

吕森林,邵龙义, Tim Jones, 等. 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, 2005, 25(7): 863 - 869

L Ü Senlin, SHAO Longyi, TIM Jones, et al. Microscopy and size distribution of mineral particles in Beijing PM₁₀ [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(7): 863 - 869

北京 PM₁₀ 中矿物颗粒的微观形貌及粒度分布

吕森林^{1,2,*}, 邵龙义², Tim Jones³, 吴明红¹, 焦 正¹

1. 上海大学环境与化学工程学院射线应用研究所, 上海 218000;
2. 中国矿业大学(北京)资源与地球科学系, 北京 100083;
3. Department of Earth, Ocean and Planetary Sciences, Cardiff University, Cardiff, CF10, 3YE, UK.

收稿日期: 2004-11-02 修回日期: 2005-04-24 录用日期: 2005-04-30

摘要: 使用高分辨率环境扫描电镜和图像分析技术对北京 PM₁₀ 中矿物颗粒的微观形貌和粒度分布特征进行了研究. 结果表明, 北京 PM₁₀ 中的矿物颗粒按其形貌、组成特点可以分为单矿物和矿物集合体 2 类; 矿物颗粒多以不规则的形态出现; 形态规则的矿物主要是硫酸盐类矿物, 是大气化学反应的产物, 形态不规则的矿物是来自扬尘的原生矿物. 不同类型污染产生的 PM₁₀ 中矿物颗粒的粒度分布特征表现不同, 在沙尘暴样品和道路扬尘样品中矿物颗粒的粒度峰值在 1~2.5 μm; 在局地扬尘的样品中, 矿物颗粒的粒度较粗, 主要分布在 1~2.5 μm 和 2.5~10 μm.

关键词: 矿物颗粒; 微观形貌; 粒度分布; 可吸入颗粒物 (PM₁₀)

文章编号: 0253-2468(2005)07-0863-07 中图分类号: X513 文献标识码: A

Microscopy and size distribution of mineral particles in Beijing PM₁₀

L Ü Senlin^{1,2,*}, SHAO Longyi², TIM Jones³, WU Minghong¹, JIAO Zheng¹

1. Applied Radiation Institute, School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai, 218000, China;
2. Department of Resources and Earth Sciences, China University of Mining and Technology, Beijing, 100083, China;
3. Department of Earth, Ocean and Planetary Sciences, Cardiff University, Cardiff, CF10, 3YE, UK;

Received 2 November 2004; received in revised form 24 April 2005; accepted 30 April 2005

Abstract: Microscopy and size-distribution of mineral particles in Beijing PM₁₀ was studied by high resolution Environmental Scanning Electronic Microscopy (ESEM) and image analysis technologies (IA). The ESEM analysis showed that minerals in PM₁₀ had regular and irregular shapes, being composed of single minerals or mineral aggregates, respectively. Minerals with irregular shapes were popular in PM₁₀. Energy-dispersive X-ray analyzer (EDX) analysis indicated that minerals with regular shapes were mainly sulfates, which were the production of atmospheric chemical reaction, while minerals with irregular shapes were mainly primary minerals, originated from geological sources. Three categories of mineral particles in PM₁₀, the dust storm particles, local fugitive dusts and roadside dusts, were characterized for their size distributions. The number-size distribution of the dust storm and roadside dust particles had unimodal pattern with the peak in range of 1-2.5 μm, however, the number-size distribution of the local fugitive dust particles displayed major size ranges of 1-2.5 μm and 2.5-10 μm.

Keywords: mineral particles; micro morphology; size-distribution; airborne in halable particles (PM₁₀)

由于北京特殊的地理位置和气象条件,加之近年来经济快速发展带来的车辆和建筑工地的迅速增加等原因,使北京的空气污染由煤烟型向复合型转变^[1],可吸入颗粒物 (PM₁₀) 成为首要的污染物. 研究表明^[2~5],北京 PM₁₀ 的组成相当复杂,直接同矿物有关的成分比机动车和燃煤/工业污染源 (分别为 15.5% 和 5.6%) 要高得多,而在沙尘暴期间可吸入

颗粒物的浓度更高,超出国家标准的几十到几百倍,其中矿物是主要成分^[6].

