

张娟娟,刘波,张瑛,2021. 台风“鲇鱼”(1617)导致的江西持续性暴雨天气过程成因[J]. 气象与减灾研究,44(1):16-24.  
Zhang Juanjuan, Liu Bo, Zhang Ying, 2021. Study on the causes of persistent rainstorm by Typhoon Megi (1617) in Jiangxi province[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research,44(1):16-24.

## 台风“鲇鱼”(1617)导致的江西持续性 暴雨天气过程成因

张娟娟<sup>1</sup>, 刘波<sup>2</sup>, 张瑛<sup>2</sup>

1. 江西省气候中心, 江西 南昌 330096
2. 江西省气象台, 江西 南昌 330096

**摘要:** 利用常规地面观测资料、卫星和雷达资料以及 NCEP 再分析资料,对台风“鲇鱼”(1617)在江西引发的持续性暴雨过程的成因进行分析。结果表明:台风处于大陆副热带高压和西太平洋副热带高压之间的鞍型场中,系统稳定维持,移动非常缓慢,影响时间长。台风登陆后水汽输送通道仍然维持,低层一支由偏南风 and 偏东风汇合而成的低空急流,为台风暴雨提供充足的水汽和热量。台风暴雨过程分为两个阶段:第一阶段台风本体降水。登陆后台风暖心结构逐渐遭到破坏,但台风中心附近仍维持上下一致的垂直正涡度柱结构,中低层正涡度区位于台风低压中心和台风北侧风向辐合带,辐合带附近不断有局地中尺度对流云团生成发展。同时,台风高层的气流辐散区与低层台风中心北侧的辐合带相互配合,形成“高层辐散、低层辐合”的垂直环流结构。第二阶段台风与冷空气相结合形成降水。因冷空气锋区南压而产生的锋生作用,一方面导致台风低压的不稳定能量进一步释放,另一方面使得低层的动力抬升作用增强。台风影响期间,地形对台风降水的增幅有一定贡献。

**关键词:** 台风暴雨, 涡度区, 能量锋区, 冷空气, 地形

中图分类号: P443

文献标识码: A

文章编号: 1007-9033(2021)01-0016-09

doi: 10.12013/qxyjzyj2021-003

## Study on the Causes of Persistent Rainstorm by Typhoon Megi (1617) in Jiangxi Province

Zhang Juanjuan<sup>1</sup>, Liu Bo<sup>2</sup>, Zhang Ying<sup>2</sup>

1. Jiangxi Provincial Meteorological Observatory, Nanchang 330096, China
2. Jiangxi Meteorological Observatory, Nanchang 330096, China

**Abstract:** Using various conventional and surface observation data, radar and NCEP re-analysis data, the causes of a persistent rainstorm by Typhoon Megi (1617) in Jiangxi were analyzed. The results were as follows: 1) Typhoon Megi was located between the continent sub-high and the west subtropical high, the systems of which were stable and maintained. The water vapor transport channel was still maintained after the landing. A low level jet formed by the conflowing of southerly and easterly winds provided sufficient water vapor and heat for the rainstorms. The process of typhoon rainstorm can be divided into two stages: the first stage was typhoon body precipitation. The warm core structure of typhoon was gradually destroyed after landing, but the vertical positive vorticity column structure maintained from top to bottom near the typhoon center. The middle and low-level positive vorticity area was located in the convergence zone of the typhoon low-pressure center and its northern wind direction, and local mesoscale convective cloud clusters were generated and developed constantly near the convergence zone. There are obvious divergence areas of wind direction and wind speed in the upper level of typhoon, accompanied by the northern convergence zone of low-level typhoon center, forming the vertical coupling of high-level divergence and low-level convergence.

收稿日期: 2020-12-05; 修订日期: 2021-01-26.

基金项目: 中国气象局预报员专项(编号:CMAYBY2017-039).

作者简介: 张娟娟, 硕士, 高级工程师, 主要从事中短期业务和研究, E-mail: 1162165587@qq.com.

In the second stage, the precipitation was formed by typhoon combined with cold air. The cold air front was pressed southward and the frontogenesis was strengthened. On one hand, the unstable energy of typhoon low pressure was further released; on the other hand, the dynamic uplifting effect of low level was enhanced. During the process of typhoon, topography also contributed to the precipitation increase.

