

焉耆盆地表层土壤重金属的分布、来源及区域差异^{*}

海米提·依米提^{1**} 祖皮艳木·买买提² 夏库热·塔依尔²

(¹新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室, 新疆师范大学, 乌鲁木齐 830054; ²新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046)

摘要 采集焉耆盆地土壤样品,测定重金属的含量,然后运用经典统计学和地统计学方法分析结合行政区划、土地利用类型以及土壤环境质量标准(GB 15618—1995)研究焉耆盆地表层土壤中重金属的分布特征、来源及区域差异。结果表明:焉耆盆地表层土壤中6种重金属的平均含量顺序为:Mn>Zn>Ni>Pb>As>Hg;其中Zn、Pb、Ni、As的最大值超过新疆土壤背景值,但未超过国家土壤环境质量二级标准。地统计分析表明,As、Pb、Hg和Zn在盆地西北部焉耆县以及和静县出现较高值;Mn和Ni在盆地西南部及东北部博湖县和和硕县出现较高值。在焉耆盆地4种土地利用类型土壤中,As、Hg、Pb、Zn的平均含量顺序为耕地>草地>荒漠>湿地;Mn、Ni的平均含量顺序为荒漠>草地>湿地>耕地。结合考虑焉耆盆地不同土壤采样点的背景值,As、Pb、Hg和Zn主要来源于人为污染,Mn和Ni主要来源于自然环境。研究表明,近年来的经济发展已经对盆地西部焉耆县耕地等土地利用类型表层土壤中重金属含量产生负面影响,应引起重视,加强对不合理经济活动的控制,保护绿洲环境。

关键词 土壤;重金属;地统计学;区域差异;焉耆盆地

中图分类号 S127 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2014)10-2789-07

Spatial distribution, source and regional difference of soil heavy metals in Yanqi basin, China. YIMIT Hamit^{1**}, MAMT Zulpiya², TAYIR Xiakure² (¹ *Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China*; ² *College of Resource and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(10): 2789–2795.

Abstract: In order to understand the status of heavy metal contents in Yanqi basin, a typical oasis basin in arid region, we collected soil samples and measured the contents of Pb, Mn, As, Zn, Ni and Hg. The multi-variate statistical analysis and geostatistical analysis methods in combination with administrative division, land use types and the National Standard of Soil Quality (GB 15618–1995) were applied to study the spatial distribution characteristics, source, and regional differences of heavy metals in the soils of Yanqi basin. The results showed that the average contents of the six heavy metals in Yanqi basin was in order of Zn > Pb > Mn > As > Ni > Hg. The maximum contents of Zn, Pb, Ni and As exceeded the soil background values of Xinjiang, but were still within the second grade of the national standard. Geostatistical analysis showed that the contents of As, Pb, Hg and Zn were higher in the northwestern Yanqi county and Hejing county, while Mn and Ni had higher contents in southeastern and southwestern Heshuo county and Bohu county. The contents of As, Hg, Pb and Zn in different land use types were in order of cropland > grassland > bare land > wetland, while the contents of Mn and Ni were in order of bare land > grassland > wetland > cropland. According to the background of the sampling sites, As, Pb, Hg and Zn mainly originated from anthropogenic pollution, while Mn and Ni mainly originated from

^{*} 国家自然科学基金重点项目新疆联合基金项目(U1138302)和国家自然科学基金项目(41061025)资助。

^{**} 通讯作者 E-mail: hyimit@yahoo.com

收稿日期: 2014-02-02 接受日期: 2014-06-14

natural environment. Our results suggested that recent economic development had negative influences on heavy metal contents in the cropland and some other land use types of the west of the basin. Therefore, we should pay more attention on such influence and take measures to prevent the pollution of heavy metals in soils of Yanqi basin.

Key words: soil; heavy metal; geostatistical analysis; regional difference; Yanqi basin.

