

基于点苍山-洱海剖面观测系统对青藏高原东南缘气象要素垂直变化的研究

董保举

(大理国家气候观象台, 大理 671003)

摘要: 利用在青藏高原东南缘云南大理点苍山-洱海间不同海拔高度设立的自动气象观测站资料, 分析了2012年1月1日—2014年12月31日的风向、风速、气温、相对湿度和气压等气象要素的立体变化特征, 得出: 1) 不同海拔高度风速日变化均呈单峰型分布, 海拔高度及地形对风速影响较大, 海拔2640.0 m位于东西风局地环流高度位置。海拔1990.5~2640.0 m都存在东西风、南北风转化的日变化。2) 气温日变化是单峰型分布, 最小值出现在日出后, 最大值出现在午后至日落前。3) 相对湿度日变化是单峰型分布, 海拔3520.0 m及以上的相对湿度最大值出现在22:00, 最小值出现在11:00, 而海拔1975.4~2640.0 m最大值出现在07:00-08:00, 最小值出在15:00-17:00。4) 气压日变化为双峰双谷型, 第一个峰值出现在中午前, 第二个峰值出现在午夜; 第一个谷值出现在日出前, 第二个谷值出现在日落。探讨了云南大理点苍山-洱海不同海拔高度气象要素日变化特殊分布是由于地形环境、水陆分布以及太阳辐射分布差异造成的, 为今后研究高原复杂下垫面的大气结构、地气交换及局地环流时空变化特征提供重要依据。

关键词: 日变化, 气象要素, 云南大理, 青藏高原

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.05.002

A Study of Meteorological Element Daily Variation with Elevation in Yunnan Dali Region, the Southeastern Margin of Tibetan Plateau

Dong Baoju

(Dali National Climate Observatory, Dali 671003)

Abstract: Based on observational data at 6 automatic meteorological stations which were set up between Cangshan Mountains and Erhai Lake area in the southeastern margin of Tibetan Plateau, three dimensional variation characteristics of wind speed, wind direction, air temperature, relative humidity and atmospheric pressure were analyzed for the period from January 2012 to December 2014. The results show as follows: 1) The diurnal variation of wind speed at different elevations displayed as one peak, and it is influenced greatly by The altitude and terrain. The local of easterly and westerly wind cycle appears under 2640.0 m above sea level. There are diurnal variations of east-west and north-south wind components between 1990.5 m and 2640.0 m above sea level. 2) The diurnal variation of air temperature showed single valley with the minimum value before sunrise, and single peak with the maximum value in afternoon and before sunset. 3) The diurnal variation of relative humidity showed one peak with the maximum around 22:00 and one valley with the minimum around 11:00 at higher than 3520.0 m above sea level, while one peak with the maximum between 07:00 and 08:00 and one valley with the minimum at 15:00 to 17:00 between 1975.4 m and 2640.0 m above sea level. 4) The diurnal variation of atmospheric pressure showed double-peak with its first and second peak values before noon and midnight respectively, while double-valleys with its first and second valley values before sunrise and sunset respectively. The causes of diurnal variation of meteorological elements were related to terrain environment, land and lake distribution, solar radiation and so forth. These provide important basic knowledge on the atmospheric structure, the land-atmosphere exchange, and the local atmospheric circulation's variation around the Tibetan Plateau.

Keywords: diurnal variation, meteorological elements, Yunnan Dali, Tibetan Plateau

收稿日期: 2017年3月13日; 修回日期: 2017年8月14日
作者: 董保举(1979—), Email: dongbaoju@163.com
资助信息: 云南省气象局科技项目(YB201210)

0 引言

青藏高原东西长约3000 km, 南北宽约1500 km, 平均海拔高度在4 km以上, 高大的地形达到对流层中下部, 被称为“世界屋脊”和“地球第三极”, 气象

