

基于激光云高仪探测污染天气边界层高度

乔晓燕¹, 薛禄宇², 田野¹

(1. 北京市气象探测中心, 北京 100176;
2. 北京市大兴区气象局, 北京 102600)

摘要: 利用 2016 年 10 月北京市大兴 CL51 云高仪后向散射数据, 分别采用梯度法和小波协方差法计算了边界层高度。分析了晴空和霾污染天气边界层高度的差异及影响因素。结果表明, 两种方法计算的边界层高度一致性较好。晴空和霾污染天气边界层高度具有不同特征, 在霾污染天气, 由于大气中污染物削弱了到达地表的太阳辐射, 地表没有足够的热量使边界层发生明显抬升, 边界层高度维持在较低的高度。晴空天气, 由于太阳辐射对地面的增温, 边界层高度在正午前后有明显的抬升, 边界层高度较高且日变化较明显。边界层高度与地面 PM_{2.5}、PM₁₀、CO 和黑碳气溶胶等污染物浓度呈负相关关系。

关键词: 激光云高仪; 边界层高度; 小波协方差法; 梯度法

中图分类号: X51; P49

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2021040016

Observation of atmospheric boundary layer height of pollution weather with lidar ceilometer

QIAO Xiaoyan¹, XUE Luyu², TIAN Ye¹

(1. Beijing Meteorological Observation Center, Beijing 100176, China;
2. Daxing Meteorological Office of Beijing, Beijing 102600, China)

Abstract: The atmospheric boundary layer height (ABLH) was calculated by the lidar ceilometer based on the data of Vaisala CL51 ceilometer observed in October 2016 by the Beijing Daxing station. Both the gradient method and the wavelet covariance method were adopted. The atmospheric boundary layer height difference and its influence factors in sunny and haze conditions were analyzed. The results showed that there was no significant difference in ABLH by the two methods. The boundary layer height had different characteristics under different weather conditions. In the case of haze pollution, due to the absorption and scattering of the solar radiation by pollutants in the atmosphere, there was less solar radiation reached the earth surface, the ABLH was lower because of the less heat. While in sunny days, because of the warming of the earth by the solar radiation, the ABLH was higher than that of haze days, and the daily variation of ABLH was more obvious. The ABLH was negatively correlated with the concentrations of PM_{2.5}, PM₁₀, CO, black carbon aerosol and other pollutants on the ground.

Keywords: ceilometer; atmospheric boundary layer height; wavelet covariance transform method; gradient method

CLC number: X51; P49

大气边界层(atmospheric boundary layer)为最贴近地面的一层大气,是指直接受地面影响的对流层部分,响应地面作用的时间尺度为一个小时或更短,厚度约为对流层高度的 1/10^[1-3]。它主要通过摩擦阻力、蒸发和蒸腾、热量输送、污染物排放以及影响气流变化的地形等与地面的作用形成^[4-6]。大气边界层内的空气运动由于受到地球自转、温度层结、水汽输送和复杂下垫面等因素的影响而非常复杂^[7-8],具有各种气象要素日变化较大、垂直梯度

较大等特点,大气边界层高度也随时间和空间不断变化。人类活动带来的污染物排放、传输和转化大部分发生在该层。因此,大气边界层的观测和研究成为大气科学领域的重要内容^[9-11]。

常用的提取大气边界层高度手段为:利用常规无线电探空探测的温度、湿度和风廓线计算得到。但是,常规探空探测很难得到高时空分辨率的大气边界层高度信息^[10]。近年来,随着遥感技术的迅速发展,激光雷达、微波辐射计和风廓线雷达等高时

收稿日期: 2021-04-14

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(8204073); 国家重点研发计划项目(2017YFC1501704)

作者简介: 乔晓燕(1984-),女,硕士、高级工程师。研究方向: 探测资料应用。E-mail: xiaoqiaoliushui0323@126.com

引用格式: 乔晓燕,薛禄宇,田野. 基于激光云高仪探测污染天气边界层高度[J]. 环境保护科学, 2022, 48(5): 121-126.

