

# 新疆喀纳斯景区表层土壤磁学特征及环境意义<sup>①</sup>

韩文堂<sup>1,2</sup>, 陈学刚<sup>1,2\*</sup>

(1 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054; 2 新疆维吾尔自治区重点实验室,  
新疆干旱区湖泊环境与资源实验室, 乌鲁木齐 830054)

**摘要:**为探究环境磁学方法在景区土壤污染监测中的可行性,以新疆5A级景区喀纳斯为研究区域,采集表层土壤样品72个,并对其进行系统的环境磁学分析。结果表明:喀纳斯景区土壤磁性矿物平均含量较高,磁学矿物主要由亚铁磁性矿物构成,并含有少量的不完全反铁磁性矿物。磁晶颗粒主要为粗颗粒多畴,同时存在较少的超顺磁颗粒。磁参数空间分布表明,磁性矿物含量参数( $\chi_{LF}$ 、SIRM、SOFT、HIRM)在湖口旅游区表现出高值,新村、老村和旅游接待地呈现相对低值;其他参数( $\chi_{FD\%}$ 、S-ratio、SIRM/ $\chi_{LF}$ )空间分布规律与含量磁性参数基本呈相反趋势;研究区的磁性高值点分布与景区人类活动密集区、建筑物及道路的分布具有一致性;湖口旅游区较高的磁性值主要与较强的自然成土作用有关,其他区域的磁性高值点主要受旅游活动的影响。因此,借助土壤磁学方法能够有效区分和圈定景区土壤人为污染范围,为景区土壤污染防治和旅游规划提供参考依据。

**关键词:**表层土壤;磁学特征;土壤污染;旅游活动;喀纳斯景区

中图分类号:P934; X53 文献标识码:A

旅游产业的兴起对生态环境的影响是不可避免的,旅游活动产生的环境污染物对景区土壤、植被、水体、大气等环境破坏日趋严重。景区土壤是景区环境的主要载体,也是景区环境污染物的主要“蓄积库”。景区土壤作为景区生态系统的重要组成部分,其优劣状况对土壤环境及旅游地生态系统的健康与稳定有重要影响<sup>[1]</sup>。因此,研究景区土壤的污染程度,是评价景区环境质量的一个重要方面。早在20世纪30年代就有学者开始关注旅游活动对土壤环境的影响<sup>[2]</sup>,迄今为止,大量研究表明人类旅游活动会产生景区土壤有机质含量减少、含水量下降、容重增加、植被覆盖度降低、pH升高、养分含量减少等土壤环境问题<sup>[3-8]</sup>。这些研究所用的指标虽然能够反映土壤环境的破坏情况,但无法指示土壤重金属污染程度,而土壤一旦受到重金属污染,修复治理十分困难。因此,土壤重金属监测已成为该领域研究热点。

土壤磁学因其测量简单、快捷、经济、能现场作业且无污染的优点,已成为土壤污染研究的新方法。20世纪50年代,Borgne首次将地球物理学中的磁测技术引入土壤学,通过土壤磁学特征研究,阐明在成

土过程中土壤磁学性质变化的规律,可指示土壤重金属污染的程度,圈定污染范围,判别不同的污染源<sup>[9]</sup>。一些国外学者采用磁测方法对城市土壤环境污染进行了监测和评价。Kapicka等<sup>[10]</sup>利用磁化率来监测城市火电厂附近表土污染的空间分布和圈定工业活动引起的污染区。Petrovsky等<sup>[11]</sup>利用磁测技术研究城市不同环境中的污染程度,认为被污染土壤的磁化率值与重金属元素的含量存在较强的相关性。国内学者郑妍和张世红<sup>[12]</sup>、卢升高和白世强<sup>[13]</sup>及刘德新等<sup>[14]</sup>首先分别对北京、杭州、开封等城市进行了系统的环境磁学测定,发现城市土壤磁性显著增强,土壤磁化率空间分布特征及对重金属污染具有指示意义。之后,各地学者分别对上海<sup>[15]</sup>、徐州<sup>[16]</sup>、西安<sup>[17]</sup>、武汉<sup>[18]</sup>、乌鲁木齐<sup>[19]</sup>等城市和自然保护区<sup>[20]</sup>土壤磁学特征进行了探讨,大量研究表明土壤磁学性质对污染物具有响应和指示意义,能够表征土壤环境的变化,这使得应用磁学方法来监测旅游活动产生的土壤环境污染成为可能。

目前关于土壤磁学特征研究多集中在城市,而有关旅游景区土壤磁学特征的研究鲜有报道。因此,本

基金项目:国家自然科学基金项目(41461033)资助。

\* 通讯作者(caschxg@126.com)

作者简介:韩文堂(1989—),男,甘肃武威人,硕士研究生,主要从事旅游开发与规划研究。E-mail: 576810609@qq.com

文以西北干旱区生态环境较脆弱的新疆喀纳斯景区表层土壤为研究对象,采用磁学方法系统分析了景区表层土壤的磁性矿物含量、组成、粒度等磁学特征,研究旅游活动干扰下土壤磁学特征的差异及空间分布,并初步探讨了土壤磁学特征的环境意义,以期为景区进一步合理规划旅游活动、开展土壤污染防治提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

喀纳斯景区( $48^{\circ}35' \sim 49^{\circ}11' N$ ,  $86^{\circ}54' \sim 87^{\circ}54' E$ )地处新疆维吾尔自治区布尔津县境内,海拔在 $1064 \sim 3147 m$ ,东西长约 $74 km$ ,南北宽约 $66 km$ ,总面积 $25 \text{ 万 } \text{ hm}^2$ 。该区属温带大陆性气候,年均降水量 $1065.4 \text{ mm}$ ,蒸发量约 $1097 \text{ mm}$ ,两者大致持平,年平均气温 $-0.2^{\circ}\text{C}$ ,全年无夏季,冬季长达7个月。土壤类型为草甸黑钙土。喀纳斯素有“人间净土”的美誉,毗邻俄、蒙、哈三国,具有“一地连四国”的空间组合,具备建立世界级旅游胜地的资源和区位优

势,目前是新疆旅游资源最集中、品味最高、发展空间和潜力最大的国家5A级景区和地质公园<sup>[21]</sup>,2011年被授予“最具人气旅游目的地”称号,现已成为拉动新疆地区旅游及相关产业发展的龙头。随着旅游人数的持续增加,旅游活动已对景区生态环境产生影响<sup>[22]</sup>,特别是旅游活动密集的喀纳斯村周围。

### 1.2 土壤样品采集

本研究以新疆喀纳斯景区为研究区,用GPS精确定位,采集土壤表层( $0 \sim 10 \text{ cm}$ )样品,并按研究区人类活动密集程度及用地功能将景区划分为新村(N采样区,放牧和居住用地)、老村(O采样区,居住和人文旅游用地)、湖口旅游区(L采样区,喀纳斯湖旅游活动密集区)和旅游接待地(R采样区,游客服务设施用地)。研究区位置及采样点具体分布如图1所示。2016年8月11日至8月14日在研究区采集样品,其中N区16个,O区13个,R区23个,L区20个,共采集表层土壤样品72个,将土样装入聚乙烯袋中编号,供实验测试。采样过程中所用工具均为无磁性塑料材质。

