

田磊, 张武, 史晋森, 等. 河西春季沙尘气溶胶粒子散射特性的初步研究[J]. 高原气象, 2010, 29(4): 1050—1057

河西春季沙尘气溶胶粒子散射特性的初步研究

田磊, 张武*, 史晋森, 黄建平, 宋松涛,
丁晓东, 闭建荣, 曹贤杰, 张镭

(兰州大学 大气科学学院半干旱气候变化教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 利用 2008 年春季中美沙尘暴联合观测试验中张掖观测站的积分浑浊度仪及同期常规气象资料, 分析了有、无沙尘天气下气溶胶总散射系数(550 nm)及后向散射比的日变化特征, 讨论了一次典型沙尘暴过程中气溶胶的散射特性。结果表明, 在这两种天气状况下, 总散射系数日变化都呈双峰型, 但峰值大小和出现的时间不同。无沙尘日的气溶胶细粒子所占比例的变化较为明显, 日较差比有沙尘日的大。沙尘暴发生时, 气溶胶总散射系数有明显的突变, 积分浑浊度仪是对沙尘气溶胶连续监测的有效工具。

关键词: 河西走廊干旱区; 气溶胶; 总散射系数; 后向散射系数比; 积分浑浊度仪

文章编号: 1000-0534(2010)04-1050-08 **中图分类号:** P425.5+5 **文献标识码:** A

1 引言

大气气溶胶是指大气与悬浮在大气中的直径在几个纳米(nm)到几十微米(μm)之间的固体和液体颗粒共同组成的多相体系, 具有化学成分复杂、时间和空间变化大的特点。气溶胶粒子能够吸收和散射太阳辐射, 从而影响地—气系统的辐射收支, 造成气溶胶的直接辐射强迫效应。另外, 气溶胶粒子还可以作为云的凝结核影响云的物理和光学特性以及降水效率, 并作为反映表面影响大量化学反应的速度, 造成气溶胶的间接辐射效应。因此, 大气气溶胶在大气辐射和气候变化的研究中占有重要地位^[1-4]。

沙尘气溶胶是对流层气溶胶的主要成分之一, 其来源主要是自然生成, 受下垫面和天气状况影响较大, 尤其是沙尘暴天气发生时, 大量沙尘将滞留在大气中。对于春季易发生沙尘暴的西北干旱半干旱区来说, 沙尘气溶胶是影响气候与环境的重要因素^[5-6]。强沙尘暴天气产生的沙尘气溶胶可以长距离输送, 通过微粒生物化学循环和改变辐射平衡, 对全球变化有重要影响。因此, 我国西北干旱区的沙尘气溶胶受到许多相关科学工作者关注^[7-11]。

近年来, 我国在沙尘气溶胶光学特性方面也有许多研究, 申彦波等^[5]、姚济敏等^[6]、牛生杰等^[12]利用太阳光度计观测资料, 讨论了我国北方沙漠地区的大气气溶胶在沙尘天气下的光学特性。在散射特性方面, 杨莲梅等^[13]利用塔克拉玛干沙漠腹地塔中气象站积分浑浊度仪和能见度仪观测资料, 分析了粒子的散射系数在各级沙尘天气中的特征。章秋英等^[14]利用锡林浩特观象台积分浑浊度计的观测资料, 分析了半干旱地区气溶胶的散射系数变化特征。柯宗建等^[15]利用北京观象台的散射系数数据及部分 PM₁₀ 质量浓度数据, 分析了观测期内散射系数的变化特征及散射系数与 PM₁₀ 质量浓度以及能见度的关系。张玉洁等^[16]分析了黄土高原半干旱地区气溶胶光学厚度变化特征。延昊等^[17]利用积分浑浊度计和 PM₁₀ 浓度监测仪, 对中国北方 2005 年观测的气溶胶散射系数与可吸入颗粒物 PM₁₀ 质量浓度做了分析。

由于沙尘粒子成分及粒径等的复杂性以及来自不同地区的沙尘复折射指数不同, 以其地面反照率的区域性差别, 使得大气层顶的沙尘强迫存在很大的不确定性, 进而导致了对其气候效应的研究存在很大的不确定性^[18]。因此, 获得更全面、更有效的

收稿日期: 2009-07-08; 改回日期: 2009-09-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40633017)资助

作者简介: 田磊(1984—), 男, 甘肃武威人, 硕士研究生, 主要从事大气辐射和遥感研究. E-mail: tianlei04@lzu.cn

*通信作者: 张武. E-mail: wzhang@lzu.edu.cn

沙尘气溶胶信息显得十分重要。但是,在我国目前对沙尘气溶胶光学特性的连续监测结果仍鲜见报道(太阳光度计只能在白天观测且受云层的影响,卫星也只提供过境时的监测数据)。而积分浑浊度仪可以提供连续、实时的观测资料,实时监测沙尘事件,是目前分析、评估沙尘气溶胶随时间变化和沙尘暴影响的重要手段之一。在国外,对沙尘事件的监测方面,积分浊度仪已经得到很好的利用^[19]。

