

# 一次龙卷的雷达回波探讨

查玉泉

1977年6月10日08时左右，在广西桂林雷达站（3cm雷达）探测到一次龙卷回波。龙卷降落在广西临桂县四塘公社（雷达站西南20km左右）无人居住的丘陵地区，造成一华里宽、五华里长呈西南—东北向的风灾区，有两棵直径达一米的大樟树向东偏北倒了。通过每小时雷达回波、地面气象要素场和高空资料的分析，能定性的看到这次龙卷是怎样形成和变化的。在此基础上，提出对这次龙卷形成机制的设想，并对警戒和预报龙卷提出一些不成熟的看法。

## 一、天气背景

6月8—10日，500mb中高纬环流形势为两脊一槽型，乌拉尔地区和苏联东部分别维持着一个高脊，蒙古人民共和国及我国东北地区为一低槽。槽后的冷平流不断扩散南下，并分裂成短波槽向东南传播。在这期间副热带高压588线8日到9日有一次明显的东退减弱；而在10日08时又有西伸加强，副高西伸加强使南支槽北抬。8日08时，在850mb图上自重庆、长沙到南昌有一条东西向的切变线。西安到成都有一条槽线，9日08时槽线已移到南京、长沙、桂林、南宁一线，槽前有一支低空西南急流， $\theta_{se} = 80^{\circ}\text{C}$ \*线逐日从西南向东北伸展（桂林站850mb $\theta_{se}$ 9日08时为83°C，20时升为89°C）。地面图上9日08时静止锋在温州、南昌、衡阳、桂林、兴仁到昆明北部一线。到20时原来的静止锋已经消失，在杭州、常德、遵义、昭通到丽江又产生了一条静止锋，在静止锋南侧昆明附近有一个低压。另外在秦岭附近有一条冷锋存在，到10日02时这条冷锋加速南下，冷空气从西路影响桂林地区，使原处在静止锋附近南侧的低压南移，影响广西西部地区。冷空气从高空沿桂林地区北部天平山东侧的洛清江谷地南下和中低空偏南气流在临桂境内交绥，是产生这次龙卷的大尺度天气背景条件。

## 二、龙卷过程雷达回波的演变

龙卷回波在10日06时左右开始形成，到08时才观测到从积雨云底部下垂到地的柱状雷达回波，生命史达两个多小时。但引起龙卷母云回波的形成，可追溯到9日22时。

6月8日21时到9日14时在桂林雷达站范围内，出现了一次由西北向东南移动的锋面天气过程，相应的桂林单站探空时间剖面图上，在低空出现切变（图1）。使得桂北地区低层暖湿条件充沛，在9日22

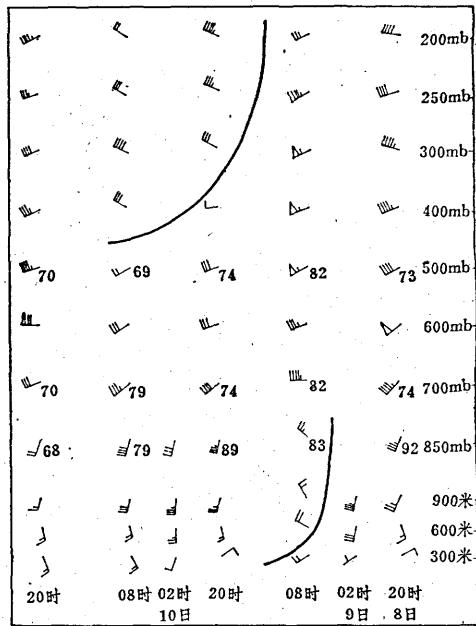


图1 桂林站探空时间剖面图（图上数字 =  $0se - 273$ ）

时雷达观测到两条呈东北—西南向互相平行的对流性短带状回波，以后西侧的短带状回波逐渐向东南方向移动，而东侧的短带状回波在偏南气流影响下向北移动，可能因受到局地地形（苗儿山）抬升的影响，对流得到剧烈发展，在这短带的中部—兴安县华江公社产生了局部特大暴雨（9日20时到10日08时过程雨量为360.3mm，其中10日03—04时降雨111.4mm）。到10日03时两条短带合并组成一条东北—西南向长达250km的对流回波带，04时带的西南端明显南压，在回波带中部（即两条回波带合并区）出现了强回波区。由于受到北方冷平流沿洛清江南下的影响，使原来呈直线状的回波带到04时56分变成弧状，在测站西侧35km处出现了一块突起强回波（图2），这块突

