

金华市表土与树叶磁性特征及其环境指示意义

孙小涵, 李怡莹, 张秀秀

浙江师范大学地理与环境科学学院, 浙江 金华

收稿日期: 2025年3月3日; 录用日期: 2025年4月10日; 发布日期: 2025年5月15日

摘要

本研究以环境磁学为基础, 选取金华市表土和行道树的叶片进行研究, 通过磁学分析比表土和树叶的磁性特征, 并以数理分析作为补充, 揭示金华市土壤污染特征, 并为金华市治理环境污染提供新的思路和方法。在金华市二环内同一采样点采集树叶和表土样品各103份, 利用环境磁学方法对其进行磁学分析, 以得到表土和树叶对环境污染的指示差异。结果表明: (1) 表土样品的磁学特征主要由磁铁矿和磁赤铁矿主导, 主要为准单畴和多畴颗粒, 工业区和绿化区的土壤污染水平最高, 居住区和商业区最低。(2) 树叶样品的磁学特征受亚铁磁性矿物控制, 指示工业区和绿化区污染较重, 文教区受人为干扰较少。(3) 对比表土和树叶样品, 发现两者在工业区和绿化区的磁性矿物含量均较高, 但表土在商业区的含量低于文教区, 而树叶在文教区的含量低于商业区, 这与污染类型和载体特性有关。(4) 表土和树叶均为采样便利的污染载体, 能反映短期污染情况。表土对土壤污染指示作用较好, 树叶在指示大气污染方面表现优异。结合两种载体可提高监测结果的准确性。

关键词

环境磁学, 金华市, 表土, 树叶

Magnetic Characteristics of Topsoil and Leaves in Jinhua City and Their Environmental Indicative Significance

Xiaohan Sun, Yiyang Li, Xiuxiu Zhang

College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: Mar. 3rd, 2025; accepted: Apr. 10th, 2025; published: May 15th, 2025

Abstract

This study is based on environmental magnetism, selecting topsoil and leaves of roadside trees in

文章引用: 孙小涵, 李怡莹, 张秀秀. 金华市表土与树叶磁性特征及其环境指示意义[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(5): 732-744. DOI: 10.12677/aep.2025.155083

Jinhua City for research. Through magnetic analysis, the magnetic characteristics of topsoil and leaves are compared, and mathematical analysis is used as a supplement to reveal the characteristics of soil pollution in Jinhua City, providing new ideas and methods for environmental pollution control in Jinhua City. 103 samples of leaves and topsoil were collected at the same sampling point within the Second Ring Road of Jinhua City, and magnetic analysis was conducted using environmental magnetic methods to obtain the differences in environmental pollution indicators between topsoil and leaves. The results showed that: (1) The magnetic characteristics of topsoil samples were mainly dominated by magnetite and magnetite, mainly consisting of quasi single domain and multi domain particles. The soil pollution levels were highest in industrial and green areas, and lowest in residential and commercial areas. (2) The magnetic characteristics of leaf samples are controlled by ferromagnetic minerals, indicating heavy pollution in industrial and green areas, and less human interference in cultural and educational areas. (3) Comparing the samples of topsoil and leaves, it was found that both had higher magnetic mineral content in industrial and green areas, but the content of topsoil in commercial areas was lower than that in cultural and educational areas, while the content of leaves in cultural and educational areas was lower than that in commercial areas, which is related to the type of pollution and carrier characteristics. (4) Both topsoil and leaves are convenient pollution carriers for sampling and can reflect short-term pollution situations. Topsoil has a good indication effect on soil pollution, while leaves perform well in indicating atmospheric pollution. Combining two carriers can improve the accuracy of monitoring results.

Keywords

Environmental Magnetism, Jinhua City, Topsoil, Leaf

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着中国经济的快速发展和城镇化的推进，人类活动对生态环境的影响日益加剧。工业生产、交通运输、化石燃料燃烧等活动向环境中排放大量污染物，导致城市土壤污染问题日益突出。环保部数据显示，全国 16.1% 的土壤污染超标，城市土壤污染已成为严重威胁人类健康的重要问题。城市土壤不仅与居民健康密切相关，还影响水体和大气质量，城市道路尘埃的再悬浮成为大气中重要的污染源[1]。工业生产和机动车辆产生的磁性颗粒沉积在地表或混入表土中，成为土壤扬尘的重要组成部分[2]。研究表土中的磁性颗粒物是环境磁学研究的重要内容之一[3]。

金华市作为浙江中部的重点城市，近年来也面临着土壤污染问题。金华市属亚热带季风气候，主要土壤类型为红壤和黄壤，城市道路密集，机动车辆多，工业发达，周边绿化良好。交通运输和工业生产产生的污染物中含有大量的磁性颗粒，这些颗粒通过多种途径进入城市土壤，使得城市表层土壤的磁学特征与自然土壤存在显著差异[4]。相比传统化学分析法，土壤磁学在污染物监测和评价中具有效率高、成本低、操作简便、无二次污染等优点，近年来逐渐在国内外得到广泛应用[5]。

近年来，国内外研究者利用环境磁学对城市土壤[1] [3] [5] [6]、耕地土壤[7] [8]、交通要道土壤污染[9] [10]、新雪[11]等展开了大量研究。研究表明，在被污染的土壤中，其表层会存在大量的亚铁磁性矿物，并且这些矿物的含量和磁性参数的大小与人类活动类型和强度有着密切关系[12]。因此，以表土作为研究对象，探讨表层土壤污染与磁学特征的内在联系，对监测区域环境污染有十分重要的意义。

本研究通过测试表土样品的等温剩磁(IRM)、饱和等温剩磁(SIRM)、高低频磁化率(χ_{lf} 、 χ_{hf})、无磁滞剩磁(χ_{ARM})、HIRM、SOFT、ARM/lf、ARM/SIRM 等参数,分析不同功能区表土的磁学特征,探讨表土 SIRM 值与金华市不同功能区的关系及污染空间分布规律,并利用 Dearing 图判断表土磁性矿物颗粒大小,揭示金华市表土的磁学特征。同时,通过测定叶片样品的 SIRM、IRM、软剩磁、硬剩磁等磁学参数,分析不同功能区树叶样品的磁学特征,探求其空间分布规律,揭示金华市植物叶片的磁学特征。最后,对表土样品的磁学参数进行相关分析,判断表土样品磁化率的主要贡献矿物,对比分析表土样品和树叶样品的磁学参数特征,结合相关文献总结叶表颗粒物和表土对环境污染的指示差异,分析不同功能区的污染情况。揭示金华市表土和植物叶片的磁学特征,并明确其土壤污染指示意义。

2. 国内外文献综述

随着工业化和城镇化进程的加快,环境污染问题日益严峻,迫切需要方便且准确的手段来辨别土壤污染状况,以有效治理环境污染。表土的磁学特征不仅可用于解释环境和气候变化,也广泛应用于环境污染检测。人类活动导致土壤磁学特征的变化,使得利用磁学方法监测表层土壤污染成为可能。

