

崔春光,王晓芳,付志康. 2013. 多源探测资料在一次非线性 MCS 分析中的综合应用. 气象, 39(5):556-566.

多源探测资料在一次非线性 MCS 分析 中的综合应用^{*}

崔春光 王晓芳 付志康

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

提 要: 用多种加密观测资料和 NCEP 日再分析资料分析了 2010 年 7 月 14 日强降水期间咸宁地区一次非线性 MCS 活动造成短时强降水的发生发展机制。结果表明, 14 日 13—18 时非线性 MCS 回波结构组织性差, 强对流单体散乱地分布在大片层状回波中, 准静止地维持在湖北咸宁地区大约 5 h, 造成了短时强降水。该 MCS 发生在梅雨锋锋面附近的地面涡旋环流中, 高空冷空气侵入和锋前抬升运动是对流的主要触发机制, 切变线南侧不稳定的暖湿气流在长江中游地区辐合集中、局地的地面气流辐合和边界层有利的风切变是该非线性 MCS 发展维持在咸宁地区的有利条件。高时空分辨率探测资料对 MCS 演变过程有较好的分析能力。

关键词: 加密观测资料, 梅雨锋, 中尺度对流系统, 发展机制

中图分类号: P458

文献标识码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.05.003

Synthetic Application of Multiple Intensified Observation Data in the Analysis of Nonlinear Mesoscale Convective System

CUI Chunguang WANG Xiaofang FU Zhikang

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

Abstract: Using multiple intensified observation data and NCEP daily reanalysis data, the development mechanism of a nonlinear mesoscale convective system (MCS) that caused a short-time severe rainfall in Xianning City on 14 July 2010 is analyzed. The results show that the organization of nonlinear MCS is poor during 13:00—18:00 BT 14 July 2010. The strong convective cells are disorderly distributed in big stratiform echoes, keeping the quasi-stationary front staying over Xianning about 5 h, and thus leading to the short-time severe precipitation in Xianning. The nonlinear MCS generates in a surface vortex circulation near Meiyu front, and the convections are triggered primarily by upper cold air and lifting motion in front of the front. The favorite ambient conditions for the nonlinear MCS to maintain and develop are the convergence and concentration of unstable warm moist airflow on the southern side of the shear line over the middle reaches of Yangtze River, the mesoscale convergence of surface local airflow and the favorable wind shear of boundary layer. In general, the high spatial-temporal resolution observation data can be well applied in analyzing the MCS evolution process.

Key words: intensive observation data, Meiyu front, mesoscale convective systems (MCS), development mechanism

* 国家自然科学基金项目(40930951 和 41105072)、灾害天气国家重点实验室开放课题(2010LASW-A04)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106003 和 GYHY200906010)及科技部科研业务项目(1101 和 1201)课题共同资助

2012 年 5 月 16 日收稿; 2012 年 11 月 30 日收修定稿

第一作者: 崔春光, 主要从事数值预报和暴雨动力学研究. Email: cgcu@whhr.com.cn

引言

2010年夏季首先我国南方经历了14次持续性强降水过程(王遵娅等,2010;王晓芳等,2010a;2011a),进入7月后持续性强降水停滞在长江流域,是进入21世纪以来气候最为异常的一年。针对2010年7月长江流域梅雨期异常强降水天气,其必然对应大气环流的异常分布。贾小龙等(2011)分析2010年海洋和大气环流异常对中国气候的影响,总结了西太平洋副热带高压脊线位置出现了阶段性异常特征和中高纬阻塞高压异常形势及其它们对夏季降水异常的关系。徐双柱等(2012)分析了2010年7月7—15日长江流域梅雨期暴雨天气,主要关注了梅雨锋不同时段中尺度对流系统的特征。尽管是在有利的大尺度环流背景下,梅雨期梅雨锋上的降水却有多个强降水中心,降水分布并非均匀化,说明降水强度不仅与天气尺度条件有关,还与局地气象条件有密切关系。中尺度对流系统(MCS)是造成强降水发生的直接影响系统,黄美元等(1984)对梅雨锋雷达回波进行了统计分析,指出锋区北侧几乎为层状云回波,锋区多数为层状云和对流云并存的混合云回波,锋区南基本上是对流云回波,大部分暴雨程度降水在锋区出现。

近年来随着加密自动站时空分辨率提高和雷达布网改进,越来越多的气象学者(王令等,2012;代刊等,2010;张家国等,2010;孙军等,2011)用加密观测资料分析 MCS 雷达回波的结构和演变特征、发生的环境条件,得到了有意义的结果。王令等(2012)具体地比较了两个突发性 MCS 个例在水汽输送条件、中低层的动力条件、冷空气侵入等方面的天气尺度条件,特别是雷达回波上 MCS 的移向移速、风廓线雷达资料中水平风垂直廓线结构等方面分析应用,进一步提高了运用高时空分辨率资料作短时突发性对流性暴雨的预报能力。翟菁等(2011)用雷达等观测资料分析 2009 年 6 月 14 日引发冰雹大风的两个强 MCS 演变过程中的对流云合并现象,指出不论是单体间的合并还是对流系统间的合并,合并后单体或对流系统都有显著的增强,对流单体的合并是单体自身的出入流和环境引导风共同作用的结果。张旭碱等(2011)数值模拟研究了一次特大暴雨过程中 MCS 的生成、合并过程,认为正涡度导致的低层辐合与大气静力不稳定都是重要的 MCS 启动机制;

MCS 形成后,在强垂直切变的环境中,倾斜抬升机制发生作用,更进一步加强了环境涡度,形成有利的正反馈过程,造成 MCS 迅速发展;这些加强的 MCS 和大尺度环境流场相互作用,造成了它们的合并。

2010年6—7月武汉暴雨研究所在湖北咸宁站开展了强天气过程 GPS 加密探空、风廓线、微波辐射计等监测,获得了重要暴雨过程高时空的观测资料。针对2010年梅雨锋上多 MCS 活动,造成降水量大而集中,这里以咸宁地区14日发生的一非线性 MCS 过程,来具体分析该次 MCS 活动的演变及其触发机制。

1 多源探测资料简介

武汉暴雨研究所暴雨监测外场试验基地以全面提升中小尺度暴雨系统观测能力为中心目标,依托气象业务观测设施天气雷达、业务高空探空站、自动气象站、雨量站等多种常规观测设备,以高空探测系统、边界层探测系统、高密度 GPS/MET 水汽监测网、云观测系统、强降水过程宏观特征观测系统、高山梯度气象观测系统为重点对象,架设各种先进气象探测设备,包括:车载和移动双偏振多普勒天气雷达、车载毫米波测云雷达、边界层风廓线雷达、GPS 移动探空系统、35 通道微波辐射计、地基 GPS/MET 站、激光雨滴谱仪,大气边界层梯度观测塔、神农架高山梯度气象观测网,对长江中游暴雨天气系统的风场、水汽场、降水场、云和降水粒子相态分布进行综合观测。部分观测设备分布如图 1 所示,图 1 阴影区为本文分析区域。

