

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

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

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究 ..... 唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)

南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析 ..... 薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)

2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征 ..... 李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)

结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟 ..... 郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)

2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析 ..... 沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翡 (1662)

移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO<sub>2</sub> 的时空分布 ..... 李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)

秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成 ..... 刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)

连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制 ..... 窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)

我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平 ..... 于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)

巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响 ..... 马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)

京杭大运河(杭州段)典型断面水生生物多样性调查及其与水环境相关性研究 ..... 陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)

合肥市区典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价 ..... 李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)

重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算 ..... 潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)

千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价 ..... 唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)

九龙江流域潜在病原菌污染分析 ..... 侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)

江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响 ..... 刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)

鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征 ..... 简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)

典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征 ..... 姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)

基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析 ..... 席庆, 李兆富, 罗川 (1773)

混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究 ..... 孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)

不同波长和强度光照对水体汞还原的影响 ..... 李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)

地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的研究 ..... 杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)

溴化铍可见光催化降解高效氯氟菊酯的研究 ..... 彭一莱, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)

石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究 ..... 常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)

电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究 ..... 卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)

典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋 ..... 甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)

颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制 ..... 何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)

石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究 ..... 周贵忠, 王兆丰, 王绚, 李文倩, 李少香 (1832)

靛基氯甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用 ..... 张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)

FePMo<sub>12</sub> 催化电化学反应降解染料废水的研究 ..... 王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)

实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究 ..... 杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)

SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究 ..... 龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)

不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响 ..... 尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)

黄原酸化废弃污泥吸附 Cu<sup>2+</sup> 研究 ..... 岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)

轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究 ..... 薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)

不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能 ..... 黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)

北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究 ..... 李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)

泰州市区重金属污染的藜袋法与路尘法评价研究 ..... 陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)

放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响 ..... 王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)

苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响 ..... 王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)

重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究 ..... 王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)

上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征 ..... 奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)

不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: <sup>13</sup>C 连续标记法 ..... 谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)

污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究 ..... 郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)

石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究 ..... 李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)

大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究 ..... 虞俊超, 王宝盛, 王亚韡, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)

应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性 ..... 周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)

氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究 ..... 王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)

吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制 ..... 黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立涛, 王惜若 (1974)

牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究 ..... 焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)

针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响 ..... 杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)

城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究 ..... 王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)

铈插层黏土负载铁催化剂在 H<sub>2</sub>S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究 ..... 孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)

脱硫类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征 ..... 祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)

固定污染源排气中 PM<sub>2.5</sub> 采样方法综述 ..... 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)

产甲烷微生物研究概况 ..... 李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)

《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)

# 应用生物配体模型 (BLM) 研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性

周腾耀<sup>1,2</sup>, 曹莹<sup>2</sup>, 覃璐玫<sup>1</sup>, 张亚辉<sup>2\*</sup>, 曾鸿鹄<sup>1\*</sup>, 闫振广<sup>2</sup>, 刘征涛<sup>2</sup>

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541004; 2. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

**摘要:** 应用生物配体模型(BLM)预测我国辽河与太湖的丰水期和枯水期 4 个点位铜对大型溞的急性毒性(48 h-LC<sub>50</sub>), 与实际水样的毒性试验结果进行比较. 结果表明, 在辽河红庙子、太湖平台山和拖山这 3 个点位中的 BLM 预测 48 h-LC<sub>50</sub> 值为 232.75 ~ 411.49  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 实测 48 h-LC<sub>50</sub> 值为 134.55 ~ 350.00  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 两者具有较好的一致性, 而辽河通江口点位, 丰水期和枯水期 BLM 预测 48 h-LC<sub>50</sub> 值与实测值相差较大. BLM 预测结果与实测结果得到的水效应比(WER)范围分别为 2.18 ~ 5.79 与 1.88 ~ 11.15, 均大于 1. 各点位的枯水期 Cu 对大型溞的急性毒性均大于丰水期, 可能是 Cu 与溶解性有机质(DOC)络合降低了其毒性.

