

# 地基遥感联合反演大气边界层高度与 ERA5 再分析资料比对分析

杨世昆<sup>1,2</sup> 杨玲<sup>1,2</sup> 张雪芬<sup>3</sup> 陶法<sup>3</sup> 何平<sup>3</sup> 茆佳佳<sup>3</sup> 焦志敏<sup>3</sup> 徐文铎<sup>4</sup>

1 成都信息工程大学, 成都 610225

2 中国气象局大气探测重点开放实验室, 成都 610225

3 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

4 南京信息工程大学, 南京 210044

**摘要:** 本文利用北京国家综合气象探测试验基地超大城市观测试验建设的地基垂直遥感设备: 激光气溶胶雷达、微波辐射计及风廓线雷达, 使用 2021 年 5 月~2021 年 8 月的观测资料, 根据不同设备的探测优势以及边界层的日变化规律, 利用激光气溶胶雷达、微波辐射计、风廓线雷达观测资料进行联合反演, 得到全天候大气边界层高度。并将反演所得的边界层高度与探空资料计算及 ERA5 再分析资料提供的全天候大气边界层高度进行比较, 发现: (1) 联合反演边界层高度与 ERA5 数据提供的大气边界层高度有较好的一致性; (2) 激光气溶胶雷达适用于白天对流边界层的观测, 微波辐射计适用于夜间稳定边界层的观测, 使用微波辐射计与风廓线雷达联合反演大气边界层高度可以改善弱降雨时单设备的反演结果; (3) 联合反演的大气边界层高度结果与单设备反演大气边界层高度均符合大气边界层的日变化规律; (4) 得到的联合反演边界层高度与探空数据计算得到的大气边界层高度差值的标准偏差为 62m, 相较于 ERA5 数据提供的一定范围内大气边界层高度均值, 联合反演边界层高度能更精准的反映更小范围内的大气边界层高度。

**关键词:** 地基垂直遥感; 激光气溶胶雷达; 微波辐射计; 风廓线雷达; 联合反演; 大气边界层高度

## Comparison and analysis of atmospheric boundary layer height retrieved by ground-based remote sensing and ERA5 reanalysis data

Yang Shikun<sup>1,2</sup> Yang Ling<sup>1,2</sup> Zhang Xuefen<sup>3</sup> Tao Fa<sup>3</sup> He Ping<sup>3</sup> Mao Jiajia<sup>3</sup> Jiao Zhimin<sup>3</sup> Xu Wenduo<sup>4</sup>

1 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 CMA Key Laboratory of Atmospheric Sounding, Chengdu 610225

3 Meteorological Observation Centre of CMA, Beijing 100081

4 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract:** This article uses the ground-based vertical remote sensing equipment constructed by the Beijing National Comprehensive Meteorological Observation and Test Base for the super-large city observation test, and the observation data of radiosonde, laser aerosol radar, microwave radiometer and wind profiler radar from May 2021 to August 2021, according to different The detection advantages of the equipment and the diurnal variation of the boundary layer are

combined with the observation data of laser aerosol radar, microwave radiometer, and wind profiler radar to obtain the all-weather atmospheric boundary layer height. Comparing the height of the boundary layer obtained from the inversion with the height of the all-weather atmospheric boundary layer provided by the sounding data calculation and the ERA5 reanalysis data, it is found that: (1) The joint inversion boundary layer height is in good agreement with the atmospheric boundary layer height provided by the ERA5 data. (2) Laser aerosol radar is suitable for the observation of the convective boundary layer during the day, and the microwave radiometer is suitable for the observation of the stable boundary layer at night. The use of microwave radiometer and wind profiler radar to jointly retrieve the height of the atmospheric boundary layer can improve the performance of a single device during rainfall; (3) The joint inversion of the atmospheric boundary layer height result and the single device inversion of the atmospheric boundary layer height are in line with the diurnal variation of the atmospheric boundary layer; (4) The joint inversion of boundary layer height obtained in this article is compared with the height difference of the atmospheric boundary layer obtained from the sounding data. The standard deviation is 62 m. Compared with the average value of the atmospheric boundary layer height in a certain range provided by the ERA5 data, joint inversion of the boundary layer height can more accurately reflect the atmospheric boundary layer height in a smaller range.

Keywords: ground-based vertical remote sensing; Laser aerosol radar; microwave radiometer; wind profiler radar; joint inversion; atmospheric boundary layer height

## 1 引言

大气边界层(Atmospheric Boundary Layer, ABL) (魏浩等, 2015)是指大气最底层, 靠近地球表面、受地面摩擦阻力影响的大气层区域。地面大气边界层主要由三部分组成: 对流边界层、中性边界层和稳定边界层。对流边界层又叫做对流混合层, 层中存在着由向上的湍流热量通量造成的强烈垂直混合, 常形成混合层(徐祥德等, 2014); 中性边界层是指含有原先混合层空气的残余层, 通常出现在日落前半小时, 湍流在混合层中衰减形成的空气层, 属于中性层; 稳定边界层是夜间地表冷却导致边界层由下向上形成的逆温层。通常情况下, 大气边界层的变化范围在 2 km 以下(Stull, 1988), 随着人类活动范围的扩大, 大气边界层的变化范围可达 4 km 或 4 km 以上。

大气边界层高度是大气数值模式和大气环境评价的重要物理参数之一。对天气预报的诊断分析, 城市污染物的监控有相当重要的作用。通过探测边界层高度可以很好的监测雾霾等环境污染。大气边界层高度(Atmospheric Boundary Layer Height, ABLH)通常采用无线电探

