

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)
五氯酚对稀有鮐鲫卵黄蛋白原及 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)	

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*

(郑州大学水利与环境学院, 郑州 450001)

摘要: 用次毫米过滤(sub-millifiltration, SMF)组件将生物处理系统内的污泥分为高浓度区和低浓度区,使高浓度区保持大量污泥,强化对有机物的去除,使低浓度区污泥浓度满足膜分离的要求。主要验证了小回流比(R 为 0.5、1.0、1.5、2.0)条件下污泥浓度分区的效果,考察了采用 SMF 组件后,系统对 COD 的去除效果,并将各小回流比条件下 A、B 两区污泥浓度的理论值和实测值做比较。结果表明,在小回流比条件下可实现污泥浓度分区,低浓度区的 MLSS 在 $9 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,高浓度区的 MLSS 在 $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上;系统的 COD 平均去除率超过 90%; A、B 两区 MLVSS 的理论值与实测值具有相关性。

关键词: 次毫米过滤; 污泥; 浓度分区; 回流比; 理论值; 实测值

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-1923-07

Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition

SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, XING Chuan-hong

(School of Water Conservation and Environmental Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Using sub-millifiltration (SMF) module get the sludge of the system divide into high concentration part and low concentration part, in order to make the high concentration part retain activated sludge to strengthen removal rate of organics and the low concentration part meet the need of MBR. Discussing the sludge concentration partition effect under the conditions of small reflux ratio(R 0.5, 1.0, 1.5, 2.0), In addition, investigating the COD removal efficiency of the system with SMF Module, comparing the measured and theoretical value of the MLVSS at each small reflux ratio. Results show that: the method of sludge concentration partition at small reflux ratio condition is feasible, the MLSS of the low concentration part is below $9 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ and the high concentration part is above $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; average removal rate of COD is above 90%; measured value of the two part is related to theoretical value.

Key words: millifiltration; sludge; concentration partition; reflux ratio; theoretical value; measured value

与传统活性污泥法相比,膜生物反应器具有很多优点,被认为是最具有发展前景的污水处理与回用技术之一^[1]。由于要保持反应器内适宜的污泥浓度以及缓解膜污染问题,膜生物反应器对曝气池的污泥浓度要求为 $5 \sim 10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[2]。如何实现维持处理系统高污泥浓度,减少污泥排放,使污水处理系统长期稳定高效地运行,同时又不影响膜生物反应器的处理效果,有必要采用一种方法将生物处理系统内的污泥按浓度分为高浓度区和低浓度区。

次毫米过滤(sub-millifiltration, SMF)组件为过滤面孔径范围是 $0.01 \sim 1 \text{ mm}$ 的材料制成的组件。污水生物处理系统的污泥粒径分布在几 μm 到几百 μm ^[3]之间,恰好属于次毫米过滤的范围,SMF 组件的应用或许是为实现污泥浓度分区的一个方法。Kiso^[4]、范彬^[5]、熊丽^[6]和薛念涛^[7]等分别用结合 0.1 mm 孔径的尼龙网、筛绢为基材制成的 SMF 组件的反应装置代替膜反应器处理城市污水,表明 SMF 组件可有效地阻挡固体悬浮物(SS);同时系统抗冲击负荷能力强, COD 去除率高,出水基本在 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下;筛绢组件的通量较大,钢丝网组件

强度较高,2 种组件出水水质相差不大。考虑系统长期稳定运行,以及材料廉价、强度高、不易污染等特点,本试验采用钢丝网制成的 SMF 组件来实现污泥浓度分区。

李明明等^[8]推导了结合 SMF 组件的污泥浓度分区系统中的营养物质与污泥浓度的关系,分析了两区污泥浓度变化规律,从理论上说明用 SMF 组件进行污泥浓度分区可行。并对 SMF 组件用于污泥浓度分区在不同温度时的最佳孔径范围以及分区验证做了小试研究^[9],但关于用 SMF 组件进行污泥浓度分区后系统对 COD 的强化去除率以及两区污泥浓度理论值与实测值的对比分析方面还尚鲜见报道。

本研究采用 SMF 组件将生物处理系统内的污泥按浓度人为分区,使高浓度区保持大量污泥,强化对有机物的去除,使低浓度区污泥浓度满足膜分离

收稿日期: 2011-08-01; 修订日期: 2011-10-27

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07210-001-001)

作者简介: 史思(1985~),女,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制理论与技术, E-mail: shisi_444@163.com

* 通讯联系人, E-mail: chxing@zzu.edu.cn

的要求. 探讨小回流比 (R 为 0.5、1.0、1.5、2.0) 条件下污泥浓度分区的效果, 考察采用 SMF 组件后, 系统对 COD 的强化去除效果, 并将各小回流比条件下污泥浓度的实测值和理论值做比较.