**Key words:** typhoon rainstorm; vorticity zone; energy front zone; cold air; terrain

## 0 引言

登陆以后的台风会因摩擦耗损而趋于衰亡,但有的登陆台风衰减后的剩余低压在一定条件下会再度加强,造成比登陆时更为严重的灾害。热带气旋登陆后引发的暴雨是我国的主要气象灾害之一(陈联寿和丁一汇,1979)。王瑾等(2007)对台风“麦莎”登陆后暴雨落区分布进行诊断分析,探讨台风云系的非对称结构及强雨区非对称分布的形成原因。程正泉等(2005)研究表明,台风登陆时在其前进方向右侧的暴雨范围及强度往往大于左侧。若台风登陆后能长时间与低空急流保持联结,则对台风残涡维持和持续性强降水形成有利(李英等,2004;程正泉等,2009;郭达烽等,2013)。孙兴池等(2009)对台风暴雨两个例分析表明,低空急流携带的暖湿平流导致低层增暖增湿而使得不稳定层结维持。也有研究指出当冷空气入侵台风西侧使其获得斜压能量,有利于台风低压维持和降水增幅(许爱华等,2006;刘维鑫等,2016)。由此可见,登陆台风暴雨的形成不仅涉及台风路径、强度、移速、本体结构,还与环境场条件、地形等诸多因素密不可分。因此,在日常预报业务中如何准确预报深入内陆台风的暴雨,仍然是需要解决的技术难点。

2016年深入内陆进入江西的第17号台风“鲇鱼”,其中心在江西境内仅维持5h,却给江西多个地区带来大暴雨,个别区域特大暴雨,3h雨量接近100mm,最大24h雨量超过300mm,灾害造成严重的经济损失。文中,利用常规地面观测资料、卫星和雷达资料以及NCEP再分析资料,对台风“鲇鱼”在江西引发的持续性暴雨天气过程进行分析,力图揭示此次台风暴雨过程的成因和机理,以期对登陆台风暴雨预报提供参考。

## 1 台风概况和风雨影响

2016年第17号台风“鲇鱼”于9月23日08时(北京时,下同)在西北太平洋上生成,26日08时其中心位于距离台湾台东市东偏南方向680km海域,中心附近最大风力有14级(42m/s,强台风级)。

27日14时在台湾花莲县沿海登陆,28日04时40分前后在福建惠安县沿海再次登陆,中心附近最大风力12级(33m/s,台风级)。28日夜间在福建龙岩境内减弱为热带低压,29日02时前后进入江西境内,其风力进一步减弱,已很难确定环流中心,中央气象台于08时停止对其编号。

受台风影响,从9月28日开始江西大部分地区出现暴雨,局部大暴雨,个别站点出现特大暴雨。暴雨范围广是此次天气过程特点之一。此次降水天气过程还可分为两个阶段:第一阶段台风本体降水(图略),28日08时—29日08时暴雨区主要位于江西省南部和中南部;第二阶段台风与冷空气相结合降水,29日08时—30日08时暴雨区位于江西省西北部。此次台风暴雨过程共导致江西省71个县(市、区)的822个站点出现大暴雨,103个县(市、区)的3202个站点出现暴雨,其中宜黄县和庐山市为整个暴雨过程的最大中心。过程雨量居前三位的分别是宜黄县杨坊村223.5mm、中堡村173.3mm和庐山市小天茶池173.3mm。杨坊村强降雨主要集中在28日至29日凌晨,此后降水明显减弱。小天茶池强降雨分为两个阶段,第一阶段28日晚上至29日凌晨,第二阶段29日白天至夜间。两站的小时雨强均不强,除小天茶池有2个时次的雨强超过20mm/h以外,其他时次雨强均在20mm/h以下,但是两站雨强超过10mm/h的时长则分别达9h和14h,可见强降雨持续时间较长。受台风暴雨影响,江西省抚州市临川区、宜黄县以及南昌市新建区不同程度受灾,特别是农业受到重创而损失严重。

受冷空气和台风共同影响,此次暴雨过程还伴有大风,8—9级大风持续时间长、范围广,时间为28日08时—29日20时,超过36h(鄱阳湖地区);29日08时庐山最大风速达到25m/s,星子28日20时最大风速达到24m/s。从江西省南部到北部平原河谷地区均出现大风,但主要集中在赣江沿岸和鄱阳湖周边地区。另外,此次过程还伴有明显降温,江西省大部分地区29日最低温度比28日下降了7—9℃,其中彭泽下降了14℃。

## 2 环流形势与云系特征

分析 28 日 08 时(图 1a)至 29 日 08 时(图 1b) 500 hPa 高度层环流形势发现,欧亚中高纬地区一直维持纬向环流,中西伯利亚地区至我国新疆北部有高原槽东移发展。低纬地区副热带高压稳定维持在海面,其脊线位于  $30^{\circ}$ — $33^{\circ}$ N。我国四川、贵州等地为大陆高压控制。台风处于大陆副热带高压和西

