

# 贺兰山地区沙尘暴若干问题的观测研究\*

牛生杰

(宁夏气象科学研究所, 银川, 750002)

章澄昌

孙继明

(北京气象学院, 北京, 100081) (宁夏气象科学研究所, 银川, 750002)

## 摘 要

利用贺兰山地区沙尘暴历史资料和综合观测资料, 对大气背景、浮尘、扬沙和沙尘暴发生期间的大气气溶胶数浓度谱、质量谱、大气总悬浮颗粒(TSP)及粒径分布、微气象、分光日射观测以及沙尘样品进行中子活化处理, 分析了该地区浮尘、扬沙和沙尘暴形成规律, 气候变化特征和贺兰山的影响。并综合研究了沙尘气溶胶尺度谱特征、光学厚度和化学组分等变化特征, 提出了若干结果。

关键词: 沙尘暴, 粒子谱, 光学厚度, 化学组分。

## 1 引 言

沙尘暴是西北地区的主要气象灾害之一, 它发生频率高, 持续时间长, 涉及范围广, 特强沙尘暴(瞬时风速  $25 \text{ m/s}$ , 能见度  $< 50 \text{ m}$ )破坏性极强。1993年5月5日发源于甘肃省金昌市的特强沙尘暴持续时间约5 h, 波及方圆500 km, 直接经济损失3.2亿元, 造成约300余人伤亡<sup>[1]</sup>。此外, 沙尘粒子能够改变云和大气的辐射特性, 从而对气候变化产生影响; 某些沙尘粒子还可作为冰核, 对降水乃至人工影响天气作业效果产生重要影响。因此关于沙尘暴发生机制、预报及防治方面的研究已成为热门论题, 如宁夏沙坡头治沙试验站的小气候特征观测和湍流输送<sup>[2, 3]</sup>, 新疆塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴分布<sup>[4]</sup>。D'Almeida 等<sup>[5, 6]</sup>汇集了包括沙漠的全球气溶胶光学性质的气候研究。Porter 和 Clarke<sup>[7]</sup>所做的远离源地的外场测量表明, 源自亚洲的沙尘, 尽管是远离源地( $1.1 \times 10^4 \text{ km}$ )的夏威夷 Mauna Lao 站, 其峰值尺度仍远大于撒哈拉沙尘的长距离输送的相应值, 同时表现出气溶胶峰值直径随气溶胶质量浓度的增大而移向较大值的趋势。最近 Karyampudi 等<sup>[8]</sup>利用大孔径扫描星载光达(LASAL)和欧洲中期天气预报中心资料, 证实了撒哈拉沙尘羽概念模式, 提出东风波槽过境形成的强气压梯度引发低空急流触发新的沙尘暴, 撒哈拉沙尘气溶胶在北非

\* 初稿时间: 1999年5月11日; 修改稿时间: 1999年12月4日。

资助课题: 国家自然科学基金项目“贺兰山地区沙尘暴若干问题的观测研究”, 项目编号49565010。

上空组成低浓度背景尘, 而且在西非西岸形成分离的窄的沙尘羽(不同于原模式中的单一尘羽), 尘层顶在东大西洋迅速降低高度, 且大颗粒下沉消失, 光学厚度迅速减小。这些与中国西北沙尘的特征明显不同。我们于1996, 1997和1998年4~5月分别在内蒙古吉兰泰气象站(1031.8 m, 39°47'N, 105°45'E)、阿拉善右旗气象站(1511.5 m, 39°13'N, 101°41'E)和宁夏银川机场气象台(1152 m, 38°29'N, 106°00'E)、盐池气象站(1347.8 m, 37°47'N, 107°24'E)开展了野外观测, 观测项目有微气象观测、土壤湿度、土壤温度、三分量脉动风速测量、分光直接辐射表、TSP, 用 Anderson 采样器观测沙尘粒子质量谱, 用美制 APS 粒谱仪观测沙尘粒子浓度谱、表面积谱和体积谱, 并对所采沙尘粒子进行了化学组成分析。随后提出若干专题分别进行论述, 包括对强沙尘暴的数值模拟。文中所指贺兰山地区包括贺兰山两侧的银川平原和阿拉善盟、腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠及毛乌素沙地, 面积约 $3 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。

