

# 高山雷达对低纬高原飑线的分析研究\*

徐八林<sup>[1~3]</sup>, 许小勇<sup>1</sup>, 杨宇<sup>3</sup>, 罗宇清<sup>1</sup>, 何跃<sup>4</sup>

(1. 中国气象科学研究院 灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; 2. 云南大学, 云南 昆明 650091;  
3. 云南德宏雷达站, 云南 潞西 678400; 4. 云南普洱雷达站, 云南 普洱 665000)

**摘要:** 利用云南德宏新一代天气雷达飑线资料, 同时结合另 5 次飑线个例, 对比国内外一些研究成果, 初步得出低纬高原飑线天气的一些中尺度指标. 以德宏 2006 年 7 月 17 日飑线过程为例, 分析了回波强度、回波速度场、气流的分布、地面风速等特点. 结果表明: 高低空急流是产生飑线灾害天气的重要因素; 雷达强回波的中心强度、顶高等参数与天气过程存在较好的对应关系, 可作为临近趋势预报的指标; 按伯努里方程  $\Delta p / \rho = \Delta V^2 / 2$  可较好地估计地面风速, 但需考虑地形影响和飑线方向的影响. 结合雷达反演降水和德宏高密度雨量站资料, 可看出飑线的强降水区域几乎都是其后部稳定的 25~40 dBz 左右的稳定层状云回波造成的.

**关键词:** 低纬高原飑线; 雷达回波; 特征分析

中图分类号: P 412.25 文献标识码: A 文章编号: 0258-7971(2009)02-0173-04

随着中尺度复合体 (MCC) 的发现, M addox<sup>[1]</sup> 将飑线定义为线状的中尺度对流系统 (MCS). 综合对飑线概念的定义<sup>[1~4]</sup>, 可确定飑线是指一条长宽之比大于 5:1 的中尺度雷暴或积雨云带, 沿着飑线可以出现雷暴, 暴雨, 大风, 冰雹, 龙卷等强对流天气; 飑线的生命史一般只有 4~18 h<sup>[2,3]</sup>.

飑线天气由于局地性和突发性强, 来势迅猛, 生命史短, 常造成较大的损失. 国内外学者对此做了大量研究, 丁一汇等<sup>[3]</sup>早在 1982 年就对我国不同区域飑线发生的天气条件进行了研究. 伍志方<sup>[5]</sup>利用 CNRAD-SA 雷达观测分析了广州一次夏季热带飑线的特征, 证实了珠江三角洲强风暴环境场的一些基本特征, 对新一代天气雷达探测飑线的方法进行了初步探讨. 应冬梅等<sup>[6]</sup>对江西暖区多次飑线的天气特征进行了统计分析, 揭示了江西暖区飑线的时空分布、产生源地、移动路径等特征. 李屏<sup>[7]</sup>仅利用大尺度卫星资料和单站观测资料对云南临沧 2004 年的一次飑线进行了天气分析, 但

未利用雷达资料做中小尺度系统分析. 在利用雷达分析方面, Ogura 等<sup>[8]</sup>利用 NSSL 提供的加密观测资料, 详细研究了 1976 年 5 月 22 日美国俄克拉何马的一次强飑线的热力、动力结构, 其结果在该领域有一定代表性. Houze 和 Smull<sup>[9]</sup>曾对上述 Ogura 等研究的同一条飑线进行了多普勒资料分析, 得到了中纬度飑线的概念模式. 廖玉芳等<sup>[10]</sup>利用多普勒天气雷达资料分析了一次强对流系列风暴的钩状回波、悬垂回波、穹隆和三体散射; 陈华<sup>[11]</sup>通过对热带气旋的分析发现, 热带气旋具有较强的螺旋性, 热带气旋的发展过程就是螺旋度增强的过程, 对飑线的结构研究有一定参考价值. 国内外对类似天气系统的分析方法也很多, 从分析方法上看: B. GoHbbaum<sup>[12]</sup>等指出螺旋度机制引导产生大气和流体中的扰动演变; 蒙伟光等<sup>[13]</sup>用湿位涡守恒和倾斜涡度发展理论对华南暴雨和中尺度对流系统进行分析; 胡福泉等<sup>[14]</sup>用假相当位温对层结对流性不稳定进行判断, 对强对流天气进行短时预报. 张

\* 收稿日期: 2008-05-23

基金项目: 灾害天气国家重点实验室基金 (2008LASW-B09); 国家自然科学基金项目 (40375008); 科技部科研院所技术开发研究专项“双线偏振雷达气象产品生成软件系统研制”资助.

