

# 光学学报

## 基于激光雷达探测的金华、合肥和兰州大气边界层高度及其统计分析

于思琪<sup>1,2,3</sup>, 刘东<sup>2,3\*</sup>, 徐继伟<sup>2,3,4</sup>, 王珍珠<sup>2,3</sup>, 吴德成<sup>2,3</sup>, 毛敏娟<sup>5</sup>, 王英俭<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;

<sup>2</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>3</sup>先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037;

<sup>4</sup>中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;

<sup>5</sup>浙江省气象科学研究所, 浙江 杭州 310008

**摘要** 利用三个站点(金华、合肥和兰州)同时期的观测数据对边界层高度进行了反演、统计和分析。研究结果表明,三个站点的边界层高度具有明显的季节、日变化特征。除冬季外,金华和合肥的边界层高度要低于兰州。兰州的边界层高度的上升和下降时间与日出、日落时间有着良好的对应关系,合肥的边界层高度则在日出数小时后才出现明显上升。金华、合肥和兰州日间月平均边界层高度最高值分别出现在 9 月、8 月和 6 月,月平均最大混合层高度出现的月份分别是 9 月、8 月和 7 月。了解边界层高度的时空分布规律,可以为空气污染防治、天气预报以及气候预测等提供进一步的参考。

**关键词** 遥感; 激光雷达; 边界层高度; 多站点; 日变化; 季节变化

中图分类号 P407.5

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2401002

### Statistics and Analysis of Planetary Boundary Layer Height Retrieved by Lidar over Jinhua, Hefei and Lanzhou

Yu Siqi<sup>1,2</sup>, Liu Dong<sup>2,3\*</sup>, Xu Jiwei<sup>2,3,4</sup>, Wang Zhenzhu<sup>2,3</sup>,  
Wu Decheng<sup>2,3</sup>, Mao Minjuan<sup>5</sup>, Wang Yingjian<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>3</sup>Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei, Anhui 230037, China;

<sup>4</sup>Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

<sup>5</sup>Zhejiang Meteorology Science Institute, Hangzhou, Zhejiang 310008, China

**Abstract** This paper utilizes the observed data at three sites, namely Jinhua, Hefei, and Lanzhou sites, for the same period to carry out planetary boundary layer height (PBLH) inversion, statistics, and analysis. The research results show that the PBLHs over Jinhua, Hefei, and Lanzhou have characteristics of seasonal and diurnal variation. The PBLHs over Jinhua and Hefei are lower than that over Lanzhou in spring, summer, and autumn. The starting

收稿日期: 2021-03-17; 修回日期: 2021-06-08; 录用日期: 2021-06-28

基金项目: “一带一路”国际科学组织联盟联合研究合作专项(ANSO-CR-KP-2020-09)、中国科学院国际合作局对外合作重点项目(116134KYSB20180114)

通信作者: \*dliu@aiofm.ac.cn

time of the rise and fall of boundary layer height over Lanzhou is in well correspondence with the time of sunrise and sunset, whereas the height over Hefei does not increase significantly until a few hours after sunrise. Jinhua, Hefei and Lanzhou have the highest monthly mean diurnal PBLHs in September, August, and June, respectively, and the corresponding monthly mean maximum mixed layer heights are in September, August, and July, respectively. Studying the spatial and temporal distribution pattern of the PBLH can provide further reference for research of air pollution prevention and control, weather forecasting, and climate prediction.

**Key words** remote sensing; Lidar; planetary boundary layer height; multiple sites; diurnal variation; seasonal variation

**OCIS codes** 280.3640; 010.0280; 010.1350

## 1 引言

大气边界层高度(PBLH)是大气边界层的重要参数。大气边界层作为对流层中受地球表面直接影响的部分,高度大多为 100~3000 m<sup>[1]</sup>。边界层的高度不仅受摩擦阻力、蒸发蒸腾作用、热传递和地形等因素的影响,还会因近地面气溶胶和地表吸收太阳短波辐射而变化。边界层的发展过程对云凝结核的输送和污染物的扩散有重要作用<sup>[2]</sup>。边界层也是天气预报和模式中需要考虑的重要因素<sup>[3]</sup>。大气边界层是对流层对地球表面产生直接影响的区域,这个区域与地面相互作用的时间尺度约 1 h。但是当出现稳定边界层时,由于湍流很弱,湍涡尺度小,下垫面的强迫作用达到边界层顶所需要的时间可能要长达几个小时。随着气象条件的变化,大气边界层高度对空气污染有着强烈的影响,由于大气气溶胶多聚集在边界层内<sup>[1]</sup>,大气边界层高度决定着污染物能够扩散的区域体积大小<sup>[1]</sup>。如果出现夜间地表辐射冷却或暖平流流经冷的下垫面等现象,大气边界层则会形成稳定边界层,不利于污染物的扩散。同时最大混合层厚度是反映日间边界层大气特征的重要气象参数,也是空气污染潜势预报必须考虑的重要因素<sup>[4]</sup>。由此可见,了解边界层的高度特征对污染排放、空气质量预测以及气候模型的改善等都有重要的作用。与传统的探空相比,激光雷达可以对边界层的高度进行连续观测<sup>[5-6]</sup>。