太平洋副热带高压之间的鞍型场中,并沿西太平洋副热带高压西南侧的东南气流逐渐往西北方向移动,其天气系统配置整体稳定。因受地面冷空气阻挡,台风移动缓慢,移速为 15—25 km/h。29 日 08 时新疆北部高原槽东移,20 时移至陕西、河南、湖北地区,同时“鲇鱼”减弱后的台风低压继续西行,其强度明显减弱,两者在江西省西部相互结合作用。

图 1 2016 年 9 月 28 日 08 时(a)和 29 日 08 时(b)500 hPa 层位势高度场(单位:dagpm)

Fig. 1 500-hPa geopotential height fields (unit:dagpm) at (a) 08:00 BT on 28th September, 2016 and (b) 08:00 BT on 29th September, 2016

28 日凌晨台风登陆时本体环流完整(图略),中低层辐合深厚,最高到达 500 hPa 层,这有利于上升运动的建立和维持。台风中心附近的密闭云区仍然发展旺盛,受偏东气流引导,云区内不断有中尺度对流云团分裂并经过江西省中南部,造成大范围暴雨;同时台风北侧倒槽一直延伸至长江中下游地区,江西省北部处于倒槽的辐合动力抬升区,倒槽后有东北向、偏东向、东南向三支气流交汇于江西省北部,三支气流的大风速核均超过 20 m/s。三支强气流的交汇,一方面增强低层动力抬升强度,另一方面使得水汽往暴雨区上空源源不断输送,有利于台风暴雨的增强。29 日 850 hPa 层以上的低压倒槽向西北方向移动,台风本体环流减弱,倒槽内东北向和东南向两支气流的强度明显减弱,其中后者风速为 12 m/s。可见相较于 28 日,29 日更有利的条件是 500 hPa 层低槽东移与台风环流在江西省西北部相结合。28—29 日副热带西风急流稳定位于  $35^{\circ}$ — $40^{\circ}$ N,江西地区上空处于副热带西风急流入口区的右侧。高空辐散的抽吸作用有利于维持深厚持久的上升运动,也有利于低层气压进一步降低,维持台风强度,从而形成持久性降水。

在第一次登陆后,台风“鲇鱼”原来的完整对称

结构逐渐遭到破坏,但是,由于台风东南侧和东侧的急流仍与暖湿洋面连接,因此低空急流仍可继续向台风进一步输送暖湿空气,这有利于台风东南侧、东侧和东北侧云团的发展(图 2a)。由于台风进一步向内陆西北方向移动,台风的对流云系逐渐往北推移,在此过程中其结构更加松散(图 2b、c),但台风中心附近的福建、江西交界处仍有强对流云团发展,云团逐渐西北行影响江西省东南部地区,其 TBB 中心值小于  $-60^{\circ}\text{C}$ 。上游福建地区仍有中尺度对流云团发展,在未来时间内也会影响江西省东南部,形成持续性降水。分析还发现,除了在台风本体内有对流云团发展,在台风北侧的东北向、偏东向、东南向三支急流交汇区也有一条明显的密闭云团发展,28 日其 TBB 中心值小于  $-50^{\circ}\text{C}$ 。29 日台风环流进一步北移减弱,其北侧的环流也北抬西行(图 2d),其中的主要对流云团发展也进一步减弱,结构更为松散,对流云团主要影响江西省西北部,其 TBB 值小于  $-30^{\circ}\text{C}$ 。

## 3 水汽分布及演变特征

分析 850 hPa 层水汽通量(图 3)和水汽通量散度(图略)发现,虽然台风已经登陆,但是水汽输送通

图2 2016年9月28日08时(a)、13时(b)、20时(c)、29日01时(d)TBB分布(单位:°C)

Fig. 2 Distributions of TBB (unit: °C) at 08:00 BT (a), 13:00 BT (b) and 20:00 BT (c) on 28th September, 2016 and 01:00 BT on 29th (d) September, 2016

图3 2016年9月28日08时(a)和20时(b)850 hPa层水汽通量分布(单位:g/(cm·hPa·s))

Fig. 3 Vapor flux distributions (unit:g/(cm·hPa·s)) of 850 hPa layer at 08:00 BT (a) and 20:00 BT (b) on 28th September, 2016

