参数,粒径分布与沉降速度能够体现颗粒污泥整体状态与降解性能,作为反应器内厌氧污泥的主体,EGSB 反应器中颗粒污泥的状态是反应器运行效果的关键<sup>[17]</sup>,颗粒污泥的状态与特性影响着厌氧反应器的处理效率、体系活性及系统稳定性等<sup>[17,18]</sup>.

从图 3 及表 2 可以看出,在盐度冲击下,大颗粒污泥受到影响解体为小颗粒污泥,使小颗粒污泥所占的比重上升. 当  $\text{Cl}^-$  浓度增加到  $7\,500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  且短暂调至  $10\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  后,粒径在  $0.9\sim 0.6\text{ mm}$  的颗粒污泥大量解体成为粒径小于  $0.6\text{ mm}$  的微小颗粒污泥,与前面的几个运行阶段相比变化较大. 在徐英博等<sup>[19]</sup>的实验中,颗粒污泥的粒径分布在高负荷下也表现出相同的变化,分析其原因为大颗粒污泥中微生物较为丰富,结构复杂,生长优势明显,而  $0.9\sim 0.6\text{ mm}$  颗粒污泥较易受影响出现解体,粒径减小. 在其他较低盐度下,颗粒污泥粒径分布变化可以保持在一个较小范围内.  $\text{Cl}^-$  浓度在  $0\sim 7\,500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  变化时,粒径大于  $2\text{ mm}$  的大颗粒污泥所占的质量分数始终在  $50\%$  以上,并且在  $\text{Cl}^-$  浓度调整到  $3\,500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  后,粒径大于  $2\text{ mm}$  的大颗粒污泥所占的质量分数还有较低增幅,可见颗粒污泥在这个等级的盐度负荷下适应良好.

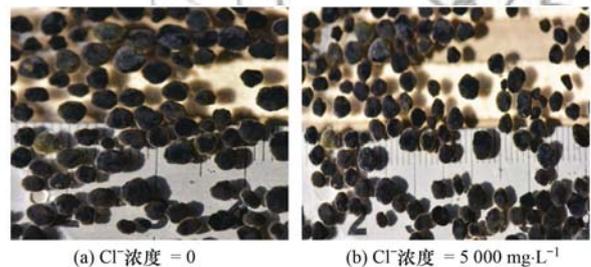


图 3 厌氧颗粒污泥照片

Fig. 3 Photos of the anaerobic granular sludge

表 2 厌氧颗粒污泥粒径分布(质量分数)/%

Table 2 Particle size distributions of the anaerobic granular sludge(mass fraction)/%

进水 $\text{Cl}^-$ 浓度 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	粒径/mm				
	$>2$	$2\sim 0.9$	$0.9\sim 0.6$	$0.6\sim 0.45$	$0.45\sim 0.2$
0	91.72	6.6	0.36	0.7	0.62
2 000	51.87	44.74	1.28	1.4	0.7
3 500	63.24	32.13	3.22	0.78	0.63
5 000	57.88	35.1	5.53	0.82	0.67
7 500	58.65	35.26	1.67	1.05	3.37

如图 4 所示,同等粒径范围内厌氧颗粒污泥的沉降速度受盐度影响不大,粒径大于  $0.9\text{ mm}$  的颗粒污泥的沉降速度始终在  $60\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$  以上,除粒径大于  $2\text{ mm}$  的颗粒污泥外的其他粒径较小的颗粒污泥的沉降速度都有一定的提升. 研究表明,废水浮力随盐度增加而提升,导致高含盐量的体系可以在系统中保留更为密实的颗粒污泥<sup>[20]</sup>,而大颗粒污泥内部容易营养不足引起细胞自溶形成空腔,从而密度下降<sup>[21]</sup>,影响沉降速度.

### 2.4 盐度对微生物群落多样性的影响

为进一步分析盐度对厌氧颗粒污泥体系中微生物群落多样性的影响,分别对  $\text{Cl}^-$  浓度为  $0$  和  $5\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  两个反应器运行阶段的厌氧颗粒污泥进行高通量测序和宏基因组分析,表 3、4 及图 5、6 分别展示了 2 个阶段中古菌和细菌在门水平和属水平分类层面上的类群分布情况.

