

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征	邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)
亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征	邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)
亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系	袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)
2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析	廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)
在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究	付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)
PM ₁₀ 可替代源成分谱的建立方法及其应用	陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)
夏季东海和南黄海一氧化氮的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究	王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)
三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征	王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)
浑太水系水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性	刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)
深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究	赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)
滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性	熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)
金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价	周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)
西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估	谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)
西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析	袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)
城市不同下垫面降雨径流多环芳烃 (PAHs) 分布及源解析	武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)
粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响	陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)
饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究	杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)
压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究	蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)
基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究	王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)
臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究	曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)
电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究	刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)
铁铜复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(Ⅲ)吸附性能研究	张伟, 陈静, 张高生 (4198)
重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究	楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)
光质对蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 生长特征及生化组成的影响研究	唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)
常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响	任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)
Fe ²⁺ 和 Fe ³⁺ 对厌氧氨氧化污泥活性的影响	李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)
CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究	阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)
盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N ₂ O 产生量的影响	王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)
硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析	曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)
利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响	王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)
北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征	苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)
环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响	张俊, 罗方园, 熊浩徽, 焦少俊, 叶波平 (4267)
稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征	刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)
典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义	靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)
变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响	王莲阁, 高岩红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)
铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响	刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)
植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究	卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)
不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征	李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)
不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究	李平, 郎漫, 徐向华, 李煜姗, 朱淑娟 (4321)
转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较	潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)
天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集	郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)
1-硝基芘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤	尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)
鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究	卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)
污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究	窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)
上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究	田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)
硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N ₂ O 产生的影响	卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)
中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究	蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)
泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究	赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)
基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究	张雪莹, 温宗国 (4395)
大气棕色碳的研究进展与方向	闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)
《环境科学》征稿简则 (4094)	
《环境科学》征订启事 (4126)	
信息 (4243, 4266, 4274, 4328)	

重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究

楼菊青^{1,2}, 杨东叶², 曹永青², 孙培德², 郑平^{1*}

(1. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 2. 浙江工商大学环境科学与工程学院, 杭州 310012)

摘要: 水蚯蚓污泥减量技术是一种可持续发展的新技术, 已成功应用于城镇生活污水处理系统。但污水处理厂的剩余污泥尤其是工业废水处理系统的剩余污泥中往往含有各种重金属污染物。为了将水蚯蚓的应用范围拓宽至含重金属污染的城镇污水或工业废水处理系统中, 本文选取典型重金属铬作为研究污染物, 以呼吸速率和 LC_{50} 为指标, 考察在 Cr 胁迫下水蚯蚓的响应机制。96 h 急性毒性试验结果表明, 随着暴露时间的增加, 半致死浓度 LC_{50} 降低, 24 h LC_{50} 和 96 h LC_{50} 分别为 $7.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Cr(VI) 对水蚯蚓的安全浓度为 $0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。正交试验结果表明, 当 Cr(VI) 浓度为 $2.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、温度 26°C 、 $\text{pH} = 6.0$ 、DO 为 $6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 水蚯蚓呼吸速率最高。对水蚯蚓呼吸速率影响的因素从主到次为 Cr(VI) 浓度、温度、DO 浓度、pH 值。在本试验中, 当六价铬浓度低于 $2.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 铬对水蚯蚓的呼吸速率有促进作用, 反之, 当六价铬浓度高于 $8.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 则对水蚯蚓的呼吸速率起到明显抑制作用。

关键词: 六价铬; 水蚯蚓; 急性毒性; 呼吸速率; 正交

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4205-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.11.023

Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress

LOU Ju-qing^{1,2}, YANG Dong-ye², CAO Yong-qing², SUN Pei-de², ZHENG Ping¹

(1. College of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. School of Environmental Science & Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Tubificidae is now used in the wastewater treatment systems to successfully minimize the sludge production, which has been proved an effective, economical and sustainable technology. But the excess sludge inevitably contains a variety of heavy metals, especially the sludge from industrial wastewater treatment plant. In order to apply tubificidae to these systems, Chromium was selected as pollutant object and the physiological responses of tubificidae to Chromium were studied in this paper. Acute toxicity was analyzed and Median lethal concentrations (LC_{50}) were determined over 96 h periods for Cr. Results indicated that 24 h LC_{50} and 96 h LC_{50} were $7.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $0.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. The duration of tubificidae in Cr solution decreased with increasing Cr concentration. Under the Cr stress, a highest respiration rate was obtained when the concentration of Cr(VI), temperature, pH and DO was $2.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 26°C , 6.0 and $6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. The order of these factors was the concentration of Cr(VI), temperature, DO and pH. The respiration experiments demonstrated that low concentration ($< 2.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) of Cr could promote the respiration rate of tubificidae. On the other hand, when the concentration of Cr was $8.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, it could remarkably inhibit the respiratory rates of tubificidae.

