

## 广州城市公园绿地重金属环境磁学研究

王钊<sup>1</sup>, 郭宇<sup>1</sup>, 郑小战<sup>1</sup>, 石晓龙<sup>1</sup>, 朱照宇<sup>2</sup>, 欧阳婷萍<sup>3</sup>

(1. 广州市地质调查院, 广东 广州 510440; 2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 3. 华南师范大学地理科学学院, 广东 广州 510631)

**摘要:** 为研究广州市城市公园绿地土壤环境磁学和重金属元素的相关性, 选取广州市主城区 14 个公园进行采样. 共采集 133 组样品并测试分析土壤的环境磁学数据和地球化学数据, 开展土壤环境磁学性质与重金属含量的对比研究. 磁学测试结果表明, 土壤磁性来源以人为输入的单畴颗粒 SD、多畴颗粒 MD 为主, 组分以软磁性矿物为主, 部分地区也有硬磁性矿物贡献. 相关性分析表明:  $\chi_{\text{ARM}}$ 、SIRM 对 Cu、Zn、Ni、Pb、Cr、Cd 和 Hg 有指示意义;  $\chi_{\text{if}}$  对 Cu、Zn、Ni、Pb 有指示意义; S-比值对 Cu、Zn、Ni、Pb、Cr、Cd 有指示意义; SIRM/ $\chi$  对 Hg 有指示意义;  $\chi_{\text{id}}\%$  对 As 有指示意义. 对  $\chi_{\text{if}}$  与 Cu,  $\chi_{\text{id}}$  与 Cu、Ni、As 进行回归曲线分析得到的回归方程有效. 因此, 环境磁学方法可作为一种探索土壤地质环境监测的新技术手段.

**关键词:** 公园绿地; 环境磁学; 重金属; 磁化率; 相关关系

**中图分类号:** X82; X83 **文献标志码:** A

## Studies on Environmental Magnetism of Heavy Metals in Urban Park Green Space of Guangzhou

WANG Zhao<sup>1</sup>, GUO Yu<sup>1</sup>, ZHENG Xiaozhan<sup>1</sup>,  
SHI Xiaolong<sup>1</sup>, ZHU Zhaoyu<sup>2</sup>, OUYANG Tingping<sup>3</sup>

(1. Guangzhou Geological Survey, Guangzhou 510440, China;

2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

3. School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

**Abstract:** In order to study the correlation between soil environmental magnetism and heavy metal elements in urban park green space in Guangzhou, 14 parks in the main urban area of Guangzhou City were selected for sampling. A total of 133 samples were collected, and the environmental magnetic data and geochemical data of the soil were tested and analyzed. The comparative study of soil environmental magnetic properties and heavy metal content was carried out. The magnetic test results showed that the source of soil magnetism was mainly artificially-input single domain particle SD and multi domain particle MD, and its component was mainly soft magnetic minerals, with contributions of hard magnetic minerals in some areas. Correlation analysis showed that  $\chi_{\text{ARM}}$  and SIRM were indicative of Cu, Zn, Ni, Pb, Cr, Cd and Hg;  $\chi_{\text{if}}$  was indicative of Cu, Zn, Ni and Pb; S-ratio was indicative of Cu, Zn, Ni, Pb, Cr and Cd; SIRM/ $\chi$  was indicative of Hg; and  $\chi_{\text{id}}\%$  was indicative of As. The regression equation obtained from the regression curve analysis of  $\chi_{\text{if}}$  & Cu and  $\chi_{\text{id}}$  & Cu-Ni-As was effective. Therefore, the environmental magnetic method can be used as a new technical means to explore soil geological environment monitoring.

**Key words:** park green space; environmental magnetism; heavy metals; magnetic susceptibility; correlation

收稿日期: 2021-06-28

基金项目: 中国地质调查局“广州市多要素城市地质调查”(DD20190291)及子项(DD20190291-2); 广州市“岭南英杰”后备人才资助项目([2019]928); 广州市规划和自然资源局调查项目(22001130104)

通信作者: 郭宇(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为地质灾害防治、环境地质学. 174563241@qq.com

环境磁学是一门新兴学科, 通过测量土壤、沉积物和岩石、大气尘埃等自然物质和人类活动产生磁性物质的各种磁学参数, 提取环境变化信息, 从而了解自然过程和人类活动对环境的影响, 预测环境长期变化趋势. 环境磁学也可指示环境污染, 人类生产活动带来废水、废气、废渣等各种废弃物, 都不同程度含有磁性物质. 通过研究土壤、水体和沉积物的磁性变化, 能够成功地揭示工业发展重金属污染对环境造成的影响.

所有物质的磁性特征按照其属性可分为3类: 抗磁性、顺磁性和铁磁性. 20世纪90年代, 伴随着高精密度电子检测技术的蓬勃发展, 各种快速、精确的磁学检测设备和检测方法应运而生, 有效推动了环境磁学的理论研究和实际应用的飞跃<sup>[1-3]</sup>. 在 Evans 等(2003)出版的《Environmental Magnetism》一书中, 系统地介绍了环境磁学的理论基础以及磁学方法在古气候、水体、土地、生物、生态、考古等学科中的运用, 表示环境磁学从理论到实践都已进入广泛普及时代<sup>[4]</sup>. 目前, 我国对土壤磁性的研究, 也取得了大量的显著成果, 尤其土壤磁学在环境污染方面的应用和探索<sup>[5-7]</sup>. 按照以往经验, 重金属吸附在铁磁性矿物上, 因而磁学性质可指示某些重金属污染, 例如西北某矿业城市大气沉积物 Cu、Pb、Zn 与低频磁化率、等温饱和剩磁、非磁滞剩磁磁化率相关性较高<sup>[8]</sup>, 珠三角土壤和沉积物磁化率、非磁滞剩磁和等温剩磁等可以指示 V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd, 而对 Pb 不具指示意义<sup>[9]</sup>. 但不得不说, 影响土壤磁学性质的因素是多样的, 对土壤的磁学性质的认识也必须建立在动态观念基础上.