工作者对青藏高原进行研究表明：高原的热力和动力作用对中国东部地区的天气和气候、亚洲季风，乃至全球大气环流和天气气候都有重要影响^[1-2]。近几年来，为认识青藏高原及珠峰大气结构和地气物理交换过程，在青藏高原以及珠峰地区相继开展了许多重要的大气科学试验，而且在青藏高原及珠峰复杂地形中建立了许多大气综合观测站，积累了大量宝贵的第一手观测资料，其中利用边界层铁塔资料、地面自动气象站观测资料和风廓线雷达资料研究边界层结构、地气物理交换过程及垂直高度上风场的变化特征等，取得了丰硕的科研成果^[3-24]。如周明煜等^[3]研究了青藏高原大气边界层结构特征：温度、湿度垂直变化与平原接近，水平流作用对边界层具有重要作用，它会影响垂直分布及时间变化的特点，高原上的边界层高度显著超过平原和海面上边界层高度，可达2200 m。邹捍等^[12]发现珠峰北坡绒布河谷地区由于陡峭地形和复杂地表状态调整下的辐射加热和冷却过程所驱动，同时伴有大气动力学的影响，导致局地大气环流系统具有很强的特殊性，主要表现为长持续时间（上午直至后半夜）和强风速（12 m/s以上）的沿河谷下气流，以及上午至后半夜的近地上升运动和100 m以上高度中的下沉运动。张志刚等^[13]利用2007年5—6月观测的珠峰北坡近地层气象资料，统计分析了大气温度、地面风向、风速等气象要素在不同海拔高度的日平均分布特征，进一步加深对珠峰北坡天气规律的认识，填补珠峰海拔7000 m以上连续观测气象资料及研究的空白。何立富等^[17]利用自动气象站和探空观测资料，对珠峰地区地面和高空大气温度、气压、湿度和风向、风速等气象要素日平均变化和垂直分布特征进行了深入分析，为珠峰地区登山气象服务和进一步研究珠峰大气状况提供科学依据。王宇^[25]利用常规观测气象资料，对云南各地山区气候进行了全面、系统的分析研究，深入地阐述了各山区各种气象要素的垂直分布特征及山区可利用的气候资源。

云南大理位于云南省的西部（98°52′—101°03′E，24°41′—26°42′N），地处云贵高原与横断山脉南端结合部^[26]，青藏高原的东南边缘地区，金沙江、元江和澜沧江三大水系分水岭地段，是孟加拉湾西南季风带的迎风区。然而在该地区利用不同海拔高度的地面观测资料进行分析研究的成果较少，本文利用2012—2014年不同海拔高度的地面自动气象站观测资料，统计分析了大气温度、湿度、风向和风速等气象要素的立体变化特征，进一步加深青藏高原东南缘云南大理局地天气规律的认识，为今后研究高原典型区域的大气结构、地气交换及局地环流时空变化特征提供重要依据，为数

值模式预报能力的改善提供基础观测数据，为提高高原复杂山地预报准确率提供资料支撑。

1 观测区域概况和资料选取

云南大理国家气候观测台（E站，100.18°E，25.70°N，海拔高度为1990.5 m），其所在地东邻容积约为30.0亿 m³，面积超过250 km²的高原湖泊洱海，西及绵延约50 km、海拔3800 m左右的点苍山山脉，西面的点苍山与东面玉案山山脉（海拔约2400 m）又形成两山对峙的峡谷，山脉和峡谷走向近似南北向，如图1所示。以大理国家气候观测台为基础，沿25.70°N左右做剖面新建5个观测站，如表1所示。资料为2012年1月1日—2014年12月31日。A站海拔较高，冬季结冰，风速和风向存在问题，所以资料分析时不取A站风速和风向数据，资料在使用时剔除明显不合理数据。

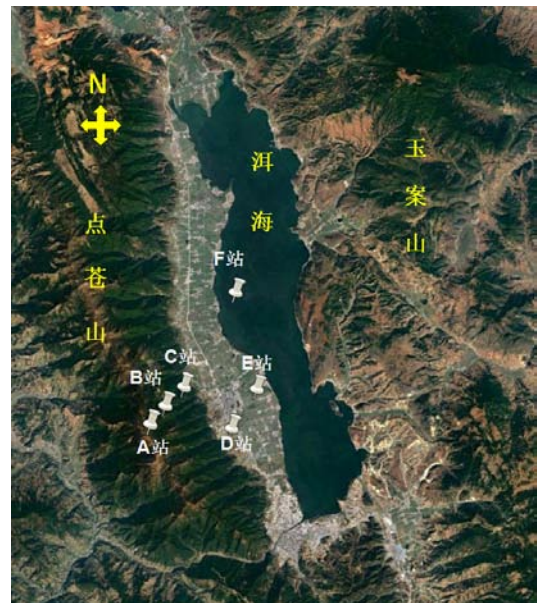


图1 云南大理地形和各自动站位置（引自Google Earth）
Fig. 1 The terrain of Yunnan Dali and the locations of automatic weather stations (quote from Google Earth)