空仪探测的气象要素垂直廓线,基于热力学基础的位温梯度法反演得到(Liu and Liang, 2010; 师宇等, 2019; 刘思波等, 2015)。虽然探空数据的探测时间相对固定,数据的准确性和可靠性相对较高,但是一天只有 2 至 4 次,时间分辨率低,很难满足大气边界层高度的应用需求。近年来,基于激光雷达、微波辐射计以及风廓线雷达等新型遥感反演大气边界层高度的方法越来越多,对推进新型遥感设备在业务中的应用,提高中小尺度灾害监测、提升雾霾监测技术以及分析天气发生演变过程的能力和水平有重大意义。赵玲等(2010)将微波辐射计资料 and 同时时间段的探空资料进行对比,发现温湿资料总体趋势相近,可用于反演大气边界层高度。张歌(2015)基于 MP-3000A 微波辐射计资料用气块法、位温法、比湿法计算大气边界层高度并分析了北京市大气边界层特征及其对大气质量的影响。Angevine et al(1994)提出可以利用风廓线雷达信噪比峰值高度来估计对流边界层的顶部。White et al(1999)提出将梯度法应用于风廓线雷达订正后的信噪比数据中,即求出距离订正后的信噪比在各个高度上的导数,其负导数最大值所在的高度,可以认为是大气边界层高度。魏浩等(2015)将小波变换法运用到风廓线雷达距离订正后信噪比数据来确定大气边界层高度。由于光信号在大气中的传输受到水蒸气 and 气溶胶的影响, Eresmaa et al(2006) and 沈建等(2017)提出使用气溶胶激光雷达将后向散射信号的强度与大气中气溶胶的含量 and 分布联系起来反演大气边界层高度。

根据上述常用反演方法可知,现有方法大多都是使用单一遥感设备观测数据反演大气边界层高度,但在不同时间段,大气边界层的发展特征不同,并且不同的天气、不同单一设备反演得到的大气边界层高度效果参差。因此本文对基于激光雷达、微波辐射计、风廓线雷达联合反演大气边界层高度的方法进行研究,并将反演结果与探空数据、ERA5 数据提供的大气边界层高度作对比,能得到较精确的连续的大气边界层高度。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据简介

利用北京国家综合气象探测试验基地(后文简称为南郊站,经度 39.48 N,纬度 116.28 E,海拔高度 32m)提供的 2021 年 5 月到 2021 年 8 月的无线电探空仪、激光气溶胶雷达(简称激光雷达)、风廓线雷达、微波辐射计资料进行研究。表 2-1 为利用各设备反演大气边界层高度所需要的产品数据及基本信息,其中由于无线电探空仪需要人为施放,因此有固定施放时间。6 月~9 月为汛期,施放时间为 08 时、14 时、20 时;其余月份施放时间为 08 时、20 时。其中使用的 MWP967KV 型地基微波辐射计、L 波段测风雷达、激光雷达的垂直分辨率的信息如表 2-2 所示。

表 2-1 反演大气边界层高度所需产品基本信息

Table 2-1 Basic information of products required to retrieve the altitude of the atmospheric boundary layer

| 遥感设备 | 时间分辨率 | 探测高度范围 | 使用数据 |
|------|-------|--------|------|
|------|-------|--------|------|

|        |                            |             |               |
|--------|----------------------------|-------------|---------------|
| 无线电探空仪 | 6月~9月：6小时/条<br>其余月份：12小时/条 | 20 km 以上    | 温度、气压、风向/风速廓线 |
| 激光雷达   | 1分钟/条                      | 0-8 km      | 后向散射系数廓线      |
| 微波辐射计  | 2分钟/条                      | 0-10 km     | 温度/湿度廓线等      |
| 风廓线雷达  | 6分钟/条                      | 0.15 km-8km | 风向/风速廓线       |

表 2-2 微波辐射计温度廓线、风廓线雷达、激光雷达垂直分辨率

Table 2-2 Vertical resolution of temperature profile of microwave radiometer、wind profiler radar and Lidar

| 设备名称  |         | 各设备垂直分辨率信息 |          |            |            |
|-------|---------|------------|----------|------------|------------|
| 微波辐射计 | 高度范围/m  | 0~500      | 500~2000 | 2000~4000  | 4000~10000 |
|       | 垂直分辨率/m | 25         | 50       | 250        | 500        |
| 风廓线雷达 | 高度范围/m  | 150~3150   |          | 3150~11000 |            |
|       | 垂直分辨率/m | 120        |          | 240        |            |
| 激光雷达  | 发射波长/nm | 532        |          | 1064       |            |
|       | 垂直分辨率/m | 7.5        |          | 15         |            |

选择 3000 m 以下的廓线数据，以风廓线雷达数据时间分辨率为基准，将每 2 分钟一条微波辐射计数据和每 1 分钟一条激光雷达数据处理为每 6 分钟一条数据，对应每条数据代表 6 分钟内所测数据的平均值，用于反演边界层高度。选取欧洲中期天气预报中心(ECMWF)所提供的 ERA5(Hersbach et al, 2020)大气边界层高度再分析资料 (39.8°N, 116.47°E)，与探空数据反演所得大气边界层高度共同作为联合反演大气边界层高度的参考标准。该资料提供的大气边界层高度时间分辨率为 1 小时，对应北京时间的整点时刻。为了与 ERA5 资料匹配，将得到的每 6 分钟一条的边界层高度，按整点时刻抽取为 1 小时一条，与 ERA5 资料所提供的整点时刻的边界层高度一一对应，作为全天候大气边界层高度进行分析。

## 2.2 数据质量控制

由于使用的微波辐射计通过探测氧气密度分布可得到温度廓线，风廓线雷达波长较长，弱降水对其影响较小，而激光雷达受弱降雨影响较大，因此联合反演时，首先区分是否发生降水，较强降水时反演结果不可信。在统计分析边界层高度变化规律时，针对每个时段，使用南郊站测得的小时降雨量数据，以中国气象局给出的 12 h 降雨等级分化表作为标准(科迪，1995)，当 12 h 降雨量大于 15 mm，即平均小时降雨量大于 1.25 mm 时，作为强降水时刻，将此刻数据点进行剔除。此外，本研究基于微波辐射计、风廓线雷达、激光雷达联合反演大气边界层高度，因此当出现某个仪器未开启观测时的数据也一并剔除。最终，剔除 25 天观测设备开启不齐全的数据，获得 2021 年 5 月到 8 月间 98 天数据，按每天 24 小时整点时刻分为非降水、弱降水、强降水三种情况。统计数据样本结果如图 2-1、图 2-2、图 2-3 所示，图中纵坐标 0~20 个统计数量表示 5 月可用的样本总量为 20 天，20~43 个统计数量表示 6 月可用的样本总量为 23 天，43~69 个统计数量表示 7 月可用的样本总量为 26 天，69~98 个统

计数量表示 8 月可用的样本总量为 29 天，三个图中色条分别表示非降水、弱降水、强降水在 5 月~8 月每个时刻对应的样本量。除去 79 个强降水时刻，对 2273 个小时观测数据样本进行分析，其中非降水时刻共 2143 个，弱降雨时刻共 130 个。

