

文章编号: 1007-4619(2005)04-0429-09

中国北方地区春季气溶胶光学特性地基遥感研究

夏祥鳌¹, 王普才¹, 陈洪滨¹, Philippe Goulob², 章文星¹

(1. 中国科学院 大气物理研究所中层大气与遥感理论和技术研究部, 北京 100029;

2. Laboratoire d'Optique Atmosphérique Université des Sciences et Technologies de Lille 法国)

摘 要: 基于中国北方地区地基太阳直接 散射辐射计观测, 分析了 2001 年春季气溶胶光学厚度、尺度和吸收特性。沙尘期间, 气溶胶光学厚度显著升高, 而尺度上升, 粗粒子浓度显著增加, 大气气溶胶表现出中性或异常消光特征。除沙尘活动之外, 中国华北地区人为排放也是导致气溶胶光学厚度偏高的一个重要原因。中国沙尘源区气溶胶单次散射反照率小于以往观测和模式结果。北京和香港两地气溶胶光学厚度、Angstrom 指数和尺度谱基本相似, 说明华北地区人为排放与沙尘活动类似, 也表现出区域尺度的特点。由于沙尘气溶胶与人为排放气溶胶相比, 折射指数实部偏大、虚部偏小, 从而北京地区沙尘期间单次散射反照率明显大于非沙尘期间, 特别是在近红外波段, 说明沙尘活动不仅可以通过增加气溶胶光学厚度, 同时也通过改变气溶胶物理、辐射特性来影响下游地区的气溶胶辐射强迫。

关键词: 气溶胶; 辐射计; 遥感**中图分类号:** P407/TP79 **文献标识码:** A

1 前 言

气溶胶仍然是当前气候模拟和未来气候预测中一个极不确定因素, 原因在于目前对气溶胶的宏、微观特性及其时空变化还缺乏充分了解。因此, 基于理论和实验研究, 获取这些气溶胶信息十分必要。尽管气溶胶时、空差异很大, 但大体上可将气溶胶分为几大类; 另外, 对这些气溶胶类型的地域分布也有一定的了解, 因此可以通过在一些典型地区, 建立长期的地面监测站网, 获取这些气溶胶类型的物理、辐射特性, 建立适合不同区域、不同类型的气溶胶动态模式, 这对于气溶胶的卫星遥感和辐射强迫研究都是十分有意义的。地基太阳光度计遥感尽管在空间代表性上有一定缺陷, 但其丰富的信息含量, 相对比较成熟的反演理论使其在气溶胶研究中具有不可替代的作用。近年来, 地基太阳光度计遥感和观测反演原理等方面都取得了许多成果, 包括提出了联合太阳直接和散射辐射反演气溶胶特性的思路; 提出了同时反演气溶胶尺度谱、折射指数和地表反照

率的方法; 开发了适合于反演算法的快速准确的辐射传输理论和反演模式等^[1-4], 另外通过一些外场综合观测试验的实施和监测网络的建设, 也积累了大量资料^[5,6]。

中国北方地区春季不仅受频繁活动的沙尘天气影响, 人为排放也是中国北方地区气溶胶的一个重要来源。气候变化对中国气溶胶的产生、输送有重要影响, 同时气溶胶通过其辐射强迫对气候也产生了一定的反馈作用。研究表明中国北方地区近年来的持续干旱可能与气溶胶的吸收有关^[7]。而中国四川盆地近 40 年来的变冷趋势可能与该地区硫酸盐浓度增加有关^[8]。鉴于中国气溶胶在气候变化中所扮演的重要角色, 而目前中国气溶胶的长期观测资料仍然十分缺乏, 因此加强气溶胶的长期监测, 增进对气溶胶特性的认识, 这对于研究中国气溶胶的辐射强迫及其环境影响都是十分必要的。本文试图通过分析 2001 年春季中国北方地区四站点太阳辐射计资料, 给出中国北方地区春季气溶胶的光学厚度、尺度和吸收特征值; 并初步分析中国华北地区沙尘和人为排放气溶胶对大气环境的影响。

收稿日期: 2003-12-18; **修订日期:** 2004-06-01

基金项目: 本工作得到基金委海外学者合作基金项目(40028503), 基金项目(4052012007, 40305002)和中国科学院大气物理研究所创新重大项目支持。

©1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

作者简介: 夏祥鳌(1973—), 男, 助理研究员。湖南南县人, 2002年毕业于中国科学院大气物理研究所获理学博士学位。现主要从事气溶胶特性、辐射强迫地基和空基遥感研究。

2 观测和分析方法介绍

近几年中国北方地区沙尘活动频繁发生。2001年春季,在亚洲气溶胶计划、中日沙尘输送等国际项目的支持和推动下,在中国北方地区设立了4个气溶胶监测站点:敦煌、内蒙古、北京和香河(表1)。从所处地理位置来看,敦煌和内蒙古以沙尘气溶胶为主,香河可代表乡村气溶胶类型,而北京受人排放的影响最大。观测所用仪器是法国生产的Cimel 380型全自动太阳直接、散射辐射计,该仪器工作的7个中心波长分别是:340, 380, 440, 670, 870, 940, 1120nm,关于仪器介绍及标定参见文献[9]。根据太阳直接辐射可获得6个波段的气溶胶光学厚度,观测精度估计为0.01—0.02^[9](940nm用来反演水汽总量);基于太阳直接和散射辐射,采用AERONET(国际气溶胶监测网)统一的反演算法,可以获得气溶胶尺度谱、折射指数、不对称因子以及单次散射反照率等。

表1 观测站点位置、海拔高度、地表状况以及观测时段

Table 1 Site location, altitude, surface condition, and observation duration

	敦煌(DH)	内蒙古(M)	北京(BJ)	香河(XH)
经、纬度, 海拔/m	40.0, 94.8, 1300	42.7, 115.9, 1342	39.9, 116.4, 92	39.8, 116.9, 36
观测时段	4月7日— 5月4日	4月17日— 5月10日	3月7日— 5月16日	3月20日— 4月17日
地表状况	沙漠	沙化草地	城市	乡村