1 材料与方法

1.1 试验用水

表 1 模拟生活污水成分/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Components of synthetic domestic wastewater/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$									
主要成分	葡萄糖	酵母膏	KH_2PO_4	$\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	NH_4Cl	CaCl_2	NaHCO_3	$\text{MnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	FeSO_4
含量	720 ± 10	80 ± 2.5	14	24	60 ± 2	18	24	6	0.3

表 2 微量元素浓缩液组成/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Components of the trace elements mixture/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$								
微量元素	H_3BO_3	$\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	$\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	KI	$\text{MnCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$
含量	0.15	0.15	0.03	1.5	0.03	0.12	0.06	0.12

1.2 试验装置

反应器由有机玻璃制成, 中间设挡板分隔为缺氧 A 区和好氧 B 区, 底部相通, 容积分别为 6 L 和 12 L (图 1). A 区底部设有气体搅拌装置, 并使 SMF 组件表面形成错流, 对表面污染进行控制. SMF 组件为不锈钢材质, 孔径 0.48 mm, 组件悬置 A 区中. B 区底部设曝气装置保证 B 区的供氧量. A、B 区侧壁设取样口.

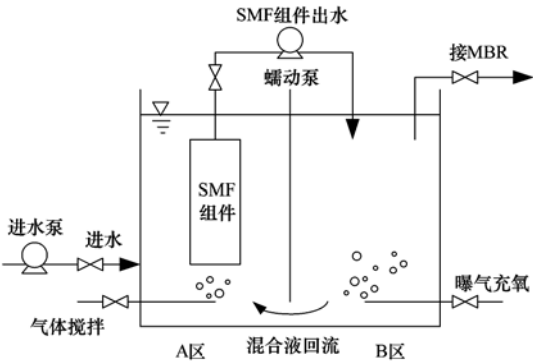


图 1 试验装置示意

Fig. 1 Experimental device scheme

原水在进水泵作用下从 A 区底部进入, 与 A 区的活性污泥混合液充分混合. 在蠕动泵的作用下抽取 A 区低浓度混合液到 B 区, 在大气压力作用下, B 区底部混合液回流至 A 区, B 区通过 MBR 出水. 试验过程保持进出水流量 $Q=1\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, 水力停留时间 $\text{HRT}_\text{A}=6\text{ h}$, $\text{HRT}_\text{B}=12\text{ h}$ 不变.

1.3 监测方法

改变系统的回流比为 0.5、1.0、1.5、2.0, 使系

进水为模拟高浓度生活污水, 其 COD 和氨氮浓度分别为 $950\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右. 主要成分见表 1 和表 2, 使用时将表 1 与表 2^[10] 成分按 1 000:1 混合使用.

试验接种污泥取自郑州市某城市污水处理厂回流污泥, 污泥经沉淀压缩后按污泥浓度 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 投泥接种.

统在不同回流比下达到稳定运行. 从反应装置内取样测定 A 区和 B 区的 MLSS ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 取 30 min SMF 组件出水混合均匀测 MLSS ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). 测定进水、SMF 组件出水、B 区上清液 (混合液静沉 30 min)、出水的 COD ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

COD 和 MLSS 的监测按照国家标准^[11], COD 用重铬酸钾法 (GB 11914-89) 测定, MLSS 用重量法 (GB 11901-89) 测定.

2 结果与讨论

2.1 各回流比条件下两区 MLSS 变化

在每个回流比条件下, 每天监测 A、B 两区以及 SMF 组件出水的污泥浓度. 如图 2 所示, 在整个运行期间, A 区的 MLSS 在 $20.4\sim 31.6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 平均为 $26.8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 反应系统中积聚了大量的活性污泥; B 区的 MLSS 在 $4.9\sim 8.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 平均为 $6.54\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 在膜组件分离作用的污泥浓度范围. SMF 组件出水的 MLSS 在 $1.8\sim 4.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 平均为 $3.27\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. 用处理系统结合 SMF 组件的方法可达到污泥浓度分区作用.

