

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 排放测量 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子珍, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)

黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合 陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)

沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究 苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)

南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析 秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)

太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征 曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)

2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系 程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)

机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成 袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)

DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响 楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)

紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附 李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)

三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征 江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)

三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征 王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)

高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例 孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093)

不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应 季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)

丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估 赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)

滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价 王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)

粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险 阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)

鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应 刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)

周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响 贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)

溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响 王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)

微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响 李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)

城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响 唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)

两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究 孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)

巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II) 谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)

改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征 唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)

UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性 任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)

对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究 王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)

高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性 牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)

硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响 周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)

单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响 马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)

钛盐混凝剂调理对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制 王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)

城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律 孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)

低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析 信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆锋 (2259)

微丝菌 (*Microthrix parvicella*) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化 王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)

基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响 吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)

1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性 黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振刚 (2276)

长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征 韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)

有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响 张名蒙, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)

生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响 张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘思新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)

多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源 孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)

苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征 陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)

河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)

杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价 龚丹丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)

土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力 田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)

添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响 陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)

应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响 尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽烽, 孙国新, 崔岩山 (2353)

不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系 辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)

芘胁迫对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响 潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚闾, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)

维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化 徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)

苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素 许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)

g-C₃N₄/Bi₂S₃ 复合物的制备及可见光催化降解 MO 张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)

海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价 耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)

《环境科学》征订启事(2130) 《环境科学》征稿简则(2251) 信息(2178,2344)

丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估

赵丽, 王雯雯, 姜霞*, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊

(中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

摘要: 为研究丹江口水库表层沉积物中重金属的污染水平及潜在的生态风险, 利用参考元素法, 对丹江口水库表层沉积物重金属的背景值进行了确定, 结果显示 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg 和 Pb 的背景值分别为 41.18、34、32.13、76.84、10.46、0.70、0.07 和 27.11 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。利用 Hakanson 潜在生态危害指数法对丹江口沉积物中重金属进行生态风险评估, 结果表明, 丹江口表层沉积物中 8 种重金属的潜在生态风险指数(RI)值在 29.49 ~ 214.11, 平均值为 118.91, 总体处于低风险水平; 8 种重金属污染系数排序为: $\text{Cd} > \text{Hg} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{As} = \text{Cu}$, 污染系数变化范围在 0.22 ~ 2.96 之间, 平均值在 1.05 ~ 1.31 之间, 处于中等偏低的污染状态, 其中, Cd 和 Hg 这两种危害性极大的元素污染系数稍高, 平均值分别为 1.31 和 1.24, 值得进一步关注。

关键词: 丹江口; 沉积物; 重金属; 背景值; 风险评估

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2113-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.06.014

Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir

ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia*, WANG Shu-hang, LI Jia-lu, CHEN Jun-yi

(State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The aim of this study was to explore the pollution level and potential ecological risk of heavy metals in sediments of the Danjiangkou Reservoir, and the study obtained the background value of heavy metals of the surface sediments using reference element and statistical methods. The results indicated that the background values of Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg and Pb were 41.18, 34, 32.13, 76.84, 10.46, 0.70, 0.07 and 27.11 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. In addition, the potential ecological risks of the eight heavy metals in sediments were assessed using the Hakanson ecological risk index method. The values of RI for these eight metals in surface sediments ranged from 29.49 to 214.11, with the mean value of 118.91, and the pollution level was low. Furthermore, the C_i^i value was in the order of $\text{Cd} > \text{Hg} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{As} = \text{Cu}$ with the mean value of 1.05-1.31, and the pollution level varied from low to intermediate. The C_i^i values of Cd and Hg were higher than those of other heavy metals with the mean values of 1.31 and 1.24, respectively, which should be paid more attentions.

Key words: Danjiangkou Reservoir; sediment; heavy metals; background value; risk assessment

在沉积物监测和评估过程中,首要的问题是确定湖库沉积物正常环境背景值的范围,但沉积物背景值是多种环境因素的共同作用的结果,受地质条件、水文状况、生物活动等多种因素的影响,往往具有很强的地域性特点^[1,2]。在湖库水生态环境中,重金属可通过吸附、解吸、絮凝、沉淀、生物吸收、富集等物理、生物反应在水-沉积物-生物体内进行着复杂的迁移转化过程,这些因素的共同作用,使得沉积物重金属背景值出现不同程度的波动^[3-6]。沉积物重金属含量背景值是制定沉积物环境质量和开展湖库生态风险评估的重要依据,也是判定人为原因导致沉积物重金属积累的基础,有助于确定沉积物重金属的来源,进而制定具有针对性的对

策^[7-9]。因此,弄清湖库沉积物中重金属的背景值及污染状况并进行评价研究,能够为湖库生态安全评估和水环境治理提供科学依据,具有重要的科学研究和实际意义。

丹江口水库作为国家南水北调中线工程的重要的水源地,是我国具有战略意义的生态屏障地区,其生态环境状况和水质安全关系到库区的社会经济以及受水区的水质安全^[10]。目前对于丹江口水库水环境的研究主要集中在水质^[11]、水生态^[12]等

