

孙绩华, 樊风, 徐安伦, 等. 2015. 西南季风爆发前后大理近地层风场及湍流通量的变化特征 [J]. 气候与环境研究, 20 (4): 369–379. Sun Jihua, Fan Feng, Xu Anlun, et al. 2015. Characteristics of wind field and turbulent flux in the surface layer in Dali before and after the southwestern monsoon burst in 2008 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (4): 369–379, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.14061.

西南季风爆发前后大理近地层风场及湍流通量的变化特征

孙绩华^{1,2} 樊风¹ 徐安伦² 董保举²

¹ 云南省气象科学研究所, 昆明 650034

² 大理国家气候观象台, 大理 671003

摘 要 利用 2008 年 4~5 月大理国家气候观象台近地面层观测系统的梯度、涡动相关通量观测资料, 结合背景场环流分析, 分析了西南季风爆发前后大理近地面层的风速、风向变化特征、风速廓线和垂直切变变化特征以及动量、感热和潜热通量变化特征。结果显示: 西南季风爆发前, 大理近地层风向以东南风为主, 平均风速较大; 风速日变化的双峰型特征较显著, 风速的垂直切变大, 动量通量数值较大且日变化特征较明显。西南季风爆发后, 大理近地层西北风频率显著增加, 平均风速减小; 风速日变化以单峰型为主, 风速垂直切变较前期显著减小, 动量通量数值减小而日变化特征较不显著。西南季风开始前后大理地气热量交换都以潜热为主, 西南季风开始前一句期间, 潜热通量的逐日变化特点是随时间逐渐减少, 感热通量逐渐增大, 二者差值逐渐减小; 西南季风开始后潜热通量的逐日变化为逐渐增大而感热通量逐渐减少, 二者差值逐渐增大。就月平均值的日变化而言, 潜热通量峰值变化不大, 雨季略低于干季的 4 月; 感热通量 4~6 月的月平均逐月降低。其原因既与雨季天气的变化有关, 也与下垫面状况的改变相联系。

关键词 西南季风 近地层风场 湍流通量 大理

文章编号 1006-9585 (2015) 04-0369-11

中图分类号 P421.1

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.14061

Characteristics of Wind Field and Turbulent Flux in the Surface Layer in Dali before and after the Southwestern Monsoon Burst in 2008

SUN Jihua^{1,2}, FAN Feng¹, XU Anlun², and DONG Baoju²

¹ Meteorological Institute of Yunnan Province, Kunming 650034

² Dali National Climate Observatory, Dali 671003

Abstract Observation data of the boundary-layer tower at the Dali National Climate Observatory from April to May 2008 were used to investigate the characteristics of wind speed, direction, profile, vertical shear, momentum flux, and sensible and latent heat flux in the surface layer before and after the southwestern monsoon burst in 2008. The results show that the main wind direction was southeast in April and northwest in May. The diurnal pattern of wind speed before and after the monsoon burst showed two peaks and one peak, respectively. After the monsoon burst, the wind speed, vertical shear, and momentum flux became lower. The latent heat flux was larger than the sensible heat flux throughout the entire period. The latent heat flux decreased (increased) before (after) the monsoon burst. The peak values of diurnal variation of monthly mean latent flux did not change significantly during the period, although the monthly mean values of

收稿日期 2014-03-21; **网络预出版日期** 2014-09-25

资助项目 公益性行业(气象)科研专项 GYHY201006054、GYHY201406001, 国家自然科学基金项目 41165001

作者简介 孙绩华, 男, 1963 年出生, 博士, 正研级高工, 主要从事高原区域大气综合观测及分析。E-mail: sunjh9595@vip.sina.com

sensible heat flux decreased monthly from April to June. The causes of the changed characteristics for wind and fluxes correlated with the weather and land surface conditions.

Keywords Southwestern monsoon, Wind field in the surface layer, Turbulent flux, Dali

1 引言

青藏高原及周边地区大范围的高原热力、动力作用及其地—气物理过程对我国东部和南部、亚洲地区乃至全球的气候变化和灾害性天气的形成均有重大影响。观测及一些理论研究揭示,高原及周边地区是引起中国区域甚至东亚地区洪涝异常的水汽输送关键区,亚洲季风爆发相关的水汽通道、高原周边水汽源、东亚季风水汽源、中低纬海洋潜热源的作用都突出表现在这一区域,即高原与中低纬季风系统成员活动及其能量、水份循环“活跃区”(徐祥德等,2002)。经过青藏高原两次科学试验及其它一些科学试验,在高原核心区东西部、珠穆朗玛峰北部等地区获取了大量的观测资料基础上,国内外大气科学研究者对该地区的环流背景、天气特征及地气相互作用过程等做了较多的研究,对高原核心区的近地面边界层地—气过程的物理结构等有了较深入和全面的认识(徐祥德等,2001)。然而,到目前为止,我们对中国区域乃至东亚地区影响甚大的季风水汽输送“关键区”的地气相互作用过程,还缺乏较为系统的观测和深刻的认识。

气候资料分析表明,在高原东南侧的水汽输送关键区,每年春夏之间随季节的变化,背景环流出现季节性转变,区域内及附近雨季开始。雨季开始前后背景环流的转变导致近地层温度、湿度、风速和风向的变化改变了近地面边界层的大气结构;雨季开始前后大气水汽含量的变化及云量的变化、雨季降雨量的变化所导致的土壤湿度、温度的变化等改变了地表接收太阳辐射能量的大小和能力;另一方面,下垫面状况,特别是植被的变化对近地层大气水汽含量变化、地表接收和反射太阳辐射能量的能力等也具有非常重要的影响。而对于这种由于环流背景的变化、复杂地形条件下局地环流的变化以及下垫面状况的变化对于水汽输送关键区的地—气交换产生的变化特征及可能的物理机理,我们尚缺乏足够的了解和认识。

