

台风海棠与中纬度系统相互作用 对河南暴雨的影响

张霞¹ 王咏青² 王君³ 王建玲⁴

(1 河南省气象台, 郑州 450003; 2 南京信息工程大学, 江苏省气象灾害和环境变化重点实验室, 南京 210044; 3 河南省气象科学研究所, 郑州 450003; 4 郑州市气象局, 郑州 450005)

摘要 应用 Barnes 滤波原理, 构建合适的带通滤波器, 获取了中尺度信息, 对 2005 年 7 月 21~24 日台风“海棠”登陆后与中纬度系统相互作用给河南省造成的暴雨过程进行了分析。结果表明: 在台风外围大尺度气旋性环流中, 中尺度低压、中尺度辐合线和辐合区是此次暴雨的直接影响系统; 台风低压移近后, 与西太平洋副高之间气压梯度加大, 可以在副高西南侧形成东南风低空急流, 东南急流的形成促使中尺度系统加强和发展; 干冷空气自对流层中层向低层伸展, 与低层的暖湿气流交汇, 使对流和暴雨加强。

关键词 暴雨 带通滤波 中尺度低压 东南风急流

引言

大气运动是由不同尺度天气系统组成的, 暴雨的产生要有一定的大尺度环流背景, 它提供中尺度天气系统形成的条件和环境场, 而中尺度系统才是直接造成暴雨的天气系统^[1], 通过对流活动, 暴雨过程又可对大尺度背景场起反馈作用, 改变原有的风场、湿度场和大气层结等^[2]。台风与中纬度天气系统的相互作用是一类典型的系统间相互作用过程, 它对天气系统的发展和暴雨等灾害天气的发生具有极其重要的意义。陈忠明^[3]通过对一次热带气旋和西南低涡相互作用的个例诊断, 指出二者相互作用向低涡区输送了大量的水汽和热量, 为涡区内特大暴雨天气的发生提供水、热条件, 相互作用对低涡结构的改变, 促进了低涡东部大气运动非平衡加剧, 其动力强迫激发的辐合和正涡度持续增长, 激励低涡发展, 为涡区特大暴雨提供动力条件。徐双柱^[4]等研究发现, 中尺度系统的源地与地形有关, 在西南气流的背风坡容易形成中尺度系统, 中尺度涡旋形成于低空急流左侧强正涡度中心附近。项素清^[5]及陈小芸^[6]等分析发现, 冷空气侵入热带低压环流残体,

触发不稳定能量释放, 导致中小尺度系统发展; 台风倒槽前西南气流的增强及西风槽后冷空气的入侵是造成台风倒槽强降水的重要原因之一。

河南省地处内陆, 受台风直接影响的几率较小, 但历史上的暴雨极值或区域性持续暴雨、大暴雨与台风活动密切相关, 如“75.8”暴雨等。本文以 2005 年 7 月 21~24 日台风“海棠”登陆后与中纬度系统相互作用给河南省带来的暴雨过程为例, 利用中尺度带通滤波处理技术获取中尺度场, 通过对获取的中尺度场特征及其与大尺度环流的相互作用的诊断分析, 较清楚地揭示了这次暴雨过程的发生、发展机制, 为今后此类天气的预报预警提供更多的参考依据。

1 天气过程及大尺度环流背景

1.1 暴雨实况及灾情

2005 年 7 月 20 日夜至 24 日凌晨, 河南省出现了一次区域性暴雨天气。此次强降水有 3 个集中时段, 第 1 时段是 7 月 20 日 20:00 至 21 日 20:00 (北京时, 下同), 强降水主要分布在信阳、驻马店两地区和周口地区的东南部(图 1a); 第 2 时段是 7 月 22 日

00:00至22日20:00,强降水分布在河南省中西部的郑州、焦作等地(图1b),第3时段是7月22日20:00至23日08:00,强降水分布在河南省东北部的濮阳地区(图1c)。这次暴雨过程共造成河南省

