

文章编号: 1004-4965(2009)04-0628-07

2007年8月10—12日山东半岛持续性特大暴雨 的维持机制分析

周淑玲, 闫淑莲, 张灿

(威海市气象局, 山东 威海 264200)

摘 要: 利用多普勒天气雷达资料、常规观测资料及 NCEP/NCAR 再分析资料, 对 2007 年 8 月 10—12 日发生在山东半岛持续性特大暴雨的特征及维持机制进行了分析。结果表明: 本次持续性特大暴雨与西太平洋副热带高压中心稳定少动和其边缘不断有冷空气侵入有关; 雷达回波强度图上, 10—11 日最强回波 > 50 dBz, 12 日回波强度在 $40 \sim 45$ dBz, 其径向速度的零速度线表现不同, 但均反映为暖平流; 暴雨前期山东半岛具备了发生强雷暴所需的不稳定大气层结, 副高边缘的低空东南急流为山东半岛输送了充足的水汽, 从而有利于山东半岛暴雨的维持; 暴雨维持的动力场特征为: 散度场维持低层辐合、高层辐散, 垂直速度场为较强的上升运动。

关 键 词: 天气学; 诊断分析; 持续性暴雨; 维持机制; 山东半岛; 雷达回波

中图分类号: P426.6

文献标识码: A

Doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2009.05.0015

1 引 言

2007 年 8 月 10—12 日, 受西风槽携带的冷空气、副热带高压边缘西南暖湿气流和减弱北上低压的共同影响, 山东半岛普降大暴雨到特大暴雨, 其中威海市平均降雨量 277.3 mm, 最大风力 10 级, 全市受灾人口 22.92 万人, 倒塌房屋 1 238 间, 农作物绝收面积 19 350 公顷, 水产品养殖受灾面积 1 182 公顷, 直接经济损失 13.9 亿元。副高边缘的突发性暴雨强度大, 有时持续时间长, 易造成巨大大气灾害, 对副高边缘发生的暴雨, 一直是许多学者研究的重点之一, 陶诗言等^[1]研究表明: 夏季我国东部暴雨带位置的变动, 受西太平洋副热带高压西伸北跳(南撤东退)的调节; 姜丽萍等^[2]对广东副高边缘的一次罕见特大致洪暴雨形成机理个例进行了分析, 指出: 有利的水汽条件、持久而强盛的上升运动、位势不稳定的大气层结共同作用导致了罕见的持续大暴雨过程; 鲍名^[3]在对华南两次持续暴雨过程中热带西太平洋对流异常作用的比较后发现, 副热带高压在华南地区持续西伸是两次持

续性暴雨发生的共同大尺度环流背景; 武麦凤等^[4]在分析 2003 年渭河流域 5 次致洪暴雨的水汽场后表明: 致洪暴雨过程的水汽通道与西太平洋副热带高压的位置有着明显的相关性; 文献[5-7]也从不同角度分析了副热带高压西侧边缘发生的持续性暴雨的动力、热力、高低空急流的特征。对山东半岛的暴雨, 许多气象工作者进行了多方面研究, 得到了一些有意义的结论^[8-9], 闫淑莲等^[10]研究表明: 远距离热带低压影响下的特大暴雨落区与能量锋区有很好的对应关系, 高、低空急流对雨强的变化起决定性的作用, 周淑玲等^[11]利用 MM5 数值模拟对 2004 年 8 月 5 日发生在山东半岛的一次中- β 尺度暴雨的研究表明: 本次副高边缘的中- β 尺度暴雨的发生、发展与重力波有密切关系。以上对山东半岛暴雨的分析多数是对某一个个例的分析, 对副高边缘持续几天的暴雨研究, 由于这类事件发生的几率较少, 目前很少有人对其详细研究, 本文拟通过对山东半岛 2007 年 8 月 10—12 日的持续暴雨的诊断分析, 发现其形成原因, 提高对这种暴雨的认识。

收稿日期: 2008-04-07; 修订日期: 2009-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(40675068); 山东省气象局重点课题(2008sdqxz19)共同资助

通讯作者: 周淑玲, 女, 山东省人, 硕士, 高级工程师, 从事短期天气预报的分析和研究。E-mail: zhoushul@sohu.com

2 资料和方法

利用 NCEP/NCAR $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的 6 h 再分析资料、烟台的多普勒雷达资料、威海站加密观测降水资料、常规观测资料,采用天气学和天气动力诊断分析方法,分析这次持续性暴雨的大尺度环流特征,雷达回波特征及造成暴雨的稳定度条件、水汽条件、动力机制。