## 2 贺兰山地区沙尘暴特征的统计分析

选择贺兰山东、西两侧有代表性的各6个气象站, 根据各站气象观测报表统计自建站至1995年的沙尘暴资料(见表1)。

表1 贺兰山两侧12个气象站沙尘暴资料概况

站名 (贺兰山西侧)	起止时间	长度(a)	沙尘暴次数	站名 (贺兰山东侧)	起止时间	长度(a)	沙尘暴次数
吉兰泰	1955~1995	41	755	陶乐	1959~1995	37	472
巴音浩特	1955~1994	40	321	石嘴山	1957~1995	39	309
巴音毛道	1958~1992	35	472	银川	1951~1995	45	267
锡林高勒	1981~1995	15	153	中卫	1959~1995	37	212
额济纳旗	1960~1995	36	550	同心	1955~1995	41	530
拐子湖	1960~1995	36	1031	盐池	1954~1995	42	891

贺兰山东、西两侧全年各月均可能出现沙尘暴, 4~5月份是贺兰山西侧沙尘暴的多发时段, 其多年平均值分别为3.2次和3.1次, 平均少于1次的月份是每年9月至次年2月共6个月, 说明春季沙尘暴发生次数较多。拐子湖是贺兰山西侧沙尘暴的多发中心, 月平均最高达5.2次, 一年当中发生次数(分别为5.0次和5.2次)最多的仍是4月和5月份; 每年10月至次年1月, 月平均次数均少于1.4。4月份贺兰山东侧沙尘暴发生频率最高, 月平均发生2.6次; 7~12月月平均发生次数少于1次。说明贺兰山东侧沙尘暴的多发季节也是春季。盐池是贺兰山东侧沙尘暴的多发中心, 发生次数最高的月份是4月, 其平均值为5.4次。但贺兰山两侧沙尘暴发生的最小频率月份有3个月的位相差, 西侧1月份沙尘暴最少, 4月份最多, 以后逐月减少; 而东侧9和10月份最少(其平均值均为0.1次), 以后逐月增加, 4月份达最大值, 以后逐月减少至9月。

贺兰山地区沙尘暴发生日数随年代呈波动变化, 有增有减, 其中同心和中卫近10 a来明显减少。但贺兰山东、西两侧的两个沙尘暴多发区拐子湖和盐池的沙尘暴发生日数的变化摆动较大, 按5~15 a的周期波动, 递减趋势不明显, 这可能与其分别处于巴丹吉林沙漠中心和毛乌素沙地边缘的地理位置直接有关。

从气候角度讲, 贺兰山是西北地区干旱和极干旱区的气候分界线之一。贺兰山对西北

气流南下有一定的阻滞作用。春季由于大气环流形势调整,形成西北地区多大风天气,同时由于气温升高,下垫面出现较强的热力不稳定,从而使春季沙尘暴频繁发生。由于贺兰山的阻挡作用,使贺兰山东侧的沙尘暴无论从强度还是次数上都较西侧有所减少。夏、秋季节整个西北地区平均风速明显低于春季,沙尘暴发生的次数也明显低于春季。冬季由于蒙古高压处于强盛时期,宁夏灵武以北的大部分地区以北风和东北风为主,出现频率为11%~16%,宁夏东部属毛乌素沙地,有充足的沙源,造成冬季贺兰山东侧沙尘暴的发生机率较秋季高。

贺兰山西侧的年平均降水量只有40 mm(拐子湖),而东侧的年平均降水量为288 mm(盐池),降水量的悬殊差异,使东侧的地表湿度、植被覆盖程度都高于西侧,相应沙尘暴的发生次数也就低于西侧。从各月平均气温的对比来看,春、夏、秋三季贺兰山西侧(拐子湖)的月平均气温高于东侧(盐池),而冬季贺兰山东侧的月平均气温则高于西侧,出现了较前三季相反的情况。这和贺兰山东、西两侧一年四季中沙尘暴出现次数的变化情况具有基本相同的特征。这说明月平均气温高也是造成沙尘暴多发的一个重要原因。

### 3 沙尘气溶胶的光学厚度特征

在无云的晴空条件下,我们对美制M-120太阳光度表进行标定后,选择在日面无云时用该仪器进行太阳辐射观测。根据是Angstrom参数法<sup>[9]</sup>利用测得的资料计算大气气溶胶光学厚度,即假设Mie光学厚度由下式决定:

$$\tau(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (1)$$

并规定 $\beta$ 为Angstrom浑浊度系数,表征大气气溶胶质粒的数浓度, $\alpha$ 称为波长指数,表征气溶胶质粒的有效粒径。

表2列出了吉兰泰气象站1996年4月晴空无云、浮尘、扬沙、沙尘暴天气条件下的大气光学厚度的代表性结果,从中可以看出, $\tau_{\lambda}$ 以无云晴空天气为最低,浮尘、扬沙和沙尘暴天气条件下 $\tau_{\lambda}$ 依次增加,沙尘暴 $\tau_{\lambda}$ 最大。根据观测,吉兰泰背景大气TSP为126.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,1996年4月21日浮尘天气、4月30日的扬沙天气、4月29日沙尘暴天气的TSP分别为220.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,694.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和1298.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。背景大气、浮尘、扬沙、沙尘暴的TSP浓度是依次增加的,说明上述4类天气TSP是造成 $\tau_{\lambda}$ 依次增加的物理原因。