200多万人受灾,6人死亡,大面积农作物绝收,2万多间房屋损坏,农业经济损失近5亿元,直接经济损失达10亿元,灾情十分严重。

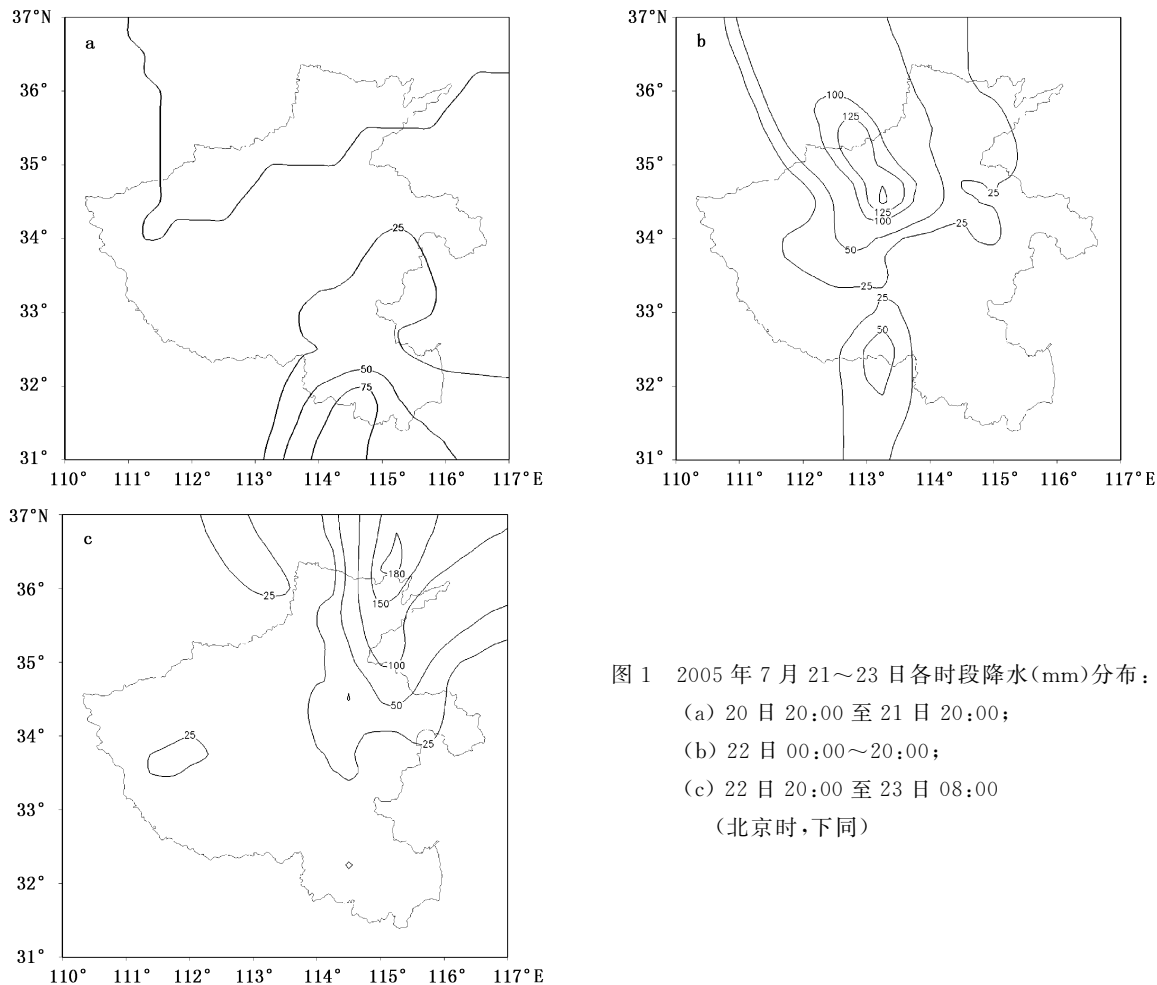


图1 2005年7月21~23日各时段降水(mm)分布:
(a) 20日20:00至21日20:00;
(b) 22日00:00~20:00;
(c) 22日20:00至23日08:00
(北京时,下同)

1.2 暴雨过程的大尺度环流特征

2005年7月19日08:00,500 hPa高空图上整个亚欧地区环流呈两槽两脊型,强大的副热带高压呈东西带状分布,主体伸入我国内陆,河南省处于副热带高压主体中,5号台风“海棠”7月19日17:00在福建连江登陆后,减弱为热带低压并继续向西北方向移动,受其影响,19日20:00,副高主体由东西向转为西北东南向,其西南侧的风速明显加大;到20日20:00,副高西端北抬明显,且主体大部位位于海上,在副高的西南侧和台风低压外围之间形成一支东南风急流(图2),河南省的南部处于急流轴附近,形成了第1个暴雨日。

22日08:00~20:00,热带低压辐合线位于长

沙、南阳到安阳西部之间达12 h;原位于新疆和甘肃交界处的西风槽,随着热带低压和副热带高压的位置变动,也向东缓慢移动,21日20:00,700 hPa的低槽位于贝加尔湖到河套北部一带,西风槽携带的冷空气前锋已影响到河南省的北中部(34°N以北)地区。冷空气在河南省中北部与暖湿空气交汇,激发了22日暴雨天气的产生。22日20:00,台风低压减弱消失,位于河套地区的低槽偏北东移后,在河套地区出现了大陆高压,台风辐合线变成了两高之间的辐合线,同时冷空气主体东移以后从河北扩散南下,冷空气和辐合线右侧及副高之间的东南暖湿气流在河南省东北部地区再次交绥,导致22日夜间濮阳地区强降水的产生。

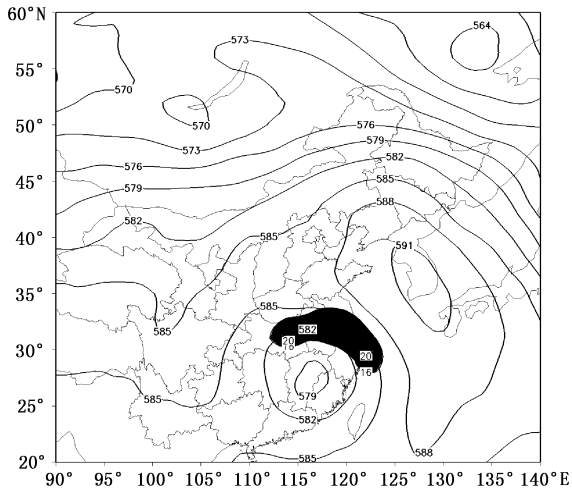


图 2 2005 年 7 月 20 日 20:00 500 hPa 形势与低空 850 hPa 急流配置(实线:500 hPa 等高线,单位:dagpm;阴影区:850 hPa 风速大于等于 16 m/s 区域)

