

夏尔希里地区两种典型植物群落土壤 重金属污染现状研究

钟 巧, 王勇辉, 焦 黎

(新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘 要: 为探明干旱区敏感性较强的荒漠—绿洲过渡带上土壤重金属的空间分布及污染现状, 对夏尔希里地区两种典型植被群落下各重金属的水平分布、垂直分布、相关性和综合污染指数进行研究。结果表明: 土壤重金属具有表聚现象, 其含量在 0~30 cm 处相对较高, 在 50~60 cm 处较低; 土壤重金属各特征值的分布表现为: 芨芨草群落 > 羊草群落; 土壤重金属空间分布中, Cr, Cu, Pb 在研究区西部分布相对较高, Zn 规律性分布较强整体呈东高西低的趋势; 相关性分析中, 芨芨草群落下土壤重金属较有机质间的相关性明显大于羊草群落 ($P < 0.05$); 重金属污染评价中, 羊草群落下各重金属污染指数均小于芨芨草群落。

关键词: 夏尔希里地区; 芨芨草; 羊草; 空间分异; 污染指数

中图分类号: X53 **文献标志码:** A

Pollution status of soil heavy metals within two typical plant communities in Xiaerxili area

ZHONG Qiao, WANG Yong-hui, JIAO Li

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

Abstract: In order to explore the spatial distribution and pollution status of heavy metal elements in soil of arid area on Desert-oasis Ecotone that has high sensitivity, the level of heavy metals distribution, vertical distribution, correlation studies and integrated pollution index under two kinds of typical plant communities were carried out in Xiaerxili region. Results showed that heavy metal had surface aggregation phenomenon in soil, and its content was relatively high in the 0~30 cm layer, whereas remained low in the 50~60 cm layer. Various characteristic values distribution of soil heavy metals for *Achnatherum splendens* community was higher than those for *Leymus chinensis* community. For spatial distribution of heavy metals, Cr, Cu and Pb in the western area of the study area was relatively high. Zn had a strong distribution pattern that Zn tended to be high in east and low in west. Correlation analysis showed that correlations among organic matters of heavy metals for *Achnatherum splendens* community were stronger than those for *Leymus* ($P < 0.05$). In conclusion, the evaluation indicates that heavy metal pollution in the *Leymus chinensis* community under heavy metal pollution index was less than that in *Achnatherum splendens* community.

Keywords: Xiaerxili area; *Achnatherum splendens*; *Leymus chinensis*; spatial variability; analysis of pollution index

土壤是人类赖以生存的自然资源和农业发展的重要基础, 对保障粮食安全和整个生态环境具有重要作用。随着工业化、城镇化进程不断加速, 人类活动所产生的重金属物质通过大气沉降、污水灌溉及垃圾填埋等途径进入土壤^[1], 致使土壤中重金属含量明显高于其背景值, 进而造成现存的或潜在的土

壤质量退化、生态与环境恶化的现象加剧^[2]。土壤重金属还进一步影响植物生理性状, 对植物的生长造成抑制作用^[3]。

芨芨草 (*Achnatherum splendens*) 和羊草 (*Leymus chinensis*) 均属禾本科 (*Gramineae*)^[4], 具有耐寒、耐旱、耐盐、适应性广的特性^[5], 在防风固沙、保持水土

收稿日期: 2015-08-05

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

作者简介: 钟 巧(1991—), 女, 新疆克拉玛依人, 硕士研究生, 主要从事干旱区环境退化与治理研究。E-mail: 869740826@qq.com。

通信作者: 焦 黎, E-mail: jiaolixsd@sina.com。

方面起着重要作用^[6]。夏尔希里地区属温带大陆性气候,内含山地、荒漠、绿洲三种地貌类型,主要建群种为芨芨草和羊草,主要分布于区域内的荒漠—绿洲过渡带上。目前,针对土壤重金属污染的相关研究主要集中在农田生态系统^[7-10],城市生态系统^[11-13]和湿地生态系统^[14-16],对于以干旱荒漠土为生境的耐旱性植被的相关研究还较少。为此本文以生态敏感性较强的夏尔希里荒漠—绿洲过渡带两种典型植物群落为研究对象,分析、评价了两种植物群落下土壤重金属的污染现状,从而为夏尔希里地区植被修复和土地资源的可持续利用提供科学依据。

