腾冲大气边界层高度变化特征及其影响因子分析1

金莉莉1,刀琦1,王一2

- 1. 云南大学大气科学系, 昆明, 650500;
- 2. 云南省腾冲市气象局, 腾冲, 697100;

摘要: 腾冲地处云贵高原, 地形复杂, 是一个典型的山区城市, 特殊地理位置引起的边界层 及其污染物跨境输送问题急需关注,研究腾冲长期边界层结构和气象条件变化特征具有重要 意义。本文利用腾冲 L 波段无线电探空观测资料和理查森数方法计算得到的大气边界层高 度(PBLH)验证了ERA5 再分析资料,基于ERA5 再分析资料,采用统计方法,分析了腾 冲 1980-2023 年 PBLH 的时间特征及其影响因子。结果表明: 腾冲 ERA5 的 PBLH 与观测 的 PBLH 有较好的相关性, 08:00 和 20:00ERA5 的 PBLH 比观测的 PBLH 平均分别低 3.7m 和 279.4m。腾冲 PBLH 呈现出显著的波动变化, 夏季和秋季呈上升趋势(0.7 m/yr、0.2 m/yr), 春季和冬季呈下降趋势(-0.1 m/yr、-0.2 m/yr), 干季和湿季呈上升趋势(0.05 m/yr、0.3 m/yr)。 白天 PBLH,春季(1504m)>冬季(871m)>秋季(572m)>夏季(468m),干季(934m)> 湿季(551m); 夜间 PBLH, 夏季(52m)>秋季(23m)>春季(27m)>冬季(19m), 湿 季(44m)>干季(21m)。白天 PBLH 波动较大,夜间较为稳定,午后 14:00 或 15:00 达到 日峰值。干季 PBLH 可超过 3500m、湿季可超过 2000m。春季和干季日 PBLH 波动最大。 PBLH 在少云天最高, 阴天最低, 夜间则相反。在年尺度上, PBLH 与 10m 风速、地表感热 通量、地-气温差、地表温度、2m 气温呈显著的正相关关系,与相对湿度、总云量、地表潜 热通量、2m 露点温度呈显著的负相关关系。在季节尺度上,春、秋、冬和干季 PBLH 主要 受到 10m 风速的驱动, 夏季和湿季则主要受到较高潜热通量、总云量、相对湿度和较低感 热通量的热力作用驱动。在昼夜变化上,白天 10m 风速、地表感热通量和相对湿度是影响 PBLH 发展的主要因子,而夜间地表潜热通量则是影响 PBLH 发展的唯一显著因子。

关键词: 大气边界层高度; 时间特征变化; 影响因子; 云南腾冲

文章编号 2024135A

Doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2502.24135

Characteristics and influencing factors of planetary boundary

layer height variation in Tengchong

JIN Lili¹, DAO Qi¹, WANG Yi²

- 1 Department of Atmospheric Sciences, Yunnan University, Kunming, 650500
- 2 Tengchong Meteorological Bureau, Yunnan Province, Tengchong, 697100

收稿日期 2025-03-10; 网络预出版日期

¹ **作者简介** 金莉莉(1984 年一),女,博士,云南大理人,副研究员,主要从事陆面过程研究。Email: jinlili1984@ynu.edu.cn

资助项目 云南省基础研究计划项目(202401BC070004);云南省"兴滇人才支持计划" 青年人才专项。 Abstract Tengchong is located in the Yunnan-Guizhou Plateau with complex terrain and is a typical mountain city. The planetary boundary layer (PBL) and its cross-border transport of pollutants caused by its special geographical location urgently need attention, so it is of great significance to study the long-term boundary layer structure and the changing characteristics of meteorological conditions in Tengchong. In this paper, the L-band radiosonde data of Tengchong and the atmospheric boundary layer height (PBLH) calculated by Richardson number method are used to verify the ERA5 reanalysis data. Based on the ERA5 reanalysis data, the temporal characteristics and influencing factors of PBLH in Tengchong during 1980-2023 are analyzed by statistical method. The results indicate that the PBLH of ERA5 has a good correlation with the observed PBLH in Tengchong, and the average PBLH of ERA5 is 3.7m and 279.4m lower than the observed PBLH at 08:00 and 20:00, respectively. The PBLH in Tengchong showed significant fluctuations, with an upward trend in summer and autumn (0.7 m/yr, 0.2 m/yr), a downward trend in spring and winter (-0.1 m/yr, -0.2 m/yr), and an upward trend in dry and wet seasons (0.05 m/yr, 0.3 m/yr). PBLH was the order in spring (1504m) > winter (871m) > Autumn (572m) > summer (468m) at daytime, while at night, PBLH was the order in summer (52m) > Autumn (23m) > Spring (27m) > Winter (19m). PBLH in wet season (44m) was higher than that in dry season (21m). PBLH fluctuates greatly during the daytime and is relatively stable at night, reaching the daily peak at 14:00 or 15:00 in the afternoon. The PBLH can exceed 3500m in dry season and 2000m in wet season. The daily PBLH fluctuates the most in spring and dry season. On the annual scale, PBLH was positively correlated with 10m wind speed, surface sensible heat flux, ground-air temperature difference, surface temperature and 2m air temperature, and negatively correlated with relative humidity, total cloud cover, surface latent heat flux and 2m dew point temperature. On the seasonal scale, the PBLH in spring, autumn, winter and dry season was mainly driven by 10m wind speed, while in summer and wet season it was mainly driven by high latent heat flux, total cloud cover, relative humidity and low sensible heat flux. In the diurnal variation, 10m wind speed, surface sensible heat flux and relative humidity in daytime were the main factors affecting the development of PBLH, while the surface latent heat flux at night was the only significant factor affecting the development of PBLH.