3 暴雨的空间和时间分布

2007 年 8 月 9 日 06 时—12 日 10 时(北京时间,下同)山东省各地市降水量分布不均,最大的为山东半岛东部的青岛、烟台、威海三市,降水量在 200.0 ~ 232.5 mm;日照、潍坊两市降水量分别为 144.8、137.3 mm;东营、德州、滨州三市降水量不足 20 mm;其他各市降水量在 25.8 ~ 84.4 mm;全省平均降水量为 82.7 mm。

从威海 10 日 06 时—12 日 09 时 1 h 降水变化(图 1)可知:威海市降水持续时间长,降水强度呈波动性,10 日 08 时—11 日 08 时降水主要表现为阵性降水,有时 1 h 降水强度较强,其中 10 日 14—15 时、11 日 01—02 时、05—06 时 1 h 降水都在 25 mm 以上,11 日 08 时—12 日 08 时 1 h 降水强度相对较弱,1 h 降水量比较均匀,都在 15 mm 以下。

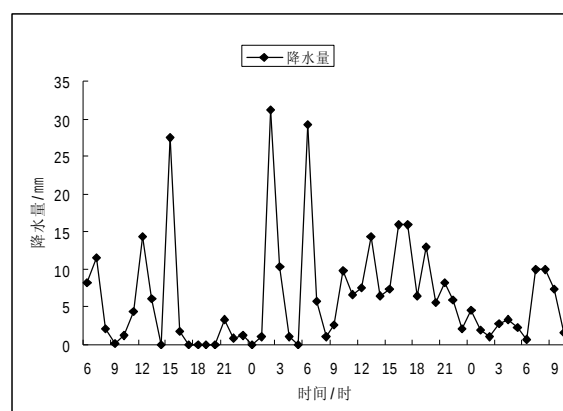


图 1 2007 年 8 月 10 日 06 时—12 日 10 时威海市 1 h 降水量(单位: mm)变化

4 大尺度环流特征

造成这次持续 3 天特大暴雨的大尺度天气形势为:高空 500 hPa 西风槽特征:9 日 20 时在蒙古到黑龙江为低涡,低涡冷槽位于蒙古东部,河套东部为一中支槽,之后两支槽缓慢东移,中支槽比北支槽移动快,10 日 08 时移到山东境内,槽前西南风逐渐增大,形成 > 20 m/s 的西南急流,山东半岛处于高空急流入口区左侧,两支槽构成阶梯槽;11 日 08 时这种形势仍维持(图 2a);12 日 08 时北支槽与中支槽合并发展,

