

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

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

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究	孙建林, 常文静, 陈正侠, 曾辉 (1513)
北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究	崔彤, 程婧晨, 何万清, 任培芳, 聂磊, 徐东耀, 潘涛 (1523)
2006~2010年珠三角地区 SO ₂ 特征分析	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邓涛, 徐婉筠, 冉靓, 赵春生 (1530)
环境空气 PM _{2.5} 连续监测系统手工采样比对测试	王强, 钟琪, 迟颖, 张杨, 杨凯 (1538)
燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放	裴冰 (1544)
南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应	方峰, 王磊, 席雪飞, 胡佳俊, 付小花, 陆兵, 徐殿胜 (1550)
基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算	冯驰, 金琦, 王艳楠, 赵丽娜, 吕恒, 李云梅 (1557)
贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析	吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 罗进, 蒋浩 (1565)
东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析	高磊, 陈建耀, 王江, 柯志庭, 朱爱萍, 许凯 (1573)
河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究	刘肖, 杨琰, 彭涛, 赵景耀, 任小凤, 张银环, 聂旭东, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (1582)
石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响	肖时珍, 熊康宁, 蓝家程, 张晖, 杨龙 (1590)
旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异	赵瑞一, 梁作兵, 王尊波, 于正良, 江泽利 (1598)
有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响	孙玉川, 王永启, 梁作兵, 袁道先 (1605)
山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究	曹霏霏, 杨丽原, 庞绪贵, 王炳华, 王云倩 (1615)
摇蚊幼虫扰动下沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应	史晓丹, 李勇, 李大鹏, 王忍, 邓猛, 黄勇 (1622)
南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响	郝卓, 高扬, 张进忠, 徐亚娟, 于贵瑞 (1630)
不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响	黄雪娇, 刘晓晨, 李振轮, 石纹豪, 杨珊 (1639)
荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响	汪小雄, 姜成春, 李锦卫, 汪晓军 (1648)
黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用	陈亚楠, 袁玲 (1655)
饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制	丁春生, 孟壮, 徐洋洋, 缪佳 (1662)
水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性	凌晓, 胡晨燕, 程明, 谷建 (1668)
化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响	张灿, 刘文君, 史云, 安代志, 白森, 徐稳 (1674)
牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性	马锋锋, 赵保卫, 刁静茹, 钟金魁, 李安邦 (1678)
丁二酸改性茶油树木屑吸附铅的研究	张晓峰, 陈迪云, 彭燕, 刘永胜, 熊雪莹 (1686)
SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响	张静, 肖太民, 张晶, 曹丽亚, 杜亚威, 刘春, 张磊 (1694)
TiO ₂ 诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制	郭宏生, 刘亚楠, 乔琪, 魏红, 董呈幸, 薛洁, 李克斌 (1700)
新型高分子絮凝剂对废水中 Cr(VI) 的捕集性能	王刚, 杜凤龄, 常青, 徐敏 (1707)
基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量	曾善文, 王泽宇, 高敬, 刘东, 张代钧, 卢培利 (1713)
分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制	黄帅, 刘宏波, 殷波, 马惠君, 符波, 刘和, 白洁 (1720)
通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响	张喻, 韩融, 陆文静, 王洪涛, 明中远, 王强, 夏伟 (1727)
生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究	吴青, 崔延瑞, 汤晓晓, 杨慧娟, 孙剑辉 (1733)
百乐克 (BIOLAK) 活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析	田美, 刘汉湖, 申欣, 赵方庆, 陈帅, 姚永佳 (1739)
异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性	梁贤, 任勇翔, 杨垒, 赵思琪, 夏志红 (1749)
菌株 <i>Arthrobacter</i> sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学	任磊, 史延华, 贾阳, 姚雪松, Ruth Nahurira, 弥春霞, 闫艳春 (1757)
短短芽胞杆菌及其芽胞对苣的降解	刘芷辰, 叶锦韶, 彭辉, 刘则华, 邓庭进, 尹华, 廖丽萍 (1763)
垃圾填埋场抗生素抗性基因初探	李蕾, 徐晶, 赵由才, 宋立岩 (1769)
不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查	麦晓蓓, 陶然, 杨扬, 张敏, 林剑华, 满滢 (1776)
硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响	柳蓉, 龙焰, 王立立, 何婷, 叶锦韶 (1785)
山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 李洪建, 李君剑, 武江星 (1793)
施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响	姜继韶, 郭胜利, 王蕊, 刘庆芳, 王志齐, 张彦军, 李娜娜, 李如剑, 吴得峰, 孙棋棋 (1802)
宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估	张文超, 吕森林, 刘丁戎, 刘品威, 米持真一, 王效举, 王青耀 (1810)
宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义	张俊辉, 王瑾, 张健, 房妮, 夏敦胜 (1818)
长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征	毛霞丽, 陆扣萍, 孙涛, 张小凯, 何丽芝, 王海龙 (1827)
矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响	李君剑, 刘峰, 周小梅 (1836)
三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究	肖烨, 黄志刚, 武海涛, 吕宪国 (1842)
钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应	黄昭露, 陈泉源, 周娟, 谢墨函 (1849)
石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应	杨茜, 吴蔓莉, 聂麦茜, 王婷婷, 张明辉 (1856)
可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究	卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 谭蒙 (1864)
绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性	金诚, 赵转军, 南忠仁, 王胜利, 武文飞, 王厚成 (1870)
硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收的影响	王丹, 李鑫, 王代长, 饶伟, 杜光辉, 杨军, 化党领 (1877)
臭氧对几种楠木气体交换参数的影响	李苗苗 (1888)
某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索	蔡锋, 赵士波, 陈刚才, 鲜思淑, 杨清玲, 周贤杰, 余海 (1902)
《环境科学》征订启事 (1543) 《环境科学》征稿简则 (1756) 信息 (1667, 1726, 1809, 1848)	

