

基于地理探测器的农田土壤重金属影响因子分析

李雨^{1,2}, 韩平², 任东¹, 罗娜², 王纪华^{1,2}

(¹三峡大学计算机与信息学院, 湖北宜昌 443002; ²北京市农林科学院北京农业质量标准与检测技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 【目的】研究土壤重金属与影响因子以及不同土壤重金属之间相关关系, 为土壤重金属空间预测模型提供更加全面的辅助变量。【方法】利用地理探测器模型, 结合空间插值技术对 2014 年湖南省湘潭县 5 个乡镇农田中 5 种土壤重金属 Pb、Cd、As、Cr 和 Hg 的空间分布变化与 6 种影响因子以及 5 种土壤重金属之间的相关性和交互作用进行研究。【结果】研究表明, GDP、平均温度和相对湿度对 5 种土壤重金属解释力较大 ($P_{D,H}$ 值均在 0.5 以上), 土壤 pH、土壤类型与高程对土壤重金属的解释力较小 ($P_{D,H}$ 值均在 0.3 以下), 其中土壤类型对于 5 种土壤重金属的解释力最低 ($P_{D,H}$ 值均在 0.1 以下)。5 种土壤重金属中, Cr 对 Cd 的解释力最强 ($P_{D,H}$ 值达到 0.95), As 对 Cd 的解释力最小 ($P_{D,H}$ 值仅为 0.20)。平均温度、相对湿度、GDP 对土壤重金属的影响显著高于其他影响因子, 而其他影响因子之间的解释力差异并不显著。各影响因子之间和 5 种重金属元素之间均具有相互增强或非线性增强作用。【结论】土壤重金属的空间分布是由多种影响因子共同作用的结果。通过地理探测器模型发现, GDP、平均温度和相对湿度等影响因子对研究区域内的土壤重金属的空间分布具有较强的解释力, 这些影响因子可作为研究区土壤重金属空间预测模型的辅助变量。地理探测器模型可以对多种影响因子进行更加全面的分析, 为土壤重金属空间预测模型的建立提供有效的依据。

关键词: 地理探测器; 土壤重金属; 影响因子; 相关分析; 交互作用

Influence Factor Analysis of Farmland Soil Heavy Metal Based on the Geographical Detector

LI Yu^{1,2}, HAN Ping², REN Dong¹, LUO Na², WANG JiHua^{1,2}

(¹Computer and Information College of Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei; ²Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097)

Abstract: 【Objective】To study the correlation between soil heavy metals and influencing factors and heavy metals in different soils, as well as to provide a more comprehensive auxiliary variable for soil heavy metal spatial prediction model. 【Method】The spatial distributions of heavy metals Pb, Cd, As, Cr and Hg in five soils in five towns of Xiangtan County, Hunan Province were analyzed by using the geophysical model and the spatial interpolation technique. The correlation and interaction of spatial distributions of heavy metals and 6 factors, as well as that of five heavy metals, were studied. 【Result】The results showed that Gross Domestic Product (GDP), the average temperature and relative humidity had a greater explanatory power to the five kinds of soil heavy metals ($P_{D,H}$ values are above 0.5). Soil pH, soil type, elevation and soil heavy metals were less explanatory ($P_{D,H}$ values below 0.3). The soil type had the lowest explanatory power to five kinds of soil heavy metals ($P_{D,H}$ values were below 0.1). Among the five soil heavy metals, Cr has the strongest explanatory effect on Cd ($P_{D,H} = 0.95$), and As is the least ($P_{D,H} = 0.20$). The effects of average temperature, relative humidity and GDP on soil heavy metals were significantly higher than those of other Influence factors, while the difference of explanatory power between other influence factors was not significant. There are mutually reinforcing or non-linear enhancement effects between the Influence factors and between the five heavy metal elements. 【Conclusion】The

收稿日期: 2017-06-05; 接受日期: 2017-09-12

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(201403014-04) 国家高技术研究发展计划项目(2013AA102302)

联系方式: 李雨, Tel: 18230062821; E-mail: liyu1127641712@163.com. 通信作者王纪华, Tel: 010-51503488; E-mail: wangjh@nercita.org.cn

spatial distribution of heavy metals in soil is the result of the interaction of multiple influence factors. Based on the geographical exploration model, the Influence factors, such as GDP, average precipitation, average temperature and relative humidity, have strong explanatory power for the spatial distribution of heavy metals of research area in soils. These influence factors can be used as the soil heavy metal space in the study area predictive model of the auxiliary variable. Geographic detector model can provide a more comprehensive analysis of various influence factors, and provide an effective basis for the establishment of soil heavy metal spatial prediction model.

Key words: geographical detector; soil heavy metal; influence factor; correlation analysis; interaction

0 引言

【研究意义】土壤重金属分布具有复杂的空间变异性而非平稳性，在对土壤重金属的调查中，通常利用合适的空间插值方法，对未知样点重金属含量值进行预测。研究土壤重金属与影响因子之间的相关性不仅可以为空间插值方法提供更加准确和可靠的辅助变量，从而提高调查成果质量，而且可以为土壤重金属的污染分析评价和防治提供解决思路。【前人研究进展】常用的土壤重金属空间插值方法主要包括克里格法和协同克里格法^[1]。协同克里格法 (Co-Kriging) 可以视作普通克里格法的改进，通过用多个辅助变量对土壤重金属含量进行估值预测，较普通克里格法能有效提高预测精度^[2]。以往研究影响因子和土壤重金属之间的相关关系多采用的是皮尔逊相关系数 (pearson correlation coefficient, PCC) 和主成分分析法 (principal components analysis, PCA)，选择的影响因子多为连续数值型。例如章清等利用 Pearson 相关系数方法选择与土壤铜含量具有较高相关性的土壤因子 (全钾、全铬、阳离子交换量、全铝、全氮 ($P < 0.05$)) 作为辅助变量，利用主成分分析 (PCA) 对辅助变量进行降维求总得分处理后与协同克里格插值相结合构建土壤铜含量空间模型 (COKPCA)^[3]；郭龙等研究土壤 pH、有机质、有效磷、速效钾、碱解氮与土壤属性指标变量之间的关系，选择与预测变量之间具有较高相关性的自变量作为辅助变量用以提高预测精度^[4]。【本研究切入点】将影响因子作为辅助变量结合空间插值方法对土壤重金属进行空间预测是目前的研究热点。已有研究虽对土壤重金属的影响因子进行了分析，但主要围绕单个或少数几个连续数值型影响因子探讨，对于某些类别型影响因子尚缺乏综合全面的分析，同时也没有阐明各影响因子的相对重要程度和交互作用特征^[5]。因此，对空间插值中辅助变量的选择研究仍有待完善。为了更加全面分析土壤重金属与影响因子相关性及其交互作用，为空间插值方法选择更佳的辅助变量，本研究利用地理探测器模型进行探测

