

乔梁, 张强, 岳平, 等. 2019. 由非季风区向季风区过渡过程中大气边界层结构的变化分析 [J]. 大气科学, 43 (2): 251–265. Qiao Liang, Zhang Qiang, Yue Ping, et al. 2019. Analysis of changes in the structure of atmospheric boundary layer from non-monsoon zone to monsoon zone [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43 (2): 251–265, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1805.17231.

由非季风区向季风区过渡过程中大气边界层结构的变化分析

乔梁^{1, 2, 3} 张强^{1, 2, 4} 岳平² 金红梅³

1 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

2 中国气象局兰州干旱气象研究所/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室/中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 兰州 730020

3 甘肃省气象信息与技术装备保障中心, 兰州 730020

4 甘肃省气象局, 兰州 730020

摘 要 利用中国西北中部具有代表性的非季风区、夏季风影响过渡区和季风区的 7 个高空站的 2013 年夏季晴天 07 时、13 时、19 时 (北京时) 的大气边界层资料, 通过分析大气边界层位温、比湿、风速的垂直结构, 发现大气边界层结构及厚度在不同区域的分布特征: 稳定边界层厚度、残余层顶高度和对流边界层厚度从非季风区、夏季风影响过渡区至季风区出现阶梯性大幅降低, 从非季风区至夏季风影响过渡区, 以及从夏季风影响过渡区至季风区, 对流边界层厚度降幅依次为 25.6% 和 81.8%, 稳定边界层厚度降幅依次为 58.3% 和 41.8%; 在稳定边界层条件下, 可观察到低空急流的存在, 非季风区低空急流出现高度明显高于夏季风影响过渡区和季风区, 且非季风区的低空急流风速也明显大于夏季风影响过渡区和季风区。通过分析与大气边界层发展最为密切的陆面热力因素在不同气候区的分布, 净辐射值、日地—气温差最大值以及感热通量值在非季风区大于夏季风影响过渡区和季风区, 从陆面热力过程为非季风区大气边界层厚度大于夏季风影响过渡区和季风区提供了理论依据。

关键词 夏季风影响过渡区 大气边界层结构特征 大气边界层厚度 陆面热力因素

文章编号 1006-9895(2019)02-0251-15

中图分类号 P421

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1805.17231

Analysis of Changes in the Structure of Atmospheric Boundary Layer from Non-monsoon Zone to Monsoon Zone

QIAO Liang^{1, 2, 3}, ZHANG Qiang^{1, 2, 4}, YUE Ping², and JIN Hongmei³

1 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

2 Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration/Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province/Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020

3 Gansu Provincial Meteorological Information and Technic Support and Equipment Center, Lanzhou 730020

4 Gansu Provincial Meteorological Bureau, Lanzhou 730020

Abstract Sounding data observed at 0700 BJT (Beijing time), 1300 BJT and 1900 BJT at seven sounding stations in central Northwest China on clear days in the summer of 2013 are used in the present study. The seven sounding stations

收稿日期 2017-09-08; 网络预出版日期 2018-05-14

作者简介 乔梁, 男, 1989 年出生, 硕士研究生, 主要从事大气边界层和陆面过程等方面的研究. E-mail: 455020268@qq.com

通讯作者 张强, E-mail: zhangqiang@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41630426、91637106、41705075, 干旱气象科学研究基金项目 IAM201709

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41630426, 91637106, 41705075), Drought Meteorological Scientific Research Fund (Grant IAM201709)

are distributed in the non-monsoon zone, the summer monsoon transition zone and the monsoon zone, respectively. Vertical structures of potential temperature, specific humidity, wind speed, and atmosphere boundary layer thickness over different zones are analyzed. The results show that there are differences in the structure characteristics and thickness of the atmosphere boundary layer in different zones. The stable boundary layer thickness, the residual layer height and the convective boundary layer thickness decrease significantly from the non-monsoon zone to the summer monsoon transition zone and from the summer monsoon transition zone to the monsoon zone. The convective boundary layer thickness decreases by 25.6% from the non-monsoon zone to the summer monsoon transition zone, and the decrease is 81.8% from the summer monsoon transition zone to the monsoon zone. The stable boundary layer thickness decreases by 58.3% from the non-monsoon zone to the summer monsoon transition zone, and the decrease is 41.8% from the summer monsoon transition zone to the monsoon zone. Low-level jets can be observed in stable boundary layer, and the height of the low-level jet in the non-monsoon zone is higher than that in the summer monsoon transition zone and the monsoon zone. A similar phenomenon is found for the wind speed of the low-level jet. Based on analysis of the distribution of land surface thermal factors in different climatic regions, it is found that the distributions of the net radiation, the daily maximum difference between surface temperature and surface air-temperature ($T_s - T_a$) and the sensible heat fluxes are similar to the distribution of the convective boundary layer thickness. These land surface thermal factors in non-monsoon zone are larger than those in the summer monsoon transition zone and the monsoon zone. Results of the present paper provide a theoretical basis for the study of differences in the structure and thickness of the atmospheric boundary layer in different zones.

Keywords Summer monsoon transition zone, Structural characteristics of atmospheric boundary layer, Atmospheric boundary layer thickness, Land surface thermal factors

1 引言

季风系统既是全球大气环流系统的重要角色,也是全球大气能量和水汽输送的主要机制(黄荣辉, 2006)。我国作为全球夏季风最活跃的区域之一,同时受到来自太平洋的东南夏季风和来自印度洋西南夏季风的影响(黄荣辉, 2011; 王会军和范可, 2013)。夏季风的到来,为季风区带来丰富的降水,夏季风强度及影响范围的年际、年代际变化及突变过程,对我国区域气候的形成和旱涝事件的发生具有决定性的影响(Fu, 1992; 郭其蕴等, 2004; 杨修群等, 2005; 丁一汇等, 2013)。我国受夏季风的影响一般从东南向西北逐渐减弱,按照受夏季风的影响程度,可将中国气候区域划分为季风区、非季风区以及夏季风影响过渡区(汤绪等, 2007; Qian et al., 2009)。夏季风影响过渡区,又被称为东亚夏季风边缘活动带,是夏季风北边缘年际和年代际的摆动区域(Hu and Qian, 2007; 林祥和钱维宏, 2012),受夏季风北边缘进退的影响,该区域降水存在很强的气候波动性(Ou and Qian, 2006),致使其陆面特性和大气边界层特征存在明显的空间变化(李岩瑛等, 2012; Huang et al., 2012)。

大气边界层是大气中最靠近地表的对流层底部的大气层区域,地球与大气之间几乎所有的热量、动量、水汽、气溶胶、微量气体和大气污染物的交换都是通过大气边界层过程来实现,因此无论

是气候变化还是大气环流的调整都与大气边界层过程的贡献密不可分(张强, 2007; 黄荣辉等, 2013; 刘辉志等, 2013)。同时,发生在我们身边的主要突发性气象灾害也大多与大气边界层过程密切相关(张强和王胜, 2005),沙尘暴和强对流天气,以及城市大气污染物的扩散,都以大气边界层的运动为基础。在大气边界层特征物理参数中,大气边界层厚度是其最为重要的参数之一,它不仅决定着一个地区的大气环境容量,而且还强烈影响着云和对流发展及演变过程,同时也是空气质量监测和天气预报中最为重要的物理参数之一,是数值天气预报模式初始化十分关键的因素(Angevine et al., 1994; 蔡芎宁等, 2006)。

近年来,诸多学者对大气边界层结构特征进行了许多观测试验和科学研究。通过我国于 1989~1993 年开展的“黑河地区地—气相互作用观测试验(HEIFI)”,发现了绿洲和湖泊的“冷岛效应”现象及其边界层结构特征(苏从先等, 1987; Hu et al., 1988; 潘林林和陈家宜, 1997)。通过“1998 年青藏高原全球能量水循环之亚洲季风青藏高原试验(GAME/Tibet)”及“2001~2006 年全球协调加强观测计划(CEOP)之亚洲季风青藏高原试验”这两次综合性气象科学试验,我国学者对青藏高原地区近地层地气相互作用和边界层结构有了深入的研究(周明煜等, 2000; 季国良等, 2002; 沈志宝等, 2002; 李茂善等, 2004)。张强等(2004, 2007)、

张强和王胜(2008)通过对2000年5~6月在中国西北地区甘肃敦煌进行的陆气相互作用外场加强观测试验,分析了位于西北干旱区的敦煌荒漠夏季大气边界层气象要素结构特征,发现该地区存在深厚大气边界层的现象。通过2006~2007年期间在西北干旱区敦煌进行的大气边界层观测试验,研究了大气边界层的发展和维持衰退过程与陆面热力和动力过程的关系,得出极强的陆面热力作用是我国干旱区形成深厚大气边界层的主导因素的结论(乔娟等,2010;张强等,2011)。吕世华和陈玉春(1995)、吕世华和罗斯琼(2005)及Ma et al. (2011)通过数值模拟的方式,探究了大气边界层在沙漠绿洲地形下的结构特征及深厚大气边界层产生的重要影响因素。岳平等(2008)利用2006年3~5月在内蒙古锡林郭勒盟进行的科技部专项“沙尘气溶胶辐射模型及气候环境生态效应研究”加强期观测的探空资料,对内蒙古高原半干旱荒漠化草原地区春季典型晴天边界层特征进行了分析。

