

文章编号: 2096-1618(2024)06-0749-06

宁夏六盘山地区夏季对流天气的观测分析

邹杰¹, 舒志亮^{1,2}, 田磊², 李笑¹, 林彤², 郭在华¹

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都, 610225; 2. 宁夏气象灾害防御技术中心, 宁夏 银川, 750002)

摘要:为探究宁夏六盘山地区的对流天气演变过程,使用宁夏六盘山地区常规观测资料、雷达资料、微波辐射计反演资料等,对2021年6月30日短时雷阵雨和2021年7月27日强降水2次对流过程进行研究。结果表明:(1)强对流天气期间多地雷达基本反射率因子超过40 dBZ,最大达到60 dBZ以上,且形成大面积的层积混合雷达回波。(2)云层结构变化明显,临近对流天气,云层迅速下降。对流时呈强回波特征,回波顶高超过6 km。(3)相对湿度垂直结构在对流天气临近会形成“上干,下湿”的2层结构,温度垂直分布有明显的“上冷下暖”的结构。(4)2次过程不稳定指数 K 均出现较大波动,临近时最大值超过40 °C,对流天气持续时间较长时, K 指数曲线下降特征不明显,呈持续上升趋势。

关键词:六盘山地区;雷达;对流;不稳定指数

中图分类号:P412.1

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2024.06.015

0 引言

对流天气通常包括强雷雨、冰雹、雷暴大风、龙卷等中小尺度天气现象,此类天气具有强度大、破坏力强、时间短等特点。由于强对流主要是由中小尺度的天气系统引起的,具有来势大、时间短等特点,在定量预报上难度很大。李伟等^[1]利用2017年夏季六盘山地区一次强对流天气过程云降水宏微观特征分析指出当雷达回波朝六盘山山体移动时,回波有明显加强的趋势。王桐根^[2]对Ka波段毫米波云雷达数据质量控制及对流过程进行分析,证明云雷达获取的回波强度参数反演雪粒子降雪量具有可行性。纪晓玲等^[3]指出宁夏雷暴多发生在3-10月,集中出现在夏季,尤其以7月突出,其中15时前后为雷暴高发时段;田磊等^[4]利用六盘山区的夏秋季大气水汽和液态水特征进行初步分析,指出六盘山区夏秋季在降水天气背景下,大气水汽含量和液态水含量均较高,分别为无降水天气背景下的1.4倍和7.0倍;黄治勇等^[5]利用对湖北咸宁短时暴雨进行潜势预报,发现 K 指数的数值对强对流天气的预报具有一定指示效果。

研究表明,雷达资料和微波辐射计资料的应用可以弥补常规探测资料的不足,对深入研究对流天气过程发展演变具有重要意义。通过微波辐射计反演相对湿度、温度、大气水汽含量(IWV,下同)、大气液态水

含量(ILW,下同)等信息分析当天天气情况,同时计算不稳定指数并分析其演变趋势,验证其可以作为预测发生对流天气的因子,并为六盘山地区中小尺度天气的特征分析提供参考,以进一步提升六盘山地区的预报预测和灾害防御水平。

1 资料与方法

1.1 数据来源

六盘山地区地处西北地区东部,属典型的温带半湿润大陆性气候,具有大陆、海洋季风边缘气候特点,是中国北方自然地带分界线^[6]。降水量、温度等相关数据来源于位于六盘山顶的六盘山国家基准气候站(106°20'E、35°67'N、海拔2842 m)和位于六盘山脉西侧^[7]的隆德国家气象观测站(106°07'E、35°37'N、海拔2079 m)根据国家标准规范观测所得的数据,两站相距9.7 km。仪器HT101型全固态Ka波段云雷达,中心频率35 GHz,天线口径1.6 m,工作波长8.6 mm^[8],采用顶空垂直探测的工作方式,获取云顶高、云底高、云廓线结构、垂直速度等参数,实现云降水连续演变过程的探测;天气雷达型号为CINRAD/CD型雷达,其波长5 cm,天线增益44.2 dB,单个扫描时间6 min,库长300 m^[9],和Ka波段云雷达均部署在六盘山气象站。地基微波辐射计部署在隆德国家气象观测站,能实时、连续检测、处理和提供大气边界层与对流层的温度、湿度、液态水廓线和总量等信息,能在几乎各种环境条件下独立工作,型号为德国RPG-HATPRO-G4^[10],其性能参数见表1。