分析。该方法最大的优势在于没有过多的假设条件与约束，具有普适性，能有效地克服传统统计分析方法处理类别变量的局限性^[6]，并能快速、经济、有效、客观地探测出要素间的关系。如 WANG 等利用地理探测器研究中国和顺地区神经中枢缺陷疾病的致病因子^[7]；杨忍等利用地理探测器模型对中国村庄空间分布影响因子进行探测识别，同时解析乡村空间优化重组背景和模式^[8]；周磊等利用地理探测器模型研究京津冀 PM_{2.5} 的污染风险因素^[9]。【拟解决的关键问题】本研究利用地理探测器模型研究土壤重金属与影响因子之间及土壤重金属元素之间的相关性和交互作用，尝试解决以往研究方法在影响因子选择和交互作用上的选择度不高的问题，为土壤重金属空间预测模型中辅助变量的选择提供更加全面的分析和解释。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

湘潭县位于湖南省中部偏东，湘江下游西岸，衡山北麓，长衡丘陵盆地北段，北纬 27°20′—28°05′，东经 112°25′—113°03′，属亚热带季风湿润气候，冬夏两季长，春秋两季短，雨水集中，光、温、水空间分布差异小，具有明显的大陆性气候特征。2013 年湘潭县 GDP 增速为 12.2%，第一、二、三产业的比重为分别为 18.9%、52.1%、29%，以第二产业为主。研究区域选择湖南省湘潭县中部的 5 个乡镇，分别为杨嘉桥镇、河口镇、易俗河镇、梅林桥镇和谭家山镇，该区域内的农田灌溉水源主要来自湘江水及其支流水域，且人口密度大，路网密布，工业发达，历史上农田环境污染较重。

1.2 数据来源

为获取有代表性的农田土壤样品，按照 NY/T 395—2000《农田土壤环境质量监测技术规范》^[10]的规定确定监测单元，采用简单随机的布点方法，以能代表监测区农田土壤环境质量为原则，同时考虑农田周围的河流、工厂和建设用地等情况，基本覆盖

研究区内的主要农田。在作物生长期采集 0—20 cm 耕层土壤,共 789 个采样样品。每个样品在采集过程中,都采用了 GPS 定位。土壤在室内风干,磨碎后过 100 目尼龙网筛,用来测定各重金属元素。土壤样品经 $\text{HNO}_3\text{-HCl-H}_2\text{O}_2$ 消解测定其 Hg、As、Pb、Cd 和 Cr 含量,采用原子吸收光谱仪分析消解液中重金属含量^[11]。研究区内农田和采样数点的空间分布如图 1 所示。

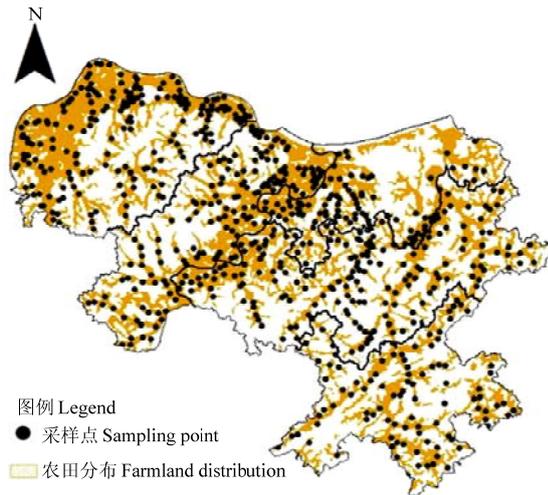


图 1 研究区农田和土壤采样点空间分布图

Fig. 1 Spatial distributions of farmland and soil sampling points in study area

根据土壤中重金属的来源分析和土壤本身的特点,并考虑到易获取程度,本研究选择的影响因子为土壤 pH、土壤类型、平均气温、平均相对湿度、高程数据和 GDP。其中土壤 pH、土壤类型为点数据,来源于 2014 年农业行业科研专项项目数据,与 789 个土壤采样点来源相同且以点为单位一一对应;平均气温、平均相对湿度、高程数据和 GDP 数据均来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据共享平台 (<http://www.geodata.cn>)。平均气温和平均相对湿度数据集利用 NCEP/NCAR 全球气候再分析资料中国区域气候要素数据及 MODIS NDVI 和 DEM 数据,将分辨率较低的 NCEP/NCAR 气候要素数据降尺度到 1 km 分辨率,提取 2014 年湘潭县 1 km 栅格逐年气候数据集;高程数据是将 SRTM 原始数据利用 Matlab 转换成 ArcGIS 能读取的 GRID 格式,对 34 个分区块的数据进行拼接,提取出研究区域的 1 km 空间分辨率的

高程数据;GDP 数据是在综合分析了人类活动形成的土地利用格局与 GDP 的空间互动规律的基础上,建立分产业(一、二、三产业) GDP 数量与土地利用类型的空间相关性模型。利用该模型对 GDP 分县统计数据空间化,从而生成 1 km 网格的 GDP 空间分布数据。

1.3 地理探测器

地理探测器主要被用来分析土壤采样点中的 5 种重金属 Pb、Cd、As、Cr 和 Hg 与所选 6 种影响因子的相关性以及多种影响因子交互作用。主要是因为地理探测器 q 值具有明确的物理含义,没有线性假设,客观地探测出自变量解释了 $100 \times q\%$ 的因变量^[12]。为了更加全面地分析土壤采样点中重金属与所选影响因子之间的相关关系,本研究应用地理探测器中的风险探测器、因子探测器、生态探测器和交互作用探测器^[13]。

风险探测器主要用于探测影响因子对土壤重金属是否具有风险性,用 t 统计量来检验:

$$t_{\bar{y}_{h=1}-\bar{y}_{h=2}} = \frac{\bar{y}_{h=1} - \bar{y}_{h=2}}{\left[\frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=2})}{n_{h=2}} \right]^{1/2}} \quad (1)$$

式 1 中, \bar{y}_h 表示子区域 h 内的属性均值,此研究为某重金属元素含量; n_h 为子区域 h 内样本数量; Var 表示方差。统计量 t 近似的服从 Student's t 分布, t 值越大代表该影响因子对土壤重金属的空间分异性影响越大。零假设 $H_0: \bar{y}_{h=1} = \bar{y}_{h=2}$, 如果在置信水平 α 下拒绝 H_0 ,则认为两个子区域间的属性均值存在着明显的差异。

因子探测器是探测某因子 X 多大程度上解释了属性 Y 的空间分异,用因子的解释力 $P_{D,H}$ 进行判断, $P_{D,H}$ 的值域为 $[0,1]$, $P_{D,H}$ 的值越大,表明目标属性 Y 的空间分异性越明显。 $P_{D,H}$ 计算公式为:

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, SSW = N \sigma^2 \quad (2)$$

$$P_{D,H} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (3)$$

式 2 中, $h=1, \dots, L$ 为变量 Y 或因子 X 的分层,即分类或分区; N_h 和 N 分别为层和全区的单元数; SSW 和 SST 分别为层内方差之和和全区总方差。 D 为影响因子, H 为目标土壤重金属含量的空间变化值, $P_{D,H}$ 为 D 对 H 的解释力。

生态探测器用于比较影响因子 X_1 和 X_2 对目标属

性 Y 的空间分布的影响是否有显著的差异, 以 F 统计量来衡量:

$$F = \frac{N_{X1}(N_{X2}-1)SSW_{X1}}{N_{X2}(N_{X1}-1)SSW_{X2}} \quad (4)$$

$$SSW_{X1} = \sum_{h=1}^{L1} N_h \sigma_h^2, SSW_{X2} = \sum_{h=1}^{L2} N_h \sigma_h^2 \quad (5)$$

式 4 中, N_{X1} 及 N_{X2} 分别表示两个因子 $X1$ 和 $X2$ 的样本量; SSW_{X1} 和 SSW_{X2} 分别表示由 $X1$ 和 $X2$ 形成的分层的层内方差之和; $L1$ 和 $L2$ 分别表示变量 $X1$ 和 $X2$ 分层数目。其中零假设 $H0: SSW_{X1}=SSW_{X2}$ 。如果在 α 的显著性水平上拒绝 $H0$, 则表明两因子 $X1$ 和 $X2$ 对目标属性 Y 的空间分布的影响存在着显著的差异。

交互作用探测器是探测风险因子之间是否具有相互作用, 判断公式如下:

协同: $P_{D,H}(D1 \cap D2) > P_{D,H}(D1)$ 或 $P_{D,H}(D2)$

双协同: $P_{D,H}(D1 \cap D2) > P_{D,H}(D1)$ 和 $P_{D,H}(D2)$

非线性协同: $P_{D,H}(D1 \cap D2) > P_{D,H}(D1) + P_{D,H}(D2)$

拮抗: $P_{D,H}(D1 \cap D2) < P_{D,H}(D1) + P_{D,H}(D2)$

单拮抗: $P_{D,H}(D1 \cap D2) < P_{D,H}(D1)$ 或 $P_{D,H}(D2)$

非线性拮抗: $P_{D,H}(D1 \cap D2) < P_{D,H}(D1)$ 和 $P_{D,H}(D2)$

相互独立: $P_{D,H}(D1 \cap D2) = P_{D,H}(D1) + P_{D,H}(D2)$

由于进行风险分析时, 对于面数据, 自变量 X 即土壤重金属含量和因变量 Y 即影响因子的空间粒度是不同的, 因此首先对面数据, 例如平均气温、相对湿度、高程数据和 GDP 数据进行直接等分离散化, 再将其与 X 分布叠加, 然后利用 ArcGIS 软件提取每个离散点上的因变量与自变量值 (Y, X); 对于点数据, 包括土壤 pH 和土壤类型数据与土壤重金属采样点数据相对应, 可以直接将这些点数据导入到地理探测器软件中进行计算。

地理探测器的具体实现采用 GeoDetector 软件 (<http://www.geodetector.org/>), 该软件使用步骤包括数据采集与整理、读入样本 (Y, X) 数据、分析结果三部分。对于输入的面数据和点数据需要做匹配处理, 连续型属性需要做离散化处理。软件运行结果主要包括 4 个部分: 比较不同影响因子对土壤采样点中的目标重金属含量的空间分异性影响是否显著; 影响因子对土壤采样点中的目标重金属含量的空间分异性的解释力; 不同的影响因子对目标重金属含量的空间分异性的影响是否具有显著差异; 以及这些影响因子对目标重金属含量的空间分异性影响的交互作用。

2 结果

2.1 土壤重金属空间分布特征

根据 2014 年对湘潭县 5 个乡 (镇) 的土壤重金属 789 个采样点数据, 利用 ArcGIS 软件对 5 种土壤重金属进行反距离插值处理, 得到该区域 5 种土壤重金属的空间分布图 (图 2)。

如图 2 所示, 研究区东部和北部土壤重金属 As、Cd、Pb 和 Hg 元素含量明显高于其他区域, 呈现从西向东逐渐增加趋势。其中 Hg 含量较高的区域为湘江边上及东部工业发达区。土壤重金属元素 Cr 在南部区域的含量较高, 且沿着国道有一定带状趋势。对 Cr 含量最高的区域进一步研究发现, 此区域有国道与多条公路交错, 交通发达, 有丰富的矿石资源和多家化工企业, Cr 的来源很有可能与此有关。土壤重金属可来源于土壤成土母质、污水灌溉、工业污染源排放、含重金属劣质化肥农药的使用和大气降尘等^[14]。从土壤重金属元素与社会因子的直观相关性分析来看, 研究区东部和北部是人口密集区, 路网密布, 工业发达, 人类活动频繁, 可能对农田土壤重金属的富集带来一定影响。

2.2 土壤重金属含量影响因子分析

2.2.1 风险探测 风险探测器揭示了各影响因子内部不同类别分区间的显著性差异。本研究引入了多种较易获取的影响因子, 包括土壤 pH、土壤类型、平均气温、相对湿度、高程数据和 GDP 数据。各影响因子的空间分布如图 3 所示。

在地理探测器计算中可以直接利用采样点中的土壤重金属数据, 不需要再做离散化处理。对于影响因子中高程、平均气温等面数据, 在提取影响因子在每个采样点上的数值的基础上, 将每个采样点的 5 种土壤重金属 Pb、Cd、As、Cr、和 Hg 分别作为目标属性 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 、 Y_5 和 Y_6 , 6 种影响因子分别作为自变量 X_1 — X_6 , 最后将每一条 (Y, X) 记录输入到 GeoDetector 中计算得到各因子的探测结果。探测结果表明, 所有影响因子均存在差异性, 说明所研究的影响因子对土壤重金属的空间分布具有风险性。

2.2.2 因子探测 利用因子探测器探测影响因子分别对 5 种土壤重金属元素的相对重要性, 即各影响因子对每种重金属元素作为目标属性 Y 的解释力 $P_{D,H}$ 值 (图 4)。

结果表明, 影响因子对 5 种土壤重金属的解释力 $P_{D,H}$ 既有一致性, 又有差异性。GDP、平均温度和相对湿度对 5 种土壤重金属解释力较大 ($P_{D,H}$ 值均在 0.5

