文章编号:1006-7639(2011)-02-0189-06

云南大理边界层风垂直变化观测研究

董保举[1,2],张成稳[3],付志嘉[2],杨 澄[2],李 育[2]

(1. 云南大学大气科学学院,云南 昆明 650091; 2. 大理国家气候观象台,云南 大理 671003; 3. 云南省大理州气象局,云南 大理 671000)

摘 要:利用2008年3月云南大理风廓线雷达观测资料,分析其上空局地环流特征。通过对云南大理上空三维风场的分析发现当地受地形影响明显,600 m以下午后至夜晚以西南风为主,出现下沉气流,风速较大,凌晨至中午以东南风为主,风速较小;600 m以上主要是西南和西北风,风速较大。这说明影响该地区的环流高度为600 m,表明该地区低层以山谷风、湖陆风及峡谷的风叠加为主导的环流特征是该地区的局地环流日变化基本特征。云南大理上空气流的逐日变化在600 m以下主要以东南风为主,高空是西北风、西南风交替出现,并且垂直运动以上升气流为主,偏西气流的加强导致垂直运动加强,南风、北风变化与垂直气流关系不是很明显,西风气流的变化对云南大理的垂直运动有重要的影响;云南大理上空在600 m以下风速变化不大,600 m以上风速随高度线性增大,点苍山高度(2 000 m)以下夜间风速大于白天风速,2 000 m以上白天风速大于夜间风速。无论是白天还是夜间100 m和1 000 m高度主导风向都相反,500 m高度能看出白天的东南风转换为夜间西南风。

关键词:云南大理;风廓线雷达;边界层;局地环流

中图分类号:P412.16 **文献标识码**:A

引 言

获取高空风传统的方法主要是通过每天08:00和20:00施放2次探空气球,由于操作复杂成本太高无法获取高时间分辨率的高空资料,同时由于风的影响使气球往外漂移无法获得测站垂直上空的资料。然而风廓线雷达利用多普勒效应[1],可以连续地获得测站上空每几min、几十m层距的高分辨率垂直风廓线资料,可以弥补常规高空风探测中时空密度分布不足的特点。许多学者利用风廓线雷达资料对高空风场、边界层结构及灾害性天气进行了研究[2-15],认为风廓线雷达能提高小尺度监测能力,能提高预报准确率。除此之外它的应用领域还包括航空航天气象保障、大气污染扩散监测等方面。

了解风的垂直变化更能深入了解云南大理山谷盆地局地环流特征,这对当地大风、暴雨、冰雹等局地强对流灾害性天气的预报有更高的时效性和准确性。本文利用云南大理风廓线雷达探测的三维风场资料,分析了云南大理局地环流垂直分布特征,这将有助于对该地区局地环流系统及驱动机制的认识,为进一步研究灾害性天气的物理结构和预报方法提供参考依据。

1 观测方法与资料选取

云南大理风廓线雷达安装在大理国家气候观象台内(100.18°E,22.7°N,海拔高度为1 990 m),其所在地东临容积约为30.0亿m^3、面积250多km^2的高原湖泊洱海,西及绵延50多km、海拔4 000 m左右的点苍山山脉,西面的点苍山与东面的玉案山山脉在大理的南部又形成2山对峙的峡谷(图1)。

云南大理风廓线雷达是日本住友公司生产的,其型号为WPR LQ-7,基本技术性能为:①工作频率1 290 MHz;②最低探测高度50 m;③最大探测高度8 000 m;④高度分辨率:50 m,100 m,150 m,200 m,300 m,600 m(可选);⑤扫描波束数:5(东、南、西、北、中)。

所用资料是2008年"中日气象灾害合作"JICA项目在大理的风廓线探测资料,由于机器故障的原

收稿日期:2010-11-10;**改回日期**:2011-03-05
基金项目:云南省气象局预报员技术开发专项(YB201007)、云南省应用基础研究项目(2008CD178)及"JICA"项目共同资助
作者简介:董保举(1979-),男,在读硕士,主要从事雷达探测与应用研究. Email:dongbaoju@163.com

