许浩，吴旭东，蒋齐，等. 宁夏沿黄城市带土壤重金属分布特征及其生态风险评价[J]. 环境科学与技术，2024，47(S1)：165-174. Xu Hao，Wu Xudong，Jiang Qi，et al. Distribution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metals of the City Belt of Ningxia along the Yellow River[J]. Environmental Science & Technology，2024，47(S1)：165-174.

宁夏沿黄城市带土壤重金属分布特征及其生态风险评价

许浩[1,2,3]，吴旭东[1,2,3]，蒋齐[1,2,3]，马丽慧[1,2,3]，于江珊[1,2,3]

（1.宁夏农林科学院林业与草地生态研究所，宁夏 银川 750021；
2.宁夏防沙治沙与水土保持重点实验室，宁夏 银川 750021；
3.宁夏生态修复与多功能林业综合研究中心，宁夏 银川 750021）

摘 要：宁夏沿黄城市带是黄河中上游重要的产业聚集区，其土壤健康状况对黄河流域生态保护和高质量发展先行区建设具有重要意义。为摸清沿黄城市带土壤重金属现状及生态风险，该研究取样检测了该区域682个样点的土壤重金属元素含量，分析了其生态风险，并进行了溯源。研究结果表明：(1)宁夏沿黄城市带0~20 cm土壤砷(As)、铬(Cr)、铜(Cu)、锰(Mn)、铅(Pb)、锌(Zn)、镍(Ni)和镉(Cd)8种重金属元素平均值分别为(3.11±1.88)、(60.66±15.64)、(17.86±6.10)、(509.92±186.74)、(17.62±11.10)、(57.36±25.33)、(25.23±4.95)和(0.77±0.49) mg/kg。0~20 cm土层重金属元素平均含量均低于土壤背景值，也低于农用地土壤污染风险筛选值。0~5 cm土层重金属元素含量高于0~20 cm土层，且Cr、Mn、Zn和Cd 4种元素含量超过了土壤背景值。(2)沿黄城市带中As、Cr、Cu、Mn、Pb、Zn和Ni这7种元素对环境污染风险极低。大部分区域土壤Cd含量明显高于背景值，污染风险较高。(3)沿黄城市带重金属元素有5种来源，其中母质源对重金属来源贡献率最高，其次为农业和工业复合源、交通运输源，农业源和工业源对重金属元素贡献小。研究结果表明宁夏沿黄城市带土壤重金属有较高等级的Cd生态风险，值得关注。

关键词：宁夏沿黄城市带； 土壤重金属； 潜在生态风险； 溯源

中图分类号：X82 **文献标志码**：A **doi**：10.19672/j.cnki.1003-6504.1077.23.338 **文章编号**：1003-6504(2024)S1-0165-10

Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals of the City Belt of Ningxia Along the Yellow River

XU Hao[1,2,3]， WU Xudong[1,2,3]， JIANG Qi[1,2,3]， MA Lihui[1,2,3]， YU Jiangshan[1,2,3]

（1. Institute of Forestry and Grassland Ecology, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences，Yinchuan 750021, China;
2. Ningxia Key Laboratory of Desertification Control and Soil and Water Conservation, Yinchuan 750021, China;
3. Research Center for Ecological Restoration and Multi-functional Forestry of Ningxia, Yinchuan 750021, China）

Abstract: The City Belt of Ningxia along the Yellow River is an important industrial cluster in the middle and upper reaches of the Yellow River, and the soil health of this region is significance to the construction of the Yellow River Basin Ecological Protection and High-Quality Development Zone. In this study，we tested the heavy metal content of 682 soil samples along the Yellow River urban belt, and analyzed ecological risks, and conducted traceability. The results are as follow: (1) The mean content of As, Cr, Cu, Mn, Pb, Zn, Ni and Cd in 0~20 cm surface soil were (3.11±1.88), (60.66±15.64), (17.86±6.10), (509.92±186.74), (17.62±11.10), (57.36±25.33), (25.23±4.95) and (0.77±0.49) mg/kg, respectively. The average content of heavy metal in 0~20 cm soil layer was lower than the soil background value, and also lower than the Screening Value of Soil Pollution Risk in Agricultural Land. The content of heavy metal in 0~5 cm soil layer was higher than 0~20 cm soil layer, and the content of Cr, Mn, Zn and Cd exceeded the soil background value. (2)The risk of environmental pollution from the seven elements As, Cr, Cu, Mn, Pb, Zn, and Ni in the urban belt along the Yellow River is extremely low. In most parts of the region, the soil Cd content was higher than the soil background value, causing higher ecological pollution risk. (3)There are five sources of soil heavy metal along the Yellow City Belt, among which the contribution rate of parent material is the highest, followed by the combined sources of agriculture-industry, transportation sources. The results of the study indicate

《环境科学与技术》编辑部：(网址)http://fjks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期：2023-06-07；修回2023-10-09

基金项目：宁夏重点研发计划项目：宁夏沿黄城市带城市林业系统主要生态功能研究与示范(2019BFG02024)；中央引导地方科技发展专项：宁夏防沙治沙与水土保持重点实验室平台建设(2021FRD05020)；宁夏绿创生态修复创新中心科研项目：贺兰山乡土植物引选及在矿山生态修复中的应用研究；宁夏回族自治区312人才计划资助

作者简介：许浩(1979-)，男，副研究员，博士，主要研究方向为自然地理学，(电子信箱)xuhao-cn@163.com。

that soil heavy metals in the urban belt along the Yellow River in Ningxia have a high level of Cd ecological risk, which is worthy of attention.

Key words: City Belt of Ningxia along the Yellow River; soil heavy metals; ecological risk; traceability analysis

土壤作为生态系统基底,生态系统中的很多重要过程都在土壤中进行,土壤中的特性不仅影响着土壤中生物地球化学循环,也影响着土壤上面的生物群落。自工业革命以来,工业生产排放的废弃物、农业生产污水灌溉、化肥农药过量使用以及大气沉降等过程导致的土壤重金属污染急剧增加[1]。重金属元素具有高毒性、持久性、不可生物降解性和生物积累进入食物链的能力[2],这些元素常通过食物链传导到动物和人类体内累积,严重危害人体健康[3,4]。

在土壤重金属污染逐渐加重背景下,重金属分布特征及生态风险评价方面已经开展了大量的研究工作并取得了很大的进展,陈林等[5]利用潜在生态风险评价方法发现宁夏引黄灌区农田中无高风险等级的样点。通过正定矩阵因子分析方法发现人为活动对土壤重金属的贡献率较大。沈城等[6]认为典型行业再利用土壤整体呈现较强潜在生态风险,再开发利用场地工业土壤中重金属Hg、Ni和Cd的污染需要进一步关注。因此,在长期土壤重金属污染背景下研究土壤重金属含量及其分布特征,对进一步评价土壤生态风险有重要意义。