1 研究区概况

夏尔希里自然保护区(45°07'43"~45°23'15"N, 81°43'09"~82°33'18"E)位于天山支脉阿拉套山山地南坡,北以阿拉套山山脊为界与哈萨克斯坦共和国接壤,东西长 66 km,南北宽 25 km,总面积为 314 km²。保护区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)等三个部分组成。其中,西部为中高山带,面积 22 000 hm²;中部为中低山区,面积 3 600 hm²,是连接东西两部分的天然廊道;东部为低山和荒漠平原戈壁地带,总面积为 5 800 hm²。

夏尔希里地区属于温带大陆性气候,水汽来源较少,主要降水多以西风气流在东侧的阿拉山口风口区汇入,抬云致雨,进而对该区域产生部分降水。夏尔希里保护区属军事管辖区,人为干扰较少。辖区内植物种类丰富,以羊草(*Leymus chinensis*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、盐角草(*Salicornia europaea*)等为优势物种,除此之外,还有雪莲、紫草、小叶斑兰等国家重点保护植物。



图 1 夏尔西里地区土壤样点分布示意图

Fig.1 Distribution of sampling sites for soil in the Xiaerxili area

2 研究方法

2.1 采样方法

样品采集时间为 2013 年 8 月和 2014 年 8 月,样点主要设置在夏尔希里地区荒漠—绿洲过渡带上,选取长势均一的羊草群落和芨芨草群落,分别采集 17 个土壤样点,共 34 个样点(图 1)。预先设点时尽量保证均匀分布,每一个样点均用 GPS 进行定位,并记录采样点周围的环境信息。在每个样点建立一个深 60 cm 的剖面,分别取 0~10,10~20,20~30,30~40,40~50,50~60 cm 的土层样品。每层土采集 1 kg,所有土壤样品均装入聚乙烯密封塑料袋中做好标记,带回实验室,剔除杂草,风干,进行研磨过筛处理,进行室内分析。

2.2 样品分析

土壤样品中重金属 Zn 和 Pb 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;重金属 Hg 采用硝酸—盐酸消解体系,原子荧光法(AFS)测定;重金属 Cu 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^[17];有机质采用重铬酸钾外热法测定^[18]。在重金属元素分析全过程中均进行质量控制,元素样品用电子天平各称取 0.2 g;有机质分析中也进行质量控制,各样品称取 0.3 g。

2.3 数据分析处理

采用 SPSS 17.0 软件对数据进行描述性统计和相关性分析,分析不同群落下各土层重金属的含量特征,并探究有机质和各重金属之间的相关性。利用 Excel 和 Arcgis10.0 软件进行空间克里格插值成图。

采用内梅罗综合污染指数分析法对其污染程度进行全面的、综合的评价。内梅罗综合污染指数的表达式为:

$$P_i = \sqrt{1/2[(C_i/S_i)_{\max}^2 + (C_i/S_i)_{\text{av}}^2]}$$

其中, P_i 为综合污染指数, C_i 为污染物 i 的实测浓度($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), S_i 为污染物 i 的评价标准($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),采用国家土壤环境质量二级标准。 $(C_i/S_i)_{\max}$ 为各重金属元素污染指数中的最大值, $(C_i/S_i)_{\text{av}}$ 为各重金属元素污染指数的算术平均值。综合污染评价分级标准^[19]见表 1。

3 结果与分析

3.1 两种典型植物群落下的描述统计特征分析

通过对夏尔希里地区荒漠—绿洲带两种典型植

物群落下土壤重金属的含量特征的比较分析(图2)可以看出,两种典型植物群落土壤重金属(Cr, Pb, Zn, Cu)含量随着深度增加均呈现出下降的趋势。羊草群落下各重金属元素含量均表现为先上升后下降的趋势。除芨芨草群落重金属元素Cu以外,其余三种重金属含量也呈现先增加后降低的趋势。同时,由图可知,除芨芨草群落下Cu元素外,其含量的最高值位于表层(0~10 cm),其它重金属元素在两种群落下的最高值均位于10~30 cm处。四种重金属元素的最低值均出现在深处(50~60 cm)。相对而言,重金属Cr元素的含量变化较大,重金属Cu

