

# 青藏高原气溶胶单颗粒类型及粒度分布

胡颖, 邵龙义, 王建英, 樊景森, 侯聪

(中国矿业大学 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

**摘要:**应用场发射扫描电镜 (FESEM) 对青藏高原纳木错综合观测站和香格里拉本底站 2011 年 7~8 月份不同天气情况下收集的气溶胶样品进行研究。结果表明, 区域内气溶胶单颗粒类型主要包括烟尘集合体、球形颗粒 (焦油球、燃煤飞灰)、似球形颗粒、矿物颗粒、生物颗粒等, 香格里拉的球形颗粒中出现了飞灰颗粒, 而纳木错样品中没有。纳木错气溶胶颗粒的数量-粒度峰值和体积-粒度峰值分别出现在  $0.2\sim 0.3\ \mu\text{m}$  和  $1\sim 2.5\ \mu\text{m}$ , 矿物颗粒数量和体积最多, 分别占 44.4% 和 61.7%。香格里拉气溶胶颗粒的数量-粒度峰值和体积-粒度峰值都呈现双峰分布, 主峰均分布在  $>2.5\ \mu\text{m}$  范围, 矿物颗粒数量和体积最多, 分别占 51.7% 和 58.7%。细粒子和粗粒子分别为纳木错和香格里拉气溶胶的主要类型。纳木错气溶胶中矿物颗粒最多, 数量百分比为 44.4%, 其次为烟尘集合体 (29.5%) 和球形颗粒 (26.1%), 香格里拉气溶胶中矿物颗粒数量百分比为 51.7%, 其次为球形颗粒 (29%) 和烟尘集合体 (19.3%); 纳木错气溶胶总颗粒物主要分布在  $0.2\sim 0.3\ \mu\text{m}$  粒径范围中, 数量百分比为 32.59%, 其中矿物颗粒最多 (15%), 其次为球形颗粒 (11.5%) 和烟尘集合体 (6.1%)。香格里拉气溶胶颗粒物主要分布在  $>2.5\ \mu\text{m}$  粒径范围中, 数量百分比为 37.5%, 其中矿物颗粒最多 (17.9%), 其次为球形颗粒 (10%) 和烟尘集合体 (9.6%)。

**关键词:**气溶胶, 场发射扫描电镜, 青藏高原

中图分类号: P579

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)06-0863-10

## Types and size distribution of individual particles in the Tibetan Plateau

HU Ying, SHAO Long-yi, WANG Jian-ying, FAN Jing-sen and HOU Cong

(College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Field emission scanning electron microscopy (FESEM) was used to study the aerosol samples collected in Nam Co and air of Shangri-La under different weather conditions during July~August, 2011. The results showed that particles could be subdivided into 5 major morphological categories, namely soot aggregates, spherical particles (tar ball and fly ash), spherical particles, mineral particles and bio-particles. There existed fly ash in Shangri-La aerosol samples, which however did not exist in Nam Co. Number-size and volume-size distribution of particles in Nam Co aerosol samples displayed peaks in the size range of  $0.2\sim 0.3\ \mu\text{m}$  and  $1\sim 2.5\ \mu\text{m}$ . The proportion of quantity (44.4%) and that of volume (61.7%) of mineral particles were the highest; size distribution of particles in Shangri-La aerosol samples displayed two major peaks in the size range of over  $2.5\ \mu\text{m}$ . The proportion of quantity (51.7%) and that of volume (58.7%) of mineral particles were the highest. Fine particles and coarse particles were the major types of aerosol samples of Nam Co and Shangri-La respectively. The amount (44.4%) of mineral particles was the highest in Nam Co, followed by soot aggregates (29.5%) and spherical particles (26.1%). The quantity proportion (32.59%) of Nam Co aerosol samples was mainly in the size range of  $0.2\sim 0.3\ \mu\text{m}$ . Mineral particles were the highest (15%), followed by spherical particles (11.5%)

收稿日期: 2013-09-11; 修订日期: 2013-10-16

基金项目: 公益性行业 (气象) 专项资助项目 (GYHY20110623)

作者简介: 胡颖 (1990-), 女, 汉族, 博士研究生, 主要研究方向为环境科学; 通讯作者: 邵龙义, E-mail: ShaoL@cumtb.edu.cn.

and soot aggregates (6.1%). The quantity proportion (37.5%) of Shangri-La aerosol samples was mainly in the size range of over 2.5  $\mu\text{m}$ . Mineral particles were the highest (17.9%), followed by spherical particles (10%) and soot aggregates (9.6%).

**Key words:** aerosol; field emission scanning electron microscopy (FESEM); Tibetan Plateau

青藏高原远离人类工农业生产区,其大气环境很少受到人类活动的影响,可以认为青藏高原部分地区的气溶胶基本代表了北半球大气环境的本底状况。监测高原地区的大气环境状况,可以获得全球有关重大环境事件的信息,为研究人类发展与自然环境的关系提供重要的科学依据(康世昌等, 2006)。颗粒物对大气能见度、酸沉降、云和降水、大气的辐射平衡、平流层和对流层的化学反应等均有重要影响(杨复沫等, 2000),同时在不同天气条件下,可吸入颗粒物的化学成分存在较大的差异。邵龙义等(2003)利用透射电子显微镜(TEM)对北京市区和背景点的细颗粒物( $\text{PM}_{2.5}$ )的形貌特征和集聚状态进行分析,将北京市大气细颗粒物分为烟尘集合体、飞灰、矿物颗粒、硫酸盐和有机颗粒等 5 种单颗粒类型,并讨论了它们的来源。康世昌等(2006)对纳木错区域的气溶胶单颗粒 SEM-EDX 的相关分析和元素特征分析,提出此处大气气溶胶以 Al、Ca、Si、K、Fe 等地壳元素为主,地壳元素占总元素浓度的 82% 以上, S、Pb 等与人类活动影响有关的污染物元素含量很低。本次研究以纳木错和香格里拉 7~8 月不同天气条件(晴天、阴天、雨天)下气溶胶样品做扫描电镜分析,并对基于各种天气的可吸入颗粒物进行数量-体积-粒度统计,为大气环境本底值提供信息参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

采样点设在西藏当雄县纳木错乡纳木错湖东南岸的纳木错综合观测站和云南省迪庆藏族自治州香格里拉县香格里拉本底站,采集大气气溶胶样品,采样时间为 2011 年 7~8 月。纳木错湖( $89^{\circ}30' \sim 91^{\circ}25'E$ 、 $30^{\circ}00' \sim 31^{\circ}10'N$ )位于青藏高原中部,是青藏高原上的第二大湖泊,面积 1 920  $\text{km}^2$ ,湖面海拔 4 718 m。其流域面积约 10 600  $\text{km}^2$ ,北部和西北部是起伏较小的藏北高原丘陵,南部和东南部属念青唐古拉山脉,整个区域形成了一个相对封闭的盆地。由于该流域处于羌塘寒冷半干旱高原季风气候区和

