

# 利用双频微波辐射计测空中水汽和云液水含量的个例分析

李铁林 刘金华 刘艳华 张云平 郑宏伟 马鑫鑫

(河南省人工影响天气办公室, 郑州 450003)

**提 要:** 利用 23.8 GHz 和 31.65GHz 双频地基微波辐射计观测资料, 结合卫星云图、雷达、探空和自记雨量计等资料分析了 2005 年 4 月在河南新乡观测的不同云系影响时大气垂直积分含水量( $V$ )和云中液态含水量( $L$ )的演变特征, 对 4 月 8 日低槽云系影响时  $V$ 、 $L$  的特征进行了分析。结果表明: 双频辐射计对空中水汽和液态水反映灵敏, 不同天气背景时对应有不同的  $V$ 、 $L$  值分布。云液水含量  $L$  的变化与云量的增减有关。降水开始之前, 水汽含量  $V$  值有明显波动, 液态水含量  $L$  值也有明显增加, 一般增大到 0.4mm 时即出现降水。这些现象对降水开始有指示意义, 可预测云系正处于降水产生的阶段, 可应用于人工增雨作业。此外, 根据微波辐射计观测资料分析了大气水汽、云液水和地面降水之间的定量关系, 云中液态水仅占汽态水的 8.7% 左右, 落回地面的降水占空中水汽量的 18% 左右。

**关键词:** 微波辐射计 遥测 云液态含水量

## Case Analysis of Precipitable Water and Cloud Liquid Water Measured by Dual-Frequency Microwave Radiometer

Li Tielin Liu Jinhua Liu Yanhua Zhang Yunping Zheng Hongwei Ma Xinxin

(Henan Artificial Weather Modification Office, Zhengzhou 450023)

**Abstract:** By using the data from the ground-based dual-frequency microwave radiometer of 23.8 and 31.65 GHz, satellite cloud picture, the data from weather radar, radiosounding and self-recording rain gauge, analyzed was the evolution of atmospheric integrated precipitable water ( $V$ ) and cloud liquid water content ( $L$ ) obtained in different cloud conditions in April of 2005 in Xingxiang, Henan. Special analysis was focused on the effect of low trough cloud system on April

资助项目:“十五”河南省重大科技攻关项目(0522030400), 2004 河南省重点科技攻关项目(0423034000), 2004 河南省气象科学技术研究项目(Z200407)共同资助

收稿日期: 2007 年 7 月 27 日; 修定稿日期: 2007 年 10 月 18 日

8. The results showed that the radiometer is sensible to the water vapor and liquid water in clouds, and different  $V$  and  $L$  correspond to different weather background. The variation in  $L$  is related to the increasing or decreasing of cloud water content. There is an obvious fluctuation in  $L$  before rain and increase significantly during rain. Generally when  $L$  reaches 0.4 mm, the precipitation happens. This reveals that cloud is developing and will rain. In addition, the relationship among the three kinds of atmospheric water, i. e., precipitable water, cloud water and precipitating water, was analyzed based on the observation data. The results showed the ratio of  $L$  and  $V$  is 0.0087, whereas the rainfall amount is only 18% of precipitable water.

**Key Words:** microwave radiometer remote measurement cloud liquid water content

## 引 言

探测研究大气中汽态、液态水的分布特征及其演变规律<sup>[1]</sup>,是云和降水物理研究的重要内容。由于微波辐射计在探测大气中水汽特性方面具有可无人职守、适时观测并连续记录所测水汽参量随时间演变等优点,而越来越受到人们的重视。Mark Heggli 等人利用地基微波辐射计对美国西部内华达山脉冬季风暴云系中的液态水分布进行了连续跟踪遥测<sup>[2]</sup>。赵柏林等人利用 1.35cm 波段辐射计遥感大气湿度层结和水汽总含量,与探空资料比较,水汽总含量偏差为 3%<sup>[3]</sup>。魏重等人所做的工作表明<sup>[4]</sup>,8.6 mm 波长微波辐射计有较宽的测量范围和较高的探测精度,基本上适用于各类云的探测。这些工作表明利用地基微波辐射计遥感大气中水汽特性是行之有效的探测工具。

