

上海市地表灰尘与降水关系的分析

王冠¹, 陈姣¹, 张晓东¹, 孙鹤晟², 任非凡³

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 上海市市东中学, 上海 200093; 3. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 为了探讨降水对上海市地表灰尘的影响,以上海市杨浦区6个不同功能区的地表灰尘为研究对象,采用环境磁学方法分析降雨前后地表灰尘的磁学特征变化,用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析其中11种重金属元素含量,采用富集因子法分析地表灰尘中各种重金属的富集情况,讨论分析降雨前后不同功能区地表灰尘的磁学特征变化及元素质量浓度的分布特征。结果表明:上海市杨浦区地表灰尘污染总体上呈现降雨后低于降雨前的变化趋势,其中降水对地表灰尘磁学参数影响最大的为频率磁化率 $\chi_{fd}\%$,对重金属元素Pb的含量影响较大;在不同功能区中,工业区和交通区受降水影响均较大,而教学区受降水影响最小;重金属的富集程度为 $Pb > As > Cd > Zn \approx Mn \approx Cr > Cu > Ni > Ca > Mg$,其中Pb、Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd等重金属已在环境中富集。众多结果显示,降水对城市地表灰尘的磁性特征和重金属含量均有一定的影响。

关键词: 环境磁学; 地表灰尘; 降水; 富集因子

中图分类号:X830.2

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2016)02-0036-09

Analysis of relation between street dust and precipitation in Shanghai

WANG Guan¹, CHEN Jiao¹, ZHANG Xiaodong¹, SUN Hesheng², REN Feifan³

(1. Department of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. East Middle School of Shanghai City, Shanghai 200093, China; 3. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092, China)

Abstract: In order to investigate the influence of precipitation on street dust in Shanghai, the paper took the street dust of six different functional areas at Yangpu district of Shanghai as research object, and used environmental magnetic method to analyze the change of magnetism characteristics of street dust before and after precipitation. It measured the contents of eleven kinds of heavy metal element with ICP-MAS method, and used the enrichment factor method to analyze the enrichment condition of all kinds of heavy metals in the street dust. It analyzed the variation characteristics of street dust's magnetism parameters and element concentrations at different functional areas with the factor of precipitation. The results showed that the street dust pollution in Yangpu district generally has higher level before the rain than that after the rain. Among all magnetic parameters involved, frequency-dependent susceptibility $\chi_{fd}\%$ is the most affected factor. The influence of precipitation on heavy metal element Pb is greater. In different functional areas, the industry and traffic area are more affected by precipitation, and the school area is less affected; degree of enrichment of heavy metal is $Pb > As > Cd > Zn \approx Mn \approx Cr > Cu > Ni > Ca > Mg$, some of these heavy metal had been enriched in the environment, such as Pb, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Cd et al. The results showed that precipitation has certain influence on magnetic feature and heavy metal content of street dust in city.

Key words: environmental magnetism; street dust; rainfall; enrichment factor

近年来,城市地表灰尘研究已成为环境领域关注的热点问题,研究内容主要集中在地表灰尘的重

收稿日期:2015-09-09; 修回日期:2015-11-24

基金项目:国家自然科学基金项目(41001331);上海市自然科学基金项目(15ZR1428700)

作者简介:王冠(1981-),女,河南新乡人,博士,副教授,主要研究方向为城市污染研究。

金属水平^[1]、来源分析^[2]、空间分布特征^[3]、赋存形态^[4]和健康风险^[5]等方面。研究结果发现在不同的城市功能区域内,地表灰尘的磁性特征和重金属含量均存在明显的差异性。地表灰尘作为污染物在城市环境中传播的重要介质,包含着城市环境信息,同时具有一定的污染指示作用。一方面,地表灰尘可通过风力、车流、人流等外力作用再次悬浮在空气中,造成二次污染,同时灰尘中富集大量的重金属及有害污染物,通过吞食、吸入和皮肤吸收等途径进入人体,对人体健康造成危害。另一方面,在降水冲刷的作用下,地表灰尘成为街道径流及水体中溶解固体和悬浮物的主要组成部分,可能会对城市土壤以及水环境造成持续污染^[6]。目前,大部分研究以气溶胶(研究对象多为PM₁₀、PM_{2.5})与多环芳烃的质量浓度来描述降雨前后大气颗粒物变化特征及分布情况^[7-9],也有部分学者通过测量颗粒物的数浓度与粒径谱分布特征来反映降水对大气颗粒物的影响^[10-11]。相对于地表灰尘中的颗粒物,目前较多研究颗粒物中的重金属元素在径流冲刷下的迁移转化与颗粒物中重金属质量浓度分布情况^[12],也有部分学者研究降水中的无机离子成分^[13]。但至今为止,关于降水前后颗粒物的磁性变化特征的研究极少,实际上将颗粒物的磁性特征与重金属元素的质量浓度两者结合起来将更加有助于进一步了解地表灰尘中颗粒物的性质与环境效应。故本文根据上海市2015年降雨前后地表灰尘的实验数据,分析降水对地表灰尘中颗粒物的去除作用,并探讨地表灰尘中磁性矿物及重金属含量对降水的响应。

