

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

区域空气质量模拟中查表法的应用研究 谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮(1409)

长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用 苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健(1418)

北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究 徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋(1425)

上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究 张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红(1431)

青岛市大气PM_{2.5}元素组成及来源研究 李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军(1438)

冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究 王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅(1446)

再悬浮装置在大气PM_{2.5}源谱分析中的应用 段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲(1452)

黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究 魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵(1457)

三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探 蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静(1463)

香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析 王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰(1471)

臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响 陈书涛,张勇,胡正华,史艳娟,沈小帅(1476)

托木尔峰青冰滩72号冰川径流水化学特征初步研究 赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰(1484)

五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究 张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林(1491)

7条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律 卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷(1497)

巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性 李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠(1503)

北运河系地表水近10年来水质变化及影响因素分析 郭婧,荆红卫,李金香,李令军(1511)

东莞运河排涝对东江河水水质影响分析 孙磊,毛献忠,黄旻旻(1519)

北京平原区地下水污染源识别与危害性分级 陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮(1526)

地下水曝气修复过程的三维数值模拟 李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌(1532)

垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究 邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永(1540)

新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究 高明瑜,谢慧君,王文兴(1550)

营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响 齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋(1556)

水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究 傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成(1564)

酞酸酯在模拟海河菹草微宇宙中的消减和分布特征 迟杰,杨青(1570)

电子束辐射对铜绿微囊藻毒素产生和释放的抑制作用研究 刘书宇,吴明红,姜钦鹏(1575)

青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析 李强坤,胡亚伟,罗良国(1579)

四溴双酚A的辐照降解研究 李杰,徐殿斗,马玲玲,吴明红(1587)

污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究 王红娟,齐飞,封莉,张立秋(1591)

高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响 李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰(1597)

城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成NDMA的影响因素研究 尚晓玲,李咏梅(1604)

利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究 沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙(1609)

好氧污泥颗粒化过程中Zeta电位与EPS的变化特性 王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓娟,竺建荣(1614)

活性污泥对病毒的生物吸附特性 周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪(1621)

阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律 邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松(1625)

两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征 李婷,孟昭福,张斌(1632)

表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响 张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州(1639)

南京市4个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析 葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军(1646)

焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能 陈春,李文英,吴静文,李静(1652)

Xanthobacter flavus DT8降解二噁烷的特性研究 金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟(1657)

未开发油气田地表烃氧化菌空间定量分布 满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(1663)

矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究 赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才(1670)

长江中游干流及22条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险 李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红(1676)

典型血吸虫病区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险 吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红(1682)

闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究 陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛(1687)

三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价 王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩(1693)

典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险 邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许玫英(1700)

密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价 高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,季宏兵(1707)

湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性 杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰(1718)

基于GIS的某训练场土壤重金属污染评价 刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军(1725)

土壤质地和湿度对SVE技术修复苯污染土壤的影响 刘少卿,姜林,姚玉君,李艳霞,刘希涛,林春野(1731)

蒙脱土、高岭土和针铁矿对DNA吸附与解吸特征 王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰(1736)

LNAPL在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究 潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙(1744)

亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征 董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷(1753)

蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究 任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥(1760)

固定化微生物技术修复PAHs污染土壤的研究进展 钱林波,元妙新,陈宝梁(1767)

《环境科学》征订启事(1483) 《环境科学》征稿简则(1620) 信息(1490,1496,1586,1743)

三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价

王健康^{1,2}, 高博^{1,2*}, 周怀东^{1,2}, 陆瑾¹, 王雨春^{1,2}, 殷淑华¹, 郝红¹, 袁浩¹

(1. 中国水利水电科学研究院水环境研究所, 北京 100038; 2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 为全面了解蓄水运用期三峡库区表层沉积物中重金属含量及其潜在生态危害程度, 在三峡库区干流及支流共采集了24个沉积物样品, 测定了Cu、Pb、Zn、Cd、Ni、Cr、As和Hg的含量, 并采用地积累指数法和潜在生态风险指数法对沉积物中的重金属污染进行了评价。结果表明, 三峡库区重金属元素Cu、Pb、Zn、Cd、Ni、Cr、As和Hg的平均含量分别为: 76.03、59.40、137.63、0.75、46.81、86.31、18.07和0.109 mg·kg⁻¹, 均高于长江沉积物背景值。地积累指数法评价结果显示: 重金属元素污染程度顺序为: Cd > Pb > Cu > As > Zn > Ni > Hg > Cr。潜在生态风险指数法评价结果表明, 各重金属污染对三峡库区构成的潜在生态危害由强至弱依次为: Cd > Hg > Cu > As > Pb > Cr > Zn, 其中Cd的贡献因子最大。总体上讲, 三峡库区蓄水运用期处于轻微生态危害等级, 并未受到明显的重金属污染。

