

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第7期

Vol.35 No.7

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

区域污染对本底地区气溶胶光学特性及辐射强迫影响的地基和卫星遥感观测研究 张小玲,夏祥鳌,车慧正,汤洁,唐宜西,孟伟,董璠 (2439)

北京上甸子区域大气本底站甲基氯仿在线观测研究 姚波,周凌晔,刘钊,张根,夏玲君 (2449)

浙江临安大气本底站 CO 浓度及变化特征 方双喜,周凌晔,栾天,马千里,王红阳 (2454)

南京北郊夏季大气颗粒物中有机碳和元素碳的污染特征 段卿,安俊琳,王红磊,缪青 (2460)

西安冬季非灰霾天与灰霾天 PM_{2.5} 中水溶性有机氮污染特征比较 程玉婷,王格慧,孙涛,成春雷,孟静静,任艳芹,李建军 (2468)

沙尘天气对兰州市 PM₁₀ 中主要水溶性离子的影响 王芳,陈强,张文煜,郭勇涛,赵连彪 (2477)

上海大气降水中细菌气溶胶的多样性研究 梁宗敏,杜睿,杜鹏瑞,王亚玲,李梓铭 (2483)

重庆主城区降水中重金属的分布特征及其沉降量 彭玉龙,王永敏,覃蔡清,王定勇 (2490)

宁波人为源 VOC 清单及重点工业行业贡献分析 李璇,王雪松,刘中,吴梁,翁燕波,胡杰 (2497)

包装印刷行业挥发性有机物控制技术评估与筛选 王海林,王俊慧,祝春蕾,聂磊,郝郑平 (2503)

氨水混合吸收剂脱除 CO₂ 实验研究 夏芝香,项群扬,周旭萍,方梦祥 (2508)

焦炉烟气中二噁英类物质排放水平研究 孙鹏程,李晓璐,成钢,陆勇,吴昌敏,罗锦洪 (2515)

2012 年夏季长江口颗粒有机碳、氮分布特征及其来源 邢建伟,钱薇微,绳秀珍 (2520)

千岛湖水体悬浮颗粒物吸收特性及其典型季节差异 王明珠,张运林,施坤,高贇,刘刚,蒋浩 (2528)

千岛湖溶解氧的动态分布特征及其影响因素分析 殷燕,吴志旭,刘明亮,何剑波,虞左明 (2539)

太湖夏季水体中尿素的来源探析 韩晓霞,朱广伟,许海,Steven W. Wilhelm,秦伯强,李兆富 (2547)

鄱阳湖阻隔湖泊浮游植物群落结构演化特征:以军山湖为例 刘霞,钱奎梅,谭国良,邢久生,李梅,陈宇炜 (2557)

不同营养湖泊沉积物中²¹⁰Pb_{ex}和营养盐垂向分布特征及相关性分析 王小雷,杨浩,顾祝军,张明礼 (2565)

地下水硝酸盐污染抽出处理优化方法模拟研究 姜烈,何江涛,姜永海,刘菲 (2572)

预压力混凝沉淀除藻工艺中 DOC 变化规律研究 陈雯婧,丛海兵,徐亚军,王巍,蒋新跃,刘玉娇 (2579)

类水滑石 Mg/Zn/Al 焙烧产物对高氯酸盐的吸附 王红宇,刘艳 (2585)

粉煤灰对阴离子水溶性混合染料的吸附动力学 孙德帅,郑强强,张晓东,方龙 (2590)

SDS 对两性修饰膨润土吸附 Cd²⁺ 的影响 王建涛,孟昭福,杨亚提,杨淑英,李彬,马麟莉,许绍娥 (2596)

老化的生物质炭性质变化及对非吸持的影响 唐伟,郭悦,吴景贵,黄兆琴,代静玉 (2604)

TiO₂ 光催化降解 PFOA 的反应动力学及机制研究 李明洁,喻泽斌,陈颖,王莉,刘晴,刘钰鑫,何丽丽 (2612)

荧光猝灭法研究洛克沙肿与腐殖酸的相互作用 朱江鹏,梅婷,彭云,葛思怡,李时银,王国祥 (2620)

改性活性炭纤维电芬顿降解苯酚废水性能研究 马楠,田耀金,杨广平,谢鑫源 (2627)

催化铁强化低碳废水生物反硝化过程的探讨 王梦月,马鲁梅 (2633)

聚丁二酸丁二醇酯(PBS)为反硝化固体碳源的脱氮特性研究 刘佳,沈志强,周岳溪,曹蓉,李元志 (2639)

某造纸厂废水中二噁英含量及其电子束辐照降解 青亮,黄锦琼,余小巍,张素坤,杨艳艳,任明忠,温玉龙 (2645)

嘉兴市规模化养猪场沼液水质调查研究 卫丹,万梅,刘锐,王根荣,张汛达,文晓刚,赵远,陈吕军 (2650)

提高污泥碱性发酵挥发酸积累的新方法 李晓玲,彭永臻,柴同志,朱建平,王淑莹 (2658)

滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 的分布及生态风险评价 郭雪,毕春娟,陈振楼,王薛平 (2664)

舟山近海水体和沉积物中多环芳烃分布特征 江敏,Le Huy Tuan,梅卫平,阮慧慧,吴昊 (2672)

青藏高原湖泊流域土壤与牧草中多环芳烃和有机氯农药的污染特征与来源解析 谢婷,张淑娟,杨瑞强 (2680)

福建鹭峰山脉土壤有机氯农药分布特征及健康风险评估 黄焕芳,祁士华,瞿程凯,李绘,陈文文,张莉,胡婷,石燎 (2691)

不同功能区表层土壤中全氟化合物污染指纹及其来源解析 张鸿,赵亮,何龙,柴之芳,沈金灿,杨波 (2698)

桑沟湾溶解态无机砷的分布、季节变化及影响因素 李磊,任景玲,刘素美,蒋增杰,杜金洲,方建光 (2705)

引黄灌区不同尺度农田土壤重金属空间分布及污染评价:以银川市兴庆区为例 王幼奇,白一茹,王建宇 (2714)

三峡水库消落区土壤、植物汞释放及其在斑马鱼体的富集特征 李楚娴,孙荣国,王定勇,赵铮,张金洋,马明,张成 (2721)

广东典型海水养殖区沉积物及鱼体中磺胺类药物的残留及其对人体的健康风险评估 何秀婷,王奇,聂湘平,杨永涛,程章 (2728)

青岛市区大气降尘重金属对人体健康风险的评价 张春荣,吴正龙,姚春卉,高宗军 (2736)

焦炉排放多环芳烃与人体健康风险评估研究 伯鑫,王刚,温柔,赵春丽,吴铁,李时蓓 (2742)

Cd、Cu 和 Pb 复合污染对蚯蚓抗氧化酶活性的影响 王辉,谢鑫源 (2748)

3 种氯酚对嗜热四膜虫的毒性效应 李雅洁,崔益斌,蒋丽娟,窦静,李梅 (2755)

施硅方式对稻米镉阻隔潜力研究 陈喆,铁柏清,雷鸣,刘孝利,叶长城,罗梅梅,毛懿德 (2762)

