

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第1期

Vol.35 No.1

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM _{2.5} 持续暴露的健康风险及其损害价值评估	谢元博, 陈娟, 李巍 (1)
长白山 PM _{2.5} 中水溶性离子季节变化特征研究	赵亚南, 王跃思, 温天雪, 戴冠华 (9)
青岛大气颗粒物数浓度变化及对能见度的影响	柯馨姝, 盛立芳, 孔君, 郝泽彤, 屈文军 (15)
重庆市大气二噁英污染水平及季节变化	张晓岭, 卢益, 朱明吉, 蹇川, 郭志顺, 邓力, 孙静, 张芹, 罗财红 (22)
西南地区再生铝冶炼行业二噁英大气排放	卢益, 张晓岭, 郭志顺, 蹇川, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (30)
西南地区新型干法水泥生产中的二噁英大气排放	张晓岭, 卢益, 蹇川, 郭志顺, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (35)
杭州市办公场所室内空气中 PBDEs 的污染现状与特征	蒋欣慰, 孙鑫, 裴小强, 金漫彤, 李云龙, 沈学优 (41)
模拟不同排放源排放颗粒及多环芳烃的粒径分布研究	符海欢, 田娜, 商惠斌, 张彬, 叶素芬, 陈晓秋, 吴水平 (46)
川东北地区元素大气沉降通量及其季节变化	童晓宁, 周厚云, 游镇烽, 汤静, 刘厚均, 黄颖, 贺海波 (53)
重庆市铁山坪 2001 ~ 2010 年酸沉降变化	余德祥, 马萧萧, 谭炳全, 赵大为, 张冬保, 段雷 (60)
汉江上游金水河流域氮湿沉降	王金杰, 张克荣, 吴川, 张全发 (66)
麦秸及其烟尘中正构脂肪酸的组成	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (73)
兰州市室内大气降尘环境磁学特征及其随高度变化研究	吴铎, 魏海涛, 赵瑞瑞, 张蕊, 刘建宝 (79)
中亚热带针阔混交林土壤-大气界面释汞通量研究	马明, 王定勇, 申源源, 孙荣国, 黄礼昕 (85)
水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO ₂ 释放的影响	柯跃进, 胡学玉, 易卿, 余忠 (93)
黄海和东海海域溶解铋地球化学分布特征	吴晓丹, 宋金明, 吴斌, 李学刚 (100)
浑河上游(清原段)水环境中重金属时空分布及污染评价	马迎群, 时瑶, 秦延文, 郑丙辉, 赵艳民, 张雷 (108)
POCIS 采样技术应用于九龙江流域水环境中雌激素的检测	张利鹏, 王新红, 李永玉, 吴玉玲, 张祖麟 (117)
降雨条件下岩溶地下水微量元素变化特征及其环境意义	陈雪彬, 杨平恒, 蓝家程, 莫雪, 师麟 (123)
锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素	唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋, 张明泉, Frauke Barthold, Lutz Breuer, Hans-Georg Frede (131)
子牙河水系河流氮素组成及空间分布特征	赵钰, 单保庆, 张文强, 王超 (143)
水稻种植对中亚热带红壤丘陵区小流域氮磷养分输出的影响	宋立芳, 王毅, 吴金水, 李勇, 李裕元, 孟岑, 李航, 张满意 (150)
黄东海表层沉积物中磷的分布特征	宋国栋, 刘素美, 张国玲 (157)
河流沉积物中有机磷提取剂 (NaOH-EDTA) 提取比例与机制研究	张文强, 单保庆, 张洪, 唐文忠 (163)
沉积物短期扰动下 BAPP 再生和转化机制	武晓飞, 李大鹏, 汪明 (171)
三峡库区典型农村型消落带沉积物风险评价与重金属来源解析	敖亮, 雷波, 王业春, 周谐, 张晟 (179)
太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价	毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 曾庆飞, 谷先坤, 李旭光 (186)
滇池沉积物中主要污染物含量时间分异特征研究	王心宇, 周丰, 伊旋, 郭怀成 (194)
浓度层析荧光光谱局部匹配溢油鉴别技术	王春艳, 史晓凤, 李文东, 张金亮 (202)
光电 Fenton 技术处理污泥深度脱水液研究	王现丽, 王世峰, 吴俊峰, 濮文虹, 杨昌柱, 张敬东, 杨家宽 (208)
同步脱氮除磷颗粒污泥硝化反硝化特性试验研究	刘小英, 林慧, 马兆瑞, 王磊, 刘静伟, 郭超, 姜应和 (214)
垃圾填埋场渗滤液短程生物脱氮的长期稳定性实验研究	孙洪伟, 郭英, 彭永臻 (221)
油田区土壤石油烃组分残留特性研究	胡迪, 李川, 董倩倩, 李立明, 李广贺 (227)
水稻光合同化碳在土壤中的矿化和转化动态	谭立敏, 彭佩钦, 李科林, 李宝珍, 聂三安, 葛体达, 童成立, 吴金水 (233)
土地利用及退耕对喀斯特山区土壤活性有机碳的影响	廖洪凯, 李娟, 龙健, 张文娟, 刘云飞 (240)
水稻土团聚体 Cu ²⁺ 吸附过程中铝的溶出及土壤溶液 pH 变化	许海波, 赵道远, 秦超, 李玉姣, 董长勋 (248)
Cr(VI) 对两种黏土矿物在单一及复合溶液中 Cu(II) 吸附的影响	刘娟娟, 梁东丽, 吴小龙, 屈广周, 钱勋 (254)
淹水时长对 3 种丛枝菌根 (AM) 真菌感染 2 种湿地植物的影响	马雷猛, 王鹏腾, 王曙光 (263)
太湖水质与水生生物健康的关联性初探	周笑白, 张宁红, 张咏, 牛志春, 刘雷, 于红霞 (271)
3 种典型污染物对水生生物的急性毒性效应及其水质基准比较	姜东生, 石小荣, 崔益斌, 李梅 (279)
某制药废水对发光细菌急性毒性的评价研究	杜丽娜, 杨帆, 穆玉峰, 余若祯, 左剑恶, 高俊发, 余忻, 滕丽君, 汤薪瑶 (286)
异丙甲草胺与锌共存对斜生栅藻毒性手性差异影响	胡晓娜, 张淑娟, 陈彩东, 刘惠君 (292)
Biotic Ligand Model 的简化模型及预测性能评价	王万宾, 陈莎, 吴敏, 苏德丽, 赵婧 (299)
基于 USEtox 的焦化行业优先污染物筛选排序研究	郝天, 杜鹏飞, 杜斌, 曾思育 (304)
微囊藻毒素降解菌 <i>Paucibacter</i> sp. CH 菌的分离鉴定及其降解特性	游狄杰, 陈晓国, 向荟圯, 欧阳溱, 杨冰 (313)
硝酸盐抑制油田采出水硫酸盐还原菌活性研究	杨德玉, 张颖, 史荣久, 韩斯琴, 李光哲, 李国桥, 赵劲毅 (319)
降解纤维素产甲烷的四菌复合系	吴俊妹, 马安周, 崔萌萌, 于清, 齐鸿雁, 庄绪亮, 庄国强 (327)
中国陆地生态系统土壤异养呼吸变异的影响因素	谢薇, 陈书涛, 胡正华 (334)
内蒙古羊草草原根呼吸和土壤微生物呼吸区分的研究	史晶晶, 耿元波 (341)
南京河流夏季水-气界面 N ₂ O 排放通量	韩洋, 郑有飞, 吴荣军, 尹继福, 孙霞 (348)
杀菌剂对湖泊水体温室气体浓度分析的影响	肖启涛, 胡正华, James Deng, 肖薇, 刘寿东, 李旭辉 (356)
生物表面活性剂强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性研究	彭海利, 张植平, 李小明, 杨麒, 罗琨, 易欣 (365)
不同硅铝比 Fe-ZSM-5 催化剂对氧化亚氮催化分解性能的研究	卢仁杰, 张新艳, 郝郑平 (371)
硫酸铵和尿素对废物焚烧过程中多种途径生成氯苯类的抑制作用	严密, 祁志福, 李晓东, 胡艳军, 陈彤 (380)
县域尺度的京津冀都市圈 CO ₂ 排放时空演变特征	汪浩, 陈操操, 潘涛, 刘春兰, 陈龙, 孙莉 (385)
保水剂性能及其农用安全性评价研究进展	李希, 刘玉荣, 郑袁明, 贺纪正 (394)

