

一次强沙尘输送过程中气溶胶垂直分布特征研究

陈勇航^{1*},毛晓琴¹,黄建平²,张华³,汤强²,潘鹤¹,王晨浩¹ (1.东华大学环境科学与工程学院,上海 201620; 2.兰州大学大气科学学院,甘肃 兰州 730000; 3.中国气象局国家气候中心,北京 100081)

摘要: 采用 CALIPSO 卫星的星载激光雷达资料,分析了 2007 年 3 月 28 日~4 月 2 日由西向东途经新疆、青海、甘肃、内蒙古、宁夏、陕西、山西、河北、北京、山东、江苏、上海、台湾等省、市、自治区的一次远程强沙尘污染传输过程,对后向散射系数、退偏比、色比等光学特性参数进行了研究.结果表明,这次过程中,较大的沙尘颗粒大多出现在近地面附近,而相对小的沙尘颗粒在对流层中高层垂直剖面上分布比较均匀.CALIPSO 卫星资料能够较好地反映强沙尘远程传输过程中沙尘气溶胶光学特性的垂直分布特征及其粒子大小、不规则性随高度的变化特征.

关键词: 沙尘; 气溶胶; CALIPSO 卫星; 激光雷达; 垂直分布

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2009)05-0449-06

Vertical distribution characteristics of aerosol during a long-distance transport of heavy dust pollution. CHEN Yong-hang^{1*}, MAO Xiao-qin¹, HUANG Jian-ping², ZHANG Hua³, TANG Qiang², PAN Hu¹, WANG Chen-hao¹ (1.College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2.College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 3.National Climate Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China). *China Environmental Science*, 2009,29(5): 449~454

Abstract: A case of long-distance transport of heavy dust pollution from west to east passing through Xinjiang, Qinghai, Gansu, Inner Mongolia, Ningxia, Shaanxi, Shanxi, Hebei, Beijing, Shandong, Jiangsu, Shanghai and Taiwan during March 28-April 2, 2007 was analyzed by using the lidar data onboard CALIPSO satellite. The optical parameters including back scattering coefficient, depolarization ratio, and color ratio were studied. Most large dust particles were near surface while relatively small ones stayed at middle and high altitude and had an even distribution. The lidar data from CALIPSO could reflect the vertical distributions of optical properties of dust aerosols as well as the features of particle size and irregularity varying with altitude during long-distance transport of heavy dust pollution.

Key words: dust; aerosol; CALIPSO satellite; lidar; vertical distributions

近 10 年来,卫星遥感技术取得了巨大进展.美国国家宇航局(NASA)于 2006 年 4 月 28 日发射 CALIPSO 卫星(气溶胶激光雷达和红外开拓者卫星观测)升空,其携带的激光雷达可以精确、快速地获取地面和大气三维空间信息,是监测气溶胶消光系数垂直分布和垂直方向积分的强有力工具^[1-5].

沙尘气溶胶对大气有很强的加热或冷却作用,能够改变大气的热力状况,进而影响大气动力结构^[6-7].据估算,中国西、北部沙漠地区每年向大气中注入约 8 亿 t 的沙尘粒子,中国、东亚以及整个北太平洋地区主要受源于该地区的沙尘气溶胶的影响^[8-10].通常情况下,沙尘气溶胶大部分存在于对流层,其空间分布复杂,随时间变化较

快^[11].过去由于技术限制,星载对地观测仪器只能用来遥感整层大气的气溶胶光学特性,而无法得到其垂直分布情况.近年来我国也有学者用地面激光雷达反演沙尘气溶胶的垂直结构^[12],但只对单点的沙尘气溶胶进行了分析,而无法对区域性沙尘传输过程进行研究.本研究针对 2007 年 3 月 28 日~4 月 2 日由西向东途经我国新疆、青海、甘肃、内蒙古、宁夏、陕西、山西、河北、北京、

收稿日期: 2008-10-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40633017,40575036);科技部公益性行业(气象)科研专项经费(GYHY200706036);上海市重点学科建设项目(B604)

* 责任作者, 副教授, yonghangchen@dhu.edu.cn

山东、江苏、上海、台湾等省、市、自治区的一次强沙尘污染过程,通过分析 CALIPSO 星载激光雷达获取的辐射参量的变化,探讨了沙尘气溶胶辐射特性的垂直分布特征以及粒子尺度、不规则性随高度的变化特征。

