

扫描电镜下煤矿区大气 PM₁₀ 微观形貌识别

宋晓焱^{1,2}, 魏思民¹, 邵龙义², 曹连海¹, 张璐¹

(1. 华北水利水电大学 资源与环境学院, 河南 郑州 450045; 2. 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)

摘要: 采集河南省煤矿区义马、平顶山、永城大气 PM₁₀ 样品, 使用场发射扫描电镜(FESEM)分析煤矿区 PM₁₀ 的微观形貌和来源. 质量浓度分析结果表明, 3个矿区夏季和冬季 PM₁₀ 的平均值在 100~241 μg/m³ 之间, 义马地区空气污染最严重. 微观形貌分析结果表明: 煤矿区大气 PM₁₀ 的类型可分为烟尘集合体、规则矿物颗粒、不规则矿物颗粒、球形颗粒及超细颗粒等几种类型, 均具有不同的来源. 颗粒物类型的多样性代表矿区污染的多源性和大气二次化学反应的复杂性. 其中, 烟尘集合体和规则矿物颗粒分别具有温室和制冷效应, 二者环境效应具有相互制约的特点. 有包壳的飞灰和空心飞灰是煤矿区特有的, 其成因主要与燃煤作用有关. 同一采样点不同季节 PM₁₀ 中不同颗粒数量百分比的变化不仅受冬夏两季燃煤量不同的影响, 还受大气湿度、温度、风速等气象因素的影响; 而不同采样点同一季节 PM₁₀ 中不同颗粒数量百分比不仅与气象因素有关, 也受采样点附近主要污染源的影响.

关键词: PM₁₀; 单颗粒; 微观形貌; 煤矿区城市

中图分类号: X513

文献标识码: A

文章编号: 1672-9102(2013)04-0118-05

大气颗粒物污染源的复杂性使得单颗粒物分析成为研究颗粒物的重要手段, 它可以提供颗粒物的粒度分布、大小、来源、成分及化学变化等信息^[1]. 电子显微镜是表征单颗粒的理想工具, 与 X 射线能谱结合, 电子显微镜可以同时提供颗粒物的形貌、化学成分和粒度分布等信息^[2], 这些信息可作为判断大气颗粒物来源的证据之一, 从而为制定相应的污染防治措施提供理论依据.

煤矿区城市作为我国能源的重要提供基地, 以重工业、重污染而特色鲜明, 由煤炭工业产生的颗粒物(PM)污染已成为矿区城市大气污染的主要来源^[3], 这些高浓度的颗粒物严重影响人体健康. 目前国内对 PM₁₀ 微观形貌特征的研究主要集中在北京、上海等大城市^[4-5], 对煤矿区城市的研究较少. 由于煤矿区城市的煤矿、燃煤电厂和煤化工企业居多, SO₂ 和 NO_x 排放量随之增多, 会导致空气中可吸入颗粒物类型的多样性. 本次实验采集河南省煤矿区代表城市义马、平顶山、永城夏季和冬季颗粒物样

品, 分析矿区颗粒物的质量浓度、微观形貌及组成, 以期为颗粒物的来源解析和健康效应评价提供基础资料.

1 采样与分析方法

1.1 样品采集

分别于 2008 年夏季(6月)与 2008 年冬季(12月)在河南省煤矿区城市义马、平顶山、永城采集大气 PM₁₀. 义马采样点位于跃进矿招待所 3 层楼顶, 平顶山采样点位于二矿招待所 6 层楼顶, 永城采样点位于城郊矿 5 层楼顶, 周围污染源主要为煤炭、煤矸石、粉煤灰堆放场和燃煤电厂. 采用青岛崂山生产的 TSP-PM₁₀ 中流量(100 L/min)采样仪监测 PM₁₀ 质量浓度, 滤膜为直径 90 mm 的玻璃纤维滤膜; 采用美国 Air Metrics 公司生产的 Minivol PM_{2.5}/PM₁₀ 便携式采样仪(5 L/min)采集 PM₁₀, 用来识别微观形貌, 滤膜为直径 47 mm 的聚碳酸酯滤膜. 根据实验需要和采样点的空气污染情况, 采样时间为 2~

收稿日期: 2013-07-29

基金项目: 国家自然科学基金(41105119); 华北水利水电大学高层次人才科研启动基金(201072)

通信作者: 宋晓焱(1981-), 女, 河南焦作人, 博士, 讲师, 主要从事气溶胶物化特征及健康效应研究. E-mail: songxy20009@163.com

6 h.

