



全国中文核心期刊
中国科技核心期刊

环境工程学报

Chinese Journal of Environmental Engineering



第8卷 第1期

Vol.8 No.1

中国科学院
生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版

1
2014

目 次

水 污 染 防 治

诱导结晶法去除地下水中氟离子	黄廷林 孙 田 邓林煜(1)
中试螺旋式自循环厌氧反应器处理安乃近制药废水的稳定性能	 陆慧锋 丁 爽 吴泽高 吴大天 张红来 厉 巍 王 茹 郑 平(6)
水源切换条件下模拟管网铁离子释放控制	唐 敏 王海波 黄显怀 唐玉朝 胡 春(13)
A ² O-MBR 工艺处理城市污水作农业灌溉用水中试研究	王素兰 于 洁 邢传宏(17)
高氨废水短程硝化特性	王 磊 段 雪 吕永涛 穆建雄 鞠 恺 王旭东 王志盈(22)
CuO/过硫酸氢钾体系催化氧化苯酚	吉 飞 李朝林 邓 磊 徐 超(27)
臭氧氧化法处理焦化废水生化出水的反应动力学	杨德敏 夏 宏 袁建梅(32)
碳纳米管电极原位产生过氧化氢及其对亚甲基蓝脱色效果	李文军 戴启洲 胡 翔 邵 磊(38)
混凝-纳滤集成工艺深度处理脱墨废水	任晓晶 刘 丹 吴 月 张忠国 张凤山 程言君 李继定(43)
碳酸根对磷酸钙沉淀反应回收磷的影响	赵亚丽 宋永会 钱 锋 程建光 梁 慧(48)
畜禽养殖废水生物处理剩余污泥臭氧减量过程中的重金属释放	何帅雄 陈梅雪 强志民(55)
蜘蛛兰去除不同程度富营养水体中氮磷及抑藻效应	黄 伟 郭沛涌 陈淑芳(62)
生物膜法处理硫化铅锌矿尾矿库外排废水	林伟雄 孙水裕 黄绍松 杜青平(67)
反冲洗周期对生物除锰滤池去除效果的影响	程庆锋 李 冬 李相昆 孟令威 张 杰(72)
印染生化尾水反渗透深度处理工艺膜污染成因分析	李 丽 杨 成 龙 超(77)
螺旋藻和菌-藻共生系统处理啤酒废水	刘玉环 史晓洁 巫小丹 阮榕生 王 辉 胡蓓娟 王允圆 万益琴(82)
利用生物柴油去除滨海构筑物上原油的模拟研究	夏文香 张丹峰 肖行川 郭 慧 于 洋 李金成(87)
磷酸微波活化多孔生物质炭对亚甲基蓝的吸附特性	贾佳祺 李坤权 张雨轩 乔小朵(92)
地下水浅埋区某加油站特征污染物空间分布	杨 青 陈小华 孙从军 康丽娟 赵 振 陈漫漫(98)
共存物质对重金属絮凝剂 MCC 除镉性能的影响	张翠玲 张明月 常 青 张家利(104)
堆肥 + 零价铁可渗透反应墙修复黄土高原地下水中铬铅复合污染	李 雅 张增强 沈 锋 汪 葵(110)
水力停留时间对反应沉淀一体化反应器中半亚硝化反应的影响	 刘月敏 焦秀梅 崖婷婷 王少坡 李玉友 孙力平(116)
气升回流一体化工艺处理生活污水	张媛媛 潘 杨 黄 勇 陈智杰(121)
EGSB 反应器处理产氢发酵液	苏彩丽 张 楠 朱灵峰 李海华(126)
Zn/Al 双金属氧化物对水中硫酸根离子的吸附性能	程璐煜 岳秀萍 曹 岳 张 悦(131)
Ni ²⁺ 对活性污泥活性及群落多样性的影响	王 伟 徐 艳 侯昭牧 江丹丹 李晓晨(138)
镁盐和炉渣对印染废水的脱色处理	李甲亮 吴利娟 单长青 王 雪(144)
银钛共负载型光催化材料降解甲基橙废水	徐 荣 葛 骁 郭海宁 束正华 封 克 王小治(150)
南京某城市污水二级处理系统中酞酸酯类的分布及去除特征	 孔祥吉 单正军 许 静 郭 敏 张雪梅 孔德洋(157)
微米级负载型 TiO ₂ 催化剂在光催化-膜分离反应器中的应用	费学宁 董业硕 陈 磊 解立平(162)
内循环厌氧反应器多相流流场的三维数值分析	雷镕甄 周冬卉 刘伟京 涂 勇 郭方峥(170)
竹制填料生物接触氧化工艺处理污染河水	蒋晓阳 熊文军 刘子正 郭一舟 黄 凯 王宗平(178)
钻井废水的生物强化处理	冯 栩 谷晋川 鲍 晋 龚志莲 江元霞 张 彬 魏春梅(184)
微波-Fenton 氧化-PAFSi 絮凝法处理含油废水	施国飞 徐晓军 贾 佳 郑 鑫 管堂珍 陈晓鸿(190)
人工湿地基质对 NH ₄ ⁺ -N 吸附性能	张 亮 邹长武 田 筱 叶骏菲(198)
2 种不同性能碳纤维载体的固定床厌氧反应器运行效果比较	林长松 袁旭峰 崔宗均 程 序 朱万斌(203)
混凝-超滤短流程工艺处理北方水库原水	曲 明 滕李军 傅金祥 杨 勇 卢善文(210)
Fenton 氧化深度处理高浓度造纸废水的中试实验	贾永强 李 伟 贾立庄 闫东杰(215)

炼化企业中水紫外线消毒及其影响因素	兰效宁	刘宏莉	卢红梅 (222)
改性矿物吸附法和 O ₃ 氧化法对维生素 B ₁₂ 废水脱色处理	单思行	范鹏飞	邢 奕 (230)
铁-镧系合金氧化物污水除磷及再生	杨永珠	江映翔	赵李丽 (236)
微气泡曝气 O ₃ /H ₂ O ₂ 处理 RO 浓水的效能及影响因素	张培龙	于 丽	庞立飞 (242)
粉末活性炭对三烯丙基异氰脲酸酯的吸附性能	赵泽华	孙亚兵	徐建华 (249)
疏基酯化壳聚糖的合成及对 Cd ²⁺ 的去除性能研究	李 平	金兰淑	林国林 (254)

大气污染防治

一种包埋微生物复合填料的制备及性能评价	李顺义	朱仁成	张雅丽	王 岩 (260)
直流电晕自由基簇射处理 PCB 热解废气的动力学模拟	林 杰	温正城	刘 彦	谢晨晖 (266)
生物滤池处理城市污水工艺中恶臭和微生物气溶胶的填料选择	刘建伟	吕 臣	夏雪峰	刘会平 (273)
超重力脱除模拟烟气中一氧化氮	王 芳	李小露	余国贤	晋 梅 (280)
煤化工企业火炬 NO _x 排放的模拟燃烧实验	梁俊宁	卢立栋	宋丽娜	柳 玲 (285)
锌、铁等离子对氧化锌烟气脱硫工艺中亚硫酸锌氧化的影响	刘兆斌	童 华	王京刚	(290)
膜吸收法净化低浓度甲醛和氨气	姚志良	叶 宇	曹鑫悦	刘伟伟 (294)

