

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第5期

Vol.38 No.5

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京工业区分夏季二次有机气溶胶浓度估算及来源解析	刘静达, 安俊琳, 张玉欣, 师远哲, 林旭 (1733)
南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性	梁静舒, 安俊琳, 王红磊, 张玉欣, 王俊秀, 施双双, 王潇 (1743)
广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素	高元官, 张凯, 王体健, 陈志明, 耿红, 孟凡 (1753)
神农架大九湖大气中的多环芳烃	金梦云, 邢新丽, 柯艳萍, 郑煌, 胡天鹏, 孙焰, 丁洋, 李绘, 张泽洲, 祁士华 (1760)
沧州市春季 NMHCs 空间分布特征	段菁春, 周雪明, 张鹤丰, 谭吉华, 胡京南, 柴发合 (1769)
北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征	梁云平, 张大伟, 林安国, 马召辉, 郭晓东 (1775)
生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析	邵珠泽, 郑国砥, 王元刚, 高定, 朱彦莉, 陈同斌, 聂二旗 (1783)
低温等离子体对复合 CVOCs 的降解特性	姜理英, 张迪, 郭海倩, 缪晶晶, 陈怡伶, 李慧 (1792)
运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析	武媛媛, 李如梅, 彭林, 端允, 王海京, 李颖慧, 白慧玲, 牟玲 (1799)
高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险: 以常州市为例	姚静波, 王明新, 齐今笛, 孙向武, 张文艺 (1807)
上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系	董小芳, 邓黄月, 张彦, 朱志鹏, 王琳, 郑祥民, 周立旻 (1817)
DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响	张允华, 楼狄明, 谭丕强, 胡志远 (1828)
我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价	张秋秋, 潘申龄, 刘伟, 张昱, 安伟 (1835)
基于 Monte Carlo 模拟法对水源水体中微囊藻毒素的健康风险评估	王阳, 徐明芳, 耿梦梦, 黎明, 耿耕南 (1842)
北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险	张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 赵晓辉, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (1852)
长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素	孙语嫣, 白莹, 苏荣国, 石晓勇 (1863)
垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制	肖晓, 何小松, 高如泰, 席北斗, 张慧, 黄彩红, 李丹, 袁志业 (1873)
3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用	李立青, 胡楠, 刘雨情, 涂声亮, 陈华超 (1881)
三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响	陈成龙, 高明, 倪九派, 谢德体, 邓华 (1889)
NO ₃ ⁻ -N 负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响	姜应和, 李瑶, 张莹, 张翔凌 (1898)
湿地基质及阴极面积对人工湿地型微生物燃料电池去除偶氮染料同步产电的影响	李薛晓, 程思超, 方舟, 李先宁 (1904)
阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响	丁为俊, 于立亮, 陈杰, 成少安 (1911)
臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响	刘海龙, 付晶森, 郭雪峰, 柴建恬, 张忠民 (1918)
紫外线和次氯酸钠对 <i>Escherichia coli</i> 和 Poliovirus 的消毒作用	徐丽梅, 张崇森, 王晓昌, 吉铮, 周进宏 (1928)
不同沉淀 pH 值条件下制备的水合氧化铝对水中磷酸盐的吸附作用	王星星, 林建伟, 詹艳慧, 张志斌, 邢云青, 姜博汇, 储鸣 (1936)
树脂基纳米钛铝氧化物复合吸附剂同步去除水中磷和氟	陈家凯, 聂广泽, 刘志英, 姚远, 徐炎华 (1947)
灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响	朱培颖, 李大鹏, 于胜楠 (1957)
城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律	桑浪涛, 石烜, 张彤, 付博文, 金鹏康 (1965)
11 种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋	周林军, 古文, 刘济宁, 石利利, 徐炎华 (1972)
反硝化抑制硫酸盐还原的工艺特性	金鹏康, 杨珍瑞, 李蓉, 李岩, 周立辉 (1982)
Fe ⁽⁰⁾ -活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素	吕永涛, 刘婷, 曾玉莲, 孙婷, 张瑶, 王磊 (1991)
两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较	李惠娟, 彭党聪, 陈国燕, 王博, 姚倩, 卓杨 (1997)
基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响	闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (2006)
温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响	范军辉, 郝瑞霞, 朱晓霞, 万京京, 刘思远, 王丽沙 (2012)
SCAR 处理城市生活污水的效能及其微生物群落动态分析	杨波, 徐辉, 冯修平, 李方, 田晴, 马春燕 (2021)
喹啉降解菌 <i>Ochrobactrum</i> sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用	徐伟超, 吴翠平, 张玉秀, 张琪, 张怡鸣 (2030)
锰氧化菌 <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制	万文结, 薛芷筠, 张泽文, 何冬兰 (2036)
温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (2044)
包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析	许晓毅, 尤晓露, 吕晨培, 王斌, 胡碧波 (2052)
强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落	曹知平, 吴静, 左剑恶, 王晓璐, 王翀, 王广启, 王凯军, 钱易 (2059)
三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征	秦红, 任庆水, 杨文航, 李昌晓 (2065)
川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素	田琳琳, 朱波, 汪涛, 赵原, 董宏伟, 任光前, 胡磊 (2074)
双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N ₂ O 排放的影响	伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 陈春兰, 王娟, 魏文学, 李勇 (2084)
生物炭介导的不同地表条件下土壤 N ₂ O 的排放特征	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (2093)
垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征	熊瑛, 王龙昌, 杜娟, 赵琳璐, 周泉, 张赛 (2102)
广东省土壤 Cd 含量空间分布预测	孙慧, 郭治兴, 郭颖, 袁宇志, 柴敏, 毕如田, 杨静 (2111)
宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价	张鹏岩, 康国华, 庞博, 郭依, 何坚坚, 秦明周 (2125)
腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响	王青清, 蒋珍茂, 王俊, 魏世强 (2136)
紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征	李秋言, 赵秀兰 (2146)
生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用	吴志娟, 毕二平 (2154)
两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制	王彤彤, 马江波, 曲东, 张晓媛, 郑纪勇, 张兴昌 (2161)
牛粪源蛭蚶及其生物炭对 Pb ²⁺ 、Cd ²⁺ 的吸附特性	杜文慧, 朱维琴, 潘晓慧, 沈旭阳, 陈思远, 陈可乐, 坎吉汗·木沙拉, 张杭君, 丁颖 (2172)
C ₃ N ₄ /BiOBr 复合可见光催化剂的性能及其作用机制	鲍玥, 周旻昀, 邹骏华, 史宇滨, 万先凯, 史惠祥 (2182)
《环境科学》征稿简则 (2020) 《环境科学》征订启事 (2035) 信息 (1782, 1798, 1827)	