模拟研究和观测资料分析表明,虽然边界层数值模式可以较好地模拟边界层的温度、湿度廓线结

构(洪雯等,2011),但在大气边界层内,再分析资料存在较大误差(肖霞等,2009)。而不同区域不同季节的观测分析表明,边界层热力和动力结构及通量交换的变化与近地层逆温、局地暴雨等重要天气的发生发展存在密切和复杂联系(朱治林等,2001;王欣等,2003;董佩明和赵思雄,2003;王林等,2011)。因此,受下垫面的动力和热力影响,复杂地形和非均一下垫面地区的边界层特征和微气象条件对大气对流运动以及降水所产生的影响,是近几年来外场试验的主要研究目标之一;如2007年在欧洲阿尔卑斯山区开展的COPS试验(Convective and Orographically-induced Precipitation Study)(张强和胡隐樵,2001;Kalthoff et al.,2011),2005~2010年在青藏高原及邻近地区开展的JICA(Japan International Cooperation Agency)“中日气象灾害合作研究中心”试验等(徐安伦等,2010,2011),以及20世纪末期开展的南海季风试验(闫俊岳等,2000)等。JICA试验利用在高原和邻近地区布设的自动站网、地基GPS水汽探测网、不同下垫面边界层通量观测站、风廓线雷达及加密探空观测,获取了大量的综合观测资料。利用观测资料,中日气象学者对高原地区边界层条件和局地灾害性天气的关系、高原下垫面热力条件对下游区域天气气候的影响等做了初步的分析和研究。由于青藏高原的动力、热力影响在东亚区域天气气候的重要性,近年来在高原主体区域还开展了其他一些外场观测试验。利用高原地区的观测试验资料,马耀明等(2000)、周明煜等(2000)、张强和曹晓彦(2003)、钱泽雨等(2005)、李茂善等(2008)、李跃清等(2009)对高原主体的一些地区的近地层地气物质、能量交换特征、地表微气象条件等开展研究并取得了一些有意义的进展。

大理观象台地处青藏高原东南缘,既受东亚季风的影响,也受南亚季风的影响。大理测点位于最高海拔约4100 m的苍山和平均海拔1972 m的洱海之间的平坦农田中。本文将利用2008年4~5月大理观象台近地层综合观测资料,分析西南季风爆发前后大理近地层风速、风向及近地面层垂直廓线的变化特征,为进一步研究高原东缘地区陆面过程的

变化机理、机制提供依据。

2 观测场地及数据处理

大理国家气候观象台(25°42'N, 100°11'E)位于云南省大理白族自治州大理市古城区行政区域内,处于大理苍山和洱海之间的国家农田保护区内,西距苍山约4 km,东距洱海西岸约2 km,海拔1990.5 m。观象台所在区域地形平坦,处于北亚热带高原季风气候区,年平均气温15.1℃,最热月平均气温20.1℃,最冷月平均气温8.7℃,气温年较差平均为11.4℃,日较差达11.6~13.1℃,年均降雨量为1078.9 mm(均为1971~2000年的气候平均)。受季风气候影响,干湿季分明;冬、春季平均降雨量仅为141.7 mm,夏、秋季平均降雨量为937.2 mm。下垫面为水稻/蚕豆轮作种植区,每年5~10月为水稻种植期,11月至次年4月为蚕豆种植期。

大理观象台边界层观测主要观测近地面层基本气象要素、土壤温度、土壤湿度以及近地面层的湍流通量。20 m 观测塔位于观测场东北区域(见图1),安装了4层(2、4、10、20 m)风速传感器(MET ONE 034A)和温湿度传感器(Vaisala HMP45C-GM),20 m 高度安装风向传感器(MET ONE 034B)。地面观测包括地表温度(红外测温计,

Campbell, IRR-P)、气压和雨量计(Vaisala, PTB220, RG13H 2NN)。辐射观测包括向上、向下太阳辐射(Kipp & ZONEN, CNR1)及向上、向下长波辐射(Kipp & ZONEN, CNR1),辐射仪器在农田下垫面被安装于1.5 m 高度上。同时还测量0~100 cm(4 cm、10 cm、20 cm、60 cm、100 cm)5层土壤温度(Campbell, 107)以及0~100 cm(4 cm、10 cm、20 cm、60 cm、100 cm)5层土壤体积含水量(Campbell, CS616)。采用热流量板测土壤热通量,每个观测站测地表以下4 cm及10 cm处2层的土壤热通量(HFP01)。所有平均场采样频率为2 s取一次,10 min给出一组平均值,平均值存在CR1000 采样器中。湍流观测仪器由超声风速温度仪(CSAT3)、湿度和CO₂脉动仪(Li-Cor, LI7500)组成,测量动量、热量、水汽及CO₂湍流通量。湍流仪器被安装于距地面5.08 m 高度上,采样频率为10 Hz,采用CR3000 采集器采样,用1G PCMCIA 卡储存,20 d 换卡一次。所有仪器采用市电供电,除仪器出现故障、仪器检修,或因天气、供电等原因出现的缺测外,观测几乎一直连续进行。在非生长季农田下垫面无作物,地表为裸土覆盖;生长季主要作物分别为蚕豆和水稻,蚕豆植株最高可达1.0 m 左右,水稻植株最高可达0.8 m 左右(观测项目和设备等详见表1)。



图1 大理观象台边界层观测塔

Fig. 1 Boundary layer observation tower at Dali Meteorological Observatory

表 1 大理观象台边界层塔观测项目表

Table 1 Observation items and devices from boundary layer tower at Dali Meteorological Observatory

观测项目	仪器	观测次数	位置 (高度)
温度	VAISALA HMP45C-GM	1 组/10 min	塔上 2、4、10、20 m
湿度			
风向	VAISALA MET ONE 034B		塔上 2、4、10、20 m
风速	VAISALA MET ONE 034B		铁塔西面约 2 m、高 1.5 m 处
红外地表温度	Campbell, IRR-P		
四成分辐射 (向上、向下) (长波、短波)	Kipp&Zonen,CNR1		铁塔西面约 2 m、高 1.5 m 处
土壤温度	Campbell 107		地表下 4、10、20、60、100 cm
土壤湿度	Campbell CS616		地表下 4、10、20、60、100 cm
土壤热通量	HFP01		地表下 4、10、20 cm
气压	VAISALA, PTB220		采集器箱内
雨量	VAISALA, RG13H 2NN		铁塔南面约 3 m 处
超声风、温 (湍流通量)	CSAT3	10 组/s	塔上 5.08 m 处
CO ₂ /H ₂ O 脉动	Li-Cor,LI7500	10 组/s	