因只有 2008 年 3 月风廓线雷达数据最完整,其它时段的资料都不全,所以资料分析时选择 2008 年 3 月的数据。风廓线雷达探测期间资料的时间分辨率为 1 min 原始数据,10 min 的平均产品数据输出,最低探测高度 100 m(相对高度,下同),最大探测高度 4 000 m,高度分辨率 100 m。利用该时段 10 min 输出的产品 U 风(东西风)、V 风(南北风)、W 风(垂直风)数据进行计算分析。

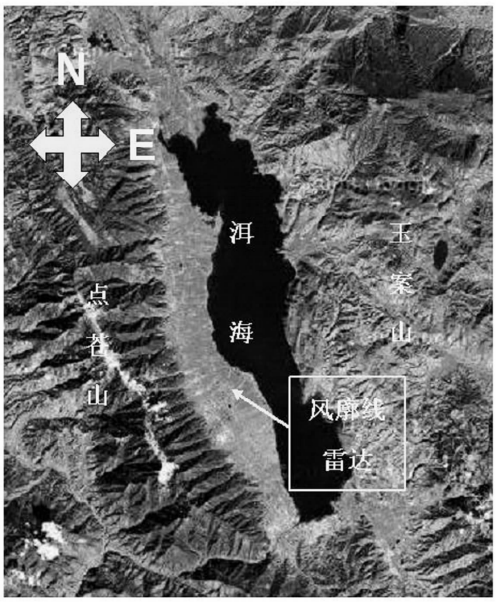

图 1 云南大理地形和风廓线雷达位置图

Fig. 1 The geographic characteristics of Dali and wind profile radar site

2 结果分析

2.1 三维风场平均日变化

为了分析云南大理上空三维风场垂直分布及变化的普遍规律,对风廓线雷达获得的云南大理上空三维风场进行平均,获得观测期间该地区三维风场垂直分布的日变化。

在气象上平均风速一般是指时间平均风速,对某一固定点(x,y,z)以某一时刻为中心,在时间间隔内求平均,即:

$$\bar{u}=\frac{1}{T}\int_{t_0-\frac{1}{2}T}^{t_0+\frac{1}{2}T}u(x,y,z,t)\,\mathrm{d}t \qquad (1)$$

$$\bar{v}=\frac{1}{T}\int_{t_0-\frac{1}{2}T}^{t_0+\frac{1}{2}T}v(x,y,z,t)\,\mathrm{d}t \qquad (2)$$

$$\bar{w}=\frac{1}{T}\int_{t_0-\frac{1}{2}T}^{t_0+\frac{1}{2}T}w(x,y,z,t)\,\mathrm{d}t \qquad (3)$$

利用(1)、(2)、(3)式分别计算 1 h 内风廓线雷达获得的风的东西向、南北向和垂直分量的算数平均,从而得到代表东西方向、南北方向和垂直方向的风速风向。这样的处理方法虽然存在一定的缺陷,在某种情况下也许会人为减少风的绝对速度,但平均值可以描述出平均时段内的主导风向。