AERONET反演算法由正反两部分组成:正问题是改进的多次散射辐射传输模式,所依据的基本原理是多次散射分量和辐射通量相对于单次散射分量而言对相函数展开误差不敏感,而相函数展开误差主要影响单次散射分量,因此可以利用单次散射分量的解析解修正相函数展开误差带来的散射辐射强度计算误差,利用该原理便可以在减少相函数展开项数,增加辐射传输计算效率的同时,又能获得足够精度的散射辐射强度计算结果;第二部分是线性约束反演算法,其基本数学表达式如下:

$$g = A \cdot f + \epsilon$$

式中 g 是由各波段、各角度太阳散射辐射强度观测组成的向量,而 f 为待反演的气溶胶特性, A 为气溶胶散射核函数组成的系数矩阵, ϵ 为观测误差。上述线性系统的最简单的数学处理方法是通过对核矩

阵求逆得到其解

$$f = A^{-1} \cdot g$$

另外也可通过将 $\sum_i \epsilon_i^2$ 最小化得到其解,如最小二乘法、最大似然法等,其共同点是利用这些方法得到统计意义上的最优解。但由于各波段以及各观测角度散射核函数之间存在相关,导致上述线性系统接近奇异,因此导致微小的观测误差将导致难以接受的反演误差。在AERONET反演算法中加入了先验物理约束条件,如反演量非负及二次线性光滑等,另外不同观测量本身观测精度也在算法中运用统计方式加以考虑^[10]。敏感性试验结果表明在0.1—7 μ m之间尺度谱反演误差在10%—25%以内,而两端反演精度显著上升,误差在80%—100%;气溶胶折射指数实部误差在0.04左右,虚部误差在30%—50%以内,而气溶胶单次散射反照率误差在0.03以内。AERONET采用统一的观测仪器与反演算法在全球范围开展长期气溶胶特性遥感观测研究,在数据采集和处理上不存在地区差异,因此处理结果也没有区域差异,因而中国地区AERONET反演精度也在上述范围之内。应该指出的气溶胶地基遥感受自身信息量局限,反演精度有待进一步验证,特别是气溶胶折射指数、单次散射反照率等特性,但从一些国际大型外场观测实验中飞机采样分析与AERONET反演结果对比分析来看,AERONET反演精度基本保持在敏感性试验误差范围内。

2001年春季中国北方地区共发生4次大范围的沙尘天气,分别出现在3月2日—6日、3月21日—26日、4月4日—14日、4月29日—5月4日,观测和模式模拟结果表明这些沙尘天气的沙尘源区主要位于蒙古高原的戈壁地区,另外内蒙中、东部地区的浑善达克和科尔沁沙地也是主要的沙尘源区^[11,12]。除这4次大范围沙尘活动之外,还有一些局部沙尘天气发生。

3 气溶胶光学厚度 (τ_a) 与 Angstrom 指数 (α)

图1给出了四站点 $\tau_{a(440nm)}$ 和 α 的日平均变化特征。内蒙古站仅记录了5月初的沙尘活动, $\tau_{a(440nm)}$ 的峰值在1.0左右,对应的 α 接近0,说明沙尘活动导致大量粗粒子被输送到大气中,即使沙尘活动结束, α 仍然在随后一段时间内继续维持比较低的水平,而在沙尘活动之前,如第113和114天,

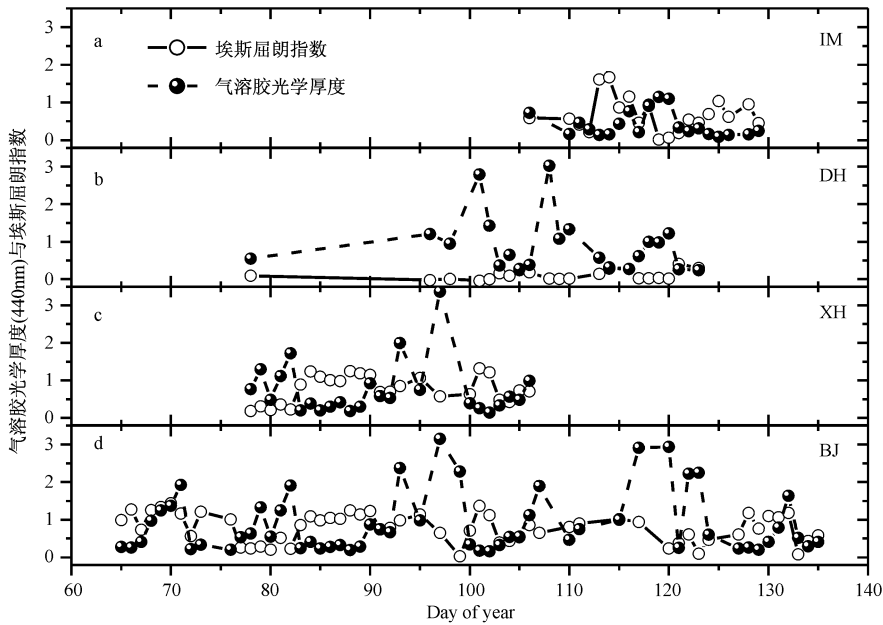


图 1 内蒙 (M), 敦煌 (DH), 香河 (XH), 北京 (BJ) 气溶胶光学厚度 (440nm) 和 Angstrom 指数日平均序列图

Fig 1 Time series of daily aerosol optical depth and Angstrom parameter in M, DH, XH, BJ

