

冯晋勤,俞小鼎,蔡菁,等,2017. 福建春季西南急流暖湿强迫背景下的强对流天气流型配置及环境条件分析[J]. 气象,43(11): 1354-1363.

福建春季西南急流暖湿强迫背景下的 强对流天气流型配置及环境条件分析*

冯晋勤¹ 俞小鼎² 蔡菁¹ 赖巧珍¹

1 福建省龙岩市气象局,龙岩 364000

2 中国气象局干部培训学院,北京 100081

提 要: 根据 2002—2013 年福建 26 次春季强对流天气过程中 12 例由西南急流暖湿强迫产生的强对流天气的高低空环流配置,利用常规高空、地面观测资料以及 NCEP 再分析资料,运用中尺度对流天气的天气图分析技术建立福建春季西南风低空急流暖湿强迫背景下的强对流天气流型的识别方法,并统计静力稳定度、水汽、抬升和垂直风切变条件及相应物理量要素,初步揭示了福建省春季西南急流暖湿强迫背景下的强对流天气过程的特征和规律。此类强对流天气是由对流层中、高层干冷空气位于低层强烈发展的暖湿平流之上形成显著条件不稳定层结,逆温、干暖盖、中低层有利的水汽条件,上干下湿的温湿廓线以及低空辐合、高空辐散为强对流天气的发生提供了有利的环境条件,强对流天气系统由地面的锋面、辐合线、热低压、925 hPa 辐合线以及西南急流脉动等中尺度天气系统触发,对流生成后在西南风急流引导下移入有利于对流发展的不稳定区域使得对流持续发展,强垂直风切变配合较大的对流有效位能有利于对流风暴持续发展。

关键词: 强对流,西南急流,暖湿强迫,流型,环境条件

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.11.004

Flow Pattern and Ambient Condition Analysis of Spring Southwest Low-Level Jet Warm Sector Severe Convection in Fujian

FENG Jinqin¹ YU Xiaoding² CAI Jing¹ LAI Qiaozhen¹

1 Longyan Meteorological Office of Fujian, Longyan 364000

2 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

Abstract: Utilizing conventional meteorological data, the NCEP reanalysis data, spring southwest jet warm sector severe convection flow pattern of Fujian is established by using mesoscale convective weather analysis technique. From the perspectives of the four basic conditions for the development of severe convection, namely the instability, moisture, lifting and wind vertical shear, the characteristics of spring southwest jet warm sector severe convection flow pattern of Fujian are revealed. Southwest jet warm sector severe convection flow pattern is characterized by low-level strong warm and moist advection over middle and high level troposphere's dry and cold air. The inversion, warm dry lid, mid-low level sufficient water vapor, upper dry and low moist vertical profile, low level convergence and high level divergence are all favorable to the development of severe convection. The severe convective weather is often triggered by the front of surface, the convergence line of surface or 925 hPa, hot low pressure of surface, pulsation of southwest

* 中国气象局预报员专项(CMAYBY2014-034)、中国气象局关键技术集成项目(CMAGJ2015M30)和中国气象局 2017 年预报关键技术业务发展专项[YBGJXM(2017)02]共同资助

2016 年 3 月 10 日收稿; 2017 年 8 月 14 日收修定稿

第一作者:冯晋勤,主要从事短期和短时临近天气预报. Email:lyfjq@hotmail.com

jet. The severe convective weather sustainably develops when the convection moves to the favorable environment by the guidance of southwest jet. Strong vertical wind shear with high CAPE is favorable for the sustainable development of convective storm.

Key words: severe convection, southwest jet, warm sector, flow pattern, ambient condition

引 言

冰雹、雷雨大风和短时强降雨这类中尺度对流天气是在有利的大尺度环流背景下,由各种物理条件相互作用形成的中小尺度天气系统所导致的剧烈天气现象。由于强对流天气系统尺度小、生命史短、突发性强,往往对人们生产、生活造成严重损失。强对流天气预报一直是天气预报业务中的难点之一。目前,在中尺度对流天气的预报中,主要以天气形势为主的主观分析结合条件(静力)不稳定、水汽、风的垂直切变及抬升等环境参数诊断分析,通过分析可对对流天气的发生以及可能的强对流天气类型进行潜势预报。早在 20 世纪 50 年代,Fujita et al(1956)提出了中尺度分析的概念,Miller(1972)和 Crisp(1979)在大量对流天气个例研究的基础上,总结出了强对流天气的天气型识别方法,即利用高空和地面观测资料分析中尺度对流系统发生、发展的环境场条件。Doswell et al(1996)提出基于构成要素的预报方法(Ingredients Based Methodology),即所谓配料法(俞小鼎,2011)。张小玲等(2012)利用“配料法”预报的思路,通过诊断有组织的深厚中尺度对流系统发生、发展的 4 个条件(水汽、不稳定、抬升和垂直风切变),开发了中尺度对流天气的环境场条件分析技术。许爱华等(2014)通过对 2000 年以来中国近百次强对流天气个例的环境场进行分析,综合考虑强对流天气形成的热力不稳定、动力抬升和水汽这三个基本条件,从强对流的不稳定条件和主要触发条件的角度,提出中国中东部强对流天气 5 种基本类别。郑媛媛等(2011)指出,强对流天气是典型的中尺度天气,它的产生有其独特的环境条件,但是在不同的大尺度环流背景下,大气热力不稳定层结、水汽、垂直风切变和触发机制等要素的重要性不尽相同,产生的强天气类型也不相同。

冰雹、雷雨大风和短时强降雨是影响福建主要的强对流天气,本文以福建春季的雷雨大风、冰雹天气为研究对象,选取 2002—2013 年春季西南急流暖湿强迫背景下的典型强对流天气个例,利用中尺度

分析方法建立福建春季西南急流暖湿强迫背景下的强对流天气的流型配置,并通过静力稳定度、水汽、风的垂直切变及抬升条件及相应物理量要素分析,初步揭示福建春季由西南急流暖湿强迫产生的强对流天气的特征和规律,以期为今后此类强对流天气分析、短期和短时预报提供参考依据和预报着眼点。