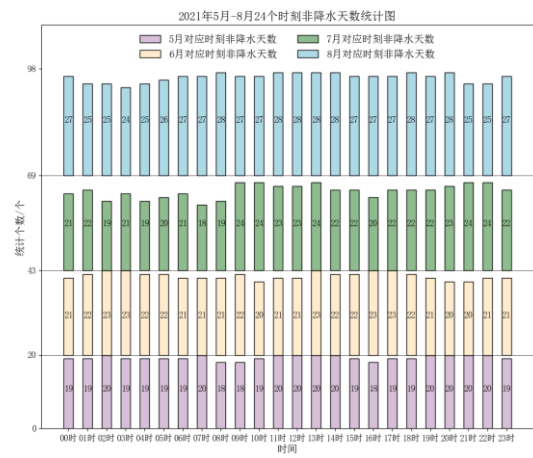


图 2-1 2021 年 5 月-8 月 24 个时刻非降水天数统计图

Fig.2-1 Statistical chart of 24-hour non precipitation days from May to August 2021

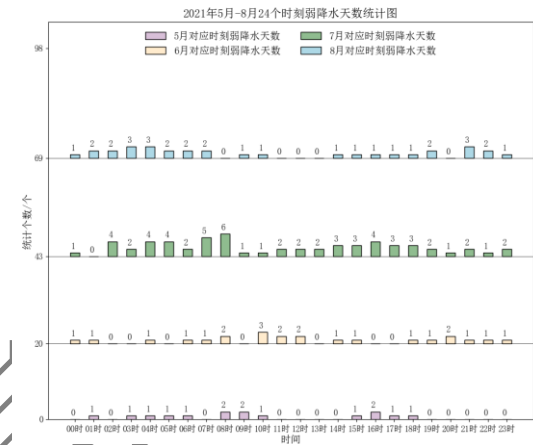


图 2-2 2021 年 5 月-8 月 24 个时刻弱降水天数统计图

Fig.2-1 Statistical chart of 24-hour weak precipitation days from May to August 2021

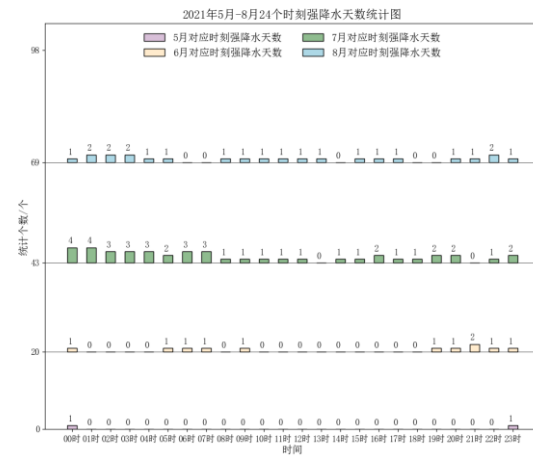


图 2-3 2021 年 5 月-8 月 24 个时刻强降水天数统计图

Fig.2-3 Statistical chart of 24-hour heavy precipitation days from May to August 2021

## 2.3 联合反演方法

基于现有的单设备反演算法存在不足的情况下, 本文对激光雷达、微波辐射计、风廓线雷达三部遥感设备联合反演大气边界层高度的方法进行研究。较弱降雨时采用微波辐射计和风廓线雷达联合反演的理查森数法(Melgarejo and Deardorff, 1974; Vogelezang and Holtslag, 1996); 无降水时, 分成白天和夜间两种情况, 白天主要使用基于激光雷达的梯度法、标准偏差法、小波协方差法; 夜间主要联合微波辐射计使用气块法(Emeis and Türk, 2004)、温度梯度法(Coen et al, 2014)和位温梯度法(刘超等, 2017)。如图 2-4 所示。

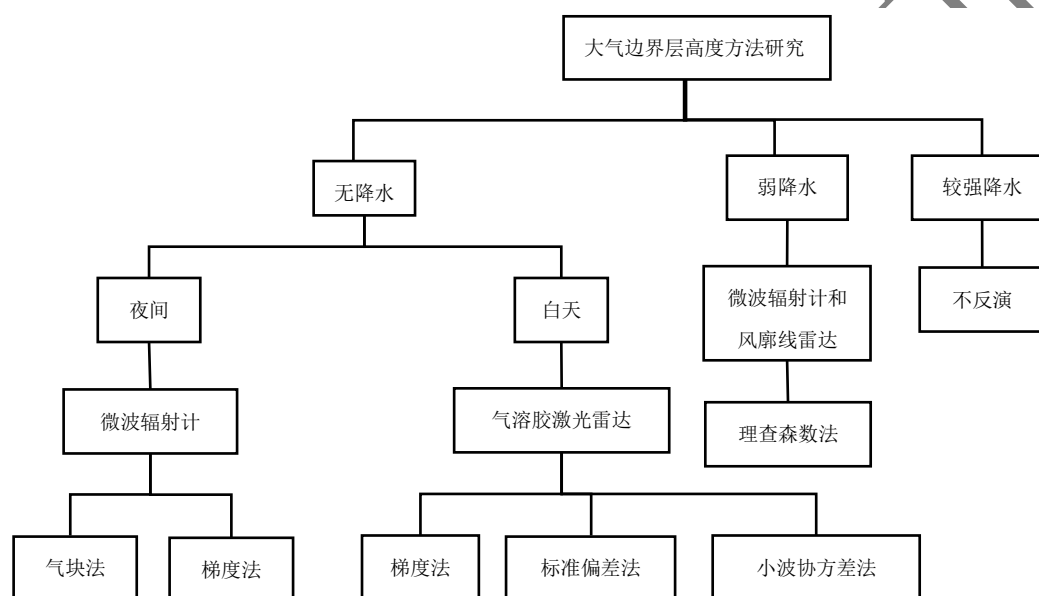


图 2-4 联合反演算法图

Fig.2-4 Joint inversion algorithm diagram

在弱降水时, 采用微波辐射计温度廓线资料和风廓线雷达水平风资料联合反演, 为了平衡降水对反演结果的影响, 使用微波辐射计与风廓线雷达数据, 通过理查森数法联合反演大气边界层高度。理查森数( $Ri$ )超过临界值时的最小高度通常被认为是大气边界层高度。根据 Sorensen et al(1998), 离地高度  $z$  处的理查森数  $Ri$  定义为:

$$Ri(z) = \frac{g(z-z_0)}{\theta(z)} \frac{\theta(z)-\theta(z_0)}{u(z)^2+v(z)^2} \quad (2-1)$$