\*在文章和图表上所标  $0se$  值均未加  $273^{\circ}\text{C}$ 。

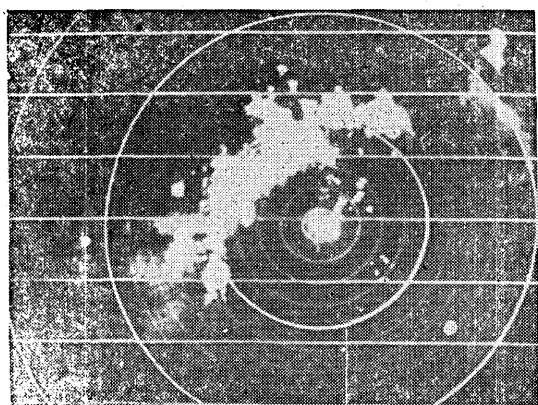


图 2 1977年 6月10日04时56分  
(仰角  $3^{\circ}$ , 0db, 每圈 10km)

起回波在低仰角时观测不到，同时回波的南端有向东侧前倾的现象。到 06 时 05 分整个回波带又向东南方向移动，在突起强回波的东南方 10km 左右的地方出现了一大一小孤立的一对点状回波，离测站 30—

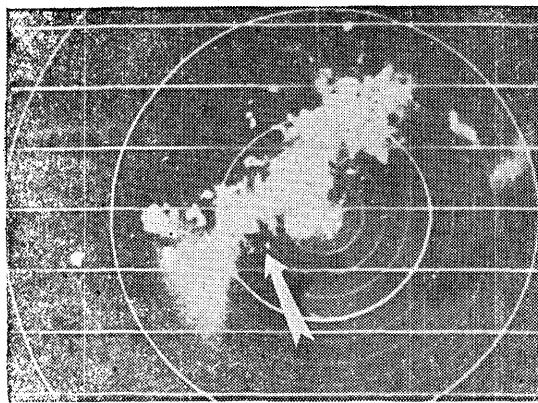


图 3—1 6月10日06时05分  
(仰角  $3^{\circ}$ , 0db, 每圈 10km)

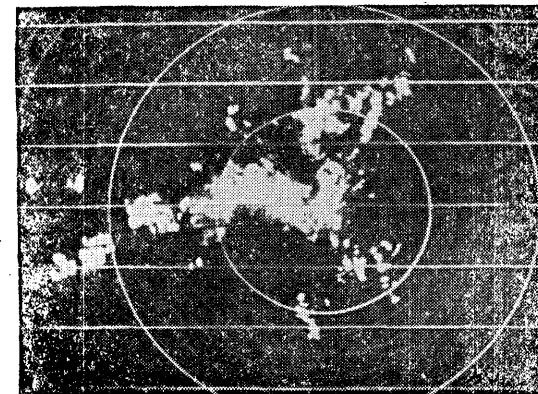


图 3—2 6月10日05时51分  
(仰角  $0.5^{\circ}$ , 0db, 每圈 10km)

35km，方位 242 度（图3—1），点状回波在低仰角 ( $0.5^{\circ}$ ) 图上（图3—2）仍然没有，说明这对点状回波是在中高层首先出现的。07时整个回波向东东北方向移动，这时这对点状回波亦向东东北移动了 3—5km，回波的范围有所扩大，同时突起强回波已经消失。到 07 时 53 分（图 4），回波仍向东北方向移动，原处在