在盐度的影响下,微生物群落的优势菌群变化很大.  $\text{Cl}^-$  浓度为  $0$  时,古菌中的优势菌属是 *Methanoregula* 与 *Methanotherix*, 分别占总数的  $50.01\%$  与  $32.59\%$ , 而当  $\text{Cl}^-$  浓度达到  $5\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 占据优势的菌属则是 *Methanobacterium* ( $57.5\%$ ), *Methanospirillum* ( $21.9\%$ ) 和 *Methanotherix*

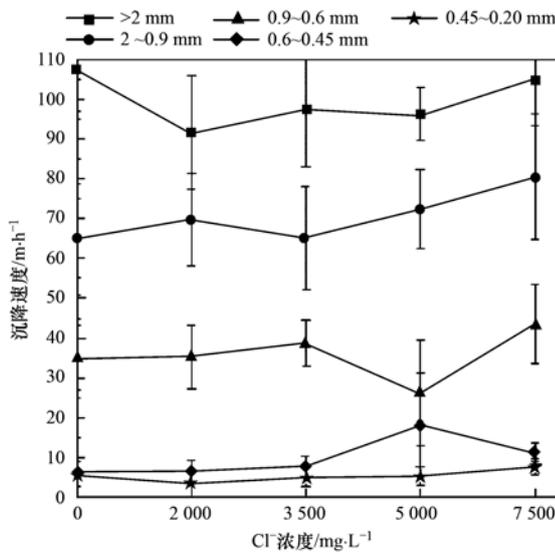


图 4 颗粒污泥沉降速度的变化

Fig. 4 Variation of settling velocity for the anaerobic granular sludge

(13.91%). *Methanoregula* 属于广古菌门 ( $\beta$ -Euryarchaeota) 甲烷微菌目 ( $\beta$ -Methanomicrobiales), 主要代谢底物是  $H_2$ 、 $CO_2$  [22]. *Methanotherix* 之前曾用名是 *Methanosaeta*, 属于专性乙酸营养型产甲烷古菌 [23,24], 有研究显示 *Methanosaeta* 适于在高负荷下

生长 [25]. *Methanobacterium* 属于广古菌门甲烷杆菌目 ( $\beta$ -Methanobacteriales), 可以利用  $H_2$ 、甲酸盐、甲醇等底物生产甲烷, *Methanospirillum* 属于广古菌门甲烷微菌目, 其主要代谢底物为甲酸 [23]. *Methanoregula*, *Methanotherix*, *Methanobacterium*, *Methanospirillum* 等都是厌氧消化器中常见的产甲烷菌属.

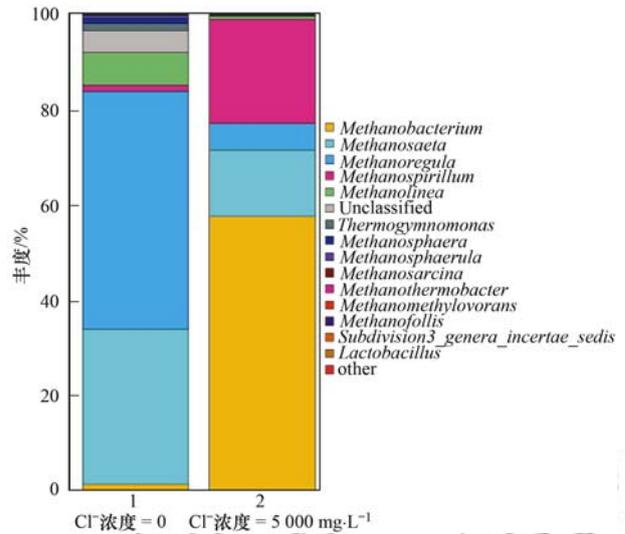


图 5 古菌属水平类群分布

Fig. 5 Phylotype distribution of archaea by taxonomic genus

表 3 古菌门水平类群分布

Table 3 Phylotype distribution of archaea by taxonomic phylum

门(样本 $Cl^-$ 浓度 = 0)	序列数	丰度/%	门(样本 $Cl^-$ 浓度 = 5 000 $mg \cdot L^{-1}$ )	序列数	丰度/%
$\beta$ -Euryarchaeota	29 548	98.77	$\beta$ -Euryarchaeota	34 109	99.98
$\beta$ -Crenarchaeota	300	1	$\beta$ -Crenarchaeota	7	0.02
Unclassified phylum	55	0.18	Unclassified phylum	1	0