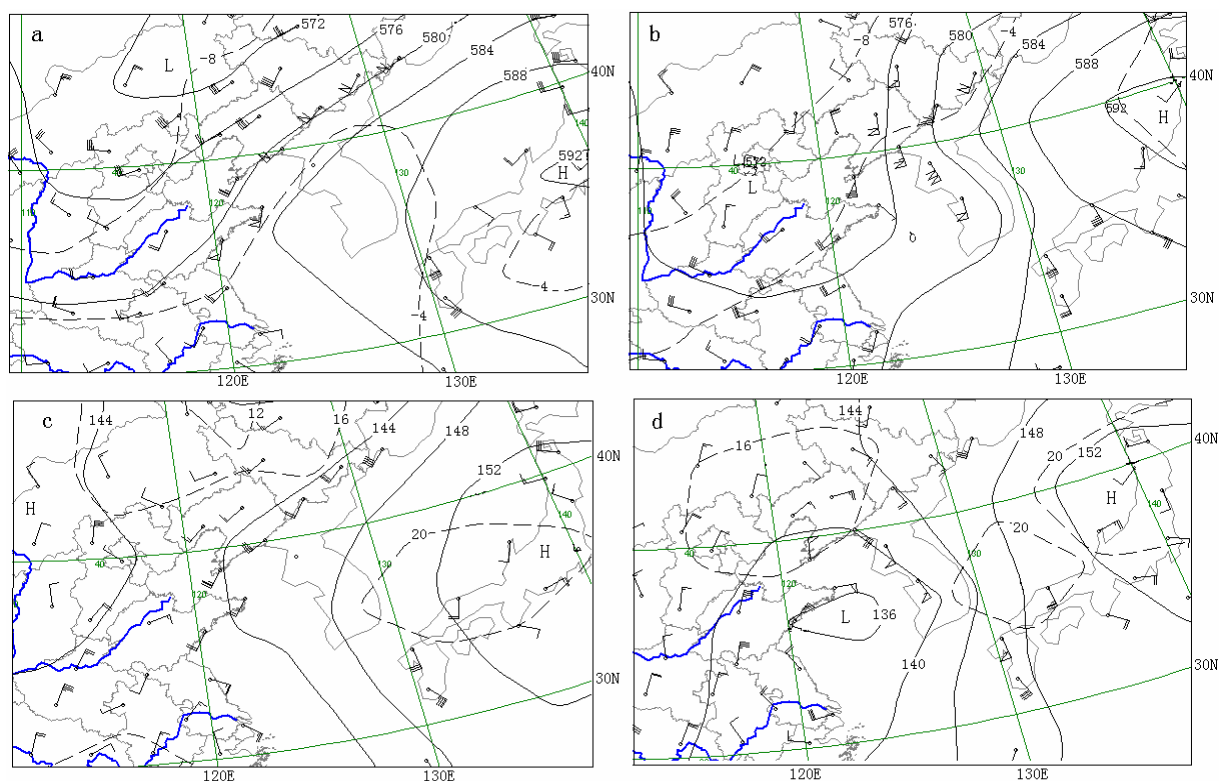


图 2 2007 年 8 月 11 日 08 时和 12 日 08 时 500 hPa(a, b)和 850 hPa(c, d)的位势高度场、温度场(实线:等高线;虚线:等温线)

在鲁西北形成弱的高空冷涡, $> 20 \text{ m/s}$ 的东南急流轴位于朝鲜半岛西海岸(图 2b), 12 日 20 时以后高空槽减弱东移。

副热带高压变化特征为: 暴雨期间, 500 hPa 图上副高中心一直维持在日本岛南部, 中心值为 592 dagpm, 稳定且稍有北移, 副高脊线呈近东西向, 副高边缘 588 dagpm 线位于日本海到朝鲜半岛, 山东半岛位于 584 dagpm 或 580 dagpm 的边缘, 这种形势使冷槽稳定少动, 并不断有冷空气侵入副高边缘。

850 hPa 低空急流变化: 暴雨期间, $> 12 \text{ m/s}$ 的低空急流沿副高边缘向北伸到山东半岛, 10 日和 11 日在山东半岛维持一东北-西南向的切变线, 西南暖湿气流到达山东半岛后产生辐合(图 2c); 12 日 08 时, 低层东海生成的低压北上到达黄海中、北部, 副高和低压之间的气压梯度增大, 朝鲜半岛西海岸形成 $> 20 \text{ m/s}$ 的东南低空急流, 随低压北上, 降水逐渐减弱, 较强降水发生在低压的北侧(图 2d)。

可见, 北支冷槽稳定少动, 不断有冷空气补充, 低层暖湿空气沿副高边缘不断输送到山东半岛, 山东半岛切变线的维持为水汽的辐合上升提供触发机制, 副热带高压中心位于日本岛南部稳定少动, 是北支槽的维持和暖湿气流输送的重要条件。

5 对流单体的雷达资料分析

选取三天中强降水的三个时次 10 日 14 时 33 分、11 日 01 时 30 分和 12 日 08 时 05 分的雷达 PPI 强度图和径向速度图分析不同时段对流单体的特征, 此三个时次威海的 1 h 降水分别为 27.5 mm、31.2 mm 和 9.9 mm。

图 3a、3d 为 10 日 14 时 33 分的 PPI 强度图和径向速度图, 在 PPI 强度图上雷达回波呈南北向的较窄带状分布, 强降水回波 $> 45 \text{ dBz}$, 最强达到 55~60 dBz, $> 55 \text{ dBz}$ 的回波呈南北向的线状; 对应的径向速度图上, 零速度等值线有两条, 一条为过雷达站为“S”形(图 3d 中箭头所示), 在第一个距离圈对应的探测范围内, 风向低层为东南风, 随高度顺时针转为西南风, 表示在雷达探测范围内有暖平流^[12], 风速从低层到高层逐渐增大, 在雷达站的东南方向, 强降水回波附近上空有 $> 20 \text{ m/s}$ 的急流; 另一条零速度线位于雷达站的西侧, 呈反“S”形(图 3d 中双箭头所示), 零速度线的结构类似冷锋锋面从西北方向靠近雷达站, 在零速度线左侧为入流的径向速度, 右侧为出流的径向速度, 该零速度线是风场的不连续线。地面图上在强降水回波附近为西北风与东北风的锋区。

