

网络出版时间:2015-06-10 08:40

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.07.016

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20150610.0840.016.html

乌鲁木齐市土壤磁学特征及其与粒度的关系

陈学刚^{1,2}, 张玉虎³, 杨 涵^{1,2}, 权晓燕², 胡江玲²

(1 新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054; 2 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054;

3 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048)

[摘 要] **【目的】**分析乌鲁木齐市市区、郊区表层土壤磁性和粒径分布特征的差异性,揭示土壤粒度与矿物磁性特征的关系,测试土壤磁性参数作为粒径代用指标的可行性,为未来运用磁学方法监测城市土壤污染提供参考。**【方法】**采集乌鲁木齐市市区建设用地及郊区农用地和未利用地表层(0~10 cm)土壤样品 45 个,采用磁测和激光衍射粒度仪测量土壤磁性参数和粒度,利用 Pearson 相关性分析和 GIS 技术计算磁性参数低频质量磁化率(χ_{LF})、高频质量磁化率(χ_{HF})、百分频率磁化率(χ_{FD})、硬剩磁(HIRM)、软剩磁(SOFTIRM)和饱和等温剩磁(SIRM)与粒径含量的相关系数,并绘制空间分布图。**【结果】**除 χ_{FD} 外,市区建设用地土壤磁性参数均值均高于郊区农用地和未利用地,多畴粗颗粒亚铁磁性矿物主导了土壤样品的磁学性质;市区表土黏土含量低于郊区,粉砂、砂粒含量略高于郊区;研究区土壤粒度组成以粉砂为主,其次为黏土和砂;通过比较市区表土磁性参数与不同粒径含量间的相关系数绝对值发现, χ_{LF} 与 2~8 μm 粒级, HIRM 与 8~16 μm 、>63 μm 粒级, χ_{FD} 与 16~32 μm 、32~63 μm 粒级含量的相关性最强。郊区农用地、未利用地土样的磁性参数与粒级含量无显著相关性;黏土和极细粉砂含量与 χ_{LF} 和 SOFTIRM、SIRM、HIRM 在西部、东北、中部和南部区域空间上存在正相关,与 χ_{FD} 的相关区域位于市区中部。细粉砂与 SIRM 和 HIRM 在西北部、东北部以及东南部存在正相关,与 χ_{FD} 在空间上分布一致性较少。中粉砂、粗粉砂和砂含量与 χ_{FD} 在西部、东北部和中部偏西南区域存在正相关。**【结论】**乌鲁木齐市市区、郊区表土磁性和粒径分布特征不同。市区建设用地表土的 χ_{LF} 、HIRM 和 χ_{FD} 分别可作为 2~8 μm 粒级、细粉砂和砂粒级、中粉砂和粗粉砂含量的代用指标。在圈定的西部、东北、中部、南部、西北、东北、东南和西南区域, χ_{LF} 、HIRM 和 χ_{FD} 能更准确地反映粒级含量的高低。

[关键词] 磁性特征;土壤粒径分布;土壤污染;乌鲁木齐

[中图分类号] S152.3

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2015)07-0168-09

Magnetic properties and the relationship with particle size of topsoil in Urumqi

CHEN Xue-gang^{1,2}, ZHANG Yu-hu³, YANG Han^{1,2},
QUAN Xiao-yan², HU Jiang-ling²

(1 Key Laboratory of Arid Region Lake Environment and Resource of Xinjiang, Urumqi, Xinjing 830054, China;

2 School of Geography Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjing 830054, China;

3 College of Resources Environment & Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: **【Objective】** This study investigated the differences in magnetic properties and particle size distribution of urban and suburban topsoil in Urumqi. The relationships between the magnetic properties and particle size distribution and the feasibility of using particular magnetic properties as soil particle size proxy were also explored to provide reference for future monitoring of urban soil pollution using magnetic methods. **【Method】** In Urumqi, 45 topsoil samples at depth of 0—10 cm were collected from urban and sub-

[收稿日期] 2014-09-01

[基金项目] 国家自然科学基金项目(41161029, 41461033, 41161074)

[作者简介] 陈学刚(1977—), 男, 四川内江人, 副教授, 博士, 主要从事城市地理与环境研究。E-mail: caschxg@126.com

urban areas with different land use types and spatial uniformity. Soil magnetic parameters including low field magnetic susceptibility (χ_{LF}), high frequency magnetic susceptibility (χ_{HF}), the percentage frequency magnetic susceptibility (χ_{FD}), hard isothermal remanent magnetization (HIRM), soft isothermal remanent magnetization (SOFTIRM) and saturation isothermal remanent magnetization (SIRM) and particle size were measured using magnetic measurement instrument and laser diffraction particle size analyzer. The Pearson correlation analysis method and GIS technology were used to determine the correlation between magnetic parameters and particle size. 【Result】 The average values of magnetic parameters except χ_{FD} of urban construction land were higher than those of agricultural land and unused suburban land. Multi-domain ferromagnetic minerals dominated magnetic properties soil samples. Clay content in urban topsoil was less than that in suburban topsoil, while silt and sand contents were slightly higher than those in suburban topsoil. The silt content was the highest, followed by clay and sand in Urumqi. Comparison of absolute values of Pearson correlation coefficients between magnetic parameters and different particle size fractions in urban topsoil showed that there were strong linear correlations between the following magnetic parameters and particle size fractions: χ_{LF} with 2—8 μm , HIRM with 8—16 μm , >63 μm , and χ_{FD} with 16—32 μm and 32—63 μm . There was no linear correlation between magnetic parameters and different particle size fractions in soil samples from agricultural land, and unused land in suburb. The contents of clay and very fine silty sand were moderately related to the values of χ_{LF} , SOFTIRM, SIRM and HIRM in west, northeast, central and southern regions and the values of χ_{FD} in urban central region. The fine silty sand content and values of SIRM and HIRM had positive correlation in northwest, northeast and southeast regions. The fine silty sand was less consistent with χ_{FD} in spatial distribution. The silty sand, coarse silt, sand content and χ_{FD} had positive correlation in northwest, northeast and southeast regions. 【Conclusion】 The magnetic properties and particle size distribution of urban and suburban topsoil in Urumqi had different distribution features. Three magnetic parameters including χ_{LF} , HIRM and χ_{FD} can be used as proxies of 2—8 μm , fine silty and sand, and silty sand and coarse silty contents in topsoil of urban construction land, respectively. In addition, χ_{LF} , HIRM and χ_{FD} can accurately reflect the particle fractions in western, northeastern, central, south, northwest, northeast, southeast and southwest regions.

