

夏尔西里自然保护区土壤重金属相关性分析及污染风险评价

许兴斌^{1,2,3}, 焦黎^{1,2}, 王勇辉^{1,2}

(1. 新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室, 乌鲁木齐 830054;

2. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054; 3. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

摘要:为了探明夏尔西里自然保护区土壤重金属污染状况及相关性,沿山路蛇形布点采样,根据实地采样数据和试验数据,通过单因子污染指数分析法和潜在生态危害评价法,分别对夏尔西里自然保护区土壤重金属污染状况进行评价分析。结果表明:夏尔西里自然保护区重金属含量超过《土壤环境质量标准(GB15618—1995)》中一级土壤评价标准,Ni,Cr处于清洁状态;土壤中Pb,Zn,Co,Cu超标率分别为65%,50%,60%,85%;土壤中Hg,As超标率分别为90%,100%;8种重金属元素潜在生态危害系数顺序为:Hg>As>Cu>Pb>Co>Ni>Cr>Zn;Zn与Ni,Cu与Pb,Co与Cu的相关性达到显著性水平;Zn与Pb,Cr与Ni,Co与Pb,Co与Zn的相关性达到极显著性水平,元素有较高的同源性,重金属元素含量主要与成土母质有关,人为干扰对重金属元素含量影响较小,Hg,As元素与其他重金属元素相关性低或无相关性。

关键词:夏尔西里自然保护区;重金属;污染评价;相关性分析

中图分类号:X53

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)05-0336-06

Risk Evaluation and Correlation Analysis of Soil Heavy Metal Contamination in Xiaerxili Nature Reserve

XU Xingbin^{1,2,3}, JIAO Li^{1,2}, WANG Yonghui^{1,2}

(1. Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Urumqi 830054, China;

2. College of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China;

3. College of Resources and Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To explore the status and correlation of soil heavy metal contamination in Xiaerxili nature reserve, the stationing and sampling were carried out in this research following an S-line along the mountain road. Based on field sample data and experimental data, the heavy metal contamination of soil in Xiaerxili nature reserve was evaluated and analyzed through single factor contamination index method and potential ecological risk index method. The result showed that extractable metal contents in Xiaerxili nature reserve exceeded the first-level evaluation standard according to soil environment quality standard (GB15618—1995). The exceeding standard ratios of Ni, Cr were zero; the exceeding standard ratios of Pb, Zn, Co, Cu were 65%, 50%, 60% and 85%, respectively; the exceeding ratios of Hg and As were 90% and 100%, respectively. The order of potential ecological risk index of the above 8 heavy metal elements is Hg>As>Cu>Pb>Co>Ni>Cr>Zn, among which the following pairs of elements were positively correlated: Zn—Ni, Cu—Pb, Co—Cu (tested at the 0.05 significant level); Zn—Pb, Cr—Ni, Co—Pb, Co—Zn (tested at 0.05 significant level). These elements shared high homology. Extractable metal contents were mainly connected with the parent material with relatively small human disturbance. There was low or no correlation between Hg and As for any other elements.

Keywords: Xiaerxili nature reserve; heavy metal; contamination evaluation; correlation analysis

土壤是地球陆地表面的覆盖层,是大气圈、生物圈、水圈和岩石圈的交界地带,生命体和非生命体相互依存,共同组成了人类与动植物生命活动的环境条件^[1]。土壤为植物提供生长环境、协调营养条件,是其区别于成土母质和其他自然体的最基本特征。土壤污染指污染物进入土壤,并形成积累,破坏土壤的自然生态平衡并导致土壤的自然功能失调,使土壤质量恶化的现象^[2]。在土壤环境污染中,以隐蔽性、复杂性、难降解、移动性差和易被富集为特点的重金属污染表现突出,土壤一旦遭受到重金属污染就难以清除,威胁人类健康生活和发育,影响植物生长、区域生态系统及生态环境可持续发展^[3-4]。随着城镇化进程加速,给生态环境带来严重的破坏,土壤重金属分异特征^[5-7]、污染评价^[8-10]、来源分析^[11-12]等方面的研究愈来愈多,与土壤重金属污染相关的研究日益成为研究热点。

