

# 一次远距离台风暴雨过程分析

孙兴池<sup>1,2</sup> 陈金敏<sup>1</sup> 刁秀广<sup>1</sup> 李 静<sup>1</sup> 杨 明<sup>1</sup>

(1. 山东省气象台, 济南 250031; 2. 山东省气象科学研究所)

**提 要:** 应用常规观测资料、卫星、雷达产品, 综合分析 2008 年山东最强的一次降水过程, 研究西风带降水系统影响山东时, 远距离台风对降水的增幅作用, 并对主要降水时段进行中尺度数值模拟。结果表明: 在西风带系统影响山东时, 远在我国东南沿海的台风右侧的东南气流产生的风向、风速辐合与西风带辐合区合并, 东南风所及范围比湿增大, 水汽通量辐合使大气中的垂直液态水含量明显增大。西风带系统在垂直方向上后倾, 使得低层影响系统受高空槽前的正涡度平流影响, 是降水发生的环流背景。中尺度模拟结果显示: 前期鲁西暴雨垂直方向对流基本稳定, 但有强的对称不稳定支持上升运动发展, 后期半岛地区的连续暴雨则是低层增温、增湿且对流和对称不稳定并存, 从而产生强降水。

**关键词:** 远距离台风 暴雨增幅 水汽输送 湿位涡 对称不稳定

## Analysis of One Far Distance Typhoon and Heavy Rain Process

Sun Xingchi<sup>1,2</sup> Chen Jinmin<sup>1</sup> Diao Xiuguang<sup>1</sup> Li Jing<sup>1</sup> Yang Ming<sup>1</sup>

(1. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031; 2. Institute of Shandong Meteorology)

**Abstract:** By using routine observational data, satellites products, Doppler radar products, the heaviest rainfall process of Shandong in 2008 is analyzed. The role of far distance typhoon in the increase of heavy rain when a westerly rainfall system affects Shandong is discussed. The main precipitation period is simulated with MM5. The results suggest that wind direction and speed convergence zone of southeast air flow on the right side of typhoon Kalmaegi combines with westerly convergence zone. Water vapor flux convergence makes vertical liquid water content increase significantly, and the specific humidity raised in the area southeast flow reached. A backward-tilting trough in westerly causes positive vorticity advection ahead of upper trough affecting the low-impact system. Mesoscale meteorological modeling shows that the vertical convection is stable and the strong symmetry instability

makes ascending motion develop in the western region of Shandong in earlier stage. Increasing temperature and humidity in low level, symmetry instability and convective instability exist simultaneously and lead to the sustained torrential rain in Shandong Peninsula in later stage.

**Key Words:** far distance typhoon heavy rain increase water vapor transportation moist potential vorticity symmetric instability

## 引 言

由台风产生的直接和间接暴雨一直是气象学者研究的重点。台风暴雨强度并不与台风强度有简单关系,而与水汽输送、台风变性、弱冷空气的侵入等密切相关<sup>[1]</sup>。李英<sup>[2]</sup>等研究了高空槽对 9711 号台风变性加强的影响,认为台风变性过程中及变性后雨量有明显增加。朱洪岩<sup>[3]</sup>等对中低纬度系统及其暴雨特征进行了模拟研究认为,当东南沿海登陆的台风与中纬度西风槽同位相叠加时,远离台风的中纬度槽前降水将明显增强。文献<sup>[4]</sup>认为,台风降雨量与云中可降水量有密切关系。陈联寿<sup>[1]</sup>指出:远距离台风暴雨与台风右侧东南气流向中纬度槽输送水汽有关,也可能与台风作为大气中的一个扰动源向前方传播有关。文献<sup>[5—7]</sup>对台风远距离暴雨的形成机制、中尺度特征进行了分析。山东地处中纬度,台风与中纬度系统的相互作用是产生大暴雨的主要影响形势,以前,山东对台风的研究,多集中在直接的风雨影响<sup>[8]</sup>,认为台风暴雨与 500hPa 正涡度区较为一致,台风与副高之间的东南低空急流输送对降雨起重要作用。

近年来,发生多次台风在我国东南沿海活动而使山东省降雨明显增幅的个例,而这类天气,由于台风远在数千里之外,在实际业务中难以判断与西风带降水是否有必然物理联系,往往忽视对台风的分析而是仅考虑西风带系统影响,雨量容易报小了。如 2008 年 7 月 17—20 日,受 850hPa 低涡和地面气旋

