

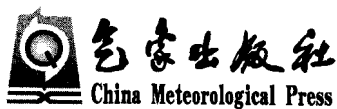
2011年灾害性天气 预报技术论文集

端义宏 魏 丽 主编



2011 年灾害性天气预报技术论文集

端义宏 魏 丽 主编



内容提要

本论文集围绕 2011 年的天气气候、暴雨(雪)、台风及海洋气象、强对流等灾害性天气发生发展成因、预报难点、预报技术,以及异常天气气候分析等进行了疑难预报个案分析和总结,提炼了灾害性天气的预报难点和需要解决的关键科学问题,提出了可供预报业务借鉴的预报着眼点和结论。

本书适用于从事天气预报业务的预报员和业务技术管理人员、科研院所的研究人员阅读。不仅可推动业务人员开展重大灾害性天气、转折性天气的研究,而且可拓宽研究人员的研究思路,同时对如何提高重大灾害性天气的预报能力有一定参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

2011 年灾害性天气预报技术论文集/端义宏,魏丽主编.

—北京:气象出版社,2012.7

ISBN 978-7-5029-5521-2

I. ①2… II. ①端… ②魏… III. ①灾害性天气-天气预报-文集

IV. ①P457-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 140652 号

2011 年灾害性天气预报技术论文集

端义宏 魏 丽 主编

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:林雨晨 张 斌

封面设计:王 伟

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:896 千字

版 次:2012 年 8 月第 1 版

定 价:120.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:黄润恒

责任技编:吴庭芳

印 张:35

彩 插:26

印 次:2012 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1—800

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

序

2012年7月21日,我国华北地区出现了一场强降水天气过程,北京地区降水强度之大、雨量之大是建国以来少有的,造成的人员死亡数多、经济损失和社会影响大。回顾2011年,我国灾害性天气多发重发现象很明显。气温变化幅度大、冷暖交替显著;暴雨过程多,旱涝急转明显;局地强对流天气多、造成灾害重;盛夏大范围持续性高温少雨天气,对社会影响大;等等。虽然全国各级气象台站坚持以提高预报准确率和精细化水平为目标,努力发挥预报员的主观能动性,全力做好各项气象预报,取得显著的成绩,但当前的天气预报能力和水平,特别是预报准确率和精细化水平距经济社会发展需求和百姓期望还有相当大的差距。因此,不断提高气象预报能力和气象防灾减灾能力,是国家经济社会发展对气象工作的迫切需求,是百姓对气象工作的期待,需要我们继续强化气象科技支撑天气预报业务,需要我们不断提高预报员的整体素质和业务能力,包括对数值预报产品的解释应用能力、各类气象资料的监测分析能力和对灾害性天气的技术总结能力,努力培养一支科学素质高、作风优良的预报人才队伍。

一年一度的全国灾害性天气预报技术研讨会,是通过加强预报员对灾害性天气过程总结和理论认识,不断提高气象预报能力的有效组织方式。在2011年第八届全国灾害性天气预报技术研讨会上,来自全国气象台和气象科研院(所)的170多位预报员和科研人员进行了交流,其中56篇论文汇编到《2011年灾害性天气预报技术论文集》中,可作为各级气象台预报业务和管理人员以及气象科研人员的参考。我期望,通过多种形式的预报技术总结和交流,将更加促进预报员的整体素质和业务能力的提高,促进我国天气预报准确率和精细化水平的提高,造福于社会,造福于人民。

中国气象局局长 郑国光

2012年7月

前 言

为提高重大气象灾害预报的准确率和精细化水平,促进灾害性天气预报技术交流和预报员队伍科技素质的提升,2011年11月29—30日,由国家气象中心、中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室与中国气象局预报与网络司、科技与气候变化司联合举办的“2011年第八届全国灾害性天气预报技术研讨会”在北京顺利召开。

本次会议主要针对2011年的重大天气事件,围绕台风、海洋气象、暴雨(暴雪)、强对流预报技术总结以及灾害性天气最新研究成果等,进行了深入研讨和交流。会议共收到来自全国各省(区、市)气象部门及相关科研院所的论文170篇,内容涉及2011年灾害性天气及其次生灾害发生发展的成因、预报技术难点、灾害性天气相关的最新研究进展等多个方面。谨此将经过专家推荐的56篇论文全文纳入《2011年灾害性天气预报技术论文集》,与读者共同分享我国天气预报技术总结与发展成果。

本文集的出版,得到了中国气象局有关职能司、各省(区、市)气象局及气象出版社的大力支持。借此机会对各单位及论文作者的支持一并表示感谢!