目前,学者对新疆乌鲁木齐市、奎屯市、伊犁河谷等地区的土壤重金属污染开展了调查研究。易治伍等^[13]对乌鲁木齐农田中 Cd, Hg, As, Cr, Pb 共 5 种重金属含量进行了分析评价,得出乌鲁木齐农田重金属变异系数较大,各元素的污染指数 $Cd > Cr > Pb > As > Hg$; 李国莉^[14]通过土壤单因子污染指数法和内梅罗指数法对奎屯市北郊蔬菜灌区土壤中 Pb, Zn, Cd, As, Hg, Cu 共 5 种重金属元素进行调查分析,结果显示土壤中 Cu 含量超标,属轻度污染;陈洪等^[15]以新疆伊犁河流域地区作为研究区域,在对研究区域典型土壤样品中重金属元素 Cu, Pb, As, Hg 的含量分析基础上,运用 GIS 地统计学知识分析研究区域土壤 Cu, Pb, As, Hg 含量的空间分布特征,结果显示土壤中砷属于重度污染, Cu, Pb 属于中度污染。

学者对新疆博尔塔拉蒙古自治州土壤重金属污染调查研究相对薄弱,对夏尔西里自然保护区土壤重金属污染的研究仍然是一片空白,对自然保护区的研究主要集中在生态系统评价、野生近缘植物研究等方面^[16-17]。因此,加强对新疆夏尔西里自然保护区土壤重金属污染的调查研究很有必要。

夏尔西里自然保护区长期处于中国与哈萨克斯坦两国边界争议区,历史上双方均施行严格的军事管制,2004 年正式划归中国,被称为“中国最后一块净土”。自然保护区位于新疆博尔塔拉蒙古自治州博尔塔拉市西北部,由于当地工业化进程加速、城镇化的发展以及气候的异常变化的影响,通过大气循环将重金属元素带入土壤中,给夏尔西里自然保护区土壤生态系统带来了威胁。及时掌握自然保护区的生态环境状况,对于充分发挥功能效应,提升管理水平,促进自然保护区生态环境可持续发展具有重要意义。

本研究选取夏尔西里自然保护区土壤重金属元素中的 Ni, Pb, Zn, Hg, As, Co, Cr, Cu 共 8 种元素作为参评因子,分别测定其含量,在统计分析的基础上,通过重金属单因子污染指数法和潜在生态危害系数法分析评价自然保护区污染现状,并探讨 Ni, Pb, Zn, Hg, As, Co, Cr, Cu 共 8 种重金属元素的相关性,为自然保护区土壤重金属污染防治提供理论和数据支持。

1 研究区概况

夏尔希里自治区级自然保护区位于新疆博尔塔拉蒙古自治州境内,地处天山支脉阿拉套山山地南坡,北与哈萨克斯坦共和国接壤,东邻阿拉山口,西部、南部与哈日图热格森林公园相连,地理位置为 $81^{\circ}43'09''$ — $82^{\circ}33'18''E$, $45^{\circ}07'43''$ — $45^{\circ}23'15''N$, 东西长 66 km, 南北宽 25 km, 面积 314 km^2 。山脉呈北东东走向,地形北高南低,由西北向东南倾斜。最高峰海拔 3 670 m,最低处 310 m。山地垂直分异显著,自下而上呈阶梯状隆起^[18]。

保护区东部为温带荒漠气候,以低山丘陵、平原为主;西段由于海拔较高,为温带山地湿润气候。盛行西风带来的北大西洋暖湿气流对北坡植被影响较大,以森林和高山草甸为主;南坡受干旱气候的影响,植被以草原和荒漠为主。从最高处到最低处依次分布着高山积雪、高山草甸、山地森林、荒漠草原和荒漠化草原,构成了干旱区典型而完整的自然地理垂直带谱,各种自然景观,复杂多样的环境。

保护区土壤成土条件与其所在地质、气候、植被状况和景观垂直结构密切相关,成土母质以残积物或坡积—残积物分布最广,主要土壤类型有高山草甸土、山地灰褐色森林土壤、山地草原土壤、山地栗钙土、山地沼泽土、荒漠土等,各种土壤类型在保护区表现出明显的垂直地带性。

2 样品采集与研究方法

2.1 土壤样品的采集

受夏尔西里自然保护区可进入性较差及军事管制等因素制约,本研究采用蛇形沿边防巡逻山路两侧进行布点采样,每个点采集 1 kg,采样深度 80 cm,以表层土壤为主,于 2013 年 8 月共采集到土壤样品 20 个。