本文分析中应用资料有:FNL $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 一日 4 次再分析场、区域雷达拼图组合反射率、风廓线雷达观测风、微波辐射计湿度、GPS 探空大气可降水量、地面加密观测逐小时风、温度、露点等。

2 2010年7月14日降水过程简介

2010年梅雨期长江中下游地区入梅偏晚,7月初 500 hPa 副热带高压脊线北跳至 22°N 附近,并稳定地维持、略有南北摆动,随之雨带在长江流域徘徊,长江中下游各地陆续入梅,湖北省 7 月 5 日入梅。7 月 8—15 日为长江中下游地区梅雨期集中降水时段,过程雨量大,降水中心雨量高达 596.6 mm (江夏站),历史少见。强降水持续时间为近 20 年来

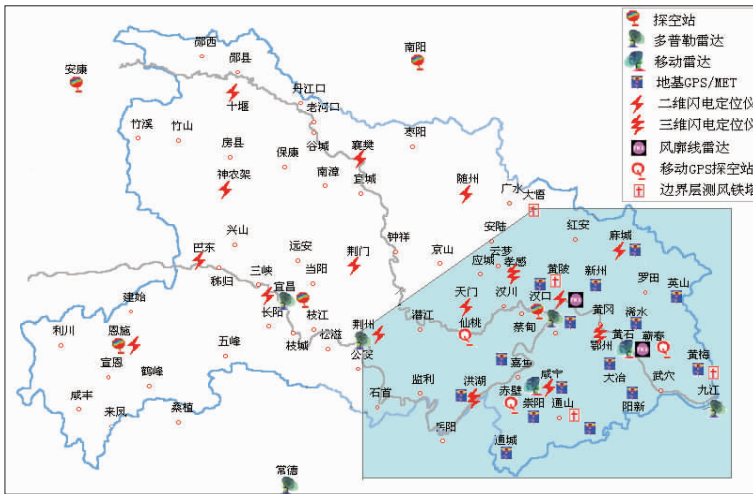


图 1 湖北省观测网

Fig. 1 Observation net in Hubei Province

最长,仅次于 1991 和 1964 年,历史并列第三。强降水区域集中,长江中游地区鄂西南至西北、鄂东、江汉平原南部、皖南地区反复遭受强暴雨袭击。极端强降水事件多,湖北省武汉市江夏区和英山县、安徽省安庆市等地多站出现多时段降水接近或破历史极值。

7 月 8—15 日持续强降水期间,长江流域每天都出现一条强降水雨带,如 7 月 14 日 08 时至 15 日 08 时暴雨带呈东西向位于湖北东南至江西北部、安徽南部和浙江北部(图 2),其中湖北东南部和江西北部大暴雨。

西交界处(也即是长江中游地区)受高压后部偏北气流影响(图 3a 中方框区域),同时也是沿海大槽底

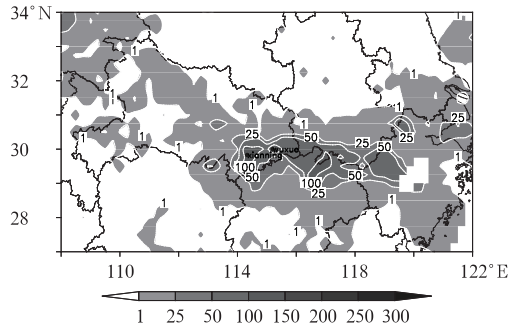


图 2 2010 年 7 月 14 日 08 时至 15 日 08 时降水量(单位:mm)

Fig. 2 Rainfall amount (unit: mm) from 08:00 BT 14 to 08:00 BT 15 July 2010

3 天气形势

7 月 14 日 08 时 588 线西伸至 108°E 以西,北侧已到河南和陕西省南部,而在湖北东部与安徽、江

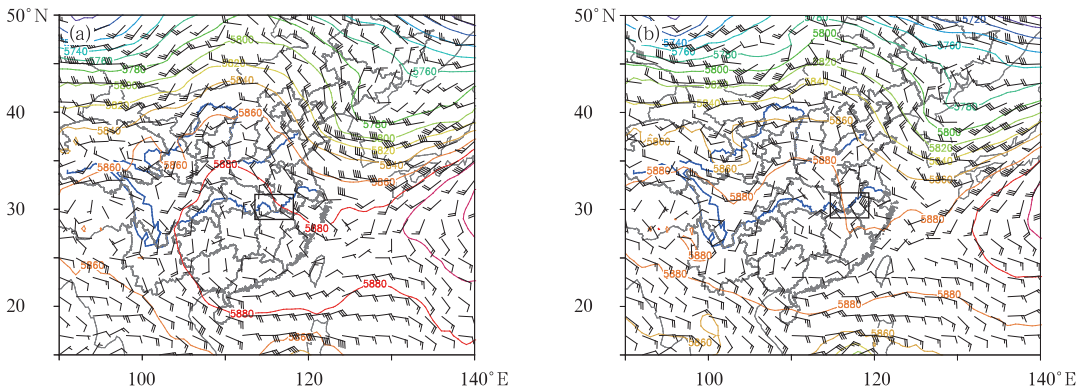


图 3 2010 年 7 月 14 日 08 时(a)和 14 时(b)500 hPa 高度场和风电场

Fig. 3 Height (unit: gpm) and wind (unit: $m \cdot s^{-1}$) fields at 500 hPa at 08:00 BT (a) and 14:00 BT (b) 14 July 2010

部,到 14 日 14 时副热带高压进一步加强,与北部的大陆高压成合并之势,在青藏高原东侧即四川盆地北部至甘肃、青海是低槽,鄂皖赣三省交界处刚好为沿海大槽底部后方显著偏北风区域(图 3b),这样高纬度分裂南下低槽携带的冷空气沿着高压北侧外围气流能连续不断被带至鄂皖赣三省交界地区。

虽然 13—14 日 500 hPa 上长江中游地区是高压环流形势,但在中低层,一条东西向切变线一直维

持着,表现为两个反气旋环流之间西南气流和东北气流形成的切变区域(图 4a)。切变线南侧对应水汽通量大值带(图 4a),自南海和东南沿海水汽随着副热带高压外围偏南气流经湘桂后转为西南气流输送至长江流域;同时在长江中下游地区还表现为水汽通量辐合带,且在湖北的东南部是一个水汽通量辐合大值中心区(图 4b),表明长江中下游地区不仅水汽来源丰沛、水汽通过能力强,且切变线南侧气流

