

张敏, 陈海, 史琴琴, 等. 黄土丘陵沟壑区耕层土壤重金属空间分异及影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(11): 2465–2475.

ZHANG Min, CHEN Hai, SHI Qin-qin, et al. Spatial heterogeneity of heavy metals and influencing factors in the surface cultivated soil of the loess hilly-gully region, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(11): 2465–2475.

黄土丘陵沟壑区耕层土壤重金属空间分异及影响因素

张敏, 陈海*, 史琴琴, 张行, 刘迪, 赵岩

(西北大学城市与环境学院, 西安 710127)

摘要: 为了解黄土丘陵沟壑区耕层土壤重金属的空间分异及影响因素, 以陕西省米脂县高渠乡为研究区, 基于地统计学方法, 分析耕地土壤表层 Pb、As、Cu、Cr、Ni、Zn 六种重金属元素的空间分异, 并结合地理探测器与统计分析, 进一步讨论重金属空间分布的影响因素。结果表明: As、Cu、Cr、Ni 含量超过黄绵土背景值的样本率分别为 23%、100%、100% 和 100%, As 和 Cu 元素为中等变异, Pb、Cr、Ni、Zn 为弱变异。Ni 元素的块金系数最大(0.59), Pb 元素的块金系数最小(0.12), Pb 和 Zn 元素有较强的空间相关性, 主要以结构性变异为主, As、Cu、Cr、Ni 有中等程度的空间相关性, 受结构性因素影响, 同时也受随机因素影响较大; 从空间分布格局上看, 六种重金属均存在空间集聚现象, 局部有高值区和低值区出现。重金属的空间分布受到地形和种植方式的共同影响, 地形对各重金属分布的影响大于种植方式, 且坡向与种植类型的交互作用对各重金属空间分布影响最大。研究表明, 高渠乡土壤耕层 Ni 含量普遍偏高, 可能对土壤环境和农产品生产的安全构成潜在威胁, 且不同重金属由于受到复杂地形和种植方式的交互影响, 空间差异明显。

关键词: 土壤重金属; 空间分布; 地理探测器; 黄土丘陵沟壑区

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2019)11-2465-11 doi:10.11654/jaes.2019-0675

Spatial heterogeneity of heavy metals and influencing factors in the surface cultivated soil of the loess hilly-gully region, China

ZHANG Min, CHEN Hai*, SHI Qin-qin, ZHANG Hang, LIU Di, ZHAO Yan

(College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: The spatial differentiation and influencing factors of heavy metals in the soil layer of the loess hilly and gully region of China were evaluated in Gaoqu Township, Mizhi County, Shaanxi Province. Using a geostatistical method, the spatial differentiation of the heavy metals Pb, As, Cu, Cr, Ni, and Zn were analyzed on the surface layer of cultivated soil. Geo-detector and statistical methods were combined to analyze the factors influencing the spatial heterogeneity of heavy metals. The content of As, Cu, Ni, and Cr was 23%, 100%, 100%, and 100% higher than the background value of the loess soil, respectively. The variability of As and Cu contents was moderate, and that of Pb, Cr, Ni, and Zn was weak. The nugget coefficient of Ni was the largest (0.59) and that of Pb was the smallest (0.12). Pb and Zn levels showed a strong spatial correlation, mainly based on structural variation. As, Cu, Cr, and Ni showed moderate spatial correlations, which were affected by structural factors and were also greatly affected by random factors. From the perspective of spatial distribution patterns, spatial agglomeration was observed with local high-value areas and low-value areas. The spatial differentiation of heavy metals was affected by the combination of topography and planting methods. The influence of topography on the distribution of heavy metals was greater than that of planting. The interaction between slope direction and planting type had the greatest influence on the distribution of heavy metals.

收稿日期: 2019-06-16 录用日期: 2019-08-02

作者简介: 张敏(1993—), 女, 河北邯郸人, 硕士研究生, 研究方向为土壤质量评价。E-mail: zm777@stumail.nwu.edu.cn

*通信作者: 陈海 E-mail: chw@nwu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671086)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41671086)

Previous studies had demonstrated that the content of Ni in the soil layer of Gaoqu Township was generally high, which may pose a potential threat to the soil environment and the safety of agricultural production. Moreover, different heavy metals were affected by the interaction of complex terrain and planting methods, and the spatial difference was evident. These findings provide a scientific basis for the spatial differentiation of heavy metals in cultivated soils, and for evaluation of soil environmental quality and ecological environment management.

Keywords: soil heavy metals; spatial distribution; geographic detector; loess hilly-gully region

土壤重金属是一种隐蔽性强、危害持久的污染物^[1]。2014年我国发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,农田土壤点位超标率为16.1%。据估算,目前我国受重金属污染的农田土壤面积约 $2 \times 10^7 \text{ hm}^2$,每年受重金属污染的粮食多达 $1.2 \times 10^7 \text{ t}$,经济损失高达 2×10^{10} 元^[2],农田土壤重金属污染的研究已经成为当前地理科学、环境科学以及生物科学关注的热点。耕层土壤重金属的积累受周边环境的交互影响,过量的重金属累积会对土壤环境以及人体健康造成危害,因此,研究耕地土壤重金属空间分布及其影响因素对土壤生态环境保护 and 治理具有重要的理论和现实意义。

目前,已有学者对农田土壤重金属空间分布进行了相关研究,主要关注矿区^[3-4]、工业区^[5]、交通干道^[6-7]、污灌区^[8-9]以及城区周边农田^[10]等。这些农田受人类活动影响较大且有明确的污染源,土壤重金属的空间分布与污染源的位置有很强的相关性。自然条件和人为活动均复杂的区域,土壤重金属的空间分布特征较复杂^[11-12]。影响土壤重金属分布的因素可分为自然因素^[13](地形、成土母质、土壤类型等)和人为因素^[14-15](工业活动、农业活动、生活垃圾等)两类。目前研究多侧重于单一因素对重金属的影响,尤其关注人为因素对重金属空间分布的影响,如工业活动^[16]、交通^[17]、污水灌溉^[18]、农业面源污染^[19]等。而针对土壤重金属分布受多种因素交互影响的农田,分析其影响因素交互作用的研究还不多见。地理探测器可探测变量之间潜在的空间相关关系,得到不同影响因素及其交互作用对于重金属分布的解释力,从而更加全面客观地分析土壤重金属空间分布的特征和机理^[20]。虽已有学者将其引入土壤重金属的研究中^[21-22],但对影响土壤重金属空间分布的机理解释尚浅,因此,统计学方法与地理探测器的结合,将更有助于阐明土壤重金属空间分布与影响因素之间的内在联系。

综上,本文以典型黄土丘陵沟壑区陕西省米脂县高渠乡的耕地土壤为研究对象,首先通过地统计学方法,分析土壤重金属的空间变异特征;其次,结合地理探测器与方差分析,综合考虑地形和农户种植方式的

