

安全与环境学报
Journal of Safety and Environment
ISSN 1009-6094, CN 11-4537/X

《安全与环境学报》网络首发论文

题目：黄河底泥重金属空间分异影响因子与源解析研究
作者：郝建秀，任珺，陶玲，方红兵
DOI：10.13637/j.issn.1009-6094.2021.0107
收稿日期：2021-01-26
网络首发日期：2021-03-23
引用格式：郝建秀，任珺，陶玲，方红兵. 黄河底泥重金属空间分异影响因子与源解析研究. 安全与环境学报. <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2021.0107>



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。

黄河底泥重金属空间分异影响因子与源解析研究

郝建秀^{1,2}, 任珺^{*1,2}, 陶玲^{1,2}, 方红兵¹

(1. 兰州交通大学 环境与市政工程学院, 兰州 730070;
2. 甘肃省黄河水环境重点实验室, 兰州 730070)

摘要: 为深入分析黄河底泥重金属空间分异影响因子及来源途径, 本文以黄河干流宁夏段底泥重金属 (Cu、Ni、Zn、Cr、Pb 和 Cd) 为研究对象, 基于地理探测器模型探测其风险因子及来源。结果表明: ①底泥重金属除 Zn 外其余重金属平均值均超过其土壤值, 尤其 Cr 和 Cd 达背景值的 3.57 和 1.39 倍, 受人类影响大, 累积明显。②重金属空间分异解释力最大的因子为路网密度 ($Q_{0.01} > 0.50$), 其次人均工业产值 (除 Cd 外, $Q_{0.01} > 0.50$), 最小的为植被盖度 ($Q_{0.01} < 0.20$)。因子交互作用均为增强型。③底泥中 Cu 和 Pb 为交通源和上游输送; Ni 和 Zn 为成土母质和大气沉降; Cr 为工业源, Cd 为交通和农业源。探测的风险区主要为青铜峡市、兴庆区和惠农区。此结论可为黄河流域环境保护和污染治理提供科学依据。

关键词: 环境学; 底泥; 重金属; 地理探测器; 影响因子; 黄河

总图分类号: X522 **文献标志码:** A

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2021.0107

0 引言

黄河是西北干旱地区生活和发展的主要水源, 其水质直接关系到西北的生态安全与经济发展^[1]。近年来, 随着经济的快速发展, 携带大量重金属污染物的废水排入黄河, 造成严重污染^[2]。可累积的毒性重金属通过植物吸收或食物链最终可危及农产品质量和人体健康^[3-4]。河流大部分重金属易累积于底泥, 并可再次释放, 造成二次污染^[5-6]。底泥重金属的特征能表征水质的污染状况^[7], 因此黄河底泥重金属研究已成为一个热点。

底泥重金属的研究, 主要集中在空间分布、污染评价和来源分析方面^[8], 对其影响因子的研究较少, 且大多为单因子分析, 如土地利用类型^[9]、经济发展水平^[10]、pH 值^[11]、盐分^[12]、总有机质^[13]等。这些研究已证实以上因子对底泥重金属均有影响, 但少见量化研究多个因子对同一水体底泥重金属影响的报道。确定关键影响因子的研究方法常采用主成分分析、相关分析、聚类分析^[14]、回归分析^[10]等多元统计方法。这些方法要求因子为数值型, 而对定性型因子无法识别。2017 年, 王劲峰^[15]首次提出的地理探测器模型, 能量化多个因子的影响程度, 探测关键因子以及因子之间的交互作用, 且对因子类型没有限制, 只要因子之间有关系就能被识别。同年, 李雨等^[16]最先利用此模型探测出土壤重金属空间分布是由多种影响因子共同作用, 且平均温度、相对湿度和 GDP 的解释力较强。2019 年, LUO Lili 等^[17]第一次将此模型用于研究河流底泥重金属, 并探测了重金属的来源。目前, 地理探测器模型已广泛运用在环境污染领域, 并被证实可行^[18-19]。

本研究以黄河宁夏段为研究区域, 利用地理探测器模型, 分析 12 个因子对 6 种底泥重金属的影响, 确定各重金属的风险因子、风险区及因子交互作用强度, 并解析其来源, 结果可为制定该区污染防治及可持续发展政策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宁夏位于西北地区, 北纬 $35^{\circ} 14' \sim 39^{\circ} 23'$, 东经 $104^{\circ} 17' \sim 107^{\circ} 39'$, 由西南向东北倾斜, 属于温带干旱、半干旱气候, 是我国水资源最少的省区 (图 1)。黄河横贯境内, 流经中卫市 (沙坡头区和中卫县)、吴忠市 (青铜峡市和利通区)、银川市 (永宁县、灵武市和兴庆区) 和石嘴山市 (平罗县和惠农区), 是流经区域的主要水源。该段两岸主要以人为土和发育较弱的初育土为主, 植被盖度较低, 灌溉农业为主, 是我国主要的粮食生产基地之一^[20]。紧邻腾格里沙漠的中卫市和吴忠市人口分布稀疏, 而已工业生产为主的石嘴山惠农区人口密度较大。矿产资源丰富, 工业主要以采矿 (煤矿为主)、冶金、化工、制造、建筑为主。横跨境内的京藏高速、包兰铁路、109 国道等主要交通干线以及青铜峡市、兴庆区和惠农区较密集的城市一级道路紧邻黄河干流分布。

收稿日期: 2021-01-26

作者简介: 郝建秀, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为重金属污染与环境地学, haojx@mail.lzjtu.cn; 任珺 (通信作者), 教授, 博士生导师, 主要研究环境污染修复理论与技术, renjun@mail.lzjtu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51668034)