图 2a 给出了 2008 年 3 月观测期间东西向风日变化过程,可以看出,在 600 m 以下,东西向风有明显的日变化特征,16:00 ~ 17:00(北京时,下同)由东风转为西风,17:00 ~ 23:00 以西风为主,21:00 左右在 500 m 出现 4.0 m/s 的西风,23:30 由西风转为东风,00:00 ~ 16:00 以东风为主,在 02:00 ~ 07:00 及 14:00 在 300 m 左右出现 2.0 m/s 的东风。在云南大理山谷盆地凌晨到太阳出来之前(00:00 ~ 08:00)边界层结比较稳定,地面吹谷风及陆风(西风)[16],而风廓线雷达探测的低层(600 m 以下)吹东风,太阳出来后(08:00 之后),地面风逐渐吹山风及湖风(东风),这是由于地面辐射逐渐增强,能量交换频繁,湍流较强的缘故,这样能量不断交换逐渐从地面到高空破坏稳定的边界层结,风廓线雷达探测的低层东风风速逐渐减弱,到 17:00 东风转换为西风。600 m 以上以西风为主,从中就可以看出山谷风及湖陆风的环流高度只有 600 m 左右;600 m 以上的西风风速随高度逐渐增大,2 500 m 高度风速达到 11.0 m/s 左右,4 000 m 风速达到 15.0 m/s 以上。风速日变化振幅大气低层较大,随高度的增加而减小,2 000 ~ 2 500 m 风速日变化振幅较小,2 500 m 以上风速日变化振幅与低层相反,随高度的增加而增大,因为风廓线雷达西边的点苍山比风廓线雷达所在位置高 2 000 m 左右,2 000 m 以下受地形影响较大,2 500 m 以上主要受大气环流西风带影响,风速较大。15:00 左右在 3 000 m 以下出现西风动量下传,持续到 21:00 结束。

图 2b 给出了 2008 年 3 月观测期间南北向风日变化过程,由图 2b 可以看出 2 000 m 以下基本由南风控制(300 ~ 800 m 高度 02:00 ~ 11:00 吹北风例外),最大风速为 16:00 ~ 22:00 的 2.0 m/s,2 000 m 以上随着高度的增加北风逐渐增多,到 3 000 m 以上基本由北风控制,最大风速 2.0 m/s 出现在 3 400 m 以上的 06:00,18:00,20:00,23:00。从凌晨到 12:00 低层基本吹南风,风速较小,最大风速为 1 m/s 左右,12:00 后风速逐渐增大,而且大风往高空传播,到 16:00,2 m/s 的风速传播到 800 m,1.5 m/s

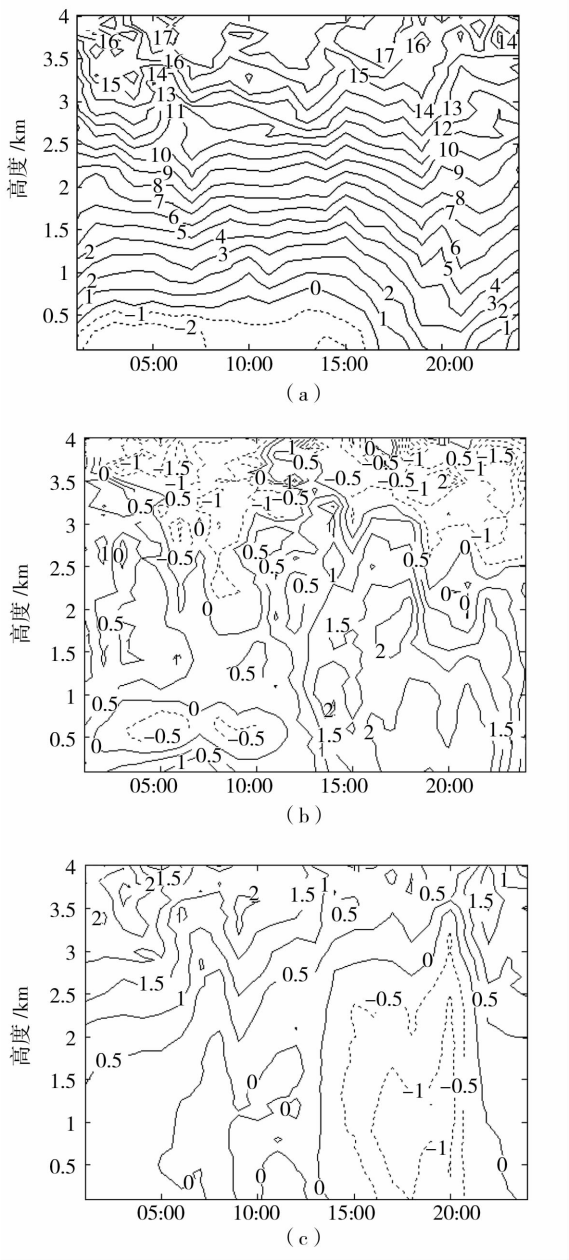

图 2　观测期间云南大理
东西风速(a),南北风速(b),垂直风速(c)
的日变化图(单位:m/s)