在人工增雨作业时,实时探测分析大气中汽态、液态水的分布特征及其演变是重要的。雷恒池、魏重等利用 22.235 和 35.3GHz 双频微波辐射计于 1997 年在陕西省西安市观测了降水系统的水汽和云液水随时间的演变,探讨了在人工影响天气作业中的应用<sup>[5]</sup>。

大气中水汽和云中液态水的分布及其演变与对应天气系统是密切相关的<sup>[6]</sup>,利用微波

辐射计观测资料,结合雷达、探空和地面云况、降水等观测资料,有利于进一步深入分析大气中汽态、液态水的分布及其演变与对应天气系统及云系结构特征之间的关系,应用于人工增雨作业。为此,本文利用 2005 年 4 月河南人工增雨外场试验期间使用 23.8 和 31.65GHz 双频微波辐射计在河南省新乡市观测的资料,分析了降水云系影响时大气中汽态、液态水的连续演变,并侧重分析了降雨前空中水汽  $V$  和云中液态水  $L$  的演变特征。

## 1 观测情况

2005 年 4 月,河南省人工影响天气中心与中国电波传播研究所合作,利用一部双频(23.8GHz 和 31.65GHz)地基微波辐射计,在河南省新乡市(35.18°N、113.88°E,海拔高度为 72.7m)对不同天气条件下大气中汽态、液态水含量的分布特征及其演变规律进行了观测。微波辐射计的两个通道共用一副天线,并增加了一个 45°角的反射镜,使来自天顶方向的微波辐射经过反射后进入天线系统,增强了微波辐射计的防雨性。微波辐射计主要性能指标如表 1 所示。

## 2 水汽量的计算

在地面所观测到的双频段的辐射亮温值

表 1 双波长地基微波辐射计性能参数

参数	取值范围
波长/cm	$\lambda_1=1.35, \lambda_2=0.8$
主频/GHz	$f_1=23.75, f_2=31.65$
带宽/MHz	0.25
天线直径/mm	500
天线增益/dB	>38
灵敏度/K	0.3
天线驱动范围	方位 $0\sim 360^\circ$ , 俯仰 $0\sim 90^\circ$
天线指向精度	方位 $0.1^\circ$ , 俯仰 $0.1^\circ$

与大气中水汽含量及云中积分液态水含量的关系是一个隐含而复杂的关系,但是它们之间有一种近似的线性关系,对大气积分水汽含量  $V$  和云中积分液态水含量  $L$  可利用经验回归统计模式计算,即:

$$V \approx A_0 + A_1 T_{B1} + A_2 T_{B2} \quad (1)$$

$$L \approx B_0 + B_1 T_{B1} + B_2 T_{B2} \quad (2)$$

式中  $T_{B1}$ 、 $T_{B2}$  分别为 23.8GHz 和 31.65GHz 通道测量的大气辐射亮温。系数  $A_0$ 、 $A_1$ 、 $A_2$  和  $B_0$ 、 $B_1$ 、 $B_2$  可根据式(1)、(2),用气象探空仪数据统计回归得到。经统计分析,  $A_0 = -3.198$ 、 $A_1 = 1.02645$ 、 $A_2 = -0.55205$ 、 $B_0 = -0.255$ 、 $B_1 = -0.010583$ 、 $B_2 = 0.031936$ 。由双通

道辐射计分别测量出大气辐射亮温  $T_{B1}$  和  $T_{B2}$ ,就可以计算出大气积分水汽含量  $V$  和云中液态水含量  $L$ 。

### 3 不同天气背景下空中水汽和液态水的特征

2005年4月,我们对新乡地区不同类型天气过程影响时的空中水汽  $V$  和云液态水含量  $L$  进行了连续观测。表2给出了微波辐射计观测的不同天气背景下的  $V$ 、 $L$  部分特征值。表中所列  $V$ 、 $L$  值分别为平均值 ( $V_A$ 、 $L_A$ )、最大值 ( $V_{max}$ 、 $L_{max}$ ) 和最小值 ( $V_{min}$ 、 $L_{min}$ )。4月7—9日,受低槽冷锋云系影响,新乡上空主要为层状云。7日和9日观测值为非降水云测值,8日测值为降水性层状云雨前时段观测值。10—11日新乡受切变线云系影响,12日是弱的低槽云系,24和26日为对流云影响。通过不同天气背景下8个观测日辐射计测值的对比分析,非降水云影响时,空中水汽  $V$  和云中液态水含量  $L$  值波动较小。降水性层状云雨前时段观测