收稿日期: 2015-10-22; 修订日期: 2016-01-21

基金项目: 科技部科技基础性工作专项(2014FY110400-01)

作者简介: 赵丽(1987~),女,硕士,主要研究方向为湖泊水环境, E-mail: zhaoli20061212@126.com

* 通讯联系人, E-mail: jiangxia@craes.org.cn

方面,而对于重金属的研究较少,尤其是对库区及入库河流水体和沉积物中重金属背景值的全面调查更是鲜见报道.本研究在丹江口水库库区和主要入库河流进行了全面布点,利用参考元素法确定了沉积物中8种重金属(Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg和Pb)的背景浓度,并对重金属的可能污染来源进行了探讨,以期全面了解丹江口水库水环境质量及水环境综合治理提供基础资料.

1 材料与方法

1.1 研究区域

丹江口水库位于汉江中上游,分布于湖北省丹江口市和河南省南阳市淅川县,水域横跨鄂、豫两省.主要入库支流有堵河、神定河、浪河、老灌河、淇河等.水库多年平均面积超700 km²,2012年丹江口大坝加高后,丹江口水库水域面积将达1022.75 km²,蓄水量达290.5亿 m³,水量较为丰富,是防洪、发电、灌溉及航运的综合性水库^[13,14].

1.2 样品采集、处理

在丹江口水库库区及其主要入库河流设置44个采样点,于2014年8月和2015年3月用抓泥斗采集86个表层10~20 cm的沉积物样品(部分河流未采集到样品),样品放入干净的自封袋内4℃保

存,带回实验室后冷冻干燥,挑除其中石块、动植物残体等杂质,研磨后过100目尼龙筛备用.丹江口采样点分布示意图1.

沉积物中重金属总量测定样品的前处理:称取经冷冻干燥、过100目筛的底泥样品0.1000 g置于消解管中,加入10 mL浓HNO₃,盖紧盖子,将消解管置于微波消解仪中消解.消解结束后冷却至室温,将消解管盖子取下,将消解管置于水浴锅中,恒温(85℃)水浴30 min,至无红色物质为止,将消解液转移至50 mL比色管中,用超纯水稀释至刻度,摇匀,溶液过0.45 μm混纤膜,4℃下保存待测.具体方法参照文献^[15,16].沉积物中重金属含量利用ICP-MS(Agilent 7500a)进行测定,具体方法参见文献^[17].

1.3 数据处理

所有样品分析均做3次平行,试验结果均以3次样品分析的平均值表示(3次分析结果的误差范围<5%).采用水系底泥标准参考样品(GBW-07307 GSD7)作为质量控制样品,对沉积物样品前处理过程和含量测定过程进行质量控制,结果显示,Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg、Pb这8种重金属的回收率均处在85%~115%之间.试验数据采用Excel 2010、Origin 9.0、SPSS 17.0软件进行统计检

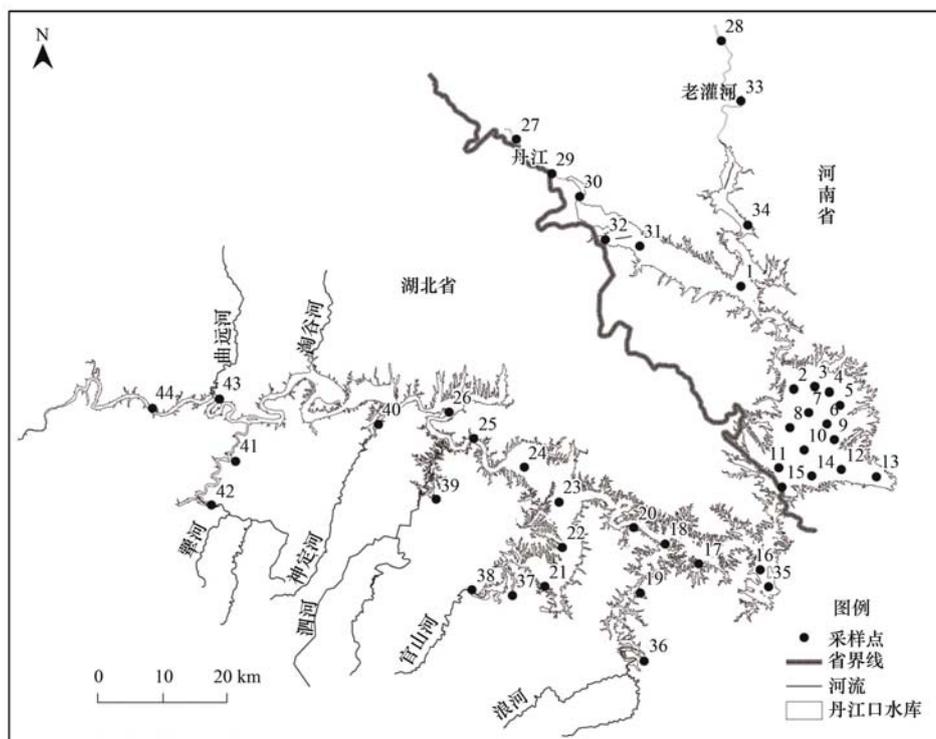


图1 丹江口水库采样点分布示意

Fig. 1 Sampling points and location of Danjiangkou Reservoir

验、分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 沉积物中 Fe 和 Al 含量的测定

Fe 和 Al 是沉积物中大量元素,其水合(氢)氧化物是沉积物中重要的无机胶体,巨大比表面积及其表面的化学活性使其具有对众多的重金属的吸附能力,可以通过吸附、共沉淀等作用而影响沉积物中重金属的含量^[18]。并且相关的研究表明,Fe 和 Al 不易受到人类活动的污染,可被广泛用于区分湖库沉积物中自然及人为物质来源^[19]。

