

北京 2014 年冬季边界层高度与颗粒物浓度的相关性研究

谭敏^{1,2}, 谢晨波¹, 王邦新^{1,2}, 吴德成¹, 马晖^{1,2}, 刘东¹, 王英俭^{1,2}

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031 ;
2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230021)

摘要: 拉曼激光雷达已经广泛应用于大气气溶胶、大气温度和水汽的空间分布及时间演变特征测量。为了获取北京污染期间大气气溶胶边界层的特征, 2014 年 11 月~2015 年 1 月期间在中国科学院大学雁栖湖校区利用拉曼激光雷达进行连续观测。使用梯度法处理激光雷达观测数据得到边界层高度, 同时与国家环保部提供的当地颗粒物浓度数据进行对比。观测期间灰霾天共出现 15 天, 污染天出现 27 天, 干净天出现 24 天。灰霾天、污染天和干净天三种情况下的平均大气边界层高度范围分别为 0.6~0.9、0.9~1.3、1~1.9 km; $PM_{2.5}$ 的质量浓度范围分别为 143~203、77~90、17~34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; PM_{10} 的质量浓度范围分别为 170~271、103~153、33~78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。研究结果表明: 北京地区大气边界层高度对近地面颗粒物浓度具有明显的负相关影响。干净天、污染天和灰霾天下的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量浓度变化率随大气边界层高度降低而依次增大。灰霾天大气边界层高度引起的 $PM_{2.5}$ 质量浓度平均变化率为 $-242.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}/\text{km}$, 约为污染天 ($-114.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}/\text{km}$) 的两倍, 干净天 ($-77.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}/\text{km}$) 的三倍; 灰霾天大气边界层高度引起的 PM_{10} 质量浓度平均变化率为 $-224.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}/\text{km}$, 约为污染天 ($-117.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}/\text{km}$) 的两倍, 干净天 ($-90.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}/\text{km}$) 的两倍。

关键词: 拉曼激光雷达; 大气边界层高度; 颗粒物; 大气污染

中图分类号: P421 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0717007

Correlation study on boundary layer height and particulate matter concentration at Beijing in winter 2014

Tan Min^{1,2}, Xie Chenbo¹, Wang Bangxin^{1,2}, Wu Decheng¹, Ma Hui^{1,2}, Liu Dong¹, Wang Yingjian^{1,2}

(1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230021, China)

Abstract: Raman lidar has been designed for the measurement of vertical and temporal distribution of aerosol optical properties, atmospheric temperature and water vapor. In order to investigate characteristics of aerosol boundary layer (ABL) height in Beijing, lidar system had been installed in the University of Chinese Academy of Sciences from November 2014 to January 2015. The data obtained by Raman lidar

收稿日期: 2018-02-05; 修订日期: 2018-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(41405032); 安徽省自主创新专项(12Z0104074); 中国科学院重点部署项目(KJZD-EW-TZ-G06-01)

作者简介: 谭敏(1989-), 男, 博士生, 主要从事激光雷达大气遥感方面的研究。Email: thankm@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 谢晨波(1976-), 男, 博士生导师, 主要从事激光雷达大气遥感和环境监测方面的研究。Email: cbxie@aiofm.ac.cn

王英俭(1963-), 男, 博士生导师, 主要从事光波和图像大气传输及自适应光学相位校正方面的研究。

Email: wyj@aiofm.ac.cn

had been used to derive the ABL height based on the gradient method and the ABL height was compared with particulate matter (PM) data provided by the Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. A total of 15 days of haze, 27 days of pollution and 24 days of clean occurred through the entire period of observation. On haze, pollution and clean days, the average heights of the ABL were 0.6–0.9, 0.9–1.3 and 1–1.9 km, respectively. And the concentrations of surface $PM_{2.5}$ were 143–203, 77–90, 17–34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, the PM_{10} concentrations were 170–271, 103–153, 33–78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. The measurement results show the height of ABL has a negative correlation with the concentration of surface PM. The rate of PM concentration variations increase gradually with the height of ABL in clean, pollution and haze days. The rate of $PM_{2.5}$ average concentration in haze days ($-242.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}/\text{km}$) is more than 2 times than the rate in pollution days ($-114.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}/\text{km}$), 3 times than the rate in clean days ($-77.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}/\text{km}$). The rate of PM_{10} average concentration in haze days ($-224.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}/\text{km}$) is more than 2 times than the rate in pollution ($-117.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}/\text{km}$) and clean days ($-90.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}/\text{km}$).

