

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第2期

Vol.36 No.2

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

霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征	朱琮宇,程金平,魏雨晴,薄丹丹,陈筱佳,江璇,王文华(373)
大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响	蒲维维,石雪峰,马志强,赵秀娟,张小玲,徐晓峰(379)
近3年太原市夏季降水的化学特征研究	郭晓方,崔阳,王开扬,何秋生,王新明(388)
太原市PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	刘珊,彭林,温彦平,白慧玲,刘凤娟,史美鲜,李丽娟(396)
青海省西宁市和天峻县大气颗粒物中有机氯农药和类二噁英多氯联苯的水平与分布	李秋旭,何畅,马召辉,马丽花,扎西卓玛,王英,金军(402)
北京10个常绿树种颗粒物吸附能力研究	王兵,张维康,牛香,王晓燕(408)
人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征	宋志文,王琳,徐爱玲,吴等等,夏岩(415)
春季融雪补给后巩乃斯河水物理化学性质空间分布特征研究	刘翔,郭玲鹏,张飞云,马杰,牟书勇,赵鑫,李兰海(421)
青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析	李鹤,李军,刘小龙,杨曦,张伟,王洁,牛颖权(430)
亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析	张垒,李秋华,黄国佳,欧腾,李钊,吴迪,周黔兰,高廷进(438)
长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性	金晓丹,吴昊,陈志明,宋红军,何义亮(448)
黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究	郭兴森,吕迎春,孙志高,王传远,赵全升(457)
苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析	陈海龙,袁旭音,王欢,李正阳,许海燕(464)
滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力	孟亚媛,王圣瑞,焦立新,刘文斌,肖焱波,祖维美,徐天敏,丁帅,周童(471)
城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性	李如忠,钱靖,董玉红,唐文坤,杨继伟(481)
艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究	张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清(490)
工矿业绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价	臧飞,王胜利,南忠仁,王兆炜,任业萌,王德鹏,廖琴,周婷(497)
山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价	戴彬,吕建树,战金成,张祖陆,刘洋,周汝佳(507)
UV协同ClO ₂ 去除三氯生及其降解产物的研究	李玉瑛,何文龙,李青松,金伟伟,陈国元,李国新(516)
氯化铁絮凝-直接过滤工艺对地下水中As(V)的去除机制研究	康英,段晋明,景传勇(523)
负载纳米零价铁铜藻基活性炭的制备及其去除水中Cr(VI)的研究	曾淦宁,武晓,郑林,伍希,屠美玲,王铁杆,艾宁(530)
磁性石墨烯吸附水中Cr(VI)研究	刘伟,杨琦,李博,陈海,聂兰玉(537)
TiO ₂ @酵母复合微球固定床吸附荧光增白剂-VBL的研究	王菲,张凯强,白波,王洪伦,索有瑞(545)
MnO ₂ /CFP复合电极的制备及电吸附Pb ²⁺ 特性的研究	刘方园,胡承志,李永峰,梁乾伟(552)
吸附相反应技术制备微弱光响应的多组分掺杂TiO ₂ 催化剂	王挺,祝轶琛,孙志轩,吴礼光(559)
掺铁TiO ₂ 纳米管阵列模拟太阳光光电催化降解双酚A的研究	项国梁,喻泽斌,陈颖,徐天佐,彭振波,刘钰鑫(568)
天然矿物负载Fe/Co催化H ₂ O ₂ 氧化降解阳离子红3R	马楠,刘华波,谢鑫源(576)
臭氧微气泡处理酸性大红3R废水特性研究	张静,杜亚威,刘晓静,周玉文,刘春,杨景亮,张磊(584)
碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响	韩芸,许松,董涛,王斌帆,王显耀,彭党聪(590)
低温低溶解氧EBPR系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究	马娟,李璐,俞小军,魏雪芬,刘娟丽(597)
O池溶解氧水平对石化废水A/O工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响	丁鹏元,初里冰,张楠,王星,王建龙(604)
改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探	周雨璐,付豪逸,范先锋,王振宇,郑冠宇(612)
热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响研究	杨世东,陈霞,刘操,肖本益(619)
不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应	齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,贾军强,郭树芳,贺云龙,闫钟清,王丽芹(625)
地表臭氧浓度升高对旱作农田N ₂ O排放的影响	吴杨周,胡正华,李岑子,陈书涛,谢燕,肖启涛(636)
亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究	刘义凡,陈书涛,胡正华,沈小帅,张旭(644)
川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素	罗由林,李启权,王昌全,李冰,张新,冯文颖,翁倩,吴冕(652)
黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响	张帅,许明祥,张亚锋,王超华,陈盖(661)
汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性	张广帅,林勇明,马瑞丰,邓浩俊,杜锟,吴承祯,洪伟(669)
土壤电动修复的电极空间构型优化研究	刘芳,付融冰,徐珍(678)
有机氯农药污染场地挖掘过程中污染物的分布及健康风险	张石磊,薛南冬,杨兵,李发生,陈宣宇,刘博,孟磊(686)
水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律	杨文骏,王英杰,周航,易开心,曾敏,彭佩钦,廖柏寒(694)
植物根系体外溶液提取方法研究:以多环芳烃为例	朱满党,都江雪,乐乐,李金凤,杨青青,陆守昆,占新华(700)
垂序商陆叶细胞壁结合锰机制研究	徐向华,刘翠英,李平,郎漫,赵小艳,杨建军,官敏(706)
1株筛自柴油污染土壤的铜绿假单胞菌对萘的降解特性研究	刘文超,吴彬彬,李晓森,卢滇楠,刘永民(712)
CdSe/ZnS量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应	陈慕飞,黄承志,蒲德永,郑朝依,袁开米,金星星,张耀光,金丽(719)
锯齿新米虾对Cu ²⁺ 和毒死蜱毒性的生理响应	李典宝,张玮,王丽卿,张瑞雷,季高华(727)
同步衍生超声乳化微萃取气相色谱法测定环境水样中的苯胺类化合物	田立勋,戴之希,王国栋,翁焕新(736)
热水环境中Na ⁺ 活化斜发沸石吸附钙离子除硬过程研究	张硕,王栋,陈远超,张兴文,陈贵军(744)
区域经济-污染-环境三维评价模型的构建与应用	樊新刚,米文宝,马振宁(751)
《环境科学》征订启事(401)	
《环境科学》征稿简则(437)	
信息(489,522,726,735)	