藏北高原草原区的东南边缘地带,对区域气候变化极为敏感,每年 6~9 月受西南季风的影响,相对温暖湿润,是流域的雨季,其他月份主要受西风环流的影响(徐彦伟等, 2007)。香格里拉大气本底( $28.01^{\circ}N$ 、 $99.44^{\circ}E$  海拔 3 580 m)所属迪庆藏族自治州地处青藏高原东南缘,是云贵高原向青藏高原的过渡带(康世昌等, 2011)。6~10 月受西南暖湿气流的影响,阴雨天气多,形成湿季(谢明恩等, 2000)。采样仪器为孔径 1 mm 的单孔便携单颗粒采样器,流量为 1 L/min,采用外径 3 mm 的铜网支持膜,样品采集信息如表 1。

表 1 样品采集信息

Table 1 Sampling information

日期	样品编号	采样时间	采样时长	采样点
2011.7.9~7.28	M1	9:50	364.1 h	纳木错
2011.7.28~8.10	M2	11:45	282.7 h	纳木错
2011.8.11~8.17	M3	14:25	156.1 h	纳木错
2011.8.11~8.23	M4	11:00	67.66 h	纳木错
2011.7.16~7.20	M5	9:50	88.7 h	香格里拉
2011.7.20~7.25	M6	12:30	86 h	香格里拉
2011.7.25~7.29	M7	9:50	89 h	香格里拉
2011.7.29~8.3	M8	9:00	100 h	香格里拉

### 1.2 实验方法

场发射扫描电镜(FESEM):将采集的样品裁下约 0.2  $\text{cm}^2$  贴在有导电胶的 2.5  $\text{cm} \times 2.5 \text{cm}$  样品桩上,再放入样品台。实验所用扫描电镜为中国科学院过程工程研究所日本产场发射扫描电镜(JSF-6700)。实验时样品镀以铂金属膜,在低真空状态下获取背散射电子图像和二次电子图像。

使用中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室的显微数字图像粒度分析系统对颗粒物进行粒度统计(Leica, UK)。分析的颗粒物主要类型为烟尘集合体、球形颗粒和矿物颗粒。具体步骤为:①首先导入从 FESEM 得到的数字图像文件;②确定比例尺;③输入第一类颗粒物的名称,设为“烟尘集合体”;④使用鼠标分别圈出图像上出现的所有烟尘集合体并点击“确定”;⑤重复步骤③和④直到处理完所有类型的颗粒物;⑥点击“确定”后,系统自动将每一颗粒的等效表面积和等效球

形直径(ESD)等数据按照颗粒物类型分别导入 Microsoft Excel。如此循环,直到处理完所有图像(邵龙义等,2003;杨书申等,2005)。

## 2 气溶胶单颗粒类型及特征

利用扫描电镜对样品中单颗粒进行形貌观察,通过辨认分析,判断出采样期间两个采样点大气可吸入颗粒主要包括烟尘集合体、球形颗粒(焦油球、燃煤飞灰)、矿物颗粒以及生物颗粒等(表2)。而燃煤飞灰只出现在香格里拉。在不同天气条件下,各样品的颗粒类型并无明显差别。

### 2.1 烟尘集合体

扫描电子显微镜下观察到的烟尘集合体形貌特

征比较明显(图1),青藏高原夏季样品中,可观察到的烟尘集合体有3种形态:密集链状的烟尘集合体,团聚状烟尘集合体,吸湿老化后的烟尘集合体。烟尘集合体主要来自于燃煤、汽车尾气及生物质的燃烧等(邵龙义等,2005),由于来源的多样性(邵龙义等,2003),使得烟尘集合体的形态呈现复杂性(Colbeck *et al.*, 1997)。而吸湿后又老化的颗粒占多数,是由于大部分烟尘集合体在采样期间其在大气中发生了一系列的物理变化,具有相当程度的老化。时宗波等(2003)主要利用高分辨率场发射扫描电镜对北京市大气可吸入颗粒物样品进行微区形貌和成分分析,研究指出链状烟尘和蓬松团块状烟尘既有可能来自机动车尾气,也可能来自燃煤,而密实块状烟尘则可能来源于煤的燃烧(时宗波等,2003)。

表2 青藏高原地区气溶胶单颗粒类型

Table 2 Individual particle types of Tibetan Plateau

颗粒类型	物理特性	元素组成	主要来源
烟尘集合体	链状颗粒,链状、蓬松状、密实状、吸湿较粗大烟尘,部分烟尘与其他颗粒物混合在一起	主要含C,有时含有少量的S和Si	主要来源于生物质和化石燃料的不完全燃烧
球形颗粒	圆球形或椭球形,包括燃煤飞灰、焦油球和二次粒子。飞灰和焦油球一般为比较规则的圆球形,二次粒子则多为椭球形	一般为Si或Al或C或S,有时含有少量其他元素	主要来源于燃煤、生物质燃烧排放和二次化学反应生成
矿物颗粒	不规则形貌的矿物颗粒,规则形貌的矿物颗粒	主要包含O、Si和Al,一般还含少量的Ca、Mg、K和S等	一般来源于扬尘和二次化学生成矿物
生物颗粒	圆球形和无定形	主要含C和少量的O	主要为植物孢子、花粉等生物颗粒
超细颗粒物	较细小颗粒,形貌无法确定	未知	主要来源于燃烧产物和二次反应生成

### 2.2 球形和似球形颗粒

在香格里拉及纳木错样品中经常见到的球形颗粒包括飞灰、焦油球及二次生成的似球形颗粒。

#### 2.2.1 飞灰

扫描电镜观察发现香格里拉样品中燃煤飞灰的粒径变化较大(0.05~1 μm),且呈现较规则圆球形颗粒,表面光滑,易于辨认(图2)。一般由Al和Si组成,有时还含有Ca和Fe等元素,是煤中的铝硅酸盐矿物在高温下熔融呈液态、随烟气排放到大气以后快速冷凝而形成的一类大气颗粒物。可能由于香格里拉处于云贵高原向青藏高原的过渡带,受西南季风和南支西风急流的交替控制,上风向长距离传输过来的燃煤污染物带来了飞灰颗粒。而在纳木错没有检测到,可能由于纳木错区域没有工业污染源,而纳木错湖畔牧民多以牛粪为燃料。