1 方法简介

CALIOP(正交极化云-气溶胶激光雷达)是 CALIPSO 卫星上最重要的探测设备,包括激光发射系统和接收系统。发射与接收系统位于 T 型光学平台上,从而保证了系统的稳定性。CALIOP 望远镜接收的回波信号分为 3 个通道,一个测量 1064nm 的后向散射强度,另外 2 个通道测量 532nm 后向散射信号的正交极化部分,因而在进行反演计算时,将 2 个通道分别获取的后向散射强度叠加作为 532nm 激光总的后向散射强度^[1-2,4]。因此,CALIOP 可以获得轨道白天和晚上的 2 个波长(532,1064nm)的后向散射系数(后向散射系数定义为目标在雷达方向上单位体积角的反射功率对单位面积入射功率之比的 4π 倍)。CALIOP 还提供了 532nm 体积退偏比的垂直廓线,退偏比是 532nm 垂直后向散射强度与 532nm 平行后向散射强度之比。它反映的是被测颗粒的不规则程度。CALIOP 还提供了色比值,色比值是 1064nm 的后向散射强度与 532nm 总后向散射强度之比,通过色比值能够识别颗粒的大小,色比值越大,颗粒越大^[1-2,4]。

2 沙尘天气过程概况

受蒙古气旋东移过程中冷空气的影响,自 2007 年 3 月 27 日起,我国新疆、甘肃、青海、陕西、内蒙古、北京、天津等西北及华北地区出现大风扬沙、浮尘甚至是沙尘暴天气,浮尘随西北方向的高空气流飘移到山东上空。山东地区由于地面风力比较小,浮尘难以飘走,3 月 31 日中午开始,出现了 2007 年以来第一次大范围浮尘天气。辽东半岛的大部分地区也出现浮尘。从 3 月 31 日夜里开始,江苏省的风向由东南风和西南风转为偏北风,4 月 1~2 日沙尘进入江苏省,苏北地区受到很大的影响。随后沙尘由渤海、东海上空输送

到上海。其中大连、济南、连云港等城市均出现了重度污染。上海的空气质量也呈现出了自 1998 年以来最差的状况:4 月 2 日,可吸入颗粒物日均值达 $0.623\text{mg}/\text{m}^3$,为 2006 年日均值的 7 倍左右;空气污染指数达到 500 的高峰值。

3 结果与讨论

3.1 后向散射系数与退偏比特征

图 1a 中后向散射系数为 0.0045~0.1000 的颗粒,一般认为是云;绿色至橙色代表的是后向散射系数为 0.0008~0.0045 的颗粒,一般认为是气溶胶;蓝色代表的是后向散射系数在 0.0001~0.0008 的颗粒,一般认为是气体分子;图的最下方灰色部分反映地形的影响。由图 1a 可见,在 78.22°E , $48.78^\circ\text{N}\sim 82.28^\circ\text{E}$, 36.95°N 轨迹范围有明显的橙色部分,均分布在海拔 5~13km 之间,这说明在 2007 年 3 月 28 日 15:16, CALIPSO 卫星轨道经过这一区域时,此处有明显的沙尘天气。在图 1a 的基础上,选取其中位于我国新疆塔克拉玛干沙漠中部的一个点(82.19°E , 37.25°N),绘出其上空 2007 年 3 月 28 日 15:16 时卫星观测到的 532nm 退偏比的图(图 1b)。由图 1b 可见,这一垂直剖面中,近地面到对流层顶退偏比都很大,最大在 5km 处,高达 80%。

由图 2a 可见,在 34.20°E , $93.60^\circ\text{N}\sim 46.05^\circ\text{E}$, 97.39°N 轨迹范围内大量的云与气溶胶并存,这些气溶胶的高度大约在海拔 8~13km,相比图 1a,沙尘高度有一定的上升。图 2b 是选取图 2a 中沙尘比较明显的一点(94.46°E , 37.17°N)绘出的退偏比图,此处位于我国青海省的西北部。由图 2b 可见,海拔 8km 以下退偏比非常小,说明其中颗粒的不规则程度很小,天气晴好,而在海拔 8km 以上,退偏比明显增大,稳定在 40%左右,说明其中颗粒的不规则程度相当大,沙尘浓度较高。

