

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第5期

Vol.34 No.5

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于过氧化物的消毒技术研究进展	习海玲, 赵三平, 周文 (1645)
环境损害评估: 国际制度及对中国的启示	张红振, 曹东, 於方, 王金南, 齐霖, 贾倩, 张天柱, 骆永明 (1653)
不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示	徐猛, 颜增光, 贺萌萌, 张超艳, 侯红, 李发生 (1667)
蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展	张志剑, 刘萌, 朱军 (1679)
基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究	刁晓君, 席北斗, 何连生, 邓祥征, 吴锋, 王鹏腾 (1687)
我国东北地区地表水酸化现状	徐光仪, 康荣华, 罗遥, 段雷 (1695)
西安市对渭河水质的影响分析	于婕, 李怀恩 (1700)
极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究	叶丰, 黄小平, 施震, 刘庆霞 (1707)
应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准	韩超南, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 曹伟 (1715)
长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI和M-AMBI法	蔡文倩, 孟伟, 刘录三, 朱延忠, 周娟 (1725)
温州城市降雨径流中BOD ₅ 和COD污染特征及其初始冲刷效应	王骏, 毕春娟, 陈振楼, 周栋 (1735)
影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究	余小龙, 沈芳, 张晋芳 (1745)
香溪河库湾春季pCO ₂ 与浮游植物生物量的关系	袁希功, 黄文敏, 毕永红, 胡征宇, 赵玮, 朱孔贤 (1754)
紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究	雷雨, 龙天渝, 伞磊, 安强, 朱芳 (1761)
高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究	马晓雁, 张泽华, 王红宇, 胡仕斐, 李青松 (1767)
纳米Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ 非均相Fenton反应催化氧化邻苯二酚	何洁, 杨晓芳, 张伟军, 王东升 (1773)
水中茶普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究	马杜娟, 刘国光, 吕文英, 姚锐, 周丽华, 谢成屏 (1782)
酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究	康雅凝, 李华楠, 徐冰冰, 齐飞, 赵伦 (1790)
镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究	柳王荣, 魏清伟, 杨仁斌, 许振成, 曾东 (1797)
基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法	金鹏康, 冯永宁, 王宝宝, 王晓昌 (1802)
不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究	万金泉, 胡梦蝶, 马邕文, 黄明智 (1808)
壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果	张聪璐, 胡筱敏, 英诗颖, 王芳 (1815)
城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究	孟晓荣, 张海珍, 王磊, 王旭东, 赵亮 (1822)
倒置A ² /O-MBR处理城市污水的中试研究	张健君, 邹高龙, 杨淑芳, 丁星, 王莉, 毛乾庄, 杨丹 (1828)
不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究	袁莹, 周伟丽, 王晖, 何圣兵 (1835)
短程同步硝化反硝化过程的脱氮与N ₂ O释放特性	梁小玲, 李平, 吴锦华, 王向德 (1845)
基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化	张明全, 李锋民, 吴乾元, 胡洪营 (1851)
多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响	陈春, 刘潇威, 郑顺安, 周启星, 李松 (1857)
浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价	徐志荣, 王浙明, 许明珠, 何华飞 (1864)
苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应	赵伟荣, 廖求文, 杨亚楠, 戴九松 (1871)
四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征	邵敏, 陈永亨, 李晓宇 (1877)
咪唑类离子液体毒性的QSAR/QSPR研究	赵继红, 赵永升, 张宏忠, 张香平 (1882)
宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征	樊新刚, 米文宝, 马振宁, 王婷玉 (1887)
内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征	郭伟, 付瑞英, 赵仁鑫, 赵文静, 郭江源, 张君 (1895)
福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究	郑桢, 杨冰玉, 吴水平, 王新红, 陈晓秋 (1901)
重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究	王玉玲, 能昌信, 王彦文, 董路 (1908)
丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响	郭伟, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 郭江源, 张君 (1915)
海洋细菌N3对几种赤潮藻的溶藻效应	史荣君, 黄洪辉, 齐占会, 胡维安, 田梓杨, 戴明 (1922)
1株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌LY01的鉴定及其氧化特性研究	刘玉娇, 杨新萍, 王世梅, 梁银 (1930)
1株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性	蔡瀚, 尹华, 叶锦韶, 常晶晶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1937)
2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解	张姝, Giulio Franco, 李晓豹, 卢晓霞, 侯珍, 杨君君 (1945)
养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群B-737及发酵特性	裴瑞林, 信欣, 张雪乔, 周迎芹, 姚力, 羊依金 (1951)
1997~2011年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析	陈圆圆, 田贺忠, 杨懂艳, 邹本东, 鹿海峰, 林安国 (1958)
黄山降水酸度及电导率特征分析	石春娥, 邓学良, 吴必文, 洪杰, 张苏, 杨元建 (1964)
夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析	文彬, 银燕, 秦彦硕, 陈魁 (1973)
广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征	谭吉华, 赵金平, 段菁春, 马永亮, 贺克斌, 杨复沫 (1982)
福建省三大城市冬季PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	陈衍婷, 陈进生, 胡恭任, 徐玲玲, 尹丽倩, 张福旺 (1988)
上海市含碳大气颗粒物的粒径分布	袁宁, 刘卫, 赵修良, 王广华, 姚剑, 曾友石, 刘遂庆 (1995)
上海市浦东城区二次气溶胶生成的估算	崔虎雄, 吴迺名, 段玉森, 伏晴艳, 张懿华, 王东方, 王茜 (2003)
沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义	钱鹏, 郑祥民, 周立旻 (2010)
厦门秋季近郊地面CO ₂ 浓度变化特征研究	李燕丽, 穆超, 邓君俊, 赵淑惠, 杜可 (2018)
GC-MS和GC-ECD同时在线观测本底大气中的HCFC-142b	郭立峰, 姚波, 周凌晔, 李培昌, 许林 (2025)
城市居家环境空气真菌群落结构特征研究	方治国, 欧阳志云, 刘芃, 孙力, 王小勇 (2031)
城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究	郭薇, 王伯光, 唐小东, 刘舒乐, 何洁, 张春林 (2038)
内河多点分散码头大气污染叠加影响特征	刘建昌, 李兴华, 徐洪磊, 程金香, 王忠岱, 肖杨 (2044)
义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究	刘瑞卿, 王钧伟 (2051)
基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究	谢元博, 李巍 (2057)
《环境科学》征订启事(1652) 《环境科学》征稿简则(1789) 信息(1807, 1821, 1881, 1987) 专辑征稿通知(1863)	

