

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

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

区域空气质量模拟中查表法的应用研究	谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮(1409)
长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用	苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健(1418)
北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究	徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋(1425)
上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究	张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红(1431)
青岛市大气 PM _{2.5} 元素组成及来源研究	李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军(1438)
冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究	王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅(1446)
再悬浮装置在大气 PM _{2.5} 源谱分析中的应用	段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲(1452)
黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究	魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵(1457)
三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探	蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静(1463)
香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析	王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰(1471)
臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响	陈书涛,张勇,胡正华,史艳妹,沈小帅(1476)
托木尔峰青冰滩 72 号冰川径流水化学特征初步研究	赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰(1484)
五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究	张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林(1491)
7 条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律	卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷(1497)
巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性	李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠(1503)
北运河系地表水近 10 年来水质变化及影响因素分析	郭婧,荆红卫,李金香,李令军(1511)
东莞运河排涝对东江河网水质影响分析	孙磊,毛献忠,黄旻旻(1519)
北京平原区地下水污染源识别与危害性分级	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮(1526)
地下水曝气修复过程的三维数值模拟	李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌(1532)
垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究	邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永(1540)
新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究	高明瑜,谢慧君,王文兴(1550)
营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响	齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋(1556)
水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究	傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成(1564)
酞酸酯在模拟海河苕草微宇宙中的消减和分布特征	迟杰,杨青(1570)
电子束辐射对铜绿微囊藻毒素产生和释放的抑制作用研究	刘书宇,吴明红,姜钦鹏(1575)
青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析	李强坤,胡亚伟,罗良国(1579)
四溴双酚 A 的辐射降解研究	李杰,徐殿斗,徐刚,马玲玲,吴明红(1587)
污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究	王红娟,齐飞,封莉,张立秋(1591)
高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响	李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰(1597)
城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成 NDMA 的影响因素研究	尚晓玲,李咏梅(1604)
利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究	沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙(1609)
好氧污泥颗粒化过程中 Zeta 电位与 EPS 的变化特性	王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓姣,竺建荣(1614)
活性污泥对病毒的生物吸附特性	周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪(1621)
阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律	邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松(1625)
两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征	李婷,孟昭福,张斌(1632)
表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响	张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州(1639)
南京市 4 个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析	葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军(1646)
焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能	陈春,李文英,吴静文,李静(1652)
Xanthobacter flavus DT8 降解二噁英的特性研究	金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟(1657)
未开发油气田地地表炔氧化菌空间定量分布	满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(1663)
矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究	赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才(1670)
长江中游干流及 22 条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险	李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红(1676)
典型血吸虫病区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险	吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红(1682)
闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究	陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛(1687)
三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价	王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩(1693)
典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险	邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许政英(1700)
密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价	高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,李宏兵(1707)
湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性	杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰(1718)
基于 GIS 的某训练场土壤重金属污染评价	刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军(1725)
土壤质地和湿度对 SVE 技术修复苯污染土壤的影响	刘少卿,姜林,姚玉君,李艳霞,刘希涛,林春野(1731)
蒙脱土、高岭土和针铁矿对 DNA 吸附与解吸特征	王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰(1736)
LNAPL 在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究	潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙(1744)
亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征	董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷(1753)
蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究	任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥(1760)
固定化微生物技术修复 PAHs 污染土壤的研究进展	钱林波,元妙新,陈宝梁(1767)
《环境科学》征订启事(1483)	《环境科学》征稿简则(1620)
信息(1490,1496,1586,1743)	

利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究

沈志强¹, 吴为中², 杨春平^{3,4}, 陈佳利^{3,4}, 王建龙^{1*}

(1. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084; 2. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871; 3. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082; 4. 湖南大学环境生物与控制教育部重点实验室, 长沙 410082)

摘要: 合成了淀粉/聚己内酯(PCL)热塑性共混物(SPCL6), 并对其性能进行了表征. 研究了 SPCL6 作为反硝化碳源和生物膜载体用于固相反硝化工艺的可行性. 结果表明, SPCL6 可作为固体碳源用于去除低 C/N 水中的硝酸盐, 在接种 1 d 后 SPCL6 就有明显的脱氮效果. 进水硝氮质量浓度对反硝化速率没有明显影响, 以 SPCL6 为固体碳源的反硝化过程符合零级反应. 剪切力对反硝化速率具有显著影响, 转速从 $70 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 提高至 $140 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 反硝化速率(以 N 计)从 $0.0165 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 提升至 $0.0328 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 红外光谱结果表明, 微生物利用后的 SPCL6 中淀粉和 PCL 均发生了降解.

