

基于风廓线雷达对暖式切变和冷式切变 大范围强降水的风垂直结构观测与差异分析

官晓东 刘玉 卜银军
(福建省三明市气象局, 三明 365000)

摘要: 应用福建省连城县风廓线雷达等资料, 对2018年6月5—7日福建省一次暖式切变和冷式切变交替下形成的大范围强降水天气进行分析。结果表明: 1) 水平风脉动和垂直风脉动出现的时间与降水出现的时间较为对应, 水平风脉动大小和水平风脉动出现的高度与降水强度存在一定的正相关, 垂直风脉动出现的高度与降水强度存在一定的正相关; 暖式切变形势下强水平风脉动和垂直风脉动出现的较为集中且高度较高, 冷式切变下强水平风脉动和垂直风脉动出现的较为分散且高度较低。2) 降水前或降水出现增大前在2~3 km高度附近出现水平风的垂直风切变并向低层传播, 降水时低层和高层的水平风的垂直风切变增大超过 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 暖式切变形势下低层水平风的垂直风切变增强时间较降水早2~6 h; 冷式切变形势下低层水平风的垂直风切变的增强时间与降水同步。3) 暖式切变形势下, 低空急流指数相对连续, 且波动较大, 对应降水的强度较强, 降水分布不均; 冷式切变形势下, 低空急流指数较为分散, 波动较小, 对应降水强度较弱, 降水分布均匀; 降水前低空急流指数的增大超前1~4 h。4) 暖式切变降水阶段, 信噪比(SNR)强回波区在降水初期出现在较高的高度上, 在降水趋于减弱时低层SNR值开始增大; 冷式切变降水阶段, SNR强回波区在低层长时间维持。

关键词: 风廓线雷达, 暴雨, 风脉动, 信噪比

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.017

Wind Vertical Structure Observation and Difference Analysis of Large Range Heavy Rainfall with Warm Shear and Cold Shear Based on Wind Profiler Radar

Guan Xiaodong, Liu Yu, Bu Yinjun
(Sanming Meteorological Office of Fujian Province, Sanming 365000)

Abstract: Based on the wind profiler radar data of Liancheng county, Fujian province, the analysis of the heavy rainfall were caused by alternating warm shear and cold shear in Fujian province from 5 to 7 June 2018. Results show that: 1) the occurrence time of horizontal and vertical wind pulsation corresponds to the occurrence time of precipitation. The magnitude of horizontal wind pulsation and the height of horizontal wind pulsation are positively correlated with precipitation intensity, while the height of vertical wind pulsation is positively correlated with precipitation intensity. The strong horizontal and vertical wind pulsation are concentrated and high in warm shear potential, while the strong pulsation and vertical wind fluctuations are dispersed and low in cold shear potential. 2) Before precipitation or before precipitation increase, vertical wind shear of horizontal wind appears near 3 km altitude and propagates to the lower level. Vertical wind shear of horizontal wind at lower and upper levels increases to more than $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ during precipitation; The vertical wind shear enhancement time of low-level horizontal wind under warm shear potential is 2-6 hours earlier than that of precipitation; the vertical wind shear enhancement time of low-level horizontal wind under cold shear potential is synchronized with precipitation. 3) Under the warm shear potential, the low-level jet index is relatively continuous and fluctuates greatly, corresponding to the intensity of precipitation is stronger, and the precipitation distribution is uneven; under the cold shear potential, the low-level jet index is more dispersed and fluctuates less, corresponding to the intensity of precipitation is weaker, and the precipitation distribution is uniform. The increase of low-level jet index is 1-4 hours ahead of precipitation. 4) In the warm shear precipitation stage, the SNR strong echo region appears at a higher altitude in the early stage of precipitation, and increases at the lower level when precipitation tends to weaken. In the cold shear precipitation stage, the SNR strong echo region maintains for a long time in the lower level.

Keywords: wind profiler radar, heavy rain, wind pulsation, power spectral density

收稿日期: 2019年5月8日; 修回日期: 2019年9月9日
第一作者: 官晓东(1985—), Email: gxdnj522@163.com
资助信息: 福建省气象局基层科技专项项目(2018J05);
国家自然科学基金面上项目(91637105); 国家
重点研发计划重点专项项目(2018YFC1507804)