作者简介: 徐八林 (1968-), 男, 江苏人, 高级工程师, 主要从事中尺度、大气探测和应用研究.

腾飞等<sup>[15]</sup>利用云南新一代天气雷达资料对 2003 年的一次暴雨过程进行了中尺度分析. 以上研究在实际业务预报上均有较好参考意义. 正如文献 [16-17] 研究表明高原地区的高山雷达探测资料也有其特点, 过去由于探测手段所限, 利用高山雷达探测研究低纬高原飚线的文献却不多见. 本文从实际业务出发, 利用德宏新一代多普勒天气雷达和 2006 年 7 月 17 日得到的一次飚线资料为例, 结合高密度乡镇雨量站资料和常规资料, 从天气背景、反射率和径向速度等中尺度特征进行低纬高原飚线分析, 同时对比昆明、文山、昭通、思茅多普勒雷达近年 5 次飚线资料(该 5 部雷达均为我国气象部门业务布点的 3830 型多普勒天气雷达, 资料格式、探测模式等参数均相同), 初步分析出一些低纬高原飚线的中尺度指标.

## 1 德宏飚线过境前后地面气象要素变化特征

2006 年 7 月 17 日晚至 18 日凌晨一次明显的飚线天气系统经保山、昌宁、施甸、龙陵影响德宏, 飚线所经之处出现了大风、大雨、暴雨和强雷暴天气, 飚线前沿经路西站用时大约 6~8 min.

飚线形成后, 在其成熟阶段, 伴有一系列中尺度特征, 导致地面气象要素呈急剧变化. 以下是飚线经过德宏州路西测站地面要素的变化特征:

(1) 冷空气丘 冷空气丘呈浅圆顶形, 发生于飚线后方下沉气流低层. 通常称其为雷暴高压, 常造成的气压上升约 2~5 hPa. 路西站观测到气压上升为 2.7 hPa. 按伯努里方程  $\Delta p/\rho = \Delta V^2/2$  估算, 可引起 18~28 m/s 风速. 雷达实际观测到的最大径向风速区在 19.2~29.5 m/s 之间(已出现速度模糊现象). 下降气流前缘附近, 即飚线两侧有明显的水平温度梯度, 通常为 5℃/50 km, 强的可达 1℃/km. 因此飚线过境后, 气温急剧下降. 此次飚线过境前后, 路西观测到的气温变化从 25.0℃ 下降到 20.2℃, 其中气温下降最大时, 在 5 min 之内降温达 2.5℃, 2.5℃/5 min 根据移动速度可得 0.5℃/km.

(2) 气压突变 飚线过境时, 地面气压剧增, 路西观测到的气压最大变化为 +2.7 hPa. 飚线过境后, 地面气压又剧降, 路西观测到的气压最大变

化为 -3.1 hPa. 其中最强的在 1 min 内下降了 1.7 hPa.

(3) 飚锋 飚线后方强下沉出流的前缘, 其两侧常伴随风向急变风速剧增. 由于下沉空气来自对流层中层, 风速较强, 加之雷暴高压区强水平气压梯度的加速, 造成的风速很强. 飚线过境时路西观测到的极大风速为: 22.0 m/s.

(4) 中尺度低压 常位于风暴后方, 因而又称尾流低压. 此次飚线过境形成的中尺度低压是由积云对流凝结潜热释放过程产生的. 此次的变压为 -3.1 hPa.