国内外学者对不同地区表土的磁性特征进行了广泛研究,探索其对环境污染的指示意义。张大文[13]等人研究枣庄市交通干线沿线表土的磁学特征,发现表土中的磁性矿物主要为粗颗粒磁铁矿,且其含量显著高于对照组,说明强磁性颗粒是导致研究区表层土壤磁学性质增强的重要因素。贾正长[14]通过研究上海城市中心区域的表土,发现城市中心区域的磁化率较高,且从内环向外逐渐降低,工业和交通是影响表土磁化率的主要因素。许淑婧[15]等人研究西北干旱区黄河沿岸工业城市的表土,发现工业区表土的磁性矿物浓度最高,颗粒最大,农业区次之,原煤区最低。国外研究中,Déborá C. Marié 等人[16]对交通污染物的初步研究表明,汽车尾气排放的磁信号由类磁铁矿控制,且收费站附近的磁力值较高,与交通量密切相关。Michal S. Bučko 等人[17]进一步探讨了不同交通量道路两侧灰尘的磁性和地球化学特征,发现交通污染是主要的磁性颗粒来源,且与道路附近土壤中的重金属浓度高度相关。S. G. Lu 等人[18]的研究显示,丽水市路边表土的磁性和重金属浓度显著升高,表土磁学参数与交通活动之间存在显著的空间关系。

除了表土,植物叶片也是研究大气污染的天然指示器。大气中的微粒通过沉降、碰撞、扩散和截留沉积到叶片表面,植物叶片因长期暴露在污染大气中,成为大气颗粒物的良好接受者。研究表明,北京市叶片上 96%的微粒为细小颗粒,主要聚集在叶面褶皱区、绒毛和气孔附近[19]。对比欧洲多座城市的植物叶片磁性特征发现,交通区叶片的吸附颗粒物浓度显著高于清洁区。研究也显示,近半数的颗粒物会随着大气运动重新回到大气中,松柏类植物则会长期滞留大气颗粒物。植物滞尘能力与叶片的形态学特征、植被的冠型结构、树木健康状况等密切相关,不同种类的城市绿化树种在滞尘能力上存在显著差异,常绿乔木滞尘能力最好[20]。通过对植物叶片磁性特征的测量,可以反映特定地点一段时间内的空气质量和环境污染物信息[21]。因此,植物叶片成为了大气颗粒物的天然接收器,为生物磁学监测提供了优良载体[22] [23]。

3. 材料与方法

3.1. 样品采集

本文的研究区域为金华市二环以内的地区,属于金华市婺城区和金东区。本区域位于盆地,地势中低四周高。属于亚热带季风气候,年平均气温约 17.5℃,年均降水量 1424 mm。金华市主要土壤类型为红壤和黄壤,植被分区属亚热带常绿阔叶林,植被类型丰富多样。区域交通发达,道路绿化良好。道路绿化植被主要有红花檵木、海桐、女贞、石楠等。

选取金华市二环以内作为研究区域,采用均匀布点法设置采样点(见图 1),每隔 1 公里采一个样,并划分功能区,共采集树叶和表土样品各 103 份,其中居住区 22 份,文教区 13 份,商业区 9 份,工业区

33 份, 绿化区 26 份。在采集树叶样品之前, 必须确保 15 天内无雨, 须选择晴朗、风力小的天气进行, 并注意采集离地面同一高度的、没有病虫害、离道路较近的叶片; 在同一地点采集表层土壤, 注意采样深度为 0~5 cm; 为避免污染, 在收集样品之前需要戴好手套并且及时更换, 且采集树叶样品时尽量避免碰到叶片表面。采集的样品装在封口塑料袋中, 对封口塑料袋进行编号, 并利用 GPS 记录每个样品的经纬度位置。采样结束后将封口袋打开, 置于恒温箱中 40℃ 低温烘干, 作为叶片样品和土壤样品保存。

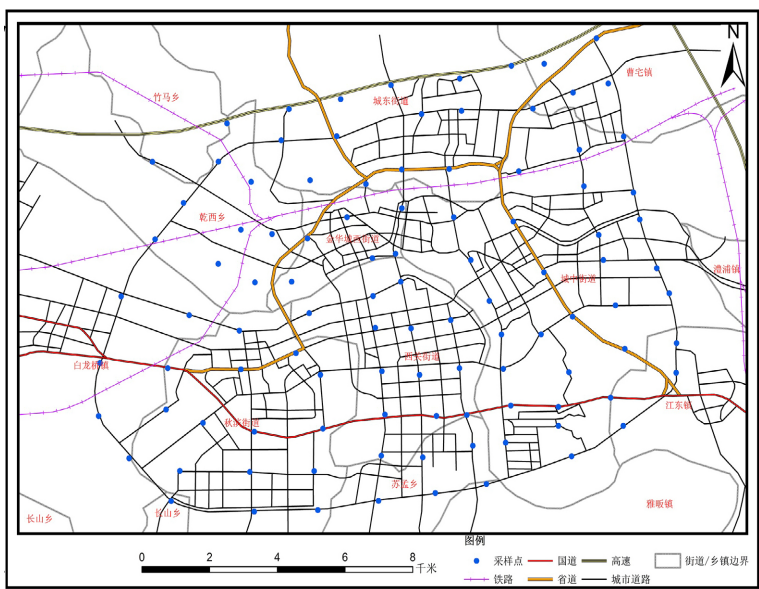


Figure 1. Distribution of sampling points in the study area
图 1. 研究区采样点分布图

3.2. 实验方法

将树叶样品烘干后, 用保鲜膜包裹好, 放入 8 cm³ 无磁立方盒中, 测定其磁学指标; 表土样品烘干后, 将植物根系等其他杂物去除, 并研磨过筛, 称取 5 g, 用保鲜膜包紧, 放入 8 cm³ 磁学专用样品盒中压实, 测定其磁学参数。

在树叶样品的磁学测试中, 首先使用 ASC 公司生产的 IM-10-30 强磁仪, 分别对叶片样品施加 1000 mT, -20 mT, -100 mT 和 -300 mT 的直流磁场, 并采用 JR-6A 旋转磁力仪对树叶样品进行等温剩磁(IRM)测定, 最后通过 Excel 工具对树叶样品的 SIRM 和 IRM 值进行计算。

在对表土样品进行磁学实验时, 采用 Bartington 公司生产的 MS2 的磁化率仪来测量土样的低频磁化率(χ_{lf})和高频磁化率(χ_{hf}), 并计算百分频率磁化率($\chi_{fd}\%$); 同时, 利用 ASC 公司生产的 D-2000 退磁仪分别施加直流磁场 0.1 mT 和交变磁场 100 mT, 以获取无磁滞剩磁(ARM), 并利用 AGICO 公司的 JR-6A 旋转磁力仪测量强度, 计算得到 χ_{ARM} 。表土样品的 SIRM 和 IRM 值测量方法与树叶样品相同。在上述测量结果的基础上, 利用 Excel 工具计算得到硬剩磁(HIRM)和软剩磁(SOFT), χ_{ARM}/χ_{lf} , $\chi_{ARM}/SIRM$ 等参数。

