

黄治勇,徐桂荣,王晓芳,等. 地基微波辐射资料在短时暴雨潜势预报中的应用. 应用气象学报,2013,24(5):576-584.

# 地基微波辐射资料在短时暴雨潜势预报中的应用

黄治勇\* 徐桂荣 王晓芳 唐永兰

(中国气象局武汉暴雨研究所暴雨监测预警湖北省重点实验室,武汉 430074)

## 摘 要

利用湖北咸宁站 2008 年 6 月 1 日—2012 年 8 月 1 日地基微波辐射计观测数据反演的相对湿度、大气液态水含量、大气水汽总量、大气层结曲线,对比分析了短时暴雨与一般降水过程发生前微波辐射计观测资料反映的特征,研究微波辐射计观测资料在短时暴雨潜势预报中的应用。结果表明:当大气液态水含量从 1 mm 左右急增至约 20 mm、大气水汽总量从 60~70 mm 急增到 90 mm 以上之后,如果 0~6 km 整层相对湿度均接近饱和或达到饱和状态,且在 800~950 hPa 附近存在逆温层,最大 K 指数超过 35℃,最大 TT 指数(Thei-Tornqvist 指数)达到或超过 40℃,那么未来 3 h 或 6 h 内发生短时暴雨的几率大。

**关键词:** 微波辐射;暴雨;潜势预报

## 引 言

研究表明,冰雹、雷暴大风、短时暴雨等强对流天气往往与对流风暴相联系,一定强度的热力不稳定、低层足够的水汽供应和一定的抬升条件是有利于对流风暴产生的环境条件<sup>[1]</sup>。受资料和技术限制,目前对水汽和不稳定条件的分析主要依赖常规单站探空观测,或一些热力学特征物理量的计算<sup>[2]</sup>。多普勒天气雷达及其产品资料对揭示强对流天气结构、形成机理具有重要作用,雷达回波强度大小及回波顶高、有界弱回波区或弱回波区大小与垂直累积液态水含量大值区等均为判断强对流潜势的指标<sup>[3-8]</sup>。迄今为止,雷达仍是开展暴雨等强对流天气临近预报预警业务的主要探测工具。但与常规探空观测相比,雷达资料无法完全准确描述大尺度天气环流变化;常规探空资料也存在空间分辨率较低、观测不连续等不足,而热力学特征物理量在计算精度上存在一定局限性。

地基微波辐射计可获得地面至 10 km 高度连续的温度、湿度、水汽以及液态水含量等垂直廓线,能很好地反映环境大气温湿廓线演变特征,其观测

准连续,观测时间步长为 3 min,可以弥补常规探空资料空间分辨率较低、观测不连续等不足。但由于降水会在微波辐射计天线罩上形成水膜,雨水的散射、发射及吸收效应会导致微波辐射计测量准确度降低。NOAA<sup>[9]</sup>对比分析了微波辐射计和无线电高空探测资料,认为从地面到 4 km 高度,两种仪器探测的温度偏差不超过 1.2℃,边界层温度偏差超过 1℃。刘建忠等<sup>[10]</sup>定量对比分析了 20 个月的微波辐射计反演资料与探空资料,发现两种仪器探测的温度所有垂直高度层次相关系数均超过 0.94,可以认为微波辐射计反演出的温度与探空比较一致。王婷婷等<sup>[11]</sup>通过比较北京城区两部微波辐射计和北京市观象台探空资料发现,无降水时微波辐射计反演的温度廓线、水汽密度廓线、相对湿度廓线随高度变化趋势与探空资料基本一致,但有降水发生时微波辐射计反演资料的可信度明显降低。因此,目前地基微波辐射计资料主要是在非降水天气下使用。

近年来,国内外学者采用地基微波辐射计观测资料开展了大量研究。COST720 温度、湿度和云廓线试验<sup>[12]</sup>,通过使用多种微波辐射计与云雷达、风廓线雷达联合观测来提高反演大气廓线算法精度,

2012-09-20 收到,2013-05-07 收到再改稿。

资助项目:国家自然科学基金项目(41205086),国家自然科学基金重点项目(40930951)

\* email: hzyqxj@126.com

研究了雾形成、发展以及消散的物理过程。Revercomb等<sup>[13]</sup>阐述了美国ARM(Atmospheric Radiation Measurement)试验中使用微波辐射计探测有关水汽的研究背景以及应用前景。刘红燕等<sup>[14]</sup>在对比分析3种测量水汽技术(地基微波辐射计、探空、GPS)差异的基础上,采用微波辐射计测量得到大气水汽总量(IWV),分析了北京地区水汽在4个季节中的日变化特征。雷恒池等<sup>[15]</sup>研究了微波辐射计在探测降雨前水汽和云液水的特征,探讨了微波辐射计在人工影响天气中的可能应用。周崑等<sup>[16]</sup>基于微波辐射计资料研究了对流降水云内与环境温差。

目前,国内在利用地基微波辐射资料分析短时强对流天气方面刚刚起步。王叶红等<sup>[17]</sup>使用微波辐射计资料对一次特大暴雨过程进行了数值模拟。魏东等<sup>[18]</sup>、刘志雄等<sup>[19]</sup>、廖晓农等<sup>[20]</sup>分别利用微波辐射计资料对局地暴雨、强冰雹和雷暴大风个例进行分析。由于受降水时微波辐射计资料精度的限制,微波辐射计资料在强对流天气分析中的应用还有待进一步深入研究。鉴于此,本文利用中国气象

局武汉暴雨研究所2008年6月1日—2012年8月1日微波辐射计观测资料反演的相对湿度、水汽、不稳定层结资料,对比分析了短时暴雨和一般性降水天气过程前微波辐射计观测反映的特征,为短时暴雨天气的监测预警及相关研究提供参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