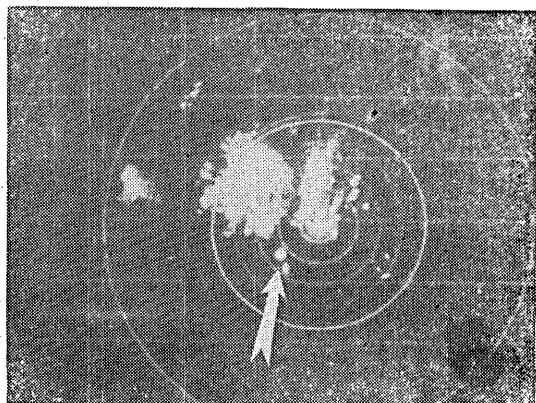


图 4 6月10日07时53分  
(仰角  $3^{\circ}$ , 0db, 每圈 10km)

测站北部的回波范围已经大大减小，西侧的回波在向东北移动过程中增强，这时这对点状回波范围继续扩大，并且相对位置也发生变化（由东西向排列变成南北向）。经30db 的衰减后所有回波均消失，仅余下一个点，对这点回波作垂直观测，得到这次龙卷的垂直剖面雷达回波图（图5—1）。综合平显和高显观测结果，说明龙卷并不是出现在雷暴主体的下面，而是在雷暴主体的南侧，与雷暴主体有一定距离的砧状回波里悬垂到地面的柱状回波。到 08 时 10 分柱状剖面回波消失，同时平显上点状回波也消失。从 07 时 53 分到 08 时 10 分的连续跟踪观测（图5—2、3），可看到龙卷回波逐渐移动及由下向上逐渐消失的过程。

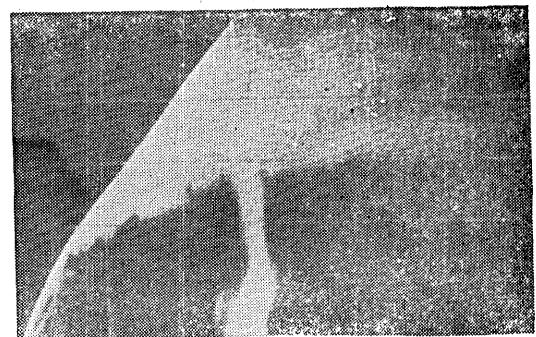


图 5—1 6月10日07时53分  
(方位  $236^{\circ}$ , 0db, 水平每格 10km, 垂直每格 2km)

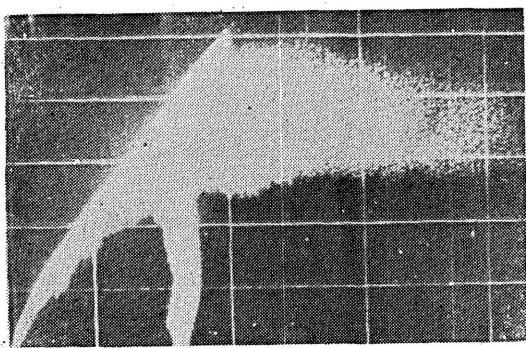


图 5—2 6月10日08时03分  
(方位 236°, 0db, 水平每格 10km, 垂直每格 2km)

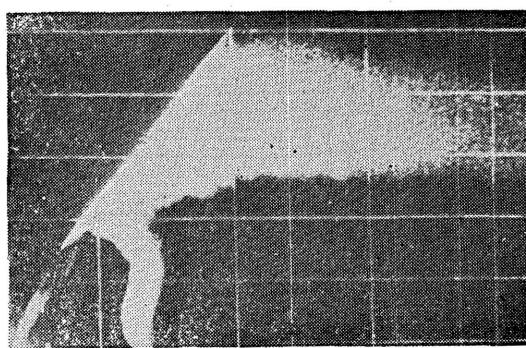


图 5—3 6月10日08时06分  
(方位 236°, 0db, 水平每格 10km, 垂直每格 2km)

### 三、气象要素场的分析

龙卷出现在6月10日6—8时桂林市西南20多公里的地方。下面我们用桂林市每天两次的探空资料作龙卷产生前后的高空要素分析，用桂北地区每小时一次的气象站、哨的地面资料来作龙卷形成时的地面场情况分析。

