

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第7期

Vol.38 No.7

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

基于船载走航气溶胶质谱技术的海洋气溶胶研究	颜金培, 陈立奇, 林奇, 赵淑惠, 李磊, 朱大勇 (2629)
利用 MODIS C6 数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征	赵仕伟, 高晓清 (2637)
秋冬季节华北背景地区 PM ₁ 污染特征及来源	张周祥, 张养梅, 张小曳, 王亚强, 沈小静, 孙俊英, 周怀刚 (2647)
杭州市 PM _{2.5} 中水溶性离子的污染特征及其消光贡献	吴丹, 蔺少龙, 杨焕强, 杜荣光, 夏俊荣, 齐冰, 刘刚, 李凤英, 杨孟, 盖鑫磊 (2656)
青岛不同强度霾天气溶胶中二次无机离子的生成及粒径分布	谢丹丹, 祁建华, 张瑞峰 (2667)
西安市重污染与清洁天 PM _{2.5} 组分及其活性氧物质对比	王堃, 韩永明, 何世恒, 张婷, 刘随心, 曹军骥 (2679)
黄山 PM ₁₀ 中二元羧酸类化合物的季节变化特征及其来源	孟静静, 侯战方, 张二勋, 董杰, 刘晓迪, 邢继钊, 刘加珍 (2688)
泉州市大气 PM _{2.5} 铜系元素组成特征及来源解析	张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 许文质, 张棕巍 (2698)
西北石化区周围毒害类空气污染物污染特征及健康风险评价	许亚宣, 李小敏, 于华通, 董林艳, 赵玉婷, 姚懿函, 邹广迅, 张新民 (2707)
G20 峰会期间宜兴市大气 VOCs 特征及来源分析	张璘, 张祥志, 秦玮, 茅晶晶, 秦艳红, 谢卫平, 史文科, 陈文泰 (2718)
四川省 2005 ~ 2014 年农业源氨排放清单及分布特征	冯小琼, 陈军辉, 姜涛, 钱骏, 叶宏 (2728)
长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单	鲁君, 黄成, 胡馨遥, 杨强, 井宝莉, 夏阳, 卢滨, 唐伟, 楼晨荣, 陶士康, 李莉 (2738)
我国城市饮用水中 N-亚硝基二甲胺的健康风险评估及水质标准制定	张秋秋, 潘申龄, 张昱, 杨敏, 安伟 (2747)
地下水污染风险评价中污染源荷载量化方法的对比分析	赵鹏, 何江涛, 王曼丽, 崔亚丰 (2754)
胶州湾表层海水中的正构烷烃及其来源解析	张倩, 宋金明, 彭全材, 李学刚, 袁华茂, 李宁, 段雨琴, 曲宝晓, 王启栋 (2763)
桂江流域夏季水-气界面 CO ₂ 脱气的空间变化及其影响因素	张陶, 李建鸿, 蒲俊兵, 吴飞红, 李丽, 袁道先 (2773)
都柳江水系沉积物锑等重金属空间分布特征及生态风险	宁增平, 肖青相, 蓝小龙, 刘意章, 肖唐付, 赵彦龙, 吴世良 (2784)
太湖表层水体及沉积物中双酚 A 类似物的分布特征及潜在风险	陈政宏, 郭敏, 徐怀洲, 刘丹, 程杰, 李江, 张圣虎, 石利利 (2793)
洱海沉积物水提取态有机氮特征及与其他来源溶解性有机氮的差异	李文章, 张莉, 王圣瑞, 肖尚斌, 钱伟斌, 席银, 许可宸, 史玲珑 (2801)
阿哈水库沉积物-水界面磷、铁、硫高分辨率空间分布特征	孙清清, 陈敬安, 王敬富, 杨海全, 计永雪, 兰晨, 王箫 (2810)
北京市水环境中精神活性物质污染特征	张艳, 张婷婷, 陈卫平, 郭昌胜, 花镇东, 张远, 徐建 (2819)
降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响	陈莹, 王昭, 吴亚刚, 赵剑强, 杨文娟 (2828)
CaO ₂ 不同投加方式对黑臭河道底泥内源磷释放抑制作用	徐焱, 李大鹏, 韩菲尔, 宋小君, 李鑫, 周婧, 黄勇 (2836)
坡耕地薄层紫色土-岩石系统中氮磷的迁移特征	鲜青松, 唐翔宇, 朱波 (2843)
微生物强化组合浮床净化微盐碱水体的效果	陈友媛, 吴亚东, 孙萍, 吴丹 (2850)
氧化镁基生物炭高效去除水体中磷的特性	王彬斌, 林景东, 万顺利, 何锋 (2859)
Pd/Fe ⁰ 双金属复合催化纤维降解水中痕量亚硝基二甲胺	张环, 傅敏, 魏俊富, 王一冰, 安慧颖, 沈书怡 (2868)
针铁矿、磁铁矿和石膏对 2,4-二氯苯酚厌氧降解的影响	孔殿超, 周跃飞, 陈天虎, 王进, 李碧 (2875)
污水再生过程中消毒副产物前体物转化规律	韩慧慧, 缪恒峰, 张雅晶, 陆敏峰, 黄振兴, 阮文权 (2883)
微生物燃料电池改性阳极处理 PTA 废水	孙靖云, 范梦婕, 陈英文, 祝社民, 沈树宝 (2893)
水稻秸秆浸泡液对蓝藻和绿藻生长选择性抑制作用	苏文, 陈洁, 张胜鹏, 孔繁翔 (2901)
沼液 SBR 处理出水养殖螺旋藻	蔡小波, 郁强强, 刘锐, 赵远, 陈吕军 (2910)
K ⁺ 强化高盐环境下厌氧氨氧化脱氮效能	吴国栋, 于德爽, 李津, 周同, 王晓静 (2917)
包埋氨氧化细菌短程硝化的高效稳定运行	于濛雨, 刘毅, 田玉斌, 石欢, 徐富, 杨宏 (2925)
ANAMMOX 的快速启动及 EPS 在 ANAMMOX 颗粒污泥中的空间分布	李惠娟, 彭聪聪, 陈国燕, 姚倩, 卓杨, 王彬斌 (2931)
厌氧氨氧化污泥中氨氧化的潜在电子受体	李祥, 林兴, 王凡, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 毕贞, 刘忻, 杨朋兵 (2941)
基于厌氧氨氧化的含氮废气原位处理	林兴, 王凡, 袁砚, 李祥, 黄勇, 袁澄伟 (2947)
基于污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶生长基质的组成	沈庆然, 李田, 曹熠, 潘奥 (2953)
罗红霉素短期冲击对活性污泥中氨氧化微生物丰度和多样性的影响	高景峰, 孙丽欣, 樊晓燕, 潘凯玲, 李定昌 (2961)
不同盐度下活性污泥中微生物群落变化规律及其处理模拟染料废水	周贵忠, 许硕, 姚倩, 银钗 (2972)
CO ₂ -咸水-砂岩相互作用过程中微生物群落结构动态变化特征	王博强, 李晨阳, 卢伟, 樊昊, 张冬至, 汪治, 吕聪, 沈福东 (2978)
油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应	田冬, 高明, 黄容, 吕盛, 徐畅 (2988)
模拟气候升温对湿地土壤微生物群落及磷素形态的影响	腾昌运, 沈建国, 王忠, 王行, 李鸿毅, 张志剑 (3000)
秦岭红桦林土壤细菌群落剖面分布特征及其影响因素	杜璨, 许晨阳, 王强, 张帆, 马武功, 和文祥, 侯琳, 耿增超 (3010)
微生物对汞矿区农田土壤汞甲基化的影响	贾钦, 朱雪梅, 王琪, 傅海辉, 郝亚琼, 何洁, 杨子良 (3020)
施用海泡石对铅、镉在土壤-水稻系统中迁移与再分配的影响	方至萍, 廖敏, 张楠, 吕婷, 黄小斌 (3028)
BS + CTMAB 复配修饰在黄棕壤吸附苯酚上的应用	刘伟, 孟昭福, 任爽, 李文斌 (3036)
1999 年与 2014 年贡嘎山峨眉冷杉枝和叶中常见重金属的生物富集特征对比	李芬, 王训, 罗辑, 袁巍, 喻子恒, 商立海 (3045)
铅锌尾矿污染区 3 种菊科植物体内重金属的亚细胞分布和化学形态特征	朱光旭, 肖化云, 郭庆军, 张忠义, 杨曦, 孔静 (3054)
膨润土调质对污泥堆肥的脱毒及重金属钝化和雌酮消除作用	周莉娜, 蔡函臻, 李荣华, 王美净, 赵军超, 王权, 张增强 (3061)
餐厨垃圾与秸秆混合中温和高温厌氧消化对比	郭香麟, 左剑恶, 史绪川, 王凯军, 李静 (3070)
我国村镇生活垃圾可燃组分基本特征及其时空差异	晏卓逸, 岳波, 高红, 李志龙, 黄启飞, 聂小琴, 汪群慧 (3078)
甲烷催化还原 NO _x 中 Co 基/分子筛催化剂的助剂和载体优化	潘华, 建艳飞, 陈宁娜, 刘红霞, 何焱, 贺亚飞 (3085)
《环境科学》征稿简则 (2737) 《环境科学》征订启事 (2809) 信息 (2867, 2971, 3027)	