广州市城市公园绿地属于《中华人民共和国土壤污染防治法》第十六条所列重点监测地块, 涉及这类地块的重金属污染状况调查及监测急需快速、灵敏、有效的技术手段<sup>[10-11]</sup>. 本文利用土壤重金属含量分析和环境磁学分析, 并将二者之间的相关关系以及重金属与磁性颗粒间的赋存机制及磁性颗粒转化机理进行深入研究, 试图为广州城市公园绿地土壤的重金属监测提出一种全新的技术方法, 为土地质量评价、污染评估, 以及后续的治理、改造和保护提出相匹配的理论指导.

## 1 土壤磁学性质分布特征

### 1.1 环境磁学参数

磁化率 $\chi$ , 一般情况以单位质量或体积的磁化率来表示. 它是指外界磁场影响下, 物体自身产生的感应磁场其感应磁化强度与外界磁场强度之比, 磁化率分为低频磁化率( $\chi_{lf}$ )和低频磁化率( $\chi_{hf}$ ): 即检测物在较低和较高频率磁场下被磁化的磁化率值. 两者的差称为频率磁化率( $\chi_{fd}$ ):  $\chi_{fd} = \chi_{lf} - \chi_{hf}$ , 差值占原低频磁化率百分比称为频率磁化率系数( $\chi_{fd}\%$ ):  $\chi_{fd}\% = [(\chi_{lf} - \chi_{hf})/\chi_{lf}] \times 100\%$ , 也称百分比磁化率.

等温剩磁 (IRM) 指常温环境检测物在外加磁场中所产生的剩磁; 加足够高的磁场时检测物产生的最大剩磁称之为等温饱和剩磁 (SIRM).

非磁滞剩磁 (ARM) 指在实验室对检测物施加强度逐渐减小的交变磁场并同时施加直流低电稳定磁场, 两者叠加而使物质产生的剩磁. ARM 与该稳定低磁场值的比值即非磁滞剩磁磁化率 $\chi_{ARM}$ .

硬剩磁 (HIRM), 等温饱和剩磁减去检测物在 300 mT 反向磁场中的剩磁的差.

S-比值 (S-ratio), 当物质已产生饱和等温剩磁后再置于反向磁场条件下 (100、300 mT) 而产生反向等温剩磁.

此外, 比值参数 $\chi_{ARM}/\chi$ 能反映检测物中的磁性物质属性, 高 $\chi_{ARM}/\chi$ 值代表检测物组成以稳定单畴磁性颗粒 SSD 为主; 低 $\chi_{ARM}/\chi$ 值代表检测物组成以粗粒假单畴颗粒 (PSD) 或多畴颗粒 (MD) 为主<sup>[12]</sup>.  $\chi_{ARM}/SIRM$  和  $SIRM/\chi$  两比值参数均与磁性物质粒度的粗细有关,  $\chi_{ARM}/SIRM$  与颗粒粒径呈反相关关系, 比值越低磁性颗粒越粗.  $SIRM/\chi$  则呈正相关, 比值越大颗粒越大<sup>[13]</sup>.

### 1.2 测试方法及结果

#### 1.2.1 地球化学测试

公园绿地土壤样品均取自广州主城区区域 (白云、荔湾、天河和越秀) 有代表性的 14 个公园绿地进行调查, 包括越秀山公园、广州雕塑公园、流花湖公园、广州市儿童公园、人民公园、荔湾

湖公园、宏城公园、传祺公园、天河公园、珠江公园、东山湖公园、麓湖公园、文化公园和广州发展公园(图1)。共采集133组样品,采样深度为0~20 cm,基本是人为来源,能反映污染特征。样品为野外采集的原始土样(散样)。

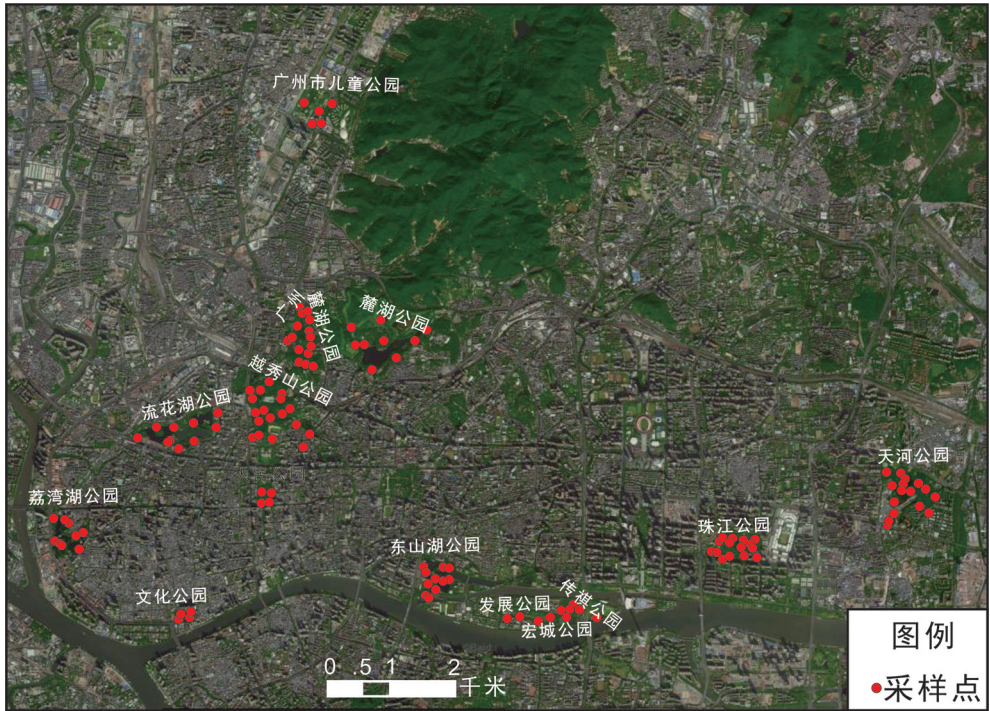


图1 城市公园绿地采样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling points of urban park green space

