金巍，曲岩，戴萍，等. 2013. 台风梅花引发局地特大暴雨的多普勒雷达分析. 气象，39(12)：1591-1599.

台风梅花引发局地特大暴雨的多普勒雷达分析*

金 巍[1,2] 曲 岩[2] 戴 萍[3] 韩 颖[2] 康晓玉[2]

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 辽宁省鞍山市气象局，鞍山 114001

3 辽宁省气象信息中心，沈阳 110016

提 要：利用 NCEP 1.0×1.0 格点资料、常规天气资料和新一代多普勒雷达等资料，分析辽宁省营口市小石棚乡特大暴雨过程的天气背景和中尺度演变特征。结果表明：(1)太平洋副热带高压(以下简称副高)西伸，强热带风暴梅花登陆后转向西北移动，热带风暴东侧的西南气流将海上充沛的水汽输送到辽宁大部，贝加尔湖弱冷空气沿脊前西北气流南下，这是辽宁营口小石棚乡产生局地特大暴雨的大尺度背景。(2) 特大暴雨落区附近探空环境场中存在深厚湿层、狭长的 CAPE 区域和相对弱的垂直风切变，比较有利于出现强对流降水。(3)强降水发生时，特大暴雨落区不断有新的中尺度对流单体生成，35 dBz 回波反射率因子高度达到 5 km 以上，低空 1.5～2.4 km 高度径向速度有 24 m·s^{-1}的最大风速区存在，低空西北急流变化过程与强降水的强弱变化基本同步，中低层暖湿气流呈气旋辐合起到了触发对流和加强对流的作用，中尺度强对流单体不断生成和中低空西北急流输送充沛的水汽辐合抬升是造成小石棚回波强度超过 40 dBz 达 5 h 以上主要原因。同时小石棚乡两山夹一沟的山谷地形条件对此次特大暴雨的发生发展也具有重要影响。

关键词：热带低压，强热带风暴，副高阻塞，特大暴雨，多普勒天气雷达

中图分类号：P458 **文献标志码**：A **doi**：10.7519/j.issn.1000-0526.2013.12.007

Analysis on the Typhoon Muifa-Induced Local Torrential Rain Based on Doppler Radar Data

JIN Wei[1,2] QU Yan[2] DAI Ping[3] HAN Ying[2] KANG Xiaoyu[2]

1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Anshan Meteorological Office of Liaoning, Anshan 114001

3 Liaoning Provincial Meteorological Information Centre, Shenyang 110016

Abstract: Using NCEP reanalysis data, conventional weather data and Doppler radar data, the characteristics of the synoptic and mesoscale meteorological background are analyzed for a torrential rainfall over Xiaoshipeng Town of Yingkou City in Liaoning Province. The results show that the Pacific subtropical high extends to the west, a strong tropical storm Muifa moves to the northwest after it lands; the southwest airflow at the east side of the tropical storm transports abundant water vapor to Liaoning, and the weak cold air of Baikal Lake moves south along the ridge before the northwest flow impacts Liaoning. Besides the existence of a deep wet layer, a narrow CAPE zone and a relative weak vertical wind sheer are beneficial to severe convective rainfall. The new mesoscale convective cells are generated continuously during the heavy rainfall. There exists a maximum wind speed zone of 24 m·s^{-1} in the lower layer and a strong radar echo with 35 dBz above 5 km. And the variation of the low-level southwest jet is in step with the variation of rainfall intensity. The cyclonic convergence of the warm moist air in the mid-low level triggers and

* 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB957800)、国家自然科学基金项目(41175043)和灾害天气国家重点实验室 2012 年开放课题《辽宁持续性冰雹天气分析和研究》共同资助

2012 年 10 月 24 日收稿； 2013 年 10 月 24 日收修定稿

第一作者：金巍，主要从事短期天气预报和气候变化研究. Email：lnyk_jw@163.com

strengthens convection. The nonstop generation of mesoscale severe convective cells and the water vapor transport from the low level northwest jet push the radar echo to above 40 dBz, lasting for more than 5 hours. In addition, the valley torrain has great influence on the torrential rain as well.

Key words: tropical low, severe tropical storm, subtropical high obstruction, torrential rain, Doppler weather radar

