



## 锦州市土壤重金属污染特征及生态风险评价

李秋燕<sup>1,2</sup>, 魏明辉<sup>1,2</sup>, 戴慧敏<sup>1,2</sup>, 贺鹏飞<sup>1,2</sup>, 刘凯<sup>1,2</sup>

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;

2. 自然资源部 黑土地演化与生态效应重点实验室, 辽宁 沈阳 110034

**摘要:** 以锦州市为研究区, 分析 8 种土壤重金属 As、Cd、Hg、Cr、Cu、Pb、Zn、Ni 的污染特征, 采用单因子污染指数法、地累积指数法、内梅罗综合指数法和 Hakanson 潜在生态风险指数法确定锦州市土壤重金属污染程度, 评价土壤重金属潜在生态风险。结果表明, 锦州市土壤重金属 Cd 和 Cr 含量高于全国土壤及辽宁省土壤背景值, Cu、Hg、Ni 和 Pb 含量高于辽宁省土壤背景值。采用单因子污染指数评价, Cd 为中度污染, Hg、Pb、Cr、Ni 和 Cu 为轻度污染。经地累积指数法评价, Cd 为轻中度污染, 其他重金属为无污染。内梅罗综合污染指数平均值为 2.25, 为中度污染等级。研究区综合潜在风险指数平均值为 157.34, 处于中等生态风险, 造成局部地区土壤潜在生态风险较高的重金属为 Cd 和 Hg。

**关键词:** 重金属; 潜在生态风险指数; 单因子污染指数; 内梅罗综合污染指数; 地累积指数; 锦州; 辽宁省

## CHARACTERISTICS OF SOIL HEAVY METAL POLLUTION AND ECOLOGICAL RISK ASSESSMENT OF JINZHOU CITY

LI Qiu-yan<sup>1,2</sup>, WEI Ming-hui<sup>1,2</sup>, DAI Hui-min<sup>1,2</sup>, HE Peng-fei<sup>1,2</sup>, LIU Kai<sup>1,2</sup>

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China;

2. Key Laboratory of Black Land Evolution and Ecological Effects, MNR, Shenyang 110034, China

**Abstract:** Taking Jinzhou City as the study area, the paper analyzes the pollution characteristics of 8 soil heavy metals including As, Cd, Hg, Cr, Cu, Pb, Zn and Ni, and uses the methods of single factor pollution index, geoaccumulation index, Nemerow comprehensive index and Hakanson potential ecological risk index to determine the degree of soil heavy metal pollution and evaluate the potential ecological risk. The results show that the contents of Cd and Cr in soil are higher than the soil background values of China and Liaoning Province, and the contents of Cu, Hg, Ni and Pb also higher than the soil background values of the province. The single factor index evaluation results reveal Cd is at moderate pollution level, while Hg, Pb, Cr, Ni and Cu mild pollution. The geoaccumulation index evaluation results reflect Cd is at light-moderate pollution level and other heavy metals pollution-free. The average Nemerow comprehensive pollution index is 2.25, indicating a moderate pollution grade. The average comprehensive potential risk index is 157.34, suggesting the study area is at moderate ecological risk. Cd and Hg contribute to high potential ecological risk in parts of the area.

收稿日期: 2020-08-31; 修回日期: 2020-09-11. 编辑: 黄欣、张哲.

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“兴凯湖平原及松辽平原西部土地质量地球化学调查”(DD20190520).

作者简介: 李秋燕(1993—), 女, 硕士, 主要从事土地质量地球化学调查工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//2284435292@qq.com

通信作者: 魏明辉(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事土地质量地球化学调查工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//48773960@qq.com

**Key words:** heavy metal; potential ecological risk index; single factor pollution index; Nemerow comprehensive pollution index; geoaccumulation index; Jinzhou City; Liaoning Province

## 0 引言

土壤是生态系统的重要组成部分,是人类生产生活的基础.近些年来,随着工业化和城市化进程的加速,土壤重金属污染日趋严重.土壤中的重金属污染具有隐蔽性强、持久性长和危害性强的特征<sup>[1]</sup>.重金属无法被土壤中的微生物降解,从而在土壤中不断积累,迁移、转化、富集后影响作物,进而通过食物链危害人体健康<sup>[2-3]</sup>.

目前,应用于土壤重金属评价的方法有单因子指数法、地累积指数法、内梅罗综合指数法和潜在生态风险指数法.单因子指数法可以较为直观地反映土壤中各项污染指标的污染程度.内梅罗综合指数法突出高浓度污染物对环境的影响,避免了由于平均作用而削弱高浓度污染权重现象的发生<sup>[3]</sup>.潜在生态风险指数是将重金属的生态效应、环境效应与毒理学效应联系在一起,对其发生的潜在生态危害进行评价<sup>[3]</sup>.地累积指数法是用于评价沉积物的方法,考虑了地质背景所带来的影响,现已较多地应用于土壤重金属生态风险评价<sup>[4-5]</sup>.本文以锦州市为研究区,采用单因子污染指数法、地累积指数法和内梅罗综合污染指数法评价重金属污染程度,应用潜在生态风险指数法评价重金属的潜在生态风险,对污染成因进行分析,以期对锦州市土壤安全和重金属污染防治提供科学依据.