Key words: magnetic property; soil particle size distribution; soil pollution; Urumqi

环境磁学通过研究磁性颗粒的生成、转化以及在地球不同圈层之间的迁移规律,揭示过去的环境变化以及人类活动对环境的影响^[1]。自 20 世纪 80 年代 Thompson 等开展了沉积物磁性特征研究以来,因其测量方法具有简便、快速、经济、无破坏性等特点^[2],已广泛应用于古气候与古环境变化、土壤发生过程以及河流沉积物来源判别等领域^[3]。近年来,学者们借助磁测技术和地球化学方法,对土壤、沉积物、大气降尘、街道尘埃和树叶等环境物质进行磁性测量,了解磁性矿物特征,进而确定污染区域,监测环境质量和解析污染源^[4-11]。城市土壤环境质量与人类健康和福利密切相关,日益受到关注^[12]。城市土壤是各种重金属和有机污染物的“汇”^[13]。研究表明,汇入城市土壤的人为成因污染物富含磁性颗粒,改变了土壤中磁性物质的循环形式和存在状况,而且特定磁参数与污染物(尤指重金属)含量

间呈正相关^[14],因而磁性参数常被用作反映重金属污染状况的替代指标^[15-18]。

然而矿物磁性除了受矿物种类及其含量等因素控制外,还与其粒度大小密切相关,不同晶粒大小的磁性矿物的磁性特征存在差异^[19]。在评价污染状况时,必须修正粒度对磁性参数的影响。大量研究探讨了环境物质磁性与沉积物或土壤粒度之间的相关性。Chaddha 等^[20]研究发现,燃煤飞灰中磁性矿物含量是粒径的函数,并强调粒径分析的重要性。Oldfield 等^[21]在对爱尔兰海滨岸沉积物的研究中发现,非磁滞剩磁磁化率与细粒级组分含量高度相关,并提出这一参数可作为沉积物细颗粒含量的代用指标。张卫国等^[22]研究认为,粒度是影响长江口潮滩沉积物磁性特征的重要因素。Booth 等^[23]对河口沉积物研究证明,矿物磁性可以用来作为粒径代用参数。Clifton 等^[24]研究指出,沉积物的细粉砂(8~16

μm)和磁化率密切相关,非磁滞剩磁磁化率与黏土($<2\ \mu\text{m}$)和极细粉砂($4\sim8\ \mu\text{m}$)强烈相关,饱和等温剩磁与极细粉砂和细粉砂存在相关。Booth等^[25-26]在小尺度上分析了街道尘埃矿物磁性和粒度的关系,结果发现磁性参数与粒径间存在紧密关系。从已有研究看,前人主要探讨了湖泊、潮滩沉积物、街尘和飞灰中粒径与磁性特征相关性的问题,但对于干旱区城市不同用地类型下土壤磁性指标和粒度的关系研究相对较少。为此,本试验以乌鲁木齐市为研究区,采用磁测、激光衍射粒度分析和统计方法,在分析市、郊区表土磁性和粒径分布特征的差异性基础上,探讨土壤粒径分布与矿物磁性参数的关系,以期评价磁性参数作为粒径替代指标的可行性及普遍性。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

乌鲁木齐市位于中国西北部,是新疆维吾尔自治区的首府,属典型的冲洪积扇绿洲城市,为中温带大陆干旱气候区,年平均温度 $7.3\ ^\circ\text{C}$,年平均降水量 $236\ \text{mm}$ 。全市平均海拔 $800\ \text{m}$,三面环山,地势东

南高、西北低,城区北部郊区有大量耕地,南部郊区分布有广泛的未利用裸地,土壤母质为冲洪积物状母质。自 1980 年以来,随着经济的快速发展,乌鲁木齐城市化进程不断加快,城市建设区面积急速扩大,从 1985 年的 $49\ \text{km}^2$ 增加到 2009 年的 $339\ \text{km}^2$ 。

1.2 采样与试验方法

为了比较市区与郊区不同土地利用方式对磁性参数的不同影响,本次选取乌鲁木齐市市区、郊区表土进行布点采集,样点的选择主要考虑空间分布的均匀性、土地利用类型与实际土壤分布情况。市区(U 采样区)24 个建设用地采样点主要分布在工业、商业、居住、公园和交通运输区内的建设用地;郊区(S 采样区)21 个未利用地和农用地采样点主要位于城市北边的农用地和城市东、西南和南部区域的未利用地。研究区位置及采样点具体分布如图 1 所示。2012-11-07-14 采集研究区表层($0\sim10\ \text{cm}$)土壤样品,每个样品均由 5 个按对角线法采取的小样混合成 $1\ \text{kg}$ 左右的样品,将其装入聚乙烯采样袋中编号。采样过程中对采样点进行 GPS 定位,最终获取表层土壤样品 45 个。

