

# 南京信息工程大学

## 硕士学位论文

### 沙尘气溶胶瞬时谱演变特征及拟合研究

作者:	顾宇丹
院系:	应用气象系
指导教师:	牛生杰教授
学科专业:	大气物理学与大气环境
答辩日期:	二零零六年五月

二零零六年五月

## 摘 要

利用美制 APS-3310A 型激光空气动力学气溶胶粒子谱仪在巴音浩特、盐池、银川等地获得了具有代表性的背景大气、浮尘、扬沙、沙尘暴天气的沙尘气溶胶资料。统计分析了不同天气沙尘气溶胶的浓度变化，粒子谱的瞬时演变特征，并用非线性最小二乘法对粒子谱进行拟合，并做了误差分析。

1、不同天气，沙尘气溶胶的浓度（数浓度、表面积浓度和质量浓度）的变化特征。背景、浮尘、扬沙、沙尘暴天气沙尘气溶胶浓度依次增大。背景大气沙尘气溶胶数浓度、表面积浓度和质量浓度分别为  $25\sim 29$  个/cm<sup>3</sup>、 $223\sim 255$  μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>、 $0.32\sim 0.4$  mg/m<sup>3</sup>；浮尘天气分别为  $28\sim 45$  个/cm<sup>3</sup>、 $249\sim 412$  μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup> 和  $0.25\sim 0.43$  mg/m<sup>3</sup>；扬沙天气分别为  $56\sim 156$  个/cm<sup>3</sup>、 $405\sim 1419$  μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup> 和  $0.43\sim 1.89$  mg/m<sup>3</sup>；沙尘暴天气分别为  $209\sim 359$  个/cm<sup>3</sup>、 $1337\sim 2533$  μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup> 和  $1.42\sim 2.95$  mg/m<sup>3</sup>。浮尘期间，粒子数浓度主要集中在  $1.0\sim 2.0$  μm 范围内；扬沙期间，粒子数浓度主要分布在  $0.1\sim 1.0$  μm、 $1.0\sim 2.0$  μm 之间；沙尘暴天气，粒子数浓度集中在小于  $2.0$  μm 范围内，且在  $0.1\sim 1.0$  μm 范围内的比重略大，达 0.5 以上。沙尘天气，表面积浓度在小于等于  $2.0$  μm 和大于  $2.0$  μm 范围内的比重相接近，分别在 0.45 和 0.55 附近；质量浓度在大于  $2.0$  μm 范围内的比重超过小于等于  $2.0$  μm 范围内的比重，达 0.7 以上。

2、分析不同沙尘天气气溶胶瞬时谱（浓度谱、质量谱、表面积谱）的演变特征。不同等级的沙尘天气，数浓度谱、表面积谱和质量谱的谱型之间存在差异。同一天气条件下，三种浓度谱的峰值浓度存在明显变化，变化趋势与总浓度保持一致。浮尘三种浓度谱的谱型较窄，对应的峰值直径主要在  $1.036\sim 1.286$  μm、 $2.128\sim 2.287$  μm 和  $2.287\sim 3.050$  μm 之间，浮尘结束时峰值粒径范围略有减小。扬沙浓度谱的谱型较宽。数浓度谱的峰值浓度在前 30min 内由  $5$  个/cm<sup>3</sup> 增至  $8$  个/cm<sup>3</sup> 左右，之后不断下降，结束时仅为  $3$  个/cm<sup>3</sup>；峰值直径主要在  $0.835\sim 0.897$  μm 和  $0.897\sim 0.964$  μm 两个粒径档中变动。表面积谱的峰值浓度随时间由  $36$  μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup> 增至  $56$  μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>，再减少到  $20$  μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup> 左右；峰值直径范

围开始为 2.287~3.050 $\mu\text{m}$ ，中期为 2.128~2.838 $\mu\text{m}$ ，末期为 2.128~2.458 $\mu\text{m}$ 。质量谱峰值直径在 2.458~5.829 $\mu\text{m}$  之间波动。沙尘暴发生时，数浓度谱的峰值浓度高达 23 个/ $\text{cm}^3$ ，维持该浓度水平一段时间后，峰值浓度开始下降，终止时降为 14 个/ $\text{cm}^3$ ；对应峰值直径在 0.723~0.835 $\mu\text{m}$  范围内变动。表面积谱的峰值浓度从初始 120 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$  降为结束时的 60 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ；峰值直径范围由起初的 2.287~2.458 $\mu\text{m}$  扩大到 2.128~2.838 $\mu\text{m}$  之间。质量谱也有同样的峰值浓度变化趋势，峰值粒径的变化范围为 2.838~4.697 $\mu\text{m}$ 。

3、对粒子谱进行了拟合和误差分析。沙尘气溶胶瞬时谱分布用对数正态分布函数拟合的参数如下：浮尘天气，数浓度谱、表面积谱、质量谱的峰值直径、标准差 $\sigma$ 和常数 $c$ 分别为 1.114~1.158 $\mu\text{m}$ 、1.50~1.53 和 3.3~5.3 个/ $\text{cm}^3$ ，1.611~1.689 $\mu\text{m}$ 、1.60~1.63 和 20.4~32.8 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ，2.011~2.121 $\mu\text{m}$ 、1.53~1.62 和 0.016~0.027 $\text{mg}/\text{m}^3$ 。扬沙天气，不同浓度谱对应的谱参数分别为 0.565~0.762 $\mu\text{m}$ 、1.75~2.03 和 10.3~25.5 个/ $\text{cm}^3$ ，1.134~1.675 $\mu\text{m}$ 、1.83~2.20 和 35.9~95.3 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ，2.249~2.641 $\mu\text{m}$ 、1.73~1.88 和 0.027~0.082  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。沙尘暴不同浓度谱的三个参数依次为 0.498~0.686 $\mu\text{m}$ 、1.66~2.0 和 55.3~80.3 个/ $\text{cm}^3$ ，1.150~1.56 $\mu\text{m}$ 、1.88~2.12 和 121~199 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ，2.192~2.519 $\mu\text{m}$ 、1.71~1.84 和 0.078~0.143  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。扬沙和沙尘暴期间，拟合峰值直径有小幅的变化，常数 $c$ 变化范围较大。浮尘三种浓度谱的标准差 $\sigma$ 在 1.5~1.7 之间；扬沙、沙尘暴表面积谱的标准差 $\sigma$ 位于 2 附近，它们的数浓度谱、质量谱的 $\sigma$ 在 1.6~2.0 之间。拟合参数落在常见值范围内，基本能反映沙尘过程中气溶胶的演变特征。

对数正态分布函数对沙尘气溶胶的瞬时谱（数浓度谱、表面积谱、质量谱）的拟合效果优于 D 分布函数和 Junge 分布函数的分段拟合，D 谱和 Junge 谱函数的拟合误差比对数正态分布函数的拟合误差大 10~60%左右。多数情况下，D 谱函数和 Junge 谱函数对同一粒径范围内粒子谱的拟合不能同时取得良好的拟合效果。

**关键词：**沙尘气溶胶；浓度；粒径；瞬时谱；拟合

## Abstract

### The Analysis and Fitting of the Instantaneous Size Distributions of Sand Aerosol Particles

Sand aerosol concentrations and particle size distribution have been measured by APS-3310A (made by U.S.A) in Bayinhaote, Yanchi and Yinchuan. A lot of data have been collected under different weather conditions, i.e. background, dust, sand-blowing, sand storm. The rules of sand aerosol concentrations' and instantaneous particle size distributions' variation are found through statistical analysis. The sand aerosol particle size distributions have been fitted by the method of non-linear least squares, and its errors are analyzed.

First, sand aerosol concentrations' variations are analyzed in different weather. Sand aerosol concentrations are changeable in different weather process. Sand aerosol concentrations (number concentrations, surface concentrations, mass concentrations) increase in turn in background atmosphere, dust, sand blowing, sand storm weather. Background atmospheric sand aerosol concentrations (number concentrations, surface concentrations and mass concentrations) are 25~29grains/cm<sup>3</sup>, 223~255μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>, 0.32~0.4mg/m<sup>3</sup>; In dust weather, they are 28~45grains/cm<sup>3</sup>, 249~412μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>, 0.25~0.43mg/m<sup>3</sup>; In sand-blowing weather, they are 56~156grains/cm<sup>3</sup>, 405~1419μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup> and 0.43~1.89mg/m<sup>3</sup>; And the aerosol concentrations in sand storm are 209~359grains/cm<sup>3</sup>, 1337~2533μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>, 1.42~2.95mg/m<sup>3</sup> in turn. The number concentrations of dust focus on 0.1~1.0μm. That of sand-blowing has the same distribution between 0.1~1.0μm and 1.0~2.0μm. The number concentrations of sand storm accumulate in the diameter less than 2.0μm, and the distribution in 1.0~2.0μm is larger than that in 0.1~1.0μm. In four weather, 90% of mass concentrations accumulate in 1.0μm ~10.0μm. The weight of surface concentrations in less than 2.0μm and great than 2.0μm to total surface

concentrations are 0.45 and 0.55. And that of mass concentrations in the diameters are 0.30 and 0.70 or so.

Second, the transmutation of sand aerosol particle size distributions (size-number distributions, size-surface distributions and size-mass distributions) are analyzed. During all weather, all concentration spectrums display a unimodal form, and different spectrums are different. Instantaneous concentration spectrums change a little, and the peak concentrations vary appreciably, changing with concentrations for identical sand weather. Three sand particle size distributions (size-number distributions, size-surface distributions, size-mass distributions) are narrow in dust. During the weather, corresponding peak diameters are in 1.036~1.286 $\mu\text{m}$ , 2.128~2.287 $\mu\text{m}$  and 2.287~3.050 $\mu\text{m}$  separately. In the end, the peak diameters' range decreased. The spectrums in sand-blowing are broad. The peak concentrations of size-number distributions increase from 5 grains/cm<sup>3</sup> to 8 grains/cm<sup>3</sup> in the first half an hour, and then its decrease to the end, and reach 3 grains/cm<sup>3</sup>. The peak diameters chiefly vary in 0.835~0.897 $\mu\text{m}$  and 0.897~0.964 $\mu\text{m}$ . To size-surface distributions, peak diameters vary from 36 to 56 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ , and then to 18 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ . The initial peak diameters are in 2.287~3.050 $\mu\text{m}$ , and that of intermediate stage is 2.128~2.838 $\mu\text{m}$ . In terminal phase it is 2.128~2.458 $\mu\text{m}$ . The peak diameters of size-mass distributions are in 2.458~5.892 $\mu\text{m}$ . When the sand storm begins, its peak concentrations reach 23 grains/cm<sup>3</sup>, and decrease to 14 grains/cm<sup>3</sup> after keeping such value some time. The peak diameters change in 0.728~0.835 $\mu\text{m}$ . And the size-surface and size-mass distributions' peak concentrations have the same variations. The peak diameters of size-surface distributions enlarge from 2.287~2.458 $\mu\text{m}$  to 2.128~2.838 $\mu\text{m}$ . The peak diameters of size-mass distributions are in 2.838~4.697 $\mu\text{m}$ .

Three, the sand aerosol particle size distributions have been fitted and its errors are analyzed. In dust weather, the simulated parameters of size-number distributions,

size-mass distributions and size-surface distributions are 1.114~1.158 $\mu\text{m}$ , 1.50~1.53 and 3.3~5.3grains/ $\text{cm}^3$ , 1.611~1.689 $\mu\text{m}$ , 1.60~1.63 and 20.4~32.8 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ , 2.011~2.121 $\mu\text{m}$ , 1.53~1.62 and 0.016~0.027 $\text{mg}/\text{m}^3$ . In sand-blowing weather, the corresponding simulated parameters are 0.565~0.763 $\mu\text{m}$ , 1.75~2.03 and 10.3~25.5grains/ $\text{cm}^3$ , 1.134~1.675 $\mu\text{m}$ , 1.83~2.20 and 35.9~95.3 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ , 2.249~2.641 $\mu\text{m}$ , 1.73~1.88 and 0.027~0.082  $\text{mg}/\text{m}^3$ . And in the sand storm, they are 0.498~0.686 $\mu\text{m}$ , 1.66~2.0 and 55.3~80.3grains/ $\text{cm}^3$ , 1.150~1.56 $\mu\text{m}$ , 1.88~2.12 and 121~199 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ , 2.192~2.519 $\mu\text{m}$ , 1.71~1.84 and 0.078~0.143  $\text{mg}/\text{m}^3$ . The simulated peak diameters in sand-blowing and sand storm change a little, and the constant C has great change. In sandblowing and storm weather, the standard deviation of size-surface distribution is nearby 2, and that of size-number and size-mass distributions are changing in 1.6~2.0. And that of dust is between 1.5 and 1.7. The fitting constants can reflect transmutation character of sand weather process.

The instantaneous measured size distributions of sand aerosol can be fitted very well by one log-normal distribution function whose fitting result is well than D model function and Junge model function's segmentation simulation. The relative error of D model and Junge model function is larger than log-normal distribution function's by 0.1~0.6 times. The simulate result of D model function and Junge model function can't get good effect in the same diameters' range at the same time.

**Key words:** sand aerosol; concentration; diameter; concentration distribution; fitting,

# 学位论文独创性声明

本人郑重声明：

- 1、坚持以“求实、创新”的科学精神从事研究工作。
- 2、本论文是我个人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。
- 3、本论文中除引文外，所有实验、数据和有关材料均是真实的。
- 4、本论文中除引文和致谢的内容外，不包含其他人或其它机构已经发表或撰写过的研究成果。
- 5、其他同志对本研究所做的贡献均已在论文中作了声明并表示了谢意。

作者签名： 顾宇丹

日 期： 2006.5

# 学位论文使用授权声明

本人完全了解南京信息工程大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或其指定机构送交论文的电子版和纸质版；有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅；有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索；有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

作者签名： 顾宇丹

日 期： 2006.5

# 第一章 前言

## 1.1 目的和意义

气溶胶是指气体的固体和(或)液体微粒与气体载体共同组成的多相体系。相应的,大气气溶胶是指大气与悬浮在气体中的固体和液体微粒共同组成的多相体系。大气气溶胶粒子的直径多在 $10^{-3}\sim 10^2\mu\text{m}$ 之间。很多过程可以产生气溶胶,根据来源可分为自然气溶胶和人为气溶胶<sup>[1,2]</sup>。目前由于人类和自然的共同作用下造成的沙尘气溶胶影响了整个世界。

中国是东亚沙尘气溶胶的主要源区,其主要来源于沙漠和干旱地区的风侵蚀及随风扬起过程。人类活动引起的土地利用的变化、沙漠化及城市化以及各种自然或人为因子引起的地表特征和气候变化都可能改变沙尘暴天气发生的频率和强度。每年春季大量沙尘气溶胶随沙尘暴天气进入到大气中,并且在适宜的大气环流背景下输送到上千公里以外的人口密集地区,从而危及和影响人类赖以生存的自然环境。沙尘气溶胶的表面能产生多种非均相化反应,影响着东亚地区酸雨的分布,硫酸盐气溶胶的形成及其谱分布以及海洋中微量成分的循环过程<sup>[3,4]</sup>。沙尘气溶胶粒子能吸收散射太阳辐射和地-气长波辐射。大量的沙尘气溶胶颗粒又作为云凝聚核能使云滴的数密度增加,云滴的平均半径变小,使云对太阳辐射的反射率增加或使云的维持时间加长,甚至使降水减少<sup>[5]</sup>。这些都会影响到地气系统的能量平衡,从而影响气候。气溶胶对环境的影响取决于它的时空分布、理化性质(包括粒子尺度谱分布、化学成分等等)以及下垫面的性质,而气溶胶的分布、理化性质及地表状况这些因子都有极大的时间和空间变率,因此客观准确地给出气溶胶粒子尺度谱分布、时空分布等特征是准确计算气溶胶气候效应的必要条件<sup>[6]</sup>。

本次研究特别选取贺兰山地区存在沙尘发生的天气过程,分析不同等级沙尘天气过程中,浓度(数浓度、表面积浓度、质量浓度)和粒子谱的变化特征。



## 1.2 国内外研究现状

沙尘暴是沙漠及其临近地区特有的一种灾害性天气，是一种历史现象<sup>[7]</sup>。多发于中亚、北美、中非及澳大利亚等地的沙漠附近。美国从 20 世纪 30 年代就先后开始了沙尘暴的时空分布、成因、结构以及监测与防治对策等方面的研究。我国自 70 年代开始对沙尘暴进行了研究，起初主要是沙尘暴的分类统计和天气学分析。徐国昌、陈敏连<sup>[8]</sup>等运用统计学和天气学等理论分析了 1977 年“4.22”沙尘暴的影响系统、演变特征、环流构造及形成原因。

1993 年 5 月 5 日我国西北地区特强沙尘暴天气造成巨大经济损失和生命财产损失，引起了我国政府和科学工作者两方面的高度重视。当年 9 月中国气象局和中国科学院联合在兰州召开首次沙尘暴天气研讨会，对沙尘暴产生机制、传输、防灾救灾等方面进行了深入的探讨<sup>[9]</sup>。江吉喜、钱正安、程麟生等分别分析沙尘暴的成因，探讨沙尘暴的分级标准以及对其发展结构和成因进行了中尺度数值模拟研究。这些工作具有一定代表性，为认识我国境内的沙尘暴起了一定的帮助作用，同时也使得沙尘暴及相关研究成为热点。

周自江<sup>[10]</sup>利用 1954~1998 年中国 681 个站的气象观测资料，分析了近 45a 我国扬沙和沙尘暴天气的时空分布特征。结果表明，我国西北、华北、东北和青藏高原地区是扬沙和沙尘暴的主要影响区，其中西北地区是多发区，存在两个明显的高频中心，即塔里木盆地及其周围地区（平均年沙尘暴日数 20.0~38.8d）<sup>[11]</sup>和阿拉善、河西走廊东北部及其邻近地区（平均年沙尘暴日数 37.7d）<sup>[11]</sup>；天气系统、地形特征、地表植被覆盖状况和降水量及其分布等因素都对扬沙和沙尘暴的地理分布有着显著影响。

李岩瑛等<sup>[12]</sup>通过对甘肃省河西走廊东部民勤、武威等四站建站以来近 50a 的气象资料详细分析了河西走廊东部沙尘暴天气发生的时空特点、成因及造成的危害情况。指出河西走廊东部的沙尘暴天气主要是大风天气过程与其特殊的地形地貌、干旱气候背景相互作用的结果。

张仁健等<sup>[13]</sup>对近 40a 来的气象记录分析指出, 中国北方春季大风日数的增减与沙尘暴日数的增减是一致的, 东亚季风有明显的 10~50 年尺度的变化。亚洲季风与厄尔尼诺事件有着密切关系, 在厄尔尼诺年, 冬春季大风天气较少, 而在反厄尔尼诺年, 大风天气出现频繁。2000 年正处于 20 世纪最强的一次厄尔尼诺事件以后的反厄尔尼诺事件的高峰期, 这一大范围的海洋-大气过程, 其变化速度和强度均超过往年, 造成近年来中国北方冬、春季寒潮大风的频繁出现, 为沙尘暴的频繁发生提供了动力学条件。

方宗义等<sup>[14]</sup>对 2000 年沙尘暴的分析指出加深的东亚大槽和东北冷涡可以产生偏北路径的大范围沙尘暴。生成沙尘暴的天气系统可分为短波槽、东北冷涡和西风带长波槽东移三类过程。

Goudie & Middleton<sup>[15]</sup>总结了沙尘暴对环境和人类造成的种种危害, 并选取南、北半球共 30 个气象站的资料, 分析了美国大平原、墨西哥、摩洛哥、撒哈拉、苏丹、中东、俄罗斯、中国、蒙古、澳大利亚等国沙尘暴和降水量随时间的演变, 认为沙尘暴的发生趋势并不是全球统一的。一些站的沙尘暴呈增加的趋势(如西非), 一些站呈减少的趋势(如墨西哥城), 另一些站呈现周期变化趋势。自然过程(总降水量、积雪、风力等)基本决定沙尘暴的发生频率, 人为活动也能对沙尘暴发生频率产生一定影响。

