

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第2期

Vol.33 No.2

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

基于人体健康风险的水污染事件污染物安全阈值研究	郑丙辉, 罗锦洪, 付青, 秦延文, 胡林林 (337)
基于人体健康风险的水污染事件遗传性致癌物安全浓度研究	罗锦洪, 郑丙辉, 付青, 黄民生 (342)
湿地水环境健康评价方法及案例分析	李玉凤, 刘红玉, 郝敬锋, 郑因, 曹晓 (346)
北运河下游典型河网区水体中氮磷分布与富营养化评价	单保庆, 菅宇翔, 唐文忠, 张洪 (352)
漳卫南运河流域水质时空变化特征及其污染源识别	徐华山, 徐宗学, 唐芳芳, 于伟东, 程燕平 (359)
黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用	安乐生, 赵全升, 叶思源, 刘贯群, 丁喜桂 (370)
沉积物扰动持续时间对悬浮物中磷形态数量分布的影响	李大鹏, 黄勇, 李勇, 潘杨 (379)
沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响	王立志, 王国祥, 俞振飞, 周贝贝, 陈秋敏, 李振国 (385)
长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价	卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 黄国忠, 胡文 (393)
洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究	张文斌, 余辉 (399)
降雨对农家堆肥氮磷流失的影响及其面源污染风险分析	彭莉, 王莉玮, 杨志敏, 陈玉成, 乔俊婧, 赵中金 (407)
浅水湖泊水动力过程对藻型湖区水体生物光学特性的影响	刘笑菡, 冯龙庆, 张运林, 赵林林, 朱梦圆, 时志强, 殷燕, 丁艳青 (412)
基于半分析模型的太湖春季水体漫衰减系数 K_d (490) 估算及其遥感反演	刘忠华, 李云梅, 李瑞云, 吕恒, 檀静, 郭宇龙 (421)
基于 QAA 算法的巢湖悬浮物浓度反演研究	张红, 黄家柱, 李云梅, 徐伟凡, 刘忠华, 徐昕 (429)
好氧/厌氧潜流湿地结构工艺优化	李锋民, 单时, 李媛媛, 李扬, 王震宇 (436)
邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻活性氧自由基的影响	别聪聪, 李锋民, 李媛媛, 王震宇 (442)
Rac-及 S-异丙甲草胺对 2 种微藻毒性特征影响研究	蔡卫丹, 刘惠君, 方治国 (448)
羟基自由基致死船舶压载水海洋有害生物研究	白敏冬, 张拿慧, 张芝涛, 陈操, 孟祥盈 (454)
天然菱铁矿改性及强化除砷研究	赵凯, 郭华明, 李媛, 任燕 (459)
零价铁降解 4-氯硝基苯动力学研究	廖娣劫, 杨琦, 李俊鎔 (469)
水体中氧氟沙星的光化学降解研究	邵萌, 杨桂朋, 张洪海 (476)
阿替洛尔在硝酸根溶液中的光降解研究	季跃飞, 曾超, 孟翠, 杨曦, 高士祥 (481)
吡啶在紫外光辐射下的生物降解	方苗苗, 阎宁, 张永明 (488)
蜜环菌漆酶对蒽醌类染料的脱色条件优化	朱显峰, 秦仁炳, 余晨晨, 范书军 (495)
ϵ -聚赖氨酸生产废菌体对六价铬吸附影响的研究	曹玉娟, 张杨, 夏军, 徐虹, 冯小海 (499)
丝状菌污泥致密过程的强化条件研究	李志华, 孙玮, 姬晓琴, 王晓昌 (505)
亚硝化颗粒污泥对温度变化的响应特性研究	罗远玲, 杨朝晖, 徐峥勇, 周玲君, 黄兢, 肖勇, 曾光明, 汪理科 (511)
我国典型工程机械燃油消耗量及排放清单研究	李东玲, 吴烨, 周昱, 杜让, 傅立新 (518)
北京市 PM_{10} 自动监测网络优化研究	齐玲, 赵越, 谢绍东 (525)
道路绿化带对街道峡谷内污染物扩散的影响研究	徐伟嘉, 幸鸿, 余志 (532)
Fe^{II} (EDTA) 络合协同 RDB 去除 NO 废气效能及过程分析	陈浚, 杨宣, 於建明, 蒋轶锋, 陈建孟 (539)
UV-B 辐射对亚热带森林凋落叶氮、磷元素释放的影响	宋新章, 张慧玲, 江洪, 余树全 (545)
干热河谷林地燥红土固碳特征及“新固定”碳表观稳定性	唐国勇, 李昆, 孙永玉, 张春华 (551)
九龙江河口表层水体及沉积物中甲烷的分布和环境控制因素研究	郭莹莹, 陈坚, 尹希杰, 孙治雷, 邵长伟 (558)
秋季黄河口滨岸潮滩湿地系统 CH_4 通量特征及影响因素研究	姜欢欢, 孙志高, 王玲玲, 牟晓杰, 孙万龙, 宋红丽, 孙文广 (565)
我国典型非木浆造纸二噁英排放研究	王志芳, 丁琼, 王开祥, 吴昌敏, 曲云欢, 赵晓冬 (574)
典型电器工业区河涌沉积物中的多溴联苯醚空间和垂直分布	邱孟德, 邓代永, 余乐洹, 孙国萍, 麦碧娴, 许玫英 (580)
电子废物拆解区农业土壤中多氯联苯的污染特征	王学彤, 李元成, 张媛, 缪绎, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (587)
北京科教园区绿地土壤中多环芳烃的残留特征与潜在风险	彭驰, 王美娥, 欧阳志云, 焦文涛, 陈卫平 (592)
上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价	柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 庄腾飞, 施振香, 卢小遮 (599)
海河流域北部地区河流沉积物重金属的生态风险评价	尚林源, 孙然好, 王赵明, 汲玉河, 陈利顶 (606)
三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价	王业春, 雷波, 杨三明, 张晟 (612)
超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中细菌群落结构分析	叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝健, 蔡明山, 许燕滨, 占星星 (618)
大庆聚驱后油藏内源微生物群落结构解析与分布特征研究	赵玲侠, 高配科, 曹美娜, 高梦黎, 李国强, 朱旭东, 马挺 (625)
不同碳源刺激对老化污染土壤中 PAHs 降解研究	尹春芹, 蒋新, 王芳, 王聪颖 (633)
应用电致化学发光分子探针技术对微小原甲藻的检测	朱霞, 甄毓, 米铁柱, 于志刚, 池振明, 路兴岚 (640)
软骨藻酸直接竞争 ELISA 方法的建立及优化	王茜, 程金平, 高利利, 董宇, 席磊 (647)
固相萃取-高效液相色谱法同时测定水体中的 10 种磺胺类抗生素	洪蕾洁, 石璐, 张亚雷, 周雪飞, 朱洪光, 林双双 (652)
五氯酚对 HeLa 细胞毒性及 DNA 损伤的研究	金帮明, 王辅明, 熊力, 张晓峰, 刘堰 (658)
建筑陶瓷碳计量与优化模型研究	彭军霞, 赵宇波, 焦丽华, 曾路, 郑为民 (665)
《环境科学》征订启事 (447)	
《环境科学》征稿简则 (475)	
信息 (524, 586, 605, 624)	

