

文章编号: 1000-2022(2006)06-0775-07

北方沙尘气溶胶光学厚度和粒子谱的反演

刘菲, 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 CE-318 太阳光度计在内蒙古额济纳旗、东胜、锡林浩特三地观测的 2002 年 6 月—2003 年 5 月间的太阳直接辐射数据,应用消光法反演大气气溶胶光学厚度[$AOT(\lambda)$, Aerosol Optical Thickness]和粒子谱分布,并分析其变化特征。结果表明,该地区气溶胶光学厚度具有明显的时空变化:春季最大,冬季最小, $AOT(\lambda = 440 \text{ nm})$ 平均最大值为 0.78,最小值为 0.13。3 个观测点中,额济纳旗的光学厚度最大,东胜最小。光学厚度的日变化主要有 4 种形式:1)早晨高傍晚低;2)早晨低傍晚高;3)早晚低中午高;4)变化平缓。这主要与沙尘天气的发生、大气层结稳定度和人类活动等因素有关。气溶胶粒子谱分布基本符合 Junge 谱,在粒径 $0.3 \mu\text{m}$ 、 $0.6 \mu\text{m}$ 和 $1.0 \mu\text{m}$ 处出现峰值。但是在不同天气条件下粒子谱有很大差异,在沙尘暴天气中,大粒子和巨粒子数有明显的增加,粒子数浓度要比晴天背景大气大了约一个量级。春季气溶胶粒子数浓度最大,夏秋季次之,冬季最小,但相差不超过一个量级。

关键词: CE-318 太阳光度计;沙尘气溶胶;光学厚度;谱分布

中图分类号: P422 **文献标识码:** A

Optical Thickness and Size Distribution of Dust Aerosol Particles in Inner Mongolia

LIU Fei, NIU Sheng-Jie

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

Abstract: By using the direct solar radiation data measured by a CE-318 sun photometer in Inner Mongolia during the period between June 2002 and May 2003, the aerosol optical thickness (AOT) and size distribution were retrieved by extinction method. Results show that there were significant variations in temporal-spatial distributions of AOT . The largest mean AOT appeared in spring [$AOT(\lambda = 440 \text{ nm}) = 0.78$] with the least in winter [$AOT(\lambda = 440 \text{ nm}) = 0.13$]. AOT was always largest in Ejina and least in Dongsheng. There were four patterns of day-time variations: (1) AOT is high in the morning and low in the evening; (2) AOT is low in the morning and high in the evening; (3) AOT peaks at noon; (4) AOT varies gently. This is mainly associated with dust weather, turbulence of boundary layer and human activities. The

收稿日期: 2005-08-11; 改回日期: 2006-02-22

基金项目: 教育部高等学校博士点基金资助项目(20050300002); 国家自然科学基金资助项目(40365002); 江苏省气象灾害重点实验室资助项目(KLME05006)

作者简介: 刘菲(1980-)女,江苏苏州人,硕士,研究方向:大气气溶胶, liufei03y@nuist.edu.cn; 牛生杰(通信作者),男,教授,博士生导师,研究方向:云、降水、大气气溶胶, niusj@nuist.edu.cn.

aerosol size distribution basically satisfied the Junge distribution and appeared an obvious peaks at $r = 0.3 \mu\text{m}$ $0.6 \mu\text{m}$ and $1.0 \mu\text{m}$. However, it shows a significant discrepancy under different weather conditions. Large dust particles and giant dust particles remarkably increased in dust weather. The aerosol number concentration in dust weather was about one order of magnitude larger than that in clean weather. And it was also larger in spring than that in winter, but the both were still within the same order of magnitude.

Key words CE-318 sun photometer, dust aerosol, aerosol optical thickness, size distribution

0 引言

沙尘气溶胶是东亚对流层大气气溶胶的主要成分,它主要来自干旱和半干旱地区,通过沙尘暴等强烈天气过程造成广泛影响^[1]。沙尘气溶胶的存在不仅对源地,而且还可通过大气输送对其下游广大地区的生态系统、大气环境和大气化学等产生很大的影响。它的存在还可能改变沙尘源地下游大气气溶胶和降水的物理化学特性^[2]。