**关键词:** 生物配体模型; Cu; 大型溞; 急性毒性; 辽河; 太湖

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1962-06 DOI: 10.13227/j.hjkk.2014.05.047

## Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to *Daphnia magna* in Water of Liaohe River and Taihu Lake

ZHOU Teng-yao<sup>1,2</sup>, CAO ying<sup>2</sup>, QIN Lu-mei<sup>1</sup>, ZHANG Ya-hui<sup>2</sup>, ZENG Hong-hu<sup>1</sup>, YAN Zhen-guang<sup>2</sup>, LIU Zheng-tao<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** The acute toxicity (48 h-LC<sub>50</sub>) of copper to *Daphnia magna* predicted by the biotic ligand model (BLM) was compared with the 48 h-LC<sub>50</sub> measured in water samples from Liaohe River and Taihu Lake at four specific sites in wet and dry seasons. The results showed that 48 h-LC<sub>50</sub> values predicted by BLM were 232.75-411.49  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  and 48 h-LC<sub>50</sub> values measured in the water samples were 134.55-350.00  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  in three sites of Hongmiaozi of Liaohe River, Pingtaishan and Tuoshan of Taihu Lake, which had a better consistency. While for Tongjiangkou of Liaohe River, there was a difference between the BLM predictions and the measured values in wet and dry seasons. According to the predictions and the experimental results, water effect ratios (WERs) were in the range of 2.18-5.79 and 1.88-11.15 which all were higher than 1. The acute toxicity of Cu of all sites in dry season was greater than those in wet season, which might be that Cu complexation with dissolved organic matter (DOC) reduced the toxicity of Cu.

**Key words:** biotic ligand model (BLM); copper; *daphnia magna*; acute toxicity; Liaohe River; Taihu Lake

生物配体模型 (biotic ligand model, BLM) 是一种简便、科学、定量评估金属生物有效性的工具<sup>[1]</sup>, 该模型考虑了各种水质参数以及不同形态重金属的生物有效性对水生生物毒性的影响, 适用于不同地点或同一地点不同时间的水质参数的变化导致金属生物有效性或毒性差异的评价<sup>[2]</sup>. 目前开发出来的应用于淡水系统中重金属的 BLM 中, Cu-BLM 是发展最为完善的, 重金属如银、镉、锌、镍、钴和铅上的 BLM 模型应用也在建立和发展之中. 同时 BLM 在沉积物 (s-BLM)<sup>[3]</sup>、土壤 (t-BLM)<sup>[4]</sup>、河口与海洋<sup>[5,6]</sup> 的重金属毒性也有应用研究. 受试生物的范围也在不断扩大, 有鱼类<sup>[7]</sup>、甲壳类<sup>[8]</sup> 和

藻类<sup>[9]</sup>, 陆地植物如莴苣<sup>[10]</sup>、动物如蚯蚓<sup>[11]</sup>、发光菌<sup>[12]</sup> 等.

Casares 等<sup>[7]</sup> 应用 BLM 对皮科马约河水样中的重金属 Cu 进行黑头呆鱼和十斑锉齿鲈的急性毒性预测, 预测结果与试验结果存在较好的一致性. De 等<sup>[13]</sup> 在巴西 Carajás 地区水样应用 BLM 验证了 Cu 对网纹水溞的生物有效性. 美国环保署

收稿日期: 2013-07-29; 修订日期: 2013-12-18

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07501-003)

作者简介: 周腾耀 (1989 ~), 男, 硕士, 主要研究方向为重金属的联合预测与生态风险评价, E-mail: z\_ty@foxmail.com

\* 通讯联系人, E-mail: zhangyahui@craes.org.cn; zenghonghu@glut.edu.cn

(USEPA)<sup>[14]</sup>和欧盟化学品管理局(ECB)<sup>[15]</sup>已经将BLM用于淡水系统中来推导铜的水质基准.国内,吕怡兵等<sup>[16]</sup>与Wang等<sup>[17]</sup>应用BLM分别对Cu的虹鳟鱼和青鳉鱼毒性分别进行了预测,验证了BLM对鱼类预测结果的可靠性.此外,对Zn的大型溞毒性的BLM模型的适用性进行了验证,并尝试了将BLM应用于对斑马鱼胚胎毒性的预测<sup>[18]</sup>.由于我国只有少数学者报道了水质参数对重金属毒性的影响,无法建立起统一的重金属毒性数据与水质参数的相关关系<sup>[19]</sup>,从而对我国重金属如Cu的水质基准开展系统的研究.本研究选取中国太湖与辽河不同时期的水样,开展Cu对大型溞(*Daphnia magna*)的急性毒性试验,应用BLM模型对实际水体的毒性进行预测,分析我国河流湖泊水样水质参数对铜急性毒性的影响,以期为我国采用BLM模型推导铜的水质基准提供基础数据.

