

韦志刚, 陈文, 黄荣辉. 2010. 敦煌夏末大气垂直结构和边界层高度特征 [J]. 大气科学, 34 (5): 905–913. Wei Zhigang, Chen Wen, Huang Ronghui. 2010. Vertical atmospheric structure and boundary layer height in the summer clear days over Dunhuang [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (5): 905–913.

敦煌夏末大气垂直结构和边界层高度特征

韦志刚¹ 陈文² 黄荣辉²

1 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所西部气候环境与灾害实验室, 兰州 730000

2 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100080

摘 要 本文利用西北干旱区陆-气相互作用野外观测试验 (NWC-ALIEX) 2008 年 8 月 11~18 日的探空试验资料, 分析了中国西北干旱区敦煌地区的大气垂直结构和边界层高度特征。结果表明, 对流层顶大约在距地 15000 m 高度左右, 为第二 (副热带) 对流层顶; 水汽主要集中在距地 6500 m 以下对流层, 0℃层在距地 3000~4000 m 高度波动, 逆湿层高度在 0℃层左右摆动; 在距地 5000 m 以上的对流层基本被西北风或偏西风统治, 在距地 9000~13000 m 左右的对流层高层, 存在一个风速为 25~50 m/s 的西北风或偏西风极大值; 敦煌夏末存在特厚边界层, 对流边界层高度可达 4200 m, 稳定边界层高度可达 1300 m。

关键词 大气垂直结构 边界层高度 敦煌 中国西北干旱区

文章编号 1006-9895 (2010) 05-0905-09

中图分类号 P404

文献标识码 A

Vertical Atmospheric Structure and Boundary Layer Height in the Summer Clear Days over Dunhuang

WEI Zhigang¹, CHEN Wen², and HUANG Ronghui²

1 Laboratory for Climate Environment and Disasters of Western China, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000

2 Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

Abstract By using the sounding data from 11 to 18 August 2008 collected in the air-land interaction experiment in Northwest China (NWC-ALIEX), the authors have analyzed the vertical atmospheric structure and boundary layer height in the summer clear days over Dunhuang, China. The results show that the height of the tropopause is at about 15000 m above the ground. It should be the second (subtropical) tropopause. The zero-temperature level varies between 3000 m and 4000 m above the ground. The vapor exists mainly in the lower troposphere below 6500 m above the ground. There is an inverse humidity layer around the zero-temperature level. The westerly and the north-west wind predominate the higher troposphere above 5000 m above the ground. The maximum wind speed of 25–50 m/s occurred between 9000 m and 13000 m above the ground. The thicker atmospheric boundary layers exist in late summer in Dunhuang. The height of the convection boundary layer can reach about 4200 m and the height of the stable boundary layer can be 1300 m.

Key words atmospheric structure, boundary layer height, Dunhuang, the arid regions in Northwest China

收稿日期 2009-10-04, 2009-12-19 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2009CB421402, 国家自然科学基金资助项目 40730952、40875045, 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-YW-220

作者简介 韦志刚, 男, 1966 年出生, 研究员, 研究方向: 陆气相互作用与气候变化。E-mail: wzg@lzb.ac.cn

1 引言

在全球变暖的大背景下,对流层顶的高度及其内部的结构也发生着相应的变化。Sausen and Santer (2003) 研究指出,从 1979 年以来全球平均的对流层顶高度呈上升趋势,认为造成这一趋势的主要原因是人类活动引起的地表气温等的变化。对探空资料、NCEP 再分析资料以及情景模拟等资料的分析均发现全球不同地区对流层高度的确存在增长的趋势 (Highwood et al., 2000; Rannandel et al., 2000; Santer et al., 2003; 吕达仁等, 2008)。Añel et al. (2006) 利用无线电探空资料对欧亚地区的对流层高度进行了系统的分析研究,认为大多数站点的对流层高度存在增长趋势,但增长趋势对资料的质量和数据分析方法是非常敏感的,所以我们应该慎重选择分析资料。

对流层顶是一个深厚的对流阻滞层,它阻碍着气溶胶和水汽的垂直交换,阻碍着积雨云顶的垂直发展,决定着云的上限、降水以及云有关的天气现象的位置。该处大气温、压、湿结构以及环流的变化直接影响着近地层的天气和气候。高空急流、臭氧层等物理、化学现象均与对流层顶的位置、强度及其变动规律密切相关。从广义的角度来说,对流层顶在习惯上被定义为对流层和平流层之间的边界或者对流层到平流层的过渡层。这个过渡层的标志是温度递减率从湍流混合的对流层(温度随高度递减)到稳定层结的平流层(温度随高度不变或递增)的突变,其厚度约几百米至 2000 m。1957 年, WMO 给对流层顶作了如下定义: 500 hPa 等压面之上温度递减率小到 $2^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 或以下的最低高度,而且在此高度与其上 2 km 气层内的温度平均递减率不超过 $2^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。这一定义因为可操作性强被普遍使用,它实际比由气温极小值确定的高度低。此外,对流层顶还有基于位涡的“动力学”定义: 动力学对流层顶理解为位涡的零阶不连续,它将对流层内位涡的低值与平流层内的高值分开 (朱保林, 2005)。