浑河上游(清原段)水环境中重金属时空分布及污染评价

马迎群^{1,2}, 时瑶^{1,2}, 秦延文^{1,2*}, 郑丙辉^{1,2}, 赵艳民^{1,2}, 张雷^{1,2}

(1. 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; 2. 中国环境科学研究院环境保护河口与海岸带环境重点实验室, 北京 100012)

摘要: 为了解浑河上游(清原段)水环境中重金属污染水平及其污染程度, 对浑河上游(清原段)表层水体和表层沉积物中6种重金属(Fe、Mn、Cu、Zn、Cd、As)的含量及时空分布分别进行了研究, 并分别采用综合污染指数评价法和地累积指数评价法对表层水体和表层沉积物中4种重金属(Cu、Zn、Cd、As)的污染程度进行了评价。结果表明, 浑河上游表层水体Mn、Cu、Zn、Cd、As的季节变化均表现为丰水期含量高于平水期和枯水期。表层水体Fe、Mn、Cu、Zn、Cd的沿程变化趋势基本相似, 均在H7站出现最高值。不同水文时期的水体pH值、硬度和DO值对水体重金属含量分布产生的影响各不相同, 水体重金属相互之间存在一定的显著性相关关系, 说明它们之间可能具有一定的同源性。浑河上游表层沉积物中Cu、Zn、Cd、Fe这4种重金属的季节变化规律均为: 枯水期 > 丰水期 > 平水期。表层沉积物中Mn、Cu、Zn、As、Cd这5种重金属的沿程变化相似, 均在中间出现一个最高值。采用综合污染指数评价法表明, 浑河上游水体大部分水质良好, 个别站位重金属污染比较突出。采用地累积指数法评价表明, 浑河上游表层沉积物主要以Cu、Cd、As污染为主。

关键词: 浑河上游; 水环境; 重金属; 时空分布; 污染评价

中图分类号: X522; X824 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)01-0108-09

Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Upper Reaches of Hunhe River (Qingyuan Section), Northeast China

MA Ying-qun^{1,2}, SHI Yao^{1,2}, QIN Yan-wen^{1,2}, ZHENG Bing-hui^{1,2}, ZHAO Yan-min^{1,2}, ZHANG Lei^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Estuarine and Coastal Environment, Water Research Institute, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The aim of this article is to explore the pollution level and contamination degree of heavy metals in the upper reaches of Hunhe River (Qingyuan Section). The contents and temporal-spatial distribution of Fe, Mn, Cu, Zn, Cd and As in surface water and surface sediments from the upper reaches of Hunhe River were analyzed respectively. The integrated pollution index and geoaccumulation index were used to evaluate the contamination degree of Cu, Zn, Cd and As. The results indicated that the contents of Mn, Cu, Zn, Cd and As in surface water from the upper reaches of Hunhe River during the wet season were higher than those during normal and dry season. Similar patterns of spatial distribution of Fe, Mn, Cu, Zn and Cd in surface water were observed, which showed that the highest content appeared at H7 station. The influence of pH, DO and hardness in the upper reaches of Hunhe River during the wet, normal and dry season on the distribution of heavy metal contents in surface water varied. Significant positive correlations were found among these elements in surface water, which implied that these elements probably had common pollution sources. The contents of Cu, Zn, Cd and Fe in surface sediments from the upper reaches of Hunhe River during the dry season were higher than those during the wet and normal season. Similar patterns of spatial distribution of Mn, Cu, Zn, As and Cd in surface sediments were also observed, which showed that the highest metal contents appeared in the midway of Hunhe River. The integrated pollution index assessment showed that the water quality in the upper reaches of Hunhe River was good except for individual stations, and that Cu, Cd and As were the main pollution elements in surface sediments in the upper reaches of Hunhe River.

Key words: the upper reaches of Hunhe River; water environment; heavy metal; temporal-spatial distribution; pollution assessment

重金属是一种重要的持久性污染物, 不易被微生物降解, 具有累积性效应^[1]。进入水体中的重金属元素, 绝大部分通过各种物理、化学、生物途径迅速由水相转入固相(悬浮物和沉积物), 最终进入沉积物中蓄积, 使沉积物成为重金属等化学物质的主要存储库^[2]。然而, 进入沉积物中的重金属类污染物质在一定的环境条件下(诸如pH、电导率、有机质的分解和生物活动等)又会被释放出来, 造成

“二次污染”^[3]。因此, 河流沉积物中重金属含量常被用作判别水环境质量的重要参考指标^[4,5]。

浑河发源于辽宁省东部抚顺市清原县的滚马

收稿日期: 2013-04-16; 修订日期: 2013-05-29

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07050-002)

作者简介: 马迎群(1982~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为重金属环境行为, E-mail: myoungking@163.com

* 通讯联系人, E-mail: qinyw@craes.org.cn

岭,属高度受控河流,是大伙房水库的主要供水河流,占水库年入库水量的 52%。大伙房水库是下游抚顺、沈阳、鞍山等 7 个城市的饮用水源地。另外,浑河还是重要的地下水补给水源,沈阳段沿岸分布着作为饮用水源的地下水取水井,其取水量占沈阳市取水总量的 70%^[6]。因此,浑河水质状况直接影响着周边地区人群的身体健康。浑河上游汇水区内的清原、新宾、抚顺这 3 县共有铁、金、铜矿产加工企业 54 家,每年开发规模 256.2 万 t。其中红透山镇的抚顺红透山矿业有限公司和清原县王家大沟金矿,污染风险较大。红透山铜矿尾矿库建于山腰,山脚下即为浑河主干道,环境风险问题突出;王家大沟尾矿库位于浑河干道,隔一山岭,风险较小,但由于氰化物毒性大,也是需要重点关注的区域^[7]。相关资料表明,河段底质重金属污染主要是由上游各支流水污染所致。如铜、金等矿产其造成的重金属污染已在水体底部沉积物中累积显现出来^[7]。近年来,在浑河的研究中,对重金属含量及分布的研究已有较多工作。马力等^[8]对浑河流域底质重金属的含量和分布状况进行了研究;张鸿龄等^[9]运用主成分分析法对浑河水体中重金属的分布及来源进行了研究;张晏漂^[10]对浑河流域沉积物中重金属分布特征及其对大型底栖动物的影响进行了相关研究。而目前对浑河水环境重金属时空分布规律的研究较少,尤其是对受到周边矿产加工企业影响的浑河上游地区研究相对较少。本文以浑河上游(清原段)为主要研究区域,分别对枯水期、平水期和丰水期的水体、表层沉积物的重金属污染现状及其变化进行研究,并分别结合综合污染指数评价法和地累积指数评价法对其表层水体和表层沉积物重金属的污染情况进行评价,以期为进一步揭示浑河由于上游矿产加工企业造成的重金属污染导致的水环境变化和为“十二五”期间浑河流域水体的治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况与站位设置

浑河干流全长 415.4 km,通常把浑河位于沈阳市与抚顺市交界处以上的流域称为浑河中上游,即位于 E120°20′~125°15′,N41°30′~41°15′的流域^[11]。该流域主要处于大陆性季风气候条件下,年均气温和多年平均降水量分别为 9℃ 和 686.4 mm,且受季风影响降雨主要集中在 6~9 月,其降水量占全年降水量的 70%~80%,河水上涨,进入汛期,河

