

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

**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

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析..... 廖晓农, 张小玲, 王迎春, 刘伟东, 杜佳, 赵玲慧 (2031)

阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究 ..... 苗红妍, 温天雪, 王跃思, 刘子锐, 王丽, 兰中东 (2045)

上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究 ..... 包良满, 雷前涛, 谈明光, 李晓林, 张桂林, 刘卫, 李燕 (2052)

七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究 ..... 马娟娟, 李真 (2060)

冬季东海、南黄海中 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究 ..... 宋以柱, 张洪海, 杨桂朋 (2067)

大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价 ..... 徐姗姗, 李纯厚, 徐娇娇, 肖雅元, 林琳, 黄小平 (2075)

深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征 ..... 王鑫璇, 张鸿, 何龙, 沈金灿, 柴之芳, 杨波, 王艳萍 (2085)

表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析 ..... 孙玉川, 沈立成, 袁道先 (2091)

桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程 ..... 唐文魁, 陶贞, 高全洲, 毛海若, 姜光辉, 焦树林, 郑雄波, 张乾柱, 马赞文 (2099)

汾河源区不同景观带水文过程研究 ..... 杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 邹松兵 (2108)

北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征 ..... 郭高轩, 琚宜文, 翟航, 许亮, 沈媛媛, 纪轶群 (2114)

光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用 ..... 章艳红, 叶淑君, 吴吉春 (2120)

紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应 ..... 陈维梁, 高扬, 林勇明, 朱波, 徐亚娟, 于贵瑞, 吴承祯 (2129)

基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究 ..... 陆宇超, 毕孟飞, 李泽利, 沙健, 王玉秋, 钱丽萍 (2139)

镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价 ..... 周晓红, 李义敏, 周艺, 卫安平, 周广顺, 肖思思 (2148)

两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响 ..... 杨文斌, 李阳, 孙共献 (2156)

湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化 ..... 武晓飞, 李大鹏 (2164)

不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响 ..... 王尚, 李大鹏 (2171)

池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究 ..... 吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 赵峰, 谢从新, 张敏 (2178)

再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放 ..... 王晓慧, 毕春娟, 韩景超 (2185)

低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响 ..... 赵士波, 孙荣国, 王定勇, 王小文, 张成 (2193)

活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂 ..... 刘海龙, 张忠民, 赵霞, 焦茹媛 (2201)

准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学 ..... 刘玉海, 叶招莲, 文颖频, 毕承路 (2209)

AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究 ..... 涂勇, 刘伟京, 张耀辉, 徐军, 唐敏, 陈勇, 白永刚 (2216)

镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究 ..... 杨春艳, 陈复彬, 赵慧, 常自强, 章竹君 (2223)

微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究 ..... 刘春, 年永嘉, 张静, 张明, 张磊, 龚鹏飞, 肖太民, 李星 (2230)

聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究 ..... 唐丹琦, 王娟, 郑天龙, 刘建国, 汪群慧 (2236)

丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响 ..... 侍宽, 薛罡, 高品, 吴凡 (2241)

聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化 ..... 周振, 胡大龙, 乔卫敏, 陈冠翰, 蒋玲燕, 李震, 麦穗海 (2249)

鄱阳湖持久性有机污染物 (POPs) 长距离传输潜力模拟 ..... 弓晓峰, 向洪锐, 陈春丽, 周文斌, 王佳佳, 刘春英, 曾艳 (2256)

基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估 ..... 廖志恒, 孙家仁, 吴兑, 范绍佳, 任明忠, 吕家扬 (2264)

农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策 ..... 谭冰, 王铁宇, 李奇锋, 张海燕, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (2272)

渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价 ..... 王莎莎, 高丽荣, 田益玲, 朱帅, 张芹 (2281)

基于荧光传感器 F<sub>rex</sub> 的特性检测水质环境中生物毒性物质 ..... 赵巍, 汪钊, 蔡强, 欧文斌, 孟凡国 (2287)

对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放 ..... 张元春, 梁文艳, 赵远, 李飞贞, 曹敬灿, 胡绍杰 (2294)

基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育 ..... 赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 丁进锋, 徐嘉杰, 李树君 (2300)

酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究 ..... 刘莹, 王丽华, 郝春博, 李璐, 李思远, 冯传平 (2305)

河蚬 (*Corbicula fluminea*) 扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响 ..... 王雪, 赵大勇, 曾巾, 余多慰, 吴庆龙 (2314)

海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态 ..... 田琪, 王佳, 范晓蕾, 罗生军, 郭荣波, 邱艳玲 (2322)

DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响 ..... 吴义诚, 邓欢, 肖勇, 赵峰 (2328)

重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究 ..... 田江, 彭霞薇, 李霞, 孙雅君, 冯红梅, 江泽平 (2334)

1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性 ..... 王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 许培雅 (2341)

黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响 ..... 江玲, 杨芸, 徐卫红, 王崇力, 陈蓉, 熊仕娟, 谢文文, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (2349)

黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应 ..... 李玲, 仇少君, 陈印平, 赵西梅, 刘京涛, 陆兆华 (2358)

宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征 ..... 蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 黄懿梅 (2365)

长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响 ..... 张俊, 杨晓洪, 葛峰, 王娜, 焦少俊, 叶波平 (2374)

长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响 ..... 常同举, 崔孝强, 阮震, 赵秀兰 (2381)

伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价 ..... 赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 詹江渝, 杨剑虹 (2392)

江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价 ..... 张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 高抒, 高文华 (2401)

小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析 ..... 欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 耿晓君 (2411)

保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究 ..... 张赛, 王龙昌, 黄召存, 贾会娟, 冉春燕 (2419)

米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究 ..... 吴君君, 杨智杰, 翁发进, 刘小飞, 陈朝琪, 林伟盛, 王小红, 陈坦 (2426)

水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响 ..... 刘晓焯, 张洪, 李永峰 (2433)

《环境科学》征订启事 (2208) 《环境科学》征稿简则 (2400) 信息 (2084, 2200, 2229, 2391)

# 丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响

侍宽, 薛罡, 高品, 吴凡

(东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620)

