

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第8期

Vol.35 No.8

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

2012年春季京津冀地区一次沙尘暴天气过程中颗粒物的污染特征分析 刘庆阳, 刘艳菊, 赵强, 张婷婷, 张美根, 王存美 (2843)

杭州灰霾天气超细颗粒浓度分布特征 陈秋方, 孙在, 谢小芳 (2851)

气象因素对广州市大气中二噁英污染特征的影响 杜国勇, 苏原, 任明忠, 张素坤, 青宪 (2857)

龙凤山本底站大气 CO₂ 数据筛分及浓度特征研究 栾天, 周凌晔, 方双喜, 姚波, 王红阳, 刘钊 (2864)

区域传输对华东森林及高山背景点位大气污染物浓度的影响 苏彬彬, 许榕洋, 张若宇, 纪贤鑫 (2871)

天津市夏季蜂窝状溶蚀器涂层溶液浓度确定的实验研究 张诗建, 姬亚芹, 张雷波, 赵雪艳, 朱振宇, 杨文 (2878)

铅锌冶炼厂不同工艺铅元素粒径分布特征 梁俊宁, 李文慧, 葛毅, 陈洁, 宋丽娜, 刘杰 (2883)

KI 改性黏土脱除烟气中单质汞的研究 沈伯雄, 陈建宏, 蔡记, 何川, 李卓 (2890)

污泥直接干化产生的恶臭及挥发性有机物特征研究 陈文和, 邓明佳, 罗辉, 张婧赢, 丁文杰, 刘俊新, 李琳 (2897)

基于风险管理的区域(流域)地下水污染预警方法研究 白利平, 王业耀, 郭永丽, 周友亚, 刘俐, 颜增光, 李发生 (2903)

1980~2010年浙江某典型河流硝态氮通量对净人类活动氮输入的动态响应 张柏发, 陈丁江 (2911)

南京仙林新市区土地利用结构与格局对湿地水环境氮、磷影响研究 蔡春晓, 刘红玉, 李玉凤, 王聪, 侯明行 (2920)

三江平原典型沼泽湿地养分累积与沉积特征 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 石福臣, Sasa Kaichiro (2928)

岩溶地下河流域表层土壤多环芳烃污染特征及来源分析 蓝家程, 孙玉川, 师阳, 徐昕, 袁道先, 胡宁 (2937)

亚热带典型岩溶区地表流水文地球化学昼夜变化及其影响因素研究 张陶, 蒲俊兵, 袁道先, 章程, 何师意, 于爽, 刘文, 莫雪, 周建超, 杨会, 唐伟 (2944)

藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究 肖可, 沈立成, 王鹏 (2952)

广西五里峡水库夏季溶解无机碳行为的初步研究 刘文, 蒲俊兵, 于爽, 章程, 区绎如, 袁道先, 杨会, 唐伟 (2959)

铜陵相思河流域重金属分布特征研究 陈莉薇, 徐晓春, 王军, 陈芳 (2967)

不同压力作用下太湖蓝藻气囊体积分数及上浮特性研究 王巍, 丛海兵, 徐亚军, 陈雯婧, 徐思涛, 吴军, 蒋新跃 (2974)

酸性条件下Ti(IV)催化 O₃/H₂O₂ 降解邻苯二甲酸二甲酯 高燕, 沈佟栋, 陈尧, 周慧华, 童少平 (2980)

无机离子与胡敏酸对零价铁去除水中Pb(II)、Hg(II)的影响 施秋伶, 周欣, 张进忠, 邱昕凯 (2985)

羟基磷灰石-四氧化三铁-沸石复合材料制备及去除水中刚果红研究 方巧, 林建伟, 詹艳艳, 杨孟娟, 郑雯婧 (2992)

不锈钢 201、304 和 316L 在模拟污水管道反应器中的腐蚀 鲍国栋, 左剑恶, 王雅娇, 于里 (3002)

微滤过程中腐殖酸与膜表面黏附特性的试验研究 王磊, 王磊, 黄丹曦, 王旭东 (3007)

不同类型 LDHs 对垂直流人工湿地无烟煤基质的覆膜改性及其脱氮效果研究 张翔凌, 郭露, 陈俊杰, 刘小婷, 徐璐, 陈巧珍, 王晓晓 (3012)

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 刘春, 龚鹏飞, 肖太民, 张明, 年永嘉, 杨景亮, 张晶 (3018)

SPG 膜微气泡曝气生物膜反应器运行性能影响因素研究 张磊, 张明, 刘春, 张静, 刘俊良 (3024)

曝气膜生物反应器运行过程中污泥活性特征变化及其对膜污染的影响 陈烜, 汤兵, 张姿, 宾丽英, 黄绍松, 付丰连, 邱兵 (3031)

限量曝气进水时间对硝化颗粒污泥的影响特性研究 刘文如, 阴方芳, 王建芳, 沈耀良 (3038)

UASBB 厌氧氨氧化反应器处理污泥脱水液的影响因素研究 李亚峰, 马晨曦, 张驰 (3044)

开封周边地区地表灰尘中汞背景值及其应用 陈彦芳, 马建华, 董运武, 刘德新, 陈星 (3052)

北京市幼儿园地面尘中有毒金属浓度及其健康风险 段恒轶, 吴亚涛, 王珏, 刘兆荣 (3060)

珠三角电子垃圾和城市地区家庭灰尘中多氯联苯的来源及暴露风险 朱智成, 陈社军, 丁南, 王璟, 罗孝俊, 麦碧娟 (3066)

温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应 齐玉春, 彭琴, 董云社, 肖胜生, 孙良杰, 刘欣超, 何亚婷, 贾军强, 曹丛丛 (3073)

不同肥料种类对稻田红壤碳氮淋失的影响 刘希玉, 邹敬东, 徐丽丽, 张心昱, 杨风亭, 戴晓琴, 王忠强, 孙晓敏 (3083)

低分子有机酸对土壤中 Cu 化学形态的影响 黄国勇, 付庆灵, 朱俊, 万田英, 胡红青 (3091)

EDTA 与柠檬酸复配洗修多重金属污染土壤效果研究 尹雪, 陈家军, 蔡文敏 (3096)

不同生态系统土壤生化特征及其与土壤呼吸和 N₂O 排放的关系 陈玲, 范会, 蒋静艳 (3102)

黄河口不同恢复阶段湿地土壤 N₂O 产生的不同过程及贡献 孙文广, 孙志高, 甘卓亭, 孙万龙, 王伟 (3110)

猪粪化肥配施对双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及其全球增温潜势的影响 王聪, 沈健林, 郑亮, 刘杰云, 秦红灵, 李勇, 吴金水 (3120)

我国北方两地环境臭氧浓度对矮菜豆生长的影响 袁相洋, 张巍巍, 孙敬松, 胡恩柱, 张玉龙, 张红星, 田媛, 冯兆忠 (3128)

丛枝菌根影响纳米 ZnO 对玉米的生物效应 王卫中, 王发园, 李帅, 刘雪琴 (3135)