本研究所用资料主要有湖北咸宁站2008年6月1日00:00(北京时,下同)—2012年8月1日00:00逐日地基微波辐射计观测资料,以及相应时间段的地面降水观测资料。由于设备运行故障等原因,在以上时段内的地基微波辐射计观测资料存在一定空缺。

定义逐3h或6h降水量达到50mm的天气过程为短时暴雨。统计2008年6月1日00:00—2012年8月1日00:00咸宁站有微波辐射计观测资料的逐日降水量超过1mm天气过程共523次,其中短时暴雨过程共4次(表1)。

表1 2008年6月1日—2012年8月1日湖北咸宁站短时暴雨天气过程

Table 1 The short-term rainstorm processes of Xianning Station in Hubei Province from 1 June 2008 to 15 July 2012

天气过程	3 h 最大降水量及发生时段	6 h 最大降水量及发生时段
2009年7月23日20:00—24日20:00	143.3 mm, 24日05:00—07:00	143.6 mm, 24日05:00—10:00
2010年7月10日20:00—11日20:00	51.3 mm, 11日09:00—11:00	75.2 mm, 11日09:00—14:00
2010年7月13日20:00—14日20:00	46.5 mm, 14日13:00—15:00	92.3 mm, 14日13:00—18:00
2011年6月13日20:00—14日20:00	76.6 mm, 14日07:00—09:00	132.1 mm, 14日07:00—12:00

2009年7月23日20:00—24日20:00咸宁站24h降水量达155.5mm。降水从23日22:00开始,23:00停顿,24日04:00降水再度出现,其后1h最大降水量为77.0mm(24日05:00),3h最大降水量为143.3mm(24日05:00—07:00),6h最大降水量为143.6mm(24日05:00—10:00)。

2010年7月10日20:00—11日20:00咸宁站24h降水量达143.9mm。整个降水过程分为两个阶段,一个为10日20:00—23:00,另一个为11日09:00—16:00。在两个降水阶段之间8h中仅01:00,04:00和06:00发生了弱降水(最大为06:00的5.9mm)。第1阶段累积降水量不足50mm,第

2阶段1h最大降水量为28.8mm(11日11:00),3h最大降水量为51.3mm(11日09:00—11:00),6h最大降水量为75.2mm(11日09:00—14:00)。

2010年7月13日20:00—14日20:00咸宁站24h降水量达125.2mm。降水从14日05:00开始,06:00—12:00降水减弱(1h降水量从0.1~4.2mm不等),13:00降水加强,其后1h最大降水量为23.8mm(14日13:00),3h最大降水量为46.5mm(14日13:00—15:00),6h最大降水量为92.3mm(14日13:00—18:00)。

2011年6月13日20:00—14日20:00咸宁站24h降水量达206.2mm。降水从13日22:00开

始,13日23:00—14日05:00弱降水维持(1 h降水量从0.1~5.3 mm不等),14日07:00降水加强,其后1 h最大降水量为35.2 mm(14日07:00),3 h最大降水量为76.6 mm(14日07:00—09:00),6 h最大降水量为132.1 mm(14日07:00—12:00)。

可见,这4次暴雨过程均具有历时短、强度大、对流性强等特点,为了描述简便起见,这里将以上4次短时暴雨过程分别简称为“09.07.24”暴雨、“10.07.11”暴雨、“10.07.14”暴雨和“11.06.14”暴雨。

### 1.2 地基微波辐射计简介

中国气象局武汉暴雨研究所在湖北省咸宁站布设的地基微波辐射计为美国Radiometrics公司生产的MP-3000A型,它配置了红外温度计,可在降水天气下进行观测。微波辐射计每3 min完成1次全天空扫描观测,利用观测到的亮温数据,通过神经网络反演,最后输出天顶方向地面至10 km高度共58层的温度、湿度、水汽和液态水含量的廓线数据,其廓线空间垂直分辨率在500 m以下为50 m,在500 m至2 km为100 m,在2 km以上为250 m。

### 1.3 地基微波辐射计观测资料检验

徐桂荣等<sup>[21]</sup>利用咸宁站GPS无线电探空和GPS气象学(GPS/MET)的观测数据,对该站微波辐射计反演的气象要素进行对比发现,无降水发生时,微波辐射计反演的温度、大气液态水含量(ILW)、大气水汽总量(IWV)廓线与GPS无线电探空结果之间系统偏差小,具有很好的正相关关系,微波辐射计反演的ILW和IWV较GPS无线电探空结果偏小,两者的系统偏差在4 mm以内。同样,在无降水发生时,微波辐射计反演的ILW和IWV与GPS/MET结果具有很好的正相关关系,两者的系统偏差小于2 mm。但有降水发生时,微波辐射计反演的温度、ILW和IWV廓线与GPS无线电探空结果的相关性明显减小,系统偏差明显加大,微波辐射计反演的ILW和IWV与GPS无线电探空及GPS/MET结果的相关性也明显减小,系统偏差明显加大。该系统偏差可能与探测设备采样方法的差异、微波辐射计反演算法以及降水影响等有关。可见在降水天气发生之前,咸宁站微波辐射计资料能在一定程度上反映天顶上空大气的温湿状况。

## 2 短时暴雨潜势特征地基微波辐射资料分析

对于某一个固定地点,单位时间内的降水率  $I$

可表示为

$$I = -\frac{1}{g} \int_0^{p_0} \frac{dq_s}{dt} dp. \quad (1)$$

由于  $\frac{dq}{dt} = F\omega$ , 其中  $\omega$  为上升速度,  $F$  为凝结函数;  $g$  为重力加速度,  $q_s$  为饱和比湿,  $p$  为气压,  $p_0$  为某一高度上的气压。

