

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析 陈卓,刘峻峰,陶玮,陶澍 (2815)

中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单 刘海彪,孔少飞,王伟,严沁 (2823)

基于长时间序列的北京 PM_{2.5}浓度日变化及气象条件影响分析 苗蕾,廖晓农,王迎春 (2836)

2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征 程念亮,李云婷,张大伟,陈添,魏强,孙彤卉,王步英,富佳明,何乐为,程兵芬,皮帅,马立光,崔继宪,孟凡 (2847)

抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析 周静博,李治国,路娜,徐曼,杨鹏,高康宁,王建国,靳伟 (2855)

成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征 蒋燕,贺光艳,罗彬,陈建文,王斌,杜云松,杜明 (2863)

嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析 沈利娟,王红磊,李莉,吕升,袁婧,张孝寒,章国骏,王翡 (2871)

泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析 张棕巍,胡恭任,于瑞莲,刘贤荣,胡起超,王晓明 (2881)

城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险:以贵阳市为例 李晓燕,汪浪,张舒婷 (2889)

桂林市酸雨变化特征及来源分析 郭雅思,于爽,黎泳珊,孙平安,何若雪 (2897)

农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH₃和N₂O)减排效果比较:以夏玉米季为例 范会,姜姗姗,魏茨,蒋静艳 (2906)

青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤CO₂、CH₄和N₂O通量的观测 吴建国,周巧富 (2914)

三峡库区香溪河秋末至中冬CO₂和CH₄分压特征分析 张军伟,雷丹,肖尚斌,张成,穆晓辉,刘佳,李迎晨 (2924)

气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析 张晨,刘汉安,高学平,张文娜 (2932)

三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例 吴东,黄志霖,肖文发,曾立雄,韩黎阳 (2940)

入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究:以洱海北部流域为例 项颂,庞燕,储昭升,胡小贞,孙莉,薛力强 (2947)

库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响:以草堂河为例 王晓彤,罗光富,操满,王雨春,汪福顺,邓兵 (2957)

农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析 李如忠,黄青飞,钱靖,殷晓曦,韦林 (2964)

农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究 李强坤,胡亚伟,宋常吉,彭聪 (2973)

三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨 柴雪思,雷利国,江长胜,黄哲,范志伟,郝庆菊 (2979)

重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究 刘静,郑丙辉,刘录三,马迎群,林岗璇,汪星,夏阳 (2989)

深圳地区全氟辛酸磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究 崔晓宇,张鸿,罗骥,张若冰 (3001)

柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价 卫亚宁,潘佳钊,宋玉梅,郭鹏然,王毅 (3007)

北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析 陈永娟,胡玮璇,庞树江,王晓燕 (3017)

昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义 王启栋,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁,曹磊 (3026)

甯醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示 廖昱,孙玉川,王尊波,梁作兵,张远瞩 (3034)

漳沱河冲洪积扇地下水中酞酸酯的污染现状与分布特征 昌盛,赵兴茹,刘琰,耿梦娇,乔翠琴 (3041)

雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析 张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,赵瑞一,梁作兵 (3049)

Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制 张翔凌,黄华玲,郭露,陈巧珍,阮聪颖,冷玉洁 (3058)

Ce³⁺与Cu²⁺协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究 张剑桥,迟惠中,宋阳,罗从伟,江进,马军 (3067)

Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究 丁文川,向星光,曾晓岚,厉晓宇,梁国强, M. M. Mian (3073)

石墨烯-TiO₂光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解 徐琪,周泽宇,王洪涛 (3079)

单偶氮染料AY17的光催化降解动力学及机制 阳海,魏宏庆,胡乐天,胡倩,阳立平,刘华杰,易翔,易兵 (3086)

硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性 马航,朱强,朱亮,李祥,黄勇,魏凡凯,杨朋兵 (3094)

膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能 刘春,于长富,张静,陈晓轩,张磊,杨景亮 (3101)

ABR工艺ANAMMOX耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水 吴鹏,张诗颖,宋吟玲,徐乐中,沈耀良,张婷 (3108)

活性污泥厌氧Fe(III)还原氨氧化现象初探 李祥,林兴,杨朋兵,黄勇,刘恒蔚 (3114)

低浓度氨氮废水单级自养脱氮EGSB反应器的快速启动 顾书军,方芳,李凯,刘勇,郭劲松,陈猷鹏,蒋甫阳 (3120)

超低溶解氧条件下的EBPR系统除磷性能 马娟,宋璐,俞小军,李璐,孙雷军,孙洪伟,李光银 (3128)

活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响 何志江,赵媛,张源凯,王洪臣,齐鲁,尹训飞,张晓军 (3135)

山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估 王菲,吴泉源,吕建树,董玉龙,曹文涛,康日斐,曹见飞 (3144)

电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征 赵科理,傅伟军,叶正钱,戴巍 (3151)

我国18种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究 冯璞阳,李哲,者渝芸,黄杰,梁东丽 (3160)

流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征 李鑫,杨军,饶伟,王代长,杜光辉,化党领,刘世亮,刘红恩 (3169)

聚羟基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu²⁺、Zn²⁺的吸附特性 朱健,雷明婧,王平,张伟丽,陈仰 (3177)

新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价 王文东,刘荟,张银婷,杨生炯 (3186)

纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附 朱倩,李正魁,张一品,韩华杨,王浩 (3192)

鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中PAHs的生物有效性 张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,王芳,王代长,蒋新 (3201)

不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响 景新新,苏志忠,邢红恩,王发园,石兆勇,刘雪琴 (3208)

中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究 王晓南,闫振广,余若祯,王婉华,陈丽红,刘征涛 (3216)

贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响 林文芳,陈胜,万堃,王春明,林惠荣,于鑫 (3224)

不同氨水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响 吕玉,周龙,龙光强,汤利 (3229)

《环境科学》征订启事(3025) 《环境科学》征稿简则(3057) 信息(3072, 3085, 3143)

膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能

刘春, 于长富, 张静, 陈晓轩, 张磊, 杨景亮

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

摘要: 在疏水 SPG (shirasu porous glass) 膜表面形成基因工程菌生物膜, 构建 SPG 膜曝气-生物膜反应器 (MABR) 生物强化处理阿特拉津废水, 考察 MABR 反应器稳定运行过程中污染物去除性能及其影响因素。结果表明, 增大 SPG 膜孔径和曝气压力, 能够提高曝气供氧能力, 改善 COD 和阿特拉津生物强化去除效能。1.5 μm 疏水 SPG 膜在 70 kPa 曝气压力下的最大供氧能力约为 22.4 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 。曝气压力为 70 kPa、水力停留时间 (HRT) 为 1.5 h 时, 1.5 μm 膜 MABR 反应器 COD 平均去除率为 80.1%, 平均去除负荷为 1.86 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$; 阿特拉津平均去除率为 62.5%, 平均去除负荷为 0.18 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 。进一步缩短 HRT、增加进水负荷后, MABR 反应器 DO 浓度显著下降, COD 和阿特拉津去除效率大幅降低。DO 浓度对阿特拉津去除的影响更为显著。随着 MABR 反应器的稳定运行, SPG 膜表面单一基因工程菌生物膜逐渐演化为复杂微生物群落, 但基因工程菌可以较好地存在于生物膜内, 从而保持阿特拉津生物强化去除能力。

关键词: 基因工程菌; 膜曝气-生物膜反应器 (MABR); 疏水 SPG 膜; 生物强化; 阿特拉津

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-3101-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.08.035

Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater

LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, CHEN Xiao-xuan, ZHANG Lei, YANG Jing-liang

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

Abstract: A hydrophobic SPG (shirasu porous glass) membrane-aerated biofilm reactor (MABR) with genetically engineered microorganism (GEM) biofilm formed on the SPG membrane surface was applied to treat atrazine wastewater. The contaminant removal performance and its influencing factors were investigated during the stable operation of this MABR. The results indicated that the oxygen supply capacity could be increased in the SPG membrane aeration when the membrane pore size and the aeration pressure increased, which could improve the performance of COD and atrazine removals. The maximum oxygen supply capacity of hydrophobic SPG membrane with pore size of 1.5 μm was estimated to be about 22.4 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ at aeration pressure of 70 kPa. When aeration pressure was 70 kPa and hydraulic retention time (HRT) was 1.5 h, the average COD removal efficiency was 80.1% and the average organic loading rate removed was 1.86 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ in the MABR with 1.5 μm hydrophobic SPG membrane. Under the same operating conditions, the average atrazine removal efficiency was 62.5% and the average atrazine loading rate removed was 0.18 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. The COD and atrazine removal efficiencies decreased significantly at further shortened HRT and increased influent organic loading rate. DO concentration showed more significant influence on atrazine removal. The simplex genetically engineered microorganism biofilm turned into complex microbial community gradually during MABR operation, but the GEM cells could still reside in the biofilm well. Therefore, the efficient atrazine removal by GEM bioaugmentation could be maintained.

Key words: genetically engineered microorganism; membrane-aerated biofilm reactor; hydrophobic SPG membrane; bioaugmentation; atrazine

膜曝气-生物膜反应器 (membrane-aerated biofilm reactor, MABR) 是膜技术和生物膜反应器相结合的一种新型污水处理工艺^[1-3]。该工艺采用的曝气膜一般为微孔疏水有机膜或致密硅胶膜, 在保持气体分压低于泡点的情况下, 空气或纯氧可以以极小的气泡或无泡的形式进入水体中, 从而可以获得极高的氧利用率^[4-8]。膜组件不仅可以起到曝气作用, 同时也可以成为微生物生长附着的载体^[9]。氧气从膜腔内通过膜孔进入液相, 被附着在

膜外壁的生物膜利用, 同时液相中的污染物质以相反的方向向生物膜内传递, 从而起到异向传质的效果, 有助于微生物对水体中的污染物进行降解, 达到净化水质的作用^[10-12]。

基因工程菌生物强化处理是提高难降解污染物

收稿日期: 2016-01-13; 修订日期: 2016-03-09

基金项目: 河北省自然科学基金项目 (E2015208140)

作者简介: 刘春 (1976 ~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为废水生物处理技术, E-mail: liuchun@hebest.edu.cn

生物去除效率的重要手段^[13]。基因工程菌生物强化不仅可以高效地去除目标污染物,提高系统的抗冲击负荷能力,而且还能够增强微生物群落结构和功能的稳定性^[14,15]。运行 SPG 膜曝气-基因工程菌生物膜反应器有助于生物膜的迅速形成,提高生物强化的处理效果和生物群落的稳定性^[16]。

阿特拉津是世界上使用最广泛的一种除草剂,由于使用量大、残留期长,在田间施用后会随着地表径流、沉降等多种途径进入地表水和地下水,从而造成水体污染^[17]。阿特拉津生产废水的不当排放,也会对人类和生态系统产生严重的危害^[18]。由于阿特拉津的难生物降解性,传统的处理方法对阿特拉津的去除效果较差,采用基因工程菌生物强化处理阿特拉津可以达到稳定高效的处理效果^[19,20]。

本研究采用疏水 SPG 膜曝气,并在 SPG 膜表面形成基因工程菌生物膜,运行基因工程菌生物强化的 MABR 反应器处理阿特拉津废水。考察稳定运行过程中,生物强化 MABR 反应器对阿特拉津的生物去除效果和影响因素,以期为难降解废水生物强化处理提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 菌株

本研究使用的基因工程菌受体细胞为 *E. coli* DH5 α ,质粒载体为 pUC18,携带阿特拉津脱氯水解酶基因(*atzA*)、绿色荧光蛋白基因(*gfp*)及氨苄青霉素抗性基因^[21]。