在过去的几十年中,国内外的研究者已对沙尘气溶胶的物理、光学、化学特性、尺度分布进行了大量的观测和研究。美国 NASA 采用 CE-318 太阳光度计在全球布设了 180 多个站点,用来监测全球气溶胶,形成 AERONET 网。李成才等^[3]、毛节泰等^[4]利用太阳光度计来校正 MODIS 气溶胶产品,研究了中国东部气溶胶光学厚度的分布特点和季节变化,指出人类活动是中国东部气溶胶的主要来源,气溶胶光学厚度的高值区对应人口稠密和经济快速发展的地区。牛生杰等^[5-9]于 1996 年至 1999 年间的 4 月和 5 月深入沙漠源地(腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠、毛乌素沙地),利用美制 APS-3310A 激光空气动力学粒子谱仪、KB120、太阳光度计等设备,对沙尘天气进行了系统测量,并利用飞机观测沙漠地区气溶胶,系统分析了贺兰山地区沙尘气溶胶微结构。张文煜等^[10]于 2001 年 4—9 月在腾格里沙漠沙坡头站进行了为期 6 个月的地面多波段太阳直接辐射观测,研究表明该地区的气溶胶光学厚度在不同天气状况下的变化有很大差别,而总体光学厚度较大,时空变化较大,但在同等条件下,各波段变化规律基本一致;不同天气状况下存在不同的气溶胶分布特征。辛金元等^[11]也对这次观测结果进行了分析。

我国的沙尘暴区是中亚沙尘暴多发区的一部分,属全球现代沙尘暴高活动区之一,主要发生在西北、华北和东北的部分地区,特别是西北沙尘暴区。内蒙古处于我国西北最大的强沙尘暴发生区域,西部干旱区发生次数最多,而且影响范围也最广,中部

万方数据

浑善达克沙地和东部的科尔沁沙地也是另一个主要影响地域。

本文利用额济纳旗、东胜、锡林浩特三地全年的太阳直接辐射数据,反演当地沙尘气溶胶的平均光学厚度和粒子谱分布,为更好了解沙尘气溶胶、提高对沙尘天气的监测防御能力提供参考依据。

1 仪器和数据

本实验使用法国 CIMEL 公司制造的全自动太阳光度计 CE-318,仪器每年进行一次定标和检测工作,得出仪器的定标常数^[12]。试验地点设在内蒙古境内的额济纳旗($101^{\circ}04'E$, $41^{\circ}57'N$,海拔高度 940.5 m)、东胜($109^{\circ}59'E$, $39^{\circ}50'N$,海拔高度 1460.4 m)、锡林浩特($116^{\circ}04'E$, $43^{\circ}57'N$,海拔高度 989.5 m)三地。观测时间从 2002 年 5 月至 2003 年 6 月,每天从北京时间 08 时开始观测,18 时结束,由光度计自动采集并记录数据。测量条件要求为无云天气,大气质量数在 $6 \sim 1$ 之间,即太阳天顶角小于 81° 。根据这个条件,对数据进行了筛选,最终三地分别获得 116 d、124 d、54 d 记录完整的观测数据。由于仪器和天气条件的原因,额济纳旗 2002 年 6 月、锡林浩特 2002 年 10、12 月和 2003 年 1 月,均没有观测资料。

2 反演方法

2.1 气溶胶光学厚度

根据 Lambert-Beer 定律^[13],计算出整层大气光学厚度,详见文献[12]。

2.2 谱分布

King 等^[14]提出,通过测量透过大气层的太阳直接辐射强度获得的大气气溶胶光学厚度值可以用来反演其粒度谱分布^[14-17]。在球形粒子的假设下,且由于气溶胶粒子的复折射率 n 在可见光和近红外波段随波长的变化较小,可取为常数,则气溶胶光学厚度 τ_i 和其粒子谱分布的积分方程可表示为

$$\tau_i = \int_0^{z_M} \int_0^{r_M} \pi r^2 N(r, z) Q_e(r, \lambda_i, n) dr dz = \int_0^{z_M} \pi r^2 Q_e(r, \lambda_i, n) N(r) dr. \quad (1)$$