水径流量占年径流量的 70%,浑河年均径流量为 28.5 亿 m³^[12]。在非农业灌溉季节,上游的大伙房水库停止放水,河道水量较小,基本上属于抚顺市和沈阳市废水的排放河道。近年来,由于工矿企业不达标污水的直接排放,农业生产过程中的农药、化肥大量施用,生活污水及生活垃圾的不定点排放等不合理资源开发利用活动,致使浑河流域水质遭受了不同程度的污染^[13]。

本文选择浑河上游(清原段)作为研究区域。浑河上游沿途分布多个金属冶炼、矿山开采等大型污染源,如抚顺红透山矿业有限公司、清原县王家大沟金矿等,是典型的重金属污染区域。根据东北地区河流的雨水补给情况及水量的大小将一个水文年划分为枯水期、丰水期和平水期。分别于 2011 年 11 月(平水期)、2012 年 4 月(枯水期)和 2012 年 7 月(丰水期)在浑河上游布点,从浑河上游清原开始共设置 11 个主要采样点进行采集,布点编号为 H1~H11。

其中 2011 年 11 月(平水期)未采到 H9 与 H11 点水样,2012 年 4 月(枯水期)未采到 H8 点沉积物样品,2011 年 11 月(平水期)仅采到 H3、H5 与 H10 点沉积物样品。具体采样点如图 1 所示。

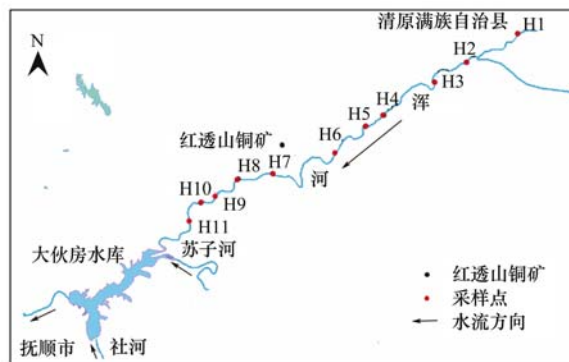


图 1 浑河上游采样示意

Fig. 1 Sampling sites from the upper reaches of Hunhe River, China

1.2 样品采集与处理

(1)表层水体样品的采集与处理 采用事先净化好的塑料桶(自来水冲洗 3 遍,高纯水冲洗 3 遍,样品采集时用河水冲洗 3 遍)在靠近河道中心部位采集水面下 0.5 m 水样,每个监测断面多点采集,然后将水样混合,并现场测定 pH 值、DO 值及硬度。样品采集后立即用 0.45 μm 滤膜抽滤,并将滤液加 HNO₃ (1 mol·L⁻¹) 酸化至 pH < 2, 运回实验室置于 4℃ 冰柜中储存待测。每个处理设 3 次重复,同时设置空白实验^[14]。

(2) 表层沉积物样品的采集与处理 用抓斗式重力采泥器采集表层沉积物样品,用木勺取顶部 0 ~ 5 cm 表层沉积物,将样品装入聚乙烯袋中密封,在实验室中于 -20℃ 条件下冷冻保存,经 FD-1A-50 型冷冻干燥机(西安德派生物仪器有限公司)冷冻干燥处理,用研钵研磨,过 100 目(0.149 mm)筛,保存于封口袋中,置于干燥器中. 沉积物样品测定重金属时采用 $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ 微波消解法消解处理待测.

1.3 测试项目与方法

(1) 重金属总量分析方法 经预处理后的水样和沉积物样品,利用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS, 美国 Agilent7500cx 型)测定样品中 6 种重金属 Fe、Mn、Cu、Zn、Cd、As 总量;分析过程中所用聚四氟乙烯容器均在 1:1 硝酸中浸泡 48 h 以上,玻璃容器浸泡 24 h,高纯水冲洗后晾干. 分析所用酸均为优级纯,水为高纯水. 实验过程中每批样品均做全程空白,以消除在样品处理及测定过程中可能带入的污染. 同时同步分析了由国家有色金属及电子材料分析测试中心生产的多元素标准样品(GSB 04-1767-2004)和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(GBW 07309),分别控制样品分析的精密度和准确度. 重金属元素平行样的相对误差 <5%,标准物的回收率在 80% ~ 120% 之间;Fe、Mn 这 2 种常量元素平行样的相对误差 <5%,标准物的回收率在 95% ~ 120% 之间.

(2) 水体重金属污染评价采用综合污染指数评价法 国内学者针对水体重金属污染评价,采取的评价方法很多,其中重金属元素综合污染指数评价法应用比较广泛^[15~17]. 该方法适用于淡水和海水,不同的水体环境采用不同的水体标准,此方法不仅能够得出单个重金属元素的污染指数,而且能够得出整个站位不同重金属元素的综合污染指数,反映重金属的综合污染程度^[18].

(3) 表层沉积物重金属污染评价采用地累积指数评价法 地累积指数法是利用重金属浓度与背景值的关系来确定重金属污染程度的参数,它能很直观地反映重金属污染级别^[18].

2 结果与讨论

2.1 浑河上游水体 pH 值、硬度和 DO 值在一个水文年内的变化

图 2 分别为浑河上游平水期、枯水期和丰水期的 pH 值、DO 值和硬度的变化. 可以看出,浑河上游平水期、枯水期和丰水期的 pH 值沿程变化趋势

比较相似. 从季节变化看,平水期和枯水期的 pH 值均略高于丰水期. 由图 2 可知,河流水体在平水期时的 pH 值为 8.89 ~ 9.77, pH 值均大于 7,属于偏碱性水平. 最高值出现于 H3 和 H5 站位,最低值出现于 H4 站位;枯水期水体的 pH 值为 7.51 ~ 9.10, pH 值均大于 7,属于偏碱性水平. 最高值出现于 H3 站位,最低值出现于 H11 站位;丰水期水体的 pH 值为 6.75 ~ 8.43,除 H7 站位(6.75)外, pH 值均大于 7,属于中性偏碱性水平,最高值出现于 H5 站位.

浑河上游水体 DO 值在一个水文年内随季节的变化呈现出高低值交替出现、且平水期与枯水期水体的 DO 含量呈现空间分布相似的变化趋势. 从季节变化看,浑河上游平水期和枯水期的 DO 含量均略高于丰水期,这与 pH 值的变化规律一致. 从图 2 可知,水体在平水期的 DO 含量为 10.83 ~ 13.05 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最高值出现在 H3 站位,最低值出现于 H1 站位;枯水期的 DO 含量为 8.46 ~ 12.54 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最高值出现在 H10 站位,最低值出现在 H11 站位;丰水期的 DO 含量为 5.40 ~ 9.21 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最高值出现在 H5 站位,最低值出现于 H3 站位.