1.2 菌悬液的制备

挑单菌落于 LB 培养基中(含 60 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 氨苄青霉素),在 37 $^{\circ}\text{C}$, 120 ~ 140 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡培养过夜,离心,磷酸缓冲液(pH 7.0)洗涤,收获细胞,制成菌悬液备用,菌悬液细胞密度(以干重计)约为 0.27 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。

1.3 实验装置

SPG 膜曝气 MABR 反应器实验装置如图 1 所示。SPG 膜为管式疏水膜,管径为 1 cm,膜管长为 50 cm,膜孔径分别为 1.5 μm 和 0.8 μm ,膜面积为 $1.57 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ 。在 SPG 膜外侧形成基因工程菌生物膜,置于不锈钢柱形反应器中,反应器有效容积为 0.12 L。采用蠕动泵向 MABR 反应器内连续进水,通过调节进水流量控制水力停留时间(HRT)。具有一定压力的空气(低于泡点压力)从 SPG 膜内侧进行无泡曝气。膜外侧形成生物膜后,1.5 μm 膜泡点压力约为 75 kPa,0.8 μm 膜泡点压力约为 130 kPa。

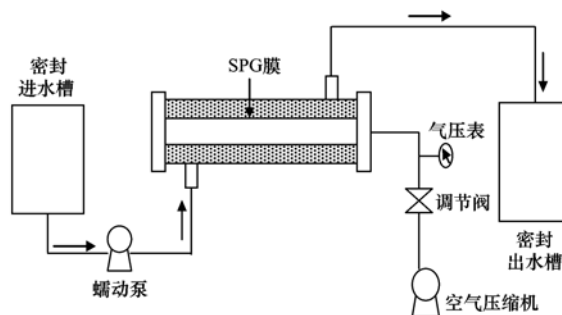


图 1 SPG 膜曝气生物强化 MABR 反应器

Fig. 1 Schematic diagram of bioaugmented MABR reactor using SPG membrane for aeration

1.4 MABR 反应器运行

挂膜:以 SPG 膜为过滤介质,采用循环水真空泵抽滤的方法(抽滤压力 > 90 kPa)对 2 L 菌悬液进行过滤,使基因工程菌细胞被截留在 SPG 膜外侧,形成一层致密均匀的基因工程菌生物膜。

运行:挂膜完成后,在不同条件下连续运行 MABR 反应器处理阿特拉津废水,进水为人工配水^[22],进水 COD 浓度约为 80 ~ 160 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,进水中阿特拉津浓度为 16 ~ 22 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。测定 MABR 反应器连续运行中,进出水溶解氧(DO)浓度、污染物(COD、氨氮和阿特拉津)浓度随时间的变化,并在此过程中观察基因工程菌生物膜的变化。实验温度为室温(18 ~ 25 $^{\circ}\text{C}$)。

1.5 生物膜微生物相的观察

在反应器运行过程中,从 SPG 膜表面刮取基因工程菌生物膜样品,进行观察。采用荧光显微镜(Leica DM4000,德国)观察生物膜上基因工程菌的绿色荧光效应。采用荧光原位杂交(FISH)技术检测生物膜样品中 *atzA* 基因的分布情况^[23],所用 *atzA* 基因特异性探针序列为:5'ACG GGC GTC AAT TCT ATG AC, 5'荧光物质为 HEX,杂交后采用荧光显微镜进行观察^[24]。通过扫描电镜观察生物膜细胞形态的变化。

1.6 污染物的检测方法

阿特拉津的检测:含有阿特拉津的水样用 0.22 μm 的滤膜过滤后,采用 HP1050 型 HPLC 进行检测,色谱柱为 Hypersil C18 反相柱,检测器为紫外检测器,检测条件为:流动相配比为甲醇:水 = 70:30,检测波长为 223 nm。

COD、氨氮浓度测定采用国标法,DO 浓度采用溶解氧仪(WTW cellOx 325,德国)测定。

1.7 统计分析

本研究使用 SPSS statistics 19 软件进行相关性

分析,考察不同变量之间的相关关系. R 值表示变量间的相关关系程度和方向. $R = -1$ 表明变量之间完全负相关, $R = 1$ 表明变量之间完全正相关, 而 $R = 0$ 表明没有相关关系. P 值表示相关性系数检验的统计量显著性概率, 当 $P < 0.05$ 时, 表明相关性显著, $P < 0.01$ 时, 表明相关性非常显著; 当 $P > 0.05$ 时, 表明无显著相关关系.

2 结果与讨论

2.1 SPG 膜孔径对 MABR 反应器运行性能的影响

在初始挂膜生物量为 $35 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 、HRT 为 3 h 的条件下, 比较 SPG 膜孔径分别为 $1.5 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.8 \text{ }\mu\text{m}$ 时, MABR 反应器生物强化处理阿特拉津废水的运行性能. MABR 反应器进出水 DO 浓度变化如图 2 所示. 可以看到, 运行过程中 $1.5 \text{ }\mu\text{m}$ 膜和 $0.8 \text{ }\mu\text{m}$ 膜的 MABR 反应器进水 DO 浓度较低, 平均 DO 浓度分别为 $0.29 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.23 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. MABR 反应器运行初期 ($0 \sim 15 \text{ d}$), 曝气气压为 30 kPa , 此时 $1.5 \text{ }\mu\text{m}$ 膜和 $0.8 \text{ }\mu\text{m}$ 膜的 MABR 反应器出水平均 DO 浓度分别为 $1.81 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.54 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 运行 15 d 之后, 将曝气气压提高至 70 kPa , $1.5 \text{ }\mu\text{m}$ 膜 MABR 反应器出水 DO 浓度明显提高, $16 \sim 45 \text{ d}$ 出水平均 DO 浓度达到 $3.16 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $0.8 \text{ }\mu\text{m}$ 膜 MABR 反应器出水 DO 浓度也有所提高, $16 \sim 45 \text{ d}$ 出水平均 DO 浓度达到 $1.87 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

