

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究 唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)

南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析 薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)

2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征 李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)

结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟 郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)

2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析 沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翡 (1662)

移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO₂ 的时空分布 李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)

秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成 刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)

连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制 窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)

我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平 于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)

巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响 马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)

京杭大运河(杭州段)典型断面水生生物多样性调查及其与水环境相关性研究 陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)

合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价 李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)

重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算 潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)

千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价 唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)

九龙江流域潜在病原菌污染分析 侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)

江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响 刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)

鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征 简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)

典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征 姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)

基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析 席庆, 李兆富, 罗川 (1773)

混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究 孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)

不同波长和强度光照对水体汞还原的影响 李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)

地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的研究 杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)

溴化铍可见光催化降解高效氯氟菊酯的研究 彭一莱, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)

石墨烯磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究 常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)

电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究 卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)

典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋 甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)

颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制 何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)

石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究 周贵忠, 王兆丰, 王绚, 李文倩, 李少香 (1832)

靛基氯甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用 张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)

FePMo₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究 王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)

实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究 杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)

SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究 龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)

不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响 尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)

黄原酸化废弃污泥吸附 Cu²⁺ 研究 岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)

轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究 薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)

不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能 黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)

北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究 李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)

泰州市区重金属污染的藜袋法与路尘法评价研究 陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)

放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响 王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)

苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响 王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)

重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因素研究 王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)

上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征 奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)

不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³C 连续标记法 谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)

污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究 郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)

石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究 李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)

大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究 虞俊超, 王宝盛, 王亚韡, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)

应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性 周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)

氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究 王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)

吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制 黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立涛, 王惜若 (1974)

牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究 焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)

针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响 杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)

城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究 王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)

铈插层黏土负载铁催化剂在 H₂S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究 孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)

脱硫类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征 祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)

固定污染源排气中 PM_{2.5} 采样方法综述 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)

产甲烷微生物研究概况 李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)

《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)

不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响

尹航¹, 刘畅¹, 高辉¹, 高大文^{1,2*}

(1. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040; 2. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090)

摘要: 采用自行设计的生物膜/颗粒污泥耦合反应器, 研究不同好/厌氧区容积负荷对该工艺脱氮除磷的影响. 试验过程中设置了 3 种不同的工况, 每种工况的好氧区和厌氧区容积均不同, 工况 I 的是 9.66 L 和 15.34 L, 工况 II 的分别为 12.56 L 和 12.44 L, 工况 III 的是 15.42 L 和 9.58 L. 不同的好/厌氧区容积对应不同的容积负荷. 结果表明, 工况 I 的氨氮与磷酸盐去除效果稍差, 工况 III 出水硝态氮较高, 造成总氮去除率较低. 工况 II 是最佳运行条件, 系统的氨氮去除率为 80.63%, 氮容积去除负荷为 $150.27 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, COD 去除率为 83.24%, 释磷量与吸磷量分别为 $7.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $11.93 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

关键词: 生物膜; 颗粒污泥; 脱氮除磷; 容积负荷; 耦合工艺

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1866-05 DOI: 10.13227/j.hjkk.2014.05.033

Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process

YIN Hang¹, LIU Chang¹, GAO Hui¹, GAO Da-wen^{1,2}

(1. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The effect of different aerobic/anaerobic zone volume loading on nitrogen and phosphorus removal by biological film and granular coupling process was investigated using a self-designed Biofilm/Granular sludge coupling reactor. Three operating modes were conducted in the experiment. In operating mode I, the volume of aerobic zone was 9.66 L, and the volume of anaerobic zone was 15.34 L. In operating mode II, the volume of aerobic zone was 12.56 L, and the volume of anaerobic zone was 12.44 L. In operating mode III, the volume of aerobic zone was 15.42 L, and the volume of anaerobic zone was 9.58 L. Three operating modes expressed different volume loading of the reactor because of different aerobic/anaerobic zone. The results showed that the performance of ammonia nitrogen and phosphorus removal was a bit poor in operating mode I, the effluent nitrate nitrogen was higher in operating mode III compared with other modes, which brought the total nitrogen removal efficiency lower. The operating mode II was optimal for nitrogen and phosphorus removal. In operating mode II, the ammonia nitrogen removal efficiency was about 80.63%, the volume loading rate of nitrogen removal was about $150.27 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, and the COD removal efficiency was higher than 83.24%; the amounts of phosphorus release and uptake under anaerobic conditions were $7.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $11.93 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

