

北京市中关村地区大气降尘的来源与垂向分布特征

秦 霏¹, 刘迎新², 鲁安怀², 吴新胜¹, 王立春¹

(1. 清华大学附属中学, 北京 100084; 2. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要: 利用光学和电子显微镜、X 射线衍射仪以及同步辐射 X 射线荧光对北京市中关村地区大气降尘的粒度分布、颗粒物微观形貌特征、矿物组成及化学元素组成等方面进行分析研究。粒度分析表明中关村地区大气降尘随着相对高度的增加, 粗颗粒物逐渐减少。大气降尘的颗粒物形貌可以分为粒状、柱状单矿物、圆球状飘珠和不规则粒状集合体 3 种类型。矿物组成及化学元素组成的分析显示中关村地区大气降尘的污染物主要来自自然扬尘、建筑扬尘、燃煤、汽车尾气等污染源。

关键词: 大气降尘; 粒度; 矿物组成; 元素

中图分类号: X513

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2007)06-0591-06

Sources and perpendicular distribution of atmospheric particles in Zhongguancun area of Beijing

QIN Fei¹, LIU Ying-xin², LU An-huai², WU Xin-sheng¹ and WANG Li-chun¹

(1. The High School Attached to Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Particle distribution, morphology, mineral and chemical compositions of atmospheric particles were studied by optic and electronic microscopy, X-ray diffraction and synchrotron radiation X-ray fluorescence. Statistical results demonstrate that the coarse particles of atmospheric particles in Zhongguancun area decrease with the elevation of the relative height. There are three morphological types, namely, grained and columnar individual minerals, spherical flying beads and irregular aggregates. Other analytical results show that atmospheric particles come mainly from natural dust, concrete industry, coal-fire, and automobile exhaust pollution.

Key words: atmospheric particles; particle sizes; mineral composition; element

大气降尘是大气中粒径大于 $10 \mu\text{m}$ 因重力和雨水的冲刷作用在较短时间内沉降到地面的大气颗粒物。由于来源的不同以及在大气中物理化学作用和沉降过程中所受的影响, 大气降尘的化学成分存在空间变异性, 对不同环境条件下的颗粒物进行成分测定, 有助于揭示不同区域大气降尘的来源, 全面评价大气降尘的环境效应(倪刘建等, 2007)。大气降尘除对生物界产生直接的物理性伤害外, 更重要的是间接的化学危害, 可造成严重的二次污染(林国珍等, 1999)。近年来国内外学者对颗粒物的来源及其物理和化学特性研究较多, 国内的研究多偏重总悬浮颗粒物和气溶胶, 尤其是对可吸入颗粒物的研究(吕森林等, 2005a, 2005b, 2006; 李金娟等, 2006), 而对颗粒粒径较

大的降尘缺乏深入全面的研究。已有的研究主要是针对降尘在功能区内水平方向上相关信息的研究(杨丽萍等, 2002; 谿绍英等, 2002; 罗莹华等, 2006; 倪刘建等, 2007), 垂向分布的报道甚少。本研究利用电子显微镜、扫描电镜、X 射线粉末衍射仪等技术对北京市中关村地区大气降尘在不同相对高度上的粒度分布、矿物组成及化学元素组成等方面进行分析研究, 以期对不同相对高度上大气的污染状况进行初步的探讨。

1 样品

选择中关村地区北京大学逸夫二楼为采样点, 为了获得

收稿日期: 2007-09-03; 修订日期: 2007-10-10

基金项目: 青少年科技后备人才早期培养计划

作者简介: 秦 霏(1991-), 女, 汉族, 现为清华大学附属中学高中二年级学生, 通讯作者: 刘迎新, E-mail: liuyingxin625@163.com。

