

阜阳地区边界层高度的长期变化特征及影响机制

路传彬¹ 戴秋丹² 谢正辉² 陈娟¹ 孙向明³ 张思超¹ 戴铁²

¹ 安徽省阜阳市气象局, 阜阳, 236000

² 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG), 北京 100029

³ 新加坡国立大学, 新加坡 119077

摘要 阜阳市是人口和粮食大市, 城镇化进程的加快引起的气候和环境问题急需关注, 研究气候变化引起的阜阳长期边界层结构和气象条件变化特征具有重要意义。我们利用安徽省阜阳市常规气象观测数据和阜阳探空站 2010—2019 年间的 L 波段高分辨率探空观测资料以及 ERA5 再分析资料, 采用总体理查森数方法计算了行星边界层高度 (PBLH), 对比分析了阜阳地区 PBLH 的长期变化特征; 并分析了多年月平均、季节和年际尺度的 PBLH 与 10 m 风速、近地面气温、相对湿度、大气压等气象影响因子的关系, 及观测和 ERA5 PBLH 差异的原因。结果表明: 阜阳 08:00 和 20:00 探空观测的 PBLH 全年均小于 500 m, 这是由于太阳辐射在这两个时段比较弱, 边界层没有充分发展或正在向夜间稳定边界层过渡。20:00 的 PBLH 高于 08:00 的, 是由于 20:00 气压低、温度高和相对湿度小共同造成边界层抬升更高, 超过风速低造成的降低影响。PBLH 有显著的季节变化, 夏季>春季>冬季>秋季。ERA5 的 PBLH 与探空观测的季节变化特征大致相同。08:00 ERA5 的 PBLH 比观测总体偏高 23 m, 这是由于 ERA5 风速偏高、温度偏高和气压偏低等原因造成; 20:00 则是 ERA5 的 PBLH 总体偏低 99 m, 其影响因素比较复杂。ERA5 与探空观测的 PBLH 多年月平均相关系数比较高, 在 08:00 和 20:00 分别为 0.91 和 0.74, 因此可以用 ERA5 资料在阜阳站点及东南地区进行 PBLH 长期趋势研究。观测和 ERA5 年平均 PBLH 逐年的波动变化一致, 探空 PBLH 是波动中保持平稳, ERA5 则是在波动中略微下降 (不具有 $p<0.05$ 的统计学意义)。月平均尺度上地表气象因子对 PBLH 有显著影响, 气压和风速的影响都比较大, 温度和湿度的影响次之。探空观测的月平均 PBLH 值与地面气压和相对湿度都呈现显著的负相关关系, 而与地表温度和风速都呈显著正相关关系。08:00 比 20:00 的相关性都更强一些; 年平均 PBLH 值与地面气象要素的关系并不显著, 因此虽然气候变化导致地表温度上升相对湿度增加, 但年平均 PBLH 改变并没有呈现一定趋势。加密观测的结果表明, 探空观测和 ERA5 的 PBLH 都随时间 02:00-20:00 由低逐渐升高再降低, 白天深厚, 夜晚浅薄, 反应了 PBLH 的典型日变化特征。

关键词 L 波段无线电探空 行星/大气边界层高度 阜阳 总体理查森数

文章编号 1006-9895(2023)09-0000-00 中图分类号 P421.1 文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2308.23091

Long-term variation characteristics of planetary boundary layer height and their influencing factors in Fuyang, China

LU Chuanbin¹, DAI Qiudan², XIE Zhenghui², CHEN Juan¹, SUN Xiangming³, ZHANG Sichao¹, and DAI Tie²

¹ Fuyang Meteorology Bureau, Anhui, Fuyang 236000

² State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

³ National University of Singapore, Singapore 119077

Abstract As a city with large population and food supply, Fuyang's rapid urbanization process in recent decades has caused urgent

收稿日期 2023-07-06; 网络预出版日期 2023-00-00

作者简介 路传彬, 男, 1971年出生, 高级工程师, 从事高空气象数据探测及研究工作。E-mail: 2288345@163.com.

通讯作者 戴秋丹, E-mail: dqd@lasg.iap.ac.cn

资助项目 国家重点研发计划 2017YFA0604500, 国家自然科学基金项目 42075162、41575092, 安徽省气象创新专项基金项目 ahqxcx2023-22
Funded by National Key Research and Development Program (Grant 2017YFA0604500) National Natural Science Foundation of China (Grant 42075162 and 41575092) Anhui Provincial Special Project for Meteorology Innovation (Grant ahqxcx2023-22)

attention to its climate and environmental issues. Research on the long-term boundary layer structure and its relationship with meteorological conditions in the context of climate change is of significant importance. By using conventional meteorological observation data from Fuyang, Anhui Province, high-resolution L-band sounding observations from Fuyang sounding station between 2010 and 2019, as well as the ERA5 reanalysis data, we employed the bulk Richardson number method to calculate the planetary boundary layer height (PBLH). The characteristics of the long-term PBLH variations in the Fuyang region were compared and analyzed. The relationships between PBLH and meteorological factors such as 10-m wind speed, near-surface temperature, relative humidity and surface pressure were analyzed at monthly, seasonal, and interannual scales using multi-year data. The discrepancies between the observed PBLH and those from the ERA5 were also examined. The results indicate that the PBLH observed at 08:00 and 20:00 throughout the year in Fuyang remained below 500 m. This was due to the relatively weak solar radiation during these time periods, leading to under-developed boundary layer or transitioning towards nocturnal stable boundary layer conditions. The PBLH at 20:00 was higher than at 08:00, which is attributed to the combined effects of lower pressure, higher temperature, and lower relative humidity in the evening, which led to a higher uplifting of the PBLH and surpassed the effect caused by lower wind speeds. The PBLH exhibited significant seasonal variations regardless of the observation time (8:00 or 20:00), with the order of seasons being summer > spring > winter > autumn. The ERA5-derived PBLH exhibited a generally consistent seasonal variation pattern with the observations. The ERA5 PBLH was 23 m higher than the observed PBLH at 08:00, primarily due to elevated wind speeds, higher temperatures, and lower atmospheric pressure in ERA5. However, at 20:00, the ERA5 PBLH was 99 m lower than the observed PBLH with more complex influencing factors. The multi-year monthly averaged correlation coefficients between ERA5 and observed PBLH were relatively high, with values of 0.91 and 0.74 at 08:00 and 20:00, respectively, indicating the potential of using ERA5 data for long-term trend studies of PBLH in Fuyang and southeastern regions. The fluctuation patterns of observed and ERA5 annual average PBLH showed overall consistency over the years, but there is stable in the data of observed PBLH, while in ERA5, a slightly decreasing trend is demonstrated (not statistically significant at $p < 0.05$). At the monthly average scale, surface meteorological factors significantly influenced PBLH, with atmospheric pressure and wind speed exerting a greater impact compared to temperature and humidity. The multi-year monthly averaged PBLH from ERA5 exhibited a significant negative correlation with surface pressure and a strong positive correlation with surface wind speed. The correlation was stronger at 08:00 compared to 20:00; The relationship between the annual average PBLH value and the ground meteorological elements is not significant, therefore, although climate change leads to an increase in surface temperature and relative humidity, the change of annual average PBLH is statistically not significant. Intensive observations indicated that both observed and ERA5-derived PBLH gradually increased from 02:00 to 20:00, followed by a decrease, reflecting the typical diurnal variation characteristics of boundary layer height, with a deeper boundary layer during the day and a shallower boundary layer at night.

Keywords L-band radiosonde sounding, Planetary/atmospheric boundary layer height, Fuyang, Bulk Richardson number

1 引言

行星边界层高度 (Planetary boundary layer height, PBLH) 用以表征边界层内部湍流垂直混合程度以及自由对流层交换水平 (Bhumralkar, 1976), 是影响大气污染物的传输和扩散的重要参数 (Bei et al. 2017), 同时也是大气模式和空气污染模式的一个重要参数 (张祥等, 2018)。一些研究将 PBLH 变化作为重空气污染形成和演变的关键因素 (Liu et al., 2013; Quan et al., 2014; Tang et al., 2016; Miao and Liu, 2019)。Chen 等 (2022) 对青藏高原污染物跨界传输中 PBLH 的作用进行研究, 得到更高的边界层有利于青藏高原的跨界污染传输, 1980-2018 年间的季风前, PBLH 以 1.8 米/季的速度下降。若城市的空气质量由局部尺度的过程主导, 则污染水平和 PBLH 之间将呈现明显的负相关 (Miao et al., 2021)。

确定 PBLH 的方法有很多, 主要有两类: (1) 基于观测的气象要素廓线分析确定边界层高度, 其中又分为直接观测和遥感观测, 各有优缺点 (Seibert et al., 2000; 张宏晟等, 2020); (2) 通过模式参数化的方法计算边界层高度。WRF 模式中就有几种边界层参数化方法可以计算 PBLH (Xu et al., 2019)。模式计算得

到了广泛的实际应用，但计算得到的 PBLH 需要观测资料的验证（陈炯和王建捷, 2006; 赵世强等, 2012）。

PBLH 与近地表对流活动，地表粗糙度和各种天气现象密切相关（Patil et al., 2013）。PBLH 在单个站点和区域都有很多研究（张强和王胜, 2008; 梁智豪等, 2020; 吴雯璐等, 2023），尤其中国西北地区和高原的 PBLH 的研究居多（韦志刚等, 2010; 赵建华等, 2013; 苏彦入等, 2018）。研究表明高原大气边界层的高度受天气、季节和位置的影响，其高度值通常在 1006~4430 m 之间变动（卢萍等, 2017），但也观测到超过 5000 m 的超高对流边界层，认为与感热通量及其累积相关，加深了对超高对流层 PBLH 的特征及其发展机理的认识（张强等, 2019; 王春晓等, 2023）。