丛枝菌根对翅荚木生长及吸收累积重金属的影响 李霞, 彭霞薇, 伍松林, 李志茹, 冯红梅, 江泽平 (3142)

含磷物质对水稻吸收土壤砷的影响 雷鸣, 曾敏, 廖柏寒, 胡立琼, 周航, 龙水波 (3149)

重金属铬(VI)的生态毒性及其土壤环境基准 王晓南, 刘征涛, 王婉华, 张聪, 陈丽红 (3155)

维生素 B₁₂ 对脱氮功能蓝藻降解 2,4,4'-三氯联苯的促进作用研究 刘嘉裕, 肖文丰, 鲁莉萍, 张杭君 (3162)

己烯雌酚降解菌株沙雷氏菌的分离鉴定及其降解特性 徐冉芳, 孙敏霞, 刘娟, 汪泓, 李欣, 朱雪竹, 凌婉婷 (3169)

多溴联苯醚在市场鲫鱼体内分布和食鱼暴露量 王俊霞, 王春艳, 刘莉莉, 周啸宇, 刘洋成, 林匡飞 (3175)

稀有鮐鲫 HMGR 基因全长克隆及雌鱼经五氯酚暴露基因表达的分析 邓川, 毛思予, 熊力, 张晓峰, 李伟, 高香, 刘秋萍, 陈韵, 刘堰 (3183)

藻细胞和高岭土的存在对病毒 MS2 存活的影响 何强, 吴庆庆, 马红芳, 周真明, 苑宝玲 (3192)

多胺功能化介孔炭对 Pb(II) 的吸附动力学与机制 李坤权, 王艳锦, 杨美蓉, 朱志强, 郑正 (3198)

生物活性炭投加量对垃圾渗滤液处理效果的影响 崔延瑞, 郭焱, 吴青, 马罗丹, 孙剑辉, 崔凤灵 (3206)

经济结构调整的污染减排效应: 以 COD 减排为例 李名升, 周磊, 陈远航, 李茜, 张建辉 (3212)

中国铅流改变原因分析 马兰, 毛建素 (3219)

放牧阉牦牛提前出栏甲烷排放强度减排潜力探讨 汪诗平, Andreas Wilkes, 汪亚运, 白玲 (3225)

中国水体硝酸盐氮氧双稳定同位素溯源研究进展 徐志伟, 张心昱, 于贵瑞, 孙晓敏, 温学发 (3230)

《环境科学》征稿简则(2936) 《环境科学》征订启事(3051) 信息(2882, 2927, 3059, 3218)

曝气膜生物反应器运行过程中污泥活性特征变化及其对膜污染的影响

陈焯, 汤兵*, 张姿, 宾丽英, 黄绍松, 付丰连, 邱兵

(广东工业大学环境科学与工程学院, 广州 510006)

摘要: 研究了曝气膜生物反应器运行过程中活性污泥主要活性特征变化及其对膜污染的影响. 通过排出剩余污泥的办法维持活性污泥浓度在 $4\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 并连续运行 75 d. 运行期间, 每日检测活性污泥的各项性质指标便于反映污泥特性的变化. 结果表明, 随着反应器运行时间的延长, 污泥脱氢酶活性逐渐增加, 其对反应器的运行有着两方面的作用, 一方面会强化微生物对污染物的去除, 但另一方面则导致了胞外聚合物的增加, 并加速膜污染. 而污泥表观产率则随着运行时间的延长先增加后有所减少, 其粒径逐渐减小, 且胞外聚合物呈现增加的趋势, 总的出水水质情况逐渐提高, 与此同时, 反应器内原生动物及后生动物在运行前期较少, 而在后期大量出现. 膜污染分析结果表明运行后期膜污染速度明显加快, 其原因在于: 污泥粒径的减小以及胞外聚合物的增加导致细小颗粒及胞外聚合物堵塞或在膜表面沉积数量增加.

关键词: 曝气膜生物反应器; 脱氢酶活性; 污泥粒度分布; 跨膜压差; 膜污染

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)08-3031-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.08.028

Variations in the Active Characteristics of Sludge During the Operation of an Aerobic Membrane Bioreactor and Their Effects on Membrane Fouling

CHEN Xuan, TANG Bing, ZHANG Zi, BIN Li-ying, HUANG Shao-song, FU Feng-lian, QIU Bing

(School of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The present work investigated the variations in the active characteristics of sludge during the operation period of an aeration membrane bioreactor, as well as their effects on the fouling of membrane module. Through discharging the excess sludge, the concentration of the mixed liquor was maintained at around $4\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ for 75 days, during which the characteristics of sludge were carefully tested every day to reflect its variation. Results indicated the dehydrogenase activity increased with the prolonging operation time. The increased activity of dehydrogenase had two effects on the operation of the bioreactor, one was the enhancement of pollutant removal by the microorganisms, while the other effect was the increase of extracellular polymeric substance (EPS), which led to a deteriorative effect on the membrane fouling. During the operation of the bioreactor, the sludge yield coefficient first increased, and then decreased to a certain degree with obvious decrease in particle size and increase in the amount of EPS, which also enhanced the quality of the effluent. At the same time, protozoan and metazoan were observed in the whole bioreactor at the late operational phase but relatively rare at the initial phase. Analysis of membrane fouling showed that the fouling rate of the membrane module increased during the late operational period, which was attributed to the deposition of fine sludge particles and EPS caused by the decreased particle size of the sludge and the increased amount of EPS.

Key words: aeration membrane bioreactor; dehydrogenase activity; particle size distribution; transmembrane pressure; membrane fouling

膜生物反应器 (MBR) 是一种由膜分离技术与生化反应器相结合的高效污水处理技术, 因其出水水质好, 污泥负荷高, 污泥产率低, 占地面积小等优点使其在工业及市政污水处理领域具有广泛的应用前景^[1]. 然而运行过程中的膜污染则是影响 MBR 运行的一个重要制约因素^[2, 3]. 已有的研究表明: 膜污染现象与污泥性质、膜材料及运行条件均有着直接的关联^[4~10], 但显然, 反应器内活性污泥性质的影响更为突出. 迄今为止, 导致膜污染的原因已基本达成共识, 包括: ①活性污泥中细小颗粒堵塞膜孔; ②大分子、可溶物质在膜表面形成凝胶层^[11].