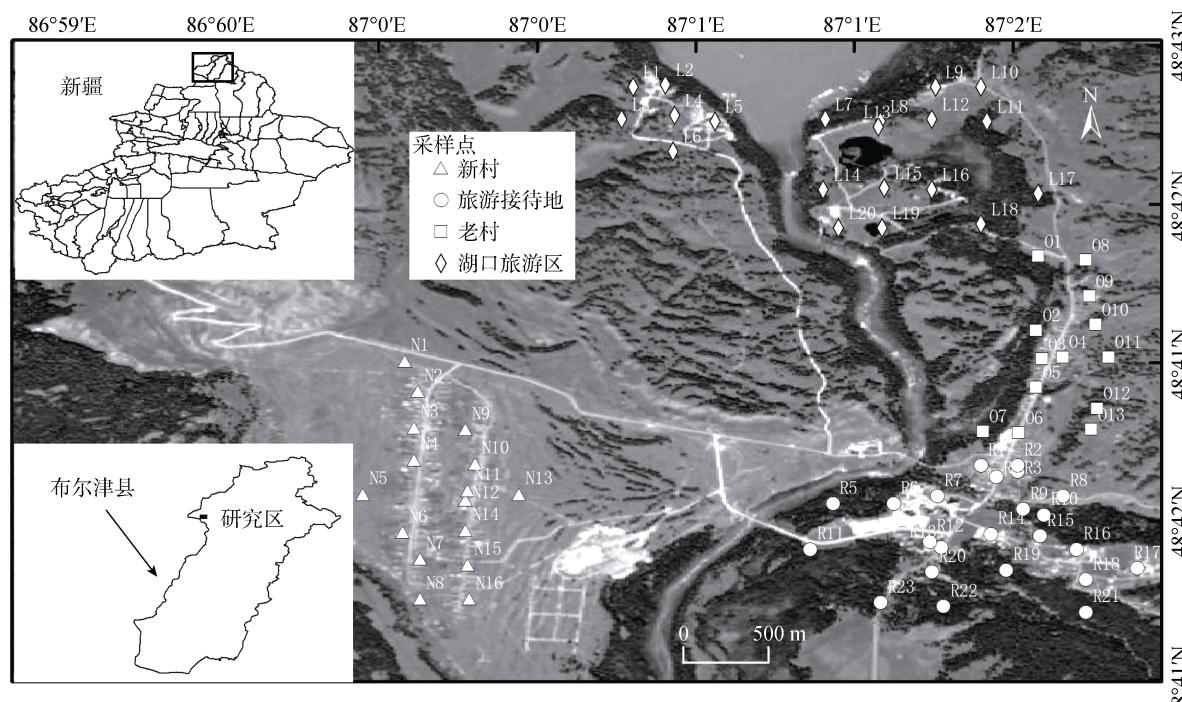


图1 研究区位置及采样点  
Fig. 1 Study area and sampling sites

### 1.3 样品测试与分析

将采回的土样放置于干燥通风无灰尘污染的室内自然风干,去除植物枯枝落叶、残茬等,过 $1 \text{ mm}$ 尼龙筛,称重后用塑料保鲜膜包紧、压实装入 $10 \text{ cm}^3$ 的磁学样品盒内,供测试用。低频质量磁化率( $\chi_{LF}$ )

( $0.47 \text{ kHz}$ )和高频质量磁化率( $\chi_{HF}$ )( $4.7 \text{ kHz}$ ),采用连接B型双频探头的Bartington MS2磁化率仪测得。等温剩磁(IRM)使用ASCIM-10脉冲磁化仪和Molspin小旋转磁力仪获得。先用ASCIM-10脉冲磁化仪依次对样品施加 $20$ 、 $40$ 、 $100$ 、 $300$ 、 $750$ 和 $1000 \text{ mT}$ 场强

磁化，再使用小旋转磁力仪分别测量对应的IRM，其中1000 mT场强下的IRM作为饱和等温剩磁(SIRM)。然后，测得样品在-20、-40、-100和-300 mT反向场强下的IRM，并分别计算出百分频率磁化率( $\chi_{FD}\%=(\chi_{LF}-\chi_{HF})/\chi_{LF} \times 100\%$ )、硬剩磁(HIRM=(SIRM+IRM<sub>-300</sub>)/2)、软剩磁(SOFT=(SIRM+IRM<sub>-20</sub>)/2)以及S比值( $S_{ratio}=100 \times (-IRM_{-300}/SIRM)$ )、SIRM/ $\chi_{LF}$ 等磁性比值参数。采用德国蔡司LEO-1430VP扫描电镜和英国牛津-200型X射线能谱仪测试土壤样品的SEM和EDX。数据统计分析采用SPSS21软件，制图采用ArcGIS9.3软件。

## 2 结果分析

### 2.1 喀纳斯景区表层土壤的磁性参数

**2.1.1 低频质量磁化率( $\chi_{LF}$ )与饱和等温剩磁(SIRM)**  $\chi_{LF}$ 、SIRM通常可以指示样品磁性矿物含量的多少。 $\chi_{LF}$ 主要反映样品亚铁磁性矿物(磁铁矿和磁赤铁矿)的总体贡献，但是在弱磁性样品中， $\chi_{LF}$ 因逆磁性矿物的存在而减小。另外，当亚铁磁性在样品中含量较低时，逆磁性和顺磁性对 $\chi_{LF}$ 影响显著，SIRM不受顺磁性和逆磁性物质的影响，主要由亚铁磁性矿物与不完全反铁磁性物质贡献<sup>[13]</sup>。SIRM与 $\chi_{LF}$

相比，SIRM更容易受磁性颗粒大小和不完全反铁磁性矿物组分(赤铁矿、针铁矿)的影响<sup>[23]</sup>。

表1为喀纳斯景区72个表土样品的磁性参数测定结果，结果表明，喀纳斯景区所有样品的 $\chi_{LF}$ 值的范围为 $(3.4 \sim 227.8) \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ，均值为 $122.3 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ，最高值出现在L区的L5采样点，为建筑物旁土壤，最低值为R区的R23采样点，为林地土壤。N区 $\chi_{LF}$ 变幅在 $(91.6 \sim 151.6) \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ，均值 $117.6 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ；O区 $\chi_{LF}$ 变幅在 $(42.4 \sim 184.6) \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ，均值 $115.2 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ；R区 $\chi_{LF}$ 变幅在 $(3.4 \sim 175.7) \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ，均值 $98.2 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ；L区 $\chi_{LF}$ 变幅在 $(38.2 \sim 227.8) \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ，均值 $158.3 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。不同区域土壤 $\chi_{LF}$ 均值大小依次为L区>N区>O区>R区，表明研究区亚铁磁性矿物含量湖口旅游区最大，新村次之，老村较小，旅游接待地最小。通过单因素方差分析表明，不同分区的 $\chi_{LF}$ 值存在显著性差异( $F=3.199$ ， $P=0.029$ )，事后检验结果显示，湖口旅游区 $\chi_{LF}$ 值显著高于新村( $P=0.002$ )、老村( $P=0.002$ )与旅游接待地( $P=0.000$ )，其余分区差异性不显著。从变异系数看，旅游接待地变异系数为42.59%，变异程度大；湖口旅游区与老村变异系数分别为29.14%、30.55%，属于中等变异强度；新村为14.72%，变异程度小。

