

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第2期

Vol.34 No.2

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

16 届亚运会期间广州城区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对霾天气的影响	陶俊, 柴发合, 高健, 曹军骥, 刘随心, 张仁健 (409)
北京地区秋季雾霾天 PM _{2.5} 污染与气溶胶光学特征分析	赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 马志强, 董璠, 何迪 (416)
上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究	王倩, 陈长虹, 王红丽, 周敏, 楼晟荣, 乔利平, 黄成, 李莉, 苏雷燕, 牟莹莹, 陈宜然, 陈明华 (424)
杭州市大气超细颗粒物浓度谱季节性特征	谢小芳, 孙在, 付志民, 杨文俊, 林建忠 (434)
保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别	李杏茹, 杜熙强, 王英锋, 王跃思 (441)
春节期间西安城区碳气溶胶污染特征研究	周变红, 张承中, 王格慧 (448)
华东区域高山背景点 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 背景值及污染特征	苏彬彬, 刘心东, 陶俊 (455)
基于电子鼻土壤与地下水污染修复现场 TVOC 和恶臭的评估	田秀英, 蔡强, 刘锐, 张永明 (462)
积融雪控制下土壤大气间汞交换通量特征	张刚, 王宁, 艾建超, 张蕾, 杨净, 刘子琪 (468)
靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究	徐林波, 高勤峰, 董双林, 刘佳, 傅秀娟 (476)
正构烷烃及单体碳同位素记录的石臼湖生态环境演变研究	欧杰, 王延华, 杨浩, 胡建芳, 陈霞, 邹军, 谢云 (484)
干旱区城市昌吉降雪及积雪中 PGEs 含量分布及其影响因素	刘玉燕, 刘浩峰, 张兰 (494)
降尘收集方法对降尘效率的影响	张正偲, 董治宝 (499)
海河流域水生生态功能一级二级分区	孙然好, 汲玉河, 尚林源, 张海萍, 陈利顶 (509)
长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究	时志强, 张运林, 王明珠, 刘笑茵 (517)
内陆水体叶绿素反演模型普适性及其影响因素研究	黄昌春, 李云梅, 徐良将, 杨浩, 吕恒, 陈霞, 王延华 (525)
溶氧对富集培养的河口湿地表层沉积物氨氧化菌多样性及氨氧化速率的影响	邱昭政, 罗专溪, 赵艳玲, 颜昌宙 (532)
自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究	张华兵, 刘红玉, 李玉凤, 安静, 薛星宇, 侯明行 (540)
淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制	周亮, 徐建刚, 孙东琪, 倪天华 (547)
高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征	崔玉洁, 刘德富, 宋林旭, 陈玲, 肖尚斌, 向坤, 张涛 (555)
城市雨水径流水质演变过程监测与分析	董雯, 李怀恩, 李家科 (561)
复合人工湿地系统强化处理单元的运行特性与效果	任峰, 陆忆夏, 刘琴, 汤杨杨, 王世和, 高海鹰, 乔红杰, 王为进 (570)
给水管网中耐氯分枝杆菌的灭活特性及机制研究	郑琦, 陈超, 张晓健, 陆品品, 刘源源, 陈雨乔 (576)
1 株溶藻菌的部分生物学特性及溶鱼腥藻作用	李三华, 张奇亚 (583)
水生植物热解生物油中对肋骨藻抗氧化酶活性的影响	姚远, 李锋民, 李媛媛, 单时, 李杰, 王震宇 (589)
TiO ₂ 光催化联合技术降解苯酚机制及动力学	张轶, 黄若男, 王晓敏, 王齐, 丛燕青 (596)
皮革废水有机污染物生物降解特性研究	王勇, 李伟光, 杨力, 宿程远 (604)
链霉菌 FX645 对偶氮染料红 AR30 的降解机制研究	谢练武, 方继前, 郭亚平 (611)
一种负载型生物载体的制备及性能研究	杨基先, 曾红云, 周义, 邱珊, 马放, 王蕾, 肖大伟 (616)
基于污泥资源化利用的蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 培养研究	嵇雯雯, 夏会龙, 方治国, 刘惠君 (622)
温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响	陈汉龙, 严媛媛, 何群彪, 戴晓虎, 周琪 (629)
天然和水热合成针铁矿对有机物厌氧分解释放 CH ₄ 的影响	姚敦璠, 陈天虎, 王进, 周飞跃, 岳正波 (635)
蚀刻废液及其回收后生产的铜盐产品中 PCDD/Fs 含量水平及分布特征	青宪, 韩静磊, 温炎桑 (642)
基于特定场地污染概念模型的健康风险评估案例研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 夏天翔, 朱笑盈, 韩丹, 张丽娜 (647)
区域地下水污染风险评价方法研究	杨彦, 于云江, 王宗庆, 李定龙, 孙宏伟 (653)
地下水有机污染源识别技术体系研究与示范	王晓红, 魏加华, 成志能, 刘培斌, 纪轶群, 张干 (662)
祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究	朱凌宇, 潘剑君, 张威 (668)
黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应	骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 周宝库, 徐明岗, 张敬业, 夏平 (676)
根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响	张晶, 于玲玲, 辛木贞, 苏德纯 (685)
长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究	罗璐, 周萍, 童成立, 石辉, 吴金水, 黄铁平 (692)
外源 Cr(III) 在我国 22 种典型土壤中的老化特征及关键影响因子研究	郑顺安, 郑向群, 李晓辰, 刘书田, 姚秀荣 (698)
某林丹生产企业搬迁遗留场地土壤中六六六的残留特征	潘峰, 王利利, 赵浩, 尤奇中, 刘林 (705)
大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析	刘芳, 王书肖, 吴清茹, 林海 (712)
天津成人头发指甲中有机氟污染物的残留特征	姚丹, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 王艳萍, 刘国卿 (718)
沉积物中雌激素及壬基酚、辛基酚、双酚 A 的测定	吴唯, 史江红, 陈庆彩, 张晖, 刘晓薇 (724)
动物饲料中砷、铜和锌调查及分析	姚丽贤, 黄连喜, 蒋宗勇, 何兆桓, 周昌敏, 李国良 (732)
氟虫双酰胺在水稻和稻田中的残留动态研究	王点点, 宋宁慧, 吴文铸, 由宗政, 何健, 石利利 (740)
2 株降解菲的植物内生细菌筛选及其降解特性	倪雪, 刘娟, 高彦征, 朱雪竹, 孙凯 (746)
嗜盐拟香味菌 Y6 降解硝基苯的特性研究	厉阗, 钱坤, 肖伟, 王进军, 邓新平 (753)
固定化条件对苯系物细胞传感器检测效果的影响	唐阔, 马安周, 于清, 邓雪梅, 吕迪, 庄国强 (760)
16S rDNA 克隆文库分析高含盐生物脱硫系统细菌多样性	刘卫国, 梁存珍, 杨金生, 王桂萍, 刘苗苗 (767)
氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响	刘涛, 李冬, 曾辉平, 畅晓燕, 张杰 (773)
筒青霉 (<i>Penicillium simplicissimum</i>) 对木质纤维素的降解及相关酶活性特征	沈莹, 胡天觉, 曾光明, 黄丹莲, 尹璐, 刘杨, 吴娟娟, 刘晖 (781)
石油污染土壤微生物群落结构与分布特性研究	杨萌青, 李立明, 李川, 李广贺 (789)
土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对相关参数的影响	王桂珍, 李兆君, 张树清, 马晓彤, 梁永超 (795)
生活垃圾填埋过程含水率变化研究	李睿, 刘建国, 薛玉伟, 张媛媛, 岳东北, 聂永丰 (804)
动物消化机制用于木质纤维素的厌氧消化	吴昊, 张盼月, 郭建斌, 吴永杰 (810)
《环境科学》征订启事 (447)	《环境科学》征稿简则 (493)
信息 (508, 588, 610, 731)	专辑征稿通知 (788)

