

马中元,叶小峰,张瑛,等. 江西三类致灾大风天气活动与回波特征分析[J]. 气象,2011,37(9):1108-1117.

江西三类致灾大风天气活动与回波特征分析<sup>\* 1</sup>

马中元<sup>1,2</sup> 叶小峰<sup>1,3</sup> 张 瑛<sup>4</sup> 许爱华<sup>4</sup> 马晓琳<sup>5</sup>  
贺志明<sup>2</sup> 肖 安<sup>4</sup> 陈云辉<sup>1,4</sup>

1 中国气象科学院灾害天气国家重点实验室,北京 100081  
2 江西省气象科学研究所,南昌 330046  
3 江西省萍乡市气象局,萍乡 337002  
4 江西省气象台,南昌 330046  
5 江西省庐山气象局,九江 332900

**提 要:** 使用常规天气资料、灾情资料、自动气象站、卫星云图和雷达回波等资料,对江西出现的灾害性大风天气进行分析,结果表明:江西致灾大风天气主要有三种类型。(1)与飑线回波带和超级单体等雷达回波系统相伴随的雷雨大风天气,同时还伴随强雷电、强降水、冰雹和龙卷等灾害性天气;(2)与冷锋雷暴回波带和冷空气大风相伴随的混合大风天气,具有雷雨大风天气和冷空气大风天气活动的特征;(3)由雷暴下沉气流触发、中高空动能下传和气压梯度风共同作用产生的无降水致灾大风天气,没有降水、雷电等天气现象伴随。

**关键词:** 雷雨大风,混合大风,无降水致灾大风,雷达回波,卫星云图

Analysis on Three Types of Hazard Wind  
Activities and Echo Characteristics in Jiangxi

MA Zhongyuan<sup>1,2</sup> YE Xiaofeng<sup>1,3</sup> ZHANG Ying<sup>4</sup> XU Aihua<sup>4</sup>  
MA Xiaolin<sup>5</sup> HE Zhiming<sup>2</sup> XIAO An<sup>4</sup> CHEN Yunhui<sup>1,4</sup>

1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081  
2 Institute of Meteorological Science of Jiangxi, Nanchang 330046  
3 Pingxiang Meteorological Bureau of Jiangxi, Pingxiang 337002  
4 Jiangxi Meteorological Observatory, Nanchang 330046  
5 Lushan Meteorological Office of Jiangxi, Jiujiang 332900

**Abstract:** Hazard wind weathers in Jiangxi are discussed with conventional data, disaster information and radar data, it is found that there are three major weather types of disastrous winds, i. e. (1) thunderstorm gale weather accompanied by the radar echo systems with the echo band of squall line and super cell etc. , at the same time, also accompanied by strong lightning, severe precipitation, hailstone, tornado and other hazard weathers; (2) hybrid-gale weather, accompanied by thunderstorm echo band of cold front and cold air gale, presents the characteristics of thunderstorm gale and cold air gale activities; (3) disastrous wind weather without rainfall, caused by the joint action of downdraft of thunderstorm triggering, down-propagation of aloft kinetic energy as well as pressure gradient wind, and it is not accompanied by rainfall, lightning and other weather phenomenon.

<sup>\*</sup> 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室 2010 年开放课题(2010LASW-A03),江西省基金课题(2009AE01800)、江西省气象局重点科研项目(JXQX2010Z04)、江西省气象局创新基金(GCX200909)、江西省气象局重点科研项目(JXQX2008Z04)共同资助  
2010 年 6 月 22 日收稿; 2010 年 10 月 18 日收修定稿  
第一作者:马中元,主要从事雷达技术与短临预报研究. Email:mazhongyuan@163.com

**Key words:** thunderstorm gale, hybrid gale, disastrous wind without rainfall, radar echoes, satellite cloud image

## 引言

江西强对流天气的主体是灾害性大风(也称致灾大风),几乎在所有强对流天气过程中都会出现不同形式的致灾大风天气。每年因致灾大风造成的农作物倒伏、房屋倒塌和江河翻船等事故;每年与致灾大风相伴随的强雷电、强降水、冰雹和龙卷等灾害性天气等,造成的国民经济损失十分巨大。

分析研究表明,江西致灾大风天气主要有三种类型:一是与飑线、弓状回波带、超级单体、南北向回波短带等雷达回波系统相伴随的雷雨大风天气,同时这类天气都伴有强雷电、强降水、冰雹和龙卷等天气现象;二是与冷锋雷暴回波带和冷空气大风相伴随的混合大风天气,具有雷雨大风的特征,同时又有冷空气大风特征;三是由雷暴下沉气流触发、高空动能下传和气压梯度风共同作用产生的无降水致灾大风天气(Disastrous wind Without rainfall, DW),它没有降水和雷电等天气现象伴随,只是空气密度流产生的大风天气。

国内外不少学者利用各种资料,对前一种雷雨大风天气进行了深入的研究,取得了许多宝贵经验和成果。例如:钱传海等<sup>[1]</sup>指出冰雹发生时可观测到 79 dBz 的反射率因子极值,并伴有弓状回波出现。慕熙昱等<sup>[2]</sup>指出在飑线带状强回波内有中尺度涡旋簇、波型特征和弓形回波出现。王彦等<sup>[3]</sup>指出弓状回波和阵风锋能够产生雷暴大风,当弓状回波向前突起时,产生的大风更强烈。何彩芬等<sup>[4]</sup>指出龙卷在雷达产品上表现为强的钩状回波,速度场上有相邻的正负速度中心和强组合切变等特征。殷占福等<sup>[5]</sup>指出超级单体风暴由单个单体发展而来,具有强风暴的典型回波特征,移动方向偏向盛行风右侧约 20°,属于右移风暴。刘娟等<sup>[6]</sup>指出超级风暴单体中强烈的水平风切变,使得回波产品上不断有中气旋(M)和龙卷涡旋(TVS)生成。俞小鼎等<sup>[7]</sup>指出反射率因子核心的逐渐降低,云底以上的速度辐合是出现下击暴流的回波特征,可以用来提前数分钟预警下击暴流的发生。吴芳芳等<sup>[8]</sup>指出风灾是由两种不同类型的雷暴大风产生,一种是阵风锋;另一种是下击暴流。这些研究成果为深入分析和研究致灾大风天气奠定了基础,但对混合大风天气和无降水

