

星载激光雷达对气溶胶垂直分布的对比分析

刘 聪¹ 苏 林¹ 张朝阳² 范 萌¹ 贾松林³ 苏成林¹ 陈良富¹

¹中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101

²香港理工大学土地测量与地理资讯学系, 香港 999077

³国家气象信息中心, 北京 100081

摘要 云和气溶胶偏振激光雷达(CALIPSO)卫星数据是探测大气气溶胶特征的有效工具。采用CALIPSO数据对37.1°N, 113.3°E ~ 38.6°N, 117°E之间地理区域的强霾天气、沙尘天气、生物质燃烧污染天气和清洁天气的气溶胶消光系数、退偏比、色比以及温度廓线进行对比分析, 结果表明: 1) 强霾天气主要是球形度较高的水溶性细粒子污染, 集中在地表1 km以内, 常伴有逆温无风或弱风现象出现; 2) 沙尘天气垂直分布广, 可存留在高空, 非球形度高, 粒子尺度不均匀, 风速偏大; 3) 生物质燃烧污染天气主要是集中在中低空的细粒子污染, 黑碳成分高, 消光系数大, 常伴有污染性沙尘共同存在。三种污染天气廓线有很大不同, 说明不同污染天气的气溶胶垂直分布的差异很大。

关键词 大气光学; 云和气溶胶偏振激光雷达; 大气气溶胶; 垂直分布廓线; 沙尘气溶胶

中图分类号 TN012

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0413001

Comparative Analysis of Vertical Distribution of Aerosols by Using Spaceborne Lidar

Liu Cong¹ Su Lin¹ Zhang Chaoyang² Fan Meng¹ Jia Songlin³

Su Chenglin¹ Chen Liangfu¹

¹State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

²Department of Land Surveying and Geo-Informatics, the Hong Kong Polytechnic University, Hongkong 999077, China

³National Meteorological Information Center, Beijing 100081, China

Abstract The cloud-aerosol lidar with orthogonal polarization (CALIPSO) satellite data is an effective tool for measuring atmospheric aerosol properties, such as extinction coefficient, depolarization ratio and color ratio profiles. Comparing the aerosol properties during heavy haze, dust storm, biomass burning and clean period by using the CALIPSO satellite data, results show that the vertical distribution of aerosols for different polluted events differ greatly. For heavy haze event, aerosols are concentrated within 1 km above ground surface with high spherical degree and small size, often with temperature inversion and breezeless or weak wind. Comparatively, dust aerosols have wide vertical distribution, and can exist in upper atmosphere, with low spherical degree, non-uniform particle size and high wind speed. The aerosols of biomass burning event are mainly composed of small size particles and concentrated in the low and middle atmosphere, with high black carbon (BC) concentration and large extinction coefficient, which are often accompanied with polluted dust aerosols. According to the results, the CALIPSO satellite data can be used to characterize the category and the characteristic of the atmospheric aerosols.

Key words atmospheric optics; cloud-aerosol lidar with orthogonal polarization; atmospheric aerosols; profiles of vertical distribution; dust aerosols

OCIS codes 010.1100; 010.0280; 260.5430; 280.1350

收稿日期: 2014-09-15; 收到修改稿日期: 2014-10-24

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41130528)、国家973计划(2010CB950801)、国家自然科学基金面上项目(41471367)

作者简介: 刘 聪(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事大气遥感方面的研究。E-mail: liucong_524793824@qq.com

导师简介: 苏 林(1959—), 男, 博士, 研究员, 主要从事大气遥感方面的研究。E-mail: sulin@irsa.ac.cn(通信联系人)

1 引言

大气气溶胶对全球变化过程和人类的生存环境有着非常重要的影响。它对太阳辐射的吸收和散射会改变地球大气系统的行星反照率,从而影响到地气系统的能量平衡^[1-2]。它可以作为云的凝结核,影响降水过程,从而影响地气系统的水循环^[3]。它也可以作为大气污染物,在一定的气象条件下形成灰霾现象,直接影响空气的能见度和人的身体健康。因此,对大气气溶胶光学、微物理、化学特性以及垂直分布特征的研究对于全球变化过程的认识和人类生存环境的改善有着重要的现实意义。

目前,人们对大气气溶胶光学、微物理、化学特性方面的认识有了长足的进展,但对其垂直分布等方面的认识由于其观测手段的不足以及其分布结构的复杂多变,仍然处在一个相对不足的水平。气溶胶的垂直分布特性可以影响大气辐射热量的垂直廓线,从而改变大气的稳定性,影响对流和湍流运动以及云的寿命^[4]。在科学研究方面,气溶胶垂直分布的变化为很多科学问题的定量化研究带来困难,包括气候、云物理、卫星气象、地球化学循环以及空气质量问题。对大气辐射强迫、地表辐射收支以及大气层顶的研究都会涉及到云和气溶胶的垂直分布信息^[5]。同时,空基遥感的大气订正也需要垂直分布信息。因此,对大气气溶胶的垂直分布特性的研究有着非常重要的科学和现实意义。以往的被动遥感只能得到大气气溶胶的整层光学特性,却无法得到其各个高度层的垂直分布特性,而激光雷达这种主动遥感方法可以很好地探测气溶胶的垂直分布特性,是探测大气气溶胶垂直分布的主要手段。

国外对气溶胶垂直分布的研究已经比较成熟。Del Guasta^[6]利用地基 532~1064 nm 地基激光雷达对佛罗伦萨行星边界层气溶胶质量的垂直分布进行观察分析,得到在夏天的早上边界层气溶胶质量浓度最大的结论;Satheesh 等^[7]用机载雷达探测了印度东海岸的气溶胶垂直分布特性,发现高层大气气溶胶消光能力是地表面的 2~3 倍;Raman 等^[8]把在中国喜马拉雅测得的 37 个合适的气溶胶垂直分布数据与云和气溶胶偏振激光雷达(CALIPSO)数据进行对比,得到了两者的偏差。

国内对气溶胶垂直分布的研究也有很多成果。韩道文等^[9]从理论上分析了温度和相对湿度对气溶胶质量浓度垂直分布的影响,并提出了气溶胶质量浓度温湿度修正反演模型;吕阳等^[10]选取北京地区 2013 年 1 月灰霾天气和 2 月晴天天气进行气溶胶垂直分布观测对比,得到严重灰霾天气时气溶胶消光系数可达晴朗天气时的 50 倍;蔡宏珂等^[11]采用 CALIPSO 资料研究了 2008 年 6 月 2 日华东秸秆焚烧排放气溶胶的垂直光学特性,发现该天气溶胶主要是非球形的细粒子组成的。