一种负载型生物载体的制备及性能研究

杨基先^{1,2}, 曾红云^{1,2}, 周义^{1,2}, 邱珊^{1,2,3*}, 马放^{1,2,3}, 王蕾¹, 肖大伟⁴

(1. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090; 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; 3. 哈尔滨工业大学宜兴环保研究院, 宜兴 214200; 4. 中国联合工程公司, 杭州 310022)

摘要: 为强化载体表面生物膜的活性, 研究以水性聚氨酯 (waterborne polyurethane) 为介质制备负载电气石的聚氨基酯 (tourmaline on polyurethane, TPU) 载体. 用扫描电镜 (SEM) 和持水倍率表征载体的物理性能, 并且考察 TPU 载体对挂膜量及硝化能力的影响. 结果表明, 水溶性聚氨酯浓度能够影响 TPU 载体对电气石的负载量, 导入电气石可以优化 TPU 载体上极性基团的数量以及环境 pH 值, 亚硝酸菌和硝酸菌在 TPU 载体上的不可逆附着量分别提高了 74.82% 和 71.89%. 与未投载体相比, NH_4^+-N 和 NO_2^--N 的去除率分别提高了 8.12% 和 9.08%, 表明优化的 TPU 载体能促进硝化作用.

关键词: 聚氨酯泡沫; 电气石; 水性聚氨酯; 硝化菌; 生物膜; 载体

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)02-0616-06

Study on Preparation and Performance of a Biological Carrier with Tourmaline

YANG Ji-xian^{1,2}, ZENG Hong-yun^{1,2}, ZHOU Yi^{1,2}, QIU Shan^{1,2,3}, MA Fang^{1,2,3}, WANG Lei¹, XIAO Da-wei⁴

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. Harbin Institute of Technology Yixing Academy of Environmental Protection, Yixing 214200, China; 4. China United Engineering Corporation, Hangzhou 310022, China)

Abstract: In order to strengthen the activity of biofilm on the carrier surface, the tourmaline on polyurethane (TPU) carrier was prepared using waterborne polyurethane as medium. The physical properties of TPU carrier were characterized by scanning electron microscope (SEM) and water absorbency, and its effect on biofilm biomass and nitrifying ability was studied. The results showed that the tourmaline loading amount of TPU carrier can be affected by waterborne polyurethane. Tourmaline can optimize the number of polar groups of the TPU carrier and the pH of the nitrification condition. The amount of nitrobacteria and nitrate bacteria irreversibly adsorbed on the TPU carrier was increased by 74.82% and 71.89%, respectively. Correspondingly, the removing rate of NH_4^+-N and NO_2^--N has risen by 8.12% and 9.08%, respectively, compared to the control without carrier. The TPU carrier was indicated to promote the nitrification.

Key words: polyurethane foams; tourmaline; waterborne polyurethane; nitrifier; biofilm; carrier

目前载体研究主要针对载体的阳离子化^[1]、极性基团^[2]、亲水性^[3~5]、孔隙率^[6]等进行改性, 从而增强微生物的处理能力, 但是对载体上纯菌生长情况则缺乏报道. 聚氨酯 (polyurethane, PU) 载体因孔隙结构和力学性能被应用到废水处理^[7~9]和医学领域^[10~12].

李彦峰等^[13]在聚氨酯中加入纳米 SiO_2 改善泡沫载体对微生物的亲合性、传质性能和理化稳定性. 由于电气石能自发调节水环境的 pH 值, 引起液态水团簇改变, 产生多种生物学效应^[14,15], 蒋侃等^[16]运用聚氨酯吸附电气石处理石化废水, 废水的 COD 和氨氮去除率提高 8%. 然而采用纳米材料制成改性生物载体^[17,18], 价格昂贵且不易获得, 在推广上具有一定的局限性, 因此研发价廉质优的功能性生物膜载体, 对于提高载体的挂膜速度和反应器内单位体积生物负荷都有重要的意义.

采用生物膜法进行生物脱氮, 载体上生物膜的生长直接影响脱氮效果^[19~21]. 因此研究以普通聚氨酯为基质材料, 优化水性聚氨酯和电气石的投加比例制得一种负载电气石的聚氨基酯 (tourmaline on polyurethane, TPU) 载体. 为了提高载体的生物亲和性和生物量, 促进硝化细菌的生长和硝化能力, 实验对普通聚氨酯载体和 TPU 载体的物理性能以及硝化菌在载体上的生长情况进行对比, 评价 TPU 载体对硝化菌的影响, 以期 TPU 载体的应用提供理论依据与实践指导.

