



环境科学
Environmental Science
ISSN 0250-3301, CN 11-1895/X

《环境科学》网络首发论文

题目: 千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素
作者: 高煜, 王国兰, 金梓函, 张军, 耿雅妮
DOI: 10.13227/j.hjlx.202102008
收稿日期: 2021-02-01
网络首发日期: 2021-05-19
引用格式: 高煜, 王国兰, 金梓函, 张军, 耿雅妮. 千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素. 环境科学. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202102008>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素

高煜¹，王国兰¹，金梓函¹，张军^{1,2*}，耿雅妮¹

(1. 宝鸡文理学院陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室，宝鸡 721013；2. 长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室，陕西 西安 710064)

摘要：为了研究千河下游水体-沉积物重金属污染特征、风险程度及其影响因素，采集千河下游表层沉积物 19 份及水样 20 份，使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定 8 种重金属(As、Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb 和 Zn)含量，分析了水体中重金属含量和健康风险，对沉积物重金属空间分布及污染特征进行探析，以 DEM、气温和降水等 11 种因子为自变量，结合地理探测器和地理加权回归模型对沉积物重金属污染影响因素进行空间分异探究。结果表明，千河下游 8 种水体重金属浓度均未超过地表水环境质量标准 II 类水体标准，其中 Pb 元素变异系数为 3.11，浓度高值区主要集中于东岭冶炼公司和凤翔火车站周围。水体成人致癌物 R^c 均值为 $7.72E-06$ ，呈较轻风险程度，儿童致癌物 R^c 均值为 $1.17E-04$ ，呈强风险程度，成人与儿童非致癌物风险均为可承受风险程度，儿童 $R_{总}$ 的高值主要集中凤翔火车站周边，呈较强风险程度；千河下游沉积物重金属除 As 和 Mn 外，其余 6 中元素均超过陕西省土壤背景值，其中 Cd 元素含量均值为 1.12 mg kg^{-1} ，是陕西省土壤背景值的 12 倍，Cd、Zn 和 Pb 污染较严重，主要分布在长青村、南湾村地区、牛家滩村、高庄和东岭冶炼公司周围；研究区沉积物重金属 PLI_{zone} 为 1.71，属于轻度污染；DEM、温度和降水是沉积物重金属 PLI 空间格局的主要自然影响因素，其交互作用均为非线性增强，对沉积物重金属空间污染扩散起到一定驱动作用。

关键词：重金属；空间分布；风险评价；地理探测器；地理加权回归 (geographical weighted regression, GWR)；千河

DOI:10.13227/j.hj.kx.202102008

Spatial Distribution, Risk, and Influencing Factors of River Water-Sediment Heavy Metals in the Lower Reaches of the Qianhe River

GAO Yu¹, WANG Guo-lan¹, JIN Zi-han¹, ZHANG Jun^{1,2*}, GENG Ya-ni¹

(1. Shanxi Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulation, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The spatial distribution of heavy metals in rivers is affected by human activities and the natural environment, and human health risks are closely related to heavy metal pollution. In order to study the characteristics, risk levels and influencing factors of heavy metal pollution in the lower reaches of the Qianhe River, 19 surface sediments and 20 water samples were collected in the lower reaches of the Qianhe River, and the contents of 8 heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb and Zn) were measured by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), the concentrations of heavy metals in water bodies and health risks were analyzed, and the spatial distribution and pollution characteristics of heavy metals in sediments were determined. Taking DEM, air temperature, precipitation and other 11 factors as independent variables, the spatial differentiation of influencing factors of heavy metal pollution in sediments were explored based on geo-detector and geo-weighted regression model. The results showed that the 8 heavy metal contents of water in the lower reaches of Qianhe River did not exceed the "Surface Water Environmental Quality Standards" II the standard for water-like bodies, in which the variation coefficient of Pb element was 3.11, and the high content areas were mainly concentrated around Dongling Smelting Company and Fengxiang Railway Station. The average R^c value of adult carcinogens in water bodies was $7.72 E-06$, showing a low risk level, and the children's carcinogens average R^c value was $1.17 E-04$,

收稿日期：2021-02-01；修订日期：2021-05-10

基金项目：国家自然科学基金项目 (41771215)；旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室 (长安大学) 开放基金项目 (300102290504)；陕西省社科界重大理论与现实问题研究项目 (2020Z042)；陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室项目 (20JS010)

作者简介：高煜(1996~)，男，硕士研究生，主要研究方向为 GIS 与环境风险评价，E-mail: 1032807791@qq.com

*通信作者，E-mail: zhangjun1190@126.com

showing a strong risk degree. The non-carcinogen risks of adults and children were both tolerable. The total high R value of children was mainly concentrated around Fengxiang Railway Station, showing a strong degree of risk. Sedimentation in the lower reaches of Qianhe River except for As and Mn, the other six elements exceed the soil background value in Shaanxi Province. The average content of Cd element was 1.12 mg kg^{-1} , which was 12 times the soil background value in Shaanxi Province. The pollution of Cd, Zn, and Pb were serious, mainly distributed in Changqing Village, Nanwan Village and Niujiatan Village, Gaozhuang and Dongling Smelting Company. PLI_{zone} of heavy metals in the sediments in the study area was 1.71, which was light pollution. DEM, temperature and precipitation were the main natural factors influencing the spatial pattern of heavy metal PLI in sediments, and their interactions were nonlinear enhanced, which play a certain driving role in the spread of heavy metals in sediments. This research can provide a scientific basis for urban planning and human health risks in the Qianhe River.

Key words: heavy metals; spatial distribution; risk assessment; geographic detector; geographical weighted regression (GWR); Qianhe River

目前, 河流中重金属污染已经成为重要的环境问题^[1,2]. 河流水体中的重金属不仅会危害水体生态环境, 还会对河流沉积物及周边土壤环境造成严重危害^[3,4]. 然而, 河流沉积物又是水环境的源和汇^[5,6], 当水体理化性质发生改变时, 沉积物中重金属会再次进入水体, 造成二次污染^[7,8]. 由于重金属具有难降解、易富集和生物毒性的特征, 水体中重金属随着农业活动进入土壤及农作物中, 最终通过食物链进入人体, 危害人体健康. 因此, 研究河流系统内重金属污染对河流周边城乡整体规划和人体健康具有重要意义.

国内外学者对河流重金属研究主要集中于风险评价^[9,10]、空间分布^[11,12]、源解析^[13,14]和地球化学等. 张博文等^[15]对汾阳河水体重金属污染研究中, 发现河水中主要污染元素是 Hg、Cr、Zn 和 Pb, 并且多数点位重金属元素含量均超过地表水环境 III 类标准. 李少华等^[16]对青海湖河流流域重金属研究发现流域重金属自上游到下游具有明显富集性. 林承奇等^[17]在九龙江河流的研究中, 发现沉积物重金属主要来源于自然源、化石燃料及农业活动. 然而, 对流域水体-沉积物重金属污染系统性研究较少, 缺乏流域水体-沉积物重金属污染特征、生态健康风险的空间化表达. 因此, 采用 GIS 对河流水体-沉积物重金属污染系统性研究, 有助于整体评价流域水环境重金属对当地生态环境和人体健康造成的影响.

当前, 已有研究者对重金属污染扩散或聚集的地理环境因素进行了研究, 但多以人为活动角度探寻区域重金属污染的驱动因素. 影响重金属污染空间分布的因素较为复杂, 除了人为活动外, 特殊区域环境、气温和降水对重金属污染扩散也有一定的影响. 李雨等^[18]和肖武等^[19]的研究利用地理探测器模型, 定量描述了自然和环境因子对重金属污染的影响, 由于地理探测器能定量表达探测目标空间分异性和变量之间的交互作用, 因此也有部分学者进行了研究^[20~25]. 但地理探测器仅能实现全局影响因子定量化表达, 无法对重金属污染的影响因子进行局部分析, 缺乏在空间定量表达. 韩静等^[26]利用地理探测器和 GWR 模型对中国重点镇布局进行了定量分析, 发现地理探测器与 GWR 模型结合定量分析既能消除 GWR 多因子多重共线性问题^[27,28], 又能将影响因子定量空间可视化. 因此, 将地理探测器与地理加权回归模型相结合, 弥补两者的不足, 可对流域重金属污染影响因素定量空间可视化局部分析.