关键词: 可生物降解聚合物; 硝酸盐; 反硝化; 固体碳源; 淀粉

中图分类号: X703.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1609-05

Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source

SHEN Zhi-qiang¹, WU Wei-zhong², YANG Chun-ping^{3,4}, CHEN Jia-li^{3,4}, WANG Jian-long¹

(1. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 4. Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control, Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Starch/PCL blends (SPCL6) was synthesized and characterized, and used as carbon source and biofilm supporter simultaneously, the feasibility and efficiency in the solid-phase denitrification process was investigated. The results showed that starch/PCL blends could serve as solid carbon source for denitrification of low C/N ratio wastewater. A high denitrification performance was observed after 1 d acclimatization. Solid-phase denitrification is a zero-order reaction, influent nitrate concentration had no obvious effect on denitrification rate. Hydrodynamic shear force played an important role in denitrification process, the denitrification rate increased from $0.0165 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ to $0.0328 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ when the rotating speed increasing from $70 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ to $140 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$. The IR analysis confirmed the biodegradation of starch and PCL in SPCL6 blends.

Key words: biodegradable polymers; nitrate; denitrification; solid carbon source; starch

异养反硝化是应对日益严重的地表水和地下水硝酸盐污染的最有竞争力的脱氮技术. 常规使用液体碳源的异养反硝化过程存在一些问题, 如碳源投加量不易控制等. 为此, 德国学者提出了采用水不溶性的可生物降解聚合物同时作为反硝化过程的碳源(电子供体)和生物膜的附着载体, 这种工艺称为固相反硝化(solid-phase denitrification)^[1]. 固相反硝化技术被用于去除饮用水、地下水、垃圾渗滤液和循环养殖废水中的硝酸盐^[1~4]. 另有部分研究报道了使用 PCL 以及小麦秸秆作为反硝化碳源和生物膜载体在同步去除水中硝酸盐和农药(如硫丹)的应用^[5,6]. 用于反硝化的固体碳源包括天然的或人工合成的高分子聚合物. 麦秸、棉花、甘草、芦竹和甲壳质等天然材料作为碳源用于固相反硝化时存在一些不足, 例如反硝化速率较低、出水色度和 DOC 较高等^[3,5]. 而人工或微生物合成的 PHAs、PCL 和 PLA 等聚合物则存在脱氮成本较高的问题^[7~9]. 因此, 开

发出具有技术及经济可行性的碳源已成为限制“固相反硝化”技术推广应用的瓶颈.

淀粉是一种廉价、来源广泛、易生物降解的天然高分子原料, 在塑料工业中常与其它热塑性聚合物共混, 以降低塑料成本. 最新的研究表明, 交联淀粉/PCL 共混物可以作为碳源用于固相反硝化^[10]. 以制备的淀粉/PCL 共混物作为碳源和生物膜载体, 研究了其用于固相反硝化工艺的可行性, 以期开发出具有实际应用价值的固体碳源奠定基础.

1 材料与方法

1.1 实验材料

收稿日期: 2011-07-28; 修订日期: 2011-11-11

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07102-003)

作者简介: 沈志强(1983~), 男, 博士, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: shenzhiqiang529@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: wangjl@tsinghua.edu.cn

实验用聚己内酯(PCL)购自深圳市光华伟业实业有限公司,相对分子质量约为60 000. SPCL6 是玉

米淀粉与 PCL 及其它助剂混匀后通过挤出机挤出后的共混物. SPCL6 的主要特征如表 1 所示.

表 1 SPCL6 主要特征

Table 1 Characteristics of SPCL6

淀粉/%	PCL/%	木粉/%	添加剂/%	C 含量 ¹⁾ /%	直径/mm	高/mm	每粒重/g	比表面积/cm ² ·g ⁻¹
52	30	5	13	48.90	3	4.5	0.053 65	10.534 9

1)用 TOC 分析仪(HACH, IL530 TOC-TN)检测

实验用水为昆明市自来水,其理化特征: NO_3^- -N 质量浓度 0 ~ 0.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; DOC 质量浓度 0.0 ~ 0.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 质量浓度低于检出限. 加入 NaNO_3 和 KH_2PO_4 , 使 NO_3^- -N 与 P 的质量浓度在 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 与 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 以模拟受硝酸盐污染的水.

