

临安一次梅雨锋暴雨过程的风廓线雷达探测资料分析

何好斐¹ 高祝宇²

(1 杭州市余杭区气象局, 杭州 311100; 2 浙江省气象信息网络中心, 杭州 310000)

摘要: 利用临安CFL-03型边界层风廓线雷达探测资料对2017年6月23—24日的一次梅雨锋暴雨过程进行了详细分析, 结果表明风廓线雷达能够揭示江淮梅雨系统中的中尺度切变线特征, 低空切变线是这次暴雨过程的降水主要集中在降水前段和后段的主要原因, 高空西风急流使降水得以维持发展。由功率谱数据估算的回波强度反映了此次暴雨过程的发展变化细节, 降水集中区的降水云体发展深厚, 达到5 km以上。垂直速度和大气折射率结构常数 (C_n^2) 与降水的变化趋势一致, 10 mm的降水量对应的垂直速度接近7 m/s, C_n^2 对数值接近-11。由于与降水的良好对应关系, 风廓线雷达产品可以应用于强降水灾害天气的监测业务。

关键词: 风廓线雷达, 暴雨, 切变线, 急流, 回波强度, 垂直速度, 大气折射率结构常数

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.006

Analysis on Wind Profiling Radar Data of a Rainstorm at Lin'an

He Yufei¹ Gao Zhuyu²

(1 Yuhang Meteorological Bureau, Hangzhou 311100

2 Information Network Center of Zhejiang Meteorological Bureau, Hangzhou 310000)

Abstract: A Meiyu front rainstorm process from June 23, 2017 to June 24, 2017 is analyzed in detail by using CFL-03 boundary-layer wind profiling radar at Lin'an, and the results show that wind profiling radar observations are able to reflect characteristics of mesoscale shear line during the Meiyu front system. The main reason why precipitation is relatively concentrated at the beginning and end of this process is that low-level wind shear happens to move over Lin'an during those periods. Thanks to upper level jet, this rainstorm lasts a long time. Except wind profiles, radar echo intensity is estimated by power spectrum data to analyze the details of developments of the rainstorm, and it is found that precipitation cloud develops vigorously with height over 5 km. Other wind profiling radar products, such as vertical velocity and atmospheric refractive index structure constant (C_n^2), change in an identical way comparing with the precipitation. When the precipitation is above 10 mm, vertical velocity is around 7 m/s and log of C_n^2 is around -11. Consequently, wind profiling radar products can be used to monitor rainstorm operationally.

Keywords: wind profiling radar, rainstorm, shear line, jet, echo intensity, vertical velocity, C_n^2

0 引言

暴雨及其造成的洪涝是我国主要的自然灾害之一, 引发的山崩、滑坡、泥石流等次生灾害更是给国民经济和人民的生命财产带来严重危害。长江三角洲地区暴雨灾害频发, 尤其是在每年6月中下旬到7月上旬的梅雨锋暴雨^[1-3], 因其强度大且持续时间久的特点往往致灾严重。

为了更好地对暴雨进行分析研究与监测预警, 降低暴雨灾害的影响, 需要高时空分辨率的非常规探测

资料以弥补常规地面高空资料的不足^[4-5], 风廓线雷达作为新型的探测设备, 在灾害天气的研究领域与业务应用中已经发挥了重要作用^[6-9]。李峰等^[10]利用国产对流层II型风廓线雷达资料对北京地区经历的一次雾霾雨雪多相态天气过程进行了诊断分析, 结果表明风廓线雷达产品可以判别天气发展转变过程, 能很好揭示降水细节变化; 古红萍等^[11]利用三个站的Airda3000边界层风廓线雷达分析了北京地区一次强降水过程, 阐述了降水过程的复杂垂直结构与发展演变机理; 陈楠等^[12]将一次春季降水过程的风廓线雷达资料与地面自动站雨量数据进行对比分析和相关统计, 分析了风廓线雷达产品与降水的相关性; 周志敏等^[13]分析了湖北咸宁地区一次冰雹过程的风廓线雷达水平风和垂直速度资料, 提取了对流发展特征; 阮征等^[14]对风廓线

收稿日期: 2019年2月27日; 修回日期: 2019年8月26日
第一作者: 何好斐(1992—), Email: heyufeizhao@163.com
通信作者: 高祝宇(1990—), Email: 1171759671@qq.com
资助信息: 浙江省气象局科技项目(2017ZD18)

雷达探测降水云体的方法进行了探究；黄伟等^[15]利用风廓线雷达资料估测了雨滴谱参数；Benjamin等^[16]分析了美国中部地区的一次强雷暴天气与一次强降雪天气，充分肯定了美国风廓线雷达站网数据在强灾害天气监测与预报中的作用。