不同盐度下活性污泥中微生物群落变化规律及其处理模拟染料废水

周贵忠, 许硕, 姚倩, 银钗

(青岛科技大学环境与安全工程学院, 青岛 266042)

摘要: 通过逐渐提高 SBR 反应器中活性污泥的盐度, 探索不同盐度下活性污泥的活性、性质及其微生物群落变化, 并研究结晶紫废水以及纳米四氧化三铁对微生物群落的影响。结果表明, 随着盐度的增加, 活性污泥的 COD、氨氮去除率以及污泥体积指数 SVI 值均降低, 在质量分数 2% 的盐度下, COD、 NH_4^+ -N 的去除率为 80% 和 75%, SVI 值不足 $35 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$; 随着盐度的增加微生物的多样性逐渐减少, 系统中革兰氏阴性菌优势菌种的位置逐渐被真菌和放线菌取代, 而革兰氏阳性菌依然为优势菌; 加入结晶紫染料的活性污泥与盐度为 2% 的活性污泥样品相比发现: 红细菌属、丽水菌属含量有所增加, 产黄杆菌、农杆菌属含量减小。加入 MNPs 的结晶紫-活性污泥与不加 MNPs 的结晶紫活性污泥对比: 酸胞菌属、产黄杆菌含量增加, 红细菌属、农杆菌属含量减小。

关键词: 盐度; 活性污泥; 污泥体积指数; 微生物群落; 染料废水

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)07-2972-06 DOI: 10.13227/j.hjks.201609184

Influence of Salinity on Microbial Community in Activated Sludge and Its Application in Simulated Dye Wastewater Treatment

ZHOU Gui-zhong, XU Shuo, YAO Qian, YIN Chai

(College of Environment and Safety Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: The performance and microbial community profiles in a sequencing batch reactor (SBR) treating saline wastewater were studied over 300 days from 0% to 2.0% salinity. The effects of crystal violet wastewater and nano-ferroferic oxide on microbial communities were also researched. The experimental results indicated that the activated sludge had high sensitivity to salinity variations in terms of pollutants removal and sedimentation. At 2.0% salinity, the system retained a good performance, and 80% removal rate of COD and 75% removal rate of NH_4^+ -N could be achieved and SVI value was less than $35 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$; With the increase of salinity, the microbial diversity reduced gradually, the advantageous position of Gram-negative bacteria was gradually replaced by fungi and actinomycetes, whereas Gram-positive bacteria strains remained the advantageous group; In the comparison of activated sludge added with crystal violet dye with the activated sludge samples with a salinity of 2%, it was found that the contents of *Parvibaculum* and *Winogradskyella* were higher while the contents of *Rhodanobacter* and *Agrobacterium* decreased. In the comparison of crystal violet-activated sludge with and without addition of MNPs, it was found that the contents of *Acidocella* and *Rhodanobacter* were higher while the contents of *Parvibaculum* and *Agrobacterium* decreased.