4. 结果与分析

4.1. 表土磁学参数分析

利用 Excel 对研究区的土壤样品的磁学参数进行统计, 统计结果如表 1 所示, 用以表征金华市表土样品中磁性矿物含量、颗粒大小以及类型。图 3 体现了表土磁学参数随空间变化的规律。

Table 1. Basic statistics of surface soil magnetic parameters in Jinhua City
表 1. 金华市表土磁参数基本统计

	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数
$\chi_{\text{f}} (10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	19.48	551.52	156.36	120.49	0.77
$\chi_{\text{hf}} (10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	18.18	550.72	153.60	119.48	0.78
$\chi_{\text{fd}}^0 \%$	0.08	7.37	2.25	1.78	0.79
$\chi_{\text{ARM}} (10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	7.44	1734.57	386.23	254.14	0.66
SIRM ($10^{-5} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$)	202.92	7718.88	2366.47	1684.20	0.71
S _{-20mT} (%)	14.81	40.49	24.24	4.89	0.20
S _{-100mT} (%)	55.87	94.76	78.83	7.39	0.09
S _{-300mT} (%)	67.68	99.58	94.44	4.76	0.05
HIRM ($10^{-5} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$)	11.89	674.57	90.78	75.45	0.83
SOFT ($10^{-5} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$)	43.53	2404.00	599.69	493.01	0.82
SOFT%	14.81	40.49	24.24	4.89	0.20
HARD%	0.42	32.32	5.56	4.76	0.86
$\chi_{\text{ARM}}/\chi_{\text{f}}$	0.15	10.45	2.98	1.43	0.48
$\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM} (10^{-3} \text{ m A}^{-1})$	0.03	0.67	0.19	0.08	0.44

低频磁化率(χ_{f})是一种表征样品受外界磁场作用下被磁化的难易程度的参数,它的大小能够体现样品中的磁性矿物富集程度,主要反映样品中亚铁磁性的含量[24]。在研究区内,表土样品的 χ_{f} 值在 $19.48 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \sim 551.52 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间波动,平均值为 $156.36 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。从空间分布上看,磁化率值大致呈现南北高,中心低的情况。南部的磁化率高值主要集中在南二环路和海棠西路,北部的高值多分布在北二环西路和环城北路,此外,城市西部的环城东路、东二环与金温线附近也存在高值,说明这些道路附近样品中亚铁磁性矿物含量较高。低值集中在宾虹西路、金衢路、万达广场、金都美地、东二环和仁芳街。研究区南部和北部样品值较高且变化幅度较大,磁化率的高低变化体现了样品所含磁性矿物浓度高低的空

间变化规律。饱和等温剩磁(SIRM)指的是样品能获得的最大剩磁,它主要反映了样品中磁性矿物的富集程度[25]。SIRM 值易受磁性矿物颗粒的影响,不受顺磁、抗磁性物质影响[26]。研究区表土样品的 SIRM 平均值为 $2366.47 \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$,最高值达 $7718.88 \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$,最小值为 $202.92 \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$,样品所含磁性矿物很高。SIRM 值在空间分布特征上与 χ_{f} 相近,高值主要集中在南二环路、海棠西路、北二环路和环城北路等,低值集中在宾虹西路、金衢路、万达广场、金都美地、东二环和仁芳街等。通过对样品 SIRM 和 χ_{f} 进行相关分析,二者呈明显的线性相关关系($R^2 = 0.905$ 图 2),表明研究区土壤样品的磁学性质主要由亚铁磁性矿物主导。对金华市各功能区表土的饱和等温剩磁进行测试,得到的饱和等温剩磁值有较大差异(表 2)。研究区内饱和等温剩磁水平最高的功能区为工业区和绿化区,其次为居住区和文教区,商业区饱和等温剩磁的平均值最低,表明工业区和绿化区磁性矿物含量最高,居住区和文教区次之,商业区磁性矿物含量最低。

Table 2. Basic statistics of saturation isothermal remanence of surface soil in each functional area (Unit: $10^{-5} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$)
表 2. 各功能区表土饱和等温剩磁基本统计(单位: $10^{-5} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$)

	居住区	文教区	商业区	工业区	绿化区
最小值	579.84	222.00	276.36	202.92	234.50
最大值	6275.96	4237.73	2472.71	7718.88	7208.75
平均值	2355.03	2364.70	1492.42	2581.90	2406.15
标准差	1387.45	1266.26	883.76	2076.88	1754.19
变异系数	0.59	0.54	0.59	0.80	0.73

