# 浑善达克沙地沙尘气溶胶的粒谱特征

# 成天涛<sup>12,3</sup> 吕达仁<sup>2</sup> 陈洪滨<sup>2</sup> 李占清<sup>4</sup>

2 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测开放实验室,北京 100029

3 中国科学院研究生院,北京 100039

4 University of Maryland , Maryland 2207, USA

摘 要 浑善达克沙地是我国主要沙尘气溶胶源地之一,但对其沙尘气溶胶特征一直缺乏研究。2001 年 4 月末到 5 月初,在内蒙古浑善达克沙地利用 PMS Fssp-100 型激光粒谱仪进行了大气气溶胶的外场观测,取得了晴天、扬沙和 沙尘暴天气条件下沙尘粒子的数浓度采样资料,通过统计分析研究,总结出浑善达克沙地在不同天气条件下近地面 沙尘气溶胶的粒谱分布规律。所得统计结果表明了与其他源地沙尘气溶胶的共同点、差异之处及其原因。这一结果 也为沙尘气溶胶辐射气候效应的数值模拟提供了新的实测依据。

关键词 浑善达克沙地 沙尘气溶胶 粒谱分布

文章编号 1006-9895 (2005) 01-0147-07 中图分类号 P435 文献标识码 A

## The Size Distribution of Dust Aerosol Particles in Onqin Daga Sandland

CHENG Tian-Tao<sup>1 2 3</sup>, LU Da-Ren<sup>2</sup>, CHEN Hong-Bin<sup>2</sup>, and LI Zhan-Qing<sup>4</sup>

1 Department of Environmental Sciences and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433

2 Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

4 University of Maryland , Maryland 2207 , USA

**Abstract** Onqin Daga Sandland is one of important sources of dust aerosol in China. But it is very short of observation and research on the size distribution characteristics of dust aerosol from this region up to now. The size distribution of dust aerosol has been measured by PMS Fssp-100 in the Onqin Daga Sandland of the Inner Monoglia Autonomous Region of China between 30 April and 10 May 2001. A lot of data have been collected under different weather conditions such as fine , sand-blowing and sandstorm and so on. The rules of dust aerosol particle size distribution are found through statistical analysis. The results show that the dust size distributions are two-mode logarithm normal in dust storms and one-mode logarithm normal in fine or sand-blowing days. This result is quite useful to simulate radiation forcing and climate effects driven by dust aerosol in climate models.

Key words Onqin Daga Sandland , dust aerosol , size distribution

# 1 引言

大量的观测和研究表明,大气气溶胶是影响气候 变化的重要因素之一,不仅能够散射太阳辐射和吸收 地气红外辐射,而且可作为云凝结核,改变云的微物 理结构、延长云的寿命和改变云的光学特性。从 IPCC 第二和第三次评估报告,可以看出有关沙尘气 溶胶的辐射强迫已引起科学家的高度重视,但目前仍 未就其大小给出一个最佳估计值,仅给出一个不确定 的范围<sup>[12]</sup>。不确定性原因可以粗略地分为宏观和微 观的物理特性两个方面,宏观上关于沙尘源、汇、大 气载荷及其与气候系统反馈机制的认识仍然不足,微

<sup>1</sup>复旦大学环境科学与工程系,上海 200433

收稿日期 2003-11-03 收到, 2004-03-17 收到四改稿

资助项目 国家自然科学基金重大项目 49790020 和国家自然科学基金海外青年学者合作研究基金 40028503

作者简介 成天涛,男,1974年出生,博士,讲师,主要从事大气物理、大气环境及大气气溶胶研究。E-mail:onlyinheart@sohu.com

观上关于沙尘物理、化学和光学特性及控制这些特性 演变的诸多过程的认识还有很大欠缺,缺乏沙尘气溶 胶物理和光学等特性的高时空分辨率观测资料是导致 这一结果的一个重要原因。粒谱分布是沙尘气溶胶的 一个重要物理特征,而且其表面是大气中很多非均相 化学反应的反应界面。