风廓线雷达不仅有很高的时间分辨率，而且垂直方向上的分辨率精细到60 m，因此对暴雨等中尺度现象的研究有很高的科学价值^[17]，将风廓线雷达资料应用于暴雨过程的分析研究是十分有意义的。目前浙江省业务运行的风廓线雷达已达7部，但风廓线雷达资料在省内的应用效果如何，仍缺乏相关的研究工作。本文利用临安站风廓线雷达探测资料分析了一次典型的梅雨锋暴雨过程，从风廓线时序变化中提取了此次暴雨过程的中尺度影响系统特征，通过功率谱数据估算回波强度以分析强降水的细节变化过程，分析垂直速度、大气折射率结构常数等产品，提取与强降水有关参数，为省内风廓线雷达对灾害性暴雨的天气分析与监测应用提供参考。

1 天气实况与设备资料

1.1 天气实况

2017年6月23—24日，受地面梅雨锋系统和高空数千千米西南东北走向急流带影响，华南和华东地区出现了持续性降水过程，其中杭州临安经历了一次暴雨过程，日降水量达到106.1 mm，降水过程小时雨量如图1所示。从图1中可以看出23日中午12时降水开始，17时降水到达开始阶段的峰值13.2 mm，18时到次日04时降水维持，小时降水量在1 mm左右，到24日上午降水势头持续不减，小时降水量10 mm左右，10—11时降水量达到降水末段的峰值，小时雨量在15.8 mm，之后降水逐渐减小，14时降水停止。此次梅雨锋暴雨过程雨量主要集中在降水前段和后段，尤

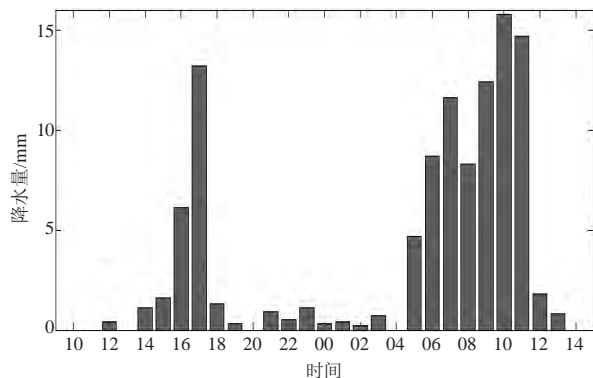


图1 2017年6月23日10时至24日14时临安地面自动站小时雨量(北京时,下同)

Fig.1 Hourly rainfall at Lin'an automatic weather station from 10:00 23 June to 14:00 24 June 2017

其在降水后段，小时雨量在10 mm左右的持续时间达到6 h，造成了杭州临安城区多处内涝积水，给民众生活带来诸多不便，水库水位上升加重了山洪暴发的危险性。

1.2 设备资料

临安风廓线雷达为CFL-03型边界层雷达，采用五波束扫描探测方式，一个探测周期包含低模式和高模式2个探测模式，探测周期为3~5 min，详细雷达参数见表1。

表1 临安风廓线雷达参数

Table 1 Parameters of wind profiling radars at Lin'an

参数	CFL-03边界层雷达	
	低模式	高模式
发射波长/m	0.227	0.227
脉冲宽度/ μ s	0.8	3.2
脉冲重复频率/Hz	31250	15625
FFT点数	512	512
谱平均数	8	4
探测起始高度/m	60	600
探测终止高度/m	1500	5280
距离库长/m	60	120

本文使用的风廓线雷达数据包括功率谱数据、ROBS文件数据、OOBS文件数据，其中功率谱数据的时间分辨率为4 min，ROBS文件数据的时间分辨率为6 min，OOBS文件数据的时间分辨率为1 h，ROBS和OOBS文件数据包含风廓线雷达探测各个高度的水平风速、水平风向、垂直速度、大气折射率结构常数等。

临安风廓线雷达与地面自动站位于同一站址，经纬度为119.7°E，30.22°N，有利于两者数据间的协同对比分析。

2 风廓线资料分析

利用风廓线雷达OOBS数据分析研究此次梅雨锋暴雨过程的动力条件，OOBS提供了每一小时间隔各个距离高度的水平风速和风向信息。图2给出了2017年6月23日10时至24日14时的水平风垂直廓线分布，从图中可以看出，降水之前10—11时，低空2 km以下以西风为主，高空以西南风为主，风随高度逆转，临安站上空冷平流过境；12—13时开始低空转为西南气流，降水开始；14时，低空1.8 km以下风向转为西北风，1.8 km以上东风转西南风，风随高度顺转，在1.8 km以上有暖平流，15时风在整个高度上由东风转西南风，临安受暖平流控制，14—15时存在着低空切变线系统如图2中左侧红线所示，低空东边暖湿气流与西北冷空气交汇，辐合上升明显，降水逐渐增多；16—21时，低层风向逐渐由东风转为偏西风，随高度增加转得越快，说明切变线系统的时间尺度随高度增加减小，

