

基于风廓线雷达技术的沙尘天气监测研究

魏文寿^{1,2}, 王敏仲^{1,2}, 何清^{1,2}

(1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002;

2. 塔克拉玛干沙漠大气环境观测试验站, 新疆塔中 841000)

[摘要] 利用塔克拉玛干沙漠大气环境观测试验站2010年4月11日沙尘天气风廓线雷达资料,分析了此次过程启动爆发的水平风场、垂直速度和雷达等效回波强度特征。研究表明:风廓线雷达是进行沙尘探测和监测的一种有效的高空大气遥感系统,它不仅可以捕捉到沙尘天气的开始和结束时间,而且能监测到沙尘在空中被输送的高度、厚度范围以及沙尘运动的垂直强度特征;塔克拉玛干沙漠扬沙和沙尘暴雷达等效回波强度约为 $-3 \sim 10$ dBZ,浮尘等效回波强度约为 $-15 \sim -3$ dBZ;水平风垂直切变以及低空东风的维持是此次沙尘天气发生的动力成因。扬沙、沙尘暴发生时,大气垂直速度表现为上升运动,在较大水平风速及干燥下垫面的配合下,导致地面沙粒被输送到高空,形成了沙尘天气。

[关键词] 风廓线雷达;沙尘天气;等效回波强度;监测

[中图分类号] P412 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2012)10-0051-06

1 前言

风廓线雷达是20世纪60年代研发并逐渐兴起的一种高空大气遥感探测系统,经过四十多年的发展,风廓线雷达技术已经成熟^[1]。在过去的几十年里,国内外学者利用风廓线雷达在大气风场探测^[2-4]、数值预报^[5]、降水过程^[6-9]、大气湍流及边界层厚度^[10-12]、雨滴谱反演^[13,14]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、日本等国家已将风廓线雷达组网并应用于气象业务中。美国国家大气海洋局(The National Oceanic and Atmospheric Administration, 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 and 大学^[15]。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,在过去的10年里,国产风廓线雷达制造技术取得了巨大的成功,其硬件性能有了质的飞跃,多项技术指标已经达到国际先进水平^[16]。风廓线雷达探测方式为连续、无人值守的遥感形式,探测资料具有种类多、时空分辨率高、精度高等特点,突出的探测优势决定了它在大气科学研究、气象业务应用和社会气象服务领域有着不可替代的重要作用。在天气预报方面,风廓线雷达组网观测资料在数值预报模式中的使用,可在一定程度上改善对风场的短时预报质量。在中小尺度气象研究领域,可以利用风廓线雷达开展对中小尺度天气系统、大气湍流、大气边界层等方面的研究,推断大气运动的湍流结构,监测大气边界层厚度的变化,确定风切变的位置高度等。由于风廓线雷达突出的探测优势,它不仅应用于气象主流领域,而且在航空、航天、军事国防、电磁波传播、空间精

[收稿日期] 2012-06-25

[基金项目] 国家科技支撑计划课题(2012BAC23B01);公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006012);中国沙漠气象科学研究基金课题(sqj2009013)

[作者简介] 魏文寿(1954—),男,甘肃武威市人,博士,研究员,主要从事荒漠环境与气候变化方面的研究;E-mail: weiwsh@idm.cn

确定位、水资源监测、大气污染监测等诸多领域都有着非常广泛的应用前景^[17]。

沙尘暴是干旱和半干旱地区特有的一种灾害性天气,是大气运动和自然地理环境的综合产物。它的发生发展不仅破坏生态平衡,而且对气候变化有着重要影响,已成为全球性的科学问题之一。风廓线雷达的发射波长为分米量级,远大于沙尘质点的直径,更适合瑞利散射条件,加上它只对近距离大气进行垂直探测,选用较窄的探测波束宽度,获取起始高度为近地面几十米、垂直分辨率 100 m 左右的探测资料,因此可以利用风廓线雷达对测站上空的沙尘天气进行探测。当大气中出现沙尘时,沙尘质点散射返回的电磁波信号强度比晴空大气要强,风廓线雷达获得的多普勒信息主要是沙尘质点运动的结果。

