

陈健康,赵玉春,陈赛,等,2019. 闽中南罕见冬季锋前暴雨两个例特征分析[J]. 气象,45(2):228-239. Chen J K,Zhao Y C,Chen S,et al,2019. Characteristic analysis on a winter prefrontal torrential rain in central and southern Fujian[J]. Meteor Mon,45(2):228-239(in Chinese).

闽中南罕见冬季锋前暴雨两个例特征分析^{*}

陈健康^{1,2} 赵玉春¹ 陈 赛² 黄惠镛² 郑 辉²

1 海峡气象开放实验室,厦门 361012

2 厦门市气象台,厦门 361012

提 要: 利用福建省逐小时加密自动站资料、风廓线、S 波段双偏振雷达与雨滴谱等新型探测资料以及 NCEP 逐 6 h 的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 大气再分析资料,分析了 2017 年 2 月 21—22 日福建中南部一次预报失败的冬季暴雨过程。结果表明:(1)此次暴雨过程类似于锋前暖区暴雨,自 2000 年以来仅此一例,十分罕见,是在低空急流偏强并长时间维持的背景下产生的,并未受到南支槽和冷空气的影响。(2)闽中大到暴雨带和闽南暴雨区的对流系统相互独立,有多个对流系统影响闽中地区,仅两个对流系统影响闽南地区。降水有较明显对流特征,属暖云弱对流降水,容易导致预报员对雨强估计不足。(3)此次冬季暴雨过程的水汽主要来自南海地区,低层水汽条件与汛期暴雨相当,但整层水汽条件较汛期略差;低空急流对暖湿气流的输送使暴雨区趋于不稳定,但对流不稳定度较汛期弱。(4)高空辐散低层辐合的配置为冬季暴雨带来了有利的动力抬升条件,但暴雨区涡旋性不强,无明显正涡度柱。其中,闽中大到暴雨主要与条件性对称不稳定有关,是在湿斜压作用下倾斜上升运动中产生,而闽南暴雨区既存在对流不稳定,也存在条件性对称不稳定。

关键词: 冬季锋前暴雨,微物理特征,低空急流,水汽,湿位涡

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.02.008

Characteristic Analysis on a Winter Prefrontal Torrential Rain in Central and Southern Fujian

CHEN Jiankang^{1,2} ZHAO Yuchun¹ CHEN Sai² HUANG Huirong² ZHENG Hui²

1 Laboratory of Straits Meteorology, Xiamen 361012

2 Xiamen Meteorological Observatory, Xiamen 361012

Abstract: Based on Fujian dense automatic station data, wind profile radar data, S-band dual polarization radar data, raindrop spectrum data and NCEP $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ reanalysis data, the failed forecast of winter torrential rain for central and southern Fujian from 20:00 BT 21 to 20:00 BT 22 February 2017 is analyzed. The results suggest that: (1) The uncommon torrential rain happened ahead of the front, under the background of strong and long persisting low-level jet, seen only once since 2000, and was not affected by the southern trough and cold air. (2) Convective systems in central and southern Fujian were independent to each other, and multiple convective systems affected central Fujian, but only two affected southern Fujian. The convective precipitation was warm rain process convection, easily causing the underestimation of rainfall intensity. (3) The water vapor came mainly from the South China Sea. Compared with heavy rain events in flood season, the low-level water vapor condition was similar to that of flood season although water vapor in the whole layer was slightly weaker. Warm and wet air transport by low-level jet increased the instability of stratification in rainstorm area, but the convective instability was slightly weaker than that in the

^{*} 国家自然科学基金项目(41675047)资助

2018 年 1 月 17 日收稿; 2018 年 8 月 17 日收修定稿

第一作者:陈健康,主要从事天气预报技术研究. Email:13914797093@163.com

flood season. (4) Divergence at upper layer coupling with low-layer convergence provided favorable condition for the dynamic lifting of rainstorm areas, but the wind vorticity was not strong and there was no obvious positive vorticity column. Analysis of wet potential vorticity indicates that the heavy-to-torrential rain in central Fujian was mainly related to conditional symmetric instability, resulting in the inclining ascending motion, but both convective instability and conditional symmetric instability played great roles in the rainstorm area in southern Fujian.

Key words: winter prefrontal torrential rain, microphysical characteristics, low-level jet, water vapor, wet potential vorticity

引 言

暴雨是华南地区最主要的灾害性天气之一,主要发生在汛期,冬季相对较少。许多学者对华南汛期暴雨进行了广泛而深入的研究,取得了许多有意义的成果(赵玉春和王叶红,2009;林确略等,2015;何立富等,2016;罗建英等,2009),对华南冬季暴雨也取得一定的认识。Jia et al(2011)研究得出,大气季节内振荡通过调整大气环流来影响孟加拉湾及南海地区冬季水汽输送,对我国冬季暴雨形成有很大影响。朱星球和王咏青(2011)对比分析了江西地区2010年12月两次冬季暴雨过程的环境场,发现这两次暴雨过程都是在高空强辐散场与中低层辐合区稳定持续地耦合下形成的,整层水汽输送与汛期暴雨相近,但是对流不稳定性及动力条件皆较弱。Li et al(2011)分析广西冬季的一次大范围连续性暴雨后,认为副热带高压异常偏强且稳定所导致的低层东南急流辐合是暴雨形成的根本原因,通过湿位涡(MPV)诊断发现暴雨发生在对流稳定条件下,湿斜压不稳定加强导致了涡旋发展和暴雨发生。

为了系统地研究分析福建冬季暴雨天气背景及环流特征,何芬等(2010)统计分析了1960—2008年共49年福建省冬季出现的暴雨过程,发现所有的暴雨过程都发生在南支槽东移及切变线维持的天气背景下,本质上是冷暖气流交汇所导致。作者也统计了2000年以来福建地区冬季出现的18次暴雨过程,其中17次过程与何芬等(2010)的研究一致,为南下冷空气与南方暖湿气流交汇产生的锋面降水,每次降水过程都有切变线的维持,以稳定性降水为主。

然而,2017年2月21—22日发生在闽中南的暴雨过程却极为特殊,暴雨期间中低层切变线及地面冷锋位于江西境内,锋面雨带也在江西境内,闽中大到暴雨带和闽南暴雨区皆位于锋前低空急流中,

与华南前汛期暖区暴雨的天气形势类似(黄士松等,1986),降水有较明显的对流特征。EC全球模式预报出了闽中和闽南地区的降水过程,但预报的降水量偏弱,其中闽南地区24 h降水预报在20~40 mm左右,且降水落区偏北,闽中地区24 h降水预报不足10 mm(图略);NCEP全球模式和福建WRF中尺度模式仅预报出了闽中地区的降水过程,且预报的降水很弱,位置略偏南(图略)。由于全球模式及区域模式均未能较好地预报出此次降水过程,加之其与冬季暴雨发生的典型环流形势不同,21日20时探空曲线显示的不稳定能量弱,导致业务预报人员对雨强估计不足,漏报了此次暴雨过程。本文利用自动站逐小时雨量资料、常规及新型观测资料以及NCEP逐6 h的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 全球再分析资料,对此次冬季暴雨过程进行细致分析,揭示冬季锋前暴雨的主要特征,为福建冬季锋前暴雨分析和预报提供一些有意义的科学依据。

1 降水概况

受低空急流影响,2017年2月21—22日福建中南部地区出现了一次大范围降雨过程,在21日20时至22日20时(北京时,下同)福建省24 h累积雨量分布图(图1a)上,两条明显的东北—西南向的雨带分别位于闽中及闽南沿海。暴雨主要位于漳州、厦门、泉州一带的沿海地区,福建中部雨带暴雨站点分散(图1a)。福建省区域加密自动站降水资料显示,共有154个站24 h累积雨量在50 mm以上,其中厦门市海沧区困瑶小学自动站雨量最大,达89.3 mm。