关键词: 沉积物; 重金属; 三峡库区; 地积累指数; 潜在生态风险指数

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1693-07

Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period

WANG Jian-kang^{1,2}, GAO Bo^{1,2}, ZHOU Huai-dong^{1,2}, LU Jin¹, WANG Yu-chun^{1,2}, YIN Shu-hua¹, HAO Hong¹, YUAN Hao¹

(1. Department of Water Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to investigate the heavy metals concentrations and their potential ecological risks of sediments in Three Gorges Reservoir during its impounding period, 24 sediment samples were collected from both the mainstream and tributaries for analyzing Cu, Pb, Zn, Cd, Ni, Cr, As and Hg. The index of geoaccumulation and the potential ecological risk index were then employed to evaluate the pollution degree of heavy metals in the sediments. The results indicate that the average contents of heavy metals in Three Gorges Reservoir: Cr is 86.31 mg·kg⁻¹, Ni is 46.81 mg·kg⁻¹, Cu is 76.03 mg·kg⁻¹, Zn is 137.63 mg·kg⁻¹, Cd is 0.75 mg·kg⁻¹, Pb is 59.40 mg·kg⁻¹, As is 18.07 mg·kg⁻¹, Hg is 0.109 mg·kg⁻¹, respectively. Average concentrations of heavy metals in sediments of Three Gorges Reservoir are relatively higher than those in sediment background of Yangtze River. The assessment by geoaccumulation index indicates that the pollution degree of heavy metals is: Cd > Pb > Cu > As > Zn > Ni > Hg > Cr. The assessment by potential ecological risk index show that the potential ecological risk intensity caused by heavy metals is: Cd > Hg > Cu > As > Pb > Cr > Zn, and Cd is the predominant element among them. In general, it is not significantly polluted during the impounding of Three Gorges Reservoir.

Key words: sediments; heavy metals; Three Gorges Reservoir; index of geoaccumulation; potential ecological risk index

作为我国重要的淡水资源库, 三峡水库维系着长江中下游的生态环境健康和供水安全。因此, 三峡库区蓄水后的水环境问题成为研究者关注的焦点, 而水体沉积物作为水环境中重金属元素的主要蓄积库, 可以反映河流受重金属污染的状况^[1,2], 其污染状况是全面衡量水环境质量状况的重要因素。随着水环境条件的变化, 沉积物中的重金属可能成为二次污染源再次释放到水体中, 从而威胁水体的水质安全^[3-6]。值得关注的是, 由于水库的澄清作用

及其库区消落带的出现将有可能导致库区干支流沉积物的重金属元素的富集^[7,8]。而迄今为止, 对三峡蓄水后, 特别是蓄水运用期库区流域范围内干支流沉积物中的重金属污染及其评价鲜有报道。

收稿日期: 2011-07-31; 修订日期: 2011-11-07

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07104-001); 水利部公益性行业科研专项经费项目 (200901055)

作者简介: 王健康(1987~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境污染与防治, E-mail: shuibenerban@126.com

* 通讯联系人, E-mail: gaobo@iwhr.com

三峡水库正常蓄水位为 175 m, 2008 年 11 月三峡水库首次实验性蓄水至 172 m, 库区水环境条件也随之会出现相应变化. 为全面了解这一特殊时期三峡库区沉积物重金属的污染特征及其生态环境风险, 本研究以三峡库区干流及其主要支流为研究区域, 于 2008 年 10 月期间采集了库区干支流表层沉积物样品, 分析测定了沉积物中生态环境风险较高的 Zn、Cr、Cu、Pb、Ni、As、Cd 和 Hg 等 8 种重金属元素含量及其分布特征, 并采用德国学者 Müller^[9] 提出的地积累指数法和瑞典学者 Hakanson^[10] 提出的潜在生态危害法对库区水体沉积物中重金属污染及潜在生态风险进行定量评价, 以期对三峡库区的水污染防治提供基础数据和科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集与制备

为了研究三峡水库蓄水运用期沉积物中重金属污染状况, 于 2008 年 10 月在三峡库区支流共采集表层沉积物样品 24 个. 由于三峡水库干流中上游水流速度较快和水深较深, 且中上游表层沉积物多为沙粒, 沉积物样品难以采集, 因此本研究样品主要为库区中下游干流及支流. 其中, 干流包括太平溪和官渡口, 干流断面采用左、中、右断面分别采样; 支流包括 13 条库区一级支流, 主要包括下岩寺、黄金河、汝溪河、彭溪河、汤溪河、磨刀溪、长滩河、梅溪河、草塘河、大宁河、神农溪、童庄河、香溪河. 支流采样点的布设一般选取支流河口(距干流 3 km 处)以及支流中游. 采样布点见图 1.

采用船载铅鱼对库区干支流表层沉积物(0~20 cm)进行采集, 用聚乙烯样品袋包装, 封口并标记后带回实验室. 自然风干, 剔除砾石等杂物, 混合均匀后研磨过 100 目尼龙筛, 用棕色广口玻璃瓶保存备用.