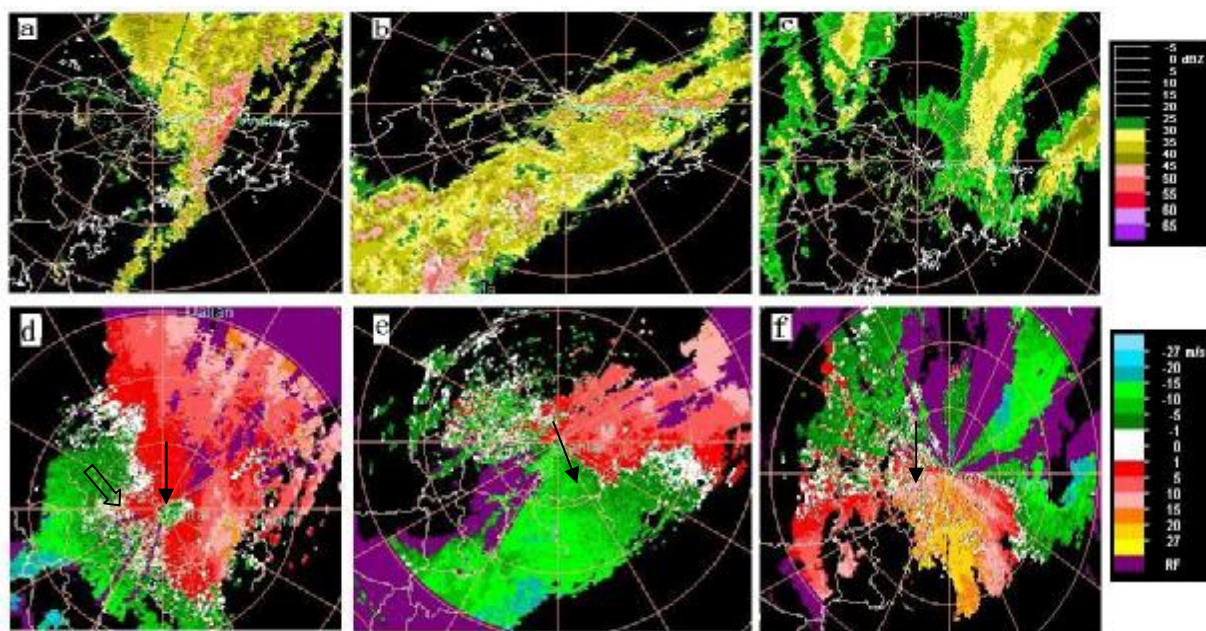


图 3 烟台雷达回波的 PPI 强度图(a, b, c)和径向速度图(d, e, f)
a, d: 10 日 14 时 33 分; b, e: 11 日 01 时 30 分; c, f: 12 日 08 时 05 分。

图 3b、3e 为 11 日 01 时 30 分的 PPI 强度图和径向速度图。在 PPI 强度图上, 雷达回波呈东北-西南向的较宽带状分布, $> 45 \text{ dBz}$ 的强回波在山东半岛北部

沿海呈东西向带状分布, 最强回波 $> 50 \text{ dBz}$, 造成威海 01—02 时和 05—06 时出现 1 h 降水分别为 31.2 mm 和 29.2 mm; 在对应的径向速度图上, 在雷达站东侧

与强回波带对应的是零速度等值线呈“S”形(图 3e 中箭头所示),第一个距离圈对应的探测范围内径向速度低层为西南风,第一个和第二个距离圈之间的探测范围内在零速度线左侧为出流的径向速度,右侧为入流的径向速度,该零速度线是风场的不连续线。地面图上在强降水回波附近为西南风与东南风的风切变线,11 日的暴雨为西南风与东南风之间的切变线造成的。

图 3c、3f 为 12 日 08 时 05 分的 PPI 强度图和径向速度图。在 PPI 强度图上,雷达回波范围较大,回波特征表现为混合性降水,最强回波在 40~45 dBz;在对应的径向速度图上,在雷达站东侧与强回波带对应的零速度等值线呈半弧状(图 3f 中箭头所示),雷达探测的径向速度低层为北风,随高度顺转为偏东风。地面图上在较强降水回波南侧为低压气旋,较强降水发生在气旋北侧。

可见,山东半岛连续三天的暴雨在雷达图上表现为三种不同的结构特征,即冷锋、切变线和低压气旋的回波特征。

6 维持机制分析

6.1 稳定度分析

由文献[9]可知:当 K 在 31~35 °C 之间时,可能出现零星雷暴, $K \geq 35$ °C 时可能产生成片雷暴, $K \geq 35$ °C 区是暴雨落区的一个指标;沙氏指数 ≤ 0 °C,可能产生雷暴,沙氏指数 ≤ -3 °C 可能产生强雷暴;定义 $\Delta Q_{se} = Q_{se850} - Q_{se500}$,当 ΔQ_{se} 为正值时说明大气层结当时处于不稳定状态,当强对流天气一旦发展后,大气中的不稳定能量就会迅速释放。计算威海市成山头探空站的稳定度指数(表 1)可知:成山头 9 日 08 时—12 日 08 时 K 指数 ≥ 35 °C,最大为 41 °C,沙氏指数 9 日 20 时—11 日 20 时都 < 0 °C,其中 9 日 20 时为 -4.5 °C,10 日 20 时为 -2.5 °C;9 日 08 时—10 日 20 时 $\Delta Q_{se} \geq 0$ °C。成山头不稳定参数表明:9 日 20 时—11 日 20 时有利于成片强雷暴、暴雨天气的发生;9 日 08 时—10 日 20 时山东半岛具备了发生强对流所需的不稳定大气层结,之后转为较稳定的大气层结。