(一) 从桂林站6月8日20时到10日20时的单站高空时间剖面图(图1)上可看到：

1. 高空槽线在9日08时到10日08时之间经过测站，10日02—08时，槽后为明显的偏北风冷平流。图中表明低层吹偏南风的暖平流随着时间的变化风速向上逐渐增加，到10日08时在850mb上南风达16m/s。这种上冷下暖的空间配置有利不稳定天气的发生和发展。

2.  $\theta_{se}$ 值的变化表示大气层结不稳定程度增加。从9日20时不稳定性厚度在850—700mb之间，到10日08时不稳定性厚度发展到850—500mb之间。这种不稳定性剧烈的增加有利不稳定天气发展。

3. 高空风的垂直方向切变在10日08时最为突出，从850mb到500mb由低空16m/s的偏南风减少到8m/s。从400mb到500mb，风场由高到低产生气旋性的切变，切变之上为西北风，之下为西南风。根据风的垂直方向上的这种分布，在400—500mb之间可能产生云系。

4. 在8日—10日08时200mb高度上，10日08时桂林处在高空辐散场中，其值为 $15 \times 10^{-5} \text{ 秒}^{-1}$ 。从散度场的连续变化来看，辐散中心是由南向北移动的。

综上分析，10日08时桂林站上空是冷性反气旋环流，风场的垂直切变较大，中空存在着风场切变层，下层是暖湿的偏南气流。这些可能是这次龙卷产生并得到发展的条件。

(二) 对10日02时到08时桂北地区气象站、哨逐时的小图分析可看出：02—04时24°C等温线逐渐向南移动，05时稳定下来，06时到08时又逐渐向北移动，与此同时地面上29mb的绝对湿度线也有类似的变化。但在有规律变化的同时，桂林地区东北部和西部温、湿和风的变化是复杂的，华江公社的特大暴雨和临桂的龙卷就发生在这种变化复杂的时刻之中。

#### 1. 从温、湿场来看

为便于比较，列出二组临近站逐时温度和绝对湿度变化表(见附表)。从表中可看到黄沙和广福处在相对的低温、低湿区；而五通和会仙处在相对的高温、高湿区。会仙08时湿度急降，是由于局地龙卷气旋发展，而水平输送又受到地形影响一时得不到补充所造成的。

#### 2. 从逐时流场来看

02时在桂北和云南、湖南的交界处是流场的辐合线，03—04时辐合线略有南移并维持在华江与融水一线。05时在会仙附近出现暖、湿气旋性环流。由于这气旋性环流的影响，在06时的图上(图6—1)，原来的东侧暖、湿区向北扩展，而西侧的干冷区沿洛清江继续南下。并且气旋性流场向偏北方向移动，使原来的流场辐合线中段向南移动并与气旋性流场接近。07时(图6—2)会仙(即图上湿中心)处在气旋中心的高湿中心，其西侧是低温区，东侧是高温区，这样的温湿场有利气旋性流场的强烈发展。到08时(图6—3)，原处在湿区中的气旋性流场变成干冷区，这时局地性地面气旋剧烈发展造成湿空气来不及补充而形成局地干区，这干区出现在08时地面龙卷回波

附表

黄沙和五通、广福和会仙温湿随时间变化表

时 间 (小时)	02	03	04	05	06	07	08
温 度 (°C)	黄 沙 24.2	23.6	21.8	21.0	21.2	21.4	21.4
绝对湿度 (mb)	五 通 24.4	24.2	24.1	24.1	23.9	24.1	24.3
温 度 (°C)	广 福 23.9	23.4	23.4	23.4	23.4	23.7	24.2
绝对湿度 (mb)	会 仙 23.9	23.9	(24.0)	24.5	24.3	25.1	25.8
	广 福 28.7	28.3	28.3	28.3	28.3	28.3	28.7
	会 仙 29.7	29.4	(29.0)	30.1	30.1	30.3	24.8

