

# 沙尘气溶胶光学厚度的全球分布及分析

马井会<sup>1,2</sup> 张 华<sup>2</sup> 郑有飞<sup>1</sup> 孙治安<sup>3</sup>

1 南京信息工程大学环境科学与工程系, 南京 210044

2 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

3 澳大利亚气象研究中心, 墨尔本 3001

**摘 要** 利用全球气溶胶数据 GADS (Global Aerosol Data Set) 计算了冬夏两季 4 种类型 (积聚型、核型、粗粒型和传输型) 沙尘气溶胶  $0.55\ \mu\text{m}$  光学厚度的全球分布。通过分析得出, 气溶胶的消光系数和垂直厚度对光学厚度的影响很大。全球沙尘气溶胶分布具有明显的季节和地理差异, 4 个沙尘暴多发区, 分别位于北非、中亚地区、澳大利亚西部和北美西部。中亚地区冬季沙尘气溶胶强度和范围比夏季大, 北美和澳大利亚地区则相反, 冬季光学厚度最大值位于北非的中部地区, 而夏季其最大值位于非洲北部靠近大西洋的地区。沙尘气溶胶对  $<8\ \mu\text{m}$  的辐射吸收作用很弱, 散射能力较强; 对于  $>8\ \mu\text{m}$  的辐射吸收能力很强, 吸收带位主要于  $8\sim11\ \mu\text{m}$  范围内。

**关键词** 沙尘气溶胶 光学厚度 复折射指数 光学参数

**文章编号** 1006-9585 (2007) 02-0156-09 **中图分类号** P422 **文献标识码** A

## The Optical Depth Global Distribution of Dust Aerosol and Its Possible Reason Analysis

MA Jing-Hui<sup>1</sup>, ZHANG Hua<sup>2</sup>, ZHENG You-Fei<sup>3</sup>, and SUN Zhi-An<sup>4</sup>

1 Department of Environmental Sciences and Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Australian National Meteorological Center, Melbourne 3001

**Abstract** GADS (Global Aerosol Data Set) data and software is adopted to calculate AOD (Aerosol optical depth) ( $\lambda = 0.55\ \mu\text{m}$ ) of four types dust aerosol (accumulation, nucleus, coarse, transmission) for winter and summer. The result shows that the extinction coefficient and vertical geometric thickness of aerosol take a great effect on AOD. There is obvious seasonal and geographical difference for the distribution of global dust aerosols. There are four typical regions in the world for dust aerosol, located in North Africa, Central Asia, West Australia and North America respectively. The intensity and extension of central Asia dust aerosol in winter are larger than those in summer, while those of the North America and Australia is just in opposite. The maximum value of AOD of dust aerosol exists in North Africa no matter in winter or summer. Dust aerosols absorb shortwave less than  $8\ \mu\text{m}$  weakly and its absorption band is in  $8\sim11\ \mu\text{m}$ . The extinction effect is mainly caused by particle scattering less than  $8\ \mu\text{m}$  and absorbing larger than  $8\ \mu\text{m}$ .

**Key words** dust aerosol, aerosol optical depth, refraction index, optical parameter

收稿日期 2005-11-30 收到, 2006-12-30 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403700 和中国气象局气候变化气溶胶专项项目

作者简介 马井会, 女, 1980 年出生, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事气溶胶辐射强迫等研究。

万方数据

E-mail: oliveflower1223@sohu.com

## 1 引言

沙尘气溶胶对大气环境有显著影响,其所经过地区污染指数增高,大气光学厚度显著增加<sup>[1]</sup>,甚至造成沙尘的跨国输送。另外,沙尘气溶胶会强烈地散射和吸收太阳辐射,从而使地面和低层大气获得的太阳辐射减少,同时沙尘气溶胶也发射和吸收红外辐射,可以起到加热作用。因此,沙尘天气增多会对一些地区的辐射收支状况产生影响,从而影响这些地区的气候状况<sup>[2]</sup>。

世界范围内有中亚、北美、中非和澳大利亚 4 大沙尘暴多发区,它们大部分分布在赤道两侧(25°S ~ 25°N)副热带低纬度地区,即 Hadley 环流圈中下沉气流所控制的干旱气候区。我国西北属于中亚沙尘暴区的一部分,是东亚沙尘气溶胶的主要源区,也是世界上唯一在中纬度(35 ~ 45°N)发生高频率沙尘暴的区域,且位于高原,因此有其特殊性。张凯和高会旺<sup>[3]</sup>的研究表明,不同粒径的气溶胶粒子在空中的高度不同,传播距离也不一样,粒径越小的微粒在空中传播的距离越远,我国沙尘气溶胶浓度和大小是自西向东逐渐递减的。

Tegen 等<sup>[4]</sup>的模式结果表明,就全球平均而言,硫酸盐、烟尘(包括黑碳)和沙尘气溶胶对全球平均气溶胶光学厚度的贡献大体相当,这说明即使在全球尺度上,沙尘气溶胶的辐射强迫问题也不能忽视。在最近的全球变化研究中,沙尘气溶胶已被证明是气候变化的一个重要因子。

王宏等<sup>[5]</sup>的研究表明,就光学特性而言,东亚沙尘模型与 OPAC (Optical Properties of Aerosols and Clouds) 模型呈现出比较相似的变化趋势,而 OPAC 模型的数据就是全球气溶胶数据 GADS (Global Aerosol Data Set),说明此数据集比较符合东亚地区沙尘气溶胶的光学特性。

有关沙尘气溶胶的光学特性研究是目前国内外研究的难点和热点,不同区域的光学特征可能存在很大差别,国内还没有用 GADS 详细研究沙尘气溶胶的光学和辐射特性等方面的工作,本文应用 GADS 中的 4 种类型(积聚型、核型、粗粒

