

Spatial Distribution and Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Main Urban Area of Xi'an

—A Case Study of Main Urban Area of Xi'an

Jiajia Sun^{1,2}, Yong Ao^{1,2*}, Yonghua Zhao^{1,2}, Siqi Liu³, Quan Fu^{1,2}

¹School of Earth Sciences and Resources/School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

²Shaanxi Provincial Key Laboratory of Land Pollution Remediation, Xi'an Shaanxi

³Shaanxi Provincial Land Engineering and Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Email: *aoyong@chedu.cn

Received: Dec. 17th, 2019; accepted: Dec. 30th, 2019; published: Jan. 6th, 2020

Abstract

Evaluation of heavy metal pollution in soil is of great significance for food safety, human health, urban soil quality guarantee, urban soil remediation, and urban human-land relations. This paper selects Xi'an main city as a research area and collects 180 surface soil samples in the area. Soil samples were analyzed by inverse distance weight interpolation method to analyze the spatial distribution characteristics of soil heavy metals in the study area. Based on this, the pollution status and ecological risk of heavy metals in the study area were evaluated by the single factor pollution index method, Nemero comprehensive pollution index method, potential ecological risk assessment and geological accumulation index method. The results showed that the average concentrations of Zn, Ni, Pb, Cu, Cd and Cr in the soil of the Xi'an main urban area were lower than the national risk screening value; the spatial distribution characteristics showed that the southern part of the main urban area of Xi'an was more polluted by heavy metals than the northern part. The Ni in the study area is basically in a clean state, and Zn, Pb, Cu, Cd, and Cr have different degrees of pollution; the average value of the Nemero comprehensive pollution index is 1.43, and the entire study area is at a light pollution level; the average value of the comprehensive ecological risk index is 21.3. The heavy metal pollution of the soil in the study area is at a slight ecological risk as a whole. From the perspective of regional differences in ecological risk, the ecological risk index of each urban area in order is Baqiao District, Xincheng District, Yanta District, Beilin District, Lianhu District, Weiyang District.

Keywords

Soil, Heavy Metals, Spatial Distribution, Risk Assessment, Main Urban Area of Xi'an

*通讯作者。

土壤重金属污染空间分布及生态风险评价

——以西安市主城区为例

孙佳佳^{1,2}, 奥勇^{1,2*}, 赵永华^{1,2}, 刘思琪³, 付泉^{1,2}

¹长安大学地球科学与资源学院/土地工程学院, 陕西 西安

²陕西省土地污染整治重点实验室, 陕西 西安

³陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安

Email: aoyong@chedu.cn

收稿日期: 2019年12月17日; 录用日期: 2019年12月30日; 发布日期: 2020年1月6日

摘要

土壤中重金属污染的评价对食品安全、人类健康、城市土壤质量保护、城市土壤修复以及城市人地关系具有至关重要的意义。本文选择西安市主城区作为研究区, 在区内采集180个表层土壤样品, 采用反距离权重插值法, 分析研究区土壤重金属的空间分布特征, 在此基础上, 利用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法、潜在生态风险评价以及地质累积指数法对研究区域土壤中重金属污染状况及潜在风险进行评价。结果表明: 研究区土壤中Zn、Ni、Pb、Cu、Cd和Cr重金属的平均含量均未超过国家风险筛选值; 空间分布特征表明西安市主城区南部受重金属污染的程度要大于北部。研究区Ni基本处于清洁状态, Zn、Pb、Cu、Cd和Cr出现不同程度的污染; 内梅罗综合污染指数平均值为1.43, 研究区整体属于轻污染水平; 综合生态风险指数平均值为21.3, 研究区土壤重金属污染整体上处于轻微生态风险; 从生态风险程度的区域差异来看, 各城区生态风险指数从大到小依次为: 灞桥区、新城区、雁塔区、碑林区、莲湖区、未央区。

关键词

土壤, 重金属, 空间分布, 风险评价, 西安市主城区

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土壤是人类生存的必要资源。土壤重金属污染对人类健康及土壤生态系统产生不利影响和潜在威胁, 因而备受关注[1] [2] [3] [4]。我国土壤污染状况严重, 土壤污染整体超标率达到16.1%, 其中轻微、轻度、中度和重度污染点位比例分别为11.2%、2.3%、1.5%和1.1%, 主要污染物为Cd、As、Pb、Hg、Zn、Cu等无机污染和滴滴涕、多环芳烃等有机污染, 其中Cd、Hg、As、Pb含量分布从西北到东南、从东北到西南方向逐渐升高[5]。目前我国处于快速城市化进程, 大量人口涌入城市, 工业的现代化和城市地区人类的密集活动以及城市快速扩张导致用地紧张, 加剧了城市土壤中重金属污染的问题, 土地质量堪忧, 研究城市土壤的重金属污染空间分布和生态风险, 对城市土地利用与规划具有至关重要的意义。由于快速的工业