Key words Planetary boundary layer height, Temporal characteristics, Influence factors, Tengchong, Yunnan

1 引言

行星边界层(PBL)是对流层的最低层,对地面强迫的响应时间在 1 小时以内,高度通常在 1—2km 之间(赵建华等,2013;刘辉志等,2018)。PBL 决定着地表和自由大气之间的热量、动量以及各种物质(水汽、污染物)的垂直交换,与一些重要的天气现象(降水、雾和霜)、极端天气和气候以及一些突发性气象灾害(沙尘暴和暴雨)的形成与发展息息相关(Serafin et al., 2018;李媛, 2020),同时 PBL 也是人类生产生活的活动所在地,在 PBL 发生的相关环境问题与人类紧密相关。因此研究 PBL 过程对大气环流模式、天气预报、气候预测模式、中

尺度气象模式以及大气环境质量预报模式起到了重要的作用(刘树华等,2001)。

行星边界层高度(PBLH)是表征 PBL 特征的重要参量,也是数值模拟、环境评估中的重要参数。人们已经使用多种仪器和方法来探测并估算 PBLH(张宏昇等,2020),如无线电探空仪(Seidel et al., 2012; Li et al., 2021; Guo et al., 2021)、飞机探测(Dai et al., 2014)、云高仪(Eresmaa and Järvinen, 2006)、地面雷达(Sawyer and Li, 2013)、声学雷达(Beyrich, 1997)、星载雷达(Liu et al., 2015; Zhang et al., 2016)等。随着探空数据和其他来源数据的出现和发展,对 PBLH的研究越来越成熟,例如,使用多种数据获得了 PBLH,研究了不同下垫面和纬度带 PBLH 的变化趋势、不同时空分布等气候特征(Seidel et al., 2012; Zhang et al., 2013; Guo et al., 2019; 乔梁等,2019; Gu et al., 2020; Xu et al., 2023; 吴雯璐等,2024)。

由于 PBLH 的观测比较困难,所以难以获取长时间序列的观测。再分析数据的出现为 PBLH 研究的推进提供了巨大的帮助。例如,韩美等(2012)使用 CFSR 再分析数据对黄东海大气边界层高度的季节变化特征及其影响因子进行研究;赵艳茹等(2017)利用 ERA5 再分析数据,对 1900—2015 年东亚和北非边界层高度的年代际变化特征及其对比分析。

虽然越来越多的观测和再分析资料研究 PBLH 气候特征及其影响因子,但大多数都是针对大范围区域,中国不同地区 PBLH 的气候特征有待进一步研究,关于亚热带和湿润地区局地长时间序列 PBLH 及其与再分析资料的对比研究仍然有限。而且,西南地区的地形地貌、气候条件以及人类活动等因素对 PBLH 的变化具有重要影响。例如,青藏高原平均 PBLH 日变化振幅大于下游地区,且其日变化振幅随站点海拔高度的增加而增大(徐桂荣等,2014)。云南高海拔区域年内 PBLH 变化差异较小;地-气温差年代际变化与 PBLH 具有较好的一致性; PBLH 夜间变化平稳、白天波动较强; 近地面层低温、高湿、弱风造成傍晚至夜间 PBLH 快速下降,导致 PM2.5 堆积到近地面层(赵平伟等,2023)。另外,东南亚春季生物质燃烧产生的污染物是云南春季 PM2.5 污染最主要的原因,大部分来自南亚和东南亚的空气污染物的越境输送与中国西南观测到的大多数空气污染物的高浓度有关(Yang et al., 2020), PBLH 是影响污染物扩散传输的重要参数。云南腾冲是东南亚污染物向云南乃至整个西南地区输送的重要通道之一,因此研究该

区域 PBLH 的变化特征具有重要的应用价值。

2 数据和方法

2.1 L 波段无线电探空数据

采用中国气象局腾冲探空站(24.98°N,98.51°E,1695.9 m)经过质量控制后的2018—2023年L波段无线电探空数据,数据分辨率为1.2s,包括每日08:00(北京时,下同)和20:00气压、位势高度、温度、露点温度、风向、风速。

2.2 ERA5 再分析数据

采用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 ERA5 再分析 PBLH、10m 风速(W10)、总云量(TCC)、2m 气温(T2m)、2m 露点温度(D2m)、地表温度(Ts)、地表感热通量(SSHF)、地表潜热通量(SLHF)、相对湿度(RH)数据,水平分辨率为 0.25°×0.25°、时间分辨率为 1h,采用双线性插值法插值到腾冲站点。

2.3 PBLH 计算方法

采用整体理查森数(R_b)方法来计算无线电探空数据的 PBLH,将 R_b 首次超过 0.25 阈值的高度估计为 PBLH(Guo et al., 2016)。选择这种方法主要是因为它既适用于稳定条件,也适用于对流条件,且对探测的垂直分辨率依赖性不强(Zhang et al., 2013)。 R_b 计算方法如下:

$$R_b(z) = \frac{\left(\frac{g}{\theta_{vs}}\right)(\theta_{vz} - \theta_{vs})(z - z_s)}{(u_z - u_s)^2 + (v_z - v_s)^2}$$
(1)

式中, $R_b(z)$ 是高度 z 至最低层之间的整体理查森数; g 是重力加速度; θ_v 是虚位温; s 是最低气压层的高度; u 是纬向分量的风速; v 是经向分量的风速。

$$\theta_{v} = \theta \left(1 + 0.61 \times \frac{0.622e}{P - e} \right) \tag{2}$$

式中, θ 是位温;e是水汽压;P是气压。

本文采用线性相关系数(R)和均方根误差(RMSE)来检验 ERA5 的 PBLH在云南腾冲的适用性。

3 结果和讨论

3.1 ERA5 与探空资料的比较

图 1为08:00和20:00观测的PBLH(PBLH_OBS)与对应时次ERA5的PBLH (PBLH_ERAS)的对比。腾冲PBLH_OBS与PBLH_ERAS之间的相关系数分别为0.43 (08:00)和0.48 (20:00),RMSE分别为81.2m (08:00)和425.6m (20:00)。在20:00,较大的RMSE表明,ERA5再分析产品未能捕捉到20:00极个别的PBLH。这与20:00刚好是傍晚有关,若根据探空资料计算PBLH时认为是不稳定对流边界层,那么计算出来的边界层高度(PBLH_OBS)偏高,而20:00的ERA5(PBLH_ERAS)偏低,这种情况夏季较少(夏季白天长,夏季20:00腾冲太阳还未落山),冬季较多(冬季白天短);将19:00ERA5的PBLH与20:00ERA5的PBLH比较也发现,19:00的PBLH更高。若计算时认为是稳定边界层,那么计算出来的边界层高度(PBLH_OBS)偏低,从而使得ERA5的PBLH(PBLH_ERAS)与PBLHOBS相比,偏低得不多。

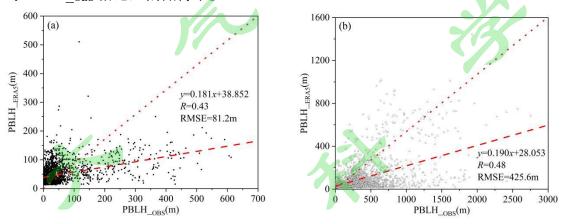


图 1 2018—2023 年 PBLH_OBS 与 PBLH_ERA5 的比较((a)08:00; (b)20:00)。 Fig. 1 Comparison of PBLH_OBS with PBLH_ERA5 during 2018-2023 ((a)08:00; (b)20:00).