分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制

黄帅, 刘宏波, 殷波, 马惠君, 符波, 刘和*, 白洁

(江南大学环境与土木工程学院环境生物技术研究室, 无锡 214122)

摘要: 采用自生生物动态膜分离高浓度污泥发酵液, 研究了动态膜的形成过程及其对污泥发酵液的分离效果. 结果表明, 自生动态膜的形成过程受污泥浓度的影响较小, 污泥浓度仅影响初始膜通量, 不影响稳定时的膜通量. 膜通量随着滤布孔径和搅拌速度的增大而增大. 动态膜的形成过程符合死端过滤模型, 分别由以下4个过程构成: 先通过与膜基材孔径相似的污泥颗粒堵塞膜基材孔, 其后在膜基材上形成单层污泥, 进而在膜基材上形成多层污泥, 最后, 大颗粒污泥继续沉积到污泥层上. 动态膜形成后, 对污泥颗粒和溶解性 COD (SCOD) 的截留率分别为 98% 和 28%, 对挥发性脂肪酸 (volatile fatty acids, VFAs) 的渗透率在 82% 以上, 胞外聚合物 (extracellular polymeric substances, EPS) 中的蛋白质是动态膜的主要成分.

关键词: 自生动态膜; 滤布; 形成; 过滤模型; 污泥发酵液; 膜分离

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1720-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.05.029

Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production

HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, MA Hui-jun, FU Bo, LIU He*, BAI Jie

(Laboratory of Environmental Biotechnology, School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Self-forming dynamic membrane was used to separate high-concentration sludge fermentation liquid, and the formation mechanism and separation efficiency of dynamic membrane were investigated. The results indicated that the impact of sludge concentrations was negligible on the formation of dynamic membrane. Though membrane flux could be influenced by sludge concentration at the initial stage of membrane formation process, the influence was not obvious at the stable stage. Membrane flux was improved with increasing filter cloth pore size and stirring speeds. Moreover, the results indicated that the formation process of dynamic membrane followed the dead-end filtration model, which could be divided into four stages. Firstly, filter cloth pore was blocked by those sludge particles with the diameter similar to the pore size of filter cloth. Secondly, sludge particles formed monolayer sludge on the filter cloth. Thirdly, sludge particles formed multilayer sludge on the filter cloth. Finally, large sludge particles deposited onto the sludge layer. After formation of the dynamic membrane, the retention efficiency of sludge particles and SCOD could reach 98% and 28%, respectively, and the permeation efficiency of VFAs was over 82%. Proteins in EPS were the main component of the dynamic membrane.

Key words: self-forming dynamic membrane; cloth filter; formation; filtration model; sludge fermentation liquid; membrane separation

城市污水处理过程中会产生大量剩余污泥, 剩余污泥的处理处置已成为污水处理厂沉重的负担, 如何实现剩余污泥的减量化和资源化成为目前污泥处理研究的重点^[1]. 污泥发酵产酸为实现城市污泥减量化及资源化利用提供了一条新思路^[2]. 但是污泥发酵产酸过程中存在产物酸积累的抑制作用^[3], 且污泥发酵液必须通过固液分离才利于后续使用, 但是目前的分离过程有明显的缺点: 提取效率过低, 固液分离不完全^[4].

普通分离膜 (membrane) 是一种实现固液分离的有效手段, 但是花费巨大, 能耗高, 膜污染严重^[5-7]. 动态膜 (dynamic membrane, DM) 技术是解决普通分离膜所遇到问题的可行方法. 动态膜利用较大孔径的廉价材料作为膜基材, 过滤过程中形成在支撑材料上的一层膜, 实现近似于微滤膜的过滤

效果^[5-8]. 目前, 关于动态膜的研究主要集中于污水处理, 研究膜基材、出水水头、污泥性质和反应控制条件对自生动态膜的形成及其污水的处理效果影响^[5-8], Kiso 等^[9]研究了不同孔径的网格支撑材料的过滤特性和出水, 高松等^[10]和 Park 等^[11]研究了动态膜对活性污泥和剩余污泥的分离效果. 使用动态膜对污泥发酵液进行固液分离的报道很少见.

本研究尝试使用动态膜实现污泥发酵液的固液分离, 研究基材孔径、污泥浓度和搅拌速度等对自

收稿日期: 2014-10-31; 修订日期: 2014-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51208231); 江苏省自然科学基金项目 (BK201411112); 江苏省自然科学基金项目 (BK2014020607); 江苏省太湖环境综合治理科研项目 (第七期专项资金) (JSZC-G2013-191)

作者简介: 黄帅 (1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为废物资源化工程, E-mail: huang3556536@126.com

* 通讯联系人, E-mail: liuhe@jiangnan.edu.cn

生动态膜形成的影响,分析其形成机制,以期为发展新的污泥发酵液固液分离方法提供基础理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验装置