对流层顶根据其地域性质的属性可分为第一(极地类)和第二(热带或副热带类)对流层顶。第一对流层顶定义为: 在 500~150 hPa (不含 150 hPa) 气压层之间, 温度垂直递减率 $\leq 2^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 的最低高度。假如此高度以上 2 km (可跨越 150

hPa) 及以内的任何高度与此高度间的平均温度垂直递减率也都 $\leq 2^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 则此最低高度应选为第一对流层顶。第一对流层顶只能有一个, 如有几个气层都符合第一对流层顶条件, 则选取高度最低的一个。第二对流层顶定义为: 在 150~40 hPa 气压层之间, (1) 不存在第一对流层顶, 温度垂直递减率 $\leq 2^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 的最低高度。假如此高度以上 2 km 及以内的任何高度与此高度间的平均温度垂直递减率也都 $\leq 2^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 则此最低高度应选为第二对流层顶。(2) 存在第一对流层顶在第一对流层顶以上存在一个厚度至少达 1 km、平均温度垂直递减率 $\geq 3^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 的第二对流层, 在第二对流层以上又出现温度垂直递减率 $\leq 2^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 的最低高度, 假如此高度以上 2 km 及以内的任何高度与此高度间的平均温度垂直递减率也都 $\leq 2^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 则此最低高度也应选为第二对流层顶。热带对流层顶比极地对流层顶高。有关分析研究表明极地对流层顶高度大致在地表以上 9000~12000 m, 热带或副热带对流层顶高度大致在地表以上 15000~17000 m, 新疆极地对流层高度从 1969 到 1999 年明显增高, 东北对流层顶的变化较复杂 (邹进上等, 1989; 张广兴等, 2005; 蔡福等, 2006)。

我国极地对流层顶以 2 月份最南 (南边界在 $25^{\circ}\text{N}\sim 26^{\circ}\text{N}$ 附近), 8 月份最北, 南边界在 8 月份北退到 $38^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 附近, 同时, 热带(副热带)对流层顶在 1 月份最南, 8 月份最北 (邹进上等, 1989)。换句话说, 在 8 月份, 我国 38°N 附近的中纬度地区为第二(副热带)对流层顶, 因而对流层顶高度较高。根据我们对陇东黄土高原平凉气象站 (纬度为 $35^{\circ}33'\text{N}$) 探空资料的分析 (Wei et al., 2009), 8 月末到 9 月初平流层底大约在距地 14000 m 和 18000 m 之间, 远比其他月份高。敦煌站纬度为 $40^{\circ}10'\text{N}$, 是不是在 8 月份也存在较高的对流层顶? 关于大气垂直结构的研究主要集中在边界层内, 对于边界层顶到对流层顶之间的研究很少, Wei et al. (2009) 对黄土高原夏末大气的垂直结构进行了初步的分析研究, 发现对更大范围垂直结构的了解有助于对边界层特征的系统认识。韦志刚等 (2005) 对 2004 年河西走廊金塔地区边界层的分析表明, 边界层的温湿特征与高空风向和风速有紧密联系。作为边界层特征的大背景, 对流层高度及边界层顶到对流层顶之间的大气垂直结构是我们进行

探空试验的目的之一, 本文将研究这个问题。

大气边界层 (ABL) 通常是指大气的最低部分受地面直接影响并与地面有直接作用的气层, 是地球表面与自由大气间进行物质、能量、热量和水气交换必经的气层。大气边界层是与人类关系最为密切的一层, 是人类活动和各项生态环境构成的主要层次, 近年来, 我国开展的一系列大型气象科学研究, 几乎都将大气边界层探测作为重点内容之一, 加上专门的大气边界层探测实验, 对大气边界层领域水平的提高带来了很好的机遇 (张宏升等, 2002; Liu et al., 2002)。目前, 一些比较先进的仪器设备 (如激光雷达、声雷达、风廓线仪等) 能够为边界层的分析提供精确的资料 (任阵海等, 2008; 李积明等, 2009), 但观测成本较大, 受仪器、运输条件等的限制, 未能普遍使用。Seibert et al. (2000) 总结和评述了这些观测方法。边界层高度作为大气模式和污染物扩散模式一个重要的参数, 一直倍受相关领域科学家的重视, 吴祖常和董保群 (1998) 利用 125 个天气站的无线探空资料分析认为我国西北的大气边界层高度比东部高。张强等 (2004)、张强和王胜 (2008) 利用西北干旱区陆一气相互作用野外观测试验 (NWC-ALIEX) 2000 年 5~6 月间在敦煌气象站使用国产“五九”型探空仪观测的小球探空资料, 分析研究了初夏季节敦煌地区边界层高度特征, 首先发现了高度达 4000 m 的特厚对流边界层, 韦志刚等 (2005) 也分析到邻近敦煌的酒泉市金塔地区存在 3500 m 的特厚对流边界层, 乔娟 (2009) 进一步用比较充实的探空资料分析表明夏季 6~7 月确实存在这样的特厚边界层。那么夏末的情形如何呢? 我们在本文进行了详细的分析研究。

2 资料和分析方法

西北干旱区陆一气相互作用野外观测试验 (NWC-ALIEX) 在国家重点基础研究发展计划项目和国家自然科学基金等项目的支持下, 从 2000 年 5 月开始一直进行气象塔站的观测, 在 2008 年 8 月在甘肃敦煌戈壁进行了第 3 次加强观测试验。此次加强试验由戈壁地表通量观测、塔站风、温、湿观测和小球探空组成, 本文对小球探空资料进行了初步分析研究。小球探空采用新型的 L 波段 (1 型) 高空气象探测雷达系统, 观测地点为

甘肃敦煌国家气候气象台, 观测时间为 2008 年 8 月 11~18 日, 挑选晴天共进行了 56 次探空观测, 每天 03、07、10、12、14、16、19、23 时 (北京时, 下同) 各 1 次 (敦煌地方时比北京时约晚 1 小时 42 分), 14 日中午天气开始变化, 气压下降, 天空变得多云转阴, 但无雨, 至 15 日下午放晴, 此期间阴或多云, 未进行观测。

