

汪学渊, 李栋, 任雍, 等. 2013. 风廓线雷达资料在台风苏拉登陆过程中的应用初探. 气象, 39(11): 1431-1436.

风廓线雷达资料在台风苏拉登陆过程中的应用初探^{*1}

汪学渊¹ 李 栋¹ 任 雍¹ 陈孝腔¹ 朱会芸²

1 福建省大气探测技术保障中心, 福州 350001

2 福建省永安市气象局, 永安 366000

提 要: 为了研究风廓线雷达在台风天气过程预报中的作用, 对 2012 年 8 月 2—4 日在福建秦屿镇登陆的台风苏拉天气过程统计分析, 结果表明: 风廓线雷达在台风苏拉登陆期间 4 km 以上高空有效数据获取率明显提高, 确定风廓线雷达的有效探测高度为 4.8 km; 通过信噪比和垂直速度数据统计分析出台风登陆前后带来间歇性的降雨, 而台风眼登陆主要表现为无降水天气, 仅有少量的降雨, 这一结论进一步在小时降雨量统计中得到验证; 通过水平风速数据统计分析出台风登陆前后在有效探测高度内水平风速在 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, 而台风眼登陆水平风速在 $0 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 统计结果与台风登陆物理过程相吻合。

关键词: 风廓线雷达, 苏拉台风, 信噪比, 垂直速度, 水平风速

中图分类号: P414

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.11.006

Preliminary Analyses on Application of Wind Profiler Radar Data to the Landing Process of Typhoon Saola

WANG Xueyuan¹ LI Dong¹ REN Yong¹ CHEN Xiaoqiang¹ ZHU Huiyun²

1 Support Centre for Atmospheric Observation Technology, Fujian Meteorological Bureau, Fuzhou 350001

2 Yong'an Meteorological Office of Fujian, Yong'an 366000

Abstract: To study the role of wind profiler radar (WPR) in the forecasting of typhoon process, this paper statistically analyzed the radar detection data of typhoon Saola when it landed Qinyu Town, Fujian Province during 2—4 August 2012. The results show that there is a significant improvement in data acquisition rate in the high level above 4 km by WPR during the landing process of typhoon Saola and the effective detection height of WPR is 4.8 km. Statistical analysis of SNR (signal to noise ratio) and vertical velocity data show that the typhoon Saola brings intermittent rain before and after the landfall, and the landfall of typhoon eye produces little or no rain. This result is further verified in the hourly precipitation analysis. Statistical analysis of horizontal wind speed data shows that the horizontal wind speed in effective detection height is about $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ before and after the landfall of the typhoon, while the horizontal wind speed of the typhoon eye is about 0 to $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ over the landing period. This statistical result is consistent with the physical process of typhoon Saola landing.

Key words: wind profiler radar (WPR), typhoon Saola, signal to noise ratio (SNR), vertical velocity, horizontal wind speed

* 2012 年 11 月 9 日收稿; 2013 年 5 月 13 日收修定稿

第一作者: 汪学渊, 主要从事风廓线雷达探测与应用研究. Email: wxy_976@163.com

引言

风廓线雷达利用多普勒效应,可以连续 24 h 不间断探测边界层的实时三维风场情况,提供探测高度范围内的大气水平风速、风向、垂直气流、大气折射率结构常数等气象要素随高度的分布和随时间的变化,具有很高的时间和空间分辨力。风廓线雷达资料在大气风场观测和数值预报、中小尺度天气系统的监测和预报以及灾害性气象服务等方面的应用越来越受到人们的重视。

国内外专家和学者利用风廓线雷达资料对大气结构和天气过程展开研究,得出具有实用价值的结论并得到广泛的应用。例如:Lehmiller 等(2001)在 2001 年利用风廓线雷达资料对夏季连续雷暴天气过程进行了研究;Muschinski 等(1999)利用边界层 WPR 垂直方向上返回信号的功率谱分析,研究了大气湍流结构,对当地的平均大气折射率湍流结构常数(C_N^2)垂直结构进行了分析。何平等(2009)对风廓线雷达探测降水过程的初步研究,认为国产风廓线雷达能够在降水天气下工作,根据风廓线探测资料可以对降水性质做出大致判断,通过垂直速度、信噪比(SNR)、速度谱数据分析估计降水粒子尺度谱及其高度分布。周志敏等(2010)利用风廓线雷达资料对冰雹天气过程进行分析,利用水平风和垂直速度数据得出结论风廓线雷达早于天气图获知冷空气

