

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第5期

Vol.34 No.5

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于过氧化物的消毒技术研究进展	习海玲, 赵三平, 周文 (1645)
环境损害评估: 国际制度及对中国的启示	张红振, 曹东, 於方, 王金南, 齐霖, 贾倩, 张天柱, 骆永明 (1653)
不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示	徐猛, 颜增光, 贺萌萌, 张超艳, 侯红, 李发生 (1667)
蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展	张志剑, 刘萌, 朱军 (1679)
基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究	刁晓君, 席北斗, 何连生, 邓祥征, 吴锋, 王鹏腾 (1687)
我国东北地区地表水酸化现状	徐光仪, 康荣华, 罗遥, 段雷 (1695)
西安市对渭河水质的影响分析	于婕, 李怀恩 (1700)
极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究	叶丰, 黄小平, 施震, 刘庆霞 (1707)
应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准	韩超南, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 曹伟 (1715)
长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI和M-AMBI法	蔡文倩, 孟伟, 刘录三, 朱延忠, 周娟 (1725)
温州城市降雨径流中BOD ₅ 和COD污染特征及其初始冲刷效应	王骏, 毕春娟, 陈振楼, 周栋 (1735)
影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究	余小龙, 沈芳, 张晋芳 (1745)
香溪河库湾春季pCO ₂ 与浮游植物生物量的关系	袁希功, 黄文敏, 毕永红, 胡征宇, 赵玮, 朱孔贤 (1754)
紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究	雷雨, 龙天渝, 伞磊, 安强, 朱芳 (1761)
高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究	马晓雁, 张泽华, 王红宇, 胡仕斐, 李青松 (1767)
纳米Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ 非均相Fenton反应催化氧化邻苯二酚	何洁, 杨晓芳, 张伟军, 王东升 (1773)
水中茶普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究	马杜娟, 刘国光, 吕文英, 姚锐, 周丽华, 谢成屏 (1782)
酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究	康雅凝, 李华楠, 徐冰冰, 齐飞, 赵伦 (1790)
镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究	柳玉荣, 魏清伟, 杨仁斌, 许振成, 曾东 (1797)
基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法	金鹏康, 冯永宁, 王宝宝, 王晓昌 (1802)
不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究	万金泉, 胡梦蝶, 马邕文, 黄明智 (1808)
壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果	张聪璐, 胡筱敏, 英诗颖, 王芳 (1815)
城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究	孟晓荣, 张海珍, 王磊, 王旭东, 赵亮 (1822)
倒置A ² /O-MBR处理城市污水的中试研究	张健君, 邹高龙, 杨淑芳, 丁星, 王莉, 毛乾庄, 杨丹 (1828)
不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究	袁莹, 周伟丽, 王晖, 何圣兵 (1835)
短程同步硝化反硝化过程的脱氮与N ₂ O释放特性	梁小玲, 李平, 吴锦华, 王向德 (1845)
基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化	张明全, 李锋民, 吴乾元, 胡洪营 (1851)
多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响	陈春, 刘潇威, 郑顺安, 周启星, 李松 (1857)
浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价	徐志荣, 王浙明, 许明珠, 何华飞 (1864)
苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应	赵伟荣, 廖求文, 杨亚楠, 戴九松 (1871)
四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征	邵敏, 陈永亨, 李晓宇 (1877)
咪唑类离子液体毒性的QSAR/QSPR研究	赵继红, 赵永升, 张宏忠, 张香平 (1882)
宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征	樊新刚, 米文宝, 马振宁, 王婷玉 (1887)
内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征	郭伟, 付瑞英, 赵仁鑫, 赵文静, 郭江源, 张君 (1895)
福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究	郑桢, 杨冰玉, 吴水平, 王新红, 陈晓秋 (1901)
重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究	王玉玲, 能昌信, 王彦文, 董路 (1908)
丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响	郭伟, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 郭江源, 张君 (1915)
海洋细菌N3对几种赤潮藻的溶藻效应	史荣君, 黄洪辉, 齐占会, 胡维安, 田梓杨, 戴明 (1922)
1株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌LY01的鉴定及其氧化特性研究	刘玉娇, 杨新萍, 王世梅, 梁银 (1930)
1株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性	蔡瀚, 尹华, 叶锦韶, 常晶晶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1937)
2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解	张姝, Giulio Franco, 李晓豹, 卢晓霞, 侯珍, 杨君君 (1945)
养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群B-737及发酵特性	裴瑞林, 信欣, 张雪乔, 周迎芹, 姚力, 羊依金 (1951)
1997~2011年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析	陈圆圆, 田贺忠, 杨懂艳, 邹本东, 鹿海峰, 林安国 (1958)
黄山降水酸度及电导率特征分析	石春娥, 邓学良, 吴必文, 洪杰, 张苏, 杨元建 (1964)
夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析	文彬, 银燕, 秦彦硕, 陈魁 (1973)
广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征	谭吉华, 赵金平, 段菁春, 马永亮, 贺克斌, 杨复沫 (1982)
福建省三大城市冬季PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	陈衍婷, 陈进生, 胡恭任, 徐玲玲, 尹丽倩, 张福旺 (1988)
上海市含碳大气颗粒物的粒径分布	袁宁, 刘卫, 赵修良, 王广华, 姚剑, 曾友石, 刘遂庆 (1995)
上海市浦东城区二次气溶胶生成的估算	崔虎雄, 吴迺名, 段玉森, 伏晴艳, 张懿华, 王东方, 王茜 (2003)
沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义	钱鹏, 郑祥民, 周立旻 (2010)
厦门秋季近郊地面CO ₂ 浓度变化特征研究	李燕丽, 穆超, 邓君俊, 赵淑惠, 杜可 (2018)
GC-MS和GC-ECD同时在线观测本底大气中的HCFC-142b	郭立峰, 姚波, 周凌晔, 李培昌, 许林 (2025)
城市居家环境空气真菌群落结构特征研究	方治国, 欧阳志云, 刘芃, 孙力, 王小勇 (2031)
城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究	郭薇, 王伯光, 唐小东, 刘舒乐, 何洁, 张春林 (2038)
内河多点分散码头大气污染叠加影响特征	刘建昌, 李兴华, 徐洪磊, 程金香, 王忠岱, 肖杨 (2044)
义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究	刘瑞卿, 王钧伟 (2051)
基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究	谢元博, 李巍 (2057)
《环境科学》征订启事(1652) 《环境科学》征稿简则(1789) 信息(1807, 1821, 1881, 1987) 专辑征稿通知(1863)	

应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准

韩超南, 秦延文*, 郑丙辉, 张雷, 曹伟

(中国环境科学研究院国家环境保护河口与海岸带环境重点实验室, 北京 100012)

摘要: 采集湘江衡阳段 29 个站点的表层沉积物样品, 测定沉积物中 4 种重金属 (Cu、Pb、Zn 和 Cd) 含量及赋存形态、以及孔隙水中重金属含量, 根据相平衡分配法的基本理论, 考虑参与沉积物-水相平衡分配的重金属组成, 实测法计算重金属的沉积物-水相平衡分配系数 (K_p), 分别引用美国 EPA 制定保护水生生物不受重金属慢性毒性影响的基本连续浓度 (CCC) 和我国地表水环境质量标准 (GB 3838-2002) I 类水质标准, 建立两种湘江衡阳段沉积物重金属质量基准 (SQC) 进行对比分析, 其中基于美国 CCC 建立的湘江衡阳段沉积物重金属质量基准与国内外研究成果相比可比性较好, 4 种重金属 (Cu、Pb、Zn 和 Cd) 的 SQC 值分别为 64.62、55.57、1360.40 和 2.34 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 此 SQC 具有保护长期生活于沉积物中的底栖生物不受重金属慢性毒性影响的意义. 通过单因子评价法将湘江衡阳段沉积物中重金属总量与沉积物质量基准值 (SQC) 进行比较, 结果表明, 湘江衡阳段沉积物中 Cd 和 Pb 含量水平对底栖生物具有较大的慢性毒性影响, Cd 污染不容忽视.

