

孙兴池. 地面倒槽暴雨的形成机制研究[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(3): 39-46.
Sun Xingchi. Study on the formation mechanism of rainstorms associated with surface inverted troughs [J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(3): 39-46. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.03.005. (in Chinese)

地面倒槽暴雨的形成机制研究

孙兴池

(山东省气象台, 山东 济南 250031)

摘要: 应用常规观测资料、NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料, 分析山东不同天气类型的暴雨过程, 发现在有冷暖空气相互作用的锋面过程中, 地面倒槽顶部是首要的暴雨落区。地面倒槽暴雨的形成机制为: 1) 地面倒槽与 850 hPa 水汽辐合中心相吻合。2) 地面倒槽的形成是低层暖平流作用的结果, 地面倒槽的东南风一侧, 为低层暖平流中心, 暖平流导致暖锋前负变压明显, 形成地面倒槽。3) 地面倒槽为冷空气和暖湿气流交汇区, 在其经向剖面上, 可见整个对流层具有冷锋完整的热力、动力空间结构特征。后倾槽时, 锋面抬升作用导致强上升运动出现在锋后, 暴雨趋向于出现在倒槽后部东北气流中。前倾槽时, 强上升运动区与向上凸起的 θ_e 舌状高值区吻合, 潜在不稳定能量释放产生暴雨, 暴雨区位于倒槽附近。

关键词: 地面倒槽; 形成机制; 暴雨落区

中图分类号: P458.1211 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2018)03-0039-08

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.03.005

Study on the formation mechanism of rainstorms associated with surface inverted troughs

SUN Xingchi

(Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China)

Abstract Based on conventional observation data and NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ reanalysis data, rainstorm processes of different weather types in Shandong are analyzed. It is found that rainstorm areas mainly appear at the top of surface inverted troughs on the front surface when warm and cold air interact with each other. The formation mechanism of rainstorms associated with inverted troughs is as follows. 1) The surface inverted trough is consistent with the water vapor convergence center at 850 hPa. 2) The surface inverted trough results from lower warm advection, whose center is located at the southeast wind side of the surface inverted trough. The warm advection causes obvious katalobar ahead of the warm front, which leads to the formation of the surface inverted trough. 3) The surface inverted trough lies where cold air meets warm and wet air current. On the meridional cross-section, the whole troposphere is characterized by complete, thermal, and dynamic space structure as the cold front. For the backward-tilting trough, the front lift results in strong ascending motion behind the front. As a result, rainstorms tend to appear in the northeast air current at the back of the trough. For the forward-tilting trough, the strong ascending motion area is consistent with the tongue-like area of high θ_e , and the inverted trough front triggers the release of potential unstable energy, resulting in rainstorms associated with the inverted trough.

Key words surface inverted trough; formation mechanism; rainstorm area

收稿日期: 2018-03-13; 修订日期: 2018-03-30

基金项目: 山东省气象局重点科研项目(2012sdqxz04)

作者简介: 孙兴池, 女, 研究员级高级工程师, 主要从事天气预报工作, sdqxst@163.com。

引言

降水预报是天气预报的核心,目前,数值模式对5天之内的天气形势(500 hPa 高度场)预报准确率较高,拟合率在95%以上,但对天气现象的预报准确性较差,尤其是对不连续天气现象的预报具有很大的不确定性。降水预报一直是气象业务和科研人员研究的重点,而由于暴雨的定点预报难度大,因而是天气研究的重中之重。一般认为低空急流的前方、低涡的东南象限、副热带高压边缘的588~584 dagpm 之间等,可能是暴雨落区,但从天气形势上预报是暴雨、大暴雨还是特大暴雨过程还是非常困难的,因此还必须对构成降水的主要因子进行分析^[1]。

在降水预报中,天气形势、低空急流和动力、温湿条件一直是关注重点。但由于地面资料具有更精细的时空分辨率,加强对地面资料的应用,深入研究雨量中心或暴雨落区相对于地面气压场的位置,能够提高降水短期预报的精细化程度。

按照以地面形势为主,兼顾高空形势的划分原则,把造成山东大范围降水的天气系统分为温带气旋、低槽冷锋、台风及中低纬度系统相互作用和低涡切变线四类。其中,因为低涡和切变线能够互相转化,低涡总是在切变线上移动,低涡减弱时可能转变为切变线,两者密不可分,因而把低涡和切变线划分为一类。

很多暴雨过程的天气系统都表现为500 hPa 高空槽以及700 hPa 和850 hPa 的低涡切变线,“北槽南涡”是华北暴雨的主要影响系统^[2],当斜压性强时可能是地面冷锋,或形成温带气旋,在斜压性弱但湿斜压性强时,可能表现为地面倒槽或静止锋,影响系统划分为低涡切变线类。低涡切变线类天气系统可能有地面静止锋配合,也可能与锋面无关。在四类降水天气系统中,仅仅低涡切变线类可能与锋面无关,而多数的降水系统都与地面锋面有关(包括静止锋),冷、暖空气相互作用是形成暴雨的重要机制之一。“1410”号台风“麦德姆”影响山东和辽宁时,强降水落区与台风低层冷、暖平流活动密切相关,冷暖平流交汇之处锋生明显,对强降水有较好指示作用^[3],郭英莲等^[4]指出中层锋生有利于对流不稳定的发生,低层锋生有利于水汽输送和辐合抬升。