喹啉降解菌 *Ochrobactrum* sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用

徐伟超, 吴翠平, 张玉秀*, 张琪, 张怡鸣

(中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 喹啉是焦化废水中的难降解有机物之一, 以喹啉为唯一碳氮源从某焦化废水处理厂活性污泥中分离出 1 株喹啉降解菌 KDQ3, 16S rDNA 序列分析表明 KDQ3 为 *Ochrobactrum* sp., 其对喹啉降解的最适条件为 37℃ 和初始 pH 7.0~8.0, 喹啉降解动力学符合 Haldane 模型。KDQ3 能在 10.4 mg·L⁻¹ Cr(VI) 存在时降解 200 mg·L⁻¹ 喹啉。此外, KDQ3 能在实际好氧池焦化废水环境中降解喹啉和提高 COD 去除率, 说明该菌具有生物强化焦化废水的应用潜力。

关键词: 焦化废水; 苍白杆菌; 喹啉; 降解动力学; 生物强化

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)05-2030-06 DOI: 10.13227/j.hjks.201610236

Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain *Ochrobactrum* sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater

XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu*, ZHANG Qi, ZHANG Yi-ming

(School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Quinoline is one of the common refractory organic pollutants in coking wastewater. An aerobic bacterial strain KDQ3 capable of utilizing quinoline as the sole source of carbon, nitrogen and energy was isolated from activated sludge of a coking wastewater treatment plant. The morphological properties and the 16S rDNA sequence identified KDQ3 as *Ochrobactrum* sp.. The optimized temperature and initial pH for quinoline degradation were 37℃ and 7.0-8.0, and the degradation kinetics fit with Haldane's model. KDQ3 could degrade 200 mg·L⁻¹ quinoline in the presence of 10.4 mg·L⁻¹ hexavalent chromium. In addition, KDQ3 was able to degrade quinoline in real coking wastewater of aerobic tank and improve the removal of COD, indicating that KDQ3 had the potential of bioaugmentation for removal of quinoline from coking wastewater.

Key words: coking wastewater; *Ochrobactrum* sp.; quinoline; degradation kinetics; bioaugmentation

焦化废水是煤高温干馏、煤气净化、副产品回收与精制过程中产生的一种有机废水, 可生化性差, 其中的难降解有机污染物主要有酚类化合物、氮杂环化合物和多环芳烃等^[1]。喹啉及其衍生物是焦化废水中主要的多环芳香含氮杂环化合物, 其毒性大, 致畸性和致癌性作用强^[2~4], 因此, 分离鉴定高效的喹啉降解菌对于生物法去除焦化废水中喹啉及其衍生物具有广泛的应用前景。

焦化废水的处理主要包括脱酚、蒸氨、脱氰、除油、生化处理、混凝沉淀和高级氧化等过程, 其中生化处理是焦化废水处理的主体和核心^[5]。近年来, 一些喹啉降解菌已从工业废水污泥、煤和页岩液化地等分离出来, 如红球菌(*Rhodococcus* sp.)^[6]、从毛单胞菌(*Comamonas* sp.)^[7]、脱硫杆菌(*Thiobacillus* sp.)^[8]、皮氏伯克霍尔德菌(*Burkholderia pickettii*)^[9]和假单胞菌(*Pseudomonas* sp.)^[10]等。1988 年 Holmes 等^[11]首次报道鉴定了 *Ochrobactrum anthropi*, 现有的研究表明 *Ochrobactrum*

sp. 能降解苯酚^[12]及菲、芘和荧蒽等多环芳烃^[13,14], 此外, 还具有 Cr 和 Pb^[15]及 As^[16]等重金属耐性, 且能将 Cr(VI) 还原为 Cr(III)^[17]。另外, 在焦化废水反硝化生物反应器中分离鉴定的 2 株 *Ochrobactrum* sp. 具有降解喹啉的作用^[18], 但其喹啉降解特性和生物强化作用的研究尚未见报道。

焦化废水中含有 Cu、Hg、Cr 和 Zn 等重金属污染物^[19], 喹啉降解菌在 Cr(VI) 存在下的降解作用未见报道, 研究重金属离子存在下细菌对喹啉的降解作用对于处理含有重金属和有机污染物的工业废水具有重要意义。本文以某焦化厂的活性污泥为菌源, 以喹啉为唯一碳氮源和能源分离鉴定喹啉降解菌, 研究其好氧降解特性, 并考察其在实际焦化废水

收稿日期: 2016-10-31; 修订日期: 2016-12-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(31370281, U1632111); 中央高校基本科研业务费专项(2010YH05); 全国大学生创新训练计划项目(C201603062)

作者简介: 徐伟超(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为废水处理, E-mail: comeonaputo@163.com

* 通信作者, E-mail: zhangyuxiu@cumt.edu.cn

中的喹啉去除作用, 以期为焦化废水和重金属-有机物复合污染废水的生物处理提供理论依据与菌源。

1 材料与方法

1.1 培养基

牛肉膏蛋白胨培养基^[20], 用于喹啉降解菌的富集培养和鉴定。

无机盐培养基 (MSM)^[6], 每升溶液中含有 Na_2HPO_4 4.26 g, KH_2PO_4 2.65 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.20 g, CaCl_2 0.006 g 和微量元素溶液 ($\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.12 g·L⁻¹, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 2 g·L⁻¹, $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.2 g·L⁻¹, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.1 g·L⁻¹, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.2 g·L⁻¹, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.09 g·L⁻¹, H_3BO_3 0.006 g·L⁻¹) 1 mL, pH 为 7.0。