许多研究者从不同的角度对矿物气溶胶进行了研究, Ginoux 等^[7] 报道矿物颗粒能够通过改变辐射平衡和影响云凝结核形成的方式影响全球气候的变化, Dentener 等^[8] 认为矿物为大气非均相化学反应提供了反应界面, Richards^[9] 的研究表明,可吸入颗

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40275040); 上海市科委 AM 基金 (No. 0318)

作者简介: 吕森林 (1966—), 男, 博士; * 通讯作者 (责任作者)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 40275040); AM Foundation from Shanghai Science & Technology Committee (No. 0318)

Biography: L Ü Senlin (1966—), male, Ph. D.; * Corresponding author

颗粒物中的矿物颗粒对人体健康可产生负面影响,庄国顺等^[10]认为,矿物颗粒,尤其是含铁(Fe^{2+})的矿物颗粒在全球生物地球化学循环过程中起着重要作用。

然而,在众多的研究中,有关 PM_{10} 中矿物组分的报道很少,其主要原因是对于 PM_{10} 中矿物组分的研究要比其化学成分的研究复杂得多^[11,12],但在扫描电镜(带能谱)成为研究矿物学的有效工具之后^[13], PM_{10} 中矿物颗粒的研究成为可能。本研究利用高分辨的环境扫描电镜对北京 PM_{10} 中矿物颗粒的微观形貌进行了大量观察,在此基础上根据北京 PM_{10} 中矿物颗粒的形态和成分对矿物颗粒进行了分类,同时使用图像分析技术对三种不同来源 PM_{10} 样品中矿物颗粒的粒度分布进行了研究,目的是对北京 PM_{10} 中矿物气溶胶的形态和来源有进一步的认识。

表 1 用于 SEM 分析的样品信息

Table 1 Information for SEM analysis

采样地点	采样日期	采样数量/个	用于 SEM 分析的样品数/个
市区(矿业大学北京校区)	2002 年 3 月~2003 年 2 月	259	58(其中有 8 个沙尘暴样品和 1 个局地扬尘样品)
近郊(卫星城市南口镇)	2003 年 3 月 4~11 日	14	6(包括 1 个道路扬尘样品)
远郊(怀柔水库)	2002 年 7 月 22~29 日,12 月 16~23 日; 2003 年 3 月 17~24 日	40	12

(SEM) 分析的样品采样时间设定为 6 h,其它样品的采集时间为 12 h。采样使用聚碳酸酯滤膜(滤膜孔径为 $0.67\ \mu\text{m}$, Millipore, UK),因为这种滤膜的表面非常平坦,十分适合于电镜观察。

用于扫描电镜及能谱分析的样品制备过程如下:将采集的滤膜裁下约 1/10,用双面胶带将样品平整地粘贴在金属垫圈上,样品镀金后放入电镜的样品仓中,抽真空后,再进行观察;实验所用扫描电镜为英国产 LEO453VP 环境扫描电镜,电镜配有 Link ISIS 能谱自动分析系统,用来获取矿物颗粒的化学成分。实验中所用电压 20 keV,电流 600 pA;电子束斑直径为 $1\ \mu\text{m}$,电子束的穿透能力为 $5\ \mu\text{m}$,信号采集时间为 100 s,使总计数值超过 100 000;本文的电镜图像均为二次电子图像,实验中能谱分析选用超薄视窗硅-锂(Si-Li)探头,可以检测到碳元素以后($Z > 6$)的所有元素。

矿物颗粒的粒度分析在中国矿业大学(北京)资源与地球科学系的显微数字图像工作站上进行,详细分析方法参见文献[14]。

2 结果(Results)

2.1 矿物颗粒的显微形貌特征

电镜观察的结果表明,北京 PM_{10} 中矿物颗粒的

1 样品采集及室内实验(Sampling and Experiments)

使用英国生产的 Negretti 采样头(切割粒径 $< 10\ \mu\text{m}$)、青岛崂山仪器厂 KB-120 气泵从 2002 年 2 月至 2003 年 3 月分别在位于北京市区的中国矿业大学(北京校区)综合楼五楼平台(离地面 18.5 m)、南口镇的都市生活用品公司办公楼楼顶(距地面约 15 m)和远郊怀柔水库的东道二楼平台(距地约 7 m)采集样品。此外,在市区采样点采集了 2002 年 3 月 20 日沙尘暴样品及次日沙尘暴期后样品,并于 2002 年 11 月 11 日在市区采集了局地扬尘样品,于 2003 年 3 月 10 日在南口镇采集道路扬尘样品,样品信息见表 1。采样时将流量设定为 $30\ \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$,用于电镜

