

doi: 10.11720/wtyht.2020.1525

赵秀芳,张永帅,冯爱平,等.山东省安丘地区农业土壤重金属元素地球化学特征及环境评价[J].物探与化探,2020,44(6):1446-1454.http://

doi.org/10.11720/wtyht.2020.1525

Zhao X F, Zhang Y S, Feng A P, et al. Geochemical characteristics and environmental assessment of heavy metal elements in agricultural soil of Anqiu area, Shandong Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(6): 1446-1454. http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1525

山东省安丘地区农业土壤重金属元素地球化学特征及环境评价

赵秀芳¹, 张永帅¹, 冯爱平¹, 王艺璇², 夏立献¹, 王宏雷¹, 杜伟¹

(1. 山东省第七地质矿产勘查院, 山东 临沂 276006; 2. 南京农业大学园艺学院, 江苏 南京 210095)

摘要: 为了解山东安丘地区土壤重金属污染现状,在该区系统采集了10 194件表层土壤样品,对Cd、Hg、Pb、As等8种重金属元素含量开展测试分析,并采用地学统计、多元统计等分析方法,探讨重金属元素的地球化学分布特征及其可能的来源。结果表明,研究区土壤中Cd、Hg、As含量平均值与潍坊市土壤背景值相当,其他元素含量平均值稍高于潍坊市土壤背景值,8种重金属元素均值均小于规范风险筛选值。根据聚类分析,8种重金属元素主要分为4类,第一类为Cr、Ni、Cu和Zn,其分布主要受成土母质等自然因素的影响,且Zn同时还受人类活动影响;第二类为Cd、Pb,第三类为Hg,其分布特征受金属冶炼加工、交通、采矿等人类活动影响较大;第四类为As,除继承成土母质外,其分布特征还受人为活动的影响。采用《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)评价研究区土壤环境质量,结果表明研究区土壤环境以安全区为主,无风险,仅在个别地方存在点源污染。

关键词: 土壤重金属元素;地球化学特征;环境评价;安丘市

中图分类号: P632

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2020)06-1446-09

0 引言

土壤是人类生存的基本资源,是农业发展的重要基础。随着社会经济快速发展,城市化、工业化、采矿、农田污灌、施肥等人为活动使农业土壤受到不同程度的重金属污染^[1-7]。土壤重金属污染不仅会使土壤肥力下降^[8],导致农作物减产和质量下降,而且会通过食物链最终危害人体健康^[9-13]。笔者在以往农业地质调查的基础上,以山东省安丘地区表层土壤为研究对象,采用地学统计、多元统计等方法分析土壤重金属元素的地球化学特征,揭示其可能来源。由于《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)发布不久,目前,应用该标准进行土壤环境评价的研究工作较少,本次采用该标准评价研究区土壤环境状况,旨在为研

究区土壤污染防治和保障农产品安全提供科学依据,助力乡村振兴,服务新农村建设。

1 研究区概况

研究区位于山东省中部偏东,东与潍坊市峡山区相邻,西与临朐县、昌乐县接壤,南隔渠河与沂水县、诸城市相望,北连潍坊市坊子区。地理坐标:东经118°44'00"~119°27'00",北纬36°05'00"~36°38'00",面积1760 km²。研究区属北温带大陆性半湿润季风气候区,四季分明,年平均气温12.6℃,年平均降水量681 mm。境内主要有汶河、潍河、渠河3条主要河流,流向自南向北、自西向东,另外还有4个大中型水库。

研究区地势总体上由西南向东北倾斜,中部有洼地(图1)。区内西南为丘陵、山地,占全区面积的

收稿日期:2019-11-06;修回日期:2020-04-22

基金项目:山东省财政基金项目(鲁勘字(2016)57号)

作者简介:赵秀芳(1982-),女,高级工程师,地球化学专业,主要从事环境地球化学研究工作。Email:zhxfwg@163.com

万方数据

60.9%。东北地势低洼为平原,海拔 24.3~515.5 m。区内西南部广泛发育元古宙、新太古代花岗石和闪长岩,白垩纪火山岩,新近系牛山组基性玄武岩,寒武—奥陶纪石灰岩等,岩石风化多形成棕壤土、褐土,东北部成土母岩则主要以冲洪积物、白垩纪火山岩为主,形成褐土、潮土、砂姜黑土(图 2)。

区内矿产资源丰富(图 3),主要有铅锌矿、硫铁矿、膨润土、石墨、重晶石、玄武岩、石灰石、建筑用砂矿等,现已被开采利用的有铅锌矿、硫铁矿、重晶石、膨润土、白云岩、石灰岩、石墨、花岗岩等,其中膨润土闻名全国,石墨已销往日本、美国、西德、意大利、法国等地,白云岩、石灰岩、重晶石等在潍坊及山东占有重要地位。

2 材料与方方法

2.1 样品采集与分析

结合研究区土地利用现状、土壤类型和地质情况,按照 1:5 万土地质量地球化学调查采样密度要求,以样点均匀分布和图斑有效控制为原则,以 1 km×1 km 的方里网格为一个采样大格,每个采样大格分为 4 个 0.25 km² 的采样小格。表层样由一个中心点及 4 个分点采集,采样深度 0~20 cm,共采集土壤样品 10 194 件。土样经晾晒风干、碾碎后过孔径为 10 目的尼龙筛。