端义宏 魏丽

2012年7月

目 录

序

前言

暴雨(雪)预报技术篇

一次热带辐合带大暴雨过程的诊断分析	刘爱鸣 吴启树 林毅(3)
风廓线雷达资料在一次暴雨分析中的应用	周志敏 万蓉 崔春光等(12)
贵州省望谟初夏暴雨的合成分析	杜小玲 杨静 彭芳(23)
纬向切变线暴雨落区预报	孙兴池 王西磊 周雪松等(43)
西北地区东部两次典型大暴雨个例对比分析	梁生俊 马晓华(52)
两次切变线影响海河流域暴雨过程的对比分析	卢焕珍 余文韬 何群英(67)
2011 年初湖南暴雪过程的成因和数值模拟分析	姚蓉 叶成志 田莹等(80)
精细化监测资料在暴雨预报模型改进中的应用	苗爱梅 郝振荣(92)
2011 年浙江梅汛期强降水分析	曾欣欣 黄新晴 滕代高(105)
2011 年 8 月 13—15 日青海省区域性大到暴雨过程成因分析	田成娟 李静 刘雪梅(118)
“2011. 02. 12”武汉短时暴雪天气过程分析	李武阶 柳草 李德俊(126)
内蒙古东北地区一次致灾大到暴雪天气分析	孟雪峰 孙永刚 姜艳丰(137)
2011 年江苏梅汛期暴雨特征分析	尹东屏 张备 孙燕等(146)
2011 年春季北疆两类暴雪过程的对比分析	陈春艳 李圆圆 秦贺(155)
一次高空槽与西南涡耦合造成的华北暴雨过程分析	何丽华 田秀霞(166)
2011 年 7 月 2 日山西省中南部暴雨中尺度特征分析	王思懋 赵桂香 田淑欣(174)
“2011. 07. 30”辽宁前倾槽大暴雨过程中尺度分析	阎琦 蒋大凯 乔小湜(183)
2010—2011 年冬季吉林省降雪天气特征及三场区域性暴雪比较分析	胡中明 云天(192)
两次山东暴雪过程对比分析	周雪松 阎丽凤 杨成芳(200)
2011 年 6 月湖北两次暴雨过程对比分析	李银娥 陈璇 李武阶等(212)
基于 LAPS 资料的 2011 年湖南首场强暴雨过程中尺度分析	田莹 叶成志 李红莉等(220)
2011 年 8 月青海东部一次强降水天气诊断分析	曹晓敏 张春秀 王志远(225)
“2010. 1. 6”新疆北部特大暴雪过程中的锋面结构及降水机制	陈涛 崔彩霞(233)
“06. 23”北京大暴雨中尺度对流系统研究	寿亦萱(244)
2010 年 7 月 16—17 日华西地区大暴雨天气过程分析	鲍媛媛(251)
北京地区一次降雪过程的动力特征分析	董林 符娇兰 宗志平(261)

台风与海洋气象预报技术篇

热带气旋“南玛都”特大暴雨成因分析	林毅 刘爱鸣 潘宁(271)
2011 年西北太平洋和南海台风活动特点及预报难点技术分析	张玲(278)
南海台风发生发展的天气模型和前兆信号	卢山 林钢 吴乃庚等(287)
热带低压与冷空气相互作用下的海南持续大暴雨物理机制分析	马学款 符娇兰(294)
热带气旋“莫兰蒂”强度的观测研究和增强条件的诊断分析	 高拴柱 吕心艳 王海平等(310)
台风对四川暴雨影响的环境场对比分析	康岚 牛俊丽 徐琳娜等(321)
台风“南玛都”(1111)造成浙江大暴雨成因分析	董美莹 陈锋 郑沛群等(331)
台风“梅花”HWRF 模式试报结果对比分析	徐迪峰(345)

