

夏尔希里地区土壤磁化率、重金属特征及相关性分析^①

赵珊珊, 王勇辉*

(新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054)

摘要: 现今环境学研究的热点问题之一是探讨土壤磁特征与重金属的耦合关系。为了探明夏尔希里地区土壤磁化率与重金属的特征, 以及它们之间的相关性, 本文选取夏尔希里地区的 67 个土壤剖面进行磁化率、重金属含量的测定, 通过统计分析, 研究表明: ①低频磁化率的特征为: 除了绿洲的土壤低频磁化率与土壤深度关系不明确外; 山地和荒漠都是随土层深度的增加, 低频磁化率值递减。此外, 新疆土壤的频率磁化率值都较低。②山地土壤类型重金属元素含量排序为 $Mn > Zn > Pb > Cr > Cu > As > Ni > Co > Hg$; 绿洲土壤类型重金属元素含量排序为 $Mn > Zn > As > Cr > Pb > Cu > Ni > Co > Hg$; 荒漠土壤类型重金属元素含量排序为 $Mn > Zn > Cr > As > Pb > Cu > Ni > Co > Hg$ 。③通过对夏尔希里地区土壤磁化率、重金属特征及相关性分析得出: 研究区土壤类型不同土层中, 山地低频磁化率与土壤深度的相关性显著, 重金属之间相关性显著。上述分析可以对区域环境的治理及保护提供科学参考。

关键词: 夏尔希里地区; 土壤; 磁化率; 重金属; 相关性

中图分类号: K903; P934

土壤磁性基本上决定于它的矿物成分, 主要是各种氧化铁的贡献^[1]。土壤磁性是土壤本身的固有性质, 它的强弱常用磁化率来表示^[2]。土壤发育程度、气候、植被和生态环境等信息都可以通过土壤磁化率来反映。土壤重金属污染情况可通过土壤磁性特征反映, 且这是土壤环境研究的重要方向之一^[3]。土壤磁化率测定的特点包括快速便捷、灵敏度高、非破坏性等, 在地学领域应用日益广泛^[4]。随着城镇化的进程加快, 土壤遭受到严重的人为活动的影响, 使土壤面临着巨大的环境压力^[5]。污染源中含有的磁性矿物与重金属元素等污染物关系密切, 使磁性测量方法在环境污染监测及环境评价研究中广泛应用^[6]。在土壤和沉积物金属污染监测中得到较好应用^[7]。土壤的一个重要组成部分是磁性矿物颗粒^[8]。土壤磁性矿物可分为自然成因和人为成因^[9]。大量研究结果表明, 遭到各种重金属污染的沉积物、土壤和道路尘埃, 其重金属质量分数与磁性参量之间存在很强的正相关关系^[10]。近年来, 国内外对土壤重金属大量研究表明土壤中某些污染物含量的有效指标是区域气候、环境状况和磁性参数, 显示了作为污染物指示的磁性参数的潜在价值^[11–14]。人类活动对土壤环境质量的影响随着我国

城镇化速度的加快而加大^[15]。因此研究开发先进、有效的土壤重金属污染监测技术十分必要^[16]。磁化率的高低与土壤中部分重金属含量密切相关^[17]。研究表明, 重金属(Pb、Zn、Cu、Mn等)与土壤磁化率值显著相关, 尤其是土壤被重金属污染后, 重金属含量与磁性参量有很强的相关性; 现代工业排放的废弃物使土壤污染, 磁化率值升高^[18–20]。这些研究结论对土壤重金属含量污染评价意义深刻^[21–22]。基于上述研究结论, 本文拟对夏尔希里地区 3 种类型土壤的磁化率与重金属含量进行测试, 并对其相关性进行分析, 用以了解夏尔希里地区的环境磁性特征, 探讨磁化率与重金属元素的相关关系。据查询, 对于该区域的土壤磁化率与重金属相关性研究还有限, 因此, 在此区域开展相关研究, 具有极高的科学价值, 因为其研究结果对于其他区域土壤的研究具有很好的参考价值, 研究结果可为地区环境治理及保护提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

夏尔希里自然保护区地理位置为 $81^{\circ}43'09'' \sim$

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41261055)资助。

* 通讯作者(wyhsd_3011@163.com)

作者简介: 赵珊珊(1994—), 女, 四川阆中人, 硕士研究生, 主要研究方向为干旱区资源利用与环境演变。E-mail: shiqudeshi@126.com