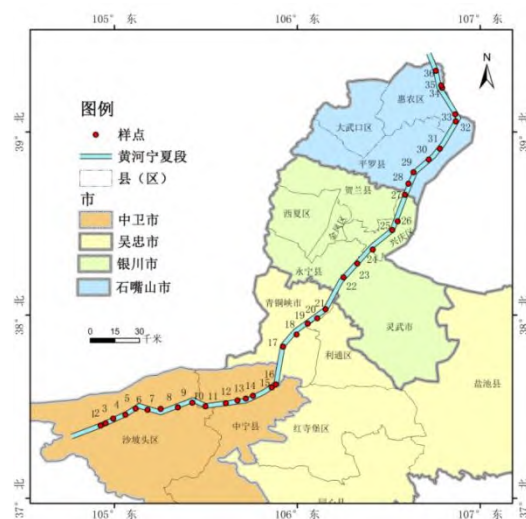


图 1 黄河宁夏段底泥样点空间分布

Fig.1 Spatial Distribution of sampling sites in sediments from Ningxia section of Yellow River

1.2 样品采集与数据测定

1.2.1 样品采集与处理

沿黄河干流宁夏段较均匀地共设 36 个样点，每个样点在同一断面不同位置采集 3 等份表层（0-5cm）底泥，同时在相应岸上选取人为影响较小的不同位置采集 3 等份表层土壤，分别均匀混合封存于聚乙烯袋中，带回实验室，经自然风干，去除石块、树枝等较大杂物，研磨过 100 目尼龙筛后，装入干燥的密封袋中备用。

1.2.2 数据测定

处理好的样品，经 HCL-HNO₃-HF 法消解后，利用电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS）测定重金属 Cu、Ni、Zn、Cr、Pb 和 Cd 含量，同时利用玻璃电极法^[21]、电导率法^[22]和烧失量法^[23-24]分别测定底泥 pH 值，盐分（EC）和有机质含量（TOC）。每个样品均设置 3 组平行实验，最终数据为其均值，且相对标准偏差都在 10% 以内。

1.3 因子选取与数据获取

1.3.1 因子选取

底泥重金属污染不仅受气温、pH 值等自然因素影响，还受工业、农业、交通等人为因素影响。本研究根据已有研究及河流底泥特征选取了 pH、盐分、TOC、高程（DEM）、土壤类型（ST）和植被覆盖度（VC）6 个自然因子和土地利用类型（LUT）、人口密度（PD）、人均工业总产值（PIP）、人均农业总产值（PAP）、人均收入（PI）和路网密度（RD）6 个人为因子。

1.3.2 数据获取

各样点的 pH、EC 和 TOC 数据源于底泥样品测定。利用手持 GPS 测定各样点高程，并利 ArcGIS10.2 软件插值获取宁夏段 DEM 数据。土壤类型、植被覆盖度和路网密度（包括高速公路、国道、省道和城市一级道路）来自于资源环境科学与数据中心（<http://www.resdc.cn/>）。结合遥感影像与样点环境记录的数据，确定各样点的土地利用类型。利用 2018 年宁夏统计年鉴，计算宁夏黄河干流流经各县（区）的人口密度、人均工业总产值、人均农业总产值和人均收入，并将其值赋予所包含的底泥样点。

1.4 地理探测器

15

地理探测器是探测底泥重金属空间分异，揭示其与影响因子关系的统计方法^[25]。本文利用其因子探测、风险探测和交互作用探测三个模块分析 12 个影响因子（ $D_1, \dots, D_{12}$ ）对 6 个底泥重金属（ $H_1, \dots, H_6$ ）的影响。

因子探测器能探测底泥重金属的主要影响因子，定量分析影响因子对底泥重金属的解释力。解释力用影响因子的类别方差之和与底泥重金属的研究区总方差的比值来确定，比值越小，说明该影响因子对特定底泥重金属的影响越大，解释力越强。计算公式为：

$$Q_{D,H} = 1 - \frac{\sum_s^m N_s \sigma_s^2}{N \sigma^2} \quad (1)$$

式（1）中 $Q_{D,H}$ 为影响因子 D 对底泥重金属 H 的解释力，越接近 1，解释力越强， $Q_{D,H}=1$ 时，表明底泥重金属 H 完全被影响因子 D 控制， $Q_{D,H}=0$ 时，表明底泥重金属 H 不受因子 D 的影响； $s=1, \dots, m$ 表示影响因子 D 的分类； N_s 和 N 分

别是类别 s 的单元数和全区的单元数; σ_s^2 和 σ^2 分别是因子 D 类别 s 的方差和底泥重金属 H 的全区总方差。

风险探测器能通过比较影响因子不同类别的底泥重金属均值来搜索影响因子的高风险类别和高风险区。均值越大, 类别的风险性就越高; 高风险类别分布的位置即为重金属的高风险区。用 t 来检验:

$$t_{H_{s=1}-H_{s=2}} = \frac{\bar{H}_{s=1} - \bar{H}_{s=2}}{[\frac{Var(H_{s=1})}{n_{s=1}} + \frac{Var(H_{s=2})}{n_{s=2}}]^{1/2}} \quad (2)$$

式中, $\bar{H}_s$ 表示类别 s 的均值, n_s 为类别 s 的样本数量。Var 代表方差。零假设 $H_0: \bar{H}_{s=1} = \bar{H}_{s=2}$, 如果在置信水平 α 下拒绝 H_0 , 则表明两个类别的属性均值存在明显的差异, 在软件中显示“**Yes**”, 反之为“**No**”。

交互作用探测器是探测双因子交互作用对底泥重金属的解释力。通过比较交互作用和单独对底泥重金属的 $Q_{D,H}$ 值大小, 来确定交互作用的程度, 分为 5 种类型:

- ①双因子增强: $Q(DA \cap DB) > \text{Max}(Q(DA), Q(DB))$;
- ②非线性增强: $Q(DA \cap DB) > Q(DA) + Q(DB)$;
- ③相互独立: $Q(DA \cap DB) = Q(DA) + Q(DB)$;
- ④非线性减弱: $Q(DA \cap DB) < \text{Min}(Q(DA), Q(DB))$;
- ⑤单因子非线性减弱: $\text{Min}(Q(DA), Q(DB)) < Q(DA \cap DB) < \text{Max}(Q(DA), Q(DB))$ 。

