许爱华，谌芸. 2013. 中尺度天气图分析技术在 2011 年我国南方 4 次强降水过程中的应用. 气象，39(7)：883-893.

中尺度天气图分析技术在 2011 年我国南方 4 次强降水过程中的应用*

许爱华[1] 谌 芸[2]

1 江西省气象台，南昌 330046

2 国家气象中心，北京 100081

提 要： 对 12 h 50 mm 以上的强降水带的预报，模式输出的降水资料是预报的重要依据，但是有时偏差可达 100～200 km。本文尝试依据国家气象中心 2010 年下发的《中尺度天气图分析技术规范(暂行稿)》，利用探空资料，对 2011 年 6 月我国南方梅雨期间强降水过程中 4 次 12 h 最强降水时段的环境场进行中尺度天气图分析，得到了有利于梅雨锋附近的强降水的预报着眼点，给出了判断强降水落区的一些参考依据。700 hPa 以下西南(偏南)急流汇合区，在这些地区，具备了较强的动力、水汽辐合和一定的风垂直切变。地面气压槽中低于日变化的 3 h 变压低值区(中心)易形成变压风辐合流场，也是强降水易发区(中心)。多数情况下锋面可以作为强降水南界，但当 925 hPa 暖切变位于地面锋面南侧(附近)，强降水发生在锋前暖区，10 m·s^{-1} 以上西南急流所能到达的纬度可作为南界。500 hPa 槽前≥18 m·s^{-1} 中层西南急流轴一般可作为 50 mm 以上的强降水区域的北界，但当 925 hPa 切变位置与中层西南急流位置重叠或位于其北侧时，则以 700 hPa 切变为北边界。将这些判据应用于多次强降水天气时段中，并与日本模式输出降水比较，在强雨带南北界以及降水中心方面有订正作用。中尺度天气图分析技术及预报思路是订正模式对强降水落区预报的有效手段之一。

关键词： 强降水，中尺度天气图分析，急流，落区预报，订正

中图分类号： P456 **文献标志码：** A **doi：** 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.07.009

Application of Mesoscale Synoptic Analysis Techniques in Four Heavy Rainfall Processes in South China in 2011

XU Aihua[1] CHEN Yun[2]

1 Jiangxi Meteorological Observatory, Nanchang 330046

2 National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: The precipitation data from model is a significant forecast basis for the severe precipitation of more than 50 mm in 12 h, but sometimes the deviation can be 100—200 km in forecasting. Based on Mesoscale Synoptic Analysis Technics Regulation (provisional) and sounding data this paper tries to analyze the mesoscale weather chart of 4 severe rainfall processes in South China during the Meiyu season of 2011, getting the key point of forecasting the heavy rainfall near Meiyu front and presenting some evidences for estimating the precipitation regions. Convergence zones of southwest or southern jet under 700 hPa have strong power, moisture convergence and certain vertical wind shear. Surface pressure trough lower than the minimum of 3 h daily variation is prone to form convergence flow field of isallobaric wind. And it is also the heavy rainfall areas (center). In most circumstances, the front can be regarded as southern

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006002 和 GYHY201206004)、国家自然科学基金面上项目(41175048)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2012-030)及全国强对流预报专家团队项目共同资助

2012 年 5 月 8 日收稿； 2013 年 2 月 25 日收修定稿

第一作者：许爱华，主要从事天气预报和预报技术研究. Email：767634540@qq.com

boundary of the heavy rainfall, but when the 925 hPa warm shear is in (or near) the south of surface front, heavy rainfall occurs in the warm sector ahead of fronts. And, southwest jet above 10 m·s^{-1} which reaches the latitude areas can act as the southern boundary. More than 18 m·s^{-1} southwest jet in front of trough at 500 hPa can act as the northern boundary of the heavy rainfall area. When the position of 925 hPa shear line overlaps the southwest jet or in the north of it, the 700 hPa shear line can be regarded as the northern boundary. Comparing these criterions with the output of Japanese model, it is found that the results can rectify the southern and northern boundaries of strong rainfall belt as well as rainfall center. Therefore, mesoscale Synoptic Analysis Technics and its forecasting ideas is an effective means for the revised model of heavy rain location forecasting.

Key words: severe precipitation, Mesoscale Synoptic Analysis Technics, jet stream, rain location forecasting, rectifying

引 言

中尺度天气是指水平尺度几十千米至几百千米,时间尺度几小时到几十小时的天气现象(寿绍文,2003),按其性质分为中尺度对流性天气和中尺度稳定性天气。中尺度对流性天气包括雷暴、短历时强降雨、冰雹、雷暴大风、龙卷以及下击暴流等(陆汉城,2000)。熊秋芬等(2009)给出了美国空军全球天气预报中心(AFGWC)环境应用部(EAB)的前首席科学家 Miller 先生的强天气定义,包括龙卷、冰雹、雷暴大风,12 h 2 inch(50.8 mm)以上强降水。可见 12 h 50 mm 以上的短历时暴雨可以作为中尺度对流性天气或强天气进行研究。中尺度对流性天气或强天气都是在一定的大尺度环流背景中,由各种物理条件相互作用形成的中尺度天气系统造成的。因此,在业务预报过程中分析中尺度天气系统生成发展的环境条件,判断中尺度对流天气系统发生发展的潜势至关重要。20 世纪 70 年代,美国强风暴中心(SPC)和美国空军全球天气中心(AFGWC)发展了强天气分析技术和规范、技术培训手册(Crisp,1979;Miller,1972),对各种强天气建立了相应的"概念模型"(熊秋芬等,2009),强天气分析技术一直应用到现在。近年来,张小玲等(2010)详细介绍了在国家气象中心强对流业务预报中应用的中尺度天气的天气图分析技术(以下简称中尺度天气图分析技术)。中尺度天气图分析的核心思想是通过从地面到高空的天气系统的配置分析中尺度天气系统发生发展的最有利的环境条件,包括水平方向和垂直方向的动力和热力不稳定、湿度等。并列举了利用中尺度分析技术较好地预报了强对流天气潜势的例子。陶诗言等(2008)在研究 MJO 与我国南方夏季流域性致洪暴雨关系的基础上提出了致洪暴雨中短期预报思路。倪允琪等(2005)提出了我国长江中下游梅雨锋暴雨的多尺度物理模型和天气学模型;张小玲等(2004)概括了梅雨锋上三类暴雨,一类是梅雨锋上的 β 中尺度的对流性暴雨,二类是梅雨锋东部的初生气旋暴雨,三类是梅雨锋西端深厚高空低槽前部的持续性暴雨,其中第一类是数值预报误差最大的;李娟等(2008)用卫星资料直接同化到暴雨过程的试验,10 天以上连续同化可以改善预报结果。张家国等(2011)给出了湖北省暴雨的雷达回波模型。尹东屏等(2010)、尹洁等(2011)、周宏伟等(2011)、伍志方等(2011)、苗爱梅等(2011)、桂海林等(2010)、姚晨等(2010)和俞小鼎(2012)利用各种高空、地面观测资料、再分析资料雷达和卫星等遥感探测资料以及数值预报产品等资料,深入分析了我国近年一些强暴雨过程的对流天气的中尺度对流系统及其发生发展的环境场条件和物理量条件以及暴雨形成机理,增强了中尺度对流系统发展规律的认识,有助于提高暴雨预报能力。

