

宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析

张军^{1,2}, 董洁¹, 梁青芳¹, 杨宁宁¹, 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, 西安 710064)

摘要: 为深入分析工业城市土壤重金属污染的影响因子及来源途径, 本文以宝鸡市区采集的 62 份表层 (0~20 cm) 土壤样品为研究对象, 使用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 测定重金属 (Cd、As、Cu、Pb、Zn、Cr、Mn 和 Ni) 含量, 基于地统计方法及地理探测器模型, 以土壤重金属污染负荷指数 (PLI) 为主导指标, 探测土壤重金属污染的影响因子, 并使用 Unmix6.0 受体模型进行重金属源解析。结果表明: ①宝鸡市区表层土壤重金属 Cd、Pb、Cu、Zn、As、Cr、Mn 和 Ni 含量均值分别为 0.77、16.75、40.52、261、17.03、49.18、331 和 30.52 mg kg⁻¹, 其中 Cd 和 Zn 均值超过了国家二级标准, 是陕西省土壤背景值的 8.2 倍和 3.8 倍, Cu、As 和 Ni 均值也超过了陕西省土壤背景值, Cd 和 Zn 在城区土壤中存在重度污染现象。②宝鸡市区表层土壤重金属区域总污染负荷指数 (PLI_{zone}) 达 1.36, 为轻度污染, 经地理探测器分析, 土壤质地和铁路距离对污染分布的解释力最强, P_{D,H} 分别为 0.040 和 0.026, 交互解释力均达 0.099。③Cd、Cu 和 As 主要为工农业活动所致的“人为源”, Zn 和 Ni 为交通排放造成的“人为源”, Cr、Pb 和 Mn 主要为“混合源”。研究区表层土壤重金属主要来源为“混合源”, 为轻度污染级, 土壤质地和距铁路距离是土壤重金属污染的主要影响因子。本研究可以为宝鸡市土壤重金属污染与防治提供科学依据。

关键词: 重金属; 土壤; 地理探测器; 空间分布; 宝鸡市

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301 (2019) DOI: 10.13227/j.hj.kx.201811114

Analysis of Pollution Characteristics and Influencing Factors of Heavy Metals in Baoji Urban Soil

ZHANG Jun^{1,2}, DONG Jie¹, LIANG Qing-fang¹, YANG Ning-ning¹, GENG Ya-ni¹

(1. Shaanxi 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 710054, China)

Abstract: In order to deeply analyze the influencing factors and sources of heavy metal pollution in industrial cities, 62 surface layer (0-20 cm) soil samples collected in Baoji City were used as research objects, and determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Heavy metal element Cd, As, Cu, Pb, Zn, Cr, Mn and Ni, were detected. based on geostatistical methods and geo-detector models. soil heavy metal pollution load index (PLI) was selected as the leading indicator to detect the impact factors of soil heavy metal pollution. The Unmix6.0 receptor model was used to analyze the heavy metal source. The results showed that: ①The average contents of heavy metals Cd, Pb, Cu, Zn, As, Cr, Mn, and Ni in the surface soil of Baoji City were 0.77, 16.75, 40.52, 261, 17.03, 49.18, 331, and 30.52 mg kg⁻¹, respectively. The average value of Cd and Zn exceeds the national secondary standard, which is 8.2 times and 3.8 times of the soil background value of Shaanxi Province. The average values of Cu, As and Ni also exceed the soil background of Shaanxi Province. The value of Cd and Zn is seriously polluted in urban soil. ②The total pollution load index (PLI_{zone}) of heavy metal is 1.36 in the surface soil of Baoji City, which is mild pollution, analyzed by geo-detector. Soil texture and the railway distance has the strongest explanatory power for pollution distribution, P_{D,H} are 0.040 and 0.026 respectively, and the mutual

收稿日期: 2018-11-16; 修订日期: 2019-03-05

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项目 (310829151140, 310829151141); 宝鸡市科技计划项目 (2017JH2-25); 陕西省地理学重点学科项目

作者简介: 张军 (1974~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向区域重金属污染控制及风险评价, E-mail: zhangjun1190@126.com

explanatory power is 0.099. ③Cd, Cu, and As are mainly “artificial sources” caused by industrial and agricultural activities, and Zn and Ni are caused by traffic emissions. Cr, Pb and Mn are mainly “mixed sources”. The main source of heavy metals in the surface soil of the study area is “mixed source”, which is mild pollution level. The soil texture and distance from railway are the main impact factors of soil heavy metal pollution. This study aims to provide scientific support for the prevention and control of soil heavy metal pollution in Baoji city.

Key words: heavy metals; soil; geo-detector; spatial distribution; Baoji City

重金属污染主要是指人类工农业生产过程中,重金属或其它化合物给自然环境或人体健康带来损害的过程及现象^[1~3].重金属进入土壤后具有难降解性、累积性和长期性等特点.城市土壤承载有高密度人口和频繁的工业活动,随之产生的重金属进入城市土壤后,由于重金属缺乏有效输出途径,致使城市土壤通常作为重金属循环系统的末端^[4].当前,因工农业及城市化发展的步伐不断加快,城市土壤重金属污染成为全球面临的的城市环境问题之一^[3~5],近期我国关于《土壤污染防治行动计划》的实施,加大了土壤污染防治的力度.因此,分析城市土壤重金属污染的影响因素,并进行源解析,为保障良好的城市生态环境和居民生活质量,以及为政府部门对环境政策制定,具有重要的理论和现实意义.

