

2002 年春季北京特大沙尘暴颗粒的矿物组成分析

邵龙义^{①②*} 李卫军^{①②} 杨书申^{①②} 时宗波^③ 吕森林^{①②}

(中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 中国矿业大学(北京)资源与地球科学系, 北京 100083; ③ Faculty of Environmental and Symbiotic Sciences, Prefectural University of Kumamoto, Kumamoto 862-8502, Japan)

摘要 应用 X 射线衍射(XRD)和带能谱的场发射扫描电镜(FESEM-EDX)对在北京 2002 年 3 月 20 日收集的一次特大亚洲沙尘暴样品进行了分析, 获得了矿物组成及粒度分布信息. 结果表明, 此次沙尘暴颗粒中矿物颗粒达 94%. XRD 半定量分析显示, 沙尘暴颗粒的矿物组成主要有黏土(40.3%)和石英(19.5%), 其次有方解石、斜长石、钾长石、赤铁矿、黄铁矿、角闪石和石膏, 但其含量都小于 10%. 分离出的黏土组分中伊/蒙混层矿物占 78%、伊利石 9%、高岭石 6%、绿泥石 7%. FESEM-EDX 分析除了检测到那些主要类型矿物外, 还检测出痕量的白云石、黄铁矿、盐类矿物芒硝、重矿物、金红石、钛铁矿和磷灰石等矿物. 此次亚洲沙尘暴颗粒和非洲撒哈拉大沙漠的沙尘羽颗粒的矿物类型相似, 但是黏土矿物组成有很大的差别, 前者以伊/蒙混层矿物为主, 后者以伊利石为主.

关键词 亚洲沙尘暴 PM_{10} X 射线衍射(XRD) 单颗粒分析 北京

由于春季西风及西北风的影响, 来自于亚洲地区干旱和半干旱区域的沙尘颗粒被不断地传送到亚洲大陆其他地区及其以外区域, 可传送到太平洋中北部, 有时甚至能到达北美大陆^[1~3]. 据估算, 对流层中近 50%的气溶胶颗粒是矿物颗粒, 这些矿物颗粒主要源自于沙漠及其周边地区^[4]. 矿物气溶胶通过散射、透射和吸收太阳光辐射能直接影响全球气候, 并且当矿物颗粒表面被可溶性物质覆盖时可作为云凝结核从而间接影响全球气候^[4,5]. 尤其是那些被沙尘暴直接搬运的矿物气溶胶能够在全局传输, 并对全球的环境和气候有着非常重要的影响^[5~8]. 另外, 气溶胶矿物组分的鉴别有助于确定沙尘暴的来源^[9,10].

春季 3 和 4 月, 中国北方常发生沙尘天气, 这给当地和其他广大地区的工农业生产、交通运输、空气质量和人民的日常生活都带来了极大危害. 沙尘暴

不仅含有从其源区产生的大量沙尘颗粒, 而且还有一定量的一次或二次形成的硫酸盐和有机气溶胶^[11~13]. 目前对大气气溶胶颗粒矿物学的研究水平还非常低^[14]. 因此提高关于气溶胶颗粒的矿物学认识是大气科学家非常重要的一项工作^[15]. 本文主要研究的是 2002 年 3 月 20 日一次特大沙尘暴天气, 利用带能谱的场发射扫描电镜(FESEM-EDX)和 X 射线衍射仪(XRD)分析了沙尘暴中沙尘颗粒的矿物学特性.

1 采样仪器与方法

1.1 样品采集

采样点设在北京海淀区中国矿业大学综合楼五楼平台, 离地面高度为 18.5 m. 采样时间为 2002 年 3 月 20~23 日. 采样仪器由 Negretti 切割头(UK)以及 KB-80 采样泵(青岛崂山)组成. 采样滤膜使用聚碳酸酯滤膜(直径 47 mm), 其核孔直径为 0.6 μ m, 流量为

收稿日期: 2005-09-18; 接受日期: 2006-05-29

国家重点基础研究发展计划(批准号: 2006CB403701)和国家自然科学基金项目(批准号: 40275040, 40575065)资助

* E-mail: shaol@cumt.edu.cn

30 L/min 时采集 PM_{10} 样品. 采集的样品主要用来观察气溶胶颗粒的形貌和分析颗粒物的成分. 同时应用 XH1000 型大流量 TSP- PM_{10} 采样器(河北先河科技发展有限公司), 使用 20 cm×25 cm 玻璃纤维滤膜, 采样速率为 1050 L/min. 样品的采集时间设定为 12 h, 最终可获得大气颗粒物的质量浓度数据. 本次研究中所采集的均为 PM_{10} 样品, 采样时记录气温、湿度、风速和风向等气象数据.

