

# 中国中东部高山和城市夏季大气气溶胶浓度及粒径分布

戴文婷<sup>1,2</sup>, 李建军<sup>1</sup>, 成春雷<sup>1</sup>, 何建辉<sup>1</sup>, 曹军骥<sup>1</sup>, 王格慧<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 为了更好了解中国中东部地区高山及城市大气气溶胶变化特征与规律, 于2009年夏季在华山、泰山、上海开展了大气气溶胶浓度与粒径分布观测实验。结果表明: 高山点气溶胶浓度水平明显低于城市点, 并且影响因素不相同。华山和泰山 TSP 浓度分别为  $(52 \pm 21) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $(80 \pm 42) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $\text{PM}_{10}$  浓度为  $(43 \pm 18) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $(65 \pm 35) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ; 而上海  $\text{PM}_{10}$  为  $(72 \pm 27) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。结合后向轨迹及 API 数据分析可知, 我国东北部气团污染最严重, 而西北部受沙尘影响气溶胶浓度高于南部。华山、泰山大气颗粒物主要为细模态 ( $< 2.1 \mu\text{m}$ ), 占  $\text{PM}_{10}$  的 65%~70%, 最高值均在  $0.7 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 。上海市金山及浦东区粗/细粒子比分别为 1.80 和 1.92, 说明上海市受地区道路扬尘及海盐的影响显著。

**关键词:** 高山; 气溶胶; 浓度; 粒径分布

中图分类号: X131.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-9901(2011)01-0263-09

## Concentrations and size distributions of summertime atmospheric aerosols at urban and alpine sites in east and central China

DAI Wen-ting<sup>1,2</sup>, LI Jian-jun<sup>1</sup>, CHENG Chun-lei<sup>1</sup>, HE Jian-hui<sup>1</sup>, CAO Jun-ji<sup>1</sup>, WANG Ge-hui<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** To investigate the characteristics of mountain and urban aerosols in central and eastern China, TSP,  $\text{PM}_{10}$  and size-segregated samples were collected during 2009 summer in Mt. Hua, Mt. Tai and Shanghai. Concentrations of aerosols at Mt. Hua and Mt. Tai were lower than those in the urban area. TSP at Mt. Hua and Mt. Tai were  $(52 \pm 21) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  and  $(80 \pm 42) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , while  $\text{PM}_{10}$  were  $(43 \pm 18) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  and  $(65 \pm 35) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , respectively.  $\text{PM}_{10}$  in Shanghai was  $(72 \pm 27) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ . Based on the combined analyses of back-trajectories and API data, air masses from northeastern China were most seriously polluted, while air masses from northwestern China were more influenced by soil dust. Aerosols over Mt. Hua and Mt. Tai were dominated by fine particles ( $< 2.1 \mu\text{m}$ ) with the peak at  $0.7 \sim 1.1 \mu\text{m}$ , which accounted for 65% and 70% of  $\text{PM}_{10}$  in Mt. Hua and Mt. Tai, respectively. Coarse/fine particles ratios at Jinshan and Pudong sites in Shanghai are 1.80 and 1.92, indicating the significant influence of road dust and sea salt.

**Key words:** mountain; aerosol; concentration; size distribution

气溶胶颗粒对空气质量、能见度、酸沉降、云和降水、大气的辐射平衡等均有重要影响。由于人口、经济水平、能源结构和地理环境的差异, 中国气溶胶的理化特征明显不同于北美及欧洲 (Wang et al, 2002)。近些年来关于气溶胶的研究在中国越

来越多, 但大多集中在城市 and 农村等平地地表, 关于高山地区的研究工作非常有限 (Wang et al, 2009; Xu et al, 2009)。高山地区大气环境较为独特, 因为它们具有温度低、湿度大、辐射强的特点, 因此高山气溶胶的化学和物理特性不同于低海拔地区。

收稿日期: 2010-11-01

基金项目: 中国科学院项目 (KZCX2-YW-148, KZCX2-YW-BR-10)

通讯作者: 王格慧, E-mail: wanggh@ieecas.cn

此外, 由于海拔高, 山顶气溶胶更易进入云层, 因而比地表颗粒物更易成为云凝结核。高山气溶胶易受长距离传输影响因而能够在更大尺度上反映区域大气环境特征。

华北平原是我国人口高密度区, 经济发达, 华山和泰山分别位于华北平原的西、东缘, 前者地处我国内陆干旱/半干旱过渡带, 而后者地处东海边缘、大气温暖潮湿。上海是典型大都市, 大气颗粒物污染主要为机动车排放。为了更好地了解中国中东部地区气溶胶区域特征, 我们在华山和泰山同时开展了 TSP、PM<sub>10</sub> 和不同粒径颗粒物采集工作, 并和上海城市地区样品相对比, 研究高山和城市气溶胶的浓度水平和粒径分布特征。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点

#### 1.1.1 高山点

华山位于西安以东 120 km, 地处我国中部。年平均气温和降雨量分别为 6.8℃ 和 1030 mm。常年以西北和西南风居多, 各占到 11% 左右。采样点位于华山西峰顶 (34°29' N, 110°05' E, 海拔 2065 m), 于 2009-07-16—2009-08-25 (夏季) 开展了 TSP、PM<sub>10</sub> 以及 8 级 Anderson 分粒级采样工作。

泰山是华北平原最高峰, 位于山东省中部。采样点位于泰山海拔 1545 m 处 (36°16' N, 117°06' E) 的日观峰气象站。于 2009-07-15—2009-08-14 (夏季) 开展了 TSP、PM<sub>10</sub> 以及 8 级 Anderson 分粒级采样工作。

#### 1.1.2 城市点

采样点分别位于上海市金山区和浦东区气象站, 于 2009-09-01—2009-09-20 在上述两个站点同时开展了 PM<sub>10</sub> 以及 8 级 Anderson 分粒级采样工作。

