DOI：10.11766/trxb202206060235

王新栋，胡雪峰，张延硕，崔蕾，刘睿，蓝文翀，李梅，王加元. 大气颗粒沉降对城市土壤性状的影响：道路灰尘的磁学证据[J]. 土壤学报，2023，60（6）：1832–1840.

WANG Xindong，HU Xuefeng，ZHANG Yanshuo，CUI Lei，LIU Rui，LAN Wenchong，LI Mei，WANG Jiayuan. Effects of the Deposition of Atmospheric Particulate Matter on the properties of Urban Soils：Evidence from Magnetic Susceptibility of Road Dusts[J]. Acta Pedologica Sinica，2023，60（6）：1832–1840.

大气颗粒沉降对城市土壤性状的影响：道路灰尘的磁学证据*

王新栋，胡雪峰†，张延硕，崔　蕾，刘　睿，蓝文翀，李　梅，王加元

（上海大学环境与化学工程学院，上海 200444）

摘　要：为研究大气颗粒物沉降对城市土壤性状的影响，对上海宝山区典型工业区、交通区、居民区和农业区表土和道路灰尘的磁化率（χ_{lf}）、重金属元素含量进行了监测分析。结果表明，上海宝山各功能区表土磁性普遍增强，χ_{lf}平均值为 130.7×10^{-8} $m^3 \cdot kg^{-1}$，86.2%表土样 χ_{lf}高于当地土壤背景磁性。与各功能区表土相邻的道路灰尘 χ_{lf}增强更加显著，平均值达 903.3×10^{-8} $m^3 \cdot kg^{-1}$。各功能区道路灰尘重金属的累积量也远高于相邻表土。其铜（Cu）、锌（Zn）、铅（Pb）、镉（Cd）、镍（Ni）、铬（Cr）、钴（Co）、锰（Mn）、铁（Fe）的平均含量分别为表土的 3.4 倍、2.4 倍、4.7 倍、2.2 倍、1.5 倍、2.8 倍、1.2 倍、1.4 倍和 1.6 倍。宝山区表土 χ_{lf}与 Cu、Zn、Mn、Cr、Ni、Cd 含量呈极显著正相关（P<0.01），与 Pb、Fe 含量呈显著正相关（P<0.01）。道路灰尘 χ_{lf}与 Zn、Mn、Cr、Co、Ni、Fe 含量呈极显著相关性（P<0.01），与 Cu 呈显著正相关（P<0.05）。但是，不同功能区表土和道路灰尘 χ_{lf}与重金属元素含量间的相关程度有差别，农业区土壤这种相关性较弱。研究区域道路灰尘的特异性状，揭示了城市大气颗粒物包含一定量人为成因的富集重金属元素的磁性颗粒。这类污染颗粒的长期、连续沉降，使得城市表土的磁性和重金属含量同步增强，并对城市土壤的性状产生深刻影响。

关键词：城市表土；道路灰尘；重金属；磁化率

中图分类号：X53　　**文献标志码：**A

Effects of the Deposition of Atmospheric Particulate Matter on the Properties of Urban Soils: Evidence from Magnetic Susceptibility of Road Dusts

WANG Xindong, HU Xuefeng†, ZHANG Yanshuo, CUI Lei, LIU Rui, LAN Wenchong, LI Mei, WANG Jiayuan

(*School of Environmental and Chemical Engineering*, *Shanghai University*, *Shanghai* 200444, *China*)

Abstract: To study the effects of deposition of atmospheric particulate matter (APM) on the properties of urban soils, the values

* 国家自然科学基金项目（41877005）资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China（No. 41877005）

† 通讯作者 Corresponding author，E-mail：xfhu@shu.edu.cn

作者简介：王新栋（1996—），男，湖南人，硕士研究生，主要从事土壤环境研究。E-mail：1834951119@qq.com

收稿日期：2022–06–06；收到修改稿日期：2022–09–25；网络首发日期（www.cnki.net）：2022–11–15

of magnetic susceptibility (χ_{lf}) and heavy metals in the topsoils and road dust in the industrial, traffic, residential and agricultural areas of Baoshan District, Shanghai, were analyzed. The topsoils in the different functional areas of Baoshan District, Shanghai, commonly have significantly enhanced magnetic strength (χ_{lf} = 130.7×10^{-8} m^3·kg^{-1} on average) of about 86.2% higher than the local magnetic background. χ_{lf} of the road dusts nearby the topsoils in the different functional areas was even more significantly enhanced, which was 903.3×10^{-8} m^3·kg^{-1} on average. Likewise, heavy metal contents in the road dust were significantly higher than those in the nearby topsoils in the different functional areas. The contents of Cu, Zn, Pb, Cd, Ni, Cr, Co, Mn and Fe in the road dust were 3.4, 2.4, 4.7, 22, 1.5, 2.8, 1.2, 1.4 and 1.6 times of those in the topsoils on average, respectively. Moreover, χ_{lf} of the topsoils in the Baoshan District was extremely significantly correlated with the contents of Cu, Zn, Cd, Ni, Cr and Mn (P < 0.01), and also significantly correlated with Pb and Fe (P < 0.05). Likewise, χ_{lf} of the road dust was also significantly correlated with the content of Zn, Ni, Cr, Co, Mn and Fe (P < 0.01), and with Cu (P < 0.05). Nevertheless, such correlations in the different functional areas of the district are highly different. Those in the agricultural topsoils are not significant. The distinctive characteristics of the road dust in the studied areas suggested that the APM under the urban environment contain a certain amount of anthropogenic magnetic particles enriched in heavy metals. The long-term and continuous deposition of such magnetic pollutants has led to the enhancement of magnetic signals and heavy metal contents in urban topsoils synchronously, and also adversely impacted the properties of urban soils significantly.