## 2 天气背景

前人研究表明, 飚线的形成依赖有利的大尺度环境条件, 主要包括: 大气层结呈条件性不稳定; 低层水汽丰富; 高、低层存在强风带(急流), 风向通常向上顺转; 大气中具有某些动力机制以释放不稳定等. 本文仅对该次飚线天气形势做简单的分析: 7 月 17 日 20 时的天气图上, 保山、德宏处于西副热带高压外围西南气流不稳定的辐合区内, 低层 700 hPa 在腾冲至丽江之间有一较强的风向切变, 风向、风速辐合较强. 腾冲探空站 16 日 20 时到 17 日 20 时资料比较, 从地面到高空的风速均加大, 表明高、低空急流较明显. 再加上由于保山、德宏白天天气晴好、高温、高湿, 极易产生强对流天气, 导致大气层结不稳定. 当各种相关条件具备时, 飚线天气形成, 在西移过程中, 再遇上述有利的天气背景条件, 故在保山、德宏得以发展加强.

## 3 雷达探测反射率和径向速度场

3.1 演变过程分析 此次飚线的发展和移动都较快, 开始尺度、强度和数量均成增长的分散风暴; 随着飚线发展加强了下曳气流和外流, 这有助于阵风锋能从母风暴中向外伸展和加速. 此时, 阵风锋速度与飚线移动速度匹配, 飚线就会持续. 此次飚线回波强度  $Z_{max}$  在 45~54 dBz 之间, 根据冰雹和强降水分析指标得出: 不会出现强冰雹, 但会有强降水出现; 飚线整体移动速度在 55~65 km/h 之间, 属于移动比较快的飚线系统; 且多普勒速度  $V_{max}$  在 19~30 m/s 之间, 并出现大片速度模糊区域, 位于强回波的后侧, 伴有强烈辐合趋势. 故较易出现单点

强降雨,乡镇雨量站观测得到的高密度降水分布情况证实了这一点。

**3.2 强度特征** 分析整个过程的强度回波图如彩图 1 所示(本文图 1~4 见封三),VPP1 扫描模式,探测半径 150 km,仰角 1.5°,在雷达回波图 1 中 a、d、f 为飊线进入并经过德宏境内各测站(施甸、潞西、瑞丽)时的强度回波图,可以看出在这个过程中强度回波都有明显的带状 MCS 标准的中尺度对流系统特征,且其水平方向上的长宽比例始终保持在 8:1 左右。分别在图 a、d、f 时刻对其做 VCS 对比分析(图略),22:16 经过施甸测站时对流顶高达 16 km 左右,35 dBz 强值中心发展到 10 km 高度;23:27 经过潞西市测站时对流顶高在 12 km 左右,35 dBz 强值中心发展到 8 km 高度;00:43 经过瑞丽测站时对流顶高在 10 km 左右,35 dBz 强值中心发展到 6 km 高度;在随着时间推移飊线在自东北向西南移动过程中,强对流发展顶高呈线性减弱趋势,对应飊线发展也呈减弱趋势。而强对流带相对正北方向的夹角越来越小,说明飊线偏南侧移动速度高于偏北侧。观察研究飊线结构发现图 1c、d 中潞西市正南方有一弓状回波带,此区域的降水更大;另外图 1f 中可以看出在陇川测站斜上方有一强回波最窄带,呈正 V 字型,说明飊线在此处结构不均匀,往往在此会形成较强灾害性天气,灾情调查也证明这一点;在此窄带偏下是一强风暴单体。

**3.3 速度特征** 速度回波图中选取飊线未经过雷达中心(图 2 VPP1 扫描模式探测半径 150 km,依次为仰角层 1~6)和经过雷达中心后(图 3 依次为仰角层 1~4)2 个时刻的速度回波图,来分析各仰角层速度特征以及速度场中包含的其他信息。在识别飊线的过程中,多普勒速度特征起重要作用,从速度分布图上可以看出在低层阵风锋前辐合、雨区内下曳气流辐散以及风暴顶的辐散,所以在飊线前沿出现强雷暴以及导致地面要素的急剧变化。

