

王敏仲,魏文寿,何清,等. 风廓线雷达对塔克拉玛干沙漠晴天边界层的探测分析[J]. 气象,2012,38(5):577-584.

# 风廓线雷达对塔克拉玛干沙漠晴天 边界层的探测分析<sup>\*1</sup>

王敏仲<sup>1,2</sup> 魏文寿<sup>1,2</sup> 何清<sup>1,2</sup> 郑伟<sup>3</sup> 胡文峰<sup>1,2</sup>

1 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,乌鲁木齐 830002

2 新疆塔克拉玛干沙漠大气环境观测试验站,塔中 841000

3 新疆巴州气象局塔中气象站,塔中 841000

**提 要:** 利用塔克拉玛干沙漠大气环境观测试验站 2010 年 8 和 10 月边界层风廓线雷达资料,分析了沙漠晴天边界层湍流、大气温度、水平风速风向以及垂直速度的发展演变特征和日变化规律。研究表明:(1)大气折射率结构常数( $C_n^2$ )能较好地反映晴空湍流对电磁波的后向散射能力,可以详细刻画湍流发展旺盛区域的高度、强度及其演变特征;沙漠夏季白天湍流发展剧烈,旺盛区域顶部可达 4000 m 高度左右。(2)RASS 系统对沙漠边界层大气温度的探测具有较好的可信度,其近地边界层温度符合一般的日变化规律,昼夜温差显著,白天高温维持时间长,升温过程相对滞后于近地气温。(3)风廓线雷达对大气风场的探测结果与地面风速风向一致,沙漠晴天主要受东风和东北风控制,风速较小,平均在  $2.0\sim 6.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  范围变化。(4)沙漠腹地大气垂直速度变化符合静力平衡理论,铅直方向运动很弱,一般在  $-1.0\sim 1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  范围波动。

**关键词:** 风廓线雷达,晴空,边界层湍流,三维风场,大气虚温

## Radar Wind Profiler Observations of Convective Boundary Layer During Clear-Air Days over Taklimakan Desert

WANG Minzhong<sup>1,2</sup> WEI Wenshou<sup>1,2</sup> HE Qing<sup>1,2</sup> ZHENG Wei<sup>3</sup> HU Wenfeng<sup>1,2</sup>

1 Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002

2 Taklimakan Desert Atmospheric Environment Observation Experimental Station of Xinjiang, Tazhong 841000

3 Tazhong Weather Station, Meteorological Office of Bayingolin Mongolian Prefecture of Xinjiang, Tazhong 841000

**Abstract:** The Urumqi Institute of Desert Meteorology under the China Meteorological Administration (CMA) launched a scientific experiment with the radar wind profiler at the Tazhong Station—an experimental site for atmospheric environment observations in the hinterland of the Taklimakan Desert in July–October 2010. This study uses high temporal resolution data from the experiment to analyze the turbulence development of boundary layer, vertical velocity and atmospheric virtual temperature of typical clear-air day. The results show that: (1) The turbulence refractive index structure constant ( $C_n^2$ ) can reflect in detail the development of turbulence, and the height of turbulence development bloom area in summer days may be reached at 4000 m. (2) RASS system has good credibility for atmospheric virtual temperature detection, and its near boundary layer is generally in line with the daily temperature variation. (3) The clear-air days in Taklimakan Desert are mainly controlled by east and north-east winds, the wind speed is relatively small and changes within  $2.0\sim 6.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . The atmospheric vertical velocity change of the desert hinterland fits in with the static equilibrium theory, the vertical velocity is very weak, generally in the  $-1.0$  to  $1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  range fluctuations.

**Key words:** radar wind profiler, clear-air day, turbulence boundary layer, three-dimensional wind field, atmospheric virtual temperature

\* 国家自然科学基金项目(40975097)、中国沙漠气象科学研究基金课题(Sqj2009013)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006012)共同资助

2011年7月27日收稿; 2012年2月27日收修定稿

第一作者:王敏仲,主要从事风廓线雷达探测与资料应用方面的研究. Email:yurenkeji@sina.com

## 引 言

风廓线雷达是 20 世纪 70 年代研发并逐渐兴起的一种高空大气遥感探测系统,经过三十多年的发展,风廓线雷达技术已经成熟<sup>[1]</sup>。在过去的几十年里,国外学者利用风廓线雷达在风场探测<sup>[2-4]</sup>、大气湍流及边界层厚度<sup>[5-7]</sup>、数值预报<sup>[8]</sup>、降水过程<sup>[9-13]</sup>、雨滴谱反演<sup>[14-15]</sup>等方面开展了大量的研究工作,取得了一批可喜的科研成果。作为新一代大气遥感探测系统,美国国家大气海洋局(NOAA)于 1987—1992 年在美国中部和南部地区布设了 35 部风廓线雷达,其观测数据已提供给国家天气服务中心、环境研究机构和大学<sup>[16]</sup>。近 20 年的运行结果证明:风廓线雷达对大气三维风场具有较强的探测能力,精细的垂直廓线数据可以显示出锋面、短波波动、气旋、重力波等天气系统连续和详实的演变过程,可在一定程度上改善对灾害性天气的预报质量。

