

# 夏尔希里地区土壤重金属含量特征及空间变异分析

钟 巧, 王勇辉, 焦 黎

(新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054)

**摘 要:**以夏尔希里地区为研究区,对土壤样品中 Co,Cr,Cu,Mn,Ni 共 5 种重金属的含量特征和空间分异规律进行了研究,采用单因子和内罗梅法分析土壤重金属的污染程度,并利用地统计学方法分析研究区土壤重金属的空间分异特征等。结果表明:研究区 5 种土壤重金属含量为:Mn>Cr>Cu>Ni>Co,5 种重金属和有机质均属于中等变异强度;相关性分析结果显示:Co 与 Cu,Mn 呈现显著相关;Cr 与 Cu,Ni 有显著正相关;有机质与 Cr,Mn,Cu,Ni 均呈现正相关;重金属含量空间分异特征整体表现为绿洲区>荒漠区>山地森林区;重金属污染评价结果为:Co 和 Mn 属于轻污染,Cr 和 Ni 处于警戒线,属于尚清洁状态。

**关键词:**夏尔希里地区;土壤重金属;相关分析;污染评价;空间分异

中图分类号:X53

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)03-0360-06

## Characteristics and Spatial Variability of the Soil Heavy Metals Contents in Xiaerxili Area

ZHONG Qiao, WANG Yonghui, JIAO Li

(College of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China)

**Abstract:** Taking Xiaerxili area as the study area, we analyzed content characteristics and spatial distributions of five heavy metals (Co, Cr, Cu, Mn and Ni) of the soil samples. The single pollution index and the composite pollution index were used to assess the soil heavy metal pollution, and geostatistics method was applied to evaluate the spatial distributions characteristics of soil heavy metals in the study area. Results showed that contents of 5 kinds of heavy metals decreased in the order: Mn>Cr>Cu>Ni>Co in the research area, the heavy metals and organic matter belonged to the medium variability; the results of correlation analysis showed that the significant correlations were found between Co and Cu, Mn; the significant positive correlations were observed between Cr and Cu, Ni; organic matter and Cr, Mn, Cu, Ni had the positive correlation; spatial distribution characteristics of heavy metal contents as a whole showed the sequence: oasis area>desert area>mountain area; heavy metal pollution assessment results indicated that Co and Mn pollution was slight, Cr and Ni pollution was still clean but at the warning level.

**Keywords:** Xiaerxili area; soil heavy metal; correlation analysis; analysis of pollution index; spatial variability

土壤是人类赖以生存的自然环境和农业生产的重要资源,土壤的生态安全是保障环境的重要基础。随着工业化和城市化进程的加快,全球土壤中重金属含量呈现急剧增加趋势<sup>[1]</sup>。近年来土壤重金属的污染问题越来越受到国内外学者的广泛关注。国外学者 Nahmani 对法国北部冲击平原地区土壤中蚯蚓生物群落与受到重金属污染的土壤环境之间的关系,研究结果表明受到污染的土壤中蚯蚓的数量会明显下降<sup>[2]</sup>。刘毅章等对中国西南地区 Cd 背景含量高的

地区存在的潜在健康风险进行研究,结果表明中国西南地区 Cd 含量较高,多叶的蔬菜 Cd 含量相对较高,而且人体中 Cd 的含量随年龄增大积累的越多<sup>[3]</sup>。国外学者研究多集中在土壤重金属的潜在风险评价方面。而国内学者主要集中在两个方面,一方面是对土壤重金属进行污染评价和修复<sup>[4]</sup>,如陈涛等以西安市某典型污灌区农田土壤为研究背景,分析长期污水灌溉对表层土壤重金属含量及富集状况的影响,并采用内罗梅和潜在生态危害指数法对其现状和风险进

收稿日期:2015-06-29

修回日期:2015-07-30

资助项目:新疆师范大学地理学博士点支撑学科开放课题资助项目(XJNU-DL-201504);国家自然科学基金(41261055)