河西走廊干旱区是我国沙尘暴必经之路和部分沙尘源区,春季沙尘频发,沙尘随风被输送至下游地区,对兰州市春季颗粒物污染的贡献也不容忽视^[20]。了解该地区沙尘天气及背景天气下的气溶胶散射特性对进一步了解西北地区沙尘气溶胶的物理特性及其辐射效应有很大的帮助。本文利用2008年春季由兰州大学与美国马里兰大学等单位联合进行的为期3个月的西北沙尘暴联合观测试验中张掖观测站4月18日~6月15日多波段积分浑浊度仪的连续观测资料,结合同期的地面常规气象资料,对该地区春季沙尘气溶胶在不同天气条件下的光学特性及其随时间的变化特征进行分析和讨论。

2 观测站点及仪器简介

2.1 观测站点

张掖市地处甘肃省西部,位于河西走廊腹地,北接合黎山、龙首山,南靠祁连山。地形为中间低,南北高,风经过时容易形成“狭管效应”;北部有巴丹吉林沙漠,西北部为大片戈壁荒漠,春季常发生沙尘暴,是我国沙尘暴输送的主要路径和源区之一。张掖观测站设在张掖市国家气候观象台,位于张掖市区西北部大约30 km处,地理坐标为 $100^{\circ}16'E$, $39^{\circ}06'N$,具体位置见图1。

2.2 仪器介绍

积分浑浊度仪(Integrating Nephelometer, Model 3563)是由美国TSI公司生产的,此仪器可以同时测量气溶胶的总散射系数和后向散射系数,可以对大气气溶胶的散射特性进行自动、连续观测。该仪器分辨率为 $5 \times 10^{-8} m^{-1}$ 。在观测中设定每5 min输出一次结果^[1]。在需要时可以用已知散射特性的标定气体(CO_2 、 CCl_2F_2 等)进行标定(观测试验前在TSI实验室进行了标定)。积分浑浊度仪进气口安装了 PM_{10} 切割头,可以过滤掉直径 $>10 \mu m$ 的沙尘粒子。根据Mie散射理论,粒子



图1 观测站地理位置

Fig. 1 Location of observation station

的散射效应与波长相关,粒径尺度在 $0.05 \sim 1.5 \mu m$ 的粒子散射效率最大,即对总散射系数的贡献最大,粒子越大对散射系数的贡献越小^[21]。因此,使用切割头过滤掉较大的沙尘粒子对散射系数的影响可以忽略。所用的同期地面常规气象资料来自于Vaisala公司生产的WTX510便携式气象站,它可以提供连续的温、压、湿、风及降水的资料。

3 结果分析

3.1 气溶胶总散射系数分析

3.1.1 日均值总体变化

从图2可以看出,在观测期内总散射系数(550 nm)的日平均值随时间变化有明显的波动,与同期天气观测实况相比,几个比较明显的峰值对应着几次沙尘天气过程。根据实地观测记录,在整个观测期内气溶胶总散射系数日平均值序列有3个主要的峰值,对应的日期5月2~3日、8日和11日均发生了沙尘暴。受强沙尘暴的影响,5月3日出现总散射系数最大值,为 $353 M \cdot m^{-1}$;由于5月21日发生了降水,所以22日出现的总散射系数最小值,为 $27 M \cdot m^{-1}$ 。该地区属于干旱农业区,北部、西部都为戈壁沙漠,春季(3~5月)干旱少雨,地表裸露程度高,土质疏松,当有较强冷空气南下时极易起尘,出现浮尘、扬沙,甚至沙尘暴,并东移或南下,严重影响着该地区及下游区域的空气质量,致使总散射系数日平均值出现较大的波动。在沙尘暴过后的几天,如果没有降水发生,总散射系数持续相对偏高,这说明一次沙尘暴过程对该地区空气质

量的影响可以持续数天。总体来看,在整个观测时期的总散射系数日均值及日均值的波动幅度均呈下降趋势,这表明大气中沙尘粒子的含量在逐渐减少,沙尘天气出现的频率也在逐渐降低。这可能有两方面的原因:(1)随着气温的升高,冷空气南下的频率和强度都有所减弱,出现大风的频率减小。(2)进入植物生长期,逐渐茂盛的植被增加了地面的覆盖度;降水的增多使表层土壤的湿度增大,土壤粒子之间的粘滞力有所增加,这样要使地表起尘就需要较大的临界风速。

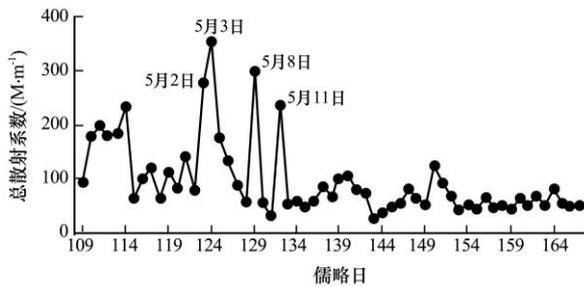


图2 总散射系数(550 nm)的逐日变化

Fig. 2 Daily change of total scattering coefficient(550 nm) of aerosol

3.1.2 沙尘气溶胶的一般特征

通过积分浑浊度仪可同时得到沙尘气溶胶在3个不同波段(450, 550和700 nm)的总散射系数 $\sigma_{s, \lambda}$ 和后向散射系数 $\sigma_{b, \lambda}$ 。由此可导出后向散射比和波长指数等重要参数。

