

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.

激光雷达反演边界层高度方法评估及其在北京的应用

李霞^{1,2} 权建农^{2,3} 王飞^{1,2} 盛久江^{1,2} 高扬⁴ 赵德龙^{1,2} 程志刚³

1 北京市人工影响天气办公室, 北京 100089

2 云降水物理研究和云水资源开发北京市重点实验室, 北京 100089

3 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

4 中国气象科学研究院中国气象局人工影响天气中心, 北京 100081

摘 要 边界层高度是影响大气边界层发展和空气污染程度的重要因子, 是环境和气候研究的重要参数。本文利用激光雷达对北京地区 2011 年 5 月至 2012 年 4 月的边界层高度进行探测分析, 采用小波协方差方法反演边界层高度, 评估了该方法的适用性。得到基于小波协方差方法自动判断边界层高度的最优参数组合, 激光雷达与飞机探测结果对比一致性较好; 与探空结果相关系数 0.88, 激光雷达反演的边界层高度略偏高。当激光雷达的垂直分辨率为 30 m 时, 更加适合北京地区的步长和阈值分别为 210 m 和 0.05; 当激光雷达的垂直分辨率为 15 m 时, 步长和阈值分别为 135 m 和 0.05。分析期间, 不同季节边界层高度日变化有明显的不同, 夏季 14:00 (北京时) 左右达到最高, 较高的边界层高度可维持 3~4 h, 平均可达 1.30 km; 冬季较高边界层高度只能维持 2 h 左右, 平均为 1.08 km。有云与无云天气边界层日变化特征以及边界层高度存在显著的差异, 云的存在减少了到达地面的直接辐射, 抑制了湍流的发展, 进一步抑制了边界层的发展; 本文也将激光雷达反演边界层高度结果应用于观测时期边界层高度与地面污染的关系研究中, 统计得到边界层高度与 PM_{2.5} 浓度的相关系数为 -0.340。

关键词 边界层高度 小波协方差方法 激光雷达 飞机 探空

文章编号 1006-9895(2018)02-0435-12

中图分类号 P407

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1710.17173

Evaluation of the Method for Planetary Boundary Layer Height Retrieval by Lidar and Its Application in Beijing

LI Xia^{1,2}, QUAN Jiannong^{2,3}, WANG Fei^{1,2}, SHENG Jiujiang^{1,2}, GAO Yang⁴,
ZHAO Delong^{1,2}, and CHENG Zhigang³

1 Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089

2 Beijing Key Laboratory of Cloud, Precipitation and Atmospheric Water Resources, Beijing 100089

3 Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089

4 Weather Modification Center, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

收稿日期 2017-05-25; 网络预出版日期 2017-11-24

作者简介 李霞, 女, 1981 年出生, 博士, 高级工程师, 主要从事大气边界层、气溶胶—云—降水相互作用研究。E-mail: lixx_14@bjmb.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41405127、41675138, 国家重点研发计划 2016YFA0602001、2016YFA0601704, 北京市气象局科技计划项目 BMBKJ201504006, 北京市自然科学基金项目 8164057

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41405127, 41675138), National Key Research and Development Program of China (Grants 2016YFA0602001, 2016YFA0601704), Science and Technology Program of Beijing Meteorological Service (Grant BMBKJ201504006), Beijing Municipal Natural Science Foundation (Grant 8164057)

Abstract The planetary boundary layer (PBL) is an important parameter in the studies of environment and climate and it affects air pollution and evolution of atmospheric boundary layer. We analyze PBL heights retrieved using wavelet covariance transform (WCT) method from lidar backscatter profiles data from May 2011 to April 2012 and evaluate the performance of this method. PBL heights are validated using observations of one radiosonde on the ground and airborne instruments for the purpose to optimize the parameters required for lidar detection using the WCT method under different atmospheric conditions. The result shows that the PBL heights have a better agreement between lidar and airborne retrievals than between lidar and radiosonde retrievals with a correlation coefficient of 0.88. Lidar appears to slightly overestimate PBL height. If the vertical resolution of lidar is 30 m, the step length and threshold for Beijing area are 210 m and 0.05, respectively; the step length and threshold are 135 m and 0.05 respectively for the vertical lidar resolution of 15 m. PBL height shows a diurnal variation with an average maximum value of 1.3 km starting from 1400 BT (Beijing time) and lasts for three to four hours in the summer, while the average maximum value of 1.08 km lasts for about two hours in the winter. The result suggests that the direct radiation reaching the ground is reduced by cloud, which depresses the evolution of turbulence and PBL and results in lower PBL height. We also apply the PBL heights retrieved from lidar to the analysis of relationship between the concentration of PM_{2.5} and meteorological elements for the one-year period. The result shows that the correlation coefficient between PBL height and the concentration of PM_{2.5} is -0.340 .

Keywords Planetary boundary layer (PBL) height, Wavelet covariance transform method, Lidar, Aircraft, Radiosonde

1 引言

大气边界层 (Planetary Boundary Layer, 简称 PBL) 是大气中直接与地表发生作用的部分, 是大气与地球之间发生物质和能量交换的桥梁。边界层内的大气过程直接影响着人类生活和生产活动, 因此大气边界层问题一直是科学研究的重要方向之一。边界层由于与地面直接相贴, 受到湍流摩擦、辐射加热、水汽交换、分子扩散等过程的影响。边界层与地面作用的响应时间尺度为一小时或者更短。大气边界层高度随时间和空间变化, 变化幅度从几百米到几公里 (Stull, 1988)。

大气边界层高度是表征边界层变化的重要参数之一, 是天气预报、气候研究和空气质量预报的重要因子。近些年气溶胶污染备受关注, 气溶胶被排放到大气中后, 其滞留的时间、扩散和累积的程度都会受到边界层高度的影响 (Quan et al., 2014; Zhang et al., 2015), 边界层高度在地面污染物浓度、边界层结构和辐射之间的正反馈中起到了重要作用 (Quan et al., 2013)。因此边界层高度是对流、湍流活动、污染物扩散等研究领域必须要了解的。研究边界层高度 (厚度) 的变化规律, 对于大气污染物监测和预报预警等工作具有重要的实用价值。

目前边界层高度的判断方式主要从热力和动力方面开展。热力方面多采用温度和湿度廓线, 根据逆温层或温度梯度不连续、水含量的变化判断。探测方法可采用探空仪、微波辐射计和机载探测设备等。动力学角度可以从风在垂直方向的变化判

断, 如风向和风速达地转风的高度, 风速最大值的高度; 或者从能量的角度, 湍流能量减小时的高度。探测方法可采用探空仪、风廓线雷达和激光风速仪等。此外, 基于以上两种理论, 借助气溶胶作为示踪物, 利用气溶胶后向散射垂直廓线也可估算, 例如激光雷达。

虽然多种遥感仪器被用于边界层发展的研究, 但激光雷达以高度连续性和高时空分辨率的特点, 成为估算边界层高度的有效手段之一。基于激光雷达获取边界层高度提出了多种方法, Hayden et al. (1997) 采用梯度法计算边界层高度, 此方法简单但稳定和连续性略差; Steyn et al. (1999) 提出采用曲线拟合方法获取边界层高度信息, 对于特殊的边界层结构容易出现误判; Cohn and Angevine (2000) 和 Davis et al. (2000) 分别基于地基和机载激光雷达利用小波协方差方法识别边界层高度, 需要事先给定算法参数是此方法的问题, 但之后国内外学者广泛使用了此方法 (Brooks, 2003; Baars et al., 2008; Wang et al., 2012; 杨富燕等, 2016); 贺千山和毛节泰 (2005)、贺千山等 (2006) 提出并应用归一化梯度法反演边界层高度, 此方法较为复杂, 应用范围有限。事实上, 基于激光雷达反演边界层高度的方法都有自己的局限性和适用范围, 必须进行评估才能更好的应用于北京地区。

