

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第6期

Vol.36 No.6

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊春季气溶胶吸湿性分析	徐彬, 张泽锋, 李艳伟, 秦鑫, 缪青, 沈艳 (1911)
南京北郊秋冬季相对湿度及气溶胶理化特性对大气能见度的影响	于兴娜, 马佳, 朱彬, 王红磊, 严殊祺, 夏航 (1919)
南京北郊冬季霾天 PM _{2.5} 水溶性离子的污染特征与消光作用研究	周瑶瑶, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 王荔 (1926)
京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系	李梦, 唐贵谦, 黄俊, 刘子锐, 安俊琳, 王跃思 (1935)
长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征	莫梓伟, 牛贺, 陆思华, 邵敏, 勾斌 (1944)
贵阳酸雨中溶解态重金属质量浓度及形态分析	朱兆洲, 李军, 王志如 (1952)
北京市火葬场大气污染物排放现状及污染特征	薛亦峰, 闫静, 田贺忠, 熊程程, 李敬东, 吴晓清, 王玮, 朱家昕 (1959)
北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征	胡月琪, 马召辉, 冯亚君, 王琛, 陈圆圆, 何明 (1966)
燃煤电厂湿烟卤降雨成因分析	欧阳丽华, 庄焯, 刘科伟, 陈振宇, 顾鹏 (1975)
Mn-Ce/分子筛的脱汞特性研究	谭增强, 牛国平, 陈晓文, 安振 (1983)
办公室内颗粒物载带溴系阻燃剂的人体呼吸暴露	李岫雯, 曾辉, 倪宏刚 (1989)
森林生物质燃烧烟尘中的有机碳和元素碳	黄柯, 刘刚, 周丽敏, 李久海, 徐慧, 吴丹, 洪蕾, 陈惠雨, 杨伟宗 (1998)
北京市常见落叶树种叶片滞纳空气颗粒物功能	王兵, 王晓燕, 牛香, 张维康, 汪金松 (2005)
气相中乙酸乙酯光解的光子效率: 波长和催化剂的影响	方雪慧, 赵洁, 舒莉, 高永, 叶招莲 (2010)
长江口邻近海域赤潮水体浮游植物光吸收特性分析	刘洋洋, 沈芳, 李秀珍 (2019)
深圳近岸海域全氟化合物的污染特征	刘宝林, 张鸿, 谢刘伟, 刘国卿, 王艳萍, 王鑫璇, 李静, 董炜华 (2028)
杭州西湖“香灰土”沉积物轻、重有机质组成特征及其环境意义	李静, 朱广伟, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军 (2038)
小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价	黄莹, 李永霞, 高甫威, 徐民民, 孙博, 王宁, 杨健 (2046)
调水型水库藻类对调水氮、磷浓度与水量的响应	万由鹏, 尹魁浩, 彭盛华 (2054)
三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系	张磊, 蔚建军, 付莉, 周川, Douglas G. Haffner (2061)
藻华聚集的环境效应: 对漂浮植物水葫芦光合作用的影响	包先明, 顾东祥, 吴婷婷, 石祖良, 刘国峰, 韩士群, 周庆 (2070)
巢湖沉积物有效磷的原位高分辨分析研究	李超, 王丹, 杨金燕, 王燕, 丁士明 (2077)
贵州施秉白云岩喀斯特区水化学和溶解无机碳稳定同位素特征	肖时珍, 蓝家程, 袁道先, 王云, 杨龙, 敖向红 (2085)
长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义	李广, 章新平, 张立峰, 王跃峰, 邓晓军, 杨柳, 雷超桂 (2094)
元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征	张小娟, 宋维峰, 吴锦奎, 王卓娟 (2102)
植草沟控制道路径流污染效果的现场实验研究	黄俊杰, 沈庆然, 李田 (2109)
Fe/Cu 催化还原降解饮用水中溴氯乙腈的性能研究	丁春生, 马海龙, 傅洋平, 赵世督, 李东兵 (2116)
三维花状结构 α-FeOOH 协同 H ₂ O ₂ 可见光催化降解双氯芬酸钠	许俊鸽, 李云琴, 黄华山, 苑宝玲, 崔浩杰, 付明来 (2122)
UV/H ₂ O ₂ 降解羟苯甲酮反应动力学及影响因素	冯欣欣, 杜尔登, 郭迎庆, 李华杰, 刘翔, 周方 (2129)
钼掺杂 TiO ₂ 光催化降解全氟辛酸	刘晴, 喻泽斌, 张睿涵, 李明洁, 陈颖, 王莉, 匡瑜, 张搏, 朱有慧 (2138)
低频无极灯降解偶氮染料酸性橙 7	吴朋, 吴军, 高士祥, 孙成, 蒋正方 (2147)
纳米 Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ 非均相类 Fenton 体系对 3,4-二氯三氟甲苯的降解	孙正男, 杨琦, 纪冬丽, 郑琳 (2154)
流变相法制备包覆型 CMC-Fe ⁰ 及降解水中 TCE 的研究	樊文井, 成岳, 余淑贞, 范小丰 (2161)
Pd-Fe/石墨烯多功能催化阴极降解 4-氯酚机制研究	祁文智, 王凡, 王辉, 施钦, 逢磊, 卞兆勇 (2168)
锰氧化物改性硅藻土对苯胺的去除动力学与机制	肖少丹, 刘露, 姜理英, 陈建孟 (2175)
铅-十六烷基三甲基氯化铵改性活性炭对水中硝酸盐和磷酸盐的吸附特性	郑雯婧, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (2185)
聚(丙烯酸酰胺-二乙烯基苯)对水溶液中刚果红的吸附	张变变, 廖运文, 高和军, 王忠志, 帅超 (2195)
大型再生水厂不同污水处理工艺的能耗比较与节能途径	杨敏, 李亚明, 魏源送, 吕鑑, 郁达伟, 刘吉宝, 樊耀波 (2203)
污泥水热液化水相产物中氮元素变化规律的研究	孙衍卿, 孙震, 张景来 (2210)
不同接种污泥 ABR 厌氧氨氧化的启动特征	张海芹, 王翻翻, 李月寒, 陈重军, 沈耀良 (2216)
基于微波-过氧化氢-碱预处理的污泥水解影响因素	贾瑞来, 魏源送, 刘吉宝 (2222)
蠡河底泥中反硝化复合菌群富集及菌群结构研究	雍佳君, 成小英 (2232)
不同类型及不同浓度抗生素条件下活性污泥丝状菌种群多样性分析	王润芳, 王琴, 张红, 齐嵘 (2239)
石油降解菌的分离鉴定及 4 株芽胞杆菌种间效应	王佳楠, 石妍云, 郑力燕, 王喆, 蔡章, 刘杰 (2245)
Shevanelia oneidensis MR-1 对针铁矿的还原与汞的生物甲基化	司友斌, 孙林, 王卉 (2252)
根表铁氧化物胶膜对水稻吸收诺氟沙星的影响	马微, 鲍艳宇 (2259)
不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响	禄兴丽, 廖允成 (2266)
城市区域近地表灰尘及重金属沉降垂向季节变化	李晓燕, 张舒婷 (2274)
中山市农业区域土壤-农产品中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染特征	李彬, 吴山, 梁金明, 梁文立, 陈桂贤, 李拥军, 杨国义 (2283)
经口摄入土壤多溴联苯醚生物可给性变化及影响因素的体外消化模拟	张云惠, 刘伟健, 程芳芳, 熊冠男, 杨笑寒, 王歆, 陶澍, 邢宝山, 刘文新 (2292)
生物炭输入对土壤本底有机碳矿化的影响	陈威, 胡学玉, 陆海楠 (2300)
改良剂对广西环江强酸铅锌污染土壤的修复作用	曾伟铨, 宋波, 袁立竹, 黄宇妃, 伏凤艳 (2306)
蒙脱石-OR-SH 复合体材料对土壤镉的钝化及机制	曾燕君, 周志军, 赵秋香 (2314)
焦岗湖湿地土地利用格局演变及区域可持续性评价	杨阳, 蔡怡敏, 白艳莹, 陈卫平, 杨秀超 (2320)