型和传输型)沙尘气溶胶资料,模拟了冬夏两季沙尘气溶胶总光学厚度的全球分布,以及 4 种类型沙尘气溶胶光学厚度的全球分布,分析了 4 种类型光学厚度对总光学厚度的贡献情况,以及造成这种状况的原因。

## 2 数据和模式简介

GADS 是由 Koepke 和 Hess<sup>[6]</sup>研发的,是对 D 'Almeida 等创立的气溶胶气候学的修正版,主要用于气候理论和应用的研究<sup>[7]</sup>。GADS 中根据气溶胶的时空分布采用混合比的方法描述气溶胶性质,使用 5° × 5° 经纬网格,是全球模式。它按照粒子的尺度分布和折射指数随波长变化的规律将气溶胶分为 10 种类型,其分别是不同物质的混合物,包括内部混合和外部混合。每种气溶胶成分的光学特性是基于 Mie 散射理论,并假设气溶胶粒子是球形粒子。这些数据可以按照季节(包括冬夏两季)、相对湿度、波长(23 波段)和气溶胶类型分别处理,本文着重研究沙尘气溶胶的光学性质。GADS 的数据来源于不同地区的地基探测资料、卫星资料和直接的气溶胶辐射观测资料的同化,代表大气的一般情况。在实际大气中,气溶胶粒子的形状很不规则,谱分布也十分复杂。本文假定沙尘气溶胶粒子的形状为球形,谱分布为对数正态分布。因为对数正态分布主要针对产生机制相同的气溶胶粒子,最适于对这类气溶胶的成分、类型和时空变化进行描述。由于气溶胶粒子中尺度较小的粒子相对集中,采用对数坐标较为方便,因此,该分布函数曾为气溶胶和其气候效应专家委员会推荐<sup>[8]</sup>,其形式如下:

$$\frac{dN(r)}{d\lg r} = \frac{N}{\sqrt{2\pi}\lg\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\lg r - \lg r_m}{\lg\sigma}\right)^2\right], \quad (1)$$

其中,  $r_m$  是粒子群的众数半径,  $\sigma$  是标准偏差,  $N$  是气溶胶粒子的数浓度(个/cm<sup>3</sup>)。代表某种成分的单个粒子的体积可以写为

$$V = \frac{3}{4} \pi r_m^3 \exp\left(\frac{9}{2}\ln\sigma\right), \quad (2)$$

这样,单个粒子的质量则为

$$M = V \cdot \rho, \quad (3)$$

其中  $\rho$  是该粒子化学成分的密度。

光学厚度计算公式是根据所选气溶胶类型，结合高度廓线计算的，

$$\tau = \sum_j \int_{H_{j \min}}^{H_{j \max}} \sigma_{e,j}(h) dh$$

$$= \sum_j \sigma_{e,j}^1 N_j(0) \int_{H_{j \min}}^{H_{j \max}} e^{-\frac{h}{z_j}} dh, \quad (4)$$

$\sigma_{e,j}^1$  是  $j$  层气溶胶的消光系数，标准化为 1 个/ $\text{cm}^3$ 。 $h$  气溶胶层的垂直高度。其中，

$$\sigma_{e,j}^1(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha}, \quad (5)$$

$\beta$  是 1  $\mu\text{m}$  处的消光系数

$$\beta = \frac{\sigma_e(\lambda_1)}{\lambda_1^\alpha}, \quad (6)$$

$\alpha$  不是一个常数，公式为

$$\alpha = \frac{\lg[\sigma_e(\lambda_2)] - \lg[\sigma_e(\lambda_1)]}{\lg(\lambda_1) - \lg(\lambda_2)}, \quad (7)$$

为了实际应用的需要，光学参数取 0.3 ~ 3.3  $\mu\text{m}$  波长范围内的平均值。

在太阳光谱 (0.3 ~ 3.3  $\mu\text{m}$ ) 波段范围内，消光系数的公式为

$$\bar{\sigma}_e = \frac{\int_{0.3}^{3.3} \sigma_e(\lambda) E_0(\lambda) d\lambda}{\int_{0.3}^{3.3} E_0(\lambda) d\lambda} \quad \text{km}^{-1} \quad (8)$$

其中， $\sigma_e(\lambda)$  为消光系数， $E_0(\lambda)$  为太阳光谱强度。

在长波波段 (8 ~ 15  $\mu\text{m}$ ) 范围内，消光系数公式为

$$\bar{\sigma}_e = \frac{\int_8^{15} \sigma_e(\lambda) B_{300}(\lambda) d\lambda}{\int_{0.3}^{3.3} B_{300}(\lambda) d\lambda}, \quad (9)$$

其中， $\sigma_e(\lambda)$  为消光系数， $B_{300}(\lambda)$  为地面温度为

300 K 时 8 ~ 15  $\mu\text{m}$  波段的光谱强度。

单次散射反照率的计算公式为

$$\omega_0 = \frac{\int_{0.3}^{3.3} \omega_0(\lambda) \sigma_e(\lambda) E_0(\lambda) d\lambda}{\int_{0.3}^{3.3} \sigma_e(\lambda) E_0(\lambda) d\lambda}, \quad (10)$$

非对称因子的公式为

$$\bar{g} = \frac{\int_{0.3}^{3.3} g(\lambda) \sigma_s(\lambda) E_0(\lambda) d\lambda}{\int_{0.3}^{3.3} \sigma_s(\lambda) E_0(\lambda) d\lambda}, \quad (11)$$

其中， $\sigma_s(\lambda)$  为散射系数， $\sigma_e(\lambda)$  为消光系数， $E_0(\lambda)$  为太阳光谱强度。

### 3 结果与分析

理论上认为波长在 0.55  $\mu\text{m}$  处的光学厚度，能够代表气溶胶在整个短波谱段的消光平均状况<sup>[5]</sup>，本文采用 0.55  $\mu\text{m}$  处的光学厚度。