Key words: salinity; activated sludge; sludge volume index (SVI); microbial community; dye wastewater

目前, 高盐废水是水处理领域的一大难点, 电渗析、焚烧法、膜分离法、蒸汽压缩法等均有一定的处理效果^[1~6]。但此类方法的投资运行费用较高, 易造成二次污染而难以在实际生产过程中推广应用。生化法因处理费用较低、应用范围广且不易造成二次污染而被广泛利用^[7]。常用的生物法包括传统活性污泥法、SBR 法、MBR 法、好氧颗粒污泥法以及厌氧生物处理法等^[8~12]。系统中适量的无机盐不仅促进微生物生长过程中的酶反应^[13], 还能够维持膜平衡、调节渗透压。但盐度一旦过量, 就会对微生物的生长起到抑制作用, 甚至会致使微生物死亡, 其主要原因在于: 废水盐度较高时会使微生物的渗透压升高, 使微生物脱水导致细胞原生质分离; 盐

度较高时会使细胞脱氢酶的活性降低; 废水中的 Cl^- 会对微生物有毒害作用, 甚至会杀死微生物; 使得水的密度增加, 造成活性污泥上浮而流失。

国内外很多研究表明, 生物法可以高效地处理高盐度废水。但随着系统盐度的增加, 微生物需要一段时间的适应过程。系统盐度的变化会引起微生物代谢途径的变化以及微生物群落的显著变化^[14,15]。本文通过逐渐提高系统的盐度, 探究不同盐度下活性污泥的性质以及微生物群落的变化, 并

收稿日期: 2016-09-22; 修订日期: 2017-02-27

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2013EEL008)

作者简介: 周贵忠 (1973 ~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为污水处理与资源化, E-mail: zhougz@qust.edu.cn

测定不同盐度下活性污泥中微生物的脂肪酸和 DNA, 对处理实际的含盐废水有较大的意义。

1 材料与方法

1.1 污泥来源与试验材料

1.1.1 污泥来源

试验选取青岛李村河生活污水处理厂二沉池污泥, 在光学显微镜下对活性污泥进行观察, 视野中观察到变形虫、草履虫等微型后生动物、原生动物等, 表明现阶段污泥的活性较高。

1.1.2 主要试剂和试验仪器

氯化钠、葡萄糖、磷酸二氢钾、硫酸铵、乙酸、氢氧化钾、纳米四氧化三铁、甲基叔丁基醚以及测定氨氮的相关试剂等。COD 测定仪、可见分光光度计、台式离心机、脂肪酸鉴定系统等。

1.2 耐盐菌的驯化

试验选取李村河污水处理厂二沉池污泥, 按污泥: 水 = 1: 1 的比例配成 12 L 活性污泥溶液于容器中, 每日投加碳源、氮源、磷源分别为: 葡萄糖 12 g, 硫酸铵 1.42 g, 磷酸二氢钾 0.344 g。间歇曝气, 每 4 h 一个周期, 曝气 3 h, 停歇 1 h。每天换水一次, 投加无碘盐逐步提高系统的盐度, 使其盐度从最开始的 0, 逐渐提升至 0.5%、1%、1.5%、2%。每个盐度下分别对活性污泥的活性和降解 COD、 NH_4^+ -N 性能进行测定, 探索不同盐度下活性污泥的污泥体积指数 SVI 的变化规律, 同时提取出污泥中微生物的脂肪酸进行分析, 得出耐盐驯化过程中活性污泥系统微生物菌群的变化。

1.3 微生物脂肪酸的提取、分析

依据微生物脂肪酸的提取步骤, 提取所需微生物的脂肪酸, 运用 MIDI-Sherlock 全自动微生物鉴定系统^[16]进行菌群的鉴定分析。

1.4 高效降解含盐结晶紫废水活性污泥的驯化

取结晶紫粉末于 3 L 烧杯中加入蒸馏水, 制成 2 500 mL 质量浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的模拟染料废水。最初向烧杯中加入 50 mL $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的结晶紫废水, 烧杯中加入 500 mL 活性污泥溶液, 加水定容至 3 000 mL, 曝气驯化培养一周, 然后每周逐渐多加 200 mL 结晶紫废水, 共驯化 10 周, 得到可以高效降解含盐结晶紫废水的活性污泥。

1.5 四氧化三铁磁纳米粒子 (MNP) 驯化含盐结晶紫废水中的活性污泥

将驯化好的 500 mL 活性污泥放入 3 000 mL 烧杯中, 加入 2 500 mL 质量浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的模拟染

料废水, 再向烧杯中加入 0.57 g 四氧化三铁磁纳米粒子 (MNPs), 搅拌, 曝气培养 8 周, 即得到试验所需微生物, 用于后续的 DNA 测序分析。

1.6 微生物 DNA 的提取、分析

本试验采用 PowerSoil DNA Isolation Kit 试剂盒直接提取活性污泥中微生物的 DNA, 得到高品质的 DNA 可直接进行 PCR 扩增, 利用高通量测序技术^[17,18], 研究不同盐度下微生物群落的变化情况。

PCR 仪: ABI GeneAmp® 9700。

测序平台: 采用 Illumina MiSeq/HiSeq 测序平台, 不同样品的 Tags 和 OTU 数目统计, OUT 丰度聚类图, 为了研究样品的物种组成及多样性信息, 对所有样品的全部 Effective Tags 序列进行聚类 (默认选取 Identity 为 97%), 形成 OTU。

2 结果与讨论

2.1 不同盐度下活性污泥对废水 COD、 NH_4^+ -N 的降解

驯化初期系统盐度为 0%, 由于污泥在容器中处于缺氧环境, 活性较差 COD 去除率仅为 55% 左右。a 阶段 (0 ~ 20 d) 是系统在盐度为 0 条件下的污泥驯化阶段, 20 d 时 COD 和 NH_4^+ -N 的去除率分别提高至 80% 和 71%; b 阶段 (20 ~ 50 d) 是系统在盐度为 0.5% 条件下的污泥驯化阶段, COD、 NH_4^+ -N 降解效率先下降后升高, 驯化 30 d 后, COD 和 NH_4^+ -N 的去除率可提高到 90% 和 78%; 50 d 开始将系统的盐度提高到 1%, 此时进入 c 阶段 (50 ~ 120 d), 驯化至 120 d 时污泥 COD 去除率达 85% 以上, NH_4^+ -N 的去除率在 80% 左右; 120 d 后进入 d 阶段, 此时系统的盐度为 1.5%, 此盐度下驯化维持 60 d, COD 去除率达到 78% 左右, NH_4^+ -N 去除率 75%; 180 d 继续提高系统盐度至 2%, 系统进入 e 阶段 (180 ~ 300 d), COD、 NH_4^+ -N 的降解效率下降明显, 190 d 时, COD 去除率低至 60.5%, NH_4^+ -N 去除率 56%, 保持盐度 2% 继续驯化, 最终在 300 d 时测得 COD 去除率为 80% 左右, NH_4^+ -N 去除率 75%, 达到预期处理效果, 如图 1 所示。

系统盐度每提高一次, 污泥对有机物和氨氮的去除效率总是先下降后逐渐恢复的趋势。盐度提高, 微生物细胞的渗透压增高, 细胞脱氢酶的活性降低, 导致活性污泥系统受到冲击, 部分微生物由于无法适应高盐环境, 甚至出现死亡现象, 使得处理效果减弱^[19], 表现为 COD、 NH_4^+ -N 的去除率下降。随着长时间的不断驯化, 系统抗盐度冲击的能力逐渐增