从上述研究可以看出,虽然诸多学者在大气边界层结构特征方面已经取得了许多重要成果,但从非季风区向季风区过渡过程中的大气边界层结构特征及厚度变化却鲜有研究。因此本文利用位于中国西北中部具有代表性的非季风区、夏季风影响过渡区和季风区的7个高空站夏季晴天高空资料及陆面热力气象要素资料,实现对大气边界层结构特征及厚度从非季风区向季风区过渡过程中的变化分析,并通过分析与大气边界层过程密切相关的陆面热力因素,来探究大气边界层结构特征及厚度在不同区域发生变化的原因。

2 数据和方法

2.1 资料介绍

本文所用的高空资料为位于中国西北中部非季风区、夏季风影响过渡区和季风区具有代表性的7个高空站(敦煌、民勤、酒泉、张掖、合作、平凉、武都)2013年6月进行的常规高空观测资料及其高空加密观测资料,常规高空观测时次为07、19时(北京时,下同),加密高空观测时次为13时。为进行晴天大气边界层结构特征及厚度的对比分析,挑选出7个高空站均为晴天的日期(2013年6月1日和6月2日)的高空观测资料统计平均后进行对比分析。7个高空站进行观测时所用雷达型号均为GFE(L)1型二次测风雷达,探空仪型号均为

GTS1型数字式探空仪,GTS1型探空仪的气压观测误差在500 hPa以下为2 hPa,在500 hPa以上为1 hPa,温度观测误差为0.2℃,相对湿度观测误差在-25℃以上为5%,在-25℃以下为10%,风向的观测误差在风速大于10 m s⁻¹时为2.5°,风速小于10 m s⁻¹时为5°,风速的观测误差小于10%,测距精度为20 m,测角精度为0.08°(李岩璞等,2011)。

2.2 夏季风影响过渡区位置

我国夏季风北边缘线存在许多不同的定义方法,主要通过降水量分布(Ou and Qian, 2006)、水汽分布(汤绪等,2009)、或综合风场、降水和位温要素(汤绪等,2006;胡豪然和钱维宏,2007;Qian et al., 2007)来确定夏季风北边缘线。鉴于降水是夏季风活动最为至关重要的指示变量,本文采用过程透雨量的方法来定义夏季风影响过渡区:即4~10月出现3次至8次过程透雨之间的区域(黄菲等,2009;曾剑等,2016)。通过该方法确定的非季风区、夏季风影响过渡区和季风区位置如图1所示,7个高空站中,非季风区有敦煌、酒泉、张掖、民勤;夏季风影响过渡区有平凉、合作;季风区为武都。统计7个高空站1951~2015年气压、温度、降水的多年平均值(表1),可看出非季风区4个站点的多年平均降水量都不足130 mm,敦煌仅为38.4 mm;而季风区和夏季风影响过渡区降水增加明显,均超过460 mm。从多年平均温度来看,处于季风区的武都年平均温度最高,达到14.8℃,其他站点年平均温度介于2~10℃之间。从多年平均气压可看出,夏季风影响过渡区的合作由于海拔较高,气压明显偏低,仅为715.1 hPa。

表1 1951~2015年站点气象要素平均值

Table 1 Mean values of meteorological factors at sounding stations during 1951–2015

站点	海拔高度/m	年平均气	年平均温	年平均降
		压/hPa	度/℃	水/mm
敦煌	1139.0	887.3	9.7	38.4
民勤	1367.5	863.7	8.4	114.9
酒泉	1477.2	852.1	7.5	86.4
张掖	1461.1	851.7	7.4	128.4
合作	2910.0	715.1	2.6	546.2
平凉	1346.6	866.2	9.0	499.9
武都	1079.1	895.3	14.8	469.1

2.3 研究方法

使用《L波段(1型)高空气象探测系统数据处理软件(V3.32)》将所选高空观测资料处理为等

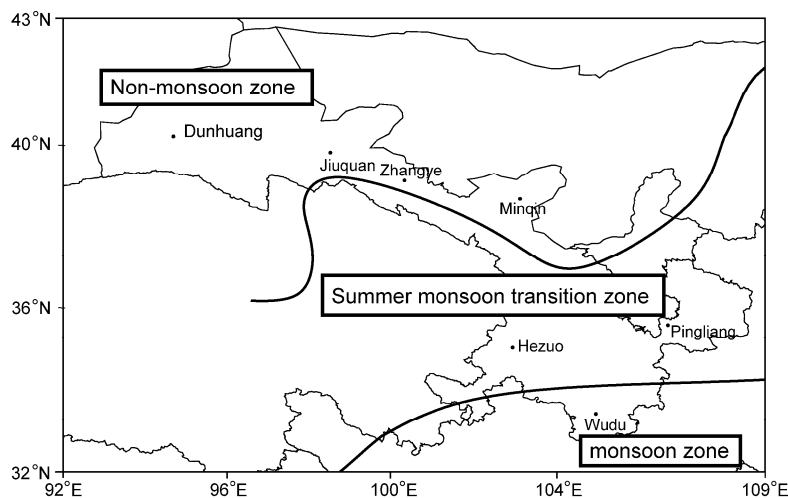


图1 非季风区、夏季风影响过渡区、季风区在中国西北中部分布

Fig. 1 The distribution of the non-monsoon zone, the summer monsoon transition zone, and the monsoon zone in central Northwest China

10 m 间隔的气象要素数据,该软件为中国气象局大气探测技术中心研发制作,并投入全国各气象部门业务使用,所处理的数据被广泛应用于业务科研中,可靠性高。各高度处的位温(单位: $^{\circ}\text{C}$)的计算采用泊松方程,比湿(单位: g kg^{-1})的计算采用大气物理中比湿和水汽压、气压之间的关系求得,具体公式如下:

$$\theta = T \left(\frac{1000}{p} \right)^{0.286} - 273.16, \quad (1)$$

$$q = 622 \frac{e}{p - 0.378e}, \quad (2)$$

其中, θ 为位温, q 为比湿, T 为热力学温度(单位: K), p 为气压(单位: hPa), e 为水汽压(单位: hPa)。

本文主要分析夏季晴天大气边界层结构特征,并不涉及阴雨天及中性边界层过程,故热力作用在所分析的大气边界层过程中起主导作用,因此使用位温廓线法来确定大气边界层厚度(Seibert et al., 2000; Hyun et al., 2005)。具体方法为:在稳定边界层条件下(07 时和 19 时),从地面开始的近地层逆位温层顶[逆位温强度超过 0.4°C (100 m) $^{-1}$]的高度作为稳定边界层厚度;在对流边界层条件下(13 时),从地面最早出现的强度超过 0.3°C (100 m) $^{-1}$ 的大气逆温层底部以下范围确定为对流边界层厚度。通过对非季风区、夏季风影响过渡区和季风区站点大气边界层厚度及位温廓线、比湿廓线及风速廓线的物理特征进行对比分析,来实现夏季风影

响过渡区在非季风区向季风区过渡过程中大气边界层结构的变化分析。

通过分析地—气温差、净辐射、感热通量这三类与大气边界层发展最为密切的陆面热力因素在不同区域的分布,对大气边界层结构及厚度在不同区域的差异做出解释(张强等, 2011)。净辐射通过彭曼公式计算所得(Yin et al., 2008; Zhang et al., 2016),地—气温差使用台站小时数据的地温减气温所得,感热通量使用 CFSv2 再分析资料的逐 6 小时近地面感热通量值。净辐射公式如下:

$$R_n = 0.77 \left(0.2 + 0.79 \frac{n}{N} \right) R_a - \sigma \left(\frac{T_{\max}^4 + T_{\min}^4}{2} \right) \cdot \left(0.56 - 0.25 \sqrt{e_a} \right) \left(0.1 + 0.9 \frac{n}{N} \right), \quad (3)$$

其中, R_n 为净辐射(单位: $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), n 为实际日照时数(单位: h), N 为最大可能日照时数(单位: h), R_a 为天文辐射(单位: $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), σ 为 Stefan-Boltzmann 常数 ($4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), $T_{\max}$ 为日最高气温(单位: K), $T_{\min}$ 为日最低气温(单位: K), e_a 为饱和水汽压(单位: kPa)。

3 位温垂直分布特征和大气边界层厚度

热力特性是判断和区分大气边界层性质的主要指标之一,位温是大气最具表现力的热力属性之一,因此分析大气位温垂直分布状态对认识大气边界层的结构十分重要(张强和王胜, 2008)。图 2

是非季风区、夏季风影响过渡区和季风区夏季晴天大气边界层位温廓线特征, 在 07 时稳定边界层条件下 (图 2a) 可看出, 位温廓线在近地面存在逆温层, 逆温层顶即为大气稳定边界层顶; 继续向上, 在一定高度范围内, 位温随高度变化很小, 为

大气边界层的残余层, 是前一天大气对流边界层的混合层在夜间的残余部分, 残余层上部即为自由大气。在对流边界层条件下 (图 2b), 可观察到位温廓线存在超绝热递减层, 即距地面约 100 m 左右, 位温随高度迅速减小, 这主要由午间地面温度高于