收稿日期: 2012-04-20; 修订日期: 2012-05-28

基金项目: 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室开放基金项目 (QA201206); 国家自然科学基金项目 (51178139)

作者简介: 杨基先 (1965~), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为生物工程技术在污水及给水处理中的应用, E-mail: yanghit27@163.com

* 通讯联系人, E-mail: qiushan_hit@163.com

1 材料与方法

1.1 材料

供试硝化菌:由哈尔滨工业大学水资源与水环境国家重点实验室提供的亚硝酸菌 ZCY-4 和硝酸菌 XYC-9.

亚硝酸菌培养基: $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ $0.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, NaH_2PO_4 $0.25 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, K_2HPO_4 $0.75 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, Na_2CO_3 $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $0.03 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, MnSO_4 $0.01 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 糖蜜 $0.05 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$, FeSO_4 $5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 阿拉伯糖 $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 调节 $\text{pH}=7.2$.

硝酸菌培养基: NaNO_2 $0.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, NaH_2PO_4 $0.25 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, Na_2CO_3 $2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, MgSO_4 $0.03 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, MnSO_4 $0.01 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 糖蜜 $0.05 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$, FeSO_4 $5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 阿拉伯糖 $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 调节 $\text{pH}=7.2$.

供试电气石:内蒙古赤峰电气石,粒度为 $0.4 \mu\text{m}$.

1.2 测定方法

1.2.1 负载电气石载体的制作

以普通聚氨酯载体为基质材料,配制一定浓度的水性聚氨酯,将电气石、水性聚氨酯、聚氨酯泡沫混合,并将更细的电气石粉末喷洒到载体上,烘干;反复清洗、烘干后待用.

1.2.2 PU 载胶量的测定

$$\omega_1 = (W_2 - W_1)/W_1$$

式中, ω_1 为 PU 载胶量, g ; W_1 为 PU 载体干重, g ; W_2 为水性聚氨酯与 PU 载体干重, g . 设立平行样取平均值.

1.2.3 TPU 负载量的测定

$$\omega_2 = (W_4 - W_3)/W_3$$

式中, ω_2 为 TPU 载胶量, g ; W_3 为 PU 载体干重, g ; W_4 为 TPU 载体干重, g . 设立平行样取平均值.

1.2.4 TPU 持水倍率测定^[22]

持水倍率表征了载体的生物亲和性,持水倍率的计算公式为:

$$\eta = (W_6 - W_5)/W_5$$

式中, W_5 为 TPU 载体浸泡前干重, g ; W_6 为 TPU 载体在水中浸泡 1 d 后过滤称重的重量, g .

1.2.5 硝化菌挂膜量的测定

挂膜量反映了载体中微生物的生物量.将制备好的 TPU 载体称重 W_7 ,置于亚硝酸菌和硝酸菌液体培养基中,投加一定量亚硝酸菌和硝酸菌,于温度 30°C ,转速 $140 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下培养.相同条件下以投加

PU 载体作为对照.培养一定时间后取出称重 W_8 ,挂膜量 $Q_w = W_8 - W_7$.

1.2.6 硝化菌硝化能力测定

将 PU 和 TPU 分别制成 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ 的正方体小块,置于装有培养基的锥形瓶中(容积为 3 L),接菌量为 10%,设置未放置载体的培养瓶为对照,每组设两个平行样.于温度 30°C ,转速 $140 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下摇床培养.每 1 h 测定 NH_4^+-N 、 NO_2^--N .

2 结果与讨论

2.1 TPU 载体影响因素的研究

2.1.1 水性聚氨酯胶浓度对 PU 载胶量的影响

为了研究水性聚氨酯浓度与 PU 载胶量的关系,实验设置不同浓度梯度的水性聚氨酯与 PU 载体结合,通过考察平均每克 PU 载体的载胶量确定水性聚氨酯浓度,结果见图 1.

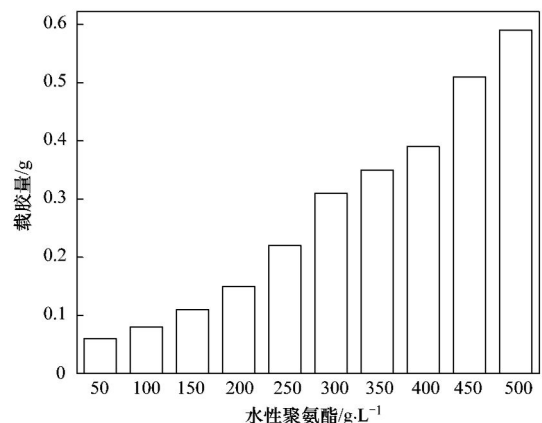


图1 不同水性聚氨酯胶浓度对 PU 载胶量的影响

Fig. 1 Effect of waterborne polyurethane at various concentrations on the adhesive bonding amount of PU

由图 1 可知,水溶性聚氨酯浓度为 $50 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时平均每克 PU 载体的载胶量为 0.06 g ,继续增加水性聚氨酯浓度至 300 g 时,平均每克 PU 载体的载胶量增加到 0.31 g .分析原因是水性聚氨酯浓度越高,酯氨酯键、脲键越多,粘接性越好^[23];水性聚氨酯的羧基($-\text{COOH}$)、羟基($-\text{OH}$)等极性基团通过内聚力和粘附力粘接到 PU 载体上^[24],耐水解作用和水力剪切的冲刷,反之,不易与 PU 粘接.当水性聚氨酯浓度 $\geq 400 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,在制作过程中发现载体的孔隙量和孔径明显减小,PU 载体适于微生物生长的优势不再明显,故后续研究水性聚氨酯浓度为 $300 \sim 400 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间.

2.1.2 电气石的投加量对 TPU 负载量的影响

为了考察电气石投加量与负载量的关系,实验

投加不同量的电气石与水性聚氨酯混合. 实验中发现电气石的加入会降低水性聚氨酯的黏性, 所以在上述实验的基础上将水性聚氨酯的浓度范围扩大到 $300 \sim 500 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 从而确定水性聚氨酯与电气石的最佳配比, 结果见图 2.