#### 3.1 沙尘气溶胶光学厚度的分布特征及其原因分析

##### 3.1.1 沙尘气溶胶总光学厚度及质量浓度的全球分布特征

表 1 给出了南北半球、赤道及全球沙尘气溶胶在冬夏两季平均光学厚度。沙尘气溶胶光学厚度平均值北半球比南半球大，北半球夏季比冬季大；全球夏季比冬季大。

由表 2 可以看出，沙尘气溶胶的季节和地理分布差异非常明显，沙尘气溶胶光学厚度最大值位于北非，接下来依次是中亚、大洋洲和北美，前 3 个地区的光学厚度最大值在同一个数量级上，

表 1 冬夏两季不同区域沙尘气溶胶光学厚度平均值

Table 1 The mean of optical depth of dust aerosol in different region for summer and winter

	南半球	北半球	赤道	全球
冬季	$1.32 \times 10^{-3}$	$1.89 \times 10^{-2}$	$1.14 \times 10^{-2}$	$1.04 \times 10^{-2}$
夏季	$1.53 \times 10^{-3}$	$1.94 \times 10^{-2}$	0	$1.05 \times 10^{-2}$

表 2 冬夏两季不同地区沙尘气溶胶光学厚度最大值

Table 2 The maximum value of optical depth of dust aerosol in different region for winter and summer

	北非 (20°N, 130°E)	中亚 (40°N, 80°E)	大洋洲 (25°S, 125°E)	北美 (35°N, 110°W)
冬季	0.401	0.223	0.103	0.039
夏季	0.465	0.214	0.140	0.067



北美地区小一个数量级。北非、大洋洲、北美地区沙尘气溶胶光学厚度最大值夏季高于冬季，而中亚地区是冬季高于夏季。

由图 1 可以明显看出沙尘气溶胶分布具有明显的地理差异和季节差异。全世界 4 个沙尘暴多发区，分别是北非的撒哈拉沙漠，中亚地区（中国属于中亚沙尘暴的一部分），澳大利亚西部和北美地区西部。其中北非和中亚的沙尘气溶胶影响范围最大，强度也大。在全球尺度，主要的源地在北非的撒哈拉沙漠、中亚的戈壁——塔克拉玛干沙漠。东亚地区的沙尘源区主要为中亚和中国西北地区沙漠以及黄土高原。中亚地区冬季沙尘气溶胶强度和范围比夏季大，北美和澳大利亚地区则相反；北非地区光学厚度最大值夏季大于冬季，冬季光学厚度最大值位于北非的中部地区，而夏季其最大值位于非洲北部靠近大西洋地区。就全球范围而言，夏季光学厚度平均值大于冬季（表 1），其原因可能是由于夏季北半球副热带高

压带北移到 20°N 以北，受副高控制地区的非洲北部和中东地区更为干燥，沙尘气溶胶浓度增大，从而引起全球平均光学厚度的增大。

3. 1. 2 4 种类型沙尘气溶胶光学厚度全球分布特征

将粒径大小不同的沙尘气溶胶分为 4 类：核型（0.07 μm）、聚集型（0.39 μm）、粗粒子型（1.9 μm）和传输型（0.5 μm）。前 3 种粒子尺度分布资料来源于 D 'Almeida<sup>[9]</sup>，传输型的粒子尺度分布资料来源于 Schütz<sup>[10]</sup>，这个资料符合 Kondratyev 等<sup>[11]</sup>和 D 'Almeida 与 Schütz 的观测值<sup>[12]</sup>。传输型沙尘气溶胶主要来自大气输送，较大的粒子在输送过程中因重力沉降而部分被清除出大气，因此沙漠上空的沙尘气溶胶大粒子比例比其下游输送的要大。下面分别给出 4 种沙尘气溶胶的冬夏两季光学厚度全球分布（图 2 ~ 5），以便讨论每种沙尘气溶胶对总光学厚度的贡献情况。

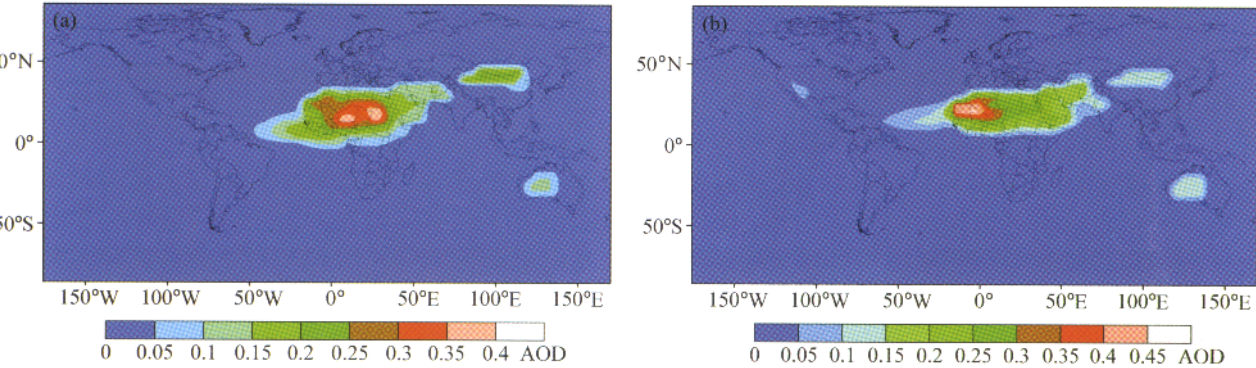


图 1 沙尘气溶胶光学厚度（λ = 0.55 μm）全球分布：( a ) 冬季；( b ) 夏季  
Fig. 1 The optical depth ( λ = 0.55 μm ) global distribution of dust aerosol : ( a ) winter ; ( b ) summer