影响,定量探测重金属含量与影响因素的相关关系,以为黄土丘陵沟壑区耕层土壤重金属的污染预防和农户合理耕种提供科学依据,为当地农田土壤环境质量评价和生态环境治理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陕西省米脂县高渠乡($110^{\circ}08' \sim 110^{\circ}13' \text{ E}$, $37^{\circ}47' \sim 38^{\circ}53' \text{ N}$),地处无定河中游,黄土高原腹地,总面积 72.4 km^2 ,下辖20个行政村(图1)。该地地表破碎,水土流失严重,地貌主要以峁、梁、沟、川为主,属于典型的黄土丘陵沟壑区^[23]。海拔 $900 \sim 1200 \text{ m}$,夏季降水较为集中。土壤类型以黄绵土为主,土壤色浅发黄,土质疏松、绵软,具有湿陷性^[24],且具有良好的透水性和可耕性。当地农耕历史久远,作物多以玉米、红葱、马铃薯、果树、杂粮等为主。2018年该乡种植面积约 12 km^2 ,其中,种植类型包括杂粮(4 km^2)、玉米(3.12 km^2)、红葱(1.71 km^2)、果树(1.59 km^2)、马铃薯(1.54 km^2)。目前,该乡是红葱种植及果树栽种的典型乡镇。以该乡耕层土壤作为研究对象,为结合自然和社

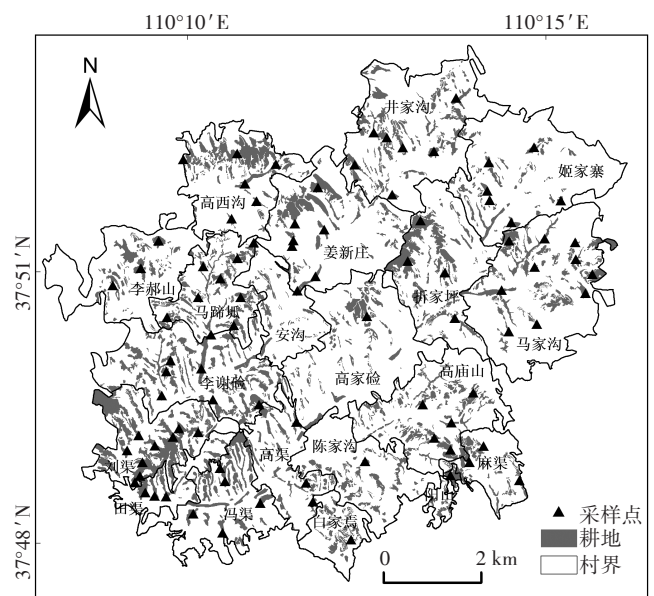


图1 研究区采样点分布图

Figure 1 Distribution of sampling points in the study area

会因素探讨土壤重金属的空间分布与影响机理提供了良好的平台。

1.2 数据来源

1.2.1 土壤样品数据

2018年7—8月课题组对高渠乡耕层土壤(0~20 cm)进行采样,共采集90个土壤样品。考虑到采样结果的差异性,依据不同种植类型和地形设置样点位置,保证采集到不同地形和种植方式下的土壤样品。此外,在实地采样中,样点尽量布设在地块中间位置,以保证样点的代表性。样点分布位置如图1所示。

采样过程中,参照《农田土壤环境质量监测技术规范》(NY/T 395—2000),采用五点混合采样法,每个子样点采集表层土壤约200 g,将其充分混合后装入样品袋内,同时记录该样点的地理坐标、高程、种植类型以及周围环境情况。将采集的土壤样品带回实验室风干,之后将土样内的植物根系、木棍、生物残体等碎屑物剔除,研磨后过0.15 mm尼龙筛,装袋制成待测样品。

本次实验使用X荧光元素分析仪(英文简称XRF,型号Niton XL 3t,美国NITON公司)对重金属元素含量进行测定,为保证实验的准确性,每个土壤样品设置3组平行实验,最终求取平均值作为该样品中各重金属的含量,且测定过程中使用国家标准样品(GBW07307)进行校准。已有学者使用XRF测量方法与常规方法测定土壤中Cu、Zn、Pb、As和Cr等重金属,测试结果较一致,相对偏差在0.044%~13.7%^[25],说明XRF法能够实现较高精度的重金属元素测定。

1.2.2 影响因素数据

行政边界、道路等基础数据来自于2009年米脂县第二次土地调查数据库,并基于2018年当地遥感影像数据和实际调研,对其进行了完善;DEM数据来自于中科院计算机网络信息中心地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),分辨率为30 m,通过GPS测点和重采样技术,得到高渠乡10 m×10 m的DEM数据;坡度、坡向、地形起伏度、地形湿度指数和地形部位指数数据是基于DEM数据通过SimDTA软件计算得出;种植类型、地块面积数据源于2018年课题组对该乡农户耕地权属地块实地调研数据。

1.3 研究方法

1.3.1 地统计分析

地统计学以半方差函数描述变量的空间相关性^[26],可以分析变量的随机性及结构性,反映区域内土壤中各距离重金属观测值的变化。公式如下:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

式中: $r(h)$ 为半方差函数; h 为两个样本点的分隔距离; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别为区域化变量 $Z(x)$ 在 x_i 和 $x_i + h$ 处的实测值; $N(h)$ 是以 h 为间距的所有观测点的成对数目。

1.3.2 地理探测器

地理探测器是探测空间分异性,以及揭示其背后驱动力的一种统计学方法^[27]。地理探测器包含四个探测器:分异及因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测。分异及因子探测器公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (2)$$

式中: q 为影响因子对于某重金属空间分异性的解释力,值域为[0, 1], q 值越大,表明某影响因子对某重金属空间分布的解释力越强; L 为重金属含量或各影响因素的分类数; N_h 和 N 分别为类 h 和全区的样点量; σ_h^2 和 σ^2 分别为类 h 和全区的方差。

交互作用探测器:能够识别不同影响因子之间的交互作用,即评估两个影响因素共同作用相对单因子对重金属空间分布的解释力是增加、减弱或者是相互独立的。

本文运用因子探测与交互探测分析分别分析地形和种植方式对土壤重金属空间分布的影响及二者的交互影响。各影响因子及分级如表1所示。地形因素的选取及分级依据参考文献[28-31],种植方式的分级及依据参考实地调研及文献[32]。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属描述性统计特征分析

运用SPSS 22对样品数据进行描述性统计,计算样品中重金属含量的最大值、最小值、平均值、标准差和变异系数,结果如表2所示。

高渠乡农田土壤中Pb、As、Cu、Cr、Ni、Zn元素的平均含量分别为16.33、10.52、30.41、101.61、57.99、55.23 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均未超过农用地土壤污染风险筛选值;As、Cu、Cr、Ni元素含量虽未超过农用地土壤污染风险筛选值,但相较于黄绵土背景值,超出样本率分别达到23%、100%、100%、100%,说明土壤中的As、Cu、Cr、Ni虽没有达到污染水平,但在长期人类活动干扰下有一定程度的积累;Pb、Zn元素均未超过黄绵土的土壤背景值。本研究样品数据中各元素的含量均没有超过农用地土壤污染风险筛选值,说明重金属

元素对研究区农产品的质量、农作物生长或土壤生态环境的风险低,但Ni元素的含量相对背景值含量普遍较高,可能对当地的土壤环境与农产品产生潜在危害。

变异系数可以表明样点重金属含量的平均空间变异程度,高渠乡农田土壤Pb、As、Cu、Cr、Ni、Zn元素的变异程度由强到弱依次为Cu>As>Ni>Cr>Pb>Zn,其中,As和Cu元素的变异系数在10%~100%之间,为中等变异,Pb、Cr、Ni、Zn的变异系数小于10%,为弱变异。