自 20 世纪 70 年代以来,国外已就撒哈拉沙漠和 中亚地区等沙尘源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分析。1989年,美国与前苏 联对塔吉克斯坦南部沙漠地区的沙尘气溶胶进行了联 合采样观测3]。实验观测结果表明,源自亚洲的沙尘 尽管沉降在夏威夷,其峰值尺度仍远大于撒哈拉沙尘 的长距离输送相应值,同时表现出气溶胶峰值直径随 气溶胶质量浓度增大而移向较大值的趋势[4]。我国这 方面的工作也有很多,但比较零散,例如,利用 KB-120 型和 Anderson 采样器观测不同天气条件下气溶胶 质量浓度的分布规律<sup>5]</sup>;利用光学粒子测量系统 PMS 观测背景大气和沙尘天气下气溶胶的空间分布[6~8]; 利用美国制造的 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 谱型及其随时间演变特征<sup>[9]</sup>;利用日本制造的 PM-730 光学粒子计数器观测研究了沙漠地区不同条件下 背景气溶胶的浓度和谱分布特征<sup>[10]</sup>;利用 APS-3310A 型激光空气动力学气溶胶粒谱仪观测了内蒙古中西部 沙漠地区不同天气下的气溶胶粒谱分布及其演变规 律11]。地基遥感和卫星遥感反演沙尘粒谱技术虽然 具有不受地域限制、与辐射强迫直接相关等优势,但 受到云等天气现象影响,反演结果仅在沙尘气溶胶浓 度相对不太大时效果较好<sup>12]</sup>。因此,地面外场观测 和采样分析仍然具有很重要的地位,全球气溶胶计划 AERONET 的观测结果将会更好地展现气溶胶包括沙 尘气溶胶的物理特性及其时空变化。

内蒙古浑善达克沙地及其周边农牧交错带是我国 沙尘暴天气的主要源地之一,对下游地区的气溶胶特 性有重要影响,到目前为止,有关该地区沙尘气溶胶 的外场观测和采样分析很少。本文为国家自然科学基 金重大项目"内蒙古半干旱草原土壤—植被—大气相 互作用(IMGRASS)"的一部分,主要利用2001年4 ~5月内蒙古浑善达克沙地的外场观测资料,统计分 析沙尘气溶胶的粒谱分布,这一结果对更好了解源于 此类下垫面沙尘气溶胶的物理特性具有一定的积极意 义。

### 2 仪器和资料

所用资料来自 PMS Fssp-100 型激光粒谱仪的观测

结果。观测时间为 2001 年 4 月末到 5 月初,观测地 点为内蒙古桑根达来,仪器架设高度为 3 ~ 4 m,这 一高度能够有效避免地表土壤颗粒的影响,同时能很 好地测量源地近地面沙尘粒子的数浓度。桑根达来位 于浑善达克沙地的东南部,四周是较为平坦的沙地, 公路两边有少量居民,观测仪器安装在远离公路和居 民区的上风方向,基本上不受局地污染的影响,因此 测点大气基本能够代表桑根达来大气的自然状况。 PMS 在观测期间,捕捉到一次较强的沙尘暴过程,以 及三次较弱的沙尘天气过程,观测结果能够较好地反 映此类源地沙尘粒子的粒谱特征。

PMS 观测系统是一种粒子前向散射分光计,其原 理是当粒子通过激光束时,接收其前向散射,经光电 转换,其脉冲信号通过脉冲分析器分辨,最终得出粒 子大小信息,并自动分档计数。PMS Fssp-100 最小探 测粒子直径为 0.5 µm,能够直接测量速度在 20.0~ 125.0 m·s<sup>-1</sup>之间的粒子,当粒子速度超出这一范围 时,观测结果需要进行订正,仪器精度使用前已用聚 苯乙烯标准气溶胶进行标定。观测时段为北京时间 6:00~19:00,晴天每 3 小时观测一次,每次持续 6 分钟;沙尘天气每小时观测一次,每次持续 20 分钟; 仪器每 45 秒采样一次。直径小于 8.0 µm 的粒子以 0.5 µm 间隔分档计数,8.0~16.0 µm 的粒子以 1.0 µm间隔分档,16.0~32.0 µm 的粒子以 2.0 µm 间 隔分档,大于 32.0 µm 的粒子以3.0 µm 间隔分档。

### 3 沙尘气溶胶的数浓度状况及其变化

表1给出2001年4月30日至5月10日浑善达克 沙地沙尘0.5~100.0 µm 粒径的数浓度观测结果,5 月3日出现一次强沙尘暴过程,虽然持续时间不长, 但最严重时沙尘数浓度达5776.0 cm<sup>-3</sup>,能见度极低, 整个过程期间平均沙尘数浓度达1079.0 cm<sup>-3</sup>。4月 30、日5月1日和5月4日出现阵性扬沙天气,沙尘 粒子数浓度比沙尘暴天气时相对要小得多。其余观测 日均为晴天,大气中的沙尘粒子数浓度不超过50 cm<sup>-3</sup>,由于受工业活动和局地污染影响很小,晴天 沙尘平均数浓度可作为浑善达克沙地气溶胶的本底状 况,其量值为27.8 cm<sup>-3</sup>,而1998年春季,贺兰山地 区<sup>[11]</sup>为23.0 cm<sup>-3</sup>,其晴天背景值小于浑善达克。