关键词: 湘江衡阳段; 重金属; 相平衡分配法; 沉积物质量基准; 沉积物质量评价

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)05-1715-10

Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River

HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, ZHANG Lei, CAO Wei

(State Environmental Protection Key Laboratory of Estuary and Coastal Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Twenty-nine surface sediment samples were collected from Hengyang sections of Xiangjiang River to detect concentrations and speciation percentage of heavy metals (Cu, Pb, Zn and Cd) in sediment and pore water. According to the Equilibrium Partitioning (EqP) approach, the sediment-water partition coefficients (K_p) of heavy metals in Hengyang section of Xiang River were revised by the bioavailable fraction, and the USEPA Criterion Continuous Concentration (CCC) which was based on aquatic toxicity of the final chronic level and GB3838-2002 I, water quality standard were introduced to establish two types of sediment quality criteria (SQC) for heavy metals (Cu, Pb, Zn and Cd) in Hengyang section of Xiangjiang River for comparison. The better SQCs (base on CCC) of Cu, Pb, Zn and Cd were 64.62, 55.57, 1360.40 and 2.34 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, and they can protect benthic organism from being poisoned by heavy metal chronic aquatic toxicity. The ratio of heavy metal concentration and SQC was used to assess sediment quality in Hengyang section of Xiangjiang River, the result showed that concentration levels of Cd, Pb in sediment in Hengyang section of Xiangjiang River had strong chronic toxic effects, Cd pollution could not be ignored.

Key words: Hengyang section of Xiangjiang River; heavy metal; the equilibrium partition (EqP) approach; sediment quality criteria; sediment quality assessment

水体沉积物作为重金属污染物的赋存地^[1], 高富集含量的重金属不仅能破坏水底的生态环境, 而且由于底质与上覆水体互相频繁的交换作用而成为河流、湖泊和海洋再污染的潜在来源. 作为污染物质重要的贮存场所, 建立沉积物重金属质量基准对于保护长期生活在沉积底质中的水生生物生命健康具有重要的意义. 然而, 我国目前尚未制定河流、湖泊等淡水沉积物重金属质量基准, 因此建立沉积物重金属质量基准已十分迫切.

作为数值型沉积物质量基准建立方法的典型代表, 相平衡分配法具有直观简洁、逻辑性强的特点,

是美国环保署推荐的方法之一^[2,3]. 相平衡分配法建立在沉积物-水相间的热力学平衡基础上, 它能充分利用水质基准的数据和研究成果, 通过孔隙水中污染物含量, 反映沉积物中污染物浓度与生物响应之间的因果关系, 具有适合于不同类型沉积物以及不进行生物体实验就能预测可能发生的底栖生物

收稿日期: 2012-06-08; 修订日期: 2012-11-12

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07528-002, 2012ZX07503-02)

作者简介: 韩超南 (1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境化学, E-mail: hcn_125@163.com

* 通讯联系人, E-mail: qinyw@cras.ac.cn

效应的优点^[4,5]. 我国已经对相平衡分配法建立沉积物质量基准进行初步研究,但由于特定区域沉积物污染程度的差异、影响沉积物中重金属生物有效性和毒性因素的复杂性等原因,不同学者所建立的水体沉积物重金属质量基准具有较大的差异性^[6],仍需对相平衡分配法建立水体沉积物质量基准进行深入研究.

湘江是我国重金属污染比较严重的河流,本研究选择湘江衡阳段作为研究区域,在相平衡分配法的基础上,通过讨论沉积物中参与沉积物-水相平衡分配的重金属组成、残渣态重金属组成、酸可挥发性硫化物中重金属组成,对沉积物-水相平衡分配系数(K_p)和沉积物重金属质量基准(SQC)进行修正,进行建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准的研究.

1 材料与方法

1.1 调查区域与站点设置

湘江是长江中游重要的支流之一,干流全长 856 km,流域面积达 94 600 km². 湘江流域分布有丰富的矿产资源,采矿业、冶炼业等工业企业较多,大量的工业废水排入湘江,导致其重金属污染十分严重. 衡阳市位于湘江中游,是一座有着多年矿冶历史的工业城市,其中水口山工业区是衡阳段重金属污染最严重的地区. 本研究选择湘江水系典型重金属污染江段(衡阳段)作为研究区域,共设站点 42 个,其中采得表层泥样 29 个,采样布点主要在流速较缓干流、干支流汇流处及排污口等,具体采样点站位如图 1 所示.



HY18、HY19 采样条件不佳,为了提高研究准确性,故补充采集地理位置临近的 HY18 补、HY19 补两站点进行研究分析

图 1 湘江衡阳段采样站位及污染企业示意

Fig. 1 Locations of sampling and enterprise site in Hengyang sections of Xiangjiang River

1.2 样品采集与预处理

采用抓斗式重力采泥器采集深度 0~5 cm 的表层沉积物样品,现场聚乙烯袋密封,置于冷冻箱并带回实验室, -20℃ 条件下冷冻干燥保存. 待使用时研磨、自然风干降温,经 100 目尼龙筛筛滤后进行实验测定分析.

1.3 样品分析测试

根据湘江流域重金属元素 Cu、Pb、Zn 和 Cd 背景含量较高的特性,选择检测率高、毒性大、区域排放量大的 4 种重金属元素 Cu、Pb、Zn 和 Cd 作为研究对象^[7~11].

沉积物重金属总量测定方法:取 0.100 0 g 干燥

过筛后的沉积物样品置于微波消解管中,加入 3 mL HCl、4.5 mL HNO₃ 与 1.5 mL HF,利用 CEM MARS 微波消解仪微波消解,消解完全后将溶液移至聚四氟坩埚,加入 1 mL HClO₄,于电热板 250℃ 进行多次赶酸,加入 2 mL HNO₃ 转移至 100 mL 容量瓶定容,使用 ICP-MS(Agilent 7500cx 型)进行重金属元素总量测定。

孔隙水重金属总量测定方法:采用 5 000 r·min⁻¹,30 min 离心分离新鲜沉积物样品,再经 0.45 μm 滤膜过滤得到沉积物孔隙水,然后使用 ICP-MS 进行重金属元素总量测定。

沉积物重金属形态分析方法:采用改进 BCR 顺序提取法^[12,13],按加入提取剂种类及提取顺序的不同将沉积物中重金属形态分为 4 种:醋酸可提取态、可还原态、可氧化态和残渣态。该法稳定性及重现性好,提取精度高,不同研究结果之间可比性强^[14,15]。

酸可挥发性硫化物(AVS)含量测定方法:酸可挥发性硫化物(AVS)是指能被 1 mol·L⁻¹ 酸度的冷盐酸所提取的硫化物,称取 1~2 g 湿沉积物样品于三口烧瓶中,加入 20 mL 1 mol·L⁻¹ 的 HCl,通入流量为 40 cm³·min⁻¹ 的 N₂,通过测定反应产生挥发性 H₂S 气体的含量来确定 AVS 含量,H₂S 气体含量测定通过向吸收瓶中加入 5 mL 对氨基二甲基苯胺二盐酸盐溶液和 1 mL 硫酸铁铵溶液,定容至 100 mL,静置 10 min,使用岛津公司 UV-1700 紫外分光光度计于 650 nm 处测定吸光值。

同步提取金属(SEM)含量测定方法:同步提取金属(SEM)是指用盐酸提取 AVS 过程中同时提取的金属,以 Ni、Cu、Pb、Zn、Cd 这 5 种重金属的含量和来表示,用火焰原子吸收分光光度计分别测定 AVS 滤液重金属含量,同时测定除氧蒸馏水重金属浓度的空白值。

每批样品在进行重金属总量及形态分析实验过程中同时做全程空白实验,所有样品均做 3 次平行实验,各重金属元素总量的相对标准偏差(RSD)均小于 5%,各赋存形态含量的标准偏差均小于 8%。实验同步分析了由地球物理地球化学勘查研究所生产的水系沉积物成分分析标准物质(GBW07309)和国家地质实验测试中心及中国计量科学研究院生产的湖底沉积物顺序提取微量元素标准物质(GBW07436),Cu、Pb、Zn、Cd 的总量和各提取形态的回收率均在 80%~120% 之间。

