

·环境矿物学·

城镇周边土壤中燃煤成因磁性微球粒的环境特性研究

汤丽玲,王之峰,马生明

(中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所,中国地质科学院应用地球化学开放实验室,河北廊坊 065000)

摘要:通过对我国 13 个中心城市及其周边地区重金属污染土壤中磁性微球粒的形貌结构和矿物成分的研究,确定其具有明显的燃煤成因特征和示踪土壤重金属污染物来源的功能。化学成分分析结果表明,8 种主要重金属元素在磁性微球粒中的含量普遍都高于土壤生态地球化学基准值,可判断磁性微球粒也是污染土壤中重金属元素的主要载体之一。磁性微球粒对土壤重金属累积的贡献率大多不超过 1%,但在微球粒含量高的情况下可达 10%,甚至 60%。由于以磁性微球粒形式存在的重金属元素相对比较稳定,因此在进行土壤地球化学生态效应评价时有必要考虑其环境意义。

关键词:重金属污染土壤,磁性微球粒,贡献率,环境特性

中图分类号:P579

文献标识码:A

文章编号:1000-6524(2010)03-0319-06

Environmental characteristics of magnetic micro-particles derived from coal combustion in soil of peripheral areas of cities

TANG Li-ling, WANG Zhi-feng and MA Sheng-ming

(Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Open Laboratory of Applied Geochemistry, CAGS, Langfang 065000, China)

Abstract: Magnetic micro-particles in soil polluted by heavy metals around 13 cities were collected for the purpose of determining their environmental significance. They can be used as tracers for the source of heavy metals in soil because the microstructure and mineral component characteristics show evidently their derivation from coal combustion. The magnetic susceptibility of falling dusts containing abundant magnetic micro-particles is much higher than the average value of urban soil, which explains clearly the reason why soil polluted by heavy metals always has high magnetic susceptibility. Finer particle sizes of magnetic micro-particles have higher magnetic susceptibilities, which facilitates the diffusion of heavy metal pollution for a long distance. The occurrence rates of the magnetic micro-particles in soil collected from 13 investigated cities all exceed 80%, which indicates the universal distribution of magnetic micro-particles in soil of urban and surrounding areas. The average content of the magnetic micro-particles in 5 kg soil sample collected from Beijing varies in the range of 30~7 070 mg with the highest being 267 g. Magnetic micro-particles can be regarded as carriers of heavy metals in soil because all the eight heavy metals could be detected in chemical component analysis and the content is 2~25 times higher than the soil eco-geochemical reference value of China's eastern plain region. Results of correlation analysis show

收稿日期:2009-11-13;修订日期:2009-12-04

基金项目:中国地质科学院基本科研业务费资助项目(ywf060724),物化探研究所基本科研业务费资助项目(AS2007J02)

作者简介:汤丽玲(1975-),女,汉族,博士,高级工程师,从事生态环境地球化学研究,联系电话:0316-2267729,E-mail:tangliling@

that in most cases there exists a significant correlation between content of heavy metals in magnetic micro-particles and that in soil polluted by coal combustion. The contribution rate of magnetic micro-particles to heavy metal accumulation in soil is generally lower than 1% though it could reach 10% or 60% in soil with much more magnetic micro-particles. It must be emphasized that the contribution rate mentioned above only shows the trend of the environmental effect of coal combustion because magnetic micro-particles do not constitute all the pollution components produced in the process of coal combustion and the content of magnetic particles can not be quantified due to the unavoidable loss in the process of elutriation. Nevertheless, the above phenomena could at least prove that magnetic micro-particles can be used as an easy means for connecting media that contact heavy metal pollution in soil of cities with atmosphere pollution produced by coal combustion. As heavy metals in magnetic micro-particles are commonly very inactive, the evaluation criterion range of heavy metal content in eco-geochemical assessment can be properly broadened according to the content of magnetic micro-particles in areas around coal combustion factories. At the same time, it should be taken into account that heavy metals in magnetic micro-particles can also be released in some extreme conditions such as low pH or high salt content. Forecast should be conducted so as to prevent the environmental disaster produced by activated heavy metals in magnetic micro-particles.

