第 24 卷第 5 期
2019 年 9 月

气 候 与 环 境 研 究
Climatic and Environmental Research

Vol. 24 No. 5
Sept. 2019

师宇, 胡非, 丁伟宸, 等. 2019. 气溶胶激光雷达和无线电探空观测边界层高度的对比分析 [J]. 气候与环境研究, 24(5): 650−662. SHI Yu, HU Fei, DING Weichen, et al. 2019. Comparitive Analysis of Planetary-Boundary-Layer Height Based on Aerosol Lidar and Radiosonde [J]. Climatic and Environmental Research, 24(5): 650−662. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19051

气溶胶激光雷达和无线电探空观测边界层高度的对比分析

师宇[1,2] 胡非[1,2] 丁伟宸[1,2] 张哲[1,2]

1 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室，北京 100029
2 中国科学院大学，北京 100049

摘 要 利用北京地区2017年11月至2018年1月连续3个月的激光雷达资料和无线电探空数据，按照清洁天、污染天和多云天3种天气条件，对大气边界层高度的计算方法和结果进行对比分析。结果表明，基于激光雷达消光系数的梯度法、标准差法和小波法都能够较好地提取边界层高度。清洁天标准差法计算的边界层高度高于梯度法和小波法，08:00（当地时间，下同）和20:00由无线电探空得到的清洁天边界层高度平均值分别为1176 m和1224 m。污染天标准差法的计算结果要低于梯度法和小波法，污染天无线电探空得到的边界层高度平均值约为956 m，和清洁天相比降低了两百多米，重污染时最低降低至562 m，逆温层高度和PM2.5浓度具有明显的反相关关系。有云时，梯度法和小波法确定的边界层高度和云高非常接近，标准差法计算的结果略低。总体而言，气溶胶激光雷达计算的边界层高度随着污染等级的提高没有明显的降低趋势，相反在重度污染情况下反而有所增加，这可能是由于污染物的不断堆积导致的。梯度法确定的边界层高度易受到污染物传输过程的影响，略高于逆温层高度。另外，激光雷达确定的边界层高度受到残留层影响时，也会高于逆温层。

关键词 边界层高度 空气污染 激光雷达 无线电探空
文章编号 1006-9585(2019)05-0650-13 **中图分类号** P404 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19051

Comparitive Analysis of Planetary-Boundary-Layer Height Based on Aerosol Lidar and Radiosonde

SHI Yu[1,2], HU Fei[1,2], DING Weichen[1,2], and ZHANG Zhe[1,2]

1 *State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
2 *University of Chinese Academy of Sciences*，*Beijing* 100049

Abstract Aerosol lidar and radiosonde are the two main methods used to detect planetary boundary layer (PBL) height. Based on three consecutive months of lidar and radiosonde data from November 2017 to January 2018 in Beijing, the detection methods and calculation results of PBL height were analyzed and compared for three kinds of weather conditions, that is clear, hazy, and cloudy. The results show that the three methods (gradient, standard deviation, and wavelet transformation methods) based on the lidar extinction coefficient extracted the PBL heights well. The PBL

收稿日期 2019-04-10；**网络预出版日期** 2019-05-24
作者简介 师宇，女，1993年出生，博士，主要大气边界层物理和大气环境研究。E-mail: shiyu@mail.iap.ac.cn
通讯作者 胡非，E-mail: hufei@mail.iap.ac.cn
资助项目 国家重点研发计划项目2017YFC0209605，国家自然科学基金项目41975018
Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2017YFC0209605), National Natural Science Foundation of China (Grant 41975018)

heights calculated by the standard deviation method in clear sky were higher than those calculated by the gradient and wavelet methods. The average PBL heights obtained by radiosonde at 0800 LST and 2000 LST were 1176 m and 1224 m, respectively. On polluted days, the calculated results of the standard deviation method were lower than those of the gradient and wavelet methods. The average PBL height obtained by radiosonde on polluted days was about 956 m, which is a decrease of more than 200 m compared to clear days. In heavily polluted days, the lowest PBL height was 562 m. There was an obvious inverse correlation between inversion height and the PM2.5 concentration. During cloudy days, the PBL heights determined by the gradient and wavelet methods were very close to the cloud height, and the results calculated by the standard deviation method were slightly lower. In general, the height of the boundary layer calculated by aerosol lidar did not decrease significantly with increases in the pollution level. In contrast, this height increased in heavy pollution, which may be due to the continuous accumulation of pollutants. The standard deviation method was not susceptible to the influence of the pollutant transport process, whereas the PBL height determined by the gradient method was susceptible to the influence of pollutant transport, with the results being slightly higher than the inversion layer. When the PBL height determined by lidar was affected by the residual layer, it was also higher than the inversion layer.

Keywords　Boundary layer height, Air pollution, Lidar, Radiosonde

1　引言

大气边界层是距离地面最近的大气层，其厚度约为1～2 km，它直接受到地表强迫的影响，对地表强迫的响应时间为1 h或者更小（Stull，1988）。大气边界层高度是大气边界层的一个基本参数（Seibert et al.，2000），它是边界层参数化过程中的一个重要的长度尺度。通常人类排放的污染物在大气中混合，传输和扩散等过程都与边界层高度密切相关，边界层高度限定了污染物扩散的环境容量，对于污染形势预报非常重要。边界层高度的时间演变对天气，气候也有着重要影响（Esau and Zilitinkevich，2010；Sawyer and Li，2013），在气候模式中，当CO_2浓度升高一倍时，全球气温的变化非常依赖于边界层结构参数（Knight et al.，2007）。

确定边界层高度的方法有理论、模拟和观测3类：理论方法主要是针对比较简单的边界层结构建立半经验公式或预报方程（Stull，1988；Davi et al.，2000）；根据数值模拟的结果也可以进一步用来确定边界层高度，例如中尺度数值模式WRF（Weather Research Forcast）中输出的边界层高度基本上是基于湍流动能或者理查孙数来计算的（张碧辉等，2012；黄文彦等，2014；Banks et al.，2016；项衍等，2019）；利用观测实验来确定边界层高度，又可以划分为利用地面观测和经验公式估算边界层高度（Nozaki，1973；程水源和席德立，1997），以及利用直接探测或者遥感探测手段获得大气风速、温湿、污染物或者湍流量的垂直分布信息直接确定或推算边界层高度（Tang et al.，2016；Dong et al.，2017；Huang et al.，2017；Mues et al.，2017）。边界层垂直结构的直接探测主要是利用铁塔、无线电探空，系留汽艇以及飞机等手段直接测量大气要素分布（Hooper and Eloranta，1986；Sawyer and Li，2013；Wang and Wang，2014）。随着遥感探测技术的不断发展，遥感探测边界层高度也日益增多，主要是借助风廓线雷达、声雷达、激光雷达，微波辐射计和云高仪探测等，此外还有机载雷达和卫星遥感探测等探测手段（陈臻懿等，2009；王琳等，2012；Quan et al.，2013；周燕秋等，2016）。

通常用来估算边界层高度的气象要素有位温、风速和风向以及湍流统计量等，位温资料较易获得，无线电探空站在每天的固定时刻进行观测，微波辐射计也可以遥感大气的温湿分布（Luan et al.，2018）。虽然无线电探空探测的时间相对固定，时间分辨率略低，但是其分布范围最广，因此也成为分析边界层高度区域性变化和季节变化的有利手段（Seidel et al.，2010；Guo et al.，2016）。一般基于位温廓线确定边界层高度都是通过位温梯度最大值所在高度来判定为边界层高度，这一方法通常只适用于白天对流边界层。但是北京地区无线电探空时间为08:00（当地时间，下同）和20:00，无论哪个季节，这两个时刻都不对应典型的对流边界层或者稳定边界层，需要结合具体位温廓线分布来分析，以往的研究在这方面讨论分析的相对较少。基于风速风向廓线确定边界层高度的方法，主要依据风速极大值、风速或风向趋近于地转风高度等方法