用于分离污泥发酵液过滤系统如图 1 所示。发酵罐整体呈圆柱形,由有机玻璃制成,底面直径为 26 cm,高为 40 cm,有效容积为 14 L;动态膜组件整体呈圆柱形,由滤布和聚氯乙烯制成,支撑材料由滤布制成,有效膜面积为0.031 4 m²。采用重力自流连续出水方式运行,滤液透过膜面进入膜组件内的空腔,经膜组件底端出水口流出。膜组件整体连接搅拌电机,膜组件由电机带动旋转,为膜面提供错流速度,同时混合反应器内液体。

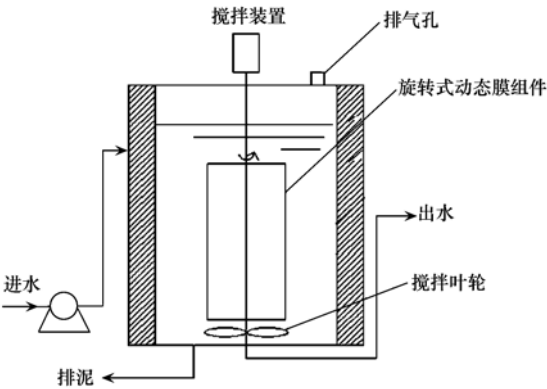


图 1 污泥发酵液过滤系统示意
Fig. 1 Sludge fermentation liquid filtration system

1.2 污泥发酵液的性质

污泥发酵液来自实验室中试规模的污泥厌氧发酵产酸反应器,其性质如表 1。

表 1 污泥发酵液的性质

Table 1 Characteristic of sludge fermentation liquid

项目	数值
TS/g·L ⁻¹	31.85
VS/g·L ⁻¹	13.02
SS/g·L ⁻¹	15.08
SCOD/mg·L ⁻¹	13 961.00
多糖/mg·L ⁻¹	708.27
蛋白质/mg·L ⁻¹	1 158.33
挥发性脂肪酸/g·L ⁻¹	3.51
pH	6.83

1.3 实验方法

实验共分为两个阶段:① 动态膜成膜过程;② 膜分离的稳定运行过程。

动态膜成膜阶段:维持 29 cm 出水压头,在不同污泥发酵液 TS 浓度(13、20、25 g·L⁻¹),支撑材

料孔径(50、40 和 25 μm)和搅拌转速(未搅拌、50 和 100 r·min⁻¹)下,启动自动态膜过滤系统,测定膜出水通量,分析动态膜的形成过程。

膜分离的稳定运行阶段:维持 29 cm 出水压头,发酵污泥 TS 浓度为 31.85 g·L⁻¹,搅拌速度为 50 r·min⁻¹,滤布孔径为 40 μm。实验期间,每隔 1 d,测定反应器内污泥浓度,据此调节排泥量,维持反应器内污泥浓度稳定。测定动态膜出水的 SS、通量、SCOD、VFAs,并分析动态膜层污泥的组成成分。

1.4 分析项目及测定方法

实验期间主要测定膜通量、TS、VS、SS、MLSS、SCOD、VFAs、蛋白质、多糖、黏度、粒径和污泥密度等。

TS、VS、SS 和 MLSS 的测定使用重量法^[12],COD 的测定采用重铬酸钾快速消解法,VFAs 的测定采用气相色谱法^[1],渗出液的黏度使用 Brookfield 黏度计测定,污泥粒径使用百特激光粒度分析仪测定。

待反应器运行结束时,将动态膜组件取出,用塑料片将滤布上动态膜层污泥轻轻刮下,用于后续分析。污泥中 EPS 和溶解性微生物产物(soluble microbial products,SMP)的提取方法按照文献[13]的方法,蛋白质的测定采用考马斯亮蓝法^[14],多糖的测定采用硫酸-苯酚法^[15]。

污泥密度根据如下公式计算:

$$\rho = \frac{m}{V}$$
(1)

式中,ρ 是污泥密度,kg·m⁻³; m 是污泥质量,kg; V 是污泥体积,m³。

膜阻力根据达西公式计算:

$$R = \frac{TMP}{\mu J}$$
(2)

式中,R 是膜阻力,m⁻¹; TMP 是跨膜压差,Pa; μ 是混合液的黏度,Pa·s; J 是膜通量,L·(m²·h)⁻¹。

1.5 堵塞过滤模型

动态膜的形成过程是包含孔径堵塞,污泥沉积,滤饼形成的综合过程^[16]。在恒定压力下,膜通量的变化可以由经典过滤模型描述。经典过滤模型是由 Hermia^[17]在 1982 年为了描述死端过滤而提出的,主要阐述了污泥粒径对膜通量变化的影响,本模型主要包括以下 4 个过滤模型。

(1) 标准阻塞模型 比膜孔径小的污泥颗粒沉积到膜孔内,堵塞膜孔,减小膜孔径。其方程如下:

$$\frac{t}{V} = at + b$$
(3)

式中, V 是 t 时刻的累积体积, m^3 ; a 和 b 是模型参数.

(2) 完全阻塞模型 污泥颗粒堵塞膜孔, 并在膜表面沉积, 形成单层污泥, 没有颗粒的层叠. 其方程如下:

$$-\ln\left(\frac{J}{J_0}\right) = at + b \quad (4)$$

式中, J 是 t 时刻的通量, $\text{L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; J_0 是初始通量, $\text{L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$.