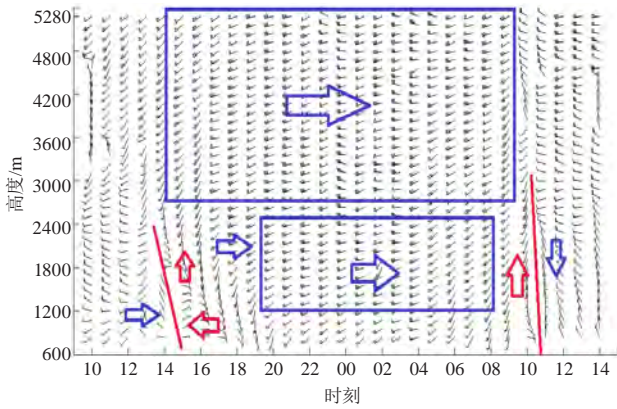


图2 2017年6月23日10时至24日14时临安风廓线雷达小时水平风垂直廓线

Fig.2 Hourly horizontal wind profiles of Lin'an wind profiling radar from 10:00 BT 23 June to 14:00 BT 24 June 2017

600 m高度切变线系统的时间尺度在6 h, 2 km高度的时间尺度为3 h, 3 km以上高空一直受偏西风急流控制; 22时一次日04时, 低空和高空都受偏西风影响, 风速较大, 降水维持发展; 05时开始低空风向由西风向南偏转, 到09时低空风向转为偏南风, 由于西南方向的水汽汇入, 降水再次增强; 10—11时, 低空风向由偏南风突然转为偏北风, 有中尺度切变线系统过境, 且发展高度深厚, 达到3 km, 如图2中右侧红线所示, 造成了11时的小时雨量超过15 mm; 12时以后低空受偏北气流影响, 降水逐渐停止。

图3给出2017年6月23日14时、20时 NCEP全球再分析850 hPa风场分布图, 图3a为23日14时的风场分布, 可以看出临安地区为西北风, 受冷气团控制, 与风廓线雷达23日14时的1.5 km左右高度水平风资料一致

致, 空间上江西北部到浙江中部有切变线, 如图3a中红线所示, 降水发展; 图3b为23日20时的风场分布, 可以看出临安地区为西南风, 受暖气团控制, 与风廓线雷达23日20时的1.5 km左右高度水平风资料一致, 此时切变线系统已消失, 降水减弱。图4给出2017年6月24日08时、14时 NCEP 全球再分析850 hPa风场分布图, 图4a为24日08时的风场分布, 可以看出临安地区为西南风, 受暖气团控制, 与风廓线雷达24日08时的1.5 km左右高度水平风资料一致, 空间上江西北部至临安以北有切变线, 如图4a中红线所示, 降水发展; 图4b为24日14时的风场分布, 可以看出临安地区为西北风, 受冷气团控制, 与风廓线雷达24日14时的1.5 km左右高度水平风资料一致, 此时切变线系统已消失, 降水减弱。从全球再分析850 hPa风场分布图可以看出, 此次暴雨过程临安地区先后经历了两次中尺度切变线系统过境, 分别触发了两次较强的降水, 第一次强降水暖气团较强, 第二次强降水冷气团较强, 与风廓线雷达水平风资料分析结果一致, 风廓线雷达时间分辨率更高, 可以看出两次切变线系统影响下临安地区风场更连续的变化。

图5给出了这次梅雨锋暴雨过程风廓线雷达不同高度平均风速情况, 其中图5a为0.06~1.08 km各个高度, 图5b为3~5.16 km各个高度。1 km以下平均风速较小, 在5 m/s左右; 3 km 以上平均风速较大, 均接近20 m/s。从平均风速的分布情况可以看出, 临安站上空3 km高度以上受急流系统影响, 急流下方风速不大, 存在着中尺度系统的可能性较大。

