

赖悦,李林,王辉,等,2024. 过去 30 年北京地区大气对流边界层高度的变化特征及其影响因素[J]. 气象,50(12):1417-1428.
Lai Y, Li L, Wang H, et al, 2024. Variation characteristics and influencing factors of atmospheric convective boundary layer height over Beijing Region in the past 30 years[J]. Meteor Mon, 50(12):1417-1428(in Chinese).

过去 30 年北京地区大气对流边界层高度的 变化特征及其影响因素 *

赖悦¹ 李林¹ 王辉¹ 张宏文² 夏芸洁¹ 韦涛¹ 孟磊¹

¹ 北京市气象探测中心, 北京 100089

² 北京市气候中心, 北京 100089

提 要: 大气对流边界层高度的演变对天气和气候变化具有重要影响, 目前关于北京地区对流边界层高度的气候特征研究较少。利用 1992—2022 年的高分辨率 ERA5 再分析资料, 研究了过去 30 年北京地区对流边界层高度的气候特征。首先使用无线电探空观测数据评估了 ERA5 大气对流边界层高度数据的表现, 结果显示 ERA5 可以很好地再现探空观测的对流边界层高度变化特征。其次研究了对流边界层高度的年际变化、季节变化和日变化特征, 以及对流边界层高度与关键气象要素的相关性。结果表明, 过去 30 年春季和秋季的对流边界层高度分别以 $61.6 \text{ m} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $13.1 \text{ m} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率呈逐年减小趋势, 夏季和冬季的对流边界层高度分别以 $2.9 \text{ m} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $7.7 \text{ m} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率呈逐年增加趋势。春季、夏季、秋季、冬季中午时段的对流边界层高度中位数分别约为 1700、1100、950、800 m。春季在全年四个季节中的对流边界层高度发展最高, 是因为春季地表感热通量最大, 同时大气层结的不稳定程度最强。通过分析对流边界层高度与感热通量、位温直减率、地气温差的相关关系, 发现在春季, 当感热通量每增大 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, 对流边界层高度升高 615 m; 当位温直减率每增大 $1^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 时, 对流边界层高度升高 1376 m; 当地气温差增大 1°C 时, 对流边界层高度升高 175 m。

关键词: 对流边界层高度(CBLH), 再分析资料, 无线电探空, 变化特征, 影响因素

中图分类号: P412, P467

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.080101

Variation Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Convective Boundary Layer Height over Beijing Region in the Past 30 Years

LAI Yue¹ Li Lin¹ WANG Hui¹ ZHANG Hongwen² XIA Yunjie¹ WEI Tao¹ MENG Lei¹

¹ Beijing Meteorological Observation Center, Beijing 100089

² Beijing Municipal Climate Center, Beijing 100089

Abstract: The temporal evolution of atmospheric convective boundary layer height (CBLH) has an important impact on weather and climate change, but there are few studies on the CBLH climatology in the Beijing Region. This study presents the CBLH climatology in Beijing by using high resolution ERA5 reanalysis data during 1992—2022. The ERA5 CBLH is first evaluated against radiosonde-derived CBLH. ERA5 can reproduce the CBLH variation characteristics by sounding reasonably well. Then, the interannual, seasonal and diurnal variations of the CBLHs, as well as the correlation between the CBLH and key meteorological parameters are analyzed. The results show that in the past 30 years, the CBLHs in spring and autumn

* 中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J058, CXFZ2023J061)、北京市科学技术协会 2022—2024 年度青年人才托举工程项目、中国气象局气象能力提升联合研究专项(23NLTSQ011)和北京市气象局重点创新团队(BMB2024ZD05)共同资助

2023 年 12 月 22 日收稿; 2024 年 5 月 20 日收修定稿

第一作者: 赖悦, 主要从事大气边界层观测和模拟研究. E-mail: yue_lai@126.com

通讯作者: 李林, 主要从事综合气象观测研究. E-mail: lilin@bj.cma.gov.cn

have decreased at the rate of 61.6 m per decade and 13.1 m per decade, respectively, while that in summer and winter have increased at the rate of 2.9 m per decade and 7.7 m per decade, respectively. The median values of CBLH at noon in spring, summer, autumn, and winter are about 1700 m, 1100 m, 950 m, and 800 m, respectively. The CBLH in spring is the highest among the four seasons because of the large surface sensible heat flux and the weak atmospheric stability. By analyzing the relationship between CBLH and sensible heat flux, potential temperature lapse rate and difference of surface temperature and air temperature ($T_s - T_a$), we have found that in spring, when the sensible heat flux increases by $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, the CBLH increases by 615 m; when the potential temperature lapse rate increases by $1^\circ \text{C} \cdot \text{km}^{-1}$, the CBLH increases by 1376 m; and when the $T_s - T_a$ increases by 1°C , the CBLH increases by 175 m.

Key words: atmospheric convective boundary layer height (CBLH), reanalysis data, radiosonde, variation characteristic, impact factor

引 言

大气边界层是大气的最低层,直接受到下垫面的影响,是地表与大气之间能量、动量和物质的交换最为活跃的区域,也是地球各圈层相互作用的关键区域(Stull, 1988)。大气边界层对于热量、水分和污染物等从地面垂直输送到自由对流层起着关键作用,因此在很大程度上影响空气质量、对流系统和云的形成(Garratt, 1992; 赵鸣和苗曼倩, 1992)。大气边界层通常分为对流边界层、稳定边界层和中性边界层。白天太阳对下垫面的增热导致感热通量向上传输,逐渐形成不稳定层结的大气边界层,称为对流边界层。中性边界层是指整个低层大气自下而上保持中性层结,浮力作用非常微弱的大气边界层。稳定边界层一般出现在夜间,是伴随地面辐射降温出现逆温层结所形成的(盛裴轩等, 2003)。

大气边界层高度是描述大气边界层结构特征的一个关键参数,其中对流边界层高度常用于确定对流边界层湍流混合的深度以及与自由大气的交换程度,在气候变化、天气预报等方面的研究中应用广泛,是数值模式验证、污染物传输诊断的重要指标(张强和胡隐樵, 2001; 贺千山和毛节泰, 2005; 李晓莉等, 2005; 陈炯和王建捷, 2006; 张美根等, 2008; 黄文彦等, 2014; 李梦等, 2015; 刘辉志等, 2018; 师宇等, 2019; 桂海林等, 2021; 吴进等, 2021; 李岩瑛等, 2022)。

多年来利用各类观测仪器,国内外学者对北京地区对流边界层高度进行了相关研究。王珍珠等(2008)使用便携式米散射激光雷达观测发现北京城区夏季的对流边界层高度基本分布在 1.8 km 以