图 1 给出观测期间 4 个典型天气条件下沙尘数浓度的日变化情况,第一类型(4月30日)为早晨风速稍大,沙尘气溶胶浓度相对偏大;日出到中午风速减小,沙尘浓度下降;午后出现局地热力环流,沙尘浓度有所回升。这种类型多为扬沙天气,如遇到大尺

CHENG Tian-Tao, et al. The Size Distribution of Dust Aerosol Particles in Onqin Daga Sandland

#### 表1 2001年4~5月浑善达克沙地近地面沙尘气溶胶的数浓度(单位:cm<sup>-3</sup>)

Table 1 The mas	ss concentration of du	ist particles exampled in C	Ingin Daga Sandland from	April 30 to May 10 in 200	( units : cm · )
观测日期	观测时间	数浓度平均值	数浓度最大值	数浓度最小值	测量次数
Sampling date	Local time	Mean number concentraion	Highest number concentraion	Lowest number concentration	Number of samples
04 - 30	07:01-18:41	591.2	991.3	189.6	59
05 - 01	06:06-21:57	572.9	1885.5	113.2	77
05 - 02	07:16-20:28	81.4	157.7	14.6	47
05 - 03	06:43-17:45	1078.9	5776.2	56.4	136
05 - 04	09:05-19:55	266.6	565.1	35.2	28
05 - 05	06:51-20:28	23.7	97.3	7.3	40
05 - 06	07:18-16:51	27.8	60.4	9.9	27
05 - 07	06:30-15:29	50.4	161.4	9.9	27
05 - 09	10:07-16:12	31.1	41.1	23.9	18
05 - 10	07:46-11:51	23.8	41.8	13.9	22



#### 图 1 沙尘气溶胶数浓度的日变化

Fig. 1 The daily change of dust number concentration

度天气系统的配合,将会出现沙尘暴过程。第二类型 (5月1日)与第一种相似,只是在傍晚风速又偏大, 沙尘浓度相对较大。第三种(5月3日)是早晨风速 很小,沙尘浓度很低;午后出现热力强不稳定,加之 天气系统过境,风速偏大,沙尘浓度增大,这种类型 多为沙尘暴天气。第四种(5月2日)认为是背景天 气条件,风速较小,除了早晨和午后沙尘浓度略大一 点外,全天浓度水平波动不大。气溶胶数浓度及其日 变化取决于地表热力状况、源强、大气扩散和湍流交 换能力、降雨等天气现象及大尺度天气过程等因素。 浑善达克沙地晴天的沙尘数浓度日变化与 1991 年 4 月甘肃平川沙漠地区的观测结果相似<sup>[10]</sup>,但下午的 沙尘浓度发展趋势不同,平川是下降的,浑善达克却 是缓慢上升,且总体量值上要小于平川,由此可见, 浑善达克沙地对近地面白天的大气混合及夜间逆温的 影响能力相对小于沙漠地区。

理论计算结果表明,半径在0.1~1.0 µm 的粒子 在大气气溶胶的消光作用中贡献最大[13,14]。对于沙 尘气溶胶,已有的研究结果表明,尺度越小的粒子对 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,半径小于1.0 µm 的粒 子对太阳辐射散射能力最强<sup>15]</sup>。本文将1.0 µm 作为 分界,分别计算5月3日沙尘暴期间大于和小于1.0 μm (含1.0 μm) 粒子的数浓度占粒子总数浓度的分 数比。从图 2 可以看出,小于等于1.0 µm粒子所占比 重随浓度增加而减小,最后保持在0.6左右;大于 1.0 um 粒子的比重随浓度增加而增多,最终稳定在 0.4 水平。另外,粒子的增加随数浓度的变化是波动 进行的,也就是说粒子的增加是有选择的,这与粒子 谱结构密切相关。表 2 给出了平均状况下沙尘气溶胶 的数浓度分布,依据粒子数浓度,这里将平均浓度小 于 60.0 cm<sup>-3</sup> 定义为晴天, 60.0~360.0 cm<sup>-3</sup> 为扬沙 天,360.0~1000.0 cm<sup>-3</sup>为弱沙尘暴或沙尘暴,大于 1000.0 cm<sup>-3</sup> 为强沙尘暴。从表 2 可知, 半径小于 4.0 µm 的粒子占到粒子总浓度的绝大多数,晴天为 96.4%,扬沙为94.2%,沙尘暴为93.7%,强沙尘暴 为92.8%;半径小于2.0µm的粒子,晴天占到总浓