道仍然维持。台风东侧有水汽通量中心,水汽通道从水汽通量中心一直往南延伸至洋面上,形成一条水汽输送带。低层850 hPa自东海至暴雨区的水汽

通量中心达 $64 \times 10^{-5} \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ 。在水汽通量中心左侧存在水汽通量散度中心,其值达 $-18 \times 10^{-7} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ 。暴雨区附近有较强的水汽

输送和辐合,为强降水提供了充足的水汽。850 hPa 层上有一支由偏南风 and 偏东风汇合而成的低空急流,其中心风速大于 20 m/s,急流将海上的水汽和热量源源不断输送至台风暴雨区。

分析宁都和庐山两个暴雨中心的水汽通量散度时间-高度剖面(4a、b)可知,水汽辐合主要发生在 600 hPa 层以下的中低层。在暴雨发生前 6 h,暴雨区上空已逐渐有水汽辐合区形成。宁都站从 28 日开始低层一直存在水汽通量辐合,至 28 日夜间水汽辐合逐渐增强,对应 28 日宁都站出现持续性强降

水。29 日凌晨,水汽通量散度大值区逐渐向上伸展至 600 hPa 层附近,在低层形成深厚的水汽辐合区。29 日白天 850 hPa 层以下均为强的水汽辐合区,其中心强度达  $-12 \times 10^{-7} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ 。庐山站降水分为两个阶段,一是 27 日台风倒槽附近的降水,低层有水汽辐合中心,持续时间不长;二是从 28 日夜间开始台风环流与冷空气相结合形成的强降水,700 hPa 层以下为持续的强水汽辐合区,其中心强度达  $-6 \times 10^{-7} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ ,对应 29 日庐山站出现持续强降水。

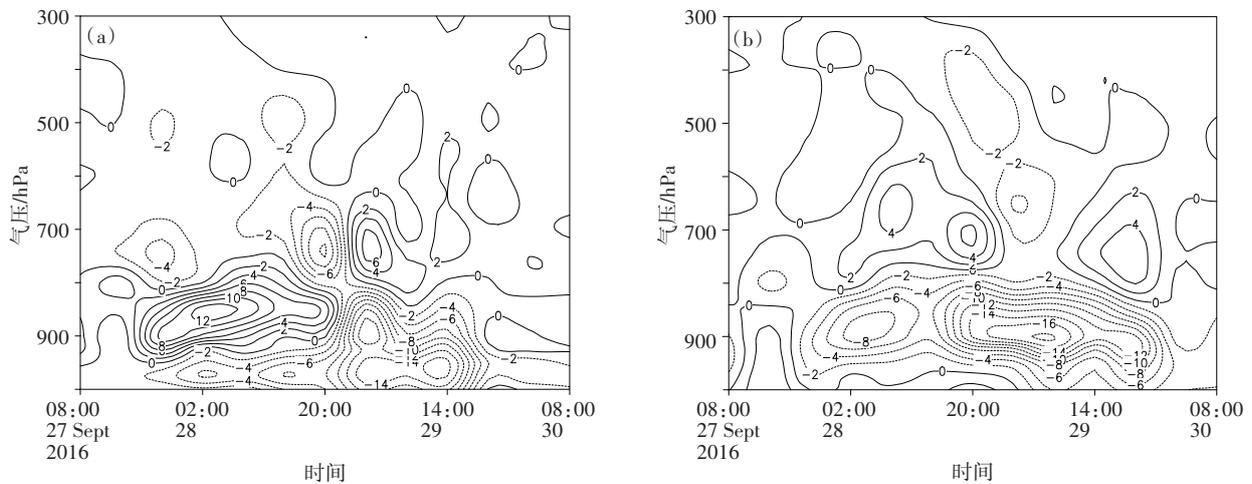


图 4 宁都(a)、庐山(b)水汽通量散度的时间-高度剖面(单位: $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ )

Fig. 4 Time-height profiles of water vapor flux divergence (unit: $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ ) at Ningdu (a) and Lushan (b)

