

1中国夏季边界层高度及其主要影响因子的分区研究

吴雯璐^{1,2} 陈海山^{1,2} 郭建平³ 许智棋⁴ 张潇艳^{1,2}

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

2 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

3 中国气象科学研究院, 北京 100081

4 北京城市气象研究院, 北京 100089

摘要 中国区域下垫面复杂且边界层热力和动力影响因子众多, 目前缺乏对全国范围内边界层高度及其影响因子的综合分析。本文基于 2012-2016 年 L 波段高分辨率探空资料, 采用 K-prototypes 算法结合 12 个可能影响因子将中国夏季边界层高度进行了聚类分析, 以探讨中国夏季边界层高度的区域性特征和主要影响因子。结果表明, 中国区域 100 个站点 08、14、20 时的边界层高度均可划分为东北、东南、西北和西南 4 个区域。在此基础上, 分析了三个不同时段不同区域边界层高度的主要影响因子, 并探究这些因子影响不同热力状态下边界层发展的可能机理。结果表明: 稳定边界层早 (08 时)、晚 (20 时) 的发展主要受风速湍流动力作用的影响, 而中午 14 时的发展与间歇性湍流作用密切相关。中性和对流边界层的发展在早上也主要受风速的驱动, 而在中午则主要受较高地表温度和较大地表净辐射通量所引起的湍流热力作用驱动。此外, 东北地区的云量和比湿、东南地区的潜热通量、西北地区的感热通量和比湿、西南地区的感热通量和土壤湿度也会通过对热力湍流的直接或间接影响, 从而影响该区域中性和对流边界层的发展。晚上, 由于东西时差的影响, 在东部地区, 风速开始成为中性和对流边界层高度的主要影响因子, 而西部地区边界层高度的主要影响因子仍为热力因子。值得注意的是, 北部地区的叶面积指数可以通过植被蒸腾作用改变比湿, 从而影响边界层的发展; 东北地区地表气压的变化可以通过影响气流的上升和下沉运动从而影响边界层的发展。

关键词 大气边界层高度 影响因子 聚类 不同稳定度类型、

文章编号

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2212.22183

Regionalization of the boundary-layer height and Its Dominant Influencing Factors in Summer Over China

WU Wenlu^{1,2} CHEN Haishan^{1,2} GUO Jianping³ XU Zhiqi⁴ ZHANG Xiaoyan^{1,2}

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

收稿日期 2022-09-21; **网络预出版日期**

作者简介 吴雯璐, 女, 1998 年 4 月出生, 硕士研究生, 主要从事陆面过程研究。E-mail: 20201201092@nuist.edu.cn

通讯作者 陈海山, E-mail: haishan@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 42130609、42205040

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 42130609, 42205040)

Abstract The underlying surface of China is complex and the driving factors of the boundary layer are numerous. At present, there is a lack of comprehensive analysis of the boundary-layer height and its influencing factors all over China. This paper uses the K-prototypes algorithm to cluster the boundary-layer height and its twelve possible influencing factors and studies the regional features of the boundary-layer height and its dominant influencing factors in summer over China, based on the high-resolution radiosonde measurements from CRN from 2012 to 2016. The results show that the boundary-layer height of the 100 stations at 08:00, 14:00, and 20:00 can be divided into four regions: northeast of China, southeast of China, northwest of China and southwest of China. On this basis, the paper then analyzes the dominant influencing factors of the boundary-layer height in different regions at different times, and studies the possible mechanism of how these factors affect the development of the boundary layer under different thermodynamic conditions. The results suggest that the development of the stable boundary layer at 08:00 and 20:00 is mainly affected by the turbulent dynamics of the wind speed, while that at 14:00 is closely related to intermittent turbulence. The development of the neutral and convective boundary layers is also mainly driven by wind speed in the morning, while at noon it is mainly driven by the turbulent thermal caused by higher surface temperature and larger net surface radiation flux. What's more, the cloud amount and specific humidity in the northeast, the latent heat flux in the southeast, the sensible heat flux and specific humidity in the northwest, and the sensible heat flux and soil moisture in the southwest can also affect the development of the neutral and convective boundary layer through direct or indirect effects on thermal turbulence. At night, because of the time difference, wind speed tend to be the main influence factor of the neutral and convective boundary layer height in the east of China, while in the west of China, the main influence factors may still be the thermal factors. In addition, the leaf area index in the north of China regulates the specific humidity by vegetation transpiration, and the specific humidity can affect the boundary-layer height by regulating the surface energy distribution. Finally, it is worth noting that the surface pressure can affect the development of the nocturnal boundary layer in the northeast of China by influencing the ascending and descending movements of the air flow.

Keywords Planetary boundary-layer height, Influene factors, Clustering, Different stability regimes

1 引言

大气边界层 (Planetary Boundary Layer, PBL) 是大气中直接受地球表面影响的对流层最低层, 与人类活动密切相关, 且对天气、气候和水文循环有重大影响 (Dang et al., 2016)。基于热力条件, 大气边界层可分为对流、中性和稳定边界层 (Zhao et al., 2017)。大气边界层高度 (Planetary Boundary-Layer Height, PBLH) 是描述大气边界层结构的关键变量之一, 边界层高度越高, 垂直混合越强, 地表污染物浓度越低 (Zhang et al., 2013; Xu et al., 2021a), 所以研究大气边界层高度对于揭示大气污染物以及热通量和湍流动量通量的时空演变具有重要意义 (Liu and Liang, 2010; Zhang and Yan, 2014; Zhang et al., 2014)。

国内外对于大气边界层高度影响因子及其影响机理的研究已颇为丰富。研究表明, 边界层高度与地表净辐射、地表温度和感热通量均呈正相关 (Dang et al., 2016; Guo et al., 2016;

Zhang et al., 2017), 净辐射加热地表会引起地表温度的升高(杜一博等, 2018), 而较高的地表温度会导致更大的感热通量, 从而使边界层抬升(Miao et al., 2017)。调节大气湿度的水文气象学因子主要通过潜热通量来影响边界层的发展, 近地面空气湿度和土壤湿度越高, 地表潜热通量越高, 感热通量越低, 进而抑制边界层发展(Sanchez-Mejia et al., 2014; Pal and Haefelin, 2016)。边界层高度还与地表风速呈正相关(李岩瑛等, 2020; 田野等, 2022), 当风速减小时, 湍流动力作用减弱, 边界层高度降低(蔡新玲等, 2007), 地形则可以通过影响风速和风向从而影响边界层的发展(Rihani et al., 2015)。此外, 理论计算表明边界层顶的夹卷过程对边界层的发展也起着重要作用(Stull, 1988), 但是由于夹卷观测的稀缺, 关于夹卷与边界层高度之间的观测分析研究较少见诸报道。

然而我国地域辽阔、地貌复杂、气候多样, 不同地区其气象要素、局地地形以及植被类型等均存在很大差异, 故我国边界层高度具有明显的空间分布特征, 且不同地区其主要影响因子也各不相同(Guo et al., 2016; Li et al., 2017; Darandm and Zandkarimif, 2019; 车军辉等, 2021)。如: 我国西北荒漠区, 裸地占据较大面积, 植被稀少, 土壤干燥, 感热通量转化率高, 地表增温迅速, 且天空少云, 太阳辐射很强, 净辐射中大部分能量转化为感热通量, 热力作用有利于大气边界层的发展(Wang and Wang, 2014; Zhang et al., 2017), 此外, 由于其地形和大气环流作用, 西北地区一般风速较大, 动力作用有利于大气边界层的发展(张强, 2007; 张强和王胜, 2008)。而我国华南地区植被覆盖较为丰富, 土壤湿度高, 潜热通量对边界层发展的调节作用较强(Xu et al., 2021a), 且较强的地表蒸散发会大幅增加近地面湿度, 不利于边界层的发展(Zhang et al., 2013; Zhang et al., 2017)。

总体而言, 中国区域下垫面复杂且边界层影响因子众多, 前人的研究大多关注特定区域和个别因子的影响, 目前仍缺乏对全国范围内边界层高度及其众多影响因子的综合分析。此外, 由于边界层高度影响因子的多样性以及不同地区边界层高度影响因子的差异性, 用常用的统计方法难以进行全面的分析。近年来随着人工智能的迅速发展, 越来越多的研究者将机器学习与气象研究相结合, 而将聚类算法用于气象领域的研究可以帮助我们更好地探究地区之间的差异。气象研究者对于聚类算法的应用已有很多, 如 Fang 等(2021)利用 k-means 算法将东北初夏冷涡路径聚为 4 类; Dinpashoh 等(2004)利用分层聚类技术将伊朗降水气候区域化, 划分为 6 个降水气候均质区和 1 个降水气候非均质区; Shi 等(2020)利用谱聚类算法基于 661 个气象站的 5 个气象变量将我国划分为 5 个气候区; He 等(2021)利用 k-means 算法将我国东部夏季极端降水聚为 5 类。鉴于聚类算法在气象研究的不同研究领域所呈现出来的优势, 故本文拟采用 K-prototypes 算法将中国夏季边界层高度结合 12 个可能的影响因子进行聚类分析, 以探讨中国区域夏季边界层高度的区域性特征和主要影响因子, 并在此基础上探究这些因子驱动不同热力状态下边界层发展的可能机理。