影响,山东省出现当年最强降水过程,全省平均雨量达 73.3mm(图 1),鲁中和半岛两地区北部普降大暴雨,除鲁西北和鲁南两地区部分县市和半岛南部以外,其他县市普降暴雨。招远过程降水量最大,为 249.3mm。对流层低层低涡与地面气旋是山东省区域性暴雨的主要影响系统,2008 年山东省出现多次气旋过程,雨量都明显小于本次。本次过程发生于 0807 号台风海鸥在福建登陆北上期间,台风的水汽输送与强降水密切相关。分析本次强降水过程中台风的作用,增强远距离台风对降水增幅的认识。

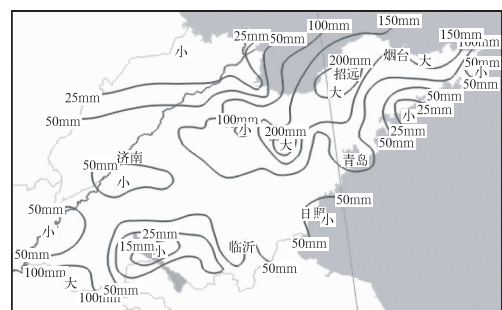


图 1 2008 年 7 月 17 日 08 时至 21 日 08 时过程雨量

## 1 环流形势及西风带影响系统

7 月中旬,我国中纬度地区为纬向环流,500hPa 多西风槽活动,西风槽携带西路冷空气自新疆东移多次影响山东省,副热带高压脊线北抬到 30°N 以北。其间,伴随着西风带槽脊的活动,副高或与西风带高压脊叠加西进增强或受西风槽影响减弱东退。本次过程发生在副高西伸增强,其边缘西南气流到达山东的过程中。16 日 08 时,588 线远在

130°E 以东的西北太平洋上, 18 日 08 时(图 2a), 588 线西伸到长江口附近; 此时位于副高东南侧的 0807 号台风海鸥刚离开台湾桃园进入台湾海峡, 并继续向西北方向移动; 500hPa 图上, 高空槽携带西路冷空气 14 日起从新疆启动, 18 日 08 时到达河套东部, 山东省处于槽前和副高边缘西南气流控制之下, 700hPa 系统比 500hPa 偏前, 槽线先期到达鲁西地区, 在高空槽前正涡度平流的作用下, 低层减压出现低涡(图 2b), 低涡前部伴随东南风急流。

