齐杏杏, 高秉博, 潘瑜春, 等. 基于地理探测器的土壤重金属污染影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(11): 2476-2486.
QI Xing-xing, GAO Bing-bo, PAN Yu-chun, et al. Influence factor analysis of heavy metal pollution in large-scale soil based on the geographical detector[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(11): 2476-2486.

基于地理探测器的土壤重金属污染影响因素分析

齐杏杏[1], 高秉博[2,3*], 潘瑜春[1,2,4], 杨　晶[2,4], 郜允兵[2,4]

(1.首都师范大学信息工程学院, 北京 100048; 2.国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097; 3.中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100083; 4.农业农村部农业信息技术重点实验室, 北京 100097)

摘　要:定量分析全国范围内Cd、Pb、Zn、As、Cu和Cr 6种土壤重金属累积量与影响因素的相关程度。通过描述性统计、地累积指数法分析了污染情况和累积量分布情况,并借助地理探测器,定量地揭示了土壤重金属含量的主要影响因素。结果表明:Cd呈现出大面积的连片污染,Pb、Zn和Cu呈现斑块状污染,As和Cr呈现零星污染。各种重金属的主要影响因素为:Cd与地理区划、海拔高度、地势三大阶梯和土壤类型相关性较强;Pb与地势三大阶梯、气候带类型和土壤类型相关性较强;Zn与海拔高度、地理区划和气候带类型相关性较强;As与气候带类型和土壤类型相关性较强;Cu与海拔高度、气候带类型和土壤类型相关性较强;Cr与土壤类型、东中西经济划分和地理区划相关性较强;全国大尺度上6种土壤重金属含量主要受自然因素主导控制,主要为多因素复合作用影响。通过定量化分析各重金属的影响因素,揭示了全国大尺度上6种土壤重金属含量整体趋势和宏观规律。

关键词:地理探测器;土壤重金属;影响因素;交互作用

中图分类号:X52　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1672-2043(2019)11-2476-11　　doi:10.11654/jaes.2019-0537

Influence factor analysis of heavy metal pollution in large-scale soil based on the geographical detector

QI Xing-xing[1], GAO Bing-bo[2,3*], PAN Yu-chun[1,2,4], YANG Jing[2,4], GAO Yun-bing[2,4]

(1.College of Information Engineering, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2.National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China; 3.College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 4.Key Laboratory of Agri-informatics, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100097, China)

Abstract: The accumulation and factors influencing soil heavy metal content including Cd, Pb, Zn, As, Cu, and Cr were quantitatively analyzed. By descriptive statistics and geoaccumulation index method, the status and cumulative distribution of heavy metals in soil were revealed, and their main influencing factors were quantitatively measured using geographic detectors. Cd pollutes a large area; Pb, Zn, and Cu pollute a small area; and As and Cr only present scattered pollution. The influencing factors detected are that Cd pollution is related to the administrative division, elevation, terrain, and soil type; Pb pollution is related to terrain, climate type, and soil type; Zn pollution is related to elevation, administrative division, climate type; As pollution is related to climate type and soil type; Cu pollution is related to elevation, climate type, and soil type; and Cr pollution is related to soil type, economic division, and administrative division. The content of six heavy metals in soils are mainly controlled by natural factors and are influenced by multiple combined factors. Quantitative analysis of the factors influencing the heavy metal content in soil reveals the overall trend and macrolaw at the national scale.

Keywords: geographical detector; soil heavy metal; influencing factor; interaction

收稿日期:2019-05-14　　**录用日期**:2019-07-24

作者简介:齐杏杏(1995—),女,安徽阜阳人,硕士研究生,从事空间数据分析。E-mail:qixingxingzi@163.com

***通信作者**:高秉博　E-mail:gaobb@nercita.org.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0800903,2017YFD0801205);北京市优秀人才培养资助项目(2016000020060G123);北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJCX20170407)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2016YFD0800903, 2017YFD0801205); Beijing Excellent Talent Training Subsidy (2016000020060G123); The Science and Technology Innovation Capacity Building Project of Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences(KJCX20170407)

土壤是人类赖以生存的自然环境和农业生产必不可少的重要资源。目前我国土壤存在不同程度的重金属污染。2014年发布的《全国土壤污染状况调查公报》[1]显示全国土壤总超标率达16.1%,主要为无机型污染,有机型次之。自然背景值高和人类活动是土壤污染的主要原因。无人为干扰的自然地理条件下的土壤环境本身具有一定含量的重金属,即土壤重金属背景含量。在影响背景含量的因素中,成土母质和气候的组合类型影响最为显著[2],并且导致在大尺度上土壤重金属含量的差异分布。此外,地形地貌和土壤的理化性质等也是影响土壤重金属含量的重要因素[3]。在背景值的基础上,随着城市化发展进程不断加快,强烈的人类活动如矿业冶炼、农业生产、废弃物排放等使重金属随着人类活动进入土壤并逐渐累积。目前对于背景值的研究较多,许多研究者已对我国不同尺度上土壤环境自然背景值做了大量的研究[2,4]。研究区域涵盖广泛,如城市土壤、工业区、林地、山地、丘陵区、海区、流域、农业土壤、矿山土壤等[5-8]。对于人为活动造成的影响,目前的研究主要集中于污染来源的解析和影响因素的分析,以解析小尺度区域土壤重金属含量来源[9-10],而缺乏国家级尺度上的土壤重金属污染影响因素及其交互作用分析。在大尺度上研究分析土壤重金属影响因素能揭示整体趋势和宏观规律,对土地资源宏观管理和决策具有重要支撑作用。地理探测器能够快速有效地定量化影响因素的强度,没有较强的模型假设,解决了传统方法在分析类别变量时的局限性,已广泛应用于公共健康[11]、土地利用[12]、重金属污染等[13]多个领域。地累积指数能够反映人类活动带来的土壤重金属污染。因此,本文结合地理探测器与地累积指数法,通过探测全国范围内Cd、Pb、Zn、As、Cu、Cr的地累积指数和16种影响因素数据之间的解释关系,定量化分析土壤重金属累积的主要影响因素,揭示宏观尺度上土壤重金属累积量的影响因素。

1 材料与方法

1.1 土壤重金属含量数据收集

数据源于Duan等[14]从国内2016年之前近10年公开发表文献中收集的土壤重金属含量数据(因资料限制,不含台湾、香港、澳门的数据),基本覆盖了各种环境、关键区域和不同土地利用方式的土壤。将提取的数据进行预处理,使用Microsoft Excel剔除异常样本点,并根据Z-score删除个别离群值点。最终提取的Cd样本点数据2114个,Pb样本点数据2325个,Zn样本点数据1663个,As样本点数据1220个,Cu样本点数据1858个,Cr样本点数据1590个。背景值数据采用《中国土壤元素背景值》[15],其源于我国在全国范围内开展的严密且系统的土壤背景值调查工作。