第一作者:钟巧(1991—),女,新疆克拉玛依人,硕士研究生,主要从事干旱区景观生态方面的研究。E-mail:869740826@qq.com

通信作者:焦黎(1963—),男,新疆乌鲁木齐人,教授,主要从事区域资源环境评价方向的研究。E-mail:jiaolixjsd@sina.com

行了评价<sup>[5]</sup>;李艳利等利用污染指数法对土壤表层重金属的污染程度进行评价,采用地统计学方法对表层土壤重金属的空间变异结构和分布格局进行了分析<sup>[6]</sup>。另一方面是对重金属的污染分布及来源进行分析<sup>[7]</sup>,钟晓兰等以江苏太仓市为研究区,运用地统计学方法对8种重金属元素的空间分布特征进行了分析,同时运用模糊综合数学法对太仓市的重金属污染进行评价<sup>[8]</sup>。穆叶赛尔·吐地等对天山北坡巴里坤—伊吾,新源—巴音布鲁克和昭苏—特克斯3个区段的重金属用单因子和内梅罗进行评价,同时运用多元统计对其分布特征及污染来源进行了分析<sup>[9]</sup>。

本文研究的夏尔希里地区包含山地、荒漠、绿洲三种地貌类型,人为干扰相对较少,相关的研究也很有限。本研究通过对夏尔希里地区土壤重金属的特征研究,分析土壤重金属空间分异特征及污染状况,研究结果可为其他地区的生态系统修复提供样板指标,同时可以清楚地探究人类活动对环境中重金属的影响以及对其的防治。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

夏尔希里自然保护区位于天山支脉阿拉套山山地南坡,新疆博尔塔拉蒙古自治州境内,北以阿拉套山山脊为界与哈萨克斯坦共和国接壤,地理位置为东经81°43′09″—82°33′18″,北纬45°07′43″—45°23′15″,东西长66 km,南北宽25 km,面积314 km<sup>2</sup>,最高峰海拔3 670 km,最低处310 km。由西部的保尔德河区(西段)、东部的江巴斯区(东段)和联接两个区域的边境廊道(中段)三个部分组成。其中西部为中高山带,面积22 000 hm<sup>2</sup>;中部为中低山区,面积3 600 hm<sup>2</sup>,是连接东西两部分的天然廊道,从而保持地区自然环境的完整性;东部为低山和荒漠平原戈壁地带,总面积为5 800 hm<sup>2</sup>。夏尔希里属于温带大陆性气候,年平均气温为5~6℃,位于亚欧大陆腹地,远离海洋,水汽来源较少,而阿拉山口是准格尔盆地的主要风口,有利于西风气流进入,并抬云致雨,其年平均降水量为183 mm<sup>[10]</sup>。

### 1.2 土壤样品采集及分析

1.2.1 样品采集 根据夏尔希里地区的地貌特征,将其分为山地森林区、荒漠区、绿洲区三种不同地貌类型。采样原则尽可能均匀分布便于比较。分别于2013年8月和2014年10月在夏尔希里地区三种地貌类型共采集土壤样品71个,其中荒漠区31个、绿洲区24个、山地森林区16个(图1)。利用GPS定位,每个土壤样点根据地貌类型采集不同土层及层数,绿洲区采集层次为表层,20 cm,40 cm,60 cm,80

cm,100 cm,山地森林区采集五层,而荒漠区为表层,10 cm,20 cm,30 cm,每层采集1 kg。



图1 夏尔希里地区土壤样点分布示意图

1.2.2 样品分析 土壤样品中重金属Co,Cr,Cu,Mn,Ni采用盐酸—硝酸—氢氟酸微波消解体系,消解后赶酸,电感耦合等离子体光谱(ICP)测定<sup>[11]</sup>,有机质采用重铬酸钾法测试<sup>[12]</sup>。