入侵时间,并能清楚地分析出冷暖平流的分布形势,垂直速度随高度的波动较大,基本上能反映对流强弱。古红萍等(2008)利用边界层风廓线雷达资料对北京夏季强降水天气分析,认为风廓线揭示强降水开始前数小时城区地面风场辐合,有利于降水过程的发展,降水前水平风切变明显增大,预示降水的开始,对降水的临近预报有很好的指示作用。董保举等(2012)利用信噪比和垂直速度判断降水期间的降水性质,降水期间功率谱密度出现双峰谱,能测出垂直气流速度及下降粒子速度。目前,国内利用风廓线雷达资料对台风登陆天气过程的应用研究较少,因此开展台风登陆期间演变特征分析,了解风场结构对台风预报具有价值意义。

福建省地处东南沿海,受到台风的影响比较大,每年有 5~8 个台风登陆或者影响福建沿海地区,同时每年因台风造成重大经济损失和人员伤亡。本文利用苏拉台风登陆期间风廓线雷达资料,对信噪比、垂直速度、水平风速进行统计分析,分析台风登陆前后风廓线特征指标的变化,得出一些有意义的结论,为风廓线雷达资料在台风预报中的应用积累经验。

1 机动式风廓线雷达的主要技术性能和台风背景资料

本文采用中国 23 所生产的 CFL-03 型机动式边界层风廓线雷达,其主要性能参数如表 1 所示。

表 1 CFL-03 型边界层风廓线雷达主要性能参数

Table 1 Main operating specifications of the CFL-03 Wind Profile Radar

测风模式	分层高度/m	测风高度/m	工作频率/MHz	时间分辨率/min	风速误差/ $m \cdot s^{-1}$	风向误差/ $^{\circ}$
低模	60	60~1080	1320	≤ 6.0	≤ 1.0	≤ 10
高模	120	600~7080				

风廓线雷达产品数据的时间分辨率为 6 min,雷达设置探测高度为 7080 m,低模和高模衔接层高度为 720 m。移动风廓线雷达具有机动性好的特点,在台风登陆前一天确定观测地点为霞浦县,距离登陆地点秦屿镇 10 km 左右。台风苏拉的移动路径如图 1 所示,2012 年第 9 号强热带风暴苏拉的中心 2012 年 7 月 30 日 08:00 位于中国台湾鹅銮鼻东南方大约 500 km 的西北太平洋洋面上($19.6^{\circ}N$ 、 $125.0^{\circ}E$),中心附近最大风力有 11 级($30 m \cdot s^{-1}$),

中心最低气压为 980 hPa,8 月 2 日 03:15 前后,强台风苏拉在台湾省花莲市秀林乡沿海登陆;3 日早上 06:50 前后减弱为强热带风暴,在福建省福鼎市秦屿镇沿海二次登陆,登陆最大风力 $25 m \cdot s^{-1}$,移动速度 $15 km \cdot h^{-1}$,穿过福建北部与浙闽交界一带,3 日 21:00 左右进入江西抚州减弱为 7 级热带低压。选取资料从 2012 年 8 月 2 日 12:30 到 4 日 11:00 的风廓线资料,分析台风登陆前后信噪比、垂直速度和水平风速的变化特征。



图 1 苏拉台风移动路径

Fig. 1 The track of typhoon Saola

获取率对比曲线,从图中可以看出,在 4.8 km 以下苏拉台风有效数据获取率都在 80% 到 90% 之间,按照有效数据获取率 80% 对应的高度为风廓线雷达有效探测高度(何平等,2009),则台风登陆期间有效探测高度为 4.8 km,有效数据获取率经典分布曲线的有效探测高度为 3.5 km,并且随着高度的增加有效数据获取率逐渐减小到 20% (在 6 km 高度),而台风苏拉在 4.8~7 km 始终保持大于 70% 的有效数据获取率。这与台风登陆期间带来的大风、降雨、大气的湿度有关,使得风廓线雷达识别功率谱谱峰的能力增强(何平,2006)。