1.2 影响因素数据收集

通过阅读文献结合土壤形成的特点和土壤中重金属元素的来源,并考虑数据获取的难易程度和全国大尺度上影响土壤重金属含量的因素,选取以下因素:植被类型、土壤类型、地貌类型、土地利用类型、土壤侵蚀、人口数据、GDP数据、海拔高度、气候带类型、地理区划、干湿分布、中国地势三大阶梯、中国年度植被指数、土壤质地、东中西经济划分、胡焕庸线。

植被类型数据引自植被生态学家侯学煜院士主编的《1∶100万中国植被图集》,反映了我国11个植被类型组。土壤类型数据来自全国普查办公室的《1∶100万中华人民共和国土壤图》,本文采用12土纲分类。地貌类型数据的划分源自《中华人民共和国地貌图集(1∶100万)》,揭示了我国8个大类的地貌类型。土地利用类型数据来自中国土地利用现状遥感监测数据库,以Landsat TM/ETM遥感影像为数据源,通过人工目视解译生成,土地利用类型包括6个一级类型即耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用土地。土壤侵蚀数据依据《土壤侵蚀分类分级标准》进行划分,根据其主导作用的侵蚀外营力类型与性质划分为水力、风力、冻融。人口数据、GDP数据、海拔高程数据均根据GIS软件中自然间断分级法(Jenks)分成5类。气候带类型数据依据中国气象局利用热量指标将全国分为11个温度带。地理区划数据依据《中华人民共和国行政区划沿革1949—1997》一书中中国六大地理分区进行划分。干湿分布是根据全国湿润状况以干燥度为水分指标,将全国分为4个等级。中国地势三大阶梯是根据中国陆地地势将其划分为三级阶梯。中国年度植被指数数据是根据SPOT/VEGETATION NDVI卫星遥感数据,采用最大值合成法生成的年度植被指数数据集。土壤质地数据是根据1∶100万土壤类型图和第二次土壤普查获取到的土壤剖面数据编制而成,根据砂粒、粉粒、黏粒含量进行土壤质地划分,分为砂土、粉砂土、黏土三大类。东中西经济划分是根据地理位置和经济发展将全国划分为三大经济带。胡焕庸线是由中国地理学家胡焕庸提出的划分我国人口密度的对比线,将中国分为两个有所差异的自然和人文地域。以上数据均来自中国科学院

资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)。

1.3 研究方法

1.3.1 地累积指数法

地累积指数也称为Muller指数,是20世纪60年代由德国科学家Muller提出的一种研究水环境沉积物中重金属污染程度的定量指标[16],该方法可以分级评价土壤重金属的污染状况,其优点在于不仅考虑了人为活动对土壤的影响,还关注了自然成岩作用所引起的土壤中重金属背景值的变化,从而减弱了土壤重金属背景值对累积量的掩盖影响。地累积指数计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2\left[C_n / \left(1.5 \times B_n \right) \right]$$

式中:I_{geo}为地累积指数;C_n为样点中重金属元素n的实测质量分数,mg·kg^{-1};B_n为土壤重金属n的背景值。考虑到岩石地质差异、沉积特征等对背景值造成的影响,加入常数1.5作为修正指数。根据地累积指数将土壤重金属污染程度分为7个等级,分级标准如表1所示。

表1 地累积指数与污染程度分级

Table 1 The geo-accumulation index and classification of pollution degree

污染程度 Pollution degree	等级 Pollution grade	地累积指数 I_{geo}
无污染	0	$I_{geo}\leq 0$
无-中度污染	1	$0<I_{geo}\leq 1$
中度污染	2	$1<I_{geo}\leq 2$
中-强度污染	3	$2<I_{geo}\leq 3$
强度污染	4	$3<I_{geo}\leq 4$
强-极强污染	5	$4<I_{geo}\leq 5$
极强污染	6	$I_{geo}>5$

1.3.2 地理探测器

地理探测器(Geographical detector)是由中国科学院地理科学与资源研究所王劲峰空间分析小组开发的探寻地理空间分区因素对疾病风险影响机理的一种方法[11]。近年来,地理探测器不断被应用到生态环境、人居环境、城市地理等方面[17-19]。地理探测器包括因子探测器、交互作用探测器、风险区探测器、生态探测器,共4种。本研究所用到的是因子探测器和交互作用探测器。因子探测器主要用于探测16种影响因素X多大程度上解释了土壤重金属Y背景值和累积量分布的空间分异。用q值度量[20],表达式为:

$$SSW = \sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2$$

$$SST = N\sigma^2$$

$$q = 1 - \frac{SSW}{SST}$$

式中:h=1,…,L为土壤重金属Y或因素X的分层(Strata),即分类或分区;N_h和N分别为层h和全区的单元数;σ_h^2和σ^2分别为层h和全区的Y值的方差;SSW和SST分别为层内方差之和(Within sum of squares)和全区总方差(Total sum of squares);q为影响因素X对土壤重金属Y的背景值或累积量分布的解释力。

交互作用探测器是探测影响因素之间是否具有相互作用,即评估$X1\cap X2$的共同作用对土壤重金属背景值或累积量分布的交互作用是增强还是减弱或是相互独立起作用。评估的方法首先是分别计算两种因素$X1$和$X2$对Y的q值:$q(X1)$、$q(X2)$,再计算它们交互时的q值:$q(X1\cap X2)$,并对$q(X1)$、$q(X2)$与$q(X1\cap X2)$进行比较。两个因素之间的关系可分为5类,见表2。

表2 交互作用判断依据

Table 2 Interaction judgment basis

判断依据 Judgement basis	交互作用 Interaction
$q(X1\cap X2)<\mathrm{Min}[q(X1),q(X2)]$	非线性减弱
$\mathrm{Min}[q(X1),q(X2)]<q(X1\cap X2)<\mathrm{Max}[q(X1),q(X2)]$	单因子非线性减弱
$q(X1\cap X2)>\mathrm{Max}[q(X1),q(X2)]$	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 结果与讨论

2.1 描述性统计分析

如表3所示,Cd、Pb、Zn、As、Cu、Cr的平均值分别为1.81、74.74、213.88、14.41、68.26、68.09 mg·kg^{-1},分别达到背景值的15.08、2.77、2.91、1.35、3.05、1.13倍。除了客观因素如自然环境和人为活动导致土壤中重金属含量升高外,另一主要主观因素是数据来源为近年来研究我国土壤重金属污染的论文,由于污染严重地区是研究者和读者的关注对象,因此均值结果呈现普遍偏高现象。