浑河上游枯水期水体的硬度值其沿程变化比较

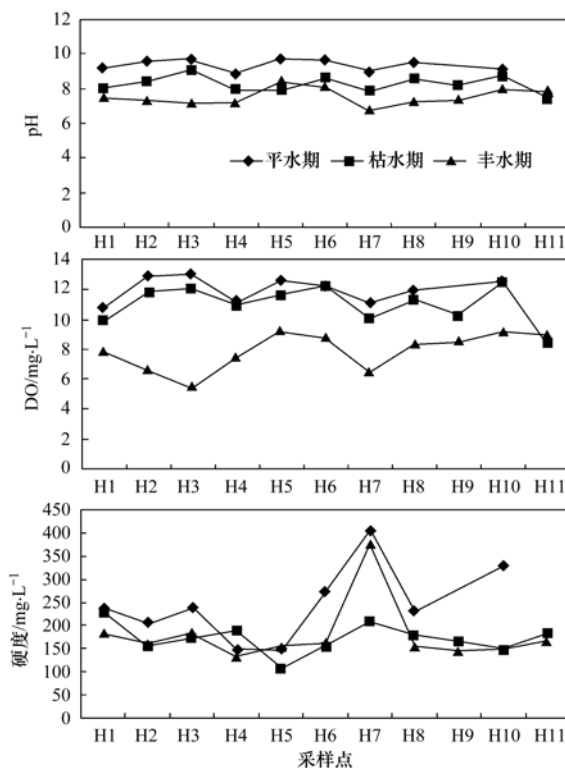


图 2 浑河上游平水期、枯水期、丰水期的 pH 值、DO 值和硬度的变化

Fig. 2 Changes of pH, DO and hardness in the upper reaches of Hunhe River

平缓,但平水期和丰水期的硬度值沿程变化却表现出一定的规律性,从 H1 ~ H5 站位的水体硬度值较低,从 H5 站位开始,随着水体流向,硬度值突然增大,直到 H7 站位达到最大值($408 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。H7 采样点为从红透山铜矿处流出的小支流与干流的汇合采样点,由于水体的 pH 值偏碱性,而且受到周边矿山的影响,可推测该区域水体中钙镁离子浓度可能较高。从季节变化看,浑河上游平水期的硬度值均高于丰水期和枯水期,丰水期和枯水期硬度值相差不大。从图 2 可知,平水期的硬度值为 $150 \sim 408 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最高值出现在 H7 站位,最低值出现在 H4 和 H5 站位;枯水期的硬度值为 $108 \sim 228 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最高值出现在 H1 站位,最低值出现在 H5 站位;丰水期的硬度值为 $132 \sim 378 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最高值出现在 H7 站位,最低值出现在 H4 站位。

2.2 浑河上游表层水体中重金属含量的分布

图 3 为浑河上游表层水体中 6 种重金属 Fe、Mn、Cu、Zn、Cd、As 在一个水文年内的分布变化。浑河上游表层水体在一个水文年内 Mn 与 Cd 的含量分别在 $\text{nd} \sim 597.1 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $\text{nd} \sim 43.65 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间。Mn 与 Cd 的含量分布具有相似的季节变化规

律:丰水期 > 平水期 > 枯水期。Cu、Zn 与 As 的含量分别在 $\text{nd} \sim 15.4$ 、 $\text{nd} \sim 1984.00$ 和 $\text{nd} \sim 1.48 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,Cu、Zn 与 As 的含量分布亦具有相似的季节变化规律:丰水期 > 枯水期 > 平水期。Fe 在一个水文年内的含量在 $\text{nd} \sim 918.1 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,其季节变化规律与其他几种重金属略有不同,表现为:平水期 > 枯水期 > 丰水期。整体看,Mn、Cu、Zn、Cd、As 这 5 种重金属的季节变化均表现出一定的规律性,其丰水期含量平均值均高于平水期和枯水期,且这 5 种重金属的最高值均出现在丰水期,造成这一现象的原因一方面浑河上游矿企分布较多,矿山遭雨水冲刷后随流水进入下游河道。另一方面这也可能与丰水期雨水径流及农业面源污染对水质的影响较大有关,丰水期受降雨等条件的影响,农田径流量加大,肥料的连续施用亦会向土壤中输入一定量的重金属,进而流入水体中的重金属浓度也随之增高^[19,20]。

从沿程变化看,重金属 Fe、Mn、Cu、Zn、Cd 的沿程变化基本相似,从 H1 ~ H6 站重金属含量变化波动不大,各点位较稳定。但从 H6 站开始,其随着水体的流向,重金属含量迅速增大,直到 H7 站达到

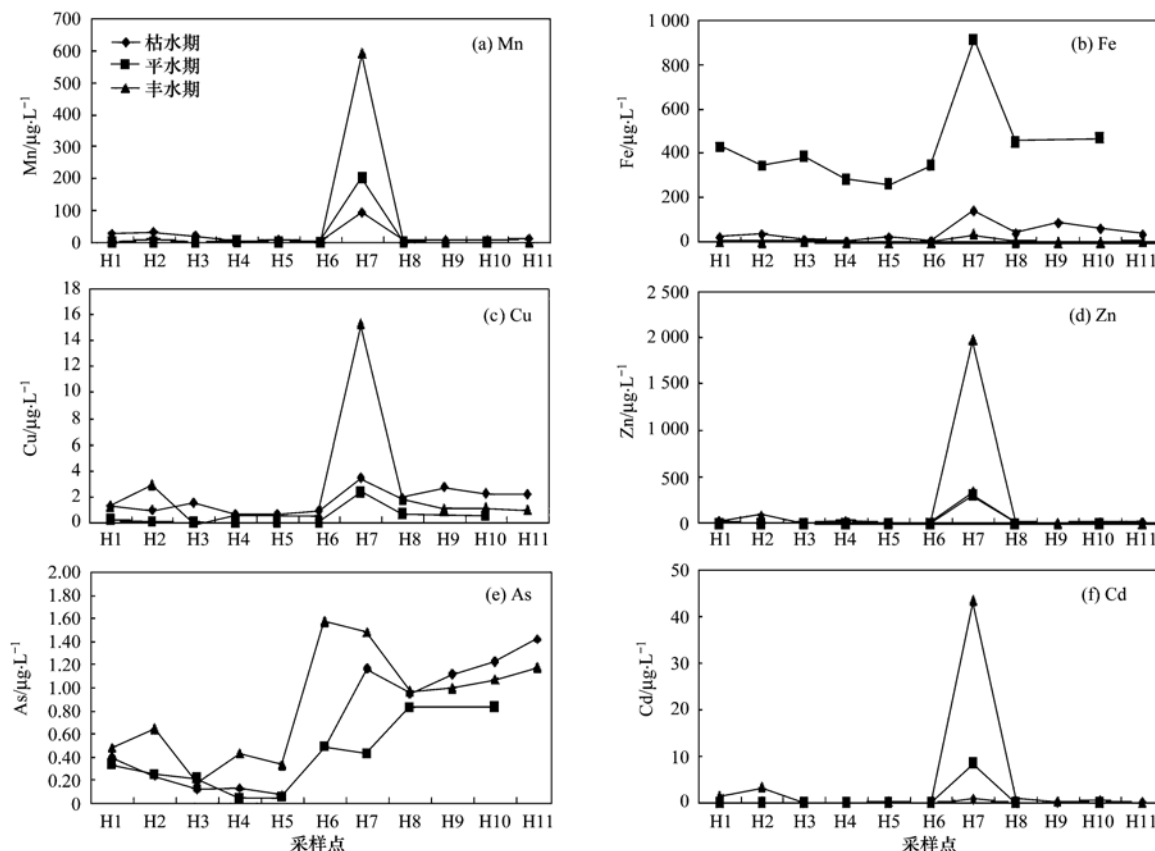


图 3 浑河上游表层水体中重金属含量沿程分布

Fig. 3 Variation of heavy metal contents in the surface water from the upper reaches of Hunhe River

最大值. 这可能与 H7 采样点所处环境有关. 该采样点周边分布多个金属冶炼、矿山开采等大型污染源. 其中,红透山铜矿位于清原县红透山镇,在大伙房水库上游约 20 km 处,是一座集采矿、选矿、冶炼于一体的国家大型矿山企业,始建于 1937 年,距今已有 70 多年的开采历史,是东北地区最大的铜矿. 红透山铜矿年排放废水量在 300×10^4 t 以上,是大伙房水库表层沉积物中重金属污染的最主要来源. 红透山铜矿等金属矿产加工企业在生产过程中产生的废水排入浑河,可能是造成该区域重金属含量过高的主要原因^[21]. 重金属元素积累最为严重的 H7 采样点很好地反映了该地区重金属污染的现状. 接着从 H7 站位开始重金属含量又急剧减小,直到 H8 站位开始慢慢降低并趋向平缓. As 的沿程变化整体亦呈现出一定的规律性,从上游到下游,其含量先减小后增大. 从上游 H1 站位开始 As 的含量逐渐降低,到达 H3 ~ H5 之间达到最低值, H1 站点位于清远满族自治县县城内,较多的生活污水排放可能是造成该点位 As 含量较高的原因. 之后 As 的含量开始直线上升,直到 H6 ~ H8 之间达到最大值,最后平缓下降. 其中 As 在一个水文年内的最高值出现在 H6 采样点,为 $1.57 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 这可能主要与 H6 采样点靠近红透山铜矿矿区及其尾矿池有关. 研究表明

该区域尤其是矿区的尾矿渣和尾矿库渗滤液中含有高浓度的 Cu、Zn、Cd、As 等重金属污染物,其尾矿库虽然进行了防渗漏处理并建有较完善的尾矿渗滤液收集回用系统,但在一些情况下,还是会有部分生产作业面、尾矿库所产生的污染水体汇入河流引起重金属污染^[7]. 由此可见,重金属元素的空间分布与污染源企业的排放存在着十分密切的关系.