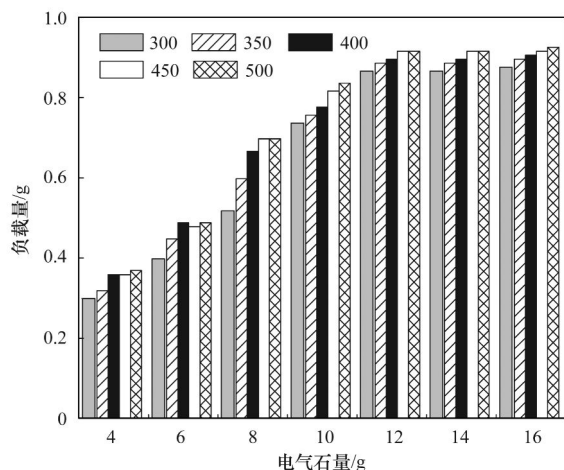


图 2 电气石量对 TPU 负载量的影响

Fig. 2 Effect of tourmaline dosage on the TPU loading amount

由图 2 可知, 当电气石投加量相同时, 随着水性聚氨酯浓度的增加, 平均每克 TPU 载体上的负载量随之增加. 分析原因是随着水性聚氨酯胶量的增加,

混合液的黏性增加, TPU 载体上负载量也随之增加. 当电气石投加量 $< 12 \text{ g}$ 时, 随着电气石投加量的增加, 平均每克 TPU 载体上的负载量随之快速提高, 当电气石投加量超过 12 g 时, 平均每克 TPU 载体上的负载量增加缓慢. 主要原因是电气石表面的羟基 ($-\text{OH}$) 可与水性聚氨酯中异氰酸酯基团 ($-\text{NCO}$) 作用, 形成氨酯基团 ($-\text{NHCOO}$), 电气石与水性聚氨酯结合并利用水性聚氨酯的黏接性被负载到 TPU 载体上, 电气石越多, 形成的氨酯基团越多, 被负载到 TPU 载体上的电气石就越多. 除此以外, 电气石大颗粒表面吸附着小颗粒, 随着电气石投加量增加, 被负载到 TPU 载体上的小颗粒电气石也随之增加. 然而随着电气石的过量投加, 水性聚氨酯的黏性降低, 所以电气石投加量增加而被固定的量并没有明显增加. 所以二者的最佳配比为: 浓度为 $400 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 100 mL 水溶性聚氨酯中投加电气石 12 g .

2.2 TPU 载体的特性

2.2.1 TPU 载体表面形态

普通聚氨酯泡沫 (PU) 载体比表面积大、孔径分布合理, 可强化扩散和传质过程. 以 PU 载体为基质材料, 将电气石负载到聚氨酯载体上制备负载电气石的聚氨酯 (TPU) 载体, 表面形态见图 3.

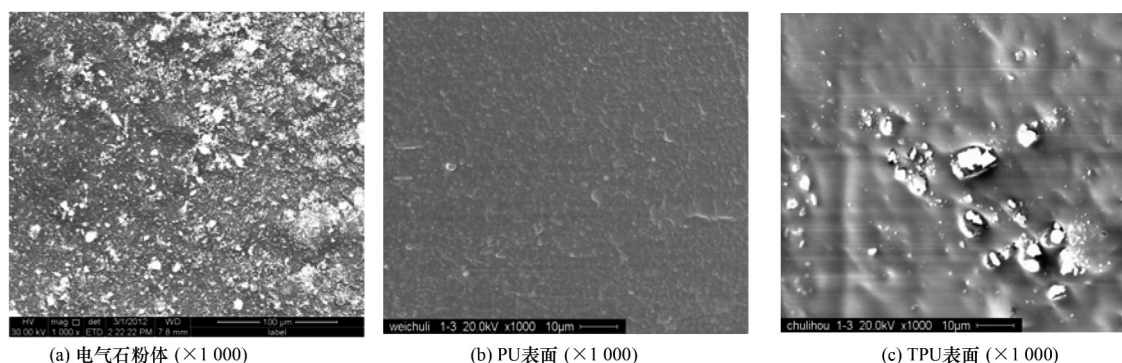


图 3 电气石和载体的 SEM 图

Fig. 3 Scanning electron microscope (SEM) photograph of tourmaline and carriers

由图 3 可知, TPU 载体表面比 PU 载体粗糙. 原因是电气石表面极不规则, 负载在 TPU 载体表面后就形成凹凸不一的结构, 而且水溶性聚氨酯和电气石接触面之间有微孔形成, 从而增加了载体表面的粗糙度. 粗糙的载体表面有利于增加微生物与载体的有效接触面积, 促进微生物的附着生长; 与此同时, 微孔的形成可降低水力剪切和冲刷对微孔微生物的伤害, 有利于营养物质、氧气、代谢废物的传质过程.

2.2.2 TPU 的亲水性

载体表面的亲水性与微生物的生长密切相关. 为了考察 TPU 载体的亲水性, 实验将载体投到蒸馏水中一定时间后测定载体湿重, 可用持水倍率来表征载体的亲水性, PU 载体和 TPU 载体的持水倍率分别为 28.2 和 39.6.

TPU 载体比 PU 载体的持水倍率提高 11.4, 主要是因为 TPU 表面是由水性聚氨酯和电气石组成, 表面的羟基能与水通过氢键的缔合作用结合, 增加 TPU 载体的亲水性. 并且电气石具有自发电极性, 可在几十 μm 的范围产生 $10^7 \sim$

$10^4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 的电场^[25],使 H_2O 电解为 H^+ 和 OH^- , H^+ 可与 TPU 载体表面的羟基形成缔合作用,使更多的水结合在 TPU 载体表面,增加 TPU 载体的持水倍率。