在同一回流比时, A 区的 MLSS 受总污泥量和 SMF 组件出水污泥浓度的影响, 在一定的范围内波动. 随回流比增加 A 区的 MLSS 并没有明显的上升或下降趋势. 较高的污泥浓度说明系统中积聚了大量的微生物, 同时也累积了部分难降解物质, 大量微生物有利于强化对有机物的去除, 但难降解物质不利于微生物的生长. 系统在长期运行期间污泥浓度并没有持续上升, 有机物的去除率也没有显著下降,

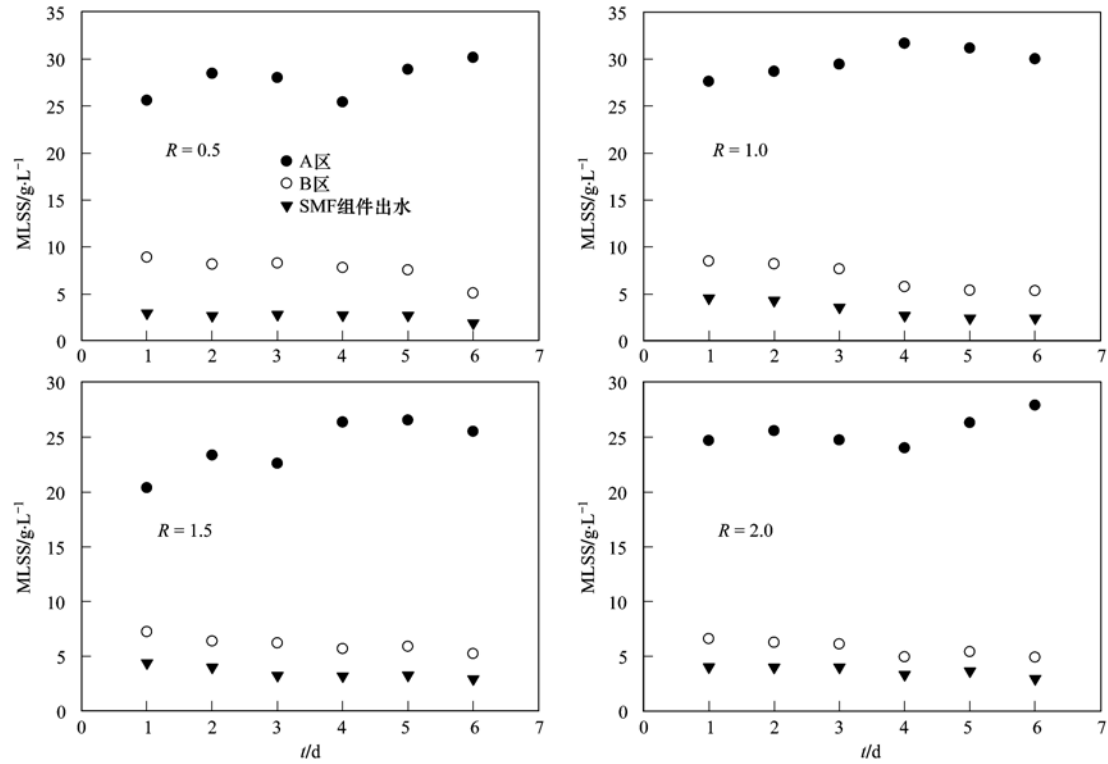


图2 不同回流比下 MLSS 随运行时间变化

Fig. 2 MLSS variation with time at different reflux ratios

说明高污泥浓度的优势大于负面影响。

B 区的 MLSS 随回流比的增加而降低,回流比 R 从 0.5 增至 2.0 时的 MLSS 平均值依次为 7.59、6.76、6.10 和 5.69 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。当回流比增大时,由 A 区通过 SMF 组件进入 B 区的水量增大,B 区混合液更新的速度加快,而进出水量不变,所以 B 区的 MLSS 会随回流比的增大而降低。控制 SMF 组件出水污泥浓度以及回流比是控制 B 区的污泥浓度的关键。同一回流比时,B 区的 MLSS 随运行时间的增加有下降趋势。

