

# 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 <sub>2.5</sub> 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PM <sub>10</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 和PM <sub>2.5-10</sub> 中水溶性无机离子特征 .....      | 苏彬彬,张智胜,陶俊,许梹洋,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,王颖雪(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锑废水及对锑的回收 .....                                             | 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,王亚旻,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-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 表面HNO <sub>3</sub> 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)                    |
| 嗜碱降解菌筛选及其对焦化废水强化处理 .....                                                | 李静,李文英(1385)                                 |
| Fe <sup>3+</sup> 对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N <sub>2</sub> O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BOD <sub>5</sub> /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矿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)              |
| 硼锑交互作用对水稻吸收积累锑和硼的影响 .....                                               | 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)                                                 |                                              |

# 喹啉降解菌筛选及其对焦化废水强化处理

李静<sup>1,2</sup>, 李文英<sup>1\*</sup>

(1. 太原理工大学煤科学与技术省部共建国家重点实验室培育基地, 太原 030024; 2. 太原理工大学化学化工学院, 太原 030024)

**摘要:** 以喹啉为目标污染物, 从焦化厂废水处理工段活性污泥中分离出 1 株能利用喹啉作为唯一碳源、氮源及能源的高效降解菌 DQS-01, 经 16S rRNA 基因分析鉴定为丛毛单胞菌科食酸菌属 (*Acidovorax* sp.) 菌株。通过考察不同培养条件下 DQS-01 降解菌的生物量及喹啉降解率随时间的变化, 确定其最佳降解条件为接种量 10%、摇瓶转速 150 r·min<sup>-1</sup>、初始 pH 8.0 ~ 10.0、温度 35℃。应用 Haldane 方程对该菌在不同喹啉初始浓度下的生长动力学过程进行了模拟, 拟合曲线与实验测定值相关性良好。将该菌与高效苯酚降解菌混合菌株用于焦化废水的生物强化处理, 在移动床生物膜反应器 (moving-bed biofilm reactor, MBBR) 运行 72 h 后, 对焦化废水 COD 的降解率达到 87.4%。

**关键词:** 食酸菌属; 喹啉; 降解性能; 降解动力学; 生物强化

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1385-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.04.034

## Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water

LI Jing<sup>1,2</sup>, LI Wen-ying<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory of Coal Science and Technology, Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** A bacterial strain, which could utilize quinoline as the sole carbon, nitrogen and energy source, was isolated from the activated sludge in a coking wastewater treatment plant. According to the 16S rRNA gene sequence analysis, the strain was identified as *Acidovorax* sp. Taken into consideration of both the growth and the quinoline degradation of the strain, the optimized degradation conditions were acquired as following: 10% inoculum, pH value of 8.0-10.0, 35℃ and 150 r·min<sup>-1</sup>. The process of its growth was simulated by Haldane kinetic model under different initial quinoline concentrations, the fitted curve had a good correlation with test measured values. Furthermore, coking wastewater was bioaugmented by the mixed strains of DQS-01 and D2 with enhanced process in a moving bed biofilm reactor, and the COD degradation rate was 87.4% within 72 h.

**Key words:** *Acidovorax* sp.; quinoline; degradation properties; degradation kinetics; enhanced biotreatment

炼焦企业生产过程产生的焦化废水中含有喹啉类氮杂环化合物, 是典型的有毒难降解污染物<sup>[1, 2]</sup>, 也是造成其出水不能达标的关键因素<sup>[3~5]</sup>。这主要是由于: ①传统活性污泥法和生物膜法中所含多数微生物的酶系统不能识别喹啉的结构, 因此很难将其去除<sup>[6]</sup>; ②含喹啉单元的化合物对许多微生物有毒害或抑制作用, 从而影响其他污染物的去除效果。采用生物强化技术, 投加对目标污染物具有较强降解能力的微生物, 可缩短处理系统驯化微生物的时间<sup>[7]</sup>; 有利于解除该污染物对其他微生物的抑制作用, 加快其他污染物的去除。国内外学者已筛选到一些喹啉降解菌, 如 *Rhodococcus* sp.、*Comamonas* sp.、*Burkholderia picekittii*、*Pseudomonas* sp. 等, 并对其喹啉生物降解动力学和降解途径<sup>[8~12]</sup> 及其在焦化废水生物强化处理的应用进行了研究<sup>[13, 14]</sup>。这些研究对认识喹啉的降解机制和强化废水中喹啉的

降解有积极的作用, 但有关 *Acidovorax* sp. 菌的研究主要见于对苯酚及苯衍生物的降解<sup>[15~18]</sup>, 以喹啉为唯一碳源的研究报道仅见于 Zhang 等<sup>[19]</sup> 对一个喹啉反硝化反应器中细菌群落结构的研究, 目前该菌株对喹啉降解特性的研究未见报道。