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

试剂:CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O为国产分析纯试剂.

仪器:美国Aglient ICP-MS,美国Aurora TOC分析仪,哈希DR2800紫外分光光度计,哈希pH仪.

### 1.2 样品采集

采集辽河与太湖水体水样,每种水体设置2个采样点,辽河上、下游各一个,太湖湖心、岸边各一个,同时避免选取有严重人为污染的水体,取样深度不超过50 cm.辽河采样点设在红庙子(纬度:41°27.364'N;经度:122°37.318'E)与通江口(纬度:42°36.979'N;经度:123°39.651'E);太湖采样点设在拖山(纬度:31°24.242'N;经度:120°10.805'E)与平台山(纬度:31°13.014'N;经度:120°05.079'E).每个采样点采集水样40 L,分别置于20 L聚乙烯容器(用20%的稀硝酸溶液浸泡24 h后用去离子水冲洗3次)并尽快运回实验室.

### 1.3 样品水质参数测定

水样到达实验室后,在4℃下避光保存,使用前用滤膜(孔径0.45 μm)过滤.水质参数的测定和毒性试验在取样后两周内完成在相似水化学条件下,试验前后测试溶液中主要阴、阳离子的浓度没有发生显著变化<sup>[20]</sup>.因此,本试验只测定了初始水样中主要阴、阳离子(Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和Cl<sup>-</sup>)与总溶解性有机碳DOC的浓度.本研究水样中的硫化物未进行测定,以默认值1×10<sup>-10</sup>代替<sup>[18]</sup>.

### 1.4 大型溞的急性毒性抑制试验

试验选用出生6~24 h,活泼、健康且大小基本一致的由孤雌生殖得到的幼溞,且在试验过程中不喂食.为使试验水样达到化学平衡,将所有水样在毒性试验前放置1 d(21℃±1℃).参照国家化学品溞类急性活动抑制试验(GB/T 21830-2008),用超纯水配成CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O储备液(4℃下避光保存),并加入到已过膜的水样中,按照几何级数的浓度系列设计5个Cu浓度,浓度范围50~800 μg·L<sup>-1</sup>,每个浓度设4个平行,每个平行加入5只幼溞,每种水样一组空白对照.毒性试验在21℃的培养箱中进行48 h,光暗比为16 h:8 h,试验过程中及时把死亡的大型溞挑出,并统计每个浓度下死亡大型溞总数.

### 1.5 数据处理

采用SPSS 18 概率单位回归计算Cu对大型溞的48 h-LC<sub>50</sub>,采用BLM 2.2.3 软件进行Cu化学形态分析和48 h-LC<sub>50</sub>的预测.

## 2 结果与分析

### 2.1 水质参数分析

采集水样和实验室曝气自来水的理化参数见表1,从中可以看出,水样pH、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>变化范围不大;太湖枯水期K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>和Na<sup>+</sup>浓度比其他水样高;辽河枯水期Mg<sup>2+</sup>浓度比丰水期水样高出100倍,比同时期太湖水样高5倍左右;辽河点位的碱度高于太湖点位2~3倍.从总体上看,大部分阴、阳离子的浓度枯水期要比丰水期高,如Mg<sup>2+</sup>和SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等;而与之相反,丰水期的DOC浓度要比枯水期要高.在辽河通江口水样中DOC明显高于其它点位,这可能与该地区同时受到严重的工业污染和农业面源污染,其中有机物污染问题严重<sup>[21]</sup>.曝气自来水pH高于所有水样,但其他水质参数远远低于水样.