Key words: biological film; granular sludge; nitrogen and phosphorus removal; volume loading; coupling process

当前,我国面临着严重的水体富营养化问题,而造成水体富营养化的原因主要为氮磷的超标排放,所以,如何有效地去除污水中的氮磷成为我国急需解决的问题^[1,2]. 在目前存在的脱氮和除磷技术中,同步脱氮除磷技术由于具有处理成本低,易与原有系统衔接,能同时去除有机碳化合物、N、P 等污染物,能提高难降解有机物的去除率,并能抑制丝状菌生长繁殖等优点而被广泛应用^[3~5]. 近年来,为实现污水的同步脱氮除磷,国内外研究者开发了改进的 Dephanox 工艺,连续流厌氧/缺氧活性污泥系统,连续流厌氧/好氧/缺氧同步脱氮除磷工艺等^[6~8]. 但连续流系统有构筑物多、占地面积大、能耗高、剩余污泥量大等缺陷,为解决以上问题而设计的 SBR 工艺也具有众多脱氮除磷生物群落难

以共存的矛盾^[9,10]. 针对以上问题,本试验设计了一种同步脱氮除磷新工艺——生物膜/颗粒污泥耦合工艺,在好氧区利用载体固定生长缓慢的硝化菌群形成硝化菌生物膜,在厌氧区培养驯化反硝化聚磷菌颗粒污泥. 好氧区与厌氧区容积负荷对氮磷的去除有显著影响^[11,12]. 好氧区容积负荷主要决定硝化反应的进行,直接影响硝化菌对氨氮的氧化作用,从而决定着氨氮的去除率,所以,好氧区的容积负荷是影响脱氮的关键因素之一. 厌氧区容积负荷不但

收稿日期: 2013-09-13; 修订日期: 2013-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(21177033); “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD38B0305)

作者简介: 尹航(1983~),男,博士研究生,主要研究方向为水污染控制.

* 通讯联系人, E-mail: dawengao@gmail.com

决定厌氧释磷量的大小,而且对反硝化聚磷菌也有着重要影响,厌氧区容积负荷决定着磷的去除情况,同时也影响着脱氮^[13]. 本试验基于生物膜/颗粒污泥耦合工艺反应器对不同好氧/厌氧区容积负荷这一影响因素进行研究,分析不同好/厌氧区容积负荷对脱氮除磷的影响,以期为该工艺高效运行提供依据.

1 材料与方法

1.1 试验用水及种泥

试验采用模拟人工配水,其组分为:COD 300 mg·L⁻¹,NH₄⁺-N 30 mg·L⁻¹,PO₄³⁻-P 5 mg·L⁻¹,微量元素混合液 0.3 mL·L⁻¹. 微量元素(g·L⁻¹)组成:FeCl₃·6H₂O 1.5; H₃BO₃ 0.15; CuSO₄·5H₂O 0.03; KI 0.18; EDTA 10; MnSO₄·H₂O 0.15; ZnSO₄·7H₂O 0.12; CoSO₄·7H₂O 0.03. 试验种泥均取自哈尔滨文昌污水处理厂二沉池.

1.2 试验装置与运行方案

试验所用反应器有效体积 25 L,分内外两个筒,外筒高 53.5 cm,直径 28 cm,内筒高 40 cm,直径 18 cm; 载体选择聚氨酯泡沫; 好氧区 DO 控制在 2~4 mg·L⁻¹; HRT 为 8.5 h,厌氧区 SRT 控制在 15 d^[14]. 反应器的运行方式为:进水 240 min(采用蠕动泵连续进水,同时开启厌氧区搅拌器)、曝气 240

min、沉淀和排水 30 min.

污水由上部经内外筒之间的夹层流入反应器底部,然后在内筒内上升至反应器顶部,再经内外筒之间的夹层流回反应器底部,构成自上而下内循环水流状态,内筒设有多孔分体隔板,隔板表面具有开口式的孔,隔板放置于隔板垫上,将反应器内筒分为上下两层,上层作为好氧区放置硝化菌载体生物膜,下层作为厌氧区放置反硝化聚磷菌颗粒污泥,隔板上安放微孔曝气盘,这样可以保证上端的硝化菌生物膜始终处于好氧状态,而下端的颗粒污泥则处于厌氧和缺氧的状态^[14]. 在反应器的外筒侧面上设有一排取水口,在最下面的取样口取样和排水,底部设有排泥管.