其中: Q_e 为消光因子, r 为粒子半径, r_0 、 r_M 为粒子半径的上限和下限, $N(r, z)$ 为局地气溶胶谱分布, $N(r, z) = \int_0^{z_M} N(r, z) dz$ 即为待求的大气柱气溶胶谱分布。(1)式就是消光法遥感气溶胶谱分布的反演方程。改写(1)式,

$$\tau_i = \int_0^{z_M} K_i(r, n) N(r) dr. \quad (2)$$

$K_i(r, n)$ 对应核函数 $\pi r^2 Q_e(r, \lambda_i, n)$ 。

分解 $N(r)$ 为缓变函数 $f(r)$ 和快变函数 $h(r)$ 的乘积 (2) 式可变为

$$\tau_i = \int_0^{z_M} K_i(r, n) h(r) f(r) dr. \quad (3)$$

选取 N 组通道, 并把整个研究谱区域分为 M 个子区间。本文取波长通道数 N 为 5, 粒度区间数 M 为 8, 具体为 0.1~0.2、0.2~0.3、0.3~0.4、0.4~0.6、0.6~0.8、0.8~1.0、1.0~2.0, 因为反演方法对 0.1~1.0 μm 的谱分布反演较为敏感, 同时初始函数选取 Junge 分布比较能反映 0.1~1.0 μm 的谱分布特征, 所以, 对这个粒度区间分割较细, 以达到对此粒度区间的反演谱更接近于真实谱分布形式。

3 反演结果与分析

3.1 月平均大气气溶胶光学厚度

本文按照 3—5 月为春季、6—8 月为夏季、9—11 月为秋季、12 月—次年 2 月为冬季来划分季节。图 1 为三地各波段气溶胶光学厚度 (AOT, 下同) 月平均值的变化。

从图 1a 可以看出: 气溶胶光学厚度从 3 月开始持续增大到 6 月, 而后开始逐渐减小, 在 7 月达到夏季的最小值, 然后经过 8 月的小幅上升后, 在 9 月又开始减小, 11 月达到最小值。值得注意的是, 冬季虽然整体处于低值区, 但 12 月却出现了一个峰值, 结合气象资料初步估计是由于沙尘天气引起的。

图 1b 与图 1a 总体变化相似, 但 AOT 值均比较小, $AOT(\lambda = 440 \text{ nm})$ 春季最大值为 0.51, 冬季最小值为 0.14。这应该与当地的气候环境有关。东胜位于内蒙古中南部, 是毛乌素沙地延伸地带, 降水相对其他两地最为丰富, 从对应的气象资料来看, 该地区全年发生的沙尘天气次数比其余两地少, 大气相对清洁。

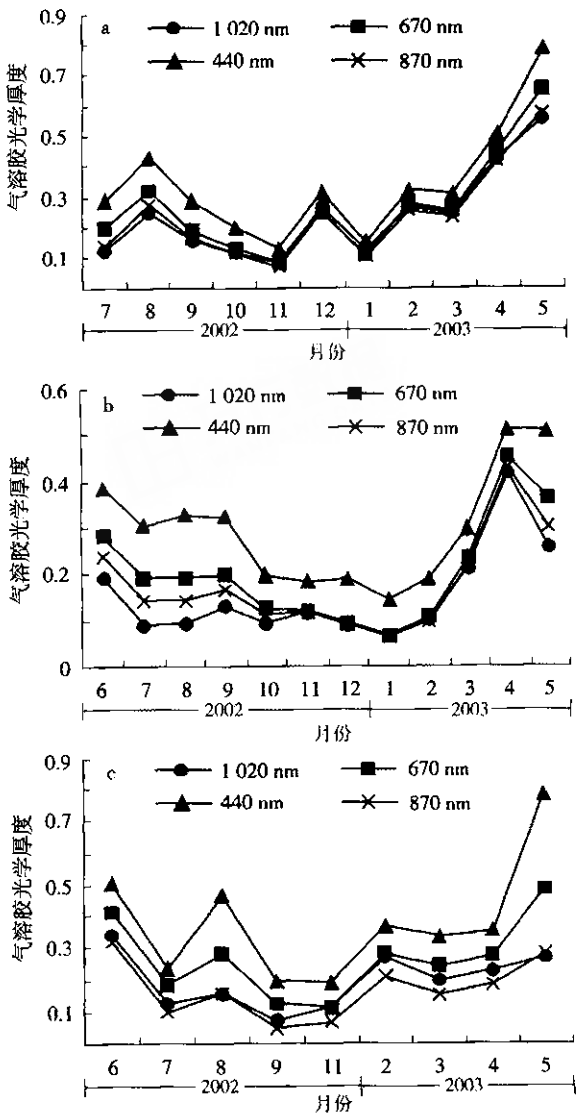


图1 2002年6月—2003年5月
额济纳旗(a)、东胜(b)、锡林浩特(c)
平均光学厚度的年变化
Fig. 1 Monthly averaged AOT in Ejin Q (a),
Dongsheng (b) and Xilinhot (c)
from June 2002 to May 2003