Key words: Cr(VI); tubificidae; acute toxicity; respiration rate; orthogonal

近年来随着我国污水处理率的提高, 剩余污泥量也在急剧增加, 据估计, 未来 5 年内, 我国城市污泥排放量将提高到 $3560 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$ 左右。如何合理地处理处置污泥成为环境治理的新课题和新挑战。而从源头上实行污泥减量是最佳方法^[1]。环节动物门寡毛纲颤蚓科分节蠕虫(俗称水蚯蚓), 能大量摄食污泥, 通过摄食活性污泥中的细菌和有机污泥, 在体内将其矿化从而减少系统中的剩余污泥产量。Rensink 等^[2]向填充了塑料载体的活性污泥系统中投入颤蚓(tubificidae), 发现单位质量 COD 的剩余污泥产量从 $0.40 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 降至 $0.15 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$, Wei 等^[3]开发了一套集成式蠕虫反应器用来处理排放的剩余污泥和回流污泥, 减量率可达 48% 左右。Elissen 等^[4]将夹杂带丝蚓(*Lumbriculus variegates*)接种于填料上, 单

位质量蠕虫的污泥减量速率约为 $0.045 \text{ mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{d})^{-1}$, 每天矿化的污泥质量约占蠕虫自身湿重的 4.5%。水蚯蚓污泥减量技术因其具有能耗低、不产生二次污染等特点, 近年来备受青睐^[5]。

目前, 水蚯蚓污泥减量工艺已成功应用于城镇生活污水处理厂^[6], 该技术成功应用的先决条件首先是水蚯蚓在系统中稳定生长并代谢繁殖^[7,8], 其次是环境因素(温度、pH、溶解氧 DO、氨氮浓度、光照、盐度等)和剩余污泥中重金属污染物的影

收稿日期: 2014-04-29; 修订日期: 2014-06-06

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(Y12E080076); 浙江省高等学校创新团队支持计划项目(T200912)

作者简介: 楼菊青(1973~), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为废物生物处理技术, E-mail: ljy7393@163.com

* 通讯联系人, E-mail: pzhang@zju.edu.cn

响^[9]. 尤其是重金属污染物, 势必会对水蚯蚓的生理造成影响进而影响水蚯蚓污泥减量能力. 铬及其化合物由于具有高毒性, 被列为中国水环境优先污染物黑名单^[10], 在制革、电镀和染料的制造等过程中均会排放含铬废水. Cr 在自然界中主要以Cr(Ⅵ)和Cr(Ⅲ)两种形态存在, Cr(Ⅲ)不容易迁移且毒性很低, 而Cr(Ⅵ)在环境中易溶于水、迁移能力强且毒性在Cr(Ⅲ)的 100 倍以上. 目前, 含铬废水的处理方法主要有还原法、离子交换法和生物吸附法等. 当将水蚯蚓应用于含铬的废水处理系统中时, 水蚯蚓会受到铬的毒性作用, 反映其生物体的生命体征及代谢活动的主要指标——呼吸速率会受到影响, 因此, 本文选取重金属Cr(Ⅵ)作为研究污染物, 以呼吸速率和 LC₅₀ 为指标, 对重金属 Cr 及环境因子对水蚯蚓呼吸速率的协同作用展开分析, 以利于在实际应用时调整运行条件, 为将水蚯蚓应用于含重金属污染的处理系统中提供理论基础.

1 材料与方法

1.1 水蚯蚓

本试验所用水蚯蚓购自上海岚灵花鸟市场, 经鉴定为正颤蚓 (*Tubifex tubifex*) 和霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*) 的混合种颤蚓科蠕虫, 比例约为 2:3. 它们受到刺激后会蜷缩身体、打结. 活性较强的水蚯蚓表现为身体颜色鲜红, 对刺激敏感; 活性较弱的水蚯蚓表现为身体颜色淡红, 尾部发白并有断节的现象, 对刺激较为不敏感; 已死亡的水蚯蚓表现为身体泛白, 失去伸缩能力, 对刺激无反应. 水蚯蚓先在实验室室温培养一段时间后再用于试验. 试验时, 先将水蚯蚓体表的污泥冲洗干净, 挑选体长均一(约 6~7 cm)、鲜红色、对于刺激反应敏捷的水蚯蚓作为试验对象. 为了排除干扰, 试验中不对水蚯蚓进行喂食.

1.2 试剂

重铬酸钾、氢氧化钾: 分析纯, 成都市科龙化工试剂厂.

1.3 试验仪器

测定水蚯蚓呼吸速率的试验设备为 BI-2000 电解呼吸仪^[11]. 称取 0.25 g 新鲜水蚯蚓(以湿重计)

水蚯蚓放入滤布囊, 悬挂于呼吸仪的反应器内, 待反应器内的温度和呼吸仪水浴锅温度平衡后进行试验. 本研究呼吸速率以单位体积内单位质量(干重)的水蚯蚓单位时间的耗氧量表示, 即 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h} \cdot \text{L})^{-1}$.

pH 采用 FE20K 精密 pH 计测定; 水蚯蚓湿重和干重采用 EL104 电子天平称量; DO 采用 Tengine-EDO 溶解氧仪测定, 水温用 WNG-01 温度计测量.

