

# 基于微波辐射计RPG-HATPRO的 夏季午后强对流个例分析

牛海林<sup>1</sup>, 吕艺影<sup>1</sup>, 高益波<sup>1</sup>, 徐迪峰<sup>2</sup>, 刘建勇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>余姚市气象局, 浙江 宁波

<sup>2</sup>宁波市气象局, 浙江 宁波

Email: lion.yiss@live.com

收稿日期: 2020年10月14日; 录用日期: 2020年10月27日; 发布日期: 2020年11月3日

## 摘要

利用NCEP再分析资料、余姚自动气象站观测数据以及RPG-HATPRO型微波辐射计资料,对2017年7月14日傍晚到夜里发生在余姚的一次强对流天气过程进行综合分析。结果表明,该次强对流过程是副高边缘发生的准正压类的强对流过程,大气层结无明显“上干下湿”结果,不利于冰雹发生,而较高的K指数、CAPE值则非常利于短时强降水、雷暴大风的出现,与实况较为吻合。强对流天气过程发生前通过微波辐射计得出的综合水汽含量维持在52 kg/m<sup>2</sup>以上、K指数高达40℃、CAPE值达2000 J/kg以上,抬升指数低至-10,与通过探空数据得到的强对流触发阈相对,K指数和CAPE值要高的多,而抬升指数则小的多,通过进一步统计多个对流过程得到基于微波辐射计对流指数的经验阈值,对日常预报将有显著的促进作用。

## 关键词

RPG-HATPRO, 强对流, 对流指数, 阈值

## A Severe Convection Analysis in Summer Afternoon Based on RPG-HATPRO

Hailin Niu<sup>1</sup>, Yiying Lv<sup>1</sup>, Yibo Gao<sup>1</sup>, Difeng Xu<sup>2</sup>, Jianyong Liu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Yuyao Meteorological Bureau, Ningbo Zhejiang

<sup>2</sup>Ningbo Meteorological Bureau, Ningbo Zhejiang

Email: lion.yiss@live.com

Received: Oct. 14<sup>th</sup>, 2020; accepted: Oct. 27<sup>th</sup>, 2020; published: Nov. 3<sup>rd</sup>, 2020

## Abstract

Based on NCEP reanalysis data, Yuyao automatic weather station observation data and RPG-HATPRO microwave radiometer data, a severe convective weather process occurred in Yuyao from the evening to the night of July 14, 2017 was comprehensively analyzed. The results show that the strong convective process is a quasi barotropic strong convective process at the edge of the subtropical high. There is no obvious “upper dry and lower wet” result in the atmospheric stratification, which is not conducive to the occurrence of hail. The higher K index and Cape value are very conducive to the occurrence of short-term heavy rainfall and thunderstorm gale, which is in good agreement with the actual situation. Before the occurrence of severe convective weather, the comprehensive water vapor content obtained by microwave radiometer is above 52 kg/m<sup>2</sup>, K index is as high as 40°C, CAPE is up to 2000 and Lifted Index is even as low as -10. Compared with the strong convection trigger threshold obtained by artificial sounding data, the K-index and CAPE are much higher, while the Lifted Index is much smaller. The empirical threshold based on the convection index of microwave radiometer is obtained by further statistical analysis of multiple convection processes, which will significantly promote the daily forecast.

## Keywords

RPG-HATPRO, Severe Convection, Convection Index, Threshold

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

强对流天气是发生在中小尺度天气系统, 具有明显的突发性、移动迅速、天气剧烈、破坏力极大等特征, 同时常伴有雷雨大风、短时强降水、冰雹等天气现象[1] [2]。余姚属浙东盆地山区和浙北平原交叉地区, 地处北亚热带季风气候区, 四季分明, 光照充足, 气温适宜, 雨量丰沛[3]。每年夏季余姚地区常出现午后强对流天气, 夏季强对流天气不仅经常伴有短时暴雨, 同时伴有强雷暴、大风和冰雹等灾害性天气, 经常给人民生命财产安全带来巨大的影响。由于夏季强对流多发生于中小尺度的云团, 常规的天气尺度的天气分析对于强对流预报的准确性有非常大误差, 目前强对流预报也是天气预报中的一个难点, 对于气象业务就是尽可能提前做出服务, 多手段监测是提高服务质量的重要途径。