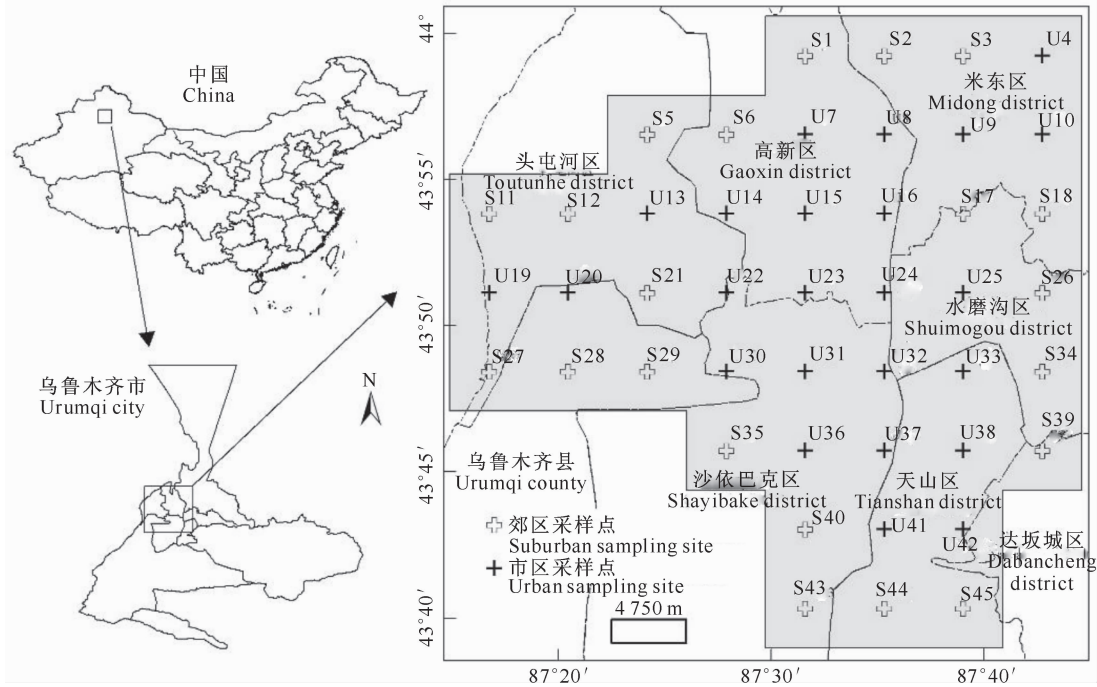


图 1 研究区位置及采样点的分布

Fig. 1 Study area and sampling locations

将采集的土样放在阴凉干燥、通风无灰尘污染的室内自然风干。待样品风干后,拣出枯枝落叶、植物根、塑料袋、砾石等杂物,过 $1\ \text{mm}$ 尼龙筛,称一定

质量样品用塑料保鲜膜包紧后装入 $10\ \text{cm}^3$ 的磁学专用样品盒内并压实,供测试用。采用 Bartington MS2 磁化率仪,测定样品低频质量磁化率(χ_{LF} ,

0.47 kHz)和 高频质量磁化率(χ_{HF} , 4.7 kHz),并计 算百分频率磁化率($\chi_{\text{FD}} = (\chi_{\text{LF}} - \chi_{\text{HF}})/\chi_{\text{LF}} \times 100\%$)。等温剩磁(IRM)利用 ASCIM-10 脉冲磁化 仪和 Molspin 小旋转磁力仪室温下获得,依次对样 品施加 20,30,50,100,300 和 1 000 mT 的磁场,使 用小旋转磁力仪分别测量对应的 IRM,并设 1 000 mT 磁场下的 IRM 作为饱和等温剩磁(SIRM)。然 后测量样品在-20,-30,-100,-300 mT 反向磁 场下的 IRM。根据上述测量结果计算硬剩磁 (HIRM = (SIRM + IRM_{-300 mT})/2)、软剩磁 (SOFTIRM=(SIRM-IRM_{-20 mT})/2),软剩磁百分 含量(SOFT=SOFTIRM/SIRM $\times 100\%$)和硬剩磁 百分含量(HARD=HIRM/SIRM $\times 100\%$)。

粒度测量时首先采用过氧化氢(H₂O₂)进行去

除有机质和碳酸盐的处理,然后加入六偏磷酸钠 ((NaPO₃)₆)使样品充分分离后测量,使用 Malvern MS 2000 测定颗粒的体积百分比,颗粒范围为0.2~ 2 000 μm ^[26]。

2 结果与分析

2.1 乌鲁木齐市不同区域的土壤磁性特征

土壤磁性是土壤物理属性的重要研究内容,可 反映母质、气候、植被、水文和人类活动等综合信 息^[27]。城市不同区域的土地利用类型对土壤磁性 的干扰不同,表土的磁性特征往往随着土地利用方 式变化而表现出明显差异。乌鲁木齐市、郊区不 同土地利用方式下土壤样品磁性参数的统计结果见 表 1。

表 1 乌鲁木齐市不同区域土壤磁性参数统计

磁性参数 Magnetic parameter	全部土样($n=45$) All samples		市区土样($n=24$) Urban samples		郊区土样($n=21$) Suburban samples	
	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean
$\chi_{\text{LF}}/(\times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	26.1~299.6	87.3	48.5~299.6	107.9	26.1~142.0	63.7
$\text{SIRM}/(\times 10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$	559.2~4 466.7	1 993.0	1 165.4~4 466.7	2 433.0	559.2~2 808.1	1 490.0
$\text{SOFTIRM}/(\times 10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$	176.6~1 870.1	724.5	401.9~1 870.1	913.3	176.6~1 083.0	508.9
$\text{HIRM}/(\times 10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$	12.8~189.9	70.1	17.4~189.9	87.4	12.8~108.9	50.4
SOFT/%	28.1~42.2	35.5	29.2~42.2	36.8	28.1~38.6	34.0
HARD/%	0.7~6.3	3.6	0.7~6.3	3.6	1.6~5.6	3.6
$\chi_{\text{FD}}/\%$	0.3~6.9	2.8	0.5~3.6	1.6	0.3~6.9	2.6

