

李萍云, 王楠, 屈丽玮, 等. 热力散度垂直通量在延安强降水过程中的诊断分析 [J]. 陕西气象, 2015 (2): 1-6.

文章编号: 1006-4354 (2015) 02-0001-06

热力散度垂直通量在延安强降水过程中的诊断分析

李萍云, 王楠, 屈丽玮, 赵强

(陕西省气象台, 西安 710014)

摘 要: 利用 NCEP1°×1°6 h 再分析资料对 2013 年 7 月 22 日延安地区强降水过程进行了热力散度垂直通量诊断分析, 结果表明: 当高空辐散区叠加在弱的低层辐合区上方时, 促进低值系统的发展, 使高低层的辐散辐合均加强, 从而引起强烈的上升运动, 为强降水的产生提供了有利的动力条件。在强降水区, 广义位温等值线呈“漏斗”状, 从对流层高层向下伸展到对流层低层, 且在对流层低层垂直梯度比较显著。在此次降水过程中, 高空主要有两股干冷空气影响延安地区, 一股位于延安西侧的中高层, 一股位于其东部的对流层低层, 这两股冷空气夹击延安地区上空中层暖湿气流, 加强了降水区附近的湿斜压不稳定, 为强降水的产生提供了有利的热力不稳定条件。热力散度垂直通量的垂直分布及整层积分的结果与地面 6 h 强降水落区有很好的对应关系, 它的变化趋势及移动方向与强降水区的变化趋势和移动方向也较为一致, 对强降水落区预报有一定的参考意义。

关键词: 强降水; 高空辐散; 广义位温; 干冷空气; 热力散度垂直通量

中图分类号: P426

文献标识码: A

近几年, 极端天气事件越来越多, 强降水在极端天气事件中所占的比例也呈增加趋势, 因此对强降水落区和雨带移动方向的预报显得尤为重要。近年来气象工作者在这方面开展了大量卓有成效的研究, 先后建立了多个对地面降水具有指示意义的宏观物理量^[1-4]。陕西地理位置特殊, 降水类型复杂, 降水预报难度较大, 需要预报员不断探索新的强降水预报技术方法。高守亭等^[5-10]从暴雨触发机理的角度出发, 主张利用多个动力变量的集合来对暴雨区进行综合判别, 这些动力因子主要包括湿热力平流参数、对流涡度矢量的垂直分量、热力散度垂直通量、水汽散度垂直通量、Q 矢量散度、热力位势散度波作用密度, 这些因子是反应暴雨系统动力、热力及水汽特征的宏观物理量, 与降水落区有一定的对应关系。目前研究证明, 要寻找出对所有类型强降水落区及移动方向相一致的因子比较困难, 不同因

子对应不同类型暴雨, 其中热力散度垂直通量对辐合辐散类的强降水过程对应关系较为理想, 因此本文选取该变量对 2013 年 7 月 22 日延安强降水过程进行诊断分析, 为今后该动力因子在陕西暴雨预报中的应用提供一些依据。

1 过程概况

2013 年 7 月延安地区出现了 5 次暴雨天气过程, 其中 21 日 20:00—22 日 20:00 的暴雨过程发生的范围最广、强度最大, 有 5 站雨量超过 100 mm, 其中富县 151.9 mm, 创 1966 年 7 月 26 日以来日降水量新高, 延长 115.7 mm, 创 1984 年 7 月 10 日以来日降水量新高。降水自西向东影响延安地区, 6 h 累计雨量最大时段为 22 日 02:00—22 日 08:00。持续强降水造成延安市严重城市内涝, 并诱发滑坡、泥石流等地质灾害, 对人民生命财产造成严重损失。

收稿日期: 2014-10-16

作者简介: 李萍云 (1982—), 女, 汉族, 山西夏县人, 硕士, 工程师, 从事天气预报与研究。

基金项目: 陕西省气象局预报员专项 (2013Y-5)

