

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第2期

Vol.33 No.2

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于人体健康风险的水污染事件污染物安全阈值研究 郑丙辉, 罗锦洪, 付青, 秦延文, 胡林林 (337)

基于人体健康风险的水污染事件遗传性致癌物安全浓度研究 罗锦洪, 郑丙辉, 付青, 黄民生 (342)

湿地水环境健康评价方法及案例分析 李玉凤, 刘红玉, 郝敬锋, 郑因, 曹晓 (346)

北运河下游典型河网区水体中氮磷分布与富营养化评价 单保庆, 菅宇翔, 唐文忠, 张洪 (352)

漳卫南运河流域水质时空变化特征及其污染源识别 徐华山, 徐宗学, 唐芳芳, 于伟东, 程燕平 (359)

黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用 安乐生, 赵全升, 叶思源, 刘贯群, 丁喜桂 (370)

沉积物扰动持续时间对悬浮物中磷形态数量分布的影响 李大鹏, 黄勇, 李勇, 潘杨 (379)

沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响 王立志, 王国祥, 俞振飞, 周贝贝, 陈秋敏, 李振国 (385)

长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价 卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 黄国忠, 胡文 (393)

洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究 张文斌, 余辉 (399)

降雨对农家堆肥氮磷流失的影响及其面源污染风险分析 彭莉, 王莉玮, 杨志敏, 陈玉成, 乔俊婧, 赵中金 (407)

浅水湖泊水动力过程对藻型湖区水体生物光学特性的影响 刘笑菡, 冯龙庆, 张运林, 赵林林, 朱梦圆, 时志强, 殷燕, 丁艳青 (412)

基于半分析模型的太湖春季水体漫衰减系数 K_d (490) 估算及其遥感反演 刘忠华, 李云梅, 李瑞云, 吕恒, 檀静, 郭宇龙 (421)

基于 QAA 算法的巢湖悬浮物浓度反演研究 张红, 黄家柱, 李云梅, 徐伟凡, 刘忠华, 徐昕 (429)

好氧/厌氧潜流湿地结构工艺优化 李锋民, 单时, 李媛媛, 李扬, 王震宇 (436)

邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻活性氧自由基的影响 别聪聪, 李锋民, 李媛媛, 王震宇 (442)

Rac-及 S-异丙甲草胺对 2 种微藻毒性特征影响研究 蔡卫丹, 刘惠君, 方治国 (448)

羟基自由基致死船舶压载水海洋有害生物研究 白敏冬, 张拿慧, 张芝涛, 陈操, 孟祥盈 (454)

天然菱铁矿改性及强化除砷研究 赵凯, 郭华明, 李媛, 任燕 (459)

零价铁降解 4-氯硝基苯动力学研究 廖娣劫, 杨琦, 李俊琦 (469)

水体中氧氟沙星的光化学降解研究 邵萌, 杨桂朋, 张洪海 (476)

阿替洛尔在硝酸根溶液中的光降解研究 季跃飞, 曾超, 孟翠, 杨曦, 高士祥 (481)

吡啶在紫外光辐射下的生物降解 方苗苗, 阎宁, 张永明 (488)

蜜环菌漆酶对蒽醌类染料的脱色条件优化 朱显峰, 秦仁炳, 余晨晨, 范书军 (495)

ϵ -聚赖氨酸生产废菌体对六价铬吸附影响的研究 曹玉娟, 张扬, 夏军, 徐虹, 冯小海 (499)

丝状菌污泥致密过程的强化条件研究 李志华, 孙玮, 姬晓琴, 王晓昌 (505)

亚硝化颗粒污泥对温度变化的响应特性研究 罗远玲, 杨朝晖, 徐峥勇, 周玲君, 黄毓, 肖勇, 曾光明, 汪理科 (511)

我国典型工程机械燃油消耗量及排放清单研究 李东玲, 吴焯, 周昱, 杜让, 傅立新 (518)

北京市 PM_{10} 自动监测网络优化研究 齐玲, 赵越, 谢绍东 (525)

道路绿化带对街道峡谷内污染物扩散的影响研究 徐伟嘉, 幸鸿, 余志 (532)

Fe^{II} (EDTA) 络合协同 RDB 去除 NO 废气效能及过程分析 陈浚, 杨宣, 於建明, 蒋轶锋, 陈建孟 (539)

UV-B 辐射对亚热带森林凋落叶氮、磷元素释放的影响 宋新章, 张慧玲, 江洪, 余树全 (545)

干热河谷林地燥红土固碳特征及“新固定”碳表观稳定性 唐国勇, 李昆, 孙永玉, 张春华 (551)

九龙江河口表层水体及沉积物中甲烷的分布和环境控制因素研究 郭莹莹, 陈坚, 尹希杰, 孙治雷, 邵长伟 (558)

秋季黄河口滨岸潮滩湿地系统 CH_4 通量特征及影响因素研究 姜欢欢, 孙志高, 王玲玲, 牟晓杰, 孙万龙, 宋红丽, 孙文广 (565)

我国典型非木浆造纸二噁英排放研究 王志芳, 丁琼, 王开祥, 吴昌敏, 曲云欢, 赵晓冬 (574)

典型电器工业区河涌沉积物中的多溴联苯醚空间和垂直分布 邱孟德, 邓代永, 余乐洹, 孙国萍, 麦碧娴, 许玫英 (580)

电子废物拆解区农业土壤中多氯联苯的污染特征 王学彤, 李元成, 张媛, 缪绎, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (587)

北京科教园区绿地土壤中多环芳烃的残留特征与潜在风险 彭驰, 王美娥, 欧阳志云, 焦文涛, 陈卫平 (592)

上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价 柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 庄腾飞, 施振香, 卢小遮 (599)

海河流域北部地区河流沉积物重金属的生态风险评价 尚林源, 孙然好, 王赵明, 汲玉河, 陈利顶 (606)

三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价 王业春, 雷波, 杨三明, 张晟 (612)

超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中细菌群落结构分析 叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝健, 蔡明山, 许燕滨, 占星星 (618)

大庆聚驱后油藏内源微生物群落结构解析与分布特征研究 赵玲侠, 高配科, 曹美娜, 高梦黎, 李国强, 朱旭东, 马挺 (625)

不同碳源刺激对老化污染土壤中 PAHs 降解研究 尹春芹, 蒋新, 王芳, 王聪颖 (633)

应用电致化学发光分子探针技术对微小原甲藻的检测 朱霞, 甄毓, 米铁柱, 于志刚, 池振明, 路兴岚 (640)

软骨藻酸直接竞争 ELISA 方法的建立及优化 王茜, 程金平, 高利利, 董宇, 席磊 (647)