χ_{LF} 表示土壤样品中亚铁磁性矿物的总体贡献。SIRM 主要反映亚铁磁性和不完全反铁磁性矿物的 贡献,与磁化率不同,SIRM 不受顺磁性和抗磁性矿 物的影响^[28]。Thompson 等^[29]研究发现,SOFT- IRM 指示样品中较粗的多畴(MD)颗粒的亚铁磁性 矿物含量,基本不受不完整反铁磁性矿物的影响。 Oldfield 等^[21]提出 HIRM 用于粗略估计样品中不 完整反铁磁性矿物含量。SOFT 和 HARD 可近似 用来估算样品中多畴亚铁磁性矿物和不完全反铁磁 性矿物的相对含量^[30]。 χ_{FD} 反映细小的超顺磁性颗 粒物(SP,粒径 $<0.03 \mu\text{m}$),能够区别土壤颗粒物是 来源于人类活动还是自然生成。从表 1 可以看出, 乌鲁木齐市(建设用地)与郊区(农用地、未利用地)土 样 χ_{LF} 的均值分别为 107.9×10^{-8} , $63.7 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。不同土地利用方式下表土 χ_{LF} 均值大小表现为市区 $>$ 郊区。采样区域表土的 SIRM 均值 变化与 χ_{LF} 相同。市区 SOFTIRM 变幅为 $(401.9 \sim 1\,870.1) \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$,均值为 $913.3 \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$;郊区 SOFTIRM 变幅是 $(176.6 \sim$

$1\,083.0) \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$,均值为 $508.9 \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$ 。HIRM 均值表现出市区 $(87.4 \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg})$ 略微大于郊区 $(50.4 \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg})$ 的特 征。市区 SOFT 为 $29.2\% \sim 42.2\%$,HARD 为 $0.7\% \sim 6.3\%$;郊区 SOFT 为 $28.1\% \sim 38.6\%$, HARD 为 $1.6\% \sim 5.6\%$,表明土样磁性中主要由亚 铁磁性矿物主导,并有少量不完整反铁磁性矿物的 贡献。根据 Dearing^[31]提出的应用 χ_{FD} 半定量估算 SP 颗粒浓度的半量化模型可知, $\chi_{\text{FD}} < 2\%$ 时,样 品中基本没有 SP 颗粒, χ_{FD} 为 $\geq 2\% \sim < 10\%$ 时,样 品中 SP 和粗颗粒混合存在; χ_{FD} 为 $\geq 10\% \sim < 14\%$ 时,样品基本都是 SP 颗粒。与半定量混合模型比 较,乌鲁木齐市 χ_{FD} 均值为 1.6% ,郊区 χ_{FD} 均值为 2.6% ,表明土壤样品中 SP 颗粒含量低,市区土 样中基本不含 SP 颗粒。通过上述参数分析可知,土 壤磁性主要是多畴(MD)粗颗粒亚铁磁性矿物占主 导,郊区磁性颗粒主要由 SP 颗粒和粗颗粒共同构 成。已有研究表明,有一定发育的自然土壤磁化率 主要受成土过程中形成的 SP 颗粒矿物主导,质量

磁化率与频率磁化率呈现正相关关系^[32]。市区高的土壤质量磁化率和低的百分频率磁化率指示其与自然土壤成土过程不同,可能受人类活动产生的粗颗粒亚铁磁性矿物影响较大。郊区磁性颗粒主要由自然和人为形成的 SP 颗粒和粗颗粒共同构成。

2.2 乌鲁木齐市不同区域的土壤粒径分布特征

粒径分布(PSD)是土壤最基本的物理属性。根据张卫国等^[22]土粒分级的标准划分,研究区表土样品的粒径分布统计结果见表 2。由表 2 可以看出,全部样品黏土(<4 μm)含量为 15.51%~40.19%,均值为 25.08%,64.6%的样品黏土含量在 20%~30%;市区黏土含量为 15.51%~31.58%,均值为 23.84%,其中 75%的样品黏土含量为 20%~30%;郊区黏土含量为 15.83%~40.19%,均值为 26.51%,其中黏土含量在 20%~30%的样品所占

比例减少到 50%,黏土含量大于 30%土样所占比例增加到 33%,郊区黏土含量略高于市区。全部土样粉砂(4~63 μm)含量为 58.22%~82.85%,其中极细粉砂(4~8 μm)含量均值为 22.28%,细粉砂(8~16 μm)含量均值为 20.36%,中粉砂(16~32 μm)含量均值为 16.31%,粗粉砂(32~63 μm)含量均值为 9.77%,显示极细粉砂、细粉砂主导了粉砂粒级含量,市区土壤粉砂含量均值略高于郊区。全部土样砂(>63 μm)含量为 0.32%~20.57%,均值 6.19%,砂含量变幅大。市区砂含量为 0.57%~20.57%,均值为 6.81%,郊区砂含量均值为 5.48%,市区含量稍高于郊区,表土砂含量远低于黏土和粉砂。总体而言,研究区土壤粒度组成以粉砂为主,其次为黏土,砂最少。

表 2 乌鲁木齐市不同区域土壤粒径分布的描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of particle size distribution of soil in different regions of Urumqi									%
粒径/μm Particle size	全部土样(n=45) All samples			市区土样(n=24) Urban samples			郊区土样(n=21) Suburban samples		
	极小值 Minimum	极大值 Maximum	均值 Mean	极小值 Minimum	极大值 Maximum	均值 Mean	极小值 Minimum	极大值 Maximum	均值 Mean
<4	15.51	40.19	25.08	15.51	31.58	23.84	15.83	40.19	26.51
4~8	15.20	28.94	22.28	16.83	28.94	22.24	15.20	28.08	22.33
8~16	14.03	30.04	20.36	14.03	27.58	20.50	15.25	30.04	20.19
16~32	9.63	26.37	16.31	12.40	19.50	16.37	9.63	26.37	16.24
32~63	2.50	18.75	9.77	4.47	18.75	10.24	2.50	16.46	9.24
4~63	58.22	82.85	68.72	58.22	75.77	69.35	58.94	82.85	68.00
>63	0.32	20.57	6.19	0.57	20.57	6.81	0.32	17.27	5.48