土壤样品分析测试项目包括 Cd、Hg、Pb、As、

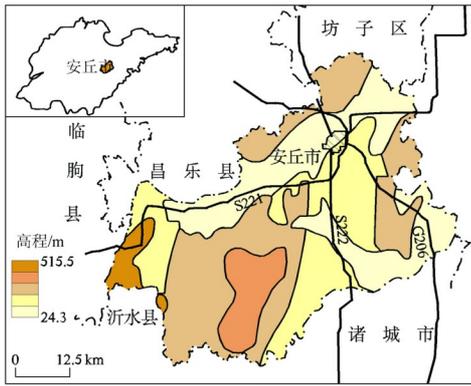


图 1 安丘市地理位置

Fig.1 Geographical location map of Anqiu City

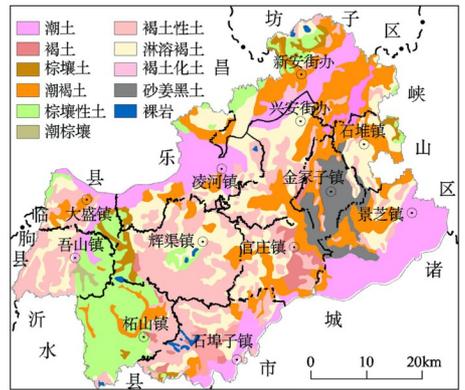


图 2 安丘市土壤类型

Fig.2 Soil type map of Anqiu City

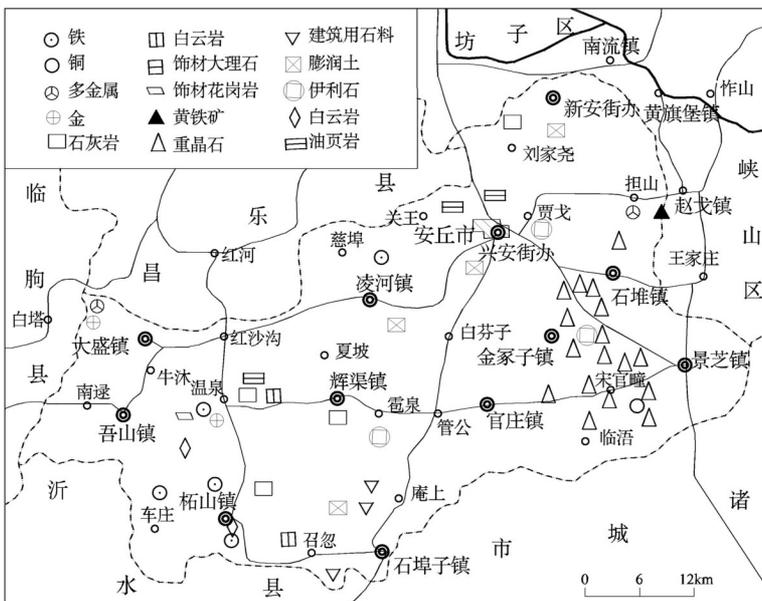


图 3 主要矿产分布

Fig.3 Major mineral distribution sketch

Cr、Ni、Cu、Zn 等。样品分析测试由中国冶金地质总局山东局测试中心完成。按照《地质矿产实验室测试质量管理规范》(DZ/T 0130—2006) 要求,通过实验室内部检查、密码抽查、外部检查等手段,严格监控各样品分析测试的准确度、精密度,保证数据分析的可靠性。结果显示,本次数据合格率大于 85%,满足规范要求。

2.2 数据统计分析、评价标准与方法

2.2.1 数据统计分析方法

地学统计分析方法是对地学数据基本参数进行描述统计分析的方法。多元统计分析方法是判断重金属元素来源的经典方法,广泛应用于土壤、水系沉积物中重金属元素来源的辨识,通常采用主成分分析、聚类分析及相关分析方法来进行,这些方法的结果可以相互验证^[14-15],以上分析方法在国内外得到广泛应用^[16-19]。

笔者利用地学统计方法对表层土壤重金属元素基本参数进行描述性统计分析,包括最大值、最小值、平均值、中值、标准差、变异系数(C_v)、偏度、峰度等。多元统计分析采用 SPSS20 中的 Pearson 相关性分析、主成分分析和聚类分析,判别重金属元素的可能来源,利用 MapGIS 中的克里金插值法进行空间制图,土壤环境综合评价利用中国地质调查局研发的“土地质量地球化学调查与评价数据管理与应用子系统”软件,采用克里金插值法成图。

2.2.2 评价标准

采用《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)^[20](见表 1、2),将安丘地区表层土壤 Cd、Hg、Pb、As、Cr、Ni、Cu、Zn 含量与之进行对比,评价各元素土壤环境质量,Ni、Cu、Zn 在本规范中无风险管制值,则采用风险筛选值。

表 1 农用地土壤污染风险筛选值

Table 1 Risk screening values for soil contamination of agricultural land

| 污染项目 | 风险筛选值/ 10^{-6} | | | |
|------|------------------|------------|------------|--------|
| | pH≤5.5 | 5.5<pH≤6.5 | 6.5<pH≤7.5 | pH>7.5 |
| 镉 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.6 |
| 汞 | 1.3 | 1.8 | 2.4 | 3.4 |
| 砷 | 40 | 40 | 30 | 25 |
| 铅 | 70 | 90 | 120 | 170 |
| 铬 | 150 | 150 | 200 | 250 |
| 铜 | 50 | 50 | 100 | 100 |
| 镍 | 60 | 70 | 100 | 190 |
| 锌 | 200 | 200 | 250 | 300 |