表 4 细菌门水平类群分布

Table 4 Phylotype distribution of bacteria by taxonomic phylum

门(样本 $Cl^-$ 浓度 = 0)	序列数	丰度/%	门(样本 $Cl^-$ 浓度 = 5 000 $mg \cdot L^{-1}$ )	序列数	丰度/%
$\beta$ -Chloroflexi	8 055	23.86	$\beta$ -Bacteroidetes	8 474	29
$\beta$ -Proteobacteria	6 413	18.99	$\beta$ -Proteobacteria	6 771	23.17
$\beta$ -Euryarchaeota	3 804	11.55	$\beta$ -Firmicutes	5 278	18.06
$\beta$ -Bacteroidetes	1 684	11.27	$\beta$ -Spirochaetes	1 790	6.13
$\beta$ -Chlorobi	1 577	4.99	$\beta$ -Chloroflexi	1 324	4.53
Unclassified phylum	3 714	11	Unclassified phylum	1 232	4.22

在细菌群中,  $Cl^-$  浓度为 0 时的门水平上的主要菌群是  $\beta$ -Chloroflexi (23.86%),  $\beta$ -Proteobacteria (18.99%),  $\beta$ -Bacteroidetes (11.27%), 当  $Cl^-$  浓度达到 5 000  $mg \cdot L^{-1}$ , 占据主体的菌群则变为  $\beta$ -Bacteroidetes (29%),  $\beta$ -Proteobacteria (23.17%) 和  $\beta$ -Firmicutes (18.06%). 在属水平上没有特别优势的菌属, 在两个不同阶段优势最大的细菌分别是 *Longilinea* (7.49%) 与 *Paludibacter* (7.69%).

*Longilinea* 属于绿弯菌门 ( $\beta$ -Chloroflexi) 的厌氧绳菌目 ( $\beta$ -Anaerolineales), 可代谢多种碳水化合物. *Paludibacter* 属于拟杆菌门 ( $\beta$ -Bacteroidetes) 的紫单胞菌科 ( $\beta$ -Porphyromonadaceae), 能发酵多种单糖和二糖产丙酸、乙酸和少量丁酸 [22,26]. 当  $Cl^-$  浓度为 0 时, 在细菌的测序分析中发现了古菌的  $\beta$ -Euryarchaeota, 因为细菌与古菌的 16S rDNA 基因序列有较高的同源性, 在对细菌测序分析时也有可能

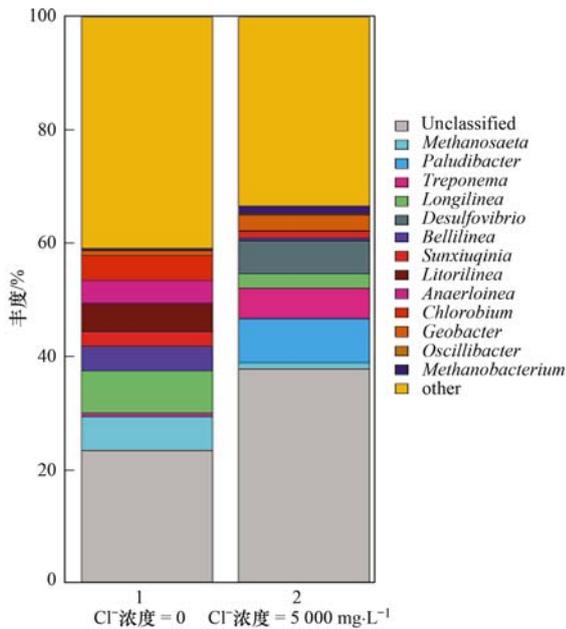


图6 细菌属水平类群分布

Fig. 6 Phylotype distribution of bacteria by taxonomic genus

发现古菌<sup>[24]</sup>,  $\beta$ -Euryarchaeota 在  $\text{Cl}^-$  浓度达到  $5\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时在细菌的测序中不再占据优势, 表明盐度的增高影响了古菌的生长。