不同相对高度上的大气降尘,选取了5个采样点,分别是7楼露天台空的空调壳上、5楼和3楼的内侧窗台、1楼的外围长廊及5楼3507室内(对应的样品名分别为Q7、Q5、Q3、Q1和Q5i)对应的采集面积分别为4 875、2 400、3 120、3 600和2 670 cm^2 ,采集时间为2006年冬季。采集时,首先用毛刷将一定面积内的大气降尘收集到光洁的白纸上,然后转移至硫酸纸中保存。采集后检出样品中较大的杂物,对样品进行称重。肉眼观察5个样品均为灰黑色,其中Q5i样品隐约可见生活纤维。通过计算得出各个不同高度上大气降尘的沉降通量分别为66.8、50.9、86.5、417.2和127.3 $\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{月}$,平均为149.7 $\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{月}$ 。倪刘建等(2006)对南京地区的统计表明最大沉降通量为65.53 $\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{月}$,付铁英等(1997)统计表明1991年到1995年辽宁本溪市市区降尘量的年均值为44.0 $\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{月}$ 。通过比较,发现本次实验计算得出的沉降通量偏大,尤其是位于1楼的采样点,这主要是本研究没有采用专门的集尘缸以及采集时间正处冬季造成的。

2 实验

2.1 粒度和颗粒形态分析

大气降尘的粒径统计在北京大学地球与空间科学学院的光学显微实验室进行,电子显微镜型号Nikon LV100PPL,照相镜头是Nikon DXM1200C,目镜10 \times ,物镜20 \times 、50 \times 、100 \times 不等。

大气降尘的微观形貌观察在北京大学物理学院电镜实验室进行,扫描电子显微镜型号为KYKY-AMRAY 1000B,分辨率60 \AA ,鲁宾逊背散射电子探头,分辨率80 \AA ,工作电压15.0 kV。

2.2 X射线衍射分析

大气降尘的矿物成分分析在北京大学科技园微构分析测试中心进行,采用Dmax-MSAL型大功率X射线粉末衍射仪,工作条件为: Cu 靶,石墨弯晶单色器,管压40 kV,管流

100 mA,扫描速度8 $^\circ/\text{min}$,步宽0.02 $^\circ$ 。

2.3 同步辐射X射线荧光分析

大气降尘中的化学元素分析在北京同步辐射装置(BSRF)荧光站上完成。采用多层膜单色器加K-B聚焦镜单色光模式,光斑尺寸20 μm (垂直) \times 50 μm (水平)。无扫描,每个点的采谱活时间为100 s,束流能量2.2 GeV,流强99.58~97.06 mA。由于采集的样品不好固定,实验时用酒精将样品分散后滴在空白胶带(无杂质元素)上进行测定,分散情况的不同可能会导致绝对含量的浮动。

3 结果和讨论

3.1 粒度和颗粒形态分析

大气降尘是气溶胶的沉降物,因此在不同相对高度上沉降的颗粒物其粒度也会有所不同(图1)。为了统计大气降尘在不同相对高度上的粒度分布,用光学显微镜进行分析。实验时首先将充分混合的适量样品均匀撒到载玻片上,放大200倍取图后,在每个样品上均匀选取10个视野,统计每个视野内颗粒物的大小和数量。以等效圆面积直径为颗粒物直径,以5 μm 为粒径单位 φ ,统计1~5 φ 范围内5个粒级单位上降尘颗粒物占该视野中统计颗粒总数的百分比,共5个样品,得到250组数据。表1列出每个样品10个统计数据的平均值,反映各个楼层降尘粒度的状况。

从表1可以看出,样品Q3、Q5及Q7中随着楼层升高,0

表1 大气降尘粒径统计平均值 %

Table 1 Statistical average size of atmospheric particles

样号	0~5 μm	5~10 μm	10~15 μm	15~20 μm	>20 μm
Q1	73.7(4)	15.2(6)	7.1(9)	2.2(8)	1.2(2)
Q3	47.6(8)	15.3(4)	20.1(4)	8.3(1)	8.5(0)
Q5	68.6(8)	9.9(8)	10.3(2)	7.2(5)	3.7(5)
Q7	79.5(1)	8.7(8)	6.6(6)	2.9(7)	2.0(8)
Q5i	19.3(1)	28.8(6)	24.5(9)	17.8(8)	9.3(5)