基于此,中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所于 2010 年 4 月在塔克拉玛干沙漠腹地实施了风廓线雷达探测沙尘天气的科学试验,该项研究利用探测试验取得的一次沙尘过程风廓线雷达资料,分析了沙尘天气启动爆发的水平风场和垂直速度特征,给出了典型沙尘天气的雷达等效回波强度及其垂直分布结构,讨论了利用风廓线雷达资料反演沙尘粒子数浓度的有关问题,其目的是拓展风廓线雷达的探测应用范围,建立基于风廓线雷达技术的沙尘天气监测方法。

2 研究区概况

塔克拉玛干沙漠位于北半球中纬度欧亚大陆腹地,面积 33.76 万 km²,是世界第二、中国第一大流动沙漠,该区年平均降水量不足 40 mm,风沙灾害极为频繁。塔克拉玛干沙漠大气环境观测试验站位于沙漠腹地,地理位置为 39°00'N,83°40'E,海拔高度 1 099.3 m,观测场地四周开阔,地表均为沙丘组成的流动沙漠,试验场地生活区有少量人工栽培的沙生灌木植物,下垫面特性基本代表了塔克拉玛干沙漠地表特征。

3 CFL-03 风廓线雷达关键技术流程和主要性能

在对流层范围内,大气湍流运动会造成大气折射率的不均匀分布,当风廓线雷达发射系统发射电磁波时,电磁波遇到不均匀分布的大气湍流运动,湍流运动会让电磁波能量产生不同方向的散射,其中

经过湍流运动散射的电磁波能量会被地面的风廓线雷达接收到,这部分能量经雷达接收系统和信号处理系统计算处理后,既可以得到大气目标物的运动信息,又可以得到大气目标物的强度信息。其中信号处理是风廓线雷达最重要的环节之一,信号处理主要包括三项关键技术(见图 1):a. 气象信号的相干积累过程,这一过程主要是牺牲时间、增加探测次数,让有规律的气象信号叠加到一起放大,而无规律的杂波信号叠加后相互抵消,目的是提高气象信号的信噪比;b. 谱变换,将时域信号转为频域信号;c. 谱平均,降低气象信号的脉动,提高气象信号的信噪比。

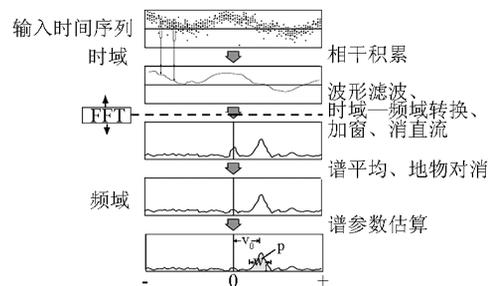


图 1 风廓线雷达信号处理原理流程图^[17]

Fig. 1 Wind profiler radar signal processing flow chart^[17]

该项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(见图 2),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、数据处理系统 6 部分组成,它的设计高度为 3 000~5 000 m,属于边界层风廓线雷达。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°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 提供的格式完全符合中国气象局要求的高/低模式谱数据、径向谱速度、实时廓线;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)、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 profiler 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 μs	0.33 μs
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



图 2 CFL-03 车载移动风廓线雷达在塔克拉玛干沙漠大气环境观测试验站观测沙尘暴

Fig. 2 A vehicle-mounted wind profiler radar detecting dust storm at the experiment station for atmospheric environment observation in the Taklimakan Desert

笔者所用资料为塔克拉玛干沙漠大气环境观测试验站 2010 年 4 月 11 日 CFL-03 风廓线雷达资料,包括水平风速、风向、垂直速度、信噪比(SNR)等。

4 沙尘天气过程简述

2010 年 4 月 11 日,受西伯利亚冷空气影响,塔克拉玛干沙漠腹地发生了 1 次沙尘天气。其中,00:00—11:40 为浮尘,11:40—14:17 为扬沙,强沙尘暴发生在 14:17—22:10,最小能见度 300 m,沙尘暴持续了约 8 h,22:10 以后转为扬沙。