中尺度天气图分析技术在短历时暴雨预报中如何应用?本文针对 2011 年 6 月 3—20 日我国南方 4 次大范围的暴雨过程中最强降水时段,基于实况探空资料,采用中尺度天气图分析技术,分析有利于暴雨中尺度系统发生发展的环境场条件,探讨 12 h 50 mm 以上强降水落区和强度预报的一些着眼点,寻找能订正数值预报模式输出的强降水落区预报有

效办法，为提高短历时强降水的预报水平提供帮助。

1　2011 年我国南方 4 次强降水过程概述

2011 年 6 月 3—20 日我国南方出现了 4 次大范围的暴雨过程：3—7（过程 1）、9—12（过程 2）、13—15（过程 3）和 17—19 日（过程 4），图 1 是这 4 次过程降水量分布。长江中下游和江南中北部累积雨量普遍在 250 mm 以上，其中江西北部、浙江北部、安徽沿江江南、湖北东南部普遍在 400 mm 以上，安徽的黄山、祁门、休宁、歙县、江西德兴、浙江衢州超过 700 mm，以黄山 799 mm 为最大。连续强降水造成我国南方旱涝急转，部分地区出现了严重的洪涝灾害。

表 1 是 4 次降水过程最强 3 天累积降水量、日最大降水和 20—08 或 08—20 时逐 12 h 最强降水时段的情况（根据国家气象站降水统计结果）。综合过程雨量、大暴雨站数及单日最大降水来看，以过程 3 最强。前 3 个过程的 12 h 最大降水均是发生最大日降水同一地点，即最大日降水基本上是在 12 h 内降下的，过程 4 中 18:20—19:20 最大日降水 205 mm 中的 140 mm 下在了 18:20—19:08 的 12 h 内。从灾情分析中发现，第 2 到第 4 过程 12 h 强降水中心及附近地区有严重的洪涝灾害，造成了重大的人员伤亡和财产损失，因此，加强 12 h 内强降水落区分析与预报，提高强降水的短时预警能力和水平，非常有必要。

本文选取了表 1 中 4 个 12 h 大范围 50 mm 以上强降水时段（也是严重致灾的时段）来进行中尺度天气图分析，并重点通过中尺度天气图分析方法对 4 次降水过程中 12 h 50 mm 以上强降水落区与天气系统关系进行讨论。从天气系统及物理量配置

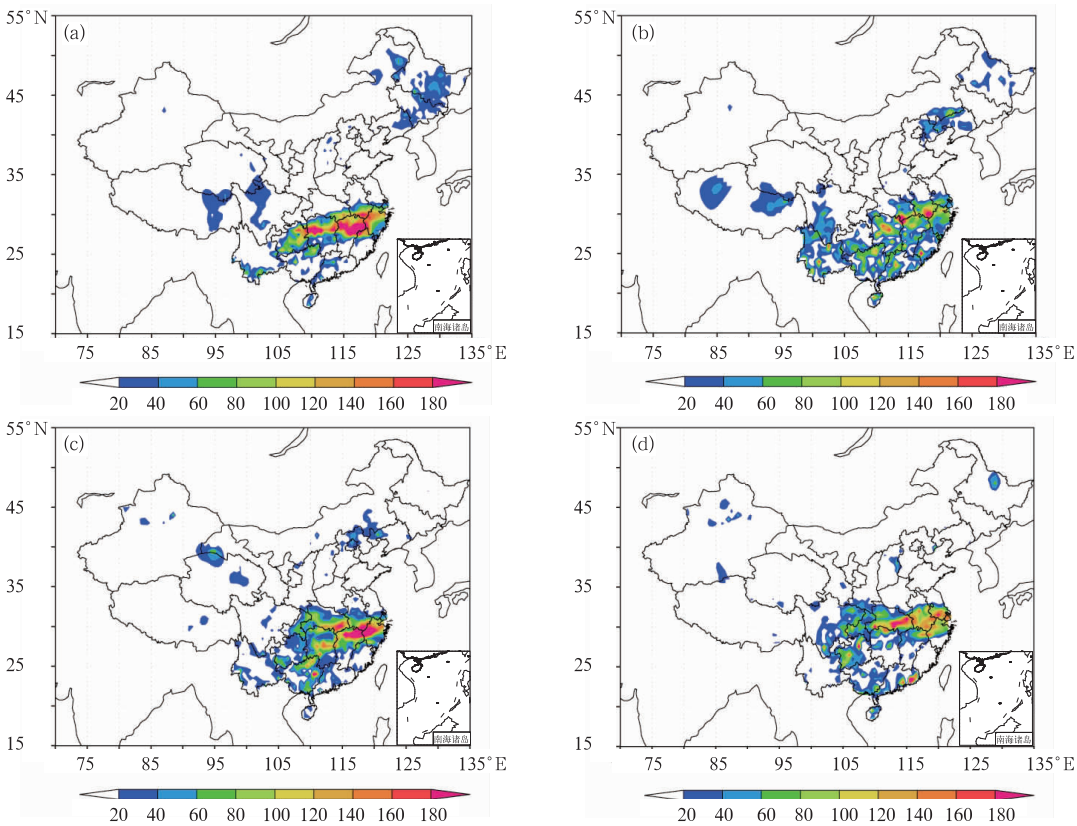


图 1　2011 年 6 月 3—20 日强降水过程降水量分布（阴影区≥20 mm）
（a）3—7 日，（b）9—12 日，（c）13—15 日，（d）17—19 日

Fig. 1　Distribution of severe rainfall event in 3－20 June, 2011 (shadings≥20 mm)
(a) total precipitation in 3－7, (b) total precipitation in 9－12,
(c) total precipitation in 13－15, (d) total precipitation in 17－19

表 1 2011 年 6 月 3—20 日 4 次过程的强降水情况

Table 1 The synoptic situation of the four severe rainfall events in 3－20 June 2011

过程时段/日.时	过程雨量≥100 mm 站数	过程雨量≥200 mm 站数	过程最大降水/日最大降水量/mm 及站名	最强 12 h 降雨时段：100 mm 以上站数/最大降水量/mm
4.08—7.08	65	14	290/184 江西余江	4.20—5.08：7/169
9.08—12.08	41	5	272/281 湖北通城	9.20—10.08：7/256
13.08—16.08	87	24	380/264 江西鄱阳	14.20—15.08：19/232
17.08—20.08	110	3	276/205 浙江衢县	18.08—18.20：12/166