改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探

周雨珺, 付豪逸, 范先锋, 王振宇, 郑冠宇*

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 探讨污泥中丝状真菌对污泥脱水性能的影响及其机制, 对生物法强化污泥脱水技术的发展具有重要意义. 本研究从剩余污泥中分离筛选可以提高污泥脱水性能的丝状真菌, 并分析其改善污泥脱水性能的具体机制. 结果表明, 在剩余污泥中存在着可以促进污泥脱水性能改善的丝状真菌, 从中分离筛选出 1 株毛霉属的真菌 *Mucor circinelloides* ZG-3, 该菌对改善污泥脱水性能具有良好的效果. 该丝状真菌处理剩余污泥过程中污泥的脱水性能改善效果主要受到接种方式、接种浓度和污泥含固率的影响, 其最适接种方式为菌丝体接种, 最适接种浓度为 10%, 最适污泥含固率约为 4%. 在最适条件下处理污泥可使污泥比阻降低 75.1%, 显著改善污泥的脱水性能, 并且处理后污泥溶液的 COD 值约为 $310 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 处理后的污泥仍具有良好的沉降性能. *M. circinelloides* ZG-3 处理剩余污泥过程中, 污泥脱水性能的改善主要与污泥胞外聚合物 (EPS) 的降解和污泥 pH 的降低有关. 因此, 采用 *M. circinelloides* ZG-3 处理剩余污泥是一种非常有潜力的新型污泥调理技术.

关键词: 污泥; 丝状真菌; 脱水性能; 毛霉属; 比阻

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)02-0612-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.02.032

Isolation of Filamentous Fungi Capable of Enhancing Sludge Dewaterability and Study of Mechanisms Responsible for the Sludge Dewaterability Enhancement

ZHOU Yu-jun, FU Hao-yi, FAN Xian-feng, WANG Zhen-yu, ZHENG Guan-yu*

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: To study the influence of filamentous fungi on the sludge dewaterability is very significant for the development of biological treatment methods for enhancing sludge dewaterability. In this study, filamentous fungi capable of enhancing sludge dewaterability were isolated from sewage sludge and the related mechanisms responsible for the sludge dewaterability enhancement were investigated. A filamentous fungus *Mucor circinelloides* ZG-3 was successfully isolated from sludge, and sludge dewaterability could be drastically improved by this fungus. Further study revealed that the enhancement of sludge dewaterability was influenced by inoculation method, inoculum size and solid content of sludge. The optimal inoculation method was mycelia inoculation, the optimal inoculum size was 10%, and the optimal solid content of sludge was about 4%. Under the optimized conditions, the specific resistance to filtration (SRF) of sludge could be decreased by 75.1% after being treated by *M. circinelloides* ZG-3. After the treatment, the COD value of sludge supernatant was only $310 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and the treated sludge still exhibited good settleability. During the treatment of sewage sludge by *M. circinelloides* ZG-3, the mechanisms responsible for the sludge dewaterability enhancement included the degradation of sludge extracellular polymeric substances (EPS) and the decrease of sludge pH. Therefore, the treatment of sewage sludge using *M. circinelloides* ZG-3 is a useful and novel method for sludge conditioning.

Key words: sludge; filamentous fungi; dewaterability; *Mucor* sp.; specific resistance to filtration

截至 2014 年 3 月底, 全国设市城市、县累计建成城镇污水处理厂 3622 座, 日处理污水能力约 $1.53 \times 10^9 \text{ m}^3$ [1], 污水处理厂每年产生超过 600 万 t 污泥 (以干重计) [2,3]. 但是, 目前城镇污水处理厂产生的浓缩污泥含水率通常高达 97% 左右, 如此高的水分含量导致污泥体积庞大, 给污泥的转运、后续处理处置都带来了很大的困难 [4]. 因此, 寻找合适的方法大幅降低污泥水分含量, 是解决污泥出路的关键所在. 当前, 添加各种化学絮凝剂并辅以机械脱水以实现“泥水分离”的方法普遍应用于我国污水处理厂, 这些絮凝剂包括聚丙烯酰胺 (PAM)、

氯化铁、聚合硫酸铝或聚合三氯化铝和助凝剂如石灰等 [5]. 但在此方法中, 投入的大量无机絮凝剂, 会大幅增加整个污水处理过程的成本, 降低污泥中有机物含量和热值, 并增加最终的污泥质量, 而部分有机絮凝剂的添加则会带来潜在的二次污染风险 [6].

生物法强化污泥脱水是近年来发展起来的一种

收稿日期: 2014-07-22; 修订日期: 2014-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21307059); 江苏省自然科学基金项目 (BK20130667); 国家级大学生创新创业训练计划项目 (201310307021)

作者简介: 周雨珺 (1993 ~), 女, 主要研究方向为污泥处理处置, E-mail: yujunjun2013@outlook.com

* 通讯联系人, E-mail: gyzheng@njau.edu.cn

污泥调理方法,其主要原理是通过微生物自身或微生物的代谢产物来改善污泥的脱水性能^[7],与添加各种絮凝剂的化学法相比,生物法具有效率高、二次污染小等特点^[8]。其中,由于良好的改善污泥脱水性能的效果,应用丝状真菌处理剩余污泥的方法已经引起了一些学者的关注^[8~13]。例如, Mannan 等^[14]的研究表明,丝状真菌 *Penicillium corylophilum* (WWZP1003) 和 *Aspergillus niger* (SCahmA103) 分别处理灭菌的剩余污泥(含固率为 0.5%~1%) 2 d 后,污泥的比阻从未处理时的 $1.36 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降至 $0.093 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.13 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别减少 93.20% 和 90.10%; Subramanian 等^[15,16]从污泥中分离到 1 株丝状真菌 *Penicillium expansum* BS30, 研究发现用此菌株处理含固率为 1% 的剩余污泥,可使污泥的毛细吸水时间(CST)从 80~245 s 降至 12.6~16 s,使污泥的脱水性能得到显著改善。但目前所分离到的丝状真菌通常只能处理含固率低于 1% 的污泥,同时处理污泥时需先将污泥进行灭菌预处理并添加外源碳源,极大地提高了处理成本^[8~11]。因此,本研究尝试从污泥中分离丝状真菌,并在污泥不灭菌和不添加外源碳源的情况下处理高含固率污泥,从而阐明此类丝状真菌改善污泥脱水性能的基本机制及影响因素,以期为生物法强化污泥脱水技术的发展提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试污泥

供试污泥取自江苏省无锡市太湖新城污水处理厂的污泥浓缩池。采集后立即测定污泥 pH、含固率、有机质含量、污泥比阻、Zeta 电位和污泥体积指数。污泥基本理化性质如下: pH 7.43, 含固率 3.7%, 有机质含量 46.5%, 污泥比阻 $1.71 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$, Zeta 电位 -31.8 mV, 污泥体积指数(SVI)为 34.6 $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 。采集的污泥保存于 4℃ 冰箱中待用。