注：括号中数值是根据分析图内插而得。

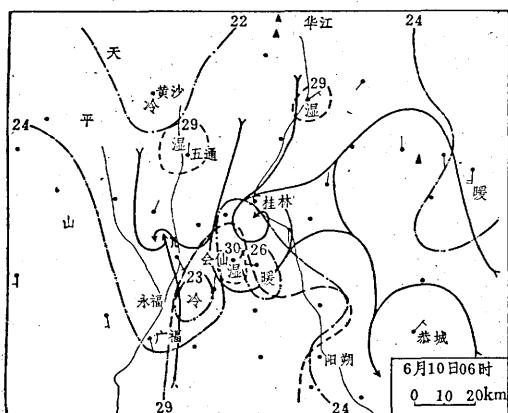


图 6-1 06时地面温湿流场

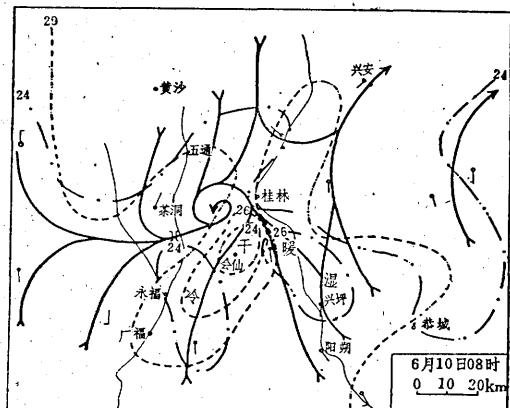


图 6-3 08时地面温湿流场

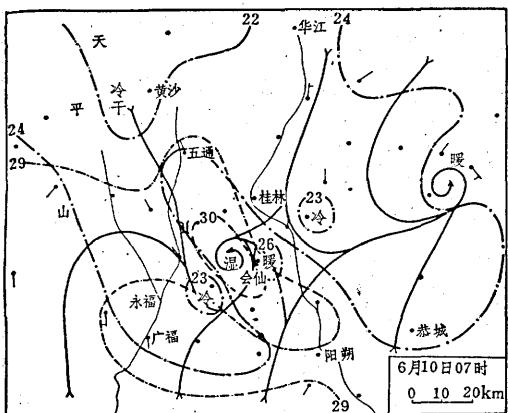


图 6-2 07时地面温湿流场

的东南方，由于得不到暖湿空气的补充，龙卷回波在 08 时 10 分消失。

#### 四、龙卷的移动

龙卷是从母云中产生的。龙卷母云的变化可以从

雷达回波的连续演变和不同仰角的观测中得知。龙卷母云先是从测站的西北向东南移动，由于中空风场垂直切变的存在，使龙卷母云砧向东南方伸展出来，在母云移速变慢、停滞而转变成向东北移动时产生龙卷。表面上看来，龙卷是产生在其母云向东南前进方向前沿，而实质上龙卷是产生在偏北气流中突起强回波的后面（即龙卷母云的南侧）。当西南气流加强，母云向东北移动时龙卷就得到发展。

从雷达平显上观测到点状回波，到龙卷垂直剖面回波消失，其移动可分为两个阶段：在 06 时到 07 时 53 分一段时间里，大的点状回波移向 60°，移速 4km/hr；但在第二个小时中，两点的相对位置发生了变化，从高空与地面流场情况来看，发生了气旋式旋转。

根据 07 时 53 分到 08 时 06 分连续跟踪观测表明，龙卷移动方向是由西南向东北，这与龙卷母云移向相一致。也与整个回波带移动一致。与 08 时高空资料比较可知，龙卷回波的移速是 400 和 500mb 高度

上风速的合成速度  $11\text{m/s}$ ，龙卷的移向与  $500\text{mb}$  风向一致。

### 五、形成龙卷回波机制的设想

通过上面分析，对这次龙卷回波形成前的征兆，可提出如下两点：

- 1.两条回波短带的合并是产生龙卷母云的前提。
- 2.强回波区南侧的较高仰角的点状回波是形成落地龙卷回波的先兆。它处于地面气旋环流的西北方位里。

从  $3^\circ$  仰角先观测到强回波，以后在偏北气流中强回波区的南侧观测到点状回波，点状回波加强发展得到柱状龙卷回波，由柱状变成漏斗状最后从低层逐渐向上“收缩”而消失的整个过程，说明龙卷先是在中空形成环流，以后动量逐渐下传，引起低层气旋性环流形式。由于低层冷干与暖湿气流辐合，造成垂直剖面柱状龙卷回波触地端粗大。在低层柱状回波周围围绕着螺旋式上升回波纹理，说明龙卷回波是上升气流和水汽凝结物所组成。龙卷减弱时在雷达回波上反映：一是触地端回波直径变小，这可能是由于触地端因摩擦作用使水平方向的暖湿气流来不及输送，出现干区；二是龙卷柱与其母云相连接处回波范围扩大，回波强度减弱；三是下垂的龙卷柱回波发生明显的弯曲。