SMF 组件出水 MLSS 随回流比的增加而升高:回流比 R 从 0.5 增至 2.0 时的 MLSS 平均值依次为 2.61、3.30、3.51 和 3.66 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。 R 为 2.0 时,SMF 组件的通量达到 $115\text{ L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,一般超微滤膜的通量为 $10\sim20\text{ L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ ^[12],SMF 组件的通量约为超微滤膜通量的 5~10 倍。

李明明等^[8]对污泥浓度分区技术的理论分析表明:在污泥分区成立的条件下,B 区的 MLSS 随着 R 值的增大而降低,随着 SMF 组件出水 MLSS 的升高而增大,与本试验研究的结果一致。李明明^[9]在相同温度条件下对 SMF 组件性能的研究,在 20℃ 连续运行时 SMF 组件的平均通量为 $140\text{ L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,组件出水 MLSS 为 $2.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,此通量

略高于本试验 R 为 2.0 时的通量,说明 R 还可再增大,此平均组件出水 MLSS 略低于本试验的平均值,由于本试验进水量较低,且控制 B 区的 MLSS < 10 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,所以组件出水 MLSS 较高。

2.2 系统平均污泥浓度的变化

将测得的 B 区污泥浓度乘以有效容积加上 B 区污泥浓度乘以有效容积再除以总有效容积,可得系统的平均污泥浓度。如图 3 所示,系统平均 MLSS 在 11~15 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,平均为 13.3 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。传统曝气池污泥浓度为 1~3 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,完全混合型反应器污泥浓度为 3~6 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[13],MBR 反应器污泥浓度为 5~8 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[14]。由于试验期间室内温度适宜(20~25℃ 左右),试验初期系统污泥增长速度较快,总泥量随时间的变化开始有一个上升的趋势,试验期间不排泥,回流比是 0.5 和 1.0 时,系统污泥浓度在 14

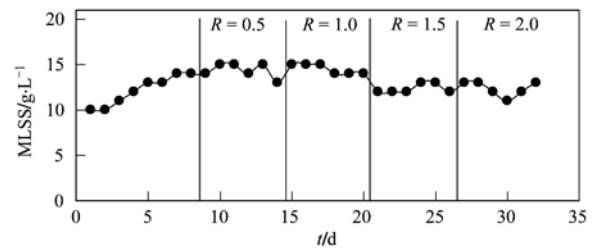


图3 系统 MLSS 随运行时间变化

Fig. 3 MLSS variation with time of the whole system

$\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右波动,第12 d(回流比1.0的第6 d)由于B区的曝气管堵塞,修理损失了一部分泥,之后污泥浓度稳定在 $13\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右。

2.3 各回流比下系统的处理效果

进水 COD 为配水后测得的 1 d 内平均进水 COD, SMF 组件出水即进入 B 区的 COD(A 区联合 SMF 组件去除后), B 区上清液为混合液沉淀 30 min 上清液。

COD 的变化情况如图 4, 进水 COD 在 $820 \sim$

$1\,053\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,平均为 $951\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,反应器对 COD 的平均总去除率 $>90\%$ 。组件出水 COD 在 $50 \sim 160\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,平均为 $112\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, A 区结合 SMF 组件对 COD 的平均去除率在 86% 以上,说明进水的大部分 COD 在 A 区以及 SMF 组件的截留作用下被去除,减轻了后续处理的负荷。A、B 两区累积去除率在 89% ~ 94%, 平均去除率 92%, 即使不结合膜组件出水,系统的处理效果依然良好。