沿黄城市带是宁夏政治经济的重心,分布了11个城市,占宁夏国土面积的43%,集中了宁夏57%的人口、80%的城镇、90%的城镇人口,创造了宁夏90%以上的GDP和财政收入[7]。宁夏平原是沿黄城市带发展的核心支撑,它包含银川平原和卫宁平原两部分,总面积约7 300 km^2。宁夏平原沿黄河两岸作为北方干旱区典型绿洲生态系统,长期灌溉淤积产生的灌淤土为宁夏平原优质农产品生产提供了重要保障。近年来虽然工农业生产迅猛发展,但宁夏平原土壤重金属含量一直在国家农用地土壤污染风险管控标准以内,没有明显的重金属污染[5,8]。值得关注的是近年来宁夏平原部分土壤重金属含量相比1990年的土壤背景值有上升的趋势[5,9,10],存在潜在的重金属污染问题。因此,本文拟进行如下探讨:(1)采用地累计指数评价方法和潜在生态风险评价方法,对宁夏沿黄城市带土壤重金属的污染程度与生态风险进行研究;(2)采用正定矩阵因子分析方法对重金属的来源进行解析。本研究结果有助于摸清宁夏沿黄城市带土壤重金属分布特征及其变化,掌握其土壤重金属环境质量及其来源,并为土壤环境污染防治及生态风险管控工作提供科学依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

宁夏平原南高北低,黄河从东南部中卫沙坡头区南长滩村流入宁夏,从北部石嘴山市惠农区银河村流出,在宁夏境内全长397 km,为宁夏贡献了近90%的水资源。该区属典型的温带大陆性季风气候,日照充足,昼夜温差大,年平均气温在7.3~9.5 ℃,年均降水量180~230 mm,年平均日照时数2 800~3 000 h。宁夏平原土壤类型主要以灌淤土为主,在贺兰山东麓至灌区之间分布有灰钙土、草甸土和灰褐土,在下游惠农区和平罗县的低洼地有潮土和盐碱土,灌区东部盐灵台地和中卫香山地区分布有风沙土和淡灰钙土。宁夏平原是典型的绿洲农业生态系统,主要种植水稻、玉米、蔬菜等农作物。平原周边是荒漠和荒漠草原生态系统,自然植被是以珍珠、红砂、短花针茅为主的荒漠植被群落为主[11]。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采样

本研究区位于宁夏沿黄城市带,以宁夏平原为核心,部分取样点涵盖了盐灵台地、河东沙地的边缘和香山的部分区域。为研究沿黄城市土壤重金属分布状况,在宁夏平原及周边地区采集了682个样点的土壤样品,采样点涵盖了主要的土地利用类型,从空间上尽量均匀分布,采样点分布见图1,在银川市及宁东工业区采样点略微密集,周边荒漠和台地等区域也设置了采样点,以便于重金属元素的空间分析。每个采样点采用五点采样法分别采集0~5 cm和0~20 cm土层样品,用四分法混合后获得1 kg的样品,保存在密封袋内带回实验室。自然风干后取100 g,用玛瑙研钵研磨、混匀过筛后保存,用于土壤重金属含量分析。

1.2.2 重金属元素分析

处理好的土壤样品先进行微波消解,先称取约0.10 g样品放入100 mL聚四氟乙烯消解罐中,加入5 mL硝酸、1 mL氢氟酸、1 mL H_2O_2,轻轻摇匀,放入微波消解仪(Milestone ETHOS UP)消解时间1 h;取出消解罐放入赶酸仪(VB24 UP)中,在通风橱中赶酸2 h。赶酸冷却后的样品转移至50 mL容量瓶中,用超纯水冲洗消解罐3次,冲洗溶液合并注入50 mL容量瓶中,然后定容至刻度待测。

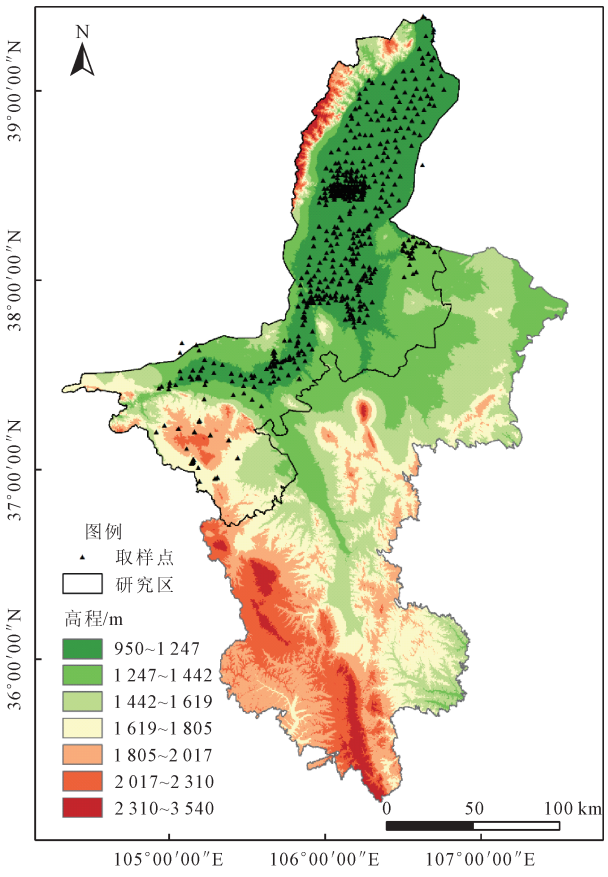


图1 土壤采样点的分布

使用ICP-OES(Agilent 5110)测定重金属元素As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Mn和Zn的含量[12,13]。测定前先根据试液中待测元素的粗估元素浓度范围，导入相应的标准溶液，测定标准工作曲线的谱线强度，以待测元素浓度为横坐标，谱线强度为纵坐标，绘制标准工作曲线，工作曲线相关系数不小于0.999。每一批样品检测的同时做空白及加标回收，为了确保实验结果的准确性和精密性，所用试剂均为优级纯，水均为超纯水，而且每批次抽取10%的样品进行平行样测定，相对标准偏差控制在≤5%。