表 2 2005年4月新乡不同天气背景下的  $V$ 、 $L$  特征值

日期	$V_A$ /mm	$V_{max}$ /mm	$V_{min}$ /mm	$L_A$ /mm	$L_{max}$ /mm	$L_{min}$ /mm	云状
20050407	18.50	23.28	16.65	0.10	0.26	0.07	Cidens
20050408	19.13	28.44	16.75	0.10	0.36	0.05	Sc, Acop
20050409	16.65	18.14	15.67	0.07	0.10	0.05	Astra
20050410	16.23	17.06	15.37	0.11	0.14	0.09	Actra
20050411	16.26	17.07	15.31	0.10	0.12	0.08	Acop
20050412	15.59	15.86	15.25	0.07	0.08	0.06	Cidens, Csfil
20050424	16.48	23.24	7.54	0.11	1.10	0.06	Cbcap
20050426	17.18	18.25	15.90	0.18	0.27	0.14	Ci, Cuhum, Fc

的  $V$ 、 $L$  值其变化明显加大,如8日  $L$  值最小为 0.05mm,最大 0.36mm。24日 19:48 和 20:25,对流云两次影响新乡,新乡地面观测有闪电和雷声,并有雨滴落地,但自记雨强计观测无雨量,辐射计观测的云液态水含量  $L$  值分别出现了 0.87mm 和 1.1mm 的大值。这说明对流云中的液态水含量明显大于层状

云。

### 4 低槽云系影响时 $V$ 和 $L$ 的演变

#### 4.1 天气背景和降水情况

2005年4月8日08时500hPa图上,在兰州、武都到宜宾一线有一低槽影响河南。

地面图上,河南省受四川盆地伸向江淮流域倒槽顶部的东北气流影响。由 8 日 13—24 时的 GOES-9 卫星云图资料分析,低槽云系从 8 日 13 时开始影响河南,对河南造成一次层状云降水过程。图 1 是该云系影响河南时

的演变情况。8 日 15 时,新乡上空为结构松散的层状云区,17 时后,较密实的层状云系开始影响新乡,一直持续到 24 时。据雷达和探空资料分析,层状云平均厚度为 6500m。图 2 是新乡气象站 4 月 8 日 1 小时雨量的演变。