锡林浩特 (图 1c) 大气气溶胶光学厚度和额济纳旗相当, 甚至有些月份还略大, $AOT(\lambda = 440 \text{ nm})$ 春季最大值为 0.78, 冬季由于缺乏观测资料, 暂取为 11 月的 0.18。这一现象除了自然原因外还与人为因素有关。锡林浩特位于已开始退化的草场, 当地过度开垦、放牧严重, 是植被退化、草场沙化最为严重的地区, 正在沙化的土地提供了足够多的沙尘源, 而且这里和额济纳旗一样同属于风力丰富区。虽然降水量远大于额济纳旗, 但这一点在对气溶胶光学厚度的影响中并没有体现。这也与 McTainsh

等^[18]的研究吻合。他们认为,沙尘气溶胶的出现首先与土壤湿度和植被有关,而不是与降水量有关。

综合图 1 可以看出,额济纳旗、东胜、锡林浩特虽位于不同的地理位置,但三地气溶胶光学厚度的变化趋势基本一致:光学厚度在春季均有一个极大值,约是其他季节的 2~6 倍,极小值出现在冬季,夏季较春季明显降低并在 7 月出现一个谷值。这是因为:一方面,春季是内蒙古西北部地区冷锋活动最为频繁的季节,冷锋过境带来的大风是扬起地表沙尘的主要动力;另一方面,由于气温回升,在冬季经过长时间冻结的土地开始融解,地表土质变的疏松,而且表面没有植被的保护作用,遇有大风天气地表沙尘很容易被吹到空中,使得大气中沙尘粒子含量增大,从而引起气溶胶光学厚度增大。进入 6 月,夏季降水增加,由于雨水对气溶胶粒子具有明显的湿沉降作用,大气中的沙尘等气溶胶粒子随着雨水被移出大气,大气变得清洁;而且,夏季地表植被相对丰

富,由地表进入大气的气溶胶粒子减少。而 8 月光学厚度的增大,其原因可能是夏季炎热,地表受太阳辐射增温,使近地面大气层结不稳定,地面源垂直输送增强,地表沙尘粒子进入大气,形成浮沉、扬沙等沙尘天气,导致大气光学厚度的增大。9 月进入秋季,天气系统逐渐变得稳定,大风沙尘天气减少,气溶胶光学厚度进一步减小。而冬季由于大气环流相对稳定,同时气温低,地表冻结或被冰雪覆盖,地面沙尘粒子明显减少,即使大风也不易吹起沙尘,而且冷空气过境,也会对大气中的气溶胶有一个明显的稀释过程。

表 1 是由气象资料统计得到的沙尘日数的月分布,其中包括沙尘暴、扬沙和浮尘天气。对照图 1 可以看出,在光学厚度值比较大的月份内,都伴随着沙尘天气发生,通常沙尘天气的天数越多,光学厚度越大,反之亦然。这进一步证实,沙尘粒子是影响这些地区大气气溶胶光学厚度的主要因素。

表 1 各地沙尘日数分布

Table 1 Monthly dust days from June 2002 to May 2003														d
试验点	2002 年							2003 年						
	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月		
额济纳旗	3	1	5	2	3	1	2	0	2	1	5	5		
东胜	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	2	0		
锡林浩特	3	0	1	0	0	2	2	0	0	0	1	0		

3.2 大气气溶胶光学厚度日变化

内蒙古地区大气气溶胶光学厚度具有明显的日变化特征,如图 2 所示,主要有 4 种形式:1)早晨高傍晚低,即早晨或上午光学厚度值比较高,然后逐渐减小,整体呈下降趋势;2)早晨低傍晚高,整体呈上升趋势;3)早晚较低,中午出现峰值;4)日变化相对稳定,变化平缓。

