

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

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

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析	曹金玲, 许其功, 席北斗, 李小平, 杨柳燕, 江立文, 魏自民, 吴献花 (1777)
基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价	孙然好, 陈利顶, 王伟, 王赵明 (1784)
云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响	孟晓云, 于兴修, 泮雪芹 (1789)
深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律	陈清武, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波 (1795)
典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险	邓代永, 邱孟德, 孙国萍, 郭俊, 张宏涛, 张琴, 许玫英 (1801)
珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价	谢文平, 王少冰, 朱新平, 陈昆慈, 潘德博, 洪孝友, 尹怡 (1808)
扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别	苏丹, 臧淑英, 叶华香, 孙丽, 贾晓丹, 李苗 (1816)
汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究	赵建刚, 乔永民 (1823)
氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验	黄伟, 朱旭宇, 曾江宁, 寿鹿, 陈全震, 江志兵 (1832)
春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布	王彦国, 林景宏, 王春光, 林茂 (1839)
滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析	陈冠秋, 李耀初, 黄晋沐, 南燕, 林茂宏 (1846)
四溴双酚 A 在 5 种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究	杨苏文, 王圣瑞, 闫振广, 张普青 (1852)
五氯酚对稀有鮑姆卵黄蛋白原及 p53 的诱导效应	熊力, 马永鹏, 张晓峰, 金帮明, 李伟, 苏永良, 毛思予, 刘堰 (1858)
全氟辛烷磺酸 (PFOS) 对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响	程艳, 崔媛, 党志超, 谢文平, 李海山, 殷缓缓, 陈会明 (1865)
水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究	陶亚, 袁田, 周顺桂, 袁勇, 庄莉, 王辉亮 (1871)
MIEX 中试实验对二级出水中有机物去除的 3DEEM 解析	杨建, 高金华, 常江 (1878)
XDLVO 理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制	姚淑娣, 高欣玉, 郭本华, 包南, 谢慧君, 梁爽 (1884)
栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性	马红芳, 李鑫, 胡洪管, 于茵, 巫寅虎 (1891)
氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究	王宏杰, 董文艺, 刘莉莎, 韩贵超 (1897)
合成氨废水短程反硝化特性研究	李妍, 李泽兵, 马家轩, 王晓毅, 赵白航, 李军 (1902)
基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制	李志华, 杨帆, 李胜, 谢磊, 王晓昌 (1907)
采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性	李志华, 吴军, 李胜, 谢磊, 王晓昌 (1913)
酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究	袁光环, 周兴求, 伍健东 (1918)
小回流比条件下污泥浓度分区试验研究	史思, 王素兰, 李瑞, 邢传宏 (1923)
非离子表面活性剂对污泥调理脱水效果的影响	侯海攀, 濮文虹, 时亚飞, 于文华, 樊明明, 刘欢, 杨昌柱, 李野, 杨家宽 (1930)
中国空气污染指数变化特征及影响因素分析	李小飞, 张明军, 王圣杰, 赵爱芳, 马潜 (1936)
南京 3 类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究	张秋晨, 朱彬, 苏继峰, 王红磊 (1944)
深圳市郊区大气中 PM _{2.5} 的特征分析	戴伟, 高佳琪, 曹罡, 欧阳峰 (1952)
餐饮业油烟的颗粒物分析	谭德生, 邝元成, 刘欣, 戴飞鸿 (1958)
Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ 低温催化还原 NO 性能研究	刘荣, 杨志琴 (1964)
自然型氨基酸及其钾盐的 CO ₂ 吸收和再生特性	晏水平, 陈竞翔, 徐明亮, 艾平, 张衍林 (1971)
耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	张军科, 江长胜, 郝庆菊, 唐其文, 程炳红, 李辉, 陈璐豪 (1979)
垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素	上官宇先, 师日鹏, 李娜, 韩坤, 李会科, 王林权 (1987)
添加不同 N 源条件下典型除草剂对土壤呼吸和 N ₂ O 排放的影响	孙青, 史淳星, 石坤, 言儒斌, 蒋静艳, 吴以中 (1994)
某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析	余立凤, 魏文侠, 田亚静, 吴广龙, 李培中, 赵丹 (2000)
脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究	罗遥, 康荣华, 余德祥, 谭炳全, 段雷 (2006)
岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系	张治伟, 朱章雄, 傅瓦利, 文志林 (2013)
废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收	施翔, 陈益泰, 王树凤, 李江川 (2021)
铬胁迫对 3 种草本植物生长及铬积累的影响	王爱云, 黄姗姗, 钟国锋, 徐刚标, 刘志祥, 申响保 (2028)
湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征	杨胜香, 田启建, 梁士楚, 周耀渝, 邹慧成 (2038)
增施 CO ₂ 对 C3 和 C4 植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响	慕楠, 刁晓君, 王曙光, 王鹏腾, 李攀峰 (2046)
生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析	乔琳, 赵宏, 王建龙 (2052)
A/O MBR 处理生活污水效率与菌群多样性的关系	邝斌宇, 史青, Montcho Leon Monthero, 丁嫚, 温东辉 (2061)
石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测	吴彬彬, 卢滇楠, 刘铮 (2068)
武汉市儿童多途径铅暴露风险评估	郝汉舟, 陈同斌, 吴基良, 雷梅, 田辉, 祖文普, 钟学斌 (2075)
电子鼻预处理装置的开发及适用性研究	卜凡阳, 文晓刚, 万梅, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (2083)
ToxTell 生物传感器在 Cu ²⁺ 、Cd ²⁺ 冲击活性污泥系统分析中的应用	王学江, 王鑫, 刘免, 吴真, 杨连珍, 夏四清 (2090)
环境样品免疫检测基质效应分析与控制	盛建武, 何苗, 施汉昌 (2095)
热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究	张璐, 严建华, 杜长明, 陆胜勇, 李晓东 (2104)
城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究	吴亚娟, 刘红梅, 陆胜勇, 严建华, 李晓东 (2110)
厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究	韩智勇, 刘丹, 李启彬 (2118)
处理垃圾渗滤液的 Fe/C 空气阴极 MFC 性能研究	唐玉兰, 彭漫, 于燕, 何亚婷, 傅金祥, 赵玉华 (2125)
基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究	龙健, 廖洪凯, 李娟, 陈彩云 (2131)
北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析	陈操操, 张妍, 刘春兰, 王海华, 李铮 (2139)
《环境科学》征稿简则 (1877)	《环境科学》征订启事 (1890)
信息 (1822, 1857, 1896, 2138)	