5 风廓线雷达对沙尘天气的探测与监测分析

5.1 风廓线雷达对沙尘垂直分布的监测

风廓线雷达对沙尘进行探测时,由于采用的电磁波波长远远大于沙尘粒子的粒径,沙尘粒子对电磁波的散射更符合瑞利散射,可用通用雷达气象方

程对沙尘等效回波强度进行计算,公式可表示为^[18,19]

$$Z = \frac{1024 \times \ln 2 \times \lambda^2 \times R^2 \times L \times P_r}{\pi^3 \times P_t \times h \times G^2 \times \varphi \times \theta \times \left[\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right]^2} \quad (1)$$

$$P_r = \text{SNR}_0 \times P_n \quad (2)$$

$$P_n = K \times T_0 \times B \times N_f \quad (3)$$

式(1)~(3)中,SNR₀为原始信噪比,P_n为噪声功率,K为玻尔兹曼常数,取值为 K = 1.38 × 10⁻²³ J/K,B为接收机带宽,T₀是用绝对温度表示的雷达天线温度,N_f为噪声系数,λ为电磁波波长,R为目标物距离,L为馈线损耗,P_r为回波功率,π是常数,h为高度,P_t为雷达发射峰值功率,G为天线增益,φ、θ为水平和垂直波束宽度, $\left[\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right]^2$ 为介电常数(取值为0.52),Z为雷达回波强度(反射率因子)。

在计算过程中,首先求出接收机的噪声功率P_n,并依据SNR资料求出未做相干积累代表真实返回信号的原始信噪比SNR₀,然后求出回波功率P_r,最后推导计算出风廓线雷达回波强度Z。

图3给出了4月11日沙尘天气等效回波强度时间—高度剖面,可以清晰地看到,扬沙、沙尘暴发生期间(11:40—22:10),回波强度表现为密实的大值层,大值层顶高约1500 m,回波强度约为-3~10 dBZ;浮尘天气时段(00:00—11:40)回波强度相对较弱,约为-15~-3 dBZ。从图3中也可以看出,扬沙、沙尘暴期间600~1500 m高度内回波强度随高度呈减弱趋势,1500 m高度以上出现了明显的低值区,这说明在沙尘过程中,低层沙尘粒子的浓度要大于高层粒子浓度,沙尘粒子对电磁波产生的后向散射强度随沙尘浓度的变化而变化,低层粒子较浓,雷达探测到的回波信号就强,高层粒子浓度较低,其回波强度就弱。

以上分析表明,风廓线雷达是进行沙尘探测和监测的一种有效的高空大气遥感系统,它不仅捕捉到沙尘天气的开始和结束时间,而且能监测到沙尘被输送的高度、厚度以及垂直强度分布特征。通过对沙尘天气等效回波强度的分析表明:扬沙和沙尘暴回波强度约为 $-3 \sim 10$ dBZ,浮尘回波强度约为 $-15 \sim -3$ dBZ,沙尘回波强度明显小于降水回波,却大于晴空回波;此次沙尘被输送的高度约在 $1\ 500$ m以内,粒子浓度从低层向上呈递减趋势。