(3) 中间阻塞模型 污泥颗粒在膜表面沉积, 形成多层污泥, 有颗粒的层叠. 其方程如下:

$$\frac{1}{J} = at + b \quad (5)$$

(4) 滤饼过滤模型, 比膜孔径大的污泥颗粒沉积到膜表面. 其方程如下:

$$\frac{t}{V} = aV + b \quad (6)$$

滤饼过滤模型的 a 和 b 与方程(1)和(2)相关:

$$a = \frac{\mu c_b \alpha_c}{2A^2 \text{TMP}} \quad (7)$$

$$b = \frac{\mu R_m}{\text{TMP} \cdot A} \quad (8)$$

式中, μ 是渗透液的黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; α_c 是滤饼阻力, $\text{m} \cdot \text{kg}^{-1}$; R_m 是膜的水力阻力, m^{-1} ; A 是膜表面积, m^2 ; c_b 是污泥浓度, $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 动态膜层污泥的孔隙度、压缩性和高度可以通过式(3)和 Kozeny 模型[式(4)和(5)]计算:

$$\alpha_c = \alpha_{c0} \text{TMP}^n \quad (9)$$

$$\alpha_c = \frac{180(1 - \varepsilon)}{\rho_1 d_p^2 \varepsilon^3} \quad (10)$$

$$\delta_c = \frac{R_c \varepsilon^3 d_p^2}{45(1 - \varepsilon)^2} \quad (11)$$

式中, α_{c0} 是一个常量, n 是压缩因素, n 值越大, 压缩性越大. ε 是滤饼的空隙, δ_c 是滤饼的高度, m ; ρ_1 是湿泥的密度, $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; d_p 是颗粒粒径, μm ; R_c 是滤饼的阻力, m^{-1} .

2 结果与讨论

2.1 自生动态膜形成过程中的过滤特征

动态膜的形成是一个复杂的过程, 受膜基材孔径、过滤液浓度和错流速度等因素的影响^[18], 在高浓度、高黏性发酵液分离环境下, 动态膜的形成特征更加复杂. 膜通量是表征动态膜形成过程特征的常见指标, 通过分析动态膜通量的变化, 研究不同因

素对动态膜形成过程的影响^[19~21]. 图2(a)是污泥发酵液 TS 浓度为 $13 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 搅拌速度为 $50 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 不同孔径的滤布形成动态膜过程中通量的变化. 比较 50 、 40 和 $25 \mu\text{m}$ 滤布孔径条件下动态膜形成过程中的通量变化, 可知, 经过 400 min , $50 \mu\text{m}$ 的滤布形成的动态膜的通量达到稳定状态, 为 $4.2 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; 经过 50 min , $40 \mu\text{m}$ 的滤布的稳定通量为 $3.2 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; 经过 20 min , $25 \mu\text{m}$ 滤布的稳定通量约为 $2.1 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 此外, 通量达到稳定时, 不同孔径的滤布的通量为: $50 \mu\text{m} > 40 \mu\text{m} > 25 \mu\text{m}$. 由此可见, 孔径越小的滤布形成的动态膜的膜通量可以在较短的时间达到稳定, 但是, 孔径越小, 稳定通量也越小. 这是由于孔径较小, 颗粒更容易堵塞滤布的孔径, 随后污泥沉积到滤布的过程越快, 动态膜层污泥的沉积量更多, 形成的污泥层更加紧密, 形成的动态膜的速度越快, 达到稳定通量的时间就缩短, 稳定时通量就越小^[22].

图2(b)是使用 $40 \mu\text{m}$ 的滤布, 搅拌速度为 $50 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 不同浓度污泥发酵液形成动态膜过程中通量的变化. 从中可知, 不同浓度的污泥发酵液在动态膜形成过程中, 初始通量不同, 但是整体变化趋势类似, 达到稳定状态时, 通量差异不明显, 为 3.2