致灾大风天气的研究却很少。

本文从历史个例分析入手,对江西出现的与雷暴回波系统相关的致灾大风天气进行分析,试图揭示江西雷雨大风、混合大风和无降水致灾大风这三类致灾大风天气的活动特点与回波特征。

## 1 雷雨大风

雷雨大风指风速大于  $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的阵风并伴有雷雨。江西产生雷雨大风的回波系统常有:飑线回波(弓状回波)带、超级单体和复合单体回波和南北向回波短带等。这些回波系统常伴有强雷电、强降水、冰雹和龙卷等灾害性天气出现。

统计结果表明<sup>[9-10]</sup>,在 1976—1987 年 3—5 月间的 89 个对流风暴中,有 21 次局地雹云型回波系统、45 次中尺度对流回波系统和 7 次混合大风型回波系统,飑线回波系统只有 16 次(18%),但造成的强对流天气现象高达 335 站次,占总数 41%,平均每次飑线过程达 21 站次。在 1999—2009 年 3—5 月间,大于 10 站次的强对流天气过程有 32 次,其中大范围的飑线过程有 11 次。在 1999—2009 年 1—11 月间,共出现雷雨大风天气 897 站次,远比 140 站次冰雹天气多 6.4 倍。

### 1.1 飑线回波带

影响江西的飑线回波系统多数是由省界外产生且有规律移入的点状或带状回波系统,因此称为“外来飑线系统”,它是造成江西雷雨大风天气的主要回波系统<sup>[11-16]</sup>。

由于地球曲率的影响,在雷达屏幕上,远处回波表现为点状或点状短带回波形态,随着回波系统的移近和发展加强,回波不断发生合并,最后发展成紧密的飑线回波带。图 1 给出 1979 年 3 月 29 日典型飑线回波演变过程(图 1a),所经之地从 21 时开始产生雷雨大风、冰雹等灾害性天气(图 1b)。

1983 年 4 月 13 日是一次典型的飑线回波过程(图 2),可以看到飑线初生时的点状回波,发展时的合并和强盛时的飑线回波带结构。21 时开始产生雷雨大风等灾害性天气。

2009 年 3 月 21 日也是典型的飑线回波过程(图 3a),飑线回波的走向与雷雨大风分布相一致,

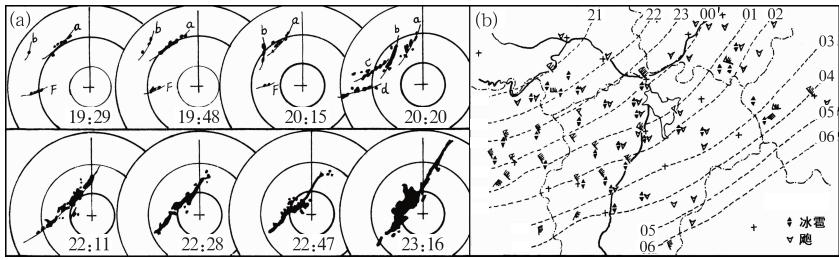


图 1 1979 年 3 月 29 日强飑线天气过程(图中均为北京时间)

(a) 强飑线回波的形成过程(九江雷达,每圈 100 km);(b) 雷雨大风、冰雹和飑分布图

Fig. 1 The weather process of strong squall line from 19:29 BT to 23:16 BT

on March 29, 1979. (a) the forming process of strong squall line echo (Jiujiang radar, each circle denotes 100 km), (b) distribution of storm winds, hail and squall

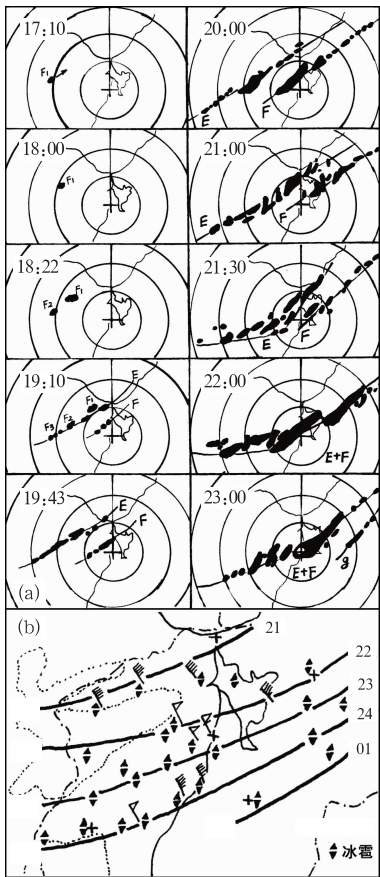


图 2 1983 年 4 月 13 日强飑线天气过程

(a) 强飑线回波的形成过程

(南昌雷达,每圈 50 km);

(b) 雷雨大风和冰雹分布图

(图中数字为北京时间)

Fig. 2 The weather process of strong squall

line from 17:10 BT to 23:00 BT on April 13, 1983

(a) the forming process of strong squall line echo

(Nanchang radar, each circle denotes 50 km),

(b) distribution of storm winds and hailstone

造成江西北部地区大范围雷雨大风、冰雹等强对流天气(图 3b)。从中尺度加密自动气象站记录上还可以看出(图略),雷雨大风、强雷电、强降水和冰雹等灾害天气的站数更加密集,远远超过基准站的灾害。

飑线回波带发展旺盛时,带中段的回波不断与移动方向前方的回波合并,出现跳跃传播加速移动,形成弯曲弓状回波结构。2007 年 6 月 25 日,赣东北出现强飑线弓状回波带<sup>[16]</sup>(图 3c),回波强度达到 55 dBz,VIL 也超过 50 kg · m<sup>-2</sup>,沿途造成较大范围的雷雨大风、强雷电、强降水等强对流天气(图 3d)。由此可见,在飑线回波带上向前突出的部分容易形成弓状回波带,产生下击暴流<sup>[17-18]</sup>。