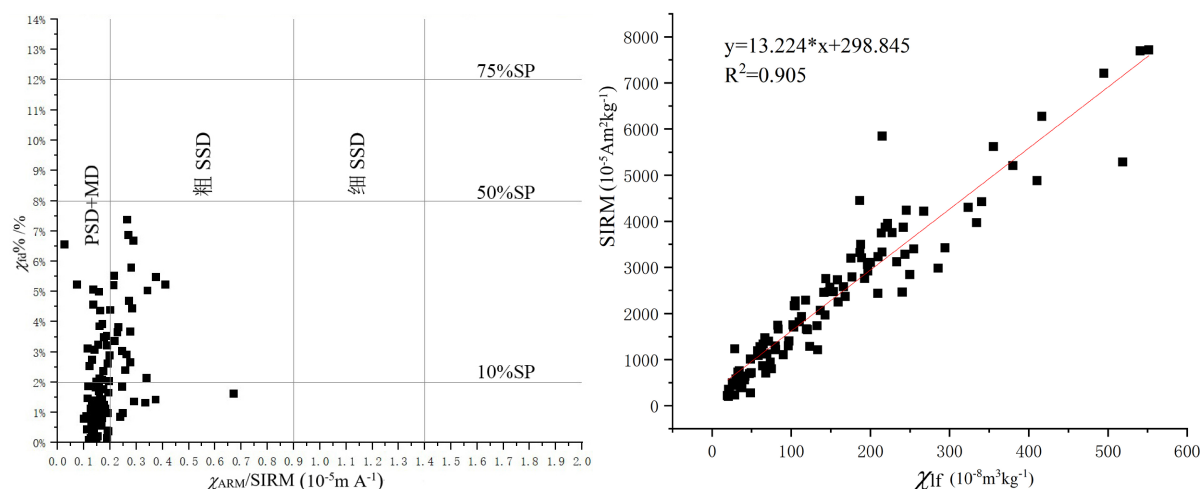


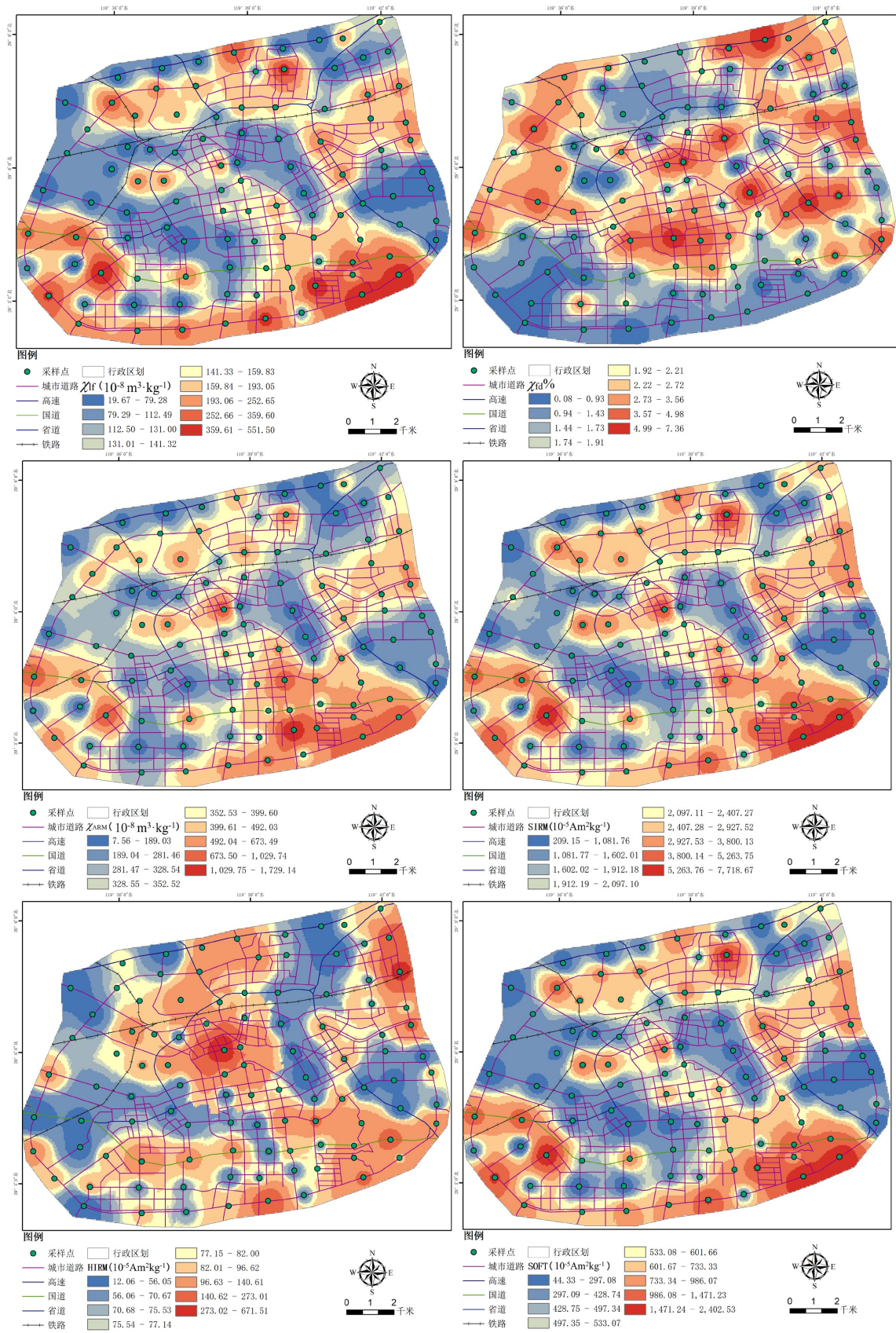
Figure 2. χ_{f} , SIRM diagrams and Dearing figure
图 2. χ_{f} , SIRM 关系图和 Dearing 图

$S_{-300\text{mT}}$ 指示样品中的低矫顽力亚铁磁性矿物的比例,如磁铁矿和磁赤铁矿等[27]。其平均值为 94.44%, 变化范围在 67.68%~99.58%之间, 当磁场强度为-300 mT 时, 土壤样品的等温剩磁趋于饱和, 证明磁铁矿和磁赤铁矿等是金华市表土样品主要载磁矿物。

频率磁化率 $\chi_{\text{f}}\%$ 能够体现样品中超顺磁颗粒的含量变化, 超顺磁颗粒具有较高的频率磁化率[28]。研究区频率磁化率的变化范围为 0.08%~7.37%, 平均值为 2.25%, 研究区的频率磁化率值整体偏低, 表明样品中细小的超顺磁颗粒矿物的含量很少。 $\chi_{\text{ARM}}/\chi_{\text{f}}$ 、 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 可以判断样品磁性颗粒的粒径大小, 较细颗粒(SD)比值高, 粗颗粒(MD 或 PSD)比值低, 金华市表土样品 $\chi_{\text{ARM}}/\chi_{\text{f}}$ 平均值为 2.98, 最大值为 10.45, 最小值为 0.15。 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 平均值为 $0.19 \times 10^{-5} \text{ m A}^{-1}$, 变化范围在 $0.03 \times 10^{-5} \text{ m A}^{-1}$ ~ $0.67 \times 10^{-5} \text{ m A}^{-1}$ 之间。据前人研究可知, 当磁铁矿作为样品的主要磁性矿物时, 可以用 Dearing-plot 图来判断磁性矿物的颗粒大小[29]。由 Dearing 提出的应用 $\chi_{\text{f}}\%$ 半定量估算 SP 颗粒浓度的半定量分析模型[29]可以看出, 当频率磁化率小于 2% 时, 样品中基本没有 SP 颗粒, 当频率磁化率位于 2%~10% 之间时, 样品中同时存在 SP 和粗颗粒; 当频率磁化率在 10%~14% 之间时, 样品基本均为 SP 颗粒。将表土样品的 $\chi_{\text{f}}\%$ 为纵坐标, $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 为横坐标绘制 Dearing-plot 图(图 2), 绝大多数表土样品都落入 PSD 和 MD 范围, 少数落入粗 SSD 范围, 且样品均小于 50%SP, SP 颗粒含量较低, 说明金华市表土样品中的磁性矿物以准单畴、多畴颗粒等磁畴粒径较粗的矿物为主。

无磁滞磁化率 χ_{ARM} 主要只适合 SO 磁铁矿含量, 因此被广泛用于检测样品单畴以及附近颗粒的含量。研究区 χ_{ARM} 的最大值达 $1734.57 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 最小值仅为 $7.44 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $386.23 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 总体水平较高。最高值在东阳街和南二环上, 低值位于环城东路、赤松路等。

