

基于 CALIPSO 资料的东亚地区气溶胶 垂直分布特征分析

宿兴涛¹, 郑军², 李学刚²

(1.北京应用气象研究所, 北京 100029; 2.中国人民解放军 32039 部队, 北京 102300)

摘要: **目的** 分析东亚地区气溶胶的垂直分布特征。**方法** 利用 2006—2012 年 CALIPSO 星载激光雷达资料, 基于气溶胶光学厚度分析结果, 选取有代表性的经度带和纬度带, 分别研究东亚大陆东部沿海地区气溶胶的垂直分布和东亚-北太平洋地区沙尘气溶胶的垂直分布。在此基础上, 选取三个有代表性的格点, 进一步研究华北和华南地区气溶胶的垂直分布及塔克拉玛干沙漠沙尘的气溶胶垂直分布, 并对其垂直分布特征曲线进行拟合。**结果** 平均来看, 除少数地区个别月份外, 东亚地区气溶胶主要出现在近地面附近。东部沿海地区, 一定高度以上, 气溶胶的消光系数随高度的增加总体上呈指数减小; 西北沙尘源区, 大致在近地面至对流层中层, 沙尘气溶胶的消光系数随高度的增加几乎呈线性递减。气溶胶的垂直分布具有显著的月际变化和地区差异, 中纬度地区, 亚洲沙尘气溶胶跨北太平洋传输在 1—5 月份较强。**结论** 高垂直分辨率的 CALIPSO 资料可作为精细分析气溶胶垂直分布特征的有力工具。

关键词: CALIPSO 资料; 东亚; 气溶胶; 垂直分布

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.06.021

中图分类号: P41

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)06-0138-07

Vertical Distribution Characteristics of Aerosol over East Asia Based on CALIPSO Data

SU Xing-tao¹, ZHENG Jun¹, LI Xue-gang²

(1.Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029, China; 2.32039 Troops of PLA, Beijing 102300, China)

ABSTRACT: Objective To analyze the vertical distribution characteristics of aerosols over East Asia. **Methods** Based on the CALIPSO spaceborne laser radar data from 2006 to 2012 and the analysis result of the aerosol optical depth, the representative longitude and latitude bands were selected to study the vertical distribution of aerosols in the eastern coastal areas of East Asia and the vertical distribution of dust aerosols in East Asia-North Pacific region. Ulteriorly, three representative grid points were selected to study the vertical distribution of aerosols in North China and South China, and the vertical distribution of dust aerosols in the Taklimakan Desert. At last, the vertical distribution fitting curves were carried out. **Results** On the average, the aerosols over East Asia mainly appeared near the ground except for a few areas in a few months. The aerosol extinction coefficient generally decreased exponentially with height above the certain height in the eastern coastal areas of China. The dust extinction coefficient of the dust aerosol decreased almost linearly with height in the dust source area roughly from the ground to the middle layer of the troposphere. The vertical distribution of aerosol had apparent inter-monthly variation and regional difference. In the mid-latitude area, the transmission of Asian dust aerosols between the North Pacific was stronger in January to May. **Conclusion** CALIPSO data of high vertical resolution can be used as a powerful tool for fine analysis of aerosol vertical distribution.

KEY WORDS: CALIPSO data; East Asia; aerosol; vertical distribution

气溶胶的垂直分布是其辐射强迫和气候效应的重要影响因子之一。Minnis 和 Cox^[1]的观测分析以及 Carlson 和 Benjamin^[2]的模拟研究均表明,抬高的撒哈拉沙尘层能明显改变大气加热率。Liao 和 Seinfeld^[3]分析认为,晴空与有云条件下,大气顶强迫对沙尘层高度非常敏感。Meloni 等^[4]也发现,气溶胶大气顶短波辐射强迫强烈依赖于气溶胶垂直廓线。Huang 等^[5]指出,以往气溶胶观测只能在全球有限站点利用被动式辐射计进行,地面观测的气溶胶光学特性在转换为柱特性时,采用了气溶胶垂直廓线分布的假设。由于气溶胶层高度可变,地面气溶胶特性与气溶胶柱特性常常存在很大的区别。因此,计算气溶胶柱特性时,不同时间如果采用相同的气溶胶垂直廓线,将导致结果存在非常大的误差(可达 2 倍)^[6]。