空分辨率的遥感设备成为估算大气边界层高度的新手段^[12-13]。与传统的气象观测手段相比,激光雷达探测大气边界层高度具有时空分辨率高、连续稳定的优势^[6]。目前基于激光雷达提取边界层高度的方法包括:目测法、梯度法、标准差法、小波协方差法和线性拟合法。王琳等^[4]基于脉冲激光雷达(MPL)数据通过设置不同的尺度间隔研究小波协方差法反演边界层高度的稳定性和准确性,结果表明在尺度间隔 > 300 m 时,反演边界层高度趋于稳定。张婉春等^[14]基于 MPL 使用梯度法探测了灰霾天气大气边界层变化特征,发现灰霾天气边界层高度较低。上述对边界层高度的反演都是基于 MPL,因激光雷达造价高并未广泛使用。激光云高仪作为一种简易的激光雷达,一般来说探测能力弱于 MPL,但与 MPL 相比造价便宜且体积较小,目前已经广泛应用于全国气象观测网,有较高的时空密度,且污染天气激光云高仪能获得足够的信噪比用于边界层高度的反演^[15-17]。

本研究基于 Vaisala CL51 云高仪使用梯度法和小波协方差法对 2016 年 10 月北京市大兴 CL51 云高仪后向散射数据进行计算,验证 CL51 激光云高仪反演边界层高度的可行性,比较梯度法、小波协方差法反演边界层高度的差异,分析不同天气条件边界层高度的日变化,并与探空探测的边界层高度进行对比。

1 仪器介绍

Vaisala CL51 云高仪是一种米散射激光雷达,目前在气象探测中主要用于云高、云层和积分云量的测量,其后向散射信号可以反映大气垂直结构。其运用脉冲二极管激光探测和测距技术,短脉冲沿垂直方向发出,在激光脉冲穿过天空时测量光的散射,发射出的激光与大气中的大气分子、气溶胶和水汽等相互作用,后向散射信号被雷达接收系统接收,得到不同高度后向散射回波强度。CL51 激光云高仪激光波长与霾粒子的直径相当,因此产生的散射为米散射,其信号强度的激光雷达方程,见式(1):

$$p_r(z) = E_0 \cdot \frac{C}{2} \cdot \frac{A}{z^2} \cdot \beta(z) \cdot e^{-2\int_0^z \sigma(\varepsilon) dz} \quad (1)$$

式中: $p_r(z)$ 为接收到的瞬时功率; E_0 为有效脉冲能量; C 为光速; A 为接收机孔径; Z 为距离; $\beta(z)$ 为容积后向散射系数; $e^{-2\int_0^z \sigma(\varepsilon) dz}$ 为大气透过率。CL51 激

光云高仪光波长 910 nm, 脉冲频率为 10 kHz, 峰值功率为 27 W, 测量高度从地面开始最高达 15 km, 高度分辨率为 10 m, 时间分辨率为 16 s。CL51 激光云高仪与其他的激光雷达相比,云高仪发射的激光功率非常低,后向散射信号容易受到环境噪音的影响。为了提高信噪比 CL51 激光云高仪采用几束激光脉冲返回信号叠加的总和,高频率的激光脉冲基本消除了伪噪声和高斯白噪声。

2 资料选取及分析方法

2.1 资料选取

本研究使用的激光云高仪后向散射资料为北京市大兴区气象局 CL51 激光云高仪 Level2 数据,该资料每 16 s 一组廓线数据,最高高度为 4 500 m。所使用的大气成分数据、地面观测数据均为北京市南郊观象台业务观测数据,其中颗粒物质量浓度资料为 1 小时平均的 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 质量浓度。

2.2 激光云高仪分析方法

大气边界层顶存在一个逆温层,使得大量的气溶胶粒子聚集在大气边界层内,逆温层以上的自由大气中气溶胶粒子浓度较低。所以在大气边界层与自由大气交界处,气溶胶粒子浓度减小非常快,反映在激光云高仪后向散射信号上,也表现为快速衰减^[13]。因此,信号减小最快的高度即可得到大气边界层高度。为理想情况下激光云高仪距离平方校正信号 $p(z)z^2$ 廓线图,见图 1,虚线为大气边界层高度。