1.2.3　污染评价

(1)地累积指数。地累积指数法是研究土壤重金属元素相对地质背景值的变化，对了解重金属污染程度有帮助[5,14,15]。其计算公式如下：

$$I_{geo}=\log_2\frac{C_i}{1.5\times B_i} \quad (1)$$

式中，I_{geo}为地累积指数；C_i为重金属元素i的含量，mg/kg；B_i为该元素的背景值，mg/kg；此处采用中国表层土壤背景值宁夏区的值为参考值[16]。

根据地累积指数I_{geo}计算结果，将重金属富集污染程度划分为不同等级(表1)。

表1　地累积指数污染程度划分标准

污染程度	无污染	轻度污染	偏中度污染	中度污染	偏重度污染	重度污染	极重度污染
分级	0	1	2	3	4	5	6
I_{geo}	<0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	>5

(2)生态风险评价。潜在生态风险指数是瑞典学者Hakanson在1980年提出的重金属生态风险综合评价方法[17]，该方法主要以土壤和沉积物中重金属的元素背景值为基础，并结合重金属的生物毒性系数、生态效应和环境效应，计算出重金属生态风险指数。由于该方法不仅考虑到土壤中重金属的含量，同时将重金属的生态效应、环境效应和毒理学联系在一起。近年来被广泛应用于重金属污染引起的生态风险评价。例如，在湘东北典型河源区，表层土壤达到中等及强风险等级的样点比例分别为80.46%和12.64%，因此确定该区域综合潜在生态风险为中等风险等级[18]。

其计算公式如下：

$$E_i=T_i\times\frac{C_i}{B_i} \quad (2)$$

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

式中，E_i为重金属i的潜在生态风险系数；T_i为重金属i的毒性系数，As为10，Hg为40，Cd为30，Cr为2，Pb为5，Zn为1，Ni为5，Cu为5[17]，徐争启等[19]给出的Mn的毒性系数为1；C_i为重金属i实测值，mg/kg；B_i为重金属i的背景值；RI为土壤中重金属的潜在生态风险指数；n为参与风险评价的重金属种类总数。

鉴于该研究区调查了8种主要污染的重金属，按照Hakanson的分类，缺乏Hg元素的毒性系数，增加了Mn的毒性系数。故采用Mn等8种重金属污染物的RI风险分级标准，可能会造成对生态风险的低估，因此本研究中，按照毒性系数比例换算了RI的分级标准(表2)。

表2　土壤重金属潜在生态风险分级标准

生态风险指数	轻微	中等	强	很强	极强
E_i	<40	40~80	80~160	160~320	>320
RI	<90	90~180	180~360	>360	

1.2.4 重金属元素溯源分析

溯源采用Paatero在1994年首次提出的正定矩阵因子分解(positive matrix factorization,PMF)模型,该模型是一种基于因子分析原理进行源解析的数据分析方法,得到了美国环保署很好的推荐用于识别污染源[20]。PMF模型基于最小迭代二乘算法,将受体原始数据矩阵分解为因子得分矩阵、因子载荷矩阵和残差矩阵,这些因子情况需要用户利用测得的源配置文件信息,以及排放或排放清单进行解释,以识别对样品有贡献的源类型[21]。众多学者采用该模型对宁夏引黄灌区农田[5]、兰州耕地[22]和广西铅锌矿流域[21]等地土壤重金属进行源解析。相关性分析对判断不同元素是否有共同来源具有一定帮助,重金属元素相关性分析采用SPSS 23.0。溯源分析计算模型采用了PMF 5.0软件进行,模型中的不确定性等参数计算参考了文献[23,24]中的方法。该模型将原始矩阵x分解为源贡献率矩阵g、源成分谱矩阵f和残差矩阵e,计算公式如下:

$$X_{ij}=\sum_{k=1}^{p} g_{ik}\times f_{ik}+e_{ij} \quad (4)$$

式中,X_{ij}为第i个土壤样品中j元素的含量;g_{ik}为第k个源对第i种样品的贡献;f_{ik}为第k个源中第i种元素的含量;e_{ij}为残差矩阵,是根据定义目标函数计算得到。

目标函数q定义如下:

$$q=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{e_{ij}}{u_{ij}}\right) \quad (5)$$

式中,u_{ij}为j元素在第i个土壤样品中的不确定度,使用PMF时,可以对每一个单独数据点进行权重处理,赋予每个数据点合适的不确定度大小。

当各元素的含量小于或等于相应的方法检出限(MDL)时,不确定度如式(6):

$$u=(5/6)\times \mathrm{MDL} \quad (6)$$

当各元素的含量大于相应的方法检出限(MDL)时,不确定度如式(7):

$$u=\sqrt{(\delta\times C)^2+0.5\mathrm{MDL}^2} \quad (7)$$

式中,δ为相对偏差;C为元素含量;MDL为方法检出限。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量特征

宁夏沿黄城市带682个样点的重金属元素的分析测试结果如表3所示。0~20 cm土壤的As、Cr、Cu、Mn、Pb、Zn、Ni和Cd平均值分别为(3.11±1.88)、(60.66±15.64)、(17.86±6.10)、(509.92±186.74)、(17.62±11.10)、(57.36±25.33)、(25.23±4.95)和(0.77±0.49) mg/kg。除了Cr和Cd含量比宁夏土壤背景值高,其余6种元素平均含量均在背景值以内,没有明显的上升。对比各个元素的最大值,除了As元素,其他元素的最大值均高于土壤背景值,表明一些样点的土壤重金属含量存在上升现象。

表3 宁夏沿黄城市带8种土壤重金属元素描述性统计特征 (mg/kg)

项目			As	Cr	Cu	Mn	Pb	Zn	Ni	Cd
土层	0~5 cm	最大值	14.31	2 374.06	116.90	6 034.65	211.47	843.47	66.56	5.52
		最小值	0.05	27.48	7.92	233.63	0.00	15.88	7.16	0.05
		平均值	2.77	70.16	17.99	538.68	19.79	65.16	24.49	0.86
		标准差	1.37	37.79	7.13	371.79	17.47	46.12	6.32	0.65
土层	0~20 cm	最大值	11.57	240.61	97.50	3 886.58	80.83	341.03	38.57	3.44
		最小值		31.40	6.94	192.04	0.00	10.55	4.75	0.05
		平均值	3.11	60.66	17.86	509.92	17.62	57.36	25.23	0.77
		标准差	1.88	15.64	6.10	186.74	11.10	25.33	4.95	0.49
土壤元素背景值[16]			11.9	60.0	22.1	524.0	20.9	58.8	36.5	0.112
农用地土壤污染风险筛选值[25]			25	250	100	–	170	300	190	0.6
农用地土壤污染风险管制值[25]			100	1 300	–	–	1 000	–	–	4