0 引言

风廓线雷达是通过向高空发射不同方向的电磁波束,接收并处理这些电磁波束因大气垂直结构不均匀而返回的信息进行高空风场探测的一种遥感设备。风廓线雷达利用多普勒效应能够探测其上空风向、风速等气象要素随高度的变化情况,由于风廓线雷达具有探测时空分辨率高、自动化程度高等优点,许多学者应用该资料对不同天气进行分析。周志敏等^[1]指出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。董保举等^[2]应用风廓线雷达对暴雨进行分析,结果表明三维风的脉动变化较大,水平风在垂直方向上存在风速切变,最大探测高度明显升高。王彦等^[3]利用风廓线雷达资料分析一次强降水过程,其指出垂直风切变对短时强降水的形成具有参考价值,降水开始前到出现降水时垂直风切变增大并由中层下降到中底层。张怪怪等^[4]、刘淑媛等^[5]利用风廓线雷达资料分析低空急流的脉动与暴雨关系,分析表明在低空急流指数迅速加强后1~2 h内将出现强降水。王秀玲等^[6]指出风廓线雷达能很好地观测到稳定性降水过程中冷、暖切变的小扰动和急流的下传过程。陈娟等^[7]也利用风廓线雷达资料分析了江西梅雨锋暴雨天气过程,其指出1 km或0.7 km高度以下水平风在垂直方向上的风切变的增大与下游降水的增强关系较为密切。戴建华等^[8]应用风廓线雷达观测资料对上海一次飚线特征做了细致的分析,提出较大的垂直风切变和风暴相对螺旋度对飚线的维持和发展起重要作用。李峰等^[9]指出降水发生前,对流层的信噪比会明显增强,降水发生时5个波束径向速度自地面向上均转为正值且径向速度不同,存在风的影响。

福建风廓线雷达于2013年开始逐步在全省展开布设应用,由于建立不久,特别是福建内陆丘陵山区在应用风廓线雷达资料对降水天气监测方面的研究较少,因此本文利用福建省连城县风廓线雷达资料,对2018年6月5—7日福建省一次暖式切变和冷式切变交替下形成的大范围强降水天气进行分析,通过分析不同天气形势下降水前后风廓线雷达资料特征,为风廓线雷达资料在暴雨天气中的应用积累经验。

1 资料

本文风廓线雷达资料来源于龙岩市连城县观测站(25.7°N, 116.7°E)CFL-06型低对流层风廓线雷达,最大探测高度≥6 km,最低探测高度150 m,4 km以下垂直分辨率为120 m,4 km以上垂直分辨率为240 m,雷达以偏东、南、西、北各14°及垂扫描方向共5个波束

观测,风速测量均方根误差≤1.0 m·s⁻¹,探测风速范围0~60 m·s⁻¹,风向测量均方根误差≤10°,探测风向范围0~360°,风速分辨率0.1 m·s⁻¹,风向分辨率0.5°(数据来源:建设项目验收现场测试报告)。数据采用每6 min实时采样高度上的产品数据,半小时平均的采样高度上的产品数据,一小时平均的采样高度上的产品数据和功率谱数据进行分析。

2 暴雨过程概述

2018年6月5—7日,福建省出现了一次较大范围的暴雨过程。通过分析该过程的环流背景和天气形势发现,此次暴雨过程分为两个阶段,即4日12时—6日00时(世界时,下同)暖式切变下形成的暴雨和6日00时—7日12时冷式切变下形成的暴雨。4日12时,500 hPa贝加尔湖以西上空存在冷性低涡,华南位于河套以南西风槽前的西南气流控制;6日00时,贝加尔湖以西的低涡演变成高空槽与河套以南的西风槽合并东移动,影响我国中东部及华南地区。6日00时之前,850 hPa华南地区始终维持西南气流控制,且达到了低空急流标准,925 hPa在福建上空始终维持一暖式切变(图1a);6日00时起,随着500 hPa槽的东移,低层冷空气南下,福建上空由暖式切变转为冷式切变(图1b)。此次暴雨过程全省有24个国家气象站出现100 mm以上的降水,4日12时—6日00时有6个国家气象站降水达100 mm以上,6日00时—7日12时有1个国家气象站降水达100 mm以上。连城站在此次降水过程中达到了127.7 mm,降水量时序分布为6日00时前降水强于6日00时后降水(图2e、2f)。

3 降水前后风廓线雷达资料分析

3.1 水平风和垂直风脉动分析

风的运动由两种运动组合而成,即一种简单的平均运动上叠加一种尺度范围广、起伏不规则的脉动运动,风脉动定义为风的瞬时值与平均值的差值^[10]。由于风脉动强烈程度与高空空气的动力不稳定相关,脉动越剧烈说明高空动力越不稳定,能为降水提供动力条件。以时间间隔为1 h计算水平(V)和垂直(W)风的平均值,以整点第30分为V、W风的瞬时值,计算该小时V、W风的脉动^[2]。