本研究所用的污泥取自于昆明市第三污水处理厂曝气池,污泥质量浓度 8 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

1.2 实验装置

静态实验反应器采用 500 mL 的磨口锥形瓶,瓶口用橡胶塞密封,上有排气管通过橡胶管导入水中,排除氮气的同时保持反应器内缺氧环境.

1.3 实验方法

1.3.1 SPCL6 接种驯化及脱氮研究

在锥形瓶中加入 SPCL6 样品 80 g, 并加入 300 mL 以自来水配制的硝氮质量浓度约为 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的配水(N:P=5:1), 然后加入活性污泥并将污泥质量浓度控制在 800 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 将锥形瓶放入恒温振荡器进行反应, 恒温振荡器转速控制在 70 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$, 温度控制在 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$. 每天换水, 换水量为 300 mL. 未控制换入配水的 DO 和 pH. 定期取样后分析 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N、pH 和 DOC. 当进水中硝氮能稳定去除时表示微生物接种驯化过程结束.

采用序批实验研究进水硝氮质量浓度影响, 换水体积为 300 mL, $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, 100 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$, NO_3^- -N 分别为 15、25 和 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 研究水力剪切力的影响时, 换水体积为 300 mL, $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, NO_3^- -N 为 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 转速分别为 70、100 和 140 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$. 未控制换入配水的 DO 和 pH.

1.3.2 SPCL6 浸出及吸水性能

(1) 浸出性能 10 g 经 50°C 真空干燥后的 SPCL6 颗粒加入至装有 100 mL 蒸馏水的 250 mL 磨口锥形瓶中, 室温下置于暗处. 每天取样后换入 100 mL 蒸馏水, 并分析样品的 DOC.

(2) 吸水性能 10 g 经 50°C 真空干燥后的 SPCL6 颗粒室温下浸泡于蒸馏水中. 定期将 SPCL6

颗粒取出, 并以卫生纸吸干表面的水分后立即称重. 吸水率为所吸收水分重量与 SPCL6 加入量的百分比.

1.4 分析方法与仪器

样品在测试前以 0.45 μm 膜过滤. 硝酸盐氮的测定^[11]: 取过滤后的水样在 220 和 275 nm 处测定吸光度. 亚硝态氮和氨氮分别采用盐酸萘乙二胺比色法和水杨酸-次氯酸盐光度法测定^[11]. pH 的监测使用雷磁 (pHsj-4a) pH 计. 使用 TOC 分析仪 (HACH, IL530 TOC-TN) 分析水样的 DOC 值(差减法). 红外分析采用的是衰减全反射方法, 将 SPCL6 颗粒直接压在晶体上, 红外光经过多次反射来读取其表面的信息. 红外光谱仪使用的是 Perkin Elmer 公司的 Spectrum GX FTIR system. N 去除率定义为: $100 \times (\text{NO}_3^- \text{-N}_{\text{进水}} - \text{NO}_3^- \text{-N}_{\text{出水}} - \text{NO}_2^- \text{-N}_{\text{出水}} - \text{NH}_4^+ \text{-N}_{\text{出水}}) / \text{NO}_3^- \text{-N}_{\text{进水}}$. 平均反硝化速率以溶解性氧化态 N (NO_3^- -N + NO_2^- -N) 质量浓度随时间变化的斜率来计算.

2 结果与讨论

2.1 SPCL6 浸出及吸水性能

SPCL6 的浸出及吸水性能如图 1 所示. 可以看出, SPCL6 颗粒浸出 1 d 后, DOC 的释放量非常明显, 达到了 165.44 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 随后 DOC 释放量快速降低, 在 20 d 时降至 1.11 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 在以差减法检测 DOC 时, 未发现无机碳 (IC) 的存在, 因此基本可排除浸出过程中微生物的影响. 并且淀粉/PCL 共混物浸泡在水中时, PCL 被认为是稳定的^[12,13], 因此 DOC 的来源主要是淀粉本身的水解. 浸泡第 1 d 后 DOC 的明显释放可能是 SPCL6 颗粒表面沾有的加工时未与 PCL 共混的淀粉水解所致, 随后 DOC 则主要来自于共混物表层的淀粉组分水解所致.