下。Tang et al(2016)通过分析云高仪观测数据,发现北京地区春季和夏季对流边界层高度高,秋季和冬季对流边界层高度低,且对流边界层高度与感热通量之间存在显著相关性。李霞等(2018)利用气溶胶激光雷达对北京地区对流边界层高度进行分析,发现夏季对流边界层高度在北京时 14:00 左右达到最高,发展较高的对流边界层在白天下午可维持 3~4 h,平均高度可达 1.3 km; 冬季较高对流边界层高度只能维持 2 h 左右,平均为 1.1 km。蔡嘉仪等(2020)使用激光云高仪数据对比分析了 5—6 月北京城区和郊区对流边界层高度的变化,发现对流边界层的形成时间城区要早于郊区,白天对流边界层高度的变化范围城区为 517~1391 m,郊区为 390~1302 m。这是由于城区地表在白天吸收了更多的太阳辐射,导致城区的加热作用强于郊区,从而加速了对流边界层高度的增长。Solanki et al(2021)使用风廓线雷达资料对比分析北京城区和山区晴空条件下的对流边界层高度变化特征,发现春季白天上午城区对流边界层的发展容易受到抑制,而山区对流边界层则正常发展演化。此外,城区对流边界层增长率相较于山区存在更加明显的季节变化特征。田野等(2022)利用微波辐射计对北京南部的对流边界层高度进行研究,发现晴天条件下对流边界层高度的变化特征与日照时长具有很好的对应关系。然而,由于观测设备存在观测中断不连续或者仪器投入运行使用年限较短等原因,上述研究工作主要集中在大气对流边界层高度的短期特征或个例分析。

无线电探空观测的时间分辨率较低,每天只在固定时间点进行观测,但其具有观测年代久、数据质量高的优势,因此成为分析大气边界层高度长期变化和边界层结构特征的有力手段(傅新姝等, 2020;

李秋阳等,2022;李怡霖等,2023;路传彬等,2023;吴雯璐等,2024)。Guo et al(2019)使用 1979—2016 年的探空数据计算了整个中国区域大气边界层高度的变化趋势,发现先增后减的趋势反转现象,并进一步揭示了边界层高度变化与土壤湿度、对流层低层稳定性、近地层空气温度和相对湿度之间的关系。该研究为本文关注北京地区的对流边界层高度研究提供了借鉴和参考。早期尤焕苓等(2010)利用北京时 08:00 的探空资料与地面日最高气温资料估算最大对流边界层高度的方法,分析了北京 1970—2007 年的最大对流边界层高度,发现平均最大对流边界层高度自 1970—1998 年有逐年减小趋势,1998 年达到最小值,而从 1998—2007 年有逐渐增加的趋势。此后,王坚等(2016)使用了与尤焕苓等(2010)相同的方法估算北京地区 1984—2013 年的逐日最大对流边界层高度,并发现了北京地区除春季之外,夏季、秋季和冬季的空气污染指数与最大对流边界层高度之间存在较好的负相关。但是,上述两项研究中的最大对流边界层高度计算均使用北京时 08:00 的探空数据,这一时刻与实际白天下午形成最大对流边界层高度的时间并不对应,因此该最大对流边界层高度计算方法对于结果分析可能存在较大误差。此外,研究也并未深入探讨北京地区对流边界层高度变化的原因,以及相关气象因素对大气对流边界层高度的影响。

再分析资料是将气象观测与数值模拟相结合,提供受实际观测约束的且具有物理一致性的长时间序列气候网格数据集,能够用于大气边界层高度的变化分析。杨世昆等(2023)将 2021 年 5—8 月北京地区地基垂直设备观测数据反演的边界层高度与 ERA5 再分析资料提供的大气边界层高度进行比较,发现反演的边界层高度与 ERA5 大气边界层高度数据的一致性较好。Guo et al(2016)对比分析了 2011—2015 年探空数据和 ERA-Interim 再分析资料所得中国地区季节平均的边界层高度,发现尽管在我国一些区域两者之间存在明显的不一致,但整体上呈现出良好的一致性。而目前关于再分析资料大气对流边界层高度在北京地区年际变化特征的评估和研究工作还较为缺乏,因此本研究为首次使用白天中午时段北京地区的多年无线电探空观测对再分析资料进行评估,分析再分析资料在北京地区的适用性,利用再分析资料研究大气边界层高度,特别是对流边界层高度的长期变化趋势,并分析北京地

区对流边界层高度的年际变化、季节变化和日变化特征,以及对流边界层高度与关键气象要素的相关性。

1 资料和方法

1.1 资料来源

本文使用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 ERA5 再分析资料研究过去 30 年北京地区大气对流边界层高度的年际和季节变化特征(Hersbach et al,2020)。再分析资料是将多源观测数据进行质量控制,并同化进入全球模式之后得到的全球格点数据集。ERA5 再分析资料是 ECMWF 制作的第五代全球大气再分析数据集,该数据集提供 1000~1 hPa 共 37 个气压层的高空以及地面全球大气数据,数据的空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,时间分辨率为 1 h(从 00:00 UTC 开始的 1 h 间隔),涵盖时间为 1950 年至今,这为研究北京地区大气对流边界层高度的气候特征提供了一个独特机会。ERA5 大气边界层高度数据在 ECMWF 的集合预报系统中采用总体理查森数法计算获得(Seidel et al,2012),总体理查森数法适用于对流边界层和稳定边界层高度的计算反演(Vogelezang and Holtslag,1996)。此外为了分析地表和近地层的气象条件,本文还使用了 ERA5 近 30 年感热通量的月平均数据以及地表和不同高度层气温的月平均数据。

MERRA-2(Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2)再分析资料用于与 ERA5 再分析资料大气对流边界层高度数据的年际变化特征进行比较。MERRA-2 再分析资料是美国国家航空航天局(NASA)下属的全球建模和同化办公室(GMAO)使用戈达德地球观测系统模型第五版(GEOS-5)制作的全球大气再分析数据集(Gelaro et al,2017)。MERRA-2 大气边界层高度数据所涵盖的时间范围为 1980 年至今,时间分辨率为 1 h(从 00:30 UTC 开始的 1 h 间隔),空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.625^{\circ}$ 。与 ERA5 大气边界层高度的计算方法不同,MERRA-2 大气边界层高度数据产品采用热量总涡流扩散系数值进行计算反演(McGrath-Spangler and Molod,2014)。

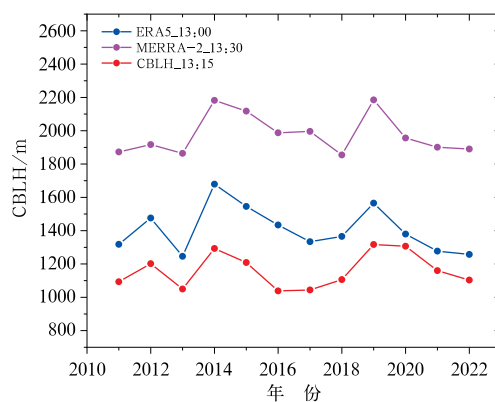
本文所使用的无线电探空观测数据来自北京市气象台。该台站位于北京市大兴区南五环路北侧,

海拔高度 31.5 m,同时该站也是北京地区唯一参加全球常规气象资料交换的观测站。L 波段高空气象探测系统用于该站的探空观测业务,每日常规探空观测为 07:15 和 19:15(北京时,下同)。探空仪型号为 GTS1 型数字式电子探空仪。该探空系统可获取垂直分辨率为 10 m 的空气温度、气压、相对湿度、风速、风向等垂直廓线数据,探测高度最高可达 35 km。已有研究对 GTS1 型探空仪和 Vaisala RS80 型探空仪在对流层内的探测性能进行对比分析,发现两者之间具有很好的一致性(Bian et al, 2011)。自 2010 年前后开始,北京市观象台在每年夏季(6 月 1 日至 8 月 31 日)13:15 增加一次探空观测,这也为本文尝试研究北京地区白天中午对流边界层高度的长期变化特征提供了一定的观测数据支撑。本文选取 2011—2022 年(共 12 a)每年 6 月 1 日至 8 月 31 日 13:15 的 L 波段探空观测数据用于再分析资料大气对流边界层高度数据评估。本文采用位温廓线法结合无线电探空观测数据进行对流边界层高度计算(Holzworth, 1964; 张强等, 2004; 张宏昇等, 2020),具体方法是将从地面开始最先出现强度超过 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$ 的大气逆温层底部确定为对流边界层高度(张强等, 2011; 2019; Zhang et al, 2011)。