表1 喀纳斯景区表层土壤磁性参数统计结果  
Table 1 Statistics of magnetic parameters of topsoils in Kanas scenic spot

| 磁性参数   | 所有土样(n=72)                  | 新村 N(n=16)                     | 老村 O(n=13)                   | 旅游接待地 R(n=23)             | 湖口旅游区 L(n=20)                |
|--|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------------|
|  | 范围(均值)                      | 范围(均值)                         | 范围(均值)                       | 范围(均值)                    | 范围(均值)                       |
| $\chi_{LF} (\times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg})$ | 3.4 ~ 227.8(122.3)          | 91.6 ~ 151.6(117.6)            | 42.4 ~ 184.6(115.2)          | 3.4 ~ 175.7(98.2)         | 38.2 ~ 227.8(158.3)          |
| $\chi_{FD} (\%)$                                   | 0.02 ~ 8.4(3.3)             | 3.7 ~ 6.5(4.9)                 | 1.3 ~ 5.7(3.4)               | 0.5 ~ 8.4(3.9)            | 0.02 ~ 3(1.5)                |
| SIRM ( $\times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$ )   | 43.2 ~ 4 187.4<br>(1 953.5) | 1 077.9 ~ 2 637.4<br>(1 806.6) | 390.4 ~ 2 784.4<br>(1 635.8) | 43.2 ~ 3 149<br>(1 697.8) | 876.8 ~ 4 187.4<br>(2 571.5) |
| SOFT ( $\times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$ )   | 21.3 ~ 2 695.6<br>(1 146.8) | 643 ~ 1 688<br>(1 112.9)       | 231 ~ 1 645<br>(1 007.1)     | 21.3 ~ 1 982.2<br>(877.4) | 594 ~ 2 695.6<br>(1 574.4)   |
| HIRM ( $\times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$ )   | 0.1 ~ 386.3(69.1)           | 2.2 ~ 117.3(57.5)              | 1.4 ~ 97(51)                 | 1.5 ~ 157(66.3)           | 0.1 ~ 386.3(93.3)            |
| $S_{ratio} (\%)$                                   | 72.3 ~ 100(92.8)            | 87.6 ~ 99.7(93.8)              | 83.4 ~ 99.8 (92.6)           | 82.9 ~ 99.8 (92)          | 72.3 ~ 100(92.9)             |
| SIRM/ $\chi_{LF}$ ( $\times 10^3 \text{ A/m}$ )    | 7.3 ~ 40.2(16)              | 11.3 ~ 19.9(15.3)              | 9.2 ~ 19.5 (13.7)            | 12.5 ~ 40.2(17.4)         | 7.3 ~ 22.9(16.5)             |

SIRM值变幅为 $(43.2 \sim 4 187.4) \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$ ，均值为 $1 953.5 \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$ ，分区来看，N区、O区、R区和L区的SIRM均值分别为 $1 806.6 \times 10^{-5}$ 、 $1 635.8 \times 10^{-5}$ 、 $1 697.8 \times 10^{-5}$ 和 $2 571.5 \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$ ，大小顺序和 $\chi_{LF}$ 不同，依次为L区>N区>R区>O区；L区依旧最大，表明亚铁磁性和不完全反铁磁性矿物的含量湖口旅游区最大，新村次之，老村最小。不同分区SIRM值存在显著差异( $F=3.511$ ， $P=0.020$ )，湖口旅游区SIRM值最大，与新村( $P=0.004$ )、旅游接待地( $P=0.000$ )和老村( $P=0.001$ )均达到了极显著差异，其

余分区差异性不显著。研究区土样SIRM值属中等变异强度，旅游接待地变异程度最大，变异系数为45.79%，新村为24.14%，变异程度最小。

**2.1.2 软剩磁(SOFT)、硬剩磁(HIRM)与S比值( $S_{ratio}$ )** SOFT、HIRM主要反映磁性矿物的浓度。其中，SOFT基本不受不完全反铁磁性矿物的影响，用来指示低矫顽力的多畴(MD)亚铁磁性矿物(如磁铁矿和磁赤铁矿)<sup>[24]</sup>；HIRM是在较强的磁场中(300 mT)获得的，反映了高矫顽力的不完全反铁磁性矿物的贡献<sup>[25]</sup>。研究区土壤样品SOFT、HIRM的均值分别为

$1.146.8 \times 10^{-5}$ 、 $69.1 \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$ ，不同采样区土壤的 SOFT 均值大小排序为 L 区>N 区>O 区>R 区，和  $\chi_{LF}$  大小分布一致；HIRM 均值大小排序为 L 区>R 区>N 区>O 区，但依旧是湖口旅游区值最大。说明湖口旅游区附近存在较多类似磁铁矿和赤铁矿的多畴亚铁磁性矿物，并伴有不完全反铁磁性矿物，同时也说明景区土壤中磁性矿物含量的空间分布差异性很大。 $S_{-ratio}$  指示样品中亚铁磁性矿物与不完全反铁磁性矿物含量相对比值，其值范围在 0.7~1.0 表征多畴亚铁磁性矿物的存在， $S_{-ratio}$  值越大，亚铁磁性矿物成分越多<sup>[19]</sup>。表 1 显示样品中  $S_{-ratio}$  值变化范围为 72.3%~100%，均值为 92.8%，进一步反映了喀纳斯景区表土样品磁性特征以多畴亚铁磁性矿物为主导。单因素方差分析表明，不同分区的 HIRM 值( $F=7.438$ ,  $P=0.000$ )存在极显著性差异，湖口旅游区 HIRM 值显著高于旅游接待地( $P=0.000$ )、新村( $P=0.002$ )和老村( $P=0.002$ )；不同分区的 SOFT 值( $F=4.003$ ,  $P=0.101$ )、 $S_{-ratio}$  值( $F=2.345$ ,  $P=0.081$ )差异性不显著。从变异系数看，HIRM 值呈强变异(90.11%)，SOFT 呈中等变异(47.40%)， $S_{-ratio}$  变异程度较小(5.40%)。

