

沙暴天气下大气中沙尘粒子空间分布特点及其微结构

游来光 马培民

(国家气象局气象科学研究所)

陈君寒 栗柯

(陕西省气象局)

提 要

根据对一次在阿拉善沙漠及其附近地区发生的沙暴天气下大气沙尘粒子的飞机观测资料,分析了3600m以下各层的沙尘含量、粒子谱、云凝结核浓度,讨论了该次沙暴天气下沙尘垂直输送的原因及向下游传输的可能范围和不同距离处的相对沉沙量。

一、引 言

沙尘暴是一种灾害性天气现象,近些年来,研究结果指出:沙尘暴天气除短时对交通、工、农业生产与人民生活造成直接危害外,还对大气辐射过程、天气、气候、云物理、卫星遥感,乃至地质成因等有重要影响;因而,它可以通过各种次生效应更长时间地直接或间接地影响人类生活环境条件。

近些年来国内外曾对我国沙尘暴的活动规律以及沙尘暴天气下大气气溶胶颗粒粒子谱及其化学成分等开展过不少研究^[1-4]。认为我国西北地区的塔克拉玛干及阿拉善沙漠是东亚地区大气沙尘的主要源地;并通过各种方法推测沙暴天气下大气中的沙尘挟带量。由于这些观测是在我国东部地区或在日本,甚至远在美国夏威夷等地地面进行观测的,缺少源区或近源区的直接观测资料;因此对在我国发生的尘暴活动规律及其传播特征还缺少确切的证据。

本文根据对1983年6月10日在阿拉善沙漠及其附近地区发生的一次沙暴天气所进行的飞机观测资料,分析了沙暴区下游近源区处的沙尘含量的垂直分布、大气气溶胶粒子谱及大气云凝结核浓度;讨论了影响大气沙尘垂直输送的动力因子,及其向下游可能传输的距离。

二、天气形势及资料收集

1983年6月10日内蒙古自治区西部有冷锋移过,锋后出现沙尘暴天气,风沙覆盖区包括巴丹吉林、腾格里和乌兰布和沙漠及其附近地区(见图1)。从天气图分析,沙尘区的

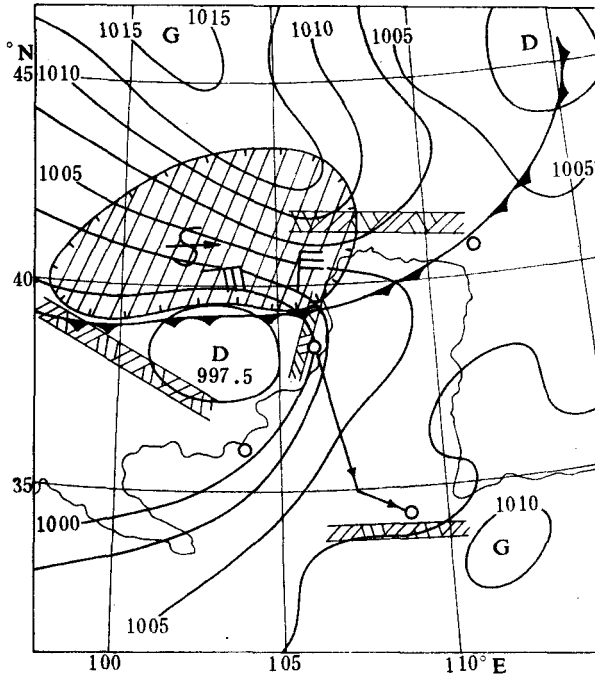


图1 1983年6月10日08时(北京时间)地面天气图及飞机探测航线(矢量线)

位置及面积维持少变,但持续时间不长,且没有东移增强的迹象。沙暴区内最低能见度08时为600m,14时为3000m,能见度低于10km的地区面积约为 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