1.2 样品制备和电镜观察

使用 JSM-6,700F 型场发射扫描电镜获得颗粒物的二次电子图像. 其具体步骤如下: 剪下滤膜中间颗粒物分布比较均匀的 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 一小块, 用镊子贴到导电胶表面上. 为了使可吸入颗粒物导电, 粘贴完之后, 把样品放入喷罐中喷金, 先抽真空 120 s 左右, 达到要求后在颗粒物表面喷金约 20 nm 厚, 从而获得颗粒物的 FESEM 像. 采用 MV2000 显微数字分析工作站的标准版进行图像处理和图像分析. 图像分析的具体步骤为: 打开软件, 调入要分析的 FESEM 图像; 进入测量菜单→坐标设定→重新确定比例尺; 进入测量菜单→测量交互→分别对各类型颗粒进行周长测量、面积测量; 将统计结果导入 EXCEL 表格, 如此循环, 直到处理完一个样品的所有 FESEM 图像; 对不同类别的颗粒物重复以上步骤.

2 结果与讨论

2.1 PM_{10} 质量浓度变化特征

从质量浓度的监测结果可知, 夏季(2008.5~6月)义马、平顶山和永城颗粒物质量浓度平均值分别为 $241\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, $186\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $100\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, 义马 > 平顶山 > 永城. 义马和平顶山夏季颗粒物的质量浓度平均值均大于国家二级标准 $150\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, 说明煤矿区城市夏季整体污染严重. 由于河南省雨季主要集中在夏季, 在采样过程中 3 个地区均有下雨情况. 其中永城夏季雨水最多, 雨水降低空气中的污染物浓度, 使得永城夏季颗粒物质量浓度最低. 冬季(2008年12月)义马、平顶山和永城颗粒物质量浓度平均值分别为 $233\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, $184\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $167\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, 义马 > 平顶山 > 永城, 3 个煤矿区城市监测的冬季颗粒物质量浓度平均值均大于国家二级标准 $150\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, 说明煤矿区城市冬季污染仍然很严重.

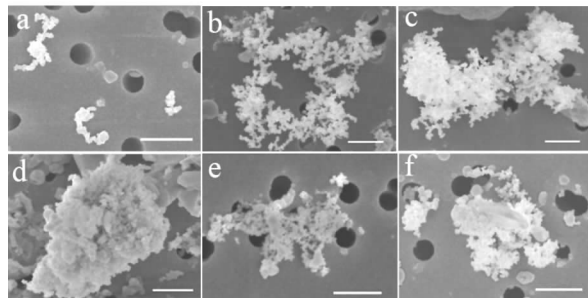
3 个煤矿区城市夏季和冬季颗粒物质量浓度都是义马最大、平顶山次之、永城最小. 义马采样点设在跃进矿, 采样点周围煤矿较多, 而且电厂设在煤矿区内, 使得空气污染严重. 平顶山采样点设在二矿招待所, 周围为市民生活区和二矿, 其余煤矿和电厂距离采样点较远, 所以污染小于义马. 永城由于濒临淮河, 雨水较多, 而且多为无烟煤, 煤质较好, 使得空气污染最小. 夏季与冬季相比, 义马和平顶山矿区颗粒物质量浓度相差不大, 永城夏季污染没有冬季严重, 可能与永城夏季雨水较多有关.