土壤重金属污染已成为影响区域生态系统健康的重要因素 (Ahmed *et al.*, 2004; Al-Abed *et al.*, 2007; 王辉等, 2013; 张雷等, 2013)。近年来人为源成为土壤中重金属的重要来源 (Chen *et al.*, 2007; 孙贤斌和李玉成, 2013)。土壤遭受重金属污染会直接影响植物的生长, 农田土壤遭受重金属污染会直接造成农产品质量的降低, 危害人类健康 (Has-Schön *et al.*, 2006; 李如忠等, 2013; 张鹏岩等, 2013)。由于土壤中重金属难以很快迁移和扩散, 一旦遭受污染很难恢复, 并形成持续的污染源。因此, 对土壤中重金属的分布状况、来源以及环境风险进行评估可以为区域土地资源利用以及恢复受污染的土壤环境提供支持。

国内外关于土壤中重金属的存在特征、来源以及污染评价已开展了大量的研究, 但大多集中在经济发展较快, 人类活动强度较大区域 (Wang & Muligan, 2006; Wu *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013a)。在国内, 研究主要集中在东、中部沿海等经济发展水平较高的地区。研究的目的主要评估人类活动对土壤中重金属含量的影响以及土壤中重金属的生态环境风险。在研究方法上大多通过采用污染指数法及生态风险法计算土壤中重金属的污染状况。在生态环境极为脆弱的西北干旱区绿洲, 随着西部大开发进程不断深入, 经济活动不断增多, 人类活动对土壤的扰动正不断增加。目前, 对西北干旱区绿洲表层土壤中重金属的分布状况、污染来源以及与经济发展关系的研究相对缺乏 (刘哲民, 2005; 易秀, 2007; Zhang *et al.*, 2013b)。

基于此, 本文以干旱区典型绿洲盆地——焉耆盆地作为研究区, 以表层土壤中重金属的空间分布状况、来源以及区域差异为研究对象, 综合运用经典统计学方法和地统计学方法, 并结合土壤样点采集背景、盆地内不同行政区经济发展水平、土地利用类型以及土壤环境质量二级标准来研究西部大开发进程不断深入, 人类活动强度不断增大的情况下, 干旱区典型绿洲盆地表层土壤中重金属的赋存状况、来源以及空间分布格局及区域差异, 从而为绿洲土壤资

源的保护和利用提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区焉耆盆地位于新疆巴音郭勒蒙古自治州境内 ($85^{\circ}50'E-87^{\circ}50'E, 41^{\circ}40'N-42^{\circ}20'N$), 总面积 7231 km^2 , 海拔 $1050\sim 2000\text{ m}$, 地势西高东低、北高南低, 属于南北疆过渡的大陆荒漠性气候, 干旱少雨, 年降水量仅为 $50\sim 80\text{ mm}$, 年蒸发量为 $2000\sim 2450\text{ mm}$, 盆地热量与光照资源丰富, 多年平均气温 $8.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 是一个典型的绿洲-荒漠交错地区。作为天山南坡绿洲经济发展的核心示范区, 近年来在国家 and 区域经济发展政策调整以及东部地区产业转移等多种因素的驱动下, 焉耆盆地的经济发展水平不断提高。同时, 人类活动的日益增多也对盆地内土壤质量的影响更加明显 (海米提·依米提等, 2011; 祖皮艳木等, 2014)。

1.2 样本采集

样品采集时间在 2012 年 7 月, 采集区域包括焉耆盆地的焉耆、和硕、和静以及博湖等 4 个行政县 (图 1), 涵盖林地、草地、耕地、建设用地 (城镇居民点附近)、荒漠、湿地等焉耆盆地的 6 大土壤类型。土壤样品的采集深度为 $0\sim 20\text{ cm}$, 采用四分法在每个样点采集土壤样品 400 g , 采集样点数目为 160 个。在采样过程中记录取样位置、取样日期、样品编号、土壤剖面质地以及样点周围的植被状况等信息以备分析。样品采集后封存、放入样品箱, 送回实验室处理。

1.3 样品测试

采集的土壤样品带回, 自然风干、剔除植物残体和石块、磨碎过 100 目筛, 保存于塑料瓶中备用。样品处理过程如下: 首先称取 0.5 g 试样于 Anton PVC 消解罐, 加入 2 mL HCl 和 10 mL HNO_3 , 封严并置于消解仪中, 升温至 $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后维持 30 min , 然后冷却取出并收集试样、过滤定容到 50 mL 待测, 为了避免污染, 所有玻璃器皿、消解罐使用之前均用 $5\%\text{ HNO}_3$ 浸泡 24 h 、冲洗干净后烘干。样品处理后采用