强对流预报技术篇

锋面北侧冷气团中连续降雹的环境场特征及成因分析	许爱华 陈云辉 陈涛等(355)
2011 年强对流天气新业务及其支撑技术	谌芸 郑永光 林隐静等(369)
2011 年 4 月 17 日广东强对流天气过程分析	张涛 方翀 朱文剑等(378)
2011 年 7 月 25 日山东乳山强降水分析	杨晓霞 刁秀广 高留喜等(386)
湖北省雷暴大风雷达回波模型研究	韦惠红 吴翠红 牛奔(396)
北京地区短时降水融合预报系统的构建	程从兰 陈明轩 杨汉贤等(408)
短时强降水客观概率预报产品的应用检验	田付友 郑永光 谌芸(417)
黄淮地区春季一次强回波成因研究	朱文剑 郑永光(424)
基于动态特征的强对流云团追踪	刘年庆 郑媛媛 蒋建莹等(433)
2011 年 6 月 9—15 日长江中下游地区两次强降雨过程中尺度对流系统触发条件分析	 孙军 代刊(443)

预报技术与方法篇

强对流天气预报检验新方法的尝试	戴建华 茅懋 邵玲玲等(455)
GRAPES 重点资料关键应用技术研究进展	张华 龚建东 许健民等(463)
TIGGE 降水多元集成方法研究	狄靖月 张国平 赵琳娜(470)
2011 年初云南东部极端低温冰冻灾害天气气候特征及成因分析	 杨素雨 李华宏 严华生等(479)
利用加密探测资料分析冷式切变线类大暴雨的动力结构	杨成芳 阎丽凤(487)
2011 年 9 月华西秋雨特征及成因分析	蔡芎宁 鲍媛媛 康志明等(498)
黄渤海一次浓雾形成的边界层特征及生消机理初探	黄彬 陆雪(506)
蒙古气旋引发的两次大范围沙尘暴过程的诊断分析	张恒德 樊利强 花丛等(518)
近 30 年中国雨雪转换次数的统计分析	张博 黄小玉 宗志平(534)
2011 年江淮梅雨大尺度环流成因分析	牛若芸(543)

彩图目录

刘爱鸣等:一次热带辐合带大暴雨过程的诊断分析	(1)
孙兴池等:纬向切变线暴雨落区预报	(1)
卢焕珍等:两次切变线影响海河流域暴雨过程的对比分析	(2)
姚蓉等:2011 年初湖南暴雪过程的成因和数值模拟分析	(4)
苗爱梅等:精细化监测资料在暴雨预报模型改进中的应用	(6)
曾欣欣等:2011 年浙江梅汛期强降水分析	(11)
田成娟等:2011 年 8 月 13—15 日青海省区域性大到暴雨过程成因分析	(12)
李武阶等:“2011.02.12”武汉短时暴雪天气过程分析	(13)
孟雪峰等:内蒙古东北地区一次致灾大到暴雪天气分析	(15)
尹东屏等:2011 年江苏梅汛期暴雨特征分析	(16)
陈春艳等:2011 年春季北疆两类暴雪过程的对比分析	(16)
王思懋等:2011 年 7 月 2 日山西省中南部暴雨中尺度特征分析	(17)
阎琦等:“2011.07.30”辽宁前倾槽大暴雨过程中尺度分析	(19)
胡中明等:2010—2011 年冬季吉林省降雪天气特征及三场区域性暴雪比较分析	(20)
周雪松等:两次山东暴雪过程对比分析	(21)
李银娥等:2011 年 6 月湖北两次暴雨过程对比分析	(21)
田莹等:基于 LAPS 资料的 2011 年湖南首场强暴雨过程中尺度分析	(23)
曹晓敏等:2011 年 8 月青海东部一次强降水天气诊断分析	(24)
陈涛等:“2010.1.6”新疆北部特大暴雪过程中的锋面结构及降水机制	(24)
寿亦萱:“06.23”北京大暴雨中尺度对流系统研究	(25)
鲍媛媛:2010 年 7 月 16—17 日华西地区大暴雨天气过程分析	(26)
董林等:北京地区一次降雪过程的动力特征分析	(26)
林毅等:热带气旋“南玛都”特大暴雨成因分析	(27)
张玲:2011 年西北太平洋和南海台风活动特点及预报难点技术分析	(27)
卢山等:南海台风发生发展的天气模型和前兆信号	(29)
马学款等:热带低压与冷空气相互作用下的海南持续大暴雨物理机制分析	(31)
高拴柱等:热带气旋“莫兰蒂”强度的观测研究和增强条件的诊断分析	(32)
康岚等:台风对四川暴雨影响的环境场对比分析	(33)
董美莹等:台风“南玛都”(1111)造成浙江大暴雨成因分析	(33)
许爱华等:锋面北侧冷气团中连续降雹的环境场特征及成因分析	(35)
湛芸等:2011 年强对流天气新业务及其支撑技术	(35)
张涛等:2011 年 4 月 17 日广东强对流天气过程分析	(36)
杨晓霞等:2011 年 7 月 25 日山东乳山强降水分析	(37)
韦惠红等:湖北省雷暴大风雷达回波模型研究	(38)
田付友等:短时强降水客观概率预报产品的应用检验	(39)