表 2 沙尘气溶胶数浓度(单位: $cm^{-3}$ )随粒径(单位: $\mu m$ )的分布

Table 2         The size-segregated number concentration of dust aerosol											
直径											平均浓度
Diameter/	$0.5 \sim 1.0$	$1.0 \sim 1.5$	$1.5 \sim 2.0$	$2.0 \sim 3.0$	$3.0 \sim 4.0$	$4.0 \sim 5.0$	$5.0 \sim 6.0$	6.0~8.0	$8.0 \sim 10.0$	$10.0\sim100.0$	Mean number
$\mu$ m											concentration
晴 天	13.0	6.0	2.8	3.0	2.0	0.6	0.3	0.0	0.0	0.0	27.8
Non-dusty day	15.0	0.0	2.0	5.0	2.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	27.0
扬 沙	78 7	11 9	23.6	27.3	12.3	7.6	2 1	1.2	0.6	0.3	108 2
Windblown	/0./ 1	70.7	11.7 25.0	27.5	12.5	7.0	2.1	1.2	0.0	0.5	190.2
弱沙尘暴	263 1	154 6	77 8	81 7	44_0	18 0	0.1	0.7	1.4	2.0	662 8
Dust storm	203.4	154.0	77.0	01.7	44.0	10.0	9.1	9.1	1.4	2.9	002.8
强沙尘暴	010 6	655 1	208 4	529 6	224 7	107 5	40 1	51.0	4.5	5 5	2011 6
Strong storm	910.0	033.1	398.4	328.0	334.7	107.5	49.1	51.0	4.5	5.5	5044.0





Fig. 2 The ratios of dust number concentration of part particles to total particles

度的 78.4%,扬沙天为 74.3%,弱沙尘暴为 74.8%, 强沙尘暴为 64.5%;沙尘暴时沙尘气溶胶平均浓度 是晴天的 20~100倍,扬沙时沙尘平均浓度是晴天的 7倍。总之,随着沙尘浓度的增加,浑善达克沙尘气 溶胶中小粒子比重相对减小,而较大粒子的比重明显 上升。同 1996~1999年贺兰山地区沙尘粒谱分布的 观测结果相比<sup>[11]</sup>,浑善达克的平均粒子数浓度相对 要大,直径大于 2.5 μm 的粒子所占比重相对较大, 并且在 1.0~1.3 μm 粒子直径处没有出现谱峰,其原 因可能与仪器的测量范围有关。

## 4 沙尘气溶胶的粒谱特征

### 4.1 粒谱分布的确定方法

气溶胶的粒谱分布有很大变动性,如果能用一种 简单合适并具有物理基础的数学函数来描述,将是十 分有意义的。这种用来描述大气气溶胶粒谱模型的函 数应具备三个特征:(1)函数拟合必须包括整个大气 气溶胶粒子尺度范围;(2)拟合函数形式与选择的粒 谱表征属性参数无关,能够适用于质量、数浓度、表 面积和体积等特征谱的描述;(3)函数应有合理的物 理基础。对于沙尘气溶胶,用对数正态分布函数拟合 其粒谱,无论在物理、数学还是经验上都很合 适<sup>[16,17]</sup>。本文在分析过程中,将粒子数浓度谱分布转 化成d*N/d*(logr)形式,并用对数正态分布函数进行拟 合:

 $\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}(\log r)} = \frac{cN_0}{(2\pi)^{\frac{1}{2}}\log\sigma} \exp\left[-\frac{(\log r - \log r_n)^2}{2\log^2\sigma}\right] (1)$ 

其中, $N_0$ 为单位体积内的总粒子数,N为粒子浓度,r为粒子半径, $r_n$ 为峰值半径, $\sigma$ 为几何标准差,c为常数。一般的沙尘气溶胶粒谱应用多个对数正态分 布函数进行拟合:

$$\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}(\log r)} = \sum_{i=1}^{c_n} \frac{c_i N_0}{(2\pi)^{\frac{1}{2}} \log \sigma_i} \exp\left[-\frac{(\log r - \log r_{ni})^2}{2\log^2 \sigma_i}\right] ,$$

(2)

其中, $c_n$ 是正态函数个数。沙尘气溶胶粒谱分布的 拟合主要在于确定峰值半径 $r_{ni}$ ,几何标准差 $\sigma_i$ 及常数 $c_n$ 和 $c_i$ ,面积谱峰值半径 $r_s$ 和体积谱峰值半径 $r_v$ 。