$g$  是重力加速度 (取 10 或 9.8),  $z_0$  是地面海拔高度,  $\theta(z)$  代表的是在高度  $z$  时的位温,  $\theta(z_0)$  代表地面海拔高度对应的位温;  $T$  指开尔文温度, 从微波辐射计的温度廓线里的温度  $t$  换算得到,  $T = t + 273.15$ ;  $P$  指压强。  $u$  和  $v$  分别代表纬向和经向风分量, 由风廓线雷达提供。将首次  $Ri/Rc > 1$  的高度作为边界层高度, 当  $Ri$  值达到一个临界值时的最低高度选为大气边界层高度。不同地点选取的临界值不同(Richardson et al, 2013)。经对比发现,  $Rc$  取 0.25

时，效果最好。

在无降雨时，由于夜间边界层主要受热量交换为主，湍流输送较弱，微波辐射计能获得温、湿度廓线，适用于夜间稳定边界层(Su et al, 2020)；激光雷达则通过探测气溶胶的光学性质，获取大气颗粒物时空分布信息，而气溶胶积累层对应于白天的对流边界层。针对这一特性，在求取夜间稳定边界层高度时主要使用温度梯度法。温度梯度计算公式如下：

$$dT/dz = 0 \tag{2-2}$$

大气的温度梯度法虽然可应用于估算边界层高度，但当不存在逆温时，温度梯度法将失效，故使用位温梯度法，从地面往上位温梯度最大对应的高度就定为边界层的高度，分母  $z$  为计算梯度步长，取 20m 时，效果较好。计算公式如下：

$$\frac{\theta_{n+1}-\theta_n}{z} \tag{2-3}$$

由于在夜间也会存在少数对流过程，此时使用气块法作为反演夜间边界层高度方法的补充，得到较为精确的夜间稳定边界层，如图 2-5 所示，选取 2021 年 7 月 7 日 14 时探空数据为例，利用气块法得到大气边界层高度。当大气以湍流混合、辐射冷却及与地面土壤间的热量交换为主时，大气中几乎没有对流作用，存在所有高度的位温  $\theta(z)$  均大于地表位温  $\theta(z_0)$  的情况，无法使用气块法判断大气边界层高度，因此将气块法用于夜间反演对流大气边界层高度的补充方法。

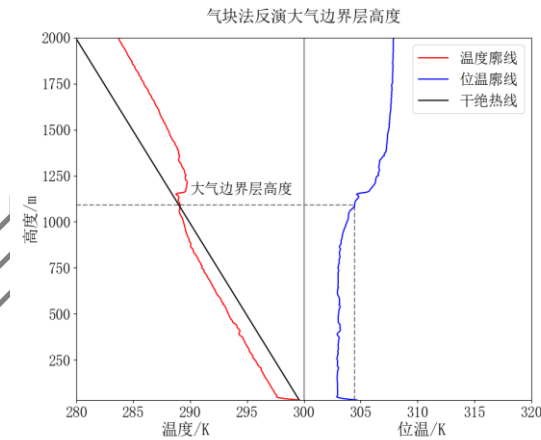


图 2-5 利用 2021 年 7 月 7 日 14 时探空观测到的温度廓线和位温廓线反演得到的大气边界层高度。其中，黑色实线为干绝热线。

Fig.2-5 The atmospheric boundary layer height obtained by inversion of the temperature profile and the potential temperature profile observed by the sounding at 14:00 on July 7, 2021. Among them, the black solid line is the dry insulation line.

在求取白天对流边界层高度时，主要使用基于激光雷达的梯度法，由于标准偏差法与小波协方差法受人为因素影响较大，故这两种方法作为梯度法(He et al, 2006)的补充。当梯度法得到大气边界层高度为异常值，如：存在突变值时，使用标准偏差法(杨富燕等, 2016)与

小波协方差法(Deng et al, 2014; 郭宇等, 2020; Lewis et al, 2013)共同修正, 订正突变值。定义后向散射信号 $b(z)$ 梯度为:

$$Db(z) = \frac{db(z)}{dz} \quad (2-4)$$

根据边界层特质,  $b(z)$ 为后向散射系数衰减最快的高度, 即  $Db(z)$ 取得最小值的高度为边界层高度(狄慧鸽等, 2014)。

根据图 2-4 以及上述方法使用规则, 形成一套基于新型遥感设备多源数据联合反演大气边界层高度的算法。将每日分为 00:00~09:00、09:00~18:00、18:00~23:59“三个时段”。在 00:00~09:00 和 18:00~23:59 两个时段, 使用微波辐射计反演大气边界层高度, 主要使用梯度法找到夜间稳定边界层高度, 并将气块法作为补充, 找到夜间少数对流情况的大气边界层高度; 在 09:00~18:00 这个时段, 主要使用基于激光雷达的梯度法反演大气边界层高度, 将标准偏差法与小波协方差法作为补充, 确保得到完整的日间大气边界层高度; 在弱降雨时使用微波辐射计与风廓线雷达联合反演结果作为大气边界层高度, 提高弱降雨时得到的大气边界层高度的准确性。

### 3 结果分析

#### 3.1 联合反演大气边界层高度结果分析

选取 2021 年 5 月 20 日、2021 年 6 月 28 日、2021 年 7 月 7 日、2021 年 8 月 2 日四个例子具体说明夜间大气边界层高度适用微波辐射计进行反演, 而白天对流边界层适合使用激光雷达进行反演; 在不同天气情况下, 即晴天和多云天的情况下, 同样有效。表 3-1 为选取四个例子的天气情况与空气质量。

表 3-1 选取日期对应天气情况表

Table 3-1 Corresponding weather conditions for selected dates

|      | 2021 年 5 月 20 日 | 2021 年 6 月 28 日 | 2021 年 7 月 7 日 | 2021 年 8 月 2 日 |
|------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
| 天气情况 | 多云              | 阴               | 多云             | 晴              |
| 空气质量 | 优               | 良               | 良              | 优              |