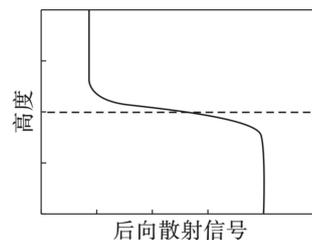


图 1 理想情况下后向散射廓线

图 1 可知,后向散射信号在大气边界层高度附近减小非常快。

2.2.1 梯度法 梯度法^[4]是根据距离平方校正信号 $p(z)z^2$ 随高度的衰减率来判断大气边界层高度。梯度 $D(z)$, 见式(2):

$$D(z) = d[p(z)z^2]/dz \quad (2)$$

大气边界层高度处于 $p(z)z^2$ 衰减最快的位置,也就是取得最大负梯度的高度。这种方法简单方

便,但是容易受到环境噪声的干扰,为了减少干扰对结果的影响,本文对 $p(z)z^2$ 进行了平滑处理,由于王琳等^[4]研究表明,平滑点数>20时,梯度法反演的边界层高度趋于稳定,故选择的平滑步长为200 m。

2.2.2 小波协方差变换法 本研究小波协方差变换使用的是 Haar 母函数, Haar 小波分析法是最早的小波分析方法^[7-8], 见式(3):

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

式中: a 是 Haar 函数的振幅; b 是 Haar 函数的中心位置。

小波协方差变换函数 $w_f()$ 的定义, 见式(4):

$$w_f(a, b) = \frac{1}{a} \int_{z_b}^{z_t} f(z) h\left(\frac{z-b}{a}\right) dz \quad (4)$$

式中: $f(z)$ 为距离平方矫正信号 $p(z)z^2$, z_t 、 z_b 分别是积分的上限和下限。公式(4)反映的是 b 高度 $\pm a/2$ 范围内的 $p(z)z^2$ 信号与 Haar 函数的相似程度。 $w_f(a, b)$ 越大, 相似程度越大, 即信号的阶跃性质越明显。 w_f 取得最大值时的 b 为大气边界层高度^[6]。激光云高仪后向散射信号为离散信号, 式(4)可写为式(5):

$$w_f(a, b) = \frac{1}{a} \left[\sum_{b-\frac{a}{2}}^b f(z) \Delta z - \sum_b^{b+\frac{a}{2}} f(z) \Delta z \right] \quad (5)$$

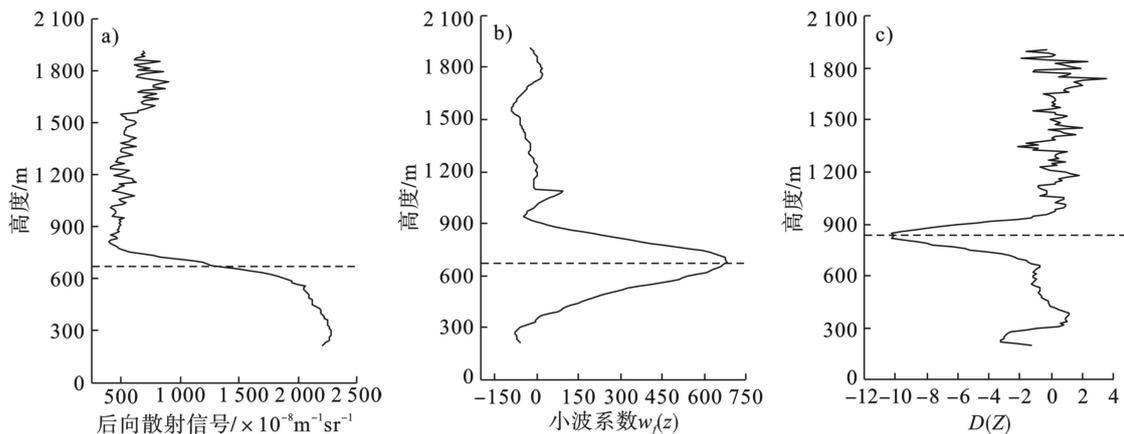


图 2 2016 年 10 月 5 日 14:00 后向散射信号廓线 (a)、小波系数廓线 (b) 和梯度廓线 (c)