本文基于微脉冲激光雷达, 以及飞机和探空资料, 并引进辐射和铁塔的常规气象要素资料研究影响边界层高度的因素。研究主要目的包括: (1) 评估基于激光雷达采用小波协方差变换法反演边界

层高度在北京地区的适用性, 给出适用于本地化的参数; (2) 研究不同天气状况 (有云和无云) 下的边界层高度的演变及其影响因素; (3) 分析边界层高度与地面污染物的相关关系。

2 资料与方法

2.1 仪器与资料

本文所用微脉冲偏振激光雷达系统是由美国 Sigma Space 公司生产, 激光器的波长为 532 nm, 垂直分辨率最高可达 15 m, 盲区 250 m, 时间分辨率最高可达 30 s, 垂直分辨率和时间分辨率都可根据需要调节, 理论探测高度 14 km。

飞机观测采用机载常规气象要素观测仪, 由美国 DMT 公司生产的 AIMMS20, 包括风速、温度和湿度以及露点的观测, 时间分辨率为 1 s。

探空数据选取与雷达同期的北京观象台每日 08:00 和 20:00 (北京时, 下同) 的常规气象数据。地面温度、湿度、风速和能见度数据由芬兰 Vaisala 公司生产的常规探测仪器获得, 时间分辨率为 1 min。

颗粒物监测仪由德国 GRIMM 公司生产的 GRIMM180, 可实时获取 PM₁、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的质量浓度, 该设备的时间分辨率为 1 min。

另外本文个例使用了地面太阳直接辐射 (CNR1 仪器观测, 荷兰 Kipp&Zonen 公司生产) 以及 325 m 铁塔的常规风温资料。本文研究地点为北京市海淀区蓝靛厂南路宝联观测点 (39.9°N, 116.3°E), 距离西四环较近, 激光雷达以及地面气象要素均放于此观测点。探空数据源于北京市南郊观象台 (39.8°N, 116.47°E)。两个观测点直线距离 21 km, 边界层高度在一定水平范围内差距较小, 因此探空数据与激光雷达具有可比性。铁塔位于中国科学院大气物理研究所, 距离激光雷达位置 9 km。飞机资料选取沿四环环城探测中的西四环资料。数据分析时间选择 2011 年 5 月至 2012 年 4 月。

2.2 边界层高度反演方法

2.2.1 激光雷达反演法

激光雷达原始数据经过相关的雷达因子订正 (包括延时、背景噪音、后脉冲和重叠因子订正) 和距离订正后, 获得标准后向散射回波信号, 开展边界层高度反演。一般来说边界层内的气溶胶浓度要高于自由大气, 并且距离地面越近, 浓度越高, 在低层有更强的后向散射回波信号。因此在边界层与自由大气之间存在一个过渡带, 之上气溶胶浓度

迅速降低, 后向散射回波信号显著减小。目前判断边界层高度的主要方法就是利用后向散射回波信号的变化。然而实际大气多数情况是边界层和自由大气之间的过渡并不明显, 需将后向散射回波信号的变化放大, 更清楚的捕捉变化信息。国内外多采用梯度法、曲线拟合法和小波协方差变换方法。小波协方差变换法基于 Harr 函数 (Gamage and Hagelberg, 1993) 和激光雷达后向散射信号确定边界层高度。具体首先定义 Haar 函数如下:

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

其中, z 为高度, b 为函数所在的位置, a 为空间范围或者计算步长, 可以根据本地特点制定。另定义 Haar 函数的协方差函数 w_f 表示为

$$w_f a, b = \frac{1}{a} \int_{z_b}^{z_t} f(z) h\left(\frac{z-b}{a}\right) dz, \quad (2)$$

其中, $f(z)$ 为激光雷达的标准化后向散射信号, $h\left(\frac{z-b}{a}\right)$ 为 Haar 函数, z_t 和 z_b 为后向散射信号的上下限。

值得注意的是, 所选积分步长不易太小或太大, 太小容易受噪音影响, 类似梯度法, 太大会平滑甚至忽略回波本身的结构。实际上根据定义最合适的范围为边界层与自由大气过渡带的厚度, 但此厚度很难获取 (Brooks, 2003)。因此选取从低层开始第一个小波协方差变换函数最大值作为边界层高度; 或者设定一个符合当地的阈值范围, 从低层开始的第一个值超过这个阈值或者在给定的阈值区间范围内, 即认为此高度为边界层高度。本文分别选取 135 m、150 m、210 m、270 m、330 m、390 m 和 450 m 为步长, 选择协方差函数范围为 0.04~0.09, 与飞机和探空观测结果进行对比, 以检验小波协方差方法判断的正确性, 并选取合适的步长和对应的函数值。

2.2.2 探空和飞机反演法

本文飞机与探空资料采用体积理查逊数法确定边界层高度 (Hennemuth and Lammert, 2006)。理查逊数是表征大气层中浮力做功与湍流切应力做功比值的无量纲参数, 其值的符号和数值代表了大气湍流状态, 理查逊数为负值代表浮力做功补充湍

流动能, 湍流能量增加, 绝对值越大湍流活动趋向于更加旺盛; 反之, 正值代表湍流能量减弱的趋势, 湍流活动区域减弱。所以认为从地面向上理查逊数第一次超过阈值时作为边界层顶。Sicard et al. (2004) 认为 0.25 作为阈值较为妥当。本文将 0.25 作为临界值, 超过此值大气脱离边界层的影响。此外, 为了多种方法综合比较, 本文也将采用较多的位温廓线判断边界层高度 (Davis et al., 2000; 韦志刚等, 2010; 李岩瑛等, 2016) 方法引入。

3 结果分析

3.1 激光雷达与飞机探测对比

边界层高度存在显著的日变化特征。上午随着太阳辐射的逐渐增强, 湍流活动加强, 边界层向上抬升, 午后边界层高度达到最大, 之后随着太阳辐射减弱边界层高度逐渐下降, 夜间边界层高度最低。因此, 中午前后边界层发展最旺盛, 边界层内物质混合最为均匀, 基于气溶胶追踪判断边界层高度最为有利。本文选取中午前后与激光雷达匹配的飞机观测资料进行对比。由于飞机观测资料有限, 选取了同期的三个个例。

2011 年 9 月 27 日 13:00 激光雷达与飞机探测如图 1 所示, 图 1 (右) 为 12:30~13:30 标准化后的雷达后向散射回波信号 (NRB), 随着高度增加回波渐弱, 13:00 位温法得到的边界层高度为 2010 m, 理查逊数法为 1860 m。如果选择小波函数积分步长 210 m (图 1 左图红色线), 阈值为 0.05, 小波协方差法得到的边界层高度为 1770 m; 步长增至 270m, 阈值为 0.07, 边界层高度为 1770 m, 均低于前两种方法的判断结果。不同的步长和阈值比较见图 2, 步长一定的情况下, 随着阈值的增加, 边界层高度增加。不同步长引起的边界层高度差异较大, 步长太大, 平滑了剧烈衰减的回波信号; 步长太小, 能反映快速的信号变化, 增加了小波函数波动频率, 有效的提高了小波的垂直分辨率, 但容易出现错估。

因此, 选取步长 210 m 和阈值 0.05 能够较好的得到边界层高度。虽然步长 270 m 和阈值 0.07 也能得到以上个例的边界层高度, 但其匹配了更大的阈值, 之后的个例未能计算得到。