引 言

目前,台风登陆引发的暴雨已经成为大气学科的一个热点问题。平均每年登陆我国的台风 7～8 个(陈联寿等,1979),台风灾害的发生频率和影响程度都居沿海地区各种自然灾害之首(梁必骐等,1995),其中,台风登陆造成的灾害往往是台风引发的暴雨造成的(程正泉等,2005);近年来,发现一些特别严重的特大暴雨,主要发生在台风登陆后东移受阻,低压中心向西倒退的情况下,比如,1975 年 8 月 7503 号台风在河南引发的特大暴雨(丁一汇等,1978),9608 号台风在华北和山西引发的特大暴雨过程(孙建华等,2006),1939 年我国北方淮河流域的特大暴雨洪水也是发生在这种情况(章淹等,1995),台风云娜登陆后西行路径对其后部的强降水也起了关键性作用(黄克慧,2006)。近年来一些气象学者对暴雨和大暴雨的成因进行数值诊断分析,指出:正位涡异常与暴雨的发生关系密切(陈春艳等,2012),台风大尺度环境场是产生台风暴雨中尺度系统的源,而凝结潜热释放和地形效应则是形成和影响这些中尺度系统和中尺度结构的重要因素(江敦春等,1997),地形的抬升作用对暴雨有明显的增强作用(吴庆梅等,2012),辐合线对于水汽输送以及暴雨的形成、触发、维持具有重要作用(周海光,2008)。随着我国新一代天气雷达全国布网初步完成,新一代天气雷达观测资料在短时强降水、局地短时暴雨等业务探测与预警研究方面初现成效。2011 年 8 月 8—9 日辽宁省营口市小石棚乡出现了特大暴雨,此过程就是在台风登陆后东移受阻西退,减弱为热带低压后产生的,该特大暴雨引发的泥石流冲垮当地桥梁 6 座,造成 31 处房屋被冲走、100 多处房屋倒塌,当地水、电供应全部中断。目前,随着气象业务现代化迅速发展,自动站、加密雨量站和多普勒雷达的资料为更深入细致分析此类强对流暴雨天气提供了可靠依据,克服了常规探测网的时间和空间分辨率低、很难对这种中小尺度天气系统作出定时、定点预报的缺陷(康岚等,2013;王令等,2012;张清华等,2012)。多普勒天气雷达具有时空分辨率高的优点,其距离分辨率可达几百米,6 min 即可完成一次体积扫描。利用新一代多普勒雷达资料,再结合常规探测资料、自动站资料以及数值格点资料等开展临近预报,有望提高局地短时强降水的预报时效,从而减小其损失。营口市气象局的 SA 波段多普勒天气雷达连续、完整地监测了这次局地短时特大暴雨,本文利用这部雷达资料对小石棚特大暴雨过程从开始到强降水结束时段作了详细的分析。

1 热带风暴梅花(1109)移动概况与辽宁降水实况

热带风暴梅花于 2011 年 7 月 28 日 14 时(北京时,下同)在西北太平洋洋面上生成,中心附近最大风力 8 级(18 m·s^{-1}),最低气压 998 hPa;而后加强为台风、强台风,8 月 6 日 15 时,“梅花”中心(28.6°N、125.0°E)位于浙江舟山市东偏南大约 310 km 的东海海面上减弱为台风,中心附近最大风力 13 级(40 m·s^{-1}),中心最低气压 960 hPa;8 月 7 日 21 时“梅花”减弱为强热带风暴,午夜开始影响黄海海域;8 月 8 日 05 时,其中心(36.5°N、123.5°E)在辽宁省丹东市南偏西方大约 380 km 的黄海中部海面上,中心附近最大风力 10 级(28 m·s^{-1}),中心最低气压 980 hPa;18 时 30 分前后,“梅花”在朝鲜西海岸北部沿海登陆,登陆时中心附近最大风力 9 级(23 m·s^{-1}),中心最低气压 985 hPa;8 月 9 日 02 时,“梅花”在辽宁铁岭市减弱为热带低压,之后强度继续减弱。热带低压梅花深入内陆之后,其生命史长,影响范围较大,降水强度大,造成严重洪涝灾害。

受副高西伸影响,热带低压梅花登陆后向西北方向移动,北方高空槽底部有弱冷空气南下,受此影响,8 月 8 日 08 时至 9 日 20 时辽宁省 64 个县级以上气象观测站中,有近三分之一出现暴雨,有 3 站 24 h 累计雨量达 100 mm 以上(图 1a);加密自动站中,营口小石棚乡 24 h 累计雨量达到 243 mm,过程

雨量达到 267 mm,其最强 6 h 降水量出现在 9 日 04—10 时,为 214 mm,最强 3 h 降水量出现在 9 日 06—09 时,达 171 mm,最强降水集中在 06—08 时,平均小时雨量达 64 mm(图 1b),其中,06:40—07:40 雨量最大,达到 80 mm。辽宁这次强降水主要出现在 9 日凌晨到午前,强降水期间,"梅花"已减弱为热带低压,其中心已移至辽宁东北部地区。由此可见,此次局地短时特大暴雨主要发生在 9 日 05—09 时,以对流性降水为主。

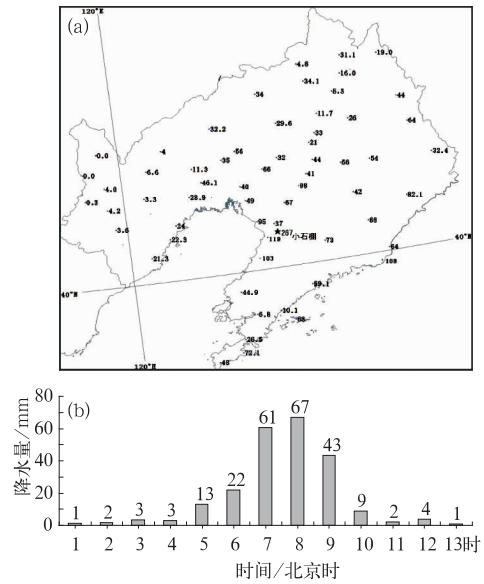


图 1　2011 年 8 月 8 日 08 时至 9 日 20 时辽宁省雨量分布图(a)与 9 日 01—13 时小石棚测站逐小时雨量(b)(单位:mm)

Fig. 1　Rainfalls at Liaoning from 08:00 BT 8 August to 20:00 BT 9 August (a) and hourly rainfalls at Xiaoshipeng Station from 01:00 to 13:00 BT 9 August 2011 (unit: mm)

2　强热带风暴天气背景分析

利用 8 月 8 日 20 时至 9 日 20 时 500 hPa 高度场与水汽云图叠加图(图 2)、850 hPa 高度场与红外云图叠加图(图略)分析强热带风暴"梅花"的高低空环流和水汽演变特征。8 日 08 时,西南急流主要位于朝鲜半岛及其东海洋面,而后强热带风暴东移在朝鲜半岛西北部登陆,西南急流减弱,并缓慢向东北方向移动;8日20时,热带风暴中心位于辽宁东南部,我国东北地区东部处于 12～20 m·s^{-1}的西南急流区,但较 08 时洋面上的西南急流在强度和面积