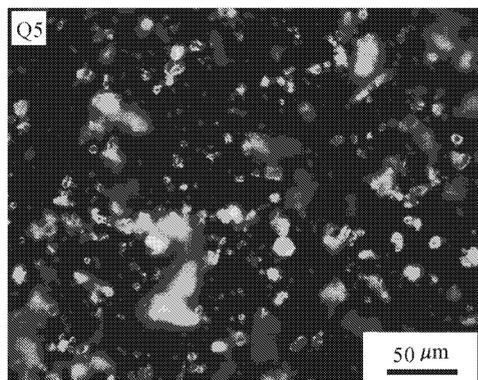
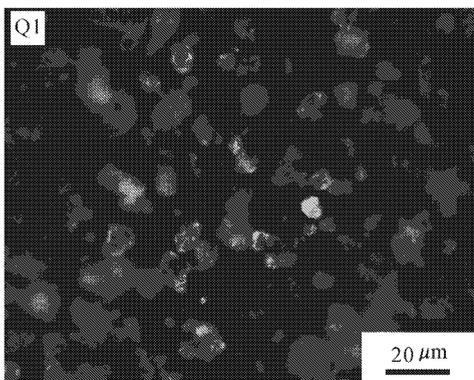


图1 大气降尘的光学显微照片

Fig. 1 Optic microscopic image of atmospheric particles

$\sim 5 \mu\text{m}$ 细颗粒物含量逐渐增多,其他粒径颗粒物的含量则随之减少。Q5i 中各粒径颗粒物的含量相对比较均匀, $5 \sim 15 \mu\text{m}$ 粒径的颗粒物略多。样品 Q1 中 $0 \sim 5 \mu\text{m}$ 细颗粒物的含量与 Q7 中含量相当,其他粒径颗粒物相对较少,这主要受以下两方面的原因的影响:一是 Q1 采样点位于北京大学一条主干道路一侧,受道路扬尘的影响较大;另一则与采样点附近地铁施工现场扬起的自然尘埃有关。因此,可以认为中关村地区大气降尘在垂向分布上有一定的规律,具有下粗上细的特征(王赞红等 2004),即随着海拔高度的增加,大气降尘中的细颗粒物含量逐渐增加,这和前人提出的大粒子质量浓度在近地层随高度增加迅速降低相一致(王庚辰等 2004)。颗粒物的粒径越小,比表面积越大,携带有害物质的机会及与生物学目标相互作用的潜力越大(李金娟等 2006),因此,其相

对污染程度越大。由于采集的大气降尘样品中以 $0 \sim 5 \mu\text{m}$ 细颗粒物为主,占总颗粒数的 19.3%~79.5%,平均 58%,说明中关村地区的大气降尘主要是远源大气传输作用的结果。

用扫描电镜进行颗粒物微观形貌分析时,先用炭导电双面胶将少量样品均匀粘贴到样品台上,镀膜后观察,随机选取特定区域后聚焦,调整衬度和对比度至最佳视觉效果时照相。

除了在 5 楼室内收集的样品 Q5i 中有明显的生活纤维外,根据扫描电镜观察结果,采集的大气降尘颗粒物形貌可以分为以下几种类型:①粒状、柱状单矿物(图 2a, b, c),它们的表面一般都吸附着许多小颗粒物质;②圆球状飘珠(图 2d, e),粒度大小不等,最大可达 $10 \mu\text{m}$ 以上,可能来自柴油废气或燃煤飞灰(陈天虎等 2003;罗莹华等 2006);③不规则粒状集合体(图 2f),可能来自地面扬尘或建筑灰尘(罗莹华等 2006)。