图 2、3 中飊线后部都有一个与其运动方向一致的大风急流即入流急流(RIJ),另 2 次个例入流急流也在飊线的中层后部,这表明了大风的潜势。而强风往往又与强回波重叠出现,所以飊线带来强风和短时强降雨天气。RIJ 是地面强风的来源,可以作为地面大风的评估依据,由于地面摩擦和环境暖湿气流的阻挡,参照雷达手册可得出德宏山区与

坝区的地面大风可以用公式描述:  $W_{sf} = C \cdot R_{ij}$

其中:  $W_{sf}$ ,  $R_{ij}$  和  $C$  分别为地面大风、 $R_{ij}$  值和系数,  $C = 0.7 \sim 0.9$  这次飊线天气过程中雷达测得的  $R_{ij}$  值大约 19~30 m/s 代入上式,计算出的理论地面大风值与测站实际值基本吻合,潞西测站 22 m/s 及陇川测站 16.8 m/s 的地面大风。值得注意的是,在使用速度产品分析预测地面大风时,要注意飊线所在位置、其移动方向及地形,会影响地面大风的估计精度。

**3.4 飊线降水特征** 图 4 为飊线过境时雷达回波资料,经去噪声、中值滤波、地物消除、四点平滑、复合平面生成、垂直廓线订正等预处理后得到每 10 min 平均反射率因子场,再经过 Z-R 转换(取  $a = 200$ ,  $b = 1.6$ )、积分时间叠加直接得到的雷达反演降水场( $x, y$  为距雷达距离)。虽然雷达反演降水场存在较多方面的不确定因素,但可以看出飊线降水分布的不均匀,且短时内呈带状分布。通过德宏已建设的乡镇雨量站(平均网格距 12.3 km)每分钟的加密资料,对比雷达回波位置,看出强降雨几乎都是飊线后部稳定的 25~40 dBz 左右的层状云回波造成的。飊线前部降水量较小。另一方面由于我们雷达海拔高度较高,在雷达扫描范围内,对远距离(约 120 km 以上)的低层回波探测能力较差,在做雷达定量降水估测分析时应引起注意。同时,我们使用文献[18]的方法也能提高估测效果。

## 4 讨论和结论

由于个例资料不足,仅对新一代天气雷达 5 次飊线资料进行分析,要深入了解低纬高原飊线特征,还需进一步研究,本研究得到了如下初步结论:

(1) 新一代天气雷达以其丰富的产品提供了时空尺度上更及时准确的信息,成为目前台站短时临近预报极有效的探测、监测分析工具。高山雷达在现有探测模式下,往往对低层回波探测能力较弱,应加以注意;

(2) 低纬高原飊线作为典型的中尺度强对流灾害性天气系统,它的发生均有适合它的大尺度背景的存在。从雷达资料和常规资料看,飊线得到加强的原因有:高低空的风切变较强,中尺度系统进入风切变区后容易得到发展。高、低空急流不但为

对流天气的发生发展带来丰沛的水汽条件,还提供了强烈的不稳定环境条件.回波的强中心强度、强回波顶高等参数与天气过程发展存在一定的对应关系,可作为临近趋势预报的指标;按伯努里方程  $\Delta p/\rho = \Delta V^2/2$  经订正可较好地估计地面风速,但需考虑地形影响和飢线方向的影响;

(3) 综合其他几次飢线个例特征可看出:飢线的雷达回波速度图上常伴有中气旋、中尺度辐合线、逆风区、“弓、V”等中尺度系统特征.回波强度图上的最窄带和速度图上的中气旋对强风暴的发展及发生灾害中心位置有明显的指示意义.雷达回波的强中心的强度、回波顶高等参数与天气现象存在一定的对应关系,是判别回波性质的主要参数.另外,在实际业务工作中除以上特征外,可以用组合反射率、各层回波的径向速度和垂直累积含水量进行这类强对流天气的判断.在做地面风速预估时,应注意飢线相对位置、移动方向与地形对预估精度的影响;

(4) 弓状回波是这次强对流天气的典型特征之一,综合相类似的 3 次个例,弓状回波形成后其凸出处(强弓带处)常为冰雹及雷雨大风等灾害天气发生的最强处;

(5) 雷达反演降水结合高密度雨量站网资料,得出强降水几乎都是飢线后部稳定的 25~40 dBz 左右的层状云回波造成的.

