

文章编号: 0254- 5357(2001)03- 0202- 06

用扫描电镜技术识别广州市大气颗粒物主要种类

董树屏¹, 刘 涛², 孙大勇³, 祁 辉¹, 段凤魁¹, 吴清柱³, 刘咸德¹, F. Adams⁴

(1. 国家环境分析测试中心, 北京 100029; 2. 广州市环境保护局, 广东 广州 510030;

3. 广州市环境监测中心, 广东 广州 510030; 4. Antwerp 大学化学系, 比利时)

摘要: 利用扫描电镜技术对大气颗粒物的来源进行识别, 采取手动分析与自动分析两种方法, 得出的结果在总趋势上相互一致。手动方法和自动方法各有特点。自动分析在细颗粒, 特别是含硫颗粒分析方面有优势, 而手动分析在形貌观测和确定有机粗颗粒污染状况方面有独到之处。实验结果表明, 大气颗粒物的来源是多样的, 治理措施也应是综合性的。既要注意工业点源的污染治理和排放控制, 如燃煤飞灰、钙质颗粒、富铁颗粒等; 也要注意面源排放, 如土壤扬尘和碳质颗粒。碳质颗粒的来源复杂, 可以是工业过程, 燃烧过程, 机动车尾气, 生物质燃烧, 树木自然排放。

关键词: 扫描电镜; 颗粒物; 来源识别; 聚类分析

中图分类号: X132 **文献标识码:** A

扫描电镜能谱分析可以观测单个颗粒物大小和形貌并对其进行化学成分分析。基于几十甚至上百个颗粒物的分析数据, 可以按颗粒物种类进行分类, 计算其数目百分数, 从而得到颗粒物来源及其重要性的信息, 为环境管理和环境决策提供科学数据和决策依据。扫描电镜能谱技术已成功地应用于研究沈阳、广州、青岛三城市大气颗粒物的来源^[1~3]。近年来, 这一技术取得新的进展, 单颗粒分析的结果和全样品分析技术的结果一致性良好^[4]。颗粒物的化学表征和物理表征相结合可以得到综合的信息^[5]。本文采取手动分析和自动分析相结合的方法识别大气颗粒物来源, 所分析的颗粒物数目大大增加, 统计意义增强, 不仅得到了更为合理的颗粒物分类结果, 而且在粒径分布、细颗粒分析、有机颗粒识别等方面得到了更多的信息, 所得结果更全面和合理。同时, 还揭示了手动分析结果和自动分析结果的一致性和各自的特点。

1 实验部分

1.1 采样点及样品采集

采样点为广州市的6个空气质量监测国控点

位, 覆盖了城市的各主要功能区, 每个站点采集大气总悬浮颗粒物(TSP)和粒径小于10 μm 的可吸入颗粒物(PM₁₀)样品, 样品数12个, 采样时间为2000年8月中旬。

使用核孔膜(Nuclepore membrane)采集大气颗粒物样品。核孔膜由聚碳酸酯制成, 用电镜观测表面平整, 特别适用颗粒物分析。采样器为国际原子能机构(IAEA)推荐的根特型(Gent type)串联采样器(SFU, Stacked Filter Unit)。可分粗细两级采集PM₁₀样品。根据本项目的实际需要, 将PM₁₀样品采集在一张滤膜上, 以利电镜分析工作, 所用滤膜孔径为0.4 μm , 可以满足采集粗、细颗粒的要求。采集TSP样品时将采样头前面的PM₁₀切割器去掉。

1.2 实验测量

1.2.1 手动分析测量

手动分析测量是实验人员选择几个视场, 顺序的分析每一个颗粒物, 对它的形貌、大小、成分进行测量, 避免主观取舍。

样品制备: 在日立公司S-2700扫描电镜专用样品台上覆盖上双面胶布, 剪取约1 cm^2 的颗粒物

收稿日期: 2001-03-26; 修订日期: 2001-05-24

基金项目: 国家自然科学基金(29777029)

作者简介: 董树屏(1966-), 男, 北京市人, 工程师, 从事环境分析工作。

样品滤膜,固定在双面胶上,然后对样品及样品台进行镀金处理,以使其具有导电性。

将制备好的6个站点的TSP样品放入电镜对其形貌、粒径、化学元素成分等进行测量分析。实验用扫描电镜为日立公司的S-2700型扫描电镜和EDAX能谱分析系统。实验高压为15 kV,放大倍数为500~1000倍。手动分析100个颗粒物大约需要8~10 h。