活性污泥是由固体颗粒, 胶体以及溶解性物质组成的非均相混合液, 本身就是一个复杂的综合体. 在 MBR 内, 这些固体颗粒, 胶体以及溶解性物质和膜之间的相互作用更加复杂, 而它们之间的这种相互作用决定了膜污染速度^[12]. 有文献报道: 曝气条件下可有效地减缓膜组件的污染, 其原因在于: ①曝气产生的剪切力减少颗粒物质在膜表面的沉积, ②

收稿日期: 2013-12-22; 修订日期: 2014-03-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51178120)

作者简介: 陈焯 (1988 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: 153062414@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: renytang@163.com

减少微生物及其他有机分子在膜表面形成凝胶层^[13]。然而,MBR在曝气条件下长期运行过程中,污泥活性特征性质会发生哪些变化?这些变化对膜组件污染又会造成何影响?这些问题实际上仍无明确结论。

鉴于上述问题对于MBR的设计及运行均有着十分重要的意义,本实验中构建了曝气MBR并连续运行75 d,实验分析污泥在运行期间的各项活性特征性质,如脱氢酶活性、污泥表观产率以及污泥粒径等,同时观察污泥中生物相的变化,测定膜污染特征参数,进而分析这些性质在长期运行的MBR所发生的变化及其对膜污染的影响,以期为MBR运行优化及延长膜组件寿命提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验用水

实验进水采用人工模拟废水,由葡萄糖、尿素、磷酸二氢钾分别提供碳源,氮源及磷源,进水COD为 $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD:TN:TP比例为100:5:1。具体营养成分比如下:葡萄糖 $375 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,尿素 $44 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,磷酸二氢钾 $18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,碳酸氢钠 $120 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,硫酸镁 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,硫酸锰 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,氯化钙 $8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,硫酸亚铁 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。进水的pH值控

制在7.0~7.6范围内。

1.2 实验装置

实验装置如图1所示,膜生物反应器材质为有机玻璃,有效容积为30 L。膜组件为中空纤维膜,由天津膜天膜科技股份有限公司提供,型号为MOF-1b,材质为聚偏氟乙烯(PVDF),膜有效面积为 0.5 m^2 ,孔径为 $0.2 \mu\text{m}$ 。长期运行的膜生物反应器往往采用运行/休息的模式进行,间隔通常为几分钟,这种方法可以减缓膜污染,但是无法实现反应器连续进出水。本实验将两个完全相同的膜组件垂直安置在反应器中,膜组件出水孔连接一个三通电磁阀,该电磁阀由计时器控制,通过这种方法来实现每隔5 min交替使用这两个膜组件,即当一个膜组件过滤出水时,另一个处于停止状态,如此交替使用,减缓膜的污染速度,同时达到连续出水的目的。膜组件下方安置了一个曝气盘,曝气量为 $200 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$,在为活性污泥提供所需溶解氧的同时,冲刷膜组件表面,降低膜污染的速度。三通电磁阀的后面连接一个真空压力表,记录跨膜压差(TMP)。通过调节蠕动泵的转子转速调节出水流量为 $5 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$,膜通量为 $10 \text{ L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 。本实验采用恒定膜通量运行模式,因而可用TMP的增长来表征膜污染的程度。

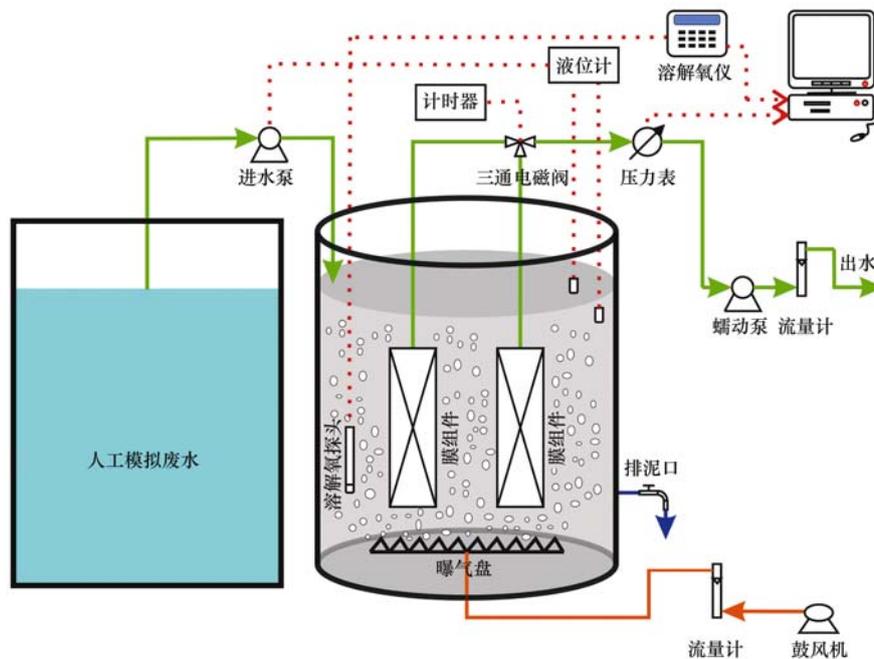


图1 曝气膜生物反应器示意

Fig. 1 Schematic diagram of the laboratory scale aeration MBR

实验所用接种污泥取自沥涝污水处理厂二沉池回流污泥,取回后稀释至 $4000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 并移至反应

器中培养,通过每日排泥使MLSS浓度保持为 $4000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。反应器运行期间TMP达到30 kPa左右时,

取出膜组件进行物理及化学清洗,无其他故障导致运行中断.化学清洗采用浓度为 $3\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的次氯酸钠浸泡 $4\ \text{h}$ ^[14],再用清水洗净后放回反应器内继续运行.

1.3 实验仪器

UV-752N 型紫外可见分光光度计(上海佑科公司);JPSJ-605 型溶解氧仪(上海仪电公司);CX31 型光学显微镜(日本奥林巴斯公司);Eyeteck 型激光粒度分析仪(荷兰安米德公司).

1.4 分析方法

常规分析项目:COD 采用重铬酸钾法测定;总氮采用过硫酸钾化-紫外分光光度法; NH_4^+ -N 采用纳氏试剂分光光度法; NO_3^- -N 采用紫外分光光度法; NO_2^- -N 采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺光度法;MLSS 采用重量法^[15].

污泥表观产率 Y 是指每去除 $1\ \text{kg}$ COD 所新增加的污泥量,本实验中每日污泥表观产率计算采用以下公式:

$$Y = (\text{MLSS}_{\text{start}} - \text{MLSS}_{\text{end}}) / \text{COD}_{\text{removal}} \quad (1)$$

式中, Y 为污泥表观产率, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$; $\text{MLSS}_{\text{start}}$ 为排泥前测得的 MLSS 总量, kg ; MLSS_{end} 为排泥后的反应器内 MLSS 总量, kg ; $\text{COD}_{\text{removal}}$ 为一天 COD 的去除量, kg .

脱氢酶活性测定基于 Burdock 等^[16]的方法并稍加修改,即取 $15\ \text{mL}$ 经过超声破碎后的活性污泥于 $15\ \text{mL}$ 离心管中,在 $4\ 000\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速下离心 $5\ \text{min}$,弃置上清液,然后加入去离子水至 $15\ \text{mL}$,再次以 $4\ 000\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心 $5\ \text{min}$,如此洗涤 3 次.第 3

次洗涤后加去离子水至 $15\ \text{mL}$,搅拌混匀活性污泥,取 $2\ \text{mL}$ 混合液于 $15\ \text{mL}$ 离心管中,先后加入 $2\ \text{mL}$ Tris-HCl 缓冲溶液, $0.5\ \text{mL}$ 0.4% 氯化三苯基四氮唑(TTC)溶液, $0.5\ \text{mL}$ 的 $0.1\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 葡萄糖溶液, $0.1\ \text{mL}$ 浓硫酸,置于 30°C 恒温振荡仪内往复振荡 $2\ \text{h}$.之后取出加入 $5\ \text{mL}$ 甲苯,室温下萃取完全后置于 $4\ 000\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心 $5\ \text{min}$.取上清液在 $485\ \text{nm}$ 处测定三苯基甲(TF)的生成量.