丹江口表层沉积物中 Fe 的含量在 12.62 ~ 39.75 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均为 25.32 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; Al 的含量在 2.87 ~ 35.00 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均为 17.47 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。相关性分析表明,Fe、Al 呈极显著相关($P < 0.01$),进一步证明所选的 86 个沉积物样品中,Fe、Al 可作为参照元素,用于区分由于重金属元素自然来源的改变或人为污染所造成的重金属含量的变化。铁和铝的回归曲线见图 2。

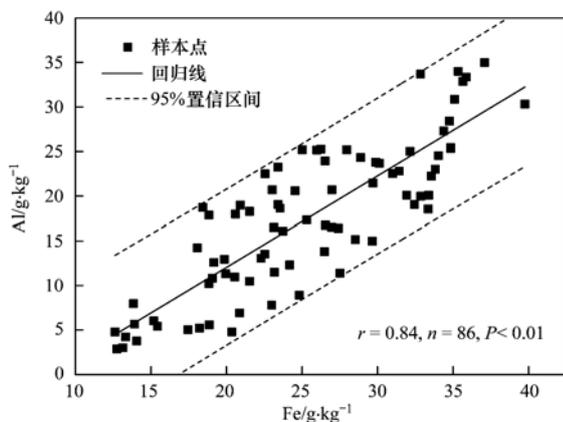


图 2 丹江口表层沉积物中铁和铝的回归分析

Fig. 2 Regression analysis of iron and aluminum in surface sediment of Danjiangkou Reservoir

2.2 金属与参考元素的回归分析

参考元素可有效地区分由于重金属元素自然来源的改变或人为污染所造成的重金属含量的变化,并可排除沉积物粒度的干扰^[20]。本研究将 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg、Pb 这 8 种重金属含量归一化 Fe,并计算出 95% 置信区间下的预测直线见图 3。

结合图 3 可以看出,8 种重金属都与 Fe 呈正显著相关,但有部分样品的重金属数据超过 95% 预测上限,说明可能存在重金属的富集。将超过 95% 预测上限的重金属样品中相应的重金属数据去除后,重新做与 Fe 的回归曲线,直到全部在 95% 置信区间以内,进而统计相应沉积物重金属的样本个数,平均值、标准差等指标,见表 1。

从表 1 中可以看出,Hg、Cd 和 Zn 去除的样本量较多,分别达到 23、15 和 14 个,而 Cr、Ni、Cu、As 和 Pb 去除的样本量相对较少,分别为 5、7、7、4 和 10 个,说明 Hg、Cd 和 Zn 可能存在较强的富集作用。余加平等^[21]研究表明,丹江口库区浙川淹没区旱地中 Hg 的含量在 0.06 ~ 0.27 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,均值为 0.14 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而浙川淹没区河流底泥中 Hg 平均含量可达到 0.19 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,也印证了丹江口水库沉积物 Hg 存在显著的富集作用。而雷沛等^[22]在研究丹江口典型库湾及支流重金属时发现支流和库湾沉积物中 Cd、Zn 平均含量分别为 1.27 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、283.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,存在着富集作用,与本次研究中发现 Cd、Zn 部分点位存在富集相一致。

2.3 沉积物重金属背景值的确定

湖库重金属背景值应该是一个表征元素含量集中分布趋势的特征值,在沉积物中含量呈正态分布的元素,其含量背景值由其算术平均值(μ)获得,在沉积物中含量呈对数正态分布的元素,其背景值由几何均值(μ')获得^[23~26]。为了解析丹江口表层沉积物重金属含量的分布趋势,利用 2.2 节得到的数据进行正态分布检验,见图 4。

表 1 丹江口表层沉积物背景值参数统计/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Background values of heavy metals in surface sediments of the Danjiangkou Reservoir/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

元素	样本数	均值	均值的 95% 置信区间		中值	标准差	几何均值
			下限	上限			
Cr	81	43.81	41.18	46.43	44.69	11.89	41.74
Ni	79	36.85	34.00	39.70	36.40	11.85	34.70
Cu	79	34.77	32.13	37.40	34.23	11.78	32.58
Zn	72	83.89	76.84	90.94	83.34	30.00	78.50
As	82	11.42	10.46	12.37	11.19	4.33	10.45
Cd	71	0.84	0.68	0.92	0.84	0.45	0.70
Hg	63	0.07	0.07	0.09	0.08	0.04	0.07
Pb	76	29.2	27.11	31.28	27.95	9.13	27.74