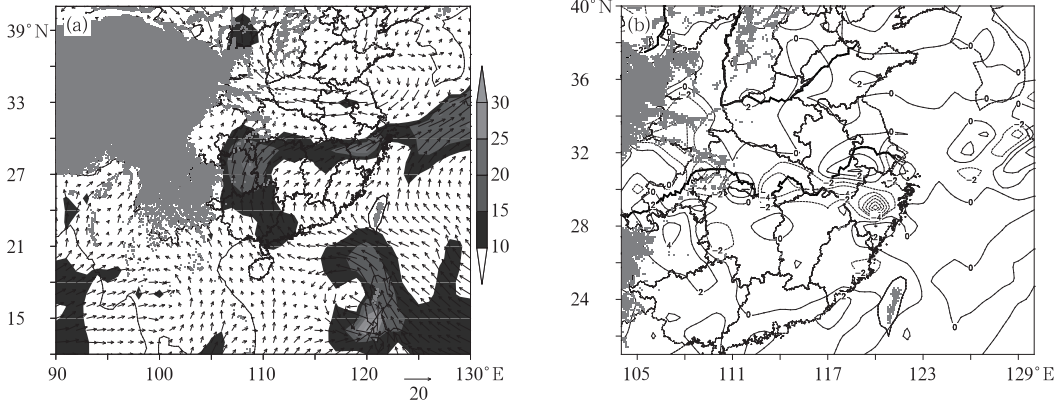


图 4 2010 年 7 月 14 日 08 时(a)850 hPa 风矢量(箭头,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),水汽通量(阴影,单位: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$)和(b)水汽通量散度(单位: $10^{-5} \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,灰色阴影表示地形)
Fig. 4 Wind sector (arrow, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and moisture flux (shaded, unit: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$) (a) and moisture flux divergence (unit: $10^{-5} \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) (b) at 850 hPa at 08:00 BT 14 July 2010 (The gray shaded is terrain)

汇合能让大量通过该地水汽辐合集中。

图 5 给出了 7 月 14 日沿 114°E 物理量垂直分布。相当位温 θ_e 锋区位于 31°N 以北,中低层偏南暖湿气流向北输送至 30°N 附近与北侧偏东气流相遇,并在 30°N 附近表现为比湿线密集,即与 θ_e 锋区一致,锋区南侧是高比湿、高 θ_e 区, θ_e 随高度明显减小,即该区为对流不稳定区。同时在 31°N 附近只有近地层为偏东风,850 hPa 以上均为偏北风,说明对流层中有较深厚冷空气影响,这与图 3 中高压后部偏北风一致。在锋区南侧 30°N 附近是天气尺度的强烈上升运动,直到对流层高层 200 hPa 以上,最强上升运动出现在对流层中低层 800~600 hPa。

由上述可见,14 日湖北东部至皖赣交界区域位于 500 hPa 上 5880 gpm 线内部,但是受高压环流脊前、槽底部偏北气流影响,对流层中低层有一条切变线维持在长江流域,切变线南侧偏南风带来暖湿不稳定气流与高压脊前冷空气在长江中游鄂皖赣接壤处汇集并产生天气尺度强上升运动,这种虽然与

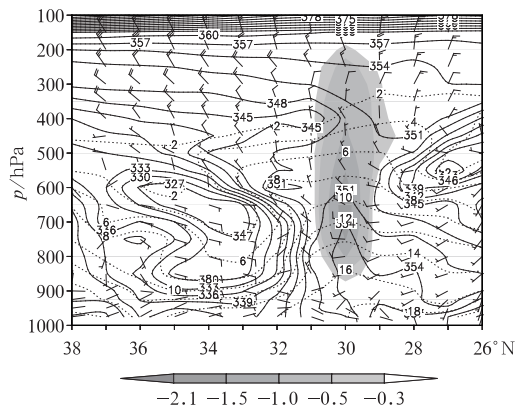


图 5 2010 年 7 月 14 日 08 时沿 114°E 风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),垂直运动(阴影, $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$),比湿(点线, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和相当位温(实线, K)的剖面图
Fig. 5 Meridional vertical sections of wind (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), vertical velocity (shaded, $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$), special humidity (dotted lines, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and equivalent potential temperature (solid lines, K) along 114°E at 08:00 BT 14 July 2010

梅雨期较典型强降水天气形势不同,但仍是有利于系统性大范围强降水天气发生的系统配置。

4 中尺度对流系统的活动

在大范围有利的大尺度背景条件,云带覆盖了整个长江中下游,但强对流云团并非形成大尺度带状,而是只发生在长江中下游局地地区,如皖南和赣北、鄂东南部经历了一次又一次 MCS 活动,导致 2010 年这些地方发生严重洪灾,说明对流发展的强不均匀性,这与局地环境条件密不可分。7 月 14 日在长江中游地区有 4 次 MCS 活动,14 日 13—18 时发生在湖北咸宁地区一次非线性状 MCS,5 个小时咸宁站出现了 86.6 mm 的短时暴雨。

14 日 13 时在鄂皖赣三省交界区域有一较大范围层状回波,其上不均匀地分布了一些强度大于 40 dBz 对流回波,这主要是皖南和赣北地区刚刚经历一次 MCS 活动造成强降水后的残余回波(图 6a)。同时在湖北中西部、湖南有新对流发展并向此成片回波西部靠近,13 时武汉南部有一块强度大于 45 dBz 对流回波移到咸宁附近,与大片层状回波连成一片(图 6a)。随后东部回波随时间减弱,而西部即湖北省东南部咸宁地区的回波却在组织加强,强回波范围变大(图 6b),14 时以后大于 30 dBz 回波很快演变为一密实的强回波团块(图 6c 和 6d),形状为不规则椭圆形,南北长,其周围为大片回波强度较弱的层状回波。强对流单体散乱地分布在大片混合回波中,并局地发展强盛,如图 6c 中位于赤壁站周围强对流,图 6d 中除赤壁站外,在整个回波东部也出现了个别旺盛的强对流单体;15:36 时赤壁南侧发展形成一团大于 45 dBz 的强回波(图 6e),强回波向东伸长。尽管在该 MCS 中可观测到回波单体的新生、发展移动和减弱消亡的过程,但这个不规则的回波系统静止少动(图 6a~6f),5 个小时该 MCS 一直维持在湖北东南部的咸宁地区。随着西侧和西南侧新对流单体的不断并入,系统一直发展加强,且很缓慢地向东南方向扩展。MCS 中强对流回波较少,但引发的小时降水量很大,咸宁站 13—17 时逐小时雨量在 15~24 mm 间。18 时以后该 MCS 减弱很快消亡(图略)。

13—18 时 MCS 中新对流单体大多在系统上游产生,且有多个源地:武汉的南部、江汉平原、湖南的

东北部,故新单体移动方向呈多样性:西南、东和东北方向,南侧新对流单体发展强度明显大于北侧(图 6a~6d),在大片回波中也观察到对流单体局地发展强盛(图 6 中东部强回波)。系统中新旧单体不断地生消更替,绝大多数单体在西侧较强盛地发展,向东移动减弱形成层状回波。强对流回波有时向东倾斜或拉长(图 6d 和 6e)。