找出一些产生短时强降水典型条件。

2 中尺度天气图分析技术在 4 次强降水过程中的应用

倪允琪等(2005)提出了基于多种实时观测资料的梅雨锋暴雨的多尺度物理模型，建立了梅雨锋暴雨的天气学模型。张小玲等(2004)、尹洁等(2011)、周宏伟等(2011)等对我国梅雨锋暴雨多尺度天气系统相互作用给出了较详细分析。但是在稳定的长江流域梅雨形势下，梅雨锋暴雨特别是 12 h 50 mm 以上强降水具体发生在天气系统的什么部位？用什么手段能找准强降水发生的落区，还是需要预报员不断总结和提炼。这里我们尝试在分析行星尺度环流背景基础上，通过中尺度天气图分析方法分析天气尺度环境场对产生暴雨的作用，提高暴雨预报的水平。

2.1 4 次强降水过程环流背景

4 次过程 500 hPa 平均高度场显示(图略)，4 次过程在亚洲中高纬地区均为两槽一脊的形势，为我国南方典型暴雨环流形势之一。4 次过程长波高压脊的东西范围分别为：70°～110°E，70°～120°E，90°～125°E 和 100°～120°E。在鄂霍次克海到我国江淮地区为东亚大槽区，中纬地区有低槽从华北东移南下和高原短波槽东移，并入我国东部地区的低槽中，并携带低层弱冷空气南下到江淮至长江中下游地区。在孟加拉湾均为明显的低槽区，槽前有强盛的西南暖湿气流向我国南方输送。逐日 500 hPa 形势分析可以看到 4 次过程的 120°E 上的副热带高压(以下简称副高)脊线位置分别为 18°～20°N，21°～23°N，20°～21°N 和 23°～24°N(图略)，有利于我国江南、长江中下游地区出现暴雨天气。从过程 1 到过程 4，588 线西伸脊点从 110°E 东退到 120°E，副高东撤、北抬使得西南暖湿空气加强西进到我国南海地区上空，与副高带来的东南水汽交汇北上。低层的偏东气流与西南气流形成稳定少动切变线和梅雨锋(及弱气旋波动)。副高西北侧冷暖空气的持续性交汇是梅雨锋暴雨的显著特征和尹洁等(2011)、周宏伟等(2011)研究结果是一致的。200 hPa 高空辐散场与倪允琪等(2005)研究成果有所不同，南亚高压在 110°～120°E 的脊线位于 23°～27°N，江南到长江中下游地区处于脊北侧的西北气流中，当高空有低槽(有 6 次明显低槽)影响长江中下游地区，槽前西南气流与西北气流构成高空分流区(辐散区)，或高空急流入口区的风速辐散区南移到长江流域。在这种稳定的行星尺度环流背景下的沿长江流域形成了上述 4 次暴雨过程。

2.2 中尺度天气系统发展的形势配置与强降水落区关系分析

图 2～图 6 是采用中尺度天气图分析技术得到的 4 日 20 时、9 日 20 时、14 日 20 时和 18 日 08 时综合图，图中阴影区和深阴影区分别是 12 h 雨量 50～99.9 和 100 mm 以上暴雨到大暴雨落区(以下统称强降水落区)。图中显示，4 日 20 时至 5 日 08 时、9 日 20 时至 10 日 08 时、14 日 20 时至 15 日 08 时及 18 日 08—20 时 4 个强降水时段中过程的影响系统有短波槽、切变线、低空急流、低涡和地面辐合线(锋面)，但是从天气系统配置上还是有一定差别或特殊性。以下通过中尺度天气图分析方法对 4 次降水过程中 12 h 50 mm 以上强降水落区与天气系统关系进行讨论。

2.2.1 6 月 4 日 20 时至 5 日 08 时短时强降水时段的中尺度天气图分析

2011 年 6 月 4 日 20 时至 5 日 08 时在江西中部偏北地区和湖南的中部偏东地区出现了大范围的 12 h 50 mm 以上强降水，其中江西的上饶市南部、鹰潭市和宜春市东部的部分地区雨量超过 100 mm，以余江 169 mm 为最大。从图 2 可以看到强降水区上空有利的动力强迫抬升和水汽条件：(1) 925～850 hPa 低空急流左侧辐合区，急流核分别达到 12

和 18 m·s^{-1}，尤其是两条走向不同的急流交汇，形成强烈的气流和水汽辐合，NCEP 1°×1°再分析资料显示了在该地区的负散度中心达到－72×10^{-5} s^{-1}（图略）；(2) 700 hPa 16 m·s^{-1}急流轴从强降水区上空穿过；(3) 500 hPa 高空短波槽前有大于 20 m·s^{-1}西南风，[在《强天气预报培训手册》中（熊秋芬等，2009）称≥35 kn(1 kn≈0.154 m·s^{-1})气流为“中层急流”，下同]，有较强的正涡度平流；(4) 200 hPa 显著的“分流型式”的辐散区正位于强降水上空，暴雨区上空强抽吸作用加强了低层辐合上升；(5) 地面气压低于 1005 hPa 的倒槽中有弱的气旋，表明地面存在大尺度辐合抬升条件；(6) 比湿≥14 g·kg^{-1}的湿舌范围大，覆盖了江南华南地区。强降水在湿舌的轴线附近。

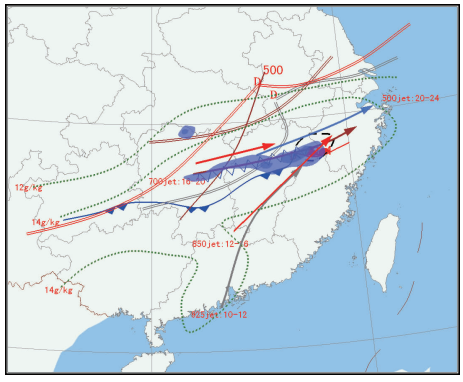


图 2　2011 年 6 月 4 日 20 时天气系统配置图
[灰色双线和灰色箭头为 925 hPa 切变和急流，红色双线和红色箭头为 850 hPa 切变和急流，棕色双线和棕色箭头为 700 hPa 切变和急流，棕色单线为 500 hPa 槽线，蓝箭头为 500 hPa 急流（急流两段标值为急流轴上风速大小，单位：m·s^{-1}），绿色虚线为 850 hPa 为等比湿线（单位：g·kg^{-1}），蓝色折线为 200 hPa 分流辐散区，阴影区和深阴影区分别是 12 h 雨量 50～99.9 和 100 mm 以上暴雨到大暴雨落区]

Fig. 2　Synoptic situation at 20:00 BT 4 June 2011
[double line: shear at 925 hPa (gray), shear at 850 hPa (red), shear at 700 hPa (brown); arrow: jet at 925 hPa (gray), jet at 850 hPa (red); jet at 700 hPa (brown), jet at 500 hPa (blue, the value is the wind speed of jet axis, unit: m·s^{-1}); single line: 500 hPa trough line (brown); dotted line: specific humidity at 850 hPa (green, unit: g·kg^{-1}); polyline: 200 hPa divergence area (blue); shaded area: precipitation of 50－99.9 mm in 12 h; shaded dark area: precipitation over 100 mm in 12 h]