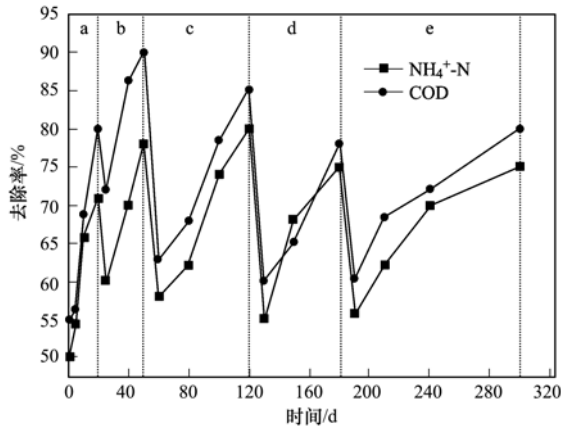


图 1 COD、NH₄⁺-N降解趋势

Fig. 1 Degradation trends of COD and NH₄⁺-N

强,适应高盐环境的微生物群落开始不断生长繁殖,对 COD、NH₄⁺-N的降解效率提高.

2.2 不同盐度下活性污泥 SVI 值的变化

由表 1 和图 2 可知,随着盐度的增加,接种时活性污泥的浓度为 3.50 g·L⁻¹,经过 300 d 驯化后,在系统 2% 的条件下,活性污泥的浓度增加到 7.52 g·L⁻¹,而活性污泥的污泥体积指数 SVI 值不断减小. 在无盐的环境中,污泥的 SVI 值在 89 mL·g⁻¹,在盐度 0.5% 的环境中,污泥的 SVI 值下降到 53 mL·g⁻¹,随着盐度的不断增加,当盐度为 2% 时,污泥的 SVI 值不足 35 mL·g⁻¹. 随着盐度增加,活性污泥 SVI 值降低,可能是由于:高盐环境下微生物的生长和生物活性均受到抑制,微生物从絮凝体上脱落上浮水中,无法沉降;盐度的冲击改变了污泥的生态环境,游离原生微型后生动物的捕食受到影响而死亡,污泥沉降性减弱^[20];高盐冲击使微生物生理活动受阻,胞外分泌物减少,污泥的絮凝性能下降. 而有研究认为高盐环境下,微生物为了生存聚集在一起,通过自身调节使胞外多聚物的分泌增加,既可以抵御盐度的毒害又增加了絮凝性能,表现为絮体颗粒变大密实,改善了沉降性能^[21].

表 1 各盐度下活性污泥 SV、MLSS、SVI 的变化

Table 1 Changes of SV, MLSS and SVI values under different salinity

项目	参数				
盐度/%	0	0.5	1.0	1.5	2.0
SV/%	31.2	32.3	29.6	27.5	26.2
MLSS/g·L ⁻¹	3.50	6.07	6.96	7.33	7.52
SVI/mL·g ⁻¹	89.1	53.2	42.5	37.5	34.8

2.3 不同盐度下活性污泥中微生物的脂肪酸分析
利用 MIDI-Sherlock 全自动微生物鉴定系统对

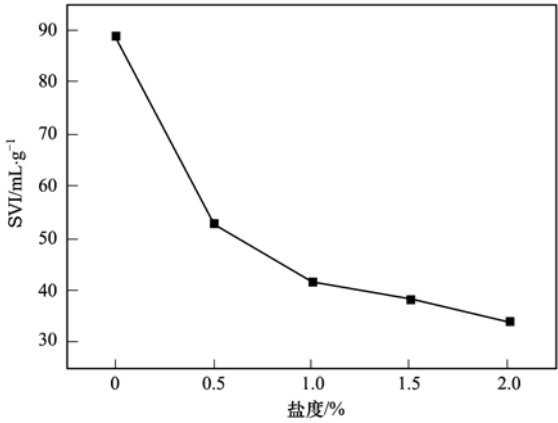


图 2 各盐度下 SVI 值

Fig. 2 SVI values under different salinity

各个盐度所提取出的脂肪酸进行分析,得到各种脂肪酸分布图谱. 将 5 个盐度下脂肪酸鉴定图谱中各菌群所占含量用 Origin 软件处理并整理得到图 3.

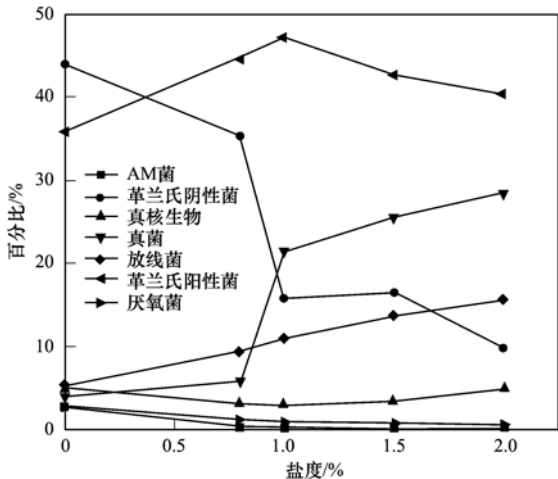


图 3 对应盐度下各菌群所占百分比

Fig. 3 Percentages of bacteria corresponding to different salinity

从活性污泥微生物的组成来看,主要由 AM 菌、革兰氏阴性菌、真核生物、放线菌、革兰氏阳性菌和厌氧菌等组成. 随着盐度的升高,革兰氏阳性菌数量表现为先增加后减小,其中在盐度为 1% 时含量最高,为 47%,整个盐度梯度革兰氏阳性菌含量均维持在 35% 以上;而革兰氏阴性菌所占百分比随着盐度的增加,表现出明显下降的趋势,从百分含量 45% 左右减小到 10% 左右;真菌和放线菌随着盐度的升高百分含量均有一定程度上增加,其中真菌的增加幅度较为明显,从 5% 左右升高到 30%,放线菌百分含量由 5% 增加到 15% 左右;图 3 中看出真核生物的百分含量随盐度变化不大,在 5% 左右波动;AM 菌和厌氧菌在活性污泥微生物群落中所占比例很小,约为 5%,随着盐度的增加,百分含量下降,盐

度 1% 以上百分含量基本为 0%。

革兰氏阳性菌细胞壁较厚,肽聚糖含量丰富,并且含有大量的磷壁酸,这种结构使其可以抵抗较高的盐度冲击,因此革兰氏阳性菌是每个对应盐度下的优势菌种;革兰氏阴性菌细胞壁以及肽聚糖膜要比革兰氏阳性菌要薄得多,因此随着盐度的增加,革兰氏阴性菌越来越少;真菌和放线菌中含有大量的累积相容性物质,如糖类、醇类、脯氨酸、天冬氨酸和谷氨酸等,可大大提高耐盐性,使其随着盐度的增加含量逐渐增大^[22]。因此,随着不断的驯化,污泥在高盐环境中的活性良好,可高效地处理废水。

