

文章编号: 2095-2163(2019)04-0258-05

中图分类号: TN911

文献标志码: A

# 基于激光雷达技术的局域 TSP 特性分析

陈柯蓓, 何梦迪, 张琦, 冯俊, 董昊, 倪晓昌, 芦宇

(天津职业技术师范大学 电子工程学院, 天津 300222)

**摘要:** 基于美国国家航空航天局云—气溶胶激光雷达与红外探测卫星搭载的激光雷达 CALIPSO 卫星系统二级数据, 选取了华北地区(纬度范围: 38°N~40°N, 经度范围: 115°E~117°E) 3 种不同天气特征, 与经纬度地理位置相结合, 通过后向散射系数不同高度色度显示选取的总悬浮颗粒物(TSP)浓度垂直分布廓线, 并利用该分布轮廓线进行了不同特征天气对比分析。结果表明: 空气质量优良、轻度雾霾、重度雾霾 3 种情况下绘制出的二维色度图存在明显颜色和分布的差异, 并给出了二维色度图平均值与当天气象局提供的大气悬浮颗粒物浓度的对比关系曲线, 表明不同天气 TSP 浓度垂直分布存在很大差异, 对直观分析天气状况具有重要意义。

**关键词:** 大气总悬浮颗粒物(TSP); CALIPSO; 背散射系数; 二维色度图

## The analysis of local TSP characteristics based on lidar technology

CHEN Kebei, HE Mengdi, ZHANG Qi, FENG Jun, DONG Hao, NI Xiaochang, LU Yu

(School of Electronic Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

**[Abstract]** Based on the secondary level data of the lidar CALIPSO satellite system carried by the NASA cloud-aerosol lidar and infrared detector satellites, the North China region was selected (latitude range: 38°N~40°N, longitude range: 115°E~117°E) by three different characteristic weathers, the vertical distribution profile of the selected total suspended particulate matter (tsp) is displayed by the different height chromaticity of the backscattering coefficient, which is combined with the geographical position of the latitude and longitude, and the two-dimensional chromaticity diagrams is used to analyze the different weather characteristics. The results show that there are obvious differences in the two-dimensional chromaticity diagrams drawn under the three air quality: good weather, light haze, heavy haze. And the local average of the 2D chromaticity is given and compared with the atmosphere provided by the weather bureau. The contrast curve of suspended particulate matter concentration indicates that the vertical distribution of TSP concentration in different weathers is different obviously, which is of great significance for the intuitive analysis of weather conditions.

**[Key words]** TSP; CALIPSO; back scattering coefficient; 2D chromaticity diagram

## 0 引言

总悬浮颗粒物(TSP)是气溶胶的一种,气溶胶是指气体粒子、固体粒子或其气体介质中的悬浮体。气溶胶按颗粒的直径大小分为总悬浮颗粒物 TSP(直径 $\leq 100 \mu\text{m}$ )、可吸入颗粒物 PM10(直径 $\leq 10 \mu\text{m}$ )、微细颗粒物 PM2.5(直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ )。其中 TSP 是大气质量评价中的一个主要指标,主要来源于秸秆燃烧时产生的烟尘、生产加工过程中产生的粉末、建造建筑和交通过程中的扬尘、风沙扬尘以及气态污染物经过复杂物理化学反应在空气中生成的相应的盐类颗粒<sup>[1]</sup>。影响 TSP 在大气中运动的主要因素有风向、风力大小、温度、大气稳定度等。大

气对于 TSP 的运输和扩散主要作用在垂直和水平两个方向。TSP 对人体的危害程度主要决定于自身的粒度大小及化学组成。慢性呼吸道炎症、肺气肿、肺癌的发病与 TSP 的污染程度明显相关。

大气中的 TSP 能够吸收一部分光线,还能使一部分的光线散射,这减少了太阳光到达地面的强度,从而影响城市的能见度,还可以改变云层存在时间和多少、降雨的多少以及阳光反射的方式。TSP 对能见度影响的程度取决于其中颗粒物的大小和相应的折射指数。在 TSP 浓度大的时候,在人的视野中物体和环境之间失去了对比度;而且由于大气中 TSP 对光的吸收和散射削弱了光的强度,由此就有了晴天、阴天、雾霾等气候现象。