从图 2 我们可以看到当 850 或 925 hPa 为“人”字型切变时，12 h 50 mm 以上强降水区域发生在：(1) 500 hPa≥20 m·s^{-1}急流轴到地面锋面附近，(2) 700 hPa≥16 m·s^{-1}急流轴南北 100 km 内，(3) 850 hPa 冷式切变的东侧，(4) 850 与 700 hPa 急流轴相交点以西，(5) 在 850 hPa 比湿≥14 g·kg^{-1}湿舌的轴线附近。12 h 100 mm 以上强降水区域发生在 925～700 hPa 三支西南急流的轴线交汇地附近，925～850 hPa 急流轴左前侧和 700 hPa 急流轴的附近，925 hPa 切变的东南侧。

从这次过程天气系统配置分析可以看到，12 h 50 mm 以上强降水并不是发生在 850 或 700 切变和低涡中心附近，而是在低涡南部 200～300 km，并和急流位置、925 hPa 切变线密切相关。

2.2.2　6 月 9 日 20 时至 10 日 08 时短时强降水时段的中尺度天气图分析

2011 年 6 月 9 日 20 时至 10 日 08 时湖南中北部，湖北东南部、江西北部、贵州南部及广西西北部出现了 12 h 50 mm 以上强降水，尤其是鄂湘赣交界地区出现了特大暴雨，湖北通城 12 h 256 mm，湖南洞庭湖区的岳阳市 12 h 雨量达 200 mm 以上，江西修水县 7 个乡镇 6 h 降水为 150 mm 以上，修水县县城 6—9 时 3 h 降水达 120 mm。特大暴雨引发这些地区山洪泥石流，造成重大人员伤亡。图 3 是采用中尺度图的天气分析方法对 9 日 20 时天气系统的配置分析的结果，显示了大暴雨到特大暴雨发生前 12 h 有利的动力强迫和水汽条件：(1) 9 日 20 时地面在湖北东部有弱气旋波生成，冷锋前部湘东北地区出现了异常 Δp_3 低值中心－0.1 hPa（通常 20 时变压是 1.0 hPa 以上），按地转偏差风原理（朱乾根等，2000），负变压中心易形成中小尺度的辐合流场；(2) 925～700 hPa 低空急流在鄂、湘、赣交界处汇合形成了明显的辐合区，尤其是 9 日夜间到 10 日 08 时 850 hPa 急流显著增强，10 日 08 时安庆站 12 h 风速加大 8 m·s^{-1}（实际预报中，可以通过数值预报结果来分析急流加强），动力强迫抬升和水汽辐合加强；(3) 500 hPa 16～20 m·s^{-1}西南风轴位于武汉、安庆到杭州，在武汉市上空 925～500 hPa 的风随高度顺转，东南风 6 m·s^{-1}转为西南风 20 m·s^{-1}，风垂直切变和涡度平流较强；(4) 高空 200 hPa“分流型式”的辐散区位于长江中下游沿江地区，并向东南方向（大暴雨发生区上空）移动；(5) 850 hPa 比湿≥14 g·kg^{-1}，特大暴雨区上空比湿达到17 g·kg^{-1}，

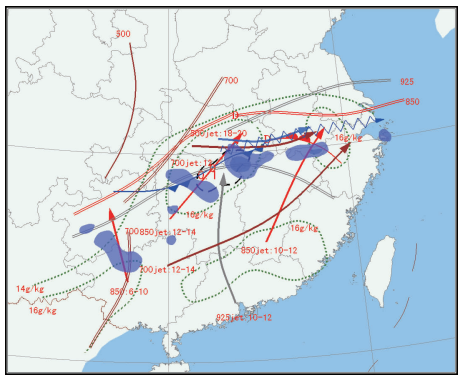


图 3 2011 年 6 月 9 日 20 时天气系统配置图
[灰色双线和灰色箭头为 925 hPa 切变和急流，红色双线和红色箭头为 850 hPa 切变和急流，棕色双线和棕色箭头为 700 hPa 切变和急流，棕色单线为 500 hPa 槽线，蓝箭头为 500 hPa 急流，(急流两段标值为急流轴上风速大小，单位：m·s^{-1})，绿色虚线为 850 hPa 等比湿线，蓝色折线：200 hPa 分流区，黑色虚线为 3 h 负变压中心，阴影区和深阴影区分别是 12 h 雨量 50～99.9 和 100 mm 以上暴雨到大暴雨落区]

Fig. 3 Synoptic situation at 20:00 BT 9 June 2011
[double line: shear at 925 hPa (gray), shear at 850 hPa (red), shear at 700 hPa (brown); arrow: jet at 925 hPa (gray), jet at 850 hPa (red), jet at 700 hPa (brown), jet at 500 hPa (blue, the value is the wind speed of jet axis, unit: m·s^{-1}); single line: 500 hPa trough line (brown); dotted line: specific humidity at 850 hPa (green), katallobaric center (black); polyline: 200 hPa diversion area (blue); shaded area: precipitation of 50－99.9 mm in 12 hours; shaded dark area: precipitation over 100 mm in 12 hour]

为武汉近 15 年来 6 月上旬最大值；(6) 9 日 20 时武汉探空显示 *CAPE* 为 1531 J·kg^{-1}(在锋面逆温上做订正 *CAPE* 可达 2000 J·kg^{-1}以上)，10 日 08 时南昌 2296 J·kg^{-1}(图 4)。高能量和较强风垂直切变有利于鄂、湘、赣交界区强风暴发展。这也是过程 2 对流性降水最强的原因之一。

从图 3 可以看到，当 925 hPa 暖切变与地面锋面紧邻或在地面锋面南侧时，12 h 50 mm 以上强降水出现在地面(气旋波)锋面附近到锋前暖区，强降水的区域可以由以下条件来确定：(1) 500 hPa≥18 m·s^{-1}急流轴以南 200 km 内，即 500 hPa 急流轴可以作为强降水北界；(2) 925 hPa≥10 m·s^{-1}西南急流北侧，即 10 m·s^{-1}西南急流所能到达最北的纬度可以作为强降水南界；(3) 在 850 hPa 比湿≥14 g·kg^{-1}湿舌中。12 h 100 mm 以上强降水区域发生在 925～700 hPa 三支西南急流的轴线汇合地、925 hPa 西南急流前端、地面异常小的或负变压中心 100 km 区域内。