所以  $t_1 \sim t_2$  时段内总降水量  $W$  可表示为<sup>[2]</sup>

$$W = - \int_{t_1}^{t_2} \int_0^{p_0} \omega \frac{\delta F}{g} dp dt. \quad (2)$$

由式(2)可知,对于一个固定地点,在某一时段内如果要形成大降水量,上升气流需要具备水汽含量高和上升速度大的条件。另外,根据云的微物理理论,降水系统中的暖云层越厚,越有利于高降水效率的产生,而暖云层厚度在一定程度上可以通过对流有效位能反映。

### 2.1 相对湿度垂直分布特征

由于大气中高层水汽含量很少,绝大部分集中于对流层中低层,其中85%~90%集中于500 hPa以下,这里重点分析0~10 km微波辐射计探测的相对湿度特征。图1为4次短时暴雨发生前相对湿度的廓线,由图1可知,在短时暴雨发生前3 h内,4次短时暴雨过程0~6 km平均相对湿度均超过90%,垂直方向最大相对湿度可达100%,最大相对湿度所在高度为0~3250 m不等,平均在2000 m左右,最小相对湿度一般都超过了80%。可见,在短时暴雨发生前,微波辐射计探测天顶方向0~6 km整层大气中的水汽基本接近饱和。

### 2.2 大气液态水含量和水汽总量特征

多普勒雷达探测的垂直累积液态水因子在冰雹、破坏性大风等强对流天气中得到广泛应用。

“09.07.24”暴雨发生前8 h,2009年7月23日21:44 ILW(图2a)从0.342 mm急增至23.012 mm,22:00降水发生后,ILW迅速下降至0.843 mm(22:04)。从23:00降水停顿至24日04:00 ILW变化不明显。24日04:00降水加强,其后3 h和6 h降水量分别达143.3 mm和143.5 mm。“10.07.11”暴雨发生前4 h,2010年7月11日05:19,ILW(图2b)从0.372 mm急增至22.5 mm,06:00降水发生后 ILW迅速下降至0.686 mm(06:03)。在07:00,08:00降水停顿期,ILW从0.686 mm以下增至22.558 mm(08:21)。09:00降水加强,ILW开始明显减小,其后3 h和6 h降水量分别达51.3 mm和75.2 mm。“10.07.14”暴雨发生前7 h,2010年7月14日

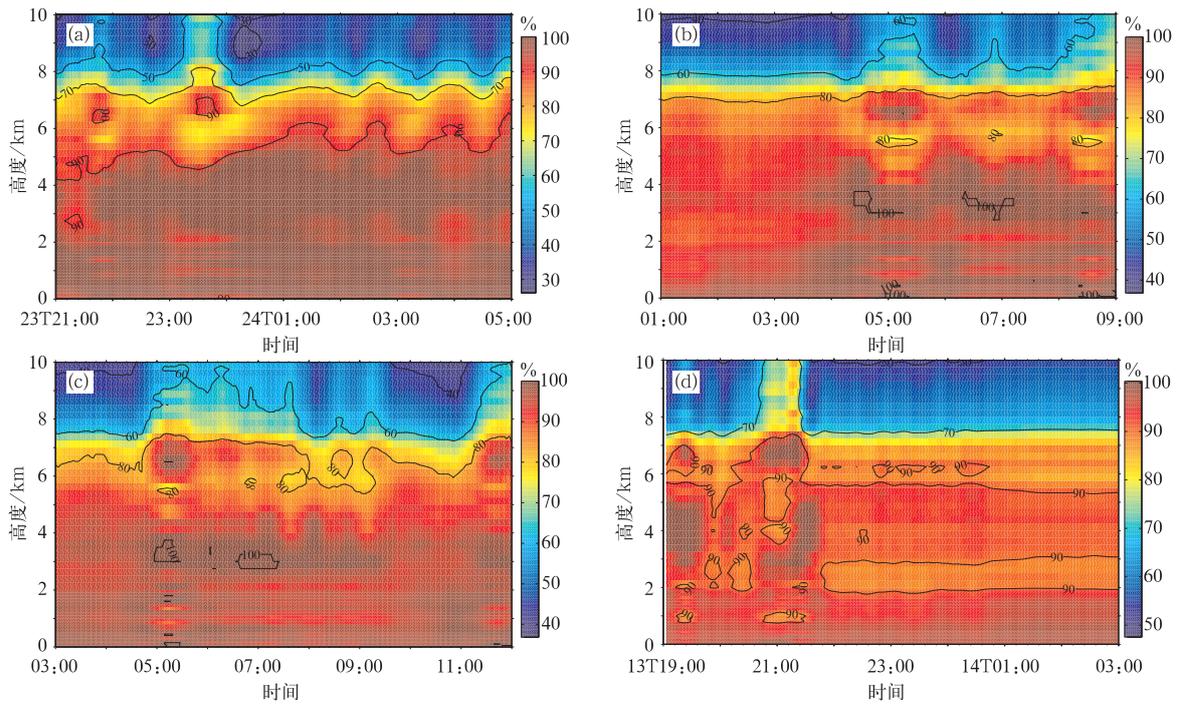


图 1 短时暴雨过程相对湿度垂直廓线

(a)2009 年 7 月 23 日 21:00—24 日 05:00,(b)2010 年 7 月 11 日 01:00—09:00,  
(c)2010 年 7 月 14 日 03:00—12:00,(d)2011 年 6 月 13 日 19:00—14 日 03:00

Fig. 1 The relative humidity vertical profiles of the short-term rainstorm processes

(a)from 2100 BT 23 July to 0500 BT 24 July in 2009,(b)from 0100 BT to 0900 BT on 11 July 2010,  
(c)from 0300 BT to 1200 BT on 14 July 2010,(d)from 1900 BT 13 June to 0300 BT 14 June in 2011