图 3-1 是 2021 年 7 月 7 日与 8 月 2 日使用单设备反演得到的大气边界层结果, 其中 08、14、20 表示探空施放时间; “-”后面的数字代表对应时刻探空数据反演得到的边界层高度, 单位为米(m)。从图中可以看出, 使用微波辐射计反演得到的大气边界层偏低, 这是由于使用微波辐射计温度廓线反演得到热力边界层高度, 而日间边界层主要是对流边界层, 温度廓线无法展现对流变化过程; 使用激光雷达反演得到的大气边界层高度整体偏高, 这是由于通过激光雷达反演得到的主要为物质边界层, 对应白天气溶胶累积量较大, 夜间的大气边界层也偏高。同时与 08 时、14 时、20 时探空数据测得的边界层高度、ERA5 数据提供的大气边界层对比, 证明夜间大气边界层高度适用微波辐射计进行反演, 而白天对流边界层适合使用激光雷达进行反演。

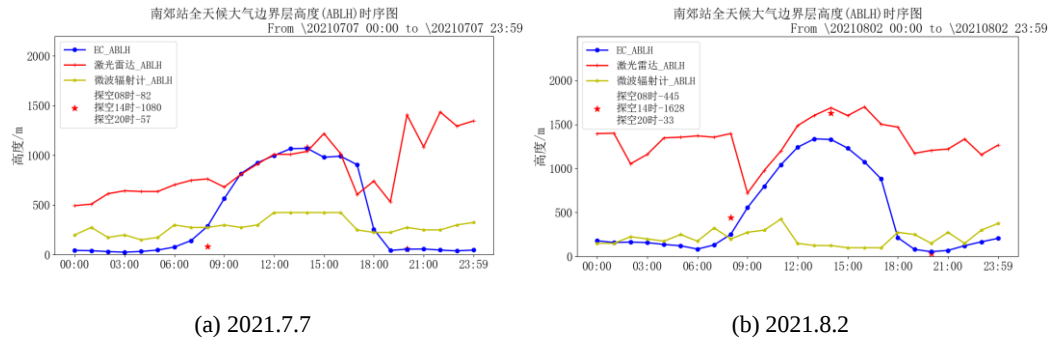


图 3-1 2021.7.7 和 2021.8.2 南郊站使用激光雷达(红色实线)与微波辐射计(黄色实线)反演大气边界层高度与探空 08 时、14 时、20 时(红色五星)、ERA5 提供大气边界层高度(蓝色实线)对比结果。(a)为 2021 年 7.7 结果；(b)为 2021 年 8.2 结果。

Fig.3-1 Comparison of atmospheric boundary layer height inversion using lidar (red solid line) and microwave radiometer (yellow solid line) at Nanjiao Station on 2021.7.7 and 2021.8.2 and the height of the atmospheric boundary layer provided by Sounding data at 08:00, 14:00 and 20:00 (red five stars) and era5 provide atmospheric boundary layer height (blue solid line). (a) is the result of 7.7 in 2021; (b) is the result of 8.2 in 2021.

图 3-2 为四个例子联合反演结果与 ERA5 数据、探空数据对比结果图，从图 3-2(a-b)中可以看出在多云天与晴天但空气质量良好的情况下，北京南郊站大气边界层的变化范围主要在 200 m~2000 m 左右。图 3-2(c-d)空气质量良好时，大气边界层受污染影响，得到大气边界层偏低，变化范围在 30 m~1000 m 之间变化，并且受轻度污染影响，边界层日变化规律有所衰减，但仍然满足夜间较低，多为稳定边界层，日间多为发展的对流边界层，最高大气边界层出现在午后 14 时至 16 时这一日变化规律。

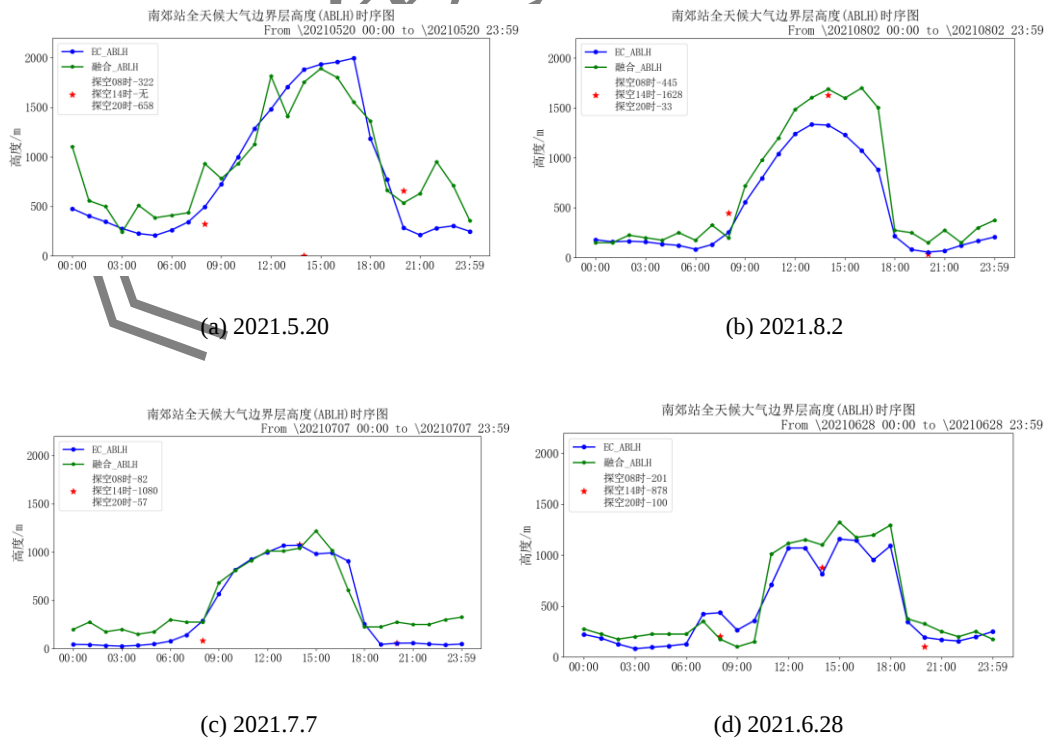


图 3-2 南郊站四个例子联合反演边界层高度与探空数据、ERA5 边界层高度对比结果。(a)为 5.20 结果对比；(b)为 8.2 结果对比；(c)为 7.7 结果对比；(d)为 6.28 结果对比。

Fig.3-2 The four examples of Nanjiao Station jointly invert the boundary layer height, the sounding data, and the comparison result of the ERA5 boundary layer height. (a) is 5.20 result comparison; (b) is 8.2 result comparison; (c) is 7.7 result comparison; (d) is 6.28 result comparison.