图2a为4日01时—5日23时的水平风脉动,4日03—15时大气中出现弱水平风脉动,4日16—19时出现一次强水平风脉动,最大脉动值出现的高度达到5 km,5日03—08时同样出现弱水平风脉动,5日09—23时出现两次强水平风脉动,其中10时最大脉动值出现高度达到10 km,对应连城站的降水量可以发现(图2e),4日16时出现6.5 mm·h⁻¹的降水,5日10

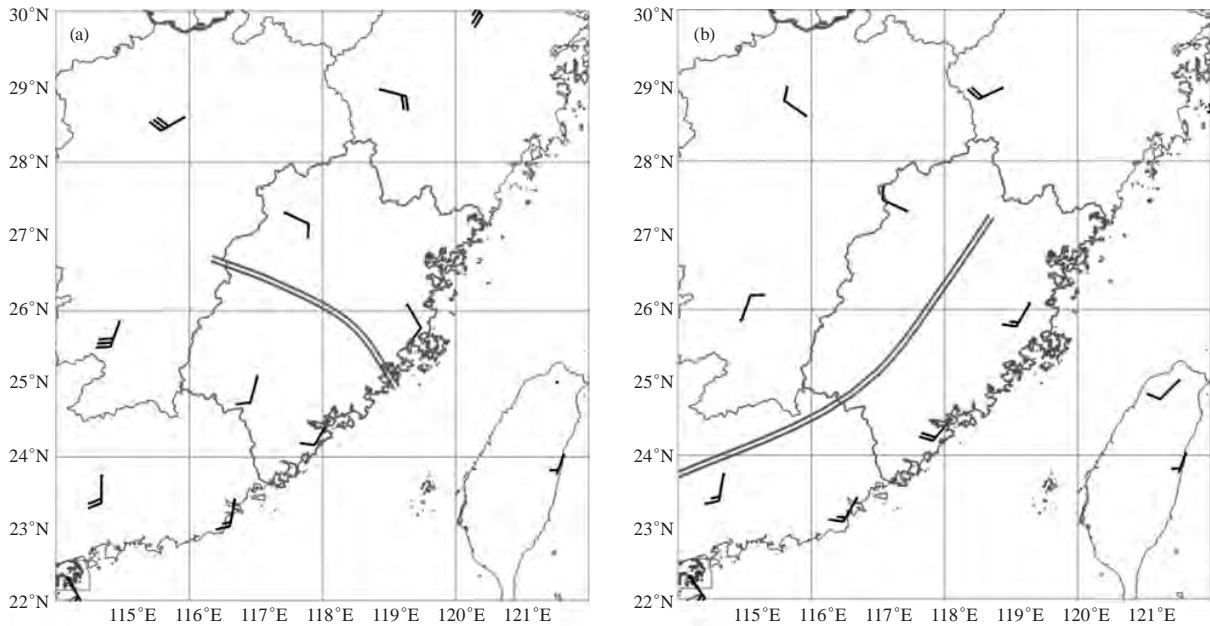


图1 925 hPa测站风 (双实线为切变线)

(a) 2018年6月5日12时; (b) 2018年6月6日12时

Fig. 1 925 hPa station wind (Double solid lines are shear lines)

(a) 12:00 on 5 June 2018, (b) 12:00 on 6 June 2018

时出现 $34.9 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的降水, 5日20时出现 $13.3 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的降水。图2b为6日01时—7日23时的水平风脉动, 6日01—7日02时出现强水平风脉动, 但分布较为分散, 且强水平风脉动值出现的最大高度约为4.5 km, 对应6日连城站出现连续性弱降水天气(图2f)。

图2c为4日01时—5日23时的垂直风脉动, 5日06—09时大气中出现弱的垂直风脉动, 4日16—21时和5日09—18时出现明显的垂直风脉动, 其中5日09—10时出现明显垂直风脉动的高度较高, 这与10时出现 $34.9 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的强降水相对应, 大气出现的垂直风脉动的高度较高, 说明对流云团发展的较为旺盛, 相应出现较大的小时降雨量。图2d为6日01时—7日23时的垂直风脉动, 6日01时—7日08时出现明显的垂直风脉动, 垂直风脉动的最大高度在4.5 km以下, 且分布较为分散, 对应降水为连续性弱降水。查看风廓线雷达实时采样高度产品数据发现4日20—21时未出现降水, 且垂直方向可信度为50%, 因此对出现垂直风脉动奇异大值不予分析。

通过以上分析可以发现, 水平风脉动和垂直风脉动出现的时间与降水出现的时间较为对应, 降水前出现较弱的水平风和垂直风脉动, 与降水时脉动值差距较大, 降水前出现的弱脉动是否为未来降水提供不稳定能量, 提前出现的弱脉动对未来降水是否具有指示意义还需进一步验证, 这与风廓线雷达资料在暴雨天