2.2.3 TPU 载体对培养基 pH 值的影响

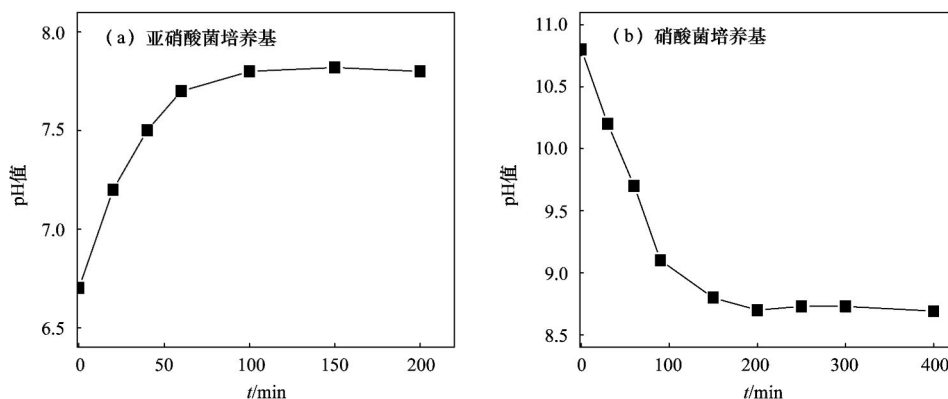


图4 TPU 载体对培养基 pH 的影响

Fig. 4 Effect of TPU carrier on the pH of medium

由图4(a)可知,在刚开始的60 min内,pH值迅速上升到7.7.原因是TPU载体上负载的电气石的自发电极性、表面羟基作用共同使亚硝酸菌培养基pH值上升.如图4(b),在刚开始的200 min内,pH值下降到8.6,原因是TPU载体上的电气石在碱性溶液中主要利用其自发电极性使pH值下降.当pH值变化到一定程度后,继续延长时间pH值不再改变,原因是TPU载体上负载的电气石已经全部用于发挥其调节功能,无多余的电气石.可见TPU载体能调节培养基的pH值.

2.3 TPU 载体对硝化菌挂膜量的影响

生物膜的形成分为可逆性附着和不可逆性附着两个过程,前者发生在载体与微生物接触的前半小时,半小时后微生物进行不可逆附着^[26].为了研究TPU载体对硝化菌挂膜量的影响,分别测定不同阶段的挂膜量,结果见表1.

表1 TPU 载体对硝化菌挂膜量的影响/ $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$

Table 1 Effect of the TPU carrier on the biofilm weight of the nitrifiers/ $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$

项目	亚硝酸菌		硝酸菌	
	PU	TPU	PU	TPU
可逆附着量	0.016	0.017	0.013	0.013
不可逆附着量	2.281	9.055	3.351	11.920

由表1可知,在可逆性附着阶段,硝化菌在PU和TPU载体上的附着量没有明显差异.原因是亚硝酸菌和硝酸菌接入培养基,菌株进行适应性代谢活动,产生的酸性代谢物不足以影响环境的酸碱性,

为了研究新制备的TPU载体能否调节培养基的pH值,实验将6块 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ 的TPU载体放入各盛有100 mL新配制的培养基的三角瓶中,测定培养基中pH值的变化考察TPU载体对培养基pH值的调节作用,结果见图4.

TPU载体未能发挥正常调节功能.

在不可逆附着阶段,TPU载体对亚硝酸菌和硝酸菌的附着表现出明显的优势,附着量分别提高了74.82%和71.89%.主要原因是TPU载体除了具有PU载体的多孔结构外,表面的微孔率也增加,微孔结构为硝化菌提供了直接的保护屏障,减少了水力剪切力的冲刷,提高了载体上不可逆附着的生物量^[27].除此以外,硝化菌适应了新的生长环境并能够产生酸性代谢产物,但是酸性代谢产物不能被利用而积累下来,抑制了硝化菌在PU载体上的生长及挂膜,然而TPU载体上的成分能自动调节酸性环境为弱碱性,促进了硝化菌在适宜的弱碱性环境中大量繁殖,挂膜量明显增加.

硝酸菌在TPU载体上挂膜量比亚硝酸菌多,这与所用的菌本身有关.

2.4 TPU 载体对硝化菌硝化能力的影响

将亚硝酸菌按10%接菌量分别接种到液体培养基中,II-ZCY-4放置TPU载体而I-ZCY-4组放置PU载体培养,ZCY-4组为对照组未放置载体,载体等量且尺寸为 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$,比较PU和TPU载体对亚硝酸菌氨氮去除的影响,结果见图5.相同条件下,将硝酸菌接种到液体培养基中,II-XYC-9组放置TPU载体而I-XYC-9组放置PU载体培养,XYC-9组为对照组未放置载体,比较PU和TPU载体对硝酸菌亚硝氮去除的影响,结果见图6.

由图5可知,亚硝化菌ZCY-4对氨氮的去除率

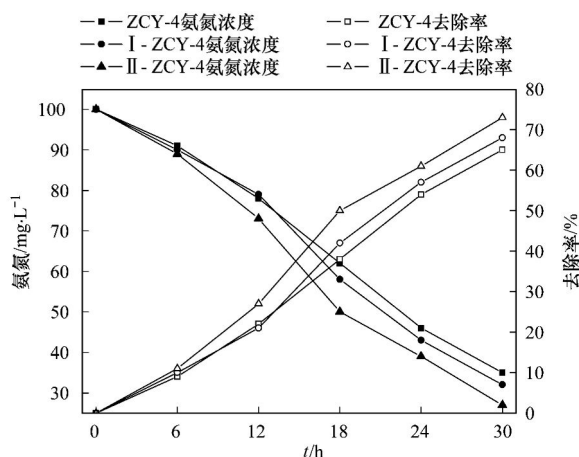


图5 TPU载体对氨氮去除的影响

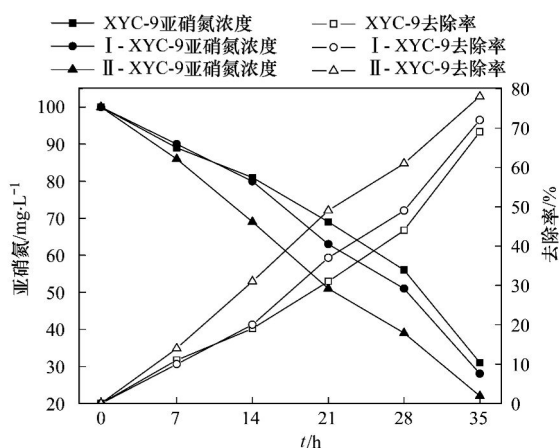
Fig. 5 Effect of the TPU carrier on the removal rate of NH_4^+-N 