1.2 菌株的富集、分离与鉴定

取某焦化厂好氧池活性污泥 20 mL, 接入含有 100 mL 富集培养基的三角瓶中, 在 37℃、150 r·min⁻¹ 转速条件下培养 1 d, 沉淀 10 min 后, 取 2 mL 上清液转接到含 200 mg·L⁻¹ 喹啉的无机盐培养基中培养 2~3 d, 按照 5% 的接种量转接到含 300 mg·L⁻¹ 喹啉的无机盐培养基中培养, 逐步提高喹啉浓度, 驯化培养喹啉降解菌。将驯化培养的菌液稀释均匀涂在含 200 mg·L⁻¹ 喹啉的无机盐平板培养基上, 在 37℃ 生化培养箱中培养 3~4 d, 挑取单个菌落纯化培养, 进行菌株鉴定以及喹啉降解特性研究。

菌种鉴定用形态观察和 16S rDNA 序列分析方法。形态观察用透射电子显微镜 (JEM-1400, 日本电子 JEDL) 观察。16S rDNA 序列扩增用通用引物: 27F 5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3' 和 1492R 5'-TACGGCTACCTTGTACGACTT-3', 在 NCBI 数据库用 BLAST 程序比对分析。

1.3 环境条件对菌株喹啉降解的影响

将菌株接至含有 200 mg·L⁻¹ 喹啉的牛肉膏蛋白胨培养基中震荡培养 (37℃、150 r·min⁻¹) 至对数期, 在 4℃ 下 12000 r·min⁻¹ 离心 10 min 收集菌体, 无菌水洗涤 2 次, 用无机盐培养基将菌株生物量 (D_{600}) 调至 1.5, 得到活化的种子菌悬液。将活化的菌悬液以 5% 接种量接入含 300 mg·L⁻¹ 喹啉的无机盐培养基中, 分别在不同温度 (23、28、32、37 和 42℃) 下振荡培养, 24 h 时取样测定菌株生物量及剩余喹啉浓度, 确定最适降解温度。在最适温度下, 24 h 时测定不同初始 pH 值 (4、5、6、7、8、9、10 和 11) 条件下菌株的生物量和剩余喹啉浓度, 确定最适生长和喹啉降解 pH。在最佳培养条件下, 测定

不同初始喹啉浓度 (30、60、100、150、200、250、300、400、500 和 600 mg·L⁻¹) 对菌株生长和喹啉降解速率的影响; 根据喹啉浓度和生物量随时间的变化关系计算比降解速率, 用 Matlab 软件按照底物抑制型 Haldane 方程进行拟合。

在 200 mg·L⁻¹ 喹啉的无机盐培养基中加入 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, 使 Cr(VI) 浓度分别为 2.6、5.2、7.8 和 10.4 mg·L⁻¹, 在 37℃ 下、150 r·min⁻¹ 振荡培养, 定时取样, 测定菌株的生物量和剩余喹啉浓度。

1.4 菌株对实际焦化废水中喹啉的降解作用

将取自某焦化废水处理厂的曝气池进水 (CW) 用双层滤膜过滤后, 用二沉池污泥 (S) 将 MLSS 调至约 4%, 将活化的菌悬液以 5% 接种量接入含有 150 mL 焦化废水中的三角瓶中, 在 37℃ 下进行摇瓶实验, 分析焦化废水中的喹啉、苯酚和 COD 的去除率。

1.5 分析方法

细菌生物量用可见分光光度计在 600 nm 下测定的光密度 (D_{600}) 表示^[6], 喹啉浓度用紫外分光光度计在 313 nm 波长下测定^[21], 苯酚浓度测定用 4-氨基安替比林法^[22]。COD 浓度测定用快速消解分光光度法^[23]。

2 结果与讨论

2.1 KDQ3 菌株的分离和鉴定

某焦化废水处理厂活性污泥中的微生物菌群经富集、分离和驯化后, 得到 1 株喹啉降解菌, 命名为 KDQ3, 其在 24 h 内可将 300 mg·L⁻¹ 喹啉降解 93.6%。在牛肉膏平板培养基上, KDQ3 菌落为圆形, 边缘光滑圆润, 淡黄色, 质地湿润。透射电子显微镜表明 KDQ3 菌为杆菌, 有鞭毛 (图 1)。BLAST 比较分析显示 KDQ3 菌株与 NCBI 数据库中的

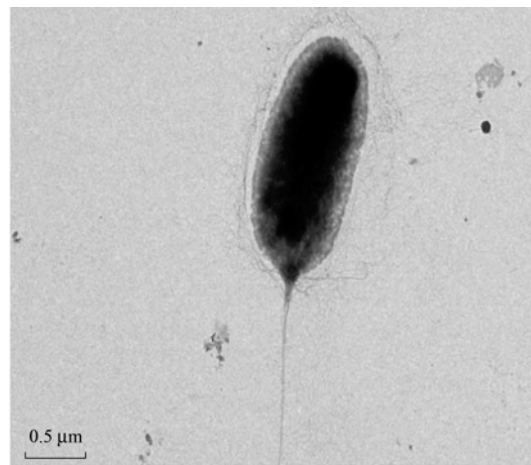


图 1 KDQ3 菌株的透射电子显微镜图

Fig. 1 Transmission electron micrograph of KDQ3 strain

Ochrobactrum sp. 的同源性达到 98%, 表明该菌属于 *Ochrobactrum* sp. (GenBank 注册号: KY681806)。

2.2 环境因素对 KDQ3 菌株生长和喹啉降解的影响

温度影响细胞膜的流动性和物质的溶解, 也影响细胞生长和酶促反应速率。图 2 结果表明在 23℃ 下, KDQ3 的生物量 D_{600} 和喹啉降解率(24 h)分别为 0.15 和 12.4%, D_{600} 和喹啉降解率随温度升高而增大, 37℃ 时均达到最大值; 然后, 其又随着温度的继续升高而急剧下降, 当温度达到 42℃ 时, D_{600} 几乎没有增加, KDQ3 死亡, 喹啉也没有降解。说明在 23℃ 下细菌生长缓慢, 喹啉降解能力减弱; 而在 42℃ 下, 可能是由于高温引起蛋白质变性, 致使细菌死亡, 喹啉降解能力丧失。从焦化废水活性污泥中分离的 *Acidovorax* sp. DQS-01 的最适温度为 35℃^[24], *Rhodococcus* sp. QL2 最适温度为 37℃^[6], 而 *Pseudomonas* sp. BW003^[25] 和 BW004 均为 30℃^[26]。