### 2.2 Cu对大型溞的实测和预测毒性数据比较

采集的原水对大型溞的急性抑制毒性结果和BLM预测结果如表2所示,48 h-LC<sub>50</sub>实测值均小于预测值,即实测毒性结果均大于预测毒性结果,在辽河红庙子、太湖平台山和拖山这3个点位,在丰、枯水期BLM模型预测Cu对大型溞的48 h-LC<sub>50</sub>为232.75~411.49 μg·L<sup>-1</sup>,实测毒性48 h-LC<sub>50</sub>为134.55~350.00 μg·L<sup>-1</sup>,二者之间的比率为1.16~1.73.对于辽河通江口,丰水期和枯水期48 h-LC<sub>50</sub>预测值分别为793.66 μg·L<sup>-1</sup>和533.91 μg·L<sup>-1</sup>,48 h-LC<sub>50</sub>实测值结果分别为244.45 μg·L<sup>-1</sup>和155.69

表 1 水样水质参数测定结果<sup>1)</sup>

Table 1 Water quality parameters and measured results of water samples

项目	丰水期				枯水期				曝气自来水
	LH	LT	TP	TT	LH	LT	TP	TT	
pH	7.57	8.00	7.98	7.56	7.98	8.07	7.72	7.86	8.40
DOC/mg·L <sup>-1</sup>	11.12	20.12	11.95	10.06	4.99	10.84	7.31	6.44	1.90
K <sup>+</sup> /mg·L <sup>-1</sup>	0.46	0.47	0.59	0.60	0.51	0.53	14.45	15.46	0.35
Ca <sup>2+</sup> /mg·L <sup>-1</sup>	77.13	64.47	46.54	53.01	66.35	78.59	104.90	111.80	4.00
Na <sup>+</sup> /mg·L <sup>-1</sup>	50.47	126.70	70.01	58.54	35.31	64.93	128.40	140.90	0.75
Mg <sup>2+</sup> /mg·L <sup>-1</sup>	1.47	1.66	1.01	1.01	179.20	194.60	37.69	43.36	0.50
Cl <sup>-</sup> /mg·L <sup>-1</sup>	33.00	57.60	50.80	44.00	43.80	72.40	66.20	54.00	2.00
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /mg·L <sup>-1</sup>	55.00	52.00	63.00	55.00	76.00	90.00	67.00	66.00	0.10
碱度(以 CaCO <sub>3</sub> 计)/mg·L <sup>-1</sup>	142.00	219.00	69.00	79.00	193.00	258.00	87.00	98.00	48.00

1) LH:辽河红庙子; LT:辽河通江口; TP:太湖平台山; TT:太湖拖山

表 2 Cu 对大型溞的 48 h-LC<sub>50</sub> 实测值和 BLM 模型

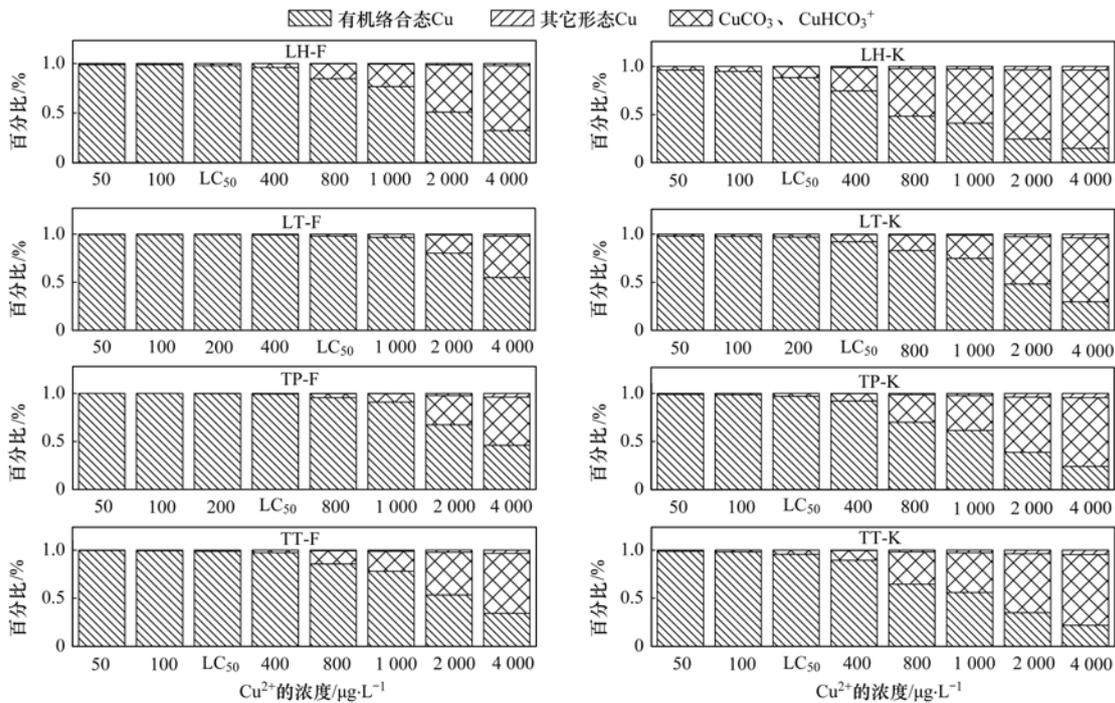
48 h-LC<sub>50</sub> 预测值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Experimental 48 h-LC<sub>50</sub> and the predicted 48 h-LC<sub>50</sub> by BLM model of Cu to *Daphnia magna*/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