## 1 研究区概况

锦州市位于辽宁省的西南部(120°43'~122°36'E, 40°48'~42°08'N),在“辽西走廊”东端,南临渤海,北依松岭山脉,总面积 10 301 km<sup>2</sup>,海岸线 105 km.属于温带季风性气候,春季温和多风,夏季高温多雨,秋季温凉晴朗,冬季寒冷干燥.年平均气温为 7.8~9.0 ℃,无霜期为 144~180 d;年均降水量为 567 mm.土壤类型主要为棕壤和草甸土,约占研究区面积的 70%.

## 2 研究方法

### 2.1 土壤样品布设与采集

采样区域为锦州市全部区域.土壤采样按照 2 km×

2 km 规则格网采样法进行采样,采样密度为 1 点/km<sup>2</sup>,采样深度 0~20 cm,每 4 km<sup>2</sup>组合成一个样品分析,累计获取表层土壤分析样品 2490 件.

### 2.2 化学分析

土壤分析测试了 Hg、As、Cd、Cu、Cr、Ni、Pb、Zn 等 8 种重金属元素含量.根据土壤样品的特点,用原子荧光测定仪(AFS)测定 Hg 和 As 元素,以等离子发射光谱法(ICP-MS)测定 Cd 和 Cu 元素,以 X 射线荧光光谱法(XRF)测定 Cr、Ni、Pb、Zn 元素.样品由国土资源部东北矿产资源监督检测中心完成测试分析.

### 2.3 土壤重金属污染及生态风险评估方法

#### 2.3.1 单因子污染指数法

单因子污染指数法是针对某一污染物的污染程度进行评价的方法,以土壤单项污染物的实测值与评价标准相比,可以直观地反映出该区域单个重金属的污染程度.

计算公式为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中,  $P_i$  为单项重金属污染指数;  $C_i$  为重金属  $i$  的实测浓度(单位 10<sup>-6</sup>);  $S_i$  为重金属  $i$  的土壤环境质量标准(单位 10<sup>-6</sup>),本次评价选用辽宁省土壤元素含量背景值作为质量标准.

单项重金属污染指数评价标准如表 1 所示.

表 1 单项污染指数分级标准

Table 1 Grading standard of single factor pollution index

污染指数	$P_i \leq 1$	$1 < P_i \leq 2$	$2 < P_i \leq 3$	$P_i > 3$
污染分级	无污染	轻度污染	中度污染	重度污染

#### 2.3.2 内梅罗综合指数法

内梅罗综合指数法是在单因子污染指数法的基础上,通过单因子污染指数得出多种污染物综合污染指数,从而对各污染物的污染程度进行综合评价.

计算公式为:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{P_{\text{jmax}}^2 + P_{\text{jave}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中,  $P_{\text{综}}$  为  $j$  点重金属污染综合指数;  $P_{\text{jmax}}$  为  $j$  点单项

污染指数的最大值;  $P_{jave}$  为  $j$  点单项污染指数的平均值.

内梅罗综合指数法评价标准如表 2 所示.

表 2 内梅罗综合指数分级标准

Table 2 Grading standard of Nemerow comprehensive index

综合指数	$P_{综} \leq 0.7$	$0.7 < P_{综} \leq 1$	$1 < P_{综} \leq 2$	$2 < P_{综} \leq 3$	$P_{综} > 3$
污染分级	清洁(安全)	尚清洁(警戒)	轻度污染	中度污染	重度污染

### 2.3.3 地累积指数法

地累积指数法可以定量评价沉积物中的重金属污染程度,除了考虑人为因素和土壤背景值,还考虑到了自然成岩作用可能会引起的背景值变动.

计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 \left( \frac{C_i}{kS_i} \right) \quad (3)$$

式中,  $I_{geo}$  为土壤样品中重金属  $i$  的地累积污染指数;  $C_i$  为重金属  $i$  的实测浓度 (单位  $10^{-6}$ );  $k$  为考虑各地岩石层差异而导致成岩作用引起背景值的变动而取的系数(一般取值 1.5);  $S_i$  为重金属  $i$  在土壤中的背景值(单位  $10^{-6}$ ).

地累积指数评价标准如表 3 所示.

### 2.3.4 Hakanson 潜在生态风险评价法

潜在生态风险指数法根据重金属的性质、环境行为特点、浓度水平、各元素的生物毒性差异及其叠加作用、生态效应等因素,可定量评估单个及多个重金属污染物潜在生态危害程度,被广泛应用于对沉积物及土壤重金属污染的评价.