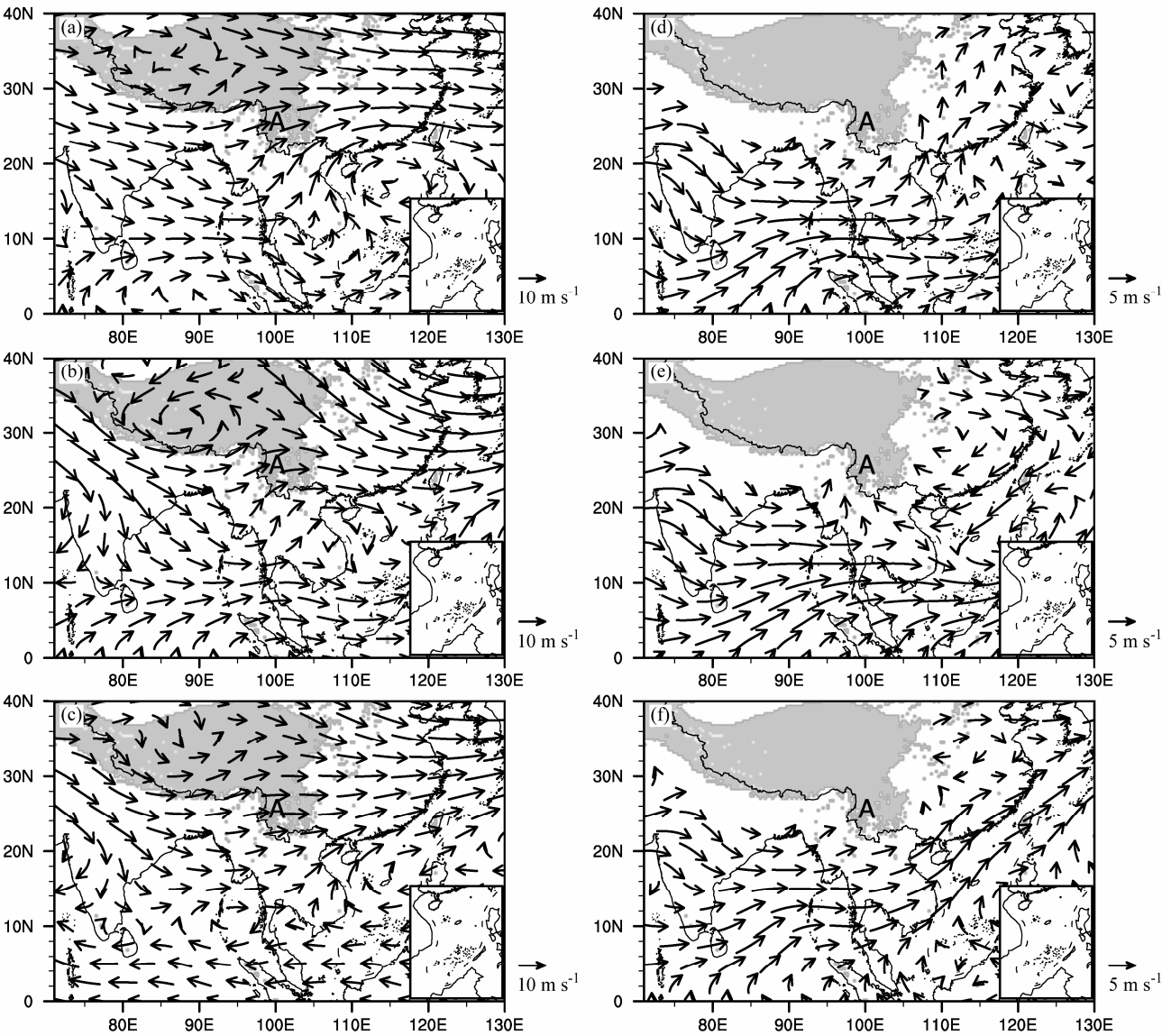


图 2 2008 年 5 月 (a、d) 上旬、(b、e) 中旬、(c、f) 下旬东亚 500 hPa (左列) 和 850 hPa (右列) 风场

Fig. 2 Mean wind fields at 500 hPa (left panel) and 850 hPa (right panel) for the (a, d) first ten days, (b, e) middle ten days, and (c, f) last ten days of May 2008

观测资料在进行分析以前, 先进行资料质量控制, 去掉不合理或因仪器出现故障, 或天气等原因产生的野点。平均场每个样本取样时间长度均为 30 min, 湍流场及辐射资料每个样本取样时间长度均为 30 min, 湍流 10 Hz 原始资料采用 Edire 软件来进行后处理。本文分析的湍流动量通量结果由涡动相关测量系统测得。

3 大气环流背景

已有研究表明, 2008 年夏季风爆发偏早、偏强, 而高原地区雨季开始时间与季风爆发时间基本对应(李菲和段安民, 2011)。大理地区 2008 年雨季自 5 月中旬开始。由图 2 可见, 5 月上旬在南中国海附近存在一个反气旋环流, 中南半岛北部到云南东南部及广西大部地区为其外围的偏西南气流控制。在 30°N 以北, 100°E 以东的东亚中高纬地区有较强的西北气流, 30°N 以南到 25°N, 100°E 以东地区以较强偏西气流为主。孟加拉湾东北部沿海区域有一低槽, 槽前西南气流和南海反气旋外围的西南气流在中南半岛北部到我国西南地区东南部汇合形成了范围较大的西南气流区, 而孟加拉湾中部到南部基本为平直西风气流控制。进入中旬后, 500 hPa 环流变化明显, 随着东亚中高纬地区强西北气流南下, 西北气流南移到 (25°N, 100°E) 以东区域, 南海附近的反气旋环流急剧减弱, 而孟加拉湾东北部低槽仍然存在, 槽前西南气流仍控制了中南半岛西北部到云南西部至西南部附近。同时在青藏高原地区出现了明显的气旋性环流, 其南部的西南

气流和孟加拉湾东北部低槽前的西南气流叠加, 控制了青藏高原南部到中南半岛西北部(包含云南西部到西南部地区)的广大地区, 大理即在此范围内。5 月下旬低纬地区环流变化明显, 随着赤道辐合带的北抬, 10°N 以南区域大部为偏东气流控制, 与上中旬相比完全转向。孟加拉湾北部低槽减弱明显, 云南大部地区基本以偏西气流为主。对应应在 850 hPa 层上(图 2d-2f), 5 月上旬孟加拉湾北部低槽较弱, 南海附近高压外围的强西南气流主要控制了南海北部到我国广东、广西沿海地区。云南大部地区基本为弱的偏西气流控制。进入中旬, 南海地区出现气旋性环流, 配合 500 hPa 环流场, 以湖南为中心我国南方地区为反气旋性的冷高压控制。青藏高原南侧上空和南海低压之间在大陆南方反气旋后部共同形成了强偏南气流通道, 而这股气流汇合了来自孟加拉湾和南海的充沛水汽并在云南西部地区有明显辐合, 为大理雨季的开始提供了丰富的水汽来源。5 月下旬后, 随着 10°N 附近的强西风气流北抬到 15°N 一线, 原在南海地区的低压环流减弱消失, 南海到云南及青藏高原南侧的水汽来源也随之消失。但随着高层环流的季节性变化, 高原南侧到孟加拉湾北部的低槽有所加强, 槽前的西南气流为孟加拉湾水汽向我国大陆包括云南地区的输送创造了良好的环流背景。