宿兴涛^[7-8]曾对沙尘气溶胶垂直分布的研究现状进行过综述,其他气溶胶垂直分布研究方法基本相同。通过对以往研究工作分析发现,尽管对东亚地区气溶胶垂直分布观测研究较早,但绝大多数限于时间较短的天气过程,极少数研究能达到月尺度^[5],并且这些观测次数、时间尺度、空间尺度有限,无法对大范围区域进行连续观测。由于不同的天气条件气溶胶可以抬升的高度存在很大差异,即使同一地区在不同季节不同时刻,气溶胶的垂直分布也会存在很大的不同。另外,不同气溶胶模型关于源汇方案等存在差别,采用数值模式对沙尘垂直分布的认识也存在很大差异。CALIPSO (The Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) 卫星的发射提供了一个很好的机会,有利于对大范围区域气溶胶的垂直廓线特征进行连续观测,不少学者利用其开展了不少研究工作^[9-14],但研究范围和时间尺度均比较小。文中利用 CALIPSO 星载激光雷达观测资料,研究更长时间、更大范围气溶胶的垂直廓线特征,以期从气候角度加深对该地区气溶胶垂直分布的认识,并为气候模式比对提供参考。

1 资料介绍

CALIPSO 卫星发射于 2006 年 4 月,携带主要设备之一为正交偏振云-气溶胶雷达 CALIOP (The Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization)。它可以在任何地形、高反照率表面、有云和晴空条件下,对气溶胶的垂直分布进行观测。CALIOP 接收的回波信号分为三个通道,一个测量 1064 nm 的后向散射强度,另外两个通道测量 532 nm 后向散射信号的正交极化部分。反演计算时,将两个通道分别获取的后向散射强度叠加作为 532 nm 总的后向散射强度。CALIPSO 各种参数反演算法参考文献[15]。

CALIPSO 雷达三级气溶胶廓线月产品 (Lidar Level 3 Aerosol Profile Monthly Products) 1.00 版(下文简称 CALIPSO L3 V1.00)是在 CALIPSO 雷达二级气溶胶廓线产品基础上制作出来的,发布于 2011 年 12 月,记录了在统一空间格点上气溶胶光学特性的月平均廓线。CALIPSO L3 V1.00 主要针对对流层设计,产品垂直范围在 12 km 以下。该产品主要参数为 532 nm 气溶胶的消光系数垂直廓线及其垂直积分-气溶胶光学厚度。另外,还包括气溶胶类型(海洋气溶胶、沙漠沙尘气溶胶、污染大陆气溶胶、清洁大陆气溶胶、生物质燃烧气溶胶等)及空间分布信息。需要指出的是,气溶胶平均廓线产品分为两种:一是针对所有种类气溶胶(下文称总气溶胶),二是仅针对沙尘气溶胶。根据天空条件和时间范围,CALIPSO L3 V1.00 分为四种类型产品(见表 1),产品空间分辨率见表 2。文中采用 All sky 条件白天的产品。资料研究时间尺度为 2006 年 7 月—2012 年 6 月,共 6 年。

表 1 CALIPSO L3 V1.00 产品类型

天空状况	时间范围
All sky (各种云天条件)	白天
All sky (各种云天条件)	夜间
Combined (包括无云、云上两种情况)	白天
Combined (包括无云、云上两种情况)	夜间

表 2 CALIPSO L3 V1.00 产品空间范围和分辨率

方向	范围	分辨率
纬向	180°W—180°E	5°
经向	85°N—85°S	2°
垂直	-0.5~12 km	垂直 60 m

2 结果分析

2.1 气溶胶光学厚度分布

CALIPSO 卫星反演得到的 532 nm 波长全球总气溶胶光学厚度 (Aerosol Optical Depth, AOD) 与沙尘气溶胶光学厚度 (Dust Aerosol Optical Depth, DAOD) 分布分别如图 1 和图 2 所示。由图 1 可见,全球总气溶胶主要分布在西非及临近的大西洋海域、中非南部、西亚、南亚、塔克拉玛干沙漠以及东亚大陆东部沿海地区。结合图 2 分析可知,除中非南部和东亚大陆东部沿海地区外,这些地区同时也是沙尘气溶胶的主要分布区。图 3 给出了全球 532 nm 波长 DAOD/ AOD 比值分布。由图 3 可见,撒哈拉沙漠地区沙尘气溶胶占总气溶胶的比值达 0.9 以上,西亚绝