采样点位置见图 1。

### 1.2 采样仪器和方法

KC-120H 型大气采样器 (中国, 青岛崂山仪器总厂) 用于收集 TSP 和 PM<sub>10</sub>, 流量均为 100 L·min<sup>-1</sup>, 置于地上 4~10 m 的高度, 24 h 连续采样。颗粒物样品收集在 Φ90 mm (Whatman) 石英滤膜上 (QM/A), 采样之前滤膜在 450℃ 马弗炉烧 8 h 以去除有机物。

Series 20-800 Andersen Non-Viable 分级大气采样器 (美国, Thermo Fisher) 用于收集不同粒径颗粒物, 切割粒径分别为 <0.4 μm, 0.4~0.7 μm, 0.7~1.1 μm, 1.1~2.1 μm, 2.1~3.3 μm, 3.3~4.7 μm, 4.7~5.8 μm, 5.8~9.0 μm, >9.0 μm, 共 9 级, 流速为 28 L·min<sup>-1</sup>。每套样品连续采集 6 天。颗粒物收集在 Φ80 mm (Whatman) 石英滤膜上。

### 1.3 样品分析

采样前后将滤膜置于干燥器中平衡 24 h, 用 ±1 μg 精密度的电子微量天平 (Sartorius MC5) (Sartorius, Göttingen, Germany) 称量滤膜至恒重。前后质量之差除以采样体积 (校正到标准状态) 即为颗粒物浓度。

KC-120H 型大气采样器所采集 PM<sub>10</sub> 的质量浓度与 Series 20-800 Andersen Non-Viable 分级大气采样器所采集得到 PM<sub>10</sub> 的质量浓度数据具有很好的线性相关 (图 2), 说明两套仪器所得数据一致且可靠。

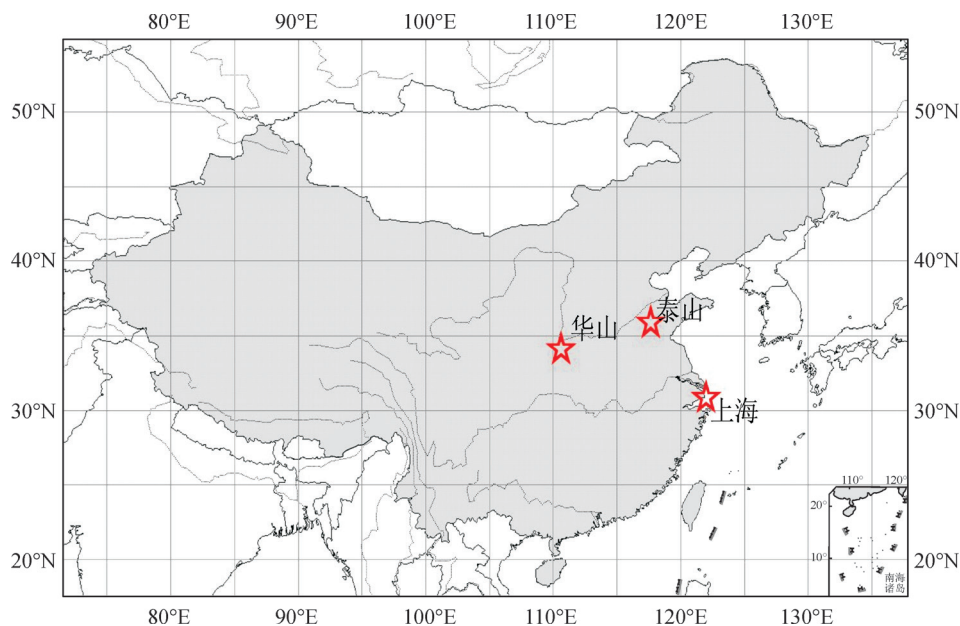


图 1 采样点位置 (华山、泰山、上海)

Fig.1 Sampling location (Mt. Hua, Mt. Tai and Shanghai)

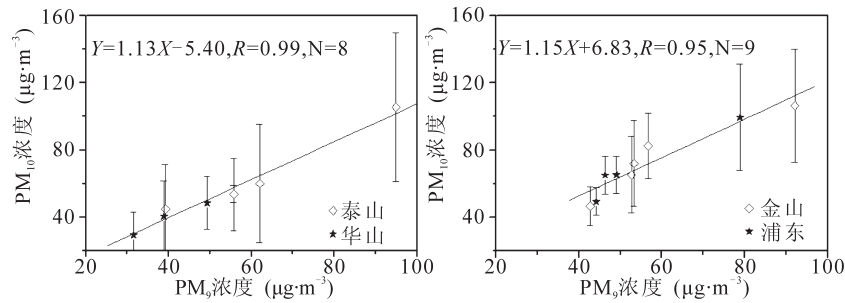


图2  $PM_{10}$  质量浓度 (KC-120H 采样器收集) 和  $PM_9$  质量浓度 (Andersen 分粒级采样器收集) 相互比较

Fig.2 An intercomparison of concentrations of  $PM_{10}$  samples (collected by KC-120H) and  $PM_9$  fraction of the eight-stage samples (collected by Series 20-800 Andersen Non-Viable)

## 2 结果与讨论

### 2.1 $PM_{10}$ /TSP 浓度水平

#### 2.1.1 高山地区

华山共采集 74 个 TSP 和  $PM_{10}$  样品, 质量浓度日变化趋势如图 3a 所示。TSP 和  $PM_{10}$  浓度的最低值均出现在 8 月 22 日, 最高值出现在 8 月 9 日, 两者变化趋势一致。自 8 月 18 日开始几乎每天都有间接性小雨, 20 日到 21 日连续小雨, 22 日阴天到 23 日转晴。如图 3 阴影部分所示, 降水天气期间, 雨水冲刷掉大颗粒部分, 使得 TSP 和  $PM_{10}$  质量浓度值相近。8 月 9 日之前的连续晴天导致了最高值的出现。另外, 7 月 20 日的高值是由于全天大风引起, 这说明华山颗粒物与远距离输送不无关系。华山顶 TSP 的浓度为  $16\sim 92\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 平均浓度为  $(52\pm 21)\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $PM_{10}$  的浓度变化为  $12\sim 84\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 平均浓度  $(43\pm 18)\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (表 1),  $PM_{10}$  占 TSP 的 83%。