千河下游陈仓段, 为千河入渭口河段, 该流域人口众多、交通密集且厂矿遍布, 其中上游是宝鸡市水源地之一的冯家山水库. 此前, 该区域长青镇工业园区周边曾发生过儿童血铅事件, 有学者对工业园区周边土壤重金属污染进行了研究^[29,30], 但缺乏对千河下游流域沉积物及水体重金属系统性研究, 加之千河下游部分乡镇地区还存在饮用地下水/井水. 因此, 本文借助 GIS 对千河下游水体及沉积物中重金属含量进行空间分布特征分析, 对水体重金属健康风险和沉积物重金属污染进行评价, 并采用地理探测器和地理加权回归模型, 引入 DEM、气温和降水等 11 种影响因子, 对沉积物重金属污染影响因子进行空间分异和回归分析, 以期千河流域城镇规划及人体健康风险提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

千河发源于甘肃省六盘山地区, 是渭河较大的支流之一, 在宝鸡市陈仓区底店汇入渭河, 本文研究区选取千河下游入渭口 (宝鸡市陈仓区段, 图 1). 研究区人口密度 673 人 km^{-2} , 河道地势平坦, 海拔 $507\sim 600 \text{ m}$, 土壤耕层有机质含量在 1% 以上, 全县 97% 一等地分布于此, 年平均日照 $2100\sim 2130 \text{ h}$. 千河中游为冯家山水库水源地, 河流西部分布宝鸡鑫隆保温材料泡沫厂、千河玫瑰园、陕西燕园德普新能源科技公司和汽车维修厂等设施. 河流东部分布有宝中铁路线、宝鸡睿智石油机械配件公司、康源牧业、长青能源化工和宝鸡市厚德耐磨材料公司, 银昆高速、宝凤高速以及陇千铁路在此汇集.

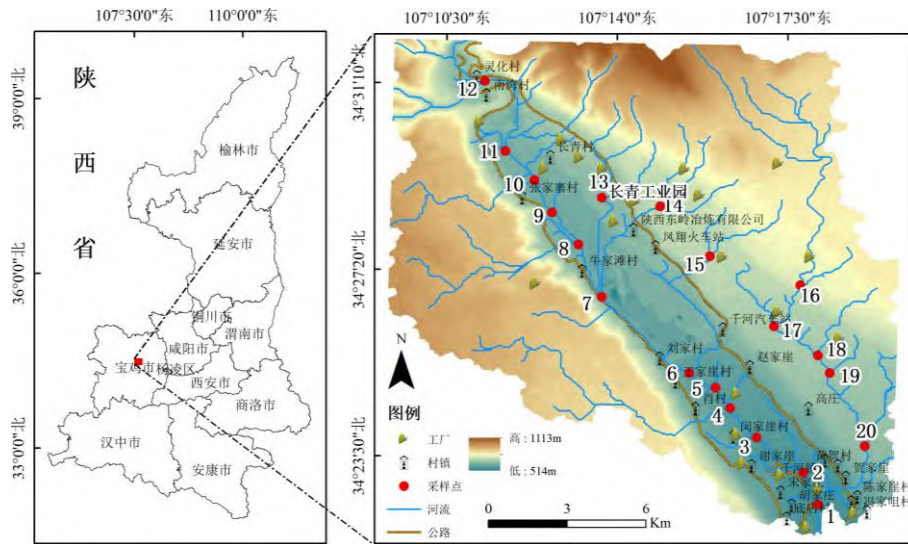


图1 研究区采样点示意

Fig. 1 Sampling points in study area

1.2 数据来源

1.2.1 样品采集及处理

对千河下游进行水文分析, 结合当地实际情况, 2019 年 4 月使用 GPS 定位仪确定采样点位, 实际采样中, 由于 6 号点位河流底部未有沉积物, 因此共采集表层 0~10cm 的河流沉积物 19 份, 3~4 处混合均匀, 放入聚乙烯样品袋内, 水样 20 份均采集河流 0~15cm 表层水, 装入乙烯塑料瓶内, 带回实验室待测. 称取风干后沉积物样品 0.1000 g, 沉积物采用 $\text{HClO}_4\text{-HNO}_3\text{-HF-H}_2\text{O}_2$ 法用全自动消解仪(Deena II, Thomas Cain, US)进行消解, 水样中加入浓硝酸使 $\text{pH}<2$ 后, 用 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤. 采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, NexION350X, PE)测定沉积物及水中 Cd、As、Cu、Pb、Zn、Cr、Mn 和 Ni 的含量, 重复 3 次, 采用 GSD12^[31]作为质量控制样, 回收率控制在 90%~105%. 实验所用药剂均为优级纯, 水为超纯水.

1.2.2 数据获取

结合研究区实际情况, 选取数字高程 (DEM)、植被覆盖指数(NDVI)、土地利用类型、土壤类型、黏土、砂土、降水、温度、距铁路距离、距道路距离及距工厂距离这 11 个因子. DEM(GDEMDEM 30m)及影像数据(Landsat 8 OLI_TIRS)来自于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 矢量数据来自全国地理信息资源目录服务系统 (<http://www.webmap.cn/>), 其余数据均来自资源环境数据云平台 (<http://www.resdc.cn/>), 在 ArcGIS 10.5 与 ENVI 5.3 中对数据进行相应预处理.

1.3 研究方法

1.3.1 污染负荷指数

Tomlinson 等^[32]在关于沉积物的研究中提出了污染负荷指数(pollution load index, PLI), 由于能够对沉积物重金属污染进行定量评价, 因此本文选用 PLI 对千河下游沉积物重金属污染进行评价. 计算公式为:

$$CF_i = \frac{C_i}{C_n} \quad (1)$$

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n} \quad (2)$$

$$PLI_{\text{ZONE}} = \sqrt[m]{PLI_1 \times PLI_2 \times \dots \times PLI_m} \quad (3)$$

式中, CF_i 为元素 i 的污染指数; C_i 和 C_n 分别表示元素 i 含量实测值和背景值, mg kg^{-1} ; n 为所测元素总量; PLI_{ZONE} 为沉积物总污染负荷指数; m 表示样本容量. 污染分级标准如表 1 所示.

表 1 污染分级标准

Table 1 Pollution classification standards

项目	无污染	轻度污染	中度污染	重度污染
参数	$CF \leq 1$	$1 < CF \leq 2$	$2 < CF \leq 3$	$CF > 3$
	$PLI \leq 1$	$1 < PLI \leq 2$	$2 < PLI \leq 3$	$PLI > 3$

1.3.3 健康风险评价模型

采用 US EPA 健康风险评价模型，对千河河水中 4 种非致癌物（Pb、Zn、Cu、Mn）和 4 种化学致癌物（As、Cd、Ni、Cr）进行评估，判断千河下游河流水体中重金属对人体健康的风险情况。模型公式如下。

非化学致癌污染物健康(R^n)风险评价模型：

$$D_i = \frac{\theta \cdot C_i}{BW} \quad (4)$$

$$R_i^n = \frac{D_i \times 10^{-6}}{RfD_i} \quad (5)$$

$$R^n = \sum R_i^n \quad (6)$$

式中， D_i 为非致癌物 i 经饮水途径的单位日均暴露计量， mg (kg d)^{-1} ； θ 为人体每日平均饮水量（成人 2.2 和儿童 1.0）， L d^{-1} ； BW 为陕西省人体平均体重（成人 64.06 和儿童 19.14）， kg ； R_i^n 为非致癌物 i （共 m 种）经饮水途径所产生的健康危害的个人平均年风险， a^{-1} ；

化学致癌污染物健康风险(R^c)评价模型：

$$R_i^c = 1 - e(-D_i q_i) / 76.34 \quad (7)$$

$$R^c = \sum R_i^c \quad (8)$$

式中， R_i^c 为致癌物 i （共 k 种）通过饮水途径产生的个人致癌年风险， a^{-1} ； D_i 为致癌物 i 通过饮水途径的单位日均暴露计量， mg (kg d)^{-1} ； e 为常数， q_i 为致癌物 i 的饮水途径致癌强度系数，本研究中采用的强度系数标准如表 3， mg (kg d)^{-1} ；76.34 为研究区人均寿命， a ； C_i 为致癌物或非致癌物的实际质量浓度， mg L^{-1} 。

总健康风险 $R_{\text{总}}$ ：

$$R_{\text{总}} = R^n + R^c \quad (9)$$

由于当前对于健康风险评价缺乏统一划分等级，本研究将 ICRP 推荐的最大可接受风险水平($5\text{E}-05$)、US EPA 推荐的可接受风险限值($1\text{E}-06$)以及耿雅妮等^[33]和郑德凤等^[34]对水质健康风险等级划分标准相结合，采用的划分标准如表 3。

表 2 健康风险评价模型参数

Table2 Health risk assessment model parameters

化学致癌物	饮水途径 $q_i/\text{mg (kg d)}^{-1}$	非化学致癌物质	饮水途径 $RfD_i/\text{mg (kg d)}^{-1}$
Cr	41.0	Pb	1.4×10^{-3}
Cd	6.1	Cu	5.0×10^{-3}
As	15.0	Zn	3.0×10^{-4}
Ni	2.0×10^{-2}	Mn	1.4×10^{-1}

表 3 水质健康风险等级划分标准
Table 3 Water quality health risk classification standard

水质健康 年 风险值(R)	$R < 1E-06$	$1E-06 \leq R$ <1E-05	$1E-05 \leq R$ <5E-05	$5E-05 \leq R$ <1E-04	$1E-04 \leq R$ <5E-04	$5E-04 \leq R$ <1E-03	$R \geq 1E-03$
风险等级	可承受 风险级	较轻风 险级	轻风 险级	较强风 险级	强风 险级	很强风 险级	超强风 险级

1.3.4 地理探测器

地理探测器是基于空间分异理论,采用空间统计方法,探测并定量分析各影响因子间交互作用的工具.该模型由因子探测器、生态探测器、风险探测器和交互探测器这 4 个子模型组成,其中因子探测器是核心部分.模型如下:

$$P_{D,H} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m n_{D,i} \sigma_{D,i}^2}{n \sigma^2} \quad (10)$$

式中, $P_{D,H}$ 为影响因子因子 D 对 H (重金属含量空间分布)的解释力, n 为总的研究区单元数, $n_{D,i}$ 为因子 D 中第 i 分区的单元数, σ 为沉积物重金属含量的总标准差, $\sigma_{D,i}$ 为因子 D 中第 i 分区标准差. $P_{D,H}$ 的大小表示空间分异程度的强弱, $P_{D,H} \in [0, 1]$, 当 $P_{D,H}$ 值越靠近 1 时, 则空间分异性越强, 反之亦然.