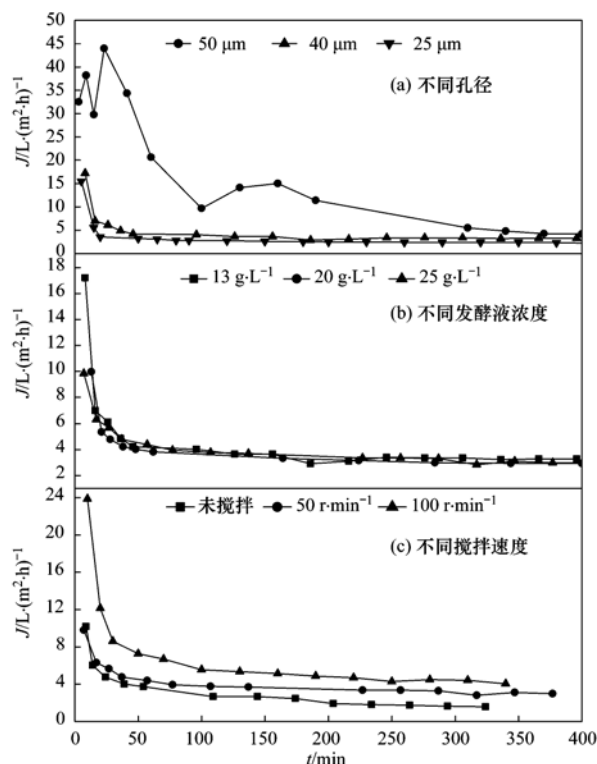


图2 不同运行条件下动态膜的形成特征

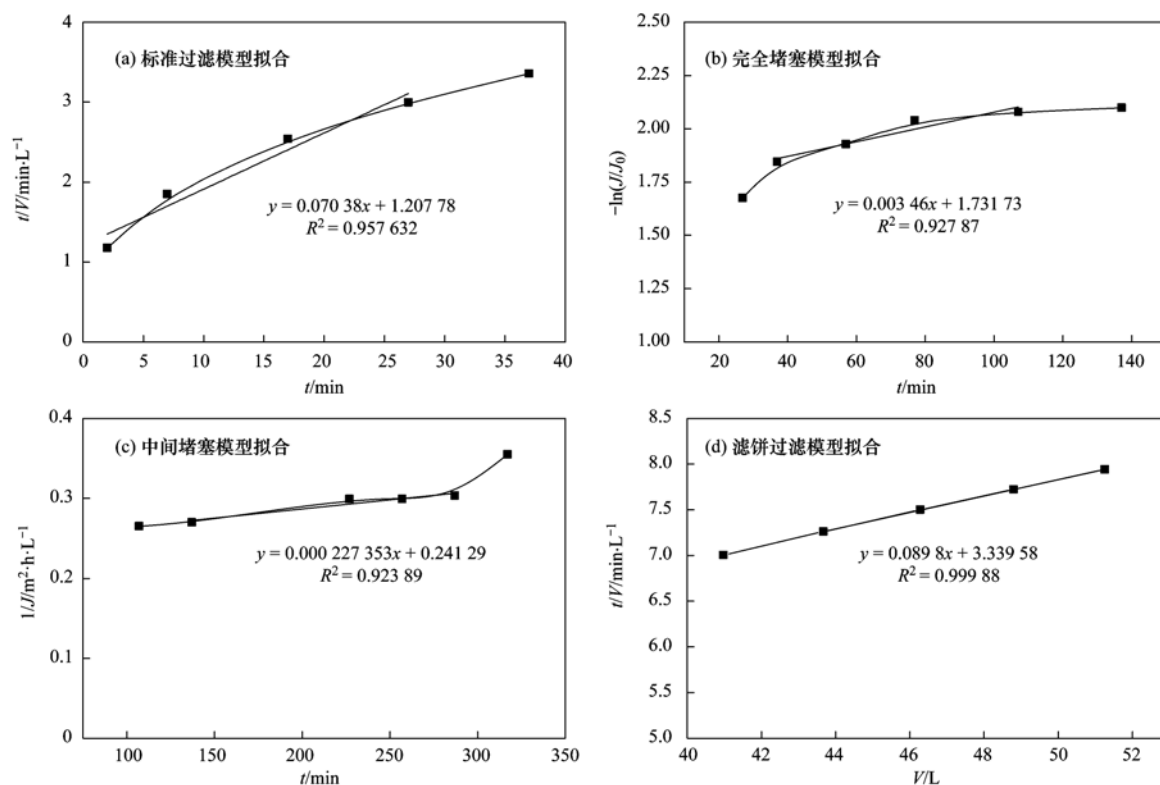
Fig. 2 Formation characteristics of dynamic membrane under different operation conditions

$\text{L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 因此, 污泥浓度影响动态膜形成过程的初始通量, 而对稳定通量影响不大. 这是因为, 在滤布孔径相同的条件下, 随着发酵液污泥浓度的增大, 污泥颗粒与滤布接触的机会越大, 污泥颗粒堵塞孔径和沉积到滤布表面的概率越大, 所形成的动态膜更加厚而紧密, 因此, 污泥浓度越高, 初始时膜通量下降越快. 随着过滤的不断进行, 污泥不断沉积到滤布和污泥上, 由于存在错流速度, 污泥层的厚度有一个上限, 导致最终形成的动态膜层有相似的厚度和结构, 动态膜的稳定通量接近.

污泥发酵液 TS 浓度为 $25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 滤布孔径为 $40 \mu\text{m}$ 时, 动态膜形成过程中通量的变化如图 2 (c). 从中可知, 不同搅拌速度形成的动态膜的通量随着搅拌速度的增大而增大. 未搅拌时, 初始通量较小, 然后不断减小, 最后降至 $1.6 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 搅拌速度为 $50 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 稳定通量分别为 $3.2 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $4.3 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 这是因为搅拌速度的增加, 提供了更强的剪切力, 污泥颗粒受到更强的冲刷, 阻止部分污泥颗粒沉积到滤布上, 因此, 在滤布上面形成的动态膜层更加薄, 稳定时出水膜通量更大^[23].

2.2 自生动态膜形成过程的模型拟合

污泥发酵液形成动态膜的过程中膜通量变化数据与经典过滤模型的拟合如图 3 所示 (以动态膜形成的最佳条件为例, 污泥发酵液 TS 浓度为 $25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 滤布孔径为 $40 \mu\text{m}$, 搅拌速度为 $50 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$). 在最初的 27 min 内, 膜通量变化符合标准过滤模型 [见图 3 (a)]. 在此阶段, 由于滤布孔径较大, 溶解性物质和小颗粒物体可以通过动态膜层, 出水中 SS 浓度较高. 由于错流作用, 大颗粒污泥絮体无法沉积到滤布上, 只有与滤布孔径相近的污泥颗粒才能进入孔内, 堵塞滤布孔径, 通量快速下降. 在 27 ~ 37 min 时, 膜通量变化的模型逐渐由标准堵塞模型过渡为完全堵塞模型. 在随后的 70 min 内, 膜通量变化符合完全堵塞模型. 此阶段, 污泥颗粒沉积到滤布上, 没有颗粒的层叠. 经过此阶段后, 滤布上已经形成了单层污泥, 已经拥有截留固体颗粒的能力, 此时膜出水的 SS 较低. 在 140 ~ 290 min 时, 膜通量变化符合中间堵塞模型. 此阶段, 污泥颗粒继续沉积到已经形成的单层污泥上, 污泥的不断沉积使动态膜层污泥不断压实, 阻力不断上升, 此阶段污泥的沉积会造成膜污染的加重. 最后, 膜通量的变化



