

梁智豪,王东海,梁钊明. 探空观测的边界层高度时空变化特征. 应用气象学报,2020,31(4):447-459.

DOI: 10.11898/1001-7313.20200407

## 探空观测的边界层高度时空变化特征

梁智豪<sup>1)</sup> 王东海<sup>1)2)3)\*</sup> 梁钊明<sup>3)4)</sup>

<sup>1)</sup>(中山大学大气科学学院,珠海 519082)

<sup>2)</sup>(广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室,珠海 519082)

<sup>3)</sup>(南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海),珠海 519082)

<sup>4)</sup>(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081)

### 摘 要

基于 2010—2018 年我国 119 个站点 L 波段探空秒级资料,通过对位温廓线法所得边界层高度进行 Kmeans 聚类,将我国分为青藏地区、西北地区、中部地区和东部地区 4 个分区,分析我国边界层高度及边界层状态(对流、中性和稳定边界层)发生频率的变化特征。结果表明:2010—2018 年 08:00 我国年平均边界层高度均为 200~600 m,以稳定边界层为主,20:00 年平均边界层高度从青藏地区、西北地区、中部地区到东部地区逐渐减小,其中青藏地区和西北地区全年以对流和中性边界层状态为主,中部地区和东部地区以中性边界层为主;4 个分区的月平均边界层高度在 08:00 逐月变化不明显,且各分区差异不大,而 4 个分区 20:00 月平均边界层高度随时间呈单峰结构,最大值出现在春夏季,最小值出现在秋冬季,从青藏地区、西北地区、中部地区到东部地区变化幅度逐渐减小;青藏地区、西北地区和中部地区的边界层高度日变化幅度春夏季大、秋冬季小,而东部地区边界层高度日变化在不同季节特征相近。

**关键词:** L 波段探空; 边界层高度; 边界层状态; 时空变化

### 引 言

离地面 1~2 km 高度的大气边界层(atmospheric boundary layer, ABL),又称行星边界层(planetary boundary layer, PBL),为受地球表面摩擦和热过程等显著影响的大气层,是大气系统的重要组成部分<sup>[1-2]</sup>。水汽、动量和热量等在自由大气和下垫面之间的边界层中进行频繁的输送交换,天气、气候和水循环等过程都与大气边界层中的物理、化学与生态过程等密切相关<sup>[3]</sup>,突发性气象灾害也多与大气边界层过程密切相关<sup>[4-8]</sup>。大气边界层是人类生产和活动的主要场所,人类活动过程中排放的污染物以及它们在传输、转化等大部分过程均发生在这一层,边界层的气象状态影响着污染物扩散和堆积等,进

而对污染事件的发生发展起重要作用<sup>[9-11]</sup>。保护生态环境、研究大气的污染机理和开展大气污染预报、保障地面交通和航空安全等,均有赖于大气边界层的研究<sup>[12]</sup>。

边界层高度(boundary layer height, BLH)是边界层研究中重要的特征参数之一,表征其对水汽、气溶胶、污染物等物质的容纳能力,也是天气、气候和空气质量模式中判断湍流混合、垂直扰动、对流传输、云带、大气污染物扩散、分析大气环境容量的重要指标<sup>[13-20]</sup>。边界层高度受到地形、季节、天气及昼夜等因素影响<sup>[21]</sup>,目前普遍认为一般地区白天对流边界层高度低于 2000~3000 m,夜间稳定边界层的最大高度不超过 400~500 m<sup>[22-23]</sup>。我国地形和气候环境相对复杂,使我国边界层的形成和发展具有不同于一般地区的特征。张强等<sup>[24]</sup>指出在极端干旱荒漠和戈

2019-12-22 收到,2020-04-13 收到再改稿。

资助项目:国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(41861164027),广东省科技计划(20170244,2017B020218003),国家自然科学基金项目(41775097,41705026)

\* 通信作者,邮箱:wangdh7@mail.sysu.edu.cn

壁地区夏季晴空天气下对流边界层高度可超过4000 m,夜间稳定边界层也存在超过1000 m的个例。杨飞跃<sup>[25]</sup>使用探空和微波辐射计资料分析表明,半干旱地区大气边界层在5—7月的晴朗天气条件下,可出现4000 m以上的深厚边界层。

基于我国边界层高度的统计研究已有不少成果,乔娟<sup>[23]</sup>利用常规探空观测资料,研究5个不同干旱程度地区大气边界层的结构特征,发现边界层高度与干旱程度和地理位置分布有关,干旱程度越高的地区边界层厚度越大,且大气边界层高度基本随经度的增大而减少,随纬度的增大而增大。徐桂荣等<sup>[26]</sup>利用青藏高原地区的加密探空资料通过分析由气块法和理查森数法相结合计算所得的边界层高度发现,青藏高原中部对流边界层发生频率较青藏高原东侧更多。涂静等<sup>[27]</sup>分析2006—2007年沿海的大连、青岛和台州3个站点的边界层高度,得出内陆边界层春夏季高、秋冬季低的特征,而沿海地区边界层则表现为夏季低、秋季高。Liu等<sup>[28]</sup>基于14个大型观测试验的无线电探空资料,使用位温廓线法计算得到的边界层高度探讨了陆地、海洋和冰面3种下垫面的边界层高度日循环特征。

上述对国内边界层变化特征的探讨,大多数基于对单站或某地区部分站点的分析,由于我国地域广阔且地形复杂,无法全面概括全国边界层高度的变化特征,且常规探空资料在垂直分辨率上有所欠缺,在计算边界层高度时也不够细致。为此,本文采用2010年1月—2018年12月我国共119个站点的L波段探空资料,通过位温廓线法计算边界层高度,探讨我国边界层高度和边界层状态发生频率的时空分布。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

本文所用资料包括2010年1月1日—2018年12月31日L波段探空资料和ERA5逐日、逐月再分析资料。

L波段高空气象探测系统是我国自行研制的高空气象探测系统,该探测系统可达到1.2 s的秒级周期,单次采集包括气压、高度、温度、相对湿度、风向、风速等在内的一组变量,为获取高分辨率的大气垂直廓线信息提供有利条件<sup>[29-30]</sup>。L波段系统的建设,缩短了我国高空气象探测技术与国际先进水平

的差距,提升了高空气象探测的自动化程度、观测资料的精度和时间密度<sup>[31-32]</sup>。秒级探空资料与常规探空资料在垂直方向上具有一致性,但秒级探空资料的高分辨率特性更细致地反映大气状态<sup>[33]</sup>。

本文使用的L波段探空资料为每日08:00(北京时间,下同)和20:00两次常规观测,部分站点有02:00和14:00加密观测时次。L波段探空站点共有121个,剔除资料缺失较为严重的2个站点(缺失率达92.6%和78.6%),本文选取119个有效站点用于统计分析。其中,讨论日变化时使用的加密探测站点包括达日站、红原站、甘孜站、巴塘站、锡林浩特站、达县站、温江站、宜宾站、西昌站、徐州站、阜阳站、南京站、武汉站、东源站、清远站、阳江站和海口站,共17个站点。

ERA5再分析资料是ECMWF发布的第5套再分析资料,通过ECMWF的全球预报系统生成,模式垂直层数达到137层,模式层顶为0.01 hPa。本研究使用的逐日和月平均资料,时间分辨率为1 h,使用的变量为边界层高度(单位:m),其水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。

