

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第6期

Vol.34 No.6

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2008 ~ 2010 年北京城区大气 BTEX 的浓度水平及其 O ₃ 生成潜势	曹函玉, 潘月鹏, 王辉, 谭吉华, 王跃思 (2065)
利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态	牟莹莹, 楼晟荣, 陈长虹, 周敏, 王红丽, 周振, 乔利平, 黄成, 李梅, 李莉, 王倩, 黄海英, 邹兰军 (2071)
沈阳市降水化学成分及来源分析	张林静, 张秀英, 江洪, 张清新 (2081)
秦皇岛大气污染物浓度变化特征	刘鲁宁, 申雨璇, 辛金元, 吉东生, 王跃思 (2089)
笼养鸡生长过程 NH ₃ 、N ₂ O、CH ₄ 和 CO ₂ 的排放	周忠凯, 朱志平, 董红敏, 陈永杏, 尚斌 (2098)
碳化硅协同分子筛负载型催化微波辅助催化氧化甲苯性能	王晓晖, 卜龙利, 刘海楠, 张浩, 孙剑宇, 杨力, 蔡力栋 (2107)
生物滴滤塔净化多组分废气的研究	张定丰, 房俊逸, 叶杰旭, 邱松凯, 钱东升, 戴启洲, 陈东之 (2116)
在氧化和还原氛围下脉冲电晕法降解二硫化碳废气	金圣, 黄立维, 李国平 (2121)
模拟大气 CO ₂ 水平升高对春季太湖浮游植物生理特性的影响	赵旭辉, 汤龙升, 史小丽, 杨州, 孔繁翔 (2126)
一种确定湖泊水质基准参照状态浓度的新方法	华祖林, 汪靛 (2134)
HSPF 径流模拟参数敏感性分析与模型适用性研究	李燕, 李兆富, 席庆 (2139)
基于非点源污染的水质监测方案研究	吴喜军, 李怀恩, 李家科, 李强坤, 董雯 (2146)
不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究	陈玲, 刘德富, 宋林旭, 崔玉洁, 张革 (2151)
春季东海赤潮发生前后营养盐及溶解氧的平面分布特征	李鸿妹, 石晓勇, 陈鹏, 张传松 (2159)
三峡库区大宁河枯水期藻细胞的时空分布	张永生, 郑丙辉, 王坤, 姜霞, 郑浩 (2166)
湖泊沉积物溶解性有机氮组分的藻类可利用性	冯伟莹, 张生, 焦立新, 王圣瑞, 李畅游, 崔凤丽, 付绪金, 甄志磊 (2176)
刚毛藻分解对上覆水磷含量及赋存形态的影响	侯金枝, 魏权, 高丽, 孙卫明 (2184)
反复扰动下磷在沉积物和悬浮物以及上覆水间的交换	李大鹏, 王晶, 黄勇 (2191)
三峡库区主要支流表层沉积物多溴联苯醚的分布特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 刘晓茹, 余丽琴, 文武, 张盼伟 (2198)
UV 和 H ₂ O ₂ 联合消毒灭活饮用水中大肠杆菌研究	张一清, 周玲玲, 张永吉 (2205)
臭氧降解水中邻苯二甲酸二甲酯的动力学及影响因素	于丽, 张培龙, 侯甲才, 庞立飞, 李越, 贾寿华 (2210)
硝酸根对水体中甲基汞光化学降解的影响	毛雯, 孙荣国, 王定勇, 马明, 张成 (2218)
炔雌醇氯化反应的动力学和机制研究	王斌楠, 刘国强, 孔德洋, 陆勇鹤 (2225)
金属离子对 δ-MnO ₂ 去除对叔辛基酚抑制作用的研究	李非里, 牟华倩 (2232)
核-壳表面磁性印迹聚合物的制备及其对水中双酚 A 的特异性去除	刘建明, 李红, 熊振湖 (2240)
有机蒙脱石负载纳米铁去除溶液中四溴双酚 A 的研究	闫梦玥, 庞志华, 李小明, 迟建宇, 罗隽 (2249)
纳滤预处理测定景观水体中溶解性有机氮质量浓度及其分布特征	于红蕾, 霍守亮, 杨周生, 席北斗, 咎逢宇, 张靖天 (2256)
改性水凝胶的制备及其对 Pb ²⁺ 、Cd ²⁺ 吸附性能研究	吴宁梅, 李正魁 (2263)
直接大红 4BE 的磷钨酸均相光催化还原脱色	魏红, 李克斌, 李娟, 陈经涛, 张涛 (2271)
基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究	张磊, 刘平, 马锦, 张静, 张明, 吴根 (2277)
Fenton 法处理竹制品废水生化出水出水的研究	郭庆稳, 张敏, 王炜, 杨治中, 吴东雷 (2283)
二价铁离子对 UASB 反应器厌氧发酵产氢效能的影响	李永峰, 王艺璇, 程国玲, 刘春妍 (2290)
进水底物浓度对蔗糖废水产酸合成 PHA 影响研究	陈志强, 邓毅, 黄龙, 温沁雪, 郭子瑞 (2295)
接种好氧颗粒污泥快速启动硝化工艺的过程研究	刘文如, 沈耀良, 丁玲玲, 丁敏 (2302)
聚磷污泥去除高浓度铅的影响因素研究	杨敏, 卢龙, 冯涌, 方超, 李雄清 (2309)
体积溶氧传递系数在好氧颗粒污泥系统中的变化特性初步分析	李志华, 范长青, 王晓昌 (2314)
我国淡水水体中双酚 A (BPA) 的生态风险评价	汪浩, 冯承莲, 郭广慧, 张瑞卿, 刘跃丹, 吴丰昌 (2319)
麦穗鱼物种敏感性评价	王晓南, 刘征涛, 闫振广, 张聪, 何丽, 孟双双 (2329)
不同评估方法得出的五氯酚的 PNEC 值的比较研究	雷炳莉, 文育, 王艺陪, 康佳, 刘倩 (2335)
桂林市交警头发 Hg、Pb 含量及分布研究	钱建平, 张力, 李成超, 黄栋 (2344)
直流电场处理后降线藻趋光性对 Cu ²⁺ 和 Hg ²⁺ 的响应	王飞祥, 袁玲, 黄建国 (2350)
UV-B 辐射对青冈凋落叶化学组成和分解的影响	宋新章, 卜涛, 张水奎, 江洪, 王志坤, 赵明水, 刘永军 (2355)
7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 杨聘聘 (2361)
溶解氧对碳氮硫共脱除工艺中微生物群落影响解析	于皓, 陈川, 张莉, 王爱杰 (2368)
不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析: 基于 PLFA 和 MicroResp TM 方法	陈晓娟, 吴小红, 刘守龙, 袁红朝, 李苗苗, 朱捍华, 葛体达, 童成立, 吴金水 (2375)
典型滨海湿地干湿交替过程氮素动态的模拟研究	韩建刚, 曹雪 (2383)
三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究	刘意章, 肖唐付, 宁增平, 贾彦龙, 黎华军, 杨菲, 姜涛, 孙旻 (2390)
北京市不同区位耕作土壤中重金属总量与形态分布特征	陈志凡, 赵焯, 郭廷忠, 王永峰, 田青 (2399)
季节变化对贵阳市不同功能区地表灰土重金属的影响	李晓燕 (2407)
东营市孤岛地区土壤中类二噁英类 PCBs 的污染特征	王登阁, 崔兆杰, 傅晓文, 殷永泉, 许宏宇 (2416)
模拟氮沉降对森林土壤有机物淋溶的影响	段雷, 马萧萧, 余德祥, 谭炳全 (2422)
甲基 β 环糊精对污染场地土壤中多环芳烃的异位增效洗脱修复研究	孙明明, 滕应, 骆永明, 李振高, 贾仲君, 张满云 (2428)
胶质芽孢杆菌对印度芥菜根际土壤镉含量及土壤酶活性影响	杨榕, 李博文, 刘微 (2436)
长期施用粪肥蔬菜基地蔬菜中典型抗生素的污染特征	吴小莲, 向垒, 莫测辉, 姜元能, 严青云, 李彦文, 黄献培, 苏青云, 王纪阳 (2442)
有机废弃物堆肥培肥土壤的氮矿化特性研究	张旭, 席北斗, 赵越, 魏自民, 李洋, 赵昕宇 (2448)
北京市生活垃圾转运站耗能和排污特征及其影响因素分析	王昭, 李振山, 冯亚斌, 焦安英, 薛安 (2456)
氨对垃圾焚烧飞灰浸出特性的影响及地球化学模拟	官贞珍, 陈德珍, Thomas Astrup (2464)
焚烧飞灰预处理工艺及其无机氯盐的行为研究	朱芬芬, 高冈昌辉, 大下和傲, 姜惠民, 北岛義典 (2473)
富含中孔与酸性基团的生物炭的制备与吸附性能	李坤彬, 李辉, 郑正, 张雨轩 (2479)
生物炭技术缓解我国温室效应潜力初步评估	姜志翔, 郑浩, 李锋民, 王震宇 (2486)
基于物质流分析的钾素流动与循环研究	白桦, 曾思育, 董欣, 陈吉宁 (2493)
《环境科学》征订启事 (2115) 《环境科学》征稿简则 (2224) 信息 (2217, 2289, 2349, 2398) 专辑征稿通知 (2478)	