## 4 台风降水多尺度特征

### 4.1 第一阶段台风本体降水

#### 4.1.1 台风本体影响

分析台风低压维持期间 28 日 14 时涡度和垂直速度沿  $116^\circ\text{E}$  的垂直剖面(图 5a)发现,  $28^\circ\text{N}$  以南均为大范围的正涡度区, 涡度零线达 150 hPa 层, 其中心值为  $24 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。由此可知, 28 日台风登陆以后, 即使其强度减弱、环流逐渐被破坏, 但中心附近仍维持上下层一致的垂直正涡度柱结构, 台风低压仍然是大范围的深厚系统, 有强盛的旋转和垂直上升运动。分析各时次中低层涡度场(图略)发现, 正涡度区主要位于台风低压中心以及台风北侧风向辐合带, 同时覆盖浙江、福建、广东东部、江西东南部等地区。28 日江西省东南部上空的正涡度区与暴雨区分布较为一致。随着台风低压的减弱, 暴雨区上空正涡度中心的强度逐渐减弱。分析宁都单点垂直速度随时间的分布(图 5b)发现, 在江西强降水区上空  $27^\circ\text{N}$  附近, 从 28 日下午开始整层的持续而强有

力的上升运动一直存在, 其最大高度达 200 hPa 层。其中最强上升时段为 28 日夜间至 29 日上午, 上升运动中心位于 850 hPa 层附近, 对应于江西省东南部的强降水中心。

#### 4.1.2 对流层低层偏东气流作用

分析地面形势场(图略)发现, 27 日高压中心位于内蒙古, 其强度为 1 032.5 hPa, 位于高压底部的偏东气流的风速为 10 m/s 左右。28 日高压中心逐渐东移南压, 强度为 1 025 hPa, 高压底部的偏东气流逐渐加强。随着高压中心继续东移南压, 高压中心与台风低压之间的气压梯度进一步增大, 台风底部的偏东气流也随之再度加强, 风速达到 28 m/s。分析 850 hPa 层流场和散度场(图略)发现, 28 日台风北侧和东侧各存在一支中心风速大于 20 m/s 的东北气流和偏东气流, 这两支气流呈气旋式旋转并且逐渐汇合, 在  $30^\circ\text{N}$  附近形成气流强辐合带; 在气流交汇区附近为强的散度辐合中心。同时台风高层存在明显的偏东气流与偏南气流的风向、风速辐散区, 正好对应于低层台风中心偏北侧的辐合带, 形

图5 2016年9月28日14时涡度(等值线,单位: $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ )、垂直速度(阴影,单位:Pa/s)沿 $116^{\circ}\text{E}$ 垂直剖面(a)和宁都单点10倍垂直速度的时间-高度剖面(b)

Fig. 5 Vorticity (contour; unit: $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) and vertical velocity (shadow; unit:Pa/s) along  $116^{\circ}\text{E}$  vertical section at 14:00 BT 28th September, 2016 (a), time-height section of 10 times vertical velocity at Ningdu (b)

成“高层辐散、低层辐合”的垂直耦合,有利于气流垂直运动的加强,为暴雨天气提供了动力条件。同时,在此垂直耦合区域云图上存在东北—西南向发展的螺旋云带(图略)。

#### 4.2 第二阶段冷空气与台风形成稳定降水

何立富等(2006)研究指出,中纬度地区冷空气从850 hPa层以下低层不断侵入台风低压的北部,增强了其北侧的东北气流,与来自东部海面的东风气流在台风低压北部形成汇合,造成大暴雨。另外李英等(2004)研究表明,台风北侧、西侧的冷空气与低压环流结合有斜压锋生作用,有利于强降水维持或发展。

#### 4.2.1 冷空气作用

此次异常大暴雨过程同样与低层冷空气有关,虽然高空槽冷空气主体位置偏北,但从温度平流沿 $115^{\circ}\text{E}$ 的垂直剖面(图6a)来看,从28日早晨开始,中低层700 hPa以下一直到边界层1 000 hPa都有冷平流逐渐南下至长江流域,冷平流输送最强在900 hPa层附近,在 $30^{\circ}$ — $32^{\circ}\text{N}$ 附近形成冷堆,冷平流中心强度达 $-26 \text{ K/s}$ 。至29日上午(图6b), $25^{\circ}$ — $30^{\circ}\text{N}$ 地区中低层以下700—1 000 hPa层暖平流输送同样明显,而最强暖平流出现在850 hPa层,其中心强度达 $28 \text{ K/s}$ 。冷、暖平流交汇在 $30^{\circ}\text{N}$ 附近,从28日凌晨至29日下午(图略)形成长达36 h的