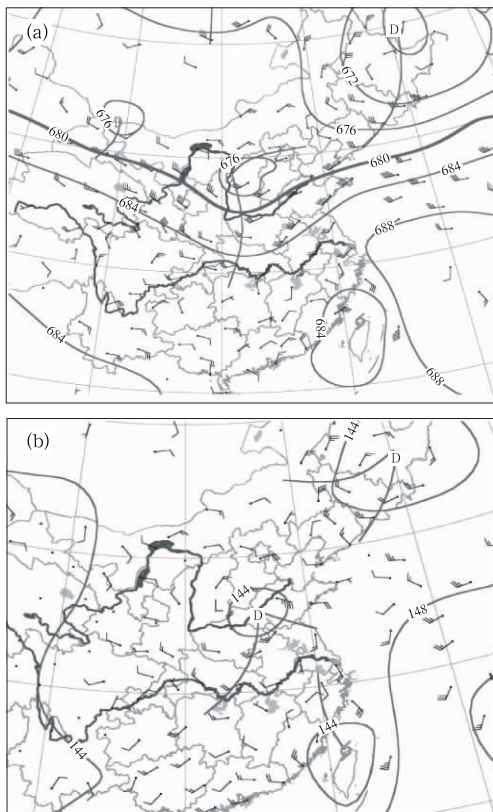


图 2 2008 年 7 月 18 日 08 时 500hPa(a) 和 850hPa(b) 形势

## 2 大暴雨过程形成机制分析

### 2.1 高空正涡度平流

影响系统在垂直方向上始终后倾, 使得低层系统处于高空槽前正涡度平流影响之下, 得

以发展和持续。17 日 08 时 500hPa 高空槽位于河套时, 槽前正涡度平流进入鲁西, 20 日 20 时高空槽位于 120°E, 将要移出山东半岛, 槽前正涡度平流离开山东, 山东省降水基本结束, 历时 80 多个小时。其间, 正涡度平流中心从鲁西移至半岛, 17 日 20 时, 500hPa 高空槽到达山西, 山东全部为正涡度平流控制(图 3a),  $7 \times 10^{-9} \text{ s}^{-2}$  的中心位于鲁西, 18 日 08 时, 500hPa 高空槽在原地加强, 正涡度平流中心仍位于鲁西, 17 日 20 时至 18 日 08 时, 鲁西出现区域性暴雨, 位于鲁西南的曹县最大为 115.1mm。19 日 08 时, 500hPa 正涡度平流中心移至青岛, 18 日 20 时至 19 日 20 时, 山东半岛普降大到暴雨, 北部为大暴雨。

### 2.2 西风带辐合区与台风远距离风向风速辐合区合并

在 17 日 20 时 500hPa 正涡度平流中心附近(图 3a), 18 日 08 时, 850hPa 鲁西出现低涡, 低涡中心与辐合中心一致, 辐合中心达  $-12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (图 3b), 此时台风位于台湾海峡, 台风右侧有一支东南风急流, 其北侧东南急流前方的江浙一带风速较小, 由于风速及风向辐合, 为大于  $-10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  的辐合区, 850hPa 低涡辐合区与台风北侧的东南风辐合区合并, 山东中南部为大于  $-10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  的辐合区。18 日上午, 在台风远距离产生的辐合区上, 鲁东南云系增强并出现强回波, 临沂普降大雨或暴雨, 18 日 05—08 时, 3 小时最大雨量出现在临沂市烈烈士陵园, 累积降水为 46.6mm。

### 2.3 700hPa 上升运动与高层辐散

对流层上层辐散、低层辐合是强降水产生的重要条件。根据以往的总结研究, 山东出现强降水的 200hPa 形势经常是: 大于  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的高空急流轴从内蒙古或河套伸向我国东北地区, 急流核一般位于东北三省境内。