2.3 乌鲁木齐市土壤磁性特征与粒级含量的关系

不同粒径含量间的 Pearson 相关系数值。

表 3 是不同土地利用方式下,土壤磁性参数与

表 3 乌鲁木齐市不同土地利用方式下土壤磁性参数与粒级含量的相关性

Table 3 Correlations between magnetic properties and particle size fractions in different land use types of Urumqi

土地利用类型 Land use	粒径/μm Particle size	χ _{LF}	SIRM	SOFTIRM	HIRM	χ _{FD}
建设用地 Development land	<2	0.233	0.203	0.225	0.199	-0.103
	2~4	0.599 * *	0.512 *	0.552 * *	0.481 *	-0.314
	4~8	0.606 * *	0.576 * *	0.516 * *	0.565 * *	-0.575 * *
	8~16	0.355	0.435 *	0.344	0.496 *	-0.413 *
	16~32	-0.352	-0.301	-0.271	-0.152	0.438 *
	32~63	-0.472 *	-0.487 *	-0.451 *	-0.473 *	0.505 *
	>63	-0.519 * *	-0.505 *	-0.474 *	-0.591 * *	0.289
农用地/ 未利用地 Agricultural land/ Unused land	<2	-0.279	-0.403	-0.334	-0.209	0.131
	2~4	-0.153	-0.364	-0.268	-0.191	0.157
	4~8	0.010	-0.096	-0.046	0.084	0.034
	8~16	0.057	0.208	0.088	0.101	0.031
	16~32	0.080	0.229	0.116	0.017	-0.066
	32~63	0.108	0.206	0.158	0.032	-0.141
	>63	0.132	0.178	0.230	0.156	-0.106

注: * 表示在 $P<0.05$ 水平(双侧)上显著相关; * * 表示在 $P<0.01$ 水平(双侧)上极显著相关。
Note: *. Significant at the $P<0.05$ level; * *. Significant at the $P<0.01$ level.
从表 3 可以看出,对建设用地土样,χ_{LF} 与黏土 (2~4 μm)、极细粉砂(4~8 μm)极显著正相关,与

粗粉砂(32~63 μm)、砂(>63 μm) 粒级含量显著或极显著负相关,与其他粒级含量不具显著相关性;除了细粉砂(8~16 μm)外,HIRM、SIRM 与粒级含量的关系和 χ_{LF} 趋势相同,而 SOFTIRM 与粒级含量的关系则与 χ_{LF} 趋势完全相同; χ_{FD} 与 4~16 μm 粒级含量间存在极显著或显著负相关性,与 16~63 μm 粒级含量呈显著正相关,与其他粒级含量不具显著相关性。而郊区农用地、未利用地土样的磁性参数与粒级含量无显著相关性。上述结果也表明,粗颗

粒亚铁磁性矿物和少量不完整反铁磁性矿物主要富集于粒径 2~16 μm 的细粒级土壤中。此外,通过比较相关系数绝对值的大小发现, χ_{LF} 与 2~8 μm 粒级含量相关性均较大,HIRM 与 8~16 μm 、>63 μm 的相关性均较大, χ_{FD} 与 16~32 μm 、32~63 μm 的相关性均较大。因此,在市区建设用地背景下,上述磁性参数最适应作为相应粒级含量的代用指标,图 2 是市区建设用地描述磁性参数作为粒级函数的散点图。

