

基于激光雷达的京津冀地区大气边界层高度特征研究

吕立慧^{1,2}, 刘文清^{1,2}, 张天舒^{1*}, 董云升¹, 陈臻懿¹, 范广强¹,
刘洋^{1,2}, 项行^{1,2}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 大气边界层高度对大气颗粒物污染具有重要的影响。为研究京津冀区域的大气边界层高度变化特征,利用该地区多个站点的激光雷达数据,进行了统计研究,并将激光雷达观测值与美国国家气象局国家环境预报中心全球资料同化系统模式模拟结果进行了对比。观测数据表明,京津冀地区的大气边界层具有明显的日变化特征和季节变化特征:白天的大气边界层高度高于夜晚,且边界层高值出现在 14:00 左右;夏、冬季的大气边界层高度高于春、冬季;冬季大气边界层高度有降低趋势。此外,2014 年 11 月多个站点由激光雷达测得的边界层高度的统计分析表明,京津冀地区大气边界层高度在 300~900 m 之间,且东南方向较高。

关键词 大气光学; 大气边界层高度; 激光雷达; 气溶胶消光系数

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.010101

Characteristics of Boundary Layer Height in Jing-Jin-Ji Area Based on Lidar

Lü Lihui^{1,2}, Liu Wenqing^{1,2}, Zhang Tianshu¹, Dong Yunsheng¹, Chen Zhenyi¹,
Fan Guangqiang¹, Liu Yang^{1,2}, Xiang Yan^{1,2}

¹Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract The atmospheric boundary layer height has important influence on particulate air pollution. A statistical investigation of atmospheric boundary layer height based on a large amount of Lidar data from multiple sites is used to analysis the characteristic in the Jing-Jin-Ji area. The atmospheric boundary layer height retrieved from the Lidar data is compared with the national weather service national centers for environmental prediction global data assimilation system forecast model result. Statistical results show that the atmospheric boundary layer of the Jing-Jin-Ji area has obvious characteristics of diurnal and seasonal variations, and the atmospheric boundary layer height is higher in the daytime than at night, and the peak value of the atmospheric boundary layer height occurs at 14:00. The atmospheric boundary layer height during the summer and autumn is higher than spring and winter, the atmospheric boundary layer height in winter also has a decreasing tendency. In addition, the statistical result of November 2014 based on all Lidar sites of atmospheric boundary layer height shows that the boundary layer height of the Jing-Jin-Ji area is between 300~900 m and higher in the southeast.

收稿日期: 2016-09-06; **收到修改稿日期:** 2016-09-19; **网络出版日期:** 2016-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(41305126)、国家自然科学基金重大研究计划(91544232)、国家 973 计划(2014CB447900)

作者简介: 吕立慧(1989—),女,博士研究生,主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: lhlv@aiofm.ac.cn

导师简介: 刘文清(1954—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事环境光学特征、有害痕量气体光学与光谱学监测方法及新型环境监测技术等方面的研究。E-mail: wqliu@aiofm.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: tszhang@aiofm.ac.cn

Key words atmospheric optics; atmospheric boundary layer height; Lidar; aerosol extinction coefficient

OCIS codes 010.1110; 290.2200; 280.1100; 010.3640

1 引言

大气边界层(PBL)是直接受地面影响的那部分大气层,对地面响应的的时间尺度为 1 h 或更短^[1]。颗粒物作为目前最重要的空气污染成分之一,主要集中在近地面的大气边界层内,大气边界层高度变化对颗粒物的传输分布具有重要影响。因此,研究大气边界层高度变化特征对大气颗粒物污染研究具有重要的意义。激光雷达具有高时空分辨率和连续探测等特点,在大气和环境监测领域具有广泛的应用^[2-4]。激光雷达作为大气边界层探测的有效工具,已被广泛用于大气边界层高度的探测与研究中,验证了激光雷达探测边界层高度的可行性^[5-6]。但大多数的研究结果都基于短期或单个站点的雷达数据,而基于长期多站点激光雷达数据的研究甚少。近年来,中国科学院安徽光学精密机械研究所在京津冀地区建立了多个激光雷达站点对该区域的颗粒物和臭氧的分布进行了长期探测,获得了长期、大范围的激光雷达数据,并对该区域的灰霾形成进行了分析^[7-8]。本文利用京津冀地区的大量激光雷达数据计算大气边界层高度,统计研究该区域的边界层高度多时间尺度周期的变化特征,为京津冀地区的颗粒物污染研究提供新的科学依据。