1.2 样品测试与分析

利用 FESEM 观测样品形貌. 剪下聚碳酸酯滤膜样品的 1/10 左右, 用导电胶将其粘贴在金属桩上, 再将样品镀金, 然后用 XL-30 场发射扫描电镜(Philips)和 JOEL-6300 系列场发射扫描电镜(日本电子)进行分析, 文中的图像均为二次电子像. 具体实验步骤参见文献[16]. 另外, 再剪下聚碳酸酯滤膜样品的 1/10 左右, 用导电胶将其固定在样品桩上, 在不镀膜的条件直接进入仪器并在背散射电子条件下获得能谱数据.

沙尘暴颗粒物的矿物学研究应用了 X 射线衍射技术, 实验中选用日本理学 D/MAX-2500X 射线衍射仪, 实验条件: 扫描速度 $3^\circ(2\theta)/\text{min}$, Cu 靶, 扫描范围 $3^\circ\sim 50^\circ$, 采样步宽 $0.01^\circ(2\theta)$, 管压 40 kV, 管流 125 mA. 具体实验步骤参见文献[17]. 对于大气颗粒物的 XRD 定量分析, 本次实验采取 K 值法进行, 试样和刚玉为 1:1 配比, K 值法计算公式如下:

$$X_i = \frac{1}{K_i} \times \frac{I_i}{I_{\text{cor}}} \times 100,$$

式中, X_i 指试样中 i 矿物的质量百分含量(wt%), K_i 指 i 矿物的参比强度, I_i 指 i 矿物的衍射峰强度, I_{cor} 指刚玉某衍射峰强度.

2 结果与讨论

2.1 “2002-03-20”特大沙尘暴的反向轨迹图及 PM_{10} 质量浓度变化

“2002-03-20”沙尘暴为多年罕见的特大沙尘暴天气, 当时中国北方绝大部分地区都受到了沙尘暴的袭击, 北京也遭受到严重的危害, 这次特大沙尘暴对日本和韩国也造成了影响^[18]. 根据卫星云图动态资料和场流分析, 可以看出此次沙尘过程是由多次极强冷空气陆续侵袭形成^[19].

“2002-03-20”特大沙尘暴主要发生在 3 月 20 日 10:00~14:30 左右, 期间采样点风速保持在 8 m/s 左右, 风向为西风, 平均温度为 10°C , 平均湿度为 32%, 能见度不及 200 m(表 1). 在 3 月 20 日 10:00~3 月 23 日 10:00 期间, PM_{10} 质量浓度最高可达 $3339.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 最低浓度也在 $741.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 平均为 $1675.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 是国家空气质量二级标准的 10 倍多(表 1). 北京市环境监测中心的数据也表明 3 月 20 日 21:00~3 月 21 日 2:00, PM_{10} 的浓度超过 $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ^[20]. 可见沙尘暴对北京市的空气质量造成了十分不利的影响.

地面监测的风速和利用风玫瑰图显示的资料相近, 风向主要集中在西北方向(图 1(a)), 最大风速在 7~10 m/s 之间. 从沙尘移动的反向轨迹图(图 1(b))可以看出, 此次沙尘主要是受西伯利亚冷空气的影响, 反向轨迹图还显示出在接受源 50 m 高度的沙尘粒子, 来自于内蒙古的 1500 m 高空, 这说明可能是冷空气前峰经过内蒙古时把经长距离传送的沙尘再一次输送至北京.

2.2 “2002-03-20”特大沙尘暴 PM_{10} 微观形貌类型及粒度分布特征

从样品的 FESEM 图像看, 沙尘暴期间(3 月 20 日 14:20~15:50)采集的 PM_{10} 样品中的颗粒物几乎全由矿物颗粒组成(图 2(a)), 而沙尘暴过后(3 月 21 日 8:10~10:10)采集的样品中除了矿物颗粒外, 还可见到一定量的烟尘和飞灰(图 3(a)). 这两个样品的粒度分析结果分别见图 2(b)和 3(b).