14 日 13—18 时 MCS 雷达回波的主要特征为:大片散状回波随时间发展为一个对流回波组织较为混乱的 MCS,对流回波和层状回波没有规律地混合在一起,回波发展区域较集中,演变成一个不规则椭圆形,系统准静止。系统维持期间东部有多个新对流单体产生源地,回波单体沿不同方向移入系统中,发展不均匀。该 MCS 明显不同于回波组织性好的线状回波对流系统,结构不清晰,文献(王晓芳,2010b;2011b)分析的线状 MCS 回波组织性强,对流回波和层状回波演变呈现很强的规律性,而本例 MCS 强对流回波发展看似没有很好的规律性,但是这类 MCS 是长江流域最常见的一类(黄美元等,1984;王晓芳,2012),通常能造成强降水天气,其发生发展机制是科学研究中的难点之一。

7 月 14 日卫星云图上长江中游地区至日本一直维持着绵延数千千米的梅雨锋云带(图略),云带上对流云团此起彼伏,首先在湖北东部—皖南赣北—浙江有两个发展旺盛的对流云团,即两个 MCS 活动(图 7a),这两个 MCS 的对流云团在高空偏北气流影响下缓慢地向东南方向移动,其中一个正好位于湖北东南至江西西北,湖北省武穴市正受其影响,造成了该地强降水天气的发生;此时在湖北中部有少量对流云在发展(图 7a)。到 10 时湖北南部开始有一些 γ 中尺度对流发展,2~3 h 后这些发展的对流形成一个椭圆形较密实的对流云团,停滞在湖北南部咸宁地区(图 7b),与图 6a 中咸宁地区出现成片强回波一致,回波东南方的散状回波对应了图 7b 中正在减弱的大范围对流云团。

14 时 TBB 上展现为一个准圆形云团(图略),云团边界温度梯度较大,云顶温度达到 -75°C 以下,说明云顶很高,云中对流发展旺盛。但在 TBB 图上无法分辨 MCS 中对流回波和层状回波的结构和演变特征,显然卫星云图上 MCS 的结构特征没有雷达回波图上清晰。

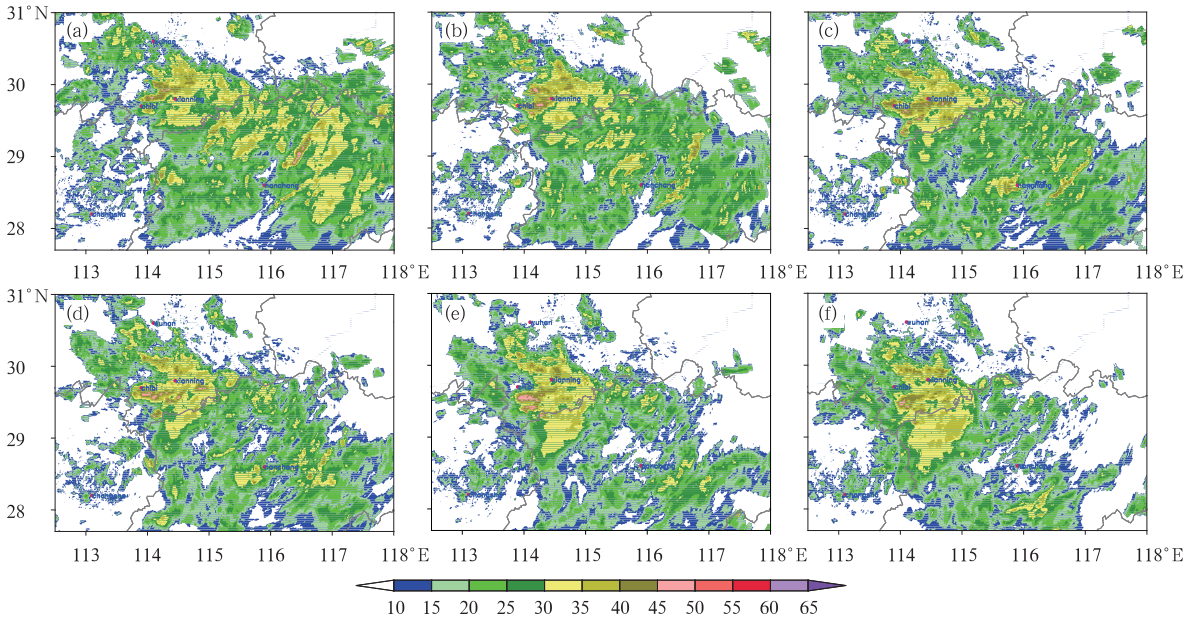


图 6 2010 年 7 月 14 日 13:00—16:24 时 MCS 的雷达组合反射率图像(单位: dBz)

(a) 13:00, (b) 13:48, (c) 14:30, (d) 15:00, (e) 15:36, (f) 16:24

Fig. 6 The composite radar reflectivity (unit: dBz) for the MCS on 14 July 2010

(a) 13:00 BT, (b) 13:48 BT, (c) 14:30 BT, (d) 15:00 BT, (e) 15:36 BT, (f) 16:24 BT

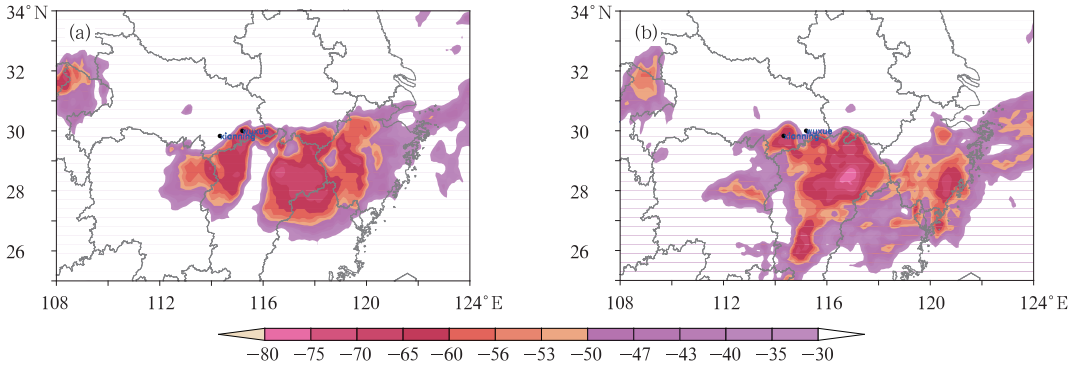


图 7 2010 年 7 月 14 日 FY-2E 的相当黑体亮度温度(单位: °C)

(a) 08:00, (b) 13:00

Fig. 7 The black body temperature (unit: °C) at 08:00 BT (a) and 13:00 BT (b) 14 July 2010