1.2 再分析资料大气对流边界层高度的评估

无线电探空观测数据反演的对流边界层高度与再分析资料大气对流边界层高度在 2011—2022 年夏季(6—8 月)的年际变化特征如图 1 所示。与北京市观象台所在位置经纬度距离最接近的相应再分析资料经纬度格点上的大气对流边界层高度数据用于本研究。由于无线电探空观测时间为 13:15,为了与探空观测时间尽可能保持一致,选取 ERA5 在 13:00 的大气对流边界层高度和 MERRA-2 在 13:30 的大气对流边界层高度与探空观测结果进行对比评估。

从图 1 中可以看出,MERRA-2 和 ERA5 均能够还原大气对流边界层高度观测值的年际变化特征。然而,两种再分析资料存在不同程度的高估现象,其中 MERRA-2 出现的高估程度相对较大。此外,观测反演的对流边界层高度与 ERA5 之间的相关系数为 0.68,与 MERRA-2 之间的相关系数为 0.63。因此,ERA5 与观测计算的对流边界层高度在年际变化趋势上的一致性好于 MERRA-2。需要



注:ERA5_13:00,MERRA-2_13:30 和 CBLH_13:15 分别为 13:00,13:30,13:15 的 ERA5、MERRA-2 和无线电探空观测的 CBLH。

图 1 2011—2022 年北京地区无线电探空观测与再分析资料的夏季平均大气对流边界层高度变化特征

Fig. 1 Variation characteristics of mean convective boundary layer height (CBLH) from radiosonde observations and reanalysis data over Beijing Region in summer from 2011 to 2022

注意的是,探空观测是在特定位置进行的单点观测,而 ERA5 是每个网格单元上的平均。考虑到这一点,尽管两者之间在数值上存在一些系统性误差,但 ERA5 很好地再现了 2011—2022 年探空观测的夏季平均对流边界层高度变化特征。ERA5 和探空观测结果的对比分析表明,ERA5 可用于大气边界层高度的长期变化特征研究(Slätberg et al, 2022; Lai et al, 2023)。同时,为了确保使用更加准确可靠的数据进行对流边界层高度分析,对 ERA5 大气对流边界层高度与观测值之间的系统性误差进行订正,将 2011—2022 年 ERA5 夏季平均对流边界层高度和探空观测值之差的平均值确定为系统性误差值,该值为 246 m。下文中所使用的 ERA5 大气对流边界层高度值为减去此系统性误差值之后的数值。

2 大气对流边界层高度变化特征

2.1 大气对流边界层高度的年际和季节变化

1992—2022 年春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)、冬季(12—2 月)四个季节在 13:00 的 ERA5 大气对流边界层高度变化特征如图 2 所示。从图中可以看出,过去 30 年夏季和冬季的对流

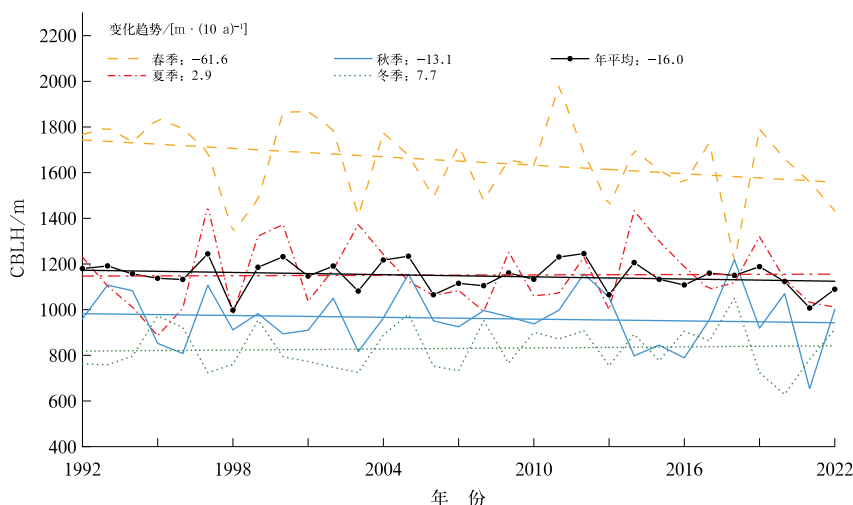


图 2 1992—2022 年 13:00 北京地区不同季节 ERA5 平均大气对流边界层高度年际变化特征

Fig. 2 Interannual variation of mean ERA5 CBLH over Beijing Region in different seasons at 13:00 BT from 1992 to 2022

边界层高度呈现逐年增加的趋势,增长速率分别为 $2.9 \text{ m} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $7.7 \text{ m} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$;春季和秋季则呈现逐年减小的趋势,减小速率分别为 $61.6 \text{ m} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $13.1 \text{ m} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。春季和秋季对流边界层高度的减小速率大于夏季和冬季边界层高度的增加速率。因此从总体上看,1992—2022 年的年平均对流边界层高度以 $16.0 \text{ m} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率呈递减趋势。此外,过去 30 年的年平均对流边界层高度最小值出现在 1998 年,且 1998 年之前的对流边界层高度整体上偏高于 1998 年之后,该结果与尤焕苓等(2010)和王坚等(2016)关于年平均最大对流边界层高度变化趋势的研究结论相同,同时也进一步说明了 ERA5 大气对流边界层高度数据与观测实况基本一致。

为了更好地了解北京地区中午大气对流边界层高度的年际变化趋势特征,对图 2 中 ERA5 大气对流边界层高度在 1992—2022 年四个季节的年际变化分别进行 M-K(Mann-Kendall)检验(符淙斌和王强,1992)。图 3a 为春季对流边界层高度年际变化的 M-K 检验结果。通过对 UF 值和 UB 值的分析可以得到对流边界层高度变化趋势的详细信息,并且可以明确突变的时间。当 $UF > 0$,表明对流边界层高度呈上升趋势;当 $UF < 0$,表明呈下降趋势。当 UF 值超过置信区间时($UF > 1.96$ 或 $UF < -1.96$),则表明上升或下降趋势显著。可以看到,1992—2022 年春季对流边界层高度的变化趋势基

本为先增大后减小。夏季的变化趋势为先减小后增大(图 3b)。秋季呈现先增大后减小再增大最终减小的趋势,冬季的变化趋势则与秋季基本相反(图 3c 和 3d)。此外,四个季节的 UF 值均未超过 0.05 显著性水平线。UF 值和 UB 值在置信区间内的交点对应出现突变的时间,本文在此对于数值大小的突变不做详细探讨。

