DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.03.017
戴倩倩, 徐梦洁, 庄舜尧, 等. 基于地理探测器的封丘县农田土壤重金属分布影响因素研究. 土壤, 2022, 54(3): 564–571.

基于地理探测器的封丘县农田土壤重金属分布影响因素研究①

戴倩倩[1], 徐梦洁[1*], 庄舜尧[2], 陈冬峰[2]

(1 南京农业大学公共管理学院, 南京 210095; 2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘 要: 以河南省封丘县为研究区, 利用反距离加权插值法研究了农田土壤重金属 Cd、Cu、Cr、Pb、Zn 和 As 的空间分布特征; 同时, 应用基于地理探测器模型定量研究了 8 个因子对土壤重金属空间分布的影响。结果表明: 研究区土壤 Cd、Cr、Pb 和 Zn 含量超过了黄河下游潮土背景值, 而 Cu 和 As 含量低于黄河下游潮土背景值; 其中有极少量样点 Cd 含量超过农用地土壤污染风险筛选值, 而其他均未超标。在空间分布上, Cd、Cr、Pb 含量的高值区分别主要分布在研究区中部、西南部和北部, As 含量的高值区分布在研究区北部和西南部, Cu 和 Zn 含量的高值区在研究区南北方向呈带状分布。Cd、Pb 和 As 含量的低值区主要分布在研究区南部, Cr、Cu、Zn 和 As 含量的低值区主要分布在研究区中部。地理探测器分析表明, 土壤重金属空间分布受到自然因子和人为因子的共同作用, 有机质含量是影响较大的自然因子, 人口密度是影响较大的人为因子。两因子之间的交互作用均大于单因子的作用, 其中有机质含量与各因子的交互作用对重金属空间分布的影响较显著。

关键词: 土壤重金属; 空间分布; 地理探测器; 封丘县

中图分类号: X53 **文献标志码**: A

Study on Factors Influencing Heavy Metal of Farmland Soils Based on Geographical Detector in Fengqiu County

DAI Qianqian[1], XU Mengjie[1*], ZHUANG Shunyao[2], CHEN Dongfeng[2]

(1 *College of Public Administration*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210095, *China*; 2 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture*, *Institute of Soil Science*, *Chinese Academy of Sciences*, *Nanjing* 210008, *China*)

Abstract: The spatial distribution of Cd, Cu, Cr, Pb, Zn and As in cropland in Fengqiu County of Henan Province were explored based on inverse distance weighted interpolation method. Simultaneously, the geographical detector model was adopted to illustrate the effects of 8 influencing factors on heavy metal spatial distribution. The results show that the average contents of Cd, Cr, Pb and Zn are higher while Cu and As are lower than the background values of the fluvo-aquic soil in the lower Yellow River. All heavy metal contents in soil are lower than the allowable values for agricultural land except for Cd from few samples. The high-values of Cd, Cr, and Pb are distributed in the middle, southwest and north, respectively, while As is distributed in the north and southwest. The high-values of Cu and Zn are shown in zonal distribution. The low-values of Cd, Pb and As are mainly distributed in the south, and the low-values of Cr, Cu, Zn and As mainly distributed in the middle. According to the geo-detector model, the spatial distribution of heavy metals is influenced by both the natural and artificial factors, among of which, soil organic matter content is a dominant natural factor, while the population density is the primary artificial one. The interaction effect of each two factors is greater than that of single factor, especially the interaction between soil organic matter and other factors.

Key words: Soil heavy metals; Spatial distribution; Geographical detector; Fengqiu County

土壤质量与粮食安全、农产品质量和农业的可持续发展息息相关[1-2]。随着工业化、城市化和农业集约化的快速发展, 我国农田土壤环境受到了巨大冲击, 土壤污染日趋严重[3-4] , 其中重金属污染是土壤污染主要形式之一, 被称为潜在的“化学定时炸弹”[5-6]。当农田土壤中重金属累积到一定程度时, 不仅导致农业综合生产能力下降, 还可能对人类健康构成威胁[7-8]。农产品质量会受到产地环境质量的直

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFE0112700)资助。

* 通讯作者(xmj@njau.edu.cn)

作者简介: 戴倩倩(1997—), 女, 安徽潜山人, 硕士研究生, 主要从事土地资源管理方面研究。E-mail:daiqianq@163.com

接影响，因此，对农田土壤重金属的污染状况开展调研与防治显得尤为重要[9]。

了解土壤重金属的分布特征及其影响因素是土壤重金属调研的重要内容，也是土壤重金属污染防治的基础。许多学者通过研究土壤重金属污染特征与影响因素，发现土壤重金属的空间分布表现出明显的异质性[10]。自然因素和人为因素都会影响土壤重金属含量及分布，且不同因子对重金属元素的影响会因地而异，贡献度也存在差异。李福燕等[11]发现，有机质含量与 Hg、Cd、Cr 和 Pb 含量呈正相关；pH 与 Cd、Pb 含量呈正相关，与 Hg 和 Cr 含量呈负相关。余小芬等[12]对云南农用地耕作层土壤重金属研究发现，重金属含量与土壤类型、海拔高度、土壤 pH 等因素相关。刘琼峰等[13]研究指出，土壤 pH、有机质、氮磷含量是影响土壤 Pb、Cd 含量的重要因素。类似地，还有许多研究也表明，距道路、居民点以及工矿企业的距离对土壤重金属的空间分布都有较大影响[14-15]。但是这些研究在自然和人为因子如何共同影响土壤重金属空间分布的机制方面，还有待深入。地理探测器可以利用空间分异性来探测因子对因变量的影响[16]。该方法已在医学[17]、地理学[18]领域得到广泛运用，在土壤学[19]研究中也有所实践，但在土壤重金属研究中还较为少见。