保护性耕作对后茬冬小麦土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响 潘莹,胡正华,吴杨周,孙银银,盛露,陈书涛,肖启涛 (2771)

渭北生草果园土壤有机碳矿化及其与土壤酶活性的关系 贾曼莉,郭宏,李会科 (2777)

蒸汽-空气混合注射修复 TCE 污染的二维土箱实验研究 王宁,彭胜,陈家军 (2785)

铜离子对双室微生物燃料电池电能输出的影响研究 牟姝君,李秀芬,任月萍,王新华 (2791)

连续流强制通风槽式污泥堆肥工艺的温室气体和氨气排放特征 赵晨阳,魏源送,葛振,钟佳,才兴,张媛丽,李洪枚 (2798)

冬季猪粪固体堆放过程中 NH₃、N₂O 和 NO 排放特征研究 丁钢强,韩圣慧,袁玉玲,罗琳,王立刚,李虎,李萍 (2807)

填埋场渗滤液腐殖酸随填埋龄的变化特性及模型研究 黄友福,许心雅,范良鑫,方艺民 (2816)

渗滤液反渗透浓缩液回灌出水水质变化规律的研究 王东梅,刘丹,刘庆梅,陶丽霞,刘颖 (2822)

中国铅流变化的定量分析 马兰,毛建素 (2829)

半短程亚硝化与厌氧氨氧化联合脱氮工艺微生物特征研究进展 赵志瑞,侯彦林 (2834)

《环境科学》征稿简则(2679) 《环境科学》征订启事(2735) 信息(2476,2556,2713,2770)

3 种氯酚对嗜热四膜虫的毒性效应

李雅洁, 崔益斌, 蒋丽娟, 窦静, 李梅*

(南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210023)

摘要: 以原生动物的嗜热四膜虫作为受试生物, 研究了 3 种氯酚的急性毒性和遗传毒性及环境因子对污染物的生物效应, 探讨了水体硬度对 3 种氯酚生物毒性的影响. 结果表明, 3 种氯酚毒性大小依次为五氯酚 (PCP) > 2, 4, 6-三氯酚 (2, 4, 6-TCP) > 2, 4-二氯酚 (2, 4-DCP), 表明随着氯原子数目的增加, 生物毒性增强. 硬度实验结果显示随水体硬度升高, 3 种氯酚对四膜虫的急性毒性先降低后增加, 但不同的水体硬度下 2, 4-DCP 对四膜虫的 24、48、72 和 96 h EC_{50} 值分别为 3.69、3.54、3.02 和 2.34 $mg \cdot L^{-1}$; 2, 4, 6-TCP 分别为 3.23、2.83、2.56 和 1.97 $mg \cdot L^{-1}$; PCP 分别为 0.63、0.45、0.34 和 0.28 $mg \cdot L^{-1}$, 3 种氯酚的 EC_{50} 值分别在同一数量级上, 表明对四膜虫的毒性影响不大. 采用单细胞凝胶电泳技术 (SCGE) 研究了 3 种氯酚对四膜虫核 DNA 的损伤作用, 结果显示氯酚类化合物具有细胞毒性, 彗星实验可以较好地指示氯酚类化合物的遗传毒性.

关键词: 四膜虫; 急性毒性; 水体硬度; EC_{50} ; 彗星实验

中图分类号: X503.22 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)07-2755-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.07.045

Toxicity of Three Chlorophenols to Protozoa *Tetrahymena thermophila*

LI Ya-jie, CUI Yi-Bin, JIANG Li-juan, DOU Jing, LI Mei

(State Key Laboratory of Pollution Control & Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Using *Tetrahymena thermophila* as the indication organism, the single acute toxicity and genotoxicity induced by 2, 4-dichlorophenol (2, 4-DCP), 2, 4, 6-trichlorophenol (2, 4, 6-TCP) and pentachlorophenol (PCP) were determined. The results showed that the 24, 48, 72 and 96-hour EC_{50} values of 3 individual CPs to *T. thermophila* were 3.69, 3.54, 3.02, 2.34 $mg \cdot L^{-1}$; 3.23, 2.83, 2.56, 1.97 $mg \cdot L^{-1}$ and 0.63, 0.45, 0.34, 0.28 $mg \cdot L^{-1}$, respectively, which revealed that the acute toxicity of CPs increased with the number of chlorine on benzene ring. Effects of water hardness on the acute toxicities of 2, 4-DCP, 2, 4, 6-TCP and PCP to *T. thermophila* were evaluated. It showed that the effect of water hardness on the acute toxicities of the three CPs to *T. thermophila* had a certain influence, but the impact was relatively insignificant. The results in the SCGE showed that there were significant differences ($P < 0.05$) between the control and treatment groups at various concentrations of the three CPs. It recommended that the comet assay of *T. thermophila* was sensitive to the three detected CPs and could be a useful tool for screening and detecting of environmental genotoxins.

Key words: *Tetrahymena thermophila*; acute toxicity; water hardness; EC_{50} ; comet assay

氯酚类化合物 (chlorophenols, CPs) 是一种中等强度的化学毒物, 能够引起蛋白质变性, 使细胞中毒或死亡^[1], 其中 2, 4-二氯酚 (2, 4-dichlorophenol, 2, 4-DCP)、2, 4, 6-三氯酚 (2, 4, 6-trichlorophenol, 2, 4, 6-TCP) 和五氯酚 (pentachlorophenol, PCP) 已被美国和欧盟列为优先监测的有机污染物^[2,3], 对水生生物的生长、繁殖等方面具有重要影响, 其大量使用已对人类健康构成严重威胁^[4,5]. 此外, 作为我国水域重要的污染物, 3 种氯酚在食物链高营养级水平如杜氏盐藻^[6]、大型溞^[7]、河蚬^[8]等的单一及联合毒性已有许多报道.

嗜热四膜虫 (*Tetrahymena thermophila*) 作为一种淡水中常见的单细胞真核原生动物, 不仅生长周期短, 而且对许多毒物的响应比其他高等生物更为敏感、直接, 是理想的生物毒性试验对象^[9], 其胞核

结构功能复杂程度与多细胞动物相似, 与其它真核微生物模式生物相比 (如真菌), 四膜虫和人类具有较高程度的功能保守性^[10,11]. 已有研究表明, 部分重金属^[12,13]和有机农药^[14]对四膜虫具有急性毒性, 其中黄卫红等^[15]研究得出 2, 4-DCP 和 2, 4, 6-TCP 对四膜虫急性毒性 48 h EC_{50} 分别为 1 849 $\mu g \cdot L^{-1}$ 和 916 $\mu g \cdot L^{-1}$, 但目前尚无环境因子, 如硬度与氯酚对四膜虫的复合毒性研究.