表1 各自动站站点信息

Table 1 The information of automatic weather stations

站名	经度/°E	纬度/°N	海拔/m	备注
A	100.09	25.67	4092.0	点苍山电视台
B	100.10	25.68	3520.0	点苍山杉庵亭
C	100.12	25.70	2640.0	点苍山白雀寺
D	100.16	25.67	2130.0	点苍山阳和
E	100.18	25.70	1990.5	大理国家气候观测台
F	100.14	25.78	1975.4	洱海水面上点

2 结果分析

2.1 风向和风速分布差异

为了便于比较它们在各个方位的大小及相应的

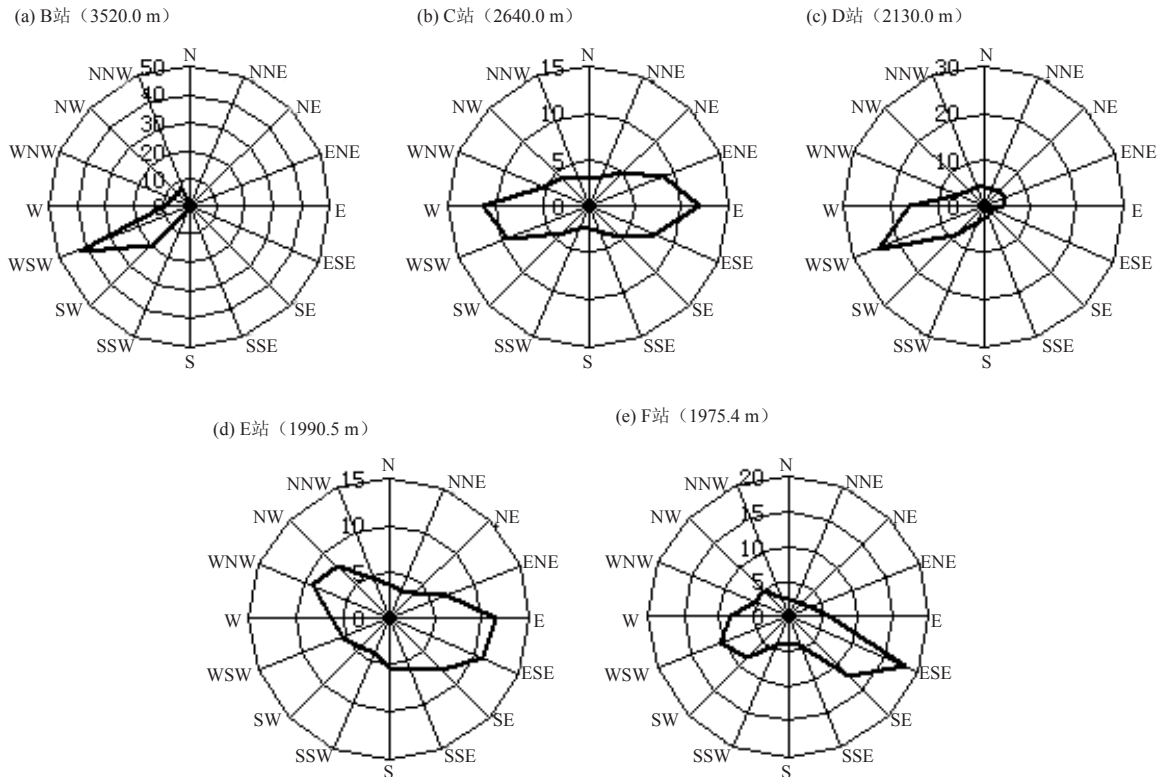


图2 不同高度风向频率分布特征

Fig. 2 The distributing characteristics of wind direction frequency at different elevations