2.2 样品测定

根据土壤环境质量评价标准,取 0.1 kg 土壤样品进行测定,土壤重金属元素 Hg, As 采用荧光光度法测定, Ni, Pb, Zn, Cr, Cu 采用火焰原子吸收分光光度法测定样品含量^[2]。

2.3 土壤重金属污染评价方法

2.3.1 单因子污染指数分析法 采用单因子污染指数分析法^[2]对研究区土壤重金属污染进行评价:

$$P_i=C_i/S_i \tag{1}$$

式中: P_i ——土壤中 i 污染物的污染指数; C_i —— i 种污染物的实测含量(mg/kg); S_i ——土壤的 i 污染物的标准值(mg/kg)。单因子污染指数分级标准如表 1 所示,其中 P_i 值越大,污染越严重。

表 1 单因子污染指数分级标准

分级	污染指数	污染等级
I	$P_i<1$	清洁
II	$1\leq P_i<2$	轻度污染
III	$2\leq P_i<3$	中度污染
IV	$P_i\geq 3$	重度污染

2.3.2 潜在生态危害指数法 为了更加深入地研究夏尔西里自然保护区土壤重金属可能存在的危害效应,本文采用潜在生态危害指数法(RI)。该方法是由瑞典著名地球化学家 Hakanson 提出的一种土壤

重金属评价方法,也是目前最为常用的评价重金属污染程度的方法之一,该方法的重点是确定重金属的毒性系数^[19]。根据这一方法,区域土壤中单一重金属第 i 种元素的潜在生态危害系数为:

$$E_r^i=T_r^iP_r^i \tag{2}$$

式中: E_r^i ——潜在生态危害系数; P_r^i ——重金属 i 的污染因子; T_r^i ——重金属 i 的毒性系数(表 2)。

表 2 土壤中重金属的毒性系数

金属元素	Pb	Cu	Zn	Cr	Ni	Co	As	Hg
毒性系数	5	5	1	2	5	5	10	40

潜在生态危害指数(RI)为多种重金属元素潜在生态危害系数 E_r^i 之和,用公式表示为:

$$RI=\sum_{i=1}^n E_r^i \tag{3}$$

根据单一潜在危害系数,将土壤重金属污染状况划分为 5 个等级;根据多种土壤重金属的潜在生态危害指数,将土壤重金属污染状况划分为 5 个等级^[19],等级划分见表 3。

表 3 潜在生态危害指数与污染状况的关系

类别		污染状况等级划分			
E_r^i	$E_r^i<40$	$40\leq E_r^i<80$	$80\leq E_r^i<160$	$160\leq E_r^i<320$	$E_r^i\geq 320$
RI	$RI<50$	$50\leq RI<300$	$300\leq RI<600$	$RI>600$	$RI>600$
污染等级	轻度生态危害	中等生态危害	强生态危害	很强生态危害	极强生态危害

2.4 评价标准

夏尔西里自然保护区属于生态保护区,符合《土壤环境质量标准(GB15618—1995)》中一级土壤评价标准。

3 结果与分析

3.1 单因子污染指数分析

通过对 20 个采样点表层土壤样品中 Ni,Pb,Zn,Hg,As,Co,Cr,Cu 共 8 种重金属元素含量进行测定,参照《土壤环境质量标准(GB15618—1995)》中一级土壤重金属污染评价标准,绘制重金属元素实测值与标准值的对比图(图 1)。将重金属元素实测值带入公式(1)中,计算出单个重金属元素的污染指数,即获得单个重金属元素的富集指数(表 4)。

夏尔西里自然保护区土壤重金属元素中,Ni,Cr 元素采样点重金属含量低于土壤一级标准, $P_i\leq 1$,处于清洁状态,Pb,Hg,As,Cu 元素采样点重金属含量高于标准值,其余元素重金属含量分布于标准值两侧。

土壤中 Pb,Zn,Co,Cu 的含量超标率分别为 90%,55%,60%,100%, P_i 评价范围分别为 0.01~3.79,0.01~2.15,0.54~1.48,1.04~2.61,采样点 13 中 Pb,Zn 的含量分别为 132.5,214 mg/kg,分别高于土

壤标准值 3.8,2.14 倍。其中 Pb 为 1~2 的样点数占 65%, P_i 为 2~3 的样点数占 20%,属轻度污染;Zn,Co 为 1~2 的样点数分别占 50%,60%,属轻度污染;Cu 元素虽然超标率为 100%,但评价指数 P_i 为 1~2 的采样点占 85%,属轻度污染(表 4)。