聚磷污泥去除高浓度铅的影响因素研究

杨敏¹, 卢龙^{1*}, 冯涌^{1,2}, 方超¹, 李雄清¹

(1. 南昌大学环境与化学工程学院, 南昌 330000; 2. 江西省环境监测中心站, 南昌 330000)

摘要: 利用聚磷活性污泥去除废水中的铅 [$\rho(\text{Pb}^{2+}) = 150.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$], 研究了反应体系内不同溶解氧状况和初始 pH 值对污泥除铅的效率和稳定性的影响. 结果表明, 厌氧条件下, pH 6 时, 铅的去除率随时间增长呈上升趋势, 32 d 后铅去除率达 99.8%, 其中有机物及硫化物结合态铅、残渣态分别占 41.8% 和 52.6%, 污泥中铅的稳定性良好. 好氧条件下, 在相对较短时间内铅的去除率随 pH 上升而增加, 反应 2 h 时, pH 6、pH 4 和 pH 2 对应的铅的去除率分别为 99.9%、96.9% 和 30.3%; 而好氧 32 d 后 pH 6、pH 4 和 pH 2 的污泥中残渣态铅含量分别为 3 072.3、4 726.8 和 2 359.1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别占污泥中总铅的 41.8%、65.8% 和 88.8%. 综合考虑除铅率和除铅后污泥稳定性, 好氧且 pH 4 理论上是聚磷污泥除铅的最佳条件.