飞机于13时45分从银川机场起飞,垂直爬高到3000m高度出航,在3600m高度层平飞,进行水平探测,于15时46分在西安机场着陆。飞机上安装有PMS粒子测量系统,包括FSSP-100(测量0.5至8或2至 $32\mu\text{m}$ 粒子谱)、OAP 2D-C(测量25至 $800\mu\text{m}$ 粒子及图形)、OAP 2D-P(测量200至 $6400\mu\text{m}$ 粒子谱及图形)等三个探头。还安装有MEE-130云凝结核计数器及大气温度、露点温度等测量仪器。根据航行中观测的气溶胶粒子谱及大粒子图形,将所测粒子简化为密度 $2.7\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的球形粒子计算大气沙尘含量。在整个飞行过程中,大气相对湿度甚低,仅30%左右;因此,飞机观测记录的粒子谱资料不会包括水相粒子(云滴或冰晶等),且在此湿度时,气溶胶粒子也不会因吸附水汽而增大。

三、沙暴天气下大气气溶胶粒子的物理特征 及其空间分布特点

1. 大气中沙尘含量及粒子浓度的垂直分布特点

不同探头所观测到的大气沙尘含量、粒子浓度、平均直径的高度分布如表1。从表1可见在2至3.3km高度层内有一高沙尘含量层、粒子总浓度最大值为每升1500个左右,主要集中在0.5至 $8\mu\text{m}$ 的小粒子段;大气中的沙尘含量主要集中在2至 $32\mu\text{m}$ 粒子段,最大含尘层中(2.4—3.0km)含尘量超过 $1\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,垂直气柱内包含的沙尘总量为 $1.7\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

表 1 沙尘含量 \bar{Q} (gm^{-3})、粒子平均直径 D (μm)和粒子浓度 N (l^{-1})的高度分布

高度 (km)	FSSP (0.5—8 μm)			FSSP (2—32 μm)			2D-C (25—800 μm)		
	N	D	Q	N	D	Q	N	D	Q
1.2—1.5	250	1.46	4.1×10^{-5}	50	3.93	9.7×10^{-5}			
1.5—1.9	650	1.42	9.5×10^{-5}	132	3.69	2.3×10^{-4}			
1.9—2.4	1320	1.47	2.1×10^{-4}	280	3.85	6.5×10^{-4}	2.07	39.5	3.2×10^{-4}
2.4—3.0	1460	1.50	2.4×10^{-4}	315	3.82	5.7×10^{-4}	2.71	38.3	3.9×10^{-4}
3.0—3.3	700	1.46	1.1×10^{-4}	128	3.81	2.5×10^{-4}	1.24	40.3	2.4×10^{-4}
3.3—3.6	230	1.27	2.4×10^{-5}	49	3.61	6.2×10^{-5}			
平均	768	1.43	1.2×10^{-4}	159	3.79	3.1×10^{-4}	2.01	39.4	3.2×10^{-4}

2. 沙尘粒子的尺度谱

图 2 为 2500m、3000m 两个高度层上的沙尘粒子谱,图中直线为按幂递减率拟合的结果,拟合式分别为 $dN/d\log D = 1.18 \times 10^8 \times D^{-2.7}$ 和 $dN/d\log D = 5.11 \times 10^7 \times D^{-2.7}$ 。该图表