中国从 20 世纪 80 年代开始风廓线雷达的研制和应用工作,1989 年中国气象科学研究院研制了第一部 UHF 风廓线雷达,用于北京中尺度灾害天气预报基地的业务试验,证明了其有效性和可靠性<sup>[17]</sup>。在过去的 10 年里,中国相继自主研发了多种类型可供业务和科研使用的风廓线雷达<sup>[1]</sup>。阮征等<sup>[18]</sup>曾基于湍流散射理论,构建了风廓线雷达强度信息对大气折射率结构常数的估算方法;何平等<sup>[1]</sup>曾结合风廓线雷达探测事例分析了晴空热对流的演变过程和热对流对上层空气的加热效应;顾映欣等<sup>[19]</sup>利用北京风廓线雷达资料对局地暴雨、锋面天气过程进行分析,表明该资料在短时预报中具有较好的应用能力;邹悍等<sup>[20]</sup>、王敏仲等<sup>[21]</sup>曾利用风廓线雷达分别对中国珠穆朗玛峰北坡绒布河谷和新疆百里风区大气三维风场进行探测研究;以上研究都表明:风廓线雷达在大气风场监测、边界层变化、降水过程等方面具有较好的应用研究前景。

塔克拉玛干沙漠位于北半球中纬度欧亚大陆腹地,坐落于新疆塔里木盆地中央,平均海拔高度在 1000 m 以上,面积  $33.76 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,是世界第二、我国第一大流动沙漠,该区年平均降水量不足 40 mm<sup>[22]</sup>,气候干旱,沙尘灾害频繁。近年来,有关沙漠边界层特性方面的研究很多<sup>[23-27]</sup>,这些研究多借助于气象塔、系留气球探空和无线电探空仪等手段进行,然而气象塔观测高度有限,其他技术手段成本

昂贵且时间分辨率低,无法详细刻画边界层的精细结构特征。风廓线雷达借助大气湍流反演三维风随高度的分布,是观测和研究大气边界层和湍流的有效工具。本研究尝试利用边界层风廓线雷达对塔克拉玛干沙漠典型晴天进行探测(沙漠地区气候极端干燥,大气水汽含量少,风廓线雷达探测时某些高度层会出现缺测),并利用获取的高分辨率资料,分析沙漠晴空湍流、三维风场、大气温度的发展演变特征,以期能够进一步加深对塔克拉玛干沙漠边界层的认识。

## 1 风廓线雷达探测基本原理和主要技术性能

大气中存在着各种不同尺度随时间变化的湍流,它们能引起折射指数的不规则变化,对无线电波产生散射作用。风廓线雷达向天空发射无线电波,并接收它的回波,这些回波是由于大气湍流在空中不同层面引起的电波折射而产生的,通过对回波的处理和分析就可以获得湍流的多普勒系数和强度系数,从而反演出湍流强度、运动方向和运动速度随高度的分布。大气湍流的运动是随背景风的运动而运动的,因此,如果获得了大气湍流的多普勒速度和方向,同时也就获得了风的多普勒速度和方向<sup>[28]</sup>。

本研究采用的设备为中国航天科工集团二十三所研制的 CFL-03 相控阵风廓线雷达。主要由发射机系统、接收机系统、天馈系统、监控系统、信号处理与控制系统和数据处理系统 6 部分组成,它的设计高度为 3000~5000 m。CFL-03 采用 5 个固定指向波束的探测方式,1 个垂直波束,4 个天顶角为  $15^\circ$  的倾斜波束,倾斜波束在方位上均匀正交分布。为了兼顾探测高度和低层的高度分辨率,CFL-03 采用高、低两种工作模式。低模式使用窄脉冲、高度分辨率为 50 m,高模式使用宽脉冲、高度分辨率为 100 m。两种模式交替进行,在保证低空具有较高高度分辨率的同时可以达到较高的探测高度。CFL-03 提供的数据完全符合中国气象局要求的高/低模式谱数据、径向谱速度和实时廓线数据格式;每种廓线包含水平风、垂直速度、信噪比、 $C_n^2$ (大气折射率结构常数)和谱宽等信息。表 1 列出了 CFL-03 的主要技术参数。

表1 CFL-03 风廓线雷达主要技术参数

Table 1 Technical parameters of the CFL-03 wind-profiling radar

参数名称	参数	参数名称	高模式参数	低模式参数
雷达波长	227 mm	脉冲宽度	0.66 $\mu\text{s}$	0.33 $\mu\text{s}$
波束宽度	8°	最低探测高度	600 m	50 m
波束数	5	噪声系数	2 dB	2 dB
天线增益	25 dB	高度分辨率	100	50
馈线损耗	2 dB	相干积累次数	64	100
接收机	数字中频	FFT点数	512	256
发射峰值功率	2.36 kW	带宽	1.5 MHz	3.0 MHz

## 2 结果与分析

### 2.1 沙漠晴空湍流发展旺盛区域的高度及演变特征

理论上,在局地均匀、各向同性湍流的惯性子区内,描述晴空大气湍流运动对电磁波的后向散射能力用大气折射率结构常数( $C_n^2$ )表示,因此, $C_n^2$ 也是表征大气光学湍流强度的一个重要参数<sup>[29]</sup>。