### 1.3 数据分析

采用SPSS 17.0软件进行传统的描述性统计方法,分析土壤重金属元素数据的平均含量、偏度系数、峰度系数、变异系数、相关性等,然后利用地统计学方法分析重金属的空间变异特征和分布规律。同时利用ArcGIS 10.0软件进行空间克里格插值成图。

### 1.4 土壤污染评价方法

土壤污染评价标准以国家土壤环境质量二级标准为参照值,土壤污染评价的方法采用目前国内外较为普遍的单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法。单因子指数法适合对单一因子污染的评价,内梅罗综合污染指数法,能更全面、综合地反映土壤的污染程度。

1.4.1 单因子污染指数法 采用公式:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中: $P_i$ ——土壤中污染物*i*的环境质量指数; $C_i$ ——污染物*i*的实测浓度(mg/kg); $S_i$ ——污染物*i*的评价标准(mg/kg),采用国家土壤环境质量二级标准,下同。

1.4.2 内梅罗综合指数法采用公式:

$$P = \sqrt{1/2[(\max P_i)^2 + (P_i)^2]} \quad (2)$$

式中: $P$ ——土壤中重金属元素的综合污染指数,根据*P*值的变幅,将土壤环境质量划分为五级: $P \leq 0.7$ 为安全, $0.7 \leq P \leq 1$ 为警戒线, $1 < P \leq 2$ 为轻度污染, $2 < P \leq 3$ 为中度污染, $P > 3$ 为重度污染。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤重金属及有机质含量统计分析

夏尔希里地区土壤重金属Co,Cr,Cu,Mn,Ni含量的描述性统计分析表明(表1):Co含量变化区间

为 2.5 ~ 22.88 mg/kg,Cr 含量为 28.75~95.00 mg/kg,Cu 的含量为 17.55~153.75 mg/kg,Mn 含量为 326.25~1 148.75 mg/kg,Ni 的含量为 7.50~55.00 mg/kg,有机质的含量为 0.03%~8.87%。均值分析结果显示:Mn>Cr>Cu>Ni>Co。变异系数反映采样总体中各样点之间的平均变异程度。当变异系数小于 0.1 为弱变异性,在 0.1~1 为中等变异,大于 1 为强变异性<sup>[13]</sup>。夏尔希里地区的 5 种重金属据上述标准均表现为中等变异性,其中有机质变异系数最大为 0.78,其次是 Cu,Co,变异系数分别为 0.44,0.32,Cr 变异系数最小为 0.19。有机质也属于中等变异,离散程度较大空间分布较重金属元素更为明显。有机质

含量较高,与夏尔希里地区特殊的气候、水文密切相关。由于夏尔希里地区内含自然保护区,保护区在高山地带,地势由东南向西北逐渐抬升,有利于北冰洋、大西洋较湿的气流进入,形成丰富的降水,使得其发育高山植物群落,有利于土壤养分的积累,促使有机质的含量比其他地区高<sup>[14]</sup>。Cr,Mn,Ni 三种重金属变异程度相似,均为 0.20 左右,说明这三种元素在该地区受外界的影响比较一致,空间分异不明显,同时,反映这 3 种元素在该地区的来源可能具有一定的同源性。此外,经分析除 Mn 元素呈现正态分布外,其余四种元素都是非正态分布,Cu,Cr,Co 峰度均小于 3,说明数据分布的集中程度低于正态分布。

表 1 夏尔希里地区土壤重金属的描述性统计

元素	平均值	标准差	最大值	最小值	变异系数	偏度系数	峰度系数	中位数
Co/(mg·kg <sup>-1</sup> )	13.47	4.32	22.88	2.50	0.32	-0.27	-1.12	14.58
Cr/(mg·kg <sup>-1</sup> )	65.87	12.57	95.00	28.75	0.19	-0.26	-0.19	67.51
Cu/(mg·kg <sup>-1</sup> )	45.77	20.28	153.75	17.55	0.44	1.29	2.60	36.34
Mn/(mg·kg <sup>-1</sup> )	697.07	137.91	1148.75	326.25	0.20	0.17	0.49	702.50
Ni/(mg·kg <sup>-1</sup> )	25.94	5.63	55.00	7.50	0.22	0.40	3.00	26.17
有机质/%	2.00	1.57	8.87	0.03	0.78	1.73	3.08	1.53