1.4 试验方法

1.4.1 水蚯蚓干湿比的测定

为了更准确地进行定量及比较, 试验结果以干重表达, 因此需测定水蚯蚓的干湿比. 水蚯蚓的干重(dry weight, dw)和湿重(wet weight, ww)均用电子天平称量. 挑取适量颜色鲜红、活性强的水蚯蚓, 用清水反复冲去表面污泥后, 放于带有小孔的铝箔纸上, 铝箔纸下面放置吸水纸巾吸去水蚯蚓表面的水分, 吸干后称量, 计为湿重. 然后, 将水蚯蚓于烘箱内 103~105℃ 条件下烘至衡重, 称量, 计为干重. 作干重-湿重关系图, 并对数据进行线性拟合, 其拟合方程的斜率即为干湿重比.

1.4.2 六价铬对水蚯蚓的急性毒性研究

用重铬酸钾配制铬液. 根据预试验, 正式试验的铬浓度范围设定在 0.00~20.00 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 区间, 根据浓度对数设置 11 个浓度梯度(表 1). 试验时选用表 1 中试验浓度来进行正式试验. 试验中, 每组水蚯蚓 20 条, 放入直径为 12 cm 盛装了 50 mL 对应浓度铬溶液的培养皿中, 每个浓度设置 3 个平行和一组空白对照组. 试验条件: 温度为 $(22 \pm 1)^\circ\text{C}$. pH 为 7.0 ± 0.1 , DO 为 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 试验开始的前 6 h 内, 连续记录和观察试验现象. 当水蚯蚓表现为身体泛白, 无伸缩能力, 对于触碰无反应时可判定为死亡. 已死亡的水蚯蚓及一些絮状排泄物应及时从培养皿中清除, 以免对试验造成影响. 根据死亡数计算出 12、24、36、48、60、72、84、96 h 的死亡率, 并根据死亡率-概率单位图求得对应概率单位, 以浓度对数为 x , 概率单位为 y 轴, 作概率单位-浓度对数图, 并求其线性回归方程($y = kx + b$), 从而得到各个时间点对应的半致死浓度^[12], 即 24 h LC₅₀、48 h LC₅₀、

表 1 Cr(Ⅵ) 对水蚯蚓的急性毒性浓度梯度

Table 1 Concentrations of Cr(Ⅵ) for acute toxicity test											
浓度对数	1.70	1.96	2.22	2.48	2.74	3.00	3.26	3.52	3.78	4.04	4.30
理论浓度/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	50	91	166	302	550	1 000	1 820	3 311	6 025	10 965	20 000
试验浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.05	0.10	0.15	0.30	0.50	1.00	2.00	3.00	6.00	11.00	20.00

72 h LC_{50} 、96 h LC_{50} . 通过以下公式计算Cr(VI)对水蚯蚓的安全浓度(SC):

$$SC = 24\text{ h } LC_{50} \times 0.3 / (24\text{ h } LC_{50} / 48\text{ h } LC_{50})^3$$

(1)

1.4.3 呼吸速率正交试验

本试验选取温度、pH 值、DO 浓度为环境因子,利用正交试验直观分析法,探究它们与六价铬对水蚯蚓呼吸速率的协同影响.

依据急性毒性试验结果,Cr 浓度设置为: 24 h LC_{50} 、48 h LC_{50} 、72 h LC_{50} 、96 h LC_{50} 及安全浓度(SC)取整,从小到大分别为 0.10、0.50、1.00、2.50、8.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 根据本课题组前期的研究结果^[6,11,13],本试验采用四因素五水平正交试验,四因素的各水平见表2,正交试验设计表如表3所示.

表2 正交试验因素水平

Table 2 Levels and factors in orthogonal experiment				
水平	试验因素			
	Cr(VI) 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	pH 值	DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
	A	B	C	D
1	0.10	14	5.0	2.0
2	0.50	18	6.0	3.0
3	1.00	22	7.0	4.0
4	2.50	26	8.0	5.0
5	8.00	30	9.0	6.0

表3 正交试验设计表 $L_{25}(5^4)$

Table 3 Orthogonal array $L_{25}(5^4)$				
试验号	Cr(VI) 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	pH 值	DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
1	0.10	14	5.0	2.0
2	0.10	18	6.0	3.0
3	0.10	22	7.0	4.0
4	0.10	26	8.0	5.0
5	0.10	30	9.0	6.0
6	0.50	14	6.0	4.0
7	0.50	18	7.0	5.0
8	0.50	22	8.0	6.0
9	0.50	26	9.0	2.0
10	0.50	30	5.0	3.0
11	1.00	14	7.0	6.0
12	1.00	18	8.0	2.0
13	1.00	22	9.0	3.0
14	1.00	26	5.0	4.0
15	1.00	30	6.0	5.0
16	2.50	14	8.0	3.0
17	2.50	18	9.0	4.0
18	2.50	22	5.0	5.0
19	2.50	26	6.0	6.0
20	2.50	30	7.0	2.0
21	8.00	14	9.0	5.0
22	8.00	18	5.0	6.0
23	8.00	22	6.0	2.0
24	8.00	26	7.0	3.0
25	8.00	30	8.0	4.0

1.4.4 数据分析

所有试验均设3个平行,并计算其平均值和标准差进行统计分析. 利用 Origin 8.5 软件进行 ANOVA 分析,将试验组与对照组进行显著性 t 检验,以 $P < 0.05$ 作为显著性依据.