后向散射比 b_{λ} 是后向散射系数与总散射系数

的比值,它表示细粒子在总体中的相对含量。由以下公式计算:

$$b_{\lambda} = \sigma_{b, \lambda} / \sigma_{s, \lambda}, \quad (1)$$

在分析气溶胶光学特性时,波长和气溶胶总散射系数之间的关系为

$$\sigma_{s, \lambda_1} = \sigma_{s, \lambda_2} (\lambda_1 / \lambda_2)^{-\dot{a}_s}, \quad (2)$$

式中, σ_{s, λ_1} 是波长为 λ_1 时的总散射系数, \dot{a}_s 是大气气溶胶波长指数。在实际中^[22],波长指数 \dot{a}_s 可由公式(3)得到:

$$\dot{a}_s(\lambda_1 / \lambda_2) = - \frac{\log(\sigma_{s, \lambda_1}) - \log(\sigma_{s, \lambda_2})}{\log \lambda_1 - \log \lambda_2}. \quad (3)$$

由总散射系数逐日变化可以看出,发生沙尘天气时的总散射系数明显偏大,可以达到总体平均值的数倍,带来的沙尘对大气中气溶胶含量的贡献较大。为了方便讨论不同天气下的气溶胶散射特性,结合地面观测记录,把数据分为三类:扬沙或浮尘类、沙尘暴类及非沙尘类。若一天中有扬沙或浮尘发生,则把这一天归为扬沙、浮尘日;同理,把有沙尘暴发生的一天归为沙尘暴日。具体日期为4月19, 20, 21, 22, 23, 25, 28, 29、5月4, 5, 6, 26, 29及6月12日归为扬沙、浮尘日;5月2, 3, 8和11日归为沙尘暴日;其余归为无沙尘日。另外,在扬沙、浮尘日中提取扬沙过程的观测数据样本定义为扬沙过程,在沙尘暴日中提取沙尘暴过程的样本定义为沙尘暴过程,对其气溶胶散射特性做了统计,结果如表1所示。

表1 总体平均、无沙尘日、扬沙浮尘日、沙尘暴日及沙尘暴和扬沙过程的气溶胶散射特性参数的值(算术平均值/中值)

Table 1 Aerosol scatter parameters(arithmetic mean/median) for the total mean, without dust days, sand blowing and floating dust days, dust-storm days, dust-storm and sand blowing processes

参数	总体	无沙尘日	扬沙、浮尘日	沙尘暴日	沙尘暴过程	扬沙过程
$\sigma_{s, 450} (M \cdot m^{-1})$	116/73	72/54	163/140	269/186	991/938	419/370
$\sigma_{s, 550} (M \cdot m^{-1})$	103/64	63/47	137/126	274/150	1095/1049	384/339
$\sigma_{s, 700} (M \cdot m^{-1})$	94/56	55/43	127/120	277/139	1145/1093	347/311
$\sigma_{b, 450} (M \cdot m^{-1})$	15.5/10.8	10.6/8.2	19.1/17.4	41.7/20.4	171/170	56.7/48.8
$\sigma_{b, 550} (M \cdot m^{-1})$	15.3/10.4	10.3/8.0	18.8/17.2	43.4/20.5	182/185	56.2/48.9
$\sigma_{b, 700} (M \cdot m^{-1})$	16.9/12.8	12.4/10.9	19.6/18.4	44.6/21.0	190/190	55.5/49.9
b_{450}	0.148/0.154	0.152/0.152	0.140/0.162	0.152/0.163	0.173/0.166	0.143/0.154
b_{550}	0.164/0.168	0.171/0.171	0.150/0.167	0.155/0.161	0.166/0.160	0.150/0.157
b_{700}	0.216/0.183	0.247/0.228	0.169/0.174	0.161/0.168	0.165/0.161	0.163/0.169
$\dot{a}_s(700/450)$	0.516/0.553	0.590/0.648	0.441/0.349	0.160/-0.079	-0.330/-0.339	0.343/0.449
$\dot{a}_s(700/550)$	0.403/0.418	0.470/0.592	0.255/0.283	0.146/-0.001	-0.178/-0.175	0.367/0.441
$\dot{a}_s(550/450)$	0.652/0.650	0.735/0.767	0.664/0.393	0.176/-0.145	-0.512/-0.581	0.315/0.455

3.1.3 无沙尘日总散射系数的日变化

在进行日变化趋势分析时, 根据观测期间的天气记录剔除扬沙、浮尘及沙尘暴日, 得到 42 天无沙尘日的散射系数样本, 占整个观测期样本的 71%。无沙尘日的气溶胶总散射系数(550 nm)的日变化可代表观测时期总散射系数(550 nm)背景的日变化。

表 2 无沙尘日的风向频率

Table 2 Frequency of wind direction without dust days

风向	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
频率百分比/%	9	5	10	30	12	4	8	22