在地面冷锋或静止锋影响时,由于冷锋前的暖区上空有暖平流,引起地面降压^[5],易形成锋前低压,因而在与锋面有关的大范围暴雨过程中,往往

存在地面低压,研究降水中心相对于地面低压中心的分布,能够弥补高空资料时空分辨率不足的问题。

在有冷锋影响时,地面倒槽的尖端处最容易产生暴雨,而处于正槽内的冷锋则很少出现暴雨^[6]。在实际业务中,我们发现无论哪一类天气系统影响时,如果伴随地面倒槽,则降水的范围大、强度强。比如,在低槽冷锋过程中,如果没有倒槽出现,雨带窄,且强降雨分散。温带气旋的暴雨落区也多出现在气旋中心北侧的倒槽上。登陆山东的台风,往往出现空心结构,在台风中心北侧的倒槽上产生强降雨,而台风中心登陆时反而是和风细雨,主要降水已经结束了。出现地面倒槽,在旱季,是可能产生明显降水的信号,在雨季,则可能是产生暴雨的信号。例如造成重大人员伤亡的2012年7月21日北京大暴雨过程中,对流层中低层深厚的低涡系统和地面的低压倒槽辐合区为暴雨发生提供了动力抬升条件^[7]。

本文选取山东温带气旋、低涡切变线、低槽冷锋和台风四类重大暴雨过程个例,利用常规观测资料、NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料,深入研究暴雨落区相对于地面倒槽的位置,揭示地面倒槽的降水机制,可对雨量中心或者暴雨落区的预报提供参考。

1 山东几次重大降水过程的暴雨落区与地面倒槽

1.1 2013年5月26日温带气旋过程

2013年5月26—27日,受强烈发展的黄淮气旋影响,山东出现了较为罕见的强降水过程,全省平均降水量达60.4 mm,暴雨区位于鲁南、鲁中南部和山东半岛南部。其中,鲁中南部、鲁南地区多地24 h 降水量突破历史同期极值,大暴雨区集中出现在鲁南地区,日照降水量最大,为204.1 mm。

图1给出了本次过程相应时刻6 h 雨量 ≥ 25 mm雨区与气旋中心的关系(图1a、b、c),可见,强降水出现在气旋中心的北侧,即位于倒槽顶端的偏东风中,气旋中心及以南地区雨量则较小。

1.2 2010年7月19日低涡切变线过程

2010年7月19—21日,受低涡切变线影响,鲁西北地区出现大暴雨,全省平均雨量55.1 mm,乐陵雨量最大,为204 mm。经向切变线影响华北的时段主要在19日白天到夜间,此阶段地面有静止锋配合。由图2可见,19日白天,位于地面倒槽顶部的鲁西北地区出现暴雨,局部大暴雨。其中,乐陵08—14时6 h 雨量68 mm,14—20时6 h 雨量135 mm。

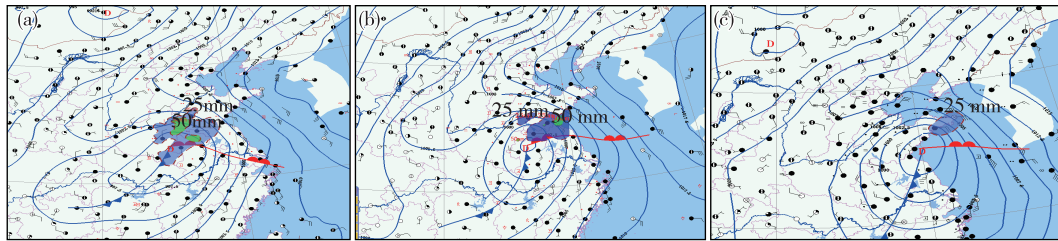


图1 地面倒槽与强降水落区分布(a.2013年5月26日14时,b.2013年5月26日20时,c.2013年5月27日08时;填色区为6h雨量 ≥ 25 mm雨区)

Fig.1 Distribution of surface inverted troughs and rainstorm areas (a. 14:00 BST on 26, b. 20:00 BST on 26, c. 08:00 BST on 27 May 2013; colored area: rainfall amount in 6 h ≥ 25 mm)

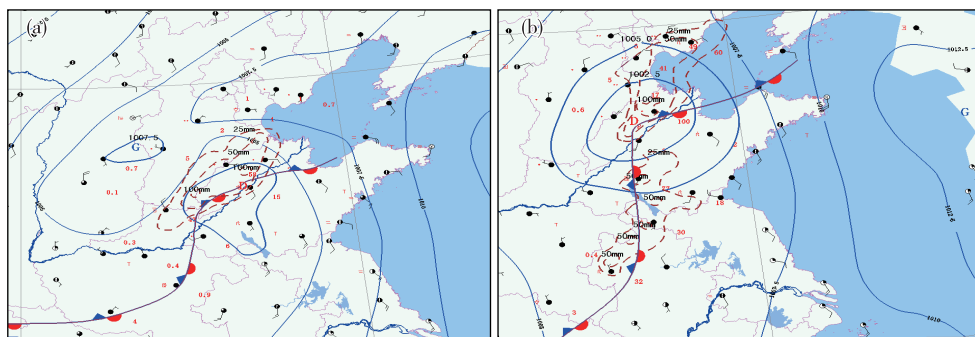


图2 2010年7月19日14时(a)和20时(b)地面形势(虚线:6h降雨量 ≥ 25 mm雨区)