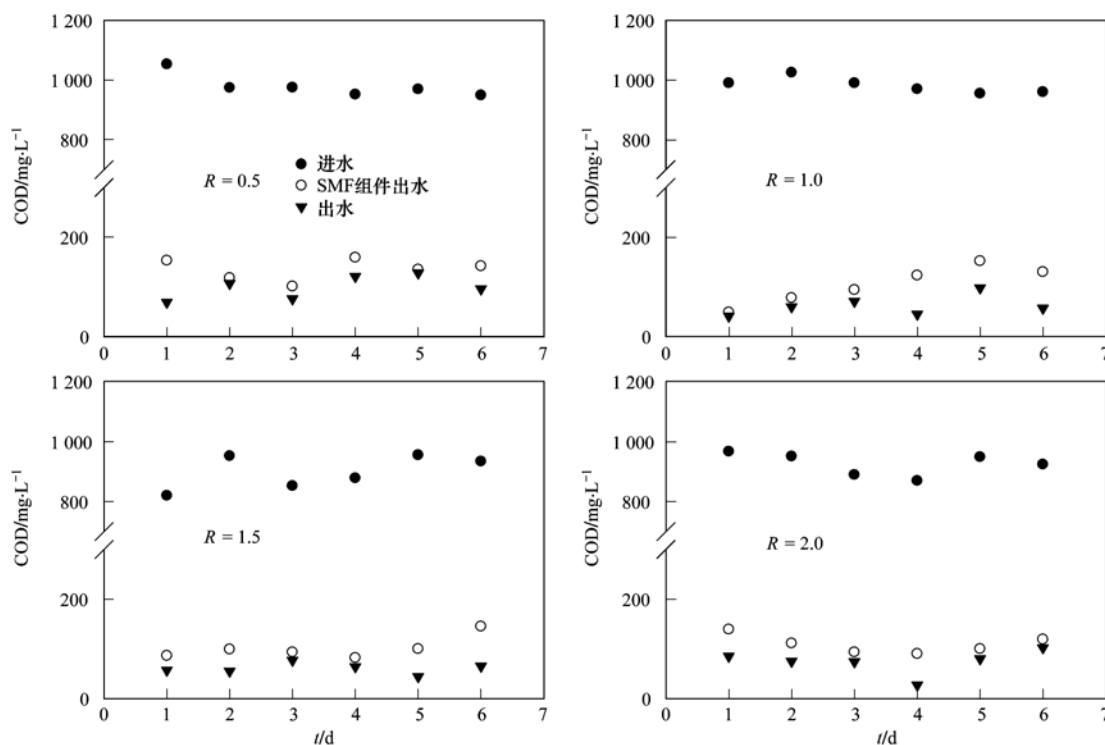


图 4 不同回流比下 COD 随运行时间变化

Fig. 4 COD variation with time at Different reflux ratios

在不同的回流比条件下, A 区联合 SMF 组件去除率以及反应器总去除率除了在 $R = 0.5$ 时稍低外,其余都相差不大。在加大回流比时,并没有影响系统 COD 的去除率。本试验结果回流比是 1.0 时系统的处理效果最好, COD 去除率平均为 93.67%。

本试验是使 A 区处于厌、缺氧状态,理论上厌、缺氧联合好氧可以达到脱氮的效果,增大回流比有利于提高氮的去除率。

系统平均的 COD 容积负荷为 $2.56\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, B 区 COD 容积负荷平均只有 $0.35\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 在使用了 SMF 组件后 B 区的 COD 容积负荷大为减轻。在膜生物反应器处理废水的研究中, COD 容积负荷可达到 $4\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 以上^[14]。将本处理系统与膜生物反应器相结合,可处理高浓

度废水或者有效降低反应器的容积。

熊丽等^[6]在 SMF 组件用于动态膜反应器处理生活污水的试验中, 组件出水 COD 平均为 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 主要目的为用动态膜代替膜组件出水。本试验 SMF 组件出水 COD 平均为 $112\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 且采用 SMF 组件的主要目的不是去除 COD, 而是为了达到污泥浓度分区并使高污泥浓度区分担一部分的 COD 负荷。

2.4 污泥浓度理论值与实测值的对比分析

对 A 区和 B 区微生物量以及营养物质做物料衡算^[8], 图 5 为物料衡算简图, 推导公式如下。

$$X_B = \frac{Y_G[(1+R)c_{A,B} - Rc_B - c_e] + (1+R)X_{A,B}}{R + bT_B}$$

(1)

$$X_A = \frac{Y'_G [c_i + Rc_B - (1 + R)c_{A,B}] - (1 + R)X_{A,B} + RX_B}{b'T_A} \quad (2)$$