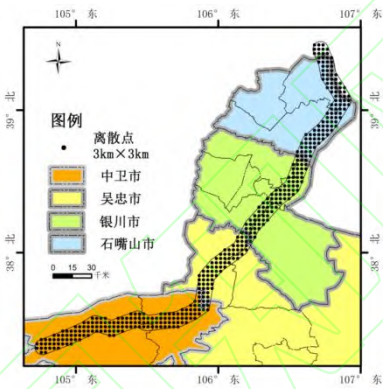


图 2 宁夏黄河干流的离散点分布

Fig.2 Distribution of discrete points in Ningxia section of the Yellow River

1.5 数据处理与图形制作

为制作重金属与各影响因子的空间分布图, 利用 ArcGIS10.2 软件在黄河干流宁夏段两侧建立 3km 缓冲区, 与样点数据的克里金插值图进行掩膜提取, 并按自然分级断点法形成 8 个类别 (其中土地利用类型和土壤类型按实际各分为 4 类和 5 类) 的空间分布图 (图 3, 图 6)。

为满足地理探测软件 (GeoDetector) 对数据的要求, 利用 ArcGIS10.2 软件离散化采样点, 结合宁夏段的缓冲区, 形成沿黄河干流 3km×3km 的格网点 (图 2), 然后从各数据插值图提取其值至离散点, 最后将每一条 (H, D) 记录输入到 GeoDetector 软件进行底泥重金属与影响因子之间关系的探测。

2 结果与分析

2.1 底泥重金属含量

除重金属 Zn 外, 宁夏黄河干流底泥重金属 Cu、Ni、Cr、Pb 和 Cd 元素的平均含量均超过其对应的岸上土壤平均值, 尤其是 Cr 和 Cd 的均值达到其土壤值的 3.57 和 1.39 倍 (表 1)。与中国沉积物平均值^[26]、地壳含量^[27]以及中国土壤环境质量一级标准相比, 只有 Cr 和 Cd 的平均含量均超标, 说明 Cr 和 Cd 受人类影响较大, 累积明显, 是研究区主要的污染因子。Cu、Ni、Zn 和 Cr 的变异系数介于 19.39%~25.12%之间, 属于中等变异程度 (15%<CV<36%), 而 Pb 和 Cd 的变异系数分别为 64.00%和 93.01%, 达到高变异程度, 说明各重金属含量的空间分布存在一定差异, 且 Pb 和 Cd 的空间差异更显著, 从其空间分布图也可得出此结论 (图 3)。Cu 的含量沿黄河流向逐渐增加, 最大区域分布在惠农区。Ni 和 Zn 的含量在空间分布上具有相似性, 为“两头高, 中间低”, 最高值均集中在沙坡头区; Cr 含量的分布趋势与 Ni 和 Zn 的相反, 为“中间高, 两头低”, 最高点集中在中宁县和青铜峡市, 表明 Ni 和 Zn 可能有相同的污染源, 但与 Cr 来源不同。Pb 的空间分布差异较大, 主要以高值为主, 其中高值主要集中在银川市和石嘴山市。Cd 含量的空间分布主要以低值为主, 高值点主要集中在青铜峡市、兴庆区和惠农区。

表 1 黄河宁夏段底泥重金属含量统计（单位：mg/kg）

Table 1 Statistic characteristics of heavy metals in sediments from Ningxia section of Yellow River

统计特征	Cu	Ni	Zn	Cr	Pb	Cd
最小值	11.57	12.75	56.11	64.54	0.50	0.13
最大值	32.17	60.55	162.64	142.6	41.05	4.55
平均值	23.05	42.60	95.50	98.60	10.07	1.42
标准差	5.39	10.70	23.82	19.12	6.55	1.32
变异系数 CV(%)	23.37	25.12	24.94	19.39	64.00	93.01
土壤平均值 ¹	21.29	38.24	102.95	27.65	9.27	1.02
中国沉积物平均值 ²	25	20	71	35	20	0.1
地壳平均值 ³	45	68	95	90	20	0.3
土壤环境质量一级标准	35	40	100	90	35	0.2

2.2 地理探测器分析

2.2.1 因子探测器

利用因子探测器探测影响因子与底泥重金属以及底泥重金属之间的关系，确定各底泥重金属空间分异的主要影响因子及其之间的关联性。对宁夏黄河干流底泥重金属空间分异解释力最大的因子为路网密度（ $Q_{D,H}$ 值均大于 0.50）^[28]，最小的因子为植被覆盖度（ $Q_{D,H}$ 值均小于 0.20）（图 4）。除植被盖度外，其余影响因子对 Cu 和 Pb 空间分异解释力均较大，其中最大的因子为路网密度， $Q_{D,H}$ 分别为 0.95 和 0.91，其次为人均收入， $Q_{D,H}$ 值分别为 0.92 和 0.88，二者之间解释力最强，且 Ni、Zn 和 Cr 对二者的解释力也均较强（ $Q_{D,H}$ 值均大于 0.80）（图 5）。对 Ni 和 Zn 空间分异解释力最大的影响因子均为路网密度， $Q_{D,H}$ 分别为 0.87 和 0.75，其次均为 DEM， $Q_{D,H}$ 分别为 0.83 和 0.71，且 Cu 对二者的解释力均较大。对 Cr 空间分异解释力前两位因子分别为 pH 值（0.71）和人均工业总产值（0.68），且 Cu 和 Pb 对其的解释力较大。对 Cd 空间分异解释力前三位因子分别为路网密度（0.58）、pH（0.38）和人均农业生产总值（0.34），其它重金属对其的解释力都不大（ $Q_{D,H}$ 值均小于 0.40）。

2.2.2 交互作用探测器

利用交互作用探测器探测 12 个影响因子对底泥重金属的交互作用，表明各影响因子之间的作用类型以双因子增强为主，非线性增强为辅，不存在减弱或独立的作用类型。土地利用类型与其他因子之间对 Ni 和 Zn 元素主要以非线性增强作用为主。植被覆盖度与其他因子之间对 Cu、Cr、Pb 和 Cd 元素的作用类型以非线性增强为主。