2 资料和方法

实际大气并不是完全干燥,而是含有水汽,但又不是完全饱和,即处于“非均匀饱和”的状态^[11]。为了描述非均匀饱和湿大气的热力状态,Gao^[5]提出了广义位温的概念,其表达式为:

$$\theta^* = \theta \exp[L_v q_{vs} / (c_p T_c) (q_v / q_{vs})^k], \quad (1)$$

其中, θ 为位温, $\exp[L_v q_{vs} / (c_p T_c) (q_v / q_{vs})^k]$ 为凝结潜热函数, L_v 为单位质量水汽的凝结潜热, c_p 为空气定压比热, q_v 为水汽比湿, q_{vs} 为饱和水汽比湿, T_c 为抬升凝结高度处的温度, k 为经验常数(本文参考文献^[12]取值为9)。由定义可见,在干空气中 $q_v = 0, \theta^* = \theta$,在饱和大气中 $q_v = q_{vs}, \theta^* = \theta_e$,但是当比湿 q_v 介于0和 q_{vs} 之间时, θ^* 既不是 θ ,也不是 θ_e ,而是介于两者之间, θ^* 可以表示大气从干到湿,再到完全饱和的变化过程,能更好地反映出实际湿大气中的水汽湿度变化。可见,广义位温可更真实地描述实际湿大气的状态。

热力散度垂直通量是在广义位温基础上建立的因子,其表达式^[12]为:

$$W_{\text{ptediv}} = \frac{\omega}{\rho} \nabla_h \cdot (\mathbf{v}_h \theta^*) = \frac{\omega}{\rho} (\theta^* \nabla_h \cdot \mathbf{v}_h + \mathbf{v}_h \cdot \nabla_h \theta^*), \quad (2)$$

其中 $\mathbf{v}_h = (u, v)$ 和 $\mathbf{v} = (u, v, \omega)$ 分别为水平和三维速度矢量, u 为纬向速度, v 为经向速度, ω 为垂直速度, ρ 为质量密度, $\nabla_h = \partial/\partial x \mathbf{i} + \partial/\partial y \mathbf{j}$ 和 $\nabla = \partial/\partial x \mathbf{i} + \partial/\partial y \mathbf{j} + \partial/\partial p \mathbf{k}$ 分别为水平和三维空间梯度算子。该物理量涵盖了大气垂直运动、水平辐合(辐散)和热量平流输送等要素,是动力、热力效应相耦合的物理量。

利用一天4次的NCEP/NCAR再分析资料(水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 、垂直26层的风场、温度场、相对湿度场、垂直速度场)进行计算,得到热力散度垂直通量及其各分量,根据延安地区2013-07-21T20—22T20(北京时,下同)自动气象站逐6h降水量演变情况,分别从热力散度垂直通量的动力项(水平辐合辐散项 $\nabla_h \cdot \mathbf{v}_h$ 、垂直速度 ω)和热力项(广义位温 θ^* 、广义位温平流项 $\mathbf{v}_h \cdot \nabla_h \theta^*$)对此次大暴雨过程进行诊断分析,最后分析热力散度垂直通量的分布特征。由于

