

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示 高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康(1141)

2013年1月北京市PM_{2.5}区域来源解析 李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松(1148)

2013年1月北京市一次空气重污染成因分析 程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅(1154)

上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征 常燕,冯冲,瞿建国,张经(1164)

厦门春季PM₁₀中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析 张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成(1173)

硫氧同位素示踪南京北郊大气PM_{2.5}中硫酸盐来源 魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝(1182)

结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程 包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠(1187)

春季华东高山背景区域PM_{2.5}和PM_{2.5-10}中水溶性无机离子特征 苏彬彬,张智胜,陶俊,许榕洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇(1195)

落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究 杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹(1202)

四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征 何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪(1208)

深圳市船舶排放清单与时空特征研究 杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏(1217)

超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性 孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗(1227)

空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征 张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹(1234)

基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应 靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽(1241)

黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响 张永领,王明仕,董玉龙(1249)

调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响 王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远(1256)

春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响 于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚(1263)

降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析 任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春(1270)

北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价 钟惠舟,韦朝海(1277)

丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析 李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏(1285)

三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例 操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺(1293)

营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响 王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖(1301)

一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究 杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏(1309)

昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析 梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明(1317)

河道曝气提升河流水质的WASP模型研究 朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽(1326)

γ辐射降解水中的盐酸环丙沙星的研究 祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静(1332)

电化学氢化物发生法处理含镉废水及对镉的回收 陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼(1338)

Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水 孙文静,王亚曼,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳(1345)

生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素 孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪(1352)

308 nm光作用下α-Fe₂O₃表面HNO₃的光解 陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强(1359)

L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚 何家洪,徐强,丁武泉,李强(1365)

酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究 许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博(1374)

枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性 马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用(1379)

嗜咪降解菌筛选及其对焦化废水强化处理 李静,李文英(1385)

Fe³⁺对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N₂O释放的影响 李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建(1392)

内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究 赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉(1399)

利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻 王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东(1406)

进水渗滤液总氮和BOD₅/TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响 杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰(1412)

重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析 师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先(1417)

湖南攸县典型煤矿和工厂区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析 张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰(1425)

沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响 苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春(1431)

施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响 王秀丽,梁成华,马子惠,韩月(1437)

不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复 邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提(1445)

陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价 齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞(1453)

有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响 王菲,袁婷,谷守宽,王正银(1461)

玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究 程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云(1468)

硼钨交互作用对水稻吸收积累镉和硼的影响 向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐(1474)

丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响 郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新(1481)

滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究 陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁(1489)

不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系 吴静,陈书涛,胡正华,张旭(1497)

工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析 王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮(1507)

《环境科学》征订启事(1216) 《环境科学》征稿简则(1248) 信息(1163,1194,1248,1424)

醌基功能型高分子生物载体 (PET-AQS) 制备及催化生物反硝化特性研究

许晴¹, 侯正浩¹, 田秀蕾², 牛春梅¹, 郭延凯², 廉静², 郭建博^{1,2*}

(1. 河北科技大学材料科学与工程学院, 石家庄 050018; 2. 河北科技大学环境科学与工程学院, 河北省污染防治生物技术实验室, 石家庄 050018)

摘要: 通过化学合成, 将蒽醌磺酸钠 (AQS) 固定在聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 上形成醌基功能型高分子生物载体并研究其在生物反硝化上的应用. 通过红外光谱衰减全反射法 (ATR-IR) 和能谱 (EDS) 分析, 醌基基团成功固定在高分子表面, 且醌基质量摩尔浓度为 $0.1406 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$. 醌基功能型高分子生物载体 (PET-AQS) 能加速生物反硝化, 且速率常数 K_x 与载体投加浓度呈零级反应动力学. 在投加 PET-AQS 0.0562 mmol 的反硝化体系中, 循环使用 10 次, 反硝化速率均是空白体系的 1.2 倍以上, 表明 PET-AQS 具有良好的重复利用稳定性, 有利于实际应用.