本研究以某焦化厂废水处理系统曝气池中的活性污泥为菌源, 筛选到 1 株对喹啉具有高效降解能力的 *Acidovorax* sp. 菌株, 发现该菌能同时降解异喹啉、苯、吡啶、苯酚等广泛存在于焦化废水中的芳香族化合物, 并将其应用于实际焦化废水的处理, 以期为后期利用该菌对焦化废水进行生物强化处理的工业化应用提供良好的生物材料和技术支持。

收稿日期: 2014-09-29; 修订日期: 2014-12-08

作者简介: 李静 (1981 ~), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为环境生物技术, E-mail: lijing@tyut.edu.cn

\* 通讯联系人, E-mail: ying@tyut.edu.cn

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 实验菌源

喹啉降解菌 DQS-01: 从某焦化厂污水处理系统曝气池活性污泥样品中筛选。

苯酚降解菌 D2: 本实验室分离筛选的高效苯酚降解菌, 经鉴定为睾丸酮丛毛单胞菌 *Comamonas testosteroni*<sup>[20]</sup>。

#### 1.1.2 培养基

对文献[21]所提供的无机盐培养基配方进行改良, 在微量元素储备液中去掉  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 改良的喹啉无机盐培养基配方如下:  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  4.26 g,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  2.65 g,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.2 g,  $\text{CaCl}_2$  0.02 g,  $\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.002 g, 微量元素储备液 1 mL (主要成分:  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$   $1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$   $0.002 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$   $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$   $0.024 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{ZnCl}_2$   $0.006 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$   $0.07 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 去离子水 1 000 mL,  $\text{pH} = 7.0$ 。灭菌后加入一定量喹啉 ( $0.22 \mu\text{m}$  微孔滤膜过滤) 作为菌种生长的唯一碳源和氮源。

LB 培养基: 酵母膏 5 g, 蛋白胨 10 g,  $\text{NaCl}$  10 g, 琼脂粉 10 g, 蒸馏水 1 000 mL,  $\text{pH} = 7.0$ 。

### 1.2 菌种的筛选分离

将采集的活性污泥样品加入无菌水中, 在  $30^\circ\text{C}$ 、 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  的摇床培养箱中培养 24 h, 静置后取 10 mL 上层清液接种于 90 mL LB 培养基中培养 24 h; 然后以喹啉为唯一碳源和氮源, 按 10% 的接种量将培养液转接至无机盐培养基上进行反复驯化。喹啉溶液的初始浓度为  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 以  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  梯度逐渐增大喹啉浓度至  $1\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 筛选可以在改良的喹啉无机盐培养基上进行生长的菌落, 经平板划线法分离纯化得到纯菌落。

### 1.3 菌种鉴定

形态学观察。将最终筛选得到的纯菌落划线接种于 LB 固体培养基,  $30^\circ\text{C}$  倒置培养 24 h, 观察菌落形态; 挑取菌体进行革兰氏染色, 用荧光倒置显微镜 (LEICA DMI400B) 观察菌体形态特征。

生理生化实验。参照文献[22]进行实验并对菌种进行鉴定。

分子生物学鉴定。菌种的分子生物学鉴定由大连 TaKaRa 生物工程公司完成, 通过对该菌株的 16S rRNA 基因进行扩增后对扩增产物进行测序, 得到的序列与 GenBank 数据库中的类似序列进行 Blast

比对, 从而确定其分类地位。

### 1.4 分析方法

#### 1.4.1 菌体生物量的测定

采用称重法测量, 取 5 mL 发酵培养液, 用带有  $0.22 \mu\text{m}$  滤膜的针筒式过滤器进行过滤, 经蒸馏水洗涤 3 次,  $80^\circ\text{C}$  烘干至恒重后测量。

#### 1.4.2 喹啉降解率的测定

参考文献[23, 24], 采用紫外可见分光光度计 (Biol-140, 美国 PE) 在 277 nm 下检测样品中喹啉浓度。以未加菌的灭菌喹啉无机盐培养基为空白对照, 将喹啉初始浓度记为  $A_0$ ,  $t$  时间后的喹啉浓度记为  $A_t$ , 则:

$$\text{喹啉降解率}(\%) = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100$$

#### 1.4.3 COD 降解率的测定

采用密封催化消解法<sup>[25]</sup>, 利用化学耗氧量测定仪 (HH-6 型, 中国姜堰) 进行 COD 的测定。将溶液初始 COD 记为  $c_0$ ,  $t$  时间后 COD 记为  $c_t$ , 则:

$$\text{COD 降解率}(\%) = \frac{c_0 - c_t}{c_0} \times 100$$

$$\text{COD 降解速率}[\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}] = \frac{c_0 - c_t}{t}$$

### 1.5 环境因素对 DQS-01 菌降解性能的影响

挑取纯培养菌落接种于 500 mL LB 培养基中过夜培养, 使菌体活化及增殖。将该菌液  $4\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  下离心, 沉淀用无菌水清洗 3 次以去除表面杂质, 再转移至无菌水中制备成一定浓度的菌悬液 (生物量为  $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右)。按一定的接种量加入到喹啉无机盐培养基 (喹啉初始浓度为  $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 中, 在不同摇瓶转速、初始 pH、温度下振荡培养。每组实验做三组平行试样, 以未加菌的喹啉在同等条件下作为空白对照。