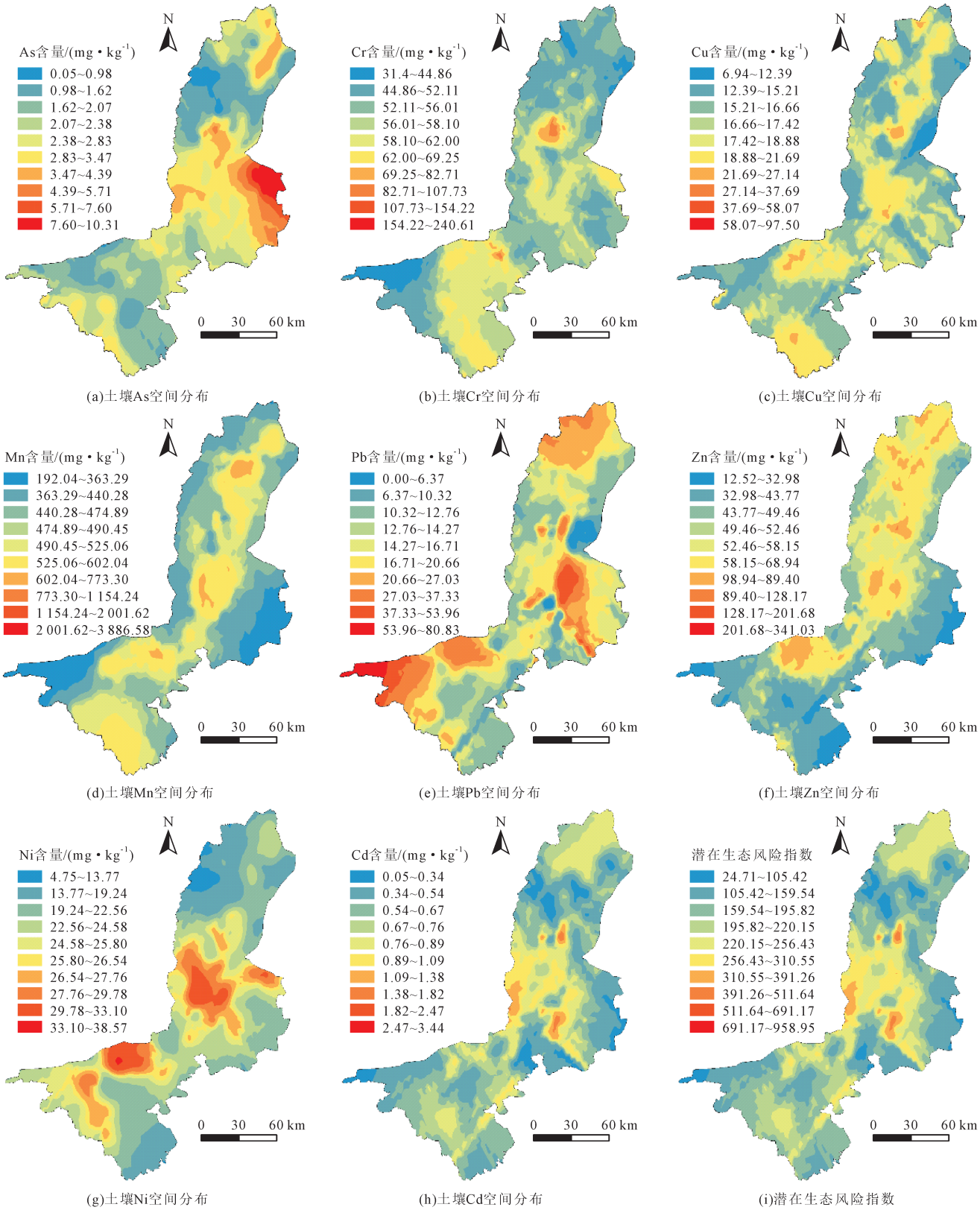
注:"–"表示未有该值。

0~5 cm土壤的As、Cr、Cu、Mn、Pb、Zn、Ni和Cd平均值分别为(2.77±1.37)、(70.16±37.79)、(17.99±7.13)、(538.68±371.79)、(19.79±17.47)、(65.16±46.12)、(24.49±6.32)和(0.86±0.65) mg/kg。As、Cu、Pb和Ni这4种元素含量低于土壤背景值,Cr、Mn、Zn和Cd这4种元素含量超过了土壤背景值。对比0~5 cm土层和0~20 cm土层重金属含量可以看出,除了As和Ni,0~5 cm土层的其他6种重金属元素含量均高于0~20 cm土层,表明重金属元素更倾向于在0~5 cm的表土层聚集。

0~5 cm和0~20 cm的8种重金属元素平均值均低于农用地土壤污染风险筛选值,表明沿黄城市带总体重金属污染风险低。而部分样点重金属含量最大值超过了农用地土壤污染风险筛选值,表明局部点位存在重金属污染风险。极少数样点0~5 cm土层的Cr和Cd元素最大值超过了农用地土壤污染风险管制值,表明该区域土壤重金属污染风险高,不适合种植农作物。

2.2　土壤重金属空间分布特征

通过地统计分析模块中的克里金插值对0~20 cm土层8种重金属元素进行分析，得到8种重金属的空间分布状况图(图2)。As主要分布在银川市和吴忠市，其中在宁东工业区最为集中；Cr在银川北部和中宁县存在相对高值分布；Cu、Mn和Zn的分布具有一定的相似性，高值区域主要集中在整个沿黄城市带平原区域；Pb在银川的东部和中卫市西部出现高值；Ni在青铜峡、吴忠和中宁县北部存在高值；Cd则更集中于银川和吴忠市。总体来看，所有重金属分布高值区



(a)土壤As空间分布　(b)土壤Cr空间分布　(c)土壤Cu空间分布

(d)土壤Mn空间分布　(e)土壤Pb空间分布　(f)土壤Zn空间分布

(g)土壤Ni空间分布　(h)土壤Cd空间分布　(i)潜在生态风险指数

图2 宁夏沿黄城市带土壤重金属元素及RI的空间分布

都出现在工业集中区和沿黄河灌区，这也是人类活动比较集中的区域，表明沿黄城市带重金属元素与人类活动密切相关。

所有样点0~20 cm土层的As、Cr、Cu、Pb和Ni含量均低于土壤风险筛选值，只有1个样点（中宁县某金属制造企业附近）的Zn含量高于土壤污染风险筛选值。275个样点的Cd元素含量高于土壤风险筛选值，主要分布于银川市主城区、石嘴山市北部和吴忠市。Mn元素含量最高的8个样点均出现在中宁县某金属制造企业周边，这8个样点的Cu和Zn重金属含量也较高，表明企业生产过程排放对土壤Mn等重金属含量贡献较大。