变化,把各站风向的频率都换算成可比的百分数^[27],从图2中可以看出,B站的主导风向为西西南和西南风,分别占到43%和19%,基本上偏西风为主,其主要原因是该站位于近似南北向的点苍山山脉中上部,位于洱海盆地的西边,受高空西风 and 局地峡谷风南风影响;C站的主导风向为西风和东风,分别占到12%和11%,东风和西风基本一致,这与C站所处位置高度有关,C站比洱海盆地高出600 m左右,刚好是局地环流东西风能量交换最高的位置,这与许鲁君等^[28]、董保举等^[29]研究的云南大理点苍山-洱海地区环流高度是一致的;D站的主导风向为西西南和西风,分别占到24%和16%,基本上偏西风为主,其主要原因与B站近似,该站位于近似南北向的点苍山山脉山脚下,位于洱海盆地的西边,受高空西风 and 局地峡谷风南风影响;E站的主导风向为东风和东东南风,分别占到12%和11%,而F站的主导风向为东东南和东南风,分别占到18%和12%,可以得出E站和F站基本是东风和东偏南风,这是因为E站和F站均处在大理盆地中央,E站位于陆地,F站位于洱海水面,二者都受山谷风(湖陆风)和峡谷风影响。

从不同高度测站每小时平均风速的日变化分布可

以看出(图3),5个站风速日变化均呈单峰型分布。B站风速较大,平均风速为5.0 m/s;C站风速最小,平均风速仅为1.6 m/s;D—F站平均风速为2.3~3.0 m/s。其原因是B站处于洱海盆地西边点苍山山脉海拔3520 m的位置,海拔较高、风速较大;C站的海拔高度位于东西风局地环流高度位置^[28-29],所以风速较小;D—F站位于洱海盆地,海拔相对较低,四周都有山阻挡,风速相对较小。

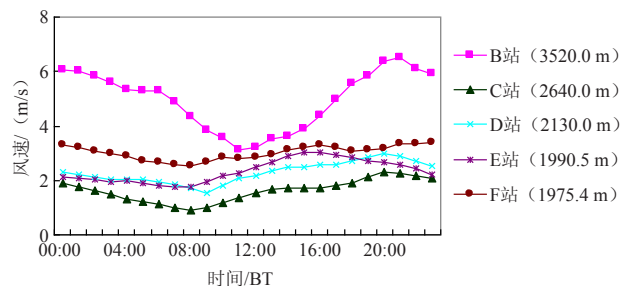


图3 不同高度风速日变化(单位:m/s)

Fig. 3 The diurnal changes of wind speeds at different elevations (unit: m/s)

从风速极值出现的时间来看,B站风速极大值出现在21时,为6.5 m/s,极小值出现在11时,为3.1 m/s;C站风速极大值出现在20时,为2.3 m/s,极小

值出现在08时，为0.9 m/s；D站风速极大值出现在20时，为3.0 m/s，极小值出现在09时，为1.5 m/s；E站风速极大值出现在15时，为3.0 m/s，极小值出现在07时，为1.8 m/s；F站风速极大值出现在23时，为3.4 m/s，极小值出现在08时，为2.5 m/s。总体看来风速都有明显的日变化，其共同特点是，日出前后至中午风速较小，日落后至凌晨风速较大。

2.2 纬向风和经向风日变化

为了进一步分析云南大理点苍山—洱海之间纬向风和经向风的变化规律，将风速进行分解。 u 风（纬向风，或东西风）， v 风（经向风，或南北风）分量按下式求得^[30]，

$$\begin{aligned} u &= |V| \sin(\alpha - 180^\circ) \\ v &= |V| \cos(\alpha - 180^\circ) \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中， $|V|$ 为风速， α 为风向，北风定义为 0° ，东风定义为 90° 。然后对云南大理点苍山—洱海地区的纬向风和经向风进行平均，获得观测期间该地区纬向风和经向风不同海拔高度分布的日变化。