点位	丰水期 48 h-LC <sub>50</sub>		枯水期 48 h-LC <sub>50</sub>	
	实测	预测	实测	预测
LH	197.53	266.66	134.55	232.75
LT	244.45	793.66	155.69	533.91
TP	350.00	411.69	210.49	243.73
TT	194.78	235.29	187.77	248.01
曝气自来水	71.46	71.16	—	—

$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,二者差距较大,主要原因可能是由于水质参数 DOC 的差异性造成的。

由表 2 可知,枯水期 48 h-LC<sub>50</sub> 均比丰水期低,表明枯水期 Cu 急性毒性大于丰水期. 由表 1 中水质参数对比分析发现,大部分阴、阳离子的浓度枯水期要比丰水期高,与之相反,丰水期的 DOC 浓度要比枯水期要高. BLM 对 Cu 的形态分析如图 1 所示,在各点位中 Cu<sup>2+</sup> 浓度在 48 h-LC<sub>50</sub> 时主要是以有机络合态存在的,达到 88.3% ~ 99.1%,其次是 CuCO<sub>3</sub>、CuHCO<sub>3</sub><sup>+</sup>,占 0.9% ~ 11.2%,其他形态 Cu [CuOH<sup>+</sup>、Cu(OH)<sub>2</sub>、CuSO<sub>4</sub>、Cu(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub><sup>2-</sup>、CuCl<sup>+</sup> 和游离态 Cu<sup>2+</sup>] 所占不到 0.5%,其中丰水期各个点位的有机络合态 Cu(97.7% ~ 99.1%) 高于枯水期(88.3% ~ 96.7%)。



F: 丰水期, K: 枯水期, 下同

图 1 BLM 对各点位 Cu 形态分析

Fig. 1 Cu speciation analysed by BLM on each site

### 2.3 水效应比

水效应比(water effect ratio, WER)是以实际水样测定的毒性结果与实验室水测定毒性结果的比值,WER 考虑了特定点(site-specific)水质特性(包括 DOC、pH 和碱度等)对铜生物有效性的影响,EPA<sup>[22]</sup>规定特定点水质基准为国家水质基准与水效应比的乘积,计算公式如下:

$$WER = LC_{50}(\text{site specific})/LC_{50}(\text{lab}) \quad (1)$$

$$WQC_{\text{site specific}} = WQC \times WER \quad (2)$$

式中,WER 为水效应比;  $LC_{50}(\text{site specific})$  为以现场实际水样测定的毒性结果;  $LC_{50}(\text{lab})$  为实验室标准试验测定毒性结果;  $WQC_{\text{site specific}}$  为特定点水质基准; WQC 为水质基准。

如图 2 所示,红庙子、平台山和拖山这 3 个点在丰水期和枯水期的 WERs 预测值与 WERs 实测值分别为 3.27 ~ 5.79 与 1.88 ~ 4.90,二者具有较好的一致性。对于辽河通江口点位,WERs 预测值与 WERs 实测值分别为 2.18 ~ 3.42 与 7.50 ~ 11.15,二者差距较大。根据预测结果与测试结果得到的水效应比均大于 1。