2 暴雨过程的中尺度场特征

利用 NCEP/NCAR 每 6 h 一次的再分析格点资料(共 26 层,网格距为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$),采用 Barnes 低通滤波方案进行中尺度滤波^[7~11],取滤波常数分别为 $c_1 = 30000 \text{ km}^2$ 、 $G_1 = 0.3$; $c_2 = 150000 \text{ km}^2$ 、 $G_2 = 0.3$ 的两个低通滤波器构造一中尺度带通滤波器,对中心点位置 114°E 、 34°N , $95^{\circ} \sim 135^{\circ}\text{E}$ 、 $20^{\circ} \sim 50^{\circ}\text{N}$ 范围内格点上的风、高度、温度和相对湿度等要素进行带通滤波处理,该滤波器的最大响应波长位于 800 km,最大响应函数值达 0.85。由这一滤波器可提取水平尺度在 400 km 左右的中 α 尺度波动。

2.1 中尺度高度场

分析 7 月 20 日 20:00 850 hPa 的中尺度扰动高度场(图 3a)发现:在 117°E 、 30°N 附近有一中心值为 -20 gpm 的中尺度扰动低压(以下简称中尺度低压),其倒槽伸向河南省的南部地区,而河南省的其它地区则处在 5 gpm 的中尺度扰动高压中(以下简称中尺度高压),河南省南部的降水也正是此时开始;21 日 02:00,中尺度低压中心位置不动,其倒槽则明显西北伸,受倒槽影响,信阳地区的降雨强度显著增强(第 1 时段强降水)。21 日 08:00,中尺度低压强度明显减弱,其中心位置西北移至河南省南部与安徽和江西 3 省的交界处,此后中尺度低压中心位置少动,强度逐渐减弱,河南省南部的降雨强度也随之逐渐减弱。21 日 20:00,中尺度低压中心值为 -9 gpm ,其倒槽西北伸至河南省的西北部地区,中尺度高压中心减弱东移,22 日 08:00,中尺度低压倒槽西北伸至陕西境内,河南省沿黄河两岸地区一直处于此倒槽曲率最大处的辐合区附近(图 3b),因而该区域降水加强并维持,至 22 日 20:00,中尺度低压消失,河南省的降水也明显减弱(第 2 时段强降水)。23 日 02:00,在 850 hPa 的大尺度场上,已看不到明显的气旋性环流,但经滤波后的中尺度场上,河南省处在中心值为 -3 gpm 的中尺度低压中心(图略),低压倒槽呈东北西南向,河南省东北部地区处于倒槽前,中尺度风场上该地区有明显的辐合存在,因此 23 日夜问河南省东北部的濮阳地区出现了 100 mm 以上的强降水。

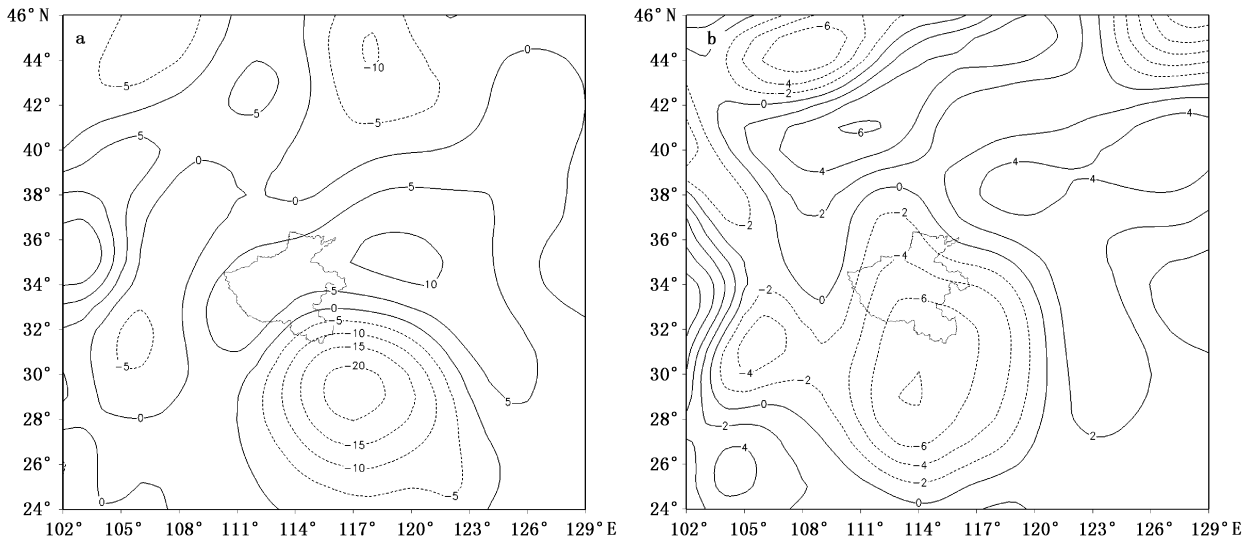


图 3 2005 年 7 月 20 日 20:00(a)和 22 日 08:00(b)850 hPa 中尺度滤波后的高度场(单位:gpm)