当淀粉/PCL 共混物浸泡在水中时, 淀粉中的羟基可以与水形成氢键, 因而会发生明显的吸水现象. 共混物吸水性能与很多因素有关, 如淀粉的类型与含量、是否含有相容剂以及浸泡样品的尺寸等.

SPCL6 吸水速度较快, 浸泡 2 h 后吸水率达到 13.02%, 并在 1 d 后吸水率达到饱和, 为 30.81%。淀粉/PCL 共混物的吸水率在 21.5% 左右^[13], 而 Mani 等^[14]发现随着淀粉含量的不同, 淀粉/PCL 共混物的吸水率在 9% ~ 16% 之间。

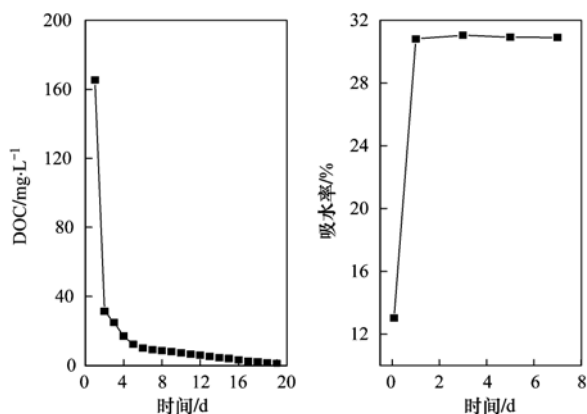


图1 SPCL6 浸出性能和吸水性能

Fig. 1 Performance of leaching and water absorption

2.2 SPCL6 接种驯化过程

SPCL6 颗粒的接种驯化情况如图 2 所示。可以看出, 在整个 20 d 的接种驯化过程中出水 NO_3^- -N 基本均低于 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 并且在第 1 个换水批次就能将进水 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NO_3^- -N 降至 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 表明 SPCL6 颗粒具有启动速度快去除效果好的优点。而 PCL 作为固体碳源时所需的启动时间为 16 d^[1], 表明淀粉与 PCL 共混后可以显著地缩短其作为固体碳源反硝化时所需的接种时间。由于淀粉的生物降

解性能要优于 PCL, 所以 PCL/淀粉共混物的生物降解速率要优于 PCL^[15]。因而反硝化微生物在利用淀粉/PCL 共混物时要比利用 PCL 更易于获得碳源进行生长繁殖和反硝化。PLA 的生物降解性能要劣于 PCL^[9], 利用 PLA 作为固体碳源反硝化所需的启动时间为 40 d^[16], 远比 PCL 的 16 d 要久。

亚硝酸盐是反硝化过程中的一种中间产物, 在接种驯化过程 NO_2^- -N 质量浓度均低于 $0.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 表明系统运行良好, 无中间产物累积。前 2 个换水批次的出水中较高的 NH_4^+ -N, 这主要来源于接种污泥, 随后 NH_4^+ -N 质量浓度迅速降低至 $0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下。氨氮可能是硝酸盐通过 DNRA 过程 (dissimilatory nitrate reduction to ammonia, DNRA) 产生的。Honda 等^[17]发现在使用 PCL 为固体碳源的反硝化体系中有 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的氨氮生成。驯化阶段 N 去除率基本均在 97% 以上, 表明系统对硝酸盐具有稳定而高效的去除效果。出水 DOC 快速升高至 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右后, 随着 SPCL6 颗粒表面生物膜的逐渐成熟而降低至 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。对比 SPCL6 颗粒的浸出性能 (图 1) 可以发现, 序批实验时 DOC 的释放主要来自于微生物对共混物的分解作用, 而不是由淀粉本身的水解所致。