大型再生水厂不同污水处理工艺的能耗比较与节能途径

杨敏¹, 李亚明^{2, 3*}, 魏源送^{1*}, 吕鑑², 郁达伟¹, 刘吉宝¹, 樊耀波¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124; 3. 北京排水集团清河再生水厂, 北京 100192)

摘要: 能耗是再生水厂运行主要的考核指标. 采用比能耗分析法、单元能耗分析法以及冗余分析法等探讨了清河再生水厂不同污水处理工艺(倒置 A²/O、A²/O 和 A²/O-MBR)的能耗构成和时空分布特征. 重点考察了 A²/O-MBR 工艺的主要能耗环节和原因, 探讨了 A²/O-MBR 工艺的节能改造方法, 并比较了其改造前后的能耗. 结果表明, 曝气是清河再生水厂污水处理的常规工艺和 A²/O-MBR 工艺的主要耗能需求, 分别占总能耗的 42.97% 和 50.65%. 在保证 A²/O-MBR 工艺出水水质的同时, 采用脉冲曝气改造后节能效果明显. 改造后的膜运行通量增大约 20%, 吨水能耗为 0.53 kW·h·kg⁻³, 降幅达 42.39%, 去除单位 COD 能耗为 1.29 kW·h·kg⁻¹, 降幅达 54.74%. 该厂 A²/O-MBR 工艺回流量大, 但与出水水质相关性较弱. 在一定范围内降低回流比不会造成出水水质恶化, 因此可作为进一步节能的方向之一.

关键词: 再生水厂; A²/O-MBR; 脉冲曝气; 污水; 能耗

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)06-2203-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.06.038

Energy Consumption Comparison and Energy Saving Approaches for Different Wastewater Treatment Processes in a Large-scale Reclaimed Water Plant

YANG Min¹, LI Ya-ming^{2, 3*}, WEI Yuan-song^{1*}, LÜ Jian², YU Da-wei¹, LIU Ji-bao¹, FAN Yao-bo^{1*}

(1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 3. Qinghe Reclaimed Water Plant, Beijing Drainage Group Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: Energy consumption is the main performance indicator of reclaimed water plant (RWP) operation. Methods of specific energy consumption analysis, unit energy consumption analysis and redundancy analysis were applied to investigate the composition and spatio-temporal distribution of energy consumption in Qinghe RWP with inverted A²/O, A²/O and A²/O-MBR processes. And the A²/O-MBR process was mainly analyzed to identify the main nodes and causes for high energy consumption, approaches for energy saving were explored, and the energy consumption before and after upgrading for energy saving was compared. The results showed that aeration was the key factor affecting energy consumption in both conventional and A²/O-MBR processes, accounting for 42.97% and 50.65% of total energy consumption, respectively. A pulsating aeration allowed an increasing membrane flux and remarkably reduced the energy consumption of the A²/O-MBR process while still meeting the effluent standard, e.g., the membrane flux was increased by 20%, and the energy consumptions per kiloton wastewater and kilogram COD_{removed} were decreased by 42.39% to 0.53 kW·h·kg⁻³ and by 54.74% to 1.29 kW·h·kg⁻¹, respectively. The decrease of backflow ratio in the A²/O-MBR process within a certain range would not deteriorate the effluent quality due to its insignificant correlation with the effluent quality, and therefore may be considered as one of the ways for further energy saving.

Key words: reclaimed water plant; A²/O-MBR; pulse aeration; wastewater; energy consumption

北京地区水资源短缺, 再生水需求量不断增加, 甚至超过了地表水的供水量^[1]. 因水量巨大、稳定, 污水作为再生水水源将在今后成为必然^[2]. 膜生物反应器(membrane bioreactor, MBR)具有出水浊度低、水质稳定和自动化程度高等优点^[3], 常用做超滤、反渗透等再生水处理的预处理手段^[4, 5]. 但是相对常规工艺, MBR 能耗高, 降低了其在再生水处理中的优势. 目前生活污水的 MBR 处理吨水能耗大多分布在 0.45 ~ 0.91 kW·h 左右, 比常规工艺处理同类污水的吨水能耗 0.24 ~ 0.37 kW·h 高出 1 ~ 2 倍, 相应的 COD 去除能耗为 1.40 ~ 2.76

kW·h·kg⁻¹左右, 其 COD 去除能耗也高于常规工艺的 1.01 ~ 1.54 kW·h·kg⁻¹^[6]. 随着城镇污水排放标准的日益提高, 城市建设用地更趋紧张, A²/O-MBR 的应用迅速增加^[7], A²/O-MBR 工艺的能耗问题引起了人们重视. 然而由于 A²/O-MBR 工艺起步较晚^[8], 现有的 A²/O-MBR 工艺能耗的研究大多集中在实验室规模的短期运行^[9]或模拟研究^[10], 大部分

收稿日期: 2014-11-25; 修订日期: 2015-01-13

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07203-002); 国家自然科学基金项目(51278483)

作者简介: 杨敏(1988~), 男, 博士研究生, 主要研究方向是膜分离技术的数值模拟与优化, E-mail: yangmsunb@126.com

* 通讯联系人, E-mail: liyaming@bdc.cn; yswwei@rcees.ac.cn

的这类研究试图从反应器构型、操作条件(如曝气)和膜污染等方面考察 MBR 运行能耗^[11~13],或者仅着眼于某个局部(如膜生物池或膜组件内部)^[14, 15],对实际 A²/O-MBR 污水处理厂节能降耗的指导意义有限. 虽然有文献报道 A²/O 工艺^[16]或 MBR 工艺^[17]的大型污水处理厂能耗情况,但鲜见 A²/O-MBR 工艺污水处理厂的能耗报道,并且由于处理水质、环境条件以及调查时间(时间分布和时间长度)存在差异,现有的研究未能准确比较不同工艺的能耗水平.

北京市清河再生水厂采用:倒置 A²/O、A²/O、A²/O-MBR 污水处理工艺,运行数据完整,工艺丰富、可对照性强. 因此,本研究以清河再生水厂为对象,通过全面分析、对比该厂常规工艺(倒置 A²/O、A²/O)与 A²/O-MBR 工艺的运行能耗构成,确定各工艺能耗水平,分析高能耗的主要环节及原因,进而提出针对 A²/O-MBR 工艺的节能措施,以期今后该再生水厂和同类工艺降低运行能耗提供借鉴.