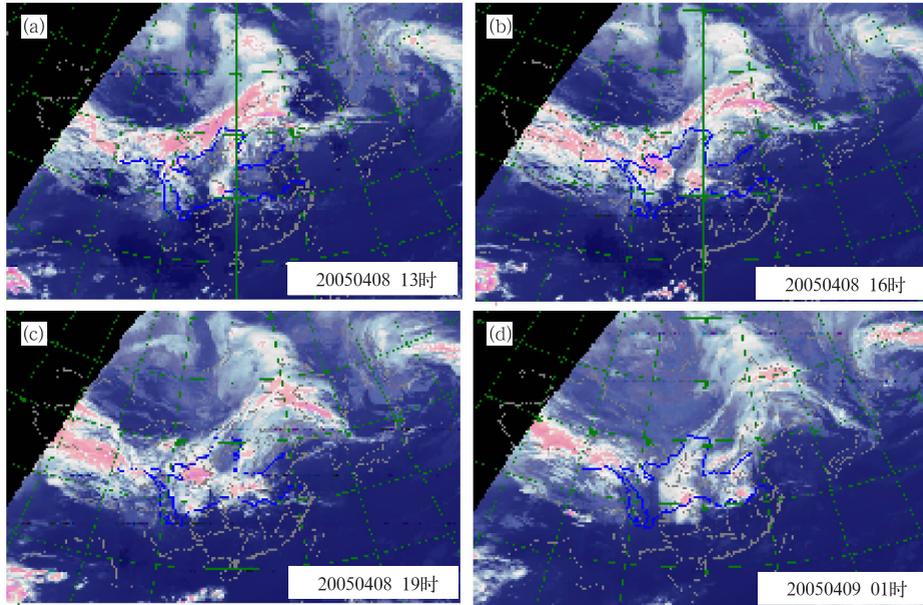


图 1 2005 年 4 月 8—9 日 GOES-9 红外卫星云图

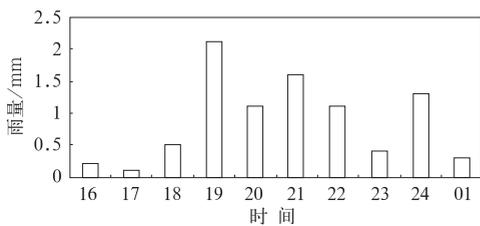


图 2 2005 年 4 月 8 日新乡 1 小时降雨量

#### 4.2 降雨前空中水汽 $V$ 和云中液态水 $L$ 的演变特征

利用 4 月 7—8 日设在新乡的双波长地基微波辐射计观测资料,结合郑州 714-CD 雷达、新乡自记雨量计、常规地面观测等资料,对所观测的空中水汽和云中液态水的演变特征进行了分析。

4 月 8 日 13 时,低槽云系开始影响河南,15 时,新乡上空出现结构松散的层状云区,17 时后,较密实的层状云系开始影响新乡,一直持续到 9 日 14 时。微波辐射计对云系影响全过程进行了连续观测,清楚的观测了降水云系在降雨前水汽和云液态水含量的时空演变过程。图 3 是 2005 年 4 月 8 日 09:33 到 9 日 02:00 空中水汽( $V$ )和液水( $L$ )的演变图。

根据新乡自记雨量计观测,4 月 8—9 日共出现三个降雨时段,分别为 15:19—15:28, 0.2mm; 17:31—22:30, 6.8mm; 23:29—24:40, 2.6mm。对比微波辐射计观测资料进行分析,第一个降雨时段,空中水汽  $V$ 、云液水  $L$  值的变化见图 3 中的 A~B

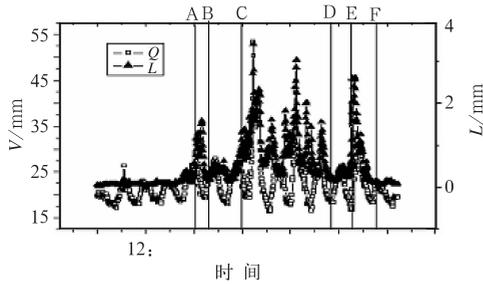


图 3 2005 年 4 月 8 日 09 时—9 日 02 时空中  $V$  和云液水  $L$  的演变图

段, 14:40:01,  $V$  值为 23.02 mm、 $L$  值为 0.13 mm, 随着云区的移近,  $V$ 、 $L$  值逐渐增大, 14:53:08,  $V$  值为 25.37 mm、 $L$  值为 0.40 mm, 新乡气象站观测到有雨滴落地, 随后云中液态含水量  $L$  值迅速增大, 15:19:01,  $L$  值增大到 1.31 mm。从 14:40  $L$  值开始增大到 15:19 地面观测到降水, 经历的时间为 39 分钟。降水后  $L$  值回落到 0.3 mm 以下。

第二个降雨时段,  $V$ 、 $L$  值的变化对应图 3 中的 C~D 段。16:45:27,  $V$  值为 20.74 mm、 $L$  值为 0.15 mm, 以后  $L$  值逐渐增大, 17:04:48,  $V$  值为 26.38 mm、 $L$  值为 0.40 mm。随后  $L$  值快速增大, 到 17:31,  $L$  值增大到 0.86 mm, 自记雨量计开始观测到降水, 17:31—22:30, 新乡降水 6.8 mm。从 16:45  $L$  值开始增大, 到 17:31 地面观测到降水, 经历的时间为 46 分钟。降水后  $L$  值回落到 0.3 mm 以下。