1.2.2 自动分析测量

自动分析测量是利用安特卫普大学化学系的JEOL 733型扫描电镜(又称电子探针)的智能分析系统自动分析颗粒物样品。颗粒物的识别和分析自动进行,无须操作人员介入。分析100个颗粒物大约需要1 h。

样品的制备:在电镜专用载片上覆盖上双面胶布,然后剪取约1 cm²的颗粒物样品滤膜,固定在双面胶上,对样品及载片进行镀碳的处理,以使其具有导电性,能够利用电镜观察分析。将镀好碳的样品及载片用导电性能良好的铜胶布固定于样品台上,放入电镜进行观测和分析。

粒径分布测量:利用733自动化分析系统进行测量,测量对象为6个站点的PM₁₀样品和1#站的TSP样品。实验高压为20 kV,放大倍数为2000倍,束流强度为1 nA。

颗粒物元素组成能谱测量:实验仪器和参数与粒径分布测量实验相同。测量对象为6个站点的PM₁₀样品。

①最小粒径设定为0.75 μm时,实验偏重于了解粗颗粒的污染状况,简称为“粗颗粒”分析。

②最小粒径设定为0.1 μm时,由于粒径在0.1~0.5 μm的颗粒物数目占总数目的绝大部分,这个实验的结果更偏重于说明细颗粒的污染状况。观测的粒径范围较好地覆盖了粗、细颗粒两个“模态”,简称为“双模态”分析。

运用数据转换软件PRODPP、聚类分析软件IDAS^[6]处理电镜实验数据,根据颗粒物的元素组成进行聚类分析,对颗粒物进行分类。

2 结果和讨论

2.1 粒径分布的自动测量

每个样品滤膜随机测量500个颗粒物,最小粒径设定为0.1 μm,兼顾粗、细颗粒的检出范围,使粒径分布的结果更具代表性。

表1列出的是6个站点的PM₁₀样品在各个

粒径(*d*)范围内的颗粒物数目(*n*)平均值所占颗粒总数百分比和标准偏差值(*s*)。

表1 PM₁₀样品粒径分布统计表

Table 1 Particle size distribution of PM₁₀ sample

<i>d</i> /μm	$\frac{n/\text{个}}{\bar{n}}$	<i>s</i>	比例/%	<i>d</i> /μm	$\frac{n/\text{个}}{\bar{n}}$	<i>s</i>	例/%
0.1~0.5	414	2.8	82.8	2.0~2.5	3.2	2.2	0.6
0.5~1.0	52.2	2.0	10.4	2.5~3.0	1.2	1.2	0.2
1.0~1.5	15.2	2.3	3.0	>3.0	5.7	2.5	1.1
1.5~2.0	8.7	0.7	1.7				

由表1的数据可以看到:从颗粒物数目上看,0.1~0.5 μm和0.5~1.0 μm的颗粒物占了绝大多数,大约分别占82.8%和10.4%。粗颗粒在数目上占极少数,大于2.5 μm的颗粒物总共只占1.3%。

6个国控站点的粒径分布在总的趋势上十分相似,各个粒径范围内的颗粒物数目稳定性很好。这表现为表1中的平均值标准偏差数值均较小。在这个区域范围内大气颗粒物的粒径分布具有很好的共性。

图1为1#站TSP与PM₁₀样品粒径分布趋势对数对照图。比较清晰地反映了TSP样品与PM₁₀样品在粒径分布方面的异同。两个样品的颗粒物主要分布在细颗粒,尤其是在0.1~0.5 μm内,在TSP样品中占78.0%,在PM₁₀样品中占到83.4%。在大于0.5 μm的各粒径范围中,TSP样品的颗粒物数目都高于PM₁₀样品中的颗粒物。说明两种采样方式所取得的样品在粒径分布的总趋势上是相同的,但是TSP样品上的粗颗粒多于PM₁₀样品的粗颗粒。

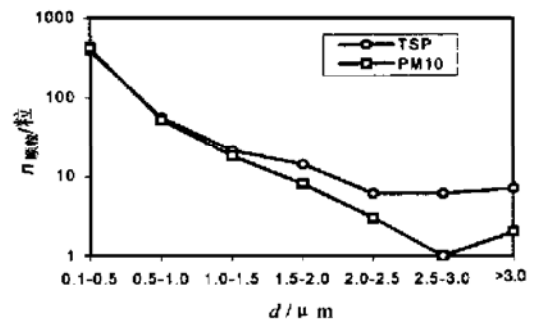


图1 广州1#站样品粒径分布趋势对数图

Fig. 1 Size distribution plot of aerosol samples collected at site number 1 in Guangzhou