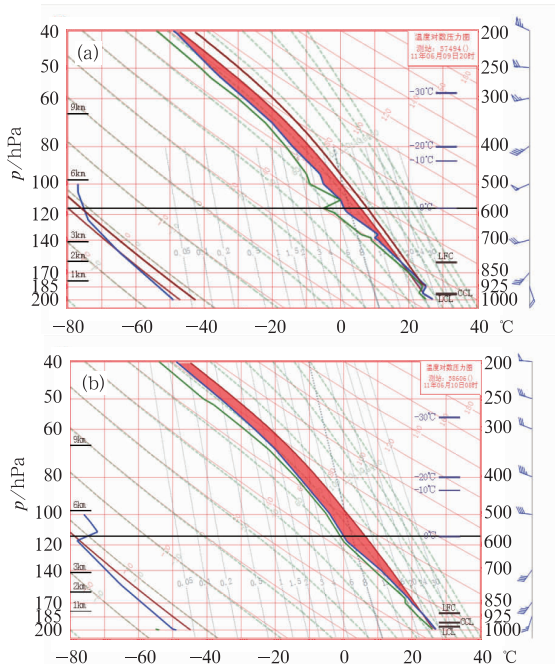


图 4 2011 年 6 月 9 日 20 时武汉探空图(a)和 6 月 10 日 08 时南昌探空图

Fig. 4 Radiosonde profiles at (a) 20:00 BT 9 June 2011 in Wuhan and (b) 08:00 BT 10 June 2011 in Nanchang

2.2.3 6 月 14 日 20 时至 15 日 08 时短时强降水时段的中尺度天气图分析

2011 年 6 月 14 日 20 时至 15 日 08 时在安徽南部、浙江北部、江西北部和湖南中东部出现了最大范围的 12 h 50 mm 以上强降水，江西北部到浙江西北部有大范围的 100 mm 以上的强降水，江西东北部的鄱阳县降水为 232 mm。图 5 是采用中尺度天气图分析方法对 14 日 20 时天气系统的配置进行分析的结果，图 5 显示了大暴雨到特大暴雨发生前 12 h 有利的动力强迫和水汽条件：(1) 14 日 20 时地面静止锋上出现弱的波动，静止锋附近降压显著，20 时气压降至 1002.5 hPa 以下，Δp_3 明显低于日变化，且负变压区范围大，赣北均处于 $\Delta p_3 \leqslant 0$ 区域内，在南昌县低值中心达到－1.3 hPa(之后 12 h 南昌县雨量 117 mm)。(2)925～700 hPa 三层低空急流强盛，最大风速分别达到 12、18 和 24 m·s^{-1}。急流前侧和左侧赣北到皖南上空汇合形成了中低层强辐合区；尤其是南昌与安庆站西南风风速差达 16 m·s^{-1}，

同时低涡在急流北侧沿切变线东移，在大暴雨带上空形成强烈的动力辐合抬升和水汽辐合。（3）700 hPa 16 m·s^{-1}以上急流轴从湖南中部伸到浙江北部，长达近几千千米，恰好与强降水落区相吻合。（4）14 日 20 时中层 500 hPa 18～24 m·s^{-1}大风轴位于长江中下游地区，15 日 08 时南移到大暴雨带上空，显然大暴雨发生过程中风垂直切变和涡度平流加大。（5）高空 200 hPa“分流形式”辐散区位于暴雨带北缘上空。（6）长江中下游、江南、西南地区东部 850 hPa 比湿≥12 g·kg^{-1}，大暴雨上空比湿≥14 g·kg^{-1}。由此可见，高空低槽、中低层切变、低涡（低压环流）、急流、地面锋面系统、高空分流区的多个有利天气尺度系统较好的配置造成了最大范围的一次大暴雨天气过程。与尹洁等（2011）分析的特大暴雨过程的天气系统的配置是一致的。

从图 5 我们可以看到当 850 或 925 hPa 为“人”

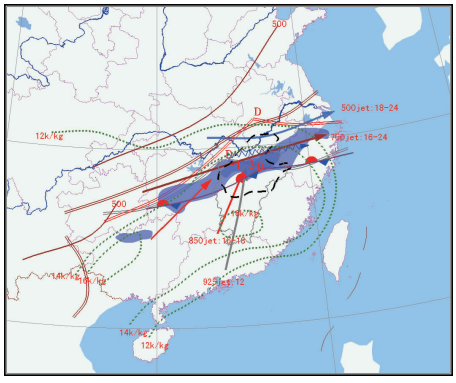


图 5　2011 年 6 月 14 日 20 时天气系统配置图
［灰色双线和灰色箭头为 925 hPa 切变和急流，
红色双线和红色箭头为 850 hPa 切变和急流，
棕色双线和棕色箭头为 700 hPa 切变和急流，
棕色单线为 500 hPa 槽线，蓝箭头为 500 hPa 急流
（急流两段标值为急流轴上风速大小，单位：m·s^{-1}），
绿色虚线为 850 hPa 等比湿线，蓝色折线：200 hPa
分流区，黑色虚线为 3 h 负变压中心，阴影区
和深阴影区分别是 12 h 雨量 50～99.9
和 100 mm 以上暴雨到大暴雨落区］

Fig. 5　Synoptic situation at 20:00 BT 14 June 2011
[double line: shear at 925 hPa (gray), shear at 850 hPa (red), shear at 700 hPa (brown); arrow: jet at 925 hPa (gray), jet at 850 hPa (red), jet at 700 hPa (brown), jet at 500 hPa (blue), the value is the wind speed of jet axis, unit: m·s^{-1})
single line: 500 hPa trough line (brown); dotted line: specific humidity at 850 hPa (green), katallobaric center (black); polyline: 200 hPa diversion area (blue); shaded area: precipitation of 50－99.9 mm in 12 h; shaded dark area: precipitation over 100 mm in 12 h]

字型切变，12 h 50 mm 以上强降水区域发生在：(1) 500 hPa≥20 m·s^{-1}急流轴到地面锋面附近；(2) 700 hPa≥16 m·s^{-1}急流轴南北 100 km 内；(3) 850 hPa 切变的东侧和南侧；(4) 850 与 700 hPa 急流相交点以西；(5)850 hPa 比湿≥14 g·kg^{-1}湿舌中。12 h 100 mm 以上强降水发生区域：(1) 925～700 hPa 三支西南急流轴线交汇地附近，925～850 hPa 急流轴前端和 700 hPa 急流轴附近；(2) 925 hPa 切变的附近；(3) 地面倒槽中异常小的变压中心附近（图 5 中的黑虚线）。

2.2.4　6 月 18 日 08 时至 18 日 20 时短时强降水时段的中尺度天气图分析

18 日 08 时至 18 日 20 时在湖北东部、安徽南部、江苏南部和湖南西北部出现大范围的 12 h 50 mm以上强降雨，湖北东部和安徽南部的部分地区降雨为 100 mm，武汉市最大达到 166 mm，6 h 降雨 149 mm，城区不少地方渍涝积水，全城交通几近瘫痪。图 6 是采用中尺度天气图分析方法对 18 日 08 时天气系统的配置进行分析的结果，图 6 显示了大暴雨发生前 12 h 有利的动力强迫和水汽条件：(1) 18 日 08 时地面静止锋位于长江中下游地区，静止锋附近降压显著，湖北南部到湖南北部 20 时气压降至 1002.5 hPa 以下，$\Delta p_3 \leqslant 0$ 变压区，－0.5 最低 Δp_3 中心出现在距武汉市上游 100 km 的天门县。(2) 925～850 hPa 切变位于长江流域，且近乎重合，低压沿切变线东移，切变南侧存在一支东西长达近 1000 km 的强偏南急流，中心风速达到了 16～20 m·s^{-1}，700 hPa 切变位于淮河流域，其南部西南急流从湖南西北部伸到浙江北部。(3) 我国日本海到山东的低槽引导低层冷空气南下，使得切变北侧的东北风加大，925 hPa 达到 10～14 m·s^{-1}。(4) 500 hPa 低槽正好叠加在低层切变东段上空，具有前倾结构，槽前西南风达到 20～24 m·s^{-1}。(5) 高空 200 hPa 风向“分流”辐散区位于暴雨带上空。(6) 850 hPa 长江流域有比湿≥14 g·kg^{-1}湿舌。这些条件在长江流域叠加形成了低层强辐合和高空辐散以及源源不断的水汽供应，造成大范围的强降水。