1 材料与方法

1.1 数据来源

为考察清河再生水厂不同污水处理工艺能耗的时空分布特征及其影响因素,收集、整理了不同污

水处理工艺各年的水量、进出水水质和电耗等数据,其中常规工艺(倒置 A²/O、A²/O)包括 2008 年和 2012 年运行数据,A²/O-MBR 工艺包括 2012 年下半年到 2014 年上半年运行数据.

1.2 清河再生水厂概况

清河再生水厂污水处理工艺包括常规工艺和 A²/O-MBR 工艺,出水全部作为再生水厂水源,处理规模为 55 万 t·d⁻¹. 常规工艺分为两期建设,分别为倒置 A²/O 工艺和正置 A²/O 工艺,污水来自同一管网,处理规模均为 20 万 t·d⁻¹,分别于 2002 年 10 月和 2004 年 12 月投入运行,2012 年清河再生水工程全面建成,一期、二期生化池进行改造后投加填料,出水经过反硝化滤池+超滤+臭氧处理后进入再生水管网. A²/O-MBR 工艺处理规模为 15 万 t·d⁻¹,于 2012 年 4 月通水运行,出水经过接触氧化+次氯酸钠消毒后进入再生水管网. 此外,为提高生化处理的碳源浓度和氮、磷的去除效率,保证生化反应池内有较高的碳氮比和碳磷比,故清河再生水厂未设初沉池,污水经过沉砂池后进入生化池.

1.2.1 常规工艺介绍

清河再生水厂一期采用倒置 A²/O 工艺,污泥外回流比为 80%~100%,无内循环. 一期工艺流程示意图见图 1(a).

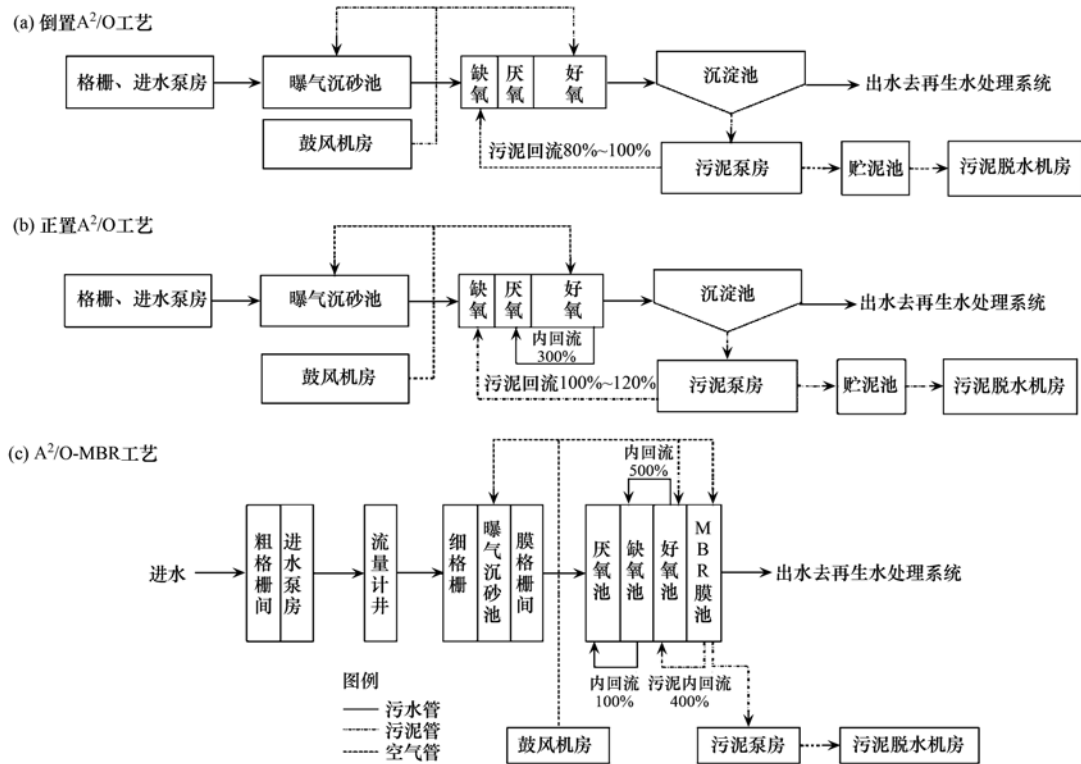


图1 清河再生水厂污水处理工艺流程示意

Fig. 1 Wastewater treatment processes diagram of Qinghe reclaimed water plant

倒置 A²/O 工艺单独为厌氧池配水,总磷去除率达 94.87%,出水年均浓度为 $(0.31 \pm 0.34) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (2008 年全年数据,下同)。由于缺氧段池容较小,未设内回流,脱氮效果不理想,出水总氮年均浓度为 $(21.74 \pm 4.32) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。二期采用正置 A²/O 工艺,增大了缺氧池池容所占比例,内回流设为 300%,总氮去除率由一期的 65.89% 提高至 74.05%,出水总氮年均浓度降低至 $(16.51 \pm 3.53) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。同时二期为保证系统除磷能力,增大污泥外回流比至 100% ~ 120%,出水总磷年均浓度为 $(0.82 \pm 0.75) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。二期工艺流程示意图见图 1(b)。

由于污水被提升到曝气沉砂池进行除砂处理平分进入一期、二期两个处理系统,且后续采用的工艺类似,设备相当,所以两期工程的能耗基本相同,本文采用两期平均能耗作为“常规工艺”能耗。

1.2.2 A²/O-MBR 工艺介绍

清河再生水厂 A²/O-MBR 工艺采用北京碧水源公司“MBRU-1000”型膜组器,每个组器内设 60 片 PVDF 帘式膜,单片膜面积 27.5 m^2 ,平均膜孔径 $0.15 \mu\text{m}$,平均膜运行通量为 $16.4 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,单个膜组器投影面积 6.0 m^2 ,设计曝气量 $\geq 75.0 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 。膜池污泥回流比为 400%,好氧池内回流比为 500%,缺氧池内回流比为 100%,其工艺流程示意图见图 1(c)。

在 A²/O-MBR 工艺中,污泥被膜池截留回流到好氧池以保持污泥负荷,然后由好氧池回流到缺氧池进行脱氮,膜池出水 TN 浓度为 $(14.80 \pm 4.50) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (2014 年上半年数据,下同)。但大量污泥回流到缺氧池导致这部分污泥未经历厌氧阶段,影响除磷效果^[18],因此再由缺氧池内回流至厌氧池,膜池出水 TP 为 $(0.18 \pm 0.08) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.3 能耗分析方法

采用比能耗分析法、单元能耗分析法和冗余分析法研究常规工艺和 A²O-MBR 工艺的能耗。比能耗是处理单位体积的污水所消耗的能量,可折算为吨污水电能 ($\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{t}^{-1}$) 或去除单位质量的污染物所消耗的能量 ($\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[19]。比能耗分析法可以直观地表示不同工艺的能耗水平,可为工艺取舍、改进提供参考。单元能耗分析是将再生水厂按功能和能耗特征分成预处理、生化处理、深度处理和污泥处理这 4 个单元分别进行能耗分析,确定节能潜力,通过解析每一单元的能耗变化规律和主要影响因素,筛选出可行的节能途径^[20]。冗余分析属于约