表 2 农用地土壤污染风险管制值

Table 2 Risk control values for soil contamination of agricultural land

| 污染项目 | 风险管控值/ 10^{-6} | | | |
|------|------------------|------------|------------|--------|
| | pH≤5.5 | 5.5<pH≤6.5 | 6.5<pH≤7.5 | pH>7.5 |
| 镉 | 1.5 | 2 | 3 | 4 |
| 汞 | 2.0 | 2.5 | 4 | 6 |
| 砷 | 200 | 150 | 120 | 100 |
| 铅 | 400 | 500 | 700 | 1000 |
| 铬 | 800 | 850 | 1000 | 1300 |

2.2.3 评价方法

1) 土壤环境单指标评价

按照表 3 所示的土壤单项环境地球化学等级划分界限值,分别进行单指标土壤环境地球化学等级划分。表中: C_i 为土壤中 i 指标的实测浓度; S_i 为污染物 i 在农用地土壤污染风险管制标准(GB 15618—2018)中给出的风险筛选值(表 1); G_i 为污染物 i 在农用地土壤污染风险管制标准(GB 15618—2018)中给出的风险管制值(表 2)。

表 3 土壤环境地球化学等级划分界限

Table 3 Geochemical classification for soil environment

| 等级 | 一等 | 三等 | 三级 |
|------|----------------|----------------------|-------------|
| 污染风险 | 无风险 | 风险可控 | 风险较高 |
| 划分方法 | $C_i \leq S_i$ | $C_i < S_i \leq G_i$ | $C_i > G_i$ |

2) 土壤环境综合评价

在单指标土壤环境地球化学等级划分基础上,每个评价单元的土壤环境综合等级等同于单指标划分出的环境等级最差等级。

3 结果与分析

3.1 土壤重金属元素含量特征

研究区表层土壤 Cd、Hg、Pb、As 等 8 种重金属元素基本参数以及潍坊市背景值列于表 4。Cd、Hg、As 含量平均值与潍坊市土壤背景值相当,其他元素含量平均值不同程度地高于潍坊市土壤背景值。相比而言,Ni 较潍坊市土壤背景值最高,是潍坊市表层土壤背景值的 1.38 倍。

研究区表层土壤 8 种重金属元素含量均值均小于规范(GB 15618—2018)中的筛选值,因此,研究区 Cd、Hg、As 等 8 种重金属污染总体上极低。极个别表层土壤样品中 Cd、Pb、As、Cr 含量最大值超过规范管制值,Ni、Cu、Zn 含量最大值超过规范筛选值,因此研究区 Cd、As 等 8 种重金属元素在个别地方存在点源污染。

表4 表层土壤重金属元素含量统计特征值

Table 4 Statistical characteristic values of heavy metal element contents in surface soil

| 元素 | 最大值/ 10^{-6} | 最小值/ 10^{-6} | 平均值/ 10^{-6} | 中值/ 10^{-6} | 标准差 | $C_v/\%$ | 偏度 | 峰度 | 潍坊市土壤背景值 ^[21] |
|----|----------------|----------------|----------------|---------------|-------|----------|---------|-------|--------------------------|
| Cd | 5.96 | 0.01 | 0.12 | 0.11 | 0.12 | 94.90 | 1246.09 | 30.37 | 0.11 |
| Hg | 2.290 | 0.001 | 0.033 | 0.030 | 0.046 | 138.40 | 1310.1 | 31.29 | 0.03 |
| Pb | 1665.10 | 3.10 | 28.33 | 24.18 | 31.07 | 109.70 | 1004.05 | 25.27 | 22.90 |
| As | 223.00 | 0.01 | 7.79 | 7.70 | 4.02 | 51.60 | 861.03 | 17.84 | 7.80 |
| Cr | 2227.00 | 6.09 | 80.38 | 68.30 | 49.45 | 61.50 | 358.31 | 10.38 | 65.30 |
| Ni | 1084.00 | 2.94 | 37.21 | 29.70 | 31.27 | 84.00 | 137.57 | 7.02 | 26.90 |
| Cu | 288.00 | 3.63 | 25.19 | 23.10 | 11.10 | 44.10 | 43.32 | 3.76 | 21.20 |
| Zn | 1129.16 | 6.40 | 67.19 | 63.81 | 27.26 | 40.60 | 406.01 | 13.2 | 58.50 |

变异系数表征重金属元素在空间上的离散和变异程度。 C_v 值越大,可能受人类活动干扰越大。研究区表层土壤重金属元素变异程度差别较大,特别是Cd、Hg、Pb的变异系数分别达到94.90%、138.40%和109.70%,说明Cd、Hg、Pb在区内分布较不均匀,可能受到人为活动的影响。

偏度可以衡量概率分布的不对称性,偏度系数小于0为左偏,反之为右偏。Zhao Yongcun^[22]、David^[23]认为,在自然条件下,如果没有受到外源输入的影响,母质类型相同的土壤元素遵从正态分布。但人类活动的影响会改变其分布形态,Cd、As等8种重金属元素偏度系数为正值,分布形态属正偏(表4),尤其是Cd、Hg、Pb偏度较大,可能受人类活动影响较大。

3.2 土壤重金属元素空间分布特征

为进一步明晰研究区表层土壤重金属元素含量的空间分布特征,应用MapGIS 6.7软件进行克里金插值分析,得到研究区表层土壤重金属元素分布图(图4)。从图中可以看出,研究区表层土壤Cd、Hg、Pb、As等8种重金属元素的空间分布差异明显。