05:01,ILW(图 2c)从 0.305 mm 急增至 22.646 mm, 05:00 降水发生后 ILW 迅速下降至 4.067 mm (06:09)。07:00—11:00 弱降水维持期,ILW 经历了多次弱的减小与增长过程,11:46 ILW 从 1.0 mm 以下增至 22.617 mm。12:00 降水加强,ILW 开始明显减小,其后 3 h 和 6 h 降水量分别达 46.5 mm 和 92.3 mm。“11.06.14”暴雨发生前 10 h,2011 年 6 月 13 日 20:48,ILW(图 2d)从 0.686 mm 增至 13.233 mm,22:00 降水发生 ILW 迅速下降至 0.328 mm(22:01)。13 日 23:00—14 日 05:00 弱降水维持期,ILW 基本在 2.0 mm 以下,07:00 降水加强,其后 3 h 和 6 h 降水量分别达 76.6 mm 和 132.1 mm。

“09.07.24”暴雨发生前 8 h,2009 年 7 月 23 日 21:44,IWV(图 3a)从 71.84 mm 急增至 102.97 mm, 22:00 降水发生后 IWV 迅速下降至 74.17mm (22:10)。23 日 23:00 至 24 日 04:00 为降水停顿期, IWV 从 71.84 mm 增至 120.42 mm(23:54)。24 日 04:00 降水加强,其后 3 h,6 h 发生了短时暴雨。

“10.07.11”暴雨发生前 4 h,2010 年 7 月 11 日 05:36, IWV(图 3b)从 67.38 mm 急增至 92.98 mm, 06:00 降水发生后 IWV 迅速下降至 71.83 mm(06:03)。在 07:00,08:00 降水停顿期,IWV 从 67.65 mm 增至 96.54 mm(08:21)。09:00 降水加强,其后 3 h,6 h 发生了短时暴雨。“10.07.14”暴雨发生前 7 h, 2010 年 7 月 14 日 04:59 IWV(图 3c)从 69.39 mm 急增至 97.59 mm, 05:00 降水发生后 IWV 迅速下降至 76.27 mm(06:13)。07:00—11:00 弱降水维持期,IWV 经历了多次弱的减小与增长,11:46 IWV 从 70.0 mm 以下增至 94.672 mm。12:00 降水加强,其后 6 h 发生了短时暴雨。“11.06.14”暴雨发生前 10 h,2011 年 6 月 13 日 21:16 IWV 从 59.27 mm 急增至 91.83 mm(图 3d), 22:00 降水发生,IWV 迅速下降至 59.22 mm(22:23)。13 日 23:00—14 日 05:00 弱降水维持期,IWV 基本在 65.0 mm 以下,07:00 降水加强,其后 3 h,6 h 发生了短时暴雨。

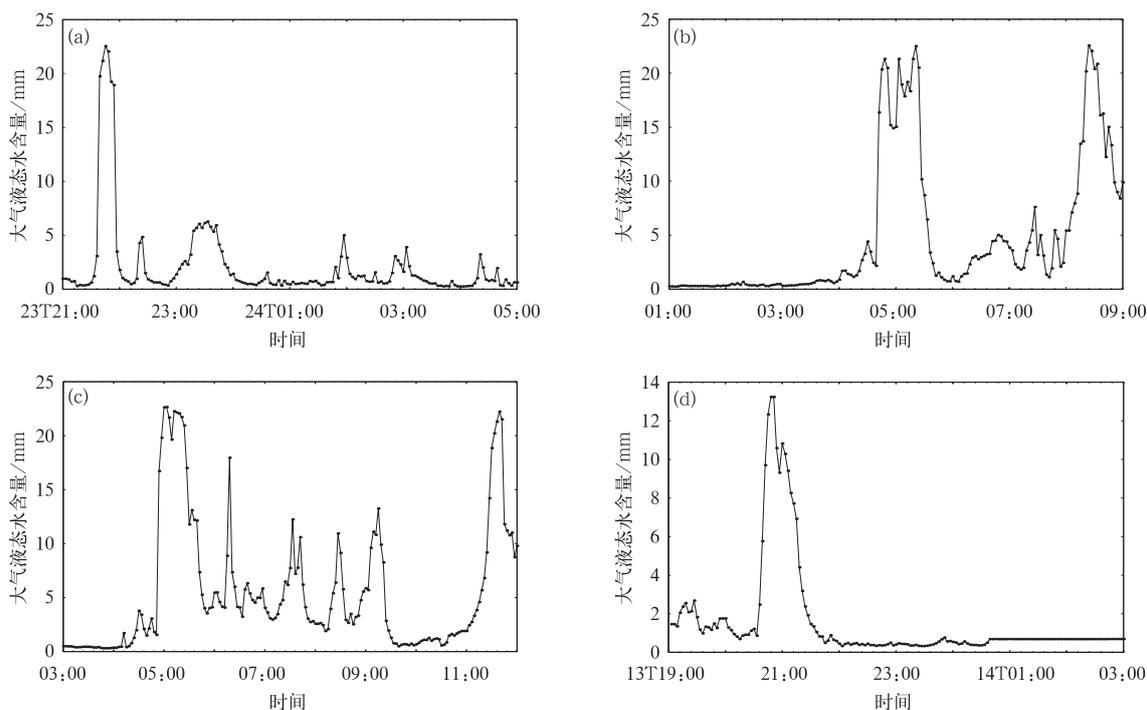


图2 短时暴雨过程大气液态水含量(ILW)廓线

(a)2009年7月23日21:00—24日05:00,(b)2010年7月11日01:00—09:00,  
(c)2010年7月14日03:00—12:00,(d)2011年6月13日19:00—14日03:00