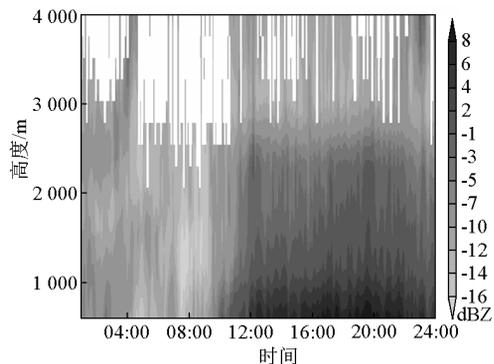


图3 2010年4月11日沙尘天气回波强度时间—高度剖面图

Fig. 3 Time-height profiles of dust weather echo intensity on 11 April, 2010

5.2 风廓线雷达对沙尘天气水平风场的监测

图4给出了CFL-03风廓线雷达对2010年4月11日沙尘天气水平风场的探测结果。图4中带箭头的实线为风垂直切变所处的位置高度。可以看出,在切变线以上主要为西风和西北风,切变线以下为东南风和东风,说明低空东风的维持是沙尘天气发生的动力条件。从水平风场的量级来看,沙尘天气启动前,垂直风切变的位置高度约为 500 m,低空 500 m以下水平风速较大,约为 12 m/s, 500 m以上西风并不是非常强烈,当沙尘天气开始后,水平风垂直切变位置逐渐升高到 $1\ 000$ m以上,但风速相对较小。进一步结合4月11日等效回波强度垂直剖面(见图3),发现在东南风的动力作用下,塔克拉玛干沙漠沙尘被输送到高空 $1\ 200 \sim 1\ 300$ m高度左右,而这一高度恰好与边界层偏东风维持的高度基本一致,说明在这次过程中,主要是低空偏东风吹动沙尘向西输送,高空西风气流并没有将沙尘向东西远距输送,只是局限在塔里木盆地活动。

以上分析表明:风廓线雷达可以有效监测沙尘天气水平风场的变化特征,由于受塔里木盆地三面

环山地形的影响,水平风垂直切变以及低空东风的维持是此次沙尘天气发生的动力成因,在地表热力和大气层结条件满足的状况下,近地表风速大于 $3.0 \sim 4.0$ m/s就有可能诱发扬沙天气,风速更大时则会导致沙尘暴的发生。

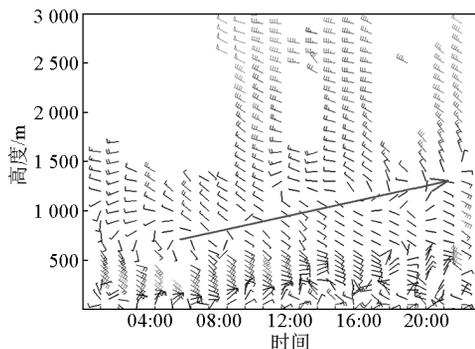


图4 2010年4月11日沙尘天气水平风时间—高度图

Fig. 4 Time-height of horizontal winds of dust weather processes on 11 April, 2010

5.3 风廓线雷达对沙尘天气垂直速度的监测

风廓线雷达探测到的垂直速度数据常采用“时间—高度”序列方式显示,即横坐标为时间、纵坐标为高度,每次垂直风探测结果按彩色等级显示为一列,并按观测时间先后顺序排列。“时间—高度”序列的显示方法有利于反映垂直速度的时间、高度变化,所以被普遍采用。

图5给出了2010年4月11日沙尘过程大气垂直速度的时间—高度图。可以看出,沙尘天气发生前及发生过程中,低空 $1\ 000$ m以下大气主要以辐合上升运动为主, $3:30 \sim 13:00$ 有一个“较强上升速度回波区”,从中可以分辨出2个强中心。第1个强中心($4:00 \sim 7:00$)最大上升速度 1.0 m/s、所在高度 300 m;第2个强中心($10:00 \sim 13:00$)最大上升速度 1.27 m/s、所在高度 500 m。根据“较强上升速度回波区”可以判定:2个强中心分别对应着2个上升速度较大的空气块。上升空气块的时间尺度约为 $2 \sim 3$ h,垂直尺度约 300 m。风廓线雷达可以直接测量上升空气块的时间尺度和垂直尺度,水平尺度则需要根据时间尺度和水平风进行估计。在上述2个上升空气块出现的时间和高度范围内,水平风平均约 7.5 m/s,由此可以估计上升空气块的水平尺度在 67.5 km左右。图6给出了与第2个强中心对应时刻($12:00$)的垂直速度廓线,可见在沙尘启动时 1 km以下高度为上升气流, 1 km高度以上以下下沉气流为主。大气垂直向上运动起到了抽气筒的效应,

