

王新敏,张霞,孙景兰,等. 2008 年 7 月黄淮暴雨过程中西南涡结构特征分析[J].暴雨灾害,2015,34(1):54-63
WANG Xinmin,ZHANG Xia,SUN Jinglan,et al.The analysis on the structure characteristics of the Southwest Vortex in a rainstorm event in July 2008 over Huanghuai valley [J].Torrential Rain and Disasters ,2015,34(1):54-63

2008 年 7 月黄淮暴雨过程中西南涡结构特征分析

王新敏^{1,2},张霞²,孙景兰³,吕林宜²,徐文明²

(1. 中国气象局农业气象保障与应用技术重点开放实验室,郑州 450003;2. 河南省气象台 郑州 450003;
3. 河南省气象局 郑州 450003)

摘要:对西南涡暴雨的预报不仅取决于对西南涡移动路径的把握,也与西南涡的结构及其演变密切相关。利用 NCEP/NCAR 1°×1°逐 6 h 再分析资料,对 2008 年 7 月一次东移影响黄淮的西南涡的结构特征和暴雨机理进行分析,结果表明:西南涡的生成过程包含高原涡的耦合诱发,西南涡的生成、发展与干位涡向对流层低层扰动下传有关;中高纬冷空气与副热带高压边缘暖湿气流对峙加强了系统的斜压性,使西南涡中心向上伸展的位涡柱和正涡度柱具有向西倾斜的结构;成熟的西南涡具有中尺度非对称的显著斜压结构特征;对流层中层正涡度平流是西南涡发展和引导西南涡移动的重要因素;凝结释放大量潜热促使低层西南低涡发展,使降水增强。

关键词:西南涡;动力结构;暴雨;位涡;凝结潜热

中图分类号: P458 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1004-9045.2015.01.008

The analysis on the structure characteristics of the Southwest Vortex in a rainstorm event in July 2008 over Huanghuai valley

WANG Xinmin^{1,2},ZHANG Xia²,SUN Jinglan³,LV Linyi²,XU Wenming²

(1. Key Laboratory of Agrometeorological Safeguard and Applied Technique,CMA,Zhengzhou 450003;2. Henan Meteorological Observatory, Zheng Zhou 450003;3. Henan Meteorological Bureau,Zheng Zhou 450003)

Abstract: The forecast of heavy rain induced by vortex is not only determined by the vortex movement track, but also closely related to its structure and revolution. Based on NCEP/NCAR 1°×1° 6-hourly reanalysis data, the structure characteristics of southwest vortex and the mechanism of heavy rain production in July 2008 are analyzed. The results show that the formation process of southwest vortex includes the coupling and induction of Tibetan Plateau vortex, and the generation and development of southwest vortex are related to the transport of dry potential vorticity downwards to the lower troposphere. The confrontation of cold air from middle-high latitudes and warm-wet air along the edge of the sub-tropic high strengthens the baroclinicity of the system, which makes the potential vorticity column and positive vorticity column over the vortex center incline westward with height. The mature southwest vortex is with a meso-scale asymmetric significantly baroclinic structure. The positive vorticity advection in the mid-troposphere is an important factor that makes southwest vortex develop and move. The latent heating makes southwest vortex develop, thus enhances the precipitation.

Key words: southwest vortex; dynamic structure; heavy rain; potential vorticity; condensation latent heat

引言

西南低涡(以下简称西南涡)是我国最强烈的暴雨系统之一,它所造成的暴雨天气的强度、频数和范围,仅次于台风及其残余低压^[1]。西南涡的结构及发生发展历来是研究的重点和热点。不同西南涡个例和同一个例

的不同阶段,动力与热力作用对西南涡发展的影响不一样^[2]。卢敬华^[3]和李国平^[4]从流场、温湿场、温压场三个方面总结了西南涡的结构。解明恩等^[5]通过研究边界层内的流场结构发现,在整个气旋环流中有局部的反气旋环流出现,上升与下沉运动交替分布于其中。陈忠明等^[6]通过个例分析认为,西南涡是个深厚系统,其正涡

收稿日期:2014-04-01;定稿日期:2014-12-25

资助项目:中国气象局 2014 年气象关键技术集成项目(CMAGJ2014M31);中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放基金项目(201205);中国气象局成都高原气象研究所高原气象开放实验室基金课题(LPM201204)

第一作者:王新敏,主要从事天气分析及预报。E-mail:hnwxm@cma.gov.cn

度可伸展至 100 hPa 以上,西南涡中心轴线接近于垂直,是一个准圆形而非对称的中尺度系统。韦统健等^[7]和王晓芳等^[8]对影响长江流域暴雨的西南涡进行合成分析和个例研究指出,西南涡是一显著的斜压系统,降水主要发生在西南涡移动方向右侧的两个象限,且温湿场和铅直流场在西南涡区呈现明显的不对称分布。