自 1973 年德国工业排放致土壤重金属污染报道以来,土壤重金属污染问题倍受国内外学者关注,已有大量关于重金属的文献从不同区域^[6~8]、不同尺度^[9,10]、不同介质^[11,12]等方面进行了较丰富的研究.广大学者对重金属源解析^[13~18],风险评价^[19,20],重金属修复^[21,22],空间分布^[23]及变异性^[24]等方面开展了深入研究.对土壤重金属与影响因子的研究中,单一影响因子的定性研究较为成熟,如吕建树使用单因素方差分析法,得出土地利用类型是影响日照市土壤中 Cd、Hg 浓度的主要因子^[25];刘世梁通过对矿区土壤重金属质量比研究,发现土地利用类型对土壤重金属质量比的影响较大^[26].目前,对土壤重金属与对多个影响因子之间的定量表述,以及对不同影响因子对重金属污染交互作用的研究有待深入探讨.近年来“3S”技术的迅速发展,已成为地理环境指标空间量化表达的重要手段,已在土壤重金属研究领域内有较多应用^[23,27].此外,为定量分析地理空间属性问题,还需用到空间统计方法.2010 年, Wang 等^[28]基于统计学的空间方差分析原理,成功研发的地理探测器模型,因能客观反映地理环境要素对解释因子的影响力,及度量空间异质性而受到较多关注^[29~35].目前,已有个别学者将地理探测器引入到农田土壤重金属的相关研究中,如肖武等^[33]通过地理探测器对巢湖流域典型农田土壤重金属进行了生态风险评价,李雨等^[34]研究了土壤中不同重金属元素之间的相关关系, Wang 等^[35]使用地理探测器对河流灌区土壤重金属做了健康风险评价.城市人口密度大,人类活动影响强烈等因素导致城市土壤中重金属含量高、来源复杂、种类较多,工业城市土壤重金属含量的影响因子更具多元性特点,因此,本文试图引入地理探测器模型,分析多种地理环境因子对城市土壤重金属污染的影响.同时,进行土壤重金属探源分析,是其污染治理的重要步骤.当前,在众多源解析方法中,以多元统计法^[36]及 PMF(positive matrix factorization)模型、FA(factor analysis)模型、CMB(chemical mass balances)模型等以研究污染区域为主的受体模型的应用较多^[37,38].近年来,美国环境保护署新颁布的 Unmix6.0 受体模型,能够通过受体浓度的高低直接进行源解析,该模型因具有对污染源进行分类判别,及不同污染源对特定元素贡献率以定量化表达等优点^[37~39],已在国内外众多土壤重金属源解析研究中广泛运用,但国内应用较少.此外,与多元统计等方法相比,Unmix6.0 模型具有计算过程更简捷,解析结果更为准确等优点^[40,41].

宝鸡市作为陕西省重要的老工业基地,其土壤重金属污染已受到较多学者的关注^[6,42~43],但早期研究因受技术条件及数据资料所限,加之近年来市区面积的扩展,已有研究范围多集中在市区部分区域,对城区土壤重金属浓度和空间分布进行整体研究的较少;也缺乏对土壤重金属污染影响因子及源解析的研究.本文以宝鸡市区为研究区域,通过对土壤中 8 种重金

属元素 (Cd、As、Cu、Pb、Zn、Cr、Mn 和 Ni) 含量的测定, 在“3S”技术基础上, 使用地统计法及地理探测器模型, 对土壤重金属污染与地理环境因子之间的关系进行探讨, 并使用 Unmix6.0 模型对土壤重金属进行源解析, 同时结合地理信息系统 (GIS) 技术, 对源贡献率进行定量化、可视化表达, 以期宝鸡市重金属污染防治和来源解析提供实践和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宝鸡市地处东经 $106^{\circ}18' \sim 108^{\circ}03'$, 北纬 $33^{\circ}35' \sim 35^{\circ}06'$ 之间, 城区坐落于渭河谷地之上, 南、北、西三面为山地塬坡地貌, 城区面积约 110 km^2 , 人口近 150 万。宝鸡市是陕西省重要的河谷型工业城市, 市区分布有众多工矿类、化学化工类、冶金类、机械制造类等企业, 宝成线、陇海线等重要交通干线穿城而过。近年来, 市区建设呈以渭河为中轴向东拓展的趋势。城市主导风向为西风, 年平均降水量在 755 mm 左右, 气候属于暖温带半湿润类型。

1.2 数据来源

1.2.1 土壤样品采集及处理

于 2017 年 3 月, 采集市区表层 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土壤样品 62 份 (图 1)。采样点主要以铁路沿线及工业区较密, 且兼顾全城的方法, 借助遥感影像图和 GIS 技术布设, 实际采样时, 在采样点所在地设一正方形 (边长 5 m), 使用手动钢制土钻取各顶点及对角线交点的 5 个分样做 1 个混合样, 如遇街道等狭长的路面硬化地点时, 沿绿化带取 5 个间隔 5 m 的分样做 1 个混合样, 每个混合样重约 1.0 Kg , 最后装入聚乙烯自封袋。样品运回实验室后, 采用 $\text{HNO}_3\text{-HCl-H}_2\text{O}_2$ 法进行消解, 用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, NexION350X, P E) 测定 Cd、As、Cu、Pb、Zn、Cr、Mn、Ni 的含量。实验过程中采用国家标准土壤样品 GSS-25 进行质量控制, 元素回收率控制在 $92 \sim 105\%$ 之间。每个样品重复测量 3 次, 相对标准偏差 (RSD) 小于 10% 。实验所用药剂均为优级纯。

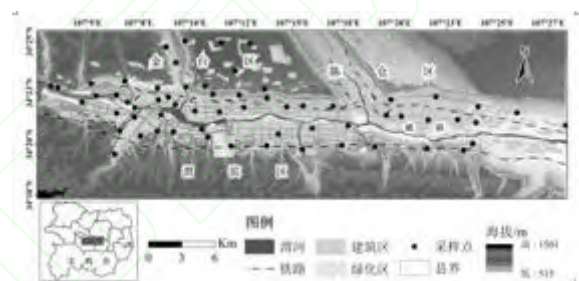


图 1 宝鸡城区采样位置示意

Fig. 1 Schematic diagram of sampling location in Baoji urban area

1.2.2 指标选取及数据获取

地理环境因子包括高程因子、土壤因子, 植被因子和土地利用等, 对应每类因子, 本文参照文献[33~35]的因子选取, 同时宝鸡市区实际情况, 最终选取数字高程模型 (digital elevation model, DEM)、距铁路距离、距工厂距离、公路密度、土壤类型、土壤质地、植被覆盖指数 (NDVI)、距河流距离和土地利用这 9 个因子。DEM (GDDEMDEM 30m) 及影像数据 (Landsat 8 OLI_TIRS) 来自于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 环境数据均来自资源环境数据云平台 (<http://www.resdc.cn/>), 在 ArcGIS10.5 与 ENVI5.3 中对数据进行相应的整理和预处理。