Cd在西南部山区、东部人类生产活动频繁的各城镇周边形成明显富集,整体上有以高值区为中心向四周逐渐降低的趋势。高值区在西南部及东部呈面域分布,其他地区呈点状分布。

Hg在各城镇周边出现明显富集,高值区在人口

密集、金属冶炼加工、采矿等工矿企业众多的东部及东北部地区呈现面域分布,其他地区呈点状分布,整体上有从东北—西南逐渐递减的趋势,在吾山—柘山镇一带Hg含量最低。

As与Pb空间分布格局规律比较相似,表现为从东北—东向西南逐渐递减的趋势,呈地带性分布。研究区东北及东部人口密集、金属冶炼加工、采矿等工矿企业众多,交通发达,S222及G206在东部穿过,省道S221由西南—东北贯穿全境。在各城镇周边及交通干线两侧,As与Pb富集明显。同时,As在西南部辉渠镇—石埠子镇的石灰岩区也出现明显的富集现象,其他地区呈点状分布。

Cr、Cu、Ni和Zn空间分布规律比较相似,表现为从西南向东北逐渐递减的趋势,在西南部花岗岩、玄武岩区呈现明显富集。高值区在西南部呈面域分布,在东北部呈点状分布。

3.3 重金属元素来源解析

3.3.1 相关分析

利用SPSS20软件,对研究区10 194件表层土壤样品中的Cd、Pb、Hg、As、Cr、Ni、Cu、Zn进行相关性分析。如表5所示,重金属元素Cr、Ni、Cu、Zn之间以及Cd、Hg、Pb、As之间呈极显著正相关,说明Cr、Ni、Cu和Zn及Cd、Hg、Pb和As可能具有相同的来源,这些元素之间的联系和来源可以通过主成分分析和聚类分析进一步进行判别。

表5 土壤重金属元素间相关系数

Table 5 Correlations matrix for the heavy metals in soil

| 元素 | Cd | Hg | Pb | As | Cr | Ni | Cu | Zn |
|----|----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----|
| Cd | 1 | | | | | | | |
| Hg | 0.087 ** | 1 | | | | | | |
| Pb | 0.583 ** | 0.059 ** | 1 | | | | | |
| As | 0.145 ** | 0.095 ** | 0.175 ** | 1 | | | | |
| Cr | 0.053 ** | -0.035 ** | -0.090 ** | -0.067 ** | 1 | | | |
| Ni | 0.058 ** | -0.042 ** | -0.094 ** | -0.066 ** | 0.910 ** | 1 | | |
| Cu | 0.187 ** | - | - | 0.037 ** | 0.616 ** | 0.697 ** | 1 | |
| Zn | 0.571 ** | 0.036 ** | 0.295 ** | 0.067 ** | 0.403 ** | 0.429 ** | 0.625 ** | 1 |