从图4a可以看出，C—F站都存在东西风转换的日变化，其中C、D和E站日变化最明显，F站只有19和20时为西风，其他时段都为东风，日出时东风风速较小，白天风速较大，日落风速较小，之后东风逐渐增大至凌晨。E站从23时至次日07时东风风速接近零，日出后东风逐渐增强，至13时为最大值为1.4 m/s，之

后逐渐减弱，到18时变为西风，西风持续至00时。C站09时开始出现东风，为0.2 m/s，随时间推移东风逐渐增强，至14时东风达到最大值，为1.0 m/s，之后东风逐渐减弱，16时为0.4 m/s，17时变为西风，为0.1 m/s，之后西风逐渐增强，至21时达最大值1.0 m/s，之后西风逐渐减弱，至次日07时为0.1 m/s。C站和D站东西风变化趋势基本一致，只是D站西风较大、C站较小，而东风C站比D站稍大。B站全天为西风，明显的单峰型结构，白天风速较小，日落后风较大，最大值发生在21时，为5.7 m/s，之后风速逐渐减小，最小值为次日11时，为2.8 m/s。

从图4b可以看出，C—E站都存在南北风转换的日变化，其中C站和D站日变化最明显，E站只有11和12时为北风，其他时段都为南风，凌晨至中午风速较小，中午后风速逐渐增大，至18时风速达到最大，为1.0 m/s，之后南风逐渐减小。C站和D站变化趋势基本一致，只是D站的变化幅度比C站大，日出至午后（08—15时）为北风，其他时段为南风。B站和F站全天为南风，存在明显的日变化，但是变化趋势基本相反，B站最小值出现在11时，为0.9 m/s，之后风速逐渐变大，21时达到最大值2.6 m/s，之后风速逐渐变小，最小值出现在日出后；F站的最大值出现在09时，为1.0 m/s，之后风速逐渐减弱，至18时达到最小值0.5 m/s，之后风速缓慢增加，至日出时达到最大值。

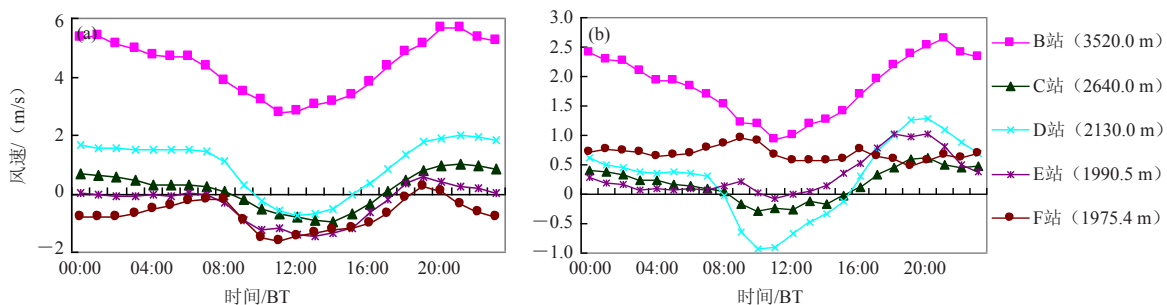


图4 纬向风 (a) 和经向风 (b) 日变化 (单位: m/s)

Fig. 4 The diurnal variation of zonal wind speed (a) and meridional wind speed (b) (unit: m/s)

2.3 气温日变化

不同海拔高度的6个测站气温日变化均呈单峰型分布(图5)，存在明显的日变化，最小值出现在07时(F站除外，最小值出现在08时)，最大值出现时间不一致，A站与F站相同，都是17时，B站为13时，C站和D站为15时，E站为16时。可以看出，除了A站和B站，F站最低气温和最高气温要比其他站晚1~2 h，这是因为F站的下垫面水体的热容量要比陆地大，导致水体上空的气温升高比陆地推后。从日较差来看，A站在点苍山山顶，与盆地地面相差2000 m

左右，由于海拔较高，日变化幅度不大，日较差为 2.6°C ，B站为 5.6°C ，F站为 6.3°C ，C站为 7.1°C ，D站为 10.1°C ，E站为 9.2°C 。6个站气温变化幅度中，F站气温上升比D站和E站慢，而在气温下降阶段D站和E站比F站下降得快，究其原因主要是下垫面不同，F站下垫面为水体，其他站为陆地，水的热容量比陆地的热容量大，所以F站变化较慢。

