

乌兹别克斯坦表层土壤元素含量与空间结构特征初步分析

刘文^{1,2}, 吴敬禄^{1*}, 马龙³

(1.中国科学院南京地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.中国科学院新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

摘要:基于经典统计学和地统计学方法对乌兹别克斯坦表层土壤元素的组成和空间特征进行了研究。首先对土壤元素含量平均值、变异系数等特征进行了计算, 比较了土壤元素含量特征。乌兹别克斯坦表层土壤 Ca、Na、Mg 等化学活动性元素的含量以及 Co、Be、K、Zn 等元素的含量偏高, 而 Al、Fe 等其余元素含量相较于世界土壤中值偏低, 变异系数也较小。元素含量的聚类分析表明, Ca、Sr、Mg、Na 等化学活动性元素和 Al、Fe 等其他元素的特征差异较大。在此基础上, 运用 Gs+ 软件对乌兹别克斯坦土壤表层元素含量的空间异质性进行了分析。结果表明: 土壤中 Al、Fe、Be、K、Ti 等元素具有强烈的空间自相关性; Cu、Pb、Zn、P 等元素的空间结构显然已受到一些施肥、污灌、工农业生产等小尺度因素的影响, 但整体上还没有达到破坏其原有空间格局的程度。化学活动性元素 Ca 和 Sr 除受土壤母质的影响外, 还受到一定程度的局部随机因素的影响, 在抽样尺度下没有空间相关性。另外, 采用瑞典科学家 Hakanson 潜在生态危害系数法对土壤中重金属元素的潜在生态危害性进行了初步评价, 乌兹别克斯坦土壤表层元素重金属 Cu、Cr、Zn、Pb 的潜在生态危害程度均为轻微, 其中 Zn 和 Cu 危害程度最高, 这与当地的社会经济发展状况一致。

关键词: 乌兹别克斯坦; 表层土壤; 元素; 空间异质性

中图分类号: X833 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)02-0282-08 doi:10.11654/jaes.2013.02.011

An Initial Analysis of Topsoil Element Contents and Its Spatial Distribution in Uzbekistan

LIU Wen^{1,2}, WU Jing-lu^{1*}, MA Long³

(1.State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2.Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: The element contents and its spatial characteristics in Uzbekistan topsoils were studied with the methods of classic statistics and geostatistics. Firstly, using the software SPSS 15.0 for windows, the average values and coefficient variations of topsoil elements were calculated. The element contents (Ca, Na, Mg, Co, Be, K and Zn) of Uzbekistan are higher than their median values of world soil, and the other, the stable elements such as Al and Fe are lower. The geochemical active elements (Ca, Sr, Mg and Na) have significant differences with the stable elements such as Al, Fe and so on. Then, the element contents and its spatial distribution in Uzbekistan were analyzed with the software of Gs+. The results showed that the stable elements (Al, Fe, Be, K and Ti) in the topsoil have a strong spatial autocorrelation; the heavy metals (Cu, Pb and Zn) and nutrient element P are influenced by the small-scale factors including fertilization, irrigation, industrial and agricultural production, which have not yet reached the extent of the destruction of their original spatial patterns. The geochemical active elements (Ca and Sr) are affected not only by the soil parent material but also by a certain degree of local random factors, which lead to no spatial autocorrelation. In order to assess the current status of heavy metals in Uzbekistan topsoils, Hakanson potential ecological risk index was used to conduct a preliminary assessment of potential ecological dangers of heavy metals in Uzbekistan topsoil. The potential ecological risk index of Cu, Cr, Zn and Pb are small and the degree of ecological hazard is light, which is consistent with the Uzbekistan's social and economic development.

Keywords: Uzbekistan; topsoil; elements; spatial heterogeneity

收稿日期: 2012-07-18

基金项目: 国家国际科技合作计划(2010DFA92720); 中科院重要方向性项目(KZCX2-EW-308); 西部之光项目(XBBS201106)

作者简介: 刘文(1981—), 女, 博士研究生, 研究方向为湖泊资源与环境。E-mail: wenliu@live.cn

* 通信作者: 吴敬禄 E-mail: w.jinglu@niglas.ac.cn

土壤中元素的自然含量主要取决于成土母质,但受到土壤的侵蚀、工业废水以及生活污水的排放等影响,元素含量发生一定程度的变化^[1]。元素含量的空间结构特征是由各种地球化学过程及人类活动综合作用产生的,通过对空间分布特征的研究,有助于对产生该结果的各种原因进行进一步探讨,从而提高对各种自然和人类活动作用过程的认识^[2]。研究表明,地统计学是研究土壤特性空间变异特征的较好方法^[2-3]。土壤中的重金属元素在土壤中的含量超过背景值而造成了重金属污染,重金属污染已经成为评价人类活动影响的重要指标^[4]。从土壤中重金属可能存在的生态危害效应这个角度出发,利用重金属含量分析数据,结合各重金属污染物生物毒性大小的不同、污染物的沉积特征以及区域敏感性等因素来综合评价土壤中重金属污染物的潜在生态危害效应,并定量给出生态危害的程度,具有重要的现实意义^[5]。