1.2 培养基

马丁氏固体培养基:磷酸二氢钾 1.0 g, 七水合硫酸镁 0.5 g, 蛋白胨 5.0 g, 葡萄糖 10.0 g 和琼脂 15~20 g。将各成分溶解后加蒸馏水补充体积至 1000 mL, 115℃ 高压蒸汽灭菌 30 min。土豆葡萄糖液体培养基(PDA):取去皮土豆 200 g, 切成小块, 加蒸馏水 1000 mL 煮沸 30 min, 用 8 层纱布过滤土豆汁, 滤去土豆块, 加蒸馏水补充滤液体积至 1000 mL, 加葡萄糖 20 g, 115℃ 高压蒸汽灭菌 30

min。

1.3 丝状真菌的分离筛选

采得污泥立即进行微生物分离。将部分浓缩污泥置于 28℃, $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 摇床中培养 12 h, 之后梯度稀释至 10^{-3} 、 10^{-4} 和 10^{-5} , 再分别涂布到马丁氏平板(真菌选择性培养基)上, 放置到 28℃ 恒温培养箱中培养数天, 得到多株真菌, 再分别进行分离纯化, 选择 1 株具有较好污泥脱水性能的真菌作为本试验所用真菌菌株。

分子生物学鉴定:采用 OMG 公司产生的真菌 DNA 试剂盒快速提取该真菌的基因组 DNA, 并进行 PCR 扩增 18S rDNA-ITS 序列, 引物采用真菌 ITS 序列扩增通用引物 ITS1-Forward (5'-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3') 和 ITS4-Reverse (5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3')。PCR 反应体系为:反应液总体积为 20 μL , 含有 $10 \times \text{Ex Taq buffer}$ 2.0 μL , dNTP Mix ($2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 1.6 μL , 5p Primer 1 0.8 μL , 5p Primer 2 0.8 μL , Template 0.5 μL , 5u Ex Taq 0.2 μL , 超纯水 14.1 μL 。PCR 反应条件为:95℃ 预变性 5 min, 24 个循环(95℃ 变性 30 s, 55℃ 退火 30 s, 72℃ 延伸 90 s), 最终 72℃ 延伸 10 min。PCR 产物委托上海美吉生物医药科技有限公司进行双向测序。之后将 18S rDNA 测序结果提交到 NCBI 数据库进行 BLAST 比对, 找到典型的菌株系列用 Clustal X2.0 软件进行同源性比较, 并采用 Mega 4.0 软件构建系统发育树, 确定该菌株的分类地位。

孢子悬液的配置:在无菌环境下,加数毫升无菌水至长有真菌的平板中,用玻璃涂棒搅动使真菌孢子冲洗下来,用 4 层擦镜纸过滤,滤液置于离心管中,4℃ 保存待用,用血球计算板计数。将孢子悬液稀释至 10^7 个 $\cdot \text{mL}^{-1}$, 取 1 mL 稀释后孢子悬液接种至土豆液体培养基中,置于 28℃, $120 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 恒温振荡摇床中培养 2 d 后获得菌丝悬液。分别设置孢子接种和真菌菌丝接种 2 种不同的接种方式接种至污泥中,接种比例均为体积比 5%, 接种后体系总体积为 300 mL, 每个处理设置 3 个平行,置于 28℃, $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 恒温振荡摇床中培养,反应 3 d 后,每个处理取样涂布至马丁氏培养基中,根据真菌生长状况确定其最适接种方式。

1.4 丝状真菌接种量对污泥脱水性能的影响试验

将孢子悬液稀释至 10^7 个 $\cdot \text{mL}^{-1}$, 取 1 mL 孢子悬液接种至土豆液体培养基中,置于 28℃, $120 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 恒温振荡摇床中培养 2 d 后获得菌丝悬液。向剩余污泥中接入此菌丝悬液,依体积比设计 6 个

不同的接种量处理,分别为 CK(不接菌)、1%、3%、5%、10%和20%,总体积为300 mL,每个处理设置3个平行,置于28℃,180 r·min⁻¹恒温振荡摇床中培养,每天定时取样测定污泥比阻值,以确定最适真菌接种量。

1.5 污泥含固率对污泥脱水性能的影响试验

将孢子悬液稀释至10⁷个·mL⁻¹,取1 mL稀释后孢子悬液接种至土豆液体培养基中,置于28℃,120 r·min⁻¹恒温振荡摇床中培养2 d后获得菌丝悬液。将原始污泥分别稀释至含固率为0.5%、2%和3.7%(未稀释)3个浓度梯度,然后分别向其中接入10%菌丝悬液,并分别设置不加菌丝悬液的空白处理,总体积为300 mL,每个处理设置3个平行,置于28℃,180 r·min⁻¹恒温振荡摇床中培养,每天定时取样测定污泥比阻,以确定真菌处理的最适污泥含固率。

在确定最适接种方式、最适接种浓度和最适污泥含固率的基础上,进一步阐明丝状真菌促进污泥脱水性能改善的机制,试验设置接种最适量真菌和不接菌两个处理,每个处理3个平行,置于28℃,180 r·min⁻¹恒温振荡摇床中培养,每天定时取样测定污泥pH、污泥比阻、CST、Zeta电位、污泥体积指数、污泥上清液COD和污泥EPS含量。

1.6 测定方法

采用pHS-3C精密pH计(上海雷磁厂)测定污泥的pH值;Zeta电位值通过Colloidal Dynamic Zeta

电位测定仪测定;污泥的比阻(SRF)采用布氏漏斗-真空抽滤法测定^[17,18];污泥毛细吸水时间(CST)采用CST测定仪(TYPE 304M,英国Triton公司)测定;污泥体积指数(SVI):取100 mL污泥摇匀后,倒入100 mL量筒中,静止沉降30 min后,记录污泥体积V(mL),烘干测定污泥质量m(g),则SVI = V/m(以TSS计, mL·g⁻¹);COD采用Orion COD Thermoreactor分析仪测定。

EPS的提取与测定^[19]:将污泥在15 000 r·min⁻¹,4℃下离心20 min,上清液过0.45 μm滤膜,所得滤液即为污泥总EPS,EPS含量通过TOC分析仪(SHIMADZU TOC-5000A)测定。

2 结果与讨论

2.1 丝状真菌的分离及其最适接种方式的确定

采用马丁氏培养基从污泥中筛选菌种,将获得的不同真菌进行分离纯化后,进行液体培养,然后采用液体培养液分别做真菌污泥脱水试验。通过比较污泥在不同真菌处理下的脱水性能,最后选定1株有最佳污泥脱水效果的真菌菌株,通过测序和同源性比较对其进行鉴定,确定该真菌为毛霉属。该丝状真菌菌株编号为*Mucor circinelloides* ZG-3(下文中简称为*M. circinelloides* ZG-3),进化树如图1所示。该菌在马丁氏培养基上菌丝为淡黄色,菌丝较长,在土豆液体培养基中培养2 d后,菌丝分散均匀,不相互缠绕成菌丝球。

