

文章编号: 1000-2022(2006)04-0500-07

## 贺兰山地区沙尘气溶胶瞬时谱分析及拟合

顾宇丹, 牛生杰

(南京信息工程大学 大气物理与大气环境重点实验室, 江苏 南京 210044)

**摘 要** 利用 APS-3310A 型激光空气动力学粒子谱仪, 1998 年 4、5 月和 1999 年 4 月在贺兰山附近的巴音浩特、盐池、银川等地采集了具有代表性的背景大气、浮尘、扬沙、沙尘暴天气条件下沙尘粒子谱分布资料。对粒子瞬时谱的统计分析发现, 不同的沙尘天气过程中, 气溶胶的瞬时浓度存在很大差别。扬沙、沙尘暴天气过程中, 气溶胶浓度变化较大; 浮尘天气过程中, 气溶胶浓度变化较小。沙尘现象越强, 粗粒子( $d > 2.5 \mu\text{m}$ )越多, 各粒径段浓度变化越明显。不同过程, 粗细粒子对粒子表面积浓度贡献程度不一。沙尘气溶胶粒子谱型为单峰结构, 对粒子的瞬时谱进行了谱型拟合, 其具有对数正态分布函数的特征。

**关键词** 贺兰山地区; 沙尘气溶胶; 瞬时谱; 拟合

**中图分类号** P402 **文献标识码** A

## Analysis and Fitting of the Instantaneous Size Distribution of Sand-Dust Aerosol Particles in Helan Mountainous Area

GU Yu-dan, NUI Sheng-jie

(Key Laboratory of Atmospheric Physics & Atmospheric Environment, NUIST, Nanjing 210044, China)

**Abstract** Sand-dust aerosol particle size distributions have been measured by the APS-3310A (made by U. S. A.) in Bayinhaote, Yanchi and Yinchuan nearby the Helan Mountains during the April and May of 1998, and the April of 1999, respectively. A lot of data have been collected under different weather conditions, i. e. background, floating dust, blowing sand and sand storm. The rules of sand aerosol particle size distribution are found through statistical analysis. Sand aerosol concentration is changeable in different weather processes. During the blowing sand and sand storm weather, aerosol concentration changes a lot, but during the floating dust weather, the circumstance don't exist. The stronger the aerosol concentration, the more the number of aerosol particles greater than  $2.5 \mu\text{m}$ , and the more obvious the change in the concentration of various diameter ranges. During the four processes, coarse and fine particles have different contribution to the surface concentration. The mean instantaneous measured size distributions of sand aerosols are characterized by 1-mode-a single peak mode, which can be fitted very well by a log-normal distribution function.

收稿日期: 2005-07-21; 改回日期: 2006-03-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40365002); 南京信息工程大学科研基金资助项目(QB06)

作者简介: 顾宇丹(1980-), 女, 上海崇明人, E-mail: guyd2003y@nuist.edu.cn;

万卉(数据通信作者), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 云、降水、大气气溶胶, E-mail: niusj@nuist.edu.cn.

**Key words** Helan Mountain area ; sand aerosol ; instantaneous size distribution ; fitting

# 0 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 , 延长云的寿命 , 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 20 世纪 70 年代至今 , 国内外研究人员利用各种手段对撒哈拉沙漠、中亚等地的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。Sverdrup<sup>[1]</sup>在莫哈伟沙漠采样中采集到来自美国南部沿海盆地的气溶胶 , 这一气溶胶使得该地区小粒子端气溶胶体积较背景采样扩大 6 倍之多 , 揭示了不同地区之间气溶胶的输送及影响。Porter 等<sup>[2]</sup>观测研究发现 , 源至亚洲地区的沙尘尽管经长距离输送后沉降到夏威夷 , 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峰值直径有随气溶胶质量浓度的增大而移向较大值的趋势。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沙漠地区不同天气条件下沙尘气溶胶的空间分布<sup>[3]</sup> ; 利用 Anderson 采样仪研究单个沙尘事件中沙尘源地及其下游地区近地面气溶胶谱型、浓度的差异及变化规律<sup>[4-6]</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>[7]</sup> ; 利用 APS-3310A 型激光空气动力学气溶胶粒谱仪研究内蒙古中西部