1.2 超级单体和复合体回波

超级单体回波发生在锋前暖区雹云中或飑线回波带上,常伴有钩、指状回波,入流缺口、回波穹窿、虚假尖顶、三体散射等典型回波特征<sup>[17]</sup>。

1.2.1 局地雹云回波

影响江西的雹云可以分为两种:一是锋前暖区雹云<sup>[19-20]</sup>,产生的雷雨大风和冰雹灾害十分严重;二是锋后冷区雹云,产生灾害较轻。

在冷锋前暖区中,由于暖倒槽发展旺盛,午后地面温度高,加上地形的影响,在江西局部地区会产生局地雹云。局地雹云的能量主要来自近地面层的相对入流,对应在雷达回波上则表现为超级单体回波(图 4a,b)。1981 年 4 月 17 日 14 时 22 分在北部冷锋回波带的前方约 250 km 处的暖区中,回波发展成超级单体回波,出现明显的云砧前伸回波特征,卷云砧前伸方向就是雹云的移向,有入流缺口回波特征,地面已出现强天气。在入流缺口最深最宽时,位于其下方的临川罗针和唱凯两公社发生强烈降雹(雹径达 10 cm),同时伴有 12 级雷雨大风天气。

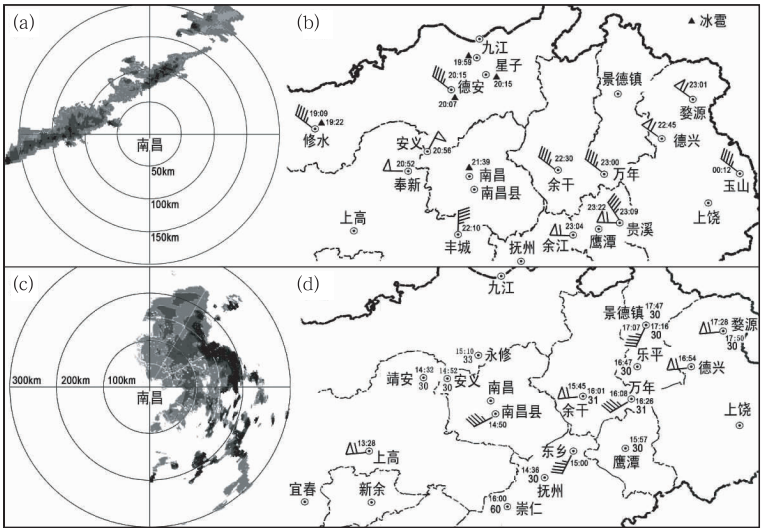


图 3 两次强飚线天气典型雷达回波特征与灾情图(南昌雷达)  
(a) 2009 年 3 月 21 日强飚线回波带;(b) 2009 年 3 月 21 日灾情分布图;  
(c) 2007 年 6 月 25 日强飚线回波带;(d) 2007 年 6 月 25 日灾情分布图  
Fig. 3 Disaster situations and typical radar echo characteristics of two processes of strong squall line (Nanchang radar). (a) the echo band of strong squall line on March 21, 2009, (b) the distribution of the situation of a disaster on March 21, 2009, (c) the echo band of strong squall line on June 25, 2007, (d) the distribution of the situation of a disaster on June 25, 2007

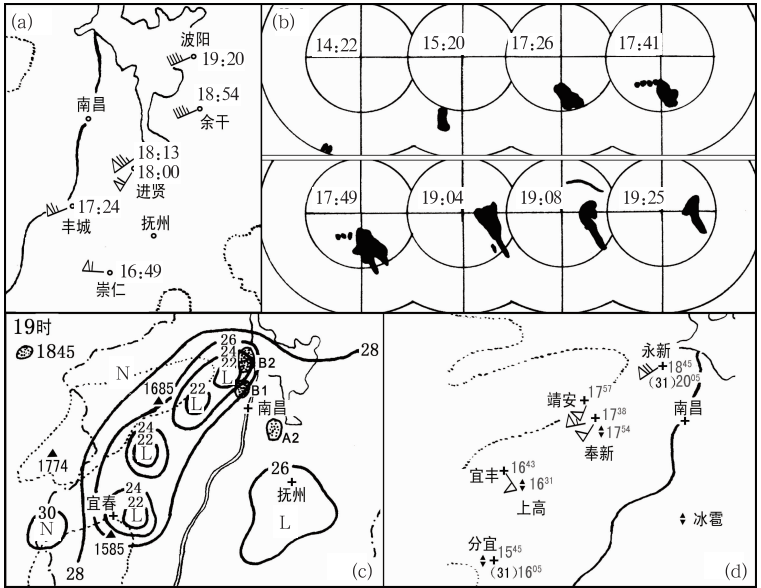


图 4 1981 年 4 月 17 日(a,b)和 1986 年 4 月 24 日(c,d)局地雹云天气过程  
(a) 雷雨大风分布图;(b) 局地雹云回波演变图(南昌雷达,每圈 50 km);  
(c) 局地雹云回波图(南昌雷达);(d) 雷雨大风和冰雹分布图  
Fig. 4 The weather processes of local hail-cloud on April 17, 1981 (a,b) and April 24, 1986 (c,d)  
(a) distribution of storm winds, (b) evolution of local hail-cloud echo (Nanchang radar, each circle denotes 50 km), (c) local hail-cloud echo (Nanchang radar), (d) distribution of storm winds and hailstone

在这次雹云个例中还发现一个有趣的现象, 19:18雷达上出现雹云在消散阶段中强烈的下沉气流造成的窄带回波,且带来大风天气(没有降水)。

1. 2. 2 雷暴冷堆对流回波

由对流风暴中的下沉冷空气形成的雷暴冷堆, 在向外扩展过程中对周边空气的抬升作用,可以在

原对流风暴附近触发产生新的对流回波<sup>[21]</sup>,使原对流风暴得以维持或发生传播。一般情况下,雷暴冷堆触发产生的回波其传播方向在下风方,当在雷暴冷堆上叠加其他条件时(如加入地形),其传播方向会发生改变。雷暴冷堆形成后,在其西北侧触发产生了对流回波 B1 和 B2(图 4c)。调查实况表明,B1 和 B2 回波产生了冰雹和雷雨大风天气(图 4d)。

2010 年 7 月 20 日 14 时 50 分左右,江西永修县虬津乡八角岭突然电闪雷鸣,暴雨如洪,龙卷风席卷了八角岭城山分厂(村),造成百余人受灾,经济损失达几百万元。通过对雷达回波和中尺度观测网资料分析(图略),在雷暴活动地方出现强降水造成降温形成雷暴冷堆,而在雷暴前方是强盛的西南气流加速增温,温差近 10℃/100 km,由于雷暴冷堆引起的局地锋区足以触发产生对流运动,江西永修龙卷雷暴回波就是在这种触发机制下产生的。