这些研究大致搞清了沙尘暴源地、发生频次的年变化等宏观成因; 但没有把沙尘暴的启动同微观的物理量之间相联系。

目前, 我国在沙尘(暴)气溶胶的理化特性(沙尘气溶胶质量浓度的时空分布、沙尘气溶胶谱分布、化学组分、光学特征等)等研究方面已取得了进展<sup>[15-21]</sup>, 为研究沙尘启动输送沉降及其环境气候效应的影响奠定了基础。20 世纪 80 年代以来, 许多学者对此进行外场观测研究<sup>[21-37]</sup>, 给出沙尘暴中沙尘粒子的平均尺度分布和平均浓度的变化; 根据多波长太阳光度计和半球辐射计的初步观测结果, 给出沙尘暴发生期间的沙尘光学厚度, 反演出粒子谱分布; 利用激光空气动力学粒子谱仪等仪器给出了沙尘粒子谱和质量浓度的初步观测结果,

并探讨沙尘质量浓度与气象条件的关系，谱分布与相对湿度的关系等，均取得了一定的成果。

周明煜等<sup>[26]</sup>曾研究了 1980 年 4 月 18 日袭击北京的一次沙尘暴粒子的浓度和粒径分布。曲绍厚<sup>[27]</sup>等则讨论了这次沙尘暴的来源，结果表明这次沙尘来源比较复杂，它不只来源于某一单一地区。杨东贞，王超<sup>[22]</sup>分析了 1990 年 4 月发生的两次沙尘暴天气过程及其产生的原因，并用逆向轨迹法追溯了沙尘的源地。得出沙尘气溶胶的 TSP 浓度在沙尘暴期间比无沙尘暴时要高数倍至一个量级左右，沙尘气溶胶主要集中在大粒子 ( $d > 2.1 \mu\text{m}$ ) 中的结论。他又和颜鹏<sup>[28]</sup>等利用常规气象观测资料、卫星云图以及 1988、1990、1992、1993、1995、2000 年等年北京风沙天气期间所采集的气溶胶样品的分析结果，长时间系统地研究了北京风沙天气分布特征，产生风沙天气的主要原因及沙尘的来源等。得出了北京的风沙天气主要出现在春季，是造成春季大气污染的重要原因之一；北京春季风沙天气是由沙尘暴、浮尘和扬沙共同造成的，但以扬沙引起的频率为最高，占 71.4%；风沙期间大气气溶胶与无风沙时气溶胶的物理化学特征有明显的差异。沙尘天气发生期间各谱段的 TSP 都高于无沙尘时的值，且主要分布在粗粒子组 ( $d > 2.1 \mu\text{m}$ )，约占 93.7%，而沙尘天气发生前，粗粒子组的 TSP 只占 53.6%；最大粒径组 ( $d > 11.0 \mu\text{m}$ ) 的 TSP 浓度比沙尘天气发生前高出 43 倍，比结束时高 8 倍多，再次验证了 90 年的结果。但他们的研究用的是日本产 Anderson 分级采样器共 8 级，采样时间为小时量级，因此，所得到的沙尘气溶胶质量浓度的粒径分布即质量谱，是采样时间内的平均质量谱。不能得到沙尘气溶胶浓度的连续演变特征。

牛生杰等<sup>[29-33]</sup>于 1996 年至 1999 年 4、5 月间深入沙漠源地(腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠、毛乌素沙地)利用美制 APS-3310A 型激光空气动力学粒子谱仪、KB120、太阳光度计等设备，对沙尘天气进行了系统测量，并利用飞机观测沙漠地区气溶胶。共观测到沙尘暴 4 次，扬沙 4 次，浮尘 2 次，背景大气 3 次。分析得出沙漠地区上空沙尘气溶胶粒子数浓度一般为  $1 \sim 10$  个/ $\text{cm}^3$ ，平均直径为

1.6~4.6 $\mu\text{m}$ ，最大直径为 13.0~28.0 $\mu\text{m}$ ；TSP 质量浓度为 0.01~0.08  $\text{mg}/\text{m}^3$ ；PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 分别占 TSP 的 3.6%~13.8%和 50.3%~88.1%。高空沙尘气溶胶数浓度与下垫面状况密切相关，沙漠地表上空的粒子数浓度高于植被覆盖较好的地区上空；当在沙漠地区上空飞行轨迹为上升、平飞、下降时，沙尘气溶胶粒子谱呈现出由单峰偏态、双峰、正态到单峰偏态等形式的演变。

张仁健等<sup>[34]</sup>对 2000 年 4 月 6 日发生在北京的强沙尘暴，采用单孔分级式撞击采样仪对沙尘气溶胶进行采样。其粒径分为 8 级。气溶胶粒子数浓度用苏州产 BCJ-1 尘埃粒子计数器采样，粒径分 6 档。并用质子激发 X (PIXE) 荧光法对其化学成分进行分析，结果表明北京春季沙尘污染极为严重。沙尘暴期间，20 种元素总质量浓度高达 1536 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，是 1999 年春季的 7 倍，研究还发现，沙尘暴期间绝大多数元素浓度在粒径大于 16 $\mu\text{m}$  处出现一个非常高值，远高于其他谱段的浓度，而在沙尘暴后及其他时间，还没有观测到这种谱分布。沙尘暴期间的粗粒子 ( $d>2\mu\text{m}$ ) 和细粒子浓度大幅度增加，分别是沙尘暴后的 20 倍、7 倍。

庄国顺等<sup>[35]</sup>利用 FA-3 型 Andersen 采样器也对 2000 年 4 月 6 日北京沙尘暴进行了监测。分析了各种元素的富集因子，地壳元素的富集系数比平日高，而污染源元素相比于平日富集系数下降。S 在沙尘暴中含量高达 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，比平常高出 4 倍，主要来源于长期传输过程中由气体到气溶胶的转化。

盛立芳等<sup>[36]</sup>根据 TSP, PM<sub>10</sub> 及分级粒子质量浓度观测资料，分析了 2002 年春季发生于我国北方的 2 次沙尘天气过程对青岛大气环境的影响。得出沙尘天气期间 2~7 $\mu\text{m}$  粒子为影响青岛的主要成分。根据地面气象资料和 PM<sub>10</sub> 连续监测资料发现，在地面风向转北之前，高空气流传输速度快，其携带的沙尘会首先影响到青岛。

奚晓霞等<sup>[37]</sup>通过对兰州地区春季大气背景、浮尘、扬沙、沙尘暴天气的大气采样，得到了不同天气状况下大气气溶胶的浓度、PM<sub>10</sub>，粒子谱分布在背景大气、浮尘天气均为双峰型，扬沙天气为 3 峰型，沙尘暴则为单峰型。

高卫东等<sup>[38]</sup>指出沙尘暴期间,塔里木盆地沙尘气溶胶小颗粒绝对浓度大幅度增加;百分比含量也迅速增加;小颗粒( $<3.3\mu\text{m}$ )与大颗粒( $>3.3\mu\text{m}$ )的相对浓度呈大幅度增加趋势,说明尘暴期间由于当地沙源丰富,细小颗粒迅速被携带到高空,成为沙尘气溶胶的主要来源。

Murayama 等<sup>[39]</sup>在中国合肥、韩国汉城、日本长崎、东京、札幌等地布设激光雷达、天空辐射计、激光粒子计数器等组成沙尘暴监测网,成功捕捉了1998年4月14~23日发源于塔克拉玛干的沙尘暴,结果表明:在3km高度附近有一个沙尘累积高值区;沙尘气溶胶平均体积谱中粗模态粒子半径位于 $2\mu\text{m}$ 处。并给出了沙尘气溶胶数浓度和 $\text{PM}_{10}$ 随时间的变化,但这种时间间隔为小时量级,所得结果只代表下游沙尘气溶胶的物理特性,因此沙尘气溶胶在远距离输送过程中的物理化学性质的变化不得而知,他们打算今后要深入亚洲内陆沙尘气溶胶源地开展观测研究。

Haywood 等<sup>[40]</sup>对 Saharan 沙尘暴进行两架次飞机探测,飞机上装有 GPS 飞机气象仪、辐射仪器和粒子测量系统(PMS)。PMS 包括 PCASP-100X 和 FSSP 两个探头,分别探测  $0.05\sim 1.5\mu\text{m}$  和  $1.0\sim 23\mu\text{m}$  范围内的粒子谱和粒子浓度。1999年5月8日的飞行中,飞机从高空下降至2400m高度进行两个5分钟的水平直线飞行,给出了平均粒子谱分布,其特征是半径为 $1\mu\text{m}$ 的粒子数在沙尘天气中增长最多;沙尘累积峰值区在3km附近,最大粒子半径小于 $10\mu\text{m}$ 。该项目主要研究沙尘气溶胶的光学特性和直接辐射效应,对沙尘粒子谱就没进行细致分析。

Husar 等<sup>[41]</sup>在太平洋两岸布设激光雷达、太阳光度计、机载采样仪器、地面监测网和常规卫星监测,成功监测了1998年4月中旬的沙尘暴。美国西海岸25个环境监测站提供的 $\text{PM}_{10}$ 由平时的 $10\sim 25\mu\text{g}/\text{m}^3$ 增加到1998年4月26日和5月1日的 $65\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、4月29日华盛顿州和俄勒冈州 $\text{PM}_{10}$ 超过 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。华盛顿 Mount Rainier, 俄勒冈 Crater Lake 和明尼苏达 Boundary Water 1988~1998年监测结果表明 $\text{PM}_{2.5}$ 均小于 $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,而1998年4月29日上述三个站 $\text{PM}_{2.5}$ 达

5~10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,美国西海岸沙尘气溶胶质量中值直径约为 2~3 $\mu\text{m}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  占沙尘 TSP 的 30~50%。因此,他们认为是亚洲沙尘气溶胶传输到了美洲,但这只能是一种可能性,应对此进行源解析,提出进一步的证据,该项研究也没有给出沙尘暴下游地区粒子谱的瞬时演变。

Chun 等<sup>[42]</sup>1998 年 4 月 19 日在韩国观测了沙尘气溶胶粒子谱和数浓度随时间的演变。观测到的体积谱分布函数在直径 1~5 $\mu\text{m}$  之间出现峰值,体积平均直径为 2 $\mu\text{m}$ ,对数标准差为 1.6。对不同粒径粒子数浓度的连续观测表明,在汉城和 Anmyon 岛观测的气溶胶数浓度,对于 1.5~10 $\mu\text{m}$  之间的粒子有很好的相关,小于 0.8 $\mu\text{m}$  和大于 10 $\mu\text{m}$  的粒子几乎不相关,说明这两类粒子与直径为 1~10 $\mu\text{m}$  的粒子来源不同。亚洲沙尘粒子大量输送的直径范围为 1.35~10 $\mu\text{m}$ ,主要为 2.23~6.06 $\mu\text{m}$ 。传输的粒子群中缺乏大于 10 $\mu\text{m}$  的粒子,这类粒子在从塔克拉玛干戈壁传向韩国的 2~3 天中首先因重力沉降而被清除了。由气象资料和卫星图像可以推测 1998 年 4 月 15 日沙尘在清除过程中并没有大量跨太平洋输送。

以上的对于沙尘气溶胶外场研究主要针对平均谱分布特征和化学组分,并没有深入分析沙尘浮扬、积累、各模态相互作用、输送和沉降等过程中沙尘气溶胶浓度的时间演变特征和沙尘气溶胶粒子谱的连续演变特征,也没有对粒子谱进行拟合。

除了对沙尘暴的天气背景,起沙与输送机制、物理化学等特性方面进行了深入的研究外,近几年还开展了沙尘暴的模式研究。

陈伟民<sup>[43]</sup>利用改进型 PSU/NCAR 中尺度模式 (MM4 标准版),以常规观测资料作为初始场,较好地模拟了 1994 年 4 月 5~11 日发生的沙尘暴过程中海平面气压变化及部分地区的大风。同时提出了沙尘暴中尺度的研究与暴雨中尺度系统的研究是区别的,积云对流参数化不是特别重要,在涉及研究沙尘暴数值模式中,应当合理地处理其他的热力、动力过程及外强迫源的作用。

刘春涛等<sup>[44]</sup>为了研究黑风暴和沙尘暴的沙尘形成、输送及沉降机制,把一种沙尘源、汇项的参数化方案和一个沙尘输送方程引入已有的 MM4 中尺度数

值模式模拟系统。应用这个改进和发展的模式模拟系统基本成功地模拟了“93.5”黑风暴的天气系统演变及其沙尘浓度的近地层和垂直分布以及沙尘的沉降与输送。模拟结果表明,用包括沙尘输送方程及其沙尘源、汇项参数化方案的中尺度数值模式来研究黑风暴的沙尘形成、输送和沉降机制是一种具有应用前景的方法。

刘毅<sup>[45]</sup>等运用 MM4 中尺度动力学模式结合沙尘气溶胶传输模式,模拟分析了 1992 年 4 月 10 日发生的一次沙尘暴天气及沙尘气溶胶(黄沙)的输送过程。得出蒙古气旋冷锋后的大风是沙尘扬起的主要动力,地形抬升、白天混合层内的湍流扩散和锋区强烈的上升气流将沙尘输送到高层。沙尘气溶胶的水平输送主要通过对流层下层和上层两层向下游输送。低层沙尘随冷锋一起向下游输送,移速较慢;高层沙尘主要通过西风气流迅速输送到下游区域。

黄美元<sup>[46]</sup>等在比较国内外相关起沙机制模型的基础上,结合中国北方大量气象台站的有关起沙过程的观测资料,提出了一个适合我国北方的用于黄沙输送模拟与预报的新起沙机制模型。

周荣卫<sup>[47]</sup>等建立了一个包含沙尘起沙、输送、干沉积和湿沉积过程的气溶胶输送扩散模式,并和中尺度气候模式 RIEMS 相连接研究了 1998 年 4 月 14 日~17 日和 1997 年 10 月的沙尘起沙、输送、干沉积和湿沉积的过程。结果表明沙尘在我国西北的沙地和沙漠地区起沙后,会逐渐向我国的东南方向移动并在输送过程中沙尘浓度值逐渐减小。

沙尘气溶胶对云的核化、辐射传输、大气层结、锋生等过程产生影响,以上这些受沙尘粒子影响的过程又均直接与大气降水过程相关。因此,沙尘暴的出现,又有可能影响降水过程。以往国际上存在两种相反的观点:长期以来的纯理论分析认为,沙尘气溶胶中大量的大粒子可充当凝结核中的巨核,从而加速碰并过程,使降水增强<sup>[48]</sup>;但近年来越来越多的观测事实与之相反,沙尘气溶胶中的小粒子会使 CCN 增加而阻碍降水发展,虽然有大粒子,但可溶性小,成核较难。对此 Rosenfeld 等<sup>[49]</sup>利用卫星、星载雷达和飞机进行观测,结果显示,

沙尘暴路径上云滴有效半径小于启动降水过程的阈值  $14\mu\text{m}$ , 从而出现明显的沿沙尘输送路径的带状无降水或微弱降水区域。大气气溶胶粒子影响降水过程最明显的例子可能便是低纬降雨带南移, Rotstayn<sup>[50]</sup>对此进行了数值模拟研究, 认为这一现象是南北半球气溶胶分布及增长趋势不均造成的。

数值模拟是以实测资料为依据。对于沙尘气溶胶输送过程中微物理作用还是需要外场观测资料的分析结果来支持。

### 1.3 论文的主要内容

分析盐池、银川、巴音浩特等地不同沙尘天气气溶胶资料, 揭示沙尘天气过程中, 气溶胶浓度特征和谱型的演变, 并对粒子谱进行拟合。

#### 1.3.1 沙尘气溶胶浓度特征

分析不同天气气溶胶数浓度、质量浓度、表面积浓度的变化特征, 及不同粒径范围内浓度(数浓度、质量浓度、表面积浓度)的变化。

#### 1.3.2 沙尘气溶胶瞬时谱分析及拟合

总结沙尘天气过程中粒子谱的分布规律和瞬时演变特征, 对粒子谱进行拟合及误差分析, 给出具有代表性的谱分布参数。

#### 参考文献:

- [1]秦瑜,赵春生,等.大气化学基础[M].北京:气象出版社,2003:1~202.
- [2]刘毅,王明星,张仁健,等.中国气溶胶研究进展[J].气候与环境研究,1999,4(4):406~414.
- [3]王玮,赵德山,陈延智,等.大气气溶胶与降水相互影响的探讨[J].环境科学研究,1988,1(1):38~44.
- [4]章澄昌.大气气溶胶教程[M].北京:气象出版社,1995:1~328.



- [5]庄国顺,郭敬华,袁葱,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[J].科学通报,2001,46(3):191~196.
- [6]Niu Shengjie, Fan Shuxian, Sun Zhaobo et al, Numerical Simulations of Mud-rain causing mechanism[J],2004,submitted to Journal of Meteorological society of Japan..
- [7]张德二.我国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析[J].中国科学, 1984, 3(B):278~288.
- [8]徐国昌,陈敏连,吴国雄,等.甘肃省“4.22”特大沙尘暴分析[J].气象学报,1979,37(1):26~35.
- [9]朱福康,汤绪.我国沙尘暴天气的研究-全国沙尘暴天气研讨会综述[C].气象科技,1994,1:10~13.
- [10]周自江.近45年中国扬沙和沙尘暴天气[J].第四纪研究,2001,21(1):9~17.
- [11]王式功,杨德保,金炯等.我国西北地区黑风暴的成因和对策[J].中国沙漠,1995,15(1):19~30.
- [12]李岩瑛,杨晓玲,王式功.河西走廊东部近50a沙尘暴成因、危害及防御对策[J].中国沙漠,2002,22(3):283~287.
- [13]张仁健,韩志伟,王明星,等.中国沙尘暴天气的新特征及成因分析[J].第四纪研究,2002,22(4):374~380.
- [14]方宗义,王炜.2002年我国沙尘暴的若干特征分析[J].应用气象学报,2003,14(5):513~521.
- [15]Goudie. A.S,and N.J. Middleton.The Changing Frequency of Dust Storms Through Time, Storm Vol II,Ed,R.Pielke,Jr,and R.Pielke,Sr.Routledge. Hazards and disasters series,2001,322-339.IDNDR(International Decade for Natural Disaster Reduction)
- [16]Gillete,D.,Threshold friction velocities for dust production for agricultural soil[J]. J Geophys Res, 1988,93:12645~12662.
- [17]Gillete,D.,andR.Passi.,Modeling dust emission caused by wind erosion[J]. J Geophys Res, 1988,93:14233~14242.
- [18] Gillete , D., and K.J. Hanson , Spatial and temporal variability of dust production caused by wind erosion in the United States[J]. J Geophys Res, 1989,D2(94):2197~2206.
- [19]王明星,张仁健.大气气溶胶研究的前沿问题[J].气候与环境研究,2001,6(1):119~124.

- [20]安俊岭,张仁健,韩志伟.北方 15 个大城市总悬浮颗粒物的季节变化.气候与环境研究,2000,5(1):25~29.
- [21]王庚晨.大气气溶胶浓度及其谱分布的某些特征[J].大气科学,1982,6(2):211~216.
- [22]杨东贞,王超,温玉璞,等.1990 年春季两次沙尘暴特征分析[J].应用气象学报,1995,6(1):18~26.
- [23]来光年,沈新伊,汪新福,等.北京大气气溶胶元素组分及粒度分布的研究[J].中国环境监测,1989,5(5):10~13.
- [24]谷福印,马培民,游来光,等.北京地区大气气溶胶的物理特征[J].环境科学学报,1989,9(3):318~327.
- [25]游荣高,任丽新.北京采暖期间和采暖期前大气气溶胶物理特性的对比研究[J].大气科学,14(3):354~363.
- [26]周明煜,曲绍厚,宋锡铭,等.北京地区一次沙尘暴过程的气溶胶特征[J].环境科学学报,1981,2:207~218.
- [27]曲绍厚.北京地区一次沙尘暴过程的来源[J].环境科学学报,1984,4:80~85.
- [28]杨东贞,颜鹏,徐祥德,等.北京风沙天气的气溶胶特征[J].应用气象学报,2002,13(7):185~194.
- [29]牛生杰,孙继明,桑建人.贺兰山地区沙尘暴发生频次的变化趋势[J].中国沙漠,2000,20(1):55~58.
- [30]牛生杰,章澄昌,孙继明.贺兰山地区沙尘气溶胶粒子谱分布的观测研究[J].大气科学,2001,25(2):243~252.
- [31]牛生杰,孙继明,陈跃,等.贺兰山地区沙尘气溶胶质量浓度的观测分析[J].高原气象,2001,20(1):82~87.
- [32]牛生杰,章澄昌,孙继明,等.贺兰山地区大气气溶胶光学特征研究[J].高原气象,2001,20(3):29~301.
- [33]牛生杰,章澄昌.贺兰山地区沙尘气溶胶化学组分及富集因子分析[J].中国沙漠,2000,20(3):264~268.