朱文剑等:黄淮地区春季一次强回波成因研究 (40)

刘年庆等:基于动态特征的强对流云团追踪 (43)

孙军等:2011 年 6 月 9—15 日长江中下游地区两次强降雨过程中尺度对流系统
触发条件分析 (44)

张华等:GRAPES 重点资料关键应用技术研究进展 (46)

杨素雨等:2011 年初云南东部极端低温冰冻灾害天气气候特征及成因分析 (46)

杨成芳等:利用加密探测资料分析冷式切变线类大暴雨的动力结构 (47)

蔡芎宁等:2011 年 9 月华西秋雨特征及成因分析 (47)

黄彬等:黄渤海一次大雾形成的边界层特征及生消机理初探 (47)

张恒德等:蒙古气旋引发的两次大范围沙尘暴过程的诊断分析 (49)

张博等:近 30 年中国雨雪转换次数的统计分析 (50)

牛若芸:2011 年江淮梅雨大尺度环流成因分析 (51)

暴雨(雪)预报技术篇

一次热带辐合带大暴雨过程的诊断分析

刘爱鸣 吴启树 林毅

(福建省气象台,福州 350001)

摘 要 2011年6月28日,热带辐合带云团给广东和福建沿海带来暴雨和大暴雨天气,实际预报误差较大。利用常规高空、地面观测资料和NCEP再分析资料,对这次暴雨过程进行天气学分析和动力、热力特征诊断。结果表明,赤道高压北抬和稳定的东高西低环境场有利于南风加强;辐合带随高度向南倾斜,使对流层中、下层的差动温度平流和差动涡度平流加强,利于对流不稳定层结发展和动力抬升;弱冷空气的侵入使斜压不稳定加强,均有利于暴雨强度加强。低层湿位涡的正压项(MVP1)和斜压项(MVP2)对暴雨落区有较强诊断能力,综合反映了暴雨区对流不稳定和斜压不稳定的发展。但斜压项(MVP2)所表现的特征与锋面降水有明显不同,特别是斜压项(MVP2)之子项纬向涡度和相当位温纬向梯度(MPV21),其量级与经向涡度项(MPV22)相当,并与暴雨落区最为一致。

关键词 辐合带 大暴雨 湿位涡

1 引言

暴雨洪涝灾害每年都给我国带来不同程度的影响,因此国内很多气象学者对暴雨的研究给予很大关注^[1,2]。福建省位于东南沿海,处于东、西风带交替影响的过渡区,既有锋面性质的暴雨,又有热带气旋暴雨。以往对华南大暴雨过程的分析和研究主要从锋面降水或热带气旋降水方面着手。暖区暴雨^[3],即受入海高压、副热带急流、西南季风或热带辐合带影响的暴雨,是华南暴雨最显著的特点,但这方面的分析文章很少。这类暴雨天气由于影响系统不太明显,预报难度较大,暴雨经常会漏报或迟报。但这类暴雨暖湿不稳定程度高,所产生的降水激烈,极易造成突如其来的重大灾害。因而深入分析此类暴雨发生的机制,对提高暴雨预报的准确率十分重要。2011年6月28日受热带辐合带云团影响,华南沿海出现暴雨、大暴雨天气,实际预报误差较大。利用常规高空、地面观测资料和NCEP水平分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的再分析资料对这次暴雨过程进行诊断分析,探讨暴雨漏报原因,为这类暴雨天气预报提供参考依据。