1.3 研究方法

1.3.1 污染负荷指数

采用 Tomlinson 等^[44,45]提出的污染负荷指数 (PLI) 对土壤重金属污染评价, 计算公式为:

$$CF_i = C_i / C_n \quad (1)$$

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

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

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} 为区域总污染负荷指数; 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 grading standards				
项目	无污染	轻度污染	中度污染	重度污染
参数	$CF \leq 1$	$1 < CF \leq 2$	$2 < CF \leq 3$	$CF > 3$
	$PLI \leq 1$	$1 < PLI \leq 2$	$2 < PLI \leq 3$	$PLI > 3$

1.3.2 地理探测器

地理探测器是基于空间分异理论, 采用 GIS 空间分析技术, 探测变量间交互作用的工具^[29-35]. 其模型由因子探测器、生态探测器、风险探测器和交互探测器 4 个子模型组成, 其中因子探测器是核心部分. 模型如下:

$$P_{D,H} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m n_{D,i} \sigma_{D,i}^2}{n \sigma^2} \quad (4)$$

式中, $P_{D,H}$ 为因子 D 对 H (PLI 指标空间分布) 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 PLI 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污染指标的解释力, 若值越靠近 1, 则表示交互作用越明显 (表 2)^[33-35], 本文试图根据因子探测器和交互作用探测器的结果, 得出影响宝鸡市市区土壤重金属污染分布较强的因素.

表 2 交互作用结果划分

Table 2 Interaction results segmentation	
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	$P_{D,H}(x \cap y) > P_{D,H}(x) + P_{D,H}(y)$

1.3.3 Unmix6.0 受体模型

Unmix6.0 模型是美国环保署推荐的源解析模型, 其模型^[40,41]如下:

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^m F_{jk} S_{ik} + E \quad (5)$$

式中, C_{ij} 为第 i 个样品 ($i = 1, \dots, N$) 中第 j 个物种 ($j = 1, \dots, n$) 的含量; F_{jk} 为第 j 个物种在源 k ($k = 1, \dots, m$) 的源组成; S_{ik} 为源 k 在第 i 个样品的贡献率; E 为各个源组成的标准偏差. 本研究具体源解析工作在 Unmix 6.0 软件中完成.

为保证源解析结果精确可靠, 同时考虑到土壤中各元素的含量存在较大数量差异, 在将实验所得原数据导入 Unmix 6.0 软件前, 将原数据进行离差标准化处理, 处理后的数据处于

[0, 1]之间且无量纲.离差标准化公式如下:

$$X_k = \frac{X_i - \text{Min}X_i}{\text{Max}X_i - \text{Min}X_i} \quad (6)$$

式中, X_k 为离差标准化后的值(其中 $k = 1, \dots, n$), X_i 为土壤样品的实测值, $\text{Max}X_i$ 和 $\text{Min}X_i$ 分别为土壤样品实测值的最大值与最小值.

2 结果与分析

2.1 重金属元素含量

土壤重金属元素的描述统计见表 3.除 Cd 与 Zn 元素外, 其余各重金属元素均值均未超过国家二级标准.元素 Cd、Cu、As、Ni 和 Zn 的均值都超过了陕西省土壤背景值, 其中元素 Cd 和 Zn 的均值分别是背景值的 8.2 倍和 3.8 倍.各元素含量最大值超过了陕西省土壤背景值, 说明市区土壤重金属聚集明显.从偏度和峰度值可知, 各重金属含量不符合正态分布, 按照吕建树等^[25]和马群等^[46]对变异程度的分类, 研究区内各重金属元素均为高度变异(变异系数>36%), 变异系数较高, 表明市区土壤已受到人为活动的干扰.

表 3 土壤重金属描述统计

Table 3 Descriptive statistics of soil heavy metal

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	国家二 级标准 /mg kg ⁻¹
Cd	0.77	0.14~5.50	1.34	41.6	6.36	0.094	0.3
As	17.03	2.9~67.93	1.08	1.6	-0.49	11.2	30
Cu	40.52	4.7~214	1.18	34.0	5.61	21.4	100
Pd	16.75	0.00~49.2	0.67	5.1	1.44	21.4	300
Zn	261	22.9~1882	1.14	16.7	3.74	69.4	250
Cr	49.18	8.4~249	0.72	0.87	-0.96	62.5	200
Mn	331	0.00~614	0.65	1.15	-1.00	557	—
Ni	30.52	6.73~198	0.82	26.8	4.72	28.8	50

空间插值模型选择是土壤重金属空间分布特征、污染评价的关键^[27,47].非参数地统计学中的指示克里格法是理想的处理非正态的土壤重金属含量数据^[25], 因此本研究选用单元指示克里格插值法, 借助 ArcGIS 10.5 绘制土壤重金属含量空间分布(图 2), 如图 2 所示, 各元素在空间分布上具有一定差异, 其中, Cd 和 Mn 的极值点空间分布相反, 说明二者来源不同, 其中 Cd 的高值区在渭滨区和金台区的中部交界处, 以东西走向带状分布, 在陈仓区东部以片状分布, 其他地方属低值区; Pb 和 Cr 的高值区主要在渭滨区和金台区的东部交界处, 以团块状分布; Zn 和 Ni 的空间分布较一致, 即二者具有共同来源, 高值区呈西北-东南带状走向分布, 主要集中于金台区和渭滨区的中部, 市区其他大部分区域为低值区; Cu 高值区和 Zn 与 Ni 的空间分布较一致, 主要集中于金台区与渭滨区的中部, 但呈东北-西南带状走向; As 高值区主要位于金台区中西部和陈仓区与金台区相交交界处, 以块状形式分布.