致谢:昆明、文山、普洱雷达站的有关人员为本研究提供宝贵个例资料.

## 参考文献:

- [1] MADDOX R A. Mesoscale convective complex, bull [J]. Amer Met Soc, 1980, 137(4): 1387.
- [2] 陆汉城,杨国祥.中尺度天气原理和预报[M].北京:气象出版社,2000
- [3] 丁一汇,李鸿洲,章名立,等.我国飢线发生条件的研究[J].大气科学,1982,6(1): 18-27.
- [4] BLUESTEIN H. Dynamics of mesoscale weather system

- [J]. NCAR Summer Colloquium Lecture Notes, 1984, (June - 6): 497-516
- [5] 伍志方. CNRAD-SA 新一代天气雷达观测夏季热带飢线的特征分析[J].气象,2003,29(3): 38-40
- [6] 应冬梅,郭艳.江西暖区飢线的天气雷达回波气候特征分析[J].江西科技,2000(4): 23-24
- [7] 李屏.临沧飢线天气过程分析[C]//云南重大灾害性天气气候技术总结文集.2004: 108-111
- [8] OGURA Y, LIDU M T. The structure of a midlatitude squall line[A]. A case study. JAS, 1980, 37: 553-567
- [9] HOUZE R A, HOBBS P V. Organization and structure of precipitation cloud systems[J]. Advances in Geophysics, 1982, 24: 225-315.
- [10] 廖玉芳,俞小鼎,郭庆.一次强对流系列风暴个例的多普勒天气雷达资料分析[J].应用气象学报,2003,14(6): 656-662
- [11] 陈华,谈哲敏.热带气旋的螺旋度特性[J].热带气象学报,1999,15(1): 81-85.
- [12] GOLDBAUM B, BRANOVER H, MOISEEV S S. Turbulence in the Wake and Long-Living Vortex Structures[A]. Physics and Chemistry of the earth, Part B: Hydrology, Ocean and Atmosphere, 1999, 24(6): 623-626
- [13] 蒙伟光,王安宇,李江南,等.华南暴雨中尺度对流系统的形成及湿位涡分析[J].大气科学,2004,28(3): 330-341.
- [14] 胡富泉,郭敏,周君群.强对流天气短期实时预报及特型法[J].高原气象,1997,16(4): 440-445
- [15] 张腾飞,马联翔,鲁亚斌,等.20030816 云南暴雨过程的中尺度分析[J].云南大学学报:自然科学版,2006,28(2): 136-143
- [16] 徐八林,刘黎平,许小永.高山雷达站选址对估测降水的影响分析[J].气象科技,2006,34(3): 340-343
- [17] 徐八林,刘黎平,徐文君,等.利用低仰角扫描改进高山雷达低层回波探测能力浅析[J].气象,2008,34(9): 61-67.
- [18] 李德俊,尤卫红,李跃清.迭代法在低纬高原地区多普勒天气雷达测量降水中的应用[J].云南大学学报:自然科学版,2008,30(1): 61-67.

(11): 2150-2156

Corrosion, 2008, 64 (6): 541-552

- [11] PRIYA ARS, MURALIDHARAM VS SUBRAMANIA  
A. Development of novel acidizing inhibitors for carbon  
steel corrosion in 15% boiling hydrochloric acid [J].