2.2 地累积指数法评价结果

如表4所示,从总体来看Cd、Pb、Zn、As、Cu、Cr的地累积指数值范围波动较大。主要由于以全国的土壤重金属含量作为研究对象,研究尺度大,样本点数据覆盖了各种不同功能区的土壤。如在矿山、工厂附近污染较重,因此地累积指数值较高,而在自然保护区等受污染较轻的地区,地累积指数值就相对较低,

表3 土壤重金属描述性统计结果(mg·kg^{-1})

Table 3 Descriptive statistics of heavy metals in soils(mg·kg^{-1})

元素 Element	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation	背景值 Background value
Cd	0.01	70.51	1.81	6.34	3.50	0.12
Pb	0.01	2 693.27	74.74	175.26	2.34	27
Zn	0.02	4 893.00	213.88	488.86	2.29	73.6
As	0.01	327.48	14.41	20.63	1.43	10.7
Cu	0.03	2 434.76	68.26	163.69	2.40	22.4
Cr	0.01	296.63	68.09	44.89	0.66	60.2

表4 土壤重金属污染地累积指数分级

Table 4 Classification of soil heavy metals based on geo-accumulation index

元素 Element	地累积指数均值 I_{geo} mean	地累积指数 I_{geo}	各级样本数 Number of samples at all levels						
			0级 Level 0	1级 Level 1	2级 Level 2	3级 Level 3	4级 Level 4	5级 Level 5	6级 Level 6
Cd	1.12	−6.63~9.61	677	415	355	229	188	130	120
Pb	−0.10	−11.61~5.80	1313	644	215	65	49	31	8
Zn	−0.16	−12.54~5.69	948	442	147	54	36	29	7
As	−0.75	−11.52~5.07	940	181	65	18	11	4	1
Cu	−0.06	−10.49~6.91	1016	520	195	54	32	28	13
Cr	−0.75	−13.62~3.82	1255	232	54	22	27	0	0

因此I_{geo}值离散程度较大。从整体地累积指数均值角度来看,全国范围内Cd平均地累积指数值为1.12,为无-中度污染。另外5种重金属平均地累积指数值均在0以下,不存在污染情况。单独从地累积指数均值来看,只能对整体污染初步了解,不能较为准确地反映真实污染情况,需要通过不同角度与地累积指数空间分布图进行进一步分析。

图1为地累积指数分级对比情况,通过各元素受到污染的样本点占比情况,可以反映6种重金属污染程度的大小,侧面反映出污染情况。从各元素受到污染的样本点位率来看,各元素超标点位率从高到低为Cd>Cu>Pb>Zn>As>Cr,分别为67.98%、45.32%、43.53%、42.99%、22.95%、21.07%。地累积指数空间分布图可以反映整体土壤重金属的污染情况,并呈现土壤重金属的污染特征是点状还是面状。如图2所示,从地累积指数空间分布图看出,Cd在全国范围内存在普遍污染情况,呈现出大面积的连片污染,Pb、Zn和Cu呈现斑块状污染,As和Cr呈现零星污染。这与多数研究者的研究结果一致[21-23]。

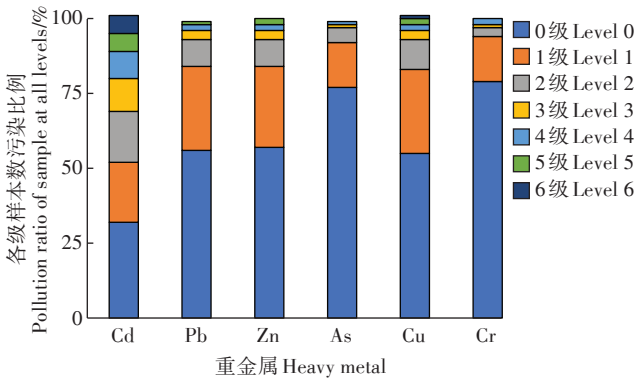


图1 土壤重金属地累积指数分级对比

Figure 1 Classification and comparison of soil heavy metals geo-accumulation index

2.3 地理探测器探测结果

因子探测器探测影响因素是否对土壤重金属分布有影响以及影响作用的大小,通过确定其相对重要性,筛选出主要影响因素。由于实际环境中土壤重金属含量受多种影响因素共同作用,一般情况下不存在单一性质的因素形成土壤重金属的某种空间分布和含量的变化,因此通过交互作用探测器来确定哪些因素能够显著增强主要因素的影响力或者因素之间能够显著增强影响,从而确定影响土壤重金属含量的辅助因素。本文采用16种影响因素进行探测,图3为影响因素空间分布图。