从图 6 我们可以看这次 12 h 50 mm 以上强降水发生的区域在：(1) 700 hPa 切变南侧，(2) 地面锋面附近及北侧，(3) 西界为 850 hPa 冷式切变，(4) 东界为 850 与 700 hPa 急流相交的经度，(5) 强

降水出现在 850 hPa 比湿舌北缘 12～15 g·kg^{-1}区域中。强降水北界与前 3 个个例不同，500 hPa 急流轴与 700 hPa 急流轴、850 hPa 切变线、925 hPa 切变线等多条特征线重叠，这些特征线正好位于强降水上空，表明系统垂直结构陡直或前倾时，这时如果 500 hPa 大风轴作为强降水北界，就会使强降水带变窄，导致漏报。因此，这种情况下可能以 700 hPa切变南侧作为北界更合适。

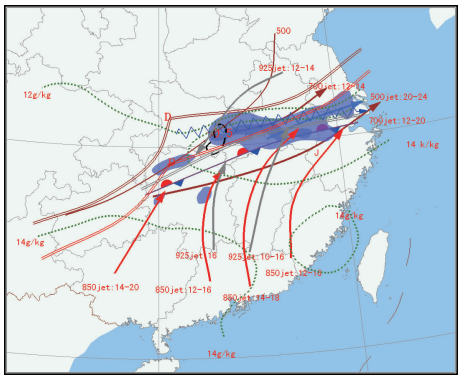


图 6 2011 年 6 月 18 日 08 时天气系统配置图
[灰色双线和灰色箭头为 925 hPa 切变和急流，
红色双线和红色箭头为 850 hPa 切变和急流，
棕色双线和棕色箭头为 700 hPa 切变和急流，
棕色单线为 500 hPa 槽线，蓝箭头为 500 hPa 急流
（急流两段标值为急流轴上风速大小，单位：m·s^{-1}），
绿色虚线为 850 hPa 等比湿线，蓝色折线：200 hPa
分流区，黑色虚线为 3 h 负变压中心，阴影区
和深阴影区分别是 12 h 雨量 50～99.9
和 100 mm 以上暴雨到大暴雨落区]

Fig. 6 Synoptic situation at 08:00 BT 18 June 2011
[double line: shear at 925 hPa (gray), shear at 850 hPa (red), shear at 700 hPa (brown); arrow: jet at 925 hPa (gray), jet at 850 hPa (red), jet at 700 hPa (brown), jet at 500 hPa (blue, the value is the wind speed of jet axis, unit: m·s^{-1}); single line: 500 hPa trough line (brown); dotted line: specific humidity in 850 hPa (green), katallobaric center (black); polyline: 200 hPa diversion area (blue); shaded area: precipitation of 50－99.9 mm in 12 h; shaded dark area: precipitation over 100 mm in 12 h]

12 h 100 mm 以上强降水区域与前 3 个个例相似，也发生在：(1)925～700 hPa 三支西南急流轴线交汇地区，925～850 hPa 急流轴前端和 700 hPa 急流轴附近(最靠近切变线的一条≥12 m·s^{-1}的西南急流)；(2)925 hPa 切变的附近；(3)地面倒槽中异常小的变压中心附近(图 6 中的黑虚线)。

3 12 h 50 mm 以上强降水落区的预报着眼点

基于上述中尺度天气图分析结果，梅雨期间，长江中下游地区到江南，区域性 12 h 50 mm 以上的强降水产生的有利条件是：地面有低于 1005 hPa 的低压倒槽和静止锋，925～700 hPa 有切变线和低压环流，切变南侧存在一支西南到偏南急流(其中 925～700 hPa 急流核大于 10、14 和 16 m·s^{-1})，500 hPa 有短波槽东移。12 h 50 mm 以上的强降水区域和 100 mm 以上的强降水中心的落区预报着眼点：

(1) 700 hPa 以下急流汇合区。在中低层多层急流交汇的地区，具备了较强的动力、水汽辐合和一定的风垂直切变，有利于暴雨发生。

(2) 925 hPa 暖切变位于地面锋面南侧(附近)，易形成锋前暖区暴雨，强降水发生在 10 m·s^{-1}以上西南急流的北侧，即 925 hPa≥ 10 m·s^{-1}偏南风能到达的纬度可作为暖区暴雨的南界。对暖区暴雨，锋区和斜压锋生作用较弱，边界层以下强辐合条件可能更为重要。

(3) 500 hPa 槽前≥18 m·s^{-1}中层西南急流轴，可作为 50 mm 以上的强降水区域的北界；当 925 hPa 切变位置与中层西南急流位置重叠或偏北时，则以 700 hPa 切变为北边界，这时强降水会位于 500 hPa 槽前急流轴正下方。

(4) 700 hPa 西南急流轴和 200 hPa 辐散区下方。特别是 700 hPa 切变南侧≥12 m·s^{-1}的西南急流附近水汽辐合条件较好，当和低层辐合系统的叠加时，容易形成较深厚的水汽辐合层，有利于暴雨发生。

(5) 地面锋面(辐合线)附近 3 h 变化低于日变化的区域，08 和 20 时 $\Delta p_3 \leqslant 0.5$ hPa，多数 $\Delta p_3 \leqslant 0$ hPa。负变压中心产生的变压风辐合对暴雨形成有利(朱乾根，2000)。

(6) 850 hPa 四川盆地以东有东北—西南向冷式(或人字)切变时，其在经度一般作为强降水西边界；但当 500 hPa 低槽比冷式切变位置偏东，即为前倾结构时，且槽后有较大范围的 10 m·s^{-1}以上西北气流时，500 hPa 低槽可作为强降水西边界。

(7) 850 和 700 hPa≥12 m·s^{-1}急流或延长线的最东部的交汇位置，可以作为东边界的参考。

100 mm 以上的强降水中心的判断可以参考三

个条件:一是 925～700 hPa 的西南(或东南)急流交汇处,二是低于日变化的 3 h 小的变压中心,三是当 925～850 hPa 为冷式切变时,100 mm 以上的强降水中心发生在西南急流左前侧,当为暖切变时,强降水中心在偏南急流的前部和东南急流左前侧。