原始样品在烘干后,剔除其中的有机团块、植物组织、砾石等杂质,8种重金属Pb、Cr、Zn采用X射线荧光光谱法(XRF)进行测试;Cd、Cu、Ni采用感应耦合等离子体质谱法(ICP-MS)进行测试;As、Hg采用原子荧光光谱法(AFS)进行测试。根据地球化学测试结果各公园重金属元素平均含量统计数据见表1。

表1 城市公园绿地各公园重金属元素平均值汇总表

Tab. 1 Summary of average values of heavy metals in urban park green space

公园/元素	As	Cd	Cu	Pb	Hg	Ni
雕塑公园	71.65	0.22	27.47	131.05	0.54	15.55
越秀山公园	62.89	0.37	38.61	131.86	1.31	19.61
儿童公园	32.12	0.05	23.38	75.18	0.04	21.83
麓湖公园	31.16	0.27	40.82	100.56	0.73	17.76
发展公园	27.85	0.54	73.38	149.28	0.31	16.98
流花湖公园	26.12	1.08	65.07	99.63	0.70	27.18
东山湖公园	25.10	0.55	52.51	101.68	1.13	24.46
宏城公园	24.03	0.36	39.48	66.65	0.50	19.65
天河公园	23.35	0.28	33.89	63.08	0.38	12.91
荔湾湖公园	23.34	2.90	87.56	204.05	1.30	29.35
人民公园	19.32	0.53	55.64	122.25	3.62	20.95
传祺公园	18.94	0.26	32.78	58.62	0.26	20.82
珠江公园	18.07	0.35	31.94	61.86	0.39	17.94
文化公园	17.68	0.52	45.20	83.00	0.84	21.38

1.2.2 磁学测试

环境磁学检测同样要经过前处理, 之后将样品装入 2 cm×2 cm×2 cm 的无磁立方检测盒中, 压实后上机进行分析测试. 采样检测使用卡帕桥多频率磁化率仪 (MKFI-KA) 进行综合反映样品中磁性颗粒含量的低频 (976 Hz) 和 高频 (15 616 Hz) 磁化率测试, 所得数据经过仪器软件归一化处理分别得到低频磁化率 ( $\chi_{lf}$ ) 和 高频磁化率 ( $\chi_{hf}$ ), 再利用公式  $\chi_{fd} = \chi_{lf} - \chi_{hf}$  和  $\chi_{fd}\% = (\chi_{lf} - \chi_{hf})/\chi_{lf} \times 100\%$  得到反映超顺磁颗粒含量及其对磁化率的贡献频率磁化率 ( $\chi_{fd}$ ) 及 频率磁化率系数 ( $\chi_{fd}\%$ ). 利用交变退磁仪 (D-2000) 在 100 mT 峰值场和 0.05 mT 直流场下得到对单畴颗粒敏感的非磁滞剩磁, 然后用旋转磁力仪 JR6-A 测试, 结果以其磁化率的形式  $\chi_{ARM}$  表示; 利用脉冲磁化仪在不同场强下得到等温剩磁, 并以在 2 000 mT 场强获得的等温剩磁作为反映样品中除超顺磁颗粒以外的磁性颗粒含量的饱和等温剩磁 (SIRM); 获得 SIRM 后再依次反向施加 100 mT 和 300 mT 直流场获得 IRM-100 和 IRM-300, 然后经过计算得到反映磁性颗粒大小的两类比值参数即  $\chi_{ARM}/\chi$ 、 $\chi_{ARM}/SIRM$ 、SIRM/ $\chi$  和 反映样品中软硬磁性矿物相对含量的 S-100 和 S-300. 城市公园绿地全部样品土壤磁学性质统计结果见表 2, 分区样品土壤磁学性质统计结果见表 3.

表 2 城市公园绿地土壤磁学性质统计结果 (样本数=133)

Tab. 2 Statistical results of soil magnetic properties of urban park green space (sample number=133)

磁学指标	最小值	最大值	平均值	标准差
$\chi_{lf}(10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1})$	6.48	328.22	48.71	47.56
$\chi_{ARM}(10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1})$	9.16	619.25	156.30	115.21
SIRM ( $10^{-6} Am^2 \cdot kg^{-1}$ )	749.60	34 800.70	7 120.44	6 391.93
$\chi_{fd}\%$	0.03	14.43	4.78	2.56
$\chi_{ARM}/\chi$	0.49	6.69	3.64	1.09
$\chi_{ARM}/SIRM (10^{-5} m \cdot A^{-1})$	7.33	65.22	25.15	9.94
SIRM/ $\chi (kA \cdot m^{-1})$	5.35	45.75	15.30	5.04
S-100	0.27	0.92	0.71	0.11
S-300	0.44	1.08	0.85	0.10

表 3 公园绿地土壤磁化率参数分区统计结果

Tab. 3 Statistical results of soil magnetic susceptibility parameters of park green space in different regions