2 仪器与方法

2.1 激光雷达系统

近年来,京津冀地区的大气污染问题日益严重。为获取该区域大气颗粒物时空分布和边界层状况,中国科学院安徽光学精密机械研究所在京津冀地区建立了多个激光雷达站点,包括中国科学院大气物理研究所(简称为大气所,IAP)站(39.98°N,116.37°E)、中国科学院大学(UCAS)超级站(40.41°N,116.68°E)、门头沟监测站(39.94°N,116.12°E)、琉璃河监测站(39.60°N,115.99°E)、保定监测站(38.88°N,115.49°E)、邢台监测站(37.08°N,114.49°E)、廊坊监测站(38.71°N,116.65°E)、永乐店监测站(116.80°E,39.71°N)、唐山监测站(118.17°E,39.65°N)和天津宁河监测站(39.36°N,117.84°E)。激光雷达站点分布图如图 1 所示。实验所用的米散射激光雷达系统由发射系统、接收系统和信号探测与采集系统三部分组成。米散射激光雷达系统的具体参数如表 1 所示。

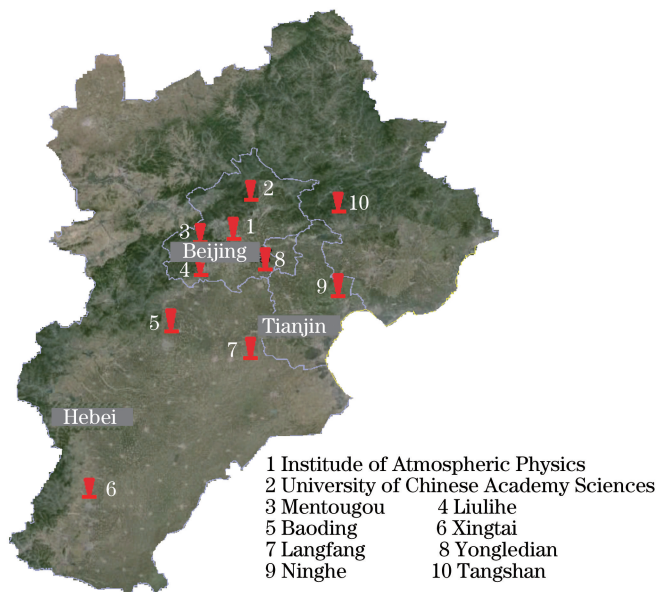


图 1 京津冀地区激光雷达站点分布图

Fig. 1 Distribution map of Lidar sites in the Jing-Jin-Ji area

表 1 米散射激光雷达系统技术参数

Table 1 Parameters of the Mie-scattering Lidar system

| Item | Parameter |
|------------------------|---------------|
| Laser | Nd:YAG |
| Wavelength /nm | 532 |
| Pulse energy /mJ | 20 |
| Repetition rate /Hz | 20 |
| Pulse duration /ns | 6~9 |
| Divergence angle /mrad | 0.5 |
| Telescope | Cassegrainian |
| Diameter /mm | 203 |
| Range resolution /m | 7.5 |

2.2 激光雷达探测大气边界层高度方法

利用激光雷达资料计算大气边界层高度的算法^[9]有梯度法、曲线拟合法、小波协方差变换法和标准偏差法等。本文采用常用的梯度法^[10]提取大气边界层高度,根据激光雷达方程

$$P(r) = CP_0 r^{-2} \beta(r) \exp \left[-2 \int_0^r \alpha(r') dr' \right], \quad (1)$$

式中 $P(r)$ 是激光雷达接收到的信号功率, C 是激光雷达系统常数, P_0 是激光发射功率, r 是探测距离, β 和 α 分别是大气后向散射系数和大气消光系数。