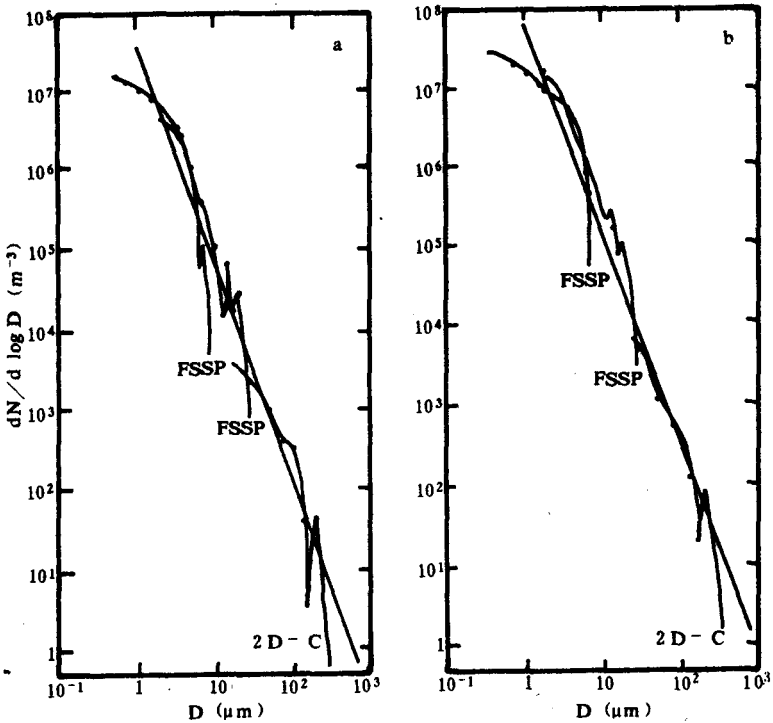


图 2 2500m 高度(a)和 3000m 高度(b)层的沙尘粒子谱

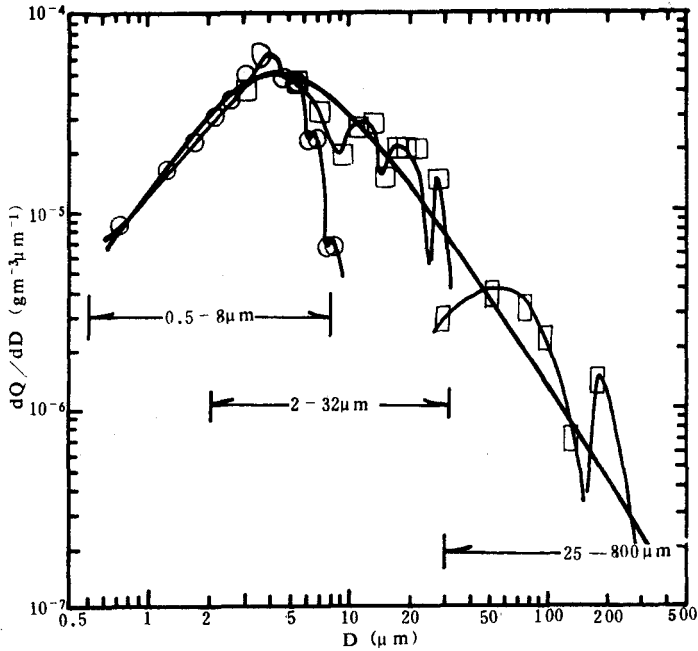


图3 大气中沙尘质量密度的尺度谱

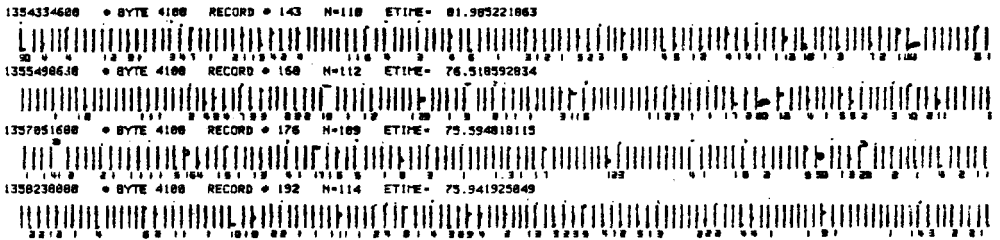


图4 PMS OAP 2D-C 探头记录的粒子图形
(垂直方向最大宽度相当 800μm)

明,粒子尺度大于 3μm 的粒子谱较好地符合幂律递减。图 3 为大气中沙尘质量密度的尺度谱,最大质量密度出现在 3—6μm 的直径范围内。资料处理系统给出的最大粒子直径为 200μm;由 2D-C 探头观测的粒子图形分析,最大的粒子直径为 350μm,见图 4。