Fig.2 Surface synoptic charts at 14:00 BST (a) and 20:00 BST (b) on 19 July 2010 (dashed line: rainfall amount in 6 h ≥ 25 mm)

1.3 2014年7月25日“麦德姆”台风过程

台风进入中纬度以后,降水常出现明显非对称分布,像“1210”号台风“达维”强降水偏于东部象限,与台风本身的非对称结构相关^[8]。“1410”号台风“麦德姆”是近年来对山东影响较大的一个台风,其在福建登陆后一路北上进入黄海,再次登陆山东半岛,造成半岛地区普降大暴雨,一举解除了当年山东半岛的严重旱情。降水主要集中在7月25日,

此次过程全省平均雨量为50.9mm,最大降水量莱西240.8mm。由图3可见,25日14时,台风位于青岛沿海,即将在山东半岛再次登陆时,其主要云系和暴雨区位于台风倒槽处,台风中心以南云系分散,降雨量较小,因而,台风中心登陆半岛时,暴雨已经结束。认识倒槽降水的机制和重要性,有助于预报提前出现的暴雨区。

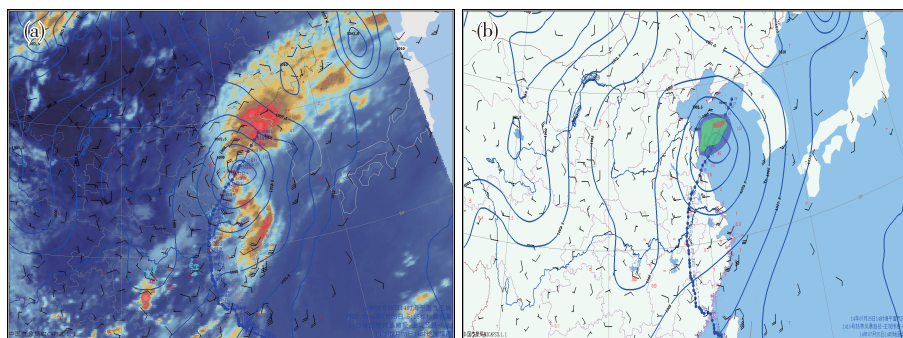


图3 2014年7月25日13:15卫星云图(a;叠加了14时地面形势)与14时地面形势(b;填色区为6h降雨量 ≥ 25 mm雨区,红色为 ≥ 100 mm雨区)

Fig.3 Satellite imagery (a; superimposed on the surface synoptic chart at 14:00 BST) at 13:15 BST and surface synoptic chart (b; colored area: rainfall amount in 6 h ≥ 25 mm, red area: rainfall amount in 6 h ≥ 100 mm) at 14:00 BST on 25 July 2014

1.4 2007年7月18日低槽冷锋过程

低槽冷锋暴雨次数虽然多,但大多是局部零星出现^[6],郑丽娜等^[9]普查了2000—2009年山东所有暴雨个例发现,低槽冷锋型暴雨过程共有39例,其中有低涡或低空急流配合的15例。当副热带高压势力强,脊线稳定在23~28°N之间或有低涡、低空急流伴随时,可能造成大范围暴雨。

2007年7月18日,较强冷空气侵入地面热低压,造成山东大范围暴雨,全省平均雨量为61.6 mm,其中,鲁西北、鲁中北部、山东半岛地区出

现大暴雨。18日14时,冷锋开始影响鲁西北,此时暴雨区位于地面倒槽顶部的偏北风中(图4a)。之后,锋面快速移动,触发锋前暖空气上升,锋前出现暴雨,18日20时,6 h暴雨区分布在锋面两侧的倒槽附近(图4b)。

以上四次过程中,强降水都发生在地面倒槽附近,低压中心南侧的正槽附近普遍降水偏弱,或仅出现零散的暴雨区。因此,在冷暖空气相互作用的降水过程中,地面倒槽对暴雨落区有很好的指示性。

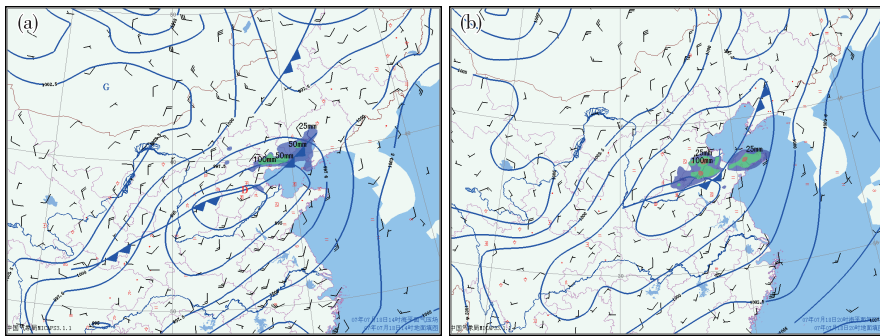


图4 2007年7月18日14时(a)与20时(b)地面形势(填色区为6 h降雨量 ≥ 25 mm雨区,红色为6 h降雨量 ≥ 100 mm雨区)

Fig.4 Surface synoptic charts at 14:00 BST (a) and 20:00 BST (b) on 18 July 2007 (colored area: rainfall amount in 6 h ≥ 25 mm, red area: rainfall amount in 6 h ≥ 100 mm)