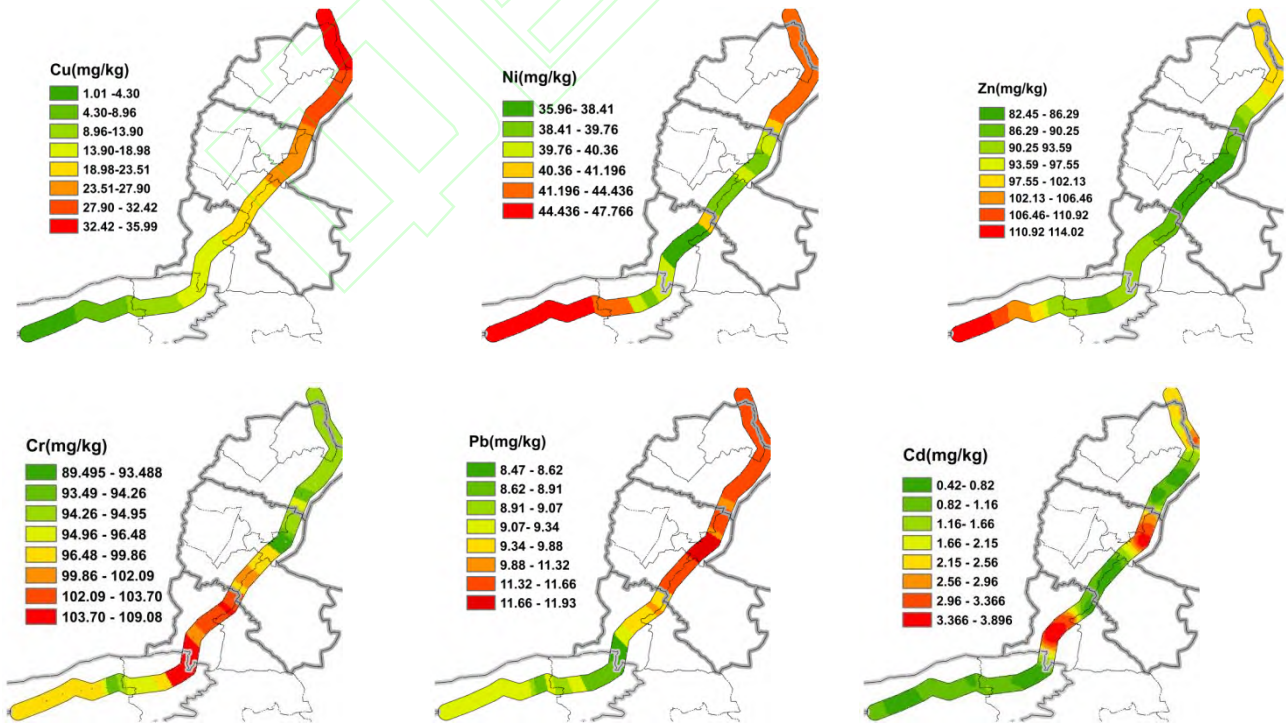


图 3 底泥重金属空间分布

Fig.3 Spatial Distribution of sediment heavy metals

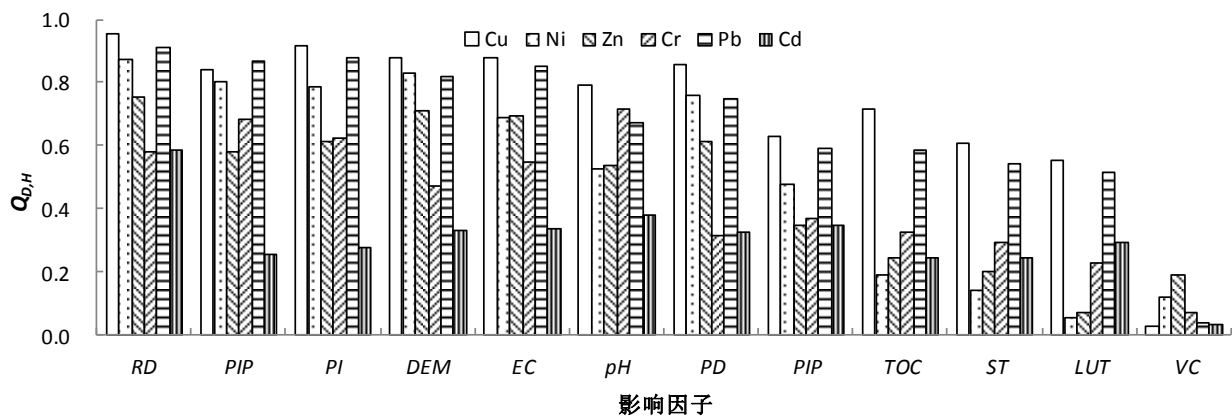


图 4 各影响因子对 6 种底泥重金属的解释力

Fig.4 Explanatory powers of influencing factors to six heavy metals in sediments

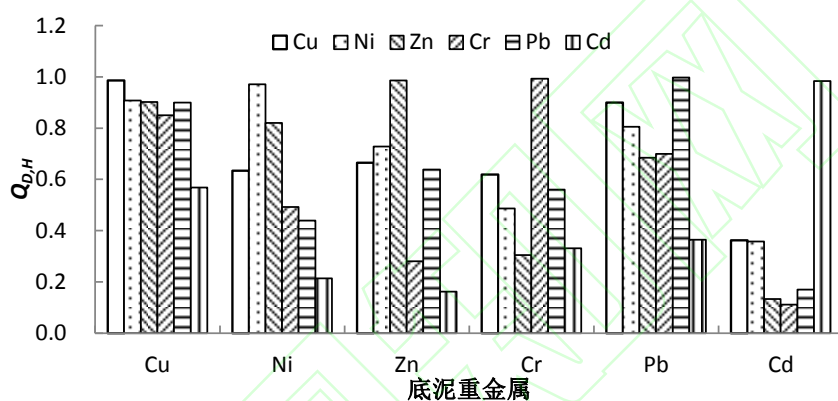


图 5 底泥重金属之间的解释力比较

Fig.5 Comparisons of explanatory power between heavy metals in sediment

表 2 底泥重金属的因子与风险探测结果

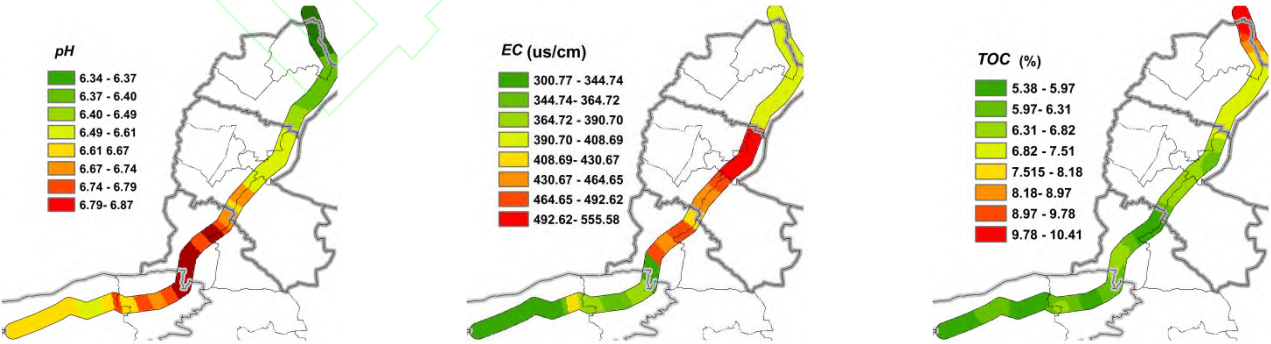
Table 2 Factors and risk detection results of heavy metals in sediments

重金属元素		解释力排序				
		1	2	3	4	5
Cu	影响因子	<i>RD</i>	<i>PI</i>	<i>EC</i>	<i>DEM</i>	<i>PD</i>
	$Q_{D,H}$ 值	0.95	0.92	0.88	0.88	0.84
	风险类	7-8 类	7 类	4 类	1 类	8 类
	风险区	银川市	惠农区	平罗县/ 惠农区	惠农区	惠农区
Ni	影响因子	<i>RD</i>	<i>DEM</i>	<i>PIP</i>	<i>PI</i>	<i>PD</i>
	$Q_{D,H}$ 值	0.87	0.83	0.8	0.78	0.76
	风险类	1 类	8 类	1 类	1 类	1 类
	风险区	沙坡头区	沙坡头区	沙坡头区	沙坡头区/中宁县/青铜峡市	沙坡头区/中宁县
Zn	影响因子	<i>RD</i>	<i>DEM</i>	<i>EC</i>	<i>PD</i>	<i>PI</i>
	$Q_{D,H}$ 值	0.75	0.71	0.69	0.61	0.61
	风险类	1 类	8 类	1 类	1 类	1 类

	风险区	沙坡头区	沙坡头区	沙坡头区	沙坡头区/中宁县	沙坡头区/中宁夏/青铜峡市
Cr	影响因子	<i>pH</i>	<i>PIP</i>	<i>PI</i>	<i>RD</i>	<i>ST</i>