2 资料和方法

2.1 数据资料

本文采用了中国气象局发布的 2012 至 2016 年 L 波段高分辨率(1.2s)无线电探空资料, 该资料提供了 120 个观测站在每日 00:00UTC(08:00BJT)和 12:00UTC(20:00BJT)的观测以及部分观测站在夏季(6-8 月)增加的每日 06:00UTC(14:00BJT)的加密观测, 在计算边界层高度前, 我们先对所有的大气探空观测记录进行了质量控制, 剔除了温度、湿度、风速在任意气压层的异常值以及任意时次少于 30 个有效样本的站点, 最终有 100 个站点通过了质量控制。此外, 本文所使用的温度、气压、风速和云量也是从 L 波段探空资料中提取的, 其中云顶高度的计算主要借助相对湿度阈值法(Xu et al., 2021b), 而文中所用云量数据为探空时间对应的本站总云量。

全球陆地数据同化系统数据集（Global Land Data Assimilation System dataset, GLDAS）是美国国家航空航天局和国家环境预测中心联合开发的新一代再分析数据集（Rodell et al., 2004），包含反映地表状况的各种物理量和辐射通量。本文中的表层土壤湿度、净长波辐射通量、净短波辐射通量、感热通量、潜热通量和比湿均是从 GLDAS 中提取的，其水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，时间分辨率为逐三小时，时间的选取与探空资料对应一致。

本文所用资料还包含了欧洲中期预报中心提供的 ERA5 逐小时再分析资料（Hersbach et al., 2018）中的叶面积指数，其水平分辨率均为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，选取的时间与探空仪测量的时间一致。

2.2 研究方法

用 Liu-Liang 法来计算边界层高度已被证实较好（Xu et al., 2021a），该方法将边界层分为对流、中性和稳定三种热力状态后，分别计算不同热力状态下的边界层高度（Liu and Liang, 2010）。其中，对边界层类型的确定需要对探空资料样本进行间隔 5hPa 的重新取样，而后计算距地面 25hPa（第五层）和 10hPa（第二层）之间的位温差（Potential Temperature Difference, PTD）。结合 PTD 值与探空仪测量计算的 100m 总体 Richardson（Ri）数一起识别边界层热力状态：

- （1）如果 PTD 高于 0.1K 且 Ri 为正值，则为稳定边界层；
- （2）如果 PTD 介于 -0.1K 和 0.1K 之间，则为中性边界层；
- （3）其他所有边界层都属于对流边界层。

确定了边界层类型后，分别计算不同热力状态下的边界层高度。对流与中性边界层高度的计算方法为：从地表开始，将探空仪测量的位温与地表位温差大于某一定值，且位温梯度首次大于一个阈值时的高度作为边界层高度，即：

$$\theta_k - \theta_z \geq \delta \quad \text{and} \quad \dot{\theta}_k \geq \gamma \quad (2.1)$$

稳定边界层高度的计算方法为：当湍流由浮力强迫主导时，相邻两层位温梯度差值发生突变或者连续两层位温均小于一个阈值时所对应的高度为浮力机制所确定的边界层高度，即：

$$\dot{\theta}_k - \dot{\theta}_{k-1} < -\delta \quad \text{or} \quad \dot{\theta}_{k+1} < \gamma, \dot{\theta}_{k+2} < \gamma \quad (2.2)$$

而当湍流由风切变主导时，1.5km 以下第一次出现风速极大值大于等于 2m/s 时所对应的高度为风切变所确定的边界层高度。比较这两种机制下所确定的边界层高度，取较低值作为稳定边界层高度。

K-prototypes 算法与 K-means 算法均为气象领域中常用的聚类算法，且二者均具有收敛速度快和聚类效果好的优点。通过对比，K-prototypes 算法与 K-means 算法在本研究中的结果无明显差异，本文采用并给出了 K-prototypes 算法进行聚类的结果（Huang, 1998; Huang and Ng, 1999）。K-prototypes 算法在聚类时所使用的样本间变量的距离为欧式距离（针对数值属性数据）和汉明距离（针对分类属性数据）。聚类后，我们利用 t-SNE 算法对聚类结果进行降维可视化。t-SNE（t-distributed stochastic neighbor embedding）是用于非线性降维的一种机器学习算法（Maaten et al., 2008），其核心思想为保证在低维空间的数据分布与原始特征空间的数据分布相似性尽可能的高。气象研究者常将该算法用于对高维数据聚类后进行降维可视化，以通过视觉直观验证聚类算法的可靠性和聚类结果的有效性，如 Fang 等（2021）曾利用 t-SNE 算法来降维查看东北冷涡活动路径的聚类效果。

此外，本文还利用了偏最小二乘法中的变量投影重要性准则（variable importance in projection, VIP）来计算各因子对边界层高度的贡献情况，该方法可以消除变量间多重共线性产生的影响，所谓的多重共线性是指一些自变量之间存在较强的线性关系。一般认为，VIP ≥ 1

时解释变量对于响应变量具有显著的解释意义，某一解释变量的 VIP 值越大，它在解释响应变量具有更加重要的作用（曾涛等，2010）。

3 不同时次边界层高度及其影响因子的聚类分析

3.1 聚类因子和聚类分区

表 1 边界层高度与不同气象因子的相关性分析统计结果

Table 1 The correlation between boundary-layer height and different meteorological factors

时次	气象因子									
/BJT	Ts	SM	LAI	SHF	LHF	NRF	Ps	V	SH	CLD
08	0.23**	0.14**	0.07**	0.17**	0.25**	0.27**	0.20**	0.45**	0.19**	0.07**
14	0.22**	-0.46**	-0.38**	0.46**	-0.12**	0.42**	-0.27**	0.15**	-0.49**	-0.32**
20	0.07**	-0.44**	-0.44**	0.52**	-0.02*	0.49**	-0.34**	0.29**	-0.45**	-0.19**

注：*表示通过了置信度为 95%的显著性检验，**表示通过了置信度为 99%的显著性检验。

据前人研究可知，大气边界层高度的发展主要受地表过程控制，包括地表向大气输送的感热和潜热通量（Huo et al., 2021），以及受太阳辐射和云量强迫的影响（Seidel et al., 2012; Guo et al., 2019）。其中辐射能量通量、感热通量和潜热通量等对热量的输送所引起的热力不稳定以及热力湍流是边界层发展的主要热力因素（张杰等，2013; Guo et al., 2021），而风速、地形等所影响的湍流动力作用是边界层发展的主要动力因素（Darandm and Zandkarimif, 2019）。故本研究初步确定影响边界层高度的系列热力和动力因子，进一步通过 2012-2016 年夏季中国边界层高度与不同因子的相关分析，确定了地表要素中的地表温度（Ts）、土壤湿度（SM）、叶面积指数（LAI）、感热通量（SHF）、潜热通量（LHF）和净地表辐射通量（NRF），近地面要素中的地表气压（Ps）、风速（V）和比湿（SH）以及强迫因子云量（CLD）等十个数值型影响因子。这些因子与边界层高度的相关性在早、中、晚时刻均较好，但不同时刻的相关性表现出一定的差异（表 1）。08 时，风速与边界层高度的相关系数高达 0.45，远大于其他因子与边界层高度的相关系数；14 时，风速与边界层高度的相关性减弱，而感热通量和地表净辐射通量与边界层高度呈较强正相关，土壤湿度和比湿则与边界层高度呈较强负相关；20 时，风速与边界层高度的相关性又开始增强，且感热通量、地表净辐射通量、土壤湿度和比湿仍与边界层高度有着较好的相关关系，此外，叶面积指数与边界层高度的负相关关系也较好。

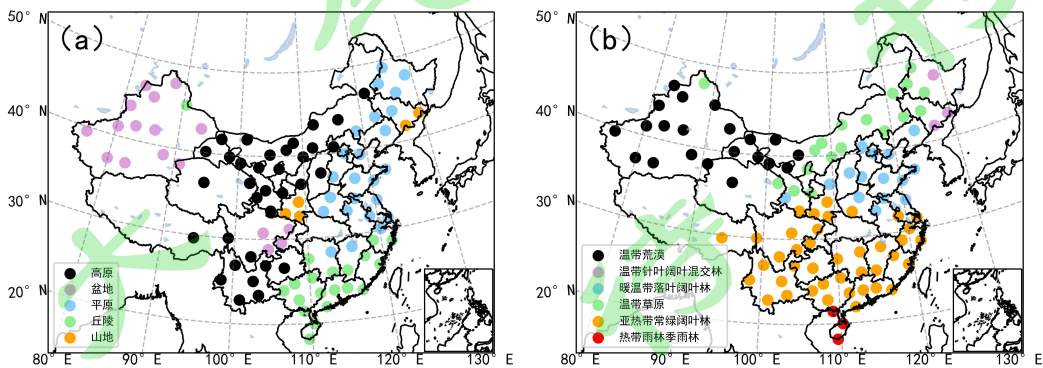


图 1 （a）地形分类和（b）植被覆盖分类的全国 100 个探空站空间分布

Fig.1 Spatial distribution of 100 sounding stations over China divided by (a) topography and (b) vegetation coverage

此外，由于植被类型与地形对边界层高度也有重要影响，而植被类型和地形情况无法用数值表示，所以本文据 2014 年中国地图出版社和吴征镒等（1980）的研究，将 100 个站点划分为高原、盆地、平原、丘陵和山地这 5 类地形区域以及温带荒漠、温带针叶阔叶混交林、暖温带落叶阔叶林、温带草原、亚热带常绿阔叶林和热带雨林季雨林这 6 类植被覆盖区域，确定了两个类别型影响因子（图 1）。