2.3 浑河上游表层水体重金属与 pH、硬度和 DO 的关系

对浑河上游枯水期、平水期和丰水期表层水体的重金属含量与水体 pH、硬度和 DO 之间进行相关性分析,如表 1 所示. 可以看出,枯水期表层水体重金属 Fe、Mn、Cu、Zn、Cd、As 与水体 pH、硬度和 DO 之间无显著性相关关系,说明 pH、硬度和 DO 不是影响枯水期重金属含量分布的主要影响因子.

平水期 Fe 与 pH、硬度和 DO 之间均呈现显著性正相关性,说明平水期 Fe 在水体中的含量分布受到水体 pH、硬度和 DO 的较大影响. 而 Cu、As 与硬度之间亦呈现出显著的正相关性,表明水体硬度与 Cu 和 As 在水环境中的行为存在密切关系. 丰水期水体 Fe、Mn、Cu、Zn、Cd 与水体硬度之间均呈显著性正相关性,说明硬度对丰水期水体这 5 种元素含量的分布产生较大的影响.

表 1 浑河上游水体 pH、硬度和 DO 与水体重金属总量间的相关分析¹⁾

Table 1 Correlation matrix of pH, DO and hardness and heavy metal contents in the surface water from the upper reaches of Hunhe River										
阶段	重金属	pH	DO	硬度	Fe	Mn	Cu	Zn	Cd	As
枯水期	Fe	-0.220	-0.298	-0.237	1					
	Mn	-0.229	-0.259	0.465	0.723 *	1				
	Cu	-0.114	-0.414	0.352	0.896 **	0.549	1			
	Zn	-0.333	-0.305	0.432	0.785 **	0.924 **	0.657 *	1		
	Cd	-0.345	-0.318	0.384	0.825 **	0.864 **	0.705 *	0.984 **	1	
	As	-0.233	-0.481	0.232	0.650 *	0.183	0.837 **	0.333	0.450	1
平水期	Fe	0.681 *	0.659 *	0.939 **	1					
	Mn	0.120	0.091	0.545	0.754 **	1				
	Cu	0.204	0.178	0.656 *	0.840 **	0.944 **	1			
	Zn	0.114	0.086	0.546	0.753 **	1.000 **	0.946 **	1		
	Cd	0.120	0.092	0.554	0.760 **	0.999 **	0.951 **	1.000 **	1	
	As	0.504	0.512	0.712 *	0.585	0.119	0.404	0.127	0.143	1
丰水期	Fe	-0.595	-0.435	0.983 **	1					
	Mn	-0.545	-0.384	0.971 **	0.983 **	1				
	Cu	-0.561	-0.375	0.953 **	0.976 **	0.987 **	1			
	Zn	-0.545	-0.388	0.972 **	0.984 **	1.000 **	0.990 **	1		
	Cd	-0.551	-0.397	0.972 **	0.983 **	0.998 **	0.993 **	0.999 **	1	
	As	0.042	0.325	0.390	0.414	0.447	0.466	0.444	0.438	1

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

枯水期重金属 Fe 与 Mn、Cu、Zn、Cd、As 这 5 种重金属之间均呈现显著性正相关性, Mn 仅与 Zn

和 Cd 呈现显著性正相关性; Cu、Zn、Cd 两两之间均呈显著性正相关性, As 与 Cu 呈显著性正相关性.

与枯水期相似,平水期和丰水期的 Fe 与 Mn、Cu、Zn、Cd 这 4 种重金属之间均呈现显著性正相关性, Mn 仅与 Cu、Zn 和 Cd 呈现显著性正相关性. Cu 与 Zn、Cd 两两之间均呈显著性正相关性. 说明这些重金属迁移过程具有相似的规律,从地球化学的角度看,这些金属之间可能具有相似的地球化学行为,这也说明了它们可能具有一定的同源性,可能主要受到了浑河沿岸矿产加工企业污染的影响.

2.4 浑河上游表层沉积物中重金属含量的分布

图 4 为浑河上游表层沉积物中重金属 Fe、Mn、Cu、Zn、Cd、As 在一个水文年内的分布变化. 浑河上游表层沉积物中 Mn 和 As 的含量分别在 $221.35 \sim 3\,124.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.18 \sim 63.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间. Mn 和 As 的含量分布具有相似的季节变化规律: 丰水期 > 枯水期 > 平水期. Cu、Zn、Cd、Fe 这 4 种重金属的含量范围分别为: $23.42 \sim 723.26$ 、 $64.43 \sim 1\,862.92$ 、 $0.14 \sim 17.24$ 和 $28\,681.20 \sim 81\,319.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 4 种重金属的季节变化规律均为: 枯水期 > 丰水期 > 平水期. 整体看, Mn 的含量最高值出现在丰水期,这与其表层水体最高值的变化一致. 而 Cu、Zn、Cd、As、Fe 这 5 种重金属含量的最高值均出现在枯水期. 有资料表明,该区域沉积物中重金属主要来自上游矿山企业的洗选工艺. 进入枯水期,河流没有了雨水补给和径流,水量稀少,水体对

重金属的稀释作用减少,水体排放主要以污水为主,从而使得所选研究区域由于受到矿山的洗选和尾矿库的影响,造成枯水期重金属含量较高^[7,12].

从沿程变化看, Fe 的沿程变化与其他金属略有不同,其沿程分布特征主要表现为波峰与波谷交替出现的多峰值变化. Mn 的沿程变化趋势与 Cu、Zn、As、Cd 4 种重金属沿程变化相似,均在中途出现一个高峰值. 但 Mn 的波峰值出现在丰水期的 H6 站. Cu、Zn、As、Cd 这 4 种重金属含量的沿程变化趋势比较相似,从上游 H1 ~ H6 站, 4 种重金属含量变化不大,随着水体流向,从 H6 站开始,枯水期沉积物中 4 种重金属的含量值突然增大,到 H7 站重金属含量达到最大值. 这可能主要与 H7 采样点所处环境有关, H7 站为从红透山铜矿流出的小支流与干流的汇合点,该地区矿产开发时间已达数十年,其造成的重金属污染已在水底沉积物中累积出来. 因而受红透山铜矿尾矿库影响,该点重金属含量累积较高,环境风险问题突出^[7]. 接着从 H7 站位开始重金属含量急剧降低,并缓慢趋向平缓. 丰水期浑河上游表层沉积物 Cu、Zn、As、Cd 这 4 种重金属的最高值除 Zn 出现在 H6 站, Cd 出现在 H10 站外,其余均出现在 H8 站. 研究表明尾矿中的大量重金属通过地表水释放并沉淀到沉积物中, 4 种重金属最高值所在站位均靠近红透山铜矿,在水量充沛的丰水期