同期的其他两个个例对比见图 3。利用较为理想的匹配组合, 即步长 210 m 和阈值 0.05 反演边界层高度。5 月 22 日, 飞机在观测点附近飞行时间分

别为 09:20 和 11:30 左右。理查逊数法得到的边界层高度分别为 428 m 和 649 m, 小波协方差法分别为 480 m 和 750 m, 二者分别相差 52 m 和 101 m, 小波协方差法略高。7 月 5 日 11:30 理查逊数法得到的边界层高度为 934 m, 小波协方差法较其低 94 m。因此利用步长 210 m 与阈值 0.05 能够较好的得到边界层高度, 与理查逊数法得到的边界层高度偏差均在 150 m 之内。值得注意的是小波法的时序演变表明, 随着边界层的发展小波的峰值增加, 特别是有云存在的情况下, 小波法在云区存在极大峰值, 因此在数据处理之前尽量剔除云的影响。

以上个例对比表明激光雷达与飞机探测结果有较好的一致性。通常边界层的最上层为夹卷层, 并维持一定厚度, 因此边界层顶是拥有一定厚度的, 雷达与飞机探测方法不同, 反演的边界层高度可能是夹卷层的某一厚度, 二者不一定相同。再者由于飞机探测资料的有限性, 以及雷达与飞机所在观测点之间的距离差异, 存在一定的差异是可以接受的。

3.2 激光雷达与探空仪对比

由于飞机探测资料稀少珍贵, 可与激光雷达匹配的数据有限, 本文选取与激光雷达同期的高空探空仪资料进行对比。选取秋冬季高空探空仪早晚 (08:00 和 20:00) 的观测与激光雷达进行对比。激光雷达在观测期间不同季节采用不同的垂直分辨率, 夏季为 30 m, 冬季和春季 15 m。前面的分析已经给出了较为满意的步长与阈值组合, 即步长为 210 m 与阈值 0.05, 但由于垂直分辨率的变化, 重新选取步长, 采取类似 3.1 节的方法, 得到步长为 135 m、阈值为 0.05 时, 能够较好的给出与理查逊数法较为一致的边界层高度。

观测时期选取探空仪与雷达匹配的数据总数为 130 对, 剔除受降水、边界层顶附近云、大风影响以及采用小波法无法判断边界层高度的数据, 二者匹配数据 90 对, 对比结果如图 4, 二者有较好的一致性, 相关系数 0.88, 平均偏差 0.02 ± 0.13 km, 雷达反演的边界层高度平均高于探空结果, 并且随着边界层高度的增加, 偏差增大。因此基于激光雷达反演的边界层高度是可靠的。需要注意的是, 在北京污染较为严重的时期以及夜间非常稳定的大气条件下, 边界层高度低于 300 m, 激光雷达不能很好的判断, 这也是采用本方法和激光雷达盲区存在的局限之一。

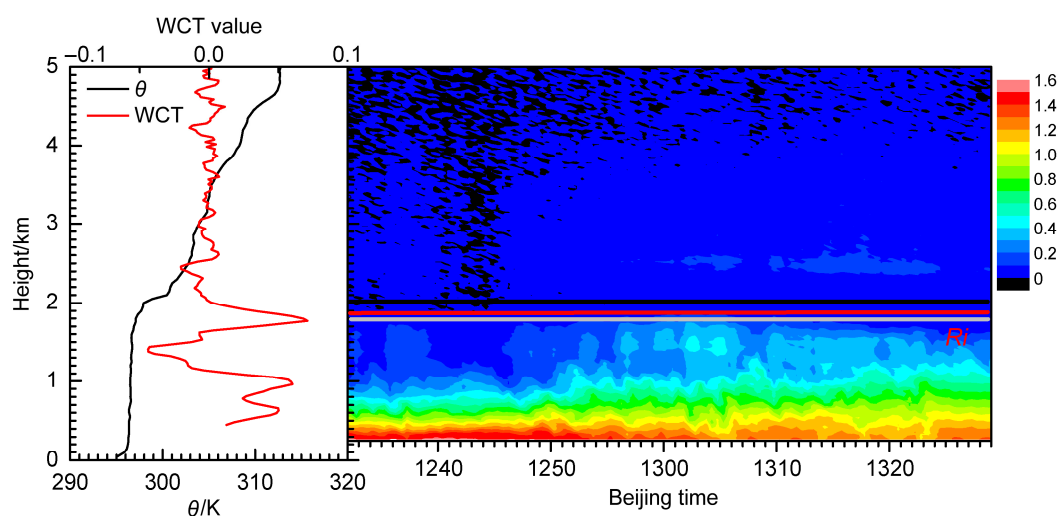


图1 2011年9月27日气溶胶不同垂直分布条件下不同方法反演的边界层高度。左图黑线为位温(θ , 单位: K)曲线, 红线为小波协方差廓线(简称WCT, 单位: $\text{counts km}^2 \mu\text{s}^{-1} \mu\text{J}^{-1}$, 下同, 步长 210 m); 右图为 12:30~13:30 (北京时, 下同) 雷达回波(填色: 标准化后向散射廓线, 简称NRB, 单位: $\text{counts km}^2 \mu\text{s}^{-1} \mu\text{J}^{-1}$, 下同)的时序变化, 其中红线、黑线和灰线分别为理查逊数法(Ri)、位温法和小波法确定的边界层高度

Fig. 1 PBL (planetary boundary layer) heights retrieved by different methods for 27 September 2011. The left panel presents potential temperature (θ , units: K) profile (black line) and WCT (wavelet covariance transform) value profile (red line, units: $\text{counts km}^2 \mu\text{s}^{-1} \mu\text{J}^{-1}$, the same below, the step length is 210 m). The right panel presents time series of the NRB (normalized relative backscatter; shaded, units: $\text{counts km}^2 \mu\text{s}^{-1} \mu\text{J}^{-1}$, the same below) from 1230 BT to 1330 BT (Beijing time), and the PBL height derived from the Richardson number (Ri , red line), from the potential temperature (θ , black line) and from WCT (gray line), respectively

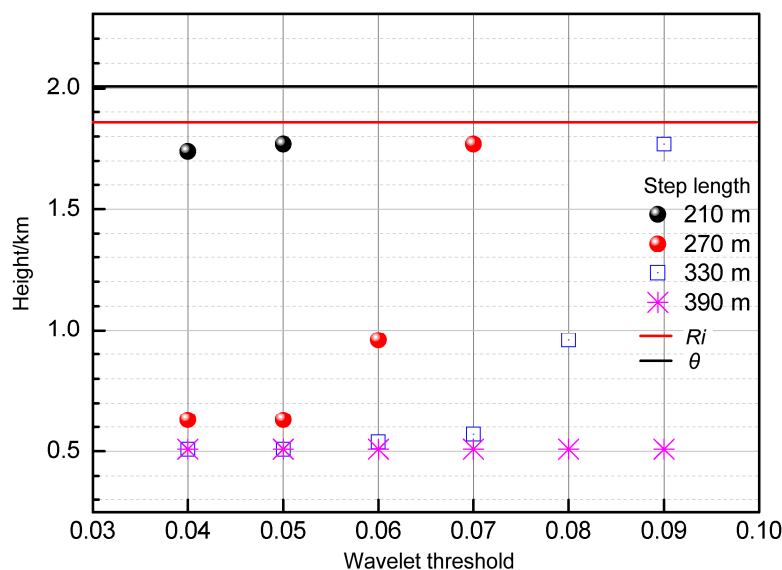


图2 2011年9月27日选择不同步长(210 m、270 m、330 m和390 m)和阈值(0.04、0.05、0.06、0.07、0.08和0.09)的边界层高度。红线、黑线分别为理查逊数法(Ri)和位温法(θ)确定的边界层高度