微波辐射计可以反演大气层温度、湿度以及液态水的垂直剖面情况, 可实现对温度、湿度、液态水含量的连续监测, 监测资料具有时间分辨率高、精度高的优点, 分析微波辐射计资料可以得到短时临近天气预报指标, 对降水、冰雹天气又重要的预警和指示作用[4] [5] [6] [7]。黄晓莹等[2]发现微波辐射计监测显示的降水情况和实况基本相符, 与探空数据相比, 微波辐射计的大气温度、湿度廓线等天气要素的垂直分布合理。计算分析 K 指数、深对流指数 CAPE、对流有效位能 SDCL 等常用参数, 并选取个例进行分析, 结果显示对流参数变化情况与实际降水的强度有对应关系。郑祚芳等[8]发现微波辐射计对降水的预报具有指示意义, 特别是云中液态水含量急剧增减过程对降水过程指示意义更大。陈宏尧提出探空资料可以作为衡量微波辐射计的标准, 姚作新分析了温度、相对湿度误差情况及产生的原因, 结果显示微波辐射计提供的垂直廓线图在监测和分析天气系统方面有一定的优势, 但探测准确性略差。赵玲等[9]发现微波辐射计与探空数据总体相似, 温度、湿度的相关系数分别为 0.994 和 0.697, 二者均能反映温度随着高度递减的趋势。微波辐射计在天气预报预警中的应用越来越多[10]-[15]。

## 2. 资料

### 2.1. NCEP 再分析资料

NCEP 再分析资料是由美国环境预报中心提供的逐 6 小时格点资料，水平分辨率  $1^\circ \times 1^\circ$ ，研究时段为北京时间 2017 年 7 月 14 日 08 时。本文天气形势分析资料采用 NCEP 再分析资料进行分析。

### 2.2. 自动气象站数据

使用余姚国家一般气象站和区域自动气象站的观测数据，对强对流过程的降水、大风进行统计，分析强对流过程前后气象要素变化情况。

### 2.3. RPG-HATPRO 微波辐射计资料

RPG-HATPRO 型地基微波辐射计(见图 1)由德国 RPG 公司制造，主要由微波扫描镜、分光镜、微波接收器组、微波窗口、红外辐射计、方位定位仪、内置定标黑体、鼓风机、加热器、降雨传感器、地面气象传感器、GPS 时钟、电源系统、数据通信光纤和稳固支架等构成。采用多通道并行测量，具有 7 个频率 51~59 GHz 的温度通道和 7 个 22~32 GHz 的湿度通道。

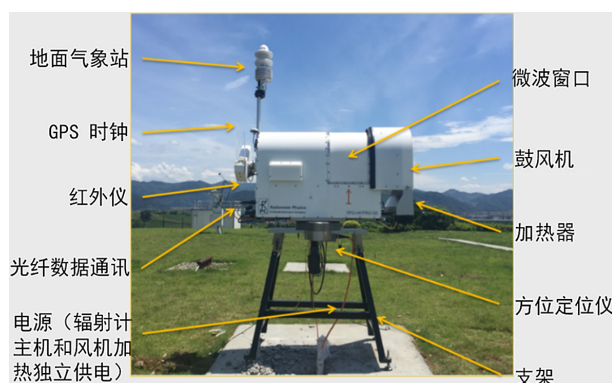


Figure 1. Schematic structure of RPG-HATPRO

图 1. 微波辐射计的结构

RPG-HATPRO 型地基微波辐射计根据接收不同频率下的辐射信息，产生电压信号(0 级数据)，由定标结果将电压数据转换为亮温数据(1 级数据)。根据亮温数据，利用本地多年探空资料正向模拟微波辐射，并结合红外仪和地面微型气象站，采用神经网络和回归算法反演 0~10 km 高度范围内的温度、湿度、液态水廓线、液态水路径(LWP，即单位面积垂直气柱内积分的液态水含量)、综合水汽含量(IWV，即单位面积上的整层水汽积分量)等 2 级数据，同时根据气象学原理、微型自动气象站数据生成地面气象参数、对流稳定指数等其他数据(表 1)。0~2 级数据及其他数据均可同时保存。

Table 1. Data products of PRG\_HATPRO

表 1. 微波辐射计的数据产品

0 级数据	1 级数据	2 级数据	其他数据
检测器 电压数据	亮温 边界层亮温 红外仪数据	边界层温度廓线 对流层湿度廓线 对流层温度廓线 液态水廓线 液态水路径 综合水汽含量	地面气象参数 降水状况 云底高度 对流稳定指数 内无数据

