

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM _{2.5} 清除作用	孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)
降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力	董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)
北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价	刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)
浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数	徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)
2014 年 APEC 期间北京市 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 氧化性损伤能力研究	郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)
武汉市洪山区夏季 PM _{2.5} 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析	孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 瞿程凯 (3714)
基于快速聚类方法分析常州市区 PM _{2.5} 的统计特性	王振, 余益军, 徐圆青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)
PM _{2.5} 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析	杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)
树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成	刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)
轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征	樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴烨, 胡京南, 郝吉明 (3743)
基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子	邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)
西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露	张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)
生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究	段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)
三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响	陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)
城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响	廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)
基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价	王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)
贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价	何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 邴海健 (3798)
多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征	钱锋, 吴婕, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)
地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因	何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)
昆明市不同功能区排水管道沉积物性质	常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)
滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响	丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)
紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制	黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)
排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征	焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)
快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料	李洁, 肖琳 (3850)
一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能	王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)
生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中臭味物质的去除效能及其微生物特性	宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)
聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响	赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)
典型南方水源氨基酸浓度变化与去除	刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)
O ₃ /UV 降解含氮杂环化合物喹啉	陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)
蒽醌-2-磺酸钠促进 <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析	胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)
2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析	孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)
不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢	王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)
长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究	付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)
焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析	蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)
黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究	刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)
苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响	胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)
城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究	黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)
菌株 <i>Desulfovibrio</i> sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素	谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)
生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响	徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)
模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响	曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)
生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响	张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)
土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响	王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)
土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟	施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)
组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控	王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)
几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响	周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)
蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响	宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)
不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟芬琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)
黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究	董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)
挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为	黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)
中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能	宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)
《环境科学》征订启事 (3827)	《环境科学》征稿简则 (4053)
信息 (3736, 3930, 4043)	

苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响

胡小兵^{1,2}, 饶强¹, 唐素兰¹, 姜晶¹, 谢瑞桃¹, 郝文静¹, 钟梅英¹

(1. 安徽工业大学建筑工程学院, 马鞍山 243032; 2. 生物膜法水质净化及利用技术教育部工程研究中心, 马鞍山 243032)

摘要: 为了探究苯酚对污泥活性及微型动物群落结构的影响, 以 SBR 工艺的活性污泥为研究对象, 分析苯酚对污泥 TTC-ETS 活性、INT-ETS 活性和微型动物群落结构及其动态变化的影响。结果表明, 污泥 TTC-ETS 活性较之 INT-ETS 活性能够更有效表征有机毒害物质苯酚对污泥活性的影响, 且随着进水苯酚浓度的增大, 苯酚对污泥活性的抑制越明显: 进水浓度在 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 苯酚对污泥活性的抑制率为 $(20.75 \pm 10.43)\%$ 。进水苯酚浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 抑制率为 $(39.73 \pm 26.92)\%$, 且波动较大。在 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 进水运行后期, 苯酚对污泥活性的抑制率稳定在 40% 左右; 苯酚对活性污泥微型动物群落结构的影响随浓度的增大而增大, 且对不同微型动物类群影响不同: 在低浓度苯酚进水条件下, 只有单个微型动物类群(有壳变形虫)受到明显的抑制, 而当浓度增大至 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 对多个微型动物类群(固着型纤毛虫、有壳变形虫、匍匐型纤毛虫、肉食性纤毛虫等)产生抑制, 对少数类群(鞭毛虫、线虫等)产生促进作用; 苯酚影响下的污泥活性与微型动物之间存在一定的关联性, 棘刺厘壳虫(*Centropyxis aculeata*)、多变斜板虫(*Plagiocampa mutabilis*)等可作为含酚废水处理过程中污泥活性低的指示生物, 湖累枝虫(*Epistylis lacustris*)、软波豆虫(*Bodo lens*)、跳侧滴虫(*Pleuromonas jaculans*)等可作为污泥活性高的指示生物。

关键词: 苯酚; 活性污泥; 毒害效应; 电子传递体系(ETS)活性; 微型动物群落; 指示生物

中图分类号: X17 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-3939-10 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.10.036

Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge

HU Xiao-bing^{1,2}, RAO Qiang¹, TANG Su-lan¹, JIANG Jing¹, XIE Rui-tao¹, HAO Wen-jing¹, ZHONG Mei-ying¹

(1. College of Architectural Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China; 2. Engineering Research Center of Water Purification and Utilization Technology Based on Biofilm Process, Ministry of Education, Maanshan 243032, China)

Abstract: In order to investigate the effects of phenol on activity and microfauna community structure of activated sludge, phenol with different concentrations were added into the wastewater for activated sludge culturing in a SBR reactor, then the activity parameters of TTC-ETS and INT-ETS of activated sludge were measured, and the dynamics of microfauna community was analyzed. The results indicated that TTC-ETS activity was more applicable to evaluate the effects of phenol on sludge activity than INT-ETS activity. The higher the concentration of phenol was, the more seriously the sludge activity was inhibited. When $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ of phenol was added into the influent, the inhibition rate of sludge activity was $(20.75 \pm 10.43)\%$, while it increased to $(39.73 \pm 26.92)\%$ with a great fluctuation at the phenol concentration of $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The inhibition rate of sludge activity fluctuated at about 40% in the later period of sludge culturing with $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ of phenol. The inhibitory effects on microfauna community in activated sludge increased with increasing phenol concentration. Phenol had different effects on various groups of microfauna community, i. e., only one group (testate amoebae) was inhibited significantly at a low feeding concentration of phenol, many groups (sessile ciliates, testate amoebae, crawling ciliates, carnivorous ciliates) were inhibited at the phenol concentrations of $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, whereas a few groups (flagellates, nematodes, etc.) were promoted at the phenol concentration of $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. There was a certain degree of relationship between sludge activity and microfauna under the influence of phenol, which means that *Centropyxis aculeata*, *Plagiocampa mutabilis* etc., may be bio-indicators for low sludge activity, and *Epistylis lacustris*, *Bodo lens* and *Pleuromonas jaculans* can be used as bio-indicators for high sludge activity in the activated sludge used to treat phenolic wastewater.

Key words: phenol; activated sludge; toxic effect; electron transport system (ETS) activity; microfauna community; bio-indicators

活性污泥法是以活性污泥为核心的废水生物处理技术, 其中对污染物降解起关键作用的是活性污泥中的细菌^[1], 而作为细菌的捕食者——微型动物在维持细菌群落活力^[2], 为活性污泥中的细菌提供矿物营养^[3], 维护活性污泥微环境生态食物链健康^[4], 维持活性污泥系统稳定^[5]发挥重要作用, 可

作为活性污泥法废水处理效能的指示生物^[6~9]。

水中存在的有毒有害物质一方面会对活性污泥

收稿日期: 2016-03-10; 修订日期: 2016-04-29

基金项目: 安徽省高校省级自然科学基金项目(KJ2013A059)

作者简介: 胡小兵(1966~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为污水生化处理, E-mail: hxb1612@ahut.edu.cn

中的不同类别细菌产生不同程度的抑制效应,对细菌群落结构产生影响,进而通过食物链的传递影响到处于食物链顶端的微型动物的群落结构^[10];另一方面,毒害物直接对微型动物产生毒害效应,如重金属离子^[11,12],从而对活性污泥微型动物群落结构产生重要影响。