- [34]张仁健,王明星,浦一芬,等.2000年春季北京特大沙尘暴物理化学特性的分析[J].气候与环境研究,2000,5(3):259~266.
- [35]庄国顺,郭敬华,袁蕙等.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[J].科学通报,2001,46(3):191~197.
- [36]盛立芳,耿敏,王园香,等.2002年春季沙尘暴对青岛大气气溶胶的影响[J].环境科学研究,2003,15(5):11~17.
- [37]奚晓霞,李杰,权建农,等.兰州市春季沙尘气溶胶质量浓度的若干研究[J].干旱区研究,2004,21(2):112~116.
- [38]高卫东,姜巍,等.塔里木盆地地区沙尘气溶胶特征分析[J].干旱区资源与环境,2003,16(4):75~78.
- [39]Murayama,T.,N.,Sugimoto,and I.Uno,et al.Ground-based network observation of Asian dust events of April 1998 in east Asia[J].J.Geophys.Res., 2001,106(D16):18345~18359.
- [40]Haywood,J.M.,P.N.,Francis,and M.D.,Glew,et al.Optical properties and direct radiative effect of Saharan dust:A case study of two Saharan dust outbreaks using aircraft data[J].J Geophys Res, 2001,106(D16):18417~18430.
- [41]Husar,R.B.,D.M.Tratt, and B.A.Schichtel,etal.Asian dust events of April 1998[J].J Geophys Res, 2001,106(D16):18317~18330.
- [42]Chun,Y.,J.Kim,J.C.Choi,K.O.Boo,etal. Characteristic number size distribution of aerosol during Asian dust episode in Korea[J].Atmos Environ,2001,35(15):2715~2721.
- [43]陈伟民,王强,牛志敏,等.中国西部“4.5”沙尘暴过程中尺度低压的数值模拟[J].中国沙漠,1996,6(2):140~144.
- [44]刘春涛,程麟生.黑风暴的沙尘形成与输送参数化及中尺度数值试验[J].气象学报,1997,55(6):726~739.
- [45]刘毅,周明煜,等.北京及近中国海春季沙尘气溶胶浓度变化规律的研究[J].环境科学学报,1999,19(6):642~647.
- [46]黄美元,王自发,等.东亚地区黄沙长距离输送模式设计[J].大气科学,1998,22(4):625~637.

- [47]周荣卫,刘红年,蒋维楣,等.中国地区沙尘气溶胶输送过程的数值模拟[J].气象科学,2004,24(1):17~25.
- [48] Yin,Y.,Z.Levin,T. Reisin,and et al. The effects of giant cloud condensation nuclei on the development of precipitation in convective clouds -- A numerical study[J].Atmos. Research,53:91~11.
- [49]Rosenfeld,D.,Y.Rudich,,R.Lahav,etal.Desert dust suppressing precipitation:A possible desertification feedback loop[J].PNAS,Proc.Natl Acad Sc U.S.A.,98(11): 5975~5980..
- [50]Rotstayn,L.D.,U.Lohmann,etal.Tropical rainfall trends and the indirect aerosol effect[J].J Climate,15: 2103~2117.

## 第二章 沙尘气溶胶的浓度特征

### 2.1 引言

宁夏地处黄土高原西北部边缘,境内地势南高北低,地表侵蚀、水土流失严重。其上游甘肃河西、内蒙古一带沙漠纵横,西部有腾格里沙漠,西北部有巴丹吉林和乌兰布和沙漠,东南部有毛乌素沙地(图 2.1)。三大沙漠构成了我国第二大沙漠区。而贺兰山处于这三大沙漠之间,东北—西南走向,成为干旱区的自然分界线,具有干旱少雨、夏热冬寒、昼暖夜凉、风大、蒸发大的气候特点,加上周围沙源充足,贺兰山地区春季常发生浮尘、扬沙等天气现象,严重时会出现沙尘暴甚至破坏力极强的强沙尘暴天气(瞬时风速 $\geq 25\text{ms}$ ,能见度 $< 50\text{m}$ )。据 12 个气象站各 40 余年气象资料统计分析,4 月和 5 月分别是贺兰山东、西两侧全年沙尘暴的高发期,两侧平均沙尘暴发生次数分别为 2.6 次和 3.2 次,最高达 5.1 次<sup>[1]</sup>。

沙尘暴是地壳物质和土壤微粒进入大气层并通过大气传输而进行物质的再分布和再循环的重要过程。所携带的沙尘粒子是一种大范围、高浓度的污染物。大气中的沙尘气溶胶的浓度变化,对环境有着极为显著的影响,尤其是细颗粒( $\text{PM}_{2.5}$ )。它易于富集空气中的重金属、酸性氧化物、有机污染物、细菌和病毒等,且能较长时间悬浮在空中,并输送到很远的地区。

我们于 1998 年、1999 年 4、5 月分别在内蒙古巴音浩特( $105^{\circ}40'E, 38^{\circ}50'N, 1561.4\text{m}$ )、宁夏盐池气象站( $107^{\circ}24'E, 37^{\circ}47'N, 1347.8\text{m}$ )和银川机场气象台( $106^{\circ}00'E, 38^{\circ}29'N, 1152.0\text{m}$ )用美制 APS-3310A 型激光空气动力学气溶胶粒子谱仪进行采样,分析了贺兰山地区背景大气、浮尘、扬沙和沙尘暴天气(以测站气象站观测的天气现象和能见度作为区分标准)下气溶胶的浓度(数浓度、表面积浓度、质量浓度)特征。

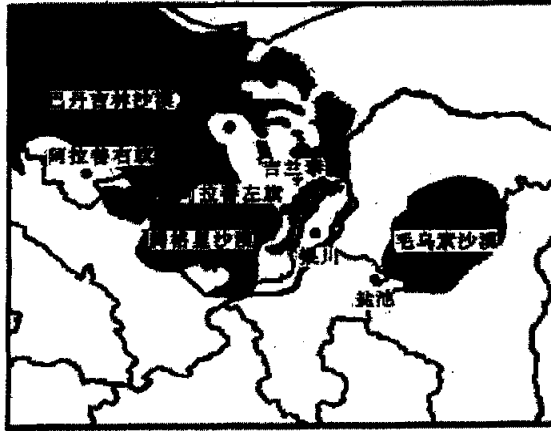


图 2.1 贺兰山地区沙漠分布示意图（阴影区为沙漠区）<sup>[2]</sup>

## 2.2 资料来源和仪器介绍

测量仪器为美制 APS-3310A 型激光空气动力学气溶胶粒子谱仪（仪器外型同 APS-3321，见图 2.2）。仪器中分离的激光束测量粒子的末速度，由于粒子处于低雷诺数的环境，其末速度相当于粒子空气动力学直径，测得的电信号进行转换所得即为粒子空气动力学直径。该仪器在 0.5~30.5 $\mu\text{m}$  范围内共分 57 档。仪器可以连续几个月、几天、几个小时、甚至几秒采样，采样流量，采样间隔都可以根据需要来设置。它能同时给出气溶胶颗粒的空气动力学粒径、气溶胶数浓度、体积浓度及数浓度、体积浓度的累积百分比。APS 比起以往其它粒子谱仪谱宽、分级多、重叠计数的误差小，能减少虚假峰的出现。一般采样时把显示浓度水平调低，维持在 100 个/ $\text{cm}^3$  以下，以此减小仪器误差。在沙尘暴的采样观测中，实际浓度资料偏低，表面积和质量误差甚大，主要是当数浓度高时、重叠效应使示值偏小甚多。但对背景大气和浮尘、扬沙天气一般比较准确。仪器架设的高度为 1~4m，这一高度能够有效地避免地表土壤颗粒的影响。

有关采样地点、时间、长度、天气状况等情况见表 2.1。

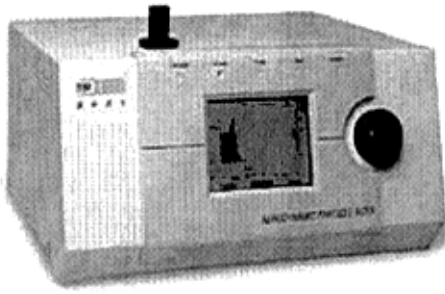


图 2.2 3321-APS 型空气动力学粒子谱仪

表 2.1 观测资料

地理位置	站名	日期	采样时间	样本数	持续时间 (s)	采样间隔 (s)	天气现象	最大风速 (m/s)
贺兰山东侧 (气象局院内)	盐池	04/22/98	17:30:58~18:21:12	90	30	3~4	沙尘暴	10.8
	盐池	04/28/98	09:52:49~11:20:03	152	30	3~4	扬沙	12.1
	银川	05/19/98	23:52:26~00:49:24	100	30	3~4	浮尘	3.7
贺兰山西侧 (阿拉善盟气象局院内)	巴音浩特	04/11/99	12:26:34~12:28:29	6	20	4	背景天气	0.7

## 2.3 不同天气条件下沙尘气溶胶浓度分布特征

### 2.3.1 不同天气条件下沙尘气溶胶浓度变化

地面气象观测规范<sup>[3]</sup>定义：浮尘是由于尘土、细沙均匀地浮游在空中，使水平能见度小于10.0千米。浮尘多为远处尘沙经上层气流传播而来，或为沙尘暴、扬沙出现后尚未下沉的细粒浮游在空中而成。扬沙是由于大风将地面尘沙吹起，使空气相当混浊，水平能见度在1.0千米至10.0千米以内。沙尘暴是由于强风将地面大量尘沙吹起，使空气很混浊，水平能见度小于1.0千米。据定义可见，三种沙尘天气下沙尘气溶胶的浓度肯定存在不同的变化。因此讨论这三种沙尘天气浓度的演变特征。

1998年和1999年4、5月间,对贺兰山地区背景大气、浮尘、扬沙、沙尘暴天气采样各1次。有关采样的浓度和峰值浓度(数浓度、表面积浓度、质量浓度)等参量见表2.2。由表2.2可以看出,巴音浩特的背景气溶胶数浓度、表面积浓度、质量浓度分别为 $25\sim 29$ 个/ $\text{cm}^3$ 、 $223\sim 255\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 、 $0.32\sim 0.4\text{mg}/\text{m}^3$ 。质量浓度的变化范围大于吉兰泰(腾格里沙漠)、盐池(毛乌素沙地)和阿拉善右旗(巴丹吉林沙漠)三地的背景气溶胶浓度范围 $0.109\sim 0.142\text{mg}/\text{m}^3$ ,也高于银川背景气溶胶的质量浓度(平均 $0.098\text{mg}/\text{m}^3$ ),是其他地区背景质量浓度的 $18\sim 30$ 倍<sup>[4]</sup>。这与他的地理位置有关,巴音浩特地处巴丹吉林沙漠的边缘,观测点设在阿拉善盟气象局院内,此处是巴音浩特的最高点,向西约 $10\text{Km}$ 处即是腾格里沙漠,因沙源充足,沙尘粒子经湍流输送至近地层大气,造成该地沙尘气溶胶质量浓度和数浓度均高于其他地区。

银川观测到的浮尘天气的沙尘气溶胶数浓度、表面积浓度及质量浓度分别为 $28\sim 45$ 个/ $\text{cm}^3$ 、 $249\sim 412\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 和 $0.25\sim 0.43\text{mg}/\text{m}^3$ ,峰值数浓度为 $2\sim 4$ 个/ $\text{cm}^3$ 。此次浮尘采样的浓度(数浓度、表面积浓度、质量浓度)略高于背景采样,但远低于同天气等级下盐池<sup>[4]</sup>( $140$ 个/ $\text{cm}^3$ 、 $0.51\text{mg}/\text{m}^3$ )、北京<sup>[5]</sup>( $0.979\text{mg}/\text{m}^3$ )等地的采样。表明即使属于同一天气等级,沙尘气溶胶的质量浓度也能相差 $2\sim 4$ 倍,这与采样区域、采样仪器有关。银川浮尘采样浓度低于盐池,是因为银川浮尘天气的沙尘气溶胶是远方输送来的,以及贺兰山的地形作用。

盐池扬沙天气的沙尘气溶胶数浓度、表面积浓度和质量浓度分别为 $56\sim 156$ 个/ $\text{cm}^3$ 、 $405\sim 1419\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 和 $0.43\sim 1.89\text{mg}/\text{m}^3$ 。同盐池其他几次扬沙天气(同时段)采样的数浓度和质量浓度的平均值( $97$ 个/ $\text{cm}^3$ 和 $0.42\text{mg}/\text{m}^3$ )<sup>[4]</sup>相比,该次扬沙强度属于中等。峰值粒子数、峰值表面积浓度和峰值质量浓度分别为 $3\sim 8$ 个/ $\text{cm}^3$ 、 $19.35\sim 64.31\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 和 $0.02\sim 0.094\text{mg}/\text{m}^3$ ,是浮尘天气相对值的 $1\sim 3$ 倍。

1998年4月28日盐池观测到沙尘暴。整个沙尘暴过程,气溶胶数浓度、表面积浓度以及质量浓度分别为 $209\sim 359$ 个/ $\text{cm}^3$ 、 $1337\sim 2533\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 和



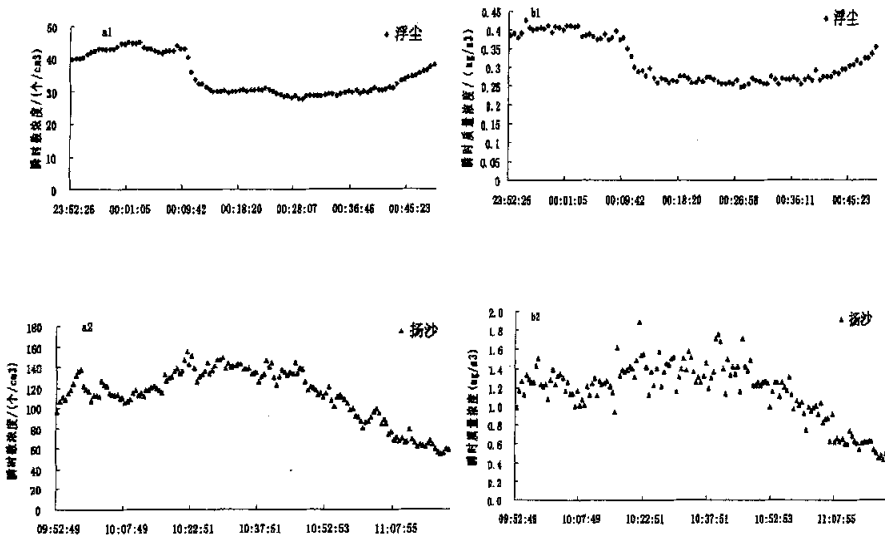
1.42~2.95mg/m<sup>3</sup>。同该地区其他 4 次沙尘暴的平均数浓度 (237 个/cm<sup>3</sup>) 和质量浓度 (1.35 mg/m<sup>3</sup>)<sup>[4]</sup>相比, 4 月 28 日沙尘暴略强。峰值粒子数 14~24 个/cm<sup>3</sup>, 也大于其他沙尘暴过程平均峰值粒子数 14 个/cm<sup>3</sup>。同其他等级的沙尘天气相比, 沙尘暴天气的数浓度、表面积浓度、质量浓度以及对应的峰值浓度高出许多, 比背景、浮尘天气高一个量级以上, 是扬沙天气的 2~4 倍。可见, 同一区域不同天气采集的沙尘气溶胶的浓度差别很大。(考虑到沙尘暴中沙尘数浓度高, 因重叠效应使示值偏小, 实际数浓度、质量浓度应更大些。)

表 2.2 瞬时采样各种特征浓度及其对应峰值浓度统计

地点	天气现象	数浓度 (个/cm <sup>3</sup> )	峰值粒子数 ( $\mu\text{m}$ )	质量浓度 (mg/m <sup>3</sup> )	质量 峰值浓度	表面积 ( $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ )	表面积 峰值浓度
盐池	沙尘暴	209~359	14~24	1.42~2.95	0.072~0.157	1337~2533	60.20~112.8
	扬沙	56~156	3~8	0.43~1.89	0.02~0.094	405~1419	19.35~64.31
银川	浮尘	28~45	2~4	0.25~0.43	0.016~0.028	249~412	16.03~26.96
巴音浩特	背景	25~29	2	0.32~0.4	0.02	223~255	8.91~10.69

据上文, 背景、浮尘、扬沙、沙尘暴天气气溶胶数浓度、表面积浓度和质量浓度依次增大, 除了背景天气外, 其他三种天气期间数浓度、表面积浓度、质量浓度存在一定的变化幅度。图 2.3 为不同沙尘天气数浓度和质量浓度随采样时间的变化。可以看出, 浮尘过程, 数浓度、质量浓度变化较平缓, 初始的数浓度和质量浓度分别接近 40 个/cm<sup>3</sup>、0.4mg/m<sup>3</sup>, 该浓度值保持 15min 后, 略有下降, 达到 30 个/cm<sup>3</sup>、0.25mg/m<sup>3</sup>, 维持这一浓度水平近 20min 后, 浓度略有回升。整个浮尘过程, 浓度变化不大, 这与采样时间段、天气状况和粒子来源有关。时值午夜, 对应的湍流交换活动比白天小, 实测的径向风速小于 3.7m/s。粒子主要自远方输送, 在天气变化不强的条件下, 浓度的变化是稳定平缓的。扬沙天气气溶胶浓度 (数浓度、质量浓度) 是在波动中缓慢递增继而缓慢递减的。前 30min 内数浓度、质量浓度分别从 100 个/cm<sup>3</sup> 上升至 156 个/cm<sup>3</sup>、1.0mg/m<sup>3</sup> 上升至 1.8 mg/m<sup>3</sup>, 在该值附近平衡近 20min 后, 浓度逐渐开始下降, 终止前的

30min 内数浓度和质量浓度分别下降了  $100 \text{ 个}/\text{cm}^3$ 、 $1.46\text{mg}/\text{m}^3$ ，降幅达 36%和 78%。据他人观测<sup>[6]</sup>，在扬沙发生之前风速不断增加至扬沙中期达到最大，之后再恢复至初始状态。本次采样实测最大风速为  $12.1 \text{ m/s}$ 。浓度增加很可能是风速增加所致。沙尘暴天气数浓度和质量浓度的变化范围大于其他天气。在初始 2min 内，沙尘暴的浓度接近该采样过程的较大值 ( $356 \text{ 个}/\text{cm}^3$ 、 $2.84\text{mg}/\text{m}^3$ )，在这一浓度附近维持近 20min 后，浓度开始下降，至采样结束时，数浓度和质量浓度分别为  $218 \text{ 个}/\text{cm}^3$ 、 $1.834 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。浓度变化趋势与胡泽勇<sup>[7]</sup>研究的沙尘暴过境时地面风速变化相接近——沙尘暴发生前风速存在慢速振荡变化，过境时风速激增，强风持续一段时间后逐渐减弱，风速总体变化趋势是逐渐减小的。采样期间最大的风速为  $11.3 \text{ m/s}$ ，显然风速对浓度有很大的影响。由此可见，风对于沙尘粒子在空中的悬浮和输送起一定作用。沙尘暴时的风速小于扬沙的风速，但数浓度和质量浓度却是扬沙天气的 2~4 倍，可见造成浓度差异的原因有多方面，风速只是其中的一方面。