2.4 模拟染料废水降解趋势

向驯化好的活性污泥中加入质量浓度为 5 mg·L⁻¹ 的结晶紫染料废水,曝气培养,每隔 12 h 取样一次,并于紫外-可见光分光光度计上进行波长扫描,扫描出的数据用 Origin 软件绘图,结果如图 4。从中可以看出,结晶紫在 582 nm 处有最大吸收峰,在 301 nm 处有吸收峰。0 h 最大吸收峰处的吸光度值为 1.136, 12 h 最大吸收峰处的吸光度值为 0.791, 24 h 最大吸收峰处的吸光度值为 0.274, 分别代入标准曲线计算得出结晶紫的浓度分别为 5、3.45、1.16 mg·L⁻¹。可以直观地看出结晶紫浓度随时间逐渐降低,验证了经高盐结晶紫模拟废水驯化的活性污泥对结晶紫具有显著的降解能力^[23]。

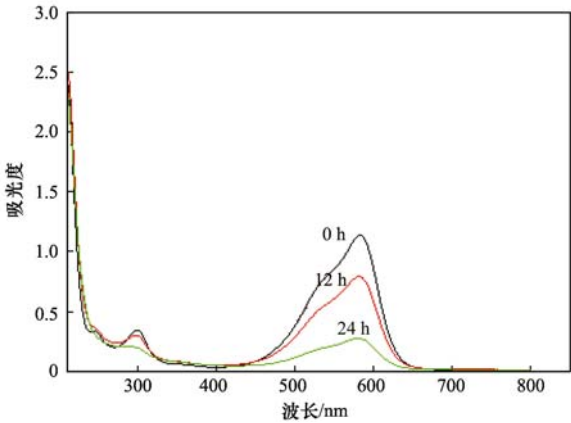


图 4 结晶紫吸收峰变化
Fig. 4 Change of crystal violet absorption peak

2.5 16S rDNA 测序分析结果

对耐盐驯化阶段的活性污泥(盐度分别为 0.5%、1%、1.5%、2%)以及高盐结晶紫染料驯化阶段的污泥和 MNPs 驯化出的功能微生物进行 DNA 提取并对提取出的 DNA 进行 16S rDNA 测序分析^[24]。

DNA 检测合格后(浓度 > ng·μL⁻¹),用一对特

异性引物(515F、806R)对 16S rDNA 的 V4 区进行 PCR 扩增,电泳结果如图 5。从中可以看出 PCR 扩增的条带清晰,大小合适,产物纯度较高,且无杂带,可以进行 DNA 测序分析。

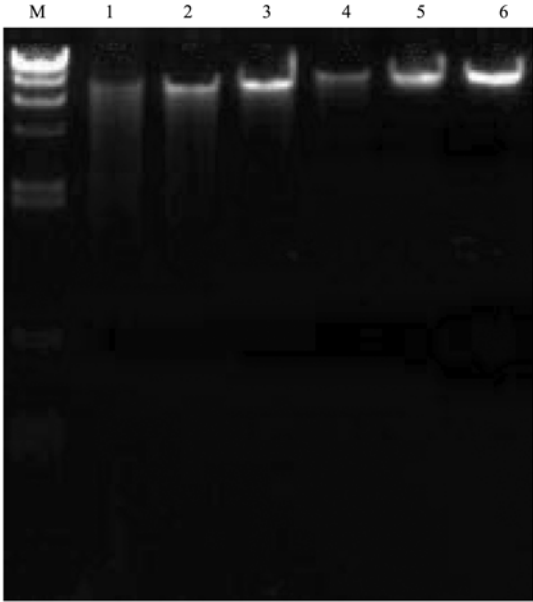
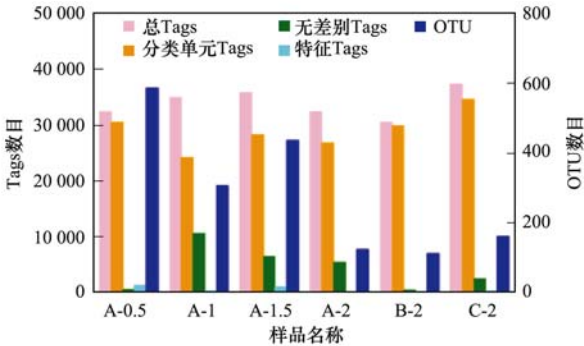


图 5 活性污泥细菌 16S rDNA 基因的 PCR 产物
Fig. 5 PCR products of 16S rDNA gene from bacteria in activated sludge

由图 6 可以看出样品 A-0.5、A-1、A-1.5、A-2 中 OUT 数目分别为 600、300、420、160,随着盐度的不断增加,微生物群落的生长受到不同程度的抑制,致使微生物的多样性逐渐降低^[25]。图 7 中横向为样品信息,纵向为 OTU ID,其中左侧的聚类树为 OTU 的系统发生关系及其物种注释,分支的颜色表示 OTU 所在的属(右边的图例),上方的聚类树为样品聚类树,中间的热图是 OTU 的相对丰度热图,颜色与相对丰度的关系见图 7 中的刻度尺。从中可以



样品编号 A-0.5、A-1、A-1.5、A-2、B-2、C-2 分别对应盐度为 0.5%、1%、1.5%、2% 活性污泥样品、结晶紫驯化活性污泥样品和 MNPs 驯化出的功能微生物样品,下同

图 6 不同样品的 Tags 和 OTU 数目统计

Fig. 6 Statistics of Tags and OTU number in different samples

看出,随着盐度的不断增加,酸胞菌属(*Acidocella*)、丽水菌属(*Winogradskyella*)、产黄杆菌(*Rhodanobacter*)、红菌(*Parvibaculum*)含量均有不同程度的升高,并且产黄杆菌(*Rhodanobacter*)成为优势菌种;而变形菌属(*Dechloromonas*)、黄色单胞菌(*Dokdonella*)、硝化螺菌属(*Nitrospira*)、海藻球菌属(*Phycococcus*)含量呈下降趋势,体现了微生物群落随系统的盐度逐步演变的过程。