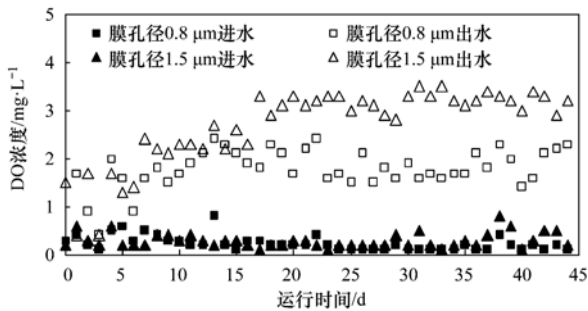


图 2 不同孔径 SPG 膜曝气 MABR 反应器中进出水 DO 浓度变化

Fig. 2 DO concentration in influent and effluent of MABR reactor with different SPG membrane pore size

MABR 反应器 COD 去除率变化如图 3 所示, 可以看到, MABR 反应器运行初期 ($0 \sim 15 \text{ d}$), $1.5 \text{ }\mu\text{m}$ 膜和 $0.8 \text{ }\mu\text{m}$ 膜的 MABR 反应器 COD 平均去除率分别为 59.0% 和 55.8% , 出水平均 COD 浓度分别为 $47.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $48.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均 COD 去除负荷分别为 $0.55 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $0.44 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. 提高曝气压力后, $16 \sim 45 \text{ d}$ 运行过

程中, $1.5 \text{ }\mu\text{m}$ 膜和 $0.8 \text{ }\mu\text{m}$ 膜的 MABR 反应器 COD 平均去除率分别为 81.1% 和 67.5% , 出水平均 COD 浓度分别为 $19.19 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $34.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均 COD 去除负荷分别为 $0.64 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $0.60 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. 进水 DO 浓度一定时, 出水 DO 浓度取决于 SPG 膜曝气供氧能力和 COD 去除负荷. $1.5 \text{ }\mu\text{m}$ 膜 MABR 反应器出水 DO 浓度和 COD 去除负荷均高于 $0.8 \text{ }\mu\text{m}$ 膜 MABR 反应器, 表明 $1.5 \text{ }\mu\text{m}$ SPG 膜供氧能力明显高于 $0.8 \text{ }\mu\text{m}$ SPG 膜. 提高曝气压力后, MABR 反应器出水 DO 浓度和 COD 去除负荷均有所提高, 表明 SPG 膜供氧能力增加. 可见, MABR 反应器的供氧能力受到 SPG 膜孔径和曝气压力的影响, 且是影响 COD 去除性能的重要因素, 增大 SPG 膜孔径和提高曝气压力能够提高供氧能力, 从而改善 COD 去除性能.

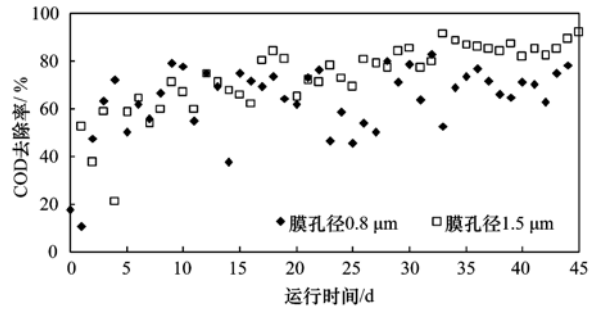


图 3 不同孔径 SPG 膜曝气 MABR 反应器 COD 去除率
Fig. 3 COD removal efficiency of MABR reactor with different SPG membrane pore size

MABR 反应器阿特拉津去除率变化如图 4 所示, 可以看到, MABR 反应器运行初期 ($0 \sim 15 \text{ d}$), $1.5 \text{ }\mu\text{m}$ 膜和 $0.8 \text{ }\mu\text{m}$ 膜的 MABR 反应器阿特拉津平均去除率分别为 42.49% 和 33.55% , 出水平均阿特拉津浓度分别为 $10.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $11.61 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 阿特拉津平均去除负荷分别为 $0.059 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $0.044 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. 提高曝气压力后, $16 \sim 45 \text{ d}$ 运行过程

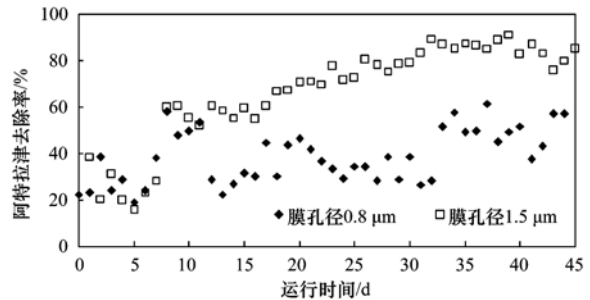


图 4 不同孔径 SPG 膜曝气 MABR 反应器阿特拉津去除率
Fig. 4 Atrazine removal efficiency of MABR reactor with different SPG membrane pore size

中,1.5 μm 膜和0.8 μm 膜的 MABR 反应器阿特拉津平均去除率分别为 78.7% 和 41.5%,出水平均阿特拉津浓度分别为 $3.36 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10.95 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,阿特拉津平均去除负荷分别为 $0.10 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $0.066 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. 可见,SPG 膜曝气供氧能力对阿特拉津去除性能的影响更为显著,1.5 μm 膜的 MABR 反应器在 70 kPa 曝气压力下的阿特拉津去除负荷比 30 kPa 曝气压力下高 69.5%,比相同条件下 0.8 μm 膜的 MABR 反应器高 51.5%.

2.2 HRT 对 MABR 反应器运行性能的影响

在初始挂膜生物量为 $35 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 、曝气压力为 70 kPa 的条件下,连续运行 1.5 μm SPG 膜曝气 MABR 反应器,并逐渐缩短 HRT,考察反应器生物

强化处理阿特拉津废水的运行性能.