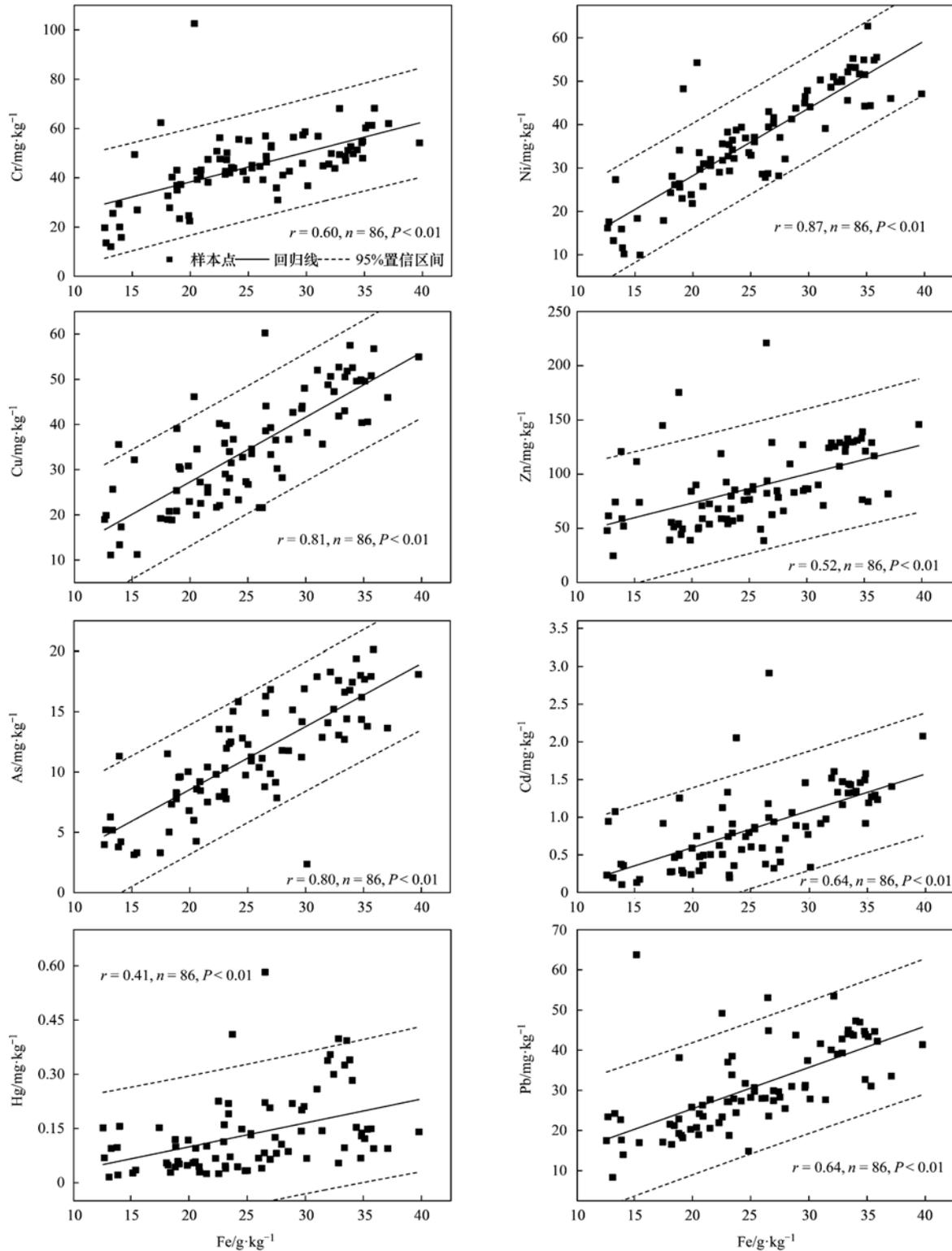


图3 丹江口表层沉积物8种重金属与Fe的回归曲线

Fig. 3 Regression curves of eight heavy metals and iron in surface sediment of Danjiangkou Reservoir

结合图4和正态分布K-S检验表明,除Hg外, Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd和Pb这7种重金属元素都符合正态分布,而Hg经过对数转换后,也符合正态分布特征(K-S检验, $P > 0.05$)。因此,初步得到丹

江口表层沉积物重金属Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg和Pb的背景值分别为43.81、36.85、34.77、83.89、11.42、0.84、0.07、29.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。沉积物元素的背景值是不受或者很少受人类活动影响的情