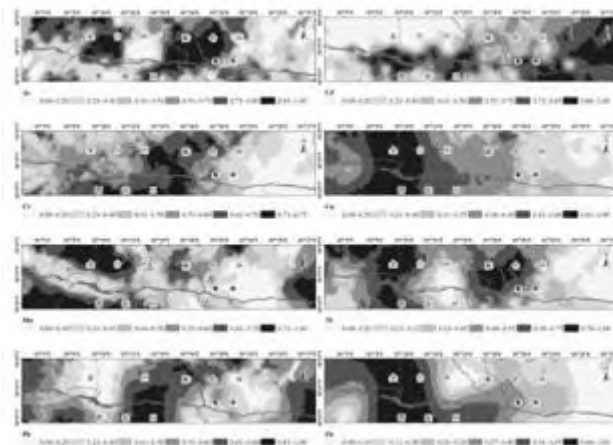


图 2 土壤重金属含量分布

Fig.2 Distribution of heavy metal content in soil

2.2 重金属污染负荷指数

经公式 (1) ~ (3) 计算得到宝鸡市区土壤重金属污染指数, 如图 3 所示, Cr、Pb 和 Mn 的 CF 均值均小于 1, 属于无污染程度, Cu、As 和 Ni 的 CF 均值在 1~2 之间, 属于轻度污染; Cd 和 Zn 的 CF 均值超过 3, 属于重度污染; 宝鸡市区 PLI_{zone} 为 1.36, 属于轻度污染.

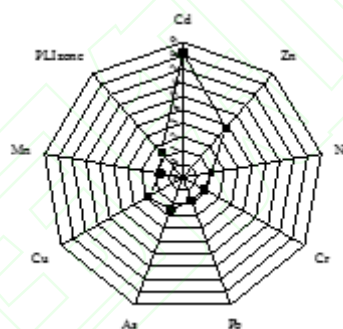


图 3 土壤重金属污染指数

Fig. 3 Soil heavy metal pollution index

根据各采样点的 PLI 值, 采用单元指示克里金插值绘制 PLI 的空间分布 (图 4), 从图 4 可知, 研究区重度污染区主要聚集于城区渭河干流与支流交汇处的周边区域, 市区近一半的区域处于中度污染级, 陈仓区东部与渭滨区西南部暂处于无污染级.

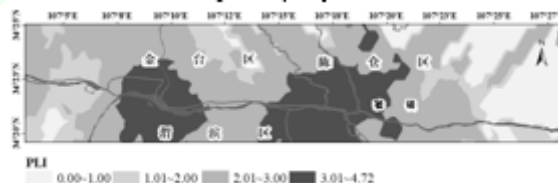


图 4 重金属污染指数 (PLI) 空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of heavy metal pollution index

2.3 地理探测器结果分析

各地理环境因子数据 (图 5) 最终在 ArcGIS 10.5 中处理成 100 m×100 m 的渔网数据, 提取相应的渔网中心值, 以进行地理探测器分析.

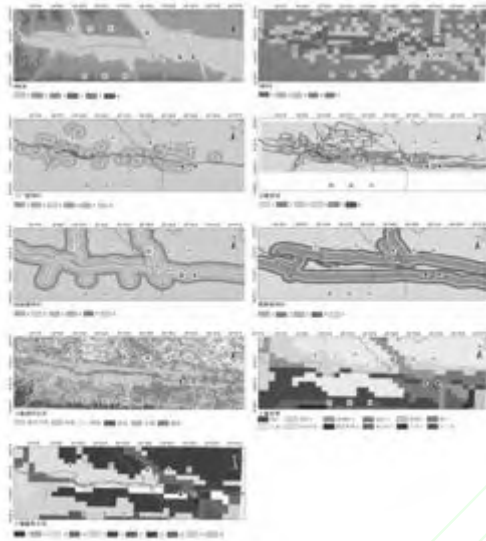


图 5 地理环境因子（分级）空间化表达

Fig. 5 Geographical environmental factor (hierarchical) spatial representation

2.3.1 因子分析

因子探测器反映了地理环境因子对 PLI 空间分布的解释力，由公式（4）得，各环境因子的 $P_{D,H}$ 值降序排列为土壤质地（0.040）>距铁路距离（0.026）>公路密度（0.020）>DEM（0.013）>NDVI（0.011）>土壤类型（0.010）>距河流距离（0.009）>距工厂距离（0.002）>土地利用类型（0.001）。其中土壤质地、距铁路距离和公路密度对研究区土壤重金属 PLI 的解释力较强。

2.3.2 交互作用探测分析

表 4 显示了两种环境因子叠加后的 $P_{D,H}$ ，结果表明，各环境因子两两之间均为非线性增强，表明各环境因子的交互作用大于单独作用，其中，距离铁路距离和土壤质地对重金属污染分布交互作用较强（交互解释力达 0.099），说明污染源与铁路运输和土壤质地存在相关性。

表 4 地理环境因子对 PLI 的交互作用

Table 4 Interaction of geographic environment factors with PLI

	DEM	公路 密度	土地利 用类型	NDVI	土壤 类型	土壤 质地	距河流 距离	距铁路 距离	距工厂 距离
DEM	0.013								
公路密度	0.043	0.020							
土地利用类型	0.017	0.029	0.001						
NDVI	0.025	0.035	0.017	0.011					
土壤类型	0.036	0.034	0.015	0.024	0.010				
土壤质地	0.092	0.067	0.055	0.064	0.056	0.039			
距河流距离	0.030	0.035	0.015	0.024	0.028	0.063	0.009		
距铁路距离	0.043	0.050	0.031	0.042	0.043	0.099	0.045	0.026	
距工厂距离	0.022	0.027	0.010	0.015	0.019	0.049	0.021	0.043	0.002