1.5 地面倒槽的形成与冷锋侵入

冷锋前常出现一种锋前热低压^[5],由于西南低空急流的暖平流输送,引起地面气压下降,西南倒槽发展,最终形成低气压^[6],当暖平流强时,地面低气压,气压场表现为闭合的、庞大的低压区,地面庞大的低气压是强暖湿气流的标志。

当锋面进入热低压时,可能堵塞消失或转为温带气旋^[5]。在以上四个个例中,2007年7月18日济南大暴雨过程即为冷锋进入热低压引起MCC发展,热低压堵塞减弱,影响系统归类为低槽冷锋过程,降水持续时间短但伴有短时强降水和雷暴等剧烈天气现象。2013年5月26日温带气旋过程,则是冷锋进入热低压转为温带气旋,降水持续时间长,累计降水量大,一般会造成大范围暴雨。在冷空气势力弱的雨季,湿斜压性强,2010年7月19日鲁西北大暴雨过程弱冷空气进入地面热低压演变为静止锋,850 hPa为低涡,归类为低涡切变线过程。2014年7月25日,冷空气侵入台风北侧,形成台风倒槽暴雨。以上四次过程,虽然归类为不同的影响系统,但都是冷锋与地面低压相互作用,降水的形成都是冷(干)和暖(湿)空气相互作用的结果。

锋面侵入热低压时,并非低压的各个部位都有均匀的降水,低压中心北侧倒槽是首选的强降水区。

2 地面倒槽与低层热力、动力条件的配置

2.1 地面倒槽与850 hPa水汽辐合区

除了高温高湿的雨季,没有低空急流也可能产生暴雨外,低空急流与大部分暴雨过程有关,以上四次暴雨过程都有低空急流,从地面气压场与850 hPa风场的配置(图5)可见,地面低压右侧为大范围西南气流,这支西南气流使地面降压形成低气压,而左侧为弱北风。当冷空气侵入热低压时,水汽辐合并非在地面低压的各个部位均匀分布,而是与冷空气入侵的位置、周围系统的影响^[10]、低空急流的位置及急流轴上风速的脉动有关。但是,在倒槽顶部,总是存在水汽辐合大值区(图5a、b、c、d蓝色椭圆处),此处位于低空急流前方,是暖湿气流和冷空气交汇处,因此,地面倒槽顶端是首要的暴雨落区。如2013年5月26日温带气旋过程,暴雨集中在地面倒槽顶部,其他部位没有暴雨。2014年7月25日台风“麦德姆”影响过程,台风进入中纬度以后,逐渐转为空心结构,暴雨出现在与冷空气迎

合的地面倒槽附近,台风中心登陆山东半岛时仅为小雨。

在地面低压的其他部位,并非没有暴雨,比如2010年7月19日,当冷空气带来的干侵入到达暖输送带上空时,潜在对流不稳定能量释放,造成了暖区(兖州)暴雨^[11]。暖区暴雨动力条件较弱,预报难度大,需要预报员加强关注。

除了由冷暖空气辐合造成倒槽顶部的水汽辐合区,在热低压前部的暖输送带上,存在弱水汽辐合区(图5),究其原因,可能由于低空急流中的风速脉动导致暖输送带上出现弱水汽辐合区,而强风速中心沿急流轴向下游传播,即沿低空急流轴传播的

中尺度风速脉动或风速最大值对天气的影响,甚至比低空急流本身更重要^[12]。在2007年7月18日济南大暴雨过程中,18日14时,山东受暖输送带上的水汽辐合区影响(图5d),鲁西北东部、鲁中和山东半岛为大于 $-2 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{ cm}^{-2} \cdot \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{ s}^{-1}$ 水汽辐合区,14—20时,这一带出现了大范围暴雨,局部大暴雨。因此,虽然水汽辐合比其他三次过程明显偏小,但全省平均雨量是四次过程中最大的,且伴随短时强降水、雷暴等剧烈天气现象,此次过程是盛夏季节伴有低空急流的前倾槽过程,冷锋触发了潜在对流不稳定能量释放造成暖区暴雨,暴雨分布在锋面附近,偏于低压中心的北侧。