	$Q_{D,H}$ 值	0.71	0.68	0.62	0.58	0.29
	风险类	8 类	3 类	3 类	2 类	2 类
	风险区	青铜峡市	中宁县	中宁县	中宁县/青铜峡市/平罗县	青铜峡市/永宁县 /兴庆区
Pb	影响因子	<i>RD</i>	<i>PI</i>	<i>PIP</i>	<i>EC</i>	<i>DEM</i>
	$Q_{D,H}$ 值	0.91	0.88	0.87	0.85	0.82
	风险类	7-8 类	5-6 类	6 类	8 类	2 类
	风险区	银川市	惠农区	兴庆区	兴庆区	银川市/石嘴山市
Cd	影响因子	<i>RD</i>	<i>pH</i>	<i>PAP</i>	<i>EC</i>	<i>DEM</i>
	$Q_{D,H}$ 值	0.58	0.38	0.34	0.33	0.33
	风险类	6 类	8 类	3-4 类	8 类	1 类
	风险区	惠农区	青铜峡市	兴庆区/惠农区	兴庆区	惠农区

2.2.3 风险探测器

风险探测器能探测各底泥重金属关键因子的风险类，结合关键因子的空间分布图能确定风险类的空间分布位置，即为重金属的风险区（表 2，图 6）。结果表明 Cu 元素主要影响因子的风险类为路网密度第 7 和 8 类（7 类与 8 类不具有显著性差异）、人均收入第 7 类和盐分第 4 类，最主要的风险区为惠农区，表明 Cu 在路网密度大、经济发达、盐分含量中等的风险区累积明显；Ni 和 Zn 元素主要影响因子的风险类均为路网密度第 1 类、DEM 第 8 类和人均工业产值第 1 类，最主要的风险区均为沙坡头区，表明 Ni 和 Zn 在路网密度小、海拔高、工业产值小的沙坡头区累积显著；Cr 元素主要影响因子的风险类为 pH 第 8 类、人均工业产值第 3 类和人均收入第 3 类，主要的风险区为青铜峡市和中宁县，表明 Cr 在 pH 值大、工业产值和人均收入中等的青铜峡市和中宁县累积明显；Pb 元素主要影响因子的风险类为路网密度第 7 和 8 类、人均收入第 5 和 6 类和人均工业产值第 6 类，主要的风险区为银川市和石嘴山市，表明 Pb 在路网密度大、工业产值和经济较好的银川市和石嘴山市累积明显；Cd 元素主要影响因子的风险类为路网密度第 6 类、pH 第 8 类和人均农业产值第 3 和 4 类，主要的风险区为青铜峡市、兴庆区和惠农区，表明在 Cd 在路网密度较大、pH 值最大和农业产值中等的风险区累计显著。