### 1.6 DQS-01 菌降解谱范围分析

以苯酚、苯、喹啉、异喹啉、吡啶为碳源底物,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  为氮源, 调整培养基中碳源与氮源的含量, 使菌体生长初始 C/N 为 5/1, 取接种量 5%,  $35^\circ\text{C}$ 、 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  振荡培养。同时设未加菌的灭菌培养液为空白对照。

### 1.7 DQS-01 菌对实际焦化废水的生物强化实验

#### 1.7.1 MBBR 的启动挂膜及稳定运行

采用直接低浓度启动挂膜方法<sup>[26, 27]</sup>, 将来自焦化厂曝气池污泥置于实验室自制的 MBBR 反应器中<sup>[28]</sup>, 曝气 24 h (曝气量为  $0.3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , 下同), 将焦化厂调节池出水用蒸馏水稀释, 使其 COD 浓度

约为  $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 加入填料 (Mutag Biochip<sup>TM</sup>, 德国) 进行曝气, 使活性污泥与填料 (填充率为 5%)<sup>[29]</sup> 充分接触; 48 h 后弃掉部分混合液, 再加入经稀释后的焦化废水, 让 COD 浓度保持在  $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右; 采用持续增长进水浓度的方式以促进生物膜的增长成熟. 整个系统挂膜成功及稳定运行约需 40 d 左右, 此时焦化废水进水 COD 浓度约为  $600\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

1.7.2 生物强化实验

将活化的 DQS-01 菌、DQS-01 菌及本课题组筛选的高效苯酚降解菌 D2 所组成的混合菌株 (生物量为 1:1) 按接种量为 10% (菌液/焦化废水, 体积比) 的比例投入反应器中, 按照 1.7.1 节的方法使 MBBR 处于稳定运行状态后, 以不投加降解菌的 MBBR 对焦化废水的降解为空白对照, 考察 DQS-01 及 D2 菌对焦化废水的生物强化效果.

2 结果与分析

2.1 菌种分离、筛选及鉴定

通过不断增加无机盐培养液中喹啉浓度, 最终筛选到 1 株以喹啉为唯一碳源、氮源及能源进行生长的菌株, 该菌株在喹啉浓度为  $50\sim600\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的培养液中生长良好, 当喹啉浓度大于  $600\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 菌体生长缓慢直至不再生长.

该菌株在无机盐平板培养基上呈规则圆形, 边缘整齐, 表面光滑, 菌落透明至乳白色, 直径  $1.0\sim5.0\text{ mm}$ . 经革兰氏染色后在显微镜下观察呈阴性, 菌体细胞呈短杆状, 有的成对出现, 大小为  $(0.3\sim0.8)\text{ }\mu\text{m}\times(1.5\sim5.0)\text{ }\mu\text{m}$ . 同时, 对 DQS-01 菌进行生理生化鉴定, 结果如表 1 所示, 确定该菌属于食酸菌属 (*Acidovorax* sp.). 结合其 16S rRNA 基因序列分析, 将该基因序列登录到 NCBI 数据库 (登录号为 KP126996), 得到的结果是该菌与燕麦食酸菌 *Acidovorax avenae* 相似度高达 100%.

表 1 DQS-01 菌的生理生化实验结果

| Table 1 Physiological and biochemical test results of DQS-01 strain |      |       |    |
|---------------------------------------------------------------------|------|-------|----|
| 测试项目                                                                | 结果   | 测试项目  | 结果 |
| 氧化酶                                                                 | +    | 乙酰胺   | +  |
| 葡萄糖氧化发酵                                                             | 非发酵型 | 七叶灵水解 | -  |
| 硝酸盐还原                                                               | +    | 甲基红   | -  |
| 亚硝酸盐还原                                                              | +    | 脲酶活力  | -  |

2.2 DQS-01 菌生长及对喹啉的降解

以 15% 的接种量将 DQS-01 接种到初始喹啉浓度为  $300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的无机盐培养基中, 在  $120\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下恒温培养, 每隔一段时间取样

测菌体生物量及喹啉降解率. 实验结果如图 1 所示, DQS-01 菌在接种后能很快适应初始浓度较高的喹啉培养基并迅速进入对数生长期, 48 h 菌体生物量达到最大; 这段时间内喹啉的降解速率也最大. 因此, 在考察各种环境因素对该菌降解性能影响实验中均在菌体培养 48 h 时取样.