以上分析可知,这次暴雨过程中,中尺度低压的产生、发展、移动及其低压倒槽走向的改变在暴雨的产生、雨幅增强及雨区落区的改变中起着十分重要的作用。

2.2 中尺度流场

图4是经中尺滤波后的850 hPa中尺度扰动流场,与850 hPa中尺度扰动高度场对应,20日20:00(图4a),在117°E、29°N处有一中尺度气旋性辐合中心,到了21日02:00,辐合中心略有北移,且辐合线自辐合中心西北伸至河南省的中南部,21日08:00,中尺度辐合线维持,而强降水发生在中尺度辐合线附近偏向右侧的区域。

22日08:00 850 hPa的中尺度流场上可以看到(图4b),随着台风低压的西北移,中尺度辐合线也有明显的西北移,河南省西部地区有明显的流线辐合,该地的降雨强度也因此而显著加大,流线辐合区一直维持在河南省的中西部地区近12 h,河南省第2时段强降水的开始与结束时间正与中尺度辐合线的西移和流场辐合维持的时间相吻合,22日20:00(图略),随着大尺度影响系统的移动和变化,中尺度辐合线由原来的西北东南向逐渐转为东北西南向,流场辐合位于河南省东北部地区,此时,强降雨的落区也由中西部转移到东北部的安阳地区。

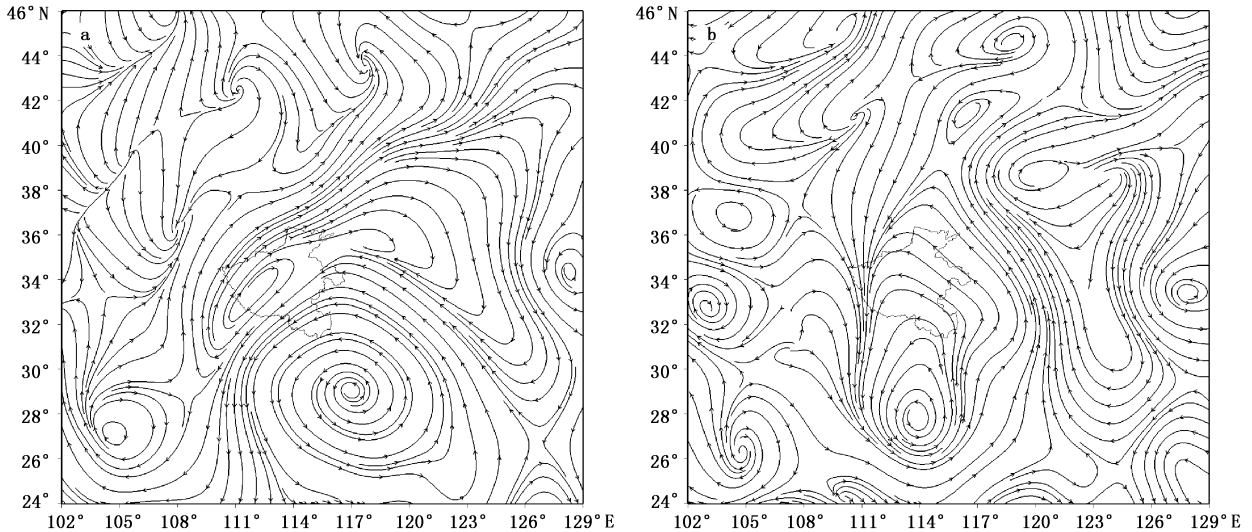


图4 2005年7月20日20:00(a)和22日08:00(b)中尺度滤波后的850 hPa中尺度流场

2.3 中尺度系统的温、湿特征

为分析中尺度系统的温、湿特征,采用Barnes滤波技术,对对流层中下层等压面上的温度和相对湿度进行带通滤波,得到中尺度系统的温度场和湿度场(滤波后的温、湿度数值表示相对冷暖、干湿特征)。

7月20日20:00 850 hPa等压面上,中尺度低压具有冷性、高湿特点,自700 hPa到对流层中层的500 hPa,中尺度低压仍具高湿特征,但其中心温度却比周围略高,为暖性,湿层此时到达对流层中层。此后,中尺度低压倒槽向西北伸展,其850 hPa上冷湿特征维持,21日08:00(图5),湿度中心位于河南省南部,高湿中心与中尺度低压倒槽配合较好时,亦

是降水增幅最大时。21日20:00 850 hPa上,河南仍处于高湿区,由于降水的消耗,700 hPa和500 hPa低压区的湿度显著减小,而此时段,也是雨强减弱时。第2时段暴雨开始前,中尺度辐合线与辐合区同样具有高湿特征,在低层为冷性,而700 hPa和500 hPa温度值较辐合区周围略高(图略),中尺度系统的温湿特征反映了大中尺度系统间的相互作用,低层暖湿的空气,经扰动上升,到达对流层中层,暖湿空气上升过程中凝结,释放潜热,改变了对流层中层原有的温湿场特征,使对流层中层气温略升,湿度加大。