对额济纳旗、东胜、锡林浩特三地气溶胶光学厚度的日变化形式作统计(表 2)。由结果可见,在 3 个测站中,早晨低傍晚高始终是出现频率最高的一种形式,占总天数的比例分别达到了 36 %、36 % 和 35 %,三地几乎相等。为了分析其原因,作另外两个统计。首先,由于沙尘粒子对气溶胶光学厚度影响很大,所以统计沙尘天气发生时,气溶胶光学厚度日变化的类型。结果发现:在沙尘日,额济纳旗光学厚度日变化有 56 % 属于早晨低傍晚高类型,在东胜更到达了 75 %,而锡林浩特因为资料太少,代表性不够好,未作比较。这表明,沙尘天气发生的优势频率是在午后到傍晚的时间段内,沙尘天气的发生万方数据

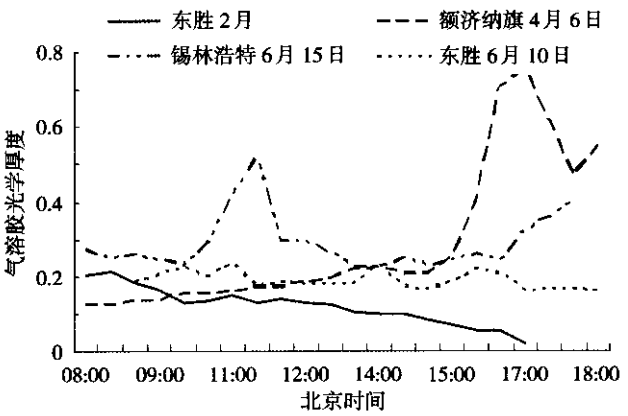


图 2 气溶胶光学厚度日变化

Fig. 2 Day-time variation patterns of AOT

必然会导致相应时段内气溶胶光学厚度的增大,这一结果与牛生杰^[19]对贺兰山地区历史气象资料的统计分析结果“约有 66 % 的沙尘暴主要发生在午后到傍晚的时段内”相吻合。另外,从季节分布来看,额济纳旗地区,早晨低傍晚高这种变化形式中有 64 % 是发生在秋季,而东胜是 85 %。这应该是由

于秋季大气相对稳定,悬浮在大气中的气溶胶粒子沉降作用比较缓慢,到下午时,大气中的气溶胶粒子积累到了一天中的最大值,从而引起气溶胶光学厚度增大。

表 2 中,变化平缓在各地中所占比例都是最小的。从当天气象资料来看,这种形式主要发生在晴

朗无云的天气,此时大气状况比较稳定,无沙尘现象发生。而且此时气溶胶光学厚度的值都比较小,说明大气比较清洁,局地大气中气溶胶含量及其理化性质比较稳定,可以作为背景大气气溶胶光学厚度的值。

表 2 各地 AOT 日变化形式出现天数及占总天数的比率

Table 2 Statistics of the day-time variation patterns of AOT d

观测站	总天数	早晨高傍晚低	早晨低傍晚高	早晚低中午高	变化平缓	其他形式
额济纳旗	116	29(25)	42(36)	28(24)	13(11)	4(3)
东胜	124	36(29)	45(36)	26(21)	17(14)	0(0)
锡林浩特	54	13(24)	19(35)	18(33)	2(4)	2(4)

注:总天数指获得有效观测数据的天数,括号中的数值为各种变化形式出现天数占总天数的比率(%)。

对于早晚低中午高这种形式,原因应该与中午边界层大气层结不稳定有关。这 3 个地区太阳辐射强烈,白天太阳辐射对地面加热,地面对底层大气加热,形成大气层结不稳定。这种不稳定经过一段时间的积累,在中午前后形成局地湍流,风卷起地面的沙尘悬浮在空气中,使气溶胶光学厚度值变大。当局地湍流强度很大时,甚至会发生浮尘、扬沙等天气。

早晨高傍晚低这种形式在总天数中所占比例也是很高的,它可能与早晨逆温层消散过程有关。早晨地面温度低,形成贴地逆温,对流弱,气溶胶粒子不易向上扩散,中午前后,随着逆温层的消散,垂直输送大大加强,使得近地面气溶胶粒子浓度降低。另一个可能就是人类活动的影响。早晨人为活动加强,各类排放源开始大量增加,如车辆、锅炉、炉灶等大量排放的烟尘,增加了空气的污染。