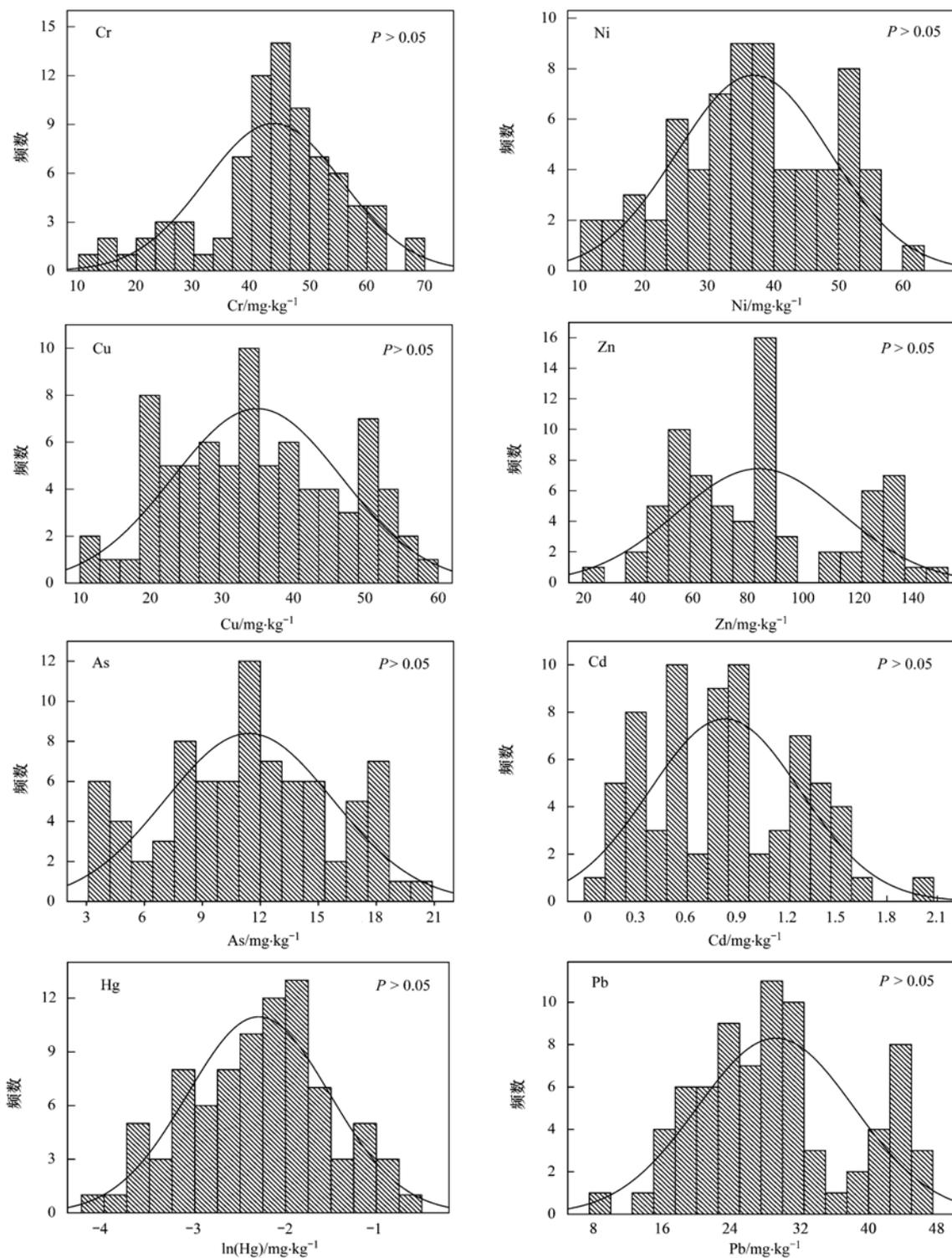


图 4 丹江口表层沉积物重金属含量及其频数分布

Fig. 4 Histogram of original and concentrations of eight heavy metals in surface sediment of Danjiangkou Reservoir

况下,沉积物固有的元素含量水平^[23],但由于人类活动的影响几乎无所不在,严格地说,要通过取样调查的方法来找出真正的沉积物重金属元素的背景值是非常困难的. 因此,本次研究采用均值的 95% 置

信区间进行修正,将 95% 置信区间下限作为丹江口沉积物的背景值,则 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg 和 Pb 的背景值分别为 41.18、34、32.13、76.84、10.46、0.70、0.07、27.11 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

3 讨论

3.1 与其它研究的对比

确定沉积物重金属元素背景值常用的方法主要包括参考元素法和参考沉积物法。参考元素法是将金属含量归一化处理,转化为参考元素的含量,并计算出 95% 置信区间。参照沉积物法以未受污染水体沉积物中重金属含量作为背景值或者通过柱状样获取工业化以前的沉积物样品中重金属含量作为背景

值。考虑到丹江口水库水体平均深度在 40 m 以上,尤其是蓄水后的主库区基本在 60 m 以上,柱状沉积物样品较难获得。因此,本研究利用参考元素法,采用了离河口较远的 86 个沉积物作为样本,将 8 种重金属的含量与 Fe 做归一化处理,识别出偏离 95% 置信区间的数值后,对原始数据以及经过对数转换的数据进行正态分布检验,并做出其相应的频数分布图,进而求出 8 种重金属的背景值。将本研究结果与其它相关研究进行对比(表 2)。