图 5 和式中 Q 、 Q_1 、 Q_2 分别表示进出水、SMF 组件出水、B 区回流至 A 区污泥的流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$); X_i 、 $X_{A,B}$ 、 X_A 、 X_B 、 X_e 分别表示进水、SMF 组件出水、A 区、B 区、出水的微生物浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); c_i 、 $c_{A,B}$ 、 c_B 、 c_e 分别表示进水、SMF 组件出水、B 区污泥上清液、出水的 COD 浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); T_A 和 T_B 表示 A 区和 B 区的水力停留时间 (d); Y_G 和 Y'_G 表示 B 区和 A 区的理论产率系数 [$m(\text{MLVSS})/m(\text{COD})$]; b 、 b' 表示 B 区和 A 区的衰减常数 (d^{-1}); R 表示 B ~ A 区的污泥回流比; V_A 和 V_B 表示 A 区和 B 区的有效体积 (m^3); 其中 $Q_1 = (R + 1)Q$; $Q_2 = RQ$; 理想条件下: $X_i = 0$; $X_e = 0$.

将式(1)、(2)整理可得两区污泥浓度与回流比的关系.

$$X_B = \frac{[Y_G(c_{A,B} - c_e) + X_{A,B}](1 - bT_B)}{R + bT_B} + \frac{Y_G(c_{A,B} - c_B) + X_{A,B}}{R + bT_B} \quad (3)$$

$$X_A = \frac{[Y'_G(c_B - c_{A,B}) + X_B - X_{A,B}]}{b'T_A} R + \frac{Y'_G(c_i - c_{A,B}) - X_{A,B}}{b'T_A} \quad (4)$$

由式(3)可知,在其它条件不改变的情况下,B 区的污泥浓度会随回流比 R 的增大而减小,与试验所得结果一致.由式(4)可知,在其它条件不改变的情况下,SMF 组件出水的污泥浓度和回流比 R 都会对 A 区的污泥浓度有影响,所以 R 增大,对 A 区污泥浓度的影响无法由本式确定,实际试验结果 A 区污泥浓度随 R 增大无明显变化.

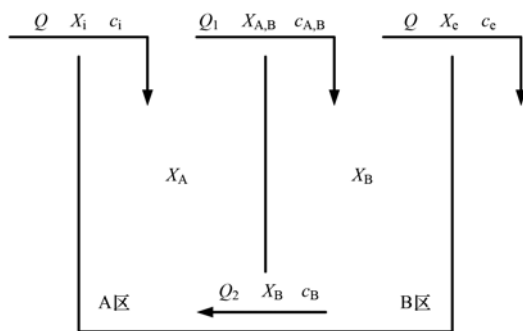


图 5 物料衡算简图

Fig. 5 Material balance brief fig

取好氧区的产率系数和衰减常数^[13] $Y_G = 0.4$ 、 $b = 0.06$; 缺氧区的产率系数和衰减常数 $Y'_G = 0.5$ 、 b'

$= 0.06$. 取污泥浓度 $X_{A,B}$ 、 X_A 、 X_B 为相应测定的 MLSS 的 75%, 将已确定的参数代入公式(1)、(2)求得本试验各组数据的理论微生物浓度,并将理论值与实测值作比较,如图 6.

X_i 表示理论值, X_p 表示实测值, ΔX 表示理论值与实测值的绝对差, dX 表示理论值与实测值的相对差, 即:

$$\Delta X = |X_p - X_i| \quad (5)$$

$$dX = \frac{|X_p - X_i|}{X_p} \quad (6)$$

由图 6 可知, B 区 MLVSS 的理论值和实测值吻合基本良好, 且实测值与理论值有比较一致的上下波动性. 绝对差在 $9 \sim 644 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 平均为 $271 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 相对差 $0.002 \sim 0.138$ 之间, 平均为 0.058 .

A 区 MLVSS 的理论值与实测值吻合基本良好, 且变化有一定的相关性, 表现在图 6 中实测值与理论值有一致的上下波动性. 绝对差在 $45 \sim 2756 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 平均为 $1331 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 相对差在 $0.002 \sim 0.127$ 之间, 平均为 0.067 . B 区的 MLVSS 理论值与实测值绝对偏差较大.

MLVSS 理论值与实测值存在偏差的原因主要是以下 3 个方面.

(1) 试验中改变回流比条件后, 会影响系统的一系列运行状态, 比如溶解氧、COD 浓度、营养物质浓度的改变, 从而影响微生物对能源物质和营养物质的分解利用, 所以微生物对营养物质的去除上有滞后性, 反映在试验中就是测得的 COD 变化情况有滞后性, 从而使得由 COD 以及污泥浓度推导出的理论值有滞后性.