HIRM 为硬剩磁, 可以用于估算反铁磁性矿物的含量。SOFT 值指示软剩磁, 软剩磁近似反映亚铁磁性矿物含量。研究区 HIRM 最高值为 $674.57 \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$, 最低值为 $11.89 \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$, 平均值为 $90.78 \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$ 。SOFT 的变化范围在 $43.53 \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$ ~ $2404.00 \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$ 之间, 平均水平为 $599.69 \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$ 。HIRM 的高值集中分布在解放西路、东二环、南二环等, 低值主要分布在赤松路、仁芳街、东市北街、金衢路、宾虹西路、西二环等地。SOFT 高值集中在南二环、海棠西路、北二环、环城东路中段、东二环北路中段, 低值主要分布在东市南街、东市北街、八一北街、宾虹西路等地。HARD% 平均值为 5.56%, 变化范围为 0.42%~32.32%。SOFT% 平均值为 24.24%, 变化范围为 14.81%~40.49%。



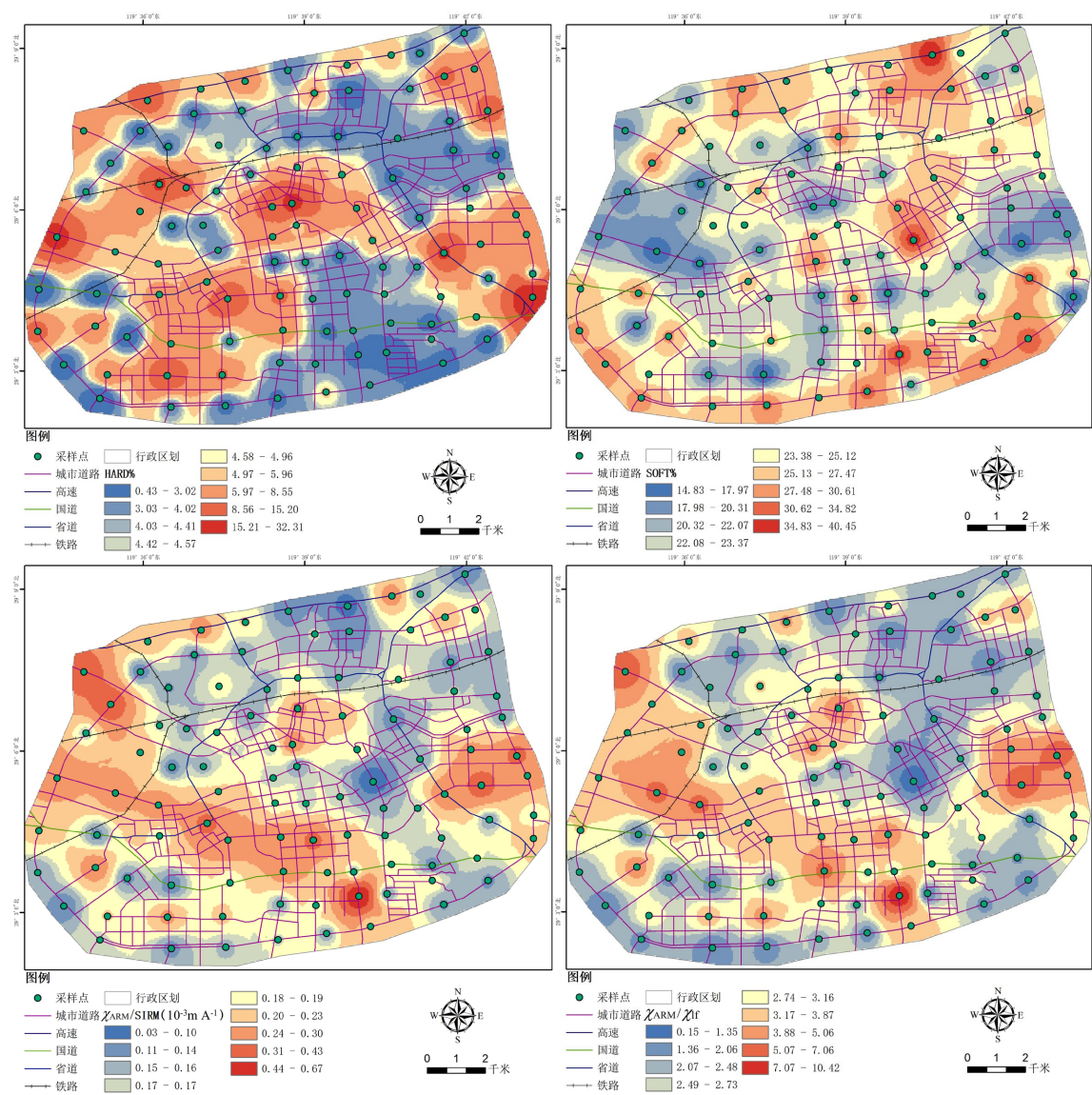


Figure 3. Spatial distribution of topsoil magnetic parameters
图 3. 表土磁学参数空间分布图

4.2. 树叶磁学参数分析

利用 Excel 对金华市行道树树叶的磁学参数进行统计，结果如表 3 所示。

Table 3. Basic statistics of leaf magnetic parameters in Jinhua City
表 3. 金华市树叶磁参数基本统计

	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数
SIRM ($10^{-5}\text{Am}^2\text{kg}^{-1}$)	25.78	529.39	111.20	81.81	0.74
S-20mT (%)	16.72	33.40	24.09	2.32	0.10
S-100mT (%)	75.81	87.64	81.70	2.08	0.03
S-300mT (%)	92.09	99.63	97.99	1.12	0.01
HIRM ($10^{-5}\text{Am}^2\text{kg}^{-1}$)	0.43	17.93	2.08	2.19	1.05
SOFT ($10^{-5}\text{Am}^2\text{kg}^{-1}$)	6.34	126.25	26.83	20.52	0.77