NCEP/NCAR再分析资料间隔为6h,为了诊断分析结果对预报有一定指示意义,采用6h累计雨量初始时刻的各物理量与6h累计降水量对比分析。

3 热力散度垂直通量的动力项

此次过程强降水区主要位于 $108^\circ\text{E} \sim 111^\circ\text{E}$ 、 36°N 附近。21日20:00,在延安西侧 $105^\circ\text{E} \sim 106^\circ\text{E}$ 区域上空250hPa高度附近有 $6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 辐散中心,位于200hPa高空急流入口区的右侧,在延安东部 110°E 对流层低层750hPa附近有弱辐合区,此时对流层无上升运动。随着高空急流核的东移,22日02:00(图1a)在延安地区上空对流层中高层200~500hPa出现辐散,中心位于250hPa附近,强度超过 $18 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,同时,中低层出现大片的辐合区,中心位于700hPa附近,强度达 $-10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,辐散区与辐合区中心均位于 109°E 上空,在高层强辐散和低层辐合的作用下,延安地区上空形成了一深厚的上升运动区,上升运动伸展至200hPa,中心在400~500hPa,最大值为 $-6 \times 10^{-2} \text{ hPa/s}$ (图1b),强降水开始出现。22日08:00高层辐散低层辐合中心东移至 110°E ,高层辐散中心分裂为上下两个,一个位于200hPa附近,另一个位于400hPa附近,强度均减弱至 $8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,低层辐合中心略微上移强度减弱至 $-8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (图1c),由于辐合辐散区东移减弱,上升区运动东移减弱(图1d),伸展范围降至300hPa以下,其中心在600hPa,最大值减小为 $-3 \times 10^{-2} \text{ hPa/s}$,降水强度开始减弱。随着系统的东移,22日14:00延安地区上空200~700hPa转为弱辐散区,800hPa延安东部为弱辐合区,上升运动减弱至 $-1 \times 10^{-2} \text{ hPa/s}$,此时降水强度明显减弱。

可见在强降水开始前,延安地区上空低层有弱辐合,其西侧高层有辐散;在强降水开始时,延安地区上空高层辐散明显加强,低层辐合也明显增大,但低层辐合仍明显小于高层辐散;当高层辐散减弱至与低层辐合强度相当时,强降水开始减弱。这说明在此次过程中,高空辐散区叠加在低层弱辐合区上方,促进低值系统发展^[13-14],