### 3 结论

(1) 在 COD 容积负荷为  $3.267\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$  的运行条件下, EGSB 反应器在  $\text{Cl}^-$  浓度小于  $7\,500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时运行效果较好, 随着  $\text{Cl}^-$  浓度的提高, 反应器运行效果基本表现出波动后提升的变化。最终  $\text{Cl}^-$  浓度在  $7\,500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 反应器的 COD 平均去除率在  $98.1\%$ , 容积产气率能够基本稳定在  $1.3\text{ m}^3\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$  以上。在盐度驯化后, 适当提高盐度能够提高反应器的运行效果。

(2) 保持反应器 COD 容积负荷为  $3.267\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ , 反应器中的厌氧颗粒污泥对于  $0\sim 7\,500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  范围内的  $\text{Cl}^-$  浓度体现出良好的适应性, 大颗粒污泥在盐度提升的影响下仍然占据反应器颗粒污泥的主体, 而在  $\text{Cl}^-$  浓度短暂提升到  $10\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的冲击下, 粒径较小的颗粒污泥容易受到影响, 出现解体现象。同等粒径范围内厌氧颗粒污泥的沉降性能在高盐废水的影响下有小幅度的提升, 并且大颗粒污泥的沉降速度保持在  $60\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$  以上。

(3) 盐度影响了厌氧颗粒污泥中微生物的类群分布, 群落中优势菌群的变化很大。当  $\text{Cl}^-$  浓度由 0 增加到  $5\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 古菌群中的优势菌群由 *Methanoregula* ( $50.01\%$ ) 和 *Methanothrix* ( $32.59\%$ )

变为 *Methanobacterium* ( $57.5\%$ ), *Methanospirillum* ( $21.9\%$ ) 和 *Methanothrix* ( $13.91\%$ ); 细菌群中, 原本数量较多的 *Longilinea* ( $7.49\%$ ) 受盐度影响丰度降低, *Paludibacter* ( $7.69\%$ ) 成为占据优势的菌群。

### 参考文献:

- [1] 胡训杰, 杨玉楠, 刘红, 等. 嗜盐菌强化生物活性炭处理不同盐浓度采油废水的研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(10): 2213-2218.  
Hu X J, Yang Y N, Liu H, et al. Study on the treatment of oilfield produced wastewater with different salinities using halophile enhanced biological activated carbon [J]. Environmental Science, 2007, **28**(10): 2213-2218.
- [2] 李坤, 徐军, 云干, 等. 复合耐盐微生物菌剂强化 MBBR 工艺处理高盐废水[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(6): 2829-2834.  
Li K, Xu J, Yun G, et al. Treatment of high salt wastewater in MBBR process strengthened by complex salt-tolerant microorganism [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(6): 2829-2834.
- [3] 姜妍, 蒋林时, 苗时雨, 等. 紫外-Fenton 法处理高盐有机废水[J]. 环境工程学报, 2016, **10**(5): 2349-2354.  
Jiang Y, Jiang L S, Miao S Y, et al. Treatment of high-salinity organic wastewater by ultraviolet-Fenton process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, **10**(5): 2349-2354.
- [4] 江学, 梅凯. 高盐废水处理研究新发展[J]. 能源环境保护, 2014, **28**(4): 15-17.  
Jiang X, Mei K. The new developments of high-salt wastewater treatment [J]. Energy Environmental Protection, 2014, **28**(4): 15-17.
- [5] Lefebvre O, Molett R. Treatment of organic pollution in industrial saline wastewater: a literature review [J]. Water Research, 2006, **40**(20): 3671-3682.
- [6] 王爱芳, 鲍建国. 高盐废水生物处理的研究现状[J]. 环境科学与技术, 2009, **32**(6C): 209-213.  
Wang A F, Bao J G. Review of the biological treatment of Salinity wastewater [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **32**(6C): 209-213.
- [7] Pollice A, Rozzi A, Tomei M C, et al. Monitoring the inhibitory effect of NaCl on anaerobic wastewater treatment processes by the Rantox biosensor [J]. Environmental Technology, 2000, **21**(5): 535-544.
- [8] 宋彩霞, 邓新平, 厉圆, 等. 对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 1176-1182.  
Song C X, Deng X P, Li T, et al. Isolation and characterization of a halotolerant *p*-nitroaniline degrading strain S8 [J]. Environmental Science, 2014, **35**(3): 1176-1182.
- [9] 尹航, 杜娟, 盛培展, 等. MBBR 工艺处理反渗透浓盐水中试研究[J]. 冶金动力, 2015, (6): 42-44, 47.  
Yin H, Du J, Sheng P Z, et al. Pilot study on MBBR process to treat reverse osmosis concentrated brine [J]. Metallurgical Power, 2015, (6): 42-44, 47.
- [10] Vallero M V G, Pol L W H, Lettinga G, et al. Effect of NaCl on thermophilic ( $55^\circ\text{C}$ ) methanol degradation in sulfate reducing granular sludge reactors [J]. Water Research, 2003, **37**(10):