区域参数	磁化率参数	范围	平均值	中值	标准差	变异系数
白云区 N=21	低频磁化率 $\chi_{lf}(10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1})$	7.52~313.71	48.50	34.82	62.80	1.29
	高频磁化率 $\chi_{hf}(10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1})$	7.13~310.53	46.41	29.80	62.36	1.34
	频率磁化率 $\chi_{fd}\%$	0.72~14.43	6.01	5.52	3.78	0.63
荔湾区 N=25	低频磁化率 $\chi_{lf}(10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1})$	18.21~185.25	63.05	47.47	42.81	0.68
	高频磁化率 $\chi_{hf}(10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1})$	17.45~185.19	60.75	45.67	41.99	0.69
	频率磁化率 $\chi_{fd}\%$	0.03~6.22	4.05	4.11	1.46	0.36
天河区 N=36	低频磁化率 $\chi_{lf}(10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1})$	6.48~157.86	35.86	25.53	30.45	0.85
	高频磁化率 $\chi_{hf}(10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1})$	6.33~155.00	34.44	24.05	29.96	0.87
	频率磁化率 $\chi_{fd}\%$	1.19~11.09	4.64	4.54	2.07	0.45
越秀区 N=50	低频磁化率 $\chi_{lf}(10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1})$	12.53~328.22	50.89	37.75	49.60	0.97
	高频磁化率 $\chi_{hf}(10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1})$	11.75~325.09	48.94	35.30	49.00	1.00
	频率磁化率 $\chi_{fd}\%$	0.36~12.22	4.72	4.43	2.47	0.52

磁化率参数统计结果显示, 城市公园绿地土壤的样品低频磁化率值 ( $\chi_{lf}$ ) 大于高频磁化率 ( $\chi_{hf}$ ), 而且两者变化趋势一致, 这一规律与一般沉积物样品的特征是完全一致的<sup>[11]</sup>.  $\chi_{fd}\%$  平均值均低于 5%, 根据 Dearing 分类, 土壤含微量-少量超顺磁颗粒 SP, 还含有较多多畴颗粒 MD<sup>[14]</sup>, 表明其中的细粒磁性颗粒可能主要来源于人类活动. 城市公园土壤  $\chi_{ARM}/\chi$ 、 $\chi_{ARM}/SIRM$  和 SIRM/ $\chi$  的平均值都很低, 可能指示了这些区域土壤中磁性颗粒以人为输入的较粗颗粒为主, 即土壤组成以粗粒假单畴颗

粒(PSD)或多畴颗粒(MD)为主,此项与 $\chi_{fd}\%$ 统计结果一致.反映土壤中软、硬磁性矿物相对含量的S-100和S-300在土壤中均表现出较高值(平均值分别在0.7和0.8以上),意味着这些土壤中磁性组分以软磁性矿物为主<sup>[15-16]</sup>.

## 2 讨论分析

### 2.1 土壤磁学性质间相互关系及其意义

磁化率与其他磁学指标间的相关关系能反映样品中磁性颗粒的基本状况及其代表的环境意义.城市公园土壤磁化率与其他环境磁学参数的相关关系如图2所示.

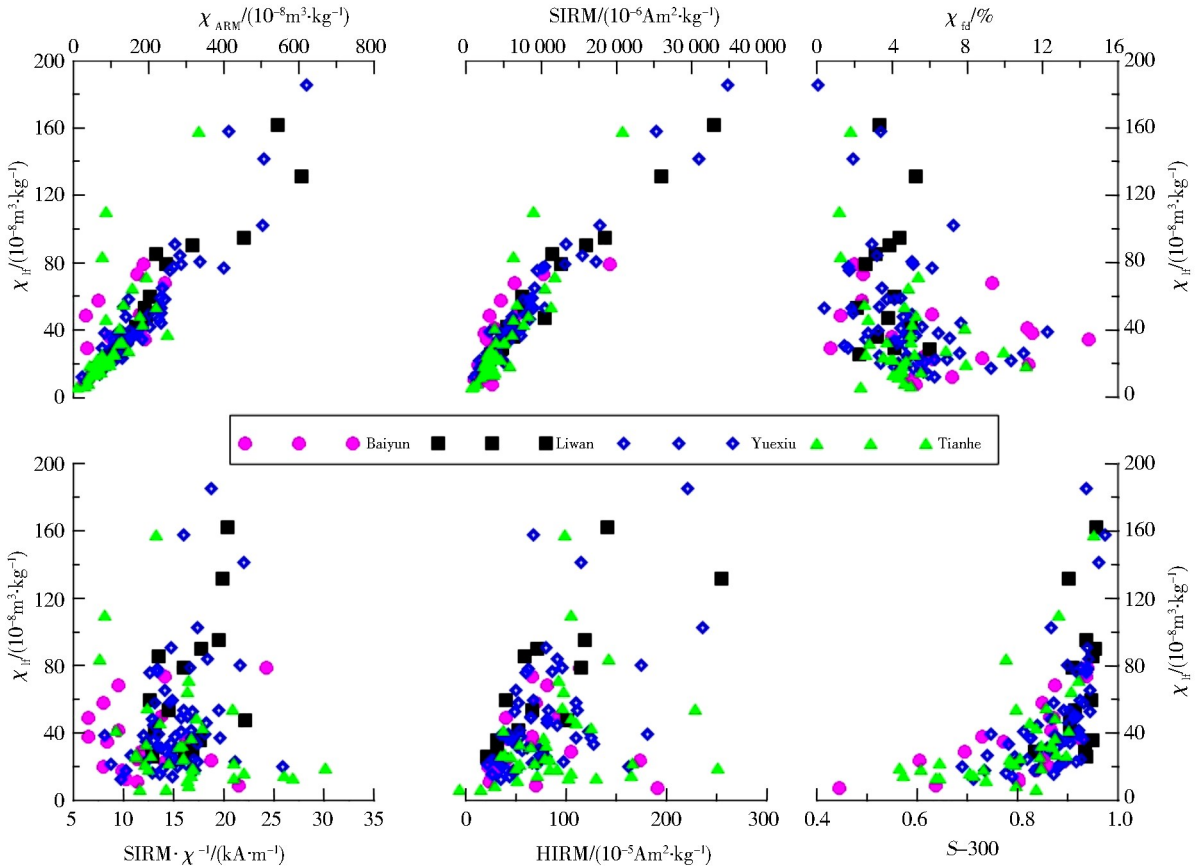


图2 城市公园土壤磁化率与其它参数散点图

Fig. 2 Scatter plot of soil magnetic susceptibility and other parameters in urban park