倒置 A²/O-MBR 处理城市污水的中试研究

张健君¹, 邹高龙^{1*}, 杨淑芳¹, 丁星¹, 王莉², 毛乾庄², 杨丹²

(1. 深圳市市政设计研究院有限公司, 深圳 518029; 2. 南方水务有限公司, 深圳 518029)

摘要: 针对城市生活污水, 研究了两点进水倒置 A²/O-MBR 系统对 COD、NH₄⁺-N、TN、TP、出水 SS、跨膜压差(TMP)的影响。结果表明, 该系统对 COD、NH₄⁺-N 具有较高的去除率, 出水符合 GB 18918-2002 中一级 A 标准; 当混合液回流比为 200% 时, 系统出水 TN 浓度小于 15 mg·L⁻¹; 正常排泥后, 系统对 TP 的去除率达 90% 左右; 在膜丝未大量断裂前, 系统出水 SS 小于 10 mg·L⁻¹; 随着系统的运行, TMP 逐渐增大, 不正确的曝气方式会导致 TMP 迅速增加。膜截留对 COD、TP、SS 有直接去除作用, 由于膜滤出水中没有固体损失, 可以精确控制污泥龄, 有利于世代周期较长的硝化菌和反硝化菌在反应器中生长; 当污泥浓度增加到 6 500 mg·L⁻¹ 左右, 进水量增加 0.5 倍对出水水质影响很小。

关键词: 倒置 A²/O-MBR; COD; 脱氮除磷; SS; TMP

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)05-1828-07

Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A²/O-MBR Process

ZHANG Jian-jun¹, ZOU Gao-long¹, YANG Shu-fang¹, DING Xing¹, WANG Li², MAO Qian-zhuang², YANG Dan²

(1. Shenzhen Municipal Design & Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518029, China; 2. Southwater Co., Ltd., Shenzhen 518029, China)

Abstract: For the treatment of municipal wastewater, the effects of the reversed A²/O-MBR system on COD, NH₄⁺-N, TN, TP, SS and transmembrane pressure (TMP) were investigated through two-point feeding. The results indicated that the removal efficiencies for COD and NH₄⁺-N were high in the system, the effluent met the requirements of the Class A in first grade discharge standard of GB 18918-2002. The effluent TN was < 15 mg·L⁻¹ when the reflux ratio of nitrification was 200%, whereas the average TP removal rate was 90% after the excessive sludge was removed. The effluent SS was < 10 mg·L⁻¹ before the large-scale breakage of membrane. The TMP increased gradually with the operation of the system, if the way of aeration was not correct, the TMP would increase quickly. Efficient separation by the membrane contributed to the removal of COD, TP and SS. Because there was no sludge washout in the system, SRT could be properly controlled, it was good for the ammonia-oxidizing bacteria and denitrifying bacteria which both have long life-cycle. Even if the inflow was increased to 1.5 fold, the effluent quality was good when the sludge concentration was increased to 6 500 mg·L⁻¹.

Key words: reversed A²/O-MBR; COD; nitrogen and phosphorus removal; SS; TMP

随着社会的发展,水资源短缺逐步成为全球面临的巨大挑战,未处理以及处理不达标污水的排放更进一步加剧了可用水资源短缺的状况,我国目前面临的情况更为严峻。最近我国部分城市水价调整,鼓励使用中水,为污水再生回用提供了良好的市场发展空间。但传统污水再生处理技术存在着出水质量不高,占地大,稳定性差等特点。膜技术的快速发展,特别是膜生物反应器(MBR)技术在近几年内得到了突破性的应用发展,为污水再生回用的实现带来了前景。MBR集合了传统活性污泥法生物降解和滤膜高效截留的共同优势,具有出水水质好,没有细菌,节省土地,高污泥龄低污泥排放量等特点,越来越吸引人们的注意力^[1,2]。国外对于膜生物处理技术的研究始于20世纪60年代,Smith等^[2]第一个利用MBR处理污水。美国Syracuse大学的

Staverger教授于1971年发表文章,详细论证了膜生物反应器在处理城市污水方面的优势^[3~5]。从此,MBR工艺受到了人们的普遍关注,MBR对BOD、COD具有较高的去除率,但MBR自身对脱氮除磷效果不佳,无法满足日益严格的污水排放标准,因此,研究采用膜生物反应器与其它工艺的组合工艺实现污水资源化,满足出水达到回用或更高标准,成为污水处理领域的新兴热点。本研究在南方水务有限公司所属深圳市坂雪岗污水处理厂建立了以倒置A²/O-MBR为核心的单元式再生水处理中试研究基地。中试采用进口A膜和国产B膜,对两种膜出水

收稿日期: 2012-07-24; 修订日期: 2012-10-10

基金项目: 深圳市人居环境委员会环境科研项目

作者简介: 张健君(1970~),男,博士,主要研究方向为水污染处理技术与控制, E-mail: zhangjj@szmedi.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: zoug@szmedi.com.cn

COD、NH₄⁺-N、TN、TP、SS 以及跨膜压差 TMP 进行了对比研究,以期为 MBR 污水资源化技术提供新的优化工艺、技术参数选择,同时也为现有的污水厂升级改造提供可靠的运行经验.