综上所述, 2008 年 5 月中旬随着 500 hPa 和 850 hPa 环流的调整, 西南季风爆发, 孟加拉湾东北部低槽槽前西南气流和来自南海的偏南气流共同为大理雨季的开始提供了丰沛的水汽源, 而中高纬冷空气的加强南下, 是当地雨季开始的触发机

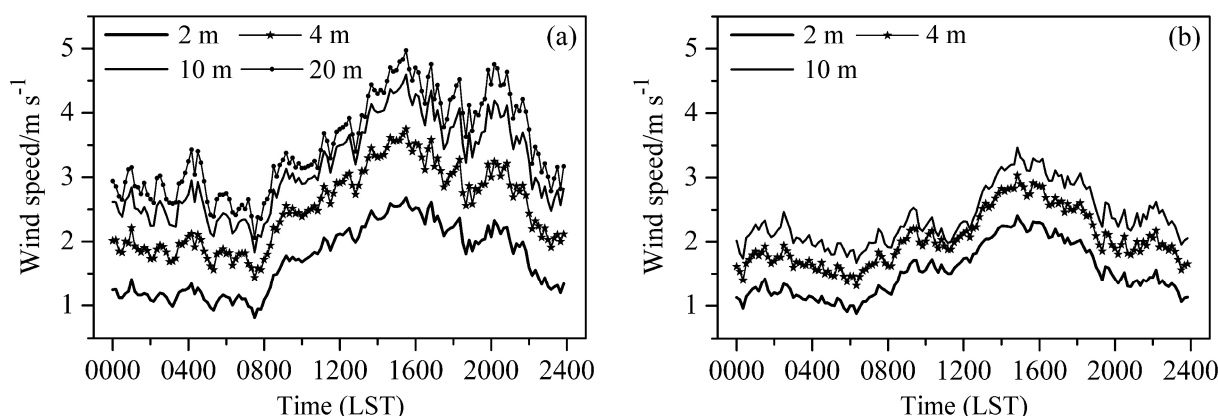


图3 2008年(a)4月、(b)5月大理各层风速月平均的日变化

Fig. 3 Mean diurnal variations of wind speeds at different heights at Dali Meteorological Observatory in (a) Apr and (b) May 2008

制。而随着西南季风爆发, 当地雨季开始。

4 结果和讨论

4.1 近地层风速、风向变化特征

图 3 给出了大理 2008 年 4 月和 5 月的观测塔各层风速月平均的日变化 (5 月 20 m 高度风速缺失)。从风速最大值看, 4~5 月大理风速随时间逐

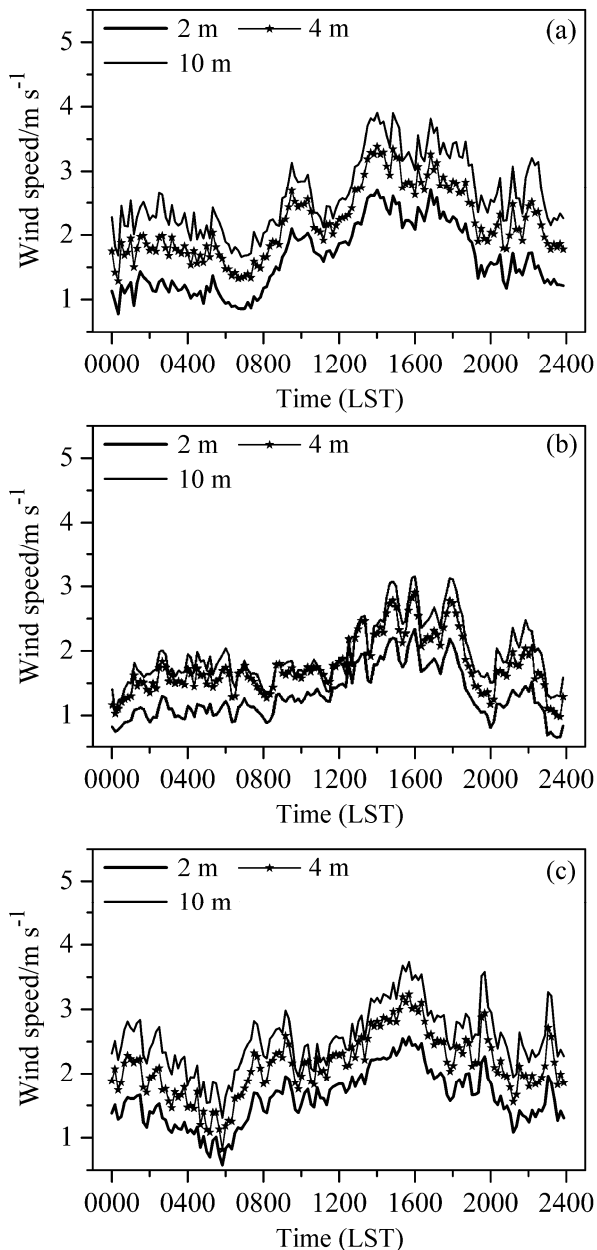


图 4 2008 年 5 月 (a) 上旬、(b) 中旬、(c) 下旬大理各层风速平均的日变化

Fig. 4 Mean diurnal variations of wind speeds in (a) first ten days, (b) middle ten days, and (c) last ten days of May 2008 at Dali Meteorological Observatory

渐减小, 以 4 m 高度为例, 月平均的日最大风速从 4 月的接近 4 m/s 到 5 月的 3 m/s。从风速日变化看, 西南季风爆发前的 4 月, 风速在 14:00 (北京时间, 下同) 至 16:00 和 20:00 至 22:00 出现两个峰值区, 这种特征在 10 m、20 m 高度上更明显。最小风速时段大致在日出前后的 07:00 至 08:00 左右。5 月的小风时段出现时间则提前到 06:00 至 07:00。而 5 月的较大风速峰值出现的时间仍在 14:00 至 16:00 左右, 并且 20:00 至 22:00 不再出现相对大风区。2~4 m 高度处, 4~5 月平均风速日变化的另一特点是两层间风速切变值随时间增加有逐渐减小的趋势。

与高原核心区的 3 站相比, 大理站风速日变化的规律也呈现一高一低的特点, 且其峰值和最小值出现的时刻随季节的变化特点与昌都站的最为接近, 比西部的改则站要早 (徐祥德等, 2001), 与半干旱区的吉林通榆站相比, 大理风速峰值出现时刻要晚 2~3 h (刘辉志等, 2006)。风速月平均的日变化峰值出现时刻由西向东逐渐提前的变化特征和日出时间在地域上的差别对应, 这种变化的原因与日出后近地层对流交换加强导致的近地层风速变化有关。