续表

SOFT%	16.72	33.40	24.09	2.32	0.10
HARD%	0.37	7.91	2.01	1.12	0.56

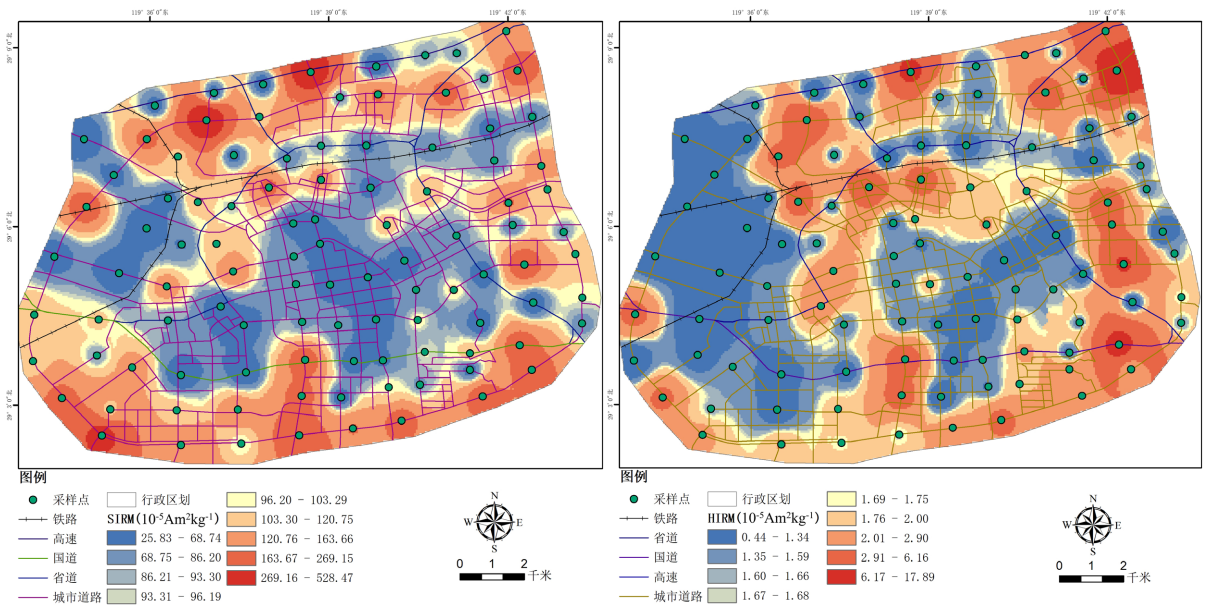
研究区树叶 SIRM 参数的变化范围在 $25.78 \times 10^{-5} \text{Am}^2\text{kg}^{-1}$ ~ $529.39 \times 10^{-5} \text{Am}^2\text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $111.20 \times 10^{-5} \text{Am}^2\text{kg}^{-1}$ 。结合表 4 和图 4 可知,研究区树叶饱和等温剩磁的空间差异性较大。SIRM 空间分布大致体现南北高中心低的特点,高值分布在北南二环、西二环南段、东二环,低值集中在环城南路西段和八一南街,金温线和宾虹西路也存在低值。工业区和绿化区的 SIRM 具有较高水平,平均值分别为 $122.10 \times 10^{-5} \text{Am}^2\text{kg}^{-1}$ 和 $121.70 \times 10^{-5} \text{Am}^2\text{kg}^{-1}$,居住区和商业区次之,文教区最低,为 $67.04 \times 10^{-5} \text{Am}^2\text{kg}^{-1}$ 。这种差异主要是因为工业区污染排放较多且车流量大,绿化区样品采集位置在交通干线附近,因此车流量大,受人类活动影响较大。文教区附近植被覆盖度较高,环境较好,且部分有河流流经,车流量相对较小,离工业区距离远,叶片附着磁污染物较少。由此可知,金华市工业区和绿化区行道树叶片磁性矿物浓度较大。

Table 4. Basic statistics of leaf saturation isothermal remanence in each functional area

表 4. 各功能区树叶饱和等温剩磁基本统计

	居住区	文教区	商业区	工业区	绿化区
最小值	25.79	29.74	36.87	27.52	27.25
最大值	529.39	113.93	251.71	456.06	248.54
平均值	111.90	67.04	102.96	122.10	121.70
标准差	107.54	28.51	74.51	87.36	65.95
变异系数	0.96	0.43	0.72	0.72	0.54

S_{300mT} 平均值为 97.99%,变化范围在 92.09%~99.63%之间。表明树叶样品得到的等温剩磁在 300mT 的磁场下接近饱和,说明行道树叶片样品中所含的主要载磁矿物均为亚铁磁性矿物。



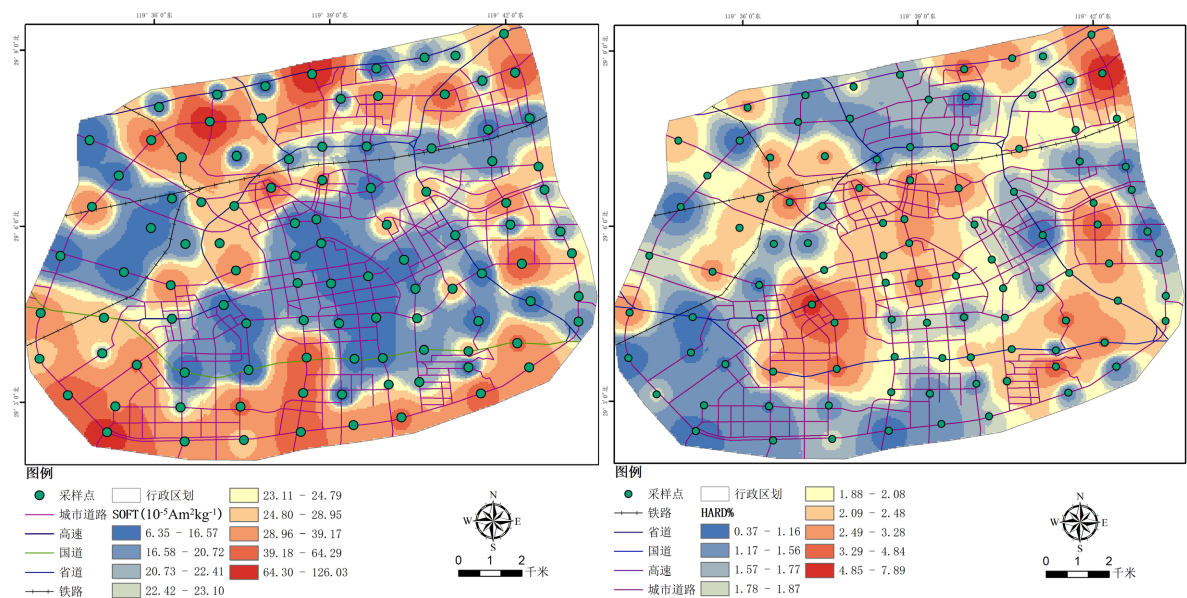


Figure 4. Spatial distribution of leaf magnetic parameters
图 4. 树叶磁学参数空间分布图

树叶样品的硬剩磁最高值可达 $17.93 \times 10^{-6} \text{Am}^2 \text{kg}^{-1}$ ，最低仅为 $0.43 \times 10^{-5} \text{Am}^2 \text{kg}^{-1}$ ，平均值为 $2.08 \times 10^{-5} \text{Am}^2 \text{kg}^{-1}$ 。软剩磁的最大值和最小值分别为 $126.25 \times 10^{-5} \text{Am}^2 \text{kg}^{-1}$ 和 $6.34 \times 10^{-5} \text{Am}^2 \text{kg}^{-1}$ ，平均值为 $26.83 \times 10^{-5} \text{Am}^2 \text{kg}^{-1}$ 。HIRM 的高值集中分布在康济街、康济南街、东二环北段、南二环、人民西路、后城里街等，低值主要分布在西二环与仙华北街之间、西二环与沪昆线之间的城区，八一南街以东到环城东路以西，同时环城北路一带 HIRM 值也较低。SOFT 高值集中在南二环、八达路、金衢路、环城西路一带，低值主要分布在海棠东路和西路以北到宾虹路以南、宾虹西路以北到人民西路以南的地区，环城北路一带 SOFT 值也较低。HARD% 平均值为 2.01%，变化范围为 0.37%~7.91%。SOFT% 平均值为 24.09%，变化范围为 16.72%~33.40%。