余姚国家一般气象站(121°8', 30°1')微波辐射计于 2017 年 1 月 1 日正式投入使用, 期间仪器稳定运行, 本文对 2017 年 7 月 14 日的强对流天气的温度、湿度、综合水汽含量及对流指数等微波辐射计数据进行分析。

### 3. 天气概况及环流形势

#### 3.1. 天气概况

2017 年 7 月 14 日受副热带高压影响, 全市大部分地区出现高温天气, 平原地区日最高气温达到 39°C~40°C, 傍晚到上半夜余姚全市出现强对流天气, 并伴有强雷电和雷雨大风, 面雨量 6.5 毫米, 最大国家站 46.1 毫米, 强降水落区恰好集中在余姚城区一带, 其中国家站 19 时一小时雨强 19.6 毫米, 有 11 个站出现 8 级及以上大风, 最大国家站 24.5 米每秒(10 级), 其次姚家站和文山站 19.5 米每秒(8 级)(见图 2)。

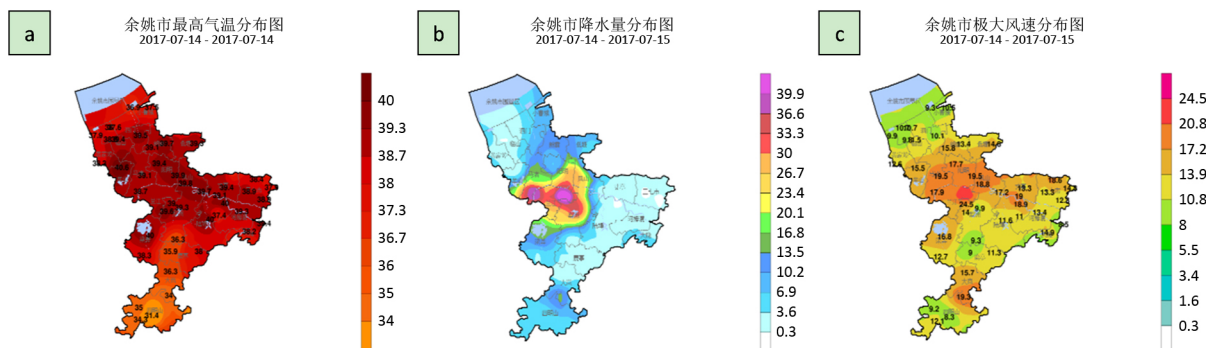


Figure 2. Distribution of daily maximum temperature (a), process rainfall (b) and extreme wind speed (c) in Yuyao on July 14, 2017  
图 2. 2017 年 7 月 14 日余姚日最高气温(a)、过程雨量(b)、过程极大风速(c)分布图

#### 3.2. 大气环流形势

2017 年 7 月 14 日上午 8 时余姚位于 500 hPa 位于副热带高压控制, 前期天气晴好, 气温上升较快, 使得能量迅速积聚, 有利于余姚地区大范围高温天气的出现, 高温出现往往都会超过对流温度, 大大加强了午后强对流发生的热力条件。由于处在副高的边缘, 受西南气流影响, 大气层结稳定性较差, 为强对流的发生提供了较好的不稳定条件, 中低层均为西南暖湿气流, 为余姚上空带来一定的水汽, 同时上游地区还有低涡在逐渐东移, 850 Hpa 有弱切变存在, 天气形势有利于强对流的发生。加之, 余姚复杂的地形条件, 地面受热不均匀的程度较大, 从而有利于对流云的产生(图 3)。综合来看, 整个天气形势非常有利于强对流天气的发生, 是一种准正压类的强对流过程。