A/O MBR 处理生活污水效率与菌群多样性的关系

邝斌宇¹, 史青², Montcho Leon Monthero¹, 丁嫚¹, 温东辉^{1*}

(1. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871; 2. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要: 采用缺氧/好氧膜生物反应器(A/O MBR)工艺处理生活污水, 试运行了5种不同的工况以确定最佳工艺参数, 利用变性凝胶梯度电泳(DGGE)技术研究缺氧池和好氧池(MBR)中细菌群落结构, 分析出水水质与细菌种群多样性的关系。结果表明 A/O MBR 在水力停留时间(HRT)为12 h, 污泥停留时间(SRT)为10 d, 硝化液回流比为300%, 污泥回流比为100%的条件下, 对COD、氨氮、总氮有稳定良好的去除, 平均去除率分别为96.4%、99.1%、75.8%; 系统运行过程中, 缺氧池和好氧池中菌群结构发生较大变化, 同一工况下两池菌群的相似性通常大于50%, 但缺氧池菌群多样性随工况变换而波动较大, 好氧池菌群多样性随运行时间而逐渐丰富; 缺氧池菌群多样性指数与反硝化效率成正相关关系。

关键词: A/O MBR; 菌群多样性; 工艺优化; 脱氮; DGGE

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-2061-07

Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR

KUANG Bin-yu¹, SHI Qing², Montcho Leon Monthero¹, DING Man¹, WEN Dong-hui¹

(1. College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 2. School of Water Resource and Environmental Science, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: An Anoxic/Oxic Membrane Bioreactor (A/O MBR) was used to treat sewage. Five different working conditions were run to determine the optimal process parameters. Bacterial community structures in both anoxic and oxic tanks were analyzed using denaturing gradient gel electrophoresis (DGGE). The relationship between effluent water quality and bacterial community diversity was established. The experimental results indicated that, under the optimal parameters of hydraulic retention time (HRT) 12 h, sludge retention time (SRT) 10 d, reflux ratio of nitrified effluent 300%, and reflux ratio of sludge 100%, the A/O MBR removed COD, NH_4^+-N , and TN effectively and stably with the average removal rates of 96.4%, 99.1% and 75.8%, respectively. The bacterial communities varied markedly in both anoxic and oxic tanks during the sewage treatment experiment. Under a same working condition, the communities in both tanks were often similar with a similarity of more than 50%. The community diversity of the anoxic tank fluctuated depending on different working conditions, while the diversity of the oxic tank increased steadily along with the operation time. A positive correlation between the bacterial community diversity of the anoxic tank and the denitrification efficiency of the A/O MBR was established.

Key words: A/O MBR; bacterial community diversity; process optimization; denitrification; DGGE

世界水资源日趋匮乏且时空分配不均衡, 导致全球超过20亿人处于高度的用水紧张状态^[1]。我国的水资源形势也不容乐观。2008年全国水资源总量为27 434亿 m^3 , 人均水资源拥有量仅为世界平均水平的1/4^[2]。在水资源不足的同时, 生活和生产过程中所排放的污染物对水环境的污染也日趋严重。据文献[3], 在我国204条河流的409个地表水国控监测断面中, IV类及以下水质的断面比例为40.1%, 主要污染指标为高锰酸盐指数、五日生化需氧量和氨氮; 在26个国控重点湖泊(水库)中, IV类及以下水质的湖泊占20个。

污水回用是缓解水资源缺乏的有效途径。通过污水处理工艺, 把水中的污染物去除后重复利用水, 不仅能减少污染物排放, 还能节约自来水用量。近年来, 已有研究表明, 在分散型住宅小区的人口数

量达到一定规模时, 对小区生活污水予以集中处理和回用, 比将污水远距离排入市政管网、经城市污水处理厂处理后再回用更为经济^[4]。我国已在住宅小区^[5]、城市污水处理厂^[6]成功开展了大量污水再生回用的实践。膜生物反应器(membrane bioreactor, MBR)是常用的污水再生处理技术^[7,8], 其技术特点是: 水力停留时间(HRT)和污泥停留时间(SRT)完全分离; 反应器容积负荷高, 污泥浓度(MLSS)高, 而剩余污泥量少; MBR的较长SRT有利于世代周期长的细菌(如硝化细菌)生长和积累^[9]。与传统活

收稿日期: 2011-07-23; 修订日期: 2012-02-06

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07102-002-01)

作者简介: 邝斌宇(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境工程与环境生物学, E-mail: kby@pku.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: dhwen@pku.edu.cn

性污泥法相比,MBR 的污泥颗粒更细^[10],已有分子生态技术手段证明 MBR 有更高的菌群多样性^[11],且细菌种群结构与进水的水质有关^[12],当进水中含有较为丰富的可利用底物时,MBR 中可以形成较多优势种群^[13].目前,对于 MBR 处理效率与微生物多样性关系的研究尚不多,有研究认为硝化效率与氨氧化细菌的多样性有关系^[14],但另一项研究表明污泥中的微型动物群落与氨氮去除率的关系不显著^[15].