苯酚是生产某些聚合树脂、造纸、精炼石油以及药物(如阿司匹林)等工业过程生产废水中的主要污染物^[13],当进入废水生物处理系统时,会对活性污泥微生物产生影响,从而影响到废水处理效果。目前,苯酚对活性污泥处理系统的毒害研究主要集中于活性污泥处理性能^[14,15]、污泥特性^[16]、代谢机制^[17]、动力学^[18]和细菌群落结构^[19]等方面。为了筛选出苯酚对活性污泥处理性能(运行参数、处理效果等)的指示生物而进行了少量的微型动物研究^[8,20],而未从群落结构动态变化的角度揭示苯酚对活性污泥的微生态系统的长期影响机制。

本研究的主要目的是基于序批式活性污泥处理系统(SBR),探究含酚废水对活性污泥活性及微型动物群落结构的持续负荷影响,并探讨污泥活性与微型动物群落之间的关系,筛选污泥活性指标的指示生物,以期为含酚废水生物处理系统的生产运行提供生物学理论及技术依据。

1 材料与方法

1.1 装置启动与运行控制

自制序批式反应器(SBR),其主体由高85 cm、内径7.5 cm的有机玻璃柱制成,有效容积为3.2 L。空气压缩机通过置于反应器底部的微孔曝气头提供系统所需氧气,同时为泥、水的混匀与环流提供动力。通过调节空气流量计控制曝气强度($0.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$),维持水中稳定的溶解氧(DO) [$(6.02 \pm 0.47) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$]。反应器在室温 [$(21.6 \pm 4.2) ^\circ\text{C}$] 下运行。分别设置对照系统CK(进水不添加苯酚)和试验系统EK[进水添加苯酚(aladdin试剂,分析纯)]这2个系统。

接种污泥取自马鞍山市某污水处理厂好氧池,采用自来水对污泥进行清洗并均混后分别投加至2个反应器,闷曝2 d后,混合液悬浮固体浓度(MLSS)分别为 $2753 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2669 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,污泥沉降比(SV)均为22%。然后进行污泥培养驯化,培养原水由静置48 h的自来水混合配制而成,水中投加一定量的 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 、 NH_4Cl 、 KH_2PO_4 (微量元素来源于试验用水),使BOD:N:P之比接近100:5:1。用

$\text{NaHCO}_3/\text{Na}_2\text{CO}_3$ 缓冲体系($\text{pH} = 9.25$)调节进水pH(7.60 ± 0.10)。通过系统中活性污泥微型动物群落物种多样性及出水水质等指标判定^[11],系统运行约30 d,活性污泥达初步成熟,完成驯化,进行正式试验。

正式试验分成3个阶段,在培养原水中加入不同量高浓度苯酚溶液($50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$),使第1、第2、第3阶段原水中苯酚溶液浓度分别为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (低浓度)、 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (中等浓度)和 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (高浓度);试验期间,系统的进水水质控制在COD为 $(839.04 \pm 87.70) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、氨氮为 $(45.22 \pm 4.95) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、总磷为 $(6.65 \pm 0.34) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,系统中污泥负荷(以COD/MLSS计)约为 $0.25 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 。

正式试验期,反应器采用间歇曝气的方式运行(曝气和沉淀交替进行,时间均为2 h),每天运行2个周期,每个周期12 h。在每个周期沉淀结束前将反应器中上清液通过出水口排出,排水比(进水体积与反应池总有效体积之比)为1/3.2,然后补入新鲜原水至原水位,重新进入下一个周期运行,如此循环往复。通过每日在曝气阶段末期排放一定量泥水混合液的方式控制MLSS在 $4000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,并控制污泥龄 θ 为25 d。

1.2 样品采集及微型动物鉴别计数与分类

正式试验开始后,每隔1~2 d在第1个周期(08:00~20:00)最后一个曝气阶段结束前30 min内,通过虹吸管在反应器垂直方向上等距离(反应器底部往上10、40、70 cm处)采集3个污泥混合液平行样用于微型动物鉴别计数。

使用微量移液器(DRAGON大龙)移取 $25 \mu\text{L}$ [单独取样鉴别统计小型鞭毛虫(flagellates) ($\leq 20 \mu\text{L}$)时取样量为 $5 \mu\text{L}$]摇匀后的污泥混合液置于光学显微镜(PH50系列, $\times 100$ 或 $\times 400$)下对微型动物进行鉴别、计数。根据形态学和行为学特征并依照图谱、文献[21,22]将微型动物按需要鉴定到种或类群。原生动物均鉴定到种,轮虫(rotifers)、线虫(nematodes)等微型后生动物鉴定到类群^[23]。鉴定工作在5 h(最长不超过8 h)内完成,以避免微型动物数量和物种丰富程度在鉴别过程中改变^[23,24]。将微型动物群落中常见的纤毛虫类原生动物分为菌食性纤毛虫(Bacterivorous ciliates)和肉食性纤毛虫(Carnivorous ciliates),其中菌食性纤毛虫又分为匍匐型纤毛虫(Crawling ciliates)、固着型纤毛虫(Sessile ciliates)和游泳型纤毛虫(Swimming ciliates)等三大类群^[23],将微型动物数量所得数据

折算成个·mL⁻¹.

1.3 污泥活性与水质及污泥常规指标测定

每隔 2~3 d 在第 1 个周期最后一个曝气阶段结束前 30 min 内取一定量的泥水混合液进行污泥电子传递体系 (electron transport system, ETS) 包括 TTC-ETS 和 INT-ETS 活性测定^[25,26]. 其中,抑制率 (IR) 计算公式为:

$$IR = (R_0 - R) / R_0 \times 100\%$$

式中, R_0 为对照系统测定值, R 为试验系统测定值.

在进水曝气后的 1 min 内取少量混匀后的泥水混合液过滤 (0.45 μm 微滤膜), 采用紫外-可见分光光度法 (上海仪电 752N) 测定滤液中实际苯酚浓度 (最大吸收波长为 270 nm). 其他指标: 化学需氧量 (COD)、氨氮 (NH₄⁺-N)、总磷 (TP) 按照标准方法^[27]测定; 污泥沉降比 (SV) 采用 30 min 沉降直接读数法测定; 混合液悬浮固体浓度 (MLSS) 采用重量法测定; 溶解氧 (DO) 和水温 (T) 采用便携式溶解氧测定仪 (雷磁 JPBJ-608) 测定; pH 值采用数显 pH 计 (雷磁 PHS-25) 测定.

1.4 数据处理分析

采用 Shannon-Wiener 指数^[28] H' 表征活性污泥微型动物群落物种多样性, 其计算公式:

$$H' = - \sum_{i=1}^S (p_i \ln p_i)$$

式中, S 表示物种种数, p_i 表示第 i 个种的个体数占所有物种总数的百分比.

所有微型动物统计数据均取 3 个平行样平均值进行分析. 统计分析采用软件 SPSS 19.0 进行 Pearson 相关性、LSD 多重比较 ($\alpha = 0.05$) 和主成分分析 (PCA), 其中 Pearson 相关性分析之前需将所有原始数据按对数公式 $x = \ln(x + 1)$ 进行转换. 采用

Origin 9.0 和 Excel 2007 完成相关图表制作.

2 结果与讨论

2.1 污泥活性对苯酚毒害效应的响应及其变化

在整个试验过程中, 两个活性污泥系统的处理效果没有明显的差异 ($P > 0.05$) [试验过程中, 两个系统 COD 和 NH₄⁺-N 去除率分别为 (95.38 ± 4.41)%、(97.06 ± 2.42)% 和 (98.92 ± 1.58)%、(98.46 ± 2.29)%], 可能的原因是在足够长的反应时间 (本试验曝气反应时间为 6 h) 条件下对一定范围内浓度 (< 400 mg·L⁻¹) 的进水苯酚能够作为碳源的一部分被细菌充分降解, 以致对活性污泥处理效果不产生明显影响^[14,16]. 但进水浓度在 400 mg·L⁻¹ 以下的苯酚对好氧污泥形态、比耗氧速率 (SOUR)^[16] 以及活性污泥微型动物群落种属组成^[20] 均有明显的影响.