探空数据可以用于研究 PBLH 的性质及其与其它气象变量的关系（Huang et al., 2021）。近年来的研究多通过无线电探空数据结合再分析资料、星载遥感和 WRF 模式模拟的手段（Salmun et al., 2023; 王春晓等, 2023），边界层气象学在研究长时间尺度和区域尺度空间范围 PBLH 的气候学统计特征方面取得新进展。对于区域和单个站点的年变化或年际变化（Slätberg et al. 2022）的研究，对 PBLH 的认识从单个站点短时间尺度逐渐发展到对区域和长时间尺度的认识。赵采玲等（2019）基于探空资料与 ERA-Interim 再分析资料，研究了中国西北地区大气边界层高度变化特征，西北地区 2015-2016 年 PBLH 在冬季为最高。Slätberg 等（2022）利用 ERA5 研究青藏高原长期的 PBLH 时空特征，发现青藏高原中部和西南部的 PBLH 高于西部和东部；在年际时间尺度上，PBLH 与北大西洋涛动在冬季青藏高原西部和东南部、夏季东部和秋季中部呈正相关关系，而在冬季东北部呈负相关。夏季青藏高原中部和西南部的 PBLH 与印度夏季季风呈负相关。张祥等（2018）对北极地区研究，发现 PBLH 与相对湿度呈现负相关。Guo 等（2019）观察到中国 PBLH 的随时间呈增长的变化趋势，发现 PBLH 与相对湿度呈负相关，而与近地表温度呈正相关。Zhang 等（2018）利用 2012-2016 年夏季探空观测资料研究了中国夏季 PBLH 的热力学稳定性，发现中国夏季对流边界层（CBL）占主导地位（70%），有时边界层为中性（NBL, 26%）和稳定边界层（SBL, 4%），CBL 和 NBL 的 PBLH 与近地表温度（湿度）呈正（负）相关，而 SBL 没有明显的关系。夏季西北地区 PBL 高度较高，南北梯度显著。白天的 PBL 高度与近地面相对湿度呈显著负相关，但与近地面温度呈正相关（Zhang 等人, 2013）。

阜阳位于淮河以北，具有以暖温带向北亚热带渐变的过渡带气候特征，旱涝灾害频繁，表现出气候明显的变异性。阜阳地处平原，是粮食生产大市，人口上千万，近年来加快城市化进程（安徽省发展和改革委员会, 2022 年），其气候和环境问题急需关注。随着气候变化引起的长期边界层结构和气象条件变化也缺乏研究。Huo 等（2021）采用阜阳和安庆站的探空资料作为 ERA-interim 再分析资料的 PBLH 的验证，2010-2018 年二者的季节相关系数在 0.65-0.87 之间，由此采用 ERA-interim 再分析资料研究区域 PBLH 的长期趋势。但并没有采用观测资料详细研究阜阳站 PBLH 的趋势及气象因子的影响，也没有和 ERA5 资料进行对比研究。ERA5 再分析资料已被证明可靠性很高，广泛用于区域尺度的气候、环境等研究中（Huang et al., 2021; Slätberg et al. 2022; Urban et al., 2021），经过验证可以用来分析 PBLH 的长期趋势。我们利用淮河流域安徽省阜阳市多年常规气象观测和探空站 2010—2019 年间的 L 波段高分辨率探空观测及 ERA5 再分析资料，采用总体理查森数方法计算了 PBLH，分析了安徽阜阳 10 年间的 PBLH 变化特征，对比观测和 ERA5 再分析资料的结果，并分析了多年月平均和年际尺度的 PBLH 与地表气压（PRS）、近地面（2 m）温度（Ts）、10 m 风速（WS）和 2 m 相对湿度（RH）的关系。本研究对阜阳地区陆气相互作用和污染扩散的研究提供基础。

2 资料和方法

2.1 观测资料

本文采用中国气象局阜阳探空站（32.9°N，115.83°E，31 m）2010 至 2019 年 L 波段高分辨率（1.2s）无线电探空资料，包括每日 00:00UTC（北京时 08:00）和 12:00UTC（北京时 20:00）的观测以及夏季（6-8 月）和秋季（9-10 月）增加的每日 06:00UTC（北京时 14:00）和 18:00UTC（北京时 02:00）的加密观测。资料经过质量控制用于计算边界层高度。探空资料同时包含了一些气象要素的观测值，如气压、风速、水汽压、位势高度、位温、地理高度、地面相对湿度和地面气温等。

地面常规资料包括每日北京时 02:00、08:00、14:00 和 20:00 时的地面气压、地面 2 m 气温、10 m 风速和地面相对湿度等要素的观测数据。

2.2 再分析资料

ERA5 再分析资料是欧洲中期天气预报中心（ECMWF，简称欧洲中心）发布的第 5 套再分析资料，由欧洲中心的全球预报系统生成，模式垂直层数达 137 层，模式层顶为 0.01 hPa，空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，时间分辨率为 1 h。本文采用 ERA5 资料提取的变量包括 PBLH，气压、2 m 气温、10 m 纬向、经向风和 2 m 露点温度，采用双线性插值法插值到本站点（赵天保等 2004），时间的选取与探空资料对应一致。

ERA5 的 10 m 风速由 u、v 风合成得到；ERA5 的相对湿度（RH）根据环境温度和露点温度参数由 August-Roche-Magnus 关系计算得出：

$$RH = 100\% \times \frac{e^{\frac{aT_d}{b+T_d}}}{e^{\frac{aT}{b+T}}} \quad (1)$$

这里 a 和 b 为常数，分别为 17.625 和 243.04， T_d 和 T 分别为 ERA5 资料的 2 m 露点温度和 2 m 气温，单位由 K 转变为 $^\circ\text{C}$ 。

2.3 PBLH 计算方法和统计分析

PBLH 的计算方法有很多（张祥等，2018；张宏昇等，2020），有总体理查森法、逆温法、位温梯度法等。本文采用总体理查森数方法（BRN）来计算 PBLH，Seidel 等（2012）对 10 种计算 PBLH 的方法进行了对比研究，得出 BRN 法既可以准确判断出夜晚稳定边界层高度，又能够准确指出白天对流边界层高度，是无线电探空仪、模型和再分析数据定义 PBLH 的最广泛采用的方法之一（Wang et al., 2022），比较适用于较大数据集的气候学研究分析（Guo et al., 2016；张祥等，2018）。

无线电探空仪的 PBLH 计算为 R_i 达到临界值的高度，例如 $R_{ic} = 0.25$ 。 R_i 是与浮力相关的湍流和与风剪切相关的湍流的比值，公式如下：

$$R_i(z) = \frac{(g/\theta_{vs})(\theta_{vz} - \theta_{vs})(z - z_s)}{(u_z - u_s)^2 + (v_z - v_s)^2} \quad (2)$$

其中 z 是高度， $R_i(z)$ 为高度 z 至地面之间的总体理查森数，下标 s 表示地表（或模型或再分析数据中地表以上第一个模式层的高度），g 是重力加速度， θ_v 是虚位温，u 和 v 是纬向和经向分量风速。其中虚位温 θ_v 不是直接探测量，我们通过资料中的位温 θ 、气压 P 和水汽压 e 计算：

$$\theta_v = \theta \left(1 + 0.61 \times \frac{0.622e}{P - e} \right) \quad (3)$$

由于无线电探空观测中没有观测到地表，因此地表相关项由无线电探空最低层的观测值代替和计算。

计算出 R_i 数后，从地面向上扫描 R_i 廓线，找到第一层 R_i 大于等于临界值的高度层，将这层与其相邻的较低的高度层进行线性插值，从而估算出 R_i 为临界值时的高度即为大气边界层高度（Seidel et al., 2012）。

ERA5 再分析资料的 PBLH 诊断方法为理查森数 (R_i) 达到临界值 0.25 时边界层的最低高度 (Seidel et al., 2012; Vogelezang 和 Holtslag, 1996)。

本文采用线性相关系数 (R) 和均方根误差 (RMSE) 进行相关性分析，对比探空观测和 ERA5 的 PBLH，及探讨气象因素对 PBLH 的影响。

3 结果与讨论

3.1 阜阳 PBLH 变化特征

1) PBLH 总的变化特征

图 1 给出了 2010–2019 年阜阳地区探空观测的 PBLH (PBLH_OBS) 和 ERA5 的 PBLH (PBLH_ERA5) 在 08:00 (北

京时，下同)和 20:00 的频率分布 (1a-b)，以及在加密时次 02:00 和 14:00 的频率分布 (1c-d)。从图 1a-b 中可以看出，在 08:00，PBLH_OBS 和 PBLH_ERA5 曲线相近，基本都低于 1000 m，平均值分别为 259 m 和 281 m，二者差别很小，PBLH_ERA5 偏高约 22 m，差别主要发生在 200 m 以下。但 PBLH_OBS 最高达 4436 m，而 ERA5 最高为 1460 m。二者都是在 200 m 分布概率较大，累积频率分布更接近 (图 1b)。

在 20:00，PBLH_OBS 和 PBLH_ERA5 也基本在 1000 m 以下，与 08:00 不同的是，相对于 PBLH_OBS，PBLH_ERA 整体偏低 (图 4b)，平均值 (206 m) 偏低约 100 m。二者都是在 100 m 分布概率较大。在 300 m 以下，PBLH_ERA5 概率大于 PBLH_OBS；在 300 m 以上，PBLH_OBS 频率分布更大。PBLH_OBS 在 08:00 低于 20:00，这与 Guo 等 (2016) 在区域上的结果一致。PBLH_ERA5 却在 08:00 较高。

阜阳探空在 02:00 和 14:00 的加密探空数据主要是夏季 6-8 月，2019 年在秋季 9-10 月也有，但数据量都比较少。为了比较，ERA5 的 PBLH 也取的同样的日期。由图 1c-d 可以看到，在 02:00，PBLH_OBS 和 PBLH_ERA5 都低于 1000 m，平均值分别为 266 m 和 211 m，PBLH_OBS 的概率在 400 m 以下比 ERA5 的小，而在 400 m 以上高一些，平均值比 ERA5 高 56 m。在 14:00，PBLH_OBS 和 PBLH_ERA5 的概率分布与前面的时次有很大不同，概率分布较大的区域不是发生在低空，而是呈正态分布发生在 1000 m 左右的高空。这是因为 14:00 边界层充分发展为对流边界层，PBLH 达到四个时次的最高点。PBLH_OBS 和 PBLH_ERA5 的平均值分别为 992 和 1116 m。