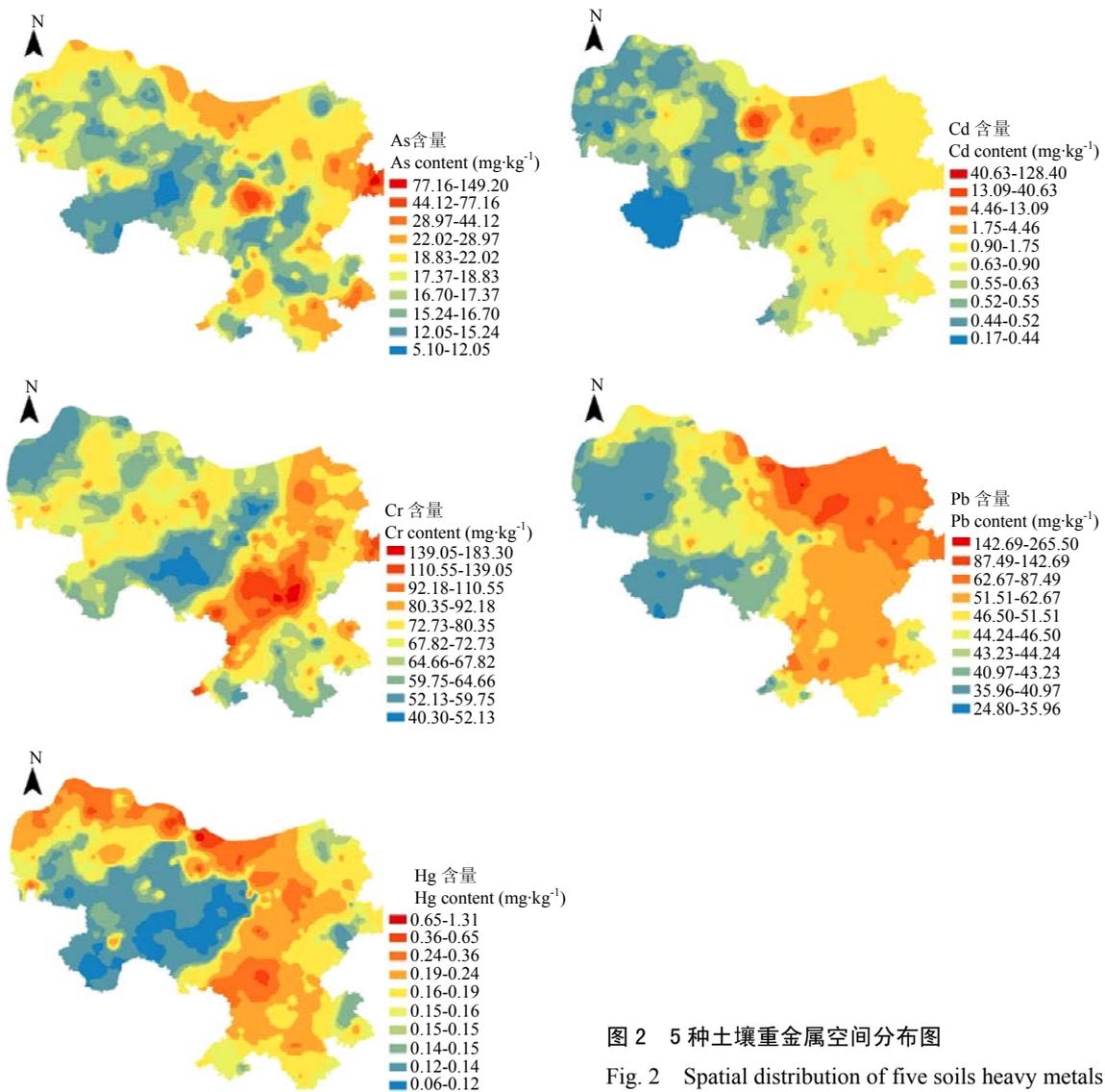


图2 5种土壤重金属空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of five soils heavy metals

以上)。可能是由于 GDP 体现了工业发达程度，而工业排放是土壤重金属的重要来源。而平均温度和相对湿度可能从多个方面影响土壤重金属，例如通过影响成土母质的形成或土壤重金属的迁移和转化来间接影响土壤重金属的含量。土壤 pH、土壤类型、高程对土壤重金属的解释力较小 ($P_{D,H}$ 值均在 0.3 以下)，其中土壤类型对于 5 种土壤重金属的解释力最低 ($P_{D,H}$ 值均在 0.1 以下)。高程对 Cr 的解释力明显大于其对 Pb、Cd、Hg 和 As 的解释力，可能是由于 Pb、Cd、As 和 Hg 主要来源于人为干扰输入，而 Cr 生成和迁移过程受地势影响较大。

本研究除了对影响因子进行因子探测，同时也对 5 种土壤重金属之间的解释力进行了探测，探测结果如图 5 所示。

图 5 结果表明，5 种土壤重金属之间均有不同强弱的相关性。其中 Cr 对 Cd 的解释力最强， $P_{D,H}$ 值达到 0.95，然而 Cd 对 Cr 的解释力相对较小， $P_{D,H}$ 值仅为 0.24，表明 Cr 对 Cd 的影响要明显大于 Cd 对 Cr 的影响，可能是由于土壤中的 Cr 主要来源于岩石风化和工业废水，而 Cd 来源除了工业三废外，还有不合理的农药和化肥等的使用，相比 Cr 来源更加广泛。As 对 Cd 的解释力最小， $P_{D,H}$ 值仅为 0.20，而 Cd 对 As 的解释力为 0.43，表明 As 与 Cd 之间的相关性较弱。其他土壤重金属之间的相关性均较为显著。

2.2.3 生态探测 生态探测着重比较 $P_{D,H}$ 值的大小来探索一个影响因子对土壤重金属的影响是否比另一个影响因子大，即相对重要性是否显著，若显著，则记为 Y，否则记为 N。以 Pb 为例，生态探测结果如表 1 所示。