探空观测由甘肃省敦煌气象站探空观测组负责实施, 观测过程完全按照中国气象局统一观测规范, 观测资料的质量控制也按照统一要求订正和剔除了不合理资料。温、湿、压测量周期为 1.2 ± 0.1 s, 垂直分辨率为 7~20 m。气温、相对湿度、气压的仪器测量精度分别 0.3°C 、5%、2 hPa, 仰角、方位、斜距为每秒观测 1 个数据, 仰角和方位的观测误差在观测角大于 6° 时 $\leq 0.08^{\circ}\text{C}$, 斜距的观测误差 ≤ 20 m (马舒庆等, 2005; 邹玉玲等, 2006)。

探空电码经过 L 波段 (1 型) 高空气象探测系统软件 V2.03 版订正、分析计算得到气温、气压、相对湿度, 然后, 我们根据普通气象公式计算得到位温和比湿。用多元大气压高公式将气压换算成距地高度。我们根据每分钟输出的仰角、方位、斜距的订正数据计算风向和风速, 垂直分辨率可达 40~500 m。

最后, 根据计算结果绘出风、位温、比湿的廓线, 研究它们随高度的变化特征, 分析探讨大气垂直结构和边界层特征。

3 敦煌夏末大气垂直结构的一般特征

我们对各日各时刻的温、湿廓线都进行了分析研究, 发现廓线随高度的变化有一些共同的基本特征, 这里只给出代表性的图表来介绍。图 1 为 2008 年 8 月 11 日北京时间各时和 8 月各日北京时间 14 时气温随高度变化廓线, 从图中可以看出, 对流层顶在距地 14000~16000 m 高度, 该对流层顶显然属于第 2 对流层顶, 敦煌站纬度为 $40^{\circ}10'N$, 说明极地对流层顶已北退, 副热带对流层顶在 8 月份可到达敦煌地区。黄土高原平凉气象站纬度为 $35^{\circ}33'N$, 8 月末对流层顶高度也为 15000 m 高度左右, 也为第二 (副热带) 对流层顶 (韦志刚等, 2009)。

换句话说, 在 8 月份, 由于我国极地对流层顶南边界退到最北位置 (邹进上等, 1989), 在 $35^{\circ}N \sim 41^{\circ}N$ 附近的中纬度地区, 我们能够观测到较高的副

热带对流层顶。在图 1 中,我们还给出了 0℃ 层高度,0℃ 层在距地 3000~4000 m 高度波动。从图 1 还可以看出,在距地 6500 m 高度左右存在逆温层,部分时日不太明显。

图 2 为 2008 年 8 月 11 日各时和 8 月各日 14 时比湿随高度变化廓线,从图中可以看出,比湿在 6500 m 以上就基本变得很小,水汽主要集中在距地 6500 m 以下对流层。图 1 所示 6500 m 的逆温与

水汽的明显减少有关。从图 2 还可发现,在对流层中有明显的逆湿层存在,结合图 1 发现该逆湿层在 0℃ 层附近摆动。

我们知道北半球无论冬、夏在中高纬度都是西风带,冬季的风要比夏季大。夏末西风急流的中心位置究竟多高? 我们考察了 56 个观测时次风速和风向随高度的变化,发现在距地 9000~13000 m 左右的对流层高层,都存在一个风速为 25~50 m/s

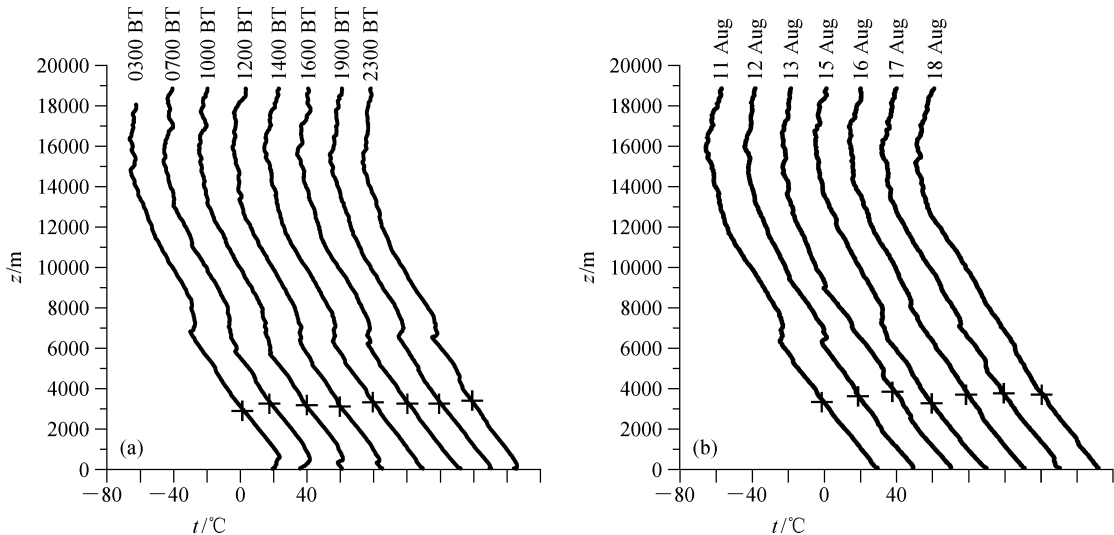


图 1 2008 年 8 月气温 (t) 随高度 (z) 变化廓线 (+: 各时刻 0℃ 层高度): (a) 11 日北京时间各时; (b) 各日北京时间 14 时。横坐标轴标注的数值为第 1 条廓线的, 该组数值向右移一格刻度标注为第 2 条廓线的 (依次类推)
Fig. 1 Vertical profiles of the air temperature (t): (a) On 11 Aug 2008; (b) at 1400 Beijing Time (BT) in Aug 2008. Symbol ‘+’ shows the location of the zero temperature level. The tick labels below the x axis are only for the first profile, these labels move a tick mark to the right at the x axis for the second profile, and the rest may be deduced by analogy in sequence