(2) 反应器设计为完全混合状态, 但实际取样过程中可能存在浓度不均的问题.

(3) 污泥的产率系数以及衰减系数随微生物所处环境(温度, 溶解氧等)有稍微的改变, 但无法在公式中体现.

如表 3 所示, 回流比从 $0.5 \sim 2.0$, 实测值和理论值的平均值均有降低的趋势. 当回流比增大而进水流量不变时, B 区中污泥混合液更新速度加快, 所以随着回流比的增大, B 区的污泥浓度有下降的趋势. 李明明等^[8]对于污泥浓度分区技术的理论研究提出: 在 SMF 组件出水污泥浓度不变时, B 区的污泥浓度会随 R 的增大而降低. 与本试验结果较一致. 另外, 他对两区污泥浓度理论值与实测值的对比结果^[9]为 A、B 两区微生物浓度的理论值和实测值吻合基本良好, 但也存在一些偏差较大的天数, 主要

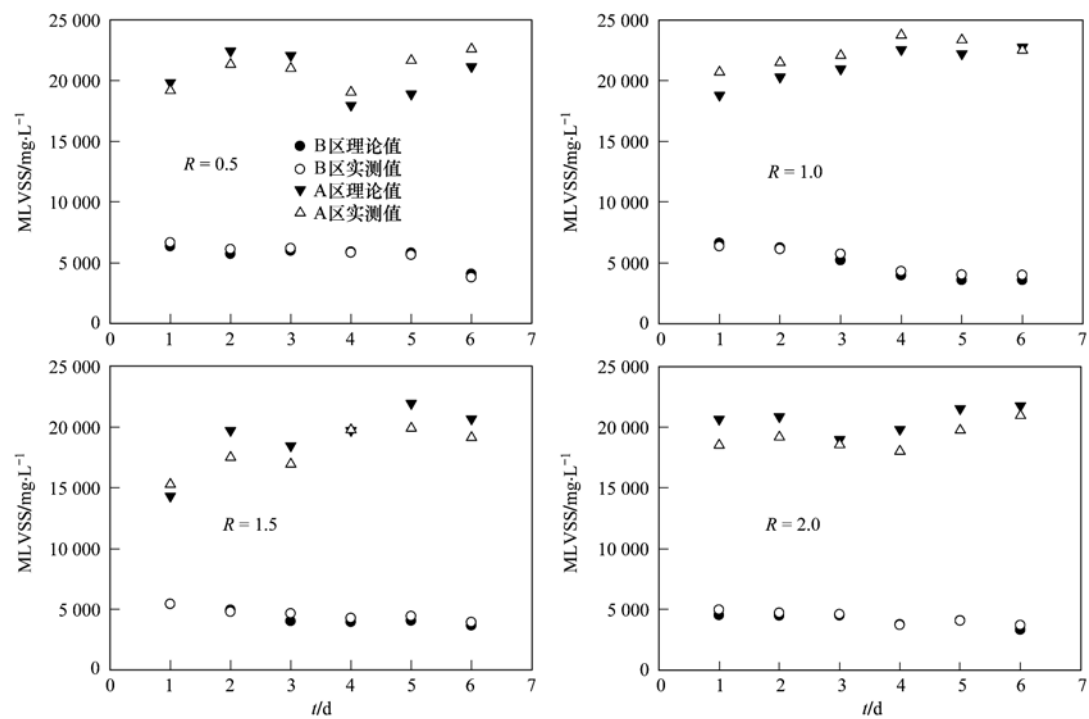


图 6 两区 MLVSS 理论与实测值随时间变化

Fig. 6 Theoretical and measured data of MLVSS variation with time in the two part

原因是活性污泥中的微生物受增殖速度和内源呼吸自身分解速度的限制,对变化的进水水质的反映有一个滞后,当进水 COD 突然增大(或减小)时,反应器内的微生物浓度不能立即达到理论值,造成实测值在短期内会低于(或高于)理论值.