由图 3a 可以看出, 该地区春季在不受扬沙及沙尘暴的影响时大气是比较清洁的, 总散射系数远低于观测时期的总平均值($103 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$)。总散射系数日变化呈双峰型, 这与已有研究结果一致^[1, 14], 但峰值出现的时间不相同, 第一峰值出现在早晨 07:00(北京时, 下同), 第二峰值出现在 22:00, 午后几小时内出现一天中的低值区。张掖地处河西走廊中部, 由依托黑河的张掖绿洲及周边的大片山地、荒漠组成, 北部为巴丹吉林沙漠。居民以从事农、牧业为主。气溶胶受外来沙尘和本地人类活动(主要为农业生产)的共同影响。其中, 风和近地面的湍流交换对总散射系数日变化起着很重要的作用。对无沙尘日的连续观测的风速风向资料统计分析后发现, 观测站常吹东南风和西北风, 出现的频率分别为 30%和 22%, 且有明显的昼夜转换(表 2)。如图 3b 所示, 正午到傍晚这段时间常吹

西北风, 夜间常吹东南风。观测站西面和北面均为戈壁和沙漠, 居民区很少, 无沙尘日的风速相对较低, 即使从戈壁沙漠吹来的风的沙尘含量也很少, 是相对清洁的, 因此午后的西北风对气溶胶有稀释和消散作用。经分析, 正午到傍晚, 风速和总散射系数呈负相关, 相关系数达 -0.92 。由于该地区属于内陆干旱区, 地表土壤干燥、疏松, 热容量较小。白天太阳对地面的加热很快, 地面与大气出现明显的温差, 有利于使混合层内产生湍流交换, 这种湍流交换在午后最为明显。这一条件加速了西北风对气溶胶的稀释和消散作用。因此在这一时段, 气溶胶总散射系数出现一天的低值区。观测区东南方为张掖市区(见图 1), 市区及周边人口比较密集, 有一定的污染物排放, 气溶胶浓度相对较高, 遇东南风时, 带来的污染物使观测站所在区域的气溶胶总散射系数在夜间明显上升。日落后, 到达地面的辐射减小, 地表温度下降较快, 地面净辐射转变为负值, 逐渐形成有逆温层结的稳定大气边界层, 不利于扩散, 从而使污染物产生堆积, 以至于在夜间的总散射系数始终较高。日出后的一段时间, 居民生活、生产活动也开始加强, 污染物排放有所增多, 逆温层的存在使得总散射系数在早晨 07:00 出现主峰值, 此后随着太阳升高, 到达地面的辐射增强, 逆温层逐渐被破坏, 近地层湍流开始发展, 总散射系数开始下降。

3.1.4 有沙尘日总散射系数日变化

有沙尘日(沙尘暴、扬沙、浮尘发生日, 共计 17 天)的气溶胶总散射系数明显比无沙尘日的总散

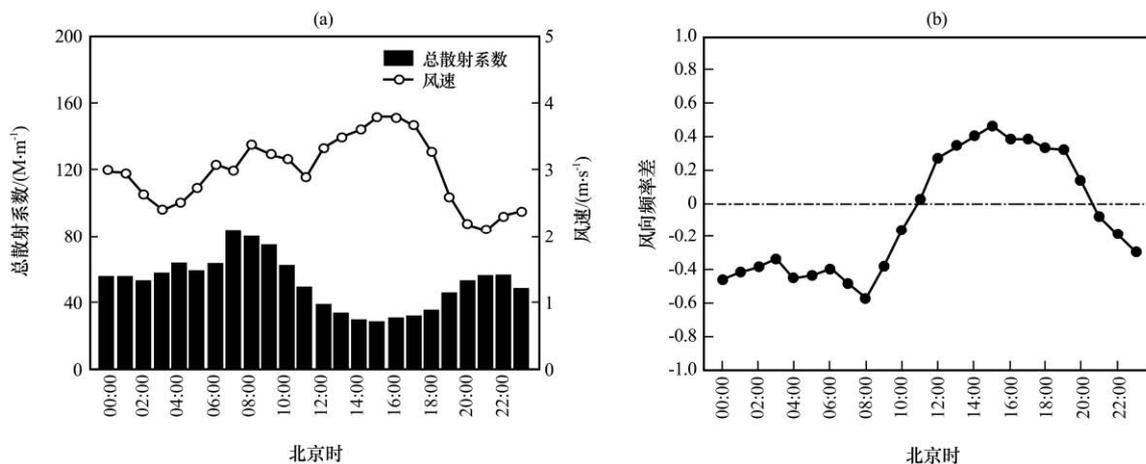


图 3 无沙尘日总散射系数(550 nm)、风速(a)和风向频率差(NW-SE)(b)日变化

Fig. 3 The diurnal variation of total scattering coefficient (550nm), wind speed(a) and frequency difference of wind direction (NW-SE)(b) without dust days