三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价

王业春, 雷波, 杨三明, 张晟*

(重庆环境科学研究院, 重庆 401147)

摘要: 为揭示三峡水库连续2 a(2008年和2009年)175 m 试验性蓄水对库区消落带土壤重金属的影响, 选择了库区腹地忠县境内的3个地质地貌特征、土地利用历史等相似消落带。采集了不同高程(160 m和170 m)和土壤层(0~10 cm和10~20 cm)36个土壤样品, 用X射线荧光光谱法测定了As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn共7种重金属含量, 并对其污染现状和潜在生态风险程度进行了评价。结果表明, 尽管160 m和170 m 高程淹水时间差异较大(244 d), 但土壤重金属含量并没有显著差异; 重金属相关分析显示Cd相对独立, 而其它重金属大都存在着显著或极显著的正相关关系; 地累积指数(geoaccumulation index, I_{geo})表明重金属污染程度顺序依次为: As > Cd > Cu > Ni > Zn = Pb > Cr, 其中As、Cd和Cu地累积指数(I_{geo})分别为0.45、0.39和0.06, 属轻度污染, 其它重金属为无污染; Håkanson潜在生态风险指数(E_i)表明重金属潜在生态风险顺序为: Cd > As > Cu > Pb > Ni > Cr > Zn, 其中Cd的潜在生态风险指数(E_i)为59.10, 危害风险达中度, 其余重金属风险均为较轻。因此污染评价方法指出了该区域消落带土壤的主要污染或存在潜在生态危害的重金属元素为As、Cd和Cu。

关键词: 三峡库区; 消落带; 水位高程; 重金属; 污染评价

中图分类号: X131.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)02-0612-06

Concentrations and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals at Different Water-level Altitudes in the Draw-down Areas of the Three Gorges Reservoir

WANG Ye-chun, LEI Bo, YANG San-ming, ZHANG Sheng

(Chongqing Academy of Environmental Science, Chongqing 401147, China)

Abstract: To investigate the effect of 175 m trial impounding (2008 and 2009) of the Three Gorges Reservoir on soil heavy metals, three draw-down areas with similar geological environment and history of land-use in Zhongxian County were chosen. Altogether 36 surface soil samples (including 0-10 cm and 10-20 cm soil layer) from water-level altitude of 160 m and 170 m were obtained, and their heavy metals concentrations (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn) were measured by the X-ray fluorescence spectrometric method. Geoaccumulation index (I_{geo}) and Håkanson potential ecological risk index were applied to assess the heavy metals pollution status and potential ecological risk, respectively. Results indicated that although the inundation period of 160 m was 224 d longer than that of 170 m, significant difference in concentrations of heavy metals were not found between the two water-level altitudes. Except for Cd, most of the heavy metals highly related with each other positively. According to the geoaccumulation index, the pollution extent of the heavy metals followed the order: As > Cd > Cu > Ni > Zn = Pb > Cr. The I_{geo} value of As, Cd and Cu were 0.45, 0.39 and 0.06, respectively, indicating that the soil was only lightly polluted by these heavy metals. Håkanson single potential ecological risk index followed the order: Cd > As > Cu > Pb > Ni > Cr > Zn. Cd with E_i values of 59.10, had a medium potential for ecological risk, while As, Cr, Cu, Pb, Ni and Zn only had a light potential. Consequently, although As, Cd and Cu were the major heavy metals with potential ecological risk for surface soil pollution in the draw-down areas in Zhongxian County, the Three Gorges Reservoir.