1 材料与方法

1.1 样品采集与预处理

本实验以上海市杨浦区为例,为了保证样品的代表性及均一性,将杨浦区划分为工业区(GY)、商业区(SY)、交通区(JT)、居民区(JM)、教学区(JX)和清洁区(QJ)6个功能区,每个功能区选择2处采样点来收集降雨前后的地表灰尘。分别在2015年1月选择连续干燥无雨的天气以及降雨之后地表干燥当日,用塑料簸箕和塑料毛刷进行降雨前后地表灰尘的收集,现场将样品放入聚乙烯塑料袋中密封保存并贴上标签。共采集24个降雨前后的地表灰尘样品,每个样点收集的样品量均大于10 g,并且整个采样过程中样品未接触任何金属工具。所有样品带回实验室后,剔除石头、树枝、头发丝等杂物后,将其晾在实验台面待其自然风干一周左右后,即可进

行接下来的环境磁学与重金属含量分析。

1.2 实验方法

称取4g左右地表灰尘样品用聚乙烯保鲜膜包裹完整后装入磁学专用样品盒,压实,待测。所有磁学参数测量均在河口海岸学国家重点实验室完成,采用英国Bartington MS2磁化率仪测量磁化率 χ ,非磁滞剩磁ARM(交变磁场峰值100 mT、直流磁场0.04 mT)和饱和等温剩磁SIRM使用英国Molspin公司生产的交变退磁仪、脉冲磁化仪和ARGICO公司生产的JR6旋转磁力仪完成测量。根据测量结果计算相关的磁性参数,包括低频 χ_{lf} (0.47 kHz)、饱和等温剩磁SIRM、非磁滞剩磁磁化率 χ_{ARM} 、硬剩磁HIRM($HIRM = (SIRM + IRM_{-300})/2$)等参数,以及比值参数频率磁化率 $\chi_{fd}\%$ ($\chi_{fd}\% = (\chi_{lf} - \chi_{hf})/\chi_{lf} \times 100$)、 $\chi_{ARM}/SIRM$ 、 χ_{ARM}/χ_{lf} 、 $SIRM/\chi_{lf}$ 和 S_{-ratio} ($S_{-ratio} = IRM_{-300}/SIRM$,其中 IRM_{-300} 是样品在300 mT反向磁场中磁化后所携带的剩磁)。

地表灰尘样品重金属元素含量的测定则称取0.1 g地表灰尘样品,在TOPEX型号的全能型微波消解仪内采用HNO₃-HCl-HF法进行消解赶酸处理后,用5‰的硝酸定容至50 mL。以电感耦合等离子体质谱仪ICP-MS(NexION 300X型号)测定Fe、Mg、Ca、Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd和Pb等11种重金属的质量浓度。

1.3 富集因子的计算方法

本研究采用富集因子EF(Enrichment Factor of Element)来分析上海市杨浦区地表灰尘中重金属元素的富集情况,其定义公式如下:

$$EF = \frac{(C_X/C_R)_{\text{地表灰尘}}}{(C_X/C_R)_{\text{地壳}}} \quad (1)$$

式中: C_X 为待测元素浓度,mg/kg; C_R 为被选定的参考元素浓度,mg/kg; (C_X/C_R) 为样品中某一元素浓度与参比元素浓度比值; (C_X/C_R) 为地壳中某一元素丰度与参比元素丰度的比值。

参比元素一般选用地壳中普遍存在,化学稳定性好,且人为污染来源少、精确度较高的元素,目前较多采用Al、Fe、Sc等元素^[14-16]。本研究选用Fe作为参比元素,地壳中各元素的丰度值参考中国土壤元素背景值^[17]。不同重金属的富集程度可根据TORFS判断准则^[18]分为以下几类:当 $EF > 10$,说明颗粒物中该元素已富集,主要来源于人为污染;当 $EF < 1$,说明该元素在地壳中贫乏;当 $1 \leq EF \leq 10$ 时,则该元素主要来源于地壳土壤或自然尘埃。

2 结果与讨论

2.1 磁学特征

磁化率作为应用最为广泛的环境磁学参数之一,其值的大小可反映样品中亚铁磁性矿物的含量。由表 1 可知,降雨前地表灰尘样品 χ_{fr} 的变化范围为 $197.51 \times 10^{-8} \sim 1874.78 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,平均值为 $735.21 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。降雨后 χ_{fr} 的变化与降雨前的变化幅度大体一致,平均值降低为 $684.57 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,变化范围为 $303.74 \times 10^{-8} \sim 1143.26 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。Hu 等^[19] 提出上海土壤 χ_{fr} 的背景值为 $(29.10 \pm 9.80) \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,表 1 结果显示杨浦区降雨前后地表灰尘磁化率值均显著高于磁化率背景值,说明该地区地表灰尘中磁性矿物含量相对较高,且降水后地表灰尘中的磁性矿物含量相对有所减少。对比不同功能区,其中工业区和商业区内地表灰尘的 χ_{fr} 值较高,清洁区最低,结果显示工矿企业、人口密集、活动强烈的地区通常为磁化率高值分布区,这一结果与王冠^[20] 等研究兰州市街道尘埃磁学

特征的时空变化规律的研究结果一致。频率磁化率 $\chi_{\text{fd}}\%$ 的高低可反映超顺磁性颗粒的多少,二者之间呈正比。

降雨前后的样品中 $\chi_{\text{fd}}\%$ 最小值均为 0.08,平均值分别为 1.76 和 2.71,表明总体上样品中超顺磁颗粒含量很低,同时降雨使灰尘中超顺磁颗粒物含量减少。清洁区的 $\chi_{\text{fd}}\%$ 较高,而工业区的 $\chi_{\text{fd}}\%$ 最低,这一结果与 χ_{fr} 的功能区分布情况恰好相反。有研究学者发现^[21], χ 值越高,而 $\chi_{\text{fd}}\%$ 越低,样品污染程度越高,表 1 实验结果显示降雨前后杨浦区地表灰尘受人为污染影响较大,但降雨后的污染程度明显低于降雨前。不同功能区呈现出的污染程度趋势为:工业区 > 商业区 > 交通区 > 居民区 > 教学区 > 清洁区(图 1),受人为影响较小的清洁区 χ_{fr} 相对较小,受污染程度也最小,这种地表灰尘 χ_{fr} 分布结果指示了上海市杨浦区地表灰尘样品中磁性颗粒物主要来自于自然与人类活动两种来源,其中人类活动对磁性颗粒物的贡献更为突出,这与前人的研究结果一致^[22]。