大气与地表进行的物质和能量交换主要是在大气边界层内发生,地表下垫面变化<sup>[7]</sup>、人类活动<sup>[8]</sup>和所处区域的气候特征<sup>[9]</sup>都会影响大气边界层高度的分布特征。为了探究不同区域边界层高度的变化情况,本文利用金华、合肥和兰州三个观测点在 2013 年和 2014 年内同时期的观测数据对边界层高度进行了反演、统计和分析,给出了边界层高度在三个观测点的日变化、季节变化和昼夜变化特征。为了探究最大混合层高度在不同区域的变化,本文还分析了三个观测点的最大混合层高度及其出现时间

与日出时间之差的情况。最后给出昼夜边界层高度在不同季节与地面温度的关系。

## 2 实验与方法

### 2.1 实验观测地点与激光雷达系统参数

本研究使用的观测数据来自金华、合肥和兰州三个观测点。金华观测点(29.14°N, 119.65°E)使用的是一台自主研发的双波长米氏偏振拉曼激光雷达系统,简称 DMPRL<sup>[10]</sup>,时间分辨率为 30 s,距离分辨率为 7.5 m。合肥观测站点(31.49°N, 117.13°E)使用的是一台双波长米氏偏振激光雷达,简称 DMPL<sup>[11]</sup>,时间分辨率为 15 min,距离分辨率为 7.5 m。兰州观测点位于 SACOL 站(35.95°N, 104.14°E)<sup>[12]</sup>,使用的是一台 527 nm 的微脉冲激光雷达,简称 MPL,时间分辨率为 30 min,距离分辨率为 15 m。金华和合肥观测点使用 532 nm 波长大气回波信号对边界层高度进行识别。金华地面温度数据来自金华就近的气象站点,该气象站点距离金华激光雷达观测点约 4 km。合肥地面温度数据观测位置与激光雷达在同一地点。兰州观测点使用 527 nm 波长大气回波信号对边界层高度进行识别。观测点的日出和日落时间是根据当地经纬度计算获得。

### 2.2 边界层高度反演方法及结果

利用激光雷达反演边界层高度的方法有梯度法<sup>[13]</sup>、小波协方差变换法<sup>[14-15]</sup>、归一化梯度法<sup>[16]</sup>、阈值法<sup>[17]</sup>、拟合法<sup>[18]</sup>等。本研究主要采用连续小波法(CWT)结合二维矩阵法<sup>[19]</sup>来反演三个观测点的边界层高度。当一天中有出现降水的情况时,降水可能会影响边界层高度的反演结果,因此本文统计时主要选取一天中边界层较完整的情况,如果一天中连续出现降水或缺测的情况,则此情况不参与统计。为更好地描述边界层高度的变化,本文的边界层高度在日间识别的是混合层高度,在夜晚识别的是稳定边界层高度。图 1 给出了三个观测站点的边界层高度反演个例,黑线表示边界层高度。

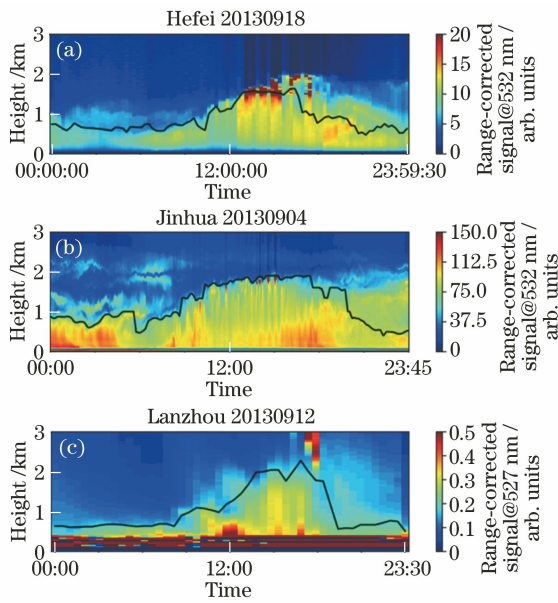


图 1 合肥、金华和兰州观测站点利用激光雷达识别的边界层高度。(a)合肥;(b)金华;(c)兰州

Fig. 1 Three cases of PBLH retrieved from Lidar over Hefei, Jinhua and Lanzhou. (a) Hefei; (b) Jinhua; (c) Lanzhou

### 2.3 样本数量

金华、合肥和兰州的观测时间是从 2013 年到 2014 年,图 2 给出了三个观测点用于统计各个月份的数据天数。金华和合肥观测点使用的数据日期分别是 2013 年 6 月到 2014 年 5 月。兰州观测点 6 月、7 月使用的是 2014 年的数据,2 月、3 月和 4 月使用的是 2013 年的数据。整体来看,各个月份的样本数量都大于 5 d,金华和合肥观测点在冬季和春季的样本量相对较多。金华观测点的样本量在 3 月较少,合肥在 2 月份的样本量较少,兰州在 8 月份的样本量较少。样本量较少的月份主要是受到降水或缺

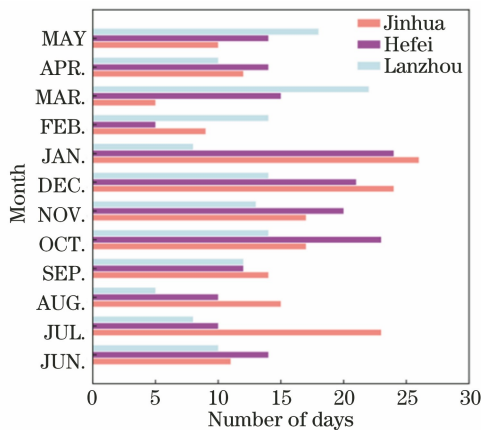


图 2 2013 年 6 月和 2014 年 5 月边界层的统计天数  
Fig. 2 PBLH observation days from June, 2013 to May, 2014