从风速变化 (如图 4) 看, 2 m、4 m、10 m 风速均是上旬最大, 下旬次之, 中旬最小。从风速变化的时间分布看, 5 月上旬和下旬在日出以后都有一个风速较快增加的过程, 而中旬的风速增加约在中午以后才出现。三旬的日变化风速出现的峰值时间差别不大, 大约在 14:00 至 16:00 左右。而从 3 层间风速梯度变化看, 西南季风爆发前的上旬最强, 下旬次之, 中旬最弱。

大理 2008 年西南季风爆发前后 4 月、5 月的月风向频率分布见图 5a 和 5b。由图可见, 在季风爆发期间, 大理雨季开始前后的风向变化显著, 4 月基本以南风到东南风为主, 类似于当地冬半年的风向特征。5 月大理风向出现较大变化, 南风出现的频率减少而西北风出现的频率增加, 与大理多年平均的夏半年风向变化规律接近。由于大理站其西部为海拔最高达 4100 m 的苍山, 东部临近洱海湖面, 这种风向季节性的变化和西南季风爆发前后的高层环流转变有关, 和大理特殊地形特征也有联系。

为分析西南季风开始前后大理风向转变的细致特征, 本文给出了 5 月上、中、下 3 旬大理测站的旬风向频率分布 (见图 6)。结果显示, 5 月上旬大理虽然出现了一定比例的西北风, 但总体来说,

东南风仍是大理上旬的主导风向；中旬风向分布转为以西北风为主，东南风的比例显著减小，说明伴随中旬西南季风的爆发，大理出现西北风的频率比季风爆发前要增加许多。下旬风向则与上旬风向较为接近。

4.2 近地层风速廓线变化特征

图 7a、7b 分别为大理 2008 年 4 月和 5 月月平均近地面层各时次风速垂直廓线。虽然 4 月和 5 月

最大风速出现的时刻都为 16:00 前后，但西南季风爆发前的 4 月近地层风速比季风爆发后的 5 月要大，而风速随高度增加的垂直切变在 4 月也明显大于 5 月。

由图 8 可见，上旬风速大于中旬和下旬，最大风速出现时次为 14:00，风速最小时次出现在 06:00，风速随高度增加。5 月中旬风速有所减小，最大风速出现时次为 16:00，最小风速出现时次在 20:00，

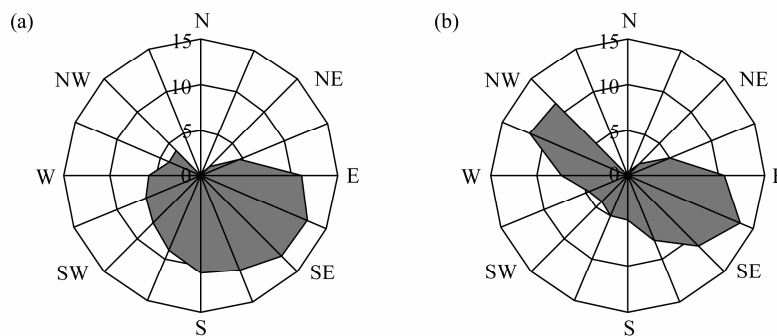


图 5 2008 年 (a) 4 月和 (b) 5 月大理风向频率分布
Fig. 5 Frequency distributions of wind directions in (a) Apr and (b) May 2008 at Dali Meteorological Observatory

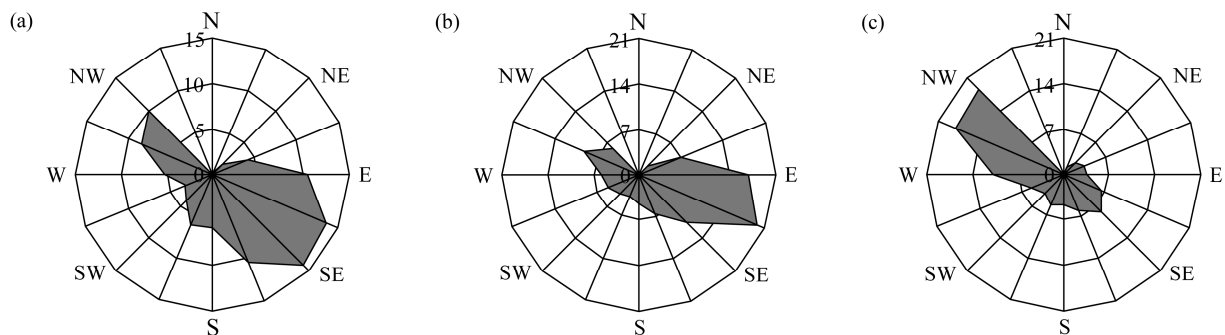


图 6 2008 年 5 月 (a) 上旬、(b) 中旬、(c) 下旬大理风向频率分布
Fig. 6 Frequency distributions of wind directions in (a) first ten days, (b) middle ten days, and (c) last ten days of May 2008 at Dali Meteorological Observatory

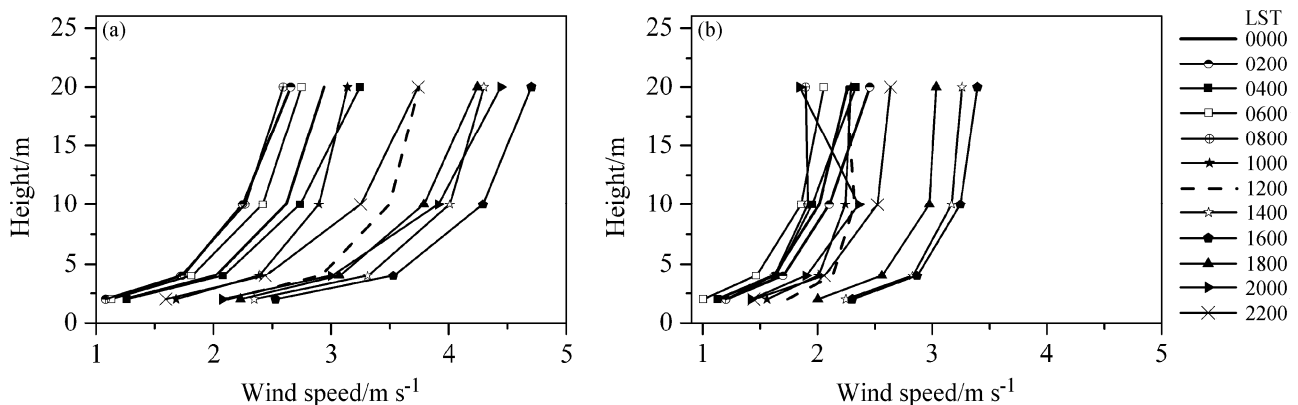


图 7 2008 年 (a) 4 月、(b) 5 月大理月平均风速廓线
Fig. 7 Mean wind profiles in (a) Apr and (b) May 2008 at Dali Meteorological Observatory