黄淮海平原作为我国重要的粮食主产区，其土壤重金属污染状况已受到较多关注[20-21]。但是，土壤重金属污染影响因子方面的研究还不多。封丘县位于黄淮海平原中部，是我国重要的粮食生产基地，近年来农药化肥使用量大幅增长，养殖业规模不断扩大，可能会加速土壤重金属在耕地中的累积[22]。因此，本文以封丘县耕地土壤 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 和 As 等重金属为研究对象，通过土壤系统采样分析，采用反距离加权插值法获得土壤重金属含量的空间分布特征，同时利用地理探测器法研究土壤重金属空间分布的自然与人为影响因子，从而揭示各因子及交互作用对土壤重金属空间分布的影响。研究结果可为农田土壤重金属的管理及防范提供参考，为当地种植业和养殖业规划提供依据，促进区域农业发展与环境保护和谐统一。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

封丘县位于河南省东北部(34°53′ ~ 35°14′ N，114°14′ ~ 114°46′ E)，是黄淮海平原的一部分，属暖温带大陆性季风气候，年降水量 615.1 mm，无霜期 214 d，年平均气温 13.5 ~ 14.5 ℃，海拔高度 65 ~ 72.5 m。全县总面积 1 220.5 km^2，其中耕地面积 6.17×10^4 hm^2，是我国重要的粮食生产基地。

1.2　数据来源

1.2.1　土壤重金属数据　　于 2018 年 4 月，基于研究区遥感影像和土地利用类型，采用网格化布点方法，按照梅花形采样法利用土钻进行田间采样，采样深度为 0 ~ 15 cm，共获取土壤样品 117 份。采样同时，利用 GPS 记录采样点的坐标。研究区的区位及采样点分布情况如图 1 所示。采集的土样带回实验室，置于室内阴凉通风处自然风干，挑出杂物，经研磨和过尼龙筛等预处理，对样品中 Cd、Cu、Cr、Pb、Zn 和 As 及有机质含量进行测定。

1.2.2　其他数据　　其他数据包括 DEM 数据、遥感数据、土壤类型数据、地理空间数据和人口数据。DEM(ASTER GDEM)和遥感数据(Landsat8 OLI)均来

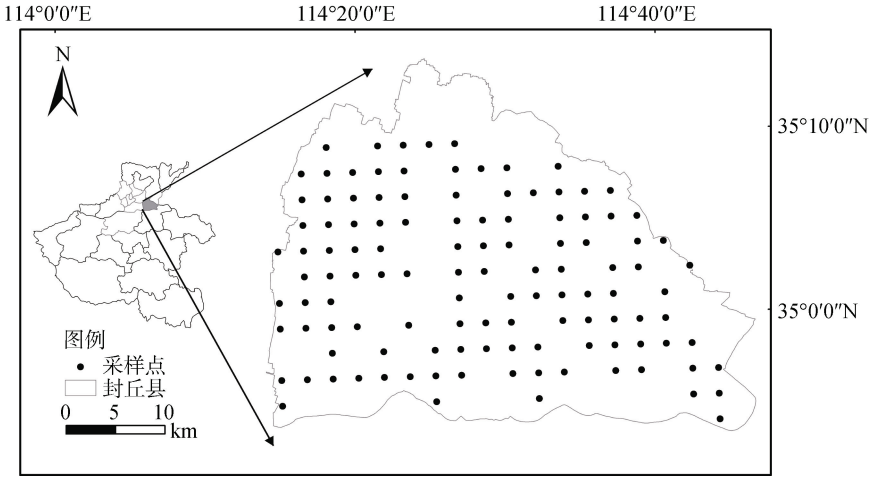


图 1　研究区区位与采样点分布
Fig. 1　Locations of study area and sampling sites

源于地理空间数据云平台(www.gscloud.cn)；土壤类型数据来源于世界土壤数据库(HWSD)[23]；地理空间数据来源于 OpenStreetMap(https://www.openstreetmap.org/)。另外，人口密度数据来自于中国科学院地理科学与资源研究所(http://www.resdc.cn)的中国人口空间分布公里网格数据集[24]。本研究以高程(*X*1)、坡度(*X*2)、有机质(*X*3)、土壤类型(*X*4)、归一化植被指数 NDVI(*X*5)、到村庄的距离(*X*6)、到公路的距离(*X*7)和人口密度(*X*8)等作为土壤重金属影响因子，各因子分布状况如图 2 所示。