3 讨论

3.1 基于 Unmix 6.0 模型的源解析

采用 Unmix 6.0 软件, 将土壤 8 种元素解析为 3 个源(表 5)。其中 3 个源的拟合相关系数 $\text{Min Rsq} = 0.82$, 代表该模型可解释 82% 的物种方差; 信噪比 $\text{Min Sig.Noise} = 2.49$, Unmix 6.0 模型要求信噪比的最低值需大于 2, 即 $\text{Min Sig.Noise} > 2^{[39-41]}$, 由此可知这 3 个源得出的结果可信。如表 5 所示, Cd、As 和 Cu 在源 1 上有较大的载荷, Cr、Pb 和 Mn 在源 2 上有较大载荷, Zn 和 Ni 在源 3 上有较大载荷。各源贡献比例依次为源 2 (77.67%) > 源 3 (13.75%) > 源 1 (8.58%), 说明源 2 为研究区的主要污染源。

表 5 源划分

Table 5 Source division

元素	源 1	源 2	源 3
Cd	0.1220	-0.0064	-0.0093
Cr	0.0540	0.1320	-0.0101
Pb	-0.0590	0.3570	-0.0175
As	0.1440	0.0948	-0.0137
Zn	0.0002	0.0274	0.1010
Cu	0.0923	0.0477	0.0372
Mn	-0.1750	0.5500	0.0545
Ni	-0.0357	0.0733	0.8690
总计	0.1430	1.2938	0.2290
源贡献率/%	8.58	77.67	13.75

由 Unmix 6.0 模型源贡献的空间分布(图 6)可知, 源 1 高值区主要集中于金台区北部与陈仓区虢镇附近, 源贡献率为 8.58%。对照描述性统计结果(表 3), Cd、As 和 Cu 的平均值高于陕西省土壤背景值, 变异系数较高, 说明 Cd、Cu、As 受到人为活动的影响, 其中 Cu、As 属于轻度污染, Cd 已达重度污染。结合图 5(土地利用类型)和图 6(源 1)发现, 源 1 高值区的土地利用类型为耕地, 农业生产过程中农药化肥的过量使用易导致 Cd、As 的污染^[22,37,40], 堆肥、猪粪等有机肥的使用, 会使土壤 Cu 含量成倍增加^[37], 在实地采样中发现, 源 1 高值区有较多随意丢弃的农药及化肥包装袋等污染物, 说明农业生产对该区域的土壤环境造成较严重的污染, 这与郭晓东等^[48]的研究结果一致; 此外, 周雪明等^[18]、Wei 等^[49]和王洪涛等^[50]的研究表明, 工业活动(如冶炼加工和垃圾焚烧等)产生的废渣和废气等, 也是 Cd 和 Cu 的主要来源。近年来, 随着宝鸡市区向东拓展, 市区氮肥厂、冶炼厂和垃圾焚烧区等工厂企业也随之搬迁到陈仓区虢镇及附近, 从而造成该地的土壤 Cd 和 Cu 等污染, 这与宋志廷等^[51]对天津武清区、车丽娜等^[17]对哈尔滨市等地土壤重金属源解析结果一致。因此源 1 为工农业活动所致的“人为源”。

源 2 贡献率高达 77.67%, 高值区主要在金台、渭滨和陈仓三区交界处, 以块状形式集中。由表 3 可知, Cr、Pb、Mn 的平均值虽低于陕西省土壤背景值, 处于无污染级, 结合图 2(Cr 和 Mn 的含量分布)和图 5(土壤质地)发现, Cr 和 Mn 含量和土壤质地的空间分布较一致, 说明 Cr 和 Mn 主要来自土壤中, 这与 Sajn 等^[52]和 Boruvka 等^[53]发现 Cr、Mn 一般受地质背景控制的结果一致, 众多研究表明^[14-17,36,44], 汽车尾气经大气沉降会对土壤中 Pb 的含量产生重要影响, 本研究图 2 中 Pb 含量的高值区与图 5 中公路密度的高等级分布相吻合, 这说明研究区 Pb 主要来自交通排放。此外, 本研究结果显示, Cr、Mn 和 Pb 虽处于无污染级, 但在空间上也属高度变异, 说明 Cr、Mn 和 Pb 在局域上也受到人类活动干扰, 车丽娜等^[17]和王利军等^[36]认为, 长期堆放的生活垃圾、工厂排放等易引起重金属 Cr 和 Mn 含量增加, 因此政府部门应做好关于 Cr、Pb、Mn 的防御措施; 此外, 李小平等^[6,54, 55]曾发现, 因汽车尾气排放等原因, 重金属 Pb 是宝鸡市区土壤最主要的环境污染物; 本研究结合文献^[6, 54, 55]发现, 当前宝鸡市区土壤 Pb 污染治理效果明显, 综合可知, 源 2 为“混合源”。

源 3 高值区主要集中于金台区和渭滨区的中部，呈南北带状走向分布，对照表 3，Zn 和 Ni 的平均值均高于陕西省土壤背景值，同时 Zn 和 Ni 的含量在空间上属高度变异，Ni 属于轻度污染，Zn 达到重度污染，说明 Zn 和 Ni 在局域上受到人为干扰，具有人为属性。有研究表明^[25,33]，Zn 和 Ni 主要以自然源的形式存在与土壤中，这与本研究发现 Zn 和 Ni 在城区绝大部分区域无污染的结果吻合。Jiang 等^[16]和卢鑫等^[37]均认为，Zn 是一般汽车刹车片、轮胎、机动车润滑油的主要添加剂，居民生活垃圾的堆放也是 Zn 的主要来源，卢鑫等^[37]、艾建超等^[40]和王菊等^[42]认为化石燃料的燃烧是 Ni 的重要来源途径，本研究在采样中发现，源 3 高值区内分布有宝鸡市汽车站、汽修厂、驾校及进出市区的较长坡道，大量客货车辆的频繁制动和启动，导致汽车轮胎的磨损、润滑油和刹车片的耗损严重，以及车辆燃油的不充分和机油等泄露，使得 Zn 和 Ni 直接或经大气沉降间接进入土壤，从而造成污染。因此，源 3 主要由交通排放造成的“人为源”。