2 方法学研究

2.1 相平衡分配法的基本模型

美国环保署于 1985 年提出相平衡分配法,此后荷兰^[16]和英国^[17]也分别利用该法建立沉积物重金属质量基准,相平衡分配法主要观点认为当水体中某污染物浓度达到水质基准时,沉积物中该污染物的浓度即为其沉积物的质量基准值。相比其它方法,相平衡分配法拥有可靠的理论基础,充分利用基于广泛生物实验的水质基准,间接考虑污染物的生物有效性,故有利于污染物-生物效应间关系的评估,并且不需要大量的生物效应数据,具有较大的发展潜力^[18]。

相平衡分配法建立在 3 个前提假设^[19,20]的基础上,这 3 个假设均是根据经验研究成果而提出。

(1)物质在沉积相-孔隙水相之间快速可逆交换,最终能达到热力学平衡状态,其平衡分配关系可用沉积物-水相平衡分配系数 K_p 表述。

(2)沉积相中某物质的生物有效性与孔隙水相中该物质游离非络合态的活性浓度相关,与总浓度无关。

(3)底栖生物和上覆水生物对物质具有相近的敏感性。

根据模型假设,污染物质在沉积相与孔隙水相的分配最终达到平衡状态,而当孔隙水中该物质的含量达到水质基准时,沉积物中该物质的含量即可视为该物质在沉积物中的质量基准,公式^[21,22]如下:

$$K_p = \rho_s / \rho_{iw} \quad (1)$$

$$SQC = K_p \times WQC \quad (2)$$

式(1)为沉积物-水相平衡分配系数的计算公式,式中, K_p 为污染物的沉积物-水相平衡分配系数, L·g⁻¹; ρ_s 为沉积物中具有生物有效性的污染物质含量, μg·g⁻¹; ρ_{iw} 为孔隙水中污染物质量浓度, μg·L⁻¹。式(2)为建立沉积物质量基准的基本公式,式中 SQC 为污染物的沉积物质量基准, μg·g⁻¹; WQC 为污染物的水质基准, μg·L⁻¹。

2.2 应用于重金属的相平衡分配模型修正

本研究采用改进 BCR 顺序提取法把沉积物中重金属赋存形态分为 4 种,即醋酸可提取态、可还原态、可氧化态和残渣态。对于重金属污染物,沉积物原生矿物(即残渣态)的重金属非常稳定,一般认为不具有生物有效性^[23,24],因而其不参与沉积相-水相平衡分配过程。

当沉积物中酸可挥发性硫化物 (AVS) 含量较高时, 二价重金属 Me^{2+} 易与 S^{2-} 结合形成硫化物沉淀, 这部分重金属也不参与沉积物-水相平衡分配过程^[25]. 然而, 研究发现 AVS 含量对于沉积物孔隙水中重金属浓度起控制作用, 当 $\text{SEM}/\text{AVS} > 1$ 时, 沉积物中重金属释放到孔隙水中而具有生物毒性, 当 $\text{SEM}/\text{AVS} < 1$ 时, SEM 全部被 AVS 结合失去生物有效性, 从而不具有生物毒性^[26-28].

考虑到残渣态重金属和酸可挥发性硫化物中重金属不参与沉积物-水相平衡分配过程, 本研究认为应将沉积物质量基准计算公式修改如下:

$$K_p = (\rho_s - [M]_{\text{AVS}}) / \rho_{\text{iw}} \quad (3)$$

$$\text{SQC} = K_p \times \text{WQC} + [M]_{\text{R}} + [M]_{\text{AVS}} \quad (4)$$

式(3)为沉积物-水相平衡分配系数的修正公式, 式中, K_p 为重金属的沉积物-水相平衡分配系数, $\text{L} \cdot \text{g}^{-1}$; ρ_s 为沉积物中具有直接或潜在生物有效性的重金属含量, $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; ρ_{iw} 为孔隙水中重金属含量, $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 式(4)为建立沉积物重金属质量基准的修正公式, 式中, SQC 为沉积物重金属质量基准, $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; $[M]_{\text{R}}$ 为沉积物中残渣态重金属含量, $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; WQC 为重金属的水质基准, $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; $[M]_{\text{AVS}}$ 为沉积物中与酸可挥发性硫化物 (AVS) 结合的重金属含量, $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$.

2.3 修正模型的参数探讨

2.3.1 沉积物-水相平衡分配系数 (K_p)

根据上述模型修正可知, 残渣态重金属不参与沉积物-水相平衡分配过程, 从而不具有生物有效性, 本研究将沉积物中醋酸可提取态、可还原态、可氧化态重金属含量之和作为具有直接或潜在生物有效性的重金属含量 (ρ_s). 同时, 酸可挥发性硫化物中的重金属 ($[M]_{\text{AVS}}$) 也不参与沉积物-水相平衡分配过程, 故推算沉积物-水相平衡分配系数 K_p 值时应当去掉这部分重金属含量. 所以 K_p 值的计算公式修正如式(3)所示.

2.3.2 水质基准 (WQC)

在本研究中, 建立沉积物重金属质量基准所用的水质基准 WQC 采用美国《清洁水法》304(a) 水生生物基准的基准连续浓度 (CCC)^[29] 和我国地表水环境质量标准 (GB 3838-2002) 进行对比分析. 基准连续浓度 CCC 表示持续暴露在环境中不会对水生生物产生显著影响的污染物质的最大浓度, 该水质基准与水质硬度相关, 根据美国《清洁水法》304(a) 水生生物基准^[30,31], CCC 的计算方法如表 1^[31] 所示.

表 1 美国保护水生生物和人体健康的基准连续浓度 (CCC)⁽¹⁾

重金属	mc	bc	CF
Cu	0.854 5	-1.702	0.960
Pb	1.273	-4.705	$1.462\,03 - [(\ln \text{硬度}) (0.145\,712)]$
Zn	0.847 3	0.884	0.986
Cd	0.740 9	-4.719	$1.101\,672 - [(\ln \text{硬度})] (0.041\,838)$

1) $\text{CCC} = \exp\{\text{mc} \times [\ln(\text{硬度})] + \text{bc}\} \times \text{CF}$, CF 为淡水转换系数, 指将以水柱中总可回收部分表示的金属基准值转换成以水柱中可溶部分表示的基准值时推荐的转化系数

2.3.3 酸可挥发性硫化物含量 ($[M]_{\text{AVS}}$)

实际上, 江河沉积物大多数为氧化型沉积物, 其中 AVS 含量很低, 此时在相平衡分配法中可以不考虑 AVS 的影响, 而对还原型的水库、湖泊沉积物则需考虑 AVS 的影响^[32]. 本研究对湘江衡阳段 29 个沉积物样品进行 AVS 含量分析, 大多数站点沉积物 AVS 含量检测不出, 原因可能是湘江水体流动性较好, 其沉积物为氧化型沉积物, 又通过测定湘江衡阳段沉积物中重金属赋存形态发现, 除了 Cu 以外, Pb、Zn、Cd 的可氧化态重金属含量均比较少 (如图 3), 所以本研究忽略修正公式(4)中的 AVS 含量对湘江衡阳段沉积物重金属质量基准进行计算.

3 结果与讨论

3.1 湘江衡阳段沉积物中重金属总量分布特征

湘江衡阳段 42 个采样站点共采集表层沉积物样品 29 个, 其中测得孔隙水重金属含量的有 19 个, 由于建立沉积物重金属质量基准同时需要沉积物和孔隙水的数据, 所以本研究主要讨论 19 个站点的沉积物重金属总量分布, 如图 2 所示. 湘江衡阳段沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cd 的平均含量分别为: 88.33、290.68、585.13、34.60 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$. 与 1992 年陈静生^[33] 分析得到的湘江沉积物重金属含量背景值 (Cu 为 16.7 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, Pb 为 22.5 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, Zn 为 73 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, Cd 为 0.5 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) 相比, 湘江衡阳段沉积物重金属含量是背景值数 10 倍, 其中 Cd 甚至达到背景值的 70 倍, 这说明湘江衡阳段污染十分严重. 从图 2 可以看出, 湘江衡阳段沉积物重金属含量随着上游至中游至下游, 呈现先升高再降低的趋势, 中下游沉积物重金属含量大于上游, 其中 HY-19 补站点重金属总量远远大于其余站点, HY-19 补站点位于分布有许多污染企业的水口山工业区内, 可能由于大量的工业废水排入湘江而导致重金属的高含量富集.