图 3(a)可知, 后向散射信号在 450~600 m 高度衰减最快, 可见边界层高度在 450~600 m 之间; 图 3(b)显示小波系数廓线取得极大值的高度为 530 m; 图 3(c)可知, 梯度廓线在 450 和 540 m 高度均取得极大值, 对照后向散射廓线可知 540 m 处为边界层高度。

式中, Δz 是激光云高仪距离分辨率为 10 m, a 为小波振幅, 小波振幅选择 300 m。

3 结果分析

3.1 不同天气小波法与梯度法反演结果对比

为了研究基于 CL51 激光云高仪后向散射信号反演大气边界层高度的情况, 选择 2016 年 10 月 5 日 14:00、2016 年 10 月 13 日 10:30 和 2016 年 10 月 31 日 10:30 3 个时段, 使用小波协方差法与梯度法分别计算大气边界层高度, 利用后向散射廓线、小波系数廓线和梯度廓线分析 2 种方法结果的差异。

2016 年 10 月 5 日 14:00、2016 年 10 月 13 日 10:30 和 2016 年 10 月 31 日 10:30 激光云高仪后向散射信号、小波系数和后向散射信号垂直梯度, 见图 1。2016 年 10 月 5 日、2016 年 10 月 13 日和 2016 年 10 月 31 日分别为轻度霾天气、重度霾天气和晴空天气, 见图 2~图 4。

图 2(a)可知, 后向散射信号在 600~750 m 高度明显减小, 与图 1 理想后向散射信号在边界层高度附近明显减小相符, 后向散射信号在 600~750 m 高度衰减最快, 可见边界层高度在 600~750 m 直接; 图 2(b)小波系数廓线极大值高度为 680 m, 680 m 即小波法反演的边界层高度; 图 2(c)梯度廓线极小值高度为 730 m, 730 m 即梯度法反演的边界层高度。

图 4(a)后向散射信号在高度 750~900 m 之间快速衰减, 对比理想后向散射信号廓线可知, 边界层高度就在 750~900 m 之间。图 4(b)小波系数廓线在 840 m 高度处存在一个极大值, 图 4(c)梯度廓线存在波动, 这是由于后向散射信号廓线存在波动造成的, 梯度值极小值 760 m 即为边界层高度。可

见,小波分析法和梯度法都能反映后向散射信号快速减小的位置,但是在提取边界层高度时,梯度法

容易受局部气溶胶团的干扰,小波法能更稳定地提取边界层高度。

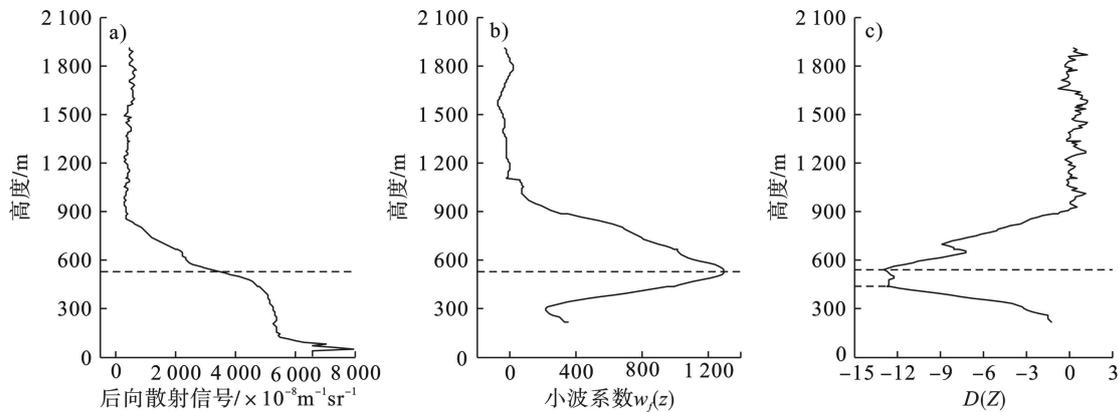


图 3 2016 年 10 月 13 日 10:08 后向散射信号廓线 (a)、小波系数廓线 (b) 和梯度廓线 (c)