3 月 20 日 14:20~15:50 采集的样品中大于 $1 \mu\text{m}$ 的矿物颗粒占颗粒物总数的 46.2%, 其中 1~2.5 和 2.5~5 μm 粒度范围内的矿物颗粒分别占颗粒物总数的 37%和 7.3%(图 2). 但在 3 月 21 日 8:10~10:10 采集的 PM_{10} 样品中, 大于 $1 \mu\text{m}$ 的颗粒物仅占颗粒物总数的 15.0%, 其中 1~2.5 和 2.5~5 μm 粒度范围内的矿物颗粒分别占颗粒物总数的 14.0%和 0.8%(图 3), 说明沙尘暴过后粒径较大的颗粒的含量有大幅度降低. 烟尘集合体(约在 0.2~0.3 μm 粒度范围)在沙尘暴峰期样品中很少见到, 而在沙尘暴过后样品中的含量明显增高. 图 2 中烟尘比较细小, 它可能主要来自于沙尘长距离传送过程中所经过的工业区或人类居住区的人为释放源, 而图 3 中烟尘集合体的数量和大小都比图 2 中的大, 可能是由于当地人为源释放的烟尘颗粒混入, 这与 Alfaro 等^[21]对 2002 年 4 月在陕西

表 1 “2002-03-20”特大沙尘暴样品的采样记录

样品号	采样时间(北京时间) ^{a)}	质量浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	平均温度/	平均湿度/%	起始风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	终止风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	起始风向	终止风向
1	20 日 10:00~20 日 22:00	3339.44	10	32	8	8	W	W
2	20 日 22:00~21 日 10:00	1196.93	8	20	8	6	W	W
3	21 日 10:00~22 日 22:00	1226.06	9	25	6	10	W	NW
4	22 日 22:00~23 日 10:00	741.07	9	19	>10	>10	NW	NW

a) 采样时间均在 2002 年 3 月间, 应用 XH1000 型大流量 TSP-PM₁₀ 采样器

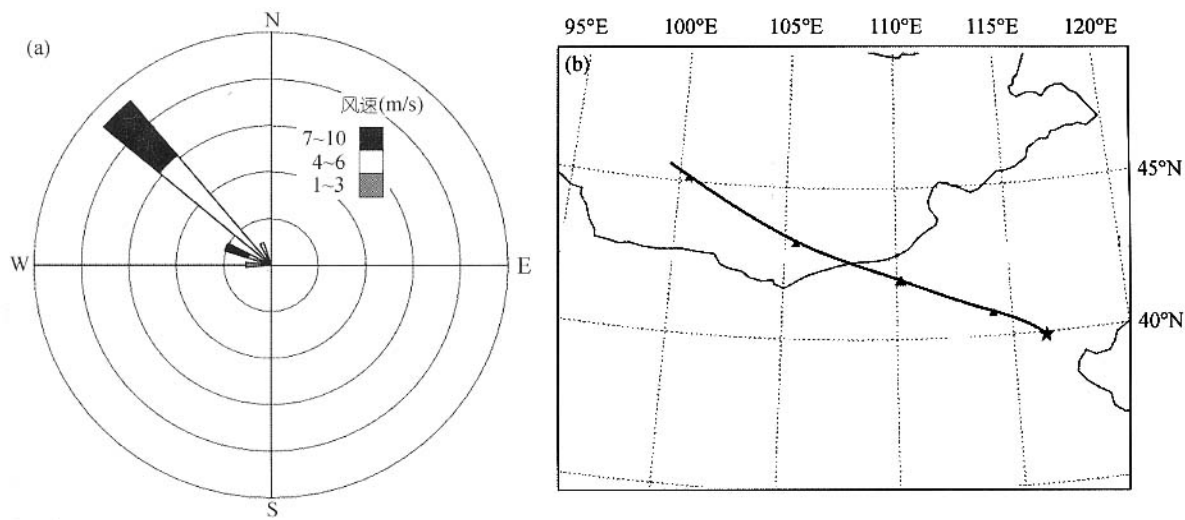


图 1 “2002.3.20”沙尘暴天气风向玫瑰花图及沙尘暴反向轨迹图

(a) 采样点 39°22' N, 116°42' E 的风玫瑰图; (b) HYSPLIT MODEL 模拟的 2002 年 3 月 19~21 日 48 h(GMT) 的沙尘移动轨迹图。★代表北京采样点, 资料来源于 <http://www.arl.noaa.gov/ready>