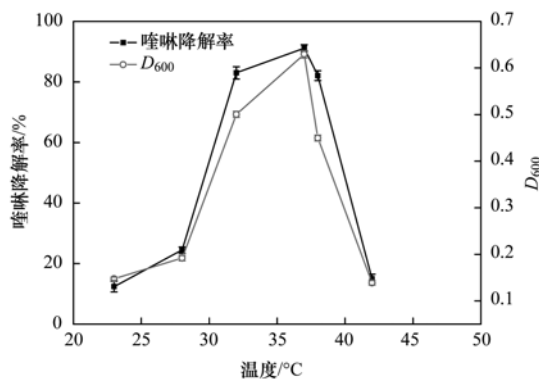


图 2 温度和 pH 对 KDQ3 菌株生长和喹啉降解的影响

Fig. 2 Effects of temperature and pH on the growth and quinoline degradation of KDQ3

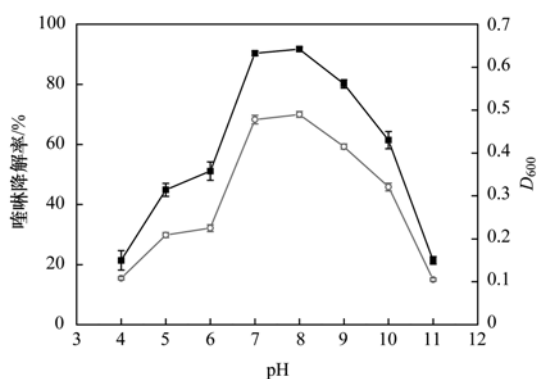
2.3 KDQ3 降解动力学

在最佳的温度和 pH 条件下, 分析 KDQ3 降解喹啉的动力学。图 3 结果表明在 23.73 ~ 492.27 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 喹啉浓度范围内, 初始喹啉浓度越高, KDQ3 生长的适应期越长, 喹啉对菌株生长的抑制作用越大, 喹啉完全降解需要的时间也越长; 当喹啉浓度达 579.29 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, KDQ3 的 D_{600} 在 48 h 内不增反降, 喹啉浓度降低甚微, 表明高浓度喹啉具有抑制 KDQ3 生长和喹啉降解的作用。

根据 KDQ3 降解喹啉的比降解速率与底物浓度的实验数据, 通过 Matlab 软件按照 Haldane 方程对比降解速率进行非线性最小二乘曲线拟合, 拟合的喹啉降解动力学曲线和实验数据结果如图 4, 得出 KDQ3 降解喹啉的动力学参数为: $q_{\max} = 0.18 \text{ h}^{-1}$ 、 $K_s = 16.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $K_i = 241.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。 K_s 为半饱和常数, K_i 为抑制系数, K_i 值越高, 底物对微生物毒

因此, 在实际污水处理中, 好氧池的温度应保持在 30 ~ 37℃, 以提高菌株的喹啉降解效率。

pH 影响微生物对营养物质的吸收和代谢过程。图 2 结果表明 D_{600} 与喹啉降解率成正相关, 在初始 pH 7 ~ 8 时, KDQ3 菌株生长最快, 生物活性最高, 24 h 时喹啉的降解率高达 91.8%, 说明 KDQ3 降解喹啉的最适初始 pH 为 7 ~ 8。 *Acidovorax* sp. DQS-01 降解喹啉的最适 pH 为 8 ~ 10^[24], *Rhodococcus* sp. QL2 的最适 pH 为 8 ~ 9^[6], *Pseudomonas putida* WS-5 降解喹啉的最适 pH 为 9^[27], 而 *Pseudomonas* sp. BW003 和 BW004 的最适 pH 为 7 ~ 8^[25,26]。说明喹啉降解菌的最适 pH 为 7 ~ 10, 碱性环境可中和喹啉降解产生的酸性产物, 促进微生物的代谢过程, 增强微生物对喹啉的降解利用。同时, 焦化废水中存在大量的氨氮, 蒸氨后废水的 pH 约 8 ~ 9, 呈弱碱性, 所以 KDQ3 可用于强化焦化废水的生物处理过程。



性越低, 而微生物对底物的耐受性越高。 *Acidovorax* sp. DQS-01 降解喹啉的动力学参数为 $q_{\max} = 0.64 \text{ h}^{-1}$ 、 $K_s = 164 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $K_i = 253 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[24], *Rhodococcus* sp. QL2 降解喹啉的动力学参数为 $q_{\max} = 0.49 \text{ h}^{-1}$ 、 $K_s = 68.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $K_i = 387.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[6], *Burkholderia pickettii* 降解喹啉的动力学参数为 $q_{\max} = 0.44 \text{ h}^{-1}$ 、 $K_s = 166.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $K_i = 650 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[9]; 与之相比, KDQ3 的最大比降解速率 (0.18 h^{-1}) 和抑制系数 ($241.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 均较小, 然而, 在好氧池中喹啉浓度一般在 50 ~ 150 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 远低于抑制系数 K_i , 所以, KDQ3 作为活性污泥微生物菌群中的一员可能在降解喹啉过程中发挥了重要作用。

2.4 KDQ3 在 Cr(VI) 存在时的喹啉降解作用

焦化废水中含有重金属 Cr 污染物^[19], 在 2.6、5.2、7.8 或 10.4 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr(VI) 浓度下, 以 200