计算公式为:

$$E_i = T_i \times P_i \quad (4)$$

表 3 地累积指数分级标准

Table 3 Grading standard of geoaccumulation index

地累积指数	$I_{geo} \leq 0$	$0 < I_{geo} \leq 1$	$1 < I_{geo} \leq 2$	$2 < I_{geo} \leq 3$	$3 < I_{geo} \leq 4$	$4 < I_{geo} \leq 5$	$I_{geo} > 5$
污染程度	无污染	轻中度污染	中度污染	中强度污染	强度污染	极强度污染	极严重污染

表 4 潜在生态风险评价法分级标准

Table 4 Grading standard of potential ecological risk index

$E_i$	$E_i < 40$	$40 \leq E_i < 80$	$80 \leq E_i < 160$	$160 \leq E_i < 320$	$E_i \geq 320$
RI	$RI < 150$	$150 \leq RI < 300$	$300 \leq RI < 600$	$RI \geq 600$	-
潜在生态风险等级	轻微	中等	强	很强	极强

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i \quad (5)$$

式中,  $E_i$  为单项重金属潜在生态风险指数;  $T_i$  为污染物毒性响应系数,参考相关研究<sup>[6]</sup>,设定  $Hg=40$ ,  $Cd=30$ ,  $As=10$ ,  $Cu=Pb=Ni=5$ ,  $Cr=2$ ,  $Zn=1$ ;  $P_i$  为单个重金属  $i$  的污染系数,由公式(1)计算获得; RI 为综合潜在生态风险指数. 潜在生态危害单项系数  $E_i$  可以描述单个污染物的污染程度,潜在生态危害指数 RI 根据单项系数  $E_i$  来确定,描述土壤多种重金属污染物的综合潜在生态危害系数,此值分为 4 个等级.

Hakanson 潜在生态风险评价法评价标准如表 4 所示.

### 2.4 数据统计

采用 ArcMap10.4.1 软件作图,并用 Excel、SPSS 软件对数据进行统计和分析.

## 3 结果与讨论

### 3.1 土壤重金属含量与分布

研究区土壤 pH 值在 4.80-9.47 之间,平均值为 6.66. 研究区表层 2490 个土壤样品的重金属含量统计结果见表 5. 土壤中重金属 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 含量的平均值分别为  $6.90 \times 10^{-6}$ 、 $0.30 \times 10^{-6}$ 、 $65.78 \times 10^{-6}$ 、 $20.23 \times 10^{-6}$ 、 $0.04 \times 10^{-6}$ 、 $26.81 \times 10^{-6}$ 、 $24.71 \times 10^{-6}$ 、 $61.69 \times 10^{-6}$ . 从土壤各重金属元素平均含量来看,Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 含量高于辽宁省土壤背景值,As 和 Zn 的含量低于辽宁省土壤背景值. 与全国表层土壤对比,Cd 和 Cr 元素含量高于全国背景值,As、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 含量低于全国背景值.

变异系数(CV)是表征元素在空间分布上变异程度的指标,在一定程度上可以反映出重金属元素受到人为干扰的程度<sup>[7]</sup>.一般认为,  $CV < 0.1$  为弱变异,  $0.1 \leq CV < 1$  中等强度变异,  $CV \geq 1$  为强变异<sup>[8]</sup>.研究区土壤 pH 值的变异系数为 0.14,说明研究区的酸碱度变化较为稳定.由表 5 可以看出,8 种重金属变异程度的大小为  $Hg > Cd > Ni > As > Cr > Zn > Cu > Pb$ ,Hg 和 Cd 的变异系数大于 1,属于强变异;Ni、As、Cr、Zn、Cu、Pb 等 6 种重金属变异系数均大于 0.1,属于中等变异,说明锦州市的重金属污染程度空间分异性较强,受外界干扰较为严重,可能受到了工业生产、交通污染以及化肥施用等人为活动的影响.Hg 和 Cd 的变异系数达到了 1.11 和 1.02,远超过其他重金属,表明 Hg 和 Cd 受人为干扰更为严重<sup>[9]</sup>.

表 5 锦州市土壤重金属含量统计

Table 5 Contents of soil heavy metals in Jinzhou City

元素	平均值	最大值	最小值	标准差	变异系数	背景值	
						辽宁省	全国
						As	6.90
Cd	0.30	2.98	0.05	0.30	1.02	0.108	0.097
Cr	65.78	562.00	21.70	27.30	0.41	57.9	61
Cu	20.23	137.00	1.10	6.97	0.34	19.8	23
Hg	0.04	0.94	0.01	0.05	1.11	0.037	0.065
Ni	26.81	152.00	8.50	14.58	0.54	25.6	27
Pb	24.71	176.00	9.60	6.75	0.27	21.1	26
Zn	61.69	298.00	13.20	23.22	0.38	63.5	74

注:辽宁省背景值据文献<sup>[10]</sup>,全国背景值据文献<sup>[11]</sup>.含量单位: $10^{-6}$ .

### 3.2 土壤重金属污染评价

#### 3.2.1 单因子污染指数评价

采用单因子指数法对土壤中各重金属元素污染程度进行分析,结果见表 6.

样点污染程度比例=单因子污染指数评价(无污染/轻度污染/中度污染/重度污染)的样品数/样品总数 $\times 100\%$ ;超标率=单因子污染指数评价值大于 1 的样品数/样品总数 $\times 100\%$ .