需要说明的是尽管细颗粒在数目上占绝大多数,但是不能据此推论细颗粒在质量上也一定占主要地位。有文献^[7]指出,粒径变化10倍,质量变化1000倍。故粗颗粒所占质量百分比不能因其数目少而低估。

2.2 TSP 样品手动分析结果

表2列出了颗粒物的主要种类以及化学组成和形貌特点,并且对X射线能谱特征进行了简单描述。

表2 大气颗粒物种类及其特征

Table 2 Atmospheric particle classes and its characteristics

序号 No.	名称 name	化学组成特征和能谱特征 chemical and spectral features	形貌特征 morphology
1	土壤扬尘 soil dust	硅铝酸盐, 硅、铝特征峰,计数高	无定形
2	燃煤飞灰 fly ash	硅铝酸盐, 硅、铝特征峰,计数高	球形
3	富钙颗粒 Ca- rich	含钙高,钙特征峰, 计数高	无定形
4	富硫颗粒 S- rich	含硫高,硫特征峰, 计数高	无定形
5	碳质颗粒 carbonaceous	大于钠原子序数元素未 检出,无特征峰,计数低	无定形
6	富钾颗粒 K- rich	含钾高,钾峰明显	无定形
7	富铁颗粒 Fe- rich	含铁高,铁峰明显	无定形
8	富锌颗粒 Zn- rich	含锌高,锌峰明显	无定形
9	富钛颗粒 Ti- rich	含钛高,钛峰明显	无定形

原子序号低于钠的元素都具有同碳质颗粒相似的能谱特征,但能以颗粒物形式存在的种类并不多见。除碳质颗粒外, NH_4NO_3 颗粒也是较常见的由轻元素组成的颗粒物,但这种颗粒物在高速电子的轰击下很快分解。本文所认定的碳质颗粒是经得起电子轰击的颗粒物。

对6个国控站点TSP样品的476个颗粒物进行测量,包括粒径测量、颗粒物形貌描述、化学元素组成分析。然后根据颗粒物的化学成分进行分类,结果列于表3。

从表3所列结果可以看出,颗粒物中主要的种类有4种,即土壤扬尘、燃煤飞灰、钙质颗粒和碳质颗粒,其数目百分比都超过了10%。

土壤扬尘和燃煤飞灰都是硅铝酸盐类颗粒物,由于化学组成相似,用一般的化学分析方法很难区

别,用手动测量时依据颗粒物的形貌可以区分。土壤扬尘的外形一般是无定形的,而燃煤飞灰是经过高温燃烧过程形成球形颗粒物。从结果中可以看出,这6个站点的硅铝酸盐颗粒物中,土壤扬尘的数目都大于燃煤飞灰。土壤扬尘颗粒的直径均值也大于燃煤飞灰。

从数目上看,碳质颗粒物是仅次于硅铝酸盐的颗粒物,说明这种颗粒的污染是普遍存在的,不容忽视。富钙颗粒也具有普遍性,且占较大比例。富硫颗粒和富铁颗粒数目所占百分比在5%~10%,也不应忽视。

表3 手动分析6个国控站点TSP样品结果汇总表

Table 3 Summary of SEM manual measurements for

TSP samples at 6 sites in Guangzhou

颗粒物类别 cluster	n/个						Σ
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	
土壤扬尘 soil dust	33	32	22	14	23	18	142
燃煤飞灰 fly ash	10	21	14	6	4	6	61
富钙颗粒 Ca- rich	6	10	8	14	9	12	59
碳质颗粒 carbonaceous	33	7	22	27	28	27	144
富硫颗粒 S- rich	3	4	4		9	4	24
富铁颗粒 Fe- rich	3	6	4	7	2	9	31
富钛颗粒 Ti- rich	1		1	2	1		5
富锌颗粒 Zn- rich			1	3		1	5
富钾颗粒 K- rich	1			2			3
富铬颗粒 Cr- rich		1					1
富铝颗粒 Al- rich		1					1
Σ	90	82	76	75	76	77	476

2.3 PM10 样品自动化分析和聚类分析结果

PM10样品的测量工作,有双模态和粗颗粒两个实验模式,共分析颗粒物4928个。每一类颗粒物以占所分析颗粒物总数的百分比列于表4和表5中。对照表4和表5的结果,按颗粒物种类进行讨论:

① 硅铝酸盐颗粒是大气颗粒物污染的最主要种类。这一点在粗颗粒结果(表5)中更加显著。6个样品的结果中硅铝酸盐所占百分比都是最高,其中1#站、2#站、5#站的百分比都达到了60%

以上,最低的6#站也超过了40%。这反映出硅铝酸盐矿物颗粒的粒径分布特征,主要以粗颗粒存在。

表4 双模态分析广州大气颗粒物PM₁₀样品结果^①

颗粒物类别 particle class	Table 4 Particle number abundance summary for particle classes %					
	GZ1	GZ2	GZ3	GZ4	GZ5	GZ6
硅铝酸盐 aluminosilicates	34.4	56.2	31.0	42.6	61.1	4.4
富硫颗粒 S- rich	57.3	18.7	31.5	12.4	26.1	34.5
碳质颗粒 carbonaceous	0.7	4.6	2.6	9.9	0.5	29.3
富铁颗粒 Fe- rich	7.6	11.2	7.4	10.4	7.3	8.9
富锌颗粒 Zn- rich						
富氯颗粒 Cl- rich			5.1	7.1		2.4
富钙颗粒 Ca- rich		5.1	14.2	3.4	3.8	2.3
其他 others		4.2	8.3	14.2	1.1	18.2

① 粒径 0.1~10 μm。

表5 粗颗粒分析广州大气颗粒物PM₁₀样品结果^①

颗粒物类别 particle class	Table 5 Particle number abundance summary for particle classes %					
	GZ1	GZ2	GZ3	GZ4	GZ5	GZ6
硅铝酸盐 aluminosilicates	67.5	87.0	57.7	55.0	64.5	41.9
富硫颗粒 S- rich	19.4	5.8	11.4	4.4	26.0	16.9
碳质颗粒 carbonaceous	1.6		3.4	0.6	0.5	0.5
富铁颗粒 Fe- rich	7.1	3.9	7.4	16.7	4.5	10.6
富锌颗粒 Zn- rich				7.2		
富氯颗粒 Cl- rich			4.7	0.6		4.5
富钙颗粒 Ca- rich		3.2	12.1	12.2		13.1
其他 others	4.4		3.4	3.4	4.5	10.2

① 粒径 0.75~10 μm。

双模态分析结果(表4)集中反映了细颗粒的情况,其中硅铝酸盐颗粒所占百分比比粗颗粒结果有一定的降低,但大部分在30%~60%,依然是主要颗粒种类。3#站结果中,硅铝酸盐颗粒占

31%,与含硫颗粒持平。6#站结果中硅铝酸盐颗粒所占百分比最低,仅为4.4%。这种情况与这个站点良好植被覆盖的环境有关。这个事实对今后扬尘污染的治理应该有启发。

② 含硫颗粒与碳质颗粒。实验结果表明,含硫颗粒一般粒径都较小,属于细颗粒,化学组成以S-K S-Zn为主,根据文献[4,8],这些颗粒物来源于生物质燃烧。含硫颗粒中的S-Ca颗粒粒径较大,可能是碳酸盐颗粒酸化的产物。总体来看,含硫颗粒的数目仅次于硅铝酸盐。在双模态分析结果中,1# 3# 6#站点的含硫颗粒为首要颗粒物种类。最低的是4#站样品,为12.4%。碳质颗粒较为突出的6#站样品,约占29.3%。这可能与周围良好植被环境有关。

粗颗粒中含硫颗粒与碳质颗粒的数目百分比大大降低,且以K-S Zn-S为代表的生物质燃烧排放颗粒大大减少,S-Ca颗粒的比例增加。含硫颗粒最高的站点为5#站样品,占26%,最低的站点是4#站样品,仅占4.4%,并且均为S-Ca,未发现其他含硫颗粒。粗颗粒中碳质颗粒检出占很低比例,最大仅为3.4%。说明碳质颗粒物主要存在于细颗粒中。必须指出,在自动化分析过程中碳质颗粒由于背散射电子信号弱,一般都忽略了,这导致碳质颗粒的数目大大低于手动分析的结果。

③ 富铁颗粒在各个样品中均有检出,表明这种颗粒在这一地区的大气中有普遍性。在双模态分析结果中,2# 4# 6#站样品富铁颗粒所占比例较高,为11.2%、10.4%和8.9%。在粗颗粒分析结果中,4# 6#站样品比较突出,分别占16.7%和10.6%。这表现出2#站与4# 6#站的富铁颗粒有不同的粒径分布特征。