2.2 夏尔希里地区土壤重金属及有机质相关性分析

相关分析可以用来检验成对数据间的近似性和元素来源差异。相关系数的绝对值越大,相关性越强;即相关系数越接近于 0,相关程度越弱,相关系数越接近 1 或-1,相关程度越强<sup>[15]</sup>。通过对夏尔希里地区土壤重金属与有机质相关性分析,结果表明(表 2):Co 与 Cu,Mn 有显著地相关性,相关系数为

-0.624,0.494;Cr 与 Cu,Ni 有显著正相关,相关系数为 0.541,0.684;有机质与 Cr,Mn,Cu,Ni 呈现正相关,但相关系数较小。夏尔希里地区不同地貌类型受人类干扰的强度不同,重金属来源存在差异性,即自然因素(地质条件、流水的迁移及大气降水等)和人类活动(耕地、施肥等)的影响。这对当地重金属的积累会产生一定的效果。

表 2 夏尔西里地区土壤重金属相关性分析

元素	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	有机质
Co	1.000					
Cr	-0.126*	1.000				
Cu	-0.624**	0.541**	1.000			
Mn	0.494**	0.160**	-0.008	1.000		
Ni	0.174**	0.684**	0.312**	0.291**	1.000	
有机质	-0.176**	0.125*	0.188**	0.141*	0.046	1.000

注:\*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关;\*\*表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

2.3 夏尔希里地区土壤重金属变异函数拟合分析

通过对 5 种重金属变异函数拟合模型分析,得到夏尔希里地区重金属变异函数模型参数。块金值反映最小间距内的重金属变异性和测量分析过程中引起的误差,基台值是变异函数随着间距增到一定程度后出现的平稳值,通常用来表示系统内部总的变异。块金值与基台值的比值为空间异质性程度。若该比值高,则说明随机性因素引起的空间变异性程度起主要的作用,反之,

则说明结构性因素引起的空间变异性程度起主要的作用。因此,块金值与基台值的比值可以用来表明系统变量的空间自相关程度。若比值<25%,说明系统具有强烈的空间自相关性,若比值为 25%~75%,表明系统具有中等的空间相关性,若比值>75%说明系统的空间自相关性较弱<sup>[16]</sup>。夏尔希里土壤重金属的块金值和基台值之比在 7.64%~49.83% 范围内变化(表 3)。其中 Mn,Ni 具有强烈的空间自相关性,表明影响这

些重金属在空间分布的结构性因素很强,它们的变化主要受结构因素控制如:地形、母质、母岩、土壤矿物质等的影响较大,而受到随机因素土地利用、耕作措施及施肥等的影响较小;Co,Cr,Cu 具有中等强度的空间自相关性,即土壤的内在属性和人为因素影响程度相近。变程反映了某种观测尺度下空间相关性的作用范围,它的大小不仅受到观测尺度的限制,还与在取样尺度上影响土壤元素的各种生态过程相互作用有关<sup>[17]</sup>。当观测点之间的距离大于该值时,说明该元素

的均一性强,其分布主要受较大尺度因子的影响,即它们之间是相互独立的;如果小于该值,说明土壤中该元素的均一性较弱,影响因子的空间尺度较小,在小的范围内的变异加强,整体的分布情况也更加复杂,即说明观测点之间存在一定的相关关系。研究区 5 种重金属的空间自相关范围差异明显,其中 Mn 的变程最大,其次是 Ni,再次是 Co,说明这几种元素的空间分布相互独立,Cr,Cu 较短,说明两种元素的空间分布整体上相对比较复杂。