- [12] 曹楚南. 腐蚀电化学原理 [M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2004, 235-238

## Absorption and inhibition effect of sodium oleate for cold rolled steel in hydrochloric acid media

LIXiang-hong<sup>1</sup>, DENG Shu-duan<sup>2</sup>, BAIWei<sup>3</sup>, FU Hu<sup>1</sup>, MU Guan-nan<sup>4</sup>

(1 Department of Fundamental Courses, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

2 Department of Wood Science and Technology, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

3 School of Chemistry and Bio-Science, Yunnan Nationalities University, Kunming 650031, China

4 Department of Chemistry, Yunnan University, Kunming 650091, China

**Abstract** The inhibition effect of anionic surfactant of sodium oleate (SO) on the corrosion of cold rolled steel (CRS) in 1.0 mol/L HCl solution was investigated by weight loss and potentiodynamic polarization methods. The results show that sodium oleate is a good inhibitor in 1.0 mol/L HCl. Inhibition efficiency increases with increasing the inhibitor concentration. Polarization curves show that sodium oleate is a mixed-type inhibitor in hydrochloric acid. The adsorption of SO on CRS surface obeys the amended Langmuir adsorption isotherm equation. The experimental data have been treated with adsorption theory and kinetic Arrhenius equation. Three adsorption thermodynamic parameters (adsorption free energy  $\Delta G^0$ , adsorption heat  $\Delta H^0$ , adsorption entropy  $\Delta S^0$ ) and kinetic parameter of apparent activation energy  $E_a$  are also calculated. Based on the parameters, the inhibitive mechanism was discussed in detail.

**Key words** steel; sodium oleate; hydrochloric acid; adsorption; inhibition

\* \* \* \* \*

(上接第 176 页)

## Analysis on squall line weather process in low latitude plateau by Mountain top radar data

XU Ba-lin<sup>1-3</sup>, XU Xiaoyong<sup>1</sup>, YANG Yu<sup>3</sup>, LUO Yu-qing<sup>1</sup>, HE Yue<sup>4</sup>

(1 Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 10081; 2 Yunnan University, Yunnan Kunming 650091;

3 Yunnan Dehong radar station, Yunnan Luxi 678400; 4 Yunnan Pu'er radar station, Yunnan Pu'er 665000)

**Abstract** By using squall line data of new type weather Radar in Dehong Yunnan, and contrasting with 5 other squall line cases at the same time, some mesoscale indicators of squall line weather in low latitude plateau are obtained. By analyzing characteristics of echo intensity, echo velocity field, air stream distribution, surface wind velocity in squall line weather in 2006-07-17 in Dehong, the results shows upper and low-level jet stream is important factor causing squall line severe weather; parameters such as central intensity of strong Radar echo height of top etc. can be used as indicators of tendency now cast because of good correspondence with weather process. The velocity of surface wind can be better estimated according to Bernoulli's equation:  $\Delta p / \rho = \Delta V^2 / 2$ , but influences of topography and squall line direction should be considered. By combining with Radar precipitation retrieval and data of high density precipitation stations in Dehong, conclusions can be drawn that almost the whole heavy rain region is caused by stationary stratiform cloud echo about 25-40 dBZ in its rear part.

**Key words** squall line weather in low latitude plateau; radar echo; characteristic analysis

《高山雷达对低纬高原飚线的分析研究》图 1 ~ 4(见 173 ~ 176)

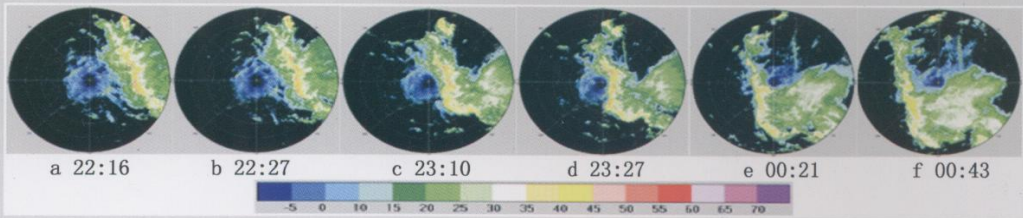


图 1 2006 年 7 月 17 ~ 18 日德宏飚线强度回波路径 (色标单位: dBz)  
Fig.1 The radar reflector path of DeHong severe squall line on July 17,2006

