

东风波引发的湖南南部强暴雨过程分析

蒋丽敏¹ 付炜² 彭艳青³ 李菁华¹

(1 永州市气象局, 永州 425000; 2 株洲市气象局, 株洲 412000; 3 怀化市气象局, 怀化 418000)

摘要: 利用常规观测资料、ERA5再分析资料及永州多普勒雷达资料等对2016年8月12—13日湖南南部的东风波暴雨过程进行综合分析。结果表明: 这次深厚东风波暴雨过程处于南亚高压由西部型向东部型转换的过渡阶段, 副热带高压控制我国中东部, 西南季风卷入到副热带高压南侧强盛偏东风波动中, 诱生出低涡, 使得垂直风切变加大, 东风波系统得以较长时间维持; 主要降雨区位于诱生低涡经过的区域和东风波槽前东北气流区, 低涡西侧的能量锋区及东风波槽前 θ_{sc} 大值区的出现均对强降雨区的预报有一定的指示作用, 当槽前正涡度平流中心与低层 θ_{sc} 大值区重叠时, 降水强度明显增大; 强降雨区与湘南地区特殊地形密切相关, 暖湿气流与山脉走向夹角大, 使得降水增幅明显。

关键词: 东风波, 暴雨, 诱生低涡, 诊断分析, 地形影响

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.06.014

Analysis of Heavy Rainfall in Southern Hunan Caused by Easterly Wave

Jiang Limin¹, Fu Wei², Peng Yanqing³, Li Jinghua¹

(1 Yongzhou Meteorological Observatory, Yongzhou 425000 2 Zhuzhou Meteorological Observatory, Zhuzhou 412000

3 Huaihua Meteorological Observatory, Huaihua 418000)

Abstract: Based on conventional observation data, ERA5 reanalysis data and Yongzhou Doppler radar data, the heavy rainfall occurring in Southern Hunan Province from 12 to 13 August 2016, which was affected by easterly wave, was analyzed. The results show that the heavy rainfall process occurred in the period when the 200 hPa South Asian High was converting from the western type to the eastern type, and the central and eastern China were controlled by the Western Pacific Subtropical High (WPSH). The mesoscale low vortex was induced by the southwest monsoon and easterly wave on the south side of WPSH, and it was the low vortex that increased the vertical wind shear and made the easterly wave maintaining for a long period of time. The main rainfall area was located in the zone where the mesoscale low vortex passed through. It was also within the range of the northeast wind in front of the easterly wave trough. Both the frontal zone of energy on the west side of the vortex and the large value region of θ_{sc} (equivalent potential temperature) in front of the easterly wave indicate the occurrence of rainstorm in a certain area. The precipitation intensity will increase significantly when the center area of the positive vorticity advection in front of the easterly wave overlaps with the low-level θ_{sc} large value area. There is high correlation between the rainstorm area and the special terrain of southern Hunan. The large angle between the alignment of mountain and the warm moist flow makes the precipitation increase significantly.

Keywords: easterly wave, heavy rainfall, mesoscale low vortex, diagnostic analysis, terrain effect

0 引言

1940年Riehl^[1]最早根据加勒比海地区的气象资料归纳出了东风波的经典模型, 指出坏天气发生在槽后。但影响我国的东风波结构由于受到西南气流的影响, 与经典模型略有不同^[2], 强对流及强降水在东风波槽前槽后均出现过。

因东风波引发的强天气情况比较复杂, 这些年来我国诸多学者专家对其展开研究, 沈钦锋等^[3]指出当有低层的中尺度辐合线出现时易触发或加强对流天气, 缺乏低层系统配合时难触发强天气; 刘丽君等^[4]通过分析一次影响海南岛的东风波暴雨, 指出东风波天气下配合低空东风急流的出现激发次级环流有利于降水的增幅, 同时低空东风急流也是暴雨所需水汽的最大提供者; 诸多研究^[5-9]也证实, 在单纯的东风波影响下降水强度一般不强, 当东风波与西南季风或低涡或其他天气系统相互作用时, 可造成较大范围强降水, 另外地形的影响也很重要^[10-12], 地形强迫抬升及对暖湿气流的阻挡作用、沿海喇叭形超浅海河口港湾

收稿日期: 2021年11月2日; 修回日期: 2022年4月27日
第一作者: 蒋丽敏(1989—), Email: jlmjlm2007@126.com
通信作者: 付炜(1985—), Email: Fuwei_0302@126.com
资助信息: 湖南省气象局预报员专项(XQKJ18C008); 湖南省气象局研究型业务预报预测专项(XQKJ22C005); 湖南省气象局重点课题(XQK21A001)

的狭管效应等，都对降水有一定的增幅作用。为进一步加强对东风波强降水的认识，诸多学者专家通过物理量进行诊断分析，王忠东等^[13]、曹楚等^[14]皆指出在涡度场以及垂直螺旋度与暴雨或强降水的落区也有很好的对应关系；顾思南等^[15]也表示风暴相对螺旋度演变能够提前预报东风波强降水的落区，但提前的时效较短。

近年来对东风波强降水的研究发现了这些事实，在天气预报业务中得到应用，但东风波影响下的降水天气突发性强、尺度较小、发展迅速，预报预警难度大，需要进一步深化以及更系统的研究。2016年8月12—13日湖南南部的强降水过程，使得部分城区积水，农作物受损、房屋及道路被摧毁，造成较大经济损失，是近十年来对湘南影响最大的一次东风波暴雨过程。本文对此次暴雨过程进行分析，以期加深对东风波暴雨的认识，找出预报着眼点，为今后监测与防范此类天气过程提供参考。

1 东风波暴雨天气形势实况分析

2016年8月11日凌晨，中国台湾附近的东风波发展加强，自东向西移动，陆续经过广东中北部、广西东北部、中部等地，影响华南地区，13日白天掠过广西南部进入北部湾。受其影响，华南北部地区出现了大到暴雨局地大暴雨的天气，雨带自东向西扩展，相继影响多省。最强降水时段出现在12日08时至13日08时（图1），三个强降水中心分别位于广东中西部、湖南南部和广西中部，最大累积降水量达264.9 mm（图1红点处，广东清远佛冈县境内），最大小时雨强达103.3 mm（12日16—17时，广西梧州苍梧县境内），湖南南部强降水中心累积雨量为157.2 mm。此次过程以短时强降水为主，具有影响范围广、降水效率高、移