化和城市化,城市土壤重金属污染已经成为城市环境污染研究的热点问题。近年来,一些学者对西安市的表层土壤、护城河沉积物、地表灰尘、灌溉区等重金属污染物及风险进行了评价[6][7][8][9][10],研究结果表明,整体上西安市二环内表层土壤的潜在生态风险处于中等水平,西安市护城河沉积物重金属的潜在生态风险达到严重水平,西安城区地表灰尘重金属的生态风险水平达到强度,西安市北郊灌溉区的潜在风险处于轻微水平。对于西安市主城区的土壤重金属空间分布特征和生态风险评价等方面进行全面系统的调查研究相对缺乏。西安是中国西部地区重要的中心城市,是“一带一路”核心区。随着城市规模的扩大及人口快速增长,有必要对西安市主城区土壤重金属污染进行研究。本文以西安市主城区为研究区域,测定 Zn、Ni、Pb、Cu、Cd 和 Cr 的重金属含量,分析研究区土壤中重金属的空间分布特征,采用单因子指数法、内梅罗综合指数法、地累积指数法及潜在生态评价法对该地区土壤进行评价,以期为今后环境质量评价与保护、农业规划、污损土地修复与整治、快速监测土壤中重金属含量提供科学依据。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

西安(107°40'E~109°49'E, 33°42'N~34°45'N)位于关中平原中部,北临渭河和黄土高原,南邻秦岭(图 1)。全市下辖 11 区 2 县,总面积 10752 km²。2018 年末常住人口 1000.37 万,常住人口城镇化率 74.01%。本研究区主要包括未央区、莲湖区、碑林区、新城区、雁塔区、灞桥区平原部分。研究区气候属于暖温带半湿润大陆性气候,海拔 400~700 m,多年平均降水量 522.4~719.5 mm,降水集中在 7~9 月,多年平均气温 13.0~13.7℃。

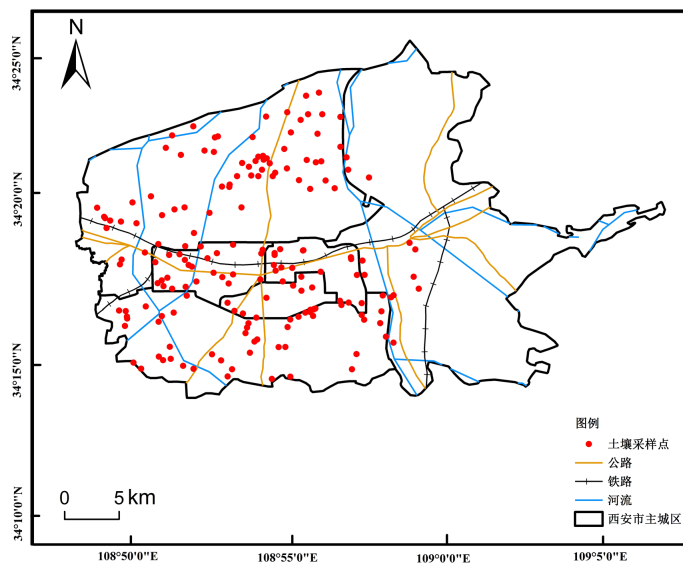


Figure 1. Location of study area and distribution of sampling points
图 1. 研究区位置及采样点分布

2.2. 样品采集与整理

于 2018 年 5 月~2019 年 1 月对西安市主城区进行土壤样品采集,根据典型区域适当加密布点的原则,采用“S”形方法共布设 180 个采样点。采用四分法用木铲采集土样,采样时刮去杂质后采集表层 15 cm~20 cm 的土壤样品,混合过 2 mm 筛后,采用四分法得约 1 kg,土样在常温下自然风干,去杂物、研磨处理,将样品细磨后过筛 100 目的筛网,土样按编号装入无色聚乙烯自封袋中。土壤 pH 值采用梅特勒-托利

多 pH 计测定(土:水 = 1:2.5 (m:V)), 水为去 CO₂ 蒸馏水。土壤样品含量在实验室经王水消解法(HNO₃-HCl-HClO₄)消解后, 使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP/MS)测定。每批土样做 3 次空白样和并行样, 样品的最终含量为平均值。测试过程中试剂均为优级纯, 采用国家标准土样 GSS-25 进行控制。采样同时用全球定位系统(GPS)定位。

2.3. 土壤重金属污染评价方法

2.3.1. 单因子污染指数法

单因子污染指数法是对土壤中的某一种重金属元素的污染程度进行评价, 是大多数单项土壤重金属污染评价普遍采用的方法, 但此方法只能反映单个重金属元素对土壤的污染程度[11] [12]。计算公式为:

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

(1)式中, P_i 为土壤样品中重金属元素 i 的污染指数; C_i 是土壤样品中重金属元素 i 的实测值; S_i 是重金属元素 i 的评价标准值, 一般以土壤元素的背景值或标准限制作为评价标准。为了加强土壤污染治理, 改善土壤环境质量, 本研究选用《土壤环境质量标准》[13] (GB 15618-2018)中风险筛选值作为标准值。 P_i 值越大, 则表明该重金属在土壤中富集情况越严重, 以 P_i 将土壤污染分为未污染($P_i \leq 1$)、轻微污染($2 < P_i \leq 3$)、中度污染($2 < P_i \leq 3$)和重度污染($P_i > 3$) 4 个等级。