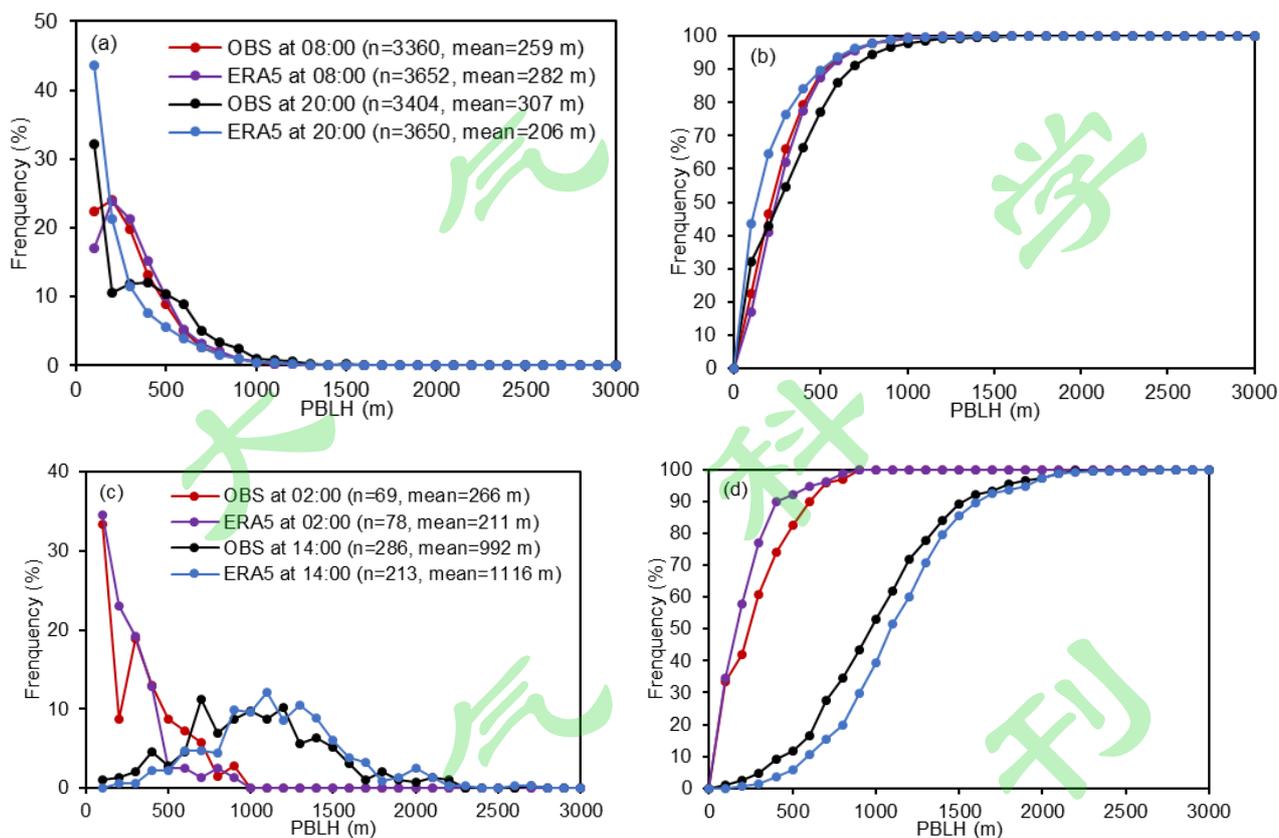


图 1 PBLH_OBS 和 PBLH_ERA5 在 2010-2019 年 (a, b) 整个期间 08:00 和 20:00 以及 (c, d) 夏秋季 02:00 和 14:00 的频率分布 (左) 和累积频率分布 (右)。n 为探测次数; mean 为平均值。

Fig. 1 Frequency distribution (left) and cumulative frequency distribution (right) of PBLH_OBS and PBLH_ERA5 at (a,b) 02:00 and 08:00 during the whole period and (c,d) 14:00 and 20:00 at the summer-autumn time from 2010 to 2019. n is the number of soundings; mean is the value at each observed time.

2) PBLH 季节变化特征

图 2 为观测与 ERA5 的月平均 PBLH (PBLH_OBS 和 PBLH_ERA5) 对比，可以看到阜阳无线电探空仪站

点 PBLH_OBS 与 PBLH_ERA5 之间的相关比较高, 08:00 和 20:00 相关系数分别为 0.79 和 0.69, RMSD 分别为 55 m 和 118 m, 08:00 的 PBLH_ERA5 略微偏高(图 2a), 20:00 PBLH_ERA5 偏低(图 2b)。表 1 也给出了多年月平均和年平均尺度上 PBLH_OBS 和 PBLH_ERA5 以及地表观测和 ERA5 的相应气象变量之间的相关关系。可以看到 PBLH_OBS 和 PBLH_ERA5 的相关都很显著, 多年月平均相关系数在 08:00 和 20:00 分别达 0.91 和 0.74。08:00 的相关系数普遍高于 20:00 (年平均尺度除外), 都有在 08:00 的 PBLH_ERA5 略微偏高, 20:00 PBLH_ERA5 偏低的关系。ERA5 地面气象要素与观测相比, 在 08:00 和 20:00 都一致性地表现为 ERA5 的 PRS 偏低, Ts 偏高, WS 偏大, 以及 RH 偏小。

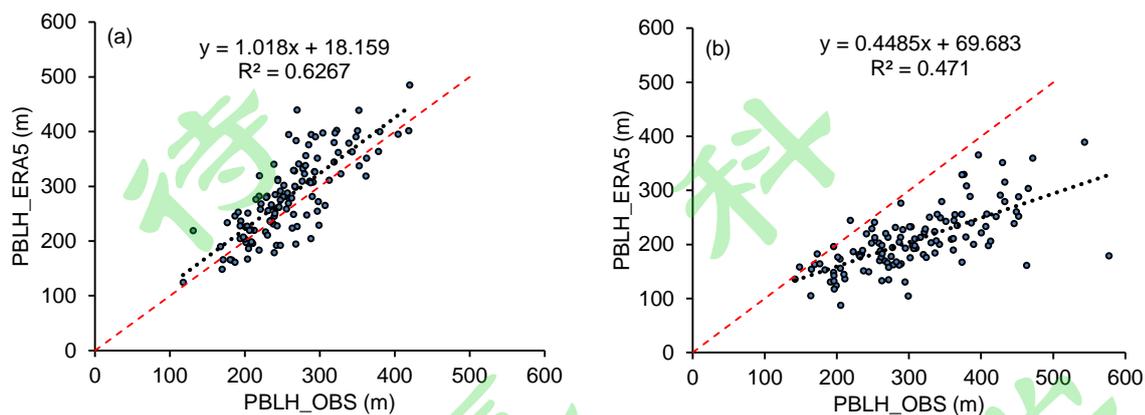


图 2 月平均探空观测的边界层高度(PBLH_OBS)与 ERA5 资料的边界层高度(PBLH_ERA5)在(a) 08:00 和(b) 20:00 的对比
Fig.2 Comparison of the monthly mean radiosonde PBLH (PBLH_OBS) with PBLH of ERA5 data (PBLH_ERA5) at (a) 08:00 and (b) 20:00

表 1 2010-2019 年探空 PBLH 和地面观测气象要素 (地面气压、2 m 气温、相对湿度和 10 m 风速) 与 ERA5 相应变量之间的相关系数 (R), 平均绝对值误差(MAE) 和均方根误差 (RMSE)

Table 1. The correlation coefficients and root-mean-square-error between the observations (radiosonde PBLH and surface meteorological factors including surface pressure, 2 m air temperature, relative humidity and 10 m wind speed) and ERA5 PBLH and meteorological variables at Fuyang from 2010 to 2019

		PBLH/m	地面气压/hPa	2 m气温/°C	相对湿度/%	10 m风速/m s ⁻¹	
多年月平均	08:00	R	0.91*	1.00*	1.00*	0.98*	0.63*
		MAE	23	-0.23	0.25	-1.40	0.36
		RMSE	40	0.27	0.27	1.77	0.41
	20:00	R	0.74*	1.00*	1.00*	0.95*	0.67*
		MAE	-99	-0.29	0.46	-2.73	0.59
		RMSE	106	0.34	0.50	3.18	0.60
年平均	08:00	R	0.51	0.80*	0.95*	0.96*	0.74*
		MAE	23	-0.22	0.25	-1.40	0.36
		RMSE	27	0.33	0.34	2.46	0.37
	20:00	R	0.54	0.82*	0.93*	0.97*	0.76*
		MAE	-99	-0.29	0.46	-2.73	0.59
		RMSE	101	0.37	0.49	4.06	0.59

注: *表示具有统计学意义 (P < 0.05)。

图 3 给出的是阜阳站 PBLH 的季节变化, 图 3a 为 08:00, 2b 为 20:00 PBLH_OBS 和 PBLH_ERA5。08:00 探空观测的 PBLH 全年均小于 500 m, 这是由于太阳辐射在这个时段还比较弱, 边界层没有充分发展。PBLH 有显著的季节变化 (图 3a), 即夏季(291 m) > 春季 (281 m) > 冬季(235 m) > 秋季(227 m)。夏季 PBLH 最高, 秋季最低, 这是因为中国南方夏季的辐射比较强 (Guo et al., 2016; 戴秋丹等, 2021), 但夏季比秋季的 PBLH 仅高出 64 m。ERA5 的 PBLH 与观测的季节变化特征大致相同, 最低在冬季, ERA5 的 PBLH 总体稍高一些 (冬季略低)。观测和 ERA5 的最大值分别出现在 7 月(375 m)和 6 月 (314 m), 最小值都出现在 1 月, 分别为 216 m 和 185 m。