1 研究个例、资料选取及方法介绍

福建春季强对流天气主要以强雷暴、冰雹、雷雨大风及短时强降雨为主,其中春季是福建省冰雹最主要的发生时期,据统计(林新彬等,2013),3—5 月冰雹发生站次占全年总站次的 78%,3—4 月占全年的 71.9%。日降雹 ≥ 3 站次冰雹过程 3—5 月占 77.8%, ≥ 10 站次大范围过程占 96%。测站有雷暴并伴有 ≥ 8 级大风的大范围(≥ 10 站)雷雨大风过程在 4 月发生最多。因此,福建春季是发生大范围冰雹、雷雨大风等强对流天气的主要季节,为总结福建春季(3—5 月)强对流天气中尺度特征,定义当日出现 ≥ 3 站次降雹或雷雨大风天气过程为典型强对流天气过程,选取 2002—2013 年 26 次春季强对流天气过程进行分类,总结出西南急流暖湿强迫、斜压锋生型及高空冷平流型是影响福建春季强对流天气的三种主要天气流型配置(冯晋勤等,2015)。

在三种主要天气流型配置中由西南急流暖湿强迫产生的强对流天气共出现 12 例,占春季对流个例 46.2%,是影响福建春季最多的一类强对流天气。分析方法主要利用高空和地面观测资料,运用中尺度对流天气的天气图分析技术(张小玲等,2010),以强对流天气发生的三个基本条件:静力不稳定、抬升及水汽条件分析强对流天气的环境场,建立西南急流暖湿强迫背景下的强对流天气流型配置的概念模型,并通过分析反映静力不稳定、水汽、抬升和垂直风切变条件及其演变的关键环境背景参数,即基于构成要素的配料法分析强对流环境背景(张小玲等,2012),归纳总结福建春季西南急流暖湿强迫背景下强对流天气流型配置及关键环境背景参数特征。

2 西南急流暖湿强迫背景下的强对流天气流型配置及关键环境参数特征

2.1 流型配置概念模型

西南急流暖湿强迫背景下的强对流天气主要是由于对流层中、高层干冷空气位于低层强烈发展的暖湿平流之上形成显著条件不稳定,低层强烈暖湿平流及地面升温对上述显著条件不稳定气层的建立起主导作用。地面处于锋前低压倒槽暖区内,低空西南急流输送暖湿平流,一方面增加条件不稳定性,同时提供充沛的水汽。低层西南急流脉动或风速辐合、地面辐合线、925 hPa 切变线及地面强烈发展的热低压等为主要的触发抬升条件。同时,200~300 hPa 高空分流区的强烈辐散或高空急流与低空西南急流耦合形成的次级环流也为强对流天气的发生提供较强的垂直上升运动背景,进一步增加条件不稳定和对流有效位能(CAPE),并减小对流抑制(CIN; Doswell, 1987; 王秀明等, 2014)。根据强对流天气中尺度分析方法(张小玲等, 2012)得到这类导致春季强对流天气的流型配置概念模型(图 1)。

2.2 环境参数特征

2.2.1 静力(条件)不稳定

这类天气由于 850 hPa 或以下有强盛西南暖湿急流,风向与等温线交角大,暖湿平流显著,08 时福建上空均为暖平流,20 时个别时次由于冷空气入侵表现为弱的冷平流,温度平流平均值为 $3.8 \times 10^{-6} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$,最大值可达 $12.9 \times 10^{-6} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ (表 1),有利于条件不稳定层结的建立。通常高层

700 或 500 hPa 的温度槽缓慢东移,低层暖脊快速建立;低层暖脊发展处,700 hPa 以上有冷槽配合或有小槽快速东传带来弱冷空气(负变温),850 与 500 hPa 垂直温差在 25°C 左右(表 1),700 与 500 hPa 垂直温差 $>15^\circ\text{C}$,大气层结呈现条件不稳定状态。同时,由于地面一般处于锋前低压倒槽暖区内,午后升温增湿明显,高温达 25°C 以上,露点 $>18^\circ\text{C}$ (表 1),气压呈下降趋势,24 h 减压 2~4 hPa,有时高达 6~7 hPa,并且可能生产热低压,天气表现为高温高湿,进一步加大了条件不稳定层结。

低层强烈发展的西南暖湿平流,加上地面升温,建立起较为深厚的条件不稳定层结,满足了深厚湿对流产生的条件之一。通过利用假相当位温(θ_{se})及其垂直递减率来综合判断大气层结不稳定(孙继松和陶祖钰, 2012; 王秀明等, 2014)。从物理量场分析可以看出,在福建、江西、广东及广西为高温高湿区,低层暖湿平流明显,福建出现对流天气的区域 $\theta_{se} > 330 \text{ K}$ 、比湿 $> 10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在低层西南急流的暖湿平流作用下,高温高湿区由上游广东、广西的条件不稳定区向下游福建西部发展,强对流天气一般出现在 θ_{se} 高值舌轴北侧,位于强 θ_{se} 锋区的南缘。由于华南有暖湿平流的输送,低层暖平流显著,而对流层中、高层为相对干冷的平流,使得华南大部迅速产生了显著的条件不稳定区域。从广西、广东到福建存在一条东北—西南向的不稳定区,850 和 500 hPa θ_{se} 差值可达 10~16 K,福建强中心可达到 8~15 K。利用 12 次强对流天气过程发生区域邻近探空站点(表 2)(选取强对流发生地点距探空地点不超过 150 km 的探空站作为邻近探空站点,并选取强对流发生前最近时次的探空资料。)资料进行统计,850~500 hPa θ_{se} 减小,最小的 θ_{se} 平均高度在 500 hPa 附

表 1 静力不稳定性相关物理量统计

Table 1 Statistics of temperature advection at 08:00 BT and 20:00 BT, temperature difference between 850 hPa and 500 hPa, the height of minimum potential temperature, potential temperature difference between 850 hPa and 500 hPa, depression of the dew point at 850 hPa and the dew point at 850 hPa