电子传递体系 (ETS) 活性可表征活性污泥系统中的微生物活性^[26,29~31], 揭示系统硝化反硝化规律^[26], 表征重金属对污泥活性的影响^[32,33]. TTC-ETS 和 INT-ETS 是用于检测污泥 ETS 活性的常用方法^[34], 两者因氧化还原电位大小以及从呼吸链上接受电子的部位不同 (后者较早期地从呼吸链上接受电子) 而对污泥活性的响应不同^[25,35]. 然而, 是否可以采用污泥 ETS 活性表征酚类有机毒害物质对污泥活性的影响, 未见报道. 本研究通过测定 TTC-ETS 活性和 INT-ETS 活性, 分析比较确定适用于有机毒害物苯酚对污泥活性影响的有效表征指标, 以揭示在苯酚毒害效应影响下污泥活性的变化规律. 不同进水苯酚浓度持续负荷条件下污泥 TTC-ETS 活性、INT-ETS 活性及其动态变化如表 1 和图 1 所示.

表 1 不同进水苯酚浓度持续负荷条件下污泥 ETS 活性¹⁾

Table 1 ETS activity of the activated sludge at different influent phenol concentrations

污泥 ETS 活性 /μg·(mg·h) ⁻¹	苯酚浓度/mg·L ⁻¹		
	50	100	300
TTC-ETS	152.10 ± 59.44	164.43 ± 81.10 *	120.75 ± 39.32 **
INT-ETS	186.50 ± 128.15	165.78 ± 55.98	94.33 ± 53.25

1) 试验结果以平均值 ± 标准差表示, 对试验数据进行 LSD 多重比较分析, * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, 表明试验系统与对照系统相比, 差异显著

从图 1(a) 中可以看出, 在整个试验期间内, 对照系统 CK、试验系统 EK 中的污泥 TTC-ETS 活性分别为 (200.26 ± 65.57) μg·(mg·h)⁻¹、(152.91 ± 63.63) μg·(mg·h)⁻¹, 均存在较大波动, 且变化趋势相近, 这与前人的研究结论^[31] 相一致, 即进 waters

质等运行参数的改变不会影响 SBR 系统中污泥 TTC-ETS 活性的变化趋势. 当进水苯酚为低浓度 (50 mg·L⁻¹) 时, 苯酚的毒害效应对系统中污泥 TTC-ETS 活性的影响并不显著 ($P = 0.499$), 其抑制率 IR 仅为 (20.75 ± 10.43)% (图 2, 下同); 当进 waters

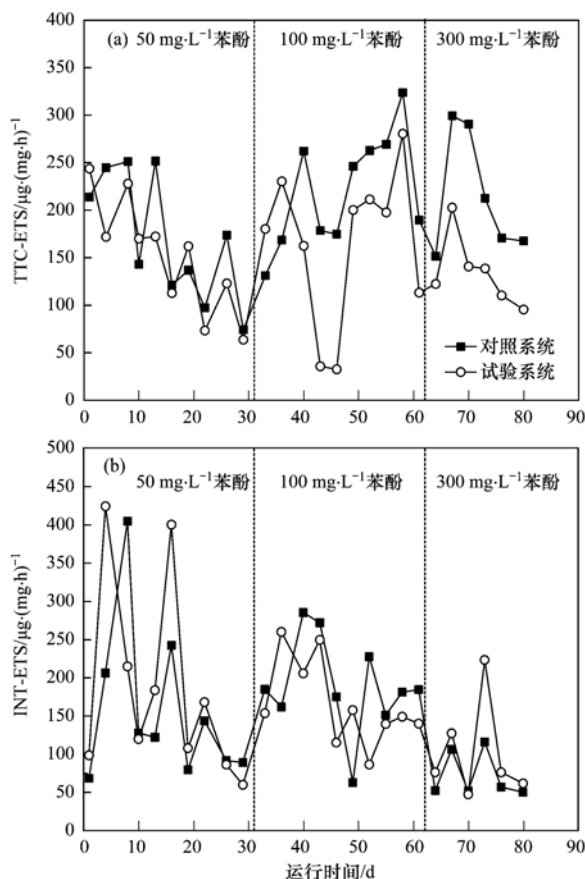
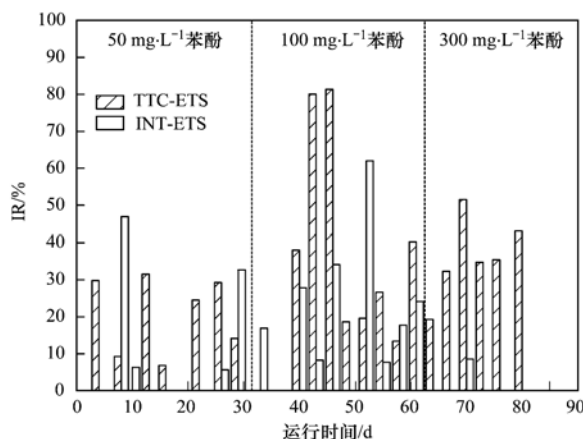


图1 苯酚对活性污泥 TTC-ETS 活性和 INT-ETS 活性的影响

Fig. 1 Effects of phenol on TTC-ETS activity and INT-ETS activity of the activated sludge

苯酚浓度增加到 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, CK、EK 两个系统中 TTC-ETS 活性均随运行时间变化而有所增大,且 EK 系统的 TTC-ETS 活性此阶段的初期更大,试验第 36 d 为 $230.30 \text{ } \mu\text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{h})^{-1}$, 比 CK 系统 [$168.57 \text{ } \mu\text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{h})^{-1}$] 大 36.62%, 这说明适当浓度的苯酚会短暂地促进污泥 TTC-ETS 活性的增大. ETS 活性表征污泥活性的方法实质上是测定好氧微生物的呼吸活性来间接指示活性污泥的生物活性^[34], 故适当浓度的苯酚短时间内能够通过促进 TTC-ETS 活性的增长 (活性污泥中微生物的呼吸增强) 来增强微生物 (包括微型动物, 下同) 对苯酚毒性生存环境的适应. 随后 TTC-ETS 活性开始降低, 系统运行第 46 d, 试验系统中污泥 TTC-ETS 活性达到最低的 $32.61 \text{ } \mu\text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{h})^{-1}$, 仅有对照系统的 18.66%, 抑制率高达 81.34%. 这是因为随着时间的推移, 苯酚在活性污泥中得到累积, 超过污泥中微生物的耐受阈值, 微生物开始大量死亡, 导致污泥活性急剧降低, 污泥 TTC-ETS 活性呈现出急剧减小的趋势. 第 50 d, 两个系统中的污泥 TTC-ETS 活性逐步增大, 且两者的差距逐渐缩小, 这是由于试验系统

中的活性污泥某些微生物通过驯化, 逐步适应了有毒的生存环境, 大量繁殖的结果. 总的看来, 进水苯酚浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 试验系统与对照系统中污泥 TTC-ETS 活性存在显著差异 ($P = 0.045$) (表 1, 下同), 说明此浓度下的苯酚毒性对污泥活性产生了明显的抑制效应; 进一步增大进水苯酚浓度至 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 试验系统与对照系统中的污泥 TTC-ETS 活性差异性进一步增大 ($P = 0.008$), 但在这一阶段后期, 苯酚对污泥 TTC-ETS 活性的抑制率相对稳定在 40% 左右.