比较观测的 2018—2023 年月平均 PBLH_OBS 与 PBLH_ERAS (图 2)发现,08:00 的 PBLH_OBS 和 PBLH_ERAS 分别在 11—167m(均值为 52m)和 19—100m(均值为 48m)之间变化;20:00 的 PBLH_OBS 和 PBLH_ERAS 分别在 126—1046m(均值为 380m)和 22—335m(均值为 100m)之间变化。08:00 的 PBLH 在夏季较厚,20:00 的 PBLH 在春季和夏季较厚。

08:00 的 PBLH, ERA5 有偏低和偏高的情况,偏低最大可达 70m、偏高最大可达 29m。而 20:00 的 PBLH, ERA5 则偏低,偏低范围在 97—804m 之间。总体而言,08:00 的 PBLH OBS 和 PBLH ERA5 在 11—次年 4 月(干季)较接近,

在 6—8 月差异较大,这与 08:00 的 PBLH_ERA5 偏低有关。与 08:00 相比,20:00 的月平均 PBLH_OBS 和 PBLH_ERA5 在全年差异均较大,这与 20:00 的 PBLH_ERA5 偏低有关,尤其在 2—6 月差异最大,因为根据探空资料计算 PBLH 时把中性边界层当作了不稳定边界层,使得计算出来的 PBLH 偏高很多。

图 3 显示了 PBLH_OBS 与 PBLH_ERAS 之间的 PBLH 差异,08:00 和 20:00 的 PBLH_OBS 与 PBLH_ERAS 偏差均值分别是 3.7m 和 279.4m。尽管 PBLH_ERAS 和 PBLH_OBS 之间存在偏差,但是,PBLH_ERAS 和 PBLH_OBS 的年变化趋势一致,总体时间变化与探空数据相似。研究表明,对于我国,PBLH 再分析产品中 ERAS 的偏差最小,与探空观测的关系最为接近;ERAS 产品在描述对流边界层和中性边界层的 PBLH 方面表现更好,但无法描述午后早期稳定边界层,这表明即使对于 PBLH 类型,通过再分析产品也很难确定午后 PBLH 是否处于稳定状态(Xu et al, 2023)。

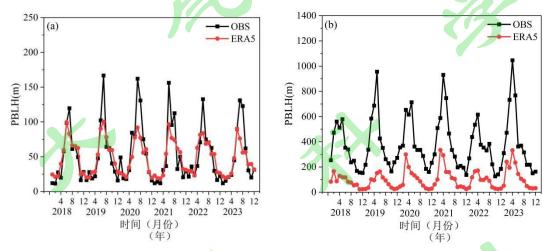


图 2 2018—2023 年月平均 PBLH_OBS 与 PBLH_ERA5 的比较((a)08:00; (b)20:00)。 Fig.2 Comparison of the monthly mean PBLH_OBS with PBLH_ERA5 during 2018-2023 ((a)08:00; (b)20:00).

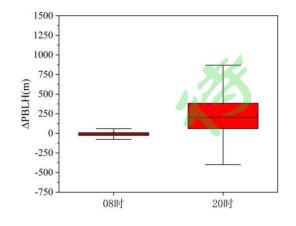


图 3 2018—2023年PBLH ERA5与PBLH OBS的差异。

Fig.3 The differences between PBLH _{ERA5} and PBLH _{OBS} during 2018-2023.

3.2 PBLH 的时间变化特征

3.2.1 1980-2023 年长期变化趋势

云南腾冲年平均 PBLH 在 1983 至 1987 年、1993 至 2013 年、2017 至 2023 年呈上升趋势,增长幅度分别为 4.0 m/yr、1.5 m/yr 和 5.7 m/yr,在 1988 至 1992 年呈下降趋势,下降幅度为-12.4 m/yr(图 4)。进一步分析,腾冲 PBLH 的这种趋势变化与 W10、TCC、T2m、Ts 和 Ts-T2m 的趋势基本一致;1990 年之后 W10 呈上升趋势、TCC 呈下降趋势,T2m、Ts 和地-气温差(Ts-T2m)在 1994 年之后呈上升趋势(图 5)。

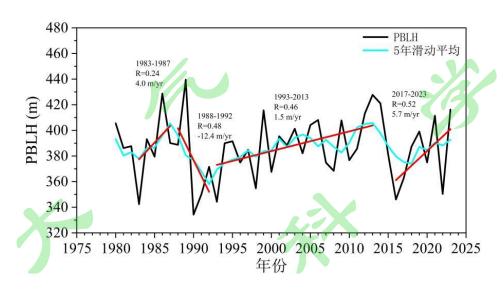


图 4 腾冲 1980—2023 年平均 PBLH ERA5 变化趋势及 5 年滑动平均。

Fig.4 Average PBLH_ERA5 change trend and 5-year sliding average in Tengchong from 1980 to 2023.

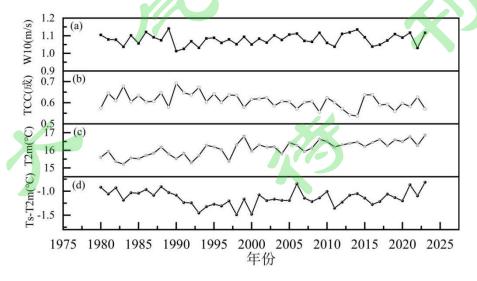


图 5 腾冲 1980—2023 年 ERA5 平均 W10、TCC、T2m 和 Ts-T2m 变化趋势。

Fig. 5 Average W10, TCC, T2m and Ts-T2m change trend of ERA5 in Tengchong from 1980 to 2023.