表2 吉兰泰气象站不同天气条件下的 $\tau_{\lambda}$ 日平均值

日 期	地 方 时	观测次数	风速(m/s)	天气现象	$\tau_{450\text{nm}}$	$\tau_{575\text{nm}}$	$\tau_{665\text{nm}}$
1996年4月21日	7:45~18:43	11	0.9~4.0	浮尘,无云	0.6135	0.6041	0.3323
1996年4月22日	5:48~17:41	9	0.2~1.5	晴天,无云	0.4414	0.4167	0.1619
1996年4月29日	7:14~13:40	4	1.0~10.2	沙尘暴,Ci	1.2780	1.2742	0.8270
1996年4月30日	8:19~17:41	9	2.6~8.8	扬沙,C,b,Ci	1.1226	0.8300	0.5277

## 4 沙尘气溶胶的TSP浓度和粒径分布

### 4.1 沙尘气溶胶TSP

1996年4~5月和1997年4~5月,我们分别在内蒙古吉兰泰和阿拉善右旗、宁夏银川和盐池用KB-120采样器连续采样,在等温等湿条件下对所采样本进行检测,得到大气背景

悬浮颗粒物总浓度 TSP 和浮尘、扬沙、沙尘暴发生时的悬浮颗粒物总浓度 TSP, 其结果见表3。

表3 贺兰山地区 TSP( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 随天气现象和地理位置的变化

	吉兰泰	右旗	银川	盐池
本底	126.4 (1996年4月18日)	—	59.1 (1996年5月9~10日)	63.0 (1997年5月6日)
浮尘	220.6 (1996年4月21日)	(1997年4月7日)	—	264.9 <sup>①</sup> (1997年5月6日)
扬沙	973.2 (1996年4月23日)	—	106.7 (1996年5月6日)	
沙尘暴	1298.8 (1996年4月29日)	—	—	

注: ①100  $\mu\text{m}$  切割头。

TSP 随天气现象的变化比较明显, 其中沙尘暴出现时, 因历时较短, 而取样期较长, 平均浓度受到明显冲淡, 包括银川的一次扬沙现象也受采样时间较长而冲淡。1996年4月29日当沙尘暴发生时, 最低能见度降至650 m, 但历时仅38 min, 取样1 h, 而1996年4月23日扬沙持续11 h, 能见度最小为5000 m, 相应的 TSP 最大浓度达1295.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 由能见度对比估计, 沙尘暴期间, 实际 TSP 浓度远高于表中所列值。贺兰山西侧当不同视程障碍现象出现时的 TSP 浓度, 一般均大于山体东侧, 主要原因是西侧测站接近或位于沙漠区, 出现沙尘扬起时的风速也比较大。

#### 4.2 沙尘气溶胶 TSP 浓度的粒径分布

用 Anderson 粒子采样器对大气本底、浮尘、扬沙和沙尘暴进行观测, 将所采样品分级在等温等湿条件下检测, 得到沙尘气溶胶 TSP 浓度的粒径分布。Anderson 粒子采样器共分9级, 其粒径分布为:  $> 11 \mu\text{m}$ ,  $7 \sim 11 \mu\text{m}$ ,  $4.7 \sim 7 \mu\text{m}$ ,  $3.3 \sim 4.7 \mu\text{m}$ ,  $2.1 \sim 3.3 \mu\text{m}$ ,  $1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$ ,  $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$ ,  $0.43 \sim 0.65 \mu\text{m}$ ,  $< 0.43 \mu\text{m}$ , 分别称为1~9级。图1分别给出了吉兰泰1996年4月18日背景大气、4月23日扬沙、4月29日沙尘暴和银川1996年5月11日背景大气的 Anderson 分级质量浓度, Anderson 分级质量总浓度分别为135.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 769.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 1311.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和107.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