关键词: 功能生物载体; 氧化还原介体; 高分子材料; 固定化; 反硝化

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1374-05 DOI: 10.13227/j.hjkk.2015.04.032

Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis

XU Qing¹, HOU Zheng-hao¹, TIAN Xiu-lei², NIU Chun-mei¹, GUO Yan-kai², LIAN Jing², GUO Jian-bo^{1,2*}

(1. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 2. Pollution Prevention Biotechnology Laboratory of Hebei Province, School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: Anthraquinone sodium sulfonate (AQS) was immobilized on polyethylene terephthalate (PET) by chemical synthesis, forming quinone functional polymer biocarrier (PET-AQS), and its characteristics in bionitrification catalysis were analyzed. Quinone group was demonstrated to be successfully immobilized on the surface of the polymer and the concentration of immobilized quinone was $0.1406 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$ by Attenuated Total Reflectance Spectrometry (ATR-IR) and Energy Dispersive Spectrometry (EDS). The PET-AQS could accelerate bionitrification. The relationship between the denitrification rate constant (K_x) and the PET-AQS concentration ($c_{\text{PET-AQS}}$) obeyed the pseudo-zero order kinetics. After ten rounds of recycling in the bionitrification system with approximately 0.0562 mmol quinone, the denitrification rate was kept at more than 1.2 times of the blank system. This indicated that PET-AQS exhibited a good operational stability and was beneficial to practical application.

Key words: functional biocarrier; redox mediator; polymer material; immobilization; denitrification

随着现代工业的快速发展, 引发的环境问题也日益严峻. 其中大量含硝酸盐氮废水成为主要的水体污染源^[1,2]. 水体中硝酸盐氮超标, 导致一些藻类过量繁殖进而引起水体富营养化, 水生生物死亡, 威胁人类身体健康^[3~5]. 目前, 生物法是具有实际应用前景的反硝化处理办法^[6~8]. 但生物法也存在着反应速率慢, 处理周期长的问题, 因而提高生物反硝化效率成为研究的热点.

目前, 提高反硝化速率的研究方向包括反应器构造的优化^[9]、新型反硝化原理和技术探索^[10]和优势菌的筛选^[11]等, 其中介体催化反硝化新技术成为关注热点^[12]. 近年来研究表明, 醌类氧化还原介体能加速一些难降解污染物的生物转化过程, 而醌基基团是加速生物转化污染物过程的主要活性官能

团^[13~15]. 其能够从氧化态与还原态之间进行可逆转化, 进而加速生物代谢过程中电子传递速率或改变电子传递途径^[16~19]. 赵丽君等^[20]利用蒽醌磺酸钠 (AQS) 调控亚硝酸盐反硝化特性, 研究表明 AQS 在反硝化过程中起到辅酶和加速反硝化过程中的电子传递速率的作用. 李海波等^[21]研究表明 AQS、蒽醌-2-磺酸钠 (AQDS) 等水溶性醌类氧化还原介体催化生物反硝化研究. 但是水溶性醌类氧化还原介体需要连续投加保持生物转化效率, 导致对水环境造

收稿日期: 2014-09-25; 修订日期: 2014-11-26

基金项目: 河北省高校百名优秀创新人才支持计划项目 (BR2-211); 河北省杰出青年科学基金项目 (E2012208012); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (51208170); 河北省高等学校高层次人才科学研究项目 (GCC2014045)

作者简介: 许晴 (1988 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向高分子功能材料, E-mail: tkldwx@163.com

* 通讯联系人, E-mail: jianhguo@163.com

成二次污染,原料浪费以及成本增加的问题. 与之相比,非水溶性醌类氧化还原介体得到广泛关注, Guo 等^[22,23]采用海藻酸钙包埋, Cervantes 等^[16]采用离子交换树脂物理化学吸附, Lu 等^[24]采用聚氨酯和聚酯化学接枝等方法制备非水溶介体^[25]. 然而,以上方法也存在一些缺点例如海藻酸钙/琼脂机械强度不高,离子交换树脂易发生解吸附等缺点.