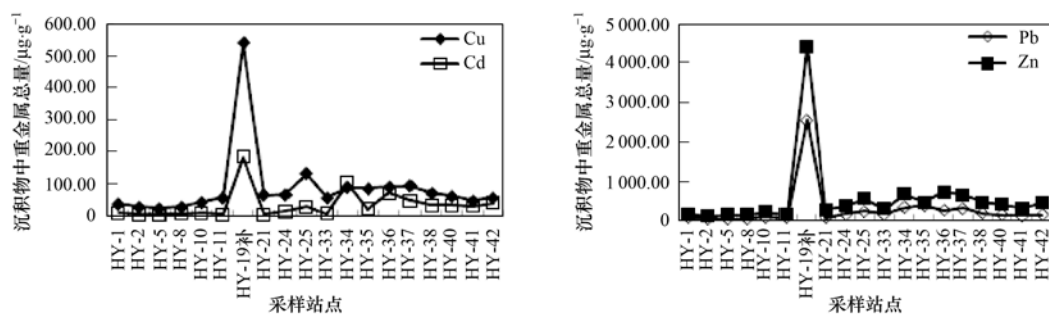


图2 湘江衡阳段沉积物中重金属总量

Fig. 2 Heavy metal concentrations of sediment in Hengyang sections of Xiangjiang River

3.2 湘江衡阳段沉积物重金属赋存形态分布特征

湘江衡阳段沉积物 Cu、Pb、Zn、Cd 的赋存形态分布(质量分数)如图 3 所示,可以看出 4 种重金属具有生物有效性的含量(醋酸可提取态、可还原态、可氧化态重金属之和)均大于残渣态含量,这说明湘江衡阳段沉积物重金属的生物有效性和迁移性比较强,对水生底栖生物存在较大的潜在风险. 其中 Cd 的主要赋存形态为醋酸可提取态,平均质量

分数达到 79.28%; Pb 以可还原态为主要赋存形态,平均质量分数为 65.99%; Zn 的醋酸可提取态和残渣态质量分数分别为 46.89% 和 28.67%; Cu 的醋酸可提取态、可还原态、可氧化态和残渣态质量分数接近相等(均小于 35%),这说明湘江衡阳段沉积物中 Cd 具有较大的直接生态危害性,Zn 具有一定的直接生态危害性,Pb 具有较大的潜在生态危害性,Cu 的潜在生态危害性较小.

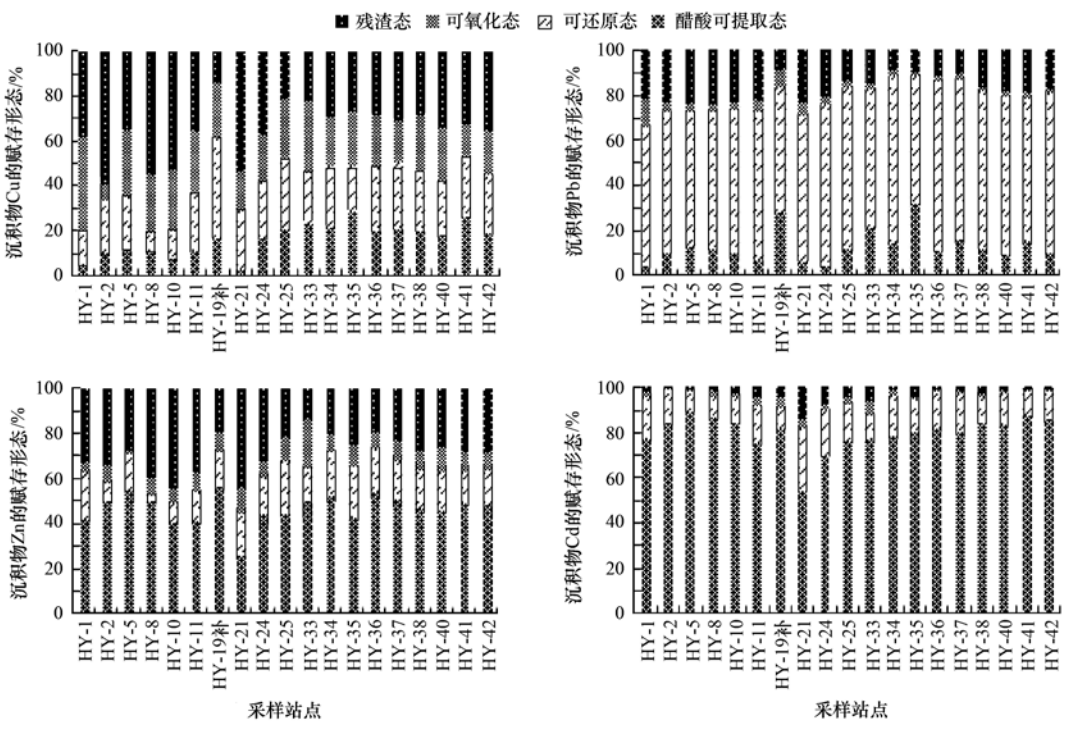


图3 湘江衡阳段沉积物重金属赋存形态分布

Fig. 3 Heavy metal fraction speciation of sediment in Hengyang sections of Xiangjiang River

3.3 湘江衡阳段沉积物-水相平衡分配系数(K_p)的确定

湘江衡阳段沉积物中有效态、残渣态重金属含量和孔隙水中重金属含量如表 2 所示,本研究采用实测沉积物中有效态重金属含量与孔隙水中重金属

含量,忽略 AVS 含量,根据公式(3),计算出 Cu、Pb、Zn、Cd 的沉积物-水相平衡分配系数 K_p 平均值分别为 10.74、45.63、23.22、11.33 $L \cdot g^{-1}$. 从表 3 可以看出, HY-25、HY-34、HY-42 站点可能因污染企业工业废水排放而导致沉积物中有效态重金属高

含量富集,但孔隙水中重金属含量很少,或者其它原因,从而使得这些站点的 K_p 值相比其他站点出现异常. 为了保证建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准的准确性,本研究去掉 HY-25、HY-34、HY-42 站点的 K_p 异常值,然后进行平均得到 Cu、Pb、Zn、Cd 的 K_p 值,分别为: 8.04、22.86、17.40、10.53 $L \cdot g^{-1}$.

K_p 值是建立沉积物重金属质量基准值的准确

性保证,与其他流域 K_p 值(如表4)相比,湘江衡阳段沉积物 K_p 值高于湖泊类型的太湖和滇池、河流类型的辽河,但稍微低于长江水系的乌江、嘉陵江、汉江等,由此可见不同流域沉积物 K_p 值差别较大,不同流域的 K_p 值可能因沉积物粒度分布、有机质百分含量等而不同,湘江衡阳段沉积物粒度类型主要为粒径较粗的粉砂质砂,有机质百分含量平均为 2.40%^[34].