2.3 进水硝氮质量浓度的影响

通常认为在活性污泥反硝化系统中, 当有机碳源充足而且硝酸盐氮质量浓度高于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 反硝化速率与硝酸盐氮质量浓度符合零级动力学^[18]。对于固体碳源反硝化系统, 进水硝氮在 $50 \sim 150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 反硝化速率改变很小^[19]。但是, 在 PCL 作为固体碳源与生物膜载体的反硝化系统中, 当硝酸盐氮质量浓度低于 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 反硝化速率会迅速下降^[20]。图 3 为不同初始硝酸盐质量浓度下, 以 SPCL6 为碳源的硝酸盐去除曲线。结果表明, 在 NO_3^- -N 质量浓度为 $15 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, NO_3^- -N 去除曲线的斜率相近, 即反硝化速率与进水硝酸盐质量浓度无关, 反硝化过程符合零级反应动力学; 而且当系统中硝氮质量浓度低于 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 反硝化速率显著降低。不同初始硝氮质量浓度下, 亚硝氮和氨氮随时间的变化如表 2 所示。可以看出, 反硝化的中间产物亚硝酸盐质量浓度的变化均是先升高后降低, 这与 Wang 等^[21]以 PCL 和可降解餐盒作为反硝化碳源时得出的结论一致。3 种初始硝氮质量浓度下以碳源加入量计的平均反硝化速率 (以 NO_3^- -N + NO_2^- -N 计, 下同) 为 $0.0193 \sim 0.0207 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 。PCL 作为固体碳源的反硝化速率在 $0.0046 \sim$

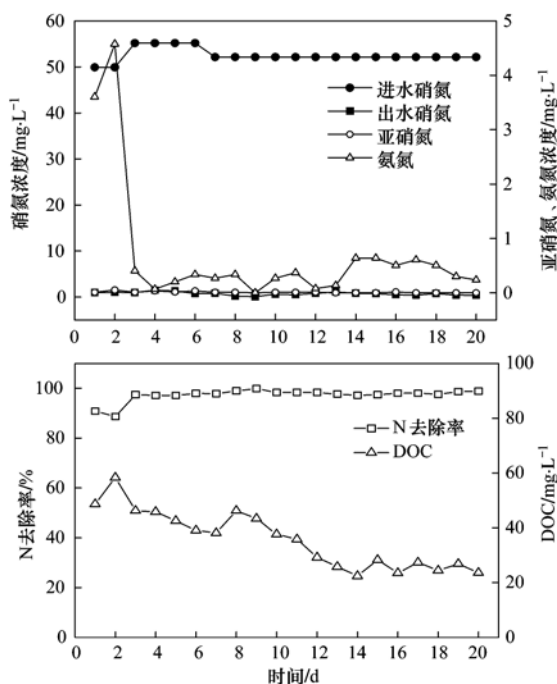


图2 SPCL6 挂膜阶段运行情况

Fig. 2 Performance of SPCL6 during the start-up period

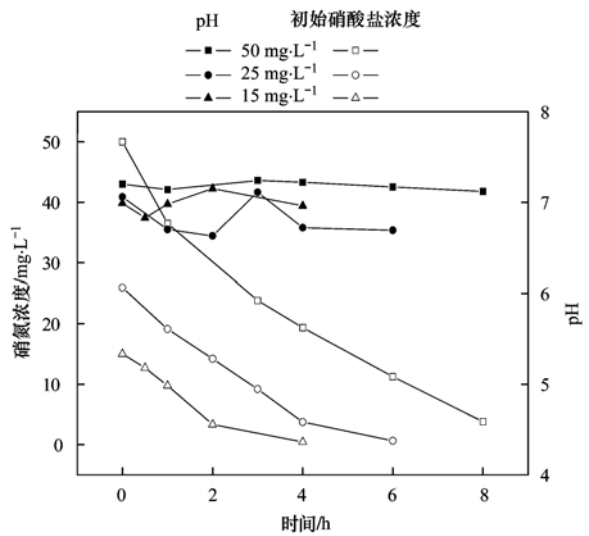


图3 不同硝氮质量浓度下的反硝化性能
Fig. 3 Performance of denitrification with different influent nitrate concentration

0.028 3 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 之间^[22], 而 PLA 作为反硝化碳源的反硝化速率为 0.002 6 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ ^[16].

3 种初始硝氮质量浓度下, pH 均有升有降(图 3), 表明在 SPCL6 在生物降解的过程中产生了有机酸, 中和了反硝化过程中产生的碱度. PCL 在降解过程中会释放一些低分子量的有机酸, 如己二酸^[23]. 整体上 pH 的变化幅度很小, 无需外加试剂中和反硝化时产生的碱度. 不同初始硝氮质量浓度下的反硝化过程均有一定的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 生成(表 2), 可能主要来自于 DNRA 途径.