由于聚类算法不能独立确定类别的数量，本研究将聚类的数量设置为 3 和 8 之间的整数，然后比较不同聚类结果的轮廓系数。轮廓系数表示的是簇内外间的不相似程度，即聚类结果的凝聚和分散情况，可以用来评估聚类效果；其值介于-1 和 1 之间，值越接近于 1，分类效果就越好（Wang et al, 2018）。结果表明，当簇数为 4 时，三个时刻的轮廓系数分别为 0.29、0.29 和 0.31，说明聚类效果较好，且高于其他簇数下的轮廓系数，故本研究将聚类簇数设定为 4。聚类初始化参数选取的是 Cao 等（2009）的方法，其余参数则设置为默认最优值。

3.2 聚类结果分析

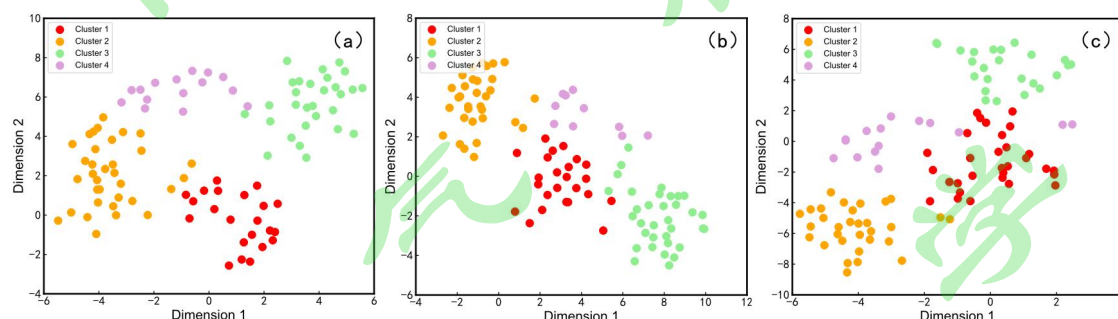


图 2 (a) 08 时、(b) 14 时和 (c) 20 时降维后的聚类分布

Fig.2 Distribution of clustering results after dimensionality reduction at (a) 0800, (b)1400, and (c) 2000 BJT

用 K-prototypes 算法将 2012-2016 年中国夏季 100 个站点的边界层高度及 10 个数值型影响因子和 2 个类别型影响因子进行聚类，并用 t-SNE 算法将聚类结果进行降维可视化。降维后的聚类结果以二维散点图的形式显示（图 2），不难发现 100 组边界层高度及其影响因子数据被明确划分为四个集群，集群内的数据相对集中，集群之间存在明显差异。然而，在 14 和 20 时刻观察到少量的位置交叉，可能是由于这两个时次的数据特征相似，并且在降维过程中可能丢失了一些信息，导致映射结果有较小的偏差。总的来说，聚类结果是可靠的。

聚类后，100 个站点在不同时刻按类别的分布情况如图 3a-5a 所示，可以发现，中国区域在早、中、晚三个时刻的划分基本相似，均可划分为界线较为清晰的四个区域，即东北、东南、西北和西南。值得注意的是，东部和西部地区的分界线在早、中、晚三个时刻有较小的偏差，这可能是由于地方时差和边界层高度各影响因子联合作用导致。

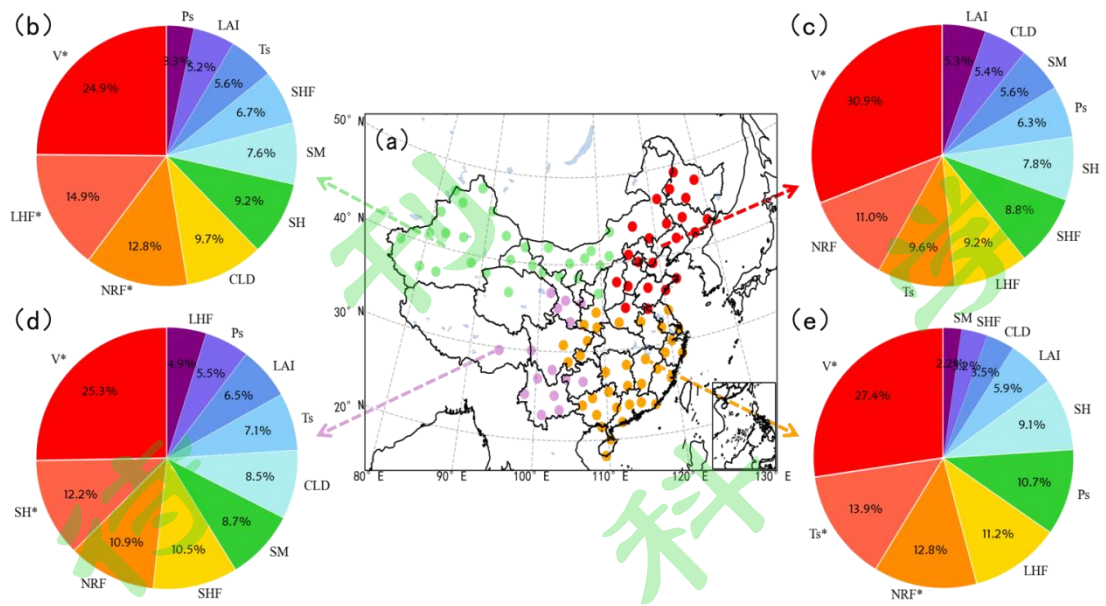


图3 (a) 夏季 08 时聚类分布及 (b-e) 各区域边界层高度影响因子对边界层高度的贡献 (* 表示该因子的 VIP 值大于等于 1, 即对边界层高度影响显著)

Fig.3 (a) The classification results at 08:00 in summer and (b) the contribution of corresponding influence factors to the boundary-layer height in each region after clustering (* indicates that the VIP value of this factor is greater than or equal to 1, implying the significant effects of the factors on the boundary-layer height)

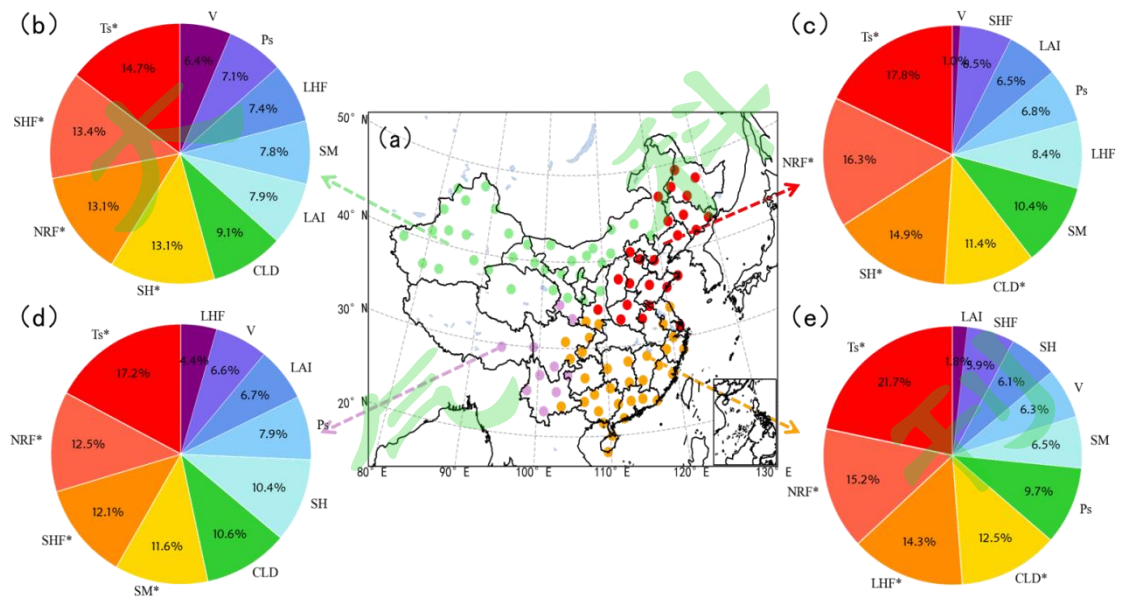


图4 同图3, 为夏季 14 时

Fig.4 Similar to Fig. 3, but for 1400BJT in summer.

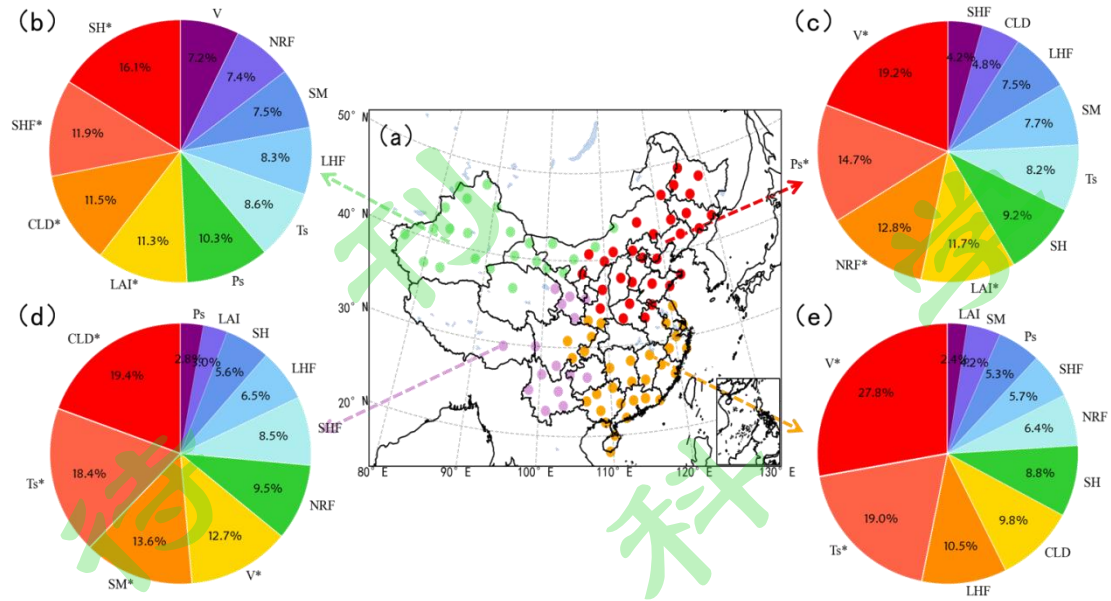


图 5 同图 3，为夏季 20 时

Fig.5 Similar to Fig. 3, but for 2000BJT in summer.