土壤中 Hg,As 的含量分别为 0.12~1.80,21.24~105.57 mg/kg。Hg 元素中除采样点 1,2 外,其余点均处于最大标准值的上方(图 1),超标率达到 90%(表 4), P_i 评价范围为 0.80~12.02,35% 的采样点大于 3,属重度污染;As 的污染评价指数为 1.42~7.04,超标率为 100%, $P_i>3$ 的采样点占了 75%,属重度污染。

土壤中 Hg,As 的污染评价指数范围为 0.80~12.02,1.42~7.04,污染指数较大,超标率分别为 90%,100%(表 4),属重度污染,是夏尔西里自然保护区土壤重金属污染的重要贡献者。

本区域长期处于中哈两国边界争议区,2004 年正式划归中国,当前仍然属于军事管辖区,采样点沿途只有一条边防巡逻山路,汽车轮胎磨损、老化,汽车车体的磨损以及产生的灰尘经大气沉降在周围土壤中,导致土壤中 Pb,Zn,Cu 等元素的含量升高^[20]。博乐市冬季以煤炭供暖为主,是大气颗粒物污染较严

重的城市之一,大气颗粒中含有大量重金属元素,通过大气沉降的方式进入周边区域,可能成为保护区土

壤的污染源之一。但人为干扰总体很小,保护区土壤重金属含量超标与土壤背景值高有一定关系。

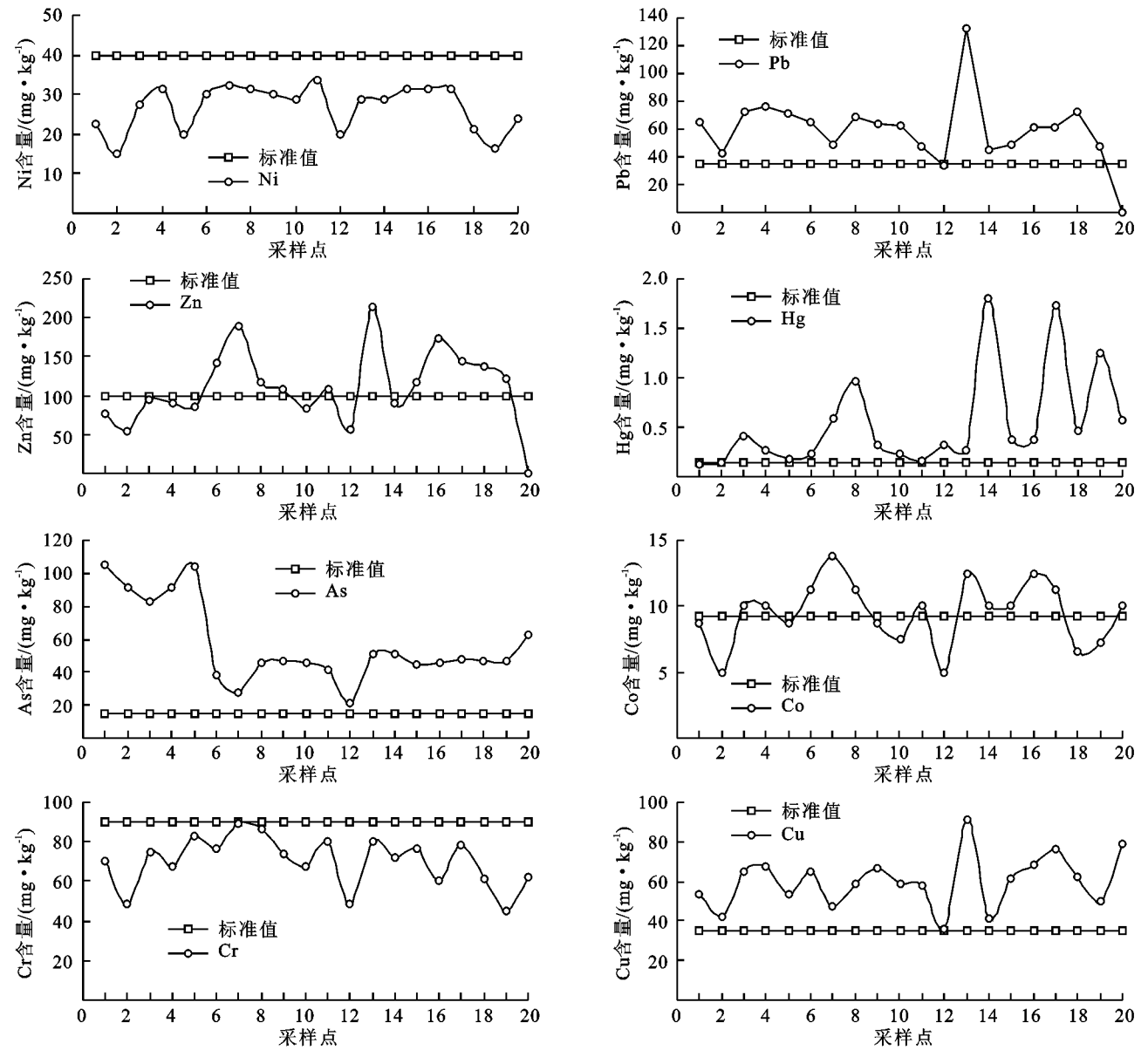


图 1 重金属元素含量实测值与标准值的比较

表 4 土壤重金属单因子评价结果

重金属 元素	测试 点/个	评价指数 P_i 范围	污染指数 P_i								超标率/ %
			$P_i \leq 1$ (清洁)		$1 < P_i \leq 2$ (轻度污染)		$2 < P_i \leq 3$ (中度污染)		$P_i > 3$ (重度污染)		
			个数	百分比/%	个数	百分比/%	个数	百分比/%	个数	百分比/%	
Ni	20	0.38~0.84	20	100	0	0	0	0	0	0	0
Pb	20	0.01~3.79	2	10	13	65	4	20	1	5	90
Zn	20	0.01~2.15	9	45	10	50	1	5	0	0	55
Hg	20	0.80~12.02	2	10	6	30	5	25	7	35	90
As	20	1.42~7.04	0	0	2	10	3	15	15	75	100
Co	20	0.54~1.48	8	40	12	60	0	0	0	0	60
Cr	20	0.50~0.99	20	100	0	0	0	0	0	0	0