挑选 2021 年 5 月 20 日 08 时、20 时；2021 年 6 月 28 日、2021 年 7 月 7 日、2021 年 8 月 2 日 08 时、14 时、20 时反演结果，将联合反演得到边界层高度、EAR5 提供的边界层高度分别与探空反演得到的大气边界层对比，结果如表 3-2 所示，联合反演算法比探空反演结果差值平均结果高 124 m，ERA5 数据结果比探空反演结果差值平均结果低-20 m。联合反演算法结果与探空反演结果差值的标准偏差为 215 m，ERA5 结果与探空反演结果差值的标准偏差为 201 m，与探空反演结果相比，两者都可以表征当前大气边界层高度结果。

表 3-2 联合反演算法、ERA5、探空反演结果对比

Table 3-2 Comparison of joint inversion algorithm, ERA5, and sounding inversion results

| 时间             | 联合反演算法<br>结果/m | ERA5 结果/m | 探空反演结果/m | 联合反演算法结果与<br>探空反演结果差值/m | ERA5 结果与探空<br>反演结果差值/m |
|----------------|----------------|-----------|----------|-------------------------|------------------------|
| 2021.5.20—08 时 | 930            | 495       | 322      | 608                     | 173                    |
| 2021.5.20—20 时 | 535            | 283       | 658      | -123                    | -375                   |
| 2021.6.28—08 时 | 235            | 435       | 201      | 34                      | 234                    |
| 2021.6.28—14 时 | 1095           | 815       | 878      | 217                     | -63                    |
| 2021.6.28—20 时 | 325            | 192       | 100      | 225                     | 92                     |
| 2021.7.7—08 时  | 275            | 287       | 82       | 193                     | 205                    |
| 2021.7.7—14 时  | 1035           | 1070      | 1080     | -45                     | -10                    |
| 2021.7.7—20 时  | 310            | 56        | 57       | 253                     | -1                     |
| 2021.8.2—08 时  | 285            | 253       | 445      | -170                    | -192                   |
| 2021.8.2—14 时  | 1688           | 1328      | 1628     | 60                      | -300                   |
| 2021.8.2—20 时  | 150            | 55        | 33       | 117                     | 22                     |

选取 2021 年 7 月 12 日，除 01 时到 02 时为较强降水情况，此时数据质量较差，不作为分析时段，分析其余时刻为弱降雨的情况，空气质量为优，图 3-3 展示了将经过质控后的微波辐射计与风廓线雷达数据使用理查森数法联合反演得到的边界层高度（图 3-3 中绿色实线）与 ERA5 提供的边界层高度（图 3-3 中蓝色实线）、单独使用激光雷达梯度法（图 3-3 中红色实线）、单独使用微波辐射计位温法（图 3-3 中黄色实线）作对比的结果，弱降雨时，受水汽影响，微波辐射计与激光雷达衰减严重，直接使用得到大气边界层高度误差较大。使用经过质控后的微波辐射计与风廓线雷达基于理查森数法联合反演得到的结果比较原有方法有了改进。

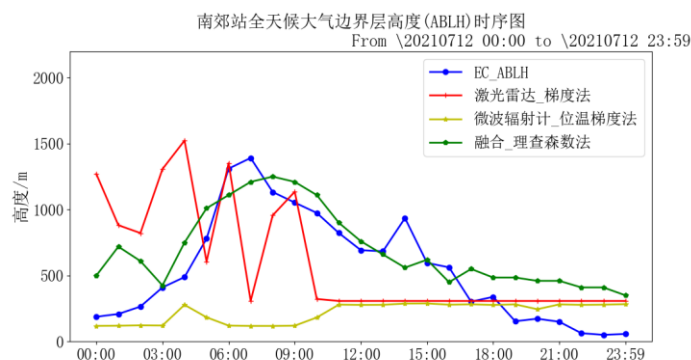


图 3-3 2021 年 7 月 12 日南郊站弱降雨时联合反演算法(绿色实线)与 ERA5 提供大气边界层高度(蓝色实线)、激光雷达(红色实线)、微波辐射计(黄色实线)反演大气边界层高度对比结果图。

Fig.3-3 The joint inversion algorithm (green solid line) and ERA5 provide the atmospheric boundary layer height (blue solid line), lidar (red solid line), microwave radiometer ( yellow solid line) Inversion results of atmospheric boundary layer height comparison.

### 3.2 大气边界层高度特征及日变化规律

使用 2021 年 5 月~2021 年 8 月 31 日的探空数据反演得到的大气边界层高度、ERA5 再分析资料提供的大气边界层高度的平均值来描述大气边界层的日变化特征。以此来验证地基遥感设备联合反演算法的有效性。如图 3-4 所示,是 2021 年 5 月到 8 月的 ERA5 数据、探空数据反演得到 08 时、14 时、20 时大气边界层高度以及联合反演得到的大气边界层高度的平均日变化。选取 08 时、14 时、20 时联合反演结果、探空数据反演结果、ERA5 结果对比看出,08 时联合反演结果比探空反演结果高 95 m,14 时联合反演结果比探空反演结果高 169 m,20 时联合反演结果比探空反演结果高 46 m,总体标准偏差为 62 m。ERA5 数据提供的大气边界层高度与探空反演结果相比,08 时比探空反演结果高 136 m,14 时比探空反演结果高 564 m,20 时比探空反演结果低 110 m,总体标准偏差为 254 m。联合反演大气边界层结果与探空反演结果相关度较高,因此,联合边界层算法得到结果更能体现南郊站的大气边界层变化情况。