Key words: Urban soils; Road dust; Heavy metals; Magnetic susceptibility (χ_{lf})

城市土壤和城市大气环境质量影响人体健康，因而正受到越来越密切的关注。工业生产、交通运输、化石（煤）燃烧、城市垃圾处理等人为活动，会不断向城市大气释放污染颗粒，成为大气悬浮物[1-2]，其中常含有人为技术源磁性颗粒，而且，该类磁性颗粒多吸附或包含有害重金属元素。随着悬浮颗粒的沉降，城市土壤磁性和有害重金属元素就会同步增强。有关城市土壤磁化率与一种或多种重金属含量间的相关关系，已有大量报道[3-5]。如，武汉市工业区土壤铜（Cu）、铅（Pb）、锌（Zn）、汞（Hg）含量与磁化率呈显著正相关[6]；希腊塞萨洛尼基工业区土壤镉（Cd）、铬（Cr）、Cu、镍（Ni）、Pb、钼（Mo）、锑（Sb）、锡（Sn）和 Zn 含量与磁化率高度相关[7]；尼日利亚中北部伊洛林汽车站土壤 Cu、铁（Fe）、Cr、Zn、Cd、镁（Mg）、锰（Mn）、Pb 含量与磁化率显著正相关[8]。但对城市环境人为磁性颗粒的来源、数量、分布，以及对城市土壤性状的影响，仍需深入研究。

城市道路灰尘多源于大气悬浮颗粒的干湿沉降。在风和车辆交通的作用下，还会重新扬起，再次变为城市大气悬浮物。受工业和交通影响的道路灰尘，重金属含量高于相邻土壤[9]；而且，磁性强度与重金属含量具有较好的相关性[3, 10]。上海宝山区工业发达、交通密集，还有燃煤发电厂。本文通过对宝山不同功能区道路灰尘与相邻表土磁化率（χ_{lf}）和重金属累积的监测比较，研究和探讨城市大气悬浮颗粒中人为磁性颗粒的数量、特性和分布，以及对城市土壤发生演化的影响。

1　材料与方法

1.1　研究区域概况

上海陆域地处长江三角洲前沿，是在长江和海潮共同作用下，以长江为主的河流所带泥沙不断淤积而成。上海地势平坦，平均海拔仅为 2.19 m，属亚热带湿润季风气候。宝山区位于上海市北部，区域总面积 365.3 km^2，常住人口 223 万。宝山是上海传统的工业基地，有著名的宝钢、上钢一厂等大型钢铁冶炼企业。

1.2　样品采集与处理

在上海宝山区，选择四个典型产业或生活功能区：工业区位于月浦镇和杨行镇，有 2 家火力发电厂、1 家钢铁集团和众多金属材料加工厂；交通区位于顾村镇，上海外环高速路边缘；农业区位于罗店镇蔬菜基地；居民区位于大场镇，有学校、居民小区和商业街。连续三个晴天后，使用塑料铲在选定的工业区、交通区、居民区和农业区分别采集 21、12、14、11 个表土样（0～10 cm）（图 1）。每一个表土样，由样点范围内 5 个亚样混合而成，每样约 500 g。在四个功能区表土采样点附近的固化路面

上，分别用毛刷采集 28、17、17、7 个道路灰尘样，每样品约 200 g。表土和灰尘样，在室内自然风干。表土样分别过 2 mm 和 0.149 mm 筛，灰尘样分别过 0.5 mm 和 0.149 mm 筛，待测。

1.3 实验方法

1.3.1 基本理化性质测定[11] 表土和道路灰尘 pH 采用 pH 计测定；表土和道路灰尘有机质采用重铬酸钾-硫酸消化法测定。

1.3.2 磁化率测定 分别称取表土（<2 mm）或道路灰尘样（<0.5 mm）10 g，用保鲜膜包裹，置于 10 mL 圆柱状聚乙烯样品盒中。采用双频磁化率仪（MS-2 型，Bartington，英国）测试低频（0.47 kHz）磁化率（χ_{lf}）和高频（4.7 kHz）磁化率（χ_{hf}），测试相对误差小于 0.3%。频率磁化率（χ_{fd}%）的换算式为：χ_{fd}%=（χ_{lf}–χ_{hf}）/χ_{lf}×100%。

1.3.3 重金属全量测定 称取表土或道路灰尘样品 0.2000 g（<0.149 mm）于聚四氟乙烯烧杯中，用 HNO_3-HF-$HClO_4$ 法消解。消解后用超纯水定容至 50 mL 容量瓶。采用电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS，Agilent 7500，美国）测定消化液中 Cu、Zn、Mn、Cr、Co、Ni、Pb、Cd 元素含量。消化液中的 Fe 含量，采用邻菲啰啉比色法测定[11]。测试过程每隔 5 个样品插入一次监控标样，元素测试的误差和相对标准偏差均低于 5%，在许可范围内。

1.4 重金属污染评价方法

污染负荷指数（PLI）计算公式[12]：

$$CF_i = \frac{c_i}{c_{0i}} \quad (1)$$

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \cdots CF_n} \quad (2)$$

式中，CF_i 为重金属 i 的单因子污染系数；C_i 为土壤或沉积物重金属 i 的实测值；C_{0i} 为土壤或沉积物重金属 i 的背景值[13]。上海土壤 Cu、Zn、Pb、Cd、Ni、Cr、Co、Mn 的背景值分别为 28.6、86.1、25.5、0.13、31.9、75、12.7、560.2 mg·kg^{-1}[13]。某点土壤 PLI<1 时，为无污染；1≤PLI<2，为轻度污染；2≤PLI<3 时，为中度污染；PLI≥3 时，为重度污染[12]。

1.5 数据处理

实验数据主要采用 Excel 2010 处理。利用 ArcGIS Map 10.2 软件绘制采样图，用 Origin2018 绘制柱状图。用 SPSS 24 软件对表土和道路灰尘的磁性参数和重金属元素含量进行皮尔森（Pearson）相关性分析。