Fig. 2　The diurnal variations of wind speed along east - west(a), south - north(b) and vertical direction(c) observed by the wind profile radar in Dali of Yunnan province

的风速传播到 2 300 m,1 m/s 的风速传播到 2 800 m,23:00 后南风逐渐减弱。南风往高空传播的时间与西风动量下传时间接近。

图 2c 给出了 2008 年 3 月观测期间垂直方向(向上为正,向下为负)风的日变化过程,由图 2c 可以看出云南大理上空 3 000 m 以上基本以上升气流为主,最大上升运动出现在 03:00 的 3 700 m 高度处,速度达 3.2 m/s,另外 09:00 的 3 500 m 高度出现 2.2 m/s 的上升运动,22:00 的 3 500 m 高度处出现 2.0 m/s 的上升运动也较为明显。2 000 m 以下 23:00 ~ 13:00 垂直运动比较微弱,风速在 0.8 m/s 以下。14:00 后大气垂直下沉运动建立并迅速加强,17:00 和 20:00 在 1 000 m 左右高度出现最大下沉速度 1.2 m/s,20:00 后下沉气流逐渐减弱,到 22:00 结束。下沉运动的出现时间与西风动量下传时间接近。

通过对云南大理上空三维风场的分析,发现大理上空风日变化的主要特点是低层(600 m 以下)午后至夜晚(15:00 ~ 23:00)以西南风为主,出现下沉气流,风速较大,凌晨至中午(00:00 ~ 12:00)以东南风为主,风速较小,高空(600 m 以上)主要是西南和西北风,风速较大。说明该地区低层以山谷风、湖陆风及峡谷的风叠加为主导的环流特征是该地区的局地环流日变化基本特征,主要来源于山谷(湖陆)的热力差异及狭管效应。风廓线雷达观测的低层风向的变化与地面风向相反,这说明了地形影响该地区的环流高度为 600 m。

2.2　三维风场逐日变化

为了研究云南大理局地大气环流的变化过程及其与高层风场之间的联系,我们将 2008 年 3 月观测的三维风场进行日平均。

图 3a 给出了云南大理上空东西风的逐日变化,可以看出 600 m 以下主要以东风为主,最大风速 2.0 m/s 左右,600 m 以上主要以西风为主,风速的变化基本上随高度的增加而逐渐增大。3 月 13 日以前高空西风变化不大,最大风速为 10 m/s 左右,3 月 13 日以后高空西风风速突然增强,西风有向下传的趋势,最大风速超过 20 m/s。通过以上分析认为 600 m 左右高度是东西风的交界高度,600 m 以下受地形影响较大,600 m 以上受大气的环流影响。

图 3b 为云南大理上空南北风的逐日变化,可以看出高度 1 000 m 以下风速逐日的变化不是很大,1 000 m 以上风速逐日变化较大,从低层到高空南北风逐日交替出现。在 200 m 左右高度 3 月 27 日出现 4 m/s 的最大南风,最大北风为 8 m/s 出现在 3 月 10 日和 3 月 26 日 3 500 m 高度以上,在 3 月 11 日 3 700 ~ 4 000 m 之间和 3 月 21 日 2 600 ~ 3 300 m 之间出现了 8 m/s 的最大南风。

从图 3c 可以看出，云南大理上空垂直速度低层（1 000 m 以下）逐日变化比较平缓，高空变化比较大。垂直速度的逐日变化主要以上升气流为主，仅在 3 月 8 日、17 日和 20 日有下沉运动，21 日从低层到高空全部为下沉速度，最大下沉速度为 2 m/s。最大上升速度出现在 3 月 14 和 3 月 28 日，最大上升速度达到 6 m/s。垂直速度也有随高度的增加逐渐增大的特点，高度较低垂直运动不明显，而高度较高时有较强的垂直速度。总的看来上升运动出现的几率多于下沉运动，且上升运动的绝对值也比下沉速度大。