Key words: heavy metal polluted soil; magnetic micro-particles; contribution rate; environmental characteristics

已有的多目标地球化学调查结果显示,我国城镇周边土壤的重金属异常现象普遍存在,并且在位于人口密集区或工业区的近地表土壤中普遍存在着一种具有磁性的微球粒物质(朱立新等,2004)。根据姚多喜等(2002)对煤燃烧过程中的演化特征,判断其为燃煤成因(马生明等,2007)。这种物质一方面可以经选矿富集后作为富铁的环境材料资源,在冶金、建材、选矿、环境工程等领域应用;另一方面,其中往往富集重金属元素,具有污染环境的可能性(孙俊民等,2005),因此微球粒已受到环境研究者的高度重视。在环境地球化学领域,对于微球粒物质的研究主要集中在成因判别及其引起土壤地球化学异常的机理方面,而对于这种物质对形成土壤地球化学异常的环境意义究竟如何还缺乏实际的数据,因此,本文对 13 个大中城市及其周边的土壤进行了系统研究,以查明这种磁性微球粒的空间分布规律、所携带的重金属元素种类和含量,并就微球粒对形成城镇周边土壤重金属元素异常的贡献率进行了探索性研究。

1 样品采集与分析测试

1.1 试验区选择及样品采集

试验区的选择主要考虑城市的类型和功能,集中在典型的工业城市及其周边,少数其他类型城市用作对比研究,同时兼顾自然景观条件差异。依据

上述选区原则,确定广州、北京、长春、沈阳(含本溪、鞍山)、贵阳、郑州、太原、西安、兰州、重庆、南京(含马鞍山)、长沙等中心城市作为试验区。

采样点的布置结合城市功能分区特点,尽量选择在市区及近郊区未受人为活动扰动的土壤,进行土壤表层和垂直剖面采样,表层样品采集深度为 0~20 cm,剖面采样深度根据土壤层厚度和采样点具体情况确定,一般控制在 0~200 cm,单件样品重量为 5 kg,同时对应采集一份用于土壤元素分析的样品。

1.2 磁性微球粒的分选

在样品采集现场对样品进行初步淘洗富集,工作方法同常规的自然重砂分离流程,为了减少细粒级微球粒的流失,除延长浸泡和沉降时间外,尽量多保留灰砂部分。磁性微球粒室内分选由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,根据样品特征采用摇床、重液或磁选法进行分选。

1.3 磁性微球粒鉴定和元素组成分析方法

磁性微球粒矿物成分分析由中国地质工程勘查研究院采用 X-衍射分析方法完成,仪器型号为日本理学 Dmax/22002 γ A10 型,Cu 靶 K α 射线,石墨单色器,4°/min,100 mA,50 kV。微球粒化学成分分析由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所中心实验室完成,其中 As 和 Hg 采用物化探研究所生产的原子荧光光谱仪测定,仪器型号为 XGY-1011A,附专属汞空心阴极灯,仪器工作参数:原子化器高度 7 mm,原子化温度 200℃,载气流量 500 mL/min,主

灯电流为 30 mA, 负高压 180 V。其他元素采用美国 Thermo Elemental 公司 ICP-MS 分析测定, 仪器型号为 X-seriesII, 功率 1.3 kW, 采样深度 60 步, 载气流速 0.76 L/min, 等离子体气流速 13.0 L/min, 测量通道 3, 辅助气流速 0.9 L/min, 分析方式脉冲, φ 采样锥 (Ni) 1.0 mm, φ 截取锥 (Ni) 0.7 mm。所有元素测试过程经国家一级标准物质监控, 元素分析精度均优于 5%。

2 磁性微球粒的矿物学特征

2.1 物性和形貌特征

土壤中的磁性微球粒主要集中在强磁性部分, 少量在电磁部分, 但是也有个别属于无磁性的玻璃质、碳质微球粒。其中铁质磁性微球粒主要为黑色

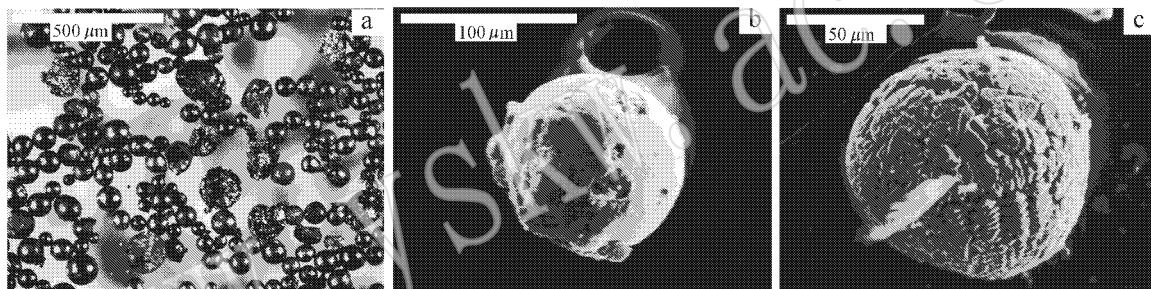


图 1 磁性微球粒形貌结构特征

Fig. 1 Microstructure characteristics of magnetic micro-particles

a—双目实体显微镜下的磁性微球粒; b—扫描电镜下球粒表面气孔结构; c—扫描电镜下球粒表面多边形镶嵌结构
a—magnetic micro-particles under stereobinocular microscope; b—blowholes in the magnetic micro-particle, SEM; c—polygonal mosaic structure in the magnetic micro-particle under SEM