1 材料与方法

1.1 中试装置及运行方法

本中试采用如图 1 所示装置. 系统由缺氧池(1.64 m³)、厌氧池(1.0 m³)、好氧池(5.61 m³)与膜池组成,好氧池出水均分为两路分别进入 A 膜膜池和 B 膜膜池,2 个膜池的容积均为 1.7 m³,对应的倒置 A²/O + A 膜称为 1 号系统(系统 1),倒置 A²/O + B 膜称为 2 号系统(系统 2).

利用坂雪岗污水处理厂的回流污泥接种,接种后直接运行,接种后 MLSS 为 2 000 mg·L⁻¹ 左右,中试进水来自坂雪岗污水处理厂的沉砂池出水,通过潜水泵后的阀门控制进水流量,进入缺氧池与厌氧池流量为 3:1,污泥回流至厌氧池,回流比约为 70%,混合液回流至缺氧池. 整个中试过程分 3 个阶段:阶段 1(第 1~13 次)进水量为 20 m³·d⁻¹,混合液回流比为 100%,MLSS 从 2 000 mg·L⁻¹ 逐渐提

高至 4 700 mg·L⁻¹,从第 10 次开始排泥,1 d 排泥 2 次,MLSS 维持在 4 700 mg·L⁻¹ 左右;阶段 2(第 14~23 次)进水量为 20 m³·d⁻¹,混合液回流比为 200%,MLSS 维持为 4 300~4 700 mg·L⁻¹,系统正常排泥,系统 2 在第 21 次更换 B 膜;阶段 3(第 24~40 次)进水流量提高至 30 m³·d⁻¹,第 24~25 次暂停排泥,提高 MLSS 至 6 300 mg·L⁻¹ 后系统正常排泥,维持 MLSS 在 6 500 mg·L⁻¹ 左右. 利用浮球阀控制系统装置水位,膜浸没于膜池中,膜的下方设穿孔曝气管,采用膜通量恒定出水,通过时间继电器控制抽吸泵间歇运行,根据膜制造厂家建议,A 膜开 9 min 停 1 min,B 膜开 8 min 停 2 min. 好氧池与膜池采用鼓风机曝气,控制好氧池气水比为 8:1,膜池气水比为 10:1,TMP 通过抽吸泵出水口处的真空表测定. 每 3 d 为一个水样分析周期,反应器运行参数具体见表 1.

1.2 膜组件

A 膜型号为浸没型 Poreflon Module,一共 3 支,B 膜型号 JL-MBR-20,一共 3 片,2 种膜都为中空纤维微滤膜,详细技术参数见表 2.

1.3 进水水质

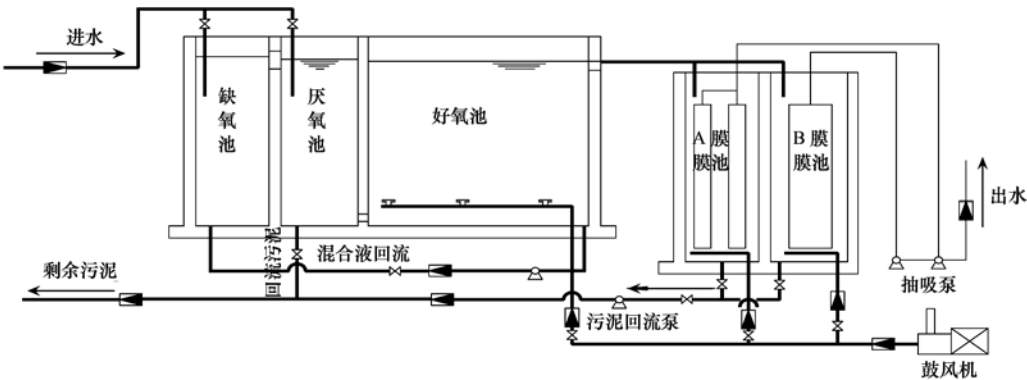


图 1 中试装置流程示意

Fig. 1 Process of the pilot system

表 1 倒置 A²/O-MBR 池运行参数

Table 1 Operational parameters in the combined reversed A²/O-MBR system

系统	参数	阶段 1(第 1~13 次)	阶段 2(第 14~23 次)	阶段 3(第 24~40 次)
倒置 A ² /O	进水量/m ³ ·d ⁻¹	20	20	30
	HRT/h	11.94	11.94	7.96
	SRT/d	14.6(第 10~13 次)	14.6	18.3
	MLSS /mg·L ⁻¹	2 000~4 800	4 300~4 800	6 200~6 900
	好氧池曝气量(气水比)	8:1	8:1	8:1
	混合液回流率/%	100	200	200
膜池	膜通量/m ³ ·(m ² ·d) ⁻¹	0.56(A 膜) 0.17(B 膜)	0.56(A 膜) 0.17(B 膜)	0.83 0.25
	曝气量(气水比)	10:1	10:1	10:1
	污泥回流率/%	70	70	70

表 2 A 膜与 B 膜特性

Table 2 Characters of membrane A and membrane B

类型	膜材料	截流孔径/ μm	中空纤维内径/ μm	中空纤维外径/ μm	膜面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{支}^{-1}$
A 膜	PTFE	0.2	0.8	1.3	6
B 膜	PVDF + 特种纳米材料	0.1	0.9	1.5	20

进水为坂雪岗污水处理厂旋流沉砂池后出水,具体参数见表 3.

表 3 进水水质/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 3 Inflow water quality/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

参数	COD	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	TN	TP
最大值	497	43.68	47.52	8.89
最小值	262	30.68	32.65	4.52
平均值	374	38.00	42.73	6.73

1.4 分析方法

每隔 3 d 取 1 次水样,系统出水样取自抽吸泵出水口,进水样取自沉砂池后出水上清液,膜池上清液水样取自膜池混合液沉淀 30 min(相当于传统二沉池出水),水质指标中 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP、MLSS、出水 SS 等测定方法采用国家标准方法检测^[6].