#### 2.2.2 焦油球

扫描电镜观察发现青藏高原夏季样品中出现焦油球(图3),Pósfai等(2004)研究指出,焦油球是生物质和生物燃烧产生的无定形炭质球。是高分子有机聚合体,难溶于水,在可见光波段能轻微吸收光线(胡敏等,2008)。推测焦油球来源是当地牧民燃烧牛粪或者植物而排放的产物。

#### 2.2.3 似球形颗粒

扫描电镜观察发现青藏高原夏季样品中似球形颗粒较为常见,外形近似球形或椭球,一些似球形颗粒表面较粗糙或与其他颗粒(矿物颗粒、烟尘等)相连(图4),这与观测站所处的地理位置和气候条件有关,采样时间为7月,处于雨季,空气湿度较大,从而促进矿物粒子潮解和二次颗粒物的生成。部分似球形颗粒在高速电子轰击前后,形貌存在明显差异,说

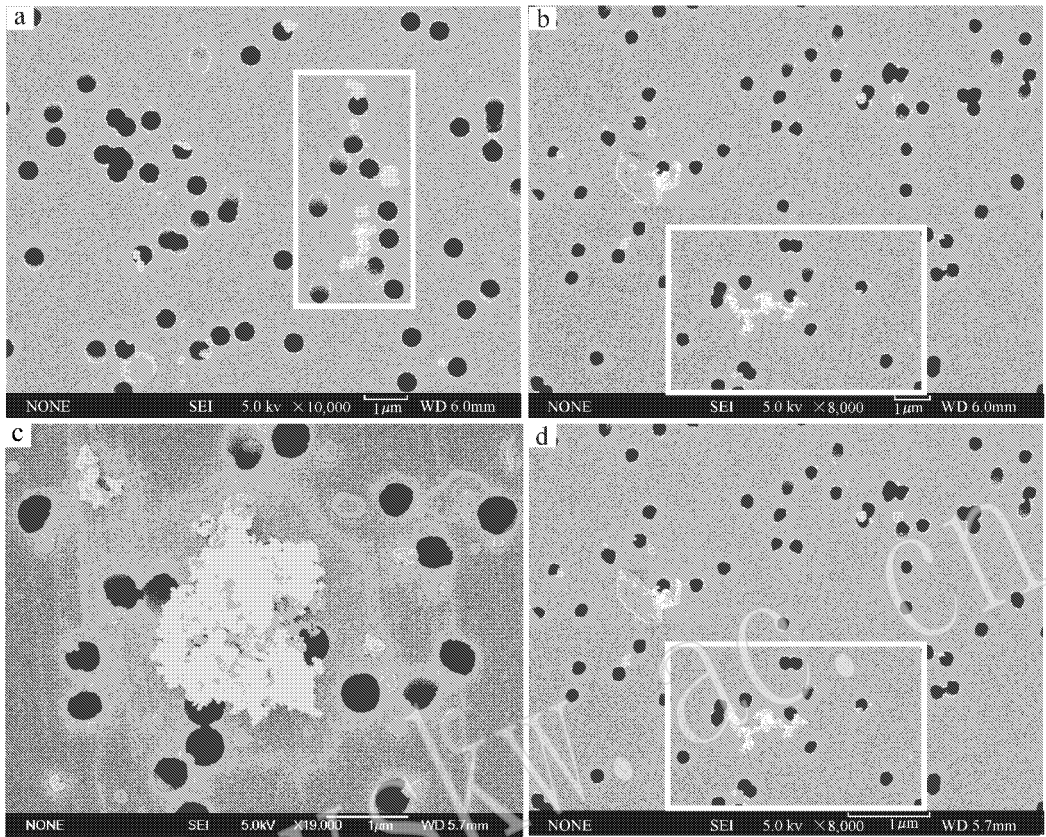


图 1 烟尘集合体的 FESEM 显微形貌

Fig. 1 Morphologies of soot aggregates

a, b—链状烟尘集合体；c—团聚状烟尘集合体；d—吸湿老化后的烟尘集合体

a, b—individual chain-like soot aggregates；c—chain-like soot aggregates；d—fluffy and aged soot aggregates

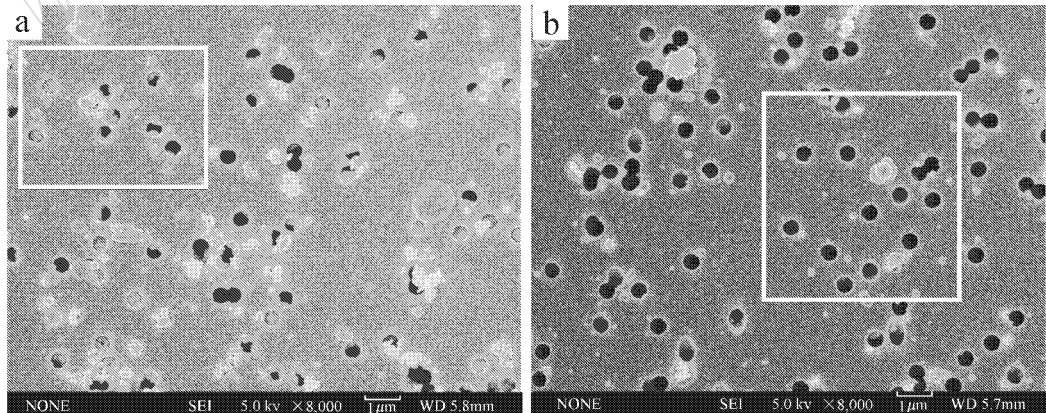


图 2 飞灰的 FESEM 显微形貌

Fig. 2 Morphologies of fly ash

明这些颗粒中存在挥发或半挥发物质(Li *et al.*, 2010), 对这类颗粒的透射电镜及能谱分析表明, 这些似球形颗粒成分主要为硫酸盐和硝酸盐, 主要来源于空气中的二次化学反应(王建英, 2012)。