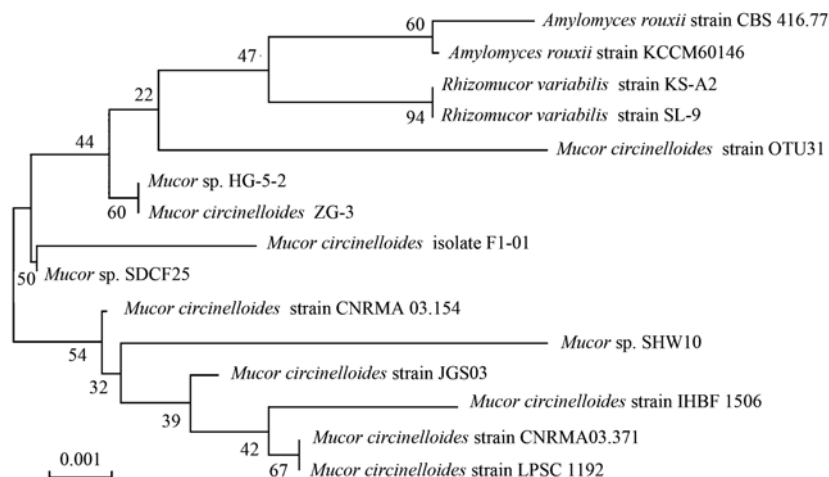


图1 *M. circinelloides* ZG-3及其相关菌株的ITS系统发育树

Fig. 1 Phylogenetic tree of *M. circinelloides* ZG-3 and related strains based on ITS sequence

分别以真菌孢子和真菌菌丝形式将此菌接种至剩余污泥中,培养3 d后,将污泥样品涂布于PDA平板上,培养后发现,以菌丝接种的真菌生长状况良

好,而以孢子悬液接种的真菌则生长缓慢(图2)。因此,菌丝接种是将*M. circinelloides* ZG-3接种至污泥中的最适接种方式。

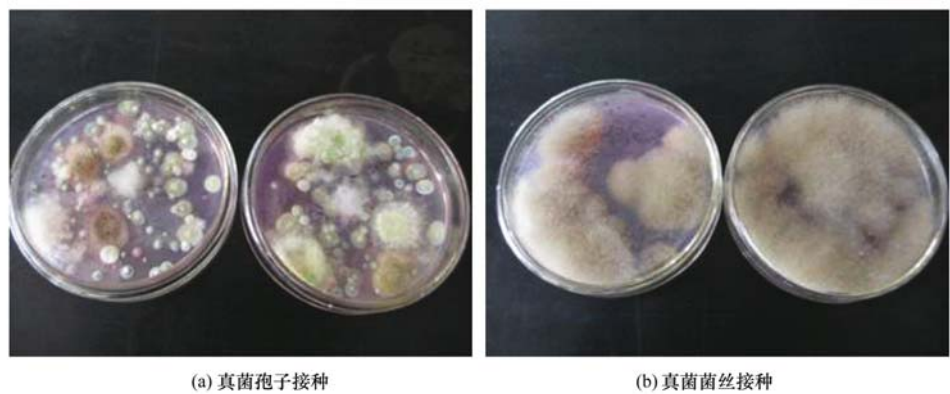


图2 以真菌孢子和真菌菌丝形式接种 *M. circinelloides* ZG-3 至污泥并培养 3 d 后的生长情况

Fig. 2 Growth of *M. circinelloides* ZG-3 inoculated into sludge in the forms of fungal spores and fungal mycelia

2.2 丝状真菌接种量对污泥脱水性能的影响

丝状真菌接种量对污泥脱水性能的提高有重要影响,主要表现在过低的丝状真菌接种量对污泥脱水性能的提高作用不显著,而过高的丝状真菌接种量则有可能使污泥的脱水性能在处理后出现恶化^[14]. 图3为采用不同接种量的丝状真菌 *M. circinelloides* ZG-3 处理剩余污泥过程中比阻和比阻降低率的变化. 如图3(a)所示,在不接种丝状真菌而只对污泥进行好氧培养的空白对照中,污泥的比阻值在培养的过程中先降低后升高,此结果与其他学者的研究结果一致,其原因可能是好氧培养条件下污泥中微生物胞外聚合物发生降解,从而在一定程度上改善了污泥的脱水性能^[20]. 接种1%、3%、5%和20%的丝状真菌的处理中污泥比阻值的变化趋势与空白对照一致,在培养的第3 d 达到最低污泥比阻值,之后逐渐上升. 而接种10%丝状真菌的处理中污泥比阻值则在6 d 的培养期内一直呈下降

趋势,第6 d 时污泥的比阻值降为 $5.23 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$.

污泥的比阻降低率可以从另一方面有效地反映污泥脱水性能的改善效果^[21]. 图3(b)为不同菌丝体接种浓度下比阻降低率的变化. 从中可知,接种量为1%、3%和5%的处理的比阻降低率略高于不接丝状真菌的空白对照,但明显低于接种量为10%和20%的处理. 尽管接种量为20%的处理中,比阻降低率在第5 d 可达到最大的78.4%,但培养最后1 d 降至57.7%. 而接种量为10%的处理中比阻降低率持续上升,并在第6 d 达到最大值75.1%. 因此,对于采用丝状真菌 *M. circinelloides* ZG-3 处理剩余污泥而言,采用10%的接种量可以在培养过程中有效改善污泥的脱水性能,降低污泥的比阻值.

2.3 不同污泥含固率对污泥脱水性能的影响

采用丝状真菌 *M. circinelloides* ZG-3 处理不同含固率(0.5%、2%、3.7%)污泥过程中,污泥比阻

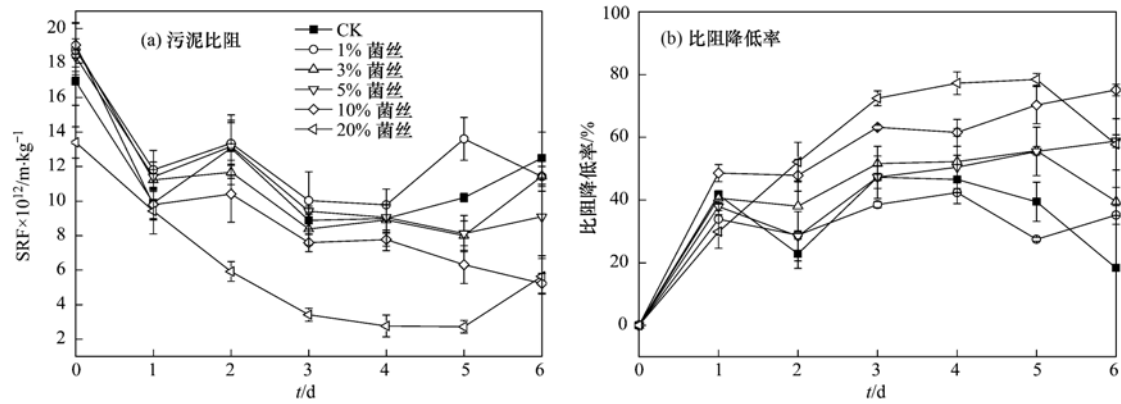


图3 不同菌丝体浓度的 *M. circinelloides* ZG-3 处理污泥过程中污泥比阻及比阻降低率的变化

Fig. 3 Changes of sludge SRF and the reduction rate of sludge SRF during sludge treatment by *M. circinelloides* ZG-3 with different inoculum sizes