2 结果与分析

2.1 倒置 A^2/O -MBR 对 COD 的去除

由图 2 可以看出:当进水 COD 浓度为 $262 \sim 497 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,系统 1 的 3 个阶段出水 COD 平均浓度为 $15.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均去除率为 95.7%,系统 2 的 3 个阶段出水 COD 平均浓度为 $17.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均去除率为 95.2%,即两个系统出水 COD 都低于 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,符合城市污水处理厂出水一级 A 标准,其中膜池上清液 COD 浓度为 $27 \sim 58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均浓度为 $42.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,即膜过滤对 COD 有明显的去除作用.当 COD 浓度、污泥浓度、混合液回流量、进水量等因素在一定范围内变化时,对 COD 的去除率影响轻微,系统维持较高的 COD 去除率.

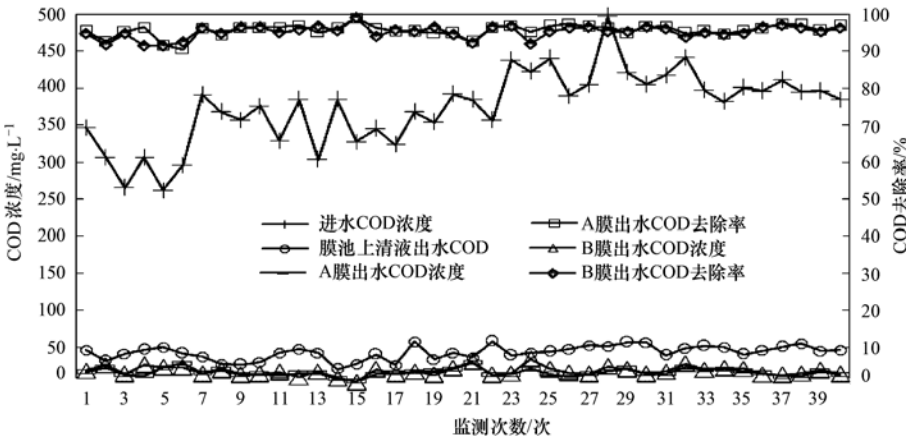


图 2 倒置 A^2/O -MBR 对 COD 的去除

Fig. 2 Removal rate of COD in the combined reversed A^2/O -MBR process

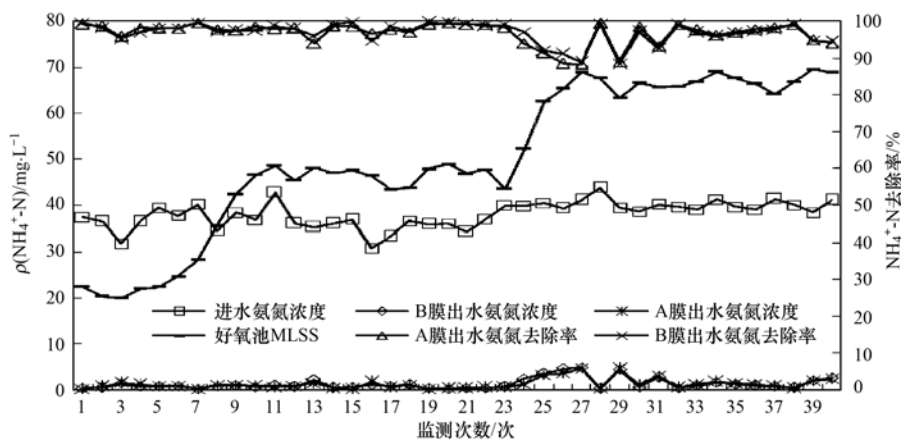
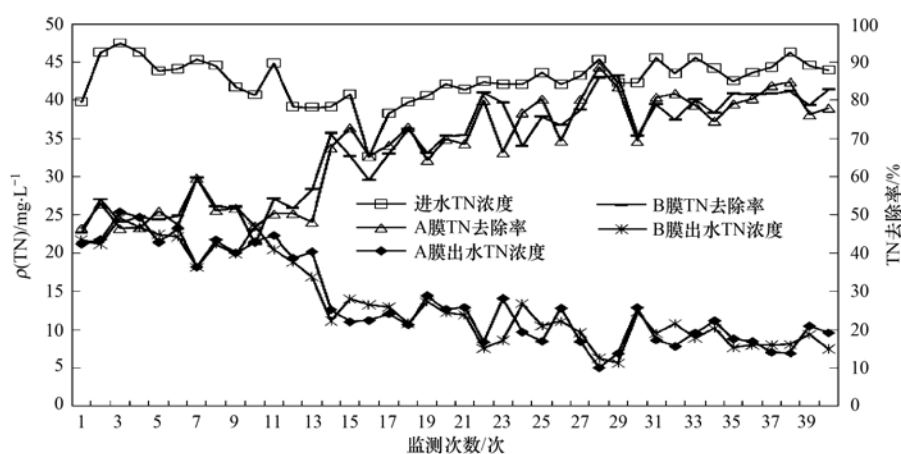
2.2 倒置 A^2/O -MBR 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除

由图 3 可以看出:当进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 $30.68 \sim 43.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,系统 1 的 3 个阶段出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 $0.22 \sim 4.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均浓度为 $1.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均去除率为 96.7%;系统 2 的 3 个阶段出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 $0.12 \sim 4.65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均浓度为 $1.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均去除率为 96.6%,符合城市污水处理厂出水一级 A 标准,因膜池上清液出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度与系统出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度相差很小,图 3 未列出膜池上清液 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度.在第 3 阶段中,从第 25 ~ 32 次系统出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度比前阶段浓度偏

高并有波动,但总体而言系统参数在一定范围的变化对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果影响不大,系统对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 具有较高的去除率.