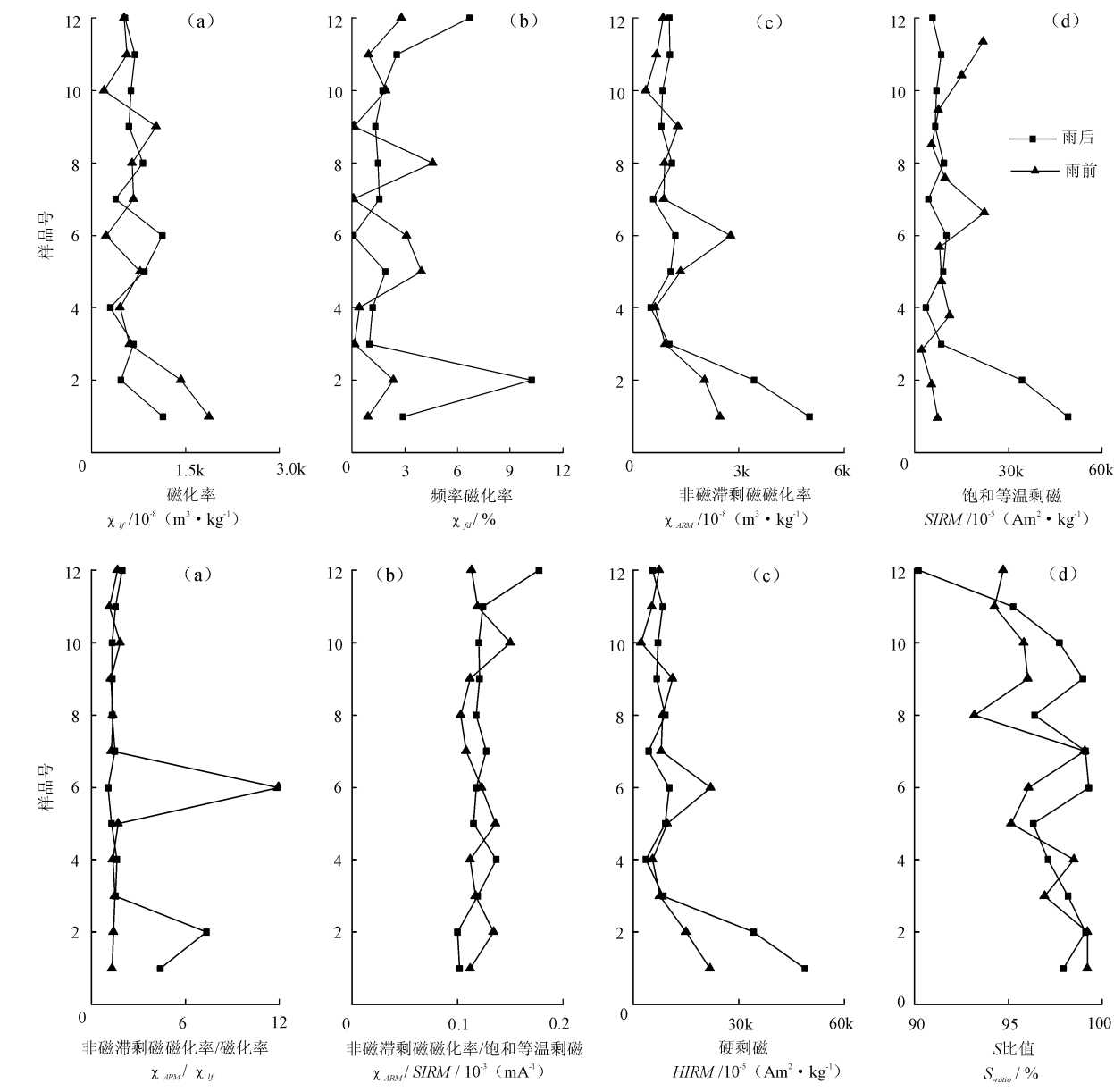
表 1 降雨前后地表灰尘样品的基本磁学参数

项目	磁化率/ $10^{-8}(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$		非磁滞剩	频率	剩磁/ $10^{-5}(\text{Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$		$\chi_{ARM}/SIRM$ $/10^{-3} \text{mA}^{-1}$	S 比值 S_{-ratio}	χ_{ARM}/χ_{lf}	
	低频	高频	磁磁化率	磁化率	饱和等温	硬剩磁				
	χ_{lf}	χ_{hf}	$\chi_{ARM} / \%$	$\chi_{fd} / \%$	SIRM	HIRM				
最大值	雨前	1874.78	1857.64	2762.89	4.61	22483.87	22044.31	0.27	99.21	11.94
	雨后	1143.26	1128.71	5007.10	10.20	49215.43	48709.92	0.20	99.29	7.36
最小值	雨前	197.51	193.65	361.48	0.08	2403.00	2352.72	0.03	93.21	1.17
	雨后	303.74	300.20	497.23	0.08	3626.83	3574.85	0.02	90.21	1.07
平均值	雨前	735.21	740.92	1254.65	1.79	10530.76	10368.44	0.11	96.52	2.31
	雨后	684.57	668.08	1468.88	2.71	13096.30	12947.50	0.10	97.14	2.18
雨前/雨后		1.07	1.11	0.85	0.66	0.80	0.80	1.10	0.99	1.06