6.2 水汽条件分析

分析 10 日 08 时—12 日 20 时 700 hPa 的 $T-T_d$ 分布可知,山东半岛东部都是 $T-T_d \leq 3$ °C,这说明暴雨维持期间山东半岛的水汽一直很充沛。以下利用 NCEP/NCAR 再分析资料分析暴雨期间相对湿度、水汽通量和水汽辐合。

分析 2007 年 8 月 9 日 08 时—13 日 02 时相对湿度的时间-高度剖面图发现:10 日 02—08 时 700 hPa 以下相对湿度 $> 90\%$,10 日 14 时后 $> 90\%$ 相对湿度的

高度不断增加,到 11 日 20 时 300 hPa 以下相对湿度均 $> 90\%$,这显示水汽条件有利于暴雨的维持。另外,在 10 日 14 时,700~500 hPa 之间和 11 日 08 时 500~400 hPa 为干冷空气,之下为暖湿空气,上干冷下暖湿的层结结构突出,有利于强对流天气的发生(图 4)。

表 1 2007 年 8 月 9 日 08 时—12 日 20 时
成山头探空站的稳定度指数

日期	K 指数/°C	沙氏指数/°C	$\Delta Q_{se}/^{\circ}\text{C}$
9 日 08 时	39	4.3	10.4
9 日 20 时	41	-4.5	11.5
10 日 08 时	39	-1.5	0.0
10 日 20 时	39	-2.5	7.2
11 日 08 时	38	-1.0	-1.4
11 日 20 时	38	-1.0	-0.1
12 日 08 时	35	1.7	-4.1
12 日 20 时	27	4.5	0.6

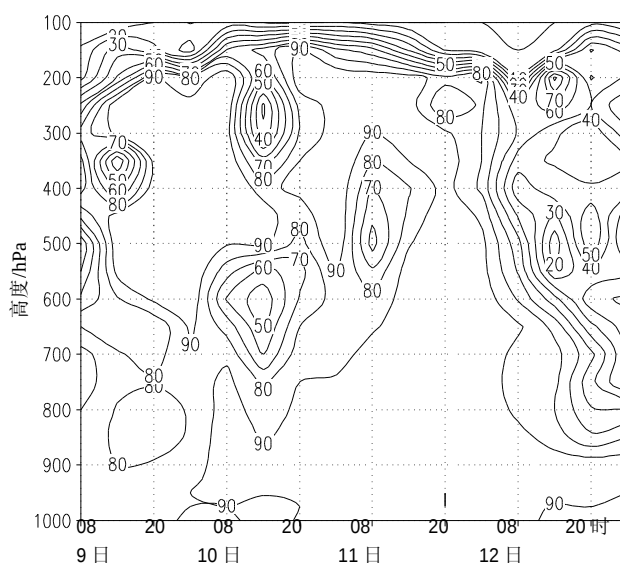


图 4 2007 年 8 月 9 日 08 时—13 日 02 时相对湿度
(单位: kg/kg)的时间-高度剖面图

对 2007 年 8 月 10 日 08 时—11 日 20 时 850 hPa 平均水汽通量(图 5a)和水汽通量散度(图 5b)分析发现,山东半岛到黄海北部为东北-西南向的明显水汽辐合,在山东半岛有 $< -3 \times 10^{-5} \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{hPa} \cdot \text{cm}^2)$ 的水汽辐合中心。水汽通量中心位于东海,其向北伸向山东半岛,山东半岛位于水汽通量前方梯度大的区域内,可见暴雨期间水汽主要来自东海,水汽输送则靠西太平洋副热带高压西侧的东南气流完成。

6.3 动力诊断分析

利用 NCEP/NCAR 再分析资料,分析了暴雨期间

850 hPa 散度和 700 hPa 垂直上升速度的水平分布特征,进一步分析了散度和垂直上升速度的时间-高度的变化特征。图 6a、6b 为 8 月 10 日 14 时和 11 日 02 时 850 hPa 水平散度场分布,可见山东半岛到黄海北部为辐合区,辐合区中心位于烟台到威海,中心值为 $-6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,这种散度场分布在暴雨期间一直维持,

有利于水汽和能量在山东半岛辐合,上升。图 6c、6d 为 8 月 10 日 14 时和 11 日 02 时 700 hPa 垂直上升速度,与低层 850 hPa 辐合区相对应的为上升运动,上升运动中心值为 -1.5 Pa/s ,其与 850 hPa 散度辐合中心重合。这种散度场与上升运动场的配合,使对流发展、加强。