在各地的观测中,早晚高中午低这种日变化都只发生了 1~2 d,这与张军华^[20]西藏当雄地区在中午具有极小值的结果恰好相反。他认为这与中午气温升高,相对湿度变小,大气中吸湿性粒子干缩有关。由此可以推断,内蒙古地区影响大气气溶胶光学厚度的主要成分是非吸湿性的沙尘粒子。

本次试验观测条件要求为晴天无云,由于在扬沙、浮沉、沙尘暴天气出现时,天空常伴有云存在,所以实际发生沙尘天气的日数要多于观测到的资料,光学厚度也要大于计算结果。

3.3 大气气溶胶粒子谱分布

将各地年平均气溶胶光学厚度作为输入值,计算得到各地大气气溶胶粒子的平均谱分布如图 3 所示。由图可以看出,各地气溶胶的谱形基本一致,总万方数据

体上满足 Junge 谱。额济纳旗气溶胶粒子谱呈三峰型分布,第 1 峰出现在粒径 0.3 μm 处,而且在小于 0.3 μm 的区域内,粒子数浓度要小于其他两地,但相差保持在一个数量级内;第 2 峰出现在粒径 0.6 μm 处,第 3 峰出现在粒径 1.0 μm 处。在图中还可以看到,在粒径为 0.4 μm 时,额济纳旗的粒子数浓度已经超过了其他两地,并且始终保持最高,说明该地大粒子含量较高。东胜地区的粒子谱形与 Junge 谱最为接近,没有明显的峰值,而且粒径大于 1.0 μm 的粒子数明显少于其他两地。锡林浩特与额济纳旗的情况类似,也在粒径 0.3 μm、0.6 μm 和 1.0 μm 处出现峰值,不同的是,其粒子数浓度始终保持较高数值。谱分布的差异说明各地气溶胶粒子中各种成分的含量有所差别,这应该与各地的环境和气象条件密切相关。对比成天涛等^[21]利用激光粒谱仪在浑善达克沙漠实测的结果可以看出,在 0.1~2.0 μm 粒径范围内,本文的拟合结果与实测的气溶胶粒子谱型相似,但实测结果的峰值在 0.8 μm 处,这可能与源地气溶胶颗粒本身的谱分布特性不同有关。

不同天气条件下,气溶胶粒子谱分布也不同。以额济纳旗为例,分别计算了沙尘天气和晴天背景大气下的气溶胶粒子谱分布(图 4)。从图 4 可以看出,在沙尘暴、扬沙和晴天背景大气条件下,粒子谱形式基本一致,都符合 Junge 谱,在 0.3 μm 处有一明显峰值,在 0.6 μm 和 1.0 μm 处分别出现两个小峰值,但是在沙尘天气中,粒子数浓度要明显大于背景大气近一个量级。而且,不同强度的沙尘天气中,谱分布的差别也较大。沙尘暴天气中,粒径大于 0.2 μm 的大粒子和大于 1.0 μm 的巨粒子的数浓度

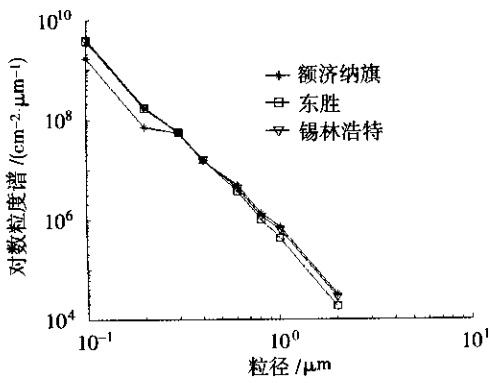


图 3 各地大气气溶胶粒子年平均谱分布
Fig. 3 Yearly averaged atmospheric aerosol size distributions

要远远高于扬沙天气条件下的粒子数浓度。这表明,在不同天气条件下进入大气的气溶胶粒子是有差别的,大粒子和巨粒子是对进入大气层的太阳光产生消光作用的主要气溶胶粒子区,是造成沙尘天气能见度低的主要原因。这与已有的理论计算结果也是一致的。半径在 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 的粒子在大气气溶胶的消光作用中贡献最大^[22]。