收稿日期:2023-05-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42075073);宁夏自然科学基金资助项目(2023AAC03802);第二次青藏高原科学考察研究资助项目(2019QZKK0104);中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室开放研究资助项目(CAMF-202211)

通信作者:舒志亮. E-mail:8633204@163.com

表 1 微波辐射计性能参数

性能参数	参数值
辐射测量范围	0~800 K
积分时间	≥0.4 s, 可调
主频	K 波段: 21 通道 (22.24~31.9 GHz) V 波段: 21 通道 (51.26~58.0 GHz)
通道带宽	57.55/58.0 GHz; 2000 57.30/57.16 GHz; 1000 56.66/56.91 GHz; 600
综合水汽含量 IWV	精度: ±0.2 kg/m ² ; 噪声: 0.05 kg/m ² RMS
液态水路径 LWP	精度: ±20 g/m ² ; 噪声: 2 g/m ² RMS

1.2 方法

六盘山地区夏季对流天气发生较多,经常出现短时暴雨或者冰雹等中小尺度天气^[11]。挑选 2021 年 6 月 30 日、2021 年 7 月 27 日 2 次夏季对流天气,利用新一代天气雷达和 Ka 波段毫米波云雷达分析当天回波特征,以及中小尺度天气背景下对流云的垂直结构变化,结合微波辐射计数据,得到其对流层的温度、湿度、液态水廓线含量和大气水汽含量等信息,对当天对流天气时间段进行数据归纳,反演出温度廓线(对流层)、综合水汽含量(IWV)、液态水路径(ILW)、湿度廓线等,对数据处理并分析其变化。分析对流天气发生前后的数据特征,并计算 2 次过程主要对流时段前

后的 K 指数, K 指数可以反映大气的层结稳定情况,这种指标对夏季对流情况的预报作用是明显的,对于对流天气具有指示作用^[12]。以上分析可作为宁夏六盘山地区短时对流天气中天气情况的演变特征。

1.3 个例简介

六盘山地区处于东亚季风的边缘,是海洋暖湿气流进入西北内陆的门户,全年降水较少,远低于全国平均值。自动气象站逐小时降水数据记录 2021 年 6 月 30 日及 2021 年 7 月 27 日分别出现短时对流天气。其中 6 月 30 日 16:00–17:00 出现短时雷阵雨,降雨时间较短,降水时段平均气温下降 2.5℃,累计降雨量为 6.1 mm; 7 月 27 日 14:00–18:00 出现强降水,降雨量大持续时间长,降水时段平均气温累计下降 5.1℃,累计降雨量为 17.3 mm。

2 雷达资料分析

2.1 天气雷达资料分析

天气雷达可有效监测中小尺度天气系统的产生、发展、成熟和消亡的过程。图 1 为 2021 年 6 月 30 日 16:32、17:42 及 2021 年 7 月 27 日 14:26、16:06 共 4 个时间节点的基本反射率图,旨在对宁夏六盘山地区强对流天气过程的雷达回波特征进行分析。由图 1 可