气过程特征分析中的应用^[2]所提出的观点有所不同。水平风脉动大小和强水平风脉动出现的高度与降水强度存在一定的正相关, 垂直风脉动出现的高度与降水强度存在一定的正相关。暖式切变形势下, 风垂直结构上强水平风脉动和垂直风脉动出现的较为集中且出现最大高度较高, 对应降水强度较大且时序分布较为集中; 冷式切变形势下, 强水平风脉动和垂直风脉动出现的较为分散且出现的最大高度较低, 对应降水强度较小且时序分布均匀, 说明此次降水过程暖式切变下降水云发展较冷式切变下降水云发展的高度更高, 对流性更强。

3.2 水平风垂直切变

由图3可见, 2018年6月4日04时在2 km附近出现 $6.0\sim 7.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的水平风的垂直风切变, 4日10时水平风的垂直风切变高度降低至1 km以下, 且强度增强到 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上, 4日16时从地面到高空都出现大于 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 水平风的垂直风切变, 此时地面出现降水; 4日19时—5日08时低空水平风的垂直风切变始终存在, 但强度先减弱后增大, 高空水平风的垂直风切变减弱, 对应期间为无降水; 4日20时2 km附近出现 $4.5\sim 6.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的水平风的垂直风切变, 并再次出现向下传播的现象, 5日07时1 km以下水平风的垂直风切变再次加强, 5日09时起低层和高空出现 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的水平风的垂直风切变, 对应5日09—23时出现