内蒙古站气溶胶的 α 接近或超过了 1.5, 说明沙尘活动前内蒙古站气溶胶主要是以细粒子为主, 需指出的是第 116 和 118 天的观测显示, 尽管 $\tau_{a(440\text{nm})}$ 接近 1.0, 但对应的 α 却维持在 0.9 左右, 结合前面观测到较高的 α , 说明内蒙古站除受沙尘气溶胶影响外, 也可能受到人为排放的干扰 (因仪器位于一小乡镇中)。敦煌站 τ_a 有 3 个高值区, 分别是 96–102, 108–111, 117–120。前两次高值区, $\tau_{a(440\text{nm})}$ 峰值达到 3.0 左右, 对应于该高值区的 α 接近 0, 甚至小于 0, 表明在沙尘活动期间, 大气气溶胶呈现出中性甚至反常消光特征, 王栋梁等在塔里木盆地也观测到类似现象^[13]。5 月初发生在敦煌地区的沙尘天气强度比前两次弱, τ_a 与同期内蒙古的观测大体相当。敦煌地区气溶胶 α 一直保持在 0.5 以下, 说明即使没有沙尘活动, 敦煌地区大气中粗粒子对消光的贡献仍然超过细粒子。

北京的观测记录了 6 个气溶胶高值区, 分别是 68–71, 79–82, 93–99, 105–107, 115–123 和 132, 从这些高值区对应的 α 以及地面气象观测来看, 这些高值区并非全由沙尘活动引起, 如观测前期和后期尽管 $\tau_{a(440\text{nm})}$ 超过了 1.5, 但对应的 α 却在 1.0 以上, 地面气象观测也未曾记录有沙尘, 而是霾、烟或轻雾。这表明在这些天气条件下, 人为排放也将导致 τ_a 高值。从地面气象观测资料来看, 这些可能导致高 τ_a 的天气现象往往交替出现, 2001 年“五一”期间北京

地区的天气现象便是如此。统计结果表明, 观测期间内这些天气现象出现次数依次为: 烟 (26)、霾 (11)、轻雾 (40), 沙尘天气 (包括扬沙和浮尘) (47), 这表明北京地区气溶胶的人为排放与沙尘天气对气溶胶光学厚度的贡献具有同等重要的地位。Takemura 的模拟结果也表明东亚地区春季沙尘活动和人为排放对气溶胶光学厚度的贡献大体相当^[14]。

香河 τ_a 高值区分别出现在 79–82, 93–99, 与北京有很好的对应关系, 另外, 两站在同期观测中都存在很好的线性对等相关。图 2 为两站 $\tau_{a(440\text{nm})}$ 和 α 日平均值的线性相关关系图, 两站 $\tau_{a(440\text{nm})}$ 的均方根偏差为 0.13, 线性偏差为 0.014, 对于 α , 均方根偏差和线性偏差分别为 0.089 和 0.0082。北京和香河的气溶胶光学厚度以及尺度谱相似, 这说明中国华北地区不仅受到区域尺度沙尘活动的影响, 人为污染也同样表现在区域尺度上。

4 气溶胶体积尺度谱 ($v(r)$)

图 3 给出了四站 $v(r)$ 平均 (为比较起见, 图中所有 $v(r)$ 均用气溶胶光学厚度进行标准化), 其中除敦煌外, $v(r)$ 根据 α 分为两类 (阈值设为 0.6, $\alpha > 0.6$ 代表非沙尘期间, 而 $\alpha < 0.6$ 则表示沙尘期间的观测)。从图 3 可见, $v(r)$ 可由两个对数正态分布描述:

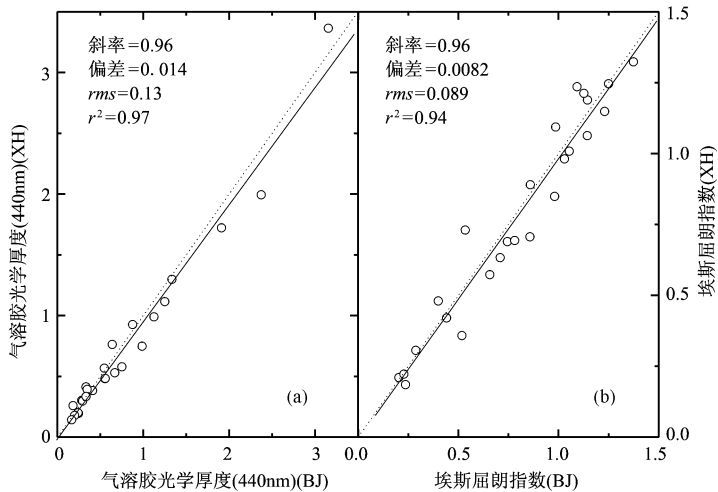


图 2 北京和香河气溶胶光学厚度 (440nm)

(a)和 Angstrom 指数 (b)日平均值线性关系图 (包括斜率、偏差、平方根偏差和解释方差)。图中虚线表示 1:1 对应关系

Fig 2 Linear analysis of daily aerosol optical depth angstrom parameter between BJ and XH. Also included are slopes bias rms and r^2