Key words: Raman lidar; atmospheric boundary layer height; particulate matter; air pollution

0 引言

据 2016 年人口普查,北京市总人口已经超过两千万,随着越来越多的人涌入北京,在未来的四十年内,北京城区将额外增加三百万人口。人口数量的增长以及北京工业化的发展使得污染物的排放量也显著增加,从而导致了更多的空气质量问题。北京大气污染的现状是颗粒物一直是大气污染的主要构成。颗粒物是指悬浮于空气中,大小和组分都很不一样的固体和液体颗粒。由于颗粒物具有散射和吸收特性,因此颗粒物在降低能见度的同时也影响了地球大气系统的辐射效应。颗粒态污染物按粒径大小分为 TSP、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 等,其中 TSP(空气动力学直径小于 $100 \mu\text{m}$ 的颗粒物)称为总悬浮颗粒物。 PM_{10} (空气动力学直径小于 $10 \mu\text{m}$ 的颗粒物)又称为可吸入颗粒物,在环境空气中持续的时间很长,对人体健康和大气能见度的影响都很大。 $PM_{2.5}$ (空气动力学直径小于 $2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物)由于粒径小且含有重金属等有毒物质能够引起呼吸和肺部问题,甚至导致早产儿的死亡^[1-2],因此 $PM_{2.5}$ 对人体健康的影响更大。

大气边界层(Atmospheric Boundary Layer, ABL)一般是指直接受地球表面影响的对流层,它对地面强迫力响应的的时间尺度约为 1 h 或更小。这些强迫力包括摩擦力,蒸发和蒸腾,热传递,污染物的排放以及地形引起的气流变化。大气边界层高度是完全随时间和空间变化的,变化范围从几百米到几千米^[3]。

由于大气边界层的作用,导致绝大多数大气污染物被限制在边界层内,大气边界层和气溶胶边界层(Aerosol Boundary Layer)会处于同一高度,在文中,将大气边界层和气溶胶边界层近似为相同。

目前最常用的探测大气边界层的方法是通过无线电探空仪获得边界层的气象状况来确定的,但是由于水平风速的影响,无线电探空仪会水平移动从而影响局地垂直探测精度,再加上无线电探空仪释放受到人力约束,无法实现大气边界层空间分布连续观测^[4]。激光雷达具有很高的时间和空间分辨率,并且具有长期自动连续观测能力,因此被广泛应用于大气边界层,大气气溶胶,空气污染物,大气成分以及云的研究^[5-6]。

北京的大气颗粒物污染十分严重^[7],由于大气边界层决定着颗粒物的扩散空间,因此研究其城市边界层高度和颗粒物浓度之间的关系对北京大气污染研究有着很好的现实意义。2014 年 11 月,依据中科院重点部署项目“先导 2014 京津冀地区灰霾综合外场实验”任务需求,中国科学院大气成分与光学重点实验室利用自行研制的温度水汽、气溶胶拉曼激光雷达(Temperature Water Vapor and Aerosols Raman Lidar, TWAR^[8])对北京市大气边界层进行了探测。文中着重对拉曼激光雷达探测的大气边界层时间演变特征进行分析,并结合国家环保部公布的当地 PM 数据进行大气边界层高度和 PM 浓度间的相关性研究。

物,回波信号的强弱与气溶胶的含量呈现正比关系,由于边界层与自由大气的交界处通常存在一个稳定层,有时为逆温层。该稳定层或逆温层使得大量的气溶胶粒子富集在边界层以内。稳定层或逆温层以上的自由大气层内的气溶胶粒子远低于边界层内的气溶胶粒子,使得探测到的信号出现明显的变化。因此在大气边界层与自由大气交界处,气溶胶浓度减少得非常快,反映在激光雷达回波信号上,就是回波信号的快速衰减,也就是激光雷达距离平方校正回波信号(PRR)廓线的快速变化。而距离平方校正信号的一阶导数会出现一个最小值,同时气溶胶消光系数呈现明显的衰减,PRR 一阶导数的最小值和气溶胶消光系数明显变小的位置就是大气边界层的高度。