在两条雨带中分别选取2个自动站为代表来分析此次降水过程演变情况,其中福建中部雨带县(市)级台站皆没有达到暴雨量级,选取了一都镇、赤锡乡区域自动站为代表,南部雨带选取诏安、厦门为代表。图1b给出了代表站降水量逐时演变情况,可以看到

福建省中部雨带主要降水时段集中在21日22时至22日05时,最大小时雨强为 $20.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,南部雨带主要降水时段为22日02—11时,最大小时雨强为 $33.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。两条雨带主要降水的起始时刻相隔约4 h,强降水维持时间较短,具有一定的对流性特征。

2 天气背景

2.1 大尺度环流形势

闽中大到暴雨即将发生时(21日20时),东亚地区500 hPa中高纬呈“两槽一脊”型,影响我国的高空大槽位于河套地区东侧,副热带高压北侧边界位于 20°N 附近。850 hPa层上,冷式切变线从华北南部一直伸展至西南地区,整个锋面雨带位于切变线附近,福建受偏南气流影响,风速不大,西南急流带位于江西上空。从925 hPa层来看,前一股冷空气已减弱出海,福建中东部沿海地区处于入海冷高压后侧高压脊控制下,随着冷空气从台湾海峡回流,福建中东部盛行东北或偏东风,由于回流冷空气较浅薄,925 hPa上福建东南沿海已转为东南风。新一股冷空气前沿仍位于江西北部,925 hPa切变线也位于江西北侧至西南一带,地面图上冷锋位于江西境内,江西东部及福建西部处于暖倒槽中(图2a)。

22日08时,500 hPa高空大槽分裂为南北两支,南支槽位于重庆至贵州一带,850 hPa切变线略有东移南压,仍位于江西西侧至西南地区,西南急流南移至福建上空。厦门风速为 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,南侧汕头风速达 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从卫星图像可以明显看出,整个锋面云系仍位于江西境内,福建南部上空有一条独立于锋面云系的云带位于锋前。925 hPa切变线略有南压,位于江西中部,福建受东南暖湿气流影响。地面图上冷锋位于闽赣交界处,暖倒槽东移并往北发展加深,控制闽中南地区(图2b)。此时,福建中部降水已经停止,闽南处于降水最强时段,降水主要发生在锋前。

2.2 暴雨属性

对福建省区域自动站海平面气压及气温分布的演变分析发现,至22日12时,暴雨过程趋于结束,新冷空气位于福建西北部地区,闽中南仍处于锋前暖区中(图3a)。进一步分析德化、翔安30 min平均

风廓线资料(图3b,3c)发现:前期边界层(红色框中)由于受到前股冷空气回流的影响,盛行东北风,德化受冷空气影响时间仅持续到21日23:30,翔安靠近沿海,东北风维持时间更长,一直持续到22日09时。随着前股冷空气的进一步东移减弱,两个站点皆转为偏南风,一直到降水结束,边界层皆为偏南风控制。21日21时,德化地区对流层低层(1400 m左右高度)整个西南急流已基本建立,一直持续到降水结束;闽南暴雨区上空低空急流于23:30前后建立并维持,这些与探空资料的特征基本一致。

可见,直至降水结束,福建中南部地区未受到新的冷空气影响,即暴雨主要发生在锋前暖区内,类似于锋前暖区暴雨,是在低空急流偏强且长时间维持的背景下产生的。

3 中尺度特征分析

3.1 中尺度对流云团演变特征

利用日本葵花8卫星逐2 h的 $0.02^{\circ} \times 0.02^{\circ}$ 红外资料,分析造成此次锋前暴雨的中尺度对流系统发展演变特征发现:21日22:30开始,福建中部发展出多个分散的对流单体,呈东北—西南向的带状分布,对流云团A已经发展旺盛,位于福州沿海(图4a)。这些带状分布的对流单体沿着西南引导气流往东北方向移动,并不断发展。至22日00:30,对流系统A已经移至台湾海峡,不再影响福建,分散对流单体发展加强,合并成B、C、D三个对流系统,其中对流系统B导致了该雨带中雨强 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的强降水(图4b)。02:30,对流系统D开始减弱消亡,并分裂成若干小的对流单体,对流系统B、C加强合并成 β 中尺度对流系统F;生成于广东的对流单体发展成对流系统E,移到福建境内,南部沿海也发展出对流云团G,不过其主体位于海上,并未给福建带来明显降水(图4c)。04:30,D云团又重新发展,但是已经移到沿海地区,E云团也开始消亡,至此,闽中地区的降水基本结束(图4d)。06:30—08:30,先后有两个生成于广东沿海的对流云团H、I沿着西南引导气流北上,影响闽南地区,其云顶亮温不低,基本在 $-42 \sim -32^{\circ}\text{C}$,比中部雨带的对流系统更弱,但是带来的雨强却更强,达到 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上,导致了福建南部大范围暴雨,其中08—09时,发展旺盛的对流系统I导致了厦门

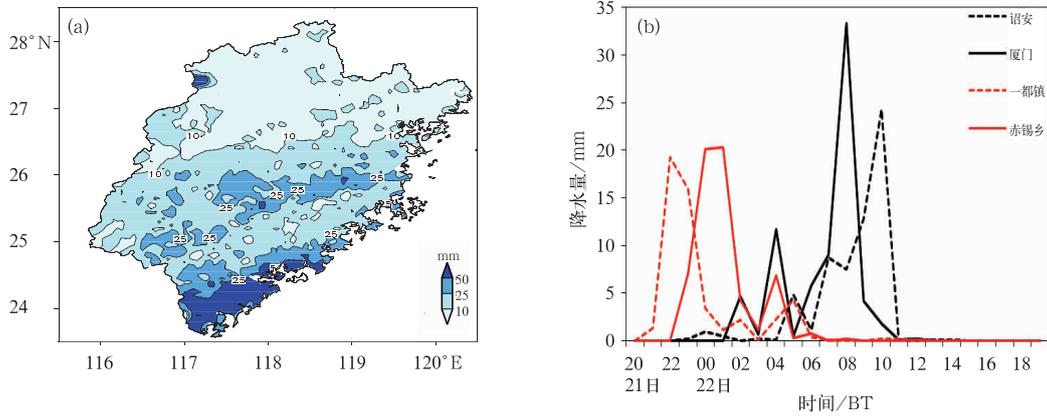


图 1 2017 年 2 月 21 日 20 时至 22 日 20 时福建省 24 h 累积雨量(a)及 4 个代表站的降水量逐时演变(b)
 Fig. 1 Accumulated precipitation over Fujian Province (a) and hourly rainfall at four representative stations (b) from 20:00 BT 21 to 20:00 BT 22 February 2017