2 天气概况及预报情况

2.1 天气概况

2011 年 6 月 28 日,受热带辐合带云团影响,广东和福建沿海出现暴雨和大暴雨天气。28 日 08 至 29 日 08,福建大部分县市出现暴雨,其中沿海部分县市和乡镇出现大暴雨,以仙游九鲤湖 236.9mm 为最大。暴雨主要出现在 28 日夜间,12 h 雨量超过 100mm,最强降水时段在 28 日 23 时~29 日 04 时,一些乡镇小时雨量达 30~40mm(图 1)。

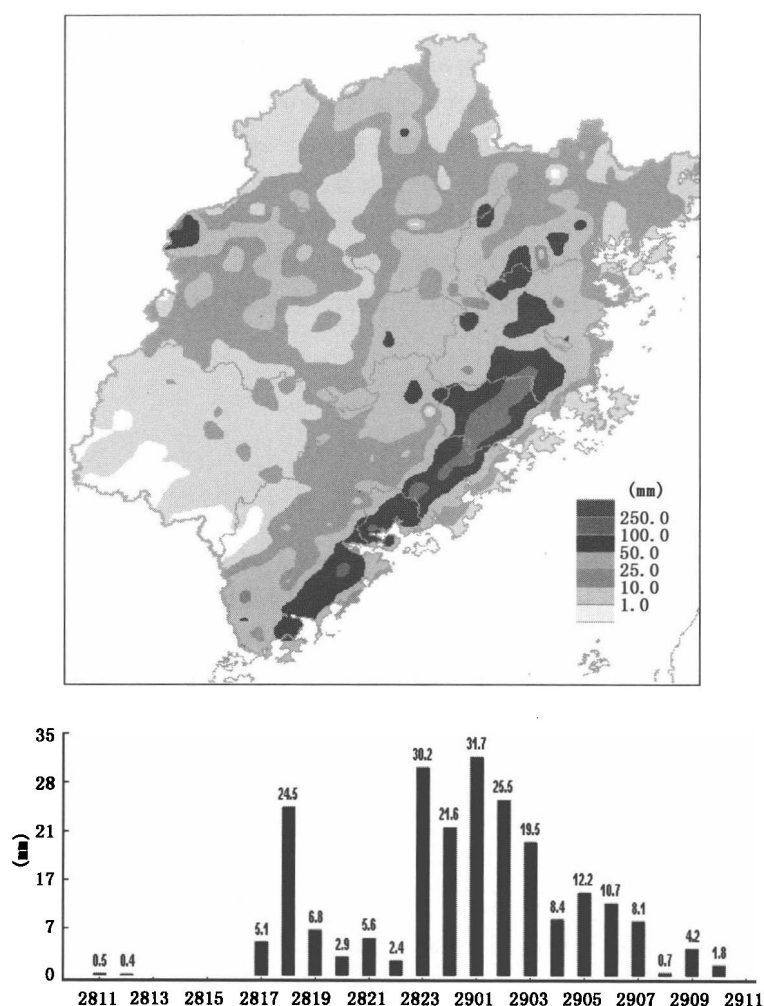


图 1 2011 年 6 月 28 日 20 时—29 日 08 时福建 12 h 积累雨量(上)和 28 日 08 时至 29 日 08 时仙游九鲤湖逐时雨量分布(下)

2.2 预报情况

6月28日8时,500~850hPa低槽、切变从河套东部延伸至西南地区东部,副高成块状位于日本岛南部,高度场呈东高西低,华南地区处西南气流中,水汽条件较好,但无低空急流。另外,在闽粤交界处有一东南风和西南风构成的辐合线,辐合线随高度向南倾斜,云图上对应热带云团。地面,中国大陆为低压区控制,主锋面在河套以北;江西北部到湖南中部有一很弱的锋面,与其上空河套东部的低槽对应。西南地区有低压发展,气压场也是呈东高西低(图2)。预报中考虑,未来24h,福建北部受东移低槽和弱锋面影响,南部受辐合带云团影响,对流性天气概率较大,可能出现短时强降水等强对流天气,考虑到冷空气很弱,西南气流也不强,同时28日08时起始场的T639、GRAPES和日本的数值预报当夜12h雨量仅预报10~20mm,所以我们预报沿海大雨,局地有暴雨或大暴雨。对沿海区域的暴雨范围和强度预报明显偏弱。