2 数据获取率统计分析

2.1 数据获取率处理方法

数据获取率是反映风廓线雷达探测性能的一个很重要的指标,综合反映风廓线雷达获取有效观测数据的能力。有效数据获取率 (Available Data Rate, ADR) 定义为:实际获取的有效数据量与应获得的数据总量之比(胡明宝等,2008),即

$$ADR(\%) = \frac{\text{有效数据量}}{\text{应获得的数据总量}} \times 100\%$$

在不同高度上,风廓线雷达的有效数据获取率不同。取高度、有效数据获取率为坐标轴便可以得到一条随高度变化的有效数据获取率曲线。

2.2 台风登陆期间风廓线雷达数据获取率分析

台风登陆期间获取的数据文件总数 426 个,统计每一层的有效数据,画出如图 2 所示的有效数据

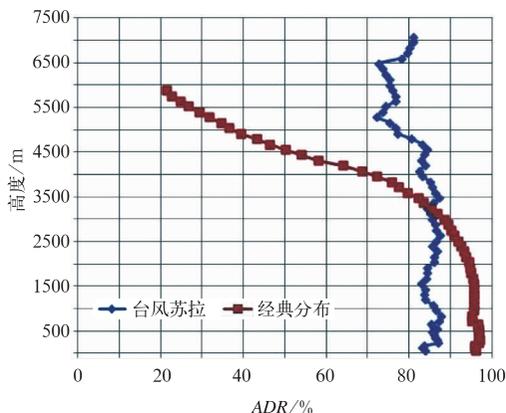


图 2 苏拉台风与经典分布对比曲线

Fig. 2 Comparison of typhoon Saola's effective data acquisition rate and classic distribution curve

3 台风苏拉风廓线雷达资料分析

3.1 台风登陆期间信噪比和垂直速度的变化特征分析

信噪比(SNR)是风廓线雷达返回信号中信号与噪声的比值,反映的是回波功率,SNR 越大对应回波功率越强。如图 3 所示,图中的数据采用风廓线雷达高模的信噪比,高度从 600~7080 m 的时间序列资料。低模由于采用发射脉冲宽度不同,造成低模和高模的信噪比不连续,而且低模容易受到地物杂波的干扰,只提取高模的信噪比进行分析。信噪比在无降雨天气和有降雨天气表现为不同的特征,在无降雨天气风廓线雷达探测的回波功率是由于大气湍流运动造成折射率分布不均匀而产生的散射简称湍流散射,表现为回波信号非常微弱,且随着高度的增加回波功率呈指数级递减;在有降雨天气风廓线雷达探测的回波功率主要是由于雨滴在入射电磁波极化下作强迫的多极振荡而产生的散射,相对湍流散射回波功率强,且随着高度的增加回波功率衰减效率低。垂直速度是指大气和雨滴在铅直方向上运动速度,在无降雨天气下大气的垂直速度在 $-1 \sim 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,而且大部分在 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近(王敏仲等,2012);而在降雨天气下风廓线雷达主要探测雨滴的下落速度,速度在 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。

利用信噪比和垂直速度在不同天气条件下表现不同的特征进而分析台风登陆过程。从图 3 中可以看出(3R06:35 表示 3 日 06:35)台风登陆前的 X 区域,从 600~5500 m 的信噪比取值在 25 dB 左右的红色区域,信噪比强度大,回波功率强,出现红色和蓝色相间的区域,而蓝色区域信噪比随着高度呈指数级递减,变化范围从 20 dB 逐渐减小为 -20 dB ,

初步判断为间歇性降雨(红色区域对应降雨,蓝色对应无降雨);通过垂直速度数据的分析以验证上面的判断,从垂直速度数据来看,如图 4 所示的 E 区域,在高度 0~5300 m 范围内,垂直速度在 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右(向下的速度为正)的黄色区域为雨滴下落速度,蓝色区域大气的垂直速度在探测范围内为 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,呈现黄色和蓝色相间,这与信噪比的现象是一致的。可以得出:台风登陆前,出现间歇性的降水过程。

从图 3 和图 4 的 Y 和 F 可以看出,信噪比随着高度增加急剧下降,在 4 km 高度信噪比大约为 -10 dB ,对应的垂直速度维持在 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近,只在 3R06:35 之前出现少量信噪比强度大的红色区域对应垂直速度为黄色区域,以上分析得出:台风眼登陆期间仅有少量的降水,大部分无降水。

从图 3 和图 4 的 Z 和 G 区域对比,同样的分析方法可以得出台风登陆后带来间歇性的降水。台风结束时间在 4R04:00,信噪比随着高度逐渐减小,垂直速度维持在 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,无降水过程,台风对当地的影响结束。