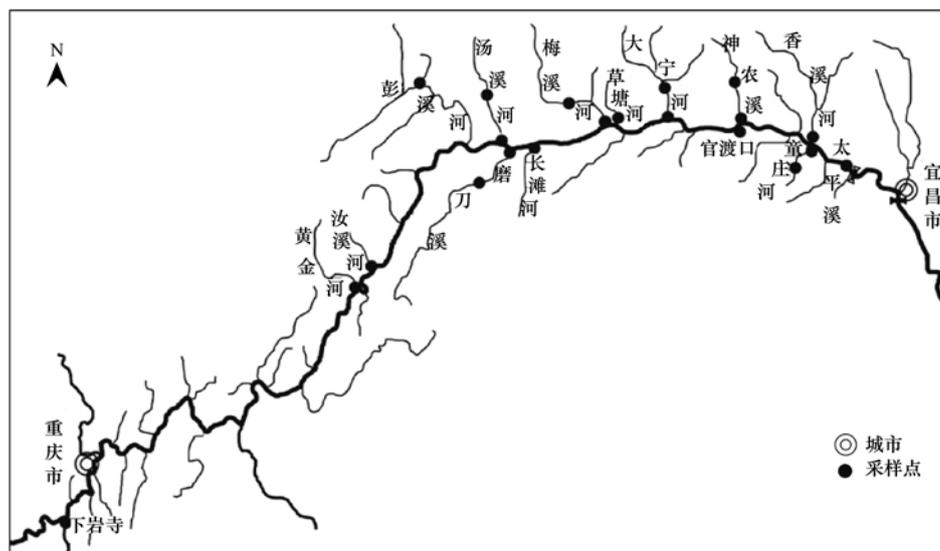


图 1 三峡库区采样示意

Fig. 1 Sampling sites for Three Gorges Reservoir

1.2 样品测试

所有实验用水由 Milli-Q 高纯水发生器制得 ($>18.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$). HCl、HNO₃ 和 HF 为微电子级 (BV-III 级, 北京化学试剂研究所). 实验过程中所用器皿均采用 20% HNO₃ 浸泡过夜, 并用高纯水冲洗干净后备用.

准确称取样品 40 mg, 置于容量为 10 mL 的聚四氟乙烯消解罐中. 然后加入 2 mL HNO₃ 和 0.2 mL H₂O₂, 超声 1 h 后在电热盘上在 60℃ 保温 24 h. 蒸干样品, 加入 2 mL 6 mol·L⁻¹ 的 HNO₃, 超声 1 h 后保温过夜, 然后加入 2 mL HF 放在电热盘上, 再于 60℃ 保温 24 h. 蒸干样品, 加入 1 mL 6 mol·L⁻¹

HNO₃ 和 1 mL HF 后, 放入高压釜中在 190℃ 消解 48 h. 此消解程序可以保证沉积物样品完全消解并得到澄清的溶液. 稀释后, 加入内标, 采用 Elan DRC-e 型 ICP-MS (美国 Perkin-Elmer 公司) 测定样品中重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cd、Ni、Cr 和 As 的含量. Hg 元素含量的测定采用 DMA-80 型固液相直接测汞仪 (意大利 Milestone 公司).

质量控制: 在分析沉积物样品的同时, 采用相同的分析程序分析了空白样品、平行样品以及沉积物标准物质 GSD-10 (GBW 07312, 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所) 测定结果在标样的保证值范围之内.

1.3 地积累指数法

地积累指数法是对水体沉积物中重金属污染评价方法中应用最广泛的方法之一。地积累指数是利用某一种重金属的总含量与地球化学背景值的关系来确定重金属污染程度的定量指标。该法比较直观地反映了外源重金属在沉积物中的富集程度, 数据具有较高的可比性。其计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left(\frac{C_i}{1.5B_i} \right)$$

表 1 地积累指数与污染程度分级

Table 1 Index of Geoaccumulation and classification of pollution degree

I_{geo}	≤ 0	0 ~ 1	1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 5	> 5
级数	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	无	无 ~ 中度	中度	中 ~ 强度	强度	强 ~ 极强	极强

1.4 潜在生态风险评价方法

对于沉积物重金属的生态危害评价, 瑞典学者 Hakanson 提出的潜在生态危害法是目前大多数学者采用的^[13~15]。该方法利用沉积物中重金属相对于工业化以前沉积物的最高背景值的比值及重金属的生物毒性系数进行加权求和得到生态危害指数。指数反映了 4 个方面的情况: ①沉积物重金属的浓度效应, 即 RI 值随重金属污染程度的加重而增加; ②多种重金属污染物的协同效应, 即沉积物中重金属的生态危害具有加和性, 多种重金属的污染具有更高的潜在生态风险; ③不同重金属的毒性效应和; ④水体对不同重金属污染物的敏感性, 即生物毒性强和敏感性大的金属具有较高的权重值。潜在生态危害指数 RI 的计算方法如下:

$$RI = \sum E_i = \sum T_i (C_s^i / C_n^i)$$

式中, C_s^i 为表层沉积物中重金属 i 的实测含量; C_n^i 为重金属 i 的参比值, 采用工业化以前沉积物中重金属的最高背景值; T_i 为重金属 i 的毒性系数, 此值反映了该种重金属的毒性水平及水体对其污染的敏感性 (Hg、Cd、As、Pb、Cu、Cr、Zn 的毒性响应参数分别为: 40、30、10、5、5、2、1); E_i 为重金属 i 的潜在生态危害系数。RI 为多种重金属潜在生态风险危害指数。潜在生态风险参数 E_i 和潜在生态风险指数 RI 值相对应的污染程度如表 2 所示。