针对西南涡的形成、发展机理、移动路径、中尺度系统发展及凝结潜热作用等方面的研究取得很多成果。徐亚梅^[9]分析认为低空急流在四川盆地东北侧引起低层强辐合是西南涡发展的重要原因。朱禾等^[10]分析指出,西南涡的发展与地形、高低层环流配置密切相关。屠妮妮等^[11]用 WRF 模式研究 2008 年 7 月下旬西南涡暴雨中对流层中层至低层冷/暖空气入侵的作用,认为冷/暖空气入侵会改变对流层中、低层流场,并影响西南涡移出后的路径,进而影响降水落区和大暴雨中心强度。李国平等^[12]研究西南涡激发暴雨天气的动力机制与预报后指出,暴雨的发展趋势与湿位涡变率的变化趋势基本一致,湿位涡变率由负值转为正值对预报大暴雨形成和减弱有一定作用。赵平等^[13]通过对一次西南涡暴雨诊断分析指出,在西南涡发展过程中伴随着低层辐合、上升运动以及水汽通量辐合的加强,潜热加热的垂直分布有利于低涡发展。段海霞等^[14]、屠妮妮等^[15]对川渝暴雨的中尺度和凝结潜热分析表明,高层强辐散与中、低层强辐合及强上升运动和对流不稳定条件的存在,可能为中尺度对流系统的发生发展提供有利的动力和热力背景,凝结加热通过影响西南涡环境场的高低空急流、高低层辐合辐散,从而影响中尺度系统的发展与暴雨的发生。

上述研究多着眼于西南涡原地发展所造成的川渝暴雨和东移影响长江流域的暴雨,而针对西南涡东移影响黄淮地区的暴雨研究较少。据统计,河南省由西南涡引发的大范围暴雨和大暴雨每年均有发生,主要集中在 6 月下旬到 7 月。2006—2009 年 6—8 月西南涡东移共造成河南 9 例暴雨(7 月 5 例,6 月和 8 月各 2 例)。其中 1 例暴雨为台风沿海北上、中低层东风急流配合地面台风外围的东风气流影响所致,具有特殊性;而其他 8 例的天气背景具有共性特征:即 500 hPa 西太平洋副热带高压(以下简称副高)脊线稳定在 25°N 附近,河南处于副高边缘,东北地区为冷涡(或冷槽),河套西部(105°—110°E)有短波低槽(或低涡)东移;中低层 700 hPa 和 850 hPa 在副高边缘有西南低空急流,并伴随有切变线;一支强盛的水汽通道从孟加拉湾或中南半岛经云贵、湖北向河南输送水汽;地面有四川伸向江淮的暖倒槽(或弱的气旋)配合,河南处于倒槽或气旋顶部的偏东气流里。2008 年 7 月 21—23 日,受东移西南

涡影响,河南东南部(南阳、驻马店、信阳、周口、商丘)、山东等地出现 2008 年以来范围最大、强度最强的区域性大暴雨。该过程西南涡移动路径曲折,冷空气对西南涡路径影响较大,各数值模式对其移动路径预报偏差较大,导致暴雨落区预报较实况有较大偏差。谌伟^[16]、廖移山^[17]等对本次西南涡过程中襄樊段的暴雨成因进行了分析,重点分析了 200 hPa 强辐散中心形成的原因及其在降水中心上空稳定、停滞、加强的机制等,但未对西南涡结构特征做深入分析,本文继文献^[18]着重分析西南涡移动路径之后,利用 NCEP/NCAR 1°×1°逐 6 h 再分析资料,对影响本次强降水的西南涡结构特征、发展演变、产生暴雨物理机制进行诊断,以加深对西南涡诱发河南暴雨的认识。

1 过程概况

2008 年 7 月 21 日,青海湖东侧高原低涡发展东移,在东北低涡后部偏北气流和副高北侧强盛的西南暖湿气流交汇的环流背景下(图略),四川盆地东部生成的西南涡逐渐发展(水平尺度约 400 km),并随高原涡东移。在冷空气入川和西南急流的共同作用下(图 1),西南涡经川、渝向东北方向移动到达鄂西北;东移的东北低涡后部冷空气自西南涡西北侧侵入,使西南涡加强并缓慢东移,并于 23 日 08:00(北京时,下同)移至豫东南,且随着东北低压北缩减弱,副高再次增强,西南涡前部与副高间气压梯度加大,西南气流再次加强,西南涡快速向东北移动,于 23 日 20:00 移至山东境内。该西南涡移动路径曲折,经历 21 日生成发展、22 日成熟停滞、23 日再发展三个阶段。受西南涡东移影响,22 日 05:00—23 日 05:00,河南省 1 983 个乡镇雨量站