采用中尺度天气分析方法对 2011 年 6 月 4 日 20 时、6 日 20 时、9 日 20 时、14 日 20 时、18 日 08 时和 20 时 6 个时间的实况探空进行分析,依据上述强降水预报着眼点,做出未来 12 h 50 mm 以上强降水的范围估计(落区预报),得到图 7。图 7 中的实线所包围的区域是 12 h 50 mm 以上降水落区预报,虚线是 100 mm 以上降水中心可能发生区域,图 7 中的数值是日本降水格点预报值。从图 7 可以看到,与降水实况(图 7 中的阴影区)比较,实况 12 h 50 mm 以上基本上落在采用中尺度分析得到的预报范围里,但预报范围比实况大,预报区域的北界多比实况偏北;可能发生 100 mm 以上的强降水中心预报与实况降水中心相近。由此可见,依据中尺度分析判断强降水中心位置是有较好的预报参考作用。

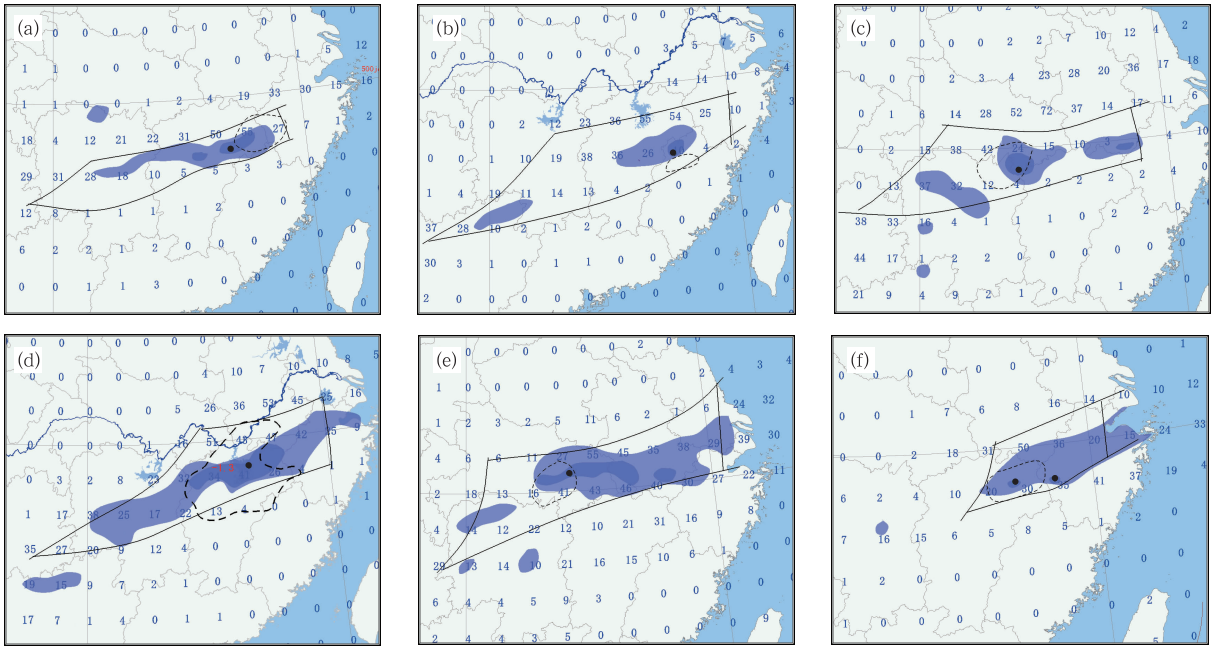


图 7　2011 年 6 月 12 h 50 mm 以上降水实况(阴影)和根据中尺度天气图分析判断的 12 h 50 mm 以上落区(实线)以及日本模式输出降水预报(数值)

(a)4 日 20 时,(b)6 日 20 时,(c)9 日 20 时,(d)14 日 20 时,(e)18 日 08 时,(f)18 日 20 时

(虚线是地面 08 时或 20 时 3 h 负变压区域,实心圆点是实况强降水中心)

Fig. 7　Observed precipitation of more than 50 mm in 12 hours (shadings) and the estimated precipitation of more than 50 mm in 12 hours by Mesoscale Synoptic Analysis Technics (solid line), and the precipitation area of the Japanese model forecasting (number)

(a) 20:00 BT 4 June, (b) 20:00 BT 6 June, (c) 20:00 BT 9 June, (d) 20:00 BT 14 June, (e) 08:00 BT 18 June, (f) 20:00 BT 18 June 2011

(dotted line: katallobaric area of 3 h at 20:00 BT, solid dot: heavy rainfall center)

预报实践表明,日本降水模式对中纬度大范围的降水有较好的预报能力,其输出的降水预报是业务预报的重要信息之一,但夏季降水强度系统误差常常是实况雨量的 2～3 倍,位置偏离误差不确定。图 7 中的日本降水预报与实况相比,强降水区的预报位置普遍比实况偏北,图 7b～7d 偏北误差达 100～200 km,尤其是图 7c 和 7d 最大降水区落在依据中尺度分析得到的 12 h 50 mm 线北界以北。欧洲细网格降水预报对这两个时段的预报也有相似的偏北的误差(图略)。由此可见,中尺度分析得到的 12 h 50 mm 的北界线(下称“北界线”)可以用于修正模式输出的强降水区预报的位置,当模式输出强

降水带位置出现在北界线以北时，需要订正到北界线以南。当中层急流位于 925 hPa 切变北侧时，500 hPa低槽前的中层急流可以作为 12 h 50 mm 线北界线，当中层急流位和 925 hPa 切变重合或在其南侧时，以 700 hPa 切变线为北边界。依据中尺度分析得到的 12 h 50 mm 线南界和东、西界没有明显优于数值预报。

为了验证这些预报着眼点是否有一定的普适性。我们从 2010 年 6 月 17—21 日，运用这些预报着眼点能够较好地分析出 12 h 50 mm 以上强降水区的位置。以 19 日 08—20 时强降水为例，19 日 08 时 700 hPa 急流汇合区东西跨度大，所以强降水区东西范围也大，尤其是在江西东部 19 日 08 时至 20 日 08 时出现特大暴雨。图 8 中的日本降水格点大值中心位于湖南境内，江西东部最大降水39 mm，而用中尺度天气图分析方法得到的综合图上，可以分析出低空急流在江西东部到福建西北部交汇，且 300～200 hPa 在这一地区为显著的分流式辐散区（图略），图 8 中的实心圆点为国家气象站 12 h 150 mm以上强降水中心，江西东部到福建西北达

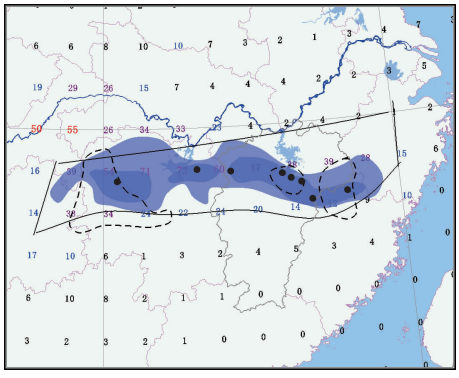


图 8 2011 年 6 月 19 日 12 h 50 mm 以上降水实况（阴影）和基于中尺度天气图分析判断的 12 h 50 mm 以上落区（线条）以及日本模式输出降水预报（数值）
（虚线是地面 08 时 3 h $\Delta p_3 \leqslant 0.5$ hPa 变压区域，实心圆点是实况强降水中心）