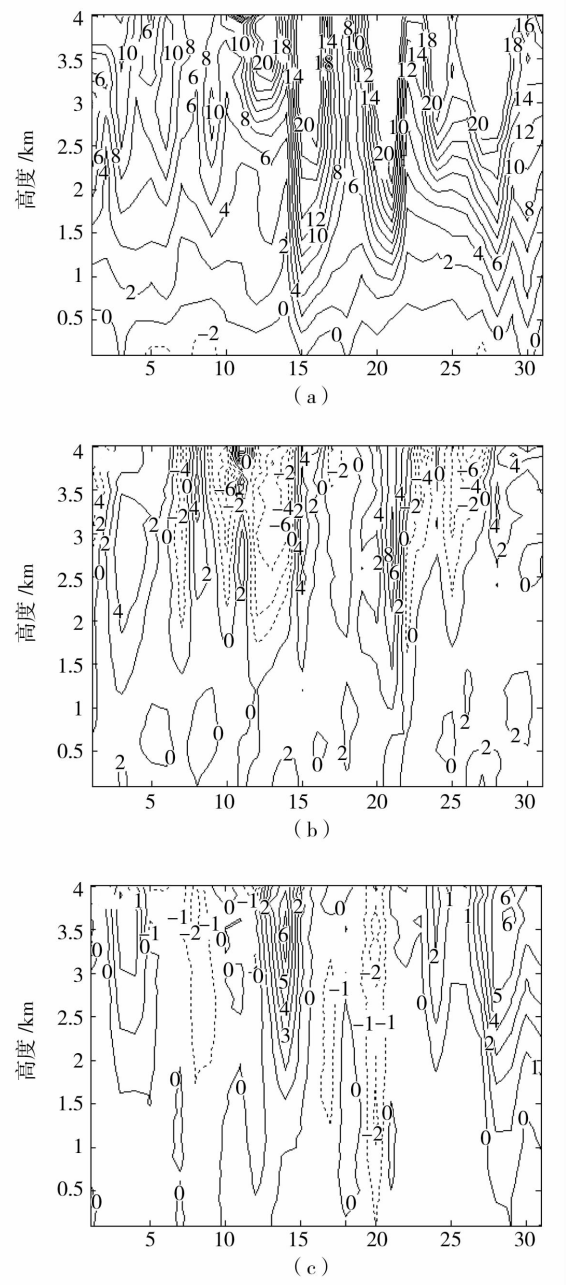

图 3 观测期间云南大理东西风速（a），南北风速（b），垂直风速（c）的逐日变化图

Fig. 3 The daily variations of wind speed along east - west (a), south - north (b) and vertical direction (c) observed by the wind profile radar in Dali of Yunnan province

由以上分析可以看出，云南大理上空气流的逐日变化在 600 m 以下主要以东南风为主，高空（600 m 以上）是西北风、西南风交替出现，并且垂直运动以上升气流为主。偏西气流的加强导致垂直运动加强，南风、北风变化与垂直气流关系不是很明显，可以认为西风气流的变化对云南大理的垂直运动有重要的影响。

2.3 白天和夜间风廓线比较

为了考察白天和夜间云南大理上空垂直风廓线的差异，把白天和夜间的风廓线进行了平均。白天时段为 08:00 ~ 19:00，其它时段为夜间。图 4 是 2008 年 3 月风廓线雷达观测期间云南大理上空白天夜间平均风速廓线和白天夜间最大风速。从图上可以看出，白天和夜间的平均风速在 600 m 以下变化不大，风速约为 3 m/s，600 m 以上风速随高度线性增大，最大风速为 4 000 m 高度的 17 m/s 左右。从地面至 2 000 m 夜间平均风速大于白天平均风速，2 100 ~ 4 000 m 白天平均风速大于夜间平均风速。白天云南大理西边点苍山顶以下较稳定的风速垂直变化和白天风向的多变也有很大的关系，相反的风向使平均风速较小，而夜间风向较稳定，风速的算术平均值必然较大，>2 000 m 高度由于不受地