表 2 不同初始硝氮质量浓度下 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 质量浓度变化/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 2 Change in $\text{NO}_2^- \text{-N}$ and $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ concentration with different influent nitrate concentration/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

时间/h	$\text{NO}_2^- \text{-N}$ 质量浓度			$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 质量浓度		
	50	25	15	50	25	15
0.5			0.610			0.333
1	1.152	0.245	1.212	0.042	0.328	0.200
2		0.414	1.554		0.124	0.266
3	1.386	0.551		0.146	0.230	
4	1.518	0.628	0.277	0.006	0.504	0.238
6	0.374	0.105		0.016	0.324	
8	0.046			0.313		

2.4 水力剪切的影响

通过改变恒温振荡器的转速来控制序批实验装置内 SPCL6 颗粒承受的水力剪切力大小, 得到不同转速下的反硝化效果, 如图 4 所示. 提高转速有利于提高系统的反硝化速率. 当转速从 70 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 提高至 140 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, SPCL6 颗粒的平均反硝化速率

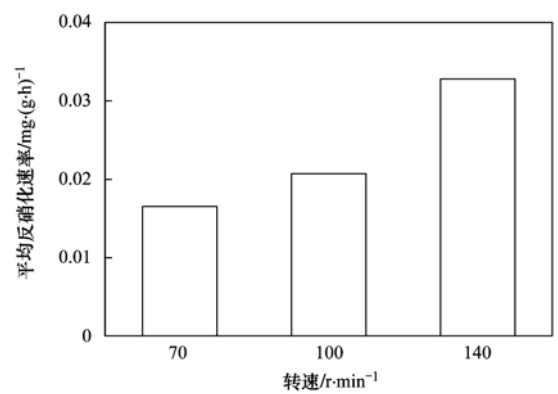


图4 剪切力的影响
Fig. 4 Effect of hydrodynamic shear force

(以 N 计) 从 0.016 5 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 提升至 0.032 8 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 提高了约 1 倍. 不同碳源表面的生物膜构造各有差异, 导致水力剪切力对反硝化速率的影响各不相同. 周海红^[20]在以 PCL 和 PBS(一种淀粉与聚烯烃材料相溶后形成的共聚物)作为反硝化碳源时发现当转速从 70 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 提升至 150 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 两者的反硝化速率分别降低了 87.81% 和 16.06%.

2.5 红外光谱结果

图 5 所示为未挂膜及在序批实验中持续换水运行 180 d 后的 SPCL6 颗粒的红外光谱结果. 3 400 ~ 3 200 cm^{-1} 之间的宽吸收峰代表了淀粉中 O—H 的伸缩振动, 3 000 ~ 2 800 cm^{-1} 和 1 453 ~ 1 350 cm^{-1} 之间的吸收峰分别代表了 C—H 的伸缩振动和弯曲振动, 1 750 ~ 1 640 cm^{-1} 之间的吸收峰代表了 C=O (有机酸、醛和酮) 的伸缩振动, 1 300 ~ 950 cm^{-1} 之间的吸收峰代表了 C—O 伸缩振动和 O—H (一级、二级、三级醇或酯类) 弯曲振动. SPCL6 经过微生物 180 d 利用后, 3 400 ~ 3 200 cm^{-1} 吸收峰变化不明显, 而 3 000 ~ 2 800 cm^{-1} 、1 750 ~ 1 640 cm^{-1} 、1 453 ~ 1 350 cm^{-1} 和 1 300 ~ 950 cm^{-1} 处的吸收峰均有明