固相萃取-高效液相色谱法同时测定水体中的 10 种磺胺类抗生素 洪蕾洁, 石璐, 张亚雷, 周雪飞, 朱洪光, 林双双 (652)

五氟酚对 HeLa 细胞毒性及 DNA 损伤的研究 金帮明, 王辅明, 熊力, 张晓峰, 刘堰 (658)

建筑陶瓷碳计量与优化模型研究 彭军霞, 赵宇波, 焦丽华, 曾路, 郑为民 (665)

《环境科学》征订启事 (447) 《环境科学》征稿简则 (475) 信息 (524, 586, 605, 624)

吡啶在紫外光辐射下的生物降解

方苗苗, 阎宁, 张永明*

(上海师范大学生命与环境科学学院 环境工程系, 上海 200234)

摘要: 吡啶是一种难降解的含氮杂环化合物, 难以用单一的生物方法使其有效降解. 本研究采用气升式内循环紫外光辐射与生物膜一体化反应器, 通过单独紫外辐射降解 (photolysis, P)、单独生物降解 (biodegradation, B) 以及紫外辐射与生物同步耦合降解 (photobiodegradation, P&B) 3种方法对吡啶进行间歇降解和连续降解, 以比较吡啶的降解规律. 结果表明, 间歇降解过程中, 方法 P&B 对吡啶的降解速率最快, 其次是方法 B, 而方法 P 的速率最慢. 初始浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的吡啶溶液分别采用方法 P、B 和 P&B 进行间歇降解, 其去除速率分别是: 4.95 、 10.2 和 $14.58 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$. 根据 Monod 模型求解出吡啶在方法 B 和方法 P&B 降解下的动力学方程, 其饱和常数 K_s 从 $1920.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降至 $1094.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 采用连续流方式对进水浓度分别为 50 、 100 和 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的吡啶溶液分别采用方法 P、B 和 P&B 进行降解, 其单位体积平均体积去除速率分别是: 15.8 (P)、 23.1 (B) 和 $24.9 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ (P&B), 且高于间歇降解方法. 研究结果表明, 紫外辐射与生物膜同步耦合, 可以缓解吡啶对生物膜的抑制, 并且生物仍能保持其降解吡啶的生物活性, 从而提高吡啶生物降解的速率.

关键词: 紫外光解; 生物降解; 生物反应动力学; 生物抑制; 生物反应器

中图分类号: X131.2; X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)02-0488-07

Biodegradation of Pyridine Under UV Irradiation

FANG Miao-miao, YAN Ning, ZHANG Yong-ming

(Department of Environmental Engineering, School of Life and Environmental Science, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract: Pyridine, a complex nitrogen-containing heterocyclic compounds, is usually difficult to degrade by means of single biological method. The internal loop photobiodegradation reactor (ILPBR) was used for degradation of pyridine in batch and continuous experiments following three protocols: photolysis alone (P), biodegradation alone (B), and intimately coupled photolysis and biodegradation (P&B) to investigate the regularity of pyridine degradation. The experimental results indicated that pyridine removal rate by P&B was fastest among three protocols in batch experiment, in which protocol B was faster than P. For initial pyridine concentration of $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the pyridine removal rates were respectively 4.95 , 10.2 and $14.58 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ corresponding to protocol P, B and P&B. Pyridine degradation kinetic equations were established based on Monod model, and the saturation constants decreased from $1920.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ for protocol B to $1094.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ for protocol P&B. Protocols P, B and P&B were also used for pyridine degradation in continuous flow and influent pyridine concentration increased from 50 to $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and their average removal rates were respectively $15.8 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ for protocol P, $23.1 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ for protocol B and $24.9 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ for protocol P&B, in which the removal rates were higher than that in batch. Experiments suggested that the inhibition of pyridine to biofilm could be relieved due to UV irradiation in process of intimately coupled UV photolysis and biodegradation, and biofilm had kept its bioactivity degrading pyridine and enhanced pyridine removal rates.

Key words: UV photolysis; biodegradation; biological reaction kinetics; bio-inhibition; bioreactor

吡啶是一种难降解的含氮杂环化合物, 主要来源于煤炭、炸药制造、制药、染料生产等行业, 被广泛地用作工业溶剂和农业上的除草剂、杀虫剂等^[1-4], 它具有恶臭, 高水溶性, 易挥发, 在地面和地下土壤中普遍存在^[5]. 吡啶可致畸、致癌、致突变^[6,7], 对神经有致毒作用, 对眼角膜有损害^[8], 可对人体健康和生态环境造成较大危害^[9]. 因此有必要研究含吡啶废水的处理技术.

当前吡啶废水的处理技术主要有生物降解^[10-14]、吸收^[15,16]、吸附和电吸附^[17,18]以及离子交换^[15]. 其中生物法是一种常用的处理含吡啶废水的

方法^[19,20]. 对于吡啶的生物降解, 国内外已有许多研究报道^[21]. 不少研究者已经分离鉴定了大量吡啶及其衍生物的降解菌^[22-24], 研究它们在好氧、厌氧、缺氧条件下的降解途径及降解动力学^[25-29], 但在吡啶分子中, 杂原子上的未共用电子对未参与环上 π 电子共轭体系的形成, 反而因杂氮原子很强的电负

收稿日期: 2011-03-22; 修订日期: 2011-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50978164, 50678102); 高等学校博士学科点专项科研项目 (20070270003); 上海市重点学科建设项目 (S30406)

作者简介: 方苗苗 (1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为难降解有机废水处理技术, E-mail: fmm870425@126.com

* 通讯联系人, E-mail: zhym@shnu.edu.cn

性,吸引环上电子,致使环上电子云密度急剧下降,属于“缺 π 电子结构”,妨碍了氧从分子中获得电子,使其生物降解性能大大降低^[30,31],且生物法降解吡啶时效率较低。