胞外聚合物(EPS)主要成分包括多糖、蛋白质、核酸、油脂等高分子化合物.本实验采用热提取法测定 EPS,即取 $50\ \text{mL}$ 污泥混合液,在 $5\ 000\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心力下离心 $5\ \text{min}$,然后通过 $1.2\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤.取滤过液测定溶解性细胞产物(SMP),通过 Lowry 法^[17]测定 SMP 的蛋白质组分(SMP_p),通过苯酚-硫酸法^[18]测定 SMP 的多糖组分(SMP_c).将滤膜的截留物移至烧杯中,加入 $50\ \text{mL}$ 左右去离子水,搅拌 $10\ \text{min}$,在 80°C 水浴中加热 $10\ \text{min}$,然后在 $7\ 000\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心力下离心 $10\ \text{min}$,之后通过 $1.2\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤,取滤出液测定提取出的 EPS 为附着性胞外多聚物(eEPS),同 SMP 相同的道理,测定 eEPS 的蛋白质组分(eEPS_p)及多糖组分(eEPS_c).

2 结果与讨论

2.1 膜生物反应器总的运行情况

膜生物反应器连续运行 $75\ \text{d}$,通过每天测定出水 COD、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 等指标,分析出水水质变化趋势,了解反应器的运行状况,实验结果见图 2 所示.

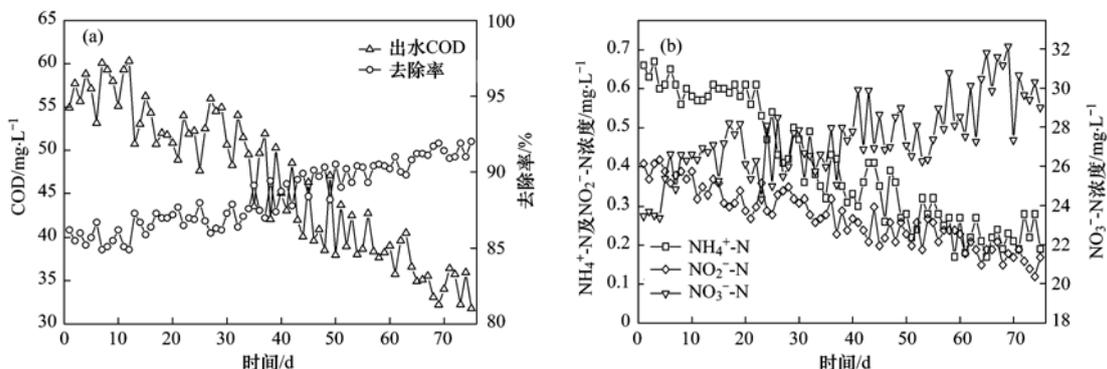


图 2 曝气膜生物反应器 COD 去除率及在出水中的 COD、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 以及 NO_3^- -N 浓度

Fig. 2 Removal efficiency of COD and concentration of COD, NH_4^+ -N, NO_2^- -N and NO_3^- -N in the effluent of the aeration MBR

如图 2(a) 所示,COD 去除率从 85% 左右增加至 92%,可以看出,随着运行时间的增加,活性污泥趋于成熟,去除效果提高.这种效果同时还表现在

NH_4^+ -N 去除率的提高上,通过图 2(b) 可以看出出水的 NO_2^- -N 浓度也随着时间降低,说明污泥硝化反应完全.出水中的 NO_3^- -N 浓度较高,而且随着时间增

加有所增加,这归因于反应器中溶解氧比较高,活性污泥处于好氧状态,无法通过反硝化将 NO_3^- -N转化为 N_2 .

2.2 污泥镜检

活性污泥中生存着的各种微生物是活性污泥

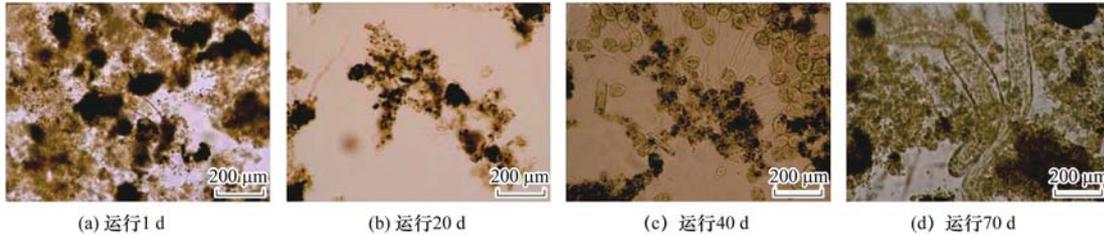


图3 运行不同天数后污泥光学显微镜下的镜检图片

Fig. 3 Images of sludge under optical microscope after different days

图3是不同运行时间段的污泥镜检图片,如图3(a)所示,污泥接种初期,由于污泥取自二沉池,活性较低,污泥内几乎无法观察到原生动物.图3(b)为运行20 d的污泥,污泥内可以观察到少量钟虫等原生动物,说明污泥活性增加,反应器运行状况良好.图3(c)为运行运行40 d的污泥,原生动物明显增加,显微镜中可以看到成簇生长的累枝虫,并且还有少量后生动物出现.图3(d)为运行70 d的污泥,镜检中不仅可以观察到累枝虫、钟虫等原生动物,还有线虫、轮虫、红斑蝶体虫等后生动物.

2.3 污泥粒度分布

活性污泥常用粒度分布来反映出污泥样品中不同粒径颗粒占颗粒总量的百分数,本研究采用的累计粒度分布百分数表示小于某粒径的颗粒占颗粒总数的百分数,结果见图4所示.

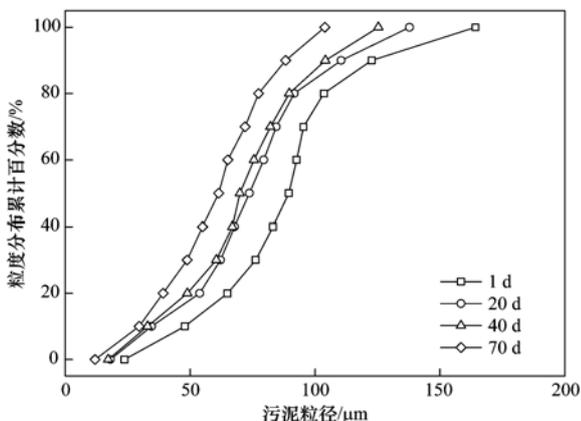


图4 不同时期污泥粒径分布

Fig. 4 Particle size distribution in different stages

图4为不同时间污泥粒度分布,新接种污泥粒径较大,主要由于其取自二沉池,在二沉池中,污泥

法处理废水的功能载体,通过光学显微镜直接观察活性污泥中的原生动物、后生动物及污泥形态能够反映出微生物的生长状况,可以间接地体现出反应器的运行情况及其处理效果^[19],结果见图3所示.