Fig.2 The atmospheric liquid water content (ILW) vertical profiles of the short-term rainstorm processes (a)from 2100 BT 23 July to 0500 BT 24 July in 2009,(b)from 0100 BT to 0900 BT on 11 July 2010, (c)from 0300 BT to 1200 BT on 14 July 2010,(d)from 1900 BT 13 June to 0300 BT 14 June in 2011

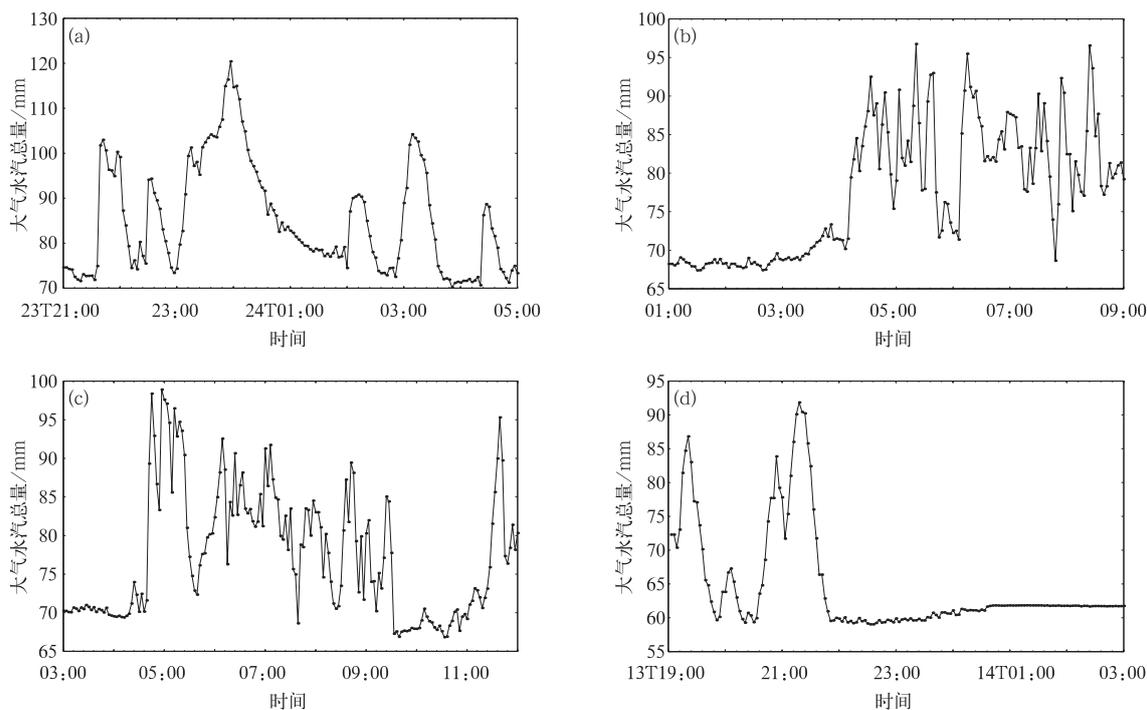


图3 短时暴雨过程大气水汽总量(IWV)廓线

(a)2009年7月23日21:00—24日05:00,(b)2010年7月11日01:00—09:00,  
(c)2010年7月14日03:00—12:00,(d)2011年6月13日19:00—14日03:00

Fig.3 The atmospheric water vapor content (IWV) profiles of the short-term rainstorm processes (a)from 2100 BT 23 July to 0500 BT 24 July in 2009,(b)from 0100 BT to 0900 BT on 11 July 2010, (c)from 0300 BT to 1200 BT on 14 July 2010,(d)from 1900 BT 13 June to 0300 BT 14 June in 2011

可见,在短时暴雨发生前 12 h 内,微波辐射计探测的 ILW 从 1 mm 左右可急增到 10 mm 以上, IWV 从 60~70 mm 可急加到 90 mm 以上。

### 2.3 不稳定能量分布特征

分析由微波辐射计资料反演的层结曲线(图略)可知,在短时暴雨发生前 6 h 内 800~950 hPa 附近存在一个的逆温层:“09.07.24”暴雨发生前 4 h,在 950 hPa 附近出现一个明显逆温层,并维持至暴雨发生,“10.07.11”暴雨逆温层在 800 hPa 附近,“10.07.14”暴雨逆温层在 800 hPa 附近,“11.06.13”暴雨逆温层在 800~850 hPa 之间,说明短时暴雨发生前大气层结处于不稳定状态。分析这 4 次暴雨过程发生前 6 h 内 300 hPa 以下的不稳定能量(为了与传统意义的对流有效位能有所区分,这里记为 CAPE\*,下同)发现,在“09.07.24”暴雨发生前 3 h 内逐 3 min 的 CAPE\* 呈波动状态,02:00—05:00 总体上超过  $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,24 日 02:16 达到最大 ( $1724 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),说明在这次短时暴雨发生前聚集了较大不稳定能量。但另外 3 次短时暴雨过程发生前 CAPE\* 却均未超过  $300 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,其中“11.06.13”暴雨过程前 3 h 内 CAPE\* 甚至没有达到  $100 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。比较这 4 次暴雨过程之前的天气实况可知,“09.07.24”暴雨主要发生在 2009 年 7 月 24 日 05:00—07:00,05:00 前 4 h 无降水发生。“10.07.