### 2.3 矿物颗粒

大气中的矿物颗粒主要来源于扬尘和二次大气化学反应(李金香等, 2007), 按照矿物形貌的规则形态可以分为规则矿物和不规则矿物。形态规则的

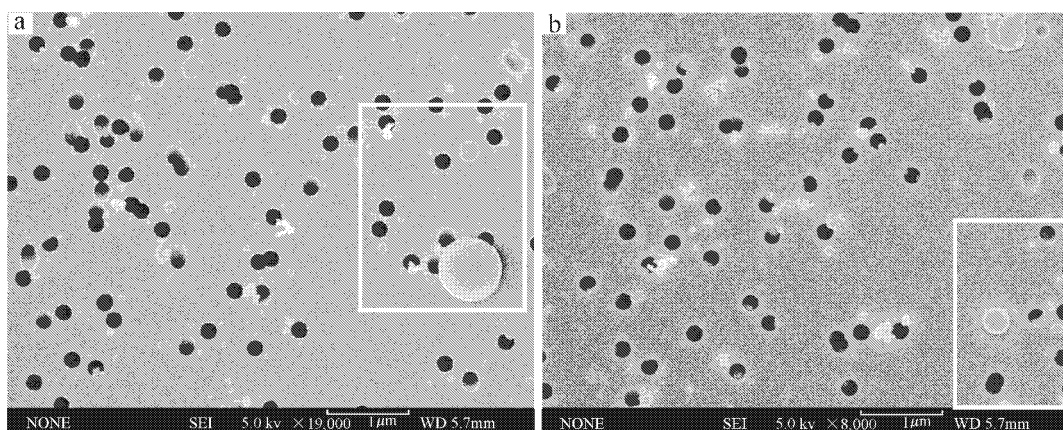


图3 焦油球的FESEM显微形貌

Fig. 3 Morphologies of tar ball

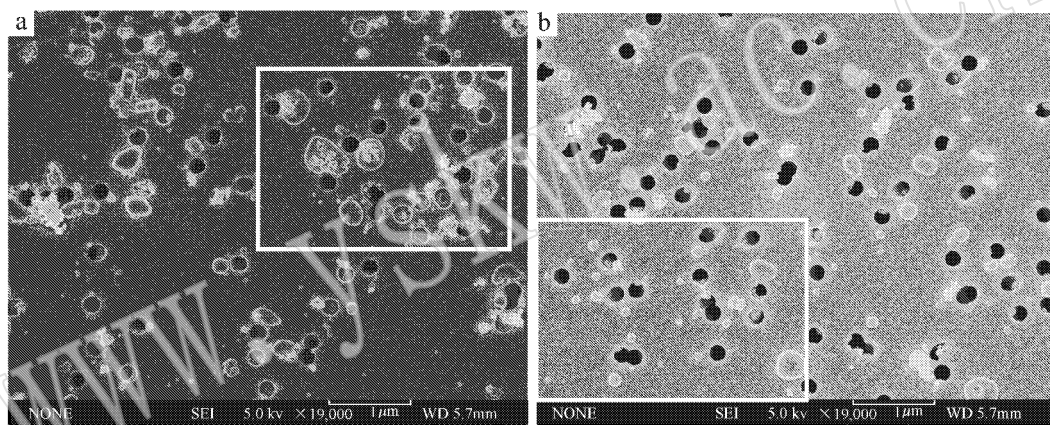


图4 似球形颗粒的FESEM显微形貌

Fig. 4 Morphologies of sphere-like particles

a—表面粗糙的似球形颗粒 b—小粒径的似球形颗粒

a—sphere-like particles with rough surface ; b—sphere-like particles with small grain size

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(吕森林,2003)。规则矿物主要是硫酸盐类矿物,不规则矿物多为地壳源的硅铝质矿物(邵龙义等,2006)。纳木错气溶胶中矿物颗粒大多具有不规则外形(图5),因此自然源(如地表扬尘)占其矿物气溶胶的主要来源。香格里拉规则矿物比例较高,说明香格里拉大气本底站颗粒物来源受人为干扰较多。

#### 2.4 生物颗粒

本次实验所采样品中,发现了一些生物颗粒(图6),有机质颗粒的特点是粒径较大,表面光滑,线条柔和,有较为规则的形状及表面构造。这些生物颗粒主要来源于当地植物的孢子或者花粉。

### 3 气溶胶单颗粒的数量-体积-粒径分布

由于青藏高原夏季气溶胶中生物颗粒比较罕见(无统计意义),将总颗粒及其中烟尘集合体、球形颗粒(包括飞灰、焦油球和似球形颗粒)和矿物颗粒三种类型进行了数量-体积-粒度统计。在纳木错和香格里拉样品中各选取8张扫描电镜图像,对颗粒类型单独分析后综合统计。

#### 3.1 总颗粒物数量-体积-粒径分布

纳木错样品总颗粒物的数量-体积-粒径分布均呈单峰分布,峰值分别在 $0.2\sim 0.3\ \mu\text{m}$ 和 $1\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 范围内,峰值分别为32.6%和56.4%。香格里拉样

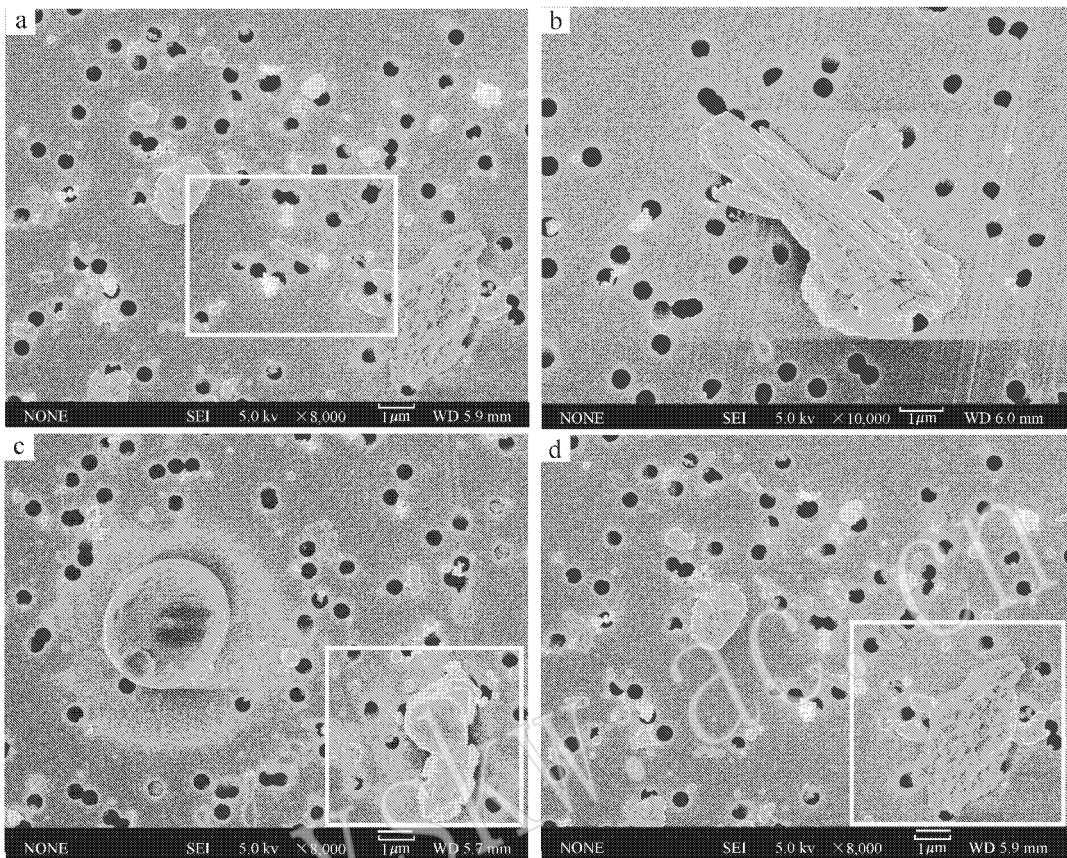


图 5 矿物颗粒的 FESEM 显微形貌

Fig. 5 Morphologies of individual mineral particles

a—规则矿物颗粒；b—长条状规则矿物集合体；c—复杂矿物集合体；d—不规则矿物

a—regular mineral particles；b—needle-like regular minerals；c—complicated mineral aggregates；d—mineral particles with rough surface