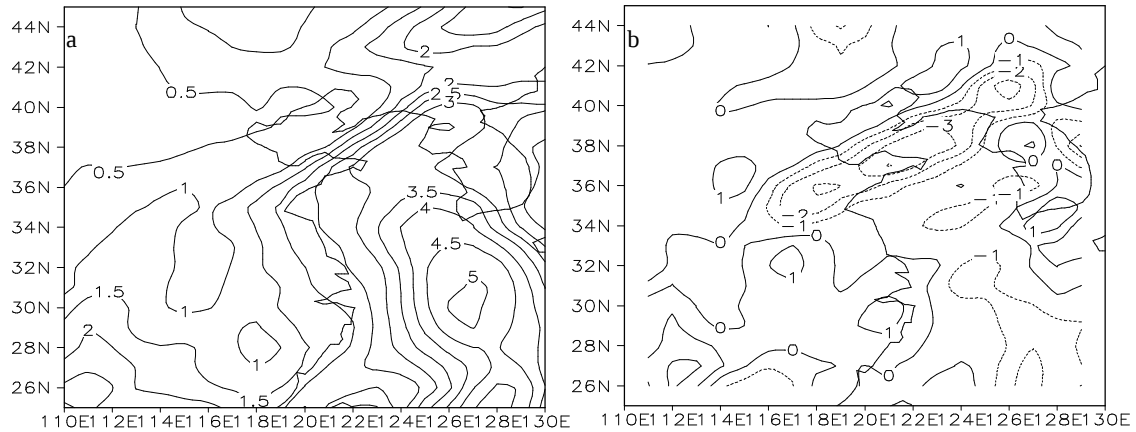


图 5 2007 年 8 月 10 日 08 时—11 日 20 时 850 hPa 平均水汽通量(a, 单位: $\text{g}/(\text{s} \cdot \text{hPa} \cdot \text{cm})$)
和水汽通量散度(b, 单位: $10^{-5} \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{hPa} \cdot \text{cm}^2)$)

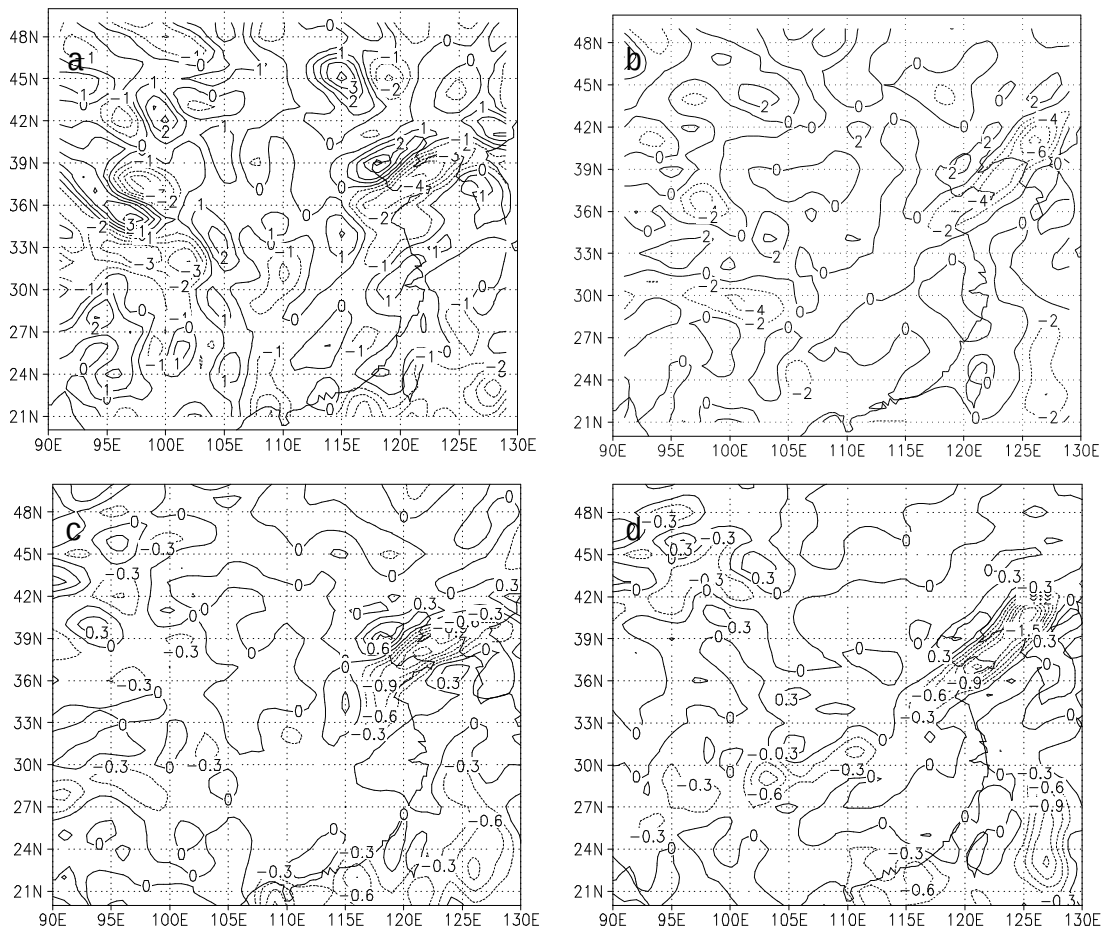


图 6 2007 年 8 月 10 日 14 时和 11 日 02 时 850 hPa 散度(a、b, 单位: 10^{-5} s^{-1})和
700 hPa 垂直上升速度的水平分布(c、d, 单位: Pa/s)