单细胞凝胶电泳 (single cell gel electrophoresis, SCGE), 又名彗星实验 (comet assay), 是测定单个细

收稿日期: 2013-11-05; 修订日期: 2014-02-27

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07501-003-002); 国家自然科学基金项目 (21077052); 江苏省科技支撑项目 (BE2012737)

作者简介: 李雅洁 (1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境毒理学, E-mail: lyj121582@126.com

* 通讯联系人, E-mail: meili@nju.edu.cn

胞 DNA 链断裂的新电泳技术^[16,17],近年来开始利用彗星实验研究毒物对四膜虫 DNA 的损伤,如 Lah 等^[18]测定了酚类、甲醛、 H_2O_2 对四膜虫 DNA 不同程度的损伤,有研究认为部分含氮杂环化合物及重金属 Cd^{2+} 能引起四膜虫核 DNA 损伤而表现出毒性作用^[19,20]. 目前有关氯酚类化合物对四膜虫的遗传毒性未见报道.

本研究以嗜热四膜虫作为受试生物,通过急性毒性和彗星实验,探讨了 3 种氯酚的急性毒性及遗传毒性效应,同时研究了水体硬度对 3 种氯酚生物毒性的影响,以期为我国氯酚化合物的生态风险评价提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 实验材料

嗜热四膜虫 (*Tetrahymena thermophila*) 由南京大学环境学院重点实验室提供. 四膜虫培养基为胰蛋白胨 15 g, 酵母粉 5 g, 葡萄糖 1 g, 超纯水 1 000 mL, 自然 pH 下 121℃ 灭菌 20 min, 冷却备用. 实验时分装于 250 mL 锥形瓶中各 100 mL, 以 4% 接种量接种, 接种密度为每毫升 $1 \sim 2 \times 10^4$ 个细胞, 28℃ 静置培养约 48 h 至对数生长期后用于实验.

1.2 受试化合物

2, 4-DCP、2, 4, 6-TCP 和 PCP 购自 Acros Organics 和 Sigma-Aldrich 公司, 纯度均为 98%, 分别用二甲基亚砜 (DMSO, 纯度 $\geq 99\%$, 南京化学试剂有限公司) 配制成母液置 4℃ 冰箱避光保存, 实验时稀释成所需浓度. 低熔点琼脂糖 (LMA)、正常熔点琼脂糖 (NMA) 购自 Sigma-Aldrich 公司 (St. Louis, MO, USA). 其余试剂均为分析纯, 购自南京化学试剂有限公司.

1.3 实验方法

1.3.1 单一氯酚的急性毒性

取四膜虫培养液 9 mL 装至 25 mL 比色管中, 根据预实验结果加入 1 mL 稀释好的不同浓度受试化合物, 按等差间距设置 7 个以上浓度梯度, 使培养体系中 2, 4-DCP 和 2, 4, 6-TCP 的最终浓度为 0.10 ~ 2.80 $mg \cdot L^{-1}$, PCP 的最终浓度为 0.05 ~ 2.50 $mg \cdot L^{-1}$. 同时加最大浓度组 DMSO 设为阴性对照, 每个浓度 3 个平行, 分别于 24、48、72 和 96 h 进行细胞计数, 实验重复 3 次.

1.3.2 不同硬度下氯酚的急性毒性

用 $CaCl_2$ 溶液调节培养基硬度使之分别为 50、150、250、350 和 450 $mg \cdot L^{-1}$ (以 $CaCO_3$ 计), 实验

步骤同上, 分别于 24 和 48 h 计数, 用经验概率单位-浓度对数法计算 EC_{50} .

1.3.3 彗星实验

3 500 $r \cdot min^{-1}$ 离心四膜虫培养液 20 min, 弃上清, 将沉淀重悬浮为原培养液体积的 1/10. 取细胞悬液分装于 1.5 mL 离心管, 依次加入 3 种氯酚, 使 2, 4-DCP 和 2, 4, 6-TCP 的最终浓度为 1.20、2.40 和 3.60 $mg \cdot L^{-1}$, PCP 的最终浓度为 0.08、0.17 和 0.25 $mg \cdot L^{-1}$, 同时设阴性对照.

常温下染毒 30 min 后进行彗星实验, 每个处理 3 片凝胶. 常规方法制片后将载片浸入新配制的细胞裂解液 (2.5 $mol \cdot L^{-1}$ NaCl, 100 $mol \cdot L^{-1}$ Na_2 -EDTA, 10 $mol \cdot L^{-1}$ Tris, 1% TritonX-100 和 10% DMSO, pH 10), 4℃ 下避光裂解 1.5 h. 碱性电泳液 (pH 13) 静止解旋 20 min 后, 于 15 V, 180 mA 下电泳 20 min. 电泳完毕后中性缓冲液 (0.4 $mol \cdot L^{-1}$ Tris) 中和, 以溴化乙锭染色, 荧光显微镜 (BX41, Olympus) 下观察并获取图像.

1.4 数据处理

Origin 8.5 软件进行 ANOVA 统计分析, 将实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. 彗星图像采用 CASP 软件分析, 选取尾动量 (TM) 和 Olive 尾矩 (OTM) 为评价参数, 每张载片至少分析 50 个细胞.

2 结果与分析

2.1 单一氯酚毒性试验

染毒 24 h 后, 2, 4-DCP、2, 4, 6-TCP 和 PCP 分别在 1.40、1.40 和 0.70 $mg \cdot L^{-1}$ 浓度下显示明显毒性, 表现为细胞增长能力明显下降, 出现团缩和死亡, 并随浓度增大和时间推移该趋势增强, 至 96h 四膜虫生长繁殖完全被抑制. 由表 1 可见, 随 3 种氯酚浓度增大, 四膜虫生长抑制率增加, 同时随着染毒时间增加, EC_{50} 值呈下降趋势, 即 3 种氯酚的毒性作用逐渐增强. 2, 4-DCP、2, 4, 6-TCP 和 PCP 的 48 h EC_{50} 值分别为 3.54、2.83 和 0.45 $mg \cdot L^{-1}$, 提示 PCP 对四膜虫的毒性作用最强.

2.2 不同硬度下 3 种氯酚对四膜虫毒性作用

不同硬度下 3 种氯酚对嗜热四膜虫的急性毒性结果如表 2 所示. 从中可见, 随染毒时间增加, 3 种氯酚 EC_{50} 值基本呈下降趋势, 表明在同一硬度下, 随染毒时间增加, 毒性作用逐渐增强, 相同硬度下 3 种氯酚毒性大小依次为 PCP > 2, 4, 6-TCP > 2, 4-DCP. 染毒时间相同时, 随硬度增大 EC_{50} 值基本呈

表 1 3 种氯酚对嗜热四膜虫的 EC_{50} 值Table 1 Acute toxicity of three chlorophenols to *T. thermophila*