束性排序,可以看成多元线性回归的扩展,采用两个变量集的线性关系模型,得到数值矩阵并对特征值进行分解,能将物种(单位能耗、处理效果)、环境变量和样点之间的关系反映在坐标轴上^[21]。

2 结果与讨论

2.1 不同工艺的比能耗分析

由图 2 可知,2012 年 A²/O-MBR 工艺的比能耗较高,平均吨水能耗为 $(0.92 \pm 0.13) \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{t}^{-1}$,是常规工艺的 2.36 倍,处于全国同类工艺水平的下游^[6]。这一方面由于采用 MBR 替代常规工艺的二沉池,膜池曝气量大,能耗势必增加,另一方面 2012 年 10 月下旬进水量骤然降低,也导致了单位能耗的升高。直到 12 月,进水量接近设计值 ($15.00 \text{ 万 t} \cdot \text{d}^{-1}$),单位能耗才大幅回落至 $(0.80 \pm 0.07) \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{t}^{-1}$,降低到常规工艺的 2 倍左右(见图 3)。因此降低 A²/O-MBR 单位能耗一方面要优化设计和运行,降低膜池曝气能耗,另一方面要保证运行过程中进水量达到设计要求。

同样地,A²/O-MBR 工艺去除单位 COD 能耗为 $(2.85 \pm 1.63) \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$,是常规工艺的 3.13 倍

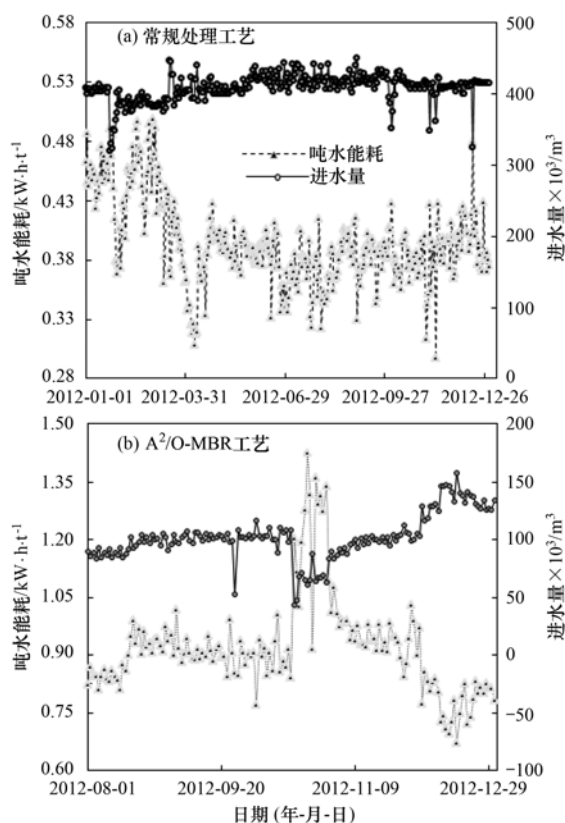


图 2 常规处理工艺和 A²/O-MBR 工艺的吨水能耗

Fig. 2 Energy consumption per ton wastewater treated by conventional process and A²/O-MBR process

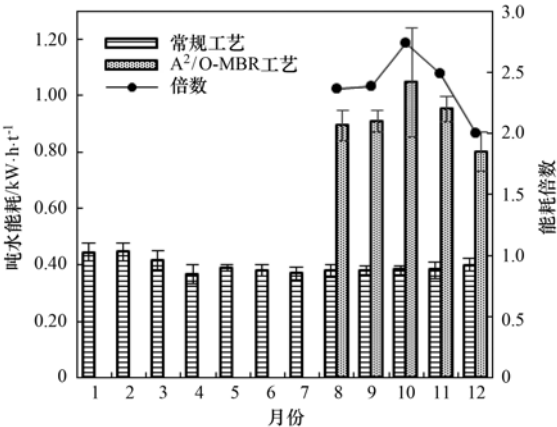


图3 2012年不同工艺吨水能耗对比
Fig. 3 Comparison of energy consumption per ton wastewater treated by different processes in 2012

(见图4),膜池曝气量大仍然是主要原因.当然MBR膜池曝气量过剩,微生物浓度高,氧化能力比常规工艺强,如能提高进水的COD,则在同等曝气强度下COD负荷更高,则COD单位能耗会有所降低.

比能耗是能耗与处理量(如进水量、 $COD_{removed}$)的比值,简单直观,通过分析可知曝气量及进水量是

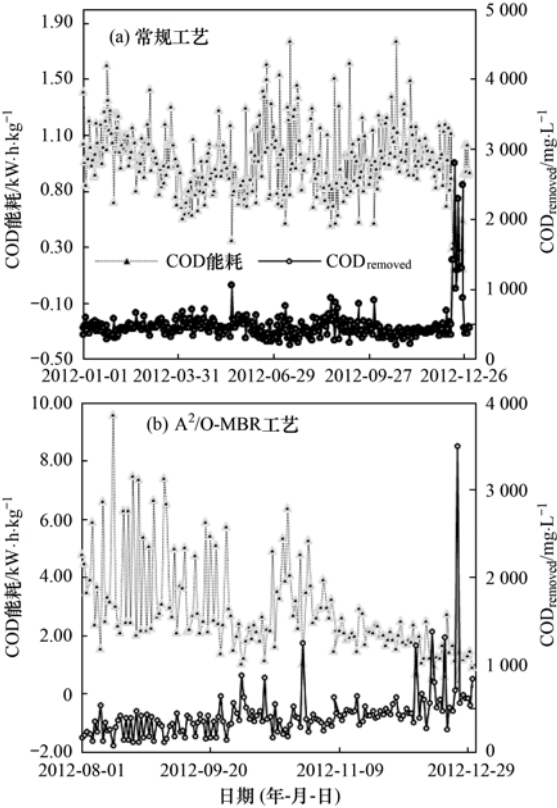


图4 不同工艺处理1kg COD的能耗
Fig. 4 Energy consumption per kilogram COD removal of conventional process and A²/O-MBR process

影响不同工艺能耗水平的关键.但比能耗无法量化各个环节的耗能情况,可能会忽略掉其他关键影响因素,因此结合单元分析法进一步分析.

2.2 不同工艺的单元能耗分析与节能潜力分析

一期、二期主要能源消耗环节包括污水提升泵、鼓风机(曝气沉砂、好氧曝气和膜曝气)、污泥脱水间与干化场、污泥泵房、再生水处理、马达控制中心(motor control center, MCC)等,各单元能耗分布见图5.