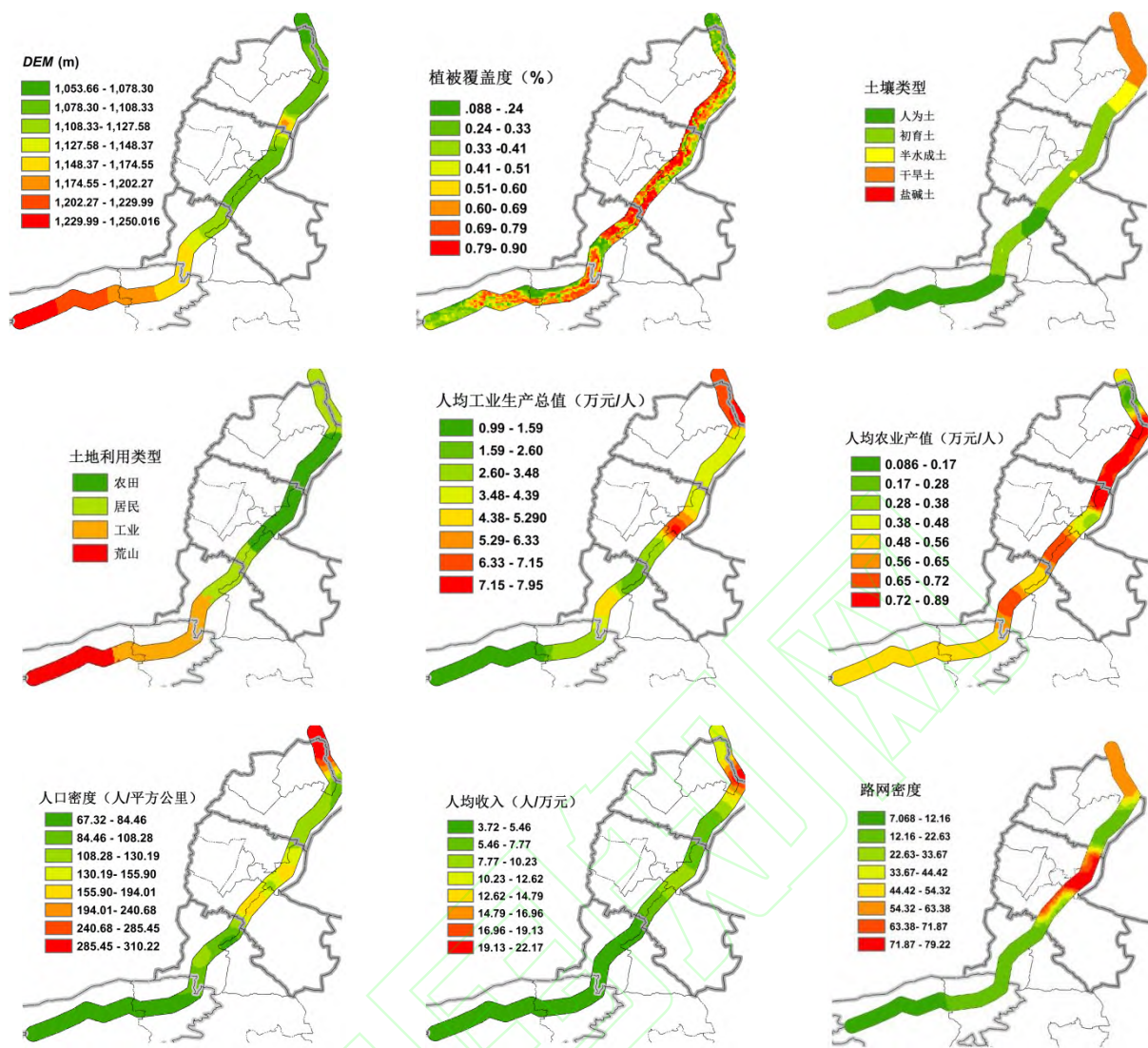


图 6 影响因子空间分布

Fig.6 Spatial Distribution of influence factors

3 讨论

底泥重金属空间分异的主要影响因子不能直接断定其为污染源,而应结合探测的风险类和风险区的实际情况来断定。Cu 和 Pb 元素的主要影响因子均为路网密度、人均收入和 DEM,且二者之间以及二者与其他重金属之间均具有较强的关联性,表明 Cu 和 Pb 可能有相似或相同的来源,且来源广泛^[29]。路网密度和人均收入识别的风险类均为高类别(7-8类),DEM 为低类别(1-2类),探测的共有风险区为惠农区和兴庆区,表明在惠农区与兴庆区的底泥中 Cu 和 Pb 元素主要源于交通运输、人类的经济活动(如三大产业发展)以及底泥迁移。此结论与当地实际相符。惠农区是石嘴山市的“煤都”,兴庆区是银川市的“核心区”,两个地区经济发达,路网密布。张义等^[30]研究的潮河底泥中 Cu 和 Pb 源于交通污染源,结果于此一致。张松林^[31]、王幼奇^[32]也分别发现惠农区和兴庆区土壤中 Pb 主要源于交通运输。

Ni 和 Zn 元素的前五位主要影响因子除 DEM 风险类为高级别外,其余均为低级别,表明二者并未源于交通运输和经济生产活动,而可能源于大气沉降;二者以及与 Cu 之间关联性较大,说明二者有相同的污染来源,源头与 Cu 的来源相关,可能源于成土母质。二者的风险区均为沙坡头区,该地以荒漠景观为主,人口密度小,工农业产值低,也证实 Ni 和 Zn 不可能源于人类活动。造成 Ni 和 Zn 在此明显累积原因最可能是美利纸业非法排入污染物所致^[33]。

Cr 元素主要影响因子 pH 值和人均工业产值的风险类分别为高级别和中低级别,与 Cu 和 Pb 关联性较大,表明底泥中 Cr 主要源于工业排入^[1],并在中碱性底泥环境中不断吸附累积所致^[14],总体来源复杂,可能与 Cu 和 Pb 的来源相关。探测的风险区青铜峡市和中宁县均有丰富的煤炭资源,极易造成重金属污染^[34-35],已有研究发现风险区土壤中 Cr 累积明显^[36]。

Cd 元素主要影响因子的风险类为路网密度中高类, pH 值高类,人均农业产值中低类,风险区为青铜峡市、兴庆区和惠

农区, 与其他金属关联性小, 表明风险区的 Cd 主要源于交通^[13]和农业污染^[31, 37], 以及中碱性底泥环境对 Cd 的不断吸附累积^[12], 且与其他重金属无共同来源, 类似的结果已有报道^[36]。