泰山顶共采集 62 个 TSP 和  $PM_{10}$  样品, TSP 和  $PM_{10}$  的浓度变化趋势一致, 最低值均出现在 7 月 19 日, 最高值出现在 7 月 30 日 (图 3b)。7 月 16 日开始下雨至 19 日放晴, 雨水对颗粒物的冲刷和 19 日晴天大气混合层高度升高, 不利于颗粒物的积累。7 月 30 日之前有 8 天的连续晴天和多云天气, 有利于颗粒物的累积。泰山 TSP 的质量浓

度为  $12\sim 206\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 平均浓度为  $(80\pm 42)\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $PM_{10}$  的质量浓度为  $12\sim 183\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 平均浓度为  $(65\pm 35)\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 占 TSP 的 82%, 比华山高出近 50% (表 1)。泰山颗粒物污染高于华山地区, 表明我国东部地区颗粒物污染较西部地区严重, 此结果与 Wittrock et al (2006) 的卫星观测结果相一致。

对华山、泰山 TSP 和  $PM_{10}$  的浓度数据进行回归分析, 结果显示 (图 4): 在置信度  $p<0.001$  的条件下, 两高山地区 TSP 和  $PM_{10}$  呈显著线性相关 ( $R=0.97\sim 0.99$ ), 表明高山地区 TSP 和  $PM_{10}$  具有

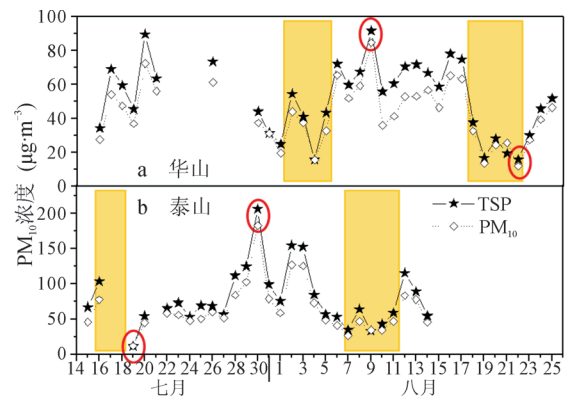


图3 高山  $PM_{10}$  及 TSP 质量浓度日变化

a. 华山; b. 泰山 (阴影部分为持续阴雨天气)

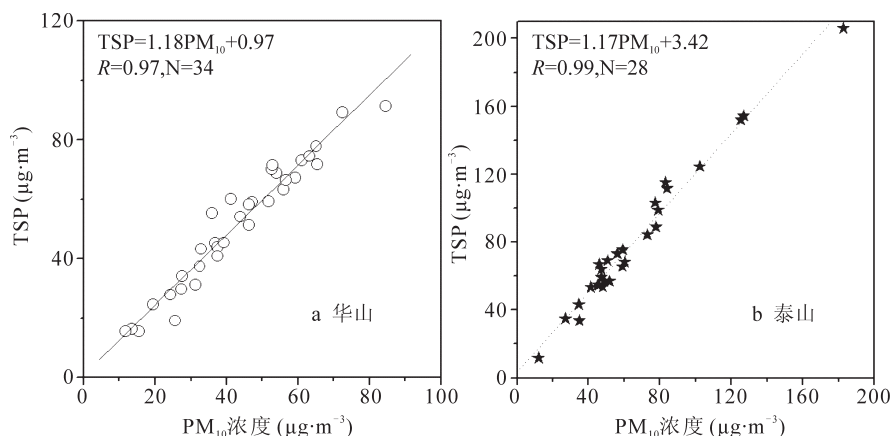
Fig.3 Diurnal variation of  $PM_{10}$  and TSP concentrations at high mountain sites

a. Mt. Hua; b. Mt. Tai. Shadow denotes continually rainy weather

表1 华山、泰山、金山、浦东四点夏季 TSP、 $PM_{10}$  平均浓度

Table 1 Average concentrations of TSP and  $PM_{10}$  in Mt. Hua, Mt. Tai, Jinshan and Pudong during summer

地点	TSP			$PM_{10}$			$PM_{10}$ /TSP
	N	Mean ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	SD ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	N	Mean ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	SD ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	
华山	34	52	21	34	43	18	0.83
泰山	28	80	42	29	65	35	0.82
金山	/	/	/	43	74	30	/
浦东	/	/	/	43	70	24	/

图4 TSP 和  $PM_{10}$  浓度关系: a. 华山; b. 泰山Fig.4 Relationship between TSP and  $PM_{10}$ : a. Mt. Hua; b. Mt., Tai.

相同的来源。高山地区与地表城市地区不同, 没有明显的当地污染源影响, 颗粒物主要为外来输送。两回归方程中的斜率分别为 1.18 (华山) 和 1.17 (泰山), 表明高山地区大于  $10\ \mu\text{m}$  的颗粒物较少, 占 TSP 的 20% 以下,  $2.1\ \mu\text{m}$  以下细颗粒物华山和泰山分别占 65% 和 70%。

### 2.1.2 城市地区

上海金山区和浦东区在 2009-09-01—2009-09-21 期间分别采集 43 个  $PM_{10}$  样品, 浓度变化曲线如图 5 所示。 $PM_{10}$  浓度最低值出现在 9 月 1 日, 当天有小雨形成了对颗粒物浓度的减低作用。随后的 11 天里, 一直为持续多云或多云转晴的天气状况, 日变化图中呈现出了缓慢上升的趋势, 至 9 月 12 日达到采样段内的最高值, 随后又下降然后缓慢上升, 在此期间同样出现了三天阴雨天气(图 5 阴影部分)。金山区  $PM_{10}$  的质量浓度变化从 36 到  $147\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 平均为  $(74\pm30)\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (表 1)。