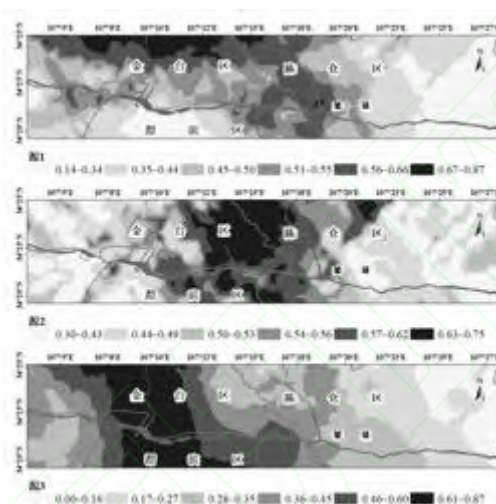


图 6 Unmix 6.0 模型源贡献空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of source contributions from the Unmix 6.0 model

3.2 重金属污染影响因子探测

本文基于地理探测器模型对宝鸡市区土壤重金属污染影响因子进行了探讨。由于地理探测器模型问世不久^[28,29]，在城市土壤重金属污染方面的应用并不多，加之重金属来源复杂，进入土壤的途径多样，因此在地理环境因子的选择标准方面还有待后续进一步研究。本文在参考文献[33~35]对农田等类型土壤重金属影响因子选取的基础上，选取土壤质地、距铁路距离、公路密度、DEM、NDVI、土壤类型、距河流距离、距工厂距离及土地利用类型 9 类地理环境因子作为自变量，尝试对因变量（城市土壤重金属污染负荷指数 PLI）的解释力，最终得出土壤质地、距铁路距离和公路密度对 PLI 解释力较大，这与吕建树等^[25]采用单因素方差分析法对日照市、王桢等^[56]对日本新潟县等地的研究结果较一致，表明地理探测器模型可以很好的应用于城市土壤重金属污染的研究。

4 结论

(1) 宝鸡市区表层 (0~20 cm) 土壤重金属 PLI_{zone} 为 1.36，属轻度污染；Cd、Zn、Cu、As 和 Ni 均值超过了陕西省土壤背景值，Cd 和 Zn 的 CF 均值超过 3，属于重度污染级，应引起注意。

(2) 宝鸡市区除陈仓区东部和渭滨区西南部外，其它区域土壤重金属 PLI 达到了中度污染级，其中城区渭河干流与支流交汇处的周边区域为土壤重金属 PLI 重度污染区。由地理探测器模型可得，土壤质地和距铁路距离对宝鸡市区土壤重金属 PLI 的交互解释力为 0.099，

有相互增强作用.

(3) 宝鸡市区表层土壤中 Cd、Cu 和 As 主要为工农业活动所致的“人为源”，Zn 和 Ni 为交通排放造成的“人为源”，Mn、Cr 和 Pb 主要为“混合源”.



参考文献:

- [1] Ganugapenta S, Nadimikeri J, Ballari L, *et al.* Assessment of heavy metal pollution from the sediment of Tupilipalem Coast, southeast coast of India[J]. International Journal of Sediment Research, 2018, **33** : 294-302.
- [2] Zhang P, Qin C, Hong X, *et al.* Risk assessment and source analysis of soil heavy metal pollution from lower reaches of Yellow River irrigation in China[J]. Science of the Total Environment, 2018, **633** : 1136-1147.
- [3] Ponsbranchu E, Ayrault S, Roybarman M, *et al.* Three centuries of heavy metal pollution in Paris (France) recorded by urban speleothems[J]. Science of the Total Environment, 2015, **518-519** : 86-96.
- [4] 白秀玲, 马建华, 孙艳丽, 等. 开封城市土壤磷素组成特征及流失风险[J]. 环境科学, 2018, **39**(2) : 909-915.
Bai X L, Ma J H, Sun Y L, *et al.* Phosphorus composition characteristics and risk of loss in Kaifeng City [J]. Environmental Science, 2018, **39**(2) : 909-915.
- [5] Natalia E K, Dmitry V V, Ilya D K, *et al.* Contamination of urban soils with heavy metals in Moscow as affected by building development[J]. Science of The Total Environment, 2018, **636**(15) : 854-863.
- [6] 李小平, 徐长林, 刘献宇, 等. 宝鸡城市土壤重金属生物活性与环境风险[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(4) : 1241-1249.
Li X P, Xu C L, Liu X Y, *et al.* Bioactivity and environment risk of heavy metals in urban soil from Baoji City[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(4) : 1241-1249.
- [7] 麦提吐尔逊 艾则孜, 阿吉古丽 马木提, 艾尼瓦尔 买买提, 等. 博斯腾湖流域绿洲农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 地理学报, 2017, **72**(9) : 1680-1694.
Mamattursun E, Ajigul M, Anwar M, *et al.* Heavy metal pollution and potential ecological risk assessment of farmland soil in Bosten Lake Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, **72**(9) : 1680-1694.
- [8] Nannoni F, Protano G. Chemical and biological methods to evaluate the availability of heavy metals in soils of the Siena urban area (Italy)[J]. Science of the Total Environment, 2016, **568** : 1-10.
- [9] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, **261**(15) : 387-397.
- [10] Hu W Y, Huang B, Shi X Z, *et al.* Accumulation and health risk of heavy metals in a plot-scale vegetable production system in a peri-urban vegetable farm near Nanjing, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, **98**(1) : 303-309.
- [11] 郭鹏然, 雷永乾, 蔡大川, 等. 广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(2) : 684-691.
Guo P R, Lei Y Q, Cai D C, *et al.* Morphological characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in urban sludge in Guangzhou[J]. Environmental Science, 2014, **35**(2) : 684-691.
- [12] Muhammad S, Shah M T, Khan S. Health risk assessment of heavy metals and their source apportionment in drinking water of Kohistan region, northern Pakistan [J]. Microchemical Journal, 2011, **98**(2) : 334-343.
- [13] 董驷睿, 胡文友, 黄标, 等. 基于正定矩阵因子分析模型的城郊农田土壤重金属源解析[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(7) : 2103-2111.
Dong L R, Hu W Y, Huang B, *et al.* Source appointment of heavy metals in suburban farmland soils based on positive matrix factorization[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(7) : 2103-2111.
- [14] 董辰寅, 张卫国, 王冠, 等. 上海宝山区城市土壤铅污染来源的同位素判别[J]. 环境科学, 2012, **33**(3) : 754-759.
Dong C Y, Zhang W G, Wang G, *et al.* Isotope discrimination of lead pollution sources in urban soils of Baoshan District, Shanghai [J]. Environmental Science, 2012, **33**(3) : 754-759.
- [15] Bressi M, Sciare J, Gherzi V, *et al.* Sources and geographical origins of fine aerosols in Paris(France) [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, **14**(16) : 8813-8839.
- [16] Jiang Y, Chao S, Liu J, *et al.* Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil for a township in Jiangsu Province, China[J]. Chemosphere, 2016, **168** : 1658-1668.
- [17] 车丽娜, 刘硕, 韩金凤, 等. 哈尔滨市融雪径流中重金属污染空间分布及源解析[J]. 环境科学学报, 2019, DOI:10.13671/j.hjkxxb.2019.0037.
Che L N, Liu S, Han J F, *et al.* Spatial distribution and source apportionment of heavy metals in the snowmelt runoff in