值的变化如图 4 所示. 从中可知, 当污泥含固率为 0.5% 时, 丝状真菌处理不能有效促进污泥比阻的降低, 达不到改善污泥脱水性能的目的. 其原因可能与丝状真菌接种增大污泥的初始比阻值有关, 因为在 0 d 时向含固率为 0.5% 的污泥中接种丝状真菌后, 其比阻值达到 $1.313 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是未接种的空白污泥的 5 倍. 在其后的培养过程中, 对于含固率为 0.5% 和 2% 的两个处理, 虽然接种丝状真菌的处理中污泥的比阻值明显降低, 但仍未明显低于不接种丝状真菌的对照污泥的比阻. 因此, 采用丝状真菌 *M. circinelloides* ZG-3 处理低含固率的污泥时, 对污泥脱水性能的改善效果不明显, 甚至有可能使污泥脱水性能恶化. 而采用 *M. circinelloides* ZG-3 对 3.7% 的原始剩余污泥进行处理时, 污泥的脱水性能则可以得到大幅度的改善. 如图 4 所示, 在 0 d 时向 3.7% 的污泥中接种丝状真菌后, 污泥的比阻值为 $2.87 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$, 明显低于未接种的空白对照. 其后, 随着反应的进行, 污泥的比阻值进一步降低, 在处理 3 d 时降为最低, 仅为 $8.4 \times 10^{11} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与原始剩余污泥的比阻值相比降低了 74%, 显示出丝状真菌 *M. circinelloides* ZG-3 处理高含固率污泥时良好的效果. 因此, 采用丝状真菌 *M. circinelloides* ZG-3 处理污泥从而改善污泥脱水性能时, 可直接对含固率为 4% 左右的原始污泥进行处理, 而处理含固率为 0.5% ~ 2% 的污泥时, 则需先将污泥浓缩至 4% 左右, 然后再进行丝状真菌处理.

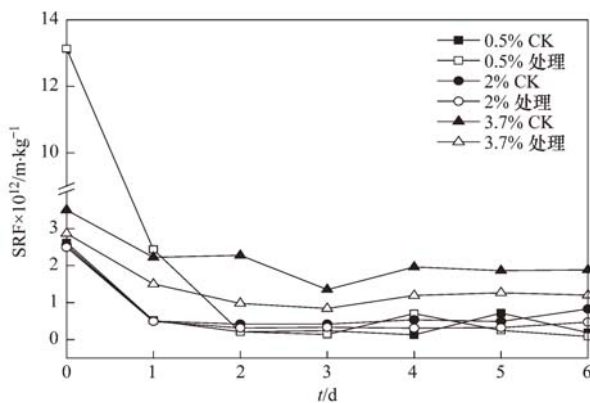


图 4 丝状真菌 *M. circinelloides* ZG-3 处理不同含固率污泥过程中污泥比阻的变化

Fig. 4 Change of SRF of sludge with different solid content treated by the filamentous fungus *M. circinelloides* ZG-3

2.4 丝状真菌处理改善污泥脱水性能的机制初探
为了进一步阐明丝状真菌促进污泥脱水性能改善的机制, 研究了接种 10% 丝状真菌 *M. circinelloides* ZG-3 处理含固率为 3.7% 的原始剩余

污泥过程中污泥 pH 值、污泥 Zeta 电位、污泥中微生物胞外聚合物 (EPS) 总量的变化, 结果如图 5 所示. 由图 5(a) 可知, 10% 丝状真菌处理原始剩余污泥的过程中, 污泥的 pH 值逐渐降低, 其降低幅度大于未接种丝状真菌的对照处理, 处理 6 d 后, 污泥 pH 值从初始的 7.09 降低至 4.97. 其原因可能是 *M. circinelloides* ZG-3 生长过程中可以代谢污泥中的有机物从而分泌一些酸性代谢物^[22], 另一方面有研究发现污泥 pH 值的降低可以促进部分污泥 EPS 的分解, 从而有助于污泥脱水性能的改善^[20]. 图 5

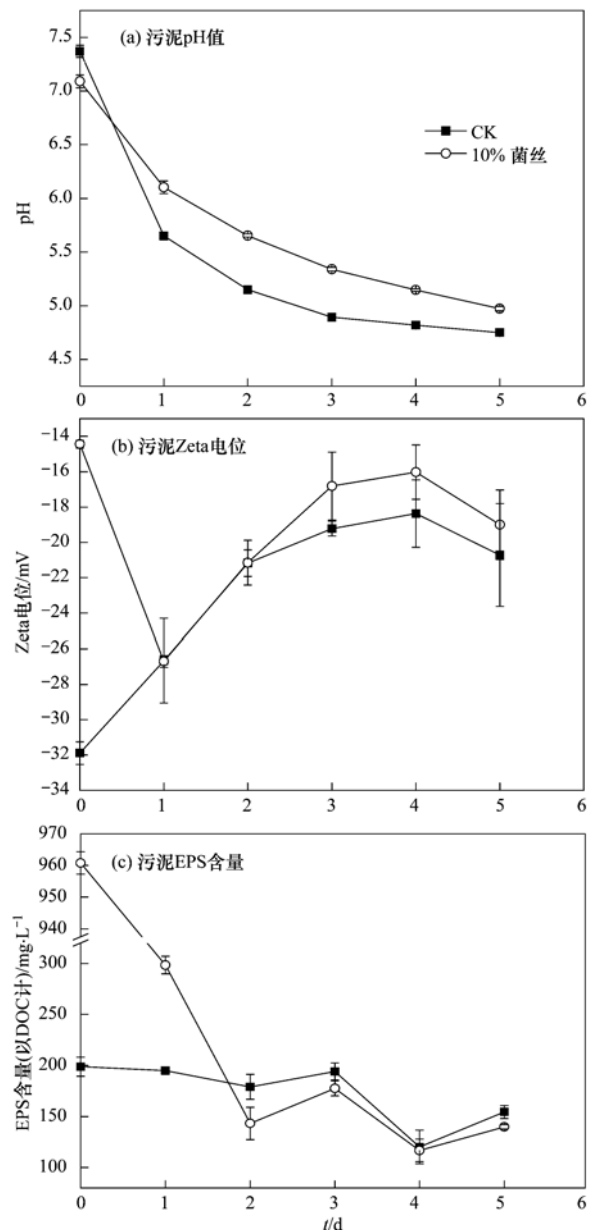


图 5 丝状真菌 *M. circinelloides* ZG-3 处理污泥过程中污泥 pH 值、污泥 Zeta 电位及污泥 EPS 含量的变化

Fig. 5 Changes of pH, Zeta potential and EPS content of sludge treated by the filamentous fungus *M. circinelloides* ZG-3