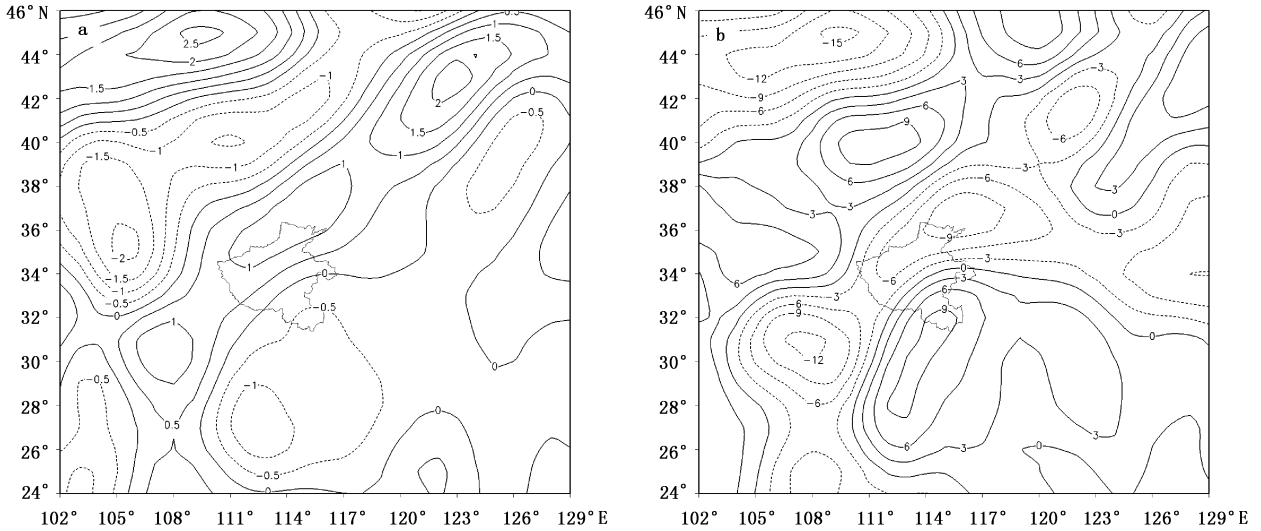


图 5 2005 年 7 月 21 日 08:00 850 hPa 中尺度滤波后的温度场(a,单位:℃)和相对湿度场(b,单位:%)

通过以上分析可知,中尺度辐合线的维持和中尺度流线辐合区的存在是这次暴雨产生、发展和维持的主要影响系统,降雨的强弱随辐合线和辐合中心的强弱变化而变化,强降雨落在中尺度辐合线附近偏右侧区域或中尺度低压中心偏向其移向一侧。

3 中尺度系统与大规模环流的相互作用

3.1 中尺度系统与低空急流

低空急流是一个动量、热量和水汽的集中输送带,它被认为是给暴雨和强对流天气提供水汽和能量的最重要的机制^[12~13]。赵平和孙健^[14]研究了 1998 年夏季华南的暴雨过程得出,气压梯度力做功为低空急流的形成和发展提供了能量来源,动能向上输送造成低空急流从对流层低层向高层发展。赵平^[15]等的研究指出,低空急流对暖湿空气的输送,可以使得急流轴附近的不稳定性增强,使中尺度系统不稳定发展。文献^[16]的研究表明,在大规模的非均匀低层急流的辐合区,通过在水平和垂直方向上大规模和中尺度相互作用,也可以使中尺度扰动加强和发展。这次暴雨过程中,随着台风低压移近,其与西太平洋副高之间气压梯度加大,从而可以在副高西南侧形成东南风低空急流,东南急流的形成对中尺度辐合线、中尺度扰动低压的形成、发展起到了积极作用。

图 6 是 20 日 08:00 至 21 日 20:00 每 6 h 一次的 850 hPa 暴雨区(沿 114°E)全风速的经向剖面图。由图可见,20 日 14:00,暴雨区的东南风速开始

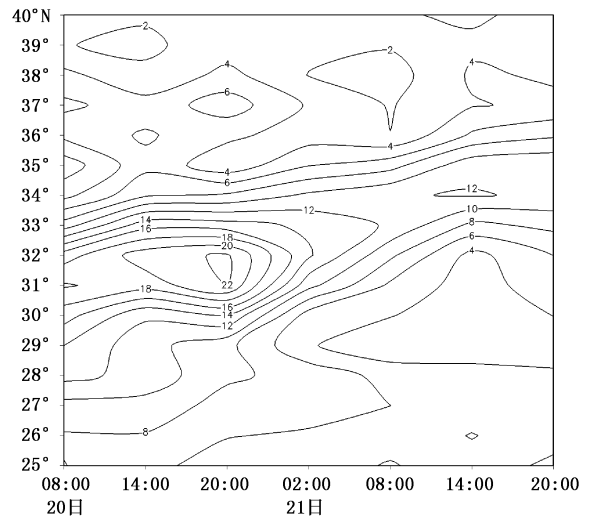


图 6 2005 年 7 月 2 日 08:00 至 21 日 20:00 850 hPa 沿 114°E 全风速(m/s)经向剖面

加大到 20 m/s,至 20 日 20:00 前后,风速达最大值,最大风速在 22 m/s 以上,此时东南风急流达到最强。之后,风速开始逐渐减小,东南急流逐渐减弱消失,整个过程中,东南急流在暴雨区维持了近 12 h,急流强度最强时,也是暴雨强度最大时,随着东南急流的减弱消失,雨强也逐渐减小。而在急流增强后,中尺度低压中心开始向暴雨区作偏移,且低压倒槽向雨区伸展,同时,暴雨区的湿度迅速加大,大湿度中心影响暴雨区时,亦是东南风急流增强时。因此,本次暴雨过程中低空东南急流的形成、增强和维持,不仅为暴雨区输送了充沛的水汽,而且也为中