- Harbin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, DOI:10.13671/j.hjkxxb.2019.0037.
- [18] 周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 等. 2011~2012 北京大气 PM_{2.5} 中重金属的污染特征与来源分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10) : 4054-4060.
- Zhou X M, Zheng N J, Li Y H, *et al.* 2011-2012 Beijing atmospheric PM_{2.5} pollution characteristics and source analysis of heavy metals[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10) : 4054-4060.
- [19] Yang Q Q, Li Z Y, Lu X N, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China, Pollution and risk assessment[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, **642**(15) : 690-700.
- [20] Shahab A D, Mahin K, Majid A, *et al.* Pollution and health risk assessment of heavy metals in agricultural soil, atmospheric dust and major food crops in Kermanshah province, Iran[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **163**(15) : 153-164.
- [21] 姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 等. 不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(11) : 4268-4276.
- Yao G H, Xu H Z, Zhu L G, *et al.* Effect of different organic materials on the efficiency of remediation of heavy metal contaminated soil by *Sedum alfredii*[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(11) : 4268-4276.
- [22] 吴涛, 伍钧. 铜、铅单一及其复合污染对鱼腥草吸收累积铜和铅的影响[J]. *土壤通报*, 2008, **39**(3) : 670-674.
- Wu T, Wu J. Effects of single and combined pollution by Cu and Pb on the accumulation of Cu and Pb in the *Houttuynia cordata* Thunb[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, **39**(3) : 670-674.
- [23] 宋静宜, 傅开道, 苏斌, 等. 澜沧江水系底沙重金属含量空间分布及其污染评价[J]. *地理学报*, 2013, **68**(3) : 389-397.
- Song J Y, Fu K D, Su B, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in sediments of Lancang River system[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, **68**(3) : 389-397.
- [24] 赵科理, 傅伟军, 叶正钱, 等. 电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(8) : 3151-3159.
- Zhao K L, Fu W J, Ye Z Q, *et al.* Spatial heterogeneity and distribution characteristics of soil heavy metals in electronic waste dismantling area[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8) : 3151-3159.
- [25] 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) : 971-984.
- Lv J S, Zhang Z L, Liu Y, *et al.* Source analysis and environmental risk assessment of heavy metals in soils of Rizhao City[J]. *Journal of Geography*, 2012, **67**(7) : 971-984.
- [26] 刘世梁, 郭旭东, 姚喜军, 等. 草原煤矿开采区土壤重金属污染分布特征及影响因子[J]. *安全与环境学报*, 2016, **16**(3) : 320-325.
- Liu S L, Guo X D, Yao X J, *et al.* Distribution characteristics and influencing factors of soil heavy metal pollution in grassland coal mining area[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, **16**(3) : 320-325.
- [27] 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 Y Q, Bai Y R, Wang J Y. Evaluation and distribution characteristics of heavy metal pollution in soils of different functional areas of Yinchuan City based on GIS[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2) : 710-716.
- [28] 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.
- [29] Wang J F, Hu Y. Environmental health risk detection with GeogDetector[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2012, **33** : 114-115.
- [30] 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.
- [31] 通拉嘎, 徐新良, 付颖, 等. 地理环境因子对螺情影响的探测分析[J]. *地理科学进展*, 2014, **33**(5) : 625-635.
- Tong LG, Xu X L, Fu Y, *et al.* Detection and analysis of the influence of geographical environmental factors on snail situation[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, **33**(5) : 625-635.