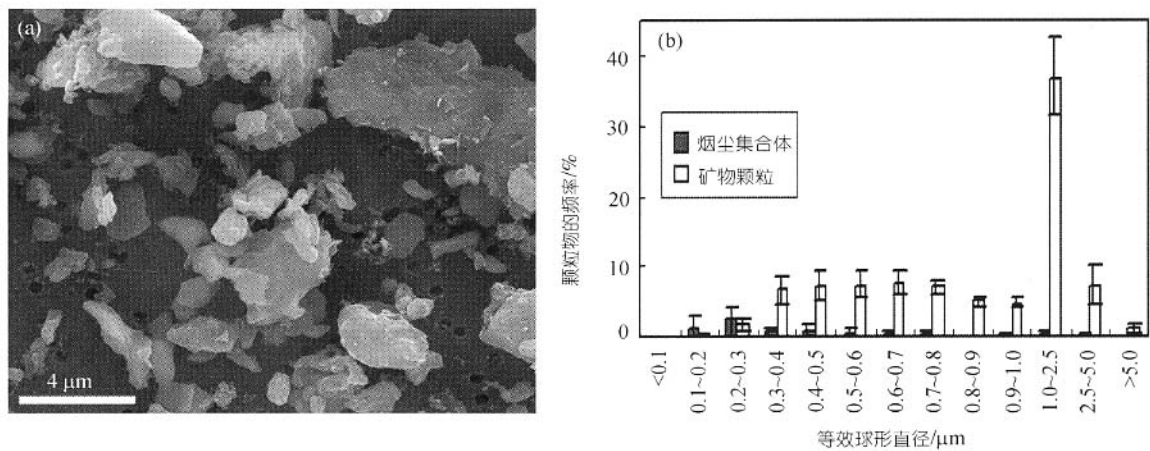


图 2 沙尘暴期间 PM₁₀ 样品的 FESEM 二次电子图像(a)和数量-粒度分布特征(b)

样品名为 D2, 采样时间: 2002 年 3 月 20 日 14:20~15:50. FESEM 的加速电压 10 kV

榆林地区一次沙尘暴过程的研究结果较为一致. 沙尘暴期间矿物颗粒在数量-粒度分布中的峰值为 1~2.5 μm , 沙尘暴过后矿物颗粒的峰值仍然在 1~2.5 μm , 但是在这一区间内的颗粒物数量在矿物颗粒中的比例明显下降, 仅占 10% 左右. 李卫军等^[22]对北京

市 2002 年春季大气中矿物颗粒物的数量-粒度分布研究也得到类似的结果.

应用 FESEM 及图像分析手段对在 2002 年 3 月 20 日 14:20~15:50 采集的 PM₁₀ 样品进行分析发现, 矿物颗粒在样品中占绝对优势(占颗粒总数的 94%,

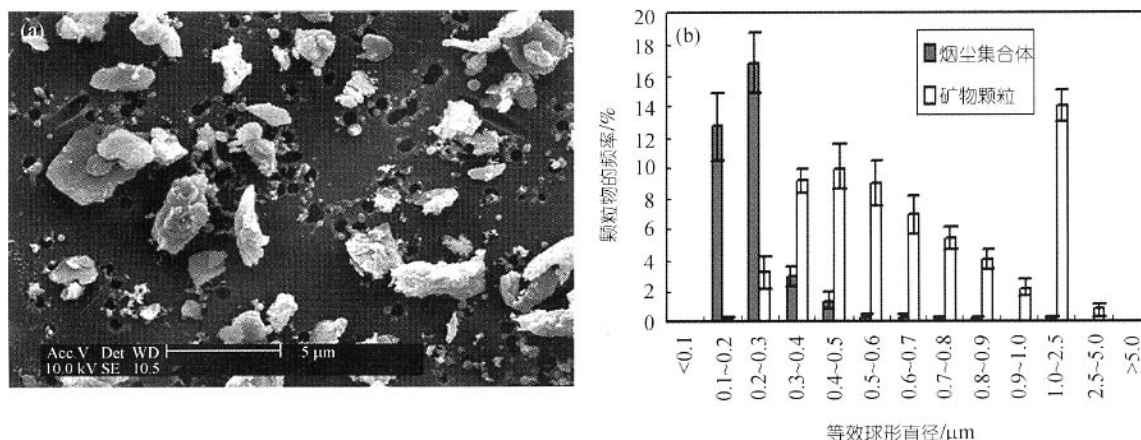


图3 沙尘暴过后 PM₁₀ 样品的 FESEM 二次电子图像(a)和数量-粒度分布特征(b)

样品名为 D5, 采样时间: 2002 年 3 月 21 日 8:10~10:10

占总面积的 99.5%); 烟尘集合体仅占颗粒物总数量的百分比为 6%, 占颗粒物总面积的百分比仅为 0.5%。与此不同, 在 2002 年 3 月 21 日 08:10~10:10 沙尘暴过后采集的 PM₁₀ 样品中, 人为污染源的贡献明显增大, 其中烟尘集合体的数量百分比大幅度上升(占总数量的 35%), 矿物颗粒的数量百分比已经降至 65%, 面积百分比降至 95%。