品总颗粒物数量-体积-粒径分布均呈双峰分布,主峰均分布在  $>2.5 \mu\text{m}$  范围内,峰值均为 37.5%,次峰分别分布在  $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m}$  和  $0.5 \sim 0.6 \mu\text{m}$  范围内,峰值为 20.3% 和 6.6% (图 7)。

### 3.2 矿物颗粒数量-体积-粒径分布

纳木错样品矿物颗粒的数量-粒径分布呈双峰分布,峰值分别在  $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m}$  和  $1 \sim 2.5 \mu\text{m}$  范围内,峰值分别为 15% 和 4.6%。体积-粒径分布呈单峰分布,峰值在  $1 \sim 2.5 \mu\text{m}$  范围内,峰值为 47.6%。香格里拉样品矿物颗粒数量-体积-粒径分布均呈双峰分布,主峰均分布在  $>2.5 \mu\text{m}$  范围内,峰值分别为 17.9% 和 23.7%,次峰分布在  $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m}$  和  $0.5 \sim 0.6 \mu\text{m}$  范围内,峰值为 12% 和 4% (图 8)。

### 3.3 球形颗粒数量-体积-粒径分布

纳木错样品球形颗粒的数量-粒径分布呈单峰分布,峰值分布在  $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m}$  范围内,峰值为 11.5%。体积-粒径分布呈双峰分布,主峰和次峰分

别在  $1 \sim 2.5 \mu\text{m}$  和  $0.4 \sim 0.5 \mu\text{m}$  范围内,峰值为 7.6% 和 1.4%。香格里拉样品球形颗粒数量-体积-粒径分布均呈双峰分布,主峰均分布在  $>2.5 \mu\text{m}$  范围内,峰值分别为 7% 和 1.8% (图 9)。

### 3.4 烟尘集合体数量-体积-粒径分布

纳木错样品烟尘集合体的数量-粒径分布呈单峰分布,峰值分布在  $0.3 \sim 0.4 \mu\text{m}$  范围内,峰值为 11.3%。体积-粒径分布呈双峰分布,主峰和次峰分别在  $0.9 \sim 1 \mu\text{m}$  和  $0.4 \sim 0.5 \mu\text{m}$  范围内,峰值为 3.8% 和 2.6%。香格里拉样品烟尘集合体数量-体积-粒径分布均呈双峰分布,主峰均分布在  $>2.5 \mu\text{m}$  和  $1 \sim 2.5 \mu\text{m}$  范围内,主峰分别为 9.7% 和 7.8%,次峰分别在  $0.3 \sim 0.4 \mu\text{m}$  和  $0.5 \sim 0.6 \mu\text{m}$  范围内,峰值为 3.6% 和 1.1% (图 10)。

综上所述,纳木错气溶胶各颗粒物类型的数量-粒度分布的主峰均在  $0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$  范围,体积-粒度分布主峰均在  $1 \sim 2.5 \mu\text{m}$  范围,说明细粒子在纳木错