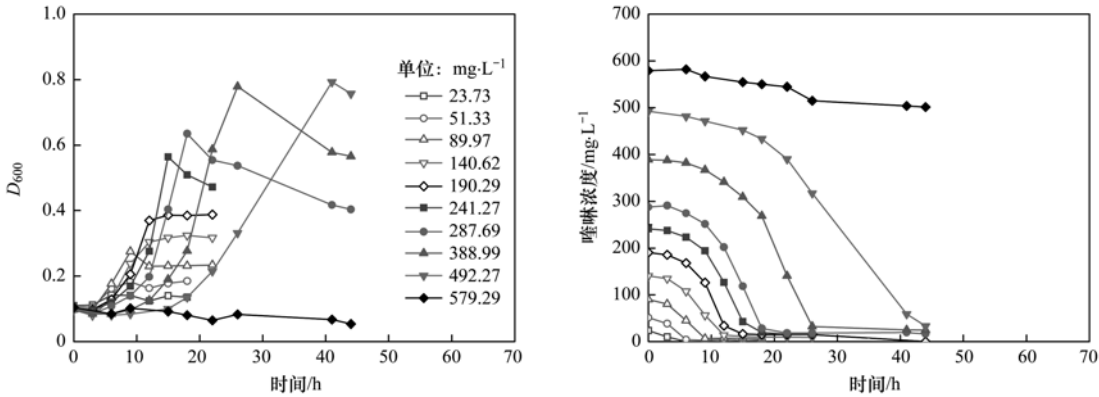


图3 不同喹啉浓度对 KDQ3 菌株生物量和喹啉降解率的影响

Fig. 3 Effects of quinoline concentrations on biomass and quinoline degradation of KDQ3

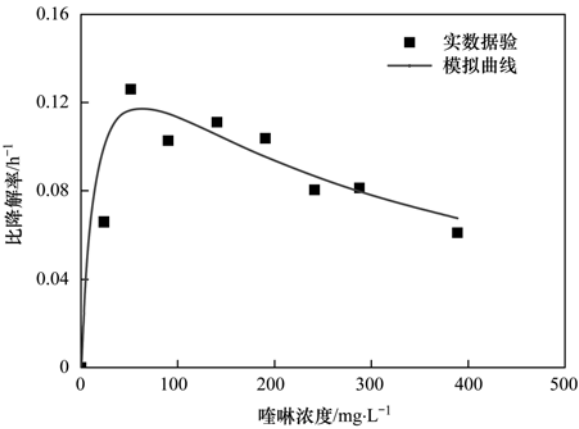


图4 实验数据与回归曲线

Fig. 4 Measured values and regression curve

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 喹啉为唯一碳氮源,分析Cr(VI)对喹啉的降解作用. 结果表明在接种 48 h 内,KDQ3 的生物量随着时间的增加而增加,喹啉降解率的变化趋势与生物量一致(图 5);48 h 时 KDQ3 的生物量达到最大值(0.26 ~ 0.31),喹啉降解率也达到最大值(88.1% ~ 92.7%),表明喹啉的降解是由于 KDQ3 的生长所致. 在细菌的快速生长阶段(16 ~ 48 h),KDQ3 的生物量随着Cr(VI)浓度升高而降低,24 h

差异较大;同样,喹啉降解率也随着Cr(VI)浓度升高而降低,24 h 差异较大,表明Cr(VI)具有抑制KDQ3 生长和喹啉降解的作用. 虽然 $10.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cr(VI)对 KDQ3 生长具有一定的抑制作用,但在其稳定生长期,喹啉的降解率也能达到 88.1%,表明 KDQ3 在 $2.6\sim10.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cr(VI)存在下能有效地降解喹啉. 水体中的Cr(VI)多溶于水中,而Cr(III)可吸附在固体物质上而存在于沉积物(底泥)中,Cr(VI)对微生物的毒性远高于Cr(III)^[28]. 皮革厂污水是重金属和有机物复合污染废水,Sultan等^[17]从皮革厂污水中分离的 *Ochrobactrum intermedium* STCr-5 能高效还原 $100\sim1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Cr(VI),在 72 h 内其能完全还原 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Cr(VI),96 h 对 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cr(VI)的还原率为 50%. 从制革废水中分离的 *Ochrobactrum intermedium* CrT-1 在 24 h 对 100 、 500 和 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Cr(VI)的还原率分别达 82%、28% 和 16%^[29]. 从铬污染填埋场分离的 *Ochrobactrum* sp. CScr-3 能高效还原 $100\sim800\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Cr(VI),在 30 h 内能将 $282.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Cr(VI)还原 90%^[30],表明 *Ochrobactrum* sp. 具有

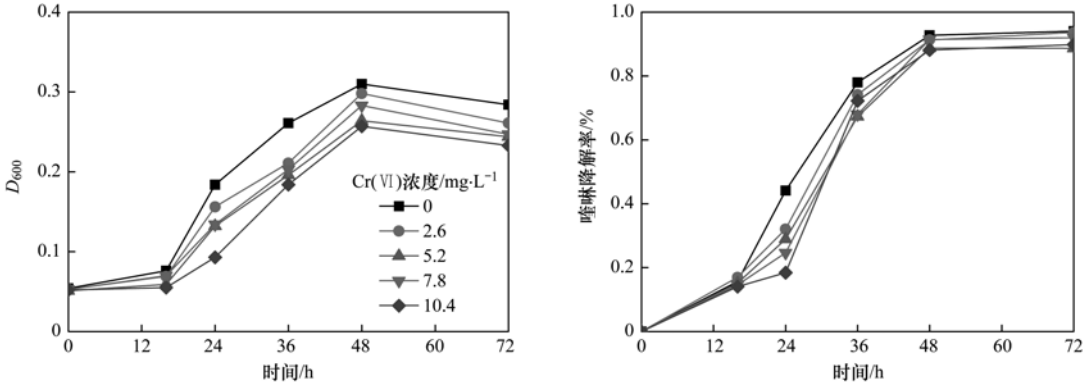


图5 Cr(VI)浓度对 KDQ3 生长和喹啉降解的影响

Fig. 5 Effects of Cr(VI) concentrations on the growth and quinoline degradation of KDQ3

较高的 Cr(VI) 耐受和还原能力. 同时, 由于 *Ochrobactrum* sp. 具有广谱的有机物利用范围, 可降解苯酚、萘、茚、蒽、甲基对硫磷和硝基酚等多种难降解有机物^[12~14]. 本研究首次报道 KDQ3 具有在 Cr(VI) 存在下的降解喹啉能力. 所以 *Ochrobactrum* sp. 可能在制革和焦化企业产生的重金属-有机物复合污染的工业废水处理领域拥有潜在的应用前景.