本研究综合以上的优缺点,鉴于聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)的高分子材料化学性质稳定、物理机械性能优良、具有生物相容性和耐疲劳性的特征,及其在酸、碱条件打开酯键,形成羧基和羟基官能基团,易于通过化学方法固定 AQS 的特性,制备醌基功能型高分子生物载体 (PET-AQS),并且利用该功能生物载体进行生物反硝化的基础研究.

1 材料与方法

1.1 主要试剂

聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET),石家庄恒佳丝网制品有限公司; 9,10-蒽醌-2-磺酸钠(AQS),重庆跨越(集团)股份有限公司; 乙二胺,天津市大茂化学试剂有限公司; 氯磺酸,成都艾科试剂有限公司. 其他实验试剂均采用分析纯,天津市永大化学试剂有限公司.

1.2 醌基修饰聚对苯二甲酸乙二醇酯

通过对聚对苯二甲酸乙二醇酯胺解,在载体表面形成大量的氨基,采用化学方法实现 9,10-蒽醌-2-磺酰氯(ASC)与 PET 的合成,制备出醌基修饰聚对苯二甲酸乙二醇酯.

将 2 g PET(2 cm × 2 cm)和 100 mL 乙二胺加入到 150 mL 四口圆底磨口烧瓶中,同时,加入 32.5 mmol 氢氧化钠作为催化剂,升温至 40℃,反应 5 h 后停止. 将产物-胺化聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET-NH₂)用蒸馏水冲洗 3~5 次,直至表面呈中性,再放置于 60℃ 干燥箱干燥备用. 9,10-蒽醌-2-磺酰氯(ASC)由 9,10-蒽醌-2-磺酸钠(AQS)制备合成,合成方法参照文献^[26].

将一定量 ASC 充分溶解在 90 mL 二氯甲烷,再将此溶液与 PET-NH₂ 加入到四口圆底磨口烧瓶中,使得 PET-NH₂: ASC = 1: 5.5,同时再加入 30 mL 8 mmol·L⁻¹的氢氧化钠溶液,升温至 40℃,反应 5 h 后停止. 将产物-醌基功能型高分子生物载体(PET-AQS)分别用 *N,N*-二甲基甲酰胺(DMF)和蒸馏水洗 3~5 次,直至表面呈中性,再放置于 60℃ 干燥箱

干燥备用.

1.3 醌基功能型高分子生物载体催化生物反硝化研究

菌种来自本实验室驯化分离的反硝化菌种 *Paracoccus versutus* 菌株 GW1 (GenBank 登录序号: GU111570). 将菌株 GW1 按 10% 接种量接到 250 mL 反硝化培养基^[26]中 35℃ 恒温摇床中 140 r·min⁻¹培养,待菌液初始浊度为 0.3 左右,加入硝酸盐的储备液及一定量的 PET-AQS,使得最终混合液中硝酸盐的浓度为 300 mg·L⁻¹ (每组实验设置 2 个平行样,每组实验重复 3 次). 此反硝化实验在 35℃ 恒温生化培养箱中静置培养,确保厌氧条件,每 2 h 进行取样测定.

1.4 分析方法

采用红外光谱衰减全反射法(ATR-IR, Nicolet6700/FT-Raman modules, 美国)测定醌基修饰前后聚对苯二甲酸乙二醇酯的化学结构; 采用能谱分析(EDS, KYKY-AMRAY-1000B, 德国)测定修饰在功能生物载体上醌基含量; 硝酸盐氮采用紫外分光光度法测定^[27],亚硝酸盐氮采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺光度法测定^[27] (UV-2600, 上海天美); 氧化还原电位采用 ORP 电极(雷磁)测定; pH 采用酸度计测定(DELTA-320, 上海梅特勒).