11”暴雨主要发生在 2010 年 7 月 11 日 09:00—11:00,而 01:00,04:00 和 06:00 均有弱降水发生。“10.07.14”暴雨主要发生 2010 年 7 月 14 日 13:00—18:00,06:00—11:00 始终有间断性弱降水发生(1 h 降水量为 0.1~4.2 mm)。“11.06.13”暴雨主要发生在 2011 年 6 月 14 日 07:00—12:00,2011 年 6 月 13 日 20:00—14 日 20:00 咸宁站 24 h 降水量达 206.2 mm。降水从 13 日 22:00 开始,13 日 23:00—14 日 05:00 弱降水维持(1 h 降水量为 0.1~5.3 mm)。可见,短时暴雨过程前的弱降水可以导致不稳定能量释放。

从 K 指数和 TT 指数随时间演变(图 4)可以看出,“09.07.24”,“10.07.11”和“10.07.10”暴雨发生前 6 h 内 K 指数和 TT 指数均表现出多峰结构,在  $40^\circ\text{C}$  附近呈波动状态(图 4a,4b,4c),上升和下降的趋势基本一致,而且两者的大小非常接近,其中“10.07.11”和“10.07.10”暴雨发生前最小 K 指数和 TT 指数均超过  $35^\circ\text{C}$ ,”09.07.24”暴雨发生前最小 K 指数和 TT 指数仅 04:16—04:40 低于  $35^\circ\text{C}$ ,其他时间均超过  $35^\circ\text{C}$ 。“11.06.13”暴雨发生前 6 h 内 K 指数和 TT 指数存在波动(图 4d),但是每次波动的时间很短、幅度较小,K 指数大体上维持在  $35\sim 36^\circ\text{C}$  之间,TT 指数维持在  $39\sim 40^\circ\text{C}$  之间。

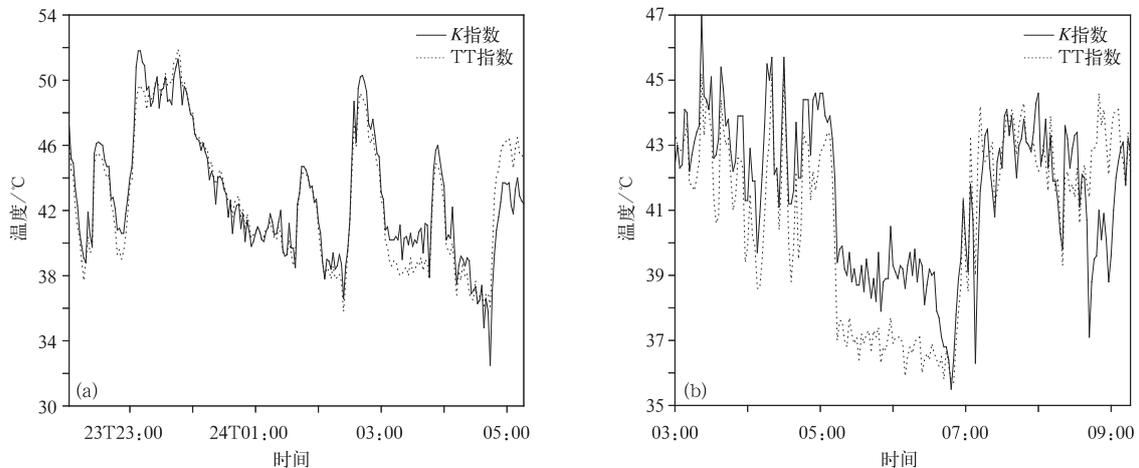


图 4 短时暴雨过程 K 指数和 TT 指数随时间变化

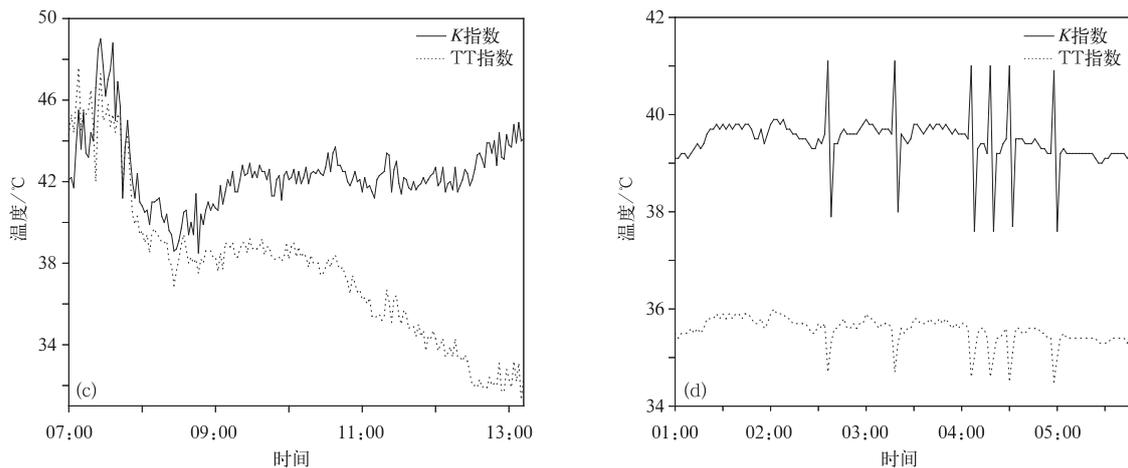
(a)2009 年 7 月 23 日 22:00—24 日 05:00,(b)2010 年 7 月 11 日 03:00—09:00,

(c)2010 年 7 月 14 日 07:00—13:00,(d)2011 年 6 月 14 日 01:00—06:00

Fig. 4 Temporal variation of K index and TT index for the short-term rainstorm processes

(a)from 2200 BT 23 July to 0500 BT 24 July in 2009,(b)from 0300 BT to 0900 BT on 11 July 2010,

(c)from 0700 BT to 1300 BT on 14 July 2010,(d)from 0100 BT to 0600 BT on 14 June 2011