1.3 南北向雷暴回波短带

锋前暖区中南北向雷暴回波短带也是产生雷雨大风、强降水和冰雹的回波系统,它的回波结构更接近复合体,由多个强单体回波群组成。

2002 年 6 月 27 日,赣中地区出现一次较强雷电天气过程,影响系统是锋前暖区雷暴回波短带(图 5a)。16:30 九江北部是大范围混合型锋面降水回波,锋前暖区雷暴回波带结构十分明显,回波强度达到 55 dBz。这个近百余千米长、呈南北走向的回波短带,在向东北偏东方向移动中不断发展壮大,与回波带南面的对流回波不断合并,最大回波强度达到 60 dBz。雷暴回波短带在向东北方移动过程中,造成宜丰 18 m·s<sup>-1</sup>、高安 20 m·s<sup>-1</sup>、南昌 18 m·s<sup>-1</sup>、莲塘 17 m·s<sup>-1</sup> 等雷雨大风和强雷电天气(图 5b)。

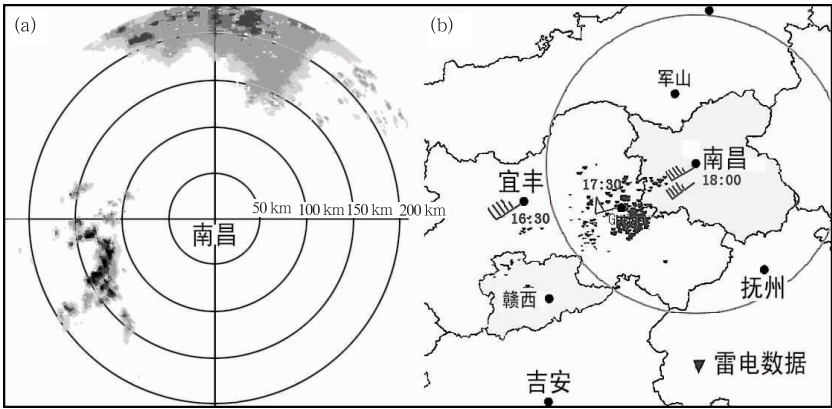


图 5 2002 年 6 月 27 日暖区复合体回波过程  
(a)16:30 复合体回波图; (b)雷雨大风和雷电数据分布图  
Fig. 5 The process of complex echo in warm area on June 27, 2002  
(a) the complex echo at 16:30 BT, (b) distribution of storm winds and lightning data

由此可见,当锋前暖区出现呈南北走向的雷暴回波短带时,回波在移动中不断出现合并现象和回波强度达到 55 dBz 时,极有可能出现雷雨大风、强雷电、强降水和冰雹等灾害性天气。

2 混合大风

由冷锋触发产生的雷暴回波带和锋后梯度风产生的冷空气大风混合在一起的大风天气叫混合大风天气。冷锋触发产生的雷暴回波带系统随冷锋移动,沿途伴有雷雨大风、强降水、强雷电和冰雹等灾

害性天气,大风过境后紧接着出现锋后梯度风产生的持续性冷空气大风,中间没有转南风的过程,具有雷雨大风和冷空气大风共同的特点。

研究分析表明,混合大风回波系统在 1976—1987 年春季只发生过 7 次,占整个对流风暴回波系统的 7.8%,且都发生在北支槽前形势下。混合大风站次高达 234 站次,平均每次过程 33.4 站次(不包括 25 站次冰雹和 12 站次强降水)。混合大风主要沿北路从长江河谷口自北向南侵入江西,其大风的分布受赣江河谷地势的影响,具有明显的特点。混合大风的年际分布、月旬分布和日变化都没有明

显的规律,可以发生在春季任一句中和一天当中任一时段里,其持续时间约为 10 小时,最长可达 15 小时。由于雷雨大风、强雷电、强降水和冰雹等强对流天气与冷空气大风混在一起,往往影响面大、范围广,造成的灾害十分严重。

混合大风有两种不同回波带形式:Ⅰ型雷暴回波带和Ⅱ型雷暴回波带。

2.1 Ⅰ型雷暴回波带

由冷锋前东西向的 850 hPa 切变线触发产生的Ⅰ型雷暴回波带,当与冷空气叠加在一起南下时,往往造成江西大范围的混合大风天气。例如:1981 年 5 月 2 日强对流天气过程<sup>[22]</sup>。

Ⅰ型雷暴回波带的形成与演变在卫星云图上表现十分清楚(图略)。Ⅰ型雷暴回波带是一单纯雷暴回波带,锋前没有对流天气产生,带上雷雨大风天气和锋后冷空气大风天气相配合,先后产生大风天气,这一特点与飑线系统不同。

图 6a 是 1981 年 5 月 2 日全省大风分布。可见,全省大部分县站受到大风的侵袭,最大风力达  $26\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,因风灾造成赣江、鄱阳湖水面上翻沉船 104 只,这在历史上都是罕见的。除大风外,全省有 14 处降雹,22 处记飑和两个大暴雨( $>100\text{ mm}/12\text{ h}$ )中心(图略)。强对流天气主要分布在赣北和赣中,其中冰雹和飑发生在 14 时前,暴雨却主要发生在 14 时以后。从天气活动特征上看主要有两个特点:

(1) 影响范围广、持续时间长。大风最早出现在瑞昌(09:18),最晚出现在南康(19:16),自北向南扫过江西省历时 10 小时。

(2) 大风从九江葫芦口灌入鄱阳湖盆地后,沿着赣江河谷向两边山区成扇形散开,河谷中大风比两边山区提前 1~2 小时,风向近似河谷走向,风力更大一些。分析  $\Delta T_{24}$  变温图可知(图略),14 时  $\Delta T_{24}$  降温中心在南昌( $-14.2^{\circ}\text{C}$ ),20 时  $\Delta T_{24}$  降温中心在峡江( $-14.6^{\circ}\text{C}$ ),说明冷空气是沿赣江河谷低洼地形南下的。