计算退偏比在各个高度的频率得到图 3,图 3 中 a 和 b 分别是对应于图 1a 和图 2a 垂直剖面范围的退偏比频率图。由图 3a 可见,2007 年 3 月 28 日 15:16,在我国新疆塔克拉玛干沙漠中部,退偏比值在 0~100%均有出现。在 0.5~10km 高度,退偏比值 95%~100%的出现频率很高,约 10%~25%,特别是在 0.5~5km 高度频率约为 25%,说明此时此高度

上沙尘气溶胶最为密集.5~10km,退偏比值在0~40%出现的频率也较大,可达5%~10%,同时,在此高度退偏比值95%~100%出现频率也相当大,约5%~10%,且退偏比值有随着高度增加的趋势.由图3b可见,2007年3月29日凌晨3:40,在我国青海省的西北部,在对流层中0~6km高度,退偏比值

较塔克拉玛干沙漠中的沙尘气溶胶明显减小,主要集中在0~20%,说明气溶胶粒子的不规则性较小;在6km以上,退偏比值为20%~50%的出现频率约为10%~22%,说明此高度上气溶胶的不规则性较大,沙尘浓度较大,且退偏比值也有随着高度增加的趋势,表明此处越往高空沙尘强度越大.

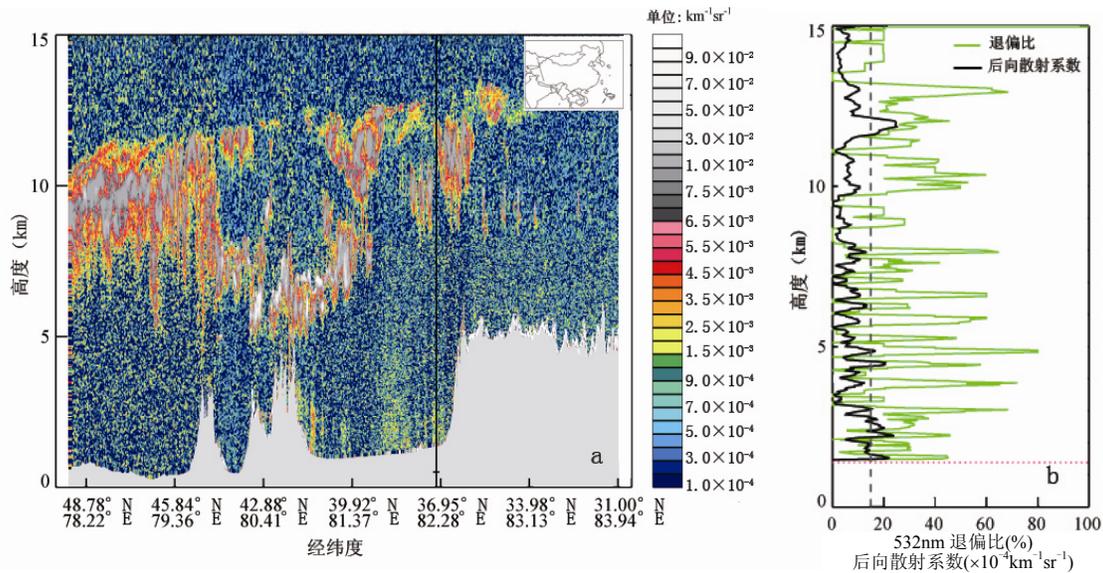


图1 2007年3月28日15:16 532nm 激光总后向散射系数垂直剖面及37.25°N,82.19°E 退偏比与总后向散射系数单点廓线

Fig.1 The altitude-orbit cross-section of total attenuated backscattering intensity and the vertical profiles of depolarization ratio and total 532nm attenuated backscattering intensity at 37.25°N,82.19°E at 15:16, March 28, 2007