数值	T_{adv08} / $10^{-6} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$	T_{adv20} / $10^{-6} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$	$T_{850-500}$ / $^\circ\text{C}$	T_{dsur} / $^\circ\text{C}$	$H_{min\theta_{se}}$ /m	$\Delta\theta_{se850-500}$ /K	$T_{850} - T_{d850}$ / $^\circ\text{C}$	T_{d850} / $^\circ\text{C}$
最大值	11.0	12.9	28.0	23.0	5820.0	20.5	8.0	16.1
最小值	1.1	-4.3	24.0	12.5	3000.0	7.5	1.0	12.0
75%百分位数	4.0	6.8	26.0	20.7	5800.0	16.6	3.3	15.3
中位数	3.2	3.6	25.0	18.9	5600.0	13.9	2.0	14.0
25%百分位数	2.4	0.3	24.3	15.8	4352.5	11.1	1.3	12.8
平均值	3.7	3.8	25.3	18.1	5005.0	13.9	2.8	14.1

表 2 12 次冰雹、雷雨大风天气过程时间、地点及对应邻近探空站

强对流天气出现时间	强对流天气类型及地点	邻近探空站
2002 年 4 月 8 日	冰雹:建阳、建瓯、邵武、政和	邵武(58725)
2003 年 4 月 12 日	雷雨大风、冰雹:光泽、浦城、邵武、政和、顺昌、建阳、建瓯、古田、屏南、闽侯、武平	邵武(58725) 福州(58847)
2005 年 3 月 22 日	雷雨大风:永定、上杭、新罗、漳平、南靖、华安、德化、永春、安溪	厦门(59134)
2006 年 4 月 11 日	冰雹:光泽、邵武、将乐、屏南	邵武(58725)
2006 年 5 月 9 日	雷雨大风:光泽、浦城、建宁、华安、仙游	邵武(58725) 福州(58847)
2007 年 4 月 1 日	冰雹:尤溪、建宁、将乐、长乐、顺昌	邵武(58725)
2010 年 3 月 5 日	冰雹:邵武、顺昌、建阳、建瓯、宁化、明溪、三明、沙县	邵武(58725)
2012 年 4 月 10 日	冰雹:闽侯、邵武、光泽、武夷山	邵武(58725)
2012 年 4 月 12 日	冰雹:光泽、宁化、泰宁、清流、尤溪、连城、长汀	邵武(58725) 龙岩(58927)
2012 年 4 月 14 日	冰雹:沙县、长汀、清流、尤溪	龙岩(58927) 邵武(58725)
2013 年 3 月 19 日	冰雹:武夷山、连城、武平、上杭、漳平、永定	邵武(58725) 赣州(57993)
2013 年 3 月 23 日	冰雹:光泽、武夷山、浦城、松溪	邵武(58725)

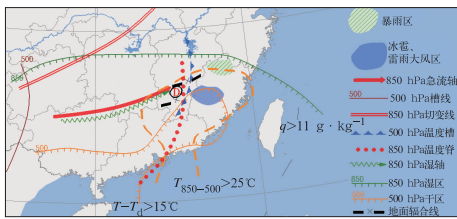


图 1 西南急流暖湿强迫背景下强对流天气流型配置概念模型

(黄色虚线包围的为 $T_{850-500} > 25^{\circ}\text{C}$ 的锋前暖区, 红色双矢线为 850 hPa 的西南风低空急流轴, 蓝色锋线符号为 500 hPa 温度槽的槽线, 绿色齿线为 $q_{850} > 11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的低空高湿区边界, 橙色齿线为 $T - T_d > 15^{\circ}\text{C}$ 的高空干区边界, 蓝色的冰雹雷雨大风区位于干湿叠加区, 绿色暴雨区位于湿舌前方)

Fig. 1 Conceptual model of southwest jet warm sector severe convection flow pattern

(Yellow dotted line is warm sector ahead of front which $T_{850-500} > 25^{\circ}\text{C}$, red double arrow line is the 850 hPa southwest jet, blue front line is 500 hPa temperature trough, green sawtooth line is low level high humidity region which $q_{850} > 11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, orange sawtooth line is high level dry zone which $T - T_d > 15^{\circ}\text{C}$, blue hail and thunder wind region locates in dry and wet superposed area, green heavy rain region locates in the front of wet tongue)

近(表 1), 500 和 850 hPa 的 θ_{se} 差平均值可达 13.9°C (表 1)。如 2012 年 4 月 12 日福建西部混合型强对流天气, 12 日 08 时 $\theta_{se} > 340 \text{ K}$ 以及比湿 $> 14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的高温高湿区主要分布在 25°N 以南, 925 hPa 附近, 850 和 500 hPa θ_{se} 差值为 7 K, 到 14 时随着西南急

流的加强北抬以及午后地面升温近地面逆温层消失, 高温高湿区北扩至 $25^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$, 低层 θ_{se} 等值线变得更密集, θ_{se} 锋区表现得更为明显, 850 和 500 hPa 的 θ_{se} 差值增大到 8 K(图 2), 强对流天气也正是出现在此区域。

2.2.2 水汽条件

这类形势配置中, 由于低层存在西南急流且水汽充沛, 850 hPa 通常温度露点差 $< 2^{\circ}\text{C}$, 露点温度 $> 12^{\circ}\text{C}$ (表 1), 比湿场在华南地区呈舌状分布, 中心值达 $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上, 低层处于高湿环境中, 当低层西南急流轴北侧存在风速辐合时, 有利于西南部的湿舌向东北方向伸展。850 hPa 水汽通量舌从广西、广东北部、江西南部伸到福建, 大值中心在福建上游的两广境内, 中心值达 $15 \sim 20 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$, 福建上空平均值为 $13.9 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$, 最大可达 $23.8 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ (表 3), 且上游有水汽输送最大值中心, 在西南急流的作用下, 有充足的水汽向强对流发生区域输送。水汽通量散度总体表现为水汽辐合, 平均值达 $-8.7 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大值达 $-19.2 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 20 时较 08 时增大。整层可降水量 08 时平均 3.73 cm, 20 时增加到 4.15 cm。700 hPa 温度露点差大部分在 10°C 以内(表 3), 比湿 $> 6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 总体而言, 中低层的湿度相对较大, 500 hPa 通常为温度露点差 $> 15^{\circ}\text{C}$ 的干区(表 3), 700 hPa 以下为湿层, 500 hPa 附近相对较干, 温湿廓线表现为“上干下湿”有利于强对流天气的产生,