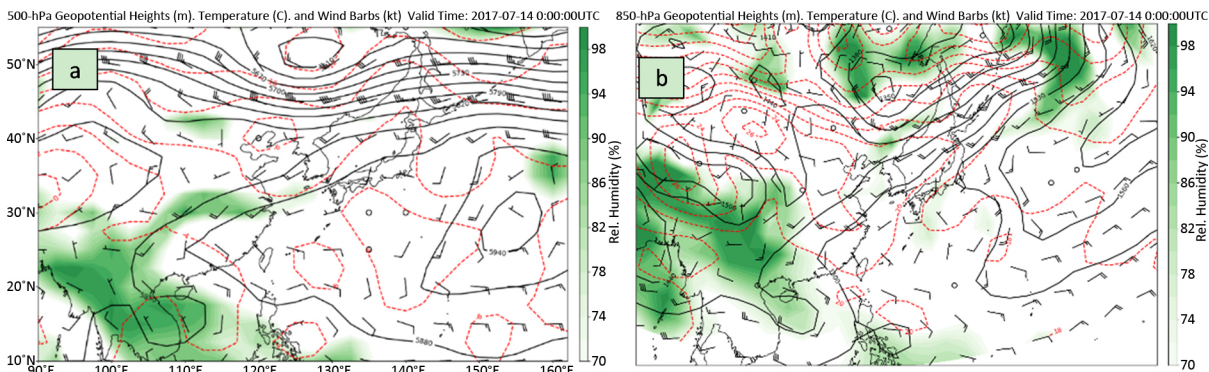


Figure 3. 500 hPa (a) and 850 hPa (b) geopotential heights, temperature and wind barbs  
图 3. 7 月 14 日 08 时 500 hPa (a)和 850 Hpa (b)位势高度场(等值线)、温度场(虚线)和风场(风杆)



## 4. RPG-hatPro 资料对比分析

探空曲线和对流指数在强对流预报中发挥着重要的作用, 本文基于 RPG-HATPRO 资料对余姚 2017 年 7 月 14 日强对流天气前后探空曲线和对流指数特征做逐一分析, 探究微波辐射计资料在强对流天气预报预警的作用。

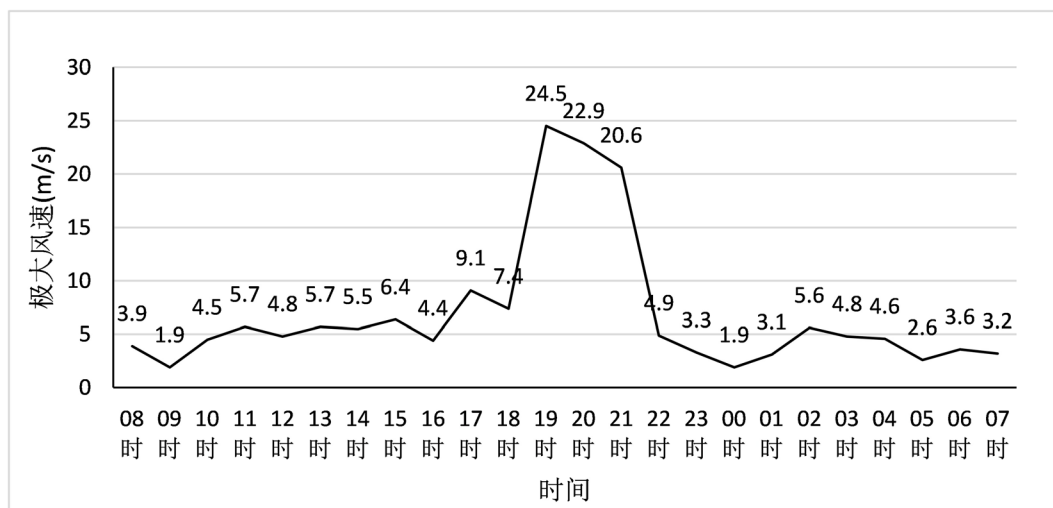


Figure 4. Hourly extreme wind speed variation at Yuyao national weather station

图 4. 余姚国家站 7 月 14 日 8 时至 15 日 7 时逐小时极大风速变化

通过余姚国家站 7 月 14 日至 15 日小时极大风速的变化图(图 4)可以看出, 风速剧烈变化时段出现在 14 日 19 时前后, 18 时至 21 时连续三小时的极大风速均达到 20 m/s 以上, 是强对流天气最剧烈的时段, 因此本文取 16 时数据表示强对流发生前的状态, 20 时数据代表强对流发生时的状态, 23 时数据代表强对流发生后的状态。