元素的含量变化较小,起伏相对较平稳。同时,由图可知,除重金属Pb在30~60 cm处,其羊草群落下的重金属含量高于芨芨草群落下的含量外,其它三种重金属元素均呈现出芨芨草群落下的含量明显高于羊草群落下的含量,尤其是重金属Zn表现最为明显。通过观察可以发现不同群落下重金属的含量均呈现Zn > Cr > Pb > Cu,除重金属Cu以外,重金属Zn、Cr、Pb在两种群落下的变化趋势基本保持一致。其中在30~60 cm处重金属Pb在芨芨草群落下下降趋势更为显著且低于羊草群落的含量。

表1 土壤综合评价分级标准

Table 1 Classification criteria for soil comprehensive evaluation

污染指数 Pollution index	污染程度 Pollution degree	污染水平 Pollution level	等级 Grade
$P_n \leq 0.7$	安全 Safe	清洁 Clean	I级
$0.7 < P_n \leq 1$	警戒 Warning	尚清洁 Still clean	II级
$1 < P_n \leq 2$	轻污染 Light	土壤污染物超过其背景值,作物开始受污染 The soil pollutant surpasses its background value, the crops starts to pollute	III级
$2 < P_n \leq 3$	中度污染 Moderate	土壤、作物受到中度污染 The soil and crops receive the moderate	IV级
$P_n > 3$	重度污染 Heavy	土壤、作物受污染已相当严重 The soil and crop pollution is serious	V级

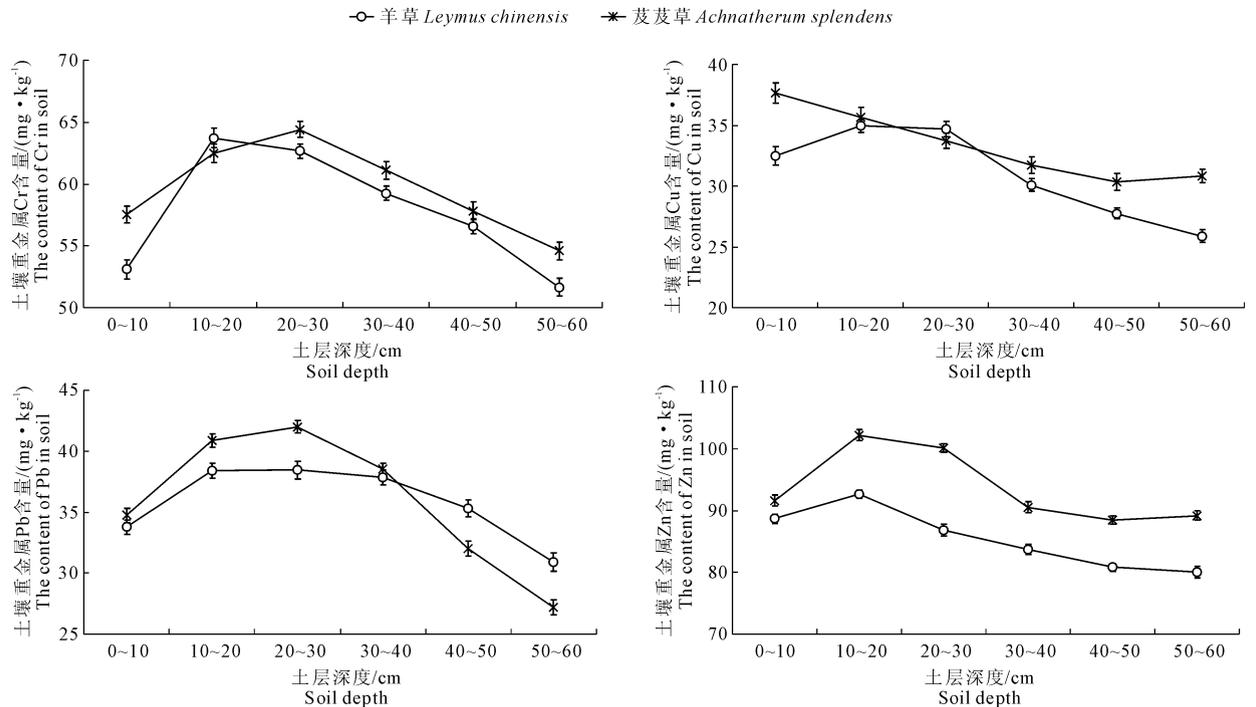


图2 两种群落下重金属含量描述性统计分析

Fig.2 Descriptive statistics of soil heavy metal concentrations under two typical vegetation communities