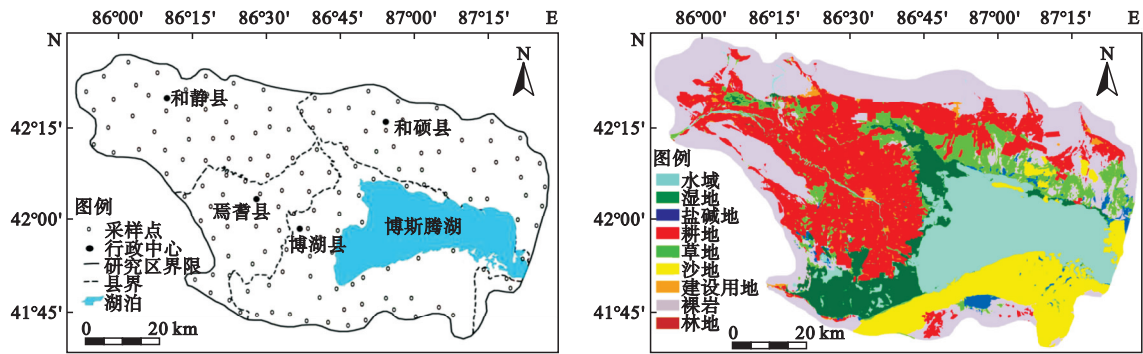


图1 研究区样点分布及土地利用类型示意图
Fig.1 Maps of soil sampling sites and land use cover of Yanqi basin oasis in 2011

电感耦合等离子体原子光谱发射仪 ICAP 6500, 测试 6 种重金属元素 Pb、Ni、Hg、As、Mn、Zn 的含量。重金属元素的检出限采用测定的空白溶液的标准偏差的 3 倍时所对应的分析物浓度。所有土壤样品测试后再抽取总样品数的 20% 进行重金属含量的重复性检验, 检验结果表明本次测试所有土壤样品中重金属元素含量的测试合格率为 100%。

1.4 研究方法

1.4.1 经典统计学方法 运用经典统计学方法分析焉耆盆地土壤中 6 种重金属的含量范围、平均值、变异系数、标准方差并结合新疆土壤背景值(孙继坤等,1987;中国环境监测总站,1990)以及土壤环境二级标准(GB 15618—1995)(国家环保局,1995), 综合分析焉耆盆地土壤中 6 种重金属的统计特征。

1.4.2 地统计学方法 半方差函数是用来描述区域化变量结构性和随机性这一空间特征而提出的空间分析方法,能够有效地揭示属性变量在空间上的分布、变异和相关特征,可以有效地解释空间格局对生态过程与功能的影响,其计算公式为:

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

式中: $r(h)$ 为半方差函数; h 为分隔两样点的距离,称为步长。 $N(h)$ 为相距为 h 的样点对数目; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别为区域化变量 $Z(x)$ 在位置 x_i 和 $x_i + h$ 处的实测值。以 h 为横坐标, $r(h)$ 为纵坐标,即可得到半方差函数图 2。

图 2 中包含 3 个重要参数分别为块金值(nugget),变程(range),基台值(sill)。其中变程表示半方差达到基台值时的样本间距。块金值也叫块金方差,反映的是最小抽样尺度以下变量的变异性及测量误差。块金值 C_0 是间距 h 为 0 时的半方差,称为

块金系数或块金效应,它反映了在最小间距内的变异性 和测量分析过程中引起的误差。基台值通常用来表示系统内总的变异。空间相关性为块金值(C_0)与基台值之比,当其比值小于 25% 时,说明变量之间具有强烈的空间相关性;当其比值在 25% ~ 75% 时,变量具有中等程度的空间相关性;当其比值大于 75% 时,则说明变量间的空间相关性很弱。

在研究中利用 ArcGIS 地理信息系统软件的 Geostatistical Analyst 模块,根据地统计学的半方差函数模型,通过选用最优参数,对焉耆盆地土壤中 6 种重金属的空间变异性进行模型拟合。在此过程中最佳拟合模型是标准平均值最接近零、均方根预测误差最小、平均标准误差最接近于均方根预测误差、标准均方根预测误差最接近于 1。最后用交叉验证法来修正模型的参数。模型的选择利用 ArcGIS 中的交叉验证,选用最优参数,确定最佳模型。选择克里格最优内插法,利用区域化变量的原始数据和半方差函数的结构性,对未采样点的区域化变量的取值进行线性无偏最优估计,最终生成焉耆盆地 6 种土壤重金属的空间分布图。