从图2来看,城市公园绿地属于高强度人类活动区域,土壤磁化率与其他环境磁学指标的关系基本一致,同时,城市公园在各区之间未见明显差异.土壤低频磁化率 $\chi_f$ 与 $\chi_{ARM}$ 、SIRM、S-300呈正相关关系,表明土壤中磁性颗粒主要为SD、MD;低 $\chi_{fd}\%$ 值显示其主要为人为输入;除去HIRM高值(硬磁性矿物含量较高)后,磁化率与HIRM之间呈正相关关系,表明土壤中硬磁性颗粒不容忽视的贡献<sup>[17]</sup>.

### 2.2 土壤重金属含量与磁学性质相关关系

使用SPSS遵循“分析-相关-双变量”菜单,对土壤重金属含量与环境磁学指标进行 Pearson 相关分析,城市公园土壤重金属含量与磁学性质之间的相关系数分别如表4.通过相关性分析,城市公园土壤中8种重金属含量均与磁学性质存在一定的相关关系,表明环境磁学技术在城市公园土壤重金属研究中的实用性. Cu、Zn、Ni、Pb含量与 $\chi_f$ 、 $\chi_{ARM}$ 、SIRM(磁性矿物含量指标)及S-比值(软硬磁性矿物含量指标)呈显著正相关关系,指示这些元素广泛存在于各种粒径的软磁性颗粒中.而Cr、Cd和Hg含量与 $\chi_{ARM}$ 、SIRM呈显著正相关但与 $\chi_f$ 之间不存在明显相关性,表明这3种元素可能与SD

和 MD 颗粒共存; 同时, Cr 和 Cd 含量还与 S-比值呈显著正相关关系, 表明 Cr 和 Cd 更可能与软磁性颗粒共存; Hg 含量与 SIRM/ $\chi$  之间的显著正相关进一步证明 Hg 与较粗的磁性颗粒共存. 城市公园土壤中 As 含量与  $\chi_{fd}\%$  之间的显著正相关关系指示 As 可能来源于自然过程形成的少量 SP 颗粒.

表 4 城市公园土壤重金属含量与磁学性质相关系数

Tab. 4 Correlation coefficient between heavy metal content and magnetic properties in urban park soil

指标	$\chi_{ARM}$	$\chi_{fd}$	SIRM	$\chi_{fd}\%$	SIRM/ $\chi$	S-100	S-300
Cu	0.539*	0.279*	0.473*	-0.247*	0.129	0.346*	0.345*
Zn	0.343*	0.189**	0.310*	-0.148	0.108	0.228*	0.243*
Ni	0.454*	0.217**	0.345*	-0.278*	0.020	0.327*	0.330*
Pb	0.396*	0.205**	0.368*	-0.020	0.042	0.287*	0.276*
Cr	0.487*	0.126	0.313*	-0.034	0.118	0.203**	0.199**
Cd	0.212**	0.090	0.204**	-0.122	0.161	0.148	0.173**
As	0.078	-0.015	0.022	0.306*	-0.054	0.010	-0.040
Hg	0.337*	0.146	0.336*	-0.057	0.201**	0.130	0.137

注: \* 和 \*\* 分别表示在 0.01, 0.05 水平下显著相关; 无 \* 表示无显著相关关系.

因此, 土壤中以 SD 和 MD 为主要磁性颗粒, 含少量超顺磁颗粒 SP.  $\chi_{ARM}$ 、SIRM 对 Cu、Zn、Ni、Pb、Cr、Cd 和 Hg 有指示意义;  $\chi_{fd}$  对 Cu、Zn、Ni、Pb 有指示意义; S-比值对 Cu、Zn、Ni、Pb、Cr、Cd 有指示意义; SIRM/ $\chi$  对 Hg 有指示意义;  $\chi_{fd}\%$  对 As 有指示意义.

综上所述, 重金属可以积聚在表土, 重金属含量的高低可以指示城市环境污染程度. 人类活动会导致一部分的重金属进入城市表土, 在这一过程中会释放一定数量的磁性颗粒, 所以表土中的磁性矿物和重金属元素存在着一定的共存关系, 表土磁学参数和重金属元素含量的 Pearson 相关分析结果进一步表明, 环境磁学技术方法可有效地应用于土壤重金属含量监测检测, 但不同类型土壤所适用的磁学指标有所不同.

### 2.3 土壤重金属含量与磁学性质分布分析

在前述土壤重金属含量与环境磁学指标相关关系分析的基础上, 为土壤选取具有显著相关关系的重金属元素含量与磁学指标作散点图进行进一步分析. 城市公园土壤重金属含量与磁学指标的散点图分别如图 3-6 所示.