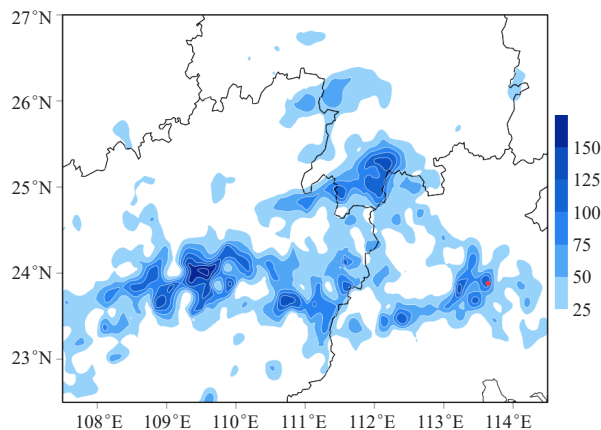


图1 2016年8月12日08时至13日08时降水实况图(单位: mm)
Fig. 1 Accumulated precipitation from 08:00 BT 12 to 08:00 BT 13 August 2016 (unit: mm)

动快、强降水分布不均等特点，上述地区都出现了不同程度的致灾现象，这也是近十年来影响湘南地区范围最广、强度最大的一次东风波暴雨天气过程。

200 hPa上显示（图略），11日20时之后位于90°E以西和江淮地区的两个1260 dagmp高压中心合并加强，12日08时呈带状从江淮地区一直延伸到青藏高原，高压中心于12日20时向东越过90°E，中心加强到1264 dagmp，呈块状稳定在90°E以东，南亚高压由西部型转东部型的过渡阶段，属带状型过程^[16]。500 hPa，11日08时（图略）副热带高压位于我国中东部，588 dagmp西脊点至川西高原，脊线位于30°N附近，日本岛到山东半岛附近有592 dagmp中心，台湾以北洋面和闽浙沿海为偏东气流，在700 hPa上达急流强度，台湾海峡附近对流层中低层形成东风波；12日08时（图2a），中高纬西风槽经向度减小，副高中心强度减弱、范围缩小，由块状结构逐渐转为带状，并继续西伸，西脊点至青藏高原东部，副高南侧偏东风有组织性加强，在其引导下，700 hPa急流伸展到赣北（南昌站东东南风14 m·s⁻¹），东风波系统由东向西移动，中南半岛、南海一带西南季风加强北上与偏东气流在粤东地区诱生出低涡（地面图上表现为粤赣交界处有低压系统生成，该处 ΔP_{24} （24小时变压）达-5 hPa，图略），此时降水强度增加，低涡经过之处陆续出现暴雨（12日11—14时在广西境内 ΔP_3 （3小时变压）负值中心达3.2 hPa，有利于地面辐合。图略）；13日08时，700 hPa低涡向西南方向移至广西南部，东风波波槽减弱，涡东侧由东东南急流转为偏东风（郴州站12日20时东东南风14 m·s⁻¹，13日08时东风10 m·s⁻¹），至此华南地区降水减弱，过程趋于结束。

12日08时粤东地区诱生出低涡，东风波槽线位于粤赣交界，位于槽前的郴州站探空图（图3a）显示，风随高度顺转，低层1000~500 hPa有较强的垂直风切变，400~250 hPa盛行偏东风，200 hPa转为东南风，低层东风分量随高度增加，基本气流的垂直切变为东风切变，降水主要发生在东风波槽前。雷达图（图略）上已有强积云降水回波移向郴州站，郴州站将出现较强降水，该站K指数41℃，SI达-2.41℃，图3b中显示在925~400 hPa存在 $\partial\theta_{se}/\partial z < 0$ 和 $\partial\theta_{se}^*/\partial z < 0$ （符号含义见图3），表明大气处于条件不稳定层结状态，湿层较为深厚，对流条件理想，有利于东风波槽前出现强降水。

此次暴雨过程发生在南亚高压在由西部型转东部型的过渡阶段，东风波出现在副高南侧，中低层配合有低涡、低空急流等天气系统，暴雨主要发生在低涡

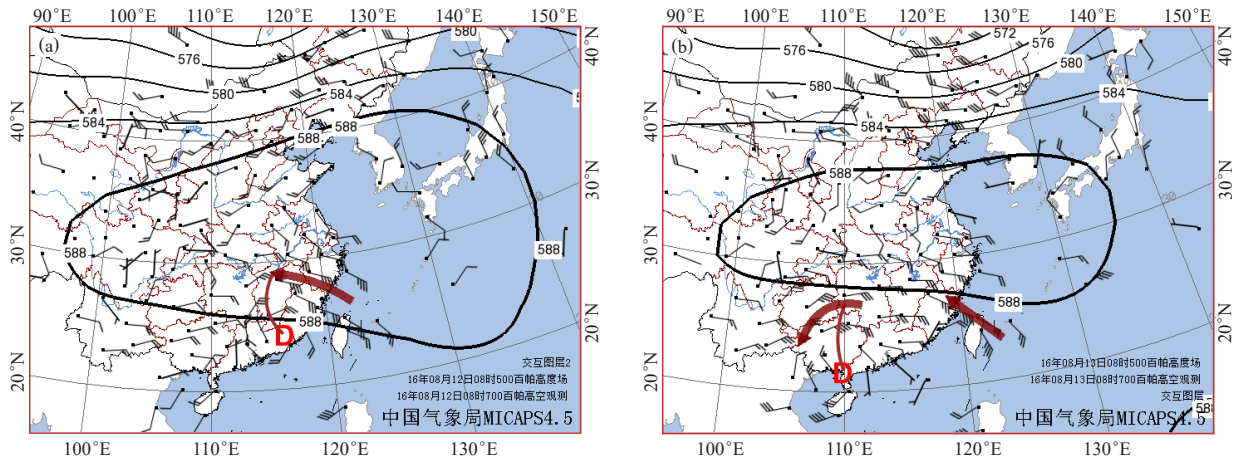


图2 8月12日08时(a)、8月13日08时(b) 500hPa高度场(等值线,单位: dagpm)及700hPa风场(风向杆,单位: $m \cdot s^{-1}$)
Fig. 2 500 hPa height field (contour, unit: dagpm) and 700 hPa wind field (barb, unit: $m \cdot s^{-1}$) at (a) 08:00 BT 12; (b) 08:00 BT 13 August 2016