**摘要:** 研究了丝状菌膨胀状态和正常污泥状态下无纺布生物反应器的污泥絮体形态、出水水质对比, 膜通量变化, 膜阻力分析和胞外聚合物 (EPS) 含量分析。结果表明, 膨胀污泥的平均粒径为 448.6  $\mu\text{m}$ , 正常污泥的平均粒径为 234.8  $\mu\text{m}$ ; 丝状菌膨胀状态下的平均 COD 去除率、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率、出水浊度分别为 90.1%、93.1%、1.33 NTU, 较之正常污泥状态下的 91.4%、97.0%、0.99 NTU, 丝状菌膨胀对 COD 去除几乎没有影响, 对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除有一定的抑制, 对出水浊度略有影响; 膨胀污泥状态和正常污泥状态下的平均膜通量衰减速率分别为 3.29  $\text{L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h}^2)^{-1}$ 、4.87  $\text{L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h}^2)^{-1}$ , 膨胀状态下的膜污染较轻, 膨胀状态下的膜污染以可逆污染为主, 正常状态下以不可逆污染为主, 优先发生可逆污染可以减少不可逆污染的发生, 从而减缓膜通量的下降; 正常污泥和膨胀污泥混合液中溶解性微生物产物 (SMP) 含量分别为 21.369  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、10.182  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 蛋白质/多糖 (P/C) 分别为 0.370、0.497, SMP 的总量与膜污染阻力有关系, P/C 与可逆污染所占的比例有关系, 混合液污泥的松散附着性 EPS 与膜污染的关系同 SMP 相似; EPS 含量较高的污泥更易于在膜表面累积, 并且累积于膜表面的 EPS 主要是蛋白质, 混合液污泥 EPS 总量、膜面污泥 EPS 以及它们的 P/C 都与膜表面可逆污染存在正相关性。

**关键词:** 无纺布生物反应器; 污泥膨胀; 生物处理; 膜污染; 胞外聚合物

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2241-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.06.028

## Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor

SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, WU Fan

(School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** Sludge flocs morphology and effluent qualities of nonwoven bioreactor during filamentous bulking and normal sludge status were compared. Flux variations, analysis of filtration resistances and extracellular polymer substances (EPS) contents during filamentous bulking and normal sludge status were studied. The results showed that the average particle size of bulking sludge flocs and normal sludge flocs was 448.6  $\mu\text{m}$  and 234.8  $\mu\text{m}$ , respectively. During the bulking sludge status, the average COD and  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  removal rate and effluent turbidity were 90.1%, 93.1% and 1.33 NTU, respectively, compared with 91.4%, 97.0% and 0.99 NTU during the normal sludge status. Filamentous bulking had little impact on COD removal, while it inhibited  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  removal to a certain extent and had slight impact on effluent turbidity. Average membrane flux decay rates during the bulking sludge status and the normal sludge status were 3.29  $\text{L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h}^2)^{-1}$  and 4.87  $\text{L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h}^2)^{-1}$ , respectively, and the fouling during bulking sludge status was slighter. Reversible fouling was the main fouling when sludge was bulking while irreversible fouling was the main fouling when the sludge was in normal status. The prior occurrence of reversible fouling could reduce irreversible fouling therefore slow down the flux decline. Soluble microbial products (SMP) contents in normal sludge mixed liquid and bulking sludge mixed liquid were 21.369  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  and 10.182  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , respectively, protein/polysaccharide (P/C) was 0.370 and 0.497, respectively, SMP gross was related to fouling resistance and P/C was associated with reversible fouling proportion. The relation between loosely bound EPS in mixed liquid sludge and membrane fouling was similar to SMP. Sludge with more EPS could accumulate on membrane more easily, and the EPS that accumulated on membrane was mainly protein. EPS gross in mixed liquid sludge, EPS in membrane surface sludge and their P/C all had positive correlations to reversible fouling.

**Key words:** nonwoven bioreactor; sludge bulking; biological treatment; membrane fouling; EPS

近年来,膜生物反应器 (MBR) 在废水处理及回用领域的应用日益增多,然而,MBR 膜组件易污染致使维护费用高成为阻碍 MBR 得到广泛应用的主要因素<sup>[1]</sup>。当前对于膜污染控制方法的研究主要集中在抗污染膜材料的开发<sup>[2,3]</sup>、优化反应器的运行条件<sup>[4,5]</sup>与改善混合液特性<sup>[6,7]</sup>这 3 个方面,研究开

发低成本、低工作压力的膜材料(如无纺布、纺织布、筛网)成为 MBR 研究的一个重要方向。价格低

收稿日期: 2013-10-11; 修订日期: 2013-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51178093); 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20120075110012)

作者简介: 侍宽 (1988 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: fellas@126.com

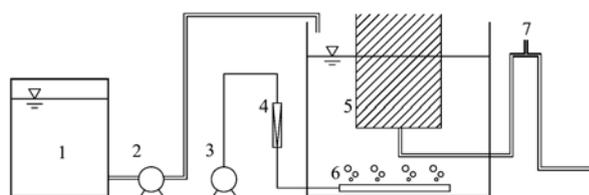
廉的无纺布材料具有大孔径,高孔隙率,在低压力下也能获得高膜通量的特点,显示出应用于开发新型 MBR 的巨大潜力<sup>[8]</sup>. MBR 由于用膜分离替代传统二沉池,具有不受污泥沉降性能及污泥膨胀问题影响的优点,但另一方面,污泥膨胀对污泥混合液黏度、Zeta 电位,污泥相对疏水性等有显著影响,因而会加剧膜污染<sup>[9]</sup>.

本研究中 MBR 采用无纺布材料结合跨膜压力最小化的溢流出水运行方式,通过研究这种新型无纺布生物反应器在正常污泥和丝状菌膨胀污泥两种状态下的污泥形态、出水水质对比,膜通量变化,膜阻力分析和 EPS 含量分析,考察丝状菌膨胀对新型无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

实验装置采用重力溢流式无纺布生物反应器(图1),有效容积 20 L. 反应器进水通过蠕动泵连续进水,出水依靠反应器内外液位差溢流排出. 膜组件采用聚乙烯无纺布袋,膜孔径 25  $\mu\text{m}$ ,反应器水力停留时间 8 h,膜通量 30  $\text{L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ ,微孔曝气装置置于反应器底部,曝气强度 6  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ ,反应器内污泥浓度控制在 6 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右,溶解氧控制在 3  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右,反应器内水温 20 $^{\circ}\text{C}$  左右. 实验原水采用人工配制的模拟生活污水(表1).