图 4 为 1992—2022 年 ERA5 大气对流边界层高度在 13:00 的季节变化和月变化箱线图。图中给出了不同季节或月份的对流边界层高度中位数、四分位数以及最大值和最小值,方形空心点和黑色实心点分别表示平均值和出现的异常值。从图 4a 可以看出,各季节的对流边界层高度为春季>夏季>秋季>冬季,这一结果与王坚等(2016)关于日最大对流边界层高度季节变化特征的结论基本一致。春季、夏季、秋季、冬季对流边界层高度的中位数大致分别为 1700、1100、950、800 m,各季节的平均值大小与中位数基本相同。此外,春季对流边界层高度的波动程度明显大于其他三个季节,冬季的变化幅度最小。从对流边界层高度的逐月变化上看,对流边界层高度从冬季到春季逐渐增大,在 5 月达到最高(中位数约为 1900 m),在夏季逐渐下降,随后在秋季出现小幅上升,最终在 12 月降至最低,此时的对流边界层高度中位数约为 700 m(图 4b)。Guo et al(2016)基于无线电探空数据和 ECMWF 再分析资料研究得到中国边界层高度在春季和夏季高于

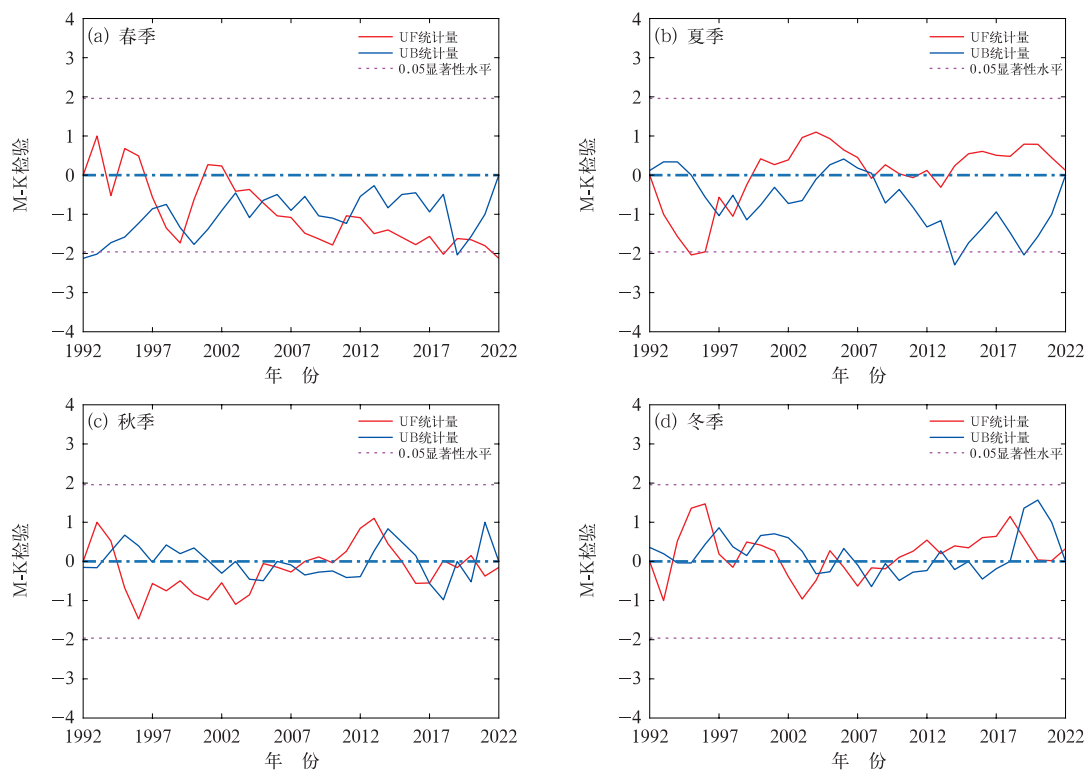
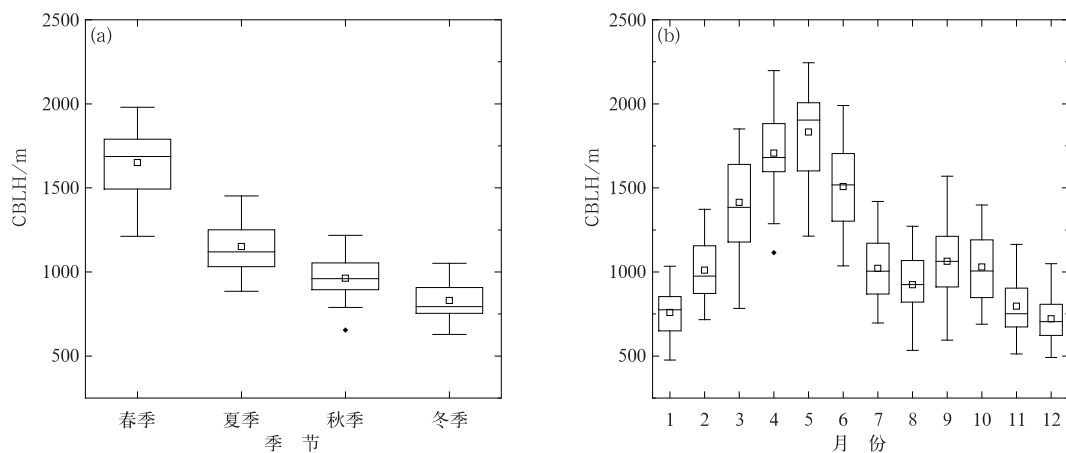


图 3 1992—2022 年 13:00 北京地区 ERA5 不同季节平均大气对流边界层高度年际变化的 M-K 检验
Fig. 3 M-K test of for the interannual variation of mean ERA5 CBLH over Beijing Region
in different seasons at 13:00 BT from 1992 to 2022



注:图中给出 CBLH 中位数、四分位数、最大和最小值;方形空心点和黑色实心点分别表示平均值和异常值;下同。

图 4 1992—2022 年 13:00 北京地区 ERA5 大气对流边界层高度的(a)季节变化和(b)月变化箱线图
Fig. 4 Box plots of (a) seasonal and (b) monthly variations of ERA5 CBLH
over Beijing Region at 13:00 BT from 1992 to 2022

秋季和冬季,但春季和夏季边界层高度之间的差异不大,甚至夏季要高于春季。分析造成该结果与本文所得边界层高度季节变化略有不同的原因,是由于该研究是基于整个中国地区所开展的边界层高度季节性分析,且使用的再分析资料为 ERA-Interim。

此外,该研究中分析的是 20:00 的边界层高度。

图 5 为 1992—2022 年 ERA5 资料的不同季节大气边界层高度日变化箱线图,对流边界层高度出现在白天时段,夜间时段为稳定边界层高度。图中给出了日变化不同时刻的大气边界层高度中位数、