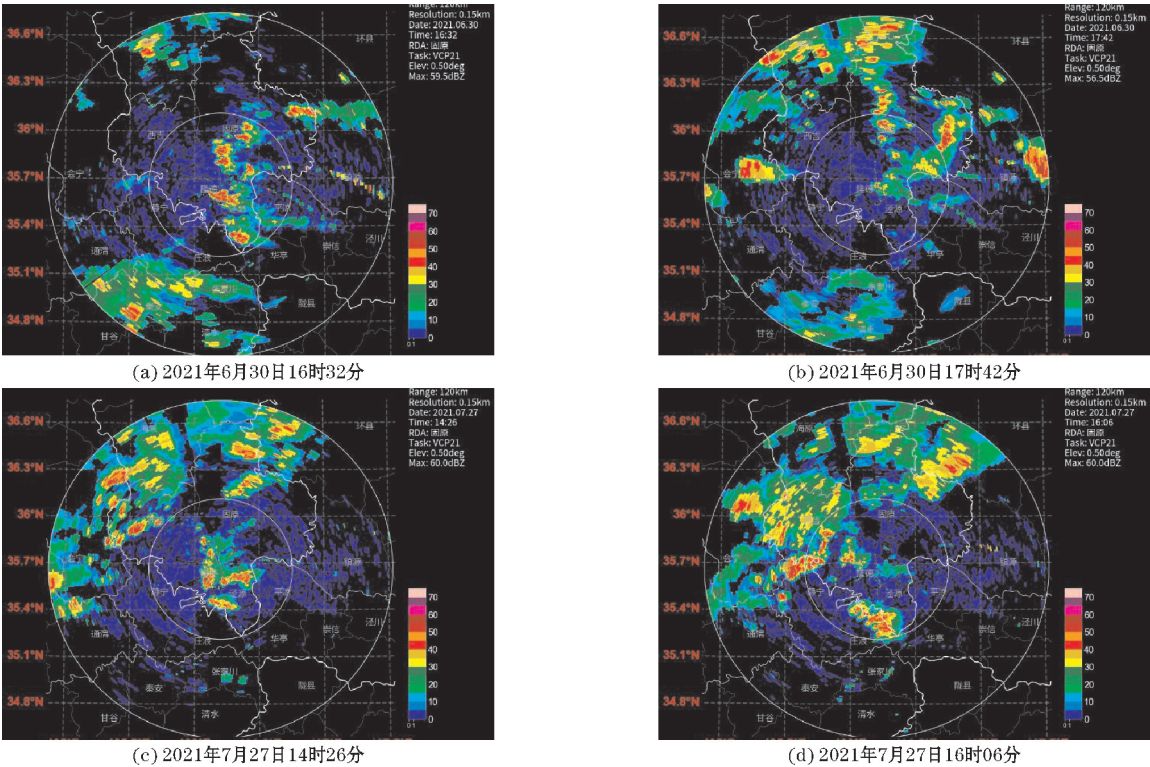
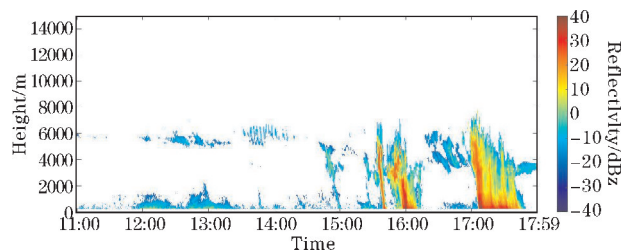


图 1 新一代天气雷达基本反射率

知2次个例雷达回波呈现典型的强对流回波特征,多处基本反射率因子 ≥ 40 dBZ。6月30日16:32(图1a)六盘山站东南方向形成大面积强回波,出现雷阵雨,降水量为5.2 mm,回波最大反射率因子达到59.5 dBZ,回波带1 h内向东北方移动扩散(图1b),六盘山站位于隆德站东北方向,即六盘山站天气特征晚于隆德站。7月27日天气过程主要是由于午间的热力条件抬升扰动,导致原地生成大量对流泡,逐渐合并发展为强对流天气过程,对流天气持续时间近4 h,回波特征表现为以隆德为中心(图1c),出现较大范围的强回波,雷达反射率因子最大达到60 dBZ,伴随出现短时强降雨,降雨量为12.3 mm。后因热力条件减弱,隆德附近强回波逐渐消散转而向隆德以南庄浪方向移动消散(图1d)。