Fig. 2 PBL heights retrieved by combinations of different step lengths (210 m, 270 m, 330 m and 390 m) and thresholds (0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08 and 0.09) for 27 September 2011. Red line and black line denote the PBL height derived from the Richardson number (Ri) and the potential temperature (θ), respectively

在激光雷达判断边界层高度的过程中, 希望能给出确定的步长和阈值, 方便实时自动计算边界层高度, 但是冬、春季诸多个例在计算小波函数过程中, 函数值均偏小, 并不能达到设定的阈值, 这是此方法本身存在的问题(Brooks, 2003; Morille et al.,

2007)。如果根据实时数据减小阈值可能会得到有效的边界层高度, 采用 Granados-Muñoz et al.(2012)提出的迭代法, 当无法找到超过阈值的函数值时, 不断减小阈值(迭代步长 0.001), 直到找到峰值, 设定为边界层高度。此方法有效的得到了无法

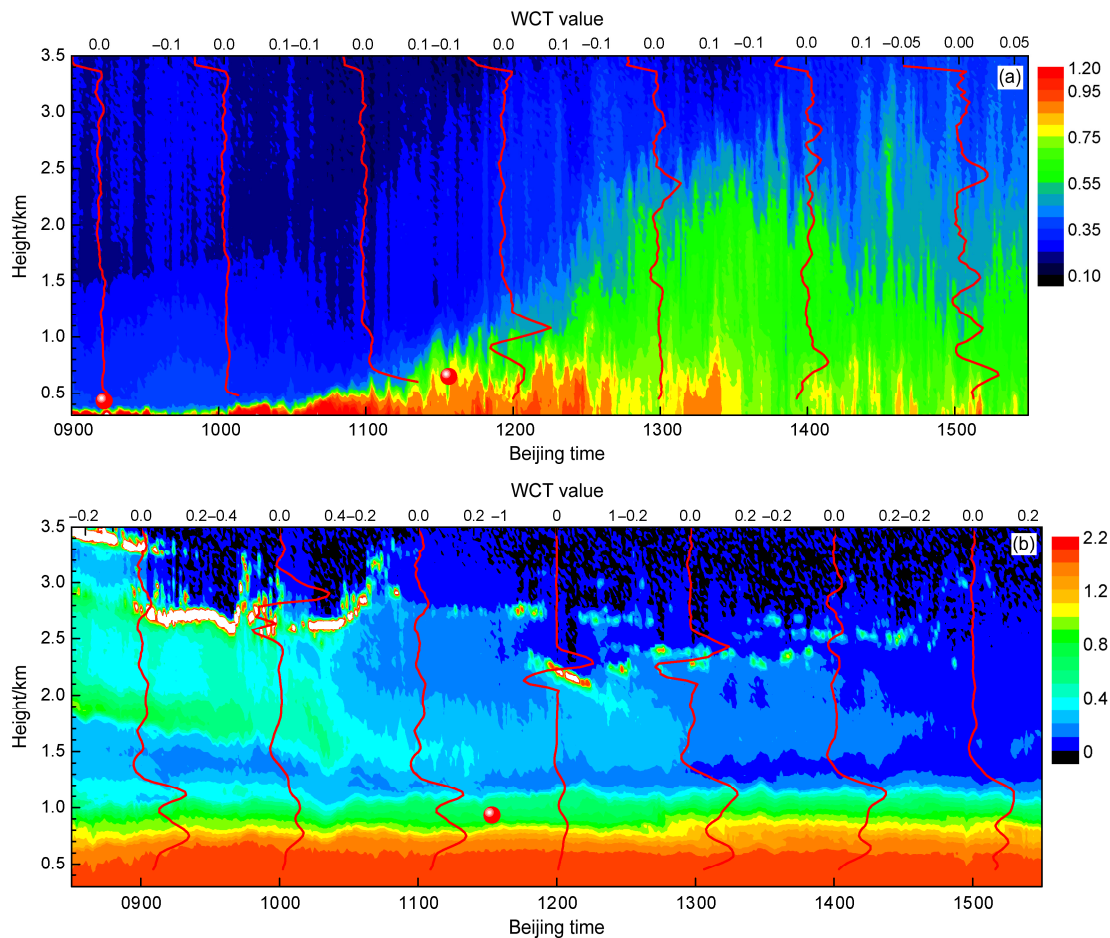


图 3 2011 年 (a) 5 月 22 日 09:00~15:00 和 (b) 7 月 5 日 08:30~15:30 飞机探测与激光雷达 (NRB) 判断的边界层高度。图中红线为不同时刻的小波协方差廓线, 红点为飞机的理查逊数法得到的边界层高度

Fig. 3 Time series of NRB (shading): (a) From 0900 BT to 1500 BT on 22 May 2011; (b) from 0830 BT to 1530 BT on 5 July 2011. The red lines represent the WCT value profiles at individual times, the red dots represent the PBL height retrieved by Richardson number based on aircraft measurement

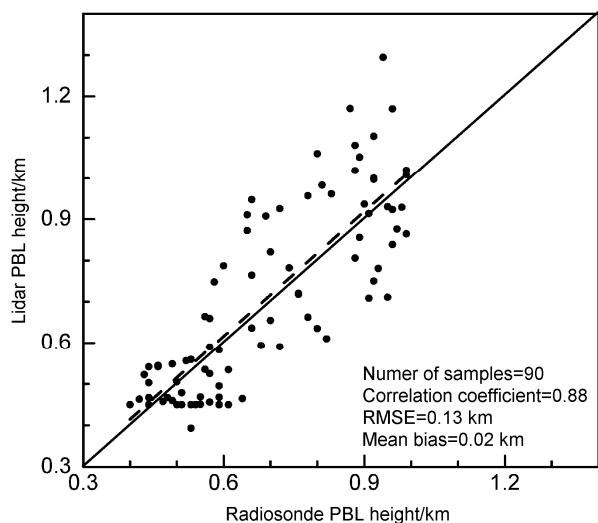


图 4 探空仪与激光雷达反演的边界层高度对比

Fig. 4 PBL heights retrieved by lidar and radiosonde

达到阈值的个例, 见图 5。激光雷达判断边界层高度受到气溶胶垂直分布特征的影响。当边界层混合均匀, 如图 5a, 利用迭代阈值法, 2012 年 3 月 9 日小波函数存在单一的峰值, 得到的边界层高度为 1560 m, 与理查逊数法和位温法有较好的一致性, 偏差为 120 m 和 75 m。傍晚随着太阳辐射的减弱, 边界层高度下降, 低空出现残留层, 滞留了较高浓度的气溶胶 (Quan et al., 2013), 见图 5b。此种气溶胶垂直分布特征在北京的傍晚出现频率颇高, 特别是冬季。近地面强后向散射信号叠加低空的回波信号, 小波函数呈现多个峰值, 当步长为 135 m 和阈值 0.05 时, 得到的边界层高度较理查逊数法偏低 120 m, 较位温法低 1000 m, 位温法将边界层高度定义为第二个强回波层顶。选定的步长和阈值能够较好地保证小波法和理查逊数法的一致性。较为复

杂且难以判断的边界层分布见图 5c, 气溶胶浓度随高度呈分层逐渐降低的特征在北京十分常见, 不同于图 5b 存在第二个强气溶胶层, 边界层高度更高。小波法判断近地面高浓度气溶胶层顶为边界层高度, 但此高度与边界层顶并不一致。此种情况下, 小波函