随着 HRT 缩短,MABR 反应器进出水 COD 浓度和 COD 去除率变化如图 5 所示. 可以看到,HRT 分别为 3、1.5 和 0.75 h 时,MABR 反应器 COD 平均去除率分别为 80.8%、80.1% 和 55.8%,出水平均 COD 浓度分别为 19.58、24.41 和 $65.08 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,COD 平均去除负荷分别为 0.63、1.86 和 $2.93 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. 可见,HRT 从 3 h 缩短至 1.5 h 时,MABR 反应器 COD 去除效率基本保持不变,COD 去除负荷大幅提高;HRT 从 1.5 h 缩短至 0.75 h 时,MABR 反应器 COD 去除负荷持续提高,但去除效率明显降低,表明此时 COD 进水负荷已经超出 MABR 反应器的处理能力.

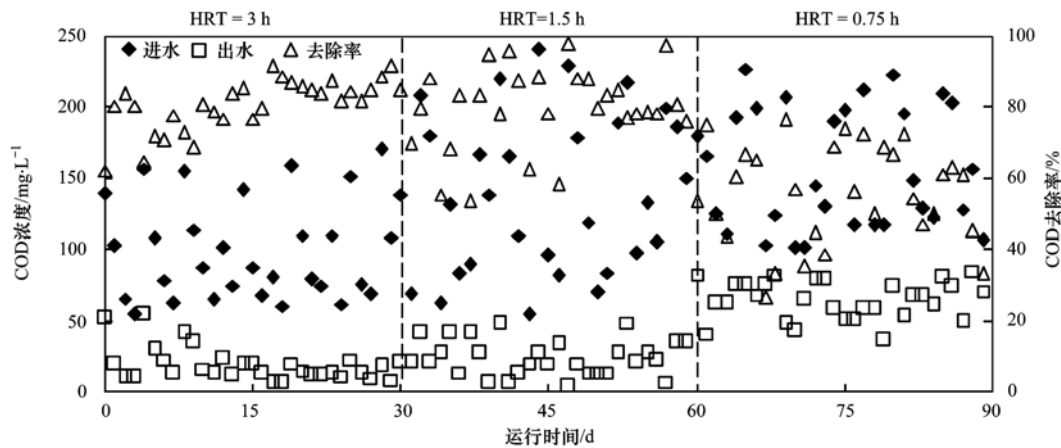


图5 不同 HRT 下 1.5 μm SPG 膜曝气 MABR 反应器中 COD 进出水浓度和 COD 去除率

Fig. 5 COD concentration in influent and effluent and COD removal efficiency of MABR reactor aerated by 1.5 μm SPG membrane at different HRT

随着 HRT 缩短,MABR 反应器进出水 DO 浓度变化如图 6 所示. 可以看到,HRT 分别为 3、1.5 和 0.75 h 时,MABR 反应器进水平均 DO 浓度分别为

0.28 、 0.24 和 $0.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水平均 DO 浓度分别为 3.14 、 1.49 和 $0.59 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 可见,随着 HRT 缩短,COD 去除负荷大幅提高,DO 消耗量随之增加,

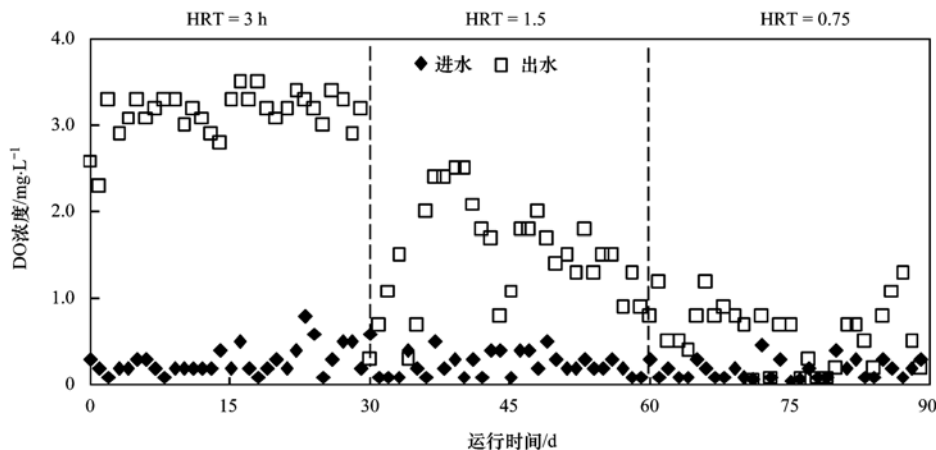


图6 不同 HRT 下 1.5 μm SPG 膜曝气 MABR 反应器进出水 DO 浓度变化

Fig. 6 DO concentration in influent and effluent of MABR reactor aerated by 1.5 μm SPG membrane at different HRT

因此出水 DO 浓度随着 HRT 缩短大幅下降. HRT 为 0.75 h 时出水平均 DO 浓度降至 $0.59 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 接近进水平均 DO 浓度, 表明此时 SPG 膜曝气供氧量基本完全消耗, 供氧能力成为 COD 去除的限制因素, 使得 COD 去除效率降低; 按照此时 COD 去除负荷估算, $1.5 \mu\text{m}$ 疏水 SPG 膜曝气在 70 kPa 曝气压力下的极限供氧能力约为 $22.4 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$.

随着 HRT 缩短, MABR 反应器进出水阿特拉津浓度和阿特拉津去除率变化如图 7 所示. 可以看

到, HRT 分别为 3、1.5 和 0.75 h 时, MABR 反应器阿特拉津平均去除率分别为 78.7%、62.5% 和 18.5%, 出水平均阿特拉津浓度分别为 3.44、6.77 和 $16.52 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 阿特拉津平均去除负荷分别为 0.10、0.18 和 $0.12 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. 可见, HRT 从 3 h 缩短至 1.5 h 时, MABR 反应器阿特拉津去除效率有所降低, 但阿特拉津去除负荷显著提高; HRT 从 1.5 h 缩短至 0.75 h 时, MABR 反应器阿特拉津去除效率大幅降低, 阿特拉津去除负荷也明显降低.