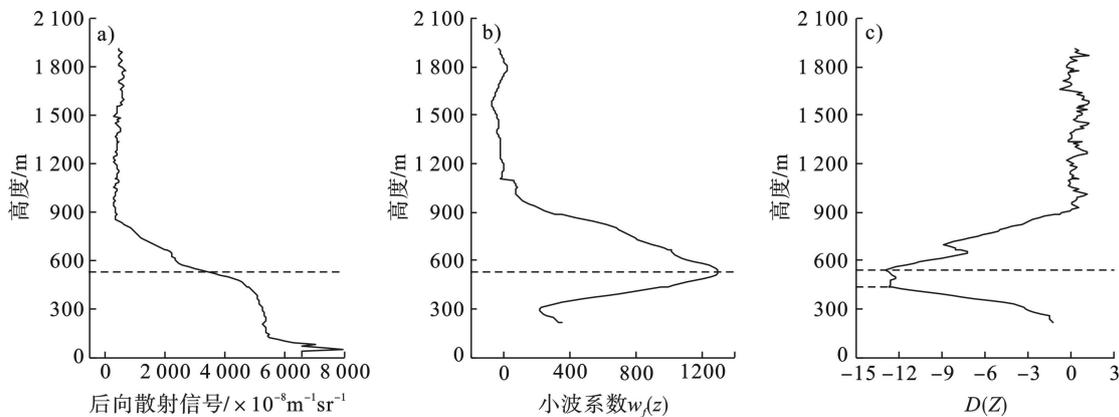


图 4 2016 年 10 月 31 日 10:30 后向散射信号廓线 (a)、小波系数廓线 (b) 和梯度廓线 (c)

3.2 不同污染程度边界层高度日变化特征

不同天气连续探测边界层高度时序图,可更直

观地反映污染天气边界层高度与晴好天气边界层高度的不同特征,见图 5。

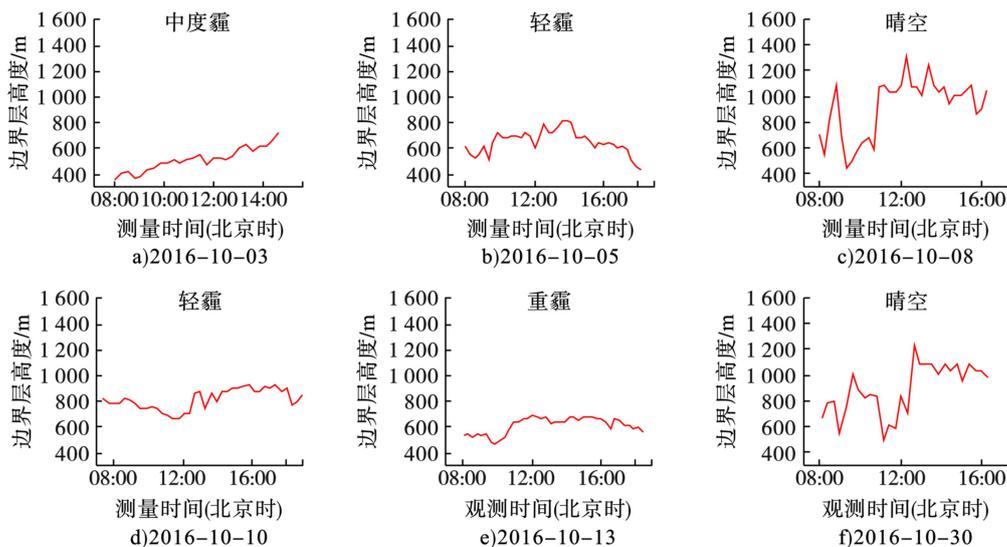


图 5 不同天气大气边界层高度日变化

图 5 可知,2 种方法得到的边界层高度差别不大,但是不同天气边界层高度及其日变化存在明显差异。不同天气边界层高度的差异与地面风速、辐

射、湿度和能见度等气象要素息息相关,以下结合地面气象要素分析不同天气边界层高度的差异。2016 年 10 月 3 日、10 月 5 日、10 月 10 日和 10 月 13 日