**2.1.3 百分频率磁化率( $\chi_{FD}\%$ )与  $SIRM/\chi_{LF}$**   $\chi_{FD}\%$  能够反映出粒级在磁性矿物的赋存状态，常用来衡量磁性矿物中超顺磁颗粒(SP, 近于  $0.015 \mu\text{m}$ )的含量<sup>[26]</sup>。研究区样品的  $\chi_{FD}\%$  变化范围在 0.02%~8.4%，均值为 3.3%，不同分区的  $\chi_{FD}\%$  均值大小顺序为 N 区>R 区>O 区>L 区， $\chi_{FD}\%>6\%$  的样品仅有 3 个，其余样品均低于 6%，说明样品中细黏滞性超顺磁颗粒含量较低，主要由粗颗粒多畴亚铁磁性矿物主导。不同分区的  $\chi_{FD}\%$  值存在显著差异( $F=3.536$ ,  $P=0.019$ )，新村的  $\chi_{FD}\%$  值最大，与旅游接待地( $P=0.024$ )、老村( $P=0.006$ )和湖口旅游区( $P=0.000$ )均存在极显著差异，旅游接待地的  $\chi_{FD}\%$  值次之，与湖口旅游区( $P=0.000$ )、老村( $P=0.000$ )均存在极显著差异，而老村和旅游接待地之间差异并不显著( $P=0.368$ )。研究区土壤  $\chi_{FD}\%$  值变异程度属于中等变异(54.77%)。

$SIRM/\chi_{LF}$  也能指示磁性颗粒的粒径大小，与磁性矿物粒径大致呈反向关系，但由于超顺磁颗粒对  $\chi_{LF}$  有贡献，对 SIRM 没有贡献，当样品中存在大量超顺磁颗粒时，样品的  $\chi_{LF}$  显著增高，则  $SIRM/\chi_{LF}$  值降低<sup>[27]</sup>。研究区表土  $SIRM/\chi_{LF}$  的变化范围在  $(7.3 \sim 40.2) \times 10^3 \text{ A/m}$ ，平均值为  $16 \times 10^3 \text{ A/m}$ ，不同采样区土壤的  $SIRM/\chi_{LF}$  均值大小为 R 区>L 区>N 区>O 区，与磁性矿物颗粒粒径大小正好相反。单因素方差分析表明不同分区的  $SIRM/\chi_{LF}$  值不存在显著差异( $F=1.011$ ,  $P=0.393$ )。

## 2.2 喀纳斯景区表层土壤磁性矿物的扫描电镜-X 射线能谱分析

根据典型土壤样品磁性矿物的扫描电镜-X 射线能谱(SEM-EDX)分析的结果，可以确定矿物颗粒的大小、形貌及组分等信息(图 2)。典型样品选自 N5、L20 和 L5 采样点，扫描电镜图片显示，土壤样品中除含有不规则形状颗粒外，还存在球状磁性颗粒。这种球状颗粒的形成一般与人类活动有关，可分为三类：表面有吸附物，趋向于球形，直径约为  $30 \sim 40 \mu\text{m}$ ；表面比较光滑，具有金属光泽，直径约  $15 \mu\text{m}$ ；表面爆裂，形如橘子，直径约为  $60 \mu\text{m}$ 。电子探针能谱分析(EDX)揭示，研究区土壤样品磁性颗粒主要由 Si、O、C、Fe、Al 等元素组成，其中 Fe 元素重量比在 6.75%~48.12%。

## 3 讨论

### 3.1 土壤磁性矿物类型

利用不同磁性参数绘制的散点图可以指示磁性矿物组成的变化。分别以  $\chi_{LF}$  为横坐标，以 SIRM、SOFT、HIRM 为纵坐标，对所有样品进行相关性分析(图 3)，其中， $\chi_{LF}$  与 SIRM 显著正相关， $R^2=0.7208$ (图 3A)，反映了样品磁学特征的贡献主要来源于亚铁磁矿物质和不完全反铁磁性矿物； $\chi_{LF}$  与 SOFT 亦存在相关性， $R^2=0.6297$ (图 3B)，进一步反映了样品的磁学特征受亚铁磁性矿物的控制。 $\chi_{LF}$  与 HIRM 相关性较差， $R^2=0.1304$ (图 3C)，表明样品中不完全反铁磁性矿物不主导样品的磁性特征。可见，喀纳斯景区表土样品的磁学特征受亚铁磁矿物质控制。

IRM 是区分磁性矿物种类的另一重要参数<sup>[28]</sup>，选取研究区各区域典型样品 N1、O5、R15 和 L2，IRM 获得曲线如图 4 所示，样品在施加 100 mT 磁场时 IRM 呈快速上升，达到饱和值的 71%~80.4%，场强在 100~300 mT 时 IRM 呈缓慢上升趋势，施加 300 mT 磁场时达到饱和值的 89.3%~95.5%，场强增大到 750 mT 时达到饱和值的 94%~98%，持续增大到 1 000 mT 时，样品全部达到饱和。样品在施加 300 mT 磁场时，几乎全部样品已达到饱和，说明研究区低矫顽力的亚铁磁性矿物(磁铁矿、磁赤铁矿)主导了样品磁性特征，但场强高于 300 mT 后，IRM 仍持续缓慢增加，表明样品中含有高矫顽力不完全反铁磁性矿物(如赤铁矿、针铁矿)，其含量远低于亚铁磁性矿物。

饱和剩磁矫顽力( $B_0$ )<sub>CR</sub> 是使饱和等温剩磁降低到零的磁场强度，可用来鉴别磁性混合物来源<sup>[16]</sup>。

单畴和多畴磁铁矿的 $(B_0)_{CR}$ 的理论值分别为33 mT和15 mT，而赤铁矿的剩磁矫顽力理论值为300 mT<sup>[29]</sup>。图4显示了典型样品 $(B_0)_{CR}$ 介于23~38 mT，说明研究区典型土样中含有低矫顽力的多畴磁铁矿，同时由表1可知，SIRM/ $\chi_{LF}$ 均值较小，可确定研究区磁性矿物以多畴磁铁矿为主。

### 3.2 土壤磁性矿物含量

由上述分析可以看出，研究区表土磁性矿物含量整体较高，且磁性特征以亚铁磁性矿物为主导。喀纳斯景区表土样品的 $\chi_{LF}$ 比北疆城市乌鲁木齐(87.3×

$10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ )、石河子( $90.4 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ )以及同属高山湖泊景区的天山天池( $82.05 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ )土壤都高，但低于北疆土壤平均值( $205.36 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ )，乌鲁木齐、石河子土壤 $\chi_{LF}$ 主要与城市规模、人口密度有密切关系，景区土壤磁化率主要与成土母质、旅游活动有关。研究区不同分区亚铁磁性矿物含量存在明显差异，其中湖口旅游区最大，新村次之，旅游接待地较小，老村最小。磁性矿物来源可能由土壤母质、成土过程等自然因素和旅游活动产生的生活排污、汽车尾气、化石燃料燃烧等人为因素造成。