图 3 中的 E~F 段是第三个降雨时段  $V$ 、 $L$  值的变化。22:35:39,  $V$  值为 20.74 mm、 $L$  值为 0.15 mm, 以后  $L$  值逐渐增大, 22:50:57,  $V$ 、 $L$  值分别为 24.88 mm 和 0.4 mm, 随后  $L$  值快速增大, 到 23:29,  $L$  值增大到 1.75 mm, 自记雨量计开始观测到降水, 23:29—24:40, 测站降水 2.6 mm。从 22:35  $L$  值开始增大到 23:29 地面观测到降水, 经历的时间为 54 分钟。降水后  $L$  值回落到 0.3 mm 以下。

为了更清楚地考查降雨开始前这一时段云中水汽含量  $V$  和液态水含量  $L$  的演变情况, 给出了 A~B 段更细时间分辨率的  $V$ 、 $L$  随时间变化图(图 4)。由图可见, 在出现降水之前,  $V$  值先上升到一个小的峰值, 稍下降后又迅速上升至降雨开始。 $L$  值的变化与  $V$  值变化相一致。 $L$  值超过 0.5 mm 后地面出现降水。说明在降水云的前方存在一个小的含水量高值区和低值区。

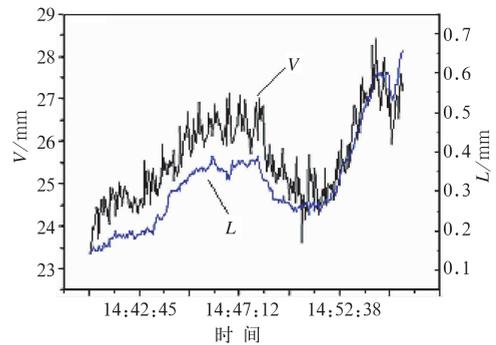


图 4 2005 年 4 月 8 日 14:55 降水开始前  $V$ 、 $L$  值随时间的演变

由以上分析可见, 在层状云降水前, 大气中水汽  $V$  和云中液态水含量  $L$  都有一个增大的过程,  $V$  值在降水开始前表现为小的波动, 变化范围在 17~23 mm 之间。临近降水时, 波动明显加大, 先出现一个低值, 随后  $V$  值增大到 20~29 mm。出现降水后  $V$  值又下降。降雨前液态水含量  $L$  从一个低值区间 (0.09~0.20 mm) 开始增大, 临近降雨时,  $L$  值均增大到一个阈值 0.4 mm。从  $L$  值开始增大到地面出现降水所经历的时间在 39~54 分钟, 降水结束之后,  $L$  值均回落到 0.3 mm 以下。

#### 4.3 不同云状影响时 $V$ 、 $L$ 值的演变

7 日 08 时, 新乡上空开始出现密卷云、毛卷云, 云量 3, 以后云量逐渐增加, 14 时, 云量为 10, 云状为卷层云。到 20 时, 云量又

减少为 7。8 日 02 时后,云量又增加到 10,一直维持到 9 日 14 时,云状分别为层积云、高积云、高层云等。在测站上空出现不同云状时,辐射计对空中水汽和云中液态水反映灵敏,尤其是液水含量( $L$ )的变化与云量的增减关系密切。云量增加时, $L$  值明显增大。

7 日 20 时,新乡气象站地面观测云状为 Cidens Cifil,云量 7,云层较薄。微波辐射计观测大气积分水汽含量和云中液态水含量都较小。通过对 7 日 22:30—24:00 测站  $V$ 、 $L$  值的分析表明,这一时段  $V$  值平均为 18.50mm,最大 23.28mm,最小 16.05mm。

$L$  值平均为 0.10mm,最大 0.26mm,最小 0.01mm。

从 7 日 20 时到 8 日 20 时,测站上空的云状演变依次为:Cidens Cifil、Setra、Acop、Asop,空中水汽含量和云中液态含水量也逐渐增大,尤其是降水云影响测站时,云中液水含量  $L$  值均对应一个较大的峰值。20 时以后,测站上空又受非降水云影响,其  $V$ 、 $L$  值也随之减小,云中液态含水量一般都降到 0.3mm 以下。说明微波辐射计测值对不同云状的影响是敏感的。