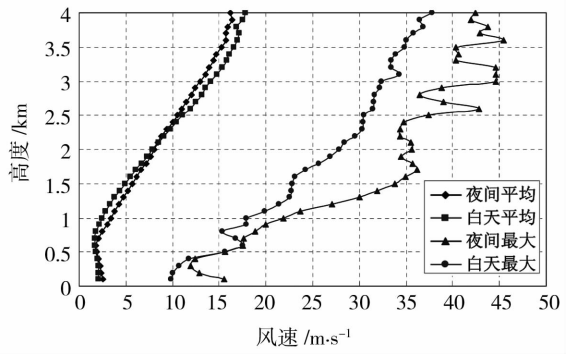

图 4 观测期间云南大理上空白天（夜间）的平均风速廓线和白天（夜间）风速最大值廓线

Fig. 4 The variation of average wind speed and maximum wind speed with altitude in daytime (nighttime) over Dali of Yunnan province during the whole observation period

形影响直接受西风环流影响,白天的平均风速大于夜间的平均风速。从各层风速极大值变化范围看,夜间极大值都≥白天风速极大值,从地面到 300 m 极大值风速差值由大变小,400 ~ 700 m 风速极大值几乎相等,从 800 m 开始风速增大,夜间风速极大值 > 白天风速极大值,夜间风速极大值在 1 700 m 高度后变化不大,而白天风速极大值在 2 300 m 高度后变化不大。

图 5 为白天和夜间 100 m、500 m 和 1 000 m 高度处的风玫瑰图。由图可以看出,无论是白天还是夜间各个方向的风都存在,100 m 高度处白天和夜间东风占主导风向,其次是东南风。