1. 原水箱; 2. 蠕动泵; 3. 空气泵; 4. 转子流量计;  
5. 无纺布膜组件; 6. 微孔曝气装置; 7. 出水三通管

图1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental device

表1 进水水质

Table 1 Influent water quality

主要成分	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	水质指标	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
葡萄糖	400	COD	286.03 ~ 365.61
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	75.7	$\text{NH}_4^+-\text{N}$	13.47 ~ 16.2
$\text{KH}_2\text{PO}_4$	14	pH 值	6 ~ 8
$\text{MgSO}_4$	75.7		
$\text{CaCl}_2$	3.2		
$\text{NaHCO}_3$	80		

### 1.2 分析方法

污泥形态采用光学显微镜(Olympus, CX31)观

察, COD 测定采用微波密封消解法,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  测定采用氨氮测定仪(北京双晖京承, CM-02N), MLSS 测定采用重量法(快速水分测试仪), 出水浊度测定采用浊度仪(Hach, HI88703), 通过重力自流法(出水水头 13.7 cm)测定最大膜通量, 用膜通量衰减速率来表征膜污染情况, 粒径分析采用激光粒度分析仪(Beckman Coulter, LS13320). EPS 提取采用超声波法<sup>[10]</sup>结合热提取法<sup>[11]</sup>提取, 离心后上清液经 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤后测定, 多糖含量的测定采用苯酚-硫酸法<sup>[12]</sup>, 以葡萄糖为标准样品, 蛋白质含量的测定采用改进的 Lowry 法<sup>[13]</sup>, 以牛白蛋白为标准样品, 用多糖和蛋白质含量总和来表征 EPS 的含量<sup>[14]</sup>.

膜阻力通过以下公式进行分析<sup>[15]</sup>:

$$R_t = R_m + R_f = R_m + R_{rf} + R_{irf} \quad (1)$$

式中,  $R_t$  为膜过滤总阻力,  $\text{m}^{-1}$ ;  $R_m$  为膜固有阻力,  $\text{m}^{-1}$ ;  $R_f$  为膜污染阻力,  $\text{m}^{-1}$ ;  $R_{rf}$  为可逆污染阻力, 即膜面泥饼层累积造成的阻力, 可通过水力冲刷去除,  $\text{m}^{-1}$ ;  $R_{irf}$  为不可逆污染阻力, 即膜孔内部堵塞造成的阻力, 不能通过水力冲刷消除,  $\text{m}^{-1}$ . 根据 Darcy 定律:

$$J = \frac{\Delta P}{\mu \cdot R} \quad (2)$$

可由膜通量计算得出膜阻力, 式中,  $J$  为膜通量,  $\text{L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ ;  $\Delta P$  为膜两侧压力差, Pa;  $\mu$  为透过液的黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ; 结合式(1)和(2), 得到:

$$R_t = \frac{\Delta P}{\mu \cdot J_t} \quad (3)$$

$$R_m = \frac{\Delta P}{\mu \cdot J_m} \quad (4)$$

$$R_{rf} = R_t - \frac{\Delta P}{\mu \cdot J_q} \quad (5)$$

$$R_{irf} = \frac{\Delta P}{\mu \cdot J_q} - R_m \quad (6)$$

式中,  $J_t$  为污染后的膜通量,  $J_m$  为新膜的膜通量,  $J_q$  为去掉膜面污泥后的膜通量.

## 2 结果与讨论

### 2.1 丝状菌膨胀的发生与污泥形态分析

本实验所用正常状态污泥及丝状菌膨胀污泥分别取自另一稳定运行无纺布生物反应器(有效容积 90 L)的不同时期, 接种污泥稳定运行 10 d 后进行水质指标及膜污染情况检测. 另一反应器前期污泥沉降性能良好, 未发生污泥膨胀[图2(a)]. 反应器后期温度较低, 低温对微生物的生长代谢有一定的影响<sup>[16]</sup>, 加上实验原水放置期间有机物有一定的腐

败变质现象,葡萄糖分解产生许多低分子有机酸,而且反应器内硝化细菌降解 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的过程中降低了反应器内的碱度,造成了反应器内 pH 值的降低,而低 pH 值有利于丝状真菌的生长,同时抑制其他适应正常 pH 值环境的微生物的生长<sup>[17]</sup>,故反应器后期发生了严重的丝状菌膨胀[图 2(b)].

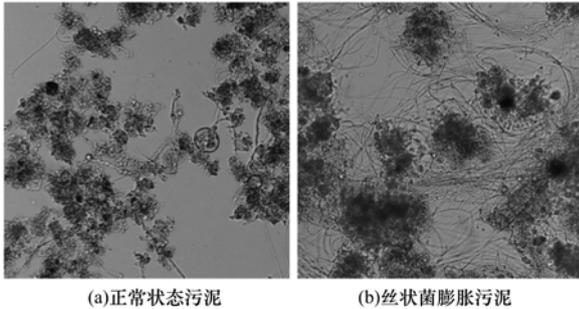


图 2 污泥颗粒显微镜照片(100×)

Fig. 2 Microscope photos of sludge flocs (100×)

对污泥颗粒进行粒径分析,由图 3 可以看出,发生丝状菌膨胀的污泥颗粒在  $d \geq 200 \mu\text{m}$  范围内的数量远远大于正常状态下的污泥,由图 2 可看出,丝状菌过度增殖产生的丝状结构为污泥颗粒的附着与聚集提供了有利的支撑骨架,污泥絮体与未膨胀状态下相比结构更加牢固,絮体更大. 污泥颗粒的平均粒径和中值粒径见表 2.