- 2269-2280.
- [11] 刘锋, 吴建华, 马向华, 等. 上流式厌氧生物滤池处理高含盐废水的试验研究[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2003, **16**(2): 34-38.  
Liu F, Wu J H, Ma X H, *et al.* The experimental study on treatment of highly  $\text{Cl}^-$  concentrated wastewater in upflow anaerobic bio-filter reactor[J]. Journal of University of Science and Technology of Suzhou (Engineering and Technology), 2003, **16**(2): 34-38.
- [12] 李彬, 王志伟, 安莹, 等. 膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 643-650.  
Li B, Wang Z W, An Y, *et al.* Membrane surface fouling properties in MBRs for high-salinity wastewater treatment [J]. Environmental Science, 2014, **35**(2): 643-650.
- [13] Liao R H, Li Y, Yu X M, *et al.* Performance and microbial diversity of an expanded granular sludge bed reactor for high sulfate and nitrate waste brine treatment [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, **26**(4): 717-725.
- [14] Kimata-Kino N, Ikeda S, Kurosawa N, *et al.* Saline adaptation of granules in mesophilic UASB reactors [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2011, **65**(1): 65-72.
- [15] López I, Borzacconi L. Modelling of an EGSB treating sugarcane vinasse using first-order variable kinetics [J]. Water Science & Technology, 2011, **64**(10): 2080-2088.
- [16] 张文艺, 翟建平, 李琴, 等. 厌氧序批式反应器(ASBR)处理啤酒废水的试验研究[J]. 给水排水, 2005, **31**(12): 61-64.  
Zhang W Y, Zhai J P, Li Q, *et al.* Anaerobic sequencing batch reactor treating beer brewery wastewater[J]. Water & Wastewater Engineering, 2005, **31**(12): 61-64.
- [17] 宿程远, 刘兴哲, 王恺尧, 等. EGSB 处理中药废水过程中厌氧颗粒污泥特性变化[J]. 化工学报, 2014, **65**(9): 3647-3653.  
Su C Y, Liu X Z, Wang K Y, *et al.* Characteristics of anaerobic granular sludge in EGSB reactor treating traditional Chinese medicine wastewater[J]. CIESC Journal, 2014, **65**(9): 3647-3653.
- [18] Delforno T P, Okada D Y, Polizel J, *et al.* Microbial characterization and removal of anionic surfactant in an expanded granular sludge bed reactor[J]. Bioresource Technology, 2012, **107**: 103-109.
- [19] 徐英博, 洗萍, 唐铭, 等. 垃圾渗滤液厌氧处理过程颗粒污泥生长特性[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(5): 2213-2219.  
Xu Y B, Xian P, Tang M, *et al.* Growth characteristics of granular sludge in anaerobic treatment of landfill leachate [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(5): 2213-2219.
- [20] 李志华, 刘娜, 王晓昌, 等. 采用热重方法分析不同含盐条件下好氧颗粒特性[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(7): 1284-1287.  
Li Z H, Liu N, Wang X C, *et al.* Evaluation of aerobic granules formed under different sodium chloride concentrations using thermogravimetric analysis [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, **28**(7): 1284-1287.
- [21] 曾国敏, 马邕文. 常温下 IC 反应器启动过程中的颗粒污泥性能研究[J]. 环境工程学报, 2010, **4**(1): 67-70.  
Zeng G M, Ma Y W. Study on characteristics of anaerobic granular sludge during IC reactor start-up at normal temperature [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, **4**(1): 67-70.
- [22] 李慧星, 杜风光, 薛刚. 高通量测序研究酒精废水治理中厌氧活性污泥的微生物菌群[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(11): 4112-4119.  
Li H X, Du F G, Xue G. Microbial community analysis of anaerobic activated sludge in the process of alcohol wastewater treatment using high throughput sequencing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(11): 4112-4119.
- [23] 承磊, 郑珍珍, 王聪, 等. 产甲烷古菌研究进展[J]. 微生物学通报, 2016, **43**(5): 1143-1164.  
Cheng L, Zheng Z Z, Wang C, *et al.* Recent advances in methanogens [J]. Microbiology China, 2016, **43**(5): 1143-1164.
- [24] 方绍燕, 张辉. 胜利油田油泥沙细菌和古菌多样性研究[J]. 中国沼气, 2014, **32**(6): 3-8, 15.  
Fang S Y, Zhang H. Research on diversity of bacteria and archaea in oily sludge of Shengli oilfield [J]. China Biogas, 2014, **32**(6): 3-8, 15.
- [25] 朱文秀, 黄振兴, 任洪艳, 等. IC 反应器处理啤酒废水的效能及其微生物群落动态分析[J]. 环境科学, 2012, **33**(8): 2715-2722.  
Zhu W X, Huang Z X, Ren H Y, *et al.* Performance and microbial community dynamic characteristics of an internal circulation reactor treating brewery wastewater [J]. Environmental Science, 2012, **33**(8): 2715-2722.
- [26] 王学华, 黄俊, 宋吟玲, 等. 高效水解酸化 UASB 活性污泥的菌群结构分析[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(11): 2779-2784.  
Wang X H, Huang J, Song Y L, *et al.* Analysis on bacterial community structure in UASB reactor's sludge with hydrolysis acidification capacity of a dyeing wastewater treatment process [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(11): 2779-2784.

## CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated $MgCl_2$ Solution	LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i>	(3095)
Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i>	(3102)
Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric $PM_{2.5}$ in Changzhou City	GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i>	(3110)
Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China	JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i>	(3120)
Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China	WANG Shi-bao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i>	(3130)
Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck	XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i>	(3139)
Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System	SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i>	(3146)
$PM_{10}$ Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM	WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i>	(3153)
Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port	HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i>	(3162)
Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols	LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i>	(3169)
Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities	LU Hui-jie	(3178)
Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i>	(3185)
Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River	NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i>	(3192)
Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i>	(3200)
Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer	WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i>	(3209)
Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo	XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i>	(3218)
Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin	ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i>	(3225)
Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario	LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i>	(3235)
Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance	LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i>	(3243)
Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i>	(3254)
Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed	E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i>	(3264)
New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination	LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i>	(3273)
Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process	ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i>	(3281)
Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River	XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i>	(3290)
Spatiotemporal Variations of Chlorophyll a and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir	SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i>	(3302)
Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms	WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i>	(3312)
Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake	ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i>	(3319)
Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology	ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i>	(3330)
Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora	MENG Ting, YANG Hong	(3339)
Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource	HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i>	(3347)
Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture	WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i>	(3354)
Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater	LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i>	(3362)
Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i>	(3369)
Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX	ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i>	(3377)
Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue	KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i>	(3385)
Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space	WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i>	(3393)
Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR	ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i>	(3399)
Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System	WANYAN De-qing, HUANG Yong, LI Zhen, <i>et al.</i>	(3406)
Effect of Different TOC to $NH_4^+$ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process	WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i>	(3415)
Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge	TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i>	(3422)
Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i>	(3429)
Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge	LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i>	(3435)
Characteristics of $N_2O$ and $NO_x$ Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes	HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo	(3442)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field	ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i>	(3451)
Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia	ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-peí, SUN Yi-fei, <i>et al.</i>	(3463)
Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils	XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i>	(3473)
Effects of $CaCO_3$ Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil	GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i>	(3483)
Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil	WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(3489)
Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors	ZHANG Yan-jun	(3497)
Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications	WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i>	(3507)
Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium	ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i>	(3519)
Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation	WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i>	(3529)
Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting	YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i>	(3536)
Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China	LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(3544)