$S_{\text{IRM}}, \chi_{\text{ARM}}, H_{\text{IRM}}, S_{\text{-ratio}}$ 等参数主要与样品的种类、粒度、磁性矿物含量有关。其中, S_{IRM} 由于不受顺磁性和逆磁性矿物的影响,主要反映亚铁磁性矿物和不完全反磁性矿物的贡献之和^[23]。由表 1 知,杨浦区地表灰尘 S_{IRM} 值总体偏高,雨前变化范围为 $2403.00 \times 10^{-5} \sim 22483.87 \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$,平均值达到 $10530.76 \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$,在工业区和商业区的 S_{IRM} 值明显高于其他功能区(见图 1),说明工业区和商业区的地表灰尘中亚铁磁性矿物和反铁磁性矿物的含量较高。 χ_{ARM} 主要指示样品中单畴晶粒度的亚铁磁性矿物的含量;硬剩磁 H_{IRM} 反映了不完整的反铁磁性矿物的含量; $S_{\text{-ratio}}$ 通常指高矫顽

力剩磁与低矫顽力剩磁物质的相对含量的多少。杨浦区地表灰尘 χ_{ARM} 降雨前的变化范围为 $361.48 \times 10^{-8} \sim 2762.89 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,平均值为 $1254.65 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$; H_{IRM} 降雨前的变化范围为 $2352.72 \times 10^{-5} \sim 22044.31 \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$,平均值为 $10368.44 \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$,其中工业区的 H_{IRM} 最高,其他地区相对较低,说明在工业区不完整反铁磁性矿物主导了样品的磁性特征。 $S_{\text{-ratio}}$ 雨前雨后的变化范围较小,分别为 93.21% ~ 99.21% 和 90.21% ~ 99.29%,总体数值偏高。由表 1 可以看出, $S_{\text{IRM}}, \chi_{\text{ARM}}, H_{\text{IRM}}, S_{\text{-ratio}}$ 这 4 个磁学参数降雨前的数值均略低于降雨后的数值,表明了降水并不一定会使地

表灰尘中所有的磁性矿物都减少,不同的磁性种类、粒度的磁性矿物对降水的响应存在一定的差异。



注:工业区:样品号 1~2;交通区:样品号 3~4;商业区:样品号 5~6;
教学区:样品号 7~8;居民区:样品号 9~10;清洁区:样品号 11~12

图1 上海市杨浦区不同功能区降雨前后地表灰尘的磁学参数

$\chi_{ARM}/SIRM$ 与 χ_{ARM}/χ_{lf} 比值与样品中磁性矿物的类型和颗粒大小密切相关,高值通常反映较细的单畴颗粒,低值指示较粗的多畴颗粒。表1可以看出降雨前后 $\chi_{ARM}/SIRM$ 的平均值分别为 2.31 和 2.18, χ_{ARM}/χ_{lf} 的平均值分别为 0.11 和 0.10,两者的值均小,说明样品中含有较多的多畴粗颗粒^[24]。从降雨前后各磁学参数的比值(表1)可以看出,受降水影响波动最大的是频率磁化率 χ_{fd} ,其次分别为 χ_{ARM} 、SIRM、HIRM,而剩余的其他磁学参数(χ_{lf} 、 $\chi_{ARM}/SIRM$ 、 S_{ratio} 、 χ_{ARM}/χ_{lf})降雨前/降雨后的比值

均接近于1,表明这些磁学参数受降水的影响很小。

2.2 重金属含量分析

2.2.1 降雨前后地表灰尘重金属水平 上海市杨浦区降雨前后的近地表灰尘重金属元素含量分析结果如表2所示。除了重金属 Pb 外,降雨前其他重金属含量的算术平均值均低于降雨后。各重金属含量的最大值中,只有重金属 Ca、Cd、Pb 雨前的含量低于雨后,其中雨后 Ca 的含量降低为雨前的 16%,雨后 Pb 的含量降低为雨前的 20%。降雨前重金属 Mg、Ca、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As 的含量最小值均大

于降雨后,Pb、Cd 的含量却呈现雨后低于雨前的趋势,变动幅度分别为 32.22 ~ 26.13 和 0.50 ~ 0.49 mg/kg。与土壤背景值相比,除了 Mg、Ca、Fe、Mn 等重金属的平均值含量低于背景值外,Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 等重金属的平均值均高于背景值含量。其中差值最小的是 As,高出土壤背景值近 1 倍,差值较大的为 Cd 和 Pb,分别高出背景值 5 和 16 倍。从 24 个样品的降雨前/后比值的平均值来看,降雨

前后地表灰尘中重金属含量的变化较大,其中只有 Pb 的雨前/雨后比值大于 1,说明该元素在降雨后的地表灰尘中含量远远低于降雨前。

从整个样本数来看,Ca、Cu、Cd 雨前/雨后比大于 1 的样品数接近 50%,表明在样品数上,地表灰尘中 Ca、Cu、Cd 等重金属含量降雨前后的差异均衡,而 Mg、Cr、Mn、Fe、Ni、Zn、Pb 灰尘中含量降雨前后差异明显。