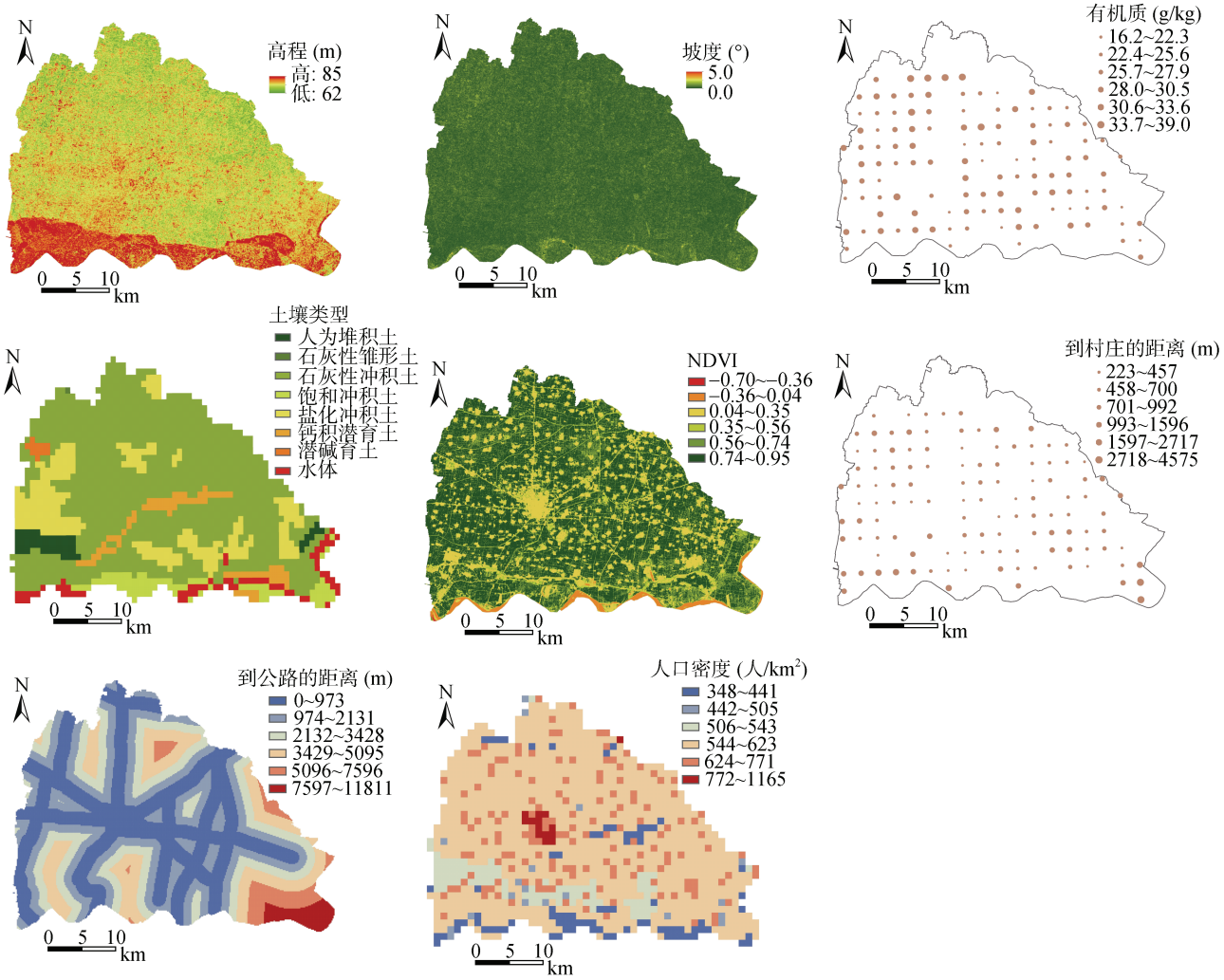


图 2　各影响因子分布图

Fig. 2　Distributions of various influencing factors

1.3　样品分析与数据处理

1.3.1　样品分析　　土壤中 Cd、Pb 含量采用等离子体质谱法(ICP)测定，Cu、Cr、Zn 含量采用等离子体发射光谱法测定，As 含量采用原子荧光法测定[25]。有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定[26]。

1.3.2　数据处理与分析　　在 ArcMap 软件中基于 DEM 数据，经 Spatial-Analyst 处理得到研究区高程、坡度因子；在 ENVI 软件中，遥感影像经过几何校正、大气校正等预处理，利用波段运算得到 NDVI；在 ArcMap 中利用距离分析工具得到距离因子。

本文运用 SPSS 22.0 软件对土壤重金属含量进行描述性统计，利用 ArcMap 10.2 中的反距离加权插值(inverse distance weighted, IDW)生成研究区土壤重金属含量的空间分布图[27]，利用地理探测器法研究土壤重金属空间分布的自然与人为影响因子。地理探测器是探测空间分异性以及揭示其影响力的一种统计学方法，在 GeoDetector 软件中操作，核心思想假设为：如果某个自变量对某个因变量有重要影响，那么自变量和因变量的空间分布应该具有相似性[16]。本研究主要用到其中的因子探测器和交互作用探测器。因子探测器可以衡量因子在多大程度上解释了土壤重金属的空间变异，因子的影响力以 q 值表示，即自