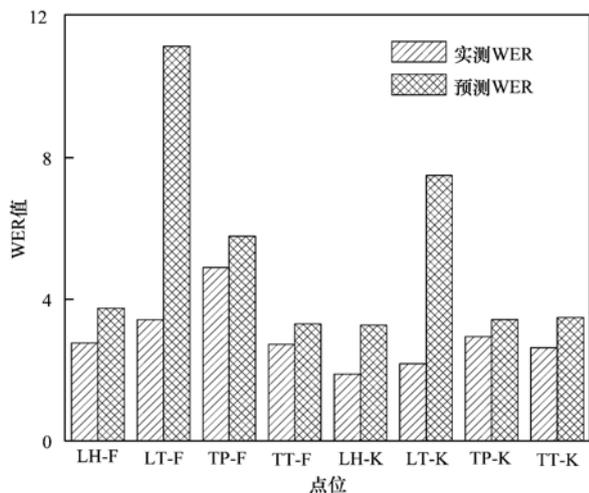


图 2 WERs 预测值与实测值的比较

Fig. 2 Comparison of predicted WERs and measured WERs

### 3 讨论

在国内 BLM 模型被用来替代生物试验进行 Cu 对水生生物的急性毒性预测已有成功应用的范例。吕怡兵等<sup>[16]</sup>在研究珠江、长江、淮河、松花江 12 个点应用 BLM 模型预测 Cu 对虹鳟鱼  $LC_{50}$  为  $0.13 \sim 0.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,与测试结果  $0.11 \sim 0.47 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  相符合。本研究中,辽河的红庙子与太湖的平台山、拖山这 3 个点在丰水期和枯水期 BLM 模型预测 Cu 对大型溞的 48 h- $LC_{50}$  为  $232.75 \sim$

$411.49 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,实际测试 48 h- $LC_{50}$  为  $134.55 \sim 350.00 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,二者之间的比率为  $1.16 \sim 1.73$ ,预测结果与测试结果具有较好的一致性。

本研究中所有采样点位的枯水期 48 h- $LC_{50}$  均比丰水期低,表明枯水期原水中 Cu 对大型溞的急性毒性大于丰水期。Cu 与有机物或无机物络合都可能降低游离态的  $\text{Cu}^{2+}$ <sup>[23,24]</sup>,直接影响生物配体的运输和渗透性能<sup>[25]</sup>,从而降低了 Cu 的生物有效性。在本研究中所有点位的枯水期原水 DOC 含量比丰水期低,而枯水期的无机态离子普遍要高于丰水期。采用 BLM 对所有采样点位中 Cu 形态分析可以看出,Cu 在 48 h- $LC_{50}$  时主要以有机络合态 Cu 存在,丰水期质量分数 ( $97.7\% \sim 99.1\%$ ) 高于枯水期 ( $88.3\% \sim 96.7\%$ ),其次是无机物络合形态 Cu,丰水期和枯水期均小于 12%,游离态  $\text{Cu}^{2+}$  含量非常低。由此可以得出,Cu 与有机物络合对生物有效性起着主要作用,对大型溞的急性毒性影响最大,造成丰水期的毒性低于枯水期。此外,有机络合态 Cu 可能会附着在配体的上皮细胞表面的黏液上,分解后可以再释放出游离态  $\text{Cu}^{2+}$ ,然后结合到配体组织上产生毒性效应。然而,这个分解过程 Cu 的吸收速率与游离  $\text{Cu}^{2+}$  相比要慢得多<sup>[26]</sup>。这也可能是王春艳<sup>[1]</sup>应用 BLM 预测 Cu 对中国湘江与三峡库区水体大型溞急性毒性 48 h- $LC_{50}$  为  $23.16 \sim 133.9 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,与本研究中 48 h- $LC_{50}$  预测值为  $232.75 \sim 793.66 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  存在差异性的主要原因。如湘江、三峡水库的 DOC ( $0.90 \sim 5.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 比太湖、辽河 DOC ( $4.99 \sim 20.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 低 4 倍左右,中国不同水系由于水质参数的不同,即使在相同的总 Cu 浓度下,所表现的毒性亦有很大差别。

对于辽河通江口,丰水期和枯水期 48 h- $LC_{50}$  预测值结果分别为  $793.66 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $533.91 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,48 h- $LC_{50}$  实测值结果分别为  $244.45 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $155.69 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,二者差距较大。在辽河通江口水样中 DOC、碱度相对较高,达到自来水的 5 ~ 10 倍,可能影响到实际试验结果。研究表明在更为复杂的高有机物含量、碱度和颗粒物含量<sup>[7,17,27]</sup>的地表水中,BLM 对重金属毒性的预测差异性较大,有待进一步研究。