2.2 FESEM 下颗粒物的形貌特征

1) 烟尘集合体(soot aggregates)

烟尘集合体是大气颗粒物研究的重点之一, 燃煤和机动车尾气是烟尘集合体的主要来源. 烟尘集

合体是在高温下 ($>600\text{ }^\circ\text{C}$) 燃料燃烧过程中生成的由很小的球体组成的串珠状聚合物, 通常是由 C 的小分子浓缩聚合形成. 在高分辨率扫描电镜和高放大倍数下可观察到烟尘集合体的形态呈球形和椭圆形, 粒度为 $50\sim 100\text{ nm}$ ^[6]. 河南省煤矿区的烟尘集合体主要有以下几种类型: 链状(图 1a 和 1b)、蓬松状(图 1c)、密实状(图 1d)、吸湿后的烟尘集合体(图 1e)和与盐类矿物混合的烟尘集合体(图 1f). 链状烟尘集合体既可能来自机动车尾气, 也可能来自燃煤, 蓬松状和密集状的烟尘集合体主要为汽车尾气排放^[7]. 烟尘集合体具有温室效应, 与 CO_2 等温室气体的环境效应类似, 通常导致局地或区域性气温升高, 称为“greenhouse particles”^[8].



(a) 单个链状烟尘集合体; (b) 多个链状烟尘集合体; (c) “蓬松状”的烟尘集合体; (d) 密集的烟尘集合体; (e) 吸湿后的烟尘集合体; (f) 与盐类矿物混合的烟尘集合体; (比例尺 $1\ \mu\text{m}$)

图 1 烟尘集合体的 FESEM 显微形貌

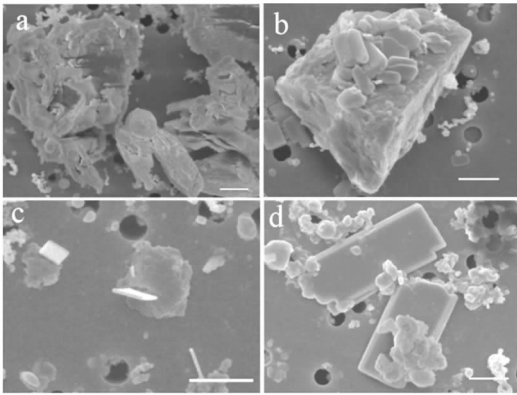
Fig. 1 FESEM images of soot aggregates

2) 矿物颗粒(mineral particles)

矿物颗粒是煤矿区城市大气颗粒物的最主要组分之一. 大气中矿物颗粒的主要来源有: 扬尘和二次大气化学反应产物. 扬尘包括土壤扬尘、道路扬尘和粉煤灰、煤矸石、煤堆场裸露堆放产生的扬尘, 一般具有不规则的形态, 常见的不规则矿物有黏土矿物(图 2a)和石英(图 2b); 二次大气化学反应形成的矿物颗粒种类最多, 一般具有规则形态, 其形状有针状、柱状、长条状、簇状和片状等^[9], 常见的有石膏(图 2c)、硫酸钾(图 2d), 硫酸钾为义马和永城夏季秸秆焚烧时生成的规则颗粒.

从几百张颗粒物的微观形貌图片上看, 煤矿区城市 and 北京、兰州等相比的一个很大特点是矿物颗粒物多, 粒径大, 占的面积大. 一般情况下, 空气中的矿物多为不规则矿物, 而在空气污染严重, 风速较小, 气流平稳, 空气湿度较大的条件下, 空气中会有大量规则矿物出现, 由煤矿区周围电厂排放的大量 SO_2 和 NO_x 与碱性矿物发生反应形成. 根据规则矿物形貌特征, 并结合它的成分可以很好研究大气二次反应的机理, 这类规则矿物多为硫酸盐和硝酸盐类矿物. 盐类矿物的环境效应与烟尘集合体相反, 具

有制冷的效果,导致区域或局部气温降低.但是,盐类矿物可被烟尘集合体吸附,形成混合颗粒,这种混合颗粒主要体现烟尘集合体的环境效应,即温室效应^[10].由此可见,烟尘集合体和二次反应形成的盐类矿物的环境效应具有相互制约的特点.河南省煤矿区常见链状烟尘集合体和混合盐类矿物的烟尘集合体,这可能导致该区温室效应比较明显.另外,盐类矿物具有吸湿性,上升到高空可形成云的凝结核,对局部气候产生影响.