研究区不同重金属元素单因子污染指数的大小为  $Cd > Hg > Pb > Cr > Ni > Cu > Zn > As$ ,其中 Cd、Hg、Pb、Cr、Ni、Cu 6 种重金属存在污染情况,Cd 的污染指数为 2.73,

表 6 锦州市土壤重金属单因子评价结果

Table 6 Evaluation results of single factor index method for soil heavy metal pollution in Jinzhou City

元素	最大值 ( $P_{max}$ )	最小值 ( $P_{min}$ )	平均值 ( $P_{ave}$ )	各级样点所占比例/%				超标率/ %
				无污染	轻度 污染	中度 污染	重度 污染	
As	13.86	0.24	0.78	87.63	11.93	0.32	0.12	12.37
Cd	27.59	0.44	2.73	7.51	44.90	22.17	25.42	92.49
Cr	9.71	0.37	1.14	42.21	52.13	4.66	1.00	57.79
Cu	6.92	0.06	1.02	53.61	45.02	1.20	0.16	46.39
Hg	25.41	0.16	1.20	57.47	34.78	4.42	3.33	42.53
Ni	5.94	0.33	1.05	63.61	30.32	4.18	1.89	36.39
Pb	8.34	0.45	1.17	23.53	75.06	1.20	0.20	76.47
Zn	4.69	0.21	0.97	59.76	38.71	1.20	0.32	40.24

达到了中度污染水平,其余 5 种为轻度污染水平.土壤重金属超标率大小依次为  $Cd > Pb > Cr > Cu > Hg > Zn > Ni > As$ ,其中 Cd 的超标率最大,达到 92.49%,Pb、Cr 的超标率均大于 50%.Cd 的污染指数和超标率均最大,表明研究区 Cd 污染情况严重,并且存在局部重度污染.有研究表明施用含有镉的农药和肥料会造成锦州市农田土壤的 Cd 超标<sup>[11]</sup>;纺织厂、冶金厂、塑料厂是导致锦州市工业区土壤 Cd 超标及高风险的最主要潜在污染源<sup>[12]</sup>.Hg 的超标率为 42.53%,除 Cd 外重度污染样品数所占比例最高,说明研究区整体 Hg 为轻度污染,但存在局部污染情况.有研究表明,黑山县和北镇市农田 Cd 和 Hg 超标,主要原因是施用含有镉和汞的农药和肥料<sup>[11]</sup>.Hg 在锦州地区一直存在污染情况,20 世纪 50—80 年代,氯碱化工业排放 Hg 高达 265 t,到 90 年代末期,随着工艺的进步,化工企业采用了离子交换膜法制碱,Hg 的排放量才逐渐降低<sup>[13]</sup>.Pb 污染指数的平均值仅次于 Cd 和 Hg 且超标率排在第二位,说明研究区内 Pb 元素虽为轻度污染,但是污染范围广.土壤中 Pb 的主要来源有燃煤、大气沉降、过量的化肥施加、汽车尾气排放<sup>[14]</sup>等.程新彬等人对辽宁省典型地区大气颗粒物中重金属元素分布做了研究,锦州市的大气可吸入颗粒物中 Pb 含量最高<sup>[15]</sup>.Cr、Cu、Ni 为轻度污染水平,Cr 和 Cu 污染可能来源于成土母质,虽然含 Cu 化肥施入量较大,但化肥中 Cu 含量较低,通过化肥、石灰、固体废物、动物粪便输入的 Cr 也

远远低于土壤本身含量<sup>[14]</sup>. Ni 可能来源于城市污泥,城市污水处理厂产生的污泥以及一些工业废水的排放造成 Ni 污染. Zn 和 As 存在局部样点被污染情况,单因子污染指数评价为无污染.

### 3.2.2 内梅罗综合指数法评价

单因子污染指数可以评价出整个研究区单个重金属的污染程度,而内梅罗综合指数法可以反映 2490 个样点各自的污染情况. 研究区土壤重金属内梅罗综合指数在 0.60~19.81 之间,平均值为 2.25,为中度污染等级. 仅有 0.84%的土壤为清洁土壤,处于警戒线的土壤样点占 7.83%,轻度污染、中度污染和重度污染样点所占比例分别为 55.98%、18.03%和 17.31%,表明研究区大部分样点均受到了不同程度的污染. 由图 1 可知,研究区内土壤重金属污染严重的样点分布在锦州西部人口密集、汽车保有量大并且工业发达的城镇区以及沿海区域. 汽车尾气排放、轮胎磨损等交通运输活动<sup>[16]</sup>可能是导致锦州市土壤重金属污染的来源之一. 畜禽粪便同样是导致锦州土壤重金属污染的重要原因<sup>[9,17]</sup>. 锦州市内的冶炼、电镀等化工企业排放的废水和废渣含有的 Cd、Cr、Cu、Pb、Hg、As 等重金属,加剧了重金属对土壤的污染<sup>[18-19]</sup>. 锦州湾地区的重金属污染总体处于相对较高的水平<sup>[13,20]</sup>.