3.2 夏尔希里地区土壤重金属空间分异特征

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。重金属Cr、Pb在研究区的西南部和东南部分布均偏高,重金属Cu主要分布于研究区的西部,Zn主要分

布于研究区的东部。虽然 4 种重金属在分布上有一定的相似性,但也有各自的分布特点:重金属 Cr 含量在 $45.76 \sim 87.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,在研究区内整体多呈岛状和条带状分布。高值区出现在 $81^{\circ}20'00'' \sim 81^{\circ}25'00''\text{E}$,含量在 $80.52 \sim 87.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,此处主要分布着芨芨草群落,重金属含量呈现自高值中心向四周递减的趋势。在 $81^{\circ}30'00'' \sim 81^{\circ}40'00''\text{E}$ 呈现低值区,含量大致在 $45.76 \sim 52.71 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,分布着部分芨芨草群落和羊草群落,其含量呈现自低值中心向四周增加的趋势。在研究区东部重金

属含量较高,野外采集发现此处主要分布着羊草群落和部分芨芨草群落。

重金属 Cu 含量最少,范围大致在 $24.34 \sim 59.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,其整体多呈条带状分布。如图 3 所示,在研究区西部重金属 Cu 的含量较高,其含量呈现自西向东递减的趋势,此处主要分布着芨芨草群落。在 $81^{\circ}35'00'' \sim 82^{\circ}05'00''\text{E}$ 之间出现低值区,分布范围较广,且其含量呈现出向东西方向递增的趋势,此处主要分布着羊草群落和部分芨芨草群落。