沙漠地区不同天气条件下的气溶胶粒谱分布及其演变特征<sup>[8]</sup> ; 利用 PMS Fssp-100 型激光粒谱仪对浑善达克沙地进行外场观测 , 获得沙地气溶胶在不同天气条件下的分布特征<sup>[9]</sup> ; 利用飞机探测气溶胶在不同高度上的分布 , 以及气溶胶谱型随采样高度的变化<sup>[10-11]</sup>。除外场实测 , 地基遥感和空基遥感技术也被用来研究沙尘气溶胶 , 如 : 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>[12-15]</sup>。以往对沙尘气溶胶的研究 , 主要分析其平均谱 , 而对于不同沙尘天气过程中粒子谱的瞬时演变特征揭示较少 , 本文利用 1998 年 4、5 月和 1999 年 4 月在盐池、银川、巴音浩特等地不同沙尘天气条件下采得的沙尘粒子谱资料 , 分析沙尘过程中沙尘粒子谱瞬时演变特征 , 并对粒子谱进行拟合 , 给出谱参数 , 供沙尘数值模拟应用。

# 1 资料与仪器

测量仪器为美制 APS-3310A 型激光空气动力学气溶胶粒子谱仪 , 详见文献 [10]。观测资料如表 1 所示。

# 2 沙尘气溶胶瞬时谱特征分析

图 1 给出 3 种沙尘天气条件沙尘气溶胶采样浓度( 数浓度和质量浓度 ) 瞬时演变。浮尘过程中( 图 1a、b ) , 其瞬时数浓度、质量浓度变化较平缓。当时测得的径向风速小于 3.7 m/s , 又是午夜 , 对应的湍流交换活动比白天小。在扬沙过程中( 图 1c、d ) , 沙尘气溶胶浓度在波动中缓慢递增再缓慢递减 , 实测最大风速为 12.1 m/s。据观测<sup>[16]</sup> , 在扬沙发生之前风速不断增加至扬沙中期达到最大 , 之后恢复到初始状态。浓度增加很可能是风速增加所致。沙尘暴开始时( 图 1e、f ) , 沙尘气溶胶瞬时浓度突然上升达

表 1 观测资料

Table 1 Observational data used							
地理位置	地点	日期( 年-月-日 )	采样时刻( 时 : 分 : 秒 )	样本数	持续时间/s	采样间隔/s	天气现象
贺兰山东侧	盐池	1998-04-22	17 : 30 : 58—18 : 21 : 12	90	30	3 ~ 4	沙尘暴
贺兰山东侧	盐池	1998-04-28	09 : 52 : 49—11 : 20 : 03	152	30	3 ~ 4	扬沙
贺兰山东侧	银川	1998-05-19	23 : 52 : 26—00 : 49 : 24	100	30	3 ~ 4	浮尘
贺兰山西侧	巴音浩特	1999-04-11	12 : 26 : 34—12 : 28 : 29	6	20	4	背景天气