云南腾冲 PBLH 的年际变化在季节上也呈现出显著的波动变化。1980年至2003年春季、夏季、秋季、冬季的 PBLH 气候倾向率分别为-0.1 m/yr、0.7 m/yr、0.2 m/yr、-0.2 m/yr,夏季和秋季呈上升趋势,春季和冬季呈下降趋势;其中夏季的上升趋势最为显著,从 5a 滑动平均上看也为明显的波动上升趋势。1980年至2023年干季和湿季的 PBLH 均为波动上升趋势,湿季(5—10 月)的增长趋势(0.3 m/yr)比干季(11 月一次年 4 月)(0.05 m/yr)更为显著(图 6)。

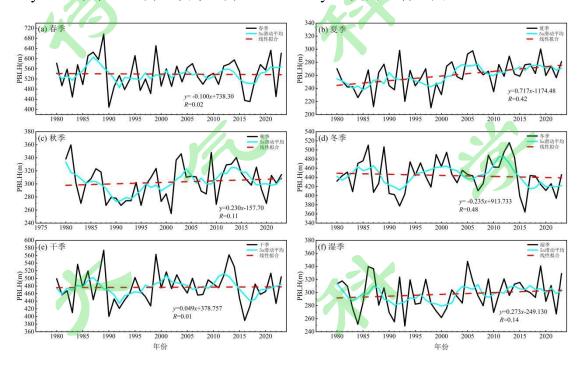


图 6 腾冲 1980—2023 年 ERA5 四季、干湿季 PBLH 年际变化趋势及 5 年滑动平均。 Fig.6 Interannual variation trend and 5-year sliding average of PBLH in four seasons, wet and dry seasons in Tengchong by ERA5 from 1980 to 2023.

3.2.2 季节变化特征

云南腾冲 1980 至 2023 年不同季节白天(09:00 至 20:00)和夜间(21:00 至次日 08:00)逐小时 PBLH 箱线图。如图 7a 所示,在春、夏、秋、冬四季中,白天 PBLH 均值表现为春季最高(1504m),夏季最低(468m),秋季为 572m,冬季为 871m;白天春季 PBLH 有较大的变化范围,同时春季最大值可超过 3500m。如图 7b 所示,夜间的四季与白天相反,PBLH 值夏季最高(52m),冬季最低(19m),春季为 27m,秋季为 33m;夜间四季 PBLH 变化平稳,除了夏季最

大值可能超过 100m 以外, 其余均在 80m 之下。

就干、湿季而言,白天,干季 PBLH 均值(934m)>湿季(551m);干季的中位数为 846m,而第一四分位数和第三四分位数分别为 146m、1552m,跨度达 1100m 左右,最大值可超过 3500m;湿季的中位数为 413m,而第一四分位数和第三四分位数分别为 179m、833m,跨度不大,最大值也在 2000m 以下。夜间,干、湿季 PBLH 变化平稳,变化范围均在 60 m 以下。

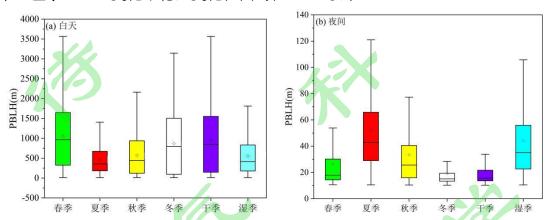


图 7 腾冲 1980—2023 年 ERA5 不同季节白天 (a) 和夜间 (b) 逐小时 PBLH 箱线图 (矩形盒黑色横线表示中位数,矩形盒的上下边缘线分别表示 25%和 75%分位数,矩形盒上下两端的外延线表示正常值中的最大和最小高度值,黑色菱形表示平均值)。

Fig. 7 Hour-by-hour PBLH of ERA5 box plot of Tengchong during daytime (a) and nighttime (b) in different seasons from 1980 to 2023 (The black horizontal line of the rectangular box represents the median, the upper and lower edge lines of the rectangular box represent the 25% and 75% quantile respectively, the epitaxial lines of the upper and lower ends of the rectangular box represent the maximum and minimum height values in the normal value, and the black diamond represents the average value).

腾冲 PBLH 在春季和冬季最高、夏季最低,秋季居中(图 7 和图 8)。值得注意的是,腾冲夏季 TCC 明显高于其他三个季节,夏季 SSHF 又是一年中最低、SLHF 在一年中较高,这是夏季 PBLH 在一年中最低的三个关键因素,且高 TCC 抑制了 PBLH 的发展(图 8)。腾冲春季和冬季的 W10 和 SSHF 为一年中较高,而 TCC 为一年中较低,这是春季和冬季 PBLH 在一年中最高的两个关键因素;SLHF 在秋季较高,但 W10 对 PBLH 的影响占主导作用。除了夏季,PBLH 与RH 之间始终存在较强的负相关关系,夏季 RH 最高而 PBLH 最低(图 8)。RH 与 PBLH 的变化趋势相反,当 RH 较高时,空气中的水蒸气含量增加,较高的湿度可以通过改变地表能量分配,使得潜热增加,感热减少,从而抑制边界层的发展,使得 PBLH 减小(Darandm and Zandkarimif,2019)。

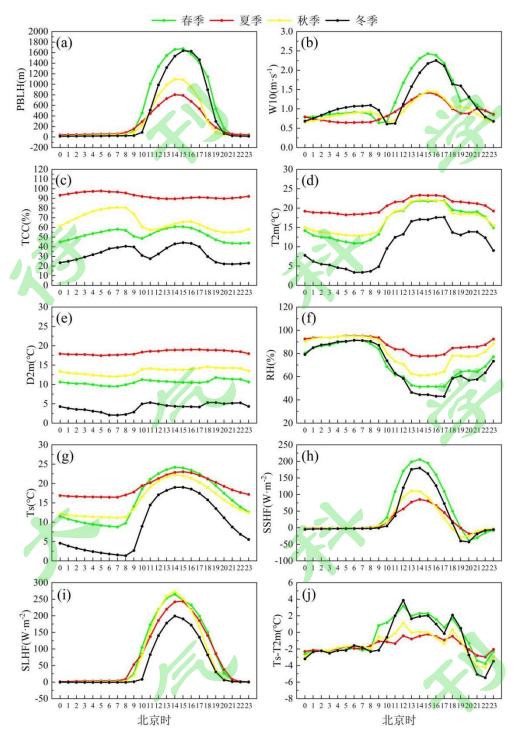


图 8 1980—2023 年 PBLH_ERA5 及其影响因子的季节平均日变化特征(a:PBLH; b:W10; c:TCC; d:T2m; e:D2m; f:RH; g:Ts; h:SSHF; i:SLHF; j:Ts-T2m)。 Fig.8 Seasonal mean diurnal variation of PBLH_ERA5 and its influencing factors from 1980 to 2003 (a: PBLH; b:W10; c:TCC; d:T2m; e:D2m; f:RH; g:Ts; h:SSHF; i:SLHF; j:Ts-T2m).