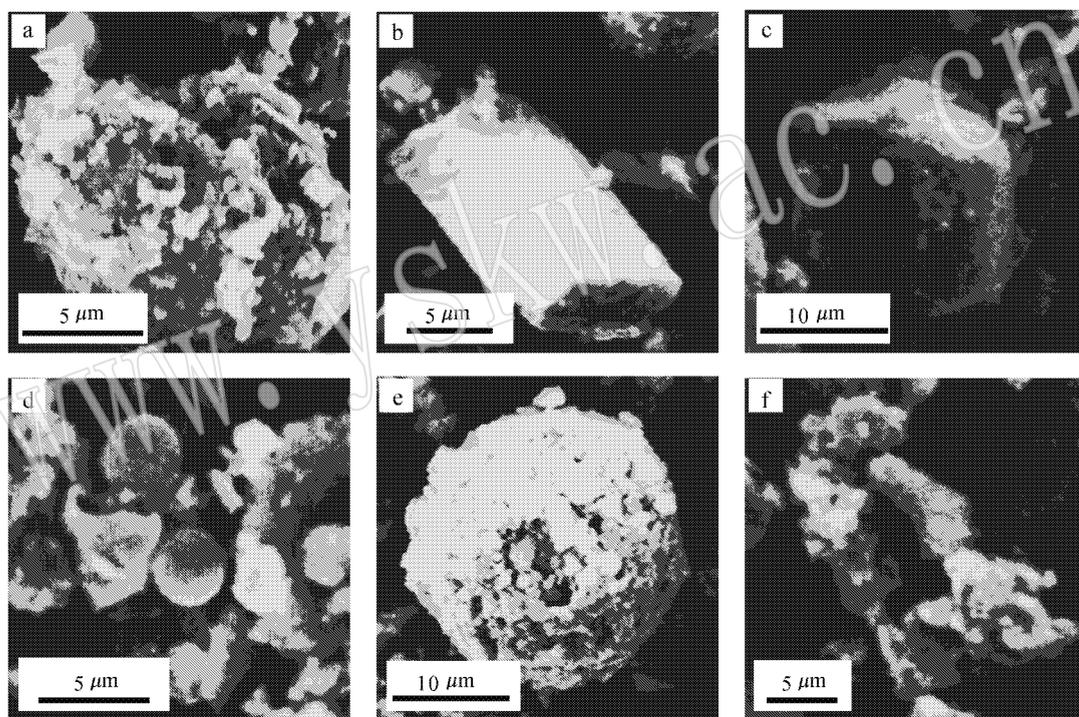


图 2 大气降尘颗粒物的显微形貌

Fig. 2 SEM images of atmospheric particles

a, c—粒状单矿物颗粒; b—柱状单矿物颗粒; d, e—圆球状飘珠; f—不规则粒状集合体

a, c—individual particles; b—columnar particles; d, e—spherical flying beads; f—irregular particles

3.2 X 射线衍射分析

分析大气降尘矿物成分时,首先将样品在玛瑙研钵中进行充分研磨,然后固定在样品台上采谱。根据衍射谱中衍射峰的位置确定 d 值,查询 JCPDS 卡片后确定矿物类型(图 3),矿物含量按衍射峰强度计算,矿物半定量分析结果见表 2。

X 射线衍射分析(XRD)结果表明,中关村地区大气降尘的矿物组成垂向上基本稳定,主要是石英、白云石、石膏,方解石、白云母、角闪石、钠长石、钾长石、绿泥石、高岭石和蒙脱石

等 11 种矿物。汪安璞等(1996)在中国科学院生态环境研究中心共识别出 24 种物相(离本采样点 3.8 km),同本研究相比有相当大的差异。本次鉴定出的绿泥石、角闪石等矿物,在汪安璞采集的大气气溶胶样品中均没有检出,但是他们鉴别出了尖晶石和伊利石等矿物。吕森林等(2005a)对北京城区可吸入颗粒物的 XRD 研究中检测出了石英、方解石、白云石、伊利石、绿泥石、高岭石、伊利石/蒙脱石混层、钾长石、斜长石、角闪石等矿物。这些矿物在本研究中大部分都被检测到。

XRD 定量分析(表 2)表明,中关村地区大气降尘中的含

量最多的矿物是石英和长石,约为 58%,其他依次为白云母、白云石、方解石、石膏以及粘土矿物绿泥石、高岭石和蒙脱石。石英和长石可以源于地面扬尘,也可以源自工业烟尘、粉尘。本文样品中这两种矿物的含量明显高于前人研究结果(吕森

林等 2005a;罗莹华等 2006),这与北京市近几年建筑行业迅猛发展有一定关系。白云石、方解石等碳酸盐矿物(罗莹华等 2006)以及白云母等建筑扬尘的代表矿物含量也偏高,也是同样原因造成的。

表 2 大气降尘矿物成分定量分析结果

Table 2 XRD quantitative results of atmospheric particles

$\omega_B/\%$

样品名	石英	白云石	石膏	方解石	白云母	角闪石	钠长石	钾长石	绿泥石	高岭石	蒙脱石
Q1	31	10	5	7	13	2	15	12	3	1	1
Q3	27	9	3	9	13	2	15	17	3	1	1
Q5	29	14	5	8	13	-	19	7	3	1	1
Q7	30	14	1	8	17	1	19	7	3	1	1
Q5i	33	10	3	11	12	-	20	6	3	1	1