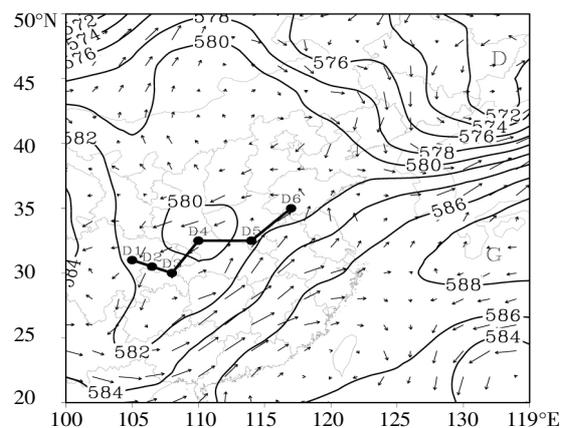


图 1 2008 年 7 月 22 日 20:00 500 hPa 位势高度(实线,单位: dagpm)、700 hPa 风矢量(箭头)及 21 日 08:00—23 日 20:00 逐 12 h 的 700 hPa 西南涡中心位置(D1~D6)

Fig.1 The 500 hPa geopotential height (solid line, unit: dagpm) and 700 hPa wind vector (arrow) at 20:00 BT 22 July 2008 and southwest vortex centers (from D1 to D6) on 700 hPa with 12 h intervals from 08:00 BT 21 July to 20:00 BT 23 July 2008

中,有 202 站出现 100~249 mm 的大暴雨;其中河南东南部驻马店、周口等 5 站出现 250 mm 以上的特大暴雨,且周口淮阳站 22 日 08:00—14:00 的 6 h 降水量达 107 mm(图略)。

2 西南涡结构及暴雨特征

西南涡结构复杂,对西南涡动力、热力结构及其演变的分析是认识西南涡的重要方面,也是准确预报暴雨落区的前提。为此,针对该西南涡的结构、演变及诱发的暴雨机理做分析如下。

2.1 动力结构特征

2.1.1 位涡分析

位涡是综合热力、动力的物理量,可反映环境场的干冷、暖湿空气活动^[19-20]。分析该西南涡暴雨过程中的高低空位涡演变发现(图略),20 日 08:00,300 hPa 上我

国西北高原地区的位涡正值中心,在东移过程中高度下降至 500 hPa 附近;20 日 14:00 在高层位涡的东侧,500 hPa 的 34°N、99°E 附近开始出现+2.2 PVU 的位涡中心,该中心 20 日 20:00 沿 99°E 东移至 102°E,与 500 hPa 的高原涡和低槽对应。21 日 08:00,700 hPa 上 32°N、105°E 附近开始出现+1.2 PVU 的位涡中心,21 日 14:00 增大至 1.6 PVU,并东移到川东附近 (32°N、106°E),21 日 20:00 (图 2a) 该位涡中心位于四川东部 (31°N、106°E),位涡中心与此时的西南涡中心(30.5°N、106°E)近于重合,且与西南涡生成和发展时段对应。位涡演变表明,西南涡生成过程包含高原涡的耦合诱发作用,也反映了高层干位涡具有向对流层低层扰动下传,促使低层西南涡发展的作用。图 2b 为沿 30.5°N 经西南涡中心的位涡高度—经度剖面图,分析可知,在 106°E 附近正位涡柱垂直伸展至 500 hPa,最大中心位

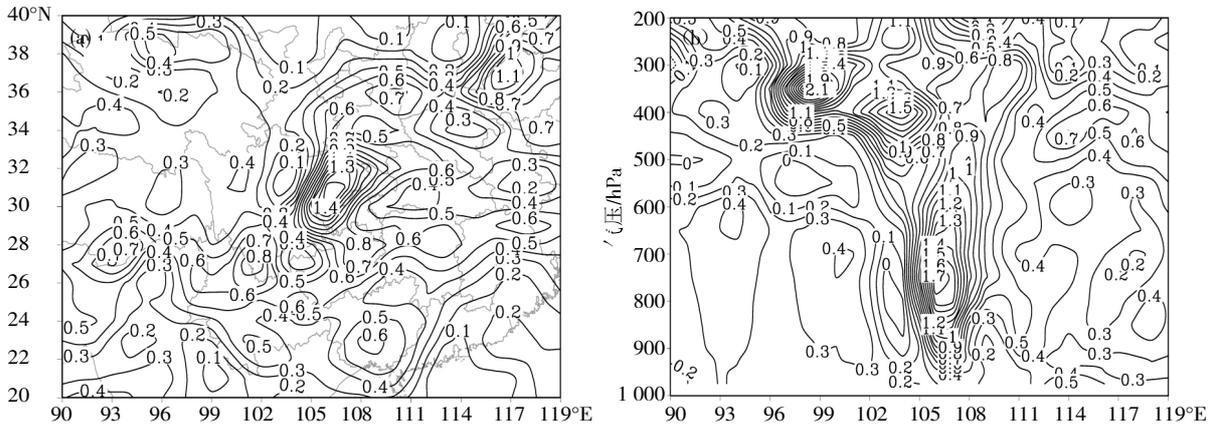


图 2 2008 年 7 月 21 日 20:00 700 hPa 位涡(a)和经西南涡中心的位涡高度—经度剖面图(b)(单位:PVU)