同时,前期大量实验也证实了用激光雷达回波信号探测大气边界层高度的可行性和准确性。从探测方法划分,目前使用最多的方法是梯度法、小波分析法和标准偏差法。梯度法^[9]的难点在于回波信号包含大量噪声,因此加入小孔光阑和滤光片,此外,对非平稳信号的探测也不准确;小波分析法^[10]的难点在于上下限以及尺度间隔的选择;标准偏差法^[11]需要连续的激光雷达回波信号廓线,由于 TWAR 激光雷达的回波信号是 4 min 内的平均值,因此不适合此方法。此外在众多方法的比较中,梯度法、小波分析法是普遍使用的方法且准确度较高^[12]。但是小波分析法与梯度法的本质是一样的,而 ADOLFO 等人更是确认了在使用低通空间滤波器的情况下,小波分析法完全等同于梯度法^[13],因此综合考虑算法的简易度以及探测结果准确度上,文中使用梯度法。此外,由于边界层高度在短时间内相差不大,因此改进梯度法,使得在非平稳信号下也可以提高精确度^[14]。

激光雷达接收的米散射回波信号可以用公式(1)表示:

$$P(R)=P_0CR^{-2}[\beta_m(R)+\beta_a(R)]\cdot \exp\{-2\int_0^R [a_m(R')+a_a(R')]dR'\} \quad (1)$$

式中: $P(R)$ 为激光雷达接收的高度 R 处气溶胶粒子和空气分子的后向散射回波功率, W ; R 为高度, km ; P_0 为激光雷达发射功率, W ; C 为激光雷达系统常数, $W \cdot km^3 \cdot sr$; $\beta_m(R)$ 和 $\beta_a(R)$ 分别是高度 R 处大气分子和气溶胶粒子的后向散射系数, $km^{-1} \cdot sr^{-1}$; $a_m(R')$ 和 $a_a(R')$ 分别为高度 R' 处大气分子和气溶胶粒子的

消光系数, km^{-1} ; R' 变化范围从 $0 \sim R, km$ 。大气气溶胶的消光系数由 Fernald 方法^[15]反演求的。由公式(1)可得 PRR 的表达式如下:

$$P(R) \cdot R^2 = P_0 C [\beta_m(R) + \beta_a(R)] \cdot \exp\{-2\int_0^R [a_m(R') + a_a(R')]dR'\} \quad (2)$$

PRR 的一阶导数可表示为:

$$DEV(R) = d[P(R) \cdot R^2] / dR \quad (3)$$

式中: $DEV(R)$ 廓线最小值对应的高度就是大气边界层的高度。

图 2 为 2014 年 12 月 15 日 08:00 时 TWAR 激光雷达探测到的回波信号,图 2 中(a)~(d)分别是距离平方校正回波信号廓线(PRR)、距离平方校正回波信号梯度变化廓线(DEV)、反演获得的大气气溶胶消光系数廓线与探空气球所得的温度廓线。由图中可以观察到:梯度法、消光系数和温度廓线求得的边界层高度分别为 2.14、2.13、2.1 km。利用梯度法求得的大气边界层高度与消光系数,温度廓线求得的大气边界层高度基本一致,验证了利用激光雷达回波信号测量大气边界层高度的准确性。

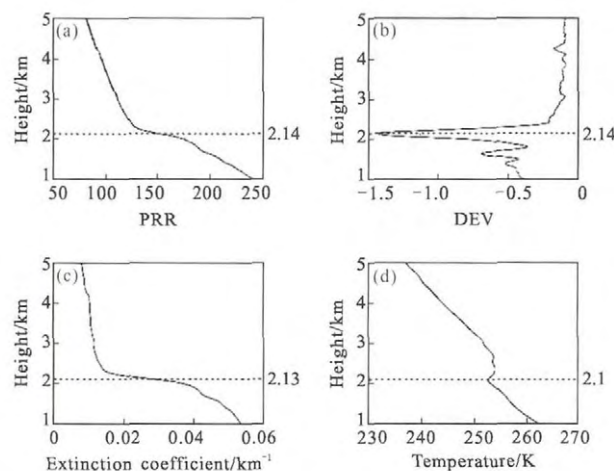


图 2 激光雷达探测到的 PRR(a)、DEV(b)、消光系数(c)及无线电探空仪探测的温度廓线(d)