表2 湘江衡阳段沉积物-水相平衡分配系数 K_p ⁽¹⁾

Table 2 The K_p in Hengyang sections of Xiangjiang River

站点	有效态含量 (ρ_e)/ $\mu g \cdot g^{-1}$				残渣态含量 ($[M]_R$)/ $\mu g \cdot g^{-1}$				孔隙水含量 (ρ_{wv})/ $\mu g \cdot L^{-1}$				沉积物-水相平衡分配系数 (K_p 值)/ $L \cdot g^{-1}$				硬度 ($CaCO_3$) / $\mu g \cdot L^{-1}$
	Cu	Pb	Zn	Cd	Cu	Pb	Zn	Cd	Cu	Pb	Zn	Cd	Cu	Pb	Zn	Cd	
HY-1	24.17	52.68	117.04	8.10	14.42	14.93	57.58	0.20	3.99	7.59	6.50	0.61	6.06	6.94	17.99	13.25	36.53
HY-2	11.51	37.41	71.32	5.26	15.80	11.72	36.84	0.02	1.98	2.28	5.33	0.28	5.82	16.40	13.39	18.98	49.68
HY-5	15.67	31.25	103.75	5.14	8.10	9.95	38.48	0.06	1.50	2.63	4.94	0.40	10.46	11.88	20.99	12.95	65.37
HY-8	13.46	48.81	94.75	6.60	15.93	15.99	62.58	0.17	4.19	2.19	13.95	0.45	3.21	22.30	6.79	14.82	65.37
HY-10	21.11	64.78	126.52	7.97	22.44	20.22	99.84	0.25	3.85	8.03	4.05	1.17	5.48	8.06	31.27	6.83	65.37
HY-11	37.27	53.54	97.97	4.83	19.77	16.25	57.97	0.24	4.87	0.77	3.95	0.20	7.66	69.33	24.80	24.61	49.68
HY-19 补	463.18	2325.37	3577.57	176.21	76.14	244.27	868.61	7.85	18.65	50.00	417.00	8.11	24.84	46.51	8.58	21.73	95.54
HY-21	30.76	56.32	159.42	3.93	33.73	17.13	127.77	0.64	43.89	41.85	197.10	16.73	0.70	1.35	0.81	0.24	82.80
HY-24	41.93	132.09	253.02	13.63	24.11	35.81	122.18	1.15	31.42	4.23	24.61	1.12	1.33	31.24	10.28	12.15	56.45
HY-25	104.51	211.89	436.39	27.67	28.00	35.25	122.00	1.36	2.40	2.00	3.85	1.31	43.56	105.73	113.41	21.10	62.10
HY-33	44.91	147.58	256.83	6.73	12.57	25.84	42.14	0.45	8.04	34.08	11.19	1.93	5.58	4.33	22.95	3.49	49.68
HY-34	63.93	302.40	545.69	100.85	25.67	32.56	136.63	1.13	2.22	1.30	16.59	5.72	28.74	233.16	32.89	17.64	54.00
HY-35	64.11	350.51	345.95	19.61	22.34	38.60	113.93	0.85	2.55	9.72	31.74	4.78	25.14	36.06	10.90	4.11	62.10
HY-36	65.69	237.71	592.13	70.63	24.59	31.84	144.80	0.87	4.82	5.20	18.57	5.73	13.62	45.70	31.89	12.32	54.00
HY-37	65.59	277.80	502.96	47.63	27.53	34.86	154.04	0.83	17.30	74.51	46.99	13.40	3.79	3.73	10.70	3.55	56.45
HY-38	51.95	150.48	340.26	32.11	19.56	29.98	128.13	1.03	10.79	12.91	13.91	8.40	4.81	11.66	24.46	3.82	54.00
HY-40	41.34	127.31	311.53	31.93	20.78	28.61	109.36	0.67	26.79	6.74	27.51	6.38	1.54	18.90	11.32	5.00	56.45
HY-41	32.83	98.26	230.79	29.76	15.25	23.78	89.44	0.45	3.84	3.14	7.39	2.79	8.55	31.30	31.21	10.66	49.68
HY-42	37.57	122.72	318.05	40.06	20.10	26.42	123.22	0.53	12.18	0.76	19.27	4.99	3.08	162.40	16.50	8.03	49.68
平均值					23.52	36.53	138.71	0.99					10.74	45.63	23.22	11.33	58.68
去除异常 值后平均					20.59	24.99	98.16	0.61					8.04	22.86	17.40	10.53	56.25

1)表中黑体字数据作为异常值处理

表3 中国不同流域的沉积物-水相平衡分配系数 $K_p/L \cdot g^{-1}$

Table 3 The K_p in different basins of China/ $L \cdot g^{-1}$

流域	K_p -Cu	K_p -Pb	K_p -Zn	K_p -Cd
湘江衡阳段	8.04	22.86	17.40	10.53
辽河 ^[35]	2.36	4.06	0.90	1.88
乌江 ^[36]	19.95	79.43	19.95	15.85
岷江 ^[36]	79.43	39.81	25.12	12.59
嘉陵江 ^[36]	15.85	125.89	10.00	63.10
汉江 ^[36]	3.98	31.62	12.59	50.12
鄱阳湖 ^[36]	31.62	100	10	63.1
太湖 ^[35]	3.58	4.43	1.19	2.62
滇池 ^[37]	2.46	5.72	5.33	1.48

3.4 湘江衡阳段水质基准值(WQC)的确定

美国《清洁水法》304(a)水生生物基准的基准连续浓度(CCC)表示持续暴露在环境中不会对水生生物产生显著影响的污染物质的最大浓度. 由于我

国尚未定制关于河流重金属慢性生物毒性的水质基准,所以本研究选择 CCC 作为沉积物重金属质量基准建立方法的水质基准值,意义在于保护水生底栖生物不受沉积物中重金属慢性毒性的影响,根据表1的计算方法,结合实测得到的湘江衡阳段水质硬度(以 $CaCO_3$ 计,如表2)平均值 56.25 $\mu g \cdot L^{-1}$,计算出湘江衡阳段水质基准 WQC(依据 CCC 推算)如表4所示,此表同时列出了我国地表水环境质量标准(GB 3838-2002)Ⅰ类、Ⅱ类水质标准.

湘江衡阳段水质属于 GB 3838-2002 Ⅲ类水质,但 GB 3838-2002 Ⅱ类水质标准作为建立沉积物重金属质量基准的 WQC 值相比美国 CCC 和 GB 3838-2002 Ⅰ类标准推算的 WQC 显然过高,所以本研究选择依据美国 CCC 计算和 GB 3838-2002 Ⅰ类水质

标准作为沉积物质量基准建立方法的水质基准值 WQC 进行对比分析.

表 4 湘江衡阳段水质基准 WQC/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

依据来源	WQC-Cu	WQC-Pb	WQC-Zn	WQC-Cd
美国 CCC	5.48	1.34	72.56	0.16
GB 3838-2002 I 类	10	10	50	1
GB 3838-2002 II 类	1 000	10	1 000	5

3.5 湘江衡阳段沉积物重金属质量基准值 (SQC) 的确定

按照建立沉积物重金属质量基准的公式 (4), 选用基于实测计算得到沉积物-水相平衡分配系数 K_p 值 (去除异常值后的平均值)、水质基准 WQC (分别依据美国 CCC 和 GB 3838-2002 I 类标准) 及沉积物残渣态重金属含量, 忽略 AVS 的影响, 计算湘江衡阳段沉积物重金属质量基准 (SQC), 结果如表 5 所示.

对比本研究依据美国 CCC 和 GB 3838-2002 I 类标准建立的两种湘江衡阳段沉积物重金属质量基准 (如表 5), 除了 Zn 以外, 依据美国 CCC 建立的 Cu、Pb、Cd 的 SQC 值均小于依据 GB 3838-2002 I 类标准建立的 SQC 值. 出现该结果的直接原因是水质基准值差异所导致, 从表 4 可以看出, 除了 Zn 以外, 依据美国 CCC 计算得到 Cu、Pb、Cd 的 WQC 值均小于 GB 3838-2002 I 类水质标准.

对比本研究 and 方涛等^[32]研究的同为湘江水系的沉积物质量基准 (如表 5), 本研究建立的湘江衡阳段沉积物 Cu、Pb 质量基准与方涛等研究结果具有一定的可比性, 但略低, Zn 相比其较大, Cd 相比

其较小, 沉积物-水相平衡分配系数 K_p 值是产生上述差异的原因. 这说明对于相同水系, 由于受到环境及沉积物自身性质等多种因素的影响, 不同时间、不同采样地点 K_p 值会随之发生变化. 关于沉积物中 K_p 值的研究目前还没有统一结论, 所以需要进行深入研究.