2.2 土壤重金属空间变异分析

基于地统计学方法,采用普通克里金插值法得到高渠乡农田土壤重金属含量的空间分布图。为检验数据是否符合地统计学正态分布的要求,首先,将重金属数据在SPSS软件中做K-S(Kolmogorov-smirnov)检验,结果表明(表2)Pb、As、Cu、Cr、Ni、Zn($P_{(K-S)} > 0.05$)均呈近似正态分布。

2.2.1 半方差函数分析

利用GS+软件确定重金属的最佳半方差函数理论模型,不同重金属拟合的最佳半方差函数理论模型、相关参数如表3所示。所有元素的决定系数均大于0.541,残差RSS也相对较小,说明拟合的理论模型符合地统计分析要求。

块金系数表示在总变异中随机因素引起的变异所占的比例,用块金值和基台值的比值表示,若块金系数小于0.25,说明重金属的空间差异主要由结构性因素决定,如成土母质、地形等自然因素,重金属的空间相关性较强;若块金系数大于0.25小于0.75,说明重金属既受到结构性因素的影响,又受到的随机性因素的影响,有中等程度的空间相关性;若块金系数大于0.75,说明随机因素引起重金属在空间上的差异较大,具有较小的空间相关性。由表3可知,本研究区

中Pb、Zn主要受结构性因素影响,As、Cu、Cr、Ni受结构性因素和随机性因素的共同影响;各重金属均表现出小尺度(变程均小于1 km)的空间异质性。

2.2.2 土壤重金属空间格局分析

利用地统计学中普通克里金插值法对高渠乡土壤重金属区域化变量进行估计,其中标准平均值(Mean standard error, MSE)越接近0,标准均方根误差(Root mean square standardized error, RMSSE)越接近1,精度越高。由表3可知,各重金属元素在拟合的半方差函数模型下预测精度较好,反映出研究区耕地土壤重金属空间分布情况(图2)。

由图2可知,各重金属表现出不同程度的聚集,

表2 高渠乡农田土壤重金属含量统计($n=90$)

Table 2 Descriptive statistics of heavy metals in farmland soil of Gaoqu Township($n=90$)

重金属元素 Heavy metals	Pb	As	Cu	Cr	Ni	Zn
最大值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	19.70	14.17	42.62	122.93	72.30	63.91
最小值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	13.33	7.13	21.53	78.61	46.87	47.80
平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	16.33	10.52	30.41	101.61	57.99	55.23
标准差/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.40	1.33	4.02	8.73	5.54	3.81
变异系数/%	8.57	12.64	13.22	8.59	9.55	6.90
K-S检验[$P_{(K-S)}$]	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
黄绵土背景值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	19.80	11.40	18.90	65.10	27.60	65.60
农用地土壤污染风险筛选值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	170.00	25.00	100.00	250.00	190.00	300.00

注:黄绵土背景值来自于《黄土高原土壤地球化学》^[33],农用地土壤污染风险筛选值来自《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)。

Note: The background value of loessial soil comes from the *Soil Geochemistry of the Loess Plateau*. Risk screening values for soil contamination of agricultural land come from the *Soil Environmental Quality Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land* (GB 15618—2018).

表1 各影响因子及分级依据

Table 1 Impact factors and grading

影响因素 Influencing factor		分级及依据 Grading and basis
地形	高程	依照自然断点法分级 ^[28] 。低(1):901~1015 m;中(2):1015~1074 m;高(3):>1074 m
	坡度	根据国际地理学会地貌调查与制图委员会的坡度分级标准 ^[29] 。缓坡(1):0~5°;中坡(2):5~15°;陡坡(3):>15°
	坡向	按方位重分类 ^[30] 。阴坡(1):北(337.5°~22.5°)、东北(22.5°~67.5°);半阴坡(2):东(67.5°~112.5°)、西北(292.5°~337.5°);半阳坡(3):东南(112.5°~157.5°)、西(247.5°~292.5°);阳坡(4):南(157.5°~202.5°)、西南(202.5°~247.5°)
	地形起伏度	依照自然断点法分级。小(1):1~19 m;中(2):19~30 m;大:>30 m
	地形湿度指数(TWI)	表征土壤水分的干湿程度 ^[31] ,依照自然断点法分级。干(1):1~5;中(2):5~10;湿(3):10~22
	地形部位指数(TPI)	反映目标区域在山体中的相对位置,小于0为山谷(1),接近0为山坡(2),大于0为山脊(3) ^[31]
种植方式	种植类型	根据当地主要种植的作物分类 ^[32] :玉米(1)、洋芋(2)、红葱(3)、果树(4)、杂粮(5)
	地块面积	结合农户调研,确定影响农户种植管理方式较大的界值。小(1):<0.2 hm^2 ;中(2):0.2~0.66 hm^2 ;大(3):>0.66 hm^2
	地块距道路距离	结合农户调研,确定影响农户种植管理方式较大的界值。近(1):0~150 m;中(2):150~300 m;远(3):>300 m

从整体空间特征上看,Pb和Cr的分布具有相似性,高值区比较分散,主要分布在中部以及东南部区域,根据调研材料,该区域分布有规模较大的养殖场,当地农户习惯在农田中大量投入农家肥。As、Cu和Ni在空间分布上有相似性,As和Cu均在高渠乡西北部有高值出现,该区高程较高,有大面积果园种植;Ni含量呈中间低两侧高的空间分布,在沟道交汇处含量较低。Zn含量空间分布相对比较分散,高值区域主要

出现在北部和西部,西南部为低值区。

从重金属含量等级范围看,各重金属含量主要处于第Ⅱ范围内,且主要分布在海拔1015~1094 m、坡度5°~15°之间的地形上。其中,Pb含量在第Ⅱ等级的面积占69.75%,主要分布在刘渠、井家沟、李谢硷等村;As含量在第Ⅱ等级的面积占59.91%,主要分布在姜新庄、马家沟、陈家沟等村;Cu含量主要处于第Ⅰ、Ⅱ等级,占93.42%,高西沟、高渠和马家沟

表3 重金属含量的半方差函数理论模型及相关参数

Table 3 Semi-variogram function theoretical model, relevant parameters and verification results of heavy metals

元素 Element	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块金系数 $C_0/(C_0+C)$	变程 Range/m	理论模型 Theoretical model	决定系数 r^2 Coefficient of determination	残差平方和 Residual sum of squares	标准平均值 MSE	标准均方根误差 RMSSE
Pb	5.20×10^{-3}	4.34×10^{-2}	0.12	485	高斯函数	0.541	2.051E-04	3.6×10^{-2}	1.023
As	3.70×10^{-3}	3.77×10^{-2}	0.25	450	球面函数	0.559	2.018E-04	-2.7×10^{-2}	1.010
Cu	1.79×10^{-2}	3.59×10^{-2}	0.45	910	球面函数	0.699	1.223E-04	-1.0×10^{-2}	1.006
Cr	1.52×10^{-2}	4.52×10^{-2}	0.34	675	高斯函数	0.832	1.881E-04	7.2×10^{-3}	0.994
Ni	2.64×10^{-2}	4.52×10^{-2}	0.59	780	指数函数	0.542	1.544E-04	9.7×10^{-4}	1.018
Zn	4.84×10^{-3}	2.69×10^{-2}	0.18	600	球面函数	0.582	5.778E-05	6.7×10^{-3}	1.032