射系数大3倍~4倍,且日变化幅度较大,最大值可达 $322 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$,最小值仅为 $76 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ 。图4显示,日变化呈明显的双峰型,但峰值出现的时刻与无沙尘日不同,有沙尘日的峰值分别出现在01:00和20:00(无沙尘日的峰值则出现在07:00和22:00)。与无沙尘日相似的是午后都出现日平均变化的低值区。结合地面观测记录和总散射系数日变化特征,张掖站发生的3次沙尘暴的具体时间分别为5月2日20:00、8日01:00和11日04:00。这与沙尘日总散射系数日变化的峰值发生的时段相一致。从峰值出现的时段可以反映出,在观测期内张掖站的沙尘天气多发生在傍晚和凌晨。这与已有的研究^[23-24]得出的“沙尘天气多发生在午后和傍晚”的结果不同。

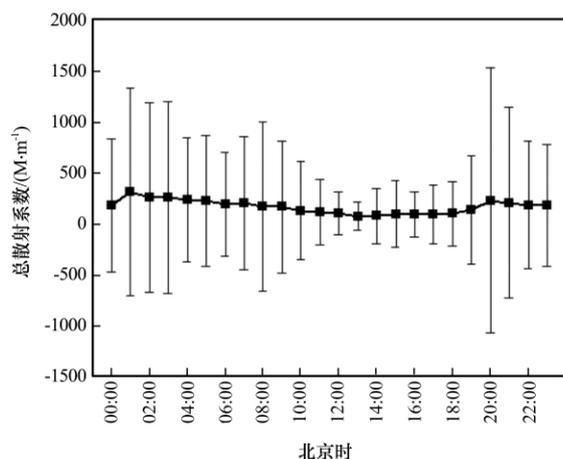


图4 沙尘日总散射系数(550 nm)日变化
误差棒代表标准差

Fig. 4 The diurnal variation of total scattering coefficient(550 nm) with dust days. Error bars represent standard deviation

我们用 HYSPLIT TRAJECTORIES (www.ready.noaa.gov 网站)对张掖站发生的沙尘暴进行向后轨迹分析后得出(图略),这3次沙尘暴均是远距离输送至张掖站的。观测站北面的巴丹吉林沙漠、西面的塔克拉玛干沙漠及西北面的大片戈壁荒漠是西北地区最主要的沙尘源区,张掖站发生的沙尘暴大多来自这几个区域。因此观测区沙尘暴发生的时间与沙尘源地的位置和当时的风速、风向有关。由于一天中,午后地面温度最高,近地面湍流交换最剧烈,风速也较大,具备了最有利的起沙的气象条件。但无论是有沙尘日还是无沙尘日,午后几小时的总散射系数都比较小,空气相对是比较清洁的。这表明张掖站发生的沙尘多为外源型。这就

是沙尘发生时间相对滞后的主要原因。

3.2 气溶胶后向散射比

3.2.1 日均值总体变化

后向散射比是衡量气溶胶光学特性的一个重要参量。在可见光下,沙尘气溶胶粒子的散射性质可以近似用 Mie 散射理论来解释。根据 Mie 散射理论,当粒子尺度参数增大时,前向散射与后向散射之比增大,即后向散射比的大小可以反映细粒子($d < 2 \mu\text{m}$)在沙尘气溶胶中所占的比例。本文所指的后向散射比由公式(1)计算得到,其中 $\lambda = 550 \text{ nm}$ 。

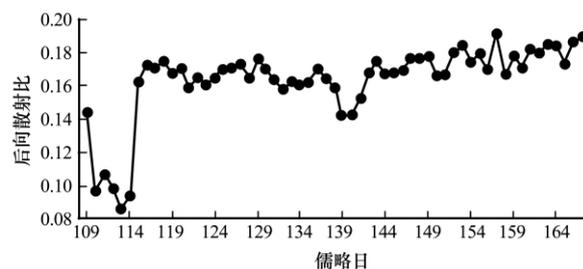


图5 后向散射比逐日分布

Fig. 5 Daily average of the ratio of backscatter to total scattering

图5显示,整个观测期的后向散射比日平均值除4月19~23日这5天偏低之外,大多都在0.15~0.19之间,日平均值序列相对总散射系数序列来说波动较小,总体平稳,略有上升。在沙尘暴发生日,后向散射比也没有出现像总散射系数那样突出的变化。4月19~23日后向散射比在0.1左右。这几天由于出现连续的浮尘天气,总散射系数也持续偏高。表明这几天大气中颗粒物的浓度较高,但细粒子所占比例较小。根据同期天气资料,这几天气温偏低,空气相对湿度较大。在颗粒物浓度较高的情况下,相对湿度的增大可能会使细粒子聚合成较大粒子,因而减少了细粒子所占的比例^[25]。整个观测期的后向散射比总体呈上升趋势,即沙尘气溶胶中的细粒子所占的比例在逐渐升高。

3.2.2 有、无沙尘日后向散射比的日变化

图6显示,有、无沙尘日后向散射比小时平均值序列都有明显的日变化。在无沙尘日,后向散射比从日出时开始缓慢上升,11:00以后上升速度明显加快,在13:00达到了一天中的最大值;然后缓慢下降,随后又小幅上升,在19:00达到了第二个峰值后下降,在夜间变化相对稳定;从01:00开始下降,在04:00出现一天的最小值。总体来看,下午的值明显偏高,这与无沙尘日下午出现总散射系