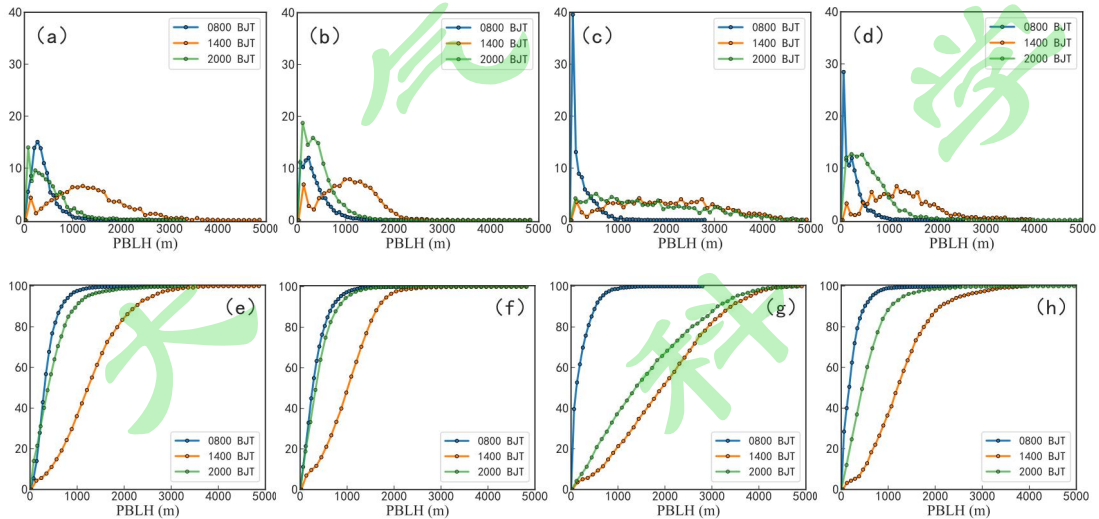


图 6 2012-2016 年夏季我国 (a, e) 东北地区、(b, f) 东南地区、(c, g) 西北地区和 (d, h) 西南地区大气边界层高度的 (a, b, c, d) 频率分布与 (e, f, g, h) 累积频率分布

Fig.6 (a, b, c, d) The frequency distributions and (e, f, g, h) cumulative frequency distributions of planetary boundary-layer height in the (a, e) northeast, (b, f) southeast, (c, g) northwest and (d, h) southwest of China during the summer of 2012-2016

进一步对聚类后早、中、晚三个时刻的各地区边界层高度进行对比分析，如图 6，可以发现各地区边界层高度均为中午高，早晚低，且晚上 20 时的边界层高度均大于早上 08 时。由频率分布图可以看出，东南地区 08 时和 20 时的边界层高度频率分布趋势较为一致，西北地区 14 时和 20 时的边界层高度频率分布趋势较为一致。早上，边界层高度的频次分布较为集中，各地区间差异较小，且累积频率分布较为一致；中午，边界层高度的频次分布较广，其中西北地区的边界层高度最高，其峰值频率带从 1000 米一直延续到 3000 米左右，而其他地区峰值频率带基本在 1000 米到 1500 米之间；晚上，除西北地区外，其余地区边界层高度的频次分布均较为集中，峰值频率出现在 500 米左右。

4 不同时段不同地区的边界层主要影响因子探究

基于偏最小二乘法的变量投影重要性 (variable importance in projection, VIP) 准则, 在四个分区分别计算出边界层高度各影响因子的 VIP 值, 并根据各 VIP 值占 VIP 值和的百分比, 确定各因子对边界层高度的贡献率, 以找出各地区边界层发展的主要影响因子, 并比较区域之间的差异。

图 3-5 分别为夏季 08 时、14 时和 20 时的分类结果分布, 以及各分区边界层高度的 10 个数值型影响因子对该地区边界层高度的贡献率饼图。在 08 时 (图 3), 全国范围内边界层的发展主要受风速动力驱动, 而风速对东部地区边界层高度的影响要高于西部地区, 这可能是由于东西时差的影响, 当我国东部的边界层已然进入中性或弱对流状态时, 西部的边界层仍处于夜间稳定层结状态 (参见图 10)。此外, 一些热力因子也对边界层高度有着重要影响, 在东部地区为地表温度和地表净辐射通量, 而在西部地区为感热通量和潜热通量, 值得注意的是, 西北地区潜热通量更为重要, 而西南地区感热通量更为重要。在 14 时 (图 4), 全国边界层高度的发展已较为充分, 动力因子对边界层高度的影响可以忽略不计, 而热力因子对边界层高度的影响尤为为重要。其中, 地表温度和地表净辐射通量为各地区边界层高度发展的重要热力影响因子, 此外, 不同地区之间也具有一定差异, 如: 东北地区的比湿、东南地区的潜热通量和西部地区的感热通量均对边界层高度有着重要影响。在 20 时 (图 5), 随着太阳辐射的逐渐减弱, 边界层发展的动力作用增强而热力作用减弱。由于东西时差的影响, 在东部地区, 其特征与 08 时类似, 风速动力作用及地表温度和地表净辐射通量热力作用共同影响着边界层的发展, 此外, 与 08 时不同的是, 东北地区的地表气压对 20 时边界层的发展起着重要作用。而西部地区的特征与 14 时类似, 其不稳定性特征仍较为明显, 热力驱动作用仍占据主导地位, 且云量对边界层高度的调控作用较 14 时更为重要。此外, 值得注意的是, 西北和西南地区影响边界层高度的湿度因子具有一定差异, 西北地区以比湿和叶面积指数为重而西南地区则以土壤湿度为重。

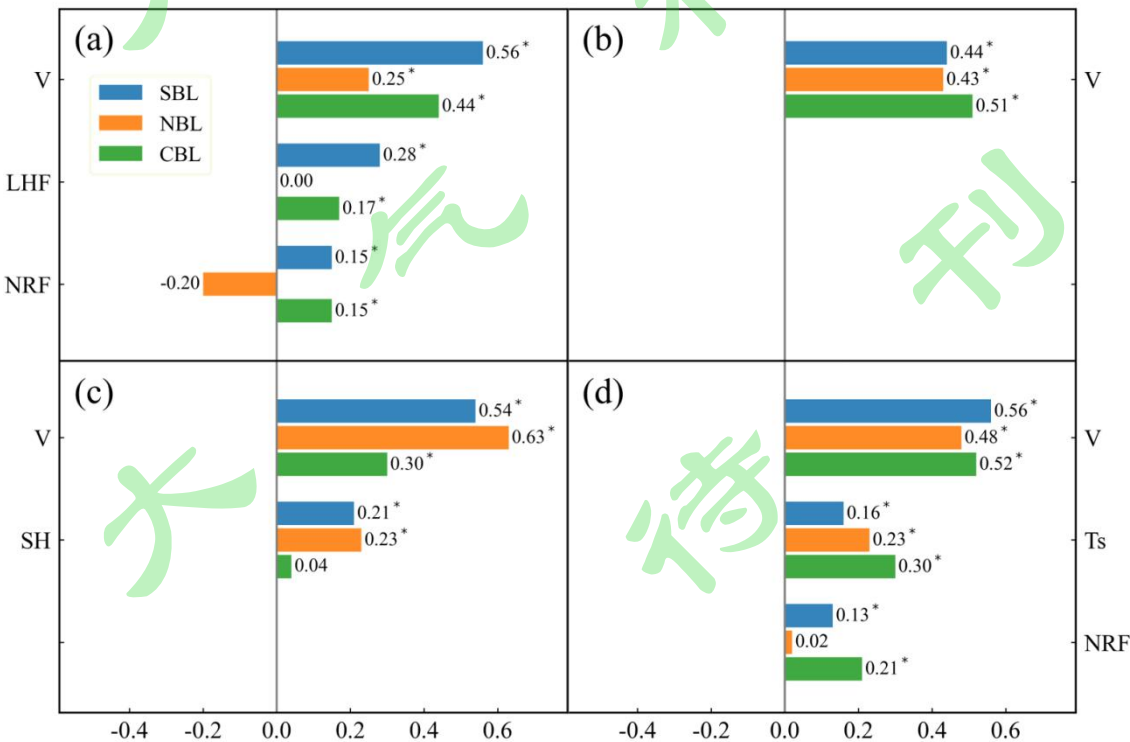


图 7 2012-2016 年夏季 08 时 (a) 西北地区、(b) 东北地区、(c) 西南地区 and (d) 东南地区边界层高度的显著影响因子 (VIP 值大于等于 1 的因子) 与不同热力状态下边界层高度的相关性 (*表示通过了置信度为 95%的显著性检验)

Fig.7 The correlation between the significant influence factors (VIP top 4) and the boundary-layer height under different thermal conditions in the (a) northeast , (b) southeast , (c) northwest and (d) southwest of China at 08:00 during the summer of 2012-2016 (* indicates the correlation has passed the significance test with 95% confidence)