多个对数正态分布拟合函数方程中,包含多个待 定参数,而且有的参数同时出现在系数项和指数项 中,直接用非线性最小二乘法难以得到理想的拟合效 果,为此引进 Hatch-Choate 方程<sup>[18]</sup>:

$$\frac{d}{r_n} = \exp(b\ln^2\sigma), \qquad (3)$$

其中, *d* 为待定平均直径, *b* 为已知常数(依赖于 *d* 的类型)。面积谱和体积谱与数浓度分布谱峰个数相同,也就是说正态分布函数的个数相同,而且存在如下简单的数学关系:

$$\ln r_{\rm v} = \ln r_{\rm n} + 3\ln^2 \sigma , \qquad (4)$$

$$\ln r_{\rm s} = \ln r_{\rm n} + 2\ln^2 \sigma \,. \tag{5}$$

通过这种方法可以将非线性拟合过程简化为线性最小 二乘法拟合问题,而且拟合效果会更好。

### 4.2 数浓度谱、表面积谱和体积谱

从浑善达克沙地外场观测资料的分析可知,沙尘 气溶胶的粒谱分布呈对数正态特征。图3是平均状况 下沙尘的粒谱分布,可以看出数浓度谱、面积谱和体 积谱在360~1000 cm<sup>-3</sup>和1000~6000 cm<sup>-3</sup>数浓度区间 均为双峰结构,而在0~360 cm<sup>-3</sup>数浓度区间为单峰 结构。在数浓度中,小粒子占沙尘气溶胶粒子分布的 绝大部分;大粒子对沙尘气溶胶的体积和表面积有重 要影响,特别是浓度越小时影响相对越大。表3,4 和5分别给出数浓度谱、面积谱和体积谱的峰值半径 及其对数正态分布函数的标准方差。

Patterson 等<sup>171</sup>在分析比较了美国南部和撒哈拉等 地区风蚀土壤的沙尘气溶胶粒谱分布后认为,沙尘的 数浓度谱、面积谱和体积谱均呈双峰结构,并具有 A,B,C三种模态,A模态主要是人为活动的二次气 溶胶,B模态主要是土壤颗粒,C模态主要是沙子颗 粒。沙尘数浓度较大和中等时,体积谱峰值半径在 3.0  $\mu$ m和30.0  $\mu$ m左右;沙尘数浓度较小时,体积谱 峰值半径在0.14  $\mu$ m和2.3  $\mu$ m。同Patterson等<sup>173</sup>的结 果相比,浑善达克沙尘数浓度较大和中等时,数浓度 说、面积谱和体积谱的峰值半径较为接近,但数浓度 较小时体积谱峰值半径差别较大,这可能与沙尘浓度 的选取标准及沙尘本身的粒子特性差异有关。另外,



图 3 沙尘气溶胶的平均数浓度谱(长虚线) 面积谱(虚线) 和体积谱(实线)粒子数浓度:(a)1000~6000 cm<sup>-3</sup>;(b)360 ~1000 cm<sup>-3</sup>;(c)0~360 cm<sup>-3</sup>

Fig. 3 The average size-number , size-surface and size-volume distributions of dust aerosol Dust number concentration :( a ) 1000 – 6000 cm<sup>-3</sup> ;( b ) 360 - 1000 cm<sup>-3</sup> ;( c ) 0 - 360 cm<sup>-3</sup>

沙尘的粒谱分布与源强、离源距离、采样仪器及采样 高度等因素有着密切关系。1989年,美国与前苏联 在塔吉克斯坦南部沙漠联合观测实验的结果显示,沙 漠气溶胶粒谱分布呈单峰结构,峰值直径在3.5~6.0 µm,而浑善达克为双峰结构,这与实验采样地点距 离沙源较远有关,直径大于20.0µm的粒子很难观测 到<sup>[4]</sup>。1991年,甘肃平川的观测结果显示,晴天沙 尘气溶胶的粒谱分布呈三峰特征,峰值半径分别在 0.1~0.2,0.3~0.4和1.5~2.0µm之间,第一模态 (峰值半径0.1~0.2µm)为仪器虚假峰;1.5~2.0µm 峰在沙漠气溶胶中普遍存在,其来源属于大范围的背 景土壤尘<sup>[10]</sup>,而浑善达克晴天气溶胶的粒谱分布并没 有出现这一模态,这可能与沙漠、沙地及荒漠化土地

#### 表 3 数浓度谱的峰值半径及其对数正态函数拟合谱的标准方差

 
 Table 3
 The median radius and standard deviation of dust sizenumber distribution in logarithm normal

数浓度/ $cm^{-3}$	峰值半径 $r_n/\mu m$	常数 c	标准差 $\sigma$			
Number concentration	Medium radius	Constant	Standard deviation			
> 1000	0.80 16.0	0.96 0.0008	1.85 1.50			
360 ~ 1000	0.50 16.0	1.22 0.0032	2.30 1.50			
< 360	0.45	1.40	3.10			

#### 表 4 面积谱的峰值半径及其对数正态函数拟合谱的标准方差

 
 Table 4
 The median radius and standard deviation of dust sizesurface distribution in logarithm normal