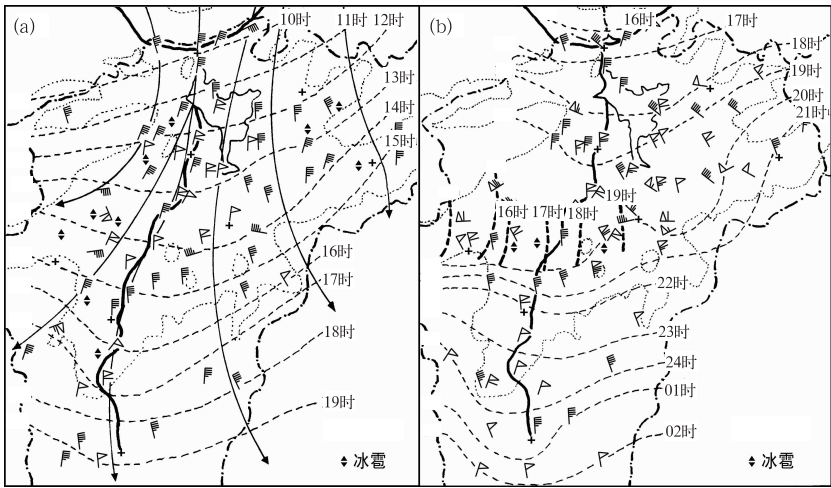


图 6 两次混合大风天气过程灾害分布图  
(a) 1981 年 5 月 2 日; (b) 1983 年 4 月 28 日

Fig. 6 Disaster distribution due to two processes of mixed strong winds  
(a) the distribution on May 2, 1981, (b) the distribution on April 28, 1983

2.2 Ⅱ型雷暴回波带

当与冷锋相伴随的Ⅱ型雷暴回波带南下时,在锋前暖区有利地形条件下,会触发产生对流回波。这些对流回波在有利的层结和环境条件下,常发展成局地雹云。由于暖区雹云回波系统的移向与Ⅱ型雷暴回波带的移向不一致,两种回波系统发生辐合运动,十分有利于强对流天气的产生。这种情况与飑线回波系统中的回波辐合现象十分相似,所不同

的是:(1)Ⅱ型雷暴回波带中单体排列并不紧密,呈点状不连续带结构,而飑线回波是紧密的强回波带。(2)Ⅱ型雷暴回波带过境后紧跟着是大范围冷空气大风天气。例如:1983 年 4 月 28 日混合大风天气过程(图 6b),江西大部分地区受冷空气大风和雷雨大风、冰雹等侵袭,最大风力达  $32\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。Ⅱ型雷暴回波带的活动特征有两点:

(1) 大风分布特点与 1981 年 5 月 2 日过程相似,表明冷空气沿赣江河谷南下具有明显地形特征。

不同之处在江西中部西部走廊出口处下方,出现两次局地强对流天气系统活动,造成较大范围雷雨大风、强雷电、强降水和冰雹天气。这两次系统是在Ⅱ型雷暴回波带南下时,随着午后地表温度的升高,在锋前武功山和西部走廊地形的影响下产生的。

(2)Ⅱ型雷暴回波带的形成除与冷锋触发生有关外,还与当地环境条件关系密切。13 时Ⅱ型雷暴回波带呈点状不连续带结构,主要在长江以北(图略)。15 时随着冷锋的南压,点状不连续回波带也南压,与此同时,在宜春东北部有对流回波发展且向东北方移动。17 时Ⅱ型雷暴回波带继续南压,宜春地区对流回波发展旺盛,且在东移中与冷锋回波带交汇。这种交汇使Ⅱ型雷暴回波带上局部地方发展加强,因而产生强对流天气。由多部雷达探测的Ⅱ型雷暴回波带长达千余千米(图略),仍呈点状不连续回波带结构。

由此可见,具有辐合运动的Ⅱ型雷暴回波带造成的强对流天气,与Ⅰ型雷暴回波带有两点不同:(1)Ⅱ型雷暴回波带与暖区对流回波系统发生辐合运动,造成江西中部较大范围雷雨大风、强雷电、强降水和冰雹天气,随后出现大范围冷空气大风天气。(2)Ⅱ型雷暴回波带呈点状不连续回波带结构,与紧密排列的Ⅰ型雷暴回波带结构不同。

### 3 无降水致灾大风

在江西历史气象记录中,经常会记录到突发性大风天气现象,尤其是在鄱阳湖水域和长江流域,一阵狂风把货船吹翻,事发之后竟然找不到天气原因。查看地面观测资料,只有大风记录而没有降水记录,雷达上也反查不到与出现致灾大风时间和地点相对应的回波系统。这种突发性大风天气现象,很难收集天气资料,也很难用雷暴大风形成理论来解释。

无降水致灾大风顾名思义就是没有降水而能出现致灾的大风。它与无雷暴系统伴随的冷空气偏北大风、台风外围环流偏东大风和西南气流偏南大风有所不同,就是无降水致灾大风是由雷暴系统下沉气流触产生的。2009 年 6 月 5 日观测到一次较完整的无降水致灾大风天气过程<sup>[23]</sup>。

#### 3.1 大风分布和气象要素结构

2009 年 6 月 5 日 23:10 至 6 日 00:51,江西九江地区自东向西出现持续 76 min 较大范围的致灾

大风天气,十多个站次出现大于  $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  大风,给局部地区造成了严重的灾害,其中长江一艘货轮遇强风而倾覆(图 7)。

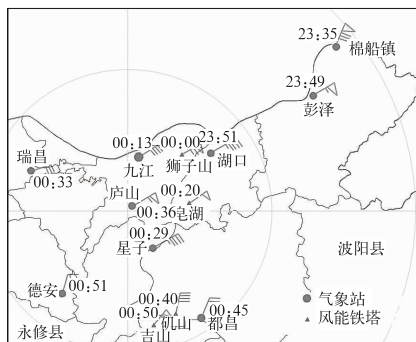


图 7 2009 年 6 月 5 日江西九江  
无降水致灾大风分布图  
(图中数字为北京时间)

Fig. 7 The distribution of disastrous  
winds without precipitation in Jiujiang,  
Jiangxi on June 5, 2009

可以看出,致灾大风 5 日 23:35 从彭泽县棉船镇开始,瞬间风速达到  $31.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,彭泽站 23:49 风速达到  $21.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,途经下游湖口、九江、庐山、星子等地,几乎所经之地都出现  $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上大风。6 日 00:51 在德安县结束,历时 76 min。