因为背景分级浓度取样时间较长, 实际表示无大型天气过程时的平均气溶胶负荷和粒径分布, 其中吉兰泰站在取样前, 连续两天出现较强的扬沙天气, 取样时扬沙影响尚未完全消除, 故总浓度稍高。银川站背景分级浓度远低于吉兰泰站, 谱型分布基本类似。峰值均在3.3~4.7  $\mu\text{m}$  段, 但银川站的大颗粒( $d > 7 \mu\text{m}$ ) 占的质量比例(21.9%)比吉兰泰站(8.8%)高得多。因银川机场气象台邻近贺兰山(距离约1.7 km), 可能与越过山体的偏西气流携带较大沙尘下沉有一定关系。浮尘天气下, 尺度较大的粗粒比例有所增加,  $d > 7 \mu\text{m}$  的质量百分比从背景值的8.8%增至11.6%, 处于8级的沙尘浓度从背景值低于9级的浓度, 增至明显大于9级, 但峰值浓度尺度仍位于4级。扬沙开始出现时, 虽然能见度较小, 但沙尘负荷增加并不大, 随着扬沙持续, 沙尘质量负荷逐步增大, 大尺度粒子质量浓度开始超过小尺度粒子(9级和8级)的质量浓度, 但峰值仍维持在4级, 总浓度成倍增大。一旦扬沙现象终止, 粒子质量浓度迅速回落, 但大粒子浓度比例仍偏高。沙尘暴仅收集到一次资料, 大尺度粒子浓度增加但峰值却移至5级, 因沙尘暴维持时间甚短, 可能受其后的扬沙浓度稀释影响, 粒径分布特征与扬沙有些类似。

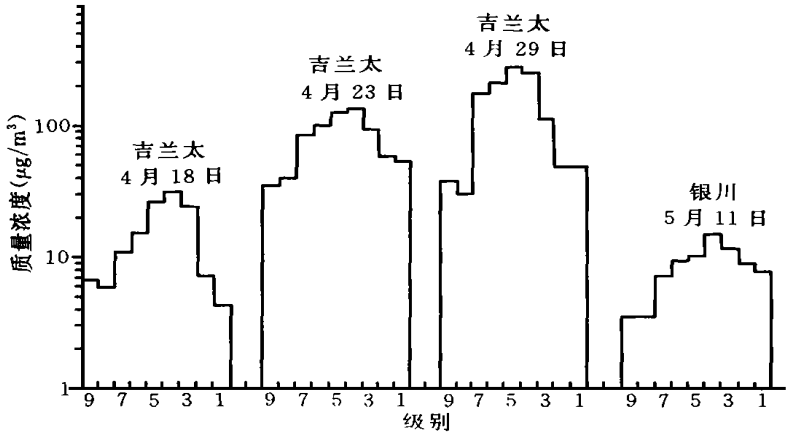


图1 沙尘气溶胶浓度的粒径分布

## 5 沙尘气溶胶的化学组成

1996年4~5月间,我们在内蒙古吉兰泰气象站和宁夏银川,对大气中的沙尘进行采样,分别按背景值、浮尘、扬沙、沙尘暴分类,分析其化学组成。对所采沙尘进行中子活化分析所得结果列入表4。

表4 1996年4~5月沙尘气溶胶中的元素浓度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

日期	4月21日	4月23日	4月29日	4月30日	5月6日	5月11日
天气现象	浮尘	扬沙	沙尘暴	扬沙	扬沙	背景
Al	4.9	22.1	12.1	5.7	6.4	2.0
Ca	7.3	2.5	15.4	7.8	11.2	4.9
地 Mn	0.087	0.39	0.21	0.96	0.11	0.037
K	1.38	1.86	—	—	—	0.48
壳 Ba	0.0705	0.0791	0.0812	0.0786	0.0822	0.0317
Rb	0.0102	0.0409	0.023	0.0142	0.015	0.0046
类 Fe	3.86	10.44	8.1	5.4	5.36	1.74
V	0.0095	0.043	0.022	0.011	0.013	0.0038
Ti	0.36	1.9	1.0	0.52	0.50	0.15
稀 La	0.0044	0.0198	0.0101	0.0062	0.0063	0.002
Ce	0.0078	0.035	0.0179	0.0107	0.0108	0.0035
土 Nd	0.003	0.0135	0.0068	0.0042	0.0043	0.0014
Sm	0.00052	0.0024	0.0011	0.00073	0.00075	0.00023
类 Eu	0.000099	0.00045	0.00023	0.00014	0.00015	0.000045
Sc	0.00091	0.004	0.0021	0.0013	0.0012	0.00041
Cl	2.2	3.5	1.8	2.1	1.1	0.79
海 Mg	3.7	14.5	9.8	4.9	4.7	1.5
盐 Br	0.0078	—	—	—	0.0058	0.016
类 Na	1.45	6.2	2.66	1.995	2.038	0.555
As	0.0308	0.0162	0.0174	0.0206	0.0218	0.0326
易 Sb	0.0089	0.0076	0.0079	0.0108	0.0116	0.0228
挥 Se	0.0026	0.0018	0.0019	0.0021	0.002	0.0028
发 Cr	0.0168	0.0336	0.0308	0.0232	0.0234	0.0076
类 Zn	0.18	0.14	0.146	0.166	0.17	0.185