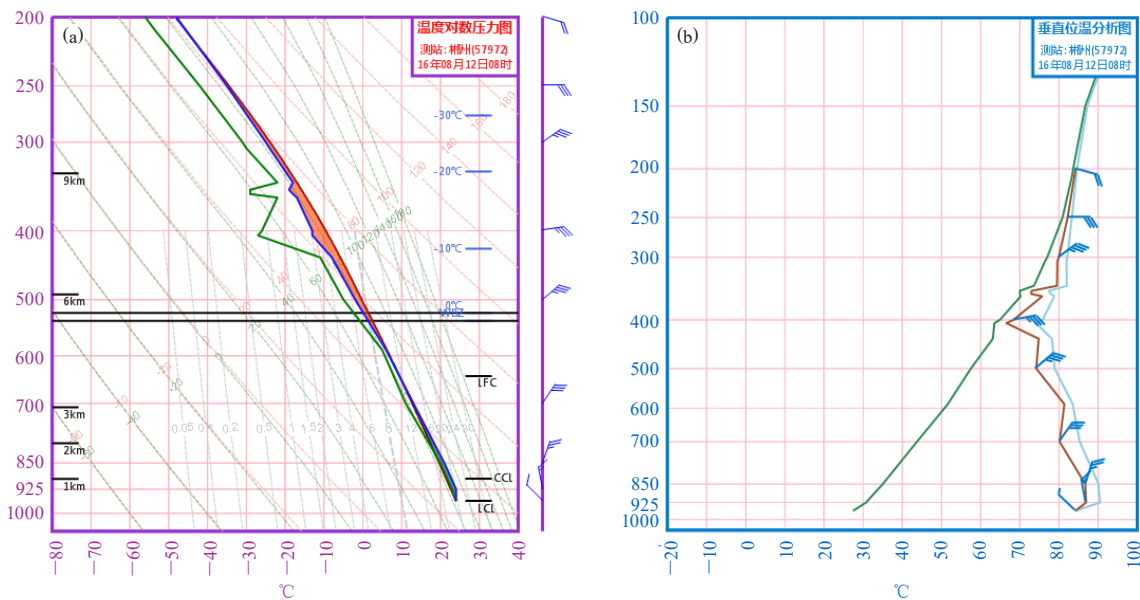


图3 2016年8月12日08时郴州站探空图(a)和位温(单位: $^{\circ}C$)垂直分布图(b)(图b中绿色曲线为位温线 θ 、棕色曲线为假相当位温线 θ_{sc} 、蓝色曲线为饱和假相当位温线 θ_{sc}^*)
Fig. 3 T -log p profiles of temperature (a, blue curve, unit: $^{\circ}C$); dew point temperature (b, green curve, unit: $^{\circ}C$); wind (a, barb, unit: $m \cdot s^{-1}$); potential temperature (b, green curve, unit: $^{\circ}C$); pseudo-equivalent potential temperature (b, brown curve, unit: $^{\circ}C$); saturation pseudo-equivalent potential temperature (b, blue curve, unit: $^{\circ}C$) at Chenzhou Station at 08:00 BT 12 August 2016

中心附近及东风波槽前区域。

2 水汽条件分析

东风波暴雨的形成除了与东风波本身强度和环流等因素相关外,还与水汽输送关系密切,水汽输送对东风波系统的维持及降水强度都有重要影响。图4d显示湘南地区在12日白天水汽输送最为强盛,其中12日16时前后水汽辐合最剧烈,现对影响湘南地区最强降水时期8月12日白天(图4a),特别是16时前后的水汽特征(图4b)进行分析。

整层平均水平水汽通量(图4a 8月12日08—20时的平均量,积分为1000~300 hPa)的分布显示,此次暴雨水汽输送通道主要有两个,一是孟加拉湾经中南半岛、南海向华南沿海及西太平洋输送,即西南季风的输送;二是西太平洋副热带高压边缘偏东气流向西输送。此次过程前期副热带高压南侧偏东气流输送水汽贡献值大,在最强降水时期,孟加拉湾向华南输送的水汽通量加大(前期华南地区西南风和偏西风的水汽通量值小,图略),低涡进入广西后再次以偏东风