测等因素的影响,较少的样本量可能会对当月统计的结果造成误差。

### 3 边界层高度统计结果

我国有着很多种土壤类型,其中浙江区域以红壤和黄壤为主,安徽区域以黄棕壤为主,甘肃区域则以灰漠土和灰钙土为主。不同类型的土壤对水分有着不同的保持力<sup>[20]</sup>。有研究表明,地面湿度状况对边界层发展的影响明显,不同环境和下垫面条件下的能量输送特征也有很大的差异,这会导致在不同区域的边界层高度随季节产生较大差异<sup>[21-22]</sup>。同时,金华、合肥和兰州三个观测站点具有不同的经纬度、辐射强度和局地气候等,这些差异也会造成大气边界层高度的日变化以及季节变化不同。

图 3 给出了三个站点边界层高度按季度平均的日变化。图 3(a)~(d)是金华区域季平均边界层高度分别在夏秋冬春四个季节(JJA, SON, DJF, MAM)的分布情况,其中实线表示平均值,阴影表示标准差。从图中可以看出金华夜间边界层较为稳定且在各个季节的高度差异不大,夏季和秋季的夜间边界层高度略大于 0.5 km,冬季和春季则略小于 0.5 km。在四个季节中,金华的日间边界层高度在 14:00—16:00 到达最大值。在秋季、冬季和春季三个季节中,日间边界层高度达到最大值后开始快速下降,而夏季中日间边界层高度达到最大值后则下降较为缓慢。图 3(a)展示的是夏季边界层高度的日变化情况,从图中可以看出,夏季的边界层在 06:00 左右开始上升,在 15:00 之前到达一天中边界层高度的最大值,约 1.3 km。在秋季,如图 3(b)所示,边界层在 06:00 之后开始逐步缓慢上升,在 15:00 左右到达一天中边界层的最大高度,约 1.1 km。图 3(c)中,冬季的边界层变化较为缓慢,且在一天中边界层的最大值约为 0.9 km。冬季的金华边界层高度不管在夜间还是日间均小于 1 km,且边界层高度在日间的上升速度远小于其他季节,这可能与冬季到达地面的辐射强度较低有关。金华的边界层高度在春季的日变化情况和在秋季的日变化情况相似,但其日间和夜间的边界层高度均小于秋季。

合肥季平均边界层高度的变化情况如图 3(e)~(h)所示。整体来看,合肥夜间边界层的高度基本稳定在 0.5 km 附近,没有出现明显的随时间变化的趋势。在夏季,合肥的日间边界层高度在 09:00 左右开始迅速上升,在 12:00 达到极大值,

约为 1.3 km。从 12:00 至 19:00,边界层高度相对稳定,高度在 1~1.3 km。19:00 之后边界层的高度开始迅速降低,到 23:00 降至 0.5 km 左右。在图 3(f)中,秋季的边界层高度从 10:00 之后开始上升,在 13:00 左右达到极大值 0.9 km,此高度维持至 18:00 后迅速降低。合肥冬季的边界层高度在 12:00 前才开始明显上升,在 02:00 左右达到边界层高度的最大值,约 0.8 km,18:00 开始边界层高度缓慢下降。如图 3(h)所示,在春季,边界层高度在 10:00 开始增长,在 13:00 左右到达边界层高度的极大值 1.2 km。达到极大值之后边界层高度缓缓降低,到 18:00 时降低到 1.1 km,在此之后边界层高度迅速降低,于 22:00 降至 0.5 km 以下。合肥冬季的日间边界层高度开始上升的时间要晚于夏季、秋季和冬季,且夏季达到边界层高度极大值的时间要早于其他三个季节。合肥区域的边界层高度达到极大值后会在数小时内维持相对稳定,直到边界层高度开始迅速下降。

图 3(i)~(l)为兰州在不同季节的平均边界层高度的日变化情况。如图 3(i)所示,夏季兰州的边界层高度从 06:00 开始逐步上升,10:00 左右边界层的高度上升至 2 km 左右。自 10:00 至 18:00,夏

季兰州的边界层高度相对稳定,大约在 2 km 处,从 18:00 开始边界层的高度开始逐步下降,21:00 之后边界层的高度不再降低,此时的边界层高度约 0.8 km。图 3(j)是兰州秋季边界层高度的日变化情况。从图 3(j)中可以看出,在秋季边界层的高度从 08:00 左右开始上升,边界层高度在 11:00 达到 1.5 km。秋季的边界层高度达到极大值后,从 14:00 左右开始逐步下降,到 20:00 左右边界层高度不再降低,稳定在 0.6 km。与夏季的边界层高度变化情况相比,秋季的边界层高度开始上升的时间要晚 1 h 左右,且边界层能够达到的最大高度也要低 0.5 km 左右。冬季的季平均边界层高度日变化如图 3(k)所示,边界层高度在 09:00 之后开始上升,在 14:00 升高到最大值,随后开始缓慢下降,直至 0.5 km。与其他三个季节相比,冬季边界层高度开始上升的时间要明显晚于其他三个季节,且边界层能够达到的最大高度仅有 1 km。图 3(l)为春季的平均边界层高度的日变化情况,该季节边界层高度的日变化(边界层高度开始上升的时间和边界层能够达到的最大高度)与秋季相似。不过,兰州春季边界层高度从极大值开始下降的时间要晚于秋季。