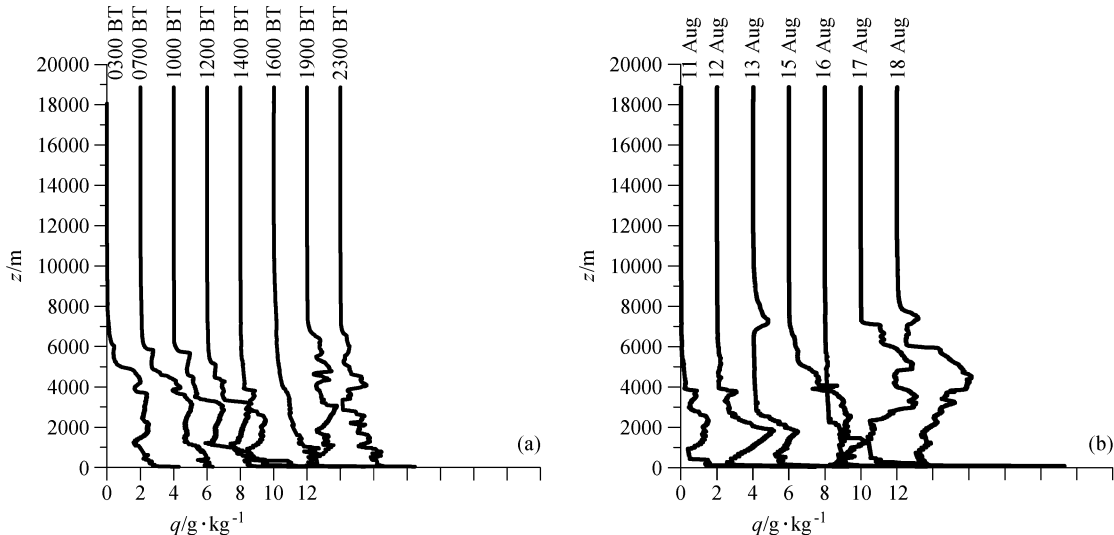


图 2 同图 1, 但为比湿 (q) 随高度 (z) 变化廓线
Fig. 2 The same as Fig. 1, but for vertical profiles of the specific humidity (q)

的西北风或偏西风极大值,即所谓最大风层,风速随天气过程发生变化,图 3 为 2008 年 8 月各日 03 时和 14 时风速随高度变化廓线,03 时是当地最低温度出现、低层大气最稳定的时刻,14 时则为最高温度出现、对流最旺盛、大气最不稳定的时刻。这两个时刻很有代表性,从图 3 中可以明显看出这一特征。图 4 对应于图 3,给出了 8 月各日 03 时和 14 时距地 15000 m 以下高度风向随高度变化图,可以看出,无论白天或是夜晚,距地 5000 m 以上的对流层中上层基本被西北风或偏西风统治,5000 m 以下对流层低层风向或随高度增加从偏东风向偏西风转换,或全为偏西风统治。

图 5 给出 2008 年 8 月 11 日和 16 日 03 时、14 时风速和风向随高度变化廓线,风速、风向随高度的变化特征一目了然,距地 12000 m 左右的对流层西风急流非常明显,对流层低层接近地面为偏东风,随高度增加向偏西风转换,对流层顶西风明显减弱。

综上所述,敦煌地区 2008 年夏末对流层顶高度大约在距地 15000 m 高度左右,为第二(副热带)对流层顶。极地对流层顶在 8 月中旬已北退过敦煌地区。水汽主要集中在距地 6500 m 以下对流层,0℃层在距地 3000~4000 m 高度波动,逆湿层高度在 0℃层左右摆动。大多数情形在距地 6500 m