虽然 MBR 对有机物和氨氮可高效去除,但由于其单一好氧条件以及较低排泥量,往往不能有效地脱氮和除磷.因此,本研究将 A/O 脱氮工艺与 MBR 技术相结合,即在好氧的膜生物反应器前增加缺氧池,增加两池之间的硝化液回流系统,同时适当降低 SRT 和提高排泥量,以优化 A/O MBR 系统的综合处理效率.为了揭示系统中的菌群结构,采用变性凝胶梯度电泳(denaturing gradient gel electrophoresis, DGGE)技术,分析不同工况下缺氧池和好氧池(MBR)中污泥的菌种多样性和相似性. DGGE 是一项简便快速的基因指纹技术,它根据不同序列的 DNA 双链在同一浓度的变性剂中部分解链程度不同,使碱基组成不同的 DNA 片段在凝胶上分离开,可直接观察到微生物群落的多态性^[16,17].本研究旨在建立 A/O MBR 对生活污水处理效率与菌群多样性的关系.

1 材料与方法

1.1 试验装置

本试验工艺是缺氧/好氧-膜生物反应器(A/O MBR),装置如图 1 所示.其中缺氧池有效体积 $V_A =$

3 L,好氧池(MBR)有效体积 $V_0 = 5$ L.

MBR 的膜组件是聚乙烯超滤膜组件,垂直浸没在好氧池中,用于分离污泥和水.膜组件规格如表 1 所示.为了有效控制膜污染,适时有自来水人工清洗膜表面;在一个工况运行结束后,若该工况全程膜通量降低较严重,则对膜进行化学清洗,方法是用 1% 的次氯酸钠溶液浸泡膜 24 h,再用自来水清洗.

表 1 膜组件规格

Table 1 Properties of the membrane

特性参数	规格
内径/mm	0.8
外径/mm	1.4
孔径大小/ μm	0.02
纤维数量	71
表面积/ m^2	0.096 7
纤维长度/ $\text{cm} \cdot \text{根}^{-1}$	30 ~ 32
膜通量/ $\text{L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$	12 ~ 15

1.2 运行条件

试验用水取自某大学中水站,是经过格栅处理后的生活污水,包括洗衣、餐饮、洗澡和冲厕产生的废水.将中水站生化反应池中的活性污泥接种到本试验的缺氧池和好氧池中进行培养.

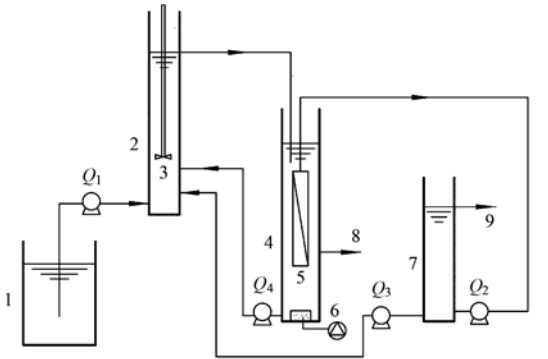
试验期间进水 pH 为 7 ~ 8,溶解氧(DO)接近 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其它主要水质指标如表 2 所示,进水水质整体波动较大.经处理后的出水可用于浇灌绿地和回注河道,即应达到《城市污水再生利用城市杂用水水质》(GB/T 18920-2002)及《城市污水再生利用景观环境用水水质》(GB/T 18921-2002)的要求.对于本试验,设定出水考核目标为: $\text{COD} \leq 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N} \leq 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{TN} \leq 15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{TP} \leq 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

表 2 进水的水质情况/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 2 Water qualities of the influent/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	平均值	标准差	最大值	最小值
COD	293	145	702	100
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	76.9	10.5	109	56.3
TN	78.3	9.05	102	65.9
TP	7.25	3.77	25.2	3.38

在 A/O MBR 接种污泥培养稳定后,开展预试验,获得好氧池的 HRT、SRT、硝化液回流比(r)和污泥回流比(R)等主要工艺参数的较优工作范围.以表 3 的 5 种工况条件进行工艺参数优化试验.在运行全过程中,好氧池的 DO 控制在 $4 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,缺氧池的 DO 控制在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下;好氧池 MLSS 在 $1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,pH 在 7 ~ 8.



1. 进水池;2. 缺氧池;3. 搅拌器;4. 好氧池;5. UF 膜组件;
6. 空气泵;7. 出水池;8. 排泥口;9. 溢流出水; Q_1 进水流量;
 Q_2 出水流量; Q_3 硝化液回流流量; Q_4 污泥回流流量

图 1 A/O MBR 装置示意

Fig. 1 Diagram of the A/O MBR

每个工况均先运行 3 d,待系统稳定后,采集进、出水样,进行水质分析;在每个工况运行结束时,采集两池内污泥样本,进行菌群结构分析.综合比较各工况处理效率后,以最佳工况再连续运行一段时间,以进一步验证处理效果.