2 结果与分析

2.1 水蚯蚓干湿比

本试验测得的干湿比约为 15.6% (如图1),曾有报道称颤蚓的干湿比为 $16.1\% \pm 1.5\%$ ^[14],与本试验所测值相近. Elissen^[15]提到,对于不同种类水蚯蚓干湿比不同,颤蚓和夹杂带丝蚓的干湿比分别为 17.0% 和 13.0%,和本试验略有不同,原因可能是所选试验对象在体长,直径和生物体积上存在差异^[15,16].

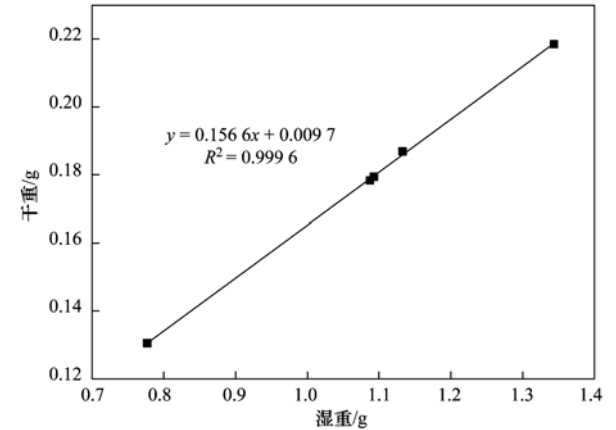


图1 水蚯蚓干湿比

Fig. 1 Dry weight vs. wet weight of worms

2.2 铬对水蚯蚓的急性毒性

经过 Grubbs 检验法检测数据的可靠性后,分别作出 24、48、72 和 96 h 的浓度对数-概率单位图,同时求出相应的 LC_{50} 和置信区间,试验结果见表4.

表4 六价铬对水蚯蚓的急性毒性试验结果

Table 4 Acute toxicity of Cr(VI) to worms					
时间/h	线性回归方程	R^2	LC_{50} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	置信区间/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	
24	$y = 1.2127x + 0.2693$	0.9237	7.94	5.43 ~ 11.61	
48	$y = 1.4443x + 0.0510$	0.9600	2.67	1.40 ~ 5.08	
72	$y = 1.6186x + 0.2898$	0.9533	0.81	0.45 ~ 1.47	
96	$y = 1.4726x + 1.0399$	0.9744	0.49	0.26 ~ 0.92	

安全浓度为:

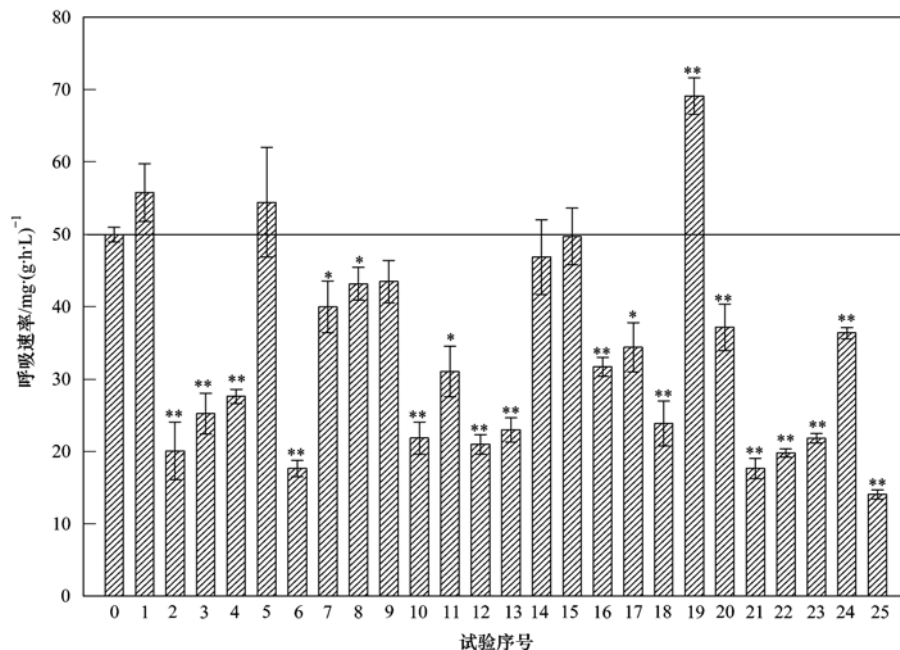
$$SC = 24\text{ h } LC_{50} \times 0.3 / (24\text{ h } LC_{50} / 48\text{ h } LC_{50})^3$$
$$= 7.64 \times 0.3 / (7.64 / 2.67)^3$$
$$= 0.09\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$$