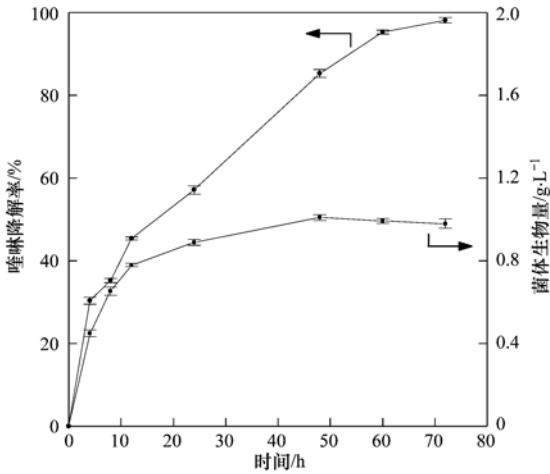


图 1 DQS-01 菌的菌体生长曲线与喹啉降解率关系

Fig. 1 Curves of the growth and quinoline degradation of DQS-01 strain

2.3 环境因素对 DQS-01 菌降解性能的影响

2.3.1 接种量对喹啉降解性能的影响

按 1.5 节所述, 以 1%、5%、10%、15% 的接种量将 DQS-01 接种到喹啉无机盐培养基中,  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $120\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  振荡培养 48 h 后, 测定菌体生物量的变化及对喹啉的降解, 实验结果如图 2(a) 所示, 接种量对喹啉降解率的影响较少; 而对菌体生长量的变化影响较大. 接种量为 1% 时, 底物浓度相对较高, 使菌体生长受到抑制, 菌体生物量增长较慢导致其喹啉降解率不高; 当接种量大于 10% 时, 菌体增殖速率加快, 但由于菌体呼吸旺盛, 体系溶解氧消耗过快会导致菌体较早进入衰退期, 影响喹啉降解. 综合考虑菌体生长及对喹啉的降解情况, 选择 10% 为最佳接种量.

2.3.2 摇瓶转速对喹啉降解性能的影响

按 10% 的接种量将 DQS-01 接入喹啉无机盐培养液中,  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  恒温培养, 考察转速对喹啉降解性能及生物量的影响. 实验结果如图 2(b) 所示, 当转速较低时, 溶解氧少, 生物量及喹啉降解率都比较低; 随着转速的提高, 溶解氧增多, 此时菌体生长较快, 菌体呼吸旺盛, 喹啉降解率也有所提高; 但当转速达到  $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  时, 过高的氧分压可能导致菌体生长提前进入衰退期或者对菌体产生毒害作用<sup>[30]</sup> 而导

致喹啉降解率下降. 因此, 确定  $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  为最佳摇床转速.

### 2.3.3 初始 pH 值对喹啉降解性能的影响

分别用  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  HCl 和 NaOH 调整无机盐培养液的初始 pH 为 6.0、7.0、8.0、9.0 和 10.0, 接种量 10%、 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $30^\circ\text{C}$  恒温培养, 考察不同初始 pH 条件下菌种生长及喹啉降解性能. 从图 2 (c)、2(d) 可以看出, 喹啉降解所需的最适 pH 与菌体生长的最适 pH 不同. 菌体生长的最适 pH 为 7.0, 而该菌在初始 pH 值为 6.0 ~ 10.0 的条件下对

喹啉都有一定的降解, 且在初始 pH 为中性及碱性条件下对喹啉的降解效果较好. 在不同的酸碱体系中, DQS-01 的代谢途径可能会有所不同. 初始 pH 为微酸性和中性时, 体系 pH 变化较小; 初始 pH 值为碱性溶液的体系随着培养时间的延长 pH 不断降解从而向中性靠近<sup>[6]</sup>. 由于焦化废水水质偏碱性, 故初始 pH 应调整至 8.0 ~ 10.0 为宜, 这与王培明等<sup>[31]</sup>的研究结果相同.