不包括 0 ~ 100% 以外的数据

图2 苯酚对活性污泥 TTC-ETS 活性、INT-ETS 活性的抑制影响

Fig. 2 Inhibition of TTC-ETS activity and INT-ETS activity of the activated sludge by phenol

图 1(b) 表明: 在整个试验过程中试验系统和对照系统具有相近的 INT-ETS 活性变化规律, 这与 TTC-ETS 活性类似. 然而, LSD 多重比较分析结果表明 (表 1), 进水苯酚浓度在 $50 \sim 300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内, 苯酚对污泥 INT-ETS 活性几乎没有显著影响 ($P > 0.05$), 这可能是因为 INT 较早地从呼吸链上接受电子, 只有细胞色素 b 之前的电子传递过程被阻断后其活性才能受到抑制, 因此 INT-ETS 活性受影响的概率要小一些^[25]. 此外, TTC 氧化还原电位 (460 mV) 明显高于 INT 氧化还原电位 (90 mV)^[35], TTC 作为人工电子受体时在进水浓度在 $50 \sim 300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内的苯酚毒害作用下更容易接受电子发生电化学反应, 故污泥 TTC-ETS 活性比 INT-ETS 活性更加敏感, 更适合作为苯酚对好氧污泥活性毒害效应的响应指标, 以反映苯酚对好氧污泥活性的影响规律.

2.2 苯酚对活性污泥微型动物群落结构的影响

2.2.1 苯酚对活性污泥微型动物形态的影响

在试验过程中发现, 随着苯酚浓度的增大, 试验

活性污泥系统中开始出现体型与微型动物大小相近的胞囊(其个体大小为 100 ~ 300 μm),如虫体收缩状态下的轮虫[图 3(a)],其数量变化规律如图 3(b)所示. 由图 3(b)可知,在低浓度条件下,未观察到胞囊,当进水苯酚浓度增大至 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,一些微型动物(由观察到的胞囊大小可以判断出并非所有微型动物都形成胞囊)为了避免苯酚毒性环境的毒害,纤毛等消失,身体向内收缩成椭圆形,并在体外积累一层保护膜形成胞囊,这一现象在韦贞鸽等^[36]的相关研究中也观察到了. 此时,胞囊开始大量出现,第 37 d 达最大值(4 640 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$). 随后开始急剧减少,到第二阶段结束时减至 173 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$,

在高浓度(300 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)条件下,胞囊数量仍较少,试验结束时,几乎观察不到胞囊,说明过高浓度(> 300 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的苯酚其毒害作用使微型动物形成胞囊的生存机制失效,大量死亡而消失. 胞囊是微型动物对毒性的形态适应方式,是一种自我保护的生存机制,也是影响微型动物群落结构动态变化的原因之一,但由于胞囊只是微型动物的休眠体,以下对活性污泥微型动物群落结构进行分析时,不包括胞囊.

2.2.2 苯酚对活性污泥微型动物群落结构的影响
不同浓度苯酚毒害作用下,活性污泥微型动物群落结构如表 2 所示.

表 2 活性污泥系统中微型动物群落不同类群的多度和相对多度¹⁾

Table 2 Abundance and relative abundance of the different groups of microfauna community in the activated sludge systems							
系统	微型动物类群	第 1 阶段(0 ~ 31 d)		第 2 阶段(32 ~ 62 d)		第 3 阶段(63 ~ 79 d)	
		多度 /个 $\cdot\text{mL}^{-1}$	相对多度 /%	多度 /个 $\cdot\text{mL}^{-1}$	相对多度 /%	多度 /个 $\cdot\text{mL}^{-1}$	相对多度 /%
对照系统	匍匐型纤毛虫	773 $\pm$ 784	6.24 $\pm$ 8.51	949 $\pm$ 1 133	4.57 $\pm$ 4.48	1 619 $\pm$ 1 559	22.89 $\pm$ 22.73
	固着型纤毛虫	1 008 $\pm$ 1 115	6.16 $\pm$ 11.13	3 491 $\pm$ 3 064	16.72 $\pm$ 10.70	117 $\pm$ 187	1.92 $\pm$ 3.28
	游泳型纤毛虫	227 $\pm$ 560	0.54 $\pm$ 0.78	4 $\pm$ 14	0.03 $\pm$ 0.12	0 $\pm$ 0	0.00 $\pm$ 0.00
	肉食性纤毛虫	5 $\pm$ 12	0.01 $\pm$ 0.04	4 $\pm$ 11	0.01 $\pm$ 0.04	575 $\pm$ 510	8.52 $\pm$ 7.71
	有壳变形虫	1 482 $\pm$ 988	8.63 $\pm$ 5.54	7 365 $\pm$ 3 294	41.49 $\pm$ 11.39	2 030 $\pm$ 947	30.08 $\pm$ 16.31
	裸变形虫	2 189 $\pm$ 3 909	12.41 $\pm$ 21.83	20 $\pm$ 36	0.10 $\pm$ 0.22	0 $\pm$ 0	0.00 $\pm$ 0.00
	鞭毛虫	21 371 $\pm$ 26 049	64.84 $\pm$ 27.58	3 859 $\pm$ 2 549	20.53 $\pm$ 9.81	2 550 $\pm$ 1 089	35.29 $\pm$ 9.84
	微型后生动物	265 $\pm$ 371	1.11 $\pm$ 1.47	2 794 $\pm$ 1 787	16.55 $\pm$ 9.02	92 $\pm$ 163	1.29 $\pm$ 2.27
	所有微型动物	27 327 $\pm$ 25 345	100.00 $\pm$ 0.00	18 486 $\pm$ 8 675	100.00 $\pm$ 0.00	6 982 $\pm$ 1 108	100.00 $\pm$ 0.00
试验系统	匍匐型纤毛虫	560 $\pm$ 601	5.13 $\pm$ 5.99	444 $\pm$ 667	3.75 $\pm$ 4.97	327 $\pm$ 410 *	3.94 $\pm$ 5.59 *
	固着型纤毛虫	1 008 $\pm$ 1 012	7.79 $\pm$ 8.31	1 497 $\pm$ 1 892 *	9.58 $\pm$ 9.61	160 $\pm$ 124	1.67 $\pm$ 1.49
	游泳型纤毛虫	76 $\pm$ 160	0.29 $\pm$ 0.71	174 $\pm$ 675	0.70 $\pm$ 2.69	3 $\pm$ 6	0.03 $\pm$ 0.06
	肉食性纤毛虫	0 $\pm$ 0	0.00 $\pm$ 0.00	0 $\pm$ 0	0.00 $\pm$ 0.00	102 $\pm$ 102 *	1.01 $\pm$ 1.05 *
	有壳变形虫	535 $\pm$ 1 131 *	7.15 $\pm$ 15.15	3 524 $\pm$ 1 379 **	38.14 $\pm$ 18.50	1 497 $\pm$ 433	15.68 $\pm$ 7.71 *
	裸变形虫	271 $\pm$ 613	3.62 $\pm$ 8.18	68 $\pm$ 92	0.42 $\pm$ 0.54 *	0 $\pm$ 0	0.00 $\pm$ 0.00
	鞭毛虫	23 243 $\pm$ 40 676	75.05 $\pm$ 28.18	4 280 $\pm$ 3 096	33.76 $\pm$ 13.80 **	7 850 $\pm$ 4 198 **	70.72 $\pm$ 20.77 **
	微型后生动物	92 $\pm$ 126	0.98 $\pm$ 1.75	1 440 $\pm$ 1 319 *	13.66 $\pm$ 9.36	588 $\pm$ 633 *	6.97 $\pm$ 8.43
	所有微型动物	25 786 $\pm$ 40 003	100.00 $\pm$ 0.00	1 1427 $\pm$ 6 518 *	100.00 $\pm$ 0.00	10 527 $\pm$ 3 403 *	100.00 $\pm$ 0.00