82°33'18"E, 45°07'43" ~ 45°23'15"N, 地处新疆维吾尔自治区博尔塔拉蒙古自治州境内的阿拉套山北麓, 是国家级自然保护区, 北以阿拉套山山脊为界与哈萨克斯坦共和国接壤。夏尔希里自然保护区新北区, 原属中、哈两国争议区, 直到 20 世纪末夏尔希里才完整地回归中国版图。由于长期属于军事争议区, 这里鲜有人员活动, 所以自然资源保存完好。夏尔希里由保尔德河区(西段)、江巴斯区(东段)和联接两个区域的边境廊道(中段) 3 段组成; 属于温带大陆性气候, 地貌类型有戈壁荒漠、山地森林、高山草甸、雪山等多种。

1.2 土壤样品的采集

采样时间为 2013、2014 年 8 月, 地点位于夏尔希里地区, 分别在山地、绿洲、荒漠 3 类地形按照随机取样法布点 67 个, 山地采集点分为 4 层, 分别为 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80 cm, 绿洲采集点分为 5 层, 分别为 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80、80 ~ 100 cm, 荒漠采集点分为 3 层, 分别为 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60 cm, 共采集土壤样品 317 个(采样点见图 1)。

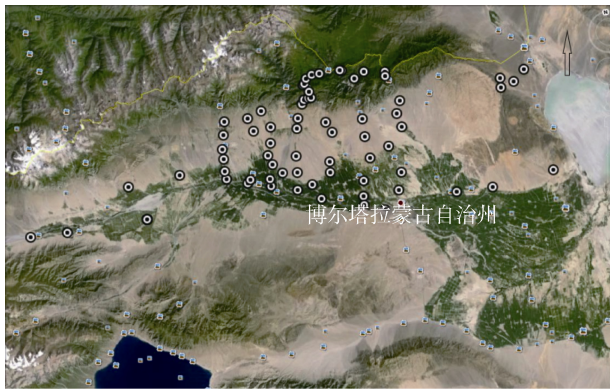


图 1 采样点分布图
Fig. 1 Distribution of the soil sampling sites

1.3 样品分析和方法

磁化率测定: 将所选取样品带回实验室, 自然风干后, 去除小石子、草根等外源物质, 研磨成粉末状, 称取一定质量装入 100 cm³ 的磁学专用样品盒内压实密封, 使用 Bartington MS₂ 磁化率仪测量低频磁化率(X_{lf} , 470 HZ)和高频磁化率(X_{hf} , 4 700 HZ)。根据 X_{lf} 和 X_{hf} , 计算样品中的频率磁化率(X_{fd})。三者的关系为: $X_{fd}(\%) = (X_{lf} - X_{hf}) / X_{lf} \times 100\%$ 。由于低频、高频磁化率一般高度相关, 因此夏尔希里地区土壤样品中重金属含量与磁化率的关系主要通过低频磁化率(X_{lf})与频率磁化率(X_{fd})进行分析。

重金属元素测定: 土壤样品中重金属(Co、Cr、Cu、Mn、Pb、Ni、Zn)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; As 和 Hg 采用盐酸-硝酸-氢氟酸微波消解体系, 消解后回流赶酸, 原子荧光法(AFS)测定。此外, 本文主要运用了传统地球学统计方法统计了磁化率和重金属的平均值、变异系数、相关性等描述性统计, 利用统计软件 SPSS17.0 和 Excel 进行数据分析, 部分图形利用 ArcGIS10 制作。

2 结果与分析

2.1 夏尔希里地区土壤磁化率特征分析

表 1 反映的是夏尔希里地区山地地貌类型的土壤低频磁化率和频率磁化率统计特征。低频磁化率均值分析结果显示: 随着土层深度的增加, 低频磁化率值递减。当变异系数 $CV < 10\%$ 时, 表现为弱变异; 当 CV 介于 $10\% \sim 100\%$ 时, 表现为中等变异; 当 $CV > 100\%$ 时表现为强变异。因此, 夏尔希里地区土壤低频磁化率不同土层的变异结果显示: 中等变异的土层包括 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80 cm, 仅 80 ~ 100 cm 土层为弱变异性。

表 1 山地低频磁化率和频率磁化率特征分析
Table 1 Characteristics of low-frequency and frequency magnetic susceptibility of the mountainous region

参数	土层(cm)	平均值	最大值	最小值	中间值	标准差	变异系数(%)
低频磁化率 X_{lf} ($10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$)	0 ~ 20	38	136	3	35	23	61
	20 ~ 40	31	89	2	29	20	65
	40 ~ 60	23	40	2	22	12	52
	60 ~ 80	22	43	4	23	11	50
	80 ~ 100	20	21	18	20	2	10
频率磁化率 $X_{fd}(\%)$	0 ~ 20	5	46	-8	5	6	120
	20 ~ 40	4	9	-2	4	2	50
	40 ~ 60	3	6	-2	2	2	67
	60 ~ 80	3	11	-6	2	4	133
	80 ~ 100	2	2	1	2	1	50