腾冲 PBLH 在干季高、湿季低(图 7 和图 9)。与湿季相比,干季具有更高的 W10、SSHF 和 Ts-T2m,更少的 TCC、D2m、RH、Ts、SSLF,这些都有利于干季边界层的发展(图 9)。腾冲 W10 对干季 PBLH 的影响高于湿季,这与干

季 W10 高于湿季有关。RH 对干季 PBLH 的影响高于湿季,相关系数可达-0.77,干季 RH 低于湿季,较低的 RH 有利于中性和对流边界层的发展。TCC 对湿季 PBLH 的影响高于干季,相关系数高达-0.91,因为湿季 TCC 高于干季,较高的 TCC 可以通过改变地表能量分配减少感热通量,从而抑制边界层的发展(图 9)。

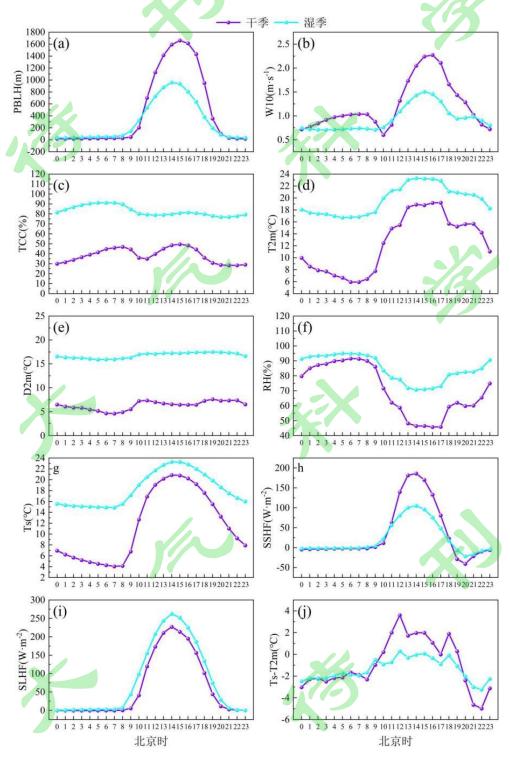


图 9 1980—2003 年 PBLH_ERA5 及其影响因子的干湿季平均日变化特征(a:PBLH; b:W10; c:TCC; d:T2m; e:D2m; f:RH; g:Ts; h:SSHF; i:SLHF; j:Ts-T2m)。

Fig. 9 Average diurnal variation of PBLH_ERA5 and its influencing factors in wet and dry seasons from 1980 to 2003 (a: PBLH; b:W10; c:TCC; d:T2m; e:D2m; f:RH; g:Ts; h:SSHF; i:SLHF; j:Ts-T2m).

图 10 为云南腾冲 1980 至 2023 年分干、湿季后,在不同天气状况下的 PBLH 箱线图。午后 15:00,干季的 PBLH 从高到低依次为少云天、多云天、晴天、阴天;湿季的 PBLH 从高到低依次为晴天、少云天、多云天、阴天。湿季 15:00 的 PBLH 随云量的增加而降低;15:00 的干、湿季之间,除晴天外,少云天、多云天、阴天为干季的 PBLH 大于湿季;干季 PBLH 波动大于湿季,在干季的少云天,PBLH 甚至能达到 3250m 以上。午夜的 00:00,无论干、湿季,PBLH 均为阴天最高,晴天最小,夜间的 PBLH 表现为随云量的增加而升高。整体上,湿季夜间 PBLH 大于干季,阴天 PBLH 的波动最大,但均在 100m 以下。

干季的午后,少云天和多云天 PBLH 大于晴天、阴天,这主要是一定程度下的云量使得太阳辐射能更有效地加热地表,增强了感热通量,从而促进了边界层的发展,过多的云量减少太阳辐射,过少的云量则可能降低大气吸收地面的感热通量。至于干季晴天 PBLH 低于湿季,可能是由于湿季较高的水分蒸发增加了潜热释放,即便在晴天,这种额外的能量输入也有助于维持较高的 PBLH。

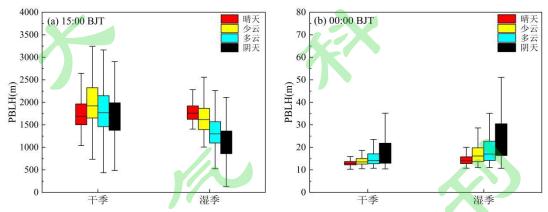


图 10 1980—2023 年腾冲 15:00 (a)、00:00 (b) ERA5 在不同天气状况下的 PBLH 箱线 图 (同图 7)。

Fig.10 PBLH of ERA5 box plot at 15:00 (a) and 00:00 (b) in Tengchong from 1980 to 2023 under different weather conditions (similar to Fig.7).

3.2.3 日变化特征

图 11a 是云南腾冲 1980 年至 2023 年 PBLH 春季、夏季、秋季、冬季的日变化特征。从四季日变化来看,云南腾冲春季、冬季的日最高 PBLH 值出现在 15:00 (1675m 和 1636m),夏季、秋季日最高 PBLH 值出现在 14:00 (803m 和 1096m)。

秋季的日最低 PBLH 值为 23:00,春季、夏季和冬季的日最低 PBLH 值均出现在 00:00。春季 PBLH 日变化波动最大,在午后可达 2250m 以上。

图 11b 是云南腾冲 1980 年至 2023 年干、湿季的 PBLH 日变化特征。从图中可以看出,在日变化尺度上,最低值均出现在 00:00 (干季为 17m,湿季为 32m),最高值出现在午后 (干季在 15:00, 1661m;湿季在 14:00, 958m)。干季 PBLH 的日变化波动最大,在午后可达 2000m 以上。在对比干、湿季 PBLH 的日变化趋势时发现,21:00 至次日 10:00,湿季的 PBLH 大于干季;在 11:00 至 20:00,干季的 PBLH 大于湿季。

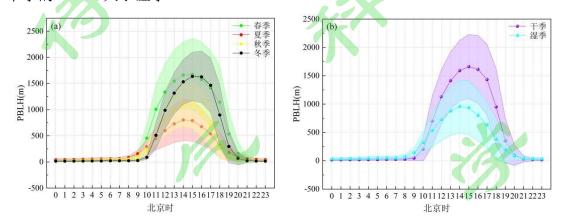


图 11 1980—2023 年腾冲 ERA5 四季(a)、干湿季(b)PBLH 日变化(误差带为标准差)。 Fig.11 Daily variations of PBLH in seasonal (a), dry and wet seasons (b) in Tengchong by ERA5 from 1980 to 2003 (error band is standard deviation).