1) 统计结果以平均值 $\pm$ 标准差表示,对试验数据进行 LSD 多重比较分析,* 表示 $P < 0.05$,** 表示 $P < 0.01$,表明试验系统与对照系统相比,差异显著

从表 2 中可知,两个系统中微型动物群落类群组成均在不同运行阶段而所有不同. 当进水苯酚浓度为 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,除有壳变形虫($P = 0.026$)外,两个活性污泥系统中的微型动物群落不同类群多度[单位体积(mL)泥水混合液中微型动物个体总数]均不存在显著性差异($P > 0.05$),整个群落多度也不存在显著性差异($P = 0.904$),且所有微型动物类群相对多度均不存在显著性差异($P > 0.05$),说明低浓度苯酚对活性污泥微型动物群落结构没有显著性影响;当进水苯酚浓度增加至 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,苯酚对微型动物群落中的固着型纤毛虫($P = 0.041$)、有壳变形虫($P = 0.000$)、微型后生动物($P =$

0.025)等类群以及整个微型动物群落多度($P = 0.018$)均产生显著性影响,其中裸变形虫和鞭毛虫的相对多度(物种个体数占所有物种总数的百分比)与对照系统相比存在显著性差异($P < 0.05$),说明当进水浓度为 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,苯酚会对活性污泥微型动物群落结构产生明显的影响;进一步增大进水苯酚浓度至 300 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,与对照系统相比,试验活性污泥系统中的匍匐型纤毛虫($P = 0.04$)、肉食性纤毛虫($P = 0.022$)、鞭毛虫($P = 0.004$)也存在显著性差异($P < 0.05$),且整个微型动物群落多度差异进一步增大($P = 0.014$),说明高浓度苯酚长期作用下对活性污泥微型动物群落不同类群产生不同

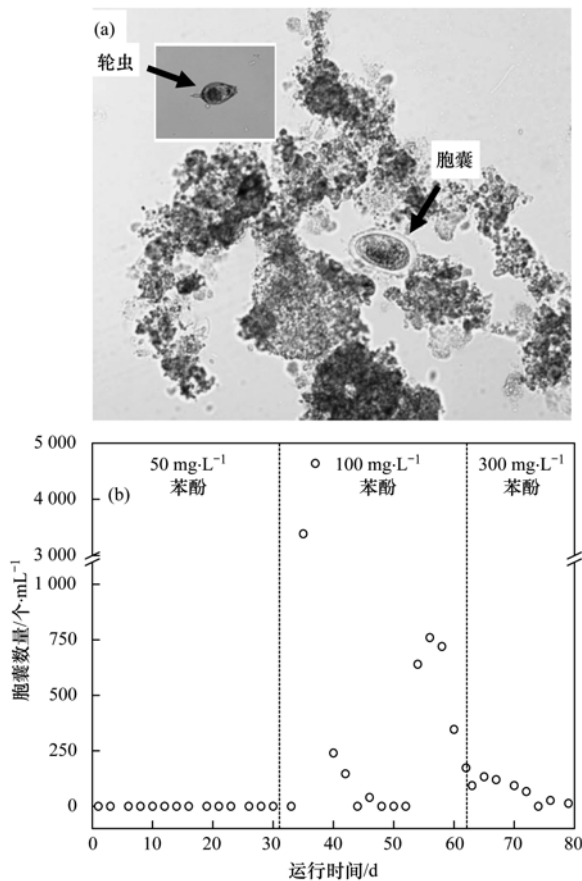


图3 苯酚毒害作用下微型动物形成的胞囊
(100 倍)及其数量变化规律

Fig. 3 Cyst formed by microfauna under the action of phenol toxicity ($\times 100$) and the variation law of its quantity

影响：一方面,高浓度苯酚对微型动物群落中的多数类群的生长繁殖存在明显的抑制作用,如匍匐型纤毛虫、肉食性纤毛虫、有壳变形虫、裸变形虫等.另一方面,高浓度苯酚对微型动物群落中的某些类群的生长繁殖也存在明显的促进作用,如鞭毛虫.试验系统鞭毛虫多度 $[(7\,850 \pm 4\,198) \text{ 个} \cdot \text{mL}^{-1}]$ 显著大于对照系统 $[(2\,550 \pm 1\,089) \text{ 个} \cdot \text{mL}^{-1}]$ (表2),其相对多度达 $(70.72 \pm 20.77)\%$,成为优势类群.可能的原因是:①在较高浓度苯酚长期作用下,苯酚在活性污泥中累积(水中实际浓度达 $80 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),细菌活力受到抑制,其凝聚能力降低,污泥絮体粒径变小^[16],不利于爬行或附着于污泥絮体表面捕食细菌的匍匐型和固着型纤毛虫^[37]生长繁殖,而有利于游离于絮体表面活动的鞭毛虫存活,从而使其在微环境食物链中对细菌的捕食更有竞争力而快速繁殖;②相对于体型较大的纤毛虫原生动物,鞭毛虫[尤其是异养型鞭毛虫(HNAN)]对游离细菌的捕食效率更高^[38],因而生长繁殖旺盛.此

外,高浓度苯酚对微型后生动物中线虫的生长繁殖也有促进作用.更重要的是,与对照系统相比,试验系统中的匍匐型纤毛虫($P=0.038$)、肉食性纤毛虫($P=0.016$)、有壳变形虫($P=0.040$)、鞭毛虫($P=0.001$)的相对多度均存在显著性差异(表2),说明高浓度苯酚的进入会对活性污泥微型动物群落结构产生更为显著的影响.

有研究者认为不同种类在群落中的数量分布曲线是表现群落结构的一个重要指标^[21],故在此基础上获得的 Shannon-Wiener 指数 H' 可以反映群落结构差异.为了进一步揭示苯酚浓度大小对活性污泥微型动物群落结构的影响程度,对不同浓度条件下微型动物群落物种多样性指数进行主成分分析,结果如图4所示.从中可知,选取的2个主成分贡献率分别为 52.08% 、 19.69% ,累积贡献率达 71.77% .低浓度苯酚持续负荷作用下的活性污泥微型动物群落物种多样性及相应对照系统与PC1和PC2均呈正相关,中等浓度苯酚持续负荷作用下的活性污泥微型动物群落物种多样性与PC1和PC2均呈正相关,而其相应对照系统中的微型动物群落物种多样性与PC2呈负相关,即两者差异明显,说明中等浓度苯酚进水较之低浓度苯酚进水对活性污泥微型动物群落结构影响更大.进一步分析,除对照系统高浓度苯酚持续负荷作用下的微型动物群落物种多样性指数与PC1呈负相关外,其余条件下的微型动物群落物种多样性均与PC1呈正相关,说明高浓度苯酚长期作用下,活性污泥系统中的微型动物群落物种多样性发生了更为明显的变化,即群落

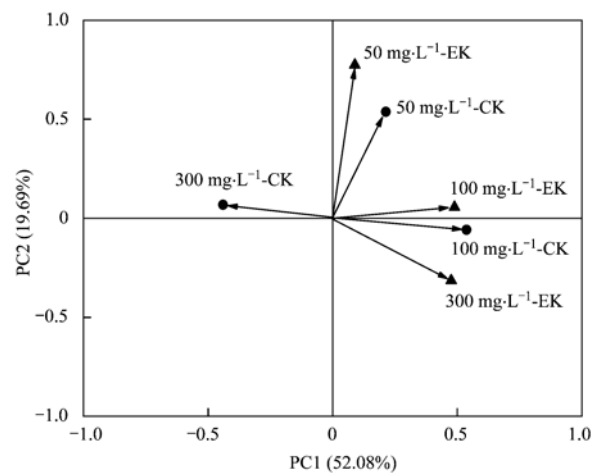


图4 不同浓度苯酚影响下活性污泥系统中微型
动物群落物种多样性主成分分析(PCA)

Fig. 4 Principal component analysis (PCA) on species diversity index of the microfauna community at different phenol concentrations

结构受到了明显影响. 样方之间距离大小反映了方间特征量的相似程度, 且距离越近相似程度越高^[39]. 从样方距离来看, 低浓度苯酚和中等浓度苯酚对活性污泥微型动物群落物种多样性的影响相接近, 而高浓度苯酚作用下的微型动物群落与对照系统相比距离最大, 说明高浓度苯酚对微型动物群落物种多样性影响最大, 即高浓度苯酚对活性污泥微型动物群落结构影响最大, 这与前文分析结果相一致.