注:“**”表示0.01显著性水平;“-”表示未达到显著性水平,未列出。

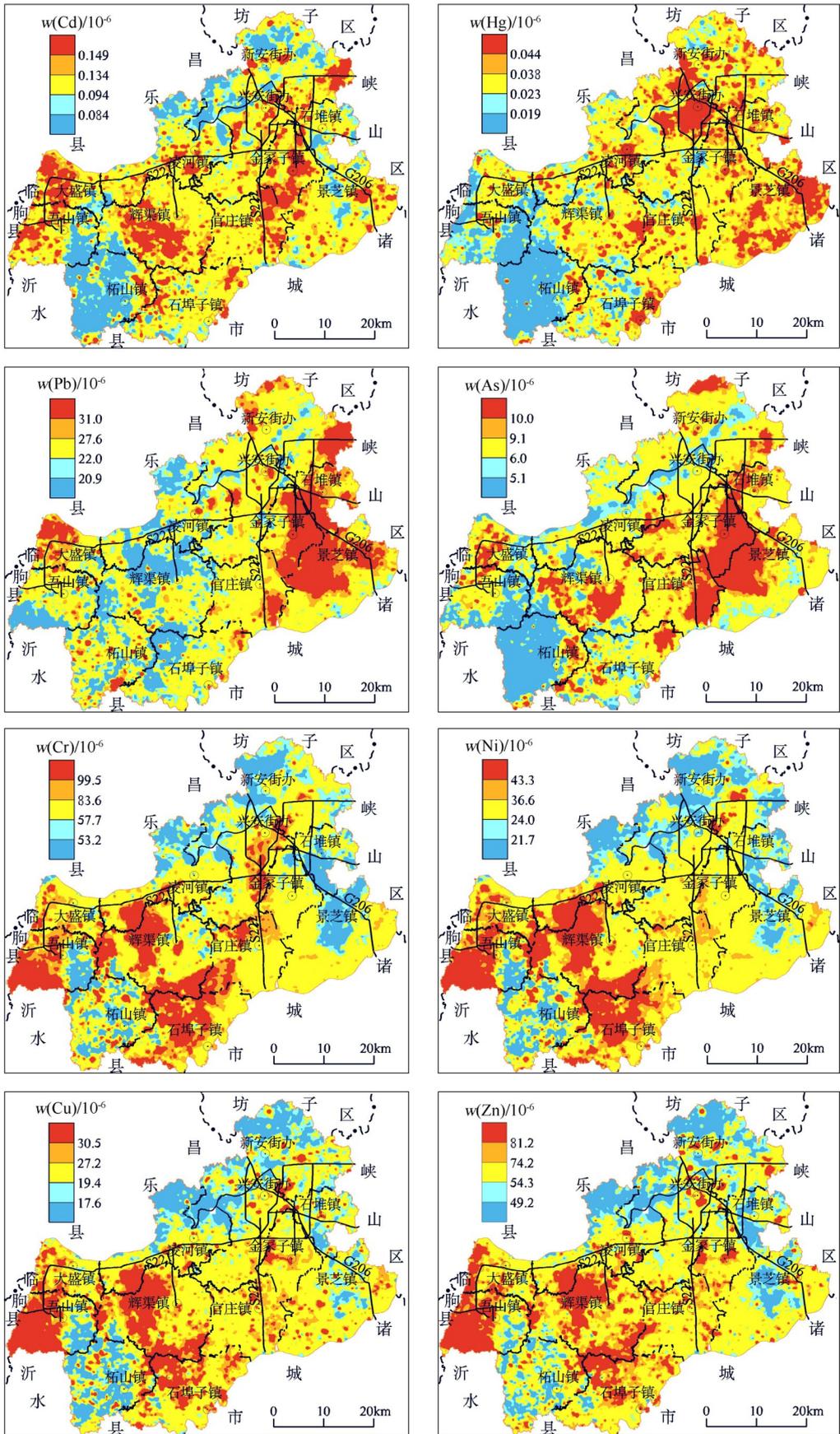


图4 表层土壤重金属元素含量空间分布

万方数据

Fig.4 Spatial distribution of heavy metals in surface soil

3.3.2 主成分和聚类分析

土壤中重金属元素主要来源于成土母质和人为活动,主成分分析和聚类分析是判断重金属元素来源的有效方法。研究区8种重金属元素的主成分分析结果见表6,根据特征值大于1原则,筛选出4个成分,共解释了84.46%的原有信息,说明通过对4主成分分析即可得到Cd、Hg、Pb、As、Cr、Ni、Cu、Zn 8种重金属元素含量数据的大部分信息。主成分F1为Cr、Ni、Cu、Zn,主成分F2为Cd、Pb,主成分F3为Hg,主成分F4为As。聚类分析结果见图5,聚类分析将8种重金属元素分为4类,分别对应着各个主成分,聚类分析与主成分分析结果一致。

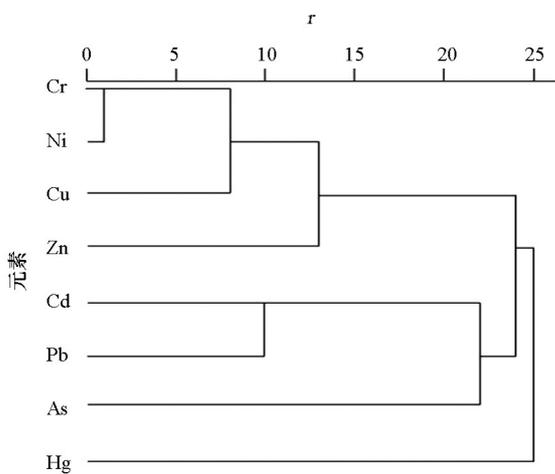


图5 表层土壤重金属元素系统聚类分析

Fig.5 Hierarchical cluster analysis of heavy metal elements in surface soil

主要污染物识别是通过土壤污染物对主成分的贡献率,即主成分载荷进行分析。载荷值反映的是主成分与变量的相关系数,其中载荷大的可认为是重要污染因子^[24],可以帮助判别土壤重金属元素的可能来源。陈晓晨等^[25]认为,在同一主成分上较高

载荷的金属元素之间相关性良好,而且可能具有相同的来源。在表6的主成分F1中,Cr、Ni、Cu、Zn载荷值分别为0.829、0.861、0.855、0.777,均大于0.7,说明这4种元素的共性信息集中在主成分F1上,它们具有较高的相关性。从空间分布上看,Cr、Ni、Cu、Zn在研究区西南部山区含量相对较高,该区域土壤类型为棕壤土、褐土,成土母岩主要为花岗岩、玄武岩。从表7不同成土母质元素含量统计可以看出,花岗岩中Cr、Ni、Cu、Zn含量分别为 139.78×10^{-6} 、 70.74×10^{-6} 、 30.92×10^{-6} 、 71.68×10^{-6} ,为火山岩、石灰岩、闪长岩、冲洪积物中Cr含量的1.8~2.0倍,Ni含量的2.0~2.8倍,Cu含量的1.3倍左右,Zn含量的1.1倍左右;玄武岩中Cr、Ni、Cu、Zn含量分别为 172.5×10^{-6} 、 112.56×10^{-6} 、 46.13×10^{-6} 、 95.12×10^{-6} ,为火山岩、石灰岩、闪长岩、冲洪积物中Cr含量的2.3~2.8倍,Ni含量的3.3~4.5倍,Cu含量的1.7~2.2倍,Zn含量的1.3~1.5倍;因此成土母岩是土壤中Cr、Ni、Cu、Zn的主要来源,表层土壤中Cr、Ni、Cu、Zn主要受到成土母岩等自然来源的影响。值得注意的是,Zn在主成分F2中载荷稍高,研究区东部及东北部一带采矿、金属冶炼加工、电镀厂企业众多,交通发达,因此推测Zn在自然地质背景的基础上还叠加了人类活动的影响。

Cd、Pb在F2中显示出较高的载荷,贡献率为23.56%;Hg在主成分F3中显示较高的载荷,贡献率为12.71%;As在主成分F4中显示较高的载荷,贡献率为11.23%,同时As在主成分F3中载荷稍高。施肥作为农业生产的重要环节,是实现粮食增产最为有效的措施手段,但也在一定程度上对农田重金属污染^[26-27]及人体健康^[28]带来风险。相关研究表明,化学肥料、有机肥料以及农药等可能为农用地土壤Cd的基本来源之一^[29],研究区东部为平原