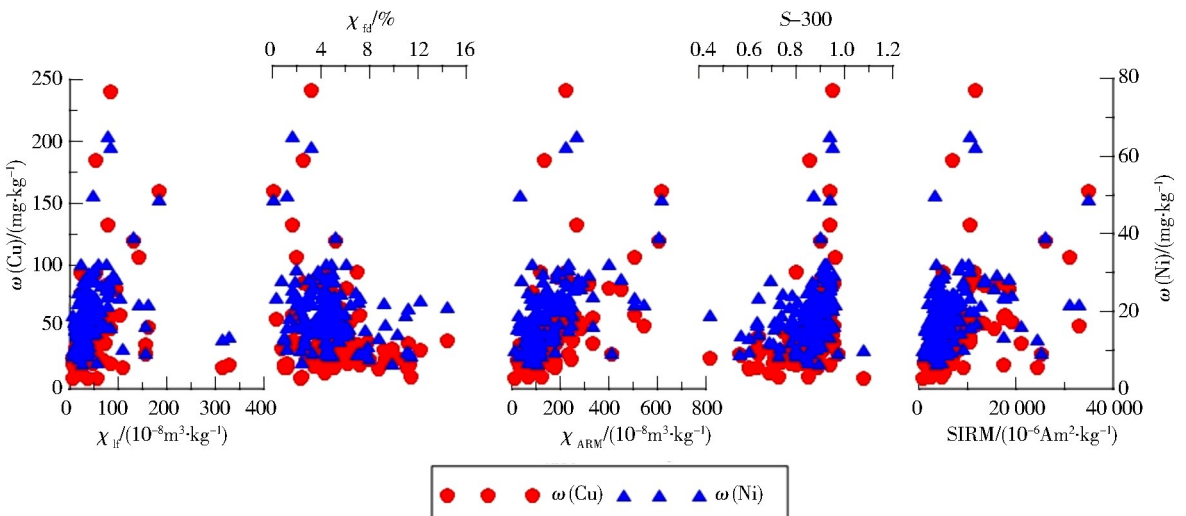


图 3 城市公园土壤 Cu、Ni 含量与磁学性质散点图

Fig. 3 Scatter plot of Cu and Ni contents and magnetic properties in urban park soil

从图 3-6 所示的重金属与环境磁学指标间的相关关系来看, 城市公园土壤中 Cu、Zn、Ni、Pb、Cr、Hg、Cd、As 含量都与磁性颗粒有着密切关系, 少量 Cu、Zn、Ni、As 存在于软磁性的 SP 颗粒中, 这些 SP 颗粒可能是自然成土过程中产生的, 也可能通过大气降尘输入<sup>[18]</sup>. 综上所述上述重金

属在城市公园土壤中存在有人为输入的软磁性 SD、MD 颗粒。

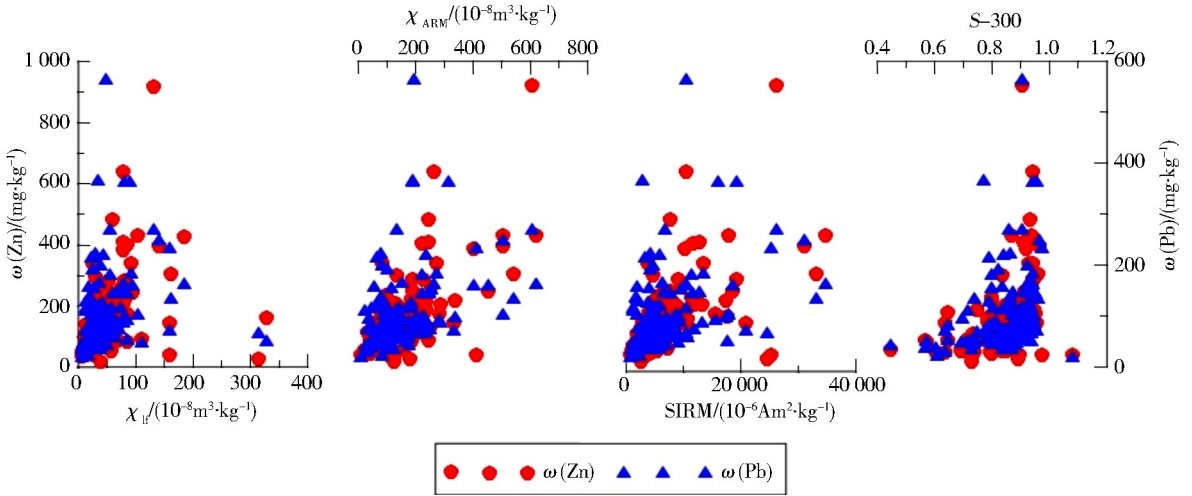


图 4 城市公园土壤 Zn、Pb 含量与磁学性质散点图

Fig. 4 Scatter plot of Zn and Pb contents and magnetic properties in urban park soil

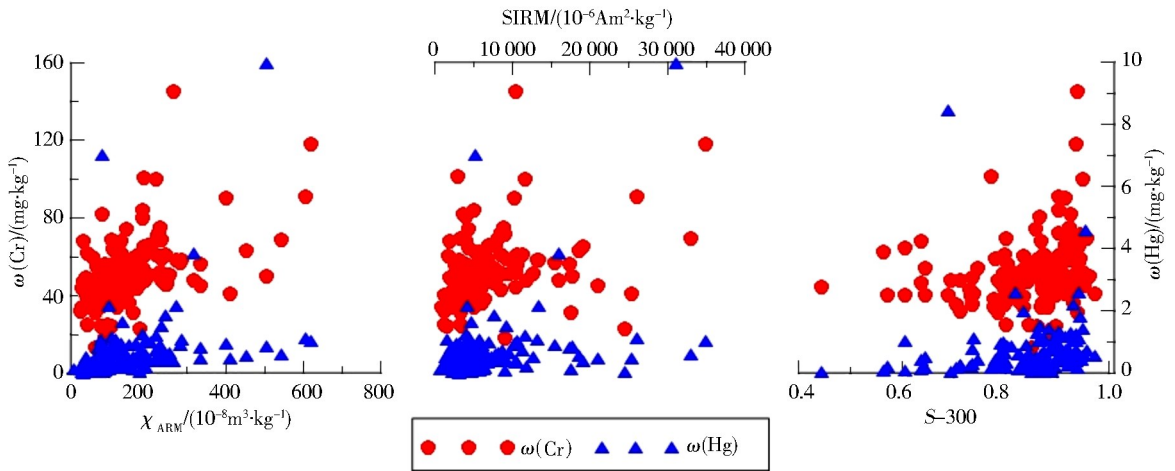


图 5 城市公园土壤 Cr、Hg 含量与磁学性质散点图

Fig. 5 Scatter plot of Cr and Hg contents and magnetic properties in urban park soil