0~5 cm土层的Cr分别有7个和2个样点中的含量超过农用地土壤污染风险筛选值和农用地土壤污染风险管制值；较少样点的Cu、Pb和Zn含量超过农用地土壤污染风险筛选值，这几种元素的高值区均出现在中宁县某金属制造企业周边。有2个和314个样点的Cd含量分别超过管制值和筛选值，表明Cd元素污染风险在全区普遍较高。

综合分析可以发现，0~5 cm土层的重金属含量更高，与农用地土壤污染风险筛选值相比，超标的样点也更多。不过这些重金属超标的样点大多是非农用地，对农业生产和食品安全的影响较小。

2.3 土壤重金属风险评价

对比不同重金属元素的地累积指数平均值发现，所有元素的地累积指数均小于1，表明宁夏沿黄城市带土壤重金属地累积指数总体属于无污染的清洁水平（表4）。所有采样点的As和Ni不存在污染现象；Cr、Cu、Mn、Pb、Zn和Pb分别在95.75%、98.53%、99.27%、95.16%和85.92%的样点中不存在污染现象；Cd仅在3.22%的样点中不存在污染现象；Cd分别在9.97%和0.44%的样点中存在偏重度和重度污染现象。

表4 土壤重金属的地累积指数占比 （%）

重金属	I_{geo}平均值	I_{geo}<0	0≤I_{geo}<1	1≤I_{geo}<2	2≤I_{geo}<3	3≤I_{geo}<4	4≤I_{geo}<5	5≤I_{geo}<6
As	−2.77	100.00	0	0	0	0	0	0
Cr	−0.16	95.75	4.10	0.15	0	0	0	0
Cu	−0.96	98.53	13.19	0.15	0	0	0	0
Mn	−0.67	99.27	0.44	0.15	0	0	0	0
Pb	−1.07	85.92	13.93	0.15	0	0	0	0
Zn	−0.72	95.16	4.25	0.59	0	0	0	0
Ni	−1.14	100.00	0	0	0	0	0	0
Cd	−1.90	3.22	9.38	27.71	4.84	9.97	0.44	0

总体来看，沿黄城市带土壤不存在As和Ni的污染现象，存在Cr、Cu、Pb和Zn的点状轻度污染现象，土壤中的Cd在大部分区域出现了偏中度污染，极少数样点出现了偏重度乃至重度污染。

采用公式（2）和（3）统计了沿黄城市带11个县区重金属潜在生态风险指数，结果见表5。由表5可以看出，沿黄城市带11个县区As、Cr、Cu、Mn、Pb、Zn、Ni 7种元素潜在生态风险指数E_i等级均为轻微级别，环境污染风险极低。除了平罗县，其他10县市Cd的E_i指数均达到了很强的等级。平罗县综合潜在生态风险指数RI指数达到了中等等级，其他10个县市区RI指数达到了强的等级。Cd元素的E_i指数和RI具有很强的一致性。可见，当前宁夏沿黄城市带土壤重金属污染风险主要来自于Cd元素，综合潜在生态风险指数RI受Cd影响大，在土壤污染防治中值得关注。

表5 重金属潜在生态风险指数分县区统计表

重金属	潜在生态风险指数E_i										
	大武口	贺兰	惠农	利通区	灵武	平罗	青铜峡	沙坡头区	银川	永宁	中宁
As	1.82	1.59	2.71	2.37	4.87	1.91	2.42	2.11	2.79	2.74	2.00
Cr	1.66	1.83	1.71	1.95	1.96	1.68	1.87	1.93	2.44	1.82	2.11
Cu	3.89	3.87	4.04	4.26	3.83	3.85	3.88	3.92	4.40	3.82	4.13
Mn	0.95	0.98	0.96	1.02	0.93	1.11	0.94	0.98	0.92	0.96	1.07
Pb	4.93	3.67	4.14	4.53	6.08	3.27	4.12	3.46	4.50	3.64	3.71
Zn	1.08	1.03	1.07	0.99	0.90	0.97	1.01	0.78	1.11	0.96	0.97
Ni	2.64	2.98	3.23	3.74	3.79	2.75	3.74	3.51	3.45	3.84	3.34
Cd	195.01	177.70	194.66	295.90	188.37	146.40	216.67	179.42	240.77	219.78	175.85
综合潜在生态风险指数RI	211.97	193.65	212.53	314.76	210.73	161.94	234.65	196.10	260.38	237.56	193.18

2.4 土壤重金属来源解析

2.4.1 重金属元素的相关性

通过8种重金属元素的相关性分析（表6），发现As−Cr−Cu−Pb−Zn−Ni−Cd，Cr−As−Cu−Mn−Pb−Zn−Ni，Mn−Cr−Cu−Pb−Zn−Ni（P<0.05）有显著正相关关系，表明这几组重金属元素有共同来源或某种关联，总体来看Cd元素与其他元素的相关系数较小，显示出其可能具有单独来源。

表6　土壤重金属的相关性分析

	As	Cr	Cu	Mn	Pb	Zn	Ni	Cd
As	1							
Cr	0.236**	1						
Cu	0.154**	0.374**	1					
Mn	−0.016	0.298**	0.514**	1				
Pb	0.093*	0.105**	0.460**	0.177**	1			
Zn	0.108**	0.288**	0.773**	0.499**	0.525**	1		
Ni	0.343**	0.280**	0.423**	0.171**	0.270**	0.269**	1	
Cd	0.078*	0.069	0.235**	−0.033	0.397**	0.279**	0.123**	1

注：n=682，**在0.01级别(双尾)，相关性极显著；*在0.05级别(双尾)，相关性显著。

2.4.2　正定矩阵因子分析

本研究利用PMF 5.0分析污染物的可能来源，因子筛选参考陈林等[5,21]的方法，设定不同的因子数，通过信噪比、目标函数Q的最优解和真值，结合观测值与预测值之间的相关性(R^2)等要素确定因子数，发现当因子数为5时模型的总体拟合效果较好。

因此本研究得到8种元素在5种来源中的贡献率(图3)。结合各因子的贡献率数据，因子1对Zn的贡献率最高，达到55.73%，对Cu的贡献率达到38.09%，且对Mn、Cr、Ni、Pb均有一定贡献。而调查也发现，这几种元素在工业企业周边土壤中含量较高(图2)。研究表明，表层土壤中Cu和Zn含量在人口密集和人为活动扰动较为强烈的区域较高[26]。金属冶炼加工、机械制造和电镀等工业也会导致含Zn和Cu的废水废气排放，造成土壤Cu和Zn富集。例如，钢材加工过程中常加入Cu以增强钢材的耐蚀性，电镀工业常用Cu做电镀的衬底以此增强电镀面的附着稳定性[27,28]。因此，Cu和Zn相伴随的来源可以确定为工业来源。所以因子1为工业来源。