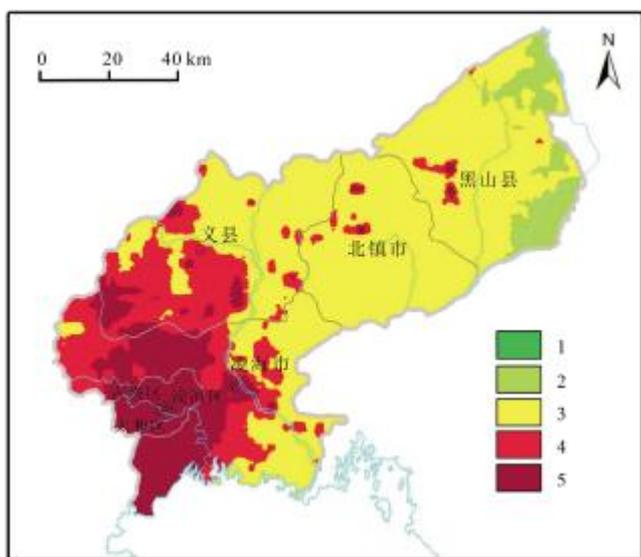


图 1 锦州市土壤重金属污染内梅罗综合指数评价结果

Fig. 1 Distribution map of soil heavy metal pollution in Jinzhou City by Nemerow multi-factor index method

1—安全(safe); 2—警戒(alert); 3—轻度污染(mild pollution); 4—中度污染(moderate pollution); 5—重度污染(heavy pollution)

### 3.2.3 地累积指数法评价

地累积指数评价结果如表 7 所示. 8 种重金属的地累积指数表现为  $Cd > Pb > Cr > Hg > Cu > Ni > Zn > As$ . Cd 的地累积指数为 0.5,表明土壤中 Cd 属于轻中度污染水平,其他重金属元素地累积指数的平均值均小于 0,为无污染状态. 未受到 As、Cu、Ni、Pb、Zn 污染的土壤样点比例大于 90%, 仅有少部分样点存在污染. 88.80%的样品未受到 Cr 污染,10.20%的样品为 Cr 轻中度污染,其余 1%为 Cr 中度—中强度污染. 受到 Hg 污染的样品中,12.41%为轻中度污染,2.21%为中度污染,1.04%为中强度—强度污染,有 0.08%的土壤受到极强度无污染,虽然 Hg 的评价结果为无污染,但是存在着不同程度的点源污染. 研究区内 Cd 污染较为严重,仅有 34.02%的土壤未受到 Cd 污染,40.56%的样点为轻中度污染,19%为中度污染,还有 6.43%的样品为中强度污染—极强度污染. 可以看出,所采集的样品中,Cd 污染最为严重,Hg 污染情况也不容忽视.

表 7 锦州市土壤重金属地累积指数评价结果

Table 7 Evaluation results of geoaccumulation index for soil heavy metal pollution in Jinzhou City

元素	平均值 $I_{geo}$	各级样点所占比例/%						
		无 污染	轻中度 污染	中度 污染	中强度 污染	强度 污染	极强度 污染	极严重 污染
As	-1.00	98.80	1.08	0.08	0	0.04	0	0
Cd	0.50	34.02	40.56	19.00	4.06	2.25	0.12	0
Cr	-0.48	88.80	10.20	0.96	0.04	0	0	0
Cu	-0.62	93.73	6.10	0.12	0.04	0	0	0
Hg	-0.60	84.26	12.41	2.21	0.80	0.24	0.08	0
Ni	-0.65	90.04	8.07	1.89	0	0	0	0
Pb	-0.39	91.73	8.07	0.16	0.04	0	0	0
Zn	-0.71	94.66	5.02	0.32	0	0	0	0

样点污染程度比例计算方式同表 6.

### 3.2.4 Hakanson 潜在生态风险评价

应用 Hakanson 提出的潜在生态风险指数法,计算了锦州市土壤重金属污染潜在生态风险指数,如表 8 所示.

表 8 锦州市土壤重金属 Hakanson 潜在生态风险评价结果  
**Table 8 Evaluation results of Hakanson potential ecological risk index for soil heavy metals in Jinzhou City**

元素	最大值 ( $E_{max}$ )	最小值 ( $E_{min}$ )	平均值 ( $E_{ave}$ )	各级样点所占比例/%				
				轻微	中等	强	很强	极强
As	138.64	2.38	7.84	99.96	0.00	0.04	0.00	0.00
Cd	827.78	13.06	82.01	24.62	44.18	23.09	5.26	2.85
Cr	19.41	0.75	2.27	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cu	34.60	0.28	5.11	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hg	1016.22	6.49	48.04	54.78	37.15	6.02	1.37	0.68
Ni	29.69	1.66	5.24	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pb	41.71	2.27	5.86	99.96	0.04	0.00	0.00	0.00
Zn	4.69	0.21	0.97	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00

锦州市土壤 8 种重金属元素潜在风险指数平均值  $Cd > Hg > As > Pb > Ni > Cu > Cr > Zn$ 。Cd 和 Hg 存在严重生态风险:土壤中 Cd 属于轻微、中等、强、很强和极强的样点比例分别为 24.62%、44.18%、23.09%、5.26% 和 2.85%;土壤中 Hg 属于轻微、中等、强、很强和极强的样点比例分别为 54.78%、37.15%、6.02%、1.37% 和 0.68%。如图 2 所示,Cd 强—极强潜在生态风险区域成连片分布,主要集中在城市化明显的太和区、古塔区、凌河区及凌海市,很强—极强生态风险区域分布在