2.3 磁性特征

磁性微球粒的矿物成分决定其具有较高的磁化率, 但由于磁化率分析需要的样品量较大, 因此对来自辽宁省本溪市的含有磁性微球粒的燃煤降尘样品进行了磁化率分析, 结果表明燃煤降尘的磁化率值在 $(400 \sim 3\,500) \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 之间(表 1), 明显高于城市土壤的平均磁化率 $(118.6 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg})$ (卢瑛等 2001), 因此微球粒进入土壤必然引起土壤磁化率升高(闫海涛等, 2004; 张春霞等, 2005)。并且在各粒级组别中, 易随风飘散的细粒级组分的磁化率明显高于粗粒级组分, 为燃煤污染的远距离扩散提供了条件, 前人研究业已证明, 燃煤型工厂周边土壤磁化率值随离源区的距离增大而减小(Kapicka *et al.*, 1999)。土壤磁化率的这一变化特征正是利用磁学方法进行土壤环境污染研究的重要依据(Strzyszczyk and

和褐色, 玻璃质微球粒为褐色、棕色、白色、无色或混合杂色。形状以球粒状为主, 部分呈片状、瘤状、水滴状、不规则状、联体状、双球状。球粒表面有气孔结构、多边形镶嵌结构、皱纹结构、瘤状突起、席纹结构等, 球粒内部以空腔结构、海绵结构为主(图 1)。

2.2 矿物组成特征

通过对磁性微球粒样品 X-射线衍射分析, 确定磁性微球粒的主要矿物组成为磁铁矿、赤铁矿、莫来石、方解石、石膏、石英、长石、非晶质物质等, 此结果与陈天虎等(2003)、孙俊民等(2005)对燃煤固体物的研究结果一致。同时, 土壤中的磁性微球粒与对应地区燃煤粉尘中分选出的磁性微球粒相比, 其矿物成分、形态结构、微量元素特征、含碳特征等方面均无明显差别(马生明等, 2007)。微球粒的这一矿物组成特征是判断其燃煤成因的重要依据之一。

表 1 不同粒径燃煤降尘和飘尘的磁化率 $10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$

Table 1 Magnetic susceptibility of different particle sizes of falling dusts and floating dusts

样品粒径/mm	本溪-1	本溪-2	本溪-3	本溪-4
0.18~0.83	406	480	1 342	1 324
0.08~0.18	585	1 260	2 803	3 471

Magiera, 1998; Durza, 1999; 白世强等, 2005)。

3 磁性微球粒与土壤重金属污染

3.1 土壤中磁性微球粒的分布

对我国 13 个中心城市的磁性微球粒研究结果表明(表 2), 各城市周边土壤中都有磁性微球粒出现, 所采集样品中磁性微球粒的出现频率均超过 80%, 每 5 kg 土壤中磁性微球粒的平均含量在 30~

7070 mg 之间,这足以说明磁性微球粒在城镇周边土壤中存在的普遍性。对于北京、南京、本溪、广州、漳州 5 个城市,每 5 kg 土壤样品中磁性微球粒最高含量都在 10 g 以上,北京甚至达到 267 g。而且,同一个城市土壤中微球粒含量呈现出工业区高于居民生活区,城市中心区高于郊区的规律,老城区和新建城区之间也有差异。在平面上基本围绕城镇呈环带状分布,随着距城镇中心距离的增大叠加量逐渐减小直至消失。

3.2 磁性微球粒分布与土壤重金属含量的关系

为了研究土壤中磁性微球粒的含量变化与重金属含量间的关系,首先对土壤中分选出的磁性微球

表 2 不同试验区土壤中磁性微球粒出现频率及含量

Table 2 Occurrence frequency and content of magnetic micro-particles in soil of different cities