国内外地基激光雷达的应用已经很广泛,它有高精度、高时空分辨率及垂直分辨率等特点,但也有自身局限性^[12-13],即只能实现单点垂直观测,而星载激光雷达能大范围进行全球全天候的无间断观测,这是地基激光雷达无法比拟的,所以有必要对星载激光雷达的卫星数据进行分析研究。2006 年 4 月 28 日,美国航空航天局(NASA)发射的 CALIPSO 卫星升空,成为 A-Train 系列卫星的一员,用于捕捉云和气溶胶的垂直结构信息^[14]。CALIPSO 携带的正交偏振云-气溶胶激光雷达(CALIOP)可以精确、快速的获取地面和大气三维空间信息^[15],全天候进行全球范围观测,是探测及反演大气气溶胶垂直分布的有力工具。CALIPSO 的载荷双波长 CALIOP 的激光器是半导体抽运 Nd:YAG 激光器,有 532 nm 偏振可见光与 1064 nm 红外两个波长,单脉冲能量是 110 mJ,重复频率为 20.25 Hz。

研究气溶胶的垂直分布能够反映一个区域的大气污染程度,对评价大气环境污染、研究气溶胶的辐射气候效应具有重要的意义^[16],而分布的差异性决定了气溶胶对大气影响的千差万别。引起大气污染的天气情况有很多种,本文对 3 种污染天气(霾、沙尘和生物质燃烧)和一个清洁天气的气溶胶垂直特性进行分析,得到不同类型污染的天气情况的廓线特性,来观察不同类型的污染天气的气溶胶垂直分布是否有较大的差异性。

2 不同类型的气溶胶污染天气垂直分布特性

本文针对 4 种类型气溶胶污染说明其垂直分布特性,选择的地理范围在 37.1°N, 113.3°E~38.6°N, 117°E 之间,包含了河北省邢台市、石家庄市、衡水市以及山东德州等相邻城市;采用的数据为 2013 年 11 月 4 日霾天气数据、2010 年 4 月 3 日沙尘天气数据、2013 年 6 月 14 日生物质燃烧污染天气数据以及 2013 年 11 月 28 日晴朗清洁天气数据,均为二级 5 km 分辨率数据,廓线是根据有效的气溶胶数据平均做成。以上数据均来自

于 NASA 的 CALIPSO 数据应用中心,数据所用波长皆为 532 nm 可见绿光。

2.1 霾天大气垂直分布特性

2013年10月1日~7日之间是一次强霾污染过程,灰霾天持续不散。强灰霾天气的灰霾成分主要以细粒子为主^[17],水溶性无机盐污染严重^[18],天空呈现灰白色,能见度低。图1为10月4日华北地区上空下午中分辨率成像光谱仪(MODIS)影像图,黄线为该天傍晚 CALIPSO 轨迹。从图中可见此次灰霾跨越辽宁、河北、北京、天津、山东西部、河南、山西东部,分布范围广大,其中河北省东南部、北京以及天津地区灰霾非常严重。

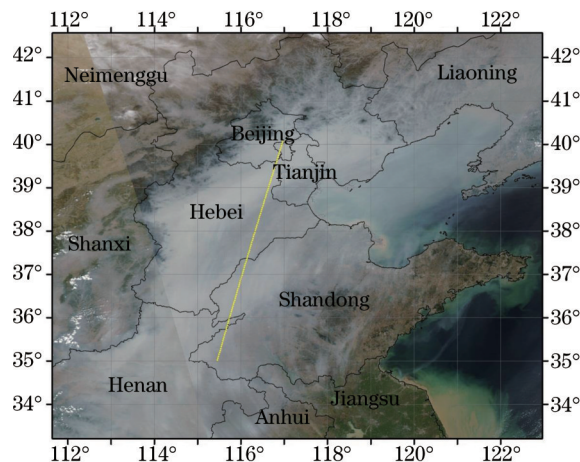


图1 2013年10月4日下午华北地区上空 MODIS 影像图与 CALIPSO 轨迹

Fig.1 True color image of MODIS and CALIPSO trajectory over north China in the afternoon of October 4,2013

图2(a)~(f)分别为数据所在地理区域气溶胶的平均消光系数廓线(蓝色阴影区域为误差区间)、平均退偏比廓线、平均色比廓线、平均温度廓线、不同高度廓线平均数、地表平均风速图,其中图2(a)~(c)图片均已过滤掉云的影响,下文的图均做同样的处理。消光系数误差区间是通过计算所选廓线的标准差得到的,以后的图同理。该天数据选取范围是 37.5°N , 116.2°E ~ 38.0°N , 116.3°E 之间,图2(e)为不同高度层的廓线平均数,由于很多特征值被 CALIPSO 定义为非气溶胶或不确定度较大的气溶胶,而廓线平均的只是确定性较大气溶胶数据,所以不同高度层的廓线平均数会有不同,该天最大廓线平均数是10条,分辨率达到50 km。从图2(a)可见强污染区域在1 km以下,消光系数很大,最大达到了 1.17 km^{-1} ,这主要是因为细粒子水溶性无机盐存在集中在地表面低空;在1 km以上消光系数骤降,均小于 0.2 km^{-1} ,而且随着高度的增大,消光系数值逐渐减小,到3.63 km处减为0,高空处无明显气溶胶层出现。从图2(b)可见在1 km以下气溶胶粒子退偏比均小于0.1,主要是球形度比较规则的粒子分布,而在1 km以上退偏比逐渐增大,到2 km处出现明显分层,退偏比突然增大,而且在2~4 km之间有很多值都超过了0.2,主要集中在2.3~3.5 km之间。沙尘气溶胶多为非球形,CALIPSO算法的场景分类算法(SCA)中定义退偏比 $\delta > 0.2$ 为沙漠型沙尘气溶胶(无其他气溶胶混合), $0.075 < \delta < 0.2$ 为污染型气溶胶。污染型气溶胶是沙漠型沙尘与生物质燃烧产生的烟尘混合物^[19]。图2(c)显示1 km以下气溶胶色比大部分小于0.5,粒子尺寸很小的细粒子居多,随着高度上升,廓线值整体呈增大的趋势,粒子平均尺寸逐渐增大,粗粒子逐渐增多。图2(d)显示该天灰霾天气出现了典型的逆温现象,逆温层高度约在0.25 km,逆温现象导致污染物停留,不利于扩散,是灰霾天气的常见现象。图2(f)显示该灰霾天气地表经向和纬向的风速都比较小,最大风速不超过3 m/s,这样小的风速限制了污染物的扩散速度,是灰霾污染物积累的原因之一。