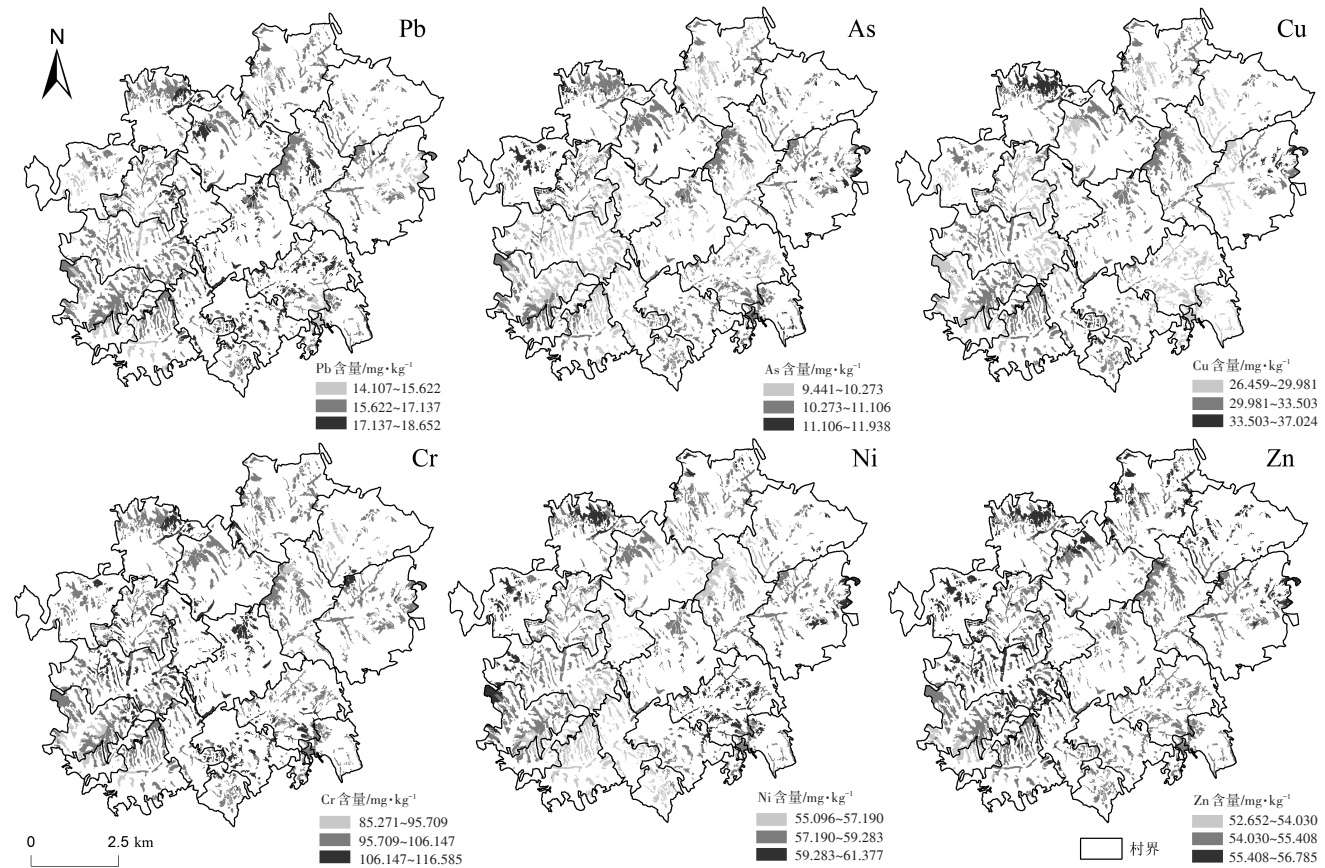


图2 高渠乡农田土壤重金属含量空间分布图

Figure 2 Spatial distribution of heavy metals' content in farmland soil of Gaoqu Township

等村含量较高;Cr 含量在第Ⅱ等级的面积占 71.73%,主要分布于折家坪、姜新庄和冯渠等村;Ni 含量在第Ⅱ等级的面积占 53.82%,主要分布在马蹄坨、李谢砭和高家砭等村;Zn 元素含量主要处于第Ⅱ、Ⅲ等级,占 96.62%,主要分布在陈家沟、高庙山和李郝山等村。

2.3 土壤重金属空间分布的影响因素分析

2.3.1 土壤重金属空间分布影响因子探测

各地形因子对土壤重金属的探测结果如表 4,由各影响因子对重金属空间分布的解释力大小判断,各重金属均受到地形与种植方式的影响,且各影响因子对重金属的影响程度不同。其中,地形因子中坡向对各重金属的影响均较大,其中,对 As 和 Zn 的影响达到了显著水平;地形起伏度、地形部位指数和坡度对各重金属影响均较小;其余各地形因子对各重金属的影响差异较大,表现为高程对 Cr 和 Zn 的影响较大,且对 Cr 的影响达到显著水平;地形湿度指数对 Cr 和 Ni 影响较大,对其他各重金属的影响均较小。对于种植方式,除 Pb 外,种植类型对各重金属的影响均较大,其中,对 Cr 和 Zn 的影响达到显著水平;地块距道路距离对各重金属的影响差异较大,其中对 As 和 Ni 的影响达到了显著水平;地块面积对 Ni 的影响较大,对其他各重金属的影响均较小。

2.3.2 地形对土壤重金属分布的影响

为了进一步揭示不同地形条件下各重金属的分布情况,对各地形条件下土壤重金属的含量通过 SPSS 软件进行方差分析,结果如表 5,地形因子与重金属含量的关系既存在空间相关性,也存在线性相关性,分析结果有一定的一致性。具体表现为,Cr 在不同的高程下存在显著差异,结合探测结果,Cr 与高程

既存在空间相关性又存在线性相关性,Cr 含量在高海拔处含量最低,海拔主要通过影响土壤侵蚀和种植活动来影响土壤中重金属的迁移情况,高海拔区域土壤侵蚀较严重,且耕地多分布在中低海拔处,重金属随土壤迁移,在中低海拔区域积累。

半阳坡土壤中 Cr 的含量显著高于半阴坡与阴坡,其余元素组间差异不明显。地形湿度指数从空间角度对 Cr、Ni 元素的解释力较强,组间差异也处于显著水平,表现为地形湿度指数在第一和第二等级差异不明显,在第三等级含量显著高,两元素表现出相似的规律。地形湿度指数反映土壤中的水分,指数越高土壤水分越大,Cr 和 Ni 元素容易在土壤含水量较高的区域积累,对水的吸附性较强。