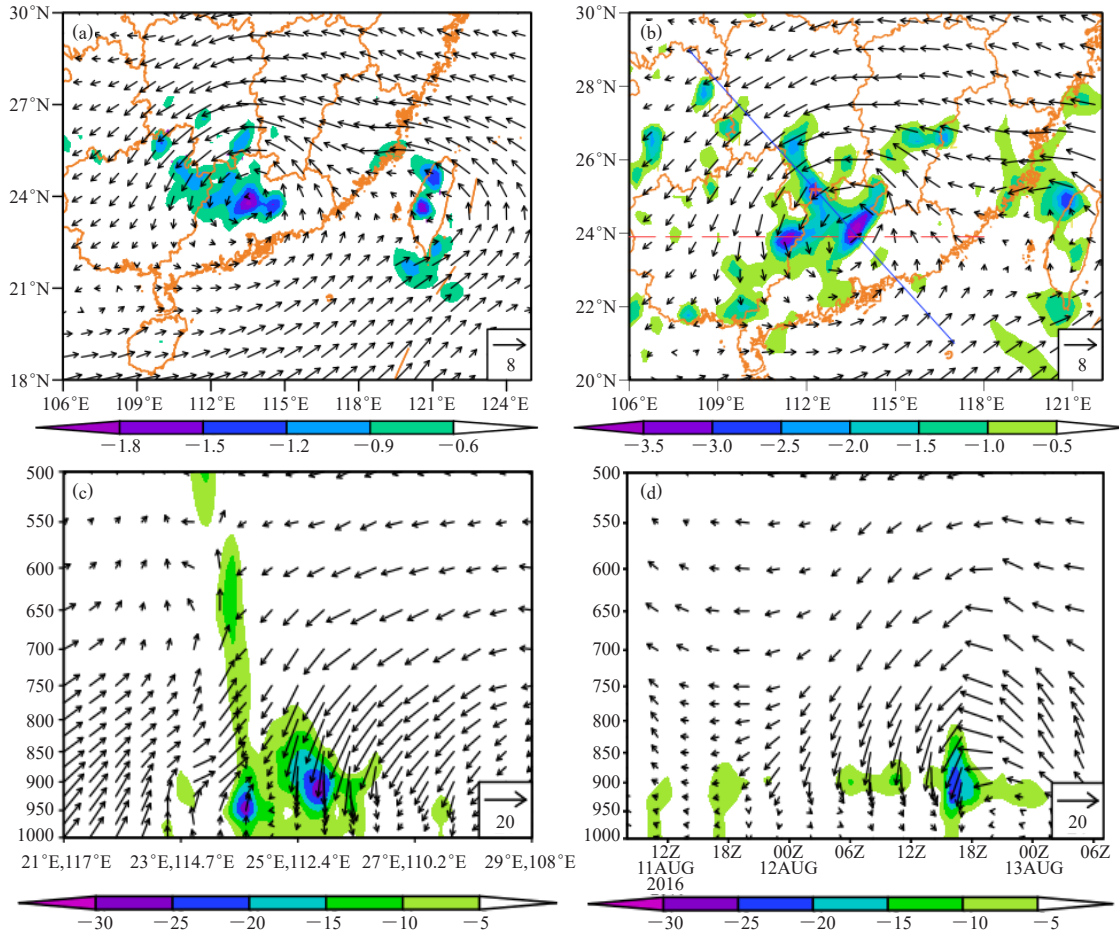


图4 (a) 8月12日08—20时(北京时)平均、(b) 8月12日16时(北京时)整层水平水汽通量(箭头, 单位: $10^3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)及整层水汽通量散度(填色, 单位: $10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、(c) 沿图4b中蓝实线的水平水汽通量(箭头, 单位: $10 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$)及水汽通量散度(填色, 单位: $10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$)的斜向垂直剖面、(d) 图4b中红十字处的水平水汽通量(箭头, 单位: $10 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$)及水汽通量散度(填色, 单位: $10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$)的时间高度剖面

Fig. 4 Water vapor flux (vector, unit: $10^3 \text{ g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{s})^{-1}$) and water vapor flux divergence (shaded, unit: $10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) in whole level average from 08:00 to 20:00 BT 12 August 2016 (a); at 16:00 BT 12 August 2016 (b); Slant-vertical section of water vapor flux (vector, unit: $10 \text{ g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{hPa})^{-1}$) and water vapor flux divergence (shaded, unit: $10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot (\text{s} \cdot \text{hPa})^{-1}$) (c); Time-Height profile of water vapor flux (vector, unit: $10 \text{ g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{hPa})^{-1}$) and water vapor flux divergence (shaded, unit: $10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot (\text{s} \cdot \text{hPa})^{-1}$) (d)

的水汽输送为主(图略)。图4b显示水汽通量大值区集中在东风波动明显区、诱生低涡经过的北侧。随着诱生低涡逐渐西移至广东中北部,水汽通量大值区西扩至湘桂交界,水汽通量中心值 $\geq 8 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,位于诱生低涡正北侧。东南沿海、粤赣湘桂地区的水汽输送强,但水汽通量辐合区集中在有限的区域内。粤湘桂交界处处于水汽通量 $4 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的大值区中,且水汽通量强辐合区位于诱生低涡附近的粤中地区及粤桂交界的北部,最强辐合中心达 $-3.5 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,其次是湖南南部,此时强降雨区也位于湖南南部。

沿着两个水汽辐合中心作垂直剖面进行分析(图4c,沿 $[21^\circ \text{N}, 117^\circ \text{E}]$ 到 $[29^\circ \text{N}, 108^\circ \text{E}]$),强水汽通

量散度在500 hPa以下,水平水汽输送最强出现在低层700 hPa以下。湖南南部($25^\circ \text{N} \sim 26^\circ \text{N}$),水汽通量中心值 $\geq 18 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$,对应的水汽辐合区位于800 hPa以下,最强辐合中心在925 hPa层, $\leq -25 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$,图4d($[25.2^\circ \text{N}, 112.3^\circ \text{E}]$ 的时间-高度剖面)亦显示出强水汽辐合层在800 hPa以下,最强时段在低涡位于广东中北部的8月12日16:00左右,此时湘南处东风波槽前,由于副高南侧携带大量水汽的低层东北急流的较长时间维持,造成了湖南南部暴雨,局地大暴雨天气。广东中北部($23.5^\circ \text{N} \sim 25^\circ \text{N}$)850 hPa以下来自孟加拉湾经中南半岛、南海等地的西南风和偏南风的水汽输送为主,850 hPa以上西南风和偏南风与来自西北太平洋

的东北风共同为其输送水汽，水汽辐合中心在925 hPa上，最强达 $-25 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 且水汽辐合区延伸到500 hPa以上，整层水汽辐合厚度比湘南大得多，低层西南风的维持加强了位于广东中北部的低涡，更强的动力条件，使得水汽辐合深厚，整层水汽辐合高于湘南，引发广东中北部出现区域性暴雨，局地大暴雨、特大暴雨。

3 东风波发展的动力诊断

王坚红等^[17]通过对十次东风波的动力结构进行分析，指出正涡度区指示东风波槽位置，正涡度值的大小指示东风波强度；王忠东等^[13]也指出，涡度场和垂直螺旋度均对东风波及其诱生低涡的演变过程有很好的指示意义。此次降雨的主要影响系统是东风波及其诱生低涡，通过对正涡度中心经过附近 23.8°N (图4a中的红虚线)作纬向垂直剖面，对东风波及其诱生低涡的发展及动力结构进行分析。