利用九江地区 8 个县市 1 min 自动气象站数据和狮子山、皂湖、吉山和矾山风能观测数据计算出来的 5 要素曲线图(图略),可以看出,无降水致灾大风的风场、气压、温度、湿度和降水曲线具有与雷暴大风不同的特点。

最早出现大风的是彭泽县,大风来时风向突转,风速开始加大到  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时维持;23:50 左右,风速有个脉冲波动达  $21.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;大于  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的风速维持了近 1 小时(23:30—00:30),其他站点风速变化特征大致相同。气压在 993~1000 hPa 之间波动(庐山站由于是高山站,气压在 880 hPa 左右波动),走势比较平稳,没有雷暴“高压鼻”现象出现。大部分站点都有明显降温现象出现,降温最大是庐山( $5\sim 6^\circ\text{C}$ ),表明无降水致灾大风空气温度比外界环境空气温度低。大部分站过境时湿度明显下降,表明无降水致灾大风空气湿度比外界环境空气湿度小。在上述气象站降水自记上没有出现降水记录。

由此可见,无降水致灾大风是中高层干冷空气下沉造成的,过境时并不伴随降水,气压平稳,温度和湿度明显下降,瞬间风速可达 12 级,大于  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  值风速能维持几十分钟甚至 1 小时以上时间。

3.2 基本天气形势背景

6月5日08、14和20时,500 hPa高空图上(图略),天气系统为两槽一脊型,高层有明显干冷平流,低层盛行西南气流,符合产生强对流天气的潜势条件<sup>[24]</sup>,属于东北冷涡型强对流天气过程<sup>[25]</sup>。

6月5日20时随着高空低槽东移,925 hPa出现“S”型波状辐合线(切变线),在沿辐合线附近的安徽到浙江北部形成了强辐合区,其北侧的南京和杭州偏北风分别达到20和16 m·s<sup>-1</sup>,安徽境内强飏线天气就发生在925 hPa波状辐合线上。

20时地面图上,雷暴高压中心最大 $\Delta P_3$ 在安徽定远,达到+10.3 hPa;23时,雷暴高压中心继续向南移动,安徽安庆 $\Delta P_3$ 也达到+9.6 hPa。整个雷暴高压和 $\Delta P_3$ 变压区形成西北—东南走向的高压(变压)带,与地面冷锋、925 hPa辐合线相对应。分析表明,强盛的雷暴高压是安徽强飏线系统所致,在飏线系统向南移动中,其雷暴下沉气流和变压梯度风的共同作用,造成安徽境内大范围雷雨大风等强对流天气,也为江西这次无降水致灾大风天气的发

生埋下伏笔。

3.3 MCS 演变特征

从6月5日20时红外云图、500 hPa高度场、925 hPa风场叠加图上可以看出(图略),MCS发生在500 hPa东北冷涡槽后和内蒙古一带的西风槽前的925 hPa波状辐合线上。由于500 hPa槽后西北干冷气流位于低层暖湿平流之上,形成对流不稳定形势,低层具有强烈辐合,为MCS强烈发展创造了良好的环境条件。

图8给出MCS的演变过程。6月5日17时,内蒙古一带是500 hPa西风带槽线云系,长江流域沿925 hPa辐合线上,产生若干对流单体组成的中尺度对流云团,结构较松散,但对流单体强度较强,安徽开始出现强对流天气。同时,在这些中尺度对流云团西南侧有新生对流云团发展。18时,西南侧对流单体开始合并,19时发展成为紧密的MCS,云顶亮温区十分明显,开始造成安徽境内大范围强对流天气。19—22时,MCS维持少变,23时后MCS开始分裂不断减弱,云顶亮温区已逐渐消散。

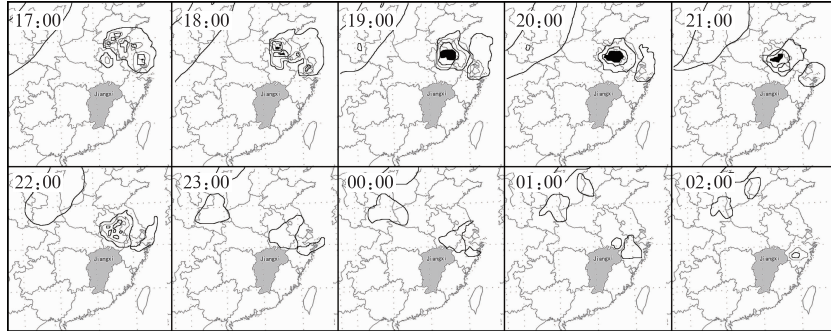


图 8 2009 年 6 月 5 日 17 时至 6 月 6 日 02 时逐小时 MCS 动态演变示意图  
Fig. 8 MCS dynamic evolution from 17:00 BT 5 June to 02:00 BT 6 June, 2009

雷达回波分析表明,最强回波单体出现在 MCS 移动方向的右后侧,即 MCS 西南侧,对流单体呈线状排列的强飏线回波,走向与 MCS 的移向基本一致。23 时后,在 MCS 消散期间,东北冷涡槽后干冷气流经 MCS 混合后产生强烈的下沉气流,并向地面辐散,为这次无降水致灾大风天气提供了有利的动力条件。

综上分析,MCS 是在有利天气系统的配置下产生,并造成安徽境内大范围强飏线天气。在 MCS 减弱消散阶段,雷暴中强大的下沉气流向下倾泻,形成一种触发机制携带中高干冷空气下沉,在强变压梯度风的共同作用下,造成江西九江地区这次无降水致灾大风天气。

3.4 安徽飏线回波

分析南昌多普勒天气雷达观测资料可知(图 9),6 月 5 日 22:08,在江西北部皖南 MCS 对流云团移动方向的右后侧(西南侧)是一条排列紧密、窄而长的飏线回波带,这条飏线回波带基本上沿对流云团移动方向移动。23:09,飏线回波带开始减弱,并继续向东南方向移动。23:40,回波带继续减弱,在回波带西侧尾端处 30~40 km 处出现窄带回波。6 月 6 日 00:01,回波带继续在向东南方向移动中减弱分裂,00:59 回波开始消散。与此同时,九江多普勒天气雷达也观测到这次过程(图略)。