Fig.2 Profiles of PRR(a), DEV(b), extinction coefficient (c) detected with TWAR lidar and temperature (d) detected with radiosonde

3 结果分析

3.1 个例分析

图 3(a)为 2014 年 11 月 20 日~2014 年 11 月 21 日

TWAR 激光雷达测量的大气边界层的连续时空分布 (由于供电故障, 11 月 20 日 00:00~08:00 的数据未观测)。图 3 (b) 为相同时间内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量浓度分布。

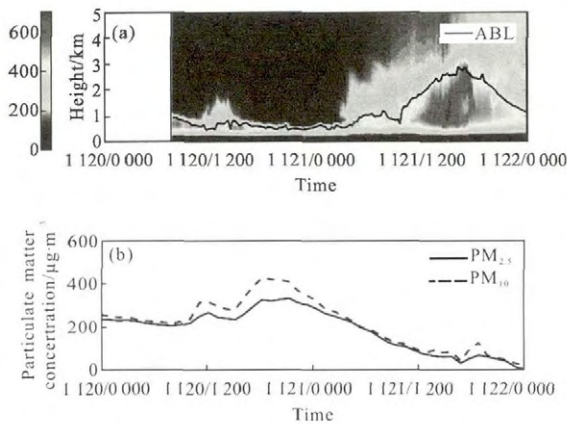


图 3 2014 年 11 月 20 日~2014 年 11 月 21 日 TWAR 连续测量的大气边界层时空分布(a)以及 PM 质量浓度(b)的变化
Fig.3 Continuous observation of ABL (a) by TWAR and variation of PM concentrations (b) form 20 Nov 2014 to 21 Nov 2014

根据观测记录, 20 日为灰霾天(天气阴, 白天无大风, 晚上 22:00 左右有持续的偏北风)。从测量结果可以看出从 08:00 点开始, 大气边界层高度从 1 km 左右降低到 0.5 km 左右, 12:00~14:00 之间, 边界层高度抬升到 0.8 km 左右, 然后一直降低到 0.5 km 左右保持稳定。相对应的 20 日 PM 质量浓度在 12:00 之前保持稳定且维持在 $220 \mu g/m^3$ 左右, 12:00~22:00 之间, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量浓度持续上升到 $331 \mu g/m^3$ 和 $406 \mu g/m^3$ 。可能的原因是 12:00 之前, 由于低的大气边界层不利于 PM 扩散和输送, 此时也无大风情况, 使得 PM 质量浓度很稳定。但是随着人类活动的影响, 污染物的排放增大, 同时大气边界层高度持续降低, 使得 PM 质量浓度一直升高, 而从 22:00 左右, 持续的偏北风清除了颗粒物, 从而观察到 PM 质量浓度的降低^[16]。

21 日为霾转晴天, 该天的近地面风向持续为偏北风, 且风速全天保持在 $6\sim 10 m/s$ 。从测量结果可知大气边界层高度从 10:00 左右持续升高, 15:00 左右达到最高约为 3 km 左右, 然后一直降低到 1 km 左右。相对应的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量浓度从 $303、344 \mu g/m^3$ 降低到 $5、22 \mu g/m^3$ 。可能的原因是持续的偏北风将污染物清除, 再加上大气边界层高度升高,

使得全天的 PM 质量浓度持续降低。

3.2 大气边界层高度与 PM 质量浓度的统计分析

按照中华人民共和国环境保护部的规定, 将空气质量按空气质量指数(Air Quality Index, AQI)分为五个级别: 优(一级, AQI: 0~50); 良(二级, AQI: 51~100); 轻度污染(三级, AQI: 101~150); 中度污染(四级, AQI: 151~200); 重度污染(五级, AQI: 201~300); 严重污染(六级, AQI: >300)。在文中, 将优、良天气归为干净天; 将轻度污染、中度污染归为污染天; 将重度污染、严重污染归为雾霾天。利用 TWAR 进行三个月(剔除无效的数据之后, 一共剩下 66 天)的连续观测, 并与中华人民共和国环境保护部提供的当地 PM 质量浓度数据进行对比分析。在整个实验期间, 灰霾天共发生 15 天, 污染天为 27 天, 干净天为 24 天。