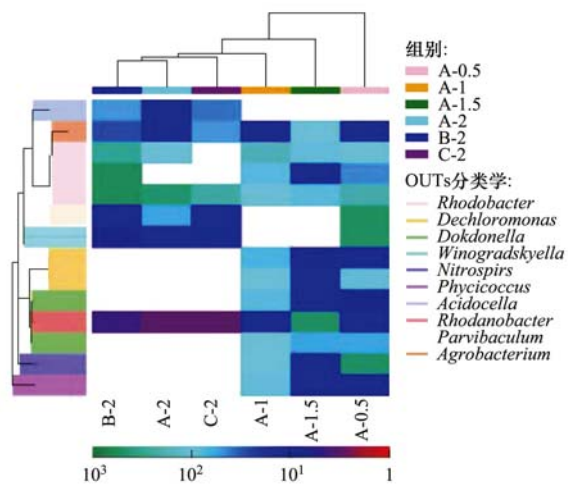


图7 OUT 丰度聚类图

Fig. 7 Clustering of OTU abundance

将样品 B-2(盐度 2% 的条件下加入结晶紫染料的活性污泥样品)与 A-2(盐度 2% 的活性污泥样品)对比发现:红细菌属(*Parvibaculum*)、丽水菌属(*Winogradskyella*)含量有所增加,而产黄杆菌(*Rhodanobacter*)、农杆菌属(*Agrobacterium*)含量降低,说明红细菌属(*Parvibaculum*)、丽水菌属(*Winogradskyella*)能以结晶紫染料为能源物质,将其分解为其他小分子物质,一方面用于自身的生长代谢,另一方面用于细胞的增殖,使得菌属的含量升高;结晶紫染料不能作为能源物质被产黄杆菌(*Rhodanobacter*)、农杆菌属(*Agrobacterium*)所利用,致使没有可以维持其自身生长代谢的物质,从而使该菌属的数量不断降低。

将样品 C-2(加入 MNPs 的结晶紫-活性污泥样品)与样品 B-2 对比可以看出:酸胞菌属(*Acidocella*)、产黄杆菌(*Rhodanobacter*)含量增加,其原因是由于加入的 MNPs 有效地提高了污泥抗有毒有害物质冲击的能力,并且 MNPs 可作为微生物生长栖息的载体,提高了酸胞菌属(*Acidocella*)、产黄杆菌(*Rhodanobacter*)的生物活性,便于其生长繁殖,使其含量增加;红细菌属(*Parvibaculum*)、农杆菌属(*Agrobacterium*)含量减小,可能由于 MNPs 的

加入改变菌属的生物磁场以及四氧化三铁对该菌属的微毒性,影响其新陈代谢等生命活动,导致数量下降。

3 结论

(1)系统的盐度显著影响活性污泥的活性和沉降性能,随着盐度的增加,系统对废水 COD、 NH_4^+ -N 的去除率以及 SVI 值均有所降低。经过一定时间驯化后,在系统盐度在 2% 的条件下, COD 和 NH_4^+ -N 的去除率基本稳定在 80% 和 75% 左右, SVI 值从开始的 $89 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 下降到 $34 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

(2)随着系统盐度的增加,革兰氏阴性菌优势菌种的位置逐渐被真菌和放线菌取代,而革兰氏阳性菌依然为优势菌种;盐度对真核生物的生长影响不大,对 AM 菌和厌氧菌起到抑制作用。

(3)驯化后的活性污泥可较好的处理含盐结晶紫废水,经 24 h 生化处理,结晶紫废水的降解率可达 76.8%。

(4)随着盐度的增加微生物的多样性逐渐减少,其中酸胞菌属、丽水菌属、产黄杆菌、红菌含量升高,产黄杆菌成为优势菌种,变形菌属、黄色单胞菌、硝化螺菌属含量下降。

(5)加入结晶紫染料的活性污泥中红细菌属、丽水菌属含量有所增加,产黄杆菌、农杆菌属含量减小。加入 MNPs 的结晶紫-活性污泥中酸胞菌属、产黄杆菌含量增加,红细菌属、农杆菌属含量减小。

参考文献:

- [1] Mabrouk A A, Nafey A S, Fath H E S. Thermoeconomic analysis of some existing desalination processes[J]. Desalination, 2007, **205**(1-3): 354-373.
- [2] Lee K P, Arnot T C, Mattia D. A review of reverse osmosis membrane materials for desalination—development to date and future potential[J]. Journal of Membrane Science, 2011, **370**(1-2): 1-22.
- [3] Zejli D, Ouammi A, Sacile R, et al. An optimization model for a mechanical vapor compression desalination plant driven by a wind/PV hybrid system[J]. Applied Energy, 2011, **88**(11): 4042-4054.
- [4] Afonso M D, Bórquez R. Review of the treatment of seafood processing wastewaters and recovery of proteins therein by membrane separation processes—prospects of the ultrafiltration of wastewaters from the fish meal industry[J]. Desalination, 2002, **142**(1): 29-45.
- [5] Roy D, Rahni M, Pierre P, et al. Forward osmosis for the concentration and reuse of process saline wastewater [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, **287**: 277-284.
- [6] Khajavi S, Jansen J C, Kapteijn F. Production of ultra pure water by desalination of seawater using a hydroxy sodalite membrane[J]. Journal of Membrane Science, 2010, **356**(1-2):