由表4可以看出,两次扬沙过程,各种元素的浓度基本相同;沙尘暴中各种元素的浓度

明显高于扬沙过程的元素浓度,也较两次背景观测的元素浓度高;背景观测中各种元素浓度也有较大差异,有些元素浓度可相差10倍以上;黑风暴发生前、发生后的元素浓度<sup>[10]</sup>与沙尘暴发生时(1996年4月29日)的元素浓度基本相当,但特强沙尘暴发生期间元素浓度较沙尘暴发生时元素浓度高得多,有的元素两者相差一个量级。将采集在膜(美国产Waterman)上的气溶胶样品作中子活化分析(NAA),分析的元素为:Al, Ca, Mn, K, Ba, Rb, Fe, V, Ti, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Sc, Cl, Mg, Br, Na, As, Sb, Se, Cr, Zm, Tb, Yb, Lu, U, Tr, Hf, Cs, Ta, Co, I, In 共35种。考虑到同类元素一般具有相同的分布变化特征,故分别选择各类代表性元素列于表4,并对此进行分类讨论。贺兰山地区沙尘样本中,无论背景值或有沙尘浮扬现象时,均以地壳类元素浓度最高,在沙尘浮扬现象出现前,为 $10^{-1} \sim 10^0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 量级,沙尘暴时达峰值,一般为 $10^1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 量级,特强沙尘暴时高达 $10^2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 量级<sup>[10]</sup>,变化最明显的元素主要有Al, Ca, Mn, Ti, Fe等。海盐类元素浓度稍低,沙尘暴发生时,浓度稍有增加,但一般不超过10倍。稀土类和易挥发类两类元素浓度基本相当,属最低一类。扬沙、沙尘暴发生时稀土类元素有明显增加,增幅达 $10^1 \sim 10^2$ 倍。易挥发类元素含量除Zn较大外,其余含量均较小,沙尘暴、扬沙发生时,除Cr能增大数倍外,As有明显的减少趋势。特强沙尘暴发生时,上述变化趋势基本不变,但变幅增加较大。

富集因子分析表明,沙尘气溶胶中,亲硫元素和亲沉积元素富集程度均较高,尤以挥发性元素Sb和Se以及易溶组分Cl的富集因子最高。产生明显贫化的微量元素和痕量元素有Sm, Ta, Sc, V, Ba, Hf, Eu, Ti等。沙尘气溶胶的富集与贫化具有一定的规律性,有待于进一步研究。

## 6 沙尘气溶胶的尺度分布

测量仪器为美制APS-3310A型激光空气动力学气溶胶粒子谱仪,该仪器在 $0.5047 \sim 30.5 \mu\text{m}$ 范围内分为58档,加上小于 $0.5047 \mu\text{m}$ 和大于 $30.5 \mu\text{m}$ 两档,共计60档,可用于测量各种固体颗粒谱分布,包括尺度谱、表面积谱和体积谱(在对密度假设条件下,可转化为质量谱)。采样时间为1996年4月17日~5月1日和1998年4月21日~5月10日,分别在吉兰泰和盐池,采样高度距地4m。

### 6.1 谱分布特征

以沙尘为主的气溶胶数浓度谱,为典型的单峰型,多数可用对数正态分布来拟合。无沙尘现象时,峰值比较稳定,但随地貌、地形和地理位置而异,峰值直径位于 $0.64 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 之间(如图2a),盐池站较吉兰泰站大,并且多为双峰谱,这可能与城市污染有关。当吉兰泰站出现浮尘、扬沙和沙尘暴时,峰值移向较大尺度。强度愈大,峰值直径愈大,而且均可采用对数正态分布拟合,拟合度甚高。而盐池站出现浮尘和扬沙时,峰值直径较本底反而小,一般在 $1.0 \mu\text{m}$ 左右,出现沙尘暴天气时,峰值直径明显增大,均大于 $2.0 \mu\text{m}$ (如图2)。

### 6.2 谱分布随时间的变化

#### 6.2.1 日变化

数浓度谱多为单峰型,表面积谱和体积谱在7:00~9:00, 19:00~20:00时(地方时,下同)两时段以及深夜常表现为双峰谱,其余均为三峰谱。以沙尘为主的气溶胶谱的特征量