激光雷达距离平方校正信号 $P(r)r^2$ 的梯度 $D(r)$ 可表示为

$$D(r) = d [P(r)r^2] / dr, \quad (2)$$

激光雷达的距离平方校正信号 $P(r)r^2$ 反映了气溶胶浓度随高度的变化情况。通常大部分气溶胶集中在边界层内,大气边界层和自由对流层间气溶胶浓度相差很大,因此距离平方校正信号 $P(r)r^2$ 的梯度的绝对值最小值对应的高度可作为大气边界层高度。Menuet 等^[6]将由梯度法测得的大气边界层高度与探空结果进行了对比,结果显示两者的相关性高达 0.99,对比结果具有很好的一致性,证明了该方法的有效性。此外,梯度法无需任何阈值,因此被广泛应用于激光雷达数据对大气边界层高度的反演。

为验证激光雷达系统探测大气边界层高度的准确性,这里以大气所站为例,将由激光雷达数据反演得到的边界层高度与美国国家气象局国家环境预报中心全球资料同化系统(NCEP-GDAS)模式模拟结果进行了比对。NCEP-GDAS 模式模拟结果的最高时间分辨率为 3 h,水平尺度经纬网格分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ ^[11]。由于在近地面也存在气溶胶浓度突变的情况^[12-13],因此在利用梯度法反演大气边界层高度的过程中,为排除近地层大气干净层高度的影响,边界层高度的测定范围在 200 m 以上。而利用 NCEP-GDAS 模式模拟的夜间边界层高度基本都在 200 m 以下,因此选取白天的数据进行比对。

图 2 所示为激光雷达反演边界层高度结果与 NCEP-GDAS 模式模拟结果的对比。其中图 2(a)显示了 2014 年 11 月 8 日~13 日期间,北京时间 8:00,11:00,14:00,17:00 这 4 个时间点激光雷达与 NCEP-GDAS 模式模拟的边界层高度的结果。可以看出,两种边界层高度结果的值相近且变化趋势基本一致。图 2(b)给出了激光雷达反演结果与 NCEP-GDAS 模式模拟结果的相关性分析。相关性统计结果显示,激光雷达反演结果与模拟结果的相关性 $R^2 = 0.82$ 。因此,利用激光雷达系统所得到的边界层高度结果与模式模拟结果具有一定的可比性,利用该方法统计研究京津冀地区的边界层特征是可行的。

3 结果与讨论

3.1 大气边界层日变化特征

图 3(a)和(b)以邢台站激光雷达 2014 年 11 月 2 日~5 日和 18 日~21 日两个时段为例,给出了两个时间段气溶胶消光系数时空分布及大气边界层高度变化特征。图 3(a)和(b)中的黑色曲线均为利用梯度法反演得到的大气边界层高度。在选取的两个时间段中,11 月 2 日~3 日为轻度污染时期,11 月 4 日~5 日为中度污染时期,而 11 月 18 日~21 日为重度污染时期。从图 3 中可以看出,无论是在轻度污染、中度污染还是