Junge 幂律常用以拟合很宽的粒子直径范围内的粒子谱,从图 2 可以看出用幂律拟合单一探头量程内的粒子谱则与实测值有较大偏离,鉴于在非沙尘天气影响下的大气气溶胶粒子只能在 0.5 至 8μm 粒子直径范围内观测到粒子谱资料,而且沙尘含量和沙尘的消光系数主要是集中在较小粒子段;为了与其他天气背景条件下的观测资料进行比较,我们用指数律拟合 0.5—8 和 2—32μm 粒子直径范围内的粒子谱。6 月 10 日及 6 月 9 日相邻两天在银川、西安两地观测的对流层低层的粒子谱按指数式拟合的谱参数 Δ 与 N 值列于表 2。上述结果表明,在沙尘影响下谱的截距没有明显变化而斜率值 Δ 则显著降低,说明

表 2 0.5 至 8 μm 的气溶胶粒子谱拟合的参数值 $\Lambda(\mu\text{m}^{-1})$ 和 $N_0(\text{cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1})$

地 点	高度范围 (m)	日 期 年.月.日	Λ	N_0	天气特征
银 川	1100—2700	1983.6.9	1.66	6.16	
	1100—2700	1983.6.10	0.98	5.50	受沙暴影响
西 安	400—2000	1983.6.9	1.39	2.16	
	400—2000	1983.6.10	1.06	4.19	

表 3 沙尘粒子谱参数 $N_0(\text{cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1})$ 、 $\Lambda(\mu\text{m}^{-1})$ 与沙尘含量 $Q(\text{gm}^{-3})$ 的相关式

粒子尺度范围 (μm)	n	相关式	r
0.5—8.0	13	$N_0 = 947Q^{0.6657}$	0.9783
	13	$\Lambda = 0.274Q^{-0.1201}$	-0.9606
2—32	11	$N_0 = 217Q^{0.7137}$	0.9695
	11	$\Lambda = 0.1605Q^{-0.1077}$	-0.9205

沙暴天气下大气中的粗大粒子明显增多。

本例大气中所包含的沙尘质量,约有 65%是由 2—32 μm 的粒子组成的,对这一粒子尺度范围内的粒子谱按指数律拟合后,建立了谱参数 Λ 、 N_0 和沙尘含量 Q 的相关,结果如表 3。表明沙尘含量越高,粒子数总浓度越大,且其中粗大粒子的所占比例越大。

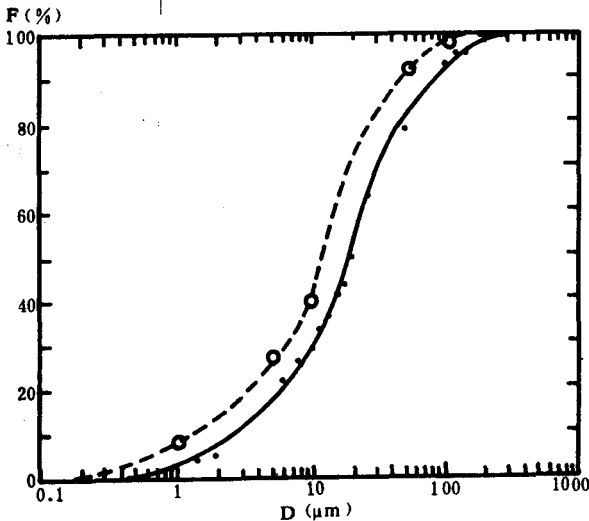
图 5 大气沙尘含量相对值 (F) 随粒子直径的积分分布(实线), (虚线为马兰黄土的值)

图 5 为银川上空观测的沙尘粒子相对质量随粒子直径的积分分布,同图也给出了其他地区的地面观测资料,与陕西洛川马兰黄土粒子的资料比较^[5],可以看出在沙暴天气影响下,银川上空的沙尘是由更粗的粒子组成的,直径大于 20 μm 的粒子约占总质量的