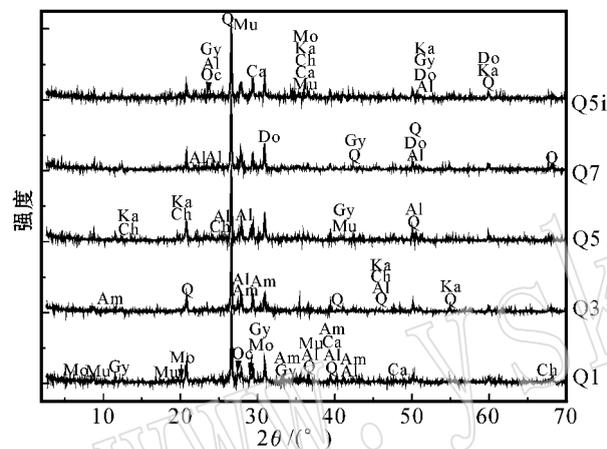


图 3 大气降尘 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of atmospheric particles

Q—石英;Al—钠长石;Mu—白云母;Oc—正长石;Ca—方解石;Gy—石膏;Ch—绿泥石;Am—角闪石;Ka—高岭石;Mo—蒙脱石;Do—白云石;Q—quartz;Al—albite;Mu—muscovite;Oc—orthoclase;Ca—calcite;Gy—gypsum;Ch—chlorite;Am—amphibole;Ka—kaolinite;Mo—montmorillonite;Do—dolomite

石膏在所有的样品中都被检测到,而北京表土的矿物成分中并没有石膏(吕森林等 2005a),因此,该矿物可能是大气中 SO_x 与颗粒物相互作用的产物(陈天虎等 2001;端木合顺 2005;罗莹华等 2006)。绿泥石、高岭石、蒙脱石等粘土矿物是含水的硅酸盐矿物,在高温下不稳定,工业烟尘中不可能存在此类粘土矿物,是大气降尘地面扬尘来源的标志(陈天虎等 2001)。

综上所述,本系列样品的污染源主要来自地面扬尘、建筑扬尘以及大气中新生矿物颗粒。

3.3 同步辐射 X 射线荧光分析

样品的 X 射线荧光(XRF)光谱如图 4 所示,受实验条件限制,只检测到周期表上原子序数 16 之后,即硫之后各元素的相对含量。由于元素的峰面积与它的浓度成正比(吴自勤, 2000),用专门的解谱软件 WinQxas 计算出各元素的峰面积

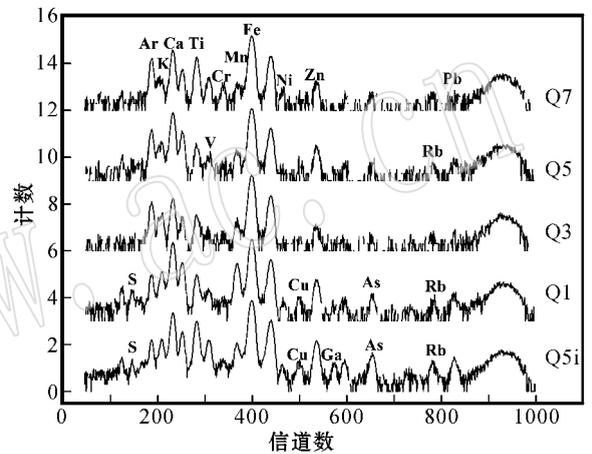


图 4 大气降尘的同步辐射 X 射线荧光谱

Fig. 4 Synchrotron radiation XRF spectra of atmospheric particles

后,除以流强便得到各元素的相对含量。

采用富集因子法(EF)对采集样品中某些元素的污染来源进行分析,判断自然与人为污染源对大气污染的贡献。富集因子(EF)的定义为: $EF_i = (C_i/C_n)_{\text{环境}} / (C_i/C_n)_{\text{背景}}$,其中, C_i 为考查元素 i 的质量浓度, C_n 为选定的参比元素的质量浓度,下标“环境”是当前颗粒物中元素与参比元素的比值;“背景”是土壤中相应元素的平均含量与参比元素的平均含量比值。参比元素一般选择地壳中含量丰富的元素,经常采 Al、Fe、Si 等;也可以选择在地壳中比较稳定,且人为污染比较小的惰性元素如 Zn、Ti 等。本研究中选择 Ti 作为参比元素,背景值取自北京地区地壳中各元素含量值(中国环境监测总站, 1990),由于相关资料中没有元素 Ar 的背景值,本文无法计算该元素的富集因子。通常颗粒物中元素富集因子大于 10 时,即可认为该元素被富集,主要来源于人类活动的污染,并且富集因子数值越大污染越严重,而富集因子接近于 1 的元素则主要是由土壤或岩石风化的尘埃刮入大气引起的。表 3 为计算得出的样品中各元素的富集因子。