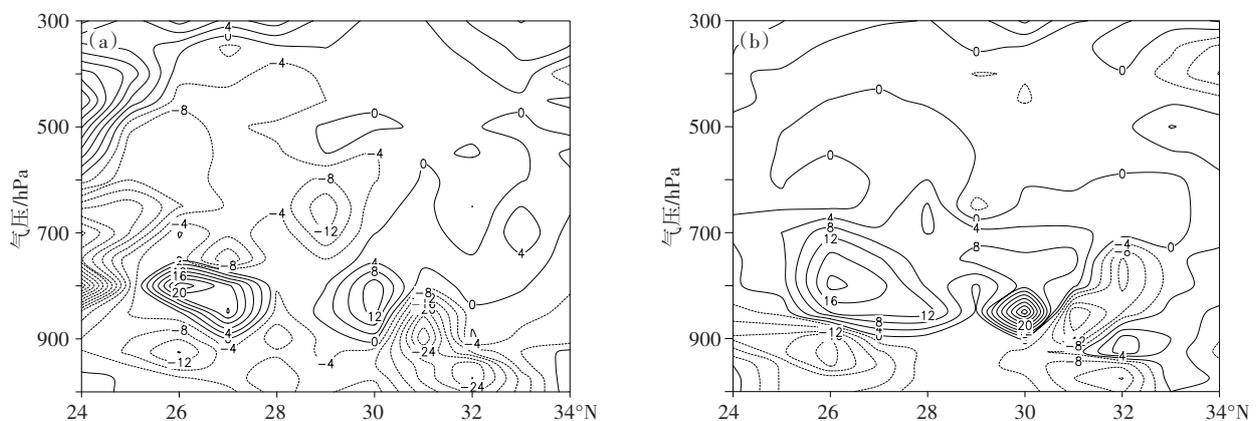


图6 2016年9月28日08时(a)、29日08时(b)温度平流(单位:K/s)沿 $115^{\circ}\text{E}$ 的垂直剖面

Fig. 6 Temperature advections (unit:K/s) along  $115^{\circ}\text{E}$  vertical section at 08:00 BT on 28th September, 2016 (a) and 29th September, 2016 (b), respectively

对峙,冷空气侵入暖湿气流底部,形成冷垫,使得台风低压的暖湿气流在冷空气之上滑行,两者相互作用,增强了大气的斜压性和低层辐合动力抬升作用。

同时,分析 28 日 925 hPa 层流场(图略)发现,华北低槽引导冷空气从低层南压至长江中下游一带。南压的冷高压与台风低压之间的气压梯度明显增大,导致台风北侧的偏东气流明显加强,形成了风速为 20 m/s 左右的东北向急流。这支急流与台风低压东部的东南气流和偏东气流在暴雨区附近上空交汇,一方面使得台风北部的动力辐合和上升运动得以加强和维持,另一方面将东部洋面上的水汽持续不断地输送至暴雨区上空,形成台风北侧暴雨区的水汽输通道,两方面的作用使得江西省北部地区暴雨显著加强。

#### 4.2.2 冷空气、热带低压相互作用的锋生过程

第 4.2.1 节分析表明,此次异常大暴雨过程与

低层冷空气有关,冷空气侵入暖湿气流底部而形成冷垫,使得台风低压中的暖湿气流在冷空气上抬升辐合。

分析 28 日白天低层 850 hPa 层的  $\theta_{se}$  水平分布(图 7)发现,08 时锋面位于  $32^{\circ}\text{N}$  以北地区,从广东至福建上空存在一个南北向分布的  $\theta_{se}$  高值区,不稳定能量被源源不断从海上输送到大陆,使得高能舌在 28 日暴雨过程期间持续存在,暴雨区位于高能舌的顶端。江淮流域以北为  $\theta_{se}$  低值区,28 日夜间随着冷空气的不断南移。冷空气从湖北、湖南沿中路南下形成  $\theta_{se}$  低值区,尤其在湖北、湖南、江西三省交界处形成  $\theta_{se}$  低值中心,其强度为 330 K。随着冷空气锋区南压,在台风西侧的江西省上空  $\theta_{se}$  明显增强且梯度增大,尤其是江西省西北部冷暖空气交汇区锋生作用明显,锋生加强触发降水的再度加强发展,对应 29 日庐山出现强降水。

图 7 2016 年 9 月 28 日 08 时(a)、29 日 02 时(b)850 hPa 层  $\theta_{se}$  分布(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 7 The  $\theta_{se}$  distributions of 850 hPa layer at 08:00 BT on 28th September, 2016 (a) and 02:00 BT (b) on 29th September, 2016 (units:  $^{\circ}\text{C}$ ), respectively