使高低层的辐散辐合均加强,从而引起强烈的上升运动,导致强降水的产生。随着高层辐散的东

移减弱,降水随之东移减弱。

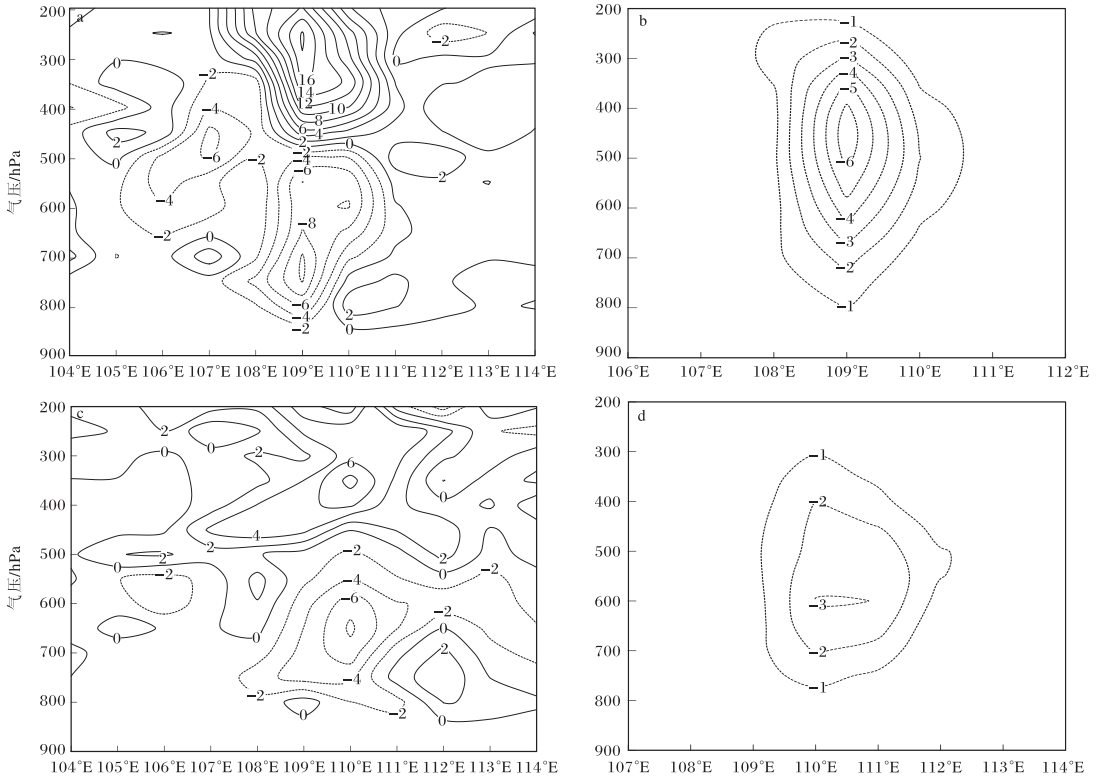


图1 2013-07-22 延安强降水过程的水平辐散(单位为 10^{-5} s^{-1} ; a 02时, c 08时)和垂直速度 ω (单位为Pa/s; b 02时, d 08时)沿 36°N 垂直剖面

4 热力散度垂直通量的热力项

4.1 广义位温的分布特征

广义位温可真实反映实际大气的水汽分布和热力性质,更好地体现暴雨过程中水汽的集中和水汽梯度效应,对暴雨落区有一定的指示意义^[11-12]。强降水发生前,21日20:00广义位温(图略)在延安地区及其西侧对流层低层700 hPa, 108°E 附近有一338 K的大值中心;高层500 hPa, $106^\circ\text{E}\sim 108^\circ\text{E}$ 附近有一广义位温横槽,说明延安西侧为高温高湿区。延安地区上空600 hPa以上广义位温等值线比较平直。22日02:00(图2a),广义位温大值区东移,300~800 hPa高低层连通呈“漏斗”状,“漏斗”底部主要位于延安西部 $108^\circ\text{E}\sim 109^\circ\text{E}$,延安西部上空500~800 hPa广义位温增大,广义位温垂直梯度在延安上空对流层低层850 hPa, $108^\circ\text{E}\sim 110^\circ\text{E}$ 附近比较显著,说明高温高湿区已移到了延安西部,且温度湿度有所增大,同时说明延安地区存在热力不连续面,大

气湿斜压性明显^[15]。22日08:00广义位温(图2b)“漏斗”东移变浅变宽,“漏斗”底部主要位于700 hPa, $109^\circ\text{E}\sim 111^\circ\text{E}$ 附近,广义位温水平梯度大值区相应地抬高东移至700 hPa, $110^\circ\text{E}\sim 112^\circ\text{E}$ 附近。22日14:00广义位温等值线漏斗底部下移至800 hPa附近,漏斗低层700~800 hPa变宽,宽度范围从之前的3.5个经度变为5.5个经度,上部500~600 hPa附近变窄,宽度范围从之前的3个经度变为2个经度,说明暖湿空气主要位于对流层低层。

可见在强降水区,广义位温等值线呈“漏斗”状,从对流层高层向下伸展到对流层低层,且在对流层低层垂直梯度比较显著。而在非强降水区,广义位温等值线相对比较平直,对流层低层的垂直梯度也不明显。

4.2 广义位温平流的分布特征

强降水发生前,从广义位温平流项可以看出21日20:00,延安上空以暖湿平流($-\mathbf{v}_h \cdot \nabla_h$

$\theta^* > 0$) 为主 (图略), 说明延安地区上空不稳定能量在积聚。22 日 02: 00, 在延安地区上空对流层中低层 500~700 hPa 为暖湿平流 (图 3a), 中心在 600 hPa、109°E 附近, 最小值达 -9×10^{-4} K/s; 在其西侧 104°E~107°E 对流层中高层 200~700 hPa 为干冷平流, 最大中心位于 400~500 hPa, 105°E~106°E 附近, 最大值为 6×10^{-4} K/s; 在 700 hPa 下为干冷空气输送, 其中心位于 800 hPa, 110°E 附近, 最大值可达 15×10^{-4} K/s。22 日 08: 00 中层暖湿平流东移至 108°E~111°E (图 3b), 最大值略微减小; 延安西侧的干冷平流东移至 109°E, 中心增大至 12×10^{-4} K/s, 中心位于 400~500 hPa, 107°E~108°E 附近; 对流层低层 700~800 hPa 的干冷平流中心东移至 110°E~111°E, 最大值减弱至 9×10^{-4} K/s; 此外在 500 hPa, 110°E 附近有一