对比本研究建立的湘江衡阳段沉积物重金属质量基准与国内研究结果 (如表 5), 我国不同流域沉积物重金属质量基准差异较大, 但是基于美国 CCC 建立的湘江衡阳段沉积物 Cu、Pb、Cd 质量基准与香港临时沉积物质量基准值^[38]相近, 具有较好的可比性. Zn 的 SQC 值相比长江水系 (嘉陵江、汉江)、辽河、鄱阳湖、太湖、滇池、香港临时沉积物重金属质量基准值较大, 一方面是因为依据美国 CCC 计算得到 Zn 的水质基准值较大, 另一方面是湘江当地 Zn 矿物质的背景元素值较高而使沉积物残渣态 Zn 含量较高. Cd 的 SQC 值相比辽河、鄱阳湖、太湖、滇池沉积物重金属基准值较小, 原因是计算得到的 Cd 的水质基准值较小及沉积物残渣态 Cd 含量低.

对比本研究建立的湘江衡阳段沉积物重金属质量基准与国外研究结果 (如表 5), 国外的沉积物重金属最低效应水平 LEL、效应范围低值 ERL、可能效应水平 PEL、效应范围中值 ERM 是在生物毒理学实验的基础上制定的, 而本研究建立的湘江衡阳段沉积物重金属质量基准未进行生物毒理学实验修正, 但两者对比发现基于美国 CCC 建立的湘江衡阳段沉积物 Cu、Pb、Cd 的 SQC 值均高于最低效应水平 LEL、效应范围低值 ERL, 而均低于可能效应水平 PEL、效应范围中值 ERM, 这说明根据相平衡分

表 5 湘江衡阳段与其它流域的沉积物重金属质量基准 (SQC) 比较/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

流域	WQC 依据来源	SQC-Cu	SQC-Pb	SQC-Zn	SQC-Cd
湘江衡阳段	美国 CCC	64.62	55.57	1 360.40	2.34
湘江衡阳段	GB 3838-2002 I 类	100.97	253.54	968.01	11.14
辽河 ^[35]	美国 CCC	52.8	18.9	177.7	5.42
嘉陵江水系 ^[36]	美国 CCC	196.00	405.00	494.00	68.00
汉江水系 ^[36]	美国 CCC	62	112	640	55
嘉陵江水系 ^[36]	GB 3838-2002 II、III 类	27	14	42	0.345
汉江水系 ^[36]	GB 3838-2002 II、III 类	18	9	61	0.331
鄱阳湖 ^[36]	GB 3838-2002 II、III 类	46	18	64	0.333
滇池 ^[37]	GB 3838-2002 III 类	54.9	67.8	106.4	5.56
太湖 ^[35]	美国 CCC	55.3	20.6	6.42	6.42
湘江水系 ^[32]	美国 CCC、GB 3838-2002 I 类	96.9	88	683	54
香港临时沉积物质量基准 ISQG-low ^[38]		65	75	200	1.5
最低效应水平 LEL ^[39]		16	31	120	0.6
可能效应水平 PEL ^[40]		108	112	271	4.2
效应范围低值 ERL ^[41]		34	46.7	150	1.2
效应范围中值 ERM ^[42]		270	218	410	9.6

配法建立的沉积物重金属质量基准与生物响应建立的沉积物重金属质量基准之间具有一定的可比性。总体而言,由于特定区域沉积物污染程度差异、沉积物自身地球化学性质差异、保护水生生物不受沉积物重金属慢性毒性影响的水质基准差异、沉积物中重金属生物有效性和毒性因素的复杂性等原因,相平衡法建立的湘江衡阳段沉积物重金属质量基准值可能并不是非常精确,但其可为我国流域水环境质量基准、标准管理工作提供相对可靠的理论数据,具有较强的参考性。

3.6 湘江衡阳段沉积物质量评价

通过将美国保护水生生物淡水水质基准 CCC 和我国地表水环境质量标准 GB 3838-2002 I 类水质标准建立的两种湘江衡阳段沉积物重金属质量基准进行比较,结果显示基于美国 CCC 的沉积物重金属质量基准值相对较小,并且与国内外 SQC 研究成果具有较好的比较性,所以本研究选择基于美国 CCC 建立的沉积物重金属质量基准对采集到湘江衡阳段表层沉积物的 29 个站点进行简单沉积物质量评价。评价方法采用单因子评价法,通过每个站点的沉积物中各种重金属总量与建立的湘江衡阳段 SQC(基于美国 CCC)的比值,即此站点沉积物重金属总量的污染倍数,判定水生底栖生物长期生活在湘江底质环境中,其沉积物重金属含量水平对其是否具有重金属生物慢性毒性的影响,评价结果如图 4 所示。

从湘江衡阳段沉积物中各种重金属总量与基于美国 CCC 建立的湘江衡阳段 SQC 比值(图 4)可以看出:①对于 Cu,湘江衡阳段上游站点(HY-1~HY-12)沉积物中 Cu 污染倍数小于 1,中下游站点(HY-

12~HY-42)沉积物中 Cu 污染倍数大部分位于 1~8.35 之间,其中在 HY-19 补站点达到最大污染倍数 8.35,说明湘江衡阳段中下游站点沉积物中 Cu 含量水平可能对长期生活的底栖生物造成慢性毒性影响;②对于 Pb,湘江衡阳段上游站点(HY-1~HY-12)沉积物中 Pb 污染倍数在 0.74~1.53 之间,中下游站点(HY-12~HY-42)沉积物中 Pb 污染倍数位于 1.32~46.24 之间,其中在 HY-19 补站点达到最大污染倍数 46.24,说明湘江衡阳段中下游站点沉积物中 Pb 含量水平对长期生活的底栖生物具有慢性毒性影响;③对于 Zn,除了 HY-19 补站点(Zn 污染倍数为 3.27)外,湘江衡阳段其余站点的 Zn 污染倍数均小于 1,说明湘江衡阳段沉积物中 Zn 含量水平基本不对长期生活的底栖生物造成慢性毒性影响;④对于 Cd,湘江衡阳段上游站点(HY-1~HY-12)沉积物中 Cd 污染倍数在 1.32~3.55 之间,湘江衡阳段中下游站点(HY-12~HY-42)沉积物中 Cd 污染倍数在 1.95~78.66 之间,中下游站点 Cd 的污染倍数普遍大于上游站点,并在 HY-19 补站点达到最大值 78.66,说明湘江衡阳段沉积物中 Cd 含量水平对长期生活的底栖生物具有严重的慢性毒性影响。

值得注意的是,湘江衡阳段 HY-19 补站点位于水口山工业区,其沉积物 Cu、Pb、Zn、Cd 污染倍数均远远高于 1,此站点沉积物重金属含量水平会对底栖生物造成严重的慢性毒性影响,甚至具有急性毒性影响风险,建议加强对此区域的污染控制工作。总体而言,湘江衡阳段沉积物 Pb 和 Cd 的污染应当引起重视,其含量水平对底栖生物具有较大的慢性毒性影响。

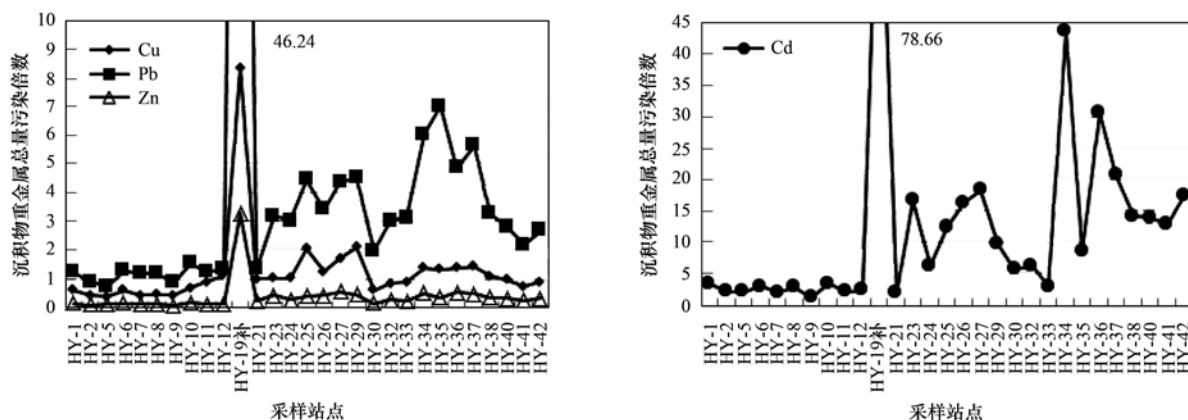


图 4 湘江衡阳段沉积物质量评价结果

Fig. 4 Sediment quality assessment in Hengyang sections of Xiangjiang River

4 结论

(1) 本研究基于相平衡分配法, 通过实测值得到沉积物-水相平衡分配系数 K_p 值, 分别采用 USEPA 保护水生生物和人体健康的基准连续浓度 (CCC) 和我国地表水环境质量标准 (GB 3838-2002) I 类标准分别作为水质基准 (WQC), 建立两种湘江衡阳段沉积物重金属质量基准。通过与国内外相关研究成果比对, 基于美国 CCC 建立的沉积物重金属质量基准 (SQC) 的可比性较好, 其 SQC 值为: Cu $64.62 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; Pb $55.57 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; Zn $1360.60 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; Cd $2.34 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