根据图 9 所示,安徽南部飏线回波带 5 日 22:08

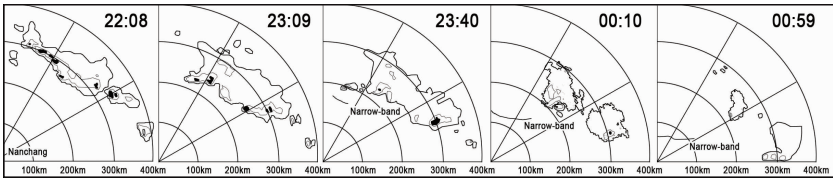


图 9 2009 年 6 月 5 日 22:08 至 6 日 00:59 雷达回波演变图  
南昌雷达,每圈 100 km

Fig. 9 The evolution of radar echo from 22:08 BT 5 June to 00:59 BT 6 June, 2009  
Nanchang radar, each circle denotes 100 km

以前就已经形成,强度达到 60 dBz,造成安徽境内连续出现雷雨大风、强雷电和强降水等强对流天气,这时江西北部九江地区却晴空无云。5 日 23:35 至 6 日 00:51,历时 76 min 的致灾大风横扫九江大部区域,没有降水出现,雷达上只是出现细长的窄带回波。当时难以识别这种窄带回波会出现致灾大风,因为这种致灾大风不像雷雨大风那样具有明显的飑线或雷暴回波结构,也不像混合大风那样具有雷暴回波带和强冷空气锋区结构。

3.5 雷达窄带回波

在雷暴消散阶段,由于强烈的下沉辐散气流把中高干冷空气带到地面,并向四周辐散冲击,这种下沉的干冷空气和环境场暖湿空气形成一个不连续面(称为雷暴的出流边界或阵风锋),当这种不连续面达到一定程度时,就会发生大气折射率的改变,引起电磁波的散射,被雷达所接收形成窄带回波。这种窄带回波常常成为强对流天气的触发机制和引发大风天气,合肥雷达就观测到一次干冷锋窄带回波,随后窄带回波与边界层辐合线相遇,产生对流风暴发展成强对流天气过程的例子<sup>[7]</sup>。在历史个例分析中也探测到这种窄带回波<sup>[26]</sup>。

图 9 中 23:40 观测到的窄带回波(“narrow-band”处),显示出强大雷暴出流边界。23:46 雷达反射率因子和雷达径向速度场上都有明显的窄带回波特征(图略)。窄带回波反射率因子在 2~18 dBz,径向速度在-5~5 m·s<sup>-1</sup>,窄带宽度 5 km 左右,窄带长度 60~70 km,呈线性弧状。这种窄带回波凭单张雷达回波图是很难辨别出的,往往容易忽视,采用雷达回波图连续动画显示,就可以清楚辨别出窄带回波所在位置及移动路径。

从雷达反射率因子与径向速度场图上可以看出:(1)窄带回波所经之地对应地面是大风天气,窄带回波位置与大风出现时间基本同步。(2)窄带回波移速随时间推移而减弱。6 月 5 日 23:35,窄带回波移速很快,移速达到 110 km·h<sup>-1</sup>,风速达到 31 m·s<sup>-1</sup>。23:49,移到彭泽县时,移速为 90 km·h<sup>-1</sup>,风速达到 22 m·s<sup>-1</sup>。6 月 6 日 00:20,移到皂湖(风能铁塔)时,移速下降到 80 km·h<sup>-1</sup>,风速达到 20 m·s<sup>-1</sup>。00:45 之后,移速迅速下降,移过都昌县时移速减为 30 km·h<sup>-1</sup>,风速只有 8 m·s<sup>-1</sup>。最后窄带回波移到新建县附近消散。

由此可见,根据带回波移动速度可以定性判断地面大风级别,移速快风力大,移速慢风力小。另外,这次窄带回波过境时阵风突起,风力≥17 m·s<sup>-1</sup>,气压变化不大(没有高压鼻),温度和湿度同时急速下降,这些特征与其他雷暴天气有明显不同。

3.6 无降水致灾大风与阵风锋的区别

飑线(弓状回波)带、超级单体等雷暴回波系统,在其移动前方经常出现出流边界造成的阵风锋。阵风锋和下击暴流都是雷暴系统强烈下沉气流造成的,并伴随雷暴系统移动而产生雷雨大风等强对流天气。阵风锋是雷暴出流与环境空气的边界,不一定每次阵风锋都产生致灾大风,只有发展成下击暴流时才会产生致灾大风。

无降水致灾大风也是由雷暴消散时下沉气流产生的,虽然形成机制与阵风锋、下击暴流比较相似,但形成后雷暴快速消亡、过境气象要素变化和风场结构都与阵风锋不同(表 1)。

无降水致灾大风是一种空气密度流,由雷暴消散时的下沉气流触发产生后,就携带中高层冷空气

表 1 阵风锋与无降水致灾大风的要素对照表  
Table 1 Meteorological element contrast between the gust front caused  
disastrous winds and the disastrous winds without precipitation

| 要素      | 风向风速      | 气压        | 温度 | 湿度 | 降水      | 移动            |
|---------|-----------|-----------|----|----|---------|---------------|
| 阵风锋     | 风向突变,风速加大 | 上升,有“高压鼻” | 下降 | 上升 | 有雷雨或强降水 | 随雷暴系统移动、生消    |
| 无降水致灾大风 | 同上        | 平稳        | 同上 | 下降 | 无降水     | 生成后摆脱雷暴系统惯性移动 |

动能下传,加上地面 3 小时变压产生的气压梯度风等因素,使下沉气流十分强大。无降水致灾大风产生后以每小时百千米的速度快速摆脱雷暴母体,尽管雷暴母体都已消散,它仍然独自惯性移动并继续影响下游数百千米范围。

4 结论与讨论

江西三类致灾大风天气系统中,最为频繁和影响最大的是雷雨大风天气,在雷达回波上主要由飑线回波(弓状回波)带、超级单体与复合体回波、南北向回波短带和台风低压环流暴雨带等回波系统组成。这些回波系统除出现雷雨大风天气外,还伴有强雷电、强降水、冰雹和龙卷等灾害性天气出现。