形态可以分为形态规则和形态不规则 2 类,如图 1 和图 2 所示。形态规则的矿物颗粒按其形态特征可细分为柱状、板状、片状、六方柱状、针状、簇状等(图 1),颗粒大小从数十纳米到 $2.5\ \mu\text{m}$ 不等。形态不规则矿物颗粒按其形貌特点可以分为矿物单体(图 2a、b、c)和矿物集合体(图 2 中 d、e、f) 2 类。

2.2 矿物颗粒的粒度分布

使用图像分析软件对 PM_{10} 中的矿物颗粒进行了统计分析,为了和矿物颗粒对比,实验中同时对 PM_{10} 中的烟尘集合体和飞灰等不同类型的颗粒进行了统计。

2.2.1 沙尘暴 PM_{10} 中矿物颗粒的粒度分布 在“3.20”沙尘暴期间(2002 年 3 月 20 日)采集的 PM_{10} 样品中,矿物颗粒的数量浓度在 PM_{10} 中达到 93%,其中粒度大于 $1\ \mu\text{m}$ 的矿物颗粒物占颗粒物总数的 48%; $1\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 和 $2.5\sim 5\ \mu\text{m}$ 粒度范围内的矿物颗粒分别占颗粒物总数的 35%和 9%(图 3a)。但在沙尘暴过后(3 月 21 日 8:10—10:10)采集的 PM_{10} 样品中,矿物颗粒在 PM_{10} 中的数量下降到 43%,其中大于 $1\ \mu\text{m}$ 的矿物颗粒物仅占颗粒物总数的 15.0%, $1\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 和 $2.5\sim 5\ \mu\text{m}$ 粒度范围内的矿物颗粒分别占颗粒物总数的 14.4%和 1.2%(图 3b)。

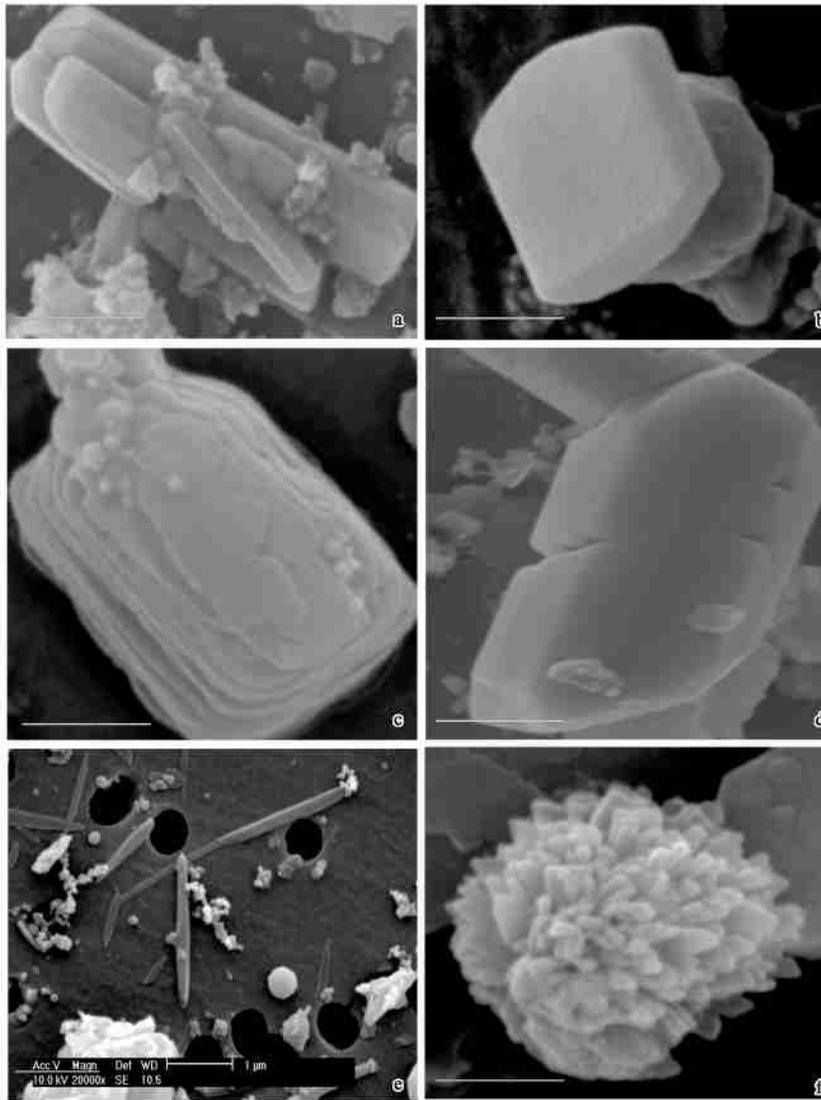


图 1 形态规则的矿物颗粒
(比例尺:1 μm, a-柱状、b-板状、c-片状、d-六方柱状、e-针状、f-簇状)