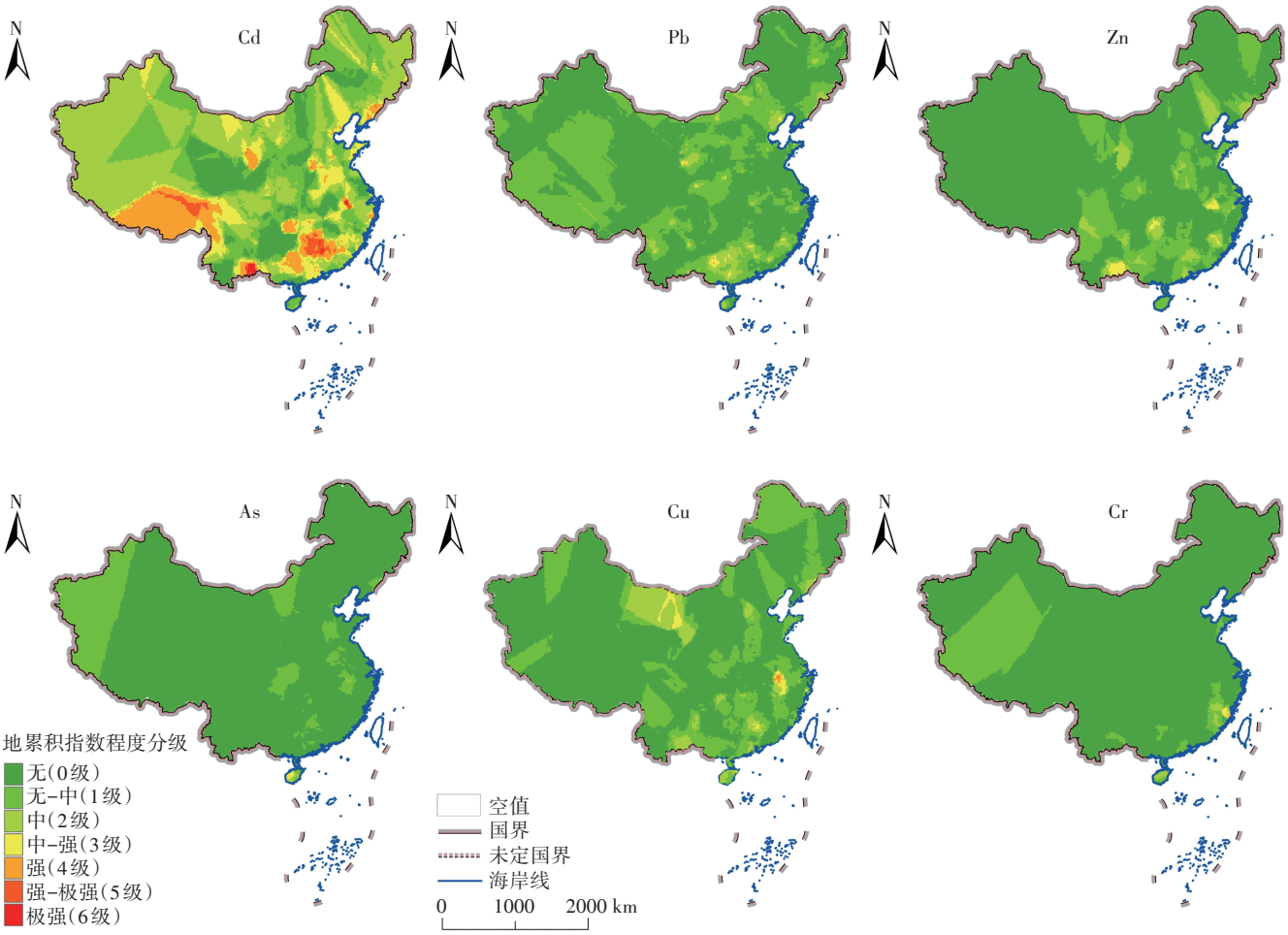


图2 土壤重金属污染地累积指数的空间分布

Figure 2 Spatial variation of soil heavy metals pollution based on geo-accumulation index

2.3.1 土壤重金属原始含量因子探测

将Cd、Pb、Zn、As、Cu、Cr原始含量分别作为目标属性Y,16种影响因素作为自变量$X1$~$X16$,利用因子探测器探测大尺度下土壤重金属污染影响因素。某一因素的q值越高说明其对土壤重金属污染分布的影响程度和贡献越大。结果显示所有影响因素的q值较小,均值在0.014左右,最大值也低于0.035,很多影响因素并未通过显著性检验。图4为探测6种土壤重金属原始含量时通过0.05显著性水平检验的影响因素,虽然整体q值都较低,但仍有通过显著性检验的因素,这表明全国范围内确实存在整体趋势影响和宏观规律,因此可进一步探索以分析出大尺度下土壤重金属污染的影响因素。

2.3.2 土壤重金属地累积指数因子探测

由于采用原始样点进行探测,样点值是背景值和人为活动累加的结果,背景值会掩盖累积的含量。因此本文采用地累积指数来衡量土壤重金属污染程度,作为土壤重金属累积量探测污染的影响因素。图5是通过0.05显著性水平检验,对6种土壤重金属累积量分布差异有影响的因素。从图中看出,q值相比原始含量直接探测有着明显提高,最高达到了0.097。根据q值大小,选择对土壤重金属累积量分布贡献相对较高的因素,作为主要影响因素:Cd,地理区划、海拔高度、地势三大阶梯;Pb,地势三大阶梯、气候带类型;Zn、Cu海拔高度;As,气候带类型;Cr,土壤类型、东中西经济划分、地理区划。

2.3.3 土壤重金属地累积指数交互探测

由于因素交互的数量过多,只列出交互结果较高的部分。对Cd来说,交互作用最高的是地理区划∩土壤类型,达到0.18,意味着不同分区的相同土壤类型或相同分区的不同土壤类型间Cd累积量分布差异大。如表5所示,影响因素交互后解释力都是提高的,且多为非线性增强作用,即两因素交互作用q值大于两因素q值之和,说明累积量受多种因素共同制约,表明复合的影响更大。因此辅助因素的选择能够