混合大风天气在雷达回波上有两种类型:Ⅰ型是冷锋前东西向 850 hPa 切变线触发产生的雷暴回波带,产生与雷雨大风天气相似的系列强对流天气。Ⅱ型是冷锋直接产生的雷暴回波带与锋前暖区局地强对流回波系统作辐合运动,使强对流天气更加激烈。Ⅰ型和Ⅱ型雷暴回波带都有共同的特点,就是雷暴过境后紧接着出现大范围冷空气大风,并影响江西大部地区。

无降水致灾大风天气在雷达回波上表现为北部有强飑线回波系统路过,云图上表现为 MCS 结构。在飑线回波系统减弱消散期,强大下沉气流成为触发机制,携带中高空冷空气动能下传,加上  $\Delta P_3$  变压风的影响,使得这股下沉气流达到极致形成密度流,并凭借自身惯性向前移动,造成沿途致灾大风天气。在无降水致灾大风密度流的前沿,雷达回波上可以观测到窄带回波特征,从反射率因子和速度场上都有明显反映。根据窄带回波的移动速度,还可以定性估算致灾大风的风速,这在实际预报分析中十分有用。

到目前为止,无降水致灾大风天气的个例很少,随着 CINRAD 雷达网和中尺度自动气象站网的建立,这一类天气的监测和研究会更加细致和深入。值得讨论的是:要深入和细致地研究致灾大风天气的机理,雷达网数据的同步十分重要,它涉及到雷达的统一授时<sup>[27]</sup>、雷达同步观测技术<sup>[28]</sup>和雷达数据的质量控制<sup>[29]</sup>等方面内容。

本文使用了 CINRAD 之前的 711 和 713 两种类型的天气雷达资料,虽然当时没有速度场等产品支持,但从定性角度分析就反射率因子来讲,弥补了 CINRAD 历史资料不足。历史资料的回波系统的演变对研究天气系统的活动规律十分有用。

参考文献

[1] 钱传海,张金艳,应冬梅,等. 2003 年 4 月江西一次强对流天

气过程的诊断分析[J]. 应用气象学报, 2007, 18(4):460-467.

[2] 慕熙显,党人庆,陈秋萍,等. 一次飑线过程的雷达回波分析与数值模拟[J]. 应用气象学报, 2007, 18(1):42-49.

[3] 王彦,吕江津,王庆元,等. 一次雷暴大风的中尺度结构特征分析[J]. 气象, 2006, 32(2):75-80.

[4] 何彩芬,姚秀萍,胡春蕾,等. 一次台风前部龙卷的多普勒天气雷达分析[J]. 应用气象学报, 2006, 17(3):370-375.

[5] 殷占福,郑国光. 一次强风暴三维结构的观测分析[J]. 气象, 2006, 32(9):9-16.

[6] 刘娟,朱君鉴,魏德斌,等. 070703 天长超级单体龙卷的多普勒雷达典型特征[J]. 气象, 2009, 35(10):32-39.

[7] 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[J]. 应用气象学报, 2006, 17(4):385-393.

[8] 吴芳芳,王慧,韦莹莹,等. 一次强雷暴阵风锋和下击暴流的多普勒雷达特征[J]. 气象, 2009, 35(1):55-64.

[9] 马中元,张幼兰,应冬梅,等. 江西省强对流天气雷达回波的统计[J]. 江西气象科技, 1985, 8(5):4-8.

[10] 马中元,张幼兰,应冬梅,等. 江西省强对流天气的雷达气候统计[M]//运用雷达作强对流天气短时预报研究文集,北京:气象出版社,1990:79-84.

[11] 曹艳华,马中元,叶小峰,等. 江西外来飑线的常见卫星云图特征[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(4):54-59.

[12] 马中元,汪润清. 一次中小尺度雷暴系统的回波分析[J]. 江西气象科技, 1981, 4(6):1-7.

[13] 马中元,张幼兰. 中尺度地形辐合线与强对流天气[J]. 江西气象科技, 1986, 9(2):50-52.

[14] 马中元,方维之. “86. 4. 24—25”强对流天气过程分析[J]. 江西气象科技, 1987, 10(2):31-34.

[15] 马中元,张幼兰,叶瑞珠,等. 雷达带状回波的几种演变形式[J]. 江西气象科技, 1988, 11(4):28-29-36.

[16] 马中元,许爱华,陈云辉,等. 江西灾害性强雷电天气的雷达回波特征分析[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(5):16-23.

[17] 俞小鼎,姚秀萍,熊延南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社, 2006:273-281.

[18] 陈良栋. 伴有地面大风的弓状回波带[M]//运用雷达作强对流天气短时预报研究文集,北京:气象出版社, 1990:45-49.

[19] 马中元. 飑、飑线与雹云[J]. 江西气象科技, 1984, 7(3):67-70.

[20] 马中元,张幼兰,林景辉. 赣中暖区雹云的几种类型[J]. 江西气象科技, 1989, 12(1):37-40.

[21] 马中元,张瑛,马晓琳,等. 江西对流风暴的触发系统与形成机制探讨[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(3):19-26.

[22] 马中元. 一次锋前雷暴带的形成与演变[J]. 江西气象科技, 1983, 6(5):1-6.

[23] 马中元,许爱华,贺志明,等. 九江地区一次无降水致灾大风天气过程分析[J]. 气象与减灾研究, 2009, 32(3):52-56.

[24] 许爱华,詹丰兴,刘晓晖,等. 强垂直温度梯度条件下强对流天气分析与潜势预报[J]. 气象科技, 2006, 34(4):376-390.

[25] 吴义红,王龙学,张丽. 岳西初夏两场冰雹特征对比分析[J]. 气象与减灾, 2009, (4):17-19, 43.

[26] 杨玉春,马中元. 一次窄带回波观测实例浅析[J]. 江西气象科技, 1983, 6(1):45-46.

[27] 马中元,朱春巧,王华军,等. GPS—Net 授时系统在气象业务中的应用[J]. 气象, 2010, 36(4):135-139.

[28] 马中元,朱春巧,陈云辉,等. CINRAD 雷达同步观测技术思路与实践[J]. 气象水文海洋仪器, 2009, 26(4):1-6.

[29] 马中元,朱春巧,刘照明,等. CINRAD 雷达数据质量控制方法初探[J]. 气象, 2010, 36(7):143-150.