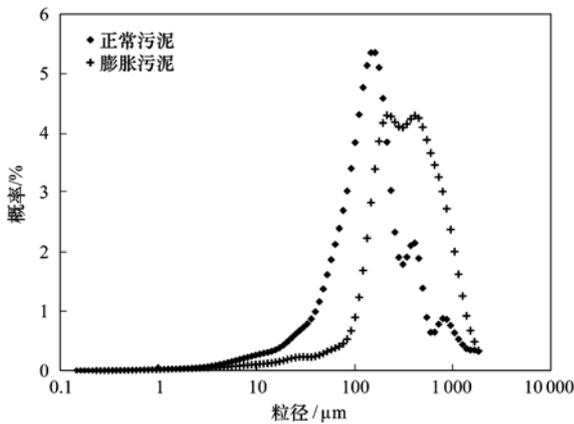


图 3 污泥颗粒的粒径分布

Fig. 3 Particle size distributions of sludge flocs

表 2 污泥颗粒的粒径

Table 2 Particle sizes of sludge flocs

类型	平均粒径/ $\mu\text{m}$	中值粒径/ $\mu\text{m}$
正常状态污泥	234.8	150.5
丝状菌膨胀污泥	448.6	346.3

## 2.2 丝状菌膨胀对处理效果的影响

### 2.2.1 COD 去除情况

由图 4 可以看出,正常污泥状态下无纺布生物反应器中上清液和出水的平均 COD 去除率分别为 86.5% 和 91.4%,实验期间上清液 COD 去除率降低,可能由于污泥活性较高,沉降性能有所下降,导致上清液中有细小的污泥颗粒悬浮;膜过滤出水 COD 比通过静置得到的上清液有所降低,证明无纺布膜对有机污染物有一定的截留作用,可提高出水水质. 丝状菌膨胀状态下无纺布生物反应器中上清液和出水的平均 COD 去除率分别为 87.8% 和 90.1%,出水 COD 略优于上清液 COD,但相差不大. 由于丝状菌大量繁殖,污泥絮体变大,对细小颗粒物质的吸附作用增强,故发生丝状菌膨胀后,污泥沉降性能恶化的同时,上清液中悬浮颗粒物有所减少,同时丝状菌比表面积大,在底物浓度相对较低的条件下对基质的亲和能力比菌胶团强<sup>[18]</sup>,故上清液 COD 与未发生膨胀时相比有所降低. 丝状菌膨胀状态下的出水 COD 去除率与正常污泥状态下相比,没有明显区别,说明丝状菌膨胀对无纺布生物反应器中 COD 的去除几乎没有影响.

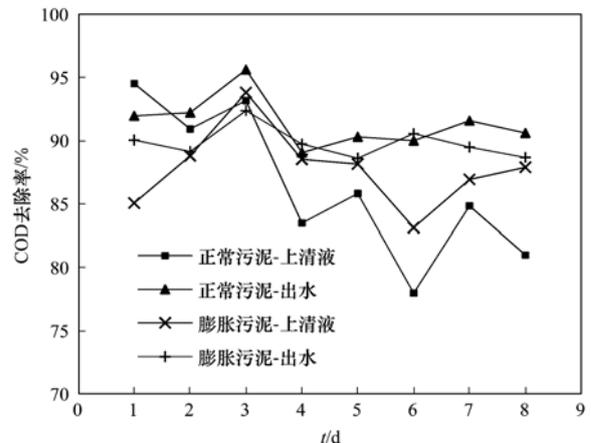


图 4 正常污泥和膨胀污泥状态下的 COD 去除情况

Fig. 4 COD removal during normal sludge and bulking sludge status

### 2.2.2 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除情况

从图 5 可以看出,正常污泥状态下无纺布生物反应器中上清液和出水的平均  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率分别达到 94.8% 和 97.0%,反应器中污泥混合液及膜出水对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  均有良好的去除效果,其中膜出水略优于上清液,证明通过无纺布膜组件的过滤对出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的浓度有一定的降低,可以优化出水水质. 丝状菌膨胀状态下无纺布生物反应器的上清液和出水平均  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率分别为 91.9% 和 93.1%,均低于正常污泥状态,可能由于在反应器同等曝气条件下,丝状菌膨胀时的溶解氧浓度略低于正常污泥状态,而溶解氧是影响丝状菌膨胀状态下脱氮效率的

关键因素<sup>[19]</sup>,丝状菌膨胀状态下硝化作用受到一定的抑制.

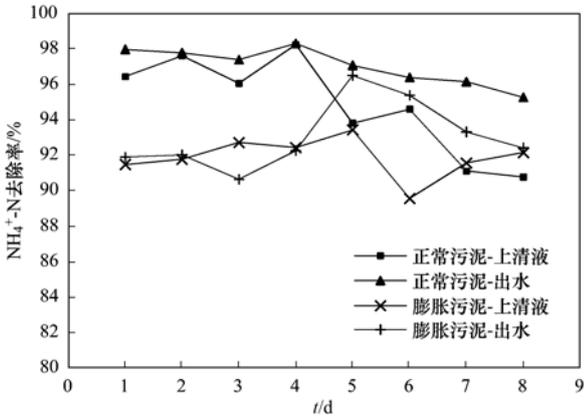


图 5 正常污泥和膨胀污泥状态下的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N去除情况

Fig. 5 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N removal during normal sludge and bulking sludge status

### 2.2.3 出水浊度情况

图 6 为正常污泥状态和丝状菌膨胀状态下无纺布生物反应器的出水浊度情况,正常污泥状态下平均出水浊度为 0.99 NTU,丝状菌膨胀状态下平均出水浊度为 1.33 NTU,丝状菌膨胀对出水浊度略有影响,考虑到丝状菌膨胀时上清液的澄清度比未膨胀时好,分析原因可能是由于丝状菌膨胀状态下无纺布对细小微粒的截留作用有所减弱,结合后述膜污染情况(2.3.2 节)的分析,无纺布在正常污泥状态下的不可逆污染情况比在丝状菌膨胀状态下严重,膜孔堵塞造成膜通量下降的同时,膜孔有效孔径减小,对细小微粒的截留作用更强,故出水浊度更优.另外丝状菌膨胀状态下出水浊度最高也只达到 1.9 NTU,说明丝状菌膨胀对出水浊度的影响并不严重.