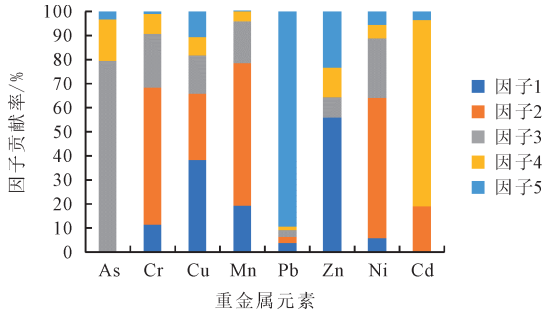


图3 基于PMF中各因子对土壤中重金属含量贡献率分布

因子2对Mn、Cr、Ni和Cu的贡献率最高，分别为59.25%、56.91%、58.30%和27.53%，且对Cr和Pb等也有一定的贡献。这几种元素在研究区未出现富集现象，说明这几种元素受污染程度较低，受人类活动影响不大。Cr和Ni是自然来源的标志性元素，研究表明Cr和Ni主要来源于成土母质[5,22,28]。这几种元素含量均在土壤背景值范围内，且因子对这几种元素均有贡献，可以认为因子2是母质来源。

因子3对As的贡献率高达79.31%，As元素常常被认为是农业活动和工矿企业生产产生的[5,29]。农业生产中农药的使用、灌溉等措施均会带来As的污染。结合As的空间分布可以看出，As在银川东部的宁东工业区含量较高，这显然是受到了工业活动的影响(图2)。同时因子3对Cr、Mn、Ni和Cu这4种元素均有一定贡献，这4种元素与工业生产也密切相关。所以可以认为因子3是一种农业和工业复合来源。

因子4对Cd的贡献率最大，达到了77.17%。Cd是农业活动的标志元素，常作为农药的有效成分被广泛使用，具有易挥发和迁移的特性[5]。农业生产中灌溉水、化肥施用和畜禽粪便的使用均会产生Cd元素[30]。而且，Cd污染在全国农田中较为普遍[31]，所以因子4是与农业活动相关的农业污染来源。

因子5对Pb的贡献率为89.43%。Pb是交通排放的主要标志元素，主要来源于含铅汽油的燃烧、汽车引擎和轮胎的磨擦[28]。早期的含铅汽油是交通运输的主要燃料，虽然后期禁用了含铅汽油，但是早期交通运输产生的Pb在土壤中的累计是无法消除的[5]。所以因子5为高载荷的交通运输来源。

3　讨论

3.1　沿黄城市带土壤重金属特征分析

本研究以沿黄城市带682个样点的0~5 cm和0~20 cm土层土壤重金属为研究对象，分析了As、Cr、Cu、Mn、Pb、Zn、Cd和Ni这8种重金属的分布状况。结果发现As、Cr、Cu、Mn、Pb、Zn和Ni这7种重金属平均值均在土壤背景值范围内，没有发生明显的富集。8种重金属元素平均值均远低于农用地土壤污染风险筛选值，表明沿黄城市带总体重金属污染风险低(表3)。这可能是因为地处西北干旱区的银川市工农业发展总体比较缓慢，因此人类活动带来的重金属污染物较少。

0~5 cm的浅表层土壤重金属含量高于0~20 cm的土层，其中0~5 cm浅表层Cr、Mn、Zn和Cd这4种元

素超过了土壤背景值,说明沿黄城市带具有明显的干旱区表层土壤重金属环境污染特征。干旱区降水量少,重金属元素难以随水流迁移,同时干旱区土壤偏碱性,滞留于地表的重金属元素多被钝化,不利于重金属元素的迁移[32]。这些都会导致表层土壤相较0~20 cm土壤的重金属元素聚集特征更明显。

不同土地利用类型可以看出,未利用土地表层重金属元素出现一定程度富集,农田土壤重金属含量低,这是因为农用地不断的翻耕,各种因素带来的重金属随翻耕被耕作层土壤稀释[5]。此外某些工业企业周边样点的重金属元素出现了明显的富集现象,这类工业源是土壤重金属潜在污染源。虽然这类土地不属于农用地,对环境健康的影响可以忽略。但是在土地利用规划调整中必须慎重,这类土地不宜再调整为耕地和园地等农业生产用地。

空间分布特征可以看出,Cu、Mn、Pb、Zn和Cd在平原地区含量相对较高,表明人类活动对此类重金属元素的影响较大。As在银川市及东部的宁东工业区含量较高,可能受工业活动影响。Cr和Ni在中卫南部和北部、吴忠周边区域含量较高,没有明显的分布于平原内部,这可能显示了其地质背景状况。

3.2 沿黄城市带土壤存在Cd污染风险

与背景值相比,土壤Cd元素在一些区域出现了明显的上升(表3),表明人类活动带来了更多Cd。以往针对宁夏农田的研究也表明,宁夏部分枸杞地出现了Zn和Cd污染[33],贺兰县农田部分点位Cd超标,达到了中度污染水平[34]。以重金属元素环境地球化学基线值为标准的分析也表明卫宁平原Cd和Hg污染程度最高[33]。因此综合已有研究可以看出,宁夏沿黄城市带土壤重金属Cd元素在大部分区域出现了明显上升,虽然大部分样点Cd含量低于农用地土壤污染风险筛选值,但是相较背景值出现了明显的上升趋势。其他7种重金属元素含量在少数样点出现了上升趋势,但总体不存在超标现象。

地累积指数反映的是重金属元素浓度相比土壤背景值的变化[5],结果表明沿黄城市带土壤Cd含量出现了明显上升现象,Cr、Cu、Pb、Zn和Mn在部分区域上升,As和Ni没有明显的上升(表4)。有研究认为,人类活动产生了更多的Cd元素,包括矿石开采、农药与化肥施用、污水灌溉以及工业生产等[35]。化肥在农业生产中起着重要的作用,显著提高了农作物的产量,但也是农田土壤中重金属Cd的来源之一[36]。目前我国受Cd污染的耕地涉及11个省市及25个地区,土壤Cd污染十分普遍[37]。本研究中土壤Cd元素含量上升很明显,这与全国的Cd污染现状和趋势具有一致性。