④ 富钙颗粒在多数样品中都有检出。双模态分析结果中,3#站样品含量较高,为14.2%。粗颗粒分析结果中,3# 4# 6#站这几个样品中富钙颗粒百分比在10%~15%。综合双模态和粗颗粒两个实验的结果,富钙颗粒在3#站是双模态分布,4# 6#站则集中于粗颗粒中。

⑤ 在实验中还有富锌、富氯、富锰、富钛等颗粒检出,但大都数量很少。值得指出4#站样品粗颗粒结果中有7.2%的富锌颗粒检出,应对其来源做进一步研究。综合表4和表5的结果可见,3#、4# 6#站样品中有5.0%左右的富氯颗粒检出。富氯颗粒大体上可分为两类,一类为含氯和钠两种

主要元素成分,因为广州是近海城市,一般认为是海盐颗粒。其中有一部分海盐颗粒程度不同的有硫元素检出,这是海盐颗粒老化的结果。另一类富氯颗粒结果中不含钠元素,并且其他元素的谱峰也很低,这些颗粒可能是氯化铵^[4]。

从上述讨论可见各站点结果有共性,但是其中一些站点由于所处周边环境不同,在分析结果上表现出特点。3# 站点富钙颗粒比较高,在双模态结果中占 14.2%,在粗颗粒中占 12.1%。4# 站结果中,富铁、富锌、富氯和其他颗粒占较大比例,在双模态结果中共占 35%,在粗颗粒中占 40%。6# 站周围有很好的绿色植被,分析结果显示碳质颗粒占相当大比例,在双模态结果中占 29.3%,为 6 个站点中最高;而硅铝酸盐在双模态中仅占 4.4%,在粗颗粒中为 41.9%,也是各站点中最低的。

2.4 自动分析结果与手动分析结果对比讨论

表 6 列出手动分析硅铝酸盐颗粒物污染情况。图 2 为手动分析 TSP 结果与自动分析 PM10 粗颗粒结果中硅铝酸盐检出比例状况示意图。

表 6 硅铝酸盐颗粒在手动分析中的检出情况

Table 6 Statistics of aluminosilicate particles observed by SEM

项 目 item	n/个					
	1#	2#	3#	4#	5#	6#
土壤扬尘 soil dust	33	32	22	14	23	18
燃煤飞灰 fly ash	10	21	14	6	4	6
合 计	43	53	36	20	27	24
被测颗粒物总数	90	82	76	75	76	77
占总分析颗粒比例(%)	47.8	64.6	47.4	26.7	35.5	31.2

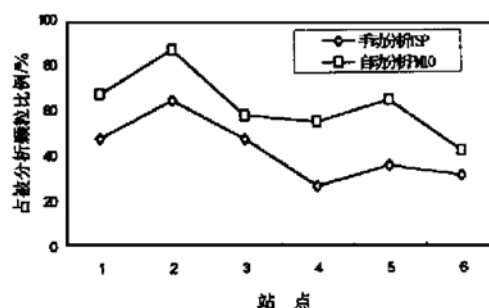


图 2 手动分析 TSP 与自动分析 PM10 硅铝酸盐颗粒比较

Fig. 2 Comparison of particle number abundance(%) of aluminosilicate particles found in both manual and automated SEM analyses

从图 2 可以看出,由于碳质颗粒物在自动测量时大部分被忽略,自动分析结果中硅铝酸盐所占比例总是高于手动分析结果。但两种分析结果中硅铝酸盐颗粒检出率最高的站点均是 1#、2# 站,最低的都是 4#、6# 站,总的趋势是基本符合的。

从手动分析结果(表 3)可以看出,钙质颗粒比例较高的是 4#、6# 站点。自动分析结果(表 4、表 5)中同样显示 4#、6# 站含钙质颗粒比例较高,另外,3# 站点检出率也较高。

手动分析中,富硫颗粒比例较高的为 5# 站,最低的是 4# 站。粗颗粒的自动分析结果同样显示 5# 站含硫颗粒检出最多,4# 站最低。双模态分析结果所反映的细颗粒情况是,1#、3#、6# 站点含硫颗粒比例较高,4# 站同样是最低。

富铁颗粒在手动分析中,4#、6# 站较高。在自动分析中,粗颗粒结果同样显示 4#、6# 站的富铁颗粒检出率较高。双模态(主要是细颗粒)结果中富铁颗粒在 2#、4#、6# 站检出率较高。