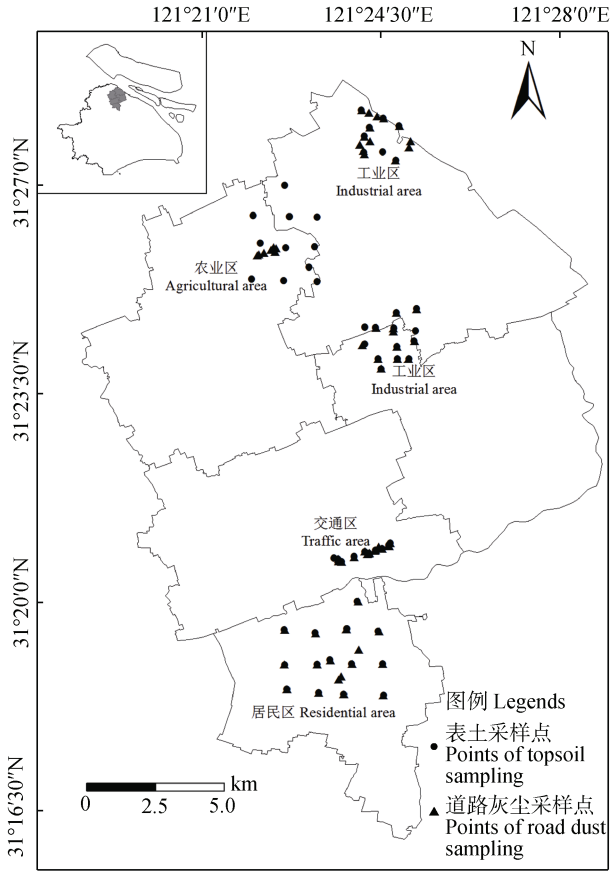


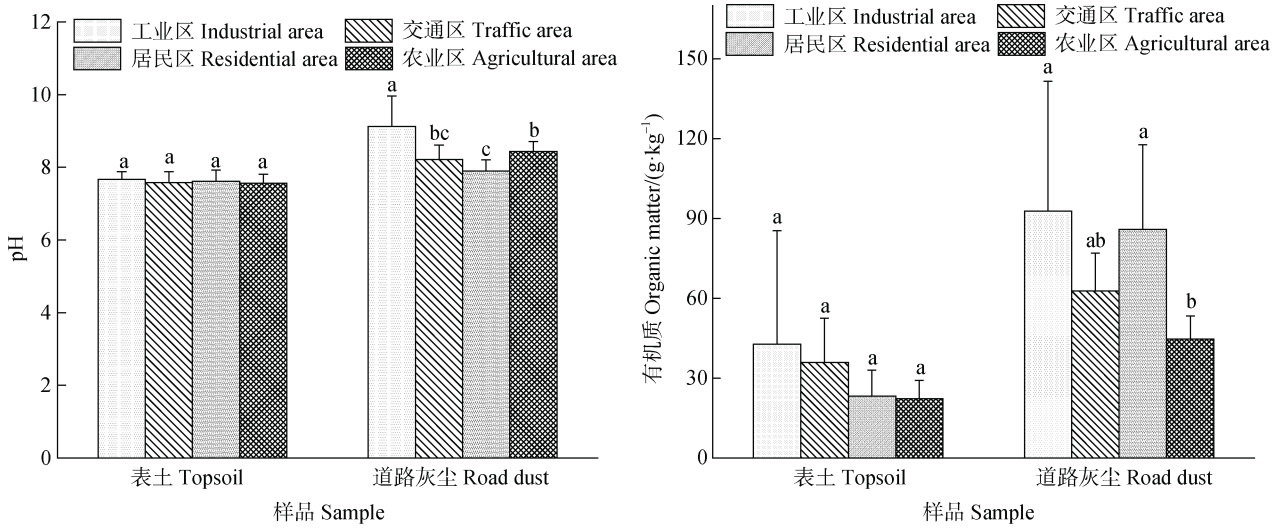
图 1 上海宝山区表土与道路灰尘采样点分布

Fig. 1 Sketch map showing the distribution of sampling points of topsoils and road dusts in Baoshan District，Shanghai，Southeast China

2 结 果

2.1 城市表土和道路灰尘 χ_{lf}

研究区域临近长江口，地下水位高，表土呈微碱性，pH 平均为 7.62，有机质平均含量为 25.22 g·kg^{-1}（图 2）。道路灰尘 pH 高于表土，平均为 8.55。道路灰尘有机质平均含量为 78.82 g·kg^{-1}（图 2），显著高于表土（P<0.05）。不同功能区表土和道路灰尘有机质含量具有显著分异。表土有机质含量由高到低依次为：工业区、交通区、居民区、农业区，平均含量分别为 42.78、35.92、23.21、22.26 g·kg^{-1}；道路灰尘有机质含量由高到低依次为：工业区、居民区、交通区、农业区平均含量分别为 92.79、85.94、62.77、44.66 g·kg^{-1}。



注：同一组不同小写字母的数据之间存在显著差异（$P < 0.05$）。下同。Note：The data marked with different lowercase letters in the same groups are significantly different（$P < 0.05$）. The same as below .

图 2　上海宝山区表土和道路灰尘 pH 和有机质含量

Fig. 2　pH and organic matter content of the topsoils and road dust in Baoshan District，Shanghai，Southeast China

研究区域表土 χ_{lf} 范围为 19.6×10^{-8}～614×10^{-8} $m^3\cdot kg^{-1}$，平均值为 130.7×10^{-8} $m^3\cdot kg^{-1}$（图 3）。不同功能区表土 χ_{lf} 由大到小依次为：交通区、工业区、农业区、居民区，平均分别为 240.0×10^{-8}、170.5×10^{-8}、66.9×10^{-8}、52.6×10^{-8} $m^3\cdot kg^{-1}$。其中，工业区和交通区表土 χ_{lf} 明显高于农业区和居民区。道路灰尘 χ_{lf} 范围为 175.3×10^{-8}～3367×10^{-8} $m^3\cdot kg^{-1}$，平均值为 903.3×10^{-8} $m^3\cdot kg^{-1}$（图 3）。不同功能区道路灰尘 χ_{lf} 由大到小依次为：工业区、农业区、交通区、居民区，平均分别为 1407×10^{-8}、717.5×10^{-8}、715.8×10^{-8}、378.8×10^{-8} $m^3\cdot kg^{-1}$。其中，工业区道路灰尘 χ_{lf} 显著地高于其他各区（P<0.05）。