Fig. 2 (a) The potential vorticity of 700 hPa and (b) the height–longitude cross section of potential vorticity through vortex center at 2000 BT 21 July 2008 (unit: PVU)

于 750 hPa,而 500—200 hPa 呈向西倾斜状态。

2.1.2 涡度与涡度平流

分析西南涡成熟期的位涡高度—经度剖面可知(图 3),22 日 14:00—22 日 20:00,正涡度中心与西南涡中

心基本重合,在河南的暴雨中心 113°—114°E 附近,仍然有向上伸展到 200 hPa 的正涡度柱,且其在 500 hPa 以上向西倾斜,表明成熟期的西南涡仍保持着与 21 日西南涡生成发展时相同的动力结构特征。显然,这种垂

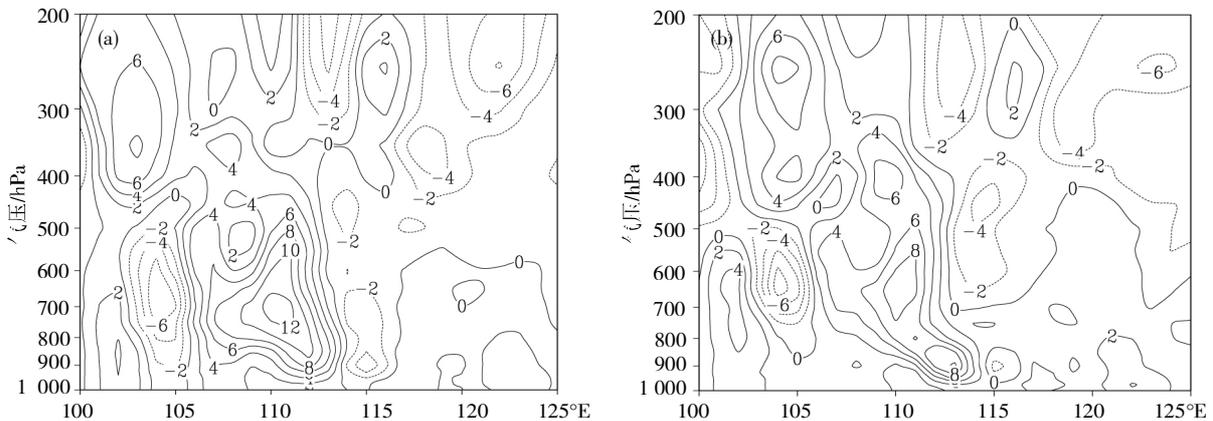


图 3 2008 年 7 月 22 日 14:00 (a)和 20:00 (b)经西南涡中心的涡度高度—经度剖面图(单位:10⁻⁵ s⁻¹)

Fig. 3 The height–longitude cross section of vorticity (unit: 10⁻⁵ s⁻¹) through vortex center at (a) 14:00 and (b) 20:00 BT on 22 July 2008

直结构与陈忠明等^[6]提出的“成熟阶段的西南涡正涡度可伸展到 100 hPa 以上,中心轴线垂直”不完全一致。22 日 14:00 是正涡度发展最强时段,正涡度中心值达 $12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,位于 700 hPa;正涡度中心的上层叠加较强的负涡度中心,中心值达 $-6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,且负涡度中心自上而下向东倾斜,紧邻正涡度柱。这表明低层辐合、高层辐散显著加强,且与河南东南部暴雨的旺盛期对应,暴雨发生在正涡度梯度轴附近区域。22 日 20:00 后,对流层中下层正涡度中心值减弱,上层负涡度中心东移,表明高层辐散、低层辐合均趋于减弱,对应的实况降水减弱。

为更直观地了解成熟期西南涡的动力结构特征,分析沿西南涡移动路径方向的涡度垂直特征。21 日 20:00 (图 4a),发展时期的西南涡中心 500 hPa 以上为负涡度,以下为正涡度柱,700 hPa 上西南涡中心位于正涡度柱前方。22 日 08:00 (图 4b),成熟阶段的西南涡表现为,正涡度向上伸展到 200 hPa,且在 500 hPa 以