(b)为处理过程中污泥 Zeta 电位的变化,从中可知,由于接入了丝状真菌 *M. circinelloides* ZG-3,导致 0 d 时污泥 Zeta 电位值升高,但随着反应进行,处理与对照之间 Zeta 电位值变化无差异,两者均是逐渐上升. 根据 DLVO 理论,Zeta 电位是反映胶体和悬浮物稳定性的重要指标,Zeta 电位负值越大,说明污泥絮体间静电排斥越大,最终导致污泥絮体颗粒变小不易絮凝,使得沉降及脱水性能变差^[23]. 因此好氧培养过程中,污泥 Zeta 电位值的升高对于污泥脱水性能的改善应该也有一定程度的贡献,但并非是导致接种丝状真菌处理优于未接种的空白对照处理的主要原因,因为在两个处理过程中污泥 Zeta 电位的差异并不明显. 目前,已有大量研究表明,污泥中存在的大量污泥 EPS 是其脱水困难的主要原因^[19,20-26]. 本研究发现,在丝状真菌 *M. circinelloides* ZG-3 处理剩余污泥的过程中,接种丝状真菌的处理和未接种的空白对照中污泥 EPS 总量在培养过程中都是逐步降低,培养 2 d 后接种丝状真菌处理中的 EPS 总量已经低于空白对照中 EPS 的总量. 结合其他学者的研究,可以推测,丝状真菌 *M. circinelloides* ZG-3 处理剩余污泥过程中,污泥

EPS 的降解也是污泥脱水性能改善的原因之一^[20]. 因此,丝状真菌 *M. circinelloides* ZG-3 处理改善污泥脱水性能的机制主要包括污泥 pH 值的降低和污泥中总 EPS 的降解.

污泥上清液 COD 值和污泥体积指数 (SVI) 可以分别衡量处理后污泥上清液水质情况和污泥沉降性能. 如图 6(a) 结果显示,由于加入真菌培养液,导致真菌处理前期污泥上清液中 COD 量远高于空白处理,但随着反应的进行,丝状真菌快速利用污泥中的有机物,培养 1 d 后丝状真菌处理中的污泥上清液 COD 值大幅降低,并在处理后期开始低于空白处理,处理 5 d 后,其上清液 COD 值仅为 $310 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右. 该结果与众多研究者的结果一致^[14,21,28],显示丝状真菌处理可以达到去除污泥溶液中 COD 的目的. 另一方面,如图 6(b) 所示,接种丝状真菌的处理污泥的 SVI 值在培养的第 1 d 由 $34.6 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 上升至 $37.9 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$,之后则保持不变,而对照组的 SVI 值一直稳定在 $35 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右,说明丝状真菌处理污泥过程中,污泥仍具有良好的沉降性能,丝状真菌处理并未导致污泥恶化,引起污泥膨胀的问题^[29].

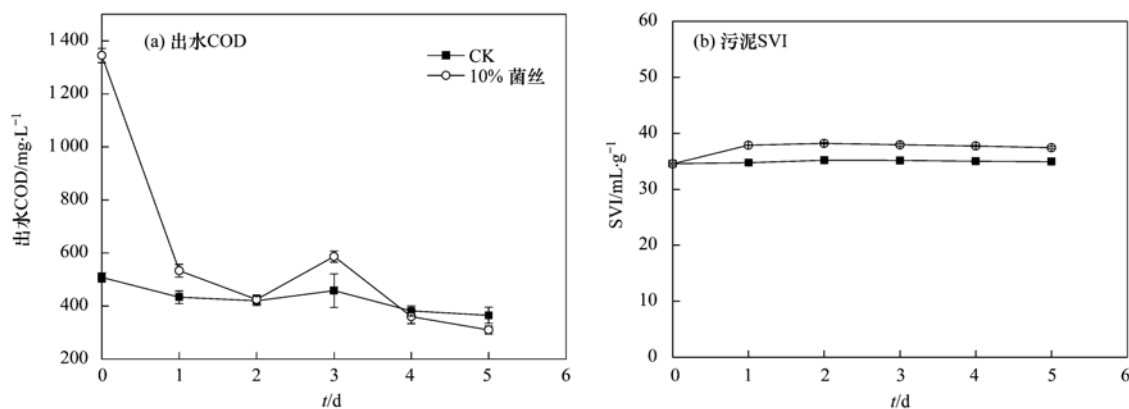


图 6 丝状真菌 *M. circinelloides* ZG-3 处理污泥过程中出水 COD 和污泥 SVI 的变化

Fig. 6 Changes of supernatant COD and sludge SVI during the treatment of sludge by *M. circinelloides* ZG-3

3 结论

从剩余污泥中成功分离到 1 株可以提高污泥脱水性能的丝状真菌 *M. circinelloides* ZG-3,该丝状真菌处理剩余污泥过程中污泥的脱水性能改善效果主要受到接种方式、接种浓度和污泥含固率的影响,其最适接种方式为菌丝体接种,体积接种浓度为 10%,最适污泥含固率约为 4%. *M. circinelloides* ZG-3 处理剩余污泥过程中,污泥脱水性能的改善主要与污泥 EPS 的降解和污泥 pH 的降低有关.

参考文献:

- [1] 住房和城乡建设部. 关于全国城镇污水处理设施 2014 年第一季度建设和运行情况的通报 [EB/OL]. http://wsxm.cin.gov.cn/shengji_sy.aspx.
- [2] Liu F W, Zhou J, Wang D Z, et al. Enhancing sewage sludge dewaterability by bioleaching approach with comparison to other physical and chemical conditioning methods [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(8): 1403-1410.
- [3] Liu F W, Zhou L X, Zhou J, et al. Improvement of sludge dewaterability and removal of sludge-borne metals by bioleaching at optimum pH [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 221-222: 170-177.