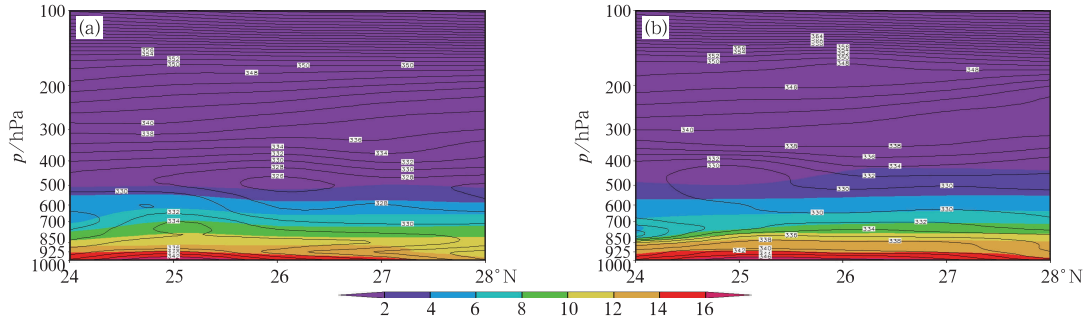


图 2 2012 年 4 月 12 日 08 时(a)和 14 时(b)利用 NCEP 再分析资料计算的沿 117°E 比湿 (阴影,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和假相当位温 θ_{se} (实线,单位: K)南北垂直剖面

Fig. 2 Vertical cross-section of specific humidity (shadow, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and potential pseudo-equivalent temperature (solid line, unit: K) along 117°E calculated with the NCEP data at 08:00 BT (a) and 14:00 BT (b) 12 April 2012

表 3 水汽及抬升条件相关物理量统计

Table 3 Statistics of vapor flux at 08:00 BT and 20:00 BT, vapor flux divergence at 08:00 BT and 20:00 BT, depression of the dew point at 700 hPa and 500 hPa, vertical velocity at 925 hPa at 08:00 BT and 20:00 BT, vertical velocity at 850 hPa at 08:00 BT and 20:00 BT

数值	q_{flux08} / $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$	q_{flux20} / $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$	q_{div08} / $10^{-8} \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	q_{div20} / $10^{-8} \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$T_{700} - T_{d700}$ / $^{\circ}\text{C}$	$T_{500} - T_{d500}$ / $^{\circ}\text{C}$	W_{92508} / $\text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$	W_{92520} / $\text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$	W_{85008} / $\text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$	W_{85020} / $\text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$
最大值	20.7	23.8	2.0	4.2	29.0	41.0	3.3	3.9	5.2	3.9
最小值	6.1	7.3	-18.1	-19.2	1.4	11.0	-6.2	-7.3	-10.8	-15.7
75%百分位数	15.7	16.8	-4.3	-4.7	20.7	29.3	1.8	-2.5	1.9	-5.5
中位数	13.7	15.0	-6.7	-9.6	3.8	27.0	-0.3	-4.1	-1.1	-7.8
25%百分位数	10.5	10.5	-11.0	-15.6	2.0	17.5	-1.4	-5.7	-3.0	-12.4
平均值	13.5	14.2	-8.0	-9.3	7.3	25.0	-0.3	-7.6	-1.4	-7.8

尤其是有利于冰雹和雷暴大风(俞小鼎,2014;俞小鼎等,2012),由于低层湿度条件好,产生的强对流天气均伴有降水出现,呈现湿对流风暴特征,这也是与北方常出现的倒“V”字型的干型雷暴大风温湿廓线的区别(廖晓农,2009)。

2.2.3 对流有效位能和对流抑制

一些对流参数可将静力稳定度和水汽这两个深厚湿对流生成要素结合,表现大气垂直层结不稳定和水汽的综合效应,反映大气整体的稳定性,在此选择业务上常用的对流有效位能(CAPE)和对流抑制(CIN)进行分析。由于强对流天气多发生在午后到傍晚,常规 08 和 20 时的探空多数不能代表对流发生前夕的大气层结,业务上常利用 14 时地面资料订正探空资料,统计表明,此类强对流天气出现区域附近的探空 CAPE 值最小为 $728 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、最大为 $2148.5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 4)。12 个个例中大部分以冰雹、雷雨大风混合型的强对流天气为主(10 个个例),仅有 2 个个例(2005 年 3 月 22 日和 2006 年 5

月 9 日)是以雷雨大风天气为主,产生雷雨大风有利的环境条件一是中层相对较干,二是对流层中、下层的环境温度直减率较大(Johns and Doswell,1992;俞小鼎等,2012),同时,对流云中的下沉气流具有一定的热力不稳定性,是气块加速下沉产生地面强阵风的条件之一(廖晓农,2009)。这两个雷雨大风个例中层相对较干(700 hPa 温度露点差 $> 8^{\circ}\text{C}$,其中 2006 年 5 月 9 日邵武探空 700 hPa 温度露点差为 $12 \sim 19^{\circ}\text{C}$),700 与 500 hPa 垂直温差在 $16 \sim 18^{\circ}\text{C}$,与冰雹和雷雨大风混合型强对流天气相比较差别不大;但其下沉对流有效位能(DCAPE)值较 CAPE 值明显增大,如 2005 年 3 月 22 日 08 时厦门探空显示 CAPE 为 0,其 DCAPE 达 $585.8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,2006 年 5 月 9 日 20 时邵武探空显示 CAPE 为 $90 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,其 DCAPE 为 $675.6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。因此,该类型强对流天气在 DCAPE 较 CAPE 明显增大时,可以预报有较明显的雷雨大风天气。