上向西倾斜,正涡度中心值为 $12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,位于 800 hPa,此时西南涡中心与正涡度中心重合。同时,在 700 hPa 西南涡移动路径前方分裂出一个次正涡度中心(位于 114°E 附近),说明成熟期的西南涡正涡度沿 700 hPa 向下游传播,是诱发河南周口中尺度暴雨的因素之一,在次正涡度中心对应的 300 hPa 以上高层出现强的负涡度中心。22 日 20:00 (图略),正涡度虽然伸展至 200 hPa,但强度有所减弱,在西南涡中心的 800 hPa 以下转为负涡度,值为 $-4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,700 hPa 正涡度中心较分散,正涡度中心继续向下游和低层传播。23 日 08:00 (图略),正涡度中心合并东移,值加强为 $13 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,中心位于 900 hPa,正涡度柱向西伸展至 400 hPa。23 日 20:00 (图略),低层正涡度中心移至山东境内,河南降水减弱趋于结束。以上分析表明,成熟期西南涡正涡度具有明显的向上向西倾斜的结构,同时正涡度中心有向下游和低层传播的特征,次正涡度中心能够预示着未来西

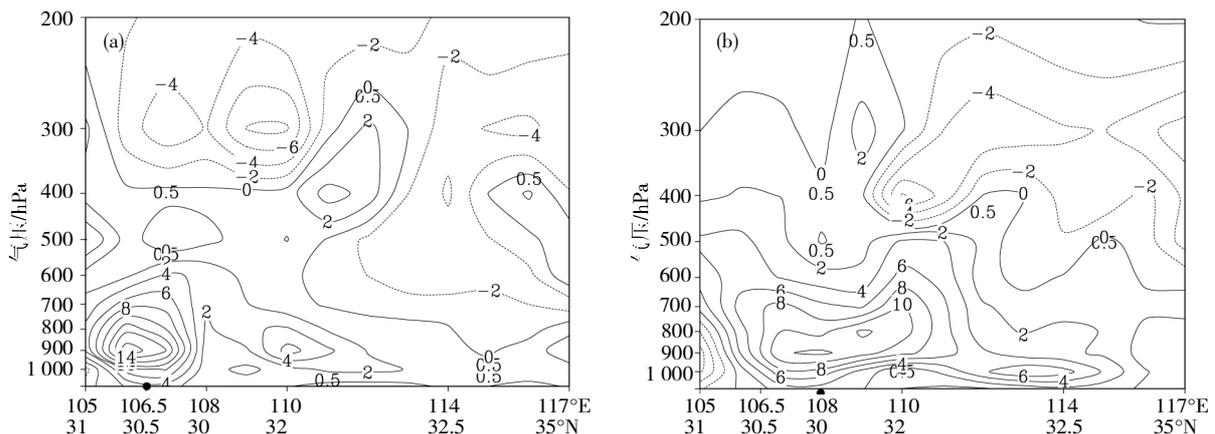


图 4 2008 年 7 月 21 日 20:00 (a)、22 日 08:00 (b)沿西南涡移动路径的涡度垂直剖面(黑点为 700 hPa 西南涡中心位置,单位: 10^{-5} s^{-1})
 Fig.4 The vertical cross section of vorticity along the moving path of the vortex (unit: 10^{-5} s^{-1} , black dot is vortex center on 700 hPa) at (a) 20:00 BT 21 and (b) 08:00 BT 22 July 2008

南涡的移向。

分析 21 日 08:00—23 日 20:00 西南涡活动区域 ($30^\circ\text{—}35^\circ\text{N}$)700 hPa 平均涡度和 500 hPa 平均涡度平流纬向-时间剖面(图 5)可知,21 日 08:00—23 日 20:00, $106^\circ\text{—}117^\circ\text{E}$ 区域 700 hPa 正涡度和 500 hPa 正涡度平流自西向东呈带状分布,且 500 hPa 正涡度平流中心先于 700 hPa 正涡度中心出现。21 日西南涡发展阶段,500 hPa 正涡度平流增强,中心值达到 $5 \times 10^{-9} \text{ s}^{-2}$,500 hPa 正涡度平流中心明显先于 700 hPa 正涡度中心出现;21 日 20:00—22 日 14:00,500 hPa 正涡度平流明显减弱,值为 $(1\text{—}2) \times 10^{-9} \text{ s}^{-2}$,且东西两侧伴有负涡度平流出现,700 hPa 上,22 日 08:00—20:00 时正涡度相应减弱,对应西南涡成熟阶段;23 日西南涡进入再次发展阶段,500 hPa 正涡度平流明显加强,于 23 日 08:00 达到 $6 \times 10^{-9} \text{ s}^{-2}$,500 hPa 正涡度平流中心再次先于

700 hPa 正涡度中心出现。分析表明,对流层中层正涡度平流造成低层减压,是西南涡形成、发展和移动的重要因素。上述分析与卢萍等^[21]的研究结果“在低涡不同发展阶段,涡度辐合辐散项对低涡的发展加强起最主要的作用,涡度平流项和涡度辐合辐散项的作用集中体现在中低层大气中”相一致。