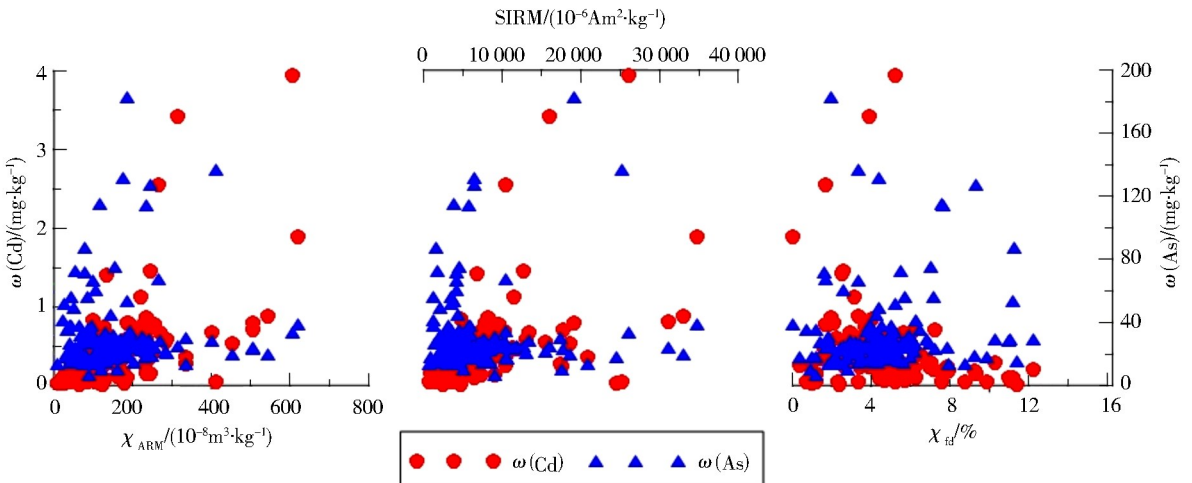


图 6 城市公园土壤 Cd、As 含量与磁学性质散点图

Fig. 6 Scatter plot of Cd and As contents and magnetic properties in urban park soil

## 2.4 利用磁学指标计算重金属含量

对公园土壤代表磁性矿物含量、粒度的低频磁化率、频率磁化率及反映高矫顽力矿物含量的 HIRM 与重金属进行相关性分析, 如表 5 所示. 结果表明, 土样品  $\chi_{lf}$  与 Cu、Zn、Ni、Pb、Cr、Hg 都存在显著的正相关关系 ( $P < 0.01$ ), 说明了土壤中 Cu、Zn、Ni、Pb、Cr、Hg 来源与磁性矿物颗粒有关, 而 Cd、As 与样品  $\chi_{lf}$  不存在显著相关性; HIRM、 $\chi_{fd}$  与重金属之间的相关性较差, 亦不存在显著的相关性. 对  $\chi_{lf}$ 、 $\chi_{fd}$  与 HIRM 进行进一步分析, 公园用地的土壤  $\chi_{fd}$  与 Cu、Ni、As 存在极显著的负相关关系 ( $P < 0.01$ ),  $\chi_{lf}$  与 Cu 呈现显著正相关关系, HIRM 与 Cu 呈正相关关系.

表 5 土壤样品重金属含量与磁学性质之间的相关关系

Tab. 5 Correlation between heavy metal content and magnetic properties of soil samples

用地类型	指标	Cu	Zn	Ni	Pb	Cr	Cd	As	Hg
公园用地	$\chi_{lf}$	0.279**	0.189*	0.217*	0.205*	0.126	0.091	-0.015	0.146
	$\chi_{fd}$	-0.247**	-0.148	-0.278**	-0.020	-0.034	-0.121	0.306**	-0.057
	HIRM	0.200*	0.096	0.076	0.075	0.155	0.089	-0.017	0.105

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.

为了探讨土壤的磁性特征与重点重金属含量之间的关系, 在上述土壤重金属与磁学性质相关分析的基础上, 以  $\chi_{lf}$ 、 $\chi_{fd}$  作为因变量, 以 Cu、Ni、As 含量为自变量 (相关度高), 分别对  $\chi_{lf}$  与 Cu,  $\chi_{fd}$  与 Cu、Ni、As 进行回归曲线分析, 结果如表 6 所示.

表 6 公园绿地土壤中的重金属含量 (y) 与土壤磁性指标 (x) 之间的回归方程

Tab. 6 Regression equation between heavy metal content (y) and soil magnetic index (x) in park green space soil

用地类型	因变量	回归方程	R <sup>2</sup>
公园用地	$\chi_{lf}$	$Cu: y = 7.7782 \chi_{lf}^{0.4368}$	0.2991
		$Cu: y = 7.634 \ln(\chi_{fd}) + 35.252$	0.0996
	$\chi_{fd}$	$Ni: y = 1.1809 \chi_{fd} + 16.441$	0.0643
		$As: y = 0.6576 \chi_{fd}^2 - 2.8673 \chi_{fd} + 30.45$	0.0171

如表 6 所示, 在公园用地中  $\chi_{lf}$  与 Cu 之间的回归方程为幂函数型, 而  $\chi_{fd}$  与 Cu、Ni、As 之间的函数关系分别为对数型、线型及多项式型. 结合上表可得, 土壤中部分重金属含量在得知  $\chi_{lf}$ 、 $\chi_{fd}$  或 HIRM 条件下, 可以通过以上回归方程推导得出.