频率磁化率（χ_{fd}%）可指示风化成土过程形成的超细顺磁颗粒（SP）[14]。土壤或沉积物 χ_{fd}%<2%，可以认为基本不含有 SP。研究区域工业区、交通区、居民区、农业区表土 χ_{fd}%平均值分别为 4.57%、14.70%、8.03%、14.74%（图 3）；13%的表土样品 χ_{fd}%<2%。相比之下，工业区、交通区、居民区、

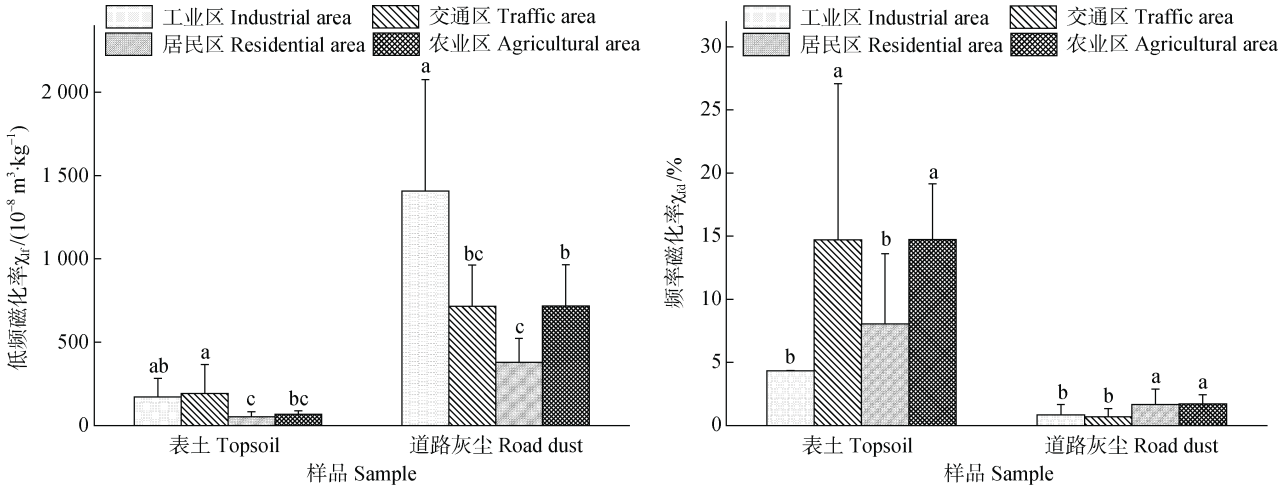


图 3 上海宝山区表土和道路灰尘磁化率（χ_{lf}）和频率磁化率（χ_{fd}%）

Fig. 3　Magnetic susceptibility（χ_{lf}）and frequency-dependent susceptibility（χ_{fd}%）of the topsoils and road dust in Baoshan District，Shanghai，Southeast China

农业区道路灰尘 χ_{fd}%平均值分别为 0.83%、0.70%、1.67%、1.71%（图 3）。有 88.4%的道路灰尘样品 χ_{fd}%<2%，表明道路灰尘几乎不含 SP，人为成因的粗磁性颗粒是磁性主导。

2.2 城市表土与道路灰尘重金属含量

研究区域表土 Cu、Zn、Pb、Cd、Ni、Cr、Co、Mn 和 Fe 的平均含量分别为 27.53 mg·kg^{-1}、146.8 mg·kg^{-1}、51.92 mg·kg^{-1}、0.29 mg·kg^{-1}、30.26 mg·kg^{-1}、83.65 mg·kg^{-1}、9.93 mg·kg^{-1}、610.1 mg·kg^{-1}和 35.10 g·kg^{-1}。Zn、Pb、Cd 的平均含量显著高于上海市土壤环境背景值[13]。道路灰尘 Cu、Zn、Pb、Cd、Ni、Cr、Co、Mn 和 Fe 的平均含量分别为 93.32 mg·kg^{-1}、352.7 mg·kg^{-1}、246.2 mg·kg^{-1}、0.64 mg·kg^{-1}、46.30 mg·kg^{-1}、235.5 mg·kg^{-1}、11.58 mg·kg^{-1}、875.0 mg·kg^{-1}和 56.95 g·kg^{-1}，分别为表土平均值的 3.4 倍、2.4 倍、4.7 倍、2.2 倍、1.5 倍、2.8 倍、1.2 倍、1.4 倍和 1.6 倍（表 1）。不同功能区表土重金属含量存在差异。其中，交通区表土 Zn、Cd、Cr 含量和 PLI 显著高于其他功能区表土（P<0.05）。交通区表土位于上海外环高速公路附近，车流量大，又离工业核心区不远。但四个功能区表土 PLI 为 1～2，均处于轻度污染水平。道路灰尘各类重金属元素的含量高于表土（表 1）。工业区道路灰尘 Cu、Zn、Pb、Cd、Ni、Cr 含量分别为相邻表土的 4.4 倍、3.6 倍、2.8 倍、2.3 倍、1.8 倍、3.4 倍；交通区道路灰尘分别为相邻表土的 2.9 倍、1.0 倍、2.9 倍、1.2 倍、1.4 倍、2.6 倍；居民区道路灰尘分别为相邻表土的 2.3 倍、1.6 倍、6.1 倍、2.0 倍、1.5 倍、2.6 倍；农业区道路灰尘分别为相邻表土的 3.4 倍、2.8 倍、7.7 倍、3.8 倍、1.3 倍、2.1 倍。表明道路灰尘源于城市环境大气降尘，更多地受人为释放污染颗粒影响，与城市表土性状有显著差别。