续图4

可见,在短时暴雨发生前6 h内,在950 hPa附近存在一个明显逆温层,K指数的最大值超过 $35^{\circ}\text{C}$ ,TT指数的最大值可超过 $40^{\circ}\text{C}$ ;不稳定能量可以超过 $1000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,也可能很小,与暴雨发生前是否有弱降水维持有关。

### 3 微波辐射计资料短时暴雨潜势特征及检验

#### 3.1 相对湿度垂直分布特征

分析短时暴雨过程之外的519个降水过程发生前逐小时相对湿度垂直廓线发现,少数降水量在5 mm以下的天气过程发生前3 h内,0~6 km平均相对湿度仅为80%~90%,最小相对湿度为70%,垂直方向最大相对湿度不到100%,其他绝大部分降水过程发生前3 h内,0~6 km平均相对湿度、垂直方向最大相对湿度及所在高度、最小相对湿度与短时暴雨发生前表现的特征没有明显差别,只是平均、最大或最小相对湿度的数值大小及最大相对湿度所在高度上存在较小差异。这是因为相对湿度反映的是水汽饱和程度,并不能很好地反映大气中水汽含量大小。

因此,微波辐射计观测的相对湿度垂直廓线并不能很好反映出短时暴雨与其他降水过程发生前水汽饱和程度的差别,但相对湿度由非饱和向饱和或接近饱和的转变趋势对于降水过程的开始有一定指示意义。

#### 3.2 大气液态水含量和水汽总量特征

分析短时暴雨过程之外的519次降水过程发生前逐小时ILW和IWV发现,ILW和IWV在降水过程发生前也有一个快速增长过程,但增长的幅度

明显小于短时暴雨过程,弱对流性降水过程发生前ILW从1 mm左右增加到6~8 mm,IWV从40 mm左右增加到60~80 mm,一般性降水过程发生前ILW从1 mm左右增加到4~5 mm,IWV从20~40 mm增加到60~70 mm。这反映出短时暴雨发生前ILW和IWV明显大于其他降水过程,说明微波辐射计探测的ILW和IWV能够在一定程度监测到短时暴雨发生前的水汽聚集。

因此,在短时暴雨发生前12 h内,微波辐射计探测的ILW从1 mm左右急增至10 mm以上,IWV从60~70 mm急增到90 mm以上这一特征,对于短时暴雨潜势分析有一定指示意义。

#### 3.3 不稳定特征

分析短时暴雨过程之外的519次降水过程发生前逐小时的层结曲线发现,在冬季(11月—次年2月),CAPE\*基本为0或者极小(小于 $10\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),仅不到2%的个例K指数和TT指数达到 $30^{\circ}\text{C}$ ;其他月份,日降水量达到25 mm以上天气过程发生前,约90%的个例大气层结处于不稳定状态,其中约10%的个例层结曲线与短时暴雨过程有类似特征,如部分降水过程CAPE\*超过 $1000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,K指数和TT指数达到 $40^{\circ}\text{C}$ ,在950 hPa附近存在一个明显逆温层。

可见,微波辐射计资料反演的层结曲线可以反映大气层结的不稳定状态,对于对流性降水过程的潜势分析有一定指示意义。

#### 3.4 检验分析

对4次短时暴雨过程发生前微波辐射资料所反映的潜势特征归纳总结,主要表现为当ILW从1 mm左右急增至约20 mm且IWV从60~70 mm

急增至 90 mm 以上之后,如果 0~6 km 整层相对湿度均接近饱和或达到饱和状态,同时 800~950 hPa 附近存在逆温层,最大  $K$  指数超过  $35^{\circ}\text{C}$ ,最大  $TT$  指数达到或超过  $40^{\circ}\text{C}$ ,那么未来 3 h 或 6 h 内发生短时暴雨的几率大。利用这些特征对另外 519 次非短时暴雨过程进行检验发现,共有 2 个非短时暴雨个例达到上述特征,空报率约 0.4%。

#### 4 结 论

利用地基微波辐射计资料反演出的相对湿度、大气液态水含量和大气水汽总量和层结曲线,对比分析了短时暴雨与一般降水过程发生前的微波辐射计资料反映的特征,总结归纳微波辐射计资料在短时暴雨潜势预报中的应用,得到以下主要结论:

1) 对于短时暴雨和一般性降水过程而言,微波辐射计观测的 0~6 km 整层相对湿度在降水发生前 3 h 内均接近饱和或达到饱和状态,很难区分两种不同性质降水发生前相对湿度廓线的特征。但降水发生前,相对湿度由非饱和状态趋向饱和或接近饱和状态的转变趋势,往往预示着降水过程的开始。

2) 在短时暴雨发生前 12 h 内,微波辐射计观测的大气液态水含量从 1 mm 左右急增至 20 mm 左右、大气水汽总量从 60~70 mm 急增至 90 mm 以上,这一特征对于短时暴雨的潜势分析有一定指示意义。

3) 在短时暴雨发生前 6 h 内,在 800~950 hPa 附近存在逆温层,大气层结均处于不稳定状态,最大  $K$  指数超过  $35^{\circ}\text{C}$ ,最大  $TT$  指数可超过  $40^{\circ}\text{C}$ ,不稳定能量可以超过  $1000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,也可能很小,与暴雨发生前是否有弱降水维持有关。