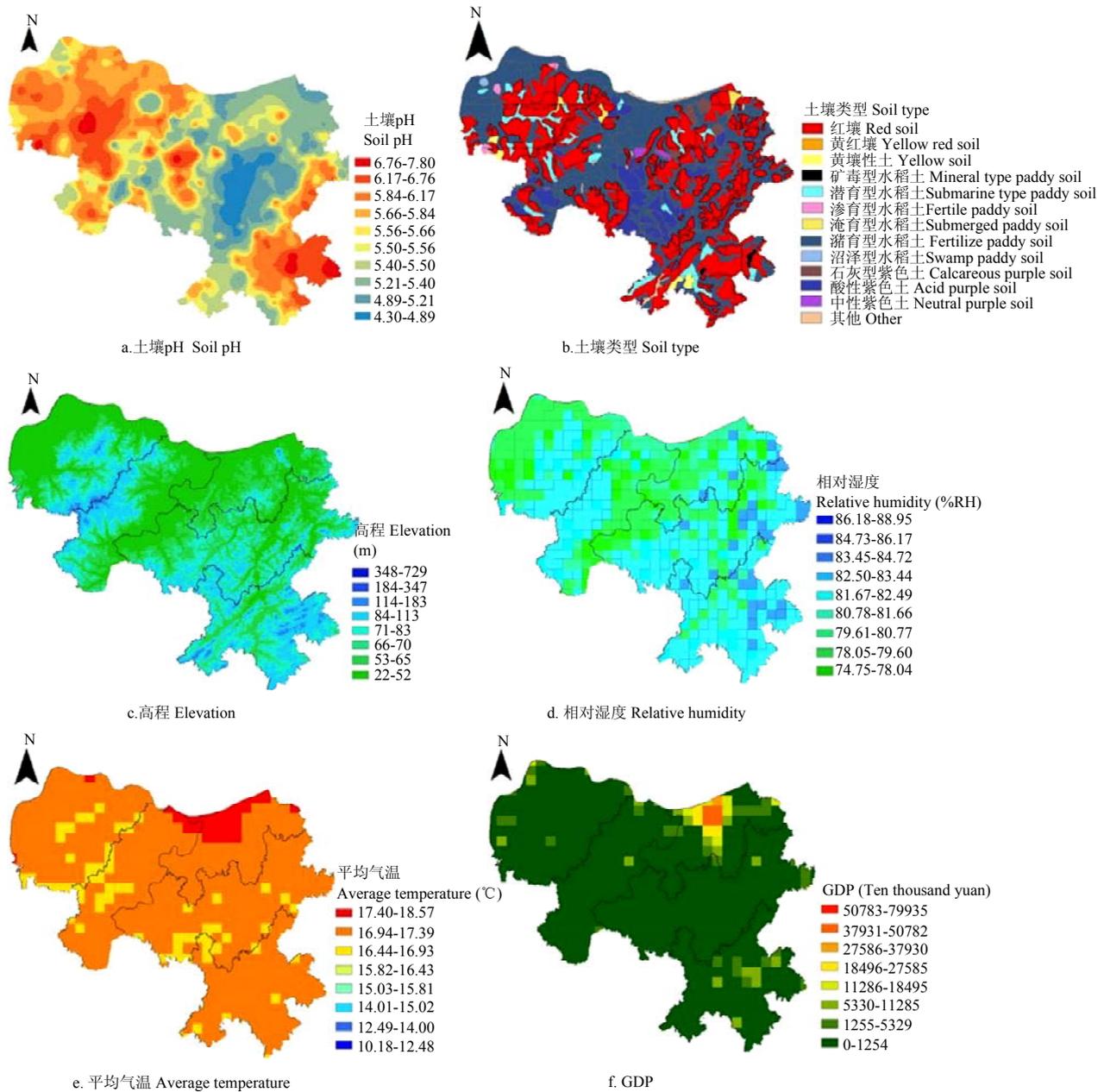


图 3 影响因子空间分布图

Fig. 3 Spatial distributions of influence factors

由表 1 可知，采用显著性水平为 0.05 的 t 检验。经检验，平均温度、相对湿度和 GDP 对 Pb 的影响与其他影响因子存在显著差异，而其他影响因子之间的解释力差异并不显著。

2.2.4 交互探测 环境中土壤重金属的空间分布是由多种影响因子共同作用的结果。在实际环境中，也不可能存在单一因子或者单一性质的因素影响重金属的分布和变化。利用交互作用探测器探测影响因子对重金属

元素空间分布变化的交互作用。对 Pb 元素而言，不同因子之间的交互作用强弱不同，有显著性差异（表 2）。

对于目标土壤重金属各影响因子之间主要是双协同作用和非线性协同作用，不存在相互独立起作用的因子。平均气温、相对湿度和 GDP 对 Pb 均为双协同作用，其余影响因子对 Pb 均为非线性协同作用。GDP 可以增强自然因子对土壤重金属空间分布变化的解释力，说明人类活动对土壤重金属的空间变化有一定影响。

表 1 Pb 生态探测结果

Table 1 Pb ecological detection results

	土壤 pH Soil pH	土壤类型 Soil type	高程 Elevation	平均温度 Average temperature	相对湿度 Relative humidity	GDP
土壤 pH Soil pH						
土壤类型 Soil type	N					
高程 Elevation	N	N				
平均温度 Average temperature	Y	Y	Y			
相对湿度 Relative humidity	Y	Y	Y	N		
GDP	Y	Y	Y	N	N	

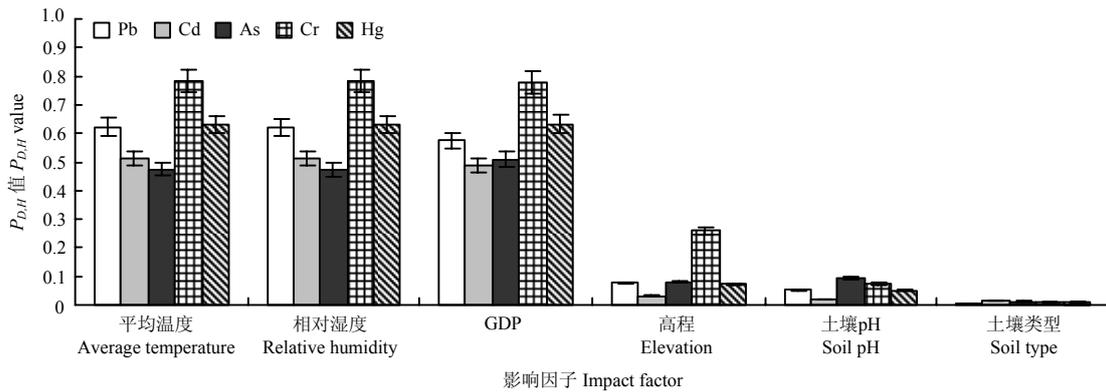


图 4 各影响因子对 5 种土壤重金属的解释力 $P_{D,H}$ 值

Fig. 4 Effects of different factors on the explanatory power of five heavy metals in soils with $P_{D,H}$ value

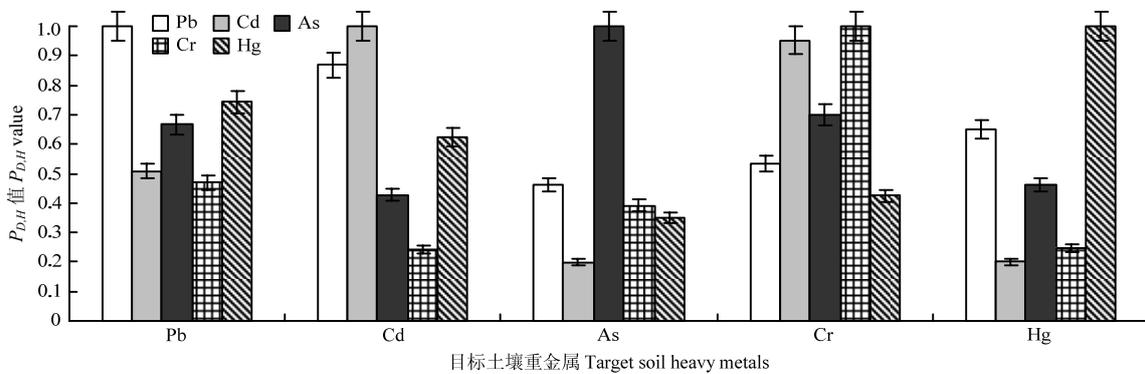


图 5 5 种土壤重金属之间的解释力对比

Fig. 5 Comparison of explanatory power between five heavy metals in soils

本研究还对 5 种土壤重金属元素之间的交互作用进行了交互探测。交互探测结果表明，除了影响因子之间存在交互作用，5 种土壤重金属元素之间同样存在一定交互作用。以 Pb 为目标属性，则其余 4 种土壤重金属之间的交互作用均为双协同作用，