Cu	20	1.04~2.61	0	0	17	85	3	15	0	0	100

3.2 潜在生态危害评价

将土壤中重金属的毒性系数(表 2)和重金属元素

的富集指数(表 4)代入公式(2)中,计算出夏尔西里自然保护区单一重金属元素潜在生态危害系数(表 5),将

结果代入公式(3)计算出多种重金属元素潜在生态危害系数 RI(表 5)。

表 5 土壤重金属潜在生态危害评价结果

重金属元素	E_i		均值	污染状况
	最小值	最大值		
Ni	1.88	4.22	3.34	轻度生态危害
Pb	0.05	18.93	8.48	轻度生态危害
Zn	0.01	2.15	1.10	轻度生态危害
Hg	32.00	480.93	144.08	强生态危害
As	18.52	70.38	37.87	轻度生态危害
Co	2.69	7.39	5.11	轻度生态危害
Cr	1.00	1.97	1.56	轻度生态危害
Cu	5.18	13.04	8.59	轻度生态危害
RI	98.99	538.64	210.13	中等生态危害

从单一重金属元素潜在生态危害评价分析结果可知,夏尔西里自然保护区采样点土壤中重金属元素 Hg 的潜在生态危害系数均值为 144.08,高于 320,属于极强生态危害;其余各土壤重金属元素潜在生态危害系数均小于 40,属轻度生态危害。8 种重金属元素潜在生态危害系数顺序为: $Hg>As>Cu>Pb>Co>Ni>Cr>Zn$ 。多种重金属元素潜在生态危害系数 RI 的均值为 210.13,介于 50~300 之间,属于中等生态危害。

表 6 土壤重金属元素的相关性分析

因子	Ni	Pb	Zn	Hg	As	Cr	Cu	Co
Ni		0.316	0.037	0.687	0.097	0.000	0.066	0.000
Pb	0.23		0.001	0.437	0.521	0.085	0.040	0.183
Zn	0.46*	0.67**		0.660	0.071	0.059	0.133	0.003
Hg	0.09	-0.18	0.10		0.226	0.875	0.753	0.434
As	-0.37	0.15	-0.40	-0.28		0.909	0.925	0.406
Cr	0.71**	0.38	0.42	0.04	-0.03		0.166	0.000
Cu	0.41	0.45*	0.34	-0.07	0.02	0.31		0.015
Co	0.77**	0.30	0.62**	0.18	-0.19	0.73**	0.52*	