50%，与马兰黄土的情况有明显差异。

3. 大气中的沙尘含量及粒子谱的水平分布特征

图6为银川至西安航程中在3600m高度层观测的0.5至8 μm 直径范围内的粒子总浓度、粒子谱参数 Δ 值和大气露点温度的水平分布。在14时22分出现粒子浓度、 Δ 值和露点温度的不连续变化，粒子浓度从每升1800个降至400个， Δ 值从1.0增至2.0；前者具有高浓度宽谱特征，后者为低浓度窄谱。据此推测，这里很像是沙尘暴影响区的边界，位于贺兰山以东约100km处。

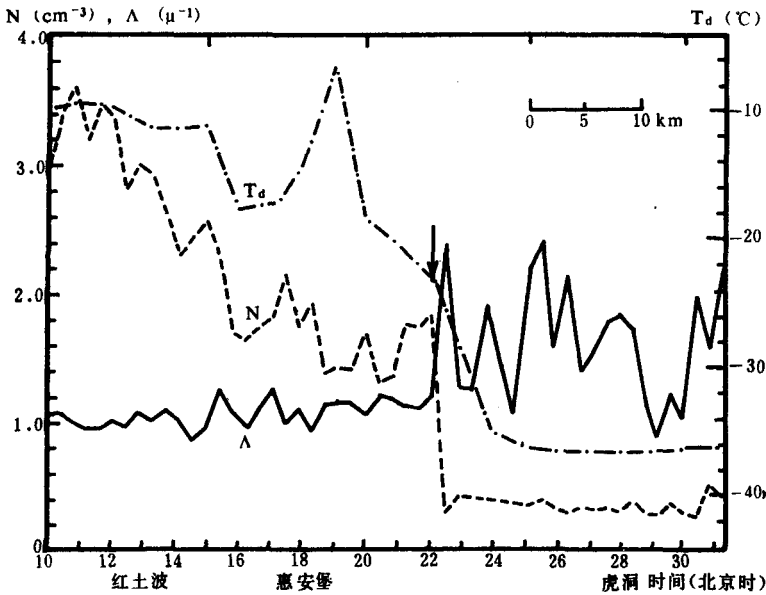


图6 3600m高度气溶胶粒子浓度(N)、粒子谱参数(Δ)值与大气露点温度(T_d)的水平变化特点(14¹⁰—14³⁰)

4. 沙尘暴影响下的云凝结核(CCN)谱

云凝结核专指在低过饱和度下能促进水汽凝结形成水滴的气溶胶粒子，其尺度约为0.1 μm ，这种尺度的粒子已低于上述粒子测量系统所用探头的观测下限。根据MEE-130型云凝结核计数器的观测资料分析，发现在沙尘暴影响区内的气溶胶粒子浓度虽明显高于非沙尘暴影响区，而CCN浓度没有很大差异，但其活性谱有所不同。图7为6月9日与6月10日银川对流层低层CCN浓度的高度分布。图8为6月10日3600m层平飞过程中在沙尘影响区与非沙尘影响区中观测的CCN活性谱。可以看出虽然CCN浓度没有显著差异，但其活性谱有所不同。在沙尘影响区内高活性核相对较少，而低活性核则较多；这可能与两类气溶胶的化学组分有关，即非沙尘区内的气溶胶粒子更具有吸湿性和可溶性。