**基金项目:** 天津市科技特派员项目(16JCTPJC52500);大学生创新训练计划项目(201710066046);教育部产教协同育人项目(XJJW0804);天津市十三五专业建设项目。

**作者简介:** 陈柯蓓(1997-),女,本科生,主要研究方向:激光雷达信号处理。

**通讯作者:** 倪晓昌 Email: nixiaochang@tju.edu.cn

**收稿日期:** 2019-04-16

对 TSP 的检测主要有 3 种:地面观测、卫星测量、现场测量。激光雷达具有长期、实时、抗干扰和高空间分辨率的特点,可提供后向散射系数和气溶胶的消光系数。而基于地面的激光雷达,空基激光雷达能获得更多高海拔、长距离、时间长的数据,从而为气象检测提供了多方面的信息<sup>[2]</sup>。

本次研究是基于 CALIPSO 卫星所采集的数据进行的。CALIPSO 卫星是美国航天宇航局和法国国家空间研究中心合作发射的卫星,是用来测量云层和大气中的漂浮物,由此来促进对长期气候变迁和气候变化性的预报<sup>[3]</sup>。其中的云-气溶胶偏振激光雷达 CALIOP 用于检测云和气溶胶的特性。而总悬浮颗粒物(TSP)属于气溶胶的一部分,所以本文讨论的 TSP 垂直浓度也基于 CALIPSO 卫星的数据,主要是检测 TSP 垂直分布的浓度特征。通过对雷达所反馈的数据的计算和分析,对 TSP 及其天气状况变化产生的影响进行分析研究,以便获取更加全面和准确的认识。

本文的数据主要来自于 CALIPSO 激光雷达的二级数据中气溶胶浓度信息数据,选取华北地区 2018 年中优良天气、轻度雾霾、重度雾霾 3 种特征天气各一天的数据,采用 Matlab 制图软件对 3 个特征天气的 TSP 浓度进行绘制二维色度图,直观地表现出不同天气的 TSP 浓度随高度和经纬度的变化,为探讨分析天气变化与 TSP 关系提供了一种新方案。

## 1 数据选取与处理办法

### 1.1 CALIPSO 激光雷达探测原理

本次采用的激光雷达所采集的数据是在单次散射的情况下,雷达接收到了离地面  $z'$  目标的后向散射的回归功率为  $p'$ ,雷达方程为<sup>[4]</sup>:

$$p(z') = \frac{cE_0 Y(z') \beta(z') A_r T_r^2(z') T_r T_t}{2(z-z')^2}$$

其中,  $Y$  表示激光雷达的几何校正参数;  $c$  为光速;  $E_0$  为激光发射器发射的激光脉冲能量;  $p(z')$  表示激光雷达对于被测物的后向散射回波功率;  $z'$  表示被测目标和地面之间的高度;  $z$  为激光雷达距离地面的高度;  $A$  为望远镜的有效接收面积;  $T_r$  为激光雷达接收的透射率;  $T_t$  为激光雷达发射系统的透射率;  $\beta$  为所探测到的大气后向散射系数,由 2 部分组成:

$$\beta(z') = \beta_m(z') + \beta_a(z')$$

其中,  $m$  为大气分子;  $a$  为气溶胶颗粒;  $T$  为激光雷达在  $z'$  的透射率,其表达式为:

$$T(\lambda, z') = \exp\left\{-\int_{z'}^z \alpha(\lambda, z') dz'\right\},$$

其中,  $\alpha$  表示在  $z'$  的大气消光系数,为气溶胶和大气分子的消光系数之和,表达式为:

$$\alpha(\lambda, z') = \alpha_m(\lambda, z') + \alpha_a(\lambda, z'),$$

其中,下标  $a$  为气溶胶分子,  $m$  为大气分子。

综上所述, CALIPSO 激光雷达方程可以表示为:

$$p(r) = \frac{E_0 \xi \beta(r) T^2(r)}{r^2}$$

其中,  $r = (z + z')$ ,  $\xi$  为系统参数,这个值是由 CALIOP 仪器参数所决定的。这些参数包括了几何重叠因子、接收器光学效率、望远镜接收面积等。  $\xi$  的数值随这些参数的改变而改变,一般表达为  $\xi = G_A C$ ,  $G_A$  为放大器的增益影响因子,  $C$  为激光雷达校正参数。