综合图2分析可以看出这次灰霾是由两部分气溶胶组成的,1 km以下为小尺寸细粒子引起的主要污染区,消光系数大,是引起当天能见度差的主要原因;1 km以上为沙尘污染区,小尺寸细粒子逐渐变少,不规则形状的粗粒子逐渐增多,其中1~2 km之间为沙尘与生物质燃烧气溶胶的混合污染区,2 km以上出现普通的沙漠型沙尘,主要集中在2.3~3.5 km之间。本次灰霾污染的重点是集中在1 km以下的低空大气,并伴有逆温现象,地表风速小,地表气溶胶消光系数大,主要成分为水溶性粒子,随着高度上升消光系数减小。图3是吕阳等^[10]在2013年1月26日与28日在北京的地基激光雷达观测结果,其结果同样显示灰霾的主要污染区在1 km以下,与本文观测结果相符。

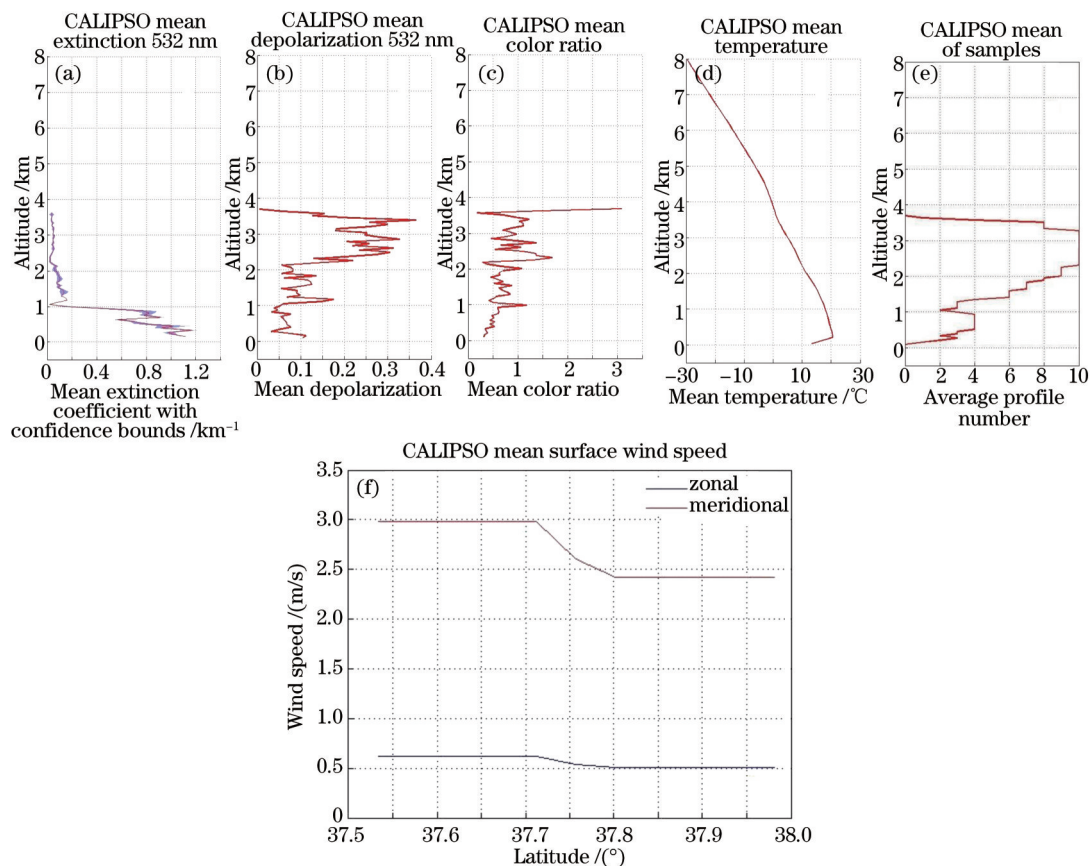


图2 2013年10月4日(a)平均消光系数廓线、(b)平均退偏比廓线、(c)平均色比廓线、(d)平均温度廓线、(e)不同高度廓线平均数和(f)地表风速图

Fig.2 Mean profiles of (a) extinction coefficient, (b) depolarization ratio, (c) color ratio, (d) temperature, (e) number of averaged profiles and (f) surface wind speed on October 4, 2013

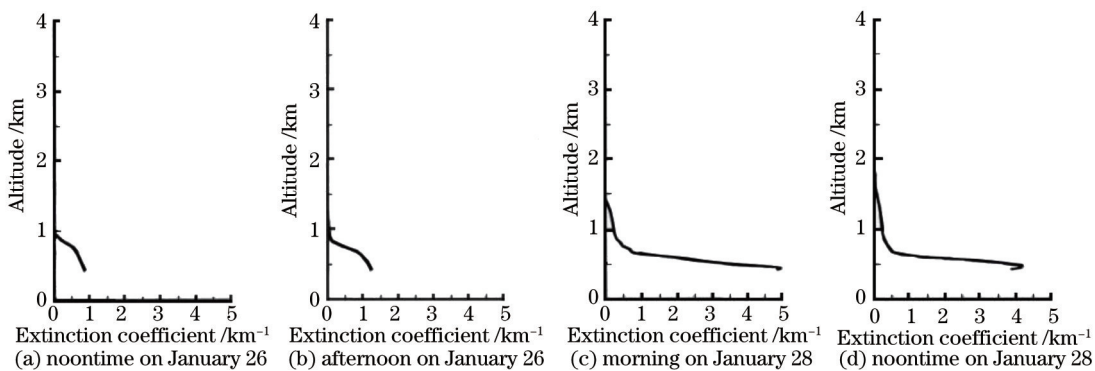


图3 灰霾消光系数观测结果^[10]

Fig.3 Relative information of dust-haze extinction coefficient profiles^[10]

2.2 沙尘天气大气垂直分布特性

2010年4月3日是一个局部大范围的沙尘天气,图4是该天下午MODIS影像图,黄线为该天傍晚CALIPSO轨迹。由图中可见沙尘污染分布集中在河北、天津、北京、山东等地,河南、辽宁、安徽、江苏也被涉及,并延伸到东边近海。污染地区上空天空呈灰黄色,与图1灰霾污染天气有明显颜色区别。