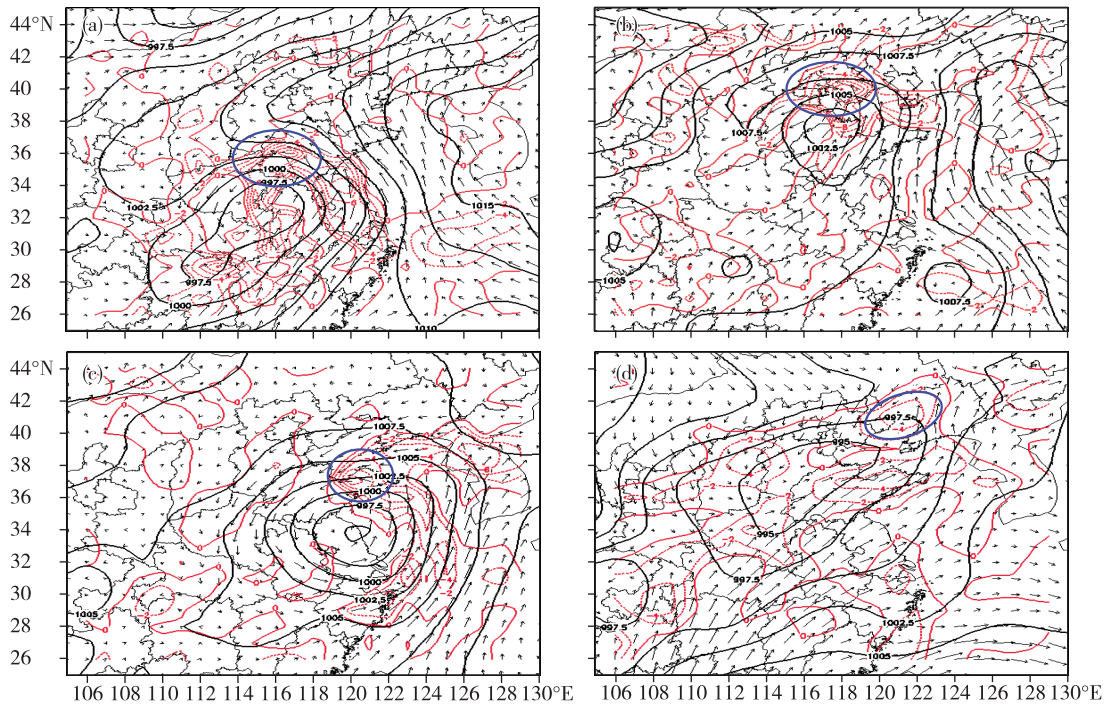


图5 地面气压场与850 hPa风场和水汽通量散度(红虚线为水汽通量散度,单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{ cm}^{-2} \cdot \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{ s}^{-1}$; a. 2013年5月26日14时, b. 2010年7月19日20时, c. 2014年7月25日08时, d. 2007年7月18日14时)

Fig.5 Surface pressure field & wind field and vapour flux divergence field (red dotted line, units: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{ cm}^{-2} \cdot \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{ s}^{-1}$) at 850 hPa (a. 14:00 BST on 26 May 2013, b. 20:00 BST on 19 July 2010, c. 08:00 BST on 25 July 2014, d. 14:00 BST on 18 July 2007)

强对流暴雨中,弱水汽辐合可能产生强降水,主要因为夏季副热带高压边缘高温高湿时,大气整层水汽含量高,弱辐合导致潜在不稳定能量释放,产生暖区暴雨,前倾槽是有利的环流形势。对2000—2011年472个暴雨日的统计发现^[13],山东暴雨物理量指标具有明显季节特征,春秋两季的暴雨出现时水汽、热力条件低,而动力因子强;盛夏季节暴雨发生时温湿条件好,对流不稳定强,但斜压性弱,因而动力条件弱。

2.2 地面倒槽与850 hPa温度平流

暖平流强度与暖锋锋生密切相关,暖锋锋生时往往在700 hPa或850 hPa上有暖式切变,这类暖切变一般出现在低层低涡的前部,切变线南部有较强的偏南风,且有温度脊配合,在较强的暖平流作用下,促使温度梯度加大,造成暖锋锋生^[5]。由于暖锋前有暖平流,为负变压,即暖锋的北侧为负变压,暖锋锋生时,暖锋前负变压加强,暖锋是通过地面气旋中心的,暖锋的北侧位于地面低压中心的东北象限,在地面上,即表现为地面倒槽的加强。

暖平流导致地面热低压形成,但暖平流的强度并非围绕地面低压中心均匀分布。图6给出了地面倒槽上850 hPa温度平流的分布,可见,四次过程中,地面倒槽的东南风一侧是暖平流最强的位置,而倒槽的东北风一侧为冷平流,可见倒槽是冷暖空气交汇的锋生地,对强降水有很好的指示作用^[3]。

2013年5月26日温带气旋过程、2010年7月19日低涡切变线过程、2014年7月25日台风“麦德姆”过程,皆为后倾槽形势,暖平流十分强盛,倒槽顶部均为强暖平流中心(图6a、b、c),而2007年7月18日过程,为前倾槽形势,且正处于盛夏高温高湿阶段,暖平流较弱,冷空气触发的暴雨区最先出现在倒槽顶部,

之后,由于潜在不稳定能量释放,冷锋云系发展成为MCC,锋面附近出现了大范围暴雨区。

当冷空气入侵地面热低压时,地面低压北侧、西侧出现冷平流,北侧入侵的冷空气,在地面倒槽上与强暖平流相互作用,是暴雨首先发生的区域。低压中心西侧入侵的冷空气,形成锋面云系,可能产生分散的暴雨区,或者由于潜在对流不稳定释放,产生暖区暴雨。

总之,在温带气旋、冷锋、静止锋等锋面过程中,常存在地面低压,地面倒槽的降水一般比正槽降水量级大、范围广,台风北上进入中纬度时,往往出现空心结构,暴雨也常常集中在地面倒槽处。