化合物	暴露时间/h	$EC_{50}/mg \cdot L^{-1}$	线性方程	R^2
2,4-DCP	24	3.69(3.22~4.23)	$y = 3.4264x + 3.0557$	0.98
	48	3.54(2.97~4.22)	$y = 2.8584x + 3.4294$	0.99
	72	3.02(2.64~3.44)	$y = 4.6218x + 2.7798$	0.97
	96	2.34(1.77~3.09)	$y = 3.9476x + 3.5415$	0.98
2,4,6-TCP	24	3.23(2.90~3.59)	$y = 3.5017x + 3.2175$	0.99
	48	2.83(2.32~2.94)	$y = 2.6531x + 3.8014$	0.97
	72	2.56(2.42~2.77)	$y = 3.0182x + 3.7679$	0.96
	96	1.97(1.50~2.58)	$y = 2.5750x + 4.2436$	0.97
PCP	24	0.63(0.45~0.88)	$y = 2.9964x + 5.6060$	0.99
	48	0.45(0.38~0.57)	$y = 2.1949x + 5.7612$	0.97
	72	0.34(0.30~0.39)	$y = 1.4475x + 5.6835$	0.97
	96	0.28(0.21~0.37)	$y = 1.5134x + 5.8366$	0.98

表 2 不同硬度下 3 种氯酚对嗜热四膜虫的 EC_{50} 值Table 2 Effects of hardness on the toxicity of three chlorophenols to *T. thermophila*

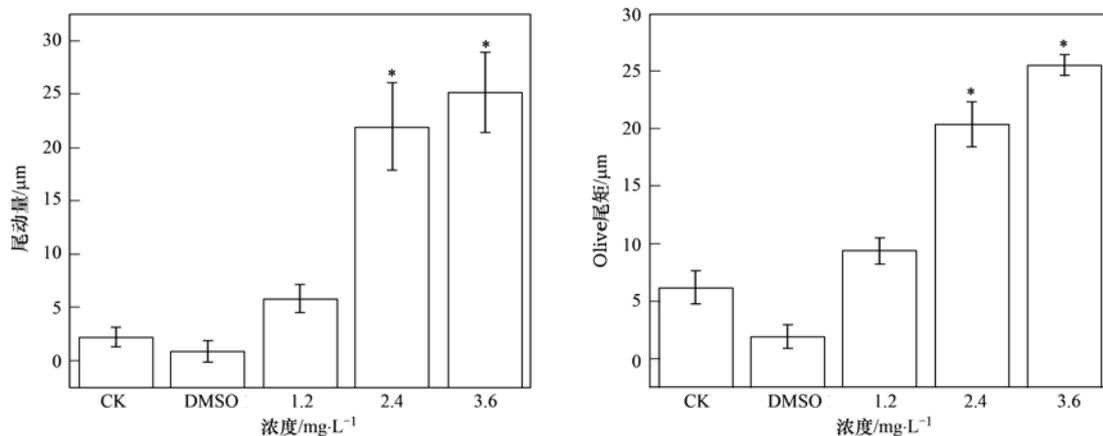
化合物	时间/h	$EC_{50}/mg \cdot L^{-1}$					
		0	50 ¹⁾	150	250	350	450
2,4-DCP	24	3.69 (3.22~4.23)	2.76 (2.15~3.55)	3.49 (3.18~3.72)	5.19 (4.63~5.82)	3.18 (2.66~3.78)	2.88 (2.48~3.35)
	48	3.54 (2.97~4.22)	3.08 (2.82~3.37)	3.64 (3.42~3.77)	5.42 (5.12~5.80)	2.31 (2.07~2.57)	2.99 (2.59~3.46)
2,4,6-TCP	24	3.23 (2.90~3.59)	2.42 (1.91~3.05)	3.10 (2.29~4.19)	2.25 (1.88~2.68)	3.22 (2.35~4.01)	2.72 (2.38~3.12)
	48	2.83 (2.32~2.94)	2.53 (1.96~3.26)	2.76 (2.08~3.66)	2.93 (2.56~3.35)	2.75 (2.11~3.58)	2.63 (2.16~3.20)
PCP	24	0.63 (0.45~0.88)	0.31 (0.25~0.37)	0.51 (0.43~0.62)	0.35 (0.29~0.44)	0.53 (0.43~0.65)	0.56 (0.47~0.66)
	48	0.45 (0.38~0.57)	0.33 (0.29~0.39)	0.59 (0.45~0.77)	0.54 (0.43~0.67)	0.42 (0.34~0.53)	0.50 (0.38~0.66)

1) 培养基硬度 ($mg \cdot L^{-1}$), 以 $CaCO_3$ 计

现先增大后降低的趋势, 但变化不显著. 不同硬度下 2,4-DCP、2,4,6-TCP 和 PCP 的 EC_{50} 值分别在同一数量级上, 可推断硬度对其毒性作用影响不大.

2.3 彗星实验结果

经 CASP 统计后, 四膜虫在不同浓度 2,4-DCP 处理下的 DNA 损伤程度如图 1 所示. 从中可见, 随



* 表示 $P < 0.05$, 下同

图 1 不同浓度 2,4-二氯酚对四膜虫的 DNA 损伤

Fig. 1 Induction of DNA damage in *T. thermophila* following exposure to different concentrations of 2,4-DCP

2,4-DCP 浓度升高, TM 和 OTM 均增加, 提示 DNA 损伤加重. 与对照相比, $1.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度组无显著性差异 ($P > 0.05$), $2.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $4.80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度组 TM 分别增加 884.50% 和 1029.05%, OTM 分别增加 281.90% 和 377.14%, 呈明显剂量-效应关系.

不同浓度 2,4,6-TCP 处理下四膜虫 DNA 损伤

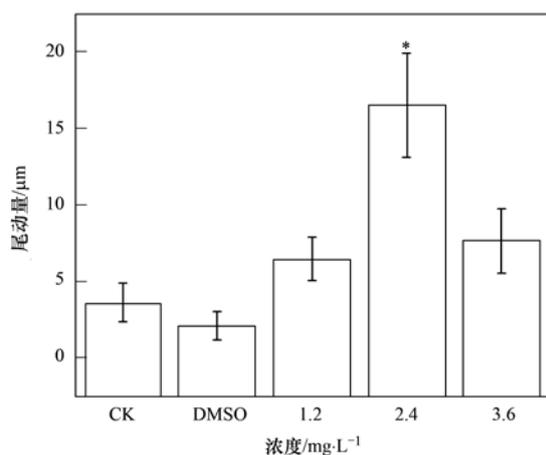


图 2 不同浓度 2,4,6-三氯酚对四膜虫的 DNA 损伤

Fig. 2 Induction of DNA damage in *T. thermophila* following exposure to different concentrations of 2,4,6-TCP

由图 3 可知, PCP 趋势表现与 2,4,6-TCP 相同, 即与对照相比低浓度差异不显著, 当浓度升高至 $0.17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时 TM 和 OTM 分别增加 2934.48% 和 1958.83%, 差异极显著 ($P < 0.05$), 表明核 DNA 受