2.3.3 种植方式对土壤重金属分布的影响

各重金属在不同种植方式下的方差分析结果见表 6。不同种植类型间各重金属(除 Cr 外)含量均存在显著差异,As 元素在果树地的含量高于其他地类,其中,显著高于玉米地 and 红葱地,可能与果树地喷洒含 As 农药有关。不同的地块面积 Ni 含量有显著差异,其中,中地块的 Ni 含量显著低于小地块和大地块。Ni 元素可能来自农家肥、化石燃料燃烧等,对于当地的种植户来说,地块面积的大小影响其生产管理的决策,一般对于地块面积较小的耕地,农户管理不完善,施肥和用药量变化幅度较大,用量不规范;而面积较大的地块,农药化肥的种类较多,用量较大,因此表现为小地块和大地块中 Ni 元素含量较高。距道路的不同距离范围间 Ni 元素有显著差异,表现为距离道路越远,Ni 含量越低,距道路的远近反映农户管理地块的便利程度,距离道路越近农户生产投入越便利,生产投入会相应增多,同时,也受到邻近机动车尾

表 4 地形因子及种植方式对土壤重金属空间分布的解释力 q 值
Table 4 Interpretation q of the spatial distribution of soil heavy metals by topographic factors

重金属 Heavy metal	地形因子 Terrain factors						种植方式 Planting methods		
	高程 Elevation	坡度 Slope	坡向 Slope direction	地形起伏度 Terrain relief	TWI	TPI	种植类型 Planting types	距道路距离 Distance from road	地块面积 Plot area
Pb	0.020 8	0.015 3	0.095 7	0.034 7	0.006 4	0.029 4	0.020 9	0.035 6	0.006 6
As	0.001 9	0.042 9	0.129 2*	0.013 6	0.000 3	0.027 5	0.070 6	0.058 4*	0.035 7
Cu	0.012 8	0.036 0	0.064 6	0.011 9	0.000 1	0.003 5	0.057 7	0.011 5	0.026 3
Cr	0.034 6*	0.014 2	0.084 4	0.031 8	0.084 5	0.016 1	0.067 2*	0.012 6	0.030 8
Ni	0.008 9	0.007 4	0.065 2	0.002 6	0.040 4	0.016 2	0.062 0	0.044 1*	0.061 1
Zn	0.040 4	0.001 5	0.193 7**	0.006 8	0.027 2	0.029 4	0.086 6*	0.022 6	0.039 9

注:*和**分别表示影响因子通过 0.1 和 0.05 水平显著性检验。
Note: * and ** indicate that the impact factor passes the 0.1 and 0.05 level significance test respectively.

表5 不同地形条件下土壤重金属的平均含量及标准差($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 5 Average value of soil heavy metal content under different topographic conditions($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

地形因子 Terrain factors	样点数 Sample number	Pb	As	Cu	Cr	Ni	Zn	
高程/m	901~1015	34	16.18±1.22a	10.44±1.17a	30.81±3.99a	101.86±9.70a	58.19±5.92a	54.61±4.08a
	1015~1074	40	16.59±1.46a	10.56±1.38a	30.57±4.19a	102.80±8.06a	57.34±5.43a	55.81±3.96a
	>1074	16	16.01±1.21a	10.23±1.57a	29.17±3.62a	98.10±7.65b	59.19±5.06a	55.10±2.59a
坡度/(°)	0~5	7	15.93±0.66a	10.73±1.41a	31.56±3.88a	103.59±5.63a	56.70±5.58a	56.09±2.79a
	5~15	61	16.28±1.37a	10.66±1.35a	30.74±3.81a	102.40±8.92a	57.76±5.35a	55.28±4.10a
	>15	22	16.62±1.38a	10.06±1.17a	29.84±4.65a	99.79±8.97a	59.02±6.13a	54.80±3.28a
坡向	阴坡	7	16.89±1.43a	10.77±1.74a	30.76±3.16a	96.86±6.94b	56.25±4.62a	57.53±3.01a
	半阴坡	23	16.56±1.54a	10.76±1.23a	30.21±4.64a	99.78±6.54b	58.94±7.48a	53.55±3.09a
	半阳坡	26	16.09±1.16a	10.40±1.43a	30.97±3.84a	104.22±7.75a	58.64±4.14a	55.19±3.42a
	阳坡	28	16.23±1.34a	10.44±1.43a	29.83±4.25a	101.85±9.65ab	57.88±5.13a	55.09±4.66a
地形起伏度/m	0~19	36	16.02±1.20b	10.43±1.23a	29.88±7.59a	99.74±7.59a	57.53±5.76a	54.79±3.43a
	19~30	43	16.61±1.37a	10.63±1.36a	30.67±8.90a	102.83±8.90a	58.43±5.22a	55.70±4.15a
	30~65	11	16.32±1.49a	10.42±1.57a	31.14±11.02a	102.97±9.62a	57.76±6.38a	54.81±3.72a
TWI	1~5	39	16.19±1.50a	10.53±1.04a	30.63±4.45a	101.19±9.52b	58.24±6.51b	54.56±2.92a
	5~10	46	16.46±1.24a	10.51±1.57a	30.24±3.87a	100.89±7.59b	57.33±4.65b	55.65±4.53a
	10~22	5	16.33±0.82a	10.61±0.95a	30.26±1.76a	111.47±7.40a	62.04±3.35a	56.52±1.22a
TPI	山谷(<1)	17	16.77±1.32a	10.52±1.70a	29.89±3.57a	101.62±9.89a	56.40±5.28a	55.85±3.96a
	山坡(-1~1)	68	16.20±1.34a	10.57±1.22a	30.68±4.15a	101.92±8.48a	58.31±5.55a	55.21±3.82a
	山脊(>1)	5	16.67±1.21a	9.82±1.27a	28.48±3.64a	97.42±8.56a	58.92±6.38a	53.39±3.03a

注:表中数值后不同字母表示差异显著($P<0.1$)。下同。

Note: Different letters after the values in the table meant significant difference at 0.1 level. The same below.

表6 不同种植方式下土壤重金属的平均含量及标准差($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 6 Average content of heavy metals in soil under different planting conditions($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

种植方式 Planting methods	样点数 Sample number	Pb	As	Cu	Cr	Ni	Zn	
种植类型	玉米	26	16.21±1.55a	10.26±1.12b	31.65±4.33a	103.69±9.31a	58.99±5.65a	55.56±4.91a
	洋芋	16	16.30±1.25a	10.71±1.11ab	31.71±4.13a	102.83±9.65a	54.87±4.54b	56.73±3.84a
	红葱	12	15.86±1.38b	9.90±1.24c	28.90±3.48b	102.27±8.26a	58.41±5.91a	53.94±2.75b
	果树	12	16.33±1.46a	11.07±1.67a	29.75±2.88ab	103.98±9.96a	59.14±2.89a	54.40±3.48a
	杂粮	24	16.74±1.02a	10.71±1.43ab	29.29±3.95b	97.90±5.12a	58.19±6.41a	54.93±2.80a
地块面积/ hm²	<0.2	34	16.30±1.36a	10.81±4.33a	30.95±4.60a	100.48±8.29a	58.53±5.88a	56.20±4.21a
	0.2~0.66	43	16.41±1.20a	10.34±4.13a	29.74±3.77a	101.59±8.30a	56.74±5.28b	54.69±3.49b
	>0.66	13	16.16±1.35a	10.38±3.48a	31.22±2.95a	104.63±9.76a	60.68±4.54a	54.46±3.42b
距道路距离/ m	0~150	40	16.40±1.36a	11.96±1.20a	29.93±4.23a	102.53±8.60a	60.97±4.13a	55.16±4.30a
	150~300	28	15.96±1.20b	10.88±1.39a	30.57±3.44a	101.88±9.59a	58.79±6.13b	54.80±3.73a
	>300	22	16.77±1.35a	9.90±1.46a	31.40±4.41a	98.74±7.71a	56.10±6.02c	56.11±2.86a