潜在生态风险指数是综合了重金属元素的背景值、毒性和含量3个要素的评价方法,其在重金属污染评价中有很强的实用性[17]。有些重金属元素如Mn虽然浓度很高,但其毒性较弱,潜在生态风险指数就可以进行针对性的区分。沿黄城市带11个县区As、Cr、Cu、Mn、Pb、Zn和Ni这7种元素E_i等级均为轻微级别。而除了平罗县的其他10个县市Cd的E_i指数达到了很强的等级(表5)。但由于Cd的毒性较强,在RI指数计算中其所占权重很高[17],这导致了沿黄城市带大部分县区Cd的RI指数都达到中度或强的等级,因此土壤重金属污染风险主要来自于Cd元素,在未来土壤污染防治中与Cd相关的污染防治措施要优先考虑[38]。

3.3 沿黄城市带土壤重金属来源

采用PMF分析方法对重金属元素进行了溯源,将沿黄城市带重金属污染初步确定为交通运输、农业、母质、工农业复合和工业5个来源。虽然PMF方法可以确定重金属影响因子数和不同元素受影响的程度,但重金属污染溯源受分析人员经验和认知的影响很大,因此要准确进行溯源很困难。本研究主要依据不同因子载荷,筛选各主要因子代表性的重金属元素,再依据该元素的可能来源进行溯源[6]。溯源过程中参考了国内相关研究文献,沿黄城市带土壤重金属溯源结果基本和陈林等[5]的溯源结果一致。由于陈林等[5]只对农田土壤进行溯源,本研究对所有土壤类型进行采样分析和溯源,在As元素来源认定上有一定差异。但是综合对比各因子对沿黄城市带土壤重金属元素的贡献率发现,母质源贡献率最高,为27.95%,其次为农业和工业复合源,贡献率21.32%,交通运输和工业源分别贡献了17.31%和16.67%,农业源对重金属元素贡献最小,为16.34%,表明当前该区域重金属元素主要体现母质源特征,工业排放和农业生产对土壤重金属来源影响较小。

4 结论

(1)宁夏沿黄城市带0~20 cm土壤As、Cu、Mn、Pb、Zn和Ni这6种重金属平均值均低于土壤背景值,也低于农用地土壤污染风险筛选值。0~5 cm土层重金属Cr、Mn、Zn和Cd四种元素含量超过了土壤背景值。重金属更倾向于在0~5 cm的表土层聚集。一些工业企业周边表层土壤有明显的重金属富集特征。

(2)沿黄城市带不存在As和Ni富集现象,Cr、Cu、Pb和Zn出现了点状轻度富集现象,Cd在大部分区域出现了中度以上富集现象,极少数样点出现了强

度甚至重度富集现象。当前宁夏沿黄城市带土壤的As、Cr、Cu、Mn、Pb、Zn和Ni这7种元素的环境污染风险极低，Cd的环境污染风险达到很强等级。

（3）对沿黄城市带土壤重金属来源贡献率最高的是母质（27.95%），其次为农业和工业复合（21.32%）与交通运输（17.31%），而工业（16.67%）和农业（16.34%）的贡献率最小。

[参考文献]

[1] Tang S Q, Yang K, Liu F, et al. Overview of heavy metal pollution and health risk assessment of urban soils in Yangtze River Economic Belt, China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2022,44(12):4455−4497.

[2] Penteado J O, Brum R L, Ramires P F, et al. Health risk assessment in urban parks soils contaminated by metals, Rio Grande city (Brazil) case study[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021,208:111737.

[3] Gu Y G, Gao Y P, Lin Q. Contamination, bioaccessibility and human health risk of heavy metals in exposed−lawn soils from 28 urban parks in Southern China's largest city, Guangzhou[J]. Applied Geochemistry, 2016,67:52−58.

[4] Rehman K, Fatima F, Waheed I, et al. Prevalence of exposure of heavy metals and their impact on health consequences[J]. Journal of Cellular Biochemistry, 2018, 119(1): 157−184.

[5] 陈林,马琨,马建军,等. 宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析[J]. 环境科学, 2023,44(1):356−366.
Chen Lin, Ma Kun, Ma Jianjun, et al. Risk assessment and sources of heavy metals in farmland soils of Yellow River irrigation area of Ningxia[J]. Environmental Science, 2023,44(1):356−366.

[6] 沈城,王文娟,沙晨燕,等. 典型行业再利用土壤重金属含量分布、来源解析及生态风险评价[J]. 环境科学, 2024,45(3):1769−1780.
Shen Cheng, Wang Wenjuan, Sha Chenyan, et al. Distribution characteristics, source analysis and ecological risk assessment of heavy metals in the typical industries reclaimed soil[J]. Environmental Science, 2024,45(3):1769−1780.

[7] 王亚娟,米文宝. 宁夏沿黄城市带生态环境承载力研究[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(11): 23−27.
Wang Yajuan, Mi Wenbao. Eco−environmental carrying capacity in urban belt along the Yellow River in Ningxia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(11): 23−27.

[8] 周勤利,王学东,李志涛,等. 宁夏贺兰县土壤重金属分布特征及其生态风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2019,36(4):513−521.
Zhou Qinli, Wang Xuedong, Li Zhitao, et al. Distribution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metal in Helan County of Ningxia, China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019,36(4):513−521.

[9] 王幼奇,白一茹,王建宇. 基于GIS的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征[J]. 环境科学, 2016,37(2):710−716.
Wang Youqi, Bai Yiru, Wang Jianyu. Distribution of urban soil heavy metal and pollution evaluation in different functional zones of Yinchuan City[J]. Environmental Science, 2016,37(2):710−716.

[10] 杨亚芳,何杰. 宁夏中部干旱带土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 石河子大学学报：自然科学版, 2021,39(5):608−613.
Yang Yafang, He Jie. Pollution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metals in arid area of central Ningxia[J]. Journal of Shihezi University：Natural Science, 2021,39(5):608−613.

[11] 王豫,赵小艳,李艳春,等. 宁夏平原湿地面积动态演变对局地气候效应的影响[J]. 生态环境学报, 2018,27(7):1251−1259.
Wang Yu, Zhao Xiaoyan, Li Yanchun, et al. Influence of dynamic evolution of wetland area on local climate effect in Ningxia Plain[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018,27(7):1251−1259.

[12] 陈亚航,苏春花,朱四喜,等. 贵州北部某铬渣场土壤重金属对酶活性和细菌群落的影响[J]. 环境科学与技术, 2023,46(9):86−94.
Chen Yahang, Su Chunhua, Zhu Six, et al. Effects of heavy metals on enzyme activity and bacterial community in a chromium slag field in northern Guizhou [J]. Environmental Science and Technology, 2023,46(9):86−94.