a. 总后向散射系数垂直剖面 b. 退偏比和总后向散射系数单点廓线

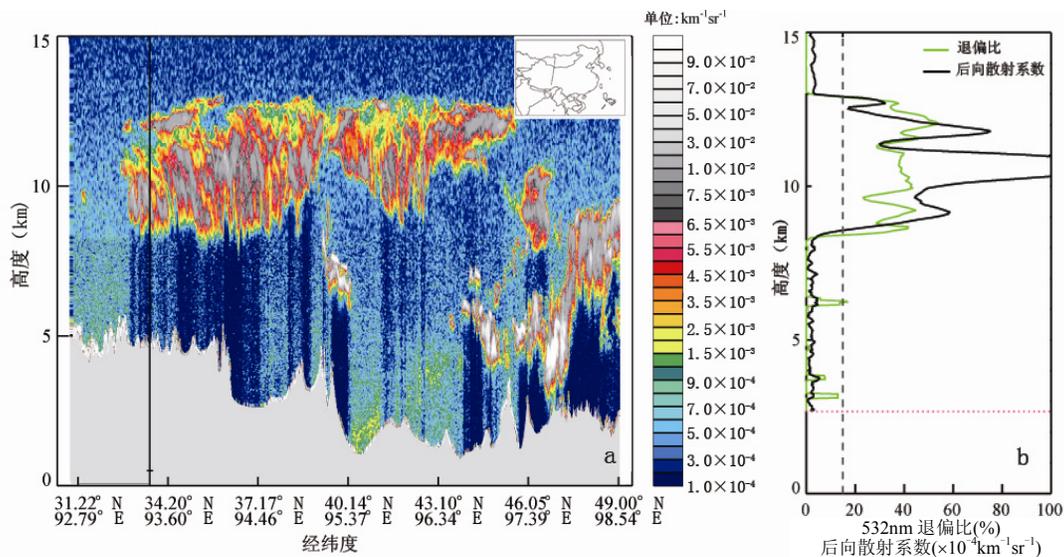


图2 2007年3月29日3:40 532nm 激光总后向散射系数垂直剖面及37.17°N,94.46°E 退偏比与总后向散射系数单点廓线

Fig.2 The altitude-orbit cross-section of total attenuated backscattering intensity and the vertical profiles of depolarization ratio and total 532nm attenuated backscattering intensity at 37.17°N,94.46°E at 3:40, March 29, 2007