（Stull，1988；Seibert et al.，2000）。

大气边界层一个最基本的特性就是其湍流性，所以湍流活动消失的高度也可以定义为边界层高度（Mahrt and Vickers，2006）。大气边界层的湍流性影响着边界层内部的污染物，热量以及水汽的垂直分布，但是湍流量的垂直廓线是很难获得的。近年来由于污染事件频发(Sun et al.，2013；Wang et al.，2014)，大气中污染物的混合、扩散等过程会受到逆温层以及湍流扩散活动的影响，所以也有学者利用气溶胶浓度为依据来估算混合层的高度（李梦等，2015）。气溶胶激光雷达在大气环境领域应用广泛（赵世强等，2012；邓涛等，2014；杨富燕等，2016），雷达发射激光，通过接收气溶胶粒子对激光的后向散射信号来反演大气的消光系数，进而得出大气气溶胶浓度信息（黄瑜等，2015；吕立慧等，2017；李霞等，2018）。由于污染源一般都在近地面，边界层内的气溶胶粒子浓度远高于其上的自由大气，从边界层到自由大气通常会出现一个气溶胶浓度梯度较大的区域，利用这一特点，激光雷达可以从其回波信号中提取到边界层高度。基于激光雷达确定边界层高度的方法，使用较多的是梯度法（Flamant et al.，1997），标准差法（Hooper and Eloranta，1986）和小波法（Cohn and Angevine，2000；Davis et al.，2000；Brooks，2003）。这三种方法的目的都是为了寻找边界层顶到自由大气过渡区的信号突变位置，也有学者对激光雷达提取边界层高度的方法不断地进行改进（Brooks，2003；Yang et al.，2017；Bravo-Aranda et al.，2017），但是以往的研究对不同天气条件下，这三种方法的对比分析较少。激光雷达容易高估夜间稳定边界层高度，晴天和霾天的气溶胶浓度和边界层高度反相关关系明显（Quan et al.，2013），对于稳定边界层，激光雷达确定的边界层高度和无线电探空确定的边界层高度相关系数为0.9，不稳定情况下相关系数更高，夜间由于气溶胶多层结构在残留层顶部，会使得激光雷达确定边界层高度存在困难（Martucci et al.，2007）。

虽然关于激光雷达和无线电探空确定边界层高度的研究已有较多，但是大都局限在晴天条件，对于多云、污染特别是重污染天气条件下气溶胶激光雷达确定边界层高度的方法研究较少，例如在不同天气条件下常用的梯度法、标准差法和小波法确定边界层高度有什么差别？特别是激光雷达确定的边界层高度与探空得到的逆温层高度不一致时，如何进行对比和甄别？这对于污染物累积的判断和模式参数化很重要。本文重点研究上述问题，并分析了污染传输过程对边界层高度的影响。

2 数据和方法

本文所用的气溶胶激光雷达位于中国科学院大气物理研究所（IAP，见图1）大气边界层和大气化学国家重点实验室院内，雷达所在经纬度为（39.97ºN，116.37ºE），海拔高度为49 m。该型气溶胶激光雷达是双波长三通道雷达，激光器发射355 nm和532 nm两种特定波长的激光脉冲，经扩束后进入大气，大气中的粒子对激光产生米散射，其中方向为180º的散射光（后向散射）被望远镜系统接收，且又被分光成355 nm、532 nm平行和532 nm垂直的三路光，由探测系统分别探测到3个通道的回波信号，再将回波信号反演成消光系数和退偏比（消偏振比）等信息，进而来研究被探测的大气情况。该激光雷达时间分辨率约为5 min左右，垂直高度分辨率为7.5 m，在靠近地面几十米范围内存在一定的盲区。无线电探空数据（风速、风向、温度、气压、相对湿度）则取自北京市气象局的南郊观象台，其国际编码ZBAA（54511站，见图1），位于北京市丰台区南二环外侧，距离气溶胶激光雷达大约10 km左右，该站站点的经纬度为（39.48ºN，116.28ºE），海拔高度为34 m。6种污染物PM2.5、PM10、二氧化氮（NO_2）、二氧化硫（SO_2），一氧化碳（CO）和臭氧（O_3）的小时平均浓度数据来自大约距离气溶胶激光雷达2 km左右的中国环境监测总站奥体中心站（OSCS，见图1）。此外，本文使用的地面气象观测数据来自http://weather. uwyo. edu/surface/meteorogram/index. shtml[2019-05-27]，该网址提供能见度、地表气压、温度、相对湿度、风速和风向等信息。

关于边界层高度的计算方法，基于气溶胶激光雷达消光系数（为方便表述，消光系数这里用E表示）本文使用了梯度、标准差法和小波法3种方法来提取边界层高度。由消光系数确定的边界层高度用符号H_c表示，表征是基于物质浓度（concentration）分布来确定的。梯度法（H_{c_gra}）和标准差法（H_{c_std}）的计算方法分别如公式（1）和（2）所示：

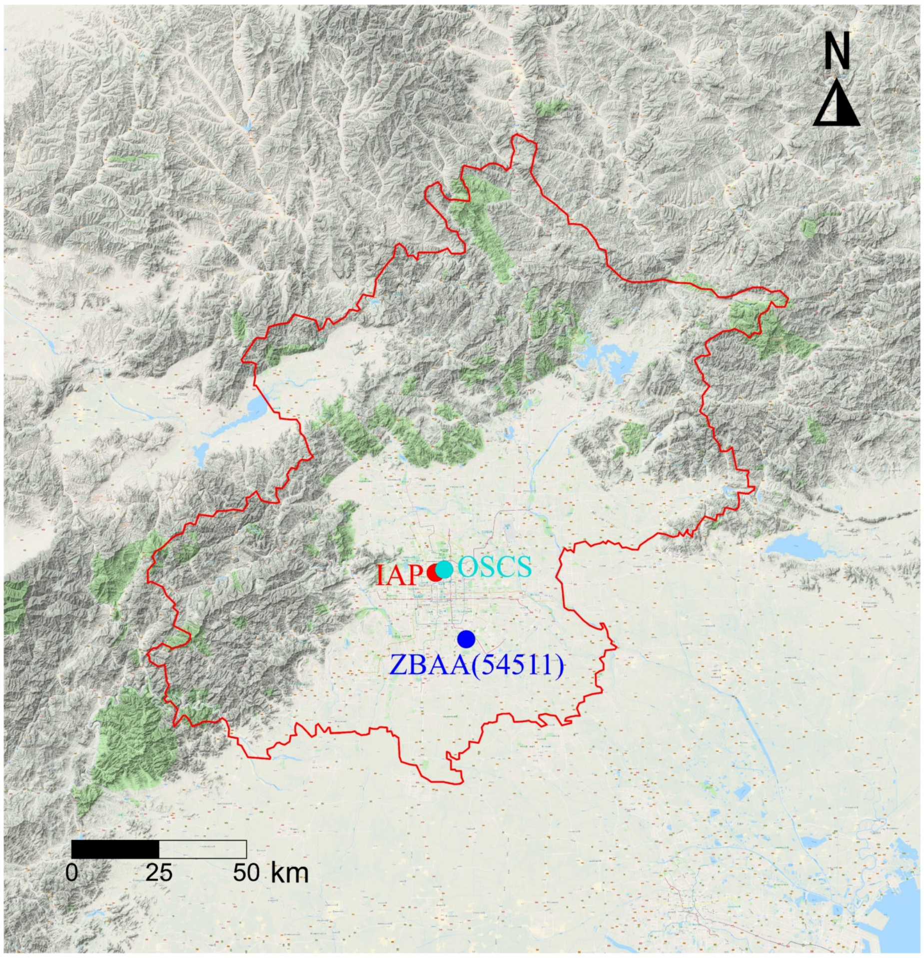

图1　北京地区观测站点分布，红色实心圆代表中国科学院大气物理研究所（IAP）；蓝色实心圆代表北京南郊观象台（国际编码为ZBAA，54511站；青色实心圆代表中国环境监测站奥体中心站（OSCS）

Fig. 1　Distribution of observation sites in Beijing area. Red solid dot: Location of the Institute of Atmospheric Physics (IAP) of the Chinese Academy of Sciences; blue solid dot: Location of Nanjiao station in Beijing, internationally coded as ZBAA station, also known as 54511 station; cyan solid dot: Location of Olympic Sports Center Station (OSCS) Environmental Monitoring

$$H_{\mathrm{c\_gra}} = \max\left(\frac{\delta E}{\delta z}\right), \tag{1}$$

$$H_{\mathrm{c\_std}} = \max\left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[E(z_i) - \overline{E(z)}\right]^2}{n}}\right), \tag{2}$$