变量可以解释 100×q%的因变量的空间分布。交互作用探测器可以识别两个因子之间的交互作用是否会增强或减弱对土壤重金属的解释力，交互作用类型如表 1 所示。q 值计算公式为:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2}\sum_{i=1}^{L} N_i\sigma_i^2 \quad (1)$$

式中：q 表示影响因子对空间分异的解释力,值域为[0,1]，q 值越大，代表自变量与因变量的空间分布越一致，自变量的解释力越强；i=1，$\cdots L$ 为影响因子的分层；N_i 和 N 分别为层 i 和研究区的单元数；σ_i^2 和 σ^2 分别是层 i 和研究区的方差。

表 1　两个自变量对因变量交互作用的类型
Table 1　Types of interaction between two covariates

判断依据	交互作用
$q(X1\cap X2) < \text{Min}(q(X1), q(X2))$	非线性减弱
$\text{Min}(q(X1), q(X2)) < q(X1\cap X2) < \text{Max}(q(X1), q(X2))$	单因子非线性减弱
$q(X1\cap X2) > \text{Max}(q(X1), q(X2))$	双因子增强
$q(X1\cap X2) = q(X1) + q(X2)$	独立
$q(X1\cap X2) > q(X1) + q(X2)$	非线性增强

2　结果与分析

2.1　土壤重金属含量的描述性统计

由表 2 可知，研究区 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 和 As 的含量范围分别为 0.13 ~ 1.08、39.78 ~ 73.03、8.77 ~ 31.71、15.50 ~ 37.33、36.14 ~ 101.60 和 2.89 ~ 17.02 mg/kg，平均值分别为 0.23、55.59、20.23、24.78、68.59 和 8.62 mg/kg。除 Cu 和 As 外，其余重金属元素的平均值均超过了黄河下游潮土背景值[28]，尤其是 Cd 元素，其平均值是背景值的 2.5 倍。由此表明，这些重金属元素(尤其是 Cd)在表层土壤中存在一定的富集趋势。除 Cd 有极少量超标样点外，其他重金属元素均未超过农用地土壤污染风险筛选值[25]，说明目前土壤重金属含量对当地农产品质量安全的风险较低。变异系数可以反映数据的离群程度，研究区土壤重金属的变异系数在 10% ~ 100%，属于中等变异，变异程度排序为 Cd > As > Cu > Zn > Pb > Cr。相关性分析结果(表 3)显示，Cd 含量与 Cr、 As 含量相关性不显著，与 Cu、Zn 含量显著正相关(P<0.05)，与 Pb 含量极显著正相关(P<0.01)；Cr、Cu、Pb、Zn 含量与 As 含量两两极显著正相关(P<0.01)。相关系数越大，说明元素来源或分布越相似[29]。

2.2　土壤重金属含量的空间分布特征

利用反距离加权插值法(IDW)得到研究区重金属含量的空间分布，如图 3 所示。由图 3 可知，各重金属元素在空间上的分布情况不尽相同。Cd 的高值区主要分布于研究区中部，低值区主要分布在南部，呈现从中部向南递减的趋势。Cr 的高值区主要分布在研究区西南部，低值区主要分布在中部。从整体上看，Cu 和 Zn 在空间分布上具有相似性，高值区在南北方向呈带状分布，低值区主要聚集在中部。Pb 的高值区主要在研究区北部，低值区在研究区南部。As 的高值区分布于研究区北部和西南部，低值区在研究区中部。

表 2　土壤重金属含量的描述性统计(mg/kg)
Table 2　Descriptive statistics of soil heavy metal contents

重金属	最小值	最大值	平均值	标准差	偏度	峰度	变异系数	背景值[28]	筛选值[25]
Cd	0.13	1.08	0.23	0.10	6.14	51.83	0.42	0.09	0.6
Cr	39.78	73.03	55.59	6.51	0.40	-0.16	0.12	53.6	250
Cu	8.77	31.71	20.23	4.37	0.11	0.19	0.22	21.4	100
Pb	15.50	37.33	24.78	4.31	0.51	0.05	0.17	14.4	170
Zn	36.14	101.60	68.59	12.01	0.01	0.02	0.18	65.1	300
As	2.89	17.02	8.62	2.72	0.57	0.50	0.32	12.94	25

表 3　土壤重金属相关性
Table 3　Correlation analysis of soil heavy metals

	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	As
Cd	1					
Cr	0.115	1				
Cu	0.233*	0.803**	1			
Pb	0.396**	0.612**	0.767**	1		
Zn	0.221*	0.798**	0.963**	0.758**	1	
As	0.126	0.808**	0.883**	0.663**	0.852**	1