2 结果与讨论

2.1 三峡库区沉积物重金属含量

三峡库区中下游干流及主要支流中沉积物的重金属含量测定结果见表 3。从中可见, 各元素的平均

式中, C_i 为沉积物中某一重金属的实测含量; B_i 为参比值即当地母岩中该元素的地球化学背景值, 目前各国学者对背景值的选择各不相同, 为了更好地反映库区目前重金属污染的情况, 本研究以长江水系沉积物背景值作为参比值^[11]; 常数 1.5 是考虑到造岩运动可能引起的背景值变动而取的系数。

根据 I_{geo} 值的计算结果, 重金属的污染程度共分为 7 级 (0 ~ 6 级)^[12], I_{geo} 值与污染程度的对应关系见表 1。

表 2 生态危害系数、指数与危害程度分级

Table 2 Ecological risk coefficient, risk index and classification of risk intensity

E_i	RI	生态危害程度
< 40	< 150	轻微
40 ~ 80	150 ~ 300	中等
80 ~ 160	300 ~ 600	强
160 ~ 320	≥ 600	很强
≥ 320		极强

含量: Zn 为 $137.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cr 为 $86.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cu 为 $76.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Pb 为 $59.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Ni 为 $46.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, As 为 $18.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cd 为 $0.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Hg 为 $0.109 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。各元素的重金属含量高于或略高于长江沉积物背景值^[11]。其中 Cd 元素的平均含量为其背景值的 3 倍, 说明 Cd 元素存在外源汇入。沉积物样品中 Cu 和 Pb 元素浓度最大值与最小值相差较大, 其最大值为最小值的 5 倍, 而其它元素沿程变化比较平缓。重金属元素含量的相对标准偏差 (RSD) 的结果表明, Cu 和 Pb 的 RSD 较大, 说明可能存在人为因素的干扰。整个库区的重金属元素的含量大小顺序为: Zn > Cr > Cu > Pb > Ni > As > Cd > Hg, 而长江沉积物背景值重金属含量顺序为: Cr > Zn > Cu > Ni > Pb > As > Cd > Hg, 从两者的含量顺序来看, 其顺序存在一定差异, 而人为因素可能是导致这种差异的主要原因。

与库区早期的研究结果对比见表 4, 结果表明, 蓄水运用期沉积物中 As、Cd、Pb 的含量高于 1999 年^[16] 和 2001 年^[17], 说明了库区沉积物中重金属近年有增加的趋势。另外, 与消落区土壤重金属含量^[8,18] 相比, 库区沉积物中重金属元素的含量明显

表 3 三峡库区沉积物重金属含量

Table 3 Concentrations of heavy metals in the sediments of Three Gorges Reservoir

元素	最小值 /mg·kg ⁻¹	最大值 /mg·kg ⁻¹	平均值 /mg·kg ⁻¹	相对标准偏差 /%	长江沉积物背景值 ^[15] /mg·kg ⁻¹
Cr	50.76	108.35	86.31	17.424	82
Ni	26.25	57.92	46.81	19.824	33
Cu	21.62	110.32	76.03	44.169	35
Zn	58.84	189.39	137.63	30.511	78
Cd	0.27	1.17	0.75	37.205	0.25
Pb	17.99	93.02	59.40	43.980	27
As	12.18	23.01	18.07	17.457	9.6
Hg	0.047	0.158	0.109	36.767	0.08

表 4 三峡库区沉积物及消落区土壤重金属含量/mg·kg⁻¹Table 4 Concentrations of heavy metals in sediments and soil of Three Gorge Reservoir/mg·kg⁻¹

时间	类型	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
1999 年 ^[16]	沉积物	2.78	0.27	145.15	62.54	0.42	36.94	25.71	160.61
2001 年 ^[17]	沉积物	5.8	0.176	63.01	35.35	—	34.8	53.41	90.29
2005 年 ^[8]	土壤	8.65	0.321	—	37	0.059	—	29.3	72.7
2006 年 ^[18]	土壤	5.5	0.292	—	29.42	0.042	—	21.66	82.46
2007 年 ^[19]	沉积物	15.59	1.35	78.8	59.15	0.46	—	63.21	126.76
本研究	沉积物	17.457	0.75	86.31	76.03	0.109	46.81	59.40	137.63

高于其消落区土壤,而与长江水系沉积物中重金属含量相当(除汞外)^[19].分析其原因主要为:淹没土壤处于一个开放的体系,环境影响因素较为复杂.水体中的 pH、水温及上游城市排放重金属元素的输移等因素的影响,淹没后的土壤对重金属的吸附解吸变化趋势并不明显^[20].另外,虽然三峡库区周边土壤^[21]及垃圾填埋场^[22]中的重金属含量均低于库区沉积物,但是由于库区沉积物作为库区环境中重金属的汇,在雨水冲刷以及地表径流的作用下,垃圾中的部分重金属元素特别是 Cr 易于释放到库区水体中^[22].