2.3 “2002-03-20”特大沙尘暴中 PM₁₀ 矿物组成的 XRD 半定量分析

XRD 是物相分析的最主要手段之一, 它依据样品晶体结构数据(一般是晶面间距数据)不仅能对样品矿物组成进行定性鉴定, 还能进行定量分析。对在本次沙尘暴期间用大流量 TSP-PM₁₀ 采样器采集(2002 年 3 月 20 日 10:00~22:00)的 PM₁₀ 样品中的矿物组分进行了 XRD 半定量分析(图 4 和 5)。结果显示, 沙尘暴样品中黏土矿物和石英含量最高, 分别达 40.3% 和 19.5%, 其次是方解石(7.5%)、斜长石(8.4%)和钾长石(1.5%), 另外还含有痕量的赤铁矿、黄铁矿、角闪石和石膏等矿物类型, 其总含量估计在 2.4%。此外, 样品中还有相当量的非晶质(可能为有机质、极少量的玻璃纤维和地壳中一些非晶质矿物等), 含量达 20.1%。同时对用离心分离出的黏土组分, 通过自然定向片、乙二醇饱和片以及(550±10) 加热片等三种处理片分别进行 XRD 分析, 可以得出此次沙尘暴样品中的不同种类的黏土矿物的相对百分含量分别为: 伊利石/蒙脱石混层矿物 78%、伊利石 9%、高岭石 6%、绿泥石 7%。

2.4 “2002-03-20”特大沙尘暴 PM₁₀ 样品的单颗粒矿物分析

XRD 方法一般能对样品的主要矿物组成进行准确分析, 但对含量较小的矿物其分辨能力就受到限制。单颗粒分析方法则可弥补这一不足, 本研究利用扫描电镜及能谱(EDX)手段对样品中单个颗粒进行化学成分测定, 通过把得到的大气单个颗粒化学成分谱和标准矿物的成分谱进行对比来确定颗粒的矿物类型^[23], 并进行单颗粒矿物组成统计分析, 最后获得矿物的相对数量百分含量。单颗粒矿物类型的鉴定方法也有一定的局限性, 如一些类质同相矿物以及同质多相的矿物则很难用能谱方法区别。因此在某种意义上 XRD 和 EDX 这两种方法在确定气溶胶矿物类型时起到相互补充作用。

表 2 中列出了“2002-03-20”特大沙尘暴样品采集过程中的样品信息和单颗粒分析的结果。本研究共分析了 301 个单矿物颗粒。从单颗粒矿物分析结果看, 这次特大沙尘暴期间的矿物颗粒样品中以黏土矿物为主, 占统计矿物总数的 59.14%(数量百分比, 下同), 在黏土矿物中又以伊/蒙混层矿物为主; 石英的比例为 19.27%, 长石为 6.98%, 方解石为 5.32%, 不易鉴定的混合颗粒为 2.33%, 除此之外, 在这次沙尘暴样品中, 检测出了白云石、黄铁矿、盐类矿物芒硝、重矿物金红石、钛铁矿和磷灰石等少量的矿物质。这些颗粒都是地质历史时期形成的地壳颗粒。而在前期研究的北京市一年四季的 PM₁₀ 样品中还检测出一些通过大气化学反应生成的颗粒, 如(NH₄)SO₄ 和 NH₄Cl 等^[17]。这些二次颗粒的大气寿命不长, 并且随

表 2 “2002-03-20”沙尘暴 PM₁₀ 样品信息和单个矿物颗粒的统计分析

样品信息					单颗粒分析结果(颗粒数)											
样品编号	采样时间 ^{a)}	平均温度/℃	平均相对湿度/%	风速(风向)/m·s ⁻¹	石英	方解石	白云石	长石	石膏	黏土矿物						其他矿物 ^{b)}
										伊利石	伊蒙混层	绿蒙混层	绿泥石	蒙脱石	高岭石	
D1	20日 10:00~20日 14:20	10	34	8(W)						2	11	6			1	2
D2	20日 14:20~20日 15:50	11	24	>10(W)	16		2	7		4	10	6	4	1		5
D3	20日 15:50~20日 22:00	10	19	>10(W)	11	3		1		1	10	8	4	4	2	8
D4	20日 22:00~21日 08:10	8	19	7(W)	4			2		3	12		3	3		2
D5 ^{c)}	21日 08:10~21日 10:10															
D6	21日 10:10~21日 18:50	9	18	>10(NW)	15	5		4	1	7	9	7	4	3		6
D7	21日 19:00~22日 07:10	6	23	9(NW)	9	2		4		2	22	6	8			2
D8	22日 07:00~22日 19:00	6	24	7(NW)	3	6		3		3	6	3	2	1		
总 计					58	16	2	21	1	22	80	36	25	12	3	25
数量百分比/%					19.27	5.32	0.66	6.98	0.33	7.31	26.58	11.96	8.31	3.99	1	8.31

a) 采样时间均在 2002 年 3 月间; b) 其他矿物包括赤铁矿、黄铁矿、磷灰石、金红石、碳颗粒、复合颗粒、钛铁矿和芒硝; c) 样品 D5 没有做单颗粒分析