气排放等交通污染的影响。

2.3.4 地形和种植方式对土壤重金属分布的交互影响

对地形因子与种植因子进行交互探测,根据两种因子之间交互作用对土壤重金属空间分布的解释力大小判断,相对单因子,两因子的交互影响力增强。最高影响因子及交互影响力结果如表7所示。地形因子对各重金属交互影响力均大于种植方式的交互

影响力,说明地形对于各重金属空间分布的影响大于种植方式差异的影响,该结论与空间相关性分析结果基本一致。其中,对于地形因子,坡向与地形起伏度对Pb和Ni元素的交互影响力最大(0.272 9、0.303 6),高程与坡向对As、Cu和Zn的交互影响力最大(0.336 9、0.341 1、0.373 7),坡向和地形部位对Cr的交互影响力最大(0.320 1),其空间解释力均相对单个地形因

子解释力增加。对于种植方式,种植因子中种植类型与距道路距离对 Pb 的交互影响力最大(0.119 9),种植类型与地块面积对 As、Cu、Cr、Ni 和 Zn 的交互影响力最大(0.237 3、0.199 6、0.262 6、0.214 4、0.271 4),其空间解释力均大于单个种植因子的解释力。而地形和种植方式的交互探测结果显示,坡向与种植类型的交互影响对各重金属的空间分布影响均最大,且地形与种植方式间因子的两两交互均大于地形因子与种植方式内部因子的交互作用,说明地形和种植方式的交互作用更能揭示研究区土壤重金属的空间分布情况,以坡向和种植类型的交互影响表现最强烈。

3 讨论

地形变化影响土壤侵蚀和土壤内部的水热环境,进而影响重金属的迁移和转化。基于长期耕作习惯,农户不同的种植方式对应于不同的施用化肥与农药的管理方式,且农户根据当地的自然环境对种植类型进行调整^[32],土壤重金属的积累因此产生空间差异。根据因子探测结果和交互探测结果,地形与种植方式的交互影响比单一因子的解释力均提升较多,说明只考虑单因子的影响不能全面揭示区域土壤重金属的空间分异,地形和种植方式的相互作用制约着土壤重金属的空间变异性。

坡向与种植类型对于各重金属空间差异的解释力最强,控制坡向或种植类型不变,即以阳坡为例,对比不同种植类型的耕地中各重金属含量的差异(表 8)。其中,种植果树的土壤中 As、Cu 含量较高,可能与果树喷洒含 As 农药及杀菌剂波尔多液有关^[34-35];而种植洋芋的土壤中 Cu、Zn 含量较高,可能与当地农户习惯在洋芋地施用磷肥和有机肥有关^[36];Cr 元素主要来源于鸡粪、牛粪、羊粪、堆肥等农家肥^[37],种植红葱、果树和玉米的土壤中 Cr 含量较高,可能与大量施用农家肥相关。

以种植玉米的区域为例,对比分析不同坡向各重金属含量的差异(表 9)。其中,As 含量在不同坡向上表现出显著差异,阴坡 As 含量大于阳坡,该结论与祝修高^[38]研究结果一致。坡向主要通过影响光照条件,进而影响土壤的水热环境,从而影响植物的生长状况,说明 As 受土壤水热环境影响较大,土壤蒸发严重,则对 As 的吸附能力变差。而 Cr 元素在阴坡含量小于阳坡,与 As 受土壤水热环境变化规律相反。

地理探测器可以从空间角度分析土壤重金属与地形因子和种植方式的空间相关性,方差分析从传统统计学角度分析不同地形和种植方式下土壤重金属的差异,从空间统计和线性统计来看,结果既有一致性也有差异性。地形因子与种植方式对于各重金属

表 7 土壤重金属的最高影响力因子及解释力

Table 7 The highest influence factor and explanatory power of heavy metals in soil

重金属 Heavy metals	最高影响力的 地形因子 Topographical factors of highest influence	地形因子的 交互影响力 Interactive influence of terrain factors	最高影响力的 种植因子 Planting factors of highest impact	种植因子的 交互影响力 Interactive influence of Planting factors	最高影响力的 因子 Factors of highest impact	最高交互 影响力 Interactive influence
Pb	坡向-起伏度	0.272 9	种植类型-距道路距离	0.119 9	坡向-种植类型	0.383 0
As	高程-坡向	0.336 9	种植类型-地块面积	0.237 3	坡向-种植类型	0.494 9
Cu	高程-坡向	0.341 1	种植类型-地块面积	0.199 6	坡向-种植类型	0.345 1
Cr	坡向-TPI	0.320 1	种植类型-地块面积	0.262 6	坡向-种植类型	0.463 7
Ni	坡向-起伏度	0.303 6	种植类型-地块面积	0.214 4	坡向-种植类型	0.351 1
Zn	高程-坡向	0.373 7	种植类型-地块面积	0.271 4	坡向-种植类型	0.498 6

表 8 不同种植类型的土壤中各重金属平均含量(mg·kg⁻¹)

Table 8 Differences in heavy metal contents in soils of different planting types(mg·kg⁻¹)

坡向 Slope direction	种植类型 Planting types	样点数 Sample number	Pb	As	Cu	Cr	Ni	Zn
阳坡	玉米	13	16.05±1.40a	10.40±1.02b	27.52±5.50b	101.16±9.64a	57.53±5.08a	52.78±5.81ab
	洋芋	3	15.17±0.30a	10.67±0.79b	32.71±4.73a	94.67±8.73b	57.40±3.16a	60.39±4.58a
	红葱	5	16.64±1.67a	9.25±1.42b	28.39±3.16b	109.83±8.89a	60.26±5.49a	51.24±2.67b
	果树	3	17.28±0.94a	12.59±1.19a	33.16±3.54a	107.84±9.97a	60.18±1.08a	56.83±1.47ab
	杂粮	4	16.84±1.53a	10.76±1.25b	29.52±1.30b	96.97±2.53b	55.51±3.62b	52.45±2.89b

表9 不同坡向的土壤中各重金属平均含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 9 Average content of heavy metals in soils with different slope directions($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

种植类型 Planting types	坡向 Slope direction	样点数 Sample number	Pb	As	Cu	Cr	Ni	Zn
玉米	阴坡	2	15.91±0.29a	11.45±0.45b	31.76±2.53a	92.21±2.58b	60.39±3.42a	56.61±0.52a
	半阴坡	4	15.36±2.49a	12.10±0.43a	31.41±3.53a	93.87±4.67b	63.66±8.36a	51.61±2.15a
	半阳坡	6	16.45±1.07a	10.53±0.54c	34.15±1.55a	106.35±5.34a	57.75±5.02a	57.11±4.76a
	阳坡	13	16.42±1.40a	9.82±1.02d	30.54±3.55a	108.20±8.45a	56.51±2.08a	53.93±5.81a