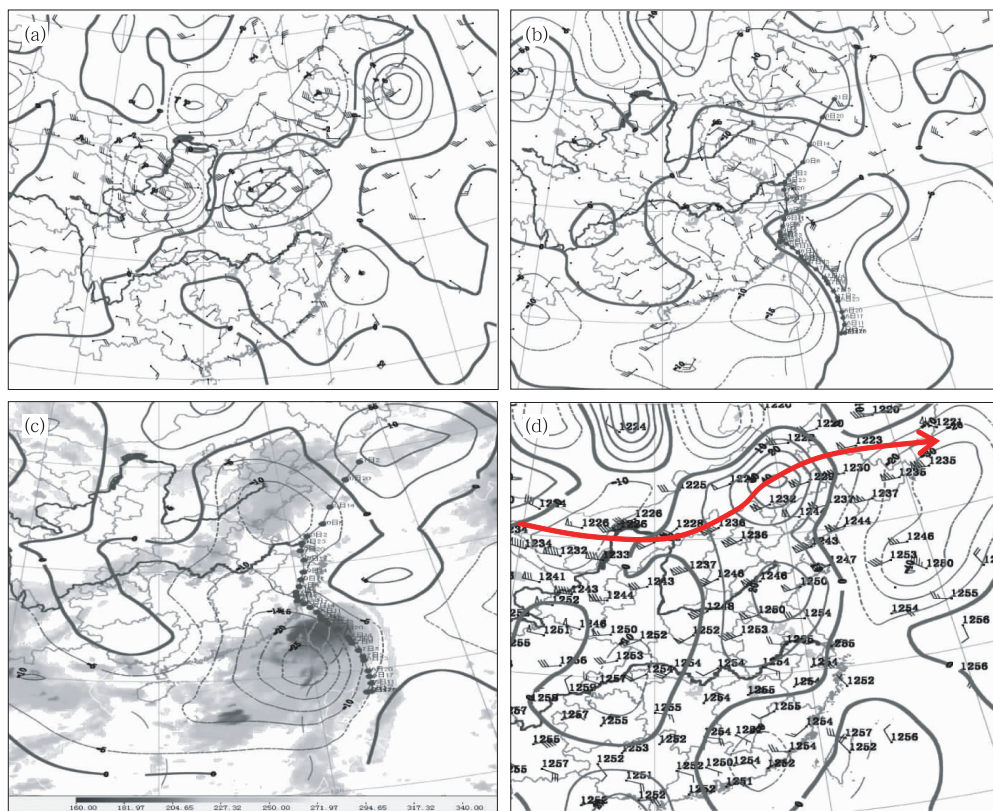


图3 2008年7月17日20时500hPa风场和涡度平流(a,单位: $10^{-9} \text{ s}^{-2}$ ),18日08时850hPa风场和散度(b,单位: $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ),18日08时700hPa垂直速度(c,单位: $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{ s}^{-1}$ )和黑体亮温TBB(c,单位:K),18日08时200hPa高空填图及散度(d,单位: $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,粗箭矢为大于 $30 \text{ m} \cdot \text{ s}^{-1}$ 急流轴)

18日08时200hPa急流轴(图3d)从甘肃经河套伸向东北地区,位于吉林境内的急流核风速为 $48 \text{ m} \cdot \text{ s}^{-1}$ 。在急流核右后方的山东为 $10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的辐散区,辐散中心青岛为 $26 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。文献[9]指出,对流层中层的上升运动与暴雨区关系密切。对比同时次700hPa上升速度和云图(图3c),可发现200hPa $20 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的辐散区与700hPa大于 $-10 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{ s}^{-1}$ 的上升运动区及TBB低亮温区十分一致。18日08时,除鲁西和半岛东北部外,大部地区为较强上升运动区,TBB在 $232 \sim 250 \text{ K}$ 之间,这正是18日白天的大到暴雨区。

## 2.4 水汽通量散度及比湿

从18日08时850hPa风场及水汽通量散度分布(图4a)可见,在台风东南急流的前方,江苏出现水汽通量辐合中心,与西风带低涡形成的水汽通量辐合区合并,对比18日08时(图略)和20时850hPa比湿(图4b),发现山东省半岛由08时的 $9 \text{ g} \cdot \text{ kg}^{-1}$ 增大到20时的 $11 \text{ g} \cdot \text{ kg}^{-1}$ ,水汽通量辐合先于比湿增大。全省在 $10 \text{ g} \cdot \text{ kg}^{-1}$ 以上,大于山东省区域性暴雨的阈值。有两个大于 $12 \text{ g} \cdot \text{ kg}^{-1}$ 的高湿舌分别从鲁西南和黄海中部向北延伸,显然,黄海中部伸向山东半岛的高湿舌与台风

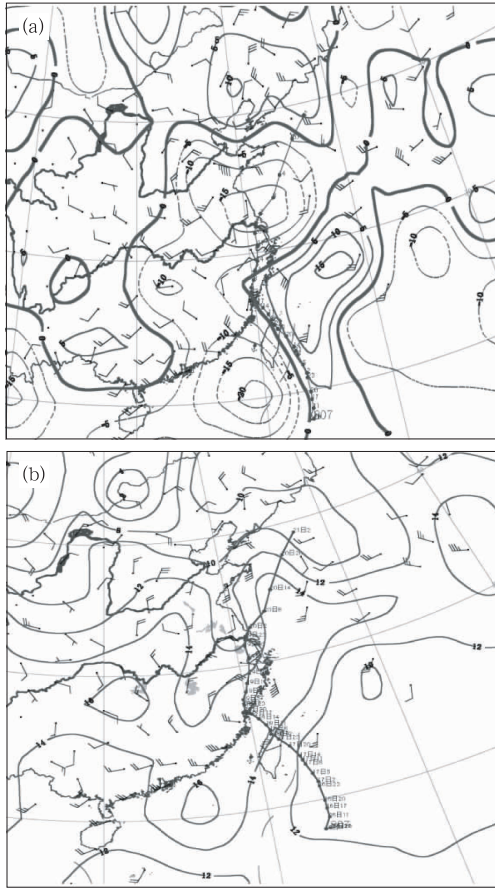


图 4 2008 年 7 月 18 日 08 时 850hPa 风场及水通量散度(a,单位: $10^{-8} \text{g} \cdot (\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa})^{-1}$ )和 18 日 20 时 850hPa 风场及比湿(b,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

右侧偏南气流的水汽输送有关。19 日 08 时半岛比湿增大到  $14 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 大于  $14 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$  比湿区与台风外围偏南气流一致, 925hPa 比湿增大到  $17 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 此时台风刚进入浙江, 台风水汽远距离输送到了山东。