数已经无法获得合适的边界层高度, 可以通过边界层高度的连续变化给出傍晚边界层降低的程度。

因此, 小波协方差方法并不能确切的给出所有大气边界层结构下的边界层高度, 需要根据天气进行实时的跟踪和订正。利用上述方法有可能给出的

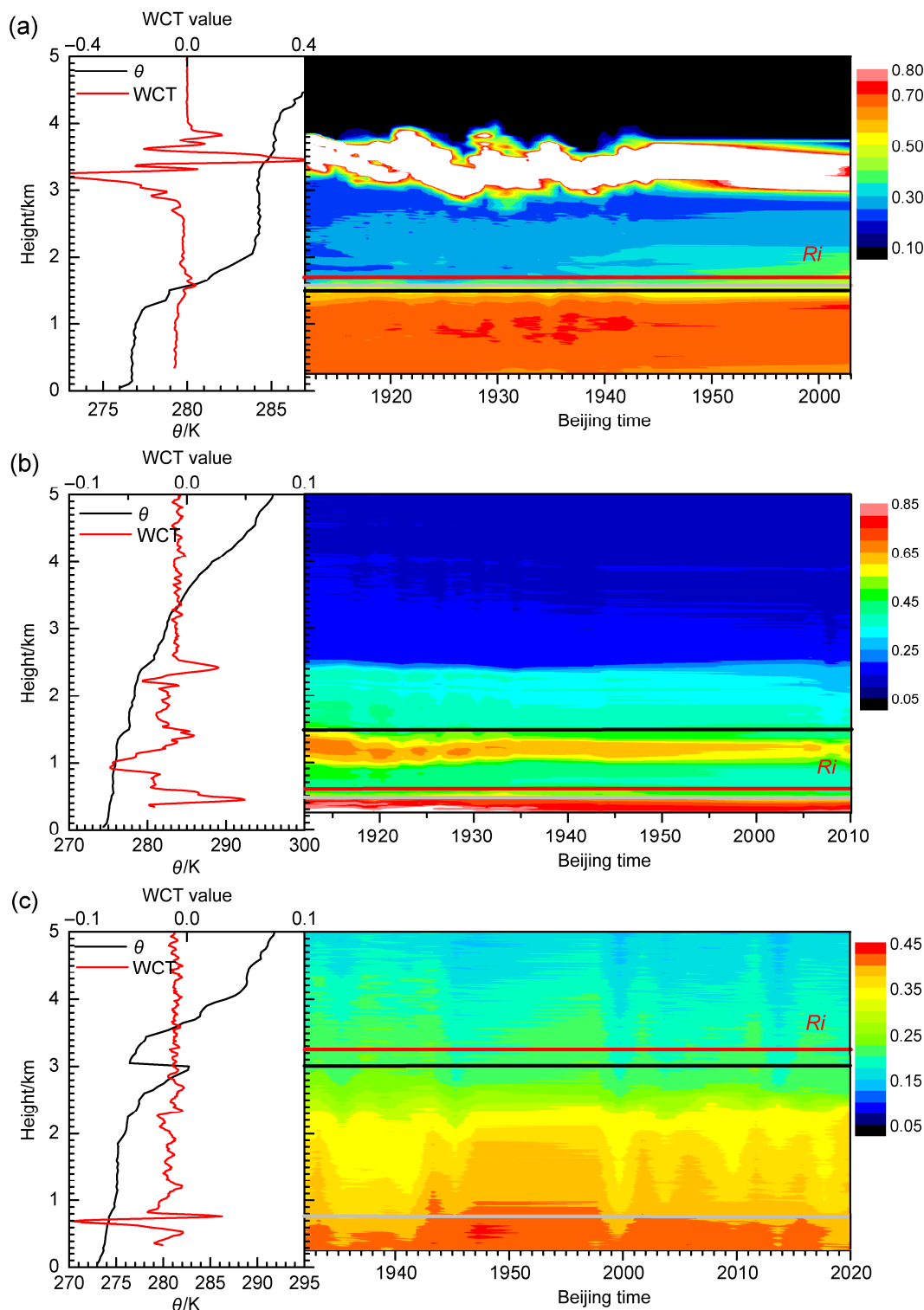


图 5 2012 年 (a) 3 月 9 日、(b) 2 月 11 日和 (c) 2 月 14 日气溶胶不同垂直分布条件下边界层高度。图中说明同图 1

Fig. 5 Same as Fig. 1, but for (a) 9 March 2012, (b) 11 February 2012, and (c) 14 February 2012

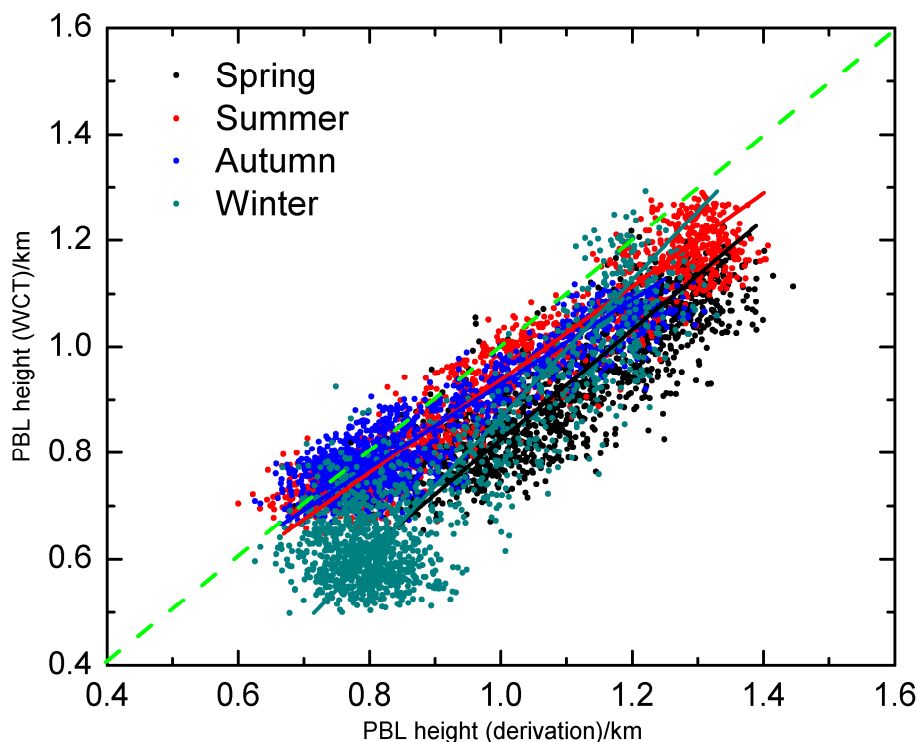


图6 小波协方差与梯度法确定的边界层高度对比

Fig. 6 PBL heights retrieved by the WCT method and the derivation method based on lidar

边界层高度并不连续,在边界层高度并不连续的情况下,加入手动修改会更好的给出边界层高度,或者可以引入其他的激光雷达参数作为参考。其中激光雷达的退偏比提供了气溶胶粒子形状差异的信息,可以作为识别边界层高度的参考。

3.3 激光雷达小波协方差方法与梯度法的比较

分别利用梯度法与小波协方差方法获得了不同季节的边界层高度,对比结果如图6所示。小波协方差法与梯度法得到的边界层高度较为一致,其中夏季和秋季较春季和冬季一致性更好,主要原因是夏季和秋季边界层发展旺盛,激光雷达后向散射回波信号递减更均匀。整体来说,小波协方差法得到的边界层高度较梯度法略偏低,特别是春季。冬季边界层高度低于700 m时,小波法较梯度法平均偏低约200 m,当边界层高度偏低时,对流发展较弱,气溶胶垂直扩散受到抑制,激光雷达后向散射回波信号低层较强,易在低层出现几个较大的梯度值,梯度法选取了最强的梯度值所在高度作为边界层高度,事实上选取一定高度层内,最大平均梯度的高度更符合实际大气特征,小波法恰恰考虑了这一特点。从判断细节而言,小波协方差可以稳定且连续获取数值,梯度法由于只考虑某一层的高度,