图6 TPU载体对亚硝氮去除的影响

Fig. 6 Effect of the TPU carrier on the removal rate of NO_2^--N

为 65.13%, 放入 TPU 载体后, 去除率升高为 73.25%。原因是 ZCY-4 未放置任何载体, 氨氮主要依靠游离亚硝酸菌的氨氧化作用去除, ZCY-4 对氨氮的去除率最低; I-ZCY-4 组中放置 PU 载体, 游离亚硝化菌、载体上附着的亚硝酸菌共同发挥氨氧化作用去除氨氮; II-ZCY-4 组中放有 TPU 载体, 除了游离亚硝化菌、吸附在载体表面的亚硝酸菌共同作用去除氨氮, 溶液中 pH 值也对氨氮的去除有影响, 当有酸性代谢产物积累时, TPU 表面电气石的自发电极性能自动调节溶液的 pH 值为弱碱性, 而亚硝酸菌生长的最适 pH 值为 7.2 ~ 8.5, 有利于亚硝酸菌对氨氮的去除, 因而 II-ZCY-4 组对氨氮的去除率最高。同理如图 6, 放置 TPU 载体后, 硝酸菌对亚硝酸的去除率升高。由图 5 和图 6 可知, 培养初始为硝化菌的适应阶段, 因而对照组与放置 PU 载体的实验组去除率无明显差异。随着时间的延长, 放置

TPU 载体的 II-ZCY-4 组和 II-XYZ-9 组对氨氮和亚硝氮去除率比对照组分别提高 8.12% 和 9.08%。这是因为 TPU 表面的自动调节作用使环境酸碱性改变, 弱化由环境 pH 值改变而引起的酶活抑制作用, 硝化菌在 TPU 载体上能进行正常的代谢活动去除氨氮和亚硝氮。所以亚硝酸菌 ZCY-4 对氨氮的去除率: II-ZCY-4 > I-ZCY-4 > ZCY-4, 硝酸菌 XYZ-9 对亚硝氮的去除率: II-XYZ-9 > I-XYZ-9 > XYZ-9。

3 结论

(1) 制作 TPU 载体的最佳配比: 浓度为 400 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 100 mL 水溶性聚氨酯中投加电石气 12 g。

(2) 导入电气石, TPU 载体孔隙结构和表面粗糙性都发生了改变, 持水倍率提高 40.42%。

(3) 与 PU 载体相比, 在可逆性附着阶段 TPU 载体上硝化菌附着量无明显差异; 在不可逆附着阶段虽有酸性代谢物产生, 但硝化菌在 TPU 载体上的附着量分别提高 74.82% 和 71.89%。

(4) 亚硝酸菌 ZCY-4 和硝酸菌 XYZ-9 分别无载体、有 PU 载体、有 TPU 载体环境中转化氨氮, 有 TPU 载体存在时两株菌的硝化活性最高, 与未投加载体相比, 加入 TPU 载体使氨氮和亚硝氮去除率分别提高 8.12% 和 9.08%。

参考文献:

- [1] 赵薇, 康勇, 赵春景. 水处理用纤维素载体的降解及生物膜附着性能[J]. 环境科学学报, 2009, 29(2): 259-266.
- [2] 张旭, 李媛, 柏丽梅, 等. 废水处理用聚乙烯生物填料表面改性及表征研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(5): 961-966.
- [3] 陈志强, 温沁雪. 一种蜂窝网管生物载体[P]. 中国专利, CN101746881A, 2010-06-23.
- [4] 梅荣武, 韦彦斐, 陆建海, 等. 一种多孔亲水性脱氮生物载体的制备方法及其用途[P]. 中国专利, CN102174253A, 2011-09-07.
- [5] 毛凡, 马一平. 新型挂膜纤维材料的研究[J]. 合成纤维, 2007, 36(2): 33-35, 37.
- [6] 刘娜. 某生活小区污水处理工程设计[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版), 2009, 22(1): 75-79.
- [7] Jun B H, Miyana K, Tanji Y, et al. Removal of nitrogenous and carbonaceous substances by a porous carrier-membrane hybrid process for wastewater treatment [J]. Biochemical Engineering Journal, 2003, 14(1): 37-44.
- [8] Tsekova K, Ilieva S. Copper removal from aqueous solution using aspergillus niger mycelia in free and polyurethane-bound form [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2001, 55(5): 636-637.
- [9] Manohar S, Kim C K, Karegoudar T B. Enhanced degradation of naphthalene by immobilization of *Pseudomonas* sp. strain NGK1