表 3 各回流比 MLVSS 平均理论与实测值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
Table 3 Theoretical and measured data of MLVSS at Different reflux ratios/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

回流比	$R=0.5$	$R=1.0$	$R=1.5$	$R=2.0$
平均理论值	5 703	4 887	4 071	4 037
平均实测值	5 840	5 421	4 666	4 428

SMF 组件有诸多的优点,但是用它来代替膜组件进行污水处理还缺乏稳定性和可靠性. 在 SMF 组件外部还未形成动态膜或者动态膜形成后由于薄厚不均出现“漏洞”时,组件没有良好的截留能力,会导致出水 SS 增大^[6,15]. 利用 SMF 组件过滤性能的优点,避免出水不稳定的缺点,用 SMF 组件作为污泥的分离装置,再用超微滤膜强化出水,一方面可保护超微滤膜,避免膜的快速污染,另一方面保持系统中存在大量活性污泥,使水力停留时间与污泥停留时间相分离,提升污泥停留时间,减少剩余污泥排放甚至接近污泥零排放.

3 结论

(1) 本研究采用 SMF 组件,将生物处理系统内

的污泥分为高浓度区和低浓度区,高浓度区保持大量污泥,强化了对有机物的去除,低浓度区污泥浓度满足了膜分离的要求. 在小回流比(R 为 0.5、1.0、1.5、2.0)条件下,污泥浓度分区达到了预期的效果,高污泥浓度区 MLSS 高达 $20\sim30\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,低污泥浓度区 MLSS 维持在 $5\sim9\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$.

(2) 试验运行期间系统平均 MLSS 在 $11\sim15\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,平均为 $13.3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$.

(3) 高浓度污泥区 COD 的平均去除率在 80% 以上,系统的 COD 去除率在 90% 以上. 系统平均的 COD 容积负荷为 $2.56\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$.

(4) A、B 两区污泥浓度 MLVSS 的实测值与理论值有相关性. 回流比从 0.5 增大到 2.0 时,低污泥浓度区的平均实测与理论 MLVSS 有降低的趋势.

参考文献:

[1] 刘锐,黄霞,刘若鹏,等. 膜-生物反应器和传统活性污泥工艺的比较 [J]. 环境科学, 2001, 22(3): 20-24.
[2] Xing C H, Yamamoto K. Membrane bioreactor at zero excess sludge: a dream or the reality? [A]. In: International Symposium on Membrane Technologies for Water and Wastewater Treatment [C]. Beijing, 2005. 152-160.
[3] Fuchs W, Resch C, Kernstock M, et al. Influence of operational conditions on the performance of a mesh filter activated sludge process [J]. Water Research, 2005, 39(5): 803-810.
[4] Kiso Y, Jung Y J, Ichinari T, et al. Wastewater treatment

- performance of a filtration bio-reactor equipped with a mesh as a filter material [J]. *Water Research*, 2000, **34**(17): 4143-4150.
- [5] 范彬,黄霞,文湘华,等. 动态膜—生物反应器对城市污水的处理 [J]. *环境科学*, 2002, **23**(6): 51-56.
- [6] 熊丽,濮文虹,杨昌柱,等. 动态膜生物反应器处理生活污水的特性 [J]. *化学与生物工程*, 2005, **22**(1): 31-33.
- [7] 薛念涛,黄霞,夏俊林. 自生态膜生物反应器处理城市污水的中试研究 [J]. *中国给水排水*, 2008, **24**(15): 20-23.
- [8] 李明明,崔燕平,邢传宏,等. 基于污泥浓度分区技术的理论研究 [J]. *安徽农业科学*, 2010, **38**(18): 9760-9763.
- [9] 李明明. 高浓度污泥分区机理及适用组件研制 [D]. 郑州: 郑州大学, 2010. 28-41.
- [10] 高方述. MBR 系统污泥形态对膜污染的影响研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2006. 6.
- [11] 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. 104-106.
- [12] 陈少华,郑祥,刘俊新. 重力出流式膜生物反应器的膜通量及膜污染控制研究 [J]. *环境科学*, 2006, **27**(12): 2518-2524.
- [13] 张自杰,林荣忱,金儒霖. 排水工程 [M]. (第四版). 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. 131.
- [14] 陈旭东,杨景亮,李再兴,等. 膜生物反应器处理废水的研究及应用 [J]. *河北工业科技*, 2004, **21**(1): 41-44.
- [15] 范彬,黄霞,文湘华,等. 微网生物动态膜过滤性能的研究 [J]. *环境科学*, 2003, **24**(1): 91-97.

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-cao, 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