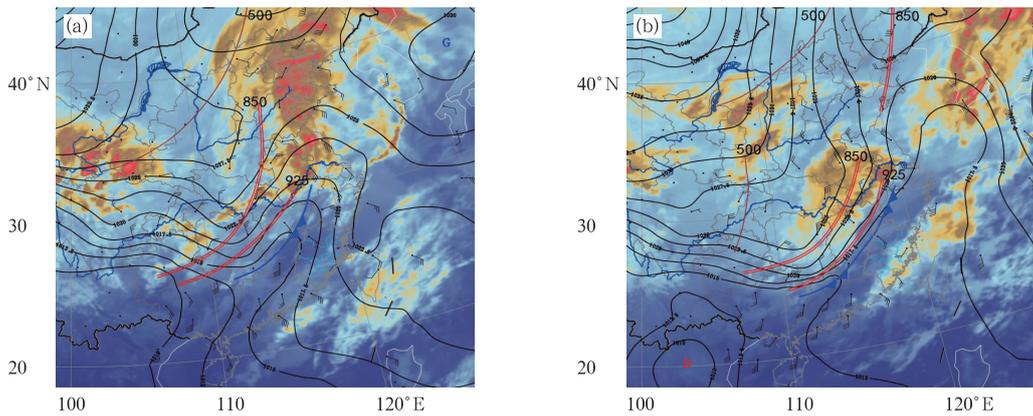


图 2 2017 年 2 月 21 日 20 时(a)和 22 日 08 时(b)综合天气图及相应时刻的 FY-2E 卫星云图
 (风羽:925 hPa 风场;黑色等值线:地面气压场,单位:hPa)
 Fig. 2 Synoptic chart with corresponding FY-2E infrared satellite image at 20:00 BT 21 (a) and 08:00 BT 22 (b) February 2017
 (wind plume: wind field at 925 hPa, black contour: pressure field in ground level, unit: hPa)

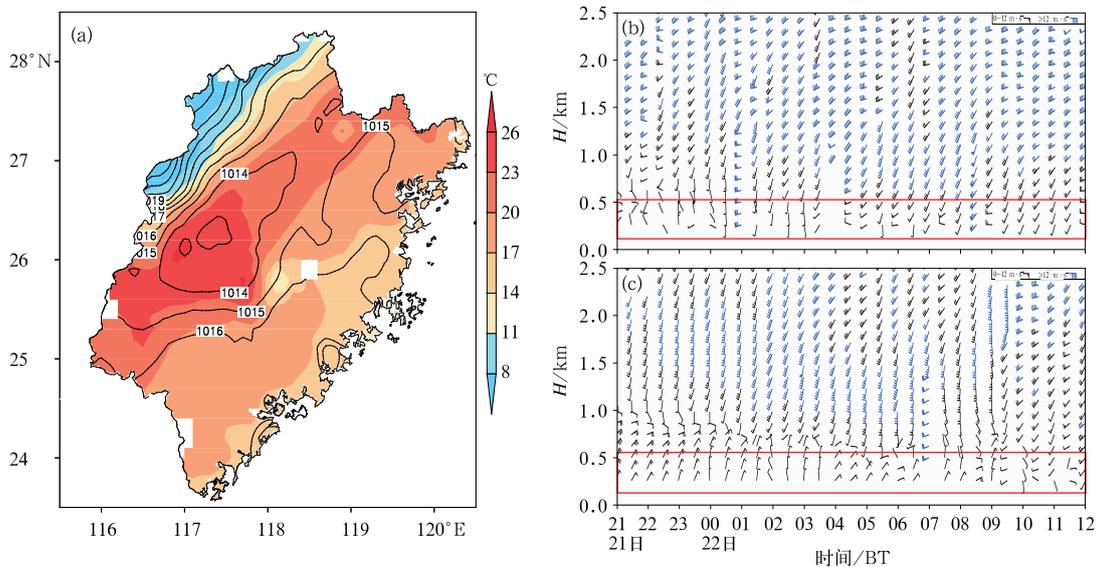


图 3 2017 年 2 月 22 日 12 时福建省海平面气压(单位:hPa)及气温(填色区)分布(a),
 21 日 21 时至 22 日 12 时德化站(b)和翔安站(c)30 min 平均风廓线雷达图
 Fig. 3 Sea level pressure (unit: hPa) and temperature (shaded area) over Fujian Province at 12:00 BT 22 (a),
 30 min mean WPR at Dehua Station (b) and Xiang'an Station (c) from 21:00 BT 21 to 12:00 BT 22 February 2017

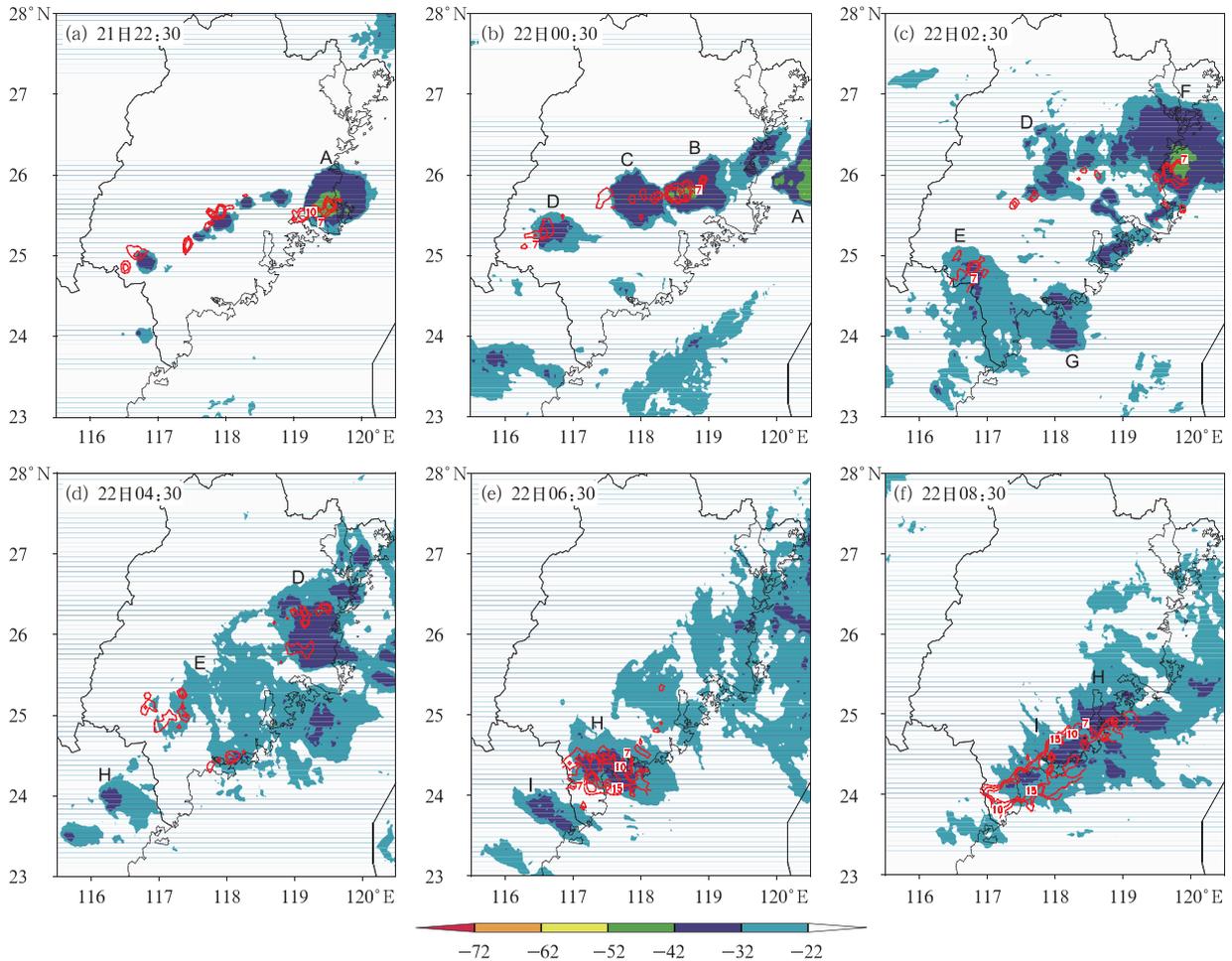


图 4 2017 年 2 月 21 日 22:30 至 22 日 08:30 葵花 8 红外卫星云图(单位: $^{\circ}\text{C}$, 阴影区: $\text{TBB} < -22^{\circ}\text{C}$) 逐 2 h 演变及云图所在时刻的 1 h 累积降水量(红色等值线, 单位: mm , 等值线间隔为 7、10 和 15 mm)
 Fig. 4 The 2 h H8 infrared satellite images (unit: $^{\circ}\text{C}$, shaded area: $\text{TBB} < -22^{\circ}\text{C}$) and corresponding accumulated rainfall for an hour (red contours, unit: mm , contour interval: 7, 10 and 15 mm) from 22:30 BT 21 to 08:30 BT 22 February 2017