5 MCS 的触发机制

在实际观测中有利天气尺度环境条件控制区域发生降水天气往往有很大差异,并非所有被有利于降水发生条件控制的地区都会有对流发展,这与局地地面和边界层条件是否存在触发强对流机制有关。本节利用高时空分辨率自动站、GPS 探空和水汽观测、风廓线等资料来分析湖北咸宁地区 7 月 14 日 13—18 时一次区域非线性 MCS 活动引发强降

水过程的主要机制。

5.1 地面风场气旋性涡旋环流

14 日 12 时在湖北咸宁地区西侧出现风场切变线(东北风和偏西风,图 8a 中短虚线)和辐合线(西北风和西南风,图 8a 中中虚线),而咸宁地区还有一个南北向风切变区域(图 8a 中圆圈点线区内内地面偏西风 and 偏南风的切变),其后 1 小时在这些小尺度系统的东部出现了 10 多毫米降水(因绘图系统中插值原因,少数几个站点大于 20 mm 的降水未能显

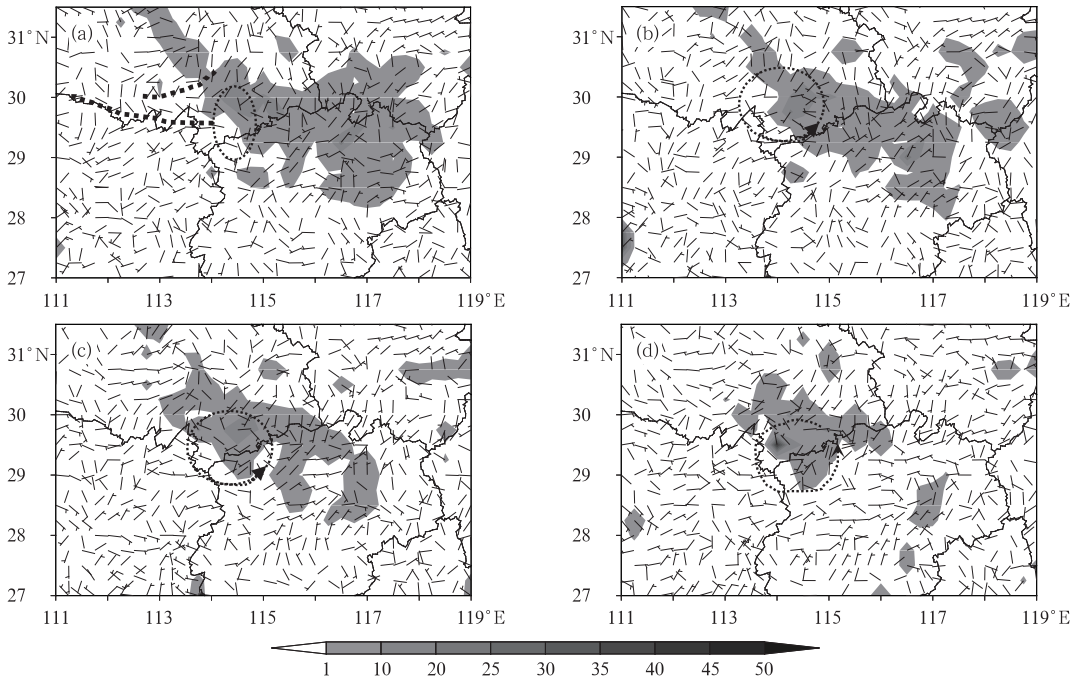


图 8 2011 年 7 月 14 日 12:00—15:00 时地面流场及其后 1 小时的降水量(阴影,单位:mm)

(a) 12:00, (b) 13:00, (c) 14:00, (d) 15:00

Fig. 8 Surface stream field and subsequent hourly precipitation (shaded, unit: mm) after one hour during the period 12:00—15:00 BT 14 July 2011

(a) 12:00 BT, (b) 13:00 BT, (c) 14:00 BT, (d) 15:00 BT

示,图 8b~8d 同样)。13 时(图 8b)原先南北向风切变区域风速增大,范围扩大,略呈涡旋环流形势,到 14 时(图 8c),可以观测到一个很显著的涡旋环流,涡旋中心的风速大于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,其南段出现了 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西南风,地面西南风加强除有利于增强涡旋周围风辐合的强度外,也有利于暖湿气流在其附近聚集上升。15 时涡旋环流向南移动,在其后 1 小时降水中心附近站点的风(咸宁站西南赤壁市)由前一时次的偏西风转为偏北风,涡旋环流中心南移,气流汇合最强出现在咸宁站南部,小时降水强中心也南移(赤壁站后 1 小时降水达 35 mm 左右,崇阳站发生 1 小时近 60 mm 降水)。地面气旋一直维持到 17 时以后才减弱消亡,对应图 6 中雷达回波上非线性状 MCS 5 个小时维持在湖北咸宁地区少动。

可见,14 日 13—18 时非线性状 MCS 形成在地面涡旋环流背景下,MCS 随着地面涡旋环流发展而增强维持。

5.2 咸宁站对流层中低层风的演变

图 9 为 14 日 13—17 时咸宁站风廓线发生强降水时对流层中下层及边界层风的演变。在强降水

前,11:28—11:56 时咸宁站边界层 1000 m 以下是西北风,600~800 m 间西北风最大达 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,表明有冷空气侵入咸宁地区。至 12:00 边界层就转为东北风,一直持续到 14:56,东北风的层次随时间在降低。这正好对应了图 8a~8c 的地面风场演变,咸宁地区涡旋发展,开始咸宁站位于初始涡旋中心西北部,此时涡旋尺度较小,风场为西北风,其后涡旋发展加强,尺度增大,地面风也变为东北风,对应图 9 中边界层风也转为东北风。12:00—14:56 时咸宁站风廓线边界层中 200 m 以下维持的东北风有利于将湖北省东南部地区雨后近地层湿冷空气带至咸宁附近,增大咸宁地区近地层及边界层梅雨锋两侧的温度和湿度梯度,也有利于梅雨锋发展加强。

12:00—15:00 时咸宁站边界层中 200 m 以下是东北风,以上为西南风(随时间西南风高度在降低),即偏南暖湿气流沿着近地层冷垫面爬升,边界层内上升运动发展。在 1000~2000 m 间 12—14 时咸宁上空出现了大于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏西风气流,由图 10 可降水量分布看,咸宁地区西侧即江汉平原是可降水量大值中心区,一般大气中水汽集中在对流层中低层,咸宁上空 1000~2000 m 出现较大风速