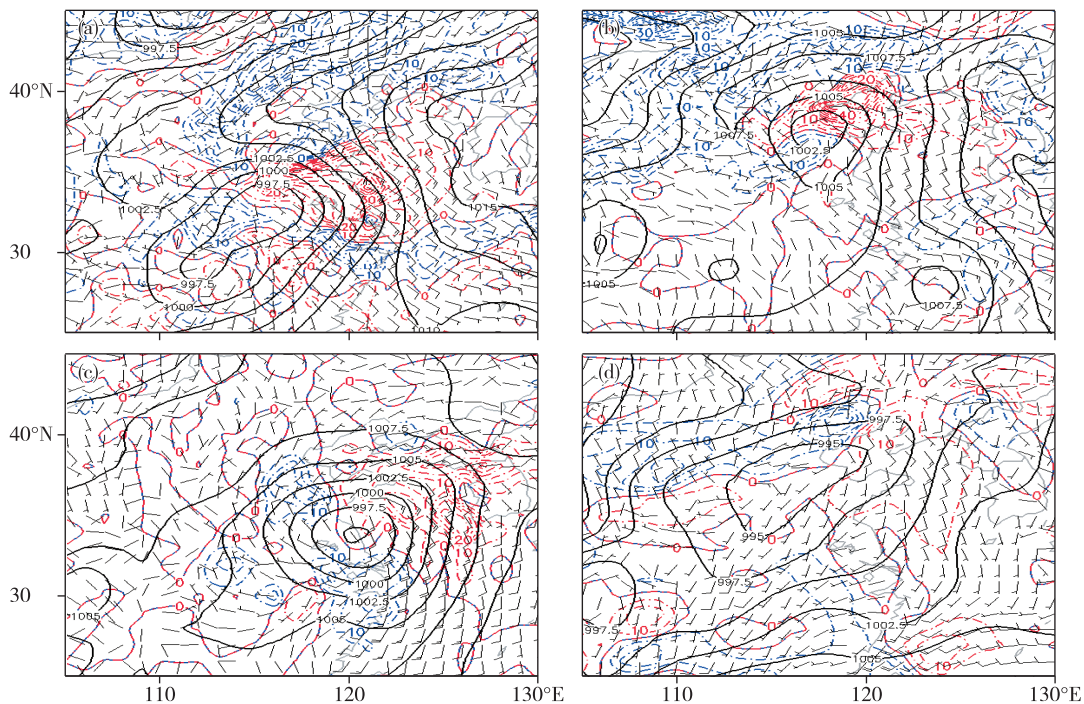


图6 地面气压场(黑实线,单位:hPa)、风场(风杆)与850 hPa温度平流(虚线,单位: $10^{-5} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$,蓝色为冷平流,红色为暖平流;a. 2013年5月26日14时,b. 2010年7月19日20时,c. 2014年7月25日08时,d. 2007年7月18日14时)

Fig.6 Surface pressure field (black line, units: hPa) and wind field (wind shaft) & temperature advection (dashed line, units: $10^{-5} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$, cold advection in blue, warm advection in red) at 850 hPa (a. 14:00 BST on 26 May 2013, b. 20:00 BST on 19 July 2010, c. 08:00 BST on 25 July 2014, d. 14:00 BST on 18 July 2007)

3 地面倒槽和经向垂直剖面

暴雨与充分的水汽供应、850 hPa水汽辐合、强上升运动和深厚的湿层有关。以上分析表明,地面倒槽顶端是暖平流中心所在区域,也是水汽辐合大值区,同时也是与冷空气交汇的锋生地。通过地面倒槽的垂直剖面图可以看到倒槽上热力、动力的空间结构特征。

四次过程中位于倒槽上的6 h最大暴雨点分别

为2013年5月26日14时嘉祥($116.4^\circ \text{E}, 35.5^\circ \text{N}$)6 h雨量75 mm, 2010年7月19日14时山东临邑($116.9^\circ \text{E}, 37.2^\circ \text{N}$)6 h雨量108 mm, 2014年7月25日08时福山($121.3^\circ \text{E}, 37.5^\circ \text{N}$)6 h雨量83 mm, 2007年7月18日19时济南($117.0^\circ \text{E}, 36.6^\circ \text{N}$)1 h雨量81.6 mm。分别制作四次过程嘉祥、临邑、福山、济南距最大降雨时段最近资料的经向剖面图(图7),可见,四次过程都存在自上而下的相当位温(θ_e)密集区,即锋区所在,锋区内等温线向冷区下

凹,具有冷锋特征。地面东南风和东北风交汇处是地面倒槽的位置,为 θ_e 密集区,即地面倒槽是北方冷空气和南方暖湿气流的交界面。在对地面形势的分析中,通常分析地面气旋中心南侧的冷锋和东侧的暖锋,而地面倒槽附近的热力动力空间结构分析是被忽视的,对多次暴雨个例分析表明,冷锋完整的空间结构常出现在通过地面倒槽的经向剖面

上^[9-11,14-15],表现为自下而上的 θ_e 密集区,等温线在锋区内下凹,经过冷气团时出现折角。本文分析的四次过程亦如此,整个对流层存在 θ_e 密集区,低层锋区内温度垂直梯度很小^[5],在高层转为向冷区倾斜,地面锋区附近有东南风和东北风的风向转变,即地面倒槽对应地面锋区,锋面的触发抬升作用导致倒槽附近常出现强上升运动,从而产生暴雨。