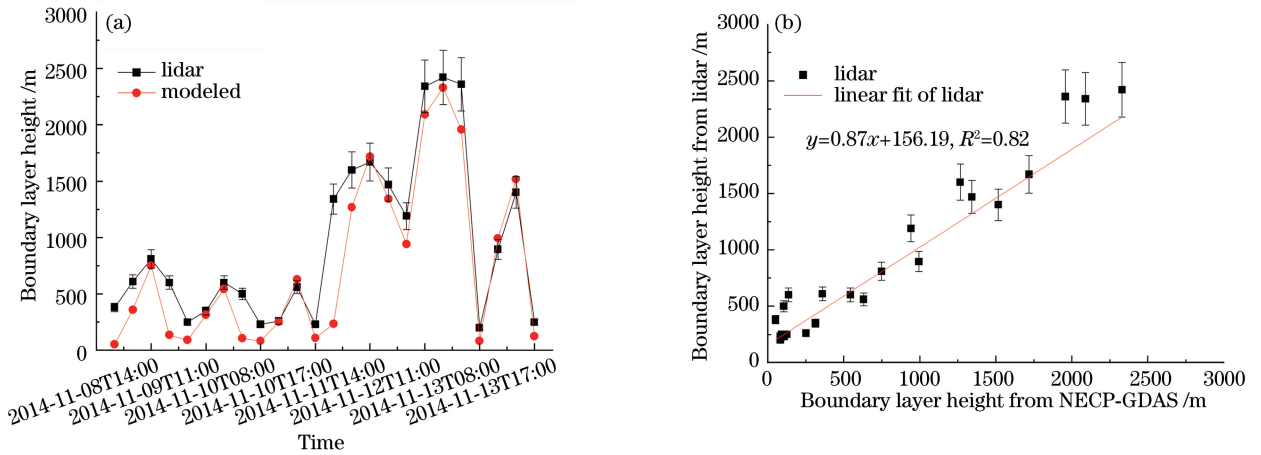


图2 激光雷达反演边界层高度结果与 NCEP-GDAS 数值模拟结果的对比

Fig. 2 Comparison of the boundary layer height retrieved from Lidar and modeled with NCEP-GDAS

重度污染的情况下,大气边界层高度均存在明显的日变化特征,白天边界层高度明显高于夜晚,与通过探空资料和地面资料分析得到的结果相一致。从北京时间 08:00 开始至第二天 08:00,大气边界层高度基本呈现先逐渐增加再降低的趋势,并基本在 14:00 左右边界层高度达到最高值。这是因为大气边界层高度取决于湍流的强弱,主要受太阳及地球辐射的影响,白天太阳辐射增强,湍流强度较强,边界层高度较高;夜晚太阳辐射变弱,湍流强度减弱,边界层高度较低。

此外,将 11 月份三个时期的边界层高度均值进行对比发现,不同程度污染情况下边界层高度相差较大。在轻度污染时期,大气边界层高度均值为 2100 m;在中度污染时期,边界层高度均值为 780 m;在重污染期间,大气边界层高度均值为 550 m。因此,在同一季度下,大气边界层除具有日变化特征明显外,大气边界层高度与空气质量之间还具有明显的负相关性,即边界层高度越低,空气污染等级越高。

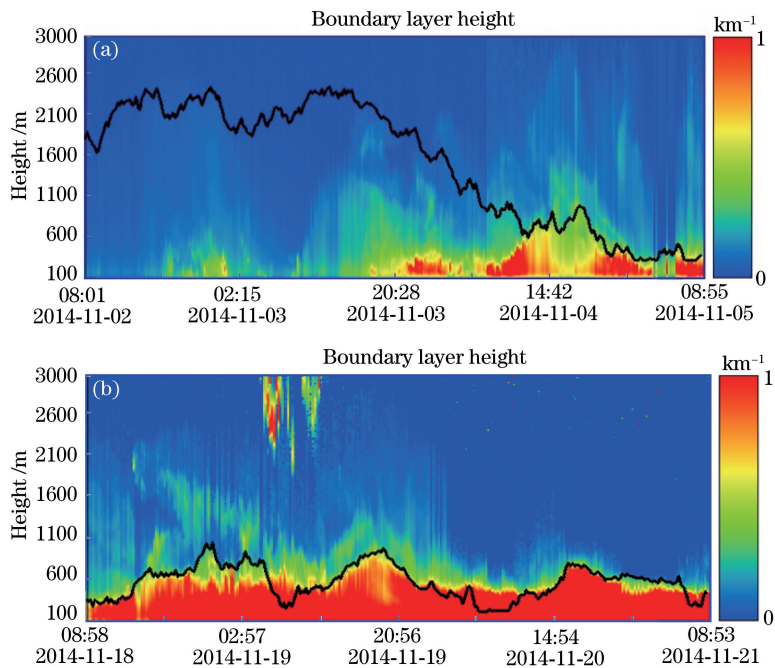


图3 气溶胶消光系数时空分布及大气边界层高度变化特征

Fig. 3 Space-time distribution of aerosol extinction coefficient and atmospheric boundary layer height

3.2 大气边界层高度的季节统计特征

为分析京津冀地区大气边界层高度的时空变化特征,对中国科学院大气所站、天津宁河站和河北唐山站三个站点 2014 年以来测得的激光雷达数据进行了统计分析,分别代表北京、天津和河北的大气边界层高度