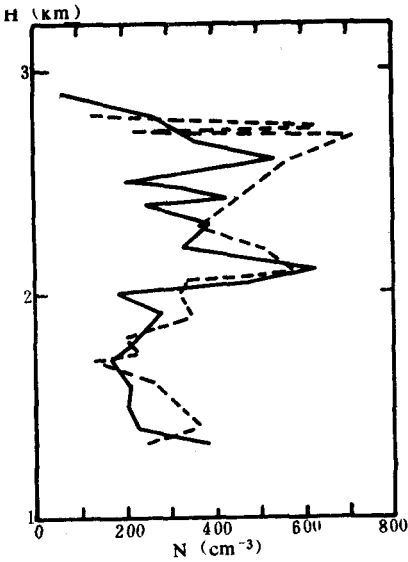


图7 1983年6月9日(虚线)与10日(实线)银川上空CCN浓度(过饱和度 $S=0.65$)的高度分布

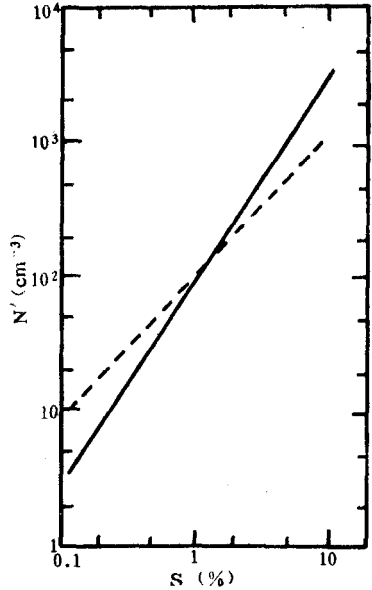


图8 3600m 高度层, 沙尘影响区(实线)与非沙尘影响区(虚线)内的CCN 活性潜

四、沙尘粒子的垂直与水平输送

● 本次个例在银川上空观测到最大含沙量层出现在 2500 至 3000m 高度层内, 银川附近地面高度 1100m 左右; 因此, 最大含沙量层距地面为 1400 至 1900m, 说明该处上空的沙尘粒子不是在当地扬起的, 很像是在上游地区扬起的沙尘通过水平输送造成的。观测到的最大尘粒直径为 $350\mu\text{m}$, 估计其落速约为 2ms^{-1} ; 因此, 将这种粗大粒子输送至 3000m 高度层, 必须有很强的上升气流。另外, 从大粒子的沉降速度考虑, 这种粗大粒子也不太可能是从很远的地方输送来的; 从当地地形特点分析, 最大可能是受贺兰山地形抬升作用的结果。银川西距贺兰山 30km, 北距贺兰山 60km, 该山最高峰为 3600m, 该日 08 时地面冷锋位于贺兰山、祁连山一线, 锋后沙尘区内地面为偏北风 12ms^{-1} , 850hPa 与 700hPa 风向为北或东北、风速 $10-12\text{ms}^{-1}$, 500hPa 风向为西南至偏西、风速为 16ms^{-1} 。按贺兰山地形坡度为 $1/7$ 估算, 最大爬坡气流的垂直速度约为 1.7ms^{-1} , 与 $200-300\mu\text{m}$ 粒子的落速接近。气流受地形辐合等其他效应造成的垂直上升速度尚不易估计。上述估算结果说明, 地形对沙尘粒子的垂直传输可能具有重要作用。

水平观测结果表明, 直径大于 $100\mu\text{m}$ 的粒子仅在银川至吴忠间的贺兰山东侧附近地区上空观测到, 在贺兰山以东更远的地区 3600m 高度层上已观测不到这种粗大粒子; 在这一高度层上的气溶胶粒子浓度与露点温度在贺兰山下风方 100km 处同时发生陡降(图 6), 很像是飞机从上升气流区进入下沉气流区。

根据在 3000m 高度层附近观测到的大气沙尘质量积分分布(图 5), 取水平风速为 10ms^{-1} , 粒子落速按斯托克公式计算; 估算了不同大小粒子落至地面的时间、距离, 并进一

步估算了在不同距离处大气沙尘含量的相对沉降量,结果如图9。该图表明,大约有25%的沙尘量沉降在下游250km范围内,50%的沙尘量沉降在1000km范围内,有20%的沙尘量可输送至10000km以远的地区。上述粗略的估算说明,如无其他大气净化过程(降雨冲刷效应等),沙暴天气下所扬起的沙尘可做洲际的长距离输送。