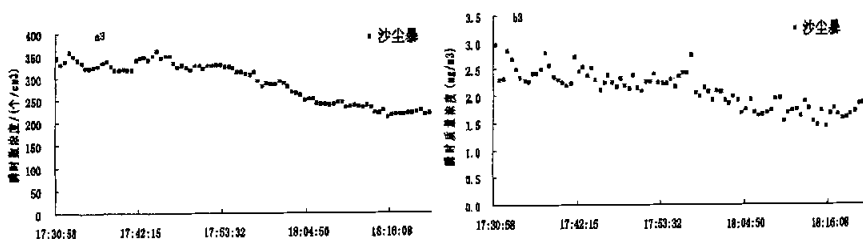


图 2.3 浮尘、扬沙、沙尘暴天气下瞬时数浓度 (a1、a2、a3)，  
质量浓度 (b1、b2、b3) 随时间变化

### 2.3.2 不同天气条件不同粒径沙尘气溶胶浓度分布

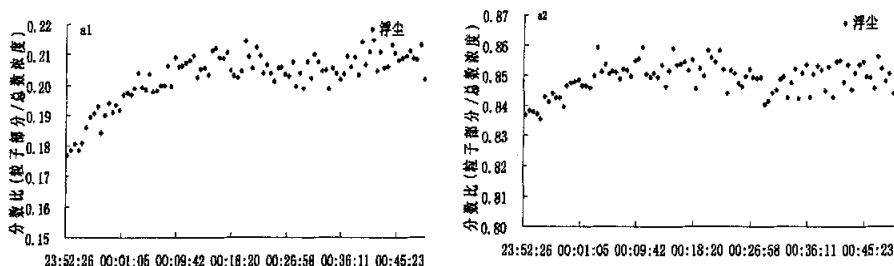
理论计算结果表明，直径在  $0.1\sim 2.0\mu\text{m}$  之间的粒子在大气气溶胶的消光作用中贡献最大<sup>[9]</sup>。对于沙尘气溶胶，已有的研究表明<sup>[10]</sup>，尺度越小的沙尘气溶胶对短波辐射的散射能力相对较强，尺度越大的粒子对长波辐射的吸收作用相对较强，直径小于  $2.0\mu\text{m}$  粒子对太阳散射能力最强。以  $1.0\mu\text{m}$ 、 $2.0\mu\text{m}$  作为分界，分别计算沙尘天气过程中粒径大于和小于等于  $1.0\mu\text{m}$  和  $2.0\mu\text{m}$ ，以及  $1.0\sim 2.0\mu\text{m}$  之间的粒子数浓度占总数浓度的分数比（图 2.4）。由图 2.4 可见，浮尘期间直径小于等于  $1.0\mu\text{m}$  和  $2.0\mu\text{m}$  粒子所占的比重分别为  $0.18\sim 0.21$ 、 $0.83\sim 0.86$ 。随采样进行，两比值不断增大，但他们的变化不与浓度的变化保持一致。 $1.0\sim 2.0\mu\text{m}$  范围内粒子的比重随时间缓慢下降，变化范围为  $0.66\sim 0.63$ 。可见浮尘期间，大于  $2.0\mu\text{m}$  的粒子不断沉降，但沉降的量不大，所以  $0.1\sim 2.0\mu\text{m}$  范围粒子的比重基本维持稳定。该次浮尘采样粒子主要集中在  $1.0\sim 2.0\mu\text{m}$  之间，这一方面与沙尘的远方输送有关，另一方面与采样地点有关，受贺兰山影响，翻山气流携带的气溶胶粒子越过山峰后会导致大颗粒先下沉。小于  $2.0\mu\text{m}$  的粒子浓度变化是浮尘浓度变化的主要原因。

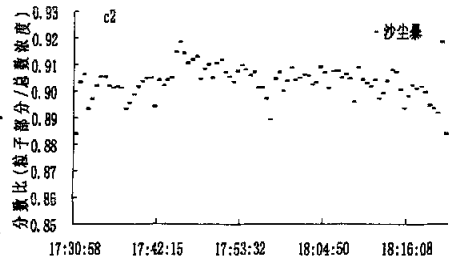
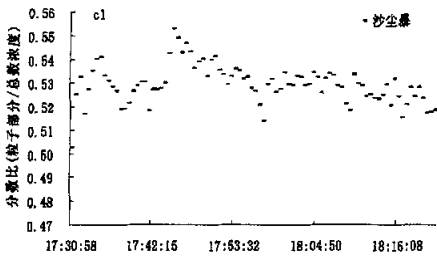
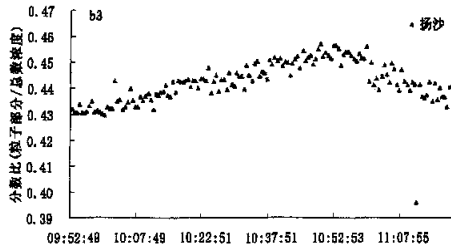
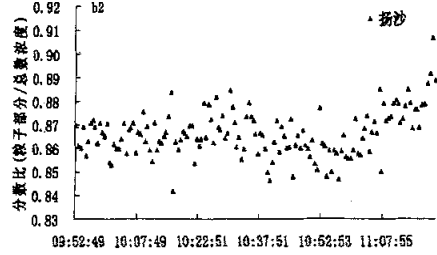
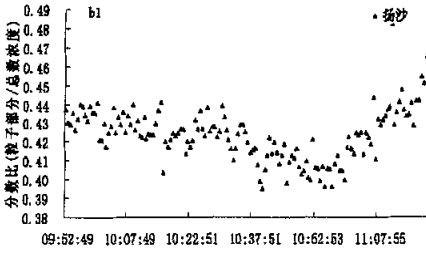
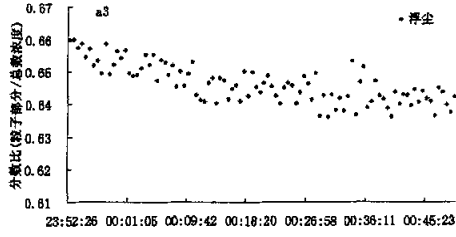
扬沙天气直径小于等于  $1.0\mu\text{m}$  和  $2.0\mu\text{m}$  粒子的分数比分别在  $0.40\sim 0.48$ 、 $0.84\sim 0.91$  之间。前一个小时内，两分数比都有下降，前者下降的幅度大于后者，显然这段时间内，在  $1.0\sim 2.0\mu\text{m}$  之间存在粒子扬起。接近结束前的半小时内，两种分数比不断增长，增长的幅度超过前一小时的降幅。表明此次扬沙天气的

强弱也与大粒子的增减有很大关系。伴随着大粒子的扬起扬沙天气增强，伴随着大粒子受重力作用沉降，扬沙天气减弱。该过程中， $1.0\sim 2.0\mu\text{m}$  粒径范围内的比重则在  $0.43\sim 0.45$  之间，变化趋势与小于等于  $1.0\mu\text{m}$  和  $2.0\mu\text{m}$  范围内的分数比相反，比值达到最大的时间滞后于数浓度达到最大的时间，表明扬沙期间，数浓度达到最大后开始下降时， $1.0\sim 2.0\mu\text{m}$  内粒子数浓度仍存在一段时间的增长。可见整个扬沙过程， $0.1\sim 2.0\mu\text{m}$  内的粒子数的变化对数浓度的变化有一定作用。 $1.0\sim 2.0\mu\text{m}$  范围内粒子浓度与总浓度的变化趋势保持一致。

沙尘暴过程中，直径小于等于  $1.0\mu\text{m}$  粒子的分数比位于  $0.53$  左右，最大值为  $0.55$ ，最小值为  $0.50$ ；直径小于等于  $2.0\mu\text{m}$  粒子的分数比在  $0.89\sim 0.91$  之间； $1.0\sim 2.0\mu\text{m}$  之间粒子的比重为  $0.36\sim 0.38$ ，略小于扬沙天气。沙尘暴期间，小于  $2.0\mu\text{m}$  的粒子的分数比并不随数浓度的减小而减小。扬沙和沙尘暴结束时，两者小于等于  $2.0\mu\text{m}$  粒子的分数比值接近。由此可见，该次扬沙主要由本地沙源造成，大粒子被大风吹到空后，受重力作用很快沉降；此次沙尘暴则来自远方输送，沿途过程中大粒子不断沉降，到达下游时，数浓度已稳定地保持在某一粒径范围内，在此过程中，也有一部分本地沙尘被扬起，但受重力作用，很快沉降，所以小于  $2.0\mu\text{m}$  粒子数浓度的比值稳定在  $0.90$  附近，上下浮动基本不超过  $0.01$ 。

从图 2.4 还可以看出浮尘、扬沙、沙尘暴天气下，小于  $2.0\mu\text{m}$  粒子的比重变化与  $0.1\sim 1.0\mu\text{m}$  范围内粒子的比重变化保持一致。小于  $2.0\mu\text{m}$  粒子的浮扬对沙尘天气过程数浓度具有重要影响。





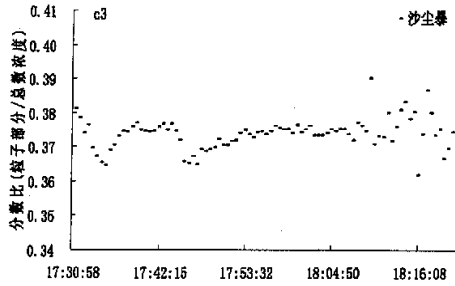


图3 沙尘气溶胶  $d \leq 1.0\mu\text{m}$  (a1、b1、c1)、 $d \leq 2.0\mu\text{m}$  (a2、b2、c2) 及  $1.0\mu\text{m} < d \leq 2.0\mu\text{m}$  (c1、c2、c3) 粒子数占总粒子数的分数比

表 2.3 给出直径小于  $10\mu\text{m}$  的沙尘气溶胶的物理特征。可以看出,四种天气,沙尘气溶胶数浓度全部集中在小于  $10.0\mu\text{m}$  的粒径范围内,表面积浓度和质量浓度 90%以上处于该粒径范围内。背景大气气溶胶的表面积浓度在此粒径范围内的百分比略小,为 96.9~98.9%,其他沙尘天气的都接近,达到 99%以上。背景大气沙尘气溶胶的质量浓度在此粒径范围内百分比为 90.1~96.3%,浮尘天气接近 100%,扬沙和沙尘暴天气能达到 93%、95%以上。贺兰山地区不同沙尘天气质量浓度的分布与浑善达克沙地<sup>[7]</sup>的保持一致。但沙尘暴期间沙尘气溶胶质量浓度分布与同天气条件下北京地区的完全不一样<sup>[8]</sup>,后者采集的粒子大部分集中在粒径大于  $10.0\mu\text{m}$  范围内,表明气溶胶的区域差异。

背景大气、浮尘、扬沙、沙尘暴条件下,小于等于  $1.0\mu\text{m}$  粒径范围内沙尘气溶胶的表面积浓度占总表面积浓度百分比分别为 8.3~9.4%、4.4~5.7%、7.8~12.7% 和 12.2~16.6% (表 2.4); 小于等于  $2.0\mu\text{m}$  粒径范围内沙尘气溶胶的表面积浓度占总表面积浓度百分比分别为 32.6~36.5%、40.3~44.8%、36.8~52.3% 和 43.2~52.9%。可以看出,沙尘天气增强,表面积浓度在小于等于  $1.0\mu\text{m}$  和  $2.0\mu\text{m}$  范围内的比重都增大。浮尘、扬沙、沙尘暴天气,表面积浓度在小于等于  $2.0\mu\text{m}$  和大于  $2.0\mu\text{m}$  范围内的百分比基本接近,约为 45%和 55%。与数浓度比,各粒径段内的比重发生了变化。

四种天气下,粒径小于  $1.0\mu\text{m}$ 、 $2.0\mu\text{m}$  沙尘气溶胶的质量浓度比重分别接近

4%和 30% (表 2.5)。扬沙和沙尘暴天气, 粒径小于  $1.0\mu\text{m}$  的质量浓度百分比相对偏高, 浮尘和背景的接近; 小于  $2.0\mu\text{m}$  粒子的质量浓度百分比背景最低, 其余天气接近。结合表 2.3 可见, 沙尘天气期间 90%的质量浓度集中在  $1.0\mu\text{m}$ ~ $10.0\mu\text{m}$  之间, 70%以上处于  $2.0\mu\text{m}$ ~ $10.0\mu\text{m}$  范围内。与表面积浓度相比, 智利浓度在  $2.0\mu\text{m}$ ~ $10.0\mu\text{m}$  粒径段内的比重进一步增加。

表 2.3 直径小于  $10.0\mu\text{m}$  的粒子浓度 (数浓度、质量浓度) 及占总浓度的百分比

地点	天气现象	数浓度 (个/ $\text{cm}^3$ )	数浓度占总量 的百分比%	表面积浓度 ( $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ )	表面积浓度占总量 的百分比%	质量浓度 ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	质量浓度占总量 百分比%
盐池	沙尘暴	209.3~359.1	100	1333.6~2524.2	99.2~100	1.409~2.907	95.1~100
	扬沙	55.6~155.5	100	402.5~1407.5	98.9~100	0.415~1.823	93.2~100
银川	浮尘	27.9~45.1	100	248.7~412.1	99.8~100	0.247~0.425	99.5~100
巴音浩特	背景	23.2~25.5	90.9~100.0	219.6~249.2	96.9~98.9	0.296~0.360	90.1~96.3

表 2.4 直径小于  $1.0\mu\text{m}$  和  $2.0\mu\text{m}$  的粒子表面积浓度及占总浓度的百分比

地点	天气现象	$d\leq 1.0\mu\text{m}$ 表面积浓度 ( $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ )	表面积浓度占总量 百分比%	$d\leq 2.0\mu\text{m}$ 表面积浓度 ( $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ )	表面积浓度占总量 百分比%
盐池	沙尘暴	197.6~348.4	12.2~16.6	665.9~1134.2	43.2~52.9
	扬沙	45.9~118.8	7.8~12.7	193.3~538.6	36.8~52.3
银川	浮尘	12.96~21.01	4.4~5.7	107.1~175.73	40.3~44.8
巴音浩特	背景	20.37~23.14	8.3~9.4	81.0~89.6	32.6~36.5

表 2.5 直径小于  $1.0\mu\text{m}$  和  $2.0\mu\text{m}$  的粒子质量浓度及占总浓度的百分比

地点	天气现象	$d\leq 1.0\mu\text{m}$ 质量浓度 ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	质量浓度占总量 百分比%	$d\leq 2.0\mu\text{m}$ 质量浓度 ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	质量浓度占总量 百分比%
盐池	沙尘暴	0.069~0.123	3.6~5.6	0.380~0.651	20.6~28.8
	扬沙	0.016~0.042	2.1~4.2	0.115~0.326	16.7~29.2
银川	浮尘	0.005~0.008	1.6~2.3	0.0650~0.168	23.5~28.0
巴音浩特	背景	0.007~0.008	1.9~2.5	0.0458~0.505	11.6~15.2

## 2.4 结论

通过贺兰山地区背景大气、浮尘、扬沙和沙尘暴天气下沙尘气溶胶的浓度变化特征的分析, 可以得出:

- 1) 巴音浩特背景大气的沙尘气溶胶数浓度、表面积浓度、质量浓度分别为 25~29 个/cm<sup>3</sup>、223~255μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>、0.32~0.4 mg/m<sup>3</sup>。高于吉兰泰、盐池和阿拉善右旗三地背景大气沙尘气溶胶质量浓度的平均值 0.126 mg/m<sup>3</sup>，也高于银川平原的背景大气值 0.098 mg/m<sup>3</sup>，是其他地区背景质量浓度的 18~30 倍。银川浮尘天气气溶胶数浓度、表面积浓度及质量浓度分别为 28~45 个/cm<sup>3</sup>、249~412μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>和 0.25~0.43 mg/m<sup>3</sup>。远低于同天气条件下盐池(140 个/cm<sup>3</sup>、0.51 mg/m<sup>3</sup>)和北京(0.979 mg/m<sup>3</sup>)等地的采样，略高于背景大气的采样。
- 2) 扬沙天气沙尘气溶胶数浓度、表面积浓度和质量浓度分别为 56~156 个/cm<sup>3</sup>、405~1419μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>和 0.43~1.89mg/m<sup>3</sup>，强度与同地区其他几次扬沙天气比属中等。沙尘暴天气沙尘气溶胶数浓度、表面积浓度以及质量浓度分别为 209~359 个/cm<sup>3</sup>、1337~2533μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>和 1.42~2.95mg/m<sup>3</sup>，是扬沙天气对应数浓度、表面积浓度、质量浓度的 2~4 倍。此次沙尘暴强度与同地区其他几次沙尘暴相比略强。
- 3) 不同沙尘天气过程，浓度变化趋势存在较大的差异；同一天气过程，数浓度、表面积浓度和质量浓度的变化趋势是一致的。浮尘过程，数浓度、质量浓度变化较平缓，初始的数浓度和质量浓度分别接近 40 个/cm<sup>3</sup>、0.4mg/m<sup>3</sup>，该浓度值保持 15min 以后，略有下降，达到 30 个/cm<sup>3</sup>、0.25mg/m<sup>3</sup>，维持这一浓度水平近 20min 后，浓度略有回升。扬沙天气，浓度在波动中缓慢递增继而缓慢递减。前 30min 内数浓度、质量浓度分别从 100 个/cm<sup>3</sup>上升至 156 个/cm<sup>3</sup>、1.0mg/m<sup>3</sup>上升至 1.8 mg/m<sup>3</sup>，在该值附近平衡近 20min 后，浓度逐渐开始下降，终止前的 30min 内数浓度和质量浓度分别下降了 100 个/cm<sup>3</sup>、1.46mg/m<sup>3</sup>，降幅达 36%和 78%。沙尘暴天气，在初始 2min 内，沙尘暴的浓度达到该采样过程的较高值(357 个/cm<sup>3</sup>、2.84mg/m<sup>3</sup>)，在这一浓度附近维持 20min 后，浓度开始不断下降，至采样结束时数浓度和质量浓度分别为 218 个/cm<sup>3</sup>、1.834 mg/m<sup>3</sup>。沙尘天气浓度(数浓度、表面积浓度、质量浓度)的变化与风速存在一定的关系。



- 4) 浮尘期间, 粒子数浓度主要集中在  $1.0\sim 2.0\mu\text{m}$  粒径范围内, 该范围内粒子的比重随时间从 0.66 缓慢下降到 0.63。扬沙天气粒径小于等于  $1.0\mu\text{m}$  和  $2.0\mu\text{m}$  粒子的分数比分别在 0.40~0.48、0.84~0.91 之间。该过程中,  $1.0\sim 2.0\mu\text{m}$  粒径范围内的比重则在 0.43~0.45 之间, 比值达到最大的时间滞后于数浓度达到最大的时间。沙尘暴过程中, 粒径小于等于  $1.0\mu\text{m}$  粒子的分数比为 0.50~0.55; 小于等于  $2.0\mu\text{m}$  粒子的分数比为 0.89~0.91;  $1.0\sim 2.0\mu\text{m}$  之间粒子的比重为 0.36~0.38, 略小于扬沙天气。沙尘暴期间, 小于  $2.0\mu\text{m}$  的粒子的分数并不随数浓度的减小而减小。扬沙和沙尘暴结束时, 两者小于等于  $2.0\mu\text{m}$  粒子的分数比值接近。小于  $2.0\mu\text{m}$  的粒子数浓度的变化是造成浮尘、扬沙、沙尘暴等沙尘天气数浓度变化的另一原因。
- 5) 浮尘、扬沙、沙尘暴天气, 表面积浓度在小于等于  $2.0\mu\text{m}$  和大于  $2.0\mu\text{m}$  范围内的百分比基本接近, 约为 45%、55%; 质量浓度在这两个粒径范围内的百分比约为 30%、70%。数浓度、表面积浓度和质量浓度三者之间, 浓度主要分布的粒径范围发生了变化。

#### 参考文献:

- [1] WMO. Niushengjie et al. Statistical Analysis and observational researches on sand storms in Helan Mountainous Area[C]. 1998:144~155.
- [2] 牛生杰, 章澄昌, 孙继明. 贺兰山地区沙尘气溶胶粒子谱分布的观测研究[J]. 大气科学, 2001, 25(2): 243~252.
- [3] 中央气象局, 1979, 地面气象观测规范[M]. 气象出版社, 北京: 22.
- [4] 牛生杰, 孙继明, 陈跃, 等. 贺兰山地区沙尘气溶胶质量浓度的观测分析[J]. 高原气象, 2001, 20(1): 82~87.
- [5] 张小玲, 刘建忠, 徐晓峰. 北京春季一次持续浮尘和污染天气过程分析[J]. 气象科技, 2004, 32(6): 424~420.
- [6] 马金福, 陈峰云. 扬沙和浮尘成因的探讨及其观测[J]. 浙江气象科

- 技, 2003, 22(1):44~46.
- [7]胡泽勇, 黄荣辉, 卫国安. 2000年6月4日沙尘暴过境时敦煌地面气象要素及地表能量平衡特征的变化[J]. 大气科学, 2002(1):1~7.
- [8]成天涛, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 浑善达克沙地沙尘气溶胶的粒谱特征[J]. 大气科学, 2005, 29(1): 147~153.
- [9]杨东贞, 王超, 温玉璞, 等. 1990年春季两次沙尘暴特征分析[J]. 应用气象学报, 1995, 6(1):19~28.
- [10]帕尔特里奇 普拉特. 气象学和气候学中的辐射过程[M]. 吕达仁, 黄润恒, 林海译. 北京: 科学出版社, 1981, 142~154.
- [11]D' Almeida G A, Schutz L. Numbre, mass and volume distribution of mineral aerosol and soils of the Sahara[J]. Climate Appl Meteor, 1983(22):233~243.