表 2 降雨前后地表灰尘重金属含量统计

种类	项目	重金属含量/(mg · kg)				
		平均值	最大值	最小值	雨前/雨后比值	上海市土壤背景 ^[17]
Mg	雨前	1989.33	4695.40	312.21	0.63	9000.00
	雨后	3796.65	5690.43	2053.30		
Ca	雨前	8365.41	22137.44	645.58	0.67	12600.00
	雨后	14360.68	18557.98	9082.76		
Cr	雨前	306.34	2578.32	47.89	0.68	70.20
	雨后	1347.35	14593.04	69.55		
Mn	雨前	362.80	1267.27	131.84	0.65	548.00
	雨后	867.31	5671.45	316.99		
Fe	雨前	9226.26	23061.84	512.50	0.56	31600.00
	雨后	25134.88	111825.00	8720.12		
Ni	雨前	124.22	985.54	15.17	0.80	29.90
	雨后	433.24	4340.16	21.07		
Cu	雨前	96.42	340.58	19.40	0.73	27.20
	雨后	314.60	2666.54	39.19		
Zn	雨前	218.79	419.64	69.99	0.59	81.30
	雨后	503.95	1071.28	105.21		
As	雨前	13.00	27.44	8.82	0.80	9.10
	雨后	101.44	1049.44	10.60		
Cd	雨前	0.86	1.98	0.50	0.89	0.14
	雨后	1.03	1.94	0.49		
Pb	雨前	428.02	2398.28	32.22	2.07	25.00
	雨后	275.79	1873.36	26.13		

2.2.2 不同功能区地表灰尘重金属降水差异 图 2 为上海市杨浦区不同功能区降雨前后地表灰尘重金属含量的分布情况。图 2 显示地表灰尘中 Cr、Cu、As、Mn、Ni 等重金属在不同功能区的降雨前后的变化趋势相近,降雨前后重金属含量变化差异最大的是工业区,降雨后的重金属含量明显高于降雨前,而其他功能的地表灰尘中这些重金属含量受降雨影响较小;降雨前后灰尘中 Pb 元素在居民区变动较大,且表现为降雨后 Pb 含量明显低于降雨前;工业区和居民区降雨前 Cd 含量明显高于降雨后,但

在商业区和教学区降雨差异不明显;工业区、交通区降雨前后地表灰尘 Fe、Zn 含量差异大,其他功能区无明显变动,在教学区和清洁区受降雨影响最小;研究区域内地表灰尘 Mg 含量均显示出降雨前低于降雨后,且工业区和商业区降雨前后灰尘 Mg 元素含量存在显著性差异。结合分析不同功能区地表灰尘重金属降雨前后比值(表 3)得出,降水对地表灰尘 Fe、Mg、Zn 等重金属含量影响较大,而在不同功能区中,工业区和交通区受降水影响较大,教学区所受影响最小。