在各时次, 取各地区影响边界层发展的主要影响因子 (VIP 值大于等于 1 的因子) 与不同热力状态下的边界层高度做相关分析, 如图 7-9, 可以发现: 08 时, 动力因子风速在各地区均与稳定、中性和对流边界层高度有着较好的正相关关系, 而热力因子则与稳定和对流边界层高度有着较好的正相关关系。14 时, 各地区的地表温度和地表净辐射通量均与中性和对流边界层高度呈较好的正相关关系, 此外, 东南地区的潜热通量、西部地区的感热通量也与中性和对流边界层高度呈较好的正相关关系。而部分地区的比湿、云量和土壤湿度则与中性和对流边界层高度呈较好的负相关关系。值得注意的是, 比湿和土壤湿度等调节大气湿度的水文气象学因子与稳定边界层高度的相关系数符号和与对流、中性边界层高度的相关系数符号相反, 且均通过了显著性检验, 其原因还需深入研究探讨。20 时, 在东部地区, 动力因子风速与稳定边界层高度相关性更好, 而其余因子则与对流边界层高度的相关性更好; 在西部地区, 除西南地区的风速为与中性边界层高度的相关性更好外, 其余因子均与对流边界层高度的相关性更好。

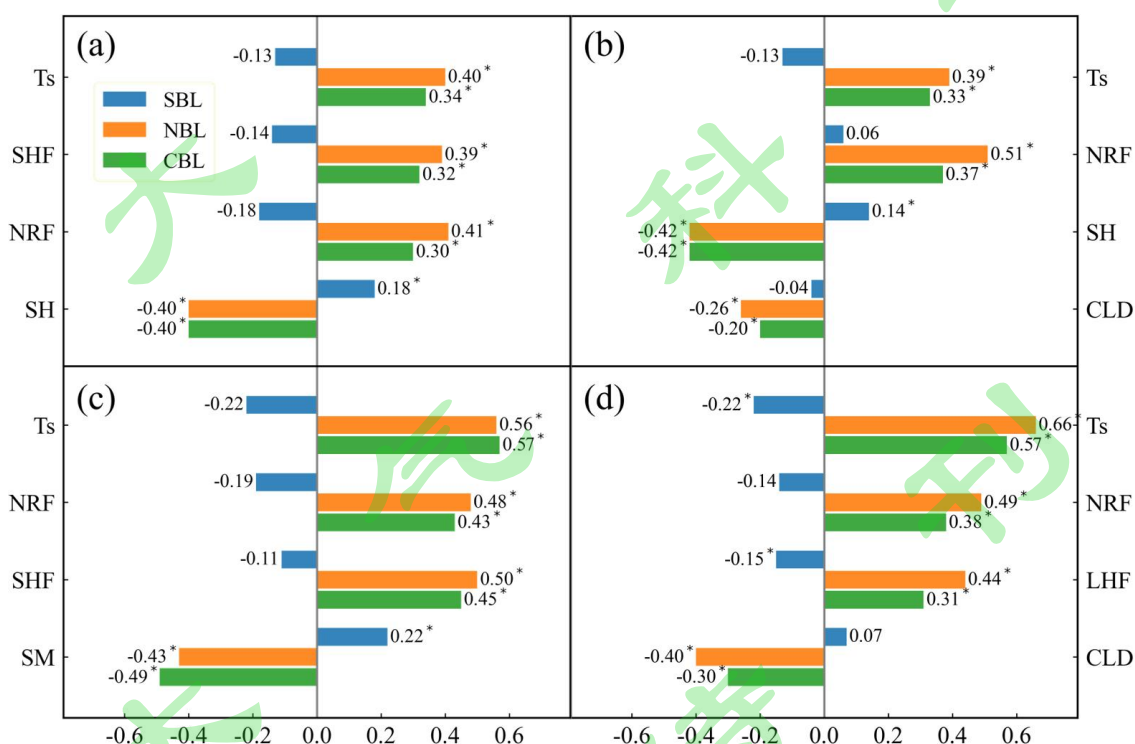


图 8 同图 7, 但为夏季 14 时

Fig.8 Similar to Fig. 7, but for 1400BJT in summer.

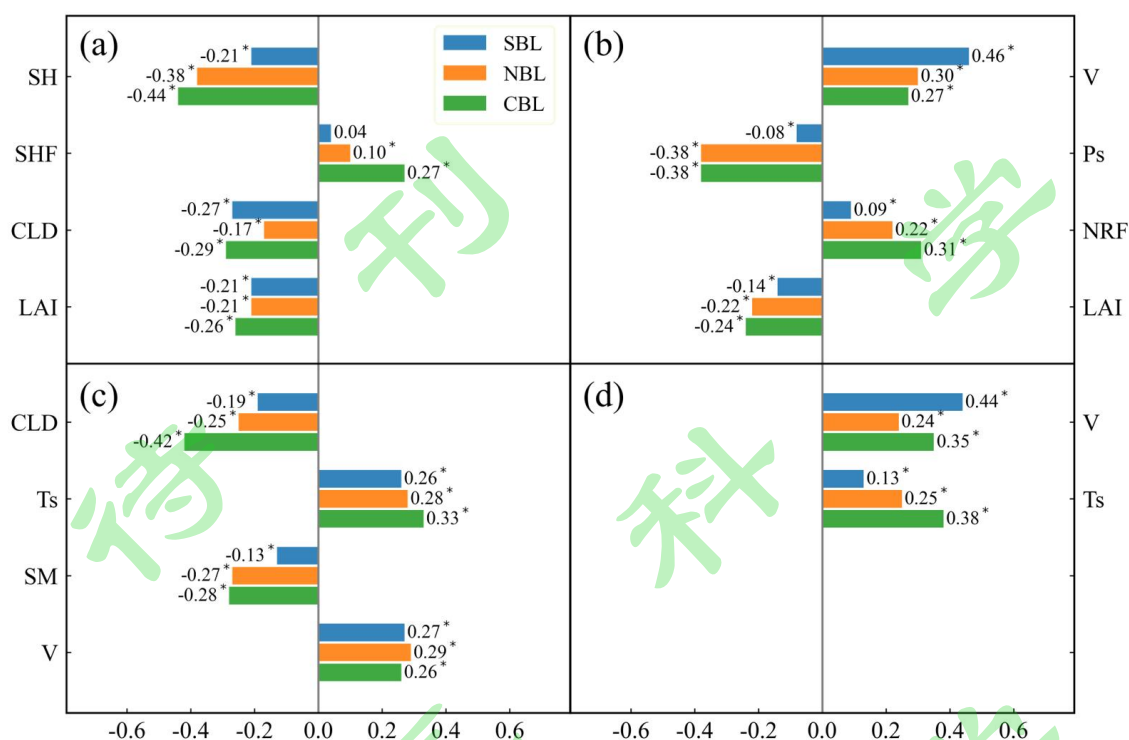


图 9 同图 7，但为夏季 20 时
Fig.9 Similar to Fig. 7, but for 2000BJT in summer.

5 各分区因子影响边界层演变的机理分析

边界层的发展过程较为复杂，且边界层高度影响因素之间具有强烈的相互作用，在确定了各分区边界层的主要影响因素后，尝试通过研究这些因子对不同热力状态下边界层高度的影响情况及其陆面过程来探究其驱动边界层演变的可能机理。首先，图 10 展示了不同时段各地区稳定、中性和对流边界层的发生频率以及边界层高度的统计特征。08 时，全国范围内大部分地区均以稳定边界层为主，其中，西部地区稳定边界层发生频率更高，接近 80%，并且高度更低，均值仅 163m。14 时，各地区均以对流边界层为主，发生频率均在 50%以上，中性边界层次之，稳定边界层仍会产生，但频率在各地区均小于 15%。日落后，随着湍流输送的减弱，边界层高度降低，稳定边界层逐渐形成，到了 20 时，除西北地区外，其余三个地区均以稳定边界层为主，且高度较低，均值均在 350m 左右，而西北地区仍以对流边界层为主。

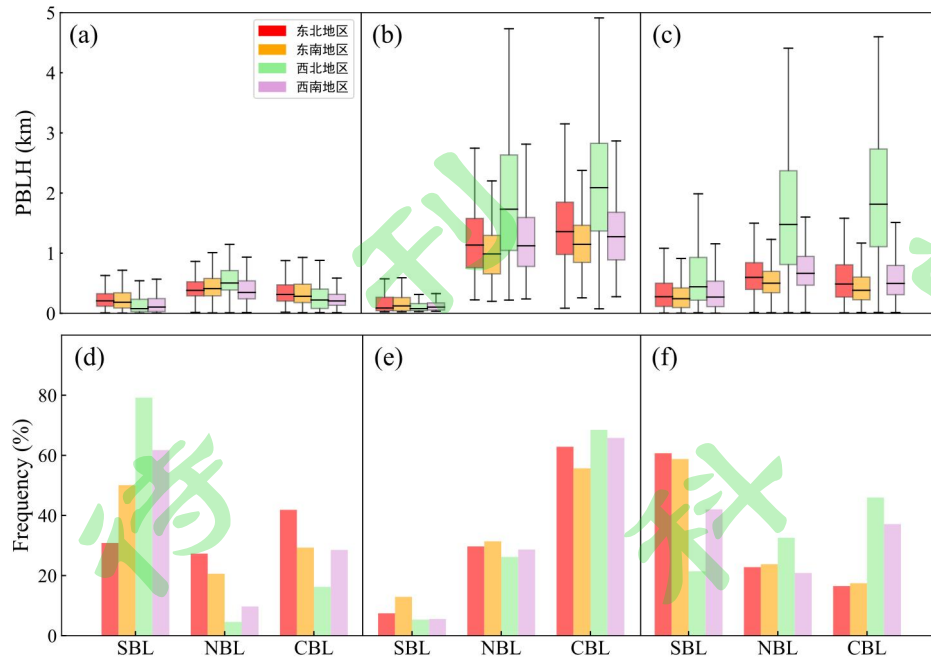


图 10 2012-2016 年 (a, d) 夏季 08 时、(b, e) 14 时和 (c, f) 20 时各地区边界层在不同热力状态下的高度 (a, b, c) 箱线图和 (d, e, f) 频率分布