东风波在掠过台湾海峡过程中强度有所减弱，12日08时 (图5a)，东风波槽西移进入粤东，因西南季风的卷入，在700 hPa上诱生出低涡 (图2a)，正涡度中心亦是诱生低涡中心，此时正涡度值小，垂直上升运动弱，但垂直方向上风切变加大。12日14时诱生低涡进入广东中北部后 (图5b)，低层西南风加强到急流强度，厚度扩展到700 hPa左右，正垂直螺旋度中心也在700 hPa上，强度达 $14 \times 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ，垂直风切变进一步加大，东风波槽强度迅速增加，900~300 hPa为较深厚的垂直上升区，与东风波波槽随高度均向东倾斜，主雨带位于低涡前侧，距涡中心2个经距左右。12日20时 (图5c)，700 hPa低涡移至两广交界的北部，西南风减弱，使得垂直风切变减弱，垂直上升区和辐合中心皆移到低涡前侧，强度有所减弱，主雨带距涡中心约3个经距。13日08时 (图5d)，700 hPa低涡移至广西南部 (图2b)，正涡度中心在广西中部，位置不重

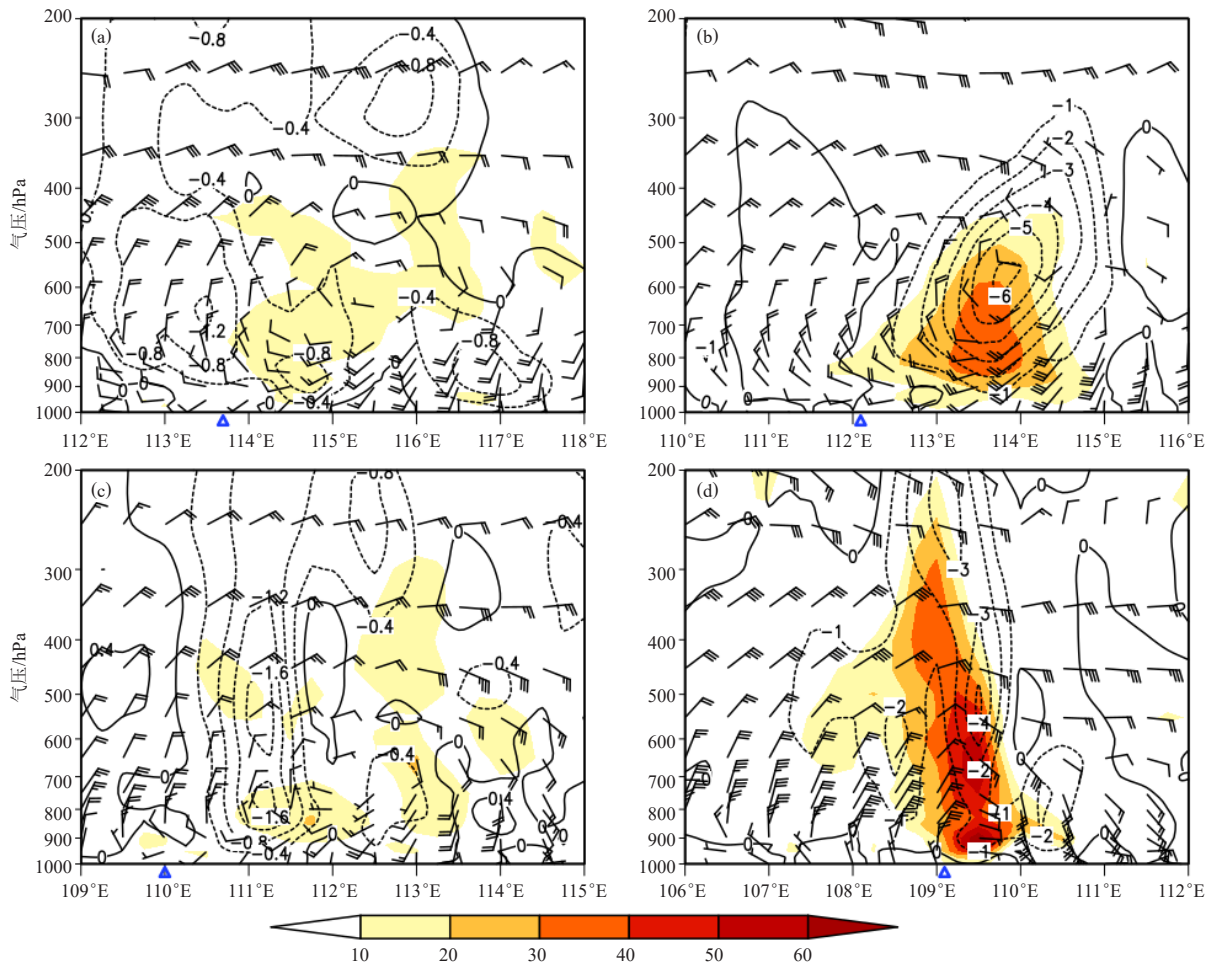


图5 8月12日08时 (a)、12日14时 (b)、12日20时 (c)、13日08时 (d) (北京时间)沿 23.8°N (图4a中红虚线)的纬向垂直剖面 (风羽为垂直方向的水平风,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、填色区为正涡度区单位: 10^{-5} s^{-1} 、等值线为垂直上升速度,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 、蓝色三角为此时主雨带的位置)

Fig. 5 Latitude-vertical section of wind (barb, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), positive vorticity (shaded, unit: 10^{-5} s^{-1}) and vertical velocity (contour, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) along 23.8°N at (a) 08:00 BT 12; (b) 14:00 BT 12; (c) 20:00 BT 12; (d) 08:00 BT 13 August 2016

叠,西南季风减弱消失,垂直风切变小,东风波波轴随高度略向西倾斜,正涡度区深厚,延伸到200 hPa,表现为深厚的波动特征,此时主雨带位于波槽前0.5个经距左右。

此次深厚东风波暴雨涡度场对东风波槽的位置和强度有很好的指示作用,诱生低涡在进入广西之前,垂直风切变大,低涡中心与正涡度中心对应较好,东风波波轴随高度略向东倾,主雨带距涡中心2~3个经距;进入广西后,西南季风减弱,垂直风切变减弱,低涡与东风波槽位置有偏离,主雨带在波槽前0.5个经距附近。此次过程中西南季风的卷入使得垂直风切变