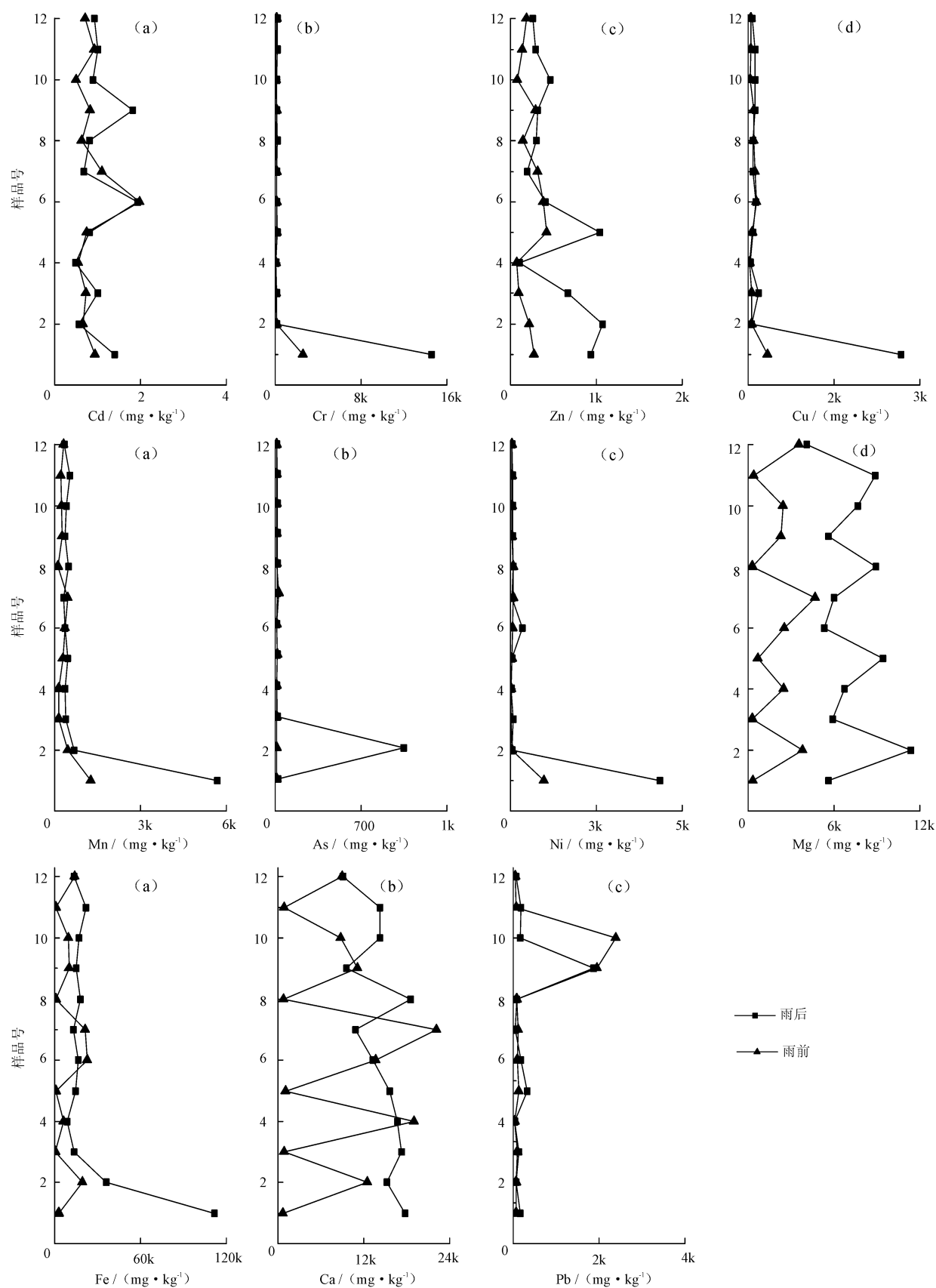


图2 杨浦区不同功能区降雨前后地表灰尘重金属含量分布情况

表 3 不同功能区地表灰尘重金属含量降雨前/雨前比值

功能区/n	重金属降雨前/雨后比值											
	Mg	Ca	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	平均
工业区(2)	0.37	0.40	0.18	0.27	0.15	0.24	0.15	0.25	0.02	0.82	0.56	0.31
交通区(2)	0.45	0.59	0.60	0.39	0.30	0.34	0.37	0.22	0.70	0.86	0.76	0.51
商业区(2)	0.43	0.51	0.71	0.79	0.76	0.29	0.99	0.56	1.07	0.99	0.44	0.68
教学区(2)	0.67	0.78	0.70	0.73	0.71	1.36	1.30	0.94	1.18	1.15	1.52	1.00
居民区(2)	0.71	0.84	0.91	0.68	0.63	0.75	0.58	0.47	0.67	0.49	2.14	0.81
清洁区(2)	0.61	0.42	0.56	0.61	0.41	0.75	0.48	0.59	0.80	0.84	0.49	0.60
平均值	0.54	0.59	0.61	0.58	0.50	0.62	0.64	0.50	0.74	0.86	0.98	0.65

2.2.3 富集因子法 根据实验计算得出 10 种重金属富集因子值如表 4 所示,从降雨前富集因子平均值可以看出,重金属的富集程度为 Pb>As>Cd>Zn≈Mn≈Cr>Cu>Ni>Ca>Mg,其中 Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 等重金属的富集因子均大于 10,说明这些元素已在环境中富集,受到人类不同程度的影响。As、Cd 及 Pb 3 种重金属元素的富集因子值大于 100,Pb 元素在降雨前富集因子的最大值高达 1184.66,表明它们已经受到人类活动的强烈影响。而 Mg、Ca 等元素的富集因子值很低,表明地表灰尘中这两种元素未受人为因素的影响,主要来源于地壳土壤或自然尘埃。从重金属富集因子的平均值来看,发现降雨后 10 种重金属元素富集因子值均低于降雨前,其中 Mg、Ca、As 的富集因子值的降幅较小,

而 Cr、Mn、Ni、Cu、As、Cd 和 Pb 的富集因子值降幅很大,降雨前的富集因子值与雨后的富集因子的比值超过 3。这一研究结果与李月梅等^[25]和张亚爽^[26]的研究结果一致,表明了降雨对灰尘中重金属能起到一定的冲刷作用,明显降低了地表灰尘 Cr、Mn、Ni、Cu、As、Cd 和 Pb 等重金属的富集程度。其中对灰尘中 Cd 的富集程度影响最大,该结果可能与颗粒物对 Cd 的吸附量受粒径的影响较小这一原因有关,不同粒径的颗粒物对重金属的吸附量存在差异性,大部分金属的吸附量基本上随粒径的增大而减小,而大颗粒物在雨水的冲刷下更易沉降^[27]。这使得几乎不受粒径影响的 Cd 大量附着于各种颗粒物上而被雨水冲刷,导致降雨后地表灰尘中重金属 Cd 元素的富集因子显著降低。

表 4 地表灰尘 10 种重金属元素的富集因子(无量纲)

采样点		重金属富集因子									
		Mg	Ca	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
最大值	雨前	1.35	3.39	439.80	182.91	207.78	113.10	249.40	456.14	415.20	1184.66
	雨后	0.80	2.14	68.81	22.63	25.29	21.95	43.63	762.53	35.28	605.71
最小值	雨前	0.23	0.23	2.74	6.95	1.43	2.86	4.89	14.13	10.08	15.36
	雨后	0.10	0.18	1.91	8.32	0.64	1.56	5.16	5.31	3.62	6.68
平均值	雨前	0.68	1.20	58.27	58.39	31.63	39.85	58.50	160.07	115.74	389.79
	雨后	0.43	0.95	10.06	12.72	4.99	7.21	15.66	85.47	17.18	82.81
雨前/雨后		1.58	1.26	5.79	4.59	6.34	5.53	3.74	1.87	6.74	4.71