表 3 A/O MBR 中好氧池工艺参数优化试验
Table 3 Optimization for the process parameters
of oxic tank in the A/O MBR

工况	HRT/h	SRT/d	回流比	
			$r/\%$	$R/\%$
1	12	10	100	100
2	12	10	100	300
3	12	10	300	100
4	12	7	300	100
5	8	10	300	100

1.3 水样分析方法

根据文献[18]进行水质检测. COD 测定采用重铬酸钾法, NH_4^+ -N 测定采用水杨酸-次氯酸盐光度法, TN 测定采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法, TP 测定采用钼锑抗分光光度法. DO 使用便携式溶氧仪(THERMO, 美国)测定, pH 使用便携式 pH 计(METTLER, 瑞士)测定.

1.4 总 DNA 提取

采用型号为 K717 的 DNA 提取试剂盒(上海博彩, 中国)对污泥样本提取总 DNA, 产物用 1% 琼脂糖凝胶电泳定性检测提取总量和纯度. 提取的 DNA 样品在 -20°C 条件下保存.

1.5 PCR

使用 16S rDNA 的 V3 区的引物(上海生工, 中国), 从总 DNA 中扩增 16S rDNA 片段. 引物为上游 338f($5' \rightarrow 3'$) ACTCCTACGGGAGGCAGCAG, 下游 518r($5' \rightarrow 3'$) ATTACCGCGGCTGCTGG, 为提高扩增片段在 DGGE 中的分离效果, 在上游引物的 $5'$ 端添加 GC 夹($5' \rightarrow 3'$) CGCCCGCCGCGCGCGCGGGCGG GGGCGGGGGCACGGGGG. 聚合酶为混合了 dNTP 等的 Taq HS 酶(TaKaRa, 日本). 采用 50 μL 扩增体系, 包括 25 μL 聚合酶, 22 μL ddH₂O, 上下游引物各 1 μL , 以及 1 μL DNA 模板. PCR 反应条件为: 首先 95°C 预变性 5 min; 其后 94°C 变性 40 s, 56°C 退火 40 s, 72°C 延伸 40 s, 该阶段循环 30 次; 最后 72°C 延伸 10 min. 反应结束后用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测 PCR 扩增效果及是否受污染. PCR 产物在 -20°C 条件下保存.

1.6 DGGE

采用 DCode 突变检测系统(Bio-Rad, 美国)对

PCR 扩增产物进行 DGGE 分析. 选用变性剂浓度范围为 35%~55% 的 10% 丙烯酰胺/双丙烯酰胺(37. 5: 1) 变性凝胶. 变性剂浓度 55% 的变性溶液含有: 25 mL 40% 丙烯酰胺/双丙烯酰胺溶液、2 mL 50 $\times$ TAE 缓冲液、22 mL 甲酰胺、23. 1 g 尿素, 加水溶解定容至 100 mL. 变性剂浓度 35% 的变性溶液含有: 25 mL 40% 丙烯酰胺/双丙烯酰胺溶液、2 mL 50 $\times$ TAE 缓冲液、14 mL 甲酰胺、14. 7 g 尿素, 加水溶解定容至 100 mL. 电泳缓冲液为 1 $\times$ TAE. 为保证每个样品上样时 loading buffer 浓度是 1 $\times$, 把 10 μL 的 PCR 产物与 2 μL 的 6 $\times$ loading buffer 混合后上样. 电泳过程是: 先在 80 V 条件下电泳 20 min, 再在 100 V 条件下电泳 12 h; 电泳完毕后, 将 1. 5 μL 染色液 SYBR Gold(Invitrogen, 美国) 加入 15 mL 的 1 $\times$ TAE 中摇匀, 倒在胶上避光染色 40 min; 将凝胶放在紫外成像仪(UVP, 美国) 拍照成像; 最后利用 Quantity One 软件的泳道和条带识别功能, 对 DGGE 图谱进行菌群结构多样性和相似性的分析.

菌群多样性采用香依-威纳指数(Shannon-Wiener Index) 表示, 计算公式为^[19]:

$$H = - \sum_{i=1}^S \left(\frac{n_i}{N} \right) \lg \left(\frac{n_i}{N} \right)$$

式中, n_i 为第 i 个 DNA 条带的峰强度; N 为泳道内所有 DNA 条带的峰强度之和; S 为泳道内的 DNA 条带数. 香依-威纳指数不仅考虑种群的数量, 还考虑了种群的丰度. 菌种多而且每个种群丰度均匀, 则指数高.

样品之间的相似性采用戴斯系数(Dice Coefficient) 表示, 计算公式为^[20]:

$$D = \frac{2S_c}{S_x + S_y} \times 100\%$$

式中, S_x 为泳道 X 所含的 DNA 条带数; S_y 为泳道 Y 所含的 DNA 条带数; S_c 为泳道 X 和 Y 所含的位置相同的 DNA 条带数. 戴斯系数可以衡量 2 个样品群落的相似性, 对于 DGGE 的条带分析, 即对比不同泳道对应样本的相似性.

2 结果和讨论

2.1 不同工况下的工艺运行效果

各工况下 COD、 NH_4^+ -N、TN 的进水和出水浓度以及去除率变化情况如图 2 所示.