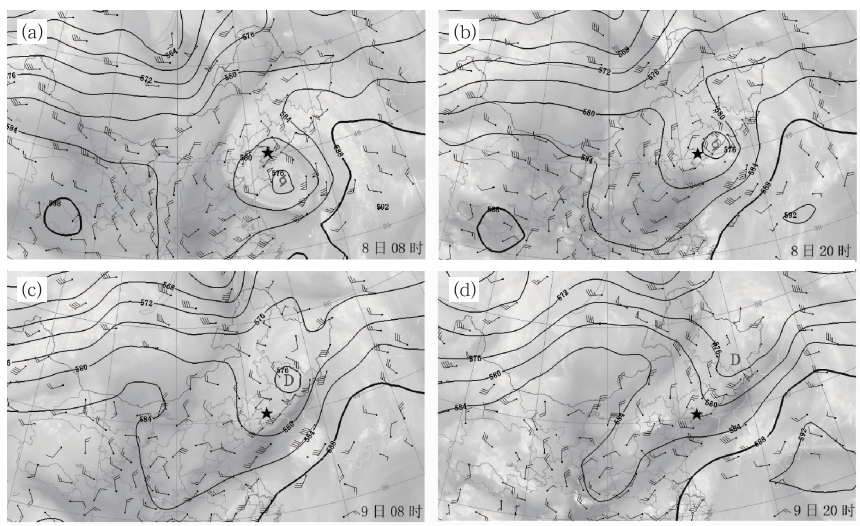


图 2　2011 年 8 月 8 日 08 时(a)、20 时(b)及 9 日 08 时(c)、20 时(d)500 hPa 天气图(等值线,单位:dagpm)与水汽云图叠加

("★"表示小石棚所在地,下同)

Fig. 2　Water vapor images with superimposition of 500 hPa synoptic charts at 08:00 (a), 20:00 BT (b) 8 August and 08:00 (c), 20:00 BT (d) 9 August 2011

上有所减弱,它与热带风暴西部的西北气流在辽宁中南部形成气旋性辐合;9 日 08 时,热带风暴梅花已转弱为热带低压,低压中心移至辽宁东北部,辽宁大部处于西北急流控制,我国东北地区东南沿海维持西南急流,贝加尔湖弱冷空气南下堆积在冷槽底部,副热带高压 588 线西伸,台风梅花北上带来充沛

水汽与北方弱的冷干气流南下共同作用下，造成辽宁东半部出现暴雨到大暴雨、局地特大暴雨。9 日 20 时热带低压梅花中心已经移到黑龙江省东南部，辽宁逐渐脱离其影响，从水汽云图分析辽宁水汽条件逐渐减弱，此次“梅花”引发的辽宁强降水即将结束。

850 hPa 风场环流结构与 500 hPa 的相似，500 hPa 热带风暴位置与 850 hPa 低空一致，存在于整个东北地区的台风螺旋雨带特征位于太平洋副高后部的暖湿区域内，说明系统较为深厚，强热带风暴的西南急流所携带的水汽比较充沛。分析得出，风场结构最显著特征是在热带风暴的东南侧有西南急流，西南侧有西北急流，低空急流对水汽输送具有重要作用，也是动量和热量的高度集中地带。

2011 年 8 月 8—9 日不同时次 200 hPa 高空风场资料(图略)得出，8 日 08 时至 9 日 08 时，朝鲜半岛到日本海附近有一比较稳定的太平洋副高中心，8 日 08 时该高压中心位于朝鲜半岛东部洋面，辽宁处于高压后顶部 18 m·s^{-1}东南气流控制区，偏西风急流区位于辽宁西北边界与吉林省西部附近；到 8 日 20 时，该高压脊加强略为北抬，中心仍在朝鲜半岛东部洋面上，偏西风急流区结构发生变化，急流轴不断向东伸展，急流轴形状从近乎东西向转为中部突起的弓形结构，急流轴位于内蒙古北部和黑龙江外围线附近，辽宁大部仍处于偏南气流控制区。到强降水发生时的 9 日 08 时，该太平洋副高中心明显东伸北抬，同时急流出口端南压；到暴雨结束后的 9 日 12 时，随我国西北地区西风急流加强并向东扩展，该太平洋副高中心明显减弱南落，中纬度环流变得更加平直。由此可见，低空热带风暴梅花前部(也是太平洋副高后部)低空西南急流的维持过程是与高空副热带高压脊主体的加强维持相伴随的，这与以前的结论相一致(朱乾根等，1992)。另外，还有高空急流的加强及向东北伸展，引导东北地区低空低槽加深南压和热带低压梅花合并，使沿西北路径的冷空气有可能从中低层侵入暴雨区，这是形成此次辽宁东半部出现暴雨到大暴雨、局地特大暴雨发生的重要条件。

综上所述，强热带风暴梅花登陆后的西北急流与高空脊前下滑的北方干冷空气相互作用，加上太平洋副高西伸阻挡，暖湿和冷干不断交汇激发了强降水发生，强热带风暴梅花本身是深厚的低压系统，具有很强的不稳定能量，在其周围存在着强烈的辐合抬升，高空脊前有干冷空气下沉，热带低压系统从海上携带暖湿空气上升，强热带风暴梅花北上为降水提供了极其有利的动力抬升，同时也承担了输送水汽的角色，“梅花”登陆后引发的大范围暴雨过程受到多要素影响，它是大、中尺度天气系统相互作用下形成的，而太平洋副高西伸阻塞促使强热带风暴梅花登陆后向西北移动、高空脊前弱冷空气南下以及不稳定能量产生的动力抬升运动对此次暴雨到大暴雨过程都具有重要作用。