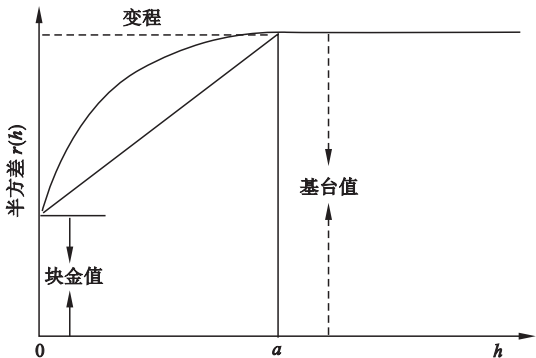


图2 半方差函数理论模型
Fig.2 Theoretical model of semivariogram

表 1 焉耆盆地各县 0~20 cm 土壤重金属含量的统计特征
Table 1 Statistical characteristic of heavy metals contents of 0–20 cm soil in Yanqi basin

重金属	最大值 (mg·kg ⁻¹)	最小值 (mg·kg ⁻¹)	标准方差 (%)	均值 (mg·kg ⁻¹)	变异系数 (%)	超标率 (%)	背景值 (mg·kg ⁻¹)	国家标准 (mg·kg ⁻¹)
Zn	250.71	108.68	27.71	148.38	13.25	11.8	110.6	500
Pb	15.38	11.61	19.51	12.71	7.19	17.5	13.5	350
Hg	0.017	0.011	22.64	0.015	12.67	0	0.017	1.0
Mn	919.7	718.9	15.53	817	14.51	0	922.4	–
Ni	61.73	50.71	10.89	56.84	23.56	15.4	51.3	60
As	16.58	8.1	17.54	11.97	28.12	13.2	11.2	25

2 结果与分析

2.1 焉耆盆地土壤重金属的统计特征

统计分析表明(表 1),焉耆盆地表层土壤中 6 种重金属的平均含量顺序为:Mn>Zn> Ni>Pb>As> Hg。土壤中重金属 Zn、Pb、Hg、As 的最大值分别为 250.71、15.38、0.017、16.58 mg·kg⁻¹;变异系数分别为 13.25%、7.19%、12.67%、28.12%;平均值分别为 148.38、12.71、0.015、11.97 mg·kg⁻¹;土壤中重金属 Ni、Mn 的最大值分别为 61.73、919.7 mg·kg⁻¹;变异系数分别为 23.56%、14.51%;平均值为 56.84、817 mg·kg⁻¹。研究表明,焉耆盆地土壤中重金属 Zn、Pb、Ni、As 的最大值均超过新疆土壤背景值(孙继坤等,1987;中国环境监测总站,1990),而未超过《土壤环境质量标准》中的二级标准(GB 15618—1995),超标率分别为 11.8%、17.5%、15.4%和 13.2%。

2.2 焉耆盆地土壤重金属主成分分析

主成分分析结果表明,焉耆盆地表层土壤中 6 种重金属可以归为 2 个主成分,分别解释总因子的 75.46%和 21.51%,累计贡献率达到 96.97%,其解释了影响土壤中 6 种重金属的 2 个可能来源。同时 2 组因子的变异系数分别达 71.36%和 41.18%,表明其差异性较大,来源复杂。第 1 主成分上 As、Hg、Zn、Pb 都具有较大的正载荷,相关样点大多取自城镇附近居民点、工业园区及交通干道和农田及城镇。在第 2 主成分上 Mn、Ni 具有较高的载荷,2 种重金属含量较高的样点大多取自荒漠、草地以及山间林地等人类活动较少,自然环境状况较好的区域。

2.3 焉耆盆地土壤重金属空间分布特征

空间变异参数计算结果表明,焉耆盆地土壤中 6 种重金属的决定系数均大于 0.55,而其 RSS 值均较小,表明对 6 种重金属所选的理论模型符合地统

计学要求(表 2)。半方差函数理论拟合结果表明,焉耆盆地土壤中 Mn、Ni 和 Hg 符合指数模型;Pb 和 As 符合球状模型;Zn 符合高斯模型。各重金属变量的有效变程均在 14760~61875 m。