当前也有人采用一些高级氧化技术(advanced oxidation processes, AOPs)处理难降解有机物,包括紫外辐射、臭氧、Fenton's Reagent 和光催化等技术^[32],其中紫外辐射是一种简单、经济的方法。紫外辐射可使有机化合物中的C—C、C—N键因吸收紫外光的能量而断裂,同时可产生强氧化性的 $\cdot\text{OH}$,使有机物逐渐降解^[33]。Stapleton 等^[34-36]用紫外辐射降解吡啶衍生物取得了良好的效果。近年来,有研究表明难降解有机物在光催化和微生物的联合作用下,通过两者的协同作用,可以大大提高难降解有机废水的处理效率^[37-39]。而以往在利用高级氧化和生物耦合对难降解有机废水进行处理时,大多是采用分步耦合的方法,即该工艺过程分别在2个单元内分步进行,以避免高级氧化的产物(如 $\cdot\text{OH}$ 和紫外辐射等)对微生物的毒害,导致微生物失活甚至杀死微生物细胞。分步耦合存在着一定的局限性,高级氧化过程时间不足,则难以进一步地生物降解。而时间过长,则效率下降,成本上升。本研究在将高级氧化和生物降解同步耦合,即紫外辐射下与生物降解在一个反应器内同步进行,以克服分步耦合存在的缺陷。在本研究过程中,选用多孔轻质陶瓷作为生物膜载体,让微生物生长于微孔内,同时通过反应器的设计可以避免紫外线的杀伤,使生物膜在紫外线的辐射下仍保持其降解有机物的生物活性。实验过程中,以吡啶为对象,分别采用单独紫外光辐射降解、单独生物降解以及紫外辐射与生物同步降解的方法,以比较吡啶的降解规律,并试图证明生物膜在紫外辐射下仍能保持生物活性,同时在紫外光与生物膜的协同作用下,吡啶的降解速率高于单独紫外辐射降解和单独的生物降解。通过该方法的研究,以期能为紫外光辐射与生物膜同步耦合降解难降解有机污染物提供理论基础,同时为难降解有机工业废水的处理提供实践依据。

1 材料与方法

1.1 反应器

如图1所示为气升式内循环紫外光/生物降解反应器,其有效工作体积100 mL。在反应器中间设置一块玻璃板,将反应器分隔成光解区和生物降解区。在生物降解区放置附有生物膜的多孔陶瓷,并在

该区内进行曝气,驱动液体在反应器内循环通过光解区和生物降解区。紫外照射装置由三根功率8 W、波长254 nm的紫外灯管组装而成。紫外光源距反应器10 cm。

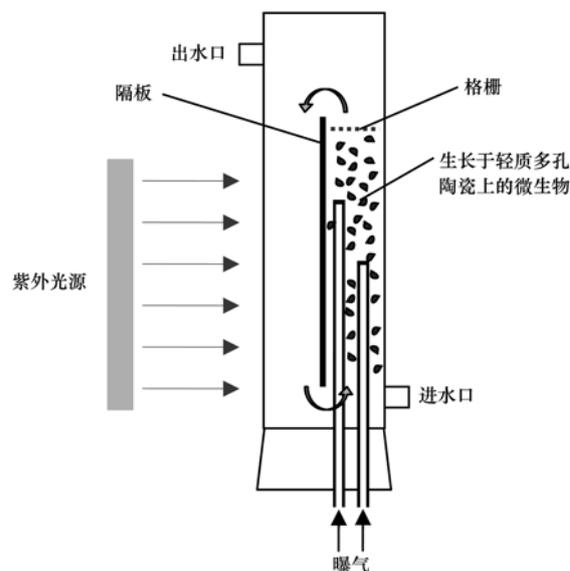


图1 气升式内循环光/生物降解反应器

Fig. 1 Internal loop photobiodegradation reactor

1.2 吡啶降解菌的驯化培养

从上海龙华水质净化厂的曝气池中取得活性污泥进行培养驯化,溶液体系为无机盐培养基(MSM)^[40]中添加一定量的吡啶,采用30℃恒温水浴曝气培养。MSM的组成为: Na_2HPO_4 1.42 g·L⁻¹; KH_2PO_4 1.36 g·L⁻¹; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.216 g·L⁻¹; CaCl_2 0.006 g·L⁻¹; H_3BO_3 1.16 mg·L⁻¹; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1.15 mg·L⁻¹; $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 1.69 mg·L⁻¹; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.38 mg·L⁻¹; $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.24 mg·L⁻¹; $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.024 mg·L⁻¹; $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 2.78 mg·L⁻¹。驯化共进行5个周期,每个周期为5 d,5个周期中吡啶质量浓度分别为50、100、300、500、800 mg·L⁻¹。

1.3 化学药品及模拟吡啶废水的配制

所用吡啶为分析纯,购自上海国药集团。模拟吡啶废水由50~1200 mg·L⁻¹的吡啶和MSM营养液加蒸馏水配制而成。MSM营养液配方与1.2节相同。

1.4 吡啶的降解

分别采用单独紫外光解(P)、单独生物膜降解(B)、紫外光解和生物膜同步降解(P&B)3种方法对吡啶进行间歇和连续的降解。当采用方法P时,反应器内只放置轻质多孔陶瓷载体而没有生物膜,

开启紫外光源;当采用方法 B 时,关闭紫外光源,放置生物膜于反应器的生物降解区;而采用方法 P&B 时,则放置生物膜于反应器内,同时开启紫外光源. 间歇实验时,吡啶浓度分别为 50、100、300、500、800 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,连续实验时,设置停留时间为 6 h,吡啶进水浓度分别为 50、100、300 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 对每一浓度均是按方法 P、B 和 P&B 方法顺序进行. 首先进行单独光解(P),32 h 之后,关闭紫外灯,加入驯化好的生物膜后,继续连续进水开始进行单独的生物降解(B). 72 h 时开启紫外灯,连续进水进行紫外辐射与生物同步耦合降解(P&B).

1.4.1 吸附与吹脱实验

为了解所用的多孔陶瓷载体对吡啶的吸附情况,在对吡啶降解之前,先分别用空白载体和负载有灭活生物膜的载体进行吸附实验,以确定吸附在降解过程中所起的作用. 灭活生物膜是将负载生物膜的载体在灭菌锅 120 $^{\circ}\text{C}$ 灭菌 30 min 所得. 吸附实验时,不曝气而是采用蠕动泵将 2 倍于反应器的吡啶溶液循环流经反应器,每间隔一定时间取样分析吡啶浓度的变化. 吡啶属于挥发性化合物,在曝气过程中,部分吡啶会挥发掉. 因此为了解吡啶的挥发占其降解的比例,采用曝气方法分别对浓度为 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 800 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的吡啶进行吹脱实验,同样每间隔一定时间取样分析吡啶的浓度.

1.4.2 单独光解 (P)

当采用光解实验时,没有生物膜,只加入模拟吡啶废水,以紫外光照射,该废水在曝气的驱动下在反应器内循环流动. 每间隔一定时间取样分析吡啶的浓度.

1.4.3 单独生物膜降解 (B)

把空载体浸渍于经过驯化的污泥中 24 h,让微生物附着于陶瓷载体上,形成生物膜,然后将其置于反应器中生物反应区,加入模拟的含吡啶废水,在曝气的驱动下在反应器内循环流动,此时关闭紫外灯,依靠生物膜对其进行生物降解. 每间隔一定时间取样分析吡啶的浓度.

1.4.4 光解和生物膜同步降解 (P&B)

在单独生物降解的基础上,开启紫外灯,通过紫外与生物膜的协同作用对吡啶进行降解,每间隔一定时间取样分析吡啶的浓度.