2.4 相对湿度日变化

不同海拔高度6个测站的相对湿度日变化都是单峰型分布，A站和B站海拔较高，相对湿度较大，为

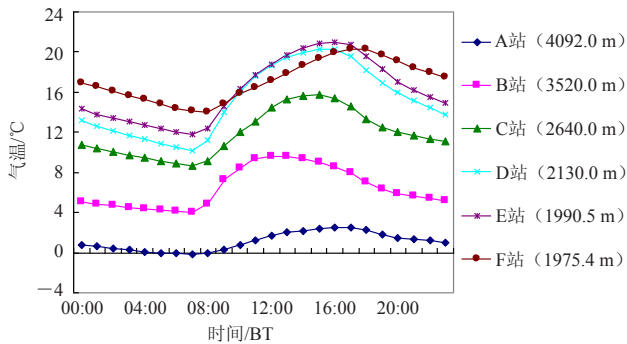


图5 不同高度气温日变化 (单位: °C)
Fig. 5 The diurnal variation of temperature at different elevations (unit: °C)

66.2%~89.9%，最大值（89.9%和77.1%）出现在22时，之后相对湿度逐渐减小，至次日11时出现最小值（81.4%和66.2%），存在日变化但变化幅度不明显；C—F站相对湿度存在明显的日变化，由于海拔较低相对湿度较小，为40.7%~77.8%，在07—08时出现最大值为75.5%、74.6%、77.8%和63.2%，随时间推移，相对湿度逐渐变小，15—17时出现最小值，分别为54.5%、40.7%、41.9%和42.3%，之后相对湿度逐渐增大，在日出时达到最大值。

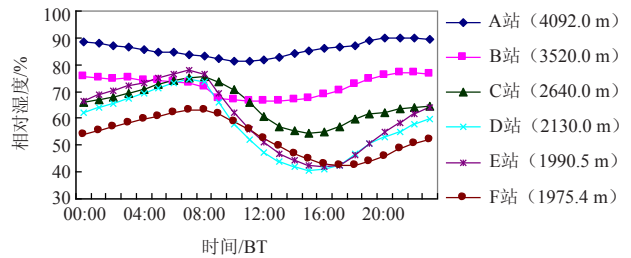


图6 不同高度相对湿度日变化 (单位: %)
Fig.6 The diurnal variation of relative humidity at different elevations (unit: %)

2.5 气压日变化

不同海拔高度6个测站气压日变化为明显的双峰双谷型，A—F站第一个峰值（621.3、667.2、740.8、788.4、802.4和804.0 hPa）出现在11—12时，第二个峰值（620.9、666.6、740.0、787.4、801.3和802.6 hPa）出现在00时；第一个谷值（619.7、655.4、739.0、786.5、800.5和801.9 hPa）出现在05—06时，第二个谷值（619.7、665.1、737.9、784.9、798.6和800.0 hPa）出现在18时，这与叶笃正等^[1]、谢爱红等^[8]的研究结果相一致，凌晨日出前后和中午时分的低谷高峰区与气温有关。气压日变化的另一个低谷高峰区