5. 讨论

5.1. 表土和树叶磁性对比研究

随着城市化进程的推进，交通和工业活动导致城市表土受到污染，尤其是道路附近和工业区的表土中强磁性颗粒的增加改变了其磁学性质。这些颗粒在风和车辆交通作用下扬起，成为大气悬浮物，并沉降到树叶上，使其也具有一定的磁性。研究表明，叶面灰尘的元素浓度与土壤污染程度显著相关，因此树叶也能反映城市土壤污染状况。本研究在金华市同一采样点采集表土和树叶样品，发现两者的磁性特征在空间分布和不同功能区上存在差异。

总体上，研究区表土和树叶样品的 SIRM 值呈东西高、中心低的分布特征，但在特定区域存在差异。南北二环表土和树叶的 SIRM 值均较高，表明污染较严重；而西二环与沪昆高铁交汇处表土 SIRM 值相对较低，但树叶 SIRM 值较高，可能与交通排放和工厂污染类型有关。仙源路、丹溪东路和建材路附近，表土 SIRM 值低于树叶，表明这些区域以交通产生的大气污染为主，污染物主要附着在树叶上。环城北路、八一南街北段等地表土 SIRM 值较高，树叶 SIRM 值较低，表明这些区域土壤受污染较重，可能与人流量和车流量较大有关。

不同功能区的 SIRM 均值也反映了污染源的差异。工业区和绿化区的磁性矿物含量最高，商业区表

土样品的 SIRM 值最低, 而树叶样品在文教区的 SIRM 值最低, 说明文教区虽有商业活动, 但主要污染来源较少。SOFT%和 HARD%指标分析(图 5)表明表土和树叶样品中的软磁质含量相近, 但表土中的不完全反铁磁性矿物含量明显高于树叶, 表明研究区污染物以亚铁磁性矿物为主, 不完全反铁磁性矿物对污染有一定影响。

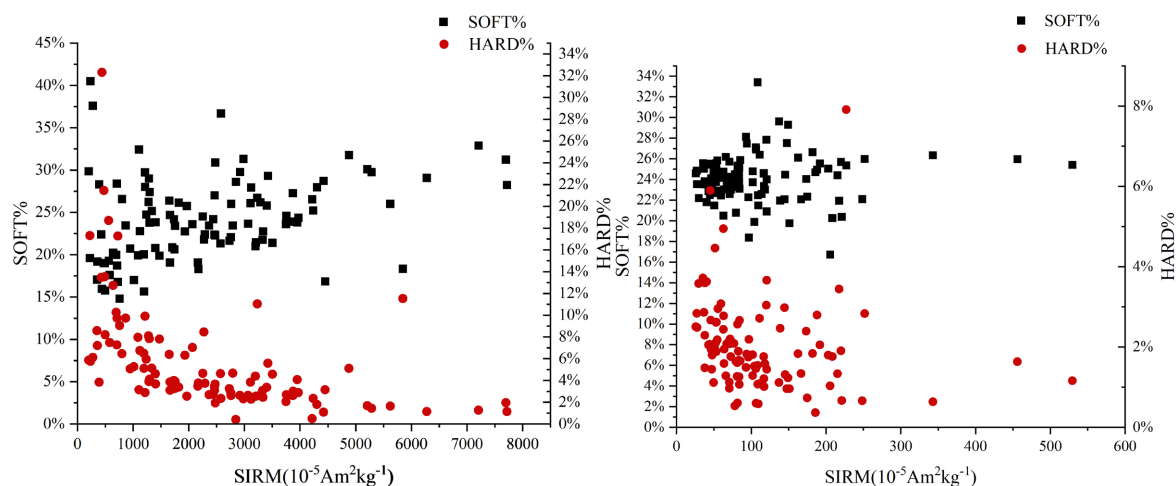


Figure 5. Scatter plot of magnetic parameters of topsoil and leaves

图 5. 表土和树叶磁学参数散点图

总结来看, 表土和树叶样品在污染指示方面各有优势, 结合两者的监测可以更准确地反映城市污染的空间分布和来源特征。

5.2. 表土和树叶磁性对环境污染的指示差异研究

根据图 3 和图 4, 金华市表土样品在人类活动频繁区域, 如交通线交汇处和工业区附近, SIRM 和 χ_{lf} 值较高, 表明这些地区土壤中磁性颗粒含量较多, 污染较为严重; 而在商业区和居住区, 如宾虹西路、金衢路、万达广场等地, SIRM 和 χ_{lf} 值较低, 指示土壤污染程度较轻。这表明工业生产和交通对土壤污染的贡献大于日常生活活动。

树叶样品的 SIRM 和 χ_{lf} 值在空间分布上与表土样品相似, 高人类活动区域如南北二环和工业区值较高, 商业区和文教区值较低。虽然树叶样品的磁学参数数值较表土低, 反映出其磁性较弱, 但树叶仍能有效指示土壤污染情况。研究表明, 表土样品和叶片样品的 SIRM 主要由亚铁磁性矿物承担, 但表土中的磁性颗粒较粗, 且含有更多不完全反铁磁矿物。

本研究的表土和树叶样品在同一地点采集, 均可指示金华市的整体污染水平。样品磁学参数的变化可以反映污染物在空间上的分布特征, 但是不同区域导致磁学参数升高的原因都不同。对于城市地区来说, 土壤污染的主要原因往往是大气沉降, 表土样品对工业排放、交通等排放的污染物较为敏感, 有利于反映短时间内金华市的土壤污染状况, 因此表土的磁化率和饱和等温剩磁测量可以快速、简便地监测受污染较严重的地区。而树叶样品在受土壤污染影响外, 还能反映大气污染物状况。不同污染物在表土和叶片上的沉积和迁移机制可能存在差异。研究显示[30], 叶表尘的元素组成对环境因子干扰最为敏感, 因此叶表尘十分适合作为反映环境污染的监测仪, 而叶表尘难以提取, 作为其承载物的树叶就成为更好的替代物, 研究也证实树叶与土壤相比更适合环境监测。在实践中可以考虑将表土与树叶结合起来对土壤污染进行监测, 可以得到空间分辨率更高更准确的结果。