2 结果与讨论

2.1 红外光谱和能谱分析

PET 和 PET-AQS 的红外光谱图如图 1 所示. 与 PET 相比, PET-AQS 在波数为 1 542.3 cm⁻¹ 处出现新的吸收峰,是乙二胺胺解 PET 形成酰胺基团 N—H 的弯曲振动; 在波数为 1 675.1 cm⁻¹ 处的吸收峰代表醌基两个 C=O 在一个环上的伸缩振动,而在 PET 的红外光谱图中无此基团的存在,证明醌基基团已经成功地接枝在聚对苯二甲酸乙二醇酯载体上.

PET、PET-NH₂ 和 PET-AQS 的元素组成及其质

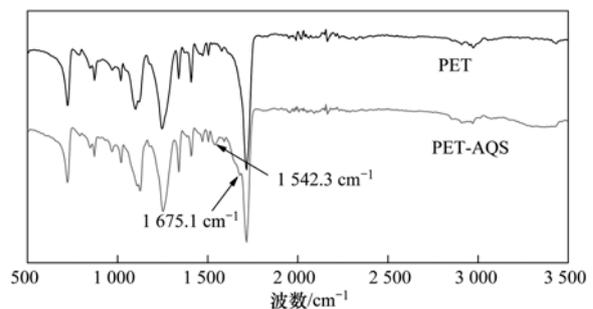


图 1 PET 和 PET-AQS 的红外光谱图

Fig. 1 Fourier infrared spectra of PET and PET-AQS

量分数如表 1 所示. 与 PET 相比, PET-NH₂ 的元素中有 N, 表示 PET 进行了胺解反应, 且胺基的含量为 4.23 mmol·g⁻¹. 与 PET-NH₂ 相比, PET-AQS 的元素中有 S, 表示醌基(9,10-蒽醌-2-磺酰氯)已经与

PET-NH₂ 中的胺基反应, 形成磺酰胺基团, 且醌基的质量摩尔浓度为 0.140 6 mmol·g⁻¹. 红外光谱和能谱均证明醌基成功修饰聚对苯二甲酸乙二醇酯, 合成了醌基功能型高分子生物载体 PET-AQS.

表 1 PET、PET-NH₂ 和 PET-AQS 的能谱分析

Table 1 Energy spectrum analysis of PET, PET-NH₂, and PET-AQS

项目	质量分数/%				醌基质量摩尔浓度 /mmol·g ⁻¹
	C	O	N	S	
PET	66.03	33.97	—	—	—
PET-NH ₂	55.10	32.05	11.85	—	—
PET-AQS	56.34	31.81	11.40	0.45	0.140 6

2.2 PET-AQS 浓度对菌株 GW1 反硝化过程的影响

设置 4 种不同醌基量的 PET-AQS, 分别为 0、0.056 2、0.168 7 和 0.281 2 mmol, 考察 PET-AQS 浓度对菌株 GW1 反硝化的影响. 实验结果如图 2 所示, 在 0~0.281 2 mmol 范围内, 随着 PET-AQS 投加量的增加对硝酸盐降解的加速效果越明显, 硝酸盐 14 h 的去除率由 52.72% 增加到 73.57%. 结果表

明, 在一定范围内增加醌基的投加量, 能加速生物反硝化作用. 同时, 由实验可以得出速率常数 K_x [mg·(L·h)⁻¹] 随着醌基浓度的增加而增加. 通过 Origin 软件进行线性拟合, 硝酸盐降解速率与醌基浓度呈正相关关系:

$$K_x = 6.651 0 \cdot c_{\text{PET-AQS}} + 8.565 7$$

$$R^2 = 0.962 0$$

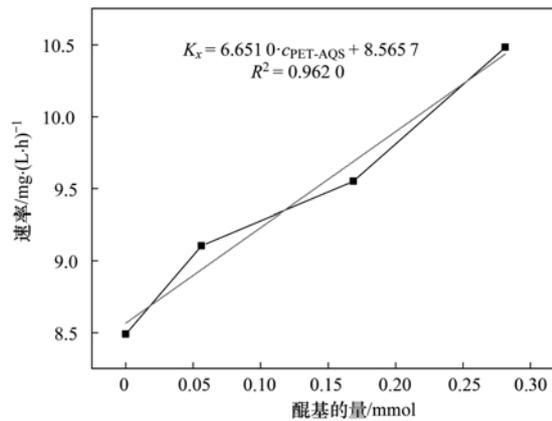
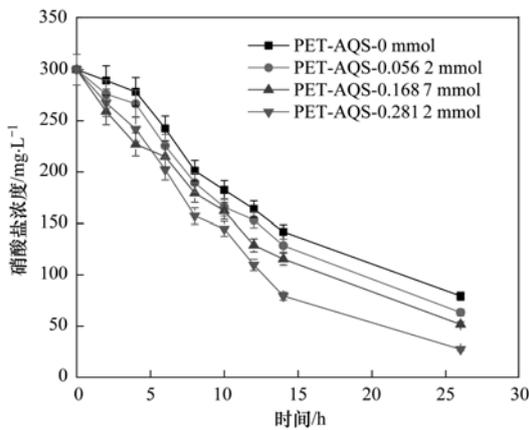


图 2 PET-AQS 浓度对硝酸盐降解的影响

Fig. 2 Effect of PET-AQS concentration on nitrate degradation

2.3 PET-AQS 的重复利用稳定性

采用 PET-AQS 对硝酸盐生物降解进行循环实验, 验证其重复利用稳定性. 实验结果如图 3 所示, 在循环使用 10 次实验过程中, PET-AQS 体系的反硝化速率 ($v_{\text{PET-AQS}}$) 均是空白体系的反硝化速率 ($v_{\text{空白}}$) 的 1.2 倍以上. 且随着实验次数的增加, 反硝化速率比值没有剧烈波动, 说明在重复循环使用过程中 PET-AQS 的化学结构没有发生变化, 醌基没有流失. 本实验验证了 PET-AQS 具有良好的重复利用稳定性和生物相容性, 也证实醌基与 PET 的化学合成酰胺键稳定牢固.

2.4 PET-AQS 调控反硝化过程中 pH 和 ORP 的变化

反硝化作用是反硝化细菌的产碱及硝酸盐呼吸

的过程, 所以测定反硝化实验中的 pH 和 ORP 的变化, 有利于考察 PET-AQS 对加速反硝化作用. 在 PET-AQS 调控生物反硝化过程中 pH 和 ORP 的变化如图 4、图 5 所示.

由图 4 结果可以得出, 在反硝化过程中, 体系的 pH 随着硝酸盐浓度的降低逐渐增高, 并且最终达到稳定, 这是由于反硝化过程中产生 $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$ 共轭酸碱对, 对体系溶液的碱度达到稳定^[28]. 然而, 空白对照体系与添加 PET 体系的 pH 稳定值相差不大, 稳定在 9.4 左右. 添加 PET-AQS 体系的 pH 稳定值比空白对照体系的 pH 要高, 为 9.6 左右, 表明 PET-AQS 在反硝化过程中能加速硝酸盐降解, 反硝化效率高, 所以该体系的最终稳定 pH 要比空白对