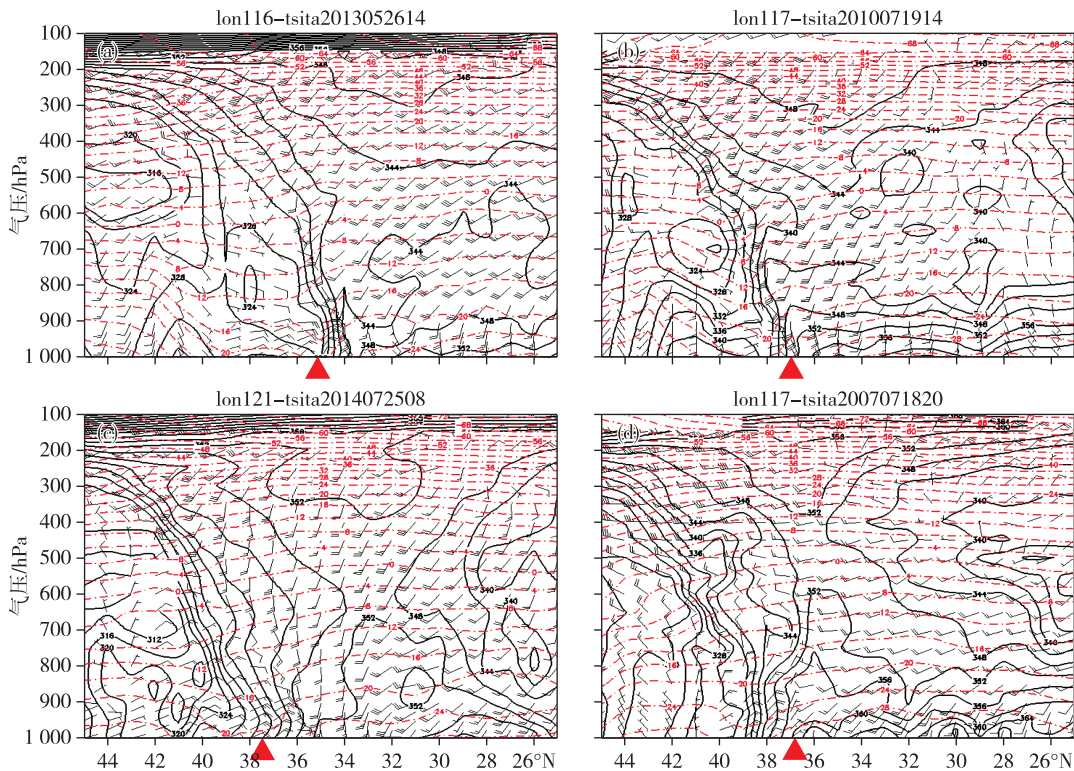


图7 经过地面倒槽的经向剖面图(a. 2013年5月26日14时, b. 2010年7月19日14时, c. 2014年7月25日08时, d. 2007年7月18日20时;相当位温,实线,单位:K;温度,点划线,单位:°C;红色三角为暴雨中心)

Fig.7 Meridional cross-section diagram along surface inverted troughs (a. 14:00 BST on 26 May 2013, b. 14:00 BST on 19 July 2010, c. 08:00 BST on 25 July 2014, d. 20:00 BST on 18 July 2007; equivalent potential temperature in solid line, units: K; temperature in dot-dash line, units: °C; red solid triangle: rainstorm center)

由图8可见,前三次过程500 hPa高空槽偏后,地面锋面之上高空为大范围偏南气流,高空锋区向北倾斜,主要上升运动区位于低层 θ_e 密集区偏北一侧(图8a-c),因而暴雨区偏于地面倒槽的东北风一侧。而2007年7月18日过程由于是前倾槽结构,高空西北风侵入到锋前向上凸起的 θ_e 舌状高值区上,强上升运动区与向上凸起的 θ_e 舌状高值区吻合(图8d),潜在对流不稳定释放产生暴雨。

可见,暴雨落区与地面倒槽密切相关,是因为地面倒槽具有冷锋的热力、动力空间结构,当具有后倾结构时,地面倒槽附近的锋面抬升作用和冷暖空气交汇触发了初始上升运动,后倾槽结构使得暖湿空气沿锋面爬升,上升运动中心位于锋后,雨量中心在倒槽

后部东北气流中。当具有前倾槽结构时,潜在不稳定释放产生暴雨,暴雨区位于倒槽附近。

4 小结

- 1) 地面倒槽对强降水有明显指示意义,在锋面过程中,地面倒槽顶部是重要的暴雨落区。
- 2) 地面倒槽与850 hPa水汽通量辐合中心相吻合,暖湿输送带到达地面倒槽顶部时产生水汽辐合中心。
- 3) 地面倒槽的东南风一侧,为低层温度平流中心,暖平流导致暖锋前负变压明显,是形成地面倒槽的重要因素。
- 4) 地面倒槽为冷空气和暖湿气流交汇区,在对