注：*表示在 P<0.05 水平显著相关，**表示在 P<0.01 水平极显著相关。

2.3　土壤重金属空间分布的影响因素

自然因素和人为因素是影响土壤重金属含量空间分布的两个方面，参考前人的相关研究，结合数据的可获取性，本文选择了高程、坡度、有机质含量、土壤类型和 NDVI 等自然影响因子，选择到村庄的距离、到公路的距离和人口密度等作为人为影响因子，探究影响土壤重金属空间分布的因素，因子分布情况如图 2 所示。根据地理探测器软件对数据格式的要求，将连续型的数据进行离散化处理。

2.3.1　影响因子影响力分析　　在地理探测器中，分别将 6 种重金属作为因变量，利用因子探测器探测 8 个因子对土壤重金属的影响力。由图 4 和表 4 可知，各影响因子对土壤重金属的空间分布有着不同程度的影响。Cd 空间分布的主要影响因子为土壤类型，其次为 NDVI 和人口密度。Cr 空间分布的主要影响

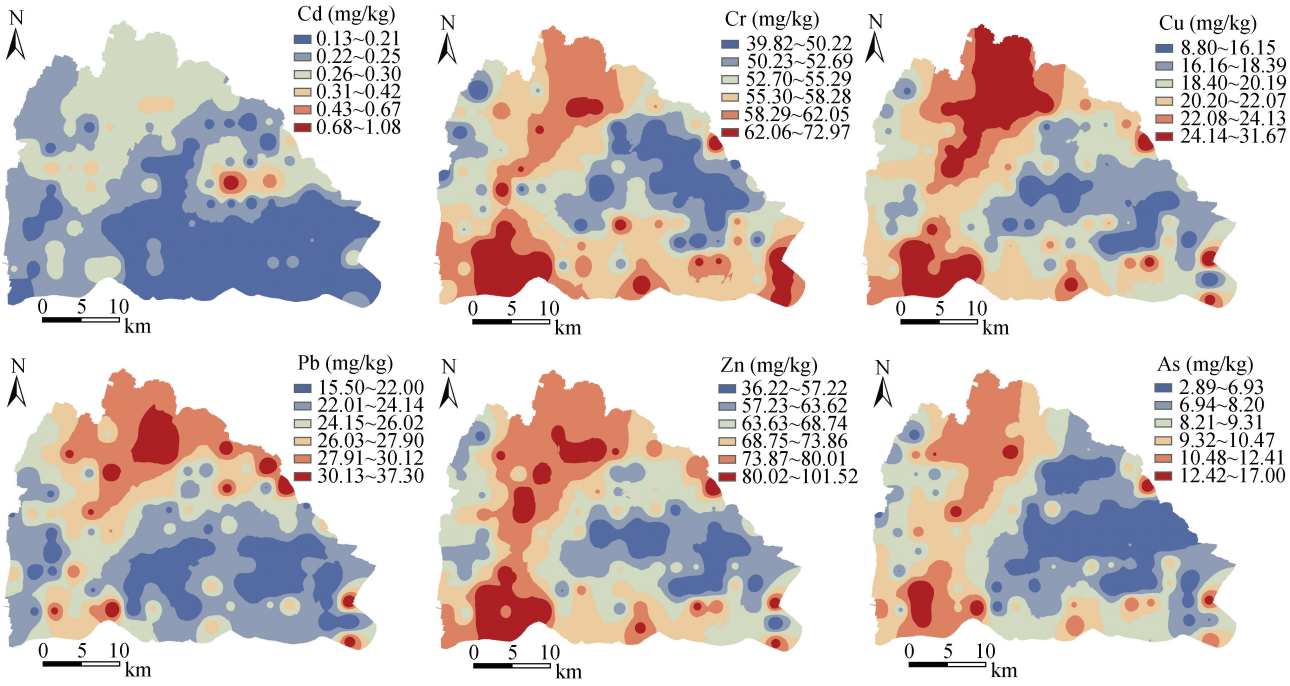


图 3 土壤重金属空间分布图

Fig. 3 Spatial distributions of soil heavy metals

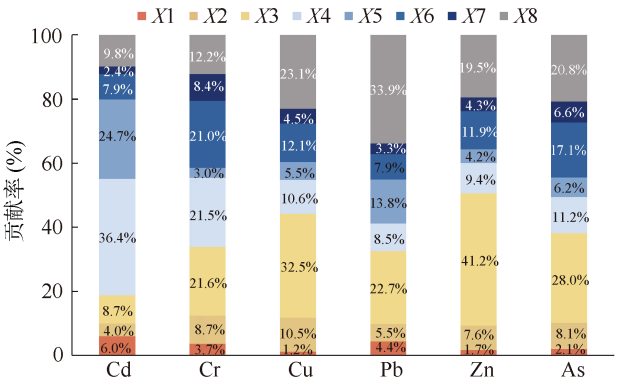


图 4 各影响因子对土壤重金属分布的贡献度

Fig. 4 Contributions of influencing factors to soil heavy metal distribution

表 4 基于地理探测器的土壤重金属影响因子分析

Table 4 Influencing factor analysis of soil heavy metals based on geographical detector