本研究旨在提高生物膜/颗粒污泥耦合工艺对模拟城市污水中氮、磷等污染物质的去除效率. 在工艺稳定运行的基础上,通过对好氧区和厌氧区的容积大小调整,研究好/厌氧区容积负荷对耦合工艺脱氮除磷影响,为该工艺高效运行提供依据.

反应器总容积一定,通过调节隔板的位置,改变好/厌氧区容积,形成 3 种不同运行工况,3 种工况下系统 HRT 保持不变,序批式运行方式各阶段的时间分配保持一致,因此,3 种工况的废水流速相同,具体各工况的好/厌氧区容积和好/厌氧区负荷见表 1.

表 1 3 种不同工况的好/厌氧区容积和负荷

Table 1 Three different working conditionst

工况	好氧区		厌氧区		
	容积 /L	氮负荷 /g·(m ³ ·d) ⁻¹	容积 /L	磷负荷 /g·(m ³ ·d) ⁻¹	COD 负荷 /g·(m ³ ·d) ⁻¹
I	9.66	242.43	15.34	29.29	1222.11
II	12.56	186.14	12.44	33.82	1517.42
III	15.42	150.65	9.58	39.30	1957.47

1.3 检测项目及分析方法

COD、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、PO₄³⁻-P 和 MLSS 等指标的测定均采用国家颁布的标准方法^[15], NO₃⁻-N 的测定采用麝香草酚法.

2 结果与讨论

2.1 不同好氧区容积负荷对氨氮去除的影响

不同好氧区容积负荷对系统 NH₄⁺-N 去除能力有明显的差别,随着好氧区氮容积负荷的不断减少,去除率相应提高,3 种工况条件下平均去除率分别为 75.07%、80.63% 和 83.66% (图 1). 好氧区氮容积负荷越小,单位污泥量的氮负荷就越低,氨氮的去除率就越高.

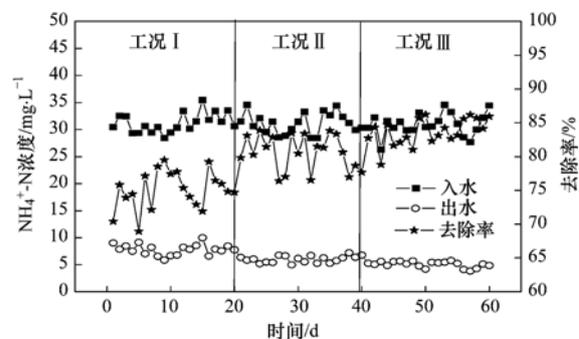


图 1 不同容积负荷条件下 NH₄⁺-N 去除效果

Fig. 1 NH₄⁺-N removal rate under different volume ratio conditions

不同好氧区氮容积负荷条件下氨氮的去除效果如图 2 所示,此阶段氮负荷主要是指氨氮负荷. 随

着好氧区氮负荷不断减少,氮去除负荷分别为 157.14 ~ 198.60、130.00 ~ 171.50 和 100.97 ~ 144.02 $\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 平均氮去除负荷分别为 181.96、150.27 和 126.09 $\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. 由数据可以看出,氮负荷越大,其去除负荷也相应地越高. 但综合考虑氮负荷对氨氮去除率的影响,好氧区氮容积负荷不宜太大,本研究应在 $186.14 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$.