表 3 土壤重金属半方差函数的拟合模型及其相关参数

元素	变异函数 模型 RSS	块金值 C <sub>0</sub>	基台值 C <sub>0</sub> +C	块金值/基台值 C <sub>0</sub> /C <sub>0</sub> +C/%	决定系数 R <sup>2</sup>	变程/km	残差
Co	指数	0.047	0.112	41.94	0.516	49.0	2.81E-03
Cr	高斯	0.015	0.030	49.83	0.214	19.2	9.69E-04
Cu	高斯	0.032	0.080	40.02	0.619	15.7	2.01E-03
Mn	高斯	0.017	0.216	7.64	0.919	135.7	2.34E-04
Ni	高斯	0.018	0.214	8.64	0.894	110.2	6.31E-04

2.4 夏尔希里地区土壤重金属空间分布特征

空间变异性导致重金属在空间分布上存在一定的规律性,从而形成有规律的空间分布格局,空间分布格局是空间变异性的具体表现。根据上述重金属元素的半方差函数模型,使用地统计学中的克里格插值法,对数据进行最优内插,可以更加直观、准确地反映土壤重金属在空间上的分布情况。从图 2 中可以看出,重金属 Co 元素的分布整体呈现斑块和条带状,其含量较 Cr,Cu,Mn,Ni 四种元素低,最高区含量范围为 16.96~18.82 mg/kg。从图 2A 观察可知在绿洲区和荒漠区含量较高,最高值出现在荒漠区,整体呈现出自荒漠区向绿洲区递减的趋势。荒漠区离绿洲近,且植被稀疏,故生态环境脆弱易受人类活动的影响。低值区出现在山地森林区,大致含量为 7.55~9.43 mg/kg,与其复杂的生态系统和远离人类干扰息息相关。

重金属 Cr 呈现岛状和条带状分布,在 81°30′00″—81°40′00″E 范围内出现低值区,野外采集此处为山地森林区和荒漠区,其含量为 46.17~58.34 mg/kg。经实地采样发现此范围的荒漠上长有稀疏植被,属于半荒漠,且周围人居活动较少。由图 2B 可以发现元素的含量整体呈现自荒漠向两侧含量呈现递增的趋势。高值区出现在荒漠区,大致在 81°10′00″—81°20′00″E 内,其含量达到 76.59~82.66 mg/kg,向东西方向为绿洲地带,其含量变化又呈现递减的趋势,但是含量仍大于山地,大致范围在 64.43~70.50 mg/kg。夏

尔希里地区 Cr 含量整体呈现绿洲区最高,山地森林区最低。

由图 2C 发现重金属 Cu 与 Cr 的变化趋势大致相同,最低值出现在山地森林区和荒漠区,含量 28.75~42.38 mg/kg,然后向东西方向出现递增的趋势。最高值也出现在荒漠区,其范围达到 65.85~75.43 mg/kg。

重金属 Mn 呈条带状分布,在山地森林区出现低值,含量 520.12~651.24 mg/kg,图 2D 发现其含量向东逐渐表现出增大的趋势。绿洲地区含量介于荒漠和山地之间,大致为 651.25~842.37 mg/kg。而在荒漠区出现高值区,其含量超过 900 mg/kg。

重金属 Ni 呈岛状分布,分布规律较为复杂,在山地森林区含量最低,图 2E 显示其含量由山地向荒漠绿洲方向呈现递增的趋势,在荒漠区出现最高值达到 29.41~30.83 mg/kg。整体呈现出荒漠区最高,山地森林区最低。