以发酵液污泥 TS 浓度为 $25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 滤布孔径为 $40 \mu\text{m}$, 搅拌速度为 $50 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 为例

图 3 自生动态膜形成过程与经典过滤模型的拟合

Fig. 3 Linear fitting of the formation process of self-forming dynamic membrane with four classic filtration laws

符合滤饼过滤模型. 此阶段, 主要是粒径较大的颗粒继续沉积到动态膜层污泥上. 综上所述, 动态膜的形成过程包含 4 个过程: 先通过与膜基材孔径相似的污泥颗粒堵塞膜基材孔, 其后在膜基材上形成单层污泥, 进而在膜基材上形成多层污泥, 最后, 大颗粒污泥继续沉积到污泥层上.

滤饼的压缩性, 孔隙度和厚度是表征动态膜物理特性的指标. 通过模型的拟合和过滤模型中的方程可以计算 4 个阶段的 α_c . 分别为 1.731×10^9 、 2.702×10^9 、 2.976×10^9 和 $2.52 \times 10^9 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$. 在阶段一, 过滤模型为标准堵塞模型, 此时膜表面只是污泥颗粒堵塞孔径, 几乎没有污泥层的形成, 此时的压缩性可以认为是 $n=0$ 且 α_c 应该就是 α_{c0} . 因此, 二、三和四阶段的压缩性分别为 0.055 9、0.068 1 和 0.047. 根据上面分析, 阶段二形成的动态膜层为单层污泥, 没有污泥颗粒的层叠, 因此, 此阶段的可压缩性较小. 而第三阶段, 污泥层是由一个颗粒沉积到另一个颗粒上形成的多层污泥, 因此, 此阶段的可压缩性较大. 随后, 污泥继续沉积, 但是可压缩性变小, 这是因为在第四阶段, 动态膜层的厚度已经超过水力边界层, 松散的污泥层可以被去除, 同时不断积累紧密的结构, 所以, 第四阶段动态膜层污泥的压缩性变小. 根据方程 (10) 计算出动态膜层的孔隙度为 0.401 4, 这比 Liu 等^[16] 的数值要高很多, 这或许是因为, 发酵污泥与活性污泥的性质不同和错流速度不同所致. 而根据方程 (11) 计算得到高度为 3.343 cm, 这比实际中的数值 0.46 cm 要大, 这是因为膜表面的错流速度所致.

2.3 自生动态膜对污泥发酵液的分离效果

污泥发酵液过滤系统能够实现良好的固液分离能力. 出水中 SS 浓度的变化和 SCOD 的变化能够反映动态膜的截留效果^[24]. 动态膜进水 SS 浓度高达 $15\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 经过 1 d 后, 出水中的 SS 已经降到了 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在随后的 10 d 中, 出水 SS 始终保持在 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 污泥发酵液中 98% 以上的 SS 被截留, 因此, 动态膜可以保持良好的固体颗粒截留能力 [图 4 (a)]. 动态膜进水 SCOD 约为 $14\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 从 1 ~ 6 d, 出水 SCOD 浓度不断下降, 到达 6 d 时稳定在 $10\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 截留率为 28% [图 4 (b)]. 由此可知, 动态膜对固体颗粒的分离效果很快就可以形成, 而完整的分离效果要 6 d 才能达到^[13]. 此时动态膜不仅可以截留固体颗粒, 还可以截留部分溶解性的大分子物质. 图 4 (c) 是动态膜对污泥发酵液中 VFAs 的渗透效果. 从中可知, 出水

VFAs 的浓度在 $2.9 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上, 动态膜对 VFAs 的渗透率在 82% 以上, 动态膜对 VFAs 没有明显的截留效果. 由图 4 (b) 和 4 (c) 可知, 出水中含有丰富的有机物, 并包含大量的 VFAs, 具有较高的利用价值, 可以作为污水处理厂的外加碳源, 也可以作为生产有机酸的原料等^[2].

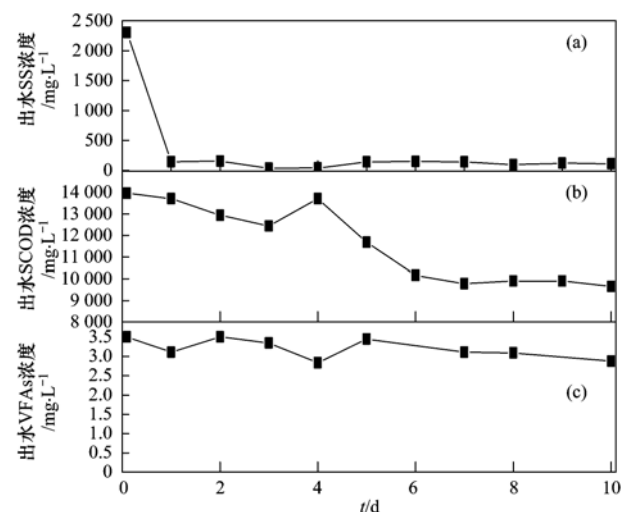


图 4 SFDMBR 对污泥发酵液的分离效果

Fig. 4 Separation of sludge fermentation liquid by SFDMBR

2.4 自生动态膜成分分析

SMP 和 EPS 是组成自生生物动态膜的主要物质, 且蛋白质和多糖是主要成分^[25]. SMP 和 EPS 所包含的蛋白质和多糖含量如图 5. 动态膜层污泥的 EPS 中蛋白质含量为 $94 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 约为发酵污泥的 2 倍, 也高于膜腔室内污泥的 EPS 中蛋白质的含量 ($78 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), 而动态膜层污泥的 EPS 中多糖、SMP