(a) 黏土; (b) 石英; (c) 石膏; (d) 硫酸钾; (比例尺 1 μm)

图2 不规则矿物颗粒的 FESEM 显微形貌

Fig. 2 FESEM images of irregular mineral particles

3) 球形颗粒(spherical particle)

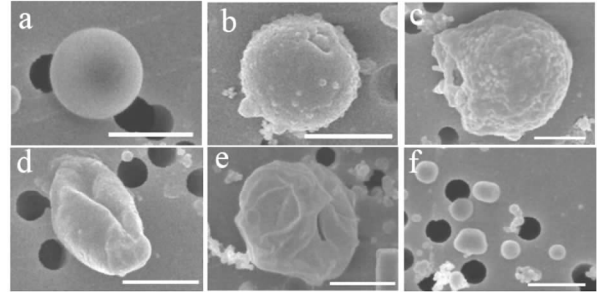
球形颗粒包括燃煤飞灰和二次生成粒子 2 种.

燃煤飞灰主要来源于燃煤和工厂排放,一般情况下飞灰颗粒主要呈球形,EDX 分析表明其主要成分是 Si 和 Al,并含有少量的 Ca, K 等元素,有时其成分全部为 C^[11]. 飞灰颗粒的等效球直径大部分在 2 μm 以下.

煤矿区的燃煤飞灰主要有以下 5 种类型:第一类为浑圆球形,表面非常光滑,未被其它颗粒物覆盖(图 3a),其粒度可能从几百纳米到几微米不等.第二类是表面被超细颗粒物覆盖的飞灰,其形成机理可能是在大量燃煤飞灰和超细颗粒物的烟尘中,由于燃煤飞灰的自吸附作用吸附了部分超细颗粒物;也可能是飞灰在淬火过程中,颗粒内部或表面形成晶相物质^[12](图 3b);第三类是有厚壳覆盖的飞灰,可能是飞灰在空气中长时间漂浮和其它物质反应生成(图 3c),这可能与煤矿区城市燃煤过程中大量的 SO₂ 和 NO_x 释放有关.第四类的燃煤飞灰呈局部内陷、表面不规则等形态(图 3d).第五类飞灰是空心燃煤飞灰(图 3e),其内部为完全空心,扫描电镜下观察表面多呈光滑的单个空心球体,偶见单体相连的复体,球体的大小及壁的厚薄不一致,这可能是燃煤过程中产生的细小的 Si-Al 质陶粒,是煤矿区城市特有的颗粒物.其中有包壳的飞灰和空心飞灰在

其它地区未见报道,是煤矿区特有的,主要与燃煤作用有关,由此可见燃煤地区飞灰形貌的多样性.

二次球形颗粒外形与飞灰相似(图 3f),TEM 分析表明相当一部分椭圆形颗粒来源于空气中二次反应生成的硝酸盐和硫酸盐颗粒^[13],其粒径多在 1 μm 以下.在透射电镜的强电子束作用下,硝酸盐分解,留下硫酸盐的残留痕迹,其能谱图上表现为高的 S 峰.



(a) 表面平滑的燃煤飞灰; (b) 表面被超细颗粒物覆盖的燃煤飞灰; (c) 有包壳的燃煤飞灰; (d) 表面凹坑的燃煤飞灰; (e) 有孔的燃煤飞灰,比表面积极大; (f) 二次球形粒子; (比例尺 1 μm)

图3 球形颗粒的 FESEM 显微形貌

Fig. 3 FESEM images of spherical particles

4) 超细颗粒

有一些颗粒物(图 4a 和 4b),它们的粒径小于 100 nm,即使在放大 10 000 倍的 FESEM 下,其微观形貌特征也难以辨认,本文将它们定为超细颗粒物.超细颗粒在大气中的数量大,能够被人类呼吸到肺泡中,直接进入血液循环.这些细小的颗粒中还含有高浓度的多环芳烃(PAH) 和诱变剂,是潜在的过敏源的携带者,因此超细颗粒对人体健康的危害更大^[14].这些超细颗粒多为二次大气化学反应生成的高温易挥发的硝酸盐和铵盐^[13].