Key words: Three Gorges Reservoir; draw-down areas; water-level altitude; heavy metals; pollution assessment

2008年和2009年三峡水库连续2 a 实行175 m 试验性蓄水, 水位由2007年的156 m 分别提高到172.8 m 和171.4 m, 三峡库区大面积消落带逐渐形成。消落带土壤中积累的重金属可能直接影响土壤理化特性、生物活性及养分有效供应, 且可以通过食物链数十倍富集后多种途径直接或间接威胁人类的健康^[1]。同时三峡库区是我国重要的水源地, 因此研究库区消落带土壤重金属及其污染程度对水库的土壤环境和水环境具有重要意义^[2~4]。

目前有关三峡库区消落带重金属的研究主要集中在大尺度或面上。一些学者就三峡库区沿江干流消落区表层土壤重金属的分布特征、污染现状或潜在生态危害进行了研究^[4~6]。同时, 对库区次级河流也展开了相关的研究, 如小江流域消

收稿日期: 2011-04-08; 修订日期: 2011-06-18

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07104-003-01)

作者简介: 王业春(1980~), 男, 博士, 主要研究方向为三峡库区生态环境, E-mail: wangyechun@yahoo.com

* 通讯联系人, E-mail: shengzts@126.com

落土壤重金属分布特征及评价^[7,8]. 然而过去研究主要集中在大尺度或面积的设点取样, 并未排除土壤类型、地形特征、海拔高度、植被等因素的直接或间接作用. 但有研究表明这些因素都可能影响土壤重金属的含量或分布^[9,10]. 同时, 三峡水库独特的调度方式, 使得消落区不同水位高程的土壤在水中浸泡时间和所承受的压力差不同, 结果使得土壤重金属含量可能存在着差异^[11,12]. 因此, 本研究选择了 3 个地质地貌特征、土地利用历史和植被特征等相似的近自然状态消落带, 分水位高程进行土壤重金属含量分析, 并采用地累积指数 (geoaccumulation index, I_{geo})^[13] 和 Håkanson 潜在生态风险指数^[14] 对土壤重金属的污染现状和潜在生态风险程度进行了评价, 旨在为三峡库区消

落区土地利用规划、土壤环境质量和保护和局部污染治理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况与消落带选择

忠县地处三峡库区腹部, 位于 107°32′42″ ~ 108°14′00″E, 30°03′03″ ~ 30°35′35″N, 长江由西南向东北横贯全境. 属亚热带东南季风气候, 年平均气温 18.2℃, >10℃ 的年积温为 5 891.4℃, 年均降雨为 1 172.1 mm, 多集中在 6 ~ 8 月^[15]. 为减少土壤类型、地形地貌等对土壤重金属的影响, 本研究选择了 3 个坡度、坡向、植被特征、土地利用历史等相似的近自然状态消落带 (彼此间隔 >0.5 km). 各消落带基本情况详见表 1.

表 1 消落带的基本情况

Table 1 Fundamental information of three draw-down areas

消落带	经纬度	坡向	坡度/(°)	植被特征	土地利用历史/土壤类型
消落带 1	N30°15′14.41″, E107°59′53.41″	10.1 NW	44.5	群落以草本为主, 盖度约为 75%	农业耕地/黄壤
消落带 2	N30°14′30.69″, E108°00′04.26″	10.8 NW	51.3	群落以草本为主, 盖度约为 80%	农业耕地/黄壤
消落带 3	N30°13′52.81″, E108°00′06.05″	8.7 NW	43.4	群落以草本为主, 盖度约为 80%	农业耕地/黄壤

1.2 高程设置与土壤样品采集

考虑到取样时期为洪水调度阶段, 通常水位大都保持在 155 m 左右, 因此本研究只设置了 2 个水位高程: 160 m 和 170 m. 2010 年 8 月 29 ~ 31 日, 每个消落带在不同的高程范围内沿河流方向采用多点混合取样法分层 (0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm) 采集土壤, 每高程的同层土壤共收集 3 个混合样, 3 个消落带共采集 36 个土壤样品.

1.3 样品处理与分析

待土壤样品风干后去除杂物及石块, 经过玛瑙研钵处理后过 100 目尼龙筛, 贮存在塑料自封袋. 重金属分析项目有: As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn, 重金属含量分析采用 X 射线荧光光谱法测定.

1.4 数据处理与分析

1.4.1 不同高程和土壤层间重金属差异性分析及金属相关性分析

不同高程 (160 m 和 170 m) 和土壤层 (0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm) 的重金属含量差异分析采用非参数的两两比较, 重金属间的相关性分析采用 Spearman 相关分析, 所有统计分析均采用 SPSS 17.0 进行处理.