其中，z代表距离地面的高度，i数值从1可取值到n，n代表距离地面的高度层数，z_i表示第i层距离地面的高度。小波变换是监测垂直探测廓线突变点的常用方法，本文使用的小波母函数是Haar函数（h），如公式（3）所示：

$$h\left(\frac{z-b}{a}\right) = \begin{cases} -1, & b - \frac{a}{2} \leqslant z \leqslant b \\ 1, & b < z \leqslant b + \frac{a}{2} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{3}$$

其中，b代表Haar函数的中心位置；a代表函数的尺度间隔，根据Brooks（2003）以及其他相关的研究，本文取a=6。基于Haar函数定义的小波协方差函数$W_f(a,b)$如公式（4）所示：

$$W_f(a,b) = a^{-1}\int_{z_b}^{z_t} E(z)h\left(\frac{z-b}{a}\right)\mathrm{d}z, \tag{4}$$

其中，z_t和z_b分别代表高度的上限和下限，小波协方差函数值$W_f(a,b)$越大表示此时消光系数信号的变化越大，小波协方差函数值$W_f(a,b)$取得最大值的高度定义为小波法估算的边界层高度（$H_{\mathrm{c\_wav}}$）。

本文把利用无线电探空的位温数据计算的边界层高度用H_θ表示：

$$H_\theta = \max\left(\frac{\delta\theta}{\delta z}\right), \tag{5}$$

其中，θ表示位温。由于北京探空时间为当地的08:00和20:00，边界层基本处于稳定和不稳定之间的转换期，不一定具有典型的对流边界层或者稳定边界层特征，所以利用无线电探空位温廓线来确定边界层高度要根据具体的情况结合廓线形状进行具体分析和判断。

3 结果和讨论

3.1 地面PM2.5浓度序列和气象要素时间演变分析

如图2所示是2017年11月至2018年1月期间的北京奥体中心环境监测站的PM2.5浓度以及南郊观象台地面观测要素能见度、温度、相对湿度、风速和风向时间序列演变图。地面PM2.5浓度显示北京地区的PM2.5浓度总是表现出“锯齿型”或者“斜坡型”的变化特征，即PM2.5浓度从较低浓度开始经历3～4 d的缓慢积累，浓度达到最高值，然后在短时间内浓度迅速下降，整个过程持续时间大约为6 d左右，且这种变化特征有一定周期性。PM2.5浓度的上升使得大气能见度急剧恶化，从清洁天大于10 km降低到污染天最低几百米左右。污染天一般都伴随有较高的相对湿度，地面相对湿度在污染时常常接近100%。相对湿度容易受到温度的影响，另外当绝对水汽含量增加时，相对湿度也会明显升高。地面风速和PM2.5浓度有着明显的反相关关系，且较大风速值的西北风一般使得北京地区PM2.5浓度快速下降，能见度提高，空气质量好转(Sheng et al.，2018)。比如2017年11月21～26日之间，2018年1月10日前后，以及2018年1月30日前后。

3.2 无线电探空位温廓线确定的边界层高度分析

由于北京地区无线电探空时间为当地时间每天的08:00和20:00，对于典型的对流边界层和稳定边界层而言，这两个时刻基本处于稳定边界层和不稳定边界层之间的中性转换期。由于大气边界层温度场的复杂性和随机性，这两个时刻的位温廓线也较为复杂，08:00由于稳定边界层经历了一整夜的发展，和20:00刚刚日落后不久的位温廓线形状有明显差异。如图3给出了这两个时刻大气边界层的位

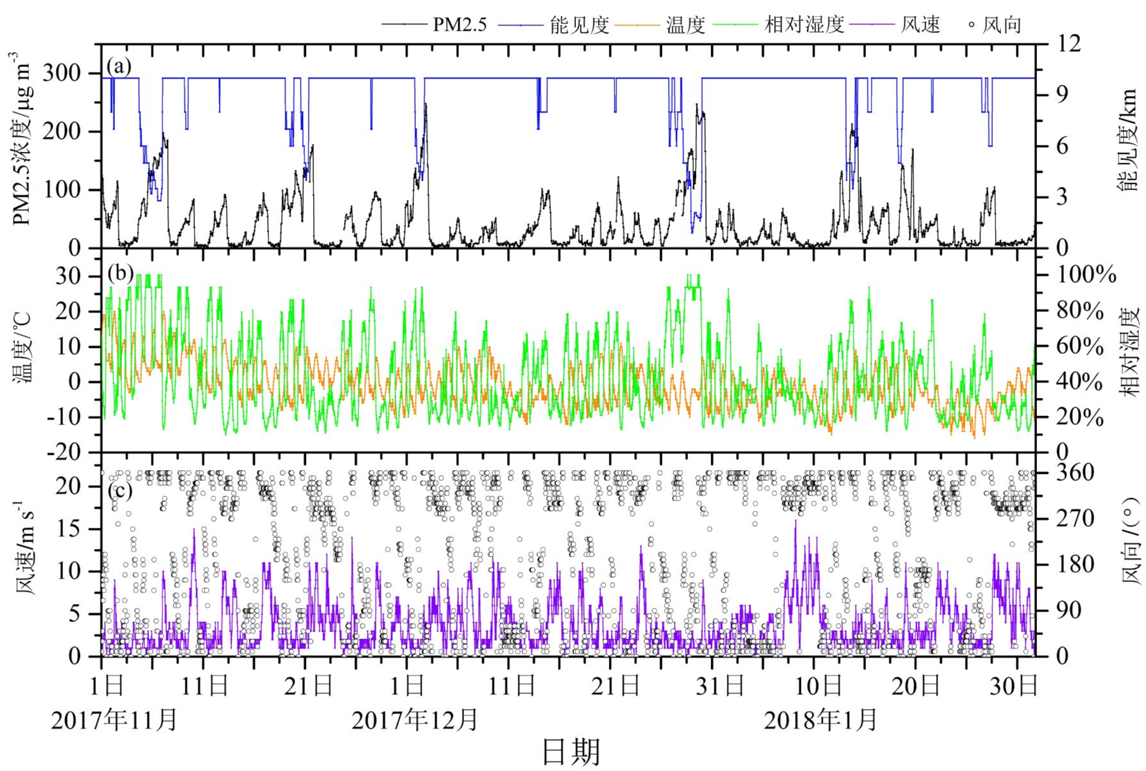

图2 2017年11月至2018年1月期间北京奥体中心环境监测站（a）PM2.5浓度和能见度以及北京南郊观象台（b）温度和相对湿度、（c）风速和风向的时间序列

Fig. 2 Time variations of (a) PM2.5 concentration and visibility at OSCS station and (b) temperature and relative humidity, (c) wind speed and wind direction at ZBAA station from Nov 2017 to Jan 2018

温垂直分布，根据位温垂直廓线主要划分为3类。同时由于逆温层的存在会影响着大气污染物的垂直分布，所以也给出了相应时刻激光雷达探测的消光系数廓线，结果如图4所示，以便于分析逆温层和气溶胶分布之间的相互关系。

在图3a所示的一类温度廓线分布型中，可以很容易地根据最大位温梯度值所在高度来确定边界层高度H_θ，H_θ高度范围为1250～1500 m，20:00太阳刚刚落山不久，地面不再接收太阳短波辐射，开始转变为由地面释放长波辐射的冷却降温过程。所以，从近地面开始逐渐形成地面逆温层，这时贴地逆温较强也非常明显，需要和上部的抬升逆温层或脱地逆温层加以区分。20:00并不是典型的稳定边界层，地面贴地逆温以上仍然保持着近中性$\partial\theta/\partial z\approx 0$的特征，即白天混合层遗留下来的残留层，残留层之上一直到距离地面1 km左右出现了