2.3.2. 内梅罗综合污染指数法

内梅罗(Nemerow)综合污染指数法不仅考虑土壤中各种污染物的平均污染水平, 还能突出最严重污染物的平均污染水平, 可全面的反映某种污染物的污染程度, 凸显最严重污染物给环境质量造成的危害[14] [15], 计算公式为:

$$P_N = \sqrt{(P_{i\max}^2 + P_{iave}^2)}/2 \quad (2)$$

(2)式中, P_N 为综合污染指数; $P_{i\max}$ 为土壤样品中各重金属单因子污染指数的最大值; P_{iave} 为土壤样品中各重金属单因子污染指数的算术平均值。依据内梅罗综合指数可将土壤重金属污染划分为 $P_N \leq 0.7$ 为安全水平; $7 < P_N \leq 1$ 为警戒水平; $1 < P_N \leq 2$ 为轻度污染; $2 < P_N \leq 3$ 为中度污染; $P_N > 3$ 为重污染。

2.3.3. 地质累积指数法

地累积指数法(Index of Geo Accumulation, Igeo)是 1969 年由德国 Muller 提出, 是一种研究土壤、沉积物中重金属污染程度的定量指标, 该方法不仅考虑环境地球化学背景值和自然成岩作用引起背景值变动的因素, 还充分考虑人为活动污染因素[16]。计算表达式为:

$$I_{geo} = \log_2 [Ci/(k \times Bi)] \quad (3)$$

(3)式中, I_{geo} 为地累积指数; Ci 为土壤样品中重金属元素 i 的实测值; Bi 为重金属元素 i 的环境背景值; k 一般取 1.5, 是考虑到成岩作用和人类活动可能导致重金属元素背景值的变动而设的常数。地质累积指数等级可划分为 $I_{geo} < 0$ 为清洁状态, $0 \leq I_{geo} < 1$ 为轻度污染, $1 \leq I_{geo} < 2$ 为偏中度污染, $2 \leq I_{geo} < 3$ 为中度污染, $3 \leq I_{geo} < 4$ 为偏重度污染, $4 \leq I_{geo} < 5$ 为重度污染, $I_{geo} \geq 5$ 为严重污染。

2.3.4. 潜在生态风险指数法

潜在生态危害指数(Potential Ecological Risk Index, RI)是 1980 年由瑞典学者 Hakanson 提出的, 主要用于定量评价土壤重金属潜在生态风险的程度, 既可反映某特定环境中单一重金属元素的影响, 还能反映多种重金属的复合影响, 该方法综合考虑了多种重金属元素的浓度、毒性因子、评价区对重金属污染

的生态敏感性以及协同作用[17] [18] [19]。因此,潜在生态危害指数是一种广泛应用于沉积物及土壤重金属的潜在生态风险评价方法。计算表达式为:

$$C_f^i = C_0^i / C_n^i \quad (4)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \quad (5)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (6)$$

式中, C_f^i 为重金属 i 的污染指数; C_0^i 为土壤样品中重金属 i 的实测值; C_n^i 为重金属 i 的环境背景值; E_r^i 为重金属 i 的潜在生态风险系数, 依据 E_r^i 将土壤潜在生态危害程度划分为轻微 ($E_r^i < 30$)、中度 ($30 \leq E_r^i < 60$)、强度 ($60 \leq E_r^i < 120$)、很强 ($120 \leq E_r^i < 240$) 和极强 ($240 \leq E_r^i$) 5 个等级; T_r^i 为重金属 i 的毒性响应因子, Zn、Pb、Cu、Ni、Cd 和 Cr 的毒性响应因子分别为 1、5、5、5、30 和 2 [20]; n 是样点重金属的种数; RI 为潜在生态风险指数。土壤中重金属的风险分级关系参照 Hakanson 的分级标准, 依据所研究重金属元素的数量以及各重金属的毒性响应系数[21], 调整其分级标准, 划分为轻微 ($RI < 50$)、中度 ($50 \leq RI < 100$)、强度 ($100 \leq RI < 200$) 和很强 ($RI \geq 200$) 4 个等级。

2.4. 统计分析

本研究区土壤重金属统计特征参数包括最小值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、最大值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、平均值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、标准差、偏度、峰度和变异系数(%). 变异系数反映了各重金属元素在空间上的离散程度, 变异系数值越大, 表明该元素的离散情况越强烈[22] [23], 变异系数小于 10% 为弱变异性, 变异系数在 10%~100% 为中等变异, 变异系数大于 100% 为强变异性[24]。偏度与峰度表明了数据偏离正态分布的程度[25]。采用相关性分析、主成分分析等多元统计方法分析数据, 研究西安市主城区重金属污染分布特征与规律。

2.5. 数据处理

以 ArcGIS 10.2 软件作为平台, 采用反距离权重插值方法对西安市主城区土壤重金属空间分布特征进行分析, 并制作土壤采样点分布图和重金属含量、综合污染指数、生态风险指数空间分布图。采用 SPSS 19.0 软件进行统计分析。

3. 结果与分析

3.1. 土壤中重金属含量分析

本研究采用《土壤环境质量标准》(GB 15618-2018)中风险筛选值作为参考标准。通过 K-S 检验对研究区 Zn、Ni、Pb、Cu、Cd 和 Cr 污染的采样点进行正态分布检验, 其 P 值均为 0.00, 呈非正态分布。研究区重金属描述性统计结果表明(表 1), Zn、Ni、Pb、Cu、Cd 和 Cr 的含量平均值分别为 142、25.3、30.0、32.1、0.34、41.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 研究区 7 种重金属的平均值均未超过国家风险筛选值。Zn、Pb、Cu、Cd、Cr 含量最大值远超过国家风险筛选值, 分别是标准值的 13.2 倍、1.62 倍、3.77 倍、9.79 倍、2.99 倍。土壤中在 180 个土壤样品中, 6 种重金属的变异系数大小为 $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Ni}$, 土壤中 Ni 属于中等变异, 其他重金属均为强变异性, 表明 6 种重金属空间分布不均匀, 受人为活动干扰强烈。