$33.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的短时强降水(图 4e, 4f)。之后, 对流系统 H、I 逐渐减弱, 闽南地区的主要降水也趋于结束。

以上分析表明, 此次暴雨过程闽中大到暴雨带和闽南暴雨区的对流系统是相互独立的, 21 日 22:30 至 22 日 04:30, 先后有多个对流系统影响福建中部, 导致了闽中地区的大到暴雨。04:30—08:30, 先后有 H、I 两个对流系统影响福建南部, 造成了闽南地区大范围的暴雨。两条雨带中的对流系统都不强, 最强的对流系统云顶亮温也不低于 -52°C , 而且南部雨带中的对流系统更弱, 云顶更低, 但是造成的小时雨强却更大。

3.2 对流特征及其微物理特征

分析可知, 两条雨带中发展最强的对流云团云

顶亮温与汛期对流系统(蒙伟光等, 2007)相比较, 说明对流云团发展不高。闽中和闽南两条雨带最强时刻的雷达回波也证实了这一点, 强降水时刻雷达回波形态均为大范围絮状回波中夹杂一些对流泡(图 5a, 5c)。从沿着两条回波带的垂直剖面也可以发现, 最强回波均不超过 50 dBz , 雷达回波高度基本在 10 km 以下, 35 dBz 以上的强回波质心高度也都不超过 4.5 km (图 5b, 5d); 利用探空资料计算发现, 0°C 层高度在 4.1 km 左右; 强回波基本在 0°C 层以下, 降水性质与暖云弱对流降水过程相似(Qin and Fu, 2016)。这种对流云团不强, 但是降水效率高, 容易导致预报员对雨量估计严重偏少。

为了进一步认清此次降水的对流性质, 利用翔安(位于闽南雨带中)激光雨滴谱仪来分析强降水时刻的雨滴微物理特征。翔安 07—10 时的雨强分别

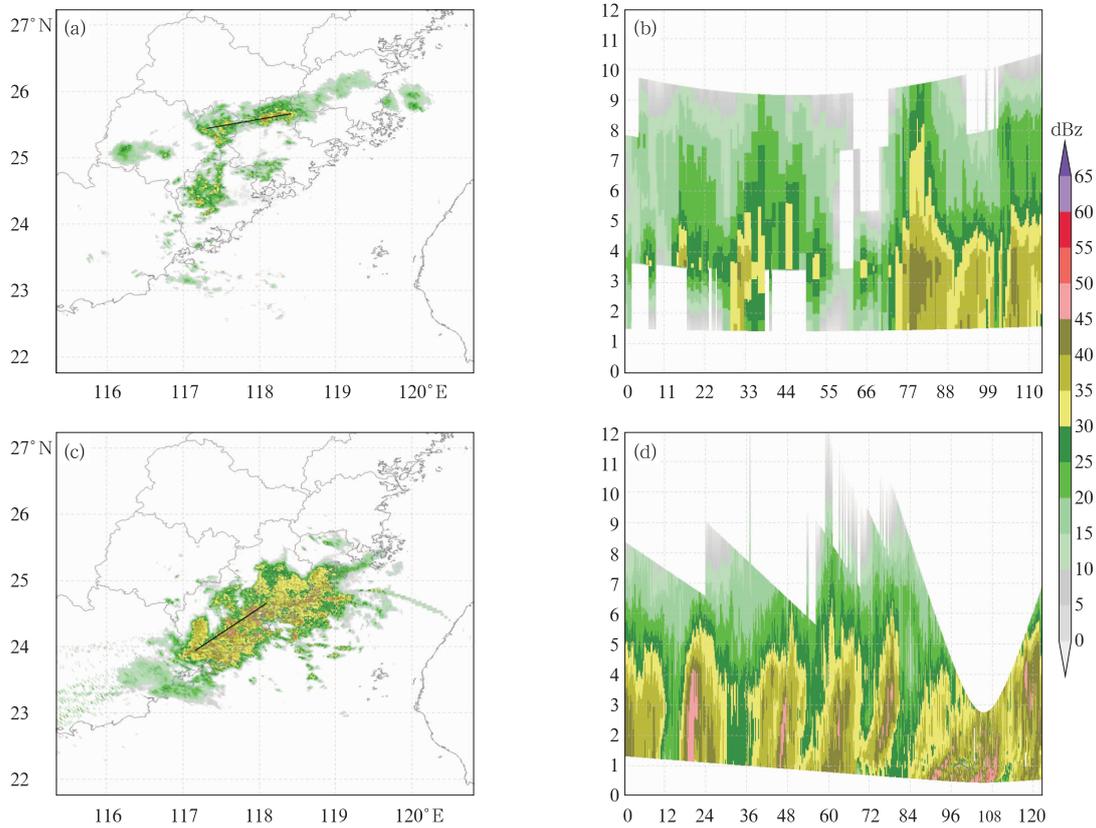


图 5 2017 年 2 月 22 日 00:01(a,b),08:02(c,d)厦门双偏振雷达 1.5° 仰角反射率因子(a,c)及沿黑色实线的垂直剖面(b,d)

Fig. 5 The 1.5° reflectivity factors (a, c) and cross-sections (b, d) from Xiamen Dual-Polarimetric Radar at 00:01 BT (a, b) and 08:02 BT (c, d) 22 February 2017

为 18.6、22.5 mm · h⁻¹。Gamache and Houze (1982)研究得出,小时雨强达到 20 mm · h⁻¹左右,基本以积云降水为主。分析翔安 07—10 时降水过程的平均数密度(图 6,雨滴谱仪为 1 min 记录一次,这里数密度指 1 min 平均的雨滴数)发现,雨滴最大直径在 4 mm 左右,0.25 mm 以下的甚小粒子数量几乎为 0。

陈宝君等(1998)、宫福久等(1997)、柳臣中等(2015)研究发现,积云和积层混合云降水的雨滴最大直径为 8 mm 左右,Blanchard and Spencer(1970)指出由于积云降水粒子直径大,在下降过程中会破碎而产生大量甚小雨滴。而此次降水粒子直径只有 4 mm 左右,远比正常积云或积层混合云降水的最大直径小,无法破碎产生甚小雨滴,导致 0.25 mm 以下的甚小粒子数量几乎为 0。

表 1 给出了不同级别直径的雨滴对雨强的贡献(将雨滴直径划分为 3 个级别:0~1、1~2、2~4.5 mm,各级别对应的数密度和雨强分别为 n₁,

n₂, n₃ 及 R₁, R₂, R₃),可以看到,2 mm 以下的小雨滴数密度很大,占比达到 94.6%。

综上所述,此次降水过程的微物理特征表现为

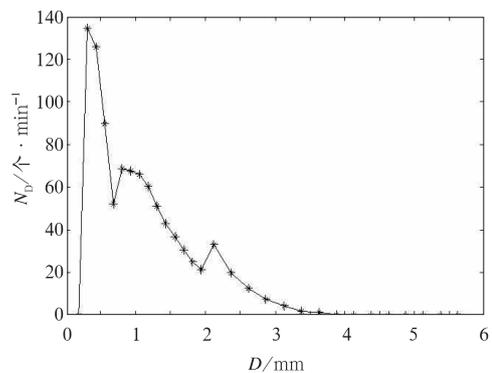


图 6 2017 年 2 月 22 日 07—10 时翔安站平均雨滴数密度

Fig. 6 The mean raindrop number density at Xiang'an Station from 07:00 BT to 10:00 BT 22 February 2017