从以上分析过程可以认为,信噪比和垂直速度能够分析台风登陆期间降雨过程,在台风登陆前后都表现为间歇性的降水,而台风眼登陆期间仅有少量的降水,大部分为无降水。

3.2 台风登陆期间水平风速变化特征

在风廓线雷达中水平风的合成是对水平风场的分布做一定的假设,目前风廓线雷达普遍采用水平风场均匀假设条件下通过几何关系计算水平风。为了能获得风廓线雷达上空三维风场信息,至少需要三个不共面的波束,为了提高测量精度,大部分风廓线雷达采用五个波束。五个波束指向一般是:一个垂直指向波束 V_{RZ} ,四个倾斜指向波束。倾斜波束一般为正东 V_{RE} 、正西 V_{RW} 、正南 V_{RS} 、正北 V_{RN} ,倾斜波束的天顶夹角 θ 一般在 15° 左右, V_{SN} 表示南北方向的水平风, U_{WE} 表示东西方向的水平风, V 表示水平风速, h 表示离雷达天线垂直高度(吴志根,2012)。利用三波束计算方法改进的五波束计算公式如下所示,将式(1)和式(2)代入式(3)可得到不同高度上的水平风速的大小,这样计算出来的水平风速比三波束准确度更高。由于这里没有讨论风向情况,因此省略风向的计算公式。

$$V_{SN}(h) = \frac{1}{\sin\theta} \left\{ \frac{1}{2} [V_{RS}(h) - V_{RN}(h)] - V_{RZ}(h) \cos\theta \right\} \quad (1)$$

$$U_{WE}(h) = \frac{1}{\sin\theta} \left\{ \frac{1}{2} [V_{RW}(h) - V_{RE}(h)] - V_{RZ}(h) \cos\theta \right\} \quad (2)$$

$$V(h) = \sqrt{V_{SN}^2 + U_{WE}^2} \quad (3)$$

利用不同高度上水平风速大小用色标表示绘制在时间序列图上,得到如图 5 所示的水平风速色标图,从图中可以看出水平风速在台风登陆不同时间段表现为不同的特征。台风登陆前水平风速随着高度的增加而增加,图中标 A 的绿色区域水平风速在 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,在 2R22:00 时刻出现的蓝色区域水平风速达 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在图中 B 区域风速极大值所对应的高度呈降低的趋势,高度从 3000 m 降低到 3R05:25 左右的 600 m,水平风速维持在极小的风速 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,可以看出台风外围的影响慢慢减小,逐渐向台风眼过渡;在图中 C 区域水平风速为 $0 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风速很小,说明台风眼内部从低空到高空水平风速很小;在图中 D 区域,风速增大为 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。

图 5 从水平风速的角度分析了台风登陆过程的变化特征。图 6 为台风登陆期间用风羽表示的不同阶段风廓线图,将侧重风向的角度分析台风登陆过程的变化特征。为了便于看到比较清晰的风廓线图,选取了图 5 中各个阶段的部分风廓线并用红色的实线隔开,图 6 中所标识的 A, B, C, D 分别与图 5 的 A, B, C, D 相对应。在图 6 的 A 区域有效探测高度为 7000 m,风速 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,风向为偏北风; B 区域有效探测高度下降为 4000 m,风速减小到 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,风向为偏北风; C 区域可以明显地看到风向开始转变,在 C 的前半部分在 1000~2500 m 高度上风向由偏北风逐渐转变为偏东风,在 5500~7000 m 高度上风向转变为东南风,在 C 区域的后半部分,风向转变为偏南风,说明在台风眼过境时风向发生了根本的逆转,并且风向变化是从高空向下传导的过程。在 D 区域有效探测高度为 7000 m,风速为 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,风向为正南风。从这个过程中可以看到台风过境时风向变化的内部结构。

从以上的分析说明台风登陆前后从低空到高空带来大风天气,风向分别为偏北风和正南风,而在台

风眼过境时表现为极小的风速,风向由偏北风逐渐转变为偏南风,这与台风运转机制有着很好的一致性。

3.3 降雨量统计分析

图 7 为台风登陆期间霞浦县气象局观测场的小时降雨量,从图中可以看出降雨主要出现在 8 月 2 日和 3 日的 17:00 左右,呈现出两个降雨中心点,中心点的降雨量分别为 16.3 和 27.3 mm。台风登陆的时间为 06:50,降雨量的统计以小时为单位,图中 08:00 的数据 0.3 表示 07:00—07:59 时 1 h 的降雨量。以 08:00 为中心左右 2 h 可以看出台风眼登陆期间出现少量的降雨,从 06:00—10:00 的降雨量分