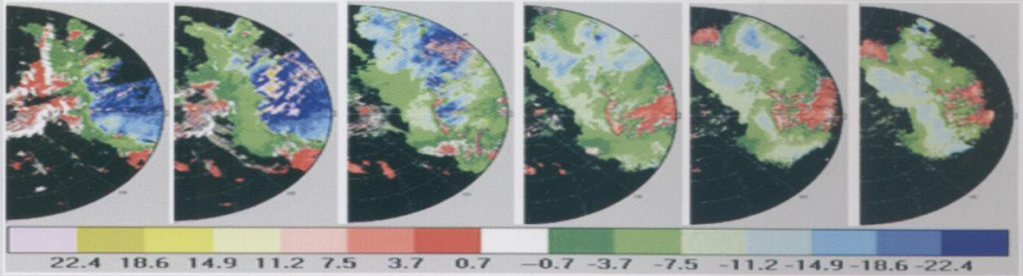


图 2 2006 年 7 月 17 日 22 : 16 基本速度场的垂直变化 (色标单位:  $m \cdot s^{-1}$ )  
Fig.2 The variations of the base velocity field at 22:16 on July 17,2006

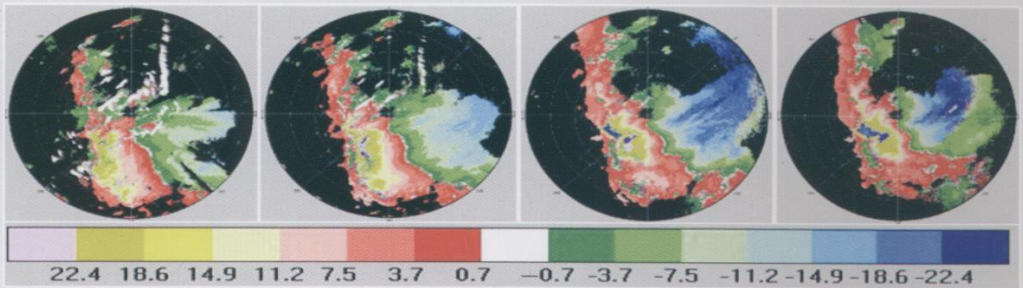


图 3 2006 年 7 月 18 日 00 : 43 基本速度场的垂直变化 (色标单位:  $m \cdot s^{-1}$ )  
Fig.3 The variations of the base velocity field at 00:43 on July 18,2006

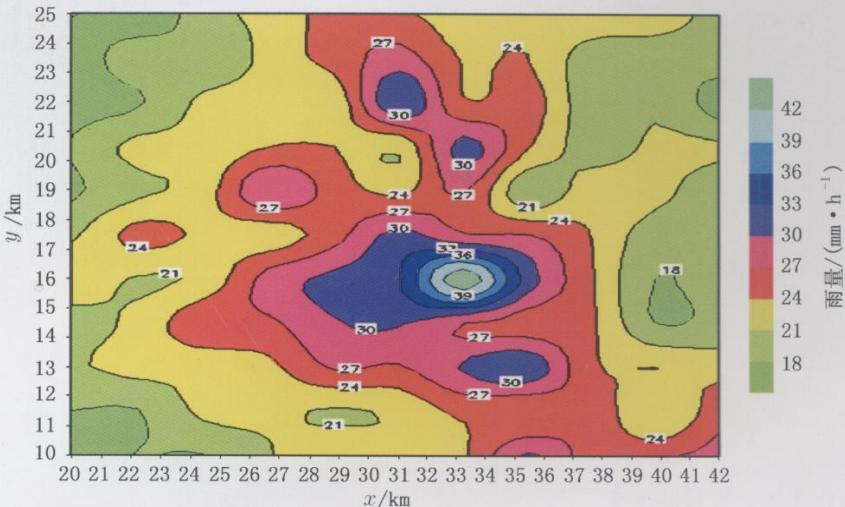


图 4 雷达反演降水场  
Fig.4 The rain field from radar