1.4.2 重金属污染现状

采用德国 Müller 提出的地累积指数法^[13] 分析消落区土壤重金属的污染现状. 地累积指数计算方

法如下:

$$I_{\text{geo}}^n = \log_2 (c_n / k B_n)$$

式中, I_{geo}^n 为重金属 n 的地累积指数; c_n 为重金属 n 在沉积物中的含量; B_n 为沉积岩 (即普通页岩) 中所测该重金属的地球化学背景值; k 为考虑到成岩作用可能会引起的背景值变动而设定的常数, 一般 $k = 1.5$. 为了使分析的污染程度更具真实性, 本研究重金属地球化学背景值采用三峡库区土壤重金属背景值^[16] (详见表 2).

根据 I_{geo} 数值的大小, 将沉积物中重金属的污染程度分为 7 级, 即 0 ~ 6 级, 如表 3 所示.

表 2 三峡库区土壤重金属的环境背景值/mg·kg⁻¹

Table 2 Background contents of soil heavy metals in Three

Gorges Reservoir/mg·kg ⁻¹							
重金属	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
背景值	5.84	0.13	78.03	25.00	29.47	23.88	69.88

1.4.3 重金属潜在生态危害评价方法

Håkanson 潜在生态危害指数法^[14] 考虑到不同重金属的毒性差异及环境对重金属污染的敏感程度, 以及重金属区域背景值的差异, 是能综合反映重金属对生态环境影响潜力的指标, 并在国内外得到了广泛运用^[17~20], 因此本研究选择该方法来评价重金属的潜在生态危害.

表 3 重金属污染程度与 I_{geo}

Table 3 I_{geo} and contamination grades of heavy metals

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

单个重金属的潜在生态危害系数 E_i 为:

$$E_i = T_i \cdot \frac{c_i}{c_0}$$

式中, c_i 、 c_0 和 T_i 分别为第 i 个重金属的测定值、参比值和毒性系数.

多个重金属的潜在生态危害指数 RI 为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i$$

根据 E_i 和 RI 大小, 参照土壤重金属潜在的生态危险系数、生态危害指数和污染程度的关系 (表 4), Håkanson 提出的重金属毒性系数分别为 Cd =

30, As = 10, Pb = Cu = 5, Cr = Ni = 2, Zn = 1. 重金属背景参考值见表 2.

2 结果与讨论

2.1 水位波动

图 1 为 2008 年 1 月 ~ 2010 年 8 月三峡大坝坝前水位波动^[21], 可以看出 160 m 淹水时间大都集中在每年 10 月初到次年 4 月, 而 170 m 则集中在每年 10 月到 12 月. 截止取样时 (2010 年 8 月 29 日), 160 m 和 170 m 水位高程的淹水时间分别为 334 d 和 90 d, 相差 244 d.

表 4 单项及综合潜在生态风险评价指标与分级标准

Table 4 Individual and general indices and grades of potential ecological risk assessment

指数类型	生态危害程度分级				
	轻微	中等	强	很强	极强
E_i	< 40	40 ~ 80	80 ~ 160	160 ~ 320	> 320
RI	< 150	150 ~ 300	300 ~ 600	> 600	

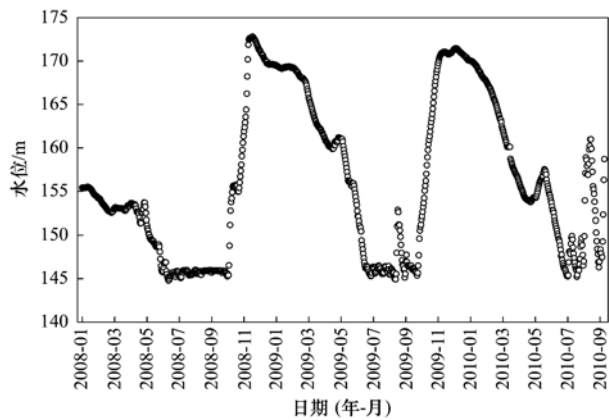


图 1 三峡大坝坝前水位波动 (2008-01 ~ 2010-08)

Fig. 1 Water-level fluctuation in front of Three Gorges Dam (2008-01-2010-08)

2.2 不同高程表层土壤重金属差异

表 5 为 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 在不同高程 (160 m 和 170 m) 及土壤层间 (0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm) 的含量及差异统计结果. 非参数检验表明水位高程和土壤层对这 7 种重金属含量并没有显著的影响 ($P > 0.05$). 三峡库区消落带的相关研究也证实了这一结果^[6,11]. 王晓阳等^[6]认为造成这种在不同水位高程间没有差异可能是由于消落带被淹没的时

间有限, 江水没能对土壤重金属在不同高程的含量产生足够显著的影响. 尽管本研究中 160 m 和 170 m 高程的淹水时间分别为 334 d 和 90 d, 淹水时间差异较大, 但同样并未造成显著差异. 程瑞梅等^[11]研究三峡库区消落带重金属时认为由于 Cu 和 Zn 主要来自土壤母岩风化, 因此海拔高程对重金属 Cu 和 Zn 含量并没有显著影响. 一般来说, 重金属的含量随土壤层次的增加而降低^[16], 但本研究发现消落带不同土壤层间重金属含量没有显著变化, 这与裴廷权等^[7]对三峡库区消落带土壤剖面重金属的研究结果一致. 由于重金属自身移动性较差, 导致其在土壤中垂直分布的均匀性, 所以在不同层间均未表现出显著的差异性^[11].