Table 1. Descriptive statistics of heavy metals in soils of the study area

表 1. 研究区土壤重金属统计特征分析

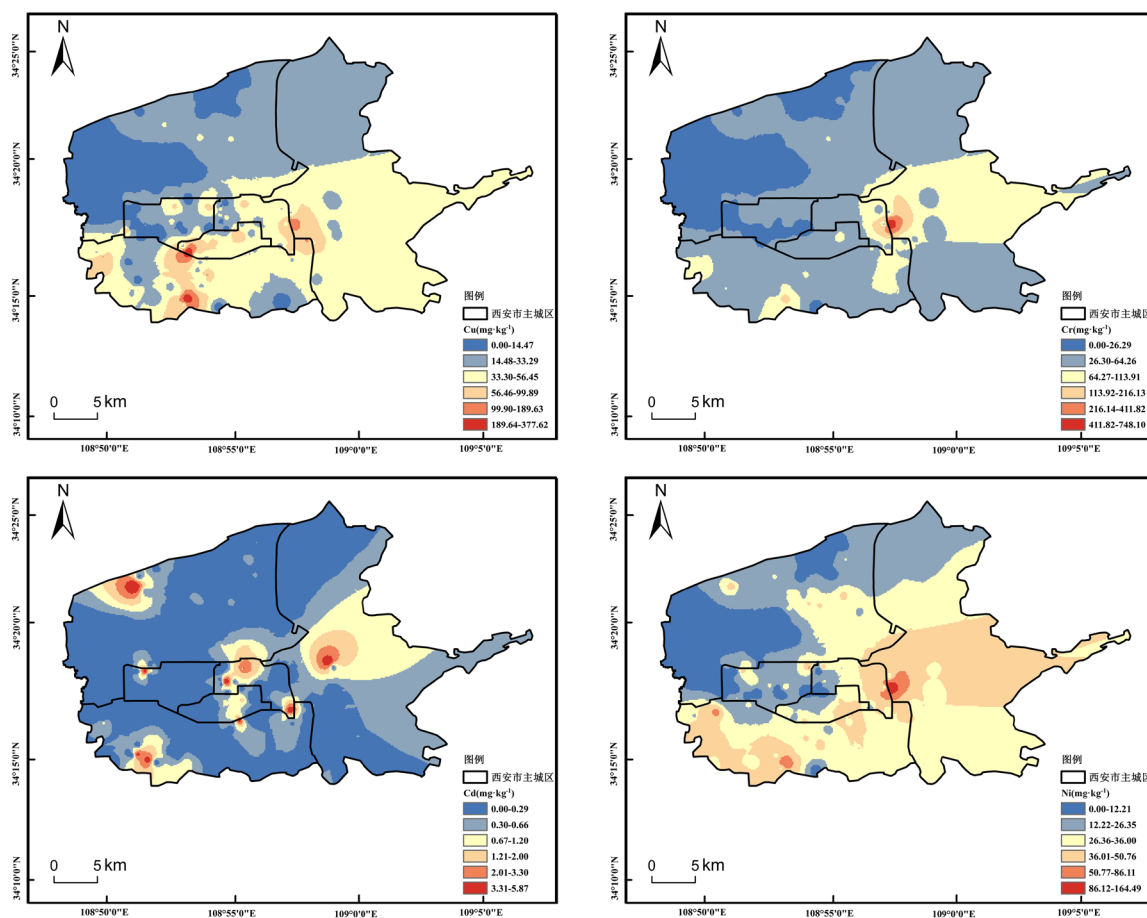
重金属 Heavy metal	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	标准差 SD	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	变异系数 (%) c.v	国家风险筛选值 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Cd	0.0002	5.87	0.34	1.05	4.07	15.6	308	0.6

Continued

Cr	0.0007	748	41.4	58.5	9.97	120	141	250
Cu	0.0002	378	32.1	42.0	4.97	34.7	131	100
Ni	0.0003	165	25.3	19.1	2.00	14.6	75.8	190
Pb	0.0001	275	30.0	34.2	3.73	21.3	114	170
Zn	0.0001	3962	142	364	8.16	76.0	256	300

3.2. 土壤中重金属含量空间分布特征

本研究采用反距离权重插值方法, 利用 ArcGIS 10.2 绘制 6 种土壤重金属空间分布图(图 2)。Cd 含量较高的区域分布广泛, 在研究区的西北部、西南部以及东部污染严重, 西部含量较低, Cd 含量平均值为 0.34, 最高值在采样点 C3-5 (某材料股份有限公司), 位于雁塔区, 含量是 $5.87 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Pb 重金属污染主要集中在研究区东南部, Pb 含量的平均值为 30.0, 最高值在采样点 Y9-3 (某仪器厂), 含量是 $274 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Zn 在研究区南部污染严重, Zn 含量的平均值为 142, 最高值在采样点 Y8-3 (某防腐木加工厂), 含量是 $3962 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Cr 在研究区东南部污染严重, 平均含量为 41.4, 最高值在采样点 X10-2 (某锻造分厂), 含量是 $748 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Ni 在研究区南部污染严重, 含量平均值为 25.3, 最高值在采样点 X10-2 (某锻造分厂), 含量是 $164 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Cu 污染主要集中在研究区南部, Cu 含量的平均值为 32.1, 最高值采样点 B1-1 (在某汽车维修), 含量是 $377 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。