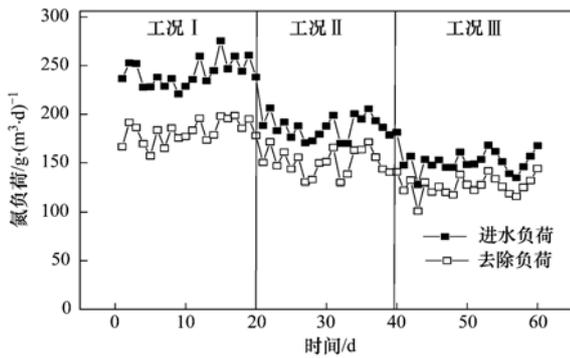


图 2 不同好氧区容积氮去除速率

Fig. 2 Volume nitrogen removal rate of Different aerobic zone

2.2 不同厌氧区容积负荷对 COD 去除的影响

厌氧区反硝化除磷对 COD 的去除原理是聚磷菌利用水解聚磷酸盐所获得的能量来吸收乙酸基质并合成为细胞内的储能物质 PHB^[16,17]. 此工艺中 COD 的去除主要发生在厌氧区,伴随着磷的释放,水中 COD 的含量有明显的下降. 图 3 表示不同厌氧区容积负荷对 COD 去除的影响. 随着厌氧区有机负荷的不断增大,厌氧结束时的 COD 浓度逐渐上升. 在进水有机负荷最大的工况 III 中,厌氧结束时 COD 浓度达到 $70.89 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,远高于其它两种工况,其厌氧区的 COD 去除率仅为 71.60%. 在工况 I 和 II 中,厌氧区的 COD 去除率较为理想,分别为 89.53% 和 83.24%. 有研究表明在反硝化除磷工艺中,如果好氧区中存在大量的 COD,氨氮的硝化将会受到很大的影响^[18]. 厌氧区的 COD 主要是用于残存 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的反硝化和内碳源 PHB 的合成,这表明在厌氧区大部分 COD 已经被去除,从而保证了好氧区自养型硝化菌的优势生长,提高了氨氮的硝化率.

由上述可知,虽然在厌氧区大部分 COD 被去除,但从总体来看,COD 的去除率不是很高,因此还要有少量的 COD 在好氧区被去除. 由该工艺的构型可以看出,待处理污水在厌氧区经过反硝化聚磷菌处理以后,会经过好氧区和厌氧区之间的多孔挡板,到达好氧区,由于硝化菌生物膜菌种的多样性,可能一部分异养菌会对污水中残余的 COD 进行降

解,这样在好氧区污水中 COD 的浓度也会有不同程度的降低,在好氧区 COD 的去除率在 5.13% ~ 17.10% 之间. 在好氧区,体系中 COD 的继续降解,对于悬浮载体的正常运行和细菌种类的多样性都是有利的,这样该工艺适应不同环境变化的能力就会变强. 3 种工况的 COD 平均去除率均达到 88.70% 以上,可见该工艺对有机物的去除效果比较稳定.

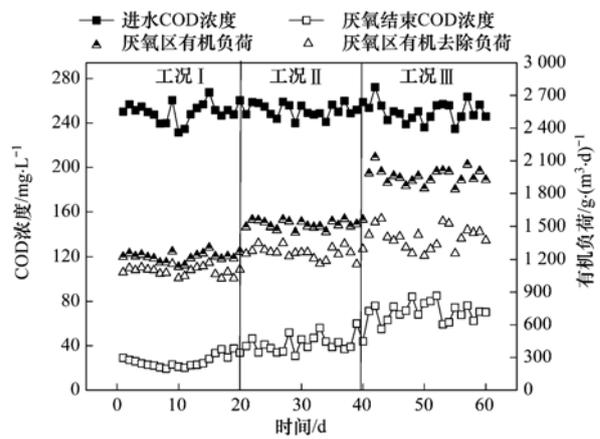


图 3 厌氧段 COD 浓度和有机负荷变化

Fig. 3 COD concentration and organic load changes of an anaerobic zone

2.3 不同厌氧区容积负荷对反硝化除磷的影响

不同厌氧区容积负荷下的释磷情况如图 4 所示,随着厌氧区的减小,厌氧末期磷浓度由最初的 $15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到 $11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 3 种工况的厌氧区磷酸盐负荷分别为 29.29、33.82 和 $39.30 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,厌氧结束时释磷量分别为 8.60、7.23 和 $5.63 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 从中可以看出厌氧区越大,越有利于 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的释放,而 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 释放量的大小,决定着体系除磷效率的高低.