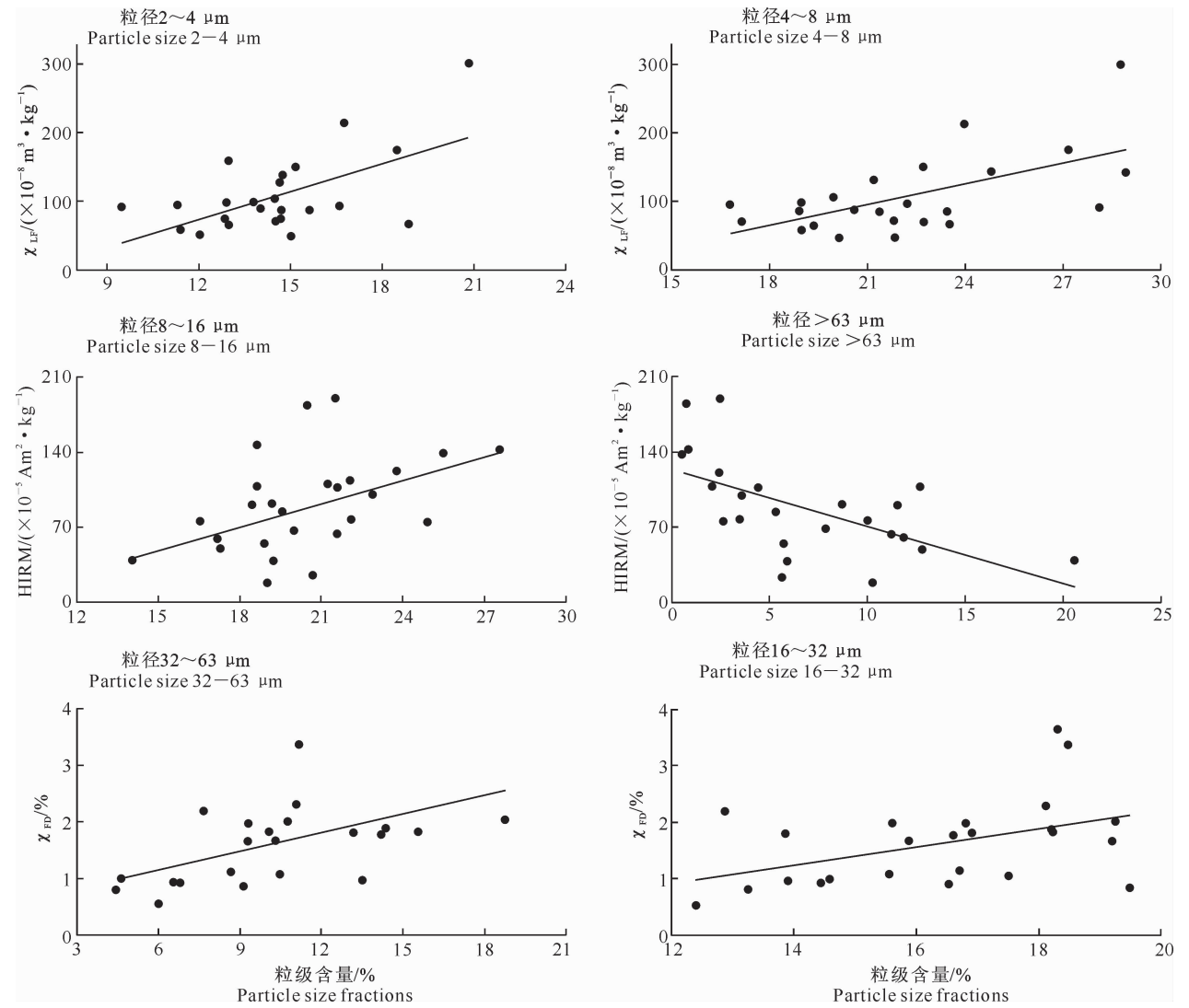


图 2 乌鲁木齐市建设用地土样磁性参数与各粒级组分含量关系的散点图

Fig. 2 Bivariate scatter-plots between magnetic parameters and particle size fractions of construction land in Urumqi

相关系数刻画的是土壤属性值间的总体关系,说明可能存在空间相互关联的情况,但不能圈定出空间依赖性的范围与程度。为进一步探查磁性参数与粒度的空间相关性,根据磁性参数与粒级间统计检验后显著相关与否和相关系数大小,将粒径划分为 2~8 μm 、8~16 μm 和 >16 μm 3 个级别,并采用

反距离权重插值法(IDW)分别对粒径含量和磁性参数进行空间插值,得到空间分布图(图 3)。如图 3 所示, χ_{LF} 、SOFTIRM、SIRM 和 HIRM 的空间分布特征较相似,基本以工业区(点)和中城区为中心,向北部的农田及东、西和南部的未利用地递减。 χ_{FD} 空间分布趋势与其他参数大致相反,分布呈东西方向

低,且向南北方向递增的趋势。黏土和极细粉砂(4~8 μm)空间分布呈西北、东北、正南向高,且向中部递减的趋势,主要分布在近郊区,与 χ_{LF} 、SOFTIRM、SIRM 和 HIRM 磁性参数在西部、东北、中部和南部区域存在空间正相关,但与 χ_{FD} 的相关区域位于市区中部。细粉砂(8~16 μm)与 SIRM 和 HIRM 在西北部的头屯河区 and 东北部米东区以

及东南部天山区内存在正相关,与 χ_{FD} 在空间分布不一致。中粉砂(16~32 μm)、粗粉砂(32~63 μm)和砂(>63 μm)含量主要分布在中部,且向西北和南部递减,西北部含量最低,北部粒径含量小于中部和南部,与 χ_{LF} 、SIRM、SOFTIRM 和 HIRM 的分布格局呈逆向分布趋势,但与 χ_{FD} 在西部、东北部和中部偏西南区域存在正相关。