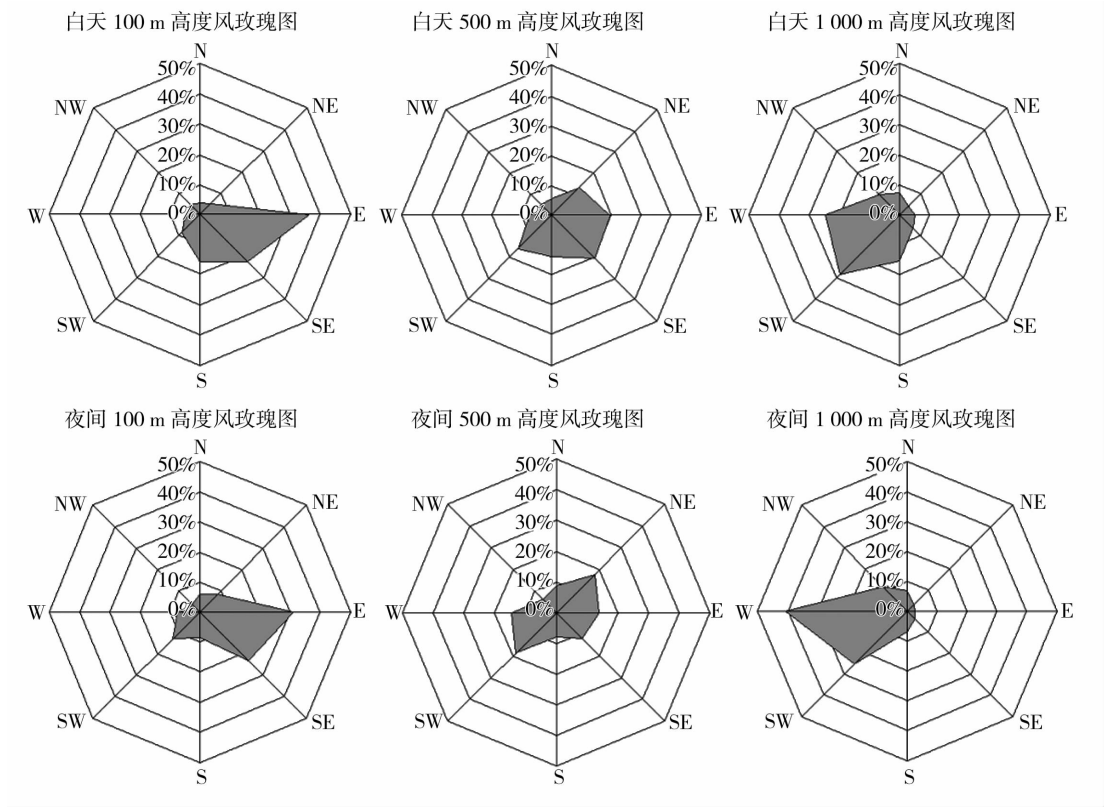

图 5　白天(上)和夜间(下)100 m(左)、500 m(中)和 1 000 m(右)高度处的风玫瑰图

Fig. 5　The wind rose in daytime (the upper) and nighttime (the lower) at the height of 100 m (left), 500 m (middle) and 1 000 m (right), respectively

500 m 高度处,白天主要吹东南风和东风,夜间主要风向是西南和东北风。1 000 m 高度处,白天主要以西南风和西风为主,夜间主要吹西风。可以看出无论白天还是夜间 100 m 高度和 1 000 m 高度主导风向都是相反的,而 500 m 高度处,白天吹东南风转换为夜间吹西南风,这是山谷风、湖陆风和峡谷风叠加造成的。

以上分析表明:在 600 m 以下风速变化不大,600 m 以上风速随高度线性增大,点苍山高度(2 000 m)以下夜间风速大于白天风速,2 000 m 以上白天风速大于夜间风速。无论是白天还是夜间 100 m 和 1 000 m 高度主导风向都相反,500 m 高度能看出白天的东南风转换为夜间西南风。

3　结论与讨论

(1)通过对云南大理上空三维风场的分析,发现大理上空风日变化的主要特点是低层(600 m 以下)午后至夜晚(15:00 ~ 23:00)以西南风为主,出现下沉气流,风速较大,凌晨至中午(00:00 ~ 12:00)以东南风为主,风速较小,高空(600 m 以上)主要是西南和西北风,风速较大。说明低层以山谷风、湖陆风及峡谷风的叠加为主导的环流特征是该地区的局地环流日变化基本特征,主要来源于山谷(湖陆)的热力差异及狭管效应。风廓线雷达观测的低

层风向的变化与地面风向相反,这说明地形影响该地区的环流高度为600 m。

(2)气流的逐日变化在600 m以下主要以东南风为主,高空(600 m以上)西北风、西南风交替出现,并且垂直运动以上升气流为主。偏西气流的加强导致垂直运动加强,南风、北风变化与垂直气流关系不是很明显,西风气流的变化对云南大理的垂直运动有重要的影响。

(3)在600 m以下风速变化不大,600 m以上风速随高度线性增大,点苍山高度(2 000 m)以下夜间风速大于白天风速,2 000 m以上白天风速大于夜间风速。无论是白天还是夜间100 m和1 000 m高度主导风向都相反,500 m高度能看出白天的东南风转换为夜间西南风。

本文仅用2008年3月的数据进行了风的垂直变化分析,还不能系统、全面地了解全年风的变化。下一步将收集的资料分春夏秋冬4季或干湿季结合地面辐射通量分析云南大理盆地局地环流特征随季节变化的规律及影响驱动机制。

致谢:对中国气象局气象科学研究院的卞林根研究员、阮征博士提供的指导和帮助表示感谢。

参考文献:

[1] 张霭琛.现代气象观测[M].北京:北京大学出版社,2000.289-298.

[2] 顾映欣,陶祖钰. UHF风廓线雷达资料的初步分析和应用[J].气象,1991,17(1):29-33.