西南侧,直至海岸带一侧。Hg 元素强—极强生态风险区域成点状分布,基本集中在各城镇点附近。土壤中 Cd 和 Hg 污染受人为影响较为严重,城区人类活动频繁,交通网络密集,工业发达,大量的污染物排放到土壤中,造成土壤中 Cd 和 Hg 超标。其他重金属均为轻微潜在生态风险。研究区仅少量局部样品点位的 As 达到强潜在生态风险程度,Pb 达到中等潜在生态风险程度。

综合计算 8 种重金属元素在各样点土壤重金属的综合潜在生态风险指数(RI),研究区所有样点的 RI 值范围为 43.89~1852.53,平均值为 157.34,为中等生态风险。有 1%样点属于很强生态风险,属于强、中等和轻微生态风险所占比例分别为 5%、27%和 67%,太和区、古塔区、凌河区城市中心区域为强生态风险,锦州市西南区域为很强生态风险区(图 3)。影响锦州市土壤潜在生态风险的主要重金属为 Cd 和 Hg,重金属污染仍需加强治理。

### 3.2.5 各评价方法在锦州市土壤重金属评价的适用性分析

对比基于单因子污染指数的重金属元素污染评价方法,8 种重金属元素的污染程度与其产生的生态风险并不完全一致。以 Cd、Hg、Cr 为例,采用单因子污染指数法时,土壤受到 Cd 污染为中度污染,Hg 和 Cr 为轻度污染;地累积指数法评价中,Cd 是轻中度污染,

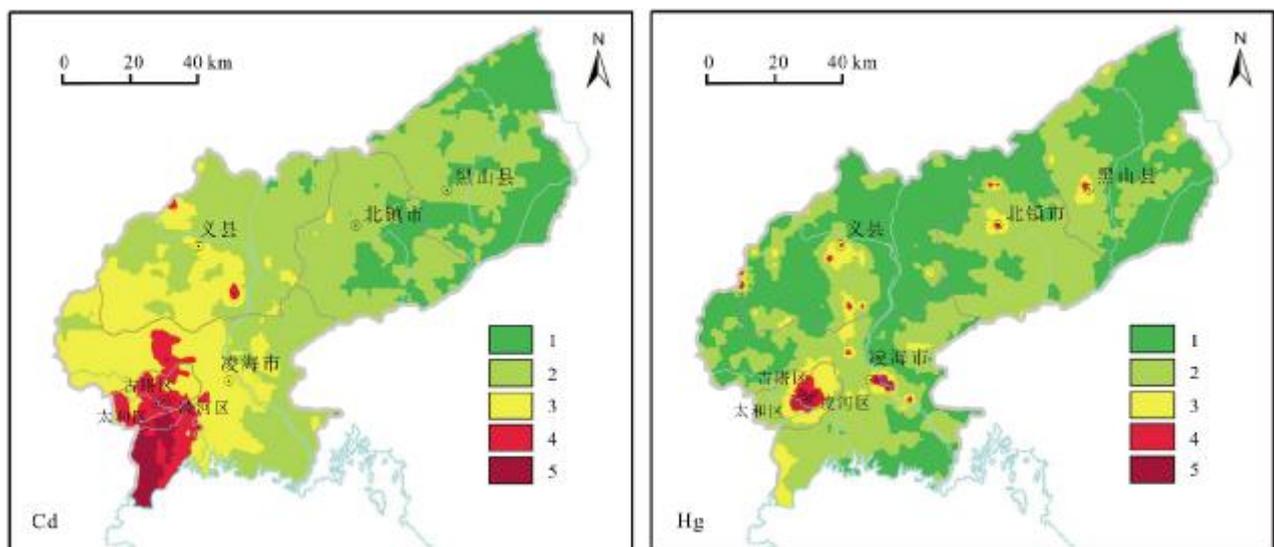


图 2 锦州市土壤重金属 Cd、Hg 潜在生态风险分布图

Fig. 2 Potential ecological risk distribution map of soil heavy metals Cd and Hg in Jinzhou City  
 1—轻微(slight); 2—中等(moderate); 3—强(strong); 4—很强(very strong); 5—极强(extremely strong)

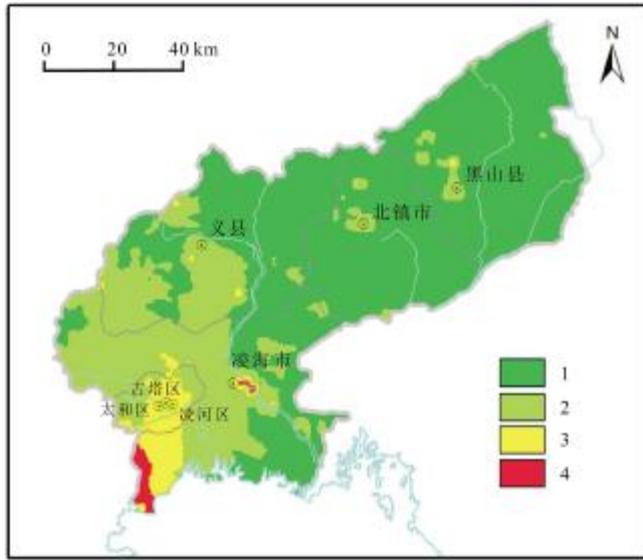


图3 锦州市土壤重金属综合潜在生态风险分布图

Fig. 3 Comprehensive potential ecological risk distribution map of soil heavy metals in Jinzhou City