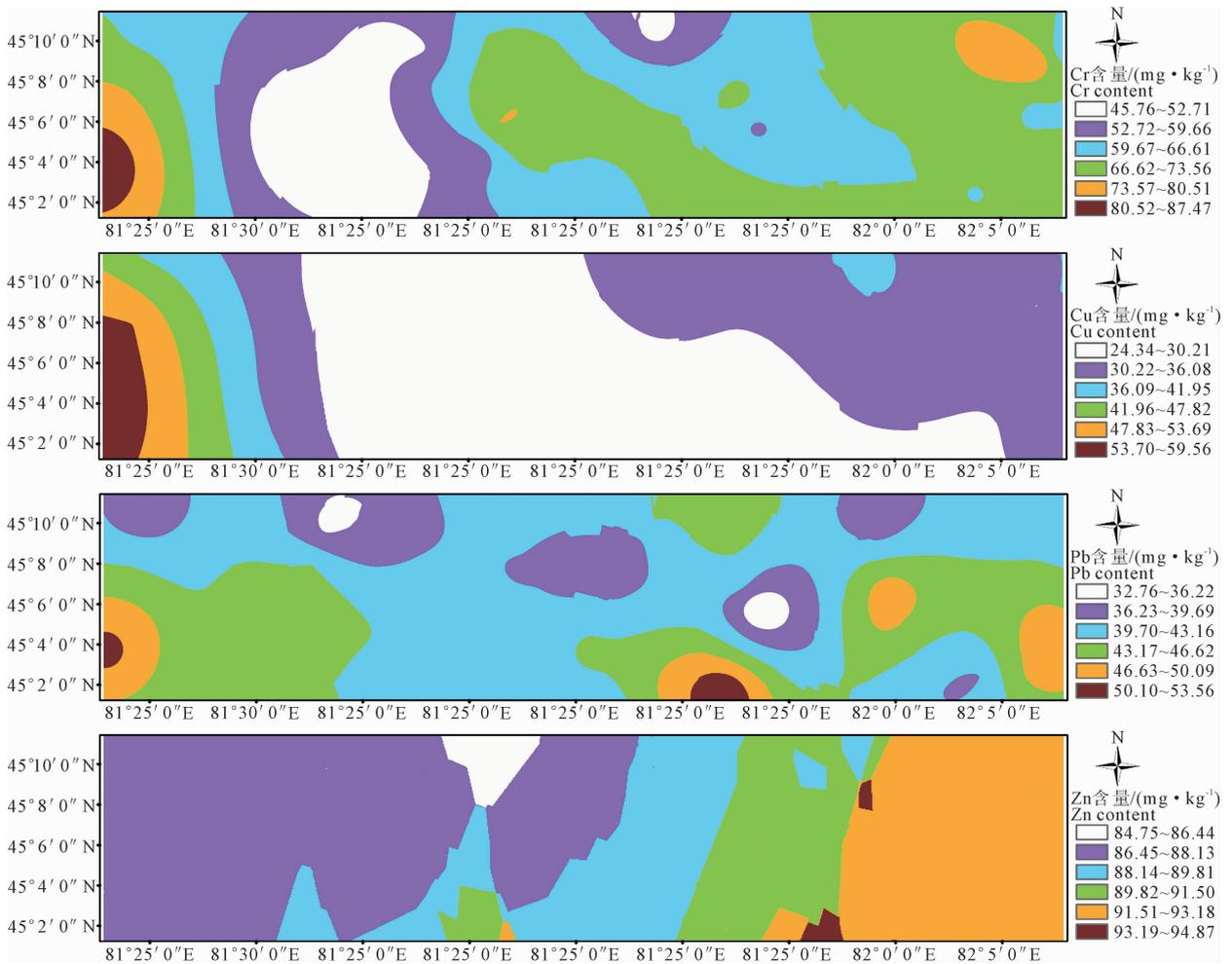


图 3 夏尔希里地区各重金属空间分异格局

Fig.3 Spatial distribution of heavy metals concentration in Xiaerxili

金属 Pb 整体分布呈现片状和斑块状,其含量范围在 $32.76 \sim 53.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,整体含量稍高于重金属 Cu。如图所示,高值区分布于研究区的西南部和 $81^{\circ}50'00'' \sim 81^{\circ}55'00''\text{E}$ 处,含量大致在 $50.10 \sim 53.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内,其呈现自高值中心向四周递减的趋势,野外采集此处主要分布为芨芨草群落。重金属含量较少的斑块处主要分布着羊草群落。在整个研究区范围内重金属 Pb 含量主要集中在 39.70

$\sim 43.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。

重金属 Zn 整体分布呈现片状,大致的含量范围在 $84.75 \sim 94.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,其含量为四种元素中最高。在 $81^{\circ}57'00'' \sim 82^{\circ}07'00''\text{E}$ 处出现高值区,含量范围达到 $91.51 \sim 94.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,此处主要分布着芨芨草群落。在 $81^{\circ}35'00'' \sim 81^{\circ}47'00''\text{E}$ 处出现低值区,其含量为 $84.75 \sim 85.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,呈现自低值中心向四周增加的趋势,此处主要分布着羊草群

落。研究区整体分布呈现自东部向西部递减的趋势。

3.3 两种群落下土壤重金属的相关分析

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^[20]。通过对夏尔希里地区两种典型群落下各重金属及有机质进行相关分析(表2),结果表明:在羊草群落下Pb和有机质的相关系数最大为0.347,其次是Cu和Cr相关系数为-0.284,Cr和有机质相关系数最小为-0.084。从表2可以看出羊草群落下各种金属及有机质之间均表现为弱相关性。在芨芨草群落下Pb和Cr相关系数最大为0.582,表现为显著的中度相关。其次是Cu与有机质和Cr相关系数分别为0.526、0.555,Pb和Zn也表现为显著的正相关,相关系数为0.500。Cr和有机质的相关系数最小为0.038,表现为正的弱相关。比较表2、表3可以发现芨芨草群落下各种金属及有机质之间的相关性较强。

表2 两种典型植被群落下各重金属及有机质相关性分析

Table 2 Correlation coefficients of the heavy metals and organic matters in two typical vegetation communities

类型 Type	元素 Element	Cr	Cu	Pb	Zn	有机质 Organic
羊草群落 <i>Leymus chinensis</i> community	Cr	1	—	—	—	—
	Cu	-0.284	1	—	—	—
	Pb	0.347	-0.134	1	—	—
	Zn	0.215	-0.173	0.186	1	—
	有机质 Organic	-0.084	0.121	-0.195	-0.272	1
芨芨草群落 <i>Achnatherum splendens</i> community	Cr	1	—	—	—	—
	Cu	0.555*	1	—	—	—
	Pb	0.582*	0.384	1	—	—
	Zn	0.364	-0.056	0.500*	1	—
	有机质 Organic	0.038	0.526*	-0.049	-0.157	1

注: * 在0.05水平(双侧)上显著相关。

Note: * Significant correlation at the 0.05 level(two-sided).