采样地点	样品件数	出现频率 / %	平均含量 / $\text{mg} \cdot 5 \text{ kg}^{-1}$	最高含量 / $\text{mg} \cdot 5 \text{ kg}^{-1}$
广州	92	87	429	14 275
漳州	70	100	192	10 334
南京	108	94	1 052	52 410
长沙	45	98	76	574
鞍山	26	98	75	417
本溪	29	100	5 900	38 025
长春	85	88	32	343
沈阳	37	97	214	3 336
贵阳	35	100	699	7 553
西安	23	96	116	820
兰州	39	95	94	1 341
太原	19	95	121	364
重庆	10	100	81	280
郑州	6	83	30	40
北京	40	92	7 070	267 168

粒进行了元素成分分析,在对磁性微球粒的单个颗粒进行电子探针分析中,重金属元素 Hg、Cd、Cr、Zn、Pb、Ni 等均有检出,而且个别元素含量还比较高。于是对磁性微球粒分选富集后进行了常规化学分析,分析结果见表 3。

从表 3 结果可以看出,磁性微球粒中不但含有所有的 8 种主要重金属元素,而且各试验区磁性微球粒中重金属元素的平均含量普遍高于我国东部平原土壤生态地球化学基准值。但不同试验区产出的磁性微球粒的重金属元素含量差别较大,具有明显的地域特色,其中广州试验区磁性微球粒的重金属含量最高,除 Hg 和 Ni 外其他元素都高于土壤中相应元素基准值的 10 倍以上,而鞍山试验区磁性微球粒中的重金属元素含量最低,As 和 Hg 的含量甚至还低于土壤的基准值。该结果证明,这种燃煤成因的磁性微球粒至少是土壤中一部分重金属污染物的载体,随燃煤降尘不断进入土壤后必然引起土壤中重金属元素的累积,也就是说,磁性微球粒是引起土壤重金属元素异常的直接原因之一。

在典型燃煤污染型试验区,土壤垂直剖面的异常组分含量表现出明显的表层累积型特征,异常组分主要在近地表土壤层中累积,随着剖面深度的加大(通常 $> -80 \text{ cm}$),大多数异常组分含量显著减弱并很快消失。磁性微球粒中的 As、Cd、Ni 含量与土壤中相应元素含量表现出明显的正相关,而 Pb 和 Zn 没有表现出这样明显的相关关系(表 4)。对磁性微球粒与土壤重金属含量的相关分析结果表明,广东一带磁性微球粒与土壤 Cd、Cr、Zn、Pb 污染相关,南京一带磁性微球粒与土壤 S、Bi、Zn、Cd 污染相关,长春一带磁性微球粒与土壤 Cd 和 Cr 污染相关。

表 3 磁性微球粒中的重金属元素含量

Table 3 Content of heavy metals in magnetic micro-particles

采样地点	$\mu\text{g/g}$						ng/g	
	As	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Cd	Hg
马鞍山($n=10$)	13	953	83	47	54	510	896	43
本溪($n=14$)	14	700	61	54	107	178	560	145
广州($n=5$)	110	1 026	297	164	287	1 354	2 920	102
贵州($n=13$)	24	530	138	138	62	150	951	150
鞍山($n=4$)	8	1 048	71	67	28	128	294	21
土壤基准值 ^①	10	65	23	30	23	64	118	25

① 朱立新,马生明,王之峰,等. 2005. 中国土壤生态地球化学基准值及数据库研究[科技部科技基础性和社会公益研究专项(2002DIB20063)资助]资料.

表 4 不同采样地点土壤剖面重金属含量与对应层位土壤中磁性微球粒重金属含量特征

Table 4 Heavy metal content of soil profiles at different sampling sites and that of magnetic micro-particles in the corresponding soil horizons

采样地点	剖面深度 /cm	球粒含量 /g·5 kg ⁻¹	$w_B/10^{-6}$								$w_B/10^{-9}$			
			As		Ni		Pb		Zn		Cd		Hg	
			土壤	球粒	土壤	球粒	土壤	球粒	土壤	球粒	土壤	球粒	土壤	球粒
本溪	0~ -20	2.3	64	169	47	118	65	287	119	293	404	842	271	434
	-20~ -40	2.0	13	115	27	101	34	364	57	297	140	480	74	205
	-40~ -60	0.6	11	79	28	52	25	108	55	229	136	261	152	156
廊坊	0~ -20	3.2	13	81	38	134	36	36	123	196	381	577	67	42
	-20~ -40	1.5	10	17	27	128	28	40	68	369	171	336	64	21
	-40~ -60	0.4	9	15	25	56	22	40	61	260	182	270	103	29
广州	0~ -20	5.3	41	99	45	128	93	44	214	207	1 044	758	196	192
	-20~ -40	3.0	13	53	28	97	127	76	296	342	1 255	886	202	188
	-40~ -60	1.2	12	50	27	80	133	74	294	327	1 324	713	193	225