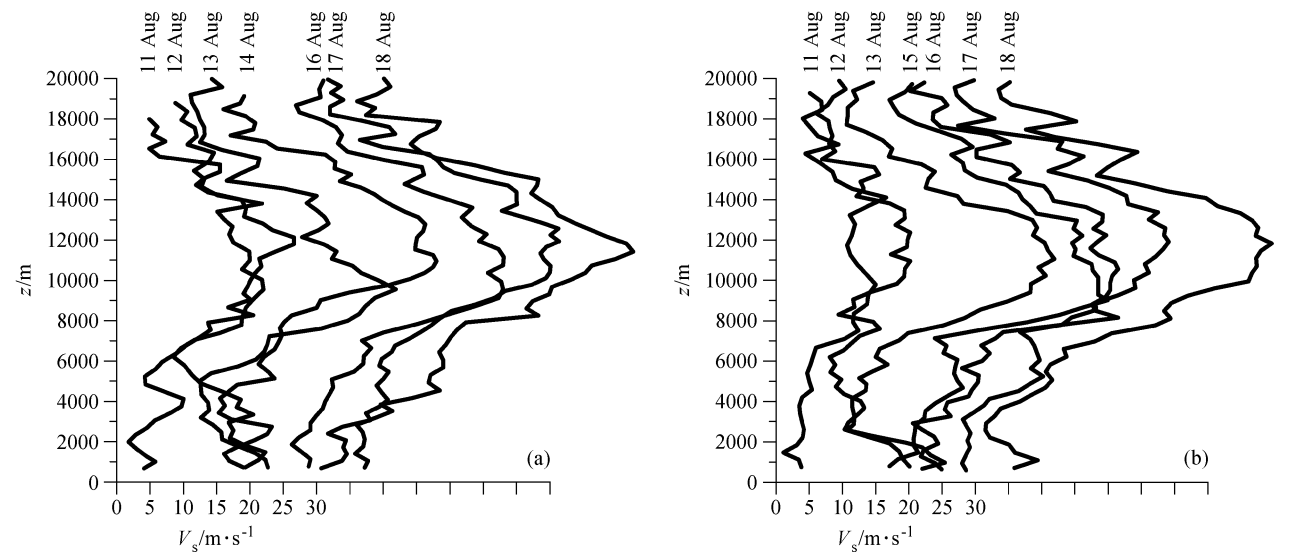


图 3 2008 年 8 月各日风速 (V_s) 随高度 (z) 变化廓线: (a) 北京时间 03 时; (b) 北京时间 14 时。其余同图 1
Fig. 3 Vertical profiles of the wind speed (V_s): (a) At 0300 BT in Aug 2008; (b) at 1400 BT in Aug 2008. The others are the same as Fig. 1

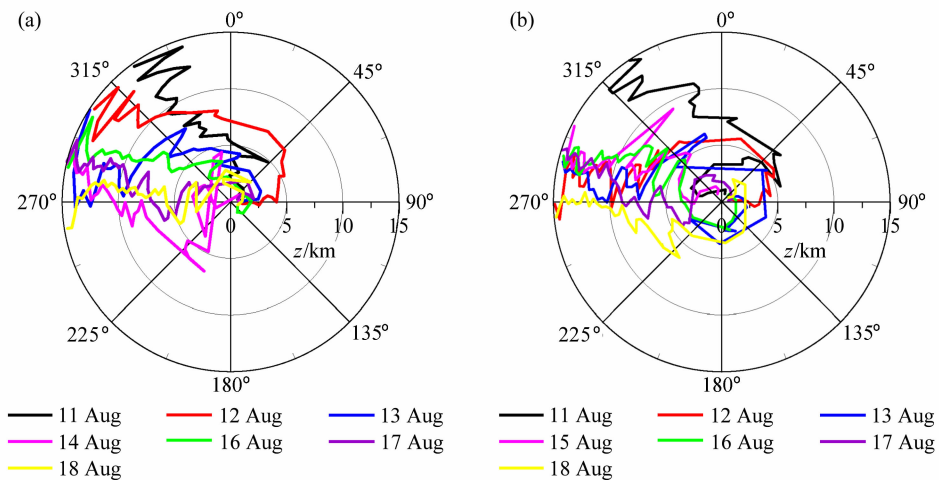


图 4 同图 3, 但为风向 (V_d) 随高度变化
Fig. 4 The same as Fig. 3, but for variation of the wind direction (V_d) with the height above the ground

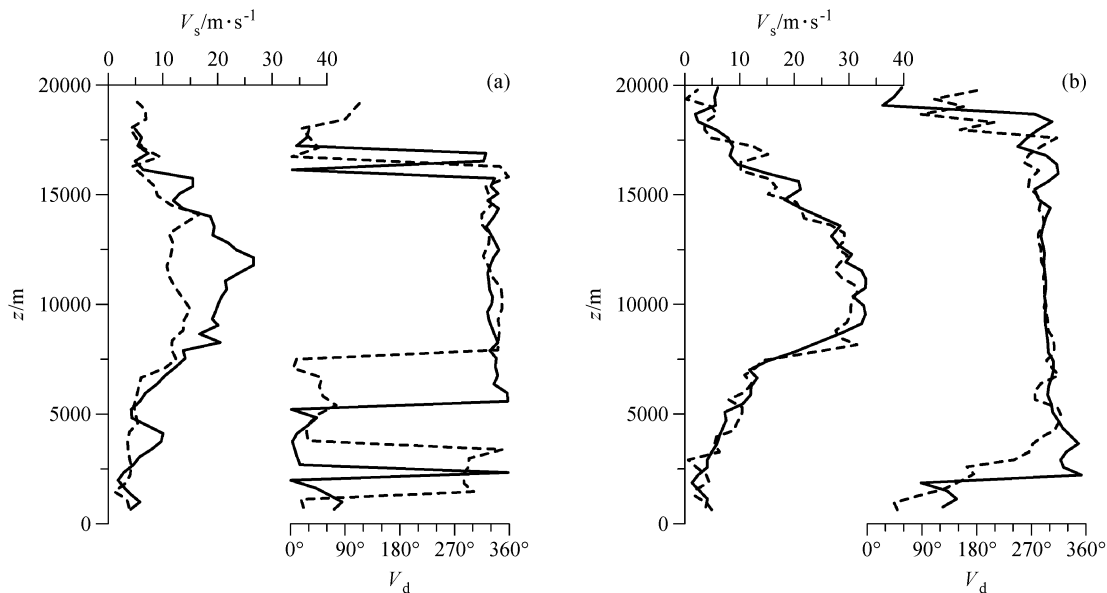


图5 2008年8月(a)11日和(b)16日北京时间03时(实线)和14时(虚线)风速(V_s)和风向(V_d)随高度(z)变化廓线

Fig. 5 Vertical profiles of the wind speed (V_s) and wind direction (V_d) at 0300 BT (solid lines) and 1400 BT (dashed lines) on (a) 11 and (b) 16 Aug 2008

左右高度存在逆温层,可能与水汽明显减少相关。在距地 5000 m 以上的对流层基本被西北风或偏西风统治,在距地 9000~13000 m 左右的对流层高层,存在一个风速为 25~50 m/s 的西北风或偏西风极大值,即所谓最大风层,是夏末西风急流的中心位置,风速随天气过程发生变化。