数低值区相对应。表明无沙尘日下午的大气气溶胶的浓度较低，且以细粒子为主。

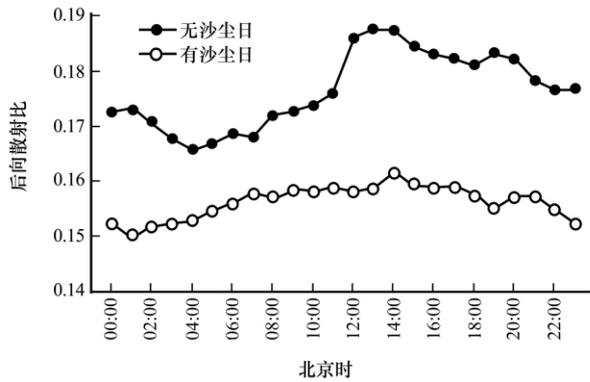


图 6 有、无沙尘日的后向散射比日变化

Fig. 6 The diurnal variation of the ratio of backscatter to total scattering with and without dust days

在有沙尘日，后向散射比从 01:00 左右开始缓慢上升，日出后上升速度变缓，在 14:00 达到一天中的最大值，然后呈波动下降，在 01:00 出现最小值。与无沙尘日相比，有沙尘日的后向散射比和日变化幅度都偏小。这表明，有沙尘日的气溶胶中的粗粒子含量相对较高。较小的日变化反映出，在有沙尘日，虽然大气中细粒子和粗粒子含量都比较大，日绝对变化也很大，但它们的相对变化却较小。结合沙尘日总散射系数变化可以看出，在发生沙尘暴较多的傍晚和凌晨，后向散射比相对较低，表明沙尘暴携带的沙尘是以粗粒子为主，进一步反映了沙尘暴过程对细颗粒物有很强的搬运能力。

3.3 一次沙尘暴过程中气溶胶散射特性

结合同期地面观测，以 5 月 2~3 日发生的一次典型的强沙尘暴过程为例，选取了包括该沙尘暴发生过程中及结束后数小时的浮尘过程的观测数据，分析此过程中气溶胶散射特性的变化。

从整个过程的总散射系数变化来看(图 7a)，总散射系数在 5 月 2 日 17:50 左右发生了第一次突变，由 $71 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ 突然增加到 $1033 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ ，然后随风速减小而迅速降低，30 min 后降到 $500 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ 以下，随后维持在 $200 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ 左右。在 19:50 左右总散射系数发生了第二次突变，由 $202 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ 突然增至 $1958 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ ，达到沙尘暴过程中的最大值。这次突变时间与地面观测记录的沙尘暴的发生时间(20:00 左右)相一致。随后总散射系数逐渐减小，在此后 2 h 内形成浮尘天气，总散射系数数值都维持在 $1000 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ 以上。5 月 3 日 09:00 以后，随着气温升高，地面湍流加强，浮尘开

始消散。午后，总散射系数降到 $100 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ 以下，整个沙尘天气过程结束。图 7a、b 显示，总散射系数的峰值与风速的峰值出现的时间并不一致，而是有所滞后。风速与后向散射比峰值出现的时间相一致。

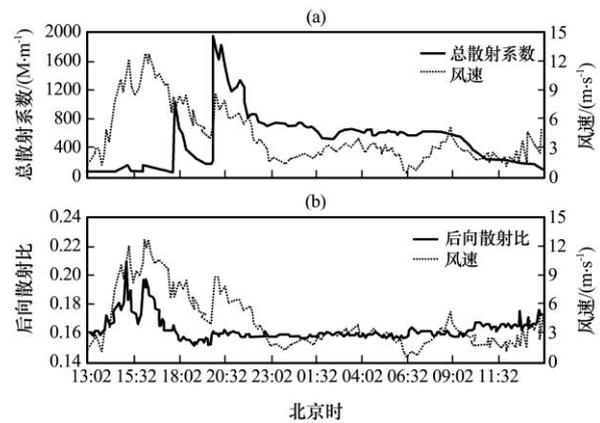


图 7 一次沙尘暴过程的总散射系数(550 nm)、风速(a)及后向散射比(b)的变化

Fig. 7 Changes of total scattering coefficient(550 nm), wind speed(a) and the ratio of backscatter to total scattering(b) during a duststorm process

根据整个过程中总散射系数和风速的变化特点，可将整个过程分为 3 个阶段。第一个阶段：5 月 2 日 13:00~17:50，在这个阶段初期风速逐渐增大，增速渐渐加快，在风速 $< 7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时，总散射系数不随风速的变化而变化，维持在 $65 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ 左右。当风速增大到 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上时，总散射系数随风速的增大有明显的增大，15:00 风速增大到 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，此时总散射系数为 $152 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ 。之后风速有小幅下降，降至 $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右，总散射系数也开始下降，降至最初的 $65 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ 左右。随后风速又开始上升，16:00~17:00，风速一直维持在 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上，期间最大风速为 $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，最大总散射系数为 $160 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ 。此后风速有所降低，总散射系数也随之下降。在这个阶段内，总散射系数与风速呈正相关，相关系数为 0.72。无论风速的平均值还是最大值在整个沙尘暴过程中都为最大，总散射系数数值相对整个过程来说变化较小，后向散射比变化剧烈，其值比其他两个过程大很多。表明在这一阶段中，大风吹起的沙尘主要以细粒子为主，源自于本地干燥的下垫面。第二个阶段：5 月 2 日 17:50~22:00 期间总散射系数和风速的变化都比较剧烈，是沙尘暴的发生阶段。这一阶段内，总散射系数有两次明显的突变，其中第一次突变发生在