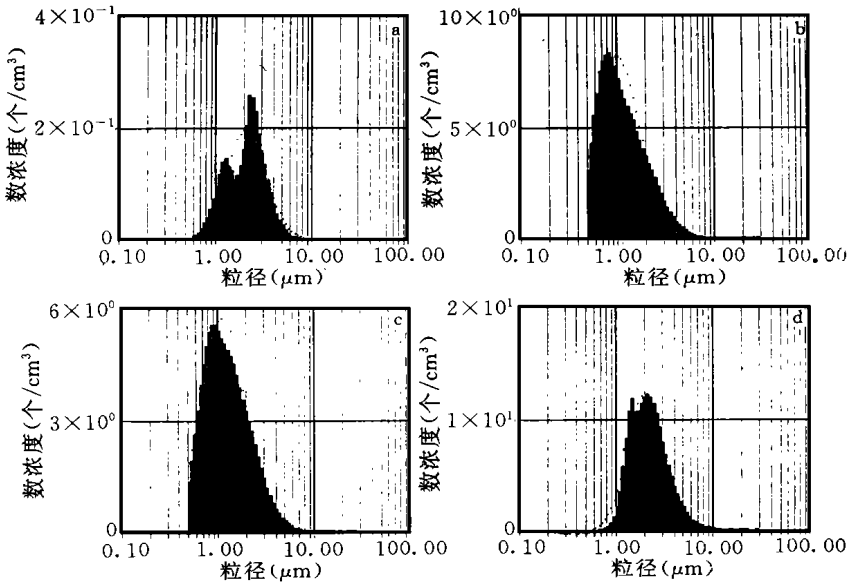


图2 盐池站沙尘气溶胶数浓度平均谱

(a. 1998年5月5日背景值, b. 1998年4月27日浮尘, c. 1998年4月25日扬沙, d. 1998年4月27日沙尘暴)

的日变化幅度比较明显,其规律性也比较明显。数浓度和可吸入气溶胶( $d < 2.0 \mu\text{m}$ )质量浓度最大值均出现在5:30,数浓度最大值出现在2:00,可吸入气溶胶质量浓度最小值出现在13:30。数浓度平均直径和质量浓度平均直径的最大值分别出现于2:00和13:30,数浓度平均直径和质量浓度平均直径的最小值分别出现于16:30和5:30。

### 6.2.2 日际变化

无沙尘现象时,气溶胶谱分布特征的日际变化比较明显,幅度比日变化要大,决定于气团属性和气象要素及其分布,如风速、稳定度和有无降水等。例如阿拉善左旗站1996年4月17日16:50,阴天,数浓度为 $53.3 \text{ 个}/\text{cm}^3$ ,质量浓度为 $187.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,可吸入质量浓度为 $120.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;4月18日7:50,小雨,数浓度降至 $8.96 \text{ 个}/\text{cm}^3$ ,质量浓度降至 $49.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,可吸入质量浓度为 $31.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,较前一日相比,下降了16.8%,26.5%和26.2%,说明降水清除作用明显,但次微米质粒不易被清除。风速大,层结不稳定促使气溶胶数浓度和质量浓度增大,峰值直径稍移向较大值。

### 6.3 浮尘、扬沙和沙尘暴的沙尘气溶胶谱分布特征

图2a, b, c, d 分别表示盐池站背景、浮尘、扬沙和沙尘暴出现时气溶胶数浓度谱分布特征。背景气溶胶数浓度很低(1998年5月5日3:28),为 $3.66 \text{ 个}/\text{cm}^3$ ,峰值直径分别为 $1.3 \mu\text{m}$ 和 $2.5 \mu\text{m}$ , $d < 1 \mu\text{m}$ 的沙尘颗粒数占8.0%,总质量浓度为 $35.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,代表沙漠地区无沙尘天气时的一般特征。浮尘出现时(1998年4月28日07:35),气溶胶浓度增加( $21.9 \text{ 个}/\text{cm}^3$ );峰值直径移至 $0.84 \mu\text{m}$ ,粒径的几何平均直径为 $1.766 \mu\text{m}$ , $d < 1 \mu\text{m}$ 的沙尘颗粒数占46.8%,总质量浓度增至 $148.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。扬沙条件下(1998年5月1日14:22),气溶胶数浓度增至 $89.3 \text{ 个}/\text{cm}^3$ ,峰值直径移至 $1.1 \mu\text{m}$ ,可采用对数正态分布拟合,拟合的几何平均直