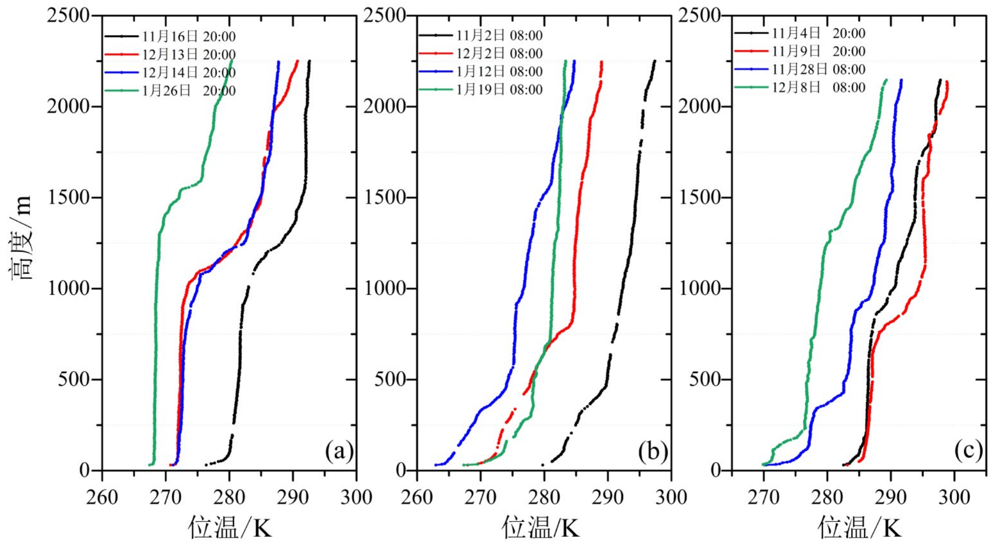

图3 北京ZBAA站无线电探空的位温垂直廓线：（a）具有一个显著覆盖逆温层；（b）具有整层逆温层；（c）具有多层逆温结构，残留层显著

Fig. 3 Profiles of potential temperature observed by radiosonde at ZBAA station, Beijing: (a) Having one distinct capping inversion layer；(b) whole inversion layer；(c) multi-layer inversion，having obvious residual layer

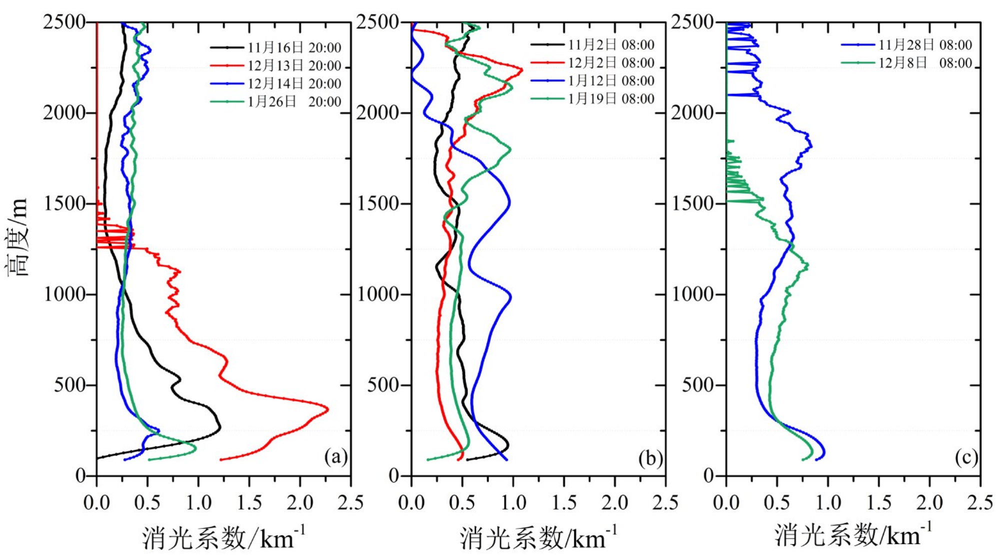

图4 和图3相对应消光系数垂直分布

Fig. 4 Profiles of extinction coefficients corresponding to Fig. 3: (a) Having one distinct capping inversion layer; (b) whole inversion layer; (c) multi-layer inversion, having obvious residual layer

另一个很薄的覆盖逆温层。从对应的消光系数垂直分布来看（图4a），在这种除了贴地逆温层之外高空只出现一个明显覆盖逆温层的温度分布型情况下，更多的气溶胶基本都聚集在逆温层之下，最大消光系数将近2.5 km^{-1}，并且由消光系数梯度所确定的边界层高度（记作*H*c）低于500 m。

北京冬季日出时刻一般为07:00左右，随着夜间地面降温的持续发展，08:00由于经过了一整夜的地面降温，自地面起形成的逆温层已经发展较为成熟（图3b），之后随着地面接收的太阳辐射逐渐增多，稳定边界层开始向不稳定边界层发展。08:00，距离地面较近的是逆温强度较大的逆温层，地面逆温层之上是逆温强度明显较低的层次，这时的边界层高度是地面逆温层能够发展的最大高度，其高度大约为300～750 m。从图4b消光系数图来看，这几个时刻气溶胶浓度略低，且这时气溶胶浓度分布和逆温层没有明显关系。在地面逆温层逆温强度较大的层结之上消光系数数值仍然略大，此处仍然有较多气溶胶颗粒物。

在图3c中，可以看到地面贴地逆温层之上具有多层逆温结构。比如11月28日距离地面300 m有一个较为明显的逆温层，400～900 m之间位温基本不随高度变化，这一高度层之间基本保持着部分白天混合层特征，这一层为残留层。稳定边界层和残留层之间的界限一般不是十分明确。残留层有时保持有白天混合到这一层的污染物，如果这时用污染物垂直分布特征来推测边界层高度，这将会和实际的稳定边界层高度存在差异。比如12月8日08:00，此时由地面降温形成的逆温层大约300 m，300 m之上为残留层，图4c显示这一层的消光系数没有明显减低，残留层中还有部分污染物，这时梯度法和小波法确定的边界层高度基本都在1200 m，和残留层顶的高度吻合。由于大气边界层的随机性，08:00和20:00的位温廓线并不总是按照这种规律出现的，本文在此归纳总结了3种出现频率最高的类型。

3.3 激光雷达确定边界层高度的时间演变分析

以下本文给出了2017年11月1日至2018年1月31日期间气溶胶激光雷达观测到的消光系数演变，图中也给出了用梯度法，标准差和小波法3种方法中提取的边界层高度，并且和基于无线电探空的位温廓线确定的边界层高度进行对比。其中对于整层基本保持中性的层结，位温从地面到高空变化幅度非常小，这种难以从位温梯度来判定边界层高度的廓线种类不参与分析讨论。

首先，梯度法、标准差法和小波法都能够有效地估算边界层高度，变化趋势基本一致，这3种方法得到的边界层高度都没有显著的日变化特征，基本都贴近消光系数变化较为剧烈的边缘区域。

从这3个月的消光系数来看，北京地区2017年12月的污染形势最为严重，消光系数最大值常常超过3 km^{-1}。气溶胶激光雷达探测的主要是气溶胶的后向散射系数，取决于大气中污染物浓度分布，而这3种方法都是依据污染物浓度垂直分布的特征，受到局地排放和周边地区输送过程的影响。当大气较为清洁的时候，比如2017年11月2日12:00至11月3日12:00期间（图5）的污染物浓度不高，消光系数不高，这时用梯度法和小波法从激光雷达提取的边界层高度基本低于200 m，标准差法略高。这3种方法在清洁天时捕捉边界层高度的能力受到限制，或者说以气溶胶为依据的激光雷达在清洁天时并不能有效捕捉边界层高度的变化。无线电探空确定的边界层高度H_θ总体上和激光雷达确定的边界层高度非常吻合，只有在少数晴天的时候，由于气溶胶浓度较低，这时H_θ会超过激光雷达确定的边界层高度H_c。

另外，从消光系数图中也可以分辨出周边地区的污染物传输过程并且随后发生沉降和北京当地污染源相互作用共同造成的局地空气污染现象。比如2017年11月27日（图5黄色虚线框），2018年1月19日（图7黄色虚线框），2018年1月27日（图7黄色虚线框）。另外消光系数图中还可以分辨出有云的天气，比如2018年1月21日（图7绿色虚线框），云层的后向散射系数很高，相应的消光系数也很大，且云层不接地。

为了深入了解污染物传输过程对边界层高度的影响，对北京地区2017年11月27日的污染传输过程进一步地分析和探讨。由图5消光系数图可知，该天12:00之前距离地面1500～2000 m之间的污染物可能是周边地区向北京的输送过程形成的，这一高度层之间消光系数较高，在该日12:00之后这些传输过来的污染物逐渐发生沉降并且和本地排放的污染物相融合，共同导致了11月28日前后北京地区的局地空气污染。地面观测到的PM2.5浓度显示，27日地面PM2.5浓度也是逐渐上升的，28日凌晨PM2.5浓度最高达100 μg m^{-3}。