尽管国内外学者对土壤元素的空间结构性特征以及重金属的危害进行了广泛的研究^[6-9],但对中亚地区的研究几乎处于空白。苏联解体以来,中亚干旱区的水土资源开发情况发生了很大的变化,乌兹别克斯坦作为最大的农业用水国,其化肥施用和土壤盐渍化强度在中亚五国之中较为突出。本文通过对乌兹别克斯坦不同地貌单元尤其是阿姆河流域和咸海流域的野外科学调查、采集不同类型表层土壤样品并进行元素地球化学方法分析,结合经典统计学和地统计学方法,对乌兹别克斯坦土壤元素含量的变化特征及空间分布规律进行了初步探讨,为中亚地区土壤环境质量评价提供基础背景信息,以期对我国干旱半干旱区不同土壤类型元素特征及其变化动态评价提供参照。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

乌兹别克斯坦位于中亚腹地,西南部与土库曼斯坦接壤,南部与阿富汗相邻,东部与塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦相接,北部和西部与哈萨克斯坦毗邻(图1)。据乌兹别克国家统计局公布的资料,截至2010年1月1日,乌兹别克共有人口 2800×10^4 人。国土东西长1425 km,南北宽930 km,总面积约为 $44.89 \times 10^4 \text{ km}^2$,占世界陆地总面积的0.3%,在世界各国中排行第55位。其中,土地面积为 $42.54 \times 10^4 \text{ km}^2$,占95%,水面 $2.2 \times 10^4 \text{ km}^2$,占5%。沙漠和山地占全国面积的60%以上^[10]。全境地势东高西低,平原低地占全部面积的80%,大部分位于西北部的克孜勒库姆沙

漠。东部和南部属天山山系和吉萨尔-阿赖山系的西缘,内有著名的费尔干纳盆地和泽拉夫尚盆地。乌兹别克斯坦属严重干旱的大陆性气候。夏季漫长、炎热,7月平均气温为 $26 \sim 32 \text{ }^\circ\text{C}$,南部白天气温经常高达 $40 \text{ }^\circ\text{C}$;冬季短促、寒冷,1月平均气温为 $-6 \sim -3 \text{ }^\circ\text{C}$,北部绝对最低气温为 $-38 \text{ }^\circ\text{C}$ 。年均降水量平原低地为 $80 \sim 200 \text{ mm}$,山区为 1000 mm ,大部分集中在冬春两季。主要河流有阿姆河、锡尔河和泽拉夫尚河。湖泊分高山湖泊和平原湖泊。高山湖泊数量较多,大多位于海拔 $2000 \sim 3000 \text{ m}$ 的山地,但面积一般都不超过 10 km^2 。平原湖泊数量较少,大多位于阿姆河和锡尔河的三角洲地带。咸海是中亚地区最大湖泊,南部属于乌兹别克斯坦,北部属于哈萨克斯坦。除咸海外,乌兹别克斯坦还有艾达尔湖(面积 1248 km^2)、坚吉兹湖(面积 312 km^2)、图达湖(225 km^2)等^[11-12]。乌兹别克斯坦作为前苏联主要原料基地,经济结构单一,农业、畜牧业和采矿业发达。农业特点是灌溉农业的水利基础设施非常发达,2007年农作物种植面积 $356.1 \times 10^4 \text{ hm}^2$,其中粮食作物 $153.9 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (小麦 $138.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$),棉花 $145.2 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[13]。现在是世界第6大棉花生产国和第2大棉花出口国,世界第7大黄金生产国,同时也是区域内重要的天然气、煤、铜、石油、银和铀生产国^[14]。

1.2 采样与分析

2009年从首都塔什干至咸海,对乌兹别克斯坦不同地貌单元进行了科学考察。考察过程中兼顾交通便利和保证不同类型土壤的采集,重点对阿姆河流域不同海拔分布的土壤,以及咸海流域不同类型进行考察,并对28个点采集了共计31个不同类型表层土壤样品,采样点位置见图1所示。土壤样品冷冻干燥后,磨细至200目,经 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱烘干后,取 $0.120 \sim 0.125 \text{ g}$ 样品于消化罐中,加入 0.5 mL 盐酸、 4.0 mL 硝酸和 3.0 mL 氢氟酸,在德国 Berghof MWS-3 微波硝化系统中硝化。自然冷却后,转移入聚四氟乙稀烧杯中加 0.5 mL 高氯酸蒸干,再加入 $1:3(V/V)$ 硝酸溶液 5 mL , 0.1 mL 双氧水和少量纯水,加热溶解残渣。冷却后定容至 25 mL ,溶液转移到聚乙烯瓶内,在 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 保存,用美国 Leeman Labs Profile ICP-AES(电感耦合等离子体原子发射光谱仪)测定,共测得Al、Fe、Ca、Na、K、Mg、Ti、Co、V、Cr、Be、Ba、Sr、Cu、Zn、Mn、Ni、P、Cd共19种元素含量,其中Cd低于检测限,未检出。采用美国 SPEX CertiPrePTM Custom Assurance Standard 多元素标准溶液,中国水系沉积物成分分析标准物质 GBW07311 作为标准参考物质。