由表 3 可知, Q5i 中共测得 15 种元素, 12 种元素的富集

表3 大气降尘中各元素的富集因子

Table 3 EF of elements in atmospheric particles

样号	S	Ar	K	Ca	Ti	Cr	V	Mn
Q5i	0.7(7)	未计算	0.64(1)	11.0(9)	19.5(1)	16.3(7)	未测出	13.8(7)
Q1	2.6(1)	未计算	0.5(5)	11.1(3)	1.8(7)	4.5(1)	未测出	36.8(4)
Q3	未测出	未计算	0.1(2)	0.8(1)	0.6(2)	3.1(4)	未测出	2.0(2)
Q5	0.7(7)	未计算	0.15(8)	4.0(4)	0.6(2)	3.7(3)	5.4(2)	2.5(0)
Q7	未测出	未计算	0.05(6)	1.84(7)	3.35(2)	13.6(6)	未测出	1.4(2)
样号	Fe	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Rb	Pb
Q5i	24.7(8)	15.5(4)	39.8(8)	93.7(5)	46.1(3)	159.2(5)	17.3(3)	64.0(2)
Q1	9.5(9)	8.6(6)	18.7(2)	35.7(5)	未测出	42.4(4)	7.7(9)	18.1(6)
Q3	5.3(1)	未测出	未测出	6.3(8)	未测出	未测出	未测出	9.14(5)
Q5	3.9(0)	未测出	未测出	19.5(8)	未测出	未测出	4.1(9)	20.0(1)
Q7	4.9(2)	13.5(0)	未测出	10.84(5)	未测出	未测出	未测出	18.2(3)

因子大于10,其中Q5i样品中As、Zn、Pb 3种元素的富集因子最高,而这3种元素刚好是由于吸烟而明显富集的(赵厚银等,2006),说明该采样点的主要污染是由室内吸烟造成的。样品Q3中各元素的富集因子均小于10,说明该采样点的大气降尘主要是来自自然污染源,即由土壤或岩石风化的尘埃刮入大气引起的。其他的3个样品Q1、Q5、Q7中富集因子大于10的元素主要集中在Ca、Mn、Cu、Zn、As、Pb、Cr、Ni等8种元素,其中Zn、Pb是3个样品中共有的富集元素,此外Q1中还有Ca、Mn、Cu、As 4种富集元素;Q7中还有Cr、Ni两种富集元素。一般认为Ca是建筑扬尘的标识;As是燃煤的标识元素;Zn是吸烟、燃油、垃圾焚烧、塑料等的标识元素;Pb是汽车排放、燃煤的标识;V、Ni、Cu等是燃油排放颗粒物的标识元素;Ni同时是燃煤飞灰的标识;Mn来自土壤或燃煤排放的颗粒物(赵厚银等,2006)。

据同步辐射X射线荧光及富集因子分析,本文认为以下5种污染源为中关村地区大气降尘的主要来源,依次为:自然扬尘、建筑扬尘、燃煤、汽车尾气以及吸烟(室内样品Q5i)。

4 结论

通过对中关村地区不同相对高度上大气降尘的研究,得出以下结论:

(1)中关村地区采集的5个样品中Q1受道路扬尘及采样点附近地铁施工的影响 $0\sim 5\mu\text{m}$ 粒径的颗粒物较多;室内收集的大气降尘样品Q5i中各粒径的颗粒物分布相对均匀;其他3个大气降尘样品粒径随着楼层升高有下粗上细的分布特征。根据扫描电镜观察结果,采集的大气降尘颗粒物形貌可以分为粒状柱状单矿物、圆球状飘珠和不规则的矿物集合体3种类型,它们分别代表了地面扬尘、汽车尾气、燃煤飞灰或建筑灰尘等污染源。