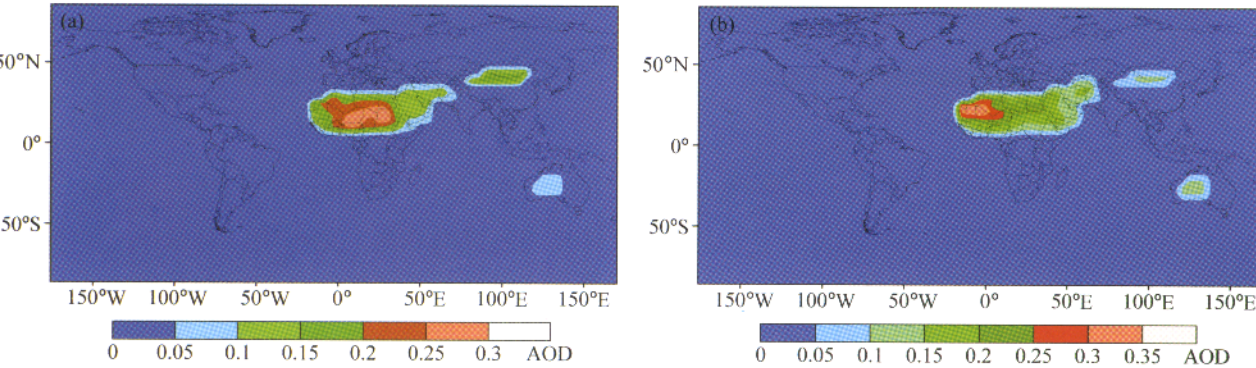


图 2 冬夏两季累积型沙尘气溶胶光学厚度（λ = 0.55 μm）全球分布：( a ) 冬季；( b ) 夏季  
Fig. 2 The optical depth ( λ = 0.55 μm ) global distribution of accumulation mode dust aerosol : ( a ) winter ; ( b ) summer  
万方数据



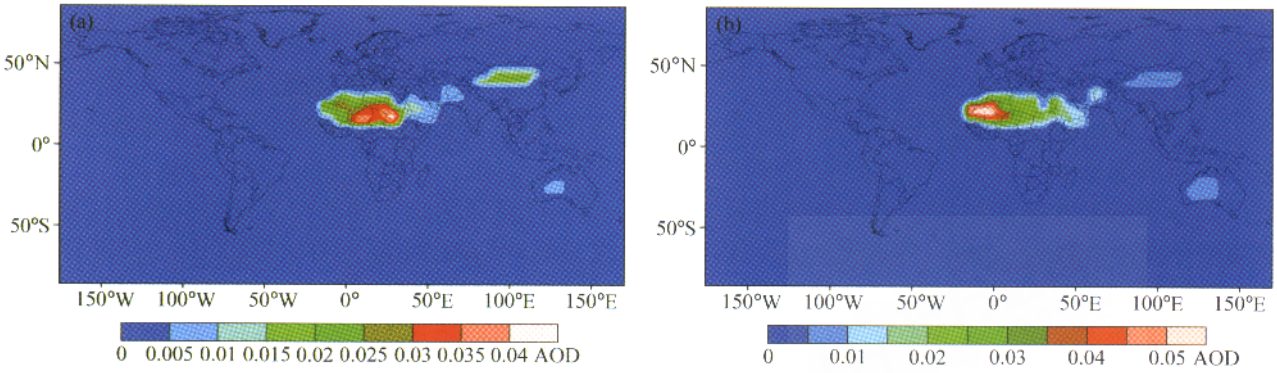


图 3 冬夏两季粗粒型沙尘气溶胶光学厚度 ( $\lambda=0.55\text{ }\mu\text{m}$ ) 全球分布:(a) 冬季;(b) 夏季  
Fig. 3 The optical depth ( $\lambda=0.55\text{ }\mu\text{m}$ ) global distribution of coarse mode dust aerosol for (a) winter and (b) summer

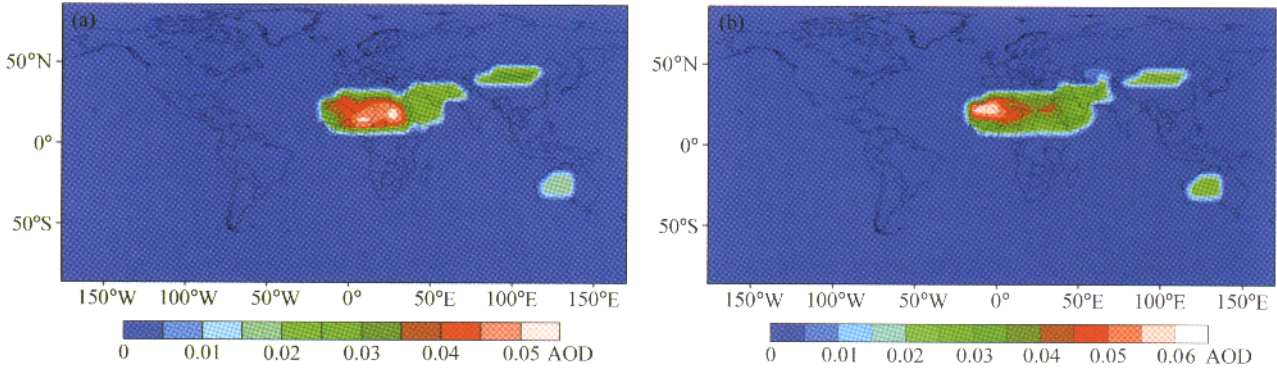


图 4 冬夏两季核型沙尘气溶胶光学厚度 ( $\lambda=0.55\text{ }\mu\text{m}$ ) 全球分布:(a) 冬季;(b) 夏季  
Fig. 4 The optical depth ( $\lambda=0.55\text{ }\mu\text{m}$ ) global distribution of nucleus mode dust aerosol :(a) winter;(b) summer