六价铬对水蚯蚓的安全浓度、96 h LC_{50} 、72 h LC_{50} 、48 h LC_{50} 、24 h LC_{50} 分别为 0.09、0.49、0.81、2.67、7.94 $mg \cdot L^{-1}$, 从结果看, 24 h LC_{50} 较高, 但随着时间的增加, 水蚯蚓对铬的耐受性快速下降, 96 h LC_{50} 为 0.49 $mg \cdot L^{-1}$, 仅为 24 h LC_{50} 的 6.2% 左右, 这表明水蚯蚓对铬的短时间耐受性较强, 但是时间超过 24 h 后, 耐性急剧降低。

2.3 铬胁迫下环境因子对水蚯蚓呼吸速率的影响

铬与环境因子协同作用下水蚯蚓的呼吸速率见图 2, 从中可知, 在不同试验条件下, 水蚯蚓呼吸速率均不同。其中 1、5、9、14、15 试验组与空白对照组无显著差异 ($P > 0.05$), 7、8、11、17 试验组有显著差异, 其余各组与空白对照组均有非常显著差异。从试验结果看, 大多数试验组呼吸速率均低于空白对照组, 只有 1 号 [Cr(VI) 浓度 0.10 $mg \cdot L^{-1}$ 、14℃、pH 5.0、DO 2.0 $mg \cdot L^{-1}$]、5 号 [Cr(VI) 浓度 0.10 $mg \cdot L^{-1}$ 、30℃、pH 9.0、DO 6.0 $mg \cdot L^{-1}$] 和 19 号 [Cr(VI) 浓度 2.50 $mg \cdot L^{-1}$ 、26℃、pH 6.0、DO 6.0 $mg \cdot L^{-1}$] 试验组的呼吸速率高于空白对照组。

这 3 组试验组中, 其中 1 号和 5 号试验组与空白对照组无显著差异 ($P > 0.05$), 说明该呼吸速率与空白对照组的差异可能是由取样误差所致, 只有 19 号试验组与空白对照组有非常显著差异 ($P \leq 0.01$), 可见, 该试验条件下水蚯蚓呼吸速率的提高是受到了某些因素的刺激。本实验室进行的前期单因素试验表明, 当温度为 22℃、pH 8.0、DO 3.5 ~ 4.0 $mg \cdot L^{-1}$ 时水蚯蚓呼吸速率最大^[11], 比较 19 号和 24 号 [Cr(VI) 浓度 8.00 $mg \cdot L^{-1}$ 、26℃、pH 7.0、DO 3.0 $mg \cdot L^{-1}$] 试验组的呼吸速率可看出, 19 号试验组的呼吸速率为 24 号的 1.9 倍, 两组试验的温度、pH 及 DO 与单因素试验^[11] 最佳呼吸速率条件较接近。可见, 造成呼吸速率差值大的主要原因在于不同的六价铬浓度, 也即在试验浓度范围内, 低浓度 (2.50 $mg \cdot L^{-1}$) 六价铬对水蚯蚓的呼吸速率反而起到了促进作用, 这可能是因为水蚯蚓体表会分泌黏液, 可以遮挡外界部分有毒有害物质, 且当 Cr 的浓度较低时, 会诱导水蚯蚓体内产生 SOD 酶等进行应激, 并通过加快呼吸速率及新陈代谢来抵抗外界毒物的刺激^[17]。



数据为 3 个平行的平均值 $\pm$ 标准差; $P \leq 0.01$ 用 ** 表示, $0.01 > P \geq 0.05$ 用 * 表示, $P > 0.05$ 无标记

图 2 不同条件下的水蚯蚓呼吸速率

Fig. 2 Respiration rate of worms under different conditions

从图 2 看出, 21、25 号试验组的呼吸速率最低, 且与空白对照组有非常显著差异 ($P \leq 0.01$), 呼吸速率分别为最大呼吸速率的 20.3%、16.3%, 说明水蚯蚓的呼吸速率受到严重抑制。21 号试验条件为

Cr(VI) 浓度 8.00 $mg \cdot L^{-1}$ 、14℃、pH 9.0、DO 5.0 $mg \cdot L^{-1}$, 25 号试验条件为 Cr(VI) 浓度 8.00 $mg \cdot L^{-1}$ 、30℃、pH 7.0、DO 3.0 $mg \cdot L^{-1}$, 不难发现这两组试验分别是在浓度最高、温度分别在最低温

(14℃) 和最高温 (30℃) 的条件下进行的, 这两组的呼吸速率分别为 $17.62 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h} \cdot \text{L})^{-1}$ 、 $11.26 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h} \cdot \text{L})^{-1}$, 郭茂新等^[9] 研究结果表明, 在无铬条件下, 当温度为 15℃ 与 30℃ 时, 水蚯蚓的呼吸速率分别为 $29.48 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h} \cdot \text{L})^{-1}$ 、 $21.66 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h} \cdot \text{L})^{-1}$, 可见同一温度水平下, 由于高浓度六价铬的作用, 水蚯蚓呼吸速率明显下降. 当 Cr(VI) 浓度为 $8.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 除了 24 号试验组呼吸速率 [$36.36 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h} \cdot \text{L})^{-1}$] 外, 其他 4 个试验组的呼吸速率均较低, 基本在 $20.00 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h} \cdot \text{L})^{-1}$ 以下, 不到最高呼吸速率的 29%, 且高浓度的平均值明显远远低于其它浓度下的平均值, 可见高浓度 ($8.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 六价铬对水蚯蚓呼吸速率起到了抑制作用.