(2)对采集样品的X射线衍射分析表明,样品中共有11种矿物,其中石英和长石类矿物含量最高占58%,其他依次为白云母、白云石、方解石、石膏、以及粘土矿物绿泥石、高岭

石和蒙脱石。

(3)通过同步辐射X射线荧光分析得知样品中分别存在9~15种元素,各样品中元素的富集情况各不相同。Q3中元素富集因子均小于10,主要是受自然污染源的影响;Q5i样品中以主要的污染源来自室内吸烟;Q1、Q5、Q7的污染源主要受建筑扬尘、燃煤、汽车尾气等人为污染源的影响,同时也有部分污染来自土壤或岩石风化的尘埃等自然污染源。

致谢 北京同步辐射装置荧光站工作人员在同步辐射X射线荧光测试中给予大力支持,张婷婷在X射线荧光的数据处理方面给予很多帮助,审稿专家和编辑部对本文提出宝贵的修改建议。在此,衷心地表示感谢!

References

- Chen Tianhu, Feng Junhui, Zhang Yu, *et al.* 2001. Components of atmospheric particles in Hefei City and their environmental significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(4): 433~436 (in Chinese with English abstract).
- Chen Tianhu and Xu Huifang. 2003. TEM investigation of atmospheric particle settings and its significance in environmental mineralogy [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(4): 425~428 (in Chinese with English abstract).
- China National Environmental Monitoring Center. 1990. The Soil Environmental Background Value in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 329~492 (in Chinese).
- Duanmu Heshun. 2005. The origin of gypsum in atmospheric particulates in Xi'an City and its environmental significance [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 25(2): 135~140 (in Chinese).
- Fu Tiejing and Sun Ping. 1997. The research on the trend of air fall dust and its contents in Benxi City [J]. *Environmental Protection Science*, 23(6): 4~6 (in Chinese).
- Ke Shaoying, Zhou Rongsheng and Wang Yunliang. 2002. Study on element composition and distribution characteristics of atmospheric dustfall in the industrial cities [J]. *Journal of Hebei University of*

- Technology, 31(5):99~102 (in Chinese).
- Li Jinjuan, Shao Longyi, Yang Shushen, *et al.* 2006. Bioreactivity of inhalable particles and analysis from its microscopic characteristics [J]. Environmental Science 27(3):572~577 (in Chinese).
- Lin Guozhen, Huang Qin, Su Zhiyi, *et al.* 1999. A study on the composition and content of aqueous solubility organic compound in dust-fall [J]. Advances in Environmental Science, 5:145~150 (in Chinese).
- Luo Yinghua, Dai Tegen, Liang Kai, *et al.* 2006. Mineral composition and morphology of atmospheric dust fall in Shaoguan City [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 25(2):162~164 (in Chinese with English abstract).
- Lü Senlin, Shao Longyi, Wu Minghong, *et al.* 2005a. Mineralogy studies on Beijing urban inhalable particulate matter (PM10) [J]. China Environmental Science, 25(2):129~132 (in Chinese).
- Lü Senlin, Shao Longyi, Tim Jones, *et al.* 2005b. Microscopy and size distribution of mineral particles in Beijing PM10 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 25(7):863~869 (in Chinese).
- Lü Senlin, Shao Longyi, Wu Minghong, *et al.* 2006. Characteristics of chemical elements in Beijing PM10 and their source apportionment [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 35(5):684~688 (in Chinese).
- Ni Liujian, Zhang Ganlin, Ruan Xinling, *et al.* 2007. The flux and pollution character of dust-fall in different functional zones of Nanjing [J]. China Environmental Science, 27(1)2~6 (in Chinese).
- Ni Liujian, Zhang Ganlin and Zhou Lixiang. 2006. Flux and particle-size distribution of airborne dust during winter season in different functional zones of Nanjing [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 19(2):27~29 (in Chinese).
- Wang Anpu, Yang Shulan and Sha Yin. 1996. Chemical characterization of individual aerosol particles in Beijing [J]. Environmental Chemistry, 15(6):488~495 (in Chinese).
- Wang Gengchen, Xie Hua, Wan Xiaowei, *et al.* 2004. Variation of aerosol mass concentration and element composition with height in Beijing area [J]. Research of Environmental Sciences, 17(1):37~40 (in Chinese).
- Wang Zanhong and Xia Zhengkai. 2004. Dust flux and particle size of the dust storm on March 20~21, 2002 in Beijing [J]. Quaternary Sciences, 24(1):95~99 (in Chinese).
- Wu Ziqin. 2000. Quantitative analysis of X-ray fluorescence without standard sample [J]. Beijing Synchrotron Radiation Facility, 1:161~162 (in Chinese).
- Yang Liping and Chen Fahu. 2002. Study on the source apportionment of atmospheric dust pollutants in Lanzhou [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 22(4):499~502 (in Chinese).
- Zhao Houyin, Shao Longyi and Yao Qiang. 2006. Study on chemical composition of indoor PM10 in some residential house in Beijing [J]. Journal of Environmental and Health, 23(1):14~17 (in Chinese).