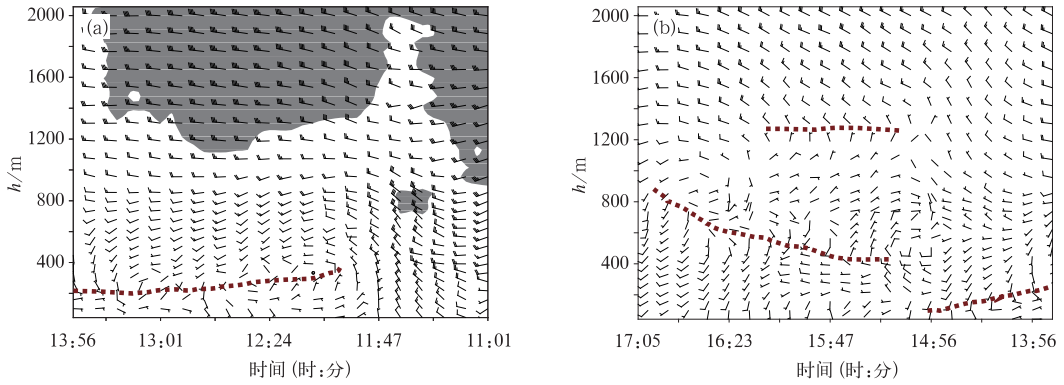


图 9 2010 年 7 月 14 日 11—17 时咸宁站 4~6 min 间隔风廓线图
(虚线为边界层中切变层,阴影为风速大于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的层次范围)
(a) 11:01—13:56, (b) 13:56—17:05

Fig. 9 Wind profile at Xianning Station every 4 or 6 minutes from 11:01 to 17:05 BT 14 July 2010
(a) 11:01—13:56 BT, (b) 13:56—17:05 BT

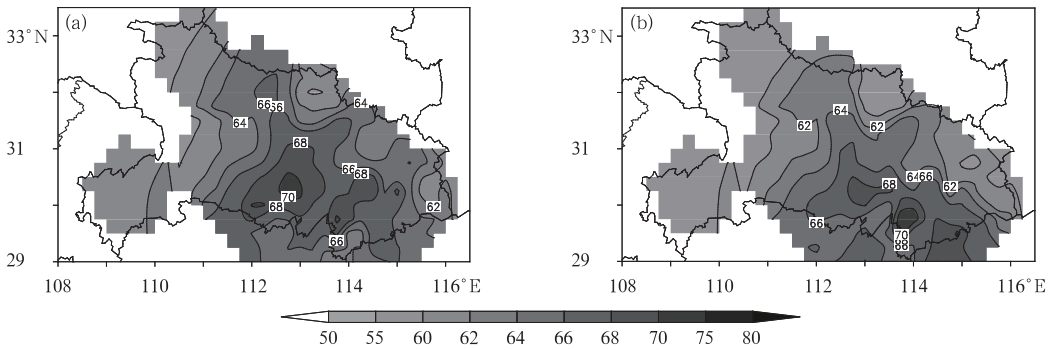


图 10 2010 年 7 月 14 日 11:30(a)和 14:30(b)湖北省 GPS/MET 观测的整层可降水量分布(单位:mm)

Fig. 10 Distribution of atmospheric column precipitable water in Hubei Province observed by GPS/MET at 11:30 BT (a) and 14:30 BT (b) 14 July 2010 (unit: mm)

的西风易将江汉平原上空高湿水汽带至咸宁地区上空,增强咸宁地区的降水量。

15 时开始,咸宁地面开始转为西南风。15:00—16:10 时咸宁在 400~1300 m 间出现了东北风,这样形成了 400 m 以下咸宁站上层偏东风底层偏西风切变,层结趋于稳定方向发展,不利于对流发展,实际 15—16 时咸宁站的降水只有 6.7 mm,即降水强度减小(图 11a 中虚线示)。16:10 时以后咸宁站上空东北风转为西南风,形成了低层西南风,上层西北风,即近地层暖湿气流上升,上层干冷空气下沉,有利于空气柱中气流混合,层结开始向不稳定趋势发展,易触发新对流,对应图 11a 中虚线后 2 小时咸宁站降水增强。

14 日 11—17 时咸宁站高时间分辨率风廓线资料很好地展示了非线性 MCS 边界层中风的垂直演变特征,其中风垂直切变随时间改变可部分解释非

线性 MCS 中对流回波组织性差、回波分布规律不强的原因(而线性 MCS 风垂直切变是有一定持续性规律)(王晓芳,2012),此外对流层中低层风向和风速变化较清晰表明了 MCS 在咸宁地区集中发展产生强降水的有利因素。

5.3 梅雨锋上地面温度、湿度和大气层中水汽分布特征

图 12 给出了降水发生开始时地面温度和温度露点差分布。14 日 08 时长江流域地面温度大多在 $24 \sim 25^\circ\text{C}$,分布较均匀,从温度场上分析不出明显锋面特征(图略),梅雨期降水时段沿长江流域带中温度露点差值小,这可能还与温度和露点的日变化有关,夜晚到清晨地面湿度相对较大(图略),随着白天太阳辐射增强,地面温度渐渐升高,上午 10 时以后长江流域温度仍在 25°C 以下,这与其上空有降水云

系覆盖,大大减弱了太阳辐射增温有关,其南北两侧温度已经升至 $28\sim 29^{\circ}\text{C}$,在长江沿岸地区地面温度比其南北两侧地面温度明显要低,温差达到 5°C 以上,形成了沿长江流域的低温带,见图 12a 中 13 时地面温度分布。此后低温带宽度在缩小,其两侧温度梯度明显加大,且一直维持在长江中下游地区沿江一带,13 时正好为一个新 MCS 发生发展并产生强降水的开始时刻,此时地面已经形成了明显静止锋锋面特征。

长江流域地面温度露点差随时间变小,在 $1\sim 3^{\circ}\text{C}$ 间,其南北两侧差值则显著增大到 5°C 以上,形成了沿长江温度露点差值小的分布,但是在未来发生强降水地域如湖北东南部、江西北部等地更是温度露点差值为 0,说明长江流域一带近地面水汽在增加,局地水汽基本为饱和状态(图 12b),这同时表示水汽在天气尺度有利条件下易在长江流域汇聚(图 3),但因为局地更小尺度环流分布不一样,如湖北东南部咸宁地区有小尺度气旋性涡旋环流发展(图 8),其地面水汽更容易在此汇合集结,导致了沿长江流域地面水汽分布不均匀。从地面温度露点差分布也可清晰地分析出地面湿度锋存在。

由 14 日地面温度和露点场演变可知,梅雨期长江流域地面存在较明显的温度锋和湿度锋,这些锋面并非一直都存在,有其发生发展演变过程。在锋面形成后,由于锋面抬升作用,其附近易触发对流,造成梅雨锋大范围降水。又因为局地气象要素不同,一些地方有气旋性涡旋环流发展或切变线形成,

这些区域地面上的上升运动进一步加强,也就更容易触发新对流,促使梅雨锋上尺度较小的强对流云团发生发展,从而产生了梅雨锋上大范围降水区域中多个强降水中心,即降水不均匀性。