中心为 6×10^{-4} K/s 干冷平流。说明延安地区中层暖湿平流东移减弱, 西部的干冷平流东移加强, 低层的干冷平流输送减弱, 这是降水在之后 6 h 内开始减弱的原因, 但由于中层 500 hPa, 110°E 附近有干冷空气输送, 使得降水并没有立即减弱, 反而在 08: 00—09: 00 的降水量达到此次过程单站小时雨量的最大值 26.3 mm。22 日 14 时 700 hPa 以上的干冷平流东移至 111°E 附近, 低层 700~800 hPa, 110°E~111°E 和 108°E 附近为弱的暖湿平流, 之后 6 h 降水量减弱为小雨。

可见此次过程开始前延安上空有暖湿平流输送。强降水发生时, 中层有暖湿平流, 西侧中高层为干冷平流, 东部低层有干冷平流, 且东部低层的干冷平流大于西侧中高层的干冷平流。当中层暖湿平流减弱, 其西侧的干冷平流加强, 东部低层的干冷平流减弱时, 强降水开始减弱。

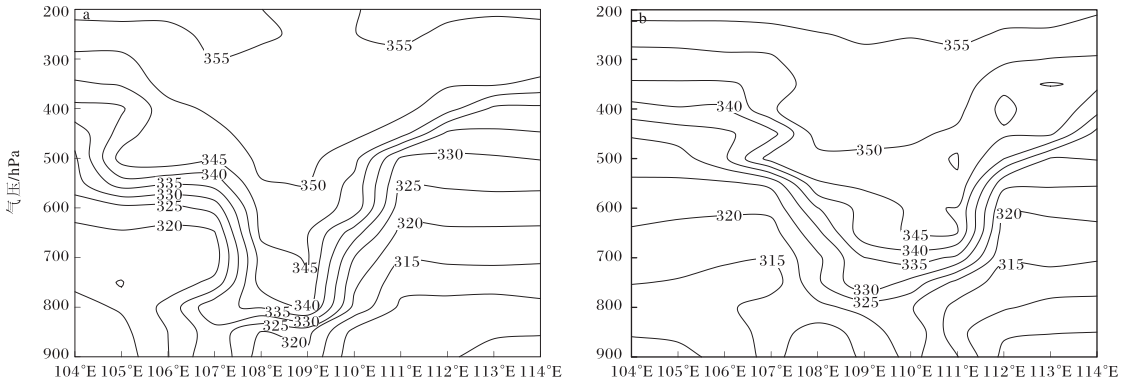


图 2 2013-07-22 延安强降水过程广义位温 (单位为 K; a 02 时, b 08 时) 沿 36°N 垂直剖面图

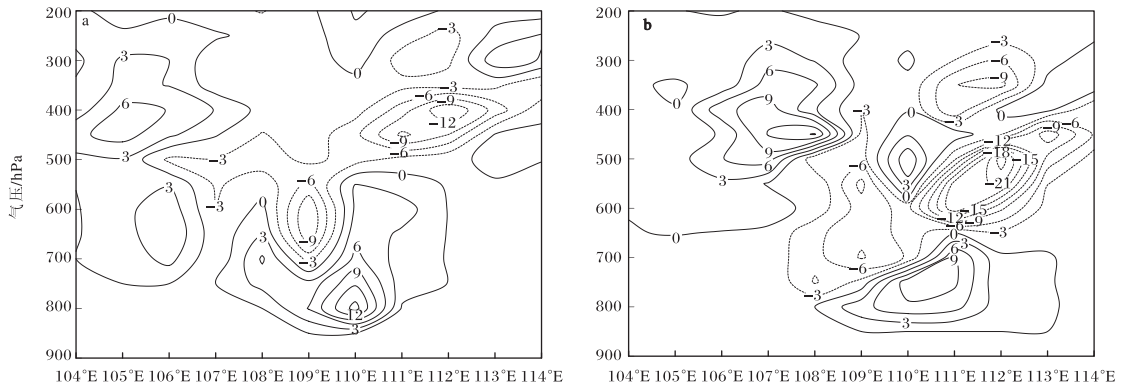


图 3 2013-07-22 延安强降水过程广义位温平流项 (单位为 10^{-4} K/s; a 02 时, b 08 时) 沿 36°N 的垂直剖面图

5 热力散度垂直通量的动、热力耦合

5.1 热力散度垂直通量的垂直分布特征