表 2 重金属含量相关研究统计对比/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 2 Comparison of concentrations of heavy metals with those reported in other related studies/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
全国黄棕壤均值 ^[27]	70.90	34.80	26.70	72.10	12.50	0.076	0.048	26.30
河南土壤均值 ^[28]	65.60	29.90	20.70	60.70	11.80	0.068	0.025	18.90
湖北土壤均值 ^[14]	85.70	41.70	32.90	92.60	13.30	0.137	0.078	27.10
长江水系背景值 ^[29]	52.30	/	21.50	73.60	7.60	0.150	0.034	21.40
丹江口淹没区 ^[14]	45.11	32.52	24.71	73.71	12.64	1.040	0.140	28.69
30cm 柱状样品 ^[22]	82.78	32.84	36.85	153.65	/	0.750	/	16.27
本研究	41.18	34.00	32.13	76.84	10.46	0.700	0.070	27.11

本研究中, Ni、Cu、Zn、As、Pb 与湖北、河南土壤背景值相近; Cr 显著低于背景值,但与丹江口淹没区农田土壤中 Cr 含量($45.11 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)较为接近; Hg 的背景值高于长江水系背景值,但介于河南省土壤背景值与湖北省土壤背景值之间,可能是因为本研究选取的样本较多,并且包括南阳与十堰两大部分区域。

本次研究中, Cd 的背景值显著高于河南省、湖北省土壤背景值,可能与丹江口所处地理位置有关^[30],有研究结果表明^[14,22,31],丹江口库区淹没区农田土壤、迁建区土壤、河流、库湾及其垂直样本 Cd 含量基本在 $0.4 \sim 11.34 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,说明丹江口水库及其周边土壤背景值可能较高,与本研究结果相符。

3.2 沉积物重金属生态风险评估

本研究采用瑞典学者 Hakanson 提出的潜在生态危害指数法对丹江口沉积物中重金属进行生态风险评价^[32]。该方法考虑到环境对重金属污染的敏感程度、不同重金属的毒性以及重金属区域背景值的差异,能够综合反映重金属对生态环境的影响潜力^[33~35],是目前较为广泛应用的评价方法,该法计

算公式如下。

单个重金属潜在风险指数:

$$C_i^i = C_D^i / C_R^i \quad (1)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_i^i \quad (2)$$

多种重金属潜在生态风险指数:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (3)$$

式中, C_i^i 为某一重金属的污染系数; C_D^i 为沉积物中重金属的实测含量; C_R^i 为计算所需的参比值; E_r^i 为潜在生态风险系数; T_r^i 为单个污染物的毒性响应系数; RI 为多种金属的潜在生态风险指数。

本次沉积物重金属生态风险评估所需的重金属背景值及计算潜在生态风险指数的参比值^[19]如表 3 所示,潜在生态风险指数等级划分标准^[30]如表 4 所示。

根据以上参数计算获得 8 种重金属污染系数及潜在生态风险指数(见表 5)。各种重金属比较, 8 种重金属污染系数排序为: $\text{Cd} > \text{Hg} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{As} = \text{Cu}$, 污染系数变化范围在 $0.22 \sim 2.96$ 之间,平均值在 $1.05 \sim 1.31$ 之间,均处于中等偏低的污染状态,可能存在轻微的富集效应,但目前不会对

表 3 沉积物重金属背景值及计算潜在生态风险指数的参比值

Table 3 Background values about heavy metals and reference values of potential ecological risk index

项目	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
背景值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	41.18	34.00	32.13	76.84	10.46	0.70	0.07	27.11
参比值	2	5	5	1	10	30	40	5

表 4 重金属污染程度及潜在生态危害等级划分标准

Table 4 Dividing standards of heavy metal pollution and ecological risk levels

单一污染物污染系数 C_i^i		潜在生态风险指数 RI	
阈值区间	程度分级	阈值区间	程度分级
$C_i^i < 1$	低污染	$RI < 150$	低风险
$1 = C_i^i < 3$	中等污染	$150 = RI < 300$	中风险
$3 = C_i^i < 6$	较高污染	$300 = RI < 600$	高风险
$C_i^i \geq 6$	很高污染	$600 = RI < 1\ 200$	很高风险
		$RI \geq 1\ 200$	极高风险

环境造成显著影响。从表 5 可以看出, Cd 和 Hg 污

表 5 丹江口水库沉积物重金属污染系数及潜在生态风险指数

Table 5 Pollution coefficients and potential ecological risk indexes of heavy metals in surface sediment of Danjiangkou Reservoir

项目	C_{Cr}	C_{Ni}	C_{Cu}	C_{Zn}	C_{As}	C_{Cd}	C_{Hg}	C_{Pb}	RI
最小值	0.29	0.3	0.35	0.32	0.32	0.28	0.22	0.31	29.49
最大值	2.49	1.84	1.87	2.88	1.93	2.96	2.23	1.96	214.11
平均值	1.14	1.06	1.05	1.18	1.05	1.31	1.24	1.09	118.91
低污染比例/%	28	54	51	51	51	36	46	44	75
中等污染比例/%	72	46	49	49	49	64	54	56	25