有利于扬沙和沙尘暴天气的发生。

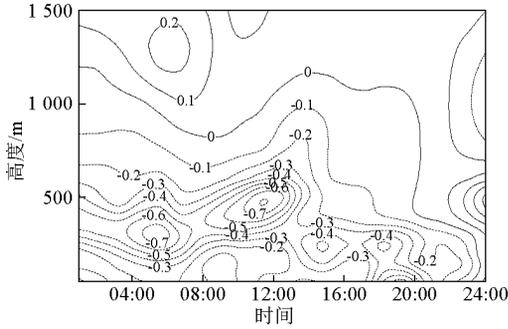


图5 2010年4月11日沙尘天气垂直速度时间—高度剖面图(单位:m/s)
(负值表示上升运动,正值表示下沉运动)

Fig. 5 Time-height profiles of the vertical velocity of the dust weather processes on 11 April, 2010 (unit: m/s) (negative stands for an ascending motion, positive for a sinking motion)

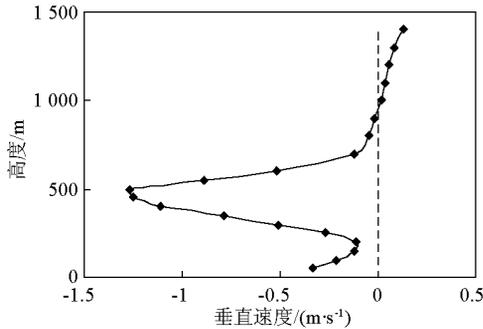


图6 2010年4月11日12时垂直速度廓线
(负值为上升,正值为下降)

Fig. 6 A vertical velocity profile at 12:00, 11 April, 2010 (negative stands for an ascending motion, positive for a sinking motion)

6 讨论

在计算出沙尘等效回波强度 Z 后,进一步尝试利用 Z 与沙尘粒径的关系估算了大气中沙尘粒子的浓度分布,这里假定沙尘为均匀的球形粒子,平均粒径为 $20 \mu\text{m}$,其回波强度 Z 与粒子数浓度的对应关系可采用文献[20]中的公式:

$$Z = N \bar{D}^3 \quad (4)$$

式(4)中, N 表示沙尘粒子数浓度,单位为 $\text{个}/\text{m}^3$, \bar{D} 为沙尘粒子平均粒径。

图7给出了2010年4月11日扬沙和沙尘暴过程(10:00—24:00)由回波强度 Z 估算出的粒子数

浓度时间—高度图。可以看出,低空600 m高度沙尘粒子数浓度相对较大,每立方米大气中最多有 1.2×10^{11} 个沙尘粒子,随着高度升高,粒子数浓度逐渐减小,在1000 m高度每立方米大气中约有 2×10^{10} 个粒子。游来光^[21]等曾在飞机上安装粒子测量系统(PMS),在中国内蒙阿拉善沙漠进行了沙尘暴粒子浓度的飞机探测,结果表明:在2000~3300 m高度内每立方米大气中最多有 1.5×10^6 个沙尘粒子。通过与此结果进行比较,发现利用风廓线雷达资料反演估算的粒子浓度明显比飞机探测结果偏大。塔克拉玛干沙漠沙尘粒子形态各异,粒径大小不均,况且缺少沙漠高空沙尘粒谱观测资料,目前还无法利用风廓线雷达对高空沙尘数浓度和质量浓度进行准确的反演计算,这部分工作有待今后继续进行深入的分析和研究。

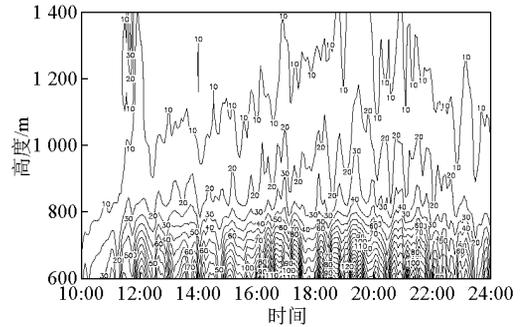


图7 2010年4月11日10:00—24:00沙尘过程粒子数浓度时间—高度图(单位: 1×10^9 个/ m^3)