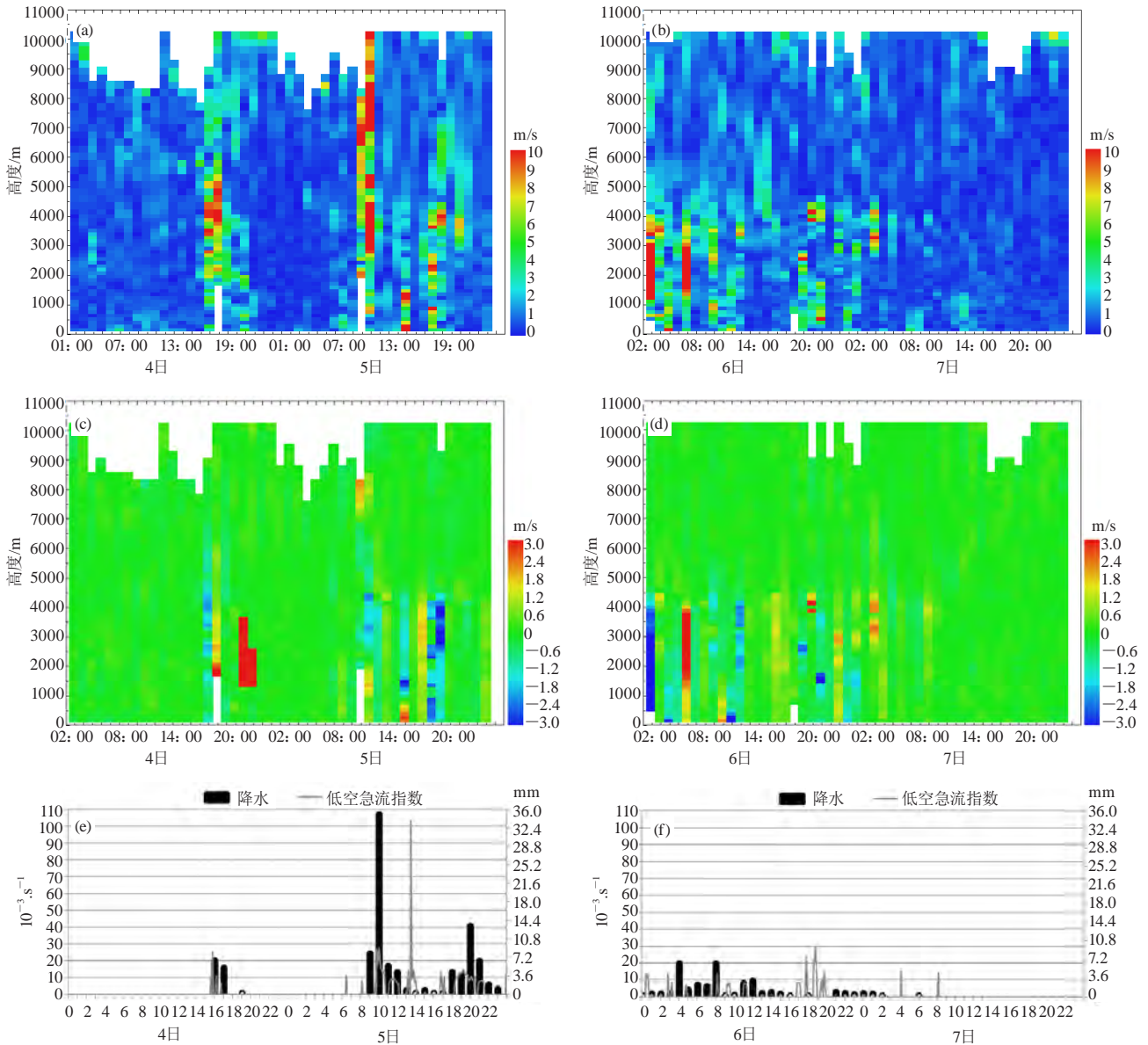


图2 2018年6月4—5日 (a、c、e) 和6—7日 (b、d、f) 的水平风脉动 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、垂直风脉动 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、低空急流指数 (单位: 10^{-3}s^{-1}) 和连城站小时雨量 (单位: mm)

Fig. 2 Horizontal wind fluctuations (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), vertical wind fluctuations (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), low level jet index (unit: 10^{-3}s^{-1}) and hourly rainfall (unit: mm) at Liancheng station on 4 to 5 June 2018 (a, c, e) and 6 to 7 June 2018 (b, d, f)

降水。

5日22时—6日04时低空和高层水平风的垂直风切变先减小后增大, 期间降水先减小后增大; 6日00时起在2.5 km附近出现 $7.5 \sim 12.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 水平风的垂直风切变, 并开始出现向下传播, 低层水平风的垂直风切变再次增大到 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 降水期间高空同样出现大于 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水平风的垂直风切变, 7日00时低空和高空的水平风的垂直风切变开始减弱, 对应降水先增大后减小, 并于7日06时降水结束。

通过以上分析发现, 降水前或降水出现增大前在

2~3 km高度附近出现水平风的垂直风切变增大并向低层传播, 这与王彦等^[3]对一次强降水过程分析中所述的一致, 说明降水前或降水出现增大前出现水平风的动量下传。降水时低空和高层的水平风的垂直风切变增大至 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。暖式切变形势下, 低层水平风的垂直风切变增强时间较降水早2~6 h, 高空水平风的垂直风切变增大时段与降水同步, 说明在降水前大气提前出现扰动, 整层大气扰动时间短, 对应降水为短时间的对流性降水; 冷式切变形势下, 低层水平风的垂直风切变的增强时间与降水同步, 高空水平风

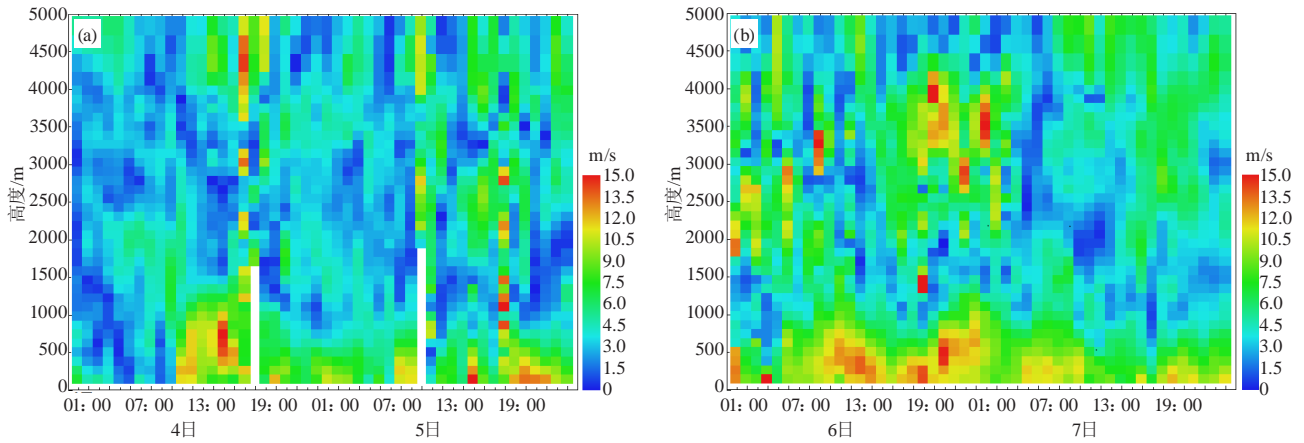


图3 水平风的垂直风切变 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a) 2018年6月4—5日; (b) 2018年6月6—7日,
Fig. 3 Vertical wind shear of horizontal wind (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a) 4 to 5 June 2018, (b) 6 to 7 June 2018