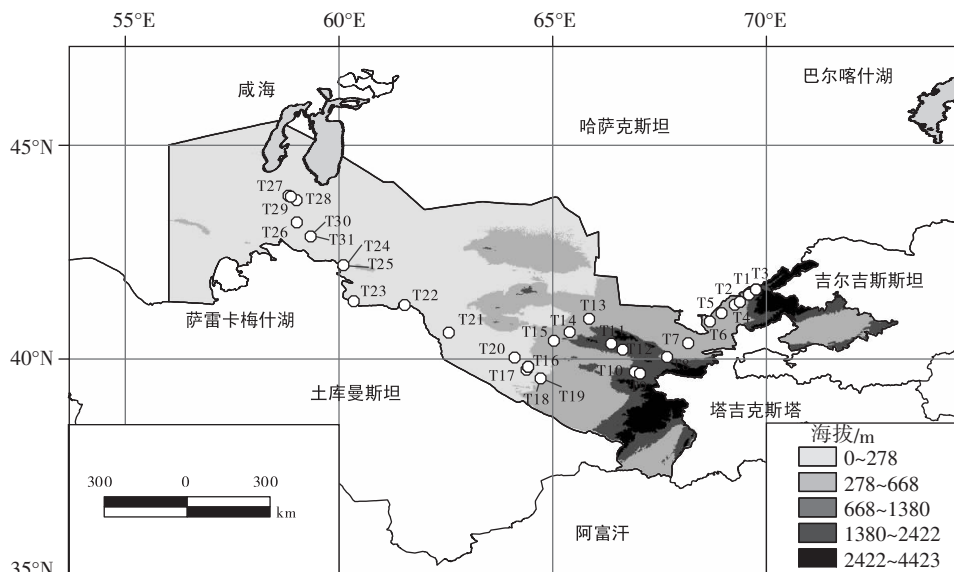


图1 采样点位置

Figure 1 Sketch map of sampling sites in Uzbekistan

2 结果与讨论

2.1 元素含量的统计学特征

用 SPSS for windows 15.0 软件计算土壤元素的平均值、方差和变异系数等参数,比较元素含量特征和变异程度。对乌兹别克斯坦表层土壤样品的元素统计分析结果见表1。Al、Fe、Ca、Na、K、Mg、Ti、Co、V、Cr、Be、Ba、Sr、Cu、Zn、Mn、Ni、P 和 Pb 元素含量平均值分别为 47.41、23.44、52.07、12.49、17.76、11.57 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 2 665.14、8.69、70.49、51.64、1.73、479.12、248.16、21.05、81.92、511.84、29.29、717.81、21.03 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。和世界土壤中值^[15]相比较,乌兹别克斯坦表层土壤样品中 Co、Be、K、Mg、Na、Ca、Zn 等元素的含量偏高,而 Al、Fe 等其余元素含量偏低。

变异系数(CV)是指各元素标准偏差与平均值的百分比,反映了不同样品间元素的差异程度。变异系数(CV)>50%的有 Ca、Pb、Sr、Cu、P,而 K、Be、Al 的变异系数小于 18%。变异系数可以用来描述区域化变量空间变异程度,按照反映离散程度的变异系数大小,可将土壤元素变异进行粗略分级(CV<10%为弱变异性;CV=10%~100%为中等变异性;CV>100%为强变异性)^[16]。综上所述,各元素均存在一定程度的变异,说明研究区的土壤元素在水平方向上存在差异。

聚类分析可以根据样本自身的属性,用数学方法直接比较各事物之间的性质,按照某些相似性或差异性指标,定量地确定样本之间的亲疏关系,并按这种

亲疏关系程度对样本进行聚类,将性质相近的归为一类,将性质差别较大的归入不同的类。为消除各元素含量量纲的影响,将各元素数据进行标准差标准化,经过处理的数据符合标准正态分布,即均值为 0,标准差为 1,其转化函数为: $x'=(x-\mu)/\sigma$,其中 μ 为所有样本数据的均值, σ 为所有样本数据的标准差。然后应用 SPSS for windows 15.0 软件对乌兹别克斯坦表层土壤元素含量进行系统聚类分析,结果见图 2。

乌兹别克斯坦表层土壤元素可以分成两个大类,Al、Fe、Ti、Cr 等稳定元素为一个大类,而 Ca、Sr、Mg、Na 为另一个大类。元素在化学风化时的分异规律是由它们在表生环境中的地球化学行为决定的,Al、Fe、Ti 等元素是地壳中稳定元素,其他元素和它的紧密关系反映了这些元素主要是受当地地球化学作用控制,是自然风化的碎屑产物^[17-18]。Al 等大多数元素的变异系数都在 25%以下,说明在源区风化、搬运过程中所处差异性相对较小。Ca、Sr、Mg、Na 等化学活动性元素的化学性质相似,反映在聚类树形图上组成一个亚类。

2.2 土壤表层元素的空间变异特征

由于人类活动(工业、农业生产)或者自然变化(土壤母质矿化)而引起的土壤重金属时空变化,这些变化均能导致土壤重金属时空属性数据的复杂化,而且土壤中不同重金属之间的相互关系也在空间上表现出复杂的相关性与变异性^[19]。已有的研究表明,地统计学是研究土壤特性空间变异特征的较好方法^[2-3]。变异函数是地统计学的基本工具,其定义为:

表 1 不同土壤样品元素分析统计结果

Table 1 Statistics results of elements in topsoil samples

元素	单位	最小值	最大值	平均值	标准差	CV/%	世界土壤中值	$P(k-s)$
Al	mg·g ⁻¹	25.71	63.32	47.41	8.24	17.38	71	0.994
Fe	mg·g ⁻¹	13.95	34.96	23.44	5.57	23.76	40	0.987
Ca	mg·g ⁻¹	7.07	132.57	52.07	26.43	50.76	15	0.641
Na	mg·g ⁻¹	5.86	31.80	12.49	5.13	41.07	5	0.167
K	mg·g ⁻¹	14.22	24.57	17.76	2.23	12.56	14	0.852
Mg	mg·g ⁻¹	3.98	19.83	11.57	4.01	34.66	5	0.836
Ti	mg·kg ⁻¹	1 325.47	4 051.55	2 665.14	674.02	25.29	5000	0.944
Co	mg·kg ⁻¹	4.77	14.08	8.69	2.37	27.27	8	0.918
V	mg·kg ⁻¹	31.85	154.06	70.49	23.71	33.64	90	0.320
Cr	mg·kg ⁻¹	27.05	81.37	51.64	12.75	24.69	70	0.992
Be	mg·kg ⁻¹	1.25	2.42	1.73	0.29	16.76	0.3	0.643
Ba	mg·kg ⁻¹	212.03	735.26	479.12	125.57	26.21	500	0.917
Sr	mg·kg ⁻¹	99.45	684.38	248.16	140.20	56.50	250	0.530
Cu	mg·kg ⁻¹	8.06	67.74	21.05	12.40	58.91	30	0.384
Zn	mg·kg ⁻¹	26.72	176.38	81.92	36.82	44.95	9	0.984
Mn	mg·kg ⁻¹	163.18	731.24	511.84	118.31	23.11	1000	0.828
Ni	mg·kg ⁻¹	16.46	52.30	29.29	9.50	32.43	50	0.809
P	mg·kg ⁻¹	212.71	2 693.24	717.81	513.94	71.60	800	0.163
Pb	mg·kg ⁻¹	6.91	54.44	21.03	11.52	54.78	35	0.218

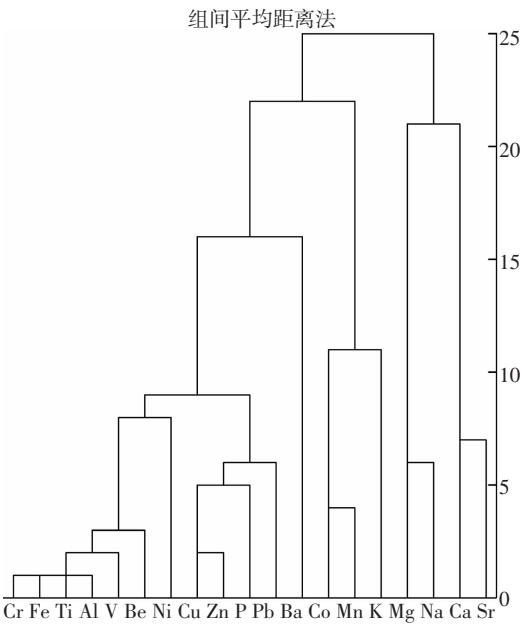


图 2 不同类型土壤元素含量聚类分析树状图

Figure 2 Hierarchical clustering dendrogram of the topsoil elements

$$\gamma(h)=\frac{1}{2}E[Z(x)-Z(x+h)]^2$$

式中: h 为距离,或称步长、距离段; E 表示数学期望; $Z(x)$ 为在位置 x 处的变量; $Z(x,h)$ 为在位置 x 偏离 h 处的变量值。

随着距离段 h 的变化,可计算出一系列的变异函数值。以 h 为横坐标, $\gamma(h)$ 为纵坐标作图,便得到了变异函数图。地球化学数据一般具有空间自相关性,点对间距离越近,元素含量的差异就越小;反之亦然。当然,当距离达到一定程度后,空间自相关消失,其差异趋于稳定,不再随距离而变化。变异函数随距离稳定增长的范围正是自相关的范围^[20-22]。

首先,采用 Kolonogorov Semirnov($k-s$)正态性检验方法对元素含量数据进行正态分布检验,对于符合正态分布的数据直接进行地统计学分析 $[P(k-s)>0.05]$,检测结果见表 1。Al、Fe、Ca、Na、K、Mg、Ti、Co、V、Cr、Be、Ba、Sr、Cu、Zn、Mn、Ni、P 均服从正态分布,数据直接用于地统计分析。通过对半方差图的曲线拟合,确定理论模型曲线,并选择最优拟合曲线。球形半方差函数指明聚集分布,它的空间结构是当样点间距小于变程的时候,样点的空间依赖性随间距增大而逐渐降低。指数模型与球形模型类似,但其基台值是渐进线,非水平直线型的半方差函数表示数据中等程度的聚集分布,其空间依赖范围超过研究尺度。如果数据是随机或均匀分布,其半方差图呈直线或稍倾斜状,块金值等于基台值,表明抽样尺度下没有空间相关性^[23]。对不同土层土壤元素含量进行变异函数分析,结果见图 3。乌兹别克斯坦土壤元素除 Ca 和 Sr 在研究区内符

合指数和球状模型的变化趋势,而 Ca 和 Sr 元素为线性模型,反映了在抽样尺度下没有空间相关性。Ca 和 Sr 等化学活动性元素在表生地球化学上具有一定共性,因而具有一致性。这可能是由于活动性元素发生了相对明显的迁移或富集,Ca 元素的强迁移能力是表生地球化学环境中一个典型特征^[24]。另一方面乌兹别克斯坦是化肥施用和土壤盐渍化强度较严重的国家,土壤盐渍化面积占总灌溉面积从 1994 年 50% 扩大到 2001 年 65.9%^[25],土壤的盐渍化加剧了 Ca 等易溶性元素的表层集聚。