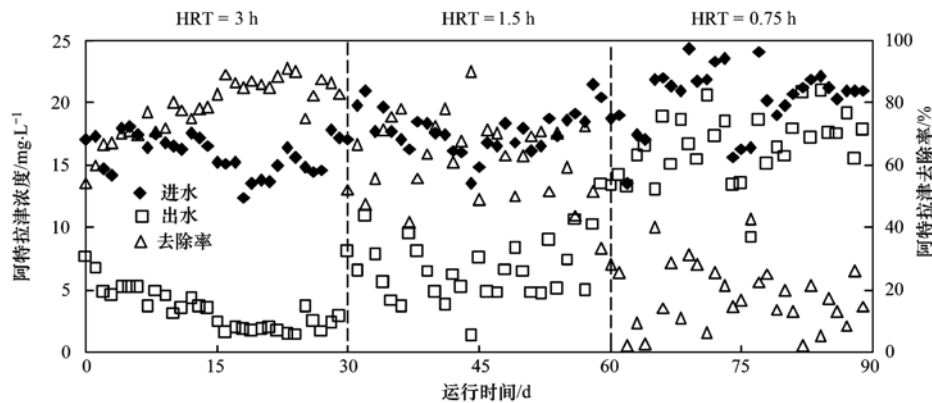


图 7 不同 HRT 下 $1.5 \mu\text{m}$ SPG 膜曝气 MABR 反应器进出水阿特拉津浓度和阿特拉津去除率

Fig. 7 Atrazine concentration in influent and effluent and atrazine removal efficiency of MABR reactor aerated by $1.5 \mu\text{m}$ SPG membrane at different HRT

对 MABR 反应器运行过程中不同变量之间的相关性进行进一步分析. 结果表明, MABR 反应器 COD 进水负荷和去除负荷存在显著正相关关系 ($R = 0.930, P < 0.01$), 表明随着 HRT 缩短和 COD 进水负荷的提高, COD 去除负荷提高; COD 及阿特拉津去除负荷和出水 DO 浓度存在显著负相关关系 ($R = -0.610, P < 0.01$; $R = -0.835, P < 0.01$), 表明随着 COD 和阿特拉津去除负荷提高, DO 消耗随之增加, 出水 DO 浓度降低; COD 及阿特拉津出水浓度和出水 DO 浓度存在显著负相关关系 ($R = -0.666, P < 0.01$; $R = -0.785, P < 0.01$), 表明随着出水 DO 浓度降低, COD 和阿特拉津出水浓度提高, 去除效率降低; COD 出水浓度和阿特拉津出水浓度存在显著正相关关系 ($R = 0.846, P < 0.01$), 表明出水中残留阿特拉津是出水 COD 浓度的重要来源. 需要指出的是, 阿特拉津去除指标与出水 DO 浓度的相关性明显高于 COD 去除指标, 进一步证实 DO 浓度对阿特拉津去除的影响更为显著.

值得注意的是, MABR 反应器生物强化处理阿特拉津废水运行过程中, 对废水中氨氮没有去除作用. 运行过程中进出水氨氮浓度如图 8 所示, 进水氨氮平均浓度为 $13.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水氨氮平均浓度

为 $15.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水氨氮浓度略高于进水氨氮浓度. 而基因工程菌生物强化膜生物反应器 (MBR) 处理阿特拉津废水中, 氨氮的去除性能良好, 平均氨氮去除率可以达到 97%^[25]. 造成这种结果的原因可能是生物强化 MABR 反应器中生物膜为单一基因工程菌生物膜, 尽管运行过程中生物膜中出现其它微生物种群, 但并未形成硝化菌群, 硝化作用不明显, 氨氮仅能作为氮源通过同化作用去除, 而阿特拉津降解过程中存在氨氮释放, 因此出水氨氮浓度略高于进水浓度. 可考虑在生物膜中接种硝化细菌, 以改善 MABR 反应器氨氮去除性能.

2.3 基因工程菌生物膜生物相变化

在 MABR 反应器运行初期和运行结束后, 采用 SEM、荧光显微镜和 FISH 技术对 SPG 膜表面基因工程菌生物膜进行观察和检测, 结果如图 9 所示. 可以看到, 运行初期, 生物膜内细胞均为杆状基因工程菌细胞 [图 9(A)], 细胞具有明显的绿色荧光效应 [图 9(B)], 生物膜内 *atzA* 基因丰富且分布均匀 [图 9(C)]. 运行结束时, 生物膜内仍然存在大量杆状细胞, 同时细胞形态多态化现象明显且存在大量细胞间物质将细胞包裹于其中 [图 9(a)], 并观察到轮虫等微型动物出现, 表明反应器运行过程中生

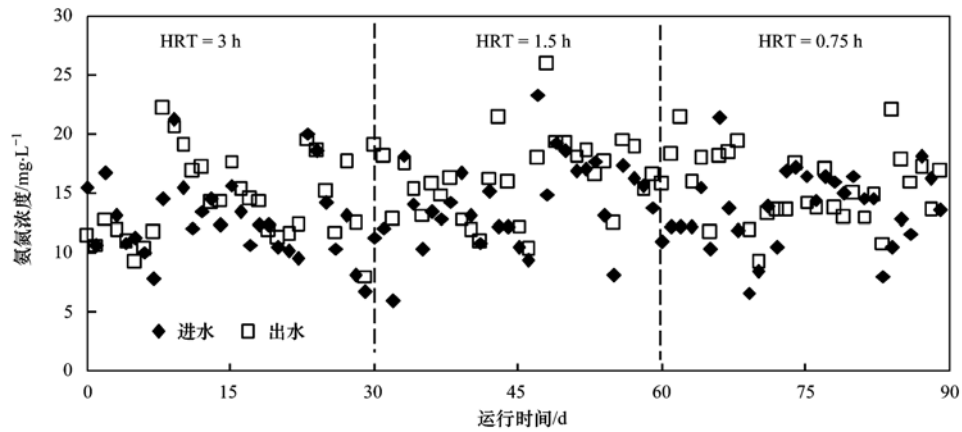


图 8 不同 HRT 下 1.5 μm SPG 膜曝气 MABR 反应器进出水氨氮浓度变化

Fig. 8 Ammonia concentration in influent and effluent of MABR reactor aerated by 1.5 μm SPG membrane at different HRT