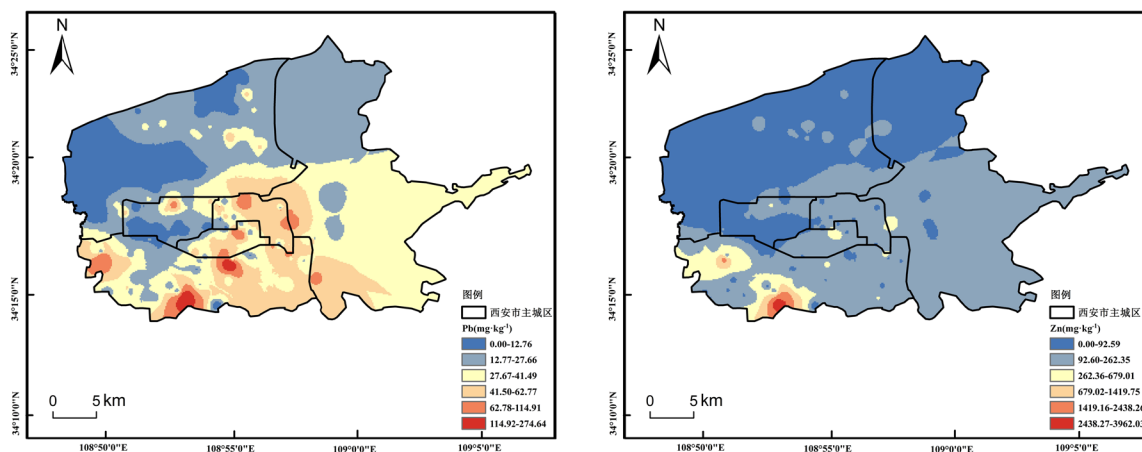


Figure 2. Spatial distribution of different heavy metals in soils of the study area
图 2. 研究区土壤中不同重金属的空间分布图

3.3. 土壤中重金属含量的污染评价

3.3.1. 单因子污染指数法

基于国家土壤重金属标准值(GB 15618-2018), 以单因子污染指数法进行评价, 所有样品中, Ni 重金属的单因子污染指数小于 1, 含量均不超过国家风险筛选值, 处于未污染状态。有少量样品中 Cd、Zn、Cu、Pb、Cr 的单因子指数大于 1, 含量超过国家风险筛选值个数分别为 14、11、6、2、1。Pb 超标率 1.1%, 仅有轻微污染占 1.1%; Cr 超标率 0.56%, 仅有中度污染占 0.56%; Zn 超标率 6.7%, 轻微污染占 5%, 重度污染占 1.7%; Cu 超标率 3.3%, 轻微污染占 2.2%, 重度污染占 1.1%; Cd 超标率 7.8%, 轻微污染占 2.2%, 中度污染占 0.6%, 重度污染占 5%。

3.3.2. 内梅罗综合污染指数法

基于国家土壤重金属标准值(GB 15618-2018), 以内梅罗综合污染指数法进行评价, 研究区土壤样品的 6 种重金属元素 Cd、Cr、Cu、Zn、Pb 和 Ni 的内梅罗综合污染指数在 0.00~48.24 之间, 180 个土样的内梅罗综合指数的平均值为 1.43 < 3, 研究区整体属于轻污染水平。其中, 10.6% 的土样受到重金属污染, 其中重度污染占 7.2%, 警戒、轻度及中度污染的所占比例较少, 分别为 1.7%、1.1%、0.5%。为直观的

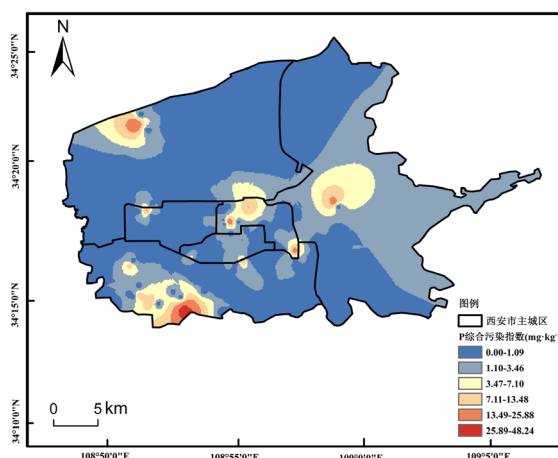


Figure 3. Spatial distribution of complex pollution in soils of the study area
图 3. 研究区土壤重金属综合污染指数分布图

反映土壤重金属污染空间分布特征, 计算了各采样点重金属的复合污染指数, 并利用 ArcGIS 做反距离权重插值得出其空间分布情况(图 3)。与 Cd 重金属空间分布图相似, 表明 Cd 是内梅罗综合污染指数评价贡献最大的因子, 在研究区的西北部、西南部以及东部污染严重。