2.2 三峡库区沉积物重金属分布特征

干流官渡口和太平溪断面采样点的重金属元素平均含量均大于支流(图 2),库区干流上游及沿岸城市工业和生活排放可能是干流重金属富集的主要原因.库区下游太平溪断面沉积物重金属元素含量均高于其上游的官渡口断面,其原因主要是因为随着库区水位的大幅提高,水体在库区的滞留时间增加,加速了库区下游水体中悬浮物的沉积,而水体中重金属因易于吸附在水体颗粒物上而被沉降下来,因此导致了下游库区沉积物中重金属浓度高于上游,这种作用也被称为“澄清作用”^[7].另外,下游库区腹地由于大部分为石灰岩,加之水位上升 172 m 调试水位之后,周围的土质岩溶解,使得重金属含量也较高,也可能是导致干流下游重金属浓度升高的

原因^[23~26].干流太平溪断面左、中和右断面的重金属元素含量相近,并未发现明显的差别.

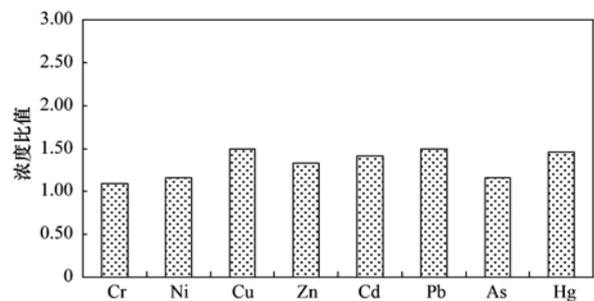


图 2 三峡库区干/支流沉积物中重金属浓度比较

Fig. 2 Comparison of heavy metal concentration ratios between mainstream and tributaries

磨刀溪、神农溪、梅溪河支流河口的重金属含量均高于支流中游的含量,其主要原因可能是在河口处,由于水动力作用的减弱及细颗粒物、有机物等的吸附沉淀作用,来自上游的重金属元素在入口处逐渐沉积,使得处于河口处重金属含量比中游的要高^[27].另外,库区沉积物中各重金属元素在 0.01 水平上彼此显著相关,说明其可能具有相似的来源(表 5).

2.3 沉积物重金属污染程度评价

2.3.1 地积累指数法

三峡库区沉积物中重金属元素的地积累指数分级计算结果见表 6.从单个重金属的 I_{geo} 来讲,三峡

表 5 三峡库区沉积物重金属元素的相关性¹⁾

Table 5 Correlation of heavy metals in sediments of Three Gorges Reservoir

	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	As	Hg
Cr	1.000	0.972 **	0.860 **	0.887 **	0.792 **	0.878 **	0.493 *	0.781 **
Ni		1.000	0.920 **	0.933 **	0.835 **	0.922 **	0.595 **	0.852 **
Cu			1.000	0.985 **	0.900 **	0.988 **	0.645 **	0.958 **
Zn				1.000	0.900 **	0.990 **	0.627 **	0.955 **
Cd					1.000	0.900 **	0.543 **	0.908 **
Pb						1.000	0.616 **	0.952 **
As							1.000	0.657 **
Hg								1.000

1) ** 表示在 0.01 水平上显著相关; * 表示在 0.05 水平上显著相关

表 6 沉积物重金属污染地积累指数 I_{geo} 及分级

Table 6 Index of geoaccumulation and classification of heavy metals pollution of the sediments