变化特征。图 4(a)~(c)分别给出了这三个站点边界层高度的统计月均值。统计结果显示,激光雷达在该站点测得的边界层高度月均值在 200~1200 m 之间,夏、秋两季(6 月~11 月)的边界层明显高于春、冬两季(12 月~5 月)。此外,综合三个站点边界层高度月均值来看:河北唐山站点 2014 年 12 月份的边界层高度最低,仅为 265 m;天津宁河站点 2015 年 6 月份的边界层高度最高,为 1210 m。冬季边界层高度较低是因为冬季太阳辐射较弱,边界层湍流相对较弱;夏季则太阳辐射强烈,大气边界层湍流旺盛,故边界层高度较高。

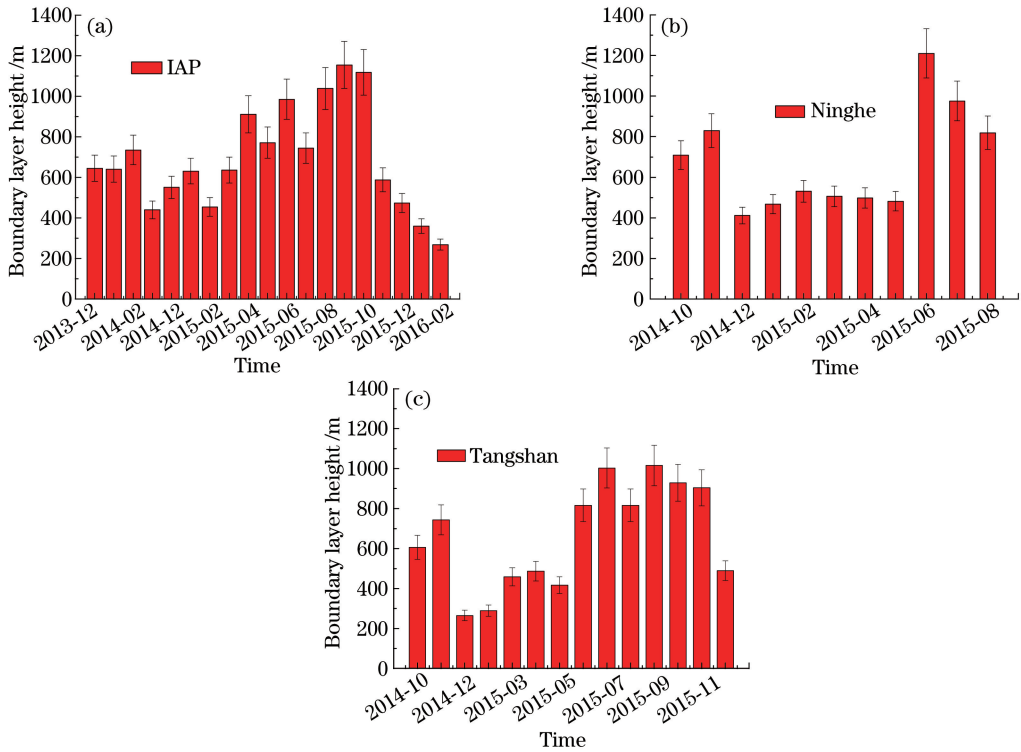


图 4 大气边界层高度月均值分布。(a) 大气所;(b) 天津宁河;(c) 河北唐山

Fig. 4 Monthly mean value of atmospheric boundary layer height. (a) Institute of Atmospheric Physics; (b) Tianjin Ninghe; (c) Hebei Tangshan

图 5 以大气所站 2015 年的激光雷达数据反演结果为例,给出了大气边界层高度四季的小时均值分布特征。由图 5 可以看到,大气所站点大气边界层高度的季节分布特征从高到低为秋季、夏季、春季、冬季。秋季大气边界层平均高度为 950 m,冬季的平均高度为 368 m。边界层高度最大值出现在秋季可能是因为该地区秋季晴天较多,日照时数较多,使得边界层高度较高,而该夏季云雨较多,日照时数较少,使得边界层高度较小。此外,该统计结果还反映了该站点四季的大气边界层的平均日变化特征:大气边界层高度日变化趋势显著,白天大夜间小,变化趋势与一天内的大气边界层高度变化趋势基本一致。由图 6 中所示的 2013~2015 年冬季大气边界层高度的平均日变化结果可以看出,2013~2015 年,该站点冬季的大气边界层高度均值呈现逐年下降趋势。