2.5 夏尔希里地区土壤重金属垂直分布特征分析

各重金属在垂直方向上依旧呈现出一定的分布规律。由图 3 可知,Mn 的含量相对较高。在山地、荒漠地区均表现出递减的趋势,绿洲地区在 20 cm 处急剧下降,随深度增加其含量也表现为递增的趋势,当深度达到 80 cm 时重金属又显著下降。Cr 相对于其他重金属元素含量较高仅次于 Mn,在山地区和荒漠区其含量随深度的变化相对稳定,变幅不大,而在绿洲地区表现为明显的降低趋势。Cu 元素含量在山地表现为抛物线形式,在 40 cm 处含量较高,荒漠地区表层至 20 cm 处变化不大,越往下呈现递减的趋势。绿洲地区其

变化更为明显,显著降低。Co 元素相对比较稳定,随深度的增加变幅并不明显。Ni 元素在山地和荒漠地区相对比较稳定,而在绿洲地区呈现下降的趋势。

2.6 土壤重金属的污染状况分析

对研究区内所有的样品重金属分析数据通过单因子污染指数进行评价(表 4)。山地类型除 Mn 的污染指数大于 1 外,其余 4 种重金属的指数均小于 1,分别为 0.98,0.80,0.83,0.66,受污染的程度相对较低。绿洲地区除 Cr,Ni 污染指数小于 1 外,其余的 Co,Cu,Mn 污染指数均大于 1,受污染程度较高,说明人类活动对这三种重金属的含量影响较大。荒漠地区,除 Co,Mn 污染指数大于 1 外,其余三种均小于 1,表明其受污染程度低。由表 4 可知,元素 Mn 在夏尔希里地区三种不同类型的土地上其污染指数均大于 1,表明受污染相对严重。Cr,Ni 两种重金属在研究区内污染均较小。采用内罗梅污染指数法对研究区内的分析数据进行分析得出 Co,Mn 属于轻污染,Cr,Ni 处于警戒线,属于尚清洁状态。

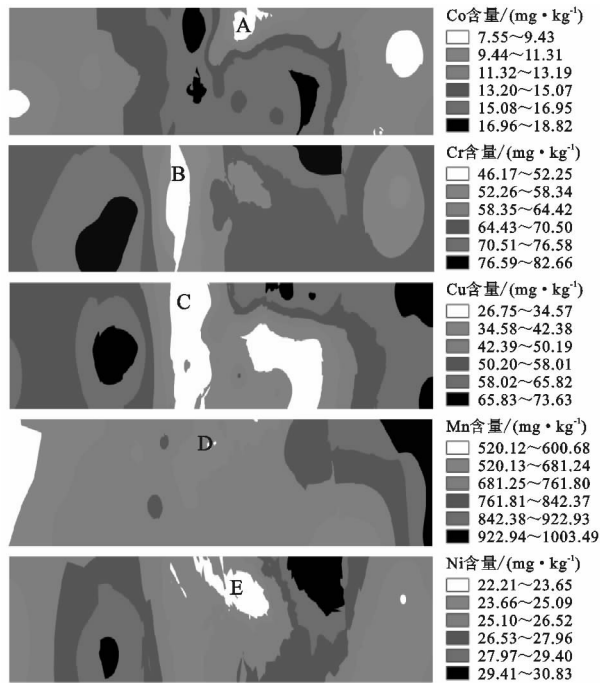


图2 土壤重金属含量的空间分布

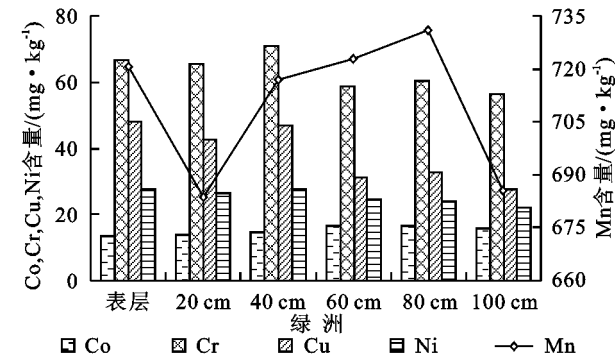


图3 不同地貌类型土壤重金属垂直分布

表 4 单因子污染指数分析

类型	Co	Cr	Cu	Mn	Ni
山地	0.98	0.80	0.83	1.22	0.66
绿洲	1.46	0.73	1.29	1.27	0.65
荒漠	1.76	0.68	0.96	1.38	0.63