2.3 重金属元素间的相关性分析

由于地球化学条件的相似性, 以及造成土壤污染的污染源中金属元素共存性导致土壤重金属在总量上存在一定的相关^[3]. 表 6 为忠县消落带土壤表层重金属间的相关系数, 从中可以看出 As 与 Pb 呈显著正相关, 而与 Cr、Cu、Ni 和 Zn 都存在着极显著的正相关关系; Cd 与其它重金属元素间没有显著的相关关系; Cr 与 Pb 没有显著相关关系, 与 Zn 呈显著正相关, 而与 Cu、Ni 存在着极显著关系; Cu 和

表 5 消落带不同高程及土壤层间重金属元素含量¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 5 Heavy metals concentrations in different altitudes and soil depths in draw-down areas/mg·kg⁻¹

金属元素	160 m 高程		170 m 高程	
	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm
As	12.91 ± 0.29 ^a	10.31 ± 1.33 ^a	12.47 ± 0.05 ^a	12.25 ± 0.19 ^a
Cd	0.29 ± 0.04 ^a	0.25 ± 0.03 ^a	0.29 ± 0.02 ^a	0.33 ± 0.02 ^a
Cr	89.23 ± 0.81 ^a	90.00 ± 0.41 ^a	88.78 ± 1.57 ^a	90.65 ± 2.70 ^a
Cu	39.00 ± 0.29 ^a	36.33 ± 0.43 ^a	41.42 ± 1.19 ^a	39.18 ± 1.38 ^a
Ni	42.49 ± 0.28 ^a	41.53 ± 0.45 ^a	41.05 ± 0.70 ^a	41.72 ± 0.97 ^a
Pb	31.09 ± 0.77 ^a	29.59 ± 1.70 ^a	28.00 ± 0.39 ^a	27.02 ± 0.71 ^a
Zn	90.78 ± 1.63 ^a	83.61 ± 1.86 ^a	83.19 ± 1.36 ^a	81.73 ± 1.87 ^a

1) 表中数据为平均值 ± 标准误; 同行相同字母表示没有显著差异(非参数检验, $P > 0.05$, $n = 3$)

Ni、Pb、Zn 均存在着极显著正相关; Ni 和 Pb 没有显著相关关系, 而与 Zn 存在极显著正相关; Pb 和 Zn 存在着显著正相关关系. 总体而言, 除 Cd 相对独立外, 其他重金属元素大都存在着显著或极显著的正相关关系(表 6). 这表明大部分重金属间关系比较密切, 增加了该区域重金属污染的风险, 即可能同时受到几种重金属元素的复合性污染.

本研究中重金属间的相关性结果总体上与其它三峡库区消落带的研究^[4,7,11]基本一致, 其中最大区别在于 Cd 与其他重金属间的关系上. 裴廷权

等^[7]发现 Cd 与 Cu、Zn 呈正相关关系, 而与 Pb、As、Ni 存在显著负相关关系. 叶琛等^[4]发现 Cd 与 Pb、Cu、Zn 间呈极显著正相关关系, 而与 Zn、Pb 和 Ni 没有显著相关关系. 喻菲等^[23]却发现 Cd 与 Cu、Pb 呈显著正相关关系, 而与 Zn、As 没有显著相关关系. 本研究表明 Cd 与其他重金属元素(As、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn)均没有显著相关性. 这些结果的不一致可能是由于重金属间的相关关系不仅取决于地球化学特征, 而且与区域各重金属是否具有相同污染源有关^[24].

表 6 重金属元素间相关系数¹⁾

Table 6 Correlation coefficients between heavy metals

	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
As	1						
Cd	0.039	1					
Cr	0.500 **	0.130	1				
Cu	0.606 **	0.094	0.567 **	1			
Ni	0.611 **	0.114	0.824 **	0.717 **	1		
Pb	0.336 *	-0.091	0.234	0.317 *	0.257	1	
Zn	0.417 **	-0.034	0.361 *	0.591 **	0.605 **	0.312 *	1

1) * 和 ** 分别表示相关系数达到 0.05 和 0.01 的显著水平

2.4 重金属污染现状及潜在生态危害评价

忠县消落区各重金属地累积指数评价结果见表 7. 其中 Cr、Ni、Pb 和 Zn 地累积指数 < 0, 污染等级为 0, 属无污染. As、Cd 和 Cu 地累积指数分别为 0.45、0.39 和 0.06, 这些值 > 0 而 < 1, 因此污染程度为 1, 属于无-中等污染. 土壤重金属污染程度顺序依次为 As > Cd > Cu > Ni > Zn =

Pb > Cr. 各重金属元素及重金属综合的潜在生态危害指数见表 8. 其中 Cd ($40 < E_i = 59.10 < 80$) 存在着中等程度的生态危害, As、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 均为轻微 ($E_i < 40$). 单个金属潜在生态危害指数大小依次为 Cd > As > Cu > Pb > Ni > Cr > Zn, 而综合的生态危害指数较低 ($RI = 99.84 < 150$), 属于轻微潜在生态危害.