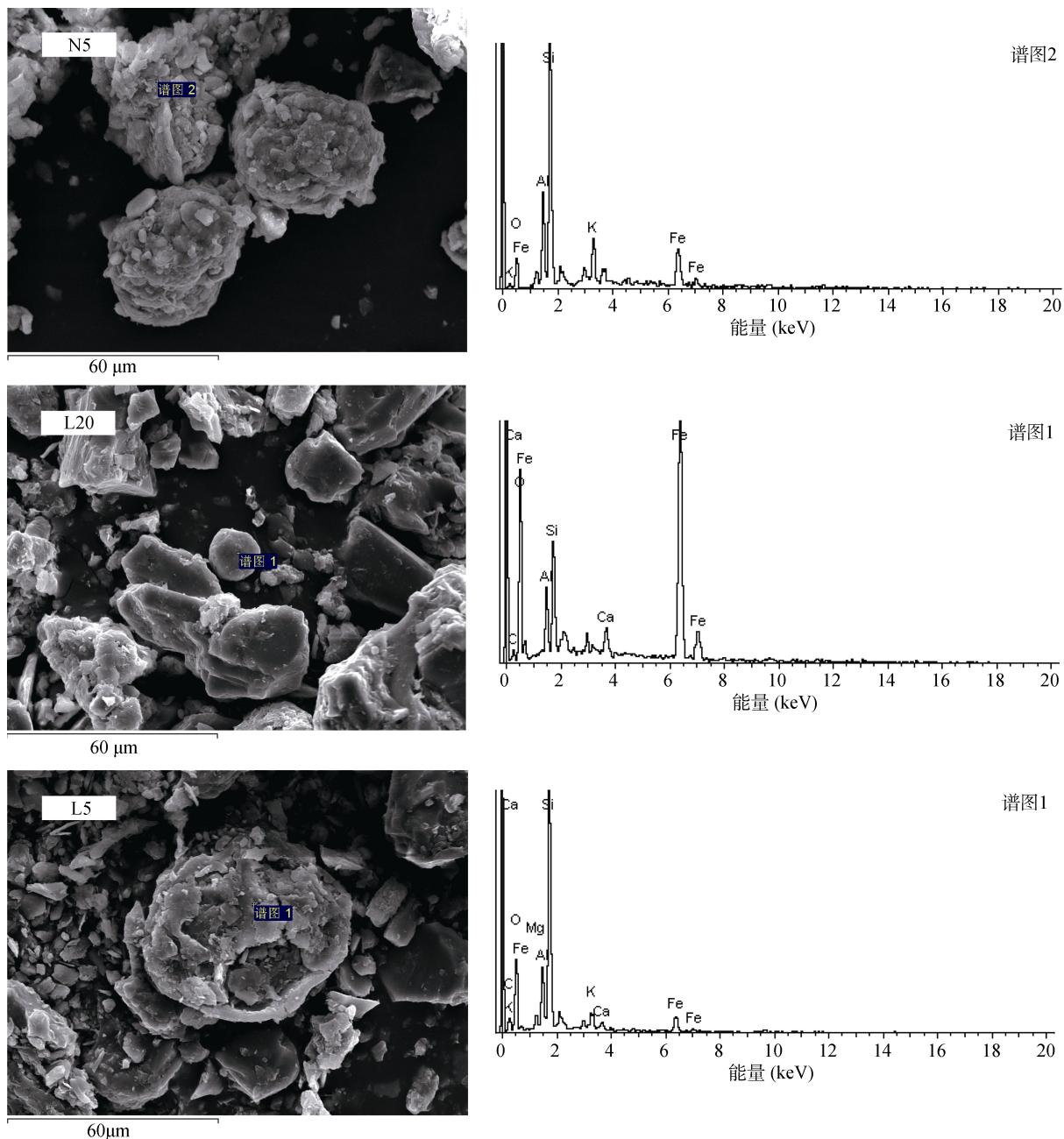


图2 典型土样磁性矿物的SEM和EDX图谱(左图为SEM图，右图为EDX图)