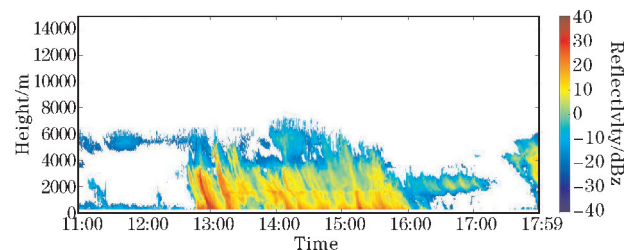
2.2 云雷达资料分析

云是由大量细微的水滴或冰晶组成的悬浮于大气中的可见聚集体。图2为Ka波段云雷达反射率,6月30日



(a) 2021年6月30日12:00–18:59

(图2a)对流天气持续时间较短,15:00之前,云层回波顶高均处在6 km左右。15:00左右云层厚度增大,大概扩展为5.5 km,云底向下发展,但回波强度不高。之后半小时,云层稀少,在5.5 km高度附近有较稀薄的云层。15:40左右,云雷达探测一块回波,其厚度大概5 km,10 min后云厚度减少,云层处于2~4 km,随后云底迅速下降,直至接地发生对流天气,此时回波强度较大,最大超过40 dBZ,云层回波顶高大概6~7 km。中途云层消亡10~20 min,随后又呈现强回波特征,在16:15左右结束,云层向上发展,活跃在36 km,持续了1 h后在17:10左右又出现对流天气,此次天气过程持续大概40 min,回波强度均值超过15 dBZ,最大超过40 dBZ。而后对流天气结束,云底抬升,云层厚度减小。7月27日(图2b)12:50之前云层回波顶高均处在6 km左右,此时处于层积云阶段。12:50–16:00,出现多个强回波中心,层积云转为对流云,最强回波中心(≥ 40 dBZ)位于云底到地面之间,此次对流过程持续时间较长,降雨更多。而后云底增高,逐渐恢复正常。



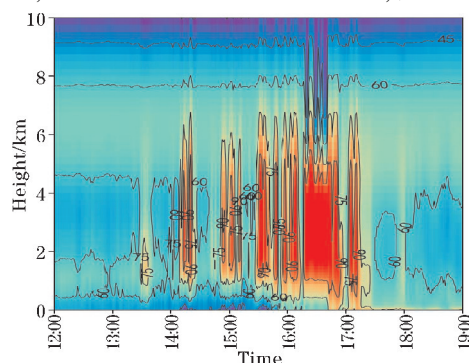
(b) 2021年7月27日11:00–17:59

图2 Ka波段云雷达反射率

3 微波辐射计资料分析

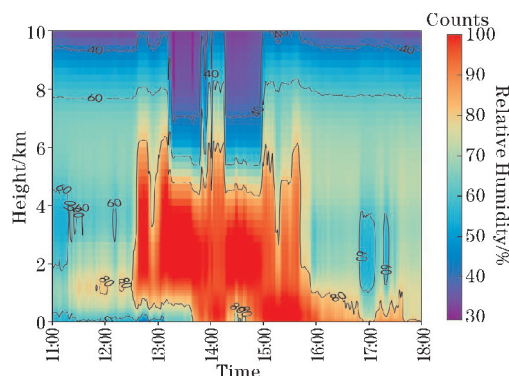
3.1 相对湿度廓线演变特征

底层适当水汽供应是对流天气的重要条件之一,大气中水汽含量很少,特别是干旱的西北地区,分析0~10 km微波辐射计的相对湿度特征^[13]。图3为相对湿度廓线,在出现对流天气前3 h内,水汽主要集中在中低层。6月30日(图3a)14:00开始底层的湿度向上抬升,中层相对湿度近于饱和状态,但底层相对湿度



(a) 2021年6月30日

度增加并不明显,且近地面出现了小于50%的干区。7月27日(图3b)在高度0~6 km相对湿度明显升高,大部分超过了90%,最大值可达100%。相对湿度垂直廓线均大体呈现0~5 km层相对湿度大,且基本趋近于饱和。出现这种情况的原因是其降雨量的大小。当临近天气情况发生时,2次个例0~5 km高度内湿度趋近于饱和,5~10 km高度内相对湿度显著减小,0~10 km总体上呈现的是“上干下湿”的2层结构,这种逆湿的层结中,一旦产生上升运动,将会触发对流不稳定^[5,10],为降水形成有利条件。