不同功能区道路灰尘重金属含量存在差异。工业区道路灰尘 Zn 含量显著高于其他各区（P<0.05）；

表 1 上海宝山区不同功能区表土和道路灰尘重金属含量

Table 1 Heavy metal contents in the topsoils and road dust in the different functional areas of Baoshan District，Shanghai，Southeast China

样品 Samples	功能区 Functional areas	Cu/（mg·kg^{-1}）	Zn/（mg·kg^{-1}）	Pb/（mg·kg^{-1}）	Cd/（mg·kg^{-1}）	Ni/（mg·kg^{-1}）
表土	工业区 Industrial area（n=21）	23.00±6.49c	140.6±57.55b	40.45±33.23a	0.25±0.11b	29.08±6.07a
Topsoils	交通区 Traffic area（n=12）	37.06±23.59a	208.0±139.56a	73.01±72.98a	0.43±0.22a	30.75±7.18a
	居民区 Residential area（n=14）	22.62±4.83c	104.0±31.82b	69.16±83.27a	0.23±0.12b	28.87±1.95a
	农业区 Agricultural area（n=11）	32.04±14.24ab	146.3±64.33b	28.87±3.52a	0.28±0.07b	33.78±8.18a
道路灰尘	工业区 Industrial area（n=28）	101.0±144.6a	507.6±345.1a	112.8±60.77c	0.58±0.20b	51.37±25.39a
Road dust	交通区 Traffic area（n=17）	106.8±106.8a	211.0±173.1b	211.9±124.7ab	0.52±0.19b	44.11±17.96a
	居民区 Residential area（n=17）	75.78±38.63a	288.5±146.9b	529.1±933.1a	0.88±0.58a	38.40±18.36a
	农业区 Agricultural area（n=7）	72.63±39.71a	233.44±17.45b	176.1±58.11ab	0.57±0.07b	50.49±16.00a

样品 Samples	功能区 Functional areas	Cr（mg·kg^{-1}）	Co（mg·kg^{-1}）	Mn（mg·kg^{-1}）	Fe（g·kg^{-1}）	PLI
表土 Topsoils	工业区 Industrial area（n=21）	72.50±25.36b	9.63±0.78b	625.2±120.3a	34.91±4.46a	1.11±0.23b
	交通区 Traffic area（n=12）	119.5±82.67a	9.62±0.61b	658.0±294.98a	38.46±6.54a	1.48±0.52a
	居民区 Residential area（n=14）	71.63±22.08b	10.36±0.71a	588.3±60.40a	34.55±5.13a	1.10±0.22b
	农业区 Agricultural area（n=11）	81.14±30.68b	10.31±0.65a	557.0±58.82a	35.05±9.42a	1.18±0.21b
道路灰尘	工业区 Industrial area（n=28）	244.6±102.3ab	14.91±12.05a	1130±413.2a	72.28±34.63a	2.44±0.9ab
Road dust	交通区 Traffic area（n=17）	315.5±293.2a	9.85±2.87a	625.4±625.4b	44.00±14.27b	2.58±0.53a
	居民区 Residential area（n=17）	152.1±64.07b	8.64±2.10a	610.0±129.1b	35.07±6.27b	2.24±0.53ab
	农业区 Agricultural area（n=7）	207.6±54.4ab	9.59±2.48a	1105±276.52a	76.15±24.76a	1.88±0.61c

注：PLI 表示污染负荷指数。表中数据为平均值±标准差。同列数据小写字母不同表示差异显著（P < 0.05）。Note：PLI is the pollution load index. The data in the table are presented as mean values ± standard deviations. The data in the same column marked with different lowercase letters are significantly different（P < 0.05）.

居民区灰尘 Cd 显著高于其他各区（P<0.05）（表 1）。PLI 值分析表明，农业区道路灰尘为轻度污染；其他各区道路灰尘均为中度污染。农业区工业分布和交通运输相对稀少，大气降尘中重金属污染物的含量也相对较低。

3 讨　论

3.1 不同功能区表土和道路灰尘 χ_{lf} 的分异

宝山区表土 χ_{lf} 显著增强，约有 86.2%表土样品高于当地土壤背景磁性[14]。而且，不同功能区表土 χ_{lf} 有明显的功能区分异：交通区和工业区表土 χ_{lf} 大多显著高于农业区和居民区（图 3）。交通区表土取自上海外环高速公路边，交通流量很大。交通工具车身金属部件、刹车片的磨损和腐蚀、轮胎与路面的摩擦以及尾气排放，均会向周围环境释放铁磁性颗粒[15]。工业区核心是著名大型金属冶炼集团，周边还有诸多金属加工和制品企业以及两家燃煤发电厂。工业和燃煤释放是工业区表土磁性增强的主要原因[10]。相比之下，农业区和居民区远离工业核心区，受交通影响较小，土壤 χ_{lf} 也较小。

道路灰尘 χ_{lf} 远高于表土（图 3）：工业区、交通区、农业区和居民区道路灰尘的 χ_{lf} 分别为相应功能区表土的 8.3 倍、3.0 倍、10.7 倍、7.2 倍。同时，不同功能区道路灰尘 χ_{lf} 也存在差异：工业区道路灰尘 χ_{lf} 显著高于其他三个功能区道路灰尘（P<0.05）（图 3）。道路灰尘的高磁性，充分表明了人为成因铁磁性物质沉降正在对城市地表和城市土壤产生深刻影响。

不同功能区表土 χ_{fd}%均显著高于道路灰尘（P<0.05）（图 3）。表土 χ_{fd}%平均为 9.35%，仅有 13%的样品 χ_{fd}%<2%。道路灰尘 χ_{fd}%的平均值为 1.10%，有 88.4%的样品 χ_{fd}%<2%。充分表明研究区域表土的 χ_{lf} 虽普遍增高，受人为影响显著，但依然含有一定量的成土成因的 SP；道路灰尘累积的磁性颗粒粒径较粗，几乎不含自然成土成因的 SP，多为人为成因的粗磁性颗粒（MD 或 SD）。