采样点	Cr		Ni		Cu		Zn		Cd		Pb		As		Hg	
	I_{geo}	级数														
童庄河	-0.4	0	0.1	1	0.9	1	0.5	1	1.3	2	1.3	2	0.3	1	0.0	0
梅溪河	-0.5	0	-0.1	0	0.3	1	0.2	1	0.7	1	0.4	1	0.0	0	-0.5	0
黄金河	-0.3	0	0.2	1	0.9	1	0.4	1	1.1	2	1.0	1	0.3	1	-0.4	0
大宁河	-0.7	0	-0.3	0	-0.5	0	-0.4	0	0.0	0	-0.5	0	0.4	1	-1.3	0
神农溪	-0.7	0	-0.2	0	0.2	1	0.0	0	0.6	1	0.0	0	0.3	1	-0.8	0
汤溪河	-0.7	0	-0.4	0	-0.9	0	-0.5	0	0.8	1	-0.8	0	-0.1	0	-1.3	0
太平溪	-0.4	0	0.1	1	1.0	1	0.6	1	1.4	2	1.0	1	0.6	1	0.0	0
草塘河	-0.3	0	0.1	1	1.1	2	0.7	1	1.6	2	1.2	2	0.5	1	0.0	0
磨刀溪	-0.8	0	-0.4	0	0.1	1	0.0	1	0.5	1	0.2	1	0.3	1	-0.7	0
下岩寺	-0.5	0	-0.1	0	0.7	1	0.3	1	0.9	1	0.6	1	0.2	0	-0.4	0
长滩河	-1.3	0	-0.9	0	-1.3	0	-1.0	0	0.0	0	-1.2	0	0.0	1	-1.6	0
澎溪河	-0.2	0	0.2	1	0.9	1	0.7	1	1.3	2	1.1	2	0.4	1	-0.1	0
官渡口	-0.5	0	-0.1	0	1.0	1	0.5	1	1.5	2	0.9	1	0.9	1	0.0	0
香溪河	-0.6	0	-0.1	0	0.8	1	0.5	1	1.3	2	0.8	1	0.7	1	0.1	1
汝溪河	-0.2	0	0.2	1	0.9	1	0.5	1	1.2	2	0.9	1	0.5	1	-0.2	0

库区沉积物中 Cd 的污染较为严重,其总体污染级别为偏中度污染,在干流以及 6 条支流采样点达到了中度污染级别($I_{geo} > 1$)。除个别采样点外, Ni、Cu、As、Zn 的污染水平基本在无~中度污染程度之间,即 I_{geo} 值为 0~1 级,是污染程度较轻的元素。所有采样点的 Cr 与 Hg 的 $I_{geo} < 0$,为无污染级别。值得注意的是,草塘河采样点 Cu、Cd 和 Pb 这 3 种元素达到中度污染程度。三峡库区各种重金属元素的污染程度由强至弱的顺序依次为: Cd > Pb > Cu > As > Zn > Ni > Hg > Cr。

2.3.2 潜在生态危害评价

经计算,三峡库区沉积物中重金属元素的潜在生态危害系数(E_i)和潜在危害综合指数(RI)如表 7 所示。

从单因子潜在危害系数 E_i 可以看出,三峡库区沉积物中 7 种重金属元素的潜在生态危害由强至弱的顺序为: Cd > Hg > Cu > Pb > As > Cr > Zn。Hg、As、Pb、Cu、Cr 和 Zn 的 E_i 均小于 40,表明这 6 种重金属

元素均为低生态危害等级。对 Cd 而言,其平均潜在危害系数 E_i 大于 40,处于中等生态危害级别,说明整个库区在一定程度上均存在中等程度 Cd 污染的潜在风险。

从综合指数 RI 值来看,三峡库区 RI 均值为 105.34,低于 150,总体处于轻微生态危害等级。其中,干流官渡口和太平溪断面接近中等生态危害等级。支流草塘河采样点由于 Cd 污染较重, RI > 150,属于中等生态危害等级。其它支流为轻微生态危害等级。

2.3.3 不同评价方法结果比较

根据地积累指数计算结果,三峡库区沉积物的重金属污染程度依次为: Cd > Pb > Cu > As > Zn > Ni > Hg > Cr,而根据潜在生态危害评价法计算的结果次序为: Cd > Hg > Cu > As > Pb > Cr > Zn。可见,2 种评价方法评价结果中 Cd 都是三峡库区的优势污染物,但这两种方法的评价结果也略有差异,主要区别在 Pb、Zn 和 Hg 这 3 种元素。参比值体系的不同和

表 7 三峡库区沉积物重金属生态危害评价指数

Table 7 Risk index of heavy metals in the sediments of Three Gorges Reservoir

采样点	E_i							RI
	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb	As	Hg	
童庄河	3.19	16.48	2.04	56.84	15.02	11.95	22.35	127.87
梅溪河	2.91	10.50	1.63	37.56	10.40	9.77	16.34	89.10
黄金河	3.41	16.59	1.99	49.14	16.08	11.64	17.28	116.12
大宁河	2.54	6.11	1.12	22.17	5.58	13.06	9.54	60.12
神农溪	2.59	10.05	1.42	33.42	8.26	11.78	13.36	80.88
汤溪河	2.44	4.82	1.00	38.61	4.75	9.15	9.24	70.01
太平溪	3.17	17.45	2.17	59.06	16.71	14.32	23.60	136.48
草塘河	3.45	19.07	2.37	70.26	18.60	13.98	22.97	150.70
磨刀溪	2.43	9.48	1.49	31.5	9.21	11.78	13.92	79.83
下岩寺	2.83	14.69	1.74	42.84	12.69	11.12	17.45	103.36
长滩河	1.69	3.60	0.74	22.02	3.60	9.76	7.35	48.76
澎溪河	3.51	16.89	2.31	57.00	17.04	12.29	20.92	129.96
官渡口	2.91	17.59	2.14	61.86	15.45	11.39	23.69	135.03
香溪河	2.74	15.15	2.00	55.32	14.56	15.34	24.38	129.49
汝溪河	3.61	16.85	2.03	49.98	15.53	13.65	20.81	122.46
均值	2.89	13.02	1.75	45.84	12.23	12.07	17.55	105.34