关键词: 聚磷; 污泥; 重金属; 铅; 影响因素

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)06-2309-05

Influencing Factors of High-Concentration Lead Removal Using the Phosphorus-Accumulating Sludge

YANG Min¹, LU Long¹, FENG Yong^{1,2}, FANG Chao¹, LI Xiong-qing¹

(1. School of Environment and Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330000, China; 2. Jiangxi Provincial Environmental Monitoring Center, Nanchang 330000, China)

Abstract: Phosphorus-accumulating activated sludge was used to remove lead [$\rho(\text{Cu}^{2+}) = 150.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$] in wastewater in this experiment. The efficiency ratio and stability of Pb removal were studied at different dissolved oxygen concentration and different initial pH. The result showed that under anaerobic condition and pH 6, the Pb removal efficiency ratio increased with time elapsing, the value reached 99.8% after 32 days. Lead in form of organic and sulfide-bound lead and residual lead in residual sludge accounted for 41.8% and 52.6%, respectively, and the lead in the sludge showed a good stability. While under aerobic condition, the lead removal efficiency ratio increased with the increase of pH within the first 2 hours, the values reached 99.9%, 96.9% and 30.3% at pH 6, pH 4 and pH 2, respectively. In contrast, the residual lead was 3 072.3, 4 726.8 and 2 359.1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ under aerobic condition after 32 days, accounting for 41.8%, 65.8% and 88.8% of total lead in the sludge. Taking the lead removal efficiency ratio and lead stability into account, aerobic condition at pH 4 is the best for removing lead with phosphorus-accumulating sludge in theory.

Key words: phosphorus-accumulating; sludge; heavy metals; lead; influencing factors

活性污泥作为一种高效的生物吸附剂, 常被用于处理含重金属废水^[1]. 但是一般污泥吸附的重金属容易解吸, 生物可利用性高^[2], 处理后的污泥非但不能资源化利用, 反而可能因填埋等处置造成二次污染.

含聚磷菌的活性污泥, 能够通过富集环境中的磷, 在一定条件下将磷以磷酸盐的形式释放出来, 与环境中的重金属形成的磷酸盐化合物溶解度低, 如羟基磷铅矿和氯磷铅矿等铅的磷酸盐矿物非常稳定^[3], 处理铅后的聚磷污泥有望得到资源化利用. 聚磷菌好氧吸磷, 厌氧释磷^[4], 厌氧环境有助于重金属与磷酸盐反应, 提高污泥中重金属的稳定性. 但是另一方面好氧能增强污泥中包括聚磷菌在内的微生物活性, 改善污泥的吸附能力, 提高重金属的去除率. 因此, 研究不同溶解氧时聚磷污泥除铅的效率和稳定性的影响因素,

对控制重金属污染、资源化利用污泥具有重要意义.

1 材料与方法

实验采用自制的 SBR 反应器, 将南昌某污水厂剩余污泥培养一周得到聚磷污泥, 污泥(干泥)中含磷量(以 P 计)为 $6 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$.

从好氧段末取出污泥, 反复洗涤数次, 加超纯水控制污泥浓度为 $20\,000.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 搅拌均匀后, 分别取 200 mL 于若干 250 mL 锥形瓶中, 用恒温水浴振荡调节锥形瓶温度为 30°C . 控制不同反应条件

收稿日期: 2012-09-03; 修订日期: 2012-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40972036); 江西省科技支撑项目(2010BSA19700)

作者简介: 杨敏(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境化学, E-mail: yangmsunh@126.com

* 通讯联系人, E-mail: lulong@ncu.edu.cn

(包括:①溶解氧. 好氧采用全程微孔砂芯曝气, 厌氧采用加压曝氮气至饱和后密封处理. ②pH. 采用 $1.0\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl 和 $6.0\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 进行调节). 加入定量预先配置的高浓度醋酸铅溶液, 使得混合液 $\rho(\text{Pb}^{2+}) = 150.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 此时开始计时. 定期从相应锥形瓶中取样, 用 $0.22\mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤后, 得到若干上清液样品. 所需污泥样由泥水混合液经离心分离后自然晾干得到, 用 Tessier 五步形态分类提取法^[5] 提取可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机物和硫化物结合态以及残渣态等 5 种形态的铅离子. 按照文献^[6] 中的原子吸收分光光度法测定上清液和污泥中各形态铅的浓度.

2 结果与讨论

2.1 溶解氧对聚磷污泥除铅的影响

2.1.1 污泥对铅的去除率

控制反应温度 30°C 左右, pH 6, 活性污泥在好氧和厌氧条件下对铅的去除率随时间的变化曲线见图 1.

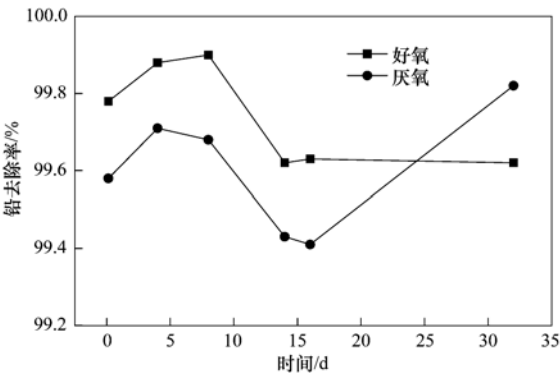


图 1 聚磷活性污泥除铅效果

Fig. 1 Lead removal efficiency of phosphorus-accumulating sludge

由图 1 可知, 污泥除铅效率都较好, 好氧和厌氧最高去除率分别达到 99.9% 和 99.8%. 污泥除铅率在第 8 ~ 15 d 左右下降, 好氧 15 d 后铅去除率基本不变, 厌氧 15 d 后铅的去除率小幅回升.