逆温层可将低空潮湿空气和对流层的中、上部

较干燥的空气分隔开,形成干暖盖,有利于大量能量积蓄,当有较强的垂直风切变以及相应的抬升条件时,有利于深对流的发展。由于此类强对流天气大部分发生在午后到傍晚,探空资料一般选取 08 时次,通过探空分析表明,逆温分为两类,一类是在近地面由于夜间地面辐射降温造成的逆温,共出现 8 次;另一类在逆温层之上温度露点差增大,为相对干区,逆温层下部为湿区,共出现 11 次,逆温层平均位于 677 hPa 附近,平均厚度为 29 hPa,此类逆温形成干暖盖有利于不稳定能量的积累。同时,此类由西南急流暖湿强迫背景下产生的强对流天气的抬升凝结高度(LCL)在 900 hPa 以下,平均 970 hPa,高度约 418.5 m(表 4),在未进行温度订正前,自由对流

高度较高平均 2529.5 m(表 4),经 14 时温度订正后高度下降至 563 m,对流抑制能量(CIN)平均为 $67.9 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,表明此类强对流天气对气层抬升达到饱和以及强迫气块上升到自由对流高度(LFC)所需的外力抬升要求相对较小。产生冰雹天气还需要适当的 0°C 层和 -20°C 层,统计表明,产生冰雹 10 个个例,平均干球 0°C 层高度(DBZ)为 4286.9 m,湿球 0°C 层(WBZ)高度为 3757.1 m,WBZ 高度明显低于 DBZ 高度,说明对流层中层相对较干,冰雹真正开始融化的高度(WBZ)低,有利于冰雹的发展(俞小鼎,2014), -20°C 层高度为 7479.7 m,暖云厚度平均为 3407.5 m(表 4)。

表 4 对流有效位能及 0°C 层高度等相关物理量统计

Table 4 Statistics of CAPE, the heights of LCL, LFC, DBZ, WBZ, -20°C and warm cloud

数值	CAPE/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	LCL/m	LFC/m	$H_{40^\circ\text{C}}$ /m	$H_{w0^\circ\text{C}}$ /m	$H_{-20^\circ\text{C}}$ /m	暖云厚度/m
最大值	2148.5	856.2	3794.1	4311.1	5114.4	8353.6	4111.1
最小值	728.0	165.4	1390.3	3355.2	3685.7	7055.6	2601.8
75%百分位数	1692.0	500.0	2756.6	3922.8	4616.7	7578.6	3508.3
中位数	1417.5	400.0	2555.5	3776.7	4297.3	7380.0	3382.3
25%百分位数	1120.3	300.0	2241.7	3468.3	3955.0	7213.5	3102.7
平均值	1427.5	418.5	2529.5	3757.1	4286.9	7479.7	3407.5

2.2.4 抬升条件

由于 500 hPa 有低槽或南支槽缓慢东移,槽前气压下降,存在负变高区,槽前较大的正涡度平流导致上升运动,同时有利于条件不稳定层结的加强,CAPE 增加和 CIN 减小。850 hPa 以下在切变南侧存在强盛西南急流,福建正处于西南急流轴的左侧,有时在福建西部存在风速辐合,在低层急流左前侧形成强的上升运动。同时,在强西南急流中的大风速核向东传播的过程中也将对强对流天气产生触发作用。925 hPa 有时在强对流发生区域存在切变线,统计 925 和 850 hPa 福建上空边界层垂直速度可以看出(表 3),平均值分别为 $-2.03 \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ (925 hPa)和 $-4.57 \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ (850 hPa),850 hPa 最大可达 $-15.7 \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,20 时较 08 时垂直上升运动明显增加。地面图上,福建通常处于锋前暖低压倒槽暖区内,倒槽内有中尺度辐合线或闭合热低压生成,热力抬升和负变压中心所产生的抬升作用同样有利于触发强对流天气。在高层 300~200 hPa 存在分流辐散区或高空急流穿过低空辐合区上空,中低层辐合、高层辐散为强对流天气的发生提供了有利的背景条件,如 2010 年 3 月 5 日 08 时福建北部

处于 850 hPa 急流轴左侧、200 hPa 急流出口区的左侧(图 5a),出现 50 mm 强降雹的邵武站散度垂直剖面图显示 300 hPa 以下为辐合区,其中 700~850 hPa 中低层为强辐合,200 hPa 附近强辐散(图 3)。这种低层辐合、高层辐散,高空急流与低空西南急流耦合

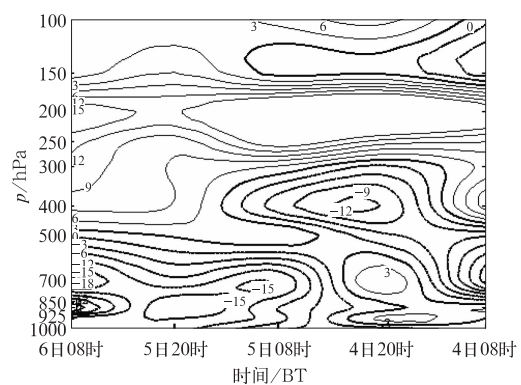


图 3 2010 年 3 月 4 日 08 时至 6 日 08 时邵武站散度垂直剖面图 (大冰雹出现在 5 日 16 时)

Fig. 3 Vertical cross-section of divergence at Shaowu Station from 08:00 BT 4 to 08:00 BT 6 March 2010 (Heavy hail occurred at 16:00 BT 5 March 2010)