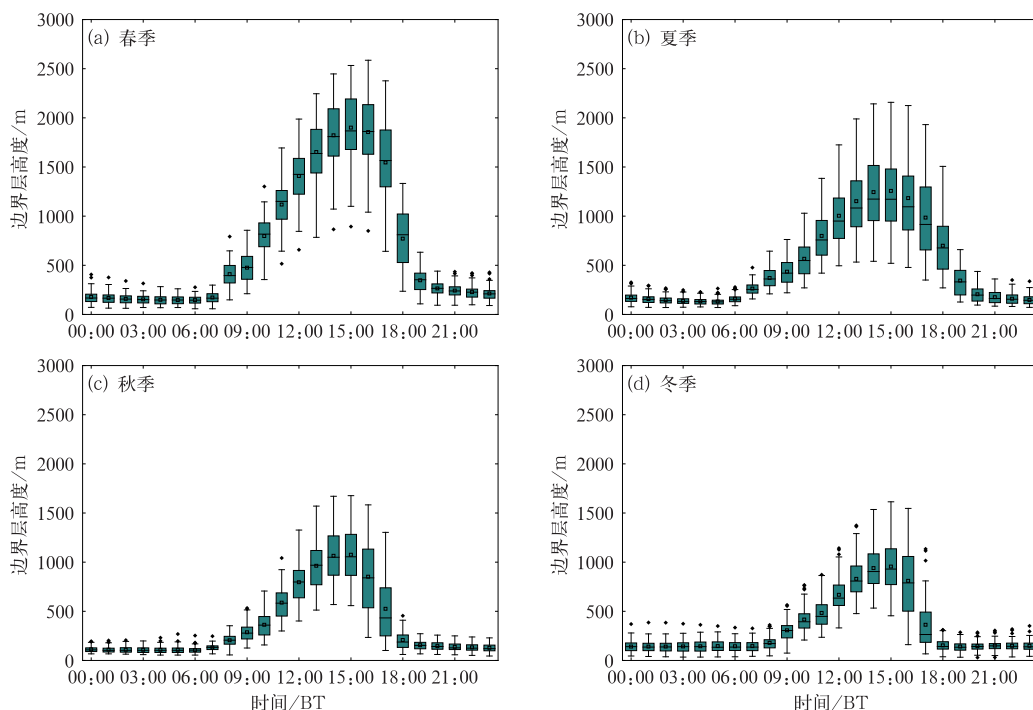


图 5 1992—2022 年北京地区 ERA5 不同季节大气边界层高度日变化箱线图

Fig. 5 Diurnal variation of ERA5 atmospheric boundary layer height over Beijing Region in different seasons from 1992 to 2022

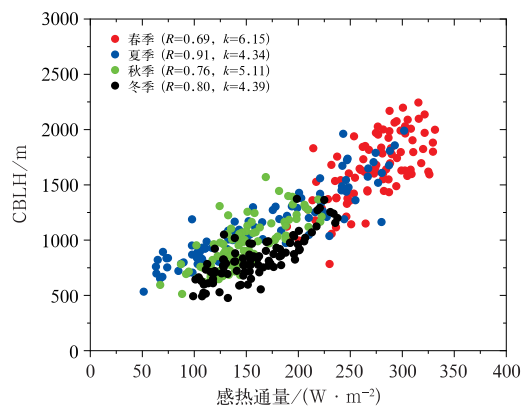
四分位数以及最大值和最小值, 方形空心点和黑色实心点分别表示平均值和异常值。从图中可以看出, 大气边界层高度具有明显的日变化特征, 夜间稳定边界层高度低, 随着日出以及太阳辐射增强, 地表迅速升温, 地表加热使得大气边界层逐渐向上发展。各个季节白天大气对流边界层高度的变化幅度大, 夜间稳定边界层高度变化幅度较小。春季、夏季、秋季、冬季大气边界层高度日变化的峰值中位数均出现在 15:00 左右, 数值大小分别约为 1900、1300、1100、950 m。各季节不同时刻的平均值与中位数大小基本相同。

2.2 大气对流边界层高度与关键气象要素的相关性研究

对流边界层高度的发展主要受到地表热力强迫和大气层结稳定度两个关键气象因素的影响 (Chen et al, 2016; Lai et al, 2023), 而地表热力作用和大气层结稳定程度可以分别通过感热通量的大小和位温直减率的变化进行分析。此外, 地气温差与对流边界层高度和感热通量的演化密切相关。因此, 为了研究对流边界层高度产生季节性差异的原因, 本研究重点分析了地表感热通量、位温直减率、地气温差

分别与对流边界层高度之间的定量化关系。

图 6 为 1992—2022 年春季、夏季、秋季、冬季 13:00 的大气对流边界层高度随地表感热通量的变化。图中给出了各个季节月平均对流边界层高度与感热通量之间的线性拟合结果。可以看出, 对流边界层高度随感热通量值线性增加。在四个季节中,



注: R 为相关系数, k 表示拟合线斜率。

图 6 1992—2022 年 13:00 北京地区不同季节月平均大气对流边界层高度与地表感热通量的关系

Fig. 6 Relationship between the monthly mean CBLH and surface sensible heat flux over Beijing Region in different seasons at 13:00 BT from 1992 to 2022

春季地表感热通量最大,秋季和冬季较小,夏季感热通量值变化幅度大。春季、夏季、秋季、冬季对流边界层高度与感热通量的相关系数(R)分别为 0.69、0.91、0.76、0.80,其中夏季的相关系数值最高,春季相关系数最低。感热通量为对流边界层的发展提供主要能量,在很大程度上决定对流边界层高度,虽然春季对流边界层高度与感热通量之间的相关系数较小,但由于感热通量值为四个季节中最大,因此,春季的对流边界层高度明显高于其他三个季节。根据各个季节对流边界层高度与感热通量之间的拟合线斜率(k)可知,春季的拟合线斜率最大,感热通量每增大 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,对流边界层高度升高 615 m。夏季、秋季、冬季的感热通量每增大 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,对流边界层高度分别升高 434、511、439 m。从全年对流边界层高度随感热通量的变化上看,当感热通量增大 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,对流边界层高度升高 535 m,对流边界层高度与感热通量的线性相关系数为 0.88。

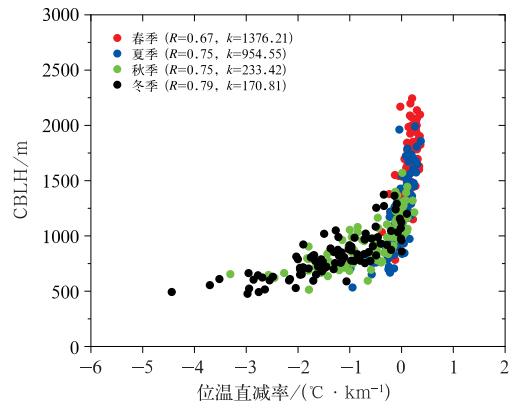
1992—2022 年春季、夏季、秋季、冬季 13:00 的大气对流边界层高度与 950~975 hPa 气压高度层位温直减率的关系如图 7 所示。大气层结稳定性对于对流边界层高度的发展至关重要,而位温直减率的数值大小则反映了大气层结的稳定程度。位温直减率(单位: $^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$)的定义如下:

$$\tau_{\theta} = -\frac{d\theta}{dz} \quad (1)$$

式中: dz 为 950 hPa 和 975 hPa 两个气压高度层之间的高度差, $d\theta$ 为上述两个气压高度层所对应的位温之间的位温差。位温直减率的数值越大,说明大气对流强度越强,大气层结越不稳定,越有利于对流边界层高度的发展。本研究选取的 950 hPa 和 975 hPa 气压高度层所对应的海拔高度分别约为 500 m 和 200 m,两个气压高度层的位温可通过相应的空气温度计算得到。从图中可以看出,春季的位温直减率值在四个季节中最大,夏季和秋季次之,冬季最小,说明春季大气层结不稳定程度最强,冬季的大气层结最为稳定。全年的对流边界层高度与位温直减率散点图整体上呈非线性,因此,这里不讨论全年对流边界层高度随位温直减率的线性变化,仅对各个季节对流边界层高度与位温直减率的线性关系进行分析。春季、夏季、秋季、冬季对流边界层高度与位温直减率的相关系数分别为 0.67、0.75、0.75、0.79。对流边界层高度与位温直减率拟合线的斜率