表 1 不同雨滴对数密度及雨强的贡献率(单位:%)

Table 1 The contribution of different raindrop sizes to the number density and rainfall intensity (unit: %)

	n1/N	n2/N	n3/N	R1/R	R2/R	R3/R
占比	62.9	31.7	5.4	3.8	42.6	53.6

粒子直径小,数量多,与热带暖云弱对流降水特征一致(俞小鼎等,2006)。其雨强贡献最大的主要来自直径 1~2、2~4.5 mm 的粒子,贡献率达到96.2%。

4 中尺度环境特征分析

4.1 水汽输送与水汽辐合

充足水汽供应是强降雨产生的必要条件。图 7 给出了整层积分水汽通量和地面至 500 hPa 垂直积分的水汽通量散度分布图。可以看到,暴雨期间存在

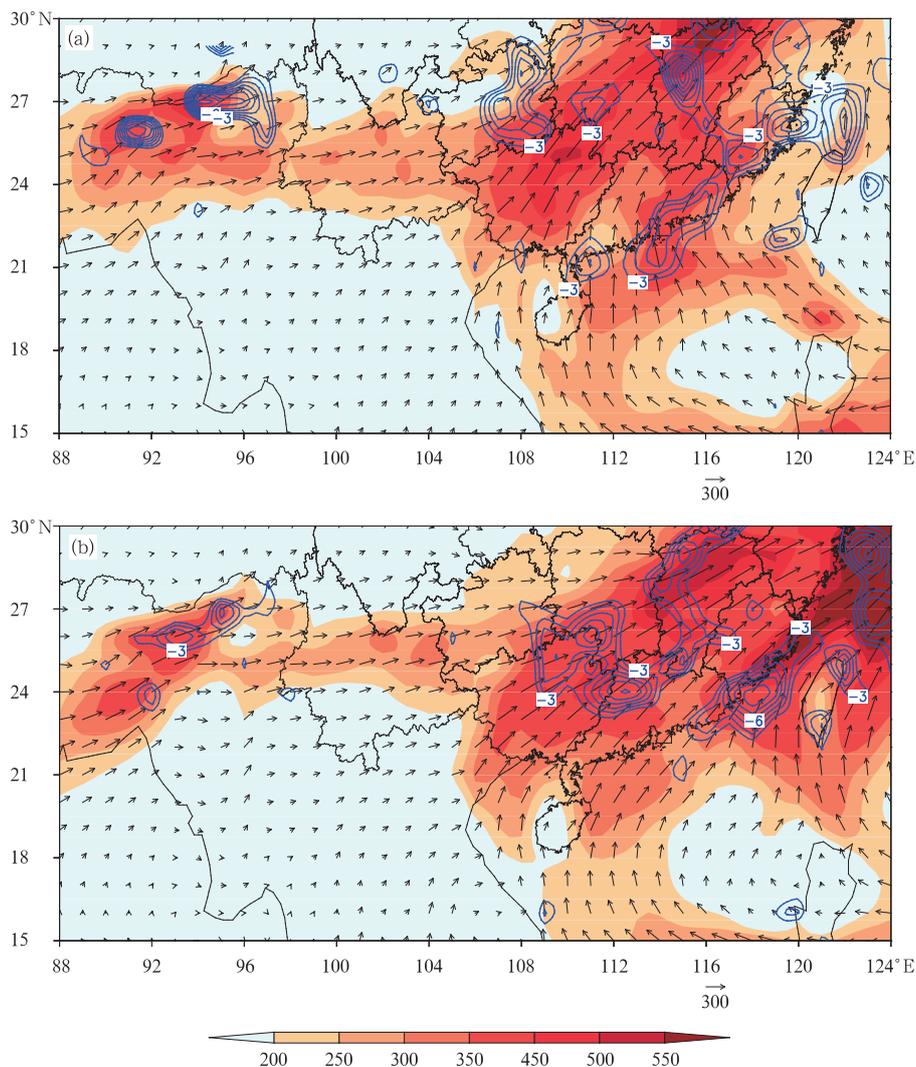


图 7 2017 年 2 月 21 日 20 时(a),22 日 08 时(b)整层积分水汽通量(箭头,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,阴影表示水汽通量超过 $200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和地面至 500 hPa 水汽通量散度垂直积分(蓝色等值线,单位: $10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 7 Vertical integral of the whole-layer water vapor flux (vector, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; shaded area: $> 200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and vertical integral from surface to 500 hPa of water vapor flux divergence (blue contours, unit: $10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) at 20:00 BT 21 (a) and 08:00 BT 22 (b) February 2017

三支水汽通量大值带,一支由孟加拉湾北部沿偏西气流不断往西南和华南地区输送,该水汽通道较弱,而且由于印度季风未爆发,孟加拉湾至中南半岛的西南水汽通道未打开,孟加拉湾并不是此次暴雨的主要水汽源地。另外两支分别是由南海输送至华南的偏南水汽通道和由太平洋经巴士海峡输送至华南的东南水汽通道,这两支暖湿气流在华南沿海合并后转向西南,将大量水汽输送到华南至江南地区。因此,南海是这次暴雨的主要水汽源地。21日20时,闽中大到暴雨即将发生时,福建地区的水汽通量基本在 $350 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,随着时间推移有加强的趋势(图7a);22日08时,福建中南部地区水汽通量达到 $500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上(图7b),虽较汛期略有偏小(朱星球和王咏青,2011),但在冬季已属十分罕见,此时闽南暴雨带降水最强。从水汽通量散度来看,闽中大到暴雨即将发生时,广东东部沿海至福建中东部地区有一条明显的水汽辐合区,其值为 $-4 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,该辐合区逐渐往东南移动并发展加强(图7a);22日08时,此时南部暴雨区降水最强,辐合区移到了福建沿海地区,中心达到了 $-8 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图7b)。暴雨区与水汽通量辐合区有较好的对应关系,由福建中部往南部沿海移动,且水汽通量及其辐合逐渐加强,导致

闽南较闽中降水更强。

从水汽通量及其辐合的垂直剖面来看(图略),闽中大到暴雨即将发生时,低层水汽输送值在 $12 \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 以上,水汽通量辐合为 $-4 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。22日08时,水汽输送值达 $20 \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$,水汽辐合中心进一步南移加强,最大值中心超过了一 $6 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$,这已与汛期暴雨期间的量级相当(朱星球和王咏青,2011)。另外,闽中大到暴雨带和闽南暴雨区的水汽通量辐合略有差异,闽中大到暴雨带的水汽通量辐合主要位于 $700 \sim 850 \text{ hPa}$,与低空急流有关,而闽南暴雨区水汽通量辐合主要位于 925 hPa 附近,与超低空急流有关。

为了进一步认识暴雨过程中水汽与急流的关系,分析了低层环流场与水汽通量及水汽通量辐合水平分布及其演变,可以看到:随着北方冷空气的逐渐南压, 700 hPa 西南急流不断南移并加强,水汽通量大值带也随之南移,但是水汽辐合却大幅减弱(图略);而 850 hPa 上,急流在南压加强的过程中,其内部的脉动辐合也在不断加强,同时,由于西南和偏南两支急流的汇合导致福建南部地区的水汽辐合进一步加大(图8a, 8c)。 925 hPa 上,随着前一股冷空气的进一步东移,冷高压底侧的回流冷空气显著