频率磁化率是用来测定土壤中超顺磁性颗粒的含量，一般当物质中 X_{fd} 值为 5% 左右时，就说明超顺磁物质较多，当 $X_{fd}>10\%$ 时，已相当可观^[9]。通过测试夏尔希里地区山地土壤的频率磁化率均值可以看出：0~20 cm 土层的超顺磁性颗粒较多，为 5%；其他土层均未超过 5%，所含超顺磁性颗粒比较少。变异系数分析结果显示 20~40、40~60、80~100 cm 均为中等变异，0~20 和 60~80 cm 土层均属于强变异。

表 2 反映的是夏尔希里地区绿洲地貌类型土壤低频磁化率和频率磁化率统计特征。低频磁化率均值分析结果显示：低频磁化率值先减小，然后增大，再

减小；夏尔希里地区绿洲土壤低频磁化率不同土层的变异结果显示：所有土层均为中等变异。

通过测试夏尔希里地区绿洲土壤的频率磁化率均值可以看出：20~40、40~60、80~100 cm 土层的超顺磁性颗粒较多，超过了 5%；其他土层均未超过 5%，所含超顺磁性颗粒比较少。变异系数分析结果显示 60~80 cm 为中等变异，其他土层均属于强变异。

表 3 反映的是夏尔希里地区荒漠地貌类型土壤低频磁化率和频率磁化率统计特征。低频磁化率均值分析结果显示：随着土壤层次的增加，低频磁化率递减；夏尔希里地区荒漠土壤低频磁化率不同土层的变异结果显示：所有土层均为中等变异。

表 2 绿洲低频磁化率和频率磁化率特征分析
Table 2 Characteristics of low-frequency and frequency magnetic susceptibility of the oasis

参数	土层(cm)	平均值	最大值	最小值	中间值	标准差	变异系数(%)
低频磁化率 X_{lf} ($10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$)	0~20	23	64	4	24	12	52
	20~40	22	69	3	19	13	59
	40~60	26	88	3	21	20	77
	60~80	45	127	21	33	31	69
	80~100	42	124	19	37	28	67
频率磁化率 $X_{fd}(\%)$	0~20	3	0.24	-8	2	4	133
	20~40	5	0.32	-6	4	7	140
	40~60	5	0.45	-8	2	10	200
	60~80	2	0.04	0.1	2	1	50
	80~100	6	0.51	0.1	2	14	233

表 3 荒漠低频磁化率和频率磁化率特征分析
Table 3 Characteristics of low-frequency and frequency magnetic susceptibility of the desert

参数	土层(cm)	平均值	最大值	最小值	中间值	标准差	变异系数(%)
低频磁化率 X_{lf} ($10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$)	0~20	44	167	8	37	31	70
	20~40	43	233	9	40	37	86
	40~60	27	37	15	27	10	37
	60~80	27	31	22	27	6	22
频率磁化率 $X_{fd}(\%)$	0~20	4	56	-6	2	10	250
	20~40	2	10	-1	1	2	100
	40~60	1	2	0	1	1	100
	60~80	1	2	1	1	1	100

通过测试夏尔希里地区荒漠土壤的频率磁化率均值可以看出：所有土层均未超过 5%，所含超顺磁性颗粒比较少。变异系数分析结果显示 0~20 cm 土层为强变异，其他土层均属于中等变异。

根据以上夏尔希里地区 3 种地貌类型土壤低频磁化率和频率磁化率统计特征可以看出，新疆土壤的频率磁化率值都较低，造成上述可能的原因主要是：新疆气候干冷，成土过程比较弱，铁的氧化物含量就会相对减少，铁磁性矿物也相对较少。因此，土壤一

般属于弱磁性，频率磁化率一般很低。

此外，夏尔希里地区 3 种地貌类型的土壤基本上全属于中等变异，只有山地土壤的 80~100 cm 土层属于弱变异。低频磁化率的特征为：除了绿洲的土壤低频磁化率为先减少，然后增大，最后又减少外；山地和荒漠都是随土层深度的增加，低频磁化率值递减。造成上述可能的原因主要是：夏尔希里长期属于军事争议区，很少有人活动，特别是山地与荒漠土壤受人为因素干扰比绿洲要少，没有影响土壤特性。

2.2 夏尔希里地区土壤重金属特征分析

表 4 为夏尔希里地区山地土壤重金属特征分布,结果表明 :山地土壤类型重金属元素含量高低次序为 Mn>Zn>Pb>Cr>Cu>As>Ni>Co>Hg, 其中 Mn 元素含量最高, Hg 元素含量最低。9 种元素的垂直分布规律为 :Cr、Co 元素重金属含量基本随着土壤深度的增