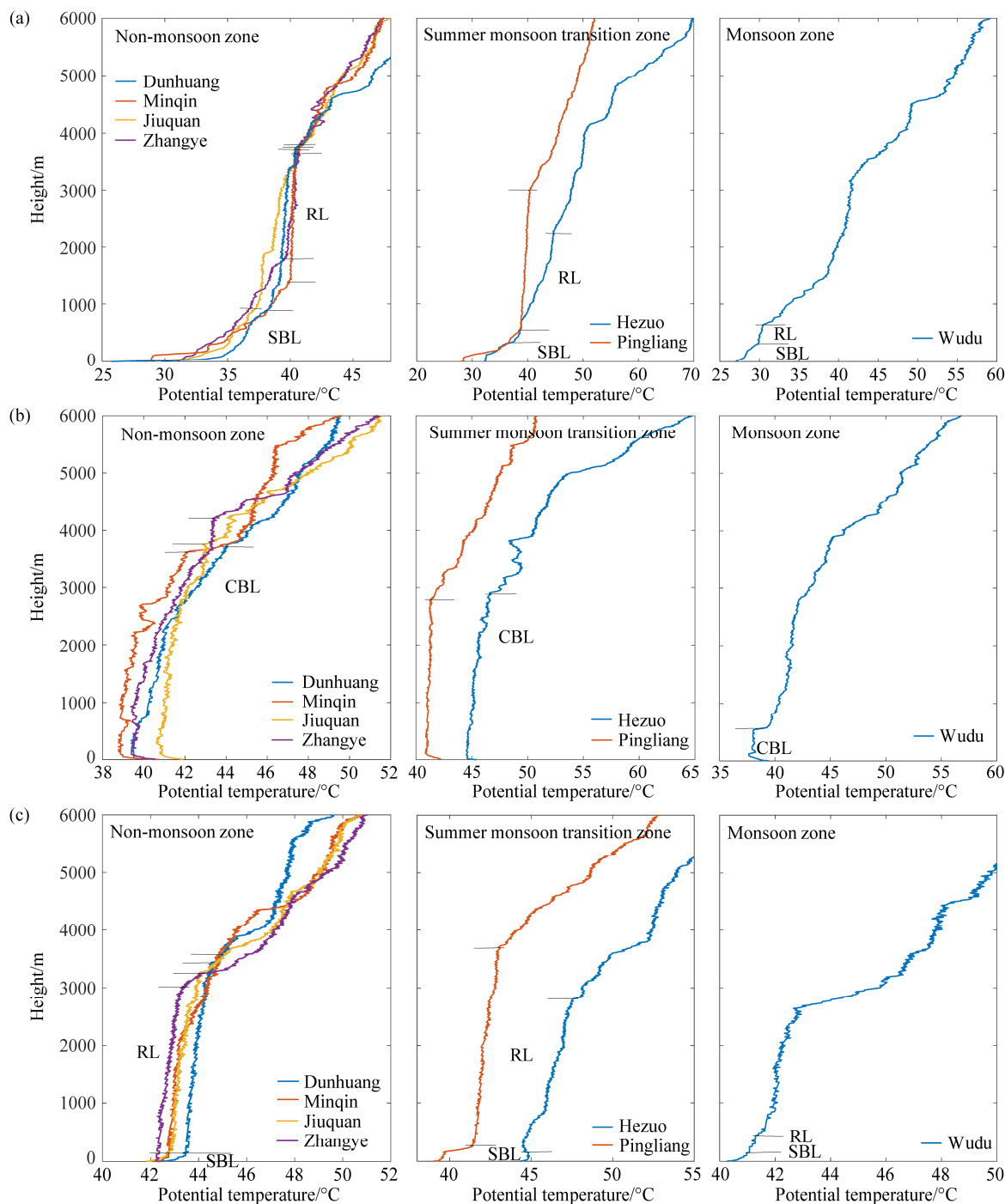


图2 典型非季风区(左)、夏季风影响过渡区(中)和季风区(右)夏季晴天大气边界层位温廓线特征:(a) 07时;(b) 13时;(c) 19时。RL: 残余层; SBL: 稳定边界层; CBL: 对流边界层; 黑色横线为各层的分界线

Fig. 2 Characteristics of potential temperature profile in the atmospheric boundary layer on sunny summer days in typical non-monsoon zone, summer monsoon transition zone, and monsoon zone: (a) 0700 BJT (Beijing time); (b) 1300 BJT; (c) 1900 BJT. RL: the residual layer; SBL: the stable boundary layer; CBL: the convective layer; the black horizontal line is the demarcation line of each layer

近地面层气温, 温度自地面至近地面层迅速降低造成。超绝热递减层上部为混合层, 位温随高度变化很小, 混合层中由于湍流强烈的垂直运动, 各气象要素在混合层中的垂直分布都很均匀。混合层向上, 位温随高度迅速增大, 该逆温层又称为卷夹层, 并把它看作是自由大气与边界层的过渡层, 卷夹层出现的逆温现象, 如同一层顶盖, 将自由大气与边界层隔离开来。非季风区站点位温在对流边界层混合层中的廓线形态与稳定边界层的残余层廓线形态相似, 位温在混合层和残余层随高度变化非常小, 几乎为垂直直线, 而其他区域残余层和混合层不仅偏薄, 且位温廓线斜率明显较非季风区偏小, 说明夏季风影响过渡区和季风区在季风气候的影响下, 大气边界层湍流运动明显弱于非季风区。19 时大气边界层位温廓线特征 (图 2c) 与 13 时大气边界层位温廓线特征 (图 2b) 形态相似, 区别主要在于近地面层, 19 时开始出现浅薄的逆温层, 这与傍晚太阳落山, 地温开始降低, 地温逐渐小于近地面层气温, 地表辐射冷却从而形成浅薄的逆温层有关, 近地面层的逆温层一旦开始出现, 则标志着大气边界层开始由对流边界层向稳定边界层转变。

将非季风区、夏季风影响过渡区、季风区 07 时稳定边界层厚度、残余层顶高度、对流边界层厚度进行对比 (图 3)。发现非季风区出现深厚大气边界层现象, 非季风区平均对流边界层厚度为 3835 m, 张掖站对流边界层厚度甚至厚达 4200 m, 这与张强等 (2004, 2007)、韦志刚等 (2010) 在干旱荒漠区观测到的对流边界层所能达到的厚度基本一致。通过与不同气候区比较, 发现稳定边界层厚度、残余层顶高度和对流边界层厚度均按照从非季风区、夏季风影响过渡区、季风区的顺序依次降低。非季风区通过夏季风影响过渡区向季风区过渡的过程中, 稳定边界层厚度、残余层顶高度和对流边界层厚度从非季风区的 1318 m、3768 m 和 3835 m, 在夏季风影响过渡区降至 550 m、2695 m 和 2855 m, 降幅达到 58.3%、28.5% 和 25.6%, 到达季风区后, 则降低至不足千米, 仅为 320 m、660 m 和 520 m, 从夏季风影响过渡区至季风区, 降幅分别为 41.8%、75.5% 和 81.8%。边界层厚度从非季风区、夏季风影响过渡区至季风区, 发生如此大的降低, 探究其原因, 一方面与不同气候区的陆面热力因素相关 (Seibert et al., 2000), 更为重要的是, 在季风系统的长期影响下, 季风区和夏季风影

响过渡区的气候特性必然会和非季风区不同, 进而影响各区域陆面水分过程和下垫面性质及植被的分布, 造成大气边界层厚度的差异分布。

4 风向、风速和比湿垂直分布特征

4.1 风向、风速分布特征

大气边界层往往具有显著的大气动力特征, 并且这些动力特征在很大程度上影响着大气运动规律 (张强和王胜, 2008)。在稳定边界层条件下, 大气边界层风速廓线中最明显的特征是稳定边界层顶附近出现的低空急流。图 4 所示为典型非季风区、夏季风影响过渡区和季风区夏季晴天稳定边界层水平风速垂直结构特征, 从图中可观察到低空急流的存在 (图中黑色横实线为低空急流出现的位置)。由于地面强摩擦阻力的作用, 白天混合层内的风矢量保持较强的次地转分布, 入夜后大气边界层转变为稳定层结, 湍流强度迅速减弱, 导致雷诺应力减小到很低的数量级, 最终导致科氏力诱发出惯性震荡, 造成稳定边界层顶附近出现低空急流 (盛裴轩等, 2003)。对低空急流出现高度和急流风速进行统计对比 (图 5), 发现非季风区低空急流出现的高度明显高于夏季风影响过渡区和季风区, 且非季风区的低空急流风速也明显大于夏季风影响过渡区和季风区。究其原因, 低空急流一般位于稳定边界层顶附近, 而非季风区稳定边界层厚度大于夏季风影响过渡区和季风区。将稳定边界层厚度与低空急流出现高度进行比较 (图 5), 发现除民勤站低空急流出现位置略低于稳定边界层顶外, 其他高空站低空急流出现位置均在稳定边界层顶上部, 其低空急流出现高度高出稳定边界层顶高度为 210~1230 m 不等。

图 6 所示为非季风区、夏季风影响过渡区和季风区夏季晴天对流边界层条件下风向风速随高度变化特征, 其中横坐标正向为东, 负向为西, 纵坐标正向为北, 负向为南, 从地面至高空 6000 m 处, 每 200 m 处风向、风速为一个点, 每个点至原点的距离即为该高度处的风速大小, 从地面向高空依次连线。从图中可看出, 处于非季风区的张掖、敦煌、酒泉三个站, 在 1000~3400 m 高度之间风向出现偏西方向, 其余各站风向以偏东、偏北方向为主。各高空站近地面风向以偏东风为主, 随着高度的增加, 风向在摆动中以偏东北、偏北方向为主。从风速的角度观察, 处于季风区和夏季风影响过渡区的