图6给出了水平风向随时间的变化分布, 图6a为

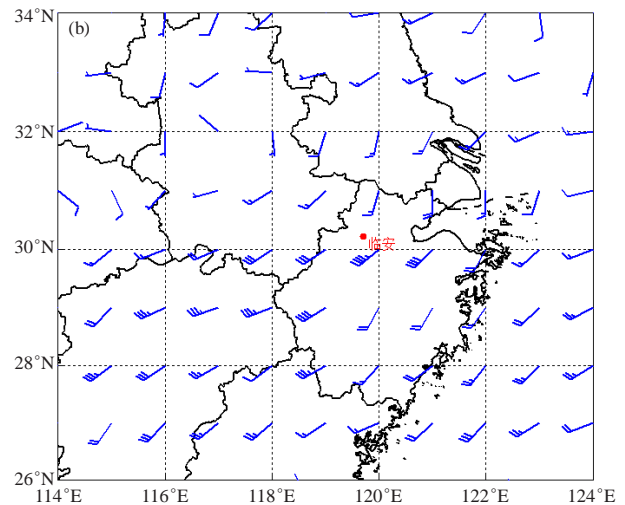
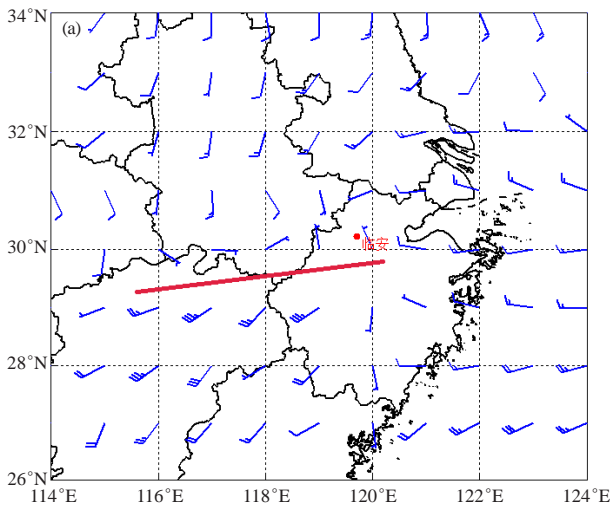
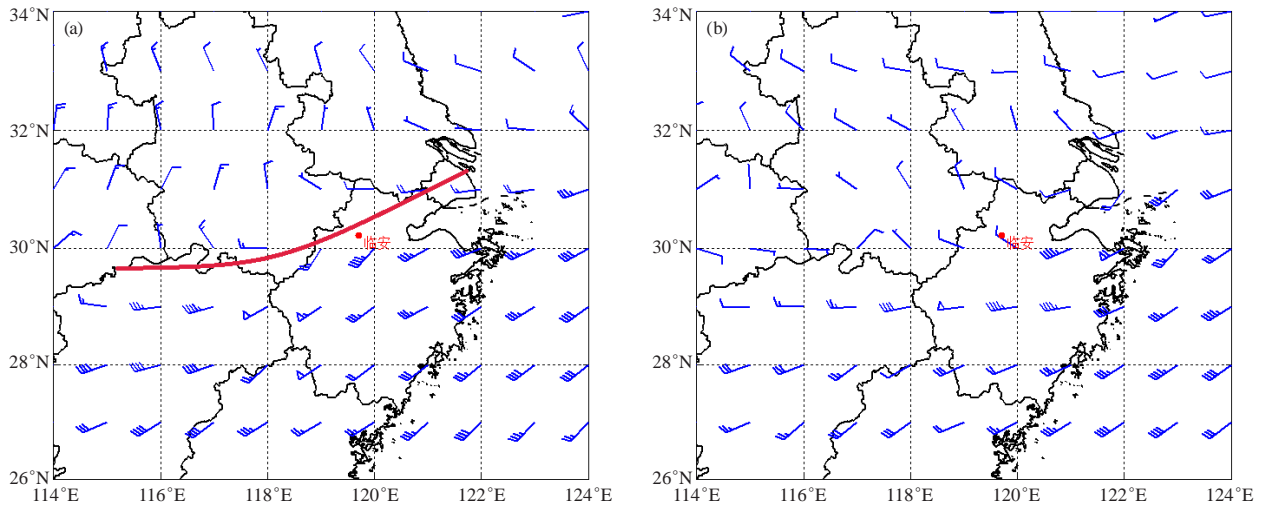


图3 2017年6月23日14时、20时 NCEP 1° × 1°全球再分析850 hPa风场
(a) 14时; (b) 20时

Fig.3 1° × 1°NCEP FNL 850 hPa wind field at 14:00 23 June and 20:00 23 June 2017
(a) 14:00 BT; (b) 20:00 BT

图4 2017年6月24日08时、14时 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 全球再分析850 hPa风场

(a) 08时; (b) 14时

Fig.4 $1^\circ \times 1^\circ$ NECP FNL 850 hPa wind field at 08:00 24 June and 14:00 24 June 2017