1—轻微(slight); 2—中等(moderate); 3—强(strong); 4—很强(very strong)

Hg 和 Cr 为无污染. 分析原因可能是研究区 Cr 和 Hg 元素含量接近于背景值,因此在成岩作用下,使得所表现出的地累积指数评价为无污染水平. 而采用重金属潜在生态风险指数表征土壤重金属污染危害时,Cd 的潜在生态风险达到强风险水平,Hg 属于中等水平,Cr 排在第7位为轻微水平. 分析其原因,主要受到污染物毒性响应系数的影响,Cd 和 Hg 的污染程度较高,并且毒性系数较大,因此具有较高的潜在生态风险,而 Cr 的毒性响应系数较低,生态风险较小<sup>[21]</sup>. 3种方法均适用于锦州市土壤重金属污染评价,若单从环境角度评价土壤各重金属元素污染程度,可采用单因子污染指数法;若需要综合考虑地质环境效应、生态毒理效应,则可采用地累积指数法和单因子潜在生态风险指数法.

研究区土壤重金属污染程度使用内梅罗综合污染指数法和 Hakanson 综合潜在生态风险指数法,得到了相似的评价结果,内梅罗综合污染指数评价为中等污染,潜在生态风险指数法评价为中等生态风险,并且指出污染区域都处于研究区西南部延伸至海岸带. 两种方法均适用于综合评价锦州市土壤重金属污染状况.

#### 4 结论

1) 研究区土壤不同重金属含量差异较大. Cd 和

Cr 含量高于全国土壤及辽宁省土壤背景值,Cu、Hg、Ni 和 Pb 含量高于辽宁省土壤背景值. 除 Zn 和 As 外,其他重金属均受到不同程度的污染.

2) 研究区内土壤重金属单因子污染指数  $Cd > Hg > Pb > Cr > Ni > Cu > Zn > As$ , Cd 属于中度污染水平,并且超标率最大,达到 92.49%. Hg、Pb、Cr、Ni 和 Cu 为轻度污染水平,土壤未受到 Zn 和 As 污染. 地累积指数法表明,Cd 属于轻中度污染水平,仅有 34.02%的土壤未受到 Cd 污染,其他重金属为无污染. 内梅罗综合指数法平均值为 2.25,处于中度污染等级,轻度污染、中度污染和重度污染样点所占比例分别为 55.98%、18.03%和 17.31%,研究区大部分样点均受到了不同程度的污染,污染严重的区域位于人口密集、汽车保有量大并且工业发达的城镇区以及沿海区域.

3) 各重金属元素 Hakanson 潜在风险指数为  $Cd > Hg > As > Pb > Ni > Cu > Cr > Zn$ , Cd 的潜在生态风险达到强风险水平,Hg 的潜在生态风险达到中等风险水平,其他重金属均为轻微潜在生态风险. 综合潜在风险指数表明,研究区综合潜在风险指数平均值为 157.34,处于中等生态风险. 所有样点中属于很强、强、中等和轻微生态风险所占比例分别为 1%、5%、27%和 67%.

4) Cd 是导致研究区土壤污染最主要的元素,其次是重金属 Hg,对研究区内梅罗综合指数和综合潜在生态风险指数的贡献较大,应该加强污染治理及生态风险防范.

#### 参考文献(References):

- [1]李春辉,孔祥科,韩占涛,等. 皖南山区土壤重金属污染及潜在生态风险评价——以池州市为例[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(34): 105-110.  
Li C H, Kong X K, Han Z T, et al. Pollution and potential ecological risk assessment of soil heavy metals in the south mountain area of Anhui—taking Chizhou city as an example [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018, 46(34): 105-110.
- [2]Wong C S C, Wu S C, Duzgoren-Aydin N S, et al. Trace metal contamination of sediments in an e-waste processing village in China [J]. Environmental Pollution, 2006, 145(2): 434-442.
- [3]方晓波,史坚,廖欣峰,等. 临安市雷竹林土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1883-1891.  
Fang X B, Shi J, Liao X F, et al. Heavy metal pollution characteristics and ecological risk analysis for soil in *Phyllostachys praecox* stands of Lin'an [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,