与此同时, 浦东区  $PM_{10}$  的质量浓度变化也呈现了与金山区一样的变化趋势。不同的是, 浓度最低值出现在了 9 月 2 日, 而最高值出现在了 9 月 11 日, 这可能是由于两者在地理区位上存在差异导致的。浦东区  $PM_{10}$  为  $44\sim130\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 平均为  $(70\pm24)\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。总体而言, 金山区  $PM_{10}$  的浓度水平大于浦东新区, 主要是因为其不同的功能区特点, 和主要是以金融贸易为主体的浦东新区相比, 金山区是上海重要的工业基地, 有化工医药、汽车及零部件、机械电子、食品加工、服装等产业实体, 较多的工业排放以及海盐输入可能是造成金山颗粒物浓度较高的原因。

各地区质量频次图分布如图 6 所示,  $PM_{10}$  平均质量浓度分布上海金山 > 上海浦东 > 泰山 > 华山。泰山地区  $PM_{10}$  的日变化较大 ( $SD=38.6$ , 表 1),

可能是由于泰山相对华山海拔更低, 对山下污染大气的输入更为敏感。华山地区  $PM_{10}$  的日变化最低 ( $SD=17.5$ , 表 1), 表明其高海拔特点导致外来污染源的输送相对均匀。

### 2.1.3 后向轨迹分析

#### (1) 华山

采样期间, 华山顶气团主要是从东、西北、南

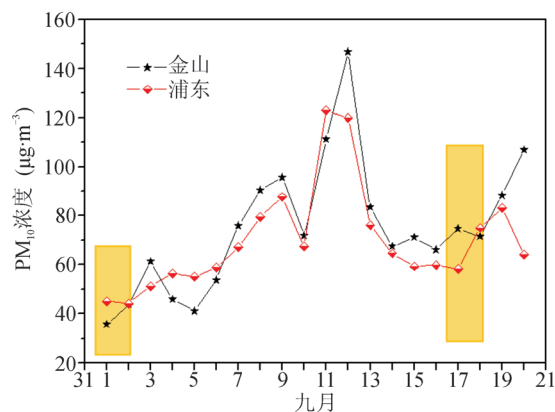
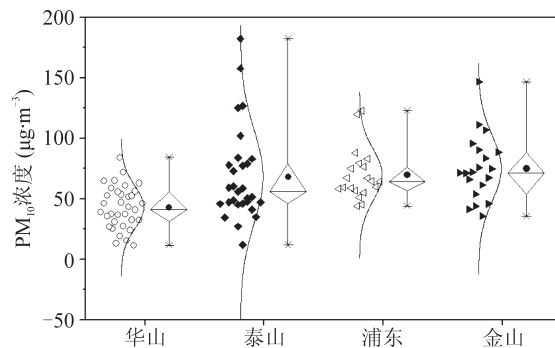
图5 上海浦东新区及金山区  $PM_{10}$  质量浓度日变化 (阴影部分为持续阴雨天气)Fig.5 Diurnal variation of  $PM_{10}$  and TSP concentrations at Pudong New Area and Jinshan District in Shanghai. Shadow denotes continually rainy weather.

图6 各地区质量浓度分布

Fig.6 Concentrations of  $PM_{10}$  in four different areas



部传输(如图7), 因此, 样品可以被分为三组: 分别受东、西北和南部气团影响的样品。通过计算  $\text{PM}_{10}$  的质量浓度均值, 得出东 ( $47 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) > 西北 ( $44 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) > 南 ( $41 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )。KC-120H 采样器采集到的  $\text{PM}_{10}$  样品的质量浓度最高值当日 2009 年 8 月 9 日后向轨迹图(天蓝色线)和质量浓度最低值当日 2009 年 8 月 22 日后向轨迹图(绿色线)标出。虽然华山夏季, 北部气团不是主导控制, 但一旦有东部及西北部气团就会出现颗粒物浓度增高的现象, 主要是因为东部是我国经济发达、人口密集的高污染区, 西北主要受到沙尘源区的影响, 而来自南方的暖湿气团较为干净。

## (2) 泰山

泰山顶气团主要可分为三类: 东、西北、南, 同样以此处理样品分类, 通过计算  $\text{PM}_{10}$  的质量浓度均值, 得出西北 ( $68 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) > 东 ( $65 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) > 南 ( $57 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )。泰山之西北部即华山之东北大部, 济南、北京、太原、郑州等城市对其影响较为明显, 因为它地处高污染地区而海拔高度也低于华山 500 m 之多。7 月 19 日(极低值, 绿色线)及 7 月 30 日(极高值, 天蓝色线)后向轨迹图, 如图 8 所示。

## (3) 城市点

采样期间, 上海市气团主要来源于北部及东北部, 按照气团的走向分为经中国东北地区 and 未经中国东北地区两大类, 计算  $\text{PM}_{10}$  质量浓度均值, 金山区为经东北 ( $87 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) > 未经东北 ( $57 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 浦东区同样为经东北 ( $78 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) > 未经东北 ( $58 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )。

我国东北地区的污染水平较为严重, 后向轨迹图显示在中国东北地区的气团控制下, 局地颗粒物浓度值会增高。另外, 金山区比浦东区更靠近海岸, 因此受北部及东北部气团携带的海盐等颗粒物的影响更为显著, 浓度也更高。后向轨迹图(图 9)所示, 其中, 红色线条标示为白天, 蓝色线条标示为夜间, 9 月 1 日(极低值)及 9 月 12 日(极高值)以绿色线条及蓝色线条标出, 符合质量浓度均值的计算结果。