为春季>夏季>秋季>冬季,当位温直减率每增大 $1^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 时,春季、夏季、秋季、冬季的对流边界层高度分别升高 1376、955、233、171 m。

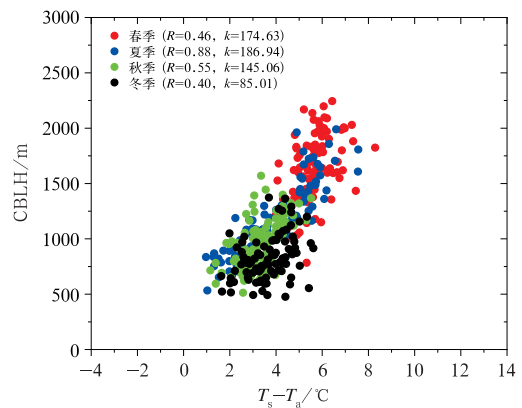
图 8 给出了 1992—2022 年春季、夏季、秋季、冬季 13:00 的对流边界层高度与地气温差的关系。本文所用的地气温差为地表温度(T_s)与 2 m 高度处



注: R 为相关系数, k 表示拟合线斜率。

图 7 1992—2022 年 13:00 北京地区不同季节月平均大气对流边界层高度与 950~975 hPa 气压高度层位温直减率的关系

Fig. 7 Relationship between the monthly mean CBLH and the potential temperature lapse rate of pressure level of 950—975 hPa over Beijing Region in different seasons at 13:00 BT from 1992 to 2022



注: R 为相关系数, k 表示拟合线斜率。

图 8 1992—2022 年 13:00 北京地区不同季节月平均大气对流边界层高度与地气温差的关系

Fig. 8 Relationship between the monthly mean CBLH and $T_s - T_a$ over Beijing Region in different seasons at 13:00 BT from 1992 to 2022

空气温度(T_a)的差值。各季节对流边界层高度与地气温差的相关系数在 0.40~0.88。夏季对流边界层高度与地气温差之间的相关性最好,但夏季地气温差的变化幅度相对较大。春季的地气温差值在四个季节之中最大,地气温差越大,感热通量越强,边界层越易抬升(Yang et al, 2023)。当地气温差增加 1℃时,春季、夏季、秋季、冬季的对流边界层高度分别升高 175、187、145、85 m(图 8)。从全年整体上看,对流边界层高度与地气温差的相关系数为 0.78,当地气温差增大 1℃时,对流边界层高度升高 227 m。

通过以上分析可知,北京地区春季大气层结在四个季节中的不稳定程度最强,同时地表感热通量值最大,因此春季的大气对流边界层高度相较于其他三个季节发展最高。张强等(2004; 2011; 2019)、Zhang et al (2011),以及张强和王胜(2008)研究发现在我国西北干旱地区对流边界层高度往往在夏季发展最高,且经常容易形成超厚大气对流边界层。这是因为西北干旱地区极强的陆面热力作用,以及夏季连续晴空期对流边界层与残余层的逐日循环增长机制所导致。而北京地区夏季由于受到东亚季风影响,降水较多,土壤和空气湿度大,难以形成发展较高的对流边界层。然而,本研究发现北京地区春季对流边界层高度在过去 30 年呈现出明显的逐年递减趋势(图 2),基于此,分析 1992—2022 年春季感热通量和位温直减率的变化。图 9 为 1992—2022 年春季平均感热通量和平均位温直减率在 13:00 的年际变化特征。从图中可以看出,春季地表感热通量和位温直减率在 1992—2022 年均呈现出递减的趋势,尽管过去 30 年由于气候变暖,春季的

近地面空气温度会略有所增加,但空气温度增加引起的对流边界层高度升高量远远小于感热通量和位温直减率减小所导致的边界层高度降低量,这也说明春季对流边界层高度在 1992—2022 年的逐年递减,主要是受到地表感热通量不断减小和大气层结稳定性持续增加的影响。

3 结论与讨论

本文首先使用无线电探空观测数据评估再分析资料的大气对流边界层高度数据,然后利用再分析资料研究了北京地区近 30 年对流边界层高度的年际变化、季节变化和日变化特征。通过对比 ERA5 和 MERRA-2 再分析资料与无线电探空观测的结果发现,两种再分析资料的对流边界层高度值之间存在较大差异,ERA5 对于再现探空观测的对流边界层高度表现更好,与观测值较为接近。基于 ERA5 得到的北京地区对流边界层高度变化特征,主要结论如下:

(1)1992—2022 年春季和秋季的对流边界层高度分别以 $61.6 \text{ m} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $13.1 \text{ m} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率呈逐年减小趋势,夏季和冬季的对流边界层高度分别以 $2.9 \text{ m} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $7.7 \text{ m} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率呈逐年增加趋势,年平均的对流边界层高度以 $16.0 \text{ m} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率呈递减趋势。通过对不同季节对流边界层高度进行 M-K 检验可知,近 30 年春季对流边界层高度的变化趋势基本为先增大后减小,夏季为先减小后增大,秋季呈现先增大后减小再增大最终减小的趋势,冬季变化趋势与秋季基本相反。

(2)1992—2022 年各个季节的对流边界层高度为:春季>夏季>秋季>冬季,春季、夏季、秋季、冬季中午时段的对流边界层高度中位数分别约为 1700、1100、950、800 m。对流边界层高度从冬季到春季逐渐增大,在春季 5 月达到全年最高,随后在夏季逐渐降低,在秋季有小幅上升,最终在冬季 12 月降至最低。春季对流边界层高度最高,是因为春季在四个季节中的感热通量值最大,同时大气层结的不稳定程度最强。春季、夏季、秋季、冬季大气边界层高度日变化的中位数峰值均出现在 15:00 左右,分别约为 1900、1300、1100、950 m。

(3)在四个季节中,春季地表感热通量值最大,夏季次之,秋季和冬季较小。春季、夏季、秋季、冬季

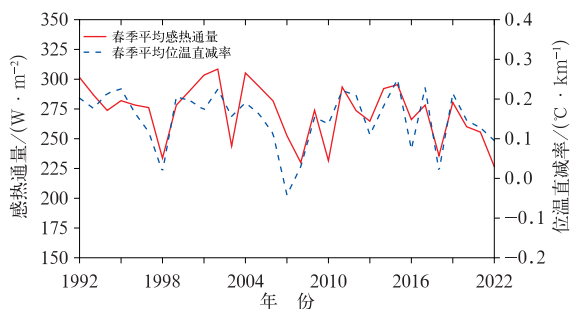


图 9 1992—2022 年 13:00 北京地区春季平均感热通量和平均位温直减率的年际变化特征

Fig. 9 Interannual variation characteristics of mean sensible heat flux and mean potential temperature lapse rate over Beijing Region in spring at 13:00 BT from 1992 to 2022