3 结论

(1) 夏尔希里地区土壤重金属平均值表明:Mn>Cu>Cr>Ni>Co。荒漠区土壤 Mn 的含量较高,这与荒漠区的母岩,地形有关,同时其脆弱的生态环境极易受到人为干扰,故其含量相对于山地较高。重金属的变异程度表现为 Cu>Co>Ni>Mn>Cr,Cu 的变异最大,说明其受外界的干扰最强,Ni,Mn,Cr 三种元素的变异系数相似,说明其受外界干扰相近,很可能具有同源性。

(2) 重金属及有机质相关性表明:Co 与 Cu,Mn 均在 0.01 水平上呈现显著的相关性;Cr 与 Cu,Ni 在 0.01 水平上也呈现显著的相关性;有机质与 Cr,Mn,Cu,Ni 均呈现正相关。相关性结果进一步说明元素之间可能具有同源性,可通过控制污染源减少重金属污染。

(3) 半方差函数表明:Mn 和 Ni 存在极强的空间自相关性,表明其主要受内在因素影响;Co,Cr,Cu 存在中等强度的空间自相关性,表明其浓度受内在因素和外在因素综合影响。Cu 和 Cr 变程较 Mn,Ni,Co 小,说明前 2 种元素可能主要受到较小尺度因子的影响。

(4) 各重金属在水平方向上分布存在特点仍呈现较好的规律:Co,Mn,Ni 在空间分布上均呈现出荒漠区>绿洲区>山地森林区;Cu 和 Cr 在空间分布上呈现绿洲区>荒漠区>山地森林区。此外,垂直方向上 Mn,Cu 在山地森林区、荒漠区、绿洲区表聚现象明显,即总体上是上层含量高于下层;Cr 在山地森林区、荒漠区随深度变化不明显,在绿洲区呈现表聚现象;Ni 随深度变化不明显。

(5) 三种地貌类型受污染情况表现出:荒漠区>绿洲区>山地森林区,说明人类活动对重金属的含量影响较大;内罗梅综合指数分析表明 Co,Mn 属于轻污染,Cr,Ni 处于警戒线,属于尚清洁状态。

参考文献:

[1] McLaughlin M J, Parker D R, Clarke J M. Metals and micronutrients-food safety issues[J]. Field Crops Research, 1999,60(1/2):143-163.

[2] Nahmani J, Lavelle P, Lapied E, van Oort F. Effects of heavy metal soil pollution on earthworm communities in the north of France[J]. Pedobiologia,2003,47(5):663-669.