重金属	*X*1	*X*2	*X*3	*X*4	*X*5	*X*6	*X*7	*X*8
Cd	0.031	0.021	0.045	0.186	0.126	0.040	0.012	0.050
Cr	0.024	0.057	0.143	0.142	0.020	0.139	0.056	0.081
Cu	0.008	0.071	0.218**	0.071	0.037	0.081	0.030	0.155**
Pb	0.026	0.032	0.133	0.050	0.081	0.046	0.020	0.199***
Zn	0.011	0.048	0.263**	0.060	0.027	0.076	0.028	0.125
As	0.011	0.045	0.155*	0.062	0.034	0.095	0.036	0.115*

注：*、**、***分别表示在 $P<0.1$、$P<0.05$、$P<0.01$ 水平影响显著。

因子为有机质含量，其次为土壤类型和到村庄的距离。Cu 空间分布的主要影响因子为有机质含量，其次为人口密度和到村庄的距离。Pb 空间分布的主要影响因子为人口密度，其次为有机质含量和 NDVI。Zn 空间分布的主要影响因子为有机质含量，其次为人口密度和到村庄的距离。As 空间分布的主要影响因子为有机质含量，其次为人口密度和到村庄的距离。可以看出，自然因子中有机质含量的影响较大，人为因子中人口密度影响较大。

2.3.2 交互因子影响力分析 本研究利用交互作用探测器识别了不同影响因子对研究区土壤重金属空间分布的交互作用。结果表明，两因子之间交互作用影响力的 q 值均大于单因子的 q 值，主要表现为双线性增强和非线性增强，说明影响因子间的交互作用影响力高于单一因子影响力。对不同重金属元素，两因子之间的交互作用强弱有所差异。本文主要选取了影响前 5 位的因子对进行分析，如表 5 所示。

*X*3∩*X*5、*X*5∩*X*6、*X*3∩*X*4、*X*4∩*X*5 和 *X*5∩*X*7 的交互作用对 Cd 的空间分布影响力均达到了 0.7 以上，其中 *X*3∩*X*5 交互作用的影响力达到了 0.776。*X*3∩*X*7、*X*3∩*X*6、*X*3∩*X*4 的交互作用对 Cr 的空间分布影响力达到 0.4 以上，其中 *X*3∩*X*7 交互作用的影响力达到了 0.459。*X*3∩*X*7、*X*3∩*X*8、*X*2∩*X*3、*X*1∩*X*3 和 *X*3∩*X*5 的交互作用对 Cu 的空间分布影响力达到

表 5　交互作用对土壤重金属影响力的前 5 位成对因子及其影响力
Table 5　Top 5 paired factors and their interaction influence on soil heavy metals

元素	1	2	3	4	5
Cd	*X*3∩*X*5(0.776)	*X*5∩*X*6(0.762)	*X*3∩*X*4(0.749)	*X*4∩*X*5(0.721)	*X*5∩*X*7(0.700)
Cr	*X*3∩*X*7(0.459)	*X*3∩*X*6(0.412)	*X*3∩*X*4(0.407)	*X*3∩*X*8(0.364)	*X*2∩*X*3(0.350)
Cu	*X*3∩*X*7(0.481)	*X*3∩*X*8(0.474)	*X*2∩*X*3(0.443)	*X*1∩*X*3(0.442)	*X*3∩*X*5(0.401)
Pb	*X*5∩*X*8(0.433)	*X*1∩*X*3(0.417)	*X*3∩*X*8(0.407)	*X*3∩*X*7(0.400)	*X*5∩*X*7(0.382)
Zn	*X*3∩*X*7(0.510)	*X*3∩*X*8(0.498)	*X*1∩*X*3(0.469)	*X*2∩*X*3(0.451)	*X*3∩*X*6(0.428)
As	*X*3∩*X*7(0.449)	*X*3∩*X*8(0.393)	*X*2∩*X*3(0.388)	*X*3∩*X*6(0.380)	*X*5∩*X*8(0.344)

注：*X*1、*X*2、*X*3、*X*4、*X*5、*X*6、*X*7 和 *X*8 分别代表高程、坡度、有机质含量、土壤类型、NDVI、到村庄的距离、到公路的距离和人口密度，表格括号内为对应的影响力 *q* 值。

0.4 以上，其中 *X*3∩*X*7 交互作用的影响力达到了 0.481。*X*5∩*X*8、*X*1∩*X*3、*X*3∩*X*8 与 *X*3∩*X*7 的交互作用对 Pb 的空间分布影响力达到 0.4 以上，其中 *X*5∩*X*8 交互作用的影响力达到了 0.433。*X*3∩*X*7、*X*3∩*X*8、*X*1∩*X*3、*X*2∩*X*3 和 *X*3∩*X*6 对 Zn 的空间分布影响力达到了 0.4 以上，其中 *X*3∩*X*7 交互作用的影响力达到了 0.51。*X*3∩*X*7 交互作用对 As 的空间分布影响力达到了 0.449。*X*3∩*X*7、*X*3∩*X*8 出现频数均达到 5 次，在所有因子对中出现频数最高，可见 *X*3∩*X*7(有机质∩到村庄的距离)、*X*3∩*X*8(有机质∩人口密度)对研究区土壤重金属空间分布的影响较大。从研究区主要影响因子交互作用对于重金属含量的解释力来看，排在前 5 位的因子对出现频数按从大到小排列顺序如下：*X*3∩*X*7(5)=*X*3∩*X*8(5)>*X*2∩*X*3(4)>*X*1∩*X*3(3)=*X*3∩*X*6(3)>*X*3∩*X*4(2)=*X*3∩*X*5(2)=*X*5∩*X*7(2)=*X*5∩*X*8(2)>*X*4∩*X*5(1)=*X*5∩*X*6(1)。