分析 9 日 08 时—13 日 02 时暴雨中心附近(37°N , 122°E)水平散度的时间-高度剖面图(图 7a)。10 日 08 时—12 日 08 时为低层辐合、高层辐散,辐合主要发生在 800 hPa 以下,950 hPa 附近有较强辐合,最强的低层辐合是 10 日 14 时、11 日 02 时、11 日 20 时—12 日 02 时,10 日 400 hPa 以上、11—12 日 500 hPa 以上为高空辐散。散度场的时间-高度垂直剖面变化反映了暴雨持续发生时 800 hPa 以下为辐合,500 hPa 以上为辐散。

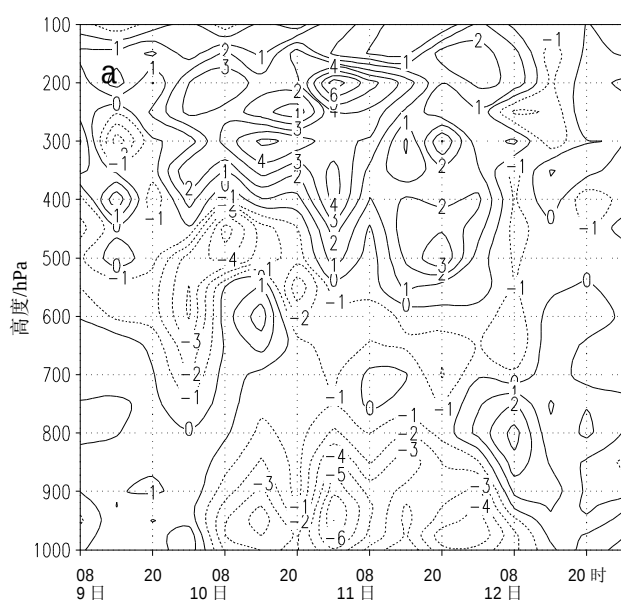


图 7b 是 9 日 08 时—13 日 02 时暴雨中心附近(37°N , 122°E)垂直上升速度时间-高度剖面图。图中垂直上升运动时段是 10 日 08 时—12 日 08 时,高度在 200 hPa 以下,10 日 14 时、11 日 20 时有较强上升运动,最强的为 11 日 02 时,中心值达到 -1.4 Pa/s ,位于 700 ~ 500 hPa 之间,对应的 1 h 降雨量最大,威海为 31.2 mm。可见,暴雨发生时存在较强垂直上升运动,使对流天气得以发展和维持;上升速度的强弱与对流天气的强弱有关,对流顶最高可达到 200 hPa。

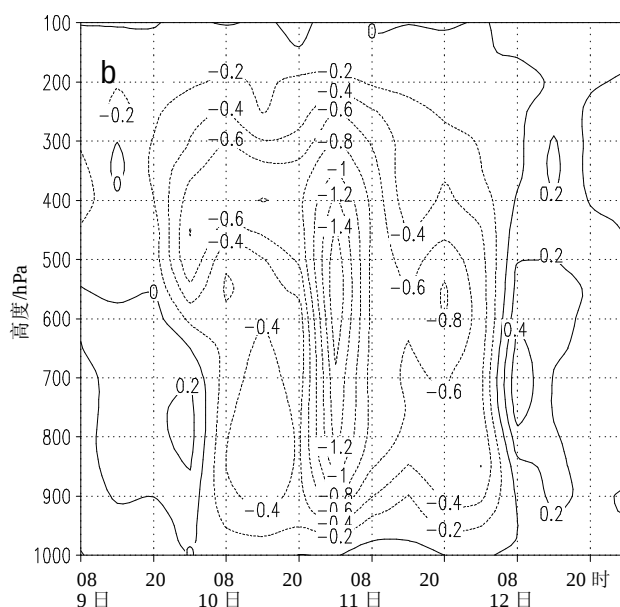


图 7 2007 年 8 月 9 日 08 时—13 日 02 时暴雨中心附近(37°N , 122°E)水平散度的时间-高度剖面图(a, 单位: 10^{-5} s^{-1})和垂直上升速度的时间-高度剖面图(b, 单位: Pa/s)