- 52-57.
- [7] 徐寒莉, 梁志伟, 毛巍, 等. 盐分对生物脱氮工艺中硝化反应的影响与机理[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(7): 2132-2140.
- Xu H L, Liang Z W, Mao W, *et al.* Impact of salinity on nitrification in the process of biological nitrogen removal and its mechanism: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, **25**(7): 2132-2140.
- [8] Zhang Y, Li B, Xu R X, *et al.* Effects of pressurized aeration on organic degradation efficiency and bacterial community structure of activated sludge treating saline wastewater[J]. Bioresource Technology, 2016, **222**: 182-189.
- [9] Taheri E, Khiadani M H, Amin M M, *et al.* Treatment of saline wastewater by a sequencing batch reactor with emphasis on aerobic granule formation[J]. Bioresource Technology, 2012, **111**: 21-26.
- [10] Tan S W, Cui C Z, Chen X C, *et al.* Effect of biofloculation on fouling-related biofoulants in a membrane bioreactor during saline wastewater treatments[J]. Bioresource Technology, 2017, **224**: 285-291.
- [11] 汪善全, 原媛, 孔云华, 等. 好氧颗粒污泥处理高含盐废水研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 145-151.
- Wang S Q, Yuan Y, Kong Y H, *et al.* Experimental investigation of high saline wastewater treatment using aerobic granules[J]. Environmental Science, 2008, **29**(1): 145-151.
- [12] Yurtsever A, Calimlioglu B, G  r  r M, *et al.* Effect of NaCl concentration on the performance of sequential anaerobic and aerobic membrane bioreactors treating textile wastewater[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, **287**: 456-465.
- [13] 操庆, 曹海生, 魏晓兰, 等. 盐胁迫对设施土壤微生物量碳氮和酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2015, **29**(4): 300-304.
- Cao Q, Cao H S, Wei X L, *et al.* Effect of salt stress on carbon and nitrogen of microbial biomass and activity of enzyme in greenhouse soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, **29**(4): 300-304.
- [14] Wagner M, Loy A, Nogueira R, *et al.* Microbial community composition and function in wastewater treatment plants[J]. Antonie van Leeuwenhoek, 2002, **81**(1-4): 665-680.
- [15] Lee T H, Kurata S, Nakatsu C H, *et al.* Molecular analysis of bacterial community based on 16S rDNA and functional genes in activated sludge enriched with 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) under different cultural conditions[J]. Microbial Ecology, 2005, **49**(1): 151-162.
- [16] Vandamme P, Pot B, Gillis M, *et al.* Polyphasic taxonomy, a consensus approach to bacterial systematics[J]. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 1996, **60**(2): 407-438.
- [17] Simon C, Daniel R. Metagenomic analyses: past and future trends[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2011, **77**(4): 1153-1161.
- [18] Voordouw G, Voordouw J K, Jack T R, *et al.* Identification of distinct communities of sulfate-reducing bacteria in oil fields by reverse sample genome probing[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1992, **58**(11): 3542-3552.
- [19] 周鹏. 盐度冲击对活性污泥系统性能影响的研究[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(5): 65-68.
- Zhou P. Effect of salinity shock on activated sludge system[J]. Environmental Science & Technology, 2011, **34**(5): 65-68.
- [20] 宋晶, 孙德栋, 王一娜, 等. 直接驯化嗜盐菌处理高盐废水的研究[J]. 环境污染与防治, 2010, **32**(2): 51-54, 58.
- Song J, Sun D D, Wang Y N, *et al.* Acclimatization of halophilic bacteria for biology treatment of high-salt wastewater[J]. Environmental Pollution and Control, 2010, **32**(2): 51-54, 58.
- [21] 赵凯峰, 王淑莹, 叶柳, 等. NaCl 盐度对耐盐活性污泥沉降性能及脱氮的影响[J]. 环境工程学报, 2010, **4**(3): 570-574.
- Zhao K F, Wang S Y, Ye L, *et al.* Effects of salinity on salt-tolerant activated sludge settling performance and nitrogen removal[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, **4**(3): 570-574.
- [22] Hahne H, M  der U, Otto A, *et al.* A comprehensive proteomics and transcriptomics analysis of *Bacillus subtilis* salt stress adaptation[J]. Journal of Bacteriology, 2010, **192**(3): 870-882.
- [23] Chen C H, Chang C F, Ho C H, *et al.* Biodegradation of crystal violet by a *Shewanella* sp. NTOU1[J]. Chemosphere, 2008, **72**(11): 1712-1720.
- [24] Jiang J L, Alderisio K A, Singh A, *et al.* Development of procedures for direct extraction of *Cryptosporidium* DNA from water concentrates and for relief of PCR inhibitors[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, **71**(3): 1135-1141.
- [25] Guo X C, Miao Y, Wu B, *et al.* Correlation between microbial community structure and biofouling as determined by analysis of microbial community dynamics[J]. Bioresource Technology, 2015, **197**: 99-105.