	0				
数浓度/cm <sup>-3</sup>	峰值半径 r <sub>s</sub> /µm	常数 c	标准差 $\sigma$		
Number concentration	Medium radius	Constant	Standard deviation		
> 1000	1.40 24.0	1.18 0.13	1.75 1.80		
360 ~ 1000	1.00 24.0	1.25 0.55	2.45 1.90		
< 360	4.0	3.10	8.80		

#### 表 5 体积谱的峰值半径及其对数正态函数拟合谱的标准方差

 Table 5
 The median radius and standard deviation of dust size 

 volume distribution in logarithm normal

数浓度 $/cm^{-3}$	峰值半径 r <sub>v</sub> /µm	常数 c	标准差 $\sigma$		
Number concentration	Medium radius	Constant	Standard deviation		
> 1000	2.00 26.0	0.65 0.60	1.90 1.70		
360 ~ 1000	1.90 28.0	0.55 3.30	2.00 1.90		
< 360	33.0	7.90	4.80		

等源地的气溶胶颗粒本身的谱分布特性不同有关,沙 漠气溶胶粒子中大粒子含量相对沙地气溶胶要多。

### 4.3 用于气候模式的气溶胶粒谱参数

表6给出不同来源和不同采样地点沙尘气溶胶 (包括土壤尘和沙尘)的面积谱、体积谱及数浓度谱 分布的特征参数,其中包括本文结果。不难发现,沙 尘气溶胶的面积谱和体积谱通常可用1~3个对数正 态函数来描述,而且其参数显示出一定的相似性。相 比之下,不同源地沙尘气溶胶的面积谱和体积谱峰值 比数浓度谱峰值更具一致性。模态 A 基本上属于背 景气溶胶,粒子尺度较小且数量偏小,其辐射强迫作 用很有限。模态 B 粒子数目最多,其散射作用对沙 尘气溶胶总的辐射强迫贡献突出。模态 C 粒子尺度 较大,一般在沙尘天气较严重时粒子数目急剧增加, 其长波吸收作用显著增大。就面积谱 B 模态而言, 美国西北部沙尘气溶胶的峰值偏小;撒哈拉沙漠和中 亚沙漠地区沙尘气溶胶浓度较大时,峰值相对较大; 其他地区的面积谱峰值均在 1.0~2.2 µm 范围内。面 积谱 C 模态在沙尘浓度较大时,对数正态分布峰值 在 20.0~32.0 µm 范围之内。B 和 C 模态的体积谱具 有与上述面积谱相似特征。数浓度谱对数正态分布的 标准差,B模态基本上在1.8~2.5范围内,而C模 态在1.4~1.7范围内。

观测地点 Observation site	资料来源 References	面积谱峰值半径 Median radii of surface distribution			体积谱峰值半径 Median radii of volume distribution			标准差 Geometric standard deviation		
	-	А	В	С	A	В	С	A	В	С
	Patterson and Gillette <sup>[17]</sup>									
科罗拉多 Colorado	轻度浓度 Light loading	0.11	1.31		0.14	2.29		1.56	2.11	
得克萨斯 Texas	中等浓度 Moderate loading		1.87	31.9		2.84	35.5		1.90	1.38
得克萨斯 Texas	重度浓度 Heavy loading		1.65	31.8		3.08	35.1		2.20	1.37
美国西南地区	Chepif <sup>[ 19 20 ]</sup>			15.6			20.7			1.70
Southwestern U.S.										
	Sehel and Lloyd <sup>[21]</sup>									
美国西北地区	1 m 高度 Sample at 1 m height		0.58	21.1		1.25	34.0		2.41	2.00
Northwestern U.S.	10 m 高度 Sample at 10 m height		0.37	14.7		0.94	18.8		2.60	1.65
美国西南地区	Sverdrup et al. <sup>[22]</sup>	0.07	1.49		0.13	3.35		2.20	2.46	
Northwestern U.S.	-									
印度沙漠地区	Peterson <sup>[23]</sup>		1.42			3.62			2.63	
Indian desert										
巴哈马群岛	Savoie and Prospero <sup>24</sup>	*	1.20		*	2.56			2.38	
Bahama Islands										
大西洋 Atlantic	Jaenecke and Junge <sup>[25]</sup>		1.26			2.17			2.09	
	D' Almeida <sup>[26]</sup>									
撒哈拉沙漠	背景天气 Non-dusty days	0.24	1.58	7.80	0.41	2.40	9.60	2.10	1.90	1.60
Sahara desert	扬沙天气 Wind-brown	0.18	4.40	21.1	0.18	7.60	27.8	2.15	2.07	1.70
	沙尘暴天气 Dusty days	0.18	8.10	31.3	0.18	18.8	44.6	2.15	2.50	1.80
撒哈拉沙漠 Sahara desert	Carlson and Benjamin <sup>[27]</sup>		5.00							
以色列 Israel	Levin et al. <sup>[28]</sup>		1.45			2.10			1.84	
塔吉克斯坦 Middle Asia	Sviridenkov et al. <sup>[4]</sup>		1.50			2.50			2.30	
中国甘肃黑河	雷文方等 <sup>[10]</sup> Lei Wenfang et al.									
Gansu in China	背景天气 Non-dusty days	0.20	2.20		0.25	2.60		1.42	1.50	
	IMGRASS ( this paper )									
浑善达克沙地	轻度浓度 Light loading			4.00			33.0			3.10
Onqin Daga	中度浓度 Moderate loading		1.00	24.0		1.90	28.0		2.30	1.50
	重度波度 Haarry laading		1 40	24.0		2 00	26.0		1 05	1 50