交互作用探测器衡量双因子对重金属含量的解释力, 若值越靠近 1, 则表示交互作用越明显(表 1)^[20,21], 交互作用结果分为 5 类(表 4).本文试图根据因子探测器和交互作用探测器的结果, 揭示地理、环境和气象要素对千河下游沉积物综合污染负荷指数 (PLI) 空间分布影响.

表 4 交互作用结果划分
Table4 Interaction result partitioning

交互结果	解释力
非线性减弱	$P_{D,H}(x \cap y) < \min[P_{D,H}(x), P_{D,H}(y)]$
单因子减弱	$\min[P_{D,H}(x), P_{D,H}(y)] < P_{D,H}(x \cap y) < \max[P_{D,H}(x), P_{D,H}(y)]$
相互独立	$P_{D,H}(x \cap y) = P_{D,H}(x) + P_{D,H}(y)$
双因子增强	$P_{D,H}(x \cap y) > \max[P_{D,H}(x), P_{D,H}(y)]$
非线性增强	$P_{D,H}(x \cap y) > P_{D,H}(x) + P_{D,H}(y)$

1.3.5 地理加权回归模型

GWR 是一种局部空间回归模型,能够量化反应空间自相关的数值, 同时也能反应各参数在不同区域内的空间异质性^[35], GWR 公式为:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (11)$$

式中, y_i 为研究区沉积物采样点 i 的因变量 PLI 值; β_0 为截距, (u_i, v_i) 为沉积物采样点 i 的坐标, $\beta_0(u_i, v_i)$ 为采样点 i 的常数项; $\beta_k(u_i, v_i)$ 为沉积物 PLI 样点 i 的第 k 个自变量(影响因子)的系数, x_{ik} 为采样点 i 的第 k 个自变量; ε_i 为随机误差项.

2 结果与讨论

2.1 千河水体重金属分析

2.1.1 水体重金属描述分析

千河水体中 8 种重金属浓度(表 5)均未超过地表水环境质量标准(GB 3838-2002)II 类水体标准^[36], 其中非致癌物重金属元素均值为: $Zn(10.8\mu g \cdot L^{-1}) > Cu(2.89\mu g \cdot L^{-1}) > Mn(0.95\mu g \cdot L^{-1}) > Pb(0.52\mu g \cdot L^{-1})$, 致癌物重金属元素均值为: $Ni(7.89\mu g \cdot L^{-1}) > As(4.54\mu g \cdot L^{-1}) > Cr(2.52\mu g \cdot L^{-1}) > Cd(0.06\mu g \cdot L^{-1})$.变异系数能够反应各样点间重金属浓度空间分布的差异性, 当变异系数大于 0.5 时, 表明重金属浓度在空间分布上极不均匀, 并且可能存在由外来影响的点源污染可能性^[37].通过表 6 发现, 研究区 8 种水体重金属变异系数均大于 0.5, 其中 Pb 的变异系数最高, 达到了 3.11, 考虑可能是受到外部因素影响较大.

与国内其他流域、河流水体中重金属浓度相比,千河水体中重金属浓度整体处于中等水平.博尔塔拉河 Cd 和 Cr 元素浓度超过地表水环境质量标准(GB 3838-2002) II 类水体标准,其中 Cr 元素浓度远超过 II 类水体标准.清姜河中的 Pb 元素浓度远超过地表水环境质量标准(GB 3838-2002) II 类水体标准.致癌物重金属元素浓度对比:千河中 As 元素在 6 条河中浓度最高,浓度最小的是清姜河;博尔塔拉河中的 Cd 和 Cr 浓度是 6 条中最高的,浓度最小的是望虞河;千河中 Ni 元素浓度远大于清姜河、沙颍河和望虞河中的 Ni 元素浓度.非致癌物重金属元素浓度对比:清姜河中的 Cu 元素浓度是 6 条中最高的,浓度最小的是望虞河;沙颍河中 Mn 元素浓度最高,浓度最小的是千河;清姜河中 Pb 元素浓度远高于其余 5 条河流,浓度最小的是望虞河;清姜河中的 Zn 元素浓度是 6 条河流中最高的,浓度最小的是望虞河.

表 5 千河水体重金属描述统计¹⁾/μg·L⁻¹
Table 5 Descriptive statistics of heavy metals in Qianhe River/μg·L⁻¹

河流	项目	元素							
		As	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
千河（本研究）	平均值	4.54	0.06	2.52	2.89	0.95	7.89	0.52	10.8
	标准差（无量纲）	11.56	0.07	1.86	3.54	2.49	4.56	1.62	6.32
	变异系数（无量纲）	2.55	1.12	0.74	1.22	2.63	0.58	3.11	0.58
清姜河 ^[33]	平均值	0.48	0.19	18.91	4.48	7.26	1.9	43.92	54.85
博尔塔拉河 ^[38]	平均值	4.2	7.5	59	3.9	—	—	45	28
沙颍河 ^[39]	平均值	2.87	0.14	0.38	1.3	58.82	0.95	0.96	9.09
望虞河 ^[40]	平均值	0.96	0.007	0.11	0.1	—	0.98	0.03	0.54
沅河 ^[41]	平均值	1.7	0.3	2.6	0.6	4.6	—	6.9	0.6
地表水环境质量标准 II 类		10	5	50	1000	100	20	10	1000

1) “—”表示文献中无数据

2.1.2 水体重金属空间分布

千河下游水体中重金属除 Cr 元素外,其余 7 种重金属浓度最高值均出现在 14 号和 15 号点位的东岭冶炼公司和凤翔火车站(图 2),从图 2 中可以看出,水体中重金属浓度高值地区周围,分布的工厂较为密集,尤其是东岭冶炼有限公司,该企业主要进行黑色金属冶炼和压延加工.13 号和 14 号点位之间的长青工业园,工业规划面积达 5 万 Km²,主要进行有色金属冶炼、焦化及发电等工业生产.河流水体中重金属浓度高值地区周围环境较为复杂,可能是受到工厂生产及人类活动的影响.Cd、Pb 和 Mn 浓度较高地区主要集中在研究区上部,其中最高值在 15 号凤翔火车站点位,该地区交通网络较为密集,陇千铁路南线、宝冯公路、宝凤公路以及千河汽车站均在此地交汇,并且该地区还是居民聚集地,人口分布也较为密集.因此,河流水体中 Cd、Pb 和 Mn 可能受到道路交通的影响.Ni 和 Zn 元素除最高值外,其余浓度较高地区主要在集中在研究区中下部及河流西部,通过调查发现,河流中、西部主要以农业和农业产业园为主.Cu 除最高值外,其余较高地区主要出现河流中东部区域,该地区主要分布有大量机械加工厂、砂石厂.在采样的过程中发现,部分采砂厂及机械加工厂排污口直接通向河流中,排污口的水体及沉积物均为黑色.Cr 浓度最高值出现在入渭口附近,该地区是银昆高速、宝凤公路、陇千铁路线交汇处,且该地区还分布有天马彩钢金属公司、利源新型建材厂等建材厂,其余高值区出现在东岭冶炼公司和凤翔火车站周围.匡荟芬等^[42]在重金属污染研究中发现,工厂活动、矿业开采以及农业活动是重金属污染的主要来源.结合千河下游水体中重金属空间分布以及实地调查,千河下游的工业生产及人类活动,可能是造成水体中重金属浓度空间变异的主要原因.