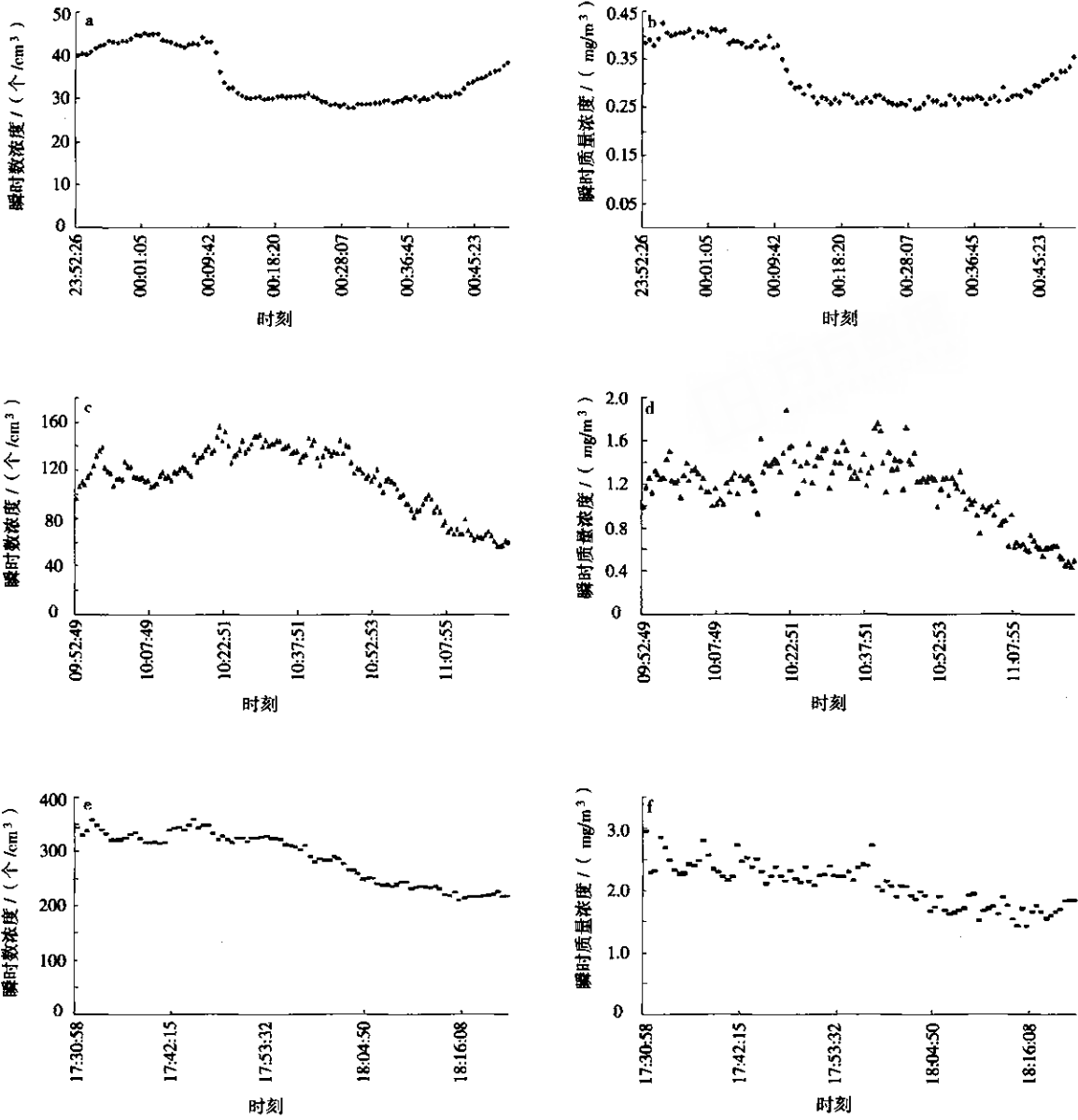


图 1 瞬时数浓度( a c e)和质量浓度( b d f)随采样时间的变化  
a b. 浮尘 c d. 扬沙 e f. 沙尘暴

Fig. 1 Temporal variations of instantaneous sample number concentration ( a c e) and mass concentration ( b d f) under different weather conditions  
a b. floating dust c d. blowing sand e f. sand storm

到最大,随后呈现振荡递减,到沙尘暴终止时,浓度仍保持较高水平。采样期间最大风速为 11.3 m/s,显然风速对浓度有很大的影响。浓度波动趋势与胡泽勇等<sup>[17]</sup>研究的沙尘暴过境时地面要素变化相吻合,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再渐渐减弱,风速总体变化趋势逐渐减小。扬沙、沙尘暴过程中,质量浓度变化幅度比数浓度明显。由此可见,风对于沙尘粒子在空中的悬浮和输送起重要作用。