分析表明,Ni 和 Mn 的块金值/基台值 $C_0/(C_0+C)$ 均小于 0.25,表明这些元素及其元素组合的空间变异均以土壤成土母质、地形等结构性变异为主;As、Pb、Zn 和 Hg 的块金值/基台值均大于 0.75,表明不存在明显的空间结构特征,主要受随机性变量影响。

地统计分析表明,焉耆盆地表层土壤中 As、Pb、Hg 和 Zn 在盆地西部的焉耆县以及和静县出现较高值(图 1、图 3);在盆地的四周及西北部的博湖县以及和静县出现较低值;Mn 和 Ni 在盆地的西南部的博湖县以及东南部的和硕县出现较高值,在盆地中部以及西北部的焉耆和盆地东北部的和硕县出现较低值。

结合焉耆盆地土壤采样点的土地利用背景(图 1、图 3),表明在盆地内不同土地利用/覆被类型中表层土壤中重金属元素的含量分布明显不同。从总体上看,焉耆盆地土壤中 As 的平均含量分布顺序

表 2 焉耆盆地表层土壤重金元素主成分因子载荷矩阵
Table 2 Factor matrix of ten elements from surface soil in Yanqi basin

元素	主成分 1	主成分 2
As	0.889	0.561
Hg	0.857	0.422
Mn	0.281	0.711
Ni	0.247	0.806
Pb	0.776	0.256
Zn	0.897	0.321
变异系数(%)	71.36	41.18
方差贡献率(%)	75.46	21.51
累积贡献率(%)	75.46	96.97

表 3 土壤重金属元素的空间变异参数

Table 3 Spatial variation parameters of the heavy metals of soil in Yanqi basin

重金属	理论模型	块金值 (C_0)	基台值 (C_0+C)	块金值/基台值 $C_0/(C_0+C)$	变程 (m)	决定系数 R^2	残差 RSS
Pb	球状模型	0.058	0.238	0.786	19421	0.911	9.31E-04
Mn	指数模型	0.061	0.267	0.229	16460	0.529	2.82E-03
Ni	指数模型	0.084	0.345	0.243	18160	0.967	8.14E-04
As	球状模型	0.246	0.325	0.757	17980	0.865	8.09E-04
Zn	高斯模型	0.218	0.285	0.765	61875	0.922	3.48E-04
Hg	指数模型	0.086	0.106	0.814	14760	0.770	8.56E-04