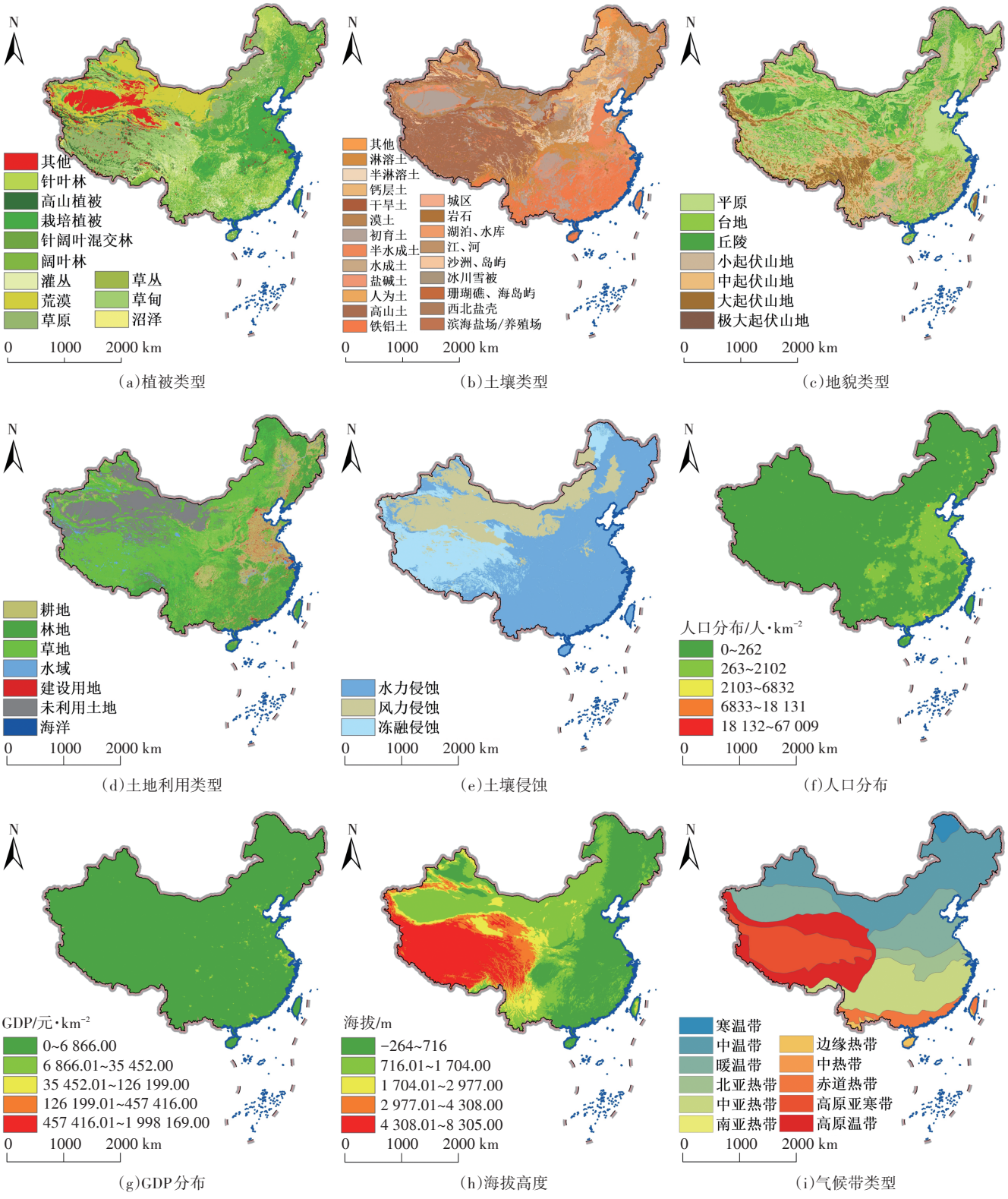
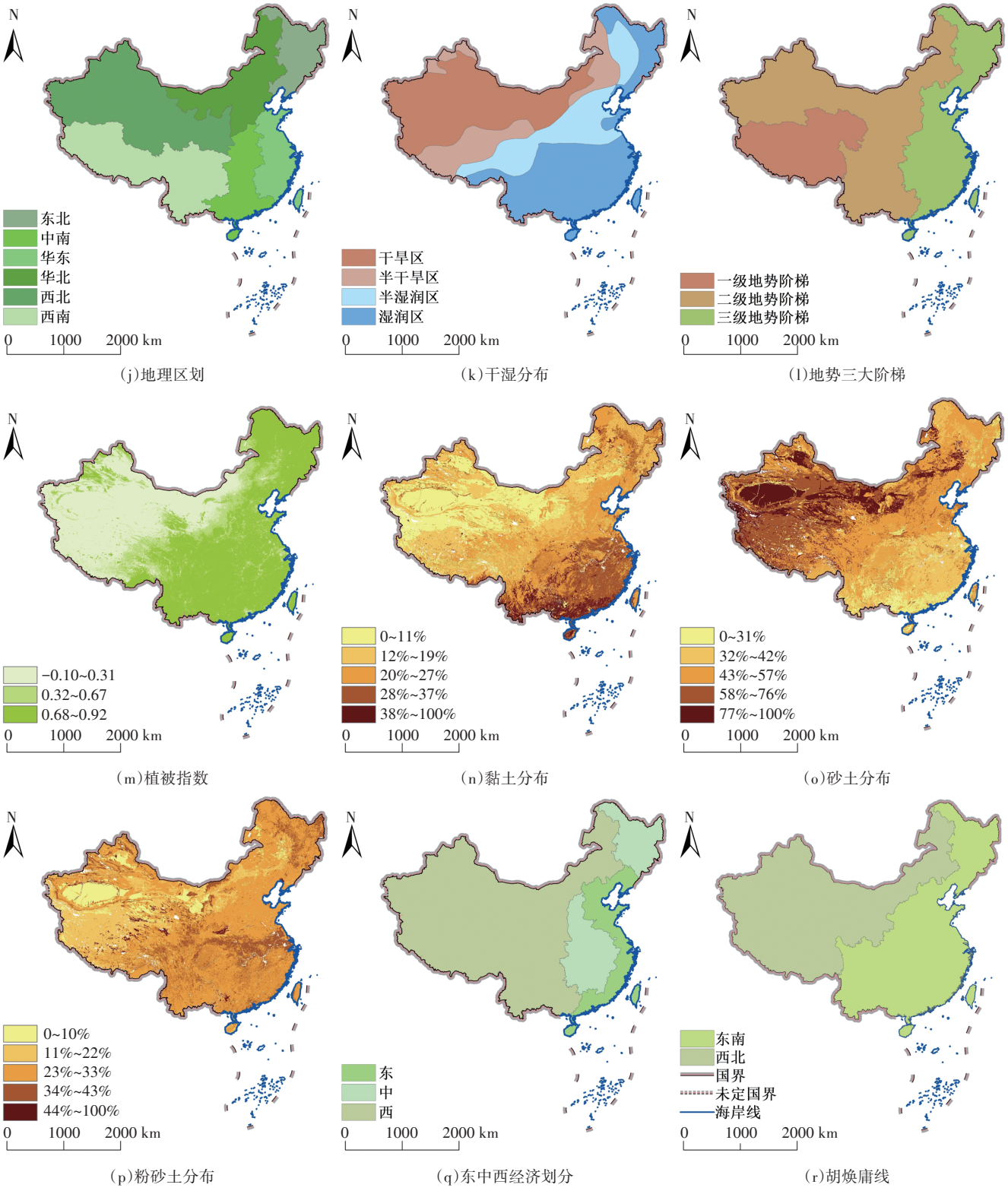


图3 影响因素空间分布图

Figure 3 Spatial distributions of influence factors

显著提高解释力,分别有:Cd、Pb、As为土壤类型;Zn为地理区划、气候带类型;Cu为气候带类型、土壤类型;Cr为地理区划、土壤类型。其既是主要因素,交互后又能增强影响,同时可作为辅助因素。