3.3 大气边界层区域分布特征

为研究京津冀地区大气边界层高度的区域分布特征,以 2014 年 11 月份京津冀 11 个站点的激光雷达数据为基础,统计分析了该月京津冀地区大气边界层高度的区域分布特征。大气边界层高度的月均值分布如图 7 所示。从图 7 中可以看出,该时段京津冀地区的大气边界层高度在 300~900 m 之间,廊坊大城和天津宁河两个站点的大气边界层高度相对较高,永乐店和保定两个站点相对较低。从整体上来说,大气边界层高度具有东南高,西北低的空间分布特征。

4 结 论

利用京津冀地区多个站点长期的激光雷达观测数据,用梯度法对该地区的大气边界层高度进行了反演

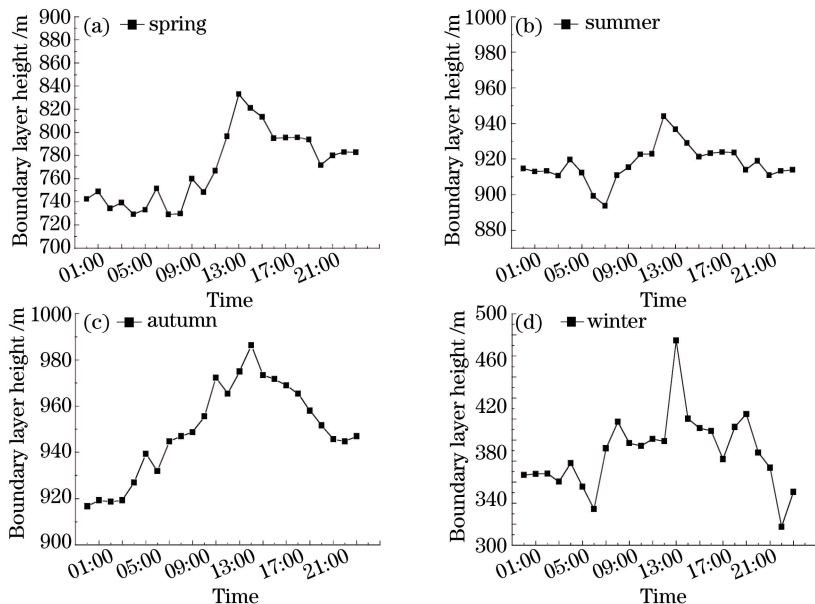


图5 大气所站大气边界层高度季节变化特征。(a) 春季；(b) 夏季；(c) 秋季；(d) 冬季

Fig. 5 Seasonal variation characteristic of atmospheric boundary layer height in the site of Institute of Atmospheric Physics.

(a) Spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

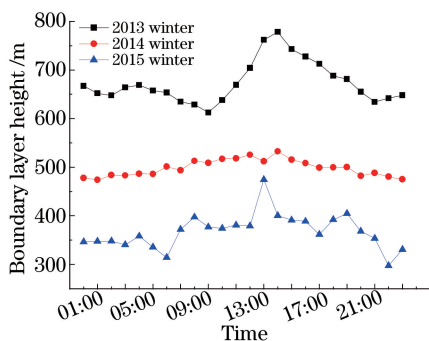


图6 2013~2015年大气所站冬季大气边界层高度的平均日变化特征

Fig. 6 Diurnal variation of atmospheric boundary layer height in winter from 2013 to 2015 in the site of Institute of Atmospheric Physics

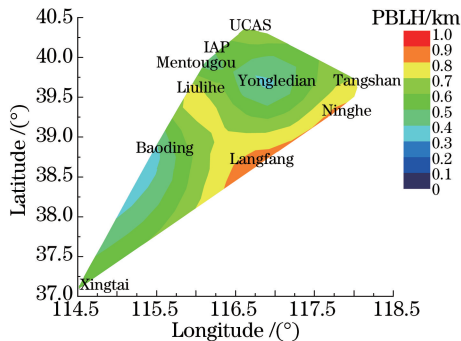


图7 2014年11月京津冀地区边界层高度区域分布特征

Fig. 7 Regional distribution characteristic of boundary layer height in the Jing-Jin-Ji area in November 2014