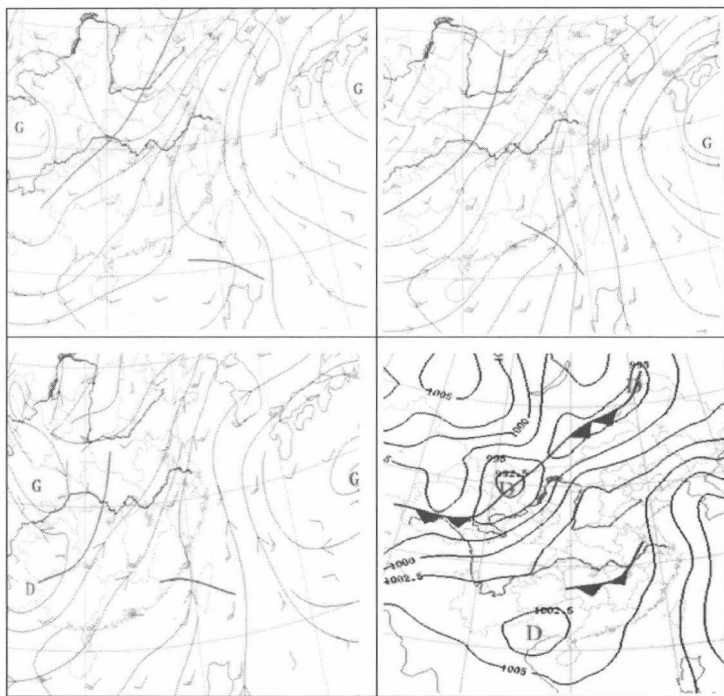


图2 2011年6月28日500hPa(上左)、700hPa(上右)、850hPa(下左)高空图和地面图(下右)

3 暴雨成因分析

本次暴雨的主要影响系统是热带辐合带,虽然暴雨开始前低空急流不强,但在东高西低环境场下,赤道高压北抬和副高加强有利于南风加强;同时辐合带随高度向南倾斜,使对流层中、下层的差动温度平流和差动涡度平流加强;弱冷空气的侵入使斜压不稳定加强,均有利于暴雨强度加强。

3.1 低空西南风加强

西南风加强是预报关键。造成西南风加强的主要原因是赤道高压北抬和副高加强。6月24日之前,赤道高压稳定在赤道附近,25日开始明显北抬,以每天 $3\sim 4$ 个纬度的速度向北抬。从28日500hPa图上(图3),可以看到,赤道高压脊线已北抬到 14°N 附近,中心在海南岛南部。同时随台风“米雷”在东部沿海北上,东部沿海500~925hPa有大范围正变高,有利于副高加强东进。而华南西部的低压向东发展,有负变高东移,华南东部沿海东高西低的气压梯度再叠加东正西负的变压梯度,有利南风加强。福建南部沿海处在赤道高压北侧来自孟加拉湾西南气流和副高东侧偏南气流的汇合处。在华南沿海东高西低、南高北低的形势下,赤道高压北抬和副高东进使南风加大,850~925hPa流场和地面风场分析表明,夜里起华南和福建沿海西南风明显加大。南风的加大有利于辐合带南侧水汽输送、辐合和上升运动加强以及辐合带的北抬,暴雨出现在850hPa辐合带南侧和500hPa辐合带北侧之间。