续图3 影响因素空间分布图

Continued figure 3 Spatial distributions of influence factors

3 讨论

(1)通过描述性统计分析发现Cd、Pb、Zn、As、Cu、Cr均值都超过全国土壤背景值均值。

(2)从整体地累积指数均值角度来看,全国范围内Cd平均地累积指数为1.12,属于无-中度污染。另

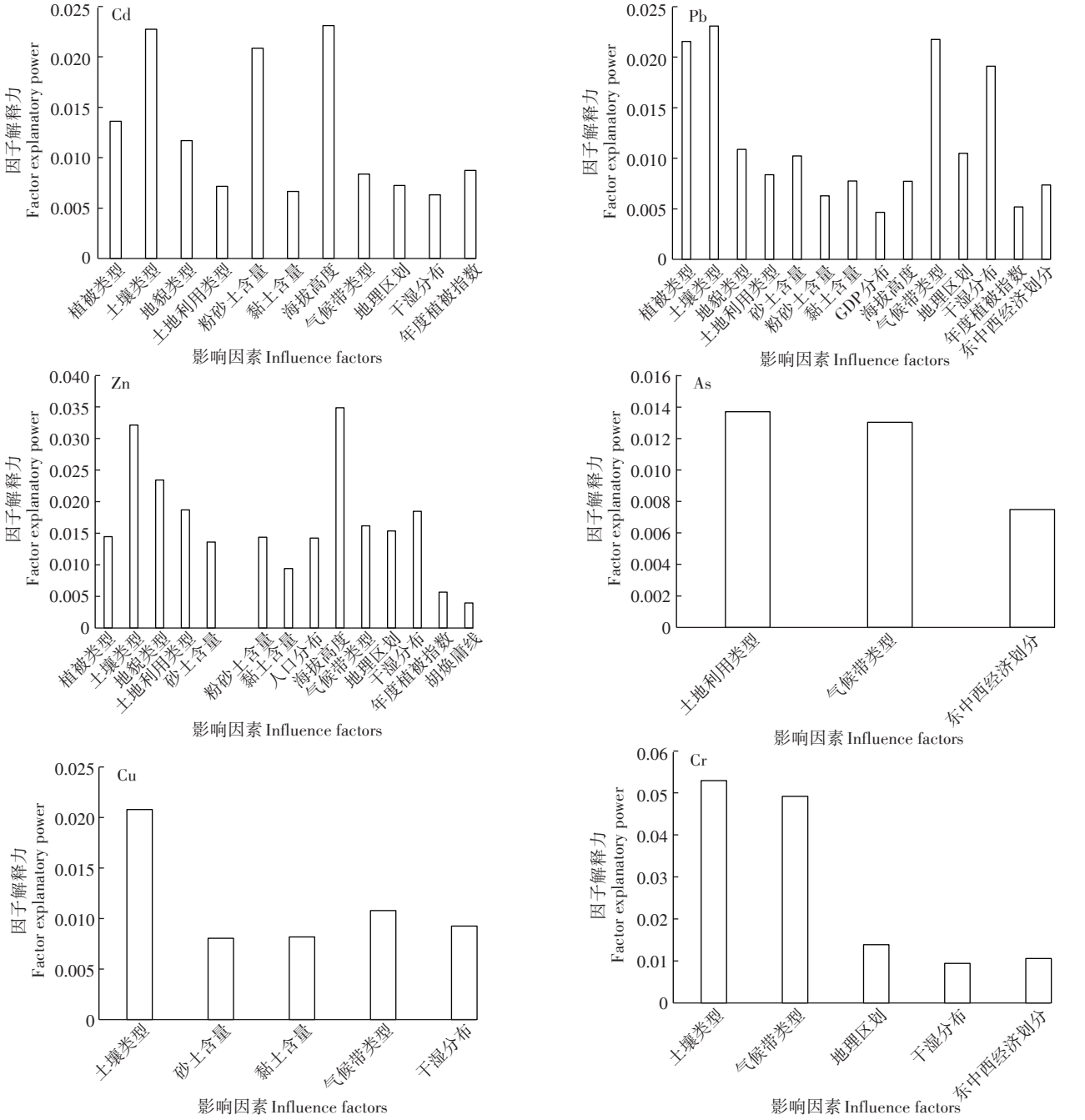


图4 原始含量因子探测器结果

Figure 4 Raw content factor detector results

外5种重金属平均地累积指数值均在0以下,不存在污染情况。通过各元素受到污染的样本点位率来看,各元素超标点位率从高到低为Cd>Cu>Pb>Zn>As>Cr。

(3)通过地理探测器探测土壤重金属原始含量分布变化的解释力,发现q值较低,通过显著性检验的因素个数也比使用累积量进行探测的要少。原因主要是两部分:一是在大尺度下,因为各地区的影响因素均不同,而在全国范围内都能造成影响的因素,其影响力主要呈现为整体趋势影响,因此q值会较低;二是土壤背景值会遮盖累积量的影响。因此使用地累积指数来探测土壤重金属污染的影响因素。

(4)通过对土壤重金属地累积指数的因子探测显示,对于6种重金属元素,影响因素解释力既具有一致性又有差异性。6种土壤重金属累积量分布主要受海拔高度、地理区划、地势三大阶梯、气候带类型、土壤类型、东中西经济划分等因素影响。在Cd、Pb、