### 2.3.4 环境温度对喹啉降解性能的影响

在接种量 10%、初始 pH 8.0、 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  条件

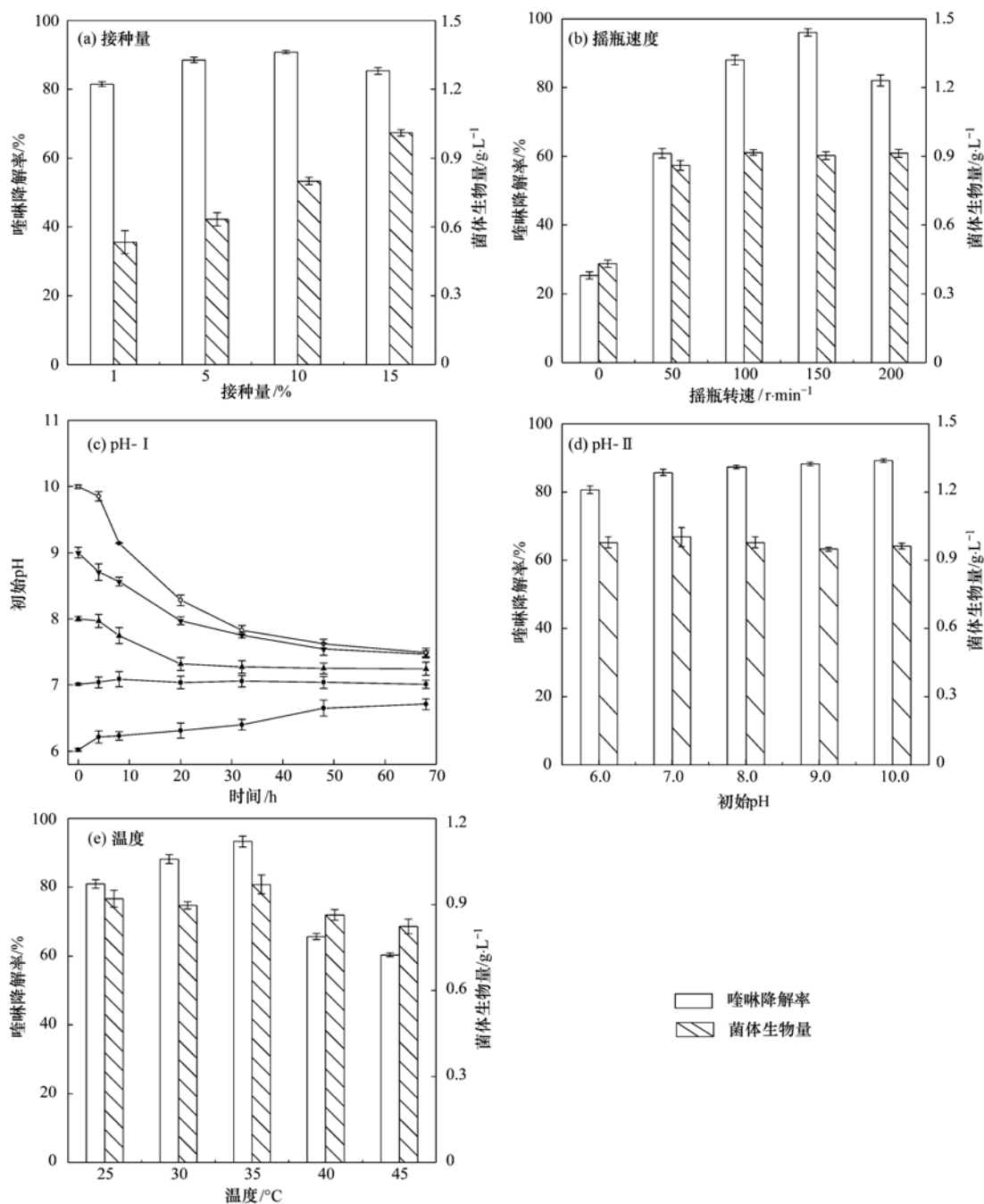


图2 环境因素对 DQS-01 菌降解性能的影响

Fig. 2 Influences of environmental factors on the quinoline degradation properties of DQS-01

下考察温度对喹啉降解性能及生物量的影响. 如图 2(e) 所示, 菌体可在 25 ~ 45℃ 范围内生长, 对环境温度的适应性较宽. 但随着培养温度的升高, 其喹啉降解率及菌体生物量都受到一定影响. 当培养温度为 35℃ 时 DQS-01 菌对喹啉降解率最高, 菌体生物量也最大, 因此确定 35℃ 为最佳降解温度.

## 2.4 DQS-01 菌株降解谱的研究

在实际废水处理系统中除喹啉外有多种污染物并存, 对底物利用的广谱性更有利于菌的生存以及

实际应用. 从图 3 可知, DQS-01 对不同芳香族化合物的降解程度由易到难依次为: 喹啉 > 异喹啉 > 苯 > 吡啶 > 苯酚. 从图 3(b) 菌种进入对数生长期的时间来看, DQS-01 能迅速利用喹啉及异喹啉, 其次是吡啶, 在以苯酚为碳源时菌体生长速度最慢. 这一现象与以苯酚类化合物为主要成分的焦化废水系统中, 喹啉类化合物很难被降解相一致. 这可能是由于苯酚在代谢过程中所产生的代谢产物对喹啉降解酶系的活性有抑制作用.