3　讨论

本研究结果显示，研究区重金属 Cd、Cr、Pb 和 Zn 含量的平均值均超过了黄河下游潮土背景值，这可能与农业生产管理过程中施用化肥和有机肥有关。含磷肥料中 Cd、Cr 含量较高，加上当地养殖业发展迅速，Cu、Zn 和 Cr 作为我国《饲料添加剂品种目录》中允许使用的微量元素，是饲料中常用的添加剂，故而使用畜禽粪便作为肥料也会向农田土壤中带入大量重金属元素[30-31]。Pb 含量受人口密度的影响最大，说明 Pb 的污染源与人类活动密切相关。Cr、Cu、Zn 和 As 含量在空间上具有相似的分布特征，这与相关性分析的结果相吻合。

地理探测器模型对研究区耕地土壤重金属空间分布的单因子分析结果表明，不同因子对土壤重金属的空间分布有着不同程度的影响，这与以往对耕地土壤重金属影响因子分析得到的结论一致[32]。有机质含量和人口密度对土壤重金属的影响较大。土壤中的有机质能与重金属元素形成络合物，影响重金属的迁移转化，进而影响土壤重金属的积累[33-34]。人口密度一定程度上反映了人类生产和生活活动的强度，人口愈密集的地方，人类活动范围越大，活动越频繁，产生的生活垃圾会带来重金属[35]。在周伟等[36]对重庆市土壤重金属的相关研究中，地势是土壤重金属含量分布差异的最主要影响因素，而本研究中高程、坡度对重金属的影响较小，主要是因为研究区地势较为平坦，整体差异不大。一般认为，交通运输过程中排放的尾气和轮胎摩擦会产生 Pb、Zn 重金属颗粒从而对周围环境造成污染，但本研究中到公路的距离对土壤重金属的影响较小，可能是因为本研究中农田采样点离公路的距离较远，有研究表明，重金属含量在一定范围内与到公路的距离成负相关，超过临界点的区域受公路的影响不大[37]。

交互作用探测器分析结果显示，Cd 元素的最高解释力因子对均来源于自然因子，除此之外的重金属元素最高解释力的因子对分别来源于自然因子与人为因子。对 6 种重金属元素，交互作用解释力较单因子解释力均大幅提高，这与以往学者们的研究结论一致[32,38]。并且从交互作用结果来看，人为因子与自然因子的交互作用强于自然因子之间以及人为因子之间交互作用。自然因子与人为因子协同作用于空间分异，造成了重金属空间分布上的不均匀性。虽然 NDVI 和到公路的距离等因子单独作用时影响并不明显，但是与其他因子共同作用时，也会加强对土壤重金属空间分异的解释力。

地理探测器虽然在量化因子间交互作用方面具有优势，但也存在一定的不足，例如对于离散化数值型变量，不同的分类方法以及分类的数量会导致探测结果产生差异。本研究中，由于研究尺度以及数据的可获取性，有些自然因子如降水量、人为因子如施肥

情况未纳入因子选择范围，后续研究可进一步进行探讨。研究结果中影响力较大的因子可作为土壤重金属空间分布预测的辅助变量，提高预测精度。同时结合自然因子和人为因子的分布情况，可识别土壤重金属污染风险地区，有针对性地关注和治理，如可以通过技术手段调节土壤性质、优化农田规划，从而有效地遏制重金属增加态势，改善土壤质量和生态环境。

4 结论

研究区重金属 Cd、Cr、Pb 和 Zn 含量的平均值超过了黄河下游潮土背景值，Cu 和 As 含量的平均值未超过该背景值，在农作物管理过程中，要注意有机肥的施用量。变异系数表明，6 种重金属元素均呈现中等变异。在空间分布上，Cd、Cr、Pb 的高值区分别分布在研究区中部、西南部、北部，As 的高值区分布在研究区北部和西南部，Cu 和 Zn 的高值区在南北方向呈带状分布。Cd、Pb 和 As 的低值区主要分布在研究区南部，而 Cr、Cu、Zn 和 As 的低值区主要分布在研究区中部。从影响因素上看，自然因子中的土壤有机质含量和人为因子中的人口密度是影响土壤重金属空间分布的主要因子。两因子之间的交互作用影响力均大于单个因子的影响力，主要呈现双线性增强或非线性增强。在进行土壤重金属防治时，应将 Cd 作为重点监测目标。

参考文献：

[1] 陈杰, 陈晶中, 檀满枝. 城市化对周边土壤资源与环境的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2002, 12(2): 70–74.