图1给出了塔克拉玛干沙漠2010年8和10月6个晴天大气折射率结构常数( $C_n^2$ )随时间和高度变化的剖面图。从8月3日 $C_n^2$ 变化图(图1a)可以清晰地看出,夜间 $C_n^2$ 较小,其值域分布范围约为 $10^{-17} \sim 10^{-15.5}$ ,早晨日出后,太阳辐射增强,近地层大气受热,大气湍流发展,湍流对雷达电磁波的后向散射增强,使得大气折射率结构常数逐渐变大,16:00—19:00时 $C_n^2$ 达到最强的时段,最大值域分布范围约为 $10^{-14.5} \sim 10^{-13.5}$ ,高度可达4000 m左右,这一高度可以认为是沙漠晴空湍流发展旺盛区域的顶部,同时也表明CFL-03在沙漠地区的晴空探测能力可达到4000 m高度;20:00以后湍流减弱, $C_n^2$ 随之减小。图1b和1c分别给出2010年8月6和13日 $C_n^2$ 时间-高度图,其演变特征与图1a相似,这里不再赘述。图1d~1f给出2010年10月3个晴天的 $C_n^2$ 变化图,其发展变化规律与8月晴天相似,夜间较弱,白天日出后开始发展,午后达到最强时段,所不同的是10月 $C_n^2$ 大值发展高度明显低于8月,其高度在3200 m以内,说明沙漠10月湍流发展旺盛区域的高度在3200 m以下。以上分析表明:风廓线雷达探测到的大气折射率结构常数( $C_n^2$ )能较好地反映、表征沙漠晴空湍流对电磁波的后向散射能力,可以

详细刻画晴空湍流发展旺盛区域的高度、强度及其演变特征。

### 2.2 近地边界层温度场特征

图2给出了RASS系统对塔克拉玛干沙漠6个晴天(时间同上)近地边界层(50~500 m)大气虚温的探测结果(沙漠地区水汽含量少,可将大气虚温近似为气温)。从图2a~2c可以看出,沙漠地区8月昼夜温差明显,夜间边界层大气保持着相对较低的温度,早上日出后,气温逐渐升高,12:00以后气温迅速升高,并于午后15:00—20:00达到一天中最热的时段,最高气温可达到35℃左右。图2d~2f分别给出10月3个晴天大气温度的时间-高度图,可以清晰地看出,10月沙漠边界层大气温度明显低于8月,夜间温度依然较低,白天边界层大气温度最高可达到27℃左右。图3给出对应的6个晴天地面气温的日变化曲线,由图3a可以看出,8月3、6和13日夜间气温在16~30℃之间变化,08:00—09:00左右气温开始升高,13:00—23:00大气保持着较高的气温,该时段气温约在36.0℃左右,通过与图2a~2c进行比较,发现边界层大气温度与地面气温较为接近,其日变化规律一致;从图3b也可以看出10月晴天地面气温与RASS探测边界层大气温度结果相近,以上分析表明:RASS系统对沙漠边界层大气温度的探测具有较好的可信度,沙漠近地边界层大气温度符合一般的日变化规律,夜间低,白天温度高,高温时段维持时间长,其升温过程滞后于近地表气温。

### 2.3 晴天水平风速特征

图4给出了塔克拉玛干沙漠2010年8和10月6个晴天边界层风场随时间和高度的变化图。可以看出,除10月7日为西南风和西风控制外,其他晴天3000 m高空以下主要受东风和东北风控制,水平风速较弱,最大风速不超过 $25.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,平均约在 $2.0 \sim 6.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围变化。需要说明的是,沙漠地区气候极端干燥,大气水汽含量少,风廓线雷达在晴天探测时某些高度层出现缺测,但该设备对晴天边界层水平风速的总体探测效果是准确和良好的。

图5给出6个晴天对应的地面风速和风向的变化曲线,从风速曲线图(图5a和5b)可以看出,沙漠晴天夜间风速很弱,约在 $0 \sim 3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围变化,白天风速增大,其值约在 $3.0 \sim 7.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围波