### 1.2 边界层高度的计算方法

本文采用位温廓线法<sup>[28]</sup>计算边界层高度,该方法先通过位温廓线确定边界层状态(对流边界层、中性边界层或稳定边界层),当边界层为对流边界层或中性边界层时,由于浮力是驱动湍流的主要机制,此时定义边界层高度为气块从地表干绝热上升到中性状态的高度<sup>[1]</sup>;当边界层为稳定边界层时,湍流主要形成机制为浮力强迫和风切驱动,此时定义边界层高度为从地面开始到热力稳定层的高度或急流中心所在高度二者中相对较低的高度。

考虑到探空资料本身具有较高的垂直分辨率(5~10 m),同时计算位温时受探测变量噪声的影响较大,因此,计算位温垂直梯度时先对位温数据进行六点垂直平滑处理,而梯度计算时则采用向前差分的方法。

### 1.3 聚类算法

本文在分析边界层高度变化时,首先使用K均值聚类算法(Kmeans)对资料进行聚类降维,该算法的主要流程是先定义聚类数量 $k$ ,再随机初始化 $k$ 个聚类中心,将样本定义为最近聚类中心的类别,之后更新聚类中心到对应类别的样本平均值中心,迭代重复更新样本类别和聚类中心,直至收敛,最后样本的类别即为最近邻聚类中心对应的类别<sup>[34-35]</sup>。

Kmeans 算法作为无监督学习算法之一,可实现在度量距离上将具有相似特征的样本进行聚类,达到资料降维目的。

## 2 不同区域边界层高度的时空变化特征

### 2.1 聚类及分区

本文对 2010—2018 年我国 119 个站点的月平均边界层高度进行 Kmeans 聚类,设置聚类数为 4,聚类结果如图 1 所示。此时可以发现聚类结果大致将我国分成青藏地区、西北地区、中部地区和东部地

区。

为了更客观地探讨上述 4 个分区边界层高度的时空变化特征,本文基于聚类结果挑选各分区典型代表站点,进而利用各分区典型代表站点的边界层高度表征该区域的边界层高度变化情况,以此揭示不同分区边界层高度的时空变化特征。值得注意的是,由于部分站点存在大量缺测时次,或是部分站点处于聚类的交界处,边界层高度随时间变化规律与聚类所对应类别无明显一致特征,因此本文剔除这些站点。图 1 中带圈站点为其对应分区所挑选的典型代表站点。

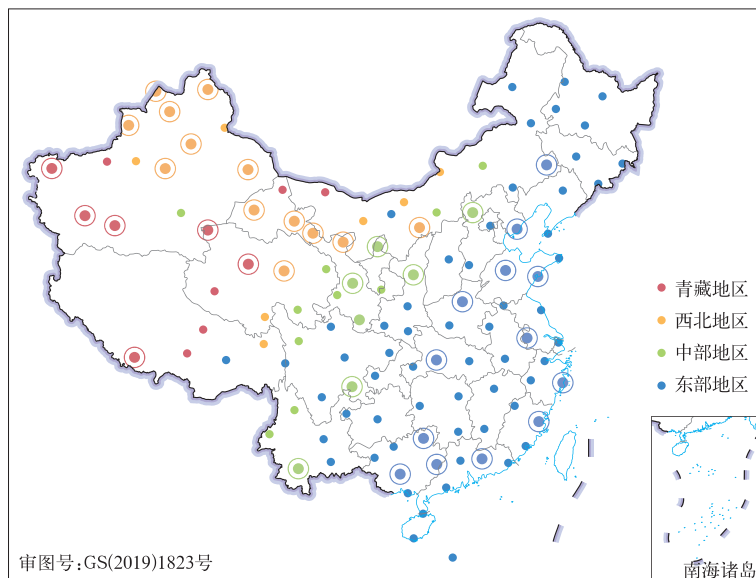


图 1 2010—2018 年我国月平均边界层高度聚类结果空间分布  
(带圈站点为青藏地区、西北地区、中部地区和东部地区挑选的代表站点)

Fig. 1 The spatial distribution of cluster result of monthly average boundary layer height in China from 2010 to 2018

(circled stations are representative stations of Qinghai-Tibet region, northwest region, central region and eastern region)

通过分析 2010—2018 年 4 个分区代表站点月平均边界层高度的逐月变化(图略)发现,4 个分区 08:00 的月平均边界层高度之间无明显差异,其中月平均边界层高度存在 1 年的周期变化,但周期变化不明显,整体差异不大;而 20:00 的月平均边界层高度则表现出高度一致性和逐年的周期性变化,表明各个分区挑选的站点相关性较强,且类别间的边界层高度变化存在明显差异,证明上述分类结果及代表站点的挑选有效。

### 2.2 边界层高度的时空变化特征

#### 2.2.1 年际变化

图 2 为 2010—2018 年 4 个分区年平均边界层高度变化的箱线图,可以看到,4 个分区在 08:00 和 20:00 的年平均边界层高度随时间变化不明显。08:00 各分区间的年平均边界层高度差异不明显,主要集中在 300~400 m,而 20:00 各分区之间的年平均边界层高度存在差异,其中青藏地区的年平均边界层高度最高,为 1200~1500 m;西北地区的年平均边界