## 2.2 与其他地区的比较

为全面了解中国各地区大气颗粒物的污染状况, 表 2 列出华山、泰山、上海金山区、上海浦东区 TSP、 $\text{PM}_{10}$  质量浓度水平与其他高山地区及城市点的数据对比。就高山地区而言, 可查数据量偏少, 总体看来欧洲高山的颗粒物浓度低于国内。从下表列出的数据来看, 若以我国空气质量标准 (GB3095-1996) 来衡量各城市  $\text{PM}_{10}$  浓度水平, 上海 2004—2005 年年平均浓度值 ( $107.9 \pm 2.39$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  还不能够满足我国二级标准, 而 2009 年夏季  $\text{PM}_{10}$  浓度值较之 Huang et al (2009) 实测值有明显下降, 能够满足二级标准规定值(日均值  $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 年均值  $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )。其余所列城市(除济南外)  $\text{PM}_{10}$  年平均浓度水平均在我国空气质量标准三级以下。

运用空气污染指数 API (Air Pollution Index) 计算了我国 31 个省会城市 2009 年夏季  $\text{PM}_{10}$  质量浓度, 其中 API 数据来源于中华人民共和国环境保护部数

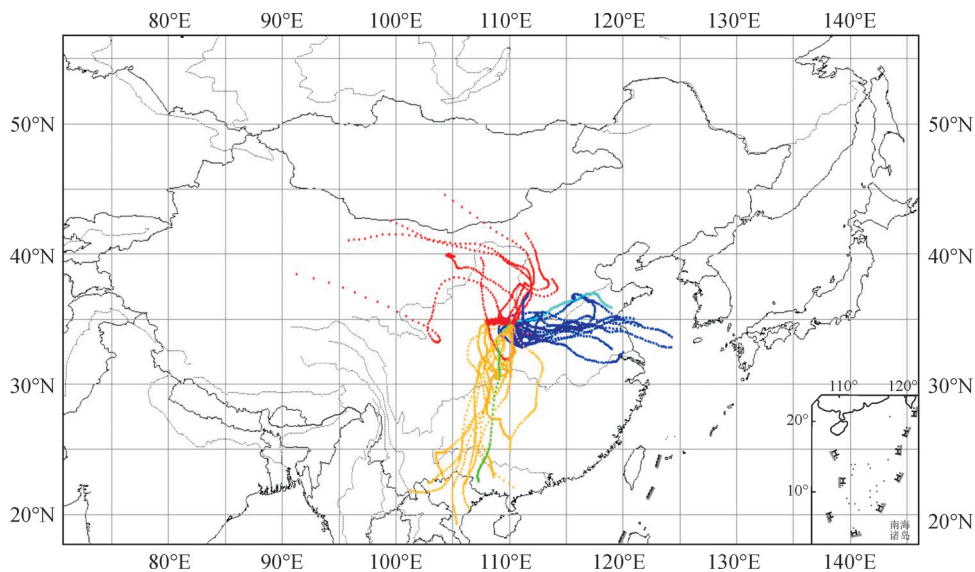


图 7 72 小时华山夏季后向轨迹图 ( $34^{\circ}29' \text{N}$ ,  $110^{\circ}05' \text{E}$ ; 海拔高度设置 2065 m; 2009-07-16—2009-08-25)

Fig. 7 72-h backward air mass trajectories reaching Mt. Hua during 2009-07-16—2009-08-25 in summer

( $34^{\circ}29' \text{N}$ ,  $110^{\circ}05' \text{E}$ , and the altitude was set as 2065 m)

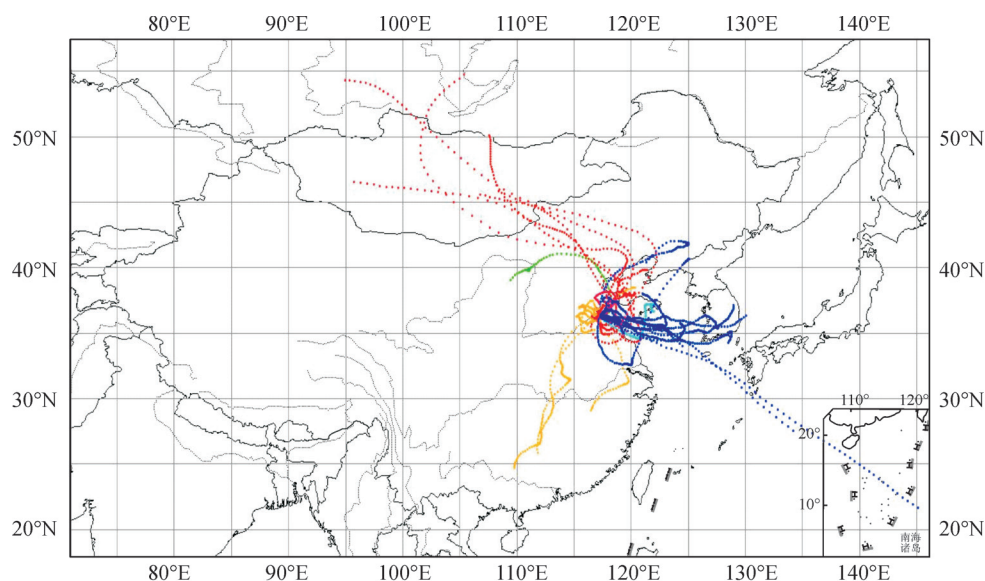


图8 72小时泰山夏季后向轨迹图 (36°16' N, 117°06' E; 海拔高度设置 1545 m; 2009-07-15—2009-08-14)

Fig.8 72-h backward air mass trajectories reaching Mt. Tai during 2009-07-15—2009-08-14 in summer (36°16' N, 117°06' E, and the altitude was set as 1545 m)

据中心相关数据 (<http://datacenter.mep.gov.cn>)。如图10所示,  $\text{PM}_{10}$  质量浓度大于  $90 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的城市有: 北京、天津、沈阳、济南、兰州、西宁, 由此可见我国东北、西北地区颗粒物浓度较高, 因此当出现从东北方向而来的气团时, 上海两个采样点颗粒物浓度升高, 与后向轨迹分析一致。