Fig.10 (a, b, c) The height boxplots and (d, e, f) frequency distribution of the boundary layer under different thermal states and in different regions at (a, d) 0800 , (b, e) 1400 and (c, f) 2000 BJT during the summer of 2012-2016

图 11-14 分别为四个地区边界层发展的示意图，其在相关性分析的基础上，展示了早、中、晚三个时刻的边界层在不同热力状态下对各影响因子响应的潜在机制，示意图仅考虑了边界层主要影响因子（VIP 值大于等于 1 的因子）的情况，其余因子则未予显示。东北地区（图 11），08 时，各类型边界层的发展均主要受风速的驱动，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（Seidel et al., 2012）。故当该地区风速为正异常时，稳定、中性和对流边界层高度远远高于平均时的状态。14 时，以中性和对流边界层为主，其发展受云量强迫、热力因子以及湿度因子的驱动。其中，地表净辐射通量和地表温度可以直接影响热力湍流混合，从而影响边界层的发展（Dang et al., 2016）；而云量强迫则通过影响大气辐射，间接影响热力湍流，从而影响边界层的发展（Zhang et al., 2017）。值得注意的是，比湿对稳定、中性和对流边界层的影响具有一定差异。稳定边界层与频繁的间歇性湍流密切相关（Mahrt, 1999），而随着比湿的增加，流体以及水分湍流也随之增强（Shaik et al., 2020），从而加强了稳定边界层内的间歇性湍流，进一步抬升了其高度。而另一方面，较高的比湿可以通过改变地表能量分配，使得潜热增加，感热减少，从而抑制中性和对流边界层的发展（Darandm and Zandkarimif, 2019）。20 时，边界层的发展同时受动力和热力作用驱动。风速动力驱动和地表净辐射通量热力驱动这里就不再赘述。值得重视的是，地表气压的增大会导致气流的下沉运动，从而抑制了边界层的发展（Xi et al., 2022）。此外，较大的叶面积指数可以使植被通过蒸腾作用增加大气湿度，从而也抑制了中性和对流边界层的发展（吕世华等，2022）。

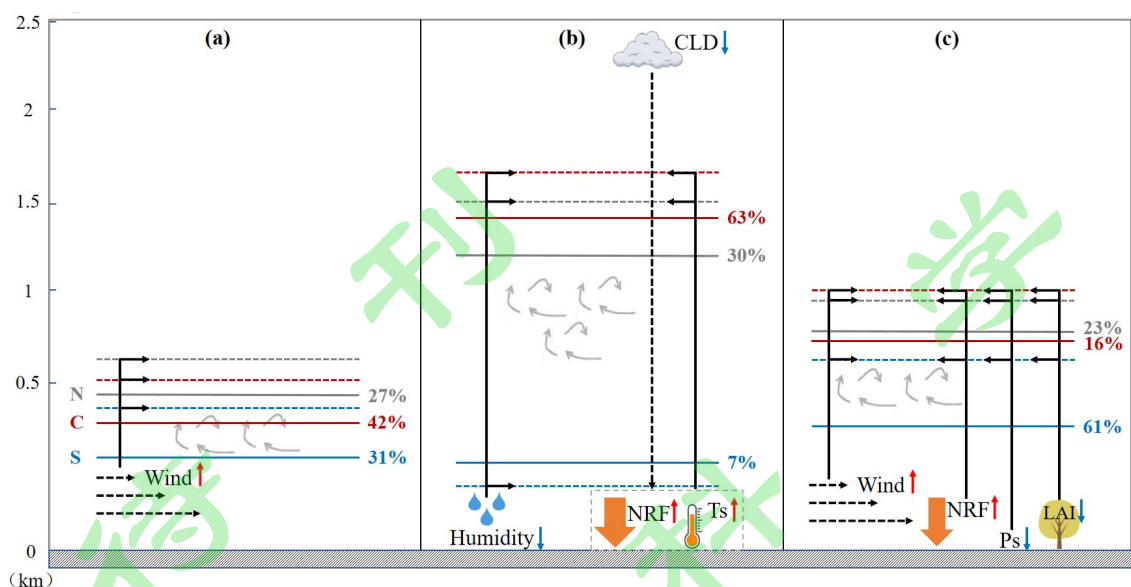


图 11 东北地区夏季 (a) 08 时、(b) 14 时和 (c) 20 时边界层主要影响因子影响边界层发展示意图 (蓝色、灰色和红色水平实线分别表示该地区稳定、中性和对流边界层的平均高度; 百分数表示该类型边界层的发生频率; 蓝色、灰色和红色水平虚线分别表示该地区边界层影响因子异常时的稳定、中性和对流边界层高度, 因子正异常用红色向上箭头表示, 负异常用蓝色向下箭头表示; 黑色箭头表示影响过程; 灰色箭头数目表示湍流强度)

Fig.11 Schematic diagram of the boundary layer development influenced by its dominant influencing factors.

(The blue grey and red horizontal solid line represents the average height of the stable, neutral and convective boundary layer in the northeast of China. The percentage represents the occurrence frequency of this type of the boundary layer. The blue, gray and red horizontal dotted line represent the heights of the stable, neutral and convective boundary layers when the influencing factors of the boundary layer are abnormal. The positive anomaly and negative anomaly factors are represented by the red up arrows and blue down arrows. The black arrows indicate the influence processes, and the gray arrows indicate turbulence.)

东南地区 (图 12), 08 时, 各类型边界层的发展也受风速湍流动力作用驱动。此外, 东南地区 08 时所获太阳光热已较多, 地表净辐射通量和地表温度也可以驱动热力边界层的发展。14 时, 地表净辐射通量和地表温度增加, 中性和对流边界层内热力湍流旺盛, 边界层发展较高。此外, 潜热通量由地表净辐射通量转化而来, 向上输送能量, 促进中性和对流边界层的发展 (王宏娜等, 2014)。值得注意的是, 稳定边界层内较高的地表温度有利于潜热通量的增加, 这意味着地表净辐射通量向感热通量的转化较少, 较低的感热通量在一定程度上抑制了稳定边界层的发展 (Miao et al., 2017)。20 时, 各类型边界层的发展主要受风速湍流动力作用驱动和地表温度湍流热力作用驱动。

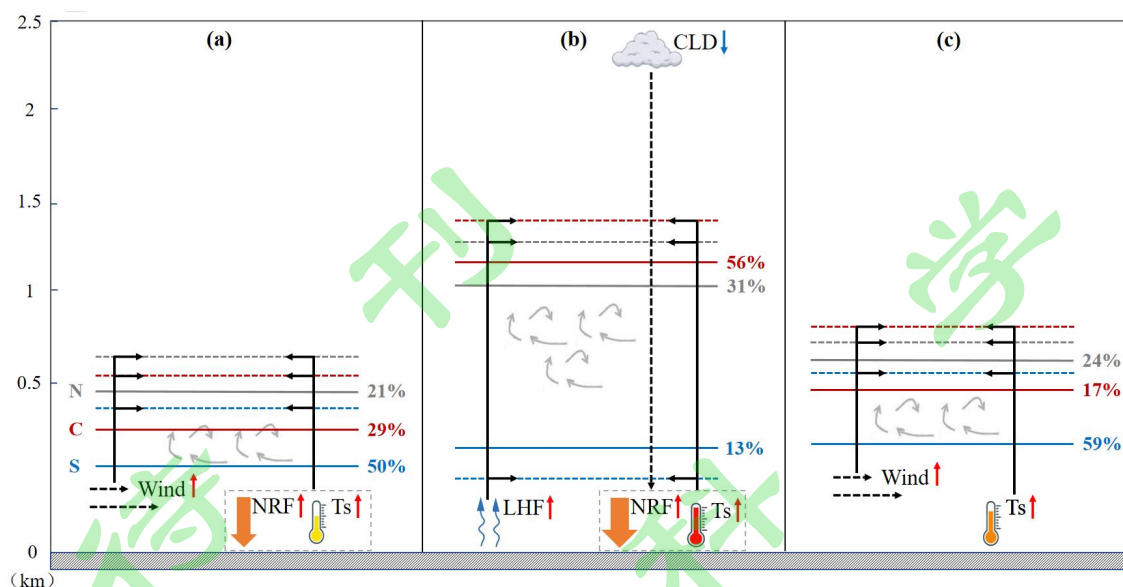


图 12 同图 11，但为东南地区

Fig.12 Similar to Fig. 11, but for the southeast of China.