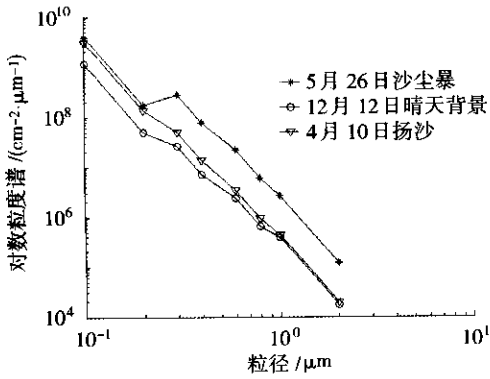


图 4 额济纳旗典型天气日平均谱分布
Fig. 4 Daily averaged atmospheric aerosol size distributions of typical weather in Ejin Qi

图 5 是各季节气溶胶粒子的平均谱分布。由图可以看出,各季节的谱形也都基本符合 Junge 谱,这一结果与高润祥^[23]在渤海西岸各季节所获得的反演结果基本一致。谱峰出现在粒径为 $0.3 \mu\text{m}$ 、 $0.6 \mu\text{m}$ 和 $1.0 \mu\text{m}$ 处,并且随着光学厚度从冬季到春季的增大,各季节粒子数浓度也相应的增大,春季大气中气溶胶粒子数浓度最大。而且在图 5a 中,由于这年冬季光学厚度出现了一个峰值,这直接导致粒子数浓度的升高,并超过了秋季。而图 5c 中的规律性不是很明显,原因是锡林浩特的观测数据太少,缺乏代表性。

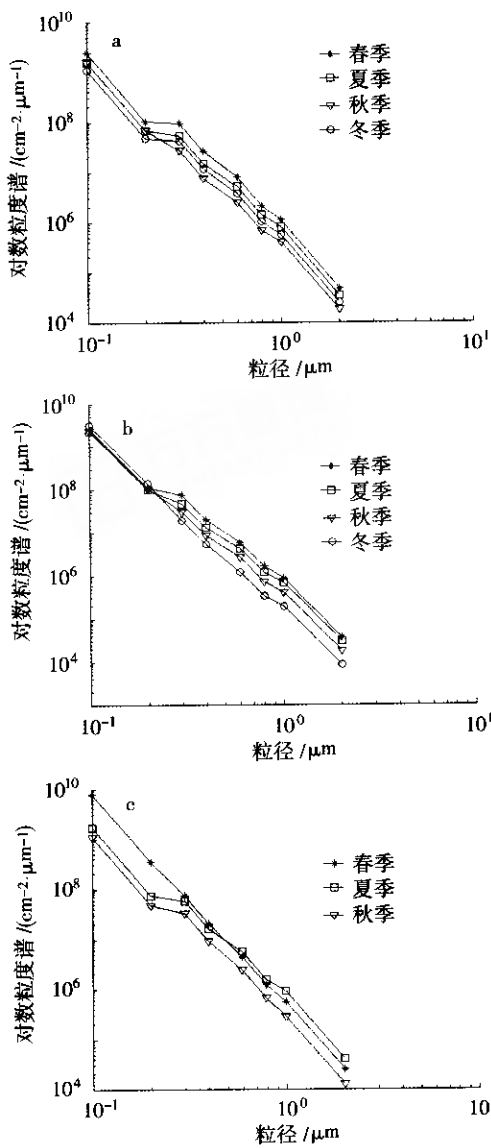


图 5 额济纳旗(a)、东胜(b)、锡林浩特(c)各季节大气气溶胶粒子平均谱分布
Fig. 5 Atmospheric aerosol size distributions in different seasons in Ejin Qi (a), Dongsheng (b) and Xilinhot (c)

4 结论

根据 CE-318 测得的太阳直接辐射数据,反演额济纳旗、东胜、锡林浩特三地大气气溶胶平均光学厚度和粒子谱分布,其反演结果基本代表了内蒙古中西部地区大气气溶胶的特点,通过比较分析,得出结论:

(1) 大气气溶胶光学厚度具有明显的时空变化,春季最大,冬季最小,主要是受沙尘天气的影响,以 440 nm 通道为例,平均最大值可达 0.78 ,最小值为 0.13 。3 个观测点中,额济纳旗的光学厚度略大