(2) 本研究采用单因子评价法, 通过沉积物重金属总量与基于美国 CCC 建立的 SQC 的比值 (污染倍数) 简单对湘江衡阳段进行沉积物质量评价, 评价结果显示: 湘江衡阳段沉积物 Pb 和 Cd 含量水平对底栖生物具有较大的慢性毒性影响, 其中 Cd 污染应当引起重视; 湘江衡阳段中下游沉积物重金属污染明显大于上游, 这与沿岸的工业活动关系密切, 应对 HY-19 补站点附近的水口山工业区加强污染控制工作。

(3) 湘江衡阳段 Cd 的主要赋存形态为醋酸可提取态 (79.28%), Pb 以可还原态占主要赋存形态 (65.99%), Zn 的醋酸可提取态和残渣态所占质量分数分别为 46.89% 和 28.67%, 说明湘江衡阳段沉积物中 Cd 具有极大的直接生态危害性, Zn 具有一定的直接生态危害性, Pb 具有较大的潜在生态危害性。

参考文献:

- [1] 黄延林. 水体沉积物中重金属释放动力学及试验研究[J]. 环境科学学报, 1995, 15(4): 440-446.
- [2] Adams W J, Kimele R A, Banett J W Jr. Sediment quality and aquatic life assessment [J]. Environmental Science & Technology, 1992, 26(10): 1865-1875.
- [3] 陈静生, 王飞跃. 关于水体沉积物质量基准问题[J]. 环境化学, 1992, 11(3): 60-70.
- [4] USEPA. Sediment Classification Methods Compendium [R]. September EPA 823-R-92-006.
- [5] Ankley G T, Ditoro D M, Hansen D J, et al. Technical basis and proposal for deriving sediment quality criteria for metals[J]. Environmental Toxicology & Chemistry, 1996, 15(12): 2056-2066.
- [6] 陈静生, 王立新, 洪松, 等. 各国水体沉积物重金属质量基准的差异及原因分析[J]. 环境化学, 2001, 20(5): 417-424.
- [7] 唐文清, 刘利, 冯泳兰, 等. 河流底泥重金属污染现状分析及评价——以湘江衡阳段为例[J]. 衡阳师范学院学报, 2008, 29(6): 55-59.
- [8] 唐文清, 曾荣英, 冯泳兰, 等. 湘江 (衡阳段) 河流沉积物中重金属潜在生态风险评价[J]. 环境监测管理与技术, 2008, 20(5): 25-27.
- [9] 刘文新, 李向东. 深圳湾水域中重金属在不同相间的分布特征[J]. 环境科学学报, 2002, 22(3): 305-309.
- [10] 雷鸣, 秦普丰, 铁柏清. 湖南湘江流域重金属污染的现状与分析[J]. 农业环境与发展, 2010, (2): 62-65.
- [11] 邱丽君, 杨喆. 湘江衡阳段底泥重金属沉积现状分析[J]. 科技资讯, 2008, (8): 166-168.
- [12] Rauret G, F López-Sánchez J, Sahuquillo A, et al. Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials[J]. Journal of Environmental Monitoring, 1999, 1(1): 57-61.
- [13] Davidson C M, Thomas R P, McVey S E, et al. Evaluation of a sequential extraction procedure for the speciation of heavy metals in sediments[J]. Analytica Chimica Acta, 1994, 291(3): 277-286.
- [14] Quevauviller P, Rauret G, López-Sánchez J F, et al. Certification of trace metal extractable contents in a sediment reference material (CRM 601) following a three-step sequential extraction procedure [J]. Science of the Total Environment, 1997, 205(2-3): 223-234.
- [15] Umoren I, Udoh A P, Udousoro I I, et al. Concentration and chemical speciation for the determination of Cu, Zn, Ni, Pb and Cd from refuse dump soils using the optimized BCR sequential extraction procedure[J]. The Environmentalist, 2007, 27(2): 241-252.
- [16] Van der Kooij L A, Van de Meent D, Van Leeuwen C J, et al. Deriving quality criteria for water and sediment from the results of aquatic toxicity tests and product standards: application of the equilibrium partitioning method[J]. Water Research, 1991, 25(6): 697-705.
- [17] Webster J, Ridgway I. The application of the equilibrium partitioning approach for establishing sediment quality criteria at two UK sea disposal and outfall sites [J]. Marine Pollution Bulletin, 1994, 28(11): 653-661.
- [18] 陈云增, 杨浩, 张振克, 等. 水体沉积物环境质量基准建立方法研究进展[J]. 地球科学进展, 2006, 21(1): 53-61.
- [19] USEPA. Briefing report to the EPA Science Advisory Board on the equilibrium partitioning approach to generating sediment quality criteria [R]. Washington DC: EPA2440252892002, 1989.
- [20] NOAA. The utility of AVS/EqP in hazardous waste site evaluations[R]. Washington: NOSORCA 87, Seattle, 1995.
- [21] 孟伟, 张远, 郑丙辉. 水环境质量基准、标准与流域水污染物总量控制策略[J]. 环境科学研究, 2006, 19(3): 1-6.
- [22] USEPA. Office of Water of Science and Technology, Draft implementation framework for the use of equilibrium partitioning sediment quality guideline[R]. Washington DC: 2000, 4-17.
- [23] Burton G A Jr. Sediment Sampling and Analysis Plan-West Branch Grand Calumet River 1993 Sediment Toxicity Test Data Summaries[R]. USEPA: 1993.

- [24] Chapman P M, Wang F Y, Adams W J, *et al.* Appropriate applications of sediment quality values for metals and metalloids [J]. *Environmental Science and Technology*, 1999, **33** (22): 3937-3941.
- [25] Hansen D J, Berry W J, Mahony J D, *et al.* Predicting the toxicity of metal-contaminated field sediments using interstitial concentration of metals and acid-volatile sulfide normalizations [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1996, **15** (12): 2080-2094.
- [26] Leonard E N, Ankley G T, Hoke R A. Evaluation of metals in marine and freshwater surficial sediments from the environmental monitoring and assessment program relative to proposed sediment quality criteria for metals [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1996, **15** (12): 2221-2232.
- [27] Pesch R E, Hansen D J, Boothman W S, *et al.* The role of acid-volatile sulfide and interstitial water metal concentrations in determining bioavailability of cadmium and nickel from contaminated sediments to the marine polychaete *Neanthes arenaceodentata* [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1995, **14** (1): 129-141.
- [28] 马德毅, 王菊英, 闫启仑, 等. 酸溶硫化物 (AVS) 对沉积物-孔隙水系统中二价有毒金属化学活动性的影响 [J]. *海洋学报*, 1997, **19** (5): 83-90.
- [29] USEPA. National recommended water quality criteria correction [R]. Washington DC: USEPA, 1999.
- [30] USEPA. National recommended water quality criteria [R]. EPA 822-R-02-047, 2002.
- [31] 夏青, 陈艳卿, 刘宪兵. 水质基准与水质标准 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2004. 112-133.
- [32] 方涛, 徐小清. 应用平衡分配法建立长江水系沉积物金属相对质量基准 [J]. *长江流域资源与环境*, 2007, **16** (4): 525-531.
- [33] 陈静生, 周家义. 中国水环境重金属研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1992. 223-234.
- [34] 王鸣宇, 张雷, 秦延文, 等. 湘江表层沉积物重金属的赋存形态及其环境影响因子分析 [J]. *环境科学学报*, 2011, **31** (11): 2447-2458.
- [35] 邓保乐, 祝凌燕, 刘慢, 等. 太湖和辽河沉积物重金属质量基准及生态风险评估 [J]. *环境科学研究*, 2011, **24** (1): 33-42.
- [36] 霍文毅, 陈静生. 我国部分河流重金属水-固分配系数及在河流质量基准研究中的应用 [J]. *环境科学*, 1997, **18** (4): 10-13.
- [37] 陈云增, 杨浩, 张振克, 等. 相平衡分配法在滇池沉积物环境质量评价中的应用研究 [J]. *环境科学学报*, 2006, **26** (9): 1545-1552.
- [38] Chapman P M, Allard P J, Vigers G A. Development of sediment quality values for Hong Kong special administrative region: a possible model for other jurisdictions [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1999, **38** (3): 161-169.
- [39] Macdonald D D, Ingersoll C G, Berger T A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, **39** (1): 20-31.
- [40] Macdonald D D. Approach to the assessment of sediment quality in Florida Coastal Waters [R]. Florida: Florida Department of Environmental Protection office of Water Policy, 1994.
- [41] NOAA. NOAA screening quick reference tables (SQuiRT) Coastal Protection and Restoration Division [R]. Washington DC: NOAA, 1999. 9-12.
- [42] Mccready S, Birch G F, Long E R, *et al.* An evaluation of Australian sediment quality guidelines [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2006, **50** (3): 306-315.