分析  $\theta_{se}$  沿  $115^{\circ}\text{E}$  的垂直剖面(图略)发现,28 日 08 时锋面位于  $32^{\circ}\text{N}$  以北,江西上空基本为暖湿空气控制,  $26^{\circ}\text{--}28^{\circ}\text{N}$  区域上空 600 hPa 层有大于 344 K 的高值区,同时在 400—500 hPa 层内有干冷空气向南扩展,并且逐渐向低层扩散,此时暴雨出现在弱的对流不稳定区。29 日凌晨,在边界层内冷空气南下,主体锋区位于  $30^{\circ}\text{--}32^{\circ}\text{N}$ ,而在锋区南侧  $28^{\circ}\text{--}30^{\circ}\text{N}$  之间区域  $\theta_{se}$  梯度增大。能量锋区的加强,一方面使得台风低压的不稳定能量得到进一步释放,另一方面也使得低层的动力抬升作用增强。

#### 4.3 高低空急流的相互作用

强降水期间,随着高空槽东移,江西地区上空一

直处于副热带西风急流入口区的右侧,反映在云图上呈反气旋弯曲的急流边界十分清晰,表明高空急流增强,入口区的辐散也增强。江西省北部还存在明显的偏东气流与偏南气流的风向辐散(图略),高空辐散的抽吸作用有利于维持深厚持久的上升运动,并且也有利于低层减压,维持台风强度,从而造成持久降水。同时从 850 hPa 层风速大于 12 m/s 的偏东风急流区演变来看,随着台风逐渐向西北方向行进,偏东气流的 12 m/s 以上大风速区也逐渐西传。江西省中北部处于高空急流右侧的辐散区,低空急流核西传,江西省中北部处于低空急流的顶端,“低层辐合、高空辐散”的上下层配置激发了对流天

气的发展。同时低空急流的西传,使得洋面上的暖湿空气输送增强,进而低层的位势不稳定能量增加。强降水出现在高空急流核右后方强辐散区和低空急流核前侧强辐合区。

#### 4.4 地形作用

陈瑞闪(2002)研究指出,地形引起降水增幅主要取决于两个因素:一是低层风速,风速愈大地形对降水的增幅作用愈强;二是气流的暖湿程度,气流愈暖愈湿,地形对降水的增幅作用愈明显。当台风趋近陆地时,因地形影响台风前部的低空辐合加强。台风登陆后,受山脉影响经常会在台风右前方出现强烈天气。在“鲇鱼”登陆进入江西后的本体降水阶

段,28日08时沿暴雨中心 $25^{\circ}\text{N}$ 合成的纬向环流垂直剖面(图8a)显示,台风偏东气流在山脉处被明显抬升,在 $116^{\circ}\text{E}$ 附近边界层至低层出现气旋辐合中心,与之对应的宁都出现强降水中心。29日02时台风进一步往西北方向移动,结合庐山地形分析此时纬向环流垂直剖面(图8b)发现,庐山西部为高山,东部为平原,强盛的东南暖湿气流经平原输送至山区,受地形胁迫而抬升,因此处于山前迎风坡的庐山产生此次暴雨过程中最强降水。再者,江西省北部的强偏东气流和南部的强东南气流与山脉走向存在较大的交角,这进一步加剧水汽的地形辐合。由此可知,地形对此次台风暴雨增幅也有一定贡献。

图8 2016年9月28日08时(a)、29日02时(b)水平风速和10倍垂直速度合成环流分别沿 $25^{\circ}\text{N}$ 和 $29^{\circ}\text{N}$ 的垂直剖面

Fig. 8 Horizontal wind speed and 10 times vertical speed combined circulation along the vertical section of  $25^{\circ}\text{N}$  at 08:00 BT on 28th September, 2016 (a), and  $29^{\circ}\text{N}$  at 09:00 BT on 29th September, 2016 (b)

## 5 小结

利用常规地面观测、卫星、雷达资料以及NCEP再分析资料,分析了台风“鲇鱼”在江西引起的持续性暴雨天气过程的成因和机理,发现:

1) 台风在西行过程中天气系统稳定维持,台风移动非常缓慢,持续的天气尺度动力抬升有利于一定雨强的稳定性降水维持,这是在江西产生区域性暴雨、局部大暴雨天气原因之一。另一方面则是由于台风系统与冷空气相互作用,延长了强降水时间,也使得降水再度增强。

2) 台风登陆后水汽输送通道仍然维持,主要存在于中低层的水汽输送带为强降水发生提供充足的水汽和热力条件。水汽通量中心和水汽辐合区对强降水落区具有一定的指示意义。

3) 登陆以后台风强度减弱,但仍维持大范围的正涡度区,且主要位于台风低压中心和台风北侧风

向辐合带。正涡度区中心附近中尺度对流云团的生成发展,形成持续性强降水。台风北侧的偏东气流的气旋式旋转、汇合而形成的气流强辐合带,与台风高层气流辐散区共同形成高低层的垂直耦合,增强了天气系统的动力抬升。