(a) 08:00 BT; (b) 14:00 BT

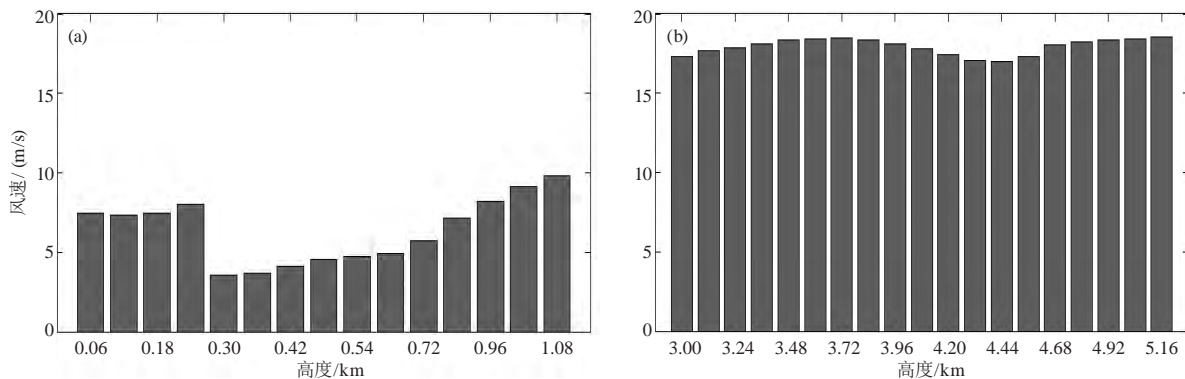


图5 降水时段内平均风速随高度的分布

(a) 0.06 ~ 1.08 km; (b) 3 ~ 5.16 km

Fig.5 Spatial distribution of average wind speed during the precipitation

(a) 0.06–1.08 km; (b) 3–5.16 km

1 km高度的水平风向随时间变化,图6b为3 km高度,图6c为5 km高度。图中水平风向指的是与正北方向的夹角,单位为度($^\circ$),范围在 $0\sim 360^\circ$, 0° 表示北风, 90° 表示东风, 180° 表示南风, 270° 表示西风, 360° 表示北风。从图6a可以看出,12:00—15:00受低空切变线系统影响,1 km高度水平风向在降水开始时出现较大波动,偏西风转为西北风又转为偏东风,15时开始切变线系统开始移出临安上空,风向逐渐由偏东风转为偏西风,说明偏西风的能量是强于偏东风的,在降水的中段20时至次日07时,1 km高度以偏西风为主,08时开始同样是受低空切变线系统影响,风迅速逆时针偏转,转为南风、偏东风至北风,带来了持续性强降水过程;从图6b可以看出,3 km高度水平风向以偏西风和西南风为主,受急流影响,风向比较平稳;从图6c可以看出,5 km高度水平风向以偏西风

为主,风向少有波动。

综上所述,此次梅雨锋暴雨过程的降水主要集中在降水前段和降水末段,这是由于在过程前期和后期,临安各经历了一次中尺度的低空切变线系统过境,过程前期暖气团较强,过程后期冷气团较强。相比全球再分析资料,风廓线雷达时间分辨率更高,可以看出两次切变线系统影响下临安地区风场连续的变化,降水过程临安地区高空一直受西风急流影响,降水得以维持发展。

3 雷达回波强度分析

3.1 雷达回波强度估算

风廓线雷达接收到的回波信号主要来自大气湍流散射,在有降水发生时,回波信号的主要贡献来自于降水粒子的散射。对于边界层风廓线雷达而言,波长一般在分米级,降水粒子的散射满足瑞利散射,弥散

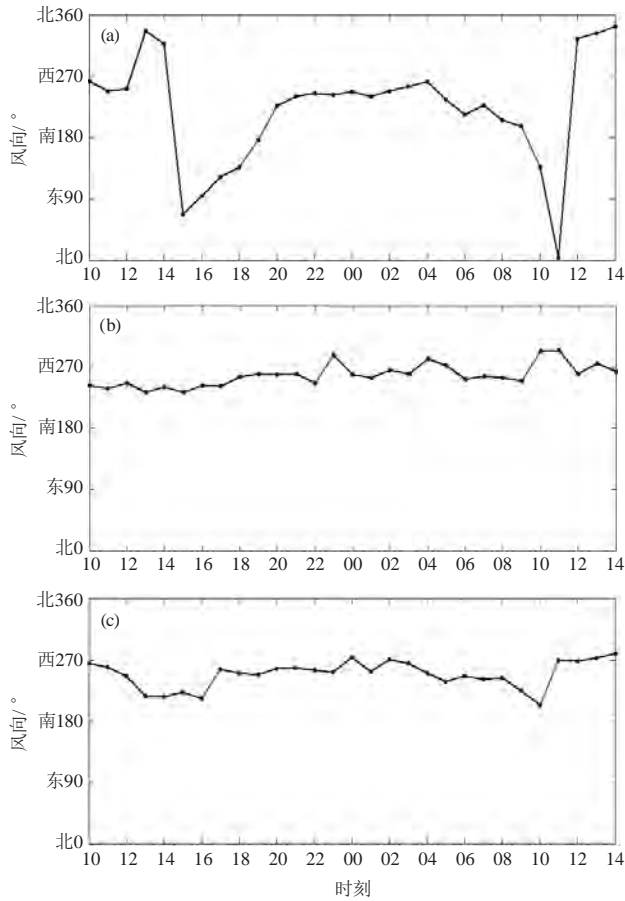


图6 降水时段内不同高度风向随时间的分布
(a) 1 km; (b) 3 km; (c) 5 km

Fig.6 Temporal distribution of wind direction at different heights during the precipitation
(a) 1 km; (b) 3 km; (c) 5 km

目标的雷达气象方程同样适用:

$$P_R = \frac{\pi^3}{1024 \times \ln 2} \times \frac{P_t h G^2 \theta \psi}{\lambda^2 R^2 L} \times \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right| \times Z, \quad (1)$$

式中, P_R 为降水回波信号功率; P_t 为发射功率; G 为天线增益; θ 、 ψ 为雷达水平、垂直波束宽度; h 为发射脉冲对应的空间长度; λ 为雷达发射波长; R 为目标物距离; L 为馈线损耗; $\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|$ 为复折射指数项, 降水一般取 0.93; Z 为雷达反射率因子, 即雷达回波强度。

为了获取 Z 值, 关键是计算回波信号功率 P_R 。 P_R 理论上可以由功率谱密度的零阶矩得到, 然而厂家给出的功率谱数据并非代表每一根谱线的功率值, 而是与功率值成正比, 需要对功率谱数据进行标定。目前对于风廓线雷达回波信号功率的估算主要有两种方法, 一种是利用回波信号信噪比, 由雷达系统的信噪比来估算 P_R ; 另一种是利用信号源对回波信号进行标定。本文采用雷回波信号信噪比估算信号功率的方