### 2.3 丝状菌膨胀对膜污染特征的影响

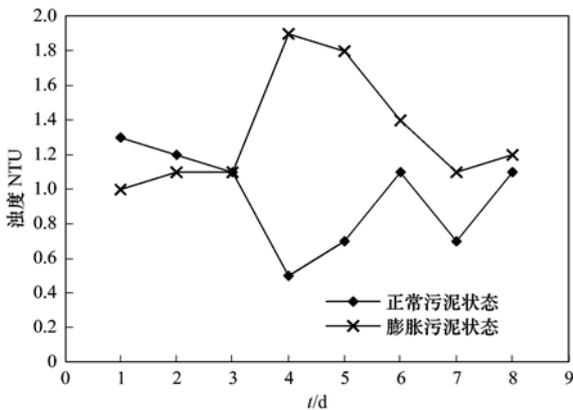


图 6 正常污泥和膨胀污泥状态下的出水浊度情况

Fig. 6 Effluent turbidity during normal sludge and bulking sludge status

### 2.3.1 膜通量的变化

由图 7 可以看出,无纺布生物反应器的膜通量在正常污泥和膨胀污泥状态下呈现不同的下降规律,由曲线的倾斜程度可看出,正常污泥状态下的膜通量前期下降速度慢(120 h 之前),后期下降速度快,而膨胀污泥状态下的膜通量前期下降速度快(100 h 之前),后期下降速度慢.

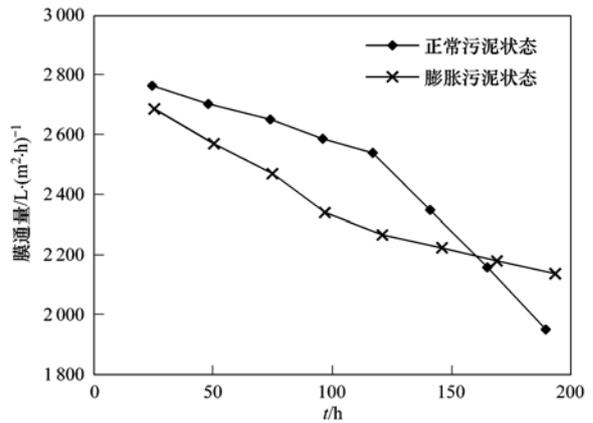


图 7 正常污泥和膨胀污泥状态下的膜通量衰减

Fig. 7 Flux variations during normal sludge and bulking sludge status

若定义单位时间内的膜通量下降为膜通量衰减速率,即膜通量衰减速率 = ΔJ/Δt,由曲线上两个点可求得一个膜通量衰减速率,则可求出,正常污泥状态下的平均膜通量衰减速率为 4.87 L·(m<sup>2</sup>·h<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>,膨胀污泥状态下的平均膜通量衰减速率为 3.29 L·(m<sup>2</sup>·h<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>,可以看出,膨胀污泥状态下的平均膜通量衰减速率较小,即膜污染情况较轻,这一结论与 Choi 等<sup>[20]</sup>对传统中空纤维微滤膜生物反应器中膜污染的研究结论有所不同,可能由于无纺布的膜孔径(25 μm)较之中空纤维膜(0.2 μm)有很大的区别,导致如污泥混合液中 Zeta 电位、EPS 含量、黏度等因素对膜污染的影响较弱,而污泥絮体粒径(表 2)等更宏观的因素对膜污染有更强的影响作用.

### 2.3.2 膜阻力分析

通过测定新膜的膜通量 J<sub>m</sub>,反应器运行 10 d 后测定污染后的膜通量 J<sub>t</sub>,去掉膜面污泥后的膜通量 J<sub>q</sub>,根据式(3)~(6)可得出正常污泥状态和膨胀污泥状态下无纺布的各部分膜阻力构成(表 3).

由表 3 可以看出,正常污泥状态下无纺布的膜污染阻力占总阻力的 9.88%,其中可逆污染阻力 2.60%,不可逆污染阻力 7.28%,膜污染阻力主要是不可逆污染阻力.图 8 是新无纺布及污染后无纺布膜表面的扫描电镜图,由图 8(b)可以看出,正常

表 3 无纺布膜阻力分析<sup>1)</sup>

Table 3 Filtration resistance analysis of nonwoven fabrics

类型	总阻力 $R_t/m^{-1}$	固有阻力 $R_m/m^{-1}$	可逆污染阻力 $R_{it}/m^{-1}$	不可逆污染阻力 $R_{irt}/m^{-1}$
正常污泥状态	372.271	335.506(90.12%)	9.67(2.60%)	27.095(7.28%)
膨胀污泥状态	359.108	331.55(92.33%)	20.7(5.76%)	6.858(1.91%)

1) 括号内为所占总阻力的百分比

污泥状态下无纺布膜表面的泥饼层较薄,膜孔内部堵塞情况比较严重,与膜阻力分析的结果相符. 膨胀污泥状态下无纺布的膜污染阻力占总阻力的 7.67%,膜污染程度比正常污泥状态下轻,其中可逆污染阻力 5.76%,不可逆污染阻力 1.91%,膜污染阻力主要是可逆污染阻力,由图 8(c)可以看出,膨胀污泥状态下无纺布膜表面的泥饼层较厚,膜孔内部的污染情况较轻,与膜阻力分析的结果相符.

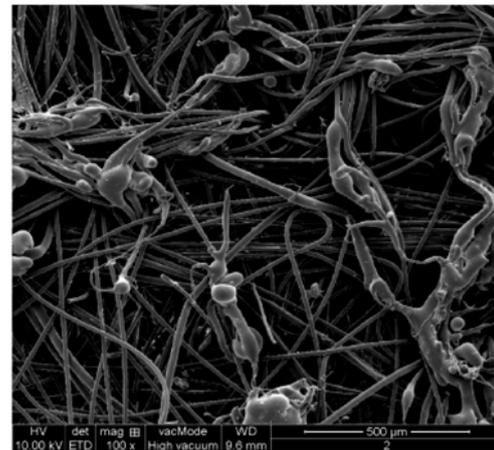
结合图 7,正常污泥状态下的膜通量下降先慢后快是由于膜污染前期膜面泥饼层累积较少,主要发生的是细小污泥颗粒进入膜孔内部引起的不可逆污染,而膜污染前期膜孔堵塞对膜通量下降速度的影响比膜面泥饼层累积对其的影响程度小,故通量下降较慢,而随着膜孔内部堵塞的加剧,对膜通量的影响越来越大,引起膜污染后期膜通量的快速下降;而膨胀污泥状态下的膜通量下降先快后慢, Meng 等<sup>[21]</sup>研究表明,发生丝状菌膨胀的污泥絮体形态更不规则,更易于黏附在膜表面,说明膜污染前期膜面泥饼层的累积是造成前期膜通量下降较快的主要原因,而反应器内部曝气对膜表面产生一定的水力剪切,使得膜面污泥的累积程度受到一定的抑制,另一方面,膜面形成的泥饼层对细小颗粒进入膜孔内部起到了阻碍作用,使得不可逆污染较少,故膜污染后期膜通量的下降速度减缓.