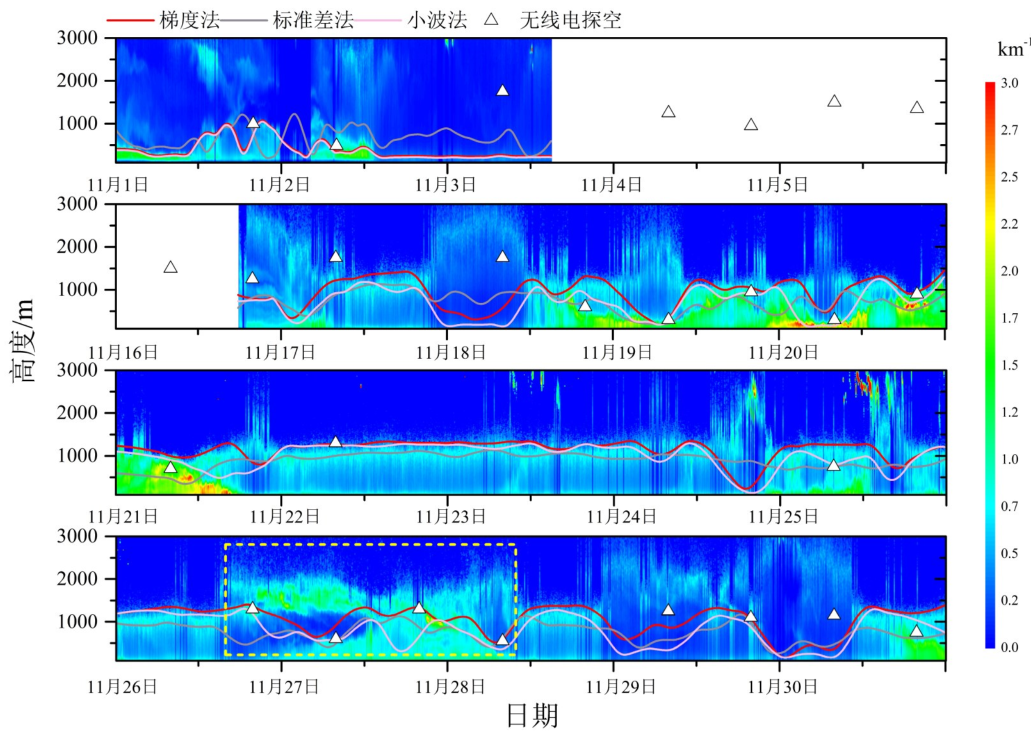

图5 2017年11月北京IAP站对于激光雷达利用梯度法（红色线）、标准差法（灰色线）和小波法（粉色线）计算的边界层高度H_c，以及无线电探空位温廓线确定的边界层高度H_θ（白色三角形），阴影部分：激光雷达探测的消光系数，白色空窗是由于2017年11月3日15:00至16日14:30数据缺失

Fig. 5 Temporal and spatial variations of extinction coefficient at IAP station, Beijing during Nov 2017 and PBL height H_c, as determined by the gradient method (red line), standard deviation method (gray line), wavelet transformation method (pink line) using lidar, and H_θ (white triangle) determined by potential temperature. The blank part of the extinction coefficient is due to a technical failure, and lidar data were missing from 1530 LST 3 Nov to 1430 LST Nov 16 2017