2.3 倒置 A^2/O -MBR 对 TN 的去除

从图 4 可以看出:当进水 TN 浓度为 $38.32 \sim 47.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,第 1 阶段(第 1 ~ 13 次),当混合液回流为 100%,系统 1 出水 TN 浓度为 $18.3 \sim 25.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均浓度为 $21.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均去除率为 50.0%,系统 2 出水 TN 浓度为 $18.3 \sim 24.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均浓度为 $21.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均去除率为 51.1%,因膜池上清液水样 TN 浓度与系统出水 TN

图3 倒置 A²/O-MBR 对 NH₄⁺-N 的去除Fig. 3 Removal rate of NH₄⁺-N in the combined reversed A²/O-MBR process图4 倒置 A²/O-MBR 对 TN 的去除Fig. 4 Removal rate of TN in the combined reversed A²/O-MBR process

浓度相差很小,图4未列出膜池上清液 TN 浓度;第2与第3阶段(第14~40次),当混合液回流为200%时,系统1出水 TN 浓度为 5.1~14.5 mg·L⁻¹,平均浓度为 10.2 mg·L⁻¹,平均去除率为 75.7%,系统2出水 TN 浓度为 5.7~14.1 mg·L⁻¹,平均浓度为 10.2 mg·L⁻¹,平均去除率为 75.7%;系统1与2出水都符合一级 A 标准. 因此出水 TN 浓度与回流比有很大的关系,随着回流比增大,污水脱氮效果明显提高.

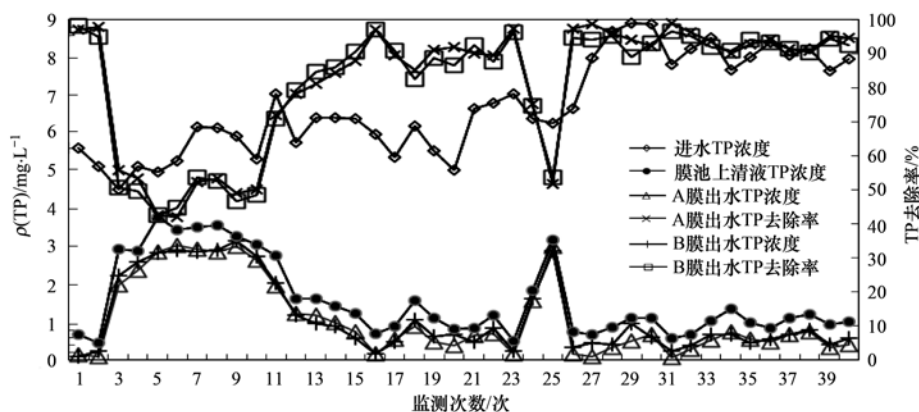
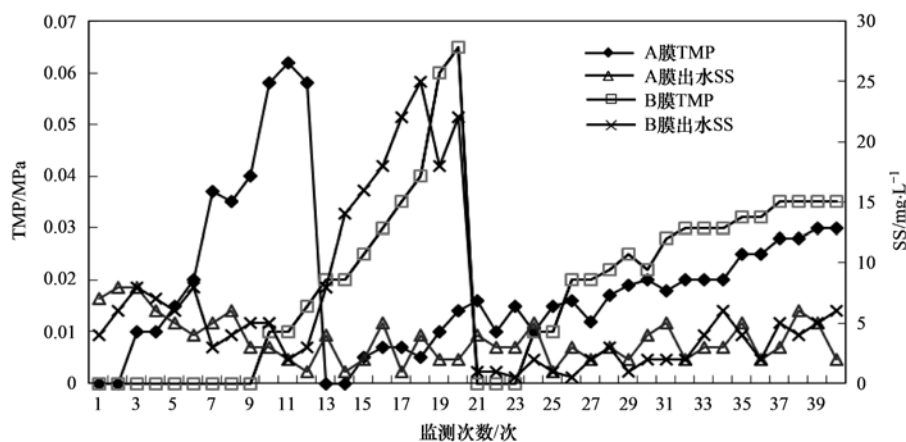
2.4 倒置 A²/O-MBR 对 TP 的去除

从图5可以看出,当进水 TP 浓度为 4.52~8.91 mg·L⁻¹,接种后一段时间(第1~10次)与阶段3中第24~25次,因系统没有排泥,出水 TP 去除率都从最初的90%以上迅速降低至50%左右. 当正常排泥后,系统1与2出水 TP 浓度迅速降低并稳定在 0.8 mg·L⁻¹以下,去除率迅速升高. 正常排泥时段,系统1与2出水 TP 平均浓度为 0.59

mg·L⁻¹,平均去除率为 90.9%. 膜池上清液水样 TP 比系统出水高 0.16~0.72 mg·L⁻¹,平均高出 0.44 mg·L⁻¹,膜对 TP 具有明显的去除作用.

2.5 倒置 A²/O-MBR 出水 SS 与 TMP

由图6可以看出,阶段1中第1~12次,A膜的TMP迅速从0增加至0.062 MPa,而同时阶段B膜从0增加至0.015 MPa,系统1与2的出水SS都低于10 mg·L⁻¹. 检查系统后查明,A膜底下的穿孔曝气管没有完全正对膜组件,导致A膜上黏附着一层厚厚的泥饼,引起膜非正常污染,跨膜压差迅速增大,当改进A膜的曝气方式,同时物理清洗A膜膜组件后,A膜TMP恢复至0 MPa;从第13~40次,A膜TMP从0 MPa逐渐增至0.03 MPa,而B膜从第13~21次由0.02 MPa逐渐增至0.065 MPa,同时检测发现B膜断丝现象逐渐增多,出水SS也逐渐增大至25 mg·L⁻¹,同时阶段A膜出水SS维持在10 mg·L⁻¹以下;第21次更换B膜. 因此在膜出现断

图5 倒置 A²/O-MBR 对 TP 的去除Fig. 5 Removal rate of TP in the combined reversed A²/O-MBR process图6 倒置 A²/O-MBR 出水 SS 与 TMPFig. 6 Effluent SS and TMP in the combined reversed A²/O-MBR process