腾冲白天和夜间 PBLH 的变化在各季节是不同的(图 7)。腾冲 1980—2003年 ERA5 白天多年日平均 PBLH 与 W10、Ts、SSHF、Ts-T2m 呈显著的正相关关系,与 RH 呈显著的负相关关系;夜间多年日平均 PBLH 与 SLHF 呈显著的正相关关系。白天,W10 是 PBLH 发展的主导动力因素,相关系数可达 0.95,因为白天 W10 高于夜间,较大的风速可以通过促进湍流动力混合,从而驱动边界层的发展(图 8 和图 12)。白天,以中性和对流边界层为主,边界层的发展主要受到地表加热和湍流混合的强烈影响,其中 SSHF(正值,向上加热)的显著正相关性表明,蒸发过程在白天 PBLH 的发展中扮演了关键角色,而 RH 的变化则通过影响大气的热力学状态来调节边界层的高度。白天的 Ts-T2m(正值)作为热力驱动因子,其正相关性进一步证实了地表加热对边界层发展的重要性。在夜间,边界层的发展主要受地表冷却和长波辐射的调控,SLHF 在夜间成为唯一有显著相关性的因子,这可能与夜间地表和大气之间的残余热量交换有关;SSHF

的热力驱动作用对夜间边界层的作用不大,但 SLHF 对夜间边界层发展的作用尤为重要。

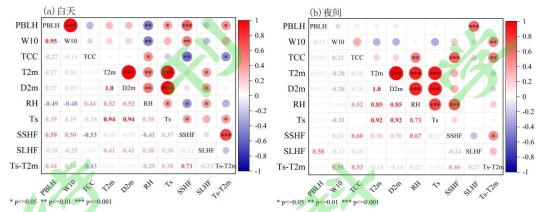


图 12 1980—2003 年 ERA5 白天和夜间多年日平均 PBLH 与影响因子在昼夜变化上的相关性热图(a:白天; b:夜间)。

Fig.12 Heat map of correlation between daytime and nighttime multi-year daily average PBLH and influence factors on diurnal variation by ERA5 from 1980 to 2003 (a: during the day; b: at night).

3.3 影响因子分析

总的来说,腾冲 1980—2003 年 ERA5 逐年年平均 PBLH 与 W10、T2m、Ts、SSHF、Ts-T2m 呈显著的正相关关系,而与 TCC、D2m、RH、SLHF 呈显著的负相 关 关 系; 各 气 象 因 子 对 PBLH 的 影 响 大 小 为 W10>RH>SSHF>TCC>SLHF>D2m>Ts-T2m>Ts>T2m(图 13)。腾冲边界层的发展主要受风速动力驱动和感热通量热力因子的影响,与前人其他地区的研究一致(Darandm and Zandkarimif,2019;Huo et al.,2021;Guo et al.,2021)。

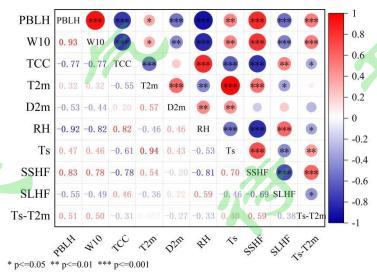


图 13 1980—2003 年 PBLH ERA5 逐年年平均与影响因子的相关性热图。

Fig.13 Correlation heat map of annual average PBLH ERAS and impact factor from 1980 to 2003.

3.3.1 季节变化的尺度分析

如图 14 所示, 腾冲 1980—2003 年 ERA5 逐年春季平均和冬季平均 PBLH 与W10、T2m、D2m、Ts、SSHF、Ts-T2m 呈显著的正相关关系,与TCC、RH、SLHF 呈显著的负相关关系;而逐年夏季平均和秋季平均 PBLH 与W10、T2m、D2m、Ts、SSHF、SLHF、Ts-T2m 呈显著的正相关关系,与TCC、RH 呈显著的负相关关系。春季、秋季和冬季,W10 与 PBLH 的相关系数分别高达 0.95、0.86和 0.92,远大于其他因子与 PBLH 的相关系数;夏季,W10 与 PBLH 的相关性减弱,而 SSHF和 SLHF与 PBLH 呈较强正相关,TCC则与 PBLH 呈较强负相关。

各季节边界层的发展主要受 W10 动力驱动,较大的 W10 可以通过促进湍流动力混合,从而驱动边界层的发展(Seidel et al., 2012),腾冲 W10 对春季、秋季、冬季 PBLH 的影响高于夏季,这与夏季 W10 为四个季节中最低有关。Ts、SSHF、SLHF等热力因子也对腾冲 PBLH 有着重要影响,在春季为 Ts 和 SSHF,在夏季为 Ts、SSHF和 SLHF,在秋季为 SSHF和 SLHF,在冬季为 SSHF。春季SSHF可达 206 W·m⁻²,这可能是 SSHF为春季第一显著性热力因子的原因(图 14)。

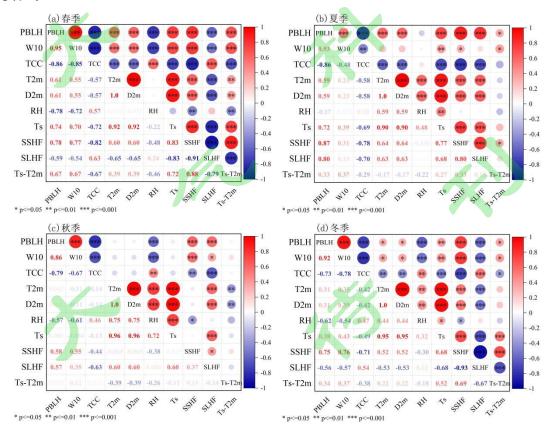


图 14 1980—2003 年 ERA5 逐年各季节平均 PBLH 与各影响因子在季节变化上的相关性热图 (a:春季; b:夏季; c:秋季; d:冬季)。

Fig.14 Heat maps of seasonal average correlation between PBLH and the influencing factors by ERA5 from 1980 to 2003 (a: spring; b: summer; c: autumn; d: winter).