图5是美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供的衡水市(38.0°N, 116.4°E,代表所选数据区域)4月3日前两天的气团后向轨迹,平均海拔高度分别为500、2000、5000 m,每6 h一条新轨迹(横排数字是日期和时间;纵排数字是海拔高度,单位是m)。可见三个高度上沙尘来源均主要是由北边蒙古国中南部和东南部地区,高空(5000 m)沙尘有部分来自中国西北部和西北中蒙边界处。

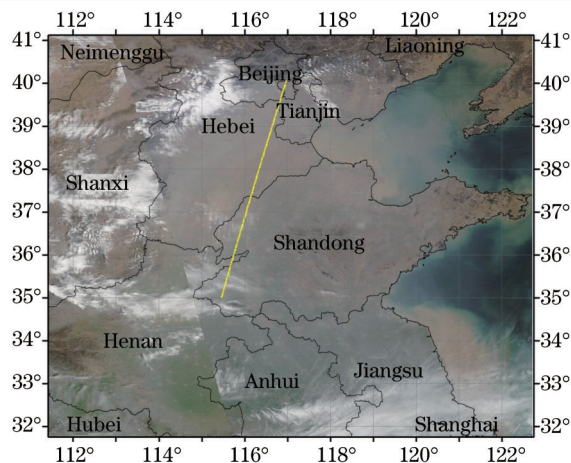


图4 2010年4月3日下午华北地区上空MODIS影像图和CALIPSO轨迹

Fig.4 True color image of MODIS and CALIPSO trajectory over north China in the afternoon of April 3,2010

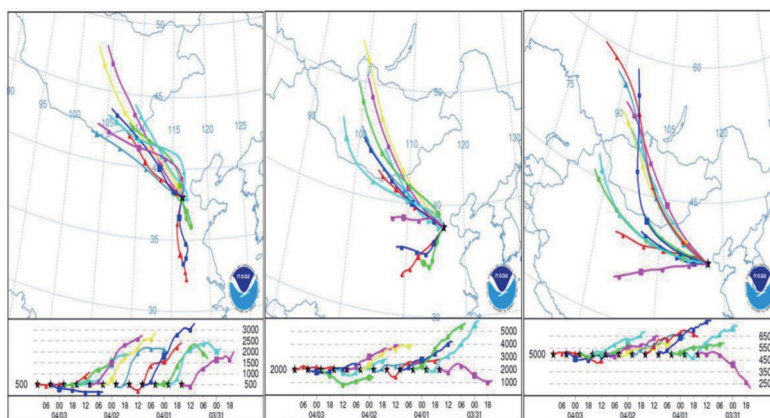


图5 2010年4月3日衡水市(38°N, 116.4°E)18:00前大气气团后向轨迹矢量图

Fig.5 Backward trajectory over Hengshui city (38°N, 116.4°E) before 18:00 on April 3, 2010

图6(a)~(f)分别为数据所在地理区域气溶胶的平均消光系数廓线(蓝色阴影部分为误差区间)、平均退偏比廓线、平均色比廓线、平均温度廓线、不同高度廓线平均数和地表风速图。从图6(e)可知该天最大廓线平均数是4条,分辨率达到20 km。该天所选取的数据范围是38.0°N, 116.4°E~38.2°N, 116.4°E之间。从图6(a)可看出该沙尘天气主要污染区集中在3 km以下,消光系数较大,在1.46 km处达到最大值0.33 km⁻¹,该最大值的大小只有强霾天气消光系数最大值的1/3,可见强霾污染天气的能见度一般比沙尘污染天气低。在2 km以上,消光系数近似抛物线减小,到6.2 km处气溶胶消失,7.1~7.8 km处有少量气溶胶存在。图6(b)、(c)显示该天退偏比绝大部分都在0.2以上,主要沙是漠型沙尘的污染,也有小部分的污染性沙尘。在0~3 km和5~6 km之间有较多的值低于0.2,是污染性沙尘集中的区域。地表附近退偏比和色比值都最大,有大量粗粒子的沙漠型沙尘存留。随着高度增加色比值呈近似抛物线缩小,沙尘尺度越来越小,这是因为粗粒子沙尘气溶胶所占的比例越来越小。图6(d)为该天区域内平均气温廓线,与图2(d)进行对比可知沙尘天气无逆温现象,而灰霾天气有逆温现象,根据气温廓线有无逆温现象可区分两者。图6(f)显示该天经向风速超过了7 m/s,与图2(f)对比明显风速偏大,可知沙尘天气的地表风速一般要强于灰霾天气。

综合以上分析得到结论:该天沙尘污染主要集中在地表3 km以下,其中0~3 km和5~6 km污染型沙尘居多,但仍伴有大量的沙漠型沙尘。1~2 km之间沙尘浓度最高,从退偏比廓线能看出在这一高度层污染性沙尘占主导,污染最严重,3~5 km之间主要是普通沙漠型沙尘聚集区,5 km以上再次出现污染型沙尘;粒子尺度随高度增加逐渐减小,地表附近粒子尺度最大;气温随高度上升而减小,无逆温现象;风速适中平稳,但比灰霾天气要大。与灰霾天气相比,沙尘污染天气气溶胶垂直分布广,其存在范围可从地表到8 km高空。