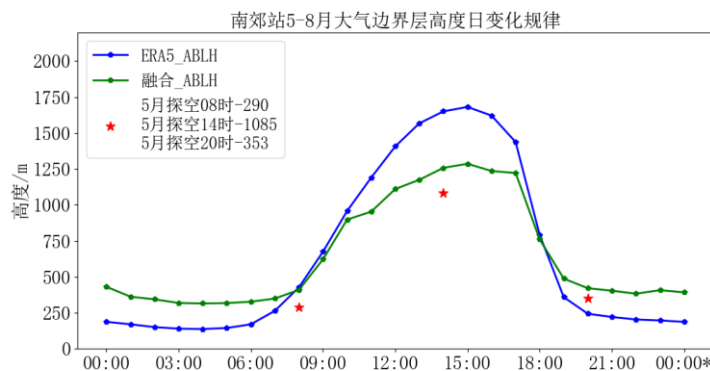


图 3-4 2021 年 5 月~8 月南郊站联合反演边界层算法与探空、ERA5 提供边界层日变化对比图

Fig.3-4 Comparison between the joint inversion boundary layer algorithm of Nanjiao station and the daily

variation of boundary layer provided by radiosonde and era5 from May to August 2021

图 3-5 为 2021 年 5 月~8 月每个月联合算法得到大气边界层高度与探空数据得到大气边界层高度的变化情况。从图 3-5 可以看出 5、6 月份晴天较多，近地面温度较高，向上的湍流热量通量造成的强烈垂直混合，使边界层高度被抬升，在中午时段边界层平均高度接近 2 km，最大高度出现在 14 时和 15 时，分别为 1725 m 和 1545 m。7、8 月份为汛期，降水与多云天气占据大部分时间，7 月晴天大概有 1~2 天，8 月晴天大概有 2~3 天，导致了这两个月日间大气边界层高度与 5、6 月份相比较低，最大高度仅分别为 872 m 和 1301 m，但也同样满足最大高度出现在 14 时与 15 时，符合边界层日变化规律。并且 5 月~7 月联合算法得到的大气边界层高度与探空数据得到的大气边界层高度一致性较好，8 月得到的边界层高度受降水影响，与探空数据得到的大气边界层相比偏差较大，但仍然保持大气边界层的日变化规律。

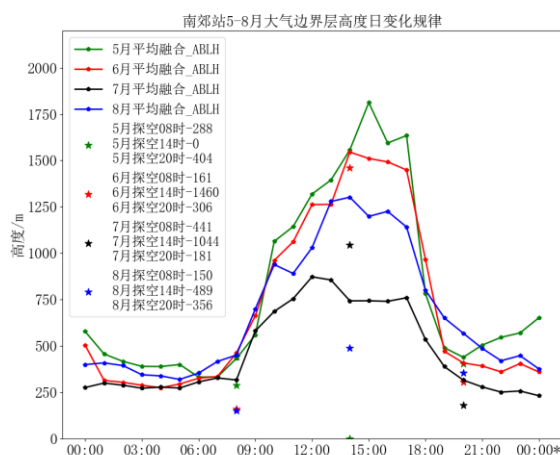


图 3-5 2021 年 5 月~8 月南郊站联合算法与探空得到的大气边界层平均日变化结果对比图。

Fig.3-5 Comparison of the results of the average daily change of the atmospheric boundary layer obtained from the joint algorithm of the Southern Suburb Station and the sounding from May to August 2021.

## 4 结论

利用北京南郊 2021 年 5~2021 年 8 月激光雷达、微波辐射计、风廓线雷达数据和探空数据，针对不同天气条件以及一天内不同时间段下各个地基遥感设备反演的边界层高度的差异，研究多源数据联合反演大气边界层的方法，并与 ERA5 再分析数据提供的结果进行了对比，分析了不同天气情况、边界层不同发展状况下，不同设备对边界层高度的影响。得到以下结论：

(1) 通过比较 2021 年 5 月~2021 年 8 月的联合反演大气边界层高度平均值、ERA5 提供的大气边界层高度平均值、探空 08 时、14 时、20 时三个时刻的大气边界层高度平均值，可以看出，联合反演边界层高度与探空数据、ERA5 数据提供的大气边界层高度反演结果有较好的一致性，且符合边界层的日变化规律。

(2) 由于边界层的发展白天与夜晚不同, 各设备反演大气边界层高度准确性也有所不同。一般情况下, 激光气溶胶雷达适用于白天对流边界层的观测, 微波辐射计适用于夜间稳定边界层的观测。

(3) 针对弱降雨天气, 提出基于微波辐射计与风廓线雷达使用理查森数法联合反演得到大气边界层高度, 对比使用激光雷达、微波辐射计单独反演大气边界层高度结果有所改善。

(4) ERA5 提供大气边界层高度与探空数据反演结果差值的标准偏差为 254 m; 联合反演结果与探空数据反演结果差值的标准偏差为 62 m。相较于 ERA5 数据提供的一定范围内大气边界层高度均值, 本文研究的联合反演边界层高度能更精准的反映更小范围内的大气边界层高度。

## 参考文献

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al, 2020. ERA5 全球再分析产品[J]. 气象科技进展, 10(4): 160. Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al, 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. Adv Meteor Sci Technol, 10(4): 160 (in Chinese). (查阅所有网上资料, 未确认本条文献作者信息, 请联系作者确认)

狄慧鸽, 侯晓龙, 赵虎, 等, 2014. 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, 63(24): 244206. Di H G, Hou X L, Zhao H, et al, 2014. Detections and analyses of aerosol optical properties under different weather conditions using multi-wavelength Mie lidar[J]. Acta Phys Sin, 63(24): 244206 (in Chinese).

郭宇, 黄兴友, 陈浩君, 2020. 风廓线雷达和微波辐射计资料反演边界层高度方法的比较[J]. 中国科技论文, 15(5): 556-562. Guo Y, Huang X Y, Chen H J, 2020. Comparison of the boundary layer height retrieval methods using wind profile radar and microwave radiometer data[J]. China Sci, 15(5): 556-562 (in Chinese).

科迪, 1995. 降雨强度标准划分[J]. 北京水利, (4): 49. Cody, 1995. Standard division of rainfall intensity[J]. Beijing Water Resour, (4): 49 (in Chinese). (查阅所有网上资料, 未找到本条文献英文信息, 请联系作者确认)

刘超, 花丛, 张恒德, 等, 2017. L波段探空雷达秒数据在污染天气边界层分析中的应用[J]. 气象, 43(5): 591-597. Liu C, Hua C, Zhang H D, et al, 2017. Application of L-band radar sounding data in analyzing polluted weather boundary layer[J]. Meteor Mon, 43(5): 591-597 (in Chinese).