2.5 KDQ3 在实际焦化废水中的降解作用

某焦化废水处理厂曝气池进水的 COD 为 650 ~ 750 mg·L⁻¹、苯酚为 50 ~ 150 mg·L⁻¹ 和喹啉为 80 ~ 120 mg·L⁻¹, pH 7 ~ 8. 图 6 结果表明在未接种的对照焦化废水 (CW + S) 中, 喹啉浓度在 12 ~ 24 h 有上升趋势, 而在接种 KDQ3 的焦化废水 (CW + S +

KDQ3) 中, 喹啉浓度在 18 h 开始下降, 24 h 时喹啉降解率达 23.3%. 活性污泥中含有苯酚降解菌, 对照和接种焦化废水中的苯酚均在 12 h 内迅速降解, 然后稳定在 71 mg·L⁻¹. COD 分析表明在 16 h 内对照与接种焦化废水的 COD 均呈下降趋势, 对照和接种的 COD 去除率 (分别为 20.7% 和 25.9%) 相似, 这可能是由于苯酚降解导致 COD 降低所致; 16 h 后苯酚不再降解, 对照的 COD 也停止下降, 而接种的 COD 由于喹啉的开始降解而降低; 在 24 h 时接种的 COD 去除率达到 31.4%, 高于对照的 COD 去除率 (20.9%). 表明 KDQ3 能在含有高浓度酚类和难降解有机物的焦化废水中降解喹啉, 且能与污泥中微生物协同作用降低 COD, 表明 KDQ3 具有生物强化处理焦化废水的潜力.

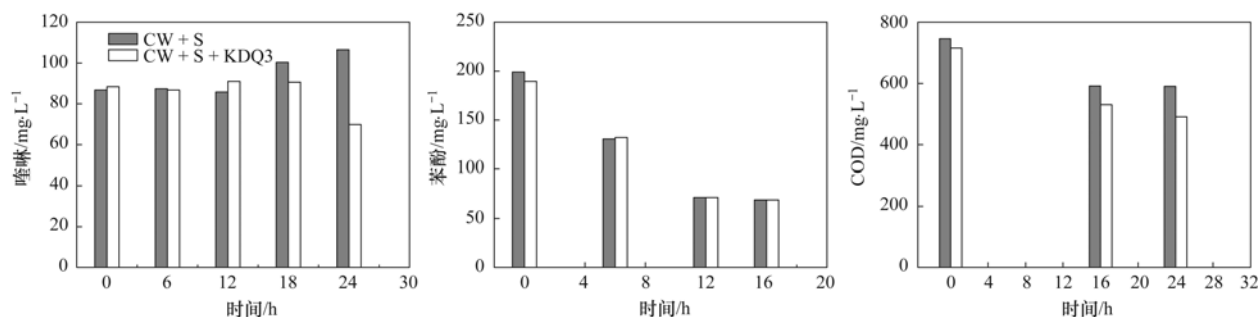


图 6 KDQ3 对焦化废水中喹啉、苯酚和 COD 的去除

Fig. 6 Removal of quinoline, phenol and COD from coking wastewater by strain KDQ3

3 结论

(1) 经富集驯化培养从某焦化废水处理厂好氧池污泥中筛选出 1 株喹啉降解菌 *Ochrobactrum* sp. KDQ3, 其降解喹啉的最适条件为 37℃ 和 pH 7.0 ~ 8.0; 喹啉降解动力学符合 Haldane 方程, 动力学参数为: $q_{\max} = 0.179 \text{ h}^{-1}$ 、 $K_s = 16.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $K_i = 241.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

(2) KDQ3 能在 10.4 mg·L⁻¹ Cr(VI) 存在下降解 200 mg·L⁻¹ 喹啉, 并能在实际焦化废水中降解喹啉和去除 COD, 所以, KDQ3 具有焦化废水生物强化的应用潜力.

参考文献:

- [1] 任源, 韦朝海, 吴超飞, 等. 焦化废水水质组成及其环境学与生物学特性分析[J]. 环境科学学报, 2007, 27(7): 1094-1100.
Ren Y, Wei C H, Wu C F, et al. Environmental and biological characteristics of coking wastewater [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(7): 1094-1100.
- [2] Bai Y H, Sun Q H, Xing R, et al. Removal of pyridine and quinoline by bio-zeolite composed of mixed degrading bacteria

- and modified zeolite[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 181(1-3): 916-922.
- [3] LaVoie E J, Shigematsu A, Adams E A, et al. Tumor-initiating activity of quinoline and methylated quinolines on the skin of SENCAR mice[J]. Cancer Letters, 1984, 22(3): 269-273.
- [4] Qiao L, Wang J L. Biodegradation characteristics of quinoline by *Pseudomonas putida* [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(19): 7683-7686.
- [5] Zhu X B, Tian J P, Chen L J. Phenol degradation by isolated bacterial strains: kinetics study and application in coking wastewater treatment [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2012, 87(1): 123-129.
- [6] 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.
Zhu S N, Liu D Q, Fan L, et al. Isolation, identification and degradation characteristics of a quinoline-degrading bacterium *Rhodococcus* sp. QL2 [J]. Environmental Science, 2008, 29(2): 488-493.
- [7] 崔明超, 李丽, 陈繁忠, 等. 喹啉降解菌 *Rhodococcus* sp. QL2 的分离鉴定及降解特性[J]. 环境科学学报, 2004, 24(1): 171-173.
Cui M C, Li L, Chen F Z, et al. Study of biodegradation pathway of quinoline by *Comamonas testosteroni* [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2004, 24(1): 171-173.
- [8] Johansen S S, Licht D, Arvin E, et al. Metabolic pathways of