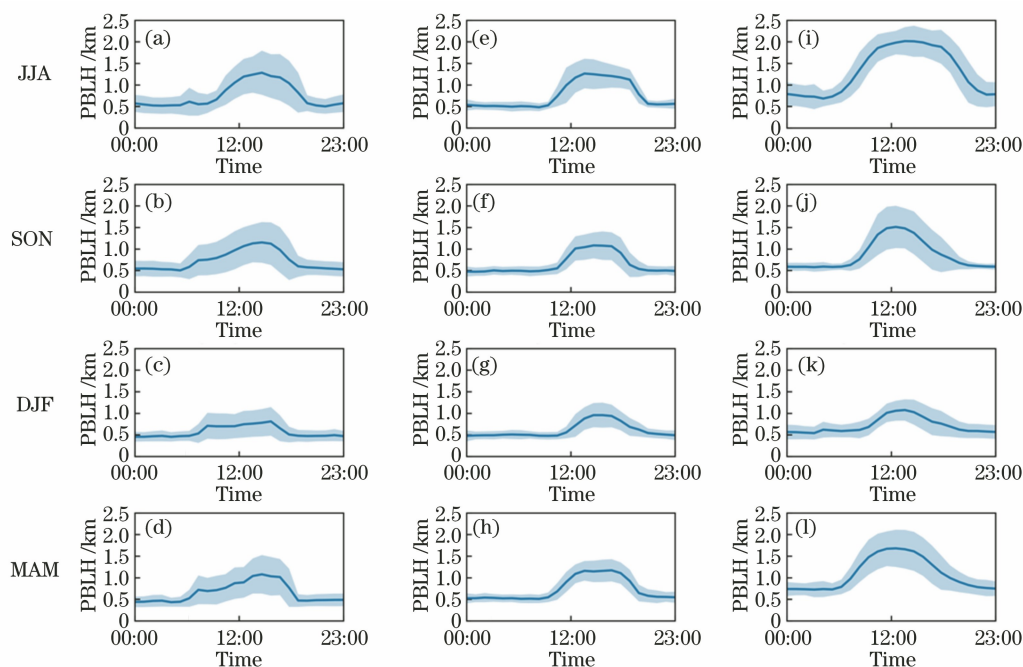


图 3 边界层高度按季度平均的日变化。(a)~(d)金华;(e)~(h)合肥;(i)~(l)兰州

Fig. 3 Seasonal average of diurnal PBLH. (a)~(d) Jinhua; (e)~(h) Hefei; (i)~(l) Lanzhou

在白天,三个观测点在冬季的边界层高度的最大值约为 1 km。金华和合肥在夏季的边界层高度最高,最大高度在 1.5 km 左右,其中金华边界层高

度的最大值大于合肥,其他两季节的边界层高度位于冬、夏两个季节之间。兰州观测点与金华和合肥不同,除了冬季边界层高度最大值略低,其他三个季

节边界层高度的最大值均接近 2 km。兰州最大混合层高度在春季、夏季和秋季要明显高于合肥,这与 Guo 等<sup>[23]</sup>的研究结果一致。三个观测点在夜间的边界层高度都处于比较低的水平(0.5 km 左右)。

从图 3 分析可知,三个观测点的边界高度的日变化情况之间存在季节性差异,为了更加清晰地展示三个站点边界层高度变化的规律和边界层高度与日出日落之间的关系,图 4 给出了三个站点逐月的边界层高度变化情况及对应的日出日落时间。图 4 中的日出日落时间是根据站点相应的经纬度计算得出。从图 4(a)中可知,金华观测点的日间混合层在秋季的高度要高于其他三个季节,且 9 月份混合层最大高度较高。从图 4(b)中可以看出,合肥观测点日间混合层的高度在秋季高于其他三个季节,这与金华的结果一致,但是日间边界层最大高度发展得最高的月份是 8 月。与金华

和合肥站点的观测情况不同,如图 4(c)所示,兰州观测点日间混合层的最大高度在夏季最高,尤其是 7 月。三个观测点在冬季月份的边界层最大高度均较低,兰州的夜间边界层高度要略大于金华和合肥。值得注意的是,虽然日落时间和边界层的降低在三个站点都有着良好的一致性,但是日出和边界层升高的时间相关性却不尽相同。如图 4(c)所示,兰州夏秋春三个季节的边界层高度在日出后的 0.5 h 左右就开始升高,而冬季边界层高度的升高时间约在日出 1 h 之后。如图 4(a)所示,金华的边界层在日出后不久便开始上升,其中,夏季与其他季节相比,边界层高度开始上升的时间相对滞后,这可能是受到边界层内气溶胶性质的影响。从图 4(b)中可以看出,在四个季节中,合肥的边界层高度大概在日出 5 h 后才会出现明显上升。