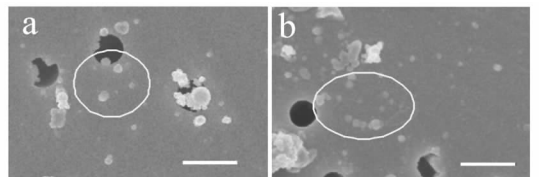


图4 超细颗粒的 FESEM 显微形貌 (比例尺 1 μm)

Fig. 4 FESEM images of ultrafine particles (scale bar 1 μm)

5) 其它颗粒(others particles)

在煤矿区城市发现一些特殊类型的颗粒物,其中图 5a、图 5d 为平顶山二矿夏季夜间 2 h 样品,从微观形貌上可能是与煤炭有关的颗粒物;图 5b 为永城城郊矿夏季采样时遇到焚烧麦秸秆天气,此长条状颗粒物为纤维;图 5c 为平顶山冬季二矿采样时样品,可能为矿物颗粒.

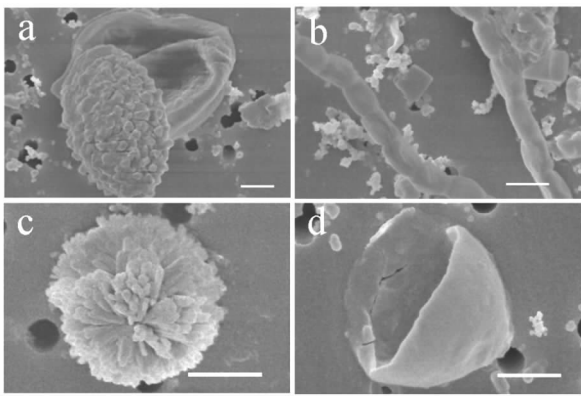


图5 其它颗粒的FESEM显微形貌(比例尺1 μm)
Fig.5 FESEM images of unknown particles in coal mine cities aerosol (scale bar 1 μm)

2.3 煤矿区城市不同季节PM₁₀的来源分析

场发射扫描电镜下观察煤矿区城市PM₁₀的微观形貌,其类型主要有烟尘集合体、燃煤飞灰、球形颗粒、规则矿物、不规则矿物和超细颗粒等,由于超细颗粒的粒径<0.1 μm ,画图时不易识别,容易造成较大偏差,所以此次分析没有统计超细颗粒物的数量.不同地点不同季节采集颗粒物的组成及形态有很大差异,选择能代表煤矿区普通天气条件下颗粒物的微观形貌图片,共分析义马、平顶山、永城夏季颗粒物977,475,1594个,冬季颗粒物2080,1959,1478个.按照其形貌进行分类,利用画图软件做出各类型颗粒数量百分比(图6a、6b).

义马和永城地区:冬季不规则矿物的数量百分比比夏季明显增多,义马从26.8%增加到47.8%,永城从17.3%增加到37.7%.不规则矿物冬季百分比增多与冬季风速大有关,来源于地表的煤矸石、粉煤灰、煤尘等被风吹起,成为PM₁₀的主要来源.冬季球形颗粒和规则矿物颗粒的数量百分比略有增多,这可能与冬季燃煤量加大有关,即燃煤导致空气中SO₂和NO_x的排放量增大,使得空气中二次反应生成的球形颗粒和规则矿物颗粒数量增多.但是,冬季烟尘集合体数量明显减少,可能与冬季该地区风速大有关.

平顶山地区:规则矿物颗粒冬夏两季变化不明显(7.1%~9%),燃煤量的加大并未导致更多的规则矿物生成,这说明二次反应生成矿物颗粒增多不仅与空气中污染气体的排放量有关,而且与大气湿度、温度和风速有很大关系;不规则矿物颗粒数量变化不太明显(31%~31.7%),冬季烟尘集合体数量明显的增加(27.1%~39.2%),这些可能与采样期间平顶山较低的风速和燃煤量增加有关.

夏季3个矿区相比,平顶山地区球形颗粒(30.9%)和规则矿物颗粒(8.9%)数量最多,说明平顶山夏季二次大气化学反应剧烈,生成的规则矿

物和二次球形颗粒较多.永城烟尘集合体的数量最多(49.9%),可能与永城采样点距离公路较近,受汽车尾气排放的影响有关.