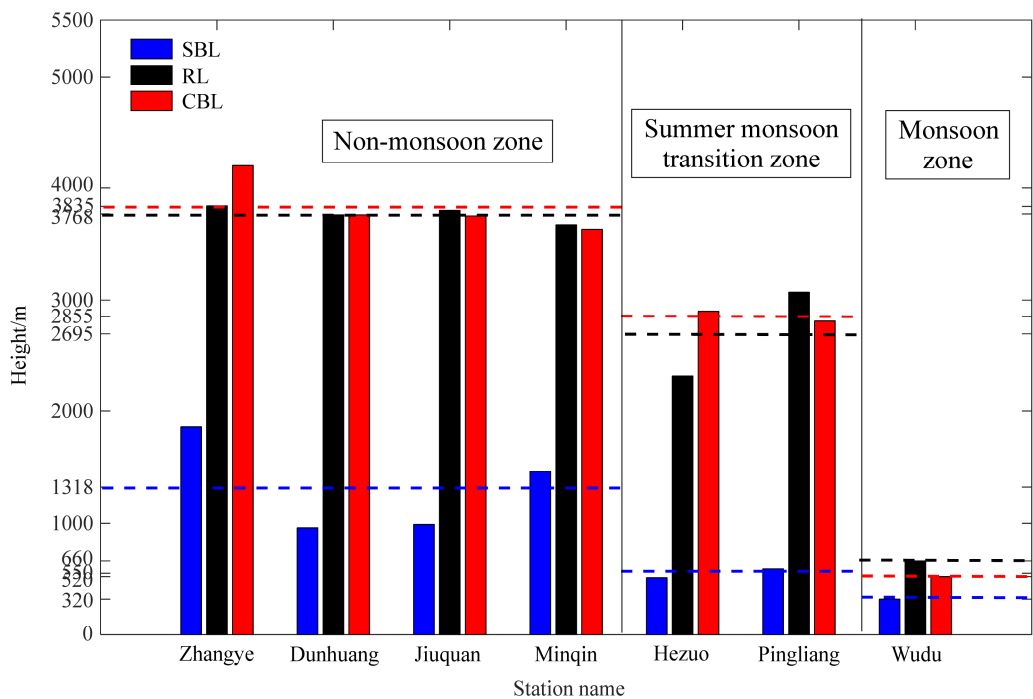


图 3 典型非季风区、夏季风影响过渡区和季风区夏季晴天边界层高度对比。蓝、黑、红色虚线分别为各区域稳定边界层厚度（SBL）、残余层顶高度（RL）和对流边界层厚度（CBL）的平均值

Fig. 3 Comparison of atmospheric boundary layer height on sunny summer days in typical non-monsoon zone, summer monsoon transition zone, and monsoon zone. Blue, black, and red dashed lines are the average values of stable boundary layer thickness (SBL), residual layer height (RL), and convective boundary layer thickness (CBL) in each zone, respectively

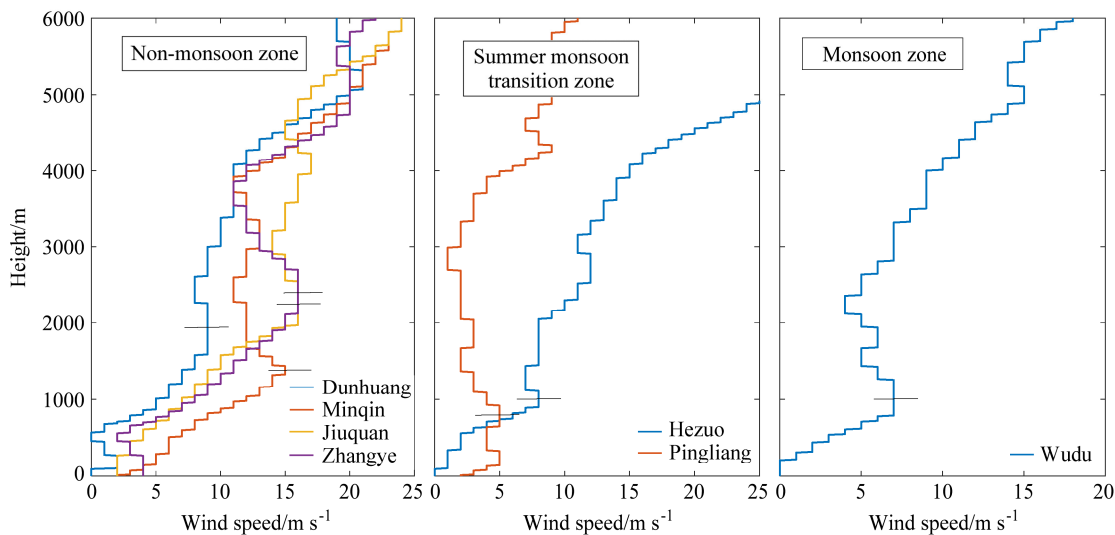


图 4 典型非季风区、夏季风影响过渡区和季风区夏季晴天稳定边界层水平风速垂直结构特征。黑色实线为低空急流出现的位置

Fig. 4 Characteristics of vertical structure of horizontal wind speed in stable boundary layer on sunny summer days in typical non-monsoon zone, summer monsoon transition zone, and monsoon zone. The black solid lines are the positions where the low-level jets appear

武都、平凉风速随高度的增加明显慢于非季风区站点。

4.2 比湿分布特征

大气边界层的热力和动力特性的垂直结构对

其内部的物质输送和分布影响也十分显著（张强和王胜，2008），水汽在垂直方向的分布，便受到大气边界层内部湍流作用的影响。图 7 为非季风区、夏季风影响过渡区、季风区夏季晴天对流边界层比

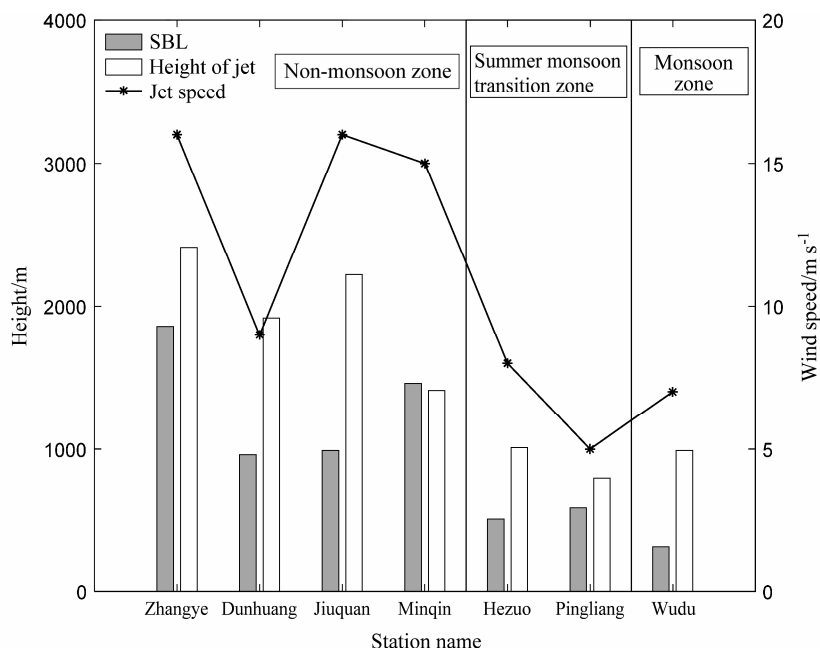


图5 典型非季风区、夏季风影响过渡区和季风区夏季晴天稳定边界层低空急流对比

Fig. 5 Comparison of low-level jets in stable boundary layer on sunny summer days in typical non-monsoon zone, summer monsoon transition zone, and monsoon zone

湿廓线特征图。从图中可看出,比湿在近地层从地表向上递减,至混合层后比湿递减速率明显减慢,说明在大气湍流作用下,下层水汽被带到高空,在混合层垂直方向上水汽分布趋于均匀。对流边界层顶越高,混合层越厚,则下层水汽所能到达的高度也就越高。继续向上,到达卷夹层后比湿出现跃减,在原本就很薄的卷夹层内,比湿迅速减小,至卷夹层上部的自由大气,比湿接近零值。在对流边界层顶处所出现的比湿跃减现象,与已有研究(盛裴轩等, 2003; 张强等, 2007)中比湿垂直廓线结构特征一致,同时也验证了通过位温垂直廓线所确定的大气边界层结构及厚度的可靠性。从图7中还可发现,非季风区和夏季风影响过渡区高空站近地层比湿明显小于季风区武都站,这与武都站在季风系统的影响下,气候相对湿润有关。

5 陆面热力因素的影响

陆面热力过程主要是指太阳辐射能量在陆面转化成热能,加热地表并向大气和土壤传输的过程,地表辐射加热(或冷却)形成的地—气温差是大气边界层热对流(或逆温层)产生的热动力,陆面辐射收支形成的净辐射是陆面热能形成的基础,近地层湍流感热输送是大气边界层热对流(或逆温