经过增益、距离和能量归一化处理, CALIOP 的激光雷达方程在 532 nm 的平行和垂直以及 1 064 nm 通道的方程可以表示为:

$$P_{532//}(r) = C_{532//} \beta_{532//}(r) T_{532}^2(r),$$

$$P_{532\perp}(r) = C_{532\perp} \beta_{532\perp}(r) T_{532}^2(r),$$

$$P_{1064} = C_{1064} \beta_{1064}(r) T_{1064}^2(r).$$

相应的衰减后向散射系数表示为:

$$\beta'_{532total}(r) = [\beta_{532\perp}(r) + \beta_{532//}(r)] T_{532}^2(r),$$

$$\beta'_{532\perp}(r) = \beta_{532\perp}(r) T_{532}^2(R),$$

$$\beta'_{1064}(r) = \beta_{1064}(r) T_{1064}^2(r).$$

### 1.2 CALIPSO 的数据获取过程及其处理

近年来卫星探测技术不断发展,搭载的云-气溶胶卫星观测平台(CALIPSO)主要载荷双波长正交偏振云-气溶胶激光雷达(CALIOPS)<sup>[5]</sup>,为研究全球范围内的云和大气悬浮颗粒物垂直分布廓线及其光学特性提供了很大的便利。其具有发射 532 nm 和 1 064 nm 2 种波长的功能,两种波长的反向散射信号可以比较和区分大气颗粒物密度与大小,通过正交偏振测量可以区分云的冰相和水相。其对大气颗粒物、烟尘、沙尘等气溶胶成分有很强的观测与区分能力,可以获得大气污染物空间分布的三维结构。CALIOP 目前在科学研究中较常用的是一级产品(Level 1)和二级产品(Level 2),通过 Level 2 产品数据可分析大气中总悬浮颗粒物的垂直分布廓线。CALIOP 提供了总后向散射系数、退偏比、色比和气溶胶光学厚度(AOD)等各项统计参数特征<sup>[6]</sup>。

图 1 介绍了从 NASA 下载 CALIPSO 雷达数据的流程。

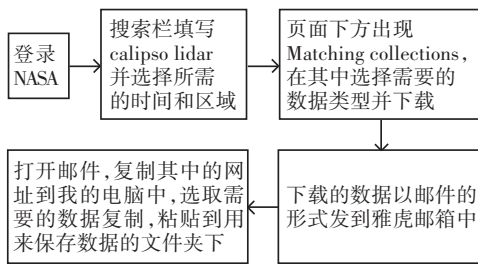


图1 数据下载流程

Fig. 1 Data download process

依据已有的研究来看,采用的方法有很多。这里从提取 CALIPSO 采集的数据中的体积退偏比及后向散射系数这 2 种值来分析大气中的气溶胶分布情况的例子来说明。

体积退偏比是用来测量目标物体的规则程度,一般认为云、水分子和规则形状的气溶胶,这些的体积退偏比很小,近乎为零。被测物质的形状越不规则、越不能被看作是球形的体积退偏比越大<sup>[7]</sup>。

总消光后向散射系数,又称为大气衰减,是指光波在大气中传播时,因受气溶胶和气体分子的散射和吸收而削弱的现象。由定义可知,在气溶胶和气体分子分布较多的区域,这部分的后向散射系数较大。用这组数据可以绘制出后向散射系数随高度变化的柱状分布图。