- [4] 周立祥. 固体废物处理处置与资源化[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007. 120-178.
- [5] 叶何兰, 叶锦韶, 钟子嘉, 等. 微生物絮凝剂的污泥脱水性能研究[J]. 环境化学, 2009, **28**(3): 414-417.
- [6] Chang J S, Abu-Orf M, Dentel S K. Alkylamine odors from degradation of flocculant polymers in sludges [J]. Water Research, 2005, **39**(14): 3369-3375.
- [7] 胡金财, 谈振娇, 张轶, 等. 污泥生物沥浸法深度脱水工程及其运行效果分析[J]. 给水排水, 2013, **39**(7): 48-52.
- [8] More T T, Yan S, Tyagi R D, *et al.* Potential use of filamentous fungi for wastewater sludge treatment [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(20): 7691-7700.
- [9] Hamdi M, Ellouz R. Use of *Aspergillus niger* to improve filtration of olive mill wastewater[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 1992, **53**(2): 195-200.
- [10] Alam M Z, Fakhru'l-Razi A. Enhanced settleability and dewaterability of fungal treated domestic wastewater sludge by liquid state bioconversion process[J]. Water Research, 2003, **37**(5): 1118-1124.
- [11] Khurshid A, Kazmi A A. Retrospective of ecological approaches to excess sludge reduction[J]. Water Research, 2011, **45**(15): 4287-4310.
- [12] Molla A H, Fakhru'l-Razi A, Abd-Aziz S, *et al.* A potential resource for bioconversion of domestic wastewater sludge [J]. Bioresource Technology, 2002, **85**(3): 263-272.
- [13] Mannan S, Fakhru'l-Razi A, Alam M Z. Optimization of process parameters for the bioconversion of activated sludge by *Penicillium corylophilum*, using response surface methodology[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, **19**(1): 23-28.
- [14] Mannan S, Fakhru'l-Razi A, Alam M Z. Use of fungi to improve bioconversion of activated sludge[J]. Water Research, 2005, **39**(13): 2935-2943.
- [15] Subramanian S B, Yan S, Tyagi R D, *et al.* A New, Pellet-Forming Fungal Strain: Its Isolation, Molecular Identification, and Performance for Simultaneous Sludge-Solids Reduction, Flocculation, and Dewatering[J]. Water Environment Research, 2008, **80**(9): 840-852.
- [16] Subramanian S B, Yan S, Tyagi R D, *et al.* Extracellular polymeric substances (EPS) producing bacterial strains of municipal wastewater sludge: Isolation, molecular identification, EPS characterization and performance for sludge settling and dewatering[J]. Water Research, 2010, **44**(7): 2253-2266.
- [17] 刘奋武, 周立祥, 周俊, 等. 不同污泥停留时间对城市污泥生物沥浸推流式运行系统的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(1): 191-196.
- [18] 宋兴伟, 周立祥. 生物沥浸处理对城市污泥脱水性能的影响研究[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(10): 2012-2017.
- [19] 周俊, 周立祥, 黄焕忠. 污泥胞外聚合物的提取方法及其对污泥脱水性能的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(7): 2752-2757.
- [20] Huo M B, Zheng G Y, Zhou L X. Enhancement of the dewaterability of sludge during bioleaching mainly controlled by microbial quantity change and the decrease of slime extracellular polymeric substances content [J]. Bioresource Technology, 2014, **168**: 190-197.
- [21] Fakhru'l-Razi A, Alam M Z, Idris A, *et al.* Domestic wastewater biosolids accumulation by liquid state bioconversion process for rapid composting [J]. Journal of Environmental Science and Health, 2002, **38**(8): 1533-1543.
- [22] Fakhru'l-Razi A, Molla A H. Enhancement of bioseparation and dewaterability of domestic wastewater sludge by fungal treated dewatered sludge [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **147**(1-2): 350-356.
- [23] Vogelaar L, Lammertink R G H, Barsema J N, *et al.* Phase separation micromolding: a new generic approach for microstructuring various materials[J]. Small, 2005, **1**(6): 645-655.
- [24] Higgins M J, Novak J T. Characterization of exocellular protein and its role in bioflocculation [J]. Journal of Environmental Engineering, 1997, **123**(5): 479-485.
- [25] Jin B, Britt M W, Paul L. Impacts of morphological, physical and chemical properties of sludge flocs on dewaterability of activated sludge [J]. Chemical Engineering Journal, 2004, **98**(1-2): 115-126.
- [26] 何培培, 余光辉, 邵立明, 等. 污泥中蛋白质和多糖的分布对脱水性能的影响[J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3457-3461.
- [27] Pipes W O, Zmuda J T. Assessing the efficiency of wastewater treatment[A]. In: Hurst C J, Crawford R L, Garland J L, *et al.* (Eds.). Manual of environmental microbiology [M]. Washington D C: ASM Press, 1997. 231-242.
- [28] Alam M Z, Fakhru'l-Razi A, Molla A H. Biosolids accumulation and biodegradation of domestic wastewater treatment plant sludge by developed liquid state bioconversion process using batch fermentation[J]. Water Research, 2003, **37**(15): 3569-3578.
- [29] 王凯军, 许晓鸣. 丝状菌污泥膨胀理论分析[J]. 中国给水排水, 2001, **17**(3): 66-69.