7 小 结

(1) 持续性暴雨发生的有利大尺度环流为副热带高压中心位于日本岛南部且稳定少动,华北北支冷槽不断有冷空气补充南下,山东半岛维持切变线或低压环流。持续暴雨天气在雷达图上表现为三种不同的结构特征,即冷锋、切变线和低压气旋的回波特征,最强降水回波强度 $> 50 \text{ dBz}$,其径向速度的零速度线的走向不同,但都表现为暖平流。

(2) 持续性暴雨发生前期,不稳定的大气层结一直维持,在 10 日 14 时,700 ~ 500 hPa 之间和 11 日 08 时 500 ~ 400 hPa 为干冷空气,之下为暖湿空气,上干下暖湿的层结结构突出;沿副高边缘东南气流将东海的水汽不断输送到山东半岛并在此形成水汽辐合;暴雨区散度场为 800 hPa 以下为辐合,500 hPa 以上为辐散,暴雨发生时存在较强垂直上升运动,使对流天气得以发展和维持,上升速度的强弱与对流天气的强弱有关,对流顶最高可达到 200 hPa。

参 考 文 献:

- [1] 陶诗言, 卫捷. 再论夏季西太平洋副热带高压的西伸北跳[J]. 应用气象学报, 2006, 17(5): 513-525.
- [2] 姜丽萍, 尤红, 夏冠聪, 等. 广东罕见特大致洪暴雨形成机理个例分析[J]. 气象科技, 2007, 35(3): 374-378.
- [3] 鲍名. 两次华南持续性暴雨过程中热带西太平洋对流异常作用的比较[J]. 热带气象学报, 2008, 24(1): 27-36.
- [4] 武麦凤, 王旭仙, 孙健康, 等. 2003 年渭河流域 5 次致洪暴雨过程的水汽场诊断分析[J]. 应用气象学报, 2007, 18(2): 225-231.
- [5] 熊文兵, 李江南, 姚才, 等. “05.6”华南持续性暴雨的成因分析[J]. 热带气象学报, 2007, 23(1): 90-97.
- [6] 施望芝, 郭施, 金琪, 等. 2002 年湖北两场连续暴雨综合诊断分析[J]. 热带气象学报, 2004, 20(5): 609-616.
- [7] 金荣花, 矫梅燕, 徐晶, 等. 2003 年淮河多雨期西太平洋副高活动特征及其成因分析[J]. 热带气象学报, 2006, 22(1): 60-66.
- [8] 于希里, 闫丽凤. 山东半岛北部沿海强对流云团与局地暴雨[J]. 气象科技, 2001, 29(1): 39-41.
- [9] 曹钢锋, 张善君, 朱官忠, 等. 山东天气分析与预报[M]. 北京: 气象出版社, 1988: 156-209.
- [10] 闫淑莲, 周淑玲, 李宏江. 远距离热带低压影响下山东半岛特大暴雨成因分析[J]. 热带气象学报, 2008, 24(1): 81-87.
- [11] 周淑玲, 吴增茂. 山东半岛一次中 β 尺度暴雨的数值模拟分析[J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35(6): 900-906.
- [12] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.

ANALYSIS OF MAINTAINING MECHANISMS OF PERSISTENT SEVERE HEAVY RAIN EVENTS IN SHANDONG PENINSULA FROM 10 TO 12 AUGUST 2007

ZHOU Shu-ling, YAN Shu-lian, ZHANG Can

(Weihai Meteorological Office, Shandong Province, Weihai 264200, China)

Abstract: An analysis of the characteristics and maintaining mechanisms of a persistent heavy rain event that occurred in Shandong Peninsula from 10 to 12 August 2007 was undertaken using Doppler radar data, conventional observations and NCEP / NCAR reanalysis data. The results show that the persistent heavy rain was related to a stable subtropical anticyclone and the intrusion of cold air on the west side of the subtropical anticyclone. The Doppler radar data show that the reflectivity of the heavy rainfall was more than 50 dBz on the 10th and 11th, and from 40 to 45 dBz on the 12th. In the velocity field, the wind vectors reveal the presence of warm advection. The heavy rainfall event was closely related with unstable conditions. Sufficient amount of water vapor over the Shandong Peninsula was transferred by a low-level southeasterly jet along the west side of the subtropical anticyclone, which was advantageous to the maintenance of the heavy rain in Shandong Peninsula. The heavy rainfall that caused floods was characterized dynamically by the observed convergence in lower troposphere and divergence in upper troposphere. The ascending branch of the vertical motion maintained with the heavy rainfall.

Key words: synoptic meteorology; diagnostic analysis; persistent heavy rainfall; maintaining mechanisms; Shandong Peninsula; Doppler weather radar echo