注: * 表示通过显著性水平为 0.05 的相关性检验, ** 表示通过显著性水平为 0.01 的相关性检验。

4 结 论

通过单因子污染指数评价分析,夏尔西里自然保护区土壤重金属含量与《土壤环境质量标准(GB15618—1995)》中Ⅰ级土壤评价标准对比看出, Ni, Cr 的污染评价指数均小于 1,在土壤中属于清洁状态;土壤中 Pb, Zn, Co, Cu 超标率分别为 65%, 50%, 60%, 85%, P_i 评价范围分别为 0.01~3.79, 0.01~2.15, 0.54~1.48, 1.04~2.61,属轻度污染;土壤中 Hg, As 的污染评价指数范围为 0.80~12.02, 1.42~7.04,污染指数较大,超标率分别为 90%, 100%,属重度污染,是夏尔西里自然保护区土壤重金

比较单因子污染指数分析法和潜在生态危害评价法,发现通过单因子污染指数分析土壤中重金属元素 As 的含量时,15 个采样点的 P_i 均超过 3,属重度污染。但在潜在生态危害评价法中,单一重金属元素 As 的潜在生态危害系数为 37.87,小于 40,为轻度生态危害。其原因可能是有些重金属元素虽然富积程度较高,但其具有亲颗粒性,容易被其他颗粒物迁移进入土壤中矿化埋藏,使它们对生物的毒性降低^[21]。因此,只有结合土壤中重金属元素单因子污染指数分析法与潜在生态危害评价法,才能系统、全面了解土壤重金属污染。

3.3 土壤中各重金属元素相关性分析

土壤重金属元素来源主要有自然来源和人为干扰两种,土壤重金属来源于成土母质和人类活动,同来源的重金属存在着相关性^[22]。

Zn 与 Ni、Cu 与 Pb、Co 与 Cu 的相关性通过 0.05 的显著性水平检验; Zn 与 Pb、Cr 与 Ni、Co 与 Pb、Co 与 Zn 的相关性通过 0.01 的显著性水平检验(表 6),表明以上元素有较高的同源性。重金属元素含量主要与成土母质有关,人为干扰对重金属元素含量影响较小, Hg, As 元素与其他重金属元素相关性低或无相关性。

属污染的重要贡献者。土壤中污染严重与土壤本身背景值高有关,因此,不能被严格界定为严重污染。

8 种重金属元素潜在生态危害系数顺序为: $Hg>As>Cu>Pb>Co>Ni>Cr>Zn$ 。多种重金属元素潜在生态危害系数 RI 的均值为 210.13,介于 50~300,属于中等生态危害。除 Hg, As 元素以外,其他元素相关性较高,表明以上元素有较高的同源性,重金属元素含量主要与成土母质有关。

参考文献:

- [1] 王红旗. 土壤环境学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [2] 于小俸, 唐巍, 胡玉, 等. 壶瓶山自然保护区土壤重金属含量的空间分布及污染评价[J]. 中国农学通报, 2010,