表 7 重金属地质累积指数及重金属污染程度评价

Table 7 I_{geo} and contamination grades of heavy metals

项目	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
I_{geo}	0.45	0.39	-0.38	0.06	-0.08	-0.31	-0.31
分级	1	1	0	1	0	0	0
污染程度	无-中	无-中	无	无-中	无	无	无

表 8 单项及综合潜在生态风险评价指数

Table 8 Individual and general indices of potential ecological risk

项目	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	RI
E_i/RI	20.54	59.10	2.30	7.80	2.83	6.06	1.21	99.84
生态风险等级	低	中	低	低	低	低	低	低

从这 2 种不同的评价指数结果可以发现,地质累积指数法评价结果为 As 污染最严重,其次为 Cd,最后是 Cu,而 Håkanson 潜在生态危害评价指标表明 Cd 污染危害最严重,其次为 As,最后为 Cu. 叶琛等^[4]也发现了相似的结果,并认为是因为计算潜在生态危害指数时要乘以重金属的毒性系数(其中 Cd、As、Cu 毒性系数分别为 30、10、5),导致地质累积指数法评价和 Håkanson 潜在生态危害评价结果的不完全一致. 尽管侧重点有所不同,但这 2 种方法都指出了该区域消落带土壤的主要重金属污染或存在潜在生态危害的重金属元素为 As、Cd 和 Cu.

As 主要来源于人为活动,尤其是金属冶炼和煤炭燃烧,同时农业生产使用污水灌溉及含 As 肥料、农药等也能引起 As 含量增加^[24]. Cd 的污染主要来自地表径流和工业废水,铅锌矿、硫铁矿废水和有关工业(电镀、碱性电池等)排放的废水含镉很高^[25]. Cu 主要来源于铜锌矿的开采和冶炼、金属加工、机械制造、钢铁生产等,也与高 Cu 杀菌剂、杀虫剂、化肥、饲料有关^[26]. 本研究中 As、Cd、Cu 存在着一定的污染和具有轻微或中等的生态危害可能与近来该区域沿岸乡镇工矿企业发展迅速产生了大量的工业废水以及相应农药化肥使用有关.

3 结论

(1) 尽管 160 m 和 170 m 高程淹水的时间差异较大(160 m、170 m 分别为 334 d 和 90 d),但并未造成不同水位高程间的重金属含量间显著差异;可能因为重金属自身移动性较差导致了其在土壤中垂直分布的均匀性,因此在不同土壤层间(0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm)未表现出显著的差异性.

(2) 除 Cd 相对独立外,其他重金属元素大都存在着显著或极显著的正相关关系,表明大部分重金属间关系比较密切,增加了该区域重金属污染的风险,即可能同时受到几种重金属元素的复合性污染.

(3) 地累积指数表明重金属污染程度顺序依次为:As > Cd > Cu > Ni > Zn = Pb > Cr, As、Cd 和 Cu 为轻度污染,Cr、Ni、Pb、Zn 为没有污染;Håkanson 单个重金属潜在生态风险顺序为: Cd > As > Cu > Pb > Ni > Cr > Zn, Cd 生态风险到达中度,其余重金属为

较轻. 这 2 种方法都指出了该区域消落带土壤的主要重金属污染或存在潜在生态危害的重金属元素为 As、Cd 和 Cu.

致谢:重庆环境科学院王目通、重庆师范大学生命科学学院吴江林和龙富波参与了野外土壤采集工作, Daniel Kister 教授对英文摘要进行了修改,在此表示感谢!

参考文献:

[1] 蔡立梅, 马瑾, 周永章, 等. 东莞市农业土壤重金属的空间分布特征及来源解析 [J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3496-3502.

[2] 张金洋, 王定勇, 石孝洪. 三峡水库消落区淹水后土壤性质变化的模拟研究 [J]. 水土保持学报, 2004, **18**(6): 120-123.

[3] 李苑劼, 吕平毓. 三峡库区沉积物中重金属元素测定的前处理方法研究 [J]. 三峡环境与生态, 2011, **33**(1): 18-20.

[4] 叶琛, 李思悦, 张全发. 三峡库区消落区表层土壤重金属污染评价及源解析 [J]. 中国生态农业学报, 2011, **19**(1): 146-149.

[5] 黎莉莉, 张晟, 刘景红, 等. 三峡库区消落区土壤重金属污染调查与评价 [J]. 水土保持学报, 2005, **19**(4): 127-130.

[6] 王晓阳, 傅瓦利, 谢芳, 等. 三峡库区消落带完整淹水后土壤重金属分布特征及其影响因素 [J]. 水土保持学报, 2010, **17**(6): 267-271.

[7] 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.

[8] 裴廷权, 王里奥, 包亮, 等. 三峡库区小江流域土壤重金属的分布特征与评价分析 [J]. 土壤通报, 2010, **41**(1): 206-211.

[9] 刘世梁, 崔保山, 温敏霞, 等. 路域土壤重金属含量空间变异的影响因子 [J]. 环境科学学报, 2008, **28**(2): 253-260.

[10] 喻菲. 三峡库区消落区土壤重金属调查及评价 [D]. 重庆: 西南农业大学, 2006.

[11] 程瑞梅, 王晓蓉, 肖文发, 等. 三峡库区消落带水淹初期土壤物理性质及金属含量初探 [J]. 水土保持学报, 2009, **23**(5): 156-161.

[12] Graf W L. Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American river [J]. Geomorphology, 2006, **79**(3-4): 336-360.

[13] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. Geojournal, 1969, **2**(3): 108-118.

[14] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.

- [15] 杜高赞, 高美荣. 三峡库区典型消落带土壤粒径分布及分形特征 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2011, **35**(1): 47-50.
- [16] 唐将, 钟远平, 王力. 三峡库区土壤重金属背景值研究 [J]. 中国生态农业学报, 2008, **16**(4): 848-852.
- [17] 王博, 赵爽, 夏敦胜, 等. 兰州市城区河道表层沉积物重金属污染及磁学参数相关关系研究 [J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1430-1440.
- [18] 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): 3262-3268.
- [19] Kabir M I, Lee H, Kim G, *et al.* Monitoring and assessing heavy metals in topsoils as potential diffuse pollutants in the Pyeongchang River Basin, Korea [J]. Water Science and Technology, 2010, **61**(12): 3156-3161.
- [20] Monticelli D, Pozzi A, Ciceri E, *et al.* Interpreting complex trace element profiles in sediment cores from a multi-basin deep lake; the western branch of Lake Como [J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2011, **91**(3): 213-229.
- [21] 中国长江三峡集团公司水情信息, 宜昌 [EB/OL]. <http://www.ctgpc.com.cn/inc/sqsk.php>.
- [22] 曹会聪, 王金达, 张学林. 东北地区污染黑土中重金属与有机质的关联作用 [J]. 环境科学研究, 2007, **20**(1): 36-41.
- [23] 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): 165-168.
- [24] 张宪军, 蓝先洪, 赵广涛, 等. 苏北浅滩表层沉积物中重金属元素 Cd、As、Hg、Se 分布及污染评价 [J]. 海洋地质动态, 2007, **23**(2): 9-13.
- [25] 余辉, 张文斌, 余建平. 洪泽湖表层沉积物重金属分布特征及其风险评价 [J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 437-444.
- [26] 林义章, 徐磊. 铜污染对高等植物的生理毒害作用研究 [J]. 中国生态农业学报, 2007, **15**(1): 201-204.