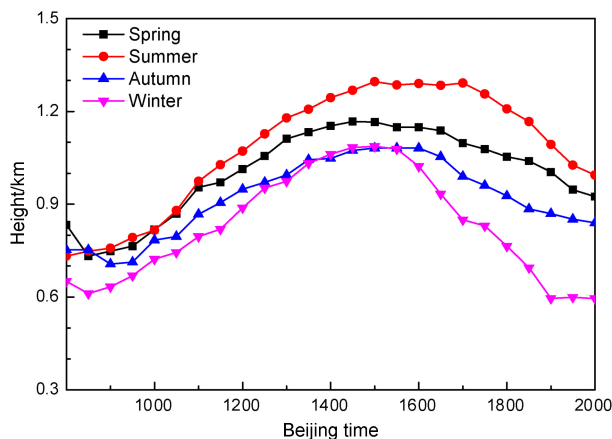


图7 不同季节大气边界层高度平均日变化特征

Fig. 7 Characteristics of diurnal variations of PBL height in different seasons

稳定性较差,容易出现不连续的跳跃点。因此本文的对比也证实了从判断边界层高度的连续性、稳定性和物理意义上小波协方差法更加符合要求。

3.4 不同天气条件下边界层的演变特征

选取观测时段上空无云影响的晴空大气,分析不同季节的日变化特征,各季节样本数均为20个。图7为北京地区的大气边界层高度存在显著的日变化特征。日出后随着太阳辐射的增强,边界层迅速

抬升；午后随着太阳辐射的逐渐减弱，边界层高度随之降低。边界层过程的发展符合经典边界层日变化概念模型（Stull, 1988）。季节间的边界层高度表明，夏季边界层高度发展最为迅速且抬升高度最高，发展最为充分，平均最高可达 1.30 km，较高的边界层高度可维持将近 4 h。夏季辐射增强迅速，地表升温较快，湍流活动加剧最为显著，热力作用导致边界层迅速发展且衰减开始时间晚。而冬季边界层发展缓慢，热力作用产生的湍流动力较弱，不足以支持边界层发展到较高的高度。因此，冬季边界层高度低于其他季节，边界层高度最高平均为 1.08 km，维持时间 2 h 左右，随即迅速下降，下降速度较其他季节明显偏快。秋季和春季次之。因此，边界层高度的变化过程体现了边界层的发展与季节气象条件的相关性。

边界层高度存在显著的日变化特征，日最高边界层高度代表当日边界层充分发展的高度，决定了污染物垂直扩散的最大能力，是边界层结构研究的重要参数。2011~2012 年季节平均日最高边界层高度统计见表 1，夏季明显高于其他季节，数据较为集中，日间的边界层发展较为一致；春季和秋季数据离散度较大，环流调整的季节，不稳定性强，春季前期更接近冬季，而后期更接近夏季；秋季正好相反。冬季边界层高度变化幅度较大，这可能与冬季北京地区静稳天气增多和所选个例有关。

表 1 北京地区季节平均日最高边界层高度统计
Table 1 Statistics of seasonal average daily maximum value of PBL heights in Beijing

	边界层高度/km				
	冬季	春季	夏季	秋季	年平均
平均值	1.08	1.17	1.30	1.08	1.09
标准差	±0.53	±0.56	±0.50	±0.58	±0.59

为了分析不同天气条件边界层高度的演变特

征以及天气条件对边界发展的影响，选取 2 月 8~10 日有云与无云的边界层演变特征，见图 8。2 月 8 日和 10 日为晴空，2 月 9 日为多云天气。晴空白天边界层高度迅速增加，午后达到最高 2.5 km（2 月 8 日）。2 月 9 日云底高度为 3.5 km，边界层高度最高只达到 0.9 km。激光雷达可以清晰而直观的看到边界层以及云的演变规律。

图 9 为地面的直接辐射与 200 m 高度的梯度理查逊数。晴空条件下，日出后太阳直接辐射增强，理查逊数接近零值（2 月 8 日）或者负值（2 月 10 日）。其中 2 月 10 日午后理查逊数达到最大负值（-5.1），表明湍流能量增强的趋势，边界层高度快速增加至 1.9 km。当有云存在的条件下（2 月 9 日），太阳直接辐射显著低于晴空的辐射量，且理查逊数初始为正值，表明湍流能量减弱的趋势，午后转为较小的负值。因此云的存在减少了到达地面的直接辐射，抑制了湍流的发展，进一步抑制了边界层的发展，致使当日最高边界层高度将至 1 km 以下，无显著的日变化特征。

3.5 边界层高度与地面污染的关系

近地面的污染发生在边界层以内，其发生和发展必然与边界层结构有着密切的关系。特别是近年来京津冀地区的霾天气备受关注，大气边界层结构对于霾的影响成为研究的热门方向之一。本文将激光雷达基于小波协方差方法反演的边界层高度与地面 PM2.5 浓度以及其他气象要素之间的关系进行相关分析。利用 2011 年 5 月至 2012 年 4 月全年的资料进行统计。

表 2 相关关系分析中，各物理量之间通过了较高的显著性检验。PM2.5 浓度与边界层高度和风速呈弱的负相关关系，其中与边界层高度的相关系数高于风速，分别为 -0.340 和 -0.194，较高的边界层高度和较大的风速都不利于 PM2.5 浓度的增加。

表 2 PM2.5 浓度与边界层高度以及其他气象要素相关系数统计表

Table 2 Relationships of the concentration of PM2.5 with PBL height and other meteorological elements

	相关系数							
	PM2.5 浓度	边界层高度	相对湿度	风速	能见度	温度	气压	边界层高度×风速
PM2.5 浓度	1.0	-0.340	0.431	-0.194	-0.624	0.119	-0.201	-0.255
边界层高度		1.0	-0.299	0.342	0.354	0.308	-0.202	0.741
相对湿度			1.0	-0.435	-0.697	0.226	-0.282	-0.383
风速				1.0	0.387	0.143	-0.137	0.810
能见度					1.0	-0.171	0.288	0.393
温度						1.0	-0.856	0.227
气压							1.0	-0.178