a. 总后向散射系数垂直剖面 b. 退偏比和总后向散射系数单点廓线

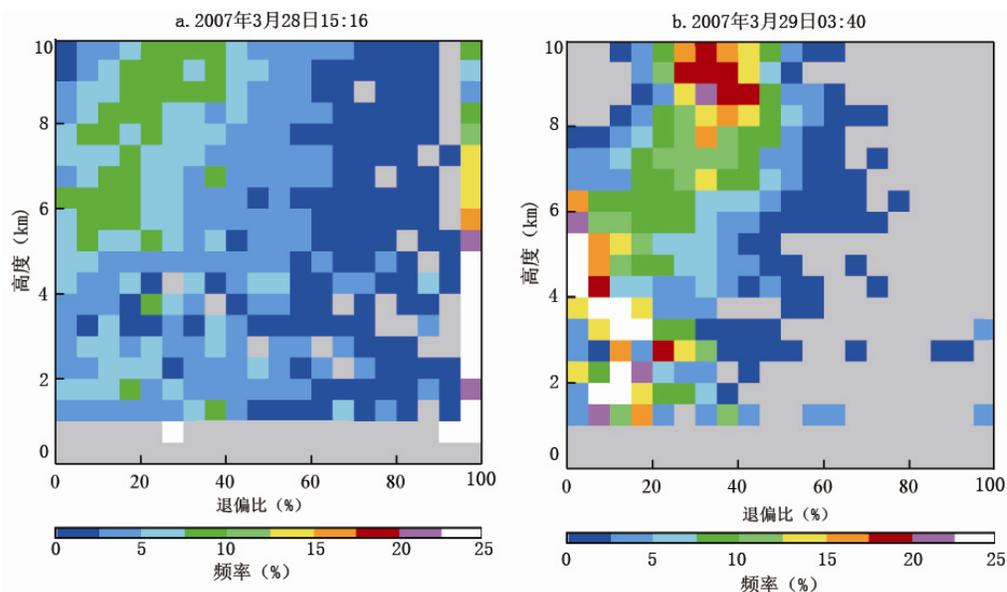


图3 退偏比在各个高度的频率

Fig.3 Frequency distribution of the depolarization ratio as function of altitude

随着沙尘天气系统的东移,2007年3月29日中午14:20分我国内蒙古的西部地区也受到影响,从 $92.13^{\circ}\text{E}, 48.78^{\circ}\text{N} \sim 97.85^{\circ}\text{E}, 31.00^{\circ}\text{N}$ 轨迹区域内的消光后向散射强度可以看到,在海拔10~13km处有明显的沙尘现象,相比图2a,高度又有一定的上升.选取该区域内的一点($95.37^{\circ}\text{E}, 39.62^{\circ}\text{N}$)做退偏比廓线图可以看到,在4~6km以及7~10km处退偏比明显增大,可以说明此时我国内蒙古的西部地区出现了沙尘天气.2007年3月30日下午13:24,从蒙古国中东部 $106.10^{\circ}\text{E}, 48.61^{\circ}\text{N} \sim 106.56^{\circ}\text{E}, 47.44^{\circ}\text{N}$ 的消光后向散射强度垂直剖面图上,可以看到有明显的沙尘现象,与前2d相比,沙尘粒子高度明显降低,主要集中在海拔2~5km处.该区域单点($106.45^{\circ}\text{E}, 47.73^{\circ}\text{N}$)自近地面到10km高空退偏比都较大,表明整个对流层都有明显的分布均匀的沙尘.

从计算出的退偏比频率可知,我国内蒙古的西部地区2007年3月29日中午14:20,整个对流层中,退偏比值为95%~100%占的比重最大,频率为12%以上,其中近地面0.5~3km处退偏比在95%~100%的值出现频率高达25%.其次,出现频率较大的退偏比值在0~50%.这一规律与我国塔克拉玛干沙漠中部极为相像.2~4km处退偏比值

集中在0~20%,且退偏比值随着高度增加有增大的趋势,表明沙尘强度随高度增大.2007年3月30日下午13:24蒙古国中东部,整个对流层退偏比值范围也主要集中在0~50%和95%~100%.

2007年4月1日凌晨2:33,沙尘污染已到达山西省西部 $110.83^{\circ}\text{E}, 36.52^{\circ}\text{N} \sim 111.26^{\circ}\text{E}, 35.04^{\circ}\text{N}$ 轨迹区域内.从消光后向散射强度来看,在这一范围内云与沙尘同时存在.从靠近陕西北部的一点($111.17^{\circ}\text{E}, 36.23^{\circ}\text{N}$)的后向散射系数廓线图可以看到,在海拔5km附近和8~10km高度后向散射系数数值很大,结合退偏比廓线图发现,在这2个高度上,退偏比值也明显增大,大于50%,可以推断,在 $111.17^{\circ}\text{E}, 36.23^{\circ}\text{N}$ 这一点上空,有明显的云.云分为水云和冰晶云,水滴的退偏比约为0,冰晶的退偏比大于50%.由此可以推断在这2个高度处有冰晶云存在,而2个高度之间有水云存在.至于是否云中和云下有沙尘还需其他资料来证实.从退偏比频率来分析,在山西省西部退偏比值范围较窄,为10%~50%,随着高度的增加,退偏比值有增大的趋势.2007年4月1日下午13:12,山西省东部靠近河北地区的 $113.07^{\circ}\text{E}, 37.31^{\circ}\text{N} \sim 113.42^{\circ}\text{E}, 36.12^{\circ}\text{N}$ 轨迹区域内也出现了明显的沙尘,主要集中在海拔8~12km.山西省东部退偏比值范围

广,在 0~100%,有 2 个峰值区 0~50% 和 95%~100%,特别是 95%~100%的出现频率最大,可达 25%.

此次沙尘过程影响范围极大,影响路径的偏南程度也极为罕见.2007 年 4 月 2 日凌晨 1:37 分,包括我国台湾的东南部在内的 121.63°E, 23.04°N~123.00°E,28.59°N 轨迹区域内的对流层内有明显的沙尘现象,从总消光后向散射强度的分析看,沙尘最高浓度出现在海拔 3~5km,近地面沙尘较弱.取其中一点(121.67°E, 23.22°N),分析退偏比频率的结果表明,3km 以下,退偏比 0~100%都会出现,接近 0 的频率很高,其他值的频率较小,说明低空沙尘含量少,而在 4km 以上的对流层中退偏比值主要集中在 70%以下,频率较大.