加而递减;Cu 元素变化不明显;Pb、Zn、Hg 元素表现出 20~40 cm 的含量高于 0~20 cm 的规律 ;其他几种元素均表现出 20~40 cm 的含量低于 0~20 cm 的规律。根据变异系数的划分,夏尔希里地区山地土壤重金属的变异规律为 :除了 Hg 为强变异性,其他重金属元素都为中等变异。

表 4 山地土壤重金属特征分布(mg/kg)
Table 4 Distribution of soil heavy metal of the mountainous region

重金属	土层(cm)	样本数	均值	最大值	最小值	中值	标准差	变异系数(%)
Co	0~20	33	9.70	13.75	3.75	10.00	2.62	27
	20~40	16	8.75	13.75	5.00	9.38	3.10	35
	40~60	13	8.65	12.50	5.00	8.75	2.19	25
	60~80	9	8.33	11.25	6.25	7.50	1.77	21
Cr	0~20	33	74.55	93.75	46.25	76.25	13.20	18
	20~40	16	69.45	91.25	37.5	71.88	15.01	20
	40~60	13	71.54	93.75	28.75	71.25	16.32	23
	60~80	9	69.17	88.75	53.75	67.50	10.92	16
Cu	0~20	33	62.46	115.00	35.00	60.00	16.75	27
	20~40	16	69.30	153.75	43.75	59.38	27.92	40
	40~60	13	58.75	101.25	35.00	58.75	17.12	29
	60~80	9	62.92	73.75	51.25	62.50	6.37	10
Mn	0~20	33	697.35	1123.75	331.25	705.00	185.77	27
	20~40	16	623.75	902.50	388.75	613.75	144.68	23
	40~60	13	636.06	823.75	477.50	570.00	135.70	21
	60~80	9	592.78	817.50	518.75	556.25	92.70	16
Ni	0~20	33	27.42	38.75	8.75	28.75	6.43	23
	20~40	16	25.00	37.50	7.50	26.88	8.34	33
	40~60	13	27.69	40.00	7.50	27.50	9.37	34
	60~80	9	24.72	31.25	15.00	25.00	5.15	21
Pb	0~20	33	68.20	150.00	33.75	62.50	27.10	40
	20~40	16	68.83	105.00	27.50	65.00	21.56	31
	40~60	13	66.15	117.50	41.25	60.00	22.06	33
	60~80	9	72.36	146.25	47.50	65.00	29.34	41
Zn	0~20	33	121.89	283.75	53.75	105.00	54.71	45
	20~40	16	148.13	521.25	63.75	112.50	108.14	73
	40~60	13	99.42	166.25	68.75	91.25	27.29	27
	60~80	9	113.19	170.00	70.00	127.50	34.72	31
Hg	0~20	33	0.54	1.84	0	0.33	0.48	89
	20~40	16	1.08	4.25	0.16	0.52	1.31	121
	40~60	13	0.59	1.70	0.07	0.40	0.49	82
	60~80	9	0.54	1.75	0.09	0.51	0.50	91
As	0~20	33	60.54	118.25	21.24	49.22	27.76	46
	20~40	16	60.20	117.88	22.59	49.39	29.50	49
	40~60	13	53.13	112.06	22.97	45.08	26.86	51
	60~80	9	48.55	84.78	24.11	45.76	20.19	42