污泥去除重金属主要有 4 种机制: 离子交换、表面配合、无机微沉淀和酶促反应^[7]. 反应开始阶

段, 主要通过离子交换和表面配合除铅. 张双圣等^[8] 用 NaOH 将制备的污泥吸附剂调至 pH > 7 时, Pb^{2+} 通过离子交换吸附到污泥表面, 去除率接近 100%. 孙鑫等^[9] 用好氧颗粒污泥来吸附 Cu^{2+} [$\rho(\text{Cu}^{2+}) = 50.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$], 主要通过污泥中的 —OH 和 —COOH 等官能团与 Cu^{2+} 进行表面配合去除, 去除率可达 95.7%. 本实验反应初期, 污泥活性高, 进行离子交换和表面配合能力强, 因此聚磷污泥除铅率急剧上升. 反应中期除铅率小幅下降, 一方面是由于污泥活性下降, 离子交换和表面配合能力减弱, 另一方面厌氧酸化导致 pH 下降, H^{+} 对 Pb^{2+} 形成吸附竞争导致厌氧状态的 Pb^{2+} 去除率进一步下降. 而反应后期, 污泥活性继续降低, 好氧优势不再, 而厌氧促进了聚磷菌持续释磷, 铅与之络合生成无机微沉淀得以去除, 厌氧状态下铅的去除率因此回升而超过好氧状态.

2.1.2 污泥中铅的形态分析

反应结束后 (32 d), 从瓶中取出污泥样进行铅的形态分析, 以考察污泥中铅的稳定性, 结果见表 1 和图 2.

从图 2 中可知, 反应 32 d 后, 污泥中的铅绝大部分以有机物及硫化物结合态和残渣态两种形态存在. 好氧条件下二者分别占到 45% 和 41.8%, 厌氧条件下二者分别达到 42.8% 和 52.6%.

重金属的形态能表征其稳定性, 生活污水中铅离子浓度一般较低, 污泥有足够的硅铝酸盐与之形成残渣态, 平均可达 50% 以上^[10~17], 有些生活污水厂污泥中重金属残渣态占比达到了 92.46%^[18], 污泥稳定性高. 然而采用一般污泥处理高浓度含铅废水时, 情况却不乐观, 污泥中的残渣态铅占比较低, 处理重金属后的污泥不稳定. 于瑞莲等^[19] 调查泉州市大华蓄电池厂污泥中的总铅含量为 $18\,074.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 污泥中残渣态铅为 $3\,497.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 仅占污泥总铅的 19.4%. 本实验采用聚磷污泥处理铅含量为 $7\,500.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的废水 (分布见表 1). 厌氧条件下聚磷污泥中残渣态铅为 $4\,023.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占污泥总铅的 52.6%, 好氧条件下残渣态铅也占到污泥总铅的 41.8%, 污泥稳定铅的能力较强. 这主要是由于聚磷污泥含磷量高, 污泥中的磷酸盐与

表 1 pH 6 时聚磷污泥中铅的形态含量和总量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Fraction lead and total lead in phosphorus-accumulating sludge at pH 6/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

溶氧状态 铅的形态	可交换态	碳酸盐 结合态	铁锰氧化 物结合态	有机物及硫 化物结合态	残渣态	Tessier 形态之和	总量	回收率 /%
好氧	95.6	382.2	492.5	3 307.5	3 072.3	7 350.1	7 494.1	98.1
厌氧	76.5	237.2	38.3	3 274.2	4 023.9	7 650.1	7 502.3	102.0

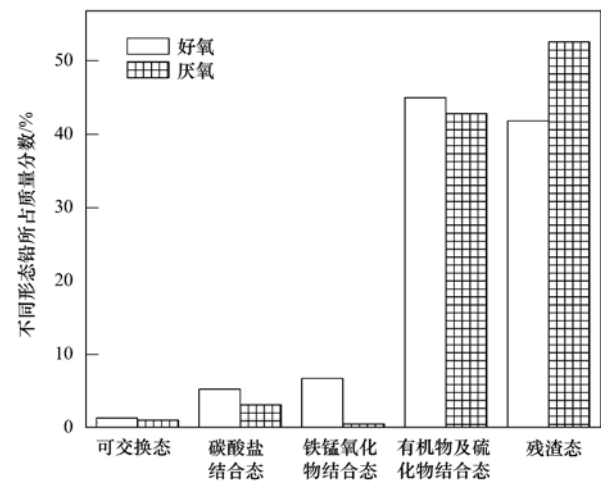


图 2 32 d 时聚磷污泥中铅的形态分布

Fig. 2 Speciation of lead in phosphorus-accumulating sludge after 32 days

表 2 不同 pH 时好氧聚磷污泥中铅的形态含量和总量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 2 Fraction lead and total lead in phosphorus-accumulating aerobic sludge at different pH/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$								
pH	可交换态	碳酸盐结合态	铁锰氧化物结合态	有机物及硫化物结合态	残渣态	Tessier 形态之和	总量	回收率/%
2	2.7	13.1	13.5	268.3	2 359.1	2 656.5	2 625.1	101.2
4	35.8	64.7	201.2	2 160.4	4 726.8	7 188.9	7 274.8	98.8
6	95.6	382.2	492.5	3 307.5	3 072.3	7 350.0	7 494.0	98.1