## 第三章 沙尘气溶胶瞬时谱分析及拟合

### 3.1 引言

沙尘气溶胶能够改变云和大气的辐射特性，是影响气候变化的重要因素之一；部分沙尘气溶胶可作为冰核，改变云的微物理机制，延长云的生命，影响降水以及人工影响天气作业效果；沙尘气溶胶的表面存在许多非均相化学反应，对大气中的物质产生和循环有一定作用。但目前就沙尘气溶胶对气候、降水、大气中物质循环影响的研究还存在许多不确定性。为了定量研究沙尘气溶胶在大气物理和大气化学中的作用，需详细分析沙尘气溶胶的理化特征，包括气溶胶粒子的数浓度、谱分布以及化学成分等。

从上个世纪七十年代至今，国内外研究人员利用各种手段对撒哈拉沙漠和中亚等地沙漠源地及其下游地区的沙尘气溶胶进行了大量的外场观测和采样。1987年 Porter<sup>[1]</sup>等的观测研究发现源至亚洲地区的沙尘尽管长距离输送、沉降到夏威夷，但其峰值仍大于撒哈拉沙尘长距离输送相应值，表明沙尘气溶胶谱的区域差别以及沙尘气溶胶质量同直径之间相同的变化趋势。国内也进行了许多相关方面的研究，例如，利用光学粒子测量系统观测研究了不同天气条件下，沙尘气溶胶的空间分布<sup>[2]</sup>；利用 Anderson 采样仪研究单个沙尘事件中，下游地区近地面的气溶胶谱型、浓度的差异及变化规律<sup>[3-5]</sup>；利用 KB120 型采样器和 Anderson 采样器对沙尘多发区进行长期监测，获得了该地区沙尘气溶胶的年变化特征<sup>[6]</sup>；利用美制 APS-3310A 型激光空气动力学气溶胶粒谱仪，在污染较重的冬季观测研究了气溶胶的粒子谱分布谱型及随时间的演变特征<sup>[7]</sup>；利用 PMS Fssp-100 型激光粒谱仪对浑善达克沙地边缘地区进行外场观测，获得沙地气溶胶在不同天气下的分布特征<sup>[8]</sup>；利用飞机探测气溶胶在不同高度上的分布，以及随采样高度的变化气溶胶谱型的变化<sup>[9-10]</sup>。除了外场实测，地基遥感和空基遥感技术也被用来研究沙尘气溶胶，利用太阳光度计、卫星等辐射资料反演出气

溶胶粒子谱特征参数<sup>[11-14]</sup>。以上的这些研究,对我国大部分地区的背景气溶胶和污染物气溶胶的谱分布及演变规律有了深入的了解。但这些研究大部分集中在市区、城市近郊和植被较好的我国中东部地区,而对西部地区尤其是沙漠面积占有较大比重的西北地区的气溶胶,研究得较少,深入沙漠源地对沙尘天气条件下沙尘气溶胶的研究就更少。且以往对沙尘气溶胶浓度的尺度分布的研究,主要关注其平均谱,对于不同沙尘天气过程中粒子谱的瞬时演变特征揭示的较少。本文利用1998年4、5月,1999年4月在盐池、银川、巴音浩特等地不同沙尘天气下沙尘粒子谱资料,分析沙尘过程中粒子谱瞬时演变特征,并对之进行拟合,给出谱参数,供沙尘数值模拟应用。

### 3.2 资料与仪器

测量仪器、观测资料详见第二章。

### 3.3 沙尘气溶胶瞬时粒子谱的特征分析

通过研究,人类定义了气溶胶的种类,给出了不同气溶胶的尺度分布(图3.1)。同时指出,气溶胶的模式不同,来源不同,形成的机制也不同,不同模式间存在质量的转移,气溶胶尺度分布的变化对大气污染的形成,下游地区的环境有一定的影响。

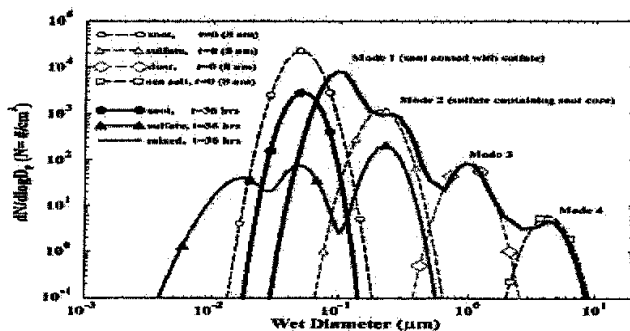


图 3.1 不同来源气溶胶粒子的尺度分布<sup>[15]</sup>

### 3.3.1 谱分布的平均量

最常用的确定一种谱分布的位置的量是算术平均、峰值和中值。统计不同天气沙尘气溶胶数浓度谱、表面积浓度谱、质量浓度谱的特征直径（表 3.1）。由表 3.1 可以看出，不同天气条件下，数浓度谱的平均直径变化不大，浮尘最高（1.519~1.592 $\mu\text{m}$ ），背景、扬沙稍高，沙尘暴略低（1.173~1.283 $\mu\text{m}$ ）；表面积谱的平均直径的变化范围略大于数浓度谱，背景偏高（3.073~3.594 $\mu\text{m}$ ），扬沙、沙尘暴次之，浮尘偏低（2.217~2.398 $\mu\text{m}$ ）；质量谱的平均直径变化范围比其他谱的大，背景最大（4.486~5.941 $\mu\text{m}$ ），扬沙次之，浮尘最小（2.641~2.970 $\mu\text{m}$ ）。数浓度谱的中值直径变化也不大，浮尘偏高（1.241~1.334 $\mu\text{m}$ ）；表面积谱的中值直径范围大于数浓度谱，背景大气偏高（2.373~2.740 $\mu\text{m}$ ）、其余天气接近；质量谱的中值直径变化范围最大，扬沙、沙尘暴天气的稍高，背景大气明显偏高（3.962~5.197 $\mu\text{m}$ ）。浮尘天气，数浓度谱的峰值直径偏高（1.036~1.286 $\mu\text{m}$ ），扬沙和沙尘暴的峰值直径值相接近。四种天气表面积谱和质量谱峰值直径之间存在同样的大小关系。背景表面积谱和质量谱的峰值直径都偏高，分别为 1.987~3.785 $\mu\text{m}$ 、4.371~8.976 $\mu\text{m}$ ，扬沙次之，浮尘最小。背景质量谱的多数特征直径值偏高，这与他观测点的地理位置有关。相对其他沙尘天气，银川浮尘采样的数浓度谱的三个特征直径值较高，由于该次浮尘天气沙尘气溶胶是自远处输送，输送过程中大量核模态的粒子凝聚成积聚模态的粒子，加上贺兰山的地形作用，致使探测到的粒子偏大。扬沙的表面积谱和质量谱的峰值直径是三种沙尘天气中最高的，这与此次扬沙过程是主要由远方沙源和局地源共同构成的有关<sup>[9]</sup>。浮尘、扬沙、沙尘暴三种天气，同种特征直径之间相比，皆是质量谱的最大，表面积谱的次之，数浓度谱的最小。

从表 3.1 还可看出，四种天气，所有数浓度谱的三个特征直径之间存在峰值直径小于中值直径小于平均直径的大小关系，表明贺兰山地区沙尘气溶胶数浓度谱呈偏斜分布，峰值偏向小粒子端。浮尘天气表面积谱和质量谱的平均直径略小于其他两种特征直径，说明浮尘天气，质量谱、表面积谱均为偏态分布，

且峰值偏向相同的粒子端。扬沙、沙尘暴天气的表面积谱和质量谱的特征直径之间都存在峰值直径>平均直径>中值直径的大小关系。由上文分析可知，所有天气的数浓度谱、浮尘的表面积谱和质量谱都为偏态分布；扬沙、沙尘暴表面积谱和质量谱近似正态分布。特征直径规律性明显，其物理意义也很清晰。

表 3.1 瞬时采样各种特征直径统计

天气现象	特征直径	背景大气	浮尘	扬沙	沙尘暴
数浓度谱	平均直径	1.364~1.452	1.519~1.592	1.263~1.450	1.173~1.283
	中值直径	1.036~1.075	1.241~1.334	1.000~1.155	0.931~0.931
	峰值直径	0.897~1.114	1.036~1.286	0.777~0.964	0.723~0.835
表面积谱	平均直径	3.037~3.594	2.217~2.398	2.401~3.069	2.330~2.726
	中值直径	2.373~2.740	1.912~2.092	1.912~2.373	1.912~2.208
	峰值直径	1.987~3.785	1.980~2.459	2.128~3.050	2.128~2.838
质量谱	平均直径	4.468~5.941	2.641~2.970	3.328~4.953	3.231~4.180
	中值直径	3.962~5.197	2.373~2.550	2.740~3.654	2.740~3.400
	峰值直径	4.371~8.976	2.287~3.050	2.458~5.829	2.838~4.697

### 3.3.2 瞬时粒子谱的分布特征

贺兰山地区不同天气沙尘气溶胶的瞬时谱（图 3.2）均呈单峰型，明显与中国工业城市气溶胶三峰分布的谱型不同。沙尘气溶胶质量谱的峰值粒径位于 2.5~9.0 $\mu\text{m}$ ，而城市气溶胶的峰值位于 0.7~0.8 $\mu\text{m}$ 、3~4 $\mu\text{m}$ 、10~15 $\mu\text{m}$  [16 17]，粗模态沙尘气溶胶质量谱的峰值浓度大于城市气溶胶。这与王明星等 [16] 研究得出的气溶胶中 Ca 元素的质量浓度一般集中在 2~4 $\mu\text{m}$ ，4~8 $\mu\text{m}$  范围内，而 4~8 $\mu\text{m}$  是由远方沙尘引起的结论较一致。表明我国沙尘气溶胶具有一定的共性。

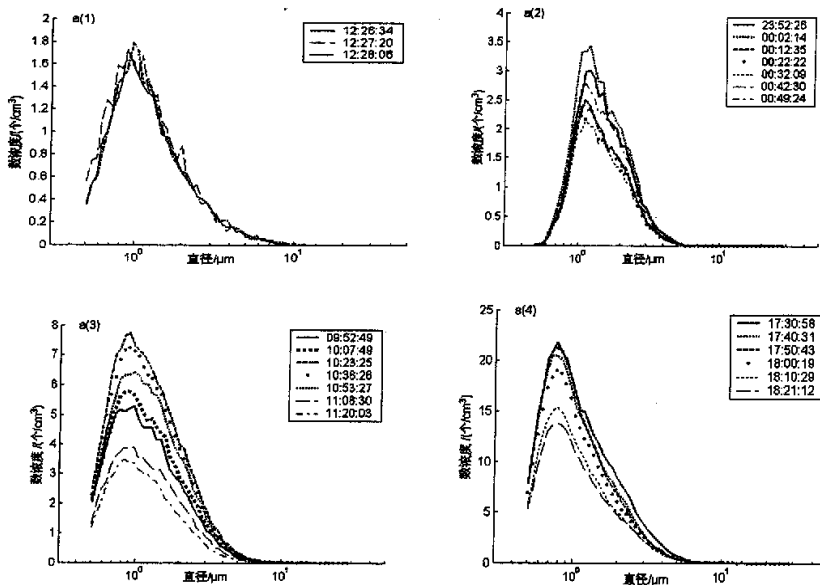
每一类谱图中第 2~4 幅分别是浮尘每隔 10min，扬沙每隔 15min，沙尘暴每隔 10min 的采样集合。第 5 幅是不同天气开始和结束各一组采样组合而成的。从图 3.2 可以看出，不同等级的沙尘天气，粒子数浓度谱、表面积谱和质量谱的谱型之间存在差异。同一天气期间，三种谱的谱型变化不大，峰值浓度和峰值直径存在变化，峰值浓度的变化趋势与总浓度保持一致。沙尘天气愈强烈，谱的峰值浓度变化愈明显。

背景大气沙尘气溶胶的数浓度谱谱型较为整齐，而表面积谱、质量谱谱型波动大，尤其是 3.0~9.0 $\mu\text{m}$  粒径范围内。浮尘期间，数浓度谱有明显变化的粒径范围为 0.8~2.5 $\mu\text{m}$ ，小于 0.8 $\mu\text{m}$  粒子数浓度在整个过程中基本接近，且在 0.505~0.542 $\mu\text{m}$  粒径内几乎探测不到粒子的存在。峰值直径主要在 1.036~1.286 $\mu\text{m}$  之间，且在浮尘结束时，峰值直径范围略有减小。与其他沙尘天气相比，扬沙数浓度谱略宽，整个天气过程，各档粒径内都存在浓度的变化，数浓度变化主要由 0.583~2.458 $\mu\text{m}$  粒子的变化造成。前 30min 内，峰值数浓度由 5 个/ $\text{cm}^3$  增至 8 个/ $\text{cm}^3$  左右，之后浓度不断下降，结束时峰值数浓度为 3 个/ $\text{cm}^3$  左右。整个过程，峰值粒径的基本在 0.835~0.897 $\mu\text{m}$  和 0.897~0.964 $\mu\text{m}$  两个粒径档中变动，且不与浓度的变化趋势保持一致。沙尘暴天气，数浓度谱与其他天气相比，峰值更偏向小粒子。谱型是四种天气中最光滑的。与扬沙一样，整个天气过程，各粒径范围都存在数浓度变化，但主要由 0.505~5.424 $\mu\text{m}$  范围内粒子的数浓度变化造成的。沙尘暴发生时，数浓度谱的峰值浓度高达 23 个/ $\text{cm}^3$ ，在该值附近保持一段时间后，峰值浓度降至 20 个/ $\text{cm}^3$  以下，终止时，峰值浓度为 14 个/ $\text{cm}^3$ 。对应峰值直径在 0.723~0.777 $\mu\text{m}$ 、0.777~0.835 $\mu\text{m}$  范围内变动，并不随浓度的变化而变化。图 a(5)表明，当沙尘天气变强时，大、小粒子数浓度同时增长，小粒子的增长幅度超过大粒子。

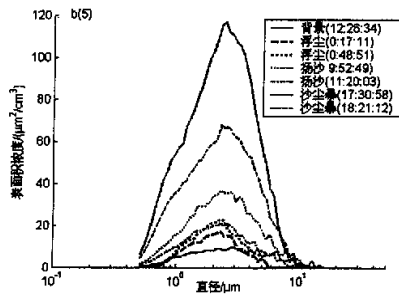
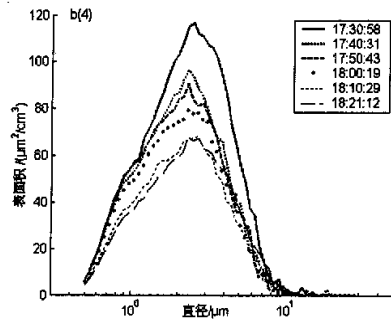
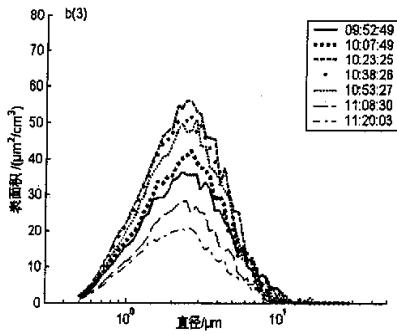
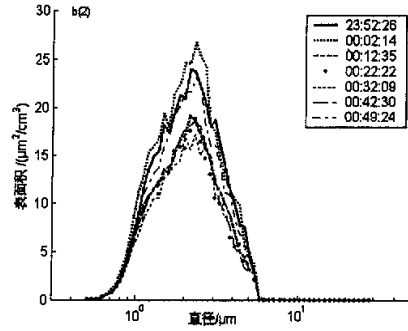
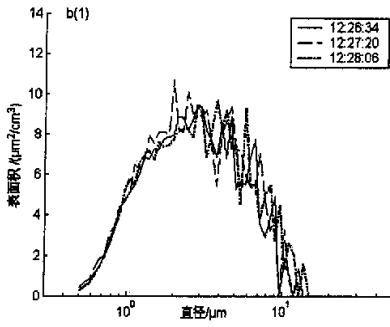
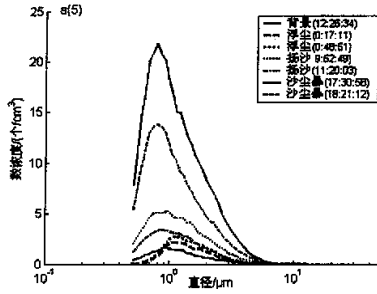
浮尘表面积谱的谱型窄，表面积浓度的变化主要由 1.0~3.5 $\mu\text{m}$  之间的粒子造成的，峰值直径主要位于 2.128~2.287 $\mu\text{m}$  范围内，偶尔能测到在 1.981~2.128 $\mu\text{m}$  或 2.287~2.459 $\mu\text{m}$  之间，结束时，峰值直径范围也略有减小。扬沙表面积谱谱型比浮尘天气的宽，是因为扬沙天气发生前不久盐池正经历浮尘天气<sup>[9]</sup>，空气中混合着粗、细粒子。扬沙开始的半小时内，峰值浓度迅速由 36 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$  增至 56 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ，之后随风速减小，在重力作用下粗粒子迅速沉降，使得终止前的半小时内表面积浓度迅速回落，峰值浓度降幅可达 38 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ，结束时表面积浓度与浮尘天气接近。初始峰值直径变化范围为 2.287~3.050 $\mu\text{m}$ ，随着表面积浓度的增至最大，对应峰值直径范围移至 2.128~2.838 $\mu\text{m}$  之间，继而随表面积浓度

的减小,峰值直径范围略有减小,到扬沙末期,峰值直径基本处于 2.128~2.458 $\mu\text{m}$  粒径范围。此次扬沙过程,粗细粒子对表面积谱有同样的贡献。沙尘暴发生时,表面积谱的峰值浓度高达 120 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ,峰值直径位于 2.287~2.458 $\mu\text{m}$  之间,15min 后由于粗粒子干沉降,峰值浓度降至 80 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$  左右,对应的直径略有变动,这一浓度水平维持 20min 后,由于粒子不断受重力作用沉降,又无沙尘扬起,峰值表面积浓度减小至 60 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$  附近,峰值直径在 2.128~2.838 $\mu\text{m}$  之间变动。表面积谱与数浓度谱相比,浓度主要集中的粒径范围扩大了。

从图 (3.2c) 可见,贺兰山地区,背景和浮尘天气沙尘气溶胶的质量谱分布明显为偏态,在半径小的一侧浓度缓慢减少,而在半径大的一侧浓度迅速下降。扬沙、沙尘暴等强沙尘天气,质量谱分布接近对数正态分布。表明强沙尘天气小粒子相对增加。扬沙质量谱谱型最不平滑,粗粒子端的波动明显。在粗粒子端沙尘暴质量谱浓度也存在波动。沙尘天气下,浮尘、扬沙、沙尘暴质量谱峰值直径分别在 2.287~3.050 $\mu\text{m}$ 、2.458~5.829 $\mu\text{m}$ 、2.838~4.697 $\mu\text{m}$  范围内振荡变化,扬沙、沙尘暴的峰值变化范围大,浮尘最小,且到沙尘天气末期所有峰值直径范围略有减小。粗粒子对质量谱的贡献大于细粒子的贡献。







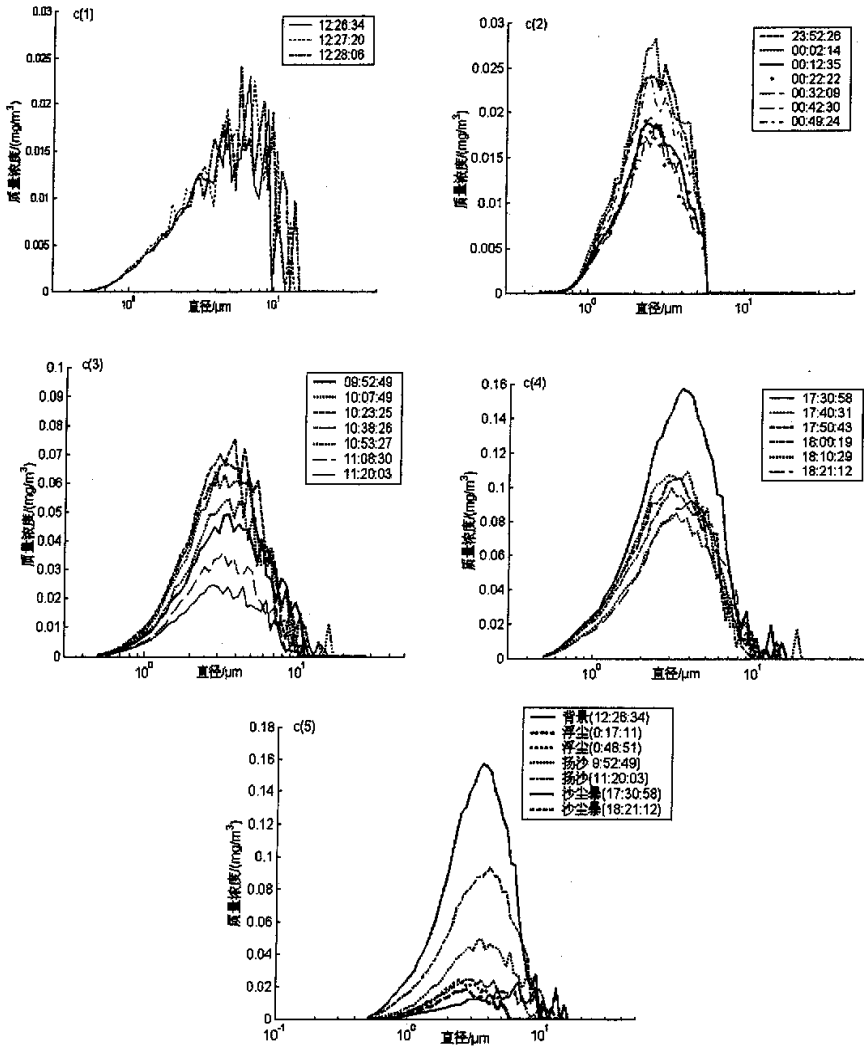


图 3.2 不同天气条件下瞬时数浓度谱(a)、表面积谱(b)、质量谱(c):  
1.背景; 2.浮尘; 3.扬沙; 4.沙尘暴; 5 集合图

### 3.4 沙尘气溶胶的粒谱拟合

气溶胶的辐射强迫和气候效应计算以及起沙模式模拟都需定量化计算。常采用几个参数来表示已知分布的特征，且希望所采用的分布函数式能对整个粒

径范围内的气溶胶均能较好的拟合。一般选用的参数愈多，拟合愈能贴切，而且存在用一种函数式来表示探测中所遇到的所有分布的实例的可能性。但是若拟合函数式较复杂，则确定参数比如要进行繁杂的计算，而且这些参数又很难赋予它相应的物理意义。对沙尘粒子谱分布的描述一样也需采用一种简单、合适并具有物理基础的数学函数式。

### 3.4.1 常用的拟合函数式<sup>[19]</sup>

#### (1) 负幂函数分布

早在 50 年代，Junge 根据大量的观测资料，尤其是取许多分布的平均后发现，大气中半径从  $10^{-1}\mu\text{m}$  到  $10^1\mu\text{m}$  间的质粒，在每个对数半径间隔内的质粒体积趋于某一常数（图 3.3）。在数学上可表示成

$$r^3 \left( \frac{dN}{d \ln r} \right) \approx \text{常数} \quad (3.1)$$

显然单位半径间隔内的质粒与  $r^{-4}$  成正比，因为  $dN/dr = n(r)$ ，推广到一般，上式可改写成

$$n(\ln r) = cr^{-v} \text{ 或 } n(r) = cr^{-v-1} \quad (3.2)$$

此即著名的 Junge 谱模式，式中的常数 A 由归一化条件

$$\frac{1}{N} \int_0^{\infty} n(r) dr = 1 \quad (3.3)$$

确定。对 (3.2) 式取对数，即  $\ln n(r) = \ln c - (v+1) \ln r$ ，说明在对数坐标图上，Junge 分布为一条直线。由此表明若实测资料在双对数坐标图上  $n(r)$  与  $r$  趋于线性分布时，可用负幂函数来描述。由于 Junge 谱模式较简单，而且相对于工业发达国家的城市气溶胶和平流层气溶胶粒子谱在  $0.1 \sim 10\mu\text{m}$  尺度范围内，同观测比较一致，从而获得广泛应用。对我国煤烟型城市污染来说由于粗模态出现峰值，Junge 谱模式只适用于模拟积聚模态质粒的分布特征。

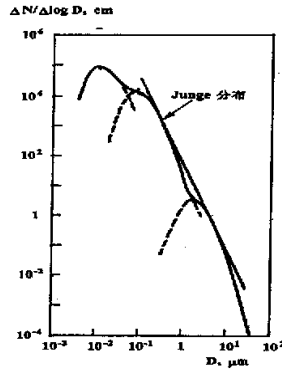


图 3.3 Junge 谱分布<sup>[19]</sup>

## (2) $\Gamma$ -分布

大量的观测发现, 大气气溶胶分布的基本特征是在核模态出现极大值, 分布曲线呈偏态。指数函数  $n(r) = r \exp(-br)$ , 在  $r = b^{-1}$  处达到极大值, 在半径小的一侧下降缓慢而在半径大的一侧按指数下降。为此可考虑用半径的幂函数代替上述指数函数中的半径项, 增加可调函数, 以便拟合实际谱分布。

Diermendjian (1969) 提出修正的  $\Gamma$ -分布作为经验拟合函数

$$n(r) = ar^\gamma \exp(-br^\beta) \quad (3.4)$$

式中可调参数共 4 个, 即  $\alpha$ 、 $b$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ , 都是正实数 ( $\gamma$  为正整数)。

游荣高 (1981) 针对我国城市气溶胶尺度 (0.3~10 $\mu\text{m}$ ) 谱, 提出下列三参数经验公式

$$n(r) = ar^b \exp(-cr) \quad (3.5)$$

式中  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为拟合参数, 实际上它与  $\Gamma$ -分布是等价的。实际拟合表明  $\Gamma$ -分布和三参数经验分布对我国城市大气气溶胶的尺度谱拟合甚好, 但在粗模态偏离仍较大。不过可以采用不同模态分别拟合相叠加的方法, 以提高其拟合度。

## (3) 对数正态分布

前二者模拟函数式均限于一定尺度范围, 且仅适用于一种权重因子 (如数

浓度), 而大量的实测资料表明, 气溶胶的尺度谱, 尤其是表面积谱、体积谱或质量谱在对数坐标中均呈现多个正态分布趋势。

据此 Whitby(1974)对寻找一般尺度分布模式提出了下列要求: 应对大气气溶胶整个尺度范围内的分布均能拟合; 对于数、表面积、体积或质量分布的拟合应具有较好的一致性, 此即要求分布形式与权重因子无关; 拟合函数应具有一定的物理基础。

显然以半径为自变量的正态分布偏离气溶胶谱太大, 若使半径为  $a\bar{r}$  的概率等于半径为  $a^{-1}\bar{r}^{-1}$  的概率可能较符合实际, 这就相当于把  $\log r$  作为质粒尺度的量度。最早 Porch 等 (1973) 用  $x = \log r$  的正态曲线拟合背景气溶胶谱, 并把它称为对数正态分布。

在统计理论上对数正态分布也有一定依据, 因由中心极限定理, 无论什么形式的分布, 当他们叠加在一起时即趋向于正态分布, 而且若分布变量由形成机制产生, 其效应由同已出现的变量值成比例, 则此变量的分布即为对数正态型。对核模态和积聚模态来说, 主要由凝结核聚合机制控制, 并作为已存质粒尺度的函数。这就是对数正态分布能较好的拟合这两种模态的主要原因。对粗模态, Whitby 等引用他人的理论结果, 根据对固态质粒的碎裂过程和液态的乳化过程特征的随机性假设出发, 认为粗模态渐进于对数正态分布。

这样只要适当的选择参数, 原则上用三个叠加的对数正态分布即可描述整个大气气溶胶尺度谱分布, 而且其数学形式对处理权重分布和矩量平均比较方便。对数正态分布函数表达式如下:

$$n(\ln(r)) = \frac{c}{\sqrt{2\pi \ln \sigma_n}} r \exp \left[ -\frac{(\ln r - \ln r_n)^2}{2 \ln^2 \sigma_n} \right] \quad (3.6)$$

或

$$n(r) = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi \ln \sigma_n}} \exp \left[ -\frac{(\ln r - \ln r_n)^2}{2 \ln^2 \sigma_n} \right] \quad (3.7)$$

其中  $r_n$ 、 $\sigma_n$  为描述对数正态分布的两个特征参量, 分别叫做几何峰值半径和几

何标准偏差。 $\sigma_n$  的定义相对于离散型和连续型分布分别为：

$$\ln \sigma_n = \left[ \frac{\sum_i n_i (\ln r_n - \ln r_i)^2}{\sum_i n_i - 1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.8)$$

和

$$\ln \sigma_n = \left[ \frac{\int_b^{\infty} (\ln r_n - \ln r_i)^2 n(r) dr}{\int_b^{\infty} n(r) dr} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.9)$$

#### (4) 对数二次曲线分布

赵德山等(1987)仿照按大气气溶胶三个自然模态分段进行模拟的思路,提出了对数二次曲线谱分布经验公式

$$n(d) = ad^b \exp[-c(\ln d)^2] \quad (3.10)$$

以质粒直径  $d$  表示,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为拟合参数。与实测资料的拟合的比较表明,用对数二次曲线经验公式分段拟合,对核模态和积聚模态的拟合度稍优于三参数拟合公式。

### 3.4.2 实测资料的拟合

据前人经验和上文的结论,对数正态分布函数表达式无疑较适合本批资料<sup>18</sup><sup>19)</sup> (式 3.6)。

沙尘气溶胶粒子谱分布的拟合主要在于确定几何峰值半径  $r_n$ , 标准差  $\sigma$  及常数  $c$ 。对所有瞬时采样进行拟合。在拟合过程发现直接采用非线性最小二乘法就能达到理想的拟合效果。据上文分析,气溶胶浓度具有明显的阶段特征,因此附表 3.2 仅列举浮尘、沙尘暴每隔 2min, 扬沙每隔 4min 的拟合参数值。

对于浮尘天气,数浓度谱的几何峰值直径、标准差  $\sigma$  和常数  $c$  为 1.114~1.158 $\mu\text{m}$ 、1.50~1.53 和 3.3~5.3 个/ $\text{cm}^3$ 。表面积谱的三个参数为 1.611~1.689 $\mu\text{m}$ 、1.60~1.63、20.4~32.8 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 。质量谱参数则为 2.011~2.121 $\mu\text{m}$ 、1.53~1.62、0.016~0.027 $\text{mg}/\text{m}^3$ 。该过程只有显示沙尘天气强度的常数  $c$  发生变化,

其他两个参数基本无变化。扬沙天气, 数浓度谱参数为  $0.565\sim 0.763\mu\text{m}$ 、 $1.75\sim 2.03$ 、 $10.3\sim 25.5$  个/ $\text{cm}^3$ 。表面积谱参数为  $1.134\sim 1.675\mu\text{m}$ 、 $1.83\sim 2.20$ 、 $35.9\sim 95.3\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 。质量谱参数为  $2.249\sim 2.641\mu\text{m}$ 、 $1.73\sim 1.88$ 、 $0.027\sim 0.082\text{mg}/\text{m}^3$ 。沙尘暴数浓度谱参数为  $0.498\sim 0.686\mu\text{m}$ 、 $1.66\sim 2.0$ 、 $55.3\sim 80.3$  个/ $\text{cm}^3$ 。表面积谱拟合参数为  $1.150\sim 1.56\mu\text{m}$ 、 $1.88\sim 2.12$ 、 $121\sim 199\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 。质量谱的拟合参数为  $2.192\sim 2.519\mu\text{m}$ 、 $1.71\sim 1.84$  和  $0.078\sim 0.143\text{mg}/\text{m}^3$ 。浮尘三种浓度谱的标准差  $\sigma$  在  $1.5\sim 1.7$  之间。扬沙和沙尘暴的拟合峰值直径有小幅的变化, 常数  $c$  变化幅度较大, 表明参数  $c$  的大小与天气现象强弱有关。扬沙、沙尘暴天气表面积谱的标准差  $\sigma$  基本处于 2 附近, 数浓度谱和质量谱的则在  $1.6\sim 2.0$  之间。表明标准差显示了谱型偏离正态分布的程度。

各种谱拟合  $t$  检验通过 95% 置信水平, 平均谱参数与瞬时谱参数有较好的一致性(表 3.2 的最后一行加粗体)。平均谱和拟合平均谱见图 3.4。一定程度上, 拟合粒子谱能反映出沙尘天气过程中谱的演变特征。强沙尘天气下, 贺兰山地区沙尘气溶胶的拟合峰值直径与撒哈拉沙漠<sup>[20]</sup>、浑善达克沙地<sup>[8]</sup>(表 3.3)比明显偏小。表明沙漠、沙地等源地与其下游地区的沙尘气溶胶, 在物理特性上存在差异。

为了比较不同函数的拟合效果, 再用 D 分布(又称 Diermendjian 分布或  $\Gamma$ -分布,) 函数和 Junge 分布函数进行拟合。

如将实测谱型, 整段用同一组参数的 D 谱函数或 J 谱函数来拟合, 这样照成的离差太大, 有的甚至出现观测值与拟合值的平均相对误差  $\bar{\varepsilon}$  都大于 100%, 而分段拟合平均相对误差会降低。Junge 等(1971)<sup>[21]</sup>也曾指出, 将整个观测范围内的粒子分布用同一组参数的 J 谱来拟合是不合适的, 而 Davies 用多个对数正态分布函数拟合实测资料取得一定成功<sup>[22]</sup>。同时考虑到大于  $10\mu\text{m}$  的巨粒子数量少, 因此试着采取分段拟合处理的方法, 检验用该方法的拟合瞬时谱的精度

D 谱拟合步骤如下: 先分别固定  $\alpha$ 、 $\gamma$  两参数, 取  $\alpha=2$ 、 $\gamma=1$  和  $\alpha=2$ 、 $\gamma=0.5$

两种情况，这时 3.4 式分别可改写成

$$\ln\left(\frac{dN}{dr}/r^2\right) = \ln\alpha - b\gamma \quad (3.11)$$

$$\ln\left(\frac{dN}{dr}/r^2\right) = \ln\alpha - b\gamma^{1/2} \quad (3.12)$$

同一组资料分别对 (3.11)，(3.12) 式用一元线性回归法求出参数  $\alpha, b$  和拟合残差平方和。取残差为小的那一组  $a, b, \alpha, \gamma$  值作为用麦夸脱迭代法确定非线性模式中参数的初值。

用 J 谱拟合比较简单，(3.2) 式两端取对数得

$$\ln\left(\frac{dN}{d \log r}\right) = \ln c + v \ln r \quad (3.13)$$

然后按一元线性回归法求出  $c, v$ 。

对浮尘、扬沙、沙尘暴天气的数浓度谱、表面积谱及质量谱都采用 D 谱和 J 谱函数分段拟合，来比较不同谱函数的拟合效果。

定义拟合数浓度谱的平均相对误差为：

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{n}(r_i) - n(r_i)}{n(r_i)} \right| \quad (3.14)$$

其中  $\hat{n}(r_i)$  为拟合值， $n(r_i)$  为实测值。迭代过程中，残差逐次减小， $\varepsilon$  开始也减小，然而并不随着残差的减小而无限减小，到一定程度时残差虽然减小但  $\varepsilon$  却不再减小，有时反而增大，为了使拟合谱型均匀逼近实测谱型，以  $\varepsilon$  最小时终止迭代。误差结果见表 3.4。

表 3.4 可见，在直径 0.1~1.0 $\mu\text{m}$  的粒子范围内，对扬沙、沙尘暴天气数浓度谱拟合，无论用 D 谱还是 J 谱，都具有一定的拟合精度，J 谱的拟合误差大多处于 11~20% 之间，低于 D 谱（60% 以上）。这两种谱函数对扬沙的拟合精度和拟合比例数（拟合误差小于 1 的组数占总样本数的百分比）都高于沙尘暴天气。浮尘数浓度在该范围内只有 J 谱函数能进行接近 36 组的拟合。在直径大于 1.0 $\mu\text{m}$



的粒子范围内, D 谱和 J 谱函数对扬沙、沙尘暴等天气的拟合都不成功, 但 D 谱函数对浮尘天气有较好的拟合, 拟合误差为 3~34%, 全部样本都能拟合。对 0.1~2.0 $\mu\text{m}$  之间表面积谱的拟合, 浮尘天气能用 J 谱拟合, 拟合比例数不高为 58%; 扬沙天气用 J 谱和 D 谱都能拟合, J 谱的拟合误差与对数正态分布函数的相当, 分别为 3.2~6%、1.2~8.5%; 沙尘暴天气能用 D 谱拟合, 但拟合误差为 88% 以上, 拟合样本数仅为 43 组, 都不高。在大于 2.0 $\mu\text{m}$  范围内, 浮尘天气用 J 谱和 D 谱都能拟合, 精度也都不高; 扬沙天气 D 谱的拟合略好于 J 谱; 沙尘暴天气两种谱型都无法拟合。对沙尘天气质量谱的拟合, 在小于等于 2.5 $\mu\text{m}$  范围内, D 谱的拟合成功组数都可达到 100%, 浮尘和扬沙的拟合误差稍低, 分别为 10.7~17%、33.6~60.9%, 沙尘暴的偏高为 68.5~99.5%; 在大于 2.5 $\mu\text{m}$  范围内, D 谱也可进行拟合, 但拟合误差较高, 成功组数也不多。在这两个粒径范围内对质量谱拟合, J 谱函数都不行。用对数正态分布函数进行分段拟合, 其误差值大多都低于其他谱函数的分段拟合, 成功组数是最高的。从表 3.5 可以看出, 对数正态分布函数能对数浓度谱、表面积谱及质量谱的整个粒径范围进行拟合, 拟合效果好于其他函数。存在拟合误差达 90% 以上, 这是因为对瞬时谱拟合, 而非平均谱的拟合造成的。如对沙尘气溶胶的平均谱进行拟合, 其拟合误差不到 30%。再次验证了对数正态分布函数适用此类粒子谱的拟合。因此可用平均谱参数作为贺兰山地区沙尘气溶胶谱参数来简化气候模式中沙尘气溶胶参数化过程。

### 3.2 三种沙尘天气下浓度谱、表面积谱、质量谱的拟合参数

#### (1) 浮尘天气

浮尘								
数浓度谱			面积谱			质量谱		
峰值直径	标准差	常数	峰值直径	标准差	常数	峰值直径	标准差	常数
/ $\mu\text{m}$	$\sigma$	$c$	/ $\mu\text{m}$	$\sigma$	$c$	/ $\mu\text{m}$	$\sigma$	$c$
1.158	1.499	4.6	1.672	1.626	29.7	2.121	1.594	0.024
1.153	1.509	4.7	1.689	1.608	29.5	2.089	1.600	0.025
1.134	1.506	5.1	1.651	1.624	31.7	2.083	1.600	0.026
1.133	1.509	5.1	1.644	1.614	32.8	2.063	1.598	0.025
1.130	1.508	5.3	1.648	1.619	32.8	2.065	1.599	0.027
1.122	1.497	5.2	1.604	1.627	31.6	2.022	1.616	0.025
1.127	1.499	5.0	1.626	1.618	30.5	2.049	1.592	0.024
1.116	1.503	5.0	1.621	1.629	30.6	2.060	1.602	0.024
1.120	1.511	3.8	1.636	1.623	23.5	2.064	1.595	0.019
1.120	1.505	3.5	1.623	1.608	21.3	2.032	1.583	0.017
1.120	1.502	3.5	1.622	1.622	21.5	2.040	1.606	0.017
1.126	1.504	3.5	1.632	1.624	21.7	2.063	1.601	0.017
1.121	1.507	3.6	1.611	1.609	21.9	2.011	1.577	0.017
1.130	1.506	3.4	1.636	1.614	21.1	2.060	1.587	0.017
1.125	1.501	3.3	1.627	1.632	20.4	2.057	1.616	0.016
1.119	1.528	3.4	1.679	1.597	20.5	2.119	1.526	0.016
1.127	1.516	3.4	1.652	1.632	21.4	2.094	1.611	0.017
1.132	1.505	3.4	1.636	1.615	21.3	2.044	1.610	0.017
1.134	1.502	3.4	1.627	1.597	21.1	2.019	1.587	0.017
1.121	1.529	3.7	1.670	1.611	22.2	2.080	1.608	0.018
1.119	1.513	3.7	1.620	1.614	22.6	2.036	1.589	0.018
1.114	1.515	4.0	1.632	1.606	23.9	2.043	1.581	0.019
1.117	1.517	4.2	1.638	1.596	25.2	2.033	1.578	0.020
1.133	1.518	4.4	1.661	1.613	27.7	2.084	1.593	0.023
<b>1.126</b>	<b>1.509</b>	<b>4.1</b>	<b>1.314</b>	<b>1.600</b>	<b>17.0</b>	<b>2.086</b>	<b>1.583</b>	<b>0.020</b>

## (2) 扬沙天气

数浓度谱			扬沙 面积谱			质量谱		
峰值直径	标准差	常数	峰值直径	标准差	常数	峰值直径	标准差	常数
/ $\mu\text{m}$	$\sigma$	$c$	/ $\mu\text{m}$	$\sigma$	$c$	/ $\mu\text{m}$	$\sigma$	$c$
0.688	1.843	18.7	1.529	1.925	61.6	2.373	1.870	0.051
0.679	1.856	21.4	1.539	1.933	69.3	2.477	1.806	0.055
0.693	1.872	21.4	1.650	1.931	72.8	2.641	1.800	0.062
0.704	1.832	21.4	1.564	1.879	71.3	2.385	1.800	0.057
0.694	1.864	21.5	1.616	1.904	72.3	2.540	1.783	0.060
0.723	1.792	21.4	1.524	1.902	73.8	2.363	1.821	0.059
0.749	1.777	23.0	1.572	1.902	85.0	2.450	1.810	0.069
0.717	1.819	24.2	1.573	1.898	83.7	2.459	1.791	0.067
0.718	1.788	25.2	1.469	1.894	84.8	2.278	1.811	0.065
0.763	1.751	23.7	1.533	1.900	88.6	2.371	1.826	0.071
0.742	1.783	23.7	1.553	1.852	83.2	2.366	1.736	0.064
0.744	1.838	25.5	1.670	1.878	95.3	2.540	1.792	0.082
0.727	1.841	24.1	1.627	1.828	83.2	2.399	1.727	0.068
0.726	1.843	21.4	1.599	1.865	75.7	2.410	1.791	0.063
0.744	1.817	21.3	1.599	1.856	77.4	2.393	1.775	0.064
0.722	1.873	19.8	1.675	1.890	71.7	2.595	1.781	0.061
0.614	1.986	19.4	1.593	1.935	56.7	2.554	1.836	0.047
0.721	1.812	18.4	1.525	1.853	62.5	2.278	1.784	0.049
0.611	1.986	19.4	1.581	1.868	54.1	2.394	1.769	0.044
0.670	1.890	14.5	1.549	1.843	44.9	2.365	1.730	0.034
0.565	2.025	17.0	1.461	1.882	42.7	2.249	1.794	0.032
0.647	1.891	13.3	1.134	2.196	53.8	2.312	1.884	0.031
0.583	2.005	16.0	1.493	1.887	42.0	2.295	1.801	0.032
0.730	1.770	10.3	1.477	1.888	35.9	2.315	1.780	0.027
<b>0.708</b>	<b>1.842</b>	<b>21.4</b>	<b>1.570</b>	<b>1.887</b>	<b>72.1</b>	<b>2.442</b>	<b>1.782</b>	<b>0.058</b>

(3) 沙尘暴天气

沙尘暴								
数浓度谱			面积谱			质量谱		
峰值直径	标准差	常数	峰值直径	标准差	常数	峰值直径	标准差	常数
/ $\mu\text{m}$	$\sigma$	$c$	/ $\mu\text{m}$	$\sigma$	$c$	/ $\mu\text{m}$	$\sigma$	$c$
0.646	1.782	71.8	1.566	1.884	187.3	2.519	1.711	0.143
0.619	1.795	80.3	1.495	1.907	191.3	2.46	1.732	0.140
0.655	1.690	66.5	1.319	1.979	183.4	2.276	1.781	0.121
0.660	1.712	67.8	1.421	1.907	179.0	2.301	1.756	0.127
0.646	1.732	66.9	1.390	1.931	175.6	2.295	1.767	0.122
0.619	1.792	76.3	1.389	1.981	199.0	2.453	1.764	0.135
0.686	1.662	66.9	1.390	1.918	186.6	2.295	1.755	0.129
0.661	1.673	72.5	1.328	1.961	187.9	2.244	1.807	0.128
0.660	1.688	66.5	1.287	1.974	185.7	2.234	1.765	0.118
0.659	1.687	66.5	1.273	1.965	181.8	2.192	1.778	0.115
0.667	1.688	66.7	1.338	1.936	182.0	2.263	1.756	0.119
0.649	1.717	66.5	1.334	1.952	174.4	2.295	1.752	0.114
0.640	1.762	66.5	1.473	1.982	175.6	2.504	1.797	0.133
0.610	1.787	66.3	1.306	1.990	167.4	2.304	1.786	0.108
0.613	1.774	64.5	1.251	2.009	169.7	2.292	1.758	0.101
0.561	1.858	65.9	1.150	2.066	167.5	2.270	1.750	0.089
0.545	1.884	65.7	1.186	2.041	155.6	2.264	1.748	0.086
0.551	1.895	65.0	1.256	2.072	161.1	2.367	1.792	0.099
0.535	1.911	65.8	1.216	2.046	153.9	2.277	1.779	0.090
0.526	1.937	65.8	1.250	2.037	150.8	2.309	1.764	0.091
0.560	1.861	55.3	1.303	1.962	120.9	2.235	1.760	0.078
0.505	1.961	65.1	1.259	2.015	136.5	2.292	1.749	0.083
0.511	1.971	65.8	1.262	2.071	149.7	2.347	1.811	0.094
0.498	1.991	65.6	1.250	2.118	146.6	2.360	1.840	0.096
<b>0.616</b>	<b>1.774</b>	<b>66.4</b>	<b>1.310</b>	<b>1.988</b>	<b>170.1</b>	<b>2.288</b>	<b>1.775</b>	<b>0.11</b>

表 3.3 对比地区的拟合参数值

参数	浮尘			扬沙			沙尘暴		
	数浓度谱	面积谱	质量谱	数浓度谱	面积谱	质量谱	数浓度谱	面积谱	质量谱
峰值	撒哈拉沙漠 <sup>[9]</sup>	—	—	—	8.80	15.20	—	16.20	37.60
直径 / $\mu\text{m}$	浑善达克沙地 <sup>[8]</sup>	—	—	—	2.0	3.80	—	2.80	4.0

表 3.4 三种沙尘天气数浓度谱 (1)、表面积谱 (2)、质量谱 (3)  
用不同拟合函数分段拟合的拟合误差

(1) 数浓度谱

数浓度谱	谱模式	浮尘	扬沙	沙尘暴
		拟合误差(%) / 比例	拟合误差(%) / 比例	拟合误差(%) / 比例
d < 1 $\mu$ m	D1	-/-	61.4~99.8/32%	80.9~99.5/56%
	D2	-/-	75.8~99.9/97%	89.0~99.8/60%
	J	39~96/40%	11.6~19.2/100%	15.7~18.4/100%
	N	-/-	0.018~0.13/100%	2.3~9.8/100%
d $\geq$ 1 $\mu$ m	D1	3~34/100%	-/-	-/-
	D2	88~99/89%	-/-	-/-
	J	-/-	-/-	-/-
	N	19~99/59%	2.6~11.6/100%	17.6~97.1/88%

(2) 表面积浓度谱

表面积谱	谱模式	浮尘	扬沙	沙尘暴
		拟合误差(%) / 比例	拟合误差(%) / 比例	拟合误差(%) / 比例
d < 2 $\mu$ m	D1	-/-	-/-	88~90/43%
	D2	-/-	40.9~65/100%	-/-
	J	39~97/58%	3.2~6/100%	-/-
	N	5~99/94%	1.2~8.5/100%	15.7~18.4/100%
d $\geq$ 2 $\mu$ m	D1	72~99/84%	55.8~96.7/100%	-/-
	D2	93~99/4%	51.5~93.7/95%	-/-
	J	67~98/93%	79.9~99.6/7%	-/-
	N	2.6~2.4/100%	6.1~92.7/98%	22.8~95.7/85%

(3) 质量浓度谱

表面积谱	谱模式	浮尘	扬沙	沙尘暴
		拟合误差(%) / 比例	拟合误差(%) / 比例	拟合误差(%) / 比例
d < 2.5 $\mu$ m	D1	10.7~17/100%	33.6~60.9/100%	68.5~99.5/33%
	D2	14.3~33.3/100%	34.8~60.9/100%	64.7~77.4/100%
	J	-/-	-/-	-/-
	N	-/-	4.4~62.7/100%	11.9~23.9/100%
d $\geq$ 2.5 $\mu$ m	D1	-/-	42.3~99.9/16%	56.8~98.8/30%
	D2	27.6~99.4/80%	47.1~64.1/61%	55.9~61.8/7%
	J	-/-	-/-	-/-
	N	2.5~32.3/100%	6.3~48.2/100%	12.1~81.4/100%

(\*注: - 代表所有瞬时谱的拟合误差值大于 100%。比例, 为拟合误差 < 1 的组数占总的拟合组数的百分比。D1, D2 分别为  $\alpha=2, \gamma=1$  和  $\alpha=2, \gamma=0.5$  时的 D 谱, J 为 Junge

谱, N 为对数正态分布谱。)

表 3.5 对数正态分布函数拟合误差

	浮尘	扬沙	沙尘暴
	拟合误差/拟合比例	拟合误差/拟合比例	拟合误差/拟合比例
数浓度谱	32.6~98.7/73%	4.8~16.9/100%	18.1~78.5/96%
表面积谱	41.6~91/50%	6.6~97.5/98%	24~98.5/85%
质量谱	33.6~97.7/74%	2.7~12.9/100%	11.4~16/100%

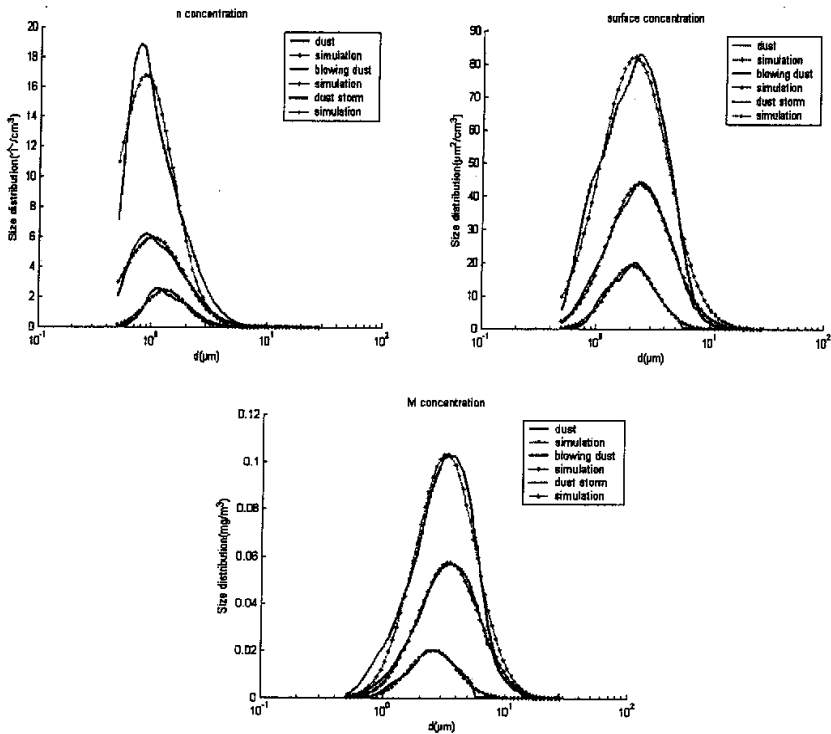


图 3.4 平均数浓度谱、表面积谱、质量谱及其拟合谱

### 3. 5 结论

通过对贺兰山地区盐池、银川、巴音浩特等地不同强度沙尘天气气溶胶连续观测资料的分析, 可以得出:

- 1) 不同沙尘天气条件下沙尘粒子数浓度谱、表面积浓度谱及质量浓度谱特征直径演变特征。对平均直径、中值直径、峰值直径任意一种特征直径在沙尘天气过程的变化来说, 数浓度谱的特征直径的变化范围最小, 前后相差0.1~0.2。表面积谱的略大, 在0.1~0.9之间。质量谱的变化范围最大0.2~4.5。浮尘数浓度谱的平均直径、中值直径和峰值直径都高于其他沙尘天气, 分别为1.519~1.529 $\mu\text{m}$ 、1.241~1.334 $\mu\text{m}$ 和1.036~1.286 $\mu\text{m}$ 。表面积谱和质量谱的三种特征直径都为背景天气最大, 扬沙次之, 浮尘最小。任何沙尘天气, 三种浓度谱的同一种特征直径之间相比存在以下关系: 质量谱的特征直径>表面积谱>数浓度谱。同一种浓度谱的不同特征直径之间相比, 任何沙尘天气的数浓度谱存在峰值直径<中值直径<平均直径的大小关系; 浮尘表面积谱、质量谱的特征直径都为中值直径最小, 其他两直径接近; 扬沙、沙尘暴的表面积谱和质量谱的特征直径关系均为峰值直径>平均直径>中值直径。
- 2) 沙尘天气期间, 气溶胶数浓度谱、表面积浓度谱及质量浓度谱的演变特征。不同等级的沙尘天气, 数浓度谱、表面积谱和质量谱的谱型之间存在差异。同一天气条件下, 三种浓度谱的峰值浓度存在明显变化, 变化趋势与总浓度保持一致; 峰值直径变化不大, 不与浓度的变化趋势保持一致。沙尘天气愈强烈, 谱的峰值浓度变化愈明显。浮尘期间, 数浓度谱的变化由0.8~2.5 $\mu\text{m}$ 粒径范围内粒子共同作用的结果; 表面积谱的谱型窄, 谱型的变化由1.0~3.5 $\mu\text{m}$ 之间的粒子造成的, 峰值直径主要在2.128~2.287 $\mu\text{m}$ 之间变动; 质量谱呈偏态, 峰值粒径在2.287~3.050 $\mu\text{m}$ 之间, 在浮尘末期, 该峰值范围略有减小。扬沙数浓度谱、表面积谱、质量谱的谱型都比其他天气的宽。扬沙天气, 数浓度谱的峰值浓度在前30min内由5个/ $\text{cm}^3$ 增至8个/ $\text{cm}^3$ , 之后1h内, 峰值数浓度不断下降, 结束时仅为3个/ $\text{cm}^3$ 左右; 峰值直径的基本在0.835~0.897 $\mu\text{m}$ 和0.897~0.964 $\mu\text{m}$ 两个粒径档中变动。表面积谱的峰值浓度随时间由36 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 增至56 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ , 再减少到18 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 左右, 结束时表面积浓度与浮尘天气接近; 峰值直径从初始的2.287~3.050 $\mu\text{m}$ , 减小到中

期的 2.128~2.838 $\mu\text{m}$ ，再减小到末期的 2.128~2.458 $\mu\text{m}$ 。质量谱峰值浓度变化与数浓度谱、表面积谱的保持一致，峰值直径在 2.458~5.829 $\mu\text{m}$  之间振荡变化。沙尘暴发生时，数浓度谱的峰值浓度高达 23 个/ $\text{cm}^3$ ，在该值附近保持一段时间后，峰值浓度降至 20 个/ $\text{cm}^3$  以下，终止时，峰值浓度为 14 个/ $\text{cm}^3$ ；对应峰值直径在 0.723~0.777 $\mu\text{m}$ 、0.777~0.835 $\mu\text{m}$  范围内变动。表面积谱的峰值浓度初始为 120 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ，至中期，降至 80 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$  附近，末期达到 60 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$  左右；峰值直径开始位于 2.287~2.458 $\mu\text{m}$  范围内，末期移至 2.128~2.838 $\mu\text{m}$  之间。质量谱也有同样的峰值浓度的变化趋势，峰值粒径在 2.838~4.697 $\mu\text{m}$  范围内波动变化。

- 3) 贺兰山地区不同沙尘天气下，气溶胶瞬时谱分布可用对数正态分布函数拟合。拟合参数如下：浮尘天气，数浓度谱、表面积谱、质量谱的几何峰值直径、标准差  $\sigma$  和常数  $c$  分别为 1.114~1.158 $\mu\text{m}$ 、1.50~1.53 和 3.3~5.3 个/ $\text{cm}^3$ ，1.611~1.689 $\mu\text{m}$ 、1.60~1.63 和 20.4~32.8 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ，2.011~2.121 $\mu\text{m}$ 、1.53~1.62 和 0.016~0.027 $\text{mg}/\text{m}^3$ 。扬沙天气，数浓度谱、表面积谱、质量谱的参数分别为 0.565~0.763 $\mu\text{m}$ 、1.75~2.03 和 10.3~25.5 个/ $\text{cm}^3$ ，1.134~1.675 $\mu\text{m}$ 、1.83~2.20 和 35.9~95.3 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ，2.249~2.641 $\mu\text{m}$ 、1.73~1.88 和 0.027~0.082  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。沙尘暴天气三种谱的参数分别为 0.498~0.686 $\mu\text{m}$ 、1.66~2.0 和 55.3~80.3 个/ $\text{cm}^3$ ，1.150~1.56 $\mu\text{m}$ 、1.88~2.12 和 121~199 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ，2.192~2.519 $\mu\text{m}$ 、1.71~1.84 和 0.078~0.143  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。扬沙和沙尘暴的拟合峰值直径有小幅的变化，常数  $c$  变化幅度较大。浮尘三种浓度谱的标准差  $\sigma$  在 1.5~1.7 之间。扬沙、沙尘暴天气表面积谱的标准差  $\sigma$  基本处于 2 附近，数浓度谱和质量谱的则在 1.6~2.0 之间。拟合参数落在常见值范围内，他们能反映沙尘过程中气溶胶的演变特征。
- 4) 对数正态分布函数对沙尘气溶胶的瞬时谱（数浓度谱、表面积谱、质量谱）的拟合效果优于 D 分布函数和 Junge 分布函数的分段拟合，D 谱和 Junge 谱函数的拟合误差比对数正态分布函数的拟合误差要大 10~60% 左右。大多



情况下, D 谱和 Junge 谱函数对同一粒径范围内浓度谱的拟合不能同时取得良好的拟合效果。不同的浓度谱, D 谱和 Junge 谱的拟合误差及能拟合的样本数是不同的。

## 参考文献:

- [1] Porter J N, Clarke A D. Aerosol size distribution models based on in situ measurements[J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102 (D5):6035~6045.
- [2] 雷文芳, 任丽新, 吕位秀, 等. 黑河地区沙漠气溶胶浓度和谱分布特征[J]. *高原气象*, 1993, 12(2):170~178.
- [3] 杨东贞, 王超, 温玉璞. 1990 年春季两次沙尘暴特征分析 [J]. *应用气象学报*, 1995, 6(1):19~28.
- [4] Chun Y J, Kim J C, Choi K O, et al. Characteristic number size distribution of aerosol during Asian dust episode in Korea[J]. *Atmos. Environ.*, 2001, 35(15): 2715~2721.
- [5] 权建农, 奚晓霞, 王鑫, 等. 兰州市 2001 年沙尘气溶胶质量浓度的特征分析[J]. *中国沙漠*, 2005, 25(1):93~97.
- [6] 刘立超, 王涛, 周茅先, 等. 沙坡头地区沙尘气溶胶质量浓度的试验观测研究[J]. *中国沙漠*, 2005, 25(3):336~341.
- [7] 赵德山等. 北京市冬季大气气溶胶空气动力学尺度谱分布的研究[J]. *大气科学*, 1988, 12(2):140~146.
- [8] 成天涛, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 浑善达克沙地沙尘气溶胶的粒谱特征[J]. *大气科学*, 2005, 29(1):147~153.
- [9] 牛生杰, 孙照渤. 沙漠地区沙尘气溶胶物理特性的飞机观测 [J]. *高原气象*, 2005, 24(4):35~42.
- [10] Haywood J M, P N Francis, D Glew, et al. Optical properties and direct radiative effect of Saharan dust: A case study of two Saharan dust outbreaks using aircraft data[J]. *J Geophys*

- Res,2001,106(D16):18471~18430.
- [11]高润祥,张文煜.渤海西岸大气气溶胶物理特征和水汽总量的研究[D].兰州大学研究生论文,大气科学系,2004.
- [12]辛金元,张文煜,袁九毅,等.沙尘气溶胶对直接太阳辐射的衰减研究[J].中国沙漠,2005,23(3):311~315.
- [13]刘玉杰,牛生杰,郑有飞.用CE-318太阳光度计资料研究银川地区气溶胶光学厚度特征[J].南京气象学院学报,2004,27(5):615~622.
- [14]刘国梁,郝丽珍.中国沙尘暴天气减少趋势的其它证据[J].中国沙漠,2005,25(3):448~449.
- [15]周慧.西安市空气污染持续维持机制初步研究[M],南京:南京信息工程大学应用气象系.2004.
- [16]张仁健,王明星,戴淑玲,等.北京地区气溶胶粒度谱分布初步研究[J].气候与环境研究[J].2000,5(1):85~89.
- [17]赵德山,汤大纲,周舟,等.北京市冬季大气气溶胶空气动力学尺度分布的研究[J],大气科学,1988,12(2),170~179.
- [18]王明星.大气化学(第二版)[M].北京:气象出版社,1999:1~467.
- [19]章澄昌.大气气溶胶教程[M].北京:气象出版社,1995:1~328.
- [20]Nishikawa M,Kanamori S,Knnamori N,etal.Kosa aerosol as eolian carrier of anthropogenic material[J].The Science of the Total Enviroment,1991(107):13~27.
- [21]Junge,C.E.etal. J.Areosol Sci,1971,2(3):305
- [22]Davis,C.N.,J.Aerosol Sci.,1974,5(3):293.

## 第四章 主要结论及创新点

### 4.1 主要结论

本文于1998年、1999年4、5月分别在内蒙古巴音浩特、宁夏盐池气象站和银川机场气象台用美制APS-3310A型激光空气动力学气溶胶粒子谱仪进行采样,分析了贺兰山地区背景大气、浮尘、扬沙和沙尘暴天气下气溶胶的浓度变化特征,谱型的演变,并对粒子谱进行拟合。

#### 1. 对沙尘气溶胶数浓度、表面积浓度、质量浓度变化特征进行分析可得出:

巴音浩特背景大气的沙尘气溶胶数浓度、表面积浓度、质量浓度分别为25~29个/cm<sup>3</sup>、223~255μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>、0.32~0.4 mg/m<sup>3</sup>。高于吉兰泰、盐池和阿拉善右旗三地背景大气沙尘气溶胶质量浓度的平均值0.126 mg/m<sup>3</sup>,也高于银川平原的背景大气值0.098 mg/m<sup>3</sup>,是其他地区背景质量浓度的18~30倍。银川浮尘天气气溶胶数浓度、表面积浓度及质量浓度分别为28~45个/cm<sup>3</sup>、249~412μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>和0.25~0.43 mg/m<sup>3</sup>。远低于同天气条件下盐池(140个/cm<sup>3</sup>、0.51 mg/m<sup>3</sup>)和北京(0.979 mg/m<sup>3</sup>)等地的采样,略高于背景大气的采样。

扬沙天气沙尘气溶胶数浓度、表面积浓度和质量浓度分别为56~156个/cm<sup>3</sup>、405~1419μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>和0.43~1.89mg/m<sup>3</sup>,强度与同地区其他几次扬沙天气比属中等。沙尘暴天气沙尘气溶胶数浓度、表面积浓度以及质量浓度分别为209~359个/cm<sup>3</sup>、1337~2533μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>和1.42~2.95mg/m<sup>3</sup>,是扬沙天气对应浓度的2~4倍。此次沙尘暴强度与同地区其他几次沙尘暴比略强。

不同沙尘天气过程,浓度变化趋势存在较大的差异;同一天气过程,数浓度、表面积浓度和质量浓度的变化趋势是一致的。浮尘过程,数浓度、质量浓度变化较平缓,初始的数浓度和质量浓度分别接近40个/cm<sup>3</sup>、0.4mg/m<sup>3</sup>,该浓度值保持15min以后,略有下降,达到30个/cm<sup>3</sup>、0.25mg/m<sup>3</sup>,维持这一浓度水平近20min后,浓度略有回升。扬沙天气,浓度在波动中缓慢递增继而缓慢

递减。前 30min 内数浓度、质量浓度分别从  $100 \text{ 个/cm}^3$  上升至  $156 \text{ 个/cm}^3$ 、 $1.0\text{mg/m}^3$  上升至  $1.8 \text{ mg/m}^3$ ，在该值附近平衡近 20min 后，浓度逐渐开始下降，终止前的 30min 内数浓度和质量浓度分别下降了  $100 \text{ 个/cm}^3$ 、 $1.46\text{mg/m}^3$ ，降幅达 36%和 78%。沙尘暴天气，在初始 2min 内，沙尘暴的浓度达到该采样过程的高值 ( $357 \text{ 个/cm}^3$ 、 $2.84\text{mg/m}^3$ )，在这一浓度附近维持 20min 后，浓度开始不断下降，至采样结束时数浓度和质量浓度分别为  $218 \text{ 个/cm}^3$ 、 $1.834 \text{ mg/m}^3$ 。沙尘天气浓度（数浓度、表面积浓度、质量浓度）的变化与风速存在一定关系。

浮尘期间，粒子数浓度主要集中在  $1.0\sim 2.0\mu\text{m}$  粒径范围内，该范围内粒子的比重随时间从 0.66 缓慢下降到 0.63。扬沙天气粒径小于等于  $1.0\mu\text{m}$  和  $2.0\mu\text{m}$  粒子的分数比分别在 0.40~0.48、0.84~0.91 之间。该过程中， $1.0\sim 2.0\mu\text{m}$  粒径范围内的比重则在 0.43~0.45 之间。沙尘暴过程中，粒径小于等于  $1.0\mu\text{m}$  粒子的分数比为 0.50~0.55；小于等于  $2.0\mu\text{m}$  粒子的分数比为 0.89~0.91； $1.0\sim 2.0\mu\text{m}$  之间粒子的比重为 0.36~0.38，略小于扬沙天气。沙尘暴期间，小于  $2.0\mu\text{m}$  的粒子的分数比不随数浓度的减小而减小。扬沙和沙尘暴结束时，两者小于等于  $2.0\mu\text{m}$  粒子的分数比值接近。小于  $2.0\mu\text{m}$  粒子的浮扬对沙尘天气过程数浓度具有影响。

浮尘、扬沙、沙尘暴天气，表面积浓度在小于等于  $2.0\mu\text{m}$  和大于  $2.0\mu\text{m}$  范围内的百分比基本接近，约为 45%、55%；质量浓度在这两个粒径范围内的百分比约为 30%、70%。数浓度、表面积浓度和质量浓度三者之间，浓度主要分布的粒径范围发生了变化。

## 2. 对不同沙尘天气条件下沙尘粒子谱特征及演变分析，可以得出：

不同沙尘天气条件下沙尘粒子数浓度谱、表面积浓度谱及质量浓度谱特征直径演变特征。对平均直径、中值直径、峰值直径任意一种特征直径在沙尘天气过程的变化来说，数浓度谱的特征直径的变化范围最小，前后相差 0.1~0.2。表面积谱的略大，在 0.1~0.9 之间。质量谱的变化范围最大 0.2~4.5。浮尘数浓度谱的平均直径、中值直径和峰值直径都高于其他沙尘天气，分别为  $1.519\sim 1.529\mu\text{m}$ 、 $1.241\sim 1.334\mu\text{m}$  和  $1.036\sim 1.286\mu\text{m}$ 。表面积谱和质量谱的三种特

征直径都为背景天气最大，扬沙次之，浮尘最小。任何沙尘天气，三种浓度谱的同一种特征直径之间相比存在以下关系：质量谱的特征直径>表面积谱>数浓度谱。同一种浓度谱的不同特征直径之间相比，任何沙尘天气数浓度谱存在峰值直径<中值直径<平均直径的大小关系；浮尘表面积谱、质量谱的特征直径都为中值直径最小，其他两直径接近；扬沙、沙尘暴的表面积谱和质量谱的特征直径关系均为峰值直径>平均直径>中值直径。

沙尘天气期间，气溶胶数浓度谱、表面积浓度谱及质量浓度谱的的演变特征。不同等级的沙尘天气，数浓度谱、表面积谱和质量谱的谱型之间存在差异。同一天气条件下，三种浓度谱的峰值浓度存在明显变化，变化趋势与总浓度保持一致；峰值直径变化范围不大，不与浓度的变化趋势保持一致。沙尘天气愈强烈，谱的峰值变化愈明显。浮尘期间，数浓度谱的变化由 0.8~2.5 $\mu\text{m}$  粒径范围内粒子共同作用的结果；表面积谱的谱型窄，谱型的变化由 1.0~3.5 $\mu\text{m}$  之间的粒子造成的，峰值直径主要在 2.128~2.287 $\mu\text{m}$  之间变动；质量谱呈偏态，峰值粒径在 2.287~3.050 $\mu\text{m}$  之间，在浮尘末期，该峰值范围略有减小。扬沙数浓度谱、表面积谱、质量谱的谱型都比其他天气的宽。扬沙天气，数浓度谱的峰值浓度在前 30min 内由 5 个/ $\text{cm}^3$  增至 8 个/ $\text{cm}^3$ ，之后 1h 内，峰值数浓度不断下降，结束时仅为 3 个/ $\text{cm}^3$  左右；峰值直径的基本在 0.835~0.897 $\mu\text{m}$  和 0.897~0.964 $\mu\text{m}$  两个粒径档中变动。表面积谱的峰值浓度随时间由 36 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$  增至 56 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ，再减少到 18 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$  左右，结束时表面积浓度与浮尘天气接近；峰值直径从初始的 2.287~3.050 $\mu\text{m}$ ，减小到中期的 2.128~2.838 $\mu\text{m}$ ，再缩小到末期的 2.128~2.458 $\mu\text{m}$ 。质量谱峰值浓度变化与数浓度谱、表面积谱的保持一致，峰值直径在 2.458~5.829 $\mu\text{m}$  之间振荡变化。沙尘暴发生时，数浓度谱的峰值浓度高达 23 个/ $\text{cm}^3$ ，在该值附近保持一段时间后，峰值浓度降至 20 个/ $\text{cm}^3$  以下，终止时，峰值浓度为 14 个/ $\text{cm}^3$ ；对应峰值直径在 0.723~0.777 $\mu\text{m}$ 、0.777~0.835 $\mu\text{m}$  范围内变动。表面积谱的峰值浓度初始为 120 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ，至中期，降至 80 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$  附近，末期达到 60 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$  左右；峰值直径开始位于 2.287~2.458 $\mu\text{m}$  范围内，

末期移至 2.128~2.838 $\mu\text{m}$  之间。质量谱也有同样的峰值浓度的变化趋势，峰值粒径在 2.838~4.697 $\mu\text{m}$  范围内波动变化。

### 3、对不同沙尘天气条件下沙尘气溶胶粒子谱进行拟合，可以得出：

贺兰山地区不同沙尘天气下，气溶胶瞬时谱分布可用对数正态分布函数拟合。拟合参数如下：浮尘天气，数浓度谱、表面积谱、质量谱的几何峰值直径、标准差 $\sigma$ 和常数 $c$ 分别为 1.114~1.158 $\mu\text{m}$ 、1.50~1.53 和 3.3~5.3 个/ $\text{cm}^3$ ，1.611~1.689 $\mu\text{m}$ 、1.60~1.63 和 20.4~32.8 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ，2.011~2.121 $\mu\text{m}$ 、1.53~1.62 和 0.016~0.027 $\text{mg}/\text{m}^3$ 。扬沙天气，数浓度谱、表面积谱、质量谱的参数分别为 0.565~0.763 $\mu\text{m}$ 、1.75~2.03 和 10.3~25.5 个/ $\text{cm}^3$ ，1.134~1.675 $\mu\text{m}$ 、1.83~2.20 和 35.9~95.3 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ，2.249~2.641 $\mu\text{m}$ 、1.73~1.88 和 0.027~0.082  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。沙尘暴天气三种谱的参数分别为 0.498~0.686 $\mu\text{m}$ 、1.66~2.0 和 55.3~80.3 个/ $\text{cm}^3$ ，1.150~1.56 $\mu\text{m}$ 、1.88~2.12 和 121~199 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ，2.192~2.519 $\mu\text{m}$ 、1.71~1.84 和 0.078~0.143  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。扬沙和沙尘暴的拟合峰值直径有小幅的变化，常数 $c$ 变化幅度较大。浮尘三种浓度谱的标准差 $\sigma$ 在 1.5~1.7 之间。扬沙、沙尘暴天气表面积谱的标准差 $\sigma$ 基本处于 2 附近，数浓度谱和质量谱的则在 1.6~2.0 之间。拟合参数落在常见值范围内，他们能反映沙尘过程中气溶胶的演变特征。

对数正态分布函数对沙尘气溶胶的瞬时谱（数浓度谱、表面积谱、质量谱）的拟合效果优于 D 分布函数和 Junge 分布函数的分段拟合，D 谱和 Junge 谱函数的拟合误差比对数正态分布函数的拟合误差要大 10~60%左右。大多情况下，D 谱和 Junge 谱函数对同一粒径范围内浓度谱的拟合不能同时取得良好的拟合效果。不同的浓度谱，D 谱和 Junge 谱函数的拟合误差及能拟合的样本数是不同的。

## 4.2 创新点

- 1、分析了不同沙尘天气沙尘气溶胶数浓度、表面积浓度、质量浓度的变化特征。
- 2、分析沙尘粒子谱瞬时演变特征。

- 3、较系统的拟合了沙尘粒子谱，给出了不同沙尘天气条件下的沙尘粒子谱分布参数，并做了误差分析。

#### **4.3 存在的问题**

1. 本文所用资料仅是在单点采样，如果能在沙尘输送路径上设多点采样，更有利于揭示输送过程中沙尘气溶胶物理特征的演变。
2. 如结合其他沙尘源地进行全面分析，可以给出不同沙源具有广泛代表性的沙尘气溶胶粒子谱。

## 参加科研项目、发表论文及参加学术活动情况

### 参加科研项目情况：

1. 国家自然科学基金项目(40365002)“沙尘暴热力动力结构及预警方法研究”；
2. 南京信息工程大学引进人才科研启动基金资助项目(QD06)“沙尘气溶胶粒子谱瞬时演变特征研究”；
3. 教育部高等学校博士点专项科研基金项目(20050200003)“沙尘气溶胶辐射模型构建及其气候强迫研究”。

### 硕士研究生在读期间发表论文：

顾宇丹、牛生杰，“贺兰山地区沙尘气溶胶瞬时谱分析及拟合”，  
南京气象学院学报 2006 年待发表（已录用）

### 参加学术交流及业务实习情况：

1. 2006 年 4 月 南京信息工程大学江苏省气象灾害重点实验室暨国家重点实验室培育点 2005 年度学术交流会（江苏 镇江）。做大会口头报告，报告题目为“沙尘气溶胶瞬时谱分析及拟合”；
2. 2005 年 11 月 第八届全国气溶胶会议暨第二届海峡两岸气溶胶技术研讨会（江苏 南京）；
3. 2005 年 4 月 南京信息工程大学江苏省气象灾害重点实验室暨国家重点实验室培育点 2004 年度学术交流会（江苏 连云港）；
4. 2005 年 3 月 南京信息工程大学气象台天气分析实习；
5. 2004 年 10 月 江苏省环境监测中心实习；
6. 2004 年 7 月 江苏省气象台实习；
7. 2004 年 6 月 第 14 届国际 Terscan 遥感大会（南京信息工程大学中美合作遥感中心）；
8. 2004 年 6 月 第一届 NIM- MODIS/AIRS 国际培训班（南京信息工程大学中美合作遥感中心）。



## 致 谢

本文是在导师牛生杰教授悉心指导和亲切关怀下完成的。牛老师从论文的选题到研究工作的进行都给予我精心指导。导师严谨求实的科学态度、渊博的学识、对科学孜孜不倦的追求和探索精神，是我学习的楷模。在论文完成过程中，导师不仅教我如何做学问，更重要的是教我如何做人。三载从师，是我毕生享受不尽的财富。在此向导师致以最衷心的感谢。

在论文撰写过程中，得到魏鸣教授、杨军副教授、杨有林工程师无私的帮助和指导，在此深表谢意；在整个学习和工作中还得到南京信息工程大学遥感中心于华英、徐永明等老师在工作 and 生活中给予的关照，在此一并表示感谢。

感谢岳平、陈林、周万福、许潇峰、刘晓莉、刘菲等同门师兄妹在三年学习生活中的关心和帮助，一起学习、一起奋斗的点点滴滴，时时浮现在眼前，萦绕在耳畔，将让人永远难忘。

完成论文的过程中还得到了罗霞、李云燕、孙琪、周丽娜、史瑞琴等同寝室姐妹及好友的鼓励和帮助，这段情谊和一起度过的时光会永远留在我的记忆中。

感谢研究生部的朱伟军、钱翼梅、马革兰等老师和应用气象系的申双和、刘寿东、林晓玲等老师三年来在学习和生活上的关心和帮助。

最后向我的父母深深致谢，在我的学习和生活中，给了我无限的关爱和支持，她们是鼓舞我前进的动力。

她们是鼓舞我前进的动力。

顾宇丹

2006年5月10日