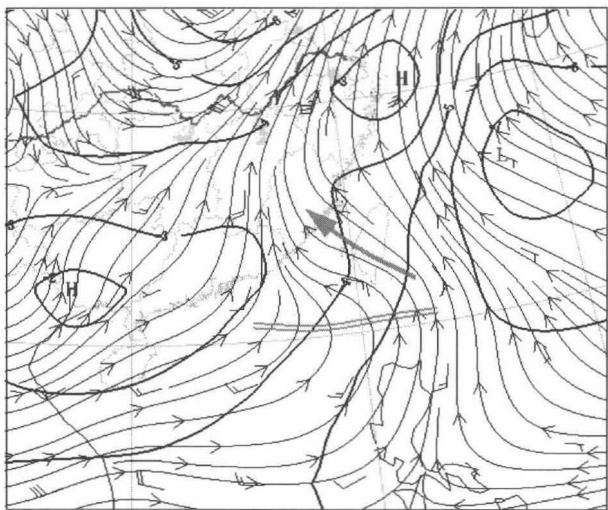


图3 2011年6月28日500hPa流场和温度场

3.2 对流不稳定加强

高空图分析表明,28日700~500hPa江西和福建出现大范围的降温,特别是在500hPa,福州 ΔT_{24} 达 -4°C 。此时西风槽尚在河套东部,这片位于西南气流区域的降温不易引起预报员注意。分析500hPa温度场表明,28日华南东部沿海地区温度场呈西高东低分布, -7°C 的冷中心在冲绳岛附近,该冷中心26日前在 140°E 以西的西太平洋上,逐日西进。副高南侧和辐合带北侧之间的偏东气流将海上的冷空气向陆地输送。高空冷平流使对流不稳定加强。另外,地面有弱冷锋南压,28日20h地面锋面到达福建西北部。逐小时雨量分析可见,28日上午强雨带呈南北向位于福建东南沿海,受东风气流引导,雨团在向北移动的同时,不断向西扩,自东向西影响到内陆并逐渐减弱。20h以后,随着锋面南压和西南气流加强,西部和沿海分别有雨团发展,22h随锋面南压,西部雨团东移并入沿海,沿海雨带明显发展。地面弱冷空气和热带辐合带云团的结合,加强了斜压不稳定,使暴雨加强。

3.3 强的高空辐散

200hPa 华南东部沿海处在高空西南急流入口区右侧,南亚高压的东侧,热带辐合带上空高空辐散强,分别有向北和向南的流出,辐散中心在低层辐合线南侧,叠加于低层辐合中心之上(图 4)。强的高空辐散有利于对流发展和暴雨的发生。

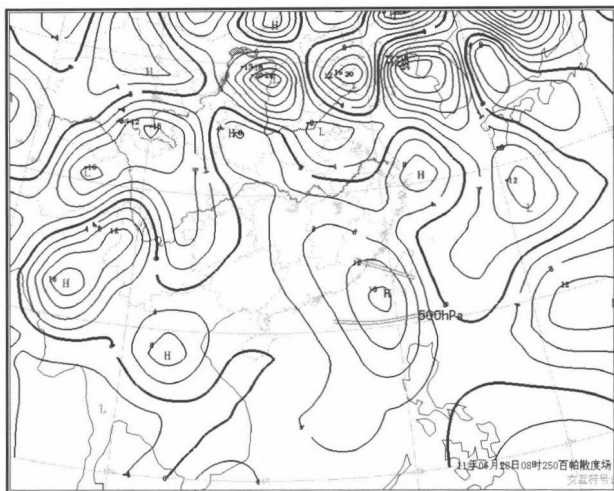


图 4 2011 年 6 月 28 日 200hPa 散度场

3.4 辐合带南倾有利于热力和动力强迫作用加强

Hoskins 等^[4]在准地转矢量的基础上导出以准地转 Q 矢量散度为唯一强迫项的 ω 方程,指出垂直运动是由动力强迫项(地转涡度平流的垂直差异)和热力强迫项(温度平流)两部分组成。公式如下:

$$\left(\sigma \nabla + f_0^2 \frac{\partial^2}{\partial p^2}\right) \omega = f_0 \frac{\partial}{\partial p} \left[V_g \cdot \nabla \left(\frac{1}{f_0} \nabla^2 \varphi + f \right) \right] + \left[V_g \cdot \nabla \left(-\frac{\partial \varphi}{\partial p} \right) \right] \quad (1)$$

式中左端与位势倾向方程左端类似,它与 ω 成正比。右端第一项为涡度平流随高度变化项,表示动力强迫作用引起的垂直运动;第二项为温度平流的拉普拉斯项,表示热力强迫作用引起的垂直运动。

(1) 辐合带南倾有利于热力强迫作用加强:6月初对流层中低层索马里越赤道气流带来的西南暖湿空气在中南半岛西部北上,中旬西南暖湿空气加强西进到我国南海地区上空。分析逐日 $\theta_{*} \geq 340K$ 特征线,可以发现:26日华南沿海 $\geq 340K$ 的中心位于 $23^{\circ}N$,27日中心北进到 $25^{\circ}N$,28日 θ_{*} 大值区从广西、广东到福建西部北部,特征线呈东北—西南向,华南东部沿海 θ_{*} 陆地高于台湾海峡和南海海面。由于辐合带南倾,低层南风将西部高值 θ_{*} 输送到暴雨区,500hPa 及其以上东风将东部海面小值 θ_{*} 输送到暴雨区,温度平流场上表现为低层暖平流,高层冷平流;由福州探空也可见,700hPa 以下,风随高度顺转,有暖平流,500~400hPa 风随高度逆转,有冷平流,对流层中、下层的差动温度平流加大,有利于热力强迫作用加强。使大气层结的对称不稳定性得到维持和加强,促进倾斜上升运动,降水强度得到加强。