表 5 为夏尔希里地区绿洲土壤环境背景值含量统计,结果显示 :绿洲土壤类型重金属元素含量高低

次序为 Mn>Zn>As>Cr>Pb>Cu>Ni>Co>Hg, Mn 元素含量最高, Hg 元素含量最低。9 种元素的垂直分布

表 5 绿洲土壤重金属特征分布(mg/kg)
Table 5 Distribution of soil heavy metal of the oasis

指标	土层(cm)	样本数	均值	最大值	最小值	中值	标准差	变异系数(%)
Co	0 ~ 20	49	13.47	19.6.0	6.25	15.34	4.33	32
	20 ~ 40	34	13.27	20.24	6.25	13.75	4.34	33
	40 ~ 60	22	13.57	19.75	6.25	14.33	3.97	29
	60 ~ 80	12	16.61	19.81	13.09	16.71	1.89	11
	80 ~ 100	12	15.71	19.11	12.54	15.62	2.14	14
Cr	0 ~ 20	49	65.80	87.50	42.06	67.90	10.92	17
	20 ~ 40	34	71.83	95.00	44.80	72.50	12.11	17
	40 ~ 60	22	66.37	90.00	39.04	71.25	13.53	20
	60 ~ 80	12	60.41	72.14	37.39	63.13	10.40	17
	80 ~ 100	12	56.26	70.85	33.75	57.68	12.36	22
Cu	0 ~ 20	49	45.51	106.25	28.58	34.43	18.02	40
	20 ~ 40	34	49.95	82.50	24.75	48.13	16.56	33
	40 ~ 60	22	49.62	113.75	21.93	41.34	24.24	49
	60 ~ 80	12	32.67	52.40	22.11	29.89	8.64	26
	80 ~ 100	12	27.71	41.30	17.55	27.45	5.95	21
Mn	0 ~ 20	49	700.85	877.88	353.75	731.13	120.76	17
	20 ~ 40	34	685.84	920.00	418.75	716.25	137.80	20
	40 ~ 60	22	665.63	926.50	326.25	677.38	135.67	20
	60 ~ 80	12	730.96	991.75	577.00	720.69	111.63	15
	80 ~ 100	12	685.53	844.13	566.50	686.25	92.95	14
Ni	0 ~ 20	49	26.86	55.00	18.75	26.25	5.42	20
	20 ~ 40	34	28.39	46.25	21.25	26.96	5.62	20
	40 ~ 60	22	25.95	38.75	17.50	24.94	5.77	22
	60 ~ 80	12	24.18	30.66	17.48	25.08	4.50	19
	80 ~ 100	12	22.03	29.69	13.85	22.2	5.76	26
Pb	0 ~ 20	49	47.17	72.50	23.75	43.75	12.39	26
	20 ~ 40	34	50.83	90.00	23.75	50.00	14.15	28
	40 ~ 60	22	47.94	70.00	31.66	45.86	11.04	23
	60 ~ 80	12	42.46	57.75	29.93	44.41	9.23	22
	80 ~ 100	12	35.76	49.66	24.93	36.83	7.27	20
Zn	0 ~ 20	49	112.32	187.25	62.50	107.50	27.24	24
	20 ~ 40	34	114.59	190.63	66.25	112.71	28.64	25
	40 ~ 60	22	116.87	200.13	83.75	100.78	31.81	27
	60 ~ 80	12	113.06	232.75	81.19	98.42	41.36	37
	80 ~ 100	12	104.43	235.00	68.14	96.54	43.18	41
Hg	0 ~ 20	49	0.29	2.75	0	0.15	0.47	163
	20 ~ 40	34	0.35	1.75	0	0.20	0.38	108
	40 ~ 60	22	0.50	3.69	0.09	0.18	0.86	169
	60 ~ 80	12	0.15	0.26	0.08	0.14	0.06	36
	80 ~ 100	12	0.13	0.18	0.10	0.13	0.03	20
As	0 ~ 20	49	79.33	136.43	18.05	90.61	36.29	46
	20 ~ 40	34	73.25	165.68	20.36	62.16	38.85	53
	40 ~ 60	22	79.90	183.71	26.04	83.84	42.34	53
	60 ~ 80	12	111.66	182.48	82.92	107.93	27.15	24
	80 ~ 100	12	103.45	145.04	75.54	104.67	17.94	17

规律为：Cr、Cu、Ni、Pb 元素表现为先随深度增加而加深，在 20~40 cm 达到顶峰，然后随深度增加而降低；Zn、Hg 元素含量随土层深度加深而增加，在 40~60 cm 时含量达到顶峰，然后又随深度加深而含量减少；其他几种元素均表现出 20~40 cm 的含量低于 0~20 cm 的规律。根据变异系数的划分，夏尔希里地区绿洲土壤重金属的变异规律为：除了 Hg 为强变异性，其他重金属元素都为中等变异。

表 6 为夏尔希里地区荒漠土壤重金属特征分布，结果表明：荒漠土壤类型重金属元素含量高低次序为 Mn>Zn>Cr>As>Pb>Cu>Ni>Co>Hg，其中 Mn 元素含量最高，Hg 元素含量最低。9 种元素的垂直分布规律为：Co、Mn、Ni 元素表现为重金属含量

随着土壤深度的增加而递减；Cr、Pb、Hg 元素含量随土层深度的增加而递增；As 元素含量表现出 20~40 cm 的含量高于 0~20 cm 的规律；其他几种元素均表现出 20~40 cm 的含量低于 0~20 cm 的规律。根据变异系数的划分，夏尔希里地区荒漠土壤重金属的变异规律为：除了 Hg 为强变异性，其他重金属元素均为弱或中等变异。夏尔希里地区 3 种土壤类型环境背景值含量统计结果表明：Hg 为强变异性，其他元素均为弱或中等变异。造成夏尔希里地区土壤重金属上述统计特点的成因和机理比较复杂，既有内在因素，也有外在因素。内在因素主要是由于夏尔希里地区长期特殊的地理位置和历史背景所决定的。