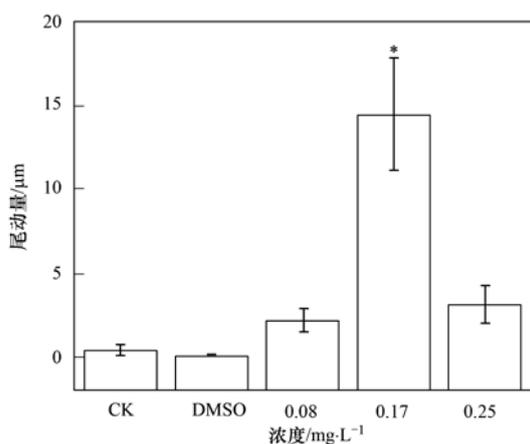


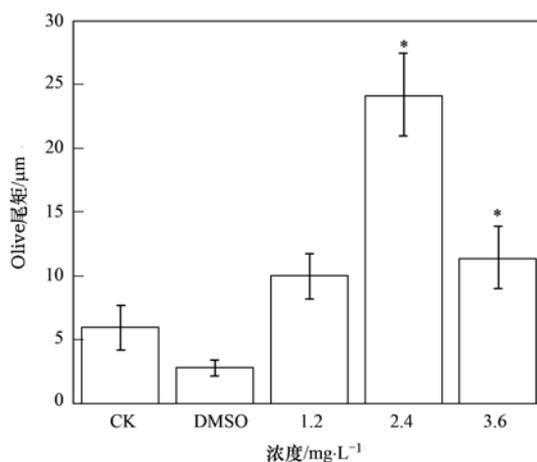
图 3 不同浓度五氯酚对四膜虫的 DNA 损伤

Fig. 3 Induction of DNA damage in *T. thermophila* following exposure to different concentrations of PCP

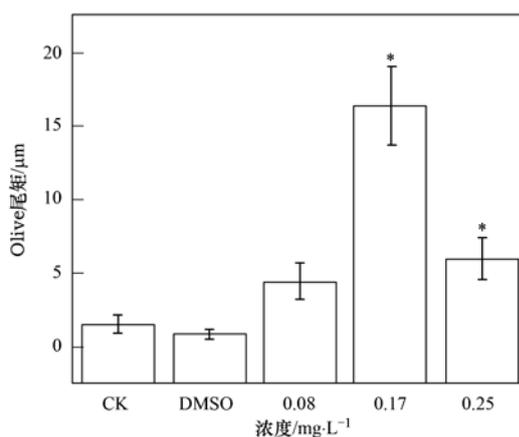
3 讨论

氯酚类化合物通常包括一个羟基和不同数目的氯原子取代苯环上的氢原子, 其分子中氯取代基的数目直接影响其正辛醇/水分配系数 (K_{ow}) 和溶解度

见图 2, 与对照组相比, $1.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 组 TM 和 OTM 均无显著性差异 ($P > 0.05$), 浓度升高至 $2.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时 TM 增加 358.97%, OTM 增加 273.87%, 与对照组相比差异显著 ($P < 0.05$). 浓度继续升高至 $3.60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, TM 值与对照相比差异不显著 ($P > 0.05$), OTM 值增加 84.68%, 低于 $2.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 组.



到严重损伤. 当浓度继续升高达到 $0.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, TM 和 OTM 均下降, 其中 TM 与对照相比无显著性差异 ($P > 0.05$), OTM 相对对照增加 694.12%, 四膜虫表现出对 PCP 损伤的高度敏感性.



(S_w) 等特征参数^[21]. 氯酚的分子结构如氯化程度及氯原子和羟基基团的位置对其毒性都有较大影响^[22]. 李静等^[23] 研究显示氯酚对金鱼的毒性随其氯化程度的增加而增加; 张亚辉等^[7] 的实验表明, 3 种氯酚对大型溞的毒性表现为 $\text{PCP} > 2,4,6\text{-TCP}$

>2,4-DCP,但是也有研究^[24]表明氯酚类污染物对小球藻、大型蚤、鲤鱼和罗非鱼等水生生物的毒性与氯酚苯环上的氯原子取代数无直接关系,只有一氯代酚的毒性明显低于其他多氯代酚的毒性. 本实验以 48 h EC_{50} 为毒性大小评判标准,得出 3 种氯酚的毒性大小顺序为 PCP > 2,4,6-TCP > 2,4-DCP,其中 2,4-DCP 和 2,4,6-TCP 的 EC_{50} 值十分接近,与文献[25]的研究结果相同. 实验结果表明随氯原子数目的增加,毒性增强^[26],这是由于酚类化合物为弱亲电试剂,能与机体内的亲核成分如酶、DNA 等发生亲电作用而破坏机体的正常新陈代谢过程,若苯环上有强吸电子基团(如氯原子),会使—OH 上的电子密度下降,亲电性增强,从而增大毒性,且苯环上取代基的数目越多,酚的毒性越大^[27].

水生态系统的环境因子,如 pH、光照、温度、浊度等多种因素都会影响污染物在水环境中的物理、化学和生物过程,从而可能导致不同的生态效应^[28]. 实验表明四膜虫生长最适 pH 为 6.8 ~ 7.2,小于 6.5 或者大于 7.8 时都不利于四膜虫的正常生长繁殖,本研究在 pH 6.8 ~ 7.2 的范围内,只选取能够表征硬度的 Ca^{2+} 来考察 3 种 CPs 对四膜虫的毒性效应. 一般认为,水体硬度通过形成不溶性碳酸盐或为碳酸钙吸收影响重金属的毒性,即溶液中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子浓度的增加能降低重金属的毒性,因此被认为具有保护功能^[29]. 现有研究多集中于硬度对重金属毒性的影响,如 Kim 等^[30]研究了铜和酚类化合物的联合毒性,得出了它们之间的络合作用降低了铜和酚类化合物的毒性. 另外有研究表明,在不同水硬度条件下,铜的毒性随水硬度的增加而降低,且半数致死浓度的对数与水硬度对数之间呈线性关系^[31]. 对氯酚等有机物污染物而言,其在水体中的生物毒性会受到多个因素的影响^[32],作为重要的环境因子,硬度的变化会改变溶液的离子强度,从而影响毒物在生物体内的吸收和分布,进而影响其毒性^[33],但因 CPs 的毒性主要由其分子态贡献^[34],因此代表水体硬度的 Ca^{2+} 对 3 种 CPs 的毒性影响较小,这也在本实验中得到证明.

3 种氯酚化合物均能引起四膜虫的损伤而表现出毒性. 结果显示对 2,4-DCP 而言低浓度下细胞出现拖尾,与对照相比差异不显著,随受试物浓度增大,尾长增加,表现出明显的剂量-效应关系;而 2,4,6-TCP 和 PCP 在实验最高浓度下 TM 和 OTM 与对照相比相对来说较低,实验中观察到该组细胞核数量较少,杂质碎片较多,文献[18,35,36]也出现

类似现象,这可能是在高浓度受试物作用下,DNA 损伤严重,经过实验裂解、解旋、电泳等过程后,大部分受损 DNA 都断裂成小片段而散失到裂解液或电解液中,导致镜检时能够观察到的核数量较少,且残留多为损伤不大的 DNA. 另外谷康定等^[37]认为四膜虫对毒物损伤的剂量反应表现在较窄范围也是可能的原因. 3 种氯酚对四膜虫的遗传毒性结果再次表明其对四膜虫的毒性大小为 PCP > 2,4,6-TCP > 2,4-DCP.