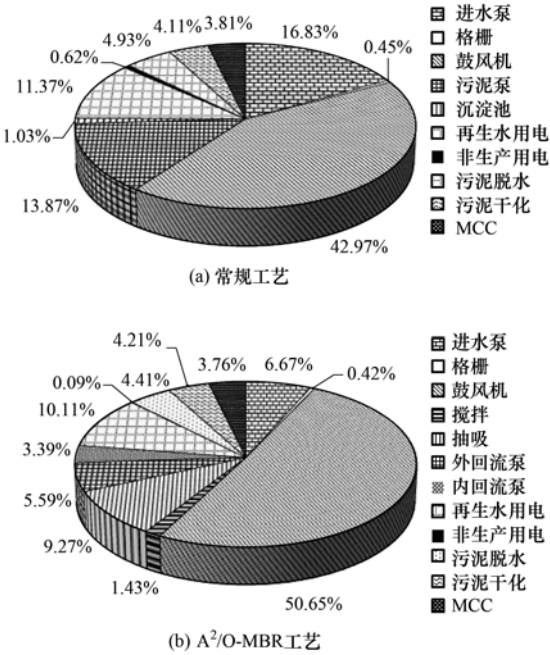


图5 不同工艺能耗分布情况
Fig. 5 Energy consumption distribution of conventional process and A²/O-MBR process

由图5可知,常规工艺主要耗能环节依次是鼓风机、进水泵、污泥泵、再生水处理、污泥脱水与干化等;A²/O-MBR依次是鼓风机、再生水处理、膜抽吸、回流泵(外回流泵+内回流泵)、污泥脱水与干化、进水泵等.

两个工艺均是曝气的能耗最大,分别占到42.97%和50.65%,是节能重点环节.通常降低曝气能耗有3种方法:①采用精确曝气,将在线测定溶氧、氨氮浓度的信号值输入自控系统,根据处理要求精确控制风量^[16];②通过非连续曝气(变频控制、间歇曝气)减少无效曝气^[22, 23];③通过工艺升级,优化构筑物及膜组件构型、曝气设备,增大氧传质系数,或者采用MBR与传统处理工艺的组合形式,保证MBR满负荷运行^[24].由于(倒置)A²/O工艺脱氮除磷对溶氧浓度有严格要求,因此采用方法

一既节能又提高出水水质, 一举两得。方法二是设备的优化控制, 通过设备控制实现变频曝气、脉冲曝气。对于曝气过量的 MBR 工艺, 空气利用率低, 通过调节曝气频率, 防止膜孔严重堵塞, 保证系统稳定运行前提下, 减少总的曝气量, 是节能的重要手段。前两种方法简单易行, 该厂都有不同程度的实施。方法一针对常规工艺, 该厂已有过研究报告^[25], 方法二针对 A²/O-MBR, 将在后文介绍。方法三旨在提高氧传质系数和增大构筑物利用率。除进行设备优选外, 还可以通过建立水厂的数学模型^[26, 27]以及计算流体力学模型^[28, 29], 进行工艺、构型的优化设计。这种方法需要大量基础数据, 且对模拟软件使用能力要求较高, 是未来的节能方向之一。

该厂常规工艺和 A²/O-MBR 工艺的污泥回流能耗均较高, 分别占 13.87% 和 8.98%, 具有一定节能空间。再生水系统采用了超滤处理, 给水泵电耗较高, 可以采用变频控制, 选择适当的系统回收率, 优化反洗策略等手段达到节能目的^[5]。由于本研究针对污水处理单元能耗, 因此不对再生水处理环节进行单独分析。MBR 膜抽吸能耗影响因素较多, 如曝气强度、污泥浓度、反洗频率等, 这部分的能耗近期主要通过加强管理, 及时调整运行来降低, 远期需要依靠技术创新, 从根本上减轻膜污染, 降低运行能耗。进水泵是一级处理的主要能耗环节, 一般通过大小泵组合运行和泵高位运行等提高泵的运行效率^[30], 但是由于该厂进水为一次提升, 节能空间有限。

综合比能耗分析及单元能耗分析可知, A²/O-MBR 工艺能耗处在同类工艺中游偏下水平, 是节能的重点, 常规工艺能耗较低, 相对 A²/O-MBR 工艺节能潜力有限。对于 A²/O-MBR 工艺, 降低曝气量、增大进水量、降低污泥回流比是降低其能耗的主要手段。但是优化运行参数降低能耗的同时, 会对出水水质造成不同影响, 故采用冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 对其影响进行综合评估。

2.3 A²/O-MBR 冗余分析

2013 年全年的 A²/O-MBR 冗余分析结果如图 6。从中可知, 与吨水能耗有较强正相关的环境变量主要为污泥回流比和膜池溶解氧, 与吨水能耗有较强负相关的环境变量主要为进水量和膜通量, 这与之前的分析是一致的。从该厂 2014 年运行数据可知, 膜池曝气溶氧平均在 $(5.73 \pm 1.88) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 仍高于生化所需的溶氧。此外, A²/O-MBR 工艺的设

计有待继续优化, 例如, 污泥回流不尽合理, 首先是好氧池外单独设立膜池, 增加了不必要的曝气量和回流泵; 其次是污泥内回流比过大, 因此也增大了能耗。最后进水量满足设计要求, 并相应地提高膜通量, 有较好的节能效果。

同时要考虑调整参数对出水水质的影响。由图 6 可知氮 (TN 和硝态氮) 的去除与吨水能耗呈负相关关系, 因此降低能耗有利于脱氮, 即降低膜池溶解氧和回流比、提高进水量和膜通量均能提高 TN 和硝态氮的去除率。以减小曝气量为例, 2014 年 TN 去除率较 2012 年提高了 1.80%, 出水 TN 由 $(17.88 \pm 4.98) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低为 $(14.80 \pm 4.50) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。COD 与膜池 DO 呈较弱的负相关关系, DO 降低后, 2014 年 COD 去除率较 2012 年升高了 1.67%, 出水 COD 由 $18.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $(15.37 \pm 1.77) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。TP 的去除受环境变量的影响与 COD 类似, 2014 年 COD 去除率较 2012 年提高了 1.80%, 出水 TP 由 $0.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低至 $(0.18 \pm 0.08) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。连续曝气时污泥 SVI 值达 113.63 ± 33.15 , 说明改造前曝气量偏大, 改造后 SVI 值降至 94.96 ± 23.55 。综合以上分析, 在一定范围内调整操作参数以便节能, 不会造成出水水质恶化。但是也要防止一味地追求高通量和低曝气量, 导致 TMP 急剧上升、出水溶氧过低影响接纳水体水质等问题^[31]。

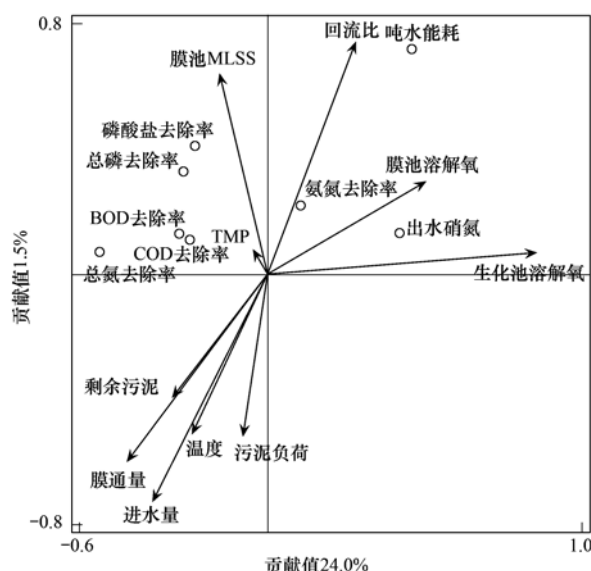


图 6 2013 年全年 A²/O-MBR 工艺能耗
与环境变量的 RDA 二维排序

Fig. 6 RDA biplot of annual energy consumption and environmental variables of A²/O-MBR process in 2013