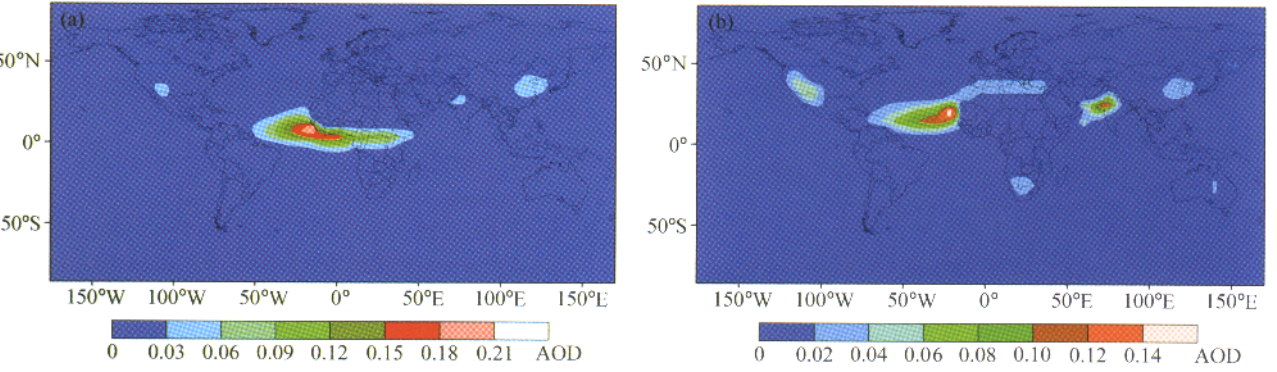


图 5 冬夏两季传输型沙尘气溶胶光学厚度 ( $\lambda=0.55\text{ }\mu\text{m}$ ) 全球分布:(a) 冬季;(b) 夏季  
Fig. 5 The optical depth ( $\lambda=0.55\text{ }\mu\text{m}$ ) global distribution of transported mode dust aerosol :(a) winter;(b) summer

积聚型沙尘气溶胶是沙尘气溶胶总光学厚度贡献最大的一类,与其浓度值和光学性质有关,主要影响区域是沙尘源地及其周围。与其他几种不同,传输型沙尘气溶胶光学厚度(图5)最大值冬季高于夏季,值得注意的是,北美地区西部的沙尘气溶胶是属于传输型沙尘气溶胶。另外, 万方数据

由于受盛行风向和副高的影响,北非地区冬季传输型沙尘气溶胶主要影响其源地的西南地区,夏季主要影响西部和北部地区。中亚地区沙尘气溶胶夏季比冬季传输得更远,由于夏季受副高影响,天气干燥容易起沙,起沙后受盛行风向影响,产生长距离输送;东亚地区沙尘源区位于高原,起

沙后更容易输送到较远的地区<sup>[13]</sup>, 加上冬季地表植被覆盖率低, 盛行西北西风, 因此冬季比夏季传输的远。

综上所述, 光学厚度的贡献是积聚型最大, 其次是传输型, 然后是核型和粗粒子型。核型和粗粒子型比积聚型和传输型小一个数量级。下面将讨论沙尘气溶胶的其他光学特性。

### 3.2 4 种沙尘气溶胶的其他物理和光学参数

为了便于对辐射强迫及其不确定性进行评估, 通常将气溶胶的辐射特性用一套与辐射效应计算直接相关的光学参数来描述, 除了光学厚度, 主要包括: 复折射指数、消光系数、单次散射反照率、非对称因子。

#### 3.2.1 复折射指数

复折射指数是气溶胶最基本、也是最重要的光学参数, 假设这 4 种沙尘气溶胶类型具有相同的复折射指数。

在气溶胶谱分布给定的前提下, 气溶胶的辐射特性随波长的变化完全取决于复折射指数随波长的变化。其中, 在光学厚度一定的前提下, 复折射指数的实部和虚部分别表示气溶胶粒子散射和吸收能力相对大小的量。实部的绝对值越大, 表示散射越强; 虚部的绝对值越大, 表示吸收越强; 反之, 亦然<sup>[14]</sup>。沙尘气溶胶主要是干旱地区的石英和粘土矿物质组成, 它的复折射指数数据来源于 Carlson 和 Benjamin<sup>[15]</sup>。采用的粒子密度是  $\rho = 2.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。其折射指数虚部在整个波长范围内变化相对较大 (图 6),  $< 8 \mu\text{m}$  的辐射, 复折射指数虚部随波长变化很小, 其绝对值均  $< 0.2$ 。在  $8 \sim 11 \mu\text{m}$  范围内, 复折射指数虚部绝对值出现了一个极大值, 此极大值  $> 0.6$ 。与虚部相

对应, 实部在此波长范围内出现一个极小值, 如果光学厚度一定的前提下, 说明沙尘气溶胶对此波段的辐射散射作用弱。在  $13 \sim 15 \mu\text{m}$  范围内, 也存在一个沙尘气溶胶吸收带。对  $> 18 \mu\text{m}$  的长波, 沙尘气溶胶的吸收和散射作用都很强。

#### 3.2.2 吸收系数、散射系数、消光系数、非对称因子、单次散射反照率

辐射特性的计算依赖复折射指数随波长的变化和粒子谱分布。本文仅考虑波长  $< 15 \mu\text{m}$  的辐射。因为沙尘气溶胶的粒径范围较大 (在  $0.005 \sim 60 \mu\text{m}$  之间), 所以, 沙尘气溶胶无论在长波还是短波波段, 其辐射效应都不能忽视 (图 7)。