固体废物处置

污泥膜覆盖好氧发酵堆体流场模拟及应用研究	盛金良	朱金龙	胡海鹤	龚 莹	施 炜 (298)			
干化床和芦苇床稳定污泥过程中的腐殖化特征	崔玉波	冉春秋	王 芳	孙红杰	高 伟 (305)			
蔬菜与餐厨垃圾厌氧发酵启动阶段微生物分析	孙玉辉	刘 齐	姜 月	车振宇	张 欢	王晓明	曹炎鑫	寇 巍 (310)
超临界丙酮降解废弃线路板中的溴化环氧树脂	邢明飞	张付申 (317)						
市政污泥与生活垃圾混烧技术验证	陈兆林	温俊明	刘朝阳	张鸿涛	杨仕桥	唐 侠	陈 清 (324)	
电解锰渣无害化处理技术	王积伟	周长波	杜 兵	陈 舒	裴倩倩 (329)			
温度与秸秆比例对牛粪好氧堆肥的影响	赵秀玲	朱新萍	罗艳丽	余 雄	贾宏涛	李金军	刘洪蓬 (334)	

土壤污染防治

铬污染土壤对水泥熟料强度和铬浸出浓度的影响	李 静	陈胡星 (341)
氧化亚铁硫杆菌对电子垃圾焚烧迹地重金属形态的影响	赵国华	高顺芝 罗兴章 (347)

噪声污染防治

城市天然气加气站噪声影响分析及噪声控制技术	熊鸿斌	陈新燕	姜 海 (353)
-----------------------------	-----	-----	-----------

环境生物技术

修复 PAHs 复合污染体系的高效菌群构建及降解特性	杨旭	陈芳艳	唐玉斌 (360)
一株反硝化细菌的分离鉴定及其反硝化特性	杨浩锋	唐佳琦	胡安辉 杨岳平 谢柳 (366)
嗜盐菌的筛选及原油降解性能	陈梅梅	邓皓	宋佳宇 刘光全 (372)
高效脱硫菌的筛选及其性能研究	张秀霞	孔甜甜	陈水泉 王志伟 邵珺 刘欣梅 (378)

环境监测与评价

含油污泥中油含量的 3 种测定方法比较	张 珂	朱建华	周 勇	武本成 (385)
程序化的未确知测度模型用于水环境质量评价	张卫兵	姚 建	汤 乐	彭 艳 (392)

工程实例

蒙自矿冶重金属冶炼废水处理工程改造与实践	马 玲	徐晓军	黄昌元	黄伟忠	陈晓鸿	韦建初	杨津津 (397)
----------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----------

相关研究

TiO ₂ 纳米管催化活性再生处理技术	刘翠云	傅大放	孟钦伟 (403)
--------------------------------------	-----	-----	-----------

CONTENTS

Removal of fluoride from groundwater by induced crystallization Huang Tinglin Sun Tian Deng Linyu(1)

Stability of pilot-scale spiral automatic circulation anaerobic reactor treating analgin pharmaceutical wastewater
..... Lu Huifeng Ding Shuang Wu Zegao Wu Datian Zhang Honglai Li Wei Wang Ru Zheng Ping(6)

Control iron release in model drinking water distribution system under water source switch Tang Min Wang Haibo Huang Xianhuai Tang Yuchao Hu Chun(13)

Treatment of urban wastewater for agricultural irrigation by AO-MBR Wang Sulan Yu Jie Xing Chuanhong(17)

Performance of shortcut nitrification for high ammonia wastewater treatment
..... Wang Lei Duan Xue Lyu Yongtao Mu Jianxiong Ju Kai Wang Xudong Wang Zhiying(22)

Catalytic oxidation of phenol by CuO/peroxymonosulfate system Ji Fei Li Chaolin Deng Lei Chao Xu(27)

Reaction kinetics of biological treatment of coking wastewater by ozonation Yang Demin Xia Hong Yuan Jianmei(32)

In-site generating hydrogen peroxide by carbon nanotubes electrode and application in decolorization of wastewater containing
methylene blue Li Wenjun Dai Qizhou Hu Xiang Shao Lei(38)

Advanced treatment of deinking wastewater by coagulation and nanofiltration integrated process
..... Ren Xiaojing Liu Dan Wu Yue Zhang Zhongguo Zhang Fengshan Cheng Yanjun Li Jiding(43)

Effect of carbonate on calcium phosphate precipitation for phosphorus recovery Zhao Yali Song Yonghui Qian Feng Cheng Jianguang Liang Hui(48)

Release behavior of heavy metals in the ozonation of sludge from swine wastewater biological treatment process
..... He Shuaixiong Chen Meixue Qiang Zhimin(55)

Removal of nitrogen and phosphorus from different degree eutrophic waters and restraint of algae by *Hymenocallis americana*
..... Huang Wei Guo Peiyong Chen Shufang(62)

Biofilm process for treating Pb-Zn sulfide ore tailing wastewater Lin Weixiong Sun Shuiyu Huang Shaosong Du Qingping(67)

Influence of backwashing period on removal efficiency in a biological manganese removal filter
..... Cheng Qingfeng Li Dong Li Xiangkun Meng Lingwei Zhang Jie(72)

Analysis of membrane fouling causes in RO process for advanced treatment of dyeing secondary effluent Li Li Yang Cheng Long Chao(77)

Brewery wastewater treatment by *Spirulina platensis* or fungi-algae symbiosis system
..... Liu Yuhuan Shi Xiaojie Wu Xiaodan Ruan Rongsheng Wang Hui Hu Beijuan Wang Yunpu Wan Yiqin(82)

Simulative study on removal of crude oil from coastal structures by biodiesel Xia Wenxiang Zhang Danfeng Xiao Xingchuan Guo Hui Yu Yang Li Jincheng(87)

Adsorption characteristics of methylene blue onto biomass-based porous activated carbons by microwave assisted H₃PO₄ activation
..... Jia Jiaqi Li Kunquan Zhang Yuxuan Qiao Xiaoduo(92)

Spatial distribution of typical pollutants of gas stations in shallow water-table areas Yang Qing Chen Xiaohua Sun Congjun Kang Lijuan Zhao Zhen Chen Manman(98)

Effects of coexisting substances on cadmiun removal performance by heavy metal flocculant MCC Zhang Cuiling Zhang Mingyue Chang Qing Zhang Jiali(104)

Remediation of Cr-Pb polluted groundwater using a mixed zero-valent iron compost permeable reactive barrier in Loess Plateau aera ...
..... Li Ya Zhang Zengqiang Shen Feng Wang Kui(110)

Effect of hydraulic retention time on half-nitrosofication in integrated reaction-precipitation reactor Liu Yuemin Jiao Xiumei Ya Tingting Wang Shaopo Li Yuyou Sun Liping(116)

Treatment of domestic sewage by airlift-reflux integrated reactor Zhang Yuanyuan Pan Yang Huang Yong Chen Zhijie(121)

Start-up of EGSB reactor for treatment of biohydrogen fermentative liquid Su Caili Zhang Nan Zhu Lingfeng Li Haihua(126)

Adsorptive removal of sulfate from water by Zn/Al layered double oxide Cheng Junyu Yue Xiuping Cao Yue Zhang Yue(131)

Effects of Ni(II) on activity and community diversity of activated sludge Wang Wei Xu Yan Hou Zhaomu Jiang Dandan Li Xiaochen(138)

Decoloration of dyeing wastewater by Mg²⁺ salts and slag Li Jialiang Wu Lijuan Shan Changqing Wang Xue(144)

Photocatalytic degradation of methyl orange wastewater by Co-deposited (Ag⁺ -TiO₂-EP) material
..... Xu Rong Ge Xiao Guo Haining Shu Zhenghua Feng Ke Wang Xiaozhi(150)

Distribution and removal characteristics of PAEs in secondary sewage process systems in a municipal sewage plant in Nanjing
..... Kong Xiangji Shan Zhengjun Xu Jing Guo Min Zhang Xuemei Kong Deyang(157)

Application of micron-scale supported TiO₂ catalysts in photocatalysis-membrane reactor
..... Fei Xuening Dong Yesuo Chen Lei Xie Liping(162)

Three-dimensional numerical analysis of multiphase flow field in internal circulation anaerobic reactor
..... Lei Rongzhen Zhou Donghui Liu Weijing Tu Yong Guo Fangzheng(170)

Experimental study on treatment of polluted water by a biological contact oxidation process filled with bamboo filler
..... Jiang Xiaoyang Xiong Wenjun Liu Zizheng Guo Yizhou Wang Zongping(178)

Bioaugmentation treatment of drilling wastewater Feng Xu Gu Jinchuan Bao Jin Gong Zhilian Jiang Yuanxia Zhang Bin Wei Chunmei(184)

Treatment of oily wastewater by microwave-Fenton oxidation-PAFSi flocculation
..... Shi Guofei Xu Xiaojun Jia Jia Zheng Xin Guan Tangzhen Chen Xiaohong(190)

NH ₄ ⁺ -N adsorption characteristics of substrates in constructed wetland	Zhang Liang Zou Changwu Tian Xiao Ye Junfei (198)
Comparative study on operational effect of two kinds of fixed-bed anaerobic reactor packed with different properties of carbon fiber as carrier	Lin Changsong Yuan Xufeng Cui Zongjun Cheng Xu Zhu Wanbin (203)
Treatment of raw water of northern reservoir by coagulation/ultrafiltration membrane short technological process	Qu Ming Teng Lijun Fu Jinxiang Yang Yong Lu Shanwen (210)
A pilot study on advanced treatment of high-concentration papermaking wastewater by Fenton oxidation process	Jia Yongqiang Li Wei Jia Lizhuang Yan Dongjie (215)
UV disinfection of reclaimed water from an oil refining and petrochemical enterprise and its influencing factors	Lan Xiaoning Liu Hongju Lu Hongmei (222)
Decoloration treatment of wastewater containing vitamin B ₁₂ by modified mineral adsorption and O ₃ oxidation	Shan Sihang Fan Pengfei Xing Yi Qiao Geng (230)
Phosphorous removal from wastewater by iron-lanthanum based alloy oxides and their regeneration	Yang Yongzhu Jiang Yingxiang Zhao Lili Liu Yanbing (236)
Treatment efficiency and influencing factors of RO concentrated water by microbubble ozonation with H ₂ O ₂	Zhang Peilong Yu Li Pang Lifei Hou Jiakai Jia Shouhua (242)
Adsorption property of Triallyl isocyanurate onto powdered activated carbon	Zhao Zehua Sun Yabing Xu Jianhua Rong Shaopeng Zhang Yan (249)
Synthesis of sulfhydryl esterification chitosan and research on removal performance of Cd ²⁺	Li Ping Jin Lanshu Lin Guolin Liu Shiguang (254)
Preparation and performance evaluation of a composite filler embedding microorganisms	Li Shunyi Zhu Rencheng Zhang Yali Wang Yan (260)
Dynamic simulation of PCB pyrolysis gas treatment by DC corona radical shower	Lin Jie Wen Zhengcheng Liu Yan Xie Chenhui Luo Qinqi (266)
Selection of packing materials for biofilter to treat odor and bioaerosol from municipal wastewater treatment process	Liu Jianwei Lu Chen Xia Xuefeng Liu Huiping (273)
Removal of NO from simulated flue gas under high gravity	Wang Fang Li Xiaolu Yu Guoxian Jin Mei Lu Ping (280)
Simulated combustion experiment on torch NO _x emissions from coal chemical industry	Liang Junning Lu Lidong Song Lina Liu Ling (285)
Effects of Zn and Fe ion on zinc sulfite oxidation in flue gas desulfurization with zinc oxide	Liu Zhaobin Tong Hua Wang Jinggang (290)
Purification of simulated low-concentration formaldehyde and ammonia by membrane absorption method	Yao Zhiliang Ye Yu Cao Xinyue Liu Weiwei Ma Yongliang (294)
Research on application & flow field simulation of membrane-covered compost pile in sludge aerobic fermentation	Sheng Jinliang Zhu Jinlong Hu Haihe Gong Ying Shi Wei (298)
Humification characteristics of stabilized sewage sludge in sludge drying bed and reed bed	Cui Yubo Ran Chunqiu Wang Fang Sun Hongjie Gao Wei (305)
Analysis of microorganism at starting stage of anaerobic fermentation of vegetable waste and restaurant garbage	Sun Yuhui Liu Qi Jiang Yue Che Zhenyu Zhang Huan Wang Xiaoming Cao Yanxin Kou Wei (310)
Decomposition of brominated epoxy resinsand in waste printed circuit boards by supercritical acetone	Xing Mingfei Zhang Fushen (317)
Validity study on co-incineration of municipal sewage sludge and municipal solid waste	Chen Zhaolin Wen Junming Liu Chaoyang Zhang Hongtao Yang Shiqiao Tang Xia Chen Qing (324)
Harmless treatment technology of manganese slag	Wang Jiwei Zhou Changbo Du Bing Chen Shu Pei Qianqian (329)
Impact of temperature and straw adding ratio on contents of nutrients in cow dung aerobic compost	Zhao Xiuling Zhu Xinping Luo Yanli Yu Xiong Jia Hongtao Li Jinjun Liu Hongpeng (334)
Effect of chromium-contaminated soil on strength and chromium ions leaching concentration of cement clinker	Li Jing Chen Huxing (341)
Partitioning variation of heavy metals in contaminated soil by E-waste open burning activities via <i>Thiobacillus Ferrooxidans</i> bioleaching	Zhao Guohua Gao Shunzhi Luo Xingzhang (347)
Analysis of noise effect and technology of noise control in urban gas stations	Xiong Hongbin Chen Xinyan Jiang Hai (353)
Construction of high-effective microbial flora for bioremediation of system polluted by PAHs and its degradation characteristics	Yang Xu Chen Fangyan Tang Yubin (360)
Identification and denitrification characteristics of a denitrifier	Yang Haofeng Tang Jiayu Hu Anhui Yang Yueping Xie Liu (366)
Isolation and oil-degrading characteristics of halophilic bacteria	Chen Meimei Deng Hao Song Jiayu Liu Guangquan (372)
Screening of high efficient desulphurization bacteria and study on its properties	Zhang Xiuxia Kong Tiantian Chen Shuiquan Wang Zhiwei Shao Jun Liu Xinmei (378)
Comparison of three kinds of determination methods on oil and water content of oily sludge	Zhang Ke Zhu Jianhua Zhou Yong Wu Bencheng (385)
Application of programmed unascertained measure model in water environmental quality assessment	Zhang Weibing Yao Jian Tang Le Peng Yan (392)
Reconstruction and practice of treatment project of heavy metals smelting wastewater from Mengzi Mining-Metallurgy Co. Ltd	Ma Ling Xu Xiaojun Huang Changyuan Huang Weizhong Chen Xiaohong Wei Jianchu Yang Jinjin (397)
Regeneration technologies for catalytic activity of TiO ₂ nanotubes	Liu Cuiyun Fu Dafang Meng Qinwei (403)

Ni^{2+} 对活性污泥活性及群落多样性的影响

王伟 徐艳 侯昭牧 江丹丹 李晓晨*

(山东农业大学水利土木工程学院, 泰安 271018)

摘要 通过检测活性污泥的电子传递体系活性以及生物多样性, 研究 Ni^{2+} 对活性污泥微生物活性及群落多样性的影响。结果表明: 与对照系统相比, 5 mg/L 的 Ni^{2+} 对 2, 3, 5-triphenyltetrazolium chloride (TTC-ETS) 活性未产生显著的影响; 但当 Ni^{2+} 的浓度进一步增大到 10、20 和 40 mg/L 后, 其对序批式反应器内活性污泥 TTC-ETS 活性的抑制率分别达到 $(36.79 \pm 11.14)\%$ 、 $(55.88 \pm 13.90)\%$ 和 $(70.97 \pm 6.78)\%$ 。低浓度 Ni^{2+} 能增强活性污泥微生物对碳源的利用, 但高于 10 mg/L 的 Ni^{2+} 则显著抑制了活性污泥微生物对碳源的利用。各个 SBR 系统中微生物群落最常见的物种相近, 物种丰富度和均一性则均有所不同, 其中群落物种丰富度随着 Ni^{2+} 浓度的增加而逐渐减小。TTC-ETS 活性、平均每孔颜色变化率、Shannon 指数和 Simpson 指数, 与 Ni^{2+} 的胁迫浓度之间的显著相关性表明, 它们均可有效地表征 Ni^{2+} 胁迫对活性污泥微生物活性及群落多样性的影响程度。

关键词 Ni^{2+} 活性污泥 TTC-ETS 活性 群落多样性 影响

中图分类号 X703 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2014)01-0138-06

Effects of Ni(II) on activity and community diversity of activated sludge

Wang Wei Xu Yan Hou Zhaomu Jiang Dandan Li Xiaochen

(Water Conservancy and Civil Engineering College, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract The effects of Ni(II) on the activity and community diversity of activated sludge were investigated by determining the electron transport system (ETS) activity and microbial metabolic diversity (Biolog). The results show that no significant inhibition could be detected in the 2, 3, 5-triphenyltetrazolium chloride (TTC-ETS) values between the control system (CK) and the sequencing batch reactor (SBR) system loaded with 5 mg/L Ni(II). However, as compared to the CK, the inhibitory rates are $(36.79 \pm 11.14)\%$, $(55.88 \pm 13.90)\%$, and $(70.97 \pm 6.78)\%$ for the TTC-ETS of sludge microorganisms in SBR systems fed with 10, 20, and 40 mg/L Ni(II), respectively. The carbon utilization capacity of the sludge microorganisms could be improved by feeding low concentration of Ni(II), while the carbon utilization capacity could be significantly inhibited as the feeding concentration of Ni(II) increasing up to 10 mg/L. According to the diversity index analysis, the microbial communities in the five SBR systems have a resemblance in the most common species, while differences in the richness and homogeneity. The Ni(II) feeding concentrations significantly correlate to the TTC-ETS, the average well colour development (AWCD), the Shannon index, and the Simpson index, suggesting that these indexes could effectively predict the effects of Ni(II) on the activity and community diversity of activated sludge.

Key words Ni(II); activated sludge; TTC-ETS; community diversity; effect

活性污泥法已被广泛应用于市政污水和工业废水的处理。活性污泥微生物以污水中的污染物质作为生长的碳源和能源, 通过自身新陈代谢的生理功能将其转化为 CO_2 或其他形式等稳定的无机物, 达到降解有机物而净化水质的目的^[1]。活性污泥微生物是污水生物处理系统中污染物的降解主体。当有毒有害物质进入处理系统时, 首先会对活性污泥微生物的生理生化活性产生影响, 消除敏感种或个体, 影响活性污泥微生物群落结构, 改变活性污泥微

生物多样性, 进而影响污水生物处理效果^[2, 3]。

镍是一种典型毒性较强的重金属, 广泛存在于家庭废水(来自涂料、药品、油墨等)、商业废水(来自洗车处、医院牙科等)、与交通有关的排放(来自

基金项目: 中国博士后科学基金项目(20080431214)。

收稿日期: 2012-11-22; **修订日期:** 2012-12-14

作者简介: 王伟(1987~), 男, 硕士研究生, 主要从事污水生物处理理论研究。E-mail: dai8888@126.com

* 通讯联系人, E-mail: lixiaochen02@163.com

汽车尾气、刹车片、轮胎等)、工业废水(来自电镀、冶炼、颜料、电池和采矿等)以及地面径流等^[4, 5]。镍在水溶液中主要以 Ni^{2+} 存在,痕量时是微生物生长代谢所必需的重金属元素,在调节微生物细胞渗透压,参与氧化还原过程中的电子传递,稳定蛋白质结构、微生物细胞壁、脱氧核糖核酸,保持活化酶的活性等方面发挥着重大的作用。过量的镍会对活性污泥微生物的许多酶产生不可逆的毒害^[6, 7],进而造成污水处理效率的下降。

目前,镍对活性污泥处理系统的毒性已经被广泛研究,主要包括活性污泥对污染物去除率影响^[8, 9]、细菌动力学^[10]、群落结构^[11]以及活性的研究^[12]等。但绝大部分研究都是从短期急性毒性的角度考察镍对活性污泥微生物的影响,鲜有镍对活性污泥微生物活性长期的动态影响以及群落多样性的影响研究。本研究利用自制序批式反应器(sequencing batch reactor, SBR)研究镍对污泥微生物活性的长期动态影响,并结合简单快速的 Biolog 微平板法^[13],探讨镍对活性污泥微生物群落多样性的影响。

1 实验部分

1.1 接种污泥和配制模拟废水

实验所用污泥取自泰安市污水处理厂二厂(氧化沟好氧段),活性污泥采集回实验室后,过 20 目筛,以去除泥沙等大颗粒杂质,待其自然沉降,弃去上层清液,沉淀污泥用自制废水洗涤 3 遍后进入实验室 KL-1 型 SBR 实验装置进行驯化培养。培养过程中,对处理后的出水进行监测,当总有机碳(total organic carbon, TOC)和氨氮(NH_4^+-N)的去除率均大于 80% 后,培养驯化完成。

自制废水配方见表 1。 Ni^{2+} 以 NiSO_4 的形式加入,然后换算成 Ni^{2+} 质量浓度。

自制废水中的主要成份及其质量浓度分别如下:蔗糖 647.1 mg/L、 NH_4HCO_3 263.4 mg/L、 K_2HPO_4 20.4 mg/L、 KH_2PO_4 4.93 mg/L、 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 3.7 mg/L、 $\text{FeCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 3.7 mg/L、 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 3.7 mg/L、 MnSO_4 0.057 mg/L、 H_2MoO_4 0.031 mg/L、 ZnSO_4 0.046 mg/L、 CoSO_4 0.049 mg/L 和 CuSO_4 0.076 mg/L,另外, Ni^{2+} 以 NiSO_4 的形式加入,然后换算成 Ni^{2+} 质量浓度。

1.2 实验方法

1.2.1 SBR 系统运行控制

驯化好的活性污泥在自制 SBR 系统内接种良

好之后,将质量浓度为 0、5、10、20 和 40 mg/L 的 Ni^{2+} 分别加入到 1[#]~5[#]SBR 系统中进行染毒。各系统其他条件均相同,系统内污泥混合液均为 4 L,污泥质量浓度控制在 5~6 g/L。SBR 系统每天 4 个循环,每个循环包括:进水 30 min、反应 4 h、沉淀 1 h、排放 20 min 和闲置 10 min。系统经过一定时间染毒后,当活性污泥微生物电子传递体系活性值基本达到稳定时,染毒结束(停止投加 Ni^{2+}),取样进行活性污泥微生物群落多样性的测定,同时各 SBR 进入恢复期。染毒及恢复期内进行电子传递体系活性的测定。

1.2.2 电子传递体系活性的测定

染毒开始后,每 3 天分别从 1[#]~5[#]SBR 系统内取污泥混合液测定电子传递体系活性(electron transport system, ETS),同步测定 1[#]~5[#]SBR 系统内活性污泥的污泥浓度。ETS 的具体测定方法见参考文献[14-16]。

1.2.3 活性污泥微生物群落多样性的测定

取 8 mL 活性污泥到离心管中,在 10 000 r/min 下离心 20 min,弃去上清液,加入 8 mL 生理盐水,在振荡器上震荡 5 min 使之混匀,重复操作 2 次。然后在 2 000 r/min 下离心 1 min。取上清液,将样本稀释一定倍数,每个 Biolog 微平板孔中加入 150 μL 稀释液,最后将接种好的板置于 25 $^{\circ}\text{C}$ 的恒温培养箱中培养,每隔 24 h 用酶标仪在 590 nm 处读数,连续测定 7 d。

平均每孔颜色变化率(average well colour development, AWCD)、Shannon 指数、Simpson 指数和 McIntosh 指数的计算方法见参考文献[17, 18],本实验采用 Biolog 微平板培养 72 h 的数据,来分析比较活性污泥微生物群落多样性。统计分析采用 SPSS 13.0 在计算机上进行。

2 结果分析与讨论

2.1 Ni^{2+} 对活性污泥 ETS 活性的影响

活性污泥电子传递体系活性是近年来备受关注的应用于评价活性污泥微生物活性的指标^[14-16]。该指标既可从生物学的角度反映处理系统微生物降解有机物的能力,又可用生物活性的高低衡量有机物的降解速率及生物处理设施的运行效果^[19]。该方法实质上是通过测定好氧微生物的呼吸活性来间接指示活性污泥的微生物活性^[16]。ETS 主要包括 2, 3, 5-triphenyltetrazolium chloride (TTC-ETS) 和 2-(p-

iodophenyl)-3-(p-nitrophenyl)-5-phenyl tetrazolium chloride (INT-ETS), 且表征重金属对活性污泥微生物活性的影响时, TTC-ETS 的灵敏度高于 INT-ETS^[16], 所以本实验中直接选取测定 TTC-ETS 活性来表征重金属对活性污泥微生物活性的影响。图 1 反映了不同浓度 Ni^{2+} 对 SBR 系统中活性污泥微生物 TTC-ETS 活性的影响。

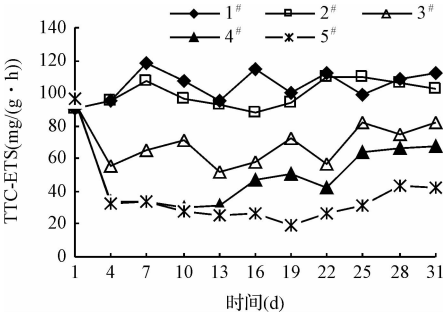


图 1 Ni^{2+} 对 SBR 系统中活性污泥 TTC-ETS 活性的影响
Fig. 1 Effects of $\text{Ni}(\text{II})$ on TTC-ETS of activated sludge in SBR systems

由图 1 中可见,不同质量浓度的 Ni^{2+} 会对 TTC-ETS 活性产生不同程度的抑制作用,在无 Ni^{2+} 投加的 1#对照系统内,整个实验周期内平均 TTC-ETS 活性为 $(106.26 \pm 8.40) \text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$,一直维持在一个较高的水平,说明实验用活性污泥具有较好的生物活性。与对照系统相比,投加量为 $5 \text{ mg}/\text{L}$ 的 2#系统内 TTC-ETS 活性受 Ni^{2+} 的影响并不明显,其平均 TTC-ETS 活性为 $(100.22 \pm 7.89) \text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。随着 Ni^{2+} 质量浓度的不断增加,活性污泥微生物的 TTC-ETS 活性开始剧烈下降,3#~5#SBR 系统内 TTC-ETS 活性分别为 (66.91 ± 11.21) 、 (46.77 ± 14.73) 和 $(30.83 \pm 7.57) \text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$,与 1#对照系统相比,其抑制率分别达到 $(36.79 \pm 11.14)\%$ 、 $(55.88 \pm 13.90)\%$ 和 $(70.97 \pm 6.78)\%$,并且在恢复期内,3#~5#SBR 系统内 TTC-ETS 活性没有明显上升。说明低浓度 Ni^{2+} 对活性污泥微生物的 TTC-ETS 活性影响较小,而高浓度 Ni^{2+} 能够显著降低活性污泥微生物的 TTC-ETS 活性,并且是不可逆的影响。

2.2 Ni^{2+} 对活性污泥微生物群落多样性的影响

近年来,以碳源利用类型为基础的 Biolog 技术得到了飞速发展,为研究微生物群落多样性提供了一种简便、快速的方法^[13, 18]。Biolog 研究微生物群落结构及其代谢功能,可以揭示环境中污染物迁移转化的生物学基础,提供评价和预测环境质量和安

全性的基本信息;并且可以从群落水平上了解和评价生物修复和生物处理技术的机理与效果,同时为控制和优化微生物群落结构,强化其代谢功能提供理论指导^[13]。

2.2.1 平均每孔颜色变化率

平均每孔颜色变化率(AWCD)是反映活性污泥微生物活性,即利用单一碳源能力的一个重要指标,可在一定程度上反映活性污泥中微生物种群的数量和结构特征^[20]。图 2 中 AWCD 随时间变化曲线的形状符合一般微生物利用基质的规律,即存在较明显的适应期、对数期和稳定期等阶段^[21]。

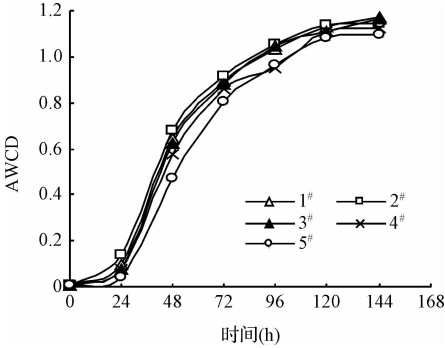


图 2 不同 SBR 系统活性污泥平均每孔颜色变化率
Fig. 2 Effects of $\text{Ni}(\text{II})$ on AWCD of activated sludge in SBR systems

由图 2 可见,1#~5#SBR 系统内活性污泥微生物活性随培养时间的延长而提高,不同 SBR 系统内活性污泥微生物利用碳源能力的顺序大致为:2# > 1# > 3# > 4# > 5#。在 24 h 之内,AWCD 均较小,表明培养 24 h 内,有较少的碳被活性污泥微生物所利用;在 24 h 后,AWCD 开始迅速上升,说明 24 h 后碳源开始被活性污泥微生物大量利用。活性污泥微生物在 Biolog 微平板上培养至 72 h 时,各添加 Ni^{2+} SBR 系统 AWCD 比对照 SBR 系统降低的百分率分别为:2#为 -1.73%、3#为 1.99%、4#为 3.78% 和 5#为 9.70%,说明 Ni^{2+} 能明显影响活性污泥微生物的碳源利用能力,低浓度 Ni^{2+} 能增强活性污泥微生物对碳源的利用,但高于 $10 \text{ mg}/\text{L}$ 的 Ni^{2+} 则显著抑制了活性污泥微生物对碳源的利用。

2.2.2 活性污泥微生物群落代谢功能主成分分析

31 种碳源的测定结果形成了描述微生物群落代谢特征的多元向量,不易直观比较,因此应用主成分分析来分析活性污泥微生物对 Biolog 微平板上 31 种碳源的利用情况^[17],活性污泥微生物利用碳源类型的主成分分析见图 3。

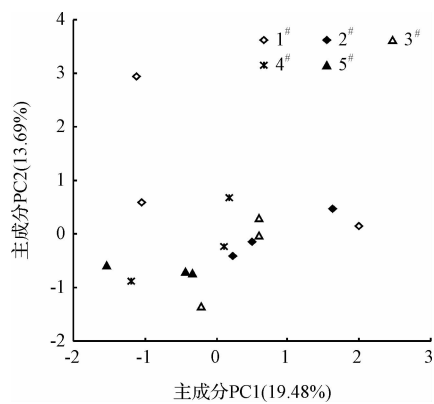


图 3 不同 SBR 系统活性污泥微生物群落主成分分析
Fig. 3 Principal components analysis on activated
sludge microbial communities in SBR systems

由图 3 可见,2 个主成分因子的特征值之和达到总方差的 33.17%,其中主成分(principal component, PC)1 的特征值达到总方差的 19.48%。2[#]和 3[#]系统,4[#]和 5[#]系统中活性污泥微生物多样性分别相似。2[#]~5[#]SBR 系统内活性污泥微生物多样性均与 1[#]系统有明显差异,说明 Ni^{2+} 对活性污泥微生物群落代谢功能有显著影响。

2.2.3 污泥微生物群落对各种碳源的代谢强度

活性污泥微生物群落代谢功能主成分分析反映了群落总体的变化,但未能反映微生物群落代谢的详细信息。因此研究活性污泥微生物对不同碳源利用能力的差异,有助于更全面了解活性污泥微生物代谢功能特征^[17]。培养时间为 72 h 时,不同 Ni^{2+} 浓度条件下活性污泥微生物对 6 类碳源^[22]利用程度见图 4。

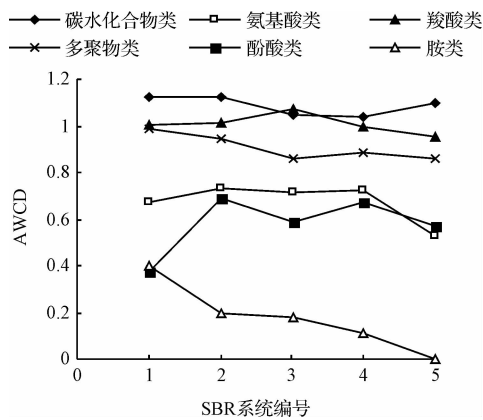


图 4 不同 SBR 系统活性污泥微生物对
6 类碳源利用能力的变化

Fig. 4 Utilizations of six kinds of
carbon source in SBR systems

由图 4 可知,活性污泥微生物对碳水化合物类、羧酸类和多聚物类等碳源的利用能力较高,而对胺类等碳源的利用能力较低。随着 Ni^{2+} 浓度的增加,活性污泥微生物对碳水化合物类和多聚物类碳源的利用能力均先轻微下降,在 Ni^{2+} 浓度为 10 mg/L 后开始趋于平稳,另外对碳水化合物类碳源的利用能力在 Ni^{2+} 浓度为 20 mg/L 后有所回升。活性污泥微生物对羧酸类、酚酸类和氨基酸类碳源的利用趋势基本一致,随着 Ni^{2+} 浓度的增加,其利用能力均先增加后下降,不同的是活性污泥微生物对羧酸类碳源的利用能力最强时是在 Ni^{2+} 浓度为 10 mg/L 时,而对酚酸类和氨基酸类碳源的利用能力最强时是在 Ni^{2+} 浓度为 5 mg/L 时。0~20 mg/L Ni^{2+} 对活性污泥微生物利用氨基酸类碳源的能力影响并不明显,但是 40 mg/L Ni^{2+} 对其影响显著。随着 Ni^{2+} 浓度的增加,活性污泥微生物对胺类碳源的利用能力持续下降,直至几乎为零。

由此可见,不同 Ni^{2+} 浓度对活性污泥微生物利用 6 类碳源能力的影响虽存在差异,但是碳水化合物类、羧酸类和多聚物类等碳源是活性污泥微生物群落的主要碳源。在 6 类碳源里, Ni^{2+} 对活性污泥微生物利用胺类碳源能力的影响最大。除酚酸类碳源外, Ni^{2+} 浓度为 40 mg/L 时,2[#]~5[#]SBR 系统中活性污泥微生物利用碳源的能力均低于 1[#]对照系统。

2.2.4 污泥微生物群落功能多样性分析

采用生态学中的 3 种多样性指数来分析 1[#]~5[#] SBR 系统中活性污泥微生物群落功能的多样性。所采用的 3 种多样性指数反映了微生物群落功能多样性的不同侧面,其中 Shannon 指数受群落物种丰富度影响较大,Simpson 指数反映了群落中最常见的物种,而 McIntosh 指数则是度量群落物种均一性的指标^[18]。SBR 系统中微生物群落代谢功能丰富度指数、常见物种指数和均一性指标随 Ni^{2+} 浓度的变化见表 1。从表 1 可知,1[#]~5[#]SBR 系统中微生物

表 1 各 SBR 系统中活性污泥微生物功能多样性
Table 1 Functional diversity of
microbial community in SBR systems

项 目	Shannon 指数	Simpson 指数	McIntosh 指数
1 [#]	3.16 ± 0.02	0.95 ± 0.00	6.02 ± 0.11
2 [#]	3.15 ± 0.05	0.95 ± 0.00	6.16 ± 0.07
3 [#]	3.08 ± 0.02	0.95 ± 0.00	6.23 ± 0.45
4 [#]	3.10 ± 0.04	0.95 ± 0.00	6.01 ± 0.16
5 [#]	2.97 ± 0.05	0.94 ± 0.00	6.07 ± 0.21

群落最常见的物种相近,物种丰富度和均一性则均有所不同,但是各个系统之间的差异并不显著,其中群落物种丰富度随着 Ni^{2+} 浓度的增加而逐渐减小。由此可见, Ni^{2+} 对活性污泥微生物功能多样性的影响并不十分显著。

2.3 Ni^{2+} 浓度和活性污泥活性及微生物多样性之间的相关性分析

活性污泥微生物是污水生物处理系统中污染物的降解主体,因此活性污泥微生物的 TTC-ETS 活性及群落多样性对 SBR 系统的正常运行有重要意义。SBR 系统中活性污泥微生物 TTC-ETS 活性、群落多样性与 Ni^{2+} 浓度之间的相关性见表 2。

表 2 活性污泥微生物 TTC-ETS 活性、群落多样性与 Ni^{2+} 浓度之间的相关性
Table 2 Relationships of TTC-ETS, community diversity and Ni^{2+} concentration

	Ni^{2+}	TTC-ETS	AWCD	Shannon 指数	Simpson 指数
Ni^{2+}	1				
TTC-ETS	-0.928 ¹⁾	1			
AWCD	-0.962 ²⁾	0.930 ¹⁾	1		
Shannon 指数	-0.949 ¹⁾	0.885 ¹⁾	0.893 ¹⁾	1	
Simpson 指数	-0.928 ¹⁾	0.902 ¹⁾	0.883 ¹⁾	0.994 ²⁾	1
McIntosh 指数	-0.190	0.126	0.375	-0.050	-0.091

注:1)在 0.05 水平(双侧)上显著相关;2)在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

从表 2 可知,AWCD 与 Ni^{2+} 浓度呈显著负相关,而 TTC-ETS、Shannon 指数和 Simpson 指数分别与 Ni^{2+} 浓度有明显的负相关性。AWCD、Shannon 指数和 Simpson 指数也分别与 TTC-ETS 有较好的相关性。因此,TTC-ETS、AWCD、Shannon 指数和 Simpson 指数均可用来表征活性污泥微生物活性及群落多样性所受 Ni^{2+} 影响的程度,进而可间接表征 Ni^{2+} 对活性污泥去除污染物效率的影响程度。

3 结 论

(1) Ni^{2+} 在 5 mg/L 时,对 TTC-ETS 活性的影响并不明显,随着 Ni^{2+} 的质量浓度增大,其对 TTC-ETS 活性的抑制作用增强,与 1[#]对照系统相比,3[#]~5[#] SBR 系统内活性污泥活性抑制率分别达到 (36.79 ± 11.14)%、(55.88 ± 13.90)% 和 (70.97 ± 6.78)%,并且在恢复期内,3[#]~5[#] SBR 系统内 TTC-ETS 活性没有明显回升。说明低浓度 Ni^{2+} 对活性污泥微生物的 TTC-ETS 活性影响较小,而高于 10 mg/

L 的 Ni^{2+} 对活性污泥微生物的 TTC-ETS 活性有着显著不可逆的抑制性影响。

(2) Ni^{2+} 能明显影响活性污泥微生物的碳源利用能力,低浓度 Ni^{2+} 能够增强活性污泥微生物对碳源的利用,但高于 10 mg/L 的 Ni^{2+} 则显著抑制了活性污泥微生物对碳源的利用。主成分分析结果表明, Ni^{2+} 对活性污泥微生物群落代谢功能有显著影响。不同 Ni^{2+} 浓度对活性污泥微生物利用 6 类碳源能力的影响虽存在差异,但是碳水化合物类、羧酸类和多聚物类等碳源是活性污泥微生物群落的主要碳源。在 6 类碳源里, Ni^{2+} 对活性污泥微生物利用胺类碳源能力的影响最大。 Ni^{2+} 对活性污泥微生物功能多样性的影响并不十分显著。1[#]~5[#] SBR 系统中微生物群落最常见的物种相近,物种丰富度和均一性均有所不同,其中群落物种丰富度随着 Ni^{2+} 浓度的增加而逐渐减小。

(3) TTC-ETS、AWCD、Shannon 指数和 Simpson 指数分别与 Ni^{2+} 浓度有明显的负相关性,因此,TTC-ETS、AWCD、Shannon 指数和 Simpson 指数,都可用来表征活性污泥微生物活性及群落多样性所受 Ni^{2+} 影响的程度,进而可间接表征 Ni^{2+} 对活性污泥去除污染物效率的影响程度。

参 考 文 献

[1] 李圭白,张杰. 水质工程学(第 5 版). 北京:中国建筑工业出版社,2005: 365-372

[2] 刘玉年,印华斌,赵丽. 重金属离子对污水生物处理影响的研究进展及展望. 安徽农业科学,2008,36(18): 7893-7895

Liu Y. N., Yin H. B., Zhao L. Review and prospect of research on the influences of heavy metal ions on the biological treatment of wastewater. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(18): 7893-7895 (in Chinese)

[3] 李洪亮,陈玉成. 污水生物处理中重金属的毒理学研究进展. 微量元素与健康研究,2006,23(1): 49-52

Li H. L., Chen Y. C. Research progress on toxicology of heavy metals in biotreatment process of wastewater. Studies of Trace Elements and Health, 2006, 23(1): 49-52 (in Chinese)

[4] You S. J., Tsai Y. P., Huang R. Y. Effect of heavy metals on nitrification performance in different activated sludge processes. Journal of Hazardous Materials, 2009, 165(1-3): 987-994

[5] Sörme L., Lagerkvist R. Sources of heavy metals in urban wastewater in Stockholm. Science of the Total Environment, 2002, 298(1-3): 131-145

- [6] Gikas P. Single and combined effects of nickel (Ni(II)) and cobalt (Co(II)) ions on activated sludge and on other aerobic microorganisms: A review. *Journal of Hazardous Materials*, **2008**, 159 (2-3): 187-203
- [7] Dilek F. B., Gokcay C. F., Yetis U. Combined effects of Ni(II) and Cr(VI) on activated sludge. *Water Research*, **1998**, 32 (2): 303-312
- [8] Ong S. A., Toorisaka E., Hirata M., et al. Effects of nickel (II) addition on the activity of activated sludge microorganisms and activated sludge process. *Journal of Hazardous Materials*, **2004**, 113 (1-3): 111-121
- [9] Rodríguez D. C., Pino N., Peñuela G. Monitoring the removal of nitrogen by applying a nitrification-denitrification process in a sequencing batch reactor (SBR). *Bioresource Technology*, **2011**, 102 (3): 2316-2321
- [10] Gökçay C. F., Yetis U. Effect of nickel (II) on the biomass yield of the activated sludge. *Water Science and Technology*, **1996**, 34 (5-6): 163-171
- [11] Li J., Zhang T., Wang L., et al. Characterization and quantification of the nickel resistant microbial community in activated sludge using 16S rDNA and nickel resistance genes. *Environmental Technology*, **2011**, 32 (5): 533-542
- [12] 孟雪征, 赖震宏, 龙腾锐. 金属离子对好氧活性污泥活性的影响. *安全与环境学报*, **2004**, 4 (6): 43-45
Meng X. Z., Lai Z. H., Long T. R. Effects of metal ions on aerobic activated sludge activity. *Journal of Safety and Environment*, **2004**, 4 (6): 43-45 (in Chinese)
- [13] 席劲瑛, 胡洪营, 钱易. Biolog 方法在环境微生物群落研究中的应用. *微生物学报*, **2003**, 43 (1): 138-141
Xi J. Y., Hu H. Y., Qian Y. Application of biolog system in the study of microbial community. *Acta Microbiologica Sinica*, **2003**, 43 (1): 138-141 (in Chinese)
- [14] 陈皓, 陈玲, 赵建夫, 等. 重金属对厌氧污泥电子传递体系活性影响研究. *环境科学*, **2007**, 28 (4): 786-790
Chen H., Chen L., Zhao J. F., et al. Effects of heavy metallic ions on electron transport system activity of anaerobic sludge. *Environmental Science*, **2007**, 28 (4): 786-790 (in Chinese)
- [15] 谭学军, 尹军, 王建辉, 等. SBR 工艺系统中污泥的 TTC-ETS 活性变化. *中国给水排水*, **2006**, 22 (1): 41-49
Tan X. J., Yin J., Wang J. H., et al. TTC-ETS activity change of activated sludge in SBR process. *China Water & Wastewater*, **2006**, 22 (1): 41-49 (in Chinese)
- [16] 尹军, 谭学军, 任南琪. 用 TTC 与 INT-电子传递体系活性表征重金属对污泥活性的影响. *环境科学*, **2005**, 26 (1): 56-62
Yin J., Tan X. J., Ren N. Q. Evaluation of TTC and INT-electron transport system activity tests for heavy metal inhibition of activated sludge. *Environmental Science*, **2005**, 26 (1): 56-62 (in Chinese)
- [17] 马驿, 陈杖榴, 曾振灵. 恩诺沙星对土壤微生物群落功能多样性的影响. *生态学报*, **2007**, 27 (8): 3400-3406
Ma Y., Chen Z. L., Zeng Z. L. Effects of enrofloxacin on functional diversity of soil microbial communities. *Acta Ecologica Sinica*, **2007**, 27 (8): 3400-3406 (in Chinese)
- [18] 刘峰, 张兰英, 刘鹏, 等. 采用 Biolog 法分析制药废水处理工艺中微生物多样性. *中国给水排水*, **2007**, 23 (21): 28-32
Liu F., Zhang L. Y., Liu P., et al. Biolog method for analysis of microbial diversity during treatment of pharmaceutical wastewater. *China Water & Wastewater*, **2007**, 23 (21): 28-32 (in Chinese)
- [19] 程丽, 李晓晨, 宋学东, 等. Cr^{6+} 对活性污泥活性及有机物去除速率的影响. *生态环境学报*, **2009**, 18 (6): 2113-2117
Cheng L., Li X. C., Song X. D., et al. Impacts of Cr^{6+} on the activity of activated sludge and the organic matter degradation rate. *Ecology and Environmental Sciences*, **2009**, 18 (6): 2113-2117 (in Chinese)
- [20] 郑华, 欧阳志云, 王效科, 等. 不同森林恢复类型对土壤微生物群落的影响. *应用生态学报*, **2004**, 15 (11): 2019-2024.
Zheng H., Ouyang Z. Y., Wang X. K., et al. Effects of forest restoration patterns on soil microbial communities. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **2004**, 15 (11): 2019-2024 (in Chinese)
- [21] 孟庆杰, 许艳丽, 李春杰, 等. 不同植被覆盖对黑土微生物功能多样性的影响. *生态学杂志*, **2008**, 27 (7): 1134-1140
Meng Q. J., Xu Y. L., Li C. J., et al. Effects of different vegetation coverage on microbial functional diversity in black soil. *Chinese Journal of Ecology*, **2008**, 27 (7): 1134-1140 (in Chinese)
- [22] Choi K. H., Dobbs F. C. Comparison of two kinds of Biolog microplates (GN and ECO) in their ability to distinguish among aquatic microbial communities. *Journal of Microbiological Methods*, **1999**, 36 (3): 203-213