2.4 A²/O-MBR 节能措施及效果

自 2013 年 6 月起, A²/O-MBR 进水量增大到 $170.02 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 导致膜在较高通量下运行. 如继续采用增大曝气量方式维持高膜通量, 则能耗仍会居高不下. 该厂最终通过管路阀门的改装, 实行非连续曝气, 减少无效冲刷, 在提高膜表观通量的同时, 降低了能耗. 改造后脉冲曝气的平均曝气强度

为 $70 \sim 110 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 比连续曝气模式减少约 30% 的曝气量, 鼓风机能耗所占比例下降到 36.18% (见图 7). 自 2013 年 5 月投入使用以来, A²/O-MBR 运行稳定, 吨水能耗下降至 $(0.53 \pm 0.06) \text{ kW} \cdot \text{h}$, 降幅达 42.39% (见图 8), 去除单位 COD 的能耗下降至 $(1.29 \pm 0.59) \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$, 降幅达 54.74%.

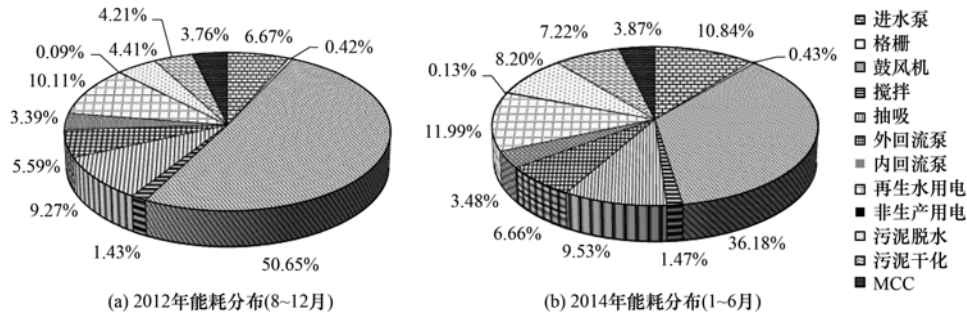


图 7 改造前后 A²/O-MBR 工艺的能耗分布情况

Fig. 7 Energy consumption distribution before and after renovation of A²/O-MBR process

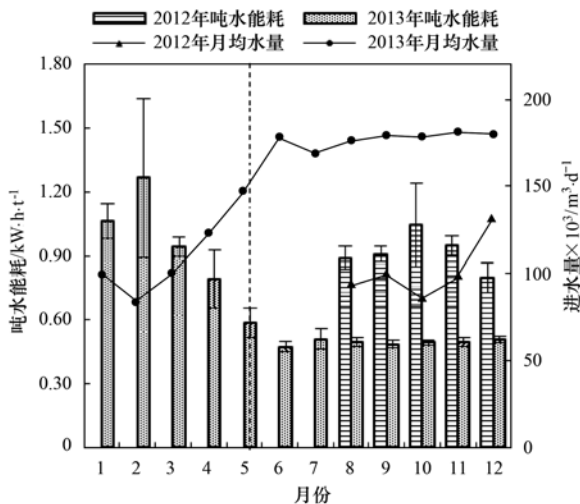


图 8 改造前后 A²/O-MBR 工艺吨水能耗情况

Fig. 8 Energy consumption per ton wastewater before and after renovation of A²/O-MBR process

综上,改造曝气方式后的 A²/O-MBR 能耗水平有了显著提高. 但由于污泥回流量较大、膜池溶解氧浓度仍较高,吨水能耗与同行业先进水平相比仍存在差距^[6]. 主要就是该厂 A²/O-MBR 于好氧池外另设膜曝气池不尽合理,增加了不必要的膜池曝气和污泥回流. 但是考虑到该工程为改建工程,且单设膜池便于膜元件清洗,因此仍可接受. 近期可以从优化污泥回流泵的配置、定期检修管道、阀门以及优化曝气的时空分布等方面着手降低能耗^[24]. 远期通过计算流体力学模拟技术^[29]、建立活性污泥数学模型^[32, 33]等方法,针对性地进行 MBR 池容、

池形、膜组件构型和位置以及运行参数等的辅助设计和优化,进一步降低运行能耗.

3 结论

(1) 比能耗分析表明,连续曝气的 A²/O-MBR 溶氧量富余,且由于运行期间进水量不足,吨水能耗达 $(0.80 \pm 0.07) \sim (0.92 \pm 0.13) \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{t}^{-1}$, 是处理同类城市污水的该厂常规工艺 (A²/O、倒置 A²/O) 的 2 倍之多; 去除单位 COD 能耗为 $(2.85 \pm 1.63) \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是常规工艺的 3 倍之多.

(2) 单元能耗分析表明, A²/O-MBR 鼓风机节能潜力大, 冗余分析表明增大进水量、降低曝气量、降低污泥回流比等节能手段对出水水质影响较小. A²/O-MBR 工艺调整为间歇曝气运行后, 间歇曝气节能效果明显, 吨水能耗减少 42.39%, 去除单位 COD 能耗减少 54.74%.

(3) 单独设立 MBR 膜曝气池不尽合理, 增加了不必要的曝气和污泥回流. 在保证膜元件能顺利清洗的条件下, A²/O-MBR 工程可将膜组件置于好氧池内, 以降低能耗.

(4) 降低 A²/O-MBR 能耗, 除了在技术上持续改进和改革外, 还应该提高再生水厂管理水平, 继续加强能耗分析与评估.

参考文献:

- [1] Judd S. The MBR Book—Principles and applications of membrane bioreactors for water and wastewater treatment [M]. UK: Elsevier, 2011. 12-14.