层)发展的热量维持机制。张强等(2011)通过2006~2007年在敦煌开展的大气边界层和陆面过程综合观测试验,结果表明当白天地—气温差越剧烈、净辐射越大、湍流感热量输送越强,对流边界层发展越旺盛,对流边界层厚度就越厚;赵建华等(2011)所建立的热力数值模型模拟表明,感热是西北干旱区对流边界层产生的主要原因,夏、冬季对流边界层厚度的51.5%和61.4%分别由感热产生;赵采玲等(2014)通过中尺度天气模式WRF对夏季晴天巴丹吉林沙漠地表温度、感热通量和边界层高度进行数值模拟,模拟结果同样表明白天感热输送越强、地表温度越高,则对流边界层厚度就越厚。

综上所述,大气边界层的发展与地—气温差、地表净辐射和近地层感热通量密切相关。不同区域所处地理位置的差异,其下垫面和气候环境的不同,以及是否受到季风系统的影响等因素,导致不同区域地—气温差、地表净辐射和近地层感热通量存在差异,而这三类陆面热力因素的差异,正是造成不同区域大气边界层结构及厚度差异分布的主要原因。

地—气温差作为大气边界层热对流产生的热动力,对边界层的发展至关重要。白天地—气温差为正时,地温高于近地层空气温度,地表辐射加热

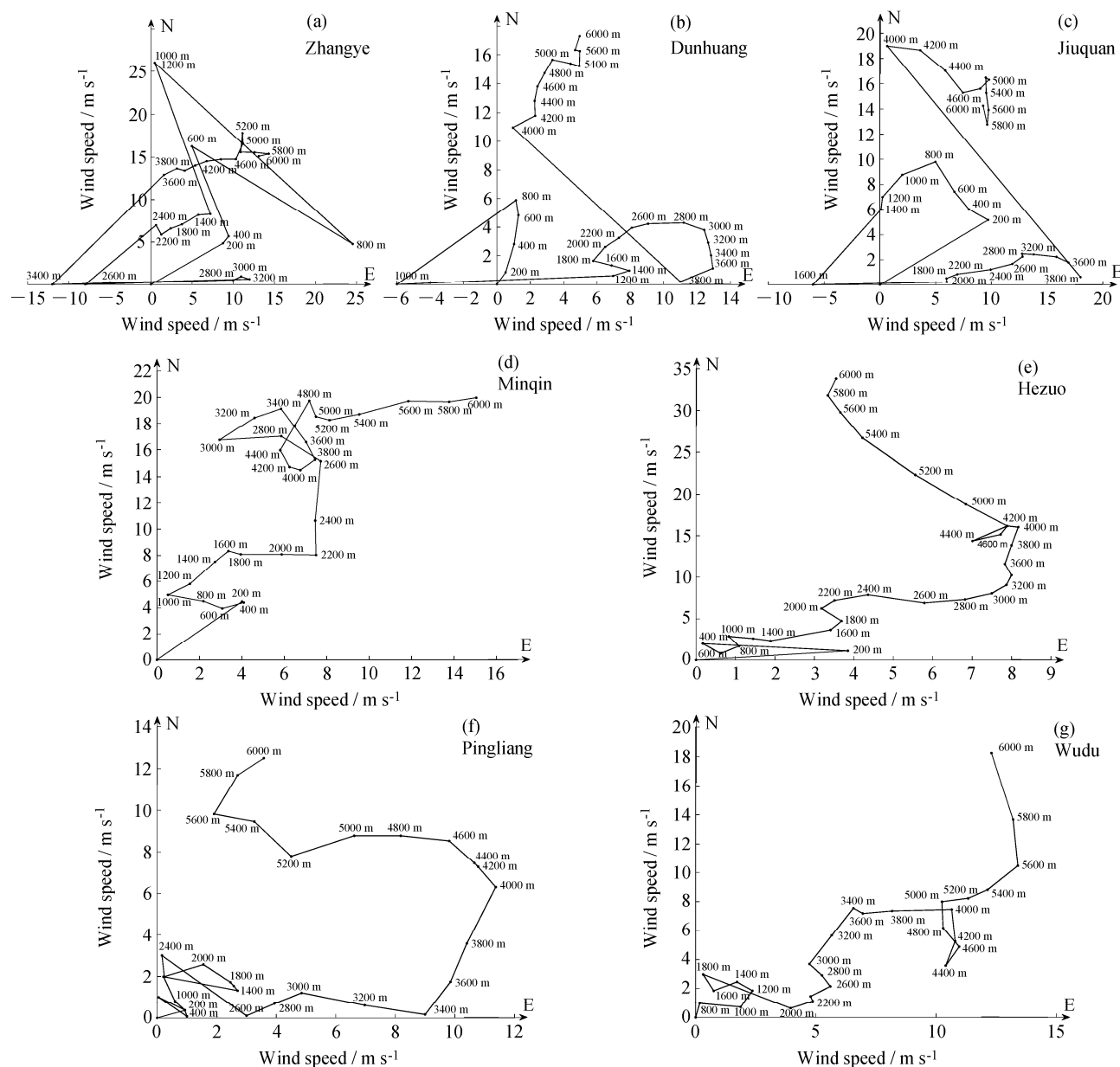


图 6 非季风区、夏季风影响过渡区、季风区夏季晴天对流边界层条件下风向、风速随高度变化特征

Fig. 6 Characteristics of wind speeds and wind directions in convective boundary layer on sunny summer days in typical non-monsoon zone, summer monsoon transition zone, and monsoon zone

近地层空气，为对流边界层发展提供热动力；夜晚地—气温差为负时，地温低于近地层空气温度，地表辐射冷却近地层空气，使得靠近地表的气温较低，近地层大气形成逆温层，为稳定边界层的发生发展创造条件。图 8 为非季风区、夏季风影响过渡区、季风区夏季晴天地—气温差日变化图。从图中可看出，08 时起，地—气温差开始迅速增大，这主要由日出后地面开始接收太阳辐射引起；12~14 时太阳高度角处于一天中的最大值，地面接收到的太

阳辐射也最强，地—气温差也达到最大值；从 14 时开始，太阳高度角逐渐减小，地面接收到的太阳辐射相应减少，地—气温差迅速减小；从 20 时至次日早晨 06 时，太阳落山，地面不再接收太阳辐射，地—气温差基本处于 -5°C 至 0°C 之间。各站点地—气温差最为显著的区别为各站地—气温差所达到的日最大值差别很大，这一时段也是对流边界层发展最为旺盛的时段，将各站地—气温差日最大值与对流边界层厚度进行对比（图 9），可看出各

区域站点地—气温差日最大值按非季风区、夏季风影响过渡区、季风区的顺序依次降低,地—气温差日最大值在不同区域的分布同对流边界层厚度的分布一致,说明地—气温差作为大气边界层发展的