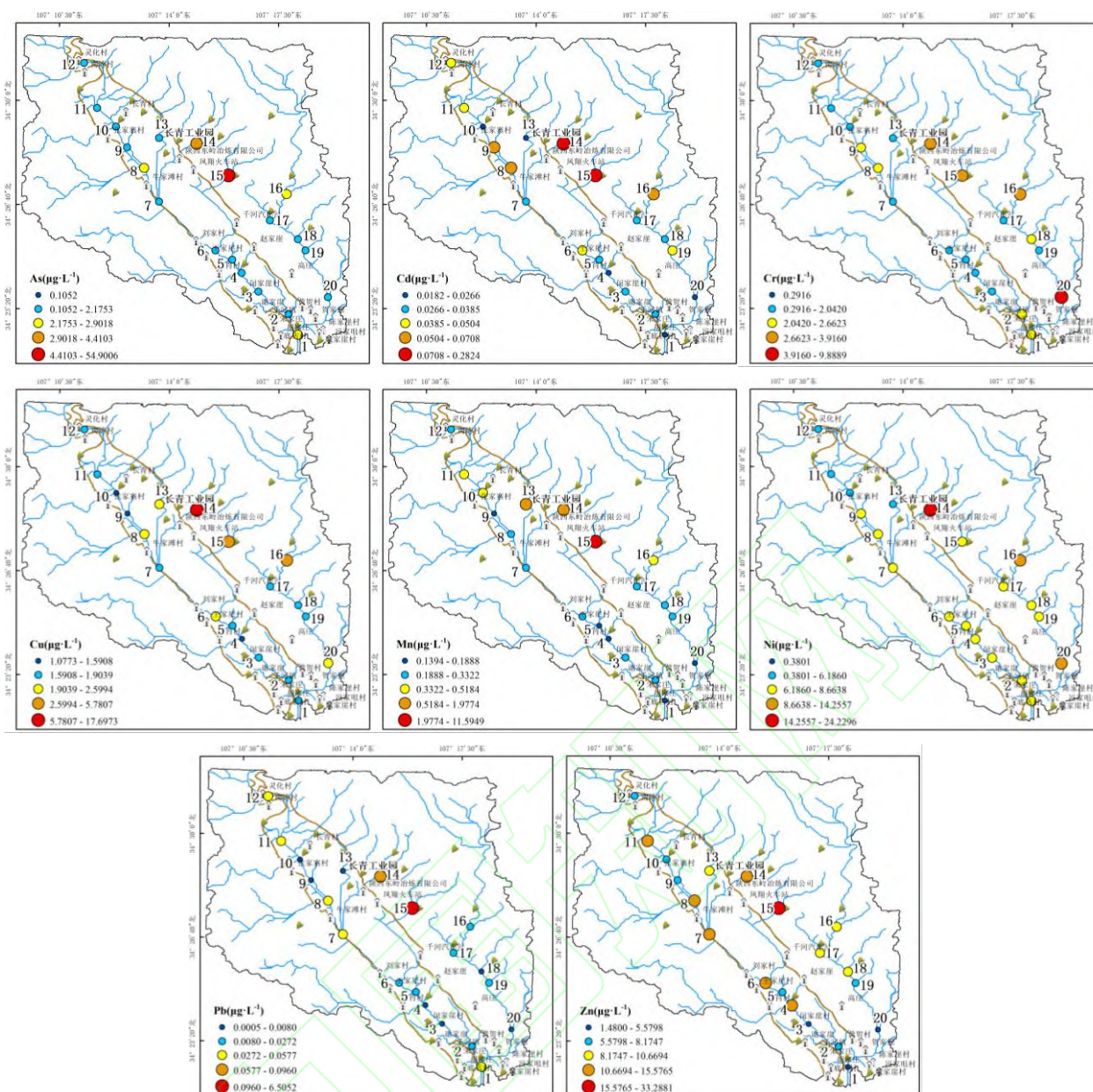


图2 千河水体重金属浓度空间分布

Fig 2 Spatial distribution of heavy metal concentration in Qianhe River

2.1.3 水体重金属健康风险评价

由于研究区上游为水源地，因此对千河水体4种致癌物重金属(As、Cr、Ni和Cd)和非致癌物重金属(Pb、Zn、Cu和Mn)进行健康风险评价(图3)。成人致癌物风险均值降序为：Cr>As>Cd>Ni， R^c 均值为 $7.72\text{E}-06$ ，其中Cr元素呈较轻风险程度，其余3种元素呈可承受风险，整体成人致癌物风险呈较轻风险程度；儿童致癌物风险均值降序为：Cr>As>Cd>Ni， R^c 均值为 $1.17\text{E}-04$ ，其中Cr元素为较强风险，As元素为轻风险，Cd和Ni元素呈可承受风险，整体儿童致癌物风险为强风险等级，需要引起重视。

成人非致癌物风险均值为：Cu>Pb>Zn>Mn， R^n 均值为 $3.94\text{E}-11$ ，4种非致癌物元素均呈可承受风险程度，整体成人非致癌物风险呈可承受风险程度；儿童非致癌物风险均值为：Cu>Pb>Zn>Mn， R^n 均值为 $6.79\text{E}-10$ ，研究区4种非致癌物元素均呈可承受风险程度，研究区整体儿童非致癌物风险呈可承受风险等级。研究区成人 $R_{\text{总}}$ 整体处于较轻和轻风险等级，儿童 $R_{\text{总}}$ 最低值为 $6.2\text{E}-05$ ，处于较强风险程度，最高值为 $6.5\text{E}-04$ ，处于很强风险程度，表明研究区儿童重金属健康风险程度较为严重，需引起当地政府关注。

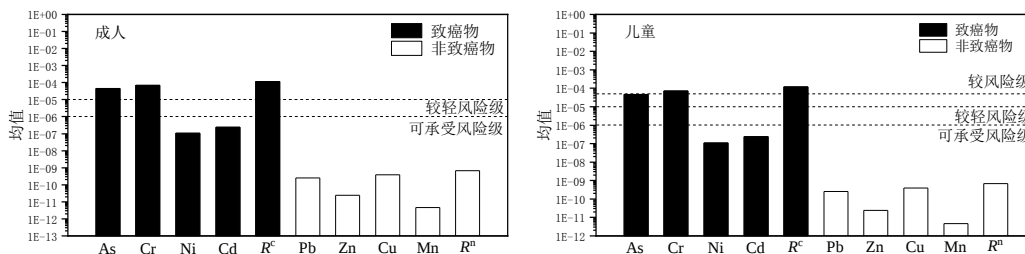


图 3 千河水体重金属健康风险评价

Fig. 3 Health risk assessment of heavy metals in Qianhe River

2.2 千河沉积物重金属

2.2.1 沉积物重金属描述分析

千河沉积物 8 种重金属含量(表 6)与陕西省土壤背景值相比,除 As 和 Mn 外,其余元素含量均值均超过背景值,其中 Cd 元素含量远高于背景值 12 倍,其次为 Zn、Pb、Ni、Cu 和 Cr 元素与陕西省背景值比值为 4.42、2.55、1.35、1.19 和 1.10,耿雅妮等^[13]对宝鸡市河流沉积物重金属研究中,发现 Cd 含量远超陕西省土壤背景值.变异系数可反映元素在不同样点间的变异程度^[43],通过表 6 可知,研究区 Cd、Zn 和 Pb 元素变异系数较大,分别为 0.54、0.48 和 0.42,在空间分布上存在较大差异,部分样点污染严重,可能受外部因素影响较大,污染来源较为复杂^[44,45].

表 6 千河沉积物重金属描述统计

Table 6 Description statistics of heavy metals in sediments of Qianhe River

元素	均值/mg kg ⁻¹	范围/mg kg ⁻¹	变异系数	峰度	偏度	陕西省背景值/mg kg ⁻¹	与背景值比值
As	8.62	2.98~14.88	0.36	-0.03	0.40	11.2	0.73
Cd	1.12	0.19~2.37	0.54	-0.45	0.53	0.094	12
Cr	68.70	27.96~126.54	0.38	-0.17	0.72	62.5	1.09
Cu	25.47	12.66~43.65	0.36	-0.88	0.35	21.4	1.19
Mn	423.00	185.12~781.71	0.34	1.12	0.76	557	0.75
Ni	38.89	20.87~56.00	0.20	1.16	-0.08	28.8	1.35
Pb	54.65	21.20~92.20	0.42	-1.36	0.13	21.4	2.55
Zn	307.07	174.22~691.26	0.48	2.13	1.64	69.4	4.42