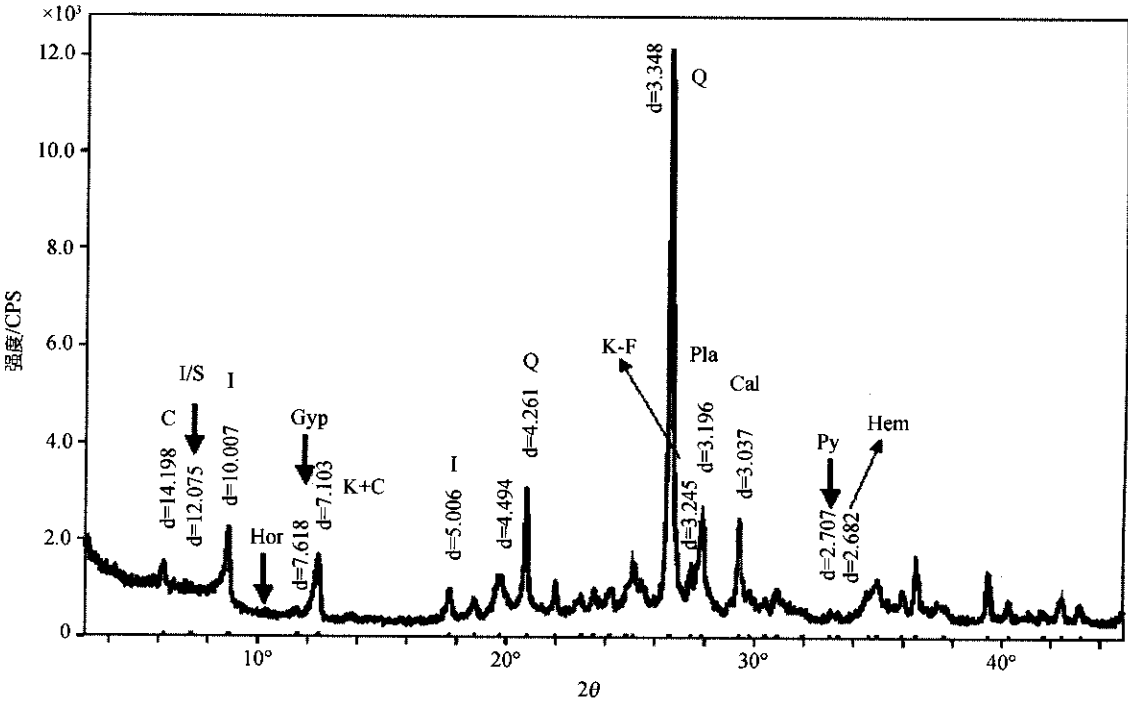


图 4 “2002-03-20”特大沙尘暴 PM₁₀ 样品的 XRD 衍射图

I: 伊利石; I/S: 伊/蒙混层; K: 高岭石; Q: 石英; Cal: 方解石; Gyp: 石膏; Hor: 角闪石; Py: 黄铁矿; K-F: 钾长石; Pla: 斜长石; Hem: 赤铁矿

着大气中温度、湿度、释放源和阳光辐射等条件的变化而发生成分或物相的转化。在研究这些二次颗粒物在大气中的作用及特性时, 沙尘暴期间的大气单颗粒物的化学成分和特征可以用作很好的参照对比物。

3 讨论

Shi 等^[15]对“2000-04-06”特大沙尘暴中的矿物进

行了 XRD 分析并分离出 PM₁₀ 颗粒, 在 PM₁₀ 中, 黏土矿物和石英的含量分别高达 39.0% 和 20.7%, 其他矿物的含量分别是: 方解石 9.1%、斜长石 7.8%、黄铁矿 1.0%、钾长石 2.1%、角闪石 0.3%。从矿物组合分析, “2002-03-20”沙尘暴和“2000-04-06”沙尘暴的矿物组成十分相似, 都是以黏土矿物和石英为主, 其他常见矿物还有长石和方解石等。但是仔细比较这两