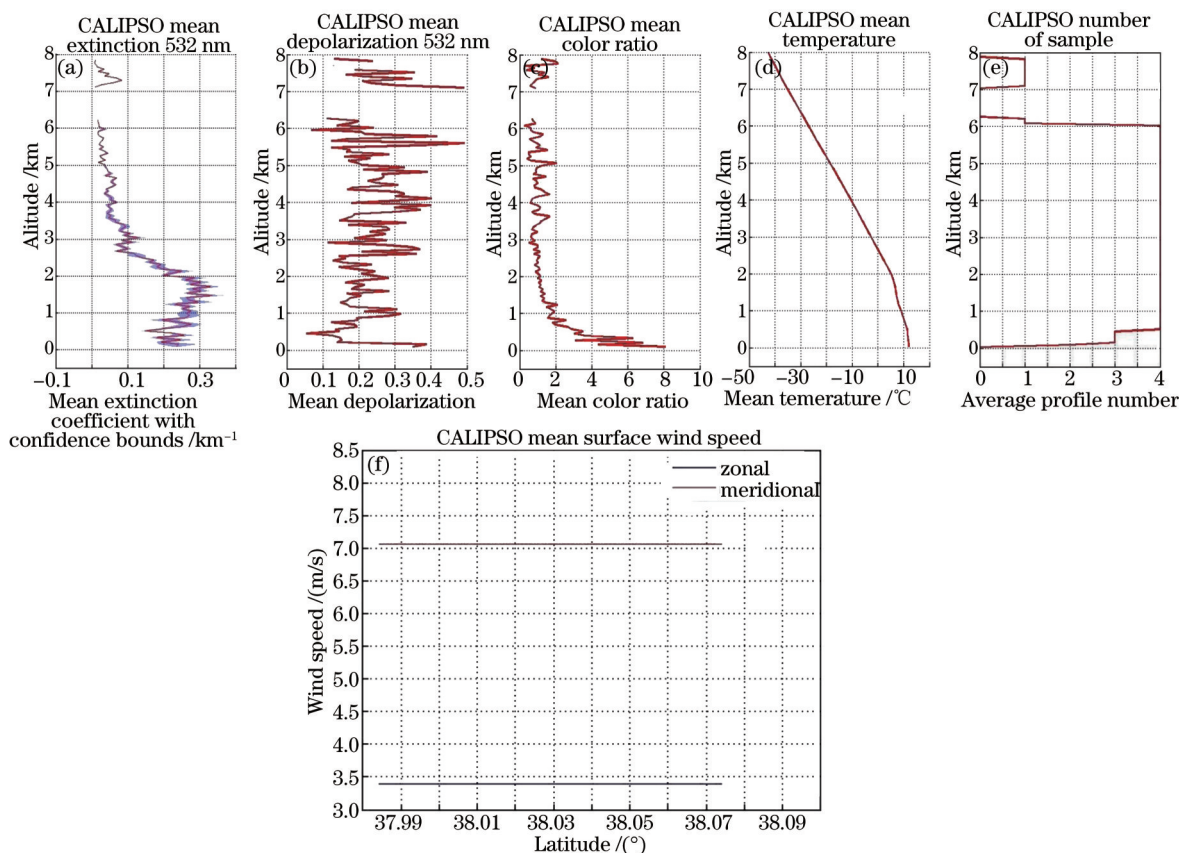


图6 2010年4月3日数据所选区域(a)平均消光系数廓线、(b)平均退偏比廓线、(c)平均色比廓线、(d)平均温度廓线、(e)不同高度廓线平均数和(f)地表风速图

Fig.6 Mean profiles of (a) extinction coefficient, (b) depolarization ratio, (c) color ratio, (d) temperature, (e) number of averaged profiles and (f) surface wind speed on April 4, 2010

2.3 生物质燃烧污染天气大气垂直分布特性

2013年6月14日是中国山东地区大范围火点燃烧日,图7是这天数据所选区域的MODIS真彩图,附有火点分布(图中红点)以及CALIPSO轨迹(图中黄线)。图中可见河北地区大半部、北京、天津等地区上空污染较重,呈灰黑色,山东地区火点分布很密集,说明大范围的火点燃烧对该天大气污染有重要的影响。图8是该天 37.5°N , 116.3°E 处地表高度500 m和1500 m的大气气团后向轨迹矢量图,可见从江苏方向来的风经过山东火点密集区吹到该坐标处,所以该处附近大气污染主要是由于山东地区的生物质燃烧引起的。火点生

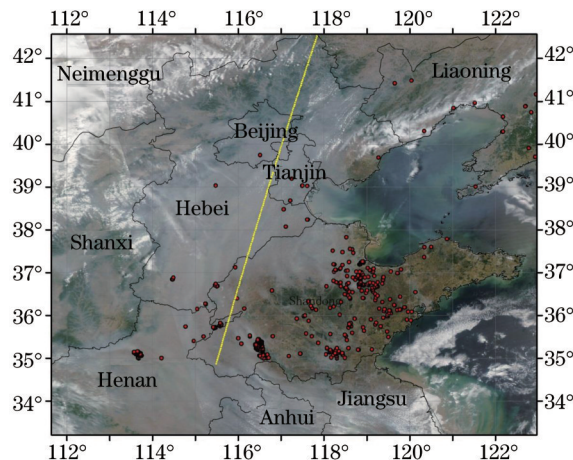


图7 2013年6月14日下午华北地区上空MODIS火点真彩图与CALIPSO轨迹

Fig.7 True color image of MODIS with fire points and CALIPSO trajectory over north China in the afternoon of June 14, 2013

物质燃烧是黑碳气溶胶的主要来源,密集集中的火点生物质燃烧会产生较多的黑碳气溶胶,同时也会对其其他颗粒气溶胶进行污染。

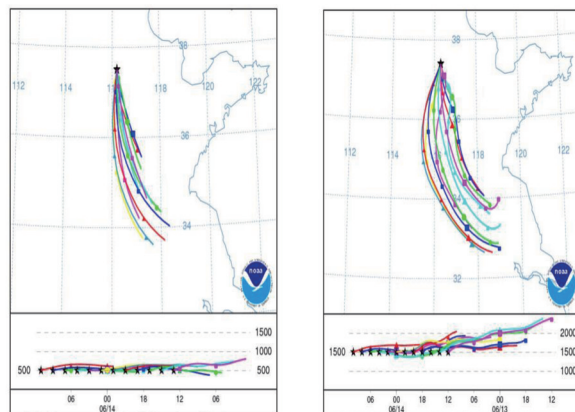


图8 2013年6月14日18:00之前37.5°N,116.3°E处气团后向轨迹矢量图

Fig.8 Backward trajectory over 37.5°N, 116.3°E before 18:00 on June 14, 2013

图9(a)~(f)分别为数据所在地理区域气溶胶的平均消光系数廓线(蓝色阴影区是误差区间)、平均退偏比廓线、平均色比廓线、平均温度廓线、不同高度平均廓线数和地表风速图。该天所选数据范围是37.3°N, 116.2°E~37.6°N, 116.3°E之间,图9(e)显示最大廓线平均数是7条,水平空间分辨率达到35 km。图9(a)中显示主要污染区在2 km以下,其中在1.6 km处消光系数达到最大值0.56 km⁻¹。2 km以上,消光系数骤减,这是因为气溶胶污染物浓度大幅度减小的缘故。图9(b)中显示随着高度上升,气溶胶的退偏比逐渐增大,在2 km以下,退偏比在0.1附近浮动。图9(c)显示2 km以下色比值很小,在0.5~1之间,黑碳气溶胶粒子尺度小,球