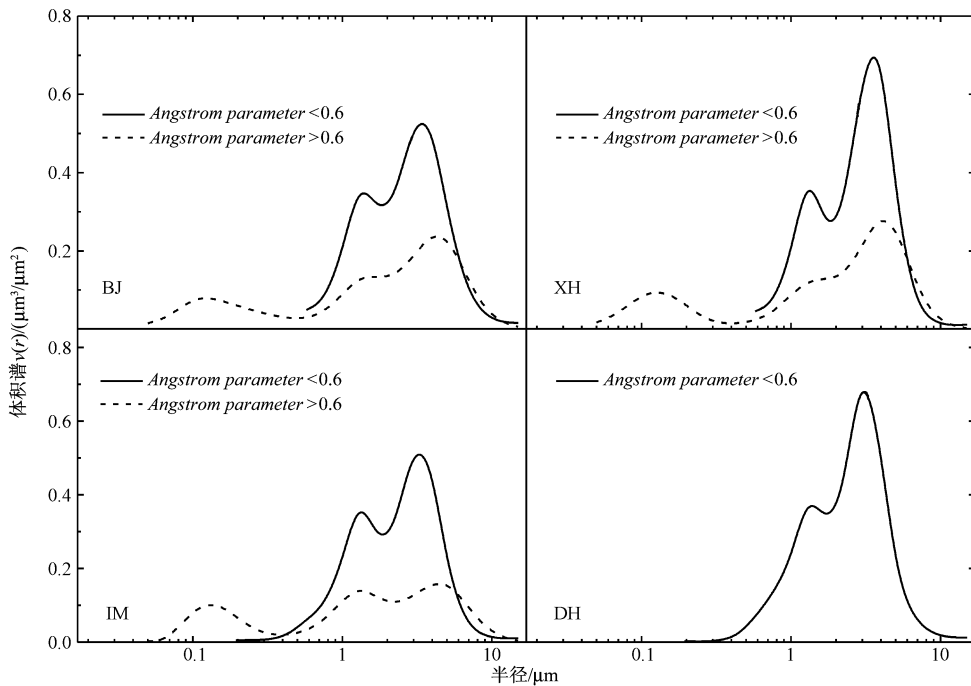


图 3 内蒙古 (M), 敦煌 (DH), 香河 (XH), 北京 (BJ) 对应于 Angstrom 指数大于 0.6 和小于 0.6 的体积尺度谱平均分布特征, 为对比起见, 所有尺度谱均用其对应气溶胶光学厚度进行了标准化

Fig 3 Volume size distributions normalized by aerosol optical depth corresponding to Angstrom parameter less and greater than 0.6 in four sites

$$v(r) = \frac{dV(r)}{d \ln r} = \sum_{i=1}^2 \frac{C_{v,i}}{\sqrt{2\pi} \sigma_i} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln r_{i,c})^2}{\sigma_i^2}\right]$$

式中参数分别是体积尺度分布函数 $v(r)$; 模态半径 r_i ; 标准偏差 σ 和体积浓度 C_v 。在 $v(r)$ 基础上, 通过一些简单的积分运算, 可以获得刻画这两个对数正态分布的参数。其中细粒子模态半径在 $0.15\mu\text{m}$

左右, 标准偏差约为 0.46, 三站差别很小 (敦煌没有反演值), 但对于粗粒子模态, 北京和香河站模态半径约为 $3.01\mu\text{m}$, 而敦煌和内蒙古站的则相对较小, 约 $2.20\mu\text{m}$, 标准偏差在 0.57—0.72 之间, 敦煌最小, 内蒙古最大; 北京和香河差别不大。沙尘和非沙尘期间模态半径和标准偏差没有显著变化, 差别主

要体现在粗粒子体积浓度上。沙尘活动期间,在气溶胶光学厚度相同前提下,约高于非沙尘期间 2—4 倍的粗粒子被输送到大气中。在其他沙尘源区如撒哈拉或中东地区,气溶胶粗粒子模态与敦煌和内蒙古地区基本相当^[15]。在非沙尘期间北京和香河地区粗粒子体积浓度大约是细粒子体积浓度的 3 倍,而在其他城市地区,如美国马里兰或法国巴黎近郊,所观测到这一比例仅在 0.5 左右^[15],这说明在中国华北地区春季,即使在非沙尘活动期间,大气中粗粒子浓度也是比较高的。

上节已经指出北京地区气溶胶来源十分复杂,既有扬沙的贡献,同时也有人为排放的贡献。对应于不同天气条件, $v(r)$ 也表现出各自不同的特征。图 4 给出了北京地区不同天气条件下的 $v(r)$ 。其中 3 月 29 日 $\tau_{a(440nm)}$ 为 0.19,可代表北京地区洁净

背景特征;4 月 17 日天气记录为霾,对应的尺度谱相对形状与背景条件下基本相似,但粗、细粒子浓度均比背景条件高一个量级;5 月 13 日天气现象为轻雾,对应的细粒子模态体积浓度与背景条件下相比,高一个量级,但粗粒子体积浓度仅是背景条件下的 5 倍,且细粒子体积浓度达到粗粒子体积浓度的 70% 左右,而 4 月 17 日粗粒子体积浓度是细粒子体积浓度的 2.3 倍,这说明 5 月 13 日人为排放量及对气溶胶总浓度的贡献均明显高于 4 月 17 日;5 月 4 日北京地区出现沙尘天气,从 $v(r)$ 来看,粗粒子浓度高出背景条件 50 倍,而细粒子浓度仅为 5 月 13 的一半左右,这说明沙尘活动的主要作用是导致大量的粗粒子被输送到大气中。上节表明,北京和香河呈现出类似的气溶胶光学厚度特征,从 $v(r)$ 和尺度谱模态参数来看,两站也十分接近。

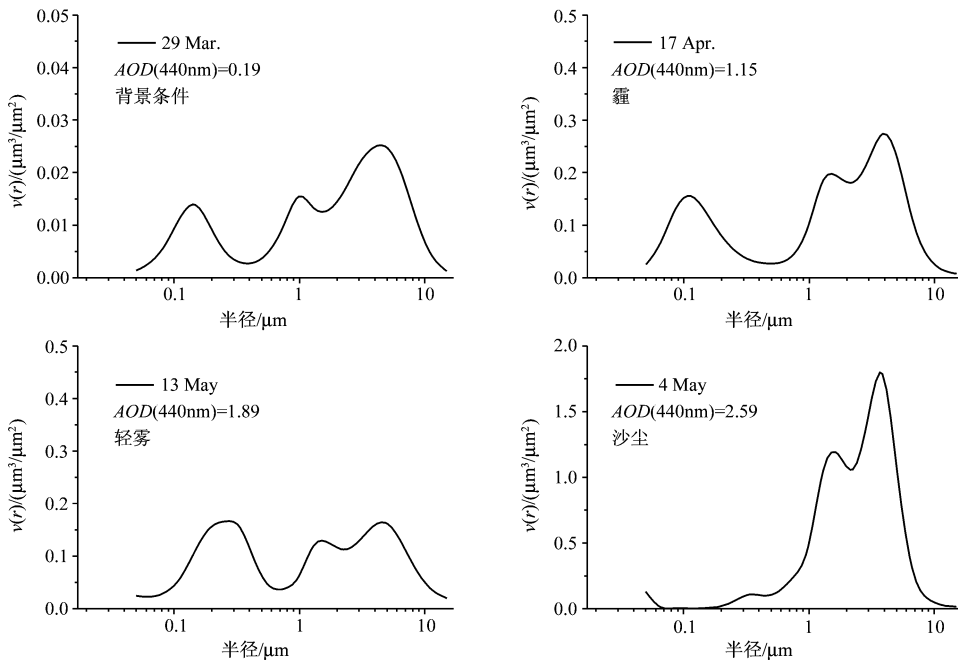


图 4 北京地区不同天气条件下气溶胶体积尺度谱特征,同时给出了气溶胶光学厚度和天气现象观测

Fig 4 Volume size distributions under different weather conditions also included are corresponding aerosol optical depth and weather record