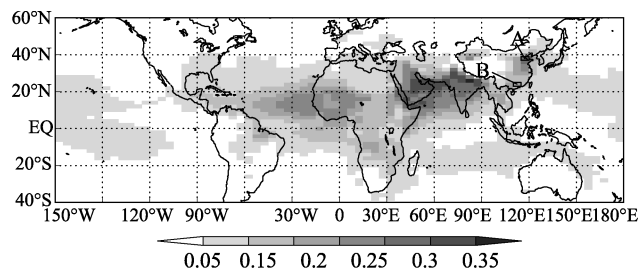


图1 532 nm 波长气溶胶光学厚度

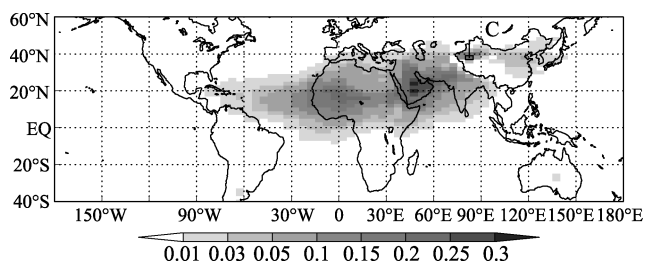


图2 532 nm 波长沙尘气溶胶光学厚度

大部分地区比值也都在 0.7 以上,我国西北绝大部分地区比值都在 0.5 以上,塔克拉玛干沙漠在 0.8 以上。

在这些地区,气溶胶的主要组成为沙尘气溶胶。我国东部地区比值较低,大部分地区在 0.2 以下,说明该地区沙尘气溶胶的比重较小,其他种类气溶胶含

量较高,如硫酸盐气溶胶、碳气溶胶等^[9]。文中重点研究东亚地区气溶胶的垂直分布特征。在后文研究中,图 1 选择 A、B 作为总气溶胶代表性格点,分别代表华北和华南地区;图 2 选择 C 为沙尘气溶胶代表性格点,代表塔克拉玛干沙漠地区。

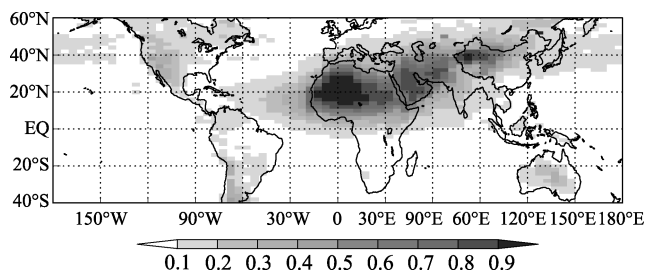


图3 532 nm 波长沙尘气溶胶光学厚度与总气溶胶光学厚度的比值

2.2 总气溶胶垂直分布

采用消光系数廓线来分析总气溶胶垂直分布。根据上文分析,东亚大陆东部沿海地区的总气溶胶分布最为显著。根据图 1,选择 115°E—120°E 经度带分析 532 nm 消光系数廓线,如图 4 所示。由图 4 可见,该地区总气溶胶垂直廓线具有以下特征。