2.2.2 沉积物重金属含量空间分布特征

沉积物中重金属各元素含量在空间分布上存在明显的差异性(图 4),高值点位在空间分布上存在相似性.其中,As 和 Zn 元素在空间分布格局较为一致,高值均集中在 7 号和 9 号点位的牛家滩村和高庄,其次是 14 号和 15 号点位的东岭冶炼公司和凤翔火车站.实地调查发现,牛家滩村和高庄周围耕地较多,多以小麦为主,且该地区农业生产多使用农药化肥.何宇等^[46]在九江流域重金属污染研究中,发现农业化肥的使用是 Zn 和 As 主要来源之一.因此,考虑千河下游沉积物中重金属污染可能是该地农业活动中,大量使用含 As 和 Zn 的农药化肥,通过地表径流或迁移,从而造成沉积物中重金属富集;Cd 元素高值区主要集中在 11、12 和 13 号点位的长青村、南湾村地区和 1 号点位的千河入渭口,该地区是陇千铁路干线和宝凤高速交叉地区,该地区人口众多、道路线路密集,并且长青工业园等工厂分布于此.Pb 元素高值区主要在牛家滩村、陇千铁路干线和宝凤高速交叉地区、凤翔火车站以及高庄周围地区,结合空间分布图 and 实际调查发现,Cd 和 Pb 高值区周围均为人口众多、道路密集,车流量较大地区.张兆永等^[47]在博尔塔拉河重金属污染研究中发现,交通运输、城镇生活是 Cd 和 Pb 元素主要来源,因此考虑千河下游沉积物 Cd 和 Pb 污染,可能受到人为活动、交通和汽车尾气排放影响;Mn 和 Ni 含量及其变异系数较低,结合土壤类型和土地利用类型,高值区土壤类型主要以褐土性土壤为主,土地利用类型主要以未利用地和林地、草地为主.陈秀端等^[48]在西安城市居民区重金属污染研究中,发现 Mn 和 Ni 元素的主要来源是成土母质,受到自然因素影响,与本文的结果一致.Cu 高值区主要在东岭冶炼公司和凤翔火车站、闵家崖村及高庄,Cr 高值区主要分布在陇千铁路干线和宝凤高速交叉地区、东岭冶炼公司和凤翔火车站、牛家滩村及高庄,尽管 Cu 和 Cr 在空间分布上略有差异,但实际调查发现,Cu 和 Cr 高值区大多分布机械加工厂、冶炼厂和汽车维修厂等工厂,尤其在千河入渭口处工厂众多.李锋等^[49]在宁波市土壤重金属研究中发现,Cu 和 Cr 的主要来源是工厂、企业和人类活动,因此,结合研究区实际情况,千河下游沉积物的 Cu 和 Cr 重金属污染可能是受到厂矿生产排放的影响.

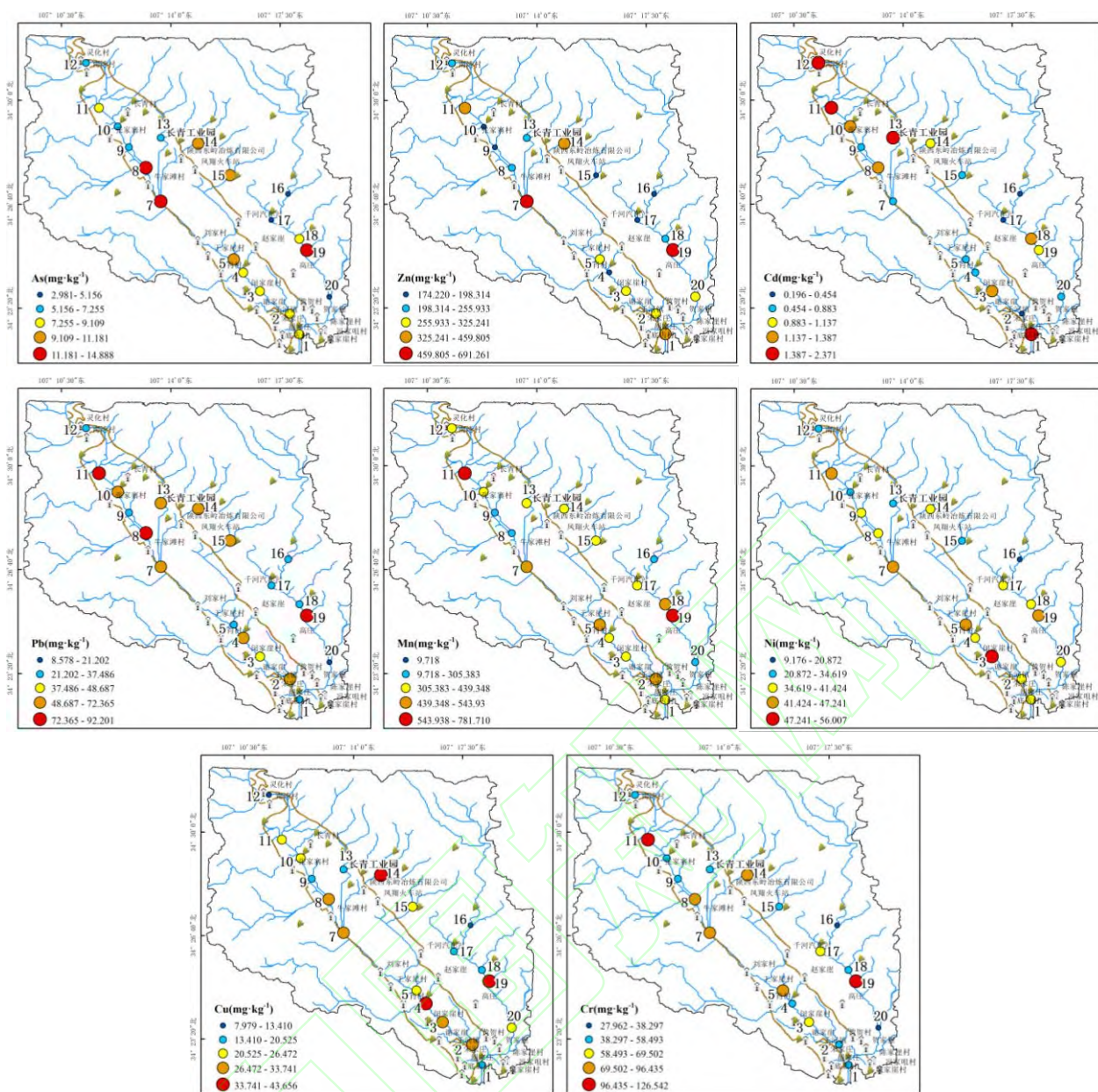


图4 千河沉积物重金属含量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of heavy metal content in sediments of Qianhe River

2.2.3 沉积物重金属污染及空间分布

通过 PLI 污染负荷指数计算, 研究区沉积物重金属 As 和 Mn 元素含量 CF 均值小于 1, 属于无污染程度; Cu、Cr 和 Ni 均值在 1~2 之间, 属于轻度污染程度; Pb 均值为 2.55, 属于中度污染; Zn 和 Cd 均值均超过 3, 其中 Cd 均值为 12, 属于重度污染; 研究区沉积物重金属 PLI_{zone} 为 1.71, 属于轻度污染。

沉积物重金属 PLI 的污染空间分布可知 (图 5), 研究区沉积物重金属各元素污染区域呈现明显的差异性, 中度和重度污染地区主要集中在长青村、高庄和牛家滩村及东岭冶炼公司, 其余轻度和无污染地区较为分散, 研究区整体呈轻度污染.表明研究区沉积物重金属污染问题, 主要存在于工矿企业和交通密集区域。

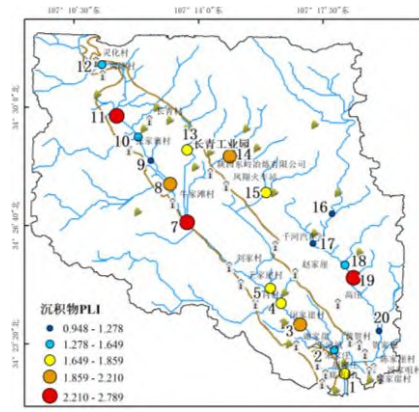


图5 千河沉积物重金属污染负荷指数 (PLI)

Fig. 5 Heavy metal pollution load index of Qianhe River sediment

2.3 沉积物重金属污染影响因子分析

2.3.1 影响因子分类

对研究区沉积物重金属污染负荷指数(PLI)进行影响因子分析,各影响因子在 ArcGIS 10.5 中处理成 200 m×200 m 的格网数据,提取相应的格网中心值,采用自然间断法分类,DEM、NDVI、温度和降水均分为 6 类,土壤类型和土地利用均分为 5 类,黏土为 3 类分类,距铁路、道路和工厂距离均为做多环缓冲区分类(如图 6).