加大,东风波系统得以较长时间维持。强降水时段,东风波波轴随高度略向东倾,主要降雨区位于诱生低涡经过的区域和低涡向北延伸的东风波槽前东北气流区。

4 东风波发展的热力诊断及与雨区的关系

本次过程具有降水效率高、分布不均等特点,预报预警难度大。现通过出现诱生低涡12日08时至13日08时600 hPa的风场、正涡度平流及低层850 hPa的假相当位温分布图,将未来6小时出现较强降水的站点叠加进行分析(图6),以期能对强降水的预报预警提供帮助。

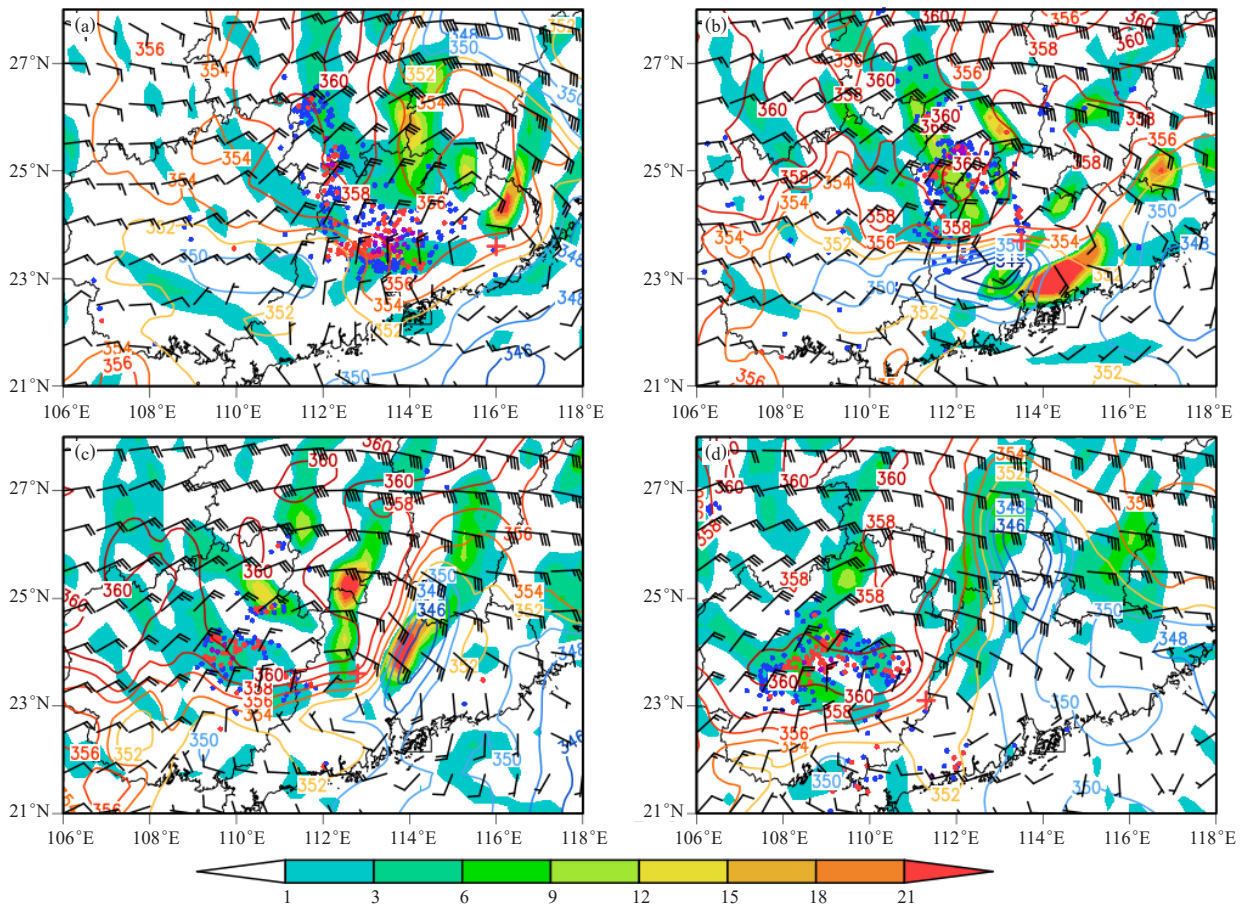


图6 8月12日08时(a)、12日14时(b)、12日20时(c)、13日02时(d)(北京时)850 hPa假相当位温 θ_{se} (蓝-红色等值线,单位:K)、600 hPa风场(风羽,单位: $m \cdot s^{-1}$)、低涡中心(红十字)及正涡度平流区(填色,单位: $10^{-9} s^{-2}$)、未来6小时强降雨雨站点(蓝点为 ≥ 25 mm、红点为 ≥ 50 mm、紫点为 ≥ 100 mm,单位:mm)

Fig. 6 Fields of 850 hPa pseudo-equivalent potential temperature (blue-red contour, unit: K), 600 hPa wind field (barb, unit: $m \cdot s^{-1}$) and positive vorticity advection (shaded, unit: $10^{-9} s^{-2}$, red crosses represent the vortex centres) and heavy rainfall stations for the next six hours (blue dots indicate above 20 mm; red dots indicate above 50 mm; purple dots indicate above 100 mm) at (a) 08:00 BT 12; (b) 14:00 BT 12; (c) 20:00 BT 12; (d) 02:00 BT 13 August 2016

850 hPa假相当位温 θ_{se} 显示,低涡中心附近等 θ_{se} 线密集,高 θ_{se} 值区主要位于诱生低涡的北侧及西侧,随东风波向西的系统性平流明显,600 hPa的正涡度平流整体上呈波列分布。12日08时(图6a),诱生低涡在广

东东南部,东风波波槽东倾明显,未来6小时强降雨区主要位于诱生低涡西侧的能量锋区(等 θ_{se} 线密集)偏暖一侧及东风波波槽前3个经距左右的 $\theta_{se} \geq 356$ K区域内,当上述区域有正涡度平流存在时降水强度明显增

大; 12日14时(图6b), 诱生低涡进入广东中部, 东波槽东倾不明显, 湖南南部为 $\theta_{se} \geq 360$ K的高值中心, 未来6小时强降雨区主要位于诱生低涡西侧、东风波波槽前1~2个经距区域内的高 θ_{se} 值区, 当正涡度平流大值与 θ_{se} 大值区重叠时, 降水强度明显加大; 12日20时(图6c)、13日02时(图6d), 西南风逐渐退出华南, 强降雨区皆位于低涡西侧的能量锋区偏高 θ_{se} 区附近。