### 2.3.3 EPS 含量分析

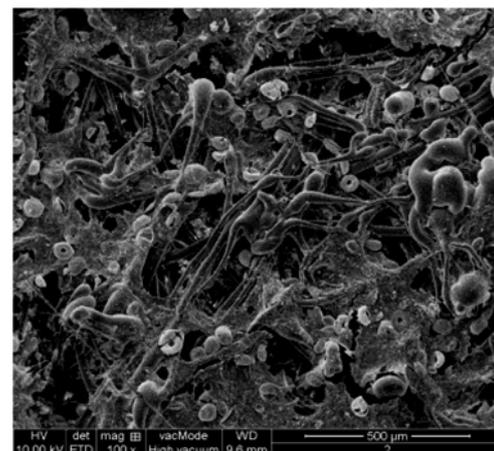
EPS(胞外聚合物)是在一定环境条件下由微生物分泌于体外的一些高分子聚合物,污水生物处理过程中大多数的微生物都会产生 EPS 参与生物絮体的形成,它们存在于细胞表面或者游离于混合液中, EPS 是污泥絮体的重要组成部分,它的生成与降解同外界环境及微生物的生存状态密切相关,比如微生物代谢活动、细胞裂解和吸附作用等<sup>[22]</sup>. EPS 可分为溶解性 EPS(S-EPS)和附着性 EPS(B-EPS),其中 B-EPS 包括松散附着性 EPS(LB-EPS)和紧密附着性 EPS(TB-EPS),有研究指出 S-EPS 与 SMP(溶解性微生物产物)实际是同一种物质<sup>[23]</sup>,故本研究用 SMP 代替 S-EPS 进行讨论.

从表 4 中可以看出,两种污泥 SMP 中多糖的含

量都比蛋白质的含量高,蛋白质/多糖分别为



(a) 新无纺布表面



(b) 正常污泥状态下无纺布



(c) 膨胀污泥状态下无纺布

图 8 无纺布膜表面扫描电镜图(100×)

Fig. 8 SEM images of non-woven fabrics(100×)

0.370、0.497, SMP 总量分别为正常污泥中 21.369  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 膨胀污泥中 10.182  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 相关研究表明, SMP 浓度是决定膜污染潜力及膜阻力的主要因素<sup>[24,25]</sup>, Ramesh 等<sup>[26]</sup>通过实验证实 SMP 贡献绝大部分膜污染阻力, 同时提出 SMP 中蛋白质和腐殖酸对不可逆污染的贡献要大于多糖, 但 Lee 等<sup>[27]</sup>提出就亲水性而言, SMP 中多糖应较蛋白质对亲水性膜初期阶段污染贡献更大, 考察 P/C (蛋白质/多糖) 对膜污染的影响比 SMP 总量更有参考价值, Yao 等<sup>[28]</sup>提出, 混合液中的蛋白质与多糖存在某种作用促进膜面滤饼层形成, 提高 P/C 有利于削弱不可逆污染. 由本实验结果可推断, SMP 总量与膜污染阻力有关系, P/C 与可逆污染所占的比例有关系.

表 5 为混合液中污泥的 EPS 含量, 正常污泥 LB-EPS 中多糖占多数, 而膨胀污泥 LB-EPS 中蛋白质占多数, P/C 分别为 0.649、1.488, 正常污泥和膨胀污泥的 LB-EPS 总量分别为 2.974  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、1.824  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , Wang 等<sup>[29]</sup>研究表明, B-EPS 有较强的污染潜质, 与 TB-EPS 相比, LB-EPS 与膜污染阻力呈现更强相关性, 从实验结果看, 混合液污泥 LB-EPS 与膜污染的关系同 SMP 相似; 两种污泥中 TB-EPS 含量都远高于 LB-EPS, 证明混合液污泥中 EPS 主要是以 TB-EPS 的形式存在, 其中, 两种污泥 TB-EPS 中都是蛋白质含量占大多数, P/C 分别为正常污泥

2.891, 膨胀污泥 3.554, 两种混合液污泥中 EPS 总量分别为正常污泥 90.337  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 膨胀污泥 157.093  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , P/C 分别为 2.724、3.510, 对照表 3 可以看出, 混合液污泥 EPS 总量及 P/C 都与膜污染中可逆污染的发生存在正相关关系, 研究表明, EPS 对混合液黏度、污泥疏水性、膜污染有重要的影响, EPS 可以通过降低菌体表面电荷和大分子间吸附架桥作用, 促进微生物在固体表面附着及絮体的形成, 因此造成膜表面可逆污染的加剧<sup>[26]</sup>.

表 6 为膜面污泥的 EPS 含量, 膜面污泥取自污染后无纺布表面附着的污泥层, 膜面 EPS 可以看作是混合液 EPS 在发生污染后的膜表面的累积, 可反映膜面可逆污染的严重程度, 从中可以看出, 膜面污泥中 LB-EPS 和 TB-EPS 都是膨胀污泥的含量高, 两种污泥的 LB-EPS 和 TB-EPS 中蛋白质的含量都高于多糖含量, 说明 EPS 含量较高的污泥更易于在膜表面累积, 并且累积于膜表面的 EPS 主要是蛋白质. 膜面污泥 LB-EPS 中的 P/C 分别为正常污泥 1.155、膨胀污泥 2.331, TB-EPS 中的 P/C 分别为正常污泥 3.248、膨胀污泥 3.935, 总 EPS 中的 P/C 分别为正常污泥 3.056、膨胀污泥 3.816, 两种膜面污泥中 EPS 总量分别为正常污泥 85.824  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 膨胀污泥 188.159  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 膜面污泥 EPS 的含量和 P/C 都与膜表面可逆污染存在正相关性.