### 六、龙卷的预报和警戒

龙卷是一种局地的灾害天气。但造成灾害的程度差异很大，剧烈的龙卷可造成很大灾害，如 1956 年 9 月 24 日上海地区出现的强龙卷将一只重 22 万斤的油桶卷起 4—5 丈高，抛到 100 多米外。因此，如何预报和警戒龙卷早已引起气象工作者的重视。近年来随着气象事业的发展，新探测手段的增加，特别是雷达技术在气象上的广泛应用，为预报和警戒龙卷提供了一定的可能性。

通过这次分析，提出对龙卷的预报和警戒的一些初步看法：

- 1.要密切注意有利产生强烈天气的大尺度背景的出现；
- 2.要注意临近高空站资料中，是否有风的垂直切变逐渐增大，低空有西南急流（暖湿气流）的存在或维持，使不稳定层的厚度逐渐加厚，并且中空存在切变层；
- 3.要注意对流回波的发生和演变，特别要警惕两

个或两个以上中小尺度雷达回波系统的合并，和由合并而引起强对流回波的形成；

4.要用不同仰角来观测强回波的变化，当强回波处在偏北流场中时，更要细心观测在强回波移动的前方或右侧有无钩状或涡旋状（点状）回波的出现，因为这种回波可能是产生龙卷的前兆。

在这里应当指出，在降雹预报中，前面三点也是基本满足的，不同的是雹多产生在雷暴主体强回波区域中，而这次龙卷却是产生在雷暴主体回波向南伸展一定距离的特殊回波上。龙卷母云和降雹母云在雷达上如何区别，还有待以后研究。

在夏半年中，有时也能在雷暴主体回波延伸出去的云砧回波下观测到下垂回波。如 1977 年 8 月 14 日 18 时 07 分（图 7）石家庄雷达站观测到的回波，是云砧下的云雨回波（无灾情报告）。对比图 5 龙卷回波，在形成和结构上均有很大差别。在平显上云雨回波多产生在雷暴主体回波的东侧。

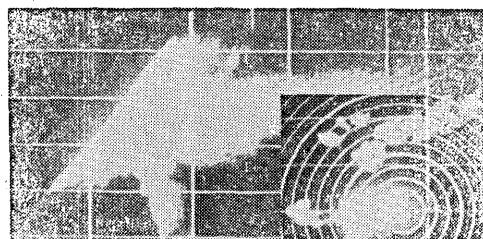


图 7 1977年 8 月 14 日 18 时 11 分石家庄站  
(高显：方位  $9^\circ$ , 0db, 水平每格  $10\text{km}$ , 垂直每格  
 $2\text{km}$ 。平显：仰角  $2^\circ$ , 0db, 每圈  $10\text{km}$ )

### 七、存在问题

龙卷是一种小尺度的天气现象，但它又是在有利的大尺度天气系统下形成和发展起来的。不同尺度天气系统的生命史是不相同的，因此，对中尺度天气系统中的一些局地回波特征，如图 2 中的突起强回波和图 3 中的点状回波，用相隔一小时的资料来说明或追踪它是不适当的，这样的分析可能产生误解。同样在地面场分析中，由于站、哨密度不够，所得结果不理想。这也说明了要更好地了解强烈中、小尺度天气现象的变化规律，还需要时间间隔更短、密度更密的资料。但若要在局地强烈天气尚未发生前就进行间隔短、内容广的观测工作，就目前雷达站的情况来看还存在着一定的困难。因此如何来发现和观测局地强烈天气？还有待进一步的探讨。