- 26(11):358-361.
- [3] 易秀,谷晓静,侯燕卿,等. 陕西省泾惠渠灌区土壤重金属污染潜在生态风险评价[J]. 干旱地区农业研究, 2010,28(6):217-221,252.
- [4] 刘勇,岳玲玲,李晋昌,等. 太原市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2011,31(6):1285-1293.
- [5] 程街亮,史舟,朱有为,等. 浙江省优势农产区土壤重金属分异特征及评价[J]. 水土保持学报, 2006,20(1):103-107.
- [6] 朱建军,崔保山,杨志峰,等. 纵向岭谷区公路沿线土壤表层重金属空间分异特征[J]. 生态学报, 2006,26(1):146-153.
- [7] 巫和听,胡雪峰,张国莹,等. 上海市宝山区土壤重金属含量及其分异特征[J]. 上海大学学报:自然科学版, 2004,10(4):400-405.
- [8] 王芬,彭国照,蒋锦刚,等. 基于双层神经网络与 GIS 可视化的土壤重金属污染评价[J]. 农业工程学报, 2010,26(4):162-168.
- [9] 刘勇,张红,尹京苑,等. 汾河太原段土壤中 Hg,Cr 空间分布与污染评价[J]. 农业工程学报, 2008,24(5):57-60.
- [10] 钟山,高慧,张漓衫,等. 平原典型垃圾焚烧厂周边土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 生态环境学报, 2014,23(1):164-169.
- [11] 贺跃,胡艳华,王秋潇,等. 大冶大港河水系沉积物中重金属来源分析[J]. 地球化学, 2011,40(3):258-265.
- [12] 宋泽峰,栾文楼,崔邢涛,等. 冀东平原土壤重金属元素的来源分析[J]. 中国地质, 2010,37(5):1530-1538.
- [13] 易治伍,王灵,钱翌,等. 乌鲁木齐市农田土壤重金属含量及评价[J]. 干旱区资源与环境, 2009,23(2):150-154.
- [14] 李国莉. 奎屯市北郊蔬菜污灌区土壤重金属污染调查[J]. 干旱环境监测, 2003,17(4):218-221.
- [15] 陈洪,特拉津·那斯尔,杨剑虹,等. 伊犁河流域土壤重金属含量空间分布及其环境现状研究[J]. 水土保持学报, 2013,27(3):100-105.
- [16] 赵彩凤,陈蜀江,梁艳,等. 新疆夏尔西里自然保护区生态系统评价[J]. 科技创新导报, 2013(10):146-149.
- [17] 赵阳,陈蜀江,马静,等. 夏尔西里自然保护区野生近缘植物研究[J]. 科技创新导报, 2013(13):142-143.
- [18] 马春林. 基于 RS 的山地植被 NPP 遥感地形模型研究[J]. 国土资源信息化, 2009(1):33-36.
- [19] 徐争启,倪师军,庾先国,等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008,31(2):112-115.
- [20] 穆叶赛尔·吐地,吉力力·阿布都外力,姜逢清,等. 天山北坡土壤重金属含量的分布特征及其来源解释[J]. 中国生态农业学报, 2013,21(7):883-890.
- [21] 程芳,程金平,桑恒春,等. 大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析[J]. 环境科学, 2013,34(3):1062-1066.
- [22] 邱海源. 土壤重金属潜在生态危害评价及其同源相关性研究[J]. 资源节约与环保, 2011(1):68-70.

~~~~~

(上接第 335 页)

- [10] 国家海洋局. 海洋调查规范(第 8 部分):海洋地质地球物理调查 GB/T12763.8—2007[S]. 北京:中国标准出版社, 2007.
- [11] 郑楠,张华,武晶,等. 辽宁老秃顶子北坡植物群落物种多样性及其与土壤特性的相关性分析[J]. 生态科学, 2009,28(6):510-515.
- [12] 张威,董应巍,于洋,等. 辽南黄土化学风化特点及其环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013,33(5):163-171.
- [13] 罗万银,董治宝,钱广强,等. 戈壁表层沉积物地球化学元素组成及其沉积意义[J]. 中国沙漠, 2014,34(6):1441-1453.
- [14] 曾艳,陈敬安,朱正杰,等. 湖泊沉积物 Rb/Sr 比值在古气候/古环境研究中的应用与展望[J]. 地球科学进展, 2011,26(8):805-810.
- [15] Nesbitt H W, Markovics G, Price R C. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering[J]. *Geochem Cosmochim Acta*, 1980,44(11):1659-1666.
- [16] Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. London:Blackwell Scientific Publications, 1985:277.
- [17] 郭媛媛,莫多闻,毛龙江,等. 澧阳平原岩板挡剖面地球化学特征与风化强度研究[J]. 地理科学, 2013,33(3):335-341.
- [18] 牟翠翠,张廷军,曹斌,等. 祁连山区黑河上游俄博岭多年冻土区活动层碳储量研究[J]. 冰川冻土, 2013,35(1):1-9.
- [19] 刘骄,黄义雄,叶功富,等. 福建沿海主要防护林树种的生物量、凋落物及其对林下土壤养分的影响[J]. 水土保持研究, 2011,18(1):146-152.
- [20] 许冬. 海南岛近海沉积地球化学研究[D]. 杭州:国家海洋局第二海洋研究所, 2007.
- [21] 杜德文,石学法,孟宪伟,等. 黄海沉积物地球化学的粒度效应[J]. 海洋科学进展, 2003,21(1):78-82.