4 结论

(1) 黄河底泥重金属 Cr 和 Cd 元素的平均含量均超过其对应的土壤含量、中国沉积物平均值、地壳含量以及中国土壤环境质量一级标准, 是研究区主要的污染因子; 各重金属均存在空间变异, 其中 Pb 和 Cd 的变异程度最大。

(2) 黄河底泥各重金属空间分异均受到所选因子的影响, 其中以人为因子路网密度、人均收入和人均工业产值为主。因子之间的交互作用不存在减弱或独立型, 均为增强型。

(3) 探测的风险区主要为青铜峡市、兴庆区和惠农区。青铜峡市主要的污染金属为 Cr 和 Cd, 兴庆区为 Cd、Pb 和 Cu, 惠农区为 Cr、Cd、Pb 和 Cu。

(4) 黄河底泥中, Cu 和 Pb 主要源于交通运输和底泥迁移; Ni 和 Zn 源于大气沉降和成土母质; Cr 源于煤炭的开发和利用以及中碱性环境的吸附累积; Cd 源于交通运输、农业生产以及中碱性环境的吸附累积。

Reference(参考文献):

- [1] GUAN Q, WANG L, PAN B, et al. Distribution features and controls of heavy metals in surface sediments from the riverbed of the Ningxia-Inner Mongolian reaches, Yellow River, China [J]. *Chemosphere*, 2016, 144: 29-42.
- [2] HUANG L, PU X, PAN J F, et al. Heavy metal pollution status in surface sediments of Swan Lake lagoon and Rongcheng Bay in the northern Yellow Sea [J]. *Chemosphere*, 2013, 93 (9): 1957-1964.
- [3] HE Z, LI F, DOMINECH S, et al. Heavy metals of surface sediments in the Changjiang (Yangtze River) Estuary: Distribution, speciation and environmental risks [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, 198: 18-28.
- [4] ISLAM M S, HOSSAIN M B, MATIN A, et al. Assessment of heavy metal pollution, distribution and source apportionment in the sediment from Feni River estuary, Bangladesh [J]. *Chemosphere*, 2018, 202: 25-32.
- [5] JIA Y, WANG L, QU Z, et al. Distribution, contamination and accumulation of heavy metals in water, sediments, and freshwater shellfish from Liuyang River, Southern China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25 (7): 7012-7020.
- [6] ZHAO G, YE S, YUAN H, et al. Surface sediment properties and heavy metal contamination assessment in river sediments of the Pearl River Delta, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 136: 300-308.
- [7] LIU J, XU Y, CHENG Y, et al. Occurrence and risk assessment of heavy metals in sediments of the Xiangjiang River, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24 (3): 2711-2723.
- [8] KE Huaming (可华明), YANG Qingwei (杨清伟), LIU Shoujiang (刘守江), et al. Distribution of the heavy metal contaminants and the corresponding eco-hazard risk assessment in the sediment of Tingzikou Reservoir of Jialing River [J]. *Journal of Safety and Environment (安全与环境学报)*, 2020, 20 (6): 2389-2397.
- [9] ARFAEINIA H, DOBARADARAN S, MORADI M, et al. The effect of land use configurations on concentration, spatial distribution, and ecological risk of heavy metals in coastal sediments of northern part along the Persian Gulf [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 653: 783-791.
- [10] WANG Linjie (王琳杰), ZENG Xiangang (曾贤刚), DUAN Cunru (段存儒), et al. Analysis on influencing factors of heavy metal pollution in sediments of Poyang Lake based on STIRPAT Model [J]. *China Environmental Science (中国环境科学)*, 2020, 40(8): 3683-3692.
- [11] ZANG F, WANG S, NAN Z, et al. Influence of pH on the release and chemical fractionation of heavy metals in sediment from a suburban drainage stream in an arid mine-based oasis [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17 (10): 2524-2536.
- [12] SHI C, DING H, ZAN Q, et al. Spatial variation and ecological risk assessment of heavy metals in mangrove sediments across China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 143: 115-124.
- [13] MA X, ZUO H, TIAN M, et al. Assessment of heavy metals contamination in sediments from three adjacent regions of the Yellow River using metal chemical fractions and multivariate analysis techniques [J]. *Chemosphere*, 2016, 144: 264-72.
- [14] LIU A, DUODU G O, GOONETILLEKE A, et al. Influence of land use configurations on river sediment pollution [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 229: 639-646.
- [15] WANG Jinfeng (王劲峰), XU Chengdong (徐成东). Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica (地理学报)*, 2017, 72(1): 116-334.