20:00 探空 PBLH 的季节变化规律与 08:00 一致(图 3b), 也是夏季 (352 m) > 春季 (343 m) > 冬季 (293 m) > 秋季 (233 m)。ERA5 也是这样的季节变化规律, 与 08:00 不同的是, 20:00 ERA5 PBLH 明显偏低。观测和 ERA5 的最大值分别出现在 6 月(385 m)和 8 月 (238 m), 最小值分别出现在 10 月 (212 m) 和 12 月 (174 m)。20:00 探空夏季比秋季的 PBLH 高 119 m, 比 08:00 的差距大 (图 3a, 3b), 这是因为受经纬度的影响 20:00 的太阳辐射在夏季和秋季比在 08:00 变化更大。

无论 08:00 还是 20:00, 阜阳站观测的 PBLH 在夏季最高, 秋季最低, 季节变化规律都是夏季 > 春季 > 冬季 > 秋季, 这与 Guo 等人 (2016) 发现 2011-2015 年中国春季和夏季的 PBLH 普遍高于秋季和冬季的结论一致。20:00 观测的 PBLH 比 08:00 的高, 与 Guo 等人 (2016) 的结果也是一致的, 这是由于 20:00 PRS 低、Ts 高和 RH 小共同造成边界层抬升更高, 超过 WS 低造成的降低影响。但 ERA5 稍有不同, 20:00 的 PBLH 比 08:00 的值低。形成的原因复杂, 需要进一步探究。ERA5 的 PBLH 季节变化规律与观测大致相同 (08:00 冬季最小), 08:00 ERA5 的 PBLH 比观测总体偏高 22 m (冬季除外), 20:00 则是 ERA5 的 PBLH 比观测的偏低, 总体偏低 99 m。

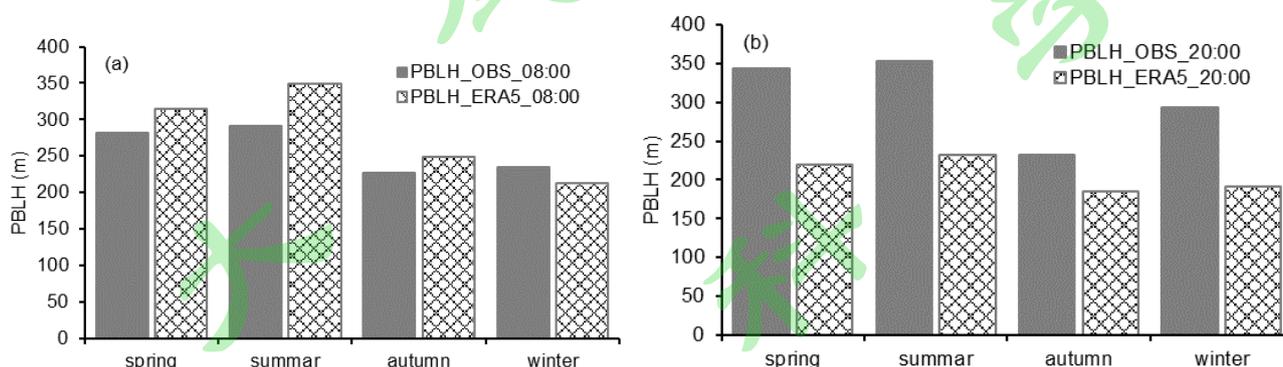


图 3 PBLH_OBS 和 PBLH_ERA5 在 (a) 08:00 和 (b) 20:00 的季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of PBLH_OBS and PBLH_ERA5 at Beijing time (a) 08:00 and (b) 20:00.

3) PBLH 年际变化特征

阜阳的大气边界层高度有显著的季节变化, 但其年际变化不是很显著。图 4 给出的是边界层高度年际变化趋势特征, 可以看到观测和 ERA5 年平均边界层高度逐年增减的变化是一致的。在 08:00, 观测和 ERA5 都是在 2013 年达到最高, 分别为 284 m 和 317 m。在 20:00, ERA5 的边界层高度值也达到最高, 为 242 m, 随后减小。而观测的 PBLH 在 2013 年达到一个小高峰, 随后在 2018 年达到最高。与多年月平均的结果类似, ERA5 的 PBLH 在 08:00 比观测的高, 但在 20:00 比观测的低。

观测和 ERA5 年平均边界层高度逐年的波动变化一致, 其总体的年际变化趋势也大致相同, 无论是 08:00 还是 20:00, 2010-2019 年间观测的 PBLH 都是波动中保持平稳, ERA5 的 PBLH 在波动中略有下降 (不具有 $p < 0.05$ 的统计意义)。

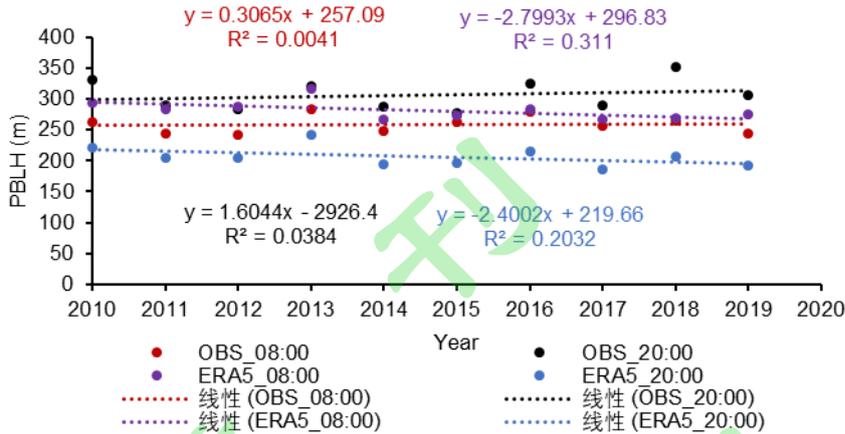


图 4 年平均的探空和 ERA5 PBLH 年际变化

Fig. 4 Interannual variability of annual mean radiosonde and ERA5 PBLH

3.2 探空加密的边界层高度

1) 探空和 ERA5 PBLH 对比

图 5 给出的是 2010-2019 年探空加密观测的 02:00 和 14:00 时段 PBLH 和 ERA5 的结果对比，可以看到二者之间的相关度较高，相关系数为 0.77，RMSD 为 493 m，ERA5 的值比探空实测偏低。其中 02:00 和 14:00 时段的相关系数分别为 0.81 和 0.62，RMSD 分别为 150 m 和 544 m。白天 14:00 大气对流发展旺盛，PBLH 较高，探空观测可以达到 2665 m，发生在 2015 年 6 月 11 日，晚上 02:00 为夜间稳定边界层，最高 PBLH 为 891 m，发生在 2015 年 8 月 10 日。

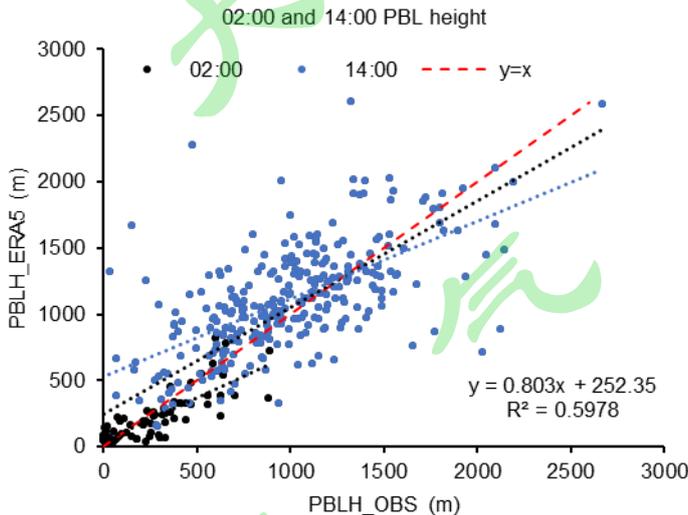


图 5 加密探空观测的 2 个时段(02:00 和 14:00)边界层高度与 ERA5 的边界层高度比较

Fig. 5 Comparison of radiosonde observation PBLH (PBLH_OBS and ERA5 PBLH (PBLH_ERA5) at 02:00 and 14:00

2) PBLH 的日变化特征

加密探空的资料在 02:00 比较少，我们选择每日连续探空时间（02: 00、08: 00、14: 00 和 20: 00）的

资料分析 PBLH 的日变化特征。便于对比, ERA5 也取了同样的时次。由图 6 可以看到, 探空观测和 ERA5 的 PBLH 都随时间由低逐渐升高再降低, 白天深厚, 夜晚浅薄, 反应了边界层高度的典型日变化特征 (Stull, 1991; Suarez et al., 1983)。探空观测的 PBLH 值在 02:00 为 278 m, 捕获的是夜间浅薄的边界层, 由于夜间辐射冷却使近地面层变得稳定。早晨 (08:00) 随着太阳辐射的增强, PBL 经历了向对流 PBL 的过渡, PBLH_OBS 增长到 303 m; 地表感热加热导致白天边界层呈现对流不稳定状态, 对流发展促成了深厚边界层的形成, 到下午 (14:00) 辐射强烈的时间 PBLH 达到峰值, 平均值为 905.48 m; 随着时间的推移辐射减弱, 白天对流边界层向夜间稳定边界层过渡, 20:00 的探测提供了有关过渡状态的信息 (Guo et al., 2016), 平均值为 336 m。下一个 02:00 又到达另一个夜间边界层。ERA5 的 PBLH 随时间的日变化与此相似, 02:00 至 20:00 的四个时次平均 PBLH 值分别为 226, 326, 968 和 260 m。晚上 PBLH_ERA5 的值都低于 PBLH_OBS, 白天高于 PBLH_OBS。PBLH_OBS 的值在四个时次的大小排列为 02:00<08:00<20:00<14:00, 与 Guo 等 (2016 年) 夏季气候平均 PBLH 的变化规律一样。ERA5 稍有不同, 与前面的结果一样也是 20:00 比 08:00 的值低。

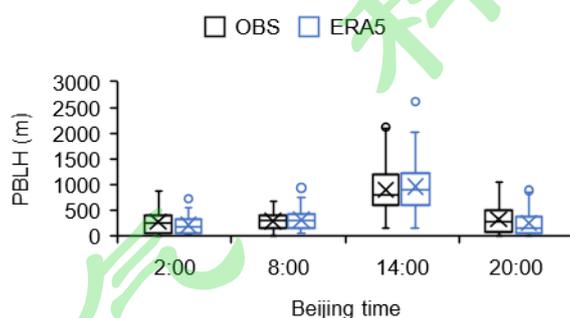


图6 加密探空观测和ERA5的每天连续4次 (02:00, 08:00, 14:00和20:00) 的PBLH盒须图。叉号表示PBLH平均值。

Fig.6 PBLH box-and-whisker plot of 4 times a day (02:00, 08:00, 14:00 and 20:00) for encrypted sounding observations and ERA5 in the summer and autumn during the study period. The cross in each box indicates the mean value of BLHs.