表 3 2005 年 4 月 7—9 日不同云状影响时所对应的云中  $V$ 、 $L$  值

日期	时间	$V$ /mm	$L$ /mm	云状	云量	是否降水	1h 雨量
20050407	20	18.68	0.1	Cidens Cifil	7	否	
20050408	02	17.00	0.1	Setra	10—	否	
	08	18.57	0.12	Acop	10	否	
	14	19.72	0.16	Acop	10	否	
	20	19.89	0.78	Asop	10	已降水	1.6mm
	02	19.56	0.1	Asop Fn	10	否	
20050409	08	18.73	0.1	Acop	10	否	
	14	17.34	0.06	Astra	10	否	
	20	16.03	0.09	Cidens Cifil	4	否	

结合雷达回波资料对  $V$  值和  $L$  值的演变作了进一步分析。图 5(见彩页)是雷达对测站上空降水云做的剖面观测,给出了测站上空降水性层状云的结构特征,可见影响测站的降水性层状云中 含有弱的对流。图 6(见彩页)是一组 PPI 资料,反映了降水云系经过测站的演变。14:47 时,测站位于弱的层状云区,辐射计观测  $V$  值为 26.37mm, $L$  值为 0.35mm,测站 14:51 开始下零星小雨,且时下时停。17:02 时, $V$  值和  $L$  值又分别从 23.77mm 和 0.24mm 开始增大,几分钟后迅速增大到 26.38mm 和 0.4mm,而雷达回波上正好对应的是一个较强的回波区开始影响测站,见图 6(彩页)17 时 28 分回波图。

#### 4.4 大气三水之间的定量关系

大气中水汽、云液水和地面降水(简称大气三水)之间的关系是时空多变的,分析三者之间的定量关系有助于了解大气水循环规律。利用微波辐射计观测的单位底面积垂直大气柱中水汽和云液态水的路径积分总量,配合相同时间分辨率的地面雨强资料,即可得到大气水的主要量(水汽、云水、雨水)的定量数值,也可以推算大气三水之间的关系。4 月 8 日 08 至 20 时,辐射计观测大气平均水汽总量 22.21mm,平均液态水含量 0.195mm,地面总降水 4.0mm。云中液态云水占气态水汽的 8.7% 左右,落回地面的降水占空中水汽量

的 18%左右。

## 5 小 结

通过对 2005 年 4 月在河南新乡所取微波辐射计观测资料的综合分析,表明当辐射计观测点位于云系不同位置时,大气中水汽含量  $V$  和液态水含量  $L$  明显不同。降水开始之前,水汽含量  $V$  值有明显波动,液态水含量  $L$  值也有明显增加,一般增大到 0.4mm 时即出现降水。从  $L$  值开始增大到地面出现降水所经历的时间在 13~54 分钟,降水结束之后, $L$  值均回落到 0.3mm 以下。这些现象对降水开始有指示意义,可预报云系正处于降水产生的发展阶段,可应用于人工增雨作业。

从微波辐射计观测的不同云状影响时相对应的云中水汽含量  $V$  和液态水含量  $L$  的变化,可以看出从低槽云系开始影响测站到出现降水,云中液态含水量逐渐增大,随着降水的结束,其  $V$ 、 $L$  值也随之减小。

根据微波辐射计观测资料对大气三水之间定量关系的分析,云中液态云水占气态水

汽的 8.7%左右,落回地面的降水占空中水汽量的 18%左右,一方面表明作为云水资源条件的云液水量仅占大气中水汽的很小一部分,另外也说明云中还有相当多的水汽未转化为地面降水。

## 参考文献

- [1] 杨红梅,葛润生,徐宝祥.用单站探空资料分析对流层气柱水汽总量[J]. 气象,1998,24(9):8-11.
- [2] Heggli Mark, et al. Field evaluation of a dual-channel microwave radiometer designed for measurements of integrated water vapor and cloud liquid water in the atmosphere[J]. J. Atmos. Ocean. tech, 1987, (4): 204-213.
- [3] 赵伯林,尹宏,李慧心,等. 1980,微波遥感大气层结的原理和实验[J]. 中国科学,9,874-882.
- [4] 魏重,林海,忻妙新. 1982,8.6mm 和 3.2cm 两个波长地面辐射计探测云中含水量[J]. 大气科学,6(2): 195-201.
- [5] 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[J]. 应用气象学报,2001,12(增刊),73-79.
- [6] 金华,王广河,游来光,等. 河南春季一次层状云降水云物理结构分析[J]. 气象,2006,32(10):3-10.