2.2.3 苯酚影响下活性污泥微型动物群落结构动态变化

活性污泥系统中不同类群微型动物相对多度随运行时间的动态变化如图 5 所示. 两个系统中不同类群的微型动物其相对多度随运行时间均有较大变化, 这与城市废水活性污泥处理系统相一致^[37,40]. 但不同浓度的苯酚影响下, 微型动物群落结构随时间的变化有所不同. 具体地, 在第 1 阶段低浓度苯酚进水条件下, 除有壳变形虫外, 苯酚对微型动物群落不同类群相对多度随时间变化的影响不明显, 两个系统中鞭毛虫多度均占据了长时间的绝对优势, 其相对多度分别达 $(64.84 \pm 27.56)\%$ 、 $(75.05 \pm 28.18)\%$, 两者无显著性差异 ($P = 0.342$), 其他类群相对多度较小, 且各类群的微型动物相对多度随时间变化趋势线上的拐点所在时间轴的位置相对差异较小(图 5); 试验第 2 阶段, 两个系统中各微型动物类群分布相对第 1 阶段较均匀, 在这一阶段有壳变形虫成为优势类群, 但试验系统中有壳变形虫前期(32~45d)受到了抑制, 对照系统和试验系统中有壳变形虫相对多度分别为 $(34.31 \pm 7.66)\%$ 、 $(25.66 \pm 18.18)\%$, 后者波动也较大. 在这一阶段, 苯酚对固着型纤毛虫也产生了明显的抑制, 其相对多度处于较低水平 $[(9.58 \pm 9.61)\%]$, 而鞭毛虫相对多度 $[(33.76 \pm 13.80)\%]$ 显著大于后者 $[(20.53 \pm 9.81)\%]$ ($P = 0.005$); 试验第 3 阶段, 对照系统中微型动物群落各类群分布较均匀, 而试验系统中鞭毛虫占绝对优势, 试验结束前其相对多度达最大值的 91.13%. 此外, 与对照系统相比, 试验系统中的匍匐型纤毛虫和肉食性纤毛虫受到了明显的抑制, 前者运行 70 d 几乎消失, 而后者相对多度一直处于极低水平 $[(1.01 \pm 1.05)\%]$.

2.3 苯酚影响下的污泥活性与微型动物间的相互关系探讨

如前文所述, 污泥 TTC-ETS 活性比 INT-ETS 活性更加敏感, 更适合作为苯酚对好氧污泥活性毒害

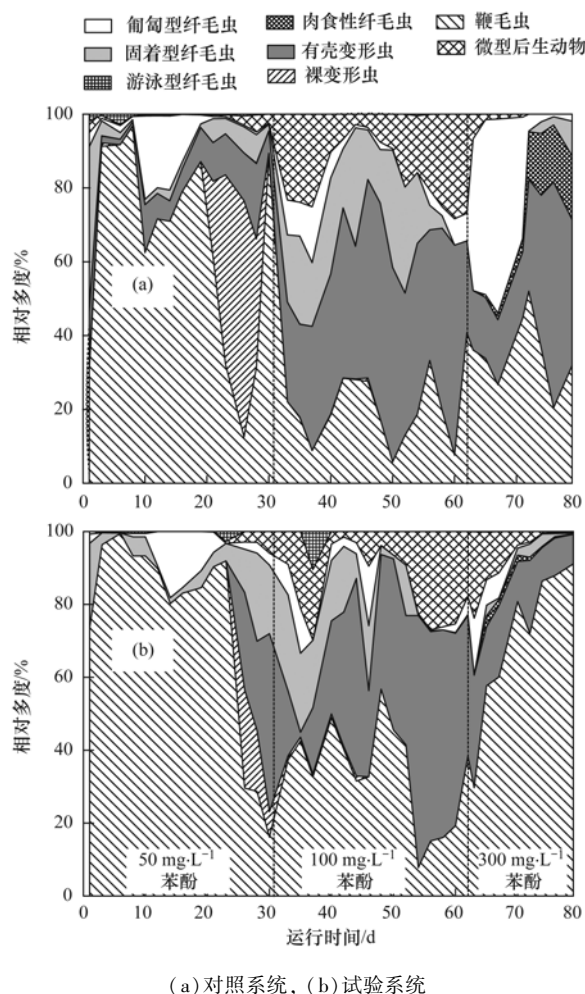


图 5 两个活性污泥系统中微型动物群落结构动态变化

Fig. 5 Dynamics of microfauna community structure in the two activated sludge systems

作用的响应指标, 故选择 TTC-ETS 活性作为苯酚影响下污泥活性的表征指标. 不同进水浓度苯酚作用下污泥 TTC-ETS 活性的变化规律[图 1(a)]与活性污泥微型动物群落结构动态变化(图 5)对比分析可知, 污泥 TTC-ETS 活性与微型动物群落结构相互之间存在着一定的关联, 如低浓度苯酚对污泥 TTC-ETS 活性及微型动物群落结构的影响均不明显; 当进水浓度达 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 苯酚对污泥 TTC-ETS 活性及微型动物群落结构产生明显的影响; 进一步增大进水浓度时, 这种影响显著增大. 活性污泥是活性污泥处理系统中的主体, 而活性污泥微生物是活性污泥污染物降解核心, 因此活性污泥微生物 ETS 活性对活性污泥处理系统的正常运行有着重要意义^[41], 而在活性污泥微环境生态系统中微型动物作为食物链顶端的捕食者, 在维持活性污泥微环境生态系统的稳定发挥着重要作用, 因此, 活性污泥活性与微型动物群落结构之间也必然存在联系. 活性污

泥微型动物与污泥活性 Pearson 相关性分析结果如表 3 所示.