## 2.3 分粒级颗粒物浓度水平

### 2.3.1 高山地区

两高山地区颗粒物的粒径分布均值特征如图

11a 和 b 所示。华山颗粒物质量浓度呈现双峰态分布, 颗粒物主要集中在  $0.7\sim 1.1 \mu\text{m}$  粒径范围内, 同时粗粒子 ( $>2.1 \mu\text{m}$ ) 模态在  $4.7\sim 5.8 \mu\text{m}$  呈现次高峰。泰山颗粒物质量浓度呈现单峰态分布, 仅在  $0.7\sim 1.1 \mu\text{m}$  范围出现峰值。大气颗粒物中大部分重金属、硫酸盐、硝酸盐、铵盐以及元素碳 (Elemental Carbon, EC) 和有机碳 (Organic Carbon, OC) 等与人为排放相关的一次、二次污染物存在于这一粒径范围之内 (Hinds, 1999)。 $\text{NH}_4^+$  和  $\text{K}^+$  也常存在

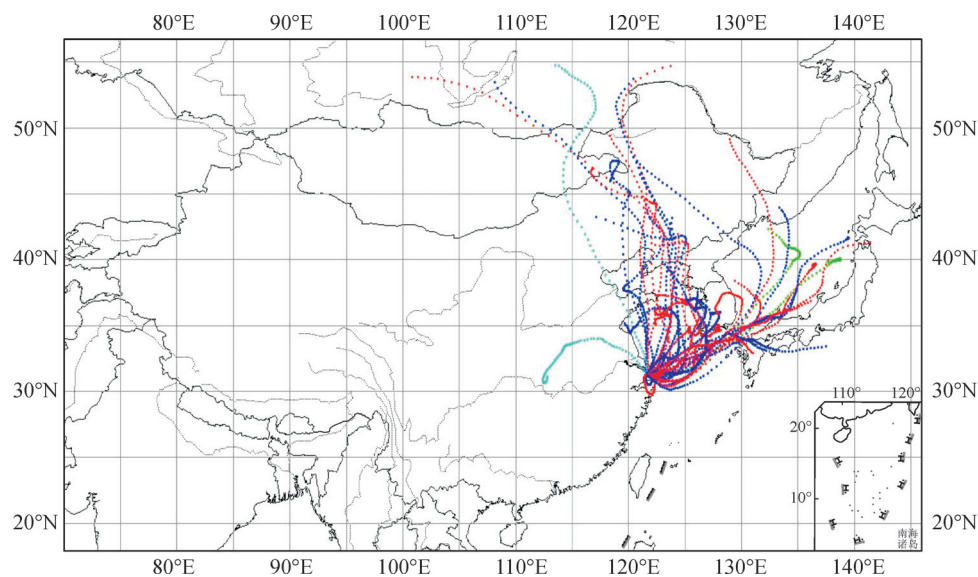


图9 72小时上海市夏季后向轨迹图 (31°14' N, 121°29' E; 海拔高度设置 500 m; 2009-09-01—2009-09-21)

Fig.9 72-h backward air mass trajectories reaching Shanghai during 2009-09-01—2009-09-21 in summer (31°14' N, 121°29' E, and the altitude was set as 500 m)

表 2 高山及城市点 TSP、PM<sub>10</sub> 浓度与其他地区的比较  
Table 2 Comparison with TSP and PM<sub>10</sub> concentrations at high mountain sites, lowland cities and other areas

采样点	采样时间	PM <sub>10</sub> (μg·m <sup>-3</sup> )	TSP(μg·m <sup>-3</sup> )	参考文献
I 高山点				
华山(中国中部, 2160 m)	2009 年夏季	43.10±17.55	51.68±21.26	本文
泰山(中国东部, 1534 m)	2009 年夏季	68.39±38.62	80.45±41.14	本文
Cimone 山(意大利, 2165 m)	2004 年夏季	16.1±9.8		Marenco et al (2006)
II 城市点				
上海金山	2009 年夏季	74.37±30.25		本文
上海浦东	2009 年夏季	69.82±23.55		本文
上海	2004 年春季到 2005 年冬季	107.9±2.39		Huang et al (2009)
西安	2006 到 2007 年冬春两季	380		李建军等 (2009)
济南	2004 年冬季	115		郝明途等 (2006)
南京	2001 年春夏秋	280		黄鹂鸣等 (2002)
厦门	2001 年春季到 2002 年冬季	610±30		程承旗等 (2005)
广州	1995 年冬季到 1996 年冬季	213±101	443±153	陈旻等 (1999)

于 0.7~1.1 μm 的积聚模态。因此两高山地区均以细粒子模态为主, 最高峰均在 0.7~1.1 μm。而一些地壳元素(如 Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 等)都以粗粒子模态集中在 4.7~5.8 μm 的粒径范围(Shen et al, 2009), 华山地区受黄土高原及西/西北部沙尘地区影响, 在粗模态中亦出现峰值。但总体而言, 高山(土壤尘土)粗粒子较少, 在从地表向高山传输过程中易沉

降, 因而山顶大气气溶胶以细粒子(<2.1 μm)为主, 占 TSP 的 60% 左右。与此相反, 城市地面大气湍流带来的土壤尘土粗粒子较多, 外加海盐的输入, 使得上海市 PM<sub>2.5</sub>/TSP 比值较小, 在 35% 左右。