# 李铁林等：利用双频微波辐射计测空中水汽和云液水含量的个例分析

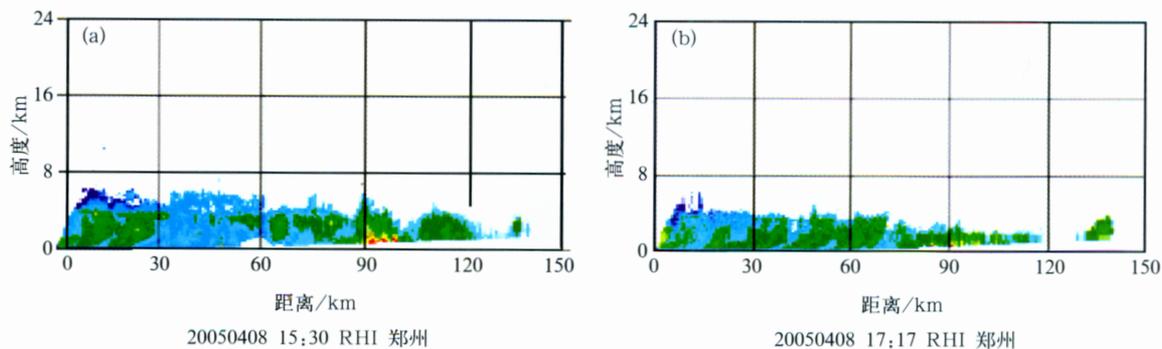


图5 714CD雷达对测站方向的RHI回波

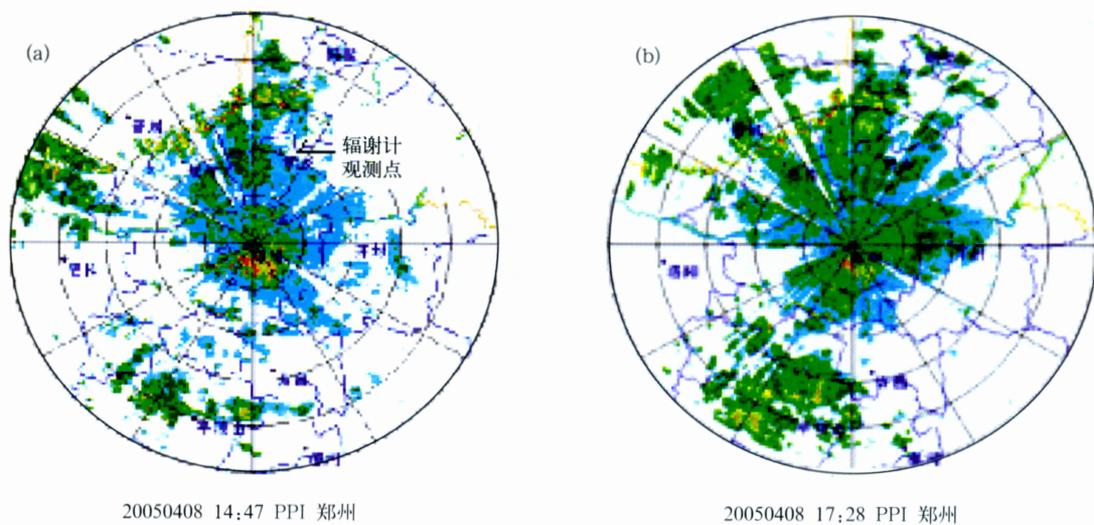


图6 2005年4月8日郑州714CD雷达PPI回波