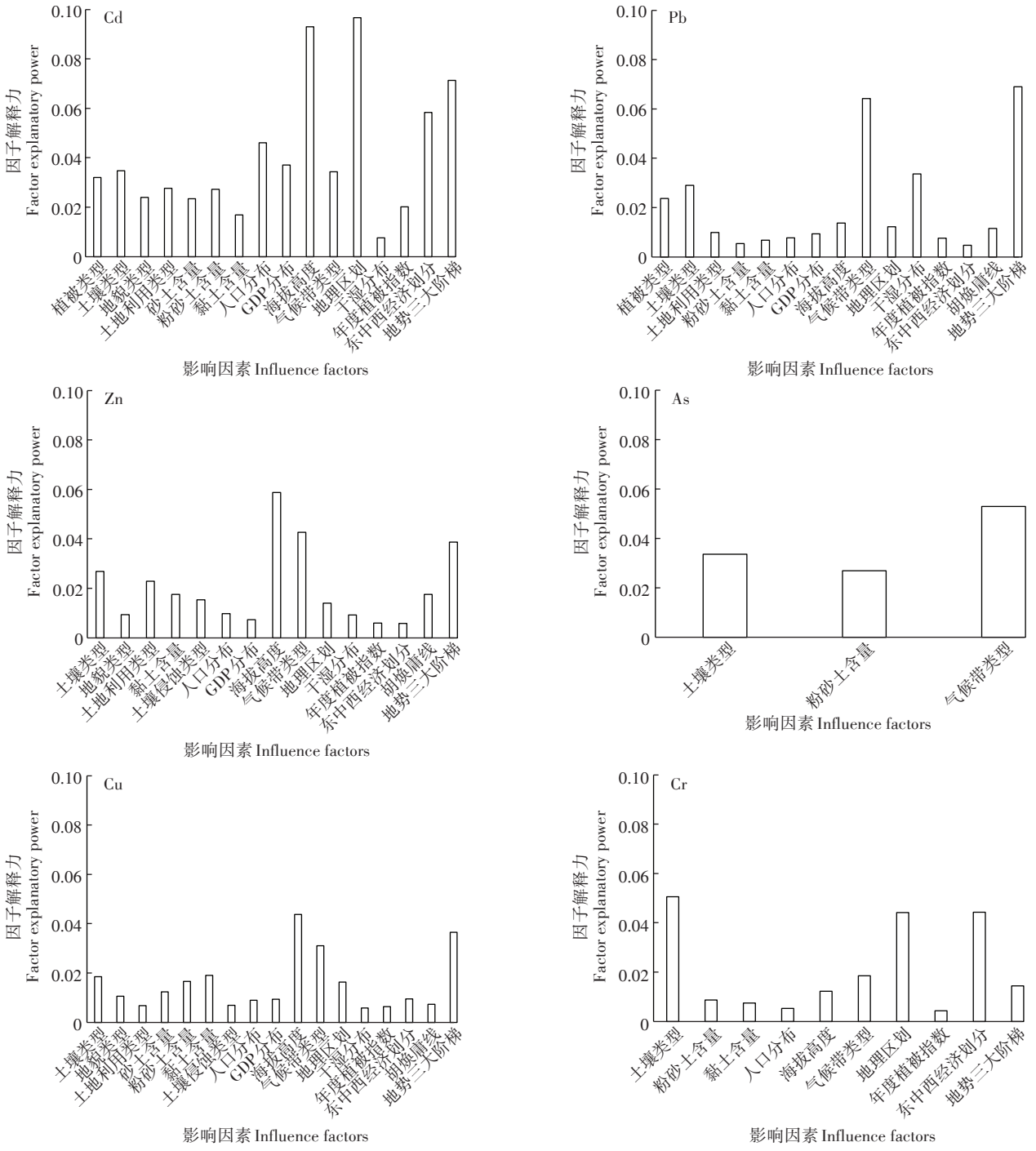


图5 累积量因子探测器结果

Figure 5 Geo-accumulation index value factor detector results

Zn、Cu累积量分布的因子探测中，通过显著性检验的因素个数最多，均在10种以上，并且q值都相对较高。表明其受到更多的因素影响且外界输入来源较多，因此污染程度也会相对较高，这与地累积指数法的污染程度评价结果也相吻合。

(5)通过对土壤重金属地累积指数的交互探测显示，任意两种影响因素交互后均不存在相互独立、单因子非线性减弱、非线性减弱。揭示了土壤重金属累积量受多种因素控制，多因素复合导致累积量的升高。

总体来看，6种土壤重金属在全国范围内都主要受自然环境因素和大区域范围人为活动的影响。小区域和局部污染源的影响对于大尺度的土壤重金属含量差异分布影响较小。Nanos等[24]对杜罗河流域的

表5 累积量交互探测器结果

Table 5 Geo-accumulation index value interactive detector results

元素 Element	$C=q(X1\cap X2)$	$A+B=q(X1)+q(X2)$	结果 Result	交互作用 Interaction
Cd	地理区划∩土壤类型=0.18	0.13=地理区划(0.10)+土壤类型(0.03)	$C>A+B$	非线性增强
Pb	气候带类型∩土壤类型=0.14	0.09=气候带类型(0.06)+土壤类型(0.03)	$C>A+B$	非线性增强
Zn	地理区划∩气候带类型=0.14	0.05=地理区划(0.01)+气候带类型(0.04)	$C>A+B$	非线性增强
As	气候带类型∩土壤类型=0.10	0.08=气候带类型(0.05)+土壤类型(0.03)	$C>A+B$	非线性增强
Cu	气候带类型∩土壤类型=0.13	0.05=气候带类型(0.03)+土壤类型(0.02)	$C>A+B$	非线性增强
Cr	地理区划∩土壤类型=0.16	0.09=地理区划(0.04)+土壤类型(0.05)	$C>A+B$	非线性增强

研究也表明,在较大的空间尺度上土壤重金属含量的变化主要由自然因素造成。Li等[25]对珠江三角洲地区的研究也证实了这一点。孙慧等[26]在研究广东省8种土壤重金属含量的影响因素贡献率时发现,除Hg外,其余重金属来源受自然因素作用大于局部范围的人为因素。而大区域范围的人为影响因素中,地理区划、东中西经济划分对6种重金属影响都较强。原因是这些因素一定程度上反映了经济类型和产业结构。地理区划是全国六大地理分区,其根本的划分依据是根据地域分异规律、经济发展、行政管理等进行划分的。6个地理分区具有不一样的人文环境,在经济类型、生产方式、产业结构、地区发展形势等方面均有所差异。东北地区是我国老工业基地,长期以工业开发、煤炭生产、钢铁加工等工业活动为支柱产业。华北地区是我国北方经济规模最大、最具活力的地区;西北地区资源丰富、石化原材料充足,涉及重金属的行业居多;华东地区是加工业、各种制造业、铅锌矿与铜矿开发成熟的地区;中南地区处于工业化、城镇化加速发展区域,在土壤污染方面呈现为新老污染、有机和无机污染交织的情况;西南地区是我国磷矿富集区,有色金属冶炼工厂分布广泛;因此各分区土壤重金属污染差异较大,所以地理区划与重金属累积量分布变化关联度高。同样东中西经济划分是依据经济发展水平和地理位置长期演变形成的,因自然条件与资源状况有所差异,所以有各自的发展特点,逐渐形成了3种经济发展水平。因此对重金属累积量造成了不同影响。而人口分布、GDP分布这种人为活动因素对6种土壤重金属含量影响都较小,其q值和与其他因素交互作用后解释力都偏低。主要原因是GDP不能很好地反映产业结构,GDP较低地区可能是农业和经济落后区,污染较小,GDP高的地区有可能是服务业发达,对于土壤污染影响也相对较小,因此GDP的高低与土壤重金属污染的关联度不高。而人口分布也同样不能很好地反映产业结构。地理区划、东中西经济划分反映了经济类型、产业结构、经济发展程度、地理环境差异等对重金属含量影响较为显著的几项综合因素,因此影响力较高。

4 结论

(1)从整体地累积指数均值来看,全国范围内Cd平均值为无-中度污染,其他重金属平均值为无污染情况。从地累积指数空间分布图来看,Cd呈现出大面积的连片污染,Pb、Zn和Cu呈现斑块状污染,As和Cr呈现零星污染。

(2)在现有的数据基础上,确定重金属累积量分布差异的主要影响因素和辅助因素,分别是:Cd,地理区划、海拔高度、地势三大阶梯和土壤类型;Pb,地势三大阶梯、气候带类型和土壤类型;Zn,海拔高度和地理区划、气候带类型;As,气候带类型和土壤类型;Cu,海拔高度和气候带类型、土壤类型;Cr,土壤类型、东中西经济划分、地理区划;通过现有数据初步得出大尺度上6种重金属含量主要受自然环境因素和大区域范围人为活动的影响,揭示了整体趋势影响和宏观规律,在以后的研究中,有待进一步的深入探索。

参考文献:

[1] 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. (2014-04-17). http://www.gov.cn/xinwen/2014-04/17/content_2661765.htm.
Report on the national general survey of soil contamination[EB/OL]. (2014-04-17). http://www.gov.cn/xinwen/2014-04/17/content_2661765.htm.