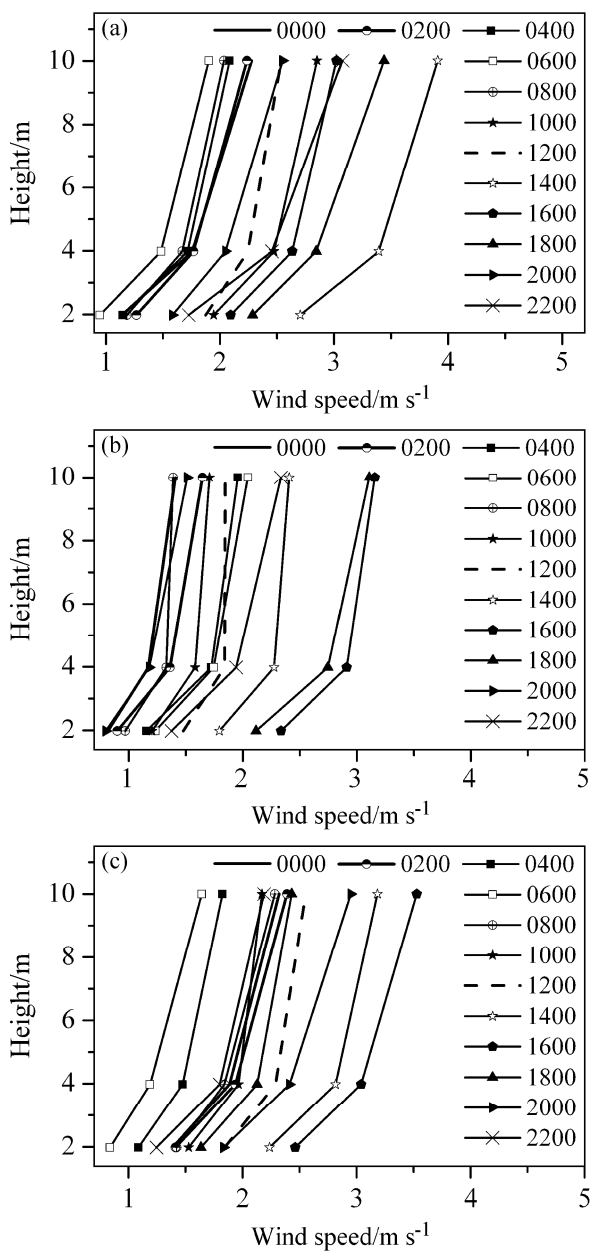


图8 2008年5月(a)上旬、(b)中旬、(c)下旬大理旬平均风速廓线

Fig. 8 Mean wind speed profiles in (a) first ten days, (b) middle ten days, and (c) last ten days of May 2008 at Dali Meteorological Observatory

风速随高度增加的梯度显著减弱,在4~10 m层之间这种减弱的趋势较上旬更明显;下旬风速较中旬略有增加,最大风速出现时次为16:00,最小风速出现时次在06:00,风速随高度增加的梯度比中旬有所加强,但强度不如上旬。

4.3 近地层湍流通量变化特征

近地层湍流动量通量(切应力)是表征陆地与大气之间相互作用强弱的一个重要参量。本文利用

2008年4~5月在大理农田下垫面进行的湍流通量观测数据,给出了大理4月、5月各月平均的日变化(图9a)和5月上、中、下三旬各旬平均的日变化(图9b)。

大理站农业气象观测数据显示,4月1日至5月1日下垫面为所种植蚕豆从鼓粒到收割期。收割前蚕豆植株高约60 cm,变化不大,而收割后至5月24日期间,下垫面基本为裸土,5月24日后水稻移栽,下垫面主要为水稻稀疏植株构成,高度大致在15~20 cm左右。因此,观测期间下垫面的较复杂变化,也是影响地-气间通量交换的一个重要因素。

由图9a可见,在西南季风爆发前后的4月、5月月均动量通量日变化特征都较为明显;夜间小而日间大,最大值出现在14:00至16:00左右,最小值出现在日出前后(06:00至08:00)。但与季风爆发前的4月相比,5月的月均动量通量值显著减小,并且在日间减小得更为明显一些,导致了季风爆发后5月平均的动量通量日变化特征较4月有明显减弱。从5月各旬平均情况(图9b)看,上旬动量通量的日变化特征较其他两旬显著,中旬其日变化特征最不显著,并且中旬动量通量的数值也较其他两旬小。

图10给出了4月1日至5月31日大理潜热、感热的逐日变化。由图10可见,大理的感热、潜热通量日变化特征显著,平均后潜热通量一直大于感热通量值的特征更明显(图略),说明西南季风雨季开始前后大理潜热通量总体大于感热通量,地气交换以潜热为主。但二者的幅度和数值在西南季风雨季开始前后均有变化,4月月平均潜热通量日最大值为 393.18 W/m^2 ,5月和6月分别是 376.76 W/m^2 、 384.51 W/m^2 ,就月平均的日变化而言,潜热通量峰值变化不大;感热通量4~6月的逐月平均的日峰值分别为 186.33 W/m^2 、 152.33 W/m^2 、 94.77 W/m^2 ,表明感热通量由雨季前向雨季开始后具有显著下降的趋势,其直接原因应该是雨季开始后天气变化和下垫面变化等因素共同作用的结果。