CONTENTS

Safety Value of Contaminant in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	ZHENG Bing-hui, LUO Jin-hong, FU Qing, <i>et al.</i> (337)
Safety Concentration of Genotoxic Carcinogens in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	LUO Jin-hong, ZHENG Bing-hui, FU Qing, <i>et al.</i> (342)
A Quantitative Method and Case Analysis for Assessing Water Health	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (346)
Temporal and Spatial Variation of Nitrogen and Phosphorus and Eutrophication Assessment in Downstream River Network Areas of North Canal River Watershed ...	SHAN Bao-qing, JIAN Yu-xiang, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (352)
Spatiotemporal Variation Analysis and Identification of Water Pollution Sources in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, TANG Fang-fang, <i>et al.</i> (359)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Shallow Groundwater in the Yellow River Delta	AN Le-sheng, ZHAO Quan-sheng, YE Si-yuan, <i>et al.</i> (370)
Impacts of Sediment Disturbance Time on the Distribution of Phosphorus Forms in Suspended Solids	LI Da-peng, HUANG Yong, LI Yong, <i>et al.</i> (379)
Influence of Submerged Macrophytes on Phosphorus Transference Between Sediment and Overlying Water in the Growth Period	WANG Li-zhi, WANG Guo-xiang, YU Zhen-fei, <i>et al.</i> (385)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments of Lake Changshouhu in Chongqing, China	LU Shao-yong, XU Meng-shuang, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (393)
Vertical Distribution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Lake Hongze	ZHANG Wen-bin, YU Hui (399)
Effects of Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Loss from Courtyard Compost and Its Risk of Nonpoint Source Pollution	PENG Li, WANG Li-wei, YANG Zhi-min, <i>et al.</i> (407)
Effects of Hydrodynamic Process on Bio-optical Properties in Algal-Dominated Lake Region of Shallow Lake	LIU Xiao-han, FENG Long-qing, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (412)
Estimation and Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient $K_d(490)$ in Lake Taihu in Spring Based on Semi-analytical Model	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, LI Rui-yun, <i>et al.</i> (421)
Monitoring the Total Suspended Matter of Lake Chaohu Based on Quasi-Analytical Algorithm	ZHANG Hong, HUANG Jia-zhu, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (429)
Optimization of Aerobic/Anaerobic Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Feng-min, SHAN Shi, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (436)
Effects of Allelochemical Dibutyl Phthalate on <i>Gymnodinium breve</i> Reactive Oxygen Species	BIE Cong-cong, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (442)
Toxicity Effects of <i>Rac</i> - and <i>S</i> -Metolachlor on Two Algae	CAI Wei-dan, LIU Hui-jun, FANG Zhi-guo (448)
Studies for Killing the Oceanic Harmful Organisms in Ship's Ballast Water Using Hydroxyl Radicals	BAI Min-dong, ZHANG Na-hui, ZHANG Zhi-tao, <i>et al.</i> (454)
Modification of Natural Siderite and Enhanced Adsorption of Arsenic	ZHAO Kai, GUO Hua-ming, LI Yuan, <i>et al.</i> (459)
Kinetic Study of 4-Chloronitrobenzene Degradation by Zero-Valent Iron	LIAO Di-jie, YANG Qi, LEE Chun-chi (469)
Photochemical Degradation of Ofloxacin in Aqueous Solution	SHAO Meng, YANG Gui-peng, ZHANG Hong-hai (476)
Photodegradation of Atenolol in Aqueous Nitrate Solution	JI Yue-fei, ZENG Chao, MENG Cui, <i>et al.</i> (481)
Biodegradation of Pyridine Under UV Irradiation	FANG Miao-miao, YAN Ning, ZHANG Yong-ming (488)
Optimization on Decoloration Conditions of Anthraquinone Dyes by Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	ZHU Xian-feng, QIN Ren-bing, YU Chen-chen, <i>et al.</i> (495)
Biosorption of Chromium(VI) by Waste Biomass of ϵ -Poly-L-lysine Fermentation	CAO Yu-juan, ZHANG Yang, XIA Jun, <i>et al.</i> (499)
Investigation on Enhanced Conditions for the Densification of Filamentous Sludge	LI Zhi-hua, SUN Wei, JI Xiao-qin, <i>et al.</i> (505)
Effect of Temperature on the Response Characteristics of Shortcut Nitrification Granular Sludge	LUO Yuan-ling, YANG Zhao-hui, XU Zheng-yong, <i>et al.</i> (511)
Fuel Consumption and Emission Inventory of Typical Construction Equipments in China	LI Dong-ling, WU Ye, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (518)
Optimization of PM ₁₀ Monitoring Network in Beijing	QI Ling, ZHAO Yue, XIE Shao-dong (525)
Effect of Greenbelt on Pollutant Dispersion in Street Canyon	XU Wei-jia, XING Hong, YU Zhi (532)
Investigation of Effect and Process of Nitric Oxide Removal in Rotating Drum Biofilter Coupled with Absorption by Fe ^{II} (EDTA)	CHEN Jun, YANG Xuan, YU Jian-ming, <i>et al.</i> (539)
Effect of UV-B Radiation on Release of Nitrogen and Phosphorus from Leaf Litter in Subtropical Region in China	SONG Xin-zhang, ZHANG Hui-ling, JIANG Hong, <i>et al.</i> (545)
Characteristics of Carbon Sequestration and Apparent Stability of New Sequestered Carbon in Forested Torrid Red Soil at Dry-Hot Valley	TANG Guo-yong, LI Kun, SUN Yong-yu, <i>et al.</i> (551)
Spatial Distribution of Methane in Surface Water and Sediment of Jiulongjiang Estuary and the Effect Environment factors of It	GUO Ying-ying, CHEN Jian, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> (558)
Methane Fluxes and Controlling Factors in the Intertidal Zone of the Yellow River Estuary in Autumn	JIANG Huan-huan, SUN Zhi-gao, WANG Ling-ling, <i>et al.</i> (565)
Study on Dioxin Emission for Typical Non-Wood Pulp Making in China	WANG Zhi-fang, DING Qiong, WANG Kai-xiang, <i>et al.</i> (574)
Horizontal and Vertical Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediment from a Typical Electrical Equipment Industrial Area	QIU Meng-de, DENG Dai-yong, YU Le-huan, <i>et al.</i> (580)
Characteristics of Polychlorinated Biphenyls in Soils from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (587)
Characterization and Potential Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Green Space Soils of Educational Areas in Beijing	PENG Chi, WANG Mei-e, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (592)
Spatial Variability and Evaluation of Soil Heavy Metal Contamination in the Urban-transect of Shanghai	LIU Yun-long, ZHANG Li-jia, HAN Xiao-fei, <i>et al.</i> (599)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments of Rivers in Northern Area of Haihe River Basin, China	SHANG Lin-yuan, SUN Ran-hao, WANG Zhao-ming, <i>et al.</i> (606)
Concentrations and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals at Different Water-level Altitudes in the Draw-down Areas of the Three Gorges Reservoir	WANG Ye-chun, LEI Bo, YANG San-ming, <i>et al.</i> (612)
Analysis of Community Structure on Sludge Aerobic/anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (618)
Research on Population Structure and Distribution Characteristic of Indigenous Microorganism in Post-polymer-Flooding Oil Reservoir	ZHAO Ling-xia, GAO Pei-ke, CAO Mei-na, <i>et al.</i> (625)
Study on Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) with Different Additional Carbon Sources in Aged Contaminated Soil	YIN Chun-qin, JIANG Xin, WANG Fang, <i>et al.</i> (633)
Detection of <i>Prorocentrum minimum</i> (Pavillard) Schiller with the Electrochemiluminescence-Molecular Probe	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (640)
Development of Direct Competitive Enzyme-Linked Immunosorbent Assay for the Determination of Domoic Acid	WANG Qian, CHENG Jin-ping, GAO Li-li, <i>et al.</i> (647)
Simultaneous Determination of 10 Sulfonamide Antibiotics in Water by Solid-phase Extraction and High Performance Liquid Chromatography	HONG Lei-jie, SHI Lu, ZHANG Ya-lei, <i>et al.</i> (652)
Effects of Pentachlorophenol on DNA Damage and Cytotoxicity of HeLa Cells	JIN Bang-ming, WANG Fu-ming, XIONG Li, <i>et al.</i> (658)
Modeling of Carbon Dioxide Measurement and Optimization on Building Ceramic Industry	PENG Jun-xia, ZHAO Yu-bo, JIAO Li-hua, <i>et al.</i> (665)

《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2月15日 33卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 2 Feb. 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