3.3.3. 地累积指数法

根据重金属 I_{geo} 分级标准, Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 的地累积指数的范围分别是-12.6~2.71、-19.0~1.00、-19.9~1.33、-20.1~-0.79、-22.3~0.11、-22.1~3.14, 平均值分别为-8.32、-5.71、-6.00、-6.38、-6.00、-4.90, 表明西安市主城区 6 种重金属累积较轻。所有采样点中, Pb、Cr 的最大地质累积指数分别为 0.11、1.00, 处于轻度污染状态的分别占 0.5%、0.5%; Cu 最大地质累积指数为 1.33, 处于轻度污染状态的占 0.5%, 偏中度污染的占 1.1%; Cd 最大地质累积指数为 2.71, 处于轻度污染状态的占 2.22%, 中度污染的占 5%; Zn 最大地质累积指数为 3.14, 处于轻度污染状态的占 1.6%, 处于偏中度污染的占 0.5%, 中度污染的占 0.5%, 偏重污染的占 0.5%。

3.3.4. 潜在生态风险指数法

利用潜在生态风险指数法计算研究区 6 种重金属的生态风险系数以及生态风险指数, 并得出生态风险等级(表 2)。Zn、Ni、Pb、Cu、Cd 和 Cr 重金属 E_i^p 范围分别为 0.00~13.2、0.00~4.33、0.00~8.08、0.00~18.9、0.01~293、0.00~5.99, 各重金属的 E_i^p 均值分别为 0.47、0.67、0.89、1.61、17.1、0.33。土样中 Cd 极强生态风险占 2.78%, 很强生态风险占 2.23%, 强度生态风险占 0.56%, 中度生态风险占 2.23%。所有土样的 Cu、Pb、Ni、Zn 和 Cr 均为轻微生态风险。因此, Cd 为最主要的生态风险因子。

Table 2. Indexes of potential ecological risk of soil heavy metals

表 2. 研究区土壤重金属潜在生态风险系数

重金属 Heavy metals	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	比例(%) Proportion				
				轻微	中度	强度	很强	极强
Cd	0.01	293	17.1	92.2	2.23	0.56	2.23	2.78
Cr	0.00	5.99	0.33	100	0	0	0	0
Cu	0.00	18.9	1.61	100	0	0	0	0
Pb	0.00	8.08	0.88	100	0	0	0	0
Zn	0.00	13.2	0.47	100	0	0	0	0
Ni	0.00	4.33	0.67	100	0	0	0	0
RI	0.01	297	21.2	92.2	2.78	0.56	4.44	0

进一步分析研究区土壤重金属潜在生态风险的空间分布特征, 对土壤样点的综合生态风险评价值(RI)进行 IDW 插值(图 4)。土壤样点的综合生态风险评价值(RI)范围为 0.01~297, 均值为 21.3, 研究区土壤重金属污染整体上处于轻微生态风险。180 个采样点中, 8 个采样点处于很强生态风险, 1 个采样点处于强度生态风险, 5 个采样点处于中度生态风险, 166 个采样点处于轻微生态风险。从 RI 的空间分布格局(图 4)来看, 研究区土壤中 Zn、Ni、Pb、Cu、Cd 和 Cr 重金属的潜在生态风险指数空间分布存在明显差异, 最高值为 297, 位于采样点 C3-5 (西安某硅材料股份有限公司); 其次为 293、269、250、245、226、209、207、195, 分别位于采样点 X4-2 (西安某纸业有限公司)、X2-1 (某石油加油站)、Y11-2 (西安某机械加工厂)、BQ-1 (西安某能源有限责任公司)、L2-5 (某生物医药物流中心)、Y4-6 (西安某卷烟材料有限责任公司)、B2-4 (某医院)、Y4-4 (西安某制药有限公司)。6 种重金属的污染源主要来自加工厂、生物医疗、能源、汽车维修等, 人流量大交通频繁。灞桥区的生态风险最大, RI 均值为 66.3, 其次是新城、碑林、雁塔、未央区, 各城区 RI 均值分别为 39.6、29.8、25.8、8.43, 最小是莲湖区, RI 均值为 3.28。

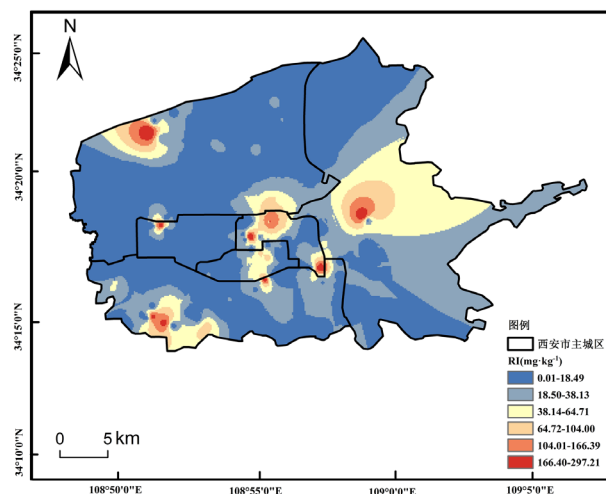


Figure 4. Spatial distribution of Potential ecological risk index in soils of the study area
图 4. 研究区土壤重金属潜在生态风险指数分布图

3.4. 土壤中重金属的分析

3.4.1. 土壤中重金属污染的相关分析

土壤重金属元素之间的相关性可以为推测土壤重金属污染来源和途径等提供重要信息，元素间的相关性越显著，它们就越可能具有相同的来源。研究区各重金属元素间相关分析结果表明(表 3)，Cr 与 Ni、Pb、Cu、Zn 的相关系数在 0.01 水平上达到了 0.6 以上，说明 Cr、Ni、Pb、Cu、Zn 的相关性很强，表明其来源相似；Pb 与 Zn 之间相关性系数相对其他重金属最大(0.90)，表明其可能有相同的来源；Cd 与其他 6 种重金属的无显著相关，表明 Cd 与其他重金属的来源有显著差异性。