4 种类型沙尘气溶胶的吸收系数、散射系数以及消光系数在整个波段范围内粗粒型最大, 均  $> 0.04$ , 值得注意的是, 在  $7.5 \sim 9 \mu\text{m}$  范围内, 粗粒型消光系数存在一个极小值 ( $< 0.05 \text{ km}^{-1}$ ), 说明粗粒型沙尘气溶胶对此波段范围内的辐射消光能力弱。传输型消光系数次之, 然后是积聚型, 核型最小。这 3 种类型随波长的增大具有相同的变化规律, 消光系数均  $< 0.01 \text{ km}^{-1}$ 。对波长  $< 5 \mu\text{m}$  的辐射消光作用相对较大, 另外一个消光作用比较大的波长范围是  $9 \sim 11 \mu\text{m}$ 。对吸收系数和散射系数来说, 粗粒型对  $< 7 \mu\text{m}$  的辐射散射作用较强 (均  $> 0.04 \text{ km}^{-1}$ ), 吸收作用较弱 (均  $< 0.04 \text{ km}^{-1}$ ); 对于  $> 7 \mu\text{m}$  的辐射吸收作用增强, 散射作用减弱。其余 3 种类型的吸收系数和散射系数随波长的增大具有相同的变化规律,  $< 8 \mu\text{m}$  的辐射散射系数大于吸收系数, 说明对此波段范围辐射的消光作用主要由粒子散射引起。 $> 8 \mu\text{m}$  的辐射吸收系数大于散射系数, 说明对此波段范围辐射的消光作用主要由粒子吸收引起。

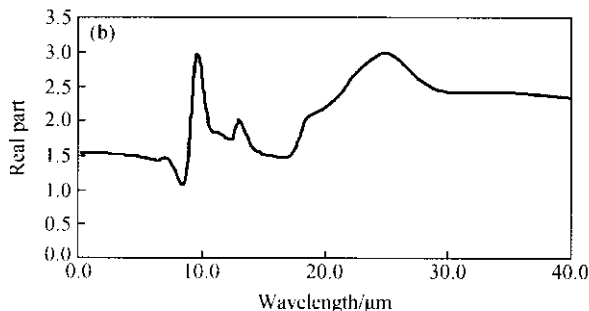
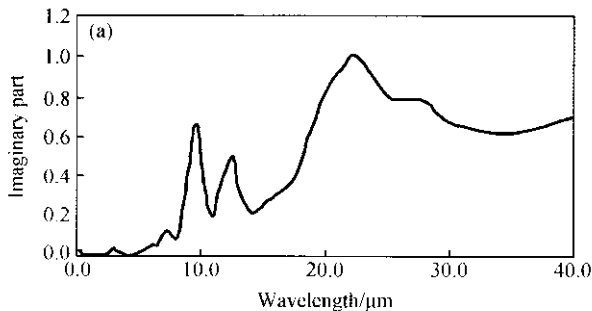


图 6 沙尘气溶胶复折射指数 (a) 虚部、(b) 实部随波长的变化

万方数据 Complex refractive indices of dust aerosol dependent on the wavelength : (a) imaginary part , (b) real part

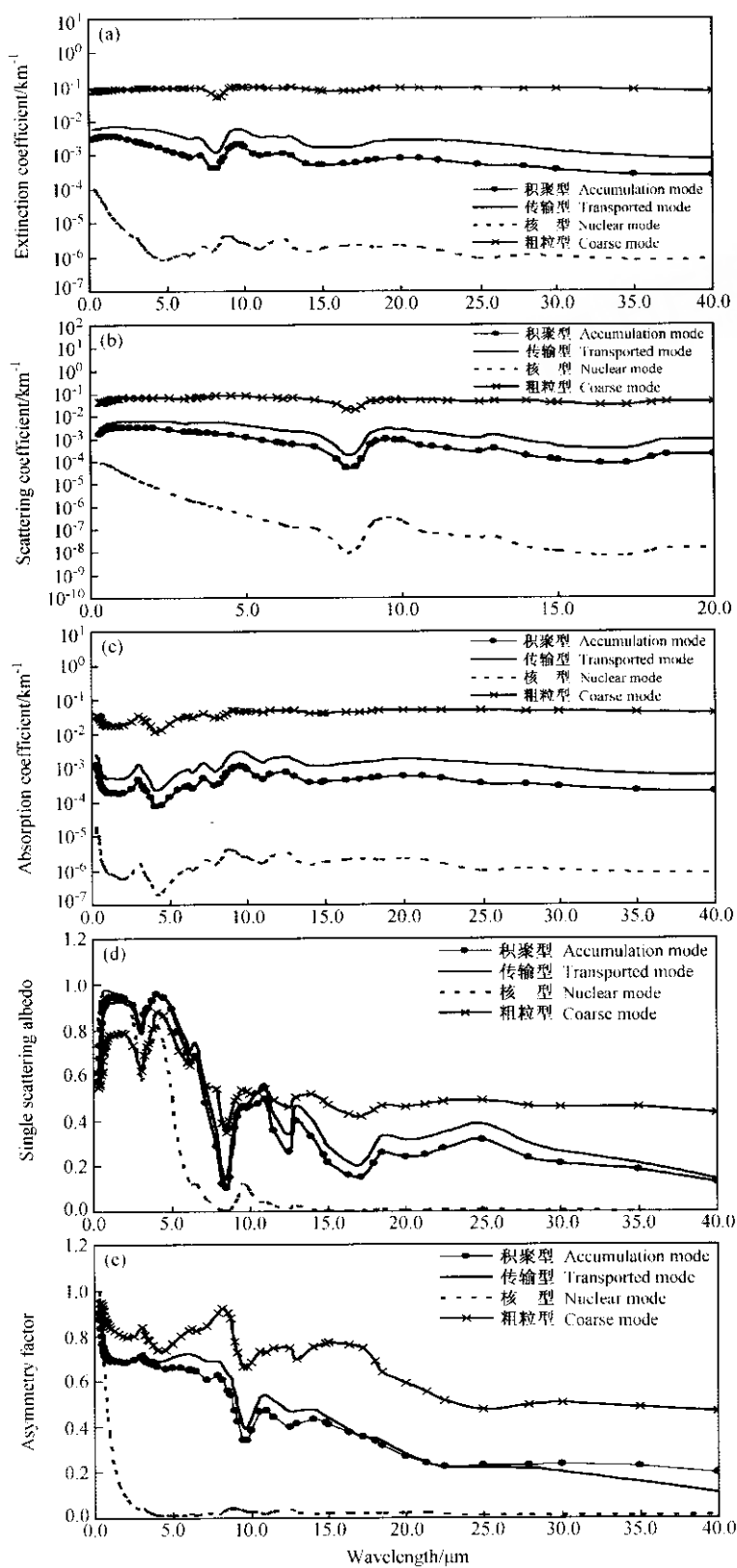


图 7 沙尘气溶胶 (a) 消光系数、(b) 散射系数、(c) 吸收系数、(d) 单次散射反照率和 (e) 非对称因子随波长的变化  
Fig. 7 (a) Extinction coefficient, (b) absorption coefficient, (c) scattering coefficient, (d) single scattering albedo and (e) asymmetry factor of dust aerosol dependent on the wavelength