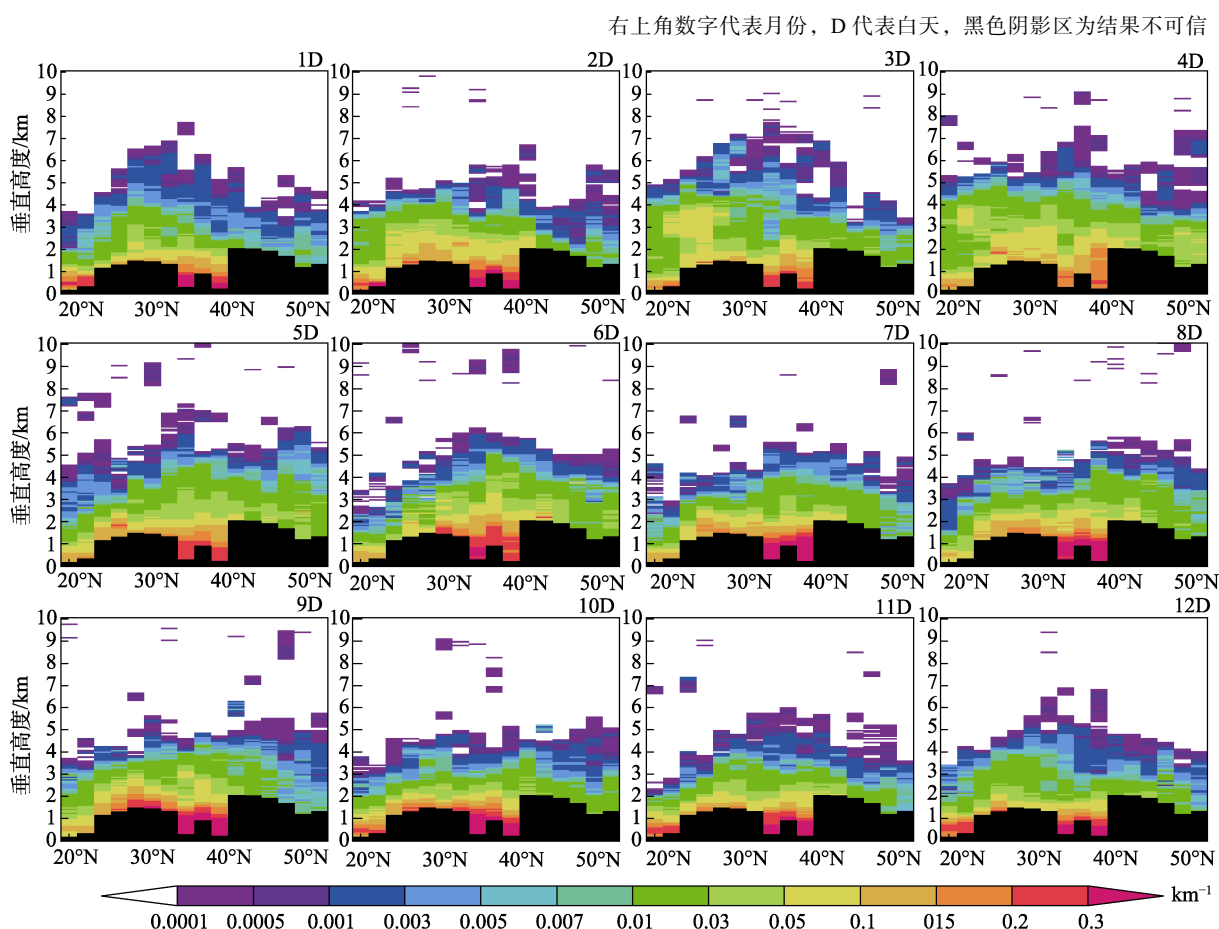


图4 沿 115°E—120°E 总气溶胶消光系数廓线

1) 一般而言, 近地面附近消光系数最大, 随着高度的上升而逐渐减小, 表明总气溶胶浓度随高度的增加而减小。这是从气候平均角度得到的结论, 与个别时期气溶胶分层情况显然不同。

2) 显著的月际变化。3—6 月份, AOD 在一年中处于低值, 但由于该时期对流活动较强, 而降水较少, 气溶胶容易向上传输, 到达的高度较高, 白天消光系数 0.01 km^{-1} 值一般能达到 5 km 左右。7—8 月份降水显著, 对气溶胶的冲刷作用明显。9—11 月份对流活动减弱, 这些因素均抑制了气溶胶的向上传输。

3) 显著的地区差异。以消光系数 0.01 km^{-1} 为例, 如 11 月一次年 2 月, 华南地区 0.01 km^{-1} 值在我国东部达到的高度最高, 而其他月份一般在长江以北至华北地区达到的高度最高。

选择 A、B 两个格点进一步分析总气溶胶垂直特征, 分别如图 5 和图 6 所示。两个地区气溶胶所含种类、比例均存在较大不同。可以看出, 多数月份, 在可信区域内, 消光系数随高度的增加而迅速减小, 但也存在差别。华北地区, 10 月一次年 3 月份气溶胶主要位于 3 km 高度以下, 4—9 月主要位于 $4\sim 5 \text{ km}$