5 个工况中, 工况 3(HRT 12 h, SRT 10 d, 硝化液回流比 r 为 300%, 污泥回流比 R 为 100%) 运行情况最好, 且相对稳定, COD、 NH_4^+ -N 和 TN 的平均

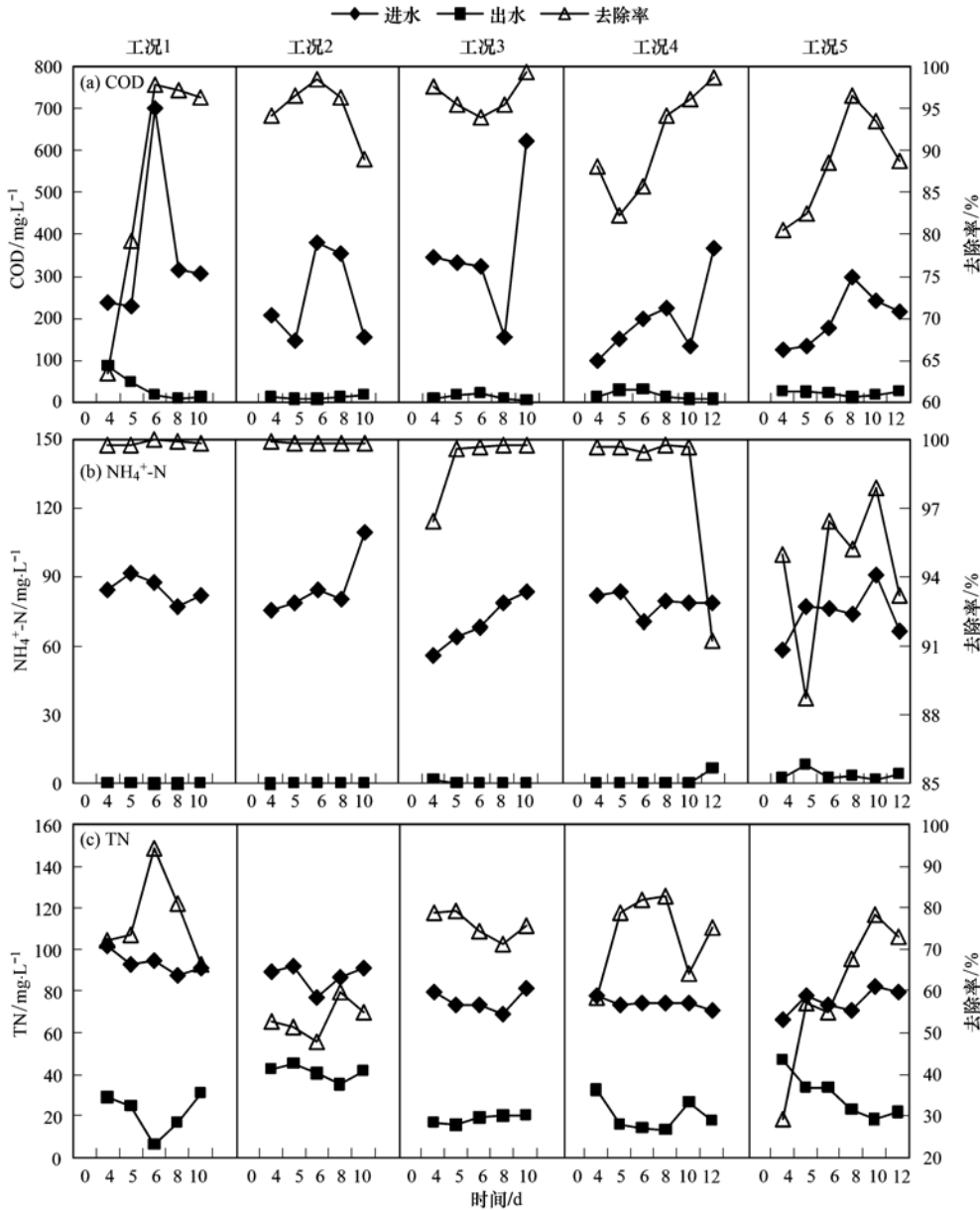


图2 5个工况下 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的进水、出水和去除率

Fig. 2 COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TN in influent and effluent and their removal rates under five working conditions

去除率分别为 96.4%、99.1% 和 75.8%。因此在 5 个工况试验结束后,以工况 3 的条件进行验证试验, COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 保持稳定去除,平均去除率分别为 97.0%、98.4% 和 75.6%。出水 $\text{COD} \leq 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+\text{-N} \leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{TN} \leq 15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中总氮的去除率与 A/O 工艺的理论总氮去除率一致。在 A/O 工艺中,设氨氮在好氧池全部转化为硝态氮,硝态氮回流到缺氧池中全部转化为氮气,并忽略细菌同化作用所去除氨氮,则 A/O 系统对氮的去除率为 $\eta = r / (1 + r)$, 式中 r 是硝化液回流比^[21]。即当 $r = 300\%$, 则 $\eta = 75\%$ 。试验结果较好地符合理论

上的总氮去除率,说明 A/O MBR 工艺能够充分利用微生物降解污染物的能力。

除了工况 3,其它工况的处理效果均不佳,原因分析如下。

工况 1 采用较低的回流比(100%),因此,缺氧池的反硝化不充分,影响了总氮去除(去除率在66%~93%波动),同时也影响了 COD 去除的稳定性。

工况 2 仍保持较低的回流比,将污泥的回流比从 100% 提高至 300%,期望通过增加缺氧池的污泥量和回流污泥所带入的硝酸盐,以强化缺氧

池的反硝化,结果表明这一参数改变没有影响好氧池的硝化反应, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率仍然保持在 99.8% 以上,但是 COD 和 TN 的去除率均比工况 1 有所下降,特别是出水 TN 浓度达到 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上.