无非线性协同作用。以 Cd 为目标属性，则 $Pb \cap Cr$ 、 $As \cap Cr$ 、 $Cr \cap Hg$ 为双协同作用，其余为非线性协同作用；以 As 为目标属性，则除 $Cd \cap Hg$ 为非线性协同作用外，其余均为双线性协同作用；以 Cr 为目标属性，则其余 4 种土壤重金属之间的交互作用均为

表 2 不同影响因子对土壤重金属元素 Pb 影响的交互作用

Table 2 Interaction of different influence factors on soil heavy metal element Pb

	土壤 pH Soil pH	土壤类型 Soil type	高程 Elevation	平均温度 Average temperature	相对湿度 Relative humidity	GDP
土壤 pH Soil pH	0.053					
土壤类型 Soil type	0.091	0.006				
高程 Elevation	0.518	0.165	0.077			
平均温度 Average temperature	0.981	0.681	0.880	0.622		
相对湿度 Relative humidity	0.981	0.681	0.880	0.622	0.622	
GDP	0.976	0.651	0.848	0.713	0.713	0.575

表 2 中主对角线的值为影响因子单独作用的 $P_{D,H}$ 值，其余数值为影响因子交互作用后的 $P_{D,H}$ 值

The values of the main diagonal in Table 2 are the $P_{D,H}$ values of the effector alone, and the remaining values are the $P_{D,H}$ values after the interaction of the influence factors

非线性协同作用；以 Hg 为目标属性，则 Cd∩As 和 As∩Cr 为非线性协同作用，其余均为双协同作用。土壤重金属之间的交互作用从一定程度上可以反映土壤重金属的复合污染状况。土壤重金属的污染往往是多种重金属元素共同作用形成的。Pb 和 Cd 之间为双线性协同作用，很有可能是 Pb 和 Cd 具有相同污染源，如污水灌溉等。通过重金属元素之间的

交互作用，可以推测它们污染来源的关系，进一步确定污染源头。

2.2.5 地理探测器与 Pearson 相关系数对比分析
土壤重金属与影响因子之间的相关分析最常用的方法是 Pearson 相关系数。以重金属 Pb 为例，分别利用地理探测器和 Pearson 相关系数分析方法对 Pb 和 6 种影响因子进行相关性分析，结果如图 6 所示。

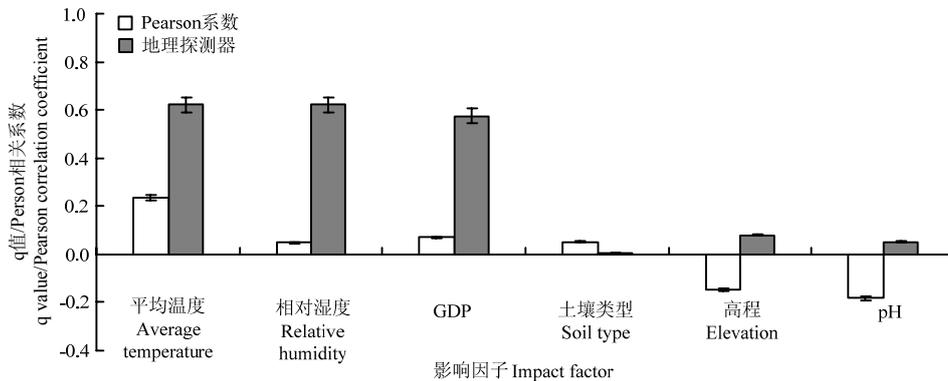


图 6 地理探测器和 Pearson 分析 Pb 与影响因子相关性结果对比

Fig. 6 Comparison of correlation between Pb and influence factors in geographical detectors and Pearson analysis

从图 6 对比结果中发现，两种方法得到的结果有一定的相似性和差异性。相似性体现在两种方法均可以得到 6 种影响因子与 Pb 的相关性强弱的排序结果，差异性体现在两种方式获得的排序结果有差异。例如 Pearson 相关分析结果显示高程和土壤 pH 与 Pb 成负相关，而地理探测器相关分析结果并无负相关。这也说明了两种方法在相关分析方面的差异性。Pearson 相关系数分析方法主要是衡量土壤重金属与影响因子

之间的线性关系，同时可以根据相关系数的正负来判断影响因子与土壤重金属是属于正相关还是负相关。而地理探测器模型探测的是土壤重金属与影响因子之间的关联性，既包括线性关系，也包含非线性关系。如果 Pearson 相关系数不显著，表明土壤重金属与影响因子之间没有明显线性关系，但是不代表没有非线性关系。因此，从这个角度来看，地理探测器的相关分析结果可能更全面，更符合空间数据的特点。

3 讨论

3.1 土壤重金属空间特征与建模策略

土壤重金属空间数据探索性分析结果表明土壤重金属具有空间异质性,与诸多研究结果一致。产生空间分异性的原因是多样的,可能由于各层(类)的机理、因子或者主导因子不同导致不同的空间分异性。因此在数据分析开始时,应当首先进行空间异质性检验,确定是使用全局模型还是局域模型,是使用全局变量还是使用局域变量,是使用全局参数还是局域参数。用全局模型分析具有异质性的对象将掩盖对象的异质性,被混杂效应所干扰,甚至导致错误的结论^[12],不同的对象性质对应不同的建模策略。经检验,本研究中的5种土壤重金属均有较强的空间异质性,符合地理探测器的适用条件。本研究通过对湘潭县域5种土壤重金属与6种影响因子分别进行风险探测、因子探测、生态探测和交互作用探测,得到与目标重金属有较强相关性的影响因子。在土壤重金属空间预测模型的建立中,既可以直接选择这部分影响因子作为辅助变量,也可以根据不同的对象性质和研究目的为土壤重金属空间预测模型选择不同的建模策略。选择多种影响因子作为辅助变量时,要考虑多个影响因子对土壤重金属的交互作用,使得选择的参数更加准确合理。