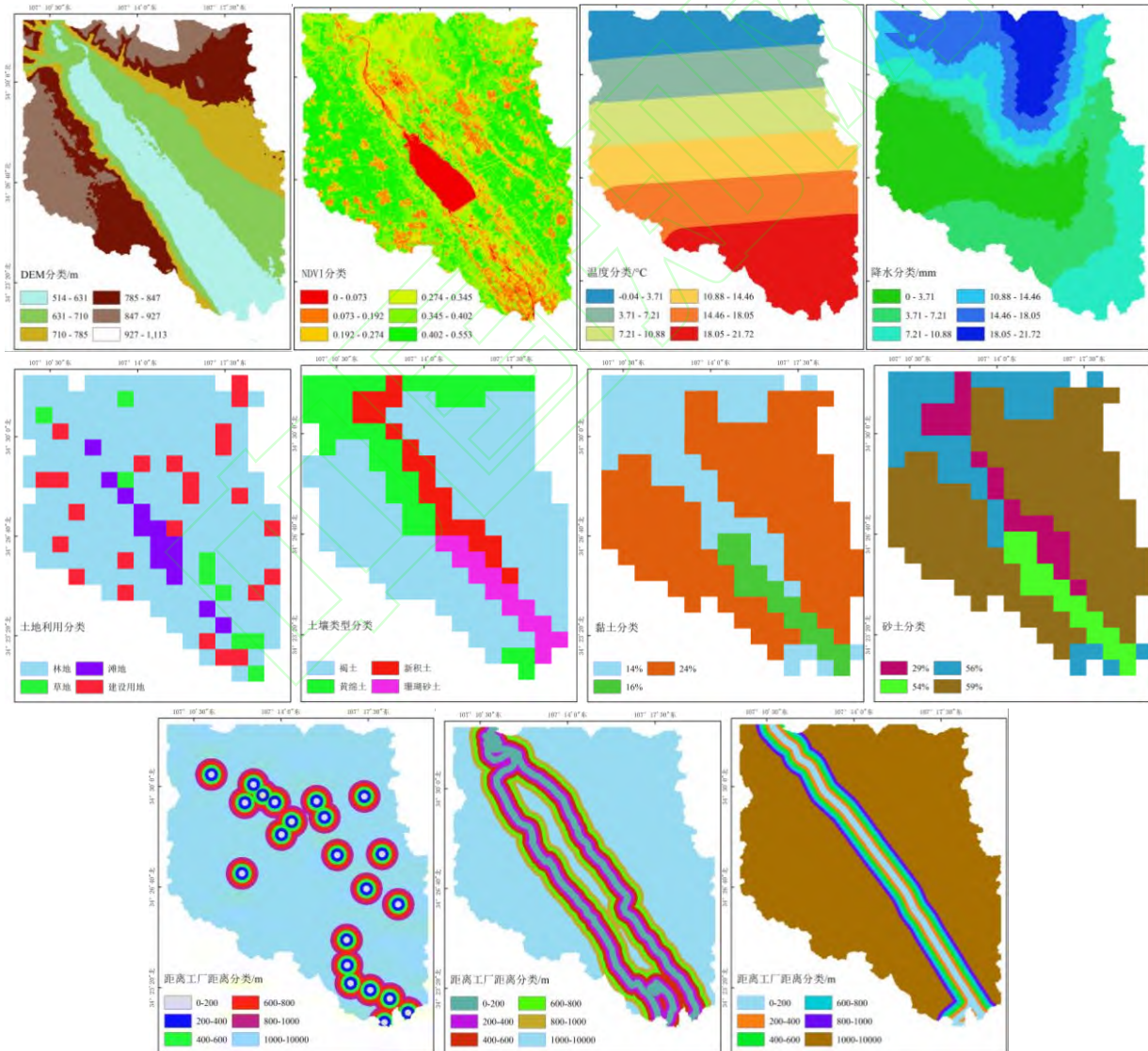


图6 影响因子分类

Fig. 6 Classification of impact factors

2.3.2 重金属污染空间分布因子探测

地理探测器中因子探测器能够反映各影响因子对 PLI 空间分布的解释力.各影响因子的解释力 $P_{D,H}$ 值降序为: DEM(0.102)>温度(0.057)>降水(0.032)>NDVI(0.023)>砂土(0.020)>土地利用类型(0.018)>距公路距离(0.012)>黏土(0.009)>距工厂距离(0.007)>距铁路距离(0.04)>土壤类型(0.002).其中 DEM、温度和降水对研究区沉积物重金属污染负荷指数 (PLI) 具有较强的解释力, 这表明河流重金属污染空间分布不仅与污染源有关, 其污染扩散分布也与当地自然地理条件有关.

2.3.3 重金属污染影响因子交互作用

沉积物结构成分复杂, 重金属污染空间分布往往是由多种自然和环境因素共同作用的结果, 不是由某种单一因素的影响^[18].因此, 利用交互作用探测器探测多种因子对沉积物重金属空间分布的交互影响程度, 有利于准确判断影响重金属污染空间分布的深层驱动机制.

表 7 是影响因子对研究区 PLI 的交互作用解释力, 结果表明, 各影响因子的交互作用均显示非线性增强的效果, 交互作用大于单独因素的影响, 对 PLI 空间分布共同产生促进作用, 其中温度和 DEM、降水和 DEM、温度和降水交互作用解释力较强.结合研究区自然地理情况, 千河下游为河谷地区, 且周围支流众多, 重金属元素通过降水和地表径流, 最终汇入河流, 并最终在河流底泥中富集.赵文杰等^[50]和艾东升等^[51]的研究中发现, 重金属元素可通过大气降水过程降落到地面, 并富集在土壤中, 与本研究的结果一致.林静等^[52]的研究发现重金属在冬春季含量高于夏秋季, 本文数据采集在冬春交换季, 结合交互探测结果分析, 气温对重金属含量空间分布也有较强的相关性.这些均说明地理环境因子和气象因子都较强影响城镇土壤重金属污染的空间分布, 选择地理因子和气象因子可以更好地揭示沉积物重金属空间变异的驱动机制.

表 7 影响因子对 PLI 的交互作用解释力

Table 7 Interaction of impact factors on PLI

	DEM	NDVI	降水	温度	土地利用类型	土壤类型	黏土	砂土	距工厂距离	距铁路距离	距公路距离
DEM	0.1016										
NDVI	0.1553	0.0232									
降水	0.2713	0.0673	0.0321								
温度	0.3962	0.1109	0.2345	0.0576							
土地利用	0.1337	0.0359	0.0674	0.1209	0.0187						
土壤类型	0.1604	0.0333	0.1126	0.2005	0.0240	0.0029					
黏土	0.1524	0.0320	0.1142	0.2023	0.0276	0.0318	0.0099				
砂土	0.1543	0.0423	0.1116	0.1996	0.0398	0.0396	0.0247	0.0204			
距工厂距离	0.1074	0.0408	0.1161	0.1425	0.0294	0.0492	0.0284	0.0358	0.0070		
距铁路距离	0.1202	0.0415	0.0715	0.0963	0.0233	0.0162	0.0398	0.0576	0.0292	0.0046	
距公路距离	0.1679	0.0389	0.0743	0.1739	0.0360	0.0318	0.0300	0.0368	0.0402	0.0526	0.0125

2.4 重金属污染主导因子回归分析

为进一步对沉积物重金属污染主导因子的驱动力进行分析探讨, 采用 GWR 模型进行局部空间回归分析, 但由于在多影响因子空间局部回归分析中, 存在多重共线性问题而导致建模不能成立.因此, 首先通过地理探测器筛选解释力较强的影响因子, 消除地理加权回归中存在的多重共线性问题, 从而将影响因子进行地理加权回归分析, 并定量空间可视化, 分析其空间回归系数, 系数越大, 表明在空间某处主导因子对因变量沉积物重金属 PLI 的影响越大(图 7).通过地理探测器因子探测, 筛选出解释力较强的 DEM、温度和降水因子, 将其进行地理加权回归分析.

DEM 回归系数波动较大(回归系数为-35.1088~-9.8972), DEM 与 PLI 在全区域均呈负相关, 通过与图 6 中 DEM 分类做对比, 回归系数最高点位处于高程 514 ~ 710 m 区间.随着海拔降低, 回归系数自上游至下游逐步递增, 这些地区海拔高度相对较低, 地势平坦、人口众多、道路密集、工厂分布较为集中, 人为活动影响较为明显, 这可能是造成研究区沉积物重金属污染聚集的原因.

温度(回归系数为-12.8201~39.0809)与降水(29.4394~46.2351)回归系数波动也较大, 但这两者在空间回归的分布格局上较为相似.回归系数最高值均在研究区北部的灵化村及张家寨村, 回归系数自北向南依次递减, 通过与图 6 中降水与温度分类做对比, 发现降水量自北向南依次递减, 温度自北向南依次升高, 赵文杰等^[50]和艾东升等^[51]的研究发现, 在人类活动及自然因素的共同作用下, 重金属元素可通过大气降水、降尘的形式降落到地表, 再通过地表

径流方式汇入河流中.林静等^[52]的研究发现重金属在冬春季含量高于夏秋季，考虑到随温度降低和降水量的增加，重金属元素随着降水及地表径流，最终汇入研究区河流底泥中，进而导致研究区河流沉积物重金属污染.