- in polyurethane foam [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2001, **55**(3): 311-316.
- [10] Courtney T, Sacks M S, Stankus J, *et al.* Design and analysis of tissue engineering scaffolds that mimic soft tissue mechanical anisotropy[J]. *Biomaterial*, 2006, **27**(19): 3631-3638.
- [11] Kavlock K D, Pechar T W, Hollinger J O, *et al.* Synthesis and characterization of segmented poly (esterurethane urea) elastomers for bone tissue engineering[J]. *Acta Biomaterialia*, 2007, **3**(4): 475-484.
- [12] Williamson M R, Black R, Kielty C. PCL-PU composite vascular scaffold production for vascular tissue engineering: attachment, proliferation and bioactivity of human vascular endothelial cells [J]. *Biomaterials*, 2006, **27**(19): 3608-3616.
- [13] 李彦锋, 马鹏程, 周成林. 改性纳米 SiO_x 复合聚氨酯泡沫及其指标方法和应用[P]. 中国专利, CN1631976A. 2005-06-29.
- [14] 祝爱侠, 刘海英, 谢中国, 等. 不同因素对超细电气石调控海水 pH 值的影响[J]. *非金属矿*, 2011, **34**(4): 50-52.
- [15] 夏枚生. 电气石在循环水养殖水处理系统中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005. 41-91.
- [16] 蒋侃, 马放, 孙铁珩, 等. 电气石对好氧反硝化菌株反硝化特性的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2007, **35**(8): 1066-1069.
- [17] 范闻. 单分散壳聚糖纳米粒子的制备及其载体应用的研究[D]. 武汉: 湖北大学, 2011. 29-58.
- [18] 尹艳丽, 王爱玲, 曹健, 等. 纳米载体固定化酶的研究[J]. *现代化工*, 2007, **27**(9): 67-70.
- [19] Apilnez I, Gutiérrez A, Díaz M, *et al.* Effect of surface materials on initial biofilm development [J]. *Bioresource Technology*, 1998, **66**(3): 225-230.
- [20] 韩雅琼, 张卫江, 徐姣. 微生物烟气脱硫的生物膜系统动力学模型研究[J]. *化学工程*, 2010, **38**(11): 82-85.
- [21] Alpkvist E, Picioreanu C, Van Loosdrecht C M, *et al.* Three-dimensional biofilm model with individual cells and continuum EPS matrix [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2006, **94**(5): 961-979.
- [22] 李彦锋, 赵光辉, 等. 改性载体固定化微生物处理高氨氮废水的研究[J]. *安徽农业科学*, 2008, **36**(7): 2877-2879, 2890.
- [23] 李军, 杨燕. 新型水性聚氨酯皮革黏合剂的制备及应用[J]. *中国皮革*, 2012, **41**(3): 37-39, 45.
- [24] 鲍战伟, 李龙, 贾桂芹, 等. 水性聚氨酯胶复合非织造布/软木纸材料的性能研究[J]. *纺织科技进展*, 2007, (3): 25-26.
- [25] 魏存弟, 孙彦彬, 杨殿范, 等. 电气石活化水效应的应用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2010, **40**(6): 1450-1455.
- [26] 李杰. 新型生物载体的制备、表征及其在废水生物处理中的应用基础研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008. 66-78.
- [27] 吴小付, 李磊, 罗汉金, 等. 亲水性多孔载体在流化床中的生物膜形成过程分析[J]. *环境工程学报*, 2008, **2**(6): 727-732.