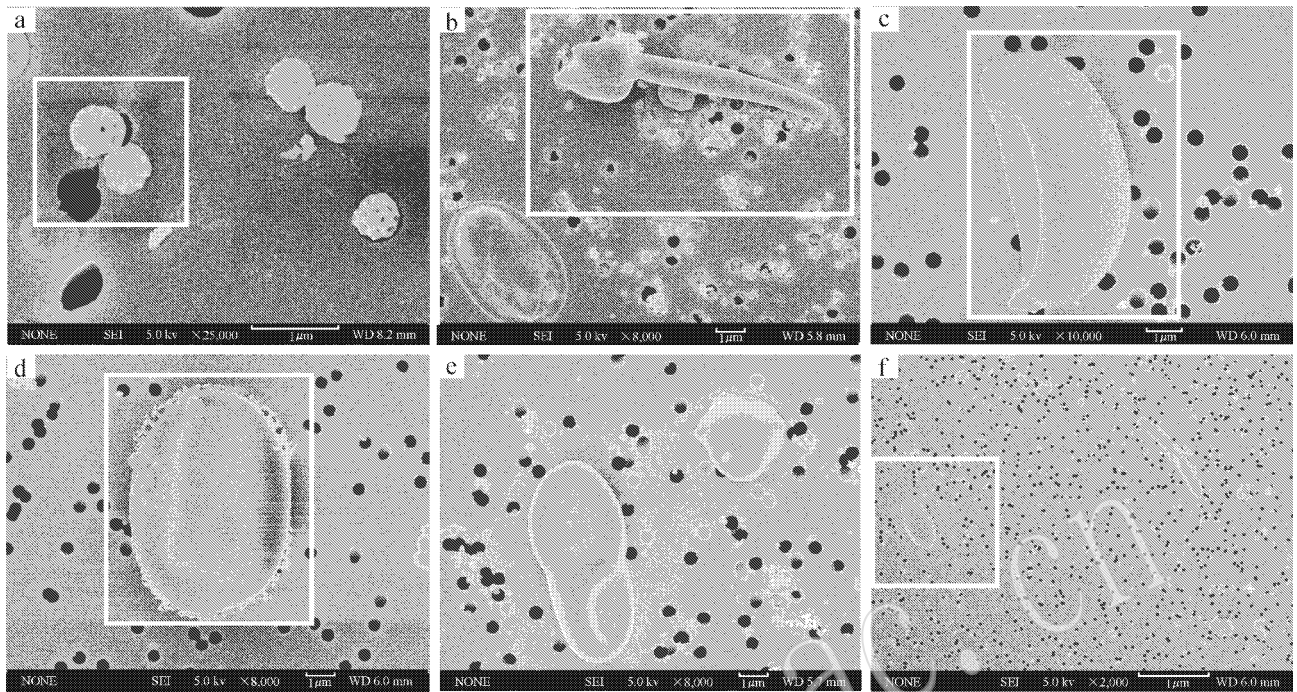


图 6 生物质颗粒的 FESEM 显微形貌

Fig. 6 Morphologies of bio-particles

a, b, c—花粉颗粒; d, e, f—未知颗粒

a, b, c—pollen particles; d, e, f—unknown biological particles

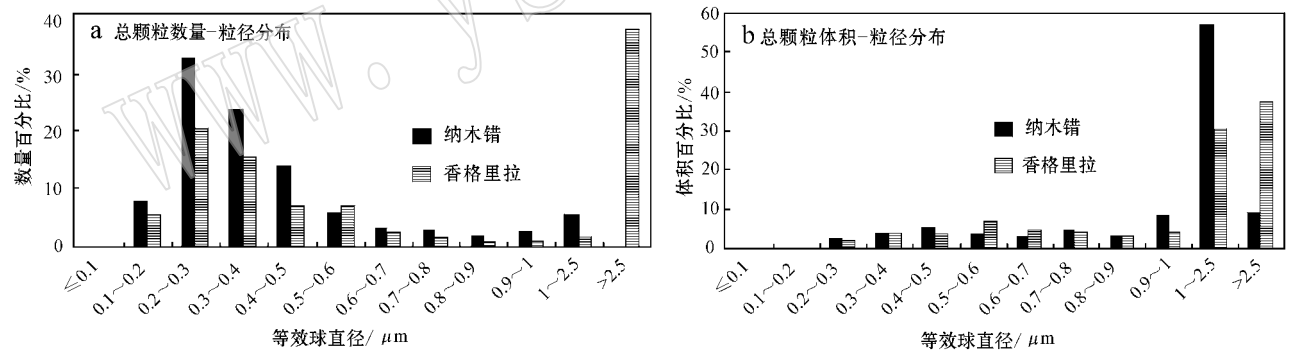


图 7 总颗粒物数量-粒径分布及体积粒径分布

Fig. 7 Size-distribution of total particles

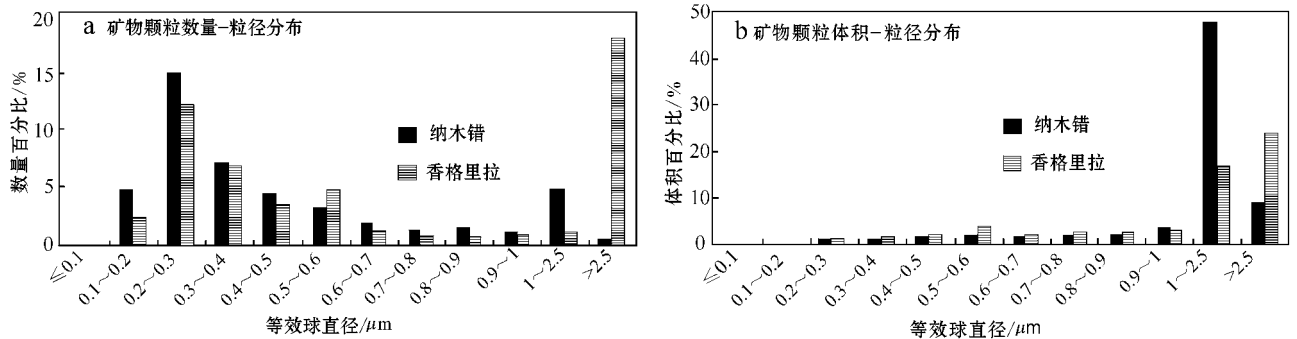


图 8 矿物颗粒数量-粒径分布及体积-粒径分布

Fig. 8 Size-distribution of mineral particles

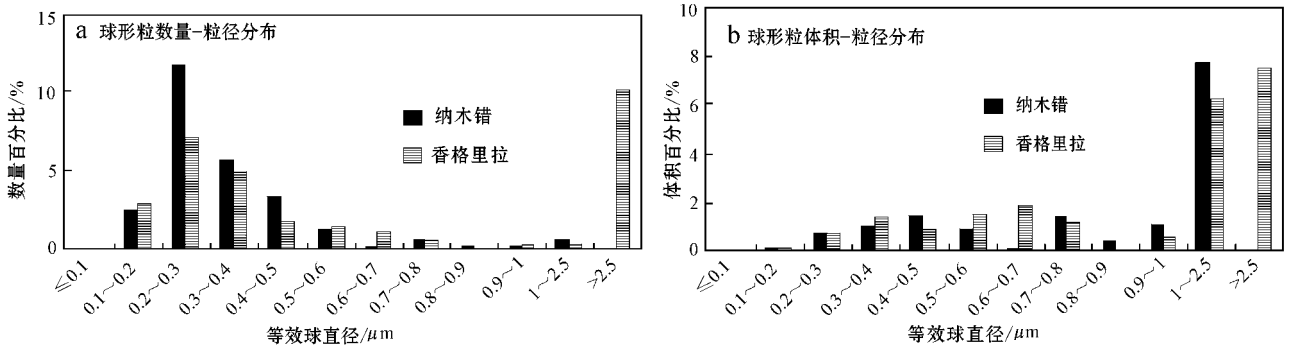


图 9 球形颗粒数量-粒径分布及体积-粒径分布

Fig. 9 Size-distribution of spherical particles

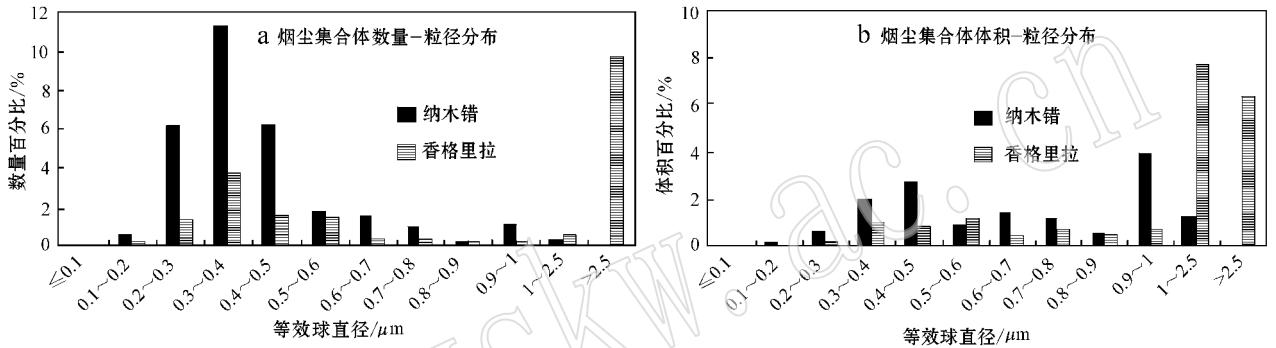


图 10 烟尘集合体数量-粒径分布及体积-粒径分布

Fig. 10 Size-distribution of soot aggregations

气溶胶颗粒中贡献较大, 细粒子作为载体, 其表面富集的元素对人体健康产生的影响更大。值得进一步关注和研究, 香格里拉气溶胶各颗粒物类型( 烟尘集合体除外) 的数量-粒度分布的主峰均在  $>2.5 \mu\text{m}$  范围, 因此粗粒子在香格里拉气溶胶颗粒中贡献较大。