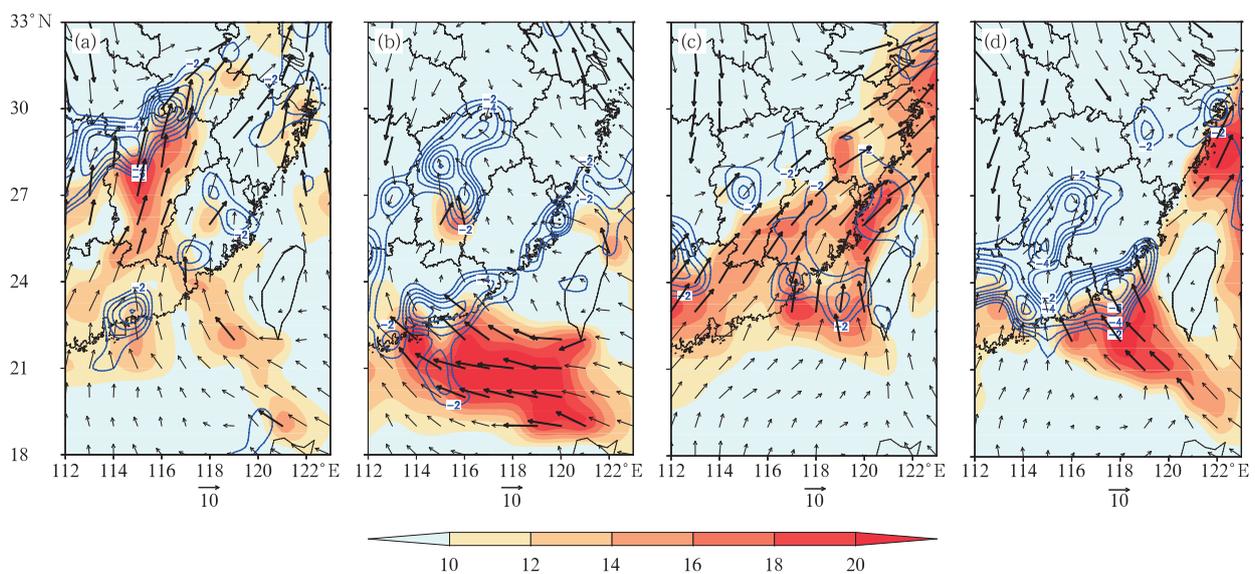


图8 2017年2月21日20时(a,b),22日08时(c,d)850 hPa(a,c)和925 hPa(b,d)的风场(箭头,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,加粗箭头:风速 $> 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),水汽通量(阴影,单位: $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)

以及水汽通量辐合(蓝色等值线,单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)分布

Fig. 8 Wind field (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, bold vector: wind speed $> 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),

water vapor flux (shaded area, unit: $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$) and water vapor

flux convergence (blue contours, unit: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)

at (a, c) 850 hPa, (b, d) 925 hPa at 20:00 BT 21 (a, b) and 08:00 BT 22 (c, d) February 2017

减弱,南方暖湿气流逐渐北抬,22日08时东南急流已从南海北抬到福建南部沿海,使得闽南沿海的水汽辐合进一步加强(图8b,8d)。

4.2 对流不稳定条件

除了对水汽的输送之外,低空急流对暖湿气流的平流作用使得大气层结变得更加不稳定。闽中大到暴雨即将发生时,受回流冷空气影响,925 hPa以下为假相当位温(θ_{se})低值区;在低空(850~600 hPa)有一明显的 θ_{se} 高值带从南侧伸向暴雨区,而高能舌上方(600~500 hPa) θ_{se} 较小,850~500 hPa大气处于对流不稳定状态,但是高能舌内的 θ_{se} 高值中心仅为334 K,比汛期暴雨的标准值350 K小(张晓美等,2009),而且 $\Delta\theta_{se(850-500\text{ hPa})}$ 仅有2 K左右,说明层结不稳定性并不强,不利于强对流的发生发展,只能支持弱对流的发展;不稳定层结($\partial\theta_{se}/\partial p > 0$)集中在850~500 hPa,但是850~500 hPa并不都是对流不稳定的,700 hPa附近层结稳定;850 hPa以下层次由于受回流冷空气影响,层结对流稳定(图9a)。22日08时,随着急流的南压加强、近地层冷空气垫的减弱,高能舌有所加强并往低层发展, θ_{se} 最大值达到336 K, $\Delta\theta_{se(850-500\text{ hPa})}$ 也达到4~6 K,大气层结不稳定性有所增强, $\partial\theta_{se}/\partial p > 0$ 的范围往低层发展,数值有所加大(图9b)。

4.3 动力条件及触发机制分析

高空辐散低层辐合的高低空配置可以为暴雨区带来有利的动力抬升机制。从散度场垂直剖面可以看出,闽中大到暴雨即将发生时,福建中部上空高层有着明显的辐散,低层也存在明显辐合,从经向垂直环流可以看到,该地区上空开始出现上升运动;从涡度垂直分布图来看闽中大到暴雨带上空涡度基本为负,并没有明显的正涡度柱,与切变型暴雨有着很大的不同(图10a)。22日08时,随着低空急流的南压加强,福建南部低层风场辐合进一步加强,高空强辐散中心高度降到300 hPa以下,其位置也南移到南部暴雨区上空,该地区上空出现强垂直上升运动,闽南雨带降水达最强;此时,中部雨带低层转为弱辐散,上升运动受到抑制,降水减弱。与闽中雨带类似,南部暴雨区上空涡旋性较弱,也无明显的正涡度柱(图10b)。

暴雨的形成离不开低层的触发条件。对于汛期暴雨,对流不稳定层结深厚,边界层内的弱辐合就能触发不稳定能量的释放(徐珺等,2014)。然而此次锋前暴雨过程,由于低层受回流冷空气的影响,边界层是对流稳定的,边界层内的辐合难以触发对流,加之地面风场比较散乱,并没有明显的辐合存在(图略)。

闽中大到暴雨发生时,从区域自动站海平面气

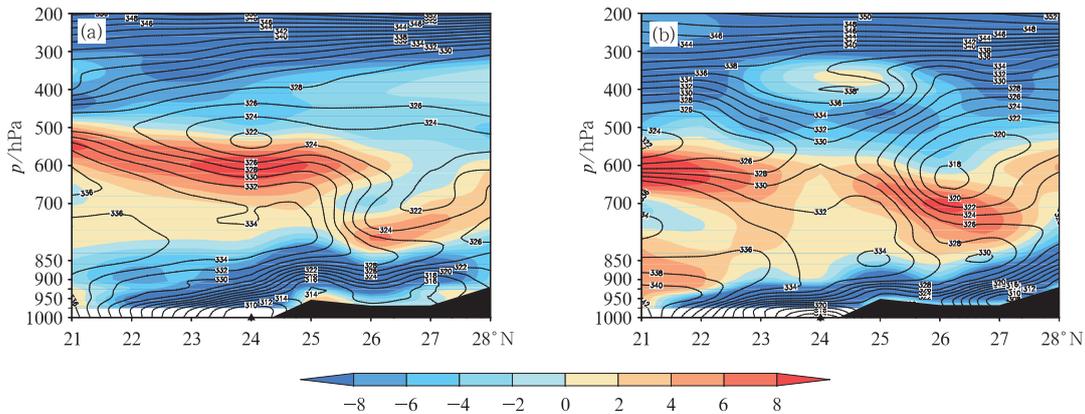


图9 2017年2月21日20时(a),22日08时(b) θ_{se} (实线,单位:K)和 $\partial\theta_{se}/\partial p$ (阴影区,单位: $10^{-4}\text{ K}\cdot\text{Pa}^{-1}$)沿 118°E 的垂直剖面
(▲:暴雨区位置,黑色阴影:地形)