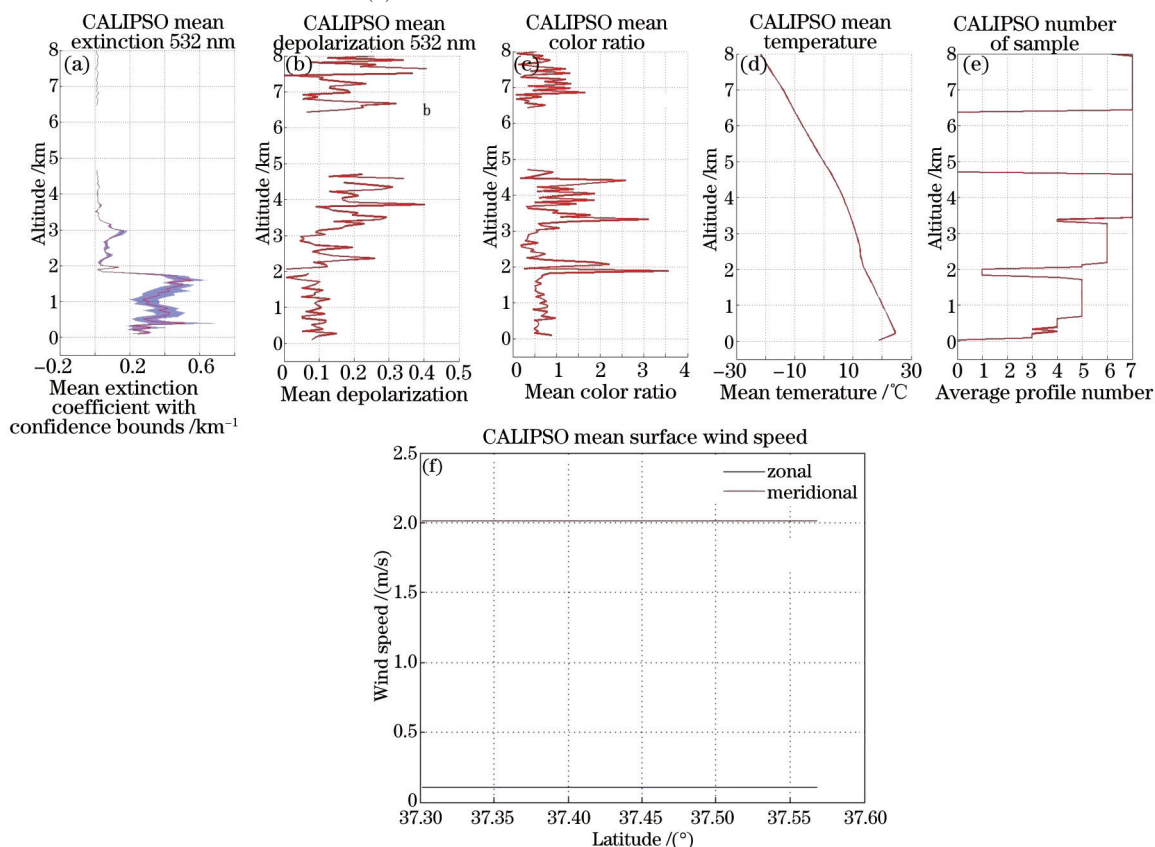


图9 2013年6月14日(a)平均消光系数廓线、(b)平均退偏比廓线、(c)平均色比廓线、(d)平均温度廓线、(e)不同高度廓线平均数和(f)地表风速图

Fig.9 Mean profiles of (a) extinction coefficient, (b) depolarization ratio, (c) color ratio, (d) temperature, (e) number of averaged profiles and (f) surface wind speed on June 14, 2013

形度高,对可见光的吸收性强,2 km 以下退偏比和色比值都很小,却是消光系数最大的区域,很可能是黑碳气最多的区段,是主要污染区段。而2~4 km 处退偏比值整体处于0.1~0.2之间,说明该区间段主要是污染性沙尘气溶胶。4 km 以上退偏比整体较大,大多数超过了0.2,说明该段主要是沙漠型沙尘集中区,6.5~8 km 之间也有少量沙尘存留。2 km 以上气溶胶色比值比较杂乱,基本都在0.6以上,是粗粒子与细粒子的混合区,在2.3.4.4.4 km 处有较大突出值,说明这些高度有较多粗沙尘粒子存在。图9(d)显示该天出现逆温现象,图9(f)显示该天风速很小,不利于污染物的扩散输送,是污染物积累的主要原因。

综合图9可得出结论:在2 km 以下是本次污染的主要污染区段,该段区间消光系数最大,球形度最高,粒子尺度最小,是黑碳气溶胶集中最多的区段;2 km 以上是沙尘污染区,2~4 km 之间整体退偏比主要在在0.1~0.2之间,主要是由于生物质燃烧引起的污染性沙尘集中区,4 km 以上退偏比大多超过0.2,主要是未被污染的沙漠型沙尘集中区;该天有逆温出现,且风速很小,不利于污染物向高空扩散,以至于存留在低空形成污染。

2.4 晴朗洁净天气大气垂直分布特性

2013年11月28日是一个洁净无云的晴朗天气。图10是这天下午的MODIS影像图,黄线为该天傍晚CALIPSO轨迹。从图中可看到这一天北京、天津、河北、山东等地区几乎没有污染,云也非常稀少,只有北京以及河北北部等小部分地区有一些云。

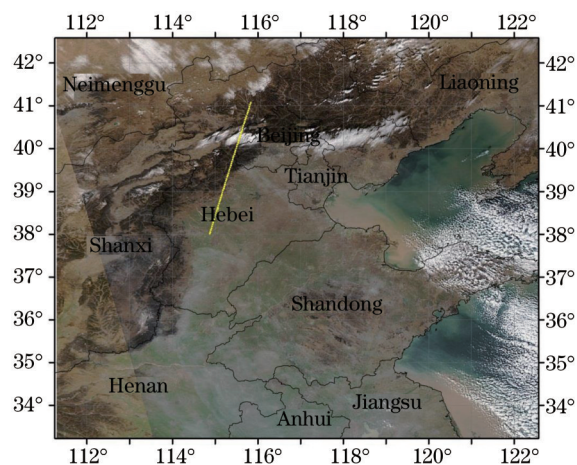


图10 2013年11月28日下午华北地区上空MODIS真彩图与CALIPSO轨迹

Fig.10 True color image of MODIS and CALIPSO trajectory over north China in the afternoon of November 28, 2013

晴朗天气的大气光学特性廓线与污染天气廓线形成鲜明的对比。图11(a)~(f)分别为数据所在地理区域气溶胶的平均消光系数廓线(蓝色阴影区为误差区间)、平均退偏比廓线、平均色比、平均温度廓线、不同高度廓线平均数和地表风速图。该天数据所选范围是38.0°N,114.9°E~38.2°N,114.9°E,从图11(e)中可知最多为4条廓线平均,分辨率达20 km。图11(a)显示气溶胶层仅仅存在于1.36 km 以下,而且消光系数都很小,最大值仅为0.24 km⁻¹,而且占据的高度区间非常小。通过消光系数对高度的积分计算,整层气溶胶的光学厚度只有0.07,这个很小的光学厚度值能很好的说明该天的能见度高,污染少。图11(b)显示气溶胶的退偏比值主要集中在0.1~0.3区间,根据2.1节中陈述,这天有少量沙尘气溶胶。图11(c)显示0.5~1 km 之间处有较大的色比值,该范围内粒子尺度最大,其他区段整体色比值在0.5~1之间。图11(d)显示该天有逆温现象,图11(f)显示该天风速很小,两者都不利于污染物的扩散,由于是11月份秋冬季,天气寒冷,逆温很有可能是由于地表的长波辐射,导致地表附近气温冷却快于上层气温所引起的。这将使气溶胶污染物更容易积累,对天气造成污染。

3 气溶胶垂直分布对比分析

由第2节中的廓线图可看出不同类型的污染天气的气溶胶垂直分布有很大差异,虽然有标准误差和地势高度的影响,但从图中可看到误差区间的随高度的趋势与平均值趋势相近,不会对结论造成影响,而不同天气所选取的数据所在范围都在邢台市及其相邻的城市,海拔高度不会有大的差异,且廓线的起始海拔高度都基本在0.1 km 左右,不会对结论产生较大的影响。由消光系数廓线来看霾天主要分布在地表1 km 附近,最大消光系数是晴朗天气的5倍,沙尘天气沙尘气溶胶垂直分布比其他3种天气都广,可以在高空存留;

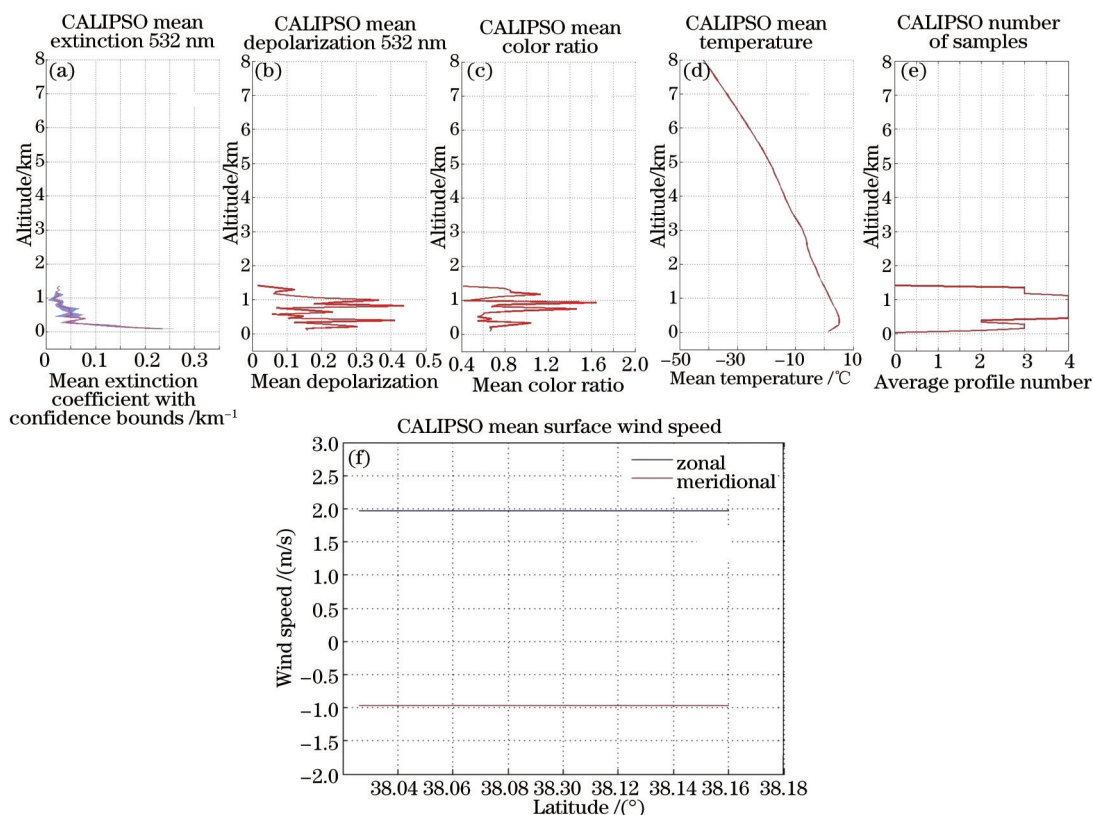


图 11 2013 年 11 月 28 日 (a)平均消光系数廓线、(b)平均退偏比廓线、(c)平均色比廓线、(d)平均温度廓线、(e)不同高度廓线平均数和(f)地表风速图

Fig.11 Mean profiles of (a) extinction coefficient, (b) depolarization ratio, (c) color ratio, (d) temperature, (e) number of averaged profiles and (f) surface wind speed on November 28, 2013

从退偏比和色比来看,沙尘天气气溶胶整体退偏比大,色比不均匀,主要污染区的粒子非球形度和尺度都比灰霾天气和生物质燃烧天气要大,沙尘是形状不规则的粗粒子居多,而灰霾粒子是形状较规则的水溶性细粒子居多,生物质燃烧产生的粒子是形状较规则的细黑碳粒子与沙尘粒子混合居多;从地表风速来看,沙尘天气地表风速也比灰霾天气和生物质燃烧天气大,灰霾天气和生物质燃烧天气地表风速很小,不利于污染物向外输送排放;从温度廓线来看,除了沙尘天气外其他3种天气都产生了逆温现象,不利于地表空气向高空对流,阻止了污染物向高空输送排放,晴朗天气出现逆温现象且风速较小,很可能导致污染物积累形成污染天气。