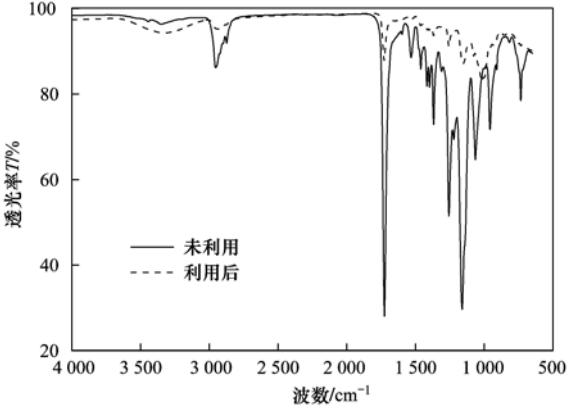


图5 SPCL6 红外光谱结果
Fig. 5 FTIR spectra of fresh and utilized SPCL6

显的降低,表明共混物体系中 C—H、C—O 和 O—H 的含量均有降低,证实了淀粉和 PCL 均已被微生物降解。

3 结论

(1) 淀粉/PCL 共混物(SPCL6)可作为反硝化固体碳源去除低 C/N 污水中的硝酸盐。挂膜 1 d 后, SPCL6 颗粒就有明显的脱氮效果,具有启动速度快的优点。

(2) SPCL6 在驯化阶段以及驯化完成后的反硝化阶段均有 NH_4^+ -N 检出,表明可能有 DNRA 反应发生,但是 NH_4^+ -N 质量浓度低于 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,表明 DNRA 不是硝酸盐的主要还原途径。

(3) 反硝化时 pH 的波动表明,淀粉/PCL 共混物在生物降解过程中会有有机酸的释放。对比 SPCL6 的浸出性能及反硝化启动过程中 DOC 变化,发现出水中 DOC 主要来源于共混物中淀粉和 PCL 在生物降解过程中所释放的小分子有机物,而不是淀粉本身的水解。

(4) 剪切力对反硝化速率有显著影响,转速从 $70 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 增加至 $140 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,反硝化速率从 $0.0165 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 提升至 $0.0328 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 。进水硝氮质量浓度在 $15 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时对反硝化速率基本无影响,以 SPCL6 为固体碳源的反硝化过程为零级反应。

(5) 红外光谱结果证实了利用过的 SPCL6 颗粒中淀粉和 PCL 组分的降解。

参考文献:

- [1] Boley A, Muller W R, Haider G. Biodegradable polymers as solid substrate and biofilm carrier for denitrification in recirculated aquaculture systems[J]. Aquacultural Engineering, 2000, **22**(1-2): 75-85.
- [2] Ovez B, Ozgen S, Yuksel M. Biological denitrification in drinking water using *Glycyrrhiza glabra* and *Arunda donax* as the carbon source[J]. Process Biochemistry, 2006, **41**(7): 1539-1544.
- [3] Robinson-Lora M A, Brennan R A. The use of crab-shell chitin for biological denitrification: Batch and column tests [J]. Bioresource Technology, 2009, **100**(2): 534-541.
- [4] Trois C, Pisano G, Oxarango L. Alternative solutions for the bio-denitrification of landfill leachates using pine bark and compost [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **178**(1-3): 1100-1105.
- [5] Aslan S, Türkman A. Combined biological removal of nitrate and pesticides using wheat straw as substrates [J]. Process Biochemistry, 2005, **40**(2): 935-943.
- [6] Boley A, Unger B, Müller W R, et al. Biological drinking water treatment for nitrate and pesticide (endosulfan) elimination[J]. Water Science and Technology: Water Supply, 2006, **6**(3): 123-127.
- [7] Chu L B, Wang J L. Nitrogen removal using biodegradable polymers as carbon source and biofilm carriers in a moving bed biofilm reactor[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, **170**(1): 220-225.
- [8] Chu L B, Wang J L. Comparison of polyurethane foam and biodegradable polymer as carriers in moving bed biofilm reactor for treating wastewater with a low C/N ratio[J]. Chemosphere, 2011, **83**(1): 63-68.
- [9] Hiraishi A, Khan S T. Application of polyhydroxyalkanoates for denitrification in water and wastewater treatment[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2003, **61**(2): 103-109.
- [10] Shen Z Q, Wang J L. Biological denitrification using cross-linked starch/PCL blends as solid carbon source and biofilm carrier[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(19): 8835-8838.
- [11] 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.
- [12] Bastioli C. Properties and applications of Mater-Bi starch-based materials[J]. Polymer Degradation and Stability, 1998, **59**(1-3): 263-272.
- [13] Di Franco C R, Cyrus V P, Busalmen J P, et al. Degradation of polycaprolactone/starch blends and composites with sisal fibre [J]. Polymer Degradation and Stability, 2004, **86**(1): 95-103.
- [14] Mani R, Bhattacharya M. Properties of injection moulded blends of starch and modified biodegradable polyesters [J]. European Polymer Journal, 2001, **37**(3): 515-526.
- [15] Avella M, Errico M E, Laurienzo P, et al. Preparation and characterisation of compatibilised polycaprolactone/starch composites[J]. Polymer, 2000, **41**(10): 3875-3881.
- [16] 范振兴, 王建龙. 利用聚乳酸作为反硝化固体碳源的研究 [J]. 环境科学, 2009, **30**(8): 2315-2319.
- [17] Honda Y, Osawa Z. Microbial denitrification of wastewater using biodegradable polycaprolactone [J]. Polymer Degradation and Stability, 2002, **76**(2): 321-327.
- [18] 王建龙. 生物固定化技术与水污染控制[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [19] Zhou H H, Zhao X, Wang J L. Nitrate removal from groundwater using biodegradable polymers as carbon source and biofilm support[J]. International Journal of Environment and Pollution, 2009, **38**(3): 339-348.
- [20] 周海红. 可生物降解聚合物作为反硝化碳源及生物膜载体脱氮研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [21] Wang X M, Wang J L. Removal of nitrate from groundwater by heterotrophic denitrification using the solid carbon source [J]. Science in China Series B: Chemistry, 2009, **52**(2): 236-240.
- [22] Zhou H H, Zhao X, Wang J L. Poly (ϵ -caprolactone) as substrate for water denitrification [J]. International Journal of Environment and Pollution, 2009, **38**(3): 349-359.
- [23] Benedict C V, Cook W J, Jarrett P, et al. Fungal degradation of polycaprolactones [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1983, **28**(1): 327-334.