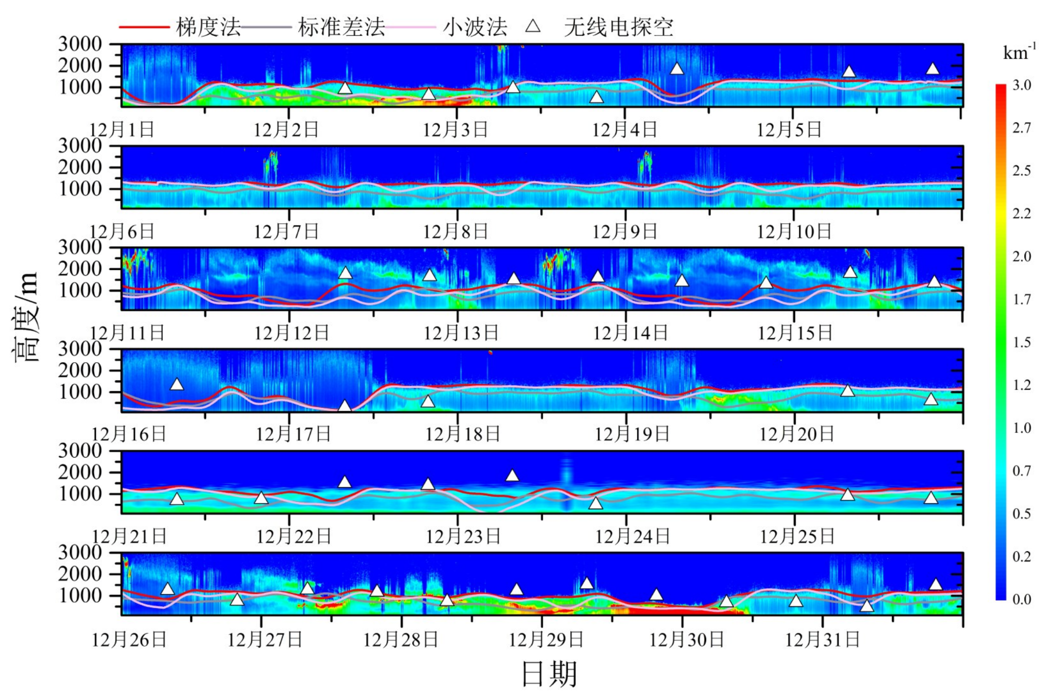

图6 同图5，但为2017年12月

Fig. 6 The same as Fig. 5, but for Dec 2017

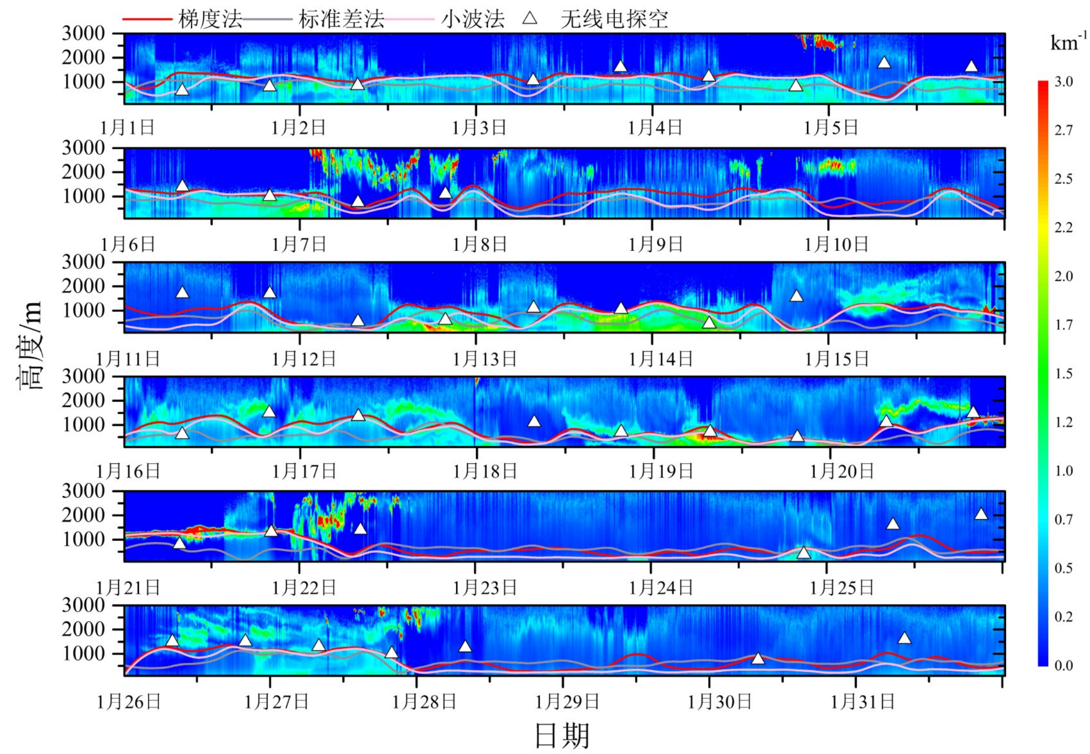

图7　同图5，但为2018年1月

Fig. 7　The same as Fig. 5，but for Jan 2018

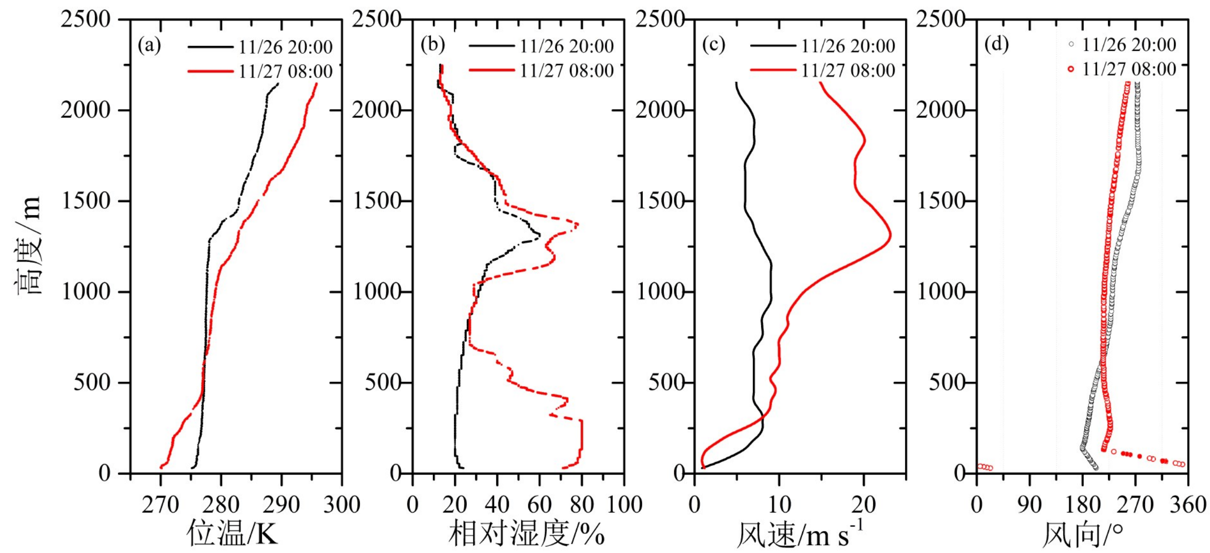

图8　北京ZBAA站2017年11月26日20:00和27日08:00（a）位温、（b）相对湿度、（c）风速和（d）风向垂直廓线

Fig. 8　Profiles of (a) potential temperature，(b) relative humidity，(c) wind speed，and (d) wind direction at 2000 LST 26 Nov and 0800 LST 27 Nov 2017 at ZBAA station, Beijing

结合2017年11月26日20:00和27日08:00无线电探空廓线（图8）来看，11月26日20:00由位温廓线确定的边界层高度H_θ大约为1300 m，通常在有污染物传输时，换言之是有平流气溶胶层的时候，会造成激光雷达对边界层高度的错误估计。这时标准差法确定的边界层高度不易受到污染物传输过程的影响，梯度法确定的边界层高度易受到污染物传输过程的影响，略高于H_θ。1000～1400 m之

间的相对湿度不但没有降低，反而增加到了50%，这一高度层的风向为西南风，可见西南风也会使得北京地区空气中水汽含量增加。27日08:00整层大气较为稳定，逆温层较为显著，相对湿度在垂直方向上存在双峰结构，低层相对湿度接近80%，低层相对湿度在500 m左右衰减强烈，地面降温导致的边界层高度H_θ大约也为500 m，500 m之上逆温强度较500 m之下明显减弱。这时基本上整层都是西南风，并且风速较高，最大风速已超过了20 m s^{-1}，来自北京西南地区的污染物在偏南风的作用下，向北京地区的污染物传输过程较为明显。梯度法确定的边界层高度约为912 m，明显高于H_θ。

3.4 基于激光雷达的3种计算边界层高度方法的对比分析

为了详细比较3种方法的特征，本文分别统计了清洁天、污染天和多云天3种天气条件下，梯度法、标准差法和小波法确定的边界层高度H_c的平均值如表1所示，表1也给出了相应天气条件下无线电探空确定的逆温层高度的平均值。参与清洁天统计的有2017年11月2日、3日、29日、12月16日以及2018年1月23～25日、28～31日。污染传输过程会影响激光雷达对边界层高度的确定，本文把有明显污染传输过程的时间段去掉，剩下参与污染天统计的有2017年11月19～20日、12月2日、27～30日，多云天指的是2018年1月21日。

虽然在清洁天气溶胶激光雷达不能有效提取边界层高度，但从梯度法、标准差法和小波法这3种方法的表现来看，标准差法计算的边界层高度在清洁天的计算结果要高于梯度法和小波法，这时无线电探空位温廓线确定的边界层高度H_θ超过了1 km，基于激光雷达的3种方法在清洁天气计算结果的最大值和H_θ较为吻合。污染天时，梯度法、标准差法和小波法计算的边界层高度H_c平均值基本在600～1000 m之间，标准差法的计算结果的平均值要低于梯度法和小波法。污染天H_θ的平均值约为956 m，和清洁天相比降低了约200 m，证明了PM2.5浓度和逆温层高度之间的反相关关系。从图7消光系数图来看，2018年1月21日该天距离地面1000～1500 m之间的消光系数较大，这一高度处有层状云出现。MODIS卫星云图（图9）的监测结果也显示该天北京地区中南部有层状云分布，卫星监测结果和气溶胶激光雷达观测结果一致。在有云出现的天气，通常也可以把云层出现的高度判定为边界层高度(Bianco et al.，2008；Von Engeln and Teixeira，2013)，云层的消光系数一般较大，云和空气之间的过渡区域也会出现消光系数梯度较大值，这时激光雷达的梯度法和小波法都较为准确地提取到了边界层高度，稳定性较好，梯度法确定的边界层高度为1308 m，小波法确定的边界层高度为1227 m，和云层出现高度非常接近，标准差法计算的结果略低。

将这3个月由气溶胶激光雷达和位温廓线得到的边界层高度按照不同的污染等级进行统计，其中污染等级的划分依据中国环境保护部颁布的《空气质量指标技术规范》（HJ 633-2012），本文分别统计了08:00和20:00这两个时刻，不同污染等级下两种探测手段得到的边界层高度的平均值（见表2）。

在空气质量优良的天气下，08:00和20:00由无线电探空得到的边界层高度平均值分别为1176 m和1224 m。随着污染等级的提高，由位温廓线计算的边界层高度H_θ总体趋势是不断降低的，重污染时最低降低至562 m，和清洁天相比降低了约600 m，可见污染物浓度和逆温层高度反相关关系较为明显。08:00的H_θ基本都低于20:00的H_θ，这可能是由于20:00的时候除了地面刚刚形成的贴地逆温层之外，高空中仍然存在有白天混合作用导致

表1　清洁天、污染天和多云天利用无线电位温廓线确定的边界层高度H_θ以及梯度法、标准差法和小波法从气溶胶激光雷达中提取的边界层高度H_c的最大值、最小值和平均值

Table 1　Boundary layer height H_θ determined by potential temperature profiles from radiosonde on clear, polluted, and cloudy days, and maximum, minimum, and average values of H_c extracted from aerosol lidar by gradient, standard deviation, and wavelet methods

m

	梯度法H_c			标准差法H_c			小波法H_c			
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	H_θ
清洁天	1328	225	576	1227	231	652	1144	178	352	1175
污染天	1447	184	966	1109	190	626	1297	137	755	956
多云天	1399	1137	1308	855	152	573	1349	1066	1227	1075

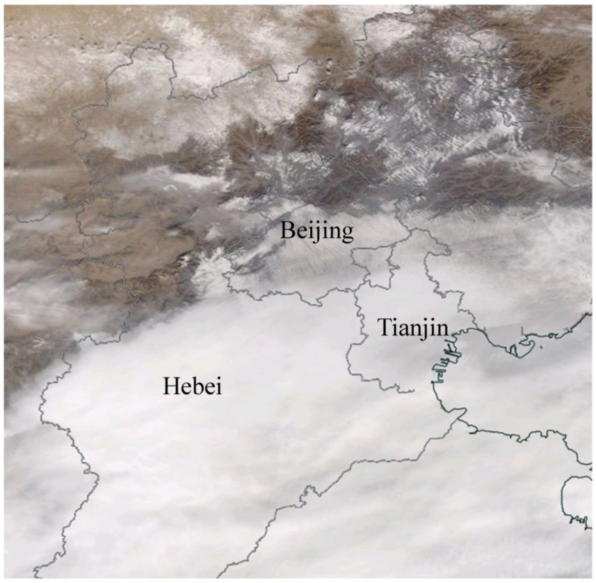

图9 2018年1月21日期间京津冀地区MODIS影像
Fig. 9 MODIS image in Beijing–Tian–Hebei area on 21 Jan 2018