径为 $1.19 \mu\text{m}$ ,  $d < 1 \mu\text{m}$  的沙尘颗粒数仅占33.7%, 总质量浓度 $557.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。在沙尘暴发生期(1998年4月27日04:42), 气溶胶数浓度增至 $191 \text{个}/\text{cm}^3$ , 峰值直径移至 $2.4 \mu\text{m}$ , 呈典型的 $\Gamma$ 分布, 拟合的几何平均直径为 $2.2 \mu\text{m}$ ,  $d < 1 \mu\text{m}$  的沙尘颗粒只占0.3%, 此时总质量浓度达到 $3800.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。扬沙和沙尘暴现象维持时, 沙尘气溶胶谱型变化不大, 但谱参数, 主要是总数浓度和峰值直径的变化比较明显, 而且质量浓度变化也很大。常表现出沙尘现象初起, 数浓度和质量浓度均突然增大, 随后振动变化, 维持在一个较低的水平上。当沙尘暴削弱消失时, 质量浓度常又增加, 但数浓度仍减少。此特点与沙尘垂直输送和分布特征有关。按质量浓度粒径分布的梯度测量, 配合沙尘气溶胶尺度谱的连续观测, 可以推断沙尘质量浓度的空间分布不均匀性, 地面浓度偏低, 随高度递增, 至一定高度可达最高浓度值然后递减<sup>[11]</sup>。

与图2对应的不同天气条件下的质量浓度谱分布特征如图3所示, 背景和出现沙尘现象时, 其质量浓度谱表现为单峰, 并可以采用对数正态分布进行拟合。

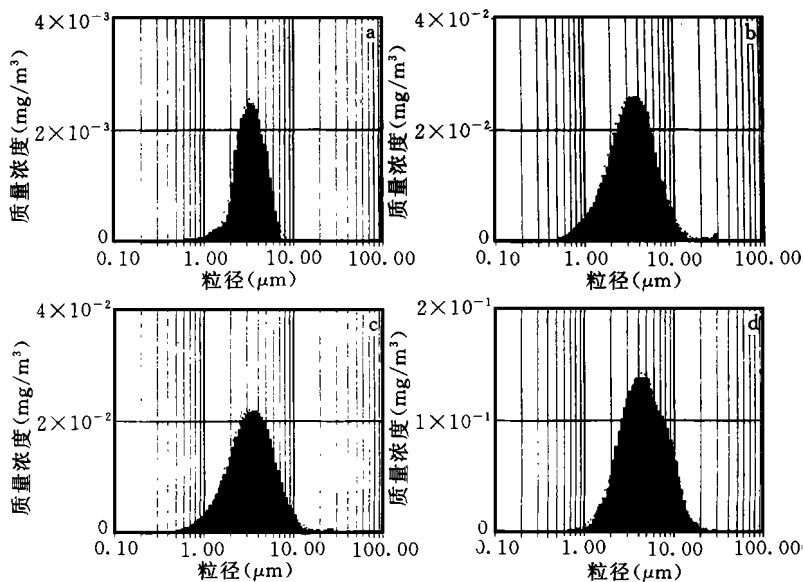


图3 盐池站沙尘气溶胶质量浓度平均谱

(a. 背景值, b. 浮尘, c. 扬沙, d. 沙尘暴; 图中粒子密度假定为 $1 \text{g}/\text{m}^3$ , 若换算成实际沙尘质量, 则应乘以2.7)

图4给出了1998年4月27日盐池沙尘暴发生中期的沙尘粒子数浓度、质量浓度和 $10 \text{min}$  平均风速随时间的演变特征。从图4可知, 在沙尘暴发生中期沙尘数浓度 $C_n$  和质量浓度 $C_m$  随风速 $V$  的大小而上下起伏, 其起伏趋势与风速的起伏趋势基本一致, 这说明水平风对沙尘暴中沙尘粒子在空中的悬浮和输送起到重要作用。还说明, 即使在沙尘暴发展的旺盛时期, 沙尘气溶胶的数浓度和质量浓度也有较大起伏。利用APS-3310A 激光空气动力学粒谱仪测量的大量粒子谱资料, 配合同步测定的TSP 采样器资料, 可建立TSP、飘尘、可吸入气溶胶质量浓度之间的经验计算公式, 以便满足应用需要。根据大量气溶胶尺度谱资料还可以研究不同沙尘气溶胶的源特征及其在大气中的生消条件, 这有待进一步研究。



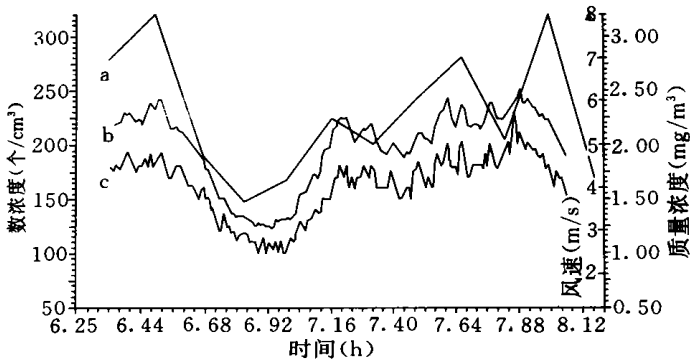


图4 1998年4月27日沙尘暴中期  $C_n$ ,  $C_m$  和  $V$  随时间的演变

## 7 结 论

对贺兰山地区沙尘现象的统计分析和观测研究可获得如下结论:

1) 该地区4和5月份沙尘暴发生频率最高, 平均为2.6~3.2次/月。起沙的10 min 平均风速阈值为5.0~5.3 m/s, 贺兰山对沙尘暴具有缩减风速和阻挡沙尘传输的作用, 并促使山体两侧沙尘暴频数相应的风速范围有明显差异。

2) 沙尘天气下, 气溶胶光学厚度迅速增大, 扬沙和沙尘暴出现初期即大于1.0, 比晴空条件下增大一个数量级。

3) 当出现沙尘天气时, 贺兰山西侧的TSP浓度一般均大于东侧。粒径分布谱型, 两侧差别不大, 随浮尘、扬沙和沙尘暴沙尘天气强度而变化, 质量浓度递增, 但峰值范围变化不大。

4) 贺兰山地区沙尘样本中以地壳类元素浓度最高, 一般为 $10^{-1} \mu\text{g}/\text{m}^3$ 至 $10^0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。沙尘暴发生时达峰值, 一般为 $10^1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 量级。特强沙尘暴发生时高达 $10^2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 量级。变化最明显的元素主要有Al, Ca, Mg, Ti, Fe, Sc, Cr等。

5) 该地区沙尘天气条件下, 气溶胶数浓度尺度谱多为单峰型, 无沙尘现象时峰值比较稳定。当发生沙尘天气时, 峰值移向较大尺度, 强度越大, 峰值直径越大。数浓度谱、表面积谱和质量谱均可用对数正态分布拟合。在沙尘暴发展的中期, 沙尘气溶胶的数浓度和质量浓度与水平风速随时间演变呈现出了基本一致的起伏趋势, 说明水平风对沙尘在空中的悬浮和输送起重要作用。

## 参考文献

- 1 夏训诚, 杨根生. 黑风暴. 北京: 科学出版社, 1996. 10~18
- 2 刘树华等. 沙漠人工植被和流动沙丘的小气候特征观测研究. 干旱地区地理, 1994, 17: 16~23
- 3 刘树华, 刘立超. 荒漠地区不同下垫面的湍流输送. 大气科学及应用, 1995, 9: 19~26
- 4 He Qing (何清), et al. The distribution of sandstorms in Taklimakan desert. Arid Land Studies, 1996, 5: 185~193
- 5 D'Almeida G A, et al. Atmospheric aerosols: global climatology and radiative characteristics. A Deepak publishing, Hampton, Va, 1991, 561pp
- 6 Gillette D A, et al. Soil Aerosol. In: Jen Jennings S J Ed. Aerosol Effects on climate. The University of Arigona

press, 1993, 73 ~ 109

- 7 Porter J N, Clarke A D. Aerosol size distribution models based on in situ measurements. *J Geophys Res*, 1997, 102, D5: 6035 ~ 6045
- 8 Karyampudi V M, et al. Validation of the saharan dust plume conceptual model using Lidar Meteorol and ECMWF data. *Bull Amer Meteor Soc*, 1999, 80(6): 1045 ~ 1076
- 9 Angstrom A. The parameters of atmospheric turbidity. *Tellus*, 1964, 16(1): 11 ~ 22
- 10 杨东贞, 于晓岚, 颜鹏等. 5.5黑风沙尘气溶胶的分析. 见: 方宗义等. 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1997, 103 ~ 110
- 11 游来光, 马培民, 陈君寒等. 沙尘天气下大气中沙尘粒子空间分布及其微结构. *应用气象学报*, 1991, 2(1): 13 ~ 20

## OBSERVATIONAL STUDIES ON SANDSTORM IN HELAN MOUNTAINOUS AREA

Niu Shengjie

*(Ningxia Research Institute of Meteorological Science, Yinchuan 750002)*

Zhang Chengchang

*(Beijing Institute of Meteorology, Beijing 100081)*

Sun Jiming

*(Ningxia Research Institute of Meteorological Science, Yinchuan 750002)*

### Abstract

According to the observation of the number concentration spectrum and the mass concentration of atmospheric aerosol, TSP and its particle size distribution, micrometeorology, and the solar spectroscopic radiation, even the neutron activation treatment of sand dust samples in Helan Mountainous area, the formation law of sandstorm, dust and sand blowing weather and the characteristics of climatic variation in this area and the influence of Helan Mountain are counted and analysed. In addition, the spectrum characteristics, the optical thickness and the chemical composition of sand aerosol particles are also counted and analysed.

**Key words:** Sandstorm, Particle size distribution, Optical thickness, Chemical composition.