1.5 分析方法

吡啶分析用美国产的型号 Agilent 1100 的高效液相色谱(配置波长 250 nm 的紫外荧光器、型号为 ZORBAX SB-C18 反相色谱柱)测试,流动相为甲醇

水溶液,体积比为甲醇:水 = 60:40,流动速率为 1 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 吡啶的吸附与挥发

实验分别将空陶瓷载体和灭活的生物载体置于反应器中生物反应区,考察 2 种载体在该反应器中对吡啶的吸附情况. 其中空白载体吸附实验连续做 2 次,第 2 次紧接着第 1 次重复一遍. 在初始浓度为 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的情况下,经过 55 min,其结果如图 2 所示. 从图 2 可知,在开始的 5 min,吸附速率较快,随后吸附速率下降. 第一次空载体在开始的 5 min 时,吸附吡啶 3.0%,55 min 后吸附量是 4.3%,第二次空载体吸附时,在开始的 5 min,吡啶吸附量下降到 0.9%,55 min 后吡啶吸附量也只有 1.7%. 而灭活挂膜载体在开始的 5 min 只吸附 0.23%,经过 55 min,灭活生物载体吸附量也只有 0.62%. 这表明灭活生物载体对吡啶的吸附作用可以忽略,而空载体吸附在短时间如 5 min 内,对吡啶有一定去除作用,但由于吸附饱和,因此在连续重复的实验过程中,其吸附作用可以忽略.

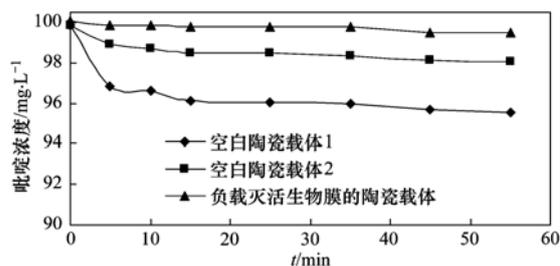


图 2 吡啶的吸附曲线

Fig. 2 Curve of pyridine adsorption

图 3 所示是浓度分别为 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 800 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的吡啶在曝气过程中的去除情况,并与方法 P、方法 B 以及方法 P&B 对吡啶去除的比较. 从图 3 中可以看出,吡啶虽然具有挥发性,但挥发的速率显然比所有降解方法的去除率都要慢. 因此可以说吡啶的去除主要还是通过降解途径,尤其是在开始 1 h 之内.

2.2 吡啶在不同处理方法过程中的降解规律

图 4 所示是分别采用单独光解(P)、单独生物降解(B)以及光解加生物降解(P&B)吡啶时的降解规律,吡啶的初始浓度从 50 ~ 800 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 从图 4 中可以看出,3 种方法中,方法 P&B 对吡啶去除的速率最快,其次是方法 B,而方法 P 的速率最慢. 如

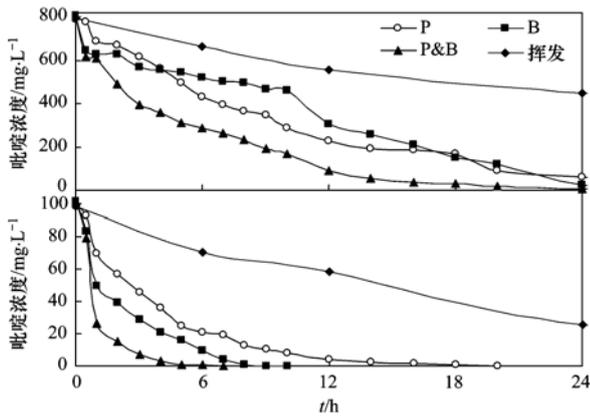


图3 吡啶通过挥发去除率并与其他方法去除的比较
Fig. 3 Pyridine removal through volatile by stripping compared with other protocols

吡啶的初始浓度 $> 500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,起初的生物降解速率低于光解速率,随着吡啶浓度的降低,生物降解速率逐步大于光解速率.这是由于当吡啶浓度较高时,对生物膜有一定的抑制作用,随着降解过程的进行,吡啶浓度下降后,生物降解速率又高于光解速率.

不同初始浓度的吡啶在不同处理方法过程中,其平均体积去除率 [volume removal rate, $\text{VRR} = (c_0 - c_t)/t$, 式中, c_0 为吡啶的初始浓度, mg/L ; c_t 为吡啶在时间 t 时刻的浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; t 为时间, h] 如图5所示,从中可以看出,随着初始吡啶浓度增加,其平均体积去除率逐渐增加.而采用方法 P&B 时的体积去除率均高于其它2种方法,如对于初始浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的吡啶,采用方法 P 时,其去除速率为 $4.95 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$,采用方法 B 时其去除速率为 $10.2 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$,而采用方法 P&B 时,吡啶的去除速率为 $14.58 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$.

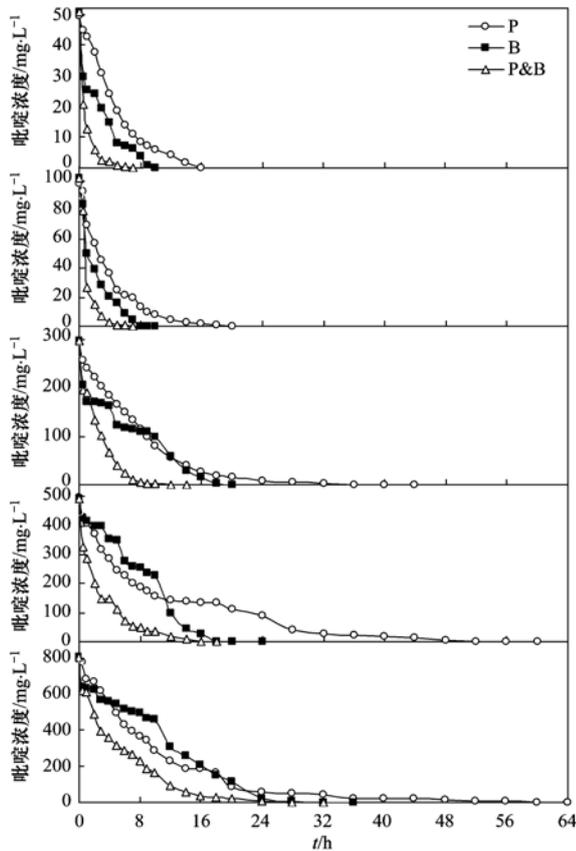


图4 不同吡啶浓度在不同处理方法过程中的降解情况
Fig. 4 Pyridine removal with different initial concentrations corresponding to different protocols in batch experiments

$100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的吡啶,采用方法 P&B 时,7 h 吡啶完全去除,采用方法 B 时需要 10 h 才能将吡啶完全去除,而采用方法 P 时则需 20 h 才能完全去除.

从图4还可看出,当初始吡啶浓度 $< 300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,生物降解速率均高于光解速率,而当吡

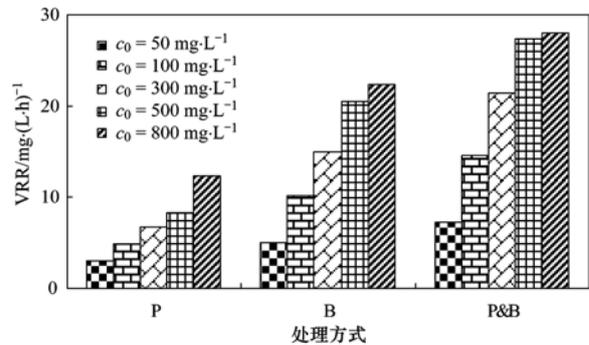


图5 不同初始浓度在不同处理方法过程中吡啶的平均去除速率
Fig. 5 Average pyridine removal rates at different initial pyridine concentration corresponding to different protocols

2.3 吡啶降解动力学分析

实验过程中分别对不同初始浓度的吡啶,采用单独紫外辐射光解(P)、单独生物降解(B)、光解与生物降解同步耦合(P&B)3种方法降解吡啶,测定最初 10 min 吡啶浓度的变化,探讨吡啶初始浓度与吡啶初始降解速率之间的关系,以此求解吡啶降解的动力学.以 10 min 内的吡啶降解速率作为初始降解速率对吡啶初始浓度做图,结果如图6所示.根据图6可以看出,在实验浓度范围内,吡啶的初始降解速率随着吡啶初始浓度的增加而增加.此外,采用方法 P 时,吡啶的初始降解速率相比方法 B 和方法 P&B,其降解速率所占比例非常小.据此可以认定,吡啶的初始降解过程中,生物降解是主要的.据此可以用 Monod 方程 $\mu_s = \mu_{s,\max} \frac{c_s}{K_s + c_s}$ 描述吡啶的降解动力学.由于在 10 min 内,生物量的变化可以忽略,

此时微生物的得率系数 $Y_{X/S}$ 可以认为是常数,因此可以用吡啶的降解速率 v_s 替代微生物的比生长速率 μ_s ,此时 Monod 方程的形式为 $v_s = v_{s,max} \frac{c_s}{K_s + c_s}$, 式中, $v_{s,max}$ 为吡啶最大降解速率, c_s 为吡啶浓度, K_s 为饱和常数.

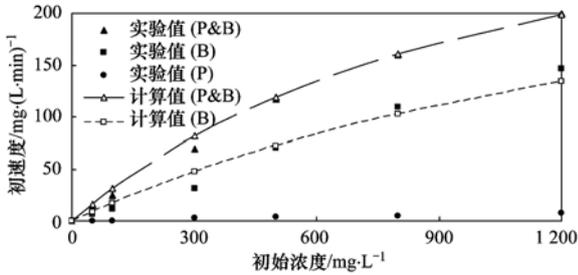


图 6 初始吡啶浓度与初始吡啶降解速率之间的关系

Fig. 6 Relationship between initial pyridine concentration and initial pyridine removal rate

采用双倒数法,分别求解得到各参数,再用 Pearson 公式计算实验值和计算值的相关性,结果如表 1 所示.

表 1 吡啶降解 Monod 方程的参数

Table 1 Parameters of pyridine degradation in Monod equation

方法	$v_{max}/\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$	$K_s/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	R^2
P&B	380	1 094. 1	0. 996
B	350	1 920. 4	0. 984

根据所求得的参数可以看出,采用方法 B 时,吡啶降解所对应的饱和常数为 $1\ 920.4\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而采用方法 P&B 时,其饱和常数下降为 $1\ 094.1\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 饱和常数反映了底物与微生物的亲合程度. 饱和常数愈小,亲合程度愈大. 据此可以判定,由于紫外光的辐射,提高了吡啶与微生物的亲合程度,从而提高了吡啶的降解速率. 吡啶的生物降解、紫外辐射与生物膜同步耦合降解的速率可以分别如下表示.

$$\text{生物降解: } v_s = 350 \frac{c_s}{1\ 920.4 + c_s}$$

紫外辐射与生物膜同步耦合降解:

$$v_s = 380 \frac{c_s}{1\ 094.1 + c_s}$$

从图 6 也可以看出,所求解的 Monod 方程与实际所求非常接近. 其相关系数也非常高,分别为 0. 996 和 0. 984.

生物降解过程中,当体系中只存在单一的限制性底物时,底物的消耗速率取决于细胞生长速率、产

物生成速率和其消耗于维持能的速率^[41]. 然而吡啶对微生物有不可逆抑制作用,吡啶进入生物体后,一方面在酶的催化作用下进行代谢转化;另一方面,吡啶以其自身的特性,通过与酶的相互作用导致酶活性的改变^[42],因此细胞生长速率对有吡啶降解菌存在的吡啶降解可能起着决定性的作用. 由表 1 可知, $K_s(B) > K_s(P\&B)$, 表明紫外光解加生物降解条件下的微生物细胞生长速率快于单独生物降解,可见虽然方法 P&B 降解吡啶的初始阶段紫外辐射对吡啶去除的作用极小,但它却可以缓解吡啶对生物膜的抑制作用. 这是因为紫外辐射可使吡啶中的 C—C、C—N 键因吸收紫外光的能量而断裂^[33],同时可产生强氧化性的 $\cdot\text{OH}$, 将吡啶直接还原,减轻了吡啶对微生物的抑制作用.

2.4 吡啶的连续降解

图 7 所示是在水力停留时间为 6 h 条件下,对不同浓度的吡啶采用不同方法降解时,吡啶的降解情况. 实验结果明显地表明,吡啶在 P&B 条件下的去除速率最快. 从图 7 还可以看出,经过 6 h 的停留时间,可将 $50\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 吡啶完全去除,将 $100\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 吡啶降至平均 $0.24\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 将 $300\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 吡啶降至平均 $0.61\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

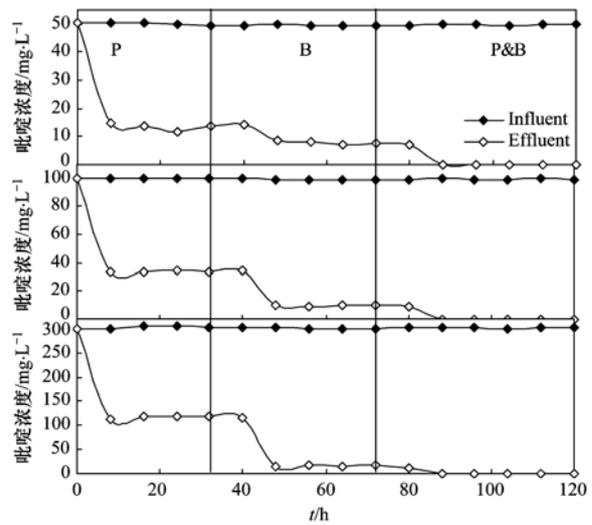


图 7 吡啶在连续流处理过程中的降解规律

Fig. 7 Pyridine removal regularity in continual flow

不同初始浓度的吡啶在连续流处理过程中的体积降解速率如图 8 所示,可以看出,随着初始吡啶浓度增加,其体积降解速率逐渐增加. 而采用 P&B 方法的体积降解速率比其它 2 种方法都要快. 除此之外,连续流处理中的 P&B 体积降解速率快于间歇处理. 如吡啶初始浓度为 $100\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 间歇处理中

P&B 体积降解速率为 $14.58 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 而连续流处理中的 P&B 体积降解速率为 $16.59 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$.

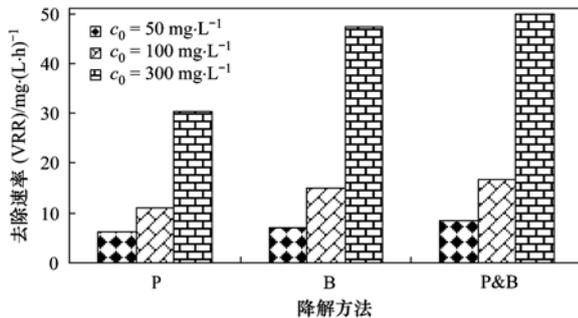


图 8 吡啶在 3 种方法处理过程中的体积降解速率

Fig. 8 Pyridine volume removal rate corresponding to different protocols and initial concentration in continual flow

3 结论

(1) 分别采用 3 种方法对吡啶进行降解, 其中采用紫外光解与生物降解同步耦合的方法去除吡啶的速率最快, 而单独生物降解吡啶的速率快于单独紫外光解的速率. 在降解过程中, 吡啶虽然有一定的挥发, 但相比这 3 种降解速率, 其挥发速率, 尤其是开始阶段的挥发可以忽略.

(2) 吡啶在紫外辐射光解过程中, 其降解速率虽然很慢, 但与生物降解耦合后, 由于吡啶受到紫外辐射, 可以缓解对微生物的抑制, 从而大大提高吡啶的降解速率. 吡啶降解动力学数据表明, 当紫外光解结合生物降解之后, 以生物降解为主, 但相应的饱和常数下降, 吡啶的降解速率提高.

(3) 吡啶在连续降解过程中, 其降解速率快于间歇降解过程.

参考文献:

[1] Fetzner S. Bacterial degradation of pyridine, indole, quinoline, and their derivatives under different redox conditions [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1998, **49** (3): 237-250.

[2] 孙庆华, 柏耀辉, 赵翠, 等. *Shinella zoogloeoides* BC026 对吡啶的降解特性研究 [J]. 环境科学, 2008, **29** (10): 2938-2943.

[3] Kim M K, Singleton I, Yin C R, et al. Influence of phenol on the biodegradation of pyridine by freely suspended and immobilized *Pseudomonas putida* MK1 [J]. Letters in Applied Microbiology, 2006, **42** (5): 495-500.

[4] Sims G K, Sommers L E, Konopka A. Degradation of pyridine by *Micrococcus luteus* isolated from soil [J]. Applied

Environmental Microbiology, 1986, **51** (5): 963-968.

[5] Kaiser J P, Feng Y, Bollag J M. Microbial metabolism of pyridine, quinoline, acridine, and their derivatives under aerobic and anaerobic conditions [J]. Microbiology Reviews, 1996, **60** (3): 483-498.

[6] Othmer K. Encyclopedia of chemical technology [M]. New York: John Wiley Science, 1982. 454-480.

[7] Zhu S, Bell P R F, Greenfield P F. Adsorption of pyridine onto spent Rundle oil shale in dilute aqueous solution [J]. Water Research, 1988, **22** (10): 1331-1337.

[8] Lataye D H, Mishra I M, Mall I D. Removal of pyridine from aqueous solution by adsorption on bagasse fly ash [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2006, **45** (11): 3934-3943.

[9] Sims G K, Oloughlin E J. Degradation of pyridines in the environment [J]. Critical Reviews in Environmental Control, 1989, **19** (4): 309-340.

[10] Brinkmann U, Babel W. Simultaneous utilization of pyridine and fructose by *Rhodococcus opacus* UFZ B 408 without an external nitrogen source [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1996, **45** (1-2): 217-223.

[11] Rhee S K, Lee G M, Lee S T. Influence of a supplementary carbon source on biodegradation of pyridine by freely suspended and immobilized *Pimelobacter* sp. [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1996, **44** (6): 816-822.

[12] Uma B, Sandhya S. Pyridine degradation and heterocyclic nitrification by *Bacillus coagulans* [J]. Canadian Journal of Microbiology, 1997, **43** (6): 595-598.

[13] Rhee S K, Lee G M, Yoon J H, et al. Anaerobic and aerobic degradation of pyridine by a newly isolated denitrifying bacterium [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1997, **63** (7): 2578-2585.

[14] Lee J J, Rhee S K, Lee S T. Degradation of 3-methylpyridine and 3-ethylpyridine by *Gordonia nitida* LE31 [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2001, **67** (9): 4342-4345.

[15] Akita S, Takeuchi H. Sorption equilibria of pyridine derivatives in aqueous solution on porous resins and ion exchange resins [J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1993, **26** (3): 237-241.

[16] Sabah E, Celik M S. Interaction of pyridine derivatives with sepiolite [J]. Journal of Colloid and Interface Sciences, 2002, **251** (1): 33-38.

[17] 徐生盼, 陈庆军, 梁晓峰. 三种活性炭对吡啶和吡啶的吸附性能 [J]. 水处理技术, 2009, **35** (9): 19-25.

[18] Niu J J, Conway B E. Development of techniques for purification of waste waters; removal of pyridine from aqueous solution by adsorption at high-area C-cloth electrodes using in situ optical spectrometry [J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2002, **521** (1-2): 16-28.

[19] Jia K Z, Cui Z L, He J, et al. Isolation and characterization of a denitrifying monooxygenase-degrading *Paracoccus* sp. M-1 [J]. FEMS Microbiology Letter, 2006, **263** (2): 155-162.