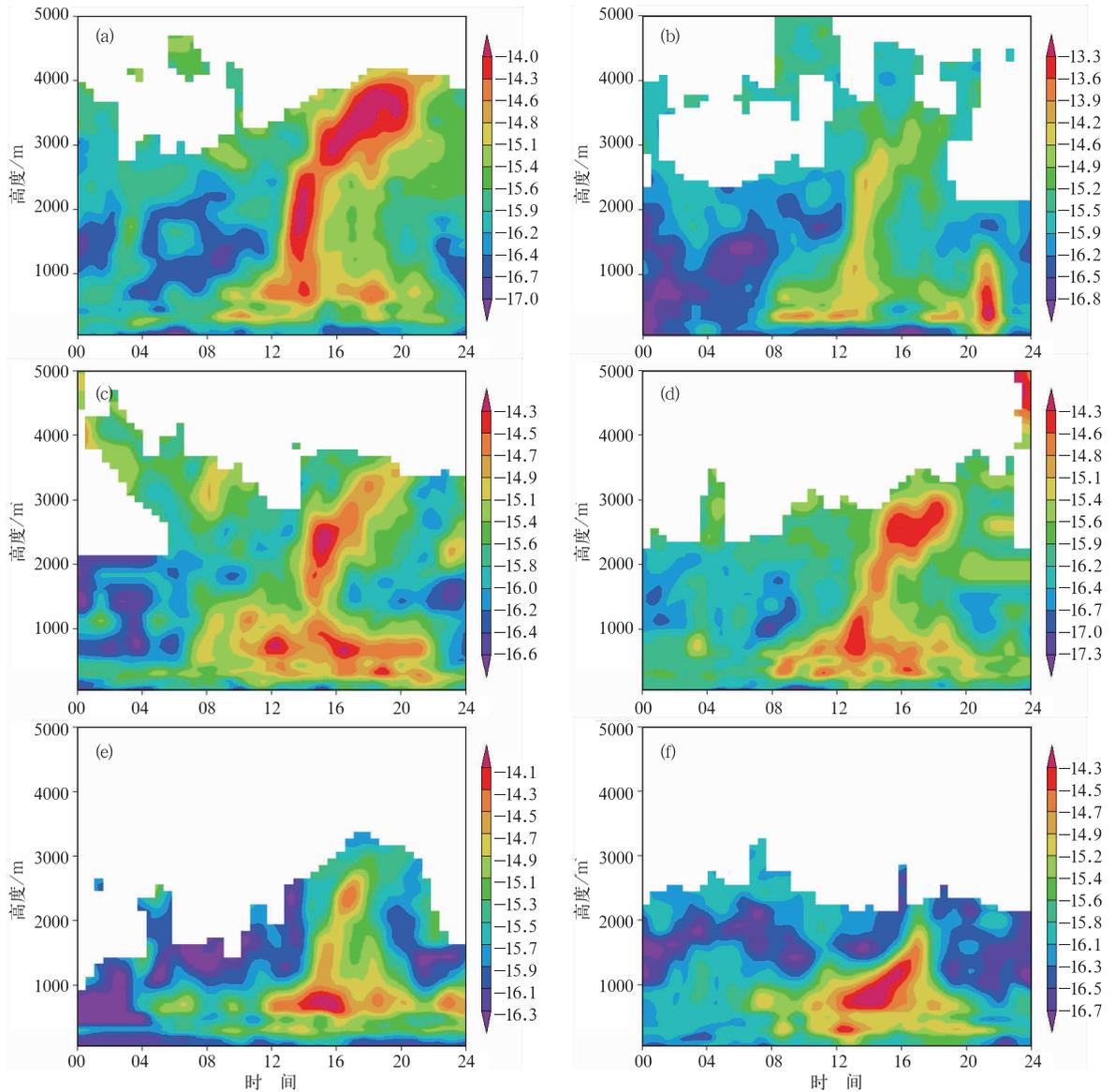


图 1 塔克拉玛干沙漠晴天大气折射率结构常数( $C_n^2$ )时间-高度图  
(a) 2010 年 8 月 3 日, (b) 2010 年 8 月 6 日, (c) 2010 年 8 月 13 日, (d) 2010 年 10 月 1 日,  
(e) 2010 年 10 月 7 日, (f) 2010 年 10 月 11 日

Fig. 1 Time-height cross-sections of the turbulence refractive index structure constant ( $C_n^2$ )  
in clear-air days (as shown in figures) over Taklimakan Desert

(a) 3 August 2010, (b) 6 August 2010, (c) 13 August 2010, (d) 1 October 2010,  
(e) 7 October 2010, (f) 11 October 2010

动, 风速变化趋势与地面气温以及大气折射率结构常数有较好的对应关系, 地面及边界层大气温度较高的时段, 对应着大气折射率结构常数和地面风速的大值时段。分析认为, 沙漠晴天日出后, 太阳辐射增强, 近地表受热, 湍流开始发展, 地面气温首先升高, 使得地面风速增大, 湍流对雷达电磁波后向散射相应增强, 大气折射率结构常数也就随之变大。从地面风向曲线图看出, 除 10 月 7 日风向主体表现为西南风和西风外, 其他晴天风向主要受东风和东北

风控制, 这与风廓线雷达探测到的边界层大气风场结果相吻合。以上分析表明: 风廓线雷达对沙漠边界层大气风场的探测结果与地面风速、风向一致, 沙漠晴天主要受东风和东北风控制, 风速较小, 平均约在  $2.0 \sim 6.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  范围变化。

## 2.4 晴天垂直速度特征

图 6 给出了 CFL-03 风廓线雷达对沙漠塔中站 4 个晴天大气垂直速度的探测结果。根据静力平衡

理论, 中纬度大气在铅直方向近似满足静力平衡关系, 垂直运动很弱。从图 6 可以看出, 风廓线雷达对大气垂直速度的探测结果符合静力平衡理论, 垂直速度较小, 主要在  $-1.0 \sim 1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  范围波动。值得注意的是, 4 个晴天 14:00—20:00 在 1000~3000 m 高度都有一个较强的下沉速度回波区, 分析认为, 塔中作业区(塔中气象站位于塔中石油作业区内)经过 10 多年的建设发展, 方圆 3~5 km 的下垫

面已被种植沙生灌木植物, 12:00 以后, 周边纯流沙下垫面受热程度会快于作业区, 进而率先产生热对流运动, 空气上升, 由于大气的连续性, 必然伴随周围空气的下沉, 以填补流沙区上升运动损失的空气, 因此, 作业区高空大气表现为下沉, 产生正的垂直速度回波区(CFL-03 风廓线雷达定义向上运动为负, 向下运动为正), 这一现象也充分说明沙漠地区午后进入热对流活动的旺盛期, 在上升气流的周围一般