的影响以空间相关性表现更显著,因而,在分析土壤重金属空间差异的影响因素时只根据线性统计分析是片面的,缺乏空间位置特征的考虑,通常会忽略一些因素。

本文旨在分析高渠乡耕地土壤重金属空间分布特征,以及定量化分析主要影响因子之间的交互作用,为了解黄土丘陵沟壑区土壤重金属空间分布特征提供了案例支撑,对研究区土壤环境质量评估、可持续发展以及生态风险预防具有理论意义和实践价值。通过研究分析可知,在种植管理过程中,农户对耕地质量的认知将会影响农户对生产资料的投入、种植类型以及有机废物的处理。为了促进黄土丘陵沟壑区生态环境的可持续发展,进一步考虑农户对耕地质量的认知,同时,深入探讨土壤理化性质及作物生长习性等对黄土丘陵沟壑区土壤重金属的空间分布特征的影响,将是未来研究的重点方向之一。

4 结论

(1)描述性分析表明,高渠乡农田土壤中六种重金属元素含量均未超过农用地土壤污染风险筛选值,对当地农产品生长、质量安全与土壤生态环境危害较小;而As、Cu、Cr、Ni元素含量在其成土母质的基础上有所积累,其中,Ni含量相对土壤背景值较高,可能对当地农产品和土壤环境产生潜在危害。

(2)从空间相关性来看,Pb、Zn元素有较强的空间相关性,以结构性变异为主,As、Cu、Cr、Ni元素具有中等程度的空间相关性,既受到结构性因素影响,也受随机性因素干扰;从空间分布格局来看,重金属在空间分布上有一定程度的聚集,局部有高值或低值区出现,且在大面积果园种植区As和Cu的含量较高,而规模较大的养殖场处Cr与Pb的含量也较高。

(3)单因子对各重金属空间分布的影响程度不同,其中,Cr受地形影响在阴坡及中低海拔处积累,且Cr和Ni均受地形湿度影响较大,As和Ni分别在不同的种植方式下差异显著。交互作用显示双因子交

互作用较单因子解释力加强,且地形对各重金属的影响大于种植方式的影响,坡向与种植类型的交互作用对各重金属的空间分布解释力最强。

参考文献:

- [1] 张 慧, 马鑫鹏, 史晓磊, 等. 区域土壤Cd和Cr空间分布的影响因素研究[J]. 土壤, 2018, 50(5): 989-998.
ZHANG Hui, MA Xin-peng, SHI Xiao-lei, et al. Influential factors of spatial distribution of Cd and Cr in regional soils[J]. *Soil*, 2018, 50(5): 989-998.
- [2] 陈卫平, 杨 阳, 谢 天, 等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 261-272.
CHEN Wei-ping, YANG Yang, XIE Tian, et al. Challenges and countermeasures for heavy metal pollution control in farmlands of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(2): 261-272.
- [3] 胡 森, 吴家强, 彭佩钦, 等. 矿区耕地土壤重金属污染评价模型与实例研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(2): 423-430.
HU Miao, WU Jia-qiang, PENG Pei-qin, et al. Assessment model of heavy metal pollution for arable soils and a case study in a mining area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(2): 423-430.
- [4] 陈怡先, 姜小三, 王 勇, 等. 基于GIS矿区土壤重金属生态环境及人体健康评价[J]. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1642-1652.
CHEN Yi-xian, JIANG Xiao-san, WANG Yong, et al. Assessment of ecological environment and human health of heavy metals in mining area based on GIS[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(4): 1642-1652.
- [5] 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 Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping. Impacts of industrial zone in arid area in Ningxia Province on the accumulation of heavy metals in agricultural soil[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(9): 3532-3539.
- [6] 朱梦杰, 汤 琳, 刘丹青. 交通干道沿线土壤重金属监测与评估综述[J]. 中国环境监测, 2015, 31(3): 84-91.
ZHU Meng-jie, TANG Lin, LIU Dan-qing. Monitor and risk assessment of heavy metals in the soils along the main road: A review[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2015, 31(3): 84-91.
- [7] 晏 星, 罗娜娜, 赵文吉, 等. 北京城区交通边缘带土壤重金属污染研究[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(12): 175-180.
YAN Xing, LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, et al. Heavy metal pollution