3 物理量诊断分析

3.1 垂直运动

在局地特大暴雨形成过程中，α 中尺度对流云团依靠什么系统维持较长时间的强劲上升运动，也是很重要的。当低层强辐合区与高空辐散区重叠时，对流得以产生和发展，次级环流形成。从前面高低空急流所处的位置看，辽宁南部处于 850 hPa 低空急流轴的入口区左侧辐合区和 200 hPa 高空急流轴的入口区右侧辐散区。由于低空热带低压梅花涡旋云系引导西南急流尺度大，次级环流强度也随之增大。分析沿 40°N 作垂直剖面图(图 3)，表明：9 日 02 时在急流轴前部东西两侧存在着一个次级环流。急流右前侧 120°～130°E 为次级环流的上升支，最大上升速度在 500 hPa 高空和 800 hPa 以下低空到超低空，量值为 -0.15×10^{-3} Pa·s^{-1}；在 110°～120°E，500 hPa 以下低空急流轴的左前侧为下降速度，最大下降速度在 600 hPa 以下，量值为 0.09×10^{-3} Pa·s^{-1}。9 日 08 时在急流轴前部东西两侧继续存在着一个次级环流，但是东西两侧的最大上升速度明显减弱和最大下降速度变化不大，急流右前侧 122°～130°E 为次级环流的上升支，最大上升速度在 300～800 hPa 之间，量值为 -0.10×10^{-3} Pa·s^{-1}；低空急流轴的左前侧为下降速度，在 112°～122°E，最大下降速度在 800 hPa 以下，量值为 0.10×10^{-3} Pa·s^{-1}。9 日 14 时在急流轴前部东西两侧继续次级环流消失。说明强降水时段与强对流时段一致，小石棚特大暴雨区始终处于次级环流的持续上升运动区。次级环流是局部特大暴雨的动力抬升条件之一，次级环流上升所在的区域是大暴雨最有可能出现的区域，这次营口小石棚的特大暴雨落区位于上升运动区域中的等值线密集带，这为预报暴

雨落区提供理论依据。

3.2　与强降水有关探空物理量分析

从营口地区邻近的沈阳(图 4)和锦州探空曲线分析，8 日 20 时和 9 日 08 时沈阳测站地面至 500 hPa 温度露点差均在 0～1℃之间，500 hPa 以下整层空气几乎饱和，地面至 300 hPa 温度露点差在 0～3℃之间，300 hPa 以下相对湿度较大，水汽条件深厚有利于高的降水效率。8 日 20 时锦州测站地面至 850 hPa 温度露点差只在 0～3℃之间，相对湿度较大，850～600 hPa 温度露点差在 7～19℃之间，相对湿度较小，中间有一个明显干层，600 hPa 以上整层相对湿度较大，两端湿中间干，比较有利于对流性降水产生；9 日 08 时锦州探空图显示地面到 250 hPa 温度和露点线很接近，温度露点差在 0～4℃之间，整层相对湿度较大，深厚水汽有利于产生高的降水效率。8 日 20 时到 9 日 08 时两个探空站点 0℃层高度都在接近 5.0 km 左右，而抬升凝结高度都在 0.9～1.0 km，这样暖云层很厚，有利于提高降水效率(Davis，2001)。8 日 20 时到 9 日 08 时沈阳和锦州探空垂直风切变不是很强，0～6 km 风矢量差均在 5～7 m·s^{-1}之间，是弱垂直风切变，这一点有利于高降水效率。沈阳 8 日 20 时和 9 日 08 时探空 *CAPE* 值分别为 710 和 521 J·kg^{-1}，均存在狭长的 CAPE 区域，意味着较低的暖云底和高的平衡高度，因此即便在 *CAPE* 值中等偏下的情况下，仍具有产生很强的降雨率的潜势。*CAPE* 较弱，意味着上升气流不是很强，而降水率与上升气流、云底比湿成正比，由于云底比湿、整层相对湿度和暖云层厚度都比较大，一定程度上抵消了云内上升气流不太强的影响，仍可以产生很大雨强；台风梅花环境特征就是 *CAPE* 狭长，温度廓线几乎与湿绝热线重合，条件不稳定较弱，而产生大冰雹和雷暴大风等强对流的环境温度递减率较大，条件不稳定度大，而地面露点或比湿要低一些，所以辽宁东部出现了暴雨到大暴雨，小石棚出现了局地特大暴雨。

Davis(2001)总结了有利于较强对流降水率的几个条件，包括：(1)具有深厚湿层；(2)中等强度的 *CAPE* 值(1500～2000 J·kg^{-1})；(3)狭长的 CAPE 区域，意味着较低的暖云底和高的平衡高度；(4)相对弱的垂直风切变。除了第 2 条，其他 3 条对此次小石棚乡特大暴雨降水过程的环境条件都符合。