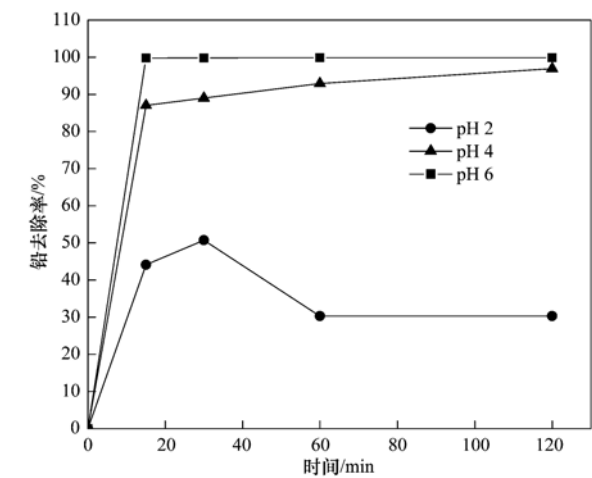


图 3 不同 pH 时好氧聚磷污泥除铅情况

Fig. 3 Lead removal with phosphorus-accumulating aerobic sludge at different pH

后 pH 2 的污泥除铅率为 30.3%，而 pH 4 和 pH 6 分别达到 96.9% 和 99.9%。这可能是由于短时间内铅的去除主要依靠离子交换和配位吸附作用，而 pH 低， H^+ 浓度高，污泥活性低，限制了这两种作用，导致除铅率下降。从铅去除率角度考虑，降低 pH 不利于污泥除铅。而 pH 4 为污泥除铅的临界值，pH 小于 4 时，铅去除率明显下降，而 pH 大于 4 时，铅去除率上升量较小。

环境中的铅生成沉淀以残渣态存在于污泥中。因此，聚磷污泥稳定铅的能力较一般污泥强。

2.2 好氧时不同 pH 对聚磷污泥除铅影响

pH 的变化能显著影响污泥去除重金属的能力大小。一般而言，降低 pH 不利于重金属的吸附^[20~23]，但在强酸性条件下能加速微生物细胞破裂，胞内多糖、蛋白质、多聚磷酸盐等流出，这些物质有助于络合、沉淀重金属^[24]，而最终达到去除重金属的目的。因此本研究在好氧条件下设置了 pH 2 和 pH 4 的两个反应瓶，与之前 pH 6 时形成对照，以考察降低 pH 对好氧聚磷污泥的除铅作用。

2.2.1 好氧聚磷污泥对铅的去除率

聚磷污泥除铅情况见表 2 和图 3。

由图 3 可知，pH 对铅的去除率影响显著，在酸性条件下，铅的去除率随 pH 升高而急剧上升，2 h

2.2.2 好氧聚磷污泥中铅的稳定性

持续曝气反应 32 d 后，测得聚磷污泥中铅的形态分布如图 4 所示。

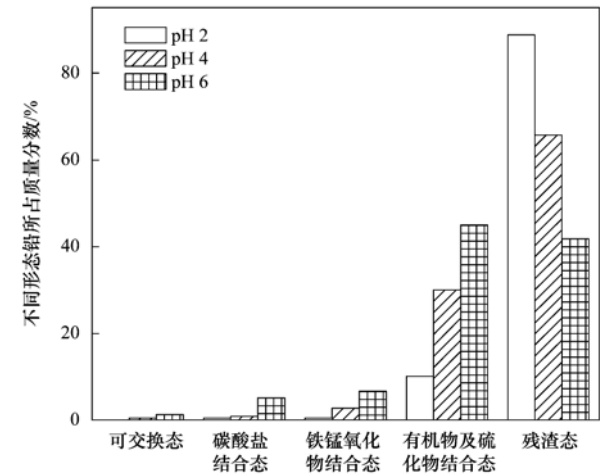


图 4 不同 pH 时好氧聚磷污泥中铅的形态

Fig. 4 Speciation of lead in phosphorus-accumulating aerobic sludge at different pH

由图 4 可知，除残渣态铅外，其他形态铅占比均随着 pH 升高而上升。原因分析如下：pH 低时，可交换态铅更易溶出析出转化为其他形态铅；碳酸盐矿物在高浓度 H^+ 作用下，转化为二氧化碳而减少，导致碳酸盐结合态铅下降^[25]；铁锰氧化物是一

种两性胶体,当 pH 值小于零点电位时,胶体表面带正电,排斥 Pb^{2+} ;而 pH 6 很可能已高于零点电位,胶体表面带负电荷,铁锰氧化胶体结合 Pb^{2+} 能力迅速上升^[26,27];pH 值上升使得污泥活性增大,产生的代谢物增多,可能是导致有机物及硫化物结合态上升的原因.与前几种形态相反,残渣态铅含量随 pH 上升而下降.pH 2 和 pH 4,残渣态含量分别高达 88.8% 和 65.8%,而 pH 6 时残渣态含量仅为 41.8%.这可能是由于聚磷污泥中微生物,特别是聚磷菌的细胞结构在强酸环境下遭到破坏,半透膜选择透过性受到抑制,通透性增强^[24, 28],细胞内的聚磷加速溶出与铅反应生成磷酸铅沉淀,所以 pH 越低,污泥中的残渣态越多.而由于 pH 2 时污泥对铅的总去除率远低于 pH 4 和 pH 6, pH 2 时污泥中残渣态含量反而最低.

由表 2 可知 pH 2、pH 4 和 pH 6 时好氧污泥中残渣态含量分别为 2 359.1、4 726.8 和 3 072.3 $mg \cdot kg^{-1}$,而由表 1 知厌氧污泥在 pH 6 条件下的残渣态铅含量也仅为 4 023.9 $mg \cdot kg^{-1}$,因此 pH 4 时好氧污泥中的铅最为稳定.

3 结论

(1)在 pH 6 条件下,聚磷污泥除铅效果佳,去除效率达到 99% 以上.厌氧除铅整体效果更优,且效果更稳定.但是由于好氧环境提高了微生物活性,短时除铅效率要稍高于厌氧时的除铅效率.