表6 表层土壤重金属元素因子载荷

Table 6 Factors matrix of heavy metal elements in surface soil

| 元素 | 主成分 | | | |
|-------|-------|--------|--------|--------|
| | F1 | F2 | F3 | F4 |
| Cd | 0.409 | 0.775 | -0.176 | -0.133 |
| Hg | 0.011 | 0.218 | 0.825 | -0.498 |
| Pb | 0.170 | 0.802 | -0.191 | -0.047 |
| As | 0.031 | 0.390 | 0.498 | 0.786 |
| Cr | 0.829 | -0.385 | 0.054 | 0.036 |
| Ni | 0.861 | -0.385 | 0.052 | 0.043 |
| Cu | 0.855 | -0.116 | 0.076 | 0.050 |
| Zn | 0.777 | 0.362 | -0.097 | -0.082 |
| 特征值 | 2.961 | 1.884 | 1.017 | 0.090 |
| 方差/% | 37.02 | 23.56 | 12.71 | 11.23 |
| 贡献率/% | 37.02 | 60.57 | 73.28 | 84.46 |

表 7 不同成土母岩中重金属元素含量

Table 7 Soil heavy metal element contents in the different parent rocks

10⁻⁶

| 元素 | 成土母岩 | | | | | |
|----|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| | 冲洪积物 | 玄武岩 | 火山岩 | 石灰岩 | 闪长岩 | 花岗岩 |
| Cd | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.14 | 0.11 | 0.11 |
| Hg | 0.034 | 0.024 | 0.03 | 0.0305 | 0.026 | 0.019 |
| Pb | 24.45 | 17.57 | 25.46 | 23.235 | 26.99 | 19.96 |
| As | 7.55 | 5.75 | 9.01 | 9.48 | 8.57 | 7.44 |
| Cr | 68.12 | 172.50 | 74.28 | 72.2 | 60.26 | 139.78 |
| Ni | 29.11 | 112.56 | 31.64 | 34.2 | 25.05 | 70.74 |
| Cu | 22.57 | 46.13 | 24.78 | 25.91 | 20.55 | 30.92 |
| Zn | 63.16 | 95.12 | 68.13 | 70.235 | 60.93 | 71.68 |

区,农业生产活动比较活跃,为了提高农作物产量,大量施用化肥、动物粪便等肥料,因此表层土壤过度施用肥料会导致 Cd 的富集。Hg、Pb 和 As 高值区出现在城镇附近,可能与研究区内大量的金属冶炼加工、电镀、电焊、矿山等工矿企业、密集的人口、繁忙的交通等频繁的人类活动有关。经调查,Hg、Pb 和 As 强异常区与这些重金属污染排放企业空间位置具有对应关系。另外,西南部辉渠镇、石埠子镇一带,土壤类型为褐土,其成土母岩寒武系石灰岩中 As 含量为 9.48×10^{-6} ,与冲洪积物、玄武岩、火山岩、闪长岩、花岗岩中 As 含量(分别为 7.55×10^{-6} 、 5.75×10^{-6} 、 9.01×10^{-6} 、 8.57×10^{-6} 、 7.44×10^{-6})相比略高,说明西南部 As 高值区可能受自然地质背景因素影响,因此推断研究区 As 主要潜在来源是在地质背景的基础上叠加了人类活动。

综上,研究区土壤中的 Cr、Ni、Cu 受自然地质背景因素影响,Cd、Hg、Pb 主要与人类活动相关,Zn、As 主要潜在来源是在地质背景的基础上叠加了人类活动。

3.4 土壤环境综合评价

土壤环境综合评价利用中国地质调查局研发的《土地质量地球化学调查与评价数据管理与应用子系统》软件,采用克里金插值的方法,以《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中的筛选值和管制值为参比值,对研究区土壤 Cd、Hg、Pb、As 等 8 种重金属元素进行单指标环境质量等级划分,并在此基础上综合评价研究区土壤环境质量,结果见图 6。研究区表层土壤环境以安全区为主,无风险;其次为风险区,主要分布于研究区西南部,风险可控。

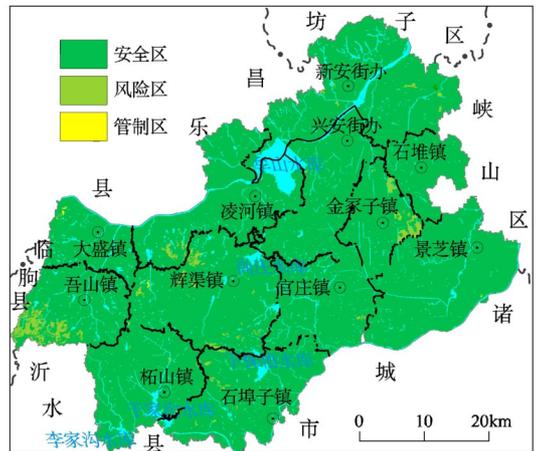


图 6 土壤环境综合地球化学评价

Fig.6 Comprehensive geochemical evaluation map of soil environment

4 结论

1) 8 种重金属元素均值均小于规范风险筛选值。除 Hg 外,极个别表层土壤样品 Cd、Pb、As、Cr 含量最大值大于规范风险管制值,Ni、Cu、Zn 含量最大值大于规范风险筛选值。总体上,研究区重金属污染极低,仅在个别地方存在点源污染。

2) 通过主成分分析,Cr、Ni、Cu 和 Zn 为主成分 F1,主要为自然源控制,而 Zn 还受人为源的影响;Cd、Pb 为主成分 F2,Hg 为主成分 F3,F2 与 F3 主要受人为源影响;As 为主成分 F4,为自然源和人为源共同作用的结果。

3) 依据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018),评价研究区土壤环境质量,结果表明研究区表层土壤环境以安全区为主。

参考文献 (References):