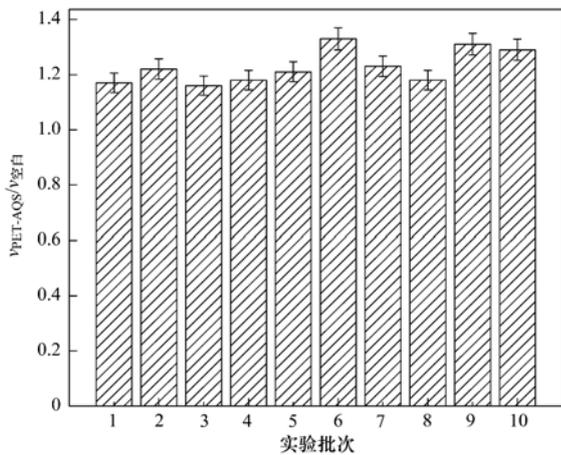


图3 PET-AQS 调控反硝化重复实验效果

Fig. 3 Accelerating effect of PET-AQS on denitrification for repeat experiments

照体系高。

氧化还原电位 (ORP) 可以表征反硝化体系中硝酸盐呼吸反应的宏观的氧化-还原特性。在反硝化初期, 溶液中包含微量的溶解氧和氮的氧化物, 导致体系 ORP 迅速降低^[29], 如图 5 所示。随着反硝化进行, 体系中硝酸盐降解占据主导反应, 最终体系的 ORP 达到硝酸盐的氧化-还原电位。空白对照体系的 ORP 最终稳定在 -375 mV , PET-AQS 体系的 ORP 下降趋势比空白体系快, 且最终稳定在 -400 mV 。即 PET-AQS 能促进反硝化作用, 使体系进入较低的稳定还原态环境, 有利于硝酸盐的生物还原。

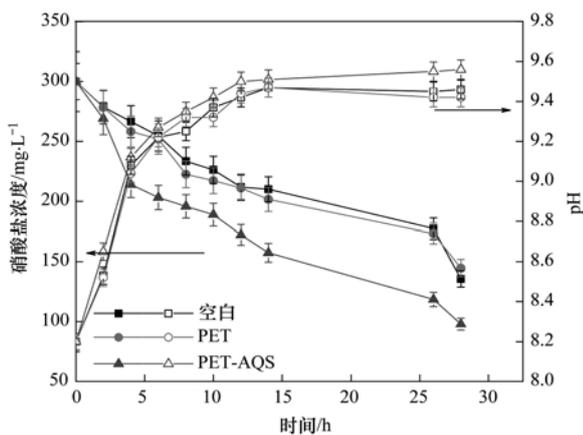


图4 反硝化过程中 pH 的变化

Fig. 4 Change of pH during the denitrification process

3 结论

(1) 通过红外光谱衰减全反射法和能谱分析, 酰基功能型高分子生物载体 (PET-AQS) 成功合成, 且酰基的质量摩尔浓度为 $0.1406\text{ mmol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

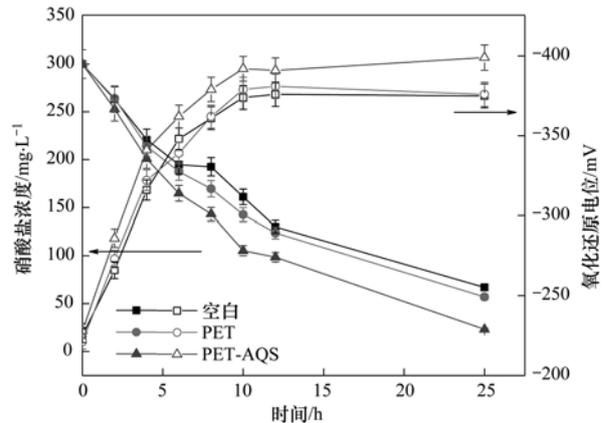


图5 反硝化过程中 ORP 的变化

Fig. 5 Change of ORP during the denitrification process

(2) PET-AQS 作为生物功能载体能加速生物反硝化作用, 且硝酸盐降解速率常数与载体投加浓度呈线性正相关性: $K_x = 6.6510 \cdot c_{\text{PET-AQS}} + 8.5657$ ($R^2 = 0.9620$)。

(3) 研究表明, 投加 PET-AQS 的反硝化体系与空白对照相比, 体系的 pH 增加较快, 最终稳定值高 0.2 左右; 体系最终稳定的 ORP 要低 25 mV; PET-AQS 循环重复使用, 表明 PET-AQS 具有良好的重复利用稳定性和生物相容性。