- 2015, 26(6): 1883-1891.
- [4]刘品祯, 贾亚琪, 程志飞, 等. 不同方法评价喀斯特煤矿区农田土壤重金属生态风险比较[J]. 中国岩溶, 2018, 37(3): 371-378.  
Liu P Z, Jia Y Q, Cheng Z F, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around karst coal mining areas: A comparison of various methods[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(3): 371-378.
- [5]王斐, 黄益宗, 王小玲, 等. 江西钨矿周边土壤重金属生态风险评价: 不同评价方法的比较[J]. 环境化学, 2015, 34(2): 225-233.  
Wang F, Huang Y Z, Wang X L, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in surrounding soils of tungsten ores: Comparison of different evaluation methods[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(2): 225-233.
- [6]Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [7]谢小进, 康建成, 李卫江, 等. 上海宝山区农用土壤重金属分布与来源分析[J]. 环境科学, 2010, 31(3): 768-774.  
Xie X J, Kang J C, Li W J, et al. Analysis on heavy metal concentrations in agricultural soils of Baoshan, Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2010, 31(3): 768-774.
- [8]钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 长江三角洲地区土壤重金属污染的空间变异特征——以江苏省太仓市为例[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 33-40.  
Zhong X L, Zhou S L, Li J T, et al. Spatial variability of soil heavy metals contamination in the Yangtze river delta: A case study of Taicangcity in Jiangsu province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(1): 33-40.
- [9]高姝. 锦州市土壤质量现状及对策建议[J]. 绿色科技, 2017(6): 73, 75.  
Gao S. Current situation and suggestions of soil quality in Jinzhou[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2017 (6): 73, 75.
- [10]迟清华, 鄢明才. 应用地球化学元素丰度数据手册[M] 北京: 地质出版社, 2007: 82-83.  
Chi Q H, Yan M C. Handbook of elemental abundance for applied geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007:82-83.
- [11]鲍士海. 锦州市基本农田土壤环境质量现状及分析[J]. 绿色科技, 2013(12): 184-185.  
Bao S H. Survey of environmental quality of basic farmland in Jinzhou, Liaoning province [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2013 (12): 184-185.
- [12]李瑞, 席北斗, 姜玉, 等. 北方主要农产地土壤污染风险评估与综合防治战略[J]. 中国工程科学, 2018, 20(5): 45-51.  
Li R, Xi B D, Jiang Y, et al. Soil pollution risk assessment and comprehensive prevention strategy for major agricultural producing areas in North China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2018, 20(5): 45-51.
- [13]张思洋, 于大涛, 张戈. 锦州湾三河入海口重金属分布特征及污染评价[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(6): 20-25.  
Zhang S Y, Yu D T, Zhang G. Distribution of heavy metals at the junction of Lianshan, Wuli and Cishan estuaries, Jinzhou bay and their contamination evaluation[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(6): 20-25.
- [14]于锐, 王洋, 王晨旭, 等. 榆树市玉米种植区黑土重金属污染状况及来源浅析[J]. 生态环境学报, 2017, 26(10): 1788-1794.  
Yu R, Wang Y, Wang C X, et al. Survey of heavy metal pollution and source identification of black soil in Zea mays L. cultivated region of Yushu city, China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(9): 1788-1794.
- [15]余涛, 程新彬, 杨忠芳, 等. 辽宁省典型地区大气颗粒物重金属元素分布特征及对土地质量影响研究[J]. 地学前缘, 2008, 15(5): 146-154.  
Yu T, Cheng X B, Yang Z F, et al. Distributional characteristics of heavy metal elements in atmospheric particulate matter and their impact on land quality in Liaoning province [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(5): 146-154.
- [16]Kluge B, Werkenthin M, Wessolek G. Metal leaching in a highway embankment on field and laboratory scale[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 493: 495-504.
- [17]王寅. 锦州市典型畜禽养殖场周边土壤污染状况调查分析[J]. 黑龙江环境通报, 2014, 38(4): 88-90.  
Wang Y. Investigation and analysis of soil pollution of typical livestock and poultry breeding farms in Jinzhou City[J]. *Heilongjiang Environmental Journal*, 2014, 38(4): 88-90.
- [18]王寅. 锦州市典型电镀企业周边土壤污染状况调查分析及防治措施[J]. 农业与技术, 2015, 35(5): 47-49.  
Wang Y. Investigation and analysis of soil pollution around typical electroplating enterprises in Jinzhou city and its prevention and control measures[J]. *Agriculture & Technology*, 2015, 35(5): 47-49.
- [19]范小杉, 罗宏. 工业废水重金属排放区域及行业分布格局[J]. 中国环境科学, 2013, 33(4): 655-662.  
Fan X B, Luo H. Spatial and industrial distribution pattern of heavy metals emission in industrial waste water [J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(4): 655-662.
- [20]李艺红, 王宏, 刘瑞志, 等. 锦州湾表层沉积物重金属潜在生态风险评估[J]. 沈阳理工大学学报, 2013, 32(5): 17-22.  
Li Y H, Wang H, Liu R Z, et al. Potential ecological risk evaluation of heavy metals in the surface sediments of Jinzhou Bay [J]. *Transactions of Shenyang Ligong University*, 2013, 32(5): 17-22.
- [21]李珊珊, 单保庆, 张洪. 汾阳河河系表层沉积物重金属污染特征及其风险评估[J]. 环境科学学报, 2013, 33(8): 2277-2284.  
Li S S, Shan B Q, Zhang H. Characteristics and ecological risk assessment of heavy metal pollution in surface sediments of Fuyang River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(8): 2277-2284.