3.3 PBLH 的气象影响

1) 多年月平均的 PBLH 与气象因子的关系

PBLH 的变化受多个气象因子的影响, 很多研究分析了它们的关系 (吴雯璐等, 2023; Guo et al., 2016), 这里我们给出 PBLH 与地表气象变量如 PRS、Ts 和 RH, 以及 WS 的相关分析(图 7)。总的来说, 多年月平均 PBLH 观测值与 PRS 和 RH 都呈现显著的负相关关系, 而与 Ts 和 WS 都呈显著正相关关系。按照相关系数的大小 (表 2), 各气象因子对 PBLH 的影响大小为 PRS>WS>Ts>RH。08:00 比 20:00 的相关性都更强一些。PBLH 与气象因子的最大相关系数为-0.79, 是 08:00PBLH 与 PRS 的关系。最弱亦达到-0.18, 为 20:00 与相对湿度的相关系数。ERA5 的多年月平均 PBLH 与其相应的气象因子的关系比较复杂一些, 但也是与 PRS 呈最显著负相关, 与 Ts 呈强的正相关, 与相对湿度的关系也比较显著, 但在 20:00 出现正的相关, 而与风速的关系很弱。各气象因子对 ERA5 PBLH 的影响大小为 PRS>Ts>RH>WS。08:00 比 20:00 的相关性普遍更强一些 (相对湿度相反)。

具体来说, 08:00 多年月平均 PBLH 观测值的变化与 Ts 及 WS 的变化都呈现较好的正相关关系 (图 7, 表 2), 相关系数分别为 0.63 和 0.72, 与 PRS 呈现最强的负相关, 相关系数为-0.79, 与 RH 的变化也呈负相关, 但相关系数最小, 为-0.29。20:00PBLH 与 Ts、WS、PRS 和 RH 都比 08:00 的相关弱一些, 相关系数分别为 0.36,0.48,-0.56 和-0.17。

多年月平均 ERA5 的 PBLH 和 PRS 呈现比观测更强的负相关, 相关系数在 08:00 高达-0.92。ERA5 PBLH 与 Ts 也呈强的正相关, 相关系数在 08:00 和 20:00 分别为 0.85 和 0.60。与 RH 的相关性较弱, 在 08:00 为

负相关，系数为-0.15，但在 20:00 为正，相关系数为 0.19，主要是 PBLH 异常偏低造成（图 7h），ERA5 RH 在 4-6 月偏小；ERA5 PBLH 与 WS 相关较差，相关系数在 08:00 和 20:00 仅为-0.09 和 0.02,其中的主要原因之一是 ERA5 的风速在春季和秋季偏大（图 7e,7f），ERA5 风速比站点观测偏大，这与其他研究的发现一致（戴秋丹等，2023）。

为便于对比，表2也给出了瞬时和月平均的PBLH与各气象因子的相关系数，可以看到PBLH与WS相关显著。从季节上来看，总的来说夏季PBLH与气象因子的相关性强(表3)，观测最小为-0.55，ERA5最小为-0.59，与PRS和RH呈负相关，与Ts和WS呈正相关。春季和夏季PBLH与风速呈显著正相关。

表 2 探空观测的 PBLH 与地面观测气象因子的相关系数(R)，以及 ERA5 资料的 PBLH 与气象因子的相关系数

Table 2. The correlation coefficients (R) between the radiosonde PBLH and meteorological variables (surface pressure, 2 m temperature, relative humidity and 10 m WS) and ERA5 PBLH and ERA5 meteorological variables at Fuyang from 2010 to 2019

			地面气压/hPa	2 m温度/°C	相对湿度/%	10 m风速/m s ⁻¹
多年月平均	08:00	ERA5	-0.92*	0.85*	-0.15	-0.09
		OBS	-0.79*	0.63*	-0.29*	0.72*
	20:00	ERA5	-0.73*	0.60*	0.19*	0.02
		OBS	-0.54*	0.34*	-0.18*	0.53*
年平均	08:00	ERA5	-0.70*	-0.22	-0.59	0.92*
		OBS	-0.43	0.17	0.19	0.28
	20:00	ERA5	-0.73*	0.05	-0.28	0.92*
		OBS	-0.62	0.46	-0.15	0.70*
瞬时	08:00	ERA5	-0.23*	0.26*	-0.16*	0.74*
		OBS	-0.08*	0.09*	-0.15*	0.56*
	20:00	ERA5	-0.07*	0.04*	0.09*	0.78*
		OBS	-0.06*	0.05*	-0.12*	0.57*
月平均	08:00	ERA5	-0.73*	0.66*	-0.11	0.35
		OBS	-0.45	0.34	-0.02	0.66*
	20:00	ERA5	-0.34	0.22	0.10	0.60*
		OBS	-0.33	0.19	-0.08	0.57

注：*表示具有统计学意义（P < 0.05）。

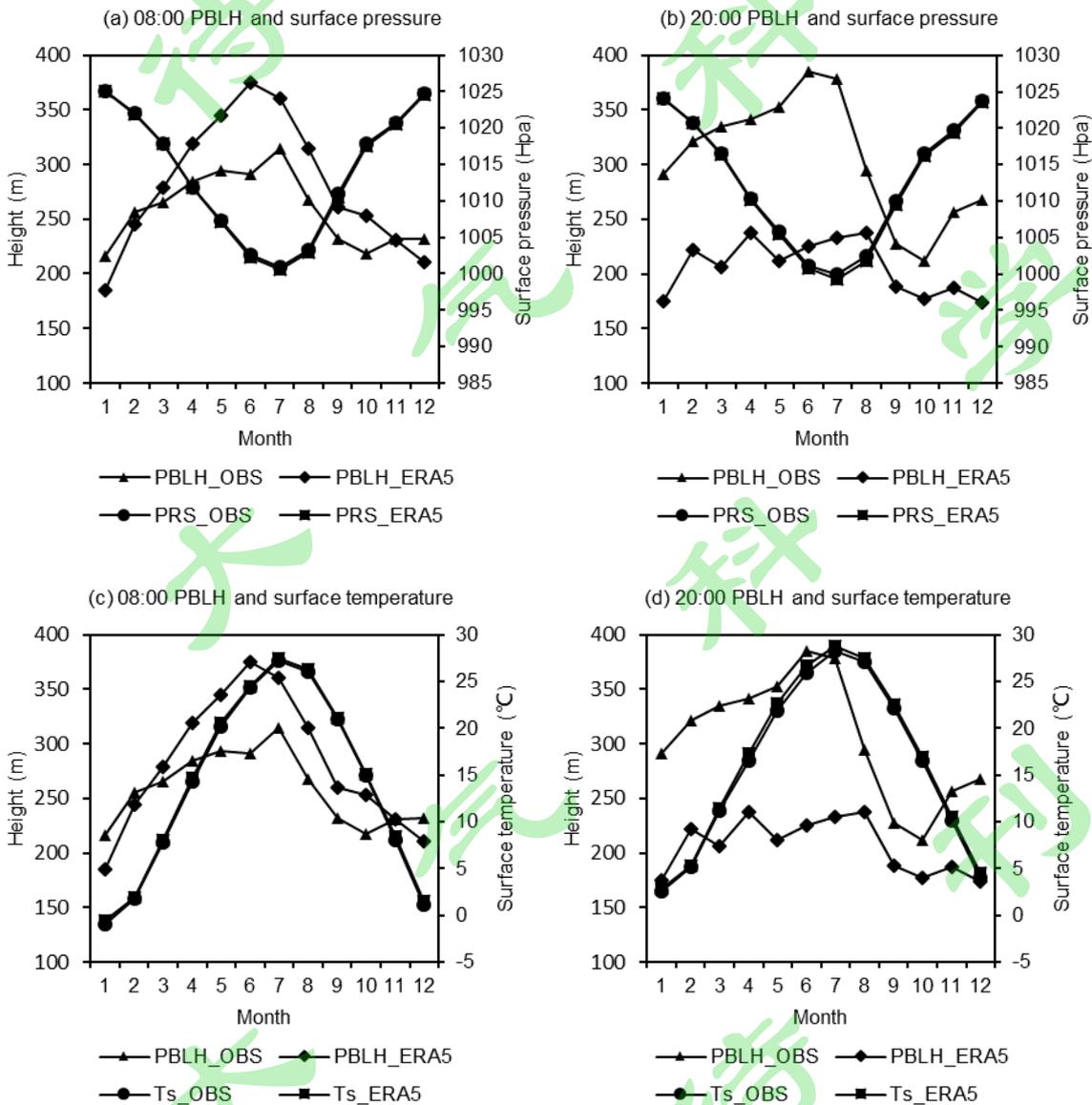
表 3 同表2，只是对春夏秋冬4个季节

Table 3. As table 2, but for four seasons

			地面气压/hPa	2 m温度/°C	相对湿度/%	10 m风速/m s ⁻¹
08:00	ERA5	春	-0.00	-0.53	-0.50	0.95*
		夏	-0.69*	0.73*	-0.81*	0.90*
		秋	-0.38	0.19	0.61	0.79*
		冬	-0.57	0.27	-0.24	0.77*
	OBS	春	-0.06	-0.42	-0.24	0.73*
		夏	-0.69*	0.61	-0.57	0.74*
		秋	-0.38	0.35	0.80*	0.46
		冬	-0.38	0.35	0.80*	0.46