丝前系统 1 与 2 出水 SS 都小于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 符合污水处理厂一级 A 标准。但随着 B 膜断裂膜丝数的增加, 系统 2 出水 SS 也逐渐增大。

3 讨论

3.1 倒置 A²/O-MBR 系统对污染物的去除

3.1.1 系统对 COD 的去除作用

由 2.1 节可知, 在整个运行过程中, 系统 1 对 COD 的去除率为 95.7%, 系统 2 对 COD 的去除率为 95.2%, 其中前端倒置 A²/O 对 COD 的去除率达 88.8%, 膜截留对 COD 的去除率约为 6%~7%, 且当进水 COD 浓度、污泥浓度、混合液回流量、进水量等因素在一定范围内变化时, 对 COD 的去除率影响较小, 系统出水中剩余的 COD 主要是溶解性的不易生物降解的有机物。系统对 COD 的高降解率一方面是由于膜的截留作用能提高 MLSS, 保持系统具有较低的 F/M, 因此在阶段 3 即使进水量增加

50%, 由于 MLSS 同时提高了约 50%, 系统 F/M 变化较小, 有利于有机物的降解; 另一方面膜对有机物有一定的截留作用, 可以截留大分子有机物, 延长其在 MBR 中的停留时间, 有利于对有机物的去除, 这与文献[7,8]结论相同。

3.1.2 倒置 A²/O-MBR 系统对 NH₄⁺-N 去除作用

由 2.2 节可知, 运行过程中, 系统 1 与 2 对 NH₄⁺-N 的去除率为 96%~97%, 由于 NH₄⁺-N 相对分子质量较小, 膜本身对 NH₄⁺-N 分子的截留作用可忽略, 因此系统对 NH₄⁺-N 的去除主要依赖倒置 A²/O 系统, 但膜对 NH₄⁺-N 降解的间接作用不容忽视, 因膜对菌胶团的截留作用, 系统泥龄较长, 有利于世代周期较长的硝化菌在反应器中积累, 也由于膜的高效截留, 可以使系统保持较高的 MLSS, 因而降低了 F/M 值, 减弱了异养菌对 DO 的竞争, 有利于硝化反应的进行^[9]。阶段 3 中出水 NH₄⁺-N 浓度比阶段 1 与 2 稍高并有一定波动, 这可能是由污泥浓度过高所

致,虽然污泥浓度并不是影响硝化效果的直接原因,但混合液性状的改变会影响溶解氧的传质效率,同时过高的 MLSS 也会导致对溶解氧的需求量增加。Krampe 等^[10]发现:影响氧传质效率的边界层系数(α)随 MLSS 值的增加呈指数下降,即氧的传质效率随 MLSS 值的增加呈指数下降。Gunder 等^[11]在对 MBR 工艺中高污泥浓度下的传氧效率进行测定时也发现,在恒定的曝气量下,随着 MLSS 值的增加则氧的传质效率明显降低,因此在 MBR 系统中需注意 MLSS 对 NH₄⁺-N 去除的影响。

3.1.3 倒置 A²/O-MBR 系统对 TN 的去除作用

由 2.3 节可知,在第 1 阶段,当混合液回流比为 100% 时,系统 1 与 2 对 TN 平均去除率只有 50.0% 与 51.1%; 在第 2 与第 3 阶段,当混合液回流比为 200% 时,系统 1 与 2 对 TN 平均去除率都为 75.7%, 因此系统对 TN 的去除与混合液回流有直接的关系,系统除氮主要依赖前端倒置 A²/O, 但同 3.1.2 节一样,由于膜对菌胶团截留作用,系统泥龄较长,有利于世代周期较长的反硝化菌生长,为系统脱氮提供了有力保障。

3.1.4 倒置 A²/O-MBR 系统对 TP 的去除作用

由 2.4 节可知,当系统因为没有排泥时,TP 去除率从 90% 以上迅速降低至 50% 左右,系统仍具有一定的除磷作用,但除磷效果逐渐降低并有波动,这是因为随着污泥浓度的增加使得聚磷菌不断产生,且随着 MLSS 值的升高菌胶团内部的厌氧区域越来越大,保证了聚磷菌对磷的充分释放,为在好氧环境下的超量摄磷提供了基础,但如果不排泥,随着系统的运行,聚磷与释磷将会逐渐达到平衡,磷的去除率也将逐渐下降。当系统正常排泥后出水 TP 最低浓度可达 0.07 mg·L⁻¹, 最高去除率可达 99.1%, TP 平均去除率为 90.9%。系统高效的生物除磷作用主要有以下几方面原因:①由于前端倒置 A²/O 系统先经过缺氧池,在缺氧池进行了反硝化,消除了进入厌氧池的 NO₃⁻-N 与混合液带入的 DO 对除磷的影响,因此给厌氧池放磷提供了完美的厌氧环境,系统经历了完整的释磷-吸磷过程。②系统两点进水减少了厌氧池由于缺少碳源而对聚磷菌生长的影响。③由于 MBR 池连续曝气,能够避免传统二沉池内泥水分离过程中溶解氧不足导致磷二次释放的影响。④膜对 TP 的去除发挥着重要的作用,由 2.4 节可知,系统出水 TP 比膜池上清液出水 TP 平均低 0.44 mg·L⁻¹,这是由于膜对胶体形态磷的截留作用,磷在水中的形态不仅有磷酸盐小分子,同时也存在和

高分子的蛋白多糖等胞外多聚物结合的胶体形态的磷,由于膜对高分子物质有很好的截留效果,减少了出水 TP 的含量,虽然这一部分截留的胶体磷的总量比较少,但对进一步降低出水磷的浓度起到了重要的作用。