(2) 辐合带南倾有利于动力强迫作用加强: 由于辐合带南倾, 在其北抬的过程, 高层的正涡度平流强于低层的正涡度平流。本次过程, 福建沿海中低层均有正涡度平流, 但较强的正涡度平流在 700hPa 至 500hPa, 明显强于低层的涡度平流。由[彩]图 5 可见, 500hPa 减去 925hPa 的差动涡度平流中心不断向东北方向扩展, 从广东东部逐渐向东北方向移到福建中部沿海。29 日 02 时福建南部出现强的差动涡度平流, 中心强度达到 $20 \times 10^{-10} \text{ s}^{-2}$, 涡度平流随高度增加破坏了该地区准地转平衡, 动力强迫作用激发的次级环流导致垂直上升运动发展。

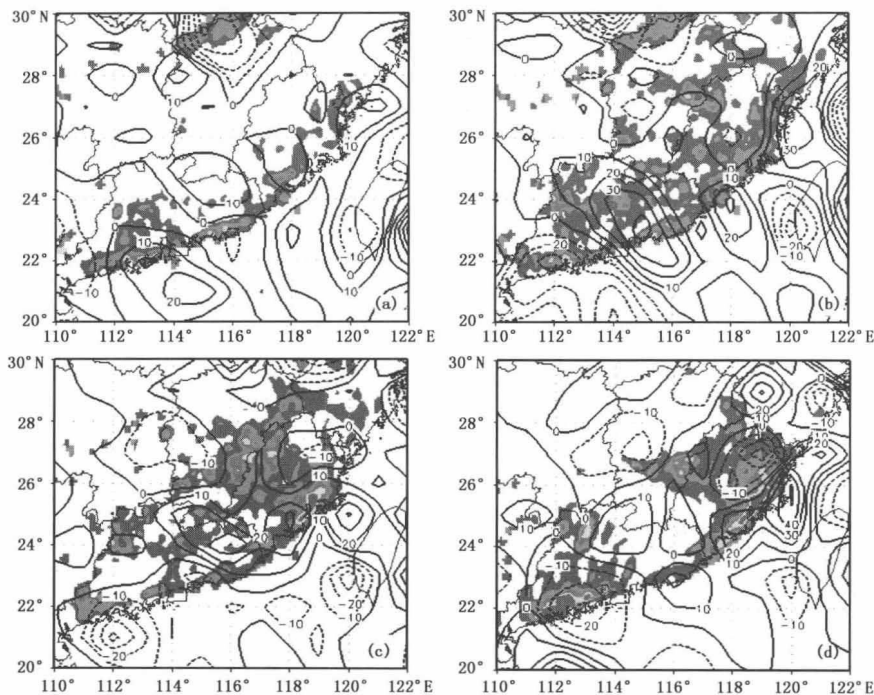


图 5 2011 年 6 月 28—29 日 500hPa 与 925hPa 的差动涡度平流(单位: 10^{-10} s^{-2})和 12h 雨量(单位: mm)
(a: 08h, b: 14h, c: 20h, d: 02h)

4 湿位涡各子项在热带辐合带暴雨中的表现

饱和湿空气具有位涡守恒特性是建立在绝热无摩擦条件下的^[5], 通过湿位涡守恒反演涡度来诊断强降水、强对流等在实际预报业务中是不实用的。但若不把湿位涡当成守恒来反演, 而是把它当成普通的物理量, 分成正压项和斜压项, 其物理意义相当清楚。忽略 ω 的水平变化, 在 p 坐标系中, 湿位涡(MPV)的表达式为^[6]:

$$MPV = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_e}{\partial p} + g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \right) \quad (2)$$

式中 θ_e 为相当位温, $(\zeta + f)$ 为垂直绝对涡度。MPV 的单位取为 PVU, $1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$

MPV 可以分为湿正压项 MPV1 和湿斜压项 MPV2 两部分, 即: