

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析	曹金玲, 许其功, 席北斗, 李小平, 杨柳燕, 江立文, 魏自民, 吴献花 (1777)
基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价	孙然好, 陈利顶, 王伟, 王赵明 (1784)
云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响	孟晓云, 于兴修, 泮雪芹 (1789)
深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律	陈清武, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波 (1795)
典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险	邓代永, 邱孟德, 孙国萍, 郭俊, 张宏涛, 张琴, 许玫英 (1801)
珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价	谢文平, 王少冰, 朱新平, 陈昆慈, 潘德博, 洪孝友, 尹怡 (1808)
扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别	苏丹, 臧淑英, 叶华香, 孙丽, 贾晓丹, 李苗 (1816)
汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究	赵建刚, 乔永民 (1823)
氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验	黄伟, 朱旭宇, 曾江宁, 寿鹿, 陈全震, 江志兵 (1832)
春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布	王彦国, 林景宏, 王春光, 林茂 (1839)
滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析	陈冠秋, 李耀初, 黄晋沐, 南燕, 林茂宏 (1846)
四溴双酚 A 在 5 种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究	杨苏文, 王圣瑞, 闫振广, 张普青 (1852)
五氯酚对稀有鮐鲫卵黄蛋白原及 p53 的诱导效应	熊力, 马永鹏, 张晓峥, 金帮明, 李伟, 苏永良, 毛思予, 刘堰 (1858)
全氟辛烷磺酸 (PFOS) 对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响	程艳, 崔媛, 党志超, 谢文平, 李海山, 殷缓缓, 陈会明 (1865)
水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究	陶亚, 袁田, 周顺桂, 袁勇, 庄莉, 王辉亮 (1871)
MIEX 中试实验对二级出水中有机物去除的 3DEEM 解析	杨建, 高金华, 常江 (1878)
XDLVO 理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制	姚淑娣, 高欣玉, 郭本华, 包南, 谢慧君, 梁爽 (1884)
栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性	马红芳, 李鑫, 胡洪管, 于茵, 巫寅虎 (1891)
氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究	王宏杰, 董文艺, 刘莉莎, 韩贵超 (1897)
合成氨废水短程反硝化特性研究	李妍, 李泽兵, 马家轩, 王晓毅, 赵白航, 李军 (1902)
基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制	李志华, 杨帆, 李胜, 谢磊, 王晓昌 (1907)
采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性	李志华, 吴军, 李胜, 谢磊, 王晓昌 (1913)
酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究	袁光环, 周兴求, 伍健东 (1918)
小回流比条件下污泥浓度分区试验研究	史思, 王素兰, 李瑞, 邢传宏 (1923)
非离子表面活性剂对污泥调质脱水效果的影响	侯海攀, 濮文虹, 时亚飞, 于文华, 樊明明, 刘欢, 杨昌柱, 李野, 杨家宽 (1930)
中国空气污染指数变化特征及影响因素分析	李小飞, 张明军, 王圣杰, 赵爱芳, 马潜 (1936)
南京 3 类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究	张秋晨, 朱彬, 苏继峰, 王红磊 (1944)
深圳市郊区大气中 PM _{2.5} 的特征分析	戴伟, 高佳琪, 曹罡, 欧阳峰 (1952)
餐饮业油烟的颗粒物分析	谭德生, 邝元成, 刘欣, 戴飞鸿 (1958)
Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ 低温催化还原 NO 性能研究	刘荣, 杨志琴 (1964)
自然型氨基酸及其钾盐的 CO ₂ 吸收和再生特性	晏水平, 陈竞翱, 徐明亮, 艾平, 张衍林 (1971)
耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	张军科, 江长胜, 郝庆菊, 唐其文, 程炳红, 李辉, 陈璐豪 (1979)
垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素	上官宇先, 师日鹏, 李娜, 韩坤, 李会科, 王林权 (1987)
添加不同 N 源条件下典型除草剂对土壤呼吸和 N ₂ O 排放的影响	孙青, 史淳星, 石坤, 言儒斌, 蒋静艳, 吴以中 (1994)
某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析	余立凤, 魏文侠, 田亚静, 吴广龙, 李培中, 赵丹 (2000)
脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究	罗遥, 康荣华, 余德祥, 谭炳全, 段雷 (2006)
岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系	张治伟, 朱章雄, 傅瓦利, 文志林 (2013)
废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收	施翔, 陈益泰, 王树凤, 李江川 (2021)
铬胁迫对 3 种草本植物生长及铬积累的影响	王爱云, 黄姗姗, 钟国锋, 徐刚标, 刘志祥, 申响保 (2028)
湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征	杨胜香, 田启建, 梁士楚, 周耀渝, 邹慧成 (2038)
增施 CO ₂ 对 C3 和 C4 植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响	慕楠, 刁晓君, 王曙光, 王鹏腾, 李攀峰 (2046)
生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析	乔琳, 赵宏, 王建龙 (2052)
A/O MBR 处理生活污水效率与菌群多样性的关系	邝斌宇, 史青, Montcho Leon Monthero, 丁嫚, 温东辉 (2061)
石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测	吴彬彬, 卢滇楠, 刘铮 (2068)
武汉市儿童多途径铅暴露风险评估	郝汉舟, 陈同斌, 吴基良, 雷梅, 田辉, 祖文普, 钟学斌 (2075)
电子鼻预处理装置的开发及适用性研究	卜凡阳, 文晓刚, 万梅, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (2083)
ToxTell 生物传感器在 Cu ²⁺ 、Cd ²⁺ 冲击活性污泥系统分析中的应用	王学江, 王鑫, 刘免, 吴真, 杨连珍, 夏四清 (2090)
环境样品免疫检测基质效应分析与控制	盛建武, 何苗, 施汉昌 (2095)
热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究	张璐, 严建华, 杜长明, 陆胜勇, 李晓东 (2104)
城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究	吴亚娟, 刘红梅, 陆胜勇, 严建华, 李晓东 (2110)
厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究	韩智勇, 刘丹, 李启彬 (2118)
处理垃圾渗滤液的 Fe/C 空气阴极 MFC 性能研究	唐玉兰, 彭漫, 于燕, 何亚婷, 傅金祥, 赵玉华 (2125)
基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究	龙健, 廖洪凯, 李娟, 陈彩云 (2131)
北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析	陈操操, 张妍, 刘春兰, 王海华, 李铮 (2139)
《环境科学》征稿简则 (1877)	
《环境科学》征订启事 (1890)	
信息 (1822, 1857, 1896, 2138)	

ToxTell 生物传感器在 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 冲击活性污泥系统分析中的应用

王学江, 王鑫, 刘免, 吴真, 杨连珍, 夏四清

(同济大学环境科学与工程学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 探讨了不同浓度 Cu^{2+} 及 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 联合对活性污泥系统 COD 去除的影响, 并采用 ToxTell 生物传感器, 以活性污泥为指示微生物, 分析了上述金属离子的毒性抑制作用. 结果表明, Cu^{2+} 浓度低于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 不会对该活性污泥系统带来明显的冲击作用, Cd^{2+} 的加入明显增强了对该活性污泥系统 COD 去除的抑制作用, 上述金属离子在抑制时间为 1.5 h 时对系统 COD 去除抑制率达到最大, 随着曝气时间的延长, COD 去除率呈逐渐上升趋势; ToxTell 生物传感器的毒性分析结果与 COD 去除抑制率相近, 初步证实该生物传感器能很好地用于活性污泥处理系统受 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 离子冲击的预警监测.

关键词: 生物传感器; 毒性; 活性污泥; 抑制; 重金属

中图分类号: X83 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-2090-05

Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor

WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, WU Zhen, YANG Lian-zhen, XIA Si-qing

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Effects of different concentrations of Cu^{2+} , Cu^{2+} and Cd^{2+} combined pollution on the removal performance of COD in activated sludge system were investigated, and the ToxTell biosensor with activated sludge was constructed to determine the toxicity of Cu^{2+} , Cu^{2+} and Cd^{2+} combined pollution. The results showed that there was no significant impact on the activated sludge process when Cu^{2+} concentration was lower than $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and the addition of Cd^{2+} enhanced the inhibition of COD removal, and the maximum inhibition efficiency of COD reached at about 1.5 h. With the increase of aeration time, the COD removal efficiency increased slowly again. The toxicity measurement with ToxTell biosensor was close to the biological effects (inhibition efficiencies of COD), which showed that the ToxTell biosensor could be used well in the early warning determination of Cu^{2+} and Cd^{2+} in the activated sludge process.

Key words: biosensor; toxicity; activated sludge; inhibition; heavy metal

在当前的污水处理技术领域, 活性污泥法是应用最为广泛的技术之一, 其本质是微生物通过氧化和降解废水中的有机物质, 产生维持自身生存和增长的能量^[1]. 而在我国目前的排水体制下, 工业废水和城市生活污水常合并进入城市污水处理厂进行处理, 随着工业废水量的增大和重金属含量的增加, 时常会对城市污水生物处理系统造成一定的冲击^[2,3]. 重金属对微生物的毒性作用可导致生物处理系统的微生物群落结构发生变化, 进而影响生物处理效果, 导致出水水质下降, 甚至处理系统瘫痪, 从而造成严重的环境污染和经济损失^[4~6]. 因此, 考察重金属离子对活性污泥系统处理能力的影响, 并找到一种简洁有效的监控方法及指标体系, 对于污水生物处理系统的运行管理具有重要的指导意义.

目前, 有关重金属对活性污泥微生物毒性的测定方法有很多种, 其中: 根据微生物酶系统受到抑制

的机制、脱氢酶活性、氧摄取速率以及氨氧化速率、微生物生长速率等是近年来国内外该领域专家重视的污泥活性指标^[7~21]. 但是, 由于测定方法不统一, 且每种方法都有其优缺点和适用条件, 导致很多的研究结论差别很大, 有的甚至相互矛盾.

本课题组在前期的研究中, 开发了一种基于氧化还原介质的微生物传感器 (ToxTell), 它可通过选择固定不同的指示微生物, 对污染物的毒性做出快速分析, 具有检测毒性污染物范围宽、操作简单、不受样品色度和浊度干扰和毒性检测结果客观真实等特点^[22,23]. 在本研究中, 笔者拟以 Cu^{2+} 及 Cu^{2+} 和

收稿日期: 2011-08-07; 修订日期: 2011-09-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51179127); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07317-008-4)

作者简介: 王学江 (1974~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水污染控制与生物传感器环境监测技术, E-mail: wangxj@tongji.edu.cn

Cd^{2+} 联合冲击的活性污泥系统为对象,结合活性污泥工艺处理性能的变化情况,探讨 ToxTell 型生物传感器在上述重金属离子冲击活性污泥系统预警监测中的应用性能,以期为该新型生物传感器在污水处理工艺运行和管理中的应用提供实验依据。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

ToxTell 型生物传感器 (ToxTell-1 型, 同济大学); 全温振荡器 (HZQ-F 型); 主要化学药剂: 对-苯醌、 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 H_2SO_4 、 AgCl 、 NaHCO_3 、 CaCl_2 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 NH_4Cl 、 KCl 、 $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 均为 AR 级, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 为 GR 级 (上海国药集团化学试剂有限公司)。

活性污泥处理装置: 反应器高 40 cm, 直径 20 cm, 内置 4 个曝气头, 反应器内设搅拌装置, 使泥水气三相混合均匀, 实验过程中控制 DO 在 $3.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上。活性污泥为经驯化后的曲阳污水处理厂的活性污泥, 污泥浓度 $2500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。进水采用模拟配水, 水质指标为 COD 为 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、TN 为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、TP 为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH 7.0。

1.2 实验方法

1.2.1 金属离子冲击实验

实验在室温 25°C 进行, 用 7 个反应器做平行实验, 其中一个做空白, 其它反应器分别加入 5、10、20、30、40 和 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度的 Cu^{2+} 离子, 定时连续取样分析出水的 COD 浓度变化情况。

在 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 联合冲击实验中, Cu^{2+} 离子浓度固定为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 分别添加不同浓度 Cd^{2+} , Cu^{2+} : Cd^{2+} 配比为 30:0、30:10、30:20、30:30 和 30:40, 定时连续取样分析出水水质变化情况。

水质指标检测方法: COD 为哈希快速消解法。

1.2.2 基于 ToxTell 生物传感器的毒性分析

活性污泥微生物电极制备: 在空白活性污泥反应器中取 5 mL 活性污泥, 在 $5000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 30 min, 用 0.85% NaCl 溶液洗涤菌体 3 次, 在 $10000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 5 min, 得到湿活性污泥菌体。取 0.5 g 上述湿菌体, 加入 200 μL 0.85% NaCl 溶液, 用灭菌牙签将菌体和水溶液搅匀, 用移液枪汲取 7 μL 均匀涂于电极工作区域表面, 室温晾干; 用双面胶纸 (3M 公司) 将聚碳酸酯膜 (孔径 0.4 μm , Whatman) 密封在菌体表面, 制得活性污泥微生物电极, 置于冰箱 4°C 保存待用。

ToxTell 微生物传感器毒性测定方法: 将上述制

得的微生物电极放置于含 0.85% NaCl 的呼吸基质中活化 30 min, 将经活化的微生物电极浸入装有 10 mL 呼吸基质的平底玻璃瓶中, 待 ToxTell 生物传感器毒性分析系统稳定 5 ~ 10 min 后, 加入一定量对-苯醌氧化还原介质, 待电信号稳定约 15 min (图 1a), 加入不同浓度铜离子进行毒性测试 (图 1b)。此过程中, ToxTell 生物传感器计算系统将自动记录微生物电极输出电流的变化曲线 (见图 1)。ToxTell 操作软件 (同济大学) 可以自动计算不同浓度梯度 Cu^{2+} 离子对应用的抑制率大小。

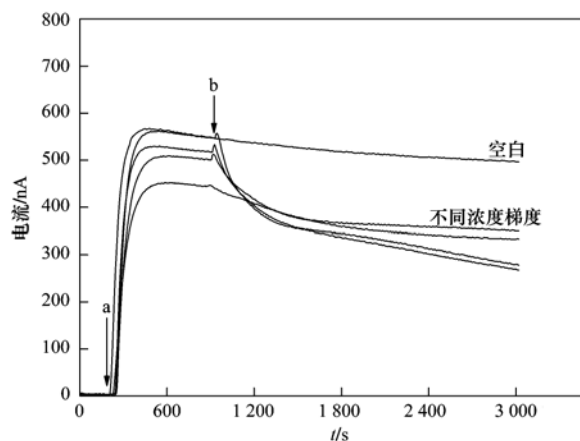


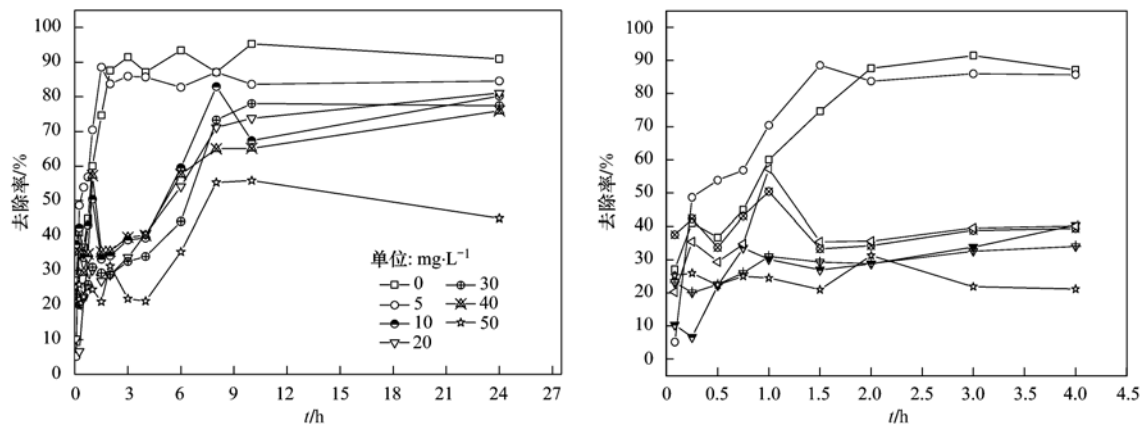
图 1 ToxTell 生物传感器毒性分析电流抑制曲线示意

Fig. 1 Typical toxicity analysis current curves of ToxTell biosensor

2 结果与讨论

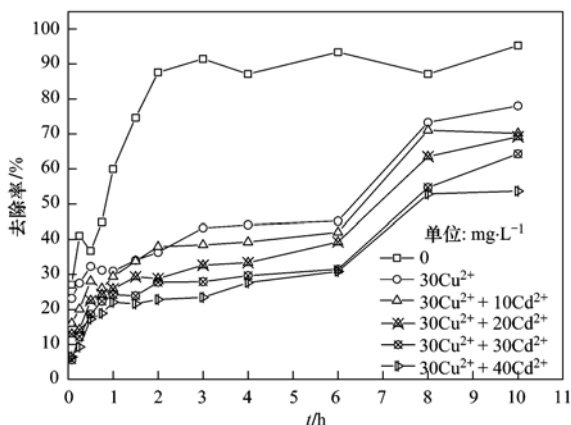
2.1 不同浓度 Cu^{2+} 对活性污泥工艺 COD 去除的影响

图 2 为该活性污泥处理工艺在不同浓度 Cu^{2+} 冲击下 COD 去除率随时间的变化曲线。由图 2 可知, 在 Cu^{2+} 浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 其对活性污泥工艺 COD 的去除存在一定的促进作用, 随着 Cu^{2+} 浓度的增加, 其对 COD 的去除的抑制作用逐渐增强, 在 1.5 h 时达到最大抑制状态。但随着曝气时间的延长, COD 去除率呈逐渐上升趋势, 这 and 好氧污泥系统对 Cu^{2+} 的逐渐适应有关。陈国炜等^[24] 和荣宏伟等^[25] 的研究同样表明, Cu^{2+} 浓度低于 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 其对活性污泥的产量和 COD 的去除率没有明显的影响。Gammoudi 等^[16] 在对 Cu^{2+} 冲击活性污泥工艺的研究中, 也发现当 Cu^{2+} 浓度为 $14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 水力停留时间超过 25 h 时, 活性污泥可以克服 Cu^{2+} 的毒性影响。本研究选取抑制时间为 1.5 h 时 Cu^{2+} 对 COD 去除抑制率作为衡量 Cu^{2+} 对活性污泥毒性作用的指标, 计算得 Cu^{2+} 对该活性污泥的 EC_{50} 约为 $41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

图2 不同浓度 Cu^{2+} 对活性污泥工艺 COD 去除的影响Fig. 2 Effects of different concentrations of Cu^{2+} on COD removal in activated sludge process

2.2 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 联合对活性污泥工艺 COD 去除的影响

Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 不同浓度配比冲击下 COD 去除率随时间的变化曲线见图 3。由图 3 可知,保持 Cu^{2+} 的浓度为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 不变时,随着 Cd^{2+} 浓度的增加, COD 的去除率呈显著下降趋势。与单一 Cu^{2+} 毒性作用相同,其在反应时间为 1.5 h 时对系统 COD 去除抑制率达到最大且趋于稳定,随着曝气时间的延长, COD 去除率呈逐渐上升趋势。抑制时间为 1.5 h 时, Cd^{2+} 配比浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 对 COD 去除抑制率约为 52%,与单一 Cu^{2+} 毒性比, Cd^{2+} 的加入明显抑制了该活性污泥系统对 COD 的去除效果。

图3 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 对活性污泥工艺 COD 去除的影响Fig. 3 Effects of combined Cu^{2+} and Cd^{2+} on COD removal in activated sludge process

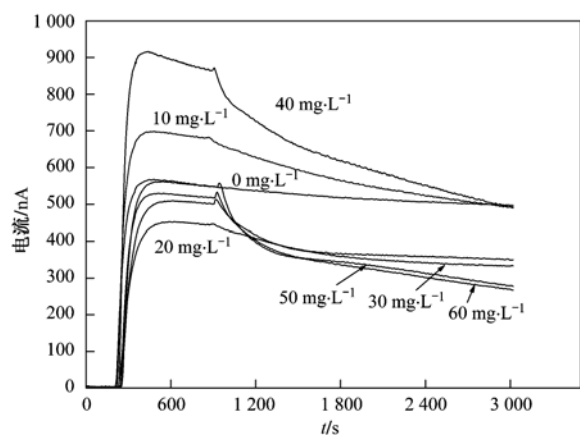
总之,重金属离子对污水生物处理工艺的毒性冲击影响与生物处理的工艺类型、进水水质、及污泥浓度、泥龄和水力停留时间等工艺参数等有关^[8-10]。然而,尽管通过工艺处理性能分析能够反

映重金属对活性污泥系统毒性冲击的影响,但由于上述指标分析的滞后性,且分析耗时较长,不能有效防范重金属对活性污泥系统毒性冲击的威胁。

2.3 基于 ToxTell 生物传感器的毒性分析

采用以活性污泥为指示生物 ToxTell 微生物传感器对 Cu^{2+} 及 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 混合毒性的分析结果分别见图 4 和 5。从中可以看出,该微生物传感器对 Cu^{2+} 及其与 Cd^{2+} 混合体系的毒性具有良好的分析性能,2 个体系中的活性污泥微生物的抑制电流信号均呈现双曲线下降趋势,电流受抑制程度随着金属离子浓度增加而增大,表明随着上述金属离子浓度的增加,其对活性污泥活性的抑制作用逐渐增加,该生物传感器的毒性分析结果同样表明 Cu^{2+} 与 Cd^{2+} 混合体系对活性污泥的毒性作用较单一 Cu^{2+} 的强。

ToxTell 生物传感器毒性分析结果与 Cu^{2+} 及 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 混合毒性对活性污泥工艺 COD 去除率抑制比较见图 6。从中可以看出, COD 的去除抑制率

图4 ToxTell 生物传感器对 Cu^{2+} 毒性分析的电流图Fig. 4 Toxicity determination of Cu^{2+} with ToxTell biosensor

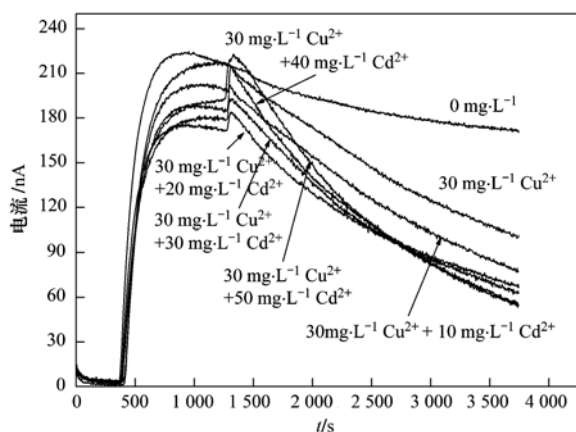


图5 ToxTell 生物传感器对 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 金属离子的毒性分析

Fig. 5 Toxicity determination of Cu^{2+} and Cd^{2+} with ToxTell biosensor

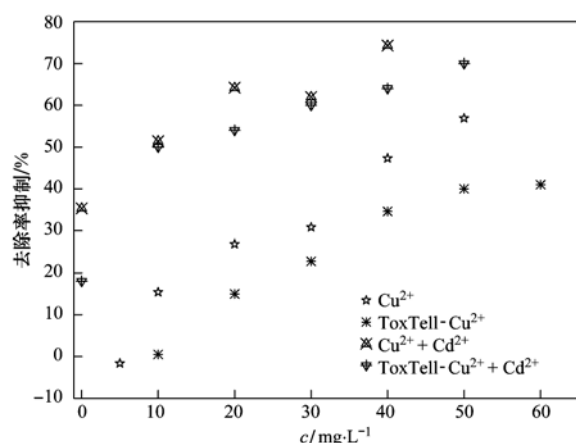


图6 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 对活性污泥系统的影响结果比较

Fig. 6 Comparison of the influence effects of Cu^{2+} and Cd^{2+} on activated sludge process

均随着金属离子浓度的增加而增大,基于 ToxTell 生物传感器分析得到 Cu^{2+} 及 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 混合对活性污泥的抑制浓度分别约为 $60 (\text{IC}_{40})$ 和 $10 (\text{IC}_{50}) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 基于 COD 的去除抑制率计算得到 Cu^{2+} 及 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 的 IC_{50} 分别约为 45 和 $9.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 两种毒性分析结果相近,表明该生物传感器能较真实地反映了上述金属离子对活性污泥系统冲击的影响. 但由于 ToxTell 生物传感器分析的是 30 min 抑制毒性,因此,其检测出的毒性响应较实际的 COD 去除抑制率稍低. 尽管如此,ToxTell 生物传感器具有的操作简单、分析快速和便携式等特点,使其能很好地用于 Cu^{2+} 及其与 Cd^{2+} 对活性污泥处理系统毒性冲击的预警监测.

3 结论

(1) Cu^{2+} 浓度低于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,不会对活性

污泥系统造成明显的冲击影响, Cd^{2+} 的加入明显抑制了该活性污泥系统对 COD 的去除性能. 上述金属离子在抑制时间为 1.5 h 时对系统 COD 去除抑制率达到最大且趋于稳定,随着曝气时间的延长, COD 去除率呈逐渐上升趋势.

(2) ToxTell 生物传感器毒性分析结果与活性污泥工艺中 COD 的去除抑制率具有良好的相近性,表明 ToxTell 生物传感器能够客观、真实地反映 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 离子对污泥微生物的毒性作用情况. 该生物传感器具有的分析快速和便携式等特点,能很好地用于上述金属离子对活性污泥处理系统毒性冲击的预警监测.

参考文献:

- [1] Cai B J, Xie L, Yang D H, *et al.* Toxicity evaluation and prediction of toxic chemicals on activated sludge system [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **177**(1-3): 414-419.
- [2] 黄昀, 王洪臣. 浅谈城市污水处理厂运行管理问题 [J]. *水工业市场*, 2007, (1): 40-43.
- [3] Stasinakis A S, Thomaidis N S, Mamais D, *et al.* Effects of chromium (VI) addition on the activated sludge process [J]. *Water Research*, 2003, **37**(9): 2140-2148.
- [4] 寇明旭, 刘全阳. 金属离子对活性污泥微生物影响研究进展 [J]. *山西建筑*, 2007, **33**(5): 176-177.
- [5] 谢冰. 重金属对活性污泥微生物的影响 [J]. *上海化工*, 2004, **29**(2): 13-16.
- [6] 李娟英, 赵庆祥, 王静, 等. 重金属对活性污泥微生物毒性的比较研究 [J]. *环境污染与防治*, 2009, **31**(11): 17-20.
- [7] Vaňková S, Kupec J, Hoffmann J. Toxicity of chromium to activated sludge [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1999, **42**(1): 16-21.
- [8] Gikas P. Kinetic responses of activated sludge to individual and joint nickel ($\text{Ni}(\text{II})$) and cobalt ($\text{Co}(\text{II})$): an isobolographic approach [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **143**(1-2): 246-256.
- [9] Pamukoglu M Y, Kargi F. Copper (II) ion toxicity in activated sludge processes as function of operating parameters [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2007, **40**(5): 1228-1233.
- [10] Principi P, Villa F, Bernasconi M, *et al.* Metal toxicity in municipal wastewater activated sludge investigated by multivariate analysis and in situ hybridization [J]. *Water Research*, 2006, **40**(1): 99-106.
- [11] Ren S J. Assessing wastewater toxicity to activated sludge: recent research and developments [J]. *Environment International*, 2004, **30**(8): 1151-1164.
- [12] Karri S, Sierra-Alvarez R, Field J A. Toxicity of copper to acetoclastic and hydrogenotrophic activities of methanogens and sulfate reducers in anaerobic sludge [J]. *Chemosphere*, 2006, **62**(1): 121-127.
- [13] 王学江, 王虹, 赵建夫, 等. 基于大肠杆菌的 CellSense 生物传感器毒性分析性能研究 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(4):

- 1210-1214.
- [14] 黄新新, 何苗, 施汉昌, 等. 用于环境污染物遗传毒性评价的重组发光细菌载体的构建 [J]. 环境科学, 2008, **29**(11): 3159-3164.
- [15] Jang J D, Barford J P, Lindawati, *et al.* Application of biochemical oxygen demand (BOD) biosensor for optimization of biological carbon and nitrogen removal from synthetic wastewater in a sequencing batch reactor system [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2004, **19**(8): 805-812.
- [16] Gammoudi I, Tarbague H, Othmane A, *et al.* Love-wave bacteria-based sensor for the detection of heavy metal toxicity in liquid medium [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2010, **26**(4): 1723-1726.
- [17] Çeçen F, Semerci N, Geyik A G. Inhibition of respiration and distribution of Cd, Pb, Hg, Ag and Cr species in a nitrifying sludge [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **178**(1-3): 619-627.
- [18] Gikas P, Romanos P. Effects of trivalent (Cr(III)) and hexavalent (Cr(VI)) chromium on the growth of activated sludge [J]. Journal of Hazardous Materials B, 2006, **133**(1-3): 212-217.
- [19] Hernando M D, Malato O, Farré M, *et al.* Application of ring study: water toxicity determinations by bioluminescence assay with *Vibrio fischeri* [J]. Talanta, 2006, **69**(2): 370-376.
- [20] Liu Q J, Cai H, Xu Y, *et al.* Detection of heavy metal toxicity using cardiac cell-based biosensor [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2007, **22**(12): 3224-3229.
- [21] Stein N E, Keesman K J, Hamelers H V M, *et al.* Kinetic models for detection of toxicity in a microbial fuel cell based biosensor [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2011, **26**(7): 3115-3120.
- [22] 王学江, 李建华, 尹大强, 等. 一种水质毒性检测用多通道生物传感装置 [P]. 中国专利: CN201796012U. 中国, 2010-12-1.
- [23] 王学江, 张峰华, 丁钰力, 等. 毒性分析微生物传感器电极固定方法研究 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2009, **37**(11): 1497-1501.
- [24] 陈国伟, 席鹏鸽, 陈慧. Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 对活性污泥生长动力学的影响 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2005, **28**(2): 151-154.
- [25] 荣宏伟, 张可方, 王勤, 等. 生物脱氮系统对重金属的耐受性研究 [J]. 环境工程, 2010, **28**(3): 16-19.

CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunmeng Lake Watershed	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow (<i>Gobiocypris rarus</i>)	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish (<i>Brachydanio rerio</i>)	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and <i>Fluorescence Characteristics</i> of Dissolved Organic Matter	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM _{2.5} in the Suburb of Shenzhen	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ Catalyst	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO ₂ Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N ₂ O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO ₂ Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis	CHEN Cao-cai, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年6月15日 33卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 15, 2012

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行