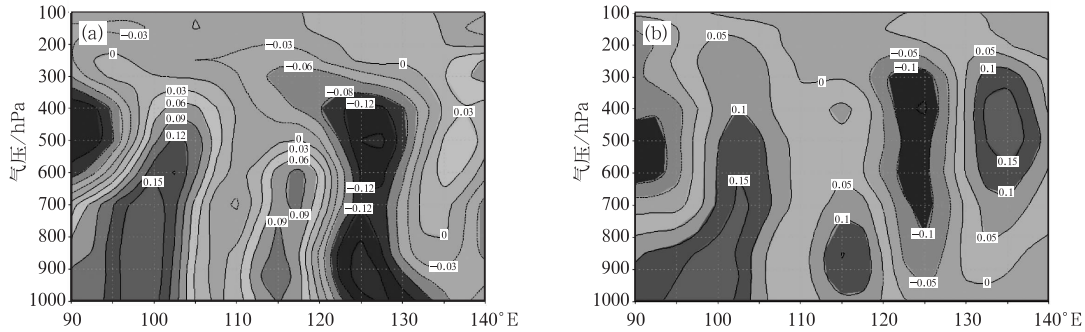


图 3　2011 年 8 月 9 日 02:00(a)和 08:00(b)垂直速度剖面图

Fig. 3　Vertical velocity profiles at 02:00 (a), 08:00 BT (b) 9 August 2011

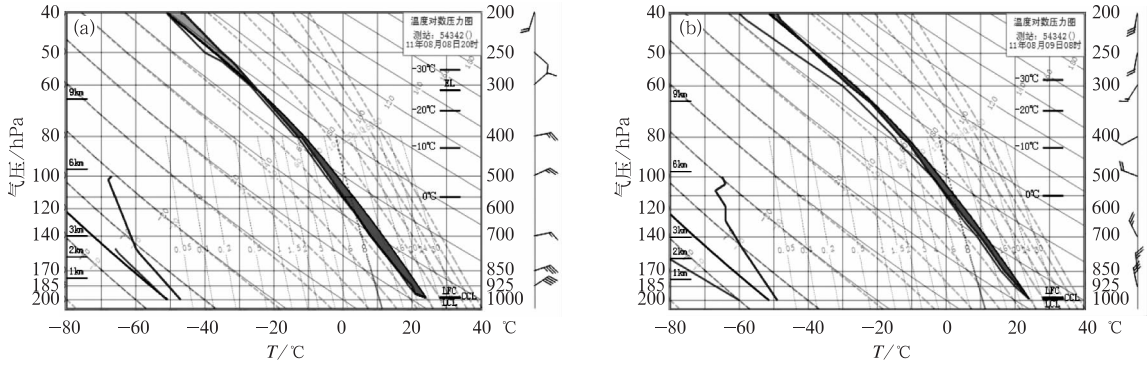


图 4　2011 年 8 月 8 日 20 时(a)和 9 日 08 时(b)沈阳探空曲线

Fig. 4　Sounding curves from Shenyang at (a) 20:00 BT 8 August and (b) 08:00 BT 9 August 2011

4 多普勒雷达资料分析

4.1 组合反射率因子分析

利用营口 CINRAD/SA 型新一代多普勒天气雷达资料，此次暴雨过程中使用 VCP21 扫描方式，每个体扫包括 9 个仰角，雷达完成一个体扫需要 6 min。2011 年 8 月 9 日 03—12 时是辽宁大部测站主降水时段，上空对流活动旺盛，在降水回波区的反射率因子呈片状在 30 dBz 以上，有许多 45～50 dBz 的强对流回波点缀中间，回波高度基本都在 5 km 以上，最强降水时段（05—09 时）回波高度可达 8～10 km。05:04—09:01 时营口小石棚组合反射率因子图（图 5）可以了解整层反射率因子强度，在强降水时段 9 日 05—09 时，上空对流活动最为旺盛，降水回波区有许多强对流单体，在小石棚附近回波强度达 40 dBz，中间点缀着 50 dBz 以上回波，在最强降水时段 9 日 06—08 时之间的两个小时，有 50 dBz 回波在小石棚附近，而且中间点缀着 55 dBz 回波，说明降水强度受到降水区上空的整层反射率因子强度的影响，组合反射率因子强度达到 40 dBz 以上，回波伸展高度 8～10 km，空气中水汽条件充沛，易于引发短时暴雨到大暴雨的发生。

2011 年 8 月 9 日 03—12 时营口小石棚的反射率因子剖面图（图 6）可以了解不同高度上的反射率因子强度，在强降水时段 9 日 05—10 时，上空对流活动最为旺盛，降水回波区有许多强对流单体，15 dBz 以上回波伸展 8 km 以上，反射率因子 30 dBz 高度伸展到 6 km 以上，而且中间点缀着 40 dBz 以上的强反射率因子，在最强降水时段 9 日 06—08 时之间的两个小时，反射率因子 35 dBz 高度伸展到 5 km 以上，而且中间点缀着反射率因子强度在 40～45 dBz 以上，云顶高度达到 8～10 km；在 9 日 06—07 时之间，反射率因子 45 dBz 高度伸展到 5 km 以上，中间点缀着 50 dBz 反射率因子，是反射率因子强度最强的时段；而降水最强的时段不是 06—07 时，而是 07—08 时，06—07 和 07—08 时云顶高度分别达到 8 和 10 km，说明降水强度不但受到降水区上空的反射率因子强度的影响，还要受到伸展高度的影响，当反射率因子强度达到 40 dBz 以上时，云顶高度越高达到 8 km 以上时，空气中水汽条件深厚，易于出现短时暴雨的发生。