Table 3. Correlation analysis of soil heavy metals in the study area

表 3. 研究区土壤重金属含量间的相关分析

元素	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Cd	1.00					
Cr	0.24**	1.00				
Cu	0.27**	0.67**	1.00			
Ni	0.22**	0.72**	0.55**	1.00		
Pb	0.31**	0.67**	0.73**	0.50**	1.00	
Zn	0.28**	0.72**	0.76**	0.53**	0.90**	1.00

注：**在置信度(双测)为 0.01 时，相关性是显著的。

3.4.2. 土壤中重金属污染主成分分析

土壤重金属主要来源于自然资源与人类活动，主成分分析(PCA)能够得到一些有关污染源信息的因素组合，通过主成分分析可以有效判别重金属元素的污染来源[26] [27] [28]。主成分分析结果表明(表 4)，前 3 个主成分可以反映原始数据的 80.97%，对所有指标基本给出充分的概括。第一主成分(PC1)特征值为 2.874，有较高荷载的是 Cr、Cu 和 Ni，贡献率为 47.90%，污染源主要来源于交通、工厂制造等人类活动；第二主成分(PC2)特征值为 1.017，有较高荷载的是 Pb 与 Zn，贡献率为 16.95%，防腐木加工厂、仪器厂、汽车维修附近土壤中 Pb 与 Zn 含量超标，可能与汽车轮胎和含铅汽油的燃烧有关，说明交通运

输、工业生产对 Pb 与 Zn 污染影响较大；说明汽车维修与加工过程中排放的三废含有 Pb 与 Zn，尤其是油漆，以及一些镀金工艺，可能大量产生 Pb 与 Zn。第三主成分(PC3)特征值为 0.967，荷载较高的元素为 Cd，贡献率为 16.12%，可能与物流和工业生产等污染相关。

Table 4. Principle component analysis of soil heavy metals in the study area

表 4. 研究区土壤重金属含量主成分分析

主成分	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
PC1	0.070	0.906	0.596	0.906	0.315	0.073	2.874	47.90	47.90
PC2	0.059	0.127	0.484	0.174	0.817	0.888	1.017	16.95	64.85
PC3	0.995	-0.004	0.039	0.122	0.078	0.019	0.967	16.12	80.97

4. 讨论

1) 西安市主城区污染元素多集中在新城区、碑林区等老城区，这可能与老城区有诸多加工厂、制造业、工业园、汽车维修企业等因素有关，且早期居民生活长期以燃煤为主。这些企业大多建立时间较早，工艺设备不够成熟，长期工业生产导致土壤受重金属污染，特别是 Cd 含量不断累积。在所有采样点中，结合各重金属含量空间分布特征，Cd、Cr、Cu、Zn 和 Pb 主要来自加工厂、物流、能源、汽车维修，这说明西安市主城区工业、交通运输对土壤中重金属的影响较明显。西安市主城区东部也有一些老工业企业，如军工电子、纺织城等，这可能是该区域土壤重金属含量高的原因。此外，西安主城区历史悠久，人口密集，交通频繁也是土壤重金属含量较高的原因之一。西安市土壤 Cd 污染、潜在生态风险最为严重，城市西南部有诸多加工厂、制造业、工业园、汽车维修企业，除工业污染外，交通运输也是城市土壤 Cd 的重要来源之一。随着工业发展和人口数量增加，交通流量逐年增加，汽车轮胎和汽油的大量燃烧，含镉气溶胶排放量的不断增加，这可能是城市土壤 Cd 生态风险较高的另一个原因。

2) 本研究没有采用动态连续数据进行分析，还需在后续工作中研究西安市土壤重金属污染的时空分布状态以及详细的污染来源。

5. 结论

本文基于实地采样数据和重金属含量测试结果，利用反距离权重插值和统计方法研究西安市主城区重金属污染空间分布、综合污染程度、潜在生态风险，结果表明：

1) 西安主城区土壤中 Zn、Ni、Pb、Cu、Cd 和 Cr 重金属的平均含量分别为 142、25.3、30.0、32.1、0.42、41.4 mg·kg⁻¹，各重金属元素存在不同程度的积累。所有重金属含量的平均值均未超过国家土壤环境质量标准的限值。各重金属元素在某些采样点出现高值，表明人类活动对土壤环境质量具有负面影响。研究区土壤中 6 种重金属元素含量的空间分布特征表明西安市主城区南部受重金属污染的程度要大于北部。

2) 研究区单因子污染指数评价中 Ni 处于未污染状态，有少量样品 Cd、Zn、Cu、Pb、Cr 的含量超过《土壤环境质量标准》(GB 15618-2018)风险筛选值标准；Cd、Cr、Cu、Zn、Pb 和 Ni 的内梅罗综合污染指数平均值为 1.43，研究区整体属于轻污染水平；研究区土壤中 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 的地累积指数变化范围较大，各重金属地累积指数均值均小于 0，表明研究区土壤中 6 种重金属累积较轻。