粗粒型沙尘气溶胶质量浓度和  $0.55\ \mu\text{m}$  消光系数均比较大, 但其对  $0.55\ \mu\text{m}$  沙尘气溶胶总光学厚度贡献却是最小的, 其主要原因是总光学厚度反映了沙尘气溶胶在大气层中总消光作用的大小, 除了水平分布以外, 还有垂直分布。粗粒型由于其粒子较大, 在密度相同的情况下, 所受重力比较大, 所以到达的高度较低, 垂直厚度较小, 从而对总光学厚度贡献较小。积聚型沙尘气溶胶尽管其质量浓度很小, 消光系数也不是很大, 但其垂直厚度大, 故光学厚度比较大。核型沙尘气溶胶质量浓度和垂直厚度都比较大, 但由于其消光作用最小, 所以光学厚度也比较小。传输型沙尘气溶胶由于其高度较高, 从而垂直厚度相对较小, 因此造成其光学厚度也不是最大。由此可见, 气溶胶的消光系数、垂直厚度和质量浓度都对气溶胶的光学厚度有影响。

单次散射反照率, 定义为散射系数与消光系数的比值。由图 7(e) 可看出, 4 种沙尘气溶胶在  $<5\ \mu\text{m}$  的波段范围内, 其单次散射反照率均  $>0.5$ , 说明沙尘气溶胶对  $<5\ \mu\text{m}$  的辐射散射能力较强。在  $5\sim7.5\ \mu\text{m}$  范围内, 除核型沙尘气溶胶单次散射反照率  $<0.5$  外, 其余 3 种均  $>0.5$ , 说明核型沙尘气溶胶对这个波段的辐射吸收能力较强。在  $7.5\sim9.5\ \mu\text{m}$  范围内, 4 种气溶胶的单次散射反照率均存在一个极小值, 说明沙尘气溶胶对此波段的辐射的吸收作用明显。 $>9.5\ \mu\text{m}$ , 核型沙尘气溶胶的单次散射反照率  $<0.1$ , 吸收作用明显。其余 3 种均在  $0.2\sim0.5\ \mu\text{m}$  范围内, 主要表现为吸收作用。

非对称因子是前向散射与后向散射的比值, 在  $<0.8\ \mu\text{m}$  波段范围内, 4 种沙尘气溶胶的非对称因子的值都  $>0.5$ , 前向散射较大, 呈现出前向散射为主的特性。核型沙尘气溶胶在  $0.8\ \mu\text{m}$  的整个波长范围, 非对称因子的值都  $<0.5$ , 说明它的前向散射较小, 呈现后向散射为主特性。粗粒子型在整个波长范围内其非对称因子的值都  $>0.5$ , 呈现明显前向散射为主特性。积聚型和传输型在  $0.8\sim8.5\ \mu\text{m}$  范围内, 其非对称因子的值都在 0.6 附近, 说明它们对此波段范围的辐射呈现前向散射为主的特征; 在  $8.5\sim11\ \mu\text{m}$  之间, 两种气溶胶的非对称因子均存在一个极小值  $<0.4$ , 说明它们对这个波段的辐射呈现后向散射为主特

征;  $>11\ \mu\text{m}$  非对称因子在  $0.4\sim0.5$  之间, 前向散射与后向散射作用基本相当。

## 4 主要结论及讨论

沙尘气溶胶总光学厚度的分布具有明显的地理和季节差异, 4 个主要沙尘区域是北非, 中亚地区 (中国属于中亚沙尘暴的一部分), 澳大利亚西部和北美地区西部, 其中北非、大洋洲、北美地区沙尘气溶胶光学厚度最大值夏季高于冬季, 而中亚地区是冬季高于夏季。北美地区西部的沙尘气溶胶属于传输型沙尘气溶胶。

研究表明, 各种类型沙尘气溶胶的质量浓度与其对总光学厚度的贡献并不存在一一对应关系, 气溶胶的消光系数和垂直厚度都对光学厚度产生很大影响。

由复折射指数得出, 沙尘气溶胶对  $<8\ \mu\text{m}$  的辐射的吸收作用很弱。沙尘气溶胶对波长  $8\sim11\ \mu\text{m}$  范围内的辐射有明显吸收作用。从气溶胶的单次散射反照率来看, 沙尘气溶胶对  $<5\ \mu\text{m}$  的辐射散射能力较强, 对  $7.5\sim9.5\ \mu\text{m}$  范围的辐射吸收能力较强。从非对称因子来看, 在  $<0.8\ \mu\text{m}$  波段范围内, 沙尘气溶胶呈现出前向散射为主的特性。核型沙尘气溶胶在  $>0.8\ \mu\text{m}$  的整个波长范围, 呈现后向散射为主特性。粗粒子型在整个波长范围内都呈现明显前向散射为主特性。

粗粒型沙尘气溶胶的吸收系数、散射系数以及消光系数在整个波段范围内最大, 沙尘气溶胶对  $<8\ \mu\text{m}$  波段范围辐射的消光作用主要是由粒子散射引起,  $>8\ \mu\text{m}$  波段范围辐射的消光作用主要是由粒子吸收引起。