[13] 李龙,马丽钧,周浪,等. 贵州省土壤重金属背景值再研究[J]. 环境化学, 2024,43(6):1−15.
Li Long, Ma Lijun, Zhou Lang, et al. Redistribution of heavy metal background in soil in Guizhou Province[J]. Environmental Chemistry, 2024,43(6):1−15.

[14] 安永龙,殷秀兰,李文娟,等. 张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析[J]. 环境科学, 2023,44(6):3544−3561.
An Yonglong, Yin Xiulan, Li Wenjuan, et al. Evaluation and source analysis of soil heavy metal pollution in a planting area in Wanquan District, Zhangjiakou City[J]. Environmental Science, 2023,44(6):3544−3561.

[15] 魏洪斌,罗明,吴克宁,等. 冀东平原农田土壤重金属污染源分析与风险评价[J]. 土壤通报, 2023,54(2):462−472.
Wei Hongbin, Luo Ming, Wu Kening, et al. Source analysis and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil in the eastern Hebei Plain[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023,54(2):462−472.

[16] 国家环境保护局主持, 中国环境监测总站主编. 中国土壤元素背景值[M]. 北京：中国环境科学出版社, 1990.

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

[18] 杨振宇,廖超林,邹炎,等. 湘东北典型河源区土壤重金属分布特征、来源解析及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2023,44(9):5288−5298.

[19] 徐争启,倪师军,庹先国,等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008,31(2):112−115.
Xu Zhengqi, Ni Shijun, Tuo Xianguo, et al. Calculation of toxicity coefficient of heavy metals in evaluation of potential ecological hazard index method[J]. Environmental Science & Technology, 2008,31(2):112−115.

[20] Paatero P. Least squares formulation of robust non−negative factor analysis[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1997,37(1):23−35.

[21] 刘楠,唐莹影,陈盟,等. 基于APCS−MLR和PMF的铅锌矿流域土壤重金属来源解析[J]. 中国环境科学, 2023,43(3):1267−1276.
Liu Nan, Tang Yingying, Chen Meng, et al. Source apportionment of soil heavy metals in lead−zinc area based on APCS−MLR and PMF[J]. China Environmental Science, 2023,43(3):1267−1276.

[22] 柴磊,王新,马良,等. 基于PMF模型的兰州耕地土壤重金属来源解析[J]. 中国环境科学, 2020,40(9):3919−3929.

[23] 张旭. 沈阳市典型设施菜地土壤重金属污染源解析与风险评价[D]. 沈阳：沈阳大学, 2022.
Zhang Xu. Analysis and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution Sources in Soil of Typical Protected Vegetable Fields in Shenyang[D]. Shenyang：Shenyang University, 2022.

[24] 扈孟楠. 图们江流域土壤重金属污染评价及来源解析[D]. 延吉：延边大学, 2022.

[25] 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
Soil Environmental Quality Soil Pollution Risk Control Standards for Agricultural Land (Trial)[S].

[26] 崔邢涛,栾文楼,宋泽峰,等. 石家庄城市土壤重金属空间分布特征及源解析[J]. 中国地质, 2016,43(2):683−690.

[27] 黄昌辰,温汉辉,蔡立梅,等. 广东揭阳市土壤铜的分布特征及其影响因素[J]. 现代地质, 2021,35(1):293−300.
Huang Changchen, Wen Hanhui, Cai Limei, et al. Distribution characteristics and influencing factors of soil Cu in Jieyang City, Guangdong Province[J]. Geoscience, 2021,35(1):293−300.

[28] 郑永立,温汉辉,蔡立梅,等. 基于PMF模型的县域尺度土壤重金属来源分析及风险评价[J]. 环境科学, 2023,44(9):5242−5252.
Zheng Yongli, Wen Hanhui, Cai Limei, et al. Source analysis and risk assessment of heavy metals in soil of county scale based on PMF model[J]. Environmental Science, 2023, 44(9):5242−5252.

[29] 张传华,王钟书,刘力,等. 基于APCS−MLR受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析[J]. 环境科学, 2023,44(6):3500−3508.
Zhang Chuanhua, Wang Zhongshu, Liu Li, et al. Source analysis of soil heavy metals in agricultural land around the mining area based on APCS−MLR receptor model and geostatistical method[J]. Environmental Science, 2023, 44(6):3500−3508.

[30] 刘进,潘月鹏,师华定. 华北地区农田土壤镉来源及大气沉降的贡献[J]. 农业环境科学学报, 2022,41(8):1698−1708.
Liu Jin, Pan Yuepeng, Shi Huading. Sources of cadmium in farmland soil and contribution of atmospheric deposition in North China[J]. Journal of Agro−environment Science, 2022, 41(8):1698−1708.

[31] 樊霆,叶文玲,陈海燕,等. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J]. 生态环境学报, 2013,22(10):1727−1736.
Fan Ting, Ye Wenling, Chen Haiyan, et al. Review on contamination and remediation technology of heavy metal in agricultural soil[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013,22(10):1727−1736.

[32] 吴烈善,曾东梅,莫小荣,等. 不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究[J]. 环境科学, 2015,36(1):309−313.
Wu Lieshan, Zeng Dongmei, Mo Xiaorong, et al. Study on stabilization effect of different passivators on heavy metal contaminated soil[J]. Environmental Science, 2015, 36(1):309−313.

[33] 王美娥,彭驰,陈卫平. 宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响[J]. 环境科学, 2016,37(9):3532−3539.
Wang Meie, Peng Chi, Chen Weiping. Impacts of industrial zone in arid area in Ningxia Province on the accumulation of heavy metals in agricultural soils[J]. Environmental Science, 2016,37(9):3532−3539.

[34] 刘志坚,董元华,张琇,等. 卫宁平原农用地土壤重金属污染特征与生态风险研究[J]. 生态环境学报, 2022,31(11):2216−2224.

[35] Liu X S, Huang D M, Zhu Y M, et al. Bioassessment of marine sediment quality using meiofaunal assemblages in a semi−enclosed bay[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015,100(1):92−101.

[36] Ning C C, Gao P D, Wang B Q, et al. Impacts of chemical fertilizer reduction and organic amendments supplementation on soil nutrient, enzyme activity and heavy metal content[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017,16(8):1819−1831.

[37] 黄卫,庄荣浩,刘辉,等. 农田土壤镉污染现状与治理方法研究进展[J]. 湖南师范大学：自然科学学报, 2022,45(1):49−56.

[38] 曾星,李伟亚,陈章,等. 龙葵修复镉污染土壤的研究进展[J]. 草业科学, 2019,36(5):1308−1316.