Fig. 1 Minerals with regular shapes

(scale bar 1 μm. a-columnar shape, b-platy shape, c-sheet shape, d-hexahedron shape, e-pin shape, f-cluster shape)

2.2.2 局地扬尘 PM₁₀ 中矿物颗粒的粒度分布

2002 年秋季(11 月 11 日)采集的局地扬尘 PM₁₀ 样品粒度分布(图 4)显示,矿物颗粒除了 1~2.5 μm 范围有明显的峰值外,在 2.5~10 μm 的区间内也有明显的峰值,矿物颗粒的粒度分布在这 2 个区域中出现的频率相近,前者是 47%,后者为 45%.

2.2.3 道路扬尘 PM₁₀ 中矿物颗粒的粒度分布 南口镇道路扬尘样品中矿物颗粒的粒度主要分布在 1~2.5 μm(图 5),尽管矿物颗粒的数量只占总颗粒物数量的 12%,但矿物颗粒的面积却占总颗粒物面积的 33%.

3 讨论(Discussion)

3.1 PM₁₀ 中矿物颗粒的微观形态

大气中的矿物颗粒主要有 2 种来源,一是扬尘,二是新生矿物(大气化学反应产物)^[14].扬尘包括建筑扬尘、风起表土尘、道路扬尘和工业扬尘等,它们一般具有不规则的形态特征;新生矿物由于没有经过远距离的搬运、磨蚀,通常具有规则、完整的晶体形态.

3.1.1 形态规则的矿物颗粒 对于柱状矿物(图 1a),在市区的夏季样品、怀柔水库采样点夏季和冬

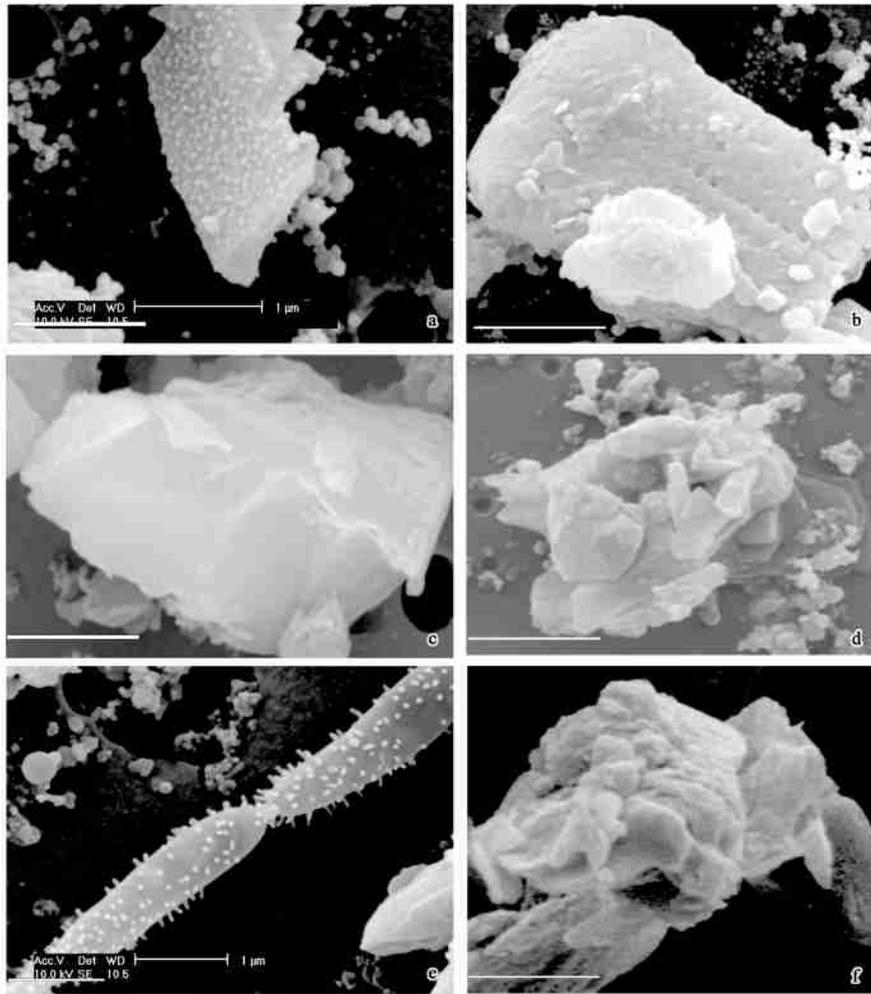


图2 形态不规则的矿物颗粒

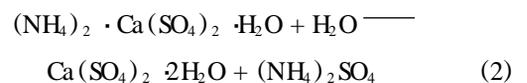
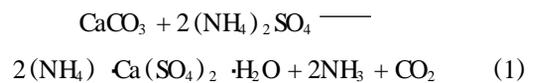
(a,b,c-矿物单体,d,e,f-矿物集合体;d中比例尺为2μm,其余为1μm)