- evaluation and spatial influence range analysis for main roads within the fifth ring road of Beijing urban[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 36(12):175-180.
- [8] 杨 璐, 张 玉, 张 智, 等. 规模化猪场灌区土壤重金属污染特征及风险评价:以重庆市某猪场为例[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(10):2166-2174.
- YANG Lu, ZHANG Yu, ZHANG Zhi, et al. Characteristics and risk of heavy metals pollution in soils of the irrigation area of a large-scale pig farm: A case study of a pig farm in Chongqing, China[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2018, 37(10):2166-2174.
- [9] 邵金秋, 刘楚琛, 阎秀兰, 等. 河北省典型灌区农田镉污染特征及环境风险评价[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(3):917-927.
- SHAO Jin-qiu, LIU Chu-chen, YAN Xiu-lan, et al. Cadmium distribution characteristics and environmental risk assessment in typical sewage irrigation area of Hebei Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(3):917-927.
- [10] 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.
- HE Bo, ZHAO Hui, WANG Tie-yu, et al. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in soils from a typical urbanized area[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(6):2869-2876.
- [11] 楚纯洁, 周金凤. 平顶山矿区丘陵坡地土壤重金属分布及污染特征[J]. *地理研究*, 2014, 33(7):1383-1392.
- CHU Chun-jie, ZHOU Jin-feng. Distribution and pollution of soil heavy metals in hilly upland around Pingdingshan coal mining area [J]. *Geographical Research*, 2014, 33(7):1383-1392.
- [12] Zhang Y B, Wu F Q, Zhang X S, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in three land-use types on the southern Loess Plateau, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(9):470.
- [13] 徐尚平, 陶 澍, 徐福留, 等. 内蒙土壤微量元素含量的空间结构特征[J]. *地理学报*, 2000, 55(3):337-345.
- XU Shang-ping, TAO Shu, XU Fu-liu, et al. Spatial distribution pattern of trace elements contents in the soil in Inner Mongolia[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(3):337-345.
- [14] 王兰化, 李明明, 张 莹, 等. 华北地区某蔬菜基地土壤重金属污染特征及健康风险评价[J]. *地球学报*, 2014, 35(2):191-196.
- WANG Lan-hua, LI Ming-ming, ZHANG Ying, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in soil of a vegetable base in north China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2014, 35(2):191-196.
- [15] Zhu D, Wei Y, Zhao Y, et al. Heavy metal pollution and ecological risk assessment of the agriculture soil in Xunyang mining area, Shaanxi Province, northwestern China[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2018, 101(2):178-184.
- [16] 张东明, 吕 新, 王海江, 等. 工业区周边农田重金属污染评价及来源分析[J]. *土壤通报*, 2017, 48(3):715-723.
- ZHANG Dong-ming, LÜ Xin, WANG Hai-jiang, et al. Heavy metal pollution assessment and source analysis on farmland soil around an industrial area[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(3):715-723.
- [17] 王冠星, 闫学东, 张 凡, 等. 青藏高原路侧土壤重金属含量分布规律及影响因素研究[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(2):431-438.
- WANG Guan-xing, YAN Xue-dong, ZHANG Fan, et al. Influencing factors of heavy metal concentration in roadside-soil of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(2):431-438.
- [18] 廖 强, 李金鑫, 李明珠, 等. 污灌条件下重金属在土壤中的累积效应及风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(11):2560-2569.
- LIAO Qiang, LI Jin-xin, LI Ming-zhu, et al. Cumulative distribution and risk assessment of heavy metals during sewage irrigation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11):2560-2569.
- [19] Zhang J J, Wang Y, Liu J S, et al. Multivariate and geostatistical analyses of the sources and spatial distribution of heavy metals in agricultural soil in Gongzhuling, northeast China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(2):634-644.
- [20] Guo P, Wu W, Liu H, et al. Effects of land use and topographical attributes on soil properties in an agricultural landscape[J]. *Soil Research*, 2011, 49(7):606-613.
- [21] 宋恒飞, 吴克宁, 李 婷, 等. 寒地黑土典型县域土壤重金属空间分布及影响因素分析:以海伦市为例[J]. *土壤通报*, 2018, 49(6):1480-1486.
- SONG Heng-fei, WU Ke-ning, LI Ting, et al. The spatial distribution and influencing factors of farmland heavy metals in the cold black soil region: A case of Hailun County[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(6):1480-1486.
- [22] 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*, 2018, 49(7):144-152.
- XIAO Wu, SUI Tao, WANG Xin, et al. Assessment and geographical detection of heavy metal pollution in typical farmland soil in Chaohu Lake basin[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(7):144-152.
- [23] 贾 慧, 陈 海, 毛南赵, 等. 高度敏感生态脆弱区景观可持续性评价[J]. *资源科学*, 2018, 40(6):1277-1286.
- JIA Hui, CHEN Hai, MAONAN Zhao, et al. Landscape sustainable development in highly sensitive ecological fragile areas[J]. *Resources Science*, 2018, 40(6):1277-1286.
- [24] 刘 迪, 陈 海, 梁小英, 等. 黄土丘陵沟壑区生态风险动态变化及其地形梯度分析:以陕西省米脂县为例[J]. *生态学报*, 2018, 38(23):8584-8592.
- LIU Di, CHEN Hai, LIANG Xiao-ying, et al. The dynamic changes to ecological risk in the loess hilly-gully region and its terrain gradient analysis: A case study of Mizhi County, Shaanxi Province, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(23):8584-8592.
- [25] 王 平, 王焕顺, 李玉璞. 偏振能量色散X射线荧光光谱法测定土壤中金属元素[J]. *环境监测管理*与技术, 2008, 20(3):41-43.
- WANG Ping, WANG Huan-shun, LI Yu-pu. Determination of metals in soil by polarized radiation-energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2008, 20(3):41-43.
- [26] 贾振宇, 张俊华, 丁圣彦, 等. 基于GIS和地统计学的黄泛区土壤磷空间变异:以周口为例[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(4):1211-1220.

- JIA Zhen-yu, ZHANG Jun-hua, DING Sheng-yan, et al. Spatial variation of soil phosphorus in flooded area of the Yellow River based on GIS and geo-statistical methods: A case study in Zhoukou City, Henan, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(4): 1211-1220.
- [27] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1):116-134.
- WANG Jin-feng, XU Cheng-dong. Geodetector: Principle and perspective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1):116-134.
- [28] 杨煜岑, 杨联安, 王 晶, 等. 基于多元线性回归模型的土壤养分空间预测:以陕西省蓝田县农耕区为例[J]. 土壤通报, 2017, 48(5):1102-1113.
- YANG Yu-cen, YANG Lian-an, WANG Jing, et al. Prediction for spatial distribution of soil nutrients based on multiple linear regression model: A case study in Lantian County of Shaanxi Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(5):1102-1113.
- [29] 李凤英, 何小武, 周春火. 坡度影响土壤侵蚀研究进展[J]. 水土保持研究, 2008, 15(6):229-231.
- LI Feng-ying, HE Xiao-wu, ZHOU Chun-huo. Advances in researches on slope gradient factor in soil erosion[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15(6):229-231.
- [30] 李 龙, 姚云峰, 秦富仓, 等. 黄花甸子流域土壤全氮含量空间分布及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2015, 26(5):1306-1312.
- LI Long, YAO Yun-feng, QIN Fu-cang, et al. Spatial distribution pattern of soil nitrogen in Huanghuadianzi watershed and related affecting factors[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(5):1306-1312.
- [31] 秦承志, 杨 琳, 朱阿兴, 等. 平缓地区地形湿度指数的计算方法[J]. 地理科学进展, 2006, 25(6):87-93.
- QIN Cheng-zhi, YANG Lin, ZHU A-xing, et al. Computation method of topographic wetness index in low relief area[J]. *Progress in Geography*, 2006, 25(6):87-93.
- [32] 毛南赵, 梁小英, 段 宁, 等. 基于ODD框架的农户有限理性决策模型的构建及模拟:以陕西省米脂县马蹄洼村为例[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(5):169-176, 223.
- MAONAN Zhao, LIANG Xiao-ying, DUAN Ning, et al. The construction and simulation of the bounded rationality of the farmer household's decision making based on the ODD structure[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(5):169-176, 223.
- [33] 田均良, 彭祥林, 等. 黄土高原土壤地球化学[M]. 北京:科学出版社, 1994:111-114.
- TIAN Jun-liang, PENG Xiang-lin, et al. Soil geochemistry of the Loess Plateau[M]. Beijing:Science Press, 1994:111-114.
- [34] 郑国璋. 陕北黄土丘陵区农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 土壤通报, 2013, 44(6):1491-1495.
- ZHENG Guo-zhang. Evaluation of heavy metal contamination and its potential ecological risk to the farmland soils in Loess Hilly area of north Shaanxi Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(6):1491-1495.
- [35] 张玉斌, 曹 宁, 余 雕, 等. 黄土高原残塬沟壑区梯田土壤重金属分布特征[J]. 中国农学通报, 2009, 25(12):252-256.
- ZHANG Yu-bin, CAO Ning, SHE Diao, et al. Heavy metal distribution feature in terrace soil on the Loess Gullied-Hilly area[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(12):252-256.
- [36] 黄绍文, 金继运, 和爱玲, 等. 农田不同利用方式下土壤重金属区域分异与评价[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊):540-548.
- HUANG Shao-wen, JIN Ji-yun, HE Ai-ling, et al. Regional differentiation and status of heavy metals in rural soils under different patterns of land uses[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Suppl):540-548.
- [37] 刘荣乐, 李书田, 王秀斌, 等. 我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2):392-397.
- LIU Rong-le, LI Shu-tian, WANG Xiu-bin, et al. Contents of heavy metal in commercial organic fertilizers and organic wastes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2):392-397.
- [38] 祝修高. 平潭土壤重金属空间变异及来源分析[D]. 福州:福建师范大学, 2016:48-49.
- ZHU Xiu-gao. Spatial variability and source analysis of soil heavy metals in Pingtan[D]. Fuzhou:Fujian Normal University, 2016:48-49.