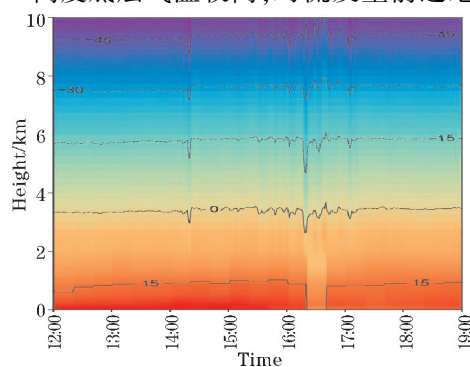
(b) 2021年7月27日

图3 相对湿度廓线

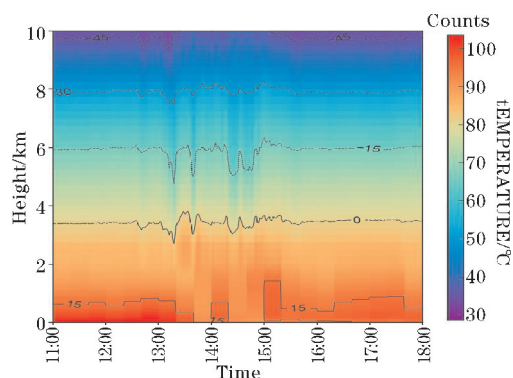
3.2 温度廓线演变特征

大气中的热力不稳定是导致强对流天气产生的有利条件,垂直温度廓线能够直观地反映出温度的演变趋势^[14]。图4为温度垂直廓线,由于6月30日(图4a)及7月27日(图4b)2次个例处于夏季,所以0~10 km高度底层气温较高,对流发生前近地面温度

达到30℃。对流天气临近时,温度出现先降后升的明显变化,低中层大气明显降温,表明此时已经有较为明显的下沉气流产生。6~10 km高度大气温度变化不明显,温度递减率减小,大气稳定性增加。不同的是7月27日出现明显的温度先降后升再降的变化趋势,特征不同原因可能是对流天气持续时间的长短。



(a) 2021年6月30日



(b) 2021年7月27日

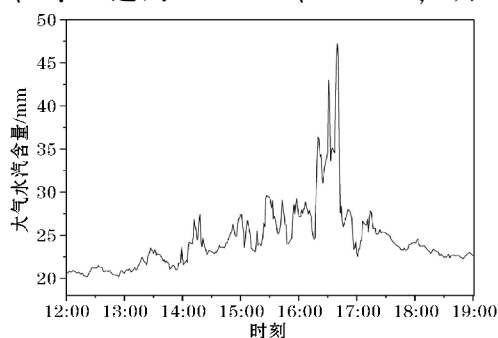
图4 温度垂直廓线

3.3 大气水汽及液态水总含量的演变特征

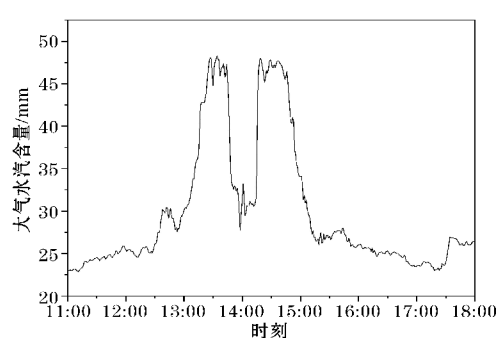
大气水汽含量与大气液态水含量可以在一定程度上反映水汽的变化,在大部分西北地区,95%的液态水路径值都在150 g/m²以下^[15]。IWV和ILW的结合分析,可以形成对对流天气的直观分析。

图5为IWV和ILW曲线,本次对流过程2次个例的IWV和ILW均经历临近对流迅速增长、对流结束迅速下降的演变过程,对流大概发生在IWV和ILW的波峰。6月30日,发生对流天气前约3 h, IWV(图5a)与ILW(图5c)开始出现波动, IWV与ILW的最大峰值分别在16:38、16:31达到47.24 mm、6.32 mm; 7月27