4 敦煌夏末边界层高度场特征

首先,我们分析了各日各时次的位温和比湿廓线,图6为两个典型晴天2008年8月11日和17日的廓线分布,我们综合位温和比湿的变化特征,在图中标出了对流边界层(CBL)、稳定边界层(SBL)、顶盖逆温层(CIL)、自由大气(FA)和残留混合层(RML)的位置,顶盖逆温层由位温的明显升高和比湿的明显减小两个特征来确定,有对流边界层的顶盖逆温和残留混合层的顶盖逆温;稳定边界层从地面开始发展,也由位温的明显升高和比湿的明显减小两个特征来确定;对流边界层也从地面开始,以消除夜晚形成的稳定结构为标记;残留混合层在稳定层之上;自由大气在顶盖逆温层之上。在根据位温和比湿确定出各时次边界层分布特征的基础上,我们绘制了从2008年8月11日到18日各时次对流边界层高度(hcbl)、残留混合层高度(hrml)和稳定边界层高度(hsbl)的变化图(见图

7),图7非常清楚地给出了三个边界层高度的演变特征。

从图6和图7可以看出,对流边界层一般从10时(当地时间08:18)左右已有所发展,到16时(当地时间14:18)发展最高,在观测期间最高达到距地4200 m高度。稳定边界层在19时(当地时间17:18)除个别时次外已开始发展,但很弱,到23时(当地时间21:18)已发展到一定高度,到07时(当地时间05:18)发展最高,在观测期间最高达到距地1300 m高度。稳定层之上的残留混合层不易消退,一般在12时(当地时间10:18)左右还存在,个别时日能持续到次日中午,残留层的高度在条件适宜的时日能够继续发展和扩张。稳定边界层一般在12~14时(当地时间10:18~12:18)消退。对流边界层从12~14时发展很快,新发展的对流与残留层对流相混合,使对流边界层迅速增厚,但最大高度一般出现在16~23时(当地时间14:18~21:18)。

根据以上的分析事实,可以肯定地说,地处西北干旱区的敦煌地区确实存在特厚边界层,夏末对流边界层可达距地4200 m高度,稳定层的高度也相应较高。这与张强等(2004)、张强和王胜(2008)利用2000年5~6月、乔娟(2009)利用2006年6~7月敦煌气象站的加强探空资料分析的

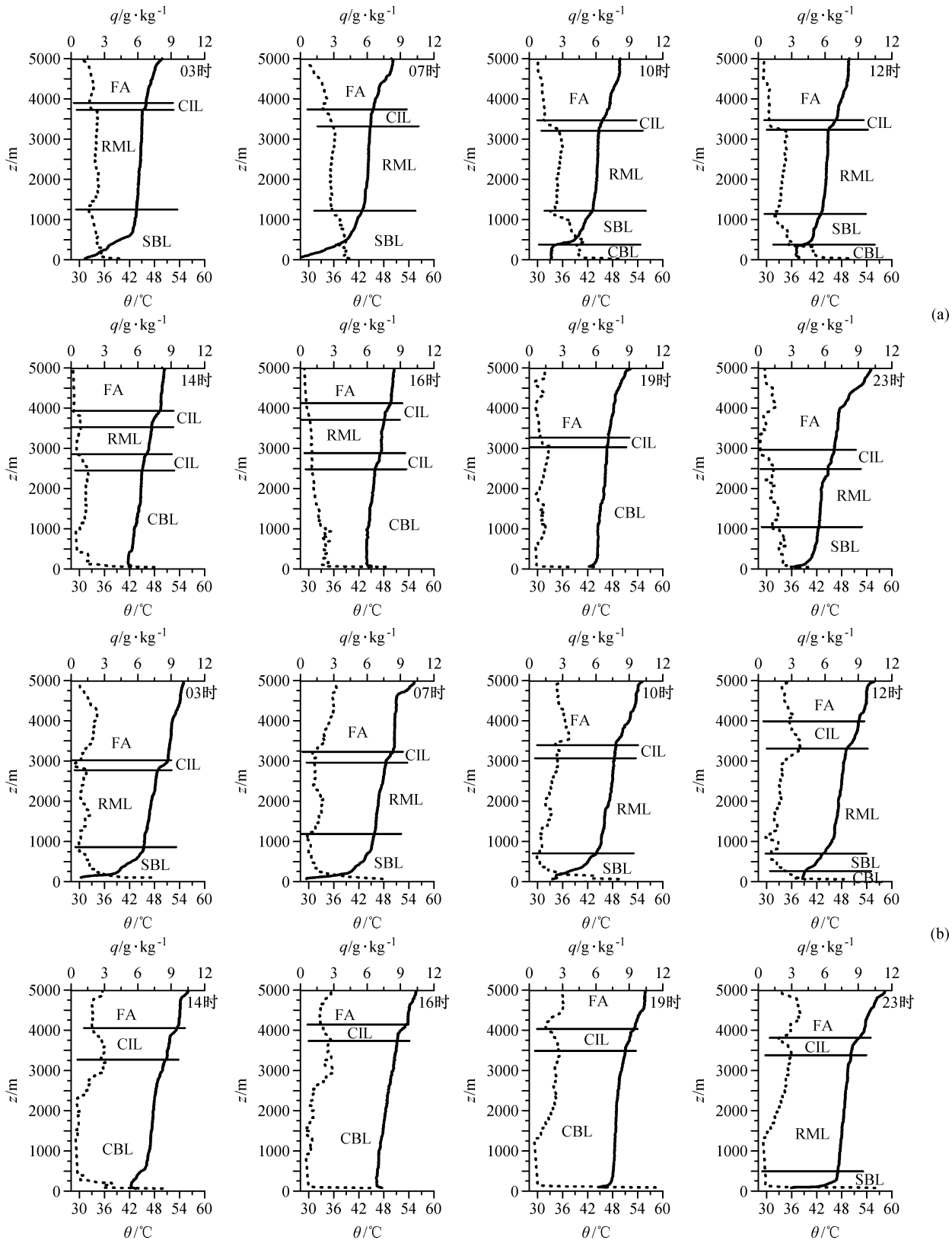


图 6 2008 年 8 月 (a) 11 日和 (b) 17 日敦煌典型晴天位温 (θ) (实线) 和比湿 (q) (虚线) 随高度 (z) 的变化廓线
Fig. 6 Vertical profiles of the potential temperature (θ) (solid lines) and the specific humidity (q) (dashed lines) in the layer below 5000-m height in Dunhuang on (a) 11 and (b) 17 Aug 2008