4.2 反射率因子强度与强降水关系

图 7 中是 2011 年 8 月 9 日 03:04—12:03 营口小石棚的 0.5°仰角反射率因子强度和逐小时雨量图，从中可以了解在比较强降水时段的反射率因子强度与逐小时强降水关系，得出：在强降水时段（06—09 时）反射率因子强度滑动平均都超过 40 dBz，而且强降水峰值出现的时间与反射率因子强度最强的时段一致，当小时降水小于 10 mm 的时段，反射率因子强度滑动平均在 20～30 dBz 之间，在小时雨量超过 40 mm 的 06—09 时之间，反射率因子强度平均都在 40～45 dBz 之间，还有短时的反射率因子强度达到 50～55 dBz 回波点缀在其中。说明出现强降水的反射率因子强度平均 40～45 dBz 之间，中间还有短时的 50～55 dBz 回波，与强降水相比，相对较弱的降水反射率因子强度一般平均都在 20～30 dBz 之间，比强降水所需的反射率降水强度要小 1 倍以上。

4.3 径向速度与强降水关系

分析 2011 年 8 月 9 日 03—12 时小石棚的 0.5°仰角径向速度和逐小时雨量图（图 8），得出：在 9 日 06—08 时强降水时段，小石棚站低空始终维持 17～24 $m \cdot s^{-1}$ 的西北急流，说明这次强降水过程中低空急流比较强，低空水汽条件比较充沛。在 1.5°仰角（图 9）的 06—08 时强降水出现时，小石棚站 1.5 km 低空也出现了 24 $m \cdot s^{-1}$ 的西北急流。西北急流在辽宁暴雨的整个生命史过程中经历了由弱变强、由强变弱的演变过程，变化过程与降水的强弱时间演变过程基本同步。在 0.6～2.4 km 高度上，西北—东南向的强回波带上有多个小区域的 24 $m \cdot s^{-1}$ 风速大值区，中低层呈气旋性暖湿气流，丰富的水汽被西南急流源源不断地从海上输送，沿着气旋云系再由西北气流不断输送到暴雨区，低层中尺度暖湿西北气流持续发展，为辽宁局地特大暴雨的触发提供了有力条件。

在雷达中心延伸的零度线两侧的正负速度区特征为（图略）：低空大尺度辐合特征明显。在 50 km 距离圆内，9 日 03 时正速度区面积略大于负速度区，表现为低空有弱辐散特征，04 时正速度区面积略小于负速度区，低空存在弱辐合特征，随着时间的推移，05—06 时正速度区越来越小，负速度区越来越大，低空辐合增强，07 时正速度区达到最大，低空

辐合达到最强,随着时间推移,正速度区逐渐减小,08 时正、负速度区面积几乎相等,低空辐合特征消失。06—08 时是强降水时段,也是低空辐合特征最显著的时段。这次大暴雨过程的强降水时段,径向速度场表现为低层大范围强辐合特征。说明低层长时间的大气辐合运动为此次大暴雨过程提供了有利的水汽条件和上升运动的条件。

4.4　风廓线分析

大暴雨中心附近风廓线风速垂直分布分析,从图 10 中可以看出,9 日 02 时(世界时,8 日 18:03)低空西北急流还没有建立,最大风速为 8 m·s^{-1},3 时

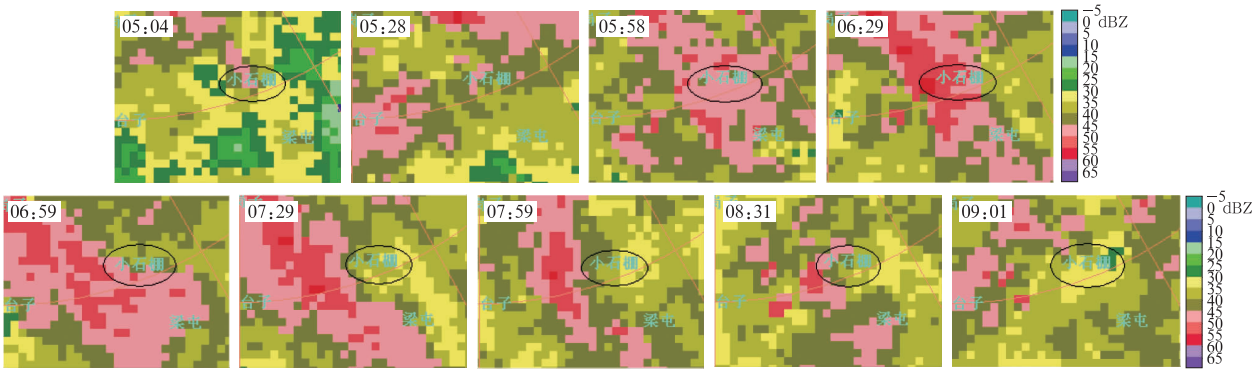


图 5　2011 年 8 月 9 日 05:04—09:01 小石棚组合反射率因子图

Fig. 5　Xiaoshipeng composite reflectivity profiles from 05:04 to 09:01 BT 9 August 2011