3.2 城市表土和道路灰尘 χ_{lf} 与重金属含量间的相关关系

研究区表土 χ_{lf} 与 Cu、Zn、Cd、Ni、Cr、Mn、PLI 呈极显著正相关（n=58；P<0.01），与 Pb、Fe 呈显著正相关（n=58；P<0.05）（表 2）。城市土壤磁性增强与重金属累积的密切关系有诸多报道：鞍山市土壤 χ_{lf}、饱和等温剩磁（SIRM）与重金属（Fe、Pb、Zn、Cu 和 Cr）含量、PLI 呈显著相关（P<0.01），城市表土 χ_{lf}、SIRM 和 PLI 的空间分布与钢铁工业区的分布相关[3]。洛阳市土壤磁性参数与 PLI 具有显著相关性（P<0.01），煤炭燃烧和交通排放是城市土壤中磁性组分的主要来源[4]。开封市土壤 χ_{lf} 与 Zn、Cu、Cd、Pb、As、Cr、Ni 存在显著的正相关（P<0.01）[5]。

表 2　上海宝山区表土和道路灰尘重金属含量与磁化率（χ_{lf}）相关关系

Table 2　Correlations between heavy metal content and magnetic susceptibility (χ_{lf}) in the topsoils and road dust in Baoshan District, Shanghai, Southeast China

样品 Samples	功能区 Functional areas	Cu	Zn	Pb	Cd	Ni
表土	工业区 Industrial area（n=21）	0.632**	0.826**	0.732*	0.620**	0.470**
Topsoils	交通区 Traffic area（n=12）	0.638*	0.421**	0.252	0.784**	0.613*
	居民区 Residential area（n=14）	0.644*	0.682**	0.778**	0.837**	–0.029
	农业区 Agricultural area（n=11）	0.098	0.319	0.081	0.343	0.347
	全部样 All the samples（n=58）	0.525**	0.776**	0.313*	0.696**	0.345**
道路灰尘	工业区 Industrial area（n=28）	0.227	0.215	0.491**	0.578**	0.731**
Road dust	交通区 Traffic area（n=17）	0.910**	0.353	–0.289	0.121	0.791**
	居民区 Residential area（n=17）	0.762**	0.337	0.418	0.193	0.581*
	农业区 Agricultural area（n=7）	0.380	–0.244	0.179	0.045	0.072
	全部样 All the samples（n=69）	0.275*	0.421**	–0.197	0.004	0.616**

续表

样品 Samples	功能区 Functional areas	Cr	Co	Mn	Fe	PLI
表土	工业区 Industrial area（*n*=21）	0.554**	–0.152	0.563**	0.738*	0.926**
Topsoils	交通区 Traffic area（*n*=12）	0.667*	0.252**	0.836**	0.842**	0.858**
	居民区 Residential area（*n*=14）	0.087	–0.211	–0.109	–0.281	0.805**
	农业区 Agricultural area（*n*=11）	0.139	0.124	0.055	–0.502	0.326
	全部样 All the samples（*n*=58）	0.593**	–0.198	0.719**	0.313*	0.780**
道路灰尘	工业区 Industrial area（*n*=28）	0.812**	0.613**	0.688**	0.094	–0.431*
Road dust	交通区 Traffic area（*n*=17）	0.825**	0.628**	0.631**	0.538*	–0.039
	居民区 Residential area（*n*=17）	0.752**	0.358	0.370	0.868**	0.167
	农业区 Agricultural area（*n*=7）	0.353	0.354	0.259	–0.181	0.308
	全部样 All the samples（*n*=69）	0.444**	0.637**	0.752**	0.418**	–0.155

注：*表示达到 95 %的显著性水平；**表示达到 99 %的极显著性水平。Note：*Means a 95% significant level；**Means a 99% significant level.

重金属污染元素可被吸附在人为释放的铁磁性颗粒表面上，或者以离子的形式进入磁铁矿/赤铁矿的晶格富集[4]，使得城市土壤的磁性强度能反映重金属元素的累积程度。

但是，不同功能区表土重金属含量与 χ_{lf} 相关程度存在差异：工业区表土 χ_{lf} 与 Cu、Zn、Cd、Ni、Cr、Mn 呈极显著正相关性（*n*=21；*P*<0.01），与 Pb、Fe 呈显著正相关性（*n*=21；*P*<0.05）；交通区表土 χ_{lf} 与 Zn、Cd、Co、Mn、Fe 具有极显著正相关性（*n*=12；*P*<0.01），与 Cu、Ni、Cr 呈显著正相关性（*n*=12；*P*<0.05）；居民区表土 χ_{lf} 与 Zn、Pb、Cd 具有极显著正相关性（*n*=14；*P*<0.01），与 Cu 具有显著正相关性（*n*=14；*P*<0.05）；农业区表土与各重金属元素含量均无显著相关性（*P*>0.05）（表 2）。农业区表土受工业和交通污染相对较少，而且农业耕种过程还会降低土壤磁性[16]。这使得农业区表土 χ_{lf} 与重金属元素的关联性较弱，与前人的研究结果[17-18]相似。

与表土相应，道路灰尘 χ_{lf} 与 Zn、Ni、Cr、Co、Mn、Fe 含量呈极显著相关性（*n*=69；*P*<0.01），与 Cu 呈显著相关性（*n*=69；*P*<0.05）。而且，该相关性在不同功能区的道路灰尘间也有差异：工业区道路灰尘 χ_{lf} 与 Pb、Cd、Ni、Cr、Co、Mn 具有极显著正相关性（*n*=28；*P*<0.01）；交通区道路灰尘 χ_{lf} 与 Cu、Ni、Cr、Co、Mn 具有极显著正相关性（*n*=69；*P*<0.01），与 Fe 呈显著正相关性（*n*=17；*P*<0.05）；居民区道路灰尘 χ_{lf} 与 Cu、Cr、Fe 具有显著极显著正相关性（*n*=17；*P*<0.01），与 Ni 呈显著正相关性（*n*=69；*P*<0.05）；但农业区道路灰尘 χ_{lf} 与各个重金属含量的相关性并不显著（*P*>0.05）（表 2）。进一步表明工业区和交通区道路灰尘深受大气铁磁性颗粒沉降的影响；农业区道路灰尘，除了包含人为成因的铁磁性颗粒，可能还更多地受本地泥土上扬的影响，χ_{lf} 与重金属含量的相关性较弱。