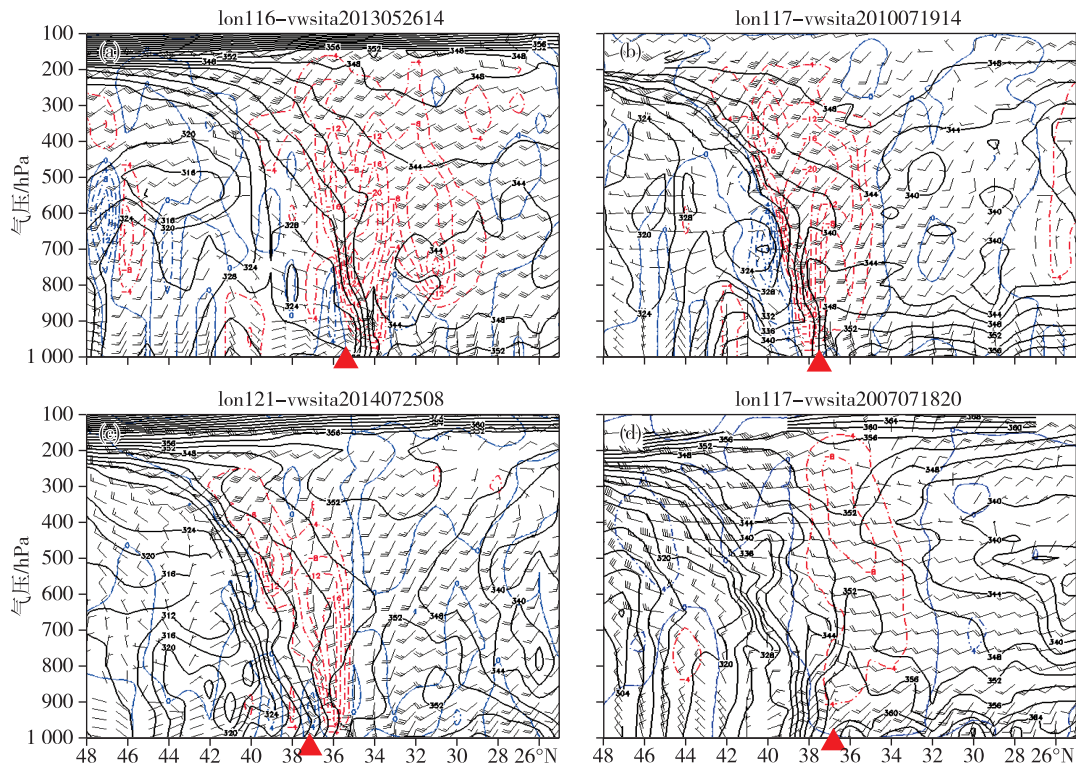


图8 经过地面倒槽的经向剖面图(a. 2013年5月26日14时, b. 2010年7月19日14时, c. 2014年7月25日08时, d. 2007年7月18日20时; 相当位温, 实线, 单位: K; 垂直速度, 虚线, 单位: $10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$; 红色三角为暴雨中心)

Fig.8 Meridional cross-section diagram along surface inverted troughs (a. 14:00 BST on 26 May 2013, b. 14:00 BST on 19 July 2010, c. 08:00 BST on 25 July 2014, d. 20:00 BST 18 July 2007; equivalent potential temperature in solid line, units: K; vertical velocity in dashed line, units: $10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$; red solid triangle: rainstorm center)

流层,具有冷锋完整的热力、动力空间结构特征。当后倾槽时,锋面抬升作用导致强上升运动出现在锋后,暴雨趋向于出现在倒槽后部东北气流中。前倾槽时,强上升运动区与上凸起的 θ_e 舌状高值区吻合,潜在不稳定能量释放产生暴雨,暴雨区位于倒槽附近。

参考文献:

- [1] 孙军, 谌芸, 杨树楠, 等. 北京721特大暴雨极端性分析及思考(二) 极端性降水成因初探及思考[J]. 气象, 2012, 38(10): 1267-1277.
- [2] 华北暴雨组. 华北暴雨[M]. 北京: 气象出版社, 1992: 130.
- [3] 梁军, 丛春华, 张胜军, 等. 变性台风“麦德姆”(1410)环流中的锋生现象及其对降水的影响[J]. 海洋气象学报, 2017, 37(4): 49-57.
- [4] 郭英莲, 王继竹, 李才媛, 等. 锋生作用对2011年梅汛期湖北暴雨的影响[J]. 气象, 2014, 40(1): 86-93.
- [5] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 4版. 北京: 气象出版社, 2000.
- [6] 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.

- [7] 孙继松, 何娜, 王国荣, 等. “7.21”北京大暴雨系统的结构演变特征及成因初探[J]. 暴雨灾害, 2012, 31(3): 218-225.
- [8] 周雪松, 孙兴池. 台风“达维”(1210)非对称性结构及其对风雨分布的影响分析[J]. 海洋气象学报, 2017, 37(4): 58-64.
- [9] 郑丽娜, 孙兴池, 孟伟. 夏季两次低槽冷锋型暴雨成因的对比分析[J]. 气象科技, 2015, 43(6): 1133-1141.
- [10] 孙兴池, 王西磊, 周雪松. 纬向切变线暴雨落区的精细化分析[J]. 气象, 2012, 38(7): 779-785.
- [11] 孙兴池, 吴炜, 周雪松, 等. 经向切变线暴雨落区分析[J]. 气象, 2013, 39(7): 832-841.
- [12] 丁一汇. 高等天气学[M]. 北京: 气象出版社, 2005: 444.
- [13] 周雪松, 吴炜, 孙兴池. 山东暴雨天气学预报指标的统计特征分析[J]. 气象, 2014, 40(6): 744-753.
- [14] 孙兴池, 郭俊建, 王业宏, 等. 低涡和副热带高压共同影响下的暴雨落区分析[J]. 气象, 2015, 41(4): 401-408.
- [15] 阎丽凤, 孙兴池, 周雪松. 影响山东的黄淮气旋暴雨落区分析[J]. 气象, 2014, 40(12): 1439-1445.