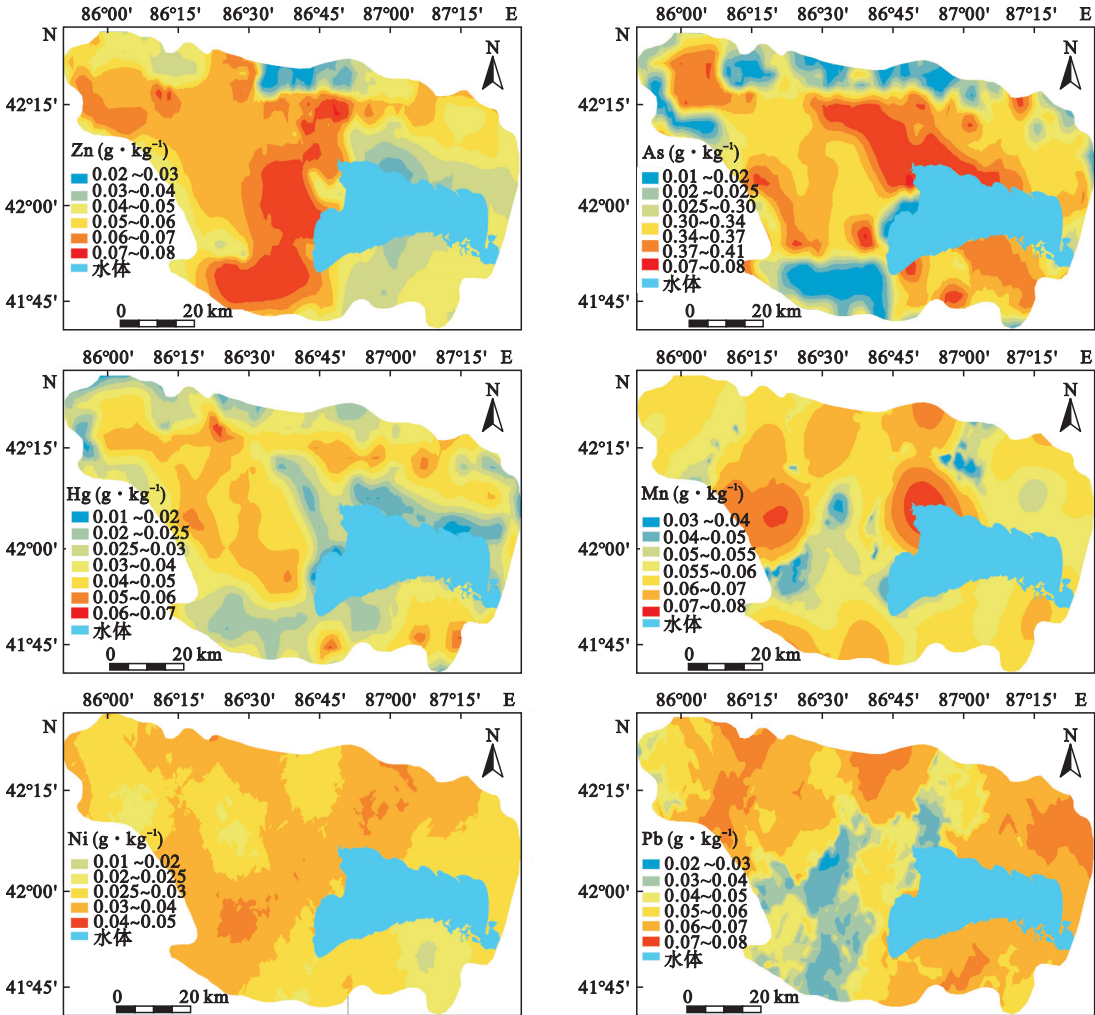


图 3 焉耆盆地土壤重金属空间分布示意图

Fig.3 Spatial distribution maps of the heavy metals of soil in Yanqi basin

为耕地>草地>荒漠>湿地;Mn 的平均含量顺序为荒漠>草地>湿地>耕地;Ni 的平均含量分布顺序为荒漠>草地>湿地>耕地;Pb 的平均含量分布顺序为耕地>草地>荒漠>湿地;Hg 的平均含量分布顺序为耕地>草地>荒漠>湿地;Zn 的平均含量分布顺序为耕地>草地>荒漠>湿地。

焉耆盆地表层土壤中 6 种重金属的地统计分析结果表明,As、Pb、Zn 和 Hg 在盆地内的耕地、城镇附近的居民点以及交通干道附近的表层土壤中具有较高值,其主要来源于人为源;Mn 和 Ni 在草地、荒漠以及湿地表层土壤中出现较高值,这些区域人为活动少,自然环境保持良好,主要来源于自然源。

3 讨论

统计分析表明,焉耆盆地表层土壤中6种重金属的平均含量均未超过《土壤环境质量标准》中的二级标准,表明总体上焉耆盆地表层土壤中重金属含量较低,土壤环境质量状况良好。本研究在城镇居民点、交通干道以及耕地等人类活动密集对土壤扰动较大的区域焉耆盆地表层土壤中As、Pb、Zn、Hg出现较高值,主成分分析将其归为一类,结合相关文献分析工业废弃物的排放、农业生产过程中农药、化肥的不合理使用以及道路运输中大量含Pb、Hg等重金属污染物的排放均可以造成土壤中Pb、Zn、Hg的含量增高(蒲瑞丰等,2007;钟晓兰等,2007;杨建等,2008;姜菲菲等,2011;陈洪等,2013;雷凌明等,2014)。在本研究中,焉耆盆地土壤中As、Pb、Zn、Hg应主要来源于人为源。在焉耆盆地表层土壤中Mn和Ni在盆地东南部以及西南部荒漠区域出现较高值,主成分分析将其归为一类,文献分析表明山间岩石的风化以及干涸河床流水冲刷均会造成自然土壤中Mn、Ni的含量富集(Facchinelli *et al.*, 2001;杨建等,2008;马建华等,2011;樊新刚等,2013;穆叶赛尔等,2013),结合样点采集背景,土壤中相关重金属元素含量较高的样点大多取自荒漠和湿地以及山间林地等人类活动影响较少,自然风化作用较强烈的地区,2种重金属元素应主要来源于自然地质背景,主要受自然活动的影响。