根据预测结果与实测结果得到的 WER 范围分别为  $3.27 \sim 11.15$  与  $1.88 \sim 4.90$ ,均大于 1,说明实验室水测试毒性大于实际水样测试毒性,基于实验室水得到的 Cu 的水质基准对于采样点位的 Cu 含

量要求实际上是一种“过保护”。

#### 4 结论

BLM 模型对辽河红庙子、太湖平台山、太湖拖山点位的大型蚤 48 h-LC<sub>50</sub> 预测结果与实测结果具有较好的一致性,而在辽河通江口点位,丰水期和枯水期 BLM 预测 48 h-LC<sub>50</sub> 值与实测值相差较大。枯水期 Cu 的急性毒性大于丰水期,可能是因为 Cu 与溶解性有机质(DOC)络合对于生物有效性起着主要作用,降低了 Cu 对大型蚤的毒性。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 王春艳. 生物配体模型预测中国典型河流水体铜毒性及其水质基准指标应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2012.
- [ 2 ] USEPA. The biotic ligand model: technical support document for its application to the evaluation of water quality criteria for copper [R]. Washington: Office of Science and Technology Health and Ecological Criteria Division, 2003.
- [ 3 ] Maruya K A, Landrum P F, Burgess R M, *et al.* Incorporating contaminant bioavailability into sediment quality assessment frameworks [J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2012, **8**(4): 659-673.
- [ 4 ] Lock K, De Schamphelaere K A C, Beaus S, *et al.* Development and validation of an acute biotic ligand model (BLM) predicting cobalt toxicity in soil to the potworm *Enchytraeus albidus* [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(7): 1924-1932.
- [ 5 ] De P A, Scrimshaw M D. Challenges for the development of a biotic ligand model predicting copper toxicity in estuaries and seas [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2012, **31**(2): 230-238.
- [ 6 ] Ndungu K. Model predictions of copper speciation in coastal water compared to measurements by analytical voltammetry[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(14): 7644-7652.
- [ 7 ] Casares M V, De C L, Seoane R S, *et al.* Measured copper toxicity to cnesterodon decemmaculatus (pisces; poeciliidae) and predicted by biotic ligand model in Pilcomayo river water: a step for a cross-fish-species extrapolation[J]. *Journal of Toxicology*, 2012, Article ID 849315, doi: 10.1155/2012/849315.
- [ 8 ] Paquin P R, Santore R C, Wu K B, *et al.* Revisiting the aquatic impacts of copper discharged by water-cooled copper alloy condensers used by power and desalination plants [J]. *Environmental Science & Policy*, 2000, **3**(S1): S165-S174.
- [ 9 ] Creémazy A, Campbell P G, Fortin C. The biotic ligand model can successfully predict the uptake of a Trivalent Ion by a unicellular *Alga* below pH 6. 50 but not above: possible role of hydroxo-species [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(5): 2408-2415.
- [ 10 ] Yen L T, Vijver M G, Jan H A, *et al.* Modeling toxicity of binary metal mixtures (Cu<sup>2+</sup>-Ag<sup>+</sup>, Cu<sup>2+</sup>-Zn<sup>2+</sup>) to lettuce, *Lactuca sativa*, with the biotic ligand model[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2013, **32**(1): 137-143.
- [ 11 ] Steenbergen N T, Iaccino F, De Winkle M, *et al.* Development of a biotic ligand model and a regression model predicting acute copper toxicity to the earthworm *Aporrectodea caliginosa* [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(15): 5694-5702.
- [ 12 ] An J, Jeong S, Moon H S, *et al.* Prediction of Cd and Pb toxicity to *Vibrio fischeri* using biotic ligand-based models in soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **203-204**: 69-76.
- [ 13 ] De C F, Ciminelli V S, De M V, *et al.* Contribution of the biotic ligand model (BLM) for copper water quality criteria in the Carajás region, Brazil-acute toxicity [R]. Brazil: INCT-ACQUA, Institute of Science and Technology for Mineral Resource, Water and Biodiversity, 2010.
- [ 14 ] USEPA. Aquatic life ambient freshwater quality criteria-copper [R]. Washington DC: Office of Water, 2007.
- [ 15 ] Van S P, Vangheluwe M, Van H A, *et al.* European union risk assessment report: copper, copper (II) sulphate pentahydrate, copper (I) oxide, copper (II) oxide, dicopper chloride trihydroxide (Part 1) [R]. Voluntary risk assessment. Environmental effects. Chapter 3.2, Part 1. Brussels, Belgium; European Copper Institute, 2007.
- [ 16 ] 吕怡兵, 李国刚, 宫正宇, 等. 应用 BLM 模型预测我国主要河流中 Cu 的生物毒性[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(12): 2080-2085.
- [ 17 ] Wang C Y, Chen H, Wu K B, *et al.* Application of the biotic ligand model to predict copper acute toxicity to *Medaka* fish in typical Chinese rivers[J]. *Water Science & Technology*, 2011, **64**(6): 1277-1283.
- [ 18 ] 陈中智, 朱琳, 姚琨, 等. Ca<sup>2+</sup> 与 Pb<sup>2+</sup> 相互作用对斑马鱼胚胎毒性效应的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(4): 1205-1209.
- [ 19 ] 吴丰昌, 冯承莲, 曹宇静, 等. 我国铜的淡水生物水质基准研究[J]. *生态毒理学报*, 2011, **6**(6): 617-628.
- [ 20 ] De Schamphelaere K A C, Janssen C R. A biotic ligand model predicting acute copper toxicity for *Daphnia magna*: the effects of calcium, magnesium, sodium, potassium, and pH [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(1): 48-54.
- [ 21 ] 张峥, 彭跃, 卢雁, 等. 辽河水体有机污染源判别[J]. *环境科学与管理*, 2011, **36**(1): 19-21.
- [ 22 ] US EPA. Interim guidance on the determination and use of water-effects ratios for metals[R]. Washington DC: Office of Science and Technology, 1994.
- [ 23 ] Di T D, Allen H E, Bergman H L, *et al.* Biotic ligand model of the acute toxicity of metals. 1. Technical basis [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2001, **20**(10): 2383-2396.
- [ 24 ] Craven A M, Aiken G R, Ryan J N. Copper (II) binding by dissolved organic matter: importance of the copper-to-dissolved organic matter ratio and implications for the biotic ligand model [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(18): 9948-9955.