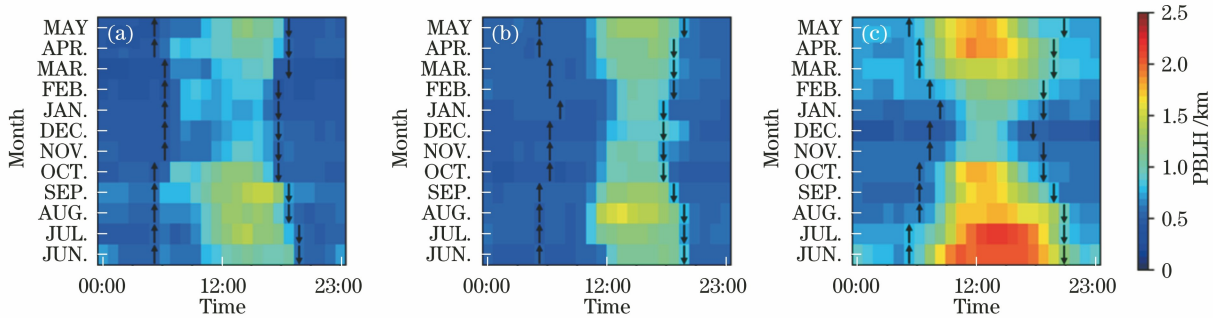


图 4 边界层高度日变化的月平均与日出(上箭头)、日落(下箭头)时间。(a)金华;(b)合肥;(c)兰州  
Fig. 4 Monthly average of diurnal PBLH, and sunrise (up arrow) and sunset (down arrow).  
(a) Jinhua; (b) Hefei; (c) Lanzhou

为了量化显示三个观测站点在不同月份日间、夜间边界层高度的变化规律,图 5 给出根据三个观测点日出日落时间计算的昼、夜月平均边界层高度,彩色条注表示平均值,误差棒表示标准差。图 5(a)是金华站点的月平均高度逐月的分布情况。从图中可以看出,在不同月份之间日间边界层的高度差异较大,其最大值与最小值之间差 0.5 km,而夜间边界层的高度差异与日间相比较小,其最大值与最小值之间约差 0.3 km。金华在 9 月日间边界层的平均高度达到最大值,约 1.1 km;同样在 9 月夜间边界层的平均高度达到最大值,约 0.65 km;在 12 月日间边界层的平均高度取得最小值,约为 0.6 km;在 3 月夜间边界层的平均高度取得最小值,约为 0.35 km。金华日间边界层平均高度的变化呈现周期性规律,从 6 月开始边界层高度逐步增大,到 9 月份到达最大值,随后开始逐渐减小,在 11 月到达最小值后又开始逐渐增大,但是 3 月和 5 月不符合这

一趋势,这可能与样本量较少和低云出现较多相关。夜间边界层在金华的平均高度从 6 月至 7 月降低,在 7 月取得极小值 0.5 km,从 7 月至 9 月逐渐增大,在 9 月到达最大值后开始逐渐下降,到次年 3 月到达最小值后又开始逐步增大。如图 5(b)所示,合肥的日间边界层月平均高度变化也具有明显的规律性,而夜间边界层月平均高度的变化不大,在 0.5 km 左右。合肥日间边界层的月平均高度最大值出现在 8 月,约 1.1 km,在 11 月出现最小值,约为 0.6 km,日间边界层的月平均高度最大值与最小值相差约 0.5 km。夜间的月平均边界层高度在 10 月为最小值,约 0.45 km。合肥日间边界层从 6 月到 8 月的月平均高度逐步升高,自 8 月至 12 月逐步降低,12 月开始,日间边界层的月平均高度又开始逐步升高。图 5(c)展示了兰州边界层月平均高度的变化情况,与其他两个站点不同,兰州的昼夜边界层月平均高度逐月的变化趋势有着良好的一致

性,从 6 月至 12 月,边界层的月平均高度逐步降低,12 月后逐步升高。兰州的日间月平均边界层高度在 6 月达最大值,约 1.8 km,在 12 月达最小值,约

0.7 km。兰州的日间月平均边界层高度在不同月份的最大值与最小值相差约为 1.1 km,要远高于金华和合肥。

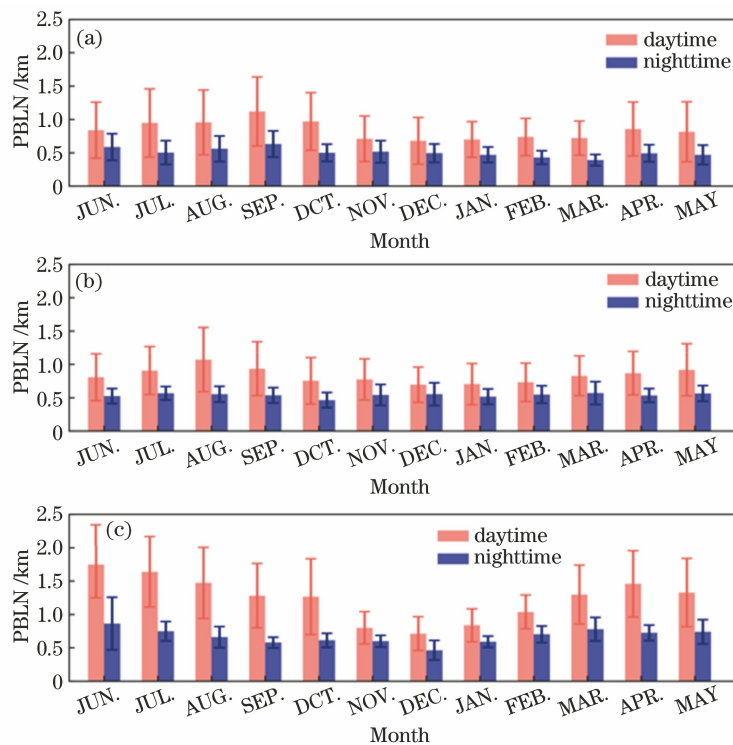


图 5 昼、夜月平均的边界层高度。(a)合肥;(b)金华;(c)兰州

Fig. 5 Average height of daytime and nocturnal PBLH. (a) Hefei; (b) Jinhua; (c) Lanzhou