图 4(a)~(c)分别为大气边界层高度、 $PM_{2.5}$ 质量浓度和 PM_{10} 质量浓度在干净天、污染天和灰霾天三种情况下的小时平均统计。从图 4(a)可以看出干净天的整体大气边界层高度最高, 污染天整体大气边界层高度次之, 灰霾天整体大气边界层高度最低。三种天气条件下, 大气边界层高度最高时分别为 1.9、1.3、0.9 km; 大气边界层高度最低时分别为 1、0.9、0.6 km。三种情况下的边界层均有日变化, 干净天的日变化最明显, 污染天次之, 灰霾天的日变化最不明显。同时还可以观察到干净天、污染天和灰霾天大气边界层高度达到最高处的时间分别为 16:00、13:00 和 12:00。这说明污染越严重, 边界层达到最大高度的时间也相应缩短, 可能的原因是污染导致了太阳辐射和大气湍流减弱, 进一步致使大气边界层结构提前稳定。

从图 4(b)和 4(c)可以看出 $PM_{2.5}$ 在灰霾天、污染天和干净天下的质量浓度平均值分别为 166、85、 $27 \mu g/m^3$; PM_{10} 在灰霾天、污染天和干净天下的质量浓度平均值分别为 202、118、 $51 \mu g/m^3$ 。在灰霾天中, 12:00 以后, 可以明显看出 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量浓度持续增加, 这是因为低的大气边界层高度不利于污染物的扩散, 加上人为因素的排放, 导致浓度持续增加, 但是在污染天和干净天, $PM_{2.5}$ 的质量浓度比较稳定, 其可能原因是因为 $PM_{2.5}$ 质量浓度的混合比较均匀。相反, PM_{10} 的质量浓度总会在 12:00 之后增加, 可能是人类活动导致的道路扬尘引起的。对比观

察图 4 (a)~(c) 可以得知大气边界层高度与 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 的质量浓度在污染天、灰霾天成负相关关系, 尤其是在灰霾天的情况下, 负相关关系非常明显。

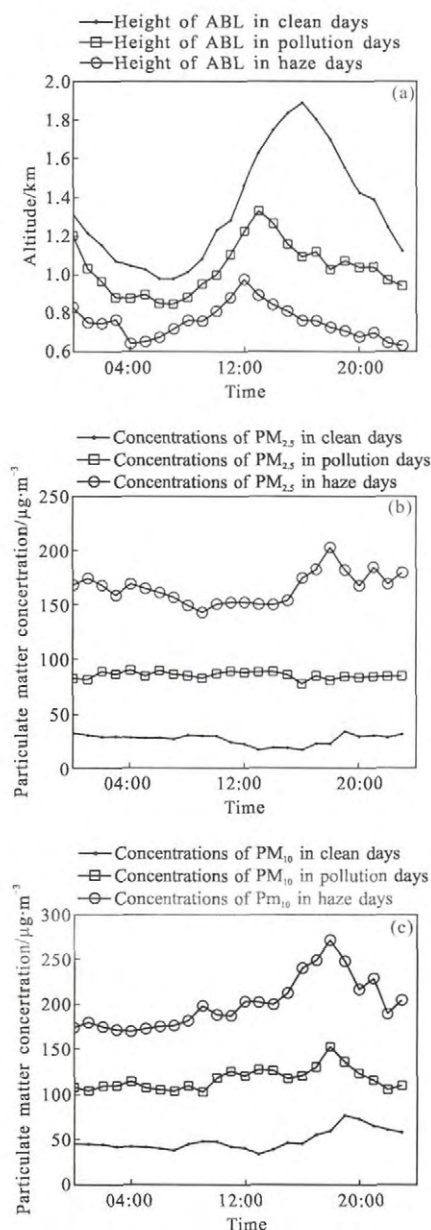


图 4 干净天、污染天、灰霾天下的边界层高度(a), $PM_{2.5}$ (b), PM_{10} (c) 浓度的小时平均变化

Fig.4 Hourly variation of the height of ABL (a), $PM_{2.5}$ (b), PM_{10} (c) in clean, pollution and haze days

3.3 大气边界层高度与 PM 质量浓度的拟合分析

图 5 是干净天、污染天、灰霾天的大气边界层高度和 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 的质量浓度的曲线拟合, 图中圆圈、正方形和星号分别对应干净天、污染天和灰霾天下的大气边界层高度。由图可知, 大气边界层高度与

$PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 的质量浓度大致呈指数型分布, 其中大气边界层高度与 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 的质量浓度相关系数分别达到 0.865 和 0.844, 这说明 PM 质量浓度与大气边界层高度之间具有非常明显的负相关性, 这也验证了 3.2 节的结论。另外, 从数值相关分析中可以估算出干净天、污染天和灰霾天下的 PM 质量浓度随大气边界层高度的变化率。干净天的情况, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 的质量浓度随大气边界层高度的平均变化率分别为 -77.4 、 $-90.4 \mu g \cdot m^{-3}/km$; 污染天的情况, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 的质量浓度随大气边界层高度的平均变化率分别为 -114.8 、 $-117.6 \mu g \cdot m^{-3}/km$; 灰霾天的情况, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 的质量浓度随大气边界层高度的平均变化率分别为 -242.4 、 $-224.2 \mu g \cdot m^{-3}/km$ 。由探测结果可知: $PM_{2.5}$ 在灰霾天的质量浓度随大气边界层高度的平均变化率约为污染天的两倍, 干净天的三倍; PM_{10} 在灰霾天的质量浓度随大气边界层高度的平均变化率约为污染天的两倍, 干净天的两倍。由此不难看出, 大气边界层高度对于近地面 PM 质量浓度具有很强的负相关影响, 且在污染和灰霾天气条件下该相关性更为明显。

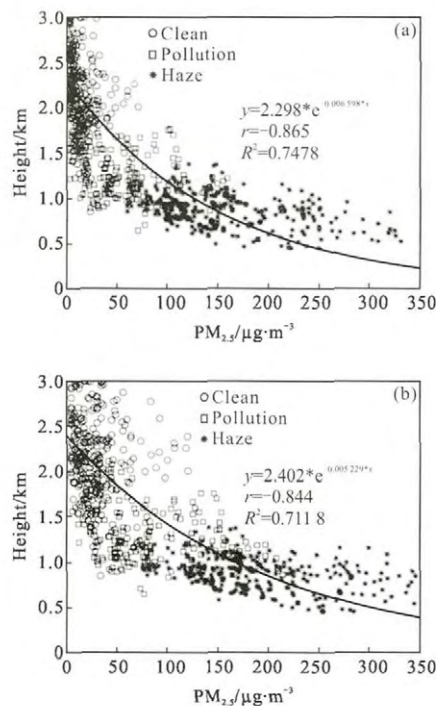


图 5 干净天、污染天和灰霾天下的大气边界层高度和 $PM_{2.5}$ (a)、 PM_{10} (b) 质量曲线拟合

Fig.5 Relationships of ABLH and $PM_{2.5}$ (a), PM_{10} (b) concentrations on clean, pollution and haze days

4 结 论

2014 年 11 月~2015 年 1 月期间利用 TWAR 激光雷达在北京怀柔地区进行了连续观测,采用梯度法反演大气边界层高度,并结合 PM 数据与气象数据进行统计和相关性分析,结论如下。

(1) 个例分析表明:采用梯度法、消光系数法和温度廓线法确定的大气边界层高度分别为 2.14、2.13、2.1 km,反演结果基本一致,说明了激光雷达探测大气边界层高度的准确性。

(2) 统计分析表明:干净天、污染天和灰霾天的情况下,大气边界层高度最大值依次降低(1.9、1.3、0.9 km),并且大气边界层高度达到最大值的时间也依次缩短(16:00、13:00 和 12:00)。对应 PM_{2.5} 质量浓度平均值为 27、85、166 μg/m³;PM₁₀ 质量浓度平均值为 51、118、202 μg/m³。大气边界层高度和 PM 质量浓度具有明显的负相关关系,在灰霾天尤为明显。

(3) 相关性分析表明:PM_{2.5} 在灰霾天大气边界层导致的质量浓度变化率 (-242.4 μg·m⁻³/km) 约为污染天(-114.8 μg·m⁻³/km)的两倍,干净天(-77.4 μg·m⁻³/km)的三倍;PM₁₀ 在灰霾天大气边界层导致的质量浓度平均变化率 (-224.2 μg·m⁻³/km) 约为污染天(-117.6 μg·m⁻³/km)的两倍,干净天(-90.4 μg·m⁻³/km)的两倍。