(2)好氧条件下,在一定范围内(4~6),聚磷活性污泥除铅率随 pH 值升高而增加,但是污泥中铅的稳定性下降.

(3)好氧条件下 pH 4 时,污泥中的残渣态铅含量最高,污泥中的铅稳定性最强.且总铅的去除率达到 96.9%,理论上是去除高浓度铅的最优选择.

(4)聚磷活性污泥能有效去除高浓度的铅,污泥中的铅稳定,生物可利用性小,处理重金属后的污泥有望得到资源化利用.

参考文献:

- [1] Rozada F, Otero M, Parra J B, *et al.* Producing adsorbents from sewage sludge and discarded tyres: characterization and utilization for the removal of pollutants from water[J]. Chemical Engineering Journal, 2005, **114**(1-3): 161-169.
- [2] Zhang F S, Nriagu J O, Itoh H. Mercury removal from water using activated carbons derived from organic sewage sludge[J]. Water Research, 2005, **39**(2-3): 389-395.
- [3] 周世伟,徐明岗.磷酸盐修复重金属污染土壤的研究进展[J].生态学报,2007, **27**(7): 3043-3050.
- [4] Yeoman S, Stephenson T, Lester J N, *et al.* Biotechnology for phosphorus removal during wastewater treatment [J]. Biotechnology Advances, 1986, **4**(1): 13-26.
- [5] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. Analytical Chemistry, 1979, **51**(7): 844-851.
- [6] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社,2002. 324-340.
- [7] 梁莎,冯宁,郭学益.生物吸附法处理重金属废水研究进展[J].水处理技术,2009, **35**(3): 13-17.
- [8] 张双圣,刘汉湖,张双全,等.污泥吸附剂的制备及其对含 Pb^{2+} 模拟废水的吸附特性研究[J].环境科学学报,2011, **31**(7): 1403-1412.
- [9] 孙鑫,李金城,郑华燕,等.好氧颗粒污泥吸附 Cu^{2+} 的研究[J].环境科学与技术,2011, **34**(9): 22-25.
- [10] He M M, Tian G M, Liang X Q. Phytotoxicity and speciation of copper, zinc and lead during the aerobic composting of sewage sludge[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **163**(2-3): 671-677.
- [11] He M M, Li W H, Liang X Q, *et al.* Effect of composting process on phytotoxicity and speciation of copper, zinc and lead in sewage sludge and swine manure[J]. Waste Management, 2009, **29**(2): 590-597.
- [12] 晋王强,南忠仁,王胜利,等.兰州市城市污水处理厂污泥中重金属形态分布特征与潜在生态风险评价[J].农业环境科学学报,2010, **29**(6): 1211-1216.
- [13] Liu Y S, Ma L L, Li Y Q, *et al.* Evolution of heavy metal speciation during the aerobic composting process of sewage sludge[J]. Chemosphere, 2007, **67**(5): 1025-1032.
- [14] 谢莹,张涛,金建峰,等.污水处理厂脱水污泥中重金属的形态分布特征研究[J].中国给水排水,2012, **28**(5): 93-96.
- [15] Yuan X Z, Huang H J, Zeng G M, *et al.* Total concentrations and chemical speciation of heavy metals in liquefaction residues of sewage sludge[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(5): 4104-4110.
- [16] Fuentes A, Lloréns M, Sáez J, *et al.* Comparative study of six different sludges by sequential speciation of heavy metals[J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(3): 517-525.
- [17] Wong J W C, Li K, Fang M, *et al.* Toxicity evaluation of sewage sludges in Hong Kong[J]. Environment International, 2001, **27**(5): 373-380.
- [18] Chen M, Li X M, Yang Q, *et al.* Total concentrations and speciation of heavy metals in municipal sludge from Changsha, Zhuzhou and Xiangtan in middle-south region of China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **160**(2-3): 324-329.
- [19] 于瑞莲,胡恭任,张丽玲.泉州城市污泥中重金属赋存形态和生物有效性分析[J].环境化学,2011, **30**(11): 1965-1966.
- [20] Bhosle N, Suci P A, Baty A M, *et al.* Influence of divalent cations and pH on adsorption of a bacterial polysaccharide adhesin[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1998, **205**

- (1): 89-96.
- [21] Baker H, Khalili F. Analysis of the removal of lead(II) from aqueous solutions by adsorption onto insolubilized humic acid: temperature and pH dependence[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2004, **516**(1-2): 179-186.
- [22] 祝惠, 阎百兴, 张丰松, 等. 粒级、pH 和有机质对汞在松花江沉积物表面吸附-解吸的影响[J]. *环境科学*, 2010, **31**(10): 2315-2320.
- [23] 乔冬梅, 齐学斌, 庞鸿宾, 等. 不同 pH 值条件下重金属 Pb^{2+} 的吸附解吸研究[J]. *土壤通报*, 2011, **42**(1): 38-41.
- [24] 高永青, 彭永臻, 王建龙, 等. 剩余污泥水解酸化过程中胞外聚合物的影响因素研究[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(1): 58-63.
- [25] Singh A K, Hasnain S I, Benerjee D K. Grain size and geochemical partitioning of heavy metals in sediments of the Damodar River—a tributary of the lower Ganga, India [J]. *Environmental Geology*, 1999, **39**(1): 91-98.
- [26] 李宗利, 薛澄泽. 污灌土壤中 Pb、Cd 形态的研究[J]. *农业环境保护*, 1994, **2**(4): 152-157.
- [27] 韩春梅, 王林山, 巩宗强, 等. 土壤中重金属形态分析及其环境学意义[J]. *生态学杂志*, 2005, **24**(12): 1499-1502.
- [28] Zhang Y, Tang C Y, Li G B. The role of hydrodynamic conditions and pH on algal-rich water fouling of ultrafiltration [J]. *Water Research*, 2012, **46**(15): 4783-4789.