处于自由沉降状态,污泥大都互相聚集,且流动性比较小,对污泥絮体的剪切较少,容易形成尺寸较大的污泥.经过20 d的培养,污泥整体粒径减小,在好氧运行过程中,曝气对污泥的剪切作用以及反应器内混合液处于紊流状态,这两者对污泥的剪切作用导致了污泥粒径的减小.40 d的污泥尺寸与20 d的污泥尺寸分布区别不是很大,而70 d污泥尺寸明显较小,这种现象主要归因于后期后生动物大量繁殖,具有较高的活性,这些后生动物穿梭于污泥中,能够破坏大的菌胶团,同时,它们以污泥絮体为食,导致了活性污泥尺寸减小.活性污泥尺寸随着运行时间增加而减小也是导致出水 NO_3^- -N出水浓度增加的原因之一.对于活性污泥絮体,溶解氧的浓度由表面向内部递减,尺寸大的活性污泥内部可能存在缺氧或者厌氧区域,在这些区域 NO_3^- -N可以通过反硝化作用而被降解.而当活性污泥尺寸减小时,这些缺氧或者厌氧区域必然随之减少, NO_3^- -N无法被反硝化,从而导致了其出水浓度随着运行时间增加而增加.

2.4 脱氢酶活性变化分析

脱氢酶是一类蛋白质,在能量转移和物质循环中起着关键性的作用,它能使氧化有机物的氢原子活化并传递给特定的受氢体实现糖、脂肪、氨基酸、核苷酸的代谢,因此,脱氢酶活性直接影响细胞的生长及新陈代谢^[20].脱氢酶活性随运行时间的变化趋势见图5所示.

图5为污泥脱氢酶活性随运行时间变化的曲线,刚接种污泥TTC-脱氢酶活性较低,经过几天的调整后,TTC-脱氢酶活性逐渐增加,活性污泥中微生物新陈代谢旺盛,对于模拟废水的COD及 NH_4^+ -N

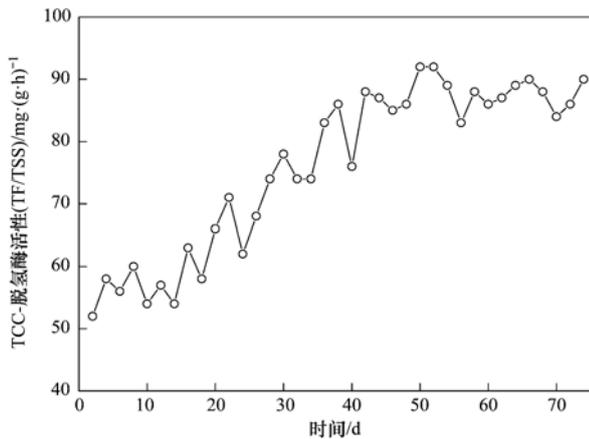


图5 TTC-脱氢酶活性变化趋势

Fig. 5 TTC- dehydrogenase activity profile

去除率也随之增加,脱氢酶活性到达一定程度后维持在一个较高的水平,因而保证了好氧 MBR 运行后期仍然保持拥有良好的出水水质.

2.5 污泥表观产率变化分析

污泥表观产率是反应活性污泥合成代谢的主要参数,与传统活性污泥法相比,MBR 往往具有相对较低的污泥表观产率. 运行期间污泥表观产率随时间的变化趋势如图 6 所示.

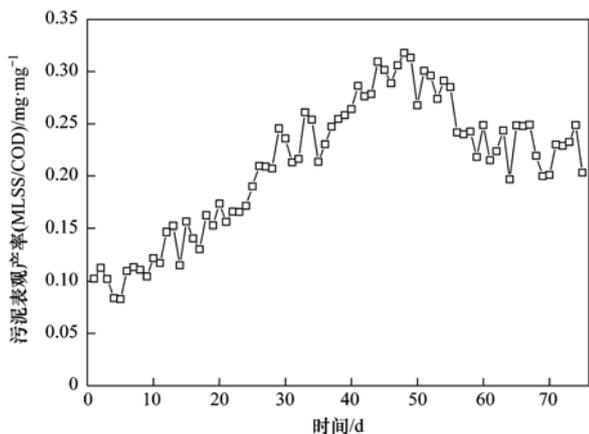


图6 污泥表观产率变化趋势

Fig. 6 Sludge yield coefficient profile

图 6 为污泥表观产率随时间变化的趋势,反应器运行初期活性污泥表观产率较小,这是因为污泥尚在适应期,污泥微生物活性较低,微生物繁殖速度慢,污泥增值量较小,同时 COD 的去除量也较小. 随着运行时间的增加,污泥适应了新的环境,其中微生物活性增加,能够有效利用营养物质进行新陈代谢,提高增值速度,因此,表观污泥产率明显增加. 曝气 MBR 运行 50d 左右,活性污泥趋于成熟,反应器内出现大量原生动物及后生动物,它们在活性污

泥生态系统中处于食物链的顶端,食物链中能量传递逐级递减,食物链顶端的生物为了维持正常的生命活动需要消耗大量的由食物链底端生物吸收的营养物质,而且,随着食物链中营养级数的增加,能量传递中以热量等形式损失也增加,因而,活性污泥生态系统中用于活性污泥增值的能量减少,这就导致了污泥表观产率后期随着运行时间的增加而降低. 许多学者也发现后生动物如红斑蝶体虫对污泥减量化具有十分明显的效果^[21~23],最后,当反应器内活性污泥生态系统达到一个相对稳定状态时,污泥表观产率也随之保持在一个相对稳定的范围内.

2.6 活性污泥 EPS 分析

活性污泥中的 EPS 是由微生物分泌于体外的一些高分子聚合物,紧密附着在活性细胞表面的 EPS 为 eEPS_p,溶解在混合液中的 EPS 为 SMP^[2],其含量与膜污染密切相关^[9, 24~27].

图 7 为活性污泥中 EPS 各组分变化曲线,随着运行时间的增加,反应器中污泥脱氢酶活性增加,微生物新陈代谢增强,从而分泌出更多的 EPS, EPS 中各个组分都有所增加. 图 7 中可以看出 eEPS_p 和 eEPS_c 的增加速度要比 SMP_p 和 SMP_c 的组分的增加速度快. 这种现象主要由两种原因造成,首先,在微生物生命周期过程中,紧密分布在细胞表面的 eEPS_p 和 eEPS_c 随着细胞最后衰老死亡裂解之后,相应地转化成了 SMP_p 和 SMP_c. 另一个原因是反应器污泥混合液处于紊流状态,污泥颗粒之间相互摩擦或者碰撞以及曝气剪切作用,导致细胞表面的 eEPS_p 和 eEPS_c 脱离扩散到混合液中,转化成 SMP_p 和 SMP_c.