近地面水汽仅仅代表地面空气湿度情形,产生强降水更需了解该地整层气柱中水汽含量多少,即可降水量大小。这里用 GPS/MET 反演间隔 30 min 大气整层可降水量资料分析 14 日湖北省整层水汽分布,如图 10 所示。梅雨期湖北省地区上空大气可降水量都较大,14 日 11:30 时(图 10a)全省区域可降水量都大于 50 mm,其中在江汉平原及其西部地区可降水量更大,为 $60\sim 70\text{ mm}$,一直到 17 时此次 MCS 影响强降水结束均如此。这里可发现虽然大气中可降水量在湖北上空都很大,但是发生强降水仅是湖北东南部咸宁地区,说明发生强降水除了有充足水汽条件还不够,需要强上升运动将集中在对流层中低层的水汽输送至对流层中上层,在合适微物理条件下才可成云致雨,如图 9 中西风或南风可将周围地区(特别是江汉平原)丰沛水汽被携带或裹挟至适宜于降水地区上空大气层中,导致强降水在局地发生。

5.4 梅雨期地面单站气象要素变化特征

图 11 为 13—14 日湖北东南部咸宁和武穴两站地面气象要素变化。咸宁 13—14 日出现了 3 个时段的降水,最后一次(14 日 13—17 时)降水强度最大,强降水发生前地面气温降低、气压下降,降水期

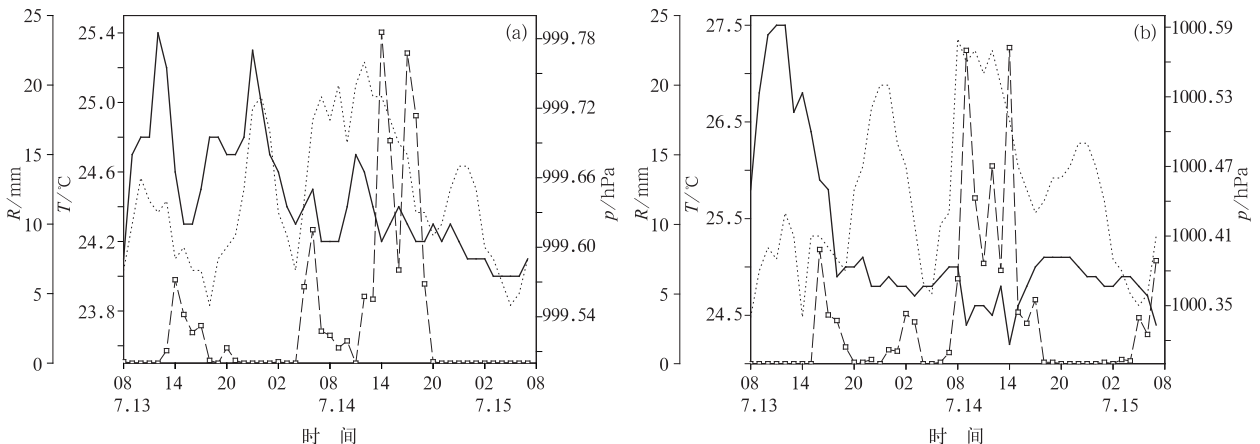


图 11 2010 年 7 月 13 日 08 时至 15 日 08 时咸宁站(a)和武穴站(b)地面气压(单位:hPa)、温度(单位: $^{\circ}\text{C}$)和降水量(单位:mm)逐小时的变化

Fig. 11 Hourly variation of physical qualities at surface from 08:00 BT 13 July to 08:00 BT 15 July 2010

(a) Xianning, (b) Wuxue

间温度有小幅波动变化,而气压则是一直下降,降水结束后,气压上升。降水期间气压下降对应了咸宁地区地面涡旋环流发展维持(图 8)。咸宁站东部武穴站 13—14 日也发生了 3 次降水过程,其中 14 日 08—14 时强降水发生在咸宁站 14 日 13—17 时之

前,这是前一个 MCS 过程影响造成,该 MCS 消亡后在其上游咸宁地区触发新对流,演变发展新 MCS 形成新的强降水。武穴站气压与咸宁站不一样,强降水发生前气压上升,气温下降,这可能与影响武穴站发生降水时地面中尺度系统性质有关。

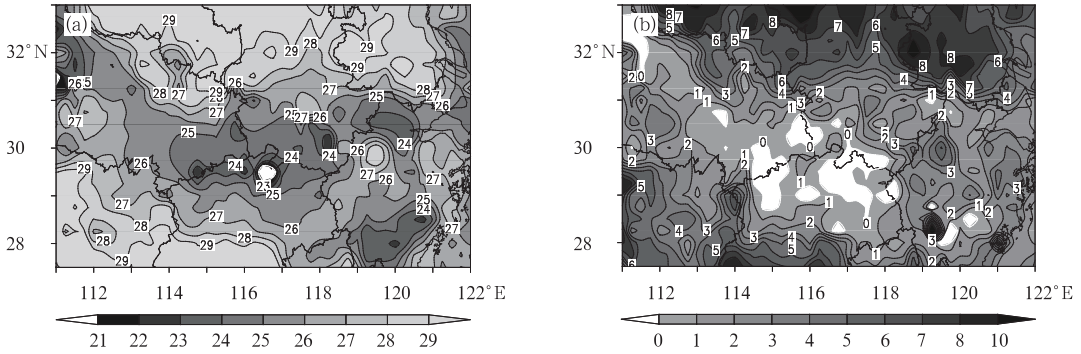


图 12 2010 年 7 月 14 日 13 时地面温度(a)和温度露点差(b)分布(单位: °C)
 Fig. 12 Distribution of (a) surface temperature and (b) the difference between temperature and dew point temperature (unit: °C) at 13:00 BT 14 July 2010

5.5 咸宁站大气探空条件

用咸宁站 GPS 加密探空资料分析 14 日 13—17 时强降水发生前和持续期间大气层中物理条件,结果表明:(1) 14 日 11 时(降水发生前)已经积累了可观的正不稳定能量,最不稳定层位于 921 hPa,其对流有效位能达到 1391 J · kg⁻¹(图 13a)。此时咸宁站没有降水,随着后期降水发生,不稳定能量释放,

对流有效位能减小,至 14 和 17 时分别为 411 和 193 J · kg⁻¹,且不稳定层抬高,也就是说咸宁站降水发生后,近地层对流位势是稳定的;(2) 最不稳定层上对流抑制能量在 11 和 17 时为 0,14 时也只有 6 J · kg⁻¹(图 13b)。表明只要有对流触发机制,就很容易形成对流发展;(3) 整层大气湿度,14 日 11 时(图 13a)600 hPa 以下气层湿度接近饱和,温度和露点温度线几乎重合,600hPa 以上气层中空气相