工况 4 在工况 3 的基础上将泥龄由 10 d 减小为 7 d,考察增大排泥量对系统处理效率的影响,结果表明 COD 和 TN 去除率再次产生较大波动,降低泥龄使得生长速率低、世代周期长的硝化细菌受到更显著的影响,最终影响了脱氮效果(总氮去除率在 58% ~82% 波动).已有的研究也表明,增加泥龄能够保证 COD 和氮的去除^[22];而泥龄减低将会影响脱氮,例如泥龄低于 2.5 d 时,硝化作用将会停止^[10].

工况 5 在工况 3 的基础上将 HRT 由 12 h 减小到 8 h,考察提高处理量对系统处理效率的影响,结果表明 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的去除率均发生大幅度波动,出水水质迅速恶化,而且由于提高了膜通量,产生严重的膜污染.

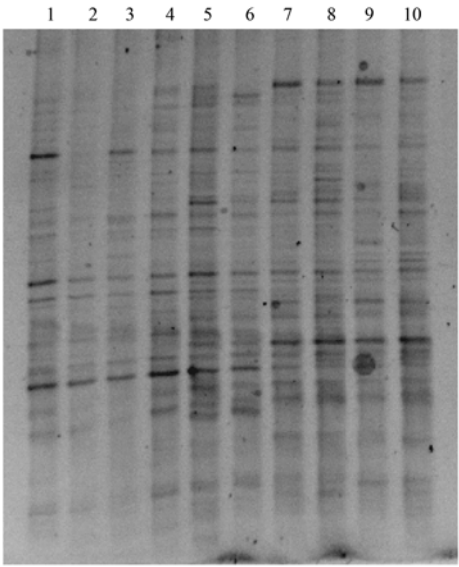
因此,通过上述 5 个工况的试验,确定工况 3 的工艺参数为 A/O MBR 最佳工艺参数.此外,由于膜组件有很好的过滤作用,所有工况下悬浮固体(SS)的去除率均大于 99%.但是各个工况下出水总磷浓度均大于 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而且波动较大,不能满足杂用水和景观用水的国标要求,因此,A/O MBR 工艺通过加强排泥并不能达到有效除磷的目标.已有的研究也表明,A/O MBR 除磷效果不佳,需要用化学方法除磷^[23].总磷的去除需要采用化学法(如投加适量聚合氯化铝药剂,可出水 $\text{TP}\leq 1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

2.2 不同工况下的菌群结构分析

以 DGGE 技术对 A/O MBR 的缺氧池和好氧池内菌群结构进行研究,探究不同工况下,反应器内菌群多样性和相似性的变化,进而分析这种变化对污染物去除效果的影响.

由各污泥样本提取的总 DNA 片段约为 23 kb,PCR 产物片段长度约为 200 bp.将各样本 PCR 产物进行 DGGE 分析,图 3 为各工况下缺氧池和好氧池污泥样本的 DGGE 电泳图,图 4 为各工况下两池污泥样本的 DGGE 电泳条带简图.

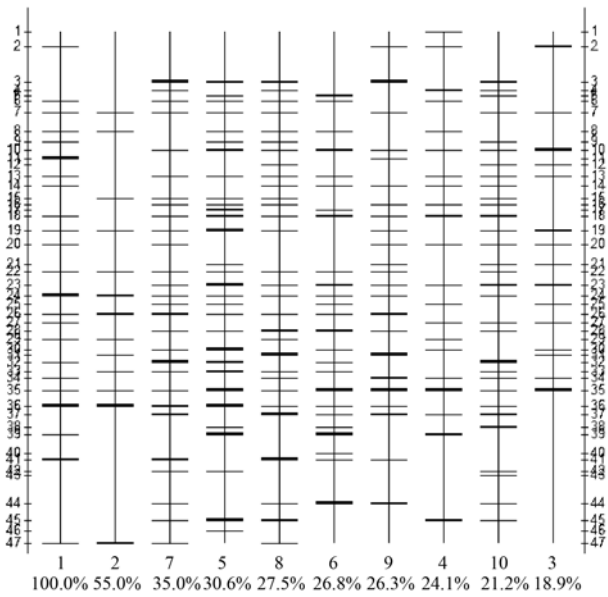
因为不同种属细菌 16S rRNA 基因序列的可变区(尤其是 V3 区)的碱基序列相差较大,所以扩增出的每种细菌 16S rRNA 基因的 V3 区序列基本可以被 DGGE 技术有效分离,每一个 DGGE 电泳条带大致对应群落中的一个优势菌种或操作分类单元(operational taxonomic unit, OTU),条带数量多少反



泳道: 1)1A; 2)1O; 3)2A; 4)2O; 5)3A; 6)3O; 7)4A; 8)4O; 9)5A; 10)5O

图 3 各工况下缺氧池(A)和好氧池(O)污泥样本的 DGGE 电泳图

Fig. 3 DGGE electrophorogram of all sludge samples in anoxic and oxic tanks



泳道: 1)1A; 2)1O; 3)2A; 4)2O; 5)3A; 6)3O; 7)4A; 8)4O; 9)5A; 10)5O;

条带按照其与条带 1A 的相似系数由大到小排列

图 4 各工况下缺氧池(A)和好氧池(O)污泥样本的 DGGE 电泳条带简图

Fig. 4 DGGE band diagram of all sludge samples in anoxic and oxic tanks

映了微生物多样性,条带的荧光信号强度反映了该种属细菌的相对丰度.

从图 3 和 4 中看出,大部分条带只在某些样品中出现,且缺氧池和好氧池中的菌群结构随着工况

变换而发生较大变化; 7、10、19、23 号条带在所有缺氧池样品中均出现, 35 号条带在所有样品中均出现,说明该条带所代表的菌种能适应各不同工况下的好氧或缺氧条件.