2.2 水平流场特征

分析 200—850 hPa 各层风场(图略)可知,西南涡区的气流有两支:一支为西南涡左侧两象限的东北风,一直从地面伸展至 500 hPa;另一支是从西南涡右前象限流入的偏南风,以 850 hPa 和 700 hPa 最强,在西南涡中心前部呈气旋性旋转并汇入左侧的东北风气流。图 6 给出 7 月 22 日 08:00、14:00 的 700 hPa 风矢量、垂直速度和 850 hPa 水汽通量散度,从中可见,这支偏南气流是由于副高边缘一直存在的强盛的偏南低空急

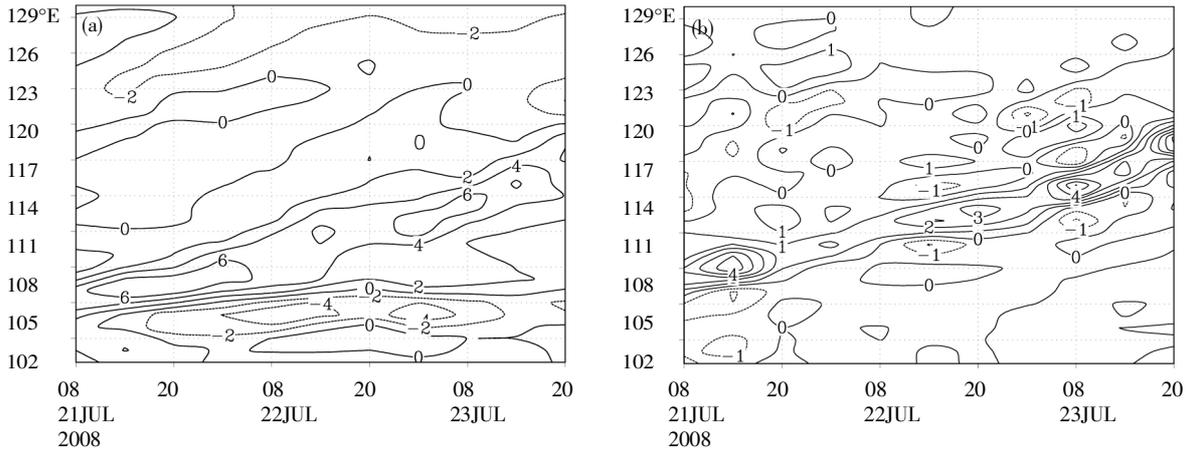


图 5 2008 年 7 月 21 日 08:00—23 日 20:00 西南涡活动区域(30°—35°N) 700 hPa 平均涡度(a,单位: 10^{-5} s^{-1})和 500 hPa 平均涡度平流(b,单位: 10^{-9} s^{-2}) 纬向-时间剖面

Fig.5 The latitude-time cross section of (a) mean vorticity (unit: 10^{-5} s^{-1}) on 700 hPa and (b) mean vorticity advection (unit: 10^{-9} s^{-2}) on 500 hPa between 30 to 35°N from 08:00 BT 21 to 20:00 BT 23 July 2008

流所致,其随着西南涡的东移北上,将中低层来自孟加拉湾的水汽源源不断地输送到西南涡的右前象限(即暴雨区),为暴雨提供充足水汽。7月22日08:00,在850 hPa和700 hPa上最大西南风风速均达 $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,700 hPa急流位置较850 hPa更靠近西南涡区域,700 hPa西南涡中心基本位于流场环流的中心,此时低空急流输送的水汽也迅速增强,并向北输送至河南南部和东南部一带,水汽通量散度中心达到 $(-10\sim-12)\times 10^{-7} \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}$;在西南涡的东南和西北象限分别伴有上升和下沉运

动,且上升运动中心位于低空急流的左前侧,下沉运动中心位于西南涡后部冷空气一侧。22日14:00西南涡区前部的偏南风左侧有强烈的上升运动配合,700 hPa垂直速度达 $-10\times 10^{-3} \text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 。冷空气下沉促使低层暖湿气流抬升,加强了大气不稳定性,同时强劲的上升运动加强了水汽的垂直输送,从而造成周口淮阳站6h雨量达107mm的强降水。而在西南涡区高层200 hPa一直维持弱的偏西风,其从西南涡后部流入、前部流出,且流出明显大于流入,伴随着强