3.2 膜污染、TMP 与出水 SS

由 2.5 节可知,随着时间的延长,TMP 逐渐变大,尤其是在第 1 阶段中,当膜组件正下方没有曝气冲刷时,由于缺少曝气气流对膜丝的剪切力作用,膜污染会迅速加剧,TMP 迅速增加;系统正常运行过程中,TMP 也会随着时间的推移而逐渐变大,这是由膜污染引起。混合液复杂的流体和生理特性导致膜污染机制非常复杂^[12],初步分析膜污染可能是由于膜表面或膜孔中粒子或溶质大分子由于与膜存在物理化学作用或机械作用在膜表面或膜孔内吸附、沉积造成膜孔径变小或堵塞,使膜产生透过流量与分离特性的不可逆或可逆变化。当 TMP 达到一定值时需要膜进行清洗,膜污染清洗可以采用物理、化学或物理化学联合方法,清洗时必定对膜丝有损伤,因此对膜的质量要求较高,在中试过程中,B 膜在运行 1 个多月后开始出现断丝现象,导致出水 SS 逐渐增大至 10 mg·L⁻¹ 以上,而 A 膜经过物理与化学清洗后,并没有出现膜丝断裂现象,出水 SS 保持在 10 mg·L⁻¹ 以下,因此在 MBR 系统中选择膜时应考虑膜质量对生产的影响。

4 结论

(1)当进水 COD 浓度、污泥浓度、混合液回流量、进水量等因素在一定范围内变化时,系统对 COD 仍具有 95% 以上的去除率,膜截留对 COD 去除有重要作用。

(2)整个运行过程中系统 NH₄⁺-N 出水浓度低于 5 mg·L⁻¹, 平均去除率为 96% 左右,当曝气量一定时,过高的 MLSS 可能会影响 NH₄⁺-N 的去除;当混合液回流比达 200% 时,出水 TN 浓度低于 15 mg·L⁻¹, TN 去除率为 75.7%。膜对 NH₄⁺-N、TN 虽然没有直接的去除作用,但由于膜对菌胶团的截留作用有利于世代周期较长的硝化菌与反硝化菌的生长,膜对两者去除起到重要的间接作用。

(3)在系统正常排泥后,两点进水倒置 A²/O-MBR 系统对 TP 的去除率达 90.9% 左右,膜对胶体形态磷的截留作用对 TP 的去除起到了重要作用。

(4)随着 MBR 运行时间的延长,TMP 逐渐增

加,膜污染逐渐加剧,当 TMP 达到一定程度时,需对膜进行清洗,无论是物理清洗还是化学清洗都会对膜丝造成损伤,因此膜丝应具有一定的耐清洗能力以防止膜丝断裂对出水 SS 的影响。

(5)系统 MLSS 提高至一定程度后提高进水量,对系统中污染物去除影响不大,因此 MBR 技术是现有污水处理厂升级改造的一个不错选择。

参考文献:

- [1] Stephenson T, Brindle K, Judd S, *et al.* Membrane bioreactors for wastewater treatment[M]. London: The International Water Association Publishing, 2001.
- [2] Smith J C V, Gregorio D D, Talcott R M. The use of ultrafiltration membranes for activated sludge separation[A]. In: Proceedings of the 24th annual Purdue industrial waste conference [C]. Lafayette: Purdue University, 1969. 1300-1310.
- [3] Holler S, Trösch W. Treatment of urban wastewater in a membrane bioreactor at high organic loading rates[J]. Journal of Biotechnology, 2001, **92**(2): 95-101.
- [4] Trouve E, Urbain V, Manem J. Treatment of municipal wastewater by membrane bioreactor: results of semi-industrial pilot-scale study[J]. Water Science and Technology, 1994, **30**(4): 151-157.
- [5] Cao J H, Zhu B H, Lu H, *et al.* Study on polypropylene hollow fiber based recirculated membrane bioreactor for treatment of municipal wastewater[J]. Desalination, 2005, **183**(1-3): 431-438.
- [6] 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, 2003. 210-284.
- [7] Wen X H, Ding H J, Huang X *et al.* Treatment of hospital wastewater using a submerged membrane bioreactor[J]. Process Biochemistry, 2004, **39**(11): 1427-1431.
- [8] Krauth K, Staab K F. Pressurized bioreactor with membrane filtration for wastewater treatment[J]. Water Research, 1993, **27**(3): 405-411.
- [9] Fernandes L, Sartaj M. Comparative study of static pile composting using natural, forced and passive aeration methods [J]. Compost Science & Utilization, 1997, **5**(4): 65-77.
- [10] Krampe J, Krauth K. Oxygen transfer into activated sludge with high MLSS concentrations[J]. Water Science and Technology, 2003, **47**(11): 297-303.
- [11] Günder B, Krauth K. Replacement of secondary clarification by membrane separation-results with tubular, plate and hollow fibre modules[J]. Water Science and Technology, 1999, **40**(4-5): 311-320.
- [12] Wu Z C, Wang Z W, Zhou Z, *et al.* Sludge rheological and physiological characteristics in a pilot-scale submerged membrane bioreactor[J]. Desalination, 2007, **212**(1-3): 152-164.