CONTENTS

Size Distribution Characteristics of Particulate Mercury on Haze and Non-haze Days	ZHU Qiong-yu, CHENG Jin-ping, WEI Yu-qing, <i>et al.</i> (373)
Impact of Atmospheric Pollutants Transport Pathways on Aerosol Optical Properties at Shangdianzi Background Station	PU Wei-wei, SHI Xue-feng, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (379)
Chemical Characteristics of 3-year Atmospheric Precipitation in Summer, Taiyuan	GUO Xiao-fang, CUI Yang, WANG Kai-yang, <i>et al.</i> (388)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Taiyuan	LIU Shan, PENG Lin, WEN Yan-ping, <i>et al.</i> (396)
Levels and Distribution of Organochlorine Pesticides and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Atmospheric Particulates in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	LI Qiu-xu, HE Chang, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (402)
Particulate Matter Adsorption Capacity of 10 Evergreen Species in Beijing	WANG Bing, ZHANG Wei-kang, NIU Xiang, <i>et al.</i> (408)
Carbon Sources Metabolic Characteristics of Airborne Microbial Communities in Constructed Wetlands	SONG Zhi-wen, WANG Lin, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (415)
Spatial Distribution Characteristics of the Physical and Chemical Properties of Water in the Kunes River After the Supply of Snowmelt During Spring	LIU Xiang, GUO Ling-peng, ZHANG Fei-yun, <i>et al.</i> (421)
Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China	LI He, LI Jun, LIU Xiao-long, <i>et al.</i> (430)
Seasonal Stratification and Eutrophication Characteristics of a Deep Reservoir, Longtan Reservoir in Subtropical Area of China	ZHANG Lei, LI Qiu-hua, HUANG Guo-jia, <i>et al.</i> (438)
Phosphorus Fractions, Sorption Characteristics and Its Release in the Sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China	JIN Xiao-dan, WU Hao, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (448)
Spatial-Temporal Distributions of Dissolved Inorganic Carbon and Its Affecting Factors in the Yellow River Estuary	GUO Xing-sen, LÜ Ying-chun, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (457)
Distributions of Phosphorus Fractions in Suspended Sediments and Surface Sediments of Tiaoxi Mainstreams and Cause Analysis	CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin, WANG Huan, <i>et al.</i> (464)
Characteristics of Nitrogen Pollution and the Potential Mineralization in Surface Sediments of Dianchi Lake	MENG Ya-yuan, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (471)
Influence of Transient Storage on Solute Transport and the Parameter Sensitivity Analysis in a Suburban Drainage Ditch	LI Ru-zhong, QIAN Jing, DONG Yu-hong, <i>et al.</i> (481)
Sources, Pollution Statue and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Aibi Lake, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaili, JIANG Feng-qing (490)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Suburban Outfall of Industrial Oasis Region	ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (497)
Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-based City of Shandong Province, Eastern China	DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, <i>et al.</i> (507)
Removal of Triclosan with the Method of UV/ClO ₂ and Its Degradation Products	LI Yu-ying, HE Wen-long, LI Qing-song, <i>et al.</i> (516)
Mechanism of Groundwater As(V) Removal with Ferric Flocculation and Direct Filtration	KANG Ying, DUAN Jin-ming, JING Chuan-yong (523)
Preparation of Nano Zero-valent Iron/ <i>Sargassum horneri</i> Based Activated Carbon for Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution	ZENG Gan-ming, WU Xiao, ZHENG Lin, <i>et al.</i> (530)
Adsorption of Cr(VI) on Magnetic Graphene from Aqueous Solution	LIU Wei, YANG Qi, LI Bo, <i>et al.</i> (537)
Adsorption of the TiO ₂ @Yeast Composite Microspheres for Adsorbing Fluorescent Whitening Agent-VBL in Fixed Bed	WU Fei, ZHANG Kai-qiang, BAI Bo, <i>et al.</i> (545)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of MnO ₂ /CFP Composite Electrode	LIU Fang-yuan, HU Cheng-zhi, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (552)
Preparation of Weak Light Driven TiO ₂ Multi Composite Photocatalysts via Adsorption Phase Synthesis	WANG Ting, ZHU Yi-chen, SUN Zhi-xuan, <i>et al.</i> (559)
Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A in Water by Fe Doped-TiO ₂ Nanotube Arrays Under Simulated Solar Light Irradiation	XIANG Guo-liang, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> (568)
Oxidation of Cationic Red 3R in Water with H ₂ O ₂ Catalyzed by Mineral Loaded with Fe/Co	MA Nan, LIU Hua-bo, XIE Xin-yuan (576)
Characteristics of Acid Red 3R Wastewater Treatment by Ozone Microbubbles	ZHANG Jing, DU Ya-wei, LIU Xiao-jing, <i>et al.</i> (584)
Effects of Carbon Sources, Temperature and Electron Acceptors on Biological Phosphorus Removal	HAN Yun, XU Song, DONG Tao, <i>et al.</i> (590)
Startup, Stable Operation and Process Failure of EBPR System Under the Low Temperature and Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (597)
Effects of Dissolved Oxygen in the Oxidic Parts of A/O Reactor on Degradation of Organic Pollutants and Analysis of Microbial Community for Treating Petrochemical Wastewater	DING Peng-yuan, CHU Li-bing, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (604)
Isolation of Filamentous Fungi Capable of Enhancing Sludge Dewaterability and Study of Mechanisms Responsible for the Sludge Dewaterability Enhancement	ZHOU Yu-jun, FU Hao-yi, FAN Xian-feng, <i>et al.</i> (612)
Impacts of Alkaline Thermal Treatment on Characteristics of Sludge from Sewage Treatment Plant	YANG Shi-dong, CHEN Xia, LIU Cao, <i>et al.</i> (619)
Responses of Ecosystem Carbon Budget to Increasing Nitrogen Deposition in Differently Degraded <i>Leymus chinensis</i> Steppes in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (625)
Impacts of Elevated Ozone Concentration on N ₂ O Emission from Arid Farmland	WU Yang-zhou, HU Zheng-hua, LI Cen-zi, <i>et al.</i> (636)
Multi-Year Measurement of Soil Respiration Components in a Subtropical Secondary Forest	LIU Yi-fan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (644)
Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin	LUO You-lin, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (652)
Effects of Land Use Change on Soil Active Organic Carbon in Deep Soils in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China	ZHANG Shuai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (661)
Carbon Source Metabolic Diversity of Soil Microbial Community Under Different Climate Types in the Area Affected by Wenchuan Earthquake	ZHANG Guang-shuai, LIN Yong-ming, MA Rui-feng, <i>et al.</i> (669)
Optimization of Electrode Configuration in Soil Electrokinetic Remediation	LIU Fang, FU Rong-bing, XU Zhen (678)
Distribution and Health Risk of HCHs and DDTs in a Contaminated Site with Excavation	ZHANG Shi-lei, XUE Nan-dong, YANG Bing, <i>et al.</i> (686)
Transformation and Mobility of Arsenic in the Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils at Different Growth Stages of Rice	YANG Wen-tao, WANG Ying-jie, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (694)
Extraction of Plant Root Apoplast Solution; A Case Study with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	ZHU Man-dang, DU Jiang-xue, YUE Le, <i>et al.</i> (700)
Mechanism of Manganese Binding to Leaf Cell Wall of <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LIU Cui-ying, LI Ping, <i>et al.</i> (706)
Degradation Characteristics of Naphthalene with a <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain Isolated from Soil Contaminated by Diesel	LIU Wen-chao, WU Bin-bin, LI Xiao-sen, <i>et al.</i> (712)
Toxic Effects of CdSe/ZnS QDs to Zebrafish Embryos	CHEN Mu-fei, HUANG Cheng-zhi, PU De-yong, <i>et al.</i> (719)
Physiological Response of <i>Neocaridina denticulata</i> to the Toxicity of Cu ²⁺ and Chlorpyrifos	LI Dian-bao, ZHANG Wei, WANG Li-qing, <i>et al.</i> (727)
Determination of Anilines in Environmental Water Samples by Simultaneous Derivatization and Ultrasound Assisted Emulsification Microextraction Combined with Gas Chromatography-Flame Ionization Detectors	TIAN Li-xun, DAI Zhi-xi, WANG Guo-dong, <i>et al.</i> (736)
Adsorption of Calcium Ion from Aqueous Solution Using Na ⁺ -Conditioned Clinoptilolite for Hot-Water Softening	ZHANG Shuo, WANG Dong, CHEN Yuan-chao, <i>et al.</i> (744)
Construction and Application of Economy-Pollution-Environment Three-Dimensional Evaluation Model for District	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ni (751)

《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)

2015年2月15日 第36卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 2 Feb. 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