研究。将激光雷达数据和 NCEP-GDAS 模式模拟得到的大气边界层高度结果的对比,说明了激光雷达探测大气边界层高度的可靠性。此外,对京津冀地区大气边界层高度特征的研究分析结论如下:1)边界层高度与季节有重要关系,该地区大气边界层高度的季节特征表现为夏、秋季较高,春、冬季较低;2)在同一季节下,大气边界层高度均存在明显的日变化特征,白天边界层高度明显高于夜晚,且边界层高值出现在午后14:00左右;3)在同一季度下,大气边界层除具有日变化特征明显外,大气边界层高度还与空气污染程度间存在明显的负相关性,同一站点的边界层高度越低,空气污染程度越高;4)从单个站点近三年冬季边界层高度对比结果来看,该地区冬季的大气边界层高度呈逐年下降趋势;5)从大气边界层高度的区域分布结果来看,京津冀地区东南部的边界层高度较高。

参 考 文 献

- [1] Stull R B. An introduction to boundary layer meteorology[M]. Norwell: Kluwer Acad, 1988.
- [2] Zhu Cunxiong, Cao Nianwen, Yang Fengkai, *et al.* Micro pulse lidar observations of aerosols in Nanjing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(5): 050101.

- 祝存兄, 曹念文, 扬丰恺, 等. 南京地区微脉冲激光雷达气溶胶观测[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(5): 050101.
- [3] Bo Guangyu, Liu Dong, Wu Decheng, *et al.* Two-wavelength lidar for observation of aerosol optical and hygroscopic properties in fog and haze days[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0113001.
伯广宇, 刘东, 吴德成, 等. 双波长激光雷达探测典型雾霾气溶胶的光学和吸湿性质[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0113001.
- [4] Ji Chengli, Tao Zongming, Hu Shunxing, *et al.* The effective lidar ratio of cirrus cloud measured by three-wavelength lidar[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(8): 0810003.
季承荔, 陶宗明, 胡顺星, 等. 三波长激光雷达探测卷云有效激光雷达比[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0810003.
- [5] Xiang Yan, Ye Qinghao, Liu Jianguo, *et al.* Retrieval of planetary boundary layer height based on image edge detection[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(7): 0704003.
项衍, 叶擎昊, 刘建国, 等. 基于图像边缘检测法反演大气边界层高度[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0704003.
- [6] 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.
- [7] Chen Z, Zhang J, Zhang T, *et al.* Haze observation by simultaneous lidar and WPS in Beijing before and during APEC, 2014 [J]. Science China Chemistry, 2015, 58(9): 1385-1392.
- [8] Fan Guangqiang, Zhang Tianshu, Fu Yibin, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics of ozone based on differential absorption lidar in Beijing[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1014003.
范广强, 张天舒, 付毅宾, 等. 差分吸收激光雷达监测北京灰霾天臭氧时空发布特征[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1014003.
- [9] Wang Lin, Xie Chenbo, Han Yong, *et al.* Comparison of retrieval methods of planetary boundary layer height from lidar data[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2012, 7(4): 241-247.
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.
- [10] Zhang Wanchun, Zhang Ying, Lü Yang, *et al.* Observation of atmospheric boundary layer height by ground-based lidar during haze days[J]. Journal of Remote Sensing, 2013, 17(4): 981-992.
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.
- [11] Wang Shanshan. Study on the retrieval of NO₂ and aerosol pollution in Shanghai urban area based on the passive DOAS technique[D]. Shanghai: Fudan University, 2012: 70-76.
王珊珊. 基于被动 DOAS 的上海城区 NO₂ 和气溶胶污染的反演研究[D]. 上海: 复旦大学, 2012: 70-76.
- [12] Yang Hui, Liu Wenqing, Lu Yihuai, *et al.* PBL observations by lidar at Peaking[J]. Optical Technique, 2005, 31(2): 221-226.
杨辉, 刘文清, 陆亦怀, 等. 北京城区大气边界层的激光雷达观测[J]. 光学技术, 2005, 31(2): 221-226.
- [13] Hu Huanling, Wu Yonghua, Xie Chenbo, *et al.* Aerosol pollutant boundary later measured by lidar at Beijing[J]. Research of Environmental Sciences, 2004, 17(1): 59-66.
胡欢陵, 吴永华, 谢晨波, 等. 北京地区夏冬季颗粒物污染边界层的激光雷达观测[J]. 环境科学研究, 2004, 17(1): 59-66.