表 4 正常污泥和膨胀污泥状态下的 SMP 含量

Table 4 SMP contents during normal sludge and bulking sludge status

类型	多糖/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	蛋白质/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	SMP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	蛋白质/多糖
正常污泥	15.6	5.769	21.369	0.370
膨胀污泥	6.8	3.382	10.182	0.497

表 5 混合液污泥中的 EPS 各组分含量

Table 5 EPS contents of mixed liquid sludges

项目	类型	多糖/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	蛋白质/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	总量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	蛋白质/多糖
LB-EPS	正常污泥	1.803	1.171	2.974	0.649
	膨胀污泥	0.733	1.091	1.824	1.488
TB-EPS	正常污泥	22.453	64.91	87.363	2.891
	膨胀污泥	34.097	121.173	155.27	3.554
总 EPS	正常污泥	24.256	66.081	90.337	2.724
	膨胀污泥	34.83	122.264	157.093	3.510

表 6 膜面污泥中的 EPS 各组分含量

Table 6 EPS contents of membrane surface sludges

项目	类型	多糖/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	蛋白质/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	总量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	蛋白质/多糖
LB-EPS	正常污泥	1.941	2.241	4.182	1.155
	膨胀污泥	2.906	6.775	9.681	2.331
TB-EPS	正常污泥	19.221	62.421	81.642	3.248
	膨胀污泥	36.165	142.313	178.478	3.935
总 EPS	正常污泥	21.162	64.662	85.824	3.056
	膨胀污泥	39.071	149.088	188.159	3.816

### 3 结论

(1) 发生丝状菌膨胀的污泥由于丝状结构有利于污泥絮体的附着聚集, 因而膨胀污泥的平均粒径和中值粒径均大于正常污泥。

(2) 丝状菌膨胀状态下反应器的上清液和出水平均 COD 去除率分别为 87.8% 和 90.1%, 较之于正常污泥状态下的 86.5% 和 91.4%, 丝状菌膨胀对 COD 去除效果几乎没有影响; 丝状菌膨胀状态下的上清液和出水平均  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率分别为 91.9% 和 93.1%, 低于正常污泥状态下的 94.8% 和 97.0%, 说明丝状菌膨胀对于硝化作用有一定的抑制; 丝状菌膨胀状态下的平均出水浊度为 1.33 NTU, 较之正常污泥状态下的 0.99 NTU, 丝状菌膨胀对出水浊度略有影响但不严重。

(3) 正常污泥状态下反应器的膜通量下降先慢后快, 丝状菌膨胀状态下的膜通量下降先快后慢, 原因是正常污泥状态下优先发生不可逆污染, 丝状菌膨胀状态下优先发生可逆污染; 正常污泥状态下的平均膜通量衰减速率为  $4.87 \text{ L} \cdot (\text{m} \cdot \text{h})^{-2}$ , 膨胀污泥状态下为  $3.29 \text{ L} \cdot (\text{m} \cdot \text{h})^{-2}$ , 膨胀污泥状态下的膜污染较轻可能是由于污泥絮体粒径等更宏观的因素对无纺布膜污染的影响更大; 反应器运行 10 d 后, 正常污泥状态下的膜阻力中, 可逆污染阻力占 2.60%, 不可逆污染阻力占 7.28%, 膜污染阻力主要是不可逆污染阻力, 膨胀污泥状态下的膜阻力中, 可逆污染阻力占 5.76%, 不可逆污染阻力占 1.91%, 膜污染阻力主要是可逆污染阻力。

(4) SMP 含量分别为正常污泥  $21.369 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 膨胀污泥  $10.182 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , P/C 分别为 0.37、0.497, SMP 总量与膜污染阻力有关系, P/C 与可逆污染所占的比例有关系; 正常污泥和膨胀污泥的混合液污泥 LB-EPS 含量分别为  $2.974 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $1.824 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , P/C 分别为 0.649、1.488, EPS 总量分别为  $90.337 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $157.093 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , P/C 分别为 2.724、3.51, 混合液污泥 LB-EPS 与膜污染的关系同 SMP 相似, EPS 总量及其 P/C 都与可逆污染的发生存在正相关关系; EPS 含量较高的污泥更易于在膜表面累积, 并且累积于膜表面的 EPS 主要是蛋白质; 膜面污泥 EPS 总量分别为正常污泥  $85.824 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 膨胀污泥  $188.159 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , P/C 分别为 3.056、3.816, 膜面污泥 EPS 的含量和 P/C 都与膜表面可逆污染存在正相关性。

### 参考文献:

- [ 1 ] Meng F, Chae S R, Drews A, *et al.* Recent advances in membrane bioreactors ( MBRs ): membrane fouling and membrane material [ J ]. *Water Research*, 2009, **43**(6): 1489-1512.
- [ 2 ] Oh H S, Yeon K M, Yang S, *et al.* Control of membrane biofouling in MBR for wastewater treatment by quorum quenching bacteria encapsulated in microporous membrane [ J ]. *Environmental Science and Technology*, 2012, **46**(9): 4877-4884.
- [ 3 ] Nady N, Franssen M C R, Zuilhof H, *et al.* Modification methods for poly ( arylsulfone ) membranes: A mini-review focusing on surface modification [ J ]. *Desalination*, 2011, **275**(1): 1-9.
- [ 4 ] Lee S, Kim M H. Fouling characteristics in pure oxygen MBR process according to MLSS concentrations and COD loadings [ J ]. *Journal of Membrane Science*, 2013, **428**(1): 323-330.
- [ 5 ] Khalili-Garakani A, Mehrnia M R, Mostoufi N, *et al.* Analyze and control fouling in an airlift membrane bioreactor: CFD simulation and experimental studies [ J ]. *Process Biochemistry*, 2011, **46**(5): 1138-1145.
- [ 6 ] Huyskens C, De Wever H, Fovet Y, *et al.* Screening of novel MBR fouling reducers: Benchmarking with known fouling reducers and evaluation of their mechanism of action [ J ]. *Separation and Purification Technology*, 2012, **95**(1): 49-57.
- [ 7 ] Wu J, Huang X. Effect of dosing polymeric ferric sulfate on fouling characteristics, mixed liquor properties and performance in a long-term running membrane bioreactor [ J ]. *Separation and Purification Technology*, 2008, **63**(1): 45-52.
- [ 8 ] Chuang S H, Lin P K, Chang W C. Dynamic fouling behaviors of submerged nonwoven bioreactor for filtration of activated sludge with different SRT [ J ]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(17): 7768-7776.
- [ 9 ] 任南琪, 刘娇, 王秀蘅. 低温时污泥膨胀对 MBR 中膜污染的影响 [ J ]. *环境科学*, 2009, **30**(1): 155-159.
- [ 10 ] Ramesh A, Lee D J, Wang M L, *et al.* Biofouling in membrane bioreactor [ J ]. *Separation Science and Technology*, 2006, **41**(7): 1345-1370.
- [ 11 ] Morgan J W, Forster C F, Evison L. A comparative study of the nature of biopolymers extracted from anaerobic and activated sludges [ J ]. *Water Research*, 1990, **24**(6): 743-750.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] Lowery O H, Rosebrough N J, Farr A L, *et al.* Protein measurement with the Folin phenol reagent [ J ]. *The Journal of Biological Chemistry*, 1951, **193**(1): 265-275.
- [ 14 ] Bura R, Cheung M, Liao B, *et al.* Composition of extracellular polymeric substances in the activated sludge floc matrix [ J ]. *Water Science and Technology*, 1998, **37**(4): 325-333.
- [ 15 ] Bae T H, Tak T M. Interpretation of fouling characteristics of ultrafiltration membranes during the filtration of membrane