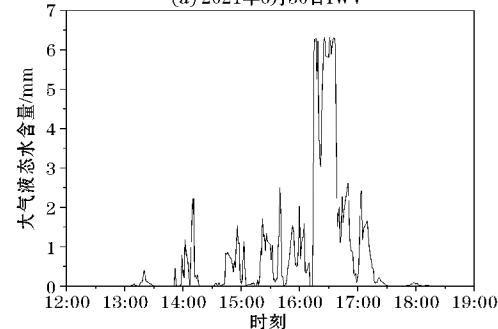
日,对流发生前约1 h, IWV(图5b)与ILW(图5d)出现波动,且波动的幅度较大,不同的是,此次对流过程出现2个波峰,且均峰值较大, IWV与ILW的最大峰值分别在13:34、14:19、13:42、14:52达到48.26 mm、47.99 mm、6.39 mm、6.49 mm。出现这种情况的原因是该天对流天气剧烈,持续时间较长,且中间对流天气减弱了一段时间,从而导致IWV及ILW减少,而后又恢复^[16]。2次个例两者幅值浮动越大,则说明当日天气状况更加剧烈。可以看出,临近对流时IWV与ILW均会出现急剧的上升, IWV与ILW波峰在时间上大致相同,随着对流发生两者迅速减小。



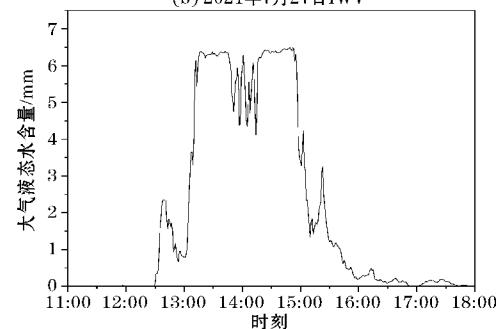
(a) 2021年6月30日IWV



(b) 2021年7月27日IWV



(c) 2021年6月30日ILW



(d) 2021年7月27日ILW

图5 IWV和ILW曲线

3.4 不稳定指数

大气的稳定指数代表对流性天气发生的可能性, K 指数常在气象学中用于分析大气稳定程度,其利用不同层结上的温度条件来计算,公式为

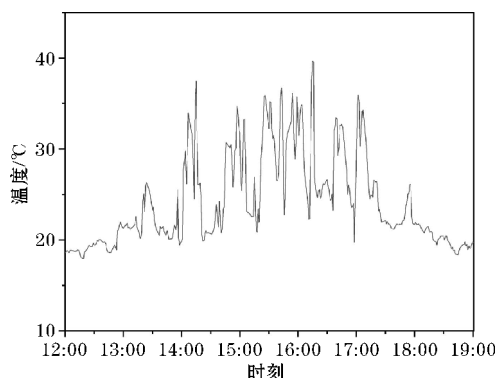
$$K = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T_{700} - T_{d700})$$

式中, T_{850} , T_{700} , T_{500} 分别为利用微波辐射计反演得到的850 hPa,700 hPa,500 hPa高度层的温度, T_{d850} , T_{d700} 分别为850 hPa,700 hPa高度层的露点温度^[17]。

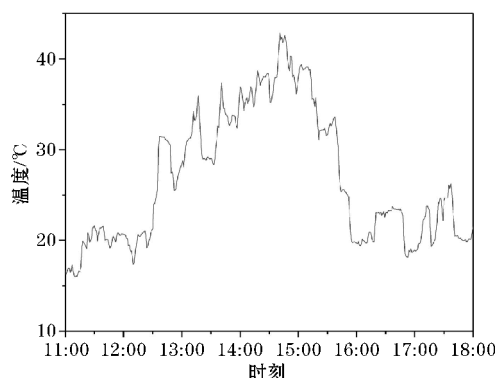
可看出, K 指数越大,大气越不稳定,发生对流性天气的可能性越大,反之 K 指数越小,表示大气越稳定。研究表明, $K > 35$ °C时容易发生对流天气^[10,18]。在南方,特别是夏季雨水比较充足时,由于水汽条件好, K 指数经常在35 °C以上,但对流却不总是发生;而在北方,有时候在冷涡背景下,中层有冷空气, $K < 30$ °C时仍可能