就整体而言,丹江口表层沉积物中 8 种重金属的 RI 值在 29.49 ~ 214.11, 平均值为 118.91, 小于 150, 处于低风险, 其中仅 25% 的点位处于中等风险。8 种重金属潜在生态风险指数空间分布特征见图 5, 河南西北部, 湖北库区大部分区域为处于中等生态风险, 河南库区大部分区域与湖北部分支流均处于低生态风险。

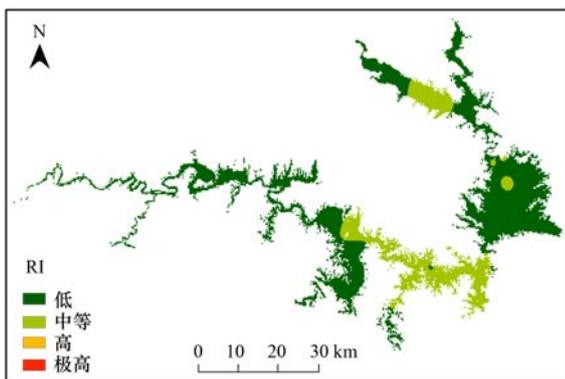


图 5 丹江口水库表层沉积物重金属潜在生态风险指数空间分布

Fig. 5 Spatial distribution about potential ecological risk indexes of heavy metals in surface sediment of Danjiangkou Reservoir

尽管通过本次评价,丹江口水库表层沉积物重金属处于低风险,但是对于 Cd 和 Hg 这类对人类危害极大的重金属元素来说,其在丹江口水库沉积物中未来的含量变化应引起关注,后期将通过水体中重金属、沉积物重金属形态分析以及与底栖生物群落结构的响应关系进一步开展深入研究。

染系数稍高,分别为 1.31 和 1.24,对比相关研究,余加平等^[21]在研究丹江口水库淹没区土壤中 Hg 大部分处于轻微生态危害程度,与本研究相近;张雷等^[31]在研究丹江口迁建区土壤重金属时,Cd 的污染系数高达 9.362,显著高于本次研究结果,这是因为其选择的背景值(0.065 mg·kg⁻¹)显著低于本次研究的背景值(0.70 mg·kg⁻¹),而本研究选取的背景值是在研究区域收集了大量样本的基础上获得的,而不是直接选取河南省或湖北省土壤环境背景值,更符合丹江口水库沉积物背景值的实际情况。

4 结论

(1) 利用参考元素法确定研究区域重金属背景值,结果显示丹江口水库沉积物中 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg 和 Pb 的背景值分别为 41.18、34.00、32.13、76.84、10.46、0.70、0.07、27.11 mg·kg⁻¹。

(2) 采用 Hakanson 潜在生态危害指数法对丹江口沉积物中重金属进行生态风险评价,丹江口表层沉积物中 8 种重金属的 RI 值在 29.49 ~ 214.11, 平均值为 118.91, 总体处于低风险。

(3) 各种重金属污染系数排序为: Cd > Hg > Zn > Cr > Pb > Ni > As = Cu, 污染系数变化范围在 0.22 ~ 2.96 之间,平均值在 1.05 ~ 1.31 之间,处于中等偏低的污染状态,其中, Cd 和 Hg 这两种危害性极大的元素污染系数稍高,其含量在丹江口沉积物中未来的变化不容忽视。

参考文献:

- [1] 雷沛. 丹江口库区及上游污染源解析和典型支流及库湾水质风险特征研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [2] Hernández-Crespo C, Martín M. Determination of background levels and pollution assessment for seven metals (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Fe, Mn) in sediments of a Mediterranean coastal lagoon [J]. Catena, 2015, 133: 206-214.
- [3] Silva N, Haro J, Prego R, et al. Metals background and enrichment in the Chiloé Interior Sea sediments (Chile). Is there any segregation between fjords, channels and sounds? [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2009, 82(3): 469-476.
- [4] Wang H T, Wang J W, Liu R M, et al. Spatial variation,