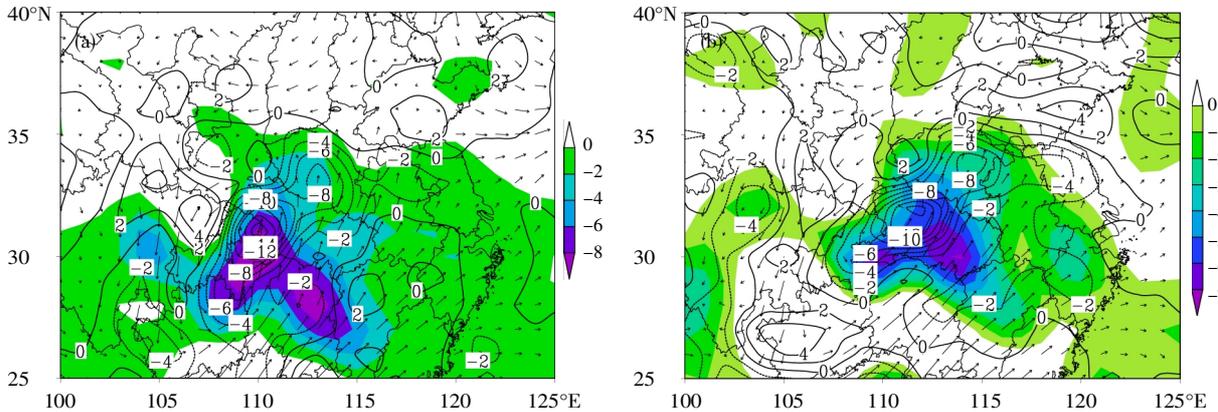


图 6 2008 年 7 月 22 日 08:00 (a)和 14:00 (b) 700 hPa 风矢量(箭矢,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、垂直速度(等直线,单位: $10^{-3} \text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$)和 850 hPa 水汽通量散度(阴影,单位: $10^{-7} \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}$)叠加图

Fig.6 The wind vector (arrow, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and the vertical velocity (isoline, unit: $10^{-3} \text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$) on 700 hPa and the water vapor flux convergence (shaded, unit: $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}$) on 850 hPa at (a) 08:00 BT and (b) 14:00 BT on 22 July 2008

烈的辐散。

2.3 垂直环流特征

分析 22 日 08:00—22 日 20:00 经西南涡中心的垂直速度和 $u-v$ 风/ $v-w$ 风的纬向/径向—垂直剖面(图 7)可知,西南涡的垂直环流结构呈明显不对称,成熟期在西南涡中心及右前方,随着西南涡的移动从低层到高层一直维持着很强的上升气流,弱的下沉气流则分

布在西南涡的西部和北部。22 日 08:00—20:00 西南涡附近及其移动的右前方一直为大尺度上升气流,对应副高边缘的一支强盛偏南低空急流,这支急流随着西南涡东移北上,将中低层来自孟加拉湾的水汽源源不断地输送到西南涡的右前象限(即暴雨区),上升运动不仅伸展高度高,且强度不断加强。强上升运动区一直与西南涡暴雨区有较好对应关系,暴雨和大暴雨区位于