3.4 两种典型植被群落下各重金属的污染评价

对夏尔希里地区两种典型植被群落下的各土壤重金属进行内罗梅综合污染指数评价(表3),计算结果表明:芨芨草群落下各重金属的内罗梅综合污染指数均大于羊草群落。根据土壤综合评价分级标准,两种植被群落下重金属Cu污染指数介于0.7~1,处于警戒线;Cr元素的污染指数介于1~2之间,

其污染情况处于轻度污染;Pb的污染指数也介于1~2之间,污染情况处于轻度污染;羊草群落下的Zn元素污染指数介于0.7~1之间,污染情况处于警戒线,而芨芨草群落下的Zn元素污染指数介于1~2之间,污染情况处于轻度污染。

表3 两种典型群落下内罗梅综合污染指数评价

Table 3 Analysis of comprehensive pollution index in two typical vegetation communities

类型 Type	Cu	Cr	Pb	Zn
羊草群落 <i>Leymus chinensis</i> community	0.82 警戒线 Warning line	1.5 轻度污染 Light pollution	1.15 轻度污染 Light pollution	0.94 警戒线 Warning line
芨芨草群落 <i>Achnatherum splendens</i> community	0.84 警戒线 Warning line	1.68 轻度污染 Light pollution	1.59 轻度污染 Light pollution	1.04 轻度污染 Light pollution

4 结论与讨论

通过对夏尔希里地区两种典型植被群落下土壤重金属的特征分析及污染评价,两种典型植物群落土壤重金属含量整体呈现出随着深度增加递减的趋势。这与李仪等^[21]对杭州西郊茶园土壤重金属的剖面分析结论一致,均表明重金属具有表聚现象。重金属含量在0~30 cm处较高,在50~60 cm处含量较低(图2)。表聚现象与土壤重金属不易降解、不易迁移的特性相关^[22]。但本研究还发现,在夏尔希里荒漠—绿洲过渡带上两种典型植被群落的重金属含量均有显著的积累,且呈现芨芨草群落下重金属的含量分布普遍高于羊草群落下重金属的含量。相关研究显示,在自然条件下,重金属含量在正常范围以内应处于清洁状态,主要来源于母质,重金属含量较高可能来源于人为排放的污染。同时,Cu、Pb等又是人类活动引起污染的重要指示元素^[23]。由于研究区羊草群落集中分布于山前地区,芨芨草群落主要分布于荒漠地区,山前地区土壤含水量、土壤养分均大于荒漠地区且受人为干扰也较小,因此,重金属含量羊草群落低于芨芨草群落。重金属Pb含量明显低于其它三种重金属,造成这种原因是由于Pb的含量变化与强烈的人为活动有关,夏尔希里地区相对人为干扰较少。

土壤重金属的空间异质性是形成有规律空间格局的原因。在本研究中,夏尔希里地区土壤重金属具有一定的空间分布规律。重金属Cr、Cu、Pb在研究区的西部分布普遍偏高,此处受人为干扰影响较大,Zn则表现出明显的连续性,在整个研究区呈现

东高西低的趋势(图 3)。本研究还发现,夏尔希里地区羊草群落下各重金属的含量整体上低于芨芨草群落下重金属的含量。重金属 Zn 含量普遍高于其余 3 种土壤重金属,这与当地的自然条件(地质、地貌)和人类活动尤其是农业活动(耕地、施肥等)密切相关。

土壤重金属的相关性分析可以验证重金属之间的相似性和来源,通过分析发现芨芨草群落下的重金属及有机质之间的相关性强度大于羊草群落。芨芨草群落下 Pb 与 Cr, Zn 呈现显著的中度相关, Cu 和有机质也呈现显著的相关性,相关系数为 0.526, 均明显高于羊草群落的相关系数。造成这种原因可能是芨芨草群落主要分布于荒漠带上,由于荒漠地区植被覆盖率低,生态环境较脆弱且人为干扰较大,人为因素导致重金属的来源相似且复合程度更高。羊草群落主要分布于荒漠-绿洲带的边缘带靠近山前平原的位置,此处自然环境较好,土壤养分及肥力较高,远离人类活动,故重金属的来源只与自然因素有关(母质、地貌等),所以元素间的相关性较弱。