法, P_R 由雷达信噪比 R_{sn} 和雷达接收系统的噪声功率 P_n 计算得到。

$$P_R = R_{sn} \cdot P_n, \quad (2)$$

其中,

$$R_{sn} = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i + N_i)}{\sum_{i=1}^n N_i}, \quad (3)$$

$$P_n = K \cdot T_0 \cdot B_0 \cdot N_f, \quad (4)$$

式中, K 玻尔兹曼常数, T_0 是用绝对温度表示的雷达接收机系统噪声温度, B_0 为接收机的带宽, N_f 是噪声系数。

由式 (1) ~ 式 (4) 推导出雷达回波强度的计算式:

$$Z = \frac{1024 \cdot \ln 2}{0.93 \cdot \pi^3} \cdot \frac{\lambda^2 \cdot K \cdot T_0 \cdot B_0 \cdot N_f \cdot L}{P_t \cdot G^2 \cdot h \cdot \theta \cdot \psi} \cdot R_{sn} \cdot R^2, \quad (5)$$

雷达信噪比由功率谱数据谱线累加值 $\sum_{i=1}^n (S_i + N_i)$ 与噪声电平值 $\sum_{i=1}^n N_i / n$ 定, 通常认为远距离处最后几个距离库的返回信号不包含气象信号, 基本为噪声信号, 噪声电平可以由最后几个距离库的功率谱数据的谱线累加平均值计算得到。图7给出了这次临安梅雨锋暴雨过程中风廓线雷达的信噪比时间高度分布, 可以看出降水发生时信噪比明显增大, 达到 40 dB 左右。

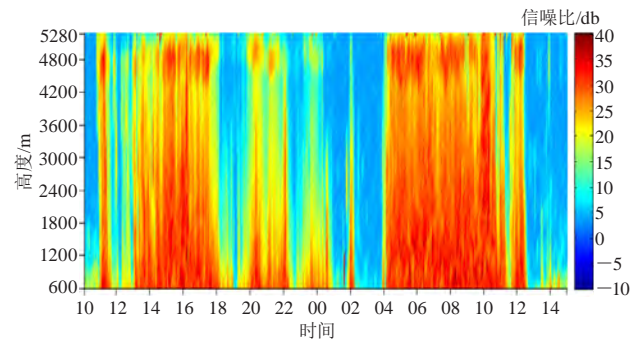


图7 降水过程的信噪比时间高度分布

Fig.7 Temporal and spatial distribution of signal-to-noise ratio during the precipitation

3.2 雷达回波强度特征

利用风廓线雷达功率谱数据, 根据式 (5) 估算风廓线雷达回波强度, 如图8所示。降水粒子的回波强度一般在 20 dBz 以上, 从图8可以看出此次梅雨锋暴雨过程的降水细节变化。11时开始回波强度在整个高度上增强, 说明临安上空开始有降水, 11—14时回波强度不高, 对应地面降水不大, 15—18时, 回波增强, 且回波顶高超过风廓线雷达最大探测高度, 5 km 高度回波强度接近 50 dBz。回波强度与粒子大小的6次方成正比, 回

波强度的贡献主要来自于大的降水粒子散射，低空回波强度较高空稍低，可能是由于高空降水粒子较大，而到了低空，降水粒子间的碰撞运动明显，大粒子变成了小粒子。18时到次日04时，20 dBz以上的回波强度不连续，且值不大，对应地面小时雨量也很小，在1 mm左右。04—12时，受中尺度低空切变线影响，降水回波连续且从降水回波高度范围可以看出降水云体发展深厚，12:30之后降水停止，回波强度减弱。

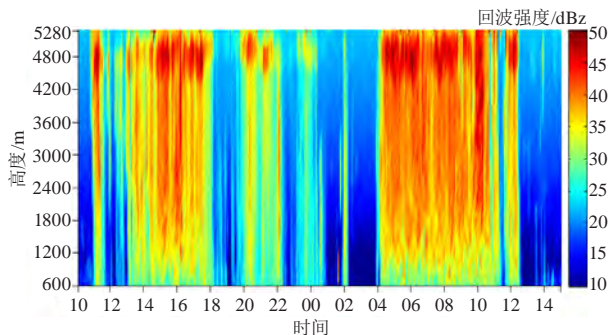


图8 降水过程的回波强度时间高度分布

Fig.8 Temporal and spatial distribution of echo intensity during the precipitation

4 风廓线雷达产品分析

4.1 垂直速度

风廓线雷达在晴空时利用湍流散射原理获取大气的垂直速度，而在降水时返回信号既包含大气的垂直速度又包含降水粒子的下落速度，在非特殊强对流情况下，粒子的下落速度比大气垂直运动速度大1~2个量级，风廓线雷达探测的垂直速度主要来自于降水粒子的下落速度。杨馨蕊等^[18]研究指出，风廓线雷达探测的垂直速度一般在4 m/s以上即为降水。