表 6 荒漠土壤重金属特征分布(mg/kg)
Table 6 Distribution of soil heavy metal of the desert

指标	土层(cm)	样本数	均值	最大值	最小值	中值	标准差	变异系数 (%)
Co	0~20	78	15.98	21.60	6.25	17.05	3.31	21
	20~40	31	15.92	22.88	8.75	16.00	3.03	19
	40~60	2	8.75	8.75	8.75	8.75	0	0
Cr	0~20	78	61.24	78.75	40.13	64.21	9.76	16
	20~40	31	62.28	78.59	34.28	64.04	11.03	18
	40~60	2	71.88	73.75	70.00	71.88	2.65	4
Cu	0~20	78	35.47	78.75	17.91	31.17	31.17	88
	20~40	31	33.21	80.00	19.45	30.40	13.07	39
	40~60	2	51.88	58.75	45.00	51.88	9.72	19
Mn	0~20	78	746.78	1 148.75	519.13	724.38	121.78	16
	20~40	31	687.97	1 083.75	487.00	660.00	145.37	21
	40~60	2	633.75	646.25	621.25	633.75	17.68	3
Ni	0~20	78	25.37	39.10	12.41	25.96	4.30	17
	20~40	31	24.82	31.43	15.05	25.33	4.11	17
	40~60	2	23.13	23.75	22.50	23.13	0.88	4
Pb	0~20	78	42.41	72.50	21.35	40.00	9.99	24
	20~40	31	43.68	68.75	23.38	40.99	10.92	25
	40~60	2	55.00	63.75	46.25	55.00	12.37	22
Zn	0~20	78	107.69	147.50	67.85	105.39	16.69	16
	20~40	31	100.06	147.50	63.78	101.68	17.98	18
	40~60	2	109.38	138.75	80.00	109.38	41.54	38
Hg	0~20	78	0.25	1.76	0.07	0.16	0.31	122
	20~40	31	0.38	4.47	0.08	0.16	0.82	213
	40~60	2	0.59	0.60	0.58	0.59	0.01	2
As	0~20	78	85.44	183.54	36.57	87.28	24.69	29
	20~40	31	95.11	144.47	19.64	99.87	28.26	30
	40~60	2	28.59	35.40	21.78	28.59	9.63	34

2.3 夏尔希里地区土壤磁化率与重金属含量的相关性分析

表 7 反映的是夏尔希里地区山地土壤低频磁化

率、频率磁化率与重金属含量的相关性特征。结果显示：在 $P<0.05$ 水平上，低频磁化率、As 与土壤深度呈显著负相关；Co、Cr 与 Mn，Zn 与 Cu 显著正相关。

表 7 山地低频磁化率、频率磁化率与重金属含量的相关性分析
Table 7 Correlation analysis of low frequency magnetic susceptibility, frequency magnetic susceptibility and heavy metal contents of the mountainous region

	土壤深度	低频磁化率	频率磁化率	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	Hg	As
土壤深度	1											
低频磁化率	-0.973*	1										
频率磁化率	-0.944	—	1									
Co	-0.922	0.927	0.932	1								
Cr	-0.730	0.694	0.703	0.913	1							
Cu	-0.270	0.350	0.330	-0.027	-0.431	1						
Mn	-0.887	0.848	0.841	0.977*	0.963*	-0.190	1					
Ni	-0.447	0.301	0.271	0.589	0.832	-0.703	0.746	1				
Pb	0.490	-0.278	-0.192	-0.402	-0.529	0.335	-0.564	-0.824	1			
Zn	-0.471	0.534	0.508	0.177	-0.235	0.977*	0.022	-0.541	0.187	1		
Hg	-0.241	0.201	0.129	-0.147	-0.467	0.863	-0.217	-0.469	-0.082	0.852	1	
As	-0.956*	0.915	0.866	0.768	0.507	0.489	0.721	0.266	-0.475	0.664	0.515	1

注：* 表示相关性达到 $P<0.05$ 显著水平，** 表示相关性达到 $P<0.01$ 显著水平，下表同。

表 8 反映的是夏尔希里地区绿洲土壤低频磁化率、频率磁化率与重金属含量的相关性特征。结果显示：在 $P<0.01$ 水平上，Co、As 与低频磁化率，Co 与 As，Cr 与 Ni、Pb，Ni 与 Pb 均呈极显著正相关。在 $P<0.05$ 水平上，Cr 与低频磁化率、As 显著负相关；Cu 与低频磁化率、Co、As 显著负相关，与 Cr、Ni、Pb、Hg 显著正相关；Ni 与土壤深度、低频磁化率显

著负相关；Pb 与 Zn 显著正相关。

表 9 反映的是夏尔希里地区荒漠土壤低频磁化率、频率磁化率与重金属含量的相关性特征。结果显示：在 $P<0.01$ 水平上，Pb 与 Cr 极显著正相关。在 $P<0.05$ 水平上，Cr 与低频磁化率、Mn 与土壤深度、Pb 与低频磁化率、As 与 Cu 显著负相关；Co 与低频磁化率显著正相关。

表 8 绿洲低频磁化率、频率磁化率与重金属含量的相关性分析
Table 8 Correlation analysis of low frequency magnetic susceptibility, frequency magnetic susceptibility and heavy metal contents of the oasis

	土壤深度	低频磁化率	频率磁化率	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	Hg	As
土壤深度	1											
低频磁化率	0.867	1										
频率磁化率	0.289	—	1									
Co	0.809	0.991**	-0.294	1								
Cr	-0.807	-0.893*	-0.001	-0.838	1							
Cu	-0.815	-0.942*	0.045	-0.914*	0.944*	1						
Mn	0.094	0.556	-0.84	0.654	-0.32	-0.484	1					
Ni	-0.892*	-0.889*	-0.142	-0.822	0.982**	0.922*	-0.195	1				
Pb	-0.836	-0.859	-0.171	-0.795	0.974**	0.957*	-0.231	0.975**	1			
Zn	-0.581	-0.586	-0.335	-0.521	0.773	0.82	-0.117	0.756	0.879*	1		
Hg	-0.54	-0.798	0.236	-0.813	0.745	0.903*	-0.695	0.673	0.779	0.784	1	
As	0.81	0.994**	-0.289	0.995**	-0.880*	-0.928*	0.631	-0.858	-0.827	-0.547	-0.808	1

3 结论

1) 夏尔希里地区 3 种地貌类型的土壤基本上全属于中等变异，只有山地土壤的 80 ~ 100 cm 土层属于弱变异。低频磁化率的特征为：除了绿洲的土壤低频磁化率先减少，后增大，再减少以外；山地和荒漠都是随土层深度的增加，低频磁化率值递减。此外，

新疆土壤的频率磁化率值都较低。

2) 山地土壤类型重金属元素含量排序为 $Mn>Zn>Pb>Cr>Cu>As>Ni>Co>Hg$ ；绿洲土壤类型重金属元素含量排序为 $Mn>Zn>As>Cr>Pb>Cu>Ni>Co>Hg$ ；荒漠土壤类型重金属元素含量排序为 $Mn>Zn>Cr>As>Pb>Cu>Ni>Co>Hg$ 。夏尔希里地区 3 种地貌类型的土壤中的重金属，除了 Hg 为强变异性，其他金属元素均为弱或中等变异。

表 9 荒漠低频磁化率、频率磁化率与重金属含量的相关性分析

Table 9 Correlation analysis of low frequency magnetic susceptibility, frequency magnetic susceptibility and heavy metal contents of the desert

	土壤深度	低频磁化率	频率磁化率	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	Hg	As
土壤深度	1											
低频磁化率	-0.877	1										
频率磁化率	-0.982	-	1									
Co	-0.87	1.000*	0.761	1								
Cr	0.907	-0.998*	-0.811	-0.997	1							
Cu	0.805	-0.991	-0.679	-0.993	0.98	1						
Mn	-1.000*	0.866	0.986	0.858	-0.897	-0.791	1					
Ni	-0.959	0.977	0.889	0.974	-0.989	-0.94	0.953	1				
Pb	0.908	-0.998*	-0.813	-0.996	1.000**	0.979	-0.898	-0.989	1			
Zn	0.17	-0.622	0.019	-0.635	0.569	0.721	-0.147	-0.441	0.567	1		
Hg	0.991	-0.934	-0.948	-0.928	0.955	0.878	-0.987	-0.989	0.956	0.301	1	
As	-0.791	0.988	0.661	0.99	-0.975	-1.000*	0.776	0.931	-0.974	-0.738	-0.866	1

3) 夏尔希里地区山地、绿洲、荒漠土壤的低频磁化率和频率磁化率与重金属不同土层的相关性结果显示：山地土壤中，在 $P<0.05$ 水平上，低频磁化率、As 与土壤深度呈显著负相关；Co、Cr 与 Mn，Zn 与 Cu 显著正相关。绿洲和荒漠土壤中，在 $P<0.01$ 水平上，Pb 与 Cr 极显著正相关；在 $P<0.05$ 水平上，Cr 与低频磁化率显著负相关，As 与 Cu 显著负相关。

参考文献：

[1] 袁大刚, 张甘霖. 城市道路区土壤的磁学性质及其发生学意义[J]. 土壤学报, 2008, 40(2): 216-221

[2] 依艳丽, 谷微微, 张大庚, 等. 葫芦岛市土壤磁化率与重金属元素分布规律及其相关性研究[J]. 土壤, 2008, 40(5): 806-811

[3] 陈秀端, 卢新卫, 杨光. 城市表层土壤磁化率与重金属含量分布的相关性研究[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 1 086-1 093

[4] 李鑫, 魏东岚. 浅述土壤磁化率的研究领域及其进展[J]. 云南地理环境研究, 2012, 24(6): 97-102

[5] 陈艳瑛, 李凤全, 王志刚, 等. 金华市各功能区表层土壤磁化率与重金属的相关性分析[J]. 广东微量元素科学, 2011, 18(12): 43-49

[6] 闫倩, 戴霜, 刘海娇, 等. 兰州某钢厂附近土壤磁化率特征及其环境意义[J]. 中国环境科学, 2011, 31(10): 1 731-1 737

[7] 陈景辉, 卢新卫. 西安城市路边土壤磁化率特征及其环境意义[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2011, 39(5): 76-82

[8] 方芳, 李晓燕. 磁化率对土壤重金属污染的指示意义[J]. 环境监测管理与技术, 2011, 23(增刊): 78-83

[9] 张果, 胡雪峰, 吴晓红, 等. 上海城市土壤磁化率的垂直分布特征及环境指示意义[J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 429-433

[10] 夏敦胜, 王博, 张英, 等. 乌鲁木齐城市表土重金属污染的环境磁学记录[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2013, 49(2): 173-180

[11] 穆叶赛尔·土地, 吉力力·阿不都外力, 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

[12] 邓少福, 杨太保, 曾彪, 等. 新疆博乐黄土磁化率特征及影响因素[J]. 土壤通报, 2012, 43(5): 1 054-1 059

[13] 王博, 夏敦胜, 贾佳, 等. 兰州城市表层土壤重金属污染的环境磁学记录[J]. 科学通报, 2012, 57(32): 3 078-3 089

[14] 闫倩, 戴霜, 刘海娇, 等. 兰州某钢厂附近土壤磁化率特征及其环境意义[J]. 中国环境科学, 2011, 31(10): 1 732-1 737

[15] 李珊, 胡雪峰, 杜艳, 等. 上海嘉定表土磁性强度的空间分异及环境指示意义[J]. 土壤学报, 2012, 49(1): 9-17

[16] 龚海明, 马瑞峻, 叶云, 等. 农田土壤重金属污染监测技术发展趋势[J]. 中国农学通报, 2013, 29(2): 140-147

[17] 刘雯, 卢新卫, 陈灿灿, 等. 电厂周围土壤磁化率对重金属污染的指示意义[J]. 土壤通报, 2013, 44(4): 993-997

[18] 曾丽婷, 陈永康, 王学松, 等. 城市表层土壤重金属与磁化率的多尺度空间变异分析[J]. 环境科学学报, 2014, 34(4): 987-995

[19] 刘德新, 马建华, 孙艳丽, 等. 开封市城市土壤磁化率空间分布及对重金属污染的指示意义[J]. 土壤学报, 2014, 51(6): 1 242-1 250

[20] 李勇. 安徽凤阳水泥工业内污染土壤剖面的磁学研究[J]. 土壤通报, 2014, 45(5): 1 089-1 093

[21] 穆叶赛尔·土地, 吉力力·阿不都外力, 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

[22] 田小松, 张洪, 张进忠. 重庆市典型降雨径流中颗粒物粒径与重金属污染输出特征研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(11): 6-11

The Soil Magnetic Susceptibility, Heavy Metal Characteristics and Correlation Analysis in the Xiaerxili

ZHAO Shanshan, WANG Yonghui*

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

Abstract: The coupling relationship between soil magnetic characteristics and heavy metal is one of the hot issues in the study of environmental science. In order to ascertain the soil magnetic susceptibility, heavy metal characteristics and their correlation, 67 soil profiles in the Xiaerxili area was selected to determine the magnetic susceptibility and heavy metal contents. The results showed that: 1) Low frequency magnetic susceptibility features: the relationship between the low frequency magnetic susceptibility and the soil depth of the oasis was uncertainly; while the low frequency magnetic susceptibility value was decreased both in mountainous region and desert with the increases of the soil depth. In addition, the soil frequency magnetic susceptibility values were low in Xinjiang. 2) The order of heavy metal elements contents in mountainous region was as follow: $Mn > Zn > Pb > Cr > Cu > As > Ni > Co > Hg$; which in oasis was: $Mn > Zn > As > Cr > Pb > Cu > Ni > Co > Hg$; and in desert was: $Mn > Zn > Cr > As > Pb > Cu > Ni > Co > Hg$. 3) By the analysis of soil magnetization, characteristics of heavy metals and their correlation in the Xiaerxili area, it was concluded that: in different types of soils in the study area, low frequency magnetic susceptibility and soil depth was significantly correlated in mountainous region, and significant correlation among heavy metals. Through the above analysis, it could provide a scientific reference for the management and protection of the regional environment.

Key words: Xiaerxili; Soil; Magnetic susceptibility; Heavy metal; Correlation