注：表中边界层高度×风速，表示将边界层高度值与风速值相乘，表征在垂直方向和水平方向的总扩散特征。

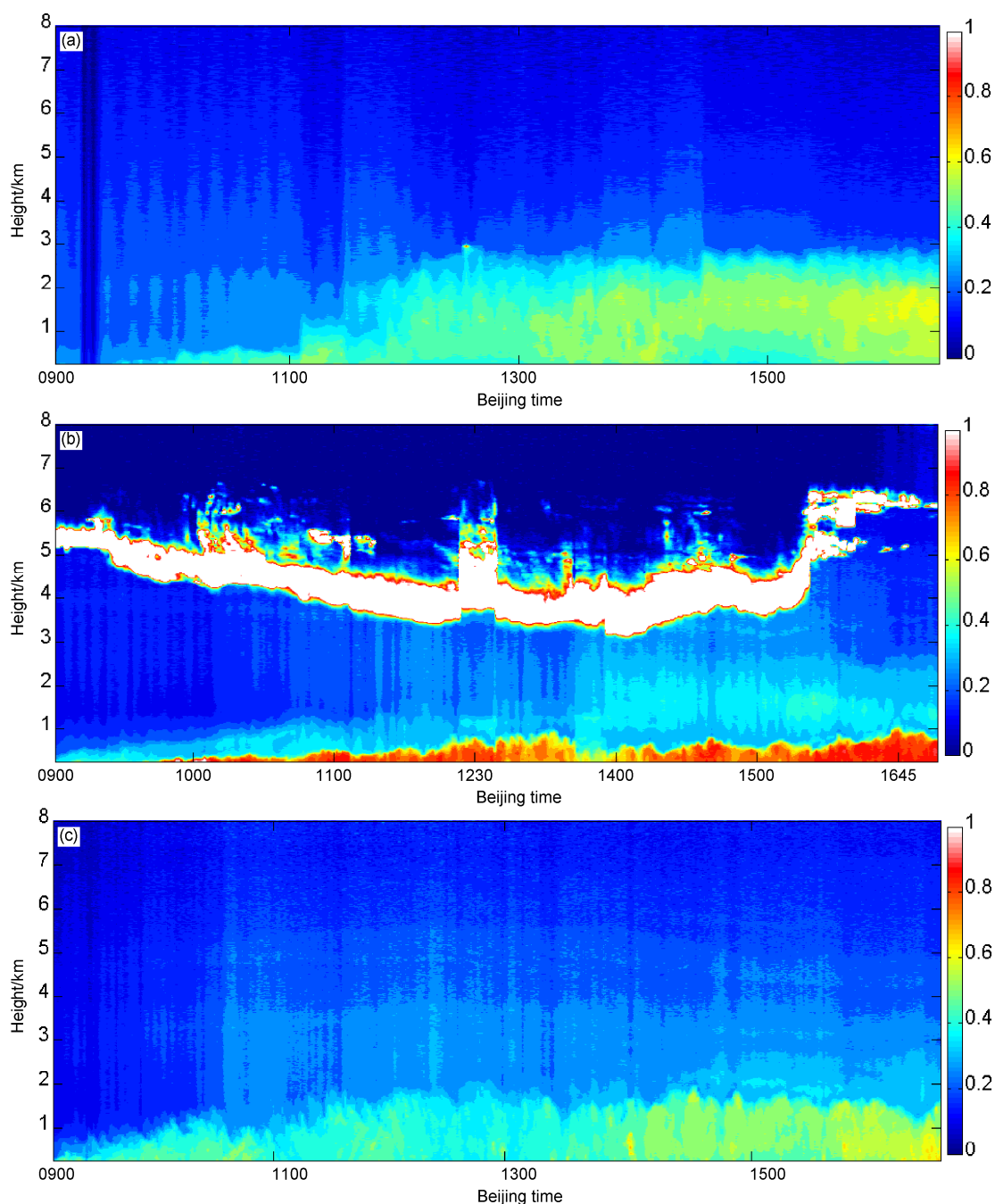


图 8 2012 年 2 月 (a) 8 日、(b) 10 日和 (c) 9 日不同天气条件下的边界层演变特征。2 月 8 日和 10 日为晴空，9 日为多云天气

Fig. 8 Evolutions of PBL for clear sky on (a) 8 February, (b) 10 February and cloudy sky (c) on 9 February with different weather conditions

PM_{2.5} 浓度与能见度的负相关关系好于其他物理量，相关系数为 -0.624 。为此将能见度低于 5 km 的数据进行分类，重点分析有霾存在（能见度低于 5 km）的天气边界层高度与 PM_{2.5} 浓度的变化。图 10 给出不同能见度分级下，PM_{2.5} 与边界层高度的平均变化。横坐标为依照能见度分级，共分 9 级，以 0.5 km 为增长间隔，第 1 级低于 1 km，第 2 级为 1~1.5 km，……，第 9 级为 4.5~5 km。边界层高度较低的

情况下，边界层从 0.35 km 升到 0.55 km，PM_{2.5} 浓度从 $196 \mu\text{g m}^{-3}$ 降到 $127 \mu\text{g m}^{-3}$ ；当边界层高度较高的情况下，边界层从 0.8 km 升到 1.1 km，PM_{2.5} 浓度从 $75 \mu\text{g m}^{-3}$ 降到 $67 \mu\text{g m}^{-3}$ 。因此，当边界层高度较低时，地面 PM_{2.5} 浓度呈现更大的变化。污染物主要发生在边界层以内，边界层高度越低，代表垂直扩散条件越不好，对于污染物的扩散并不十分有利。

PM_{2.5} 浓度与相对湿度呈弱的正相关关系（见

表 2)。高的相对湿度环境下,有利于颗粒态污染物吸湿增长过程的发生,颗粒物粒径增大,质量浓度必然增加;另外,高的相对湿度有利于二次气溶胶前体物(NO_x 和 SO_2) 转化(硝酸盐和硫酸盐)的非均向反应化学过程发生,加速转化率,增加硫酸盐和硝酸盐,特别是霾过程发生的后期(Quan et al., 2015)。

4 结论

本文基于小波协方差方法开展了激光雷达对边界层高度的反演,评估了方法的适用性,并得到性。同时研究了不同天气条件下边界层高度的变化了适合北京地区的反演算法参数,将反演结果与飞机探测和探空数据进行对比,得到了较好的一致规

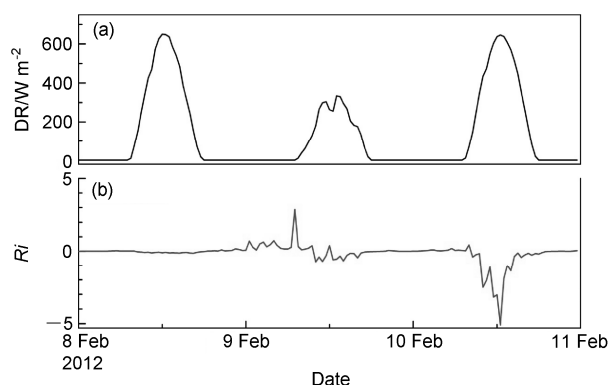


图 9 2012 年 2 月 8~10 日不同天气条件下的 (a) 直接辐射 (DR, 单位: W m^{-2}) 和 (b) 200 m 高度的梯度理查逊数

Fig. 9 (a) Direct radiation (DR, units: W m^{-2}) and (b) Richardson number (Ri) at the height of 200 m with different weather conditions from 8 February to 10 February, 2012

律,分析了地面污染物与边界层高度之间的关系。

(1) 小波协方差法与飞机和探空反演的边界层高度对比显示,小波协方差法中步长和阈值的选取至关重要。当激光雷达的垂直分辨率为 30 m 时,更加适合北京地区的步长和阈值分别为 210 m 和 0.05;当激光雷达的垂直分辨率为 15 m 时,步长和阈值分别为 135 m 和 0.05。然而激光雷达在傍晚边界层气溶胶分层分布的情况下,并不能很好的判断边界层高度,这也是激光雷达采用小波协方差方法的不足之处。

(2) 小波协方差方法和梯度法对比表明,虽然二者有较好的一致性,但是小波协方差法可以稳定且连续获取边界层高度,梯度法由于只考虑某一层的高度,稳定性较差,容易出现不连续的跳跃点。从判断边界层高度的连续性、稳定性和物理意义上考量,小波协方差法更符合实际应用。因此在边界层结构分析中,采用激光雷达小波协方差法的反演结果是可行的。激光雷达探测的边界层高度可以为污染物空间变化以及模式的改进提供基础资料,也可以用来评估其他仪器。