由此说明土壤中累积的这些重金属元素除来自燃煤产生的磁性微球粒外应该还有其他来源途径,包括以其他形式存在和回落土壤的燃煤产物。

虽然磁性微球粒中的重金属元素含量普遍高于土壤的重金属含量,但是由于不同试验区土壤中的微球粒含量存在较大差别,因此微球粒所携带的重金属对土壤重金属累积的贡献率也不同,对微球粒含量较高采样点的统计结果(表 5)表明,磁性微球粒携带的重金属量占土壤中重金属总量的比例大多不超过 1%,但在微球粒含量高的情况下可达到 10% 以上,甚至 60%(BJ-5 的 Cr)。8 种主要重金属元素中,微球粒携带的 Cr 和 Ni 所占比例较其他元素明

显偏高。需要说明的是,土壤中的微球粒虽然是由燃煤产生并随燃煤降尘回落到土壤中,但它并不是燃煤降尘的全部,对部分地区电厂飘尘与其中选出的磁性微球粒化学分析结果也显示,飘尘中的多数重金属元素含量高于磁性微球粒。并且由于在样品淘洗过程中的损失,目前对土壤中磁性微球粒含量的分析只能达到半定量水平,因此,表 5 中磁性微球粒对土壤重金属累积的贡献率只能说明其所产生的环境效应的总体趋势而非全部,但该结果至少可以说明磁性微球粒是一种便于人们识别的,具有示踪燃煤降尘污染的物质,它是将燃煤型大气污染与城镇区土壤重金属异常直接联系起来的媒介之一。

表 5 磁性微球粒携带重金属对土壤重金属累积的贡献率

%

Table 5 Contribution rates of magnetic micro-particles to heavy metal accumulation in soil

采样地点及编号	球粒含量/ g·5 kg ⁻¹	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
北京-5	267.2	7.96	8.67	60.60	7.76	13.63	11.18	13.39	8.36
本溪-15	47.5	1.26	0.87	8.13	0.96	0.72	0.71	1.46	0.80
本溪-14	42.5	0.77	0.36	7.82	1.15	0.41	1.00	0.74	0.63
马鞍山-4	37.4	0.81	0.85	8.56	1.60	0.32	1.06	0.48	0.79
本溪-19	34.3	0.74	0.10	3.38	0.43	0.77	0.85	0.07	0.16
广州-22	14.3	1.40	0.63	2.98	0.98	0.20	1.48	0.59	1.04
广州-21	13.3	1.03	0.11	1.16	0.34	0.02	1.20	0.14	0.15
本溪-14	10.9	0.26	0.17	2.45	0.34	0.05	0.35	0.33	0.24
马鞍山-1	10.2	0.26	0.66	2.41	0.37	0.06	0.24	0.24	0.68
马鞍山-2	9.2	0.25	0.62	2.25	0.50	0.12	0.29	0.33	0.83

磁性微球粒本身是一种重矿物,以磁性微球粒形式存在的重金属元素比较稳定,在土壤中不易活化释放,土壤生物也就不易吸收累积,也就是说,在

重金属全量相同的情况下,以微球粒形式存在的比例高,则其可能造成的生态环境危害相对就要小得多。陆晓华等(1996)对燃煤降尘中重金属元素的形

态分析结果也表明,其中的重金属绝大部分均以稳定的形态存在。但是在酸雨、高浓度盐分等极端条件下,这部分重金属元素溶出的比例会明显增加,因此,对微球粒含量比较高的地区进行土壤地球化学生态效应评价时,一方面需要考虑以微球粒形式存在的重金属元素的稳定性,适当放宽每一等级评价标准的重金属允许含量,同时也要针对特殊环境条件提出重要预警,以预防极端环境下重金属大量活化造成的环境危害。总之,在进行土壤生态环境地球化学评价过程中必须对以微球粒形式存在的重金属予以重视,充分考虑其可能产生的环境效应。

4 结论

(1) 土壤中磁性微球粒的形貌结构和矿物成分都表现出明显的燃煤成因特征,具有示踪土壤重金属污染物来源的功能,其较高的磁化率特征也为判断土壤重金属污染提供了具有指示意义的指标。