2.3.2 城市地区

上海市两个采样点颗粒物的粒径分布特征如图 11c 和 d 所示。城市气溶胶(金山和浦东)分粒级质

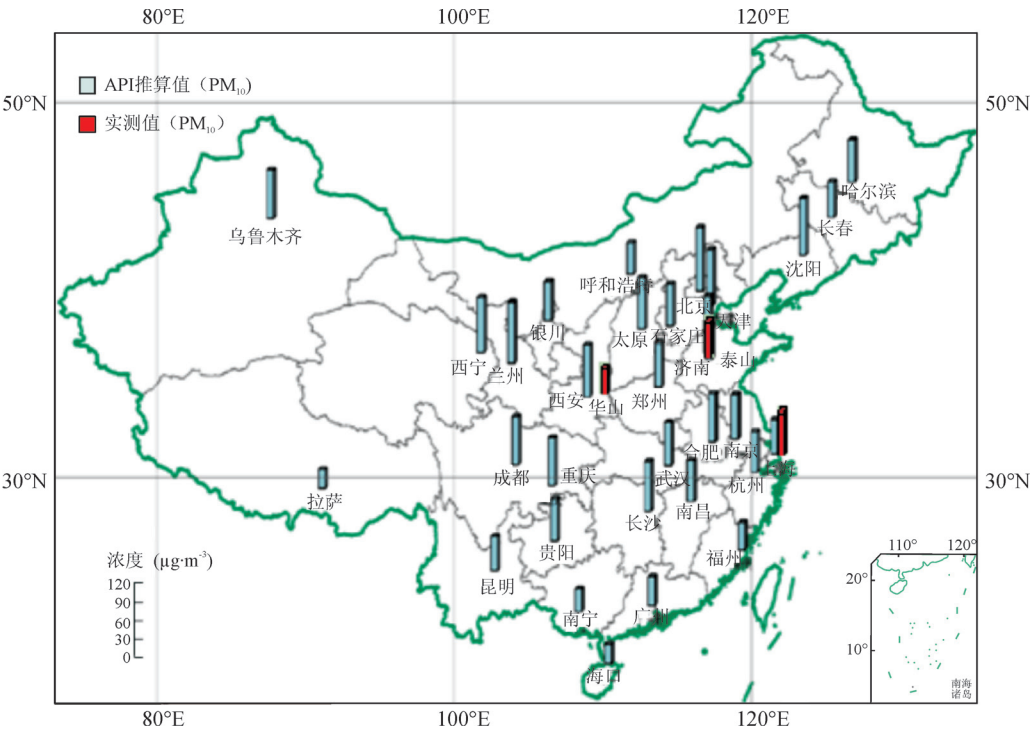


图 10 中国省会(31 个)及高山地区(2 个)夏季 PM<sub>10</sub> 质量浓度(API 计算)  
Fig.10 Comparison with PM<sub>10</sub> concentrations in two high mountain sites and 31 provincial capitals in China.  
Concentrations of provincial capitals are calculated by API.

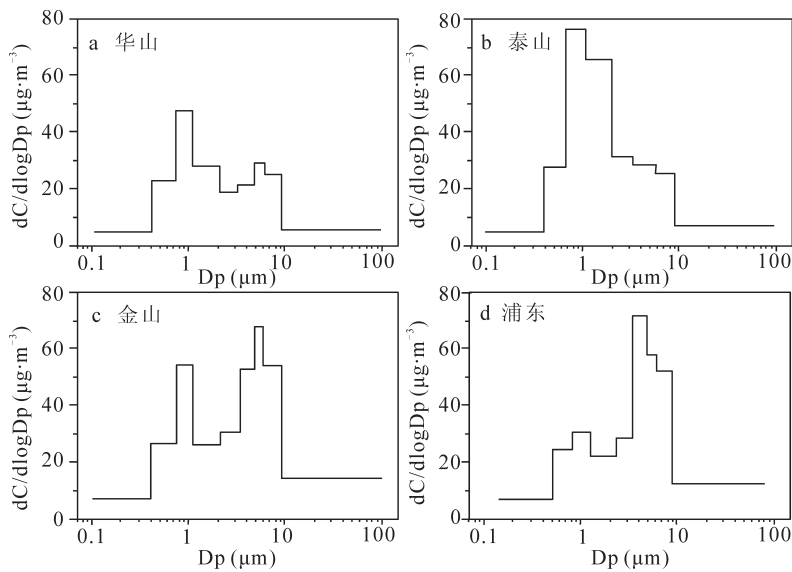


图 11 各地平均分粒级颗粒物浓度  
Fig.11 Size distributions of aerosols at four different areas

量浓度亦呈现双峰态。金山区颗粒物高浓度主要集中在 4.7~5.8  $\mu\text{m}$ ，次高峰出现在 0.7~1.1  $\mu\text{m}$ ；而浦东区的双峰分别出现在 3.3~4.7  $\mu\text{m}$  和 0.7~1.1  $\mu\text{m}$ 。总体说明城市细颗粒的排放基本趋于一致，金山区比浦东区高是因为密集的工业化生产，而粗粒子（比如海盐颗粒）在由海岸到内陆的传输过程中不断发生沉降而使高浓度集中点偏移。城市较高山地区具有更高的浓度，是由于城市点污染较为严重，人为排放源种类多且成分复杂，而粗粒子范围呈现的高峰除了海盐颗粒之外，由于经济发展迅速，机动车引起的道路扬尘也是一个重要的影响因素。表 3 列出了各地区的粗、细粒子质量浓度和几何平均粒径。高山地区和地表城市点颗粒物组成明显不同，高山细粒子居多而上海市粗粒子浓度较高（金山区  $(52.09 \pm 19.75) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ；浦东区  $(39.90 \pm 16.25) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ），此外，华山粗粒子/细粒子为 0.77 大于泰山（0.59），表明华山粗粒子的

相对含量大于泰山，这与中国西部、西北部受沙尘影响有关。后向轨迹图分析显示：华山受西北气团控制的粗细粒子质量比（0.82）> 受南部气团控制的粗细粒子之比（0.71），而泰山受西北气团控制的粗细粒子质量比（1.12）> 受东部气团控制的粗细粒子之比（0.45），进一步表明西北气团因受沙尘影响而粒径普遍偏大，东部及南部地区因受人为源影响而以细粒子为主。

上海浦东粗/细粒子质量比为 1.92 稍大于金山（1.80），后向轨迹图：上海浦东及金山地区受不经过我国东北气团控制的粗细粒子之比均大于受经过我国东北部地区气团控制下的粗细粒子之比。

泰山地处经济发达的华北平原（Gao et al, 2005），较相对偏远的西部华山地区污染更为严重，细粒子占较大比重；对于城市而言，金山区较之浦东区具有更为发达的工业生产过程，这些人为排放