3 结论

通过对实验结果的分析可以看出,应用扫描电镜技术对大气颗粒物来源进行识别,从形貌和化学组成两方面入手,相比较其他方法具有独到之处。采用手动分析测量和采用自动化测量得出的结果在总的趋势上是一致的。这两种测量方法又各有优势和特点:

① 手动分析测量的优势在于形貌观察。颗粒物的形貌特点一目了然,可以区分有特殊形貌的颗粒物,如圆球形燃煤飞灰与无定形土壤扬尘的区分;可以区分出有机颗粒物(在 X 荧光分析测量中不出特征峰)。其局限在于手动分析测量对于细小颗粒(粒径 $< 0.5 \mu\text{m}$)的分析很困难,工作效率低,分析的颗粒物数目较少,缺乏统计意义,具有较大的主观性,受到操作人员知识和经验的限制。

② 自动分析测量的优势在于工作效率高,可以做大量颗粒物的分析测量工作,所得结果具有较好的统计意义,可以分析细小的颗粒物,在颗粒物的选择上具有很好的客观性;其局限在于不能有效地区别各种外形特点的颗粒物,并且有相当大一部分碳质颗粒在分析过程中被忽略了。

采用两种测量相结合的方法对大气颗粒物的

来源进行分析,可以充分发挥各自的优势,得到更多、更准确的信息,从而得出较为准确而又有实际意义的结论。

4 参考文献

- [1] 叶汝求,王家贞,任宇征.应用扫描电镜研究沈阳地区气溶胶颗粒特征[J].环境化学.1987,6(2):1—7.
- [2] 叶汝求,李永泉,王家贞.扫描电镜—聚类分析研究广州地区气溶胶颗粒特征[J].环境化学.1992,11(6):14—20.
- [3] 刘咸德,贾红,齐建兵,等.青岛大气颗粒物的扫描电镜研究和污染源识别[J].环境科学研究.1994,7(3):10—17.
- [4] Liu X D, Espen P Van, Adams F, et al. Biomass Burning in Southern Africa: Individual Particle Characterization of Atmospheric Aerosols and Savanna Fire Samples [J]. *J Atmospheric Chemistry*. 2000, 36: 135—155.
- [5] Liu X D, Dong S P, Espen P Van, et al. Size and Chemical Characterization of Atmospheric Aerosol and Savanna Fire Samples in Southern Africa [J]. *J Aerosol Science*. 2000, 31(Suppl. 1): S186.
- [6] Bondarenko I, Treiger B, Van Grieken R, et al. IDAS: a Windows Based Software Package for Cluster Analysis [J]. *Spectrochim Acta*. 1996, B 51: 441—456.
- [7] David T Suess, Kimberly A Prather. Mass Spectrometry of Aerosols [J]. *Chemical Review*. 1999, 99: 3007—3035.
- [8] Maenhaut W, Salma I, Cafmeyer J, et al. Regional Atmospheric Aerosol Composition and Sources in the Eastern Transvaal, South Africa and Impact of Biomass Burning [J]. *J Geophys Res*. 1996, 101: 23631—23650.

Identification of Major Particle Classes in Guangzhou Aerosol by Scanning Electron Microscopy

DONG Shu-ping¹, LIU Tao², SUN Da-yong³, QI Hui¹, DUAN Feng-kui¹,
WU Qing-zhu³, LIU Xian-de¹, F. Adams⁴

(1. National Research Center for Environmental Analysis and Measurements, Beijing 100029, China;

2. Guangzhou Environmental Protection Agency, Guangzhou 510030, China;

3. Guangzhou Environmental Monitoring Center, Guangzhou 510030, China;

4. Department of Chemistry, University of Antwerp(UiA), B- 2610 Wilrijk, Belgium)

Abstract: Identification of major particle classes in Guangzhou aerosol was performed by using scanning electron microscopy(SEM). Results obtained in both manual mode and automatic mode are consistent with each other, even featured differently. Automatic mode is superior in fine particle analysis, such as various sulfur-containing particles. Manual mode is preferable in morphological observation and identifying coarse organic aerosols. It has been shown that urban aerosols come from a variety of sources. The control and remedy measures should be comprehensive in nature. Not only industrial point sources emissions such as coal combustion fly ash, calcium-containing particles, iron enriched particles, but also non-point sources emissions such as soil dust and carbonaceous particles, are important for emission abatement and control. Carbonaceous particles are generated by many sources, including industrial processes, combustion processes, vehicle exhaust, biomass burning and natural vegetation emissions.

Key words: atmospheric aerosol; scanning electron microscopy; identification; cluster analysis