层高度次之,为 800~1000 m;中部地区和东部地区 的年平均边界层高度分别约为 500 m 和 400 m。

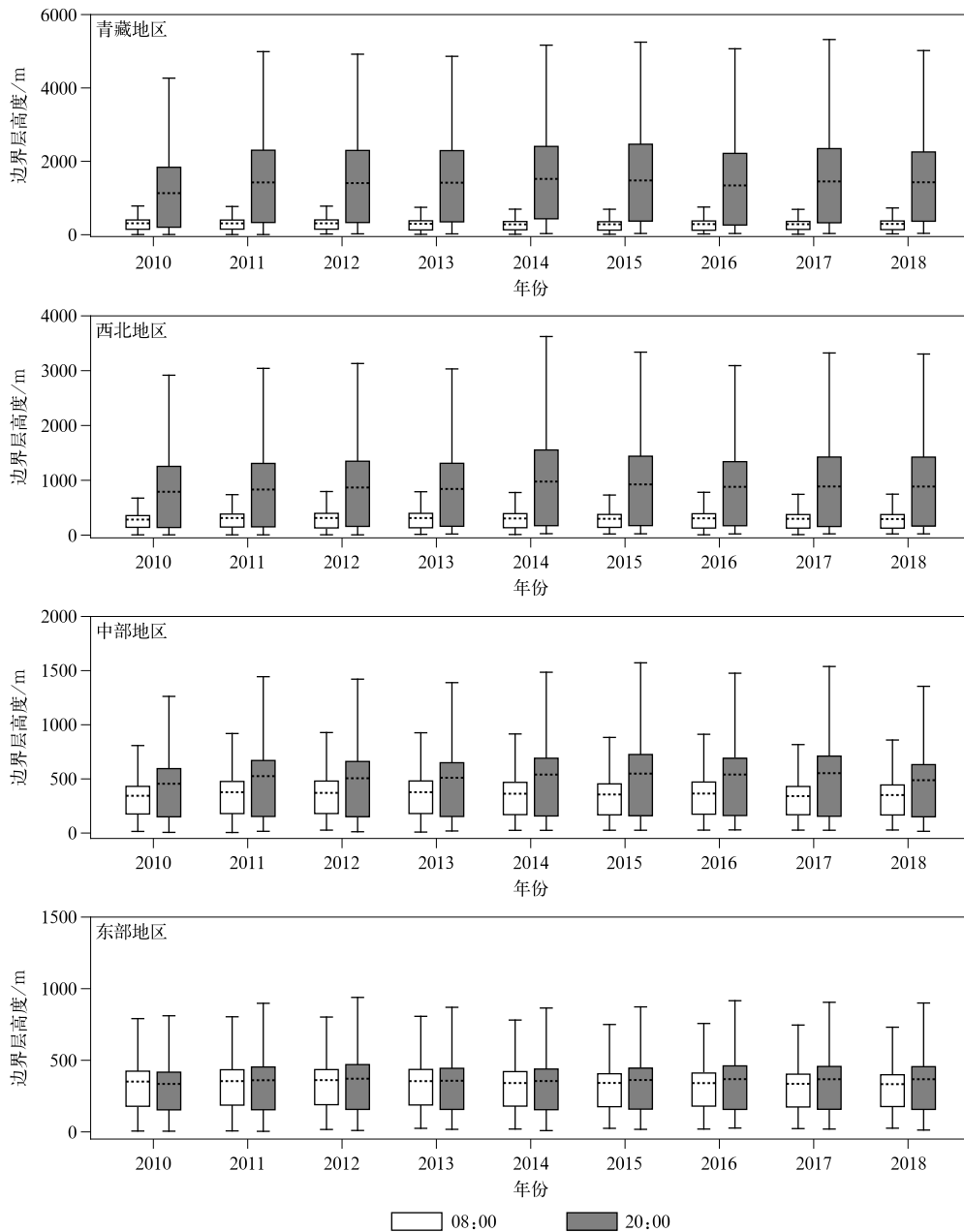


图 2 2010—2018 年青藏地区、西北地区、中部地区和东部地区边界层高度分布  
(虚线表示平均值)

Fig. 2 The distribution of boundary layer heights of Qinghai-Tibet region, northwest region, central region and eastern region from 2010 to 2018 (the dashed line denotes the average)

2010—2018 年 4 个分区不同边界层状态(对流、中性和稳定边界层)发生频率的变化情况(图 3)分析表明,2010—2018 年总体上 4 个分区在 08:00 和 20:00 的边界层状态发生频率变化不大,但各分区之间存在明显差异。从 08:00 的边界层状态频率

分布可以看到,4 个分区全年均以稳定边界层为主,其中青藏地区和西北地区稳定边界层发生频率高达 80%,而中部地区和东部地区约为 60%和 50%;中性边界层发生频率次之,青藏地区和西北地区中性边界层发生频率为 10%~20%,中部地区和东部地

区为 30%~40%;而对流边界层发生频率最低,均为 10%以下。对于 20:00,4 个分区中性边界层发生频率均为 40%~60%,稳定边界层发生频率为 20%~40%,差异主要体现在对流边界层的发生频

率,其中,青藏地区和西北地区的对流边界层发生频率分别为 30%和 20%,中部地区和东部地区则均小于 10%。

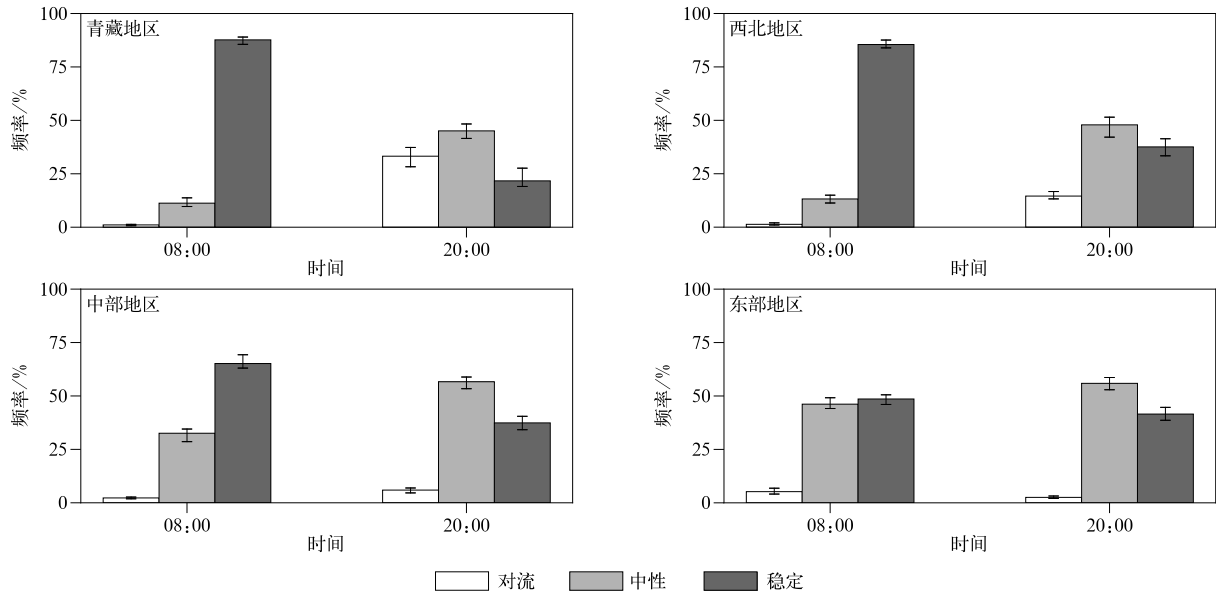


图 3 2010—2018 年青藏地区、西北地区、中部地区和东部地区不同边界层状态(对流、中性和稳定)平均发生频率 (线段表示 2010—2018 年平均发生频率的最大值和最小值)

Fig. 3 The average frequency of different boundary layer states(convective,neutral and stable) in Qinghai-Tibet region,northwest region,central region and eastern region from 2010 to 2018 (the segment denotes the maximum and minimum frequency)

### 2.2.2 年变化

上述讨论表明,2010—2018 年 4 个分区的年平均边界层高度和边界层状态发生频率无明显变化,以下对边界层高度和边界层状态发生频率的逐月分布进行分析。

图 4 给出了 4 个分区 2010—2018 年平均边界层高度的逐月变化。4 个分区 08:00 边界层高度逐月变化不明显,且各区之间也无明显差异,月平均边界层高度为 200~400 m。4 个分区 20:00 月平均边界层高度从 1 月逐渐增大,4—6 月达到最大值,随后逐渐减小;其中,青藏地区的月平均边界层高度最大值为 2454 m(4 月),西北地区为 1934 m(5 月),中部地区为 935 m(5 月),东部地区为 442 m(6 月)。