表 3 分级采样中粗细粒子浓度和几何平均粒径（GMD）  
Table 3 Concentrations and geometric mean diameters (GMD) of aerosols in fine (<2.1  $\mu\text{m}$ ) and coarse (>2.1  $\mu\text{m}$ ) modes of particles

采样点	浓度 ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )			GMD*( $\mu\text{m}$ )	
	细粒子 **	粗粒子 ***	粗 / 细	细粒子 **	粗粒子 ***
华山	25.74±4.48	19.92±4.76	0.77	0.83±0.01	9.83±1.56
泰山	43.45±5.71	25.63±0.01	0.59	0.95±0.09	9.57±4.64
金山	28.84±12.33	52.09±19.75	1.80	0.78±0.03	12.65±4.95
浦东	20.74±9.65	39.90±16.25	1.92	0.78±0.12	9.29±1.18

\*  $\log\text{GMD} = (\sum C_i \log D_{p_i}) / \sum C_i$ ，其中  $C_i$  为粒径范围为  $i$  的化合物浓度； $D_{p_i}$  为在  $i$  级收集的颗粒物的几何平均直径 (Hinds, 1999)；\*\* 空气动力学直径 <2.1  $\mu\text{m}$ ，\*\*\* 空气动力学直径 >2.1  $\mu\text{m}$ 。



源造成颗粒物浓度偏高。

高山顶颗粒物在传输过程中发生了老化,在吸湿性增长和凝并作用下,粒径逐渐变大,泰山顶湿度大于华山,故泰山细粒子的GMD较之华山要大。华山的粗粒子几何平均直径(GMD)大于泰山,这是因为沙尘排放对华山粗颗粒有一定贡献。金山和浦东细粒子GMD一致,但金山区粗粒子的几何平均直径大于浦东,可能是由于较多海盐粒子的存在,所以粗粒子的GMD较大,海盐粒子从金山向浦东扩散,沉降,因而影响减弱,所以粗粒子的浓度值及GMD值均为金山>浦东。

### 3 结论

(1) 高山地区气溶胶TSP、PM<sub>10</sub>的浓度水平普遍低于城市点。受地域及海拔高度影响,泰山气溶胶浓度水平高于华山地区。高山地区气溶胶以细粒子为主,而城市地区粗粒子浓度比重更大。结合后向轨迹分析得出:我国东北部气团污染最严重,而西北部沙尘气溶胶对华山影响明显。

(2) 高山地区均以细粒子模态为主,最高峰均在0.7~1.1 μm,受人为排放影响明显。华山气溶胶在4.7~5.8 μm出现较低次高峰,说明受远距离输送的沙尘颗粒影响。上海市气溶胶受人为污染,道路扬尘和海盐颗粒的共同影响,峰值出现在0.7~1.1 μm和3.3~5.8 μm。

(3) 通过粗细粒子(2.1 μm为界)浓度和几何平均粒径(GMD)计算,进一步证明高山气溶胶细粒子居多,在吸湿性增长和凝并作用下逐步老化,使粒径变大;而上海金山区和浦东区的粗颗粒浓度高于细粒子,可能是由于海盐的影响。

### 参考文献

- 程承旗,何华伟,马廷,等. 2005. 厦门市2001—2002年PM<sub>10</sub>浓度时间序列变化分析[J]. 水土保持研究, 12(6): 11-13.
- 陈旸,王宇骏,邢琪,等. 1999. 广州市空气可吸入性颗粒物的污染水平[J]. 中国环境监测, 15(2): 42-46.
- 郝明途,侯万国,周学华,等. 2006. 济南市PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>污染水平研究[J]. 山东大学学报, 36(6): 108-111.
- 黄鹂鸣,王格慧,王荟,等. 2002. 南京市空气中颗粒物PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>污染水平[J]. 中国环境科学, 22(4): 334-337.
- 李建军,沈振兴,同帆,等. 2009. 西安冬春季PM<sub>10</sub>中碳气溶胶的昼夜变化特征[J]. 环境科学, 30(5): 1506-1513.
- Gao J, Wang T, Ding A J, et al. 2005. Observational study of ozone and carbon monoxide at the summit of mount Tai (1534 m a.s.l.) in central-eastern China[J]. *Atmospheric Environment*, 39: 4779-4791.
- Hinds W C. 1999. *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*[M]. New York: John Wiley and Sons.
- Huang W, Tan J, Kan H, et al. 2009. Visibility, air quality and daily mortality in Shanghai, China[J]. *Science of the Total Environment*, 407: 3259-3300.
- Marenco P, Bonasoni F, Calzolari M, et al. 2006. Characterization of atmospheric aerosols at Monte Cimone, Italy, during summer 2004: source apportionment and transport mechanisms[J]. *Journal of Geophysical Research*, 111: D24202, doi:10.1029/2006JD007145.
- Shen Z X, Cao J J, Arimoto R, et al. 2009. Ionic composition of TSP and PM<sub>2.5</sub> during dust storms and air pollution episodes at Xi'an, China[J]. *Atmospheric Environment*, 43: 2911-2918.
- Wang G H, Niu S L, Wang L S, et al. 2002. Identification of dicarboxylic acids and aldehydes of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> aerosols in Nanjing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 36: 1941-1950.
- Wang G H, Kawamura K, Umemoto N, et al. 2009. Water-soluble organic compounds in PM<sub>2.5</sub> and size-segregated aerosols over Mount Tai in North China Plain[J]. *Journal of Geophysical Research*, 114: D19208, doi:10.1029/2008JD011390.
- Wittrock F, Richter A, Oetjen H, et al. 2006. Simultaneous Global Observations of Glyoxal and Formaldehyde from Space[J]. *Geophysical Research Letters*, 33: L16804, doi:10.1029/2006GL026310.
- Xu H, Wang Y, Wen T, et al. 2009. Characteristics and source apportionment of atmospheric aerosols at the summit of Mount Tai during summertime[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discuss*, 9: 16361-16379.