重金属毒性系数的差异是导致这种现象的原因^[28, 29]。地积累指数的参比值采用的是长江沉积物的背景值,而 Hakanson 生态风险指数的参比值是通过数理统计和计算得出的最高背景值。长江沉积物 Pb、Zn 的背景值要高于 Hakanson 的最高背景值,参比数值的不同会使计算结果有所不同。但 2 种评价结果存在差异的主要因素是 Pb、Zn 以及 Hg 的毒性系数有较大差别,Hg 元素的生物毒性系数达到 40,加之 RI 评价方法参比值的降低,因此其生态风险会明显上升;Pb 毒性系数为 5,而且 2 种评价方法的参比值相似,因此其生态风险水平随之上升;反之,Zn 的生物毒性系数最低($T_i = 1$),故其生态风险亦随之下降。

3 结论

(1)三峡库区中下游干流及主要支流中沉积物的重金属含量测定结果表明,各元素的平均含量:Zn 为 $137.63 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Cr 为 $86.31 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Cu 为 $76.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Pb 为 $59.40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Ni 为 $46.81 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,As 为 $18.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Cd 为 $0.75 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Hg 为 $0.109 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。各重金属含量高于长江沉积物背景值。其中 Cd 元素的平均含量为其背景值的 3 倍。

(2)干流官渡口和太平溪断面采样点的重金属元素平均含量均大于支流,支流河口的重金属含量均高于支流中游的含量。

(3)地积累指数法对三峡库区重金属的污染程度评价结果为: Cd > Pb > Cu > As > Zn > Ni > Hg > Cr,其中 Cd 接近中度污染。

(4)潜在生态危害指数法评价结果表明,三峡库区蓄水运用期重金属危害程度排序为: Cd > Hg > Cu > Pb > As > Cr > Zn, Hg、As、Pb、Cu、Cr 和 Zn 均为低生态危害等级,Cd 为处于中等生态危害等级。从综合污染程度分析,总体处于轻微生态危害等级,Cd 的影响因素应该引起重视。

参考文献:

- [1] 陈静生. 水环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.
- [2] 陈静生, 刘玉机. 中国水环境重金属研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.
- [3] 范英宏, 林春野, 何孟常, 等. 大辽河水系表层沉积物中重金属的迁移特征及生物有效性研究[J]. 环境科学, 2008, 29(12): 3469-3476.
- [4] 余光伟, 雷恒毅, 刘光立, 等. 重污染感潮河道底泥释放特征及其控制技术研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(9): 1476-1484.
- [5] 方涛, 肖邦定, 张晓华, 等. 曝气对两种不同类型沉积物中重金属释放的影响[J]. 中国环境科学, 2002, 22(4): 355-359.
- [6] 魏俊峰, 吴大清, 彭金莲, 等. 污染沉积物中重金属的释放及其动力学[J]. 生态环境, 2003, 12(2): 127-130.
- [7] 印士勇, 娄保峰, 刘辉, 等. 三峡工程蓄水运用期库区干流水质分析[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(3): 305-310.
- [8] 黎莉莉, 张晟, 刘景红, 等. 三峡库区消落区土壤重金属潜在生态危害评价[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2005, 27(4): 470-473.
- [9] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geochemical Journal, 1969, 2(3): 108-118.
- [10] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control-A sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [11] 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科