Al、Na、K、Fe 等稳定元素,其变程大于 1500 km,说明各元素在较大尺度范围内存在相关关系,反映了

区域因素(土壤母质)对元素含量影响较大,而植物吸收、施肥、灌水等小尺度因素对它们的影响较小。据半方差函数的定义, $h=0, \gamma(h)=0$ 。但半方差函数在 $h=0$ 处,并没有通过原点,而是有一个正的截矩,这个截矩称为块金方差,而这一现象称为块金效应。块金方差反映了区域化变量内部随机性的可能程度,它主要来源于两个方面,一是小于抽样尺度 h 时所具有的内部变异,二是抽样分析的误差。块金值 C_0 表示区域化变量在小于抽样尺度时非连续变异,由随机因素决定。当采样点间的距离 h 增大时,半方差函数 $\gamma(h)$ 从初始的块金值达到一个相对稳定的常数时,该常数值称为基台值(C_0+C)。当半方差函数值超过基台值时,即

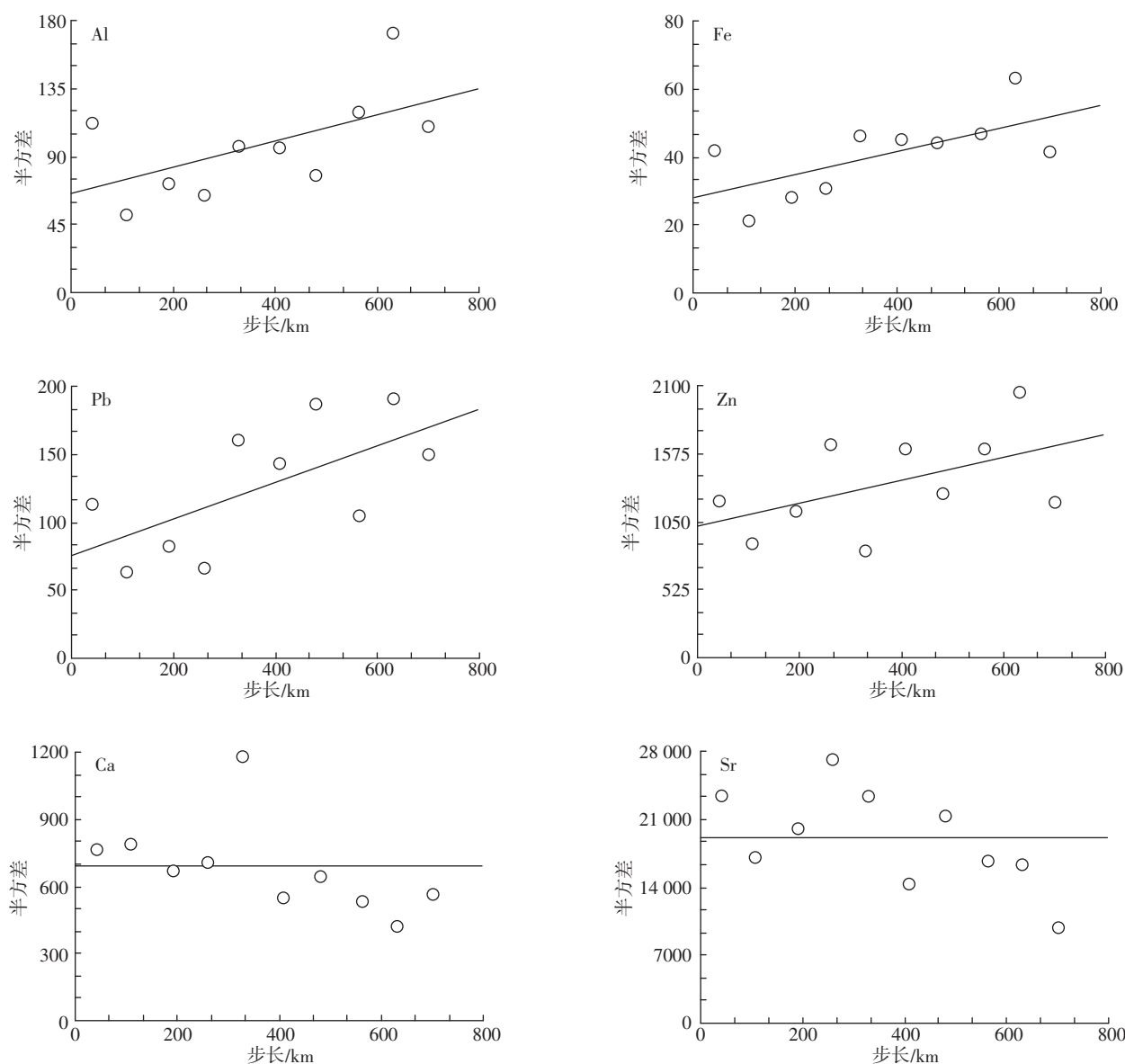


图 3 不同采样点土壤元素变异系数图

Figure 3 Semivariograms for soil elements of the topsoil samples

函数值不随采样点间隔距离而改变时,空间相关性不存在。Cambardella 等^[26]运用 $C_0/(C_0+C)$ 比值的大小判定系统内变量的空间相关程度,该比值也反映了在空间变异的成分中区域因素(自然因素)和非区域因素(人为因素)谁占主导作用。如果比值小于 25%,说明系统具有强烈的空间相关性;如果比值在 25%~75%之间,表明系统具有中等的空间相关性;若大于 75%,说明空间相关性很弱;若比值接近于 1,说明该变量在整个尺度上具有恒定的变异^[27]。从表 2 可看出,重金属元素(Co、Cr、Cu、Ni、Pb、V、Zn)的空间结构比值在 0.3~0.5 之间,反映乌兹别克斯坦土壤重金属元素在所研究的尺度上具有较强的空间自相关格局,已经受到一些施肥、污灌、工农业生产等小尺度因素的影响,但整体上还没有达到破坏其原有空间格局的程度。