CONTENTS

Concentrations and Ozone Formation Potentials of BTEX During 2008-2010 in Urban Beijing, China	CAO Han-yu, PAN Yue-peng, WANG Hui, <i>et al.</i> (2065)
Aging and Mixing State of Particulate Matter During Aerosol Pollution Episode in Autumn Shanghai Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	MU Ying-ying, LOU Sheng-rong, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (2071)
Chemical Characteristics and Source Assessment of Rainwater at Shenyang	ZHANG Lin-jing, ZHANG Xiu-ying, JIANG Hong, <i>et al.</i> (2081)
Variation of Atmospheric Pollutants in Qinhuangdao City	LIU Lu-ning, SHEN Yu-xuan, XIN Jin-yuan, <i>et al.</i> (2089)
NH ₃ , N ₂ O, CH ₄ and CO ₂ Emissions from Growing Process of Caged Broilers	ZHOU Zhong-kai, ZHU Zhi-ping, DONG Hong-min, <i>et al.</i> (2098)
Synergetic Effects of Silicon Carbide and Molecular Sieve Loaded Catalyst on Microwave Assisted Catalytic Oxidation of Toluene	WANG Xiao-hui, BO Long-li, LIU Hai-nan, <i>et al.</i> (2107)
Removal of Mixed Waste Gases by the Biotrickling Filter	ZHANG Ding-feng, FANG Jun-yi, YE Jie-xu, <i>et al.</i> (2116)
Decomposition of Carbon Disulfide by Pulse Corona Under Oxidizing and Reducing Atmosphere	JIN Sheng, HUANG Li-wei, LI Guo-ping (2121)
Effects of Simulated Elevation of Atmospheric CO ₂ Concentration on the Physiological Features of Spring Phytoplankton in Taihu Lake	ZHAO Xu-hui, TANG Long-sheng, SHI Xiao-li, <i>et al.</i> (2126)
A New Method for Estimation of the Lake Quality Reference Condition	HUA Zu-lin, WANG Liang (2134)
Parameter Sensitivity Analysis of Runoff Simulation and Model Adaptability Research Based on HSPF	LI Yan, LI Zhao-fu, XI Qing (2139)
Study on Water Quality Monitoring Scheme Based on Non-Point Source Pollution	WU Xi-jun, LI Huai-en, LI Jia-ke, <i>et al.</i> (2146)
Characteristics of Nutrient Loss by Runoff in Sloping Arable Land of Yellow-brown Under Different Rainfall Intensities	CHEN Ling, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (2151)
Distribution of Dissolved Inorganic Nutrients and Dissolved Oxygen in the High Frequency Area of Harmful Algal Blooms in the East China Sea in Spring	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, CHEN Peng, <i>et al.</i> (2159)
Temporal-Spatial Distribution of Algal Cells During Drought Period in Daning River of Three Gorges	ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, WANG Kun, <i>et al.</i> (2166)
Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen Components in the Lake Sediment to Algae	FENG Wei-ying, ZHANG Sheng, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2176)
Influence of Decomposition of <i>Cladophora</i> sp. on Phosphorus Concentrations and Forms in the Overlying Water	HOU Jin-zhi, WEI Quan, GAO Li, <i>et al.</i> (2184)
Phosphorus Exchange Between Suspended Solids Sediments Overlying Water Under Repeated Disturbance	LI Da-peng, WANG Jing, HUANG Yong (2191)
Distribution Characteristics of PBDEs in Surface Sediment from the Three Gorges Reservoir of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2198)
Study on UV and H ₂ O ₂ Combined Inactivation of <i>E. coli</i> in Drinking Water	ZHANG Yi-qing, ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji (2205)
Kinetics and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate Degradation in Aqueous Solution by Ozonation	YU Li, ZHANG Pei-long, HOU Jia-cai, <i>et al.</i> (2210)
Effects of Nitrate Ion on Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	MAO Wen, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2218)
Chlorination of Ethynyl Estradiol: A Kinetic and Mechanistic Study	WANG Bin-nan, LIU Guo-qiang, KONG De-yang, <i>et al.</i> (2225)
Metal Ions Restrained the Elimination of 4- <i>tert</i> -Octylphenol by δ -MnO ₂	LI Fei-li, MOU Hua-qian (2232)
Removal of Bisphenol A in Aqueous Solutions by Core-shell Magnetic Molecularly Imprinted Polymers	LIU Jian-ming, LI Hong-hong, XIONG Zhen-hu (2240)
Research on Removal of Tetrabromobisphenol A from Synthetic Wastewater by Nanoscale Zero Valent Iron Supported on Organobentonite	YAN Meng-yue, PANG Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (2249)
Measurement of Dissolved Organic Nitrogen with Nanofiltration Pretreatment and Its Distribution Characteristics in Landscape Water	YU Hong-lei, HUO Shou-liang, YANG Zhou-sheng, <i>et al.</i> (2256)
Preparation of a Novel Modified Hydrogel and Study of Its Adsorption Performance	WU Ning-mei, LI Zheng-kui (2263)
Photocatalytic Reductive Degradation of Direct Red 4BE by Phosphotungstic Acid	WEI Hong, LI Ke-bin, LI Juan, <i>et al.</i> (2271)
Wastewater Treatment Using a Microbubble Aerated Biofilm Reactor	ZHANG Lei, LIU Ping, MA Jin, <i>et al.</i> (2277)
Research on Fenton Treatment of the Biochemical Processes Effluent of Bamboo Industry Wastewater	GUO Qing-wen, ZHANG Min, WANG Wei, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Fe ²⁺ on Fermentation Hydrogen Production in an UASB	LI Yong-feng, WANG Yi-xuan, CHENG Guo-ling, <i>et al.</i> (2290)