5 折射指数 (n - ik) 与单次散射反照率 (ω)

表 2 给出了敦煌地区 ω 观测结果,从中可以看到敦煌地区 ω 随波长上升而增加,这是由于敦煌地区气溶胶以粗粒子散射为主,加上 k 值随波长增加而减小。敦煌地区气溶胶 $k_{(440nm)}$ 平均约为 0.0013 (范围: 0.0005—0.003),而在 1020nm, k 平均仅约为 0.0008

(范围: 0.0005—0.002),这仅是以往模式值的 $1/8—1/10$ ^[16],与王栋梁等在塔里木的地基太阳光度计遥感结果也有比较大的差别^[13],但与撒哈拉地区地基和空基遥感结果大体相当^[17]。敦煌地区气溶胶 870nm 和 1020nm 折射指数实部平均约为 1.58 (范围: 1.54—1.59),这略高于其他沙尘源区的观测^[15],但差别在观测误差范围内。内蒙古站气溶胶折射指数和单次散射反照率与敦煌站差别不大。

北京地区 n 值除 440nm 外与其他城市的反演

表 2 敦煌和北京地区气溶胶单次散射反照率反演结果

Table 2 Single-scattering albedo retrievals in DH and BJ

波段 /nm	敦煌				北京			
	440	670	870	1020	440	670	870	1020
平均	0.94	0.97	0.97	0.98	0.91	0.92	0.91	0.92
标准偏差	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
最大	0.97	0.98	0.98	0.99	0.95	0.98	0.99	0.99
最小	0.86	0.93	0.94	0.95	0.87	0.86	0.82	0.82

结果大体相当,但 k 却表现出很大的不同。北京地区 k 平均为 0.005,与波长基本无关,只是 440nm 和 670nm k 变化范围要小于 870nm 和 1020nm。北京气溶胶 k 值仅是其他城市如墨西哥城 (0.014 ± 0.006) 和巴黎近郊 (0.009 ± 0.004) 的 35%—50%^[15],但由于气溶胶尺度的不同,导致北京地区春季 ω 表现出独特特征。北京地区气溶胶 ω 大体在 0.91 左右(表 2),与波长基本无关。该值远大于美国马里兰和巴黎近郊的观测,但在 440nm 处的 ω 与墨西哥城和 Kaashidhoo 气候观测站 (KCO) 的观测结果基本相同^[16,18],不同的是 ω 随波长的变化特征,北京地区 ω 平均值基本不随波长发生变化,仅变化范围有所不同,而其他城市地区 ω 随波长增加而下降。这是由于北京地区春季受频繁发生的沙尘天气的影响,大粒子含量比较高。需指出的是 ω 高值主要出现在沙尘天气条件下。表 3 统计了 α 大于和小于 0.6 时的 ω 值。沙尘期间,气溶胶 n 值有所增加 (0.04—0.1),而虚部却下降 50% 以上,均高于反演误差。沙尘期间 ω 随波长增加而增加,这类类似于敦煌和内蒙古的反演结果,唯一的区别是北京地区沙尘期间 ω 比敦煌和内蒙古的大约小 0.02,表明沙尘期间北京地区仍然受人为排放的影响。相反,在非沙尘期间, ω 随波长增加而减小,表明此时细粒子的消光贡献占主导地位。由于沙尘期间与非沙尘期间气溶胶 ω 的这种随波长相反的变化趋势,导致在 1020nm 处 ω 的差别达 0.07,远高于反演误差,在 670nm 和 870nm 处差别分别约

0.05 和 0.06,均超过了反演误差,而在 440nm 处 ω 的差别不明显。导致这一现象的主要原因有以下两点:一是沙尘天气导致大量沙尘气溶胶被输送到大气中,而沙尘气溶胶与人为排放气溶胶相比, n 偏大,而 k 较小,这种差别在长波段表现得尤为明显,从而沙尘气溶胶的 ω 比人为排放气溶胶大(在同样尺度谱条件下);另外,在相同折射指数,不同尺度谱条件下(北京地区沙尘和非沙尘期间的尺度谱)(图 3),计算得到的 $\omega_{(1020\text{nm})}$ 差别不大,这说明尺度谱对 $\omega_{(1020\text{nm})}$ 的影响很小。Bergin 等根据 1999 年夏季地面采样资料,分析得到的气溶胶 $\omega_{(550\text{nm})}$ 为 0.81(标准偏差:0.08),由于地面采样分析均是在相对湿度 40% 左右进行,因此如果考虑实际大气相对湿度的变化,这一观测结果与实际气溶胶 ω 之间会存在一定差别^[19]。邱金桓等基于地基太阳辐射计和激光雷达资料,分析了 1988 年春季一次沙尘过程前后大气气溶胶 k 和 ω 的变化特征,发现大气气溶胶 k 和 ω 发生了明显变化, k 从沙尘天气过程以前的 0.021 减小到沙尘过程中的 0.004,对应的 $\omega_{(650\text{nm})}$ 从过程以前的 0.72 上升到 0.85^[20]。尽管邱金桓等的结果在量值上高于 AERONET 观测,但随着沙尘粒子的输入,导致大气中气溶胶 k 下降、 ω 上升的这种趋势是吻合的。Takemura 的模拟结果显示中国西部春季沙尘源区 $\omega_{(550\text{nm})}$ 平均在 0.88—0.90 左右,而华北地区 ω 大约为 0.90^[14]。显然,这些气溶胶单次散射反照率的观测和模拟值之间差别还比较大。但考虑到观测和模拟之间时、空上的差异,以及观测和模拟方法本身也存在一定误差,因此这些差别的存在是可以理解的。特别应当指出的是北京地区近年来能源结构发生了显著变化,清洁能源(天然气等)代替了过去的燃煤,因此黑碳(大气中主要的气溶胶吸收成分)含量可能有较明显的下降(这需要地面气溶胶化学成分分析资料的验证),这可能是导致 2001 年北京地区折射指数观测结果明显低于以往观测结果的原因所在。