Fig.2 SEM images and EDX spectrums of typical topsoil samples

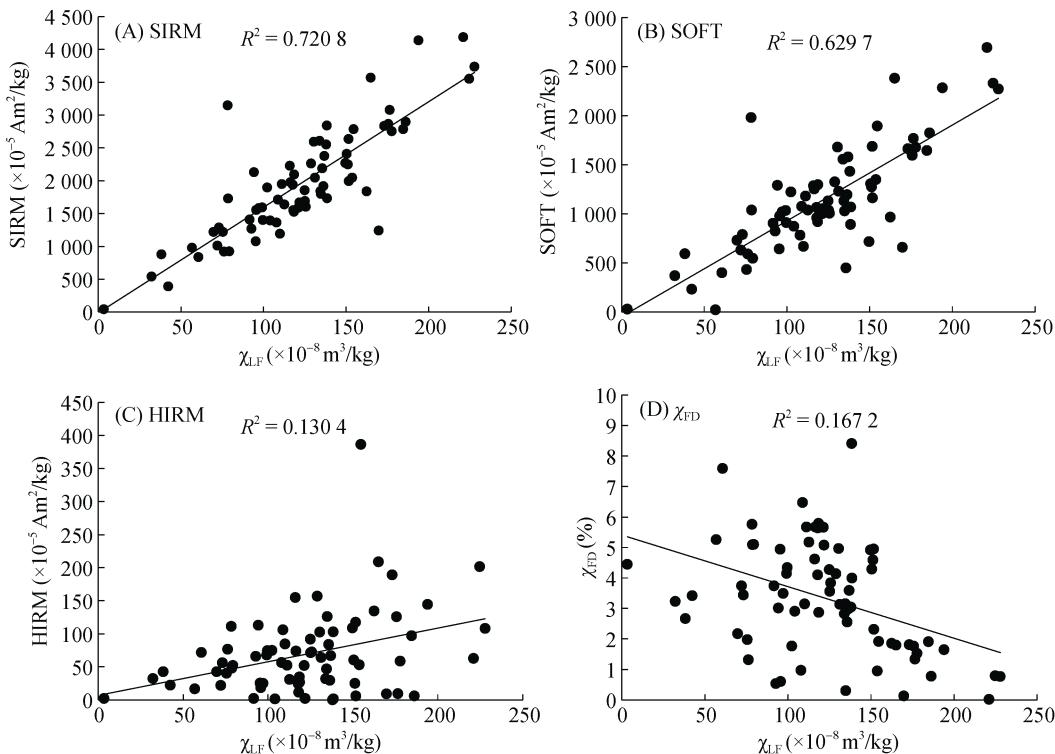


图 3 喀纳斯景区表层土壤磁性参数间的关系

Fig. 3 Correlations between magnetic parameters of topsoils in Kanas scenic spot

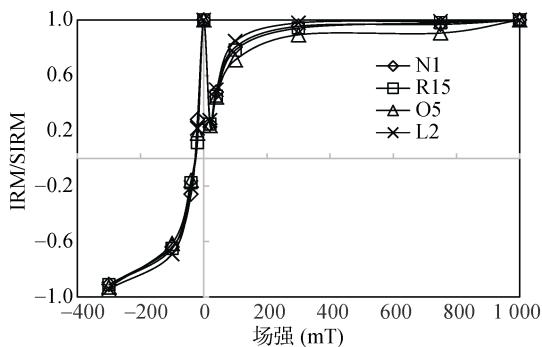


图 4 典型土样的等温剩磁获得曲线图

Fig. 4 IRM acquisition curves of typical topsoils

### 3.3 土壤磁性矿物粒度

Dearing<sup>[30]</sup>提出应用  $\chi_{FD}\%$  半定量估算超顺磁颗粒浓度的指标： $\chi_{FD}\% < 2\%$  时，土壤磁性矿物粒度以多畴为主，基本不含超顺磁颗粒； $\chi_{FD}\%$  在  $2\% \sim 10\%$  时，由少量超顺磁颗粒和粗颗粒混合存在； $\chi_{FD}\%$  在  $10\% \sim 14\%$  时，磁性矿物粒度中主要以单畴超顺磁颗粒物为主( $>75\%$ )。夏敦胜等<sup>[31]</sup>认为当  $\chi_{FD}\% > 6\%$  时，样品中含有较高比例粒径的超顺磁颗粒。研究区表土  $\chi_{FD}\%$  的变化范围在  $0.02\% \sim 8.4\%$ ，平均为  $3.3\%$ ，新村、老村、旅游接待地、湖口旅游区表土样品  $\chi_{FD}\%$  的均值分别为  $4.9\%、3.4\%、3.9\%、1.5\%$ ，新村最高，湖口旅游区最低。表土样品(R18) $\chi_{FD}\%$  最大值出现在旅游接待地( $8.4\%$ )，除新村、旅游接待地

样品 N12、R9、R18  $\chi_{FD}\% > 6\%$  之外，其余样品都在  $6\%$  以下，表明喀纳斯样品中超顺磁颗粒的含量较低，主要是粗颗粒多畴亚铁磁性矿物。

$\chi_{FD}\%$  和  $\chi_{LF}$  可以反映样品中磁性颗粒物大小或磁畴状态。当  $\chi_{LF}$  值较高而  $\chi_{FD}\%$  值接近零时，样品中磁性颗粒以粗颗粒为主，不含有超顺磁颗粒<sup>[30]</sup>。图 3D 显示， $\chi_{LF}$  与  $\chi_{FD}\%$  没有明显的相关性( $R^2 = 0.1672$ )，进一步证实喀纳斯景区土壤磁性特征的变化未受超顺磁颗粒所主导。可见，喀纳斯景区土壤含有较少的超顺磁颗粒，主要以粗颗粒多畴亚铁磁性矿物为主。有研究表明，人类活动产生的磁性颗粒具有强磁性和粗粒度的特性，明显不同于自然成土过程中产生的磁性颗粒<sup>[32]</sup>。据 SEM-EDX 结果可知，喀纳斯景区土壤中磁性颗粒的表面形态与化石燃料燃烧产生的飞灰磁性颗粒极度相似(图 2)，且以多畴颗粒为主。有研究证明，煤炭燃烧和其他工业过程产生的磁性颗粒多以多畴颗粒存在<sup>[13]</sup>。由于喀纳斯景区为国家自然保护区，无任何工业生产，可认为喀纳斯景区土壤样品中的磁性颗粒很大程度上来源于景区游客和村民燃柴、煤以及汽车尾气的排放等人类活动。

### 3.4 磁性参数的空间分布特征及环境意义

环境物质的磁学特征能够清楚地指示环境污染的状况，本研究根据土壤样品的磁性参数，绘制出喀纳斯景区表土磁性参数的点状空间分布图(图 5)。从

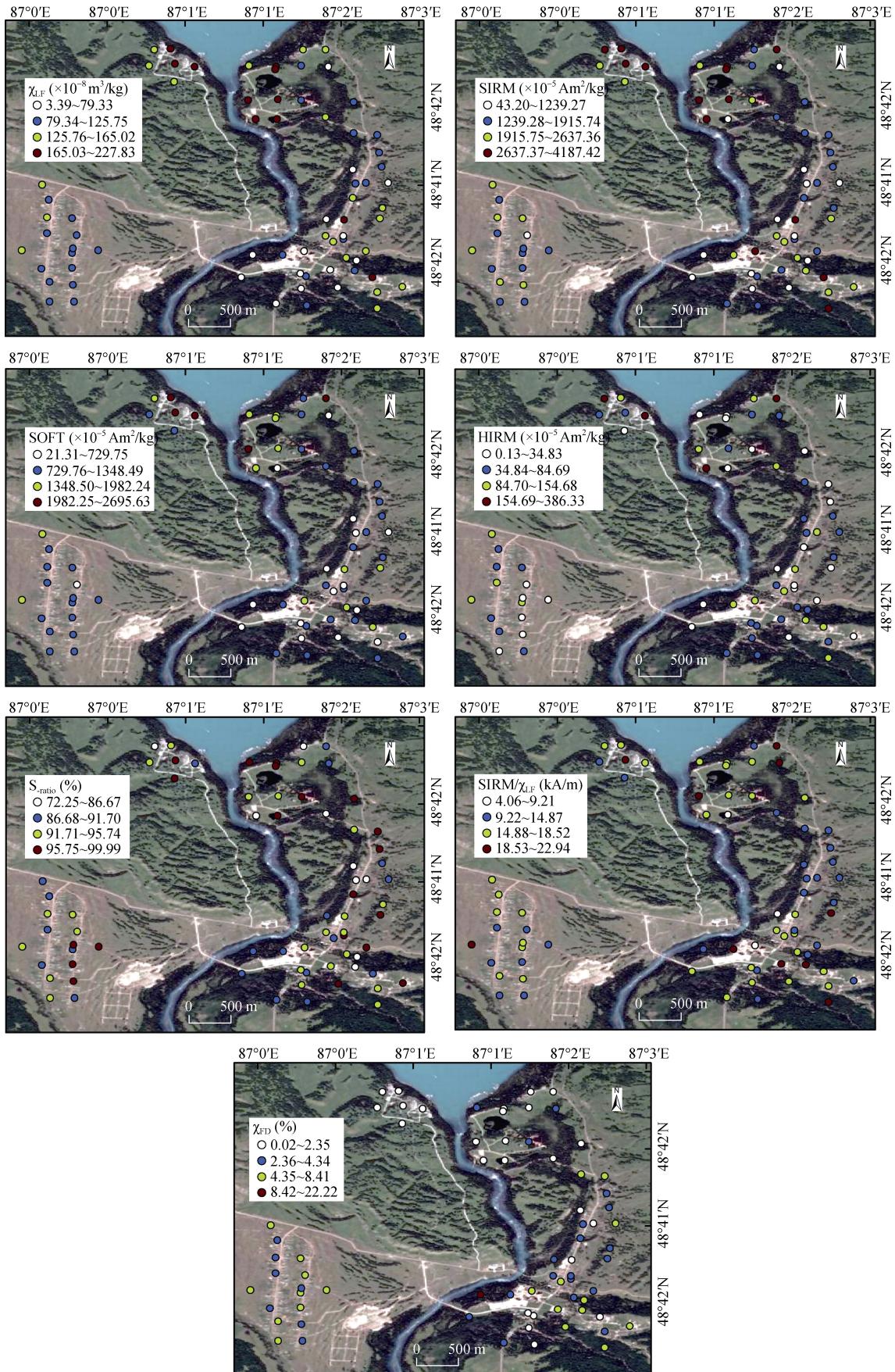


图 5 土样基本磁性参数的空间分布  
Fig. 5 Spatial distribution of magnetic parameters of topsoils

图 5 中可以看出,研究区表土  $\chi_{LF}$ 、SIRM 和 SOFT 空间分布基本一致,湖口旅游区  $\chi_{LF}$ 、SIRM 和 SOFT 表现出高值,老村磁性参数值最低。有研究表明,在人口密度大、交通密集和人类活动频繁的市中心区和近郊区,表土磁性参数值比较低,这与前人研究结果一致<sup>[33]</sup>。老村是中国保留最完整、历史最悠久的图瓦人村落,但并未表现出明显的污染土壤特征。从位置来看,湖口旅游区位于喀纳斯湖出水口,海拔相对较高,受湖水、雨水的冲刷作用较强,采样点离基岩距离较近,其表现出高值  $\chi_{LF}$ 、SIRM 和 SOFT 和低值  $\chi_{FD\%}$ ,由强磁性土壤母质生成的土壤或者被严重污染的土壤都有这样的磁学特征,湖口旅游区除码头和木栈道外,其他地方均用铁链围挡,禁止游客游览,人为影响较弱,因此湖口旅游区的磁性特征可能与土壤成土母质有关。新村、老村和旅游接待地位于地势较低的山前冲积扇,人类活动频繁,表现出中值的  $\chi_{LF}$ 、SIRM 和 SOFT,可能因后期人类活动影响加强所致。而各采样区高值  $\chi_{LF}$  的采样点 N1(道路旁土壤)、O5(道路旁土壤)、R15(水泥建筑物内土壤)、L2(木质建筑物旁土壤),采样点均位于受人类旅游干扰最大的地方,说明旅游接待设施的修建和景区内交通对景区内土壤  $\chi_{LF}$  的贡献较大。

从 HIRM 和  $S_{ratio}$  的分布规律来看,两种磁学参数的峰值分布在 L 区和 N 区,HIRM 的高值出现在 L 区的 L1、L7、L9 采样点,说明这里存在含量较高的高矫顽力的不完全反铁磁性矿物,其中除 L7 采样点位于道路旁以外,其他两个采样点均位于建筑物旁。已有研究证明,HIRM 的峰值分布与污染源的分布有较好的一致性<sup>[34]</sup>,说明景区内建筑物的修建和交通影响是造成景区土壤高矫顽力的不完全反铁磁性矿物增加的主要原因。按分区来看, $S_{ratio}$  的分布并不均匀,各区峰值分别出现在 L13、O9、R8、N11 采样点,均位于建筑物周边或道路旁,进一步证实了景区建筑物修建、道路交通与土壤多畴亚铁磁性矿物的含量密切相关。

$SIRM/\chi_{LF}$  出现的峰值在 R7 采样点(停车场建筑物旁),整体来看,R 区的  $SIRM/\chi_{LF}$  总体较高,表明 R 区的高矫顽力的不完全反铁磁性矿物含量较高,土壤粒径较小,R 区多为宾馆、办公楼、餐厅、停车场、卫生间等旅游接待设施,采集样品多为建筑物周围和道路旁边,主要污染物可能为燃煤、汽车排放物等污染和旅游接待地的生活排污。

$\chi_{FD\%}$  的高值主要分布在 N 区、R 区和 O 区,且主要集中在 2%~6%,表明这 3 个区的超顺磁颗粒明显多

于 L 区。已有研究表明,受原煤影响的土壤磁晶粒度明显较小,且由超顺磁颗粒和粗颗粒混合而成<sup>[35]</sup>,N 区和 O 区是哈萨克族和图瓦族村落,R 区是游客接待地,3 个区域居民生活和旅游接待日常烹饪和取暖以燃煤为主,附近土壤容易受到煤灰的影响。L 区几乎限定了人类游览路径,人为干扰较少。可见,人为干扰对景区土壤磁性颗粒有重要的影响,同时也说明 L 区土壤受人为因素影响的程度较小。

#### 4 结论

1) 喀纳斯景区表层土壤的磁化率范围为  $3.4 \times 10^{-8} \sim 227.8 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , 均值为  $122.3 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , 不同分区磁化率特征存在差异, 其中湖口旅游区最大, 新村次之, 老村较小, 旅游接待地最小。磁性特征以磁铁矿和磁赤铁矿的多畴亚铁磁性矿物为主导, 同时含有少量赤铁矿和针铁矿组成的不完全反铁磁性矿物; 粒度分析表明, 景区土壤中超顺磁性颗粒的含量较低, 主要以粗颗粒多畴亚铁磁性矿物为主, 其中新村土壤中存在较多的超顺磁性颗粒。

2) 喀纳斯景区表层土壤磁性参数在空间分布上呈现明显差异, 磁性参数  $\chi_{LF}$ 、SIRM 和 SOFT 的空间分布基本一致, 且  $\chi_{LF}$ 、SIRM 和 SOFT 高值点与景区中建筑物、道路等旅游基础设施的分布具有一致性, 虽然老村  $\chi_{LF}$ 、SIRM 和 SOFT 值普遍较低, 但 SIRM/ $\chi_{LF}$  也较低, 原因主要是土壤受到煤灰、烟尘的影响较大; 从 HIRM 和  $S_{ratio}$  的分布规律来看, 旅游接待地存在含量较高的高矫顽力的不完全反铁磁性矿物, 典型污染源主要集中在建筑物周边、道路旁及旅游活动密集区, 也是景区不完全反铁磁性矿物含量增加的主要来源。可见, 景区土壤磁性矿物含量和人类活动密集程度密切相关。

3) 自然成土因素是喀纳斯景区土壤磁性增强的关键因素, 但人为活动影响对一些区域的土壤磁性也有重要贡献。磁学方法多用于城市污染检测, 本研究结果表明, 景区土壤磁测研究可作为景区土壤环境污染监测、污染空间分布和污染物来源判别的新方法。

#### 参考文献 :

- [1] 李鹏, 濮励杰, 章锦河. 旅游活动对土壤环境影响的国内研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, 31(8):1097–1105
- [2] Ali M M, Murphy K J, Langendorff J, et al. Interrelations of river ship traffic with aquatic plants in the river Nile, Upper Egypt[J]. Hydrobiologia, 1999, 415: 93–100
- [3] 王舒甜, 张金池, 郑丹扬, 等. 钟山风景区土壤环境对人为踩踏扰动的响应[J]. 林业科学, 2017, 53(8): 9–16