- [25] Matsuo A Y, Playle R C, Val A L, *et al.* Physiological action of dissolved organic matter in *rainbow trout* in the presence and absence of copper: sodium uptake kinetics and unidirectional flux rates in hard and softwater[J]. *Aquatic Toxicology*, 2004, **70** (1): 63-81.
- [26] Tao S, Xu S, Cao J, *et al.* Bioavailability of apparent fulvic acid complexed copper to fish gills [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, **64**(2): 221-227.
- [27] Erickson R J. The biotic ligand model approach for addressing effects of exposure water chemistry on aquatic toxicity of metals: genesis and challenges [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2013, **32**(6): 1212-1214.

## 欢迎订阅 2014 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行人,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2014 年为 16 开本,90 元/册,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

## CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region .....	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing .....	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011 .....	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region .....	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013 .....	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO <sub>2</sub> with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China .....	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion .....	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical .....	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities .....	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu .....	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal .....	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City .....	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjinghu Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period .....	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers .....	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed .....	HOU Li-yuan, HU An-yi, Ma Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake .....	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland .....	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems .....	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method .....	XI Qing, LI Zhao-fu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration .....	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System .....	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron .....	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light .....	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /Graphene Oxide Nanoparticles .....	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism .....	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China .....	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment .....	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes .....	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater .....	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FePMo <sub>12</sub> Adopted Catalyst .....	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment .....	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor .....	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process .....	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu <sup>2+</sup> by Xanthate-Functionalized Waste Sludge .....	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L. ....	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene .....	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals .....	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LI Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area .....	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe .....	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors .....	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing .....	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs .....	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous <sup>13</sup> C Labeling .....	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area .....	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge .....	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seafood from Dalian, China .....	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake .....	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice .....	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i> .....	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate .....	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW) .....	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process .....	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H <sub>2</sub> S over Supported Fe Catalysts on CeO <sub>2</sub> -Intercalated Laponite Clay .....	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites .....	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM <sub>2.5</sub> from Stationary Sources: a Review .....	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens .....	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

# 《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5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 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