表2 在不同污染等级下边界层方高度H_θ和H_c的平均值
Table 2 The averaged values of H_θ and H_c at different pollution levels m

空气质量等级	边界层高度H_θ		边界层高度H_c	
	08:00	20:00	08:00	20:00
优良	1176	1224	916	1087
轻度污染	894	1053	840	1159
中度污染	700	696	995	634
重度污染	562	975	913	851

的覆盖逆温层。气溶胶激光雷达计算的边界层高度H_c随着污染等级的提高则没有明显的降低趋势，08:00的H_c基本都在900 m附近，20:00的边界层高度H_c随着污染等级提高略有降低，但是在重污染情况下反而有所增加，这可能是由于污染物的不断堆积所致。

4 结果和讨论

本文利用2017年11月至2018年1月北京地区3个月的激光雷达资料和无线电探空数据，对位温廓线类型进行划分，比较了清洁天、污染天和多云天3种天气条件下基于消光系数用梯度法、标准差法和小波法提取边界层高度的异同，并且和无线电探空确定的边界层高度进行对比，分析了不同污染等级下用激光雷达和无线电探空确定的边界层高度的平均值变化趋势，得到的主要结论如下：

（1）北京地区的地面观测到的PM2.5浓度总是表现出“锯齿型”或者“斜坡型”的变化特征，PM2.5浓度从低浓度值一般经历过3～4 d的缓慢积累，浓度达到最高值，然后在扩散条件良好的情况下，其浓度迅速下降；

（2）无线电探空的位温廓线可以分为3种情况：第一种是仅有一个明显的覆盖逆温层，第二种是地面降温形成的逆温强度较高的逆温层，地面逆温层之上是逆温强度稍弱的逆温层，第三种是具有多层逆温结构，存在明显的残留层；

（3）梯度法、标准差法和小波法这3种方法都能够较好地提取到边界层高度，晴天时由于污染物浓度较低，气溶胶激光雷达确定边界层高度的准确度降低。标准差法计算的边界层高度在清洁天的计算结果高于梯度法和小波法，在污染天时，标准差法计算结果的平均值要低于梯度法和小波法。气溶胶激光雷达计算的边界层高度随着污染等级的提高没有明显的降低趋势，20:00激光雷达确定的边界层高度随着污染等级提高略有降低，但在重污染下反而有所增加。污染天时逆温层高度平均值约为956 m，比清洁天降低了约200 m，逆温层高度和PM2.5浓度反相关。有云出现的天气，梯度法和小波法确定的边界层高度和云层出现高度非常接近，标准差法计算的结果略低；

（4）消光系数图上能够明显分辨出污染传输过程，标准差法确定的边界层高度不易受污染物传输过程的影响，梯度法受到污染物传输过程的影响，略高于逆温层高度。

本文的研究结果对于天气、气候和大气污染研究中边界层高度的参数化等具有参考意义。未来将进一步利用气溶胶激光雷达数据和高时空分辨的气象探空数据，深入研究夜间残留层的演变规律及其对稳定边界层高度的影响。

参考文献（References）

Banks R F, Tiana-Alsina J, Baldasano J M, et al. 2016. Sensitivity of boundary-layer variables to PBL schemes in the WRF model based on surface meteorological observations, lidar, and radiosondes during the HygrA-CD campaign [J]. Atmospheric Research, 176–177: 185–201. doi:10.1016/j.atmosres.2016.02.024

Bianco L, Wilczak J M, White A B. 2008. Convective boundary layer depth estimation from wind profilers: Statistical comparison between an automated algorithm and expert estimations [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 25(8): 1397–1413. doi:10.1175/2008JTECHA981.1

Bravo-Aranda J A, De Arruda Moreira G, Navas-Guzmán F, et al. 2017. A new methodology for PBL height estimations based on lidar depolarization measurements: Analysis and comparison against MWR and WRF model-based results [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 17(11): 6839−6851. doi:10.5194/acp-17-6839-2017

Brooks I M. 2003. Finding boundary layer top: Application of a wavelet covariance transform to lidar backscatter profiles [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 20(8): 1092−1105. doi:10.1175/1520-0426(2003)020<1092:FBLTAO>2.0.CO;2

陈臻懿, 刘文清, 张玉钧, 等. 2009. 用云高仪测量边界层高度 [J]. 激光技术, 33(5): 455−458. Chen Zhenyi, Liu Wenqing, Zhang Yujun, et al. 2009. Detection of mixing layer depth with ceilometer [J]. Laser Technology (in Chinese), 33(5): 455−458. doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.05.022

程水源, 席德立. 1997. 关于确定大气混合层高度的几种方法 [J]. 环境工程学报, 5(4): 63−67. Cheng Shuiyuan, Xi Deli. 1997. Several kinds of methods on determining atmospheric mixed layer [J]. Anvances in environmental science (in Chinese), 5(4): 63−67.

Cohn S A, Angevine W M. 2000. Boundary layer height and entrainment zone thickness measured by lidars and wind-profiling radars [J]. J. Appl. Meteor., 39(8): 1233−1247. doi: 10.1175/1520-0450(2000)039<1233:BLHAEZ>2.0.CO;2

Davis K J, Gamage N, Hagelberg C R, et al. 2000. An objective method for deriving atmospheric structure from airborne lidar observations [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 17(11): 1455−1468. doi:10.1175/1520-0426(2000)017<1455:AOMFDA>2.0.CO;2

邓涛, 吴兑, 邓雪娇, 等. 2014. 广州地区一次严重灰霾过程的垂直探测 [J]. 中国科学: 地球科学, 44(10): 2307−2314. Deng Tao, Wu Dui, Deng Xuejiao, et al. 2014. A vertical sounding of severe haze process in Guangzhou area [J]. Science China Earth Sciences, 57(11): 2650−2656. doi:10.1007/s11430-014-4928-y

Dong Z P, Li Z Q, Yu X, et al. 2017. Opposite long-term trends in aerosols between low and high altitudes: A testimony to the aerosol−PBL feedback [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 17(12): 7997−8009. doi:10.5194/acp-17-7997-2017

Esau I, Zilitinkevich S. 2010. On the role of the planetary boundary layer depth in the climate system [J]. Advances in Science and Research, 4(1): 63−69. doi:10.5194/asr-4-63-2010

Flamant C, Pelon J, Flamant P H, et al. 1997. Lidar determination of the entrainment zone thickness at the top of the unstable marine atmospheric boundary layer [J]. Bound.-Layer Meteor., 83(2): 247−284. doi:10.1023/A:1000258318944

Guo J P, Miao Y C, Zhang Y, et al. 2016. The climatology of planetary boundary layer height in China derived from radiosonde and reanalysis data [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 16(20): 13309−13319. doi:10.5194/acp-16-13309-2016

Hooper W P, Eloranta E W. 1986. Lidar measurements of wind in the planetary boundary layer: The method, accuracy and results from joint measurements with radiosonde and kytoon [J]. J Climate Appl. Meteor., 25(7): 990−1001. doi: 10.1175/1520-0450(1986)025<0990:LMOWIT>2.0.CO;2

Huang M, Gao Z Q, Miao S G, et al. 2017. Estimate of boundary-layer depth over Beijing, China, using Doppler lidar data during surf-2015 [J]. Bound. -Layer Meteor., 162(3): 503−522. doi: 10.1007/s10546-016-0205-2

黄文彦, 沈新勇, 王卫国, 等. 2014. 边界层参数化方案对边界层热力和动力结构特征影响的比较 [J]. 地球物理学报, 57(5): 1399−1414. Huang Wenyan, Shen Xinyong, Wang Weiguo, et al. 2014. Comparison of the thermal and dynamic structural characteristics in boundary layer with different boundary layer parameterizations [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 57(5): 1399−1414. doi: 10.6038/cjg20140505

黄瑜, 夏俊荣, 韩永翔, 等. 2015. 无霾和有霾情况下大气混合层高度的日变化及其特征——基于河北香河站激光雷达的观测 [J]. 科学技术与工程, 15(24): 126−131, 137. Huang Yu, Xia Junrong, Han Yongxiang, et al. 2015. The diurnal variation and characteristics of the atmospheric mixed layer height in haze and non-haze days——Based on LIDAR observation in Xianghe, Hebei [J]. Science Technology and Engineering (in Chinese), 15(24): 126−131, 137. doi:10.3969/j.issn.1671-1815.2015.24.021

Knight C G, Knight S H, Massey N, et al. 2007. Association of parameter, software, and hardware variation with large-scale behavior across 57, 000 climate models [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 104(30): 12259−64.