与之对应,图 5 给出了 2010—2018 年平均各分区边界层状态发生频率的逐月变化。4 个分区在

08:00 和 20:00 的边界层状态发生频率均呈现明显的单峰结构,其中,1—12 月稳定边界层的发生频率呈先减小后增大趋势,最小值出现在 5—7 月,而中性边界层和对流边界层的发生频率则先增大后减小,最大值出现在 5—7 月,但不同分区的变化幅度存在一定差异。对于 08:00,青藏地区、西北地区和中部地区 3 个分区全年以稳定边界层为主(50%以上),而东部地区中性边界层和稳定边界层占比相近,全年以稳定边界层和中性边界层为主(90%以上)。对于 20:00,青藏地区和西北地区春夏季以中性边界层和对流边界层为主(80%以上),明显的辐射加热使该地区的对流边界层发生频率具有更高的比重,最高分别达到 62.5%和 37.9%,而秋冬季则以中性和稳定边界层为主(60%以上);中部地区和东部地区对流边界层发生频率全年均在 15%以下,逐月变化主要体现在中性和稳定边界层。

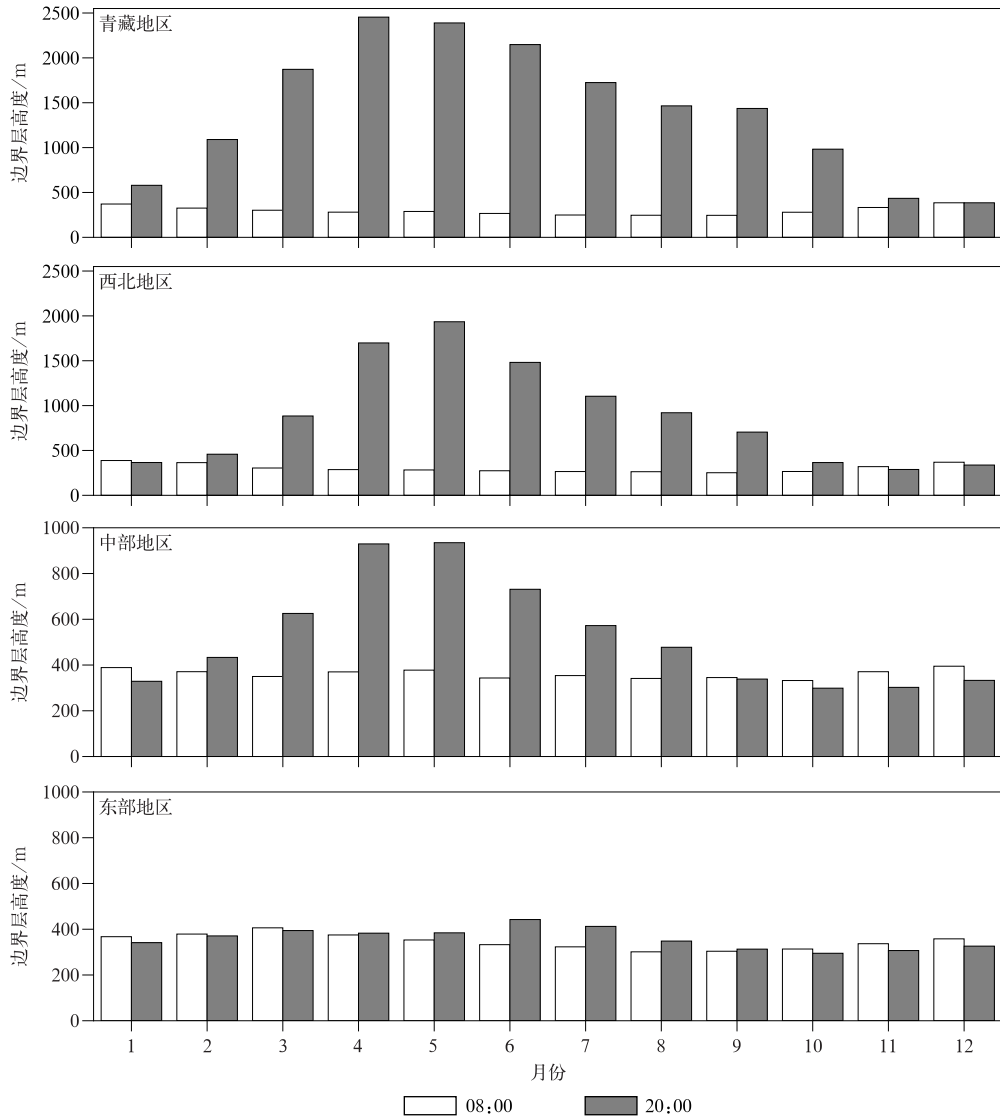


图 4 2010—2018 年青藏地区、西北地区、中部地区和东部地区平均边界层高度逐月变化  
 Fig. 4 Annual variation of average boundary layer height in Qinghai-Tibet region, northwest region, central region and eastern region from 2010 to 2018

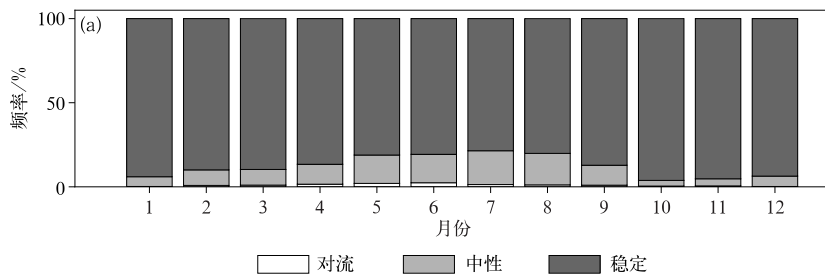
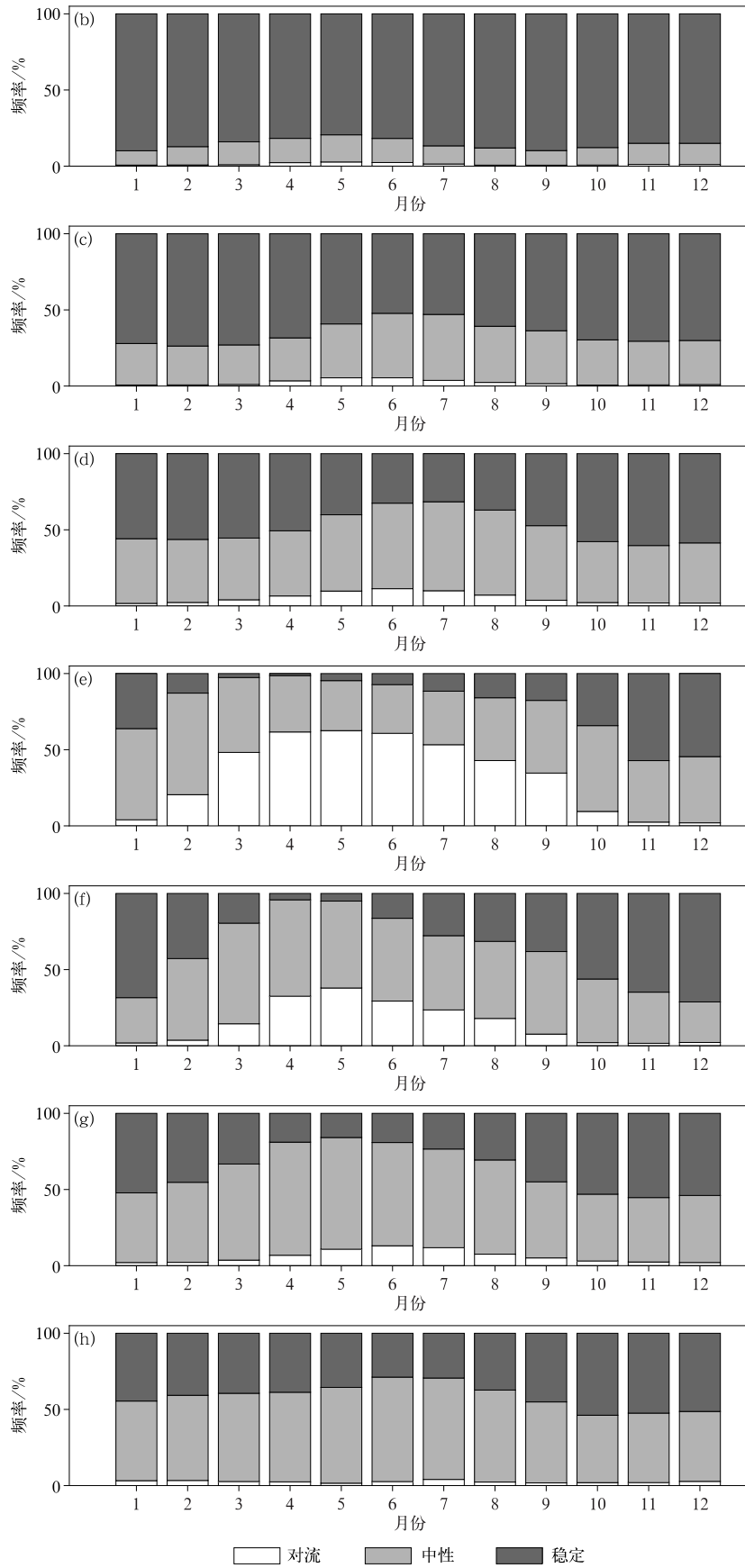