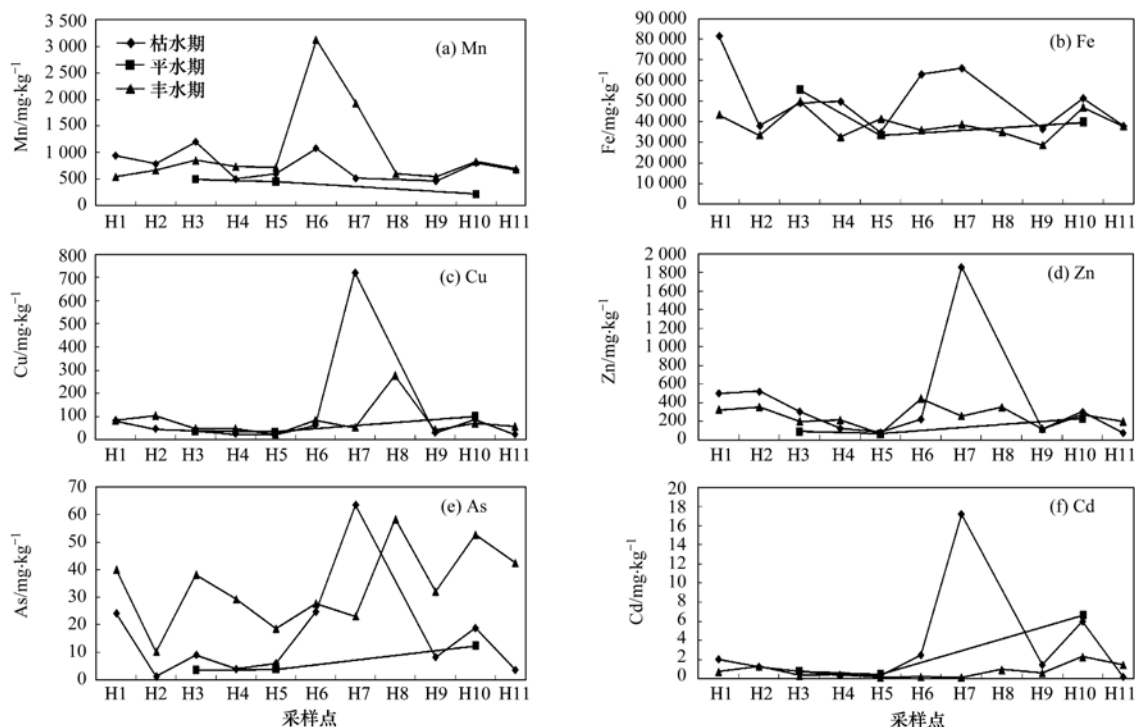


图 4 浑河上游表层沉积物中重金属含量沿程分布

Fig. 4 Variation of heavy metal contents in the surface sediments from the upper reaches of Hunhe River

重金属通过雨水的冲刷释放并沉淀到沉积物中,使得矿山周边沉积物中富集了高含量的重金属^[22]. 而4种重金属Cu、Zn、As、Cd的平水期含量最高值则出现在H10站,H10采样点地处北杂木大桥,所处环境污染主要为生活污染. 进入平水期后随着水量的减少,雨水对周边尾矿库重金属的冲刷减少,因而该采样点重金属含量较高可能主要来源于生活污染,本研究认为该点重金属高值的出现集中反映了人为污染的影响.

2.5 浑河上游水环境重金属污染评价

2.5.1 浑河上游水体综合污染指数评价法

重金属元素综合污染指数评价法是将同一站位的所有要研究的重金属元素作为一个统一的整体,研究这些重金属元素在相互作用的情况下对环境产生的影响. 本研究利用综合污染指数评价法^[23~25]对浑河上游水体重金属污染状况进行评价,其计算公式为:

$$A_i = C_i / C_{si} \quad (1)$$

$$WQI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i \quad (2)$$

式中, A_i 表示重金属元素*i*的污染指数; C_i 表示重金属元素*i*的实测含量; C_{si} 表示重金属元素*i*的评价标准(取地表水环境质量标准Ⅰ类标准作为浑河上游各重金属元素评价标准); n 为元素个数;WQI为水质综合污染指数.

当WQI≤1时,表明该水域无重金属污染;当1<WQI≤2时,表明该水域重金属为轻度污染;当2<WQI≤3时,表明该水域重金属为中度污染;当WQI>3时,表明该水域重金属为重度污染.

通过计算得到浑河上游各站位不同水文时期水体重金属综合污染指数(见表2). 结果表明,枯水期各站位除H7站外,WQI值介于0.02~0.18之间,均小于1,表明枯水期浑河上游绝大部分水体无重金属污染. H7站WQI值介于2~3之间,表明枯水期该采样点为中度污染;平水期各站位除H7站外,WQI值介于nd~0.05之间,均小于1,表明平水期浑河上游绝大部分水体无重金属污染. H7站WQI值>3,表明平水期该采样点为重度污染;丰水期各站位除H2和H7站外,WQI值介于0~0.56之间,均小于1,表明丰水期浑河上游大部分水体无重金属污染. H2站WQI值介于1~2之间,表明丰水期该采样点为轻度污染. H7站WQI值远远大于3,表明丰水期该采样点为重度污染.

综合水体重金属元素综合污染指数评价法对浑

表2 浑河上游水体重金属元素的综合污染指数

Table 2 Comprehensive pollution index of heavy metal in the surface water from the upper reaches of Hunhe River

采样点	WQI		
	枯水期	平水期	丰水期
H1	0.15	0.01	0.56
H2	0.02	0.00	1.36
H3	0.04	0.00	0.00
H4	0.17	0.00	0.02
H5	0.02	0.01	0.10
H6	0.03	0.00	0.03
H7	2.03	3.75	21.22
H8	0.07	0.05	0.36
H9	0.09	nd	0.15
H10	0.17	0.04	0.23
H11	0.18	nd	0.04

河上游不同水文时期水体重金属元素浓度进行评价,所得结果为:浑河上游大部分水体水质良好,个别站位如H7站由于受到周边矿产企业的影响重金属污染比较突出,需要引起注意,并采取相关措施加以有效地管理和控制.

2.5.2 浑河上游表层沉积物重金属地累积指数评价

德国科学家Müller^[26]于1979年提出的地累积指数法是目前沉积物重金属污染评价中使用最为广泛的方法. 计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 C_j / (kB_j)$$

式中, C_j 为实测重金属含量,mg·kg⁻¹; B_j 为普通页岩中重金属地球化学平均背景值,考虑辽河水系表层沉积物重金属背景值^[8],取Cu:39,Cd:1.1,Zn:172,As:9,mg·kg⁻¹; k 为考虑到造岩运动可能引起背景值波动而设定的常数,取 $k=1.5$.

依据 I_{geo} 将沉积物中重金属污染状况划分为7个等级,结果见表3.

根据地累积指数法计算公式和重金属污染程度与 I_{geo} 的关系,将样品重金属污染的实测结果转换为 I_{geo} 和污染程度分级,结果见表4. 可以看出枯水期浑河上游表层沉积物受到重金属污染的程度总体上为轻度污染. 其中Cu与Cd相对为主要污染物,各重金属元素污染程度由强到弱顺序依次为Cu(轻度污染)>Cd(轻度污染)>Zn(轻度污染)>As(轻度污染). 平水期浑河上游表层沉积物受到重金属污染的程度总体上为清洁. 丰水期浑河上游表层沉积物受到重金属污染的程度总体上为轻度污染,其中As与Cu相对为主要污染物,As的污染程度达到偏中度污染.

综合表层沉积物重金属地累积指数评价法对浑

表3 重金属污染程度与 I_{geo} 的关系
Table 3 Classification of I_{geo} and heavy metal contamination levels

项目	污染指标						
I_{geo}	$I \leq 0$	$0 < I \leq 1$	$1 < I \leq 2$	$2 < I \leq 3$	$3 < I \leq 4$	$4 < I \leq 5$	$I > 5$
污染级别	清洁	轻度污染	偏中度污染	中度污染	偏重污染	重污染	严重污染

表4 浑河上游表层沉积物重金属污染元素的地累积指数及污染程度
Table 4 The I_{geo} of heavy metal contamination levels in the surface sediments from the upper reaches of Hunhe River

阶段	项目	Cu	Zn	Cd	As	平均值
枯水期	I_{geo}	0.83	0.53	0.82	0.13	0.58
	污染程度	轻度污染	轻度污染	轻度污染	轻度污染	轻度污染
平水期	I_{geo}	-1.90	-2.90	-1.19	-2.92	-2.23
	污染程度	清洁	清洁	清洁	清洁	清洁
丰水期	I_{geo}	0.49	-0.02	-1.05	1.33	0.19
	污染程度	轻度污染	清洁	清洁	偏中度污染	轻度污染

河上游不同水文时期沉积物重金属元素浓度进行评价,可以看出4种重金属中Cu、Cd、As对研究区域的沉积物环境产生了一定污染,应当引起相关部门的注意.