(3) 不同天气条件下边界层高度变化规律并不相同,云的存在减少了到达地面的直接辐射,湍流能量呈现减弱的趋势,抑制了边界层的发展,边界层高度低于 1 km,并且日间边界层高度变化不大;晴空条件下,边界层高度日变化显著,午后达到最大。不同季节平均边界层高度存在显著的日变化特征差异。夏季午后的较高的边界层高度可维持 3~4 h,平均可达 1.30 km;冬季较高边界层高度只能维

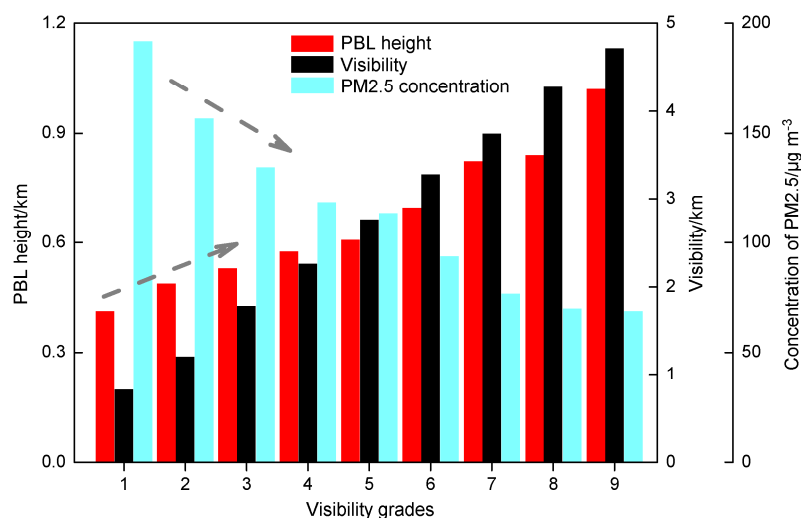


图 10 不同能见度分级 (1~9) 情况下边界层高度、能见度和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度平均值的变化特征

Fig. 10 Characteristics of average PBL height, mass concentration of $\text{PM}_{2.5}$, and visibility with different visibility grades (1-9)

持 2 h 左右, 平均为 1.08 km。

(4) 地面 PM_{2.5} 浓度与边界层高度和风速呈弱的负相关关系, 相关系数分别为 -0.340 和 -0.194, 与能见度的负相关关系好于其他物理量。较低的边界层高度和风速都不利于 PM_{2.5} 浓度的减小。

致谢 感谢北京市人工影响天气办公室的观测人员在野外观测试验期间的辛苦工作。

参考文献 (References)

- Baars H, Ansmann A, Engelmann R, et al. 2008. Continuous monitoring of the boundary-layer top with lidar [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 8 (23): 7281–7296, doi:10.5194/acp-8-7281-2008.
- 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.
- 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.
- Gamage N, Hagelberg C. 1993. Detection and analysis of microfronts and associated coherent events using localized transforms [J]. *J. Atmos. Sci.*, 50 (5): 750–756, doi:10.1175/1520-0469(1993)050<0750:DAAOMA>2.0.CO;2.
- Granados-Muñoz M J, Navas-Guzmán F, Bravo-Aranda J A, et al. 2012. Automatic determination of the planetary boundary layer height using lidar: One-year analysis over southeastern Spain [J]. *J. Geophys. Res.*, 117 (D18): D18208, doi:10.1029/2012JD017524.
- Hayden K L, Anlauf K G, Hoff R M, et al. 1997. The vertical chemical and meteorological structure of the boundary layer in the Lower Fraser Valley during Pacific '93 [J]. *Atmos. Environ.*, 31(14): 2089–2105, doi:10.1016/S1352-2310(96)00300-7.
- 贺千山, 毛节泰. 2005. 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*, 63 (3): 374–384. He Qianshan, Mao Jietai. 2005. Observation of urban mixed layer at Beijing using a micro pulse, lidar [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 63 (3): 374–384, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2005.03.013.
- 贺千山, 毛节泰, 陈家宜, 等. 2006. 基于激光雷达遥感和参数化模式研究城市混合层的发展机制 [J]. *大气科学*, 30 (2): 293–306. He Qianshan, Mao Jietai, Chen Jiayi, et al. 2006. A study of evolution and dynamics of urban atmospheric mixing-layer depth based on lidar data and numerical simulation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30 (2): 293–306, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.02.12.
- Hennemuth B, Lammert A. 2006. Determination of the atmospheric boundary layer height from radiosonde and lidar backscatter [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 120 (1): 181–200, doi:10.1007/s10546-005-9035-3.
- 李岩瑛, 张强, 张爱萍, 等. 2016. 干旱半干旱区边界层变化特征及其影响因子分析 [J]. *高原气象*, 35 (2): 385–396. Li Yanying, Zhang Qiang, Zhang Aiping, et al. 2016. Analysis on atmosphere boundary layer variation characteristics and their impact factors in arid region and semi-arid region over Northwest China [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 35 (2): 385–396, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00153.
- Morille Y, Haeffelin M, Drobinski P, et al. 2007. STRAT: An automated algorithm to retrieve the vertical structure of the atmosphere from single-channel lidar data [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 24 (5): 761–775, doi:10.1175/JTECH2008.1.
- Quan Jiannong, Gao Yang, Zhang Qiang, et al. 2013. Evolution of planetary boundary layer under different weather conditions, and its impact on aerosol concentrations [J]. *Particology*, 11 (1): 34–40, doi:10.1016/j.partic.2012.04.005.
- Quan Jiannong, Tie Xuexi, Zhang Qiang, et al. 2014. Characteristics of heavy aerosol pollution during the 2012–2013 winter in Beijing, China [J]. *Atmos. Environ.*, 88: 83–89, doi:10.1016/j.atmosenv.2014.01.058.
- Quan Jiannong, Liu Quan, Li Xia, et al. 2015. Effect of heterogeneous aqueous reactions on the secondary formation of inorganic aerosols during haze events [J]. *Atmos. Environ.*, 122: 306–312, doi:10.1016/j.atmosenv.2015.09.068.
- Sicard M, Pérez C, Comerón A, et al. 2004. Determination of the mixing layer height from regular lidar measurements in the Barcelona Area [C]//Proceedings of the SPIE 5235, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere VIII. Barcelona, Spain: SPIE, doi:10.1117/12.511481.
- Steyn D G, Baldi M, Hoff R M. 1999. The detection of mixed layer depth and entrainment zone thickness from lidar backscatter profiles [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 16 (7): 953–959, doi:10.1175/1520-0426(1999)016<0953:TDOMLD>2.0.CO;2.
- Stull R B. 1988. An Introduction to Boundary Layer Meteorology [M]. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 441–456.
- Wang Z, Cao X, Zhang L, et al. 2012. Lidar measurement of planetary boundary layer height and comparison with microwave profiling radiometer observation [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 5 (8): 1965–1972, doi:10.5194/amt-5-1965-2012.
- 韦志刚, 陈文, 黄荣辉. 2010. 敦煌夏末大气垂直结构和边界层高度特征 [J]. *大气科学*, 34 (5): 905–913. Wei Zhigang, Chen Wen, Huang Ronghui. 2010. Vertical atmospheric structure and boundary layer height in the summer clear days over Dunhuang [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 34 (5): 905–913, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.05.06.
- 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.
- Zhang Qiang, Quan Jiannong, Tie Xuexi, et al. 2015. Effects of meteorology and secondary particle formation on visibility during heavy haze events in Beijing, China [J]. *Sci. Total Environ.*, 502: 578–584, doi:10.1016/j.scitotenv.2014.09.079.