从不同功能区的角度分析(图 3),发现 Cr、Mn、Ni 3 种重金属富集因子的最大值均出现在工业区,Zn、As、Cd、Pb 在交通区和商业区的富集因子值较大,教学区地表灰尘中 Cu、Cd 的富集因子值偏大,居民区 Pb 的富集因子值普遍高于其他功能区,清洁区的 10 种重金属元素富集因子值均较低。综合结果发现不同功能区地表灰尘不同的重金属富集情况大致呈现出工业区>交通区>商业区>教学区>居

民区>清洁区的分布趋势。观察降雨前后的变化情况,可以看出在各个功能区降雨前所有的地表灰尘重金属富集因子值均明显大于降雨后,其中工业区 As 元素除外。重金属元素 Cr、Mn、Ni、As 富集因子值在工业区降雨前后变化幅度最大,降雨前后商业区的 Mg、Ca、Cd 富集因子值显著变化,交通区、教学区和居民区受降水影响最大的分别是 Zn、Cu 和 Pb,清洁区各金属富集因子受降雨影响普遍偏低。

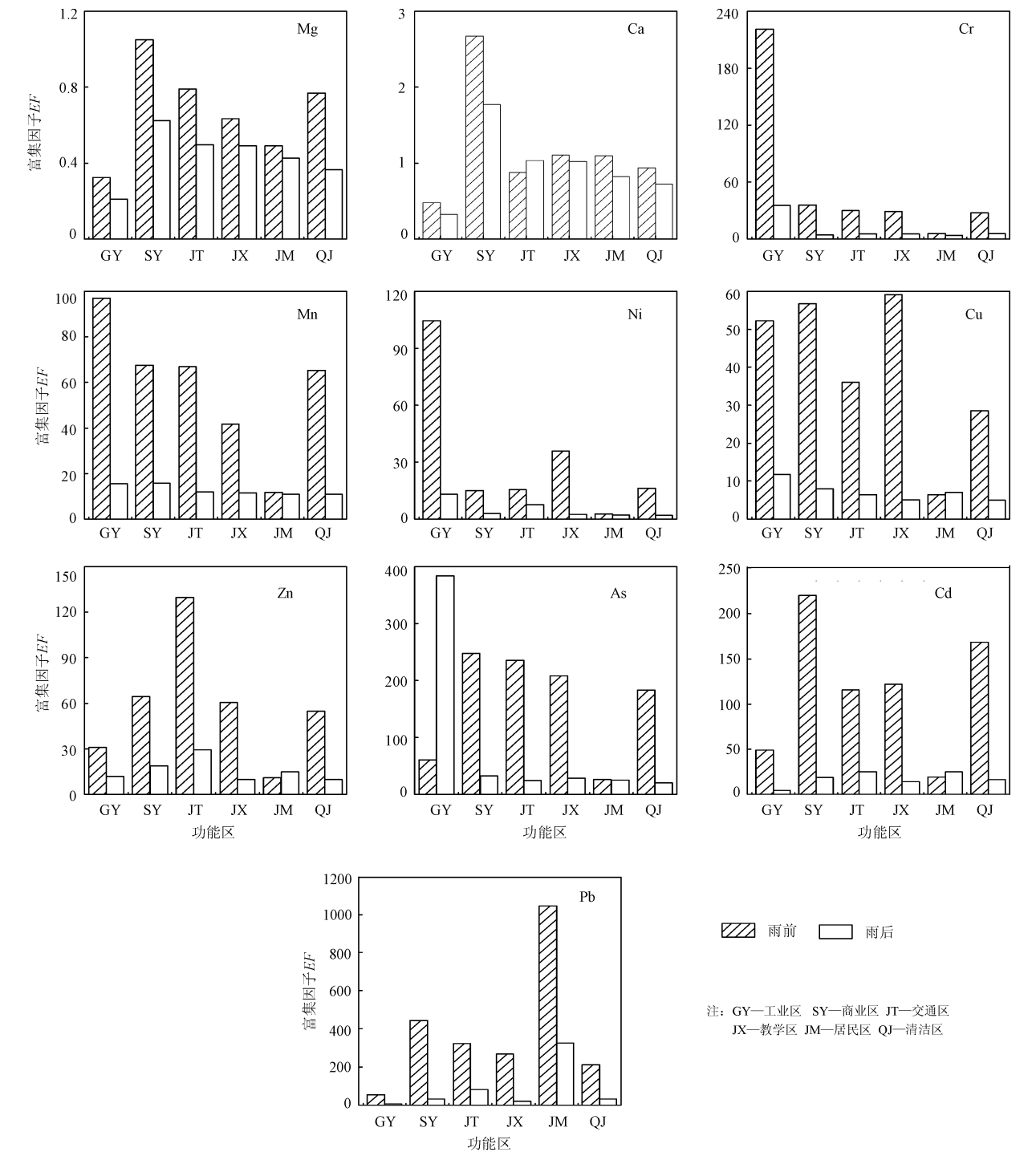


图 3 不同功能区降雨前后地表灰尘重金属的富集因子(EF)

3 结 论

本文以上海市杨浦区地表灰尘为研究对象,通过对降雨前后地表灰尘磁学特征和重金属含量分析,得出以下结论:

(1) 降雨前后样品磁化率值均大于背景值,表明地表灰尘中含有大量磁性矿物,以亚铁磁性矿物或反铁磁性矿物为主。其中,降水对地表灰尘磁学

- 参数影响最大的是频率磁化率 χ_{fd} %。
- (2) Ca、Cu、Cd 等重金属含量降雨前后的差异均衡,而 Mg、Cr、Mn、Fe、Ni、Zn、Pb 灰尘中含量降雨前后差异明显,其中重金属 Pb 的含量变动幅度最大,降雨前 Pb 含量明显高于降雨后;
- (3) 不同功能区受降水影响较大的是工业区和交通区,影响最小的是教学区;
- (4) 重金属的富集程度为 $Pb > As > Cd > Zn \approx$