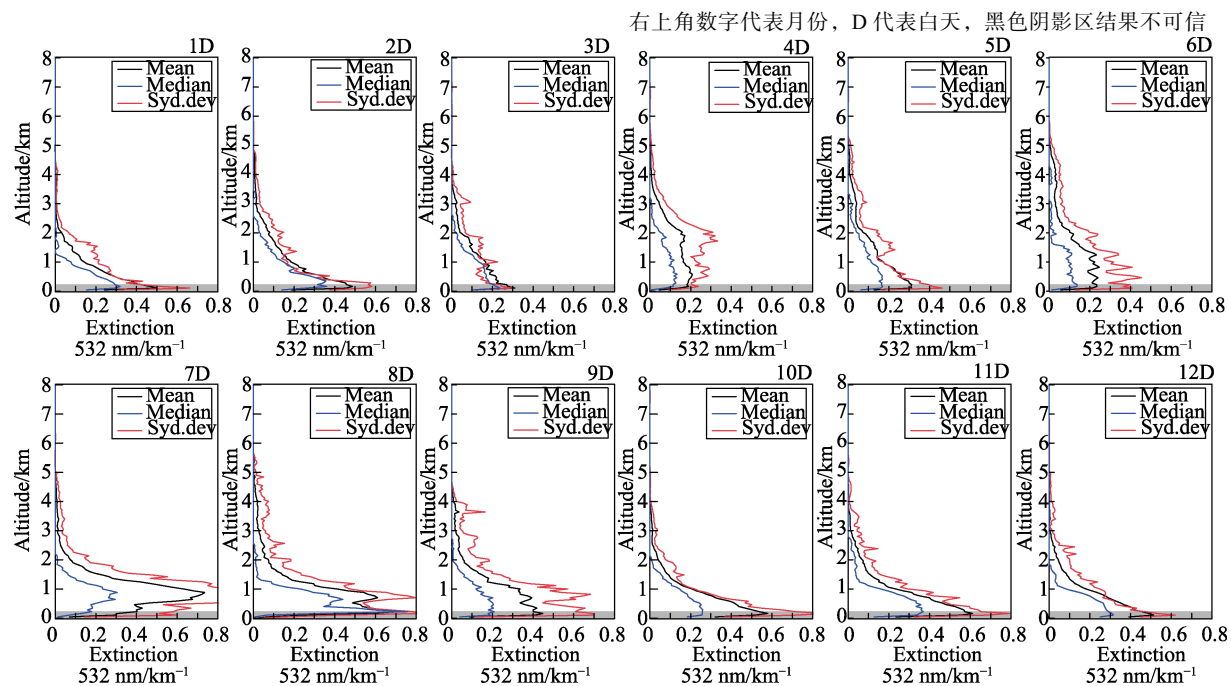


图 5 格点 A 气溶胶的消光系数廓线

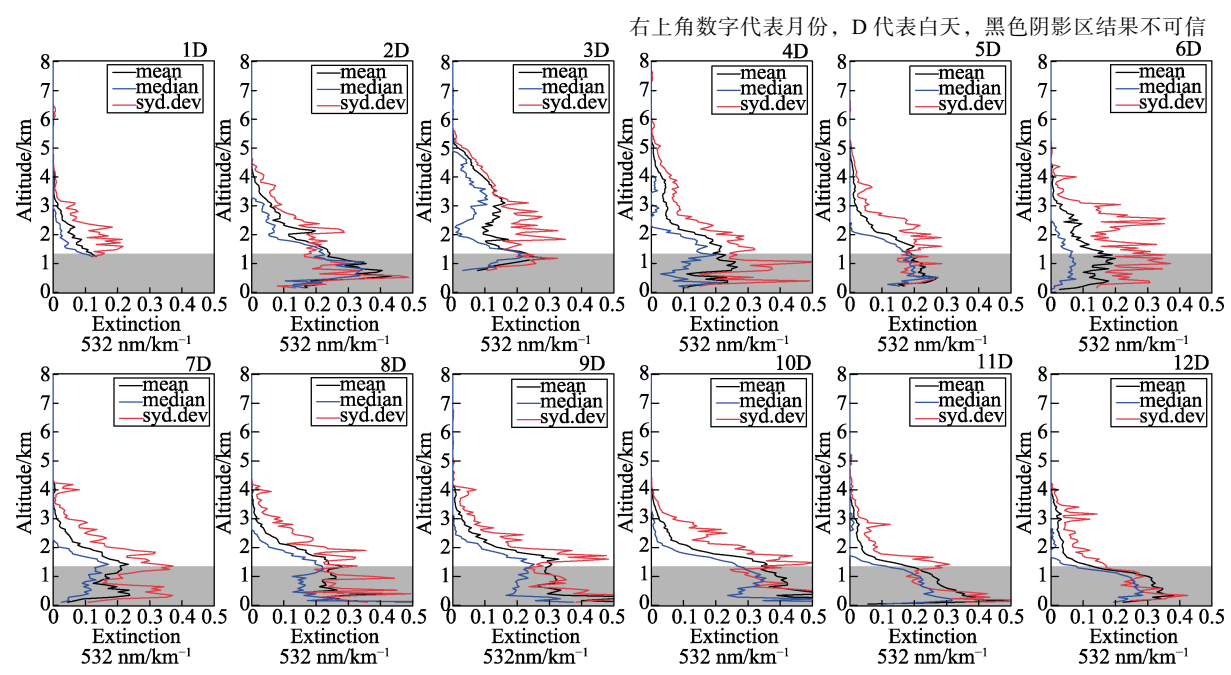


图 6 格点 B 气溶胶的消光系数廓线

以下。另外, 3—6月, 2 km 高度以下, 气溶胶消光系数变化并不大, 表明该时期气溶胶浓度在近地面到 2 km 高度分布比较均匀。7—8月, 大约在近地面到 2 km 高度, 气溶胶消光系数数值在一年中最显著, 但最大值没有出现在近地面, 而是在 1 km 左右高度。华南地区, 3月, 白天消光系数最大值出现在 3 km 左右高度, 而夜间出现高度在 2.5 km 左右。除 3—4 月外, 该地区气溶胶所处的高度主要在 4 km 以下。