运用内罗梅综合污染指数法对两种典型植被群落下的重金属进行污染评价,表明羊草群落下的 Cu 和 Zn 处于警戒线,芨芨草群落下的 Cu 也处于警戒线,而 Cr 和 Pb 在两种群落下均处于中度污染。通过表 3 可以看出羊草群落下各种金属元素的污染指数均小于芨芨草群落。表明羊草群落受到的污染较少,人为影响较弱,其重金属的主要来源为自然因素。同时说明在夏尔希里地区的荒漠-绿洲带,芨芨草群落重金属的含量较羊草群落高,且受人为影响较大。

参考文献:

[1] Zhang C. Using multivariate analysis and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland[J]. *Environment Pollution*, 2006, 142: 501-511.

[2] 杨 卓,王占利,李博文,等.微生物对植物修复重金属污染土壤的促进效果[J].*应用生态学报*, 2009, 20(8): 2025-2031.

[3] 朱永娟,朱 晶.矿区土壤重金属形态分布和富集植物研究

[J].*长春理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 33(4): 174-176.

[4] 王桔红,柴雁飞,张 勇,等.沙埋对醉马草种子萌发和幼苗生长的影响[J].*生态学杂志*, 2010, 29(2): 324-328.

[5] WU ZH L, LU SH L. On geographical distribution of *Achnatherum Beauv.* (Gramineae)[J]. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 1996, 34(2): 152-161.

[6] 张海燕,钱亦兵,段世民,等.东天山喀尔里克山北坡一淖毛湖植物群落物种多样性研究[J].*冰川冻土*, 2009, 31(5): 976-985.

[7] 姚荣江,杨劲松,杨奇勇,等.典型农区耕作土壤重金属空间变异的稳健性分析[J].*环境科学与技术*, 2012, 35(12): 1-7.

[8] 张远蓉,王 帅,郭宏平,等.农地土壤重金属安全性评价指标体系研究[J].*土壤通报*, 2009, 40(6): 1432-1435.

[9] 庞丽蓉,张福金,李秀萍,等.内蒙古农牧交错区土壤重金属含量及其分异[J].*内蒙古农业科技*, 2010(4): 71-72.

[10] 黄 夏,郭海荣,许桂苹,等.广西某农灌蔗区土壤重金属含量及污染评价[J].*南方农业学报*, 2014, 45(12): 2183-2187.

[11] 柳玉龙,章立佳,韩晓非,等.上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价[J].*环境科学*, 2012, 33(2): 599-605.

[12] 肖锦华.中国城市土壤重金属污染研究进展及治理对策[J].*环境科学与管理*, 2009, 34(4): 25-28.

[13] 马建华,李 灿,陈云增,等.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[J].*土壤学报*, 2011, 48(4): 743-750.

[14] 邵学新,吴 明,蒋科毅.西溪湿地土壤重金属分布特征及其生态风险评估[J].*湿地科学*, 2007, 5(3): 253-259.

[15] 芦宝良,陈克龙,曹生奎,等.青海湖典型湿地土壤重金属空间分布特征[J].*水土保持研究*, 2012, 19(3): 190-194.

[16] 李取生,楚 蓓,石 雷,等.珠江口滩涂湿地土壤重金属分布及其对围垦的影响[J].*农业环境科学学报*, 2007, 26(4): 1422-1426.

[17] 周佳丽.某铅锌冶炼厂周边土壤及植物中重金属测定与污染特性分析[D].昆明:昆明理工大学, 2012.

[18] 郝冠军,黄懿珍,赵晓艺,等.重铬酸钾外加热法测定土壤有机质的不确定度评定[J].*上海农业学报*, 2011, 27(3): 103-109.

[19] 翁添富,汪 珊,张 侃,等.孝感市孝南区土壤重金属污染的初步研究[J].*农业环境科学学报*, 2007, 26(增刊): 39-42.

[20] 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): 421-430.

[21] 李 仪,章明奎.杭州西郊茶园土壤重金属的积累特点与来源分析[J].*广东微量元素科学*, 2010, 17(2): 18-25.

[22] 刘剑锋,谷 宁,张可慧.土壤重金属空间分异及迁移研究进展与展望[J].*地理与地理信息科学*, 2012, 28(2): 99-103.

[23] 刘南威.自然地理学[M].北京:科学出版社, 2001: 471-473.