尺度系统的发展、移动提供了能量来源和有利的动力条件。

3.2 中尺度系统与冷空气

图7为第2个集中时段强降水发生前和增强时暴雨区假相当位温的垂直剖面图。由图可见,随着中尺度低压中心向北移近河南省,冷空气也逐渐由高纬度向中纬度伸展,21日20:00(图7a,b),一股势力较弱的干冷空气前锋(340 K)已经影响到 36°N 、 112°E 附近的地区,干冷空气自对流层中层向下伸展到达对流层低层,此后,冷中心缓慢东移南压。22日08:00,弱的干冷空气到达 35°N 、 113°E 的区域,而此时,中尺度低压辐合线正好也经过此处,沿中尺度辐合线有暖湿空气向该地输送,冷暖空气交汇于此,导致雨强加大。22日14:00,冷中心位于暴雨区,随着较强冷空气的侵入,中尺度辐合线减弱消失,雨强也迅速减小。以上分析证实,弱冷空气的侵

入,触发了抬升机制,加强了雨区的上升运动,从而可造成不稳定能量释放而形成强降雨。

暴雨的产生对中尺度系统也有着反馈作用。赵平等^[17]研究了潜热加热影响西南低涡的形成和发展的物理过程指出,在低层潜热加热加强位能向散度风动能转换,以及散度风动能向旋转风动能转换,从而使低层辐合增大,涡度增强;在高层,潜热加热通过加强位能向散度风动能转换亦使高空辐散加强。本次暴雨过程中,暴雨区的强对流活动向上输送大量水汽,在高空凝结、释放潜热,使得上升运动增强,同时,暴雨区上空由于高空辐散增强,使原有的中尺度系统增强,对流和暴雨也就加强。但这种对流热输送的结果,会抑制对流活动的进一步发展,而干冷空气自对流层中层向低层伸展,且在低层与暖湿气流长时间交汇于暴雨区,使得强降雨得以长时间持续而形成暴雨。