- [1] 崔邢涛, 栾文楼, 宋泽峰, 等. 石家庄城市土壤重金属空间分布特征及源解析[J]. 中国地质, 2016, 43(2): 683-690.
Cui X T, Luan W L, Song Z F, et al. A study of the spatial distribution and source of heavy metals in urban soil in Shijiazhuang City [J]. *Geology in China*, 2016, 43(2): 683-690.
- [2] 冯乙晴, 刘灵飞, 肖辉林, 等. 深圳市典型工业区土壤重金属污染特征及健康风险评价[J]. 生态环境学报, 2017, 26(6): 1051-1058.
Feng Y Q, Liu L F, Xiao H L, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in soil of typical industrial district of Shenzhen [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(6): 1051-1058.
- [3] 李泽琴, 侯佳渝, 王奖臻. 矿山环境土壤重金属污染潜在生态风险评价模型探讨[J]. 地球科学进展, 2008, 23(5): 509-516.
Li Z Q, Hou J Y, Wang J Z. Potential ecological risk assessment model for heavy metal contamination of agricultural soils in mining areas [J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(5): 509-516.
- [4] 段飞舟, 高吉喜, 何江, 等. 灌溉水质对污灌区土壤重金属含量的影响分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(3): 450-455.
Duan F Z, Gao J X, He J, et al. Impact of irrigation water quality on heavy metals concentrations in surface soil of paddy field [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(3): 450-455.
- [5] 王腾飞, 谭长银, 曹雪莹, 等. 长期施肥对土壤重金属积累和有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(2): 257-263.
Wang T F, Tan C Y, Cao X Y, et al. Effects of long-term fertilization on the accumulation and availability of heavy metals in soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(2): 257-263.
- [6] 张英英, 施志国, 李彦荣. 不同耕作方式对民勤绿洲耕层土壤理化性状及重金属含量的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(1): 207-214.
Zhang Y Y, Shi Z G, Li Y R, et al. Effects of different tillage methods on soil physical-chemical properties and heavy metal content in Minqin Oasis [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(1): 207-214.
- [7] 李苹, 黄勇, 林贇, 等. 北京市怀柔区土壤重金属的分布特征、来源分析及风险评价[J]. 现代地质, 2018, 32(1): 86-94.
Li P, Huang Y, Lin Y, et al. Distribution, source identification and risk assessment of heavy metals in topsoil of Huairou district in Beijing [J]. *Geoscience*, 2018, 32(1): 86-94.
- [8] 李芳, 钱秋芳. 土壤重金属污染研究进展[J]. 安徽农学通报, 2011, 17(10): 80-82, 202.
Li F, Qian Q F. Advances in pollution of heavy metals in soil [J]. *Anhui Agri. Sci. Bull.*, 2011, 17(10): 80-82, 202.
- [9] 段续川, 李苹, 黄勇, 等. 北京市密云区农业土壤重金属元素地球化学特征及生态风险评价[J]. 现代地质, 2018, 32(1): 95-104.
Duan X C, Li P, Huang Y, et al. Geochemical characteristics and risk assessment of heavy metals in agricultural soils in Miyun district of Beijing [J]. *Geoscience*, 2018, 32(1): 95-104.
- [10] 刘庆, 杜志勇, 史衍玺, 等. 山东省寿光市土壤重金属环境质量评价[J]. 江西农业大学学报, 2009, 31(1): 144-148.
Liu Q, Du Z Y, Shi Y X, et al. Evaluation on environmental quality of heavy metals in Shouguang City, Shandong Province [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2009, 31(1): 144-148.
- [11] 黄勇, 杨忠芳, 张连志, 等. 基于重金属的区域健康风险评价——以成都经济区为例[J]. 现代地质, 2008, 22(6): 990-997.
Huang Y, Yang Z F, Zhang L Z, et al. Regional health risk assessment on heavy metals in Chengdu economic region [J]. *Geoscience*, 2008, 22(6): 990-997.
- [12] 徐友宁, 张江华, 柯海玲, 等. 某金矿区农田土壤重金属污染的人体健康风险[J]. 地质通报, 2014, 33(8): 1239-1252.
Xu Y N, Zhang J H, Ke H L, et al. Human health risk under the condition of farmland soil heavy metals pollution in a gold mining area [J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(8): 1239-1252.
- [13] 夏芳, 王秋爽, 蔡立梅, 等. 有色冶金区土壤—蔬菜系统重金属污染特征及健康风险分析[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(6): 865-873.
Xia F, Wang Q S, Cai L M, et al. Contamination and health risk for heavy metals via consumption of vegetables grown in non-freezing area [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(6): 865-873.
- [14] Chai J, Guo J, Chai S L, et al. Source identification of eight heavy metals in grassland soils by multivariate analysis from the Baicheng-Songyuan area, Jilin Province, Northeast China [J]. *Chemosphere*, 2015, 134: 67-75.
- [15] Cao L L, Tian H T, Yang J, et al. Multivariate analyses and evaluation of heavy metals by chemometric BCR sequential extraction method in surface sediments from Lingdingyang Bay, South China [J]. *Sustainability*, 2015, 7: 493-495.
- [16] 吕建树, 张祖陆, 刘洋, 等. 日照市土壤重金属来源解析和环境风险评价[J]. 地理学报, 2012, 67(7): 971-984.
Lyu J S, Zhang Z L, Liu Y, et al. Sources identification and hazardous risk delineation of heavy metals contamination in Rizhao City [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(7): 971-984.
- [17] 李湘凌, 周涛发, 殷汉琴, 等. 基于层次聚类法和主成分分析法的铜陵市大气降尘污染元素来源解析研究[J]. 地质评论, 2010, 56(2): 283-288.
Li X L, Zhou T F, Yin H Q, et al. Sources analysis of dustfall in Tongling City based on hierarchical cluster analysis and principal component analysis methods [J]. *Geological Review*, 2010, 56(2): 283-288.
- [18] 王志楼, 谢学辉, 王慧萍, 等. 典型铜尾矿库周边土壤重金属复合污染特征[J]. 生态环境学报, 2010, 19(1): 113-117.
Wang Z L, Xie X H, Wang H P, et al. Combined pollution character of heavy metals in soils around a typical copper tailing [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(1): 113-117.
- [19] 张慧, 付强, 赵映慧. 松嫩平原北部土壤重金属空间分异特征及生态安全评价[J]. 水土保持研究, 2013, 2: 165-169.
Zhang H, Fu Q, Zhao Y H. Spatial variability of soil heavy metal-sand ecological quality assessment in the northern Songnen plain [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 2: 165-169.
- [20] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. GB 15618—2018 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准[S]. 北京: 中国环境