对流边界层高度与感热通量的相关系数分别为 0.69、0.91、0.76、0.80。感热通量每增大 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 春季、夏季、秋季、冬季的对流边界层高度分别升高 615、434、511、439 m。各季节的位温直减率值为: 春季 > 夏季 > 秋季 > 冬季, 位温直减率每增大 $1 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$, 春季、夏季、秋季、冬季的对流边界层高度分别升高 1376、955、233、171 m。地气温差在春季的数值最大, 在夏季与对流边界层高度之间的相关性最好。春季对流边界层高度在过去 30 年的逐年递减, 主要是由于受到地表感热通量和位温直减率值持续减小的影响。

本文主要关注再分析资料大气对流边界层高度数据在北京地区的适用性, 以及对流边界层高度的长期变化特征, 研究结果对于北京地区大气边界层气候学及大气污染研究等具有参考意义。值得注意的是, 再分析资料在边界层高度长期演变的分析中仍然存在不确定性, 因此还需要积累更多的观测数据进行验证。此外, 对流边界层的发展与天气系统和地形作用等密切相关, 这些因素同样会影响对流边界层高度, 本文主要从陆面热力作用和大气层结稳定性方面进行了分析探讨, 未来将结合多源观测数据和数值模式研究边界层高度与空气污染的关系, 以及城市化对大气边界层结构特征的影响。

参考文献

- 蔡嘉仪, 苗世光, 李炬, 等, 2020. 基于激光云高仪反演全天边界层高度的两步曲线拟合法[J]. 气象学报, 78(5): 864-876. Cai J Y, Miao S G, Li J, et al, 2020. A two-step ideal curve fitting method for retrieving full-day planetary boundary layer height based on ceilometer data[J]. Acta Meteor Sin, 78(5): 864-876 (in Chinese).
- 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 J, Wang J J, 2006. Diurnal cycles of the boundary layer structure simulated by WRF in Beijing[J]. J Appl Meteor Sci, 17(4): 403-411 (in Chinese).
- 符淙斌, 王强, 1992. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 16(4): 482-493. Fu C B, Wang Q, 1992. The definition and detection of the abrupt climatic change[J]. Sci Atmos Sin, 16(4): 482-493 (in Chinese).
- 傅新妹, 王晓峰, 雷明, 等, 2020. 小型无人机探测城市近地边界层的适用性分析[J]. 气象, 46(12): 1565-1574. Fu X S, Wang X F, Lei M, et al, 2020. On the use of small unmanned aircraft system for the atmospheric surface layer measurements over the urbanized areas[J]. Meteor Mon, 46(12): 1565-1574 (in Chinese).
- 桂海林, 秦贺, 赵培涛, 等, 2021. 2018 年春季北京一次沙尘天气边界层特征及来源分析[J]. 气象与环境学报, 37(4): 18-25. Gui H L, Qin H, Zhao P T, et al, 2021. Characteristics of atmospheric boundary layer and sources of a sand-dust event during spring 2018 in Beijing[J]. J Meteor Environ, 37(4): 18-25 (in Chinese).
- 贺千山, 毛节泰, 2005. 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, 63(3): 374-384. He Q S, Mao J T, 2005. Observation of urban mixed layer at Beijing using a micro pulse lidar[J]. Acta Meteor Sin, 63(3): 374-384 (in Chinese).
- 黄文彦, 沈新勇, 王卫国, 等, 2014. 边界层参数化方案对边界层热力和动力结构特征影响的比较[J]. 地球物理学报, 57(5): 1399-1414. Huang W Y, Shen X Y, Wang W G, et al, 2014. Comparison of the thermal and dynamic structural characteristics in boundary layer with different boundary layer parameterizations[J]. Chin J Geophys, 57(5): 1399-1414 (in Chinese).
- 李梦, 唐贵谦, 黄俊, 等, 2015. 京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系[J]. 环境科学, 36(6): 1935-1943. Li M, Tang G Q, Huang J, et al, 2015. Characteristics of winter atmospheric mixing layer height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and their relationship with the atmospheric pollution[J]. Environ Sci, 36(6): 1935-1943 (in Chinese).
- 李秋阳, 王成刚, 王旻燕, 2022. 加密探空资料同化对北京地区边界层数值模拟的影响[J]. 气象, 48(5): 580-594. Li Q Y, Wang C G, Wang M Y, 2022. Influence of densely-observed radiosonde data assimilation on numerical simulation of atmospheric boundary layer in Beijing Area[J]. Meteor Mon, 48(5): 580-594 (in Chinese).
- 李霞, 权建农, 王飞, 等, 2018. 激光雷达反演边界层高度方法评估及其在北京的应用[J]. 大气科学, 42(2): 435-446. Li X, Quan J N, Wang F, et al, 2018. Evaluation of the method for planetary boundary layer height retrieval by Lidar and its application in Beijing[J]. Chin J Atmos Sci, 42(2): 435-446 (in Chinese).
- 李晓莉, 毕宝贵, 李泽椿, 2005. 北京冬季城市边界层结构形成机制的初步数值研究[J]. 气象学报, 63(6): 889-902. Li X L, Bi B G, Li Z C, 2005. Simulation study of formation mechanism of winter urban boundary layer structure over Beijing Area[J]. Acta Meteor Sin, 63(6): 889-902 (in Chinese).
- 李岩瑛, 张春燕, 张爱萍, 等, 2022. 河西走廊春季沙尘暴大气边界层垂直结构特征[J]. 气象, 48(9): 1171-1185. Li Y Y, Zhang C Y, Zhang A P, et al, 2022. Vertical structure characteristics of atmospheric boundary layer in spring sandstorm over Hexi Corridor[J]. Meteor Mon, 48(9): 1171-1185 (in Chinese).
- 李怡霖, 赵平, 车军辉, 等, 2023. 夏季青藏高原对流边界层高度东西差异对环流场的影响[J]. 气象学报, 81(4): 569-579. Li Y L, Zhao P, Che J H, et al, 2023. Impacts of the east-west difference in convective boundary layer height on circulation over the Tibetan Plateau in summer[J]. Acta Meteor Sin, 81(4): 569-579 (in Chinese).
- 刘辉志, 王雷, 杜群, 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 H Z, Wang L, Du Q, 2018. An overview of recent studies on atmospheric boundary layer physics (2012-2017)[J]. Chin J Atmos Sci, 42(4): 823-832 (in Chinese).
- 路传彬, 戴秋丹, 谢正辉, 等, 2023. 阜阳地区边界层高度的长期变化