		冬	-0.12	0.39	0.22	0.51
	ERA5	春	-0.16	-0.29	-0.26	0.89*
		夏	-0.59	0.72*	-0.67*	0.91*
		秋	-0.37	-0.03	0.57	0.85*
		冬	-0.56	0.14	-0.12	0.76*
20:00	OBS	春	0.14	-0.40	-0.17	0.75*
		夏	-0.73*	0.91*	-0.55	0.83*
		秋	-0.30	0.42	0.08	0.37
		冬	-0.50	0.12	0.10	0.87*

注：*表示具有统计学意义（ $P < 0.05$ ）。



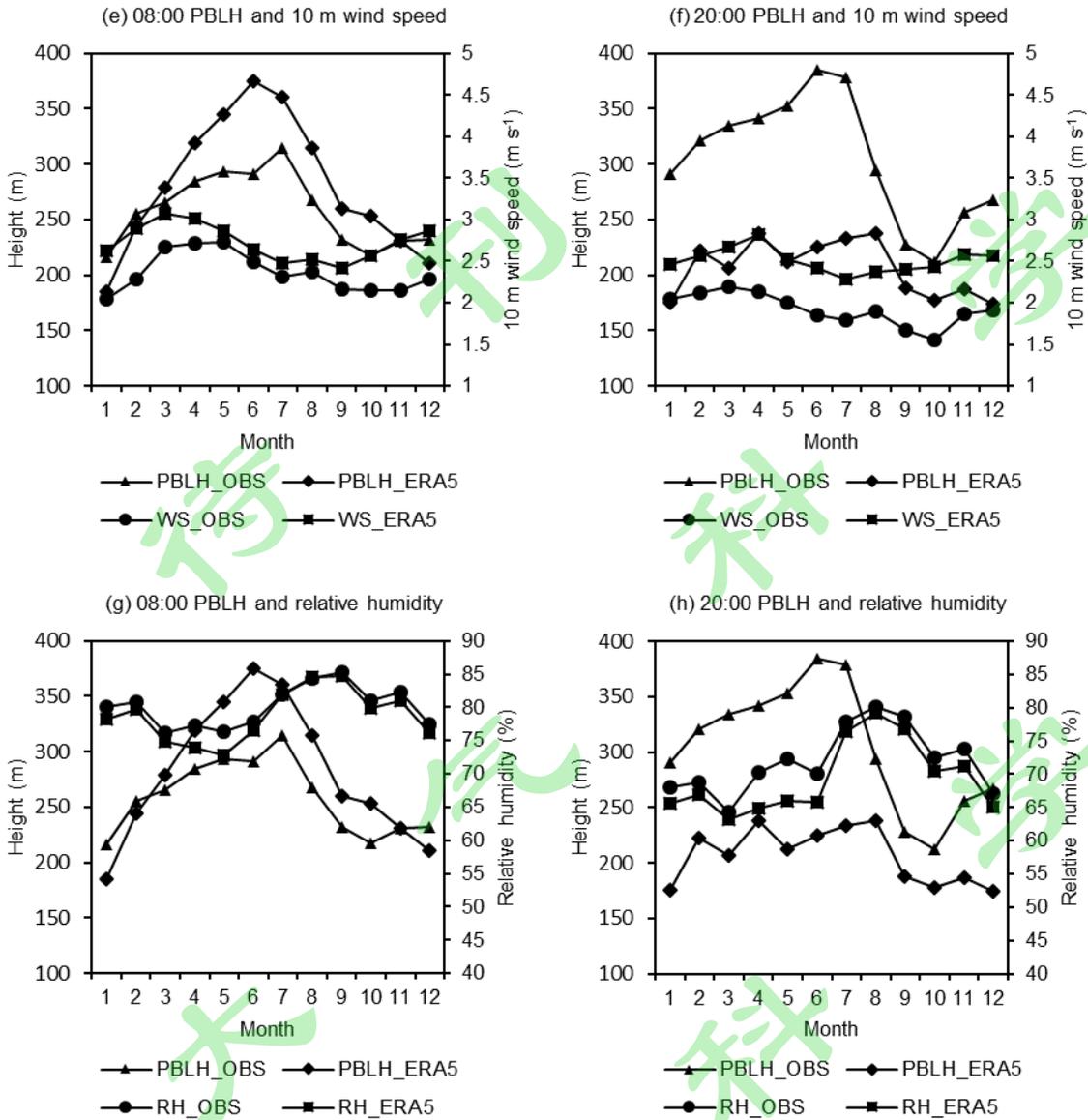


图 7 多年月平均 PBLH 和气压、近地层温度、10 m 风速及相对湿度的季节变化

Fig. 7 Seasonal variations of monthly mean PBLH and surface pressure (PRS), near surface temperature (Ts), 10 m wind speed (WS) and relative humidity (RH) in 10 years

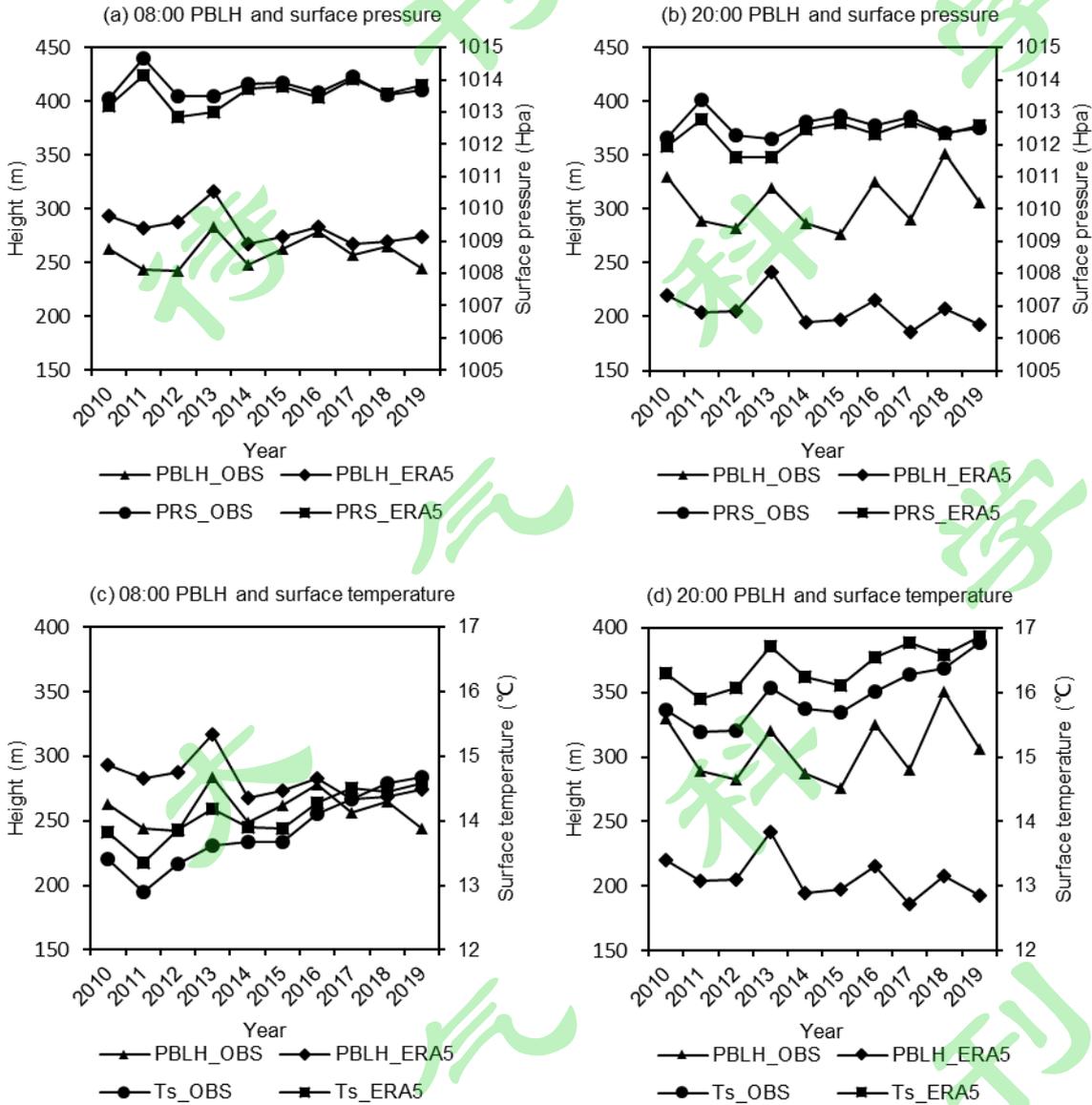
2) 年平均的 PBLH 与气象因子的关系

此外，还研究了气象因子对 PBLH 年际变化的影响，图 8 给出了年平均 PBLH 和 PRS、Ts、WS 及 RH 的年际变化。

总的来说，年平均 PBLH 观测值与 PRS 呈现显著的负相关关系，而与 Ts 和 WS，甚至 RH 都呈正相关关系，这点与多年月平均的结果不同。除了 RH(在 20:00, PBLH 与 RH 相关系数仅为 0.04)，20:00 比 08:00 的相关性都更强一些。08:00 和 20:00 气象因子对 PBLH 的影响大小不同，按照相关系数的大小（表 2），08:00 各气象因子对 PBLH 的影响大小为 PRS>WS>RH>Ts,而 20:00 气象因子对 PBLH 的影响大小为 WS>PRS>Ts>RH。无论 08:00 还是 20:00,WS 和 PRS 的影响大于 Ts 和 RH，这点与多年月平均的结果一致。观测 PBLH 与气象因子的最大相关系数为 0.70，是 20:00PBLH 与 WS 的关系。最弱为 0.04，为 20:00 与 RH