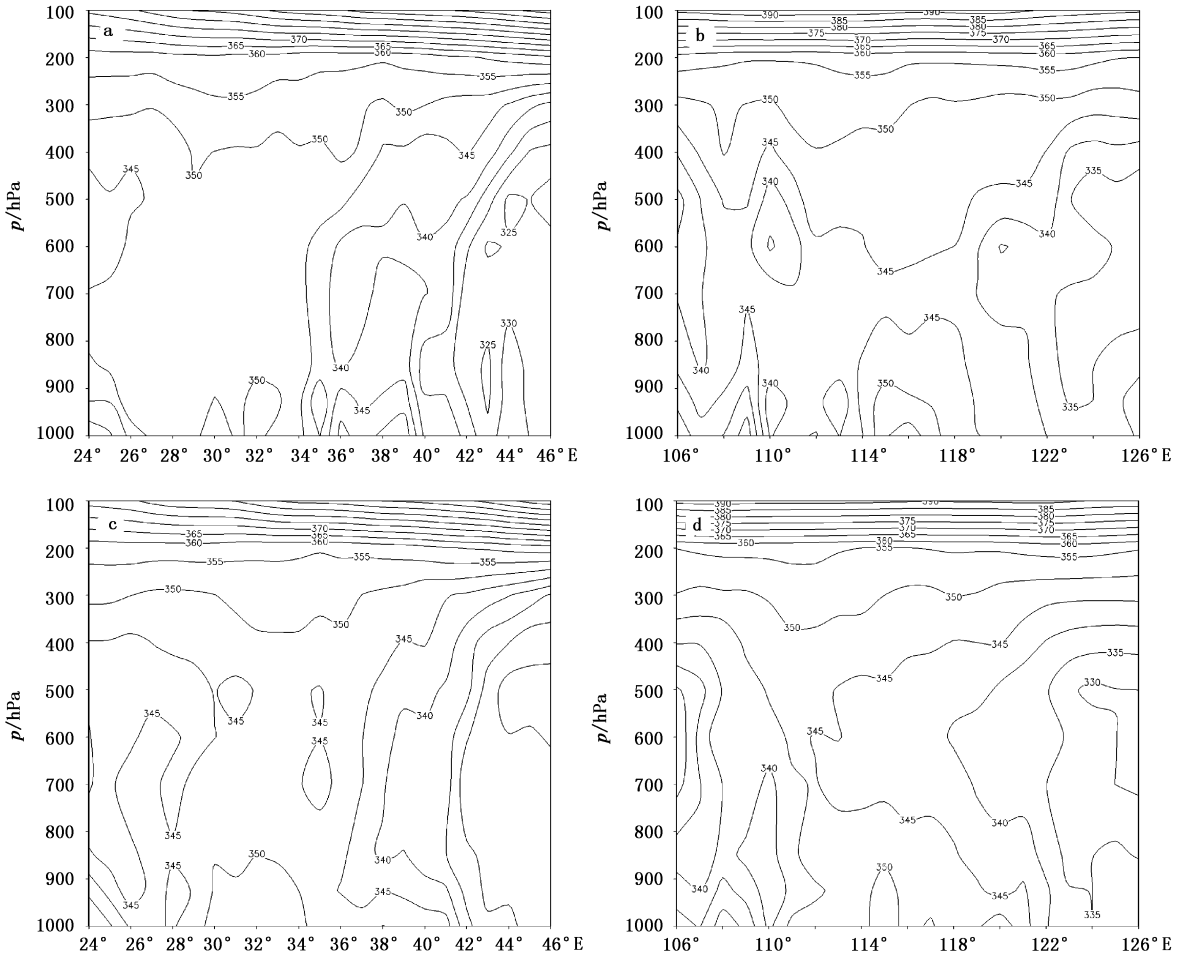


图7 2005年7月21日20:00和22日08:00分别沿 113°E 和 35°N 的假相当位温垂直剖面图
(a、b为21日20:00, c、d为22日08:00,单位:K)

3.3 中尺度系统与水汽辐合

水汽通量是表示水汽输送强度的物理量,由计算出的中下层平均水汽通量场(1000~550 hPa)可以看出,7月20日08:00水汽通量最大值中心位于浙江以东海面,自浙江经安徽省的中南部伸向河南省南部有一通畅的水汽通道(舌区),河南省南部的水汽通量 $(12\sim 14)\times 10^{-3}\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$

(图略),水汽通量的加大与中尺度低压扰动北移影响是同时的,20日夜河南省南部的信阳出现了暴雨。随着台风西北移,水汽通道也北移,至22日08:00,河南省的东北部有一个 $11\times 10^{-3}\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 的水汽通量大值中心(图8a),湿舌伸至该省中西部,水汽由沿海向河南省中西部地区输送,使得暴雨区有充足的水汽供应,暴雨得以持续。

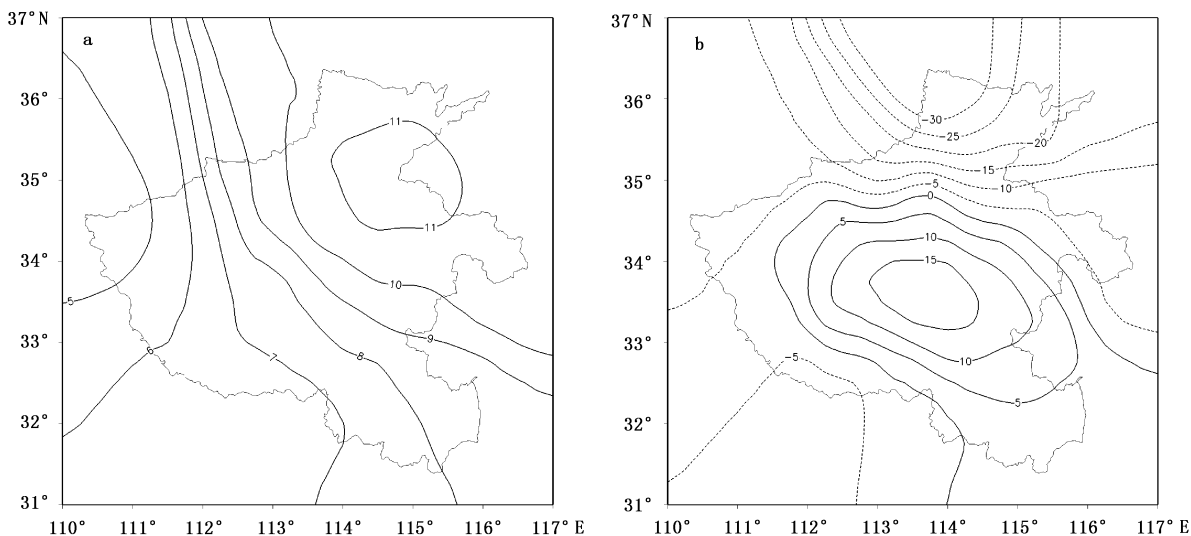


图8 2005年7月22日08:00水汽通量(a,单位: $\times 10^{-3}\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)和水汽通量散度(b,单位: $\times 10^{-9}\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)

暴雨的形成不仅需要充沛的水汽输送,且要有强烈的水汽辐合,分析本次暴雨过程的水汽通量散度场可看到,降水过程开始前,河南省无水汽通量辐合区,由于中尺度低压移近河南省南部,7月21日08:00(图略),这里的水汽辐合突然加大,处于水汽通量散度为 $-35\times 10^{-9}\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 的辐合区内,与同时次的水汽通量舌区对应,水汽自源地向西北方向输送到暴雨区的同时也在这里积聚起来,这样因降水耗散的水汽得以及时补充,使强降水持续时间较长造成暴雨。22日08:00,随着中尺度辐合线向西北部伸展,水汽通量辐合中心北移至黄河以北河南与山西省交界处(图8b),河南省的中西部处于水汽通量散度为 $(-15\sim -25)\times 10^{-9}\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 的辐合区,暴雨区也由南部北抬至此(第2时段暴雨)。由此可见,大尺度环境场为暴雨的发生提供了充沛的水汽来源,而中尺度系统则在水汽的强烈辐合和向上输送,使对流层中下层达到准饱和状态扮演了十分重要的角色。