[20] 钱城, 田沈, 杨秀山. 焦化废水的微生物降解研究进展 [J].

- 上海环境科学, 2003, **22**(2): 129-131.
- [21] 孙丽娟, 李咏梅, 顾国维. 含氮杂环化合物的生物降解研究进展 [J]. 四川环境, 2005, **24**(1): 61-64.
- [22] 李培睿, 李宗义, 秦广雍. 吡啶及其衍生物微生物降解研究进展 [J]. 生物技术, 2007, **17**(4): 96-98.
- [23] Mohan S V, Sistla S, Guru R K, *et al.* Microbial degradation of pyridine using *Pseudomonas* sp. and isolation of plasmid responsible for degradation [J]. Waste Management, 2003, **23**(2): 167-171.
- [24] Bai Y H, Sun Q H, Zhao C, *et al.* Simultaneous biodegradation of pyridine and quinoline by two mixed bacterial strains [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2009, **82**(5): 963-973.
- [25] 张晓健, 雷晓玲, 何苗. 焦化废水中几种难降解有机物的厌氧生物降解特性 [J]. 环境工程, 1996, **14**(1): 10-13.
- [26] 李咏梅, 顾国维, 赵建夫. 焦化废水中几种含氮杂环化合物缺氧降解机理 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2001, **29**(6): 720-723.
- [27] Padoley K V, Rajvaidya A S, Subbarao T V, *et al.* Biodegradation of pyridine in a completely mixed activated sludge process [J]. Bioresource Technology, 2006, **97**(10): 1225-1236.
- [28] Li J W, Cai W J, Cai J J. The characteristics and mechanisms of pyridine biodegradation by *Streptomyces* sp. [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **165**(1-3): 950-954.
- [29] Qiao L, Wen D H, Wang J L. Biodegradation of pyridine by *Paracoccus* sp. KT-5 immobilized on bamboo-based activated carbon [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(41): 5229-5234.
- [30] 何苗, 张晓健, 瞿福平, 等. 杂环化合物好氧生物降解性能与其化学结构相关性的研究 [J]. 中国环境科学, 1997, **17**(3): 199-202.
- [31] 申海虹, 顾国维, 李咏梅. 缺氧反硝化去除难降解杂环化合物吡啶研究 [J]. 上海环境科学, 2001, **20**(11): 530-533.
- [32] Scott J P, Ollis D F. Integration of chemical and biological oxidation processes for water treatment: review and recommendations [J]. Environmental Progress, 1995, **14**(2): 88-103.
- [33] 方景礼. 强螯合物废水的处理方法第三部分——紫外光氧化分解法处理螯合物废水 [J]. 电镀与涂饰, 2007, **26**(11): 31-34.
- [34] Stapleton D R, Emery R J, Mantzavinos D, *et al.* Photolytic destruction of halogenated pyridines in wastewaters [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2006, **84**(B4): 313-316.
- [35] Stapleton D R, Konstantinou I K, Karakitsou A, *et al.* 2-Hydroxypyridine photolytic degradation by 254 nm UV irradiation at different conditions [J]. Chemosphere, 2009, **77**(8): 1099-1105.
- [36] Stapleton D R, Konstantinou I K, Hela D G, *et al.* Photolytic removal and mineralisation of 2-halogenated pyridines [J]. Water Research, 2009, **43**(16): 3964-3973.
- [37] Marsolek M D, Lefler M, Kirisits M J, *et al.* Photobiocatalysis: coupled photocatalytic-biological wastewater treatment for wastewaters containing biologically recalcitrant and inhibitory organics such as 2, 4, 5-trichlorophenol [A]. In: Abstracts of papers of the American Chemical Society **228**: U547-U547 032-ENVR part 1 [C]. 2004.
- [38] Marsolek M D, Torres C I, Hausner M, *et al.* Intimate coupling of photocatalysis and biodegradation in a photocatalytic circulating-bed biofilm reactor [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2008, **101**(1): 83-92.
- [39] Zhang Y M, Wang L, Rittmann B E. Integrated photocatalytic-biological reactor for accelerated phenol mineralization [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, **86**(6): 1977-1985.
- [40] Kilbane J J. Metabolic engineering to develop a pathway for the selective cleavage of carbon-nitrogen bonds [R]. Pittsburgh: Gas Technology Institute, 2005.
- [41] 戚以政, 汪叔雄. 生物反应动力学与反应器 [M]. (第三版). 北京: 化学工业出版社, 2007. 73-75.
- [42] 何苗, 张晓健, 瞿福平, 等. 难降解有机物生物抑制特性的研究 [J]. 环境科学, 1997, **18**(2): 21-23.