不同的厌氧区容积负荷不仅会影响厌氧阶段磷

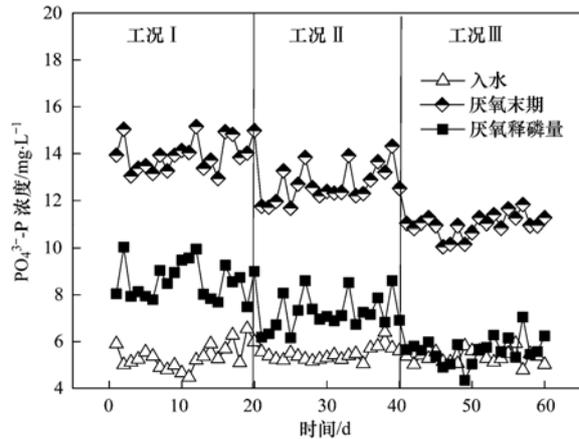


图 4 不同容积负荷条件下释磷情况

Fig. 4 Phosphorus release conditions under different volume load conditions

的释放,同时影响磷的缺氧吸收,即反硝化除磷. 由于本研究在前期对反硝化聚磷菌颗粒污泥进行了培养和驯化. 而且好氧区的硝化菌生物载体也是仅针对硝化菌进行培养和驯化,因此,该新型反应器对磷的去除主要在厌氧区的缺氧阶段通过反硝化除磷完成. 随着好氧区的增大, NH_4^+ -N 的去除率逐渐增大(图 1),硝化作用产生的硝态氮浓度也相应增多,但此时由于厌氧区是缩小的,因此导致磷的容积负荷不断上升,厌氧释磷受到影响. 由于释磷量的降低,使得反硝化聚磷菌在吸磷过程中利用硝态氮的量降低,因此导致出水的硝态氮浓度逐渐升高. 3 种工况厌氧结束时厌氧区磷容积负荷分别上升到 68.27 、 76.50 和 $85.89 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,相应的磷去除负荷分别为 62.52 、 71.93 和 $78.58 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,吸磷量分别为 12.79 、 11.93 和 $10.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 5).

通过对释磷量和吸磷量的综合分析,在工况 II [厌氧区磷负荷 $33.82 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$] 条件下, PO_4^{3-} -P 去除率比较高. 从图 5 可以看出,该条件下出水 NO_x^- -N 浓度在 $1.75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,说明电子受体相对充足,出水的 PO_4^{3-} -P 平均浓度为 $0.76 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 而工况 I [厌氧区磷负荷 $29.29 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$] 的出水 PO_4^{3-} -P 浓度为 $1.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,相比较而言,工况 I 好氧区比例相对较小,对氨氮的去除率较低(图 1),由硝化菌氧化氨氮产生的硝态氮电子受体不足,导致出水 PO_4^{3-} -P 浓度较高. 在工况 III [厌氧区磷负荷 $39.30 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$] 条件下,虽然出水的 PO_4^{3-} -P 浓度比较低,但是由于释磷量的降低,使得反硝化聚磷菌在吸磷过程中利用硝态氮的量降低,使得出水 NO_x^- -N 的浓度较高.

经过 60 d 的稳定运行,3 种工况条件对于 COD

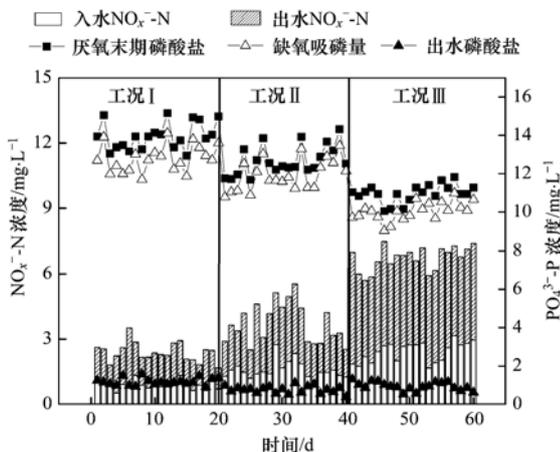


图 5 不同厌氧区容积负荷条件下吸磷情况

Fig. 5 Phosphorus uptake condition under different anaerobic zone volume load

均可以保持较高的去除率,但是对于 NH_4^+ -N 和 PO_4^{3-} -P 的去除,工况 II 和工况 III 条件要好于工况 I,主要原因是好氧区容积负荷的大小决定着氨氮氧化的情况,而氧化产物 NO_x^- -N 是反硝化除磷电子受体来源,所以除磷能力的高低与 NO_x^- -N 量的多少有重要关系. 在工况 III 条件下,氨氮充分氧化生成氧化态氮,但反硝化聚磷菌并没有充分利用,造成出水的硝态氮浓度过高. 在工况 II 条件下,即好氧区氮负荷为 $186.14 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,厌氧区磷和 COD 的负荷分别为 $33.82 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $1517.42 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 时,由于硝化生物膜氧化氨氮产生的硝态氮作为反硝化聚磷菌的电子受体被反硝化聚磷菌充分利用,所以出水硝态氮低于其它两种运行条件.

3 结论

(1) 随着好氧区氮容积负荷的减少,氨氮去除率相应的增加,3 种工况条件下氨氮去除率分别为 75.07% 、 80.63% 和 83.66% ,氮去除负荷分别为 181.96 、 150.27 和 $126.09 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$.