Influence of Substrate Concentration on PHA Production Using Fermented Sugar Cane as Substrate	CHEN Zhi-qiang, DENG Yi, HUANG Long, <i>et al.</i> (2295)
Study on Rapid Start-up of a Nitrifying Process Using Aerobic Granular Sludge as Seed Sludge	LIU Wen-ru, SHEN Yao-liang, DING Ling-ling, <i>et al.</i> (2302)
Influencing Factors of High-Concentration Lead Removal Using the Phosphorus-Accumulating Sludge	YANG Min, LU Long, FENG Yong, <i>et al.</i> (2309)
Preliminary Study on Characteristics of Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in Granular Sludge Systems	LI Zhi-hua, FAN Chang-qing, WANG Xiao-chang (2314)
Ecological Risk Assessment of Bisphenol A in Chinese Freshwaters	WANG Hao, FENG Cheng-lian, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (2319)
Species Sensitivity Evaluation of <i>Pseudorasbora parva</i>	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (2329)
Comparison of Aquatic Predicted No-Effect Concentrations (PNECs) for Pentachlorophenol Derived from Different Assessment Approaches	LEI Bing-li, WEN Yu, WANG Yi-pei, <i>et al.</i> (2335)
Study on Hair Hg and Pb Content Distribution of Traffic Polices, Guilin	QIAN Jian-ping, ZHANG Li, LI Cheng-chao, <i>et al.</i> (2344)
Changes in Phototoxic Index of <i>Daphnia carinata</i> Under Electric Field of Direct Current in Response to Cr ⁶⁺ and Hg ²⁺	WANG Fei-xiang, YUAN Ling, HUANG Jian-guo (2350)
Effect of UV-B Radiation on the Chemical Composition and Subsequent Decomposition of <i>Cyclobalanopsis glauca</i> Leaf Litter	SONG Xin-zhang, BU Tao, ZHANG Shui-kui, <i>et al.</i> (2355)
Leaf Micro-morphology and Features in Adsorbing Air Suspended Particulate Matter and Accumulating Heavy Metals in Seven Tress Species	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (2361)
Effect of Dissolved Oxygen on Microbial Community in Simultaneous Removal of Carbon, Nitrogen and Sulfur Process	YU Hao, CHEN Chuan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (2368)
Microbial Activity and Community Structure Analysis Under the Different Land Use Patterns in Farmland Soils: Based on the Methods PLFA and MicroResp TM	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (2375)
Effects of Drying-rewetting Alternation on Nitrogen Dynamics in a Typical Coastal Wetland: A Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (2383)
Cadmium and Selected Heavy Metals in Soils of Jianping Area in Wushan County, the Three Gorges Region: Distribution and Source Recognition	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, NING Zeng-ping, <i>et al.</i> (2390)
Total Contents of Heavy Metals and Their Chemical Fractionation in Agricultural Soils at Different Locations of Beijing City	CHEN Zhi-fan, ZHAO Ye, GUO Ting-zhong, <i>et al.</i> (2399)
Influence of Season Change on the Level of Heavy Metals in Outdoor Settled Dusts in Different Functional Areas of Guiyang City	LI Xiao-yan (2407)
Characteristics of Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls Contamination in Soils of Gudao Region in Dongying	WANG Deng-ge, CUI Zhao-jie, FU Xiao-wen, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Organic Matter Leaching in Forest Soil	DUAN Lei, MA Xiao-xiao, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2422)
<i>Ex-situ</i> Remediation of PAHs Contaminated Site by Successive Methyl- β -Cyclodextrin Enhanced Soil Washing	SUN Ming-ming, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2428)
Effects of <i>Bacillus mucilaginosus</i> on the Cd Content of Rhizosphere Soil and Enzymes in Soil of <i>Brassica juncea</i>	YANG Rong, LI Bo-wen, LIU Wei (2436)
Concentrations of Antibiotics in Vegetables from Manure-mended Farm	WU Xiao-lian, XIANG Lei, MO Ce-hui, <i>et al.</i> (2442)
Characteristics of Organic Nitrogen Mineralization in Organic Waste Compost-Amended Soil	ZHANG Xu, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (2448)
Characteristics and Influence Factors of the Energy Consumption and Pollutant Discharge of Municipal Solid Waste Transfer Stations in Beijing	WANG Zhao, LI Zhen-shan, FENG Ya-bin, <i>et al.</i> (2456)
Influence of Ammonia on Leaching Behaviors of Incineration Fly Ash and Its Geochemical Modeling	GUAN Zhen-zhen, CHEN De-zhen, Thomas Astrup (2464)
Pretreatment Technology for Fly Ash from MSWI and the Corresponding Study of Chloride Behavior	ZHU Fen-fen, Takaoka Masaki, Oshita Kazuyuki, <i>et al.</i> (2473)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of Mesoporous Activated Carbon with Acidic Groups	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (2479)
Preliminary Assessment of the Potential of Biochar Technology in Mitigating the Greenhouse Effect in China	JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, <i>et al.</i> (2486)
Research of Potassium Flow and Circulation Based on Substance Flow Analysis	BAI Hua, ZENG Si-yu, DONG Xin, <i>et al.</i> (2493)

《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)

2013年6月15日 34卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 6 Jun. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行