的垂直风切变增大的持续时间较长, 说明冷式切变大气未提前出现扰动, 整层大气扰动时间长, 对应降水为持续性弱降水。

3.3 低空急流指数

华南大暴雨发生时常伴有对流层下部的低空急流的加强, 而低空急流轴上的中小尺度的脉动与强降水过程有密切关系^[11], 李侃等^[12]分析暴雨成因时指出, 低空急流的出现及向地面扩展程度与暴雨之间存在密切关系。本文通过计算低空急流指数, 分析低空急流指数与降水的关系。

定义低空急流指数为 $I=V/D$, 其中 V 为2 km高度以下边界层急流中心最大风速 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), D 为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速在此刻的最低位置 (单位: km)^[5], 因此 D 越大说明低空急流越强, 所在高度越低, 越容易触发对流不稳定能量的释放, 对降水就越有利。

4日15时 I 指数增大, 15时连城开始下雨, 17时 I 指数减小为0, 降水结束 (图2e)。5日06—22时 I 指数再次增大, 时序分布上较为连续, 并且出现多个峰值, 对应降水明显增大。 I 指数相对6日00时前较小, 且不连续, 对应小时雨强较弱, 随着降水的结束, I 指数减小为0 (图2f)。通过对比分析发现暖式切变形势下, 低空急流指数相对连续, 且波动较大, 对应降水的强度较强, 降水分布不均; 冷式切变形势下, 低空急流指数出现的较为分散, 波动较小, 对应降水强度较弱, 降水分布均匀。降水前低空急流指数的增大有超前1~4 h的现象, 这与刘淑媛等^[5]所得出的结论相同。另外从图2中也可看出低空急流指数增大的幅度与降水强度不相匹配, 这是由于影响降水的因素较多, 对降水趋势有一定的指示作用, 但与降水强度无明确的

定量关系。

3.4 信噪比及功率谱密度

功率谱密度分布包含大气返回的信号, 当出现降水时返回信号中还包含降水粒子返回信号^[13]; 信噪比 (SNR) 是风廓线雷达返回信号中气象信号与噪声之比, 反映的是回波功率, SNR越大对应回波功率越强^[14]。通过研究这次降水过程中信噪比和功率谱密度在垂直方向上分布的特征变化, 来揭示冷暖切变下降降水性质的不同。

图4a的SNR数据可以看出, 在4日15时30分附近3 km以下出现大于30 dB的值, 对应15时起出现降水; 5日05:30 SNR值由低层开始增大, 09:30在4 km以下的高度出现大于30 dB的值, 11:30 SNR大值开始下传, 17:30 SNR值再次增大, 21:30高度在0.5 km以下SNR出现增大, 这期间10时和20时出现两个降水峰值。图4b的SNR数据可以看出, 6日00时—7日07时SNR在2 km高度以下逐渐增大, 特别是6日11:30—7日07时在0.5 km高度以下出现大于30 dB的值, 回波较为密实, 2 km高度以上的SNR值在不断减小, 回波变得较为松散, 这期间出现较为平缓的弱降水。

图4c功率谱密度数据中, 顶波速功率谱密度数据在 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近出现波峰, $1.23 \sim 3.63 \text{ km}$ 在 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近出现弱波峰, 由于风廓线雷达较高的探测灵敏度, 使其探测得到的降水返回信号较强, 其回波强度比大气返回信号要大, 降水信号的功率谱密度峰值远大于大气运动的功率谱密度峰值^[10], 因此这两个波峰对应的速度分别为雨滴下落速度和环境大气的垂直运动速度。其余的4个波速同样能观测到大于 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 正速