从沿 36°N 热力散度垂直通量剖面图可以看出, 在 21 日 20: 00 热力散度垂直通量几乎无值, 22 日

02: 00 (图 4) 热力散度垂直通量在延安地区 108°E~111°E 上空 200~850 hPa 为正值区, 在 109°E 附近上空有两个中心, 一个位于对流层高层 400 hPa 附近, 中心值为 13×10^{-2} (K·Pa·m) / s², 另一

个位于对流层中层 600 hPa 附近, 中心值为 $9 \times 10^{-2} \text{ (K} \cdot \text{Pa} \cdot \text{m) / s}^2$ 。22 日 08: 00 热力散度垂直通量减弱东移, 位于 110°E 、400 hPa 附近, 中心

值减弱为 $2 \times 10^{-2} \text{ (K} \cdot \text{Pa} \cdot \text{m) / s}^2$, 600 hPa 附近的中心值减为 $6 \times 10^{-2} \text{ (K} \cdot \text{Pa} \cdot \text{m) / s}^2$ 。22 日 14: 00 热力散度垂直通量减弱为 $0 \text{ (K} \cdot \text{Pa} \cdot \text{m) / s}^2$ 。

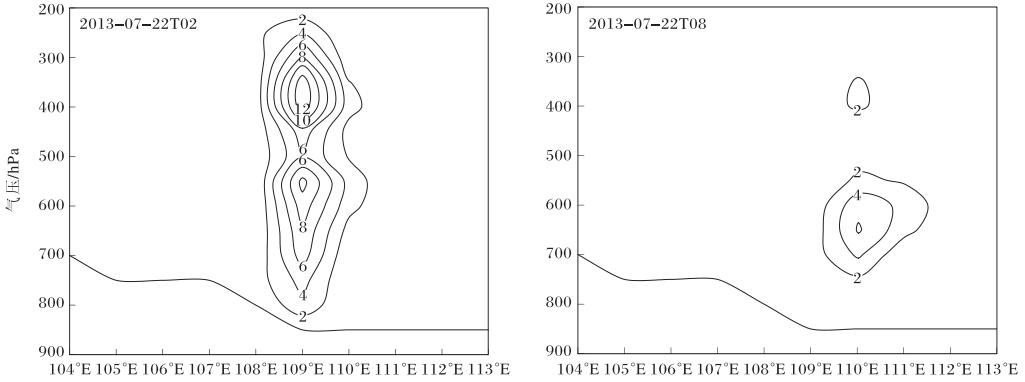


图 4 2013-07-22 延安暴雨过程热力散度垂直通量 (单位为 $10^{-2} \text{ (K} \cdot \text{Pa} \cdot \text{m) / s}^2$) 沿 36°N 垂直剖面图