对 A 和 B 两点总气溶胶分布进行了拟合分析。华北地区大致在 0.76 km 高度以上, 华南地区在 1.6 km 高度以上, 气溶胶消光系数随高度的增加呈指数减小, 公式分别为 $E_A = 0.666e^{-0.076h}$ 、 $E_B = 0.3e^{-0.091h}$ 。其中 E_A 、 E_B 分别为 A、B 格点消光系数, km^{-1} ; h 为垂直高度, km。两函数与原始数据具有非常高的相关性, 相关系数分别为 0.99、0.94, 并通过了 0.001 显著性检验。

2.3 沙尘气溶胶垂直分布

结合图 2, 选择 37°N — 39°N 纬度带分析东亚-北太平洋地区沙尘气溶胶 532 nm 消光系数的垂直分布特征, 如图 7 所示。由图 7 可见, 该地区沙尘气溶胶的垂直廓线与我国东部沿海地区总气溶胶的垂直廓线具有相似之处, 主要特征如下:

1) 从气候平均来看, 一般近地面附近消光系数最大, 随着高度上升而逐渐减小。

2) 有显著的月际变化, 但具体月际变化特征与总气溶胶不同。1—5 月份, 沙尘活动显著强于其他月份, 同时由于该时期北太平洋地区降水较少, 沙尘气溶胶在向该地区传输过程中, 浓度降低的速度并不快, 同等高度上, 东亚-北太平洋地区沙尘气溶胶的浓度梯度不大。其他月份, 同等高度上, 东亚大陆的沙尘气溶胶浓度一般显著高于北太平洋地区。