(2) 随着厌氧区有机负荷的增大,厌氧结束时 COD 的去除率逐渐减少,3 种工况条件下 COD 去除率分别 89.53% 、 83.24% 和 71.60% .

(3) 随着厌氧区磷容积负荷的增大,释磷量逐渐降低,3 种工况条件下释磷量分别为 8.60 、 7.23 和 $5.63 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,吸磷量分别为 12.79 、 11.93 和 $10.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

(4) 从生物膜-颗粒污泥耦合工艺对有机物、氮、磷污染物的去除情况来看,工况 I 条件下 NH_4^+ -N 和 PO_4^{3-} -P 的去除率不高,工况 III 条件下氮的去除率不高,所以工况 II 为最佳运行工况.

参考文献:

- [1] 陈水勇, 吴振明, 俞伟波, 等. 水体富营养化的形成、危害和防治[J]. 环境科学与技术, 1999, (2): 11-15.
- [2] Smith V H, Tilman G D, Nekola J C. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems [J]. Environmental Pollution, 1999, **100** (1-3): 179-196.
- [3] 高景峰, 陈冉妮, 苏凯, 等. 同步脱氮除磷好氧颗粒污泥形成与反应机制的研究[J]. 环境科学, 2010, **31** (4): 1021-1029.
- [4] 王晓玲, 尹军, 吴磊, 等. 污水同步脱氮除磷技术及运行控制要点[J]. 环境科学与技术, 2007, **30** (12): 113-116.
- [5] Tsuneda S, Ohno T, Soejima K, et al. Simultaneous nitrogen and phosphorus removal using denitrifying phosphate-accumulating organisms in a sequencing batch reactor [J]. Biochemical Engineering Journal, 2006, **27** (3): 191-196.

- [6] Kapagiannidis A G, Zafiriadis I, Aivasidis A. Upgrading the efficiency of an external nitrification BNR system-The modified Dephanox process [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2011, **175**: 124-135.
- [7] Kapagiannidis A G, Zafiriadis I, Aivasidis A. Effect of basic operating parameters on biological phosphorus removal in a continuous-flow anaerobic-anoxic activated sludge system [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2012, **35** (3): 371-382.
- [8] Liu G, Xu X Y, Zhu L, *et al.* Biological nutrient removal in a continuous anaerobic-aerobic-anoxic process treating synthetic domestic wastewater [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2013, **225**: 223-229.
- [9] 高廷耀, 夏四清, 周增炎. 城市污水生物脱氮除磷工艺评述 [J]. *环境科学*, 1999, **20** (1): 110-112.
- [10] 崔志新. SBR 工艺同步脱氮除磷的试验研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2004.
- [11] 刘章富, 熊杨, 侯铁, 等. 同步生物除磷脱氮的几种实用新工艺 [J]. *中国给水排水*, 2002, **18** (9): 65-68.
- [12] 曹雪梅, 彭永臻, 王淑莹. 缺氧区、好氧区容积比对 A²/O 工艺反硝化除磷的影响 [J]. *中国给水排水*, 2007, **23** (3): 27-30.
- [13] 蒋军, 吴立波, 付丽霞, 等. 容积负荷对厌氧氨氧化反应器运行影响的研究 [J]. *环境工程学报*, 2010, **4** (2): 283-287.
- [14] 高辉, 尹航, 窦元, 等. 序批式生物膜/颗粒污泥工艺同步脱氮除磷效果 [J]. *中国给水排水*, 2012, **28** (5): 12-15.
- [15] 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.
- [16] 毕学军, 张波. 倒置 A²O 工艺生物脱氮除磷原理及其生产应用 [J]. *环境工程*, 2006, **24** (3): 29-30.
- [17] Henze M, Van Loosdrecht M C M, Ekama G A, *et al.* *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design* [M]. London: IWA Publishing, 2008.
- [18] 蒋铁锋. 短程反硝化除磷工艺特征及运行效能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.

CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO ₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjinghu Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed	HOU Li-yuan, HU An-yi, Ma Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method	XI Qing, LI Zhao-fu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe ₃ O ₄ /Graphene Oxide Nanoparticles	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FePMo ₁₂ Adopted Catalyst	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu ²⁺ by Xanthate-Functionalized Waste Sludge	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LI Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³ C Labeling	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seaford from Dalian, China	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i>	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H ₂ S over Supported Fe Catalysts on CeO ₂ -Intercalated Laponite Clay	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM _{2.5} from Stationary Sources: a Review	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

《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)

2014年5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 15, 2014

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