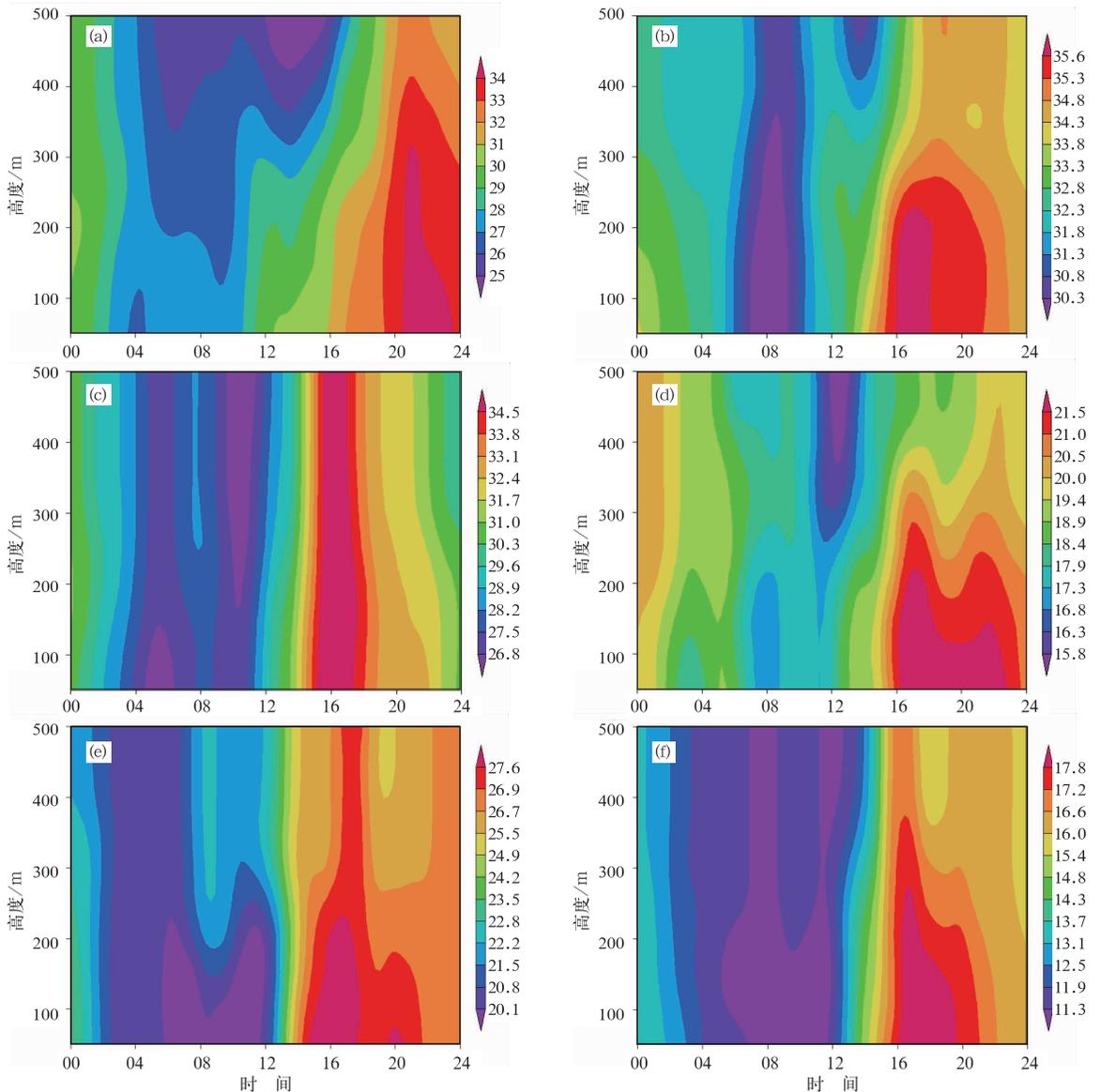


图 2 塔克拉玛干沙漠晴天大气虚温时间-高度图

(a) 2010 年 8 月 3 日, (b) 2010 年 8 月 6 日, (c) 2010 年 8 月 13 日, (d) 2010 年 10 月 1 日, (e) 2010 年 10 月 7 日, (f) 2010 年 10 月 11 日

Fig. 2 Time-height cross-sections of virtual temperature in clear-air days (as shown in figures) over Taklimakan Desert

(a) 3 August 2010, (b) 6 August 2010, (c) 13 August 2010, (d) 1 October 2010, (e) 7 October 2010, (f) 11 October 2010

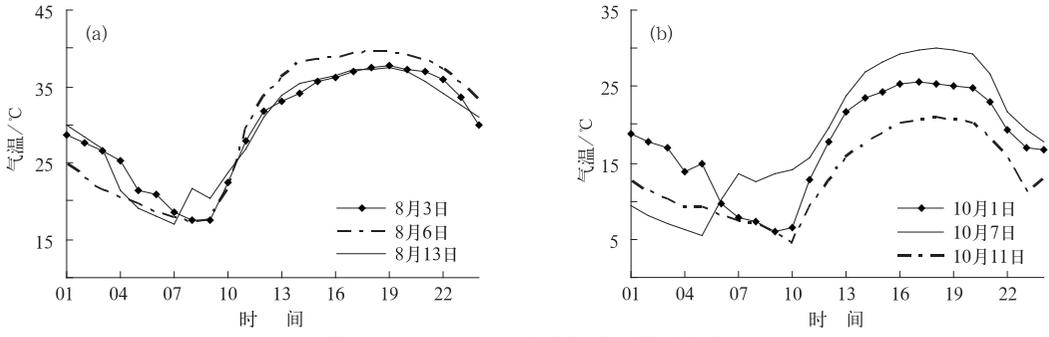


图 3 塔中气象站晴天地面气温日变化

Fig. 3 Diurnal variations of surface air temperature in clear-air days of August (a) and October (b) at the Tazhong Meteorological Station