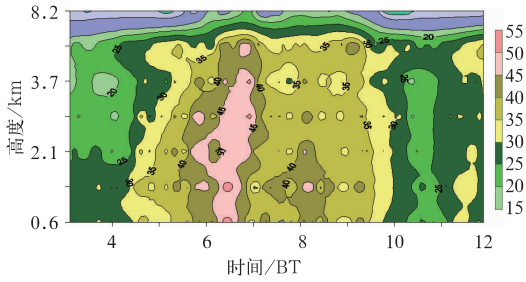


图 6　2011 年 8 月 9 日 03—12 时小石棚的反射率因子剖面图

Fig. 6　Xiaoshipeng reflectivity profile from 03:00 to 12:00 BT 9 August 2011

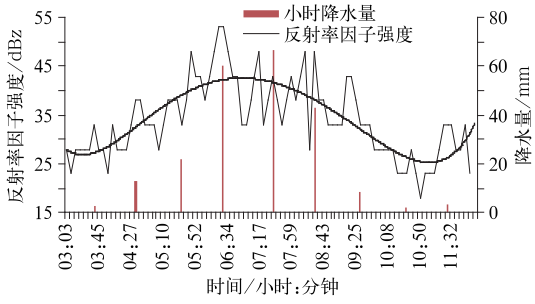


图 7　2011 年 8 月 9 日 03—12 时小石棚站点的 0.5°仰角反射率因子强度和小时雨量图

Fig. 7　Xiaoshipeng radar 0.5° elevation radial reflectivity and hourly rainfall images from 03:00 to 12:00 BT 9 August 2011

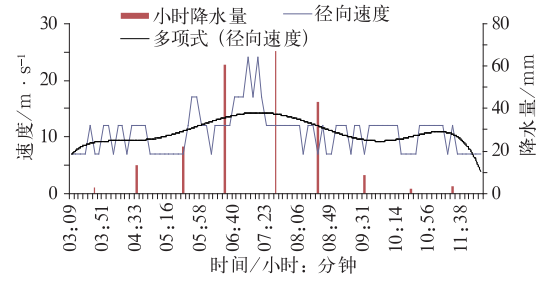


图 8　2011 年 8 月 9 日 03—12 时小石棚站点的 0.5°仰角径向速度和小时雨量图

Fig. 8　Same as Fig. 7, but for radial velocity and hourly rainfall images

在 0.9～1.5 km 高度出现 12 m·s^{-1}的西北急流,4 时 12 m·s^{-1}西北急流进一步向高空伸展到 2.4 km 高度,5 时西北急流继续加强,1.2～2.4 km 高度西北急流增强到 18 m·s^{-1},之后 18 m·s^{-1}西北急流继续向高空伸展加强,07—08 时 18 m·s^{-1}西北急流伸展高度最高达到 2.7 km,最大风速层在 1.2～2.7 km 高度,这一时期是降水最强时段。9 时 1.8 km 高度 18 m·s^{-1}的西北急流减弱到 12 m·s^{-1},18 m·s^{-1}的最大风速层抬升到 1.5～3.0 km 高度,降水强度明显减弱;10 时 0.6 km 高度的 12 m·s^{-1}西北急流减弱为偏西气流,12 m·s^{-1}的西北风速带从 0.6～3.4 km 抬升到 0.9～4.0 km 高度,

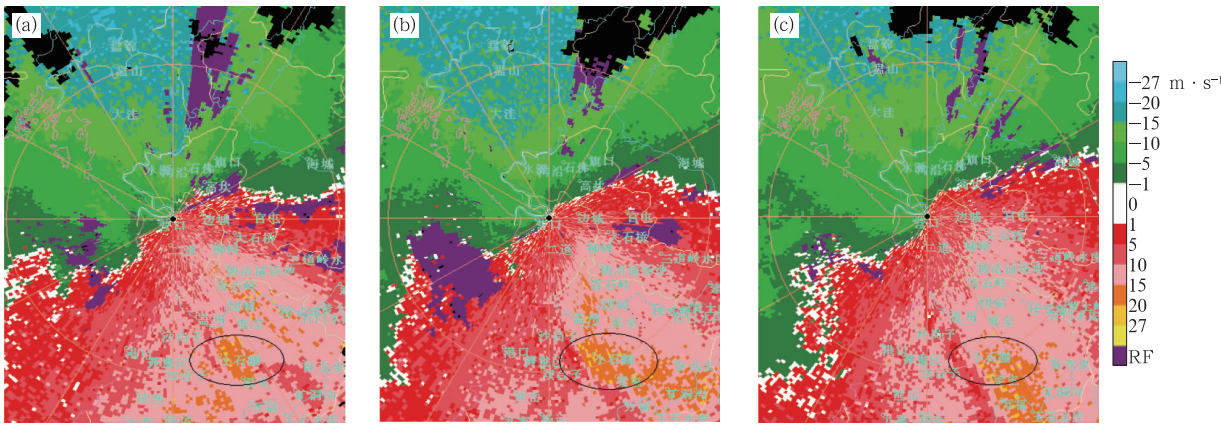


图 9 2011 年 8 月 9 日 05:52(a)、06:40(b)、07:23(c)营口 SA 雷达 1.5°仰角径向速度图

Fig. 9 Yingkou radar 1.5° elevation radial velocity images at (a) 05:52, (b) 06:40, and (c) 07:23 BT 9 August 2011

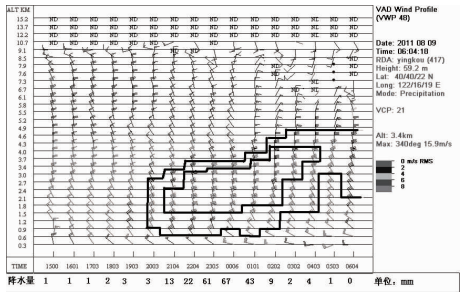


图 10 2011 年 8 月 8 日 23 时至 9 日 14 时(世界时 8 日 15:00 至 9 日 06:04)营口 SA 雷达风廓线图

Fig. 10 VWP products from Yingkou radar images from 23:00 BT 8 August to 14:00 BT 9 August 2011