风速较为稳定时,第二次突变随风速突变的发生而发生。两次突变之间间隔达2 h,而且在这一期间也没有明显的降水过程发生。结合两次突变后总散射系数的变化趋势来看,可以判断发生了两次沙尘暴,第一次过程较弱,携带的沙尘量较少,沙尘随风逐渐消散,总散射系数下降很快。第二次过程较强,携带了大量的沙尘,入夜后,风速很快下降,整个系统的移动变缓,致使大量沙尘滞留在空中,总散射系数居高不下,空气污染严重。在两次沙尘暴过程中,总散射系数与风速呈正相关,相关系数分别为0.72和0.79。总体来看,第二阶段的风速要比第一阶段的小,这可能是搬运沙尘耗费了系统的能量,从而使风速减小。第三个阶段:5月2日22:00~3日14:00期间风速较弱,总散射系数缓慢降低,即沙尘暴后的浮尘阶段。这一阶段内,由于夜间大气层结稳定,沙尘气溶胶不易扩散,沙尘粒子以自由沉降的方式落回地面,由于细粒子的沉降速度比粗粒子的小,所以随着沙尘粒子的减少,细粒子的比例在逐渐上升,使后向散射比缓慢上升。由于风速较弱(始终 $<6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),总散射系数与风速没有明显的相关性。

4 不同天气下气溶胶散射系数与 PM_{10} 质量浓度的关系

为了了解不同天气下气溶胶散射系数与 PM_{10} 质量浓度的关系,我们选择了5月2~3日一次沙尘暴过程和6月12日一次扬沙过程的每5 min一次对应时间的样本进行两者之间的相关性分析(图略),发现在沙尘暴过程、扬沙过程中散射系数与 PM_{10} 质量浓度均有相当好的正相关性,相关系数分别为0.98和0.96。这表明散射系数可以很好地反映近地面 PM_{10} 的浓度变化,说明用积分浑浊度仪监测沙尘天气的过程和强度可以取得较好的效果。

5 结论

(1) 在观测期,气溶胶总散射系数日平均值总体呈下降趋势,日平均最大值出现在5月3日,为 $353\text{ M}\cdot\text{m}^{-1}$;最小值出现在5月22日,为 $27\text{ M}\cdot\text{m}^{-1}$ 。沙尘暴对发生日总散射系数的贡献很大。后向散射比日平均值总体呈上升趋势,即气溶胶中细粒子的比例在逐渐减小。

(2) 发生沙尘天气时,气溶胶散射特性参数都有明显的变化。分类统计后得出:沙尘暴日、扬沙浮尘日的总散射系数分别为背景天气下的4.3倍

和2.2倍。波长指数随沙尘天气强度的增大而减小,在强沙尘暴过程中,波长指数 <0 。

(3) 无论是无沙尘日还是有沙尘日,总散射系数日变化都呈双峰型,但峰值的发生时间不同。无沙尘日峰值的出现主要受当地气象条件和人类活动的影响;而有沙尘日峰值的出现主要受沙尘暴的影响。在无沙尘日,风向的转换对总散射系数日变化有重要影响,午后的西北风对气溶胶有消散作用,期间细粒子比例明显增大。由后向散射比的日变化特点可以看出,无沙尘日气溶胶主要由细粒子组成,而有沙尘日气溶胶中粗粒子的比例明显升高。

(4) 观测期间,张掖站的沙尘天气一般发生在傍晚和凌晨,多为外源型。

(5) 沙尘暴爆发的时间和风速峰值的出现时间并不一致,而是有所滞后。沙尘暴发生初期,总散射系数与风速有很好的正相关性。沙尘暴爆发时总散射系数有明显的突变,用总散射系数的突变可以确定沙尘暴发生的时间。这进一步说明用积分浊度仪监测沙尘暴可以取得很好的效果。