CPs 引起细胞 DNA 损伤的原因可能是 CPs 在细胞色素的作用下转化为对应的氯代氢醌类化合物,当氢醌类化合物转化为自由基时,会对细胞 DNA 产生损伤,如 Vatsis 等^[38]发现对氯苯酚在细胞色素 P450 2E1 的作用下会转化为对苯二酚;Hoffman 等^[39]则证明四氯氢醌在转化为自由基的过程中引起 DAN 损伤. 也有研究认为 CPs 能够影响机体的抗氧化防御系统^[40],促进自由基的产生和细胞组分的氧化状态,引起 DNA 氧化损伤,如 Bukowska^[41]通过研究发现,2,4-DCP 能够引起机体消耗谷胱甘肽以及超氧化物歧化酶,导致活性氧的增加并引起氧化损伤;此外 Giri 等^[42]提出很多化合物本身带电,可与大分子化合物如 DNA 结合,从而对其产生损伤,这可能也是造成细胞 DNA 损伤的原因之一.

4 结论

(1) 3 种氯酚对四膜虫的毒性大小为 PCP > 2,4,6-TCP > 2,4-DCP,表明随着氯原子数目的增加,毒性增强.

(2) 随着 Ca^{2+} 浓度的增大,3 种氯酚对四膜虫的急性毒性表现为先降低后增加的趋势,但因氯酚的毒性主要由其分子态贡献,水体硬度的 Ca^{2+} 对 3 种 CPs 的毒性影响较小.

(3) 3 种氯酚均能引起四膜虫 DNA 严重损伤,提示可用彗星实验检测 3 种氯酚对四膜虫的遗传毒性.

参考文献:

- [1] 许文武,孟菁,胡威,等. 5 种酚类化合物对 3 种水生生物的毒性作用[J]. 环境化学, 2011, 30(10): 1751-1757.
- [2] 雷炳莉,金小伟,黄圣彪,等. 太湖流域三种氯酚类化合物水质基准的探讨[J]. 生态毒理学报, 2009, 4(1): 40-49.
- [3] Zhang X Y, Zha J M, Li W, et al. Effects of 2, 4-Dichlorophenol on the expression of vitellogenin and estrogen receptor genes and physiology impairments in Chinese rare minnow (*Gobiocypris rarus*) [J]. Environmental Toxicology,

- 2008, **23**(6): 694-701.
- [4] 高先军, 房彦军, 王彩红, 等. 两种典型氯酚类化合物暴露致稀有鮡鲫肝细胞的损伤效应[J]. 生态毒理学报, 2009, **4**(5): 682-687.
- [5] Jaromir M, Jadwiga S O, Anna M, *et al.* Analysis of annual fluctuations in the content of phenol, chlorophenols and their derivatives in chlorinated drinking waters [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2011, **18**(7): 1174-1183.
- [6] Doğa E M, Melek T S. First toxicity data of chlorophenols on marine alga *Dunaliella tertiolecta*: Correlation of marine algal toxicity with hydrophobicity and interspecies toxicity relationships [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2012, **31**(5): 1113-1120.
- [7] 张亚辉, 曹莹, 王一喆, 等. 3 种氯酚化合物对大型溞的联合毒性[J]. 生态毒理学报, 2011, **6**(4): 403-409.
- [8] 金小伟, 查金苗, 许宜平, 等. 3 种氯酚类化合物对河蚬的毒性和氧化应激[J]. 生态毒理学报, 2009, **4**(6): 816-822.
- [9] 黄卫红, 赵天珍, 赵柳青, 等. 六氯苯对原生动物四膜虫的生物毒性实验室研究[J]. 环境科学与技术, 2006, **29**(12): 11-14.
- [10] Turkewitz A P, Orias E, Kapler G. Functional genomics: the coming of age for *Tetrahymena thermophila* [J]. Trends in Genetics, 2002, **18**(1): 35-40.
- [11] Fillingham J S, Chilcoat N D, Turkewitz A P, *et al.* Analysis of expressed sequence tags (ESTs) in the ciliated protozoan *Tetrahymena thermophila* [M]. Journal of Eukaryotic Microbiology, 2002, **49**(2): 99-107.
- [12] 陈小娟, 沈韞芬, 刘艺, 等. 利用微量热法研究 Cd^{2+} 和 Cu^{2+} 对嗜热四膜虫 (*Tetrahymena thermophila*) 的毒性效应[J]. 应用与环境生物学报, 2004, **10**(6): 745-749.
- [13] Chen X J, Feng W S, Miao W, *et al.* A microcalorimetric assay of *Tetrahymena thermophila* for assessing tributyltin acute toxicity [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2008, **94**(3): 779-784.
- [14] David W R, Wayne S T, Erika M W, *et al.* Experimental reactivity parameters for toxicity modeling: application to the acute aquatic toxicity of S_N2 electrophiles to *Tetrahymena pyriformis* [J]. Chemical Research in Toxicology, 2010, **23**(1): 228-234.
- [15] 黄卫红, 赵天珍, 陆晓华. 2,4-二氯酚, 2,4,6-三氯酚对原生动物四膜虫的生物毒性研究[A]. 见: 第四届全国环境化学学术大会论文集(上册)[C]. 南京, 2008.
- [16] Olive P L. Cell proliferation as a requirement for development of the contact effect in Chinese hamster V79 spheroids [J]. Radiation Research, 1989, **117**(1): 79-92.
- [17] Olive P L, Banath J P, Durand R E. Heterogeneity in radiation-induced DNA damage and repair in tumor and normal cells measured using the "comet" assay [J]. Radiation Research, 1990, **122**(1): 862-94.
- [18] Lah B, Malovrh S, Narat M, *et al.* Detection and Quantification of genotoxicity in wastewater-treated *Tetrahymena thermophila* [J]. Environmental Toxicology, 2004, **19**(6): 545-553.
- [19] 徐忠东, 施荣华, 耿明, 等. 含氮杂环化合物对四膜虫的毒性作用研究[J]. 中国农业大学学报, 2008, **13**(3): 57-62.
- [20] 徐忠东, 陶瑞松, 耿明, 等. 重金属 Cd^{2+} 对四膜虫核 DNA 的损伤作用[J]. 安徽农业科学, 2007, **35**(34): 10943-10968.
- [21] 金小伟, 查金苗, 许宜平, 等. 氯酚类化合物对青鱼和细鳞斜颌鲴幼鱼的毒性[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(6): 1235-1242.
- [22] USEPA. Short-time methods for estimating the chronic toxicity of effluent and receiving water to freshwater organisms [M]. NW Washington DC: Environmental Protection Agency Office of Water, 2002. 1-135.
- [23] 李静, 吴端生, 彭放, 等. 硝基苯类、氯酚类化合物对金鱼的急性毒性研究[J]. 湖南环境生物职业技术学院学报, 2007, **13**(4): 8-12.
- [24] Yen J H, Lin K H, Wang Y S. Acute lethal toxicity of environmental pollutants to aquatic organisms [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2002, **52**(2): 113-116.
- [25] Marianna C. Sources and transformations of chlorophenols in the natural environment [J]. Science of the Total Environment, 2004, **322**(1-3): 21-39.
- [26] Gao J J, Liu L H, Liu X R, *et al.* Levels and spatial distribution of chlorophenols-2, 4-Dichlorophenol, 2, 4, 6-trichlorophenol, and pentachlorophenol in surface water of China [J]. Chemosphere, 2008, **71**(6): 1181-1187.
- [27] 唐伟, 孙晓怡. pH 值对酚类化合物生物毒性的影响[J]. 黑龙江环境通报, 2005, **29**(1): 46-48.
- [28] Newsted J L. Effect of light, temperature, and pH on the accumulation of phenol by *Selenastrum capricornutum*, a green alga [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2004, **59**(2): 237-243.
- [29] 聂湘平, 王翔, 史方. 三种典型渔药对大型溞 (*Daphnia magna*) 的急性毒性及其关键环境影响因子分析[J]. 生态环境, 2006, **15**(3): 529-533.
- [30] Kim K T, Lee Y G, Kim S D. Combined toxicity of copper and phenol derivatives to *Daphnia magna*: Effect of complexation reaction [J]. Environment International, 2006, **32**(4): 487-492.
- [31] Eun J P, Hun J J, Jinho J. Combined effects of pH, hardness and dissolved organic carbon on acute metal toxicity to *Daphnia magna* [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2009, **15**(1): 82-85.
- [32] 王连生. 有机污染化学进展[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998.
- [33] Grosell M, Gerdes R, Brix K V. Influence of Ca, humic acid and pH on lead accumulation and toxicity in the fathead minnow during prolonged water-borne lead exposure [J]. Comparative Biochemistry and Physiology, Part C, 2006, **143**(4): 473-483.
- [34] Rendal C, Kusk K O, Trapp S. The effect of pH on the uptake and toxicity of the bivalent weak base chloroquine tested on *Salix viminalis* and *Daphnia magna* [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2011, **30**(2): 354-359.