(2) 磁性微球粒中的重金属元素含量因各地区燃煤成分不同而异,其对土壤重金属元素累积的贡献率可高达10%以上。以磁性微球粒形式存在的重金属元素相对比较稳定,但在某些极端条件下也会活化释放,因此在进行土壤地球化学生态效应评价时有必要考虑其可能产生的影响。

References

- Bai Shiqiang, Lu Shenggao and Shan Hongdan. 2005. Progress on the study of magnetism of environmental matter and its indication to heavy metals pollution[J]. Chinese Journal of Soil Science, 36(5): 773~776 (in Chinese with English abstract).
- Chen Tianhu and Xu Huifang. 2003. TEM investigation of atmospheric particle settlements and its significance in environmental mineralogy[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 22(4): 425~428 (in Chinese with English abstract).
- Durza O. 1999. Heavy Metals Contamination and magnetic susceptibility in soils around metallurgical plant[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, 24: 541~543.
- Kapicka A, Petrovsky E, Ustjakk S, et al. 1999. 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, 66: 291~297.
- Lu Ying, Gong Zitong and Zhang Ganlin. 2001. The magnetic susceptibility characteristic of urban soil and its environmental significance[J]. Journal of South China Agricultural University, 22(4): 71~73 (in Chinese with English abstract).
- Lu Xiaohua, Ali A, Liu Hanzhen, et al. 1996. Studies on the speciation

distribution of heavy metals in particulates released from coal combustion[J]. Environmental Chemistry, 15(4): 337~342 (in Chinese with English abstract).

- Ma Shengming, Zhu Lixin and Wang Zhifeng. 2007. Forming mechanism of heavy metal anomalies at town areas and their surroundings[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 29(suppl. 1): 222~226 (in Chinese with English abstract).
- Strzyszczyk Z and Magiera T. 1998. Magnetic susceptibility and heavy metals contamination in soils of southern Poland[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 23: 1127~1131.
- Sun Junmin, Yao Qiang, Liu Huiyong, et al. 2005. Microstructure and mineral characteristics of ferruginous spheres in fly ash[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 33(3): 263~265 (in Chinese with English abstract).
- Yan Haitao, Hu Shouyun and Zhu Yuxin. 2004. Application of magnetic methods on environmental pollution research[J]. Advance in Earth Sciences, 19(2): 230~236 (in Chinese with English abstract).
- Yao Duoxi, Zhi Xiachen and Zheng Baoshan. 2002. Evolutionary feature of minerals in the process of coal combustion[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 29(3): 4~6 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chunxia and Huang Baochun. 2005. The application and research progress of environmental magnetism in monitoring urban environment pollution[J]. Progress in Geophysics, 20(3): 705~711 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Lixin, Ma Shengming and Wang Zhifeng. 2004. New advances in the study of urban environment geochemistry[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 28(2): 95~98 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白世强, 卢升高, 单红丹. 2005. 环境物质磁性对重金属污染的指示作用研究进展[J]. 土壤通报, 36(5): 773~776.
- 陈天虎, 徐惠芳. 2003. 大气降尘 TEM 观察及其环境矿物学意义[J]. 岩石矿物学杂志, 22(4): 425~428.
- 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 2001. 城市土壤磁化率特征及其环境意义[J]. 华南农业大学学报, 22(4): 71~73.
- 陆晓华, Ali A, 刘汉珍, 等. 1996. 燃煤电厂排放颗粒物中重金属形态的研究[J]. 环境化学, 15(4): 337~342.
- 马生明, 朱立新, 王之峰. 2007. 城镇及其周边土壤重金属元素异常成因机理[J]. 物探化探计算技术, 29(增刊1): 222~226.
- 孙俊民, 姚强, 刘惠永, 等. 2005. 燃煤电厂灰中铁质微珠的显微结构及其组成研究[J]. 燃煤化学学报, 33(3): 263~265.
- 闫海涛, 胡守云, 朱育新. 2004. 磁学方法在环境污染研究中的应用[J]. 地球科学进展, 19(2): 230~236.
- 姚多喜, 支霞臣, 郑宝山. 2002. 煤中物质在燃烧过程中的演化特征[J]. 矿业安全与环保, 29(3): 4~6.
- 张春霞, 黄宝春. 2005. 环境磁学在城市环境污染检测中的应用和进展[J]. 地球物理学进展, 20(3): 705~711.
- 朱立新, 马生明, 王之峰. 2004. 城市环境地球化学研究新进展[J]. 物探与化探, 28(2): 95~98.