图 5 2010—2018 年不同边界层状态(对流、中性和稳定)平均发生频率逐月变化  
 (a)08:00 青藏地区, (b)08:00 西北地区, (c)08:00 中部地区, (d)08:00 东部地区,  
 (e)20:00 青藏地区, (f)20:00 西北地区, (g)20:00 中部地区, (h)20:00 东部地区

Fig. 5 Annual variation of different boundary layer states (convective, stable and neutral) average frequencies from 2010 to 2018  
 (a)Qinghai-Tibet region at 0800 BT, (b)northwest region at 0800 BT, (c)central region at 0800 BT, (d)eastern region at 0800 BT,  
 (e)Qinghai-Tibet region at 2000 BT, (f)northwest region at 2000 BT, (g)central region at 2000 BT, (h)eastern region at 2000 BT



续图 5

### 2.2.3 日变化

研究表明:边界层高度具有明显的日变化特征,具体表现为白天深厚,晚上浅薄<sup>[1,15]</sup>。太阳辐射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,夜间辐射冷却使近地面层变得稳定,此时表现为浅薄的边界层。

利用2010—2018年L波段探空加密观测的站点资料以及1 h分辨率的ERA5再分析资料用于分析边界层高度日变化特征。图6实线为17个加密探空站点02:00,08:00,14:00和20:00的平均边界层高度。17个站点边界层高度日变化趋势基本一致,02:00和08:00边界层高度变化不明显,14:00

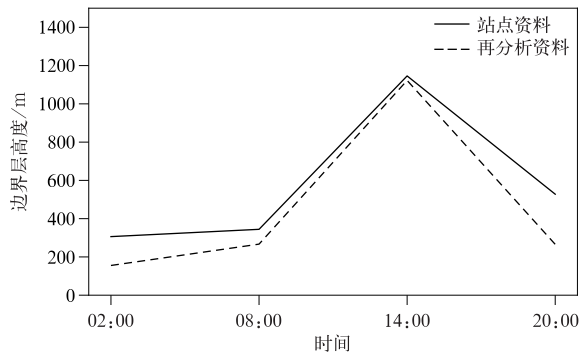


图6 L波段探空17个加密探测站点资料和ERA5再分析资料边界层高度日变化

Fig. 6 Diurnal variation of boundary layer height derived from 17 L-band sounding stations and corresponding ERA5 reanalysis data

边界层高度最高,20:00边界层高度有所降低。其中,加密观测站点的边界层高度在02:00和08:00为200~500 m,而14:00和20:00差异较大,14:00平均边界层高度最低约686 m,最高可达2000 m以上,20:00则分布在250~1400 m(图略)。

上述的探空站加密资料的时间分辨率(6 h)仍不足以分析边界层高度的日变化特征。因此,本文利用1 h分辨率的ERA5再分析资料补充探讨边界层高度的日变化。首先,对ERA5再分析资料进行初步的评估,图6虚线为对应于加密观测站点和时段的ERA5再分析资料,取相同时间点且插值到对应站点所得的平均边界层高度日变化折线图。由图6可知,L波段探空站点和ERA5再分析资料的边界层高度变化相近。同时,针对每个站点,计算ERA5再分析资料与探空资料计算所得边界层高度的相关性(图略),其中有13个站点的相关系数可达0.6~0.8,其余4个站点达到0.47以上,17个站点均达到0.01显著性水平。ERA5再分析资料和L波段探空资料计算所得的边界层高度相关显著,可用于补充讨论边界层高度的日变化特征。

为了与上述讨论保持连贯性,同时避免插值带来的误差,本文选取ERA5再分析资料与L波段探空站点的最近邻点代表该站点的边界层高度的值,再对各分区典型代表站点的边界层高度进行平均,得到4个分区边界层高度随季节变化的时间序列(图7)。整体而言,4个分区的边界层高度日变化趋