参考文献:

- [1] 王耀龙, 魏云霞, 李晓丽, 等. 废水脱氮技术研究进展[J]. 环境工程, 2010, 28(S1): 119-125.
- [2] 刘相超, 祖波, 宋献方, 等. 三峡库区梁滩河流域水化学与硝酸盐污染[J]. 地理研究, 2010, 29(4): 629-639.
- [3] 延利军. 水中硝酸盐污染现状、危害及脱除技术[J]. 能源环境保护, 2013, 27(3): 39-43.
- [4] 范彬, 曲久辉, 刘锁祥, 等. 饮用水中硝酸盐的脱除[J]. 环境污染治理技术与设备, 2000, 1(3): 44-51.
- [5] 毕晶晶, 彭昌盛, 胥慧真. 地下水硝酸盐污染与治理研究进展综述[J]. 地下水, 2010, 32(1): 97-103.
- [6] 梅翔, 陈洪斌, 张全兴, 等. 微污染源水生物处理中硝酸盐氮的变化[J]. 环境科学与技术, 2001, 98(6): 11-15.
- [7] 朱杰, 付永胜. 生物脱氮处理过程中氮素转化规律的研究[J]. 环境化学, 2006, 25(5): 624-629.
- [8] 张建美, 郝会玲. 地下水硝酸盐生物处理技术研究进展[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2014, 11(1): 24-29.
- [9] 李军, 徐影, 王秀玲, 等. 固体碳源填充床反应器反硝化性能的研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(6): 1230-1235.
- [10] 杨靖民, 姜旭, 张忠庆, 等. 基于 BaPS 系统黑土硝化、反硝化和呼吸作用研究[J]. 吉林农业大学学报, 2014, 36(1): 71-76.
- [11] 苟菊香, 张承中, 张英, 等. 一株好氧反硝化菌的筛选及其工程应用研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(11): 37-41.
- [12] 陈延明, 张华雨, 赵丽君, 等. 氧化还原介体在环境治理中