说明在无强降水发生时热力散度垂直通量在降水区值很小。在强降水开始时, 热力散度垂直通量在降水区上空值明显增大, 在对流层高层 400 hPa 和中层 600 hPa 附近有大值中心。当强降水开始减弱时, 热力散度垂直通量东移减弱, 高层中心值减弱明显, 这与高层辐散明显减弱有关, 将以上结果的动、热力项和热力散度垂直通量做比较, 可知辐合辐散所起的作用在此次过程中更明显。

中心位于延安地区西部 36°N 、 109°E 附近, 最大值为 $6 \times 10^2 \text{ (K} \cdot \text{Pa} \cdot \text{m) / s}^2$, 之后 6 h 延安大部分地方为暴雨, 36°N 附近为大暴雨。22 日 08: 00 其大值中心东移到延安东南部, 最大值减小到 $4 \times 10^2 \text{ (K} \cdot \text{Pa} \cdot \text{m) / s}^2$, 之后 6 h 延安南部为区域性暴雨, 延安西南部局地出现大暴雨。22 日 14: 00 大值区东移至山西中部, 中心减弱为 $2 \times 10^2 \text{ (K} \cdot \text{Pa} \cdot \text{m) / s}^2$, 之后 6 h 延安地区强降水结束。

5.2 热力散度垂直通量的整层积分分布特征

21 日 20: 00 陕西及其周围热力散度垂直通量的整层积分值很小, 几乎为 $0 \text{ (K} \cdot \text{Pa} \cdot \text{m) / s}^2$, 之后 6 h 无强降水出现, 22 日 02: 00 陕西中北有一热力散度垂直通量整层积分的大值区,

说明热力散度垂直通量的整层积分在强降水发生时突然增大, 强降水区位于热力散度垂直通量的大值中心附近, 随着大值中心的东移减弱, 强降水随之东移减弱。

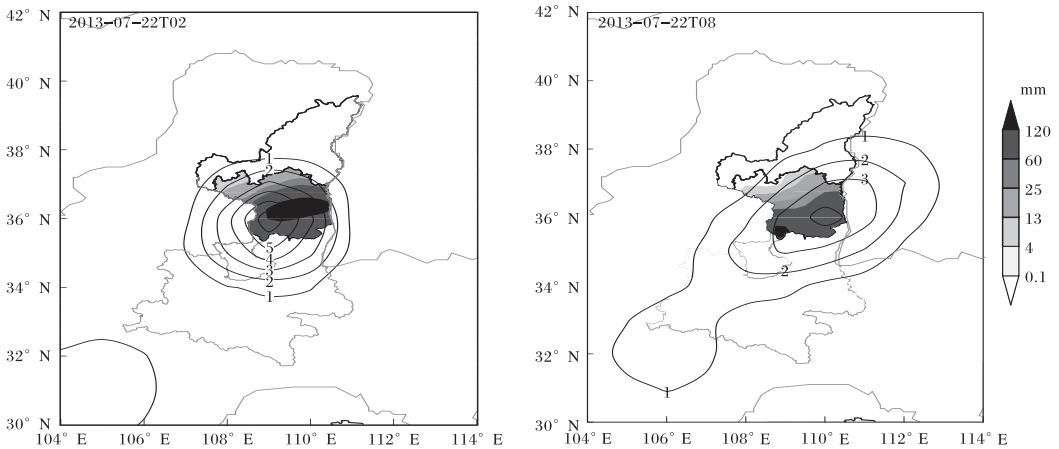


图 5 2013-07-22 延安强降水过程热力散度垂直通量的整层积分 (等值线, 单位为 $10^2 \text{ (K} \cdot \text{Pa} \cdot \text{m) / s}^2$) 和 6 h 累计降水量 (阴影)

可见热力散度垂直通量可综合反映强降水系统的动力、热力及水汽特征。它的垂直分布和整层积分的大值中心均与 6 h 强降水落区对应较好,而且它的趋势变化可从宏观上反映强降水系统的发展或减弱,对强降水的落区和雨带的移动,能给出较有价值的参考信息。