图 6 为金华、合肥和兰州三个站点不同月份的最大混合层高度,以及达到最大混合层高度时距离日出所使用的时间,误差棒表示标准差。如图 6(a)所示,金华在 7、8 和 9 月最大混合层高度均高于其他月份,都在 1.8 km 以上,其中 7 月的最大混合层高度又是几个月份中最大的,略小于 2.0 km。在金华,2 月的最大混合层高度在几个月中最低,约为

1.1 km。合肥的最大混合层高度在 8 月要高于其他月份,约为 1.8 km;12 月的最大混合层高度为所有月份中的最小值,约为 1.0 km。兰州在所有月份中的最大混合层高度的最小值也出现在 12 月,和合肥出现最小值的月份相同且该月份的最大混合层高度也相同。兰州在 6 月份达到几个月份中最大混合层高度的最大值,约为 2.3 km,这与王式功等<sup>[4]</sup>的

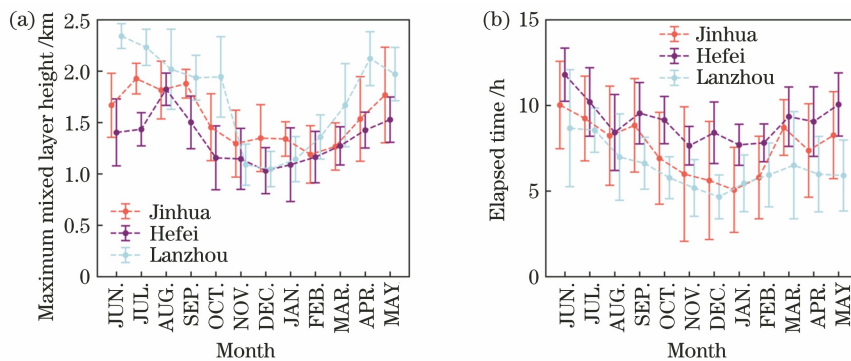


图 6 逐月最大混合层高度及达到最大混合层高度时距离日出所使用的时间。(a)逐月最大混合层高度;(b)达到最大混合层高度时距离日出所使用的时间

Fig. 6 Monthly maximum mixed layer height and time taken from maximum mixed layer height to sunrise. (a) Monthly maximum mixed layer height; (b) time taken from maximum mixed layer height to sunrise

研究结果相一致。整体来看,合肥的最大混合层高度要低于金华和兰州,三个观测点在整年中达到最大混合层高度最大值的月份并不相同。图 6(b)展示了出现最大混合层高度时距离日出所使用的时间。对比在三个站点中到达最大混合层高度所用的时间,可知合肥使用的时间最长,全年都需要 7 h 以上,其次是金华,所需时间最短的是兰州,这可能与不同区域的下垫面不同有关。与合肥和兰州相比,金华达到最大混合层高度所用时间全年各个月份相对差异较大。

为了探究合肥和金华边界层高度差异的原因,图 7 给出了金华和合肥两个站点在四个季节中边界层高度和地面温度的关系。边界层高度根据日出和日落时间分成白天和夜间两部分。在图 7(a)中金华四个季节中白天边界层高度均随温度升高而升高,而在合肥观测点,如图 7(c)所示,白天边界层高度与温度的关系出现两种情况,一种是随温度升高,边界层高度基本保持不变,另一种是随温度升高,边界层高度明显升高。没有明显温度响应的这部分边界层高度出现的时间对比图 4 中可以看出,主要集

中在日出后的几个小时内。对比图 7(b)和图 7(d)夜间边界层高度可以看出,无论是在金华还是在合肥观测点,四个季节内其对地面温度的响应都很小。就整年来看,夜间边界层高度随地面温度的增加而有所升高,这与武汉观测到的结果相似<sup>[24]</sup>。并且金华观测点的这种现象相比较合肥观测点更加明显。对图 7(a)中金华观测点的白天边界层高度和地面温度作相关性分析,具体结果详见表 1,表中  $N$  表示样本天数。金华白天边界层高度和温度的相关性在夏季和秋季较好,相关系数  $r$  分别为 0.80 和 0.79。4 个季节的拟合结果中斜率最大的是夏季,斜率最小的是冬季,秋季和春季介于夏季和冬季之间。

表 1 金华日间边界层高度与地面温度的相关性  
Table 1 Correlation between daytime PBLH and surface temperature in Jinhua

| Jinhua | Slope | Intercept | $r$  | $N$ |
|--------|-------|-----------|------|-----|
| JJA    | 0.061 | -1.088    | 0.80 | 44  |
| SON    | 0.036 | 0.143     | 0.79 | 39  |
| DJF    | 0.014 | 0.542     | 0.45 | 36  |
| MAM    | 0.021 | 0.363     | 0.55 | 41  |