表 3 沙尘和非沙尘期间北京地区气溶胶折射指数和单次散射反照率的变化特征

Table 3 Refractive index and single-scattering albedo during dusty and non-dusty period in BJ

波段 /nm		440	670	870	1020
		$\alpha < 0.6$	n	1.42 ± 0.11	1.49 ± 0.08
	k	0.0028 ± 0.0010	0.0020 ± 0.0010	0.0020 ± 0.0012	0.0021 ± 0.0013
	ω	0.92 ± 0.02	0.95 ± 0.02	0.95 ± 0.02	0.96 ± 0.02
$\alpha > 0.6$	n	1.38 ± 0.08	1.42 ± 0.06	1.45 ± 0.05	1.47 ± 0.04
	k	0.0031 ± 0.0016	0.0034 ± 0.0021	0.0032 ± 0.0021	0.0031 ± 0.0021
	ω	0.91 ± 0.02	0.90 ± 0.03	0.89 ± 0.04	0.89 ± 0.04

6 沙尘天气过程中气溶胶特性变化特征

2001年 4 月 29 日至 5 月 4 日中国发生了一次大范围沙尘天气,沙尘活动从塔里木盆地、蒙古高原戈壁地区向东推进,5 月 1 日影响北京地区,随后 5 天北京地区环境监测结果显示为中度到重度颗粒物污染,5 月 5 日,北京地区污染指数高达 500。图 5 给出了北京、敦煌和内蒙古沙尘天气期间尺度谱反演结果。很明显,沙尘天气期间,粗粒子浓度上升幅度均超过一个量级。相比而言,在相同气溶胶光学厚度条件下,敦煌地区粗粒子浓度最大,内蒙古其次,而北京最小,即使在背景条件下,也是如此,这说明由西向东,沙尘粒子所占比重逐渐下降。敦煌和内蒙古地区沙尘期间 n 、 k 以及 ω 与沙尘前后的差别不大, ω 接近表 2 给出的平均状况。而沙尘前后北京地区气溶胶辐射特性发生了明显变化,气溶胶折射指数实部上升,虚部下降,而单次散射反照率明显下降(图 6)。沙尘气溶胶的输入导致北京地区气溶胶折射指数虚部从之前的 0.008 下降到 0.003 左右,而实部从之前的 1.45 以下上升到 1.50 以上,单次散射反照率(440nm 除外)也从 0.90 以下上升到 0.96 左右,这些变化均超过了相应参数的反演误差。 $\omega_{(440nm)}$ 除受折射指数影响之外,粒子尺度也是一个主要的影响因素。较大的沙尘粒子将减弱粒子散射能力,部分抵消粒子折射指数对 $\omega_{(440nm)}$ 的影响,从而 $\omega_{(440nm)}$ 变化远不及其他

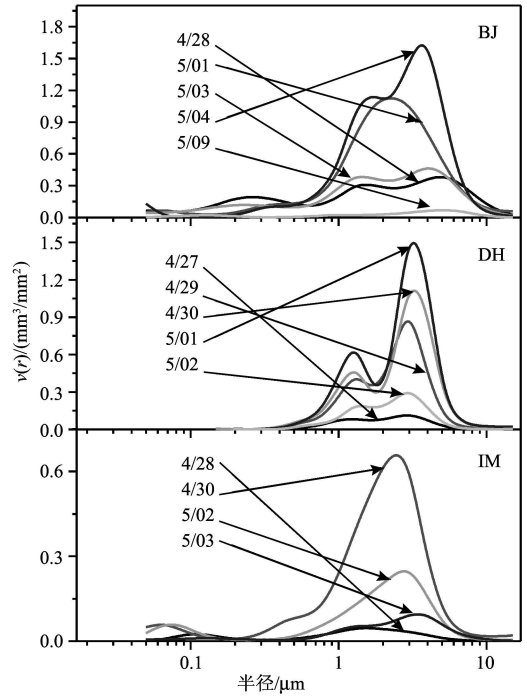
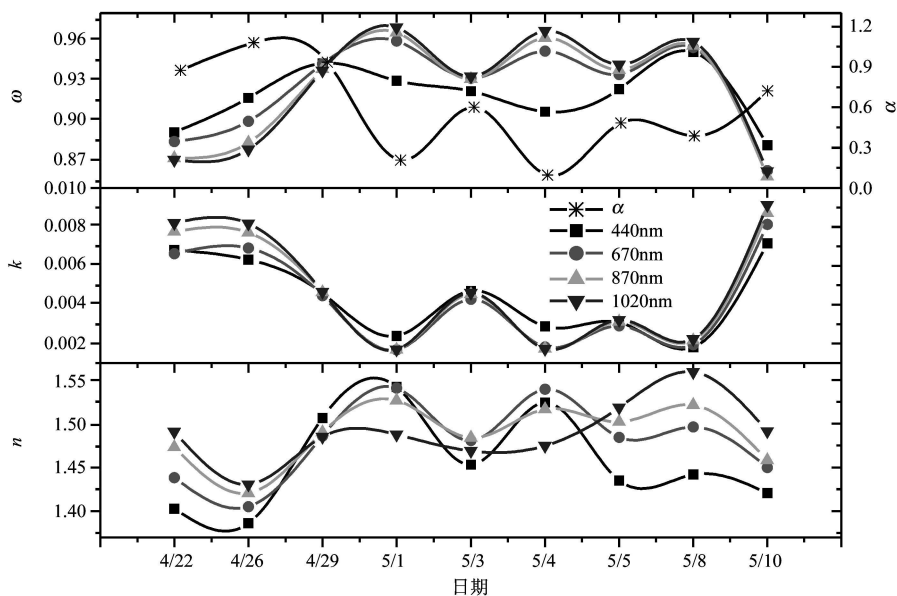