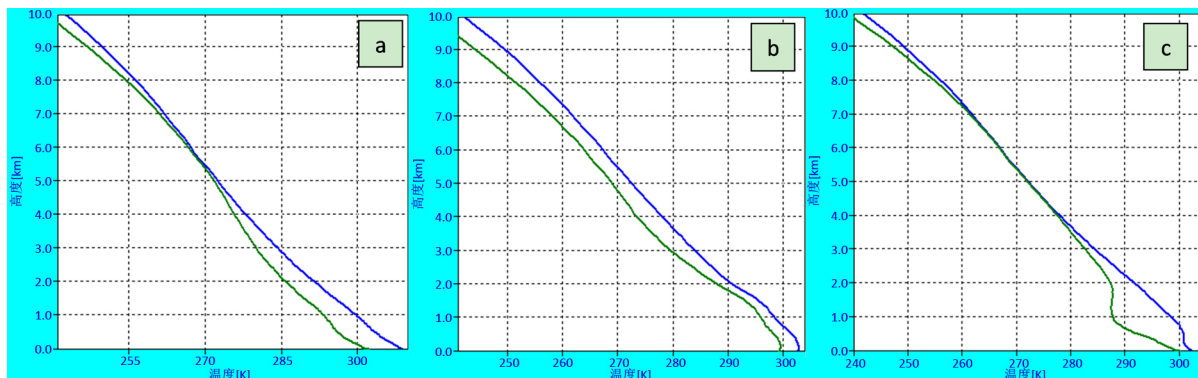
### 4.1. 温度和湿度廓线

图 5 分别代表了强对流发生前、发生时和发生后的对流层温度廓线, 可以看出, 强对流发生前整个对流层大部分都是非饱和状态, 但相对湿度均较大, 仅 5.8 千米高度附近出现水汽饱和, 大气层结并未出现“上干、下湿”下的较强热力不稳定层结, 此种情况发生较强强对流天气, 往往是对应短时强降水, 发生冰雹的概率相对较小[16], 而实况确实也没有出现冰雹, 出现了短时强降水, 说明微波辐射计探空数据有较强的参考性。强对流发生时整层大气是非饱和状态, 非常明显的是整层大气的相对湿度非常接近, 这可能是由于强对流时大气剧烈运动混合较为均匀所致, 而对流发生后的温度廓线与强对流发生前和发生时也有较大的差别, 强对流发生后的温度廓线在 3.8 千米以上的对流层大气均饱和或者接近饱和的状态, 但是在 3.8 千米以下特别是在 1 千米左右的边界层, 存在明显的干区。可见, 微波辐射计探空数据时间的连续性为强对流天气的过程变化研究提供了非常精细的大气状态数据。

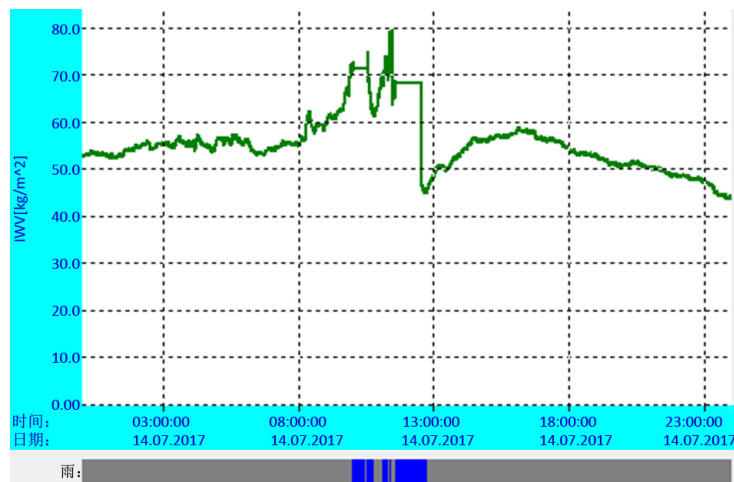
### 4.2. 综合水汽含量

从综合水汽含量的日变化图上(图 6)可以看出, 在强对流发生前, 即下午 16 时之前余姚上空的水汽含量稳定在 52~58 kg/m<sup>2</sup> 之间, 变化幅度较小, 16 时以后综合水汽含量则有较明显的上升趋势, 并在 17:30~19:30 之间伴有跳跃式上升, 达到高值区间, 均超过 65 kg/m<sup>2</sup>, 在 19:28 分前后达到最大值 80.1 kg/m<sup>2</sup>。这段时间也恰好与强对流天气最剧烈的时段相对应, 不难发现这段高值雨降水时间也有较好的对应, 而

在 20:31~20:41 分短短 10 分钟内, 综合水汽含量则有急速下降的过程, 最低降至  $45 \text{ kg/m}^2$ , 此时降水基本停止, 之后则逐渐回升, 再次回升到  $50\sim 60$  之间, 此时强对流已经结束, 天气状况趋于稳定。