3.3.2 干湿季尺度分析

在确定了各季节边界层的主要影响因子后,尝试研究这些因子在干季和湿季 状态下对 PBLH 的影响。

如图 15 所示, 腾冲 1980—2003 年 ERA5 逐年干季平均 PBLH 与 W10、T2m、D2m、Ts、SSHF、Ts-T2m 呈显著的正相关关系, 与 TCC、RH、SLHF 呈显著的负相关关系; 逐年湿季平均 PBLH 与 W10、Ts、SSHF、SLHF、Ts-T2m 呈显著的正相关关系, 与 TCC、RH 呈显著的负相关关系。干季,各气象因子对 PBLH的影响大小为 W10>SSHF>TCC>SLHF>RH>Ts-T2m>Ts>T2m(D2m);湿季,各气象因子对 PBLH的影响大小为 TCC>W10>SSHF>RH(Ts)>Ts-T2m>SLHF。

在干季和湿季,W10 是 PBLH 发展的主导动力因素。值得注意的是,除了动力因素外,干季 PBLH 的发展还受热力因子和湿度因子的驱动,湿季 PBLH 的发展则还受到云量强迫和热力因子的驱动。而热力因子,如 SSHF 对干季和湿季 PBLH 的影响几乎一致(图 15)。热力因子、湿度因子和云量强迫可以直接和间接影响热力湍流混合,从而影响边界层的发展(Dang et al., 2016; Zhang et al., 2017; Darandm and Zandkarimif, 2019)。

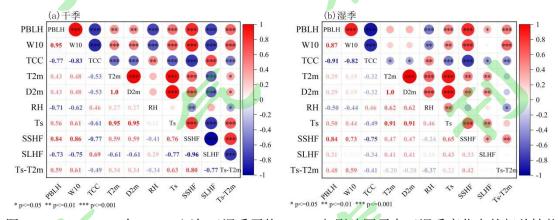


图 15 1980—2003 年 ERA5 逐年干湿季平均 PBLH 与影响因子在干湿季变化上的相关性热图 (a:干季; b:湿季)。

Fig.15 Heat map of the correlation between PBLH_ERA5 and the influencing factors in the wet and dry seasons average from 1980 to 2003 (a: dry season; b: wet season).

4 结论

本文利用腾冲探空站 2018—2023 年共 6 年的 L 波段探空观测数据,采用理查森数方法计算得到 PBLH,对比分析了 ERA5 的 PBLH 数据的适用性,基于1980—2023 年逐小时 ERA5 的 PBLH 数据,分析了云南腾冲(98.51°E, 24.98°N) PBLH 不同时间尺度的特征;结合同期的影响因子,包括:W10、TCC、T2m、D2m、Ts、SSHF、SLHF、RH、Ts-T2m,探讨了这些因素在多种时间尺度下与PBLH 之间的相互关系及影响程度,得到以下主要结论:

- (1) 1980—2023 年腾冲 PBLH 呈现出显著的波动变化,1988—1992 年显著下降(-12.4 m/yr)、2017 年之后显著增加(5.7 m/yr);春季、夏季、秋季、冬季的 PBLH 气候倾向率分别为-0.1m/yr、0.7m/yr、0.2m/yr、-0.2m/yr;干季和湿季的气 PBLH 气候倾向率分别为 0.3m/yr、0.05m/yr。
- (2) 白天,春季 PBLH 最高、夏季最低,夜间则是夏季最高、冬季最低;白天,干季 PBLH 高于湿季,夜间则相反。PBLH 日变化特征明显,白天波动较强,夜间较为稳定,峰值出现在午后 14:00 或 15:00。午后 15:00 的 PBLH 在不同天气状况下表现出明显差异,少云天的 PBLH 最高(1933m),阴天的 PBLH最低(1459m)。夜间 00:00,PBLH 的顺序相反。干季的 PBLH 普遍高于湿季,尤其是在少云条件下,PBLH 可超过 3250m。无论干湿季,夜间 PBLH 随云量的增加而升高,而午后 PBLH 则显示出与云量相关的复杂变化特征。
- (3) 在年尺度上,W10 为腾冲边界层发展的主要影响因子,SSHF 为腾冲边界层发展的重要热力影响因子。在季节尺度上,W10 对腾冲春季、秋季、冬季 PBLH 的影响高于夏季; 夏季较高的 TCC、SLHF、RH 和较低的 SSHF 是影响 PBLH 的三个主要影响因子。在干湿季尺度上,动力因子(W10)、热力因子(SSHF、Ts-T2m)、湿度因子(RH)是腾冲干季 PBLH 发展的主要影响因子,而动力因子、热力因子和 TCC 是湿季 PBLH 发展的主要影响因子。在昼夜尺度上,白天 PBLH 与 W10、SSHF、Ts-T2m 和 Ts 呈显著的正相关关系,与 RH 呈显著的负相关关系; 夜间 PBLH 与 SLHF 呈显著的正相关关系。

参考文献(References)

Darandm M, Zandkarimif F. 2019. Identification of atmospheric boundary layer height and trends over Iran using high-resolution ECMWF reanalysis dataset [J]. Theor. Appl. Climatol., 137(1/2): 1457–1465. doi:org/10.1007/s00704-018-2691-2.