3.2 色比特征

图 4a 和图 4b 分别是对应于图 1a 和图 2a

垂直剖面范围的色比频率图.由图 4a 可见,2007 年 3 月 28 日 15:16,在我国新疆塔克拉玛干沙漠中部的大部分对流层中,色比值为 0.3~2.0,表明粒子尺度范围较大,其中 0.5~1km 高度内,色比值在 0.7~1.8 出现频率达 15%,说明此时在塔克拉玛干沙漠中部近地面附近有相当多的大颗粒沙尘,由于大颗粒还未被风卷到高空,所以在 1km 以上的高空,色比>1.4 的大颗粒出现频率极小.随着沙尘天气向西移动,由图 4b 可以看出,2007 年 3 月 29 日凌晨 3:40 我国青海省的西北部对流层中,与图 4(a)中塔克拉玛干沙漠中部相比,色比值范围变窄,为 0.4~1.6,低层也不存在很大的沙尘颗粒,说明大沙尘颗粒在传输过程中发生了沉降.此处对流层中的色比值主要集中在 0.7~1.2,这种尺度的沙尘在 5km 以上相对于 5km 以下占的比重更大.

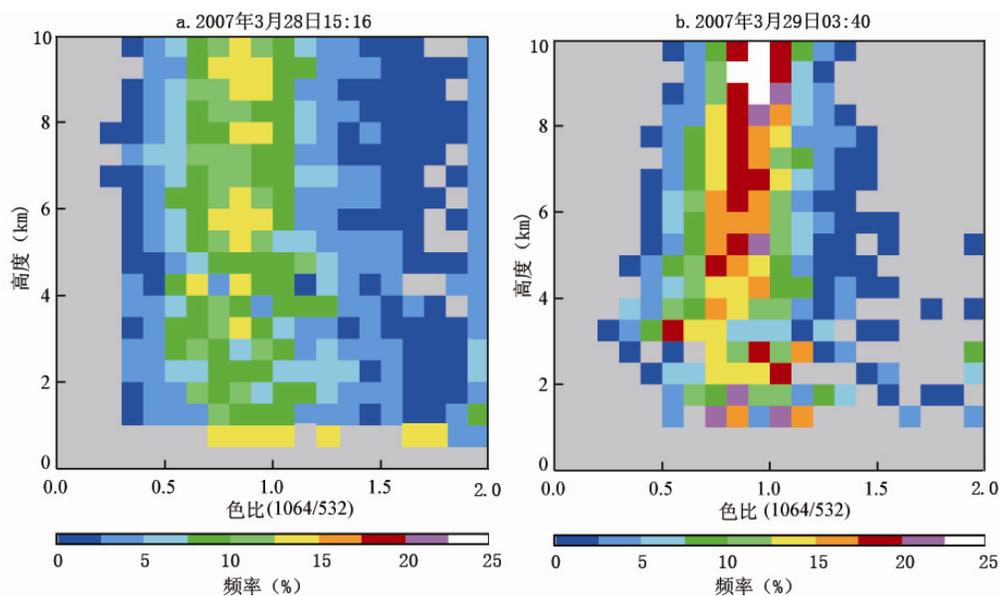


图 4 色比在各个高度的频率

Fig.4 Frequency distribution of the color ratio as function of altitude

从色比频率看,2007 年 3 月 29~30 日在我国内蒙古的西部地区 and 蒙古国中东部,色比值分布范围较大,为 0.3~2.0,说明气溶胶颗粒有大有小.但明显有 2 个峰值区,主要集中在 0.5~1.3 和 1.9~2.0.这与退偏比值的 2 个峰值区 0~50%和 95%~100%相对应.另外,蒙古国中东部,从地面到 1.5km 高度色比为 2.0 的值出现频率高达 25%.

可见,近地面大气中有相当多的大颗粒存在.

2007 年 4 月 1 日凌晨 2:33,沙尘污染到达山西省西部 110.83°E,36.52°N~111.26°E,35.04°N 轨迹区域内时,色比值集中在 0.4~1.5,仅在 0.5~1km 处出现了 1.7~2.0 的大粒子;2007 年 4 月 1 日下午 13:12,沙尘到达山西省东部靠近河北地区的 113.07°E,37.31°N~113.42°E,36.12°N 的轨迹区域

内时,色比值为0.3~2.0.在0.5~3km的高度的色比值1.7~2.0占很大比重,出现频率可达15%~25%.说明在近地面有大颗粒的沙尘气溶胶.