2.3 重金属潜在生态危害程度

近年来,国际上众多科学家从沉积学角度提出了多种重金属污染评价方法,本文主要通过瑞典科学家 Hakanson^[28]提出的潜在生态危害指数法进行重金属生态危害评价。潜在生态危害指数法由于考虑到不同重金属的毒性差异及环境对重金属污染的敏感程度,能够更准确地表示重金属对生态环境的影响潜力,在国际上被广泛应用^[29-30]。表示为:

$$E_i^* = T_i \times C_i^*$$

式中: E_i^* 为某一区域土壤中第 i 种重金属的潜在生态危害系数(The potential ecological risk factor); T_i 为重金属 i 的毒性系数,它主要反映重金属的毒性水平和环境对重金属污染的敏感程度; C_i^* 为重金属的富集系数($C_i^* = C_i/C_n^i$); C_i 为重金属 i 的实测含量; C_n^i 为计算所需的参照值,参照值采用工业化以前沉积物中重金属的最高背景值,本研究参照世界土壤元素中值数据。

当 $E_i^* < 40$ 生态危害轻微,40~80 生态危害程度中等,80~160 生态危害程度强,160~320 生态危害程度很强,>320 生态危害程度极强^[28]。在我国,不管是西部干旱区^[31-32]还是东部湿润地区^[33-34],都是随着重污染企业的不断发展,大量重金属污染物被排放,成为土壤重金属污染重要来源。乌兹别克斯坦土壤表层元素重金属中 Zn 和 Cu 潜在危害程度最高,但 Cu、Cr、Zn、Pb 的潜在生态危害程度均为轻微(表3),这与乌兹别克斯坦国家的社会经济发展状况一致。乌兹别克斯坦作为前苏联的主要原料基地,经济结构单一,农业、畜牧业、采矿业发达,农业人口占总人口 60%。由于重金属污染主要来源于化工和开采领域,如果采矿业继续使用粗放式发展方式,而且环保投入不足与意识不够、资源盲目开发、滥挖滥采,日后将直接导致重金属主

表 2 采样点土壤元素含量变异函数理论模型参数

Table 2 Theoretical semivariogram model parameters of topsoil elements in Uzbekistan

元素	理论模型	块金值(C_0)	基台值(C_0+C)	变程/km	空间结构比(C_0/C_0+C)	决定系数(R^2)
Al	球状	65	187.1	1992	0.35	0.35
Ba	球状	1700	41 820	1539	0.04	0.58
Be	球状	0.052 4	0.28	2110	0.19	0.60
Ca	线性	689.24	689.24	689.7	1.00	0.27
Co	指数	5.65	11.3	2110	0.50	0.22
Cr	球状	172.1	344.3	1869	0.50	0.29
Cu	球状	50.6	116.41	2110	0.44	0.47
Fe	球状	27.8	64	1416	0.43	0.45
K	指数	5	10.01	1574	0.50	0.20
Mg	指数	18.61	37.23	1660	0.50	0.15
Mn	球状	100	100 600	350	0.001	0.40
Na	球状	25.4	159.4	2110	0.16	0.31
Ni	指数	77.9	192.6	1468	0.40	0.82
P	指数	211 000	553 000	1473	0.38	0.51
Pb	球状	74.9	220.1	1465	0.34	0.43
Sr	线性	19 103.57	19 103.57	698.7	1.00	0.37
Ti	球状	381 000	922 300	1587	0.41	0.32
V	线性	544	1 088.1	2110	0.50	0.30
Zn	球状	1013	2027	1596	0.50	0.26

表 3 乌兹别克斯坦土壤重金属潜在生态危害评价

Table 3 The ecological risk assessment of heavy metals of Uzbekistan topsoil

元素	毒性系数 ^[28]	实测最大值/ mg·kg ⁻¹	参比值 ^[15] / mg·g ⁻¹	范围	危害程度
Cu	5	67.74	30	11.29	轻微
Cr	2	81.37	70	2.32	轻微
Zn	1	176.38	9	19.60	轻微
Pb	5	54.44	35	7.78	轻微

产区的土地被污染。

3 结论

通过乌兹别克斯坦土壤中元素含量的分析,乌兹别克斯坦土壤沉积物的元素含量大小顺序为 Ca>Al>Fe>K>Na>Mg>Ti>P>Mn>Ba>Sr>Zn>V>Cr>Ni>Cu>Pb>Co>Be。乌兹别克斯坦表层土壤样品中 Co、Be、K、Mg、Na、Ca、Zn 等元素的含量偏高,而 Al、Fe 等其余元素含量偏低。元素含量聚类表明,乌兹别克斯坦表层土壤元素可以明显的分成两个大类,Ca、Sr、Na、Mg 等化学活动性元素为一类,同时这类元素的变异系数也较高,其中 Ca、Sr 的变异系数在 50%以上;而 Al、Fe 等元素为一类,这些元素的变异系数偏低。