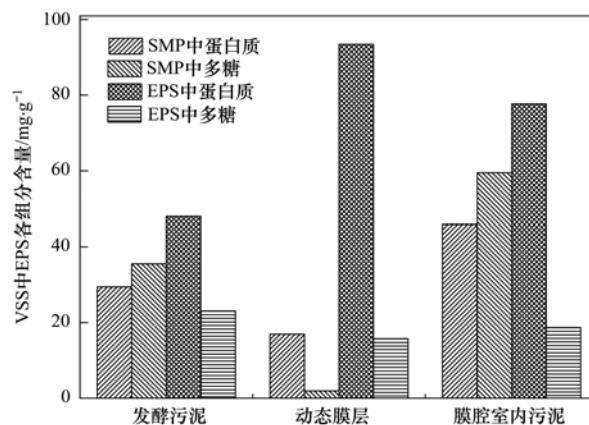


图 5 反应器内发酵污泥、动态膜层污泥和膜腔室内污泥的 SMP 和 EPS 中所含蛋白质和多糖

Fig. 5 Proteins and polysaccharides concentrations of EPS and SMP in fermented sludge, dynamic membrane layer sludge and in sludge inside the membrane chamber of the bioreactor

中蛋白质和多糖含量分别为 16、17 和 $2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 小于发酵污泥和膜腔室内污泥. EPS 中的蛋白质容易积累到动态膜层污泥中, 是其主要成分^[26], 而 SMP 中蛋白质、SMP 和 EPS 中多糖则容易透过动态膜层进入膜腔室中^[27], 导致膜腔室内污泥含有较高浓度的 SMP 和 EPS.

3 结论

(1) 动态膜的形成过程受膜基材孔径、过滤发酵液污泥浓度和搅拌速度的影响. 随着滤布孔径和搅拌速度的增大, 膜通量增大. 污泥浓度影响初始膜通量, 并不影响稳定时的膜通量.

(2) 动态膜的形成过程可以采用死端过滤模型描述, 按照过滤反应时间顺序, 过滤特征依次体现为标准过滤、完全堵塞过滤、中间堵塞过滤和滤饼过滤. 动态膜形成过程可以表述为: 先通过与膜基材孔径相似的污泥颗粒堵塞膜基材孔, 其后在膜基材上形成单层污泥, 进而在膜基材上形成多层污泥, 最后, 大颗粒污泥继续沉积到污泥层上.

(3) 动态膜形成以后, 动态膜对污泥颗粒和 SCOD 的截留效率在 98% 以上和 28% 左右, 延长了固体停留时间, 能够促进污泥的进一步发酵, 对 VFAs 的渗透效率在 82% 以上, 可以减少发酵过程中 VFAs 积累对污泥发酵产酸的抑制作用. 此外, EPS 中蛋白质是组成动态膜的主要成分.

参考文献:

- [1] Liu H, Wang J, Liu X L, *et al.* Acidogenic fermentation of proteinaceous sewage sludge; Effect of pH [J]. *Water Research*, 2012, **46**(3): 799-807.
- [2] Gao Y Q, Peng Y Z, Zhang J Y, *et al.* Biological sludge reduction and enhanced nutrient removal in a pilot-scale system with 2-step sludge alkaline fermentation and A²O process [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(5): 4091-4097.
- [3] Pratt S, Liew D, Batstone D J, *et al.* Inhibition by fatty acids during fermentation of pre-treated waste activated sludge [J]. *Journal of Biotechnology*, 2012, **159**(1-2): 38-43.
- [4] Zhang L, Zhang S J, Wang S Y, *et al.* Enhanced biological nutrient removal in a simultaneous fermentation, denitrification and phosphate removal reactor using primary sludge as internal carbon source [J]. *Chemosphere*, 2013, **91**(5): 635-640.
- [5] 叶茂盛, 张捍民, 魏奇锋, 等. 利用边界层理论确定预涂动态膜生物反应器稳定曝气量的试验研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(10): 147-151.
- [6] Ersahin M E, Ozgun H, Dereli R K, *et al.* A review on dynamic membrane filtration: materials, applications and future perspectives [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **122**: 196-206.
- [7] 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.
- [8] 张捍民, 乔森, 叶茂盛, 等. 预涂动态膜-生物反应器处理生活污水试验研究[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(2): 249-253.
- [9] 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.
- [10] 高松, 周增炎, 高廷耀. 自组生物动态膜在污泥截留中的应用研究[J]. *净水技术*, 2005, **24**(1): 14-17.
- [11] Park M S, Kiso Y, Jung Y J, *et al.* Sludge thickening performance of mesh filtration process [J]. *Water Science and Technology*, 2004, **50**(8): 125-133.
- [12] 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.
- [13] Zhang X Y, Wang Z W, Wu Z C, *et al.* Formation of dynamic membrane in an anaerobic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, **165**(1): 175-183.
- [14] Lötter L H, Van der Merwe E H M. The activities of some fermentation enzymes in activated sludge and their relationship to enhanced phosphorus removal [J]. *Water Research*, 1987, **21**(11): 1307-1310.
- [15] Huang J S, Tsai C C, Chou H H, *et al.* Simulation modeling for nitrogen removal and experimental estimation of mass fractions of microbial groups in single-sludge system [J]. *Chemosphere*, 2006, **62**(1): 61-70.
- [16] Liu H B, Yang C Z, Pu W H, *et al.* Formation mechanism and structure of dynamic membrane in the dynamic membrane bioreactor [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, **148**(2-3): 290-295.
- [17] Hermia J. Constant pressure blocking filtration laws application to powder-law non-newtonian fluids [J]. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 1982, **60**(3): 183-187.
- [18] Liang S, Qu L J, Meng F G, *et al.* Effect of sludge properties on the filtration characteristics of self-forming dynamic membranes (SFDMs) in aerobic bioreactors: Formation time, filtration resistance, and fouling propensity [J]. *Journal of Membrane Science*, 2013, **436**: 186-194.
- [19] Chu H Q, Zhang Y L, Zhou X F, *et al.* Dynamic membrane bioreactor for wastewater treatment: Operation, critical flux, and dynamic membrane structure [J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, **450**: 265-271.
- [20] 孟晓荣, 张海珍, 王磊, 等. 城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(5): 1822-1827.
- [21] Alibardi L, Cossu R, Saleem M, *et al.* Development and permeability of a dynamic membrane for anaerobic wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **161**: 236-244.
- [22] Loderer C, Wörle A, Fuchs W. Influence of different mesh filter module configurations on effluent quality and long-term filtration