CONTENTS

Characterization of Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Hazy Weather During 16 th Asian Games in Guangzhou	TAO Jun, CHAI Fa-he, GAO Jian, <i>et al.</i> (409)
PM _{2.5} Pollution and Aerosol Optical Properties in Fog and Haze Days During Autumn and Winter in Beijing Area	ZHAO Xiu-juan, PU Wei-wei, MENG Wei, <i>et al.</i> (416)
Forming Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources Apportionment of VOCs in Autumn of Shanghai, China	WANG Qian, CHEN Chang-hong, WANG Hong-li, <i>et al.</i> (424)
Study on Number Concentration Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles in Hangzhou	XIE Xiao-fang, SUN Zai, FU Zhi-min, <i>et al.</i> (434)
Pollution Characteristics and Source Identification of Atmospheric Particulate Matters <i>n</i> -Alkanes in Baoding City	LI Xing-ru, DU Xi-qiang, WANG Ying-feng, <i>et al.</i> (441)
Study on Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in Xi'an City During the Spring Festival	ZHOU Bian-hong, ZHANG Cheng-zhong, WANG Ge-hui (448)
Characteristics of PM ₁₀ and PM _{2.5} Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin, LIU Xin-dong, TAO Jun (455)
Assessment of TVOC and Odor in the Remediation Site of Contaminated Soil and Groundwater Using Electronic Nose	TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (462)
Characteristics of Mercury Exchange Flux Between Soil and Atmosphere Under the Snow Retention and Snow Melting Control	ZHANG Gang, WANG Ning, AI Jian-chao, <i>et al.</i> (468)
Study on Heavy Metal Contaminations and the Sources of Pb Pollution in Jinghai Bay Using the Stable Isotope Technique	XU Lin-bo, GAO Qin-feng, DONG Shuang-lin, <i>et al.</i> (476)
Eco-environmental Evolution Inferred from <i>n</i> -Alkanes and $\delta^{13}\text{C}$ Records in the Sediments of Shijiu Lake	OU Jie, WANG Yan-hua, YANG Hao, <i>et al.</i> (484)
Distribution of PGEs Contents and Its Factors in Snowfall and Snow Cover over the Arid Region in Changji City	LIU Yu-yan, LIU Hao-feng, ZHANG Lan (494)
Effect of Dust Deposition Collection Methods on Collection Efficiency	ZHANG Zheng-cai, DONG Zhi-bao (499)
Regionalization of the Freshwater Eco-regions in the Haihe River Basin of China	SUN Ran-hao, JI Yu-he, SHANG Lin-yuan, <i>et al.</i> (509)
Characteristics of Diffuse Attenuation Coefficient of Underwater Irradiance in the Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	SHI Zhi-qiang, ZHANG Yun-lin, WANG Ming-zhu, <i>et al.</i> (517)
Study on Influencing Factors and Universality of Chlorophyll- <i>a</i> Retrieval Model in Inland Water Body	HUANG Chang-chun, LI Yun-mei, XU Liang-jiang, <i>et al.</i> (525)
Effect of Dissolved Oxygen on Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Enrichment Culture from Estuarine Wetland Surface Sediments and Ammonia-oxidizing Rate	QIU Zhao-zheng, LUO Zhuan-xi, ZHAO Yan-ling, <i>et al.</i> (532)
Spatial Variation of Soil Moisture/Salinity and the Relationship with Vegetation Under Natural Conditions in Yancheng Coastal Wetland	ZHANG Hua-bing, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (540)
Spatial Heterogeneity and Classified Control of Agricultural Non-Point Source Pollution in Huaihe River Basin	ZHOU Liang, XU Jian-gang, SUN Dong-qi, <i>et al.</i> (547)
Phosphorus Output Characteristics Under Different Rainfall-Runoffs in Gaolan River	CUI Yu-jie, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (555)
Monitoring and Analysis on Evolution Process of Rainfall Runoff Water Quality in Urban Area	DONG Wen, LI Huai-en, LI Jia-ke (561)
Characteristics and Contribution of the Strengthening Units of Composite Constructed Wetland for Treating Urban Sewage	REN Feng, LU Yi-xia, LIU Qin, <i>et al.</i> (570)
Inactivation of <i>Mycobacteria mucogenicum</i> in Drinking Water: Chlorine Resistance and Mechanism Analysis	ZHENG Qi, CHEN Chao, ZHANG Xiao-jian, <i>et al.</i> (576)
Partial Biological Characteristics and Algicidal Activity of an Algicidal Bacterium	LI San-hua, ZHANG Qi-ya (583)
Effects of Macrophytes Pyrolysis Bio-oil on <i>Skeletonema costatum</i> Antioxidant Enzyme Activities	YAO Yuan, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (589)
Mechanism and Kinetics of Phenol Degradation by TiO ₂ Photocatalytic Combined Technologies	ZHANG Yi, HUANG Ruo-nan, WANG Xiao-min, <i>et al.</i> (596)
Biodegradation Characteristics of Organic Pollutants Contained in Tannery Wastewater	WANG Yong, LI Wei-guang, YANG Li, <i>et al.</i> (604)
Microbial Degradation Mechanism of Disperse Azo Dye Red 30 by <i>Streptomyces</i> sp. FX645	XIE Lian-wu, FANG Ji-qian, GUO Ya-ping (611)
Study on Preparation and Performance of a Biological Carrier with Tourmaline	YANG Ji-xian, ZENG Hong-yun, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (616)
Study on the <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivation Technology Based on the Excess Sludge Utilization	JI Wen-wen, XIA Hui-long, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (622)
Effects of Mild Thermal Pretreatment on Anaerobic Digestibility of Sludge with Low Organic Content	CHEN Han-long, YAN Yuan-yuan, HE Qun-biao, <i>et al.</i> (629)
Effect of Natural and Hydrothermal Synthetic Goethite on the Release of Methane in the Anaerobic Decomposition Process of Organic Matter	YAO Dun-fan, CHEN Tian-hu, WANG Jin, <i>et al.</i> (635)
Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Spent Etching Solution and Its Copper Salt Recycling Products	QING Xian, HAN Jing-lei, WEN Yan-shen (642)
Case Study on Health Risk Assessment Based on Site-Specific Conceptual Model	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> (647)
Study on the Risk Assessment Method of Regional Groundwater Pollution	YANG Yan, YU Yun-jiang, WANG Zong-qing, <i>et al.</i> (653)
Groundwater Organic Pollution Source Identification Technology System Research and Application	WANG Xiao-hong, WEI Jia-hua, CHENG Zhi-neng, <i>et al.</i> (662)
Study on Soil Organic Carbon Pools and Turnover Characteristics Along an Elevation Gradient in Qilian Mountain	ZHU Ling-yu, PAN Jian-jun, ZHANG Wei (668)
Response of Black Soil Organic Carbon, Nitrogen and Its Availability to Long-term Fertilization	LUO Kun, HU Rong-gui, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (676)
Phytoavailability and Chemical Speciation of Cadmium in Different Cd-Contaminated Soils with Crop Root Return	ZHANG Jing, YU Ling-ling, XIN Shu-zhen, <i>et al.</i> (685)
Study on Mechanism of SOM Stabilization of Paddy Soils Under Long-term Fertilizations	LUO Lu, ZHOU Ping, TONG Cheng-li, <i>et al.</i> (692)
Aging Process of Cr(III) in 22 Typical Soils of China and Influence Factors Analysis	ZHENG Shun-an, ZHENG Xiang-qun, LI Xiao-zheng, <i>et al.</i> (698)
Residual Characteristics of HCHs in Soils of a Former Lindane Production Enterprise	PAN Feng, WANG Li-li, ZHAO Hao, <i>et al.</i> (705)
Evaluation and Source Analysis of the Mercury Pollution in Soils and Vegetables Around a Large-scale Zinc Smelting Plant	LIU Fang, WANG Shu-xiao, WU Qing-ru, <i>et al.</i> (712)
Residue of Organic Fluorine Pollutants in Hair and Nails Collected from Tianjin	YAO Dan, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (718)
Analysis of Estrogens, Nonylphenol, 4-tert-Octylphenol and Bisphenol A in the Sediments	WU Wei, SHI Jiang-hong, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i> (724)
Investigation of As, Cu and Zn Species and Concentrations in Animal Feeds	YAO Li-xian, HUANG Lian-xi, JIANG Zong-yong, <i>et al.</i> (732)
Residue Dynamics of Flubendiamide in Paddy Field	WANG Dian-dian, SONG Ning-hui, WU Wen-zhu, <i>et al.</i> (740)
Isolation of Two Endophytic Phenanthrene-Degrading Strains and Their Degradation Capacity	NI Xue, LIU Juan, GAO Yan-zheng, <i>et al.</i> (746)
Biodegradation of Nitrobenzene by a Halophilic <i>Myroides odoratimimus</i> Strain Y6	LI Tian, QIAN Kun, XIAO Wei, <i>et al.</i> (753)
Effect of Immobilization on Biosensor for Benzene Derivates Detection	TANG Kuo, MA An-zhou, YU Qing, <i>et al.</i> (760)
Investigation of Bacterial Diversity in the Biological Desulfurization Reactor for Treating High Salinity Wastewater by the 16S rDNA Cloning Method	LIU Wei-guo, LIANG Cun-zhen, YANG Jin-sheng, <i>et al.</i> (767)
Assessment of the Effect of Influent NH ₄ ⁺ -N Concentration on the Abundance and Community Structure of Functional Bacteria in CANON Process	LIU Tao, LI Dong, ZENG Hui-ping, <i>et al.</i> (773)
Biodegradation of Lignocellulose by <i>Penicillium simplicissimum</i> and Characters of Lignocellulolytic Enzymes	SHEN Ying, HU Tian-jue, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (781)
Microbial Community Structure and Distribution Characteristics in Oil Contaminated Soil	YANG Meng-qing, LI Li-ming, LI Chuan, <i>et al.</i> (789)
Degradation of Oxytetracycline in Chicken Feces Aerobic-Composting and Its Effects on Their Related Parameters	WANG Gui-zhen, LI Zhao-jun, ZHANG Shu-qing, <i>et al.</i> (795)
Research of Moisture Content Variation in MSW Landfill	LI Rui, LIU Jian-guo, XUE Yu-wei, <i>et al.</i> (804)
Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass with Animal Digestion Mechanisms	WU Hao, ZHANG Pan-yue, GUO Jian-ben, <i>et al.</i> (810)

《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2月15日 34卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 2 Feb. 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