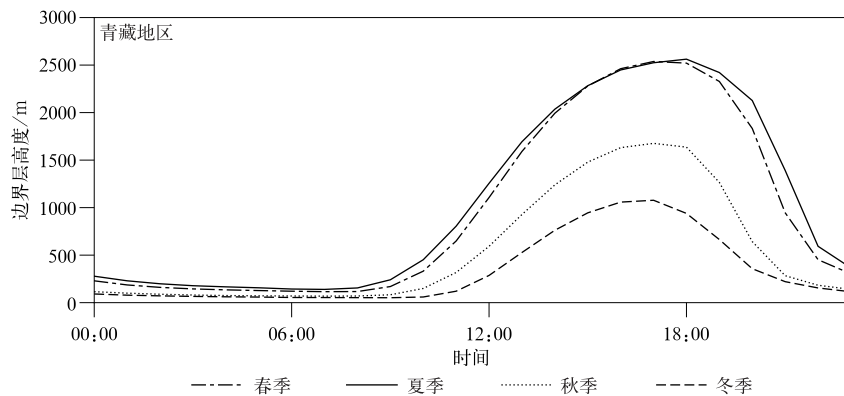
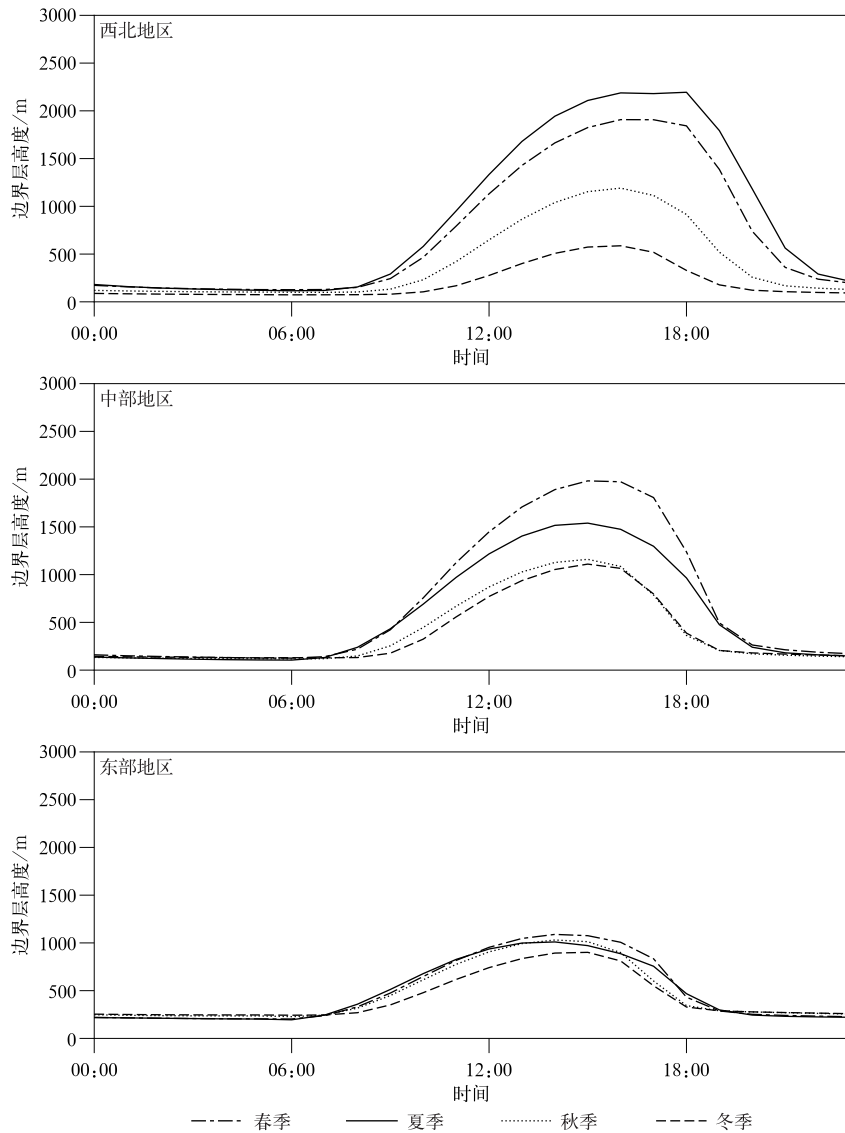


图7 基于ERA5再分析资料的青藏地区、西北地区、中部地区和东部地区不同季节边界层高度日变化

Fig. 7 Diurnal variation of boundary layer height in different seasons of four regions derived from ERA5 reanalysis data in Qinghai-Tibet region, northwest region, central region and eastern region





续图 7

势基本一致, 08:00—10:00 开始逐渐增大, 14:00—17:00 达到最大值, 后续逐渐减小。青藏地区、西北地区和中部分地区 3 个分区边界层高度日变化具有显著的季节差异, 其中青藏地区和西北地区日变化在夏季最大(最大值可达 2562 m 和 2194 m), 春季次之(2537 m 和 1907 m), 再者是秋季(1676 m 和 1190 m), 冬季最小(1077 m 和 587 m); 中部地区日变化最大值在春季最大(1981 m), 夏季次之(1539 m), 秋冬两季相近(1150 m); 而东部地区日变化在不同季节差异不大(最大值均为 800~1000 m)。

### 2.3 边界层状态与边界层高度之间的关系

上述分析表明: 在年变化上, 20:00 的边界层高度与边界层状态发生频率具有一致的变化, 而在 08:00 边界层状态发生频率变化较为明显的情况

下, 边界层高度几乎不变。因此, 讨论边界层状态与边界层高度之间的关系非常必要。

本文对 2010—2018 年不同分区站点 20:00 在 1—12 月边界层高度进行统计, 得到每个月边界层状态与边界层高度的箱型图(图 8)。08:00, 各分区在不同边界层状态下边界层高度的分布整体上维持在 200~500 m, 其上四分位和下四分位变化不大, 均在 1000 m 以下(图略)。由图 8 可知, 20:00, 4 个分区在稳定边界层状态时对应的边界层高度均很低, 且随时间变化不明显, 高度约 100~300 m; 在对流和中性边界层状态时, 对应的边界层高度在不同分区随季节变化有较大差异, 同一分区在对流边界层状态时的边界层高度比中性边界层略高, 且在对流和中性边界层状态时的边界层高度分布, 与其对