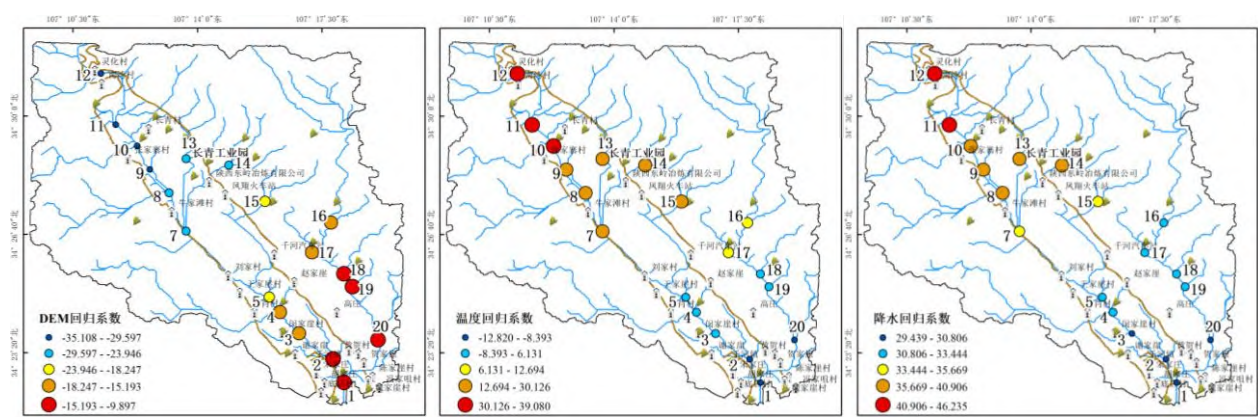


图 7 千河沉积物重金属污染主导因子回归系数

Fig.7 Regression coefficients of leading factors of heavy metal pollution in Qianhe River sediments

3 结论

- (1) 千河下游水体 8 种重金属浓度均未超过地表水环境质量标准(GB 3838-2002)Ⅱ类水体标准，其中 Pb 的变异系数为 3.11，除 Cr 元素外，其余 7 种重金属含量高值均在东岭冶炼公司及凤翔火车站地区。水体重金属致癌物成人呈较轻风险等级，儿童为强风险等级，儿童致癌物 Cr 为较强风险元素.成人及儿童非致癌物风险均为可承受风险.成人 $R_{总}$ 高值主要集中于东岭冶炼公司和凤翔火车站周围，为较轻和轻风险等级.儿童 $R_{总}$ 高值主要集中凤翔火车站附近，健康风险为很强风险等级，应引起当地政府注意.
- (2) 千河下游沉积物重金属除 As 和 Mn 外，其余 6 种重金属含量均超过陕西省土壤背景值，其中 Cd 元素含量均值为 1.12 mg kg^{-1} ，是陕西省土壤背景值的 12 倍.沉积物重金属空间分布高值点集中于人口较多的牛家滩村、高庄、东岭冶炼公司及千阳铁路干线和宝凤高速交叉地区.沉积物整体 PLI_{zone} 为 1.71，属于轻度污染，其中 Zn 和 Cd 为重度污染元素.
- (3) 因子探测器、交互作用探测器和 GWR 模型的结合使用，能更精确地描述影响因子对重金属污染的相对强度及空间相关关系.影响千河下游沉积物重金属 PLI 主要因子顺序为：DEM>温度>降水，因子交互作用均为非线性增强.DEM 回归系数与 PLI 均呈负相关，回归系数较高点位均处在河流下游入渭口区域，重金属在海拔较低的河流入渭口汇集；温度与降水回归系数自北向南依次递减，回归系数最高值在灵化村及张家寨村地区，重金属在温度低和降水多地区集聚.

参考文献:

- [1] 徐金英, 郑利林, 徐力刚, 等. 南方丘陵区河流表层沉积物重金属污染评价[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(8): 3420-3429.
Xu J, Zheng L L, Xu L G, *et al.* Evaluation of heavy metal pollution in river surface sediments in southern hilly area[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(8): 3420-3429.
- [2] Wang X L, Zhang L, Zhao Z H, *et al.* Heavy metal pollution in reservoirs in the hilly area of southern China: Distribution, source apportionment and health risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2018, **634**:158-169.
- [3] Ten H T E M, Mol G A J, Luers F. Release of metals from polluted sediments in a shallow lake quantifying resuspension [J]. Hydrobiologia, 1992, **235**: 97-105.
- [4] 江涛, 林伟稳, 曹英杰, 等. 梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染、生态风险评价及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5410-5418.
Jiang T, Lin W W, Cao Y J, *et al.* Heavy metal pollution, ecological risk assessment and source analysis in sediments of Qing liang shan Reservoir in Mei jiang River Basin[J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5410-5418.
- [5] Yu C, Zhang J, Wu L, *et al.* Effects of heavy metal and nutrients on benthic microbial communities in freshwater sediment of poyang lake (China) [J]. Journal of Residuals Science & Technology, 2015, **12**(2): 105-111.
- [6] Zhang C, Yu Z G, Zeng G M, *et al.* Effects of sediment geochemical properties on heavy metal bioavailability [J]. Environment International, 2014, **73**: 270-281.
- [7] Yi Y J, Wang Z Y, Zhang K, *et al.* Sediment pollution and its effect on fish through food chain in the Yangtze River [J]. International Journal of Sediment Research, 2008, **23**(4): 338- 347.
- [8] Zahra A, Hashmi M Z, Malik R N, *et al.* Enrichment and geo-accumulation of heavy metals and risk assessment of sediments of the Kurang Nallah—Feeding tributary of the Rawal Lake Reservoir, Pakistan [J]. Science of the Total Environment, 2014, **470**: 925-933
- [9] Islam M S, Ahmed M K, Raknuzzaman M, *et al.* Heavy metal pollution in surface water and sediment: A preliminary assessment of an urban river in a developing country [J]. Ecological Indicators, 2015, **48**: 282-291.
- [10] Wang Q, Liu R, Men C, *et al.* Spatial-temporal distribution and risk assessment of mercury in different fractions in surface sediments from the Yangtze River estuary [J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, **124**(1): 488-495.
- [11] 盛维康, 侯青叶, 杨忠芳, 等. 湘江水系沉积物重金属元素分布特征及风险评价[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(5): 2230-2240.
Sheng W K, Hou Q Y, Yang Z F, *et al.* Distribution characteristics and risk assessment of heavy metal elements in the sediments of the Xiangjiang River system[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(5): 2230-2240.
- [12] 张杰, 郭西亚, 曾野, 等. 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2202-2210.
Zhang J, Guo X, Zeng Y, *et al.* Distribution and pollution assessment of heavy metals in river sediments in the Taihu Lake Basin[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2202-2210.
- [13] 耿雅妮, 杨宁宁, 戴恩华, 等. 宝鸡市河流表层沉积物重金属空间分布、风险评价及源解析[J]. 干旱区资源与环境, 2020, **34**(10): 102-110.
Geng Y N, Yang N N, Dai E H, *et al.* Spatial distribution, risk assessment and source analysis of heavy metals in river surface sediments in Baoji City[J]. Arid Land Resources and Environment, 2020, **34**(10): 102-110.
- [14] 李悦昭, 陈海洋, 孙文超. “河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2646-2652.
Li Y Z, Chen H Y, Sun W C. Environmental Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in "River-Lake" Sediments[J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2646-2652.
- [15] 张博文, 赵甲亭, 吴二威, 等. 湟阳河河流水体中重金属污染特征及其对青海弧菌和斜生栅藻的毒性效应[J]. 生态毒理学报, 2018, **13**(1): 179-189.
Zhang B W, Zhao J T, Wu E W, *et al.* Pollution characteristics of heavy metals in the water of Fuyang River and their toxic effects on *Vibrio Qinghai* and *Scenedesmus obliquus*[J]. Journal of Ecotoxicology, 2018, **13**(1): 179-189 .
- [16] 李少华, 王学全, 高琪, 等. 青海湖流域河流生态系统重金属污染特征与风险评价[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(9): 1288-1296.
Li S H, Wang X Q, Gao Q, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and risk assessment of river ecosystems in Qinghai Lake Basin[J]. Environmental Science Research, 2016, **29**(9): 1288-1296.
- [17] 林承奇, 陈枫桦, 胡恭任, 等. 基于 PMF 模型解析九龙江河口表层沉积物重金属来源[J]. 地球与环境, 2020, **48**(4): 443-451.
Lin C Q, Chen F H, Hu G R, *et al.* Analysis of the source of heavy metals in the surface sediments of the Jiulong River Estuary based on PMF model[J]. Earth and Environment, 2020, **48**(4): 443-451.
- [18] 李雨, 韩平, 任东, 等. 基于地理探测器的农田土壤重金属影响因子分析[J]. 中国农业科学, 2017, **50**(21): 4138-4148.
Li Y, Han P, Ren D, *et al.* Impact factor analysis of heavy metals in farmland soil based on geographic detector [J]. Chinese journal of agricultural sciences, 2017, **50**(21): 4138-4148.
- [19] 肖武, 隋涛, 王鑫, 等. 巢湖流域典型农田土壤重金属污染评价与地理探测分析[J]. 农业机械学报, 2018, **49**(7): 144-152.