Fig. 2 Minerals with irregular shapes, scale bar in d is 2 μm, others are 1 μm

(a,b,c-single mineral; d,e,f-mineral aggregates)

季样品中均可观察到,长度在1~2.5 μm,可见到单个的柱状矿物,但常见的是多个柱状矿物集聚在一起。时宗波^[15]报道,在南口镇夏季的PM₁₀样品中也有柱状矿物出现。能谱(EDX)成分分析显示,这种柱状矿物的主要成分为Ca、S和O。从这种矿物的形态和成分分析可知,柱状矿物是典型的硫酸盐矿物石膏,该类矿物在形态规则的矿物中出现的几率最高。板状矿物(图1b)的能谱分析表明,其成分除Ca、S、O外,还有一定数量的K,属硫酸盐类矿物;片状矿物(图1c)的成分分析显示,S是主要的元素,亦是硫酸盐类的矿物;六方柱状物质(图1d)的成分分析显示,Si是主要成分,结合形貌特征,这种矿物是石英;针状矿物成片出现(图1e),主要成分也是Ca和S。汪安璞等^[5]报道,针状的石膏在电厂飞灰的溶液蒸

发后会出现,因此,这种针状矿物可能是Ca和S在大气中反应新生成的硫酸盐类矿物。Mori等^[16]实验室模拟的结果表明,硫酸氨和方解石在实验室条件下发生化学反应可生成针状石膏,其化学反应机理如下:



这说明方解石和硫酸盐反应生成石膏是可能发生的。在大气中,实际的化学反应可能较上述过程更复杂,不能排除非均相反应发生的可能性。但值得注意的是,在北京大气中见到的这些细长条状硫酸盐矿物长度有时可达10 μm,这种现象有待进一步的研

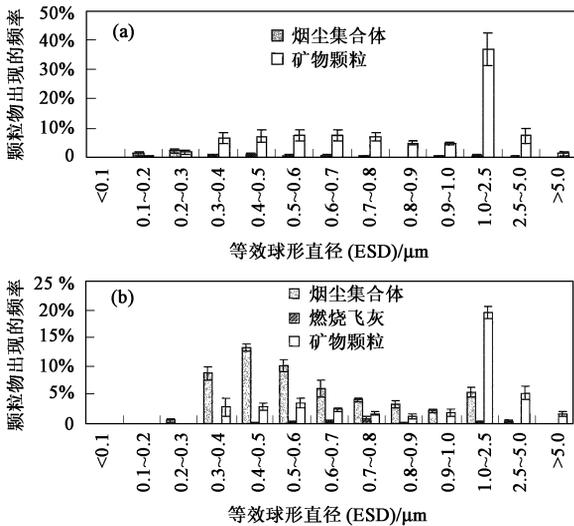


图3 沙尘暴期间(a)和沙尘暴期后(b) PM₁₀的数量-粒度分布特征

Fig. 3 Number-size distribution of PM₁₀ collected during (a) and after (b) a dust storm episode

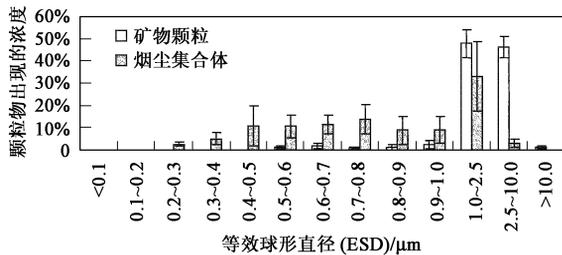


图4 局地扬尘 PM₁₀样品数量-粒度分布特征

Fig. 4 Number-size distribution of PM₁₀ of local fugitive dusts

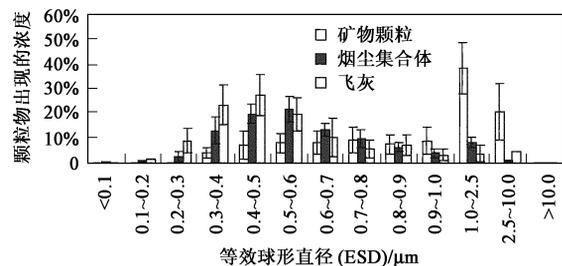


图5 道路扬尘 PM₁₀样品数量-粒度分布特征

Fig. 5 Number-size distribution of the roadside PM₁₀

究. 簇状矿物(图 1f)大小在 2 μm 左右,成分主要是 Ca、S,这可能是簇状石膏.