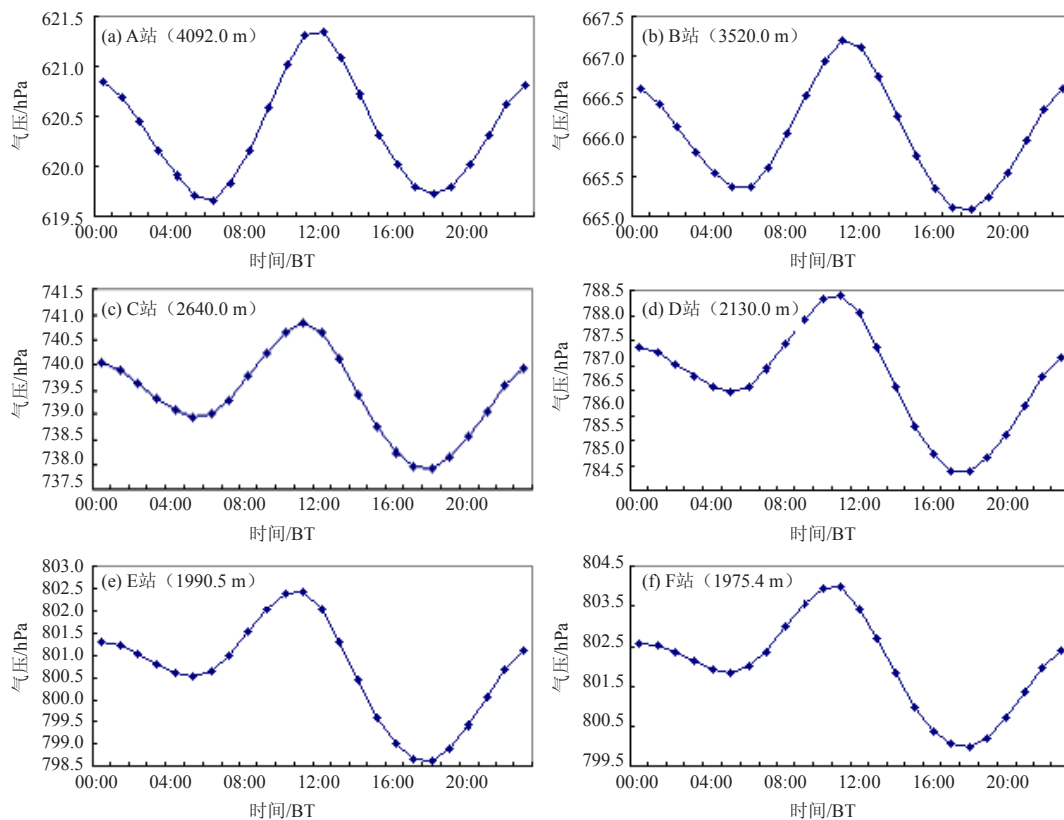


图7 不同高度气压日变化 (单位: hPa)
Fig. 7 The diurnal variation of atmospheric pressure at different elevations (unit: hPa)

的形成,是由于青藏高原周围有一条正变高的最大值带存在,导致其在日落后形成低谷区,子夜时分形成高峰区^[1]。

3 结论

本文通过对2012年1月1日至2014年12月31日青藏高原东南缘云南大理点苍山—洱海间不同海拔高度的气象要素平均值的分析,得到如下结论。

1) B站主要受高空西风和局地峡谷风南风影响,而C—F站受山谷风(湖陆风)和峡谷风影响,存在东西风转化的日变化,日出时风速较小,白天风速较大,日落风速较小。东西风局地环流高度至C站。C—E站均存在南北风转化的日变化,B站和F站全天为南风。

2) 气温日变化均呈单峰型分布,存在明显的日变化,最小值出现在07—08时,最大值出现在午后至日落前。受下垫面性质、水陆分布以及地形加热等因素影响,除了A站和B站外,位于洱海水面的F站最低气温和最高气温要比其他站晚1~2 h。

3) 相对湿度日变化都是单峰型分布,A站和B站海拔较高,相对湿度较大,在66.2%~89.9%,最大值出现在22时,最小值出现在11时;C—F站由于海拔较低,相对湿度较小,在36.6%~77.8%,最大值出现在07—08时,最小值出现在15—17时。

4) 气压日变化呈明显的双峰双谷型分布,日出前出现第一个波谷,中午前后出现第一个波峰,日落出现第二个波谷,子夜时分形成第二个波峰。

参考文献

[1] 叶笃正,高由禧.青藏高原气象学.北京:科学出版社,1979:10-48,153-171.
 [2] 钱正安,焦彦军.青藏高原气象学的研究进展和问题.地球科学进展,1997,12(3):207-216.
 [3] 周明煜,徐祥德,卞林根,等.青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究.北京:气象出版社,2000:57-78.
 [4] 钱泽雨,胡泽勇,杜萍,等.青藏高原北麓河地区近地层能量输送与微气象特征.高原气象,2005,24(1):43-48.
 [5] 马耀明,姚檀栋,王介民.青藏高原能量和水循环试验研究:GAME/Tibet与CAMP/Tibet研究进展.高原气象,2006,25(2):