4 结 论

CALIPSO 卫星能够较好的反映出气溶胶粒子在大气中的垂直分布特性,能够比较准确的区分气溶胶类型,辨识球形度和粒子的大小等气溶胶物理特征。

通过采用3种典型污染天气和一天清洁天气的CALIPSO数据制作不同参数的廓线图,结合不同廓线图进行综合对比,分析了不同天气的消光系数、退偏比和色比廓线差别的原因,给出了主要污染区的分布的污染物类型及物理特性,很好的反映了一个结论:不同类型污染天气的气溶胶垂直分布是有很大差异的。

参 考 文 献

- 1 Mao Jietai, Zhang Junhua, Wang Meihua. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2002, 60(5): 625-634.
毛节泰, 张军华, 王美华. 中国大气气溶胶研究综述[J]. 气象学报, 2002, 60(5): 625-634.
- 2 Meng Xiangqian, Hu Shunxing, Wang Zhenzhu, et al.. Vertical distribution of aerosol extinction coefficient detection in boundary layer using CCD lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0801003.
孟祥谦, 胡顺星, 王珍珠, 等. CCD激光雷达探测边界层气溶胶消光系数垂直分布[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0801003.

- 3 Huang Chaojun, Wu Zhensen, Liu Yafeng, *et al.*. Numerical calculation of optical properties of multi-particle size aerosol aggregate particles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0601006.
黄朝军, 吴振森, 刘亚锋, 等. 多粒径气溶胶凝聚粒子光学特性的数值计算[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0601006.
- 4 B T Johnson, B Heese, S A McFarlane, *et al.*. Vertical distribution and radiative effects of mineral dust and biomass burning aerosol over West Africa during DABEX[J]. *J Geophys Res*, 2008, 113(D17): D00C12.
- 5 Zhang Chaoyang, Su Lin, Chen Liangfu. Retrieval and analysis of aerosol lidar ratio at several typical regions in China[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0513002.
张朝阳, 苏 林, 陈良富. 中国典型地区气溶胶激光雷达比反演与分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0513002.
- 6 Del Guasta M. Daily cycles in urban aerosols observed in Florence (Italy) by means of an automatic 532-1064 nm LIDAR[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(17): 2853-2865.
- 7 S K Satheesh, V Vinoj, S Suresh Babu, *et al.*. Vertical distribution of aerosols over the east coast of India inferred from airborne LIDAR measurements[J]. *Ann Geophys*, 2009, 27(11): 4157-4169.
- 8 Raman Solanki, Narendra Singh. LiDAR observations of the vertical distribution of aerosols in free troposphere: Comparison with CALIPSO level-2 data over the central Himalayas[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 99: 227-238.
- 9 Han Daowen, Liu Wenqing, Zhang Yujun, *et al.*. Influence of temperature and relative humidity upon aerosol mass concentrations vertical distributions[J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2007, 24(5): 619-624.
韩道文, 刘文清, 张玉钧, 等. 温度和相对湿度对气溶胶质量浓度垂直分布的影响[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2007, 24(5): 619-624.
- 10 Lü Yang, Li Zhengqiang, Yin Pengfei, *et al.*. Joint use of ground-based LiDAR and sun-sky radiometer for observation of aerosol vertical distribution[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(4): 1008-1020.
吕 阳, 李正强, 尹鹏飞, 等. 结合地基激光雷达和太阳辐射计的气溶胶垂直分布观测[J]. *遥感学报*, 2013, 17(4): 1008-1020.
- 11 Cai Hongke, Zhou Renjun, Fu Yunfei, *et al.*. Cloud-aerosol lidar with orthogonal polarization detection of aerosol optical properties after a crop burning case[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2011, 16(4): 469-478.
蔡宏珂, 周任君, 傅云飞, 等. CALIOP对一次秸秆焚烧后气溶胶光学特性的探测分析[J]. *气候与环境研究*, 2011, 16(4): 469-478.
- 12 Yu Zhenzhen, Hou Xia, Zhou Cuiyun. Progress and current state of space-borne laser altimetry[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(2): 020006.
于真真, 侯 霞, 周翠芸. 星载激光测高技术发展现状[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(2): 020006.
- 13 Wang Huanxue, Liu Jianguo, Zhang Tianshu, *et al.*. An empirical mode decomposition algorithm based on cross validation and its application to lidar return signal de-noising[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10): 1014001.
王欢雪, 刘建国, 张天舒, 等. 一种基于交叉证认和经验模态分解的滤波算法及其在激光雷达回波信号降噪处理中的应用[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1014001.
- 14 W H Hunt, D M Winker, M A Vaughan, *et al.*. CALIPSO lidar description and performance assessment[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2009, 26(7): 1214-1228.
- 15 Chen Yonghang, Mao Xiaoqin, Huang Jianping, *et al.*. Vertical distribution characteristics of aerosol during a long-distance transport of heavy dust pollution[J]. *China Environment Science*, 2009, 29(5): 449-454.
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研究[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(5): 449-454.
- 16 Liu Zhen. Research on the Spatial and Temporal Distribution of the Northern Region of China Aerosol Based on A-Train Satellite[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2013.
刘 贞. 基于A-Train卫星资料对中国北方地区气溶胶时空分布的研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- 17 Yu Xingna, Li Xinmei, Deng Zengrandeng, *et al.*. Optical properties of aerosol during haze-fog episodes in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(4): 1057-1062.
于兴娜, 李新妹, 登增然登, 等. 北京雾霾天气期间气溶胶光学特性[J]. *环境科学*, 2012, 33(4): 1057-1062.
- 18 Huang Yimin, Liu Zirui, Wen Tianxue, *et al.*. Mass size distributions of the water-soluble inorganic ions in the haze-fog weather of Beijing[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2013, 13(4): 117-121.
黄怡民, 刘子锐, 温天雪, 等. 北京雾霾天气下气溶胶中水溶性无机盐粒径分布[J]. *安全与环境学报*, 2013, 13(4): 117-121.
- 19 Z Liu, A H Omar, Y Hu, *et al.*. CALIOP Algorithm Theoretical Basis Document Part 3: Scene Classification Algorithms[OL]. 2005-10-18. http://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/pdfs/PC-SCI-202_Part3_v1.0.pdf.