别为 0.2、1.2、0.3、1 和 0.2 mm。

从小时降雨量和信噪比以及垂直速度图对比来看,有无降水有着比较好的对应关系,验证了台风登陆前后带来较多的雨水,而在台风眼登陆期间降雨量则很少。

4 小 结

本文利用福建气象局 CFL-03 机动式风廓线雷达资料,对 2012 年 8 月 2—4 日的台风苏拉天气过程进行了统计分析,表明机动式风廓线雷达能够在台风天气工作,并得到以下初步结果:

- (1) 根据风廓线雷达资料对台风登陆期间有效

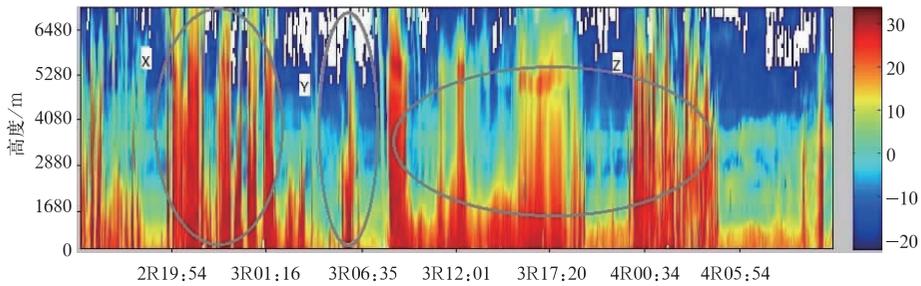


图 3 台风登陆期间高模信噪比 (3R06:35 为 3 日 06:35)

Fig. 3 The signal-to-noise ratio during the landing of typhoon Saola (3R06:35 represents 06:35 BT 3)