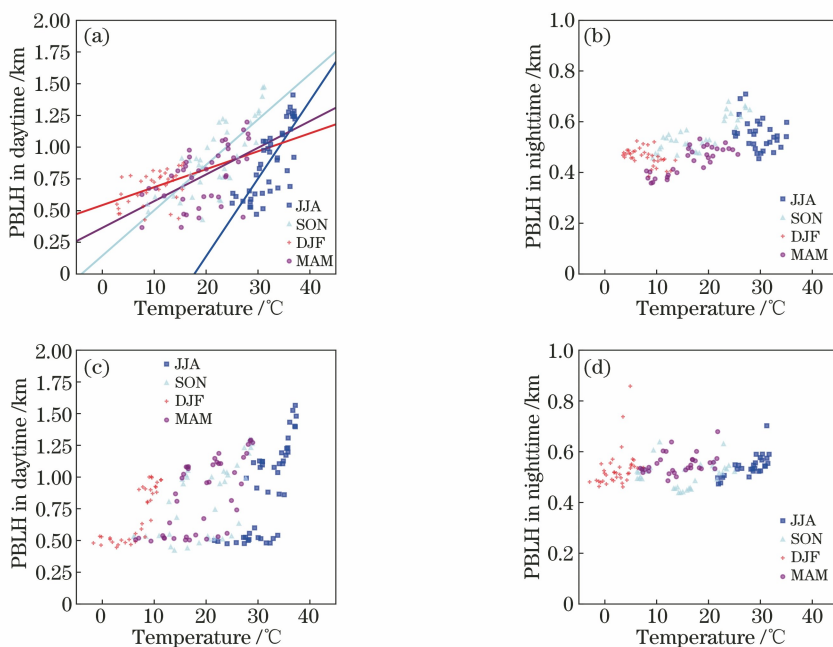


图 7 金华和合肥边界层高度和地面温度的关系。(a)金华,日间,直线表示拟合结果;  
(b)金华,夜间;(c)合肥,日间;(d)合肥,夜间

Fig. 7 Relationship between PBLH and the surface temperature in Jinhua and Hefei. (a) Jinhua, daytime, straight lines represent corresponding fitting results; (b) Jinhua, nighttime; (c) Hefei, daytime; (d) Hefei, nighttime

## 4 讨论与分析

激光雷达可用于定点连续探测大气的垂直结

构,这为连续获得昼夜边界层高度变化提供了可能。本研究通过金华、合肥和兰州观测站点的激光雷达数据,反演、统计并分析了这三个站点所观测到的边

界层高度昼夜日变化及季节变化的情况。从统计的结果可知,对于金华、合肥和兰州观测点的边界层高度,其季节平均日变化情况有所不同,除冬季外,兰州的边界层高度要高于金华和合肥的边界层高度。兰州和金华观测点的混合层高度上升时间与日出日落有着良好的相关性,且与北京地区观测到的结果相似<sup>[25]</sup>。但合肥的边界层高度则在日出数小时之后才会出现明显上升。三个观测点的月平均最大混合层高度出现的月份有所不同,一年中兰州出现月平均最大混合层高度的月份早于合肥,合肥出现月平均最大混合层高度的月份早于金华。此外,三个观测点的昼、夜月平均边界层高度在一年中的变化规律也呈现出差异。合肥和金华的日间月平均边界层高度在8、9月份到达全年的最大值,而兰州则是在6月。在三个观测点中,分析到达最大混合层高度时距离日出所使用的时间可知,合肥使用的时间最长,其次是金华,所需时间最短的是兰州,总体来看,三个观测点中到达最大混合层高度时距离日出所使用的时间都在夏季最长,在冬季最短。在夏季和冬季,金华观测点的日间边界层高度与地面温度有很好的相关性,并且夏季的斜率最大,冬季的斜率最小。值得注意的是,自日出后边界层达到最大混合层高度所需时间,合肥要大于金华和兰州,这可能与局地下垫面类型、气象要素(水汽)以及气溶胶类型有关。水汽有着较大的比热,会影响边界层高度的升高<sup>[1]</sup>。有研究表明,土壤潮湿的情况会导致边界层高度发展缓慢<sup>[26]</sup>。较大的湿度可能是合肥边界层高度发展比较缓慢的原因。兰州达到边界层高度最大月份在夏季,而金华和合肥则在秋季,这也可能与当地的湿度有关。在土壤含水量较小的情况下,地表热通量主要表现为感热通量,进而驱动对流使混合边界层高度增加;而在土壤含水量相对较大的情况下,地表热通量则更多地表现为潜热通量,而驱动对流的感热通量减少,使混合边界层高度相对较低<sup>[27]</sup>。

## 5 结 论

通过使用金华、合肥和兰州三个观测点的激光雷达数据,得到了三个站点边界层高度随时空的变化特征。随着激光雷达观测网络的发展,多站点的激光雷达联合观测有利于更加细致地分析在不同区域的边界层高度分布及变化情况,本研究能够为多站点联合观测边界层高度、分析其变化特征提供重要参考。