地统计学是研究土壤特性空间变异特征的较好方法,变异函数的曲线拟合得到了各种元素的理论模型和相应的变程、空间结构比等参数。这些参数反映了土壤元素的变异特征,能够从理论上认识土壤元素含量空间特征的变化情况。其中 Al 等稳定元素存在明显的空间相关关系,反映了区域因素(土壤母质)对元素含量影响较大;重金属元素的空间结构比值在 0.3~0.5 之间,反映已经受到一些施肥、污灌、工农业生产等小尺度因素的影响,但整体上还没有达到破坏其原有空间格局的程度。Ca、Sr 等化学活动性元素与土壤母质有关外,还受到一定程度的局部随机因素的影响和本次样本量的限制,导致了它们在一个相对较小的距离范围内存在相关关系。

采用瑞典科学家 Hakanson 潜在生态危害系数法对乌兹别克斯坦土壤表层元素中生态危害指数较高的 Cu、Cr、Zn、Pb 四种重金属的生态危害进行了评价,评价结果:乌兹别克斯坦土壤表层元素重金属潜在危害程度以 Zn 和 Cu 危害程度最高,但 Cu、Cr、Zn、Pb 的潜在生态危害程度均为轻微。

致谢:中国科学院中亚科考队成员们在野外工作中给予了支持和帮助,在此一并表示谢意。

参考文献:

[1] Kabata-Pendias A, Pendias H. Trace elements in soils and plants[M]. CRC Press, Boca Raton, FL, 2000.

[2] 张朝生, 章 申, 何建邦. 长江水系沉积物重金属含量空间分布特征研究:地统计学方法[J]. 地理学报, 1997, 52(2): 184-192.

ZHANG Chao-sheng, ZHANG Shen, HE Jian-bang. Spatial distribution characteristics of heavy metals in the sediments of Changjiang rivers system:Geostatistics method[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1997, 52(2): 184-192.

[3] 郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 555-566.

GUO Xu-dong, FU Bo-jie, CHEN Li-ding. The spatio-temporal variability of soil nutrients in Zunhua plain of Hebei Province[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 555-566.

[4] Burgos P, Madejon E, P Rez-De-Mora A, et al. Spatial variability of the chemical characteristics of a trace-element-contaminated soil before and after remediation[J]. *Geoderma*, 2006, 130(1): 157-175.

[5] Goovaerts P. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 27(4): 315-334.

[6] 徐尚平, 陶 澍, 徐福留, 等. 内蒙土壤微量元素含量的空间结构特征[J]. 地理学报, 2000, 55(3): 337-345.

XU Shang-ping, TAO Shu, XU Fu-liu, et al. Spatial distribution pattern of trace elements contents in the soil in Inner Mongolia[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(3): 337-345.

[7] Meshalkina J, Stein A, Makarov O. Spatial variability of soil contamination around a sulphureous acid producing factory in Russia[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1996, 92(3): 289-313.

[8] 崔德杰, 张玉龙. 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展[J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 366-370.

CUI De-jie, ZHANG Yu-long. Current situation of soil contamination by heavy metals and research advances on the remediation techniques [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(3): 366-370.

[9] Chapman P M, Wang F, Adams W J, et al. Appropriate applications of sediment quality values for metals and metalloids[J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, 33(22): 3937-3941.

[10] 中国驻乌兹别克斯坦大使馆经商参处. 乌兹别克斯坦概况[OB/OL]. <http://uz.mofcom.gov.cn>.

Economic and Commercial Counselor's Office of the Embassy of the People's Republic of China in the Republic of Uzbekistan. Uzbekistan: A concise overview[OB/OL]. <http://uz.mofcom.gov.cn>

[11] 邓铭江, 龙爱华, 章 毅, 等. 中亚五国水资源及其开发利用评价[J]. 地球科学进展, 2010, 25(12): 1347-1356.

DENG Ming-jiang, LONG Ai-hua, ZHANG Yi, et al. Assessment of water resources development and utilization in the Five Central Asia Countries[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(12): 1347-1356.

[12] 孙壮志, 苏 畅, 吴宏伟. 乌兹别克斯坦[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2004.

SUN Zhuang-zhi, SU Chang, WU Hong-wei. Uzbekistan[M]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2004.