- [35] Singh M, Kaarb P, Sandhira R, *et al.* Protective effects of vitamin E against atrazine-induced genotoxicity in rats [J]. *Mutation Research*, 2008, **654**(2): 145-149.
- [36] Li M, Hu C W, Gao X Y, *et al.* Genotoxicity of organic pollutants in source of drinking water on microalga *Euglena gracilis* [J]. *Ecotoxicology*, 2009, **18**(6): 669-676.
- [37] 谷康定, 唐非, 鲁志松, 等. 单细胞凝胶电泳在真核微生物上的应用[J]. *华中科技大学学报(医学报)*, 2004, **33**(2): 139-142.
- [38] Vatsis K P, Coon M J. Ipso-substitution by cytochrome P450 with conversion of *p*-hydrobenzene derivatives to hydroquinone: Evidence for hydroperoxo-iron as the active oxygen species [J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 2002, **397**(1): 119-129.
- [39] Hoffman M E, Mell F A C, Meneghini R. Correlation between cytotoxic effect of hydrogen peroxide and the yield of DNA strand breaks in cells of different species [J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Gene Structure and Expression*, 1984, **781**(3): 234-238.
- [40] Jaromir M, Ireneusz M. Chlorophenols, chlorocatechols and chloroguaiacols induce DNA base oxidation in human lymphocytes (*in vitro*) [J]. *Toxicology*, 2010, **268**(3): 171-175.
- [41] Bukowska B. Effects of 2, 4-D and its metabolite 2, 4-dichlorophenol on antioxidant enzymes and level of glutathione in human erythrocytes [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2003, **135**(4): 435-441.
- [42] Giri S, Prasarl S B, Giri A, *et al.* Genotoxic effects of malathion: an organophosphorus insecticide, using three mammalian bioassays *in vivo* [J]. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 2002, **514**(1-2): 223-231.