#### 4 气溶胶各类单颗粒的数量百分比

纳木错气溶胶中矿物颗粒最多, 数量百分比为 44.4%, 其次为烟尘集合体( 29.5%) 和球形颗粒( 26.1%), 香格里拉气溶胶中矿物颗粒数量百分比为 51.7%, 其次为球形颗粒( 29%) 和烟尘集合体( 19.3%) (图 11)。

纳木错气溶胶颗粒物主要分布在  $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m}$  粒径范围中, 数量百分比为 32.59%, 其中矿物颗粒最多( 15%), 其次为球形颗粒( 11.5%) 和烟尘集合体( 6.1%)。矿物颗粒总量最多, 为 44.4%; 香格里拉气溶胶颗粒物主要分布在  $>2.5 \mu\text{m}$  粒径范围中, 数量百分比为 37.5%, 其中矿物颗粒最多( 17.9%), 其次为球形颗粒( 10%) 和烟尘集合体( 9.6%)。矿物

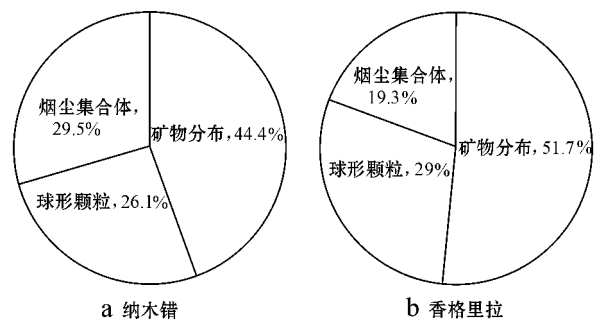


图 11 青藏高原夏季气溶胶中不同类型单颗粒数量百分比

Fig. 11 Number percentage of different types of individual particles in summer in Tibetan Plateau

颗粒总量最多, 为 51.7% (图 12)。

#### 5 结论

(1) 青藏高原气溶胶单颗粒主要类型包括烟尘集合体、球形颗粒( 焦油球、燃煤飞灰)、似球形颗粒、矿物颗粒、生物颗粒等, 其中, 烟尘集合体主要来源



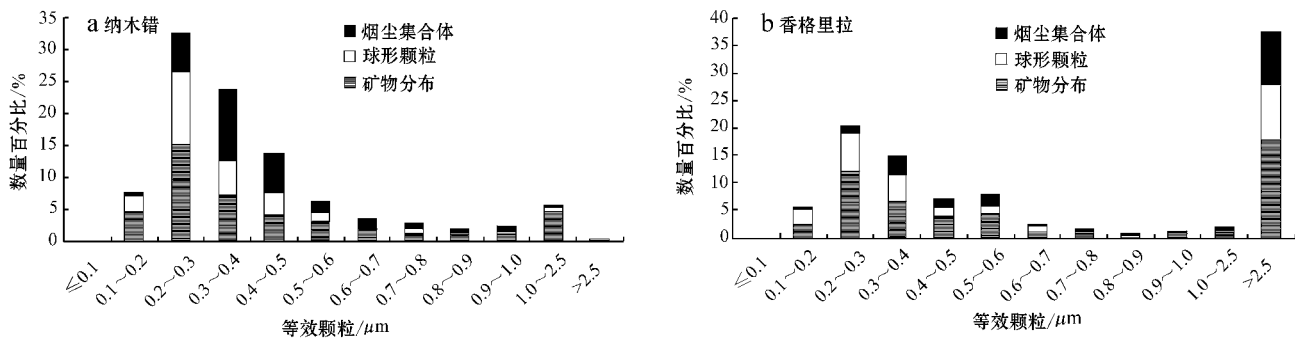


图 12 青藏高原夏季气溶胶单颗粒不同粒径数量百分比

Fig. 12 Number percentage of different sizes of individual particles in summer in Tibetan Plateau

于生物质和化石燃料的不完全燃烧,球形颗粒主要来源于燃煤、生物质燃烧排放和二次化学反应生成,矿物颗粒一般来源于扬尘和二次化学生成矿物,生物颗粒主要为植物孢子、花粉等生物颗粒,未知超细颗粒主要来源于燃烧产物和二次反应生成。

(2) 纳木错气溶胶颗粒的数量-粒度峰值和体积-粒度峰值分别出现在  $0.2\sim 0.3\ \mu\text{m}$  和  $1\sim 2.5\ \mu\text{m}$ , 矿物颗粒数量和体积最多,分别占 44.4% 和 61.7%。香格里拉气溶胶颗粒的数量-粒度峰值和体积-粒度峰值都呈现双峰分布,主峰均分布在  $> 2.5\ \mu\text{m}$  范围,矿物颗粒数量和体积最多,分别占 51.7% 和 58.7%。细粒子和粗粒子分别为纳木错和香格里拉气溶胶的主要类型。

(3) 纳木错气溶胶中矿物颗粒最多,数量百分比为 44.4%,其次为烟尘集合体(29.5%)和球形颗粒(26.1%),香格里拉气溶胶中矿物颗粒数量百分比为 51.7%,其次为球形颗粒(29%)和烟尘集合体(19.3%)。纳木错气溶胶总颗粒物主要分布在  $0.2\sim 0.3\ \mu\text{m}$  粒径范围中,数量百分比为 32.59%,其中矿物颗粒最多(15%),其次为球形颗粒(11.5%)和烟尘集合体(6.1%)。香格里拉气溶胶颗粒物主要分布在  $> 2.5\ \mu\text{m}$  粒径范围中,数量百分比为 37.5%,其中矿物颗粒最多(17.9%),其次为球形颗粒(10%)和烟尘集合体(9.6%),香格里拉的球形颗粒中出现了飞灰颗粒,而纳木错样品中则没有飞灰。

## References

Colbeck I, Atkinson B and Johar Y. 1997. The morphology and optical properties of soot produced by different fuels [J]. *Journal of Aerosol Sciences*, 28 : 715~723.

Hu Min, Deng Zhiqiang, Wang Yi, *et al.* 2008. Comparison of EC/OC in  $\text{PM}_{2.5}$  between filter sampling Off-line analysis and in situ On-line measurement [J]. *Environmental Science*, 20(12) : 3 297~3 303 (in Chinese with English abstract).