附中中文参考文献

- 陈天虎, 冯军会, 张宇, 等. 2001. 合肥市大气颗粒物组成及其环境指示意义 [J]. 岩石矿物学杂志, 20(4):433~436.
- 陈天虎, 徐惠芳. 2003. 大气降尘及其环境矿物学意义 [J]. 岩石矿物学杂志, 22(4):425~428.
- 端木合顺. 2005. 西安市大气降尘中石膏的成因与环境意义 [J]. 矿物学报, 25(2):135~140.
- 付铁英, 孙平. 1997. 本溪市大气降尘及其组分变化规律的研究 [J]. 环境保护科学, 23(6):4~6.
- 容绍英, 周蓉生, 汪云亮. 2002. 工业城市大气降尘元素组成及分布规律研究 [J]. 河北工业大学学报, 31(5):99~102.
- 李金娟, 邵龙义, 杨书申, 等. 2006. 可吸入颗粒物的生物活性及微观特征分析 [J]. 环境科学, 27(3):572~577.
- 林国珍, 黄芹, 宿志一, 等. 1999. 大气降尘中水溶性有机物组成与含量的研究 [J]. 环境科学进展, 5:145~150.
- 罗莹华, 戴塔根, 梁凯, 等. 2006. 韶关市大气降尘矿物成分和形貌特征研究 [J]. 岩石矿物学杂志, 25(2):162~164.
- 吕森林, 邵龙义, Tim Jones, 等. 2005b. 北京 PM10 中矿物颗粒的微观形貌及粒度分布 [J]. 环境科学学报, 25(7):863~869.
- 吕森林, 邵龙义, 吴明红, 等. 2005a. 北京城区可吸入颗粒物 (PM10) 的矿物学研究 [J]. 中国环境科学, 25(2):129~132.
- 吕森林, 邵龙义, 吴明红, 等. 2006. 北京 PM10 中化学元素组成特征及来源分析 [J]. 中国矿业大学学报, 35(5):684~688.
- 倪刘建, 张甘霖, 阮心玲, 等. 2007. 南京市不同功能区大气降尘的沉降通量及污染特征 [J]. 中国环境科学, 27(1)2~6.
- 倪刘建, 张甘霖, 周立祥. 2006. 南京市不同功能区冬季降尘的降尘通量和粒度分布 [J]. 城市环境与城市生态, 19(1):27~29.
- 汪安璞, 杨淑兰, 沙因. 1996. 北京大气气溶胶单个颗粒的化学表征 [J]. 环境化学, 15(6):488~495.
- 王庚辰, 谢骅, 万小伟, 等. 2004. 北京地区气溶胶质量浓度及组分随高度的变化 [J]. 环境科学研究, 17(1):37~40.
- 王赞红, 夏正楷. 2004. 北京 2002 年 3 月 20~21 日尘暴过程的降尘量与降尘粒度特征 [J]. 第四纪研究, 24(1):95~99.
- 吴自勤. 2000. 无标样 X 射线荧光 (XRF) 定量分析 [J]. 北京同步辐射装置年报, 1:161~162.
- 杨丽萍, 陈发虎. 2002. 兰州市大气降尘污染源研究 [J]. 环境科学学报, 22(4):499~502.
- 赵厚银, 邵龙义, 姚强. 2006. 北京市冬季部分住宅室内 PM10 中化学元素研究 [J]. 环境与健康杂志, 23(1):14~17.
- 中国环境监测总站. 1990. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 392~492.