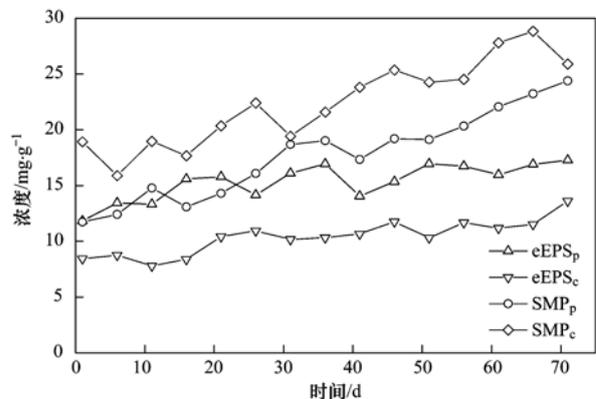


图7 EPS 各组分变化趋势

Fig. 7 EPS components profile

2.7 膜污染分析

为了解膜组件污染情况及变化趋势,依据运行过程中 TMP 的变化将反应器的运行分为两个阶段,

即当 TMP 达到 30 kPa 左右时,取出膜组件进行化学清洗,清洗之前为第一阶段,清洗之后继续运行则称为第二阶段。

从图 8 可以看出,两个阶段 TMP 的增加趋势类似,前期 TMP 增长平缓,后期加速增加.膜生物反应器依靠负压抽吸出水,在常通量运行模式中,随着运行时间增加,吸附在膜表面的泥饼厚度增加,为了保持膜通量不变,必须提高抽吸压力,这就造成了更高的操作负压,早期在较低的操作负压下,小颗粒、低重量的污泥在负压作用下吸附在膜表面,造成膜表面泥饼的增长,大的污泥颗粒由于重力较大,负压产生的吸引力无法使其固定在膜表面,而在后期,在较高操作负压下,重量更大的污泥颗粒在负压作用下,被固定在膜表面,大大增加膜表面泥饼的增长速度,这就造成了随着 TMP 的增加,膜污染的增加速度越快。

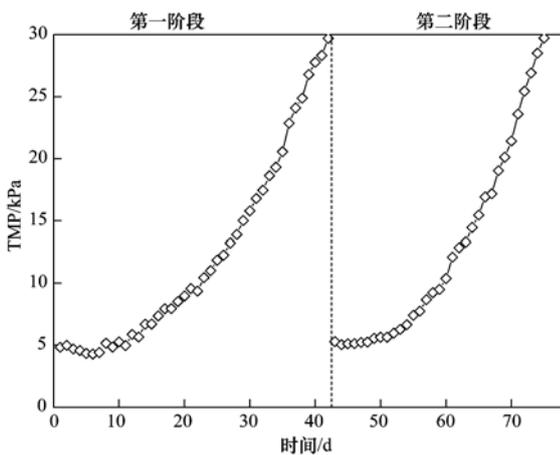


图 8 TMP 变化趋势

Fig. 8 TMP profile

对比两个阶段的 TMP 增加趋势,第一阶段经过 42 d TMP 达到 30 kPa 左右,而第二阶段只用了 33 d TMP 就到达了 30 kPa. 这种现象与活性污泥性质变化密切相关,首先是随着运行时间的增加,污泥颗粒粒径整体减小,如果忽略污泥密度的变化,污泥颗粒的重量也就随之减小,在相同负压下,重量低的污泥颗粒更容易附着在膜表面造成泥饼的增长.同时,整体污泥粒径的减小也意味着后期有更多的与膜孔径大小相同或者比膜孔径尺寸更小的污泥颗粒,这部分的污泥颗粒很可能进入膜孔内,造成膜孔的堵塞,从而加快膜污染速度.其次,在整个实验过程中,EPS 的各个组分特别是 SMP 明显增加,在蠕动泵抽吸过程中,EPS 能够形成一个水合凝胶层供生物细胞附着,同时,EPS 是这些微生物细胞的重要营

养物质来源^[25].当 EPS 作有机底物为膜表面泥饼内微生物提供营养物质时,其多糖组分的利用率比其蛋白质组分高^[28].特别是 EPS 多糖组分的增加促进膜表面泥饼的生长,从而加快膜污染的速度.活性污泥粒度分布及 EPS 的变化直接影响膜污染的速度,反应器内的原生动物和后生动物通过其在污泥中的活动及捕食行为影响污泥粒径间接影响膜污染速度,脱氢酶活性通过影响 EPS 含量间接影响膜污染速度。

3 结论

(1)运行过程中,活性污泥内的原生动动物及后生动物都明显增加,由于反应器内曝气的剪切作用以及后生动物对在活性污泥颗粒内部活动频繁造成污泥粒径随着时间增加而减小.表观污泥产率呈上升趋势,后期由于后生动物的污泥减量化效果,造成表观污泥产率下降到一定程度保持稳定。

(2)脱氢酶活性的提高对于反应器的运行利弊共存,一方面活性污泥脱氢酶活性的增加促进活性污泥中微生物的新陈代谢,从而增强了其对模拟废水中 COD 及 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除,但另一方面导致了 EPS 各组分的增加,而 EPS 的增加加快了膜污染速度。

(3)污泥粒径减小、EPS 增加导致运行后期膜污染速度呈现加快趋势。

参考文献:

- [1] Judd S. The MBR book principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment[M]. Amsterdam: Elsevier, 2006.
- [2] Le-Clech P, Chen V, Fane T A G. Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment[J]. Journal of Membrane Science, 2006, **284**(1-2): 17-53.
- [3] Hwang B, Kim J, Ahn C H, *et al.* Effect of disintegrated sludge recycling on membrane permeability in a membrane bioreactor combined with a turbulent jet flow ozone contactor[J]. Water Research, 2010, **44**(6): 1833-1840.
- [4] Zhang Y, Zhang M J, Wang F Y, *et al.* Membrane fouling in a submerged membrane bioreactor: Effect of pH and its implications[J]. Bioresource Technology, 2014, **152**: 7-14.
- [5] Zhou S, Shao Y, Gao N, *et al.* Influence of hydrophobic/hydrophilic fractions of extracellular organic matters of *Microcystis aeruginosa* on ultrafiltration membrane fouling[J]. Science of the Total Environment, 2014, **470-471**: 201-207.
- [6] Sun J Y, Xiao K, Mo Y H, *et al.* Seasonal characteristics of supernatant organics and its effect on membrane fouling in a full-scale membrane bioreactor[J]. Journal of Membrane Science, 2014, **453**: 168-174.
- [7] Farias E L, Howe K J, Thomson B M. Effect of membrane bioreactor solids retention time on reverse osmosis membrane