获取大气边界层高度对研究颗粒物的扩散和浓度分布具有重大的意义。文中得到的大气边界层高度和近地面 PM 质量浓度间的变化率对于北京地区 PM 污染预报和防治具有较好的数据支持作用。

参考文献:

- [1] Krewski D, Burnett R T, Goldberg M S, et al. Overview of the reanalysis of the Harvard Six Cities Study and American Cancer Society Study of particulate air pollution and mortality [J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health-Part A*, 2003, 66(16-19): 1507-1551.
- [2] Kioumourtzoglou M A, Schwartz J D, Weisskopf M G, et al. Long-term PM_{2.5} exposure and neurological hospital admissions in the northeastern united States [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2016, 124(1): 23-29.
- [3] Stull R B. An introduction to boundary layer meteorology[J]. *Book*, 1988, 13: 666.
- [4] Korhonen K, Giannakaki E, Mielonen T, et al. Atmospheric boundary layer top height in South Africa: Measurements with lidar and radiosonde compared to three atmospheric models [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(8): 4263-4278.
- [5] Shang Zhen, Xie Chenbo, Zhong Zhiqing, et al. Raman lidar for measurement of tropospheric water vapor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1211003. (in Chinese) 尚震, 谢晨波, 钟志庆, 等. 用于测量对流层水汽的拉曼激光雷达[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 1211003.
- [6] Hu Yang, Zhu Heyuan. 1.55 μm all-fiber coherent Doppler lidar for wind measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): S130001. (in Chinese) 胡杨, 朱鹤元. 1.55 μm 全光纤相干多普勒激光测风雷达[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(S1): S130001.
- [7] Martínez J L S, Rubio F J. Analysis of different-scales circulation patterns and boundary layer structure of PM_{2.5} heavy pollutions in Beijing during winter [J]. *Climatic & Environmental Research*, 2014, 19: 59-67.
- [8] Liu Yuli, Xie Chenbo, Shang Zhen, et al. Retrieval and analysis of atmospheric temperature using a rotational raman lidar observation [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(6): 1978-1986. (in Chinese) 刘玉丽, 谢晨波, 尚震, 等. 基于纯转动拉曼谱线激光雷达的大气温度反演分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(6): 1978-1986.
- [9] Sicard M, Rocadenbosch F, Reba M N M, et al. Seasonal variability of aerosol optical properties observed by means of a Raman lidar at an EARLINET site over Northeastern Spain [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(1): 175-190.
- [10] Brooks I M. Finding boundary layer top: Application of a wavelet covariance transform to lidar backscatter profiles [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 20(8): 1092-1105.
- [11] Menut L, Flamant C, Pelon J, et al. Urban boundary layer height determination from lidar measurements over the Paris area [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(6): 945-954.
- [12] Pal S, Behrendt A, Wulfmeyer V. Elastic-backscatter-lidar-based characterization of the convective boundary layer and investigation of related statistics [J]. *Annales Geophysicae*, 2010, 28(3): 825-847.
- [13] Comerón A, Sicard M, Rocadenbosch F. Wavelet correlation transform method and gradient method to determine aerosol

- layering from lidar returns: some comments [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2013, 30(6): 1189–1193.
- [14] Wei Hao, Hu Mingbao, Ai Weihua. Application of wavelet transform in wind profiler radar detection of atmospheric boundary layer height [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2015, 31(6): 811–820. (in Chinese)
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.
- [15] He Tao, Hou Lujian, Lv Bo, et al. Study of accuracy of lidar inversion $PM_{2.5}$ concentration [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(1): 0113001 (in Chinese)
何涛, 侯鲁健, 吕波. 激光雷达探测反演 $PM_{2.5}$ 浓度的精度研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0113001.
- [16] Wang Yue, Wang Lili, Zhao Guangna, et al. Analysis of different-scales circulation patterns and boundary layer structure of $PM_{2.5}$ heavy pollutions in Beijing during winter [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2014, 19(2): 173–184. (in Chinese)
王跃, 王莉莉, 赵广娜, 等. 北京冬季 $PM_{2.5}$ 重污染时段不同尺度环流形势及边界层结构分析 [J]. *气候与环境研究*, 2014, 19(2): 173–184.