Fig. 9 Meridional cross-section of θ_{se} (solide line, unit: K) and $\partial\theta_{se}/\partial p$ (shaded area, unit: $10^{-4}\text{ K}\cdot\text{Pa}^{-1}$) along 118°E at 20:00 BT 21 (a) and 08:00 BT 22 (b) February 2017
(▲: rainstorm area, black area: terrain)

压及气温分布可以看到,从台湾海峡回流的冷空气与福建西南侧的暖湿气流在福建中部组成一条东北—西南向的类锋面结构(图略),暖湿气流沿着冷空气垫的爬升可能是闽中地区对流系统发生的主要原因。闽南暴雨发生时,随着冷高压底部的回流冷空气减弱,925 hPa 东南急流从南海逐渐北抬到福建南部沿海(图 8d),东南急流在沿海地形作用下的抬升运动可能是闽南暴雨的主要触发机制。

4.4 湿位涡特征

湿位涡(MPV)是一个同时表征大气动力、热力和水汽性质的综合物理量,最早由吴国雄等(1995)从原始方程出发而推导出来的,被广泛应用于暴雨

研究中。湿位涡在等压面坐标中的表达式为:

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

$MPV1$ $MPV2$

式中,MPV1 是湿正压项,一般绝对涡度为正值,当大气对流不稳定时,MPV1 为负值;MPV2 是湿斜压项,包含了湿斜压性和水平风垂直切变的作用。

分析 700 hPa 湿位涡分布发现,闽中大到暴雨即将发生时,在南方暖湿气流影响下,福建省出现了大片的湿位涡负值区,福建中部强降水区域就位于湿位涡低值带中(图略);但是,雨带中的 MPV1 却接近正值,部分地区甚至大于 $0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 11a),此时绝对涡度为正值,说明大气层结不稳

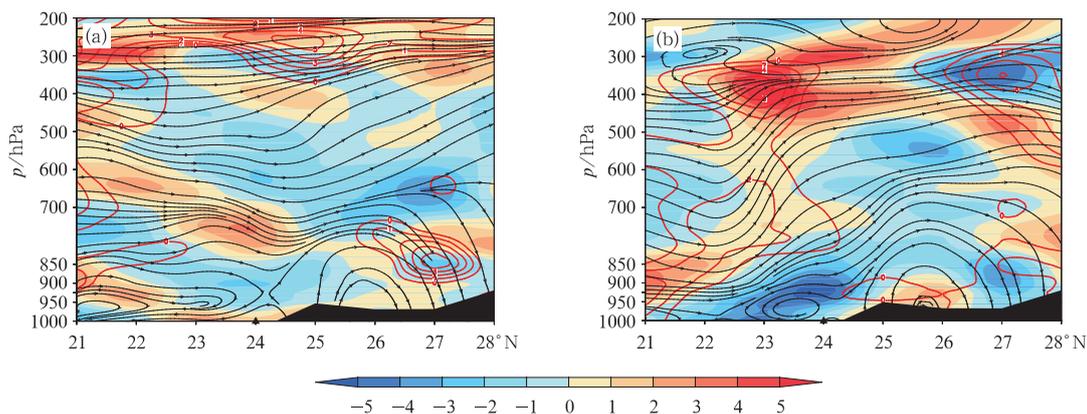


图 10 同图 9,但为散度(阴影区,单位: 10^{-5} s^{-1})、涡度(红色等值线,单位: 10^{-5} s^{-1})及径向垂直环流(流线)

Fig. 10 Same as Fig. 9, but for wind divergence (shaded area, unit: 10^{-5} s^{-1}), vorticity (red contours, unit: 10^{-5} s^{-1}) and vertical circulation

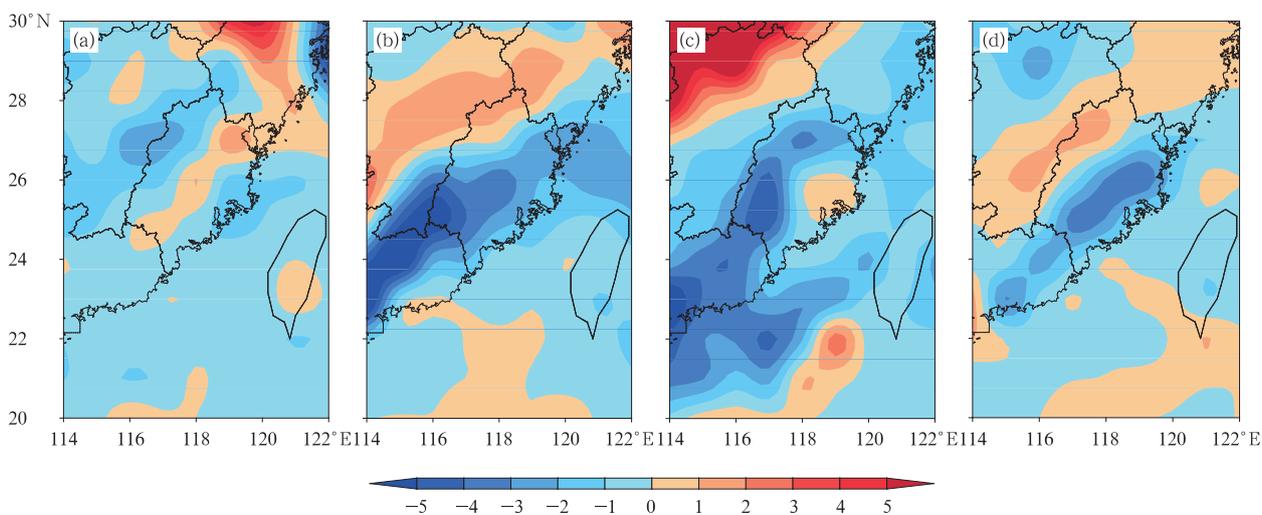


图 11 2017 年 2 月 21 日 20 时(a,b)和 22 日 08 时(c,d)700 hPa MPV1(a,c), MPV2(b,d)分布(单位: $10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Fig. 11 The 700 hPa MPV1 (a, c), MPV2 (b, d) at 20:00 BT 21 (a, b) and 08:00 BT 22 (c, d) February 2017 (unit: $10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)

定性很弱,甚至是对流稳定的,而湿斜压性却很强(图11b),大气是条件性对称不稳定的,强降水是在湿斜压作用下导致的倾斜上升运动中产生的。这种条件性对称不稳定可能与前一股入海冷空气的回流有关,西南气流沿着冷空气垫爬升,产生了斜上升运动。

22日08时,随着西南急流加强南压,MPV负值中心也有所加强并南移(图略),之后强降水区也南移至福建南部区域,此时MPV1和MPV2都为负值(图11c,11d),且量级相当,此时绝对涡度仍为正值,说明暴雨区上空既存在对流不稳定,也存在条件性对称不稳定。

5 结论和讨论

利用福建省逐小时加密自动站雨量资料、风廓线、S波段双偏振雷达及雨滴谱等新型探测资料,以及NCEP逐6h的 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 全球再分析资料,分析了2017年2月21—22日福建中南部一次预报失败的冬季暴雨过程。结果表明:

(1)暴雨期间冷锋位于江西境内,福建地区处于切变南侧的西南暖湿气流下,并未受到南支槽和冷空气的影响,是在低空急流偏强并长时间维持的背景下产生的。此次过程类似于锋前暖区暴雨,自2000年以来仅此一例,十分罕见,福建省中南部有两条西南—东北向的雨带,降水有较明显的对流性特征,雨强较大,历时较短。

(2)闽中大到暴雨带和闽南暴雨区的对流系统相互独立,有多个对流系统影响闽中地区,仅两个对流系统影响闽南地区。两条雨带最强降水回波均不超过50 dBz,回波高度皆位于10 km以下,35 dBz以上的强回波质心高度皆不超过4.5 km;降水雨滴直径小,最大粒子直径只有4 mm,远比积层混合云降水的粒子小,而且粒子数多,属于暖云弱对流降水,其降水效率高,容易导致预报员对雨强估计不足。