此次过程中, 强降雨区一处位于低涡西侧的能量锋区偏高 θ_{se} 区附近, 另一处位于东风波波槽前 θ_{se} 大值区中, 当槽前正涡度平流大值与 θ_{se} 大值区重叠时, 降水强度增大明显, 这对强降水预报预警有很好的指示作用。

5 地形的影响

地形对降水强度、落区和灾害天气都具有重要影响^[18]。此次过程中诱生低涡沿23.8°N一路西进, 强降雨区也主要位于23.8°N一带上, 12日14—20时诱生低涡靠近山区时, 移速减慢, 对应的雨区西推速度变慢。产生两处强降水中心, 分别位于低涡西侧对应梧州市北部(约23.8°N)和东风波波槽前对应永州市东南部(约25.2°N)。

现主要分析湘南地区的降水(图7a)。位于永州市东南部的降水中心6小时最大累计雨量达132.7 mm, 小时雨强最大达57.9 mm(12日14—15时, 源峰站)。

源峰站位于九嶷山脉北部, 海拔高度401 m, 周围最近的两个六要素站分别为蓝山县国家站(位于源峰站东北侧, 单程距离约3 km)和楠市林检站(位于源峰站北侧, 单程距离约8 km)。6小时降水超过50 mm、100 mm的站点(图中红点、紫点)绝大部分位于湖南南部的萌渚岭—九嶷山系一带, 此处地貌复杂多样, 山冈盆地相间分布, 属南岭山脉纬向构造带, 主峰均在1500 m以上, 九嶷山脉大体呈东西走向, 与萌渚岭山脉接壤处呈东北—西南走向, 其中6小时降水超过100 mm的站点海拔高度均超过400 m。蓝山县区竹林站海拔高度达1159 m, 相当于边界层高度, 低层西南风加强时, 竹林站在12日12—15时的西南风达 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 蓝山站在13时之后由弱北风转为东南风, 并逐渐增强, 14:18极大风速达 $11.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 13时之后因诱生低涡北侧携带西太平洋水汽的偏北气流影响到萌渚岭—九嶷山北麓, 楠市林检站亦因喇叭口地形的影响, 在13时之后转西西北风, 在14:06极大风速达 $7.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。偏东风和东南风与西西北风同时加强生成地形辐合线(图中蓝点、红点密集区), 到14时最强, 降水与风速的加强几乎同步, 小时最大雨强就出现在14—15时。6小时50 mm以上的降水区大部分在地面辐合线附近, 雷达图(图7b)显示, 辐合线附近有多个对流单体存在, 皆体现出低质心降水回波的特征, 这

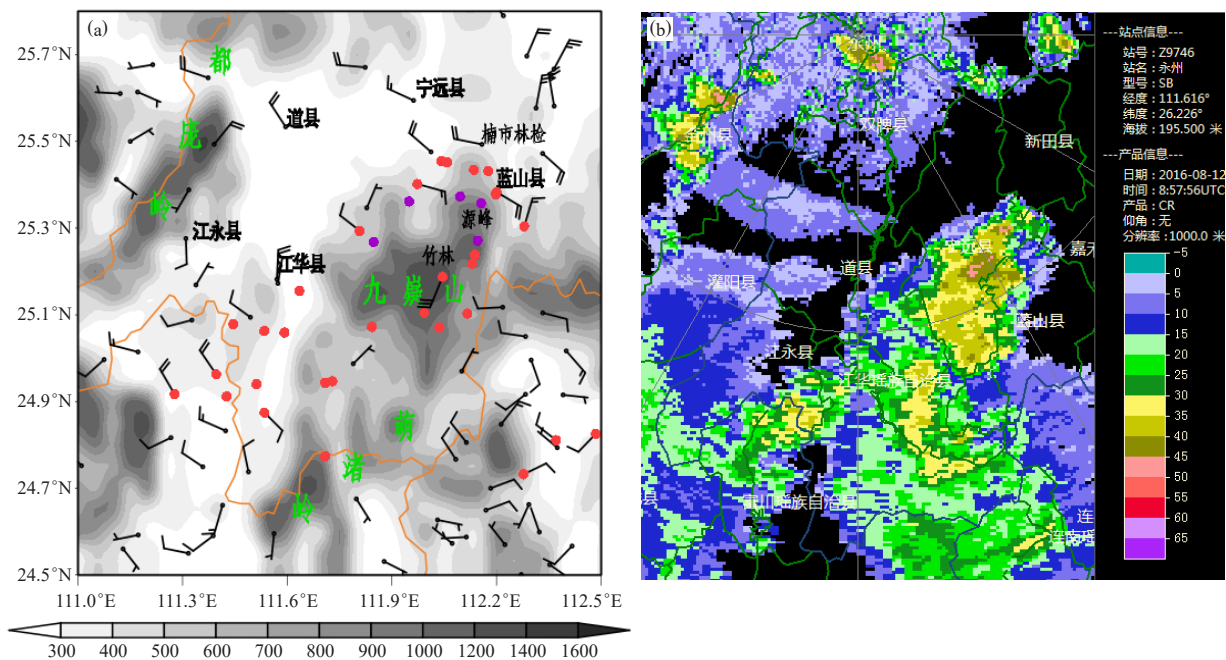


图7 8月12日14时地面极大风向风速(a, 风羽, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 填色为地形高度, 单位: m)、未来6小时强降雨站点(红点为 ≥ 50 mm、紫点为 ≥ 100 mm)、8月12日16:57永州雷达组合反射率图(b)

Fig. 7 (a) Fields of surface maximum wind (barb, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and heavy rainfall stations for the next six hours (red dots indicate above 50 mm; purple dots indicate above 100 mm) at 14:00 BT 12 August 2016 (Shadings indicate topography, unit: m); (b) Combined reflectivity of Yongzhou Station at 16:57 BT 12 August 2016