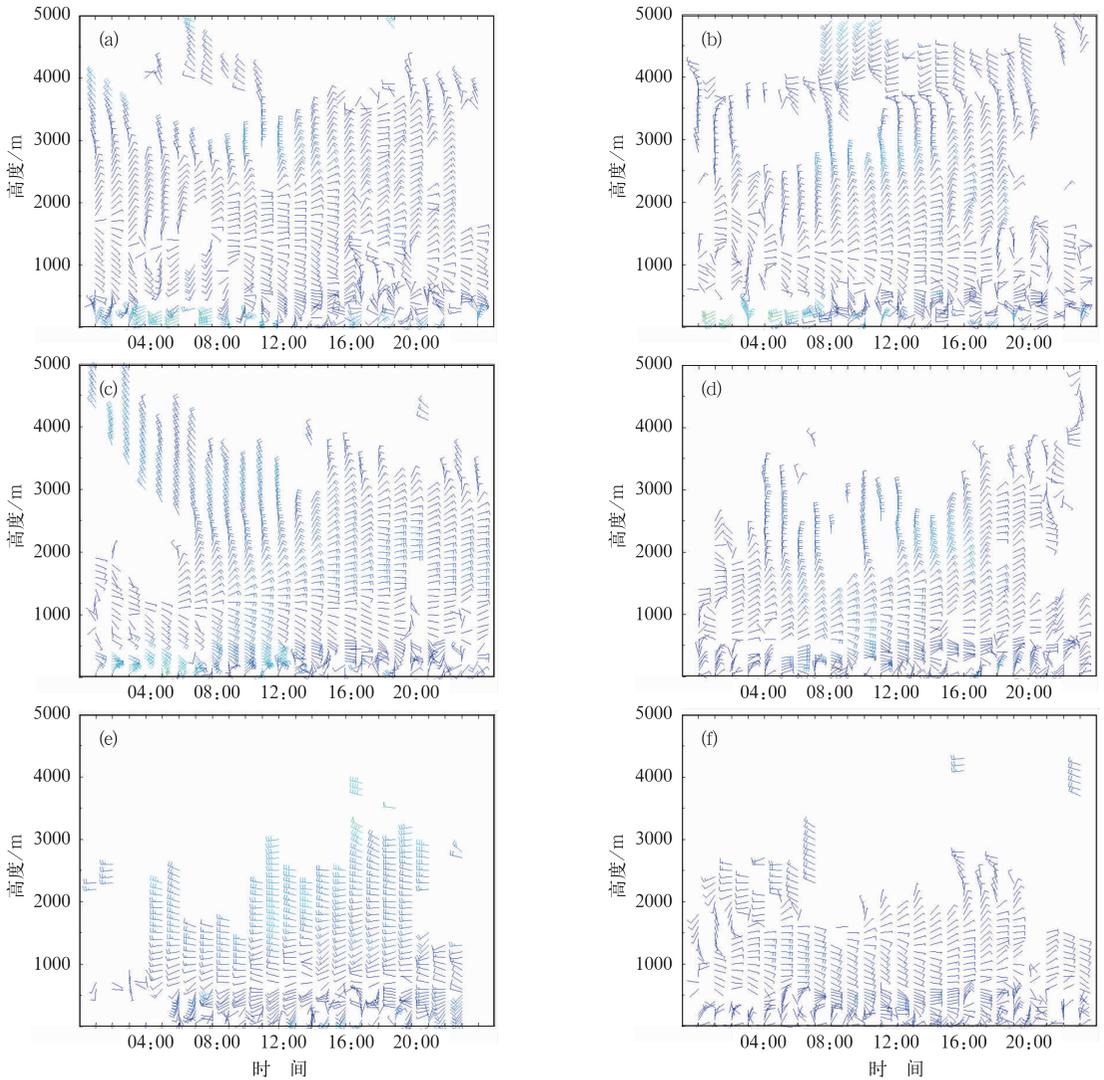


图 4 沙漠晴天边界层水平风速时间-高度变化

(a) 2010 年 8 月 3 日, (b) 2010 年 8 月 6 日, (c) 2010 年 8 月 13 日, (d) 2010 年 10 月 1 日, (e) 2010 年 10 月 7 日, (f) 2010 年 10 月 11 日

Fig. 4 Evolutions of horizontal wind speeds with time and height in clear-air days (as shown in figures) over Taklimakan Desert

(a) 3 August 2010, (b) 6 August 2010, (c) 13 August 2010, (d) 1 October 2010, (e) 7 October 2010, (f) 11 October 2010