**Figure 5.** Sounding curves before (a), during (b) and after (c) the occurrence of severe convective weather  
**图 5.** 强对流天气发生过程前(a)、中(b)、后(c)探空曲线



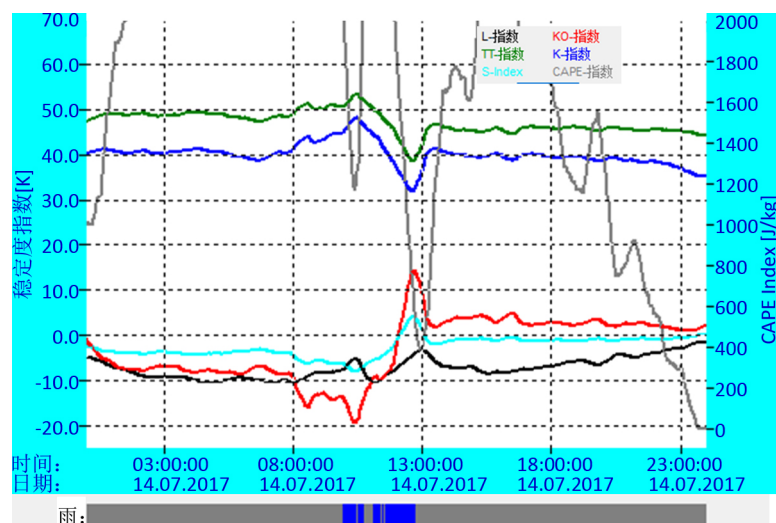
**Figure 6.** Variation of comprehensive water vapor on July 14, 2017  
**图 6.** 2017 年 7 月 14 日综合水汽含量变化图

### 4.3. 对流指数

产生强对流天气需具备基本的不稳定能量、水汽条件、触发抬升机制, 因此不稳定能量是必要条件之一。描述不稳定度的指数很多, 如 SI、K 指数、LI、CAPE 等, RPG-HatPro 型微波辐射计反演得到的稳定度指数包含 K 指数、对流有效位能 Cape 值、抬升指数 LI、总全指数。

从图 7 可以看出, K 指数与总全指数的变化基本一致, 强对流发生前后 K 指数均处于较高的水平, 天气发生前 K 指数值高达 40 左右, 说明微波辐射计反演的对流指数对该次强对流过程有很好的指示意义, 而微波辐射计可以做到实时监测的特点, 进一步证明了微波辐射计在强对流短临预报中可以发挥的巨大作用, 强对流发生后, 有快速下降的过程, 强对流结束后又有所回升, 最后仍然在 40 左右, 而总全指数虽然发生后和发生前都处于较高水平, 但强对流结束后总全指数有整体下降, 由 50 附近降至 47 左右。指数、沙氏指数和 KO 指数变化特征与 K 指数类似, 均是强对流发生前和结束后相对稳定, 天气发生时变化较大, 不过可以看到通过 RGP-hatpro 反演的抬升指数在前对流发生前一度低至  $-10$  左右, 比通常的探空数据的得到的要小的多, 而 K 指数也是比探空数据要大些, 说明微波辐射计反演的对流指数敏感性

更大,数值明显偏大或偏小。



**Figure 7.** Stability indices chart and rainfall status(black line is lifted index, green line is total index, cyan line is showwater index, red line is KO index, blue line is k index, grey line is CAPE index)

**图 7.** 各种对流指数及降水监测情况时间变化图(黑色线为抬升指数,绿色线为总全指数,青色线为沙氏指数,红色线为 KO 指数,蓝色线为 K 指数,灰色线为 CAPE 值)

此次强对流个例过程中几种对流指数变化最为剧烈的要属对流有效位能,在强对流天气发生前的 7 个小时(10 时~17 时)里 CAPE 值一直高达 2000 J/kg 以上,影响过程中,CAPE 值发生了两次陡降和陡升的过程,而这四次过程与大风变化和降水强度变化具有很好的对应关系,对流有效位能的谷值与降水的集中时段和风力最大的时段相对应,体现出了大气能量局部地区急速释放的过程,强对流天气结束后 CAPE 值有快速回升的过程,说明周边大气运动导致的大气能量交换,能量平衡的过程。