表 3 活性污泥微型动物与污泥活性 Pearson 相关性¹⁾

Table 3 Pearson correlation coefficients between microfauna species and sludge activity

类群/种	TTC-ETS 活性	
	对照系统 (CK)	试验系统 (EK)
匍匐型纤毛虫 <i>Crawling ciliates</i>	-0.133	0.087
锐利楯纤虫 <i>Aspidisca lynceus</i>	-0.080	-0.125
有肋楯纤虫 <i>Aspidisca costata</i>	-0.170	—
九肋游仆虫 <i>Euplotes novemcarinatus</i>	-0.304	—
近亲游仆虫 <i>Euplotes affinis</i>	-0.318	—
固着型纤毛虫 <i>Sessile ciliates</i>	-0.052	0.191
点钟虫 <i>Vorticella picta</i>	0.395	—
沟钟虫 <i>Vorticella convallaria</i>	-0.397	0.235
八钟虫 <i>Vorticella octava</i>	-0.133	—
小口钟虫 <i>Vorticella microstoma</i>	-0.254	-0.294
条纹钟虫 <i>Vorticella striata</i>	-0.139	—
水虱间隙虫 <i>Intranstylum asellicola</i>	-0.104	—
水虱伪独缩虫 <i>Pseudocarchesium aeslii</i>	—	0.089
湖累枝虫 <i>Epistylis lacustris</i>	0.052	0.371
肉食性纤毛虫 <i>Carnivorous ciliates</i>	—	-0.413
多变斜板虫 <i>Plagiocampa mutabilis</i>	—	-0.403
游泳型纤毛虫 <i>Swimming ciliates</i>	-0.127	-0.078
凹缝小胸虫 <i>Microthorax sulcatus</i>	-0.245	-0.112
有肋小胸虫 <i>Microthorax costatus</i>	-0.178	—
有壳变形虫 <i>Testate amoebae</i>	0.334	-0.169
盖厢壳虫 <i>Pyxidicula operculata</i>	-0.484	-0.150
针棘匣壳虫 <i>Centropyxis aculeata</i>	—	-0.628 *
半圆表壳虫 <i>Arcella hemisphaerica</i>	-0.474	—
巢居法帽虫 <i>Phryganella nidulus</i>	0.639 *	—
结节鳞壳虫 <i>Euglypha laevis</i>	0.208	-0.140
线条三足虫 <i>Trinema lineare</i>	-0.468	—
裸变形虫 <i>Naked amoebae</i>	0.011	-0.071
珊瑚囊变形虫 <i>Saccamoeba gongornia</i>	-0.029	—
柏马氏虫 <i>Mayorella cypressa</i>	—	-0.071
鞭毛虫 <i>Flagellates</i>	-0.118	-0.139
三角袋鞭虫 <i>Peranema trichophorum</i>	-0.071	-0.083
噬淀粉叶鞭虫 <i>Phyllomitius amylophagus</i>	-0.152	0.081
梨波豆虫 <i>Bodo edax</i>	0.274	0.290
慢行波豆虫 <i>Bodo repens</i>	0.263	0.267
侧偏波豆虫 <i>Bodo compressus</i>	-0.450	-0.129
球波豆虫 <i>Bodo globosus</i>	-0.309	0.163
软波豆虫 <i>Bodo lens</i>	—	0.418
舞形波豆虫 <i>Bodo saltans</i>	0.124	—
变形波豆虫 <i>Bodo amoebinus</i>	-0.047	—
跳侧滴虫 <i>Pleuromonas jaculans</i>	0.027	0.438
微小无吻虫 <i>Clautriavia parva</i>	-0.718 **	—
微型后生动物 <i>Micro-metazoa</i>	0.522	0.427
轮虫 <i>rotifers</i>	0.468	0.180
线虫 <i>nematodas</i>	0.208	0.100

1) “—”表示未观察到相应物种; * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

水中毒害物质的存在使微型动物群落与所处的微生态环境之间的关系复杂化^[42],两个活性污泥系统中的微型动物同一个种与对应污泥活性之间的相关性不同(表 3).为了使所筛选的指示生物对含酚废水活性污泥处理工艺的操作运行具有实际指导意义,选择含苯酚进水系统(即试验系统)作为分析对象,以筛选出含酚废水活性污泥法处理过程中对污泥 TTC-ETS 活性具有指示价值的微型动物种.在试验过程观察到的活性污泥微型动物群落物种中与污泥活性显著相关的种只有针棘匣壳虫(*Centropyxis aculeata*, $r = -0.628$, $P < 0.05$),说明针棘匣壳虫的大量繁殖,预示着处理含酚废水的污泥活性低.此外,其他微型动物种如湖累枝虫(*Epistylis lacustris*, $r = 0.371$, $P = 0.173$)、多变斜板虫(*Plagiocampa mutabilis*, $r = -0.403$, $P = 0.137$)、软波豆虫(*Bodo lens*, $r = 0.418$, $P = 0.121$)、跳侧滴虫(*Pleuromonas jaculans*, $r = 0.438$, $P = 0.102$)等与污泥活性也存在明显的相关性($|r|$ 为 0.3~0.5),也可作为含酚废水处理过程中污泥活性的指示生物.

以前的研究都是通过筛选与废水处理指标紧密相关的微型动物种作为活性污泥处理性能某些指标的指示生物^[9,43~45],而本研究说明某些微型动物种与污泥 ETS 活性之间存在着明显的相关性,即也可作为活性污泥废水处理过程中 ETS 活性的指示生物.

3 结 论

(1)比较分析 TTC-ETS 活性及 INT-ETS 活性等两个 ETS 活性指标结果表明,污泥 TTC-ETS 活性能更有效表征苯酚对污泥活性的影响,且随着进水苯酚浓度的增大,苯酚对污泥活性的抑制越明显,如 50 mg·L⁻¹进水条件下,苯酚对污泥活性的抑制率为(20.75±10.43)%,而 300 mg·L⁻¹进水运行后期,其抑制率稳定在 40%左右.

(2)苯酚对活性污泥微型动物群落结构的影响随浓度的增大而增大,且对不同微型动物类群影响不同.在 50 mg·L⁻¹进水条件下,苯酚只对有壳变形虫存在明显的抑制作用,而进水浓度增大至 100 mg·L⁻¹时,苯酚对固着型纤毛虫、有壳变形虫、微型后生动物等类群以及整个微型动物群落均产生显著性影响.当进水浓度为 300 mg·L⁻¹时,苯酚对匍匐型纤毛虫、肉食性纤毛虫的生长繁殖均有明显的抑制作用,而对鞭毛虫的生长却存在明显的促进

作用。

(3) 苯酚对活性污泥微型动物群落结构的动态变化有影响,且进水浓度不同对微型动物群落结构动态随时间变化的影响程度不同。随着苯酚浓度的增大,某些微型动物会形成胞囊自我保护,这种自我保护的生存机制可能是影响微型动物群落结构动态变化的原因之一,但进水苯酚浓度过高 ($> 300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时,会导致这种生存机制逐渐失效。

(4) 苯酚影响下的污泥活性与微型动物之间存在某种程度的关联,某些微型动物种可作为污泥活性大小的指示生物,如针棘匣壳虫 (*Centropyxis aculeata*) 的大量繁殖,预示着处理含酚废水的污泥活性低;湖累枝虫 (*Epistylis lacustris*) 多度与污泥活性呈明显的正相关关系 ($r = 0.371, P = 0.173$),可作为污泥活性高的指示生物等。

致谢: 感谢安徽工业大学实验室中心戴波老师以及建筑工程学院杜佳男、苏云石、张悦、周安澜等同学在试验过程中的帮助。

参考文献:

- [1] Leal A L, Dalzochio M S, Flores T S, *et al.* Implementation of the sludge biotic index in a petrochemical WWTP in Brazil: improving operational control with traditional methods [J]. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 2013, **40** (12): 1415-1422.
- [2] Madoni P. Protozoa in wastewater treatment processes: a minireview [J]. *Italian Journal of Zoology*, 2011, **78** (1): 3-11.
- [3] 胡波. 城市污水生物处理系统微型动物群落: 结构、动态及影响因素 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2012. 13-14.
- [4] Liu J, Yang M, Qi R, *et al.* Comparative study of protozoan communities in full-scale MWTPs in Beijing related to treatment processes [J]. *Water Research*, 2008, **42** (8-9): 1907-1918.
- [5] Babko R, Jaromin-Gleń K, Łagód G, *et al.* Effect of drilling mud addition on activated sludge and processes in sequencing batch reactors [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, **57** (3): 1490-1498.
- [6] Lee S, Basu S, Tyler C W, *et al.* Ciliate populations as bio-indicators at deer island treatment plant [J]. *Advances in Environmental Research*, 2004, **8** (3-4): 371-378.
- [7] Canals O, Salvadó H, Auset M, *et al.* Microfauna communities as performance indicators for an A/O shortcut biological nitrogen removal moving-bed biofilm reactor [J]. *Water Research*, 2013, **47** (9): 3141-3150.
- [8] Papadimitriou C A, Petridis D, Zouboulis A I, *et al.* Protozoans as indicators of sequential batch processes for phenol treatment: an autoecological approach [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, **98**: 210-218.
- [9] Hu B, Qi R, Yang M. Systematic analysis of microfauna indicator values for treatment performance in a full-scale municipal wastewater treatment plant [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25** (7): 1379-1385.
- [10] 齐嵘, 刘娟, 杨敏, 等. 无机废水硝化过程中原生动物群落结构特征及其变化规律 [J]. *环境科学学报*, 2013, **33** (1): 53-57.
- [11] Nicolau A, Martins M J, Mota M, *et al.* Effect of copper in the protistan community of activated sludge [J]. *Chemosphere*, 2005, **58** (5): 605-614.
- [12] Samaras P, Papadimitriou C A, Vavoulidou D, *et al.* Effect of hexavalent chromium on the activated sludge process and on the sludge protozoan community [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100** (1): 38-43.
- [13] 师永健, 张耀斌, 全燮, 等. 移动床生物膜反应器用于苯酚废水处理的性能研究 [J]. *环境工程学报*, 2013, **33** (1): 30-35.
- [14] Uygun A, Kargi F. Phenol inhibition of biological nutrient removal in a four-step sequencing batch reactor [J]. *Process Biochemistry*, 2004, **39** (12): 2123-2128.
- [15] 王旭, 杜启云, 王韬, 等. 活性污泥法处理高浓度苯酚废水的研究 [J]. *天津工业大学学报*, 2007, **26** (6): 32-35.
- [16] Leong M L, Lee K M, Lai S O, *et al.* Sludge characteristics and performances of the sequencing batch reactor at different influent phenol concentrations [J]. *Desalination*, 2011, **270** (1-3): 181-187.
- [17] 宋嘉美. 典型有毒有机物苯酚对活性污泥代谢的影响及作用机制研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2014.
- [18] 陈一良, 杨云飞, 杨超. 活性污泥法降解苯酚模拟废水的动力学研究 [J]. *中国资源综合利用*, 2006, **24** (11): 24-27.
- [19] 段佩玲, 孙瑞, 王振宇. 含苯酚废水生物处理的细菌群落结构初探 [J]. *基因组学与应用生物学*, 2015, **34** (1): 125-129.
- [20] Papadimitriou C, Palaska G, Lazaridou M, *et al.* The effects of toxic substances on the activated sludge microfauna [J]. *Desalination*, 2007, **211** (1-3): 177-191.
- [21] 沈韞芬, 章宗涉, 龚循矩, 等. 微型生物监测新技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990. 1-524.
- [22] 马放, 扬基先, 魏利, 等. 环境微生物图谱 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
- [23] Madoni P. A sludge biotic index (SBI) for the evaluation of the biological performance of activated sludge plants based on the microfauna analysis [J]. *Water Research*, 1994, **28** (1): 67-75.
- [24] Dubber D, Gray N F. Enumeration of protozoan ciliates in activated sludge: determination of replicate number using probability [J]. *Water Research*, 2009, **43** (14): 3443-3452.
- [25] 谭学军, 尹军, 王建辉, 等. OUR 和 INT-ETS 表征污泥活性的比较 [J]. *中国给水排水*, 2005, **21** (7): 43-46.
- [26] 王建辉, 尹军, 陆海, 等. SBR 反应器中有机物去除与硝化反硝化过程 TTC-ETS 活性变化 [J]. *化工学报*, 2012, **63** (7): 2234-2240.
- [27] 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.
- [28] 陈燕, 刘国华, 范强, 等. 不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化 [J]. *环境科学*, 2015, **36** (7): 2610-2616.
- [29] 谭学军, 唐利, 何小娟. 用 INT-ETS 活性表征污泥生物活性的可行性研究 [J]. *净水技术*, 2008, **27** (3): 39-43.
- [30] 尹军, 吴相会, 王晓玲, 等. 用 TTC-ETS 和 INT-ETS 表征微生物活性 [J]. *中国给水排水*, 2008, **24** (7): 8-11.
- [31] Wang J H, Yin J, Song W H, *et al.* Variation of TTC-ETS

- activity of activated sludge in SBR process [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, **281**: 174-178.
- [32] Cheng L, Li X C, Jiang R X, *et al.* Effects of Cr(VI) on the performance and kinetics of the activated sludge process [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(2): 797-804.
- [33] Wang W, Li X C, Wang P F, *et al.* Long-term effects of Ni(II) on the performance and activity of activated sludge processes [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, **92**: 144-149.
- [34] 尹军, 谭学军, 任南琪. 用 TTC 与 INT-电子传递体系活性表征重金属对污泥活性的影响 [J]. *环境科学*, 2005, **26**(1): 56-62.
- [35] 王建辉, 尹军, 陆海, 等. 基于 ETS 活性的有机物降解与硝化过程中微生物动力学 [J]. *化工学报*, 2014, **65**(2): 672-678.
- [36] 韦贞鸽, 周瑞云, 于鲁冀, 等. CASS 处理过程中运行指标与生物相的相关性研究 [J]. *给水排水*, 2007, **33**(5): 160-163.
- [37] Zhou K X, Xu M Q, Liu B, *et al.* Characteristics of microfauna and their relationships with the performance of an activated sludge plant in China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, **20**(4): 482-486.
- [38] Laybourn-Parry J, Boyall J, Rogers P. The role of flagellated and ciliated protozoa in lagoon and grass filter sewage treatment systems [J]. *Water Research*, 1999, **33**(13): 2971-2977.
- [39] 兰木岭, 高明. 不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物群落结构的影响 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 4252-4259.
- [40] Dos Santos L A, Ferreira V, Pereira M O, *et al.* Relationship between protozoan and metazoan communities and operation and performance parameters in a textile sewage activated sludge system [J]. *European Journal of Protistology*, 2014, **50**(4): 319-328.
- [41] 王伟, 徐艳, 侯昭牧, 等. Ni^{2+} 对活性污泥活性及群落多样性的影响 [J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(1): 138-143.
- [42] 胡小兵, 饶强, 叶星, 等. 焦化废水活性污泥法处理中微型动物群落及其与处理性能之间的关系 [J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(9): 2780-2789.
- [43] Papadimitriou C A, Papatheodoulou A, Takavakoglou V, *et al.* Investigation of protozoa as indicators of wastewater treatment efficiency in constructed wetlands [J]. *Desalination*, 2010, **250**(1): 378-382.
- [44] Ntougias S, Tanasidis S, Melidis P. Microfaunal indicators, Ciliophora phylogeny and protozoan population shifts in an intermittently aerated and fed bioreactor [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **186**(2-3): 1862-1869.
- [45] Papadimitriou C A, Samaras P, Zouboulis A I, *et al.* Effects of influent composition on activated sludge protozoa [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2011, **33**(1-3): 132-139.

CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM _{2.5} Under Air Heavy Pollution in Beijing	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM ₁₀ and PM _{2.5} in Beijing During 2014 APEC	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM _{2.5} During Summer in Hongshan District, Wuhan	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM _{2.5} Based on <i>k</i> -means Analysis	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM _{2.5}	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i>	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O ₃ /UV	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfonitrospira</i> sp. CMX	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO ₂ Fixation Bacterial Communities and Their CO ₂ Assimilation Contents	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt	DONG Bing-bing, CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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)

2016年10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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