CONTENTS

Observation Study on Aerosol Optical Properties and Radiative Forcing Using the Ground-based and Satellite Remote Sensing at Background Station During the Regional Pollution Episodes	ZHANG Xiao-ling, XIA Xiang-ao, CHE Hui-zheng, <i>et al.</i>	(2439)
<i>In-situ</i> Measurement of Atmospheric Methyl Chloroform at the Shangdianzi GAW Regional Background Station	YAO Bo, ZHOU Ling-xi, LIU Zhao, <i>et al.</i>	(2449)
Distribution of CO at Lin'an Station in Zhejiang Province	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, LUAN Tian, <i>et al.</i>	(2454)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in Atmospheric Particles in Nanjing Northern Suburb in Summer	DUAN Qing, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(2460)
Characteristics of Water-soluble Organic Nitrogen of PM _{2.5} in Xi'an During Wintertime Non-haze and Haze Periods	CHENG Yu-ting, WANG Ge-hui, SUN Tao, <i>et al.</i>	(2468)
Effect of Sand Dust Weather on Major Water-soluble Ions in PM ₁₀ in Lanzhou, China	WANG Fang, CHEN Qiang, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i>	(2477)
Diversity of Bacterial Areasols in Precipitation of Shanghai Area	LIANG Zong-min, DU Rui, DU Peng-rui, <i>et al.</i>	(2483)
Concentrations and Deposition Fluxes of Heavy Metals in Precipitation in Core Urban Areas, Chongqing	PENG Yu-long, WANG Yong-min, QIN Cai-qing, <i>et al.</i>	(2490)
Anthropogenic VOC Emission Inventory and Contribution from Industrial Sources in Ningbo	LI Xuan, WANG Xue-song, LIU Zhong, <i>et al.</i>	(2497)
Evaluation and Selection of VOCs Treatment Technologies in Packaging and Printing Industry	WANG Hai-lin, WANG Jun-hui, ZHU Chun-lei, <i>et al.</i>	(2503)
Experimental Study on CO ₂ Absorption by Aqueous Ammonia-based Blended Absorbent	XIA Zhi-xiang, XIANG Qun-yang, ZHOU Xu-ping, <i>et al.</i>	(2508)
Preliminary Investigation on Emission of PCDD/Fs and DL-PCBs Through Flue Gas from Coke Plants in China	SUN Peng-cheng, LI Xiao-lu, CHENG Gang, <i>et al.</i>	(2515)
Distribution and Source of Particulate Organic Carbon and Particulate Nitrogen in the Yangtze River Estuary in Summer 2012	XING Jian-wei, XIAN Wei-wei, SHENG Xiu-zhen	(2520)
Characteristics of Optical Absorption Coefficients and Their Differences in Typical Seasons in Lake Qiandaohu	WANG Ming-zhu, ZHANG Yun-lin, SHI Kun, <i>et al.</i>	(2528)
Dynamic Distributions of Dissolved Oxygen in Lake Qiandaohu and Its Environmental Influence Factors	YIN Yan, WU Zhi-xu, LIU Ming-liang, <i>et al.</i>	(2539)
Source Analysis of Urea-N in Lake Taihu During Summer	HAN Xiao-xia, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i>	(2547)
Phytoplankton Community Structure and Its Succession in Isolated Lakes of Poyang-Junshan Lake	LIU Xia, QIAN Kui-mei, TAN Guo-liang, <i>et al.</i>	(2557)
Vertical Distribution and Relationship Between ²¹⁰ Pb _{ex} Activities and Nutrients in Sediment Cores of Two Different Eutrophication Level Lakes	WANG Xiao-lei, YANG Hao, GU Zhu-jun, <i>et al.</i>	(2565)
Simulation of Nitrate Pollution in Groundwater Using Pump-and-treat Optimization Method	JIANG Lie, HE Jiang-tao, JIANG Yong-hai, <i>et al.</i>	(2572)
Variation of Water DOC During the Process of Pre-pressure and Coagulation Sedimentation Treatment	CHEN Wen-jing, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i>	(2579)
Adsorption of Perchlorate by Calcined Mg/Zn/Al Layered Double Hydroxides	WANG Hong-yu, LIU Yan	(2585)
Adsorption Kinetic Mechanism of Ionic Soluble Dye Mixture on Fly Ash	SUN De-shuai, ZHENG Qiang-qiang, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i>	(2590)
Effect of SDS on the Adsorption of Cd ²⁺ onto Amphoteric Modified Bentonites	WANG Jian-tao, MENG Zhao-fu, YANG Ya-ti, <i>et al.</i>	(2596)
Structural Changes of Aged Biochar and the Influence on Phenanthrene Adsorption	TANG Wei, GUO Yue, WU Jing-gui, <i>et al.</i>	(2604)
Photocatalytic Degradation Kinetics of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) in TiO ₂ Dispersion and Its Mechanism	LI Ming-jie, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i>	(2612)
Characterizing the Interaction Between Roxarsone and Humic Acid by Fluorescence Quenching Experiment	ZHU Jiang-peng, MEI Ting, PENG Yun, <i>et al.</i>	(2620)
Modification of Activated Carbon Fiber for Electro-Fenton Degradation of Phenol	MA Nan, TIAN Yao-jin, YANG Guang-ping, <i>et al.</i>	(2627)
Investigation of Enhanced Low Carbon Wastewater Denitrification by Catalytic Iron	WANG Meng-yue, MA Lu-ming	(2633)
Denitrification Performance of PBS as a Solid Carbon Source of Denitrification	LIU Jia, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i>	(2639)
Concentrations, Distribution Characteristics and Electron Beam Radiolysis Degradation of PCDD/Fs in Waste Water from a Paper Mill	QING Xian, HUANG Jin-qiong, YU Xiao-wei, <i>et al.</i>	(2645)
Study on the Quality of Digested Piggery Wastewater in Large-Scale Farms in Jiaying	WEI Dan, WAN Mei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(2650)
New Ways to Improve Volatile Fatty Acids Accumulation in Sludge Alkaline Fermentation System	LI Xiao-ling, PENG Yong-zhen, CHAI Tong-zhi, <i>et al.</i>	(2658)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments and Soils from Dishui Lake and Its Water Exchange Areas	GUO Xue, BI Chun-tuan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i>	(2664)
Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and Sediment from Zhoushan Coastal Area, China	JIANG Min, Le Huy Tuan, MEI Wei-ping, <i>et al.</i>	(2672)
Contamination Levels and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Soils and Grasses from Lake Catchments in the Tibetan Plateau	XIE Ting, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang	(2680)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Soil from Jiufeng Mountain Range in Fujian, China	HUANG Huan-fang, QI Shi-hua, QU Cheng-kai, <i>et al.</i>	(2691)
Pollution Fingerprints and Sources of Perfluorinated Compounds in Surface Soil of Different Functional Areas	ZHANG Hong, ZHAO Liang, HE Long, <i>et al.</i>	(2698)
Distribution, Seasonal Variation and Influence Factors of Dissolved Inorganic Arsenic in the Sanggou Bay	LI Lei, REN Jing-ling, LIU Su-mei, <i>et al.</i>	(2705)
Distribution of Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation on the Different Sampling Scales in Farmland on Yellow River Irrigation Area of Ningxia; A Case Study in Xingqing County of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu	(2714)
Release of Mercury from Soil and Plant in Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area and Its Accumulation in Zebrafish	LI Chu-xian, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i>	(2721)
Residues and Health Risk Assessment of Sulfonamides in Sediment and Fish from Typical Marine Aquaculture Regions of Guangdong Province, China	HE Xiu-ting, WANG Qi, NIE Xiang-ping, <i>et al.</i>	(2728)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Dust of Qingdao City	ZHANG Chun-rong, WU Zheng-long, YAO Chun-hui, <i>et al.</i>	(2736)
Health Risk Assessment of Coke Oven PAHs Emissions	BO Xin, WANG Gang, WEN Rou, <i>et al.</i>	(2742)
Effects of Combined Pollution of Cd, Cu and Pb on Antioxidant Enzyme Activities of Earthworm in Soils	WANG Hui, XIE Xin-yuan	(2748)
Toxicity of Three Chlorophenols to Protozoa <i>Tetrahymena thermophila</i>	LI Ya-jie, CUI Yi-Bin, JIANG Li-juan, <i>et al.</i>	(2755)
Phytoexclusion Potential Studies of Si Fertilization Modes on Rice Cadmium	CHEN Zhe, TIE Bo-qing, LEI Ming, <i>et al.</i>	(2762)
Effects of Conservation Tillage on Soil CO ₂ and N ₂ O Emission During the Following Winter-Wheat Season	PAN Ying, HU Zheng-hua, WU Yang-zhou, <i>et al.</i>	(2771)
Mineralization of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Soil Enzyme Activities in Apple Orchard in Weibei	JIA Man-li, GUO Hong, LI Hui-ke	(2777)
Steam and Air Co-injection in Removing TCE in 2D-Sand Box	WANG Ning, PENG Sheng, CHEN Jia-jun	(2785)
Effect of Cu ²⁺ on the Power Output of Dual-chamber Microbial Fuel Cell	MU Shu-jun, LI Xin-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i>	(2791)
Emissions of Greenhouse Gas and Ammonia from Sewage Sludge Composting by Continuous Aerated Turning Pile	ZHAO Chen-yang, WEI Yuan-song, GE Zhen, <i>et al.</i>	(2798)
Emissions of NH ₃ , N ₂ O, and NO from Swine Manure Solid Storage in Winter	DING Gang-qiang, HAN Sheng-hui, YUAN Yu-ling, <i>et al.</i>	(2807)
Variation Characteristics and Mathematical Model of Humic Substances in Landfill Leachates with Different Landfill Ages	HUANG You-fu, XU Xin-ya, FAN Liang-xin, <i>et al.</i>	(2816)
Research on the Variation Regularity of Effluent from the Leachate Reverse Osmosis Concentrate Recirculation	WANG Dong-mei, LIU Dan, LIU Qing-mei, <i>et al.</i>	(2822)
Quantitative Analysis on the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China	MA Lan, MAO Jian-su	(2829)
Research Progress in Microbiological Characteristics in Combined N ₂ Removal Process by Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation	ZHAO Zhi-ru, HOU Yan-lin	(2834)

《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7月15日 第35卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 7 Jul. 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