6 结论

(1) 高空辐散区叠加在低层弱辐合区上方,促进低值系统的发展,使高低层的辐散辐合均加强,从而引起强烈的上升运动,导致强降水的产生。

(2) 在强降水区,广义位温等值线呈“漏斗”状,从对流层高层向下伸展到对流层低层,且在对流层低层垂直梯度比较显著;而在非强降水区,广义位温等值线相对比较平直,对流层低层的垂直梯度也不明显。

(3) 此次过程中,高空主要有两股干冷空气影响延安地区的降水,一股位于延安地区西侧的中高层,一股位于其东部的对流层低层。这两股冷空气夹击延安地区上空中层的暖湿气流,加强了暴雨区附近的湿斜压不稳定,为暴雨区提供了有利的热力不稳定条件。

(4) 热力散度垂直通量能综合反映强降水系统的动力、热力及水汽特征。它的垂直分布和整层积分的大值中心均与 6 h 强降水落区对应较好,而且它的趋势变化可以宏观上反映强降水系统的发展或减弱,对强降水的落区和雨带的移动,给出较有价值的参考信息。

参考文献:

- [1] 吴国雄,蔡雅萍,唐晓箐. 湿位涡和倾斜涡度发展 [J]. 气象学报, 1995, 53 (4): 387-405.
- [2] 高守亭,雷霆,周玉淑,等. 强暴雨系统中湿位涡异常的诊断分析 [J]. 应用气象学报, 2002, 13 (6): 662-670.
- [3] 陈忠明,高文良,闵文彬,等. 湿位涡、热力学参数 CD 与涡度、散度演化 [J]. 高原气象, 2006, 25 (6): 983-989.
- [4] 岳彩军,寿亦萱,姚秀萍,等. 中国 Q 矢量分析方法的应用与研究 [J]. 高原气象, 2005, 24 (3): 450-455.
- [5] Gao S T, Wang X R, Zhou Y S. Generation of generalized moistpotential vorticity in a frictionless and moist adiabatic flow [J]. Geophys Res Lett, 2004, 31 (12): L12113.
- [6] Ran L K, Gao S T. A three-dimensional wave-activity relation for pseudomomentum [J]. J Atmos Sci, 2007, 64 (6): 2126-2134.
- [7] Ran L K, Abdul R, Ramanathan A. Diagnosis of wave activity over rainband of landfall typhoon [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2009, 15 (2): 121-129.
- [8] 高守亭,孙建华,崔晓鹏. 暴雨中尺度系统数值模拟与动力诊断研究 [J]. 大气科学, 2008, 32 (4): 854-866.
- [9] Gao S T, Ran L K. Diagnosis of wave activity in a heavy-rainfall event [J]. Geophys Res, 2009, 114 (D8): D08119.
- [10] Ran L K, Yang W X, Chu Y L. Diagnosis of dynamic process over rainband of landfall typhoon [J]. Chinese Phys B, 2010, 19 (7): 79201.
- [11] 周玉淑,吴科锋. 湿大气的广义位温与干大气位温及饱和湿大气相当位温的比较 [J]. 气象学报, 2010, 68 (5): 612-616.
- [12] 高守亭,冉令坤,李娜,等. 集合动力因子暴雨预报方法研究 [J]. 暴雨灾害, 2013, 32 (4): 289-302.
- [13] 许新田,李明,陶建玲,等. 陕西 2003 年持续性暴雨高低空急流特征分析 [J]. 气象科学, 2006, 26 (6): 684-687.
- [14] 许新田,宁志谦,陶建玲,等. 陕西夏季区域性大降水天气的综合分析 [J]. 陕西气象, 2007 (4): 10-15.
- [15] 冉令坤,齐彦斌,郝寿昌. “7.21”暴雨过程动力因子分析和预报研究 [J]. 大气科学, 2014, 38 (1): 83-100.