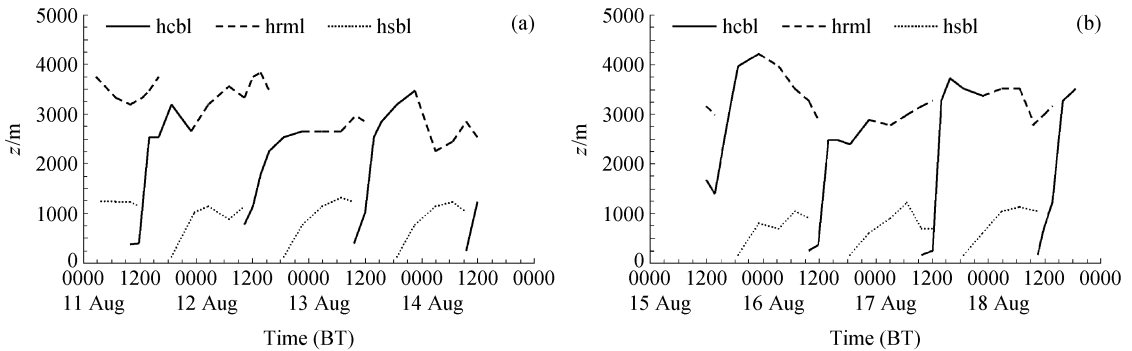


图7 2008年8月敦煌边界层高度的变化: (a) 11~14日; (b) 15~18日

Fig. 7 Variation of the boundary layer depths over Dunhuang: (a) From 11 to 14 Aug 2008; (b) from 15 to 17 Aug 2008

结果较为一致,表明夏季西北干旱区的边界层高度确实较厚。

5 结论与讨论

根据对敦煌地区2008年8月11~18日大气垂直结构和边界层高度特征的分析,我们获得了以下的一些认识:

(1) 敦煌夏末对流层顶大约在距地15000 m高度左右,为第二(副热带)对流层顶;水汽主要集中在距地6500 m以下对流层,0℃层在距地3000~4000 m高度波动,逆湿层高度在0℃层左右摆动;在距地5000 m以上的对流层基本被西北风或偏西风统治,在距地9000~13000 m左右的对流层高层,存在一个风速为25~50 m/s的西北风或偏西风极大值。

(2) 敦煌夏末存在特厚边界层,对流边界层高度可达4200 m,稳定边界层高度可达1300 m。

(3) 对中纬度地区对流层顶的研究来讲,8月份是个特殊季节,由于极地(第一)对流层顶南界的北撤,副热带对流层顶向北扩张,或许还有全球变暖背景下对流层顶上升的趋势,使得该季节出现较高的对流层顶,而对流层顶的变化对区域天气系统有着重要的影响,我们将收集相关资料对该地区对流层顶的变化特征及其对区域天气气候的影响进行系统研究,厘清我们的疑问。

(4) 张强等(2004)首先发现敦煌初夏存在特厚边界层,但由于对资料的分辨率的不信任,并没有取得共识,所以又分别于夏季、夏末在敦煌、金塔等地利用新一代雷达进行探空,对相关资料的分析证明在夏季西北干旱区确实存在特厚边界层。近

年来,我们也力求用系留探空观测该地区的边界层特征,但由于空中风太大,系留气球达不到我们要求的高度。小球位置随高度的漂移也影响资料的空间分辨率和代表性,好在我们又有了GPS探空、声雷达、风廓线仪等先进设备正投入到西北干旱区陆气相互作用观测试验之中,相信不久会有更精确的结果出来。另一个问题是世界上其它干旱区是不是也存在特厚边界层,我们对此也应进行分析研究,以探究我国西北干旱区存在特厚边界层的原因以及这种边界层与青藏高原的关系和对气候环境的影响。

致谢 卫国安、侯旭宏、李振朝、王超以及敦煌气象站探空组在加强观测试验中付出了辛勤劳动,特此致谢!

参考文献 (References)

- Añel J A, Gimeno L, Torre L, et al. 2006. Changes in tropopause height for the Eurasian region determined from CARDS radiosonde data [J]. *Naturwissenschaften*, 93: 603–609. doi: 10.1007/s00114-006-0147-5.
- 蔡福, 李辑, 明惠青, 等. 2006. 沈阳地区对流层顶气候特征分析 [J]. *气象与环境学报*, 22 (1): 11–16. Cai Fu, Li Ji, Ming Huiqing, et al. 2006. Climatic characteristics of tropopause over Shenyang [J]. *Journal of Meteorology and Environment (in Chinese)*, 22 (1): 11–16.
- Highwood E J, Hoskins B J, Berrisford P. 2000. Properties of the arctic tropopause [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126: 1515–1532.
- 李积明, 黄建平, 衣育红, 等. 2009. 利用星载激光雷达资料研究东亚地区云垂直分布的统计特征 [J]. *大气科学*, 33 (4): 698–707. Li Jiming, Huang Jianping, Yi Yuhong, et al. 2009. Analysis of vertical distribution of cloud in East Asia by space-based lidar data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (4): 698–707.