4) 低层冷空气侵入台风低压北部,与台风暖湿气流形成长时间对峙。冷空气与台风环流间的相互作用,增强大气斜压性和低层辐合动力抬升作用,有利于强降水的维持和发展。

5) 台风影响期间,江西省北部风向与山脉走向存在较大的交角,加剧了水汽的地形辐合,地形对降水的增幅作用明显。

#### 参考文献(References)

- 陈联寿,丁一汇,1979. 西太平洋台风概论[M]. 北京:科学出版社:56-58. Chen L S, Ding Y H, 1979. An introduction to the western Pacific typhoon[M]. Beijing: Science Press: 56-58. (in Chinese)

- 陈瑞闪,2002. 台风[M]. 福州:福建科学技术出版社:324-329.
- Chen R S, 2002. Typhoon[M]. Fuzhou: Fujian Science and Technology Press:324-329. (in Chinese)
- 程正泉,陈联寿,徐德祥,等,2005. 近110年中国台风暴雨研究进展[J]. 气象,31(12):3-9. Cheng Z Q, Chen L S, Xu X D, et al, 2005. Research progress on typhoon heavy rainfall in China for last ten years[J]. Meteor Mon,31(12):3-9. (in Chinese)
- 郭达烽,陈翔翔,周芳,等,2013. 台风“海葵”(2012)登陆后西折蜗行诊断分析[J]. 气象与减灾研究,36(3):25-34. Guo D F, Chen X X, Zhou F, et al, 2013. The diagnostic analysis of the westward moving path of Typhoon Haikui (2012) after landing [J]. Meteor Disaster Reduction Res,36(3):25-34. (in Chinese)
- 程正泉,陈联寿,李英,2009. 登陆台风降水的大尺度环流诊断分析[J]. 气象学报,67(5):840-850. Cheng Z Q, Chen L S, Li Y, 2009. Diagnostic analysis of large-scale circulation features associated with strong and weak landfalling typhoon precipitation events[J]. Acta Meteor Sin,67(5):840-850. (in Chinese)
- 何立富,尹洁,陈涛,等,2006. 0509号台风“麦莎”的结构与外围暴雨分布特征[J]. 气象,32(3):93-100. He L F, Yin J, Chen T, et al, 2006. Analysis of structure and heavy rain of landing Typhoon Maisha[J]. Meteor Mon,32(3):93-100. (in Chinese)
- 李英,陈联寿,王继志,2004. 登陆热带气旋长久维持与迅速消亡的大尺度环流特征[J]. 气象学报,62(2):167-179. Li Y, Chen L S, Wang J Z, 2004. The diagnostic analysis on the characteristics of large scale circulation corresponding to the sustaining and decaying of tropical cyclone after its landfall[J]. Acta Meteor Sin,62(2):167-179. (in Chinese)
- 刘维鑫,卢炳夫,魏成谱,等,2016. 台风“海燕”(2013)后期路径折向及降水机制分析[J]. 气象与减灾研究,39(2):107-115. Liu W X, Lu B F, Wei C P, et al, 2016. Analysis of the later period track and precipitation of Typhoon Haiyan (2013)[J]. Meteor Disaster Reduction Res,39(2):107-115. (in Chinese)
- 孙兴池,陈金敏,刁秀广,等,2009. 一次远距离台风暴雨过程分析[J]. 气象,35(5):34-41. Sun X C, Chen J M, Diao X G, et al, 2009. Analysis of one far distance typhoon and heavy rain process[J]. Meteor Mon,35(5):35-41. (in Chinese)
- 许爱华,陈涛,朱光宇,等,2006. “泰利”台风低压大暴雨过程和数值模拟试验[J]. 气象与减灾研究,29(2):25-31. Xu A H, Chen T, Zhu G Y, et al, 2006. Strong precipitation analysis and numerical simulation of Typhoon Telim depression[J]. Meteor Disaster Reduction Res,29(2):25-31. (in Chinese)
- 王瑾,柯宗建,江吉,2007. “麦莎”台风暴雨落区非对称分布的诊断分析[J]. 热带气象学报,23(6):563-568. Wang J, Ke Z J, Jing J, 2017. A diagnostic analysis to the asymmetric distribution of typhoon rainfall area[J]. J Trop Meteor, 23(6):563-568. (in Chinese)