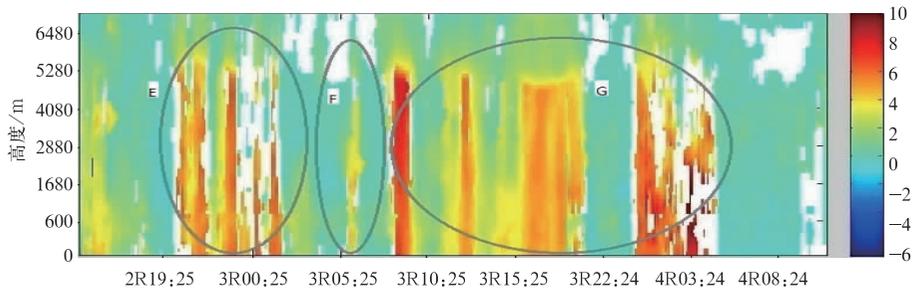


图 4 台风登陆期间垂直速度

Fig. 4 The vertical velocity during the landing of typhoon Saola

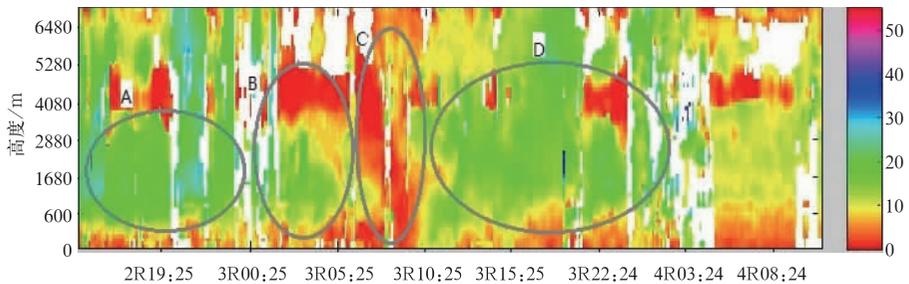


图 5 台风登陆期间水平风速

Fig. 5 The horizontal wind speed during the landing of typhoon Saola

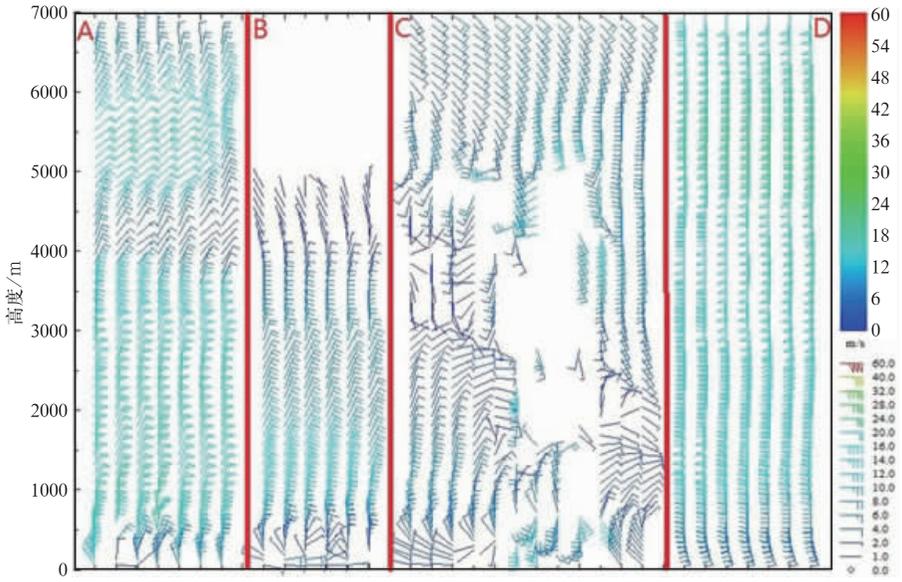


图 6 台风登陆期间不同阶段风廓线

Fig. 6 The wind profiles in different stages during the landing of typhoon Saola

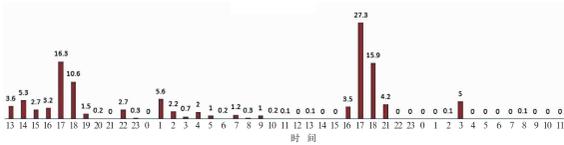


图 7 苏拉台风小时降雨量 (单位: mm)

Fig. 7 The hourly precipitation brought by typhoon Saola (unit: mm)

数据获取率进行统计分析。分析表明台风登陆期间有效探测高度为 4.8 km, 通过与效数据获取率经典分布曲线对比, 说明在台风登陆期间风廓线雷达的探测能力明显增强。

(2) 利用风廓线雷达提供的多种垂直探测资料, 可以从信噪比、垂直速度、水平风速等数据多种角度分析、了解台风天气过程。分析结果表明信噪比、垂直速度、水平风速均能反映台风天气过程, 台风外围水平风速在 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, 呈现间歇性的降雨过程; 台风眼水平风速在 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, 仅有极少量的降水, 大部分无降水; 台风登陆前后风向分别为偏北风和偏南风, 台风眼过境时风向由偏北风逐渐转变为偏南风, 并且风向变化是从高空向下传导。

(3) 通过小时降雨量的定量统计分析, 进一步验证台风外围带来大量降水, 台风眼仅有极少量的降水。

通过台风苏拉天气过程个例分析, 认识到风廓

线雷达资料在台风预报、预警等方面的巨大应用潜力。随着风廓线雷达在我国沿海陆续建设, 未来多部雷达多角度多方位同时探测台风登陆, 将为研究台风天气过程的内部结构以及演变过程提供良好的平台。

参考文献

董保举,付志嘉,李明,等. 2012. 风廓线雷达资料在暴雨天气过程特征分析中的作用. *气象科技*, 40(1):74-77.

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

何平. 2006. 相控阵风廓线雷达. 北京:气象出版社:94-103.

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

胡明宝,郑国光,肖文建. 2008. 风廓线雷达数据获取率统计分析. *现代雷达*, 30(10):14-16.

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

吴志根. 2012. 边界层风廓线雷达在降水时段中的在线分析应用研究. *气象*, 38(6):758-763.

周志敏,万蓉,崔春光,等. 2010. 风廓线雷达资料在一次冰雹过程分析中的应用. *暴雨灾害*, 29(3):251-256.

Lehmiller G S, Bluestein H B, Neiman P J, et al. 2001. Wind profiler in a supercell thunderstorm as measured by a UHF wind profiler. *Mon Wea Rev*, 129:1986-1989.

Muschinski A, Sullivan P P, Wuertz D B, et al. 1999. First synthesis of wind profiler signals on the basis of large eddy simulation data. *Radio Sci*, 6(12):1437-1459.