#### 参 考 文 献

- [1] 俞小鼎,姚秀萍,熊延南,等.多普勒天气雷达原理与业务应用.北京:气象出版社,2006:91-95.
- [2] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.天气学原理与方法.北京:气象出版社,2000:400-425.
- [3] Mueller C, Saxon T, Roberts R, et al. NCAR Auto-Nowcast System. *Wea Forecasting*, 2003, 18: 545-561.
- [4] Hand W H. An object-oriented technique for now casting heavy shower and thunder storms. *Meteor Appl*, 1996, 3: 31-41.
- [5] 俞小鼎,张爱民,郑媛媛,等.一次系列下击暴流事件的多普勒天气雷达分析.应用气象学报,2006,17(4):385-393.
- [6] 袁野,杨光,胡雯,等.利用双多普勒雷达分析对流云垂直运动结构试验.应用气象学报,2007,18(3):306-313.
- [7] 张家国,万玉发,王珏.风暴生命史雷达特征量反演.应用气象学报,2008,19(1):101-105.
- [8] 徐广阔,孙建华,雷霆,等.多普勒天气雷达资料同化对暴雨模拟的影响.应用气象学报,2009,20(1):36-46.
- [9] NOAA Eaah Sciences Research Lab. Continuous Upper Air Profiling for Improved Local Weather Prediction. 2009:1-35.
- [10] 刘建忠,张蔷.微波辐射计反演产品评价.气象科技,2010,38(3):325-330.
- [11] 王婷婷,王迎春,陈明轩,等.北京地区干湿雷暴形成机制的对比分析.气象,2011,37(2):142-154.
- [12] Dominique Ruffieux, Nash J, Jeannet P, et al. The COST720 temperature, humidity, and cloud profiling campaign; TUC. *Meteorologische Zeitschrift*, 2006, 1: 5-10.
- [13] Revercomb H E, Turner D C, Tobin D D, et al. The ARM program's water vapor intensive observation periods: Overview, initial accomplishments, and future challenges. *Bull Amer Meteor Soc*, 2003, 84: 217-236.
- [14] 刘红燕,李炬,曹晓彦,等.遥感大气结构的地基 12 通道微波辐射计的测量结果分析.遥感技术与应用,2007,2(22):222-228.
- [15] 雷恒池,魏重,沈志来,等.微波辐射计探测降雨前水汽和云液水.应用气象学报,2011,12(增刊):73-79.
- [16] 周嵬,吴宏议,田海军.基于微波辐射计资料浅析对流降水云内与环境温差.干旱气象,2011,29(1):10-16.
- [17] 王叶红,赖安伟,赵玉春.地基微波辐射计资料同化对一次特大暴雨过程影响的数值试验研究.暴雨灾害,2010,29(3):201-207.
- [18] 魏东,孙继松,雷蕾,等.用微波辐射仪和风廓线资料构建探空资料的定量应用可靠性分析.气候与环境研究,2011,16(6):697-706.
- [19] 刘志雄,戴泽军,彭菊香,等.基于 LAPS 的一次局地强冰雹过程分析.暴雨灾害,2009,28(4):313-320.
- [20] 廖晓农,俞小鼎,王迎春.北京地区一次罕见的雷暴大风过程特征分析.高原气象,2008,27(6):1350-1360.
- [21] 徐桂荣,孙振添,李武阶,等.地基微波辐射计与 GPS 无线电探空和 GPS/MET 的观测对比分析.暴雨灾害,2010,29(4):315-321.

## Applications of Ground-based Microwave Radiation Data to Short-term Rainstorm and Potential Forecast

Huang Zhiyong Xu Guirong Wang Xiaofang Tang Yonglan

(Hubei Key Laboratory for Heavy Rain and Warning Research, Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430074)

### Abstract

Microwave radiometer (MWR) can derive the profiles of relative humidity, atmospheric liquid water content, and atmospheric water vapor content with high temporal resolution. Using MWR measurements from June 2008 to August 2012 of Xianning Station in Hubei Province operated by the Institute of Heavy Rain, CMA, based on 523 precipitation cases, the characteristics of MWR measurements before the occurrences of short-term rainstorms with more than 50 mm precipitation in 3 hours or 6 hours and other general rainfalls are analyzed, and the applications of MWR measurements in the forecast of short-term rainstorms are explored.

For both short-term rainstorms and general rainfalls, the relative humidity in 0—6 km heights is close to saturation or is saturating in 3 hours before the rainfall occurrence, and no distinct difference is found between these two kinds of precipitations, however, the transforming of relative humidity from unsaturation to saturation always means the occurrence of rainfall process.

Within 12 hours before the short-term rainstorm occurrence, the integrated liquid water (ILW) increases sharply from about 1 mm to about 20 mm, and the integrated water vapor (IWV) increases rapidly from 60—70 mm to 90 mm or more, which are helpful for the potential analysis of short-term rainstorm forecast. Compared with the short time rainstorm, amplitude and rate of occurrence of precipitation of ILW and IWV growth will be much smaller.

Within 6 hours before the short-term rainstorm occurrence, a temperature inversion layer exists near 800—950 hPa, and the largest  $K$  index and TT index are above 35°C and 40°C, respectively, otherwise, the atmospheric stratification curve is unstable, and the unstable energy may be larger than 1000 J · kg<sup>-1</sup> or maybe small depending on the maintenance of weak precipitation before the rainstorm occurrence.

Of all the historical cases, there is a part of general rainfalls also occur with unstable atmosphere and temperature inversion at the bottom level. Therefore, it cannot be determined whether short-time rainstorm will occur only by the atmospheric stratification stability. In conclusion, when the ILW increases sharply from about 1 mm to about 20 mm, and the IWV increases rapidly from 60—70 mm to 90 mm or more, if the relative humidity is close to saturation or is saturating in 0—6 km heights, and a temperature inversion layer exists near 800—950 hPa, and additionally, the largest  $K$  and TT index are above 35°C and 40°C, then the probability of the occurrence of a short-term rainstorm is large in coming 3 hours or 6 hours. The verification with 519 other general rainfall cases shows that, using these criteria, 2 cases matches the above characteristics, and the false alarm rate is about 0.4%.

**Key words:** ground-based microwave radiation; rainstorm; potential forecast