李梦, 唐贵谦, 黄俊, 等. 2015. 京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系 [J]. 环境科学, 36(6): 1935−1943. Li Meng, Tang Guiqian, Huang Jun, et al. 2015. Characteristics of winter atmospheric mixing layer height in Beijing−Tianjin−Hebei region and their relationship with the atmospheric pollution [J]. Environmental Science (in Chinese), 36(6): 1935−1943. doi:10.13227/j.hjkx.2015.06.004

李霞, 权建农, 王飞, 等. 2018. 激光雷达反演边界层高度方法评估及在北京的应用 [J]. 大气科学, 42(2): 435−446. Li Xia, Quan Jiannong, Wang Fei, et al. 2018. Evaluation of the method for planetary boundary layer height retrieval by lidar and its application in Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(2): 435−446. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1710.17173

Luan T, Guo X L, Guo L J, et al. 2018. Quantifying the relationship between PM2.5 concentration, visibility and planetary boundary layer height for long-lasting haze and fog−haze mixed events in Beijing [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 18(1): 203−225. doi:10.5194/acp-18-203-2018

吕立慧, 刘文清, 张天舒, 等. 2017. 基于激光雷达的京津冀地区大气边界层高度特征研究 [J]. 激光与光电子学进展, 54(1): 010101. Lü Lihui, Liu Wenqing, Zhang Tianshu, et al. 2017. Characteristics of boundary layer height in Jing-jin-ji area based on lidar [J]. Laser and Optoelectronics Progress (in Chinese), 54(1): 010101. doi: 10.3788/LOP54.010101

Mahrt L, Vickers D. 2006. Extremely weak mixing in stable conditions [J]. Bound.-Layer Meteor., 119(1): 19−39. doi:10.1007/s10546-005-9017-5

Martucci G, Matthey R, Mitev V, et al. 2007. Comparison between backscatter lidar and radiosonde measurements of the diurnal and nocturnal stratification in the lower troposphere [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 24(7): 1231−1244. doi:10.1175/JTECH2036.1

Mues A, Rupakheti M, Münkel C, et al. 2017. Investigation of the mixing layer height derived from ceilometer measurements in the Kathmandu Valley and implications for local air quality [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 17(13): 8157−8176. doi: 10.5194/acp-17-8157-2017

Nozaki K. 1973. Mixing depth model using hourly surface observations [R]. Report 7053.

Quan J N, Gao Y, Zhang Q, et al. 2013. Evolution of planetary boundary layer under different weather conditions, and its impact on aerosol concentrations [J]. Particuology, 11(1): 34−40. doi:10.1016/j.partic.2012.04.005

Sawyer V, Li Z Q. 2013. Detection, variations and intercomparison of the planetary boundary layer depth from radiosonde, lidar and infrared spectrometer [J]. Atmos. Environ., 79: 518−528. doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.07.019

Seibert P, Beyrich F, Gryning S E, et al. 2000. Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height [J]. Atmos. Environ., 34(7): 1001−1027. doi:10.1016/s1352-2310(99)00349-0

Seidel D J, Ao C O, Li K. 2010. Estimating climatological planetary boundary layer heights from radiosonde observations: Comparison of methods and uncertainty analysis [J]. J. Geophys. Res., 115(D16): D16113. doi:10.1029/2009JD013680

Sheng J J, Zhao D L, Ding D P, et al. 2018. Characterizing the level, photochemical reactivity, emission, and source contribution of the volatile organic compounds based on PTR-TOF-MS during winter haze period in Beijing, China [J]. Atmospheric Research, 212: 54−63. doi:10.1016/j.atmosres.2018.05.005

Stull R B. 1988. An Introduction to Boundary Layer Meteorology[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Sun Y L, Wang Z F, Fu P Q, et al. 2013. Aerosol composition, sources and processes during wintertime in Beijing, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 13(9): 4577−4592. doi:10.5194/acp-13-4577-2013

Tang G Q, Zhang J Q, Zhu X W, et al. 2016. Mixing layer height and its implications for air pollution over Beijing, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 16(4): 2459−2475. doi:10.5194/acp-16-2459-2016

Von Engeln A, Teixeira J. 2013. A planetary boundary layer height climatology derived from ECMWF reanalysis data [J]. J. Climate, 26(17): 6575−6590. doi:10.1175/JCLI-D-12-00385.1

王琳, 谢晨波, 韩永, 等. 2012. 测量大气边界层高度的激光雷达数据反演方法研究 [J]. 大气与环境光学学报, 7(4): 241−247. Wang Lin, Xie Chenbo, Han Yong, et al. 2012. Comparison of retrieval methods of planetary boundary layer height from lidar data [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics (in Chinese), 7(4): 241−247. doi:10.3969/j.issn.1673-6141.2012.04.001

Wang X Y, Wang K C. 2014. Estimation of atmospheric mixing layer height from radiosonde data [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 7(6): 1701−1709. doi:10.5194/amt-7-1701-2014

Wang Y S, Yao L, Wang L L, et al. 2014. Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China [J]. Science China Earth Sciences, 57(1): 14−25. doi:10.1007/s11430-013-4773-4

项衍, 张天舒, 刘建国, 等. 2019. 基于激光雷达对WRF模式模拟边界层高度的评估 [J]. 中国激光, 46(1): 110002. Xiang Yan, Zhang Tianshu, Liu Jianguo, et al. 2019. Evaluation of boundary layer height simulated by WRF mode based on lidar [J]. Chinese Journal of Lasers (in Chinese), 46(1): 110002. doi: 10.3788/cjl201946.0110002

杨富燕, 张宁, 朱莲芳, 等. 2016. 基于激光雷达和微波辐射计观测确定混合层高度方法的比较 [J]. 高原气象, 35(4): 1102−1111. Yang Fuyan, Zhang Ning, Zhu Lianfang, et al. 2016. Comparison of the mixing layer height determination methods using lidar and microwave radiometer [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 35(4): 1102−1111. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00045

Yang T, Wang Z F, Zhang W, et al. 2017. Technical note: Boundary layer height determination from lidar for improving air pollution episode modeling: Development of new algorithm and evaluation [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 17(10): 6215−6225. doi:10.5194/acp-17-6215-2017

张碧辉, 刘树华, Liu Heping, 等. 2012. MYJ和YSU方案对WRF边界层气象要素模拟的影响 [J]. 地球物理学报, 55(7): 2239−2248. Zhang Bihui, Liu Shuhua, Liu Heping, et al. 2012. The effect of MYJ and YSU schemes on the simulation of boundary layer meteorological factors of WRF [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 55(7): 2239−2248. doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.07.010

赵世强, 张镭, 王治厅, 等. 2012. 利用激光雷达结合数值模式估算兰州远郊榆中地区夏季边界层高度 [J]. 气候与环境研究, 17(5): 523−531. Zhao Shiqiang, Zhang Lei, Wang Zhiting, et al. 2012. Boundary layer height estimate in summer over the Lanzhou suburb in the Yuzhong area using lidar measurement and numerical model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17(5): 523−531. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10170

周燕秋, 倪长健, 刘培川, 等. 2016. 基于激光雷达分析一次重霾过程混合层高度 [J]. 中国环境监测, 32(4): 22−28. Zhou Yanqiu, Ni Changjian, Liu Peichuan, et al. 2016. Analysis of mixed layer height by lidar detection over a heavy haze episode [J]. Environmental Monitoring in China (in Chinese), 32(4): 22−28. doi:10.19316/j.issn.1002-6002.2016.04.04