- [4] 金亚征, 郑志新, 常美花, 等. 旅游活动对草原植被、土壤环境的影响及控制对策[J]. 草业科学, 2017, 34(2): 310–320
- [5] 赵建昌. 旅游干扰对贺兰山典型草原生物多样性及土壤性质的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(3): 293–298
- [6] 张茜, 杨东旭, 钟永德, 等. 黄石寨景区旅游活动对典型植物群落的影响[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(7): 1158–1165
- [7] 曹丽娟. 旅游干扰对河南云台山风景区土壤质量的影响[J]. 水土保持研究, 2015, 22(4): 67–71
- [8] 马剑, 刘贤德, 何晓玲, 等. 旅游干扰对祁连山风景区土壤性质的影响[J]. 土壤, 2016, 48(5): 924–930
- [9] 陈轶楠. 晋南某钢厂及其周边农田土壤重金属含量分析与污染状况评价[D]. 山西临汾: 山西师范大学, 2013
- [10] Kapicka A, Jordanova N, Petrovsky E, et al. Magnetic stability of power-plant fly ash in different soil solutions[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, 2000, 25(5): 431–436
- [11] Petrovsky E, Kapička A, Jordanova N, et al. Magnetic properties of alluvial soils contaminated with lead, zinc and cadmium[J]. Journal of Applied Geophysics, 2001, 48(2): 127–136
- [12] 郑妍, 张世红. 北京市区尘土与表土的磁学性质及其环境意义[J]. 科学通报, 2007, 52(20): 2399–2406
- [13] 卢升高, 白世强. 杭州城区土壤的磁性与磁性矿物学及其环境意义[J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 762–769
- [14] 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(6): 1242–1250
- [15] 薛勇, 胡雪峰, 叶荣, 等. 上海宝山不同功能区表土磁化率特征及对重金属污染的指示作用[J]. 土壤通报, 2016(5): 1245–1252
- [16] 周洪英. 徐州城市表层土壤重金属污染特征与环境磁学响应[D]. 江苏徐州: 中国矿业大学, 2016
- [17] 房妮, 张俊辉, 王瑾, 等. 西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析[J]. 环境科学, 2017(3): 924–935
- [18] 郭高山, 李永涛. 武汉市道路尘埃污染中磁学指标与重金属含量对比[J]. 中国环境科学, 2017, 37(3): 868–877
- [19] 陈学刚, 魏疆, 孙慧兰, 等. 乌鲁木齐市土壤环境磁学特征及其空间变化研究[J]. 干旱区地理(汉文版), 2014, 37(2): 265–273
- [20] 赵珊瑚, 王勇辉. 夏尔希里地区土壤磁化率、重金属特征及相关性分析[J]. 土壤, 2016, 48(6): 1179–1187
- [21] 阿衣努尔. 新疆喀纳斯旅游经济发展研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2013
- [22] 唐高溶, 郑伟, 王祥, 等. 旅游对喀纳斯景区植被和土壤碳、氮、磷化学计量特征的影响[J]. 草业科学, 2016, 33(8): 1476–1485
- [23] Walden J, Oldfield F, Smith J. Environmental magnetism: A practical guide[M]. London: Quaternary Research Association, 1999: 1–243
- [24] 刘青松, 邓成龙, 潘永信. 磁铁矿和磁赤铁矿磁化率的温度和频率特性及其环境磁学意义[J]. 第四纪研究, 2007, 27(6): 955–962
- [25] 谭洁, 周卫军, 陈恋, 等. 澄阳平原杉龙岗遗址埋藏古水稻土磁性矿物特性[J]. 土壤, 2017, 49(5): 1032–1037
- [26] 卢升高. 土壤频率磁化率与矿物粒度的关系及其环境意义[J]. 应用基础与工程科学学报, 2000, 8(1): 9–15
- [27] 张卫国, 俞立中. 环境磁学研究的简介[J]. 地球物理学进展, 1995, 10(3): 95–105
- [28] 张春霞, 黄宝春, 李震宇, 等. 高速公路附近树叶的磁学性质及其对环境污染的指示意义[J]. 科学通报, 2006, 51(12): 1459–1468
- [29] 卢升高, 董瑞斌, 俞劲炎, 等. 中国东部红土的磁性及其环境意义[J]. 地球物理学报, 1999, 42(6): 764–771
- [30] Dearing J. Magnetic Susceptibility[C] // Environmental magnetism a practical guide. Technical guide, No.6. London: Quaternary Research Association, 1999: 35–62
- [31] 夏敦胜, 马剑英, 王冠, 等. 环境磁学及其在西北干旱区环境研究中的问题[J]. 地学前缘, 2006, 13(3): 168–179
- [32] 杨涵, 熊黑钢, 陈学刚. 石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究[J]. 环境科学, 2014(9): 3537–3545
- [33] 朱艳明, 郭小蕾, 周力平. 北京地区表土磁性特征及其环境意义[J]. 科学通报, 2010(17): 1717–1725
- [34] 许淑婧, 张英, 余晔, 等. 西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义[J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3578–3586
- [35] 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, 45(2): 216–221

# Magnetic Properties of Topsoils and Their Environmental Implications in Kanas Scenic Spot of Xinjiang, China

HAN Wentang<sup>1,2</sup>, CHEN Xuegang<sup>1,2\*</sup>

(1 School of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2 Key Laboratory of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Area, Urumqi 830054, China)

**Abstract:** In order to explore the feasibility of environmental magnetism method in monitoring soil pollution in scenic spots, 72 samples of topsoils were collected from Kanas 5A scenic spot in Xinjiang. The results showed that the average content of soil magnetic minerals was high in Kanas scenic spot. The magnetic properties of topsoils were predominated by ferromagnetic minerals and a small amount of anti-ferromagnetic minerals. The magnetic grains were mainly coarser multidomain (MD) particles and fewer superparamagnetic particles (SP). The parameters of  $\chi_{LF}$ , SIRM, SOFT and HIRM were higher in lake-outlet tourism area but lower in new villages, old villages and tourist reception areas, the other parameters of  $\chi_{FD}\%$ , S-ratio and SIRM/ $\chi_{LF}$  were on the contrary. The distribution of high magnetic sites was consistent with the distribution of intensive human activity areas, buildings and roads in the scenic spot. The high magnetic value of lake-outlet tourism area was mainly related to the stronger natural soil formation, and the high magnetic sites in other regions are mainly influenced by the tourism activities. Therefore, the scope of man-made pollution could be effectively distinguished and delineated in the scenic area by soil magnetic method, and it provides a reference for the prevention and control of soil pollution and tourism planning.

**Key words:** Topsoil; Magnetic properties; Soil pollution; Tourism activities; Kanasi scenic spot