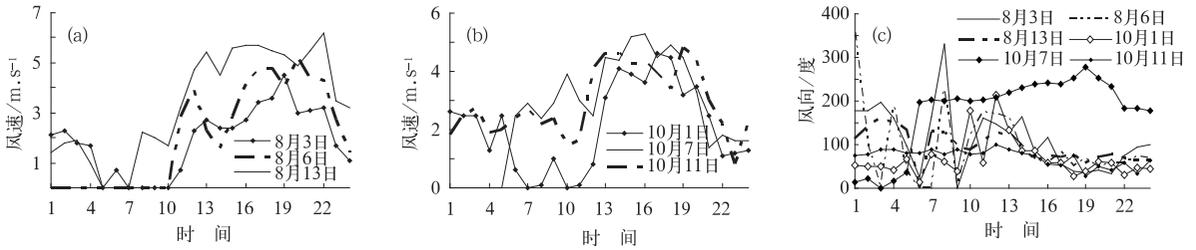


图 5 塔中气象站晴天地面风速和风向变化曲线

Fig. 5 Evolutions of surface wind speed (a, b) and direction (c) in clear-air days at the Tazhong Meteorological Station

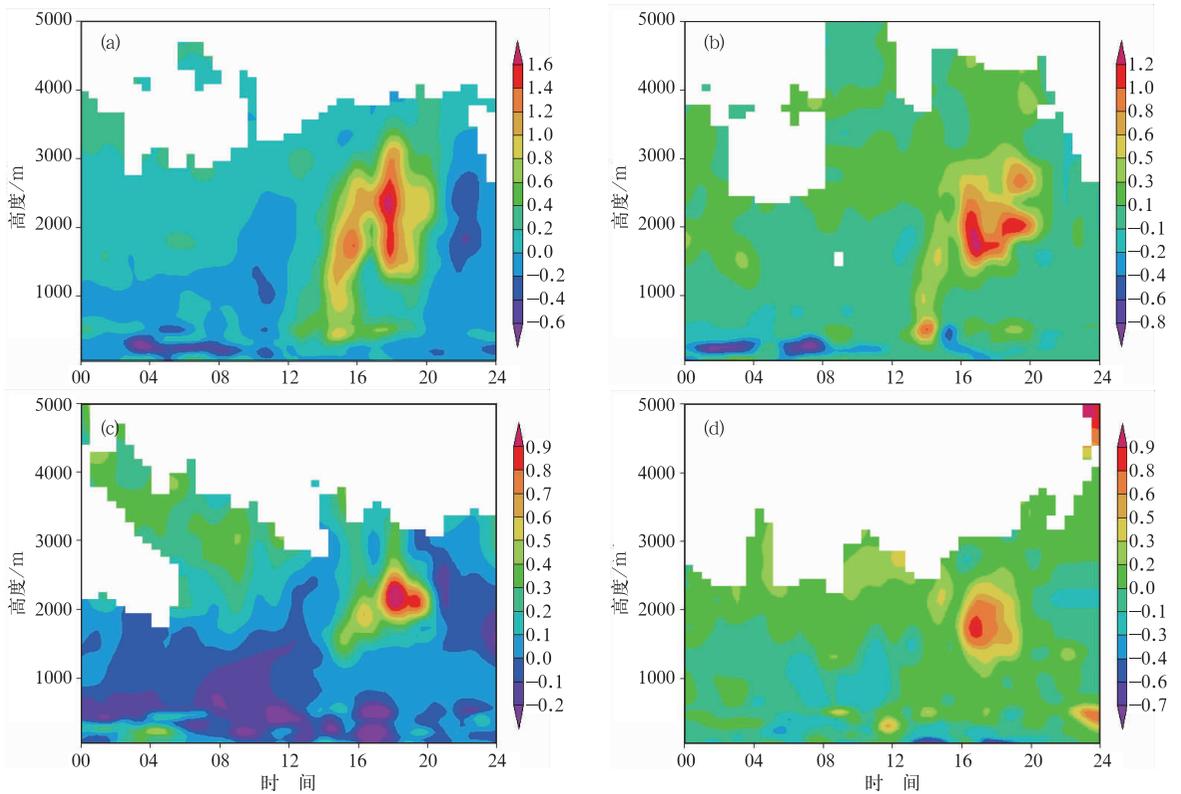


图 6 塔克拉玛干沙漠晴天垂直速度时间-高度变化

(a) 2010 年 8 月 3 日, (b) 2010 年 8 月 6 日, (c) 2010 年 8 月 13 日, (d) 2010 年 10 月 1 日

Fig. 6 Evolutions of vertical velocity with time and height in clear-air days

(as shown in figures) over Taklimakan Desert

(a) 3 August 2010, (b) 6 August 2010, (c) 13 August 2010, (d) 1 October 2010

伴有下沉气流。

### 3 结论

利用塔克拉玛干沙漠大气环境观测试验站 2010 年 8 和 10 月边界层风廓线雷达资料,分析了沙漠晴空湍流、大气虚温、水平风速风向和垂直速度的变化特征,可以初步得到以下几点结论:

(1) 风廓线雷达探测到的大气折射率结构常数 ( $C_n^2$ ) 能较好地反映和表征沙漠晴空湍流对电磁波的后向散射能力,可以详细刻画湍流发展旺盛区域的高度、强度及其演变特征;沙漠夏季 8 月晴空湍流发展剧烈,旺盛区域高度可达 4000 m 左右,10 月约在 3000 m 以下。

(2) RASS 系统对沙漠边界层大气温度的探测具有较好的可信度,其近地边界层大气温度符合一

般的日变化规律,昼夜温差显著,白天高温维持时间长,其升温过程相对滞后于近地表气温。

(3) 风廓线雷达对大气风场的探测结果与地面风速风向一致,沙漠晴天主要受东风和东北风控制,风速较小,平均约在  $2.0\sim 6.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  范围变化。