CONTENTS

Safety Value of Contaminant in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	ZHENG Bing-hui, LUO Jin-hong, FU Qing, <i>et al.</i> (337)
Safety Concentration of Genotoxic Carcinogens in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	LUO Jin-hong, ZHENG Bing-hui, FU Qing, <i>et al.</i> (342)
A Quantitative Method and Case Analysis for Assessing Water Health	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (346)
Temporal and Spatial Variation of Nitrogen and Phosphorus and Eutrophication Assessment in Downstream River Network Areas of North Canal River Watershed	SHAN Bao-qing, JIAN Yu-xiang, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (352)
Spatiotemporal Variation Analysis and Identification of Water Pollution Sources in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, TANG Fang-fang, <i>et al.</i> (359)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Shallow Groundwater in the Yellow River Delta	AN Le-sheng, ZHAO Quan-sheng, YE Si-yuan, <i>et al.</i> (370)
Impacts of Sediment Disturbance Time on the Distribution of Phosphorus Forms in Suspended Solids	LI Da-peng, HUANG Yong, LI Yong, <i>et al.</i> (379)
Influence of Submerged Macrophytes on Phosphorus Transference Between Sediment and Overlying Water in the Growth Period	WANG Li-zhi, WANG Guo-xiang, YU Zhen-fei, <i>et al.</i> (385)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments of Lake Changshouhu in Chongqing, China	LU Shao-yong, XU Meng-shuang, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (393)
Vertical Distribution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Lake Hongze	ZHANG Wen-bin, YU Hui (399)
Effects of Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Loss from Courtyard Compost and Its Risk of Nonpoint Source Pollution	PENG Li, WANG Li-wei, YANG Zhi-min, <i>et al.</i> (407)
Effects of Hydrodynamic Process on Bio-optical Properties in Algal-Dominated Lake Region of Shallow Lake	LIU Xiao-han, FENG Long-qing, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (412)
Estimation and Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient $K_d(490)$ in Lake Taihu in Spring Based on Semi-analytical Model	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, LI Rui-yun, <i>et al.</i> (421)
Monitoring the Total Suspended Matter of Lake Chaohu Based on Quasi-Analytical Algorithm	ZHANG Hong, HUANG Jia-zhu, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (429)
Optimization of Aerobic/Anaerobic Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Feng-min, SHAN Shi, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (436)
Effects of Allelochemical Dibutyl Phthalate on <i>Gymnodinium breve</i> Reactive Oxygen Species	BIE Cong-cong, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (442)
Toxicity Effects of <i>Rac</i> - and <i>S</i> -Metolachlor on Two Algae	CAI Wei-dan, LIU Hui-jun, FANG Zhi-guo (448)
Studies for Killing the Oceanic Harmful Organisms in Ship's Ballast Water Using Hydroxyl Radicals	BAI Min-dong, ZHANG Na-hui, ZHANG Zhi-tao, <i>et al.</i> (454)
Modification of Natural Siderite and Enhanced Adsorption of Arsenic	ZHAO Kai, GUO Hua-ming, LI Yuan, <i>et al.</i> (459)
Kinetic Study of 4-Chloronitrobenzene Degradation by Zero-Valent Iron	LIAO Di-jie, YANG Qi, LEE Chun-chi (469)
Photochemical Degradation of Ofloxacin in Aqueous Solution	SHAO Meng, YANG Gui-peng, ZHANG Hong-hai (476)
Photodegradation of Atenolol in Aqueous Nitrate Solution	JI Yue-fei, ZENG Chao, MENG Cui, <i>et al.</i> (481)
Biodegradation of Pyridine Under UV Irradiation	FANG Miao-miao, YAN Ning, ZHANG Yong-ming (488)
Optimization on Decoloration Conditions of Anthraquinone Dyes by Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	ZHU Xian-feng, QIN Ren-bing, YU Chen-chen, <i>et al.</i> (495)
Biosorption of Chromium (VI) by Waste Biomass of ϵ -Poly-L-lysine Fermentation	CAO Yu-juan, ZHANG Yang, XIA Jun, <i>et al.</i> (499)
Investigation on Enhanced Conditions for the Densification of Filamentous Sludge	LI Zhi-hua, SUN Wei, JI Xiao-qin, <i>et al.</i> (505)
Effect of Temperature on the Response Characteristics of Shortcut Nitrification Granular Sludge	LUO Yuan-ling, YANG Zhao-hui, XU Zheng-yong, <i>et al.</i> (511)
Fuel Consumption and Emission Inventory of Typical Construction Equipments in China	LI Dong-ling, WU Ye, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (518)
Optimization of PM ₁₀ Monitoring Network in Beijing	QI Ling, ZHAO Yue, XIE Shao-dong (525)
Effect of Greenbelt on Pollutant Dispersion in Street Canyon	XU Wei-jia, XING Hong, YU Zhi (532)
Investigation of Effect and Process of Nitric Oxide Removal in Rotating Drum Biofilter Coupled with Absorption by Fe ^{II} (EDTA)	CHEN Jun, YANG Xuan, YU Jian-ming, <i>et al.</i> (539)
Effect of UV-B Radiation on Release of Nitrogen and Phosphorus from Leaf Litter in Subtropical Region in China	SONG Xin-zhang, ZHANG Hui-ling, JIANG Hong, <i>et al.</i> (545)
Characteristics of Carbon Sequestration and Apparent Stability of New Sequestered Carbon in Forested Torrid Red Soil at Dry-Hot Valley	TANG Guo-yong, LI Kun, SUN Yong-yu, <i>et al.</i> (551)
Spatial Distribution of Methane in Surface Water and Sediment of Jiulongjiang Estuary and the Effect Environment factors of It	GUO Ying-ying, CHEN Jian, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> (558)
Methane Fluxes and Controlling Factors in the Intertidal Zone of the Yellow River Estuary in Autumn	JIANG Huan-huan, SUN Zhi-gao, WANG Ling-ling, <i>et al.</i> (565)
Study on Dioxin Emission for Typical Non-Wood Pulp Making in China	WANG Zhi-fang, DING Qiong, WANG Kai-xiang, <i>et al.</i> (574)
Horizontal and Vertical Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediment from a Typical Electrical Equipment Industrial Area	QIU Meng-de, DENG Dai-yong, YU Le-huan, <i>et al.</i> (580)
Characteristics of Polychlorinated Biphenyls in Soils from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (587)
Characterization and Potential Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Green Space Soils of Educational Areas in Beijing	PENG Chi, WANG Mei-e, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (592)
Spatial Variability and Evaluation of Soil Heavy Metal Contamination in the Urban-transect of Shanghai	LIU Yun-long, ZHANG Li-jia, HAN Xiao-fei, <i>et al.</i> (599)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments of Rivers in Northern Area of Haihe River Basin, China	SHANG Lin-yuan, SUN Ran-hao, WANG Zhao-ming, <i>et al.</i> (606)
Concentrations and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals at Different Water-level Altitudes in the Draw-down Areas of the Three Gorges Reservoir	WANG Ye-chun, LEI Bo, YANG San-ming, <i>et al.</i> (612)
Analysis of Community Structure on Sludge Aerobic/anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (618)
Research on Population Structure and Distribution Characteristic of Indigenous Microorganism in Post-polymer-Flooding Oil Reservoir	ZHAO Ling-xia, GAO Pei-ke, CAO Mei-na, <i>et al.</i> (625)
Study on Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) with Different Additional Carbon Sources in Aged Contaminated Soil	YIN Chun-qin, JIANG Xin, WANG Fang, <i>et al.</i> (633)
Detection of <i>Proocentrum minimum</i> (Pavillard) Schiller with the Electrochemiluminescence-Molecular Probe	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (640)
Development of Direct Competitive Enzyme-Linked Immunosorbent Assay for the Determination of Domoic Acid	WANG Qian, CHENG Jin-ping, GAO Li-li, <i>et al.</i> (647)
Simultaneous Determination of 10 Sulfonamide Antibiotics in Water by Solid-phase Extraction and High Performance Liquid Chromatography	HONG Lei-jie, SHI Lu, ZHANG YA-lei, <i>et al.</i> (652)
Effects of Pentachlorophenol on DNA Damage and Cytotoxicity of HeLa Cells	JIN Bang-ming, WANG Fu-ming, XIONG Li, <i>et al.</i> (658)
Modeling of Carbon Dioxide Measurement and Optimization on Building Ceramic Industry	PENG Jun-xia, ZHAO Yu-bo, JIAO Li-hua, <i>et al.</i> (665)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年2月15日 33卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 2 Feb. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号, 邮政编码: 100085) 电话: 010-62941102, 010-62849343 传真: 010-62849343 E-mail: hjkx@reces. 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@reces. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话: 010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行