些对流单体不断生消，维持了近6个小时（图略）。

这次过程中东风波波槽前的强降水与地形相关性显著，携带西太平洋水汽的偏北气流与萌渚岭-九嶷山系相遇夹角大，且山脉坡度大，强降水中心主要出现在萌渚岭-九嶷山北麓，另外，都庞岭走向与边界层暖湿气流方向基本一致且地面风弱，都庞岭附近降水较弱。可见山脉走向与暖湿气流来向的夹角对强降水的分布有一定影响，偏东风和东南风与西北风的地形辐合线的出现，使得降水云团的移动迟缓，配合迎风坡效应，低层暖湿气流加强抬升，降水增幅明显。

6 结论与讨论

1) 2016年8月12日这次过程是近十年来影响湘南地区范围最广、强度最强、受灾最强的一次东风波暴雨天气过程。强降水期间，南亚高压逐渐由西部型转东部型，500 hPa上副热带高压西伸发展成带状分布控制我国中东部，其南侧形成强盛的偏东风波动，并在偏东风气流中诱生出低涡。主要降雨区位于诱生低涡经过的区域和低涡中心向北延伸的东风波槽前东北气流区，西南季风的卷入使得垂直风切变加大，东风波系统得以较长时间维持。

2) 此次暴雨水汽输送通道主要有两个，低涡附近降水以孟加拉湾输送过来的西南方向的水汽为主，东风波槽前降水以西太平洋输送过来的偏东方向的水汽为主。此次过程中涡度场对东风波槽的位置和强度有很好的指示作用，诱生低涡在进入广西之前其中心与正涡度中心对应较好。东风波槽前的降水强度与正涡度中心强度的变化有直接关系，诱生低涡附近的降水强度与西南风强度关系密切。

3) 此次过程强雨区一处位于低涡西侧的能量锋区偏高 θ_{se} 区附近，另一处位于东风波槽前 θ_{se} 大值区中，当槽前正涡度平流大值与 θ_{se} 大值区耦合时，降水强度将明显增大，这对强降水预报预警有很好的指示

作用。此外东风波引起的暴雨与地形相关性高，有利地形下，山脉走向与暖湿气流来向的夹角大、出现地形辐合线等中尺度系统，降水增幅明显，湘南山区雨量超过100 mm的站点均位于地面辐合线附近，海拔高度在400 m以上。本文中对地形的影响仅做定性分析，南岭山脉山冈盆地交错分布，地形复杂，对海拔高度、山脉坡度、下垫面水体、林区等与降水关联程度并未作详细的讨论，将在未来工作中进行重点研究。

参考文献

- [1] Riehl, 程纯枢, 译. 热带气象学. 科学出版社, 1958.
- [2] 吴阳, 周毅. 影响我国的东风波特征分析. 海洋通报, 2005, (3): 88-91.
- [3] 沈杭锋, 林宏伟, 娄小芬, 等. 两次东风带高空冷涡强对流天气对比分析. 气象, 2021, 47(11): 1380-1390.
- [4] 刘丽君, 冯文, 陈德明. 东风急流影响下海南非热带气旋暴雨两个例分析. 暴雨灾害, 2010, 29(04): 328-333.
- [5] 马卫民, 李靖, 孙一妹, 等. 西太平洋低纬地区东风波个例分析. 海洋预报, 2014, 31(1): 63-70.
- [6] 骆凯, 赵运峰, 刘维鑫, 等. 2016年8月广西地区一次东风波暴雨过程诊断分析. 气象与减灾研究, 2017, 40(3): 216-222.
- [7] 黄天文, 陈辛动, 焦飞, 等. 影响肇庆地区两次东风波结构与雨带变化的分析. 广东气象, 2012, 34(4): 26-29.
- [8] 卢山, 邓文剑. 源自东风波台风“灿都”发展过程的结构特征分析. 热带气象学报, 2013, 29(1): 93-98.
- [9] 钱燕珍, 张程明, 王蕾, 等. 一次东风波发展成登陆热带风暴的结构特征分析. 热带气象学报, 2015, 31(1): 95-102.
- [10] 胡振菊, 黎璐, 黄小玉, 等. 一次典型东风波极端暴雨的中尺度特征及地形影响分析. 干旱气象, 2022, 40(1): 73-83.
- [11] 蒋丽敏, 李青松, 龙志宇. 影响湘南地区的东风波特征分析. 广东气象, 2021, 43(5): 23-27.
- [12] 夏秋萍, 张滨. 一次东风波引起的特大暴雨天气过程分析. 海洋预报, 2011, 28(3): 68-73.
- [13] 王忠东, 曹楚, 符生辉. 影响浙闽沿海的两次东风波过程对比分析. 广东气象, 2011, 33(2): 20-25.
- [14] 曹楚, 王忠东. 一次东风波暴雨过程诊断分析. 气象科技, 2011, 39(3): 308-314.
- [15] 顾思南, 陈从夷, 刘建勇, 等. 一次东风波大暴雨过程诊断分析. 气象科技, 2013, 41(4): 726-735.
- [16] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法. 北京: 气象出版社, 2000.
- [17] 王坚红, 曾喻, 彭模, 等. 中国南部沿海暴雨东风波特征及SST影响机制研究. 大气科学学报, 2017, 40(3): 333-345.
- [18] 付炜, 叶成志, 王东海, 等. 一次南岭山脉前汛期强对流天气过程诊断分析. 暴雨灾害, 2018, 37(6): 511-521.

(上接103页)

- [1] 陈豫英, 陈晓光, 马金仁, 等. 风的精细化MOS预报方法研究. 气象科学, 2006, 26(2): 210-216.
- [2] 刘鸿升, 余功梅. 偏北大风的数值预报释用方法研究. 气象科学, 2002, 22(1): 100-106.
- [3] 李江萍, 王式功. 统计降尺度法在数值预报产品释用中的应用. 气象, 2008, 34(6): 41-45.
- [4] 钱燕珍, 孙军波, 陈佩燕, 等. 用数值预报释用方法做近海及登陆热带气旋强度预报. 气象, 2013, 39(6): 710-718.
- [5] 陈锦冠, 林少冰. 10分钟平均最大风速与极大风速评估方程的建立. 气象, 2001, 27(10): 38-41.
- [6] 汪宏宇, 龚强, 杨洪斌. 基于测风塔数据的最大风速与极大风速关系研究. 气象与环境科学, 2019, 42(3): 110-117.