应分区的月平均边界高度有一致趋势。由此可见，20:00 月平均边界层高度在各分区和逐月的差异主

要来自于中性和对流边界层状态时的边界层高度分布的不同。

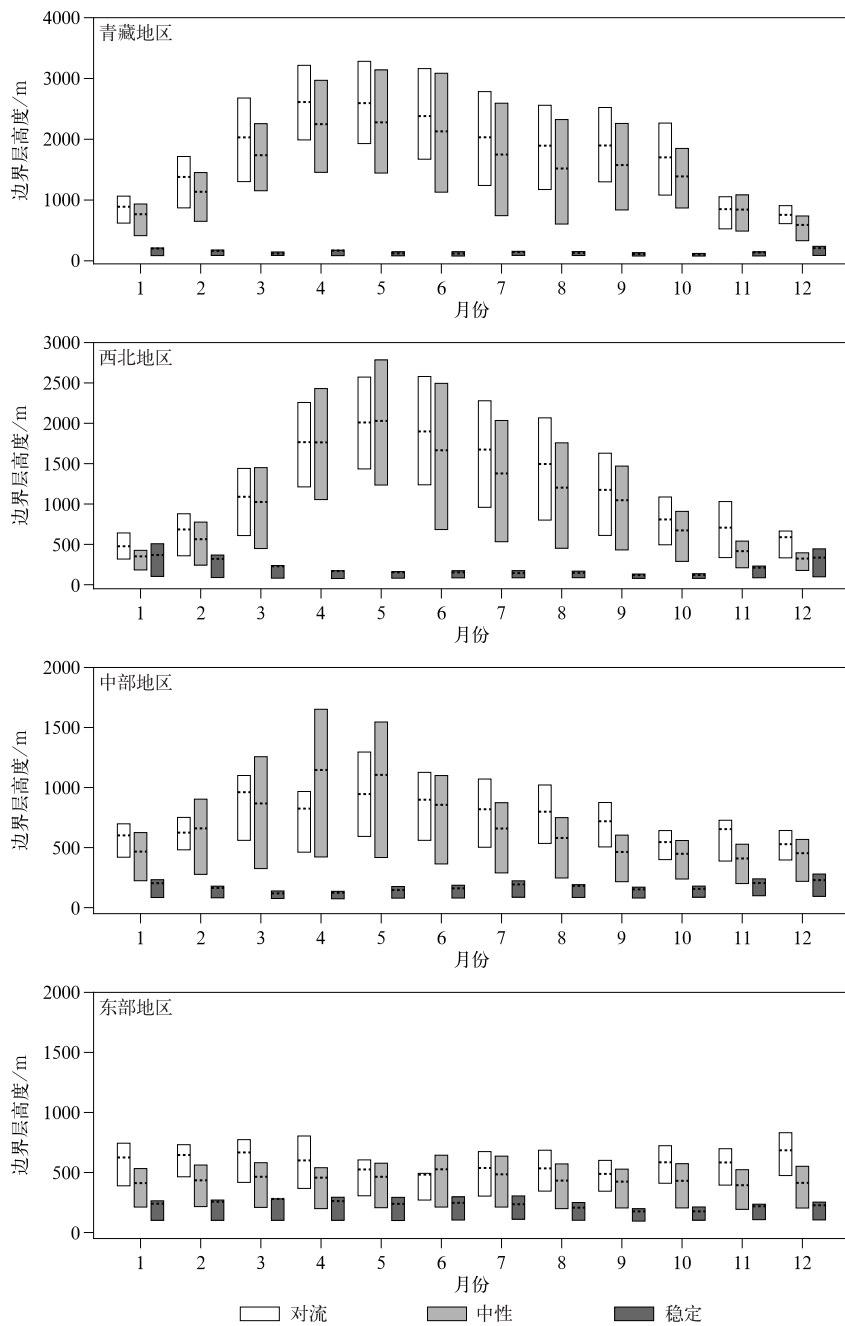


图 8 2010—2018 年 20:00 青藏地区、西北地区、中部地区和东部地区各种边界层状态(对流、中性和稳定)的平均边界层高度逐月变化(虚线表示平均值)

Fig. 8 The annual variation of average boundary layer height in different boundary layer states(convective,neutral and stable) in Qinghai-Tibet region,northwest region,central region and eastern region at 2000 BT from 2010 to 2018(the dashed line denotes the average)

图 9 为 4 个分区不同边界层状态的边界层高度分布情况。与上述结论一致,4 个分区在稳定边界

层状态时的边界层高度均无明显差异,平均值在 200 m 左右,而对流和中性边界层状态时的边界层

高度差异较为明显,对于同一分区对流边界层状态比中性边界层状态时的平均边界层高度高,且上下四分位差异相对更大,从青藏地区、西北地区、中部

地区到东部地区,对流和中性边界层状态的边界层高度平均值和上下四分位差异均逐渐减小。

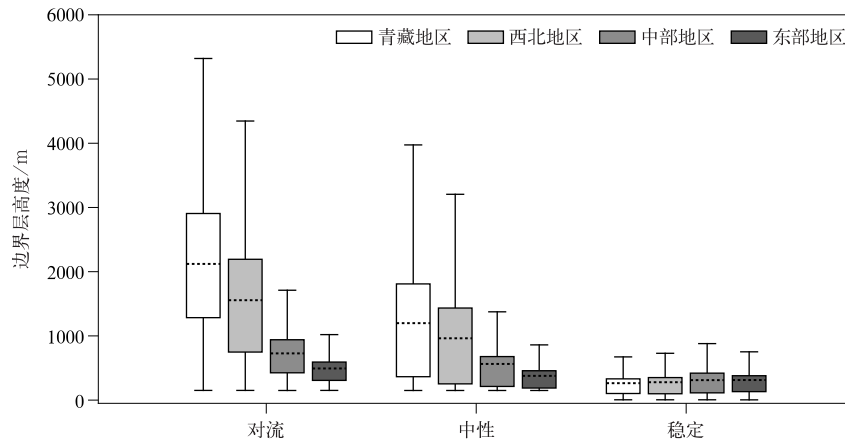


图9 不同分区对流、中性和稳定边界层状态的边界层高度分布  
(虚线表示平均值)

Fig. 9 The distribution of boundary layer height in three boundary layer states in different regions (the dashed line denotes the average)

### 3 结论与讨论

本文利用2010—2018年我国119个站点L波段探空资料,通过Kmeans聚类将我国分成青藏地区、西北地区、中部地区和东部地区,并对4个分区代表站点的边界层高度和边界层状态发生频率的时空变化特征进行统计分析,得出如下主要结论:

1) 4个分区08:00年平均边界层高度为300~400 m,青藏地区和西北地区常年以稳定边界层为主,中部地区和东部地区以中性和稳定边界层为主;20:00青藏地区年平均边界层高度为1200~1500 m,西北地区为800~1000 m,中部地区和东部地区约为500 m和400 m,而边界层不同状态发生频率的差异主要体现在对流边界层,青藏地区和西北地区对应约为30%和20%,中部地区和东部地区则均小于10%。

2) 4个分区的月平均边界层高度1—12月在08:00变化不明显且分区间差异不大,而20:00月平均边界层高度变化在4个分区均呈单峰结构,最大值出现在春夏季,其中变化幅度从青藏地区、西北地区、中部地区到东部地区逐渐减小;而边界层状态发生频率在08:00和20:00都有明显的逐月变化特

征,整体上均为稳定边界层发生频率先减小后增大,中性和对流边界层的发生频率则是先增大后减小,转折点出现在5—7月。

3) 对加密观测站点日变化特征分析表明:边界层高度02:00和08:00变化不明显,站点间差异很小,14:00边界层高度达到最大值,20:00开始减小,其中14:00和20:00站点间均存在较大差异。同时,通过ERA5再分析资料分析表明:边界层高度日变化在春夏季较为明显,而秋冬季变化幅度则较小,这种季节差异从青藏地区、西北地区、中部地区到东部地区逐渐减弱,东部地区在不同季节无明显差异。

4) 4个分区在08:00不同种边界层状态的边界层高度无明显差异,而20:00的边界层高度与边界层状态相关,其中稳定边界层的平均边界层高度较低且不随季节变化,对流和中性边界层的平均边界层高度随时间先增大后减小,最大值出现在4—6月,这种不同边界层状态的边界层高度差异从青藏地区、西北地区、中部地区到东部地区逐渐减小。

本文探究并得出全国站点边界层高度和边界层状态发生频率变化特征的初步结论,但对于其影响因素及其发展的动力机制仍有待进一步探讨。此外,由于探空资料只有08:00和20:00两个时次,受

时间分辨率限制,在讨论边界层高度时空变化特征时未能考虑一日中影响边界层高度并未达到最大值的因素,同时也未对不同站点的地方时差异及更为局地的特征差异(如沿海站点与内陆地区,中低纬度与高纬度地区或青藏高原的东西部等)进行区分讨论。以上问题均需在未来的研究中进行更细致的探讨。