西北地区（图 13），08 时，边界层的发展主要受风速动力作用驱动。此外，稳定和对流边界层的发展还受地表净辐射通量和潜热通量的驱动，而热力因子对中性边界层的作用不大。14 时，以中性和对流边界层为主，其发展主要受热力因子和湿度因子的驱动，驱动机理不再赘述。此外，稳定边界层的发展也受比湿的影响，同东北地区一致。20 时，边界层的发展也受热力因子和湿度因子的驱动。此外，较低的叶面积指数会导致比湿的减少，从而促进边界层的发展。值得注意的是，感热通量的热力驱动作用对稳定边界层的作用不大。

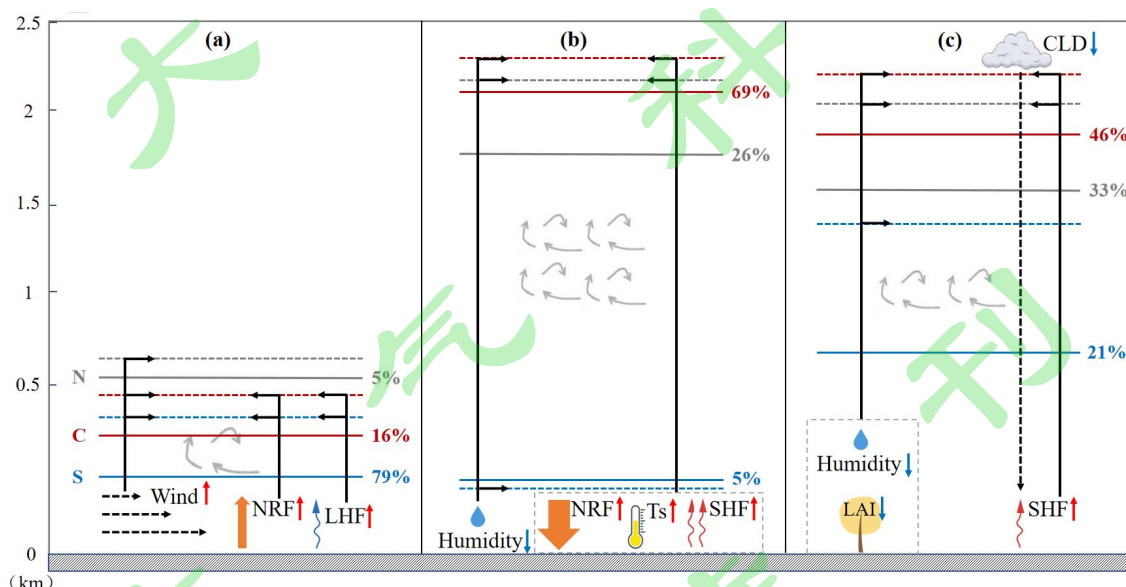


图 13 同图 11，但为西北地区

Fig.13 Similar to Fig. 11, but for the northwest of China.

西南地区（图 14），08 时，风速动力作用驱动着各类型边界层的发展。此外，较高的比湿对稳定和中性边界层具有抬升作用，比湿增加，稳定边界层内的间歇性湍流增强，稳定边界层高度抬升。14 时，中性和对流边界层的发展主要受地表热力因子的驱动，与西北地区较

为一致。而与西北地区不同的是，当西南地区土壤湿度较大时，会使得地表净辐射通量大部分转化为潜热通量，故感热通量较少，边界层发展较低（Xu et al., 2021）。此外，在稳定边界层内，随着土壤湿度的增加，流体以及水分湍流也会随之增强（Xu et al., 2021），从而加强了稳定边界层内的间歇性湍流，进一步抬升了其高度。20 时，各类型边界层的发展均受云量、地表温度和土壤湿度热力驱动以及风速动力驱动，其驱动机理同前文所述一致。

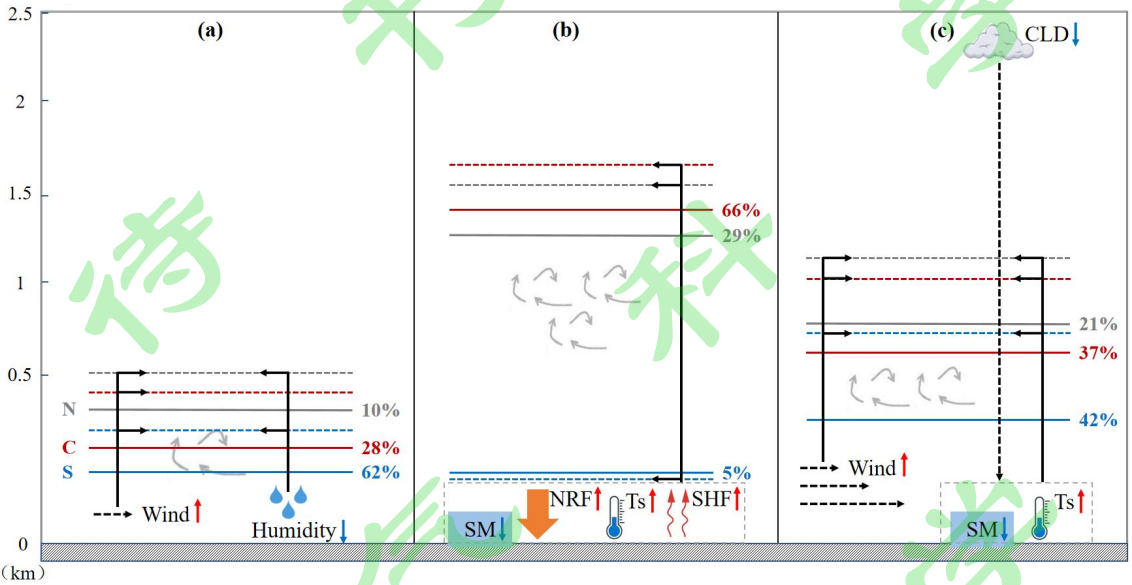


图 14 同图 11，但为西南地区

Fig.14 Similar to Fig. 11, but for the southwest of China.

我国区域辽阔，下垫面复杂，不同地区边界层影响因子特征及其影响边界层发展机理大有不同。总的而言，早、晚稳定边界层的发展主要受风速动力影响，这一点 Guo 等（2016）也曾指出，然而值得注意的是，由于各地区间接接收太阳辐射差异，一些热力因子也会驱动早、晚稳定边界层的发展，且区域性差异明显。中午，各地区仍会有稳定边界层的发生，其发展与间歇性湍流密切相关。中性和对流边界层的发展主要受热力因子直接引起的湍流热力作用以及湿度因子间接引起的湍流热力作用的驱动，前人对此的研究已颇为丰富（Dang et al., 2016; Miao et al., 2017; Xu et al., 2021），但仍缺乏对地区之间的差异对比，且已有研究大多基于对基本气象要素和热通量驱动边界层发展的研究，而很多地表要素和近地面要素也对边界层高度有着重要影响，本文对中性和对流边界层的影响因子及其区域性差异的研究较为全面。研究发现，地表温度和地表净辐射通量为各地区中性和对流边界层发展的主要热力影响因子。此外，潜热通量对东南地区以及感热通量对西北和西南地区边界层发展的作用也尤为重要。就调节大气比湿的水文气象学因子而言，东北和西北地区的叶面积指数和比湿、西南地区的土壤湿度对边界层高度的影响尤为重要。最后，值得注意的是，地表气压可以通过影响气流的上升和下沉运动从而影响东北地区夜间边界层的发展。

6 结论与讨论

本文基于 2012-2016 年 L 波段高分辨率探空资料，采用 K-prototypes 算法将中国夏季边界层高度结合 12 个可能的影响因子进行聚类分析，以探讨中国区域夏季边界层高度的区域性特征和主要影响因子，主要得到以下结论：

- （1）中国区域夏季 100 个站点早、中、晚的边界层高度均可划分为东北、东南、西北和

西南 4 个区域, 其中, 东部和西部地区的界限在三个时次有较小的偏差, 这可能是由于地方时差和边界层高度各影响因子联合作用导致的。各地区边界层高度均为中午高, 早晚低, 且晚上 20 时的边界层高度均大于早上 08 时。

(2) 08 时, 风速为全国范围内边界层发展的主要影响因子, 此外, 东部地区的地表温度和地表净辐射通量、西部地区的感热通量和潜热通量为边界层发展的重要热力影响因子。14 时, 各地区边界层的发展主要受热力因子驱动, 其中, 地表温度和地表净辐射通量为各地区边界层发展的重要热力影响因子, 此外, 不同地区之间也具有一定差异, 如东北地区的比湿、东南地区的潜热通量和西部地区的感热通量均对边界层高度有着重要影响。20 时, 由于东西时差的影响, 在东部地区, 其特征与 08 时类似, 不同的是东北地区的地表气压对 20 时边界层的发展起着重要作用; 而西部地区的特征与 14 时类似, 值得注意的是, 西北和西南地区影响边界层高度的湿度因子具有一定差异。

(3) 早、晚稳定边界层的发展主要受风速湍流动力作用驱动, 此外, 一些热力因子也会通过热力湍流作用影响早、晚稳定边界层的发展, 且区域性差异明显。中午, 各地区仍会有稳定边界层的发生, 其发展与间歇性湍流密切相关。中性和对流边界层的发展在早上也主要受风速的驱动, 而在中午则主要受较高地表温度和较大地表净辐射通量所引起的湍流热力作用驱动, 此外, 潜热通量对东南地区以及感热通量对西北和西南地区边界层发展的作用也尤为重要。晚上, 由于东西时差的影响, 在东部地区, 风速开始成为中性和对流边界层高度的主要影响因子, 而西部地区边界层高度的主要影响因子仍为热力因子。值得注意的是, 北部地区的叶面积指数可以通过植被蒸腾作用改变比湿, 从而影响边界层的发展; 东北地区地表气压的变化可以通过影响气流的上升和下沉运动从而影响边界层的发展。