3) 研究区潜在生态风险指数评价中 Cd 为最主要的生态风险因子，Cu、Pb、Ni、Zn 和 Cr 均为轻微生态风险。综合生态风险指数平均值为 21.3，研究区土壤重金属污染整体上处于轻微生态风险。从生态风险程度的区域差异来看，各城区生态风险指数从大到小依次为：灞桥区、新城区、雁塔区、碑林区、莲湖区、未央区。

基金项目

国家自然科学基金项目(31670549), 陕西省土地整治重点实验室开放基金(2018-JC08)支持。

参考文献

- [1] Sun, C., Liu, J., Wang, Y., Sun, L. and Yu, H.W. (2013) Multivariate and Geostatistical Analyses of the Spatial Distribution and Sources of Heavy Metals in Agricultural Soil in Dehui, Northeast China. *Chemosphere*, **92**, 517-523. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.02.063>
- [2] 李一蒙, 马建华, 刘德新, 等. 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2015(3): 1037-1044.
- [3] Kosheleva, N.E., Vlasov, D.V., Korlyakov, I.D. and Kasimov, N.S. (2018) Contamination of Urban Soils with Heavy Metals in Moscow as Affected by Building Development. *Science of the Total Environment*, **636**, 854-863. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.308>
- [4] Nezat, C.A., Hatch, S.A. and Uecker, T. (2017) Heavy Metal Content in Urban Residential and Park Soils: A Case Study in Spokane, Washington, USA. *Applied Geochemistry*, **78**, 186-193. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.12.018>
- [5] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. “全国土壤污染状况调查公报”探析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1689-1692.
- [6] 陈秀端, 卢新卫, 杨光, 等. 西安市二环内表层土壤重金属污染评价[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(11): 81-86.
- [7] 陈秀端, 卢新卫, 杨光, 等. 西安市区表层土壤重金属风险评价[J]. 城市环境与城市生态, 2012, 25(2): 41-46.
- [8] 张文娟, 王利军, 王丽, 等. 西安市地表灰尘中重金属污染水平与健康风险评价[J]. 土壤通报, 2017, 48(2): 481-487.
- [9] 王丽, 王利军, 史兴民, 等. 西安城区地表灰尘中重金属分布、来源及潜在生态风险[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(7): 180-187.
- [10] 徐雪, 王利军, 卢新卫, 等. 西安市护城河沉积物重金属形态、污染及潜在生态风险[J]. 干旱区研究, 2015, 32(6): 1255-1262.
- [11] 姜凤成, 李义连, 杨森, 等. 秦王川盆地土壤重金属来源、分布及污染评价[J]. 中国环境科学, 2018, 38(6): 2243-2252.
- [12] 高瑞忠, 张阿龙, 张生, 等. 西北内陆盐湖盆地土壤重金属 Cr、Hg、As 空间分布特征及潜在生态风险评价[J]. 生态学报, 2017, 39(7): 2532-2544.
- [13] GB 15618-2018 土壤环境质量标准[S]. 2018.
- [14] 姚世厅, 李玉倩, 王德利, 等. 北京万庄金矿区土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 中国矿业, 2018, 27(S2): 66-72.
- [15] Nemerow, N.L. (1974) Scientific Stream Pollution Analysis.
- [16] Muller, G. (1969) Index of Geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *GeoJournal*, **2**, 108-118.
- [17] Hu, Y., Liu, X., Bai, J., *et al.* (2013) Assessing Heavy Metal Pollution in the Surface Soils of a Region that Had Undergone Three Decades of Intense Industrialization and Urbanization. *Environmental Science and Pollution Research*, **20**, 6150-6159. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1668-z>
- [18] Hakanson, L. (1980) An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control. A Sedimentological Approach. *Water Research*, **14**, 975-1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- [19] 何博, 赵慧, 王铁宇, 等. 典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价[J]. 环境科学, 2019, 40(6): 2869-2876.
- [20] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 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.
- [21] 马建华, 王晓云, 侯千, 等. 某城市幼儿园地表灰尘重金属污染及潜在生态风险[J]. 地理研究, 2011, 30(3): 486-495.
- [22] 陈小敏, 朱保虎, 杨文, 等. 密云水库上游金矿区土壤重金属空间分布、来源及污染评价[J]. 环境化学, 2015, 34(12): 2248-2256.
- [23] 吕建树, 张祖陆, 刘洋, 等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. 地理学报, 2012, 67(7): 109-122.
- [24] Bai, Y. and Wang, Y. (2011) Spatial Variability of Soil Chemical Properties in a Jujube Slope on the Loess Plateau of China. *Soil Science*, **176**, 550-558. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e3182285cfd>

-
- [25] 王学松, 秦勇. 利用对数正态分布图解析徐州城市土壤中重金属元素来源和确定地球化学背景值[J]. 地球化学, 2007, 36(1): 98-102.
- [26] 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.
- [27] Lu, A., Wang, J., Qin, X., *et al.* (2012) Multivariate and Geostatistical Analyses of the Spatial Distribution and Origin of Heavy Metals in the Agricultural Soils in Shunyi, Beijing, China. *Science of the Total Environment*, **425**, 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.003>
- [28] Xiao, Q., Zong, Y.T. and Lu, S.G. (2015) Assessment of Heavy Metal Pollution and Human Health Risk in Urban Soils of Steel Industrial City (Anshan), Liaoning, Northeast China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **120**, 377-385. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.06.019>