- Dai C, Wang Q, Kalogiros J, et al. 2014. Determining boundary-layer height from aircraft measurements[J]. Bound.-Layer Meteorol., 152 (3):277–302. doi:10.1007/s10546-014-9929-z.
- Dang R J, Li H, Li Z G, et al. 2016. Statistical analysis of relationship between daytime lidar-derived planetary boundary layer height and relevant atmospheric variables in the semiarid region in northwest China [J]. Adv. Meteorol, 2016(3): 1–13. doi:org/10.1155/2016/5375918.
- Eresmaa R, Järvinen H. 2006. An observation operator for ground-based GPS slantdelays[J]. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 58(1): 131–140.doi:10.1111/j.1600-0870.2006.00154.x.
- Gu J, Zhang Y, Yang N, et al. 2020. Comparisons in the global planetary boundary layer height obtained from COSMIC radio occultation, radiosonde, and reanalysis data[J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 14 (3), 100018. doi:10.1016/j. aosl.2020.100018.
- Guo J, Li Y, Cohen J, et al. 2019. Shift in the temporal trend of boundary layer height in China using long-term (1979-2016) radiosonde data[J]. Geophys. Res. Lett., 46 (11): 6080-6089. doi:10.1029/2019GL082666.
- Guo J, Zhang J, Yang K, et al. 2021. Investigation of near-global daytime boundary layer height using high-resolution radiosondes: first results and comparison with ERA5, MERRA-2, JRA-55, and NCEP-2 reanalyses[J]. Atmos. Chem. Phys., 21 (22):17079–17097. doi:10.5194/acp-2021-257.
- 韩美,张苏平,尹跃进,等.2012.黄东海大气边界层高度季节变化特征及其成因[J].中国海洋大学 学报,42(增刊):034-044. Han Mei, Zhang Suping, Yin Yuejin, et al. 2012. The Seasonal Variation and Causation of Atmospheric Boundary Layer Height at Yellow-East Sea[J].Periodical of Ocean University of China (in Chinese),42(Sup.):034-044. doi:10.16441/j.cnki.hdxb.2012.s1.005.
- Huo Y F, Wang Y H, Paasonen P, et al. 2021. Trends of planetary boundary layer height over urban cities of China from 1980-2018 [J]. Front. Environ. Sci., 9: 744255. doi:org/10.3389/fenvs.2021.744255.
- Li H, Liu B, Ma X, et al. 2021b. Evaluation of retrieval methods for planetary boundary layer height based on radiosonde data[J]. Atmos. Meas. Techn., 14 (9):5977–5986. doi:10.5194/AMT-14-5977-2021.
- 李媛,2020.基于多种资料的中国大气边界层高度时空分布特征及其机理研究[D].中国气象科学研究院. Li Yuan, 2020. Long-term trend of planetary boundary layer height derived from multiple dataset in China and its underlying mechanism[D]. Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese).
- 刘辉志,王雷,杜群,等. 2018.大气边界层物理研究进展(2012~2017年) [J].大气科学, 42(4): 823-832. Liu Huizhi, Wang Lei, Du Qun, et al. 2018. An Overview of Recent Studies on Atmospheric Boundary Layer Physics (2012-2017) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(4): 823-832. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1802.17274.
- Liu J, Huang J, Chen B, et al. 2015. Comparisons of PBL heights derived from CALIPSO and ECMWF reanalysis data over China[J]. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf., 153:102–112. doi:10.1016/j.jqsrt.2014. 10.011.
- 刘树华,文平辉,张云雁,等,2001.陆面过程和大气边界层相互作用敏感性实验[J]. 气象学报,59(5): 533-548. Liu Shuhua, Wen Pinghui, Zhang Yunyan, et al. 2013. Sensitivity Tests of Interaction Between Land Surface Physical Process and Atmospheric Boundary Layer[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2001, 59(5): 533-548.
- 乔梁,张强,岳平,等, 2019.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,43(2):251-265. Qiao Liang, Zhang Qiang, Yue Ping, et al. 2019. Analysis of changes in the structure of atmospheric boundary layer from non-monsoon zone to monsoon zone [J]. Chinese

- Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43 (2): 251–265, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1805.17231.
- Sawyer V, Li Z. 2013. Detection, variations and intercomparison of the planetary boundary layer depth from radiosonde, lidar and infrared spectrometer[J]. Atmos. Environ., 79:518–528. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.07.019.
- Seidel D, Zhang Y, Beljaars A, et al. 2012. Climatology of the planetary boundary layer over the continental United States and Europe[J]. J. Geophys. Res.-Atmos., 117 (D17) doi:10.1029/2012JD018143.
- Serafin S, Adler B, Cuxart J, et al. 2018. Exchange processes in the atmospheric boundary layer over mountainous terrain[J]. Atmosphere, 9(3), p.102. doi:10.3390/atmos9030102.
- 吴雯璐,陈海山,郭建平,等. 2024.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, 48(3): 1201-1216. WU Wenlu, CHEN Haishan, GUO Jianping, et al. 2024. Regionalization of the Boundary-Layer Height and its Dominant Influence Factors in Summer over China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 48(3): 1201-1216. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2212.22183.
- Xu H Q, Chen H S, Guo J P, et al. 2023. Regionalization of the summertime planetary boundary layer height in comparison with various reanalysis datasets over China[J]. Atmospheric Research, 282,106534. doi:10.1016/j.atmosres.2022.106534.
- Yang K, Teng M, Luo Y, et al. 2020. Human activities and the natural environment have induced changes in the PM_{2.5} concentrations in Yunnan Province, China, over the past 19 years[J]. Environmental Pollution, 265, 114878. doi:10.1016/j.envpol.2020.114878.
- 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[J].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[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 78(3): 522-536. doi:10.11676/qxxb2020.044.
- Zhang W C, Guo J P, Miao Y C. et al., 2016. Planetary boundary layer height from CALIOP compared to radiosonde over China[J]. Atmos. Chem. Phys., 16 (15):9951–9963. doi:10.5194/acp-16-9951-2016.
- Zhang W C, Guo J P, Miao Y C, et al. 2017. On the summertime planetary boundary layer with different thermodynamic stability in China: A radiosonde perspective[J]. J. Climate, 31(4): 1451–1465. doi:org/10.1175/JCLI-D-17-0231.1.
- Zhang Y, Seidel D, Zhang S. 2013. Trends in planetary boundary layer height over Europe[J]. J. Clim., 26 (24):10071–10076. doi:10.1175/JCLI-D-13-00108.1.
- 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的频率密度研究 [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 (in Chinese), 32(2): 377–386. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00037.
- 赵艳茹,毛文茜,张珂铨,等. 2017.东亚、北非干旱半干旱区边界层高度变化及其影响因素[J]. 中山大学学报(自然科学版),56(05):93-100. Zhao Yanru, Mao Wenqian, Zhang Kequan, et al. 2017. The boundary layer height variation and influence factors over arid and semiarid areas of East Asia and North Africa[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (in Chinese), 56(05):93-100. doi: 10. 13471/j. cnki. acta. snus. 2017. 05. 013
- 徐桂荣,崔春光,周志敏,等. 2014.利用探空资料估算青藏高原及下游地区大气边界层高度[J].

暴雨灾害,33(3):217–227. Xu Guirong, Cui Chunguang, Zhou Zhimin,et al. 2014. Atmospheric boundary layer heights estimated from radiosonde observations over the Qinghai-Tibet Plateau and its downstream area [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 33(3): 217–227. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2014.03.004

赵平伟, 段绍玲, 史建武, 等. 2023. 云南大气边界层高度演变及其与PM2.5 变化相关性分析 [J]. 气候变化研究进展, 19 (3): 278–292. Zhao Pingwei, Duan Shaoling, Shi Jianwu, et al. 2023. Analysis on the evolution of atmospheric boundary layer in Yunnan province and its effect on the change of PM2.5 concentration [J]. Climate Change Research, 19 (3): 278–292. doi: 10.12006/j.issn.1673-1719.2022.191