3.3 大气磁性颗粒沉降对城市土壤性状的影响

城市道路灰尘源于城市大气颗粒物的干湿沉降，来源十分复杂，可分为自然来源和人为来源。自然来源包括大气环流夹带的远程黄土，也有部分为吹扬起来的本地泥土。人为来源多源于工业活动、交通运输、住宅和城市基础设施建设等过程[19]。本研究道路灰尘 pH 平均为 8.55，有机质含量平均达 78.82 $g \cdot kg^{-1}$，均高于邻近表土（图 2）。道路灰尘 χ_{lf} 的变化范围为 175.3×10^{-8}～$3\,367 \times 10^{-8}$ $m^3 \cdot kg^{-1}$（图 3），远高于黄土高原黄土和长江流域下蜀黄土[20]。而且，工业区、交通区、农业区、居民区道路灰尘 χ_{lf} 平均含量分别为同功能区相邻表土的 8.3 倍、3.0 倍、10.7 倍、7.2 倍。道路灰尘 Cu、Zn、Pb、Cd、Ni、Cr 的平均含量分别为同功能区相邻表土的 3.3 倍、2.3 倍、4.9 倍、2.3 倍、1.5 倍、2.8 倍（表 1）。充分表明研究区域道路灰尘具有强磁性和高重金属含量特性，与自然降尘有显著差异，显然是受工业和交通颗粒物排放的影响。兰州市和上海市的大气降尘具有强磁性[21-22]。国内其他城市研究也显示大气降尘具有较高的重金属含量，且大气降尘的 Cd、Cu、Hg、Pb 主要来源于工业和煤炭燃烧，As 和 Cr

主要来源于交通排放[23-25]。

不同功能区道路灰尘磁性与地球化学性状的差异，反映了城市大气颗粒物存在空间分异。这使得城市土壤的磁性通常表现出明显的空间分布规律，工业核心区和交通密集区表土磁性显著高于远离城市核心区域的农业区表土。前人[26]大量工作也证明了此观点。

城市道路灰尘的强磁性和重金属高含量特性，反映了城市大气颗粒物包含一定量的人为成因铁磁性颗粒成分；尤其是深受工业和交通影响的区域，大气颗粒物中人为释放的铁磁性颗粒含量更高。因此，城市大气颗粒物的长期、连续沉降，可能对城市土壤的理化性状、污染物累积产生深刻影响。城市土壤和工业土壤磁性和重金属含量的普遍增加，均与此有关。杭州钢铁厂附近表土 χ_{lf} 为农业土壤的 10 倍～25 倍；其 Cu、Zn、Cd、Pb 含量明显高于杭州土壤背景值[27]。武汉工业区土壤磁性与重金属含量同步增加[6]。白银市工业表土 χ_{lf}>300×10^{-8} $m^3\cdot kg^{-1}$，其值随着与冶炼厂距离的增加而减小[28]。因此，应加强城市大气人为磁性颗粒物沉降对城市土壤和周边农业土壤性状影响的研究。

4　结　论

上海宝山区道路灰尘呈碱性，pH 高于相邻表土。道路灰尘有机质含量显著高于表土（P<0.05），其中又以工业区道路灰尘有机质含量最高。宝山区 86.2%表土样 χ_{lf} 高于当地背景磁性。与表土相邻的道路灰尘 χ_{lf} 增强更加显著，平均达 903.3×10^{-8} $m^3\cdot kg^{-1}$。道路灰尘重金属的累积量也远高于相邻表土。道路灰尘和表土 χ_{lf} 与多数重金属元素的含量呈显著相关性（P<0.01 或 P <0.05），但不同功能区 χ_{lf} 与重金属元素含量间的相关程度有差别，农业区这种相关性较弱。道路灰尘的特异性状表明城市大气颗粒物包含一定量的人为成因磁性颗粒。尤其是深受工业和交通影响的区域，这类磁性颗粒含量较高。人为成因磁性颗粒具有强磁性和高重金属含量，长期、连续的沉降已对城市土壤性状产生深刻影响。

参考文献（References）

[1] Wang J, Huang Y, Li T, et al. Contamination, morphological status and sources of atmospheric dust in different land-using areas of a steel-industry city, China[J]. Atmospheric Pollution Research, 2020, 11(2): 283—289.

[2] Prokof'eva T V, Shoba S A, Lysak L V, et al. Organic constituents and biota in the urban atmospheric solid aerosol: Potential effects on urban soils[J]. Eurasian Soil Science, 2021, 54(10): 1532—1545.

[3] Zong Y T, Xiao Q, Lu S G. Magnetic signature and source identification of heavy metal contamination in urban soils of steel industrial city, Northeast China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(1): 190—203.

[4] Lu S, Yu X, Chen Y. Magnetic properties, microstructure and mineralogical phases of technogenic magnetic particles (TMPs) in urban soils: Their source identification and environmental implications[J]. Science of the Total Environment, 2016, 543: 239—247.

[5] Liu D X, Ma J H, Sun Y L, et al. Spatial distribution of soil magnetic susceptibility and correlation with heavy metal pollution in Kaifeng City, China[J]. Catena, 2016, 139: 53—60.

[6] Yang T, Liu Q S, Zeng Q L, et al. Relationship between magnetic properties and heavy metals of urban soils with different soil types and environmental settings: Implications for magnetic mapping[J]. Environmental Earth Sciences 2012, 66(2): 409—420.