- 特征及影响机制[J]. 大气科学, DOI:10.3878/j.issn.1006-9895.2308.23091. Lu C B, Dai Q D, Xie Z H, et al, 2023. Long-term variation characteristics of planetary boundary layer height and their influencing factors in Fuyang, China[J]. DOI:10.3878/j.issn.1006-9895.2308.23091. Chin J Atmos Sci(in Chinese).
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等, 2003. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社. Sheng P X, Mao J T, Li J G, et al, 2003. Atmospheric Physics[M]. Beijing: Peking University Press(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. Comparative analysis of planetary-boundary-layer height based on aerosol lidar and radiosonde[J]. Climatic Environ Res, 24(5): 650-662(in Chinese).
- 田野, 刘旭林, 于永涛, 等, 2022. 北京城区大气边界层高度的反演研究[J]. 气象科技, 50(1): 9-20. Tian Y, Liu X L, Yu Y T, et al, 2022. Inversion of atmospheric boundary layer height in Beijing urban area[J]. Meteor Sci Technol, 50(1): 9-20(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).
- 王珍珠, 李炬, 钟志庆, 等, 2008. 激光雷达探测北京城区夏季大气边界层[J]. 应用光学, 29(1): 96-100. Wang Z Z, Li J, Zhong Z Q, et al, 2008. Lidar exploration of atmospheric boundary layer over downtown of Beijing in summer[J]. J Appl Opt, 29(1): 96-100(in Chinese).
- 吴进, 李琛, 马志强, 等, 2021. 北京平原和延庆地区山谷风异同及对污染的影响[J]. 环境科学, 42(10): 4660-4668. Wu J, Li C, Ma Z Q, et al, 2021. Similarities and differences of valley winds in the Beijing Plain and Yanqing areas and its impact on pollution[J]. Environ Sci, 42(10): 4660-4668(in Chinese).
- 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 W L, Chen H S, Guo J P, et al, 2024. Regionalization of the boundary-layer height and its dominant factors in summer over China[J]. Chin J Atmos Sci, 48(3): 1201-1216(in Chinese).
- 杨世昆, 杨玲, 张雪芬, 等, 2023. 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[J]. 气象, 49(2): 178-187. Yang S K, Yang L, Zhang X F, et al, 2023. Comparison and analysis of atmospheric boundary layer height retrieved by ground-based remote sensing and ERA5 reanalysis data[J]. Meteor Mon, 49(2): 178-187(in Chinese).
- 尤焕苓, 刘伟东, 谭江瑞, 2010. 北京地区平均最大混合层厚度的时间变化特征[J]. 气象, 36(5): 51-55. You H L, Liu W D, Tan J R, 2010. Temporal characteristics of atmospheric maximum mixing depth of Beijing[J]. Meteor Mon, 36(5): 51-55(in Chinese).
- 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 H S, Zhang X Y, Li Q H, et al, 2020. Research progress on estimation of atmospheric boundary layer height[J]. Acta Meteor Sin, 78(3): 522-536(in Chinese).
- 张美根, 胡非, 邹捍, 等, 2008. 大气边界层物理与大气环境过程研究进展[J]. 大气科学, 32(4): 923-934. Zhang M G, Hu F, Zou H, et al, 2008. An overview of recent studies on atmospheric boundary layer physics and atmospheric environment in LAPC[J]. Chin J Atmos Sci, 32(4): 923-934(in Chinese).
- 张强, 胡隐樵, 2001. 大气边界层物理学的研究进展和面临的科学问题[J]. 地球科学进展, 16(4): 526-532. Zhang Q, Hu Y Q, 2001. Scientific problems and advance of atmospheric boundary layer physics[J]. Adv Earth Sci, 16(4): 526-532(in Chinese).
- 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): 1637-1650. Zhang Q, Qiao L, Yue P, 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]. Chin Sci Bull, 64(15): 1637-1650(in Chinese).
- 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 Q, Wang S, 2008. A study on atmospheric boundary layer structure on a clear day in the arid region in Northwest China[J]. Acta Meteor Sin, 66(4): 599-608(in Chinese).
- 张强, 卫国安, 侯平, 2004. 初夏敦煌荒漠戈壁大气边界结构特征的一次观测研究[J]. 高原气象, 23(5): 587-597. Zhang Q, Wei G A, Hou P, 2004. Observation studies of atmosphere boundary layer characteristic over Dunhuang Gobi in early summer[J]. Plateau Meteor, 23(5): 587-597(in Chinese).
- 张强, 张杰, 乔娟, 等, 2011. 我国干旱区深厚大气边界层与陆面热力过程的关系研究[J]. 中国科学: 地球科学, 41(9): 1365-1374. Zhang Q, Zhang J, Qiao J, et al, 2011. Relationship of atmospheric boundary layer depth with thermodynamic processes at the land surface in arid regions of China[J]. Sci China Earth Sci, 41(9): 1365-1374(in Chinese).
- 赵鸣, 苗曼倩, 1992. 大气边界层[M]. 北京: 气象出版社. Zhao M, Miao M Q, 1992. The Atmospheric Boundary Layer[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- Bian J C, Chen H B, Vomel H, et al, 2011. Intercomparison of humidity and temperature sensors: GTS1, Vaisala RS80, and CFH[J]. Adv Atmos Sci, 28(1): 139-146.
- Chen X L, Škerlak B, Rotach M W, et al, 2016. Reasons for the extremely high-ranging planetary boundary layer over the Western Tibetan Plateau in winter[J]. J Atmos Sci, 73(5): 2021-2038.
- Garratt J R, 1992. The Atmospheric Boundary Layer[M]. London: Cambridge University Press.
- Gelaro R, McCarty W, Suárez M J, et al, 2017. The modern-era retrospective analysis for research and applications, Version 2 (MERRA-2)[J]. J Climate, 30(14): 5419-5454.
- Guo J P, Miao Y C, Zhang Y, et al, 2016. The climatology of planetary boundary layer height in China derived from radiosonde and reanalysis data[J]. Atmos Chem Phys, 16(20): 13309-13319.
- Guo J P, 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[J]. Geophys Res Lett, 46(11): 6080-6089.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al, 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 146(730): 1999-2049.
- Holzworth G C, 1964. Estimates of mean maximum mixing depths in

- the contiguous United States[J]. *Mon Wea Rev*, 92(5): 235-242.
- Lai Y, Chen X L, Ma Y M, et al, 2023. Variation of atmospheric boundary layer height over the northern, central, and southern parts of the Tibetan Plateau during three monsoon seasons[J]. *J Geophys Res Atmos*, 128(9): e2022JD038000.
- McGrath-Spangler E L, Molod A, 2014. Comparison of GEOS-5 AGCM planetary boundary layer depths computed with various definitions[J]. *Atmos Chem Phys*, 14(13): 6717-6727.
- Seidel D J, Zhang Y H, 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): D17106.
- Slättberg 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]. *Int J Climatol*, 42(6): 3360-3377.
- Solanki R, Guo J P, Li J, et al, 2021. Atmospheric-Boundary-Layer-Height variation over mountainous and urban sites in Beijing as derived from radar wind-profiler measurements[J]. *Bound-Layer Meteor*, 181(1): 125-144.
- Stull R B, 1988. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology* [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Tang G Q, Zhang J Q, Zhu X W, et al, 2016. Mixing layer height and its implications for air pollution over Beijing, China[J]. *Atmos Chem Phys*, 16(4): 2459-2475.
- Vogelezang D H P, Holtslag A A M, 1996. Evaluation and model impacts of alternative boundary-layer height formulations [J]. *Bound-Layer Meteor*, 81(3-4): 245-269.
- Yang R F, Guo J P, Deng W L, et al, 2023. Investigation of turbulent dissipation rate profiles from two radar wind profilers at plateau and plain stations in the North China Plain[J]. *Remote Sens*, 15(16): 4103.
- Zhang Q, Zhang J, Qiao J, et al, 2011. Relationship of atmospheric boundary layer depth with thermodynamic processes at the land surface in arid regions of China[J]. *Sci China Earth Sci*, 54(10): 1586-1594.

(本文责编: 俞卫平)