CONTENTS

Advances in Peroxide-Based Decontaminating Technologies	XI Hai-ling, ZHAO San-ping, ZHOU Wen (1645)
Environmental Damage Assessment; International Regulations and Revelation to China	ZHANG Hong-zhen, CAO Dong, YU Fang, <i>et al.</i> (1653)
Human Health Risk-Based Environmental Criteria for Soil: A Comparative Study Between Countries and Implication for China	XU Meng, YAN Zeng-guang, HE Meng-meng, <i>et al.</i> (1667)
Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective	ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun (1679)
Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China	DIAO Xiao-jun, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (1687)
Current Status of Surface Water Acidification in Northeast China	XU Guang-yi, KANG Rong-hua, LUO Yao, <i>et al.</i> (1695)
Impact Analysis of Xi'an to the Water Quality of Weihe River	YU Jie, LI Huai-en (1700)
Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011	YE Feng, HUANG Xiao-ping, SHI Zhen, <i>et al.</i> (1707)
Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River	HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (1715)
Assessing the Benthic Ecological Status in Yangtze River Estuary Using AMBI and M-AMBI	CAI Wen-qian, MENG Wei, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (1725)
Pollution Load and the First Flush Effect of BOD ₅ and COD in Urban Runoff of Wenzhou City	WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1735)
Influencing Factors in Measuring Absorption Coefficient of Suspended Particulate Matters	YU Xiao-long, SHEN Fang, ZHANG Jin-fang (1745)
Relationship Between pCO ₂ and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring	YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, <i>et al.</i> (1754)
Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment	LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, <i>et al.</i> (1761)
Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate	MA Xiao-yan, ZHANG Ze-hua, WANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1767)
Catalyzed Oxidation of Catechol by the Heterogeneous Fenton-like Reaction of Nano-Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ System	HE Jie, YANG Xiao-fang, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1773)
Photodegradation of Naproxen in Aqueous Systems by UV Irradiation: Mechanism and Toxicity of Photolysis Products	MA Du-juan, LIU Guo-guang, LÜ Wen-ying, <i>et al.</i> (1782)
Catalytic Ozonation of Nitrobenzene in Water by Acidification-activated Red Mud	KANG Ya-ning, LI Hua-nan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1790)
Experimental Studies on Stability of Floes from Cadmium Pollution Emergency Treatment	LIU Wang-rong, GUO Qing-wei, YANG Ren-bin, <i>et al.</i> (1797)
Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring	JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, <i>et al.</i> (1802)
Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors	WAN Jin-quan, HU Meng-die, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (1808)
Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, YING Shi-ying, <i>et al.</i> (1815)
Membrane Fouling by Secondary Effluent of Urban Sewage and the Membrane Properties	MENG Xiao-rong, ZHANG Hai-zhen, WANG Lei, <i>et al.</i> (1822)
Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A ² /O-MBR Process	ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, YANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1828)
Study on Sulfur-based Autotrophic Denitrification with Different Electron Donors	YUAN Ying, ZHOU Wei-li, WANG Hui, <i>et al.</i> (1835)
Nitrogen Removal and N ₂ O Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process	LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, <i>et al.</i> (1845)
Optimization of Solid-Phase Extraction for Enrichment of Toxic Organic Compounds in Water Samples	ZHANG Ming-quan, LI Feng-min, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (1851)
Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm <i>Eisenia fetida</i>	CHEN Chun, LIU Xiao-wei, ZHENG Shun-an, <i>et al.</i> (1857)
Health Risk Assessment and Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds from Pharmaceutical Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, WANG Zhe-ming, XU Ming-zhu, <i>et al.</i> (1864)
Health Effect of Volatile Aldehyde Compounds in Photocatalytic Oxidation of Aromatics Compounds	ZHAO Wei-rong, LIAO Qiu-wen, YANG Ya-nan, <i>et al.</i> (1871)
Compositions and Distribution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in Serum of Women from Sichuan Province	SHAO Min, CHEN Yong-heng, LI Xiao-yu (1877)
QSAR/QSPR for Predicting the Toxicity of Imidazolium Ionic Liquids	ZHAO Ji-hong, ZHAO Yong-sheng, ZHANG Hong-zhong, <i>et al.</i> (1882)
Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning, <i>et al.</i> (1887)
Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia	GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1895)
Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province	ZHENG An, YANG Bing-yu, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1901)
Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites	WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, <i>et al.</i> (1908)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings	GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, <i>et al.</i> (1915)
Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China	SHI Rong-jun, HUANG Hong-hui, QI Zhan-hui, <i>et al.</i> (1922)
Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage	LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, <i>et al.</i> (1930)
Isolation of an Effective Benzo[a]pyrene Degrading Strain and Its Degradation Characteristics	CAI Han, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1937)
Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether	ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (1945)
Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics	PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, <i>et al.</i> (1951)
Correlation Between Acidic Materials and Acid Deposition in Beijing During 1997-2011	CHEN Yuan-yuan, TIAN He-zhong, YANG Dong-yan, <i>et al.</i> (1958)
Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang	SHI Chun-e, DENG Xue-liang, WU Bi-wen, <i>et al.</i> (1964)
Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer	WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, <i>et al.</i> (1973)
Pollution Characteristics of Organic Acids in Atmospheric Particles During Haze Periods in Autumn in Guangzhou	TAN Ji-hua, ZHAO Jing-ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (1982)
Characterization of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in Three Major Cities in Fujian Province, China	CHEN Yan-ting, CHEN Jin-sheng, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1988)
Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China	YUAN Ning, LIU Wei, ZHAO Xiu-liang, <i>et al.</i> (1995)
Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (2003)
Geochemical Characteristics and Sources of Atmospheric Particulates in Shanghai During Dust Storm Event	QIAN Peng, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min (2010)
Near Surface Atmospheric CO ₂ Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China	LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, <i>et al.</i> (2018)
<i>In-situ</i> Measurement of Background Atmospheric HCFC-142b Using GC-MS and GC-ECD Method	GUO Li-feng, YAO Bo, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (2025)
Airborne Fungal Community Composition in Indoor Environments in Beijing	FANG Zhi-guo, OUYANG Zhi-yun, LIU Peng, <i>et al.</i> (2031)
Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant	GUO Wei, WANG Bo-guang, TANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2038)
Superposition Impact Character of Air Pollution from Decentralization Docks in a Freshwater Port	LIU Jian-chang, LI Xing-hua, XU Hong-lei, <i>et al.</i> (2044)
Thermal Stability and Transformation Behaviors of Pb in Yima Coal	LIU Rui-qing, WANG Jun-wei (2051)
Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing	XIE Yuan-bo, LI Wei (2057)

《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)

2013年5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 15, 2013

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