### 3 大气探测资料分析

#### 3.1 大气温湿及稳定度参数

分析 18 日 08 时济南  $T-\ln p$  图, 整层比湿线与饱和比湿线接近(图略), 相对湿度较大; 表 1 是暴雨过程中山东 3 个探空站的温湿及稳定度参数, 沙氏指数  $SI$  大部分时段大于 0, 大气对流基本稳定; 18 日 08 时, 济南出现暴雨时,  $K$  指数仅为 24、25 $^{\circ}\text{C}$ , 18 日 20 时, 随着台风水汽向北输送, 青岛、成山头温度露点差减小, 导致 19 日 08 时  $K$  指数明显增大, 同时整层比湿积分( $IQ$ )也分别由 18 日 08 时 4656.5 和 4740.2 增大到 20 时 5711.3 和 5577.5, 18 日 20 时至 19 日 08 时半岛地区出现暴雨或大暴雨, 最大的安丘达 169.2mm。本次过程整层比湿积分较大, 青岛、成山头都在 4600 以上, 济南也在 3600 以上。可见, 过程发生于层结基本稳定但水汽含量充足的环境中。

表 1 山东探空站大气温湿及稳定度参数

时间	济南				青岛				成山头			
	$SI$	$K$	$CAPE$	$IQ$	$SI$	$K$	$CAPE$	$IQ$	$SI$	$K$	$CAPE$	$IQ$
17 日 20 时	1.63	34	0	5486.8	1.98	-2	39	3609.6	-0.01	31	0	4346.0
18 日 08 时	6.32	24	0	4566.2	8.43	28	34	4656.5	0.45	32	209	4740.2
18 日 20 时	2.92	25	1	3793.0	3.79	32	0	5711.3	0.98	36	0	5577.5
19 日 08 时	0.44	32	9.2	3682.8	-2.17	36	337.2	5562.2	0.04	35	0	5789.3
19 日 20 时	1.86	32	9.8	3802.0	0.69	35	0.3	5841.4	2.45	35	0	5593.9
20 日 08 时	2.91	31	0	4276.7	2.45	31	218.7	5102.2	-0.3	37	0	5924.2
20 日 20 时	2.44	32	593.3	4371.4	0.92	37	17	5084.7	-0.01	29	0	4977.7

#### 3.2 雷电及雷达资料分析

本次过程雷电强度比预计偏弱, 17—18 日, 共发生闪电 19637 次, 主要位于江苏北

部、安徽北部和山东南部, 以负闪为主, 正闪仅占总次数的 1.71%, 平均闪电强度为 13.31kA。而出现区域性暴雨的鲁中和半岛等地几乎没有闻雷。有研究表明<sup>[10]</sup>, 对流不

稳定参数  $K$ 、 $SI$  与雷电密切相关,  $K > 35$ 、 $SI < -3$  是致灾性雷电的阈值。由表 1 可见,  $SI$  指数较大, 不利对流发生, 青岛 19 日两个时次、成山头 18—20 日 4 个时次  $K > 35$ , 但  $CAPE$  值较小, 在多个时次为零, 抑制了对流发展。降水过程中, 云顶高度基本在 10km 以下。雷达资料显示本次降水过程为大范围的混合性降水回波, 主要回波强度在 30dBz 以上, 局部达 50dBz, 济南雷达的组合反射率产品显示 17 日 16 时到 18 日 04 时济南上空强回波持续时间达 10 个小时以上, 垂直液态水含量  $VIL$  最大时达到  $20 \sim 25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $VIL > 10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  是山东出现较大雨强的阈值, 18 日 06—10 时, 台风水汽输送到达鲁东南, 临沂出现  $VIL$  大于  $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  的强回波带, 局部达  $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 该大值区向东北方向移动, 09 时从日照入海, 这个时段临沂、日照普降大雨或暴雨。20 日 02—08 时, 有多个  $45 \sim 49 \text{ dBz}$  中尺度强回波区自南向北经过招远,  $VIL$  为  $10 \sim 15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 局部达  $20 \sim 25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 招远 20 日 02—08 时累计降水

为 93.8mm。计算了多个时次的大气可降水量(图略), 18—20 日, 鲁西地区由 50mm 逐渐下降到 40mm 左右, 而半岛和鲁东南地区始终维持在  $50 \sim 65 \text{ mm}$  之间, 大气可降水量持续达到暴雨量级正是台风水汽输送的结果。本次强降水过程是由于水汽充沛, 垂直液态水含量高和可降水量大, 且持续时间较长造成的。