均为霾污染天气,霾污染天气边界层高度均较低,污染程度不同边界层高度日变化也略有差异。

2016年10月3日08:00~14:30,湿度随时间逐渐减小、能见度逐渐增大,由中度霾转为轻度霾,边界层高度逐渐抬升,见图6。

图6(a)可知,研究时段内地面直接辐射值较小,地面风速也较小,地面不具备边界层高度抬升的动力热力条件。但是10月4日凌晨出现了明显降温,上游天气系统破坏了稳定边界层顶的逆温层,故边界层高度随时间逐渐抬升,边界层内的气溶胶粒子发生垂直输送,地面污染逐渐减弱。10月5日、10月10日为轻霾天气,图5(b)、(e)可知,边界层高度分布在400~900 m,低于晴空天气。由于霾对太阳辐射的衰减作用,导致到达地面的太阳辐射较晴空少,地表升温幅度小,正午前后边界层高度抬升幅度较小。10月13日是重度霾污染天气,

图5(d)可知,边界层高度较低且没有明显的日变化,集中在400~700 m。重污染天气,边界层内污染物浓度较大,对太阳辐射的吸收和散射作用较强,导致地表接收的太阳辐射较少。图6(d)可知,研究时段内,地面直接辐射值均 $< 300 \text{ W/m}^2$,地面风为不超过2 m/s的小风,不仅地表没有足够的热量使边界层发生明显的抬升,风速较小也不利于污染物扩散,所以边界层高度随时间没有显著变化,且维持在较低高度。图5(c)、(f)是晴空天气边界层高度时序图,边界层高度可达1300 m,明显高于霾污染天气,边界层高度在正午前后有明显抬升。图6(c)、(f)可知,10月8日与10月31日08:00~16:00时段地面太阳辐射值均 $> 600 \text{ W/m}^2$,12:00左右达到最大值,可达 900 W/m^2 。可见晴空天气太阳辐射较强,有利于地表温度增加,增强了湍流作用,使边界层高度抬升。