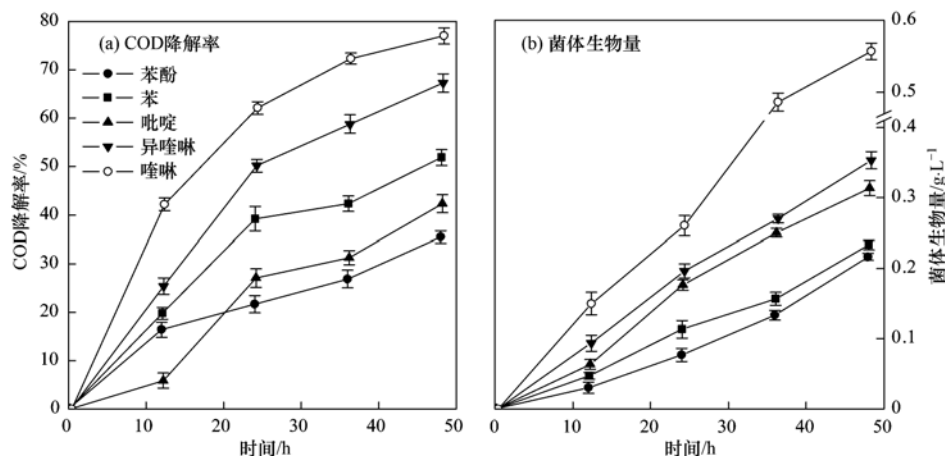


图 3 不同底物对 DQS-01 菌 COD 降解率及菌体生物量的影响

Fig. 3 Effect of different substrates on the COD degradation rates and biomass of DQS-01

## 2.5 DQS-01 菌对喹啉的降解动力学

在上述获得的最佳环境影响因素条件下, 研究了 DQS-01 以喹啉为唯一碳源、氮源和能源的降解动力学. 在不同初始喹啉培养液中, 用 Haldane 方程[式(1)所示]对该菌株的降解动力学进行了模拟.

$$\mu = \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S + S^2/K_i} \quad (1)$$

式中,  $\mu$  为细胞比生长速率 ( $\text{h}^{-1}$ );  $\mu_{\max}$  为细胞最大比生长速率 ( $\text{h}^{-1}$ );  $S$  为限制性底物质量浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $K_s$  为半饱和系数 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $K_i$  为底物抑制系数 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),  $K_i$  越高则反映底物抑制作用越不明显.

选择喹啉初始浓度范围为 100 ~ 600  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 以  $\mu$ - $S$  作图, 实验结果如图 4 所示. 随着喹啉初始浓度的增加, 菌体的比生长速率呈现先增大后减小的趋势; 当喹啉初始浓度为 202  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 菌体的比生长速率最大. 这是由于低喹啉浓度对菌体的抑制作用较弱; 当喹啉浓度增加, 菌体生长受到的抑制越来越强烈, 比生长速率迅速下降. 运用 Origin 软件处理实验数据, 用非线性最小二乘法对实验点

进行拟合, 得到 Haldane 方程动力学参数为:

$$\mu_{\max} = 0.640 \text{ h}^{-1}, K_s = 164 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}, K_i = 253 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} (R^2 = 0.977)$$

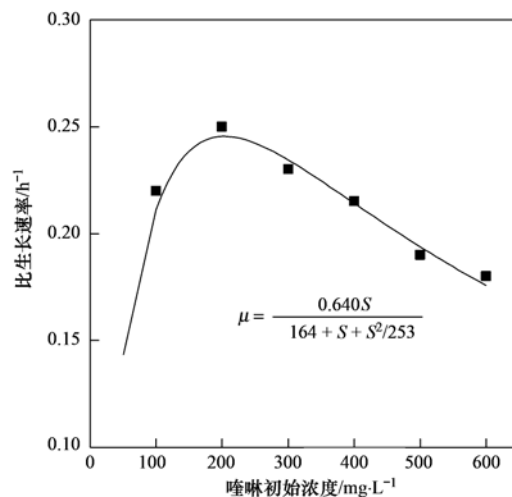


图 4 实验数据与 Haldane 模型回归曲线

Fig. 4 Measured values and regression curve of Haldane model

## 2.6 DQS-01 菌对焦化废水降解的生物强化效果

为进一步了解 DQS-01 菌在实际焦化废水处理中应用的可行性, 按 1.7.2 节所述将菌株投入实验室稳定运行的 MBBR 中, 实验结果如表 2 所示.

(1)对照组 焦化废水的降解主要来自填料对污染物的吸附及生物膜上各种微生物的降解作用.当系统运行至 60 h 时,降解率和降解速率达到最大;但随着系统运行时间的延长,附着在填料上生物膜开始增厚并从填料上解离下来,而且随着焦化废水中易降解有机物的减少,难降解有机物对系统中微生物的毒害作用进一步加剧,使 COD 降解率和降解速率有所下降.

(2)单独投加 DQS-01 菌 在系统运行的 0~12 h 内焦化废水 COD 降解速率较慢,这主要是由于焦化废水中含量最高的苯酚类化合物的存在抑制了 DQS-01 菌的生长,此时苯酚类化合物的抑制作用占主导地位;随着降解时间的延长,苯酚类化合物浓度逐渐降低,其抑制作用被逐渐解除,COD 降解速率逐渐提高至 36 h 达到最大,这与 2.3 节的结论一致.运行 36 h 后,系统中苯酚类化合物已基本被降解,其他污染物对 DQS-01 菌的抑制作用占主导,因此 COD 降解速率开始下降.