Kang Shichang and Cong Zhiyuan. 2006. Study of atmospheric precipitation and chemical characteristics of aerosol in Tibetan plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 28(3) : 371~378 (in Chinese).

Kang Shichang, Yang Yongping, Zhu Liping, *et al.* 2011. Modern Environmental Process and Changes in the Basin of Nam Co in Tibetan Plateau [M]. Beijing : China Meteorological Press (in Chinese with English abstract).

Li Jinxiang, Dong Shuping, Yu Tong, *et al.* 2007. The composition and sources of TSP of Beijing in synoptic processes in summer season [J]. *Research of Environmental Sciences*, 20(6) : 87~93 (in Chinese with English abstract).

Li W J, Shao L Y and Buseck P R. 2010. Haze types in Beijing and the influence of agricultural biomass burning [J]. *Atmos. Chem. Phys*, 10(17) : 8 119~8 130.

Lü Senlin. 2003.  $\text{PM}_{10}$  in Beijing air : Mineralogy and plasmid DNA assay [D]. Beijing : China University of Mining and Technology (in Chinese with English abstract).

Pósfai M, Gelelecsner A, Simonics R, *et al.* 2004. Atmospheric tar balls Particles from biomass and biofuel burning. *Journal of Geophysical Research*, 109(06) : 213 doi : 10.1029/2003JD004169.

Shao Longyi and Shi Zongbo. 2006. Microscopic characteristics and size distribution of summer  $\text{PM}_{10}$  in the air of a Northwestern Urban Site and a clean air site in Beijing [J]. *Environmental Science*, 24(5) : 11~16 (in Chinese with English abstract).

Shao Longyi, Yang Shushen, Shi Zongbo, *et al.* 2005. Individual atmospheric particle analysis : An overview [J]. *Journal of Palaeogeography*, 7(4) : 535~548 (in Chinese with English abstract).

Shao Longyi, Yang Shushen, Shi Zongbo, *et al.* 2006. A Study on Physico-Chemistry and Bioreactivity of Inhalable Particulates in Ur-

- ban Air[ M ]. Beijing : China Meteorological Press( in Chinese with English abstract ).
- Shi Zongbo , Shao Longyi , He Tao 'e , *et al.* . 2003. Field emission scanning electron microscope study of inhalable particles in Beijing ambient air[ J ]. Journal of Beijing Vocational( Technical Institute of Industry , 2( 2 ) ): 31 ~ 34( in Chinese with English abstract ).
- Wang Jianying . 2012. A study of individual aerosol particles collected from Tibetan Plateau[ D ]. Beijing : China University of Mining and Technology( in Chinese with English abstract ).
- Xie Mingren and Zhang Wancheng . 2000. Short-Term Climate Prediction Method and Model in Yunnan[ M ]. Beijing : China Meteorological Press( in Chinese with English abstract ).
- Xu Yanwei , Kang Shichang , Zhang Yulan , *et al.* . 2007. Relationship between  $\delta^{18}\text{O}$  of summer and autumn precipitation and water vapor sources and temperature in the delta of Nam Co in Tibetan plateau [ J ]. Scientia Geographica Sinica , 27( 5 ) : 718 ~ 723( in Chinese ).
- Yang Fumo , Ma Yongliang and He Kebin . 2000. A brief introduction to  $\text{PM}_{2.5}$  and related research[ J ]. World Environment , 4 : 32 ~ 34( in Chinese with English abstract ).
- Yang Shushen , Shao Longyi , Li Jinjuan , *et al.* . 2005. Application of transmission electron microscopy in individual aerosol particle analysis [ J ]. Journal of Liaoning Technical University , 24( 4 ) : 607 ~ 610. ( in Chinese with English abstract ).
- 附中中文参考文献**
- 胡 敏 , 邓志强 , 王 轶 , 等 . 2008. 膜采样离线分析与在线测定大气细粒子中元素碳和有机碳的比较[ J ]. 环境科学 , 20( 12 ) : 3 297 ~ 3 303.
- 康世昌 丛志远 . 2006. 青藏高原大气降水 and 气溶胶化学特征研究进展[ J ]. 冰川冻土 , 28( 3 ) : 371 ~ 378.
- 康世昌 , 杨永平 , 朱立平 , 等 . 2011. 青藏高原纳木错流域现代环境过程及其变化[ M ]. 北京 : 气象出版社.
- 李金香 , 董树屏 , 虞 统 , 等 . 2007. 北京夏季典型天气 TSP 组成和来源对比[ J ]. 环境科学研究 , 20( 6 ) : 87 ~ 93.
- 吕森林 . 2003.  $\text{PM}_{10}$  的矿物学特征及对质粒 DNA 损伤的研究[ D ]. 北京 : 中国矿业大学( 北京 ).
- 邵龙义 , 时宗波 . 2003. 北京西北城区与清洁对照点夏季大气  $\text{PM}_{10}$  的微观特征及粒度分布[ J ]. 环境科学 , 24( 5 ) : 11 ~ 16.
- 邵龙义 , 杨书申 , 时宗波 , 等 . 2005. 大气颗粒物单颗粒分析方法的应用现状及展望[ J ]. 古地理学报 , 7( 4 ) : 535 ~ 548.
- 邵龙义 , 杨书申 , 时宗波 , 等 . 2006. 城市大气可吸入颗粒物物理化学特征及生物活性研究[ M ]. 北京 : 气象出版社.
- 时宗波 , 邵龙义 , 贺桃娥 , 等 . 2003. 用场发射扫描电镜对北京市大气可吸入颗粒物的研究[ J ]. 北京工业职业技术学院学报 , 2( 2 ) : 31 ~ 34.
- 王建英 . 2012. 青藏高原气溶胶单颗粒特征研究[ D ]. 北京 : 中国矿业大学( 北京 ).
- 谢明恩 , 张万诚 . 2000. 云南短期气候预测方法与模型[ M ]. 北京 : 气象出版社.
- 徐彦伟 , 康世昌 , 张玉兰 , 等 . 2007. 青藏高原纳木错流域夏、秋季大气降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与水汽来源及温度的关系[ J ]. 地理科学 , 27( 5 ) : 718 ~ 723.
- 杨复沫 , 马永亮 , 贺克斌 . 2000. 细微大气颗粒物  $\text{PM}_{2.5}$  及其研究概况[ J ]. 世界环境 , 4 : 32 ~ 34.
- 杨书申 , 邵龙义 , 李金娟 , 等 . 2005. 透射电镜在气溶胶单颗粒分析中的应用[ J ]. 辽宁工程技术大学学报 , 24( 4 ) : 607 ~ 610.