本文计算得出, 沙尘气溶胶可以吸收和散射太阳辐射和地面长波辐射, 因此, 沙尘气溶胶导致的辐射强迫比较复杂, 考虑到地面反照率和太阳高度角等因素的不同, 大气顶的辐射强迫可以为正也可以为负<sup>[16]</sup>。对地面而言, 沙尘气溶胶产生负的辐射强迫, 因为无论是气溶胶的散射作用还是吸收作用, 都使地面接收太阳辐射减少。因此, 沙尘气溶胶对地面能量收支乃至全球气候变化有着非常重要的影响, 是目前气候研究中最大的不确定因子之一, 成为气候变化研究的难点和重点。本文利用全球气溶胶数据 GADS (Global-



Aerosol Data Set) 详细计算了 4 种类型沙尘气溶胶的各种光学和辐射特性, 为用气候模式进一步研究沙尘气溶胶的辐射强迫及其气候效应奠定了基础。

参考文献 (References)

[ 1 ] 邱金桓, 孙金辉. 沙尘暴的光学遥感及分析. 大气科学, 1994, **18** ( 1 ): 1 ~ 10  
Qiu Jinhuan, Sun Jinhui. The optics remote sensing and analyzing of dust storm. *Scientia Atmospherica Sinica* ( in Chinese ), 1994, **18** ( 1 ): 1 ~ 10

[ 2 ] Tegen I, Lacis A A. Modeling of particle size distribution and its influence on the radiative properties of mineral dust aerosol. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101** ( 14 ): 19 237 ~ 19 244

[ 3 ] 张凯, 高会旺. 东亚地区沙尘气溶胶的源和汇. 安全与环境学报, 2003, **3** ( 3 ): 7 ~ 12  
Zhang Kai, Gao Huiwang. Research on source and sink of east Asia's sand-dust aerosols. *Journal of Safety and Environment* ( in Chinese ), 2003, **3** ( 3 ): 7 ~ 12

[ 4 ] Tegen I, Holling P, Chin M, et al. Contribution of different aerosol species to the global aerosol extinction optical thickness: Estimates from model results. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102** ( 23 ): 895 ~ 915

[ 5 ] 王宏, 石广玉, Aoki. T 等. 2001 年春季东亚-北太平洋地区沙尘气溶胶的辐射强迫. 科学通报, 2004, **49** ( 19 ): 1993 ~ 2000  
Wang Hong, Shi Guangyu, Aoki T et al. The radiative forcing due to dust aerosol in the springtime 2001. *Chinese Science Bulletin* ( in Chinese ), 2004, **49** ( 19 ): 1993 ~ 2000

[ 6 ] Koepke P, Hess M, Schult I, et al. Global Aerosol Data Set, Report No. 243. *Max-Planck-Institut für Meteorologie*, Hamburg, 1997, ISSN 0937-1060 carbonaceous

[ 7 ] Hess M, Koepke P, Schult I. Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC. *Bulletin Amer. Meteor. Soc.*, 1998, **79**: 831 ~ 844

[ 8 ] Deepak A, Gerber H E. World climate programme. WCP-55. Report the experts meeting on aerosols and their climatic effects, WMO, Geneva, 1983. 107

[ 9 ] D 'Almeida G A. Desert aerosol: Characteristics and effects on climate. In: *Paleoclimatology and Paleometeorology: Modern and Past Patterns of Global Atmospheric Transport*, Leinen M, Samthein M, Ed. Kluwer Acad., Norwell, Mass., 1989. 311 ~ 338

[ 10 ] Schütz L. Sahara dust transport over the North Atlantic ocean: Model calculations and measurement. In: *Saharan dust: Mobilization, Transport, Deposition*, Morales C, Ed. John Wiley & Sons, New York, 1979. 267 ~ 278

[ 11 ] Kondratyev K Ia, Ivanov V A, Prokofev M A, et al. Determination of vertical profiles of aerosol size spectra from aircraft radiative flux measurements. I. Retrieval of spherical particle size distributions. *J. Geophys. Res.*, 1981, **86** ( C10 ): 9783 ~ 9793

[ 12 ] D 'Almeida G A, Schütz L. Number mass and volume distributions of mineral aerosol and soils of the Sahara. *J. Climate. Appl. Meteor.*, 1983, **25**: 903 ~ 916

[ 13 ] 安俊岭, 张仁健, 韩志伟. 北方 15 个大城市总悬浮颗粒物的季节变化. 气候与环境研究, 2000, **5** ( 1 ): 25 ~ 29  
An Junling, Zhang Renjian, Han Zhiwei. The season variety of the total suspended particulate matter of 15 big city in north china. *Climatic and Environmental Research* ( in Chinese ), 2000, **5** ( 1 ): 25 ~ 29

[ 14 ] 张立盛, 石广玉. 全球人为硫酸盐和烟尘气溶胶资料及其光学厚度的分布特征. 气候与环境研究, 2000, **5** ( 1 ): 67 ~ 74  
Zhang Lisheng, Shi Guangyu. The global anthropogenic sulfate and soot data and distribution characteristics of the optical depth. *Climatic and Environmental Research* ( in Chinese ), 2000, **5** ( 1 ): 67 ~ 74

[ 15 ] Carlson T N, Benjamin S G. Radiative heating rates for Saharan dust. *J. Atmos. Sci.*, 1980, **37**: 193 ~ 213

[ 16 ] 王宏. 东亚-北太平洋地区沙尘气溶胶的辐射强迫及其对大气热力结构的影响. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2004. 84 ~ 85  
Wang Hong. The radiative forcing due to dust aerosol and its impacts on the thermodynamic structure of atmosphere over east Asia-North pacific region. Ph. D. dissertation ( in chinese ), Institute of Atmospheric Physics, China Academy of Sciences, 2004. 84 ~ 85