随着沙尘向东向南输送,2007年4月2日凌晨1:37分,包括我国台湾的东南部在内的121.63°E,23.04°N~123.00°E,28.59°N的轨迹区域内的对流层内也出现明显的沙尘现象.从相应的色比频率看,色比值范围分布在0.4~2.0.整个对流层色比值在0.5~1.1范围出现的频率最大,在3km以下,存在>1.5的色比值,有大颗粒存在,但出现机会相对沙尘源区明显减少.在5~7km色比值分布在0.5~2.0,有大颗粒存在,但出现频率小.这一方面说明在对流层中高层集中了相当比重的沙尘气溶胶,另一方面也反映了这里有沙尘通过高空气流远程传输而来.

4 结论

4.1 CALIPSO 卫星资料能够较好地反映强沙尘远程传输过程中沙尘气溶胶光学特性的垂直分布特征及其粒子大小、不规则性随高度的变化特征.

4.2 在我国中西部、蒙古国中东部等植被覆盖少的地区,整个对流层退偏比值有2个峰值区0~50%和95%~100%.且在0~50%峰值区退偏比值有随着高度增加的趋势,表明越往高空气溶胶的不规则性越大,即沙尘强度越大;整个对流层色比也有2个峰值区,分别是0.7~1.1和1.8~2.0,说明这些地方对流层中有相当比重的沙尘粒子尺度比较大.

4.3 在植被覆盖多的地区,退偏比值和色比值大小分布范围都较窄,退偏比的值主要集中在0~50%,色比主要集中在0.7~1.1,说明在这些地区的对流层中小粒子占优势.

4.4 在台湾地区,对流层中高层比低层气溶胶总后向散射强度大,反映出有沙尘通过高空气流远程传输而来.

4.5 这次沙尘输送过程大部分地区较大的沙尘颗粒大多在近地面附近,说明大部分大颗粒沙尘易于沉降到近地面而不再继续迁移,而相对小的沙尘颗粒在对流层里混合,形成对流层中高层垂

直剖面上沙尘分布比较均匀的特点.

参考文献:

- [1] 夏俊荣,张 镭.Mie 散射激光雷达探测大气气溶胶的进展 [J]. 光学技术, 2006,24(4):68-81.
- [2] 贺千山,毛节泰.北京城市大气混合层与气溶胶垂直分布观测研究 [J]. 气象学报, 2005,63(3):374-384.
- [3] 胡欢陵,吴永华,谢晨波,等.北京地区夏冬季颗粒物污染边界层的激光雷达观测 [J]. 环境科学研究, 2004,17(1):59-66.
- [4] 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]. Laser Radar Techniques for Atmospheric Sensing, 2004,5575:16-30.
- [5] Winker D M, Pelon J R. The CALIPSO mission and initial results from CALIOP [J]. Proc. SPIE, 2006,6409,640902,doi:10.1117/12.698003.
- [6] Huang Jianping, Minnis Patrick, Yi Yuhong, et al. Summer dust aerosols detected from CALIPSO over the Tibetan Plateau [J]. Geophysical Research Letters, 2007,34,L18805,doi:10.1029/2007GL029938.
- [7] Tegen I, Lacis A A, Fung I. The influence on climate forcing of mineral aerosols from disturbed soils [J]. Nature, 1996,380: 419-422.
- [8] Fang M, Zheng M, Wang F, et al. The long-range transport of aerosols from northern China to Hong Kong: a multi-technique study [J]. Atmospheric Environment, 1999,33(11):1803-1817.
- [9] Lin T H. Long-range transport of yellow sand to Taiwan in spring 2000: observed evidence and simulation [J]. Atmospheric Environment, 2001,35(34):5873-5882.
- [10] Shaw G E. Transport of Asian desert aerosol to the Hawaiian Islands [J]. J. Appl. Meteor., 1980,19:1254-1259.
- [11] 申彦波,沈志宝,杜明远,等.风蚀起沙的影响因子及其变化特征 [J]. 高原气象, 2005,24(4):611-616.
- [12] 董旭辉,祈 辉,任立军,等.偏振激光雷达在沙尘暴观测中的数据解析 [J]. 环境科学研究, 2007,20(2):106-111.

致谢: 本文资料来自美国 NASA Langley Distributed Active Archive Center,在此表示感谢.

作者简介: 陈勇航(1965-),女,湖南衡阳人,副教授,博士,从事大气环境、大气辐射与遥感等研究.发表论文30余篇.