## 5. 结论与讨论

副热带高压边缘下的高温晴热天气为强对流发生孕育了充分的能量条件,低空弱切变的动力抬升作用造成气团的上升运动加强,西南暖湿气流带来充沛的水汽,从而利于对流的发生,是一种准正压类的强对流天气过程。

对流发生前未出现“上干下湿”的大气层结,不利于冰雹的发生,而较高的 K 指数、CAPE 值则非常利于短时强降水的出现。

微波辐射计的对流指数有很好的时间连续性,实现了对大气状况的实时监测,为研究强对流过程发生、发展、消亡的机制提供了更多的研究性素材,而连续的对流指数数据对强对流天气研判具有更强的指导意义。

此次强对流天气过程发生前通过微波辐射计得出的综合水汽含量维持在  $52 \text{ kg/m}^2$  以上、K 指数高达  $40^\circ\text{C}$ 、CAPE 值达 2000 J/kg 以上,抬升指数低至  $-10$ ,与通过探空数据得到的强对流触发阈值相比较,K 指数和 CAPE 值要高的多,而抬升指数则小的多,通过进一步统计多个对流过程得到基于微波辐射计对流指数的经验阈值,对日常预报将有显著的促进作用。

## 基金项目

宁波市气象科技计划资助项目(NBQX2018014B)。

## 参考文献

- [1] 蔡奕萍, 汪博炜, 冼星河. 微波辐射计资料在降水临近预报中的应用[J]. 广东气象, 2018, 40(5): 31-34.
- [2] 黄晓莹, 毛伟康, 万齐林, 廖非. 微波辐射计在强降水天气预报中的应用[J]. 广东气象, 2013, 35(3): 50-53.
- [3] 牛海林, 高益波, 胡波, 刘强, 吕艺影, 邬立辉. 余姚杨梅精细化农业气候区划研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(1): 171-175.
- [4] 李建强, 李新生, 董文晓, 吕菁菁. RPG-HATPRO 微波辐射计反演的温度和湿度数据适用性分析[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(6): 89-95.
- [5] 李娜, 张武, 陈艳, 柳丹, 史晋森, 张北斗. 基于微波辐射计的大气温湿廓线遥感探测[J]. 兰州大学学报(自科版), 2015, 51(1): 61-71.
- [6] 刘敏, 李礼, 许丽萍, 余家燕, 刘萍. RPG-HATPRO 地基多通道微波辐射计的使用与维护[J]. 分析仪器, 2014(5): 89-92.
- [7] 王周翔, 王旗, 于翠红, 李旭, 王德鑫, 王久凤. 微波辐射计的应用及研究进展[J]. 现代农业科技, 2017(9): 223-224.
- [8] 郑祚芳, 刘红燕, 张秀丽. 局地强对流天气分析中非常规探测资料应用[J]. 气象科技, 2009, 37(2): 243-247.
- [9] 赵玲, 马玉芬, 张广兴, 杨莲梅. 地基 35 通道微波辐射计观测资料的初步分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2010, 4(1): 56-58.
- [10] 张文刚, 徐桂荣, 廖可文, 卢洋, 祝伟, 冯光柳. 降水对地基微波辐射计反演误差的影响[J]. 暴雨灾害, 2013(1): 70-76.
- [11] 王万筠, 殷海涛, 陈涛. 微波辐射计资料模拟探空曲线在一次局地暴雨过程中的应用[J]. 信息系统工程, 2015(11): 78-80.
- [12] 朱雅毓, 王振会, 楚艳丽, 王云, 李青. 地基微波辐射计亮温观测数据的综合质量控制与效果分析[J]. 气象科学, 2015, 35(5): 621-628.
- [13] 张文刚, 徐桂荣, 万蓉, 贺文煌, 冯光柳. 基于地基微波辐射计的大气液态水及水汽特征分析[J]. 暴雨灾害, 2015, 34(4): 367-374.
- [14] 唐仁茂, 李德俊, 向玉春, 徐桂荣, 李跃清, 陈英英. 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(4): 806-813.
- [15] 姚作新, 吕鸣, 贺晓东, 赵玲, 刘振新, 喻辉. MP-3000A 型地基微波辐射计在乌鲁木齐探空站的辅助性探测研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2011, 5(1): 38-43.
- [16] 孙继松, 戴建华, 何立富, 郑媛媛, 俞小鼎, 许爱华. 强对流天气预报的基本原理与技术方法——中国强对流天气预报手册[M]. 北京: 气象出版社, 2014: 25-31.