3.2 多因子相关性分析问题

在多影响因子研究中,需要去除多个影响因子之间的冗余性和共线性。例如本研究中的平均气温、高程和相对湿度存在一定的共线性。在以往的研究中,为了有效的避免多重共线性问题,需要利用主成分分析方法对影响因子进行降维处理,而地理探测器在原理上解决了影响因子“多重共线”问题,而不局限于经典统计学预先指定的相乘或者单纯相加的模式,且具有更好的解释性。土壤重金属的空间分布是由多种影响因子共同作用的结果,不存在相互独立起作用的因子。对多个影响因子的选择上,根据影响因子的 $P_{D,H}$ 值大小选择合理数量的影响因子作为土壤重金属预测模型中的辅助变量。

4 结论

4.1 风险探测器结果表明影响因子对土壤重金属存在风险性;因子探测器揭示了影响因子对5种土壤重金属的解释力 $P_{D,H}$ 的一致性和差异性。土壤重金属空间数据探索性分析结果表明,土壤重金属具有空间异质性。交互作用探测证明了土壤重金属的空间分布是

由多种影响因子共同作用的结果,不同因子之间的交互作用强弱不同,有显著性差异。其中平均温度、GDP和相对湿度3种影响因子对5种土壤重金属的相关性较强。除了影响因子之间存在交互作用,5种土壤重金属元素之间同样存在双协同作用和非线性协同作用。土壤重金属之间的交互作用与土壤重金属的复合污染状况有一定联系。

4.2 不同影响因子对于土壤重金属的影响程度不同。在对土壤重金属与影响因子的相关性分析中,地理探测器有效地利用影响因子以及土壤重金属之间的交互作用,可以更加全面的分析和评估各影响因子对土壤重金属的影响,在研究空间数据的相关性和交互作用方面比经典的统计方法适用范围更广。

References

- [1] 张景雄. 空间信息的尺度、不确定性与融合. 武汉: 武汉大学出版社, 2008: 116-118.
ZHANG J X. *The Scale of the Spatial Information, Uncertainty and the Fusion*. Wuhan: Wuhan University Press, 2008: 116-118. (in Chinese)
- [2] 张仁铎. 空间变异理论及应用. 北京: 科学出版社, 2005: 57-72.
ZHANG R D. *Spatial Variation Theory and Application*. Beijing: Science Press, 2005: 57-72. (in Chinese)
- [3] 章清, 张海涛, 郭龙, 杜佩颖, 李林蔚, 李锐娟, 唐晓霏. 基于主成分分析的协同克里格插值模型对土壤铜含量的空间分布预测. 华中农业大学学报, 2016, 1: 60-68.
ZHANG Q, ZHANG H T, GUO L, DU P Y, LI L W, LI R J, TANG X F. Collaborative kriging interpolation model based on principal component analysis of the spatial distribution of soil Cu content prediction. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2016, 1: 60-68. (in Chinese)
- [4] 郭龙, 张海涛, 陈家赢, 李锐娟, 秦聪. 基于协同克里格插值和地理加权回归模型的土壤属性空间预测比较. 土壤学报, 2012, 49(5): 1037-1042.
GUO L, ZHANG H T, CHEN J Y, LI R J, QIN C. Comparison between co-kriging model and geographically weighted regression model in spatial prediction of soil attributes. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(5): 1037-1042. (in Chinese)
- [5] 孙波, 宋歌, 曹尧东. 丘陵区水稻 Cu 污染空间变异的协同克里格分析. 农业环境科学学报, 2009, 5: 865-870.
SUN B, SONG G, CAO Y D. Spatial variability of hilly rice Cu pollution collaborative kriging analysis. *Agricultural Journal of Environmental Science*, 2009, 5: 865-870. (in Chinese)
- [6] 朱鹤, 刘家明, 陶慧, 李功, 王润. 北京城市休闲商务区的时空分

- 布特征与成因. 地理学报, 2015, 70(8): 1215-1228.
- ZHU H, LIU J M, TAO H, LI L, WANG R. Temporal-spatial pattern and contributing factors of urban RBDs in Beijing. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(8): 1215-1228. (in Chinese)
- [7] WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, LIAO Y L, ZHANG T, GU X, ZHENG X Y. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1):107-127.
- [8] 杨忍, 刘彦随, 龙花楼, 王洋, 张怡筠. 中国村庄空间分布特征及空间优化重组解析. 地理科学, 2016, 36(2): 170-179.
- YANG R, LIU Y S, LONG H L, WANG Y, ZHANG Y Y. Chinese village space distribution characteristics and spatial optimization reorganization analysis. *Journal of Geographical Science*, 2016, 36(2): 170-179. (in Chinese)
- [9] 周磊, 武建军, 贾瑞静, 梁念, 张凤英, 倪永, 刘明. 京津冀 PM_{2.5}时空分布特征及其污染风险因素. 环境科学研究, 2016(4): 483-493.
- ZHOU L, WU J J, JIA R J, LIANG N, ZHANG F Y, NI Y, LIU M. Beijing-Tianjin-Hebei PM_{2.5} in time and space distribution characteristics and its pollution risk factors. *Journal of Environmental Science Research*, 2016(4): 483-493. (in Chinese)
- [10] 农业部环境监测总站. NY/T 395-2000 农田土壤环境质量监测技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- Ministry of Agriculture Environmental Monitoring Station. NY/T 395-2000 Procedural regulations regarding the environment quality monitoring of soil [S]. Beijing: China Standard Press, 2000. (in Chinese)
- [11] 罗娜, 陆安祥, 王纪华. 基于空间插值的土壤重金属污染评估分析系统设计与实现. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(2): 497-504.
- LUO N, LU A X, WANG J H. Based on the spatial interpolation of soil heavy metal pollution assessment analysis system design and implementation. *Journal of Food Safety and Quality Testing*, 2016, 7(2): 497-504. (in Chinese)
- [12] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- WANG J F, XU C D. Geographical detector: principle and prospect. *Journal of Geographical*, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese)
- [13] HU Y, WANG J, LI X, REN D, ZHU J. Geographical detector-based risk assessment of the under-five mortality in the 2008 Wenchuan earthquake, China. *PLoS ONE*, 2011, 6(6): 2592-2599.
- [14] 吴玺虹, 戴塔根, 方建武, 张建新, 邢旭东, 郭定良. 长沙、株洲、湘潭三市土壤中重金属元素的来源. 地质通报, 2007, 26(11): 1453-1458.
- WU Q H, DAI T G, FANG J W, ZHANG J X, XING X D, GUO D L. Changsha, Zhuzhou and Xiangtan city, the source of heavy metals in soil. *Geological Bulletin*, 2007, 26(11): 1453-1458. (in Chinese)
- [15] 肖小平, 彭科林, 周孟辉. 城市郊区水稻土重金属污染状况调查与评价——以湘潭市郊响水乡为例. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 680-685.
- XIAO X P, PENG K L, ZHOU M H. City suburbs paddy soil heavy metal pollution condition investigation and evaluation - A case study of Xiangshui Township in Xiangtan Suburb. *Journal of Chinese Ecological Agriculture*, 2008, 16(3): 680-685. (in Chinese)
- [16] 刘建国. 水稻品种对土壤重金属镉铅吸收分配的差异及其机理[D]. 扬州: 扬州大学, 2004.
- LIU J G. Rice varieties of soil heavy metal cadmium lead absorption differences in distribution and its mechanism[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2004. (in Chinese)
- [17] 于佳, 刘吉平. 基于地理探测器的东北地区气温变化影响因素定量分析. 湖北农业科学, 2015, 54(19): 4682-4687.
- YU J, LIU J P. Based on geographical probe temperature in northeast China influence factors of quantitative analysis. *Journal of Hubei Agricultural Science*, 2015, 54(19): 4682-4687. (in Chinese)
- [18] 丁悦, 蔡建明, 任周鹏, 杨振山. 基于地理探测器的国家级经济技术开发区经济增长率空间分异及影响因素. 地理科学进展, 2014, 33(5): 657-666.
- DING Y, CAI J M, REN Z P, YANG Z S. State-level economic and technological development zone based on geographical detector growth space differentiation and influencing factors. *Journal of Geographical Science and Progress*, 2014, 33(5): 657-666. (in Chinese)
- [19] 徐秋蓉, 郑新奇. 一种基于地理探测器的城镇扩展影响机理分析法. 测绘学报, 2015(S1): 96-101.
- XU Q R, ZHENG X Q. Based on urban expansion influence mechanism of the geographical probe analysis. *Journal of Surveying and Mapping*, 2015(S1): 96-101. (in Chinese)
- [20] LI F Z, ZHANG F, LI X, WANG P, LIANG J H, MEI Y T, CHENG W W, QIAN Y. Spatiotemporal patterns of the use of urban green spaces and external factors contributing to their use in central Beijing. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14: 237.
- [21] WANG J J, MA J J, LIU J P, ZENG D J, SONG C, CAO Z D. Prevalence and risk factors of comorbidities among hypertensive patients in China. *International Journal of Medical Sciences*, 2017, 14(3): 201-212.
- [22] WANG Y, WANG S J, LI G D, ZHANG H G, JIN L X, SU Y X, WU