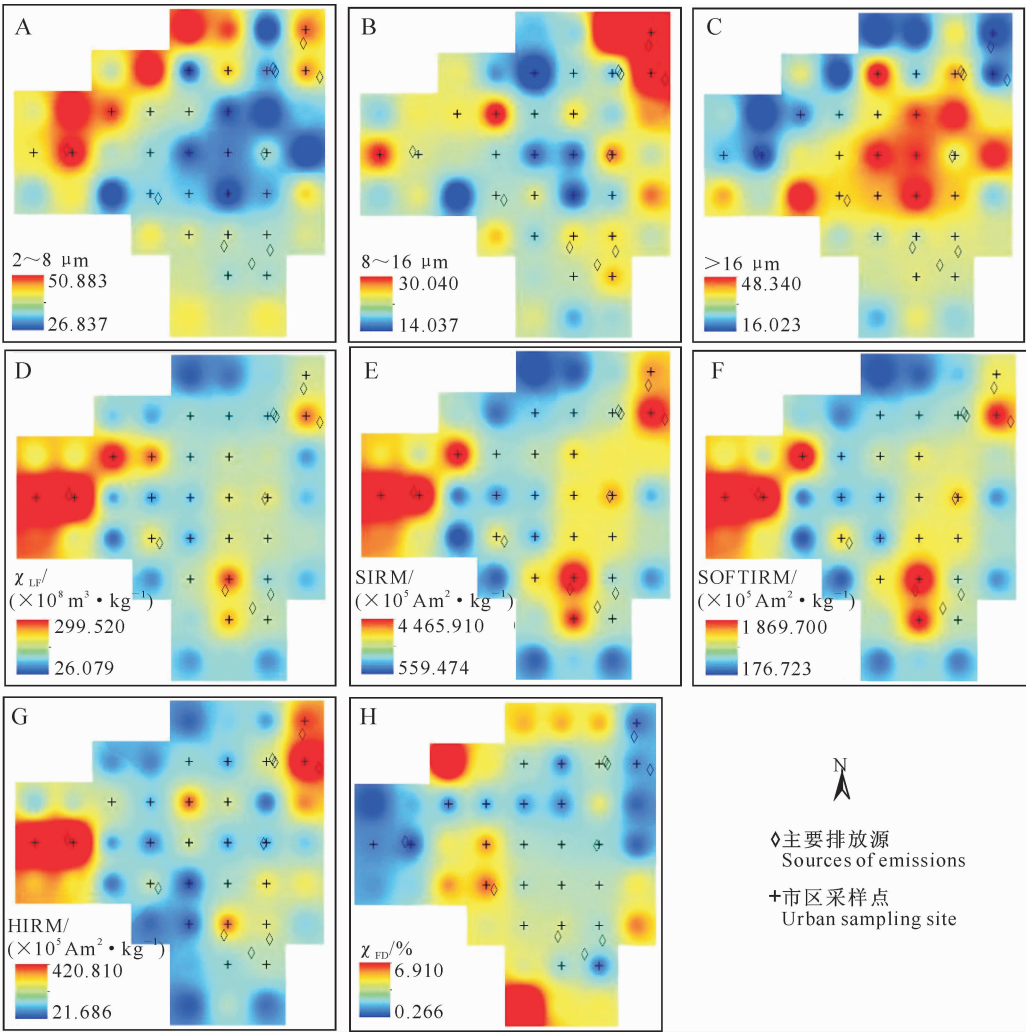


图 3 乌鲁木齐市土壤磁性参数和粒径含量的空间分布

A—C. 各粒径组分含量;D—H. 土壤磁性参数

Fig. 3 Spatial distribution of magnetic parameters and particle size in Urumqi

A—C. Content in the particle size fractions;D—H. Soil magnetic parameters

3 结 论

本研究通过对乌鲁木齐市市区和近郊区不同用地类型的表层土壤采样,分析了土壤样品磁性参数、土壤粒度组成特征及两者之间的关系,得到的主要结论如下。

1)研究区土壤中磁性矿物组成以多畴(MD)粗颗粒亚铁磁性矿物占主导,并伴有少量不完整反铁

磁性矿物和超顺磁性矿物颗粒物。除 χ_{FD} 外,市区建设用地土壤的其他磁性参数均值均高于郊区的农用地和未利用地,市区高土壤磁性矿物含量表明其可能由人类活动形成的污染物引起。

2)市区表土黏土含量低于郊区,粉砂、砂粒含量均值略高于郊区。总体而言,研究区土壤粒度组成中粉砂含量最高,其次为黏土,含量最低的是砂粒,黏土、粉砂和砂粒含量的均值分别为 25.08%,

68.72%, 6.19%, 其中极细粉砂、细粉砂主导了粉砂级含量。

3)从磁性参数与粒度含量的相关性结果来看,磁性矿物主要富集于粒径 $2\sim 16\ \mu\text{m}$ 的土壤细颗粒中,市区建设用地表土的 χ_{LF} 可作为 $2\sim 8\ \mu\text{m}$, HIRM 可作为细粉砂($8\sim 16\ \mu\text{m}$)、砂($>63\ \mu\text{m}$) 粒度含量的代用指标。 χ_{FD} 可作为中粉砂($16\sim 32\ \mu\text{m}$)、粗粉砂($32\sim 63\ \mu\text{m}$) 粒度含量的代用指标。郊区农用地、未利用地表土磁性参数对粒径的依赖性不高。

4)研究区磁性参数与土壤粒度分布的空间变化为评价两者间的空间相关性奠定了基础。 χ_{LF} 和 SOFTIRM、SIRM、HIRM 与细颗粒组分($2\sim 16\ \mu\text{m}$) 在西部、东北、中部、南部、西北、东北和东南部区域呈正相关。 χ_{FD} 与粗颗粒组分($>16\ \mu\text{m}$) 在西部、东北和西南区域存在正相关。在上述圈定的区域内, χ_{LF} 、HIRM 和 χ_{FD} 能更加准确地反映粒度含量的高低。

[参考文献]