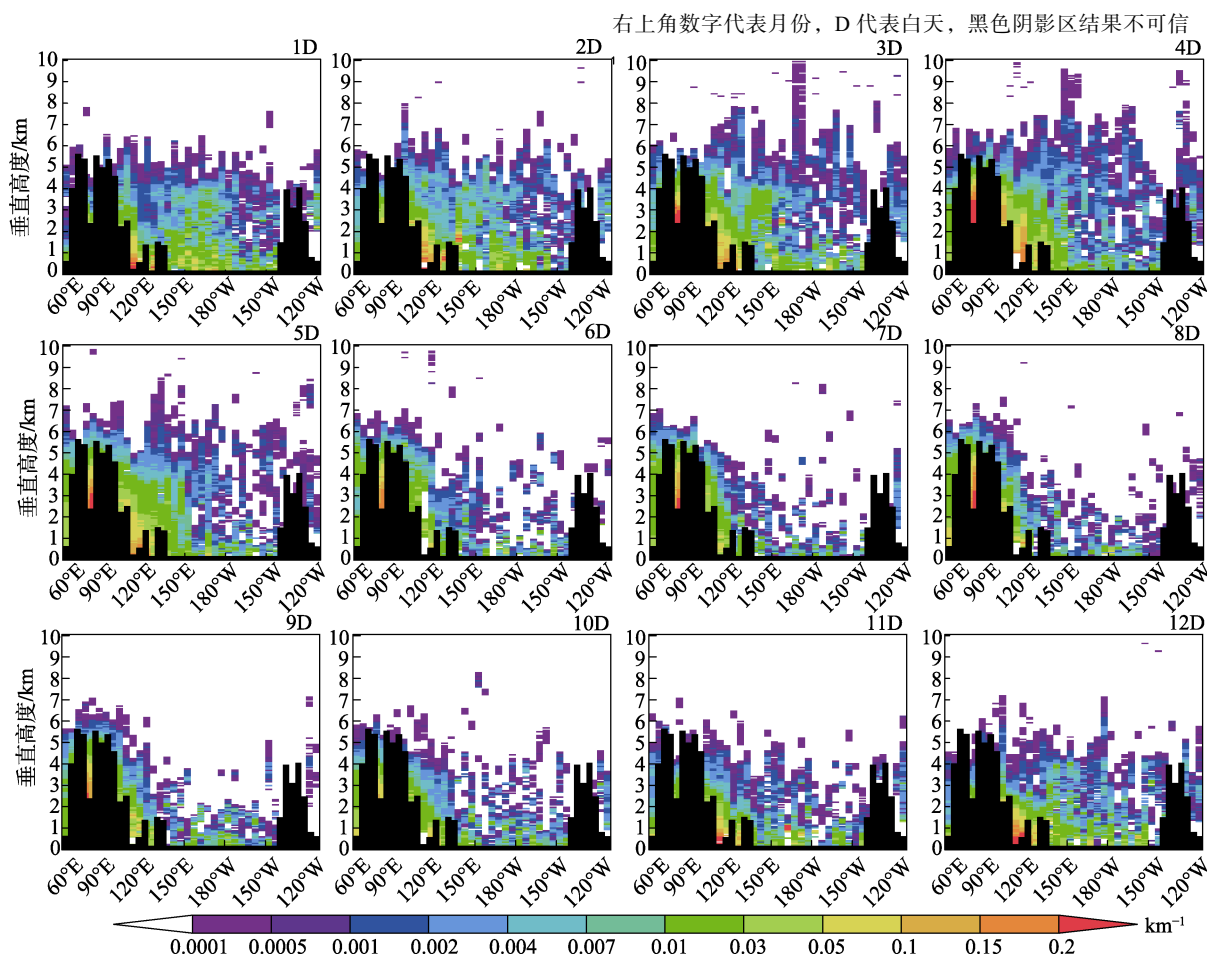


图 7 沿 37°N — 39°N 纬带沙尘气溶胶消光系数廓线

3) 不同地区气溶胶到达的高度不同。以消光系数 0.01 km^{-1} 为例, 东亚大陆所处高度一般在 5~8 km 之间, 而北太平洋地区除 1—5 月在 2~4 km 左右外, 其他月份一般仅 2 km 左右。

通过 C 格点进一步研究塔克拉玛干沙漠地区沙尘气溶胶垂直特征, 如图 8 所示。可见, 在该地区, 11 月—次年 2 月, 沙尘活动较弱, 沙尘气溶胶向上一一般仅能到 3~4 km; 3—4 月以及 10 月, 沙尘活动较

强, 沙尘气溶胶向上一般能到 5 km 左右; 5—9 月, 沙尘活动在一年中最强, 沙尘气溶胶向上可达到 6 km 左右。拟合分析发现, 在可信区域内, 大约在 2.3~5 km

高度之间, 消光系数随高度的增加几乎呈线性递减, 公式为 $E_c = -0.0038h + 0.1673$ 。该线性函数与原始数据的相关系数高达 0.99, 通过了 0.001 显著性检验。

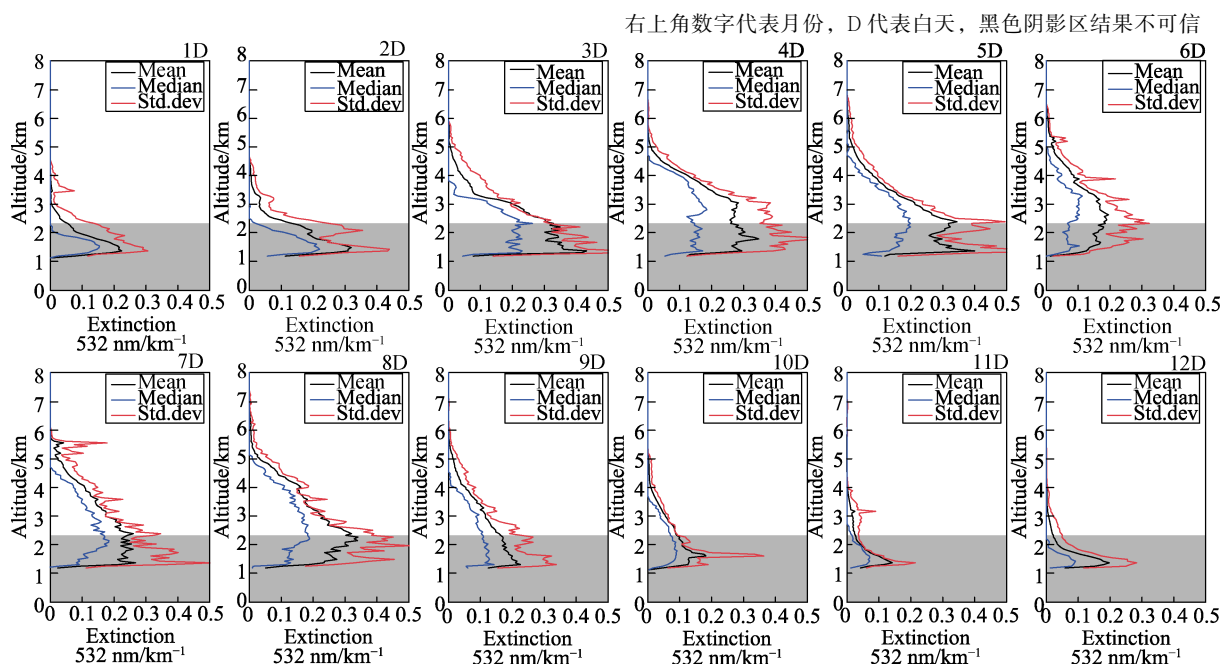


图 8 格点 C 气溶胶的消光系数廓线

3 结论

文中采用 6 年 (2006—2012) CALIPSO 星载激光雷达资料, 研究了东亚地区总气溶胶和沙尘气溶胶垂直分布特征, 并重点对华北、华南两个总气溶胶高值区以及塔克拉玛干沙漠沙尘气溶胶高值区进行了重点分析, 主要得到以下结论:

1) 西北沙尘源区与我国东部沿海地区是东亚 AOD 最显著的两个地区。从 DAOD/AOD 比值来看, 我国西北绝大部分地区都在 0.5 以上, 塔克拉玛干沙漠在 0.8 以上, 这些地区气溶胶种类以沙尘为主。我国东部地区较低, 大部分地区在 0.2 以下。

2) 从气候平均来看, 除少数地区个别月份外, 东亚-北太平洋地区气溶胶浓度最大值出现在近地面附近。

3) 在我国东部沿海地区, 一定高度以上, 总气溶胶消光系数随高度的增加总体上呈指数减小, 而气溶胶所到达的高度具有显著的月际变化和地区差异。

4) 在我国西北沙尘源区, 大致在近地面至对流层中层高度, 沙尘气溶胶消光系数随高度增加几乎呈线性递减。

5) 在中纬度地区, 亚洲沙尘气溶胶跨北太平洋传输在 1—5 月份较强。同等高度上, 东亚-北太平洋地区沙尘气溶胶浓度差异不大, 而其他月份, 同等高

度上东亚大陆沙尘气溶胶浓度一般显著高于北太平洋地区。

参考文献:

- [1] MINNIS P, COX S K. Magnitude of the Radiative Effects of the Sahara Dust Layer[M]. Fort Collins: Colo State Univ, 1977.
- [2] CARLSON T N, BENJAMIN S G. Radiative Heating Rates for Saharan Dust[J]. J Atmos Sci, 1980, 37(1): 193-213.
- [3] LIAO H, SEINFELD J H. Radiative Forcing by Mineral Dustaerosols: Sensitivity to Key Variables[J]. J Geophys Res, 1998, 103(D24): 31637-31645.
- [4] MELONI D, SARRA A D, IOTIO T D, et al. Influence of the Vertical Profile of Saharan Dust on the Visible Direct Radiative Forcing[J]. J Quant Spectrosc Radiat Transfer, 2005, 93: 397-413.
- [5] HUANG J, MINNIS P, CHEN B, et al. Long-range Transport and Vertical Structure of Asian Dust from CALIPSO and Surface Measurements during PACDEX[J]. J Geophys Res, 2008, 113: 23212-23217.
- [6] SATHEESH S K. Aerosol Radiative Forcing over Land: Effect of Surface and Cloud Reflection[J]. Ann Geophys, 2002, 20(12): 2105-2109.
- [7] 宿兴涛. 中国沙尘气溶胶研究新进展[J]. 气象与环境

- 科学, 2008, 31(3): 72-77.
- [8] 宿兴涛. 东亚-西北太平洋地区吸收性气溶胶时空分布变化及区域气候效应研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2013.
- [9] HUANG J, MINNIS P, YI Y, et al. Summer dust Aerosols Detected from CALIPSO over the Tibetan Plateau[J]. Geophys Res Lett, 2007, 34: 18805-18809.
- [10] HUANG J, MINNIS P, YAN H, et al. Dust Aerosol Effect on Semi-arid Climate over Northwest China Detected from A-Train Satellite Measurements[J]. Atmos Chem Phys, 2010, 10: 6863-6872.
- [11] UNO I, YUMIMOTO K, SHIMIZU A, et al. 3D Structure of Asian Dust Transport Revealed by CALIPSO Lidar and a 4DVAR Dust Model[J]. Geophys Res Lett, 2008, 35(6): 6803-6809.
- [12] 陈勇航, 毛晓琴, 黄建平, 等. 一次强沙尘输送过程中气溶胶垂直分布特征[J]. 中国环境科学, 2009, 29(5): 449-454.
- [13] 申莉莉, 盛立芳, 陈静静. 一次强沙尘暴过程中沙尘气溶胶空间分布的初步分析[J]. 中国沙漠, 2010, 30(6): 1483-1490.
- [14] 赵一鸣, 江月松, 张旭国, 等. 利用 CALIPSO 卫星数据对大气气溶胶的去偏振度特性分析研究[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 2943-2951.
- [15] VAUGHAN M, YOUNG S, WINKER D, et al. Fully Automated Analysis of Space-based Lidar Data: An Overview of the CALIPSO Retrieval Algorithms and Data Products[J]. Proceeding of SPIE, 2004, 5575: 16-30.