- [3] Liu Y, Xiao T, Baveye P C, et al. Potential health risk in areas with high naturally-occurring cadmium background in southwestern China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 112: 122-131.
- [4] 黄敏, 杨海舟, 余萃, 等. 武汉市土壤重金属积累特征及其污染评价[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(4): 135-139.
- [5] 陈涛, 常庆瑞, 刘京, 等. 长期污灌农田土壤重金属污染及潜在环境风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(11): 2152-2159.
- [6] 李艳利, 肖春燕, 王守全, 等. 焦作市城区土壤重金属空间变异特征及污染评价[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(3): 271-276.
- [7] 陈景辉, 卢新卫, 瞿萌. 西安城市路边土壤重金属来源与潜在风险[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(7): 1810-1816.
- [8] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 长江三角洲地区土壤重金属污染的空间变异特征: 以江苏省太仓市为例[J]. *土壤学报*, 2007, 44(1): 33-40.
- [9] 吐地穆叶赛尔, 阿布都外力吉力力, 姜逢清. 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.
- [10] 陈志军, 张晶, 卡米拉, 等. 博尔塔拉河流域水文特性[J]. *水资源研究*, 2007, 28(1): 25-28.
- [11] 陈桑琳, 鲁文杰, 杨鹏, 等. 表层土壤重金属含量测定方法综述[J]. *科技创新导报*, 2014(9): 220-220.
- [12] 杨乐苏. 土壤有机质测定方法加热条件的改进[J]. *生态科学*, 2007, 25(5): 459-461.
- [13] 魏丹, 迟凤琴, 史文娇, 等. 黑龙江南部黑土区土壤重金属空间分异规律研究[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2007, 23(1): 65-73.
- [14] 陈蜀江, 海鹰, 金海龙, 等. 新疆夏尔西里自然保护区综合科学考察[M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2006.
- [15] 张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 等. 黄河下游滩区开封段土壤重金属空间分异规律[J]. *地理研究*, 2013, 32(3): 421-429.
- [16] 陈圆圆, 孙小静, 王军, 等. 上海宝山区农业用地土壤重金属空间分异规律及分布特征研究[J]. *环境化学*, 2010, 29(2): 215-219.
- [17] 史文娇, 魏丹, 汪景宽, 等. 双城市土壤重金属空间变异及影响因子分析[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(1): 59-64.
- [18] Pagotto C, Remy N, Le Cloirec P. Heavy Metal Pollution of Road Dust and Roadside Soil near a Major Rural Highway[J]. *Environmental Technology*, 2001, 22(3): 307-319.
- [19] 颜秋晓, 何腾兵, 高安勤, 等. 不同种植年限夏山银花产地及花蕾重金属污染特征[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(1): 310-328.
- [20] 孙成胜, 蔡小冬, 张仁陟, 等. 基于 GIS 的白银区耕地耕层土壤重金属空间变异及污染评价[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(4): 750-758.
- [21] 杨洋, 周正朝, 张福平, 等. 沔河沿岸土壤重金属分布特征及来源分析[J]. *干旱区研究*, 2014, 1(2): 237-243.
- [22] 陈晓杰, 何政伟, 薛东剑. 基于模糊综合评价的土壤环境质量研究: 以九龙县里伍铜矿区为例[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(1): 130-133.
- [23] 杨基峰, 李文军, 周诗彪, 等. 常德市典型蔬菜生产基地重金属污染特征及风险评价[J]. *土壤通报*, 2015, 46(2): 489-493.
- [24] 王耕, 苏柏灵, 王嘉丽, 等. 基于 GIS 的沿海地区生态安全时空测度与演变: 以大连市瓦房店为例[J]. *生态学报*, 2014, 35(3): 670-677.
- [25] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 长江三角洲地区土壤重金属污染的空间变异特征: 以江苏省太仓市为例[J]. *土壤学报*, 2007, 44(1): 33-40.
- [26] 王雯, 伍永秋, 吴建东. 基于重金属污染的西部生态脆弱区耕地质量评价: 以兰州市榆中县为例[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(4): 194-201.
- [27] 曹雪莹, 张莎娜, 谭长银, 等. 中南大型有色金属冶炼厂周边农田土壤重金属污染特征研究①[J]. *土壤*, 2015, 47(1): 94-99.
- [28] 卞鸿雁, 庞奖励, 黄春长, 等. 汉江上游谷地重金属元素变异规律对环境演变的响应[J]. *干旱区研究*, 2015, 32(2): 336-341.
- [29] 李诚, 李芳柏, 吴志峰, 等. 景观格局对农业表层土壤重金属污染的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(4): 1137-1144.
- [30] 杨忠平, 赵剑剑, 曹明哲, 等. 长春市城区土壤重金属健康风险评价[J]. *土壤通报*, 2015, 46(2): 502-508.