(4) 沙漠晴天大气垂直速度变化基本符合静力平衡关系,铅直方向运动很弱,一般在  $-1.0\sim 1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  范围波动。

## 参考文献

- [1] 何平,马颖,阮征,等.晴空热对流泡的风廓线雷达探测研究[J].气象学报,2010,68(2):264-269.
- [2] Angevine W M. Errors in mean vertical velocities measured by boundary layer wind profilers[J]. J Atmos Oce Techno,1997,14(3):565-569.
- [3] Balsley B B, Ecklund W L, Carter D A, et al. Average vertical motions in the tropical atmosphere observed by a wind profiler on Pohnpei ( $7^{\circ}\text{N}$  Latitude,  $157^{\circ}\text{E}$  longitude)[J]. J Atmos Sci,1988,45(3):396-405.
- [4] Lothon M, Campistron B, Jacoby-Koaly S, et al. Comparison of radar reflectivity and vertical velocity observed with a scannable C-band Doppler radar and two UHF profilers in the lower troposphere[J]. J Atmos Oce Techno,2002,19(6):899-910.
- [5] Angevine W M, White A B, Avery S K. Boundary-layer depth and entrainment zone characterization with a boundary-layer profiler[J]. Boundary-Layer Meteorology,1994,68(4):375-385.
- [6] Balsley B B, Peterson V L. Doppler-radar measurements of clear air atmospheric turbulence at 1290 MHz[J]. J Appl Meteor,1981,20(3):266-274.
- [7] Hocking W K. Measurements of turbulent energy dissipation rates in the middle atmosphere by radar techniques: A review[J]. Radio Science,1985,20(6):1403-1422.
- [8] Kuo Y-H, Donall E G, Shapiro M A. Feasibility of short-range numerical weather prediction using observations from a network of profilers[J]. Mon Wea Rev,1987,115(10):2402-2427.
- [9] Chilson P B, Ulbrich C W, Larsen M F, et al. Observations of a tropical thunderstorm using a vertically pointing dual-frequency collinear beam Doppler radar[J]. J Atmos and Oce Techno,1993,10(5):663-673.
- [10] Deshpande S M, Raj P E. UHF wind profiler observations during a tropical pre-monsoon thunderstorm - A case study[J]. Atmospheric Research,2009,93(1-3):179-187.
- [11] Fukao S, Wakasugi K, Sato T, et al. Direct measurement of air and precipitation particle motion by very high frequency Doppler radar[J]. Nature,1985,316:712-714.
- [12] Gage K S, Williams C R, Ecklund W L. Application of the 915 MHz profiler for diagnosing and classifying tropical precipitating cloud systems[J]. Meteorology and Atmospheric Physics,1996,59(1-2):141-151.
- [13] 吴志根,丁若洋,郑杰,等.边界层风廓线仪多普勒频谱高度图综合应用初探[J].气象,2011,37(8):1006-1017.
- [14] Currier P E, Avery S K, Balsley B B, et al. Use of two wind profilers in the estimation of raindrop size distribution[J]. Geo Res Lett,1992,19:1017-1020.
- [15] Wakasugi K, Mizutani A, Matsuo M. A direct method for deriving drop-size distribution and vertical air velocities from VHF Doppler radar spectra[J]. J Atmos Oce Technol,1986,3(4):623-629.
- [16] Barth M F, Chadwick R B, van de Kamp D W. Data processing algorithms used by NOAA's Wind Profiler Demonstration Network[J]. Annales Geophysicae,1994,12(6):518-528.
- [17] 马大安,田文斌,丁渭兴,等.对流层风廓线雷达的研制[C]//京津冀中尺度气象试验基地文集.中国气象科学研究院中尺度气象研究所,1989.
- [18] 阮征,何平,葛润生.风廓线雷达对大气折射率结构常数的探测研究[J].大气科学,2008,32(1):133-140.
- [19] 顾映欣,陶祖钰.1989—1990年UHF风廓线雷达资料的分析和应用[J].中尺度气象文集.北京:气象出版社,1993:194-201.
- [20] 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.
- [21] 王敏仲,何清,魏文寿,等.新疆百里风区风廓线观测分析[J].气象科技,2010,38(5):100-106.
- [22] 王敏仲,魏文寿,杨莲梅,等.塔克拉玛干沙漠地表潜热特征分析[J].中国沙漠,2008,28(5):940-947.
- [23] 何清,刘强,杨兴华,等.塔克拉玛干沙漠腹地冬季大气边界层03廓线分析[J].中国沙漠,2010,30(4):909-916.
- [24] 李祥余,何清,艾力·买买提明,等.塔中春季阴天近地层风速、温度和湿度廓线特征分析[J].干旱气象,2007,25(2):22-29.
- [25] 刘强,何清,杨兴华,等.塔克拉玛干沙漠腹地冬季大气稳定度垂直分布特征分析[J].干旱气象,2009,27(4):308-313.
- [26] 吴焕萍. GIS技术在气象领域中的应用[J].气象,2010,36(3):90-100.
- [27] 何清,杨兴华,梁云,等.冬季乌鲁木齐低层大气  $\text{O}_3$  垂直分布观测的个案分析[J].气象,2010,36(4):126-131.
- [28] 张勇,王欣,徐祥德,等.大气廓线综合探测系统及其应用技术[J].气象科技,2004,32(4):263-268.
- [29] 何平.相控阵风廓线雷达[M].北京:气象出版社,2006:2-3.