- 学出版社, 1994.
- [12] Forstner U, Ahlf W, Calmano W. Sediment quality objectives and criteria development in Germany [J]. *Water Science and Technology*, 1993, **28**(8): 307-314.
- [13] 贺志鹏, 宋金明, 张乃星, 等. 南黄海表层海水重金属的变化特征及影响因素[J]. *环境科学*, 2008, **29**(5): 1153-1162.
- [14] 王立明, 林超, 刘德文. 南水北调东线一期工程黄河以北段底泥重金属污染及其潜在生态危害评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2008, **6**(3): 5-8.
- [15] 汤莉莉, 牛生杰, 徐建国, 等. 外秦淮河疏浚后底泥重金属污染与潜在生态风险评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2008, **17**(3): 424-430.
- [16] 徐小清, 邓冠强, 惠嘉玉, 等. 长江三峡库区江段沉积物的重金属污染特征[J]. *水生生物学报*, 1999, **23**(1): 1-9.
- [17] 朱圣清, 臧小平. 长江主要城市江段重金属污染状况及特征[J]. *人民长江*, 2001, **32**(7): 23-25.
- [18] 喻菲, 张成, 张晟, 等. 三峡水库消落区土壤重金属含量及分布特征[J]. *西南农业大学学报(自然科学版)*, 2006, **28**(1): 165-169.
- [19] 周怀东, 袁浩, 王雨春, 等. 长江水系沉积物中重金属的赋存形态[J]. *环境化学*, 2008, **27**(4): 515-519.
- [20] 王图锦, 胡学斌, 吉芳英, 等. 三峡库区淹没区土壤重金属形态分布及其对水质影响[J]. *环境科学研究*, 2010, **23**(2): 158-164.
- [21] 李其林, 黄昀, 刘光德, 等. 三峡库区主要土壤类型重金属含量及特征[J]. *土壤学报*, 2004, **41**(2): 301-304.
- [22] 王里奥, 岳建华, 黄川, 等. 三峡库区堆存生活垃圾重金属含量特征[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(2): 246-251.
- [23] 裴廷权, 王里奥, 韩勇, 等. 三峡库区消落带土壤剖面中重金属分布特征[J]. *环境科学研究*, 2008, **21**(5): 72-78.
- [24] 周谐, 郑坚, 张晟, 等. 三峡库区重庆段淹没区土壤重金属分布及评价[J]. *中国环境监测*, 2006, **22**(6): 86-88.
- [25] 李强, 张芹, 刘宏立, 等. 三峡库区重庆段淹没区土壤重金属背景调查[J]. *微量元素与健康研究*, 2007, **24**(4): 34-36.
- [26] 许书军, 魏世强, 谢德体. 三峡库区耕地重金属分布特征初步研究[J]. *水土保持学报*, 2003, **17**(4): 64-66.
- [27] 刘恩峰, 沈吉, 杨丽原, 等. 南四湖及主要入湖河流表层沉积物重金属形态组成及污染研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(6): 1377-1382.
- [28] 丁振华, 贾洪武, 刘彩娥, 等. 黄浦江沉积物重金属的污染及评价[J]. *环境科学与技术*, 2006, **29**(2): 64-66.
- [29] 许振成, 杨晓云, 温勇, 等. 北江中上游底泥重金属污染及其潜在生态危害评价[J]. *环境科学*, 2009, **30**(11): 3263-3268.

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment	XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, <i>et al.</i> (1409)
Applications of Pollutants Released from Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model	SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (1418)
Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities	XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (1425)
Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity	ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, <i>et al.</i> (1431)
Element Compositions and Source of PM _{2.5} Aerosols in Qingdao	LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, <i>et al.</i> (1438)
Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter	WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, <i>et al.</i> (1446)
Application of a Resuspension Test Chamber in PM _{2.5} Source Profile Analysis	DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1452)
Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou	WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (1457)
Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, <i>et al.</i> (1463)
Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors	WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, <i>et al.</i> (1471)
Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland	CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1476)
Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qingbingtan, Tomur Peak	ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, <i>et al.</i> (1484)
Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorous in Wudalianchi Lake, China	ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (1491)
Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake	LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (1497)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiwuli Stream in Lake Chaohu	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, <i>et al.</i> (1503)
Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years	GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, <i>et al.</i> (1511)
Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage	SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)
Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (1526)
3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process	LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, <i>et al.</i> (1532)
Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers	ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, <i>et al.</i> (1540)
Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid	GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)
Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of <i>Nostoc flagelliforme</i>	QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1556)
Inhibitory Effects of Liquor Cultured with <i>Hydrodictyon reticulatum</i> on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i>	FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, <i>et al.</i> (1564)
Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in <i>Potamogeton crispus</i> L. Microcosm of Haihe River	CHI Jie, YANG Qing (1570)
Control and Removal of Microcystin Production of <i>Microcystis aeruginosa</i> by Irradiation of Electron Beam	LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)
Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)
Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis	LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, <i>et al.</i> (1587)
Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob	WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, <i>et al.</i> (1591)
Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland	LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, <i>et al.</i> (1597)
Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage	SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)
Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source	SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, <i>et al.</i> (1609)
Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge	WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, <i>et al.</i> (1614)
Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge	ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, <i>et al.</i> (1621)
Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes	DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1625)
Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics	LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)
Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon	ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, <i>et al.</i> (1639)
Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis	GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, <i>et al.</i> (1646)
Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment	CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, <i>et al.</i> (1652)
Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by <i>Xanthobacter flavus</i> DTS	JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (1657)
Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (1663)
Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse	ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, <i>et al.</i> (1670)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1676)
Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1682)
Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City	CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1687)
Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period	WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1693)
Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone	DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, <i>et al.</i> (1700)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream	GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, <i>et al.</i> (1707)
Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (1718)
Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS	LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, <i>et al.</i> (1725)
Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene	LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, <i>et al.</i> (1731)
Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite	WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (1736)
LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method	PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (1744)
Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis	DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, <i>et al.</i> (1753)
Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor	REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (1760)
Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique	QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《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)

2012年5月15日 33卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 5 May 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行