表 6 沙尘气溶胶粒度谱分布参数

Table 6 The coefficient on size distribution of mineral aerosols from different sources

\* 粒子尺度范围太小,不能决定谱参数。Size range is too small to determine parameters.

为便于气候研究,在沙尘气溶胶浓度较小时,将 面积谱 B 模态峰值可取为 1.5 µm,数浓度谱分布的 标准差可取为 2.2,并利用公式(4)和(5)计算出 体积谱和数浓度谱的其他参数,最终能方便地应用于 气候模式计算。在沙尘浓度较大时,面积谱峰值和数 浓度谱分布标准差可统一取为 26.0 µm 和 1.6。理论 上也可通过体积谱计算出其他谱分布的参数,但文 献<sup>[17]</sup>显示其效果相对较差。尽管在气候模式中可以 简化沙尘气溶胶的参数化过程,但来自沙漠、沙地及 荒漠化土地等不同源地及下游地区的沙尘气溶胶,在 物理、光学和辐射等特性上存在固有差异。

### 5 总结

通过对 2001 年 4~5 月内蒙古浑善达克沙地沙尘

气溶胶数浓度及其谱分布的观测和分析研究,得到以 下结论:

(1)沙尘的数浓度主要与风速、地表热力状况、 天气现象及大尺度天气系统等因素有关,其日变化存 在四种类型。

(2)风速增大时沙尘粒子的增加是有选择的,小 粒子比重随沙尘数浓度增加而相对减小,大粒子比重 随沙尘数浓度增加而相对增多。直径小于 4.0 μm 的 粒子占数浓度的绝大多数。

(3)通过观测和资料分析得到了代表浑善达克沙 地不同天气条件下的气溶胶粒谱分布,不同数浓度级 别的沙尘粒谱分布可用两个对数正态分布函数之和很 好地描述,这些谱分布可运用于气溶胶的辐射强迫和 气候效应计算及起沙模式模拟。 参考文献

- [1] IPCC. Climate Chang 1995: The Science of Climate Change. Cambridge University Press, 1996
- [2] IPCC. Climate Chang 2001: The Science of Climate Change. Cambridge University Press, 2002
- [3] Sviridenkov M A, Gillette D A, Isakov A A, et al. Size distributions of dust aerosol measured during the Soviet-American experiment in Tadzhikistan 1989. Atmos. Environ., 1993, 27A (16): 2481 ~ 2486
- Porter J N ,Clarke A D. Aerosol size distribution models bases on in situ measurements. J. Geophys. Res., 1997, 102D (50): 6035 ~ 6045
- [5] 周明煜,朱翠娟,叶卓佳,等.北京城区秋冬季节气溶胶浓度分布规律及其与天气类型的关系.大气科学,1983,7(4): 450~455

Zhou Mingyu , Zhu Cuijuan , Ye Zhuojia , et al. The spatial and temporal features of aerosol concentration and relative weather processes in autumn and winter. *Scientia Atmospherica Sinica* ( in Chinese ), 1983, 7 (4):  $450 \sim 455$ 