图 5 5 月 1 日前后北京 (BJ)、敦煌 (DH)、内蒙古 (M) 气溶胶尺度谱反演结果

Fig 5 Volume size distributions in 1 May in BJ, DH, and IM

波段明显。另外,沙尘活动之前或之后,气溶胶 ω 随波长增加而下降,而在沙尘期间,却表现出相反的变化趋势。这次沙尘天气观测结果均印证了上节统计结果。观测事实表明,气溶胶 ω 也可作为分析北京地区气溶胶来源的一个参考。



ω : 单次散射反照率; k : 折射指数虚部; n : 折射指数实部; α : 埃斯屈朗指数

图 6 5 月 1 日前后北京地区气溶胶折射指数 ($n - ik$) 和单次散射反照率 (ω) 反演结果

Fig 6 Refractive index and single-scattering albedo in 1 May

7 气溶胶直接辐射强迫

北京地区沙尘和非沙尘期间气溶胶的 τ_a 和 ω 存在明显差别,而 ω 也是影响气溶胶辐射强迫的一个关键因素。以下结合辐射传输模式 SBDART 来分析 ω 对气溶胶直接辐射强迫效率的影响。本文中所指气溶胶直接辐射强迫为瞬时强迫,即由于气溶胶的存在导致的地表、大气顶和大气短波和长波辐射通量的

表 4 沙尘和非沙尘期间气溶胶直接辐射强迫效率日平均值及标准偏差 / (W/m^2)

Table 4 Aerosol direct radiative forcing efficiency during dusty and non-dusty period / (W/m^2)

	非沙尘期间			沙尘期间		
	地表	大气顶	大气	地表	大气顶	大气
海洋表面	-82.4 ± 10.5	-38.4 ± 8.0	+44.0 ± 2.5	-72.7 ± 9.4	-44.9 ± 8.1	+27.8 ± 1.3
陆地表面	-60.1 ± 6.4	-12.8 ± 3.8	+47.3 ± 2.8	-51.4 ± 5.4	-21.7 ± 3.9	+29.7 ± 1.5

表 4 给出了两类地表下计算结果(包括辐射强迫效率日平均和标准偏差)。在相同气溶胶光学厚度条件下,沙尘气溶胶的输入导致地表太阳净辐射上升,同时也增加返回大气顶的太阳辐射,从而降低大气辐射吸收率,这种作用在陆地表面表现得更为明显,这是由于陆地表面相对高的地表反射率增加了气溶胶的吸收作用。

8 结论与讨论

根据 2001 年春季中国北方地区太阳光谱直接 / 间接辐射观测资料,获得了这些地区气溶胶光学厚度、Angstrom 指数、尺度谱、折射指数和单次散射反照率等特性值。研究表明:中国沙尘源区沙尘气溶胶在可见光和近红外的吸收较弱,与以往塔里木盆地地基反演结果以及一些气溶胶模式的差别较大,但与撒哈拉地区地基和空基遥感结果大体相当。北京和香河两地尽管距离 80 km 左右,但观测表明两地气溶胶光学厚度、Angstrom 指数以及尺度谱均基本相似,表明中国华北地区人为排放与沙尘活动一样,可能存在着区域尺度特点。北京地区除沙尘活动对大气气溶胶光学厚度有重要贡献之外,人为排放也同等重要,沙尘活动和人为排放的共同作用导致 2001 年春季北京地区 440 nm 气溶胶光学厚度平均值接近 1.0。由于沙尘气溶胶与人为排放气溶胶的吸收能力存在比较大的差别,因此沙尘气溶胶的输入不仅通过影响气溶胶光学厚度,同时也通过改

差异。

关于 SBDART 模式传输模式的详细介绍,参见文献 [21]。SBDART 主要输入参数为 τ_a , ω , 不对称因子 (g), 地表反射率。其中 ω 输入为表 4 给出的沙尘和非沙尘期间反演平均值, g 也对应于沙尘和非沙尘期间的观测平均值。关于地表反射率,分地面和海洋两种类型,分别代表中国华北地区和邻近海域,计算中 $\tau_{a(550nm)}$ 从 0.1—1.5,以 0.1 为步长,气溶胶辐射强迫效率定义为气溶胶辐射强迫与对应 $\tau_{a(550nm)}$ 之比。

变气溶胶吸收特性,影响气溶胶辐射强迫。

气溶胶特性地基遥感方法反演结果代表大气柱气溶胶整体特性,因而与地面采样分析有着本质区别。地面采样分析在采样过程中不可避免的改变了实际大气中气溶胶特性,而地基遥感方法的优点在于能够在不影响气溶胶特性的前提下获取观测事实,另外地基遥感与气溶胶卫星遥感均是针对大气柱气溶胶特性而进行,因此地基遥感在卫星遥感中发挥着重要作用。一方面地基遥感是卫星遥感验证不可缺少的资料来源,另外通过地基遥感获取典型地区典型气溶胶类型辐射特性,建立适合当地气溶胶特性的动态气溶胶模式,也是提高气溶胶卫星遥感精度的一个重要环节。这也就是为什么最近十几年来国际上致力于气溶胶地基和空基联合遥感观测研究的原因所在。

致谢 感谢李占清教授对本文初稿提出的许多宝贵意见。感谢 Holben 教授提供 AERONET 敦煌、香河和内蒙古资料。

参 考 文 献 (References)

- [1] Lu D R, Zhou X J, Qiu J H. The Theory and Numerical Experiment of Comprehensive Remote Sensing of Aerosol by Combination of Extinction and Forward Scattering Measurements [J]. Sci China, 1982, 12: 1516—1523 [吕达仁,周秀骥,邱金桓. 消光小角散射综合遥感气溶胶分布的原理与数值试验[J]. 中国科学, 1982, 12: 1516—1523.] <http://www.cnki.net>
- [2] Qiu J H, Zhou X J. Simultaneous Determination of Aerosol Size Distribution and Refractive Index and Surface Albedo from