[7] Bourliva A, Papadopoulou L, Aidona E, et al. Magnetic signature, geochemistry, and oral bioaccessibility of "technogenic" metals in contaminated industrial soils from Sindos Industrial Area, Northern Greece[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(20): 17041—17055.

[8] Orosun M M, Oniku S A, Peter A, et al. Magnetic susceptibility measurement and heavy metal pollution at an automobile station in Ilorin, North-Central Nigeria[J]. Environmental Research Communications, 2020, 2(1): 1—9.

[9] Chang S H, Wang K S, Chang H F, et al. Comparison of source identification of metals in road-dust and soil[J]. Soil and Sediment Contamination, 2009, 18(5): 669—683.

[10] Hu X F, Li M, He Z C, et al. Magnetic responses to heavy metal pollution of the industrial soils in Shanghai: Implying the influences of anthropogenic magnetic dustfall on urban environment[J]. Journal of Applied Geophysics, 2022, 197: 104544.

[11] Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory methods[M]. Beijing: Science Press, 2012.[张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京：科学出版社, 2012.]

[12] Yao S T, Li Y Q, Wang D L, et al. Distribution and pollution assessment of soil heavy metals in Wanzhuang gold mine area in Beijing[J] China Mining Magazine,

2018，27（S2）：59—65.[姚世厅，李玉倩，王德利，等. 北京万庄金矿区土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 中国矿业，2018，27（S2）：59—65.]

[13] Wang Y，Wang Y G. Background value of soil environment in Shanghai [M]. Beijing：China Environmental Science Press，1992. [王云，汪雅谷. 上海土壤环境背景值[M]. 北京：中国环境科学出版社，1992.]

[14] Hu X F，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.

[15] Lu S G，Bai S Q，Cai J B，et al. Magnetic properties and heavy metal contents of automobile emission particulates[J]. Journal of Zhejiang University Science B，2005，6（8）：731—735.

[16] Lu S G. A comparative study on magnetic minerals of red soil and paddy soil[J]. Bulletin of Science and Technology，1999，15（6）：409—413.[卢升高. 红壤与红壤性水稻土中磁性矿物特性的比较研究[J]. 科技通报，1999，15（6）：409—413.]

[17] Li S，Zhang B，Wu D，et al. Magnetic particles unintentionally emitted from anthropogenic sources：Iron and steel plants[J]. Environmental Science & Technology Letters，2021，8（4）：295—300.

[18] Szuszkiewicz M，Petrovsky E，Lukasik A，et al. Technogenic contamination or geogenic enrichment in Regosols and Leptosols? Magnetic and geochemical imprints on topsoil horizons [J]. Geoderma，2021，381：114685.

[19] Aguilera A，Armendariz C，Quintana P，et al. Influence of land use and road type on the elemental composition of urban dust in a Mexican metropolitan area[J]. Polish Journal of Environmental Studies，2019，28（3）：1535—1547.

[20] An B N，Hu X F，Zhang P F，et al. Magnetic characteristics of the tertiary red clay in the Chinese Loess Plateau [J] Chinese Journal of Soil Science，2018，49（6）：1261—1269. [安柏年，胡雪峰，张培枫，等. 黄土高原新近纪红黏土磁性特征研究[J]. 土壤通报，2018，49（6）：1261—1269.]

[21] Wang G，Wang Y Y，Ma L J，et al. Magnetic spatial variation characteristics of indoor and outdoor dustfall in Shanghai[J]. Environmental Monitoring in China，2021，37（5）：53—66. [王冠，王阳阳，马丽娟，等. 上海室内外降尘磁学空间变化特征[J]. 中国环境监测，2021，37（5）：53—66.]

[22] Xia D S，Yu Y，Ma J Y，et al. Magnetic characteristics of urban dustfall and the implications on pollution origins[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment，2007，21（12）：110—115. [夏敦胜，余晔，马剑英，等. 大气降尘磁学特征对城市污染源的指示[J]. 干旱区资源与环境，2007，21（12）：110—115.]

[23] Wang J，Zhang X，Yang Q，et al. Pollution characteristics of atmospheric dustfall and heavy metals in a typical inland heavy industry city in China [J]. Journal of Environmental Sciences，2018，71：283—291.

[24] Yang X M，Zhong Y Q，Li G F，et al. Distribution characteristic and source apportionment of heavy metals in atmospheric dust in a typical industrial city - A case study of Jinan[J]. Environmental Chemistry，2022，41（1）：94—103.[杨新明，钟雅琪，李国锋，等. 典型工业城市大气降尘中重金属分布特征及其来源解析——以济南市为例[J]. 环境化学，2022，41（1）：94—103.]

[25] Wang M M，Yuan M Y，Su D C. Characteristics and spatial-temporal variation of heavy metals in atmospheric dry and wet deposition of China[J]. China Environmental Science，2017，37（11）：4085—4096. [王梦梦，原梦云，苏德纯. 我国大气重金属干湿沉降特征及时空变化规律[J]. 中国环境科学，2017，37（11）：4085—4096.]

[26] Xue Y，Hu X F，Ye R. Magnetic susceptibility of topsoils and their implications for heavy metal pollution in the different functional areas in Baoshan District，Shanghai[J]. Chinese Journal of Soil Science，2016，47（5）：1245—1252. [薛勇，胡雪峰，叶荣. 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，2016，47（5）：1245—1252.]

[27] Lu S G，Bai S Q. Study on the correlation of magnetic properties and heavy metals content in urban soils of Hangzhou City，China[J]. Journal of Applied Geophysics，2006，60（1）：1—12.

[28] Wang B，Zhang X，Zhao Y，et al. Spatial and temporal distribution of pollution based on magnetic analysis of soil and atmospheric dustfall in Baiyin City，Northwestern China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health，2021，18（4）：1681—1696.

（责任编辑：陈荣府）