陆面热力因素,为大气边界层的发展提供热动力,造成不同区域大气边界层厚度的分布差异。

净辐射作为陆面热能形成的基础,为边界层和湍流的发展提供最原始的动力。净辐射资料不是常

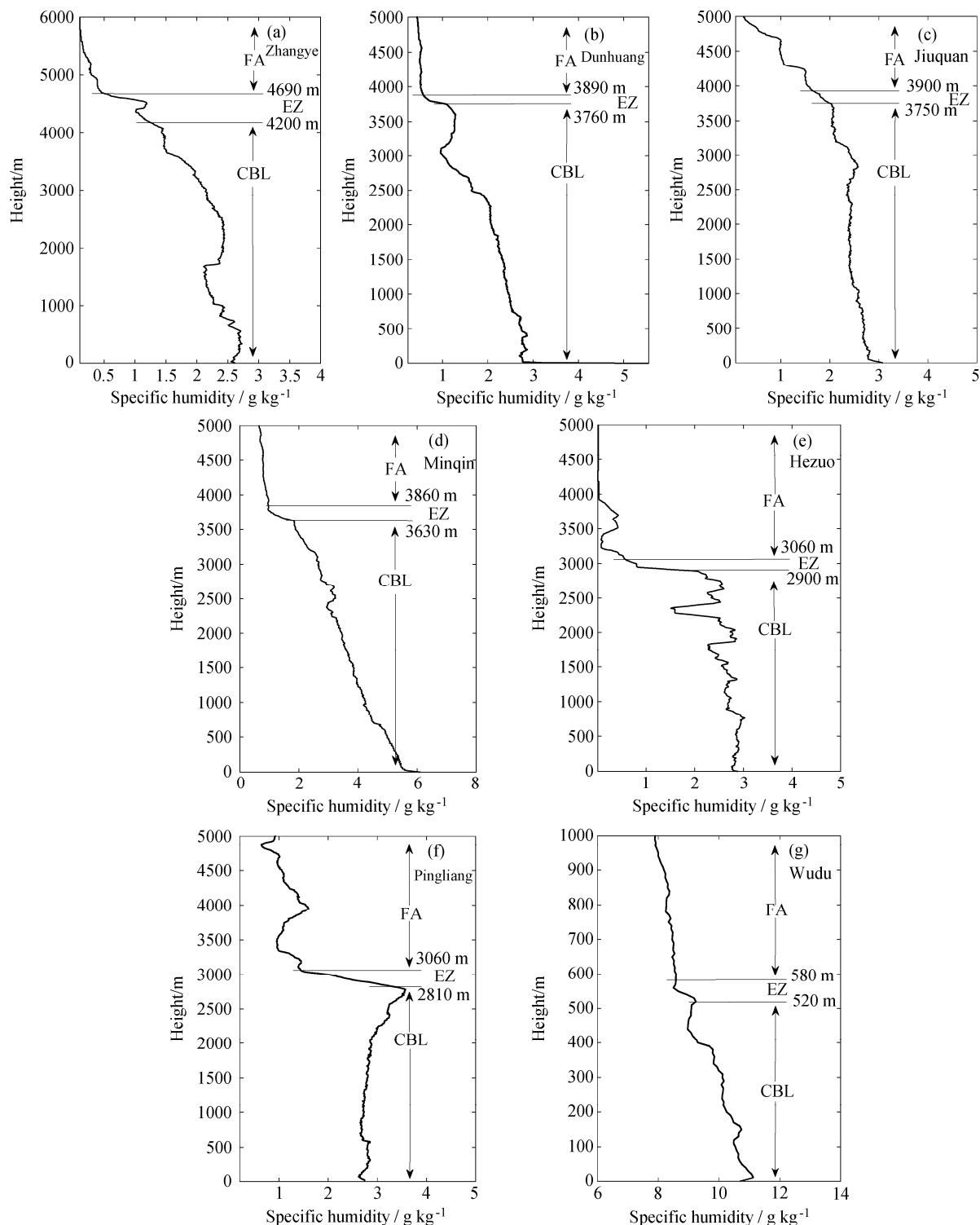


图7 典型非季风区、夏季风影响过渡区、季风区夏季晴天对流边界层比湿廓线特征。FA: 自由大气; EZ: 卷夹层; CBL: 对流边界层

Fig. 7 Characteristics of specific humidity profiles in convective boundary layer on sunny summer days in typical non-monsoon zone, summer monsoon transition zone, and monsoon zone. FA: free air; EZ: entrainment zone; CBL: convective boundary layer

规气象观测资料,利用彭曼公式,通过纬度及其他常规气象要素值对日净辐射值进行计算,将日净辐射值与对流边界层厚度进行对比(图9),可看出:非季风区站点地表净辐射值总体大于夏季风影响过渡区和季风区站点,季风区和夏季风影响过渡区地表净辐射值差别不大,各高空站地表净辐射与对流边界层厚度在不同区域的分布基本一致,地表净

辐射作为大气湍流发展的动力,在不同区域的分布,进而影响了对流边界层厚度在不同区域的分布。合作站地表净辐射值与其他站点相比偏小,合作站地处青藏高原东北端,海拔高度2910 m,远高于其他站点,海拔高度是影响净辐射值的关键因素,净辐射值会随海拔高度的增加而减小(张强等,2014),从而造成高海拔的合作站净辐射值相比其

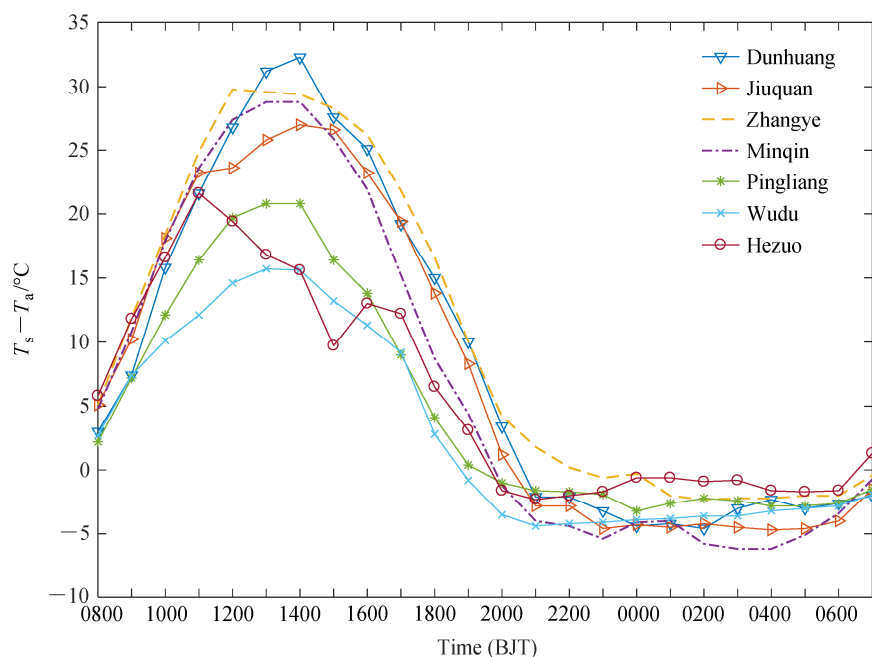


图8 典型非季风区、夏季风影响过渡区、季风区夏季晴天—气温差小时值分布特征

Fig. 8 Characteristics of hourly differences between surface temperature and surface air-temperature ($T_s - T_a$) on sunny summer days in typical non-monsoon zone, summer monsoon transition zone, and monsoon zone

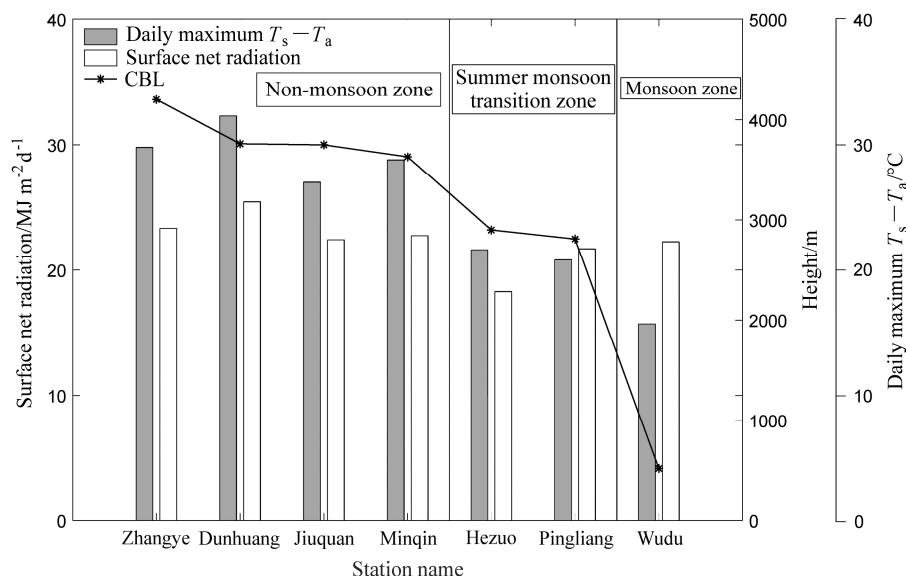


图9 典型非季风区、夏季风影响过渡区、季风区夏季晴天地表净辐射值、地—气温差日最大值与对流边界层厚度对比

Fig. 9 Comparison of net radiation, daily maximum $T_s - T_a$, and convective boundary layer thickness on sunny summer days in typical non-monsoon zone, summer monsoon transition zone, and monsoon zone

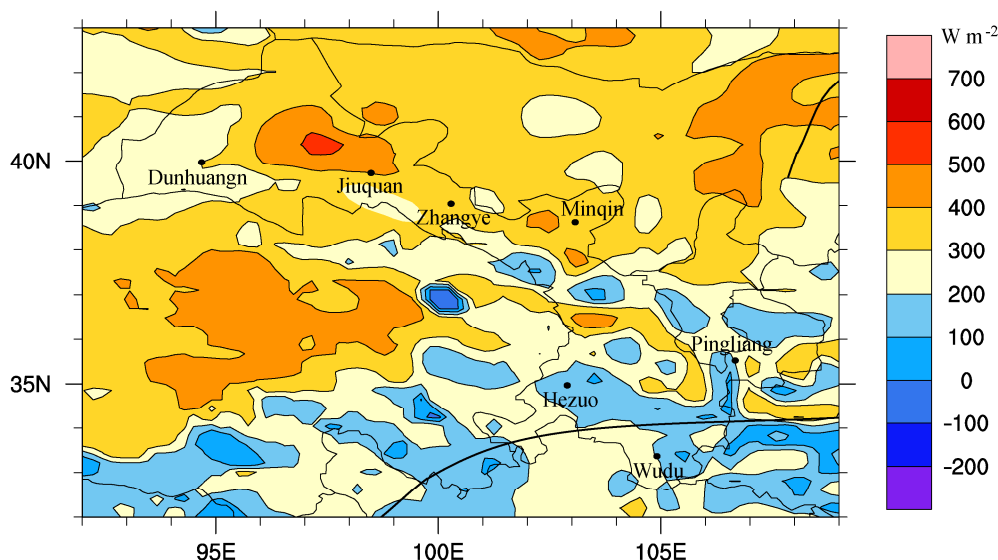


图 10 典型非季风区、夏季风影响过渡区、季风区夏季晴天感热通量 (单位: W m^{-2}) 分布

Fig. 10 Distribution of sensible heat fluxes (units: W m^{-2}) on sunny summer days in typical non-monsoon zone, summer monsoon transition zone, and monsoon zone