- K M. Identifying the determinants of housing prices in China using spatial regression and the geographical detector technique. *Applied Geography*, 2017, 79 (2017): 26-36.
- [23] 国家环境保护总局. 土壤环境监测技术规范: HJ/T 166-2004. 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 35-45.
- The State Environmental Protection Administration. Soil Environmental Monitoring Technical Specification: HJ/T 166-2004. Beijing: China Environmental Science Press, 2004: 35-45. (in Chinese)
- [24] 彭晓春, 陈志良, 董家华, 杨兵. 长株潭城市群的土壤重金属分布特征. 贵州农业科学, 2011(9): 213-216.
- PENG X C, CHEN Z L, DONG J H, YANG B. The soil heavy metal distribution characteristics of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration. *Journal of Guizhou Agricultural Science*, 2011(9): 213-216. (in Chinese)
- [25] 岳建华. 长株潭城市群土壤 pH 与重金属污染的研究. 中国农学通报, 2012, 28(2): 267-272.
- YUE J H. Soil pH of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration and heavy metal pollution research. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(2): 267-272. (in Chinese)
- [26] 郭雯. 湘潭市酸雨污染状况、化学组成及其防治对策. 环境科学导刊, 2007, 26(5): 63-66.
- GUO W. Xiangtan acid rain pollution condition, chemical composition and its countermeasures. *Journal of Environmental Science Tribune*, 2007, 26(5): 63-66. (in Chinese)
- [27] 钟晓兰, 周生路, 黄明丽, 赵其国. 土壤重金属的形态分布特征及其影响因素. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1266-1273.
- ZHONG X L, ZHOU S L, HUANG M L, ZHAO Q G. The configuration of soil heavy metal distribution characteristics and influencing factors. *Journal of Ecological Environment*, 2009, 18(4): 1266-1273. (in Chinese)
- [28] 龙永珍, 戴塔根, 邹海洋. 长沙、株洲、湘潭地区土壤重金属污染现状及评价. 地球与环境, 2008, 36(3): 231-236.
- LONG Y Z, DAI T G, ZOU H Y. Changsha, Zhuzhou and Xiangtan area of soil heavy metal pollution and assessment. *Journal of Earth and the Environment*, 2008, 36(3): 231-236. (in Chinese)
- [29] 陆安祥, 王纪华, 潘瑜春, 马智宏, 赵春江. 小尺度农田土壤中重金属的统计分析与时空分布研究. 环境科学, 2007, 28(7): 1578-1583.
- LU A X, WANG J H, PAN Y C, MA Z H, ZHAO C J. Small scale statistical analysis and spatial distribution of heavy metals in soil research. *Journal of Environmental Science*, 2007, 28(7): 1578-1583. (in Chinese)
- [30] 罗娜, 陆安祥, 王纪华. 基于 Flex 和 REST 服务的产地重金属安全等级 WebGIS 系统开发——以湖南省湘潭县为例. 农产品质量与安全, 2016, 1: 67-72.
- LUO N, LU A X, WANG J H. Based on Flex and REST services WebGIS system development, the origin of heavy metal security levels in Xiangtan county of Hunan province, for example. *Journal of Quality and Safety of Agricultural Products*, 2016, 1: 67-72. (in Chinese)
- [31] 荆文龙, 杨雅萍. 中国 1 km 栅格年平均气候要素数据集 (2000-2010 年). 国家地球系统科学数据共享平台, 2014.
- JING W L, YANG Y P. China 1 km grid average annual climate data sets (2000-2010). National Earth System Science Data Sharing Platform, 2014. (in Chinese)
- [32] 《中国 1 : 100 万土地资源图》编图委员会, 中国科学院、国家计划委员. 《中国 1 : 100 万土地资源图》. 北京: 中国人民大学出版社, 1991 年.
- Figure 1:1 Million Land Resources in China Compilation Committee of the Chinese Academy of Sciences, National Planning Committee Members. *1:10 00000 Map of Land Resources of the People's Republic of China*. Beijing: The Chinese People's University Press, 1991. (in Chinese)
- [33] 石玉林. 中国土地资源图集. 北京: 中国大地出版社, 2006.
- SHI Y L. *Atlas of China's Land Resources*. Beijing: China Land Publishing House, 2006. (in Chinese)
- [34] 王新, 梁仁禄, 周启星. Cd-Pb 复合污染在土壤-水稻系统中生态效应的研究. 农村生态环境, 2001, 17: 41-44.
- WANG X, LIANG R L, ZHOU Q X. Study on ecological effects of Cd-Pb combined pollution in soil-rice system. *Rural Ecological Environment*, 2001, 17: 41-44. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)