- Radiance Part I: Theory [J]. *Advance Atmos Sci*, 1986, **3**: 162–171.
- [3] Qiu JH. An Improved Algorithm for Radiative Transfer Equation [J]. *Chinese J Atmos Sci*, 1986, **20**: 250–257. [邱金桓. 辐射传输方程的一个改进算法 [J]. *大气科学*, 1986, **20**: 250–257.]
- [4] Nakajima T, Tonna T, Rao R, et al. Use of Sky Brightness Measurements from Ground for Remote Sensing of Particulate Polydispersions [J]. *Appl Opt*, 1996, **35**: 2672–2686.
- [5] Zhang JH, Mao JT, Wang MH. Analysis of Aerosol Extinction Characteristics in Different Area of China [J]. *Advance Atmos Sci*, 2002, **19**: 136–152.
- [6] Holben BN, Tanre D, Smimov A, et al. An Emerging Ground-based Aerosol Climatology: Aerosol Optical Depth from AERONET [J]. *J Geophys Res*, 2001, **106**: 12067–12097.
- [7] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. Climate Effects of Black Carbon Aerosols in China and India [J]. *Science* 2002, **297**: 2250–2253.
- [8] Li XW, Zhou XJ, Li WL. The Cooling of Sichuan Province in Recent 40 Years and Its Probable Mechanism [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1995, **9**: 57–68.
- [9] Holben, Eck T F, Slutsker I, et al. AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization [J]. *Remote Sens Environ*, 1998, **66**: 1–16.
- [10] Dubovik O, King M D. A Flexible Inversion Algorithm for Retrieval of Aerosol Optical Properties from Sun and Sky Radiance Measurements [J]. *J Geophys Res*, 2000, **105**: 20673–20696.
- [11] Zhang X Y, Gong S L, Shen Z X, et al. Characterization of Soil Dust Aerosol in China and Its Transport and Distribution During 2001 ACE-Asia: 1. Network Observations [J]. *J Geophys Res*, 2003, **108**: ACH3-1–ACH3-13.
- [12] Gong S L, Zhang X Y, Zhao T L, et al. Characterization of Soil Dust Aerosol in China and Its Transport and Distribution During 2001 ACE-Asia: 2. Model Simulation and Validation [J]. *J Geophys Res*, 2003, **108**: ACH4-1–ACH4-19.
- [13] Wang D L, Qiu Q H. Study on Aerosol Properties in Takaramakan Desert in Spring [J]. *Chinese J Atmos Sci*, 1988, **3**: 278–288. [王栋梁, 邱金桓. 塔克拉玛干沙漠春季大气气溶胶光学特性研究 [J]. *大气科学*, 1988, **12**: 76–81.]
- [14] Takemura T, Nakajima T, Dubovik O, et al. Single-scattering Albedo and Radiative Forcing of Various Aerosol Species with a Global Three-dimensional Model [J]. *Journal of Climate* 2002, **15**: 333–352.
- [15] Dubovik O, Holben B, Eck T F, et al. Variability of Absorption and Optical Properties of Key Aerosol Types Observed in Worldwide Locations [J]. *J Atmos Sci*, 2002, **39**: 590–608.
- [16] Hess M, Koepke P, Schult I. Optical Properties of Aerosols and Clouds: the Software Package OPAC [J]. *Bulletin Ameri Meteor Soc*, 1998, **79**: 831–844.
- [17] Kaufman Y J, Tanre D, Kamili A, et al. Absorption of Sunlight by Dust as Inferred from Satellite and Ground-based Remote Sensing [J]. *Geophys Res Letts*, 2001, **28**: 1479–1482.
- [18] Eck T F, Holben B N, Dubovik O, et al. Column-integrated Aerosol Optical Properties Over the Makdives During the Northeast Monsoon for 1998–2000 [J]. *J Geophys Res*, 2001, **106**: 28555–28566.
- [19] Bergin M H, Cass G R, Xu J, et al. Aerosol Radiative Physical and Chemical Properties in Beijing During June 1999 [J]. *J Geophys Res*, 2001, **106**: 17969–17980.
- [20] Qiu JH, Sun JH. Optically Remote Sensing of the Dust Storm and Result Analysis [J]. *Scientia Atmos Sinica*, 1994, **18**: 1–10. [邱金桓, 孙金辉. 沙尘暴的光学遥感及分析 [J]. *大气科学*, 1994, **18**: 1–10.]
- [21] Ricchiuzzi P, Yang S R, Gautier C, et al. SBDART: A Research and Teaching Software Tool for Plane-parallel Radiative Transfer in the Earth's Atmosphere [J]. *Bull Ameri Meteor Soc*, 1998, **79**: 2101–2114.

Ground-based Remote Sensing of Aerosol Optical Properties over North China in Spring

XIA Xiang-ao¹, WANG Pu-cai¹, CHEN Hong-bin¹, Philippe Gouloub², ZHANG Wen-xing¹

(1. LAGEO, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Université des Sciences et Technologies de Lille, France)

Abstract: Aerosol properties including optical depth, size distribution, absorption, etc were studied based on ground-based sun/sky radiometer measurements in the spring of 2001 over North China. Rapid increase of aerosol optical depth and coarse particle concentration, as well as aerosol neutral or anomalous extinction was observed during dusty periods. Anthropogenic emissions also contributed to high aerosol optical depth except dust input over Huabei Plain. The results showed that dust single-scattering albedo was less than those used in the model. Aerosol optical depth and Angstrom parameter in BJ and XH showed close relation, which indicated the regional anthropogenic influence on atmospheric environment. Dust activities might affect aerosol radiative forcing over the downwind regions through input of large volume of dust aerosols, and also through their effects on aerosol physical and radiative properties.

Key words: aerosol; radiometer; remote sensing