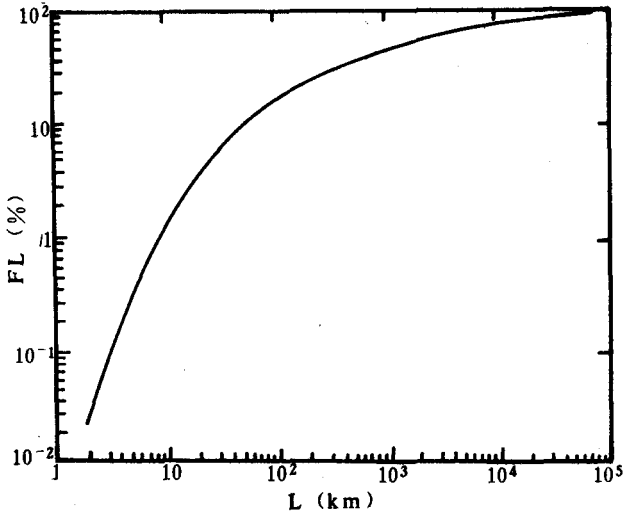


图9 沙尘区下游不同距离处大气沙尘质量沉降的百分比(%)

五、结 语

根据对一次内蒙古西部地区沙暴天气下所做的大气气溶胶飞机观测结果,分析了有关沙暴影响下大气对流层中、低层气溶胶微物理结构特征并探讨了沙尘传输的某些特点,主要结果如下:

1. 沙暴天气影响下,银川上空3000m高度附近,观测到有高含沙量层,其中包含有直径为350 μ m左右的粗大粒子,反映出大气中应存在着大于1—2m/s的强上升气流。可能与银川西面或北面山区的地形抬升有关。在这次个例中沙尘达到的高度不低于3600m。

2. 沙暴天气影响下,大气含尘量中有50%是由直径大于20 μ m的大粒子组成的,与陕西洛川马兰黄土比较其中粗大粒子明显偏多。按本次个例估算,如无其他大气净化过程,则约有50%的沙尘量可输送至下游1000km以远的地区,20%可输送至10000km。

3. 沙尘粒子谱的斜率随沙尘含量的增加而变小,谱变宽。在粒子直径为3至400 μ m的范围内,可用Junge幂律较好地拟合。

4. 沙尘影响区内的大气云凝结核谱与非影响区比较,缺少高活性核;而低活性核则数量偏多。

本文仅根据对一次沙暴影响下大气气溶胶的飞机观测进行分析,上述结果只是一些初步认识。沙暴天气强度有很大不同,而且其他一些天气现象,如云、降水等对沙暴天气的发生、演化有很大影响,还需要进行更多的个例分析,才可望得出一些更深入的认识。

参 考 文 献

- [1] 张德二,我国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析,中国科学 B,3,278—288,1984.
- [2] 周明煜等,北京地区一次尘暴过程的气溶胶特征,环境科学学报,1,207—219,1981.
- [3] Darzi, M. and J. W. Winchester, Aerosol characteristics at Manna Lao Observatory, Hawaii, after East Asian dust storm episodes, *J. Geoph. Res.* 87, C2, 1251—1258, 1982.
- [4] Iwasaka, Y., et al., The transport and spacial scale of Asian dust—storm clouds, a case study of the dust—storm event of April 1979, *Tellus*, 35B, 189—196, 1983.
- [5] 刘东生等,黄土与环境,科学出版社,202—208,1985年.

A CASE STUDY OF THE AEROSOL CHARACTERISTICS IN THE LOWER TROPOSPHERE DURING A DUST STORM EVENT

You Laiguang Ma Peimin

(Academy of Meteorological Science, SMA)

Chen Junhan Li Ke

(Shanxi Meteorological Bureau, Xi'an)

Abstract

Using the data observed by an instrumented aircraft during a dust storm originated from the western part of Inner Mongolia of China on 10 June 1983, the particle spectra, dust content and the CCN concentration are analysed. Some problems with the vertical and horizontal transports of the dust particles are also discussed based on the spatial distribution characteristics.