18 m·s^{-1}的西北急流风速带从 1.5～3.0 km 抬升到 1.5～3.7 km 高度，降水强度继续减弱；超低空 12 m·s^{-1}的西北急流快速减弱消失，低空 18 m·s^{-1}西北急流风速带抬升减弱，强降水也随着减弱到消失。说明超低空 12 m·s^{-1}西北急流的建立和消失对应着强降水的产生和结束，18 m·s^{-1}的低空西北急流风速带出现和减弱抬升对应着强降水的产生和结束，急流风速带抬升减弱，对应着强降水结束，急流风速带最强和最低时段对应着降水最强的时间。

5 结论和讨论

本文对 2011 年 8 月 8—9 日营口小石棚乡特大暴雨的成因进行了分析研究，主要结论如下：

(1) 此次特大暴雨主要是在太平洋副高西伸，强热带风暴梅花登陆后转向西北移动，热带风暴东侧的西南气流将海上充沛的水汽源源输送到辽宁大部，同时，贝加尔湖弱冷空气沿脊前西北气流南下影响，这是辽宁大部出现暴雨到大暴雨、局地特大暴雨的大尺度背景。

(2) 对流层高层稳定的辐散系统、低层稳定的辐合系统、中低层深厚的热带低压从海上携带充沛的暖湿空气是造成这次特大暴雨的主要影响系统，它们对于暴雨的形成具有触发和维持作用。

(3) 小石硼乡在强降水发生时，上空对流活动旺盛，不断有新的中尺度对流单体生成，35 dBz 反射率因子强度达到 5 km 以上，强降水时段低空反射率因子强度平均在 40～45 dBz 之间，中间夹杂 50～55 dBz 回波，低空 0.6～2.4 km 高度有 24 m·s^{-1}的低空急流存在，低空急流在暴雨的整个生命史过程中经历了由弱变强、由强变弱的演变过程，变化过程与降水的强弱时间演变过程基本同步。中低层暖湿气流呈气旋辐合起到了触发对流和加强对流的作用，中尺度强对流单体不断生成和中低空西北急流输送充沛的水汽辐合抬升是造成小石棚回波强度超 40 dBz，达 5 个小时以上主要原因，也是这次特大暴雨的直接影响系统。

(4) 小石棚乡两山夹一沟的地形条件对此次特大暴雨的发生发展也具有重要影响。

(5) 探空资料显示出：小石棚乡发生强降水时段，邻近测站的 CAPE 值比较弱，弱的 CAPE 值将降低降水效率，但是 CAPE 值区域呈狭长分布造成较低的暖云底和较高的平衡高度，使得很多单体云砧周边相对湿度很好，这也在相当程度上抵消了弱

的 CAPE 值对降水效率的降低作用。另一方面,相对弱的垂直风切变提高了降水效率作用。热带低压梅花环境特征就是 CAPE 狭长,温度廓线几乎与湿绝热线重合,条件不稳定较弱,而产生大冰雹和雷暴大风等强对流的环境温度递减率较大,条件不稳定度大,而地面露点或比湿要低一些,所以小石棚只出现了短时特大暴雨。小石棚的这次特大暴雨与中国大多数暴雨以上强降水过程出现在垂直风切变相对弱的环境下相同,但是 7.21 北京极端降水是发生在深层垂直风切变很强的环境下(0～6 km 风矢量差为 24 $m \cdot s^{-1}$)(俞小鼎,2012),说明虽然强降水多数情况需要弱切变,但是在强切变过程中也有特大暴雨个例出现,这是需要在以后的天气分析中要注意的。

参考文献

陈春艳,孔期,李如琦. 2012. 天山北坡一次特大暴雨过程诊断分析. 气象,38(1):72-80.

陈联寿,丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论. 北京:科学出版社.

程正泉,陈联寿,徐祥德,等. 2005. 近 10 年中国台风暴雨研究进展. 气象,31(12):3-9.

丁一汇,蔡则怡,李吉顺. 1978. 1975 年 8 月上旬河南特大暴雨的研究. 大气科学,2(4):276-289.

黄克慧. 2006. 台风云娜后部强降水分析. 气象,32(2):99-103.

江敦春,党人庆,朱志宏. 1997. 台风暴雨中尺度系统与结构的数值研究. 热带气象学报,13(2):168-172.

康岚,牛俊丽,徐琳娜,等. 2013. 台风对四川暴雨影响的环境场对比分析. 气象,39(4):427-435.

梁必骐,梁经萍,温之平. 1995. 中国台风灾害及其影响的研究. 自然灾害学报,14(1):86-91.

孙建华,齐琳琳,赵思雄,等. 2006. "9608"号台风登陆北上引发北方特大暴雨的中尺度对流系统研究. 气象学报,64(1):57-71.

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,38(3):281-290.

吴庆梅,杨波,王国荣,等. 2012. 北京地形和热岛效应对一次 β 中尺度暴雨的作用. 气象,38(2):174-181.

俞小鼎. 2012. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨成因分析. 气象,38(11):1313-1329.

张清华,吴建成,刘蕾,等. 2012. 热带风暴莲花外围特大暴雨的成因分析. 气象,38(5):543-551.

章淹,张义民,白建强. 1995. 台风暴雨. 自然灾害学报,4(3):15-22.

周海光. 2008. 强热带风暴碧利斯(0604)引发的特大暴雨中尺度结构多普勒雷达资料分析. 大气科学,32(6):1289-1308.

朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 1992. 天气学原理和方法. 北京:气象出版社,670-683.

Davis R S. 2001. Flash flood forecast and detection methods. Meteorol Monog, 28(50):481-526.