理论计算结果表明,直径在 0.2 ~ 2.0 μm 的粒子在大气气溶胶的消光作用中贡献最大<sup>[18-19]</sup>。对于沙尘气溶胶,已有的研究表明<sup>[20]</sup>,尺度越小的沙尘气溶胶对短波辐射的散射能力越强,尺度越大的粒子则对长波辐射的吸收作用越强,直径小于 2.0 μm 粒子对太阳散射能力最强。本文将 2.0 μm 作为分界,计算沙尘天气期间直径小于等于 2.0 μm 粒子的数浓度占总数浓度的比值。从图 2 可以看出,在浮尘、扬沙、沙尘暴天气下,直径小于等于

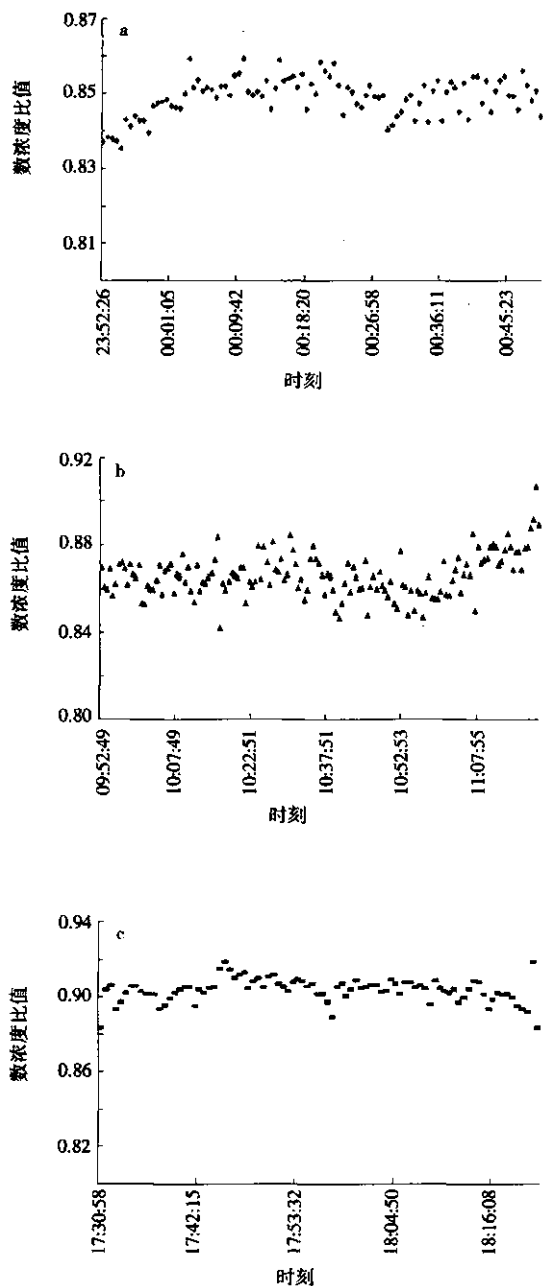


图2 沙尘气溶胶  $d \leq 1.0 \mu\text{m}$  粒子数占总粒子数的比值  
a. 浮尘 b. 扬沙 c. 沙尘暴

Fig. 2 Ratios of the dust number concentration of diameter less than and equal to  $2.0 \mu\text{m}$  to the total number concentration in different weather

a. floating dust b. blowing sand c. sand storm ;