及形成的次级环流上升支都为强对流发展提供良好的动力条件。

分析强对流发生源地及其影响区域发现,大部分对流天气发生的源地在江西或广东,强对流天气更多是由地面的锋面、辐合线、热低压,925 hPa 辐合线等中尺度天气系统触发,对流生成后在西南急流引导下进入福建,由于雷暴下沉气流与其前方的偏南气流形成地面辐合线,或是经过有利的地形抬升,移入地区的水汽条件、不稳定条件以及垂直风切变条件对对流单体发展都十分有利,使得对流单体持续发展,产生冰雹、雷雨大风等强对流天气。因此,对此类强对流天气的短时临近监测预警更需要关注上游强天气产生后是否进入有利的环境场条件区域。

2.2.5 垂直风切变

当具有良好的水汽、不稳定和抬升条件时,环境风垂直切变越大,对流风暴的结构组织将更加紧密,强的垂直风切变有利于风暴持续发展,增强中、高层干空气的吸入,加强风暴中下沉气流和低层冷空气外流。此类天气西南急流强盛,在强对流发生区域地面到 500 hPa 风矢量差平均值为 $22.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,地面到 700 hPa 风矢量差平均值为 $16.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (表 5),为三类强对流天气型中最大。以地面到 500 hPa 风矢量差达 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上为强垂直风切变, $15 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为中等标准,12 个个例中有 9 个为强垂直风切变,2 个为中等强度,利用 14 时地面资料订正探空有 8 个强垂直风切变个例的 CAPE 值大于 $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,产生的强对流天气中均出现了超级单体风暴,另一个个例 CAPE 为 $893 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 同样产生了大范围的飏线天气。

表 5 风矢量差物理量统计
Table 5 Statistics of vertical wind shear between surface and 500 hPa and between surface and 700 hPa

数值	地面—500 hPa 的 $\text{SHR}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	地面—700 hPa 的 $\text{SHR}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
最大值	38.0	28.4
最小值	8.0	9.7
75%百分位数	25.9	18.2
中位数	22.3	15.0
25%百分位数	18.8	12.5
平均值	22.2	16.4

2.2.6 环境参数讨论

对各类环境参数物理量统计进一步分析表明,

850~500 hPa 垂直温差在 25°C 左右且分布集中,可反映此类强对流天气大气层结呈现条件不稳定状态,850 和 500 hPa 高度的温度露点差反映出上下湿水汽条件,最小的 θ_{se} 平均高度在 500 hPa 附近也体现了对流层中高层的干层,但 700 和 600 hPa 高度的温度露点差差异大,代表性差。500 和 850 hPa θ_{se} 差平均值可达 13.9°C ,但分布比较分散,需要根据天气系统演变进行订正。经过 14 时地面资料订正后的 CAPE 反映出大气垂直层结不稳定。冰雹天气对应的此类天气的 0°C 层和 -20°C 层高度分别在 600 和 400 hPa 附近。LCL 在 900 hPa 以下,较小的外力即能使气层抬升达到饱和,但 LFC 需要进行温度订正后才可使用。虽然地面到 500 hPa 以及地面到 700 hPa 的垂直风切变平均值为中等以上,但分布的差异还是比较明显的,在进行强对流天气预报时可以结合 CAPE 值进行综合判断,较强的垂直风切变配合大的 CAPE 有利于强风暴的持续发展。

2.2.7 强对流天气种类及落区

这类强对流天气往往在低层急流轴、低层或地面辐合线、地面锋面及地面热低压附近发展,对流发展后随着槽前西南气流向东北移动。利用雷达资料分析,对流以暖区里的对流单体为主,发展旺盛的对流一般为多单体强风暴和(或)超级单体风暴,多数风暴由位于江西或广东的锋面等天气系统附近发展后东北移入地面锋前暖区内的福建省(图 4),暖区往往在上午时段天气较好,午后对流发展强盛。当对流层中高层(500 hPa 以上)较干时,强对流天气以雷雨大风、冰雹为主,而当湿层较深厚时,在湿度

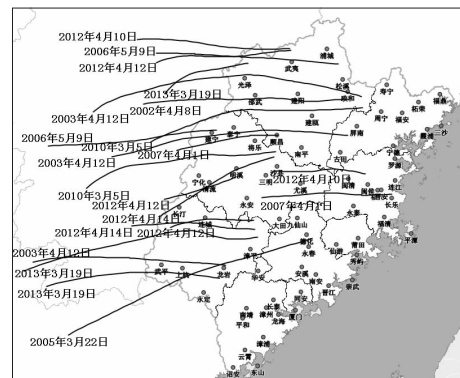


图 4 对流风暴初始位置及移动路径图
Fig. 4 Initial position and moving path of convective storm

大值一侧常常有短时强降水天气出现。

3 典型个例分析

3.1 2010 年 3 月 5 日冰雹、雷雨大风天气

2010 年 3 月 5 日受低层西南急流及高空槽东移影响,午后到夜里福建省南平、三明两市自西向东出现了明显的冰雹、雷雨大风等强对流天气,局部出现直径 50 mm 的大冰雹,雷雨大风以三门市的 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (9 级)最大。通过中尺度分析(图 5a)可以看出,5 日 08 时福建省西部 925~500 hPa 均处于西南急流内,500 hPa 处于南支槽前,并逐渐东移,在江西西部有弱温度槽东移,850 hPa 处于切变南侧西南急流区内,福建西部到广东一带有暖脊发展,850 与 500 hPa 垂直温差 $> 25^\circ\text{C}$,925 hPa 切变线位于江西到福建北部,低层强烈暖湿平流建立条件不稳定。14 时对流天气在江西东部地面冷锋、辐合线附近发展,后随低层西南急流轴东传,同时,在福建北部的地面中尺度低压所形成强烈的辐合、抬升,0~1.5 km 的风矢量差达 $19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、0~6 km 的风矢量差达 $36.89 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,为强对流天气发生发展提供了良好的动力抬升条件。从水汽条件看,低层比湿 $> 11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,邵武上空 500 hPa 温度露点差由 08 时 12°C 增大到 20 时 29°C ,存在明显上干下湿垂直结构。从邵武单站探空图分析,08 时对流层中低层(746~802 hPa)出现了逆温层(干暖盖),有利于深对流发展,此时 CAPE 为 0,但随着午后气温上升,用地面 14 时温度、露点订正后,CAPE 达 $1535 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 5b),CAPE 值中等,850 和 500 hPa θ_{se} 差值由 08 时 13.48°C 增大到 20 时 16.29°C ,