5 结论

利用大理边界层梯度观测和通量观测资料,本文主要针对2008年西南季风爆发前后,对应大理的雨季开始前后的4月和5月,从月平均及5月各

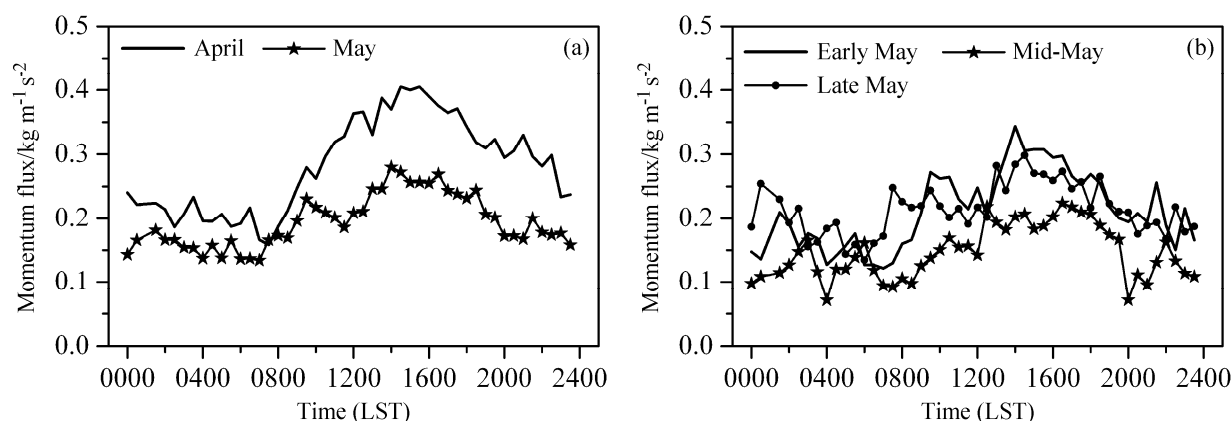


图9 2008年(a)4月和5月月平均动量通量日变化和(b)5月旬平均的动量通量日变化

Fig. 9 Diurnal variations of mean momentum fluxes for (a) Apr and May and (b) each ten days in May 2008 at Dali Meteorological Observatory

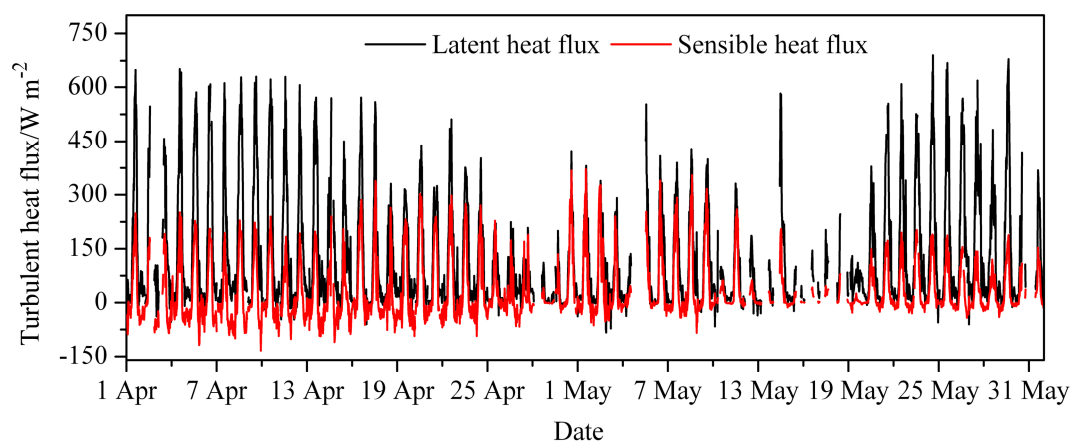


图10 2008年4月1日至5月31日大理潜热通量、感热通量逐日变化

Fig. 10 Daily variations of latent and sensible heat fluxes from 1 Apr to 31 May 2008 at Dali Meteorological Observatory

旬平均的角度, 讨论了西南季风爆发前后大理近地层风向、风速和动量通量的日变化规律, 并与青藏高原核心区近地层的近地层风向、风速变化特征进行了比较, 发现:

(1) 西南季风爆发前大理近地面层风速较大, 5月中旬后逐渐减小。风速日变化曲线由双峰型转为单峰型, 风速的垂直切变从雨季前到雨季开始呈现逐渐减小的趋势; 旬平均风速5月上旬最大, 下旬次之, 雨季开始的中旬期间风速最小, 风速垂直切变在中旬最小, 日最大风速出现时刻较高原中西部的改则、当雄早, 和高原东部的昌都接近, 较我国东北部吉林通榆晚。

(2) 西南季风爆发前大理4月以南风到东南风为主, 5月大理风向出现较大变化, 南风出现的频率减少而西北风出现的频率增加; 5月上旬东南风是主导风向, 中旬风向分布转为以西北风为主, 东

南风的比例有显著减小, 下旬风向与上旬风向分布接近。大理测站雨季开始前后风向的变化与背景环流的转变有关, 也与当地特殊地形条件, 苍山山势和洱海形状为西北—东南走向有关。

(3) 季风雨季开始前后大理地气热量交换都以潜热为主, 雨季开始前旬期间, 潜热通量的逐日变化特点是随时间逐渐减少, 感热通量逐渐增大, 二者差值逐渐减小; 雨季开始后潜热通量的逐日变化为逐渐增大而感热通量逐渐减少, 二者差值逐渐增大。大理4月潜热通量月平均日最大值为393.18 W/m², 5、6月分别是376.76 W/m²、384.51 W/m², 就月平均的日变化而言, 潜热通量峰值变化不大, 雨季略低于干季的4月; 感热通量4~6月的月平均峰值分别为186.33 W/m²、152.33 W/m²、94.77 W/m², 逐月降低。其原因既与雨季天气的变化有关, 也与下垫面状况的改变相联系。

(4) 西南季风爆发前后大理近地层动量通量的日变化特征均较为明显,但随着西南季风雨季的出现,动量通量的数值减小,其日变化特征减弱。

参考文献 (References)