$2.0 \mu\text{m}$  粒子的数浓度所占的比值分别在  $0.83 \sim 0.86$ 、 $0.84 \sim 0.91$ 、 $0.89 \sim 0.91$  之间。不同等级的沙尘过程中,小于等于  $2.0 \mu\text{m}$  粒子的数浓度占总数浓度的绝大多数,不同于浑善达克沙地结论<sup>[9]</sup>。另外,沙尘暴天气过程,虽然总数浓度变化很大(图1e),但直径小于等于  $2.0 \mu\text{m}$  粒子的数浓度比值基本无变化(图2)。扬沙和浮尘过程临近结束时,直

径小于等于  $2.0 \mu\text{m}$  粒子的数浓度比值存在增大的趋势。表明随扬沙及浮尘过程的结束,部分大粒子沉降。扬沙和沙尘暴结束时,两者直径小于等于  $2.0 \mu\text{m}$  粒子的数浓度比值接近。

观测表明<sup>[21]</sup>,沙尘气溶胶表面形成的硫酸盐和硝酸盐明显大于其他气溶胶,是非均相化学过程的重要场所。图3给出4种天气现象的瞬时表面积谱演变过程。可以看出沙尘天气过程中(图3b、图3c、图3d),表面积谱型整体变化不大,但峰值表面积浓度变化较大。沙尘天气较强时,大气中的大粒子较多,它们对表面积浓度的贡献较大。沙尘强度愈大,各粒径段内的表面积浓度变化愈明显。浮尘、扬沙、沙尘暴平均峰值表面积浓度依次相差1倍左右。图3a说明背景大气表面积谱峰值较小。图3b为浮尘过程每隔10 min瞬时表面积谱,表现为谱型窄,浓度分布集中在细粒子段( $d \leq 2.5 \mu\text{m}$ )。该浮尘过程,沙尘气溶胶峰值表面积浓度由  $24 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$  降至  $16 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ,总浓度保持在  $280 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$  左右。图3c为扬沙过程每隔15 min瞬时表面积谱,谱型相对浮尘天气的谱型宽,是由于扬沙采样前盐池正经历浮尘天气<sup>[8]</sup>,细粒子浮游在空中,接着大风把局地的粗粒子扬起所致。扬沙开始的半小时内,峰值表面积浓度由  $35 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$  迅速增至  $56 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ,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,峰值表面积浓度降幅达  $25 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 。整个扬沙过程中,粗细粒子对表面积浓度的贡献同样大。图3d为沙尘暴过程每隔10 min瞬时表面积浓度谱。沙尘暴发生时,峰值表面积浓度高达  $120 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ,10 min后由于粗粒子干沉降,峰值表面积浓度降至  $80 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$  左右,这一浓度水平维持20 min后,由于粒子不断受重力作用沉降,又无新的沙尘扬起,使峰值表面积浓度减小到  $60 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$  左右。该过程中,峰值直径先减小再增大,粗粒子对表面积浓度的贡献大于细粒子。

### 3 沙尘气溶胶的粒谱拟合

气溶胶的辐射强迫和气候效应的计算以及起沙模式的模拟都需定量计算,而气溶胶粒谱分布随地域变化很大,需采用一种简单、合适并具有物理基础的数学函数式来加以描述。对数正态分布函数表达式无疑是最适用的函数式<sup>[5,8,9,19]</sup>,它能够拟合整个尺度范围( $0.003 \sim 100 \mu\text{m}$ )的气溶胶粒谱,且与选择的粒谱表征属性参数(数浓度、表面积、质量)无

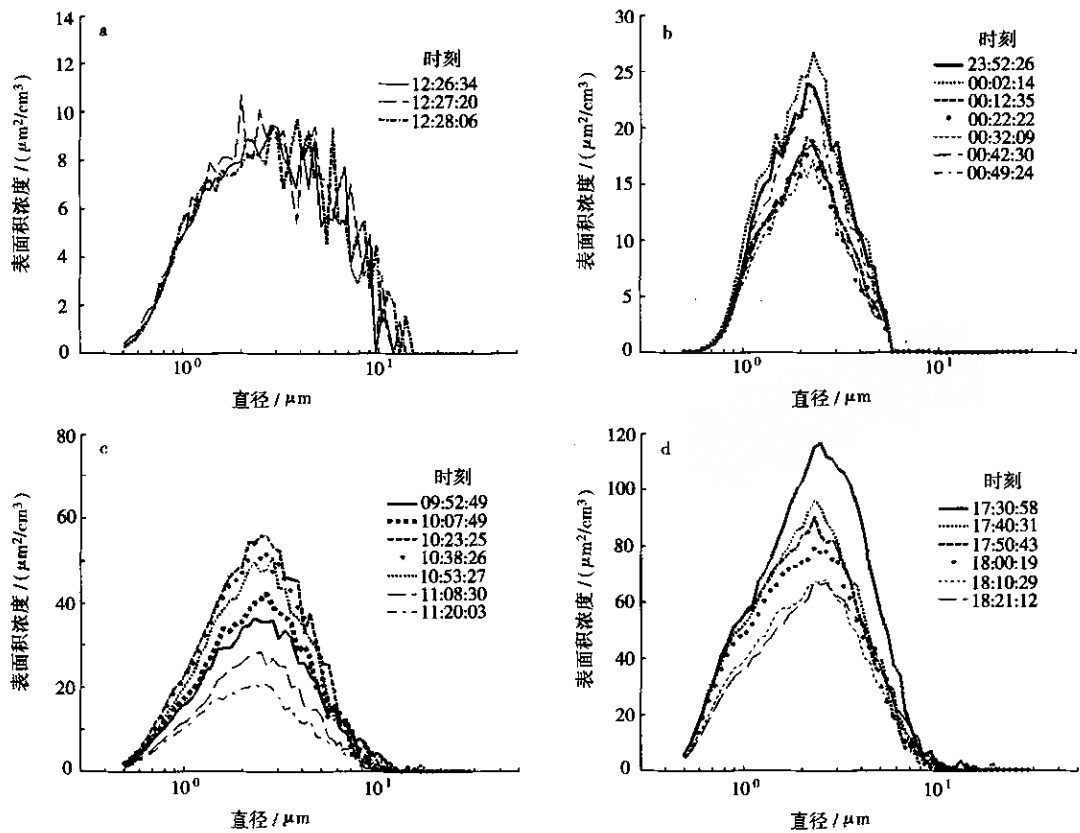


图 3 瞬时表面积谱

a. 背景大气 b. 浮尘 c. 扬沙 d. 沙尘暴

Fig. 3 Instantaneous size-surface area distributions of dust number concentration under different weather conditions

a. background b. floating dust c. blowing sand d. sand storm

关,具有合理的物理基础,符合统计学观念。该函数式为

$$n(\ln(r)) = \frac{cr}{\sqrt{2\pi\ln\sigma}} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln r_m)^2}{2\ln^2\sigma}\right]. \quad (1)$$

其中  $n(\ln(r))$  代表每一对数半径间隔中的粒子浓度(数浓度、表面积浓度、体积浓度),  $r$  为粒子半径,  $r_m$  为浓度谱的峰值半径,  $\sigma$  为标准差,  $c$  为常数。沙尘气溶胶粒子谱分布的拟合主要在于确定峰值半径  $r_m$ 、标准差  $\sigma$  及常数  $c$ , 因此直接用非线性最小二乘法就能达到理想的效果。据上文对沙尘天气过程中瞬时谱的特征分析,气溶胶的粒子浓度具有明显的阶段特征,因此初步分为初期、中期、末期进行瞬时谱拟合,结果见表 2。扬沙、沙尘暴天气过程中,气溶胶数浓度谱、表面积谱和质量谱中显示沙尘天气强度的常数  $c$  和峰值直径都有明显变化,3 种谱型的标准差  $\sigma$  无变化;浮尘天气过程中,3 个参数的值接近。各种谱拟合的  $t$  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。在一定程