当天 0°C 高度约为 4 km, -20°C 高度为 7.1 km,干暖盖、大的 CAPE、强的垂直风切变、合适的 0°C 层高度为此次强对流天气提供了良好的环境条件。

3.2 2005 年 3 月 22 日大范围飚线过程

2005 年 3 月 22 日广西、广东及福建出现了一次大范围的飚线天气过程,广西、广东等地出现 8 级以上的雷雨大风、冰雹等强对流天气,进入福建南部后以雷雨大风天气为主,部分测站出现 12 级以上的瞬时大风,该飚线从 22 日 07 时左右生成到 17:30 减弱消散,持续时间之长为近年罕见。中尺度分析显示(图 6),22 日 08 时广西东部、广东及福建 850~500 hPa 均处于西南急流内,500 hPa 处于南支槽前,700 hPa 槽线位置偏东,出现“前倾”特征,在广东、广西交界处有温度槽,850 hPa 处于切变南侧西南急流区内,温度露点差 $< 2^\circ\text{C}$,暖脊呈东北—西南向,850 和 500 hPa θ_{se} 差值 $> 10 \text{ K}$ 分布在广西东部及广东,中心值达 18 K,850 与 500 hPa 垂直温差 $> 25^\circ\text{C}$ 分布在广东、广西,20 时福建南部温差也增大到 26°C ,700 与 500 hPa 垂直温差 $> 17^\circ\text{C}$,广东、广西交界处 500 hPa 温度露点差 $> 30^\circ\text{C}$,同时 500 和 700 hPa 在广东、广西及福建南部存在 $1\sim 4^\circ\text{C}$ 的负变温区,而 850 hPa 表现为升温,上干冷下温暖的不稳定层结明显。200 hPa 广东、广西及福建南部处于急流入口区的右侧,925 hPa 切变线位于广西东部到广东北部,08 时地面图上广西东部、广东北部 3 小时加压不到 1 hPa,为加压最小区域且有辐合线配合,对流在广西东部生成后在东北移过程中逐渐发展为飚线,沿 3 h 负变压最大处移动,一路带来大风、冰雹天气。14 时在广东北部地面辐合线明显,广东与福建交界处出现 4 hPa 的负变压中心,西南

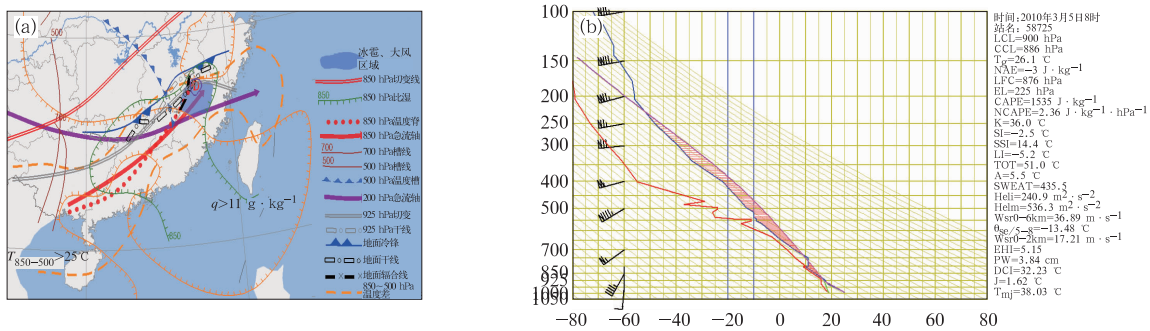


图 5 2010 年 3 月 5 日 08 时中尺度综合图分析(a)和邵武站 14 时探空订正(b)
 Fig. 5 Mesoscale composite analysis chart at 08:00 BT (a) and the correction of sounding at Shaowu Station at 14:00 BT 5 March 2010

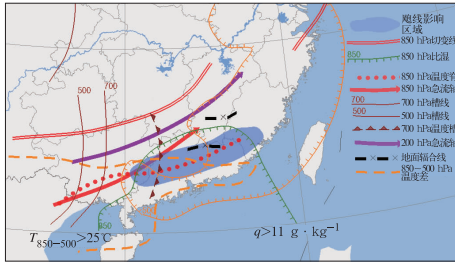


图 6 2005 年 3 月 22 日 08 时中尺度
综合图分析

Fig. 6 Mesoscale composite analysis
chart at 08:00 BT 22 March 2005

急流东传, 飊线在进入粤东的九连山和莲花山之间的狭谷地带以及福建西南部的喇叭口有利地形, 气流辐合抬升, 飊线再次加强发展。从广西、广东及福建的单站探空资料显示, 08 时梧州 0~2 km 的风矢量差达 $10.42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 0~6 km 的风矢量差达 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 清远 0~2 km 的风矢量差达 $11.36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 0~6 km 的风矢量差达 $27.17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 到 20 时厦门 0~6 km 的风矢量差增加到 $27.55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 08 时三站的 DCAPE 均大于 CAPE, 大于 $500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 强的垂直风切变、大的 DCAPE 为此次飊线的持续发展提供了良好的环境条件。

4 结 论

(1) 西南急流暖湿强迫背景下的强对流天气主要是由于对流层中、高层干冷空气位于低层强烈发展的暖湿平流之上, 形成显著条件不稳定, 低层强烈暖湿平流及地面升温建立条件不稳定起主导作用。地面处于锋前暖区低压倒槽内, 低空西南急流输送暖湿平流, 增加条件不稳定性、提供充沛的水汽。低层西南急流脉动或风速辐合、地面辐合线、925 hPa 切变线及地面强烈发展的热低压等为主的触发抬升条件。同时, 200~300 hPa 高空分流区或高空急流与低空西南急流耦合及形成的次级环流也为强对流天气的发生提供垂直上升运动背景, 加强不稳定能量的释放。