- [2] 李五勤, 张军. 北京市再生水利用现状及发展思路探讨[J]. 北京水务, 2011, (3): 26-28.
- [3] Levine A D, Asano T. Peer reviewed: recovering sustainable water from wastewater [J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(11): 201A-208A.
- [4] 李昆, 魏源送, 王健行, 等. 再生水回用的标准比较与技术经济分析[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(7): 1635-1653.
- [5] Shannon M A, Bohn P W, Elimelech M, *et al.* Science and technology for water purification in the coming decades [J]. Nature, 2008, **452**(7185): 301-310.
- [6] 王琦, 樊耀波. 膜生物反应器在污水处理与回用中的能耗分析[J]. 膜科学与技术, 2012, **32**(3): 95-103.
- [7] 徐荣乐, 樊耀波, 张晴, 等. A²O-MBR 研究与应用进展[J]. 膜科学与技术, 2013, **33**(6): 111-118.
- [8] Adam C, Gnirss R, Lesjean B, *et al.* Enhanced biological phosphorus removal in membrane bioreactors[J]. Water Science & Technology, 2002, **46**(4-5): 281-286.
- [9] 邵辉煌. 好氧池溶解氧对 MBR 工艺处理效果及运行能耗的影响[J]. 给水排水, 2009, **35**(10): 38-41.
- [10] Fletcher H, Mackley T, Judd S. The cost of a package plant membrane bioreactor [J]. Water Research, 2007, **41**(12): 2627-2635.
- [11] 郑祥, 朱小龙, 樊耀波. 膜生物反应器处理毛纺废水的中试研究[J]. 环境科学, 2001, **22**(4): 91-94.
- [12] 张健君, 邹高龙, 杨淑芳, 等. 倒置 A²/O-MBR 处理城市污水的中试研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(5): 1828-1834.
- [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] Sridang P C, Heran M, Grasmick A. Influence of module configuration and hydrodynamics in water clarification by immersed membrane systems[J]. Water Science & Technology, 2005, **51**(6-7): 135-142.
- [15] Ratkovich N, Chan C C V, Berube P R, *et al.* Analysis of shear stress and energy consumption in a tubular airlift membrane system[J]. Water Science & Technology, 2011, **64**(1): 189-198.
- [16] 李鹏峰, 郑兴灿, 孙永利, 等. A²/O 工艺污水处理厂的主要能耗点识别及节能途径[J]. 中国给水排水, 2012, **28**(8): 6-10.
- [17] Gil J A, Túa L, Rueda A, *et al.* Monitoring and analysis of the energy cost of an MBR[J]. Desalination, 2010, **250**(3): 997-1001.
- [18] 沈耀亮, 王宝贞. 废水生物处理新技术——理论与应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006. 184-208.
- [19] 陈宏儒. 城市污水处理厂能耗评价及节能途径研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009. 6-9.
- [20] 金文杰, 杨丹丹. 污水处理厂能耗分析方法[J]. 环保科技, 2012, **18**(2): 18-20.
- [21] Makarenkov V, Legendre P. Nonlinear redundancy analysis and canonical correspondence analysis based on polynomial regression [J]. Ecology, 2002, **83**(4): 1146-1161.
- [22] 朱彩琴, 周味贤, 矫甘来. 脉冲曝气在污水处理工艺中的节能应用[J]. 中国给水排水, 2013, **29**(2): 95-98.
- [23] Psoch C, Schiewer S. Long-term study of an intermittent air sparged MBR for synthetic wastewater treatment [J]. Journal of Membrane Science, 2005, **260**(1-2): 56-65.
- [24] Ratkovich N R, Bentzen T R, Rasmussen M R. Energy consumption in terms of shear stress for two types of membrane bioreactors used for municipal wastewater treatment processes [J]. Archives of Thermodynamics, 2012, **33**(2): 85-106.
- [25] 张荣兵, 鲍海鹏, 白雪, 等. AVS 系统在 A²/O 工艺稳定运行及节能优化中的应用[J]. 中国给水排水, 2012, **28**(12): 71-74.
- [26] Kurian R, Nakhla G, Bassi A. Biodegradation kinetics of high strength oily pet food wastewater in a membrane-coupled bioreactor (MBR) [J]. Chemosphere, 2006, **65**(7): 1204-1211.
- [27] Naessens W, Maere T, Nopens I. Critical review of membrane bioreactor models-part 1: biokinetic and filtration models [J]. Bioresource Technology, 2012, **122**: 95-106.
- [28] 张晴, 樊耀波, 魏源送, 等. CFD 及 ASM-CFD 在 MBR 研究中的应用进展[J]. 膜科学与技术, 2013, **33**(2): 95-103.
- [29] Naessens W, Maere T, Ratkovich N, *et al.* Critical review of membrane bioreactor models - Part 2: Hydrodynamic and integrated models [J]. Bioresource Technology, 2012, **122**: 107-118.
- [30] 金昌权, 汪诚文, 曾思育, 等. 污水处理厂能耗特征分析方法与节能途径研究[J]. 给水排水, 2009, **35**(S1): 270-274.
- [31] Metcalf & Eddy, Inc. Wastewater engineering treatment and reuse[M]. 2003. 1356-1374.
- [32] Fenu A, Guglielmi G, Jimenez J, *et al.* Activated sludge model (ASM) based modelling of membrane bioreactor (MBR) processes: a critical review with special regard to MBR specificities[J]. Water Research, 2010, **44**(15): 4272-4294.
- [33] Zuthi M F R, Ngo H H, Guo W S. Modelling bioprocesses and membrane fouling in membrane bioreactor (MBR): a review towards finding an integrated model framework [J]. Bioresource Technology, 2012, **122**: 119-129.