[2] 赵其国. 珍惜和保护土壤资源: 我们义不容辞的责任[J]. 科技导报, 2016, 34(20): 66–73.

[3] 曾希柏, 徐建明, 黄巧云, 等. 中国农田重金属问题的若干思考[J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 186–194.

[4] 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: 690–700.

[5] 范拴喜, 甘卓亭, 李美娟, 等. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(17): 310–315.

[6] Stigliani W M, Doelman P, Salomons W, et al. Chemical time bombs: Predicting the unpredictable[J]. Environment: Science and Policy for Sustainable Development, 1991, 33(4): 4–30.

[7] 张引娥. 重金属元素在厦门-漳州土壤剖面中的分布特征及其环境意义[J]. 地球与环境, 2013, 41(1): 13–19.

[8] Vatanpour N, Feizy J, Hedayati Talouki H, et al. The high levels of heavy metal accumulation in cultivated rice from the Tajan River Basin: Health and ecological risk assessment[J]. Chemosphere, 2020, 245: 125639.

[9] 张桃林. 科学认识和防治耕地土壤重金属污染[J]. 土壤, 2015, 47(3): 435–439.

[10] 陈文轩, 李茜, 王珍, 等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2020, 41(6): 2822–2833.

[11] 李福燕, 李许明, 吴鹏飞, 等. 海南省农用地土壤重金属含量与土壤有机质及 pH 的相关性[J]. 土壤, 2009, 41(1): 49–53.

[12] 余小芬, 陈军, 彭荣珍, 等. 滇中农用地土壤重金属影响因素研究[J]. 西南农业学报, 2012, 25(5): 1765–1769.

[13] 刘琼峰, 李明德, 段建南, 等. 农田土壤铅、镉含量影响因素地理加权回归模型分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 225–234, 300.

[14] 霍霄妮, 李红, 孙丹峰, 等. 北京耕地土壤重金属空间自回归模型及影响因素[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 78–82.

[15] Kim H, Lee M N, Lee J H, et al. Distribution and extent of heavy metal(loid) contamination in agricultural soils as affected by industrial activity[J]. Applied Biological Chemistry, 2020, 63: 31.

[16] 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.

[17] Wang J F, Wang Y, Zhang J, et al. Spatiotemporal transmission and determinants of typhoid and paratyphoid fever in Hongta District, Yunnan Province, China[J]. PLoS Neglected Tropical Diseases, 2013, 7(3): e2112.

[18] 刘彦随, 李进涛. 中国县域农村贫困化分异机制的地理探测与优化决策[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 161–173.

[19] 王欢, 高江波, 侯文娟. 基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区土壤侵蚀定量归因[J]. 地理学报, 2018, 73(9): 1674–1686.

[20] 周玲莉, 薛南冬, 杨兵, 等. 黄淮平原农田土壤中重金属的分布和来源[J]. 环境化学, 2013, 32(9): 1706–1713.

[21] 夏敏, 赵炳梓, 张佳宝. 基于 GIS 的黄淮海平原典型潮土区土壤重金属积累研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 684–692.

[22] Shi T R, Ma J, Wu X, et al. Inventories of heavy metal inputs and outputs to and from agricultural soils: A review[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 164: 118–124.

[23] Food and Agriculture Organization of the United Nations(FAO), International Institute for Applied Systems Analysis. China soil map based harmonized world soil database (HWSD) (v1.1) (2009). National Tibetan Plateau Data Center, 2019.

[24] 徐新良. 中国人口空间分布公里网格数据集. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统(http://www.resdc.cn/DOI), 2017. DOI:10.12078/2017121101.

[25] 生态环境部国家市场监督管理总局. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)(GB 15618—2018)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.

[26] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[27] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2012.

[28] 邵丰收, 周皓韵. 河南省主要元素的土壤环境背景值[J]. 河南农业, 1998(10): 29.

[29] 宁翠萍, 李国琛, 王颜红, 等. 细河流域农田土壤重金属污染评价及来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(3): 487–495.
[30] 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 等. 我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 986–996.
[31] 赵睿, 吴智书, 罗阳, 等. 猪粪与农田土壤中重金属累积污染的相关分析[J]. 土壤, 2017, 49(4): 753–759.
[32] 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.
[33] Zeng F R, Ali S, Zhang H T, et al. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants[J]. Environmental Pollution, 2011, 159(1): 84–91.
[34] 孙花, 谭长银, 黄道友, 等. 土壤有机质对土壤重金属积累、有效性及形态的影响[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2011, 34(4): 82–87.
[35] 刘霈珈, 吴克宁, 罗明. 太湖流域典型农用地表层土壤重金属空间分异潜在风险因子识别[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(3): 609–622.
[36] 周伟, 李丽丽, 周旭, 等. 基于地理探测器的土壤重金属影响因子分析及其污染风险评价[J]. 生态环境学报, 2021, 30(1): 173–180.
[37] 郭广慧, 雷梅, 陈同斌, 等. 交通活动对公路两侧土壤和灰尘中重金属含量的影响[J]. 环境科学学报, 2008, 28(10): 1937–1945.
[38] 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.