## 3 结论

### 3.1 环境磁学检测分析结果

(1) 公园绿地土壤磁学数据统计表明: 低频磁化率大都大于高频磁化率, 两者变化趋势一致. 磁化率参数也存在区域上的差异. 高、低频磁化率荔湾区最高, 天河区最低, 越秀区和白云区分列中等位置. 频率磁化率荔湾区最低, 白云区最高, 天河区和越秀区居中.

(2) 人为输入的 SD、MD 软磁性颗粒主导了城市公园这一高强度人类活动区域土壤的磁性, 同时硬磁性颗粒也有不容忽视的贡献. 地球化学测试结果证明大部分土壤样品都受到了 8 种重金属 (Cu、Zn、Ni、Pb、Cr、Cd、As、Hg) 污染.

### 3.2 土壤磁学参数与地球化学指标相关分析结果

(1) 城市公园土壤中 Cu、Zn、Ni、Pb 广泛存在于各种粒径的软磁性颗粒中; Cr、Cd 和 Hg 可能与 SD 和 MD 颗粒共存; Cr 和 Cd 更可能与软磁性颗粒共存; Hg 与较粗的磁性颗粒共存; As 可能来源于自然过程形成的 SP 颗粒;

(2) 土壤重金属含量环境磁学监测信息系统能为土壤重金属含量监测提供一种快捷、有效的新途径, 是一种创新思路和技术的尝试, 但由于依据的数据尚不够海量, 故尚存在一定的误差, 而且暂时只适用于所研究的区域<sup>[19-21]</sup>. 今后需要补充大量的数据来改善系统的适用性.



综上所述,广州市主城区绿地公园表土的地球化学元素尤其是重金属元素的含量与各类磁学参数具有内在的相关性,在广州市土壤磁学尚属首次.因此,深入调查、检测和研究不同地区尤其是人类活动区的环境磁学指标与地球化学元素指标之间的关系及其控制机制,是一个土壤环境质量和环境污染监测的新的技术途径.

### 参考文献:

- [1] STRZYSZCZ Z. Magnetic susceptibility of soils in the areas influenced by industrial emissions [M]. Basel: Birkhäuser, 1993: 1-359.
- [2] JENKINS P, DUCK R, ROWAN J, et al. Fingerprinting of bed sediment in the Tay Estuary, Scotland: an environmental magnetism approach [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2002, 6 (6): 1007-1016.
- [3] SCHIBLER L, BOYKO T. Topsoil magnetic susceptibility mapping: data reproducibility and compatibility, measurement strategy [J]. Studia Geophysica Et Geodaetica, 2002, 46 (1): 43-57.
- [4] EVANS M, HELLER F. Environmental Magnetism [M]. San Diego: Academic Press, 2003: 1-299.
- [5] 李琼琼,柳云龙,孙于然,等.“城-郊-乡”土壤环境磁学特征及其空间分布研究[J].长江流域资源与环境,2020,29(2):442-448.
- [6] 孙于然,柳云龙,陈诚,等.城市交通绿地土壤磁性的空间变异特征及其环境意义[J].生态环境学报,2019,28(9):1893-1899.
- [7] 韩文堂,陈学刚.新疆喀纳斯景区表层土壤磁学特征及环境意义[J].土壤,2019,51(1):185-194.
- [8] 付淑清,韦振权,吴翼,等.环境磁学方法在珠三角表层土壤和沉积物环境监测中的应用[J/OL].安全与环境学报,[2022-03-18]:1-10. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2021.1208.
- [9] 聂燕,王新,王博,等.西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应[J].环境科学,2015(9):9.
- [10] 常家华,杨世利,余江.典型企业场地土壤重金属污染及风险水平研究[J].东北师大学报(自然科学版),2019,51(1):154-160.
- [11] 吴俊伟,曾悦,杨月,等.基于云模型的饮用水源地原水重金属健康风险综合评价[J].福州大学学报(自然科学版),2014,42(2):327-332.
- [12] 夏敦胜,魏海涛,马剑英,等.中亚地区现代表土磁学特征及其古环境意义[J].第四纪研究,2006,26(6):937-946.
- [13] OLDFIELD F. Toward the discrimination of fine-grained ferrimagnets by magnetic measurements in lake and near-shore marine sediments [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1994, 99 (B5): 9045-9050.
- [14] DEARING J. Environmental magnetic susceptibility, using the Bartington MS2 system [M]. England: ChiPublishing, 1999: 15-60.
- [15] VEROSUB K, ROBERTS A. Environmental magnetism: past, present, and future [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1995, 100 (B2): 2175-2192.
- [16] HANESCH M, SCHOLGER R, REY D. Mapping dust distribution around an industrial site by measuring magnetic parameters of tree leaves [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37 (36): 5125-5133.
- [17] 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.
- [18] SHU J, DEARING J, MORSE A, et al. Magnetic properties of daily sampled total suspended particulates in Shanghai [J]. Environmental Science & Technology, 2000, 34 (12): 2393-2400.
- [19] HU X, SU Y, YE R, et al. Magnetic properties of the urban soils in Shanghai and their environmental implications [J]. Catena, 2007, 70 (3): 428-436.
- [20] 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.
- [21] 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):230-236.