图9给出23日10时至次日15时的垂直速度时间高度分布情况，数据时间分辨率为6 min，高度分辨率为60 m，下降速度为正，上升速度为负。从图9中可以看出，降水开始之前，4 km以下存在弱的上升速度，

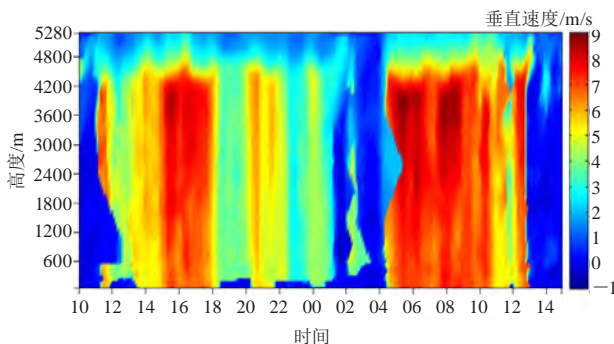


图9 降水过程的垂直速度时间高度分布

Fig.9 Temporal and spatial distribution of vertical speed during the precipitation

11时开始垂直速度增大到4 m/s以上，开始出现降水；16时附近垂直速度达到7 m/s以上，对应地面小时雨量在16时开始明显增多，16时和17时分别下了6.1 mm和13.2 mm；18时到次日04时大部分时间垂直速度维持在4 m/s左右，与地面小时雨量在1 mm左右相对应，其中03—04时垂直速度接近0 m/s，04时小时雨量为0；04时—12:30左右，降水过程加强，垂直速度在4.2 km以下达到7 m/s以上且高值区分布较为连续；12:30之后降水逐渐停止，垂直速度在0 m/s附近。

风廓线雷达探测的垂直速度与地面降水量之间有良好的正相关关系，降水量较大的时刻，整层高度上的垂直速度较大，此次个例中，地面降水量在10 mm以上的时刻，风廓线雷达垂直速度在高度上分布能达到7 m/s以上，地面降水量较小在1 mm附近的时刻，风廓线雷达垂直速度一般在4 m/s左右，且地面降水量的连续性与风廓线雷达3 m/s以上垂直速度的连续性相对应。

4.2 大气折射率结构常数

大气折射率结构常数 (C_n^2) 是衡量湍流强度的重要物理量之一，在降水发生时由于降水粒子的后向散射较晴空湍流散射强，返回信号功率值变大， C_n^2 计算结果也将变大，可以以此来研究降水过程的变化特征。

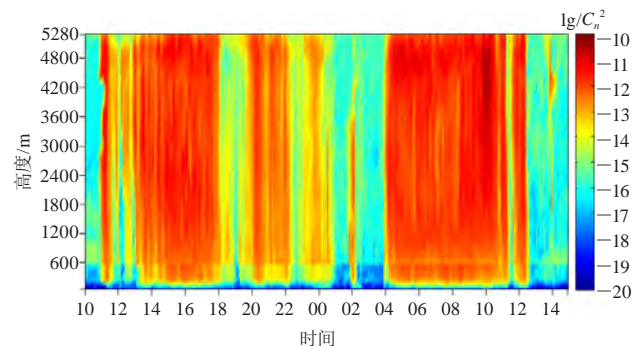


图10 降水过程的大气折射率结构常数时间高度分布

Fig.10 Temporal and spatial distribution of C_n^2 during the precipitation

图10给出 C_n^2 对数的时间高度分布，与垂直速度和地面降水的对应关系一样， C_n^2 的变化同样与地面降水有很好的对应关系。降水集中的前段和后段， C_n^2 对数值较大，在-11附近，且分布较为连续；在降水中段，地面雨量较小， C_n^2 对数值在-13附近，且不连续；在地面雨量为0的时刻， C_n^2 对数值在-17附近。

5 结论

1) 风廓线雷达资料能够捕获大尺度梅雨静止锋系统中的中尺度低空切变线，低空切变线系统带来了暴雨过程前段和后段的强降水，高空西风急流使得降水维持发展。

2) 利用功率谱数据估算了雷达回波强度, 回波强度能够反映临安此次梅雨锋暴雨过程的细节变化, 降水云体发展深厚, 5 km回波强度接近50 dBz。

3) 垂直速度和大气折射率结构常数产品与暴雨过程变化趋势一致, 降水发生时垂直速度与 C_n^2 明显增大, 10 mm以上降水时, 垂直速度接近7 m/s, C_n^2 对数值接近-11。