的相关系数。

ERA5 的年平均 PBLH 与其相应的气象因子的关系与观测的不同,与 WS 呈最显著正相关,相关系数在 08:00 和 20:00 均达到 0.92 (表 2), 与 PRS 和 RH 都呈显著负相关, 而与 Ts 的关系比较弱, 在 08:00 呈负相关关系, 总的来说 08:00 比 20:00 的相关性更强一些, 这点与观测也是不同的。各气象因子对 ERA5 PBLH 的影响大小为 WS>PRS>RH>Ts。ERA5 PBLH 与气象因子的相关比观测的相关更强, 只有 2 m 温度比较弱, 可能是 2017 年 ERA5 PBLH 偏低造成。



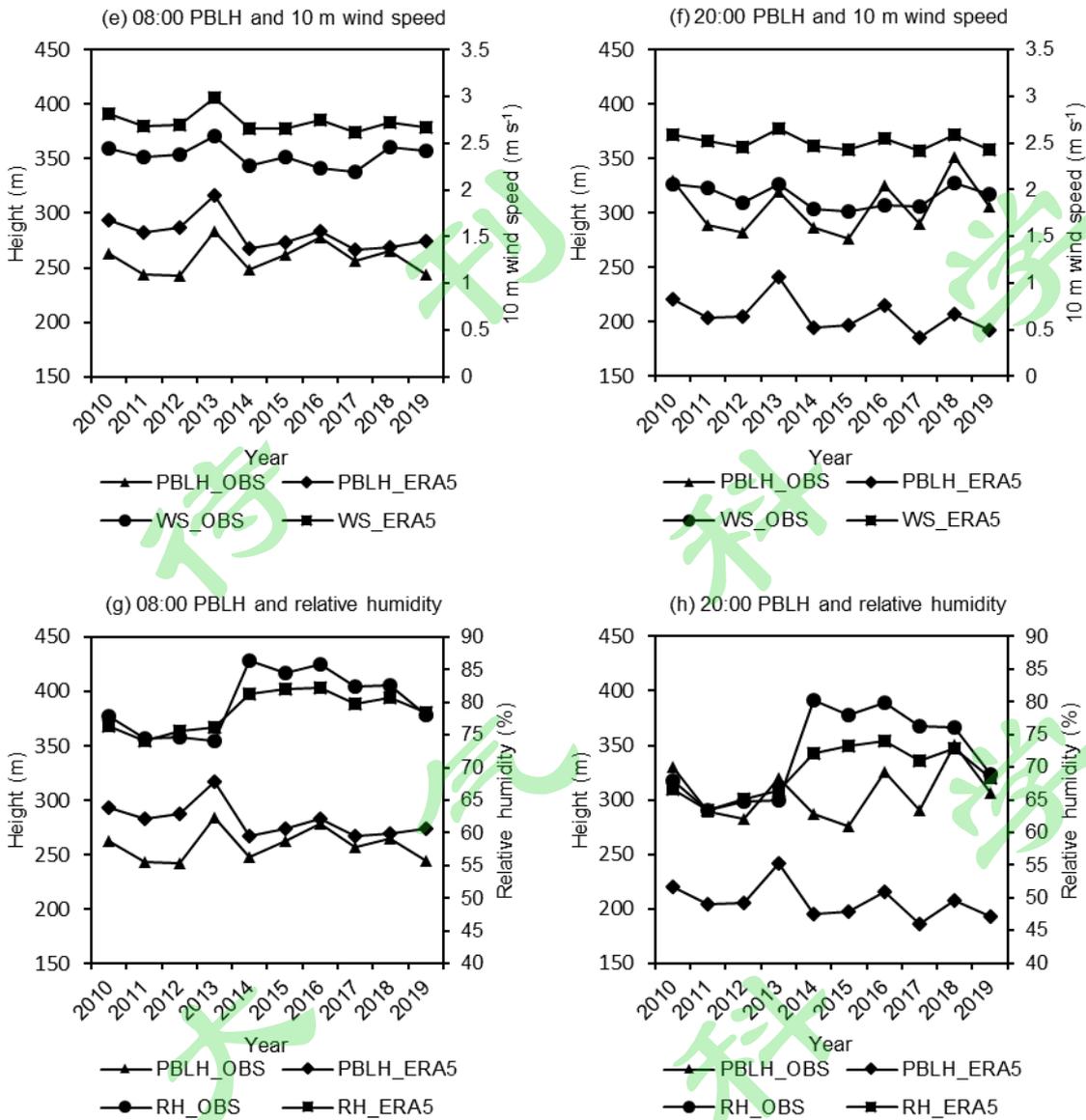


图 8 年平均 PBLH 和气压、近地层温度、10 m 风速及相对湿度的年际变化

Fig. 8 Interannual variations of yearly mean PBLH and surface pressure (PRS), near surface temperature (Ts), 10 m wind speed (WS) and relative humidity (RH)

4 结论

本文利用阜阳探空站 2010—2019 年的 10 年间 L 波段探空常规观测和加密观测数据，采用 BRN 方法计算得到 PBLH，结合 ERA5 PBLH 资料，对比分析了阜阳地区探空观测和 ERA5 多年月平均、季节和年平均 PBLH 变化特征，并利用观测和 ERA5 地面气象要素资料，通过研究 PBLH 和地面气象要素之间的关系初步分析了其影响机制和两种 PBLH 差异的原因，得到以下主要结论：

(1) 阜阳地区 08:00 和 20:00 探空观测的 PBLH 全年均小于 500 m，这是由于太阳辐射在这两个时段比较弱，边界层没有充分发展和正在向夜间稳定边界层过渡。20:00 的 PBLH 高于 08:00 的。是由于 20:00 气压低、温度高和 RH 小共同造成边界层抬升更高，超过风速低造成的降低影响。PBLH 有显著的季节变化，夏季>春季>冬季>秋季。ERA5 的 PBLH 与观测的季节变化特征大致相同。08:00 ERA5 的 PBLH 比观测的总体偏高 23 m，20:00 则是 ERA5 的 PBLH 偏低，总体比观测偏低 99 m。

(2) ERA5 与探空观测的 PBLH 多年月平均相关系数比较高，在 08:00 和 20:00 分别为 0.91 和 0.74，因此可以用 ERA5 资料在阜阳站点及东南地区进行 PBLH 长期趋势研究。年平均相关系数略低，分别为为 0.51

和 0.54。观测和 ERA5 年平均 PBLH 逐年的变化一致，观测的边界层高度是波动中保持平稳，ERA5 则是波动中略降。

(3) 地表气象因子对 PBLH 在月平均尺度上有显著影响，PRS 和 WS 的影响比较大，Ts 和 RH 的影响次之。探空观测的月平均 PBLH 值与 PRS 和 RH 都呈现显著的负相关关系，而与 Ts 和 WS 都呈显著正相关关系。08:00 比 20:00 的相关性都更强一些。ERA5 的多年月平均 PBLH 与其相应的气象因子的关系比较复杂一些，但也是与 PRS 呈最显著负相关，与 Ts 呈强的正相关，与相对湿度和风速的关系较弱。

(4) 探空观测的年平均 PBLH 值与地面气象要素的关系并不显著，因此虽然气候变化导致地表温度上升相对湿度增加，但年平均 PBLH 改变并没有呈现一定趋势。

(5) 通过分析探空加密观测资料，发现 PBLH 的典型日变化特征，四个时次的观测 PBLH 大小顺序为 02:00<08:00<20:00<14:00，午间对流 PBLH 最高，夜间稳定 PBLH 最低，与前人的研究结果比较统一。

致谢 感谢国家重大科技基础设施项目“地球系统数值模拟装置”提供支持。

参考文献 (References)

- 安徽省发展和改革委员会. 2022. 安徽省新型城镇化规划 (2021—2035年). Anhui Provincial Development and Reform Commission. 2022. Anhui Province New Urbanization Plan (2021-2035).
- Bei N, Wu J, Elser M, et al. 2017. Impacts of meteorological uncertainties on the haze formation in Beijing–Tianjin–Hebei (BTH) during wintertime: a case study. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 17, 14579–14591, <https://doi.org/10.5194/acp-17-14579-2017>
- Bhumralkar, Chandrakant. 1976. Parameterization of the Planetary Boundary Layer in Atmospheric General Circulation Models. *Reviews of Geophysics and Space Physics*. 14. 10.1029/RG014i002p00215
- 陈炯,王建捷. 2006. 北京地区夏季边界层结构日变化的高分辨模拟对比[J]. *应用气象学报*, 17(4): 403–411. Chen Jiong, Wang Jianjie. 2006. Diurnal cycles of the boundary layer structure simulated by WRF in Beijing[J]. *Quart J Appl Meteor*, 17(4): 403–411.
- Chen Yu, Chen Siyu, Zhao Dan, et al. 2022. The role of boundary layer height in India on transboundary pollutions to the Tibetan Plateau. *Science of The Total Environment*. 837. 155816. 10.1016/j.scitotenv.2022.155816
- 戴秋丹, 郭振海, 孙菽芬, 等. 2021. 安徽省淮南森林冠层辐射传输过程的特征[J]. *大气科学*, 45(1): 205–216. Dai Qiudan, Guo Zhenhai, Sun Shufen, et al. 2021. Characteristics of Solar Radiation and Radiative Transfer of a Forest Canopy in Huainan, Anhui Province [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 45(1): 205–216. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.19251
- 戴秋丹, 郭振海, 王龙欢, 等. 2023. CLM4.5模拟淮南山地森林陆气交换过程[J].*大气科学*. Dai Qiudan, Guo Zhenhai, Wang Longhuan, et al. 2023. Simulating land and atmosphere exchange processes over a mountainous forest in Huainan using CLM4.5 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2304.22186
- Guo J, Li Y, Cohen J B, et al. 2019. Shift in the temporal trend of boundary layer height in China using long-term (1979–2016) radiosonde data. *Geophys. Res. Lett.* 46, 6080–6089.
- Guo Jianping, Miao Yucong, Zhang Yong et al. 2016. The climatology of planetary boundary layer height in China derived from radiosonde and reanalysis data. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 16. 13309-13319. 10.5194/acp-16-13309-2016.
- Huang Y X, Guo B, Sun H X, et al. 2021. Relative importance of meteorological variables on air quality and role of boundary layer height. *Atmos Environ*. 267:10. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118737>
- Huo Yanfeng, Wang Yonghong Paasonen Pauli, et al. 2021. Trends of Planetary Boundary Layer Height Over Urban Cities of China From 1980–2018. *Frontiers in Environmental Science*. 9.10.3389/fenvs.2021.744255.
- 梁智豪, 王东海, 梁钊明. 2020. 探空观测的边界层高度时空变化特征. *应用气象学报*. 31(4): 447-459. Liang Zhihao, Wang Donghai, Liang Zhaoming. 2020. Spatio-temporal characteristics of boundary layer height derived from soundings. *J Appl Meteor Sci*. 31(4): 447-459. doi:10.11898/1001-7313.20200407
- Liu X G, Li J, Qu Y, et al. 2013. Formation and evolution mechanism of regional haze: a case study in the megacity Beijing, China. *Atmos. Chem. Phys*. 13, 4501–4514.