(3)此次冬季暴雨水汽主要来自南海地区,暴雨的落区及强弱与水汽辐合区的位置及强弱有很好的对应关系。暴雨区低层水汽条件与汛期暴雨相当,但是整层水汽条件比汛期略差。低空急流对暖湿气流的输送使得暴雨区趋于不稳定,但对流不稳定度较汛期弱,不稳定层结主要位于850~500 hPa之间,850 hPa以下由于受回流冷空气影响,层结对

流稳定。

(4)高空辐散低层辐合的配置为冬季暴雨带来了有利的动力抬升条件,然而暴雨区涡旋性并不强,没有明显的正涡度柱。其中,闽中大到暴雨的形成主要与条件性对称不稳定有关,是在湿斜压作用下导致的倾斜上升运动中产生的,暖湿气流沿着冷空气垫的爬升可能是该地区对流系统发生的触发机制;而闽南暴雨区既存在对流不稳定,也存在条件性对称不稳定,925 hPa东南急流在沿海地形作用下的抬升运动可能是该地区暴雨的主要触发机制。

值得注意的是,不同于以稳定性降水为主的切变型冬季暴雨,冬季锋前暴雨对流性较明显,雨强较大,历时较短,但暴雨区上空的涡旋性很弱,主要是急流脉动造成的辐合提供了动力抬升条件。与前汛期暖区暴雨相比也有所不同,冬季时由于印度季风并未爆发,故来自孟加拉湾的水汽很弱,南海是主要水汽源地,整层水汽条件较汛期差。对流不稳定层结不如汛期时深厚,边界层是对流稳定的,边界层内的辐合难以触发对流。对流不稳定度较汛期也偏弱,对流系统发展不强,以暖云弱对流降水为主,当回波从海上移过来时,由于回波偏低偏弱,加之海面缺乏自动站,无法通过雨量资料来预估降水的强弱,容易导致业务人员对雨强估计不足。

参考文献

- 陈宝君,李子华,刘吉成,等,1998.三类降水云雨滴谱分布模式[J].气象学报,56(4):506-512. Chen B J, Li Z H, Liu J C, et al, 1998. Model of raindrop size distribution in three types of precipitation[J]. Acta Meteor Sinica, 56(4):506-512(in Chinese).
- 宫福久,刘吉成,李子华,1997.三类降水云雨滴谱特征研究[J].大气科学,21(5):607-614. Gong F J, Liu J C, Li Z H, 1997. Study of the raindrop size distributions for three types of precipitation [J]. Sci Atmos Sinica, 21(5):607-614(in Chinese).
- 何芬,赖绍钧,池艳珍,等,2010.福建省冬季暴雨过程及其环流特征[J].气象科技,38(3):306-310. He F, Lai S J, Chi Y Z, et al, 2010. Winter rainstorms and its circulation characteristics in Fujian Province[J]. Meteor Sci Technol, 38(3):306-310(in Chinese).
- 何立富,陈涛,孔期,2016.华南暖区暴雨研究进展[J].应用气象学报,27(5):559-569. He L F, Chen T, Kong Q, 2016. A review of studies on prefrontal torrential rain in South China[J]. J Appl Meteor Sci, 27(5):559-569(in Chinese).
- 黄士松,李真光,包澄澜,等,1986.华南前汛期暴雨[M].广州:广东科技出版社. Huang S S, Li Z G, Bao C L, et al, 1986. The Preflood Season Rainstorm in South China[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press(in Chinese).

- 林确略,寿绍文,杨华,2015.基于数值模拟对一次广西前汛期回流暴雨形成机制的分析[J].气象,41(7):852-862. Lin Q L, Shou S W, Yang H, 2015. Analysis on formation mechanism of the backflow rainstorm occurring in first rainy season of Guangxi based on numerical simulation[J]. Meteor Mon, 41(7):852-862 (in Chinese).
- 柳臣中,周筠璐,谷娟,等,2015.成都地区雨滴谱特征[J].应用气象学报,26(1):112-121. Liu C Z, Zhou Y J, Gu J, et al, 2015. Characteristics of raindrop size distribution in Chengdu[J]. J Appl Meteor Sci, 26(1):112-121(in Chinese).
- 罗建英,廖胜石,黄归兰,等,2009.广西前汛期锋前暖区暴雨过程的模拟与分析[J].气象,35(10):50-57. Luo J Y, Liao S S, Huang G L, et al, 2009. Numerical simulation and analysis on a heavy rain process in the warm sector in Guangxi[J]. Meteor Mon, 35(10):50-57(in Chinese).
- 蒙伟光,张艳霞,戴光丰,等,2007.华南沿海一次暴雨中尺度对流系统的形成和发展过程[J].热带气象学报,23(6):521-530. Meng W G, Zhang Y X, Dai G F, et al, 2007. Analysis of mesoscale convective systems associated with a warm sector heavy rainfall event over South China[J]. J Trop Meteor, 23(6):521-530 (in Chinese).
- 吴国雄,蔡雅萍,唐晓菁,1995.湿位涡和倾斜涡度发展[J].气象学报,53(4):387-405. Wu G X, Cai Y P, Tang X J, 1995. Moist potential vorticity and slantwise vorticity development [J]. Acta Meteor Sinica, 53(4):387-405(in Chinese).
- 徐珺,杨舒楠,孙军,等,2014.北方一次暖区大暴雨强降水成因探讨[J].气象,40(12):1455-1463. Xu J, Yang S N, Sun J, et al, 2014. Discussion on the formation of a warm sector torrential rain case in North China[J]. Meteor Mon, 40(12):1455-1463(in Chinese).
- 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等,2006.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006. The Principle and Operational Application of Doppler Weather Radar[M]. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).
- 张晓美,蒙伟光,张艳霞,等,2009.华南暖区暴雨中尺度对流系统的分析[J].热带气象学报,25(5):551-560. Zhang X M, Meng W G, Zhang Y X, et al, 2009. Analysis of mesoscale convective systems associated with a warm sector heavy rainfall event over South China[J]. J Trop Meteor, 25(5):551-560(in Chinese).
- 赵玉春,王叶红,2009.近30年华南前汛期暴雨研究概述[J].暴雨灾害,28(3):193-202,228. Zhao Y C, Wang Y H, 2009. A review of studies on torrential rain during pre-summer flood season in South China since the 1980s[J]. Torrential Rain Disasters, 28(3):193-202,228(in Chinese).
- 朱星球,王咏青,2011.2010年冬季江西两次暴雨过程的环境场分析[J].气象与减灾研究,34(4):30-36. Zhu X Q, Wang Y Q, 2011. Analysis of environment fields of heavy rain events in Jiangxi Province in winter[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 34(4):30-36(in Chinese).
- Blanchard D C, Spencer T A, 1970. Experiments on the generation of raindrop-size distributions by drop breakup[J]. J Atmos Sci, 27(1):101-108.
- Gamache J F, Houze R A Jr, 1982. Mesoscale air motions associated with a tropical squall line[J]. Mon Wea Rev, 110(2):118-135.
- Jia X L, Chen L J, Ren F M, et al, 2011. Impacts of the MJO on winter rainfall and circulation in China[J]. Adv Atmos Sci, 28(3):521-533.
- Li Q, Huang H H, Wen S Y, 2011. Analysis of causes for an uncommon persistent heavy rain during winter [J]. Meteor Environ Res, 2(2):53-57.
- Qin F, Fu Y F, 2016. TRMM-observed summer warm rain over the tropical and subtropical pacific ocean: characteristics and regional differences[J]. J Meteor Res, 30(3):371-385.