3 结论

(1)从季节变化看,浑河上游水体Mn、Cu、Zn、Cd、As的季节变化均表现为丰水期含量高于平水期和枯水期. Fe的季节变化规律为:平水期>枯水期>丰水期;从空间变化看,浑河上游水体Fe、Mn、Cu、Zn、Cd的沿程变化趋势基本相似,且均在H7站出现最高值. As则呈现出从上游到下游,其含量先减小后增大的趋势.

(2)从季节变化看,浑河上游表层沉积物Fe、Cu、Zn、Cd这4种重金属的季节变化均表现为:枯水期>丰水期>平水期. Mn和As的季节变化则为:丰水期>枯水期>平水期;从空间变化看,Mn、Cu、Zn、As、Cd这5种重金属沿程变化相似,且均在H6或H7站出现一个高峰值. Fe的沿程分布表现为波峰与波谷交替出现的多峰值变化.

(3)位于红透山铜矿矿区附近的H6或H7站点水体或沉积物中较高的重金属含量说明矿区活动已经对浑河水质造成了影响;而丰水期水体中重金属含量最高也提醒人们注意加强此时的浑河水质管理.

(4)采用水体综合污染评价法对浑河上游水体重金属污染状况进行评价,结果表明,浑河上游水体大部分水质良好,个别站位由于受到周边矿产企业的影响重金属污染比较突出;采用地累积指数法对浑河上游表层沉积物重金属污染状况进行评价,结

果表明,浑河上游表层沉积物主要以Cu、Cd、As污染为主,需要引起注意. 浑河上游水体和表层沉积物重金属污染状况可能主要是受到周边矿产加工企业的影响以及重金属元素自身地球化学特征等几个方面综合作用的结果.

参考文献:

[1] 蒋炳言,汪琳琳. 中国水系沉积物重金属污染研究现状[J]. 科技信息, 2009, (9): 383.

[2] Zhan S F, Peng S T, Liu C G, et al. Spatial and temporal variations of heavy metals in surface sediments in Bohai Bay, North China[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2010, 84(4): 482-487.

[3] Segura R, Arancibia V, Zuniga M C, et al. Distribution of copper, zinc, lead and cadmium concentrations in stream sediments from the Mapocho River in Santiago, Chile [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2006, 91(1-3): 71-80.

[4] 贾振邦,陈静生,陶澎,等. 鸭绿江(丹东段)重金属污染及潜在生态危害评价[J]. 环境保护科学, 1993, 19(1): 24-30.

[5] Akcay H, Oguz A, Karapire C. Study of heavy metal pollution and speciation in Buyak Menderes and Gediz river sediments[J]. Water Research, 2003, 37(4): 813-822.

[6] 胡成,苏丹. 综合水质标识指数法在浑河水质评价中的应用[J]. 生态环境学报, 2011, 20(1): 186-192.

[7] 刘冲. 大伙房水库上游矿产企业的潜在风险研究[J]. 环境保护科学, 2011, (3): 34-36.

[8] 马力,杨晓波,佟成治,等. 辽宁省浑河流域底质中重金属元素地球化学特征[J]. 岩矿测试, 2008, 27(3): 184-188.

[9] 张鸿龄,孙丽娜,赵国苹. 运用主成分分析法评价浑河水体中重金属污染源[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2012, 24(5): 5-9.

[10] 张晏凇. 浑太河沉积物中重金属分布特征及其对大型底栖动物的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2012.

[11] 张志军. 浑河中、上游水生生物多样性及其保护[J]. 辽宁城乡环境科技, 2000, 20(5): 55-58.

- [12] 张鸿龄, 孙丽娜, 罗庆, 等. 浑河流域水体污染的季节性变化及来源[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(1): 119-125.
- [13] 陈艳丽, 范远东, 孙鹏. 应用模糊综合评判法评价浑河干流水质[J]. 水生态学杂志, 2012, **33**(2): 39-42.
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 38-48.
- [15] GB 3838-2002, 中华人民共和国地表水环境质量标准[S]. 2002.
- [16] 蔡文贵, 林钦, 贾晓平, 等. 考洲洋重金属污染水平与潜在生态危害综合评价[J]. 生态学杂志, 2005, **24**(3): 343-347.
- [17] 林洪瑛, 韩舞鹰. 珠江口伶仃洋枯水期十年前后的水质状况与评价[J]. 海洋环境科学, 2001, **20**(2): 28-31.
- [18] 陈奎, 周勇华, 张怀静. 东昌湖水体和表层沉积物重金属元素污染评价[J]. 中国海洋大学学报, 2012, **42**(10): 97-105.
- [19] 王起超, 麻壮伟. 某些市售化肥的重金属含量水平及环境风险[J]. 农村生态环境, 2004, **20**(2): 62-64.
- [20] 郑丙辉, 曹承进, 秦延文, 等. 三峡水库主要入库河流氮营养盐特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 1-6.
- [21] 罗燕, 秦延文, 张雷, 等. 大伙房水库表层沉积物重金属污染分析与评价[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(5): 987-995.
- [22] 符志友, 杨元根, 吴丰昌, 等. 铅锌矿区地表环境中重金属元素的时空动态变化及生物有效性探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, **27**(1): 89-97.
- [23] 廖为权, 姜齐. 水质评价的浓度级数法[J]. 水文, 1992, (3): 45-49.
- [24] 沈春燕, 冯波, 卢伙胜. 茂名放鸡岛海域水体重金属的分布与污染评价[J]. 海洋通报, 2008, **27**(5): 116-120.
- [25] 林洪瑛, 韩舞鹰. 珠江口伶仃洋枯水期十年前后的水质状况与评价[J]. 海洋环境科学, 2001, **20**(2): 28-31.
- [26] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. GeoJournal, 1979, **2**(3): 108-118.