- [32] 董玉祥, 徐茜, 杨忍, 等. 基于地理探测器的中国大陆热带北界探讨[J]. 地理学报, 2017, 72(1) : 135-147.
- Dong Y X, Xu W, Yang R, *et al.* Discussion on the northern boundary of China's terrestrial tropics based on Geographic al detectors[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1) : 135-147.
- [33] 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, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20180524.1924.006.html>.
- Xiao W, Yan T, Wang X, *et al.* Evaluation and geographical detection of heavy metal pollution in typical farmland soils in Chaohu Lake Basin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20180524.1924.006.html>.
- [34] 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.* Analysis of factors affecting heavy metals in farmland soil based on geographical detectors[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(21) : 4138-4148.
- [35] Wang H F, Wu Q M, Hu W Y. Using multi-medium factors analysis to assess heavy metal health risks along the Yangtze River in Nanjing, Southeast China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 243: 1047-1056.
- [36] 王利军, 卢新卫, 雷凯, 等. 宝鸡市街尘重金属元素含量、来源及形态特征[J]. 环境科学, 2011, 32(8) : 2470-2476.
- Wang L J, Lu XW, Lei K, *et al.* Content, source and speciation of heavy metal elements of street dusts in Baoji City[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(8) : 2470-2476.
- [37] 卢鑫, 胡文友, 黄标, 等. 基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤重金属源解析[J]. 环境科学, 2018, 39(3) : 1421-1429.
- Lu X, Hu W Y, Huang B, *et al.* Source apportionment of heavy metals in farmland soils around Mining area based on UNMIX model[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(3) : 1421-1429.
- [38] 魏迎辉, 李国琛, 王颜红, 等. PMF 模型的影响因素考察——以某铅锌矿周边农田土壤重金属源解析为例[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11) : 2549-2559.
- Wei Y H, Li G C, Wang Y H, *et al.* Investigating factors influencing the PMF model: A case study of source apportionment of heavy metals in farmland soils near a lead-zinc ore[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11) : 2549-2559.
- [39] 赵红安, 臧亮, 张贵军, 等. 县域尺度土壤重金属污染特征及源解析——以赵县为例[J]. 土壤通报, 2018, 49(3) : 710-719.
- Zhao H A, Zan L, Zhang G J, *et al.* Characteristics and source analysis of heavy metal pollution in soil at county scale: A case study of Zhao County[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(3) : 710-719.
- [40] 艾建超, 王宁, 杨净. 基于 UNMIX 模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析[J]. 环境科学, 2014, 35(9) : 3530-3536.
- Ai J C, Wang N, Yang J. Analysis of soil heavy metal sources in Jiapigou gold mining area based on UNMIX model[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(9) : 3530-3536.
- [41] 段淑辉, 周志成, 刘勇军, 等. 湘中南农田土壤重金属污染特征及源解析[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(6) : 80-87.
- Duan S H, Zhou Z C, Liu Y J, *et al.* Characteristics and source analysis of heavy metal pollution in farmland soils in central Hunan Province[J]. *China Agricultural Science and Technology Review*, 2018, 20(6) : 80-87.
- [42] 王菊, 张悦悦, 金美英, 等. 应用 UNMIX 模型解析长春市大气中 PM₁₀ 来源[J]. 生态环境学报, 2014, 23(5) : 812-816.
- Wang J, Zhang Y Y, Jin M Y, *et al.* Analysis of PM₁₀ source in the atmosphere of Changchun City using UNMIX model[J]. *Journal of Eco-Environment*, 2014, 23(5) : 812-816.
- [43] 刘哲民. 宝鸡土壤重金属污染及其防治[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(2) : 101-104.
- Liu Z M. Heavy metal pollution in Baoji soil and its control[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2005, 19(2) : 101-104.
- [44] 张军, 董洁, 梁青芳, 等. 宝鸡城区土壤重金属空间分布特征及生态风险评价[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(10) : 100-106.
- Zhang J, Dong J, Liang Q F, *et al.* Spatial distribution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metals in Baoji City[J]. *Arid Area Resources and Environment*, 2018, 32(10) : 100-106.
- [45] 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.

- [46] 马群, 赵庚星. 集约农区不同土地利用方式对土壤养分状况的影响[J]. 自然资源学报, 2010, **25**(11) : 1834-1843.
- Ma Q, Zhao G X. Effects of different land use types on soil nutrients in intensive agricultural region. Journal of Natural Resources[J]. Journal of Natural Resources, 2010, **25**(11) : 1834-1843.
- [47] 宋金茜, 朱权, 姜小三, 等. 基于 GIS 的农业土壤重金属风险评价研究—以南京市八卦洲为例[J]. 土壤学报, 2017, **54**(1) : 81-91.
- Song J X, Zhu Q, Jiang X S, *et al.* GIS-based risk assessment of heavy metals in agricultural soils: A case study of Baguazhou in Nanjing[J]. Acta Metall Sinica, 2017, **54**(1) : 81-91.
- [48] 郭晓东, 孙岐发, 赵勇胜, 等. 珲春盆地农田重金属分布特征及源解析[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(9) : 1875-1883.
- Guo X D, Su'n Q F, Zhao Y S, *et al.* Distribution and sources of heavy metals in the farmland soil of the Hunchun basin in Jilin Province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(9) : 1875-1883.
- [49] Wei B, Yang L. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China[J]. Microchemical Journal, 2010, **94**(2) : 99-107.
- [50] 王洪涛, 张俊华, 丁少峰, 等. 开封城市河流表层沉积物重金属分布、污染来源及风险评估[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(12) : 4520-4530.
- Wang H T, Zhang J H, Ding S F, *et al.* Heavy metal distribution, pollution sources and risk assessment of surface sediments in Kaifeng urban rivers[J]. Journal of Environmental Science, 2016, **36**(12) : 4520-4530.
- [51] 宋志廷, 赵玉杰, 周其文, 等. 基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析[J]. 环境科学, 2016, **37**(7) : 2756-2762.
- Song Z T, Zhao Y J, Zhou Q W, *et al.* Applications of geostatistical analyses and stochastic models to identify sources of soil heavy metals in Wuqing district, Tianjin, China[J]. Environmental Science, 2016, **37**(7) : 2756-2762.
- [52] Sajn R, Halamic J, Peh Z, *et al.* Assessment of the natural and anthropogenic sources of chemical elements in alluvial soils from the Drava River using multivariate statistical methods[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2011, **110** : 278-289.
- [53] Boruvka L, Vacek O, Jehlicka J. Principal component analysis as a tool to indicate the origin of potentially toxic elements in soils[J]. Geoderma, 2005, **128** : 289-300.
- [54] Li X P, Feng L N. Multivariate and geostatistical analyses of metals in urban soil of Weinan industrial areas, Northwest of China[J]. Atmospheric Environment, 2012, **47** : 58-65.
- [55] 李小平, 黄春长. XRF 光谱法研究城市工业区的土壤环境污染[J]. 土壤, 2007, **39**(4) : 567-572.
- Li X P, Huang C C. Study on soil environmental pollution in urban industrial area by XRF spectroscopy[J]. Soils, 2007, **39**(4) : 567-572.
- [56] 王桢, 张建强, 渡边泉, 等. 铁路和道路沿线土壤重金属含量及来源解析[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(2) : 364-372.
- Wang Z, Zhang J Q, Watanabe I, *et al.* Concentrations and sources of heavy metals in soil near railway and road[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, **27**(2) : 364-372.