试验因素各水平对指标的影响分析结果列于表 5 中, 从中可看出各水平对呼吸速率的影响大小, $k_{A_4} > k_{A_1} > k_{A_3} > k_{A_2} > k_{A_5}$, 可以判断 A_4 为 A 因素的优水平; $k_{B_4} > k_{B_5} > k_{B_1} > k_{B_3} > k_{B_2}$, B_4 为 B 因素的优水平; $K_{C_2} > K_{C_5} > K_{C_1} > K_{C_3} > K_{C_4}$, C_2 为 C 因素的优水平; $K_{D_5} > K_{D_1} > K_{D_4} > K_{D_2} > K_{D_3}$, D_5 为 D 因素的优水平, 则 4 个因素的优水平组合为 $A_4 B_4 C_2 D_5$, 即水蚯蚓在此条件下可获得最高呼吸速率: Cr(VI) 浓度为 $2.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、温度 26℃、pH = 6.0、DO 浓度 $6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 即 19 号试验组为最优水平组合, 其呼吸速率最高.

表 5 正交试验结果分析

Table 5 Results of orthogonal analysis				
分析指标	因素			
	A	B	C	D
K1	179.702	150.193	171.506	179.154
K2	162.844	132.177	174.709	136.343
K3	171.549	139.428	169.124	134.165
K4	196.215	217.605	128.944	149.967
K5	106.846	177.753	172.873	217.527
k1	35.940	30.039	34.301	35.831
k2	32.569	26.435	34.942	27.269
k3	34.310	27.886	33.825	26.833
k4	39.243	43.521	25.789	29.993
k5	21.369	35.551	34.575	43.505
极差 R	17.874	17.086	9.153	16.672
主次顺序	A > B > D > C			
优水平	A_4	B_4	C_2	D_5
优组合	$A_4 B_4 C_2 D_5$			

各因素对水蚯蚓呼吸速率的影响程度可通过比较极差 R 的大小得到, 从表 5 中可看出 $R_A > R_B > R_D > R_C$. 因此各因素对试验指标影响的主次顺序是 ABDC, 即对水蚯蚓呼吸速率影响的因素从主到次为

Cr(VI) 浓度、温度、DO 浓度、pH 值.

3 讨论

3.1 铬对水蚯蚓的急性毒性

根据赵岩等^[18] 和蔺玉华等^[19] 对鱼类的毒性研究, Cr(VI) 相应的 LC_{50} 要高得多, 这是因为水蚯蚓体表没有像鱼类一样的硬壳, 能够在一定程度上分离体液和环境, 起到保护的作用, 而是依靠水蚯蚓体表分泌的黏液来阻挡外界毒性刺激, 当曝露时间在 24 h 以上时, 体表分泌的黏液不足以遮挡外界有毒有害物质, 且通过体表接触和吸收后引起其体内生理指标的变化, 导致了水蚯蚓在 24 h 后对铬的耐性急剧下降^[20]. 随着六价铬浓度的升高, 对水蚯蚓的活性影响加大, 水蚯蚓反应变迟钝并逐渐丧失运动能力, 最终出现解体现象, 水蚯蚓解体后产生大量白色絮状物, 为水蚯蚓死亡后解体的产物. 付荣恕等^[21] 研究 Pb 对水丝蚓的急性毒性, 24 h LC_{50} 和 48 h LC_{50} 分别为 $7.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $4.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 结合本研究结果可见, Pb 和 Cr 对水蚯蚓的毒性相近. 此外, 孙新元等^[22] 研究铜对颤蚓的急性毒性, 结果表明 24 h LC_{50} 、48 h LC_{50} 、72 h LC_{50} 分别为 237.80 、 212.20 、 $174.30 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 可见 Cu 对水蚯蚓的毒性要远大于 Cr 的; 本试验结果与 Maestre 等^[23] 的研究结果相吻合, 其报道的六价铬对正颤蚓的 96 h LC_{50} 为 $0.19 \sim 38.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Rathore 等^[24] 研究表明, 在硬水中时, 六价铬对正颤蚓的 24 h LC_{50} 、48 h LC_{50} 、72 h LC_{50} 、96 h LC_{50} 分别为 22.73 、 5.59 、 4.55 、 $4.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 与本试验结果略有所不同. 另外, 与 Oztetik 等^[25] 和 Mendez-Fernandez 等^[26] 的研究结果也存在一定的差异, 存在差异的主要原因有: ①所用水蚯蚓的产地不同; ②水蚯蚓的种属与纯度不同; ③试验过程的控制条件不同, 如温度、pH、水硬度^[23] 等. 因此, 在实际应用中, 应根据具体接种的水蚯蚓来决定是否适用或及时调整处理系统中重金属的浓度.