冬季3个矿区相比,永城地区球形颗粒(30.0%)和规则矿物颗粒(10.9%)数量最多,说明永城冬季二次大气化学反应剧烈,可能与较高的空气湿度有关.平顶山烟尘集合体数量最多(39.5%),而不规则矿物数量最少(6.1%),可能与燃煤量加大以及采样期间较低的风速有关.

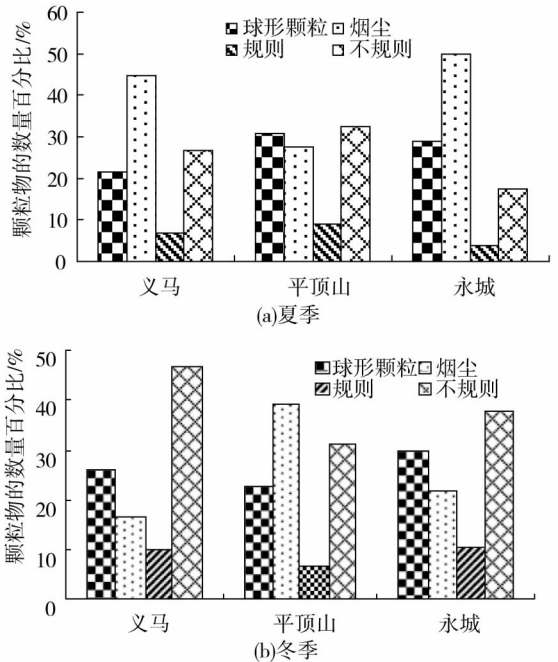


图6 煤矿区城市夏季和冬季PM₁₀颗粒物类型数量百分比

Fig.6 Percentage of different types of particles in summer and winter PM₁₀ collected in coal mine cities

3 结论

1)对河南省煤矿区城市平顶山、义马、永城的监测数据结果表明,煤矿区城市污染严重,冬季和夏季煤矿区城市的颗粒物浓度平均值大于国家空气质量2级标准(150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$),各矿区污染程度为义马>平顶山>永城.

2)FESEM研究结果表明,煤矿区城市PM₁₀中颗粒物的类型有烟尘集合体、不规则矿物、规则矿物、球形颗粒、超细颗粒以及其它颗粒等.烟尘集合体来源于汽车尾气和燃煤;不规则矿物来源于地表扬尘;规则矿物以盐类矿物为主,来源于大气二次反应;球形颗粒来源于燃煤飞灰和大气二次化学反应生成物;烟尘集合体和盐类矿物分别具有温室和制冷效应,二者环境效应具有相互制约的特点.

3)同一采样点不同季节相比,PM₁₀中不同颗粒数量百分比的变化不仅受冬夏两季燃煤量不同的影响,还受大气湿度、温度、风速等气象因素的影响.

4)不同采样点同一季节相比,PM₁₀中不同颗粒数量百分比不仅与气象因素有关,也受采样点附近主要污染源的影响。

参考文献:

- [1] Ma C J, Kasahara M, Hiller R, et al. Characteristics of single particles sampled in Japan during the Asian dust - storm period[J]. *Atmospheric Environment*, 2001(35):2707-2714.
- [2] McMurry P H. A review of atmospheric aerosol measurements[J]. *Atmospheric Environment*, 2000(34):1959-1999.
- [3] 易红宏,郝吉明,段雷,等.电厂除尘设施对PM₁₀排放特性的影响[J]. *环境科学*, 2006,27(10):1921-1927.
- Yi H H, Hao J M, Duan L, et al. Influence of dust catchers on PM₁₀ emission characteristics of power plants[J]. *Environmental Science*, 2006,27(10):1921-1927.
- [4] 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.
- Lv S L, Shao L Y, Tim J, et al. Microscopy and size distribution of mineral particles in Beijing PM₁₀ [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005,25(7):863-869.
- [5] 杨书申,邵龙义,李卫军,等.上海市冬季可吸入颗粒物微观形貌和粒度分布[J]. *环境科学*, 2007,28(1):20-25.
- Yang S S, Shao L Y, Li W J, et al. Morphology and size distribution of inhalable particulates in Shanghai during winter [J]. *Environmental Science*, 2007,28(1):20-25.
- [6] Wentzel M H, Gorzawski K H, Naum H, et al. Transmission electron microscopical and aerosol dynamical characterization of soot aerosols[J]. *Aerosol Science*, 2003(34):1347-1370.
- [7] Whittaker A, Bérubé K A, Jones T P, et al. Killer smog of London, 50 years on: particle properties and oxidative capacity[J]. *Science of the Total Environment*, 2004,334-335(1):435-445.
- [8] Irene R, Salvador G. Atmospheric inorganic aerosol of a non - industrial city in the centre of an industrial region of the North of Spain, and its possible influence on the climate on a regional scale [J]. *Environmental Geology*, 2009(56):1551-1561.
- [9] 戈定夷,田慧新,曾若谷.矿物学简明教程[M].北京:地质出版社,1998.
- Ge D Y, Tian H X, Zeng R G. A Short Course on mineralogy[M]. Beijing:Geological House,1998.
- [10] Satsangi P G, Yadav S. Characterization of PM_{2.5} by X - ray diffraction and scanning electron microscopy - energy dispersive spectrometer: its relation with different pollution sources [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2013, DOI 10. 1007/s13762-012-173-0.
- [11] Shi Z B, Shao L Y, Jones T P, et al. Characterization of airborne individual particles collected in an urban site, a satellite city and a clean air site in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2001(37):4097-4108.
- [12] 陈江峰. 准格尔电厂高铝粉煤灰特性及其合成莫来石的实验研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2005.
- Chen J F. Experimental research on character and preparation of porzite of high - alumina fly ash in Zhunger power station [D]. Beijing : China Mining and Technology University (Beijing) ,2005.
- [13] Li W J, Shao L Y. Observation of nitrate coatings on atmospheric mineral dust particles [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009(9):1-9.
- [14] 刘阳生,陈睿,沈兴安,等.北京冬季室内空气中TSP, PM₁₀, PM_{2.5}和PM₁污染研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2003, 11(3):255-264.
- Liu Y S, Chen R, Shen X X, et al. Wintertime indoor air levels of TSP, PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ at residential homes in Beijing [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2003, 11(3):255-264.

Micro - morphology of PM₁₀ collected in coal - mine cities under FESEM

SONG Xiao - yan^{1,2}, WEI Si - min¹, SHAO Long - yi², CAO Lian - hai¹, ZHANG Lu¹

(1. Institute of Resources & Environment, North China University of Water and Electric Power, Zhengzhou 450045, China;

2. College of Geoscience and Surveying Engineering, State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: PM₁₀ samples were collected in Yima, Pingdingshan and Yongcheng in summer and winter of 2,008, using the Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) to analyze the PM₁₀ micro - morphology and origins. The PM₁₀ average concentration in the three coal mine cities was 100 ~ 241 μg/m³ during summer and winter. Yima was the dirtiest city. The analysis of PM₁₀ micro - morphology by FESEM revealed the PM₁₀ samples to be comprised of soot aggregates, regular and irregular mineral particles, coal fly ashes, spherical particles (coal fly ashes and secondary particles), ultrafine particles and some other unresolved particles, which had different origins. The diversity of PM₁₀ type represent the complicity of pollution sources in coal mine cities and the second atmospheric chemical reactions. Soot aggregates and regular minerals had greenhouse and icehouse effect respectively, which environment effect had mutually-restrained characteristic. Coated and hollow fly ashes were unique in coal mine cities and mainly come from coal burning. The number percentage change of different types of particles in PM₁₀ in the same sampling sites in different seasons was affected by different amounts of coal - burning in winter and summer, as well as by atmospheric humidity, wind speed, temperature and other meteorological factors, while the percentage number of different types particles in PM₁₀ of different sampling sites in the same season was not only related with meteorological factors but also with the main pollutant sources near the sampling sites.

Key words: PM₁₀; individual particle; micro - morphology; coal mine cities