(3)单独投加本课题组筛选的高效苯酚降解菌 D2 前 12 h 内 COD 降解速率最快,这是由于该菌株对苯酚类化合物降解性能较好,能在较短时间内将苯酚化合物降解掉.当系统运行 48 h 后,体系内苯酚类化合物浓度变小,喹啉类化合物对 D2 菌生长的抑制作用越来越明显,降解速率开始变得缓慢,至 72 h 时焦化废水 COD 降解率仅为 78.2%.

(4)投加混合菌株 在 MBBR 中添加单一高效降解菌对焦化废水降解效果不是十分理想.因此本实验将高效菌株混合后用于焦化废水处理,结果发现混合菌株在焦化废水降解过程中有很好的协同作用——高效苯酚降解菌的存在解除了苯酚类化合物对喹啉降解菌的抑制作用;而喹啉菌对喹啉的降解也降低了喹啉类化合物对苯酚降解菌的毒害作用.在系统运行 60 h 后,对焦化废水 COD 的降解率达到 84.2%,出水 COD 值为  $93.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,已经达到炼焦工业污水排放的一级标准;当系统运行 72 h 后,COD 降解率达到 87.4%.

表 2 DQS-01 高效喹啉降解菌对焦化废水降解生物强化效果<sup>1)</sup>

| Table 2 Enhancement of bioaugmentation of coking plant waste water by the efficient quinoline-degrading strain DQS-01 |           |        |      |             |                                                        |        |      |             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------|------|-------------|--------------------------------------------------------|--------|------|-------------|
| 时间/h                                                                                                                  | COD 降解率/% |        |      |             | COD 降解速率/ $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ |        |      |             |
|                                                                                                                       | 对照组       | DQS-01 | D2   | DQS-01 + D2 | 对照组                                                    | DQS-01 | D2   | DQS-01 + D2 |
| 12                                                                                                                    | 4.18      | 17.0   | 28.1 | 32.7        | 2.07                                                   | 8.40   | 13.9 | 16.2        |
| 24                                                                                                                    | 15.3      | 36.5   | 47.8 | 57.4        | 3.79                                                   | 9.04   | 11.8 | 14.2        |
| 36                                                                                                                    | 23.8      | 49.3   | 52.9 | 62.6        | 3.93                                                   | 9.37   | 8.73 | 10.4        |
| 48                                                                                                                    | 33.0      | 56.8   | 59.7 | 74.0        | 4.08                                                   | 7.72   | 7.39 | 9.16        |
| 60                                                                                                                    | 42.3      | 62.4   | 73.7 | 84.2        | 4.18                                                   | 6.18   | 7.30 | 8.34        |
| 72                                                                                                                    | 49.7      | 68.9   | 78.2 | 87.4        | 4.10                                                   | 5.68   | 6.45 | 7.21        |

1) 焦化废水初始浓度为  $594\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,其中苯酚类化合物和喹啉类化合物的初始浓度分别为  $316\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和  $33.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$

3 结论

从焦化厂活性污泥中筛选得到 1 株能以喹啉为唯一碳源、氮源、能源的革兰氏阴性细菌 DQS-01 菌株.该菌株经形态学观察、16S rRNA 序列分析和系统发育分析鉴定为 *Acidovorax* sp.,具有降解异喹啉、苯、吡啶、苯酚等芳香族化合物的能力,降解谱较广,可在喹啉浓度为  $50\sim600\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的溶液中生长,具有较高的耐受能力.利用该菌株与 D2 菌株的协同作用,在 MBBR 系统中对实际焦化废水中进行生物强化处理,系统运行 60 h 后其 COD 降解率可达 84.2%,出水 COD 值为  $93.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,已经达到了炼焦工业污水排放的一级标准.

参考文献:

[ 1 ] Neuwoehner J, Reineke A K, Hollender J, et al. Ecotoxicity of quinoline and hydroxylated derivatives and their occurrence in groundwater of a tar-contaminated field site[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2009, 72(3): 819-827.

[ 2 ] 李咏梅,孙丽娟,黄明祝,等. 同分异构体喹啉和异喹啉的缺氧降解性能比较[J]. 环境污染与防治, 2005, 27(6): 420-422.

[ 3 ] 李登勇,潘霞霞,吴超飞,等. 氧化/吸附/混凝协同工艺处理焦化废水生物处理出水的过程及效果分析[J]. 环境工程学报, 2010, 4(8): 1719-1725.

[ 4 ] 帅伟,吴艳林,胡芸,等. 焦化废水生物处理尾水的活性炭吸附及条件优化研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(6): 1201-1207.

[ 5 ] 周家艳. 焦化废水生化出水中芳香族污染物深度处理技术的研究进展[J]. 化工环保, 2013, 33(6): 498-502.

[ 6 ] O'loughlin E J, Kehrmeyer S R, Sims G K. Isolation, characterization, and substrate utilization of a quinoline-degrading bacterium[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 1996, 38(2): 107-118.

[ 7 ] 柴阳云. 高效专性微生物在焦化废水处理中的应用[J]. 工业用水与废水, 2011, 42(2): 55-57.