总之,尽管形态规则的矿物在 PM₁₀ 样品中出现的频率较低,但它们的存在的确证明了大气化学反应的发生.从这些矿物的成分分析(CaO 和 SO₃ 的平

均值分别为 29.5 %和 40.5 %,其他成分的平均值为 30 %)可看出,硫是它们的主要成分(除六方柱状矿物外).这表明硫元素除了被吸附在其他颗粒表面之外,也可以化合物即矿物的形式存在.此外,硝酸盐也是北京市大气中的重要成分^[2,17].但普通的 X 射线能谱(EDX)检测不到 N 元素,因此其更加难于识别,但有的研究者^[18,19]使用 TEM(透射电镜)手段来确定硝酸盐成分.

3.1.2 形态不规则的矿物颗粒 北京 PM₁₀中的矿物颗粒多以不规则的形态出现,这些不规则形状的颗粒并非都是单矿物颗粒,它们表面常粘有一些杂质,但这并不影响对单个矿物颗粒的判断.图 2a 是不规则的片状矿物,EDX 分析显示其成分主要为 Si、Al,并含有 Na、K、Ca 等,表明这种不规则片状矿物为铝硅酸盐矿物.图 2b 是硅藻土的典型显微形貌,出现在 2002 年春季的样品中.图 2c 是石英,并伴有贝壳状断口,出现在沙尘暴的样品中.图 2d 和 f 是最常见的矿物集合体,这种形态的矿物常出现在沙尘暴的样品中.EDX 分析表明,它们的成分主要为 Si、Al,并同时伴有 Na、K、Ca、Fe 等元素,笔者认为它属于铝硅酸盐矿物集合体.对图 2e 中的细小矿物,它具有一定的形态,粒径在几十纳米,实验所用设备无法判别其成分,笔者把它归为待定矿物颗粒.

3.2 不同 PM₁₀ 样品中矿物颗粒的粒度分布特征

由于粒度分布是大气颗粒物最重要的性质之一,故有关大气颗粒物的粒度分布的研究已有很多^[20].但是,对大气颗粒物中矿物组分粒度特征的研究还不充分;而对矿物颗粒的粒度分布的研究不仅可以为矿物颗粒的毒理学研究提供基础数据^[9],而且对矿物颗粒的来源有识别作用,如 Bergametti 等^[21]对西部非州沙尘暴时产生的矿物气溶胶研究后指出,沙尘颗粒的粒度分布指示了其距来源区的远近.

3.2.1 沙尘暴 PM₁₀ 样品 粒度分析的结果表明,沙尘暴期间北京 PM₁₀中几乎全是矿物颗粒,细小矿物颗粒(粒径 < 2.5 μm)的数量在样品中占了相当大的比例(约为 83 %),但矿物颗粒的粒度主要集中在 1 ~ 2.5 μm 之间.庄国顺等^[6]和孙业乐等^[22]的研究都表明,在沙尘暴期间,细粒子的数量有明显的增多,占 TSP 总质量浓度的 40 %左右.但在沙尘暴过后(3 月 21 日 8 10—10 10)采集的 PM₁₀样品中,矿物颗粒在 PM₁₀的数量下降到 43 %,烟尘集合体的数量有了明显的增加,其峰值也很明显(图 3b),分布在 0.2 ~

0.3 μm 范围内. 沙尘暴期间矿物颗粒粒度的峰值在 1~2.5 μm , 沙尘暴过后矿物颗粒度分布没有明显的变化, 1~2.5 μm 的峰依然明显, 反映出了在沙尘暴中细矿物颗粒对北京 PM_{10} 的贡献有一定的持续性.