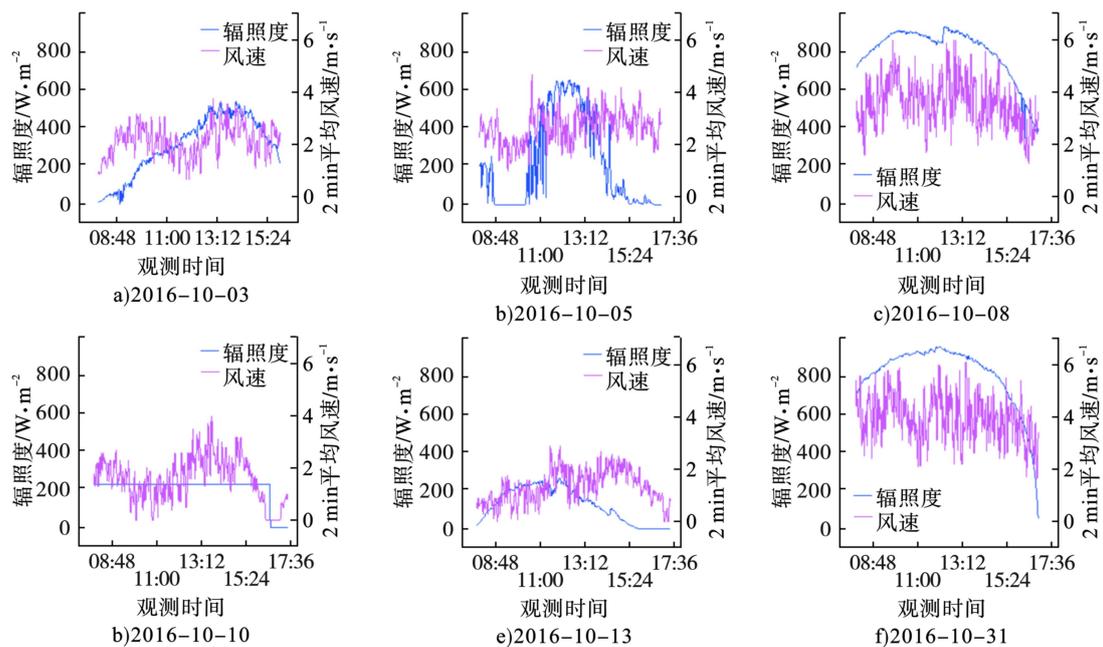


图6 地面观测直接辐射及2 min 平均风速

3.3 地面污染与边界层高度关系分析

3.2节可知,边界层高度与地面污染有直接的关系,边界层高度决定了污染物在垂直方向上的扩散空间,大气中的污染物通过对太阳辐射的吸收散射作用影响边界层高度的抬升。为了进一步了解各种污染物浓度与边界层高度的相互关系,使用2016年10月激光云高仪探测的边界层高度日平均数据分别与 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、CO和黑碳等日平均质量浓度数据进行相关性分析。边界层高度与 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和CO质量浓度的相关系数分别为-0.586、

-0.496和-0.528,可见,边界层高度与 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和CO质量浓度均存在负相关关系,边界层高度与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相关关系比与 PM_{10} 浓度相关关系更显著。

2016年10月激光云高仪探测的边界层高度与颗粒物质量浓度变化关系, $\text{PM}_{2.5}$ 在 PM_{10} 中占比变化范围为43%~94%,占比平均值为70%,见图7。

图7可知,在空气污染物中, $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物为主要成分。颗粒物质量浓度较小,边界层高度较高,颗粒物质量浓度较大,边界层高度则较低,边界层高度与 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 颗粒物质量浓度均具有较显著

的负相关关系。

黑碳气溶胶(BC)是悬浮在大气中的由含碳物质不完全燃烧产生的黑色碳质颗粒物,是光学法测得的吸光性含碳物质,具有较宽的吸收波段,在可见光和红外波段具有较强的吸收,会影响地面太阳直接辐射。边界层高度与 370、470、520、590、660、880 和 950 nm 波段测得的黑碳气溶胶质量浓度相关系数分别为-0.350、-0.242、-0.315、-0.317、-0.317、-0.315 和-0.322,可见边界层高度与黑碳气溶胶浓度也具有负相关关系。大气中的黑碳气溶胶通过吸收太阳辐射,削弱到达大气底部的辐射,减小地面增温,进而阻碍边界层高度的抬升,所以黑碳浓度越大,边界层高度越低。

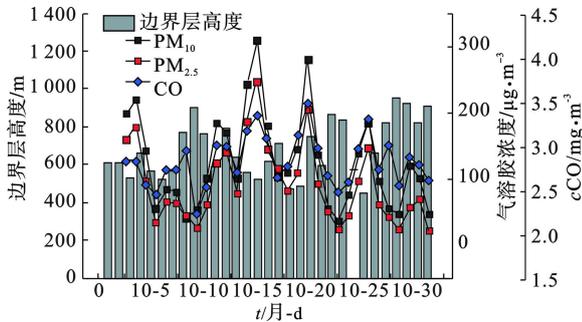


图 7 2016 年 10 月激光云高仪边界层高度与地面污染物浓度变化关系

4 结论

激光云高仪作为一种后向散射激光雷达,其后向散射信号可以反映大气垂直结构,可用于边界层高度反演。本研究利用 2016 年 10 月激光云高仪数据和探空数据,基于激光云高仪后向散射信号研究了不同天气条件下小波协方差法与梯度法提取边界层高度的差异。并与探空提取结果进行了对比,分析了地面污染对边界层高度的影响。得到以下结论。