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment	XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, <i>et al.</i> (1409)
Applications of Pollutants Released from Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model	SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (1418)
Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities	XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (1425)
Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity	 ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, <i>et al.</i> (1431)
Element Compositions and Source of PM _{2.5} Aerosols in Qingdao	LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, <i>et al.</i> (1438)
Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter	WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, <i>et al.</i> (1446)
Application of a Resuspension Test Chamber in PM _{2.5} Source Profile Analysis	DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1452)
Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou	WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (1457)
Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, <i>et al.</i> (1463)
Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors	WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, <i>et al.</i> (1471)
Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland	CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1476)
Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qingbingtan, Tomur Peak	ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, <i>et al.</i> (1484)
Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorus in Wudalianchi Lake, China	ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (1491)
Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake	LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (1497)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiwuli Stream in Lake Chaohu	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, <i>et al.</i> (1503)
Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years	GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, <i>et al.</i> (1511)
Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage	SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)
Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (1526)
3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process	LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, <i>et al.</i> (1532)
Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers	ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, <i>et al.</i> (1540)
Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid	GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)
Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of <i>Nostoc flagelliforme</i>	QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1556)
Inhibitory Effects of Liquor Cultured with <i>Hydrodictyon reticulatum</i> on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i>	FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, <i>et al.</i> (1564)
Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in <i>Potamogeton crispus</i> L. Microcosm of Haihe River	 CHI Jie, YANG Qing (1570)
Control and Removal of Microcystin Production of <i>Microcystis aeruginosa</i> by Irradiation of Electron Beam	LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)
Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)
Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis	LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, <i>et al.</i> (1587)
Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob	WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, <i>et al.</i> (1591)
Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland	LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, <i>et al.</i> (1597)
Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage	 SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)
Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source	SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, <i>et al.</i> (1609)
Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge	WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, <i>et al.</i> (1614)
Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge	ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, <i>et al.</i> (1621)
Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes	DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1625)
Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics	LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)
Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon	ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, <i>et al.</i> (1639)
Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis	 GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, <i>et al.</i> (1646)
Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment	CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, <i>et al.</i> (1652)
Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by <i>Xanthobacter flavus</i> DT8	JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (1657)
Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (1663)
Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse	ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, <i>et al.</i> (1670)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River	 LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1676)
Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1682)
Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City	CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1687)
Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period	WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1693)
Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone	DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, <i>et al.</i> (1700)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream	GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, <i>et al.</i> (1707)
Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (1718)
Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS	LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, <i>et al.</i> (1725)
Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene	LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, <i>et al.</i> (1731)
Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite	WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (1736)
LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method	PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (1744)
Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis	DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, <i>et al.</i> (1753)
Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor	REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (1760)
Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique	 QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《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5月15日 33卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 5 May 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

国内外公开发行人