$Mn \approx Cr > Cu > Ni > Ca > Mg$, 其中 Cr 、 Mn 、 Ni 、 Cu 、 Zn 、 As 、 Cd 、 Pb 等重金属已在环境中富集。众多金属中,降水对灰尘中 Cd 的富集程度影响最大;

(5) 不同功能区地表灰尘不同重金属富集情况呈现出工业区 > 交通区 > 商业区 > 教学区 > 居民区 > 清洁区的分布趋势。

致谢:本项目得到上海市青少年科学研究院的资助,整个实验过程在河口海岸学国家重点实验室和上海理工大学环境与建筑科学学院实验室完成,特此感谢。

参考文献:

- [1] 杨梅,李晓燕. 贵阳市冬季地表灰尘重金属含量动态变化及原因探析 [J]. 环境科学学报,2014,34(8):2070-2076.
- [2] 李晓燕,刘艳青. 我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源 [J]. 环境科学,2013,34(9):3648-3653.
- [3] 任春辉,卢新卫,陈灿灿,等. 宝鸡长青镇铅锌冶炼厂周围灰尘中重金属的空间分布及污染评价 [J]. 环境科学学报,2012,32(3):706-712.
- [4] Shao Li, Xiao Huayun, Wu Daishe. Speciation of heavy metals in airborne particles, road dusts, and soils along expressways in China [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2013,32(4):420-429.
- [5] 张文超,吕森林,刘丁彧,等. 宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估 [J]. 环境科学,2015,36(5):1810-1817.
- [6] 王冠,夏敦胜,杨丽萍,等. 兰州市街道尘埃元素质量分数季节变化特征 [J]. 兰州大学学报(自然科学版),2008,44(1):6-10.
- [7] Zhou Deping, Qi Ying, Gan Lulin, et al. Analysis on PM10 Pollution and Meteorological Conditions in Changchun City [J]. Meteorological and Environmental Research,2010,1(6):53-56.
- [8] 郑晓霞,赵文吉,晏星,等. 降雨过程后北京城区 PM2.5 日时空变化研究 [J]. 生态环境学报,2014,23(5):797-805.
- [9] 武子澜,杨毅,刘敏,等. 城市不同下垫面降雨径流多环芳烃(PAHs)分布及源解析 [J]. 环境科学,2014,35(11):4148-4156.
- [10] 胡敏,刘尚,吴志军,等. 北京夏季高温高湿和降水过程对大气颗粒物谱分布的影响 [J]. 环境科学,2006,27(11):2293-2298.
- [11] 李瑞芃,石金辉,张代洲. 天气条件及气团来源对青岛春季大气颗粒物数浓度谱分布的影响 [J]. 中国环境科学,2012,32(8):1392-1399.
- [12] 何小艳,赵洪涛,李叙勇,等. 不同粒径地表街尘中重金属在径流冲刷中的迁移转化 [J]. 环境科学,2012,33(3):810-816.
- [13] 马琳,杜建飞,闫丽丽,等. 崇明东滩湿地降水化学特征及来源解析 [J]. 中国环境科学,2011,31(11):1768-1775.
- [14] 邓昌州,平先权,杨文,等. 探讨富集因子背景值的选择 [J]. 环境化学,2012,31(9):1362-1367.
- [15] Bilos C, Colombo J C, Skorupka C N, et al. Sources, distribution and variability of airborne trace metals in La Plata City area, Argentina [J]. Environmental Pollution (Barking, Essex),1987,2001,111(11):149-158.
- [16] Hernandez L, Probst A, Probst J L, et al. Heavy metal distribution in some French forest soils: evidence for atmospheric contamination [J]. The Science of the Total Environment,2003,312(1-3):195-219.
- [17] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社,1990:494-495.
- [18] Castranova V, Porter D, Millecchia L, et al. Effect of inhaled crystalline silica in a rat model: time course of pulmonary reactions [J]. Molecular Cellular Biochemistry, 2002,234(1):177-184.
- [19] Hu Xuefeng, Su Yu, Ye Rong, et al. Magnetic properties of the urban soils in Shanghai and their environmental implications [J]. Catena,2007,70(3):428-436.
- [20] 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.
- [21] 郭利成,陈秀玲,贾丽敏. 福州市公园灰尘磁学特征及其环境意义 [J]. 中国环境科学,2013,33(5):775-785.
- [22] Wang Guan, Oldfield F, Xia Dunsheng, et al. Magnetic properties and correlation with heavy metals in urban street dust: A case study from the city of Lanzhou, China [J]. Atmospheric Environment,2012,46:289-298.
- [23] 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.
- [24] 夏敦胜,王冠,马剑英,等. 兰州市大气降尘环境磁学特征研究 [J]. 中国沙漠,2007,27(5):859-865.
- [25] 李月梅,潘月鹏,王跃思,等. 华北工业城市降水中金属元素污染特征及来源 [J]. 环境科学,2012,33(11):3712-3717.
- [26] 张亚爽. 东南沿海典型港口城市大气降水中的重金属 [J]. 环境科学与技术,2015,38(3):131-135.
- [27] 冯美军,王琳,卫宝立,等. 路面颗粒物粒径分布及其对重金属的吸附研究 [J]. 中国给水排水,2013,29(23):121-123.