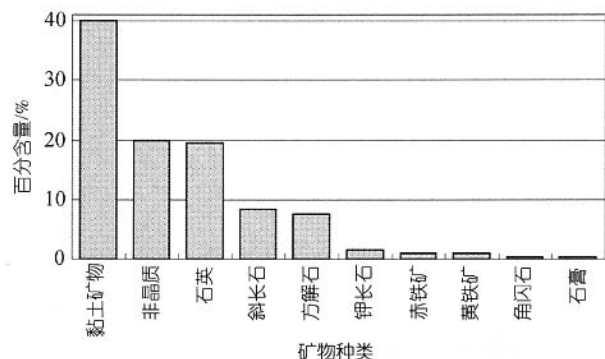


图5 “2002-03-20”特大沙尘暴 PM₁₀ 样品的 XRD 半定量分析

次沙尘暴的矿物组成发现,痕量矿物的含量有一定差别,如“2002-03-20”沙尘暴样品中存在痕量石膏,而在“2000-04-06”沙尘暴样品中并没有发现石膏;黄铁矿在“2002-03-20”沙尘暴样品中的含量仅为 0.9% 左右,而在“2000-04-06”沙尘暴样品中则达到 3.5%,这些细微的差别可能反映出这两次沙尘暴的源区和传输路径存在差异。结合图 1(a)的沙尘输送的反向轨迹计算结果,本次沙尘暴沙尘粒子来自于内蒙古高空,但是对于来自沙尘暴源区沙尘粒子的矿物特性可参考的资料很少见到。因此,在将来的研究中除了对主要矿物组分进行对比外,还应注意对黏土矿物类型及痕量矿物的识别和对比。

前人对非洲撒哈拉大沙漠的沙尘颗粒矿物学进行过研究。由红雨(red rains)传送到西班牙的非洲沙尘,主要包含伊利石、石英、蒙脱石、坡缕石、高岭石、方解石、白云石和长石,丰度依次减少^[24]。Caquineau 等^[25]利用沙尘中伊利石/高岭石的比值能很好地示踪撒哈拉沙漠沙尘羽三个不同的源区:荒漠草原(西非)、撒哈拉沙漠南部和中部以及撒哈拉沙漠的北部与西部。伊利石/高岭石的比值从南到北增加,它在长距离传送中不会发生变化,能够指示沙尘源区。伊利石/高岭土比值的纬度变化与海洋沉积物中的黏土矿物的纬度变化一致^[26]。以上研究表明亚洲沙尘暴和非洲撒哈拉大沙漠的沙尘羽中沙尘颗粒的矿物类型相似,但是黏土矿物组成有很大的差别,前者以伊利石和蒙脱石混层为主,后者以伊利石为主。但是由于亚洲沙尘暴从源区到大陆外要经过相当长的内陆路径,这在某种程度上加大了沙尘矿物学研究的难度。

4 结论

根据 FESEM 分析及图像处理,沙尘暴期间采集的样品在数量上主要以矿物颗粒为主(94%),大于 1 μm 的颗粒占颗粒总数的 46.2%。而沙尘暴过后,矿物颗粒下降到 65%,烟尘颗粒则有大幅度上升,大于 1 μm 的矿物颗粒的比例下降到 15.0%。

XRD 分析结果表明,沙尘暴颗粒物中黏土矿物的含量最高,达 40.3%,其次为非晶质(可能为有机质、极少量的玻璃纤维和地壳中一些非晶质矿物等),含量达 20.1%,其次为石英,含量达 19.5%。还有一些其他矿物颗粒如方解石、斜长石、钾长石、赤铁矿、黄铁矿、角闪石和石膏,其含量都小于 10%。黏土矿物中以伊利石/蒙脱石混层为主,另有少量伊利石、高岭石、绿泥石。

从单颗粒分析结果看,在沙尘暴颗粒中,黏土矿物占 59.14%,黏土矿物中以伊利石和蒙脱石混层矿物为主。石英含量为约 19.27%,方解石为 5.32%,此外,在沙尘暴颗粒中还检测出痕量的白云石、黄铁矿、盐类矿物芒硝、重矿物、金红石、钛铁矿和磷灰石等,以及约 2.33%的其他矿物。

比较“2002-03-20”和“2000-04-06”两次沙尘暴颗粒物的矿物组成发现,两者的主要矿物组成十分相似但是痕量矿物含量有些差别:如前者中存在石膏,而在后者中并没有发现石膏的存在;前者中黄铁矿的含量仅为 0.9%左右,而在后者中则达到 3.5%。

亚洲沙尘暴和非洲撒哈拉大沙漠沙尘羽颗粒物的矿物类型相似,但是黏土矿物组成有很大的差别,前者以伊利石/蒙脱石混层为主,后者以伊利石为主。

致谢 感谢 Cardiff 大学 Tim Jones 博士和 Kelly Bérubé 博士在 FESEM-EDX 实验中的帮助。

参 考 文 献

- 1 Duce R A, Unni C K, Ray B J, et al. Long-range atmospheric transport of soil dust from Asia to the Tropical North Pacific: temporal variability. *Science*, 1980, 209: 1522—1524
- 2 Iwasaka Y, Yamato M, Imasu R, et al. Transport of Asian dust (KOSA) particles; importance of weak KOSA events on the geochemical cycle of soil particles. *Tellus*, 1988, 40B: 494—503
- 3 Husar R B, Tratt D M, Schichtel B A, et al. Asian dust events of April 1998. *J Geophys Res*, 2001, 106: 18317—18330
- 4 Andreae M O. Climate effects of changing atmospheric aerosol levels. In: Henderson-Sellers A, ed. *World Survey of Climatology: Future Climates of the World*. New York: Elsevier, 1995. 341—392