- Lord J, Thomas A, Treat N, et al. 2021. Global potential for harvesting drinking water from air using solar energy. *Nature* 598, 611–617. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03900-w>
- 卢萍, 杨康权, 李英. 2017. 基于加密探空资料对不同海拔高度台站边界层大气的对比分析 [J]. *大气科学*. 41 (6): 1234–1245. Lu Ping, Yang Kangquan, Li Ying. 2017. A comparative analysis of atmospheric boundary layer based on intensive sounding data at different altitude stations [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*. 41 (6): 1234–1245, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1704.16230
- Miao Y, Che H, Zhang X, et al. 2021. Relationship between summertime concurring PM_{2.5} and O₃ pollution and boundary layer height differs between Beijing and Shanghai, China. *Environ. Pollut.* 268, 115775.
- Miao Y, Liu S. 2019. Linkages between aerosol pollution and planetary boundary layer structure in China. *Sci. Total Environ.* 650, 288–296.
- Patil M N, Patil S D, Waghmare R T, et al. 2013. Planetary boundary layer height over the Indian subcontinent during extreme monsoon years. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 92, 94–99. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.10.011>
- Quan J, Tie X, Zhang Q, et al. 2014. Characteristics of heavy aerosol pollution during the 2012–2013 winter in Beijing, China. *Atmos. Environ.* 88, 83–89.
- Salmun H, Josephs Holly, Molod Andrea. 2023. GRWP-PBLH: Global Radar Wind Profiler Planetary Boundary Layer Height Data. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 104. 10.1175/BAMS-D-22-0002.1.
- Seibert P, Beyrich F, Gryning S E, et al. 2000. Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height. *Atmos Environ.* 34(7):1001-1027.
- Seidel D J, Zhang Y, Beljaars A, et al. 2012. Climatology of the planetary boundary layer over the continental United States and Europe. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 117, D17106. <https://doi.org/10.1029/2012JD018143>
- Slätberg N, Lai H W, Chen X L, et al. 2022. Spatial and temporal patterns of planetary boundary layer height during 1979–2018 over the Tibetan Plateau using ERA5 [J]. *International Journal of Climatology*. 42(6): 3 360-3 377.
- Stull R B. 1991. 边界层气象学导论. 北京:气象出版社. 1-21.
- Suarez M J, Arakawa A, Randall D A. 1983. The parameterization of the planetary boundary layer in the UCLA general circulation model: Formulation and results. *Mon Wea Rev*, 111(11):2224-2243.
- 苏彦入, 吕世华, 范广洲. 2018. 青藏高原夏季大气边界层高度与地表能量输送变化特征分析 [J]. *高原气象*, 37 (6): 1 470-1 485. SU Yanru, LÜ Shihua, FAN Guangzhou. 2018. The characteristics analysis on the summer atmospheric boundary layer height and surface heat fluxes over the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 37 (6): 1 470-1 485.
- Tang G, Zhang J, Zhu X, et al. 2016. Mixing layer height and its implications for air pollution over Beijing, China. *Atmos. Chem. Phys.* 16, 2459–2475.
- Urban A, Di Napoli C, Cloke HL, et al. 2021. Evaluation of the ERA5 reanalysis-based Universal Thermal Climate Index on mortality data in Europe. *Environ Res.* 198:111227. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111227>
- Vogelezang D, Holtslag A. 1996. Evaluation and model impacts of alternative boundary-layer height formulations. *Boundary-Layer Meteorology*. 81(3–4), 245–269. <https://doi.org/10.1007/BF02430331>
- 王春晓, 马耀明, 韩存博. 2023. 青藏高原大气边界层结构及其发展机制研究 [J]. *地球科学进展*, 38 (4): 414-428. doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2023.013. WANG Chunxiao, MA Yaoming, HAN Cunbo. 2023. Research on the atmospheric boundary layer structure and its development mechanism in the Tibetan Plateau [J]. *Advances in Earth Science*. 38 (4): 414-428. doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2023.013
- Wang Yinjun, Zeng Xubin, Xu Xiangde et al. 2022. Improving the Estimate of Summer Daytime Planetary Boundary Layer Height Over Land From GPS Radio Occultation Data. *Geophysical Research Letters*. 10.1029/2021GL096304.
- 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*. 34(5): 905-913. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2010.05.06
- 吴雯璐, 陈海山, 郭建平, 等. 2023. 中国夏季边界层高度及其主要影响因子的分区研究 [J]. *大气科学*. Regionalization of the

- boundary-layer height and Its Dominant Influencing Factors in Summer Over China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2212.22183
- Xu Lujun, Liu Huizhi, Du Qun, et al. 2019. The assessment of the planetary boundary layer schemes in WRF over the central Tibetan Plateau. *Atmospheric Research*. 230. 104644. 10.1016/j.atmosres.2019.104644.
- 张宏昇, 张小曳, 李倩惠, 等. 2020. 大气边界层高度确定及应用研究进展. *气象学报*, 78(3): 522-536. Zhang Hongsheng, Zhang Xiaoye, Li Qianhui, et al. 2020. Research progress on estimation of atmospheric boundary layer height. *Acta Meteorologica Sinica*, 78(3): 522-536.
- 张强, 乔梁, 岳平, 等. 2019. 干旱区夏季晴空期超厚对流边界层发展的能量机制 [J]. *科学通报*, 64(15): 1 637-1 650. ZHANG Qiang, QIAO Liang, YUE Ping, et al. 2019. The energy mechanism controlling the continuous development of a super-thick atmospheric convective boundary layer during continuous summer sunny periods in an arid area [J]. *Chinese Science Bulletin*, 64(15): 1 637-1 650.
- 张强, 王胜. 2008. 西北干旱区夏季大气边界层结构及其陆面过程特征[J]. *气象学报*, 66(4): 599-608. Zhang Qiang, Wang Sheng. 2008. A study on atmospheric boundary layer structure on a clear day in the arid region in Northwest China[J]. *J Meteor Res*, 66(4): 599-608.
- Zhang W, Guo J, Miao Y, et al. 2018. On the summertime planetary boundary layer with different thermodynamic stability in China: a radiosonde perspective. *J. Clim.* 31, 1451-1465.
- Zhang Wanchun, Guo Jianping, Miao Yucong, et al. 2016. Planetary boundary layer height from CALIOP compared to radiosonde over China. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. 1-31. 10.5194/acp-2016-250.
- 张祥, 张叶晖, 韩靖博, 等. 2018. 北极扬马延岛大气边界层高度的气候特征分析. *极地研究*, 30(2), 8. Zhang Xiang, Zhang Yehui, Han Jingbo, et al. 2018. Climatological Characteristics of Planetary Boundary Layer Height at Jan Mayen, Arctic. *Chinese journal of polar research*. 30(2), 8.
- Zhang Y H, Seidel D J, Zhang S D. 2013. Trends in planetary boundary layer height over Europe[J]. *Journal of Climate*, 26(24):10071-10076.
- 赵采玲, 李耀辉, 柳媛普, 等. 2019. 中国西北地区大气边界层高度变化特征——基于探空资料与ERA-Interim再分析资料[J]. *高原气象*, 38(6): 1181-1193. Zhao Cailing, Li Yaohui, Liu Yuanpu, et al. 2019. The variation characteristics of planetary boundary layer height in Northwest China: Based on radiosonde and ERA-Interim reanalysis data[J]. *Plateau Meteorology*, 38(6):1181-1193. doi:10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2018. 00152.
- 赵建华, 张强, 王胜, 等. 2013. 西北干旱区夏季大气边界层逆温强度和高度频率密度研究[J]. *高原气象*, 32(2): 377-386. Zhao Jianhua, Zhang Qiang, Wang Sheng, et al. 2013. Studies on frequency density of inversion intensity and height of atmospheric boundary layer in arid region of Northwest China[J]. *Plateau Meteor*, 32(2): 377-386.
- 赵世强, 张镛, 王治厅, 等. 2012. 利用激光雷达结合数值模式估算兰州远郊榆中地区夏季边界层高度[J]. *气候与环境研究*, 17(5): 523-531. Zhao Shiqiang, Zhang Lei, Wang Zhiting, et al. 2012. Boundary layer height estimate in summer over Lanzhou suburb Yuzhong area by using lidar measurement and numerical model[J]. *Climatic Environ Res*, 17(5): 523-531.
- 赵天保, 艾丽坤, 冯锦明. 2004. NCEP再分析资料和中国站点观测资料的分析与比较[J]. *气候与环境研究*, 9(2):278-294. Zhao Tianbao, Ailikun, Feng Jingming. 2004. An Intercomparison between NCEP Reanalysis and Observed Data over China[J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 9(2):278-294.