[3] 刘淑媛,郑永光,陶祖钰.利用风廓线雷达资料分析低空急流的脉动与暴雨关系[J].热带气象学报,2003,19(3):285-290.

[4] 杨引明,陶祖钰.上海LAP-3000边界层风廓线雷达在强对流天气预报中的应用初探[J].成都信息工程学院学报,2003,18(2):155-160.

[5] 古红萍,马舒庆,王迎春,等.边界层风廓线雷达资料在北京夏季强降水天气分析中的应用[J].气象科技,2008,36(3):300-304.

[6] 董保举,刘劲松,高月忠.基于风廓线雷达资料的暴雨天气过程分析[J].气象科技,2009,37(4):411-414.

[7] 王秀玲,陈昱.层状云降水过程中的风廓线特征[J].气象科技,2010,38(4):409-412.

[8] 王开存,陈长和,张镭,等.城乡过渡地带低空温度平流和边界层特征的观测分析[J].高原气象,2004,23(4):529-533.

[9] Neff W N. Observation of complex terrain flows using acoustic sounders:Echo interpretation[J]. Boundary layer Meteor,1988(4):207-228.

[10] 孙方林,马耀明,马伟强,等.珠峰地区大气边界层结构的一次观测研究[J].高原气象,2006,25(6):1014-1019.

[11] 徐安伦,董保举,刘劲松,等.洱海湖滨大气边界层结构及特征分析[J].高原气象,2010,29(3):637-644.

[12] 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[J].高原气象,2007,26(6):1173-1186.

[13] 邹捍,李鹏,朱金焕,等. HEST2007 珠峰北坡风廓线观测研究[J].高原气象,2007,26(6):1199-1207.

[14] 辛跳儿,贺千山,魏海茹,等.上海世博园上空边界层风垂直变化观测研究[J].高原气象,2009,28(1):127-135.

[15] 刘建忠,张 蔷,杨道侠.雾日期间边界层特性分析[J].干旱气象,2010,28(1):41-48.

[16] 杨智,刘劲松,孙绩华.大理近地层山谷盆地湖陆风及湍流特征分析[J].气象与环境学报,2008,24(5):32-37.

Study on the Vertical Change of Wind in Boundary Layer in Dali of Yunnan Province

DONG Baoju[1,2], ZHANG Chengwen[3], FU Zhijia[2], YANG Cheng[2], LI Yu[2]

(1. *Department of Atmospheric Science*, *Yunnan University*, *Kunming* 650091, *China*; 2. *Dali National Climatic Observatory*, *Dali* 671003, *China*; 3. *Dali Meteorological Bureau of Yunnan Province*, *Dali* 671000, *China*)

Abstract: The local circulation characteristics over Dali of Yunnan Province was analyzed based on wind profile radar observations in March of 2008. The study on the three-dimension wind field of Dali showed the obvious influence of the local terrain. The prevailing wind direction below 600 m was southwest from afternoon to night, with large wind speed and downdraft, while eastsouth wind from dawn to morning with small wind speed. The prevailing wind direction over 600 m was southwest and northwest with large wind speed, which indicated that the 600 m height circulation played a role over this area. The characteristics of the daily variation of local circulation in this area was the combination of mountain-valley breeze, lake-land breeze and ravine wind. The daily variation of air at lower layer of Dali was southeast wind below 600 m, the northwest wind and southwest wind appeared alternatively in the upper air, and the main vertical motion was the updraft, the westerly airstream increased the vertical motion, there was no obvious relationship between the change from south wind to north wind and vertical airflow. The variation of westerly airstream had an important effect on the vertical motion. The wind speed below 600 m changed little but over 600 m it increased linearly with height, the wind speed at night was larger than that during day below the height of Diancang mountain, and vice versa. The prevailing wind was opposite at the height of 100 m and 1 000 m during both day and night, it can be showed that the wind changed from southeast during day to southwest at night at 500 m height.

Key words: Dali; wind profile radar; boundary layer; local circulation