物膜内其他微生物细胞逐渐繁殖,形成复杂微生物群落;生物膜的绿色荧光效应减弱[图 9(b)],其原

因可能是基因工程菌细胞被细胞间物质包裹及其他微生物细胞覆盖;生物膜内 *atzA* 基因丰度仍然较高

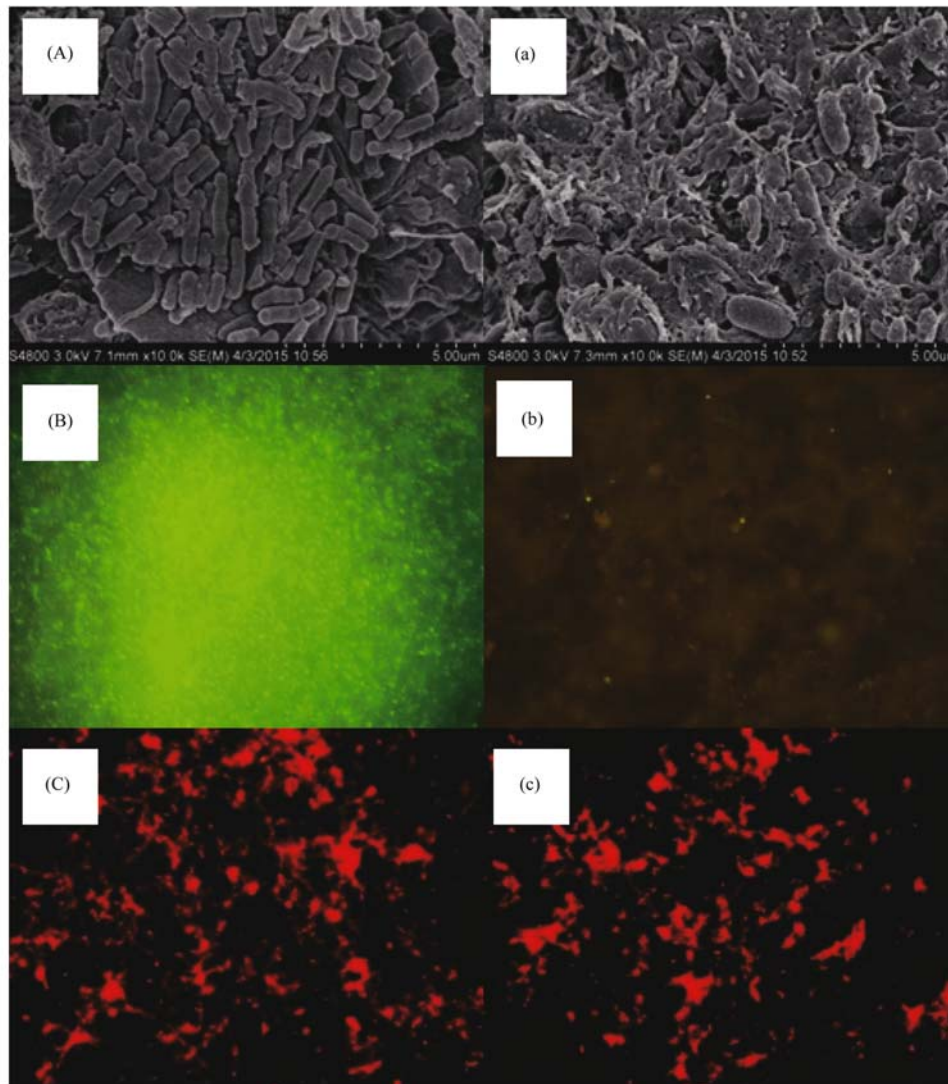


图 9 MABR 反应器运行中 SPG 膜表面基因工程菌生物膜观察

Fig. 9 Observation of genetically engineered microorganism biofilm on the SPG membrane surface during MABR reactor operation

且分布均匀[图 9(c)]. 可见, MABR 反应器长期运行中, 基因工程菌能够较好地保持在生物膜内, 并有效生物强化去除阿特拉津.

3 结论

(1) 在 SPG 膜曝气 MABR 反应器运行中, 增大 SPG 膜孔径和曝气压力, 能够提高曝气供氧能力, 改善 COD 和阿特拉津生物强化去除效能. $1.5 \mu\text{m}$ 疏水 SPG 膜在 70 kPa 曝气压力下的最大供氧能力约为 $22.4 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$.

(2) 曝气气压为 70 kPa、HRT 为 1.5 h 时, $1.5 \mu\text{m}$ 膜 MABR 反应器 COD 平均去除率 80.1%, 平均去除负荷为 $1.86 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$; 阿特拉津平均去除率为 62.5%, 平均去除负荷为 $0.18 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 进一步缩短 HRT、增加进水负荷后, MABR 反应器 DO 浓度显著下降, COD 和阿特拉津去除效率大幅降低. DO 浓度对阿特拉津去除的影响更为显著.

(3) 在 MABR 反应器稳定运行中, SPG 膜表面单一基因工程菌生物膜逐渐演化为复杂微生物群落, 但基因工程菌可以较好地存在于生物膜内, 进而保持阿特拉津生物强化去除能力.