刘思波, 何文英, 刘红燕, 等, 2015. 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, 26(5): 626-635. Liu S B, He W Y, Liu H Y, et al, 2015. Retrieval of atmospheric boundary layer height from ground-based microwave radiometer measurements[J]. J Appl Meteor Sci, 26(5): 626-635 (in Chinese).

沈建, 沈利洪, 韩笑, 等, 2017. 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, 45(3): 425-429. Shen J, Shen L H, Han X, et al, 2017. Combined observation of boundary layer using lidar and microwave radiometer in Suzhou[J]. Meteor Sci Technol, 45(3): 425-429 (in Chinese).

师宇, 胡非, 丁伟宸, 等, 2019. 气溶胶激光雷达和无线电探空观测边界层高度的对比分析[J]. 气候与环境研究, 24(5): 650-662. Shi Y, Hu F, Ding W C, et al, 2019. Comparitive analysis of planetary-boundary-layer height based on aerosol lidar and radiosonde[J]. Climatic Environ Res, 24(5): 650-662 (in Chinese).

王坚, 蔡旭晖, 宋宇, 2016. 北京地区日最大边界层高度的气候统计特征[J]. 气候与环境研究, 21(5): 525-532. Wang J, Cai X H,

Song Y, 2016. Daily maximum height of atmospheric boundary layer in Beijing: Climatology and environmental meaning[J]. *Climatic Environ Res*, 21(5): 525-532 (in Chinese).

魏浩, 胡明宝, 艾未华, 2015. 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*, 31(6): 811-820.

Wei H, Hu M B, Ai W H, 2015. The detection of the atmospheric boundary layer height using wind profiler in wavelet transform method[J]. *J Trop Meteor*, 31(6): 811-820 (in Chinese).

徐祥德, 王寅钧, 赵天良, 等, 2014. 高原东南缘大气近地层湍能特征与边界层动力、热力结构相关特征[J]. *气象*, 40(10): 1165-1173.

Xu X D, Wang Y J, Zhao T L, et al, 2014. Relationship between turbulent energy in the near-surface layer and atmospheric boundary layer thermodynamic structure over the southeastern side of Tibetan plateau[J]. *Meteor Mon*, 40(10): 1165-1173 (in Chinese).

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 F Y, Zhang N, Zhu L F, et al, 2016. Comparison of the mixing layer height determination methods using lidar and microwave radiometer[J]. *Plateau Meteor*, 35(4): 1102-1111 (in Chinese).

张歌, 2015. 基于微波辐射观测的大气边界层结构特征及其对大气质量的影响研究[D]. 济南: 山东师范大学. Zhang G, 2015. Analysis of the atmospheric boundary layer structure based on a microwave radiation technique and its influence on air quality[D]. Ji'nan: Shandong Normal University (in Chinese).

赵玲, 马玉芬, 张广兴, 等, 2010. 地基 35 通道微波辐射计观测资料的初步分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 4(1): 56-58.

Zhao L, Ma Y F, Zhang G X, et al, 2010. Analysis of measuring outcomes from Ground-based 35-channel microwave radiometer[J]. *Desert Oasis Meteor*, 4(1): 56-58 (in Chinese).

Angevine W M, White A B, Avery S K, 1994. Boundary-layer depth and entrainment zone characterization with a boundary-layer profiler[J]. *Bound-Layer Meteor*, 68(4): 375-385.

Coen M C, Praz C, Haeefe A, et al, 2014. Determination and climatology of the planetary boundary layer height above the Swiss plateau by in situ and remote sensing measurements as well as by the COSMO-2 model[J]. *Atmos Chem Phys*, 14(23): 13205-13221.

Deng T, Wu D, Deng X J, et al, 2014. A vertical sounding of severe haze process in Guangzhou area[J]. *Sci China Earth Sci*, 57(11): 2650-2656.

Emeis S, Türk M, 2004. Frequency distributions of the mixing height over an urban area from SODAR data[J]. *Meteor Zeits*, 13(5): 361-367.

Eresmaa N, Karppinen A, Joffe S M, et al, 2006. Mixing height determination by ceilometer[J]. *Atmos Chem Phys*, 6(6): 1485-1493.

He Q S, Mao J T, Chen J Y, 2006. Observational and modeling studies of urban atmospheric boundary-layer height and its evolution mechanisms[J]. *Atmos Environ*, 40(6): 1064-1077.

Lewis J R, Welton E J, Molod A M, et al, 2013. Improved boundary layer depth retrievals from MPLNET[J]. *J Geophys Res*, 118(17): 9870-9879.

Liu S Y, Liang X Z, 2010. Observed diurnal cycle climatology of planetary boundary layer height[J]. *J Climate*, 23(21): 5790-5809.

Melgarejo J W, Deardorff J W, 1974. Stability functions for the boundary-layer resistance laws based upon observed boundary-layer heights[J]. *J Atmos Sci*, 31(5): 1324-1333.

---

365 Richardson H, Basu S, Holtslag A A M, 2013. Improving stable boundary-layer height estimation using a stability-dependent critical  
366 bulk richardson number[J]. Bound-Layer Meteor, 148(1): 93-109.

367 Sorensen J H, Rasmussen A, Ellermann T, et al, 1998. Mesoscale influence on long-range transport—evidence from ETEX  
368 modelling and observations[J]. Atmos Enviro, 32(24): 4207-4217.

369 Stull R B, 1988. An Introduction to Boundary Layer Meteorology[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers: 197-250.

370 Su T N, Li Z Q, Kahn R, 2020. A new method to retrieve the diurnal variability of planetary boundary layer height from lidar under  
371 different thermodynamic stability conditions[J]. Remote Sens Environ, 237: 111519.

372 Vogelesang D H P, Holtslag A A M, 1996. Evaluation and model impacts of alternative boundary-layer height formulations[J].  
373 Bound-Layer Meteor, 81(3-4): 245-269.

374 White A B, Senff C J, Banta R M, 1999. A comparison of mixing depths observed by ground-based Wind Profilers and an Airborne  
375 Lidar[J]. J Atmos Ocean Tech, 16(5): 584-590.