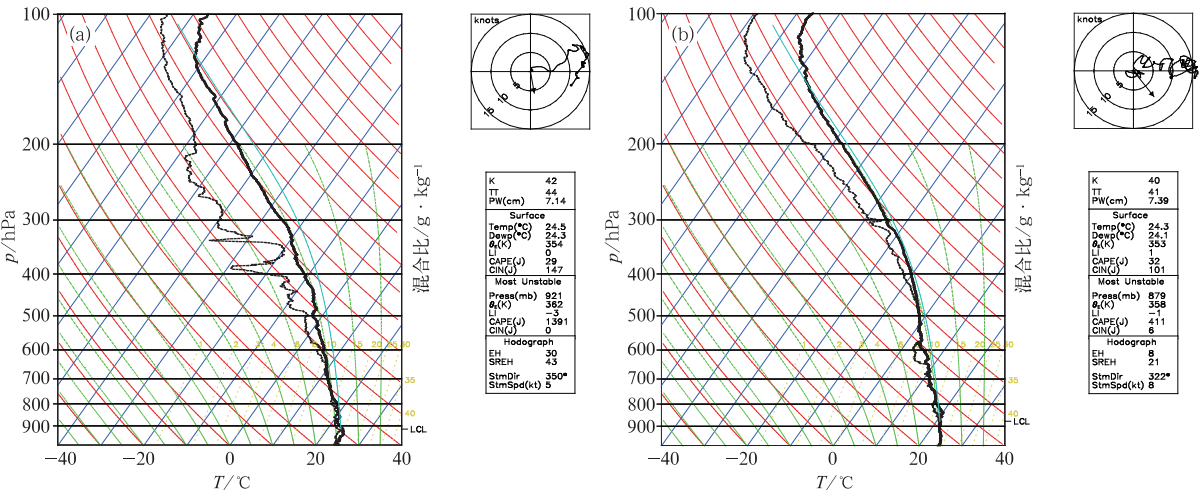


图 13 2010 年 7 月 14 日 11 时(a)和 14 时(b)咸宁站 GPS 探空 Skew-Tlog p 图
 Fig. 13 Skew-T-log p figures of GPS sounding observations at Xianning Station at 11:00 BT (a) and 14:00 BT (b) 14 July 2010

对较干,湿度上干下湿垂直配置有利于对流不稳定的发展和维持。到 14 时咸宁上空湿层明显升高至 400 hPa,这是因为咸宁站已经发生了 1 h 强降水,且在 600 hPa 左右出现了浅薄相对干层(图 13b)。

6 小 结

本文利用 NCEP 日再分析 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 资料、多种加密观测资料(地面加密、雷达、风廓线、GPS 加密探空和水汽等资料)分析了 2010 年 7 月 14 日强降水期间一次非线状 MCS 活动造成短时强降水的发生发展机制,主要得到如下结论:

(1) 梅雨期 7 月 14 日长江中游地区受 500 hPa 高压环流脊前偏北气流影响,对流层中低层维持着一条切变线,切变线南侧对流层低层高温高湿气流被偏南风与锋前上升运动携带至长江中游对流层中高层,并与高空北风和东北风气流相遇,是鄂皖赣地区大范围强降水发生发展的有利天气条件。

(2) 7 月 14 日长江中游地区经历了 4 次 MCS 活动,其中 14 日 13—18 时 MCS 为长江流域常见的一类——非线状 MCS,其回波结构没有明显组织性,对流回波和层状回波无规律混合在一起,准静止地维持在湖北咸宁地区大约 5 h,造成了短时强降水。

(3) 地面自动站加密资料显示 14 日上午梅雨锋有一个发展加强过程,地面上温度场和湿度场有明显锋面特征,锋面维持和 13—18 时咸宁地区地面涡旋环流发生发展为该时段非线状 MCS 形成提供有利的地面抬升和辐合机制。

(4) 风廓线和 GPS 加密探空资料高时空地显示了 14 日 11—17 时咸宁站 MCS 发生发展过程中风场的演变特征,先是周围边界层冷空气入侵,对流层有正对流不稳定能量积累,层结对流不稳定,对流易触发;降水发生后,边界层风切变发生变化,出现近地层大气趋于稳定;随着风场进一步发生变化,边界层呈现低层为暖湿西南风,上层为干冷西偏北风,有利于对流持续发展,导致咸宁强降水发生一减弱一再发展加强的变化。

(5) 各种加密观测资料较好地展示了 14 日 13—18 时 MCS 演变特征和形成机制的有利条件,如地面小尺度涡旋发展、边界层风垂直切变演变、水汽局地变化等,对以往分析 MCS 造成暴雨过程依赖模式输出结果的不确定性有重要改进,弥补了稀疏的常规观测资料无法展现中小尺度系统及其演变过程的不足。

致谢:感谢国家气象信息中心提供的雷达基数据和地面逐小时加密观测资料!

参考文献

- 代刊,何立富,金荣花. 2010. 加密观测资料在北京 2008 年 9 月 7 日雷暴过程分析中的综合应用. 气象,36(7):160-167.
- 黄美元,洪延超. 1984. 在梅雨锋云系内层状云回波结构及其降水的非均匀性. 气象学报,42(1):80-87.
- 贾小龙,陈丽娟,龚振淞,等. 2011. 2010 年海洋和大气环流异常及对中国气候的影响. 气象,37(4):446-45.
- 孙军,代刊,樊利强. 2011. 2010 年 7—8 月东北地区强降雨过程分析和预报技术探讨. 气象,37(7):785-794.
- 王令,王国荣,孙秀忠,等. 2012. 应用多种探测资料对比分析两次突发性局地强降水. 气象,37(3):281-290.
- 王晓芳. 2012. 长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析 I: 组织类型特征. 气象学报,70(5):909-923.
- 王晓芳,徐明,闵爱荣,等. 2010a. 2010 年 5 月我国南方持续性暴雨过程分析. 暴雨灾害,29(2):193-199.
- 王晓芳,胡伯威,李灿. 2010b. 湖北一次飑线过程的观测分析及数值模拟. 高原气象,29(2):471-485.
- 王晓芳,黄华丽,黄治勇. 2011a. 2010 年 5—6 月南方持续性暴雨的成因分析. 气象,37(10):1206-1215.
- 王晓芳,胡伯威,李红莉,等. 2011b. 梅雨期一个伴有前导层状降水对流线的结构特征. 高原气象,30(4):1052-1066.
- 王遵娅,曾红玲,高歌,等. 2010. 2010 年中国气候概况. 气象,37(4):439-445.
- 徐双柱,吴涛,王艳. 2012. 2010 年 7 月 7—15 日湖北省持续性暴雨分析. 暴雨灾害,31(1):35-43.
- 翟菁,黄勇,胡雯,等. 2011. 强对流系统中对流云合并的观测分析. 气象科学,31(1):100-106.
- 张家国,王平,吴涛. 2010. 鄂东一次下击暴流天气的中尺度分析. 气象科学,30(2):239-244.
- 张旭斌,张熠. 2011. 一次华南暴雨过程的数值模拟——中尺度对流系统形成发展机制. 气象科学,31(2):145-152.