结合经济发展背景,近年来在国家开发政策和区域产业政策调整的背景下,焉耆盆地内工、农业产值不断增加,盆地经济取得了快速的发展,人类活动对自然环境的影响程度不断增大(Mamat *et al.*, 2013, 2014;祖皮艳木等,2014)。在焉耆盆地4个县中焉耆县和和静县的经济水平最高,在其行政区域内,工、农业生产、城市生活及道路交通等活动对土壤环境产生的影响最显著程度大大高于和硕县和博湖县(Mamat *et al.*, 2013, 2014)。地统计分析表明,焉耆盆地土壤中As、Pb、Zn、Hg在盆地的西部以及西北部的和静县和焉耆县出现较高值,这应主要来源于2个县经济发展过程中不合理的人类活动对土壤环境的扰动,导致土壤中重金属含量过高。和硕县博湖县无论人口数量、经济发展水平及规模均显著低于焉耆县和和静县,在经济发展过程中人为因素对自然环境的扰动相对较少,土壤环境相对保持良好(祖皮艳木等,2014)。

近年来,焉耆盆地不合理的经济活动已经对绿洲盆地内表层土壤中重金属的含量产生了负面影响,加强该区域人类活动的自觉性,发展低耗能、低污染工业,拒绝东部硅化工以及煤化工产业的迁移,大力发展绿色、生态农业,减少工农业生产过程及道路交通中污染物质排放。

4 结论

研究区表层土壤中6种重金属的平均含量顺序为:Mn>Zn>Ni>Pb>As>Hg。土壤环境二级质量标准(GB 15618—1995)评价表明焉耆盆地表层土壤中6种重金属元素的含量均较低,土壤环境质量状况良好。

土壤中6种重金属元素可归为2个主成分因子,可以解释所有元素96.97%的信息,表明分析结果有效。在第1主成分(As、Hg、Zn、Pb)主要受人为污染源的影响;第2主成分(Mn、Ni)主要受自然地质背景的影响。

焉耆盆地表层土壤中As、Pb、Hg和Zn在盆地西北部的焉耆县和和静县一些地区出现较高值,其主要来源于人类不合理的经济活动;Mn和Ni在盆地西南部的博湖县和东南部的和硕县出现较高值,其主要来源于自然地质背景。

近年来,焉耆盆地内经济发展已经对土壤中重金属含量产生了负面影响,应对绿洲盆地内经济活动进行合理规划,采取有效措施控制污染源,以维护良好的绿洲环境。

参考文献

- 陈洪,特拉津·那斯尔,杨剑虹,等. 2013. 伊犁河流域土壤重金属含量空间分布及其环境现状研究. 水土保持学报, **27**(3): 100–105.
- 樊新刚,米文宝,马振宁,等. 2013. 宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征. 环境科学, **34**(5): 1887–1894.
- 海米提·依米提,米日姑·买买提,古丽娜尔·托合提,等. 2011. 伊犁河谷盐渍化区土壤盐分离子的空间变异特征. 干旱地区农业研究, **29**(1): 64–69.
- 姜菲菲,孙丹峰,李红,等. 2011. 北京市农业土壤重金属污染环境风险等级评价. 农业工程学报, **27**(8): 330–337.
- 雷凌明,喻大松,陈玉鹏,等. 2014. 陕西泾惠渠灌区土壤重金属空间分布特征及来源. 农业工程学报, **30**(6): 88–96.
- 李如忠,徐晶晶,姜艳敏,等. 2013. 铜陵市惠溪河滨岸带土壤重金属形态分布及风险评估. 环境科学研究, **26**