#### 4 云图分析

850hPa 天气系统与降水关系密切, 其风场结构常决定降水落区和强度。图 5 为黑体亮温  $TBB$  与 850hPa 风场叠加。17 日 20 时(图 5a), 山东省受切变线影响, 云系主要在北部, 鲁西地区为  $TBB$  低值区(250K), 17 日下午到 18 日 08 时, 鲁西、鲁中出现区域性暴雨; 18 日 08 时(图 5b), 台风右侧的南—东南气流到达苏北, 形成大于  $-15 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  水汽辐合中心(图 4a), 鲁东南云系发展, 虽然西风带低涡中心在鲁西

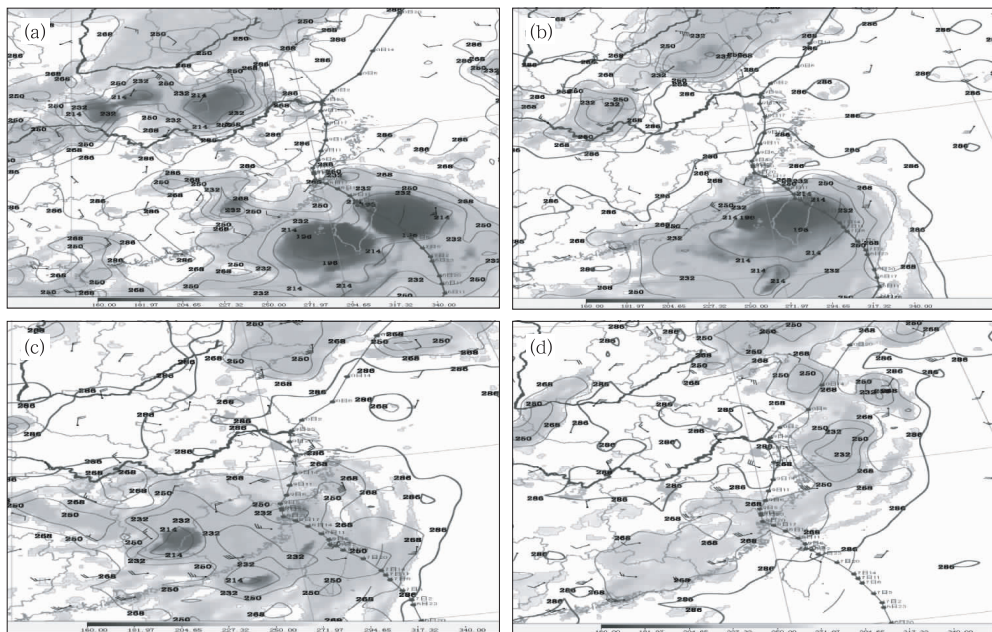


图 5 黑体亮温  $TBB$  与 850hPa 风场叠加

(a) 17 日 20 时; (b) 18 日 08 时; (c) 18 日 20 时风场和 19 日 04 时  $TBB$ ; (d) 19 日 20 时风场及 20 日 06 时  $TBB$

且伴急流,但鲁东南及鲁中东南部为 232K 的低亮温区,18 日这一带雨量较大;18 日 20 时,由于台风继续北上,东南急流到达山东半岛(图 5c),急流北侧的山东半岛北部出现区域性的大暴雨。台风 19 日刚进入浙江南部时就开始转向东北,但在其继续北上的过程中,东南气流持续影响山东,20 日半岛再次出现区域性暴雨,局部大暴雨。本次过程山东半岛连续 3 天出现暴雨、部分大暴雨,与台风水汽输送和西风带系统叠加有关,降雨时 TBB 在 250K 左右,且结构均匀,强降水是由水汽含量较高的中低云产生。

## 5 湿位涡及对称不稳定

为揭示暴雨产生时各物理量场的细致结构,采用 MM5 非静力模式的二层嵌套网格模拟结果进行分析,格距为 18km,时间步长

60min,积云参数化方案为 Grell(1993)。

由表 1 可知,本次过程发生于对流基本稳定的环境场中,而强降水的产生必然伴随较强的上升运动,分析对称不稳定及倾斜上升运动,能够揭示本次过程产生的机制。根据文献[11]湿位涡  $MPV = MPV1 + MPV2$ ,其中, $MPV1$  取决于对流稳定度,当  $MPV1 < 0$  时,对流不稳定,反之,对流稳定。 $MPV2$  与湿斜压性和垂直风切变有关,代表对称不稳定,如果  $MPV2 < 0$ ,为对称不稳定,反之,则对称稳定。一般来说,条件性对称不稳定往往与对流不稳定同时存在。