CONTENTS

Marine Aerosol Using On-board Aerosol Mass Spectrometry	YAN Jin-pei, CHEN Li-qi, LIN Qi, <i>et al.</i> (2629)
Analysis of Spatio-temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Depth over the Northwest of China by MODIS C6 Product	ZHAO Shi-wei, GAO Xiao-qing (2637)
Sources and Characteristics of Regional Background PM ₁ in North China During the Autumn and Winter Polluted Period ...	ZHANG Zhou-xiang, ZHANG Yang-mei, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (2647)
Pollution Characteristics and Light Extinction Contribution of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Hangzhou	WU Dan, LIN Shao-long, YANG Huan-qiang, <i>et al.</i> (2656)
Formation and Size Distribution of the Secondary Aerosol Inorganic Ions in Different Intensity of Haze in Qingdao, China	XIE Dan-dan, QI Jian-hua, ZHANG Rui-feng (2667)
Comparison of Characteristics and Reactive Oxidative Species of PM _{2.5} in Xi'an, China During Haze and Clean Days	WANG Kun, HAN Yong-ming, Ho Steven Sai Hang, <i>et al.</i> (2679)
Seasonal Variation and Sources of Dicarboxylic Acids and Related Compounds in PM ₁₀ from Mt. Huangshan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, ZHANG Er-xun, <i>et al.</i> (2688)
Composition Characteristics and Sources Apportionment of Lanthanoid in PM _{2.5} of Quanzhou	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (2698)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Hazardous Air Pollutants in the Surroundings of Three Petrochemical Industries in Northwest China	XU Ya-xuan, LI Xiao-min, YU Hua-tong, <i>et al.</i> (2707)
VOCs Characteristics and Sources Apportionment in Yixing City During the G20 Summit	ZHANG Lin, ZHANG Xiang-zhi, QIN Wei, <i>et al.</i> (2718)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Sichuan Province from 2005 to 2014	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (2728)
Air Pollutant Emission Inventory of Non-road Machineries in Typical Cities in Eastern China	LU Jun, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2738)
Estimation of Health Risk and Enaction of Safety Standards of <i>N</i> -nitrosodimethylamine (NDMA) in Drinking Waters in China	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2747)
Comparison and Analysis of the Quantitative Methods for Pollutant Sources Load in Groundwater Contamination Risk Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (2754)
Distribution and Sources of <i>n</i> -alkanes in Surface Seawater of Jiaozhou Bay	ZHANG Qian, SONG Jin-ming, PENG Quan-cai, <i>et al.</i> (2763)
Spatial Variations of CO ₂ Degassing Across Water-air Interface and Its Impact Factors in Summer in Guijiang River, China	ZHANG Tao, LI Jian-hong, PU Jun-bing, <i>et al.</i> (2773)
Spatial Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Antimony and Selected Heavy Metals in Sediments of Duliujiang River	NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, LAN Xiao-long, <i>et al.</i> (2784)
Distribution Characteristics and Potential Risk of Bisphenol Analogues in Surface Water and Sediments of Lake Taihu	CHEN Mei-hong, GUO Min, XU Huai-zhou, <i>et al.</i> (2793)
Characteristics of Water Extractable Organic Nitrogen from Erhai Lake Sediment and Its Differences with Other Sources	LI Wen-zhang, ZHANG Li, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (2801)
High-resolution Distribution Characteristics of Phosphorous, Iron and Sulfur Across the Sediment-Water Interface of Aha Reservoir ...	SUN Qing-qing, CHEN Jing-an, WANG Jing-fu, <i>et al.</i> (2810)
Distribution Characteristics of Drugs of Abuse and Their Metabolites in Aqueous Environment of Beijing, China	ZHANG Yan, ZHANG Ting-ting, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2819)
Impacts of Rainfall Characteristics and Occurrence of Pollutant on Effluent Characteristics of Road Runoff Pollution	CHEN Ying, WANG Zhao, WU Ya-gang, <i>et al.</i> (2828)
Inhibition of Internal Phosphorus Release in the Black-Odor Channel Under Different Adding Methods of CaO ₂	XU Yao, LI Da-peng, HAN Fei-er, <i>et al.</i> (2836)
Transport of Nitrogen and Phosphorus from Sloping Farmland with Thin Purple Soil Overlying Rocks	XIAN Qing-song, TANG Xiang-yu, ZHU Bo (2843)
Purification of Slightly Salt-alkaline Water Bodies by Microorganism Enhanced Combined Floating Bed	CHEN You-yuan, WU Ya-dong, SUN Ping, <i>et al.</i> (2850)
MgO-Biochar for the Adsorption of Phosphate in Water	WANG Bin-bin, LIN Jing-dong, WAN Shun-li, <i>et al.</i> (2859)
Degradation of <i>N</i> -nitrosodimethylamine by Palladium/ Iron Bimetallic Composite Catalytic Fiber	ZHANG Huan, FU Min, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (2868)
Effects of Goethite, Magnetite and Gypsum on the Anaerobic Degradation of 2,4-Dichlorophenol	KONG Dian-chao, ZHOU Yue-fei, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (2875)
Transformation of Disinfection Byproduct Precursors During the Wastewater Regeneration Processes	HAN Hui-hui, MIAO Heng-feng, ZHANG Ya-jing, <i>et al.</i> (2883)
Treatment of PTA Wastewater by Modified Anode Microbial Fuel Cell	SUN Jing-yun, FAN Meng-jie, CHEN Ying-wen, <i>et al.</i> (2893)
Selective Inhibition of Rice Straw Extract on Growth of Cyanobacteria and Chlorophyta	SU Wen, CHEN Jie, ZHANG Sheng-peng, <i>et al.</i> (2901)
Cultivation of <i>Spirulina platensis</i> in Digested Piggery Wastewater Pretreated by SBR with Operating Conditions Optimization	CAI Xiao-bo, YU Qiang-qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (2910)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Process with K ⁺ Addition in Saline Surroundings	WU Guo-dong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2917)
Efficient and Stable Operation of Shortcut Nitrification by Entrapping Ammonia Oxidizing Bacteria	YU Meng-yu, LIU Yi, TIAN Yu-bin, <i>et al.</i> (2925)
Fast Start-up of ANAMMOX and the Spatial Distribution of EPS in ANAMMOX Granules	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (2931)
Ammonia Oxidation with Potential Electron Acceptor in ANAMMOX Sludge	LI Xiang, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (2941)
Ammoniac Waste Gas in-situ Treatment Based on ANAMMOX Process	LIN Xing, WANG Fan, YUAN Yan, <i>et al.</i> (2947)
Extensive Green Roof Substrate Composition Based on Sludge Recycling	SHEN Qing-ran, LI Tian, CAO Yi, <i>et al.</i> (2953)
Short-term Effect of Roxithromycin on Abundance and Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Activated Sludge	GAO Jing-feng, SUN Li-xin, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (2961)
Influence of Salinity on Microbial Community in Activated Sludge and Its Application in Simulated Dye Wastewater Treatment	ZHOU Gui-zhong, XU Shuo, YAO Qian, <i>et al.</i> (2972)
Shift of Microbial Communities During the CO ₂ -Brine-Sandstone Interaction Process	WANG Bo-qiang, LI Chen-yang, LU Wei, <i>et al.</i> (2978)
Response of Soil Respiration and Heterotrophic Respiration to Returning of Straw and Biochar in Rape-Maize Rotation Systems	TIAN Dong, GAO Ming, HUANG Rong, <i>et al.</i> (2988)
Effect of Simulated Climate Warming on Microbial Community and Phosphorus Forms in Wetland Soils	TENG Chang-yun, SHEN Jian-guo, WANG Zhong, <i>et al.</i> (3000)
Patterns of Bacterial Community Through Soil Depth Profiles and Its Influencing Factors Under <i>Betula albosinensis</i> Burkill in the Xinjiashan Forest Region of Qinling Mountains	DU Can, XU Chen-yang, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3010)
Effects of Microbial Activities on Mercury Methylation in Farmland near Mercury Mining Area	JIA Qin, ZHU Xue-mei, WANG Qi, <i>et al.</i> (3020)
Effect of Sepiolite Application on the Migration and Redistribution of Pb and Cd in Soil Rice System in Soil with Pb and Cd Combined Contamination	FANG Zhi-ping, LIAO Min, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3028)
Application of Amphoteric-Cationic Combined Modification on Phenol Adsorption of Yellow Brown Soil	LIU Wei, MENG Zhao-fu, REN Shuang, <i>et al.</i> (3036)
Bioaccumulation of Heavy Metals in Twigs and Leaves of <i>Abies fabri</i> at Mount Gongga in China; A Comparison Study Between 1999 and 2014	LI Fen, WANG Xun, LUO Ji, <i>et al.</i> (3045)
Subcellular Distribution and Chemical Forms of Heavy Metals in Three Types of Compositae Plants from Lead-Zinc Tailings Area	ZHU Guang-xu, XIAO Hua-yun, GUO Qing-jun, <i>et al.</i> (3054)
Effects of Bentonite Amendment on Detoxification, Heavy Metal Passivation and Estrone Elimination of Sewage Sludge Compost	ZHOU Li-na, CAI Han-zhen, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3061)
Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Straw	GUO Xiang-lin, ZUO Jian-e, SHI Xu-chuan, <i>et al.</i> (3070)
Basic Features of Combustible Rural Garbage Component and Its Spatial-temporal Difference in China	YAN Zhuo-yi, YUE Bo, GAO Hong, <i>et al.</i> (3078)
Optimization of Promoter and Support for Co-based/zeolites Catalysts in Catalytic Reduction of NO _x by CH ₄	PAN Hua, JIAN Yan-fei, CHEN Ning-na, <i>et al.</i> (3085)