### 参考文献

- [1] Stull R B. 边界层气象学导论. 北京:气象出版社,1991:1-21.
- [2] 赵鸣,苗曼倩. 边界层气象学教程. 北京:气象出版社,1991:17-33.
- [3] 刘绕,李煜斌,高志球. 稻麦轮作农田区大气边界层高度的日变化和季节特征. 气象科技,2017,45(3):526-534.
- [4] 肖贤俊,刘还珠,宋振鑫,等. 2002年3月19日沙尘暴爆发条件分析. 应用气象学报,2004,15(1):1-9.
- [5] 张强,王胜. 论特强沙尘暴(黑风)的物理特征及其气候效应. 中国沙漠,2005,25(5):675-681.
- [6] 何立富,李峰,李泽椿. 华北平原一次持续性大雾过程的动力和热力特征. 应用气象学报,2006,17(2):160-168.
- [7] 吴庆梅,刘卓,王国荣,等. 一次华北暴雨过程中边界层东风活动及作用. 应用气象学报,2015,26(2):160-172.
- [8] 林宝亭,陆秋霖,林确略,等. 一次玉林地区漏报的强双雨带影响的过程分析. 气象,2020,46(3):313-324.
- [9] 贾梦唯,赵天良,张祥志,等. 南京主要大气污染物季节变化及相关气象分析. 中国环境科学,2016,36(9):2567-2577.
- [10] 张雅斌,林琳,吴其重,等. “13·12”西安重污染气象条件及影响因素. 应用气象学报,2016,27(1):35-46.
- [11] 贾小芳,颜鹏,孟昭阳,等. 2016年11—12月北京及周边重污染过程特征. 应用气象学报,2019,30(3):302-315.
- [12] 胡非,洪钟祥,雷孝恩. 大气边界层和大气环境研究进展. 大气科学,2003,27(4):712-728.
- [13] Deardorff J W. Parameterization of the planetary boundary layer for use in general circulation models. *Mon Wea Rev*, 1972, 100(2):215-226.
- [14] Arakawa A, Schubert W H. Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I. *J Atmos Sci*, 1974, 31(3):674-701.
- [15] Suarez M J, Arakawa A, Randall D A. The parameterization of the planetary boundary layer in the UCLA general circulation model: Formulation and results. *Mon Wea Rev*, 1983, 111(11):2224-2243.
- [16] Holtslag A A M, Nieuwstadt F T M. Scaling the atmospheric boundary layer. *Bound-Layer Meteorol*, 1986, 36(1/2):201-209.
- [17] 程水源,张宝宁,白天雄,等. 北京地区大气混合层高度的研究及气象特征. 环境科学丛刊,1992(4):46-52.
- [18] Seibert P, Beyrich F, Gryning S E, et al. Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height. *Atmos Environ*, 2000, 34(7):1001-1027.
- [19] Lin J T, Youn D, Liang X Z, et al. Global model simulation of summertime U. S. ozone diurnal cycle and its sensitivity to PBL mixing, spatial resolution, and emissions. *Atmos Environ*, 2008, 42(36):8470-8483.
- [20] Konor C S, Boezio G C, Mechoso C R, et al. Parameterization of PBL processes in an atmospheric general circulation model: Description and preliminary Assessment. *Mon Wea Rev*, 2009, 137(3):1061-1082.
- [21] 杨富燕. 大气边界层高度的地基遥感探测和数值模拟. 南京:南京大学,2015.
- [22] Garratt J R, Dessler A J, Houghton J T, et al. *The Atmospheric Boundary Layer*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [23] 乔娟. 西北干旱区大气边界层时空变化特征及形成机理研究. 北京:中国气象科学研究院,2009.
- [24] 张强,王胜. 西北干旱区夏季大气边界层结构及其陆面过程特征. 气象学报,2008,66(4):599-608.
- [25] 杨飞跃. 半干旱区边界层高度的确定方法比较及特征研究. 兰州:兰州大学,2018.
- [26] 徐桂荣,崔春光,周志敏,等. 利用探空资料估算青藏高原及下游地区大气边界层高度. 暴雨灾害,2014,33(3):217-227.
- [27] 涂静,张苏平,程相坤,等. 黄东海大气边界层高度时空变化特征. 中国海洋大学学报(自然科学版),2012,42(4):7-18.
- [28] Liu S, Liang X Z. Observed diurnal cycle climatology of planetary boundary layer height. *J Climate*, 2010, 23(21):5790-5809.
- [29] 姚雯,马颖,徐文静. L波段电子探空仪相对湿度误差研究及其应用. 应用气象学报,2008,19(3):356-361.
- [30] 马颖,姚雯,黄炳勋. 59型与L波段探空仪温度和位势高度记录对比. 应用气象学报,2010,21(2):214-220.
- [31] 奉超. L波段雷达标定及误差分析. 气象研究与应用,2008,28(3):4-5.
- [32] 姚雯,马颖,高丽娜. L波段与59-701探空系统相对湿度对比分析. 应用气象学报,2017,28(2):218-226.
- [33] 李芳芳,陈起英,吴泓锬. 基于秒级探空资料的中国地区浮力频率分布. 应用气象学报,2019,30(5):629-640.
- [34] Anil K J. Data clustering: 50 years beyond K-means. *Pattern Recognition Letters*, 2010, 31(8):651-666.
- [35] 吴凤慧,成颖,郑彦宁,等. K-means算法研究综述. 数据分析与知识发现,2011,27(5):28-35.

## Spatio-temporal Characteristics of Boundary Layer Height Derived from Soundings

Liang Zhihao<sup>1)</sup> Wang Donghai<sup>1)2)3)</sup> Liang Zhaoming<sup>3)4)</sup>

<sup>1)</sup> (School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082)

<sup>2)</sup> (Guangdong Province Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster Studies, Zhuhai 519082)

<sup>3)</sup> (Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082)

<sup>4)</sup> (State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

### Abstract

Using K-means cluster method, the whole country is divided into four regions (Qinghai-Tibet region, northwest region, central region and eastern region) by boundary layer height (BLH) derived from potential temperature gradient method based on L-band radar sounding secondly data of 119 stations from January 2010 to December 2018. Characteristics of BLH and frequency of different boundary layer state are investigated, including convective boundary layer (CBL), neutral boundary layer (NBL) and stable boundary layer (SBL), through their interannual, annual and diurnal variations respectively. Results show that there is no significant difference in the annual average BLH and the frequencies of different boundary layer states in four regions at 0800 BT and 2000 BT from 2010 to 2018. At 0800 BT, the annual average BLH is around 200—600 m and mainly in SBL. At 2000 BT, the annual average BLH in Qinghai-Tibet region is the highest (about 1500 m), followed by northwest region and central region (about 1000 m and 500 m), and that of eastern region is the lowest (about 400 m). Qinghai-Tibet region and northwest region are mainly with CBL and NBL, while central region and eastern region are mainly with NBL. Besides, the annual variation of BLH in four regions is similar at 0800 BT, but it's significantly different at 2000 BT. At 0800 BT, the difference of one-year monthly average BLH in four regions are not obvious, and there is no clear difference among these regions. But at 2000 BT, the monthly average BLH in each region reaches maximum in spring and summer, and minimum in autumn and winter. As for corresponding annual variation of different boundary layer state frequencies, SBL's frequency first increases then decreases while the frequencies of CBL and NBL first decrease then increase overall at 0800 BT and 2000 BT. And their turning point is in May to July. In general, the variation range of monthly average BLH and boundary layer state frequencies gradually descend from Qinghai-Tibet region, northwest region, central region to eastern region. The diurnal variations of BLH are different in four regions. In particular, the diurnal variations of Qinghai-Tibet region, northwestern region and central region show distinct seasonal difference. In Qinghai-Tibet region, the amplitude of diurnal variation can reach 2000—2300 m in spring and summer, but relatively weaker in autumn and winter. The diurnal variation in eastern region is similar in all seasons, and amplitudes are around 600 m.

**Key words:** L-band sounding; boundary layer height; boundary layer state; spatio-temporal variation