(2) 850 hPa 或以下有强盛西南暖湿急流, 暖湿平流显著, 低层暖脊快速建立, 中、高层 700 或 500 hPa 的温度槽缓慢东移, 有冷槽配合或有小槽快速东传带来弱冷空气, 850 与 500 hPa 垂直温差在 25°C 左右, 700 与 500 hPa 垂直温差 $>15^\circ\text{C}$ 。福建出现对流天气对应区域 $\theta_{se} > 330 \text{ K}$, 高温高湿区

由上游广东、广西不稳定区向下游福建西部发展, 强对流天气一般出现在 θ_{se} 高能舌轴北侧, 强 θ_{se} 锋区的南缘, 850 和 500 hPa θ_{se} 差值可达 $10\sim 16 \text{ K}$, 福建强中心可达到 $8\sim 15 \text{ K}$ 。地面处于低压倒槽暖区内, 24 h 减压 $2\sim 4 \text{ hPa}$, 有时高达 $6\sim 7 \text{ hPa}$, 并可能生产热低压。应用温度订正后的 CAPE 值中等偏强, 在 DCAPE 较 CAPE 明显增大时, 可以预报有较明显的雷雨大风天气。逆温层下沉增温形成干暖盖有利于不稳定能量的积累, LCL 较低、CIN 小, 强对流天气气层抬升达到饱和以及达到 LCF 所需的外力较小, 有利于强对流天气的产生。冰雹过程的 WBZ 高度明显低于 DBZ 高度。

(3) 低层存在西南急流, 水汽充沛, 850 hPa 通常温度露点差 $<2^\circ\text{C}$, 比湿 $>10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 当低层西南急流轴北侧存在风速辐合时, 有利于西南部的湿舌向东北方向伸展, 700 hPa 比湿 $>6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 中低层的湿度相对较大, 500 hPa 通常为温度露点差 $>15^\circ\text{C}$ 的干区, 温湿廓线表现为“上干下湿”。

(4) 850 hPa 以下强盛西南急流, 有时在福建西部存在风速辐合, 低层急流左前侧会形成强的上升运动。在高层 200 hPa 多数有分流辐散区或位于急流轴入口区左侧及出口区右侧, 中低层辐合、高层辐散为强对流天气的发生提供了有利的环境条件, 大部分对流天气生成于广东或江西, 多数是由地面的锋面、干线、地面或 925 hPa 辐合线、地面热低压等中尺度天气系统触发, 对流生成后在西南急流引导下进入福建, 由于雷暴下沉气流与其前方的偏南气流形成地面辐合线, 或是有利的地形抬升, 并且移入地区的水汽条件、不稳定条件及垂直风切变条件对对流单体发展都十分有利, 使得对流单体持续发展, 产生冰雹、雷雨大风等强对流天气。因此, 对此类强对流天气的短时临近监测预警更需要关注上游强天气是否进入有利的环境场条件区域。

(5) 由于此类天气西南急流强盛, 垂直风切变为中等以上强度, 在强对流发生区域 0~6 km 风矢量差平均值为 $22.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 0~2 km 风矢量差平均值为 $16.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 较强的垂直风切变配合大的 CAPE 有利于强风暴的持续发展。

参考文献

- 冯晋勤, 蔡菁, 赖巧珍, 等, 2015. 春季强对流天气中尺度特征及环境场条件分析[C]// 第七届海峡论坛 2015 年两岸民生气象论坛文集: 133-142.

- 廖晓农, 2009. 北京雷暴大风日环境特征分析[J]. 气候与环境研究, 14(1):54-62.
- 林新彬, 刘爱鸣, 林毅, 等, 2013. 福建省天气预报技术手册[M]. 北京: 气象出版社: 171-186.
- 孙继松, 陶祖钰, 2012. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J]. 气象, 38(2):164-173.
- 王秀明, 俞小鼎, 周小刚, 2014. 雷暴潜势预报中几个基本问题的讨论[J]. 气象, 40(4):389-399.
- 许爱华, 孙继松, 许东蓓, 等, 2014. 中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J]. 气象, 40(4):400-411.
- 俞小鼎, 2011. 基于构成要素的预报方法——配料法[J]. 气象, 37(8):913-918.
- 俞小鼎, 2014. 关于冰雹的融化层高度[J]. 气象, 40(6):649-654.
- 俞小鼎, 周小刚, 王秀明, 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报, 70(3):311-337.
- 张小玲, 湛芸, 张涛, 2012. 对流天气预报中的环境场条件分析[J]. 气象学报, 70(4):642-654.
- 张小玲, 张涛, 刘鑫华, 等, 2010. 中尺度天气的高空地面综合图分析[J]. 气象, 36(7):143-150.
- 郑媛媛, 姚晨, 郝莹, 等, 2011. 不同类型大尺度环流背景下强对流天气的短时临近预报预警研究[J]. 气象, 37(7):795-801.
- Crisp C A, 1979. Training guide for severe weather forecasters[R]. AFGWC/TN-79/002, Offutt AFB, NE: United States Air Force, Air Weather Service (MAC), Air Force Global Weather Central.
- Doswell C A III, 1987. The distinction between large-scale and mesoscale contribution to severe convection: a case study example[J]. Wea Forecasting, 2(1):3-16.
- Doswell C A III, Brooks H E, Maddox R A, 1996. Flash flood forecasting: an ingredients-based methodology[J]. Wea Forecasting, 11(4):560-581.
- Fujita T T, Newstein H, Tepper M, 1956. Mesoanalysis: An important scale in the analysis of weather data[R]. U. S. Weather Bureau Research Paper, (39). Washington, D. C.: U. S. Government Printing Office:1-84.
- Johns R H, Doswell C A III, 1992. Severe local storms forecasting[J]. Wea Forecasting, 7(4):588-612.
- Miller R C, 1972. Notes on analysis and severe-storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central[R]. Technical Report 200 (Revised), Offutt, NE: Air Weather Service (MAC), United States Air Force.