以上的 2 种对气溶胶的分析方式都是通过采集数据,绘制相应的柱状图,由气溶胶分布数值的高低来确定柱状图,柱状高低得出相应区域的气溶胶分布数量的高低。

本次采用绘制气溶胶在大气中分布的二维图的方式来分析气溶胶分布的多少。近些年随着经济的快速发展城市进程的加快,华北地区天气状况逐渐恶化,晴朗天气逐渐减少,雾霾天气持续增加,严重影响了人们的生活质量和公共安全。因此选取华北地区的优良天气、轻度雾霾、重度雾霾 3 种特征天气的总悬浮颗粒物浓度作为研究对象。

实验中拟合了气溶胶分布高度和经纬度之间关系,得到了关于典型天气的气溶胶垂直廓线图。在图中用不同颜色标记大气中不同的物质,蓝色的部分为水分子,也就是大气中的云,颜色越接近于黄色表示那部分大气污染物含量越高,接近黄色或者黄色部分越多,表明当天的大气污染程度越高。

本次绘制的是气溶胶垂直廓线图,能直观地表现出所测区域的大气气溶胶分布情况。不仅可以从颜色的深浅不同直接看出大气污染物多少,还可以从颜色所分布的位置来得知当天所测区域的大气污

染物处在大气中的高低位置。图 2 介绍了本次运用 MATLAB 绘图的过程:

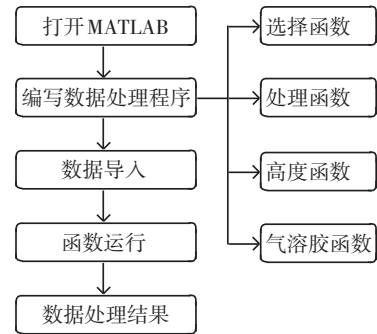


图2 MATLAB 绘图过程

Fig. 2 MATLAB drawing process

## 2 特征天气二维色度图结果分析

### 2.1 重度雾霾

选取华北地区 E115°N40°-E116°N38°。高度从 0~3 KM 低空激光雷达气溶胶数据,进行二维彩色图形绘制,如图 3 和图 4 所示。

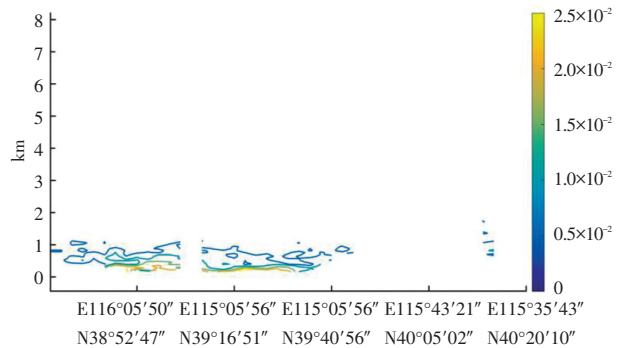


图3 重度雾霾

Fig. 3 Severe haze

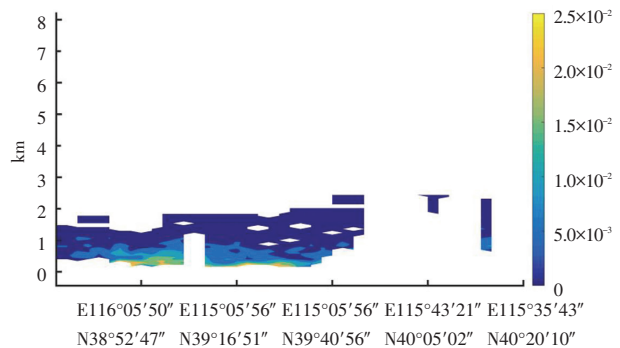


图4 重度雾霾

Fig. 4 Severe haze

首先,选取 2 种绘图方法绘制出图 3 和图 4,图 3 和图 4 同时选取 2019 年 1 月 12 日华北地区重度雾霾特征天气。在绘制图 3 时,选取经纬度信息为