发生对流(伴随雷暴大风),所以应注意季节、地域、对流类型的差异。本次分析的六盘山地区短对流过程,其位于中国西北地区,气候比较干燥^[19]。

图6为 K 指数曲线,6月30日(图6a) K 指数在发生对流前约3 h,出现波动,一直持续波动到对流发生。从第一次波动出现然后达到峰值, K 指数从13:17的20.18 °C增长到16:15的39.65 °C;7月27日(图6b), K 指数在发生对流前约2.5 h,出现波动,而后一直处于增大趋势,下降不显著, K 指数从12:11的17.53 °C增长到14:41的42.86 °C。在对流结束后, K 指数迅速下降到30 °C以下,恢复小幅度波动,说明大气层结趋于稳定,没有发生二次对流情况。两次个例中对流天气前几小时内, K 指数出现明显的升高,即大气处于不稳定状态,在临近对流时出现急剧的增长。在对流结束后迅速下降至阈值以下。



(a) 6月30日12:00-19:00



(b) 7月27日11:00-18:00

图6 K 指数曲线

4 结论

利用新一代天气雷达分析宁夏2021年6月30日和2021年7月27日回波强度和对流天气趋势,结合Ka波段云雷达阐述六盘山地区云的垂直结构变化,利用地基微波辐射计观测资料反演出的相对湿度、温度、大气水汽总含量(IWV)、大气液态水总含量(ILW)、不稳定指数等特征,分析这2次短时对流天气过程的特征,可作为六盘山地区短时对流天气的潜势预警,主要的结论有:

(1) 2次个例雷达回波变为典型的强对流回波特征,强对流天气期间多地雷达基本反射率因子超过40 dBZ,最强达到60 dBZ以上,且均形成大面积的层积混合雷达回波。

(2) 临近对流天气,云层会迅速下降,直至接地发生对流天气。对流时呈强回波特征,2次个例回波顶高均超过6 km。对流结束后,云底抬升,云层厚度减小,恢复正常。

(3) 0~10 km整层相对湿度垂直结构在对流天气临近会形成“上干下湿”的2层结构,临近这种结构会

更显著。温度垂直分布明显呈“上冷下暖”的2层结构,临近对流天气会出现降温,以上特征预示着对流天气中降水过程的开始。

(4) 对流天气临近时,低层水汽会向上进行传输,从而导致大气水汽总含量(IWV)、大气液态水总含量(ILW)会出现明显的急剧增长,结束之后,又会出现明显的下降。出现对流天气持续时间较长的天气情况时,IWV与ILW会出现双峰结构, K 指数上下浮动下降不明显。

(5) 对流天气形成之前, K 指数出现几次超过阈值的浮动,说明此时大气层结便处于不稳定状态,当 K 指数出现超过阈值的快变波动时,伴随波动加剧可以判断将会有对流天气发生。对流天气持续时间较长时, K 指数曲线下降特征不明显,总体呈持续上升趋势,波动曲线开始下降并变得平稳时,表示对流天气减弱消亡。

参考文献:

[1] 李伟,穆建华,马思敏,等.2017年夏季六盘山地

- 区一次强对流天气过程云降水宏微观特征分析[J]. 黑龙江气象, 2019, 36(3): 14-16.
- [2] 王桐根. Ka波段毫米波云雷达数据质量控制及对流过程分析[D]. 成都: 成都信息工程大学, 2020.
- [3] 纪晓玲, 陈晓光, 贾宏元, 等. 宁夏冰雹的分布特征[J]. 灾害学, 2006(4): 14-17.
- [4] 田磊, 桑建人, 姚展予, 等. 六盘山区夏秋季大气水汽和液态水特征初步分析[J]. 气象与环境学报, 2019, 35(6): 28-37.
- [5] 黄治勇, 徐桂荣, 王晓芳, 等. 地基微波辐射计在短时暴雨潜势预报中的应用[J]. 应用气象学报, 2013, 24(5): 576-584.
- [6] 王荣, 王亚琴, 闫浩文. 六盘山山地植被物候地带性分异及其对气候变化的响应[J]. 地理与地理信息科学, 2021, 37(4): 90-98.
- [7] 林彤, 桑建人, 姚展予, 等. 基于微波辐射计的宁夏六盘山西侧大气水汽变化特征[J]. 干旱区地理, 2021, 44(4): 923-933.
- [8] 邓佩云, 陶涛, 林彤, 等. 六盘山区两种不同型号Ka波段云雷达对比分析[J]. 气象研究与应用, 2022, 43(4): 79-84.
- [9] 党张利, 李化泉. 六盘山区一次冰雹天气过程分析[J]. 宁夏工程技术, 2022, 21(3): 240-245.
- [10] 黄治勇, 周志敏, 徐桂荣, 等. 风廓线雷达和地基微波辐射计在冰雹天气监测中的应用[J]. 高原气象, 2015, 34(1): 269-278.
- [11] 赵庆云, 张武, 陈晓燕, 等. 一次六盘山两侧强对流暴雨中尺度对流系统的传播特征[J]. 高原气象, 2018, 37(3): 767-776.
- [12] 黄治勇, 徐桂荣, 王晓芳, 等. 基于地基微波辐射计资料对咸宁两次冰雹天气的观测分析[J]. 气象, 2014, 40(2): 216-222.
- [13] 张茜, 孙少明, 王清平, 等. HTG-3微波辐射计资料在乌鲁木齐国际机场雷暴天气中的应用初探[J]. 气象与环境科学, 2020, 43(4): 119-128.
- [14] 林辉, 焦阳, 蔡艺友, 等. 微波辐射计在降水过程中的应用[J]. 气象水文海洋仪器, 2021, 38(1): 72-75.
- [15] 黄建平, 何敏, 阎虹如, 等. 利用地基微波辐射计反演兰州地区液态云水路径和可降水量的初步研究[J]. 大气科学, 2010, 34(3): 548-558.
- [16] Reguang J, Bin C, Ammara H, et al. A case study of cold-season thundersnow in Beijing[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2019, 12(6): 392-398.
- [17] 唐仁茂, 李德俊, 向玉春, 等. 地基微波辐射计对咸宁一次冰雹天气过程的监测分析[J]. 气象学报, 2012, 70(4): 806-813.
- [18] Chan, Pak. Performance and application of a multi-wavelength, ground-based microwave radiometer in intense convective weather[J]. Meteorologische Zeitschrift, 2009, 18(3): 253-265.
- [19] 陶涛, 张立新, 桑建人, 等. 六盘山区一次非典型冰雹天气过程微物理量特征的分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 299-307.

Observation and Analysis of Summer Convective Weather in Liupan Mountain Area of Ningxia

ZOU Jie¹, SHU Zhiliang^{1,2}, TIAN Lei², LI Xiao¹, LIN Tong^{1,2}, GUO Zaihua¹

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Science and Technology, Chengdu 610225, China; 2. Ningxia Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Yinchuan 750002, China)

Abstract: To investigate the process of convective weather evolution in the Liupan Mountains region of Ningxia, this study utilized commonly used observational data, radar data, microwave radiometer inversion data, and other resources to analyze two convective events: a short-term thunderstorm on June 30th, 2021, and a heavy rainfall event on July 27th, 2021. The results indicated that (1) Severe convective weather yielded basic reflectivity factors of over 40 dBZ in multiple regions, with a maximum of over 60 dBZ, forming a large, stratified mixture of radar echoes; (2) The cloud structure changed significantly, with clouds quickly descending near convective weather and exhibiting strong echoes, with echo tops rising over 6 km in height; (3) A vertical structure of relative humidity formed where a “dry above, moist below” two-layer structure appeared, alongside a noticeable “cold above, warm below” temperature vertical distribution structure; (4) The instability index K value showed great fluctuations during both events, with a maximum value exceeding 40 °C near convective weather. When convective weather persisted over a prolonged period, the K index curve did not display a prominent downward trend, but instead sustained an upward trend.

Keywords: Liupan Mountain area; radar; convection; instability index