由于过程雨量呈东西向分布,我们对多个时次的暴雨点作纬向垂直剖面。图 6a、b 和图 6c、d 分别是 18 日 08 时济南和 20 日 08 时招远纬向垂直剖面,从 18 日 08 时济南纬向垂直剖面(图 6a)可见,暴雨区上空(117°E 附近)700hPa 以下为  $\theta_e < 336K$  的均值区,

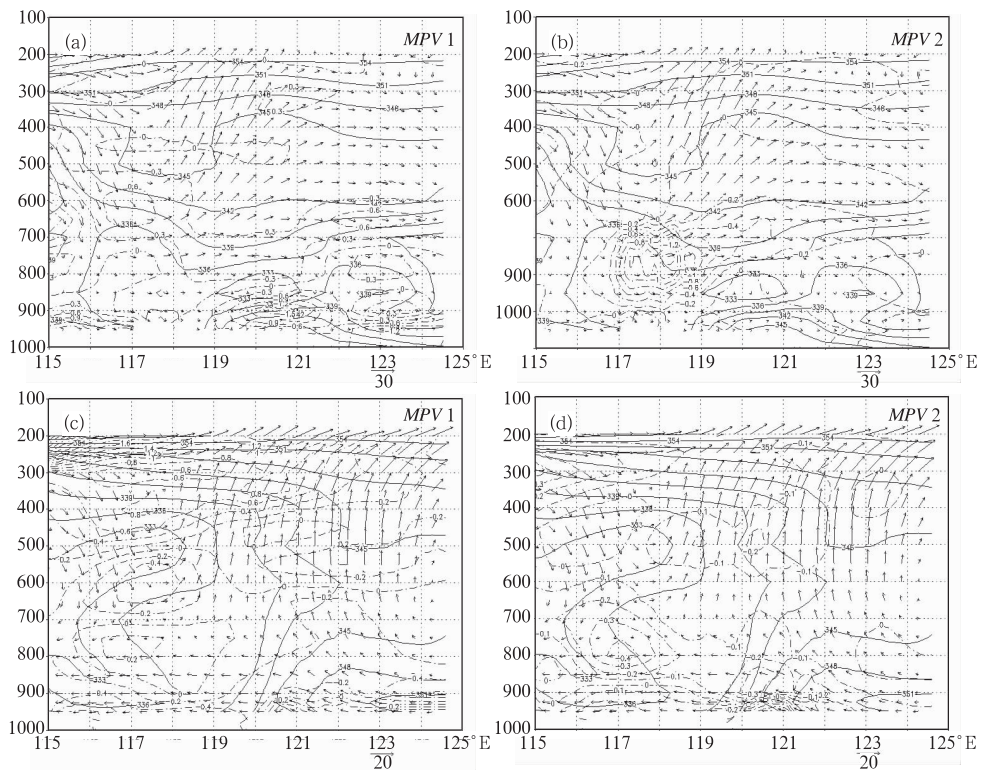


图 6 济南(36.7°N)18 日 08 时(a,b)和招远(36.4°N)20 日 08 时(c,d)暴雨区纬向垂直剖面  
实线  $\theta_e$ ,单位:K, $u$  和  $w \times 100$  合成风场;虚线:MPV1(a,c),MPV2(b,d),单位:PVU

$\frac{\partial \theta_e}{\partial p} \approx 0$ , 对应  $MPV1 \approx 0$ , 700hPa 以上  $\theta_e$  随高

度增大,  $\frac{\partial \theta_e}{\partial p} < 0$ , 对流稳定, 对应  $MPV1$  为正

值且在 600hPa 达最大为 0.6PVU; 图 6b 为相应的  $MPV2$  垂直分布, 暴雨区上空 (118°E 附近) 700hPa 以下为  $MPV2$  负值区, 位于 800hPa 的中心小于 -1.2PVU, 为强对称不稳定, 由低层切变线辐合上升到此高度的大气加速上升, 到 400hPa 垂直速度达最大为  $20 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 鲁西、鲁中地区 17 日 20 时至 18 日 14 时出现暴雨区。