表 4 计算了各工况下缺氧池和好氧池的菌群香依指数. 从中看出:好氧池污泥样品的条带数和香依指数随着运行时间的推移,有明显增加,表明 UF 膜对微生物的截留作用使 MBR 中菌群多样性持续增加,因此才能保证有机物降解和氨氧化反应进行得较为彻底,在 5 个工况中,出水的氨氮浓度基本能保持在 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下; 但是,缺氧池污泥样品的条带

表 4 各工况下 DGGE 检测的菌群多样性
Table 4 Bacterial community diversity of each condition detected by DGGE

工况	缺氧池			好氧池		
	条带数	峰强度和	香依指数	条带数	峰强度和	香依指数
1	23	2 931	1. 20	13	1 119	1. 03
2	15	1 389	1. 07	21	2 952	1. 23
3	30	3 253	1. 37	25	2 463	1. 32
4	28	3 184	1. 35	30	3 071	1. 39
5	23	2 960	1. 26	31	3 063	1. 41

表 5 各工况下 DGGE 检测的菌群相似矩阵

Table 5 Similarity matrix of each condition detected by DGGE

	1A	1O	2A	2O	3A	3O	4A	4O	5A	5O
1A	100									
1O	55	100								
2A	18. 9	18. 9	100							
2O	24. 1	9. 5	51. 1	100						
3A	30. 6	28. 6	41. 3	46. 1	100					
3O	26. 8	15. 5	36	<u>52. 3</u>	55. 3	100				
4A	35	29	24. 1	31. 4	43. 5	38. 7	100			
4O	27. 5	24. 9	19. 6	34. 3	35. 8	39. 5	59	100		
5A	26. 3	22. 7	43. 8	35. 8	30. 4	37. 3	47. 8	53. 4	100	
5O	21. 2	17. 6	26. 4	31. 9	45	40. 5	63. 1	53. 4	44. 2	100

2.3 菌群多样性与总氮去除率的关系

由表 4,在处理效率最佳的工况 3 条件下,缺氧池污泥样品的条带数和香依指数都是最高. 由于缺氧池是反硝化反应的场所,因此将各工况的出水 TN 浓度与缺氧池的香依指数结合,进行相关性分析. 图 5 显示了出水 TN 浓度与缺氧池菌群香依指数的关系.

从图 5 中看出,缺氧池菌群的香依指数和工况的出水 TN 平均浓度具有反相关关系,即缺氧池内菌群多样性越高,出水 TN 浓度越低,即脱氮效率越高. 这说明工况变换对缺氧池的菌群多样性有明显的影响,而菌群多样性的变化直接影响反硝化效率以及出水总氮浓度,缺氧池菌群多样性增加会提高反硝化效率.

数和香依指数随着工况变换,有起伏波动,表明缺氧池内菌群结构受工况条件(好氧池工艺参数)的影响较大.

计算每 2 个样品之间的戴斯系数,并把系数列成矩阵,得到相似矩阵如表 5 所示. 从中看出:同一个工况下,除了工况 5 的好氧池和缺氧池污泥样本之间的戴斯系数为 44. 2%,其余戴斯系数均在 50% 以上(如表 5 中黑体数字所示),原因是污泥回流使得缺氧池和好氧池的菌种得以交流,而且有部分兼氧菌在缺氧和好氧的条件下都能较好地生存,因此两池的菌群结构相似性较高;不同工况下,工况 2、3 的好氧池、工况 4、5 的好氧池的污泥样本之间的戴斯系数也在 50% 以上(如表 5 中下划线数字所示),说明在这些工况之间,好氧池内较多菌种能适应前后工艺条件的变化;但是,5 个工况的缺氧池污泥样品之间的戴斯系数均在 50% 以下,进一步说明好氧池和缺氧池内菌群结构受工况条件的影响是不同的,而缺氧池菌群比好氧池菌群受工况条件的影响更大.

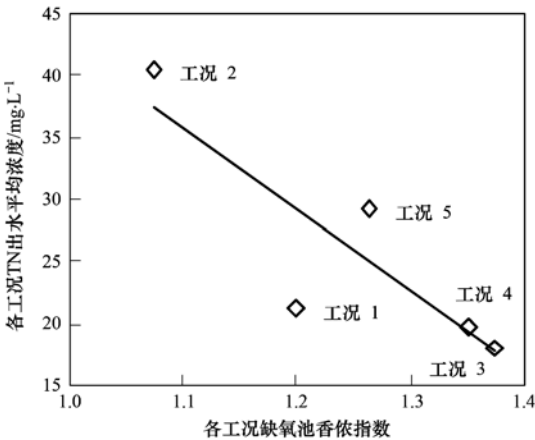


图 5 各工况出水 TN 浓度与缺氧池菌群香依指数的关系

Fig. 5 Relationship between TN in effluent and Shannon Index of bacterial community in the anoxic tank

尽管工况变换对 COD 的去除也产生影响,但是工艺出水 COD 平均浓度与缺氧池菌群多样性之间没有明显的相关关系. 原因可能是,好氧池内微生物同样对 COD 的去除有重要的作用,因此缺氧池菌群多样性与工艺出水 COD 浓度之间没有显著的关系.

3 结论

(1) 在 HRT 12 h, SRT 10 d, 硝化液回流比 300%, 污泥回流比 100% 的条件下, 工艺运行情况最好而且稳定, COD、 NH_4^+ -N 和 TN 平均去除率分别为 96.4%、99.1% 和 75.8%.