3.2.2 局地扬尘 PM_{10} 样品 局地扬尘是北京地区常见的污染现象. 对 2002 年秋季(11 月 11 日)采集的局地扬尘的 PM_{10} 样品进行了粒度分布研究, 结果表明, 局地扬尘 PM_{10} 中矿物颗粒的粒度除了 1~2.5 μm 范围有明显的峰值外, 在 2.5~10 μm 的区间内也有明显的峰值, 而沙尘暴中矿物颗粒的粒度则主要分布在 1~2.5 μm . 局地扬尘和沙尘暴样品中矿物颗粒粒度的差别反映出其来源的不同, 沙尘暴中的矿物属远源区, 经过上千 km 的搬运, 只有粒度较细的矿物搬运到采样地; 局地扬尘中的矿物属本地尘的二次扬起, 它的粒度反映了源区矿物颗粒的粒度分布特点. 在局地扬尘 PM_{10} 样品中, 另一个较为明显的特征是烟尘集合体在数量上占了很大一部分, 占到总颗粒数的 27%, 而在沙尘暴样品中很难见到烟尘集合体. 需要说明的是, 由于采样条件的限制, 本研究中所用局地扬尘样品的数量有限, 需要有更多的实验对本次的结果进行验证.

3.2.3 道路扬尘 PM_{10} 样品 北京交通发达, 道路众多, 车辆拥挤, 加上气候干燥, 道路扬尘成为北京市大气颗粒物的重要来源之一, 在交通污染源中, 矿物颗粒占有一定的比例. 时宗波^[15]在对市区学院路上采集的 PM_{10} 样品进行了显微图像分析后认为, 矿物颗粒占颗粒物总数的 9%, 矿物颗粒的粒度在 0.2~0.4 μm . 笔者对在南口镇主干道上采集的 PM_{10} 样品进行了分析, 结果与时宗波^[15]报道的有些差异. 南口镇道路扬尘样品中矿物颗粒的粒度主要分布在 1~2.5 μm , 尽管矿物颗粒的数量只占总颗粒物数量的 12%, 但矿物颗粒的面积却占总颗粒物面积的 33%, 这意味着尽管矿物颗粒在 PM_{10} 中的数量不多, 但对 PM_{10} 的质量浓度贡献却不小. 这两地道路扬尘中矿物粒度的差异可能主要来自这两地的自然环境和道路上行驶车辆数量和车型的不同.

4 结论(Conclusion)

1) 北京 PM_{10} 中的矿物颗粒多以不规则的形态出现, 按其形貌、组成特点可以分为单个矿物和矿物集合体 2 类; PM_{10} 中形态规则的矿物颗粒按其形态又可细分为柱状、片状、板状、六方面体状、针状、簇状等矿物; 形态规则的矿物主要是硫酸盐类矿物, 是

大气化学反应形成的新生矿物; 形态不规则的矿物按形态可以分为矿物单体和集合体两类, 这类矿物是原生的矿物.

2) 不同类型污染源产生的 PM_{10} 中矿物颗粒的粒度分布特征表现不同. 在沙尘暴和道路扬尘样品中, 矿物颗粒的粒度呈单一峰态分布, 峰值在 1~2.5 μm ; 在局地扬尘的样品中, 矿物颗粒的粒度虽亦呈单峰分布, 但明显较粗, 主要分布在 1~2.5 μm 和 2.5~10 μm .

参考文献(References):

- [1] Zhang Y H. Characteristic and source analysis of Beijing $\text{PM}_{2.5}$ [R]. Bulletin of "Environmental problem of inhalable particulate caused by burning materials". Engineering science (No. 14), Chinese Engineering Forum, 2001, 13—16(in Chinese)
- [2] He K, Yang F, Ma Y, *et al.* The Characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2001, 36: 4954—4970
- [3] Wang W, Tang D G, Liu H J, *et al.* Research on pollution status and pollution characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2000, 13(1): 1—5(in Chinese)
- [4] Ning D T, Zhong L X, Chung Y S. Aerosol size distribution and elemental composition in urban areas of Northern China [J]. Atmospheric Environment, 1996, 30: 2355—2362
- [5] Wang A P, Yang S Z, Sha Y. Chemical characterization of individual airborne particulate in Beijing air [J]. Environmental Chemistry, 1996, 15(6): 487—495(in Chinese)
- [6] Zhuang G S, Guo J H, Yuan H, *et al.* The composition, sources, size distribution of duststorm from China in spring of 2000 and its impact on the global environment [J]. Chinese Science Bulliten, 2001, 46(3): 191—197
- [7] Gnoux P, Chin M, Tegen I, *et al.* Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(D17): 20255—20273
- [8] Dentener F J, Carmichael J, Zhang Y, *et al.* Role of mineral aerosol as a reactive in the global troposphere [J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101: 22869—22879
- [9] Richards R. What effects do mineral particles have in the lung? [J]. Mineralogical Magazine, 2003, 67(2): 129—139
- [10] Zhuang G S, Guo J H, Yuan H, *et al.* Coupling and feedback between iron and sulphur in air-sea exchange [J]. Chinese Science Bulliten, 2003, 48(4): 313—319(in Chinese)
- [11] Moreno T, Gibbons W, Jones T, *et al.* The geology of ambient aerosol: characterizing urban and rural/coastal silicate $\text{PM}_{10-2.5}$ and $\text{PM}_{2.5}$ using high-volume cascade collection and scanning electron microscopy [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37: 4265—4276
- [12] Lü S L, Shao L Y, Shi Z B, *et al.* Mineralogical study of inhalable particles in atmosphere [J]. Journal of Liaoning technical university, 2003, 22(5): 707—710(in Chinese)