4 结论

(1) 经带通滤波后获得的原始场中不明显的中尺度低压、中尺度辐合线和中尺度辐合区是此次暴雨的直接影响系统,该中尺度系统自对流层低层到达对流层中层,具有高湿特点。

(2) 台风低压移近西太平洋副高,二者之间气压梯度加大,可以在副高西南侧形成东南风低空急流,东南低空急流既是暴雨的水汽输送者,同时又为中尺度系统的生成、发展、移动提供有利的动力条件和能量来源。

(3) 暴雨的产生加强了上升运动,使得中尺度系统增强,但同时会造成大气层结稳定性增加,抑制对流的发展和持续,而冷空气自对流层中层向低层伸展,且与低层暖湿气流的交汇则促使不稳定能量释放,利于暴雨的持续和增强。

(4) 暴雨落在中尺度低压中心附近偏向其移向的一侧,或落在中尺度辐合线附近偏右侧区域。

参考文献

- [1] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 25—34, 121—132.
- [2] 杨福全, 杨大升. 1991年江淮流域暴雨中尺度系统的相互作用[J]. 应用气象学报, 1996, 7(3): 9—19.
- [3] 陈忠明, 黄福均, 何光碧. 热带气旋与西南低涡相互作用的个案研究[J]. 大气科学, 26(3): 352—360.
- [4] 徐双柱, 金琪, 肖艳娇, 等. 泥石流暴雨两个例中尺度分析[J]. 气象科技, 2005, 33(3): 240—244.
- [5] 项素清. 热带低压环流引发的中尺度特大暴雨过程分析[J]. 气象科技, 2003, 31(1): 38—41.
- [6] 陈小芸, 黄姚钦, 炎利军. 台风倒槽局地性强降雨分析[J]. 气象科技, 2004, 32(2): 71—75.
- [7] 陈忠明. 常规资料获取中尺度信息的一种简便方案[J]. 气象, 1994, 20(7): 39—43.
- [8] 夏大庆. 气象场的几种中尺度分离算子及其比较[J]. 大气科学, 1983, 7: 303—311.
- [9] 陈忠明. 气象场中尺度带通滤波方法研究[J]. 气象学报, 1992, 50(4): 504—510.
- [10] 寿绍文. 中尺度气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 253—259.
- [11] 孙田文, 杜继稳, 张弘, 等. 突发性暴雨中尺度分离对比分析[J]. 气象科技, 2004, 32(2): 65—70.
- [12] 丁一汇. 高等天气学[M]. 北京: 气象出版社, 1991: 573—586.
- [13] 王春红, 蒋全荣. 一次华南低空急流和暴雨过程的对比数值实验[J]. 高原气象, 1996, 15(3): 318—325.
- [14] 赵平, 孙健, 周秀骥. 1998年春夏南海低空急流形成机制研究[J]. 科学通报, 2003, 48(6): 623—627.
- [15] 赵平, 孙淑清. 非均匀大气层结中大气惯性重力波的发展[J]. 气象学报, 1990, 48(4): 397—403.
- [16] Zhao Ping, Zhou Xiujie. Formation of low-level meso-scale southwest jet during seasonal rainfall [J]. Progress in Natural Sciences, 2001, (4): 272—279.
- [17] 赵平, 胡昌琼, 孙淑清. 一次西南低涡形成过程的数值试验和诊断(II): 涡度方程和能量转换函数的诊断分析[J]. 大气科学, 1992, 16(2): 178—184.

Impact Analysis of Interaction between Typhoon “Haitang” and Mid-Latitude Systems on Rainstorm in Henan

Zhang Xia¹ Wang Yongqing² Wang Jun³ Wang Jianling⁴

(1 Henan Provincial Meteorological Office; Zhengzhou 450003; 2 Key Laboratory of Meteorological Disaster and Environmental Variation in Jiangsu Province, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044; 3 Henan Provincial Institute of Meteorology, Zhengzhou 450003; 4 Zhengzhou Meteorological Bureau, Zhengzhou 450005)

Abstract: Based the theory of Barnes filtering, an appropriate band-pass filter is designed, with which the mesoscale data were obtained. The heavy rainstorm in Henan in from 21 to 24 July 2005 resulted from the interaction between Typhoon Haitang and mid-latitude systems is analyzed. The results show that the mesoscale disturbance low, mesoscale convergence line, and convergence areas within the large-scale cyclonic circulation outside the typhoon are the direct influencing systems of the rainfall storm. The large-scale circulation provided abundant vapor sources and a potentially unstable condition for heavy rain, but the mesoscale weather system played an important role in the enhancement of vapour convergence and upward transportation.

Key words: storm rainfall, band-pass filter, mesoscale low, southeast jet