- 应用研究进展[J]. 河北工业科技, 2013, **30**(4): 266-273.
- [13] 郭延凯, 马志远, 郭建博, 等. 醌介体催化强化酸性红 B 生物脱色[J]. 环境工程学报, 2013, **7**(5): 1739-1744.
- [14] Hernández-Montoya V, Alvarez L H, Montes-Morán M A, *et al.* Reduction of quinone and non-quinone redox functional groups in different humic acid samples by *Geobacter sulfurreducens* [J]. *Geoderma*, 2012, **183-184**: 25-31.
- [15] 方连峰, 王竞, 周集体, 等. 醌化合物强化偶氮染料的生物脱色[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(2): 174-178.
- [16] Cervantes F J, Garcia-Espinosa A, Moreno-Reynosa M A, *et al.* Immobilized redox mediators on anion exchange resins and their role on the reductive decolorization of azo dyes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(5): 1747-1753.
- [17] Aranda-Tamaura C, Estrada-Alvarado M I, Texier A C, *et al.* Effects of different quinoid redox mediators on the removal of sulphide and nitrate via denitrification[J]. *Chemosphere*, 2007, **69**(11): 1722-1727.
- [18] Dos Santos A B, Bisschops I A E, Cervantes F J, *et al.* Effect of different redox mediators during thermophilic azo dye reduction by anaerobic granular sludge and comparative study between mesophilic (30°C) and thermophilic (55°C) treatments for decolourisation of textile wastewaters[J]. *Chemosphere*, 2004, **55**(9): 1149-1157.
- [19] Van der Zee F P, Bisschops I A E, Lettinga G, *et al.* Activated carbon as an electron acceptor and redox mediator during the anaerobic biotransformation of azo dyes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(2): 402-408.
- [20] 赵丽君, 马志远, 郭延凯, 等. 氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3520-3526.
- [21] 李海波, 廉静, 郭延凯, 等. 氧化还原介体催化强化 *Paracoccus versutus* 菌株 GW1 反硝化特性研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(7): 2458-2464.
- [22] Guo J B, Liu H J, Qu J H, *et al.* The structure activity relationship of non-dissolved redox mediators during azo dye biodecolorization processes[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **112**(5): 350-354.
- [23] Guo J B, Kang L, Yang J L, *et al.* Study on a novel non-dissolved redox mediator catalyzing biological denitrification (RMBDN) technology[J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(11): 4238-4241.
- [24] Lu H, Zhou J T, Wang J, *et al.* Enhanced biodecolorization of azo dyes by anthraquinone-2-sulfonate immobilized covalently in polyurethane foam [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(18): 7185-7188.
- [25] Zhang H K, Lu H, Zhang S, *et al.* A novel modification of poly (ethylene terephthalate) fiber using anthraquinone-2-sulfonate for accelerating azo dyes and nitroaromatics removal [J]. *Separation and Purification Technology*, 2014, **132**: 323-329.
- [26] Feng F, Uno B, Goto M, *et al.* Anthraquinone-2-sulfonyl chloride: a new versatile derivatization reagent—synthesis mechanism and application for analysis of amines[J]. *Talanta*, 2002, **57**(3): 481-490.
- [27] 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. 271-276.
- [28] 杜海峰, 赵丽君, 郭延凯, 等. 醋酸纤维素包埋非水溶性介体催化强化生物反硝化特性[J]. 环境工程学报, 2014, **8**(6): 2417-2423.
- [29] 王少坡, 王淑莹, 彭永臻, 等. 常温内源反硝化脱氮过程中 pH 和 ORP 变化规律[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, **6**(3): 20-25.

CONTENTS

Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>	(1141)
Regional Source Apportionment of PM _{2.5} in Beijing in January 2013	LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>	(1148)
Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(1154)
Soluble of Metals within TSP in Shanghai	CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>	(1164)
Analysis of Component Spectral Characteristics of PM ₁₀ -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen	ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>	(1173)
Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes	WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>	(1182)
Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014	BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(1187)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM _{2.5-10} in Mountain Background Region of East China in Spring	SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>	(1195)
Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves	YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>	(1202)
Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province	HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>	(1208)
Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen	YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>	(1217)
Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes	SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>	(1227)
Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards	ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1234)
Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen	JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i>	(1241)
Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport	ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long	(1249)
Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary	WANG Miao-miao, SUN Zhi-gao, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>	(1256)
Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>	(1263)
Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event	REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>	(1270)
Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources	ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai	(1277)
Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period	LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>	(1285)
Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary	CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>	(1293)
Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake	WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>	(1301)
Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond	YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>	(1309)
Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer	LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>	(1317)
Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study	ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>	(1326)
Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using γ Irradiation	ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>	(1332)
Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony	CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>	(1338)
Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation	SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>	(1345)
Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol	KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>	(1352)
Photolysis of Gaseous HNO ₃ on the α -Fe ₂ O ₃ Films Under 308 nm UV Light	LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>	(1359)
Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode	HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>	(1365)
Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis	XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>	(1374)
Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i>	MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>	(1379)
Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water	LI Jing, LI Wen-ying	(1385)
Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process	LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>	(1392)
Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitritation System	ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>	(1399)
Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1406)
Effects of Total Nitrogen and BOD ₅ /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor	YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>	(1412)
Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinfo Mountain, Chongqing	SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>	(1417)
Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province	ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1425)
Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain	SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil	WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>	(1437)
Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions	DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1445)
Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County	QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>	(1453)
Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure	WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>	(1461)
Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead	CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>	(1468)
Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling	XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>	(1474)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content	GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>	(1481)
A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area	CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>	(1489)
Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase	WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>	(1497)
Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs	WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>	(1507)

《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)

2015年4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行