他站点偏低。

近地层湍流感热输送是大气边界层热对流发展的热量维持机制,通过感热通量向大气边界层不断输送热量,进而推动大气边界层的发展和维持。对 CFSv2 再分析资料中的近地面感热通量进行分析,该资料水平分辨率 0.205° (经度) $\times 0.204^\circ$ (纬度),每天有 4 个时次,分别为 02、08、14、20 时,选择 14 时 (同时也是大气对流边界层发展最为旺盛时刻) 的感热通量进行分析,从感热通量分布图 (图 10) 中可以看出,非季风区站点感热通量都处于 $300 \sim 500 \text{ W m}^{-2}$ 之间,而夏季风影响过渡区和季风区站点感热通量都处于 $100 \sim 200 \text{ W m}^{-2}$ 之间,非季风区站点感热通量明显大于其他区域站点,且差别较大,而夏季风影响过渡区和季风区感热通量值相近。感热通量作为大气边界层热对流发展的热量维持机制,在不同区域的分布差异,也进一步阐释了非季风区对流边界层厚度明显高于其他区域的原因。

6 结论

通过以上对非季风区、夏季风影响过渡区以及季风区大气边界层位温、比湿、风速的垂直结构特征及大气边界层厚度分布特征的分析,同时结合大气边界层发展最为密切的陆面热力因素在不同区域的分布,得出以下主要结论:

(1) 稳定边界层厚度、残余层顶高度和对流边界层厚度按照非季风区、夏季风影响过渡区、季风区的顺序依次降低,稳定边界层厚度、残余层顶高度和对流边界层厚度从非季风区到夏季风影响过渡区分别降低了 58.3%、28.5% 和 25.6%,从夏季风影响过渡区至季风区分别降低了 41.8%、75.5% 和 81.8%,大气边界层厚度从非季风区、夏季风影响过渡区至季风区出现阶梯性大幅降低。

(2) 在稳定边界层条件下,均可观察到低空急流的存在,发现非季风区低空急流出现的高度明显高于夏季风影响过渡区和季风区,且非季风区的低空急流风速也明显大于夏季风影响过渡区和季风区;在对流边界层条件下,季风区和夏季风影响过渡区风速随高度的增加明显慢于非季风区。

(3) 通过位温垂直结构分析得到大气边界层厚度按非季风区、夏季风影响过渡区和季风区的顺序依次递减;通过对流大气边界层比湿垂直结构分析得到的对流边界层厚度与通过位温廓线得到的对流边界层厚度相一致;地—气温差日最大值在不同区域的分布也按非季风区、夏季风影响过渡区和季风区的顺序依次递减。通过位温廓线特征、比湿廓线特征及地—气温差日最大值在不同气候区域的差异分布,验证了应用过程透雨量的方法对非季风区、夏季风影响过渡区和季风区分类的合理性和有效性。

(4) 各站点地—气温差日最大值、地表净辐射、近地面感热通量这三类陆面热力因素, 在不同区域的分布中, 非季风区大于夏季风影响过渡区和季风区; 地—气温差作为大气边界层热对流产生的热动力, 地表净辐射作为边界层和湍流发展最原始的动力, 近地面感热通量是大气边界层热对流发展的热量维持机制。通过这三类陆面热力因素在不同区域的分布差异, 从陆面热力过程可以很好的解释非季风区稳定边界层厚度、残余层顶高度和对流边界层厚度明显大于夏季风影响过渡区和季风区的原因。

参考文献 (References)

- Angevine W M, White A B, Avery S K. 1994. Boundary-layer depth and entrainment zone characterization with a boundary-layer profiler [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 68 (4): 375–385, doi:10.1007/BF00706797.
- 蔡蓁宁, 寿绍文, 钟青. 2006. 边界层参数化方案对暴雨数值模拟的影响 [J]. *南京气象学院学报*, 29 (3): 364–370. Cai Xiangning, Shou Shaowen, Zhong Qing. 2006. Impact of different boundary layer parameterization schemes on the numerical simulation for a rainstorm [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 29 (3): 364–370, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2006.03.012.
- 丁一汇, 孙颖, 刘芸芸, 等. 2013. 亚洲夏季风的年际和年代际变化及其未来预测 [J]. *大气科学*, 37 (2): 253–280. Ding Yihui, Sun Ying, Liu Yunyun, et al. 2013. Interdecadal and interannual variabilities of the Asian summer monsoon and its projection of future change [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37 (2): 253–280, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12302.
- Fu C B. 1992. Transitional climate zones and biome boundaries: A case study from China [M]//Hansen A J, di Castri F. *Landscape Boundaries*. New York: Springer, 394–402, doi:10.1007/978-1-4612-2804-2_20.
- 郭其蕴, 蔡静宁, 邵雪梅, 等. 2004. 1873~2000 年东亚夏季风变化的研究 [J]. *大气科学*, 28 (2): 206–215. Guo Qiyun, Cai Jingning, Shao Xuemei, et al. 2004. Studies on the variations of East Asian summer monsoon during A D 1873–2000 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28 (2): 206–215, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.02.04.
- 胡豪然, 钱维宏. 2007. 东亚夏季风北边缘的确认 [J]. *自然科学进展*, 17 (1): 57–65. Hu Haoran, Qian Weihong. 2007. Confirmation of the northern margin of East Asian summer monsoon [J]. *Progress in Natural Science (in Chinese)*, 17 (1): 57–65, doi:10.3321/j.issn:1002-008X.2007.01.009.
- Hu H R, Qian W H. 2007. Identifying the northernmost summer monsoon location in East Asia [J]. *Progress in Natural Science*, 17 (7): 812–820, doi:10.1080/10002007088537477.
- Hu Y Q, Su C X, Zhang Y F. 1988. Research on the microclimate characteristics and cold island effect over a reservoir in the Hexi region [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 5 (1): 117–126, doi:10.1007/BF02657351.
- 黄菲, 李栋梁, 汤绪, 等. 2009. 用过程透雨量确定的东亚夏季风北边缘特征 [J]. *应用气象学报*, 20 (5): 530–538. Huang Fei, Li Dongliang, Tang Xu, et al. 2009. Determination on the north boundary of summer monsoon in East Asian with soaking rainfall [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 20 (5): 530–538, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2009.05.003.
- Huang J, Guan X, Ji F. 2012. Enhanced cold-season warming in semi-arid regions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12 (12): 5391–5398, doi:10.5194/acp-12-5391-2012.
- 黄荣辉. 2006. 我国重大气候灾害的形成机理和预测理论研究 [J]. *地球科学进展*, 21 (6): 564–575. Huang Ronghui. 2006. Progresses in research on the formation mechanism and prediction theory of severe climatic disasters in China [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 21 (6): 564–575, doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2006.06.0564.
- 黄荣辉. 2011. 中国西北干旱区陆—气相互作用及其对东亚气候变化的影响 [M]. 北京: 气象出版社, 1–356. Huang Ronghui. 2011. *Land Atmosphere Interaction in Arid Regions of Northwest China and Its Impacts on Climate Change in East Asia (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1–356.
- 黄荣辉, 周德刚, 陈文, 等. 2013. 关于中国西北干旱区陆—气相互作用及其对气候影响研究的最近进展 [J]. *大气科学*, 37 (2): 189–210. Huang Ronghui, Zhou Degang, Chen Wen, et al. 2013. Recent progress in studies of air–land interaction over the arid area of Northwest China and its impact on climate [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37 (2): 189–210, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12303.
- Hyun Y K, Kim K E, Ha K J. 2005. A comparison of methods to estimate the height of stable boundary layer over a temperate grassland [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132 (1–2): 132–142, doi:10.1016/j.agrformet.2005.03.010.
- 季国良, 顾本文, 吕兰芝. 2002. 青藏高原北部的大气加热场特征 [J]. *高原气象*, 21 (3): 238–242. Ji Guoliang, Gu Benwen, Lü Lanzhi. 2002. Characteristics of atmospheric heating field over northern Qinghai–Xizang Plateau [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 21 (3): 238–242.
- 李茂善, 马耀明, 胡泽勇, 等. 2004. 藏北那曲地区大气边界层特征分析 [J]. *高原气象*, 23 (5): 728–733. Li Maoshan, Ma Yaoming, Hu Zeyong, et al. 2004. Study on characteristics of atmospheric boundary layer over Naqu region of northern Tibetan Plateau [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 23 (5): 728–733, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2004.05.025.
- 李岩瑛, 张强, 薛新玲, 等. 2011. 民勤大气边界层特征与沙尘天气的气候学关系研究 [J]. *中国沙漠*, 31 (3): 757–764. Li Yanying, Zhang Qiang, Xue Xinling, et al. 2011. Relationship between atmosphere boundary layer characteristics and sand-dust weather climatology in Minqin [J]. *Journal of Desert Research (in Chinese)*, 31 (3): 757–764.
- 李岩瑛, 张强, 胡兴才, 等. 2012. 西北干旱区和黄土高原大气边界层特征对比及其对气候干湿变化的响应 [J]. *冰川冻土*, 34 (5): 1047–1058. Li Yanying, Zhang Qiang, Hu Xingcai, et al. 2012. Atmosphere boundary layer characteristics and their responses to wetness change over arid regions and Loess Plateau in Northwest China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese)*, 34 (5): 1047–1058.
- 林祥, 钱维宏. 2012. 全球季风和季风边缘研究 [J]. *地球科学进展*, 27 (1): 26–34. Lin Xiang, Qian Weihong. 2012. Review of the global monsoon and monsoon marginal zones [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 27 (1): 26–34.