- 出版社,2018.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 15618—2018 Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land[S]. Beijing: China Environment Publishing, 2018.
- [21] 庞绪贵,代杰瑞,陈磊,等. 山东省 17 市土壤地球化学背景值[J]. 山东国土资源,2019,35(1): 46-56.
- Pang X G, Dai J R, Chen L, et al. Soil geochemical background value of 17 cities in Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 2019, 35(1): 46-56.
- [22] Zhao Y C, Wang Z G, Sun W X, et al. Spatial interrelations and multi-scale sources of soil heavy metal variability in a typical urban-rural transition area in Yangtze River Delta region of China[J]. Geoderma, 2010, 156(3/4): 216-227.
- [23] David M G, Zhang C S, Owen T. Carton geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in Silvermines area, Ireland[J]. Environmental Pollution, 2004, 127(2): 239-248.
- [24] 高吉喜,段飞舟,香宝. 主成分分析在农田土壤环境评价中的应用[J]. 地理研究, 2006, 25(2): 836-842.
- Gao J X, Duan F Z, Xiang B. The application of principal component analysis to agriculture soil contamination assessment[J]. Geographical Research, 2006, 25(2): 836-842.
- [25] 陈晓晨,崔岩山. 城市表层土壤中重金属的小尺度空间分布——以首钢厂区附近小区为例[J]. 中科院研究生院学报, 2010, 27(2): 176-183.
- Chen X C, Cui Y S. Small-scalespatial distribution of heavy metal sinurbantop soil: A case study in a small area near Shougang group[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2010, 27(2): 176-183.
- [26] 姜佰文,陆磊,王春宏,等. 施用有机肥对土壤重金属累积的影响及风险评价[J]. 东北农业大学学报, 2020, 51(4): 37-44.
- Jiang B W, Lu L, Wang C H, et al. Effect of organic fertilizer application on heavy metals accumulation in soil and risk assessment[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2020, 51(4): 37-44.
- [27] 唐明海. 土壤重金属污染对农产品质量安全的影响及其防治分析[J]. 河南农业, 2019(3): 48-49.
- Tang M H. Effects of soil heavy metal pollution on the quality and safety of agricultural products and its control[J]. Henan Agriculture, 2019(3): 48-49.
- [28] 敖明,柴冠群,范成五,等. 稻田土壤和稻米中重金属潜在污染风险评估与来源解析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 198-205.
- Ao M, Chai G Q, Fan C W, et al. Evaluation of potential pollution risk and source analysis of heavy metals in paddy soil and rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(6): 198-205.
- [29] 陈雅丽,翁莉萍,马杰,等. 近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(10): 2219-2238.
- Chen Y L, Weng L P, Ma J, et al. Review on the last ten years of research on source identification of heavy metal pollution in soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(10): 2219-2238.

Geochemical characteristics and environmental assessment of heavy metal elements in agricultural soil of Anqiu area, Shandong Province

ZHAO Xiu-Fang¹, ZHANG Yong-Shuai¹, FENG Ai-Ping¹, WANG Yi-Xuan²,
XIA Li-Xian¹, WANG Hong-Lei¹, DU Wei¹

(1. The Seventh Geological and Mineral Exploration Institute, Linyi 276006, China; 2. College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: In order to understand the status of soil heavy metal pollution in Anqiu Area, Shandong Province, 10 194 soil samples are systematically collected, the contents of 8 heavy metal elements including Cd, Hg, Pb and As are tested and analyzed. The geochemical distribution characteristics of heavy metal elements and their possible sources are discussed by using geostatistical and multivariate statistical methods. The results show that the average contents of Cd, Hg and As in the soil of the study area are similar to the background values of Weifang soil, and the average contents of other elements are slightly higher than the soil background values of Weifang. The average contents of the 8 heavy metal elements are all lower than risk screening values of standard. According to cluster analysis, eight heavy metal elements are mainly divided into four categories. The first category is Cr, Ni, Cu and Zn, whose distributions are mainly affected by natural factors such as the parent material of the soil, while Zn is also affected by human activities. The second category is Cd, Pb and the third category is Hg. The distribution characteristics of these elements are greatly affected by human activities such as metal smelting and processing, transportation, mining, etc. The fourth category is As, which is not only inherited from the parent material of the soil, but also affected by human activities. The soil environmental quality in the study area is evaluated by Soil Environmental Quality Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land (GB 15618—2018), the results show that the soil environment in the study area is mainly safe zone, risk-free and. Point source pollution only exists in some places.

Key words: soil heavy metal elements; geochemical characteristics; environmental assessment; Anqiu city

(本文编辑:蒋实)