20 日 08 时, 成山头探空资料显示 (表 1),  $SI = -0.3$ ,  $K = 37$ , 呈现弱不稳定, 招远纬向 (37.4°N) 垂直剖面可见, 在 120°E 以东、700hPa 以下, 由于东南气流输送高温高湿空气, 出现  $\theta_e > 345 \text{ K}$  的高能区, 与 120°E 以西的低能空气之间形成  $\theta_e$  较密集的能量锋区, 暴雨区 (120.4°E 附近) 位于能量锋区上, 600hPa 以下 (图 6c)  $MPV1$  在  $0 \sim -0.2 \text{ PVU}$  之间, 呈现弱对流不稳定, 600hPa 以上  $MPV1 > 0$ , 对流稳定。图 6d 表明, 暴雨区上空边界层以上整层  $MPV2 < 0$ , 为对称不稳定, 500hPa 为 -0.2PVU 中心, 可见暴雨区 600hPa 以下对流不稳定和对称不稳定并存, 低层辐合产生垂直扰动时, 上升运动加强。虽然 600hPa 以上对流稳定, 但对称不稳定增大使得上升运动继续发展, 在 400hPa 垂直速度达最大为  $15 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 暴雨区整层为上升运动, 19 日 20 时至 20 日 20 时招远降雨量 148.5mm。

## 6 小结

(1) 本次过程发生于副高西伸增强其边缘暖湿气流和西风带槽前西南气流共同影响下, 西风槽在垂直方向后倾, 850hPa 低涡及切变线为直接影响系统, 垂直方向对流基本稳定。

(2) 台风远距离水汽输送起重要作用, 台风右侧的东南气流形成风向、风速辐合, 和西风带低涡辐合区合并, 并随着台风继续东移北上, 持续影响山东半岛地区。

(3) 台风偏南气流所及区域比湿增大, 雷达资料显示降水过程中多个时段强降水中心都有垂直液态水含量大于  $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  的强回波带影响, 最大时达到  $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 这正是台风右侧偏南气流远距离影响山东期间。

(4) 前期鲁西、鲁中暴雨主要受西风带对流稳定的环流形势影响, 强降水由较强对称不稳定引起; 后期由于台风东南气流输送高温、高湿空气, 暴雨区低层出现能量锋区, 对流和对称不稳定并存, 导致强降水发生和持续。

## 参考文献

- [1] 陈联寿. 登陆热带气旋暴雨的研究和预报[G]. 第 14 届热带气旋论文摘要文集, 2007: 3-7.
- [2] 李英. 高空槽对 9711 号台风变性加强影响的数值模拟研究[J]. 气象学报, 2006, 64(5): 552-563.
- [3] 朱洪岩, 陈联寿, 徐祥德. 中低纬度环流系统的相互作用及其暴雨特征的数值模拟研究[J]. 大气科学, 2000, 24(5): 669-675.
- [4] Akihiko Murata, A cloud-resolving numerical simulation for characteristic rainfall induced by typhoon Meari(2004) [R]. 2006, Team Member Report on Topic 0.3 of Sixth International Workshop on Tropical Cyclones.
- [5] 范学峰, 吴秦, 席世平. AERE 台风远距离降水形成机制分析[J]. 气象, 2007, 33(8): 12-16.
- [6] 李改琴, 梁海河, 王树文, 等. 台风海棠远距离暴雨中尺度特征分析[J]. 气象, 2007, 33(8): 17-22.
- [7] 林毅, 刘铭, 蔡文通. 福建中南部台风远距离突发性暴雨成因分析[J]. 气象, 2005, 31(10): 68-71.
- [8] 孙兴池, 王文毅, 王业宏. 0509 号台风“麦莎”影响山东分析[J]. 热带气象学报, 2007, 23(3): 55-59.
- [9] 许爱华, 李玉塔, 郑婧, 等. 两次致灾雷电天气过程对比分析[J]. 气象, 2008, 34(4): 71-78.
- [10] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法 [M]. 北京: 气象出版社, 2000: 331.
- [11] 毕宝贵, 鲍媛媛, 李泽椿. “02.6”陕南大暴雨的结构及成因分析[J]. 高原气象, 25(1): 34-44.