- bioreactor mixed liquor [J]. *Journal of Membrane Science*, 2005, **264**(1): 151-160.
- [16] 左金龙, 崔福义, 杨威, 等. 膜生物反应器处理低温低浊水的工艺研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(2): 377-381.
- [17] 李亚峰, 金亚斌, 陈涛, 等. MBR 中低 pH 值与低有机负荷引起的污泥膨胀及其恢复[J]. *沈阳建筑大学学报*, 2009, **23**(6): 994-998.
- [18] 李庆召, 王定勇. 活性污泥膨胀机理及抑制对策的研究现状[J]. *环境保护科学*, 2001, **27**(4): 14-15.
- [19] Yang X, Peng Y Z, Ren N Q, *et al.* Nutrient removal performance and microbial community structure in an EBPR system under the limited filamentous bulking state [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **144**(9): 86-93.
- [20] Choi J G, Bae T H, Kim J H, *et al.* The behavior of membrane fouling initiation on the crossflow membrane bioreactor system [J]. *Journal of Membrane Science*, 2002, **203**(1): 103-113.
- [21] Meng F G, Yang F L, Xiao J N, *et al.* A new insight into membrane fouling mechanism during membrane filtration of bulking and normal sludge suspension [J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, **285**(1): 159-165.
- [22] Yang S, Li X. Influences of extracellular polymeric substances (EPS) on the characteristics of activated sludge under non-steady-state conditions [J]. *Process Biochemistry*, 2009, **44**(1): 91-96.
- [23] Laspidou C S, Rittmann B E. A unified theory for extracellular polymeric substances, soluble microbial products, and active and inert biomass [J]. *Water Research*, 2002, **36**(11): 2711-2720.
- [24] Geng Z, Hall E R. A comparative study of fouling-related properties of sludge from conventional and membrane enhanced biological phosphorus removal processes [J]. *Water Research*, 2007, **41**(19): 4329-4338.
- [25] Jeong T Y, Cha G C, Yoo I K, *et al.* Characteristics of biofouling in a submerged MBR [J]. *Desalination*, 2007, **207**(1): 107-113.
- [26] Ramesh A, Lee D J, Lai J Y. Membrane biofouling by extracellular polymeric substances or soluble microbial products from membrane bioreactor sludge [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2007, **74**(3): 699-707.
- [27] Lee W, Kang S, Shin H. Sludge characteristics and their contribution to microfiltration in submerged membrane bioreactors [J]. *Journal of Membrane Science*, 2003, **216**(1): 217-227.
- [28] Yao M, Ladewig B, Zhang K. Identification of the change of soluble microbial products on membrane fouling in membrane bioreactor (MBR)[J]. *Desalination*, 2011, **278**(1): 126-131.
- [29] Wang Z, Wu Z, Tang S. Extracellular polymeric substances (EPS) properties and their effects on membrane fouling in a submerged membrane bioreactor [J]. *Water Research*, 2009, **43**(9): 2504-2512.

## CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing .....	LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2031)
Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang .....	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2045)
Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway .....	BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i> (2052)
Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiyi Glacier Region .....	MA Juan-juan, LI Zhen (2060)
Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter .....	SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)
Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks .....	XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i> (2075)
Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups .....	WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i> (2085)
Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water .....	SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)
Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River .....	TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i> (2099)
Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment .....	YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (2108)
Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis .....	GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i> (2114)
Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application .....	ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)
Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil .....	CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i> (2129)
Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuashui Watershed .....	LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i> (2139)
Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town .....	ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (2148)
Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water .....	YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)
Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance .....	WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)
Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal .....	WANG Shang, LI Da-peng (2171)
Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment .....	LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i> (2178)
Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension .....	WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury .....	ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2193)
Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon .....	LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i> (2201)
Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation .....	LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i> (2209)
AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park .....	TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i> (2216)
Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres .....	YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2223)
Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor .....	LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2230)
Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification .....	TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i> (2236)
Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor .....	SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i> (2241)
Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride .....	ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i> (2249)
Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake .....	GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i> (2256)
Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission .....	LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i> (2264)
Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory .....	TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (2272)
Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China .....	WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i> (2281)
Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Flex .....	ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i> (2287)
Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition .....	ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (2294)
Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella .....	ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i> (2300)
Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake .....	LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i> (2305)
Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments .....	WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2314)
Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments .....	TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i> (2322)
Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP .....	WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i> (2328)
Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability .....	TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i> (2334)
Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier .....	WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i> (2341)
Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato .....	JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (2349)
Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta .....	LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i> (2358)
Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China .....	JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i> (2365)
Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes .....	ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i> (2374)
Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil .....	CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i> (2381)
Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation .....	ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2392)
Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province .....	ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2401)
Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification .....	OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i> (2411)
Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage .....	ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i> (2419)
Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest .....	WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i> (2426)
Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor .....	LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)

# 《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6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 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