参考文献:

- [1] Nisola G M, Orata-Flor J, Oh S, *et al.* Partial nitrification in a membrane-aerated biofilm reactor with composite PEBA/PVDF hollow fibers[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2013, **51** (25-27): 5275-5282.
- [2] Pellicer-Nücher C, Sun S P, Lackner S, *et al.* Sequential aeration of membrane-aerated biofilm reactors for high-rate autotrophic nitrogen removal: experimental demonstration [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44** (19): 7628-7634.
- [3] 张杨, 李庭刚, 强志民, 等. 膜曝气生物膜反应器研究进展 [J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(6): 1133-1143.
- [4] 汪舒怡, 汪诚文, 黄霞. 用于废水处理的膜曝气生物反应器 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 2006, **7**(6): 131-137.
- [5] Casey E, Glennon B, Hamer G. Biofilm development in a membrane-aerated biofilm reactor: effect of intra-membrane oxygen pressure on performance [J]. *Bioprocess Engineering*, 2000, **23**(5): 457-465.
- [6] Gilmore K R, Terada A, Smets B F, *et al.* Autotrophic nitrogen removal in a membrane-aerated biofilm reactor under continuous aeration: a demonstration [J]. *Environmental Engineering Science*, 2013, **30**(1): 38-45.
- [7] 刘春, 张磊, 杨景亮, 等. 微气泡曝气中氧传质特性研究 [J]. *环境工程学报*, 2010, **4**(3): 585-589.
- [8] Pellicer-Nücher C, Domingo-Félez C, Lackner S, *et al.* Microbial activity catalyzes oxygen transfer in membrane-aerated nitrifying biofilm reactors [J]. *Journal of Membrane Science*, 2013, **446**: 465-471.
- [9] Gong Z, Yang F L, Liu S T, *et al.* Feasibility of a membrane-aerated biofilm reactor to achieve single-stage autotrophic nitrogen removal based on Anammox [J]. *Chemosphere*, 2007, **69**(5): 776-784.
- [10] Plascencia-Jatomea R, Almazán-Ruiz F J, Gómez J, *et al.* Hydrodynamic study of a novel membrane aerated biofilm reactor (MABR): tracer experiments and CFD simulation [J]. *Chemical Engineering Science*, 2015, **138**: 324-332.
- [11] 谷静丽, 洪军, 冯亮, 等. 膜曝气生物膜反应器处理餐饮废水的研究 [J]. *水处理技术*, 2014, **40**(4): 114-117, 125.
- [12] 张磊, 刘平, 马锦, 等. 基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(6): 2277-2282.
- [13] 董春香, 姜桂兰. 除草剂阿特拉津生物降解研究进展 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 2001, **2**(3): 1-6.
- [14] 刘春, 郭亚楠, 杨景亮, 等. 基因工程菌生物强化处理系统微生物群落分析 [J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(12): 34-38.
- [15] Bathe S, Schwarzenbeck N, Hausner M. Plasmid-mediated bioaugmentation of activated sludge bacteria in a sequencing batch moving bed reactor using pNB2 [J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2005, **41**(3): 242-247.
- [16] 郭渊明, 刘春, 郭亚楠, 等. 不同生物反应器中基因工程菌生物强化处理阿特拉津研究 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 554-559.
- [17] Guzzella L, Pozzoni F, Giuliano G. Herbicide contamination of surficial groundwater in Northern Italy [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **142**(2): 344-353.
- [18] 叶新强, 鲁岩, 张恒. 除草剂阿特拉津的使用与危害 [J]. *环境科学与管理*, 2006, **31**(8): 95-97.
- [19] 刘春, 黄霞, 杨景亮. 基因强化在难降解污染物生物处理和修复中的应用 [J]. *微生物学通报*, 2008, **35**(2): 286-290.
- [20] 刘春, 龚鹏飞, 肖太民, 等. SPG 膜曝气-基因工程菌生物膜反应器处理阿特拉津废水研究 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 3018-3023.
- [21] 刘春, 李曼, 杨景亮, 等. 降解-示踪质粒的构建及性能评价研究 [J]. *环境科学与管理*, 2013, **38**(6): 53-58.
- [22] Huang X, Liu R, Qian Y. Behaviour of soluble microbial products in a membrane bioreactor [J]. *Process Biochemistry*, 2000, **36**(5): 401-406.
- [23] 刘春, 黄霞, 王慧, 等. 绿色荧光蛋白标记阿特拉津降解基因工程菌的特性 [J]. *环境科学*, 2006, **27**(7): 1139-1143.
- [24] 马婧, 孟庆翔, 任丽萍, 等. 荧光探针技术研究阿特拉津与 ct-DNA 的相互作用 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, **28**(9): 2122-2125.
- [25] 刘春, 黄霞, 孙炜, 等. 基因工程菌生物强化 MBR 工艺处理阿特拉津试验研究 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(2): 417-421.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China	CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)
Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China	LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)
Diurnal Variation of PM _{2.5} Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date	MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)
Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)
Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang	ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)
Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain	JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)
Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaying City SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)
Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)
Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case	LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)
Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin	GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)
Assessment of Gaseous Nitrogen (NH ₃ and N ₂ O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)
Soil CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons	WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)
Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)
Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir	ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)
Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)
Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai	XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)
Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River	WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)
Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream	LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)
Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979)
Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area	LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)
Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region	CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River	CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)
Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland	WANG Qi-dong, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)
Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)
Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)
Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)
Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)
Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce ³⁺ and Cu ²⁺ Ions	ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)
Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor	DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073)
Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol	XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)
Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO ₂ in Aqueous Solution	YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)
Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)
Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater	LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)
Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)
Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment	LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)
Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia	GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)
Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)
Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid	HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)
Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province	WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics	ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)
Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties	FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)
Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method	LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)
Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu ²⁺ , Zn ²⁺ Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)
Preparation and NH ₄ ⁺ -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges	WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)
Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions	ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)
Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)
Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization	JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)
Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance	LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)
Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils	LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2016年8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行