度上,瞬时拟合谱反映了沙尘过程中谱的演变特征。在强沙尘天气下,贺兰山地区沙尘气溶胶拟合的峰值直径与撒哈拉沙漠<sup>[22]</sup>、浑善达克沙地<sup>[9]</sup>沙尘气溶胶拟合的峰值直径相比,前者明显偏小(表 2),这表明不同源地之间沙尘气溶胶的物理特性存在很大差异。

为了比较不同函数的拟合效果,用  $\Gamma$ -分布函数进行了拟合。定义拟合谱的相对误差为

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{n}(r_i) - n(r_i)}{n(r_i)} \right|. \quad (2)$$

其中  $\hat{n}(r_i)$  为拟合值,  $n(r_i)$  为实测值。 $\Gamma$ -分布对浮尘、扬沙、沙尘暴天气数浓度谱拟合的相对误差分别为 37.5 % ~ 43.5 %、29.8 % ~ 36.2 %、30.5 % ~ 47.6 %;对数正态分布拟合谱的相对误差分别为 33.8 % ~ 39.9 %、25.1 % ~ 27.3 %、26.9 % ~ 39.2 %;对数正态分布拟合平均谱的相对误差分别为 22.2 %、13.7 %、32.4 %,可见对数正态分布函数对数浓度谱的拟合优于  $\Gamma$ -分布的拟合。面积谱、质量谱也是正态分布函数拟合优于  $\Gamma$ -分布拟合。



表 2 沙尘条件下各种谱的峰值直径、标准差、谱常数以及拟合相关系数

Table 2 Diameters at the peak values ,standard deviations ,constant and correlation coefficients of dust size-number ,size-surface area and size-mass distributions in logarithm normal

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
峰值直径/ μm	初期	1. 154	1. 344	2. 148	0. 676	1. 530	2. 082	0. 604	1. 484	2. 338
	中期	1. 118	1. 302	2. 10	0. 716	1. 564	2. 412	0. 646	1. 274	2. 170
	末期	1. 116	1. 306	2. 08	0. 704	1. 465	2. 104	0. 606	1. 336	2. 442
	平均谱	1. 126	1. 314	2. 097	0. 708	1. 570	2. 442	0. 616	1. 310	2. 288
	撒哈拉沙漠 <sup>[ 22 ]</sup>					8. 80	15. 20		16. 20	37. 60
	浑善达克沙地 <sup>[ 9 ]</sup>					2. 00	3. 80		2. 80	4. 00
标准差 σ	初期	1. 504	1. 598	1. 573	1. 868	1. 925	1. 831	1. 817	1. 935	1. 747
	中期	1. 510	1. 606	1. 579	1. 835	1. 919	1. 766	1. 694	2. 010	1. 799
	末期	1. 516	1. 603	1. 570	1. 779	1. 853	1. 837	1. 808	1. 988	1. 784
	平均谱	1. 509	1. 600	1. 577	1. 842	1. 887	1. 782	1. 774	1. 988	1. 775
常数 c	初期	4. 6	19. 5	0. 024	20. 9	61. 5	0. 027	80. 3	201. 6	0. 135
	中期	4. 0	17. 6	0. 019	16. 5	74. 4	0. 045	76. 4	185. 3	0. 125
	末期	4. 0	16. 2	0. 019	11. 2	33. 9	0. 026	51. 1	131. 0	0. 089
	平均谱	4. 1	16. 9	0. 020	21. 4	72. 1	0. 058	66. 4	170. 1	0. 110
相关系数	初期	0. 964	0. 977	0. 976	0. 989	0. 992	0. 970	0. 968	0. 977	0. 983
	中期	0. 963	0. 975	0. 985	0. 989	0. 990	0. 978	0. 972	0. 975	0. 978
	末期	0. 963	0. 981	0. 977	0. 989	0. 986	0. 991	0. 971	0. 981	0. 978
	平均谱	0. 965	0. 979	0. 982	0. 989	0. 994	0. 994	0. 975	0. 983	0. 983