Fig. 7 Time-height of particle concentration of the 10:00 - 24:00 dust process on 11 April, 2010 (unit: 1×10^9 numeral/ m^3)

7 结语

笔者利用设在塔克拉玛干沙漠大气环境观测试验站的CFL-03风廓线雷达资料,对2010年4月11日发生的典型沙尘天气进行分析,给出了沙尘天气启动爆发的水平风场和垂直速度特征,计算分析了典型沙尘暴、扬沙、浮尘天气的雷达回波强度及垂直分布结构,讨论了利用风廓线雷达资料反演大气沙尘数浓度的有关问题。通过笔者的分析,可以初步得到以下几点结论:

1) 风廓线雷达是进行沙尘探测和监测的一种有效的高空大气遥感系统,它不仅捕捉到沙尘天气的开始和结束时间,而且能监测到沙尘在空中被输送的高度、厚度范围以及沙尘运动的垂直强度

特征。

2)塔克拉玛干沙漠扬沙和沙尘暴等效回波强度约为 $-3 \sim 10$ dBZ,浮尘等效回波强度约为 $-15 \sim -3$ dBZ,沙尘回波强度总体小于降水回波,却大于晴空回波。

3)水平风垂直切变以及低空东风的维持是此次沙尘天气发生的动力成因。扬沙、沙尘暴发生时,大气垂直速度表现为上升运动,在较大水平风速及干燥下垫面的配合下,导致地面沙粒被输送到高空,形成了沙尘天气。

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]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,1997,14:565-569.

[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° N latitude, 157° E longitude)[J]. Journal of Atmospheric Science, 1988,45:396-405.

[4] Lathon M, Campistrone 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]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002,19:899-910.

[5] Kuo Y H, Donnell E G, Shapiro M A. Feasibility of short-range numerical weather prediction using observations from a network of profilers[J]. Monthly Weather Review,1987,115:2402-2427.

[6] 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]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1993,10:663-673.

[7] Deshpande S M, Raj P E. UHF wind profiler observations during a tropical pre-monsoon thunderstorm: a case study[J]. Atmospheric Research,2009,93:179-187.

[8] 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.

[9] 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, 59:141-151.

[10] 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,1994,68:375-385.

[11] Balsley B B, Peterson V L. Doppler-radar measurements of clear air atmospheric turbulence at 1290 MHz[J]. Journal of Applied Meteorology,1981,20:266-274.

[12] Hocking W K. Measurements of turbulent energy dissipation rates in the middle atmosphere by radar techniques: a review[J]. Radio Science,1985,20:1403-1422.

[13] Currier P E, Avery S K, Balsley B B, et al. Use of two wind profilers in the estimation of raindrop size distribution[J]. Geophysical Research Letters, 1992,19:1017-1020.

[14] Wakasugi K, Mizutani A, Matsuo M. A direct method for deriving drop-size distribution and vertical air velocities from VHF Doppler radar spectra[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,1986,3:623-629.

[15] 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,1994,12:518-528.

[16] 何平,朱小燕,阮征,等.风廓线雷达探测降水过程的初步研究[J].应用气象学报,2009,20(4):465-470.

[17] 何平.相控阵风廓线雷达[M].北京:气象出版社,2006.

[18] 阮征,葛润生,吴志根.风廓线仪探测降水云体结构方法的研究[J].应用气象学报,2001,13(3):330-338.

[19] 钟刘军,阮征,葛润生,等.风廓线雷达回波信号强度定标方法[J].应用气象学报,2010,21(5):598-605.

[20] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕.雷达气象学[M].北京:气象出版社,2001.

[21] 游来光,马培民,陈军寒,等.沙尘暴天气下大气中沙尘粒子空间分布特点及其微结构[J].应用气象学报,1991,2(1):13-21.

(下转 64 页)