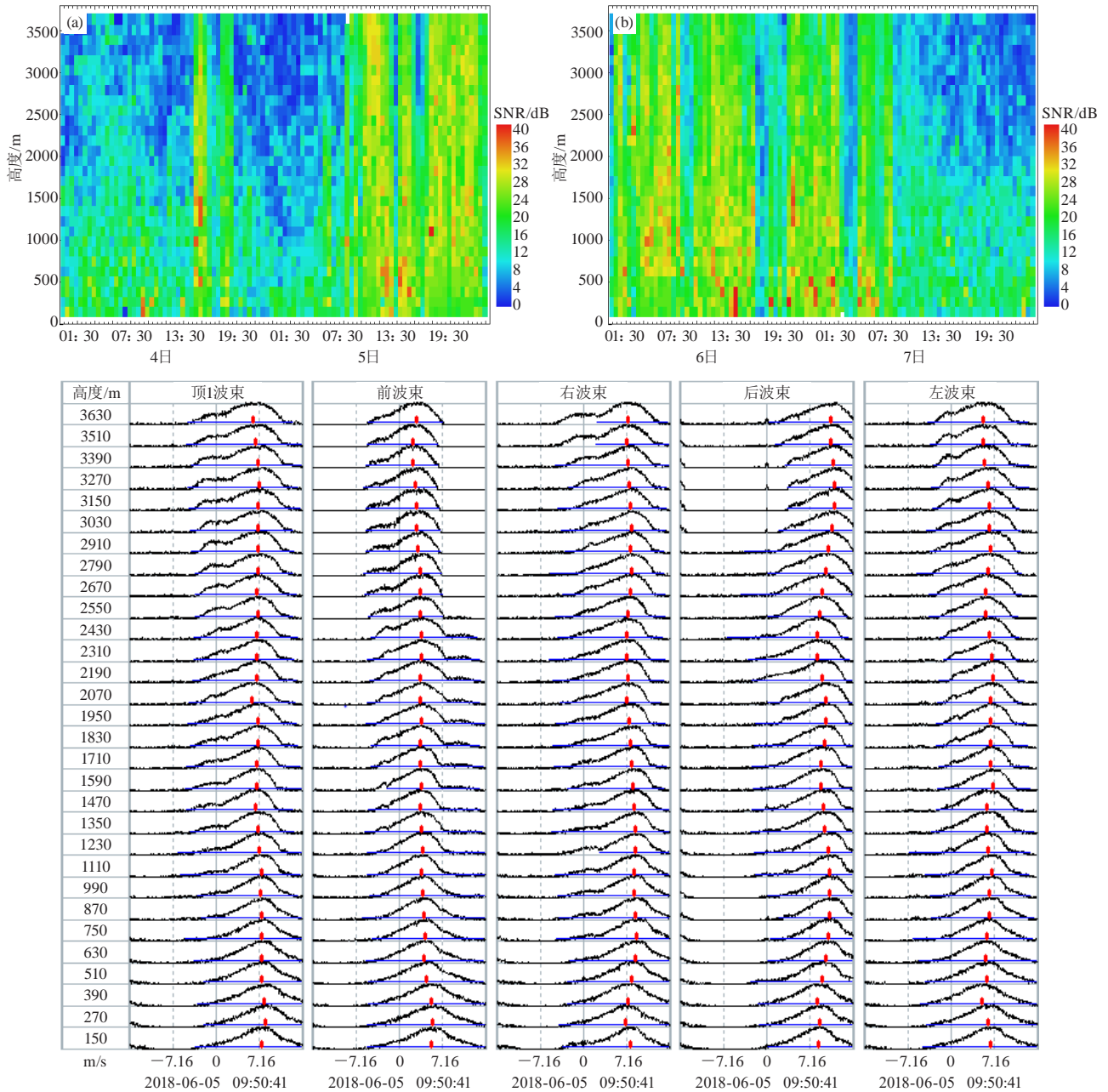


图4 2018年6月4—5日 (a) 和6—7日 (b) 的信噪比 (SNR) ; 2018年6月5日09:50的功率谱密度 (c)
Fig. 4 SNR (dB) on 4 to 5 June 2018 (a) and 6 to 7 June 2018 (b), power spectral density at 09:50 on 5 June 2018 (c)

度区出现一个谱峰, 在 $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度附近出现一个较弱的谱峰。这进一步说明了该时间出现了雨滴降落。通过查看每个时次的谱线图, 可进一步说明4日15—17时, 5日08时—7日02时为降水时段。

暖式切变降水阶段, SNR强回波区在降水初期出现在较高的高度上, 在降水趋于减弱时低层SNR值开始增大; 冷式切变降水阶段, SNR强回波区逐渐下降并在低层长时间维持; 冷式切变降水阶段SNR值在高层较暖式切变降水阶段弱; 以上分析说明暖式切变形

势下为对流云降水, 天气形势在转为冷式切时, 降水转为混合云降水。

4 结论

1) 水平风脉动和垂直风脉动出现的时间与降水出现的时间较为对应, 水平风脉动大小和水平风脉动出现的高度与降水强度存在一定的正相关, 垂直风脉动出现的高度与降水强度存在一定的正相关; 暖式切变形势下强水平风脉动和垂直风脉动出现的较为集中

(下转105页)

是否向森林防火部门发布森林火灾预警信息,有利于及早发现森林火灾,并对火灾进行及时扑救。经验证,该模型对森林火灾的监测精度较高,命中率达到83%,误警率为10%,临界成功率为76%。

多传感器信息融合过程中,在数据处理、特征提取和决策层融合时,采用的算法较普通,在今后的研究中,可以利用不同算法建立模型,选择对森林火灾识别准确率最高的模型,应用到实际业务中,将能极大提高森林火灾监测效率和准确性。

参考文献

- [1] 余福波,吴薇.多源信息融合技术在智能楼宇火灾监测系统中的应用.科技创新与应用,2011(24):16-17.
- [2] 朱泽明.基于物联网技术的智能型森林火灾报警系统的研究及应用.安徽:安徽理工大学,2015.
- [3] 陈永林,曹晓岗,邵玲玲,等.上海一次重大火灾烟雾的雷达回波特征研究.气象科学,2010,30(1):121-125.