- environmental risk and biological hazard assessment of heavy metals in surface sediments of the Yangtze River estuary [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, **93**(1-2): 250-258.
- [5] Bastami K D, Neyestani M R, Shemirani F, *et al.* Heavy metal pollution assessment in relation to sediment properties in the coastal sediments of the southern Caspian Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, **92**(1-2): 237-243.
- [6] Wang J, Liu G J, Lu L L, *et al.* Geochemical normalization and assessment of heavy metals (Cu, Pb, Zn, and Ni) in sediments from the Huaihe River, Anhui, China[J]. *Catena*, 2015, **129**: 30-38.
- [7] Bektashi L, Lazo P, Qarri F, *et al.* Application of the normalization process in the survey of atmospheric deposition of heavy metals in Albania through moss biomonitoring [J]. *Ecological Indicators*, 2015, **56**: 50-59.
- [8] Birani S M, Fernandes A R, de Souza Braz A M, *et al.* Available contents of potentially toxic elements in soils from the Eastern Amazon[J]. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 2015, **75**(1): 143-151.
- [9] Roca-Perez L, Gil C, Cervera M L, *et al.* Selenium and heavy metals content in some Mediterranean soils [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2010, **107**(2): 110-116.
- [10] 吴瑕. 南水北调中线工程对汉江中下游水环境影响研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
- [11] 马瑶瑶. 丹江口库区水资源承载力研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2011.
- [12] 刘远书, 高文文, 侯坤, 等. 南水北调中线水源区生态环境变化分析研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2015, **24**(3): 440-446.
- [13] 赵文耀, 胡家庆. 丹江口水库流域面源污染现状分析 [J]. *南水北调与水利科技*, 2007, **5**(2): 50-52.
- [14] 王剑, 尹炜, 强小燕, 等. 丹江口水库新增淹没区农田土壤重金属生态危害评价 [J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(4): 568-574.
- [15] 王书航, 王雯雯, 姜霞, 等. 蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3562-3571.
- [16] 姜霞, 王雯雯, 王书航, 等. 竺山湾重金属污染底泥环保疏浚深度的推算 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1189-1197.
- [17] 姜霞, 王书航. 沉积物质量调查评估手册 [M]. 北京: 科学出版社, 2012. 113-115.
- [18] Wang S P, Wang Y H, Zhang R J, *et al.* Historical levels of heavy metals reconstructed from sedimentary record in the Hejiang River, located in a typical mining region of Southern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **532**: 645-654.
- [19] Esmacili A, Moore F, Keshavarzi B, *et al.* A geochemical survey of heavy metals in agricultural and background soils of the Isfahan industrial zone, Iran [J]. *Catena*, 2014, **121**: 88-98.
- [20] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究 [J]. *环境科学*, 2004, **25**(1): 117-122.
- [21] 余加平, 武俐, 赵同谦, 等. 丹江口水库浙川淹没区土壤中汞和砷的赋存特征及生态风险评价 [J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(1): 111-117.
- [22] 雷沛, 张洪, 单保庆. 丹江口水库典型库湾及支流沉积物重金属污染分析及生态风险评价 [J]. *长江流域资源与环境*, 2013, **22**(1): 110-117.
- [23] Chen M, Ma L Q, Hoogeweg C G, *et al.* Arsenic background concentrations in Florida, U. S. A. surface soils; determination and interpretation [J]. *Environmental Forensics*, 2001, **2**(2): 117-126.
- [24] Ma L Q, Tan F, Harris W G. Concentrations and distributions of eleven metals in Florida soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, **26**(3): 769-775.
- [25] Holmgren G G S, Meyer M W, Chaney R L, *et al.* Cadmium, Lead, Zinc, Copper, and Nickel in agricultural soils of the United States of America [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1993, **22**(2): 335-348.
- [26] Chen J S, Wei F S, Zheng C J, *et al.* Background concentrations of elements in soils of China [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1991, **57**(1): 699-712.
- [27] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值研究 [J]. *环境科学*, 1991, **12**(4): 12-19.
- [28] 邵丰收, 周皓韵. 河南省主要元素的土壤环境背景值 [J]. *河南农业*, 1998, (10): 29.
- [29] 朱青青, 王中良. 中国主要水系沉积物中重金属分布特征及来源分析 [J]. *地球与环境*, 2012, **40**(3): 305-313.
- [30] 马振东, 张德存, 闭向阳, 等. 武汉沿长江、汉江 Cd 高值带成因初探 [J]. *地质通报*, 2005, **24**(8): 740-743.
- [31] 张雷, 秦延文, 郑丙辉, 等. 丹江口水库迁建区土壤重金属分布及污染评价 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 108-115.
- [32] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [33] El Nemr A, El-Said G F, Khaled A, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of some heavy metals in coastal surface sediments along the red sea, Egypt [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2015, doi: 10.1016/j.ijsrc.2014.10.001.
- [34] Li C, Song C W, Yin Y Y, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in sediments of Shuangtaizi estuary, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, **98**(1-2): 358-364.
- [35] Wang Y Q, Yang L Y, Kong L H, *et al.* Spatial distribution, ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediments from Dongping Lake, Shandong, East China [J]. *Catena*, 2015, **125**: 200-205.

CONTENTS

Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM ₁₀ and PM _{2.5} Emissions from Stationary Sources	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)
Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer	CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing	QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)
Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan	CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)
Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)
Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust	YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)
Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus	LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)
Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation	LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)
Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters	JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)
High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan	SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)
Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities	JI Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)
Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir	ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System	WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi	YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)
Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake	LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)
Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure	GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)
Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria	LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)
Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River	TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)
Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling	MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)
Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite	XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)
Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar	TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195)
Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater	REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag	WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite	NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)
Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)
Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)
Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Floes	WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)
Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System	SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)
Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition	XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)
Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH)	WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)
Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology	WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)
Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency	HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)
Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)
Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils	ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)
Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation	ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)
Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope	SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)
Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu	CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang	LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)
Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou	GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)
Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu ²⁺ -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter	TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)
Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism	CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)
Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model	YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)
Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar	XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)
Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i>	PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)
N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition	XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)
Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu	XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)
Preparation of Visible-light-induced g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange	ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)
Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province	GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2016年6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行