[ 8 ] 朱顺妮,刘冬启,樊丽,等. 喹啉降解菌 *Rhodococcus* sp. QL2

- 的分离鉴定及降解特性[J]. 环境科学, 2008, **29**(2): 488-493.
- [9] 张晓君, 谢珍, 马晓军. 难降解污染物喹啉微生物降解的国内研究进展[J]. 微生物学通报, 2014, **41**(3): 476-481.
- [10] Sun Q H, Bai Y H, Zhao C, *et al.* Aerobic biodegradation characteristics and metabolic products of quinoline by a *Pseudomonas* strain [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(21): 5030-5036.
- [11] Qiao L, Wang J L. Biodegradation characteristics of quinoline by *Pseudomonas putida* [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(19): 7683-7686.
- [12] Cui M C, Chen F Z, Fu J M, *et al.* Microbial metabolism of quinoline by *Comamonas* sp. [J]. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 2004, **20**(6): 539-543.
- [13] 朱小彪. 焦化废水强化处理工艺特性和机理及排水生物毒性研究[D]. 北京: 清华大学, 2012. 50-52.
- [14] Bai Y H, Sun Q H, Sun R H, *et al.* Bioaugmentation and adsorption treatment of coking wastewater containing pyridine and quinoline using zeolite-biological aerated filters [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(5): 1940-1948.
- [15] Manefield M, Griffiths R I, Leigh M B, *et al.* Functional and compositional comparison of two activated sludge communities remediating coking effluent [J]. *Environmental Microbiology*, 2005, **7**(5): 715-722.
- [16] Monferrán M V, Echenique J R, Wunderlin D A. Degradation of chlorobenzenes by a strain of *Acidovorax avenae* isolated from a polluted aquifer[J]. *Chemosphere*, 2005, **61**(1): 98-106.
- [17] Felföldi T, Székely A J, Gorál R, *et al.* Polyphasic bacterial community analysis of an aerobic activated sludge removing phenols and thiocyanate from coke plant effluent[J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(10): 3406-3414.
- [18] Baek S H, Kim K H, Yin C R, *et al.* Isolation and characterization of bacteria capable of degrading phenol and reducing nitrate under low-oxygen conditions [J]. *Current Microbiology*, 2003, **47**(6): 462-466.
- [19] Zhang X J, Yue S Q, Zhong H H, *et al.* A diverse bacterial community in an anoxic quinoline-degrading bioreactor determined by using pyrosequencing and clone library analysis [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, **91**(2): 425-434.
- [20] 陈春, 李文英, 吴静文, 等. 焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能[J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1652-1656.
- [21] Wang J L, Wu W Z, Zhao X. Microbial degradation of quinoline: kinetics study with *Burkholderia Picekttii* [J]. *Biomedical and Environmental Sciences*, 2004, **17**(1): 21-26.
- [22] 东秀珠, 蔡妙英. 常见细菌系统鉴定手册[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 163-173.
- [23] 李亚新, 赵晨红. 紫外分光光度法同时定量测定多组分混合物——喹啉 吡啶 吡啶 苯酚[J]. 环境工程, 1999, **17**(2): 58-60.
- [24] 瞿晶晶, 王玲, 王晓书, 等. 白腐真菌对受喹啉污染模拟土壤的生物修复研究[J]. 环境污染与防治, 2011, **33**(7): 47-49, 53.
- [25] 姜威, 冯晓军, 陈晶亮, 等. 水质中化学耗氧量测定方法的改进[J]. 磷肥与复肥, 2009, **24**(6): 71-72.
- [26] 雷庆铎, 赵艳霞, 吴根, 等. 生物浮动床处理焦化废水的启动研究[J]. 工业水处理, 2013, **33**(10): 48-51.
- [27] 张忠华, 汤兵, 赵一宁, 等. 移动床生物膜反应器的启动及影响因素的研究[J]. 水处理技术, 2012, **38**(11): 84-89.
- [28] Jing J Y, Feng J, Li W Y, *et al.* Removal of COD from coking-plant wastewater in the moving-bed biofilm sequencing batch reactor[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2009, **26**(2): 564-568.
- [29] 李文英, 花吉锋, 荆洁颖, 等. 移动床生物膜反应器中两种填料氧传质性能的比较[J]. 太原理工大学学报, 2010, **41**(5): 487-491.
- [30] 强婧, 尹华, 彭辉, 等. 萘降解菌烟曲霉 A10 的分离及降解性能研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(5): 1298-1305.
- [31] 王培明, 霍明昕, 朱遂一, 等. 低温喹啉降解菌的筛选及降解性能[J]. 环境工程学报, 2013, **7**(1): 154-158.

## 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>10</sub> -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 <sub>2.5</sub> and PM <sub>2.5-10</sub> 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-guo, 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 $\gamma$ 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 <sub>3</sub> on the $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 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 <sub>5</sub> /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 Jinpo 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(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

国内外公开发行人