6. 结论

金华市表土样品的磁学特征以磁铁矿和磁赤铁矿为主, 颗粒较粗, 污染物在北二环和南二环分布较多, 城市中心区污染较少, 受交通和工厂等人为源影响显著。树叶样品的磁学特征主要受亚铁磁性矿物控制, 工业区和绿化区污染较高, 文教区受人为干扰较少, 植物叶片主要受工业和交通的综合影响。

表土和树叶样品的磁性矿物分布总体相似, 但在特定区域存在差异, 工业区和绿化区磁性矿物浓度最高, 商业区和文教区的样品受交通和工厂影响有所不同。表土和树叶作为污染载体均具采样便利性和与重金属含量的高度相关性, 表土能有效反映工业和交通污染, 而树叶能更好地指示大气污染, 两者结合可提高污染检测的准确性和分辨率。

参考文献

- [1] 张甘霖, 朱永官, 傅伯杰. 城市土壤质量演变及其生态环境效应[J]. 生态学报, 2003, 23(3): 539-546.
- [2] 张甘霖, 赵玉国, 杨金玲, 赵文君, 龚子同. 城市土壤环境问题及其研究进展[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 925-933.
- [3] 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.
- [4] 周洪英, 单爱琴. 城市表土磁学特征对污染源的指示[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(4): 190-193, 199.
- [5] 毛应明, 桑树勋, 王学松, 贾金龙. 公路边土壤的磁化率特征及其对污染的指示意义[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(35): 144-147, 156.
- [6] 陈学刚, 张玉虎, 杨涵, 权晓燕, 胡江玲. 乌鲁木齐市土壤磁学特征及其与粒度的关系[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(7): 168-176.
- [7] 李萍. 金华市耕地土壤重金属污染空间特征、来源解析及健康风险评价[D]: [硕士学位论文]. 金华: 浙江师范大学, 2022.
- [8] 张大文, 张新雨, 殷会涵, 张志成, 王友郡. 枣庄市城乡接合部农田表土环境的磁学特征[J]. 枣庄学院学报, 2022, 39(5): 48-59.
- [9] Lu, S.G., Wang, H.Y. and Guo, J.L. (2010) Magnetic Enhancement of Urban Roadside Soils as a Proxy of Degree of Pollution by Traffic-Related Activities. *Environmental Earth Sciences*, **64**, 359-371. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0859-x>
- [10] Bućko, M.S., Magiera, T., Johanson, B., Petrovský, E. and Pesonen, L.J. (2011) Identification of Magnetic Particulates in Road Dust Accumulated on Roadside Snow Using Magnetic, Geochemical and Micro-Morphological Analyses. *Environmental Pollution*, **159**, 1266-1276. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.030>
- [11] 张桐, 洪秀玲, 刘玉军. 城市居住小区常见树种的滞留颗粒物能力及绿地生态服务能力优化[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(3): 296-303.
- [12] 宋英石. 北京空气细颗粒物污染特征及常见绿化树种滞尘效应研究[D]: [博士学位论文]. 中国科学院大学, 2015.
- [13] 张大文, 殷会涵, 彭文彬, 张治国, 王友郡. 鲁南枣庄市交通干道沿线表土环境磁学特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(12): 122-129.
- [14] 贾正长. 上海市交通干道尘土与表土磁学性质研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2010.
- [15] 许淑婧, 张英, 余晔, 王博, 夏敦胜. 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.
- [16] Marié, D.C., Chaparro, M.A.E., Gogorza, C.S.G., Navas, A. and Sinito, A.M. (2010) Vehicle-Derived Emissions and Pollution on the Road Autovía 2 Investigated by Rock-Magnetic Parameters: A Case Study from Argentina. *Studia Geophysica et Geodaetica*, **54**, 135-152. <https://doi.org/10.1007/s11200-010-0007-9>
- [17] Blaha, U., Sapkota, B., Appel, E., Stanjek, H. and Rosler, W. (2008) Micro-Scale Grain-Size Analysis and Magnetic Properties of Coal-Fired Power Plant Fly Ash and Its Relevance for Environmental Magnetic Pollution Studies. *Atmospheric Environment*, **42**, 8359-8370. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.051>
- [18] Lu, S.G., Zheng, Y.W. and Bai, S.Q. (2008) A HRTEM/EDX Approach to Identification of the Source of Dust Particles on Urban Tree Leaves. *Atmospheric Environment*, **42**, 6431-6441. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.04.039>
- [19] Bućko, M.S., Magiera, T., Pesonen, L.J. and Janus, B. (2009) Magnetic, Geochemical, and Microstructural Characteristics of Road Dust on Roadsides with Different Traffic Volumes—Case Study from Finland. *Water, Air, & Soil Pollution*, **209**, 295-306. <https://doi.org/10.1007/s11270-009-0198-2>

-
- [20] 俞学如. 南京市主要绿化树种叶面滞尘特征及其与叶面结构的关系[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京林业大学, 2008.
- [21] Hu, S., Duan, X., Shen, M., Blaha, U., Roesler, W., Yan, H., *et al.* (2008) Magnetic Response to Atmospheric Heavy Metal Pollution Recorded by Dust-Loaded Leaves in Shougang Industrial Area, Western Beijing. *Science Bulletin*, **53**, 1555-1564. <https://doi.org/10.1007/s11434-008-0140-9>
- [22] 张春霞, 黄宝春, 刘青松. 钢铁厂周围不同污染介质的磁学性质及环境意义[J]. 地球物理学报, 2009, 52(11): 2826-2839.
- [23] Mitchell, R. and Maher, B.A. (2009) Evaluation and Application of Biomagnetic Monitoring of Traffic-Derived Particulate Pollution. *Atmospheric Environment*, **43**, 2095-2103. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.01.042>
- [24] 房妮, 张俊辉, 王瑾, 姜珊, 夏敦胜. 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, 38(3): 924-935.
- [25] 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.
- [26] 邓海英. 旅游景区沿道路土壤磁学特征及其环境意义研究[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2018.
- [27] 田世丽, 夏敦胜, 余晔, 王博, 许淑婧. 北京市大兴区大气降尘环境磁学特征及其环境意义[J]. 中国沙漠, 2013, 33(3): 832-839.
- [28] Dearing, J.A., Bird, P.M., Dann, R.J.L. and Benjamin, S.F. (1997) Secondary Ferrimagnetic Minerals in Welsh Soils: A Comparison of Mineral Magnetic Detection Methods and Implications for Mineral Formation. *Geophysical Journal International*, **130**, 727-736. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1997.tb01867.x>
- [29] Evans, M.E. and Heller, F. (2003) *Environmental Magnetism*. Academic Press.
- [30] Li, C., Du, D., Gan, Y., Ji, S., Wang, L., Chang, M., *et al.* (2022) Foliar Dust as a Reliable Environmental Monitor of Heavy Metal Pollution in Comparison to Plant Leaves and Soil in Urban Areas. *Chemosphere*, **287**, Article 132341. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132341>