- [4] 黄克慧,朱景,黄以平,等.基于多普勒天气雷达的火情自动识别系统.气象,2013,9(2):241-248.
- [5] 文东新,张明军,龙定华,等.广西森林火灾时空分布及其影响因素.中南林业科技大学学报,2007,27(5):83-86.
- [6] Fang L, Yang J, Zu J X. Quantifying influences and relative importance of fire weather, topography, and vegetation on fire size and fire severity in a Chinese boreal forest landscape. Forest Ecology and Management, 2015, 356(SI): 2-12.
- [7] 张伟.关于大兴安岭地区森林火灾与气象因素的模型及分析.哈尔滨:东北林业大学,2015.
- [8] 郑焕能.应用火生态.哈尔滨:东北林业大学出版社,1998.
- [9] 傅泽强,陈动,王玉彬.大兴安岭森林火灾与气象条件的相互关系.东北林业大学学报,2001,29(1):12-15.
- [10] 王世刚.基于现代时间序列分析方法的通用信息融合白噪声估值器.黑龙江:黑龙江大学,2008.
- [11] 王威,冯慧,丁俊琦,等.影响森林火灾发生的气象因子分析.通讯世界,2019(3):227-228.
- [12] 黄健,徐永刚,孙中廷.多传感器数据融合技术在煤矿井下的应用.煤矿机械,2015(7):242-244.
- [13] 郭海峰,禹伟.湖南省森林火灾天气等级预测模型研究.中南林业科技大学学报,2016,36(12):44-47.
- [14] 钟敏,吴翠红,王珊珊,等.CINRAD/SA雷达两种识别跟踪产品的评估分析.气象,2012,38(6):722-727.

(上接100页)

且高度较高,冷式切变下强水平风脉动和垂直风脉动出现的较为分散且高度较低。

2) 降水前或降水出现增大前在2~3 km高度附近出现水平风的垂直风切变并向低层传播,降水时低层和高层的水平风的垂直风切变增大至10 m·s⁻¹以上;暖式切变形势下低层水平风的垂直风切变增强时间较降水早2~6 h,整层大气扰动时间短;冷式切变形势下低层水平风的垂直风切变的增强时间与降水同步,整层大气扰动时间长。

3) 暖式切变形势下,低空急流指数相对连续,且波动较大,对应降水的强度较强,降水分布不均;冷式切变形势下,低空急流指数较为分散,波动较小,对应降水强度较弱,降水分布均匀。降水前低空急流指数的增大超前1~4 h。

4) 暖式切变降水阶段,SNR强回波区在降水初期出现在较高的高度上,在降水趋于减弱时低层SNR值开始增大;冷式切变降水阶段,SNR强回波区在低层长时间维持。

参考文献

- [1] 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):251-265.
- [2] 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):74-86.
- [3] 王彦,刘一玮,孙晓磊.利用风廓线雷达资料分析一次强降水过程的风垂直切变特征.暴雨灾害,2017,36(2):172-176.
- [4] 张怪怪,胡明宝,邓少格,等.利用风廓线雷达资料对暴雨与低空急流关系的分析.气象水文海洋仪器,2011,28(1):32-35.
- [5] 刘淑媛,郑永光,陶祖钮.利用风廓线雷达资料分析低空急流的脉动与暴雨关系.热带气象学报,2003,19(3):285-290.
- [6] 王秀玲,陈昱.层状云降水过程中的风廓线特征.气象科技,2010,38(4):439-421.
- [7] 陈娟,尹洁,何文,等.风廓线雷达资料在江西梅雨锋暴雨天气过程中的分析应用.气象与减灾研究,2016,39(3):206-215.
- [8] 戴建华,陶岚,丁杨,等.一次罕见飑前强降水超级单体风暴特征分析.气象学报,2011,70(4):619-627.
- [9] 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.
- [10] 许玉貌,刘红年,徐桂玉.大气科学概论.南京:南京大学出版社,2000.
- [11] 陆汉城.中尺度天气原理和预报.北京:气象出版社,2000.
- [12] 李佩,周佳茜,叶小峰,等.基于动力因子的萍乡市一次区域性暴雨落区诊断分析.气象与减灾研究,2016,39(1):41-47.
- [13] 王晓蕾,阮征,葛润生,等.风廓线雷达探测降水云体中雨滴谱的试验研究.高原气象,2010,29(2):498-505.
- [14] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕.雷达气象学.北京:气象出版社,2001.