- [13] Welton J E. SEM Petrology Atlas[M]. Tulsa, Oklahoma, USA: AAPG, 1984
- [14] L ÜS L. PM₁₀ in Beijing air: Mineralogy and Plasmid DNA assay [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing campus), 2003, 27—30 (in Chinese)
- [15] Shi Z B. Study on Physic-chemical characteristic and bioreactivity of PM₁₀ and PM_{2.5} in Beijing air[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing campus), 2003: 22—30 (in Chinese)
- [16] Mori I, Nishikawa M, Iwasaka Y. Chemical reaction during the coagulation of ammonium sulphate and mineral particles in the atmosphere[J]. Science of the Total Environment, 1998, 224: 87—91
- [17] Yao X, Chan C K, Fang M, *et al.* The water-soluble ionic composition of PM_{2.5} in Shanghai and Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36: 4223—4234
- [18] Zhang D Z, Zhao C S, Qin Y. Composition and morphology analyses of dust particles [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1998, 18(5): 42—47 (in Chinese)
- [19] Zhang D, Iwasaka Y. Nitrate and sulfate in individual Asian dust-storm particles in Beijing, China in spring of 1995 and 1996[J]. Atmospheric Environment, 1999, 33: 3213—3223
- [20] McMurry P H. A review of atmospheric aerosol measurements[J]. Atmospheric Environment, 2000, 34: 1959—1999
- [21] Bergametti G, Gomes L, Coud éGausse, *et al.* African dust over Canary Islands: Source regions, identification and transport pattern for some summer situations[J]. Journal of Geophysical Research 94D, 1989, 14855—14864
- [22] Sun Y L, Zhuang G S, Yuan H, *et al.* 2004. Characteristics and sources of 2002 super dust storm in Beijing [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(2): 340—346 (in Chinese)
- 中文参考文献:**
- [1] 张远航. 北京市大气颗粒物细粒子污染特征和来源分析 [R]. 工程科技论坛(第十四场)“燃烧源可吸入颗粒物的环境问题”报告专家论文集. 2001:13—16
- [3] 王 玮, 汤大钢, 刘红杰, 等. 中国 PM_{2.5} 污染状况和污染特征的研究[J]. 环境科学研究, 2000, 13(1): 1—5
- [5] 汪安璞, 杨淑兰, 沙 因. 北京大气气溶胶单个颗粒的化学表征[J]. 环境化学, 1996, 15(6): 487—495
- [6] 庄国顺, 郭敬华, 袁 蕙, 等. 2000 年我国沙尘暴的组成、来源、粒径分布及其对全球环境的影响 [J]. 科学通报, 2001, 46(3): 191—197
- [10] 庄国顺, 郭敬华, 袁 蕙, 等. 大气海洋物质交换中的铁硫耦合反馈机制[J]. 科学通报, 2003, 48(4): 313—319
- [12] 吕森林, 邵龙义, 时宗波, 等. 环境大气可吸入颗粒物的矿物学研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2003, 22(5): 707—710
- [14] 吕森林. 北京市大气 PM₁₀ 的矿物学特征及质粒 DNA 损伤的研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京校区), 2003, 27—30
- [15] 时宗波. 北京市大气 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的物理和化学特征及生物活性研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京校区), 2003: 22—30
- [18] 张代洲, 赵春生, 秦 瑜. 沙尘粒子的成分和形态分析[J]. 环境科学学报, 1998, 18(5): 42—47
- [22] 孙业乐, 庄国顺, 袁 蕙, 等. 2002 年北京特大沙尘暴的理化特性及其组分来源分析[J]. 科学通报, 2004, 49(2), 340—346