- Xiao W, Sui T, Wang X, *et al.* Evaluation of heavy metal pollution and geographical exploration analysis of typical farmland soil in Chaohu Lake basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2018, **49**(7): 144-152.
- [20] Wang J F, Hu Y. Environmental health risk detection with GeogDetector[J]. Environmental Modelling and Software, 2012, **33**: 114-115.
- [21] Wang J F, Li X H, Christakos G, *et al.* Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, **24**(1): 107-127.
- [22] Wang J F, Hu Y. Environmental health risk detection with GeogDetector [J]. Environmental Modelling and Software, 2012, **33**: 114-115.
- [23] Wang Y, Wang S, Li G, *et al.* Identifying the determinants of housing prices in China using spatial regression and the geographical detector technique [J]. Applied Geography, 2017, **79**: 26-36.
- [24] Ren Y, Deng L Y, Zuo S D, *et al.* Geographical modeling of spatial interaction between human activity and forest connectivity in an urban landscape of southeast China[J]. Springer Netherlands, 2014, **29**(10):1741-1758.
- [25] Todorova Y, Lincheva S, Yotinov I, *et al.* Contamination and ecological risk assessment of long-term polluted sediments with heavy metals in small hydropower cascade[J]. Water Resources Management, 2016, **30**(12):4171-4184.
- [26] 韩静, 芮旻, 杨坤, 等. 基于地理探测器和 GWR 模型的中国重点镇布局定量归因[J]. 地理科学进展, 2020, **39**(10): 1687-1697.
Han J, Rui Y, Yang K, *et al.* Quantitative attribution of the layout of key towns in China based on geodetector and GWR model[J]. Advances in Geographical Science, 2020, **39**(10): 1687-1697.
- [27] Propastin P. Modifying geographically weighted regression for estimating aboveground biomass in tropical rainforests by multispectral remote sensing data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, **18**: 82- 90.
- [28] 杨伟, 姜晓丽. 华北地区大气细颗粒物(PM_{2.5})年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 2995-3003.
Yang W, Jiang X L. Interannual Variation of Atmospheric Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) in North China and Its Response to Land Use/Cover Changes[J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 2995-3003.
- [29] 任春辉, 卢新卫, 杨林娜, 等. 宝鸡长青镇热电厂周围灰尘重金属污染评价[J]. 环境化学, 2011, **30**(10): 1820-1821.
Ren C H, Lu X W, Yang L N, *et al.* Evaluation of heavy metal pollution in dust around Changqing Thermal Power Plant in Baoji[J]. Environmental Chemistry, 2011, **30**(10): 1820-1821.
- [30] 王利军, 卢新卫, 荆淇, 等. 宝鸡长青镇铅锌冶炼厂周边土壤重金属污染研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(2): 325-330.
Wang L J, Lu X W, Jing Q, *et al.* Study on heavy metal pollution in the soil around the lead-zinc smelter in Changqing Town, Baoji[J]. Journal of Agricultural Environment Sciences, 2012, **31**(2): 325-330.
- [31] 王利军, 卢新卫, 雷凯. 宝鸡城市街尘、土壤及河流沉积物重金属形态迁移特征[J]. 城市环境与城市生态, 2011, **24**(1): 22-26.
Wang L J, Lu X W, Lei Kai. Migration characteristics of heavy metals in street dust, soil and river sediments in Baoji City[J]. Urban Environment and Urban Ecology, 2011, **24**(1): 22-26.
- [32] Tomlinson D L, Wilson J G, Harris C R, *et al.* Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index[J]. Helgolander Marine Research, 1980, **33**(1) : 566-575.
- [33] 耿雅妮, 杨宁宁, 董洁, 等. 宝鸡市饮用水源地重金属健康风险评价[J]. 水资源与水工程学报, 2019, **30**(3): 73-77
Geng Y N, Yang N N, Dong J, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in drinking water sources in Baoji City[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, **30**(3): 73-77
- [34] 郑德凤, 赵锋霞, 孙才志, 等. 考虑参数不确定性的地下饮用水源地水质健康风险评价[J]. 地理科学, 2015, **35**(8): 1007-1013.
Zheng Defeng, Zhao Fengxia, Sun Caizhi, *et al.* Water quality health risk assessment of underground drinking water sources considering parameter uncertainty[J]. Geographical Sciences, 2015, **35**(8): 1007-1013.
- [35] Brunsdon C, Fotheringham S, Charlton M. Geographically weighted regression [J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician), 2017, **47**(3): 431-443.
- [36] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S]. 中国: 国家环境保护局, 2002.
- [37] 雷国建, 陈志良, 刘千钧, 等. 广州郊区土壤重金属污染程度及潜在生态危害评价[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(S1): 49-53.
Lei G J, Chen Z L, Liu Q J, *et al.* Pollution degree and potential ecological hazard assessment of soil heavy metals in Guangzhou suburbs[J]. China Environmental Science, 2013, **33**(S1): 49-53.
- [38] 张兆永, 吉力力 阿不都外力, 姜逢清. 博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2422-2429.
Zhang Z Y, Jilili Abduwaili, Jiang F Q. Evaluation of pollution and potential hazards of heavy metals in the water, surface sediment and bank soil of Bortala River[J]. Environmental Science, 2015, **36**(7): 2422-2429.
- [39] 丁婷婷, 李强, 杜士林, 等. 沙颍河流域水环境重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境化学, 2019, **38**(10) :2386-2401.

- Ding T T, Li Q, Du S L, *et al.* Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the water environment of the Shaying River Basin[J]. Environmental Chemistry, 2019, **38**(10): 2386-2401.
- [40] 徐晨, 王沛芳, 陈娟, 等. 望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 4914-4923.
Xu C, Wang P F, Chen J, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and ecological risk assessment of river network on the west bank of Wangyu River[J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 4914-4923.
- [41] 权轻舟. 沔河水体重金属含量分析与健康风险评价[J]. 干旱区资源与环境, 2019, **33**(5): 119-125.
Quan Q Z. Analysis and health risk assessment of heavy metal content in Luohe River[J]. Arid Land Resources and Environment, 2019, **33**(5): 119-125.
- [42] 匡荟芬, 胡春华, 吴根林, 等. 结合主成分分析法(PCA)和正定矩阵因子分解法(PMF)的鄱阳湖丰水期表层沉积物重金属源解析[J]. 湖泊科学, 2020, **32**(4): 964-976.
Kuang H F, Hu C H, Wu G L, *et al.* Analysis of heavy metal sources in surface sediments of Poyang Lake in high water period by combining principal component analysis (PCA) and Positive Definite Matrix Factorization (PMF)[J]. Lake Science, 2020, **32**(4): 964-976.
- [43] 车继鲁, 余树全, 张鑫, 等. 瓯江下游流域河流沉积物重金属污染特征、来源及潜在生态风险评价[J]. 生态科学, 2017, **36**(4): 176-184.
Che J L, Yu S Q, Zhang X, *et al.* Pollution characteristics, sources and potential ecological risk assessment of heavy metals in river sediments in the lower Oujiang River Basin[J]. Ecological Sciences, 2017, **36**(4): 176-184.
- [44] 陈明, 胡兰文, 陶美霞, 等. 桃江河沉积物中重金属污染特征及风险评价[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(5): 1599-1606.
Chen M, Hu L W, Tao M X, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in Taojiang River sediments[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(5): 1599-1606.
- [45] Chen X D, Lu X W, Yang G. Sources identification of heavy metals in urban topsoil from inside the Xi'an Second Ringroad, NW China using multivariate statistical methods[J]. Catena, 2012, **98**: 73-78.
- [46] 何宇, 洪欣, 闭潇予, 等. 九洲江流域水环境重金属污染特征及来源解析[J]. 环境化学, 2021, **40**(1): 240-253.
He Y, Hong X, Bi X Y, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of heavy metals in the water environment of the Jiuzhou River Basin[J]. Environmental Chemistry, 2021, **40**(1): 240-253.
- [47] 张兆永, 吉力力, 阿不都外力, 姜逢清. 博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2422-2429.
Zhang Z Y, Jilili A B D W L, Jiang F Q. Pollution and potential hazard evaluation of heavy metals in the water, surface sediments and riparian soil of the Bortala River[J]. Environmental Science, 2015, **36**(7): 2422-2429.
- [48] 陈秀端, 卢新卫. 基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2513-2521.
Chen X D, Lu X W. Analysis of soil heavy metal pollution sources in urban residential areas based on receptor models and geostatistics[J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2513-2521.
- [49] 李锋, 刘思源, 李艳, 等. 工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(2): 934-944.
Li F, Liu S Y, Li Y, *et al.* Spatio-temporal variability and source analysis of soil heavy metals in developed industrial cities[J]. Environmental Science, 2019, **40**(2): 934-944.
- [50] 赵文杰, 李翠梅. 大气降水中重金属的研究[J]. 环境科学与管理, 2013, **38**(10): 76-79.
Zhao W J, Li C M. Study on heavy metals in atmospheric precipitation [J]. Environmental science and management, 2013, **38**(10): 76-79.
- [51] 艾东升. 上海市大气降水化学组成特征及物源解析[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
Ai D S. Characteristics of chemical composition and source analysis of atmospheric precipitation in Shanghai[D]. Shanghai: East China Normal University, 2011.
- [52] 林静, 张健, 杨万勤, 等. 岷江下游五通桥段小型集水区大气降水中 pH 值对重金属含量的影响[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(4): 1419-1427.
Lin J, Zhang J, Yang W Q, *et al.* Influence of pH value on heavy metal content in atmospheric precipitation of small catchment area in the lower reaches of Minjiang river [J]. Chinese journal of environmental science, 2016, **36**(4): 1419-1427.