本文不足之处在于探空测站数量有限, 仅针对 100 个站点进行聚类划分, 样本量较少, 区域化不够细致。此外, 本文利用机器学习相关算法将中国区域化, 并初步确定了各区域边界层的主要影响因子, 然而边界层过程较为复杂, 且具有明显的时空变化, 其主要影响因子驱动边界层发展的具体过程还需深入研究探讨。本文为边界层的研究提供了一种新思路, 后续工作可在此基础上展开。最后, 值得注意的是, 相关性并不意味着因果关系, 边界层高度影响因子驱动边界层发展的同时, 边界层过程也会反过来影响这些因子的变化, 而这种相互作用在本文中并未有所体现。因此, 未来需要通过更多时次、更连续的观测, 以及科学设计的数值模式实验来进一步研究不同时间不同地区边界层发展的复杂过程。

参考文献 (References)

- 蔡新玲, 吴素良, 王繁强, 等. 2007. 西安市近 10 年大气稳定性和边界层厚度特征 [J]. 气象科技, 35(6): 814-817. Cai Xinling, Wu Suliang, Wang Fanqiang, et al. 2007. Characteristics of atmospheric stabilities and ABL thickness in recent 10 years in Xi'an [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 35(6): 814-817.
- Cao F, Liang J, Bai L. 2009. A new initialization method for categorical data clustering [J]. Expert Systems with Applications, 36(7): 10223-10228.
- 车军辉, 赵平, 史茜, 等. 2021. 大气边界层研究进展 [J]. 地球物理学报, 64(3): 735-751. Che Junhui, Zhao Ping, Shi qian, et al. 2021. Research progress in atmospheric boundary layer [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 64(3): 735-751.
- 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.
- Darand 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.
- Dinpashoh Y, Fakheri-Fard A, Moghaddam M, et al. 2004. Selection of variables for the purpose of regionalization of Iran's precipitation climate using multivariate methods [J]. *J. Hydrol.*, 2004(297): 109-123.
- 杜一博, 张强, 王凯嘉, 等. 2018. 西北干旱区夏季晴天、阴天边界层结构及其陆面过程对比分析 [J]. *高原气象*, 37(1): 148-157. Du Yibo, Zhang Qiang, Wang Kaijia, et al. 2018. The northwest arid areas in summer sunny day, cloudy day boundary layer structure and land surface process comparison analysis [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 37(1): 148-157.
- Fang Y H, Chen H S, Lin Y, et al. 2021. Classification of Northeast China Cold Vortex Activity Paths in Early Summer Based on K-means Clustering and Their Climate Impact [J]. *Adv Atmos Sci*, 38(3): 400-412.
- 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]. *Atmospheric 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.
- Guo J P, 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]. *Atmospheric Chem. Phys.*, 21: 17079-17097.
- He L Q, Hao X, Li H, et al. 2021. How Do Extreme Summer Precipitation Events Over Eastern China Subregions Change? [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 48(5).
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2018. ERA5 hourly data on single levels from 1959 to present [DB]. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS).
- Huang Z X. 1998. Extensions to the K-means algorithm for clustering large data sets with categorical values [J]. *Data Min Knowl Discov*, (2): 283-304.
- Huang Z X, Ng M K. 1999. A fuzzy K-modes algorithm for clustering categorical data [J]. *IEEE Trans Fuzzy Syst*, 7(4): 446-452.
- 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.
- 李岩瑛, 张红丽, 张强, 等. 2020. 西北地区东部季风摆动区大气边界层高度对夏季风活动和季风降水的响应特征[J]. *干旱区地理*, 43(5): 1169-1178. Li Yanying, Zhang Hongli, Zhang Qiang, et al. 2020. Response characteristics of atmospheric boundary layer height to summer

- monsoon activity and monsoon precipitation of monsoon swing region in the eastern part of northwest China [J]. *Arid Land Geography* (in Chinese), 43(5): 1169-1178.
- Li Z Q, Guo J P, Ding A J, et al. 2017. Aerosol and boundary-layer interactions and impact on air quality [J]. *Natl. Sci. Rev.*, 4(6): 810-833.
- Liu S Y, Liang X Z. 2010. Observed diurnal cycle climatology of planetary boundary layer height [J]. *J. Climate*, 23(21): 5790-5807.
- 吕世华, 罗斯琼. 2004. 敦煌绿洲夏季边界层特征的数值模拟[J]. *高原气象*, (02): 147-154. Lv Shihua, Luo Siqiong. 2004. Numerical Simulation of Summer Boundary Layer Characteristics in Dunhuang Oasis[J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), (02): 147-154.
- Maaten L V D and Hinton G E. 2008. Visualizing data using t-SNE [J]. *J Mach Learn Res.*, 11: 30-33.
- Mahrt L. 1999. Stratified atmospheric boundary layers [J]. *Boundary Layer Meteorol*, 90(3): 375-396.
- Miao Y C, Guo J P, Liu S H, et al. 2017. Classification of summertime synoptic patterns in Beijing and their association with boundary layer structure affecting aerosol pollution [J]. *Atmospheric Chem. Phys.*, 17: 3097-3110.
- Pal S, Haeffelin M. 2015. Forcing mechanisms governing diurnal, seasonal, and interannual variability in the boundary layer depths: Five years of continuous lidar observations over a suburban site near Paris [J]. *J. Geophys. Res.*, 120: 11936-11956.
- Rihani J F, Chow F K, Maxwell R M. 2015. Isolating effects of terrain and soil moisture heterogeneity on the atmospheric boundary layer: Idealized simulations to diagnose land-atmosphere feedbacks [J]. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 7(2): 915-937.
- Rodell M, Houser P R, Jambor U, et al. 2004. The global land data assimilation system[J]. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 85(3): 381-394.
- Sanchez-Mejia Z M, Papuga S A. 2014. Observations of a two-layer soil moisture influence on surface energy dynamics and planetary boundary layer characteristics in a semiarid shrubland [J]. *Water Resour. Res.*, 50(1): 306-317.
- 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.*, 117(17): D17106.
- Shaik A, Lim S H. 2020. Climatology of Planetary Boundary Layer Height-Controlling Meteorological Parameters Over the Korean Peninsula[J]. *Remote Sens.*, 12(16).
- Shi J, Yang L. 2020. A climate classification of China through k-Nearest-Neighbor and sparse subspace representation [J]. *J. Climate*, 33(1): 243-262.
- Stull R B. 1988. An Introduction to Boundary Layer Meteorology [J]. *Geol Mag*, 126(3): 308-309.
- 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(01): 9-20. Tian Ye, Liu Xulin, Yu Yongtao, et al. 2022. Inversion of atmospheric boundary layer

- height in Beijing urban area [J]. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 50(01): 9-20.
- 王宏娜, 陈锦年, 左涛. 2014. 印度洋潜热通量对南海夏季风爆发的影响[J]. *热带气象学报*, 30(01): 189-193. Wang Hongna, Chen Jinnian, Zuo Tao. 2014. Impact of latent heat flux over the Indian ocean on the onset of south China sea summer monsoon. *Journal of Tropical Meteorology*, 30(01): 189-193.
- Wang M, Abrams Z B, Kornblau S M, et al. 2018. Thresher: Determining the number of clusters while removing outliers [J]. *BMC Bioinform.*, 19(1): 9.
- Wang X Y, Wang K C. 2014. Estimation of atmospheric mixing layer height from radiosonde data [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 7(6): 1701-1709.
- Xi X Y, Zhang Y J, Gao Z Q, et al. 2022. Diurnal Climatology of Correlations between the Planetary Boundary Layer Height and Surface Meteorological Factors over the Contiguous United States [J]. *Int J Climatol*, 42(10): 5092-5110.
- Xu Z Q, Chen H S, Guo J P. 2021a. Contrasting effect of soil moisture on the daytime boundary layer under different thermodynamic conditions in summer over China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 48(3).
- Xu H, Guo J, Li J, et al. 2021b. The significant role of radiosonde-measured cloud base height in estimating cloud radiative forcing [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 38 (9): 1552-1565.
- 曾涛, 琚存勇, 蔡体久, 等. 2010. 利用变量投影重要性准则筛选郁闭度估测参数[J]. *北京林业大学学报*, 32(6): 37-41. Zeng Tao, Ju Cunyong, Cai Tijiu, et al. 2010. Selection of parameters for estimating canopy closure density using variable importance of projection criterion[J]. *Journal of Beijing Forestry University* (in Chinese), 32(6): 37-41.
- Zhao Y R, Mao W Q, Zhang K Q, et al. 2017. Climatic variations in the boundary layer height of arid and semiarid areas in East Asia and North Africa [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 95(3): 181-197.
- 张杰, 张强, 唐从国. 2013. 极端干旱区大气边界层厚度时间演变及其与地表能量平衡的关系 [J]. *生态学报*, 33(8): 2545-2555. Zhang Jie, Zhang Qiang, Tang Congguo, et al. 2013. Temporal variety of boundary layer height over deep arid region and the relations with energy balance[J]. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese), 33(8): 2545-2555.
- 张强. 2007. 极端干旱荒漠地区大气热力边界层厚度研究[J]. *中国沙漠*, 27(4): 614-620. Zhang Qiang. 2007. Study on depth of atmospheric thermal boundary layer in extreme arid desert regions[J]. *Journal of Forest Research* (in Chinese), 27(4): 614-620.
- 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]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 66(4): 599-608.
- 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.

- Zhang X L, Yan X D. 2014. Temporal change of climate zones in China in the context of climate warming [J]. Theor. Appl. Climatol., 115(1-2): 167-175.
- Zhang Y H, Seidel D J, Zhang S D. 2013. Trends in planetary boundary layer height over Europe [J]. J. Climate, 26(24): 10071-10076.
- Zhang Y, Gao Z, Li D, et al. 2014. On the computation of planetary boundary-layer height using the bulk Richardson number method [J]. Geosci Model Dev, 7(6): 2599-2611.