- [13] 中国驻乌兹别克斯坦大使馆经商处. 2007年乌兹别克斯坦经济数据统计分析[OB/OL]. <http://uz.mofcom.gov.cn>.
Economic and Commercial Counselor's Office of the Embassy of the People's Republic of China in the Republic of Uzbekistan. Uzbekistan economy statistical analysis in 2007[OB/OL]. <http://uz.mofcom.gov.cn>.
- [14] 张鸿翔. 中国周边国家金属矿产资源调查与合作潜力分析[J]. 地球科学进展, 2009, 24(10): 1159-1172.
ZHANG Hong-xiang. The investigation and analysis of the potential cooperation between China and neighboring countries in metal mineral resources[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(10): 1159-1172.
- [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.
China National Environmental Monitoring Center. The background concentrations of soil elements in China[M]. Beijing: Chinese Environment Sciences Press, 1990.
- [16] 王绍强, 朱松丽, 周成虎. 中国土壤土层厚度的空间变异性特征[J]. 地理研究, 2001, 20(2): 161-169.
WANG Shao-qiang, ZHU Song-li, ZHOU Cheng-hu. Characteristics of spatial variability of soil thickness in China[J]. *Geographical Research*, 2001, 20(2): 161-169.
- [17] Wilcke W, Müller S, Kanchanakool N, et al. Urban soil contamination in Bangkok: Heavy metal and aluminium partitioning in topsoils[J]. *Geoderma*, 1998, 86(3): 211-228.
- [18] 于文金, 邹欣庆. 王港滩重金属 Pb, Zn 和 Cu 积累规律及污染评价[J]. 地理研究, 2007, 26(4): 809-820.
YU Wen-jin, ZOU Xin-qing. The accumulation law and pollution estimation of heavy metals of Pb, Cu and Zn from Wanggang tidal flat[J]. *Geographical Research*, 2007, 26(4): 809-820.
- [19] Lin Y P. Multivariate geostatistical methods to identify and map spatial variations of soil heavy metals[J]. *Environmental Geology*, 2002, 42(1): 1-10.
- [20] Matheron G. Principles of geostatistics[J]. *Economic Geology*, 1963, 58(8): 1246-1266.
- [21] Rossi R E, Mulla D J, Journel A G, et al. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence[J]. *Ecological Monographs*, 1992, 62(2): 277-314.
- [22] 张朝生, 章申, 何建邦. 长江水系沉积物重金属含量空间分布特征研究: 空间自相关与分形方法[J]. 地理学报, 1998, 53(1): 87-95.
ZHANG Chao-sheng, ZHANG Shen, HE Jian-bang. Spatial distribution characteristics of heavy metals in the sediments of Changjiang rivers system: Spatial autocorrelation and fractal methods[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1998, 53(1): 87-95.
- [23] 潘文斌, 邓红兵, 唐涛, 等. 地统计学在水生植物群落格局研究中的应用[J]. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1692-1696.
PAN Wen-bin, DENG Hong-bing, TANG Tao, et al. Application of geostatistical analysis in study of macrophytes community's pattern[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(10): 1692-1696.
- [24] 刘晓东, 孙立广, 谢周清, 等. 南极纳尔逊冰缘沉积物元素地球化学特征及其化学风化作用研究[J]. 第四纪研究, 2002, 22(5): 483-491.
LIU Xiao-dong, SUN Li-guang, XIE Zhou-qing, et al. Geochemistry and chemical weathering of Nelson Periglacial Sediments, Antarctica[J]. *Quaternary Sciences*, 2002, 22(5): 483-491.
- [25] 吉力力·阿不都外力, 木巴热克·阿尤普, 刘东伟, 等. 中亚五国水土资源开发及其安全性对比分析[J]. 冰川冻土, 2009(5): 960-968.
JILILI Abuduwaili, MUBAREKE Ayoupu, LIU Dong-wei, et al. Comparative analysis of the land-water resources exploitation and its safety in the five countries of Central Asia[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009(5): 960-968.
- [26] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(5): 1501-1511.
- [27] 胡晓利, 卢玲. 黑河中游张掖绿洲地下水时空变异性分析[J]. 中国沙漠, 2009, 29(4): 777-784.
HU Xiao-li, LU Ling. Spatio-temporal variability of groundwater level in the middle Heihe River Basin[J]. *Journal of Desert Research*, 2009, 29(4): 777-784.
- [28] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [29] Pekey H, Karakas D, Ayberk S, et al. Ecological risk assessment using trace elements from surface sediments of Izmit Bay (Northeastern Marmara Sea) Turkey[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 48(9): 946-953.
- [30] Carballeira A, Carral E, Puente X, et al. Regional-scale monitoring of coastal contamination: Nutrients and heavy metals in estuarine sediments and organisms on the coast of Galicia (Northwest Spain) [J]. *International Journal of Environment and Pollution*, 2000, 13(1): 534-572.
- [31] 石晓翠, 钱翌, 熊建新. 模糊数学模型在土壤重金属污染评价中的应用[J]. 土壤通报, 2006, 37(2): 334-336.
SHI Xiao-cui, QIAN Yi, XIONG Jian-xin. Application of fuzzy mathematics models in the evaluation of soil heavy metal pollution[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(2): 334-336.
- [32] 陈牧霞, 杨潇, 王吉德. 新疆污灌区重金属含量及形态研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(1): 150-154.
CHEN Mu-xia, YANG Xiao, WANG Ji-de. Research on concentration and chemical speciation of heavy metals in sewage irrigated soil of Xinjiang[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21(1): 150-154.
- [33] 钟晓兰, 周生路, 赵其国. 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[J]. 地理科学, 2007, 27(3): 395-400.
ZHONG Xiao-lan, ZHOU Sheng-lu, ZHAO Qi-guo. Spatial characteristics and potential ecological risk of soil heavy metals contamination in the Yangtze River delta: A case study of Taicang City, Jiangsu Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(3): 395-400.
- [34] 管东生, 陈玉娟, 阮国标. 广州城市及近郊土壤重金属含量特征及人类活动的影响[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2001, 40(4): 93-97.
GUAN Dong-sheng, CHEN Yu-juan, RUAN Guo-biao. Study on heavy metal concentrations and the impact of human activity on them in urban and suburb soils of Guangzhou[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2001, 40(4): 93-97.