- quinoline, indole and their methylated analogs by *Desulfobacterium indolicum* (DSM 3383) [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1997, **47**(3): 292-300.
- [9] 韩力平, 王建龙, 刘恒, 等. 固定化及游离态皮氏伯克霍尔德氏菌(*Burkholderia pickettii*)降解喹啉的试验研究[J]. 环境科学学报, 2000, **20**(3): 379-398.
- Han L P, Wang J L, Liu H, et al. Quinoline biodegradation by immobilized and free cells of *Burkholderia pickettii* [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, **20**(3): 379-398.
- [10] Jia R, Zhang Y X, Zhang Q, et al. Isolation and degradation kinetics of the quinoline degradation bacterium strains from coking wastewater [J]. Advanced Materials Research, 2014, **864-867**: 209-212.
- [11] Holmes B, Popoff M, Kiredjian M, et al. *Ochrobactrum anthropi* gen. nov., sp. nov. from human clinical specimens and previously known as group Vd [J]. International Journal of Systematic Bacteriology, 1988, **38**(4): 406-416.
- [12] El-sayed W S, Ibrahim M K, Abu-shady M, et al. Isolation and identification of a novel strain of the genus *Ochrobactrum* with phenol-degrading activity [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2003, **96**(3): 310-312.
- [13] Wu Y R, He T T, Zhong M Q, et al. Isolation of marine benzo [a] pyrene-degrading *Ochrobactrum* sp. BAP5 and proteins characterization [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, **21**(10): 1446-1451.
- [14] 卢晓霞, 吴淑可, 侯珍, 等. 焦化厂污染土壤中多环芳烃降解菌的分离及降解特性[J]. 应用与环境生物学报, 2011, **17**(5): 722-726.
- Lu X X, Wu S K, Hou Z, et al. Isolation and degrading properties of PAHs-degrading bacteria from the contaminated soil of a coking Plant [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2011, **17**(5): 722-726.
- [15] Waranusantigul P, Lee H, Kruatrachue M, et al. Isolation and characterization of lead-tolerant *Ochrobactrum intermedium* and its role in enhancing lead accumulation by *Eucalyptus camaldulensis* [J]. Chemosphere, 2011, **85**(4): 584-590.
- [16] Branco R, Sousa T, Piedade A P, et al. Immobilization of *Ochrobactrum tritici* As5 on PTFE thin films for arsenite biofiltration [J]. Chemosphere, 2016, **146**: 330-337.
- [17] Sultan S, Hasnain S. Characterization of an *Ochrobactrum intermedium* strain STCr- 5 manifesting high level Cr (VI) resistance and reduction potential [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2006, **39**(4): 883-888.
- [18] 洪璇, 张晓君, 孟智奇, 等. 废水反硝化生物反应器中喹啉降解细菌的分离与特性[J]. 应用与环境生物学报, 2008, **14**(6): 803-808.
- Hong X, Zhang X J, Meng Z Q, et al. Isolation and characteristics of quinoline degrading bacteria from wastewater denitrifying bioreactor [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2008, **14**(6): 803-808.
- [19] 韦朝海. 煤化工中焦化废水的污染、控制原理与技术应用 [J]. 环境化学, 2012, **31**(10): 1465-1472.
- Wei C H. Pollution control principles and technology applications in the treatment of coking wastewater from coal chemical industry [J]. Environmental Chemistry, 2012, **31**(10): 1465-1472.
- [20] 张玉秀, 蒙小俊, 柴团耀. 苯酚降解菌红球菌 (*Rhodococcus* sp.) P1 的鉴定及其在焦化废水中的应用[J]. 微生物学报, 2013, **53**(10): 1117-1124.
- Zhang Y X, Meng X J, Chai T Y. Characterization of phenol-degrading *Rhodococcus* sp. strain P1 from coking wastewater [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2013, **53**(10): 1117-1124.
- [21] 柏耀辉, 孙庆华, 温东辉, 等. 假单胞杆菌 BC001 对吡啶和喹啉的生物去除 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2008, **44**(2): 237-242.
- Bai Y H, Sun Q H, Wen D H, et al. Biological removal of a bacterial strain *Pseudomonas* sp. BC001 on pyridine and quinoline [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2008, **44**(2): 237-242.
- [22] 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.
- [23] HJ/T 399-2007 水质 化学需氧量的测定 快速消解分光光度法 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [24] 李静, 李文英. 喹啉降解菌筛选及其对焦化废水强化处理 [J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1385-1391.
- Li J, Li W Y. Screening of a highly efficient quinoline-degrading strain and its enhanced biotreatment on coking waste water [J]. Environmental Science, 2015, **36**(4): 1385-1391.
- [25] 柏耀辉, 赵翠, 肖亚娜, 等. 降解喹啉的假单胞菌 BW003 菌株的分离、鉴定和降解特性 [J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3546-3553.
- Bai Y H, Zhao C, Xiao Y N, et al. Isolation, identification, and biodegradation characteristics of a quinoline-degrading bacterium [J]. Environmental Science, 2008, **29**(12): 3546-3553.
- [26] 郑中原, 赵翠, 温东辉, 等. 喹啉降解菌 BW004 的分离、鉴定及降解特性 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2013, **49**(4): 683-688.
- Zheng Z Y, Zhao C, Wen D H, et al. Isolation, identification, and metabolic characteristics of a quinoline degrading bacterium [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2013, **49**(4): 683-688.
- [27] 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.
- Wang P M, Huo M X, Zhu S Y, et al. Screening of quinoline-degradation bacteria and their biodegradation capability at low temperature [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, **7**(1): 154-158.
- [28] Sarangi A, Krishnan C. Comparison of in vitro Cr(VI) reduction by CFEs of chromate resistant bacteria isolated from chromate contaminated soil [J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(10): 4130-4137.
- [29] Faisal M, Hasnain S. Comparative study of Cr(VI) uptake and reduction in industrial effluent by *Ochrobactrum intermedium* and *Brevibacterium* sp. [J]. Biotechnology Letters, 2004, **26**(21): 1623-1628.
- [30] He Z G, Gao F L, Sha T, et al. Isolation and characterization of a Cr(VI)-reduction *Ochrobactrum* sp. strain CSCr- 3 from chromium landfill [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **163**(2-3): 869-873.