- 5 Buseck P R, Pósfai M. Airborne minerals and related aerosol particles: effects on climate and the environment. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 1999, 96: 3372—3379
- 6 Prospero J M. Long-range transport of mineral dust in the global atmosphere: impact of African dust on the environment of the southeastern United States. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 1999, 96: 3396—3403
- 7 Bishop J K B, Davis R E, Sherman J T. Robotic observations of dust storm enhancement of carbon biomass in the North Pacific. *Science*, 2002, 298: 817—821
- 8 Zhang D, Iwasaka Y, Shi G, et al. Separated status of the natural dust plume and polluted air masses in an Asian dust storm event at coastal areas of China. *J Geophys Res*, 2005, 110, D06302, doi: 10.1029/2004JD005305
- 9 Davis B L, Guo J. Airborne particulate study in five cities of China. *Atmos Environ*, 2000, 34: 2703—2711
- 10 张小曳, 张光宇, 朱光华, 等. 中国源区粉尘的元素示踪. *中国科学 D 辑: 地球科学*. 1996, 26(5): 423—430
- 11 张代洲, 赵春生, 秦瑜. 沙尘粒子的成分和形态分析. *环境科学学报*, 1998, 18(5): 449—456
- 12 庄国顺, 郭敬华, 袁惠, 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. *科学通报*, 2001, 46(3): 191—197
- 13 张仁健, 徐永福, 韩志伟. ACE-Asia 期间北京 PM_{2.5} 的化学特征及其来源分析. *科学通报*, 2003, 48(7): 730—733
- 14 Watson R T, the Core Writing Team, eds. *Climate Change 2001: Synthesis Report*. Geneva: IPCC, 2001. 1—184
- 15 Shi Z B, Shao L Y, Jones T P, et al. Microscopy and mineralogy of airborne particles collected during severe dust storm episodes in Beijing, China. *J Geophys Res*, 110, 2005, D01303, doi: 10.1029/2004JD005073
- 16 邵龙义, 时宗波. 北京西北城区与清洁对照点夏季大气 PM₁₀ 的微观特征及粒度分布. *环境科学*, 2003, 24(5): 11—16
- 17 邵龙义, 杨书申, 时宗波, 等. 城市大气可吸入颗粒物物理化学特征及生物活性研究. 北京: 气象出版社, 2006. 209
- 18 Chung Y, Kim H, Dulam J, et al. On heavy dustfall observed with explosive sandstorms in Chongwon-Chongju, Korea in 2002. *Atmos Environ*, 2003, 37: 3425—3433
- 19 任阵海, 高庆先, 苏福庆, 等. 北京大气环境的区域特征与沙尘影响. *中国工程科学*, 2003, 5(2): 49—56
- 20 徐晓峰, 张小玲. 北京地区一次罕见沙尘天气过程及空气污染状况分析. 见: 俞学曾, 编. 第九届全国大气学术环境会议论文集. 北京: 中国环境科学学会, 2002. 40—45
- 21 Alfaro S C, Gomes L, Rajot J L, et al. Chemical and optical characterization of aerosols measured in spring 2002 at the ACE-Asia supersite, Zhenbeitai, China. *J Geophys Res*, 2003, 108(D23), 8641, doi: 10.1029/2002JD003214
- 22 李卫军, 邵龙义, 吕森林. 北京西北城区 2002 年春季大气可吸入颗粒物的粒度分布特征. *电子显微学报*, 2004, 23(5): 589—593
- 23 Welton J E. *SEM Petrology Atlas. Methods in Exploration Series(4)*. Tulsa: the American Association of Petroleum Geologists, 1984. 1—237
- 24 Avila A, Queralt-Mitjans I, Alarcón M. Mineralogical composition of African dust delivered by red rains over northeastern Spain. *J Geophys Res*, 1997, 102: 21977—21868
- 25 Caquineau S, Gaudichet A, Gomes L, et al. Saharan dust: Clay ratio as a relevant tracer to assess the origin of soil-derived aerosols. *Geophys Res Lett*, 1998, 25: 983—986
- 26 Chamley H. *Clay Sedimentology*. Berlin: Springer-Verlag, 1989. 1—621