CONTENTS

An Assessment of PM _{2.5} Related Health Risks and Impaired Values of Beijing Residents in a Consecutive High-Level Exposure During Heavy Haze Days	XIE Yuan-bo, CHEN Juan, LI Wei (1)
Seasonal Variation of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} at Changbai Mountain	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (9)
Variation of Atmospheric Particle Number Concentrations in Qingdao and Its Impact on Visibility	KE Xin-shu, SHENG Li-fang, KONG Jun, <i>et al.</i> (15)
Concentrations of PCDD/Fs in the Atmosphere of Chongqing City and Its Seasonal Variation	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, ZHU Ming-ji, <i>et al.</i> (22)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Secondary Aluminum Metallurgy Industry in the Southwest Area, China	LU Yi, ZHANG Xiao-ling, GUO Zhi-shun, <i>et al.</i> (30)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Modern Dry Processing Cement Kilns with Preheating in the Southwest Area, China	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, JIAN Chuan, <i>et al.</i> (35)
Pollution Status and Characteristics of PBDEs in Indoor Air of Hangzhou	JIANG Xin-wei, SUN Xin, PEI Xiao-qiang, <i>et al.</i> (41)
Size Distribution of Particle and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Particle Emissions from Simulated Emission Sources	FU Hai-huan, TIAN Na, SHANG Hui-bin, <i>et al.</i> (46)
Atmospheric Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Elements in Northeast of Sichuan, Central China	TONG Xiao-ning, ZHOU Hou-yun, YOU Chen-feng, <i>et al.</i> (53)
Trend in Acid Deposition at Tieshanping, Chongqing During 2001-2010	YU De-xiang, MA Xiao-xiao, TAN Bing-quan, <i>et al.</i> (60)
Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen of the Jinshui Watershed in the Upper Hanjiang River	WANG Jin-jie, ZHANG Ke-rong, WU Chuan, <i>et al.</i> (66)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Wheat Straw and Its Smoke	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (73)
Magnetic Properties of Indoor Dustfall at Different Heights in Lanzhou	WU Duo, WEI Hai-tao, ZHAO Rui-rui, <i>et al.</i> (79)
Mercury Fluxes from Conifer-Broadleaf Forested Field in Central Subtropical Forest Zone	MA Ming, WANG Ding-yong, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (85)
Impacts of Rice Straw Biochar on Organic Carbon and CO ₂ Release in Arable Soil	KE Yue-jin, HU Xue-yu, YI Qing, <i>et al.</i> (93)
Geochemical Distribution of Dissolved Bismuth in the Yellow Sea and East China Sea	WU Xiao-dan, SONG Jin-ming, WU Bin, <i>et al.</i> (100)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Upper Reaches of Hunhe River (Qingyuan Section), Northeast China	MA Ying-qun, SHI Yao, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (108)
Determination of Estrogenic Compounds in Water of Jiulong River Using Polar Organic Chemical Integrative Sampler	ZHANG Li-peng, WANG Xin-hong, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (117)
Variation Characteristics and Environmental Significant of Trace Elements Under Rainfall Condition in Karst Groundwater	CHEN Xue-bin, YANG Ping-heng, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (123)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Xilin River Basin and the Possible Controls	TANG Xi-wen, WU Jin-kui, XUE Li-yang, <i>et al.</i> (131)
Forms and Spatial Distribution Characteristics of Nitrogen in Ziya River Basin	ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (143)
Impact of Rice Agriculture on Nitrogen and Phosphorus Exports in Streams in Hilly Red Soil Earth Region of Central Subtropics	SONG Li-fang, WANG Yi, WU Jin-shui, <i>et al.</i> (150)
Study on Distribution of Phosphorus in Surface Sediments of the Yellow Sea and the East China Sea	SONG Guo-dong, LIU Su-mei, ZHANG Guo-ling (157)
Characterization and Optimization of the NaOH-EDTA Extracts for Solution ³¹ P-NMR Analysis of Organic Phosphorus in River Sediments	ZHANG Wen-qiang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (163)
Regeneration and Transformation of BAPP in Suspended Solids Under Short-term Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng, WANG Ming (171)
Sediment Risk Assessment and Heavy Metal Source Analysis in Typical Country Water Level Fluctuated Zone (WLFZ) of the Three Gorges	AO Liang, LEI Bo, WANG Ye-chun, <i>et al.</i> (179)
Pollution Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Different Eastern Dredging Regions of Lake Taihu	MAO Zhi-gang, GU Xiao-hong, LU Xiao-ming, <i>et al.</i> (186)
Study on the Stages of Major Sediments in Dianchi Lake	WANG Xin-yu, ZHOU Feng, YI Xuan, <i>et al.</i> (194)
Oil Spill Identification Using Partial Surface Fitting Method Based on Concentration-Synchronous-Matrix-Fluorescence Spectra	WANG Chun-yan, SHI Xiao-feng, LI Wen-dong, <i>et al.</i> (202)
Treatment of Sludge Liquor Produced in Deep Dehydration by Photoelectro-Fenton Process	WANG Xian-li, WANG Shi-feng, WU Jun-feng, <i>et al.</i> (208)
Characteristics of Nitrification and Denitrification for Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal by Granular Sludge	LIU Xiao-ying, LIN Hui, MA Zhao-rui, <i>et al.</i> (214)
Study on Long-Term Stability of Biological Nitrogen Removal via Nitrite from Real Landfill Leachate	SUN Hong-wei, GUO Ying, PENG Yong-zhen (221)
Compositions and Residual Properties of Petroleum Hydrocarbon in Contaminated Soil of the Oilfields	HU Di, LI Chuan, DONG Qian-qian, <i>et al.</i> (227)
Dynamics of the Mineralization and Transformation of Rice Photosynthesized Carbon in Paddy Soils - a Batch Incubation Experiment	TAN Li-min, PENG Pei-qin, LI Ke-lin, <i>et al.</i> (233)
Effects of Land Use and Abandonment on Soil Labile Organic Carbon in the Karst Region of Southwest China	LIAO Hong-kai, LI Juan, LONG Jian, <i>et al.</i> (240)
Aluminum Dissolution and Changes of pH in Soil Solution During Sorption of Copper by Aggregates of Paddy Soil	XU Hai-bo, ZHAO Dao-yuan, QIN Chao, <i>et al.</i> (248)
Effect of Cr(VI) Anions on the Cu(II) Adsorption Behavior of Two Kinds of Clay Minerals in Single and Binary Solution	LIU Juan-juan, LIANG Dong-li, WU Xiao-long, <i>et al.</i> (254)
Effect of Flooding Time Length on Mycorrhizal Colonization of Three AM Fungi in Two Wetland Plants	MA Lei-meng, WANG Peng-teng, WANG Shu-guang (263)
Preliminary Study on the Relationship Between the Water Quality and the Aquatic Biological Health Status of Taihu Lake	ZHOU Xiao-bai, ZHANG Ning-hong, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (271)
Acute Toxicity of Three Typical Pollutants to Aquatic Organisms and Their Water Quality Criteria	JIANG Dong-sheng, SHI Xiao-rong, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (279)
Evaluation of the Acute Toxicity of Pharmaceutical Wastewater to Luminescent Bacteria	DU Li-na, YANG Fan, MU Yu-feng, <i>et al.</i> (286)
Influence of the Coexistence of Zn ²⁺ on the Enantioselective Toxicity of Metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	HU Xiao-na, ZHANG Shu-xian, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (292)
Simplification of Biotic Ligand Model and Evaluation of Predicted Results	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (299)
Priority Pollutants Ranking and Screening of Coke Industry based on USEtox Model	HAO Tian, DU Peng-fei, DU Bin, <i>et al.</i> (304)
Isolation, Identification and Characterization of a Microcystin-degrading Bacterium <i>Paucibacter</i> sp. Strain CH	YOU Di-jie, CHEN Xiao-guo, XIANG Hui-yi, <i>et al.</i> (313)
Inhibition of the Activity of Sulfate-reducing Bacteria in Produced Water from Oil Reservoir by Nitrate	YANG De-yu, ZHANG Ying, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (319)
Bioconversion of Cellulose to Methane by a Consortium Consisting of Four Microbial Strains	WU Jun-mei, MA An-zhou, CUI Meng-meng, <i>et al.</i> (327)
Factors Influencing the Variability in Soil Heterotrophic Respiration from Terrestrial Ecosystem in China	XIE Wei, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua (334)
Study on the Distinguishing of Root Respiration from Soil Microbial Respiration in a <i>Leymus chinensis</i> Steppe in Inner Mongolia, China	SHI Jing-jing, GENG Yuan-bo (341)
Nitrous Oxide Flux at the Water-Air Interface of the Rivers in Nanjing During Summer	HAN Yang, ZHENG You-fei, WU Rong-jun, <i>et al.</i> (348)
Effects of Antiseptic on the Analysis of Greenhouse Gases Concentrations in Lake Water	XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, James Deng, <i>et al.</i> (356)
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cell Enhanced by Biosurfactant	PENG Hai-li, ZHANG Zhi-ping, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (365)
Fe-ZSM-5 Catalysts with Different Silica-Alumina Ratios for N ₂ O Catalytic Decomposition	LU Ren-jie, ZHANG Xin-yan, HAO Zheng-ping (371)
Inhibition of Chlorobenzene Formation via Various Routes During Waste Incineration by Ammonium Sulfate and Urea	YAN Mi, QI Zhi-fu, LI Xiao-dong, <i>et al.</i> (380)
County Scale Characteristics of CO ₂ Emission's Spatial-Temporal Evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (385)
Characterization and Soil Environmental Safety Assessment of Super Absorbent Polymers in Agricultural Application	LI Xi, LIU Yu-rong, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (394)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年1月15日 35卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 1 Jan. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行