CONTENTS

Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District	LIU Jing-da, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1733)
Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing	LIANG Jing-shu, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (1743)
Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province	GAO Yuan-guan, ZHANG Kai, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (1753)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Dajiuahu, Shennongjia, China	JIN Meng-yun, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1760)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City	DUAN Jing-chun, ZHOU Xue-ming, ZHANG He-feng, <i>et al.</i> (1769)
Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing	LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei, LIN An-guo, <i>et al.</i> (1775)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant	SHAO Zhu-ze, ZHENG Guo-di, WANG Yuan-gang, <i>et al.</i> (1783)
Degradation Characteristics of Composite CVOCs by Non-thermal Plasma	JIANG Li-ying, ZHANG Di, GUO Hai-qian, <i>et al.</i> (1792)
Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng	WU Yuan-yuan, LI Ru-mei, PENG Lin, <i>et al.</i> (1799)
Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road; A Case Study in Changzhou	YAO Jing-bo, WANG Ming-xin, QI Jin-di, <i>et al.</i> (1807)
Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai	DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (1817)
Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle	ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (1828)
Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China	ZHANG Qiu-qi, PAN Shen-ling, LIU Wei, <i>et al.</i> (1835)
Health Risk Assessment of Microcystins from Drinking Water Source by Monte Carlo Simulation Method	WANG Yang, XU Ming-fang, GENG Meng-meng, <i>et al.</i> (1842)
Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (1852)
Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas	SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (1863)
Complexation Between Copper(II) and Colored Dissolved Organic Matter from Municipal Solid Waste Landfill	XIAO Xiao, HE Xiao-song, GAO Ru-tai, <i>et al.</i> (1873)
Effects of Three Bioretention Configurations on Dissolved Nitrogen Removal from Urban Stormwater	LI Li-qing, HU Nan, LIU Yu-qing, <i>et al.</i> (1881)
Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1889)
Effects of NO ₃ ⁻ -N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark ...	JIANG Ying-be, LI Yao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1898)
Effects of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland with Different Support Matrix and Cathode Areas on the Degradation of Azo Dye and Electricity Production	LI Xue-xiao, CHENG Si-chao, FANG Zhou, <i>et al.</i> (1904)
Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells	DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Joint-reaction Combined by Ozonation and Coagulation on Aquatic Organic Matters	LIU Hai-long, FU Jing-miao, GUO Xue-feng, <i>et al.</i> (1918)
Disinfection Action of Ultraviolet Radiation and Chlorination on <i>Escherichia coli</i> and Poliovirus	XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1928)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution on Hydrous Zirconium Oxides Precipitated at Different pH Values	WANG Xing-xing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1936)
Performance of Polymer-based Titanium and Zirconium Oxides Composite Adsorbent for Simultaneous Removal of Phosphorus and Fluorine from Water	CHEN Jia-kai, NIE Guang-ze, LIU Zhi-ying, <i>et al.</i> (1947)
Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms	ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan (1957)
Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network	SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, <i>et al.</i> (1965)
Fate of Eleven Phthalic Acid Esters in Aerobic Sewage Treatment System	ZHOU Lin-jun, GU Wen, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (1972)
Characteristics of Denitrification Inhibiting Sulfate Reducing Process	JIN Peng-kang, YANG Zhen-rui, LI Rong, <i>et al.</i> (1982)
Enhanced Short-cut Denitrification by Fe ⁽⁰⁾ -activated Carbon and Its Influencing Factors	LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, <i>et al.</i> (1991)
Comparison of Operating Performance of Partial Nitrification Systems with Two Different Inhibition Strategies	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (1997)
Effect of Substrate Ratio on Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX in ABR	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (2006)
Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, ZHU Xiao-xia, <i>et al.</i> (2012)
Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthen Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater	YANG Bo, XU Hui, FENG Xiu-ping, <i>et al.</i> (2021)
Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain <i>Ochrobactrum</i> sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater	XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2030)
Manganese Oxidation Characteristics and Oxidation Mechanism of a Manganese-Oxidizing Bacterium <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16	WAN Wen-jie, XUE Zhi-jun, ZHANG Ze-wen, <i>et al.</i> (2036)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2044)
Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Analysis of Activated Sludge Immobilization	XU Xiao-yi, YOU Xiao-lu, LÜ Chen-pei, <i>et al.</i> (2052)
Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge	CAO Zhi-ping, WU Jing, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (2059)
Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, <i>et al.</i> (2065)
Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin	TIAN Lin-lin, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (2074)
Effect of Dicyandiamide on N ₂ O Emission in Fallow Paddy Field and Rape Cropping	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2084)
Characteristics of Biochar-mediated N ₂ O Emissions from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (2093)
Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China	XIONG Ying, WANG Long-chang, DU Juan, <i>et al.</i> (2102)
Prediction of Distribution of Soil Cd Concentrations in Guangdong Province, China	SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, <i>et al.</i> (2111)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Suya Lake	ZHANG Peng-yan, KANG Guo-hua, PANG Bo, <i>et al.</i> (2125)
Effects of the Active Components of Humic Acids and Their Proportions on the Dynamics of Lead Transformation and Availability in Purple Alluvial Soil	WANG Qing-qing, JIANG Zhen-mao, WANG Jun, <i>et al.</i> (2136)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil	LI Qiu-yan, ZHAO Xiu-lan (2146)
Enhanced Sorption of Cetirizine to Loessial Soil Amended with Biochar	WU Zhi-juan, BI Er-ping (2154)
Characteristics and Mechanism of Copper Adsorption from Aqueous Solutions on Biochar Produced from Sawdust and Apple Branch	WANG Tong-tong, MA Jiang-bo, QU Dong, <i>et al.</i> (2161)
Adsorption of Pb ²⁺ and Cd ²⁺ from Aqueous Solution Using Vermicompost Derived from Cow Manure and Its Biochar	DU Wen-hui, ZHU Wei-qin, PAN Xiao-hui, <i>et al.</i> (2172)
Performance and Mechanism Study of Visible Light-driven C ₃ N ₄ /BiOBr Composite Photocatalyst	BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, <i>et al.</i> (2182)