- 董佩明, 赵思雄. 2003. 边界层过程对“98·7”长江流域暴雨预报影响的数值试验研究 [J]. 气候与环境研究, 8 (2): 230–240. Dong Peiming, Zhao Sixiong. 2003. Numerical experiments of effects of planetary boundary layer processes on prediction of heavy rain in the Yangtze River in July 1998 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (2): 230–240.
- 洪雯, 王毅勇, 聂晓. 2011. 湿地下垫面大气边界层温、湿廓线的数值模拟及影响因素分析 [J]. 气候与环境研究, 16 (4): 494–504. Hong Wen, Wang Yiyong, Nie Xiao. 2011. Numerical simulation of temperature and humidity profiles in atmospheric boundary layer over wetland and analysis of influence factors [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (4): 494–504.
- Kalthoff N, Kohler M, Barthlott C, et al. 2011. The dependence of convection-related parameters on surface and boundary-layer conditions over complex terrain [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 137: 70–80.
- 李菲, 段安民. 2011. 青藏高原夏季季风强弱变化及其对亚洲地区降水和环流的影响——2008 年个例分析 [J]. 大气科学, 35 (4): 694–706. Li Fei, Duan Anmin. 2011. Variation of the Tibetan Plateau summer monsoon and its effect on the rainfall and circulation in Asia—A case study in 2008 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (4): 694–706.
- 李茂善, 马耀明, 孙方林, 等. 2008. 纳木错湖地区近地层微气象特征及地表通量交换分析 [J]. 高原气象, 27 (4): 727–732. Li Maoshan, Ma Yaoming, Sun Fanglin, et al. 2008. Characteristics of micrometeorology and exchange of surface energy in the namco region [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (4): 727–732.
- 李跃清, 刘辉志, 冯健武, 等. 2009. 高山草甸下垫面夏季近地层能量输送及微气象特征 [J]. 大气科学, 33(5): 1003–1014. Li Yueqing, Liu Huizhi, Feng Jianwu, et al. 2009. Characteristics of energy transfer and micrometeorology in the surface layer of the atmosphere in summer over the alpine meadow of the Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (5): 1003–1014.
- 刘辉志, 涂钢, 董文杰, 等. 2006. 半干旱地区地气界面水汽和二氧化碳通量的日变化及季节变化 [J]. 大气科学, 30 (1): 108–118. Liu Huizhi, Tu Gang, Dong Wenjie, et al. 2006. Seasonal and diurnal variations of the exchange of water vapor and CO₂ between the land surface and atmosphere in the semi-arid area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (1): 108–118.
- 马耀明, 塚本修, 吴晓鸣, 等. 2000. 藏北高原草甸下垫面近地层能量输送及微气象特征 [J]. 大气科学, 24 (5): 715–722. Ma Yaoming, Osamu Tsukamoto, Wu Xiaoming, et al. 2000. Characteristics of energy transfer and micrometeorology in the surface layer of the atmosphere above grassy marshland of the Tibetan Plateau area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (5): 715–722.
- 钱泽雨, 胡泽勇, 杜萍, 等. 2005. 青藏高原北麓河地区近地层能量输送与微气象特征 [J]. 高原气象, 24 (1): 43–48. Qian Zeyu, Hu Zeyong, Du Ping, et al. 2005. Energy transfer of near surface layer and micrometeorology characteristics in Bailuhe area of Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24 (1): 43–48.
- 王林, 刘鹏, 林朝晖, 等. 2011. 春季亚洲中东部地表感热通量的变化特征及其与中国夏季降水的关系 [J]. 气候与环境研究, 16 (3): 310–321. Wang Lin, Liu Peng, Lin Zhaohui, et al. 2011. The distribution of surface sensible heat flux in spring over central and eastern Asia and its relationship with summer precipitation in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (3): 310–321.
- 王欣, 卞林根, 逯昌贵. 2003. 北京市秋季城区和郊区大气边界层参数观测分析 [J]. 气候与环境研究, 8 (4): 475–484. Wang Xin, Bian Lingen, Lu Changgui. 2003. A study of characteristic parameters of atmosphere boundary layer over Beijing in urban and suburban area in autumn [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (4): 475–484.
- 肖霞, 郭振海, 张文煜, 等. 2009. NCAR 分析资料在大气边界层内误差的初步分析 [J]. 气候与环境研究, 14 (5): 475–483. Xiao Xia, Guo Zhenhai, Zhang Wenyu, et al. 2009. Preliminary error analysis of the NCAR analysis datasets in the atmospheric boundary layer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (5): 475–483.
- 徐安伦, 董保举, 刘劲松, 等. 2010. 洱海湖滨大气边界层结构及特征分析 [J]. 高原气象, 29 (3): 637–644. Xu Anlun, Dong Baoju, Liu Jinsong, et al. 2010. Structure and characteristic of the atmospheric boundary layer in Erhai lakeside region of Dali [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29 (3): 637–644.
- 徐安伦, 杨艳军, 孙绩华, 等. 2011. 大理地区晚霜冻灾害前后大气边界层特征分析 [J]. 气象科技, 39 (4): 513–519. Xu Anlun, Yang Yanjun, Sun Jihua, et al. 2011. Case study of pbl characteristics before and after late frost in Dali [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 39 (4): 513–519.
- 徐祥德, 周明煜, 陈家宜, 等. 2001. 青藏高原地一气过程动力热力结构、综合物理图象 [J]. 中国科学 (D 辑), 31 (5): 428–440. Xu Xiangde, Zhou Mingyu, Chen Jiayi, et al. 2002. A comprehensive physical pattern of land-air dynamic and thermal structure on the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Science in China (Ser. D), 45 (7): 577–594.
- 徐祥德, 陶诗言, 王继志, 等. 2002. 青藏高原—季风水汽输送“大三角扇形”影响域特征与中国区域旱涝异常的关系 [J]. 气象学报, 60 (3): 257–266. Xu Xiangde, Tao Shiyan, Wang Jizhi, et al. 2002. The relationship between water vapor transport features of Tibetan Plateau—monsoon “large triangle” affecting region and drought—flood abnormality of China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 60 (3): 257–266.
- 闫俊岳, 姚华栋, 李江龙, 等. 2000. 1998 年南海季风爆发期间近海面层大气湍流结构和通量输送的观测研究 [J]. 气候与环境研究, 5 (4): 447–458. Yan Junyue, Yao Huadong, Li Jianglong, et al. 2000. Characteristics of turbulence structure and flux transfer on the sea surface during the onset of SCS monsoon in 1998 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 5 (4): 447–458.
- 张强, 胡隐樵. 2001. 大气边界层物理学的研究进展和面临的科学问题 [J]. 地球科学进展, 16 (4): 526–532. Zhang Qiang, Hu Yinqiao. 2001. Scientific problems and advance of atmospheric boundary layer physics

[J]. Advance in Earth Sciences, 16 (4): 526–532.

张强, 曹晓彦. 2003. 敦煌地区荒漠戈壁地表热量和辐射平衡特征的研究 [J]. 大气科学, 27 (2): 245–254. Zhang Qiang, Cao Xiaoyan. 2003.

The influence of synoptic conditions on the averaged surface heat and radiation budget energy over desert or gobi [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (2): 245–254.

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, 1–25. Zhou Mingyu, Xu Xiangde,

Bian Lingen, et al. 2000. Observational Analysis and Dynamic Study of Atmospheric Boundary Layer on Tibetan Plateau [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1–25.

朱治林, 孙晓敏, 张仁华. 2001. 淮河流域典型地面水热通量的观测分析 [J]. 气候与环境研究, 6 (2): 214–220. Zhu Zhilin, Sun Xiaomin, Zhang Renhua. 2001. The observation and analysis of sensible and latent heat fluxes of typical surface in Huaihe River basin [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 6 (2): 214–220.