- Liu Huizhi, Zhang Hongsheng, Bian Lin'gen, et al. 2002. Characteristics of micrometeorology in the surface layer in the Tibetan Plateau [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 19 (1): 73–88.
- 吕达仁, 陈泽宇, 卜建春, 等. 2008. 平流层—对流层相互作用的多尺度过程特征及其与天气气候关系——研究进展 [J]. *大气科学*, 32 (4): 782–793.
- Lü Daren, Chen Zeyu, Bian Jianchun, et al. 2008. Advances in researches on the characteristics of multi-scale processes of interactions between the stratosphere and the troposphere and its relations with weather and climate [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32 (4): 782–793.
- 马舒庆, 赵志强, 邢毅. 2005. VAISALA 探空技术及中国探空技术的发展 [J]. *气象科技*, 33 (5): 390–392.
- Ma Shuqing, Zhao Zhiqiang, Xing Yi. 2005. VAISALA's radiosonde technology and advancement in radiosonde technology in China [J]. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 33 (5): 390–392.
- 乔娟. 2009. 西北干旱区大气边界层时空变化特征及形成机理研究 [D]. 中国气象科学研究院硕士学位论文.
- Qiao Juan. 2009. The temporal and spatial characteristics of atmospheric boundary layer and its formation mechanism over arid region of Northwest China [D]. M. S. thesis (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences.
- Randel W J, Wu F, Gaffen D J. 2000. Interannual variability of the tropical tropopause derived from radiosonde data and NCEP reanalysis [J]. *J. Geophys. Res.*, 105: 15509–15524.
- 任阵海, 苏福庆, 陈朝晖, 等. 2008. 夏秋季节天气系统对边界层内大气中 PM10 浓度分布和演变过程的影响 [J]. *大气科学*, 32 (4): 741–751.
- Ren Zhenhai, Su Fuqing, Chen Zhaohui, et al. 2008. Influence of synoptic systems on the distribution and evolution process of PM10 concentration in the boundary layer in summer and autumn [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32 (4): 741–751.
- Santer B D, Sausen R, Wigley T M L, et al. 2003. Behavior of tropopause height and atmospheric temperature in models, reanalyses, and observations: Decadal changes [J]. *J. Geophys. Res.*, 108: 4002, doi: 10.1029/2002JD002258.
- Sausen R, Santer B D. 2003. Use of changes in tropopause height to detect human influences on climate [J]. *Meteor. Z.*, 12: 131–136.
- Seibert P, Beyrich F, Joffre S, et al. 2000. Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height [J]. *Atmospheric Environment*, 34: 1001–1027.
- 韦志刚, 吕世华, 胡泽勇, 等. 2005. 金塔绿洲夏季边界层的风、温度和湿度结构特征的初步分析 [J]. *高原气象*, 24 (6): 846–856.
- Wei Zhigang, Lü Shihua, Hu Zeyong, et al. 2005. A primary research on the characteristics of wind, temperature and humidity in the boundary layer over Jinta in summer [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 24 (6): 846–856.
- Wei Zhigang, Wen Jun, Li Zhenchao. 2009. Vertical atmospheric structure of the late summer clear days over the east Gansu loess plateau in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26 (3): 381–389.
- 吴祖常, 董保群. 1998. 我国陆域大气最大混合层厚度的地理分布与季节变化 [J]. *科技通报*, 14 (3): 158–163.
- Wu Zuchang, Dong Baoqun. 1998. Geographical distribution and seasonal variation of atmospheric maximum mixing depth over China [J]. *Bulletin of Sciences and Technology* (in Chinese), 14 (3): 158–163.
- 张广兴, 李娟, 崔彩霞, 等. 2005. 新疆 1960~1999 年第一对流层顶高度变化及其突变分析 [J]. *气候变化研究进展*, 1 (3): 106–110.
- Zhang Guangxing, Li Juan, Cui Caixia, et al. 2005. Change trend and analysis of abrupt change for the first tropopause height over Xinjiang in 1960–1990 [J]. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 1 (3): 106–110.
- 张宏升, 刘艳华, 李富余, 等. 2002. 大气边界层探测的意义与作用 [J]. *气象水文海洋仪器*, 2: 20–23.
- Zhang Hongshen, Liu Yanhua, Li Fuyu, et al. 2002. The observation on the atmospheric boundary layer [J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments* (in Chinese), 2: 20–23.
- 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 Qiang, Wei Guoan, Hou Ping. 2004. Observation studies of atmosphere boundary layer characteristic over Dunhuang Gobi in early summer [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 23 (5): 587–597.
- 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.
- 邹进上, 张降秋, 王炳忠. 1989. 我国对流层顶的时空分布特征及其影响因子 [J]. *气象科学*, 9 (4): 417–426.
- Zou Jinshang, Zhang Jiangqiu, Wang Bingzhong. 1989. The characteristics of temporal and spatial variation of tropopause over China and its controlling factors [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 9 (4): 417–426.
- 邹玉玲, 王新, 高凤姣, 等. 2006. L 波段与 59-701 探测系统观测数据的对比分析 [J]. *山东气象*, 26 (2): 49–50.
- Zou Yuling, Wang Xin, Gao Fengjiao, et al. 2006. Compare and analysis on the measurement data between the L band and the 59-701 sounding system [J]. *Journal of Shandong Meteorology* (in Chinese), 26 (2): 49–50.
- 朱保林. 2005. 北半球夏季对流层顶变动的现象及机制研究 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文.
- Zhu Baolin. 2005. Summer-time tropopause variations and its mechanism [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Sciences and Technology.