致谢 感谢中国科学院战略性先导科技专项课题(XDA05100300)提供观测数据。

## 参 考 文 献

- [1] Stull R B. An introduction to boundary layer meteorology[M]. Dordrecht: Springer, 1988.
- [2] Emeis S, Schäfer K, Münkel C. Surface-based remote sensing of the mixing-layer height a review [J]. Meteorologische Zeitschrift, 2008, 17(5): 621-630.
- [3] Mao M J, Jiang W M, Gu J Q, et al. Study on the mixed layer, entrainment zone, and cloud feedback based on lidar exploration of Nanjing City [J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(4): L04808.
- [4] Wang S G, Jiang D B, Yang D B, et al. A study on characteristics of change of maximum mixing depths in Lanzhou [J]. Plateau Meteorology, 2000, 19(3): 363-370.  
王式功, 姜大膀, 杨德保, 等. 兰州市区最大混合层厚度变化特征分析 [J]. 高原气象, 2000, 19(3): 363-370.
- [5] Chu Y F, Liu D, Wu D C, et al. Algorithm of retrieving boundary layer height based on Raman lidar water vapor data [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1204009.  
储玉飞, 刘东, 吴德成, 等. 基于拉曼激光雷达水汽数据探测边界层高度的算法 [J]. 中国激光, 2020, 47(12): 1204009.
- [6] Xiang Y, Zhang T S, Liu J G, et al. Evaluation of boundary layer height simulated by WRF mode based on lidar [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0110002.  
项衍, 张天舒, 刘建国, 等. 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, 2019, 46(1): 0110002.
- [7] Liu H Z, Wang L, Du Q. An overview of recent studies on atmospheric boundary layer physics(2012-2017) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(4): 823-832.  
刘辉志, 王雷, 杜群. 大气边界层物理研究进展(2012—2017年) [J]. 大气科学, 2018, 42(4): 823-832.
- [8] Li Z Q, Guo J P, Ding A J, et al. Aerosol and boundary-layer interactions and impact on air quality [J]. National Science Review, 2017, 4(6): 810-833.
- [9] Qiao L, Zhang Q, Yue P, et al. Analysis of changes in the structure of atmospheric boundary layer from non-monsoon zone to monsoon zone [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 43(2): 251-265.



- 乔梁, 张强, 岳平, 等. 由非季风区向季风区过渡过程中大气边界层结构的变化分析[J]. 大气科学, 2019, 43(2): 251-265.
- [10] Wang Z Z, Liu D, Wang Y J, et al. Development of dual-wavelength Mie polarization Raman lidar for aerosol and cloud vertical structure probing [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9299: 929916.
- [11] Sun L, Liu D, Wang Z E, et al. Cloud vertical structures detected by lidar and its statistical results at HeRO site in Hefei, China [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9259: 92591J.
- [12] Zhou T, Huang Z W, Huang J P, et al. Study of vertical distribution of cloud over loess plateau based on a ground-based lidar system [J]. Journal of Arid Meteorology, 2013, 31(2): 246-253, 271.  
周天, 黄忠伟, 黄建平, 等. 黄土高原地区云垂直结构的激光雷达遥感研究 [J]. 干旱气象, 2013, 31(2): 246-253, 271.
- [13] Wang Z Z, Li J, Zhong Z Q, et al. LIDAR exploration of atmospheric boundary layer over downtown of Beijing in summer [J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(1): 96-100.  
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.
- [14] 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.
- [15] Mao F Y, Gong W, Song S L, et al. Determination of the boundary layer top from lidar backscatter profiles using a Haar wavelet method over Wuhan, China [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 49: 343-349.
- [16] He Q S, Mao J T. Observation of urban mixed layer at Beijing using a micro pulse lidar [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(3): 374-384.  
贺千山, 毛节泰. 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, 2005, 63(3): 374-384.
- [17] Melfi S H, Spinhirne J D, Chou S H, et al. Lidar observations of vertically organized convection in the planetary boundary layer over the ocean [J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1985, 24(8): 806-821.
- [18] Wang W, Gong W, Mao F Y, et al. An improved iterative fitting method to estimate nocturnal residual layer height [J]. Atmosphere, 2016, 7(8): 106.
- [19] Yu S Q, Liu D, Xu J W, et al. Optimization method for planetary boundary layer height retrieval by lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(7): 0728002.  
于思琪, 刘东, 徐继伟, 等. 激光雷达反演大气边界层高度的优化方法 [J]. 光学学报, 2021, 41(7): 0728002.
- [20] Zhou W Z. A study on available water capacity of main soil types in China based on geographic information system [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2003.  
周文佐. 基于 GIS 的我国主要土壤类型土壤有效含水量研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2003.
- [21] Che J H, Zhao P, Shi Q, et al. Research progress in atmospheric boundary layer [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(3): 735-751.  
车军辉, 赵平, 史茜, 等. 大气边界层研究进展 [J]. 地球物理学报, 2021, 64(3): 735-751.
- [22] Wang W Z, Xu Z W, Liu S M, et al. The characteristics of heat and water vapor fluxes over different surfaces in the Heihe river basin [J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(7): 714-723.  
王维真, 徐自为, 刘绍民, 等. 黑河流域不同下垫面水热通量特征分析 [J]. 地球科学进展, 2009, 24(7): 714-723.
- [23] Guo J P, Miao Y C, Zhang Y, et al. The climatology of planetary boundary layer height in China derived from radiosonde and reanalysis data [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(20): 13309-13319.
- [24] Wang W, Mao F Y, Gong W, et al. Evaluating the governing factors of variability in nocturnal boundary layer height based on elastic lidar in Wuhan [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2016, 13(11): 1071.
- [25] Huang M, Gao Z Q, Miao S G, et al. Estimate of boundary-layer depth over Beijing, China, using Doppler lidar data during SURF-2015 [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2017, 162(3): 503-522.
- [26] Endo S, Shinoda T, Hiyama T, et al. Characteristics of vertical circulation in the convective boundary layer over the Huaihe river basin in China in the early summer of 2004 [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, 47(11): 2911-2928.
- [27] Bianco L, Djalalova I V, King C W, et al. Diurnal evolution and annual variability of boundary-layer height and its correlation to other meteorological variables in California's central valley [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2011, 140(3): 491-511.