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。

4 小结

通过对 1998 年 4 月、5 月和 1999 年 4 月贺兰山地区盐池、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 )不同的天气过程 ,沙尘气溶胶具有不同的浓度演变特征。沙尘暴初起时 ,气溶胶瞬时浓度突然上升 ,保持一段时间后呈现振荡递减 ,终止时 ,仍保持较高浓度。扬沙过程中 ,浓度在波动中缓慢递增再缓慢递减。

( 2 )浮尘、扬沙、沙尘暴天气下 ,直径小于等于 2. 0 μm 粒子的数浓度占总数浓度的比值分别在 0. 83 ~ 0. 86、0. 84 ~ 0. 91、0. 89 ~ 0. 91 范围之内。沙尘暴天气过程中 ,直径小于等于 2. 0 μm 粒子数浓度的比值基本无变化。临近扬沙和浮尘结束时 ,该数浓度比值存在增大的趋势。

( 3 )沙尘天气过程中 ,表面积谱型整体变化不

大 ,而峰值表面积浓度变化较大。浮尘、扬沙、沙尘暴时平均峰值表面积浓度依次相差 1 倍左右。浮尘时谱型窄 ,峰值表面积浓度的变化趋势存在上升下降再上升的过程。扬沙时受到远处浮尘和局地扬沙共同影响 ,谱型相对较宽 ,粗细粒子对表面积浓度的贡献同样大 ,峰值表面积浓度变化趋势与浮尘时的变化趋势相反。沙尘暴过程中 ,对表面积浓度贡献最大的是粗粒子 ,结束时粗粒子表面积浓度仍高于其他沙尘天气。

( 4 )不同沙尘天气下 ,贺兰山沙尘气溶胶瞬时谱分布可用对数正态分布函数拟合 ,其拟合效果优于 Γ-分布的拟合效果。拟合谱参数能反映沙尘过程中气溶胶的演变特征。

参考文献 :

[ 1 ] Sverdrup G M. Characterization of California aerosols ,2 ,aerosol size distribution in the Mojave desert[ J ]. Atmos Environ ,1975 ,9 ( 5 ) :483-494.

[ 2 ] Porter J N ,Clarke A D. Aerosol size distribution models based on

in situ measurements[ J ]. J Geophys Res ,1997 ,102 ( D5 ) :6035-6045.

[ 3 ] 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.

[ 4 ] 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 ,1( 1 ) :19-28.

[ 5 ] 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.

[ 6 ] 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.

[ 7 ] 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.

[ 8 ] 牛生杰 ,章澄昌 ,孙继明 ,等. 贺兰山地区沙尘气溶胶谱分布的观测研究[ J ]. 大气科学 ,2001 ,25( 2 ) :243-252.

[ 9 ] 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.

[ 10 ] 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.

[ 11 ] Haywood J M ,Francis P N ,Glew D ,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.

[ 12 ] 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 :兰州大学大气科学系 ,2004.

[ 13 ] 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.

[ 14 ] 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.

[ 15 ] 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.

[ 16 ] 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.

[ 17 ] 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 ,26( 1 ) :1-7.

[ 18 ] 章澄昌. 大气气溶胶教程[ M ]. 北京 :气象出版社 ,1995.

[ 19 ] 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 ,等译. 北京 :科学出版社 ,1981 :142-154.

[ 20 ] D'Almeida G A ,Schutz L N. Mass and volume distribution of mineral aerosol and soils of the Sahara[ J ]. Climate Appl Meteor ,1983 ,22 :233-243.

[ 21 ] Nishikawa M ,Kananmori S ,Knnamori N ,et al. Kosa aerosol as eolian carrier of anthropogenic material[ J ]. The Science of the Total Environment ,1991 ,107 :13-27.

[ 22 ] D'Almeida G A. On the variability of desert aerosol radiative characteristics[ J ]. J Geophys Res ,1987 ,92( D3 ) :3017-3026.