344-351.
 [6] 李茂善,戴有学,马耀明,等.珠峰地区大气边界层结构及近地层能量交换分析.高原气象,2006,25(5):807-813.
 [7] 徐祥德,陈联寿.青藏高原大气科学试验研究进展.应用气象学报,2006,17(6):756-772.
 [8] 谢爱红,任贾文,秦翔,等.2005年5—7月珠穆朗玛峰北坡海拔6523 m气象要素特征.冰川冻土,2008,28(6):909-917.
 [9] 李茂善,戴有学,马耀明,等.珠峰地区大气边界层结构及近地层能量交换分析.高原气象,2006,25(5):807-812.
 [10] 徐安伦,李建,孙绩华,等.青藏高原东南缘大理地区近地层微气象特征及能量交换分析.高原气象,2013,32(1):9-22.
 [11] 马舒坡,周立波,邹捍.珠峰北坡绒布河谷大气物质交换的观测研究.高原气象,2007,26(6):1224-1230.
 [12] 邹捍,周立波,马舒坡,等.珠穆朗玛峰北坡局地环流日变化的观测研究.高原气象,2007,26(6):1123-1140.
 [13] 张志刚,秦翔,何立富,等.2007年5—6月珠峰北坡不同高度气象要素特征分析.气象,2011,37(8):977-983.
 [14] 杨兴国,秦大河,张廷军,等.珠穆朗玛峰北坡地区气温和湿度变化特征.气象学报,2012,70(4):855-866.
 [15] 杨兴国,群觉,刘宏谊,等.珠穆朗玛峰北坡冰川表面不同季节气象特征分析.干旱气象,2008,26(4):16-21.
 [16] 刘伟刚,张东启,柳景峰,等.喜马拉雅山中段地区气温直递减率变化特征.干旱气象,2013,31(2):240-245.
 [17] 何立富,王遂缠,张志刚.穆朗玛峰地区气象要素特征观测研究.应用气象学报,2012,21(6):641-648.
 [18] 秦翔,杨兴国,李健,等.珠穆朗玛峰北坡地区的气温分布及其垂直梯度分析.高原气象,2013,32(1):1-8.
 [19] 郭建平,薛红喜,马兆岩,等.珠穆朗玛峰地区若干气象要素的垂直特征.高原气象,2013,32(6):1568-1579.
 [20] 李剑东.青藏高原那曲地区风廓线结构的观测研究.北京:中国气象科学研究院,2005:1-41.
 [21] 周立波,邹捍,马舒坡,等.南亚夏季风对珠穆朗玛峰北坡地面风场的影响.高原气象,2007,26(6):1173-1186.
 [22] 邹捍,李鹏,朱金焕,等.HEST2007珠峰北坡风廓线观测研究.高原气象,2007,26(6):1199-1207.
 [23] Zou H, Zhou L, Ma S, et al. Local wind system in the Rongbuk Valley on the northern slope of Mt. Everest. Geophys Res Lett, 2008, 35, doi: 10.1029/2008GL033466.
 [24] 徐海,邹捍,李鹏,等.藏东南林芝机场低层风场垂直结构与变化特征.高原气象,2014,33(2):355-360.
 [25] 王宇.云南山地气候.昆明:云南科技出版社,2006:13-48.
 [26] 大理白族自治州气象局.大理白族自治州气象志.北京:气象出版社,2008:25-29.
 [27] 张景哲,刘继韩.风的污染指数和不同风向的污染几率——城市总体规划中风和大气污染问题新探.环境科学,1986,3(6):15-19.
 [28] 许鲁君,刘辉志,曹杰.2014.大理苍山—洱海局地环流的数值模拟.大气科学,38(6):1198-1210.
 [29] 董保举,张成稳,付志嘉,等.云南大理边界层风垂直变化观测研究.干旱气象,2011,29(2):189-194.
 [30] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.天气学原理和方法.北京:气象出版社,1992:608-609.