CONTENTS

Hygroscopic Properties of Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing in Spring	XU Bin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Relative Humidity and Aerosol Physicochemical Properties on Atmospheric Visibility in Northern Suburb of Nanjing	YU Xing-na, MA Jia, ZHU Bin, <i>et al.</i> (1919)
Pollution Characteristics and Light Extinction Effects of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter Hazy Days at North Suburban Nanjing ...	ZHOU Yao-yao, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1926)
Characteristics of Winter Atmospheric Mixing Layer Height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Their Relationship with the Atmospheric Pollution	LI Meng, TANG Gui-qian, HUANG Jun, <i>et al.</i> (1935)
Process-based Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Paint Industry in the Yangtze River Delta, China	MO Zi-wei, NIU He, LU Si-hua, <i>et al.</i> (1944)
Concentrations and Speciation of Dissolved Heavy Metal in Rainwater in Guiyang, China	ZHU Zhao-zhou, LI Jun, WANG Zhi-ru (1952)
Situation and Characteristics of Air Pollutants Emission from Crematories in Beijing, China	XUE Yi-feng, YAN Jing, TAN He-zhong, <i>et al.</i> (1959)
Emission Characteristics of Water-Soluble Ions in Fumes of Coal Fired Boilers in Beijing	HU Yue-qi, MA Zhao-hui, FENG Ya-jun, <i>et al.</i> (1966)
Analysis on Mechanism of Rainout Carried by Wet Stack of Thermal Power Plant	OUYANG Li-hua, ZHUANG Ye, LIU Ke-wei, <i>et al.</i> (1975)
Removal Characteristics of Elemental Mercury by Mn-Ce/molecular Sieve	TAN Zeng-qiang, NIU Guo-ping, CHEN Xiao-wen, <i>et al.</i> (1983)
Indoor Exposure to Particle-Bound BFRs via Inhalation	LI Xiu-wen, ZENG Hui, NI Hong-gang (1989)
Organic Carbon and Elemental Carbon in Forest Biomass Burning Smoke	HUANG Ke, LIU Gang, ZHOU Li-min, <i>et al.</i> (1998)
Atmospheric Particle Retaining Function of Common Deciduous Tree Species Leaves in Beijing	WANG Bing, WANG Xiao-yan, NIU Xiang, <i>et al.</i> (2005)
Photonic Efficiency of Ethyl Acetate Photolysis in Gas Phase: Dependence on Wavelength and Catalyst	FANG Xue-hui, ZHAO Jie, SHU Li, <i>et al.</i> (2010)
Phytoplankton Light Absorption Properties During the Blooms in Adjacent Waters of the Changjiang Estuary	LIU Yang-yang, SHEN Fang, LI Xiu-zhen (2019)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Offshore Marine Area of Shenzhen	LIU Bao-lin, ZHANG Hong, XIE Liu-wei, <i>et al.</i> (2028)
Composition and Environmental Effects of LFOM and HFOM in "Incense-Ash" Sediments of West Lake, Hangzhou, China	LI Jing, ZHU Guang-wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (2038)
Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from the Heavily Polluted Area of Xiaoqing River	HUANG Ying, LI Yong-xia, GAO Fu-wei, <i>et al.</i> (2046)
Response of Algae to Nitrogen and Phosphorus Concentration and Quantity of Pumping Water in Pumped Storage Reservoir	WAN You-peng, YIN Kui-hao, PENG Sheng-hua (2054)
Temporal and Spatial Variation of Nutrients and Chlorophyll a, and Their Relationship in Pengxi River Backwater Area, Three Gorges Reservoir	ZHANG Lei, WEI Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2061)
Environmental Effects of Algae Bloom Cluster: Impact on the Floating Plant Water Hyacinth Photosynthesis	BAO Xian-ming, GU Dong-xiang, WU Ting-ting, <i>et al.</i> (2070)
<i>In Situ</i> High-Resolution Analysis of Labile Phosphorus in Sediments of Lake Chaohu	LI Chao, WANG Dan, YANG Jin-yan, <i>et al.</i> (2077)
Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon Stable Isotope of Shibing Dolomite Karst Area in Guizhou Province	XIAO Shi-zhen, LAN Jia-cheng, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2085)
Stable Isotope Characteristics in Different Water Bodies in Changsha and Implications for the Water Cycle	LI Guang, ZHANG Xin-ping, ZHANG Li-feng, <i>et al.</i> (2094)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes of Soil Water in the Water Source Area of Yuanyang Terrace	ZHANG Xiao-juan, SONG Wei-feng, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2102)
Performance of Grass Swales for Controlling Pollution of Roadway Runoff in Field Experiments	HUANG Jun-jie, SHEN Qing-ran, LI Tian (2109)
Performance Study of Bromochloroacetonitrile Degradation in Drinking Water by Fe/Cu Catalytic Reduction	DING Chun-sheng, MA Hai-long, FU Yang-ping, <i>et al.</i> (2116)
Catalytic Degradation of Diclofenac Sodium over the Catalyst of 3D Flower-like α -FeOOH Synergized with H ₂ O ₂ Under Visible Light Irradiation	XU Jun-ge, LI Yun-qin, HUANG Hua-shan, <i>et al.</i> (2122)
Degradation of Organic Sunscreens 2-hydroxy-4-methoxybenzophenone by UV/H ₂ O ₂ Process: Kinetics and Factors	FENG Xin-xin, DU Er-deng, GUO Ying-qing, <i>et al.</i> (2129)
Photocatalytic Degradation of Perfluorooctanoic Acid by Pd-TiO ₂ Photocatalyst	LIU Qing, YU Ze-bin, ZHANG Rui-han, <i>et al.</i> (2138)
Efficient Photolysis of Acid Orange 7 Using Low-frequency Electrodeless Lamp	WU Peng, WU Jun, GAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (2147)
Degradation of 3,4-Dichlorobenzotrifluoride by Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ Heterogeneous Fenton-Like Systems	SUN Zheng-nan, YANG Qi, JI Dong-li, <i>et al.</i> (2154)
Preparation of Coated CMC-Fe ⁰ Using Rheological Phase Reaction Method and Research on Degradation of TCE in Water	FAN Wen-jing, CHENG Yue, YU Shu-zhen, <i>et al.</i> (2161)
Degradation Mechanism of 4-Chlorophenol on a Pd-Fe/graphene Multifunctional Catalytic Cathode	QI Wen-zhi, WANG Fan, WANG Hui, <i>et al.</i> (2168)
Removal Kinetics and Mechanism of Aniline by Manganese-oxide-modified Diatomite	XIAO Shao-dan, LIU Lu, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (2175)
Adsorption Characteristics of Nitrate and Phosphate from Aqueous Solution on Zirconium-Hexadecyltrimethylammonium Chloride Modified Activated Carbon	ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2185)
Removal Congo Red from Aqueous Solution Using Poly (AM-co-DVB)	ZHANG Luan-luan, LIAO Yun-wen, GAO He-jun, <i>et al.</i> (2195)
Energy Consumption Comparison and Energy Saving Approaches for Different Wastewater Treatment Processes in a Large-scale Reclaimed Water Plant	YANG Min, LI Ya-ming, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (2203)
Transformation Regularity of Nitrogen in Aqueous Product Derived from Hydrothermal Liquefaction of Sewage Sludge in Subcritical Water	SUN Yan-qing, SUN Zhen, ZHANG Jing-lai (2210)
Start-up Performance of ANAMMOX Enrichment with Different Inoculated Sludge in Anaerobic Baffled Reactor	ZHANG Hai-qin, WANG Fan-fan, LI Yue-han, <i>et al.</i> (2216)
Influencing Factors for Hydrolysis of Sewage Sludge Pretreated by Microwave-H ₂ O ₂ -OH Process	JIA Rui-lai, WEI Yuan-song, LIU Ji-bao (2222)
Enrichment and Characterization of a Denitrifying Bacteria Consortium from Lihe River's Sediment	YONG Jia-jun, CHENG Xiao-ying (2232)
Investigation for Filamentous Bacteria Community Diversity in Activated Sludge Under Various Kinds and Concentration Conditions of Antibiotics	WANG Run-fang, WANG Qin, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2239)
Isolation and Identification of Petroleum Degradation Bacteria and Interspecific Interactions Among Four <i>Bacillus</i> Strains	WANG Jia-nan, SHI Yan-yun, ZHENG Li-yan, <i>et al.</i> (2245)
Effects of Dissimilatory Reduction of Goethite on Mercury Methylation by <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1	SI You-bin, SUN Lin, WANG Hui (2252)
Effect of Root Iron Plaque on Norfloxacin Uptake by Rice	MA Wei, BAO Yan-yu (2259)
Effects of Tillage on Soil Respiration and Root Respiration Under Rain-Fed Summer Corn Field	LU Xing-li, LIAO Yun-cheng (2266)
Seasonal Provincial Characteristics of Vertical Distribution of Dust Loadings and Heavy Metals near Surface in City	LI Xiao-yan, ZHANG Shu-ting (2274)
Characteristics of Phthalic Acid Esters in Agricultural Soils and Products in Areas of Zhongshan City, South China	LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (2283)
Variations and Influencing Factors of Oral Bioaccessibility of Polybrominated Diphenyl Ethers in Soils Using an <i>In-vitro</i> Gastrointestinal Model	ZHANG Yun-hui, LIU Wei-jian, CHENG Fang-fang, <i>et al.</i> (2292)
Impacts of Biochar Input on Mineralization of Native Soil Organic Carbon	CHEN Wei, HU Xue-yu, LU Hai-nan (2300)
Effects of Remedies on the Remediation of Typical Pb and Zn-contaminated soil in Huanjiang, Guangxi	ZENG Wei-quan, SONG Bo, YUAN Li-zhu, <i>et al.</i> (2306)
Mechanism Study of the Smectite-OR-SH Compound for Reducing Cadmium Uptake by Plants in Contaminated Soils	ZENG Yan-jun, ZHOU Zhi-jun, ZHAO Qiu-xiang (2314)
Land Use Pattern Change and Regional Sustainability Evaluation of Wetland in Jiaogang Lake	YANG Yang, CAI Yi-min, BAI Yan-ying, <i>et al.</i> (2320)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年6月15日 第36卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 6 Jun. 15, 2015

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: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行