于锡林浩特,东胜最小。

(2)大气气溶胶光学厚度主要有四种日变化形式:1)早晨高傍晚低,整体呈下降趋势;2)早晨低傍晚高,整体呈上升趋势;3)早晚较低,中午出现峰值;4)日变化相对稳定,变化平缓。

(3)各地大气气溶胶粒子谱分布基本符合Junge谱,在粒径为0.3 μm、0.6 μm和1.0 μm处出现峰值。通过比较,额济纳旗地区在粒径小于0.4 μm的区域内粒子数浓度小于其他两地,而粒径大于0.4 μm的区域内粒子数浓度最大。总体上,随着光学厚度的增大,春季是气溶胶粒子数浓度最大的季节,夏秋季次之,冬季最小,但相差不超过一个量级。

(4)气溶胶粒子谱分布在不同天气条件下有很大差异,在沙尘暴天气中,粒径在0.1~1.0 μm的大粒子以及粒径大于1.0 μm的巨粒子数有明显的增加,粒子数浓度要比晴天背景大气大了约一个量级。

参考文献：

[1] 王明星,张仁健.大气气溶胶研究的前沿问题[J].气候与环境研究,2001,6(1):119-124.

[2] 肖辉.东亚地区沙尘气溶胶影响硫酸盐形成的模式评估[J].大气科学,1998,22(3):343-353.

[3] 李成才,毛节泰,刘启汉,等.利用MODIS研究中国东部气溶胶光学厚度的分布特点和季节变化特征[J].科学通报,2003,48(19):2094-2100.

[4] 毛节泰,李成才,张军华,等.MODIS卫星遥感北京地区气溶胶光学厚度及与地面光度计遥感的对比[J].应用气象学报,2002,13(增刊):127-135.

[5] 牛生杰,孙继明,桑建人.贺兰山地区沙尘暴发生频次的变化趋势[J].中国沙漠,2000,20(1):55-58.

[6] 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[J].大气科学,2001,25(2):243-252.

[7] 牛生杰,孙继明,陈跃,等.贺兰山地区沙尘气溶胶质量浓度的

观测分析[J].高原气象,2001,20(1):82-87.

[8] 牛生杰,章澄昌,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.

[9] 牛生杰,章澄昌.贺兰山地区沙尘气溶胶化学组分及富集因子分析[J].中国沙漠,2000,20(3):264-268.

[10] 张文煜,辛金元,袁九毅,等.腾格里沙漠气溶胶光学厚度多波段遥感研究[J].高原气象,2003,22(6):613-617.

[11] 辛金元,张文煜,袁九毅,等.消光法反演腾格里沙漠地区沙尘气溶胶谱分布[J].高原气象,2004,23(5):654-659.

[12] 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.

[13] 王永生.大气物理学[M].北京:气象出版社,1987:440.

[14] King M D,Byrne D M,Herman B M,et al. Aerosol size distribution obtained by inversion of spectral optical depth measurement[J].J Atoms Sci,1978,35(11):2153-2167.

[15] 李放,吕达仁.珠穆朗玛峰地区大气气溶胶光学特性[J].大气科学,1995,19(6):755-763.

[16] Vitale V,Tomasi C,Lupi A,et al. Retrieval of columnar aerosol size distributions and radiative-forcing evaluations from sun-photometric measurements taken during the CLEARCOLUMN(ACE2) experiment[J].Atmos Environ,2000,34(29/30):5095-5105.

[17] Heintzenberg J,Muller H,Quenzel H,et al. Information content of optical data with respect to aerosol properties: numerical studies with a randomized minimization-search-technique inversion algorithm[J].Applied Optics,1981,20(8):1308-1315.

[18] McTainsh G H,Lynch A W,Tews E K. Climatic controls upon dust storm occurrence in eastern Australia[J].Arid Environments,1998,39(3):457-466.

[19] 牛生杰.沙尘气溶胶微结构及其对降水影响的观测和数值模拟研究[D].南京:南京气象学院大气科学系,2004.

[20] 张军华.地面和卫星遥感中国地区气溶胶光学特性[D].北京:北京大学地球物理系,2000.

[21] 成天涛,吕达仁,陈洪滨,等.浑善达克沙地沙尘气溶胶的粒径特征[J].大气科学,2005,29(1):147-153.

[22] 章澄昌,周文贤.大气气溶胶教程[M].北京:气象出版社,1995:328.

[23] 高润祥.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.