- [1] Wang H Q, Zhang S H, Li H Y. Mineral magnetic properties of surface sediments at Bei'anhe, Beijing, and its environmental significance [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(16): 2536-2546.
- [2] 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): 170-175.
Xia D S, Ma J Y, Wang G, et al. Environmental magnetism concepts and their applications to environmental studies in arid regions, Northwest China [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(3): 170-175. (in Chinese)
- [3] 李晓庆, 胡雪峰. 城市土壤污染的磁学监测研究 [J]. 土壤, 2006, 38(1): 66-74.
Li X Q, Hu X F. Magnetic techniques used for monitoring urban soil pollution [J]. Soil, 2006, 38(1): 66-74. (in Chinese)
- [4] 王博, 夏敦胜, 余晔, 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): 3078-3089.
Wang B, Xia D S, Yu Y, et al. Magnetic records of heavy metal pollution in urban topsoil in Lanzhou, China [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(32): 3078-3089. (in Chinese)
- [5] Xie S, Dearing J A, Boyle J F, et al. Association between magnetic properties and element concentrations of Liverpool street dust and its implications [J]. Journal of Applied Geophysics, 2001, 48(2): 83-92.
- [6] Yang T, Liu Q, Chan L, et al. Magnetic investigation of heavy metals contamination in urban topsoils around the East Lake, Wuhan, China [J]. Geophysical Journal International, 2007, 171(2): 603-612.
- [7] Wang X S, Qin Y, Sang S X. Accumulation and sources of heavy metals in urban topsoils: A case study from the city of Xuzhou, China [J]. Environmental Geology, 2005, 48(1): 101-107.
- [8] Lecoanet H, Leveque F, Ambrosi J P. Combination of magnetic parameters: An efficient way to discriminate soil-contamination sources (south France) [J]. Environmental Pollution, 2003, 122(2): 229-234.
- [9] Heller F, Strzyszc Z, Magiera T. Magnetic record of industrial pollution in forest soils of Upper Silesia, Poland [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978 - 2012), 1998, 103(B8): 17767-17774.
- [10] Kapička A, Petrovsky E, Ustjak S, et al. Proxy mapping of fly-ash pollution of soils around a coal-burning power plant: A case study in the Czech Republic [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1999, 66(1): 291-297.
- [11] Hoffmann V, Knab M, Appel E. Magnetic susceptibility mapping of roadside pollution [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1999, 66(1): 313-326.
- [12] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 城市土壤磁化率特征及其环境意义 [J]. 华南农业大学学报, 2001, 22(4): 26-28.
Lu Y, Gong Z T, Zhang G L. The magnetic susceptibility characteristic of urban soil and its environmental significance [J]. Journal of South China Agricultural University, 2001, 22(4): 26-28. (in Chinese)
- [13] 卢升高, 白世强. 杭州城区土壤的磁性及磁性矿物学及其环境意义 [J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 765-767.
Lu S G, Bai S Q. Magnetic characterization and magnetic mineralogy of the Hangzhou urban soils and its environmental implications [J]. Chinese J Geophys, 2008, 51(3): 765-767. (in Chinese)
- [14] 闫海涛, 胡守云, 朱育新. 磁学方法在环境污染研究中的应用 [J]. 地球科学进展, 2004, 19(2): 230-235.
Yan H T, Hu S Y, Zhu Y X. Application of magnetic methods on environmental pollution research [J]. Advances in Earth Science, 2004, 19(2): 230-235. (in Chinese)
- [15] Morris W A, Versteeg J K, Marvin C H, et al. Preliminary comparisons between magnetic susceptibility and polycyclic aromatic hydrocarbon content in sediments from Hamilton Harbour, western Lake Ontario [J]. Science of the Total Environment, 1994, 152(2): 153-160.
- [16] Hay K L, Dearing J A, Baban S M J, et al. A preliminary attempt to identify atmospherically-derived pollution particles in English topsoils from magnetic susceptibility measurements [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 1997, 22(1): 207-210.
- [17] Ďurža O. Heavy metals contamination and magnetic susceptibility in soils around metallurgical plant [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, 1999, 24(6): 541-543.
- [18] 张春霞, 黄宝春. 环境磁学在城市环境污染监测中的应用和进展 [J]. 地球物理学进展, 2005, 20(3): 705-711.
Zhang C X, Huang B C. The application and research progress of environmental magnetism in monitoring urban environment

- pollution [J]. *Progress in Geophysics*, 2005, 20(3): 705-711. (in Chinese)
- [19] 杨 涛. 武汉市东湖地区城市化过程环境磁学响应研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2008.
Yang T. Magnetic responses of environment during the urbanization process in the East Lake Area, Wuhan City [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2008. (in Chinese)
- [20] Chaddha G, Seehra M S. Magnetic components and particle size distribution of coal flyash [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1983, 16(9): 1767-1776.
- [21] Oldfield F, Maher B A, Donoghue J, et al. Particle-size related, mineral magnetic source sediment linkages in the Rhode river catchment, Maryland, USA [J]. *Journal of the Geological Society*, 1985, 142(6): 1035-1046.
- [22] 张卫国, 俞立中. 长江口潮滩沉积物的磁学性质及其与粒度的关系 [J]. *中国科学: D 辑*, 2002, 32(9): 783-792.
Zhang W G, Yu L Z. Magnetic properties of tidal flat sediments of the Yangtze Estuary, and its relationship with particle size [J]. *Science in China: Series D*, 2002, 32(9): 783-792. (in Chinese)
- [23] Booth C A, Walden J, Neal A, et al. Use of mineral magnetic concentration data as a particle size proxy: A case study using marine, estuarine and fluvial sediments in the Carmarthen Bay area, South Wales, UK [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 347(1): 241-253.
- [24] Clifton J, McDonald P, Plater A, et al. Derivation of a grain-size proxy to aid the modelling and prediction of radionuclide activity in salt marshes and mud flats of the eastern Irish Sea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1999, 48(5): 511-518.
- [25] Booth C A, Winspear C M, Fullen M A, et al. A pilot investigation into the potential of mineral magnetic measurements as a proxy for urban roadside particulate pollution [C]//Borrego C A, Brebbia C A. *Air pollution XV*. Southampton: WIT Press, 2007: 391-400.
- [26] Booth C A, Fullen M A, Waiden J, et al. Problems and potential of mineral magnetic measurements as a soil particle size proxy [J]. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 2008, 16(3): 151-158.
- [27] 胡宏昌, 田富强, 胡和平. 新疆膜下滴灌土壤粒径分布及与盐含量的关系 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2011, 41(8): 1035-1042.
Hu H C, Tian F Q, Hu H P. Soil particle size distribution and its relationship with soil water and salt under mulched drip irrigation in Xinjiang of China [J]. *Science in China: Technological Sciences*, 2011, 41(8): 1035-1042. (in Chinese)
- [28] 杨萍果. 山西襄汾农田土壤磁化率和养分空间变异性 [J]. *中国沙漠*, 2013, 33(3): 813-818.
Yang P G. Spatial variability of soil magnetic susceptibility and nutrients in Xiangfen, Shanxi, China [J]. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(3): 813-818. (in Chinese)
- [29] Thompson R, Oldfield F. *Environmental magnetism* [M]. London: Allen and Unwin, 1986.
- [30] 王 冠, 夏敦胜, 刘秀铭, 等. 兰州市城市街道尘埃磁学特征时空变化规律 [J]. *科学通报*, 2008, 53(4): 446-455.
Wang G, Xia D S, Liu X M, et al. Spatial and temporal variation in magnetic properties of street dust in Lanzhou city, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(4): 446-455. (in Chinese)
- [31] Dearing J A. *Environmental magnetic susceptibility: Using the Bartington MS2 system* [M]. London: Chi Publishing, 1994.
- [32] 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.
Yuan D G, Zhang G L. Magnetic properties of urban subgrade soil and their pedogenetic implications [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(2): 216-221. (in Chinese)