- [6] 何绍钦.西安市一次晴空气溶胶粒子的观测分析.气象, 1987,13(5):19~22 He Shaoqin. Observational study on aerosols in fine day, Xian. *Meteorology*(in Chinese), 1987, **13**(5):19~22
- [7] 游来光,马培民,陈君寒.沙尘天气下大气中沙尘粒子空间 分布特点及其微结构.应用气象学报,1991,2(1):13~21 You Laiguang, Ma Peimin, Chen Junhan. The spatial distribution and its micro-scale features of dust particles in dusty days. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*(in Chinese),1991,2(1):13~21
- [8] 孙玉稳,段英,吴志会.石家庄秋季大气气溶胶物理特征分析.气象,1996,22(2):40~43
  Sun Yuwen, Duan Ying, Wu Zhihui. The analysis of physical feature of aerosol particles in autumn over Shijiazhuang area. *Meteorology*(in Chinese), 1996,22(2):40~43
- [9] 赵德山,汤大钢,周舟,等.北京市区冬季大气气溶胶空气 动力学尺度谱分布的研究.大气科学,1988,12:170~179 Zhao Deshan, Tang Dagang, Zhou Zhou, et al. The aerodynamic size distribution of aerosols from urban district in winter, Beijing. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1988, 12:170~179
- [10] 雷文方,任丽新,吕位秀,等.黑河地区沙漠气溶胶浓度和 谱分布特征.高原气象,1993,12(2):170~179
  Lei Wenfang, Ren Lixin, Lu Weixiu, et al. The mass concentration and size distribution of dust aerosol over Heihe area. *Plateau Meteor*. (in Chinese), 1993, 12(2):170~179
- [11] 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.大气科学,2001,25:243~252
  Niu Shengjie, Zhang Chengchang, Sun Jiming. Observational researches on the size distribution of sand aerosol particles in the Helan Mountain area. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2001, 25: 243~252
- [12] Tanre D, Kaufman Y J, Holben B N, et al. Climatology of dust aerosol size distribution and optical properties derived from remotely

sensed data in the solar spectrum. *J*. *Geophys*. *Res*. , 2001 , **106D** (16): 18205 ~ 18217

- [13] 帕尔特里奇 普拉特. 气象学和气候学中的辐射过程. 吕达 仁,黄润恒,林海译. 北京:科学出版社,1981,142~154 Paltridge G W, Platt C M R. *Radiative Processes in Meteorology and Climatology* (in Chinese). translated by Lu Daren, Huang Runheng, Lin Hai. Beijing: Science Press, 1981,142~154
- [14] 章澄昌,周文贤.大气气溶胶教程.北京:气象出版社, 1995,328pp Zhang Chengchang, Zhou Wenxian. The Lecture of Atmospheric Aerosol

( in Chinese ). Beijing: China Meteorological Press, 1995, 328pp

- [15] D'Almeida GA, Schutz L. Number, mass and volume distribution of mineral aerosol and soils of the Sahara. J. Climate Appl. Meteor., 1983, 22: 233 ~ 243
- [16] Epstein B. The mathematical description of certain breakage mechanisms leading to the logarith mic-normal distribution. J. Franklin Inst., 1947, 244: 471 ~ 477
- [17] Patterson J M, Gillette D A. Commonalities in measured size distributions for aerosols having a soil-derived component. J. Geophys. Res., 1977, 82 (15): 2074 ~ 2082
- [18] Peter, T.M. Comparison and combination of aerosol size distributions measured with a low pressure impactor, differential mobility particle sizer, electrical aerosol analyzer and aerodynamic particle sizer. *Aerosol Science and Technology*, 1993, 19 (3): 396 ~ 405
- [19] Chepil W S. Sedimentary characteristics of dust storms, 3, composition of suspended dust. Amer. J. Sci., 1957, 255: 206 ~ 213
- $[\ 20\ ]$  Chepil W S ,Woodruff N P. Sedimentary characteristics of dust storms , 2 , visibility and dust concentration. Amer. J. Sci. , 1957 , 255 : 104  $\sim$  114
- [21] Sehel G A, Lloyd F D. Influence of soil resuspension on the airborne particle size distribution, Annual Report for 1972. 1973, Northwest Lab., Richland Washington, 1973
- [ 22 ] Sverdrup G M. Characterization of California aerosols , 2 , aerosol size distribution in the Mojave desert. Atmos. Environ. 1975 , 9: 483 ~ 494
- [23] Peterson J T. Measurement of atmospheric aerosols and infrared radiation over Northwest India and their relationship. Ph. D. dissertation, Department of Meteorology, University of Wisconsin-Madison. 1968, 115pp
- [24] Savoie D L ,Prospero J M. Sahara aerosol transport across the Atlantic ocean: Characteristics of the input and the output. Bull. Appl. Meteor. Soc., 1976, 57: 145 ~ 157
- [ 25 ] Jaenicke R , Junge C E. Study on Atlantic aerosol from Sahara desert. Beitr. Phys. Atmos. , 1967 , 40: 129 ~ 143
- [26] Guillaume A, D'Almeida. On the variability of desert aerosol radiative characteristics. J. Geophys. Res., 1987, 92D: 3017 ~ 3026
- [27] Carlson T N ,Benjamin S G. Radiative heating rates for Saharan dust. J. Atmos. Sci., 1980, 37: 193 ~ 213
- [28] Levin Z L , Joseph J H , Mekler Y. Properties of Sharaw (Khamsin ) dust comparison of optical and direct sampling data. J. Appl. Meteor., 1980, 37: 882 ~ 891