4) 风廓线雷达信噪比、回波强度、垂直速度以及大气折射率结构常数产品均能够在暴雨灾害性天气监测业务中发挥作用。

参考文献

- [1] 隆宵, 程麟生. “99·6”梅雨锋预报低涡切变线的数值模拟和分析. 大气科学, 2004, 28(3): 342-356.
- [2] 陶诗言. 长江流域梅雨锋暴雨灾害研究. 北京: 气象出版社, 2004.
- [3] 何斌, 何锋, 范晓红, 等. 一次长江中下游梅雨锋暴雨过程的诊断分析. 高原气象, 2013, 32(4): 1074-1083.
- [4] 何平. 相控阵风廓线雷达. 北京: 气象出版社, 2006.
- [5] 易仕明, 陈奕隆. 观测高空风的新装备——风廓线雷达. 气象, 1988, 14(11): 3-8.
- [6] 黄慧君, 钟爱华, 张健东. 多种探测资料在云南大理州强降水个例分析中的应用. 暴雨灾害, 2014, 33(1): 50-57.
- [7] 杨波, 魏东. 二次开发风廓线探测资料及其在天气预报中的应用. 气象科技, 2010, 38(4): 413-417.
- [8] 董保举, 付志嘉, 李明, 等. 风廓线雷达资料在暴雨天气过程特征分析中的应用. 气象科技, 2012, 40(1): 74-78.
- [9] 翟亮, 王令, 刘文军. 两次降雪天气过程预报中边界层风廓线雷达资料的应用. 气象科技, 2012, 40(5): 783-788.
- [10] 李峰, 施红蓉. 一次多相态天气过程的风廓线雷达探测资料特征分析. 气象, 2014, 40(8): 992-999.
- [11] 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. 气象科技, 2008, 36(3): 300-302.
- [12] 陈楠, 胡明宝, 徐芬, 等. 一次降雨过程风廓线雷达回波特征. 气象与环境学报, 2012, 28(5): 19-24.
- [13] 周志敏, 万蓉, 崔春光, 等. 风廓线雷达资料在一次冰雹过程分析中的应用. 暴雨灾害, 2010, 29(3): 251-256.
- [14] 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. 应用气象学报, 2002, 13(3): 330-338.
- [15] 黄伟, 张沛源, 葛润生. 风廓线雷达估测雨滴谱参数. 气象科技, 2002, 30(6): 334-337.
- [16] Benjamin S G, Schwartz B E, Koch S E, et al. 2004. The value of wind profiler data in U.S. weather forecasting. Bulletin of the American Meteorological Society, 85(12): 1871-1886.
- [17] 李晨光, 刘淑媛, 陶祖钰. 华南暴雨实验期间香港风廓线雷达资料的评估. 热带气象学报, 2003, 19(3): 269-276.
- [18] 杨馨蕊, 马舒庆, 吴蕾. UHF风廓线雷达降水数据判别方法的比较与评价. 大气科学学报, 2010, 33(5): 576-581.

(上接7页)

成为NOAA国家水模式(NWM)的基础。

(3) 在未来10年内对气象领域影响最大的趋势之一是转向基于影响的天气预报。例如, 当发生暴雨时, 预报和影响之间需要互动, 才能结合特定时段的降水量数据和坡度、土壤类型等地形条件数据, 预测出山体滑坡发生的概率。

(4) 气象观测将走向分层观测网。未来不再是拥有一个已知每个站点并进行质量的扁平网络, 替代者是一个高层网, 再下面还可以有第三层, 这些分层网最下端, 是通过物联网可以看到的来自消费者的气象数据。

(5) 未来边界层足够密集的高质量观测, 将为世界各地创建千米尺度的预报。行星边界层是需要更优数据的领域之一, 应该在行星边界层中使用更可靠的廓线信息, 而目前这样的信息尚不存在。

(6) 从卫星的角度来看, 需要重新认识的一项非常重要的技术是地球静止探测器。自20世纪70年代和80年代, 可见光红外自旋扫描辐射计(VISSR)大气测深仪(VAS)设计并在GOES卫星上运行以来, NASA没有在地球静止轨道上进行过任何温度和湿度探测的实验工作。VAS的光谱分辨率很低, 只有12个通道, 而目前近地轨道卫星上的高光谱分辨率探测器有2000多个通道。如果使用光谱分辨率更高的地球静止探测器, 能每30秒

或每分钟收集一次数据, 这样就能更好地了解小尺度天气, 对模式研究也将非常重要。

(7) 影响气象界最重大的技术进步正发生在行业之外。私营部门增值产品出现了爆炸式增长。如今气象数据应用方式多种多样, 社交平台、电视频道和应用程序都可以。一个巨大的挑战也随着其更广泛的传播出现: 确保信息以负责、准确和可靠的方式传播。令人担忧的是, 如今公众可获悉大量天气信息, 但事实上这些信息经过了过滤, 以获得更大的商业利益。未来公共和私营部门将继续紧密合作, 但是为了使这种伙伴关系良好运转, 需要制定“道德守则”, 以保证正确使用数据。

(8) 气象行业需要实施“哑巴工程”, 测风和测温并不需要超级灵巧的方式, 而是需要更便宜、能够大批量生产的方式, 来获得更多观测结果。建议NOAA与其花费数十亿美元来升级整个北美雷达网络, 不如购买50台雷达安装在卡车上, 或100台探空系统在货车上——这些技术如今价格相对合理。然后组建一个团队, 每天开车到危险区域, 以非常精细的分辨率收集大量数据。然后, 他们将其上传到数据中心输入模型。拥有这些“靶向”精细网格化数据将使我们有很大机会开展5 h严重风暴预报。

(编者感谢《中国气象报》同仁提供信息和翻译稿)