(2) 在试验过程中, 缺氧池和好氧池中的菌群结构发生不同变化, 缺氧池菌群多样性随工况变换而起伏波动; 好氧池菌群多样性随运行时间延长而逐渐变得丰富. 同一工况下, 缺氧池与好氧池菌群相似性通常大于 50%; 不同工况下, 缺氧池的菌群相似性均小于 50%, 而好氧池的菌群相似性通常大于 50%.

(3) 反应器中菌群多样性与出水水质有着密切关系. 好氧池内菌群多样性的不断增加, 保证了有机物降解和硝化反应进行得较为彻底; 缺氧池内菌群多样性越丰富, 工艺系统的反硝化效果越好, 出水 TN 浓度也越低.

(4) 总之, A/O MBR 工艺适用于分散式生活污水再生处理, 反应器中丰富的菌群保障了污水中有有机物和氮的高效去除.

参考文献:

- [1] Oki T, Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources [J]. *Science*, 2006, **313**(5790): 1068-1072.
- [2] 中华人民共和国水利部. 2008 年中国水资源公报 [EB/OL]. http://www.mwr.gov.cn/zwzc/hygb/szygb/qgszygb/201001/t20100119_171051.html, 2010-01-19.
- [3] 中华人民共和国环境保护部. 2010 年全国水环境质量状况 [EB/OL]. http://wfs.mep.gov.cn/swrkz/shzl/201106/t20110603_211631.htm, 2011-06-03.
- [4] 杨群, 章北平, 杨高华, 等. 离散型住宅小区污水深度处理与中水回用系统的优化设计 [J]. *环境工程*, 2007, **25**(3): 24-26.
- [5] 张西旺, 金奇庭. 一体式 MBR 处理高氨氮小区生活污水中试研究 [J]. *环境工程*, 2003, **21**(1): 23-26.
- [6] 杨昊, 杭世珺, 钱明达. 无锡市梅村污水处理厂 MBR 工艺优化运行研究 [J]. *给水排水*, 2010, **36**(12): 32-35.
- [7] Li F Y, Wichmann K, Otterpohl R. Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(11): 3439-3449.
- [8] 白玲, 蓝伟光, 严滨, 等. 废水处理中膜生物反应器的研究进展 [J]. *膜科学与技术*, 2008, **28**(1): 91-96.
- [9] Judd S. The status of membrane bioreactor technology [J]. *Trends in Biotechnology*, 2008, **26**(2): 109-116.
- [10] Ng H Y, Hermanowicz S W. Membrane bioreactor operation at short solids retention times: performance and biomass characteristics [J]. *Water Research*, 2005, **39**(6): 981-992.
- [11] 欧阳科, 刘俊新. 膜生物反应器与传统活性污泥反应器内生物群落特征 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(2): 499-503.
- [12] Miura Y, Hiraiwa M N, Ito T, et al. Bacterial community structures in MBRs treating municipal wastewater: relationship between community stability and reactor performance [J]. *Water Research*, 2007, **41**(3): 627-637.
- [13] 张斌, 孙宝盛, 刘慧娜, 等. 处理不同废水 MBR 系统中微生物群落结构的比较 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(10): 2944-2949.
- [14] Liang Z H, Das A, Beerman D, et al. Biomass characteristics of two types of submerged membrane bioreactors for nitrogen removal from wastewater [J]. *Water Research*, 2010, **44**(11): 3313-3320.
- [15] 陈小刚, 张洪林, 于冰, 等. A/O MBR 工艺中生物群落结构变化的研究 [J]. *环境工程技术学报*, 2011, **1**(2): 145-150.
- [16] 丁嫚, 赵翠, 温东辉. 分子生物学技术在废水生物处理中的应用 [J]. *环境工程*, 2010, **28**(S1): 86-92.
- [17] 孙庆华, 柏耀辉, 赵翠, 等. DGGE、T-RFLP、LH-PCR 对两种活性污泥的微生物种群多样性分析的比较 [J]. *环境工程学报*, 2009, **3**(8): 1365-1370.
- [18] 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. 211-281.
- [19] Eichner C A, Erb R W, Timmis K N, et al. Thermal gradient gel electrophoresis analysis of bioprotection from pollutant shocks in the activated sludge microbial community [J]. *Applied Environmental Microbiology*, 1999, **65**(1): 102-109.
- [20] LaPara T M, Nakatsu C H, Pantea L M, et al. Stability of the bacterial communities supported by a seven-stage biological process treating pharmaceutical wastewater as revealed by PCR-DGGE [J]. *Water Research*, 2002, **36**(3): 638-646.
- [21] 欧阳雄文. 新型膜—生物膜反应器 (MBR) 脱氮除磷的研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2005.
- [22] 杨春, 杨琦, 刘若鹏, 等. A/O MBR 处理城市污水回用的中试研究 [J]. *膜科学与技术*, 2006, **26**(2): 60-63.
- [23] Yoon S H, Kim H S, Park J K, et al. Influence of important operational parameters on performance of a membrane biological reactor [J]. *Water Science and Technology*, 2000, **41**(10-11): 235-242.

CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunneng Lake Watershed	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow (<i>Gobiocypris rarus</i>)	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish (<i>Brachydanio rerio</i>)	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and <i>Fluorescence Characteristics</i> of Dissolved Organic Matter	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM _{2.5} in the Suburb of Shenzhen	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ Catalyst	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO ₂ Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N ₂ O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, Liang Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO ₂ Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis	CHEN Cao-cai, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

《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6月15日 33卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 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@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人