- performance [J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, **46**(7): 3844-3850.
- [23] Khan J S, Visvanathan C, Jegatheesan V, *et al.* Influence of mechanical mixing rates on sludge characteristics and membrane fouling in MBRs [J]. *Separation Science and Technology*, 2008, **43**(7): 1826-1838.
- [24] Fan B, Huang X. Characteristics of a self-forming dynamic membrane coupled with a bioreactor for municipal wastewater treatment [J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, **36**(23): 5245-5251.
- [25] 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.
- [26] 付宽, 薛罡, 高品, 等. 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 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(6): 2241-2248.
- [27] Zhang X Y, Wang Z W, Wu Z C, *et al.* Membrane fouling in an anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for municipal wastewater treatment: Characteristics of membrane foulants and bulk sludge [J]. *Process Biochemistry*, 2011, **46**(8): 1538-1544.

关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明。

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为。自即日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊。

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊。

我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动。

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任。我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合。

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部

CONTENTS

Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen	SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, <i>et al.</i> (1513)
Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing	CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (1523)
Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (1530)
Comparison Test Between PM _{2.5} Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for PM _{2.5} in Ambient Air	WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, <i>et al.</i> (1538)
Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	PEI Bing (1544)
Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors	FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, <i>et al.</i> (1550)
Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body	FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, <i>et al.</i> (1557)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (1565)
Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City	GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, <i>et al.</i> (1573)
Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China	LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, <i>et al.</i> (1582)
Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas	XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (1590)
Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season	ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (1598)
Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater	SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i> (1605)
Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province	CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, <i>et al.</i> (1615)
Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of <i>Chironomus plumosus</i>	SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1622)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1630)
Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water	HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1639)
Effects of <i>Litchi chinensis</i> Defoliation on Growth and Photosynthesis of <i>Microcystis aeruginosa</i>	WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, <i>et al.</i> (1648)
Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to Green Algae	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655)
Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water	DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, <i>et al.</i> (1662)
Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water	LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, <i>et al.</i> (1668)
Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water	ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, <i>et al.</i> (1674)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, <i>et al.</i> (1678)
Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid	ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, <i>et al.</i> (1686)
Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes	ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1694)
TiO ₂ -Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism	GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, <i>et al.</i> (1700)
Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(VI) Ions	WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, <i>et al.</i> (1707)
On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements	ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, <i>et al.</i> (1713)
Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production	HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, <i>et al.</i> (1720)
Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test	ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, <i>et al.</i> (1727)
Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent <i>N,N</i> -bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium	WU Qing, CUI Yan-rui, TANG Xiao-xiao, <i>et al.</i> (1733)
Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin, <i>et al.</i> (1739)
Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL	LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, <i>et al.</i> (1749)
Biodegradation Characteristics and Kinetics of <i>p</i> -nitrophenol by Strain <i>Arthrobacter</i> sp. CN2	REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, <i>et al.</i> (1757)
Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of <i>Brevibacillus brevis</i>	LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (1763)
Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill	LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, <i>et al.</i> (1769)
Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations	MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, <i>et al.</i> (1776)
Effects of Nitrate and CH ₄ on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils	LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, <i>et al.</i> (1785)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau	YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (1793)
Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau	JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, <i>et al.</i> (1802)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment	ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, <i>et al.</i> (1810)
Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment	ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (1818)
Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China	MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, <i>et al.</i> (1827)
Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas	LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836)
Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China	XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, <i>et al.</i> (1842)
Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants	HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, <i>et al.</i> (1849)
Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil	YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, <i>et al.</i> (1856)
Enhanced Phytoextraction of Heavy Metals from Contaminated Soils Using <i>Sedum alfredii</i> Hance with Biodegradable Chelate GLDA	WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (1864)
Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress	JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (1870)
Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (1877)
Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants	LI Miao-miao (1888)
A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident	CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, <i>et al.</i> (1902)

《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5月15日 第36卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 5 May 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