Fig. 8 Observed precipitation of more than 50 mm in 12 h (shadings) and the estimated precipition of more than 50 mm in 12 h by Mesoscale Synoptic Analysis Technics (solid line), and the precipitation area of the Japanese model forecasting (number) 19 June 2011
(dotted line: $\Delta p_3 \leqslant 0.5$ katallobaric area of 3 h at 08:00 BT, solid dot: heavy rainfall center)

到 200 mm 以上，强降水中心多数落在了 08 时 $\Delta p_3 \leqslant 0.5$ hPa 小变压区内（图 8 中的黑色虚线）。从江西逐时雨量分析得知，江西特大暴雨在 19 日 10 时开始迅速加大的，中尺度天气图分析可在 10 时以前完成。因此，中尺度天气图分析对强降水的短时和临近预报有重要意义。

4 结论与讨论

从上述分析来看，基于实况探空的中尺度天气分析技术（思想）对于我国夏季梅雨锋上大范围降水过程中 12 h 50 mm 以上短时强降水发生条件和落区分析是一个有效的方法，有时可用于修正模式对强降水落区预报的误差，特别是对强雨带北界的订正。

梅雨期间，在长江中下游到江南中北部地区，12 h 50 mm 以上的强降水产生的条件：地面低压倒槽和静止锋，中低层 32°～28°N 有切变线和低压环流，925～700 hPa 25°～32°N 西南到偏南急流（其中 925～700 hPa 急流核大于 10、14 和 16 m·s^{-1}）。对短时强降水落区分析判断主要有以下几个着眼点：

（1）700 hPa 以下急流汇合区。

（2）925 hPa 暖切变位于地面锋面南侧（附近），易形成锋前暖区暴雨，强降水发生在 10 m·s^{-1} 以上西南急流的北侧，即 925 hPa≥10 m·s^{-1} 偏南风能到达的纬度可作为暖区暴雨的南界。

（3）500 hPa 槽前≥18 m·s^{-1} 中层西南急流轴，可作为 50 mm 以上的强降水区域的北界；当 925 hPa 切变位置与中层西南急流位置重叠或偏北时，则以 700 hPa 切变为北边界。这时强降水会位于 500 hPa 槽前急流轴正下方。

（4）700 hPa 西南急流轴和 200 hPa 辐散区下方。

（5）地面锋面（辐合线）附近 3 h 变化低于日变化的区域，08 和 20 时 $\Delta p_3 \leqslant 0.5$ hPa，多数 $\Delta p_3 \leqslant 0$ hPa。

这些预报着眼点在 2012 年 5 月 12 日赣北短历时强暴雨和 6 月 22—24 日赣中暴雨过程得到了较好的检验和应用，尤其是大暴雨集中落在地面锋面（辐合线）附近的异常小的变压区。6 月 22 日白天由于西南急流北抬比较快，暴雨落区预报比实况稍偏南，因此，这些预报着眼点还需要更多的梅雨锋暴

雨过程的验证和完善。从上述分析可以看到用中尺度天气图分析方法可以对强降水落区进行判断,但有较多空报。随着数值预报技术发展,全球模式和区域模式提供的对强降水的预报能力在不断提高,预报员在对数值模式的天气形势、降水、物理量及其演变特征分析的基础上,结合实况探空分析,再利用上述预报着眼点,可能会减少仅用天气图定性分析的空报问题。另一方面修正模式对强降水落区预报,特别是对雨带位置误差在 100～200 km 以上的情况。上述梅雨锋附近强降水预报着眼点,也可尝试应用于中期强降水预报落区的订正。以 2011 年 6 月 10 日 08 时 ECMWF 细网格中期预报为例(图略),模式预报了 14 日 08 时至 15 日 08 时暴雨带在 30°N 以北,比实况暴雨带偏北近 200 km。而根据对 14 日 20 时的预报场 500 hPa 槽前≥20 $m \cdot s^{-1}$ 西南急流轴已经达到江西北部—浙江西北部一带的信息,可以将暴雨带向南订正,因此,梅雨锋上强降水预报着眼点具有一定的普适性。

参考文献

桂海林,周兵,金荣花. 2010. 2007 年淮河流域暴雨期间大气环流特征分析. 气象,36(8):8-18.

李娟,朱国富. 2008. 直接同化卫星辐射资料在暴雨预报中应用研究. 气象,34(6):36-43.

陆汉城. 2000. 中尺度天气原理和预报. 北京:气象出版社,9.

苗爱梅,贾利冬,李苗,等. 2011. 2009 年山西 5 次横切变暴雨的对比分析. 气象,37(8):956-967.

倪允琪,周秀骥. 2005. 我国长江中下游梅雨锋暴雨研究进展. 气象,31(1):9-12.

寿绍文,励申申,姚秀萍. 2003. 中尺度气象学. 北京:气象出版社,1.

陶诗言,卫捷,张小玲. 2008. 2007 年梅雨锋降水的大尺度特征分析. 气象,34(2):3-5.

伍志方,曾沁,吴乃庚,等. 2011. 广州"5.7"高空槽后和"5.14"槽前大暴雨过程对比分析. 气象,37(7):838-846.

熊秋芬,章丽娜. 2009. 强天气预报员手册. 全国气象部门预报员轮训系列教材.

姚晨,张雪晨,毛冬艳. 2010. 滁州地区不同类型特大暴雨过程的对比分析. 气象,36(11):18-25.

尹东屏,张备,孙燕. 2010. 2003 年和 2006 年梅汛期暴雨的梅雨锋特征分析. 气象,36(6):1-6.

尹洁,郑婧,张瑛,等. 2011. 一次梅雨锋特大暴雨过程分析及数值模拟. 气象,37(7):827-837.

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.

张家国,王钰,黄治勇. 2011. 几类区域性暴雨雷达回波模型. 气象,37(3):285-290.

张小玲,陶诗言,张顺利. 2004. 梅雨锋的三类暴雨. 大气科学,28(2):188-205.

张小玲,张涛,刘鑫华. 2010. 中尺度天气的高空地面图综合分析. 气象,36(7):143-150.

周宏伟,王群,裴道好,等. 2011. 苏北东部一次梅雨锋大暴雨过程的多尺度特征. 气象,37(4):432-438.

朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 2000. 天气学原理和方法(第三版). 北京:气象出版社,55.

Crisp M C A. 1979. Training guide for severe weather forecasters. AFGWC/TN-79/002. United States Air Force, Air Weather Service (MAC), Air Force Global Weather Central.

Miller R C. 1972. Notes on ananlysis and severe-storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central, Technical Report 200 (Rev). United States Air Force, Air Weather Service (MAC).