CONTENTS

Advances in Peroxide-Based Decontaminating Technologies	XI Hai-ling, ZHAO San-ping, ZHOU Wen (1645)
Environmental Damage Assessment; International Regulations and Revelation to China	ZHANG Hong-zhen, CAO Dong, YU Fang, <i>et al.</i> (1653)
Human Health Risk-Based Environmental Criteria for Soil: A Comparative Study Between Countries and Implication for China	XU Meng, YAN Zeng-guang, HE Meng-meng, <i>et al.</i> (1667)
Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective	ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun (1679)
Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China	DIAO Xiao-jun, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (1687)
Current Status of Surface Water Acidification in Northeast China	XU Guang-yi, KANG Rong-hua, LUO Yao, <i>et al.</i> (1695)
Impact Analysis of Xi'an to the Water Quality of Weihe River	YU Jie, LI Huai-en (1700)
Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011	YE Feng, HUANG Xiao-ping, SHI Zhen, <i>et al.</i> (1707)
Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River	HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (1715)
Assessing the Benthic Ecological Status in Yangtze River Estuary Using AMBI and M-AMBI	CAI Wen-qian, MENG Wei, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (1725)
Pollution Load and the First Flush Effect of BOD ₅ and COD in Urban Runoff of Wenzhou City	WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1735)
Influencing Factors in Measuring Absorption Coefficient of Suspended Particulate Matters	YU Xiao-long, SHEN Fang, ZHANG Jin-fang (1745)
Relationship Between pCO ₂ and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring	YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, <i>et al.</i> (1754)
Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment	LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, <i>et al.</i> (1761)
Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate	MA Xiao-yan, ZHANG Ze-hua, WANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1767)
Catalyzed Oxidation of Catechol by the Heterogeneous Fenton-like Reaction of Nano-Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ System	HE Jie, YANG Xiao-fang, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1773)
Photodegradation of Naproxen in Aqueous Systems by UV Irradiation: Mechanism and Toxicity of Photolysis Products	MA Du-juan, LIU Guo-guang, LÜ Wen-ying, <i>et al.</i> (1782)
Catalytic Ozonation of Nitrobenzene in Water by Acidification-activated Red Mud	KANG Ya-ning, LI Hua-nan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1790)
Experimental Studies on Stability of Floes from Cadmium Pollution Emergency Treatment	LIU Wang-rong, GUO Qing-wei, YANG Ren-bin, <i>et al.</i> (1797)
Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring	JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, <i>et al.</i> (1802)
Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors	WAN Jin-quan, HU Meng-die, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (1808)
Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, YING Shi-ying, <i>et al.</i> (1815)
Membrane Fouling by Secondary Effluent of Urban Sewage and the Membrane Properties	MENG Xiao-rong, ZHANG Hai-zhen, WANG Lei, <i>et al.</i> (1822)
Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A ² /O-MBR Process	ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, YANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1828)
Study on Sulfur-based Autotrophic Denitrification with Different Electron Donors	YUAN Ying, ZHOU Wei-li, WANG Hui, <i>et al.</i> (1835)
Nitrogen Removal and N ₂ O Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process	LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, <i>et al.</i> (1845)
Optimization of Solid-Phase Extraction for Enrichment of Toxic Organic Compounds in Water Samples	ZHANG Ming-quan, LI Feng-min, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (1851)
Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm <i>Eisenia fetida</i>	CHEN Chun, LIU Xiao-wei, ZHENG Shun-an, <i>et al.</i> (1857)
Health Risk Assessment and Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds from Pharmaceutical Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, WANG Zhe-ming, XU Ming-zhu, <i>et al.</i> (1864)
Health Effect of Volatile Aldehyde Compounds in Photocatalytic Oxidation of Aromatics Compounds	ZHAO Wei-rong, LIAO Qiu-wen, YANG Ya-nan, <i>et al.</i> (1871)
Compositions and Distribution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in Serum of Women from Sichuan Province	SHAO Min, CHEN Yong-heng, LI Xiao-yu (1877)
QSAR/QSPR for Predicting the Toxicity of Imidazolium Ionic Liquids	ZHAO Ji-hong, ZHAO Yong-sheng, ZHANG Hong-zhong, <i>et al.</i> (1882)
Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning, <i>et al.</i> (1887)
Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia	GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1895)
Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province	ZHENG An, YANG Bing-yu, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1901)
Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites	WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, <i>et al.</i> (1908)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings	GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, <i>et al.</i> (1915)
Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China	SHI Rong-jun, HUANG Hong-hui, QI Zhan-hui, <i>et al.</i> (1922)
Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage	LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, <i>et al.</i> (1930)
Isolation of an Effective Benzo[a]pyrene Degrading Strain and Its Degradation Characteristics	CAI Han, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1937)
Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether	ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (1945)
Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics	PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, <i>et al.</i> (1951)
Correlation Between Acidic Materials and Acid Deposition in Beijing During 1997-2011	CHEN Yuan-yuan, TIAN He-zhong, YANG Dong-yan, <i>et al.</i> (1958)
Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang	SHI Chun-e, DENG Xue-liang, WU Bi-wen, <i>et al.</i> (1964)
Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer	WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, <i>et al.</i> (1973)
Pollution Characteristics of Organic Acids in Atmospheric Particles During Haze Periods in Autumn in Guangzhou	TAN Ji-hua, ZHAO Jing-ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (1982)
Characterization of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in Three Major Cities in Fujian Province, China	CHEN Yan-ting, CHEN Jin-sheng, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1988)
Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China	YUAN Ning, LIU Wei, ZHAO Xiu-liang, <i>et al.</i> (1995)
Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (2003)
Geochemical Characteristics and Sources of Atmospheric Particulates in Shanghai During Dust Storm Event	QIAN Peng, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min (2010)
Near Surface Atmospheric CO ₂ Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China	LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, <i>et al.</i> (2018)
<i>In-situ</i> Measurement of Background Atmospheric HCFC-142b Using GC-MS and GC-ECD Method	GUO Li-feng, YAO Bo, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (2025)
Airborne Fungal Community Composition in Indoor Environments in Beijing	FANG Zhi-guo, OUYANG Zhi-yun, LIU Peng, <i>et al.</i> (2031)
Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant	GUO Wei, WANG Bo-guang, TANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2038)
Superposition Impact Character of Air Pollution from Decentralization Docks in a Freshwater Port	LIU Jian-chang, LI Xing-hua, XU Hong-lei, <i>et al.</i> (2044)
Thermal Stability and Transformation Behaviors of Pb in Yima Coal	LIU Rui-qing, WANG Jun-wei (2051)
Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing	XIE Yuan-bo, LI Wei (2057)

《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)

2013年5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 15, 2013

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