- [16] LI Yu (李雨), HAN Ping (韩平), REN Dong (任东), et al. Influence Factor Analysis of Farmland Soil Heavy Metal Based on the Geographical Detector [J]. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2017, 50(21): 4138-4148.
- [17] LUO L, MEI K, QU L, et al. Assessment of the Geographical Detector Method for investigating heavy metal source apportionment in an urban watershed of Eastern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 653: 714-722.
- [18] QIAO P, YANG S, LEI M, et al. Quantitative analysis of the factors influencing spatial distribution of soil heavy metals based on geographical detector [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 664: 392-413.
- [19] ZHAO Y, DENG Q, LIN Q, et al. Cadmium source identification in soils and high-risk regions predicted by geographical detector method [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 263: 114338.
- [20] ZHANG M, WANG X, LIU C, et al. Identification of the heavy metal pollution sources in the rhizosphere soil of farmland irrigated by the Yellow River using PMF analysis combined with multiple analysis methods-using Zhongwei city, Ningxia, as an example [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27 (14): 16203-16214.
- [21] WANG Xinkai (王信凯), ZHANG Yanxia (张艳霞), HUANG Biao (黄标), et al. Accumulation and sources of heavy metals in agricultural soil in a city typical of the Yangtze River Delta, China [J/OL]. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 1-11 [2021-1-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20200501.1633.002.html>.
- [22] HUANG Liangliang (黄亮亮), ZHANG huiqin (张慧琴), LAO Liyan (劳丽燕), et al. Research progress of electrical conductivity in soil salt detection [J]. *Lowtemperature Architecture Technology* (低温建筑技术), 2018, 40(11): 77-78+91.
- [23] HU Caili (胡彩莉), MA Yuzhen (马玉贞), GUO Chao (郭超), et al. Optimization of the experiment conditions for estimating organic matter content with Loss-on-ignition Method [J]. *Earth And Environment* (地球与环境), 2016, 44(1): 110-118.
- [24] ZHANG Wenhe (张文河), MU Guijin (穆桂金). Precision control on measuring organic and carbonate content with loss on ignition method [J]. *Arid Land Geography* (干旱区地理), 2007, 30(3):455-459.
- [25] MIAO Xinhui (缪鑫辉), LIANG Qin'ou (梁勤欧). Spatial differentiation of county economic development level and its influencing factors in Zhejiang Province based on geographical detector [J]. *Journal of Zhejiang Normal University(Nat. Sci.)* (浙江师范大学学报(自然科学版)), 2020, 43 (4): 460-467.
- [26] YAN Mingcai (鄢明才), CHI Qinghua (迟清华), GU Tiexin(顾铁新), et al. The average content of chemical elements in sediments of China [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration* (物探与化探), 1995, 19(6): 468-472.
- [27] Turekian K, Wedepohl K. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geological Society of America Bulletin*, 1961, 72 (2): 175-191.
- [28] ZHANG Z, LU Y, LI H, et al. Assessment of heavy metal contamination, distribution and source identification in the sediments from the Zijiang River, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 235-243.
- [29] XIAO Wu (肖武), SUI Tao (隋涛), WANG Xin (王鑫), et al. Assessment and geographical detection of heavy metal pollution in typical farmland soil in Chaohu Lake Basin [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery* (农业机械学报), 2018, 49, (7): 144-152.
- [30] ZHANG Yi (张义), YU Yilei (于一雷), LI Shengnan (李胜男), et al. Characteristics and ecological risk assessment of heavy metal in sediments of Chao River, North China [J]. *Environmental Science & Technology* (环境科学与技术), 2020, 43(7): 169-179.
- [31] ZHANG Songlin. Research on phytoremediation of halophytes for heavy metal pollution of saline soil in northwest industrial park: a case study of Huinong Disct, Ningxia, China [D]. *Southwest University* (西南大学), 2020.
- [32] WANG Youqi (王幼奇), BAI Yiru (白一茹), WANG Jianyu (王建宇). Distribution of soil heavy metal and pollution evaluation on the different sampling scales in farmland on Yellow River Irrigation Area of Ningxia: A case study in Xingqing County of Yinchuan City [J]. *Environmental Science* (环境科学), 2014, 35 (7): 2714-2720.
- [33] ZHONG Huanxuan (仲环宣). Contaminant persistence for 20 years in the Tengger Desert [J]. *Environmental Monitoring in China* (中国环境监察), 2019, (11): 64-65.
- [34] LIU X, SHI H, BAI Z, et al. Heavy metal concentrations of soils near the large opencast coal mine pits in China [J]. *Chemosphere*, 2020, 244.
- [35] ZHANG Ruixue (张瑞雪), ZHAI Quande (翟全德), YE Huijun (叶慧君), et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals from coal mine drainage of different regions in Guizhou Province [J/OL]. *Journal of Safety and*

Environment (安全与环境学报). <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2020.0320>.

- [36] LIU Naijing (刘乃静), LI Zhen (李臻), ZHAO Yinxin (赵银鑫), et al. Assessment of heavy metal pollution and its potential risk in the urban topsoil of Wuzhong, China [J]. Science Technology and Engineering (科学技术与工程), 2020, 20(17) : 7114-7121.
- [37] KE X, GUI S, HUANG H, et al. Ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediment from the Liaohe River protected area, China [J]. Chemosphere, 2017, 175: 473-481.

Influence factors of spatial differentiation and source analysis of heavy metals of sediment in the Yellow River

HAO Jian-xiu^{1,2}, REN Jun^{1,2}, TAO Ling^{1,2}, FANG Hong-bing¹

(1.School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2.Key Laboratory of Yellow River Water Environment in Gansu Province, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to further analyze the influencing factors of spatial differentiation and source pathways of heavy metals in the Yellow River sediment, we collected 36 samples in surface sediment (0-5cm) of the Ningxia section of the Yellow River mainstream and measured concentrations of heavy metals (Cu, Ni, Zn, Cr, Pb and Cd) using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). 12 influencing factors were designated, which included 6 natural factors for pH, TOC, DEM, salinity (EC), vegetation coverage (VC) and soil types (ST), and 6 anthropogenic factors for land use types (LUT), population density (PD), per capita industrial production (PIP), per capita agricultural production (PAP), per capita income (PI) and road network density (RD). Based on the geographical detector model, this paper analyzed influence 12 factors on spatial differentiation of six heavy metals and detected their risk factors and sources. The results showed that: ① The average values of heavy metals except for Zn in the sediments of the Yellow River were higher than their corresponding background values, especially Cr and Cd were 3.57 and 1.39 times of the background values, which were greatly influenced by human beings and accumulated obviously. ② Influencing factor of the biggest explanatory power for heavy metal spatial differentiation was RD ($Q_{D,H} > 0.50$), then PIP (excluding Cd, $Q_{D,H} > 0.50$) and the smallest was VC ($Q_{D,H} < 0.20$). ③ Interaction type of factors was ascertained for mostly double factor enhancement type, a few non-linear enhancement type and no independence and weakness type. Interaction of VC or LUT and other factors were main non-linear enhancement type. ④ Sources of heavy metals in sediments of the Yellow River were different. Cu and Pb were closely related, and their common pollution sources were traffic and upstream transportation. The correlation between Ni and Zn was strong and they could mainly come from the parent material and atmospheric deposition. Cr derived mainly from industrial discharges and sources of Cd were traffic and the use of fertilizer and pesticide. ⑤ The detected risk areas were mainly Qingtongxia city, Xingqing district and Huinong district. The main polluted metals in Qingtongxia city were Cr and Cd, Cd, Pb and Cu in Xingqing district, and Cr, Cd, Pb and Cu in Huinong district.

Key words: environmental science; sediment; heavy metal; geo-detector; influence factor; Yellow River

CLC number: X522 **Document code:** A

DOI:10.13637/j.issn.1009-6094.2021.0107