- (1): 88-96.
- 刘哲民. 2005. 宝鸡土壤重金属污染及其防治. 干旱区资源与环境, **19**(2): 101-104.
- 马建华, 李 灿, 陈云增. 2011. 土地利用与经济增长对城市土壤重金属污染的影响——以开封市为例. 土壤学报, **48**(4): 743-750.
- 穆叶赛尔·吐地, 吉力力·阿布都外力, 姜逢清, 等. 2013. 天山北坡土壤重金属含量的分布特征及其来源解释. 中国生态农业学报, **21**(7): 883-890.
- 蒲瑞丰, 康尔泗, 艾贤嵩, 等. 2007. 黑河流域农业土壤重金属人为污染的富集因子分析. 干旱区资源与环境, **21**(5): 108-111.
- 孙继坤, 胡志林, 周鸿兴, 等. 1987. 天山山地土壤中微量元素含量与分布. 土壤学报, **24**(4): 335-341.
- 孙贤斌, 李玉成. 2013. 淮南大通煤矿废弃地土壤重金属空间分布及变异特征. 地理科学, **33**(10): 1238-1244.
- 王 辉, 于燕妮, 丁忠义, 等. 2013. 奎河污灌区土壤重金属 As 变化系统动力学分析. 农业工程学报, **29**(2): 125-130.
- 杨 建, 陈家军, 王心义, 等. 2008. 演马矿煤矸石堆周围环境中重金属分布特征. 环境科学研究, **21**(1): 90-96.
- 易 秀. 2007. 西安市污灌区土壤中重金属潜在生态危害评价. 干旱区资源与环境, **21**(3): 118-120.
- 张 雷, 秦延文, 郑丙辉, 等. 2013. 丹江口水库迁建区土壤重金属分布及污染评价. 环境科学, **34**(1): 108-115.
- 张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 等. 2013. 黄河下游滩区开封段土壤重金属空间分异规律. 地理研究, **32**(3): 421-430.
- 中国环境监测总站. 1990. 中国土壤元素背景值. 北京: 中国环境科学出版社.
- 钟晓兰, 周生路, 赵其国, 等. 2007. 长江三角洲地区土壤重金属污染特征及潜在生态风险评价——以江苏太仓市为例. 地理科学, **27**(3): 395-400.
- 祖皮艳木·买买提, 海米提·依米提, 安尼瓦尔·艾则孜, 等. 2014. 焉耆盆地生态系统服务价值对土地利用/覆被变化的响应. 中国沙漠, **34**(1): 275-283.
- Ahmed KM, Bhattacharya P, Hasan MA, *et al.* 2004. Arsenic enrichment in groundwater of the alluvial aquifers in Bangladesh: An overview. *Applied Geochemistry*, **19**: 181-200.
- Al-Abed SR, Jegadeesan G, Purandare J, *et al.* 2007. Arsenic release from iron rich mineral processing waste; Influence of pH and redox potential. *Chemosphere*, **66**: 775-782.
- Chen CW, Kao CM, Chen CF, *et al.* 2007. Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan. *Chemosphere*, **66**: 1431-1440.
- Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. 2001. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils. *Environmental Pollution*, **114**: 313-324.
- Has-Schön E, Bogut I, Strelec I. 2006. Heavy metal profile in five fish species included in human diet, domiciled in the end flow of River Neretva (Croatia). *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, **50**: 545-551.
- Mamat Z, Yimit H, Eziz A. 2014. Oasis land-use change and its effects on the eco-environment in Yanqi Basin, Xinjiang, China. *Environment Monitoring and Assessment*, **186**: 335-348.
- Mamat Z, Yimit H, Eziz M, *et al.* 2013. Analysis of the ecology-economy coordination degree in Yanqi Basin, Xinjiang, China. *Asian Journal of Chemistry*, **25**: 9034-9040.
- Wang S, Mulligan CN. 2006. Occurrence of arsenic contamination in Canada: Sources, behavior and distribution. *Science of the Total Environment*, **366**: 701-721.
- Wu JL, Ma L, Zeng HA. 2013. Water quality and quantity characteristics and its evolution in Lake Bosten, Xinjiang over the past 50 years. *Scientia Geographica Sinica*, **33**: 231-237.
- Zhang Z, Abuduwaili J, Jiang F. 2013a. Heavy metals in surface water in eastern, central and western Tianshan Mountains, Central Asia. *Asian Journal of Chemistry*, **25**: 7883-7887.
- Zhang Z, Abuduwaili J, Jiang F. 2013b. Determination of occurrence characteristics of heavy metals in soil and water environments in Tianshan Mountains, Central Asia. *Analytical Letters*, **46**: 2122-2131.

作者简介 海米提·依米提,男,1960年生,博士,教授。主要从事资源与环境开发与管理方面的研究。E-mail: hyimit@yahoo.com

责任编辑 魏中青