参考文献

- [1] 胡波,张武,张镭,等.兰州西固区冬季大气气溶胶粒子的散射特征[J].高原气象,2003,22(4):354-360.
- [2] 石广玉,王标,张华,等.大气气溶胶的辐射与气候效应[J].大气科学,2008,32(4):826-840.
- [3] 张小曳.中国大气气溶胶及其气候效应的研究[J].地球科学进展,2007,22(1):12-16.
- [4] 申彦波,沈志宝,杜明远.敦煌地区春季大气气溶胶粒子数浓度的分析[J].高原气象,2007,26(1):158-164.
- [5] 申彦波,沈志宝,汪万福.2001年春季中国北方大气气溶胶光学厚度与沙尘天气[J].高原气象,2003,22(2):185-190.
- [6] 姚济敏,张文煜,袁九毅,等.典型干旱区沙尘气溶胶光学厚度及粒度谱分布的初步分析[J].中国沙漠,2006,26(1):77-80.
- [7] 沈志宝,文军.沙漠地区春季的大气浑浊度及沙尘大气对地面辐射平衡的影响[J].高原气象,1994,13(3):330-338.
- [8] 陈进华,杨军.中国沙尘气溶胶研究的若干进展[J].环境研究与监测,2007,20(2):1-4.
- [9] 李刚,季国良.中国西北地区大气气溶胶散射光学厚度分析[J].高原气象,2001,20(3):283-290.
- [10] 李韧,季国良.敦煌地区大气气溶胶光学厚度的季节变化[J].高原气象,2003,22(1):84-87.
- [11] 岳平,牛生杰,张强.民勤一次沙尘暴的观测分析[J].高原气象,2008,27(2):401-407.
- [12] 牛生杰,孙继明.贺兰山地区大气气溶胶光学特征研究[J].高原气象,2001,20(3):298-301.

- [13] 杨莲梅, 张广兴, 魏文寿, 等. 粒子散射系数在沙尘天气观测分级中的初步分析[J]. 中国沙漠, 2006, 26(3): 380—383.
- [14] 章秋英, 牛生杰, 沈建国, 等. 半干旱区气溶胶散射特性研究[J]. 中国沙漠, 2008, 28(4): 755—761.
- [15] 柯宗建, 汤洁, 王炳忠, 等. 积分浊度计在沙尘暴监测网试验中应用分析[J]. 气象科技, 2004, 32(4): 258—262.
- [16] 张玉洁, 张武, 陈艳, 等. 黄土高原半干旱地区气溶胶光学厚度变化特征的初步分析[J]. 高原气象, 2008, 27(6): 1416—1423.
- [17] 延昊, 矫梅燕, 赵琳娜, 等. 中国北方气溶胶散射和 PM₁₀ 浓度特征[J]. 高原气象, 2008, 27(4): 852—858.
- [18] 董险峰. 沙尘暴气候效应研究[R]. 环境保护, 2008, 5: 46—48.
- [19] Coen M Collaud, E Weingartner. Saharan dust events at the Jungfraujoch: Detection by wavelength dependence of the single scattering albedo and first climatology analysis[J]. Atmos Chem Phys, 2004, 4: 2465—2480.
- [20] 刘立超, 沈志宝, 王涛, 等. 敦煌地区沙尘气溶胶质量浓度的观测研究[J]. 高原气象, 2005, 24(5): 765—771.
- [21] Xu J, M H Bergin, X Yu, et al. Measurement of aerosol chemical, physical and radiative properties in the Yangtze delta region of China[J]. Atmos Environ, 2002, 36: 161—173.
- [22] Aaltonen V, H Lihavainen. Measurements of optical properties of atmospheric aerosols in Northern Finland[J]. Atmos Chem Phys, 2006, 6: 1155—1164.
- [23] 王式功, 杨德保, 周玉素, 等. 我国西北地区“94.4”沙尘暴成因探讨[J]. 中国沙漠, 1995, 15(4): 332—338.
- [24] 牛生杰, 孙继明, 桑建人. 贺兰山地区沙尘暴发生次数的变化趋势[J]. 中国沙漠, 2000, 20(1): 55—58.
- [25] 李军, 孙春宝, 刘成德, 等. 气象因素对北京市大气颗粒物浓度影响的非参数分析[J]. 环境科学研究, 2009, 22(6): 663—669.

A Preliminary Study on Scattering Property of Dust Aerosol in Hexi Corridor

TIAN Lei, ZHANG Wu, SHI Jin-sen, HUANG Jian-ping, SONG Song-tao,
DING Xiao-dong, BI Jian-rong, CAO Xian-jie, ZHANG Lei

(Key Laboratory of Semi Arid Climate Change, Ministry of Education College of Atmospheric Sciences,
Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To monitor duststorm real-timely and continuously is helpful to understand the properties of dust aerosol. The data measured by an three-band integrating nephelometer (TSI 3563) and the routine weather observation at the meteorological observation station of CMA in Zhangye were analyzed during the Sino-US joint field experiment of dust aerosol in spring of 2008. Diurnal cycles of the atmospheric aerosol scattering coefficient (550 nm) and the ratio of backscatter to total scattering in the periods with and without dust events were discussed, as well as the evolution of dust aerosol scattering properties during a typical duststorm event. The results show that, the daily variation of total scattering coefficients appears a bi-peak types during both kinds of weather conditions, but the occurred time, the peak value and magnitudes are different. The daily ranges of the proportion fine particles of for aerosol without dust days are wider than that with dust days. The total scattering coefficients are rapidly increasing when a duststorm occurred. Integrating nephelometer is a very effective instrument to monitor the dust aerosol.

Key words: Arid area in Hexi Corridor; Aerosol; Total scattering coefficient; Ratio of backscatter to total scattering; Integrating nephelometer