- 刘辉志, 冯健武, 王雷, 等. 2013. 大气边界层物理研究进展 [J]. 大气科学, 37 (2): 467–476. Liu Huihui, Feng Jianwu, Wang Lei, et al. 2013. Overview of recent studies on atmospheric boundary layer physics at LAPC [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 467–476, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12315.
- 吕世华, 陈玉春. 1995. 绿洲和沙漠下垫面状态对大气边界层特征影响的数值模拟 [J]. 中国沙漠, 15 (2): 116–123. Lü Shihua, Chen Yuchun. 1995. The numerical simulation of the features of the planetary boundary layer of the oasis and the Gobi desert in the arid region [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 15 (2): 116–123.
- 吕世华, 罗斯琼. 2005. 沙漠—绿洲大气边界层结构的数值模拟 [J]. 高原气象, 24 (4): 465–470. Lü Shihua, Luo Siqiong. 2005. Numerical simulation of boundary layer structure in desert-oasis [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24 (4): 465–470, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2005.04.001.
- Ma M J, Pu Z X, Wang S G, et al. 2011. Characteristics and numerical simulations of extremely large atmospheric boundary-layer heights over an arid region in Northwest China [J]. Bound.-Layer Meteor., 140 (1): 163–176, doi:10.1007/s10546-011-9608-2.
- Ou T H, Qian W H. 2006. Vegetation variations along the monsoon boundary zone in East Asia [J]. Chinese Journal of Geophysics, 49 (3): 627–636, doi:10.1002/cjg2.876.
- 潘林林, 陈家宜. 1997. 绿洲夜间“冷岛效应”的模拟研究 [J]. 大气科学, 21 (1): 39–48. Pan Linlin, Chen Jiayi. 1997. The simulation of “cold island effect” over oasis at night [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 21 (1): 39–48, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1997.01.05.
- Qian W H, Lin X, Zhu Y F, et al. 2007. Climatic regime shift and decadal anomalous events in China [J]. Climatic Change, 84 (2): 167–189, doi:10.1007/s10584-006-9234-z.
- Qian W H, Ding T, Hu H R, et al. 2009. An overview of dry-wet climate variability among monsoon-westerly regions and the monsoon northernmost marginal active zone in China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 26 (4): 630–641, doi:10.1007/s00376-009-8213-5.
- 乔娟, 张强, 张杰, 等. 2010. 西北干旱区冬、夏季大气边界层结构对比研究 [J]. 中国沙漠, 30 (2): 422–431. Qiao Juan, Zhang Qiang, Zhang Jie, et al. 2010. Comparison of atmospheric boundary layer in winter and summer over arid region of Northwest China [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 30 (2): 422–431.
- Seibert P, Beyrich F, Gryning S E, et al. 2000. Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height [J]. Atmos. Environ., 34 (7): 1001–1027, doi:10.1016/S1352-2310(99)00349-0.
- 沈志宝, 成天涛, 王可丽. 2002. 青藏高原地面—对流层系统的能量收支 [J]. 高原气象, 21 (6): 546–551. Shen Zhibao, Cheng Tiantao, Wang Keli. 2002. The energy budget of surface-troposphere system over Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 21 (6): 546–551, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2002.06.003.
- 盛裴轩, 毛洁泰, 李建国, 等. 2003. 大气物理学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 239–272. Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. 2003. Atmospheric Physics (in Chinese) [M]. Beijing: Peking University Press, 239–272.
- 苏从先, 胡隐樵, 张永丰, 等. 1987. 河西地区绿洲的小气候特征和“冷岛效应” [J]. 大气科学, 11 (4): 390–396. Su Congxian, Hu Yingqiao, Zhang Yongfeng, et al. 1987. The microclimate character and “cold island effect” over the oasis in Hexi region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 11 (4): 390–396, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1987.04.07.
- 汤绪, 钱维宏, 梁萍. 2006. 东亚夏季风边缘带的气候特征 [J]. 高原气象, 25 (3): 375–381. Tang Xu, Qian Weihong, Liang Ping. 2006. Climatic features of boundary belt for East Asian summer monsoon [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (3): 375–381, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2006.03.003.
- 汤绪, 孙国武, 钱维宏. 2007. 亚洲夏季风北边缘研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1–122. Tang Xu, Sun Guowu, Qian Weihong. 2007. Study on the Northern Edge of Asian Summer Monsoon (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1–122.
- 汤绪, 陈葆德, 梁萍, 等. 2009. 有关东亚夏季风北边缘的定义及其特征 [J]. 气象学报, 67 (1): 83–89. Tang Xu, Chen Baode, Liang Ping, et al. 2009. Definition and features of the north edge of Asian summer monsoon [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (1): 83–89, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2009.01.009.
- 王会军, 范可. 2013. 东亚季风近几十年来的主要变化特征 [J]. 大气科学, 37 (2): 313–318. Wang Huijun, Fan Ke. 2013. Recent changes in the East Asian monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 313–318, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12301.
- 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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.05.06.
- 杨修群, 谢倩, 朱益民, 等. 2005. 华北降水年代际变化特征及相关的海气异常型 [J]. 地球物理学报, 48 (4): 789–797. Yang Xiuqun, Xie Qian, Zhu Yimin, et al. 2005. Decadal-to-interdecadal variability of precipitation in North China and associated atmospheric and oceanic anomaly patterns [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 48 (4): 789–797, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2005.04.009.
- Yin Y H, Wu S H, Zheng D, et al. 2008. Radiation calibration of FAO56 Penman-Monteith model to estimate reference crop evapotranspiration in China [J]. Agricultural Water Management, 95 (1): 77–84, doi:10.1016/j.agwat.2007.09.002.
- 岳平, 牛生杰, 张强, 等. 2008. 春季晴日蒙古高原半干旱荒漠草原地边界层结构的一次观测研究 [J]. 高原气象, 27 (4): 757–763. Yue Ping, Niu Shengjie, Zhang Qiang, et al. 2008. An observation study of atmosphere boundary layer characteristic over semi-arid desert grassland in Mongolia Plateau on clear day in spring [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (4): 757–763.
- 曾剑, 张强, 王春玲. 2016. 东亚夏季风边缘摆动区陆面能量时空分布规律及其与气候环境的关系 [J]. 气象学报, 74 (6): 876–888. Zeng Jian, Zhang Qiang, Wang Chunling. 2016. Spatial-temporal pattern of surface energy fluxes over the East Asian summer monsoon edge area in China and its relationship with climate [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 74 (6): 876–888, doi:10.11676/qxxb2016.064.
- Zhang H L, Zhang Q, Yue P, et al. 2016. Aridity over a semiarid zone in

- northern China and responses to the East Asian summer monsoon [J]. *J. Geophys. Res.*, 121 (23): 13901–13918, doi:10.1002/2016JD025261.
- 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 Desert Research* (in Chinese), 27 (4): 614–620, doi:10.3321/j.issn:1000-694X.2007.04.015.
- 张强, 王胜. 2005. 论特强沙尘暴 (黑风) 的物理特征及其气候效应 [J]. *中国沙漠*, 25 (5): 675–681. Zhang Qiang, Wang Sheng. 2005. On physical characteristics of heavy dust storm and its climatic effect [J]. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 25 (5): 675–681, doi:10.3321/j.issn:1000-694X.2005.05.010.
- 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, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2008.04.013.
- 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, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2004.05.003.
- 张强, 赵映东, 王胜, 等. 2007. 极端干旱荒漠区典型晴天大气热力边界层结构分析 [J]. *地球科学进展*, 22 (11): 1150–1159. Zhang Qiang, Zhao Yingdong, Wang Sheng, et al. 2007. A study on atmospheric thermal boundary layer structure in extremely arid desert and Gobi region on the clear day in summer [J]. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 22 (11): 1150–1159, doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2007.11.007.
- 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 Qiang, Zhang Jie, Qiao Juan, 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, doi:10.1007/s11430-011-4207-0.
- 张强, 张良, 黄菁, 等. 2014. 我国黄土高原地区陆面能量的空间分布规律及其与气候环境的关系 [J]. *中国科学: 地球科学*, 44 (9): 2062–2076. Zhang Qiang, Zhang Liang, Huang Jing, et al. 2014. Spatial distribution of surface energy fluxes over the Loess Plateau in China and its relationship with climate and the environment [J]. *Sci. China: Earth Sci.*, 57 (9): 2135–2147, doi:10.1007/s11430-014-4881-9.
- 赵采玲, 吕世华, 李照国, 等. 2014. 夏季巴丹吉林沙漠陆面热状况对边界层高度影响的模拟实验 [J]. *高原气象*, 33 (6): 1526–1533. Zhao Cailing, Lü Shihua, Li Zhaoguo, et al. 2014. Numerical simulation of influence of land surface thermal condition on Badain Jaran desert atmospheric boundary layer height in summer [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 33 (6): 1526–1533.
- 赵建华, 张强, 王胜. 2011. 西北干旱区对流边界层发展的热力机制模拟研究 [J]. *气象学报*, 69 (6): 1029–1037. Zhao Jianhua, Zhang Qiang, Wang Sheng. 2011. A simulative study of the thermal mechanism for development of the convective boundary layer in the arid zone of Northwest China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 69 (6): 1029–1037, doi:10.11676/qxxb2011.090.
- 周明煜, 徐祥德, 卞林根, 等. 2000. 青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究 [M]. 北京: 气象出版社, 125pp. Zhou Mingyu, Xu Xiangde, Bian Lin'gen, et al. 2000. Observational Analysis and Dynamics Study of the Atmospheric Boundary Layer over the Tibetan Plateau (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 125pp.