[2] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 1991, 12(4): 12-19.
WEI Fu-sheng, CHEN Jing-sheng, WU Yan-yu, et al. Study on the background contents on elements of soils in China[J]. *Environmental Science*, 1991, 12(4): 12-19.

[3] 张新英, 宋书巧. 重金属环境背景值研究[J]. 广西师院学报(自然科学版), 1999(4): 98-101.
ZHANG Xin-ying, SONG Shu-qiao. The research of environmental

background values of the heavy metal[J]. *Journal of Guangxi Normal University*(*Natural Science Edition*), 1999(4):98-101.

[4] 刘春阳, 张宇峰, 滕 洁. 土壤中重金属污染的研究进展[J]. 污染防治技术, 2006 18(4):42-45.
LIU Chun-yang, ZHANG Yu-feng, TENG Jie. Advances on pollution soils by heavy metals[J]. *Pollution Control Technology*, 2006, 18(5): 42-45.

[5] 陈同斌, 郑袁明, 陈 煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J]. 环境科学, 2004, 25(1):117-122.
CHEN Tong-bin, ZHENG Yuan-ming, CHEN Huang, et al. Background concentrations of soil heavy metals in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(1):117-122.

[6] 古德宁, 李光明, 张兆海, 等. 濮阳工业园区土壤重金属背景值及质量评价[J]. 中国环境监测, 2015, 31(1):50-52.
GU De-ning, LI Guang-ming, ZHANG Zhao-hai, et al. Background value of soil heavy metals in Puyang industrial park and quality assessment[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2015, 31(1):50-52.

[7] 鲍永恩. 辽河口海区沉积物与重金属环境背景值的关系[J]. 海洋环境科学, 1988(2):20-27.
BAO Yong-en. The relationship between sediments and background values of heavy metals in the Liaohe Estuary[J]. *Marine Environmental Science*, 1988(2):20-27.

[8] 唐 将, 钟远平, 王 力. 三峡库区土壤重金属背景值研究[J]. 中国生态农业学报, 2008 16(4):848-852.
TANG Jiang, ZHONG Yuan-ping, WANG Li. Background value of soil heavy metal in the Three Gorges Reservoir district[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(4):848-852.

[9] 张连科, 李海鹏, 黄学敏, 等. 包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析[J]. 环境科学, 2016, 37(3):1139-1146.
ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng HUANG Xue-min, et al. Soil heavy metal spatial distribution and source analysis around an aluminum plant in Baotou[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(3):1139-1146.

[10] 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.
LÜ Jian-shu, ZHANG Zu-lu, LIU Yang, et al. Sources identification and hazardous risk delineation of heavy metal contamination in Rizhao City[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(7):971-984.

[11] Wang J F, Hu Y. Environmental health risk detection with GeogDetector[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 33:114-115.

[12] Ren Y, Deng L Y, Zuo S D, et al. Geographical modeling of spatial interaction between human activity and forest connectivity in an urban landscape of southeast China[J]. *Springer Netherlands*, 2014, 29(10): 1741-1758.

[13] Todorova Y, Lincheva S, Yotinov I, et al. Contamination and ecological risk assessment of long-term polluted sediments with heavy metals in small hydropower cascade[J]. *Water Resources Management*, 2016, 30(12):4171-4184.

[14] Duan Q, Lee J, Liu Y, et al. Distribution of heavy metal pollution in surface soil samples in China: A graphical review[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2016, 97(3):303-309.

[15] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990:330-482.
Inspective Station of Environment of China. The background value of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990:330-482.

[16] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the rhine river[J]. *Geojournal*, 1969, 2:108-118.

[17] 湛东升, 张文忠, 余建辉, 等. 基于地理探测器的北京市居民宜居满意度影响机理[J]. 地理科学进展, 2015, 34(8):966-975.
ZHAN Dong-sheng, ZHANG Wen-zhong, YU Jian-hui, et al. Analysis of influencing mechanism of residents′ livability satisfaction in Beijing using geographical detector[J]. *Progress in Geography*, 2015, 34(8):966-975.

[18] 丁 悦, 蔡建明, 任周鹏, 等. 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[J]. 地理科学进展, 2014, 33(5):657-666.
DING Yue, CAI Jian-ming, REN Zhou-peng, et al. Spatial disparities of economic growth rate of China′s National-level ETDZs and their determinants based on geographical detector analysis[J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(5):657-666.

[19] 廖 颖, 王心源, 周俊明. 基于地理探测器的大熊猫生境适宜度评价模型及验证[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(6):767-778.
LIAO Ying, WANG Xin-yuan, ZHOU Jun-ming. Suitability assessment and validation of giant panda habitat based on geographical detector[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2016, 18(6):767-778.

[20] 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.

[21] 张小敏, 张秀英, 钟太洋, 等. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. 环境科学, 2014, 35(2):692-703.
ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, et al. Spatial distribution and accumulation of heavy metal in arable land soil of China[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2):692-703.

[22] 宋 伟, 陈百明, 刘 琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2):293-298.
SONG Wei, CHEN Bai-ming, LIU Lin. Soil heavy metal pollution of cultivated land in China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(2):293-298.

[23] Wei B G, Yang L S. 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.

[24] Nanos N, Martín J A R. Multiscale analysis of heavy metal contents in soils: Spatial variability in the Duero river basin (Spain)[J]. *Geoderma*, 2012, 189/190:554-562.

[25] Li C, Li F B, Wu Z F, et al. Effects of landscape heterogeneity on the elevated trace metal concentrations in agricultural soils at multiple scales in the Pearl River delta, south China[J]. *Environmental Pollution*, 2015, 206:264-274.

[26] 孙 慧, 毕如田, 郭 颖, 等. 广东省土壤重金属溯源及污染源解析[J]. 环境科学学报, 2018, 38(2):704-714.
SUN Hui, BI Ru-tian, GUO Ying, et al. Source apportionment analysis of trace metal contamination in soils of Guangdong Province, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(2):704-714.