- fouling for wastewater reuse[J]. *Water Research*, 2014, **49**: 53-61.
- [8] Tian J Y, Ernst M, Cui F Y, *et al.* Effect of particle size and concentration on the synergistic UF membrane fouling by particles and NOM fractions[J]. *Journal of Membrane Science*, 2013, **446**: 1-9.
- [9] Chang I, Le Clech P, Jefferson B, *et al.* Membrane fouling in membrane bioreactors for wastewater treatment[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2002, **128**(11): 1018-1029.
- [10] 李彬, 王志伟, 安莹, 等. 膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 643-650.
- [11] Drews A. Membrane fouling in membrane bioreactors—Characterisation, contradictions, cause and cures[J]. *Journal of Membrane Science*, 2010, **363**(1-2): 1-28.
- [12] Wu J, He C D, Zhang Y P. Modeling membrane fouling in a submerged membrane bioreactor by considering the role of solid, colloidal and soluble components [J]. *Journal of Membrane Science*, 2012, **397**: 102-111.
- [13] Braak E, Alliet M, Schetrite S, *et al.* Aeration and hydrodynamics in submerged membrane bioreactors[J]. *Journal of Membrane Science*, 2011, **379**(1-2): 1-18.
- [14] Wei C H, Huang X, Ben Aim R, *et al.* Critical flux and chemical cleaning-in-place during the long-term operation of a pilot-scale submerged membrane bioreactor for municipal wastewater treatment[J]. *Water Research*, 2011, **45**(2): 863-871.
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 105-538.
- [16] Burdock T, Brooks M, Ghaly A, *et al.* Effect of assay conditions on the measurement of dehydrogenase activity of *Streptomyces venezuelae* using triphenyl tetrazolium chloride[J]. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 2011, **2**(4): 214-225.
- [17] Lowry O H, Ni R, Farr A L, *et al.* Protein measurement with the folin phenol reagent[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1951, **193**: 265-275.
- [18] Dubois M, Gilles K A, Hamilton J K, *et al.* Colorimetric method for determination of sugars and related substances[J]. *Analytical Chemistry*, 1956, **28**(3): 350-356.
- [19] 郑祥, 刘俊新. 膜生物反应器系统中原生动物的群落特征[J]. *环境科学*, 2009, **30**(09): 2635-2640.
- [20] Friedel J K, Mölter K, Fischer W R. Comparison and improvement of methods for determining soil dehydrogenase activity by using triphenyltetrazolium chloride and iodonitrotetrazolium chloride[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1994, **18**(4): 291-296.
- [21] Wang Q Y, Wang Z W, Wu Z H, *et al.* Sludge reduction and process performance in a submerged membrane bioreactor with aquatic worms[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, **172**(2): 929-935.
- [22] Song B Y, Chen X F. Effect of *Aeolosoma hemprichi* on excess activated sludge reduction[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **162**(1): 300-304.
- [23] Liang P, Huang X, Qian Y. Excess sludge reduction in activated sludge process through predation of *Aeolosoma hemprichi* [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2006, **28**(2): 117-122.
- [24] Gao D W, Wen Z D, Li B, *et al.* Membrane fouling related to microbial community and extracellular polymeric substances at different temperatures[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **143**: 172-177.
- [25] Flemming H C, Schaule G, Griebe T, *et al.* Biofouling—the Achilles heel of membrane processes [J]. *Desalination*, 1997, **113**(2): 215-225.
- [26] Ras M, Lefebvre D, Derlon N, *et al.* Extracellular polymeric substances diversity of biofilms grown under contrasted environmental conditions[J]. *Water Research*, 2011, **45**(4): 1529-1538.
- [27] 范举红, 余素林, 张培帅, 等. 膜生物反应器处理工业废水中膜污染及膜过滤特性研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 950-954.
- [28] Zhang X Q, Bishop P L. Biodegradability of biofilm extracellular polymeric substances [J]. *Chemosphere*, 2003, **50**(1): 63-69.