城镇污水处理厂污染物排放标准中规定, 六价铬的最高允许排放浓度 (日均值) 为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而本试验得到的六价铬对水蚯蚓的安全浓度为 $0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 因此水蚯蚓可在城镇污水处理系统中存活, 能否长期在系统中稳定生长及进行污泥减量还需进一步进行长期系统的蓄积性试验研究.

3.2 铬胁迫下环境因子对水蚯蚓呼吸速率的影响

在不同水平 Cr 的胁迫下, 温度 26℃ 时, 水蚯蚓平均呼吸速率最大, 达到 $43.52 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h} \cdot \text{L})^{-1}$, 而

水蚯蚓在其他温度时,其呼吸速率均小于 $36.00 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h} \cdot \text{L})^{-1}$ 。水蚯蚓属于变温动物,其新陈代谢和生理状态均和水温相关^[27],低温会降低活性和新陈代谢速率,水蚯蚓适合生长于温度为 25°C 的环境^[6]。曾有报道称^[7],当温度在 $15 \sim 25^\circ\text{C}$ 之间时,随着温度的升高水蚯蚓污泥降解率增加, 25°C 时 TSS、VSS 降解率最大,本研究结果解释了温度对水蚯蚓生长及污泥降解效果影响的机制。

重金属 Cr 的存在也使 pH 值对水蚯蚓呼吸速率的影响有所变化,当 $\text{pH} = 6.0$ 时,平均呼吸速率最大,为 $34.94 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h} \cdot \text{L})^{-1}$, $\text{pH} = 8.0$ 时的平均呼吸速率最低,仅为 $25.79 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h} \cdot \text{L})^{-1}$,而 $\text{pH} = 9.0$ 时,呼吸速率却又达到 $34.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出现此现象的原因可能是由于溶液中重金属在 pH 升高时会生成氢氧化物或碳酸盐等难溶物质沉淀或配合物,使得水中游离金属离子浓度降低,从而毒性抑制作用也有所降低。有研究表明^[7],在 DO、pH 和温度的协同作用下,pH 为 6.5 时水蚯蚓污泥减量率达到最高。因此结合本试验,可推测中性或略偏酸性的环境更有利于水蚯蚓生长代谢及污泥减量,因为在该环境下水蚯蚓的生命体征及代谢更活跃。

在 Cr 与环境因子的协同试验中,DO 浓度为 $6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,水蚯蚓平均呼吸速率最高,为 $43.51 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h} \cdot \text{L})^{-1}$,其他 DO 浓度下的平均呼吸速率均明显低于此值。有研究表明当 DO 低于 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,水蚯蚓的生长受到抑制且污泥减量率低^[7],同时,当水蚯蚓生长于低溶解氧环境下时,为了竞争更多的氧气,水蚯蚓因伸展肢体而附着不牢固,易被冲走而随污泥排出系统。然而,高溶解氧的投入意味着高能耗,且曝气量大会造成较强的生物扰动,这不利于水蚯蚓的生存,从而导致污泥降解速率较低^[9]。因此,从经济角度和实际运行出发,应将溶解氧浓度控制在适中范围内。

4 结论

(1) 用于本试验的霍甫水丝蚓与正颤蚓混合种水蚯蚓的干湿比为 15.6%。

(2) 通过 96 h 急性毒性试验得到,六价铬对混合种水蚯蚓的安全浓度、96 h LC_{50} 、72 h LC_{50} 、48 h LC_{50} 、24 h LC_{50} 分别为 0.09、0.49、0.81、2.67、 $7.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

(3) 六价铬胁迫下,通过正交试验得知,Cr(VI)浓度、温度、DO 浓度、pH 值这 4 个因素对水蚯蚓呼吸速率影响的最优水平组合为:Cr(VI)浓

度为 $2.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、温度 26°C 、 $\text{pH} = 6.0$ 、DO 浓度 $6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,此条件下水蚯蚓呼吸速率最高,为 $69.10 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h} \cdot \text{L})^{-1}$;对水蚯蚓呼吸速率影响的重要性从主到次为 Cr(VI)浓度、温度、DO 浓度、pH 值。

(4) 当温度为 26°C 时,浓度为 $2.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的六价铬对水蚯蚓呼吸速率起到促进作用而浓度为 $8.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,则起到抑制作用,前者呼吸速率为后者的 1.9 倍。当六价铬浓度较低(低于 $2.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)时,可以通过调节温度、pH 和 DO 浓度到合适条件,使水蚯蚓正常呼吸,稳定生长。

参考文献:

- [1] 段伟伟,李绍秀,李冬梅. 污泥减量技术的研究进展[J]. 能源与环境, 2011, (5): 74-77.
- [2] Resink J H, Rulkens W H. Using metazoa to reduce sludge production [J]. Water Science and Technology, 1997, **36**(11): 171-179.
- [3] Wei Y S, Liu J X. Sludge reduction with a novel combined worm-reactor [J]. Hydrobiologia, 2006, **564**(1): 213-222.
- [4] Elissen H J H, Hendrickx T L G, Temmink H, et al. A new reactor concept for sludge reduction using Aquatic Worms [J]. Water Research, 2006, **40**(20): 3713-3718.
- [5] Christa H R, Jaap V. Sludge reduction by predatory activity of aquatic oligochaetes in wastewater treatment plants: science or fiction? A review [J]. Hydrobiologia, 2006, **564**(1): 197-211.
- [6] Lou J Q, Sun P D, Guo M X, et al. Simultaneous sludge reduction and nutrient removal (SSRNR) with interaction between tubificidae and microorganisms: A full-scale study [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(24): 11132-11136.
- [7] 诸晖,魏源送,刘俊新. 颤蚓在活性污泥中的生长研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(5): 1342-1347.
- [8] 马王钢,孙培德,宋英琦,等. 基于水蚯蚓摄食活性污泥的生长动力学研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(8): 2340-2346.
- [9] 郭茂新,朱明山,楼菊青. 环境因子对水蚯蚓污泥减量效果的影响[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(12): 2657-2662.
- [10] 周文敏,傅德黔,孙宗光. 中国水中优先控制污染物黑名单的确定[J]. 环境科学研究, 1991, **4**(6): 9-12.
- [11] 楼菊青,曹永青,胡跃城,等. 环境因子对水蚯蚓呼吸速率的影响研究[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(10): 2737-2741.
- [12] 周启星,孔繁翔,朱琳. 生态毒理学[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 76-81.
- [13] Lou J Q, Guo M X, Chen M M. Studies on the effect of environmental factors on growth of tubificidae [A]. In: 2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering [C]. Nanjing: IEEE, 2011: 4442-4445.
- [14] Egeler P, Rombke J, Meller M, et al. Bioaccumulation of lindane and hexachlorobenzene by tubificid sludgeworms (Oligochaeta) under standardised laboratory conditions [J].

- Chemosphere, 1997, **35**(4): 835-852.
- [15] Elissen H J H. Sludge reduction by aquatic worms in wastewater treatment; with emphasis on the potential application of *Lumbriculus variegatus* [D]. Netherlands: Wageningen University, 2007. 49-65.
- [16] Lafont M. Production of Tubificidae in the littoral zone of Lake Léman near Thonon-les-Bains: A methodological approach [J]. Hydrobiologia, 1987, **155**(1): 179-187.
- [17] Grajeda y Ortega Mde L, López E L, Perotzi L F, et al. Cadmium, iron, and zinc uptake individually and as a mixture by *Limnodrilus hoffmeisteri* and impact on adenosine triphosphate content [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2008, **27**(3): 612-616.
- [18] 赵岩, 孔强, 付荣恕. Cu^{2+} 、 Cd^{+} 和 Cr^{6+} 对孔雀鱼的单一与联合毒性效应 [J]. 供水技术, 2009, **3**(6): 10-12.
- [19] 蔺玉华, 卢建民, 梁智龙, 等. 铬对鲤、草鱼胚胎发育及鱼苗的毒性影响 [J]. 水产学杂志, 2000, **13**(2): 32-35.
- [20] 张敏, 邢永雷, 李成涛, 等. PBS 共聚物对蚯蚓的蛋白质含量和纤维素酶活性的影响 [J]. 生态环境学报 2012, **21**(7): 1334-1338.
- [21] 付荣恕, 杜作滨. 铅、镉污染对水丝蚓的急性毒性效应 [J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2008, **23**(4): 93-95.
- [22] 孙新元, 宋志慧, 吴光前. 水中铜离子对颤蚓的毒性效应研究 [J]. 环境科学与技术, 2010, **33**(7): 40-43.
- [23] Maestre Z, Martinez-Madrid M, Rodriguez P. Monitoring the sensitivity of the oligochaete *Tubifex tubifex* in laboratory cultures using three toxicants [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2009, **72**(8): 2083-2089.
- [24] Rathore R S, Khangarot B S. Effects of water hardness and metal concentration on a freshwater *Tubifex tubifex* Muller [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2003, **142**(1-4): 341-356.
- [25] Oztetik E, Cicek A, Arslan N. Early antioxidative defense responses in the aquatic worms (*Limnodrilus* sp.) in Porsuk Creek in Eskisehir (Turkey) [J]. Toxicology and Health, 2013, **29**(6): 541-554.
- [26] Mendez-Fernandez L, Martinez-Madrid M, Rodriguez P. Toxicity and critical body residues of Cd, Cu and Cr in the aquatic oligochaete *Tubifex tubifex* (Muller) based on lethal and sublethal effects [J]. Ecotoxicology, 2013, **22**(10): 1445-1460.
- [27] Heugens E H W, Jager T, Creighton R, et al. Temperature-dependent effects of cadmium on *Daphnia magna*: Accumulation versus sensitivity [J]. Environmental Science and Technology, 2003, **37**(10): 2145-2151.

CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM ₁₀	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoabsorbent for As(III) Removal from Aqueous Solutions	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe ²⁺ and Fe ³⁺ on the Activity of ANAMMOX	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N ₂ O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis(<i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryI δ C Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N ₂ O Releases from Bioreactor Landfill	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行