(1)通过比较基于激光云高仪的小波协方差法、梯度法,发现 2 种方法计算的边界层高度差异较小。但在提取边界层高度时,梯度法容易受局部气溶胶团的干扰,小波法能更稳定地提取边界层高度。

(2)霾污染天气,大气中污染物对太阳辐射的吸收和散射,使到达地表的太阳辐射较少,同时加热自由大气,使得大气层结更加稳定,如果没有上游天气系统的影响,不利于边界层内污染物的扩散,边界层高度会维持在较低的高度,边界层高度没有明显日变化。晴空情况下,在正午前后,较强的太阳辐射加

热了近地层大气,边界层内湍流扩散旺盛,使大气层结不稳定,边界层发生明显抬升,故边界层高度高于霾污染天气,边界层高度具有较明显的日变化。

(3)大气中的污染物通过对太阳辐射的吸收散射作用影响边界层高度的抬升,边界层高度与 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、CO 和黑碳等污染物质量浓度均存在负相关关系,边界层高度与 $PM_{2.5}$ 浓度相关关系比与 PM_{10} 浓度相关关系更显著。

参考文献

- [1] 张强. 大气边界层气象学研究综述[J]. 干旱气象, 2003, 21(3): 74-78.
- [2] LIU S Y, LIANG X ZH. Observed diurnal cycle climatology of planetary boundary layer height[J]. Journal of Climate, 2010, 23: 5790-5809.
- [3] 魏浩, 胡明宝, 艾未华. 小波变换在风廓线雷达探测大气边界层高度中的应用研究[J]. 热带气象学报, 2015, 31(6): 811-820.
- [4] 王琳, 谢晨波, 韩永, 等. 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, 2012, 7(4): 241-247.
- [5] 王珍珠, 李炬, 钟志庆, 等. 激光雷达探测北京城区夏季大气边界层[J]. 应用光学, 2008, 29(1): 96-100.
- [6] 沈建, 沈利洪, 韩笑, 等. 激光雷达与微波辐射计联合观测大气边界层高度变化[J]. 气象科技, 2017, 45(3): 425-429.
- [7] 李红, 马媛媛, 杨毅. 基于激光雷达资料的小波变换法反演边界层高度的方法[J]. 干旱气象, 2015, 33(1): 78-88.
- [8] JASPER. R. Lewis, ELLSWORTH J. Welton, REA M. Molod. Improved boundary layer depth retrievals from MPLNET[J]. Journal of Geophys. Research, 118,6: 1-10
- [9] 刘辉志, 冯健武, 王雷, 等. 大气边界层物理研究进展[J]. 大气科学, 2013, 37(2): 467-467.
- [10] 刘思波, 何文英, 刘红燕, 等. 地基微波辐射计探测大气边界层高度方法[J]. 应用气象学报, 2015, 26(5): 626-635.
- [11] 滕继晓, 秦凯, 汪云甲, 等. 基于激光雷达观测的大气边界层自动识别局部最优点算法[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37: 361-367.
- [12] 杨富燕, 张宁, 朱莲芳, 等. 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, 2016, 35(4): 1102-1111.
- [13] 狄慧鸽, 候晓龙, 赵虎, 等. 多波长激光雷达探测多种天气气溶胶光学特性与分析[J]. 物理学报, 2014, 63(24): 244206.
- [14] 张婉春, 张莹, 吕阳, 等. 利用激光雷达探测灰霾天气大气边界层高度[J]. 遥感学报, 2013, 17(4): 981-992.
- [15] 卜令兵, 袁静, 高爱臻, 等. 基于激光云高仪的雾霾过程探测[J]. 光子学报, 2014, 43(9): 09010021-09010026.
- [16] 陈臻懿, 刘文清, 张玉钧, 等. 用激光云高仪测量边界层高度[J]. 激光技术, 2009, 33(5): 455-458.
- [17] ZHU X W, TANG G Q, GUO J P. Mixing layer height on the North China Plain and meteorological evidence of serious air pollution in southern Hebei[J]. Atmospheric Research, 2018, 209: 204-211.