CONTENTS

Chemical Characteristics in Airborne Particulate Matter (PM ₁₀) During a High Pollution Spring Dust Storm Episode in Beijing, Tianjin and Zhangjiakou, China	LIU Qing-yang, LIU Yan-ju, ZHAO Qiang, <i>et al.</i> (2843)
Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles During Haze Weather in Hangzhou	CHEN Qiu-fang, SUN Zai, XIE Xiao-fang (2851)
Effect of Meteorological Factors on Characteristics of PCDD/F Pollution in Guangzhou	DU Guo-yong, SU Yuan, REN Ming-zhong, <i>et al.</i> (2857)
Atmospheric CO ₂ Data Filtering Method and Characteristics of the Molar Fractions at the Longfengshan WMO/GAW Regional Station in China	LUAN Tian, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (2864)
Influence of Atmospheric Transport on Air Pollutant Levels at a Mountain Background Site of East China	SU Bin-bin, XU Ju-yang, ZHANG Ruo-yu, <i>et al.</i> (2871)
Determining the Concentration of Coating Solution Attaching to Honeycomb Denuder in Summer in Tianjin	ZHANG Shi-jian, JI Ya-qin, ZHANG Lei-bo, <i>et al.</i> (2878)
Characterization of Lead Size Distributions with Different Process in Lead-Zinc Smelter	LIANG Jun-ning, LI Wen-hui, GE Yi, <i>et al.</i> (2883)
Effect of KI Modified Clay on Elemental Mercury Removal Efficiency	SHEN Bo-xiong, CHEN Jian-hong, CAI Ji, <i>et al.</i> (2890)
Characteristics of Odors and VOCs from Sludge Direct Drying Process	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (2897)
Research of Early-warning Method for Regional Groundwater Pollution Based on Risk Management	BAI Li-ping, WANG Ye-yao, GUO Yong-li, <i>et al.</i> (2903)
Dynamic Response of Riverine Nitrate Flux to Net Anthropogenic Nitrogen Inputs in A Typical River in Zhejiang Province over the 1980-2010 Period	ZHANG Bai-fa, CHEN Ding-jiang (2911)
Research on the Influence of Urban Land Use Structure and Pattern on Nitrogen, Phosphorus of Wetland Water Environment in Xianlin New Town of Nanjing	CAI Chun-xiao, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2920)
Profile Nutrient Distribution and Sedimentary Characteristics in Typical Marshes of Sanjiang Plain	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (2928)
Source and Contamination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil in Karst Underground River Basin	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI JIAN, <i>et al.</i> (2937)
Diel Variations of Hydrochemistry and Influencing Factors in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China	ZHANG Tao, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2944)
Hydrogen and Oxygen Isotopes of Lake Water and Geothermal Spring Water in Arid Area of South Tibet	XIAO Ke, SHEN Li-cheng, WANG Peng (2952)
Preliminary Research on the Feature of Dissolved Inorganic Carbon in Wulixia Reservoir in Summer, Guangxi, China	LIU Wen, PU Jun-bing, YU Shi, <i>et al.</i> (2959)
Distribution of Heavy Metals in Xiangsi River Valley of Tongling, China	CHEN Li-wei, XU Xiao-chun, WANG Jun, <i>et al.</i> (2967)
Volume Fraction of Gas Vesicle and Floating Characteristics of Cyanobacteria in Taihu Lake Under Different Pressures	WANG Wei, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i> (2974)
Degradation of Dimethyl Phthalate by Ti(IV)-catalyzed O ₃ /H ₂ O ₂ Under Acidic Conditions	GAO Yan, SHEN Tong-dong, CHEN Yao, <i>et al.</i> (2980)
Influence of Inorganic Ions and Humic Acid on the Removal of Pb(II) and Hg(II) in Water by Zero-Valent Iron	SHI Qiu-ling, ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2985)
Synthesis of Hydroxyapatite/Magnetite/Zelite Composite for Congo Red Removal from Aqueous Solution	FANG Qiao, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2992)
Corrosion of Stainless Steel 201, 304 and 316L in the Simulated Sewage Pipes Reactor	BAO Guo-dong, ZUO Jian-e, WANG Ya-jiao, <i>et al.</i> (3002)
Experimental Study of Adhesion Properties Between Membrane Surface and Humic Acid During Microfiltration	WANG Lei, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (3007)
Coating Modification of Anthracite Substrates in Vertical-flow Constructed Wetlands by LDHs Synthesized from Different Metal Compounds and the Nitrogen Removal Efficiencies	ZHANG Xiang-ling, GUO Lu, CHEN Jun-jie, <i>et al.</i> (3012)
Atrazine Wastewater Treatment in a SPG Membrane-Aerated Genetically Engineered Microorganism Biofilm Reactor	LIU Chun, GONG Peng-fei, XIAO Tai-min, <i>et al.</i> (3018)
Influencing Factors for Operational Performance of a Biofilm Reactor with Microbubble Aeration Using SPG Membrane	ZHANG Lei, ZHANG Ming, LIU Chun, <i>et al.</i> (3024)
Variations in the Active Characteristics of Sludge During the Operation of an Aerobic Membrane Bioreactor and Their Effects on Membrane Fouling	CHEN Xuan, TANG Bing, ZHANG Zi, <i>et al.</i> (3031)
Effects of Anaerobic Feeding Period on Nitrifying Granular	LIU Wen-ru, YIN Fang-fang, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3038)
Influencing Factors of Sludge Liquor Treatment in UASBB	LI Ya-feng, MA Chen-xi, ZHANG Chi (3044)
Background Values of As and Hg in Surface Dusts in the Vicinity of Kaifeng City and Their Application	CHEN Yan-fang, MA Jian-hua, DONG Yun-wu, <i>et al.</i> (3052)
Concentrations and Health Risks of Toxic Metals in Surface Dust in Kindergartens of Beijing	DUAN Heng-yi, WU Ya-tao, WANG Jue, <i>et al.</i> (3060)
Polychlorinated Biphenyls in House Dust at an E-waste Site and Urban Site in the Pearl River Delta, Southern China; Sources and Human Exposure and Health Risks	ZHU Zhi-cheng, CHEN She-jun, DING Nan, <i>et al.</i> (3066)
Responses of Soil Total Organic Carbon and Dissolved Organic Carbon to Simulated Nitrogen Deposition in Temperate Typical Steppe in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (3073)
Effects of Different Fertilizer Species on Carbon and Nitrogen Leaching in a Reddish Paddy Soil	LIU Xi-yu, ZOU Jing-dong, XU Li-li, <i>et al.</i> (3083)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Speciation of Exogenous Cu in an Acid Soil	HUANG Guo-yong, FU Qing-ling, ZHU Jun, <i>et al.</i> (3091)
Evaluation of Compounding EDTA and Citric Acid on Remediation of Heavy Metals Contaminated Soil	YIN Xue, CHEN Jia-jun, CAI Wen-min (3096)
Soil Biochemical Characteristics in Different Ecological Systems and Their Relationships with Soil Respiration and N ₂ O Emission	CHEN Ling, FAN Hui, JIANG Jing-yan (3102)
Contribution of Different Processes in Wetland Soil N ₂ O Production in Different Restoration Phases of the Yellow River Estuary, China	SUN Wen-guang, SUN Zhi-gao, GAN Zhuo-ting, <i>et al.</i> (3110)
Effects of Combined Applications of Pig Manure and Chemical Fertilizers on CH ₄ and N ₂ O Emissions and Their Global Warming Potentials in Paddy Fields with Double-Rice Cropping	WANG Cong, SHEN Jian-lin, ZHENG Liang, <i>et al.</i> (3120)
Influence of Ozone on Snap Bean Under Ambient Air in Two Sites of Northern China	YUAN Xiang-yang, ZHANG Wei-wei, SUN Jing-song, <i>et al.</i> (3128)
Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis Influences the Biological Effects of Nano-ZnO on Maize	WANG Wei-zhong, WANG Fa-yuan, LI Shuai, <i>et al.</i> (3135)
Effect of Arbuscular Mycorrhizae on Growth, Heavy Metal Uptake and Accumulation of <i>Zenia insignis</i> Chun Seedlings	LI Xia, PENG Xia-wei, WU Song-lin, <i>et al.</i> (3142)
Effects of Phosphorus-containing Substances on Arsenic Uptake by Rice	LEI Ming, ZENG min, LIAO Bo-han, <i>et al.</i> (3149)
Ecotoxicological Effect and Soil Environmental Criteria of the Heavy Metal Chromium(VI)	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, WANG Wan-hua, <i>et al.</i> (3155)
Promotion Effects of Vitamin B ₁₂ on the Degradation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl by <i>Nostoc</i> PD-2	LIU Jia-yu, XIAO Wen-feng, LU Li-ping, <i>et al.</i> (3162)
Isolation, Identification and Characterization of a Diethylstilbestrol-degrading Bacterial Strain <i>Serratia</i> sp.	XU Ran-fang, SUN Min-xia, LIU Juan, <i>et al.</i> (3169)
Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers in Wild Crucian Carp and Exposure Estimation of Dietary Intake	WANG Jun-xia, WANG Chun-yan, LIU Li-li, <i>et al.</i> (3175)
Cloning of Full-length cDNA of HMGR from <i>Gobiocypris rarus</i> and Analysis of Its Expression Profiles in Male Exposed to Pentachlorophenol	DENG Chuan, MAO Si-yu, XIONG Li, <i>et al.</i> (3183)
Effects of Algae and Kaolinite Particles on the Survival of Bacteriophage MS2	HE Qiang, WU Qing-qing, MA Hong-fang, <i>et al.</i> (3192)
Adsorption Kinetics and Mechanism of Lead(II) on Polyamine-Functionalized Mesoporous Activated Carbon	LI Kun-quan, WANG Yan-jin, YANG Mei-rong, <i>et al.</i> (3198)
Influence of Biological Activated Carbon Dosage on Landfill Leachate Treatment	CUI Yan-ni, GUO Yan, WU Qing, <i>et al.</i> (3206)
Effect of Economic Structure Adjustment on Pollution Emission: A Case Study of COD	LI Ming-sheng, ZHOU Lei, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (3212)
Reasons for the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China	MA Lan, MAO Jian-su (3219)
Discussion on Reduction Potential of CH ₄ Emission Intensity for Early Off-take Practice of Grazing Yak	WANG Shi-ping, Andreas Wilkes, WANG Ya-yun, <i>et al.</i> (3225)
Review of Dual Stable Isotope Technique for Nitrate Source Identification in Surface- and Groundwater in China	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, YU Gui-rui, <i>et al.</i> (3230)

《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)

2014年8月15日 第35卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 8 Aug. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行