横坐标,高度为纵坐标,右侧为 TSP 对光的后向散射系数数值的彩色分布规律表示图。通过这些标准,使用激光雷达提供的二级数据绘制了 TSP 浓度的二维廓线图,廓线图可以看出 TSP 浓度的大体分布状况,但是本文认为图 3 中 TSP 具体高低的分布状况通过廓线图不能直接展现出来,只能看出大体的分布轮廓,所以进行了改正绘制出图 4。图 4 中可以清晰的看出 TSP 的浓度分布规律,包括每个点所对应 TSP 浓度分布规律,对比图 3 廓线图更能全面直观的看出任何位置的 TSP 浓度分布规律,从而选取图 4 进行后面 TSP 浓度分析,后面的 2 组特征天气也使用图 4 的方法进行绘制和分析。

图 4 中横坐标显示经纬度信息,纵坐标为海拔高度,右侧为 TSP 对光的后向散射系数数值的彩色分布规律表示图。后向散射系数数值大小与 TSP 浓度大小成正比。2018 年 1 月 12 日华北地区  $E115^{\circ}N40^{\circ} \sim E116^{\circ}N38^{\circ}$  区域内,高度从 0~3 KM 低空 TSP 浓度分布为:低空近地面 0~1 KM 内 TSP 浓度随高度的增加浓度越来越低,该高度内后向散射系数分布在此之间。通过后向散射系数和 TSP 浓度的对应关系可知,当天近地面 TSP 浓度很高,雾霾严重,随着高度的增加(1~2 KM 高度内)后向散射系数分布在 0~0.005 之间,TSP 浓度比 1 KM 以下有所降低,大气质量较好。2~3 KM 内后向散射系数基本为 0,TSP 浓度基本为零。可见当天天气为重度污染,污染物主要聚集在近地面 1 K 以下,当天人们感受雾霾严重,图像表示出来的信息与气象台发布的天气信息相符合。

## 2.2 轻度雾霾

选取华北地区  $E116^{\circ}N40^{\circ} \sim E117^{\circ}N38^{\circ}$ 。高度从 0~3 KM 低空激光雷达气溶胶数据,进行二维彩色图形绘制,如图 5 所示。

图 5 选取 2018 年 2 月 21 日华北地区轻度雾霾特征天气,图中横坐标显示经纬度信息,纵坐标为海拔高度,右侧为 TSP 对光的后向散射系数数值的彩色分布规律,后向散射系数数值大小与 TSP 浓度大小成正比。图中清晰可见,2018 年 2 月 21 日华北地区  $E116^{\circ}N40^{\circ} \sim E117^{\circ}N38^{\circ}$  区域内,高度从 0~3 KM 低空 TSP 浓度分布为:低空 0~1 KM 内图中显示后向散射系数在 0.005~0.01 之间,表明 TSP 浓度相对较低。高度 1~2 KM 内后向散射系数基本为 0.005~0.01 内数值较低,表明 TSP 浓度相对较低,与 0~1 KM 内 TSP 浓度基本相同。高度 2~3 KM 内后向散射系数为 0~0.005 内,基本没有污染物。如

图 5 所示该地区低空 TSP 浓度较高,雾霾较为严重空气质量略差,图中西部地区相对晴朗,TSP 主要分布在低空 0~2 KM 内,所以当天污染为低空污染近地雾霾,TSP 浓度不高。由图显示当天天气状况为轻度雾霾,和气象局发布的信息相对应,图片显示较为准确。

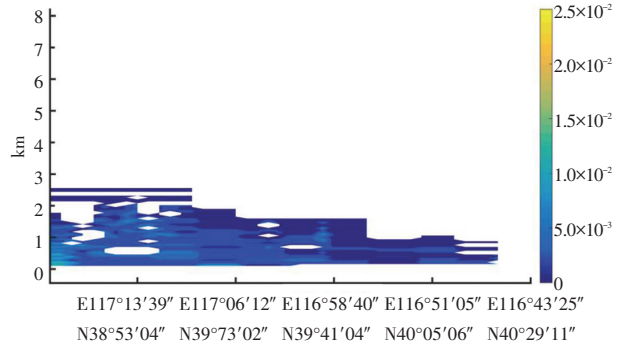


图 5 轻度雾霾  
Fig. 5 Light haze

## 2.3 优良天气

选取华北地区  $E116^{\circ}N40^{\circ} \sim E117^{\circ}N38^{\circ}$ 。高度从 0~3 KM 低空激光雷达气溶胶数据,进行二维彩色图形绘制,如图 6 所示。

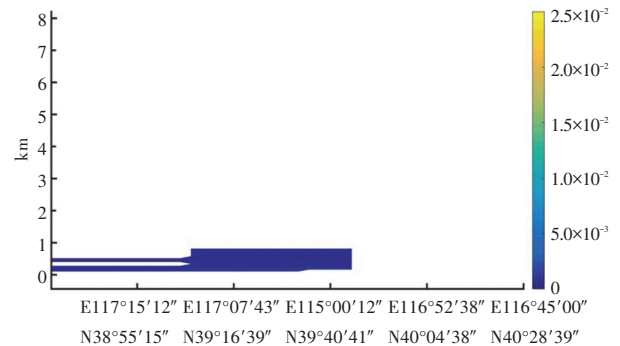


图 6 优良天气  
Fig. 6 Good weather

图 6 选取 2018 年 2 月 5 日华北地区优良特征天气,图中横坐标显示经纬度信息,纵坐标为海拔高度,右侧为 TSP 对光的后向散射系数数值的彩色分布规律表示图。后向散射系数数值大小与 TSP 浓度大小成正比。图中清晰可见,2018 年 2 月 5 日华北地区  $E116^{\circ}N40^{\circ} \sim E117^{\circ}N38^{\circ}$  区域内,高度从 0~3 KM 低空 TSP 浓度分布为:0~1 KM 内通过颜色可以直观看出后向散射系数为  $5 \times 10^{-3}$  以下,数值很小,所以当天 TSP 浓度很低,空气状态良好为优良天气,与当天气象局检测结果一致。

## 2.4 平均 AQI 浓度和平均后向散射系数 \* $10^4$ 与大气污染程度关系

图 7 拟合了平均 AQI(空气质量指数)浓度和平

均后向散射系数  $\times 10^4$  与大气污染程度之间的关系。由图中可以看出,在污染程度加重的同时,平均 AQI 浓度和平均后向散射系数  $\times 10^4$  这 2 个指数的大小呈上升趋势,展现为一定的线性关系,当平均后向散射系数低于  $3.2 \times 10^3$  时或 AQI 低于 92 时为优良天气,当  $w$  平均后向散射系数低于  $1.1 \times 10^4$  或 AQI 低于 310 时为轻度污染天气,当平均后向散射系数高于  $1.1 \times 10^4$  或 AQI 高于 310 时为重度污染。随着污染程度的增加,这 2 个指数的增长速度越来越快,上升的幅度也更大。

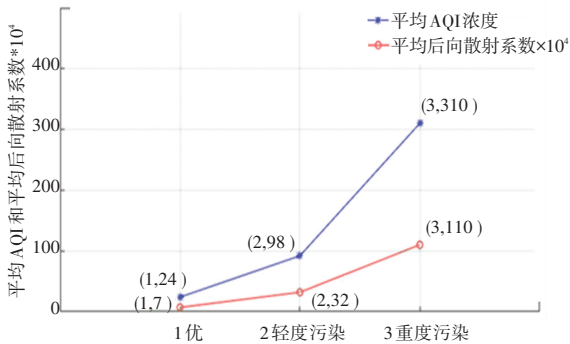


图7 平均 AQI 浓度和平均后向散射系数  $\times 10^4$  与大气污染程度关系

Fig. 7 The relationship between average AQI concentration & average backscatter coefficient  $\times 10^4$  and air pollution levels

为了验证本文方法的可行性,随机选取天津地区的 2018 年 12 月 16 日的天气数据进行了对后向散射系数进行绘制图形分析,拟合后得出当天平均后向散射系数为  $2.3 \times 10^4$ ,对比图 7 得出 2018 年 12 月 16 日当天的天气状况应为重度污染,这与当天气象局所提供的 AQI 为 290 当天为重度污染相符合,证明了此验证方法的可行性。

### 3 结束语

本文对 CALIPSO 的主要荷载激光雷达 CALIOP 的基本参数进行了简单的介绍,并对其提供的二级产品 (Level 2) 的下载和从中提取相应有效数据并对处理、绘制、拟合图形进行了详细的介绍。首先选取了 3 种典型天气 (优良天气、轻度雾霾、重度雾霾),

基于 CALIOP 的提供的二级数据选取华北地区 3 种典型天气,通过 MATLAB 进行处理并绘制出二维色度图,可以直观地反映出所选区域经纬度和垂直高度与大气对光的后向散射系数大小的色彩对应关系,得出平均后向散射系数、后向散射系数与 TSP 浓度的关系图,进而可以直观地看出 TSP 在大气中的分布位置和以及所测量区域污染物的多少。结果表明:不同特征天气情况下二维色度图有明显差异,二维色度图平均值与当天 TSP 浓度对比曲线成正比例关系,不同天气浓度垂直分布存在很大差异。通过二维色度图更加直观地反映出当天的空气质量状况,为以后的大气检测与环境治理提供便利。

### 参考文献

- [1] 吴瑛,马金鹏. 校园  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  的分布及形貌观察[J]. 干旱环境监测, 2019, 33(1): 8-12.
- [2] 帕丽达·牙合甫,杨鹏月. 乌鲁木齐市近几年大气颗粒物中重金属的浓度特征[J/OL]. 干旱区地理: 1-9 [2019-03-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20190315.1358.036.html>.
- [3] 温玉海,倪晓昌,董昊,等. 基于激光雷达技术的京津冀区域气溶胶特性分析[J]. 天津职业技术师范大学学报, 2018, 28(2): 18-23.
- [4] 温玉海. 局域激光雷达信号参数对气溶胶特性的分析研究[D]. 天津:天津职业技术师范大学, 2017.
- [5] 贾瑞,刘玉芝,华珊,等. 青藏高原地区 CALIPSO 卫星气溶胶观测资料的订正研究[C]//第 33 届中国气象学会年会. 西安:中国气象学会, 2016: 119.
- [6] 葛巧丽. 基于激光雷达的杭州市区不同强度霾探测研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
- [7] 张武,颜娇珑,曹越前. 西北东部及长三角地区霾事件中气溶胶的空间特征与比较[C]//第十三届全国气溶胶会议摘要集. 石家庄:中国颗粒学会气溶胶专业委员会, 2017: 119.
- [8] 马骁骏,秦艳,陈勇航,等. 上海地区霾时气溶胶类型垂直分布的季节变化[J]. 中国环境科学, 2015, 35(4): 961-969.
- [9] MARENCO F, AMIRIDIS V, MARINOUE E, et al. Airborne verification of CALIPSO products over the Amazon: a case study of daytime observations in a complex atmospheric scene [J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2014, 14(7): 11871-11881.
- [10] TIAN Pengfei, CAO Xianjie, ZHANG Lei, et al. Aerosol vertical distribution and optical properties over China from long-term satellite and ground-based remote sensing [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017(4): 2509-2523.

(上接第 257 页)

- [8] FOURURE D, EMONET R, FROMONT E, et al. Residual Conv-Deconv grid network for semantic segmentation [C]// British Machine Vision Conference, 2017 (BMVC'17). London, UK: BMVC, 2017: 1-12.
- [9] KINGMA D P, BA J. Adam: A method for stochastic optimization [J]. arXiv preprint arXiv:1412.6980, 2014.
- [10] JOHNSON J, ALAHI A, LI Feifei. Perceptual losses for real-

- time style transfer and super-resolution[M]//LEIBE B, MATAS J, SEBE N, et al. Computer Vision-ECCV 2016. ECCV 2016. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer, 2016, 9906: 694-711.
- [11] SIMONYAN K, ZISSERMAN A. Very deep Convolutional Networks for large-scale image recognition [J]. arXiv preprint arXiv:1409.1556v6, 2015.