西南涡移动路径的右前方;且最强上升运动在时间上对应着正涡度加强,说明成熟期的西南涡涡度场与上

升运动同相,此时也是强降水发展时期。22 日 20:00 后,上升运动仍很强,但下沉运动也进一步加强,雨区

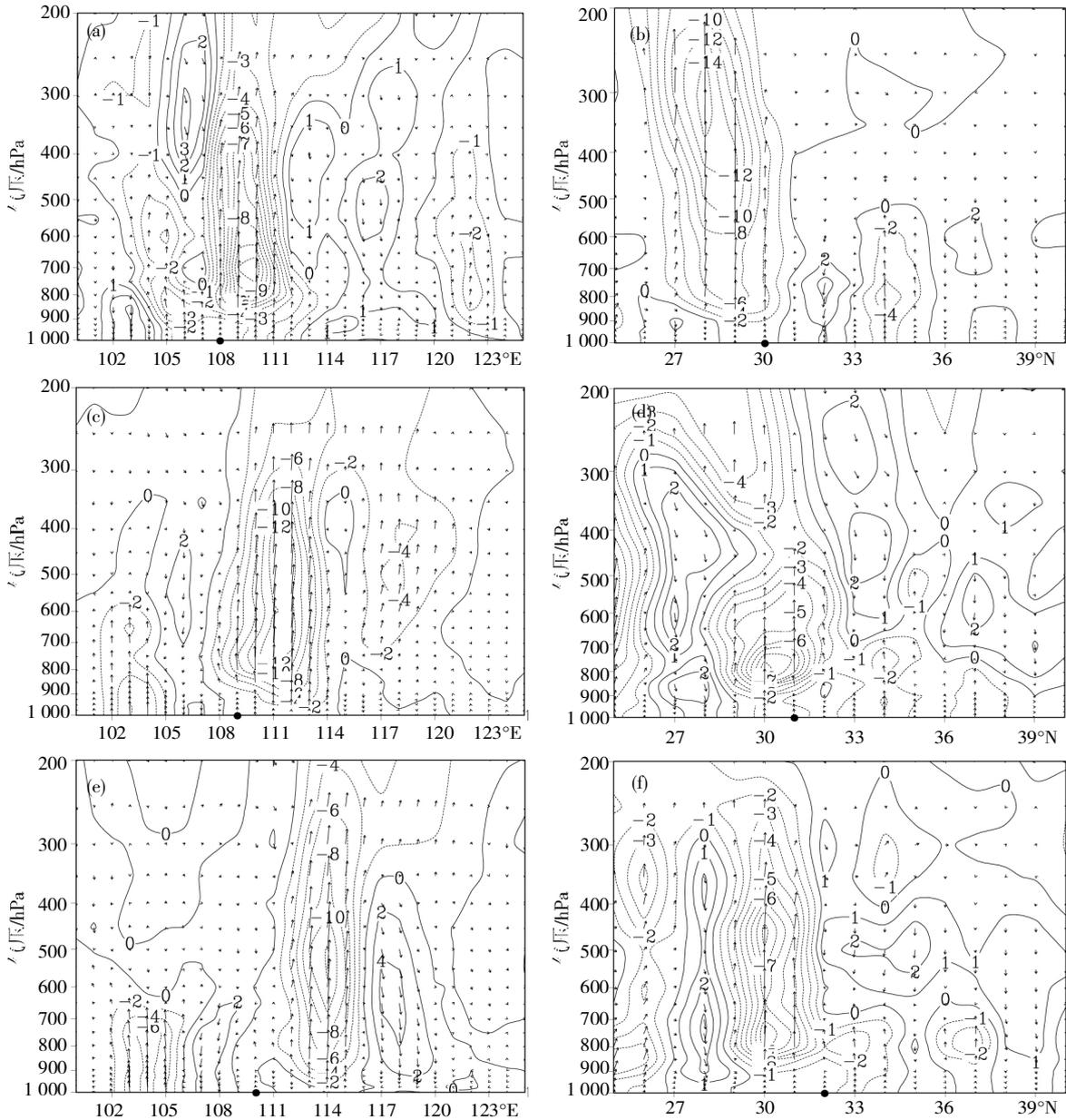


图 7 2008 年 7 月 22 日 08:00 (a,b)、14:00 (c,d)、20:00 (e,f)经西南涡中心(黑点为 700 hPa 西南涡中心位置)的垂直速度(等值线,单位: $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)和 $u-w$ 风(a、c、e)/ $v-w$ 风 (b、d、f) 纬向/径向-垂直剖面叠加图(w 放大 100 倍)

Fig.7 The meridional/zonal cross section of vertical velocity (isoline, unit: $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$) and (a,c,e) $u-w$ wind/ (b,d,f) $v-w$ wind (the vertical wind w are zooming 100 times) through the vortex center (the black dot is the vortex center on 700 hPa) at (a,b) 08:00、(c,d) 14:00、(e,f) 20:00 BT on 22 July 2008

上空“抽吸作用”减弱,降水逐渐进入衰弱期。

2.4 温湿场特征

为清晰地了解西南涡区温湿场的三维结构特征,沿西南涡中心作 21 日 08:00—22 日 20:00 相当位温的垂直剖面(图 8),分析可知,西南涡中心位于很强的温湿梯度上,其东部、南部为向东北伸展的暖湿舌,而西部、北部为伸向西南方向的狭窄干冷槽。在西南涡生成初期 21 日 08:00,西南涡中低层为比较对称的暖性结构,冷中心位于 500 hPa 以上;21 日 20:00 西南涡发

展阶段,自下而上西南涡西北侧干冷、东南侧暖湿,非对称结构明显,变陡峭和密集,暖湿中心位于 700 hPa 西南涡附近及东侧,700 hPa 西南涡西北部有冷中心配合;西南涡成熟期 22 日 14:00,西南涡中心暖湿空气被抬升,冷空气从西南涡中心的东北和西北两侧侵入到西南涡中心的 800 hPa 以下;22 日 20:00,干冷空气从西北方向继续侵入西南涡,西南涡中心 850 hPa 以下基本都为干冷空气占据,暖湿空气被进一步抬升,700 hPa 西南涡中心位于锋区密集带上,其东南暖湿、西北干冷。

这种分布是因河南东南部低层是高温高湿区域,西南暖湿气流不断向河南南部输送;而东北冷涡后部的冷空气经华北侵入到河南北部,其冷锋前沿与西南暖湿气流在河南中部形成锋区;22日14:00—22日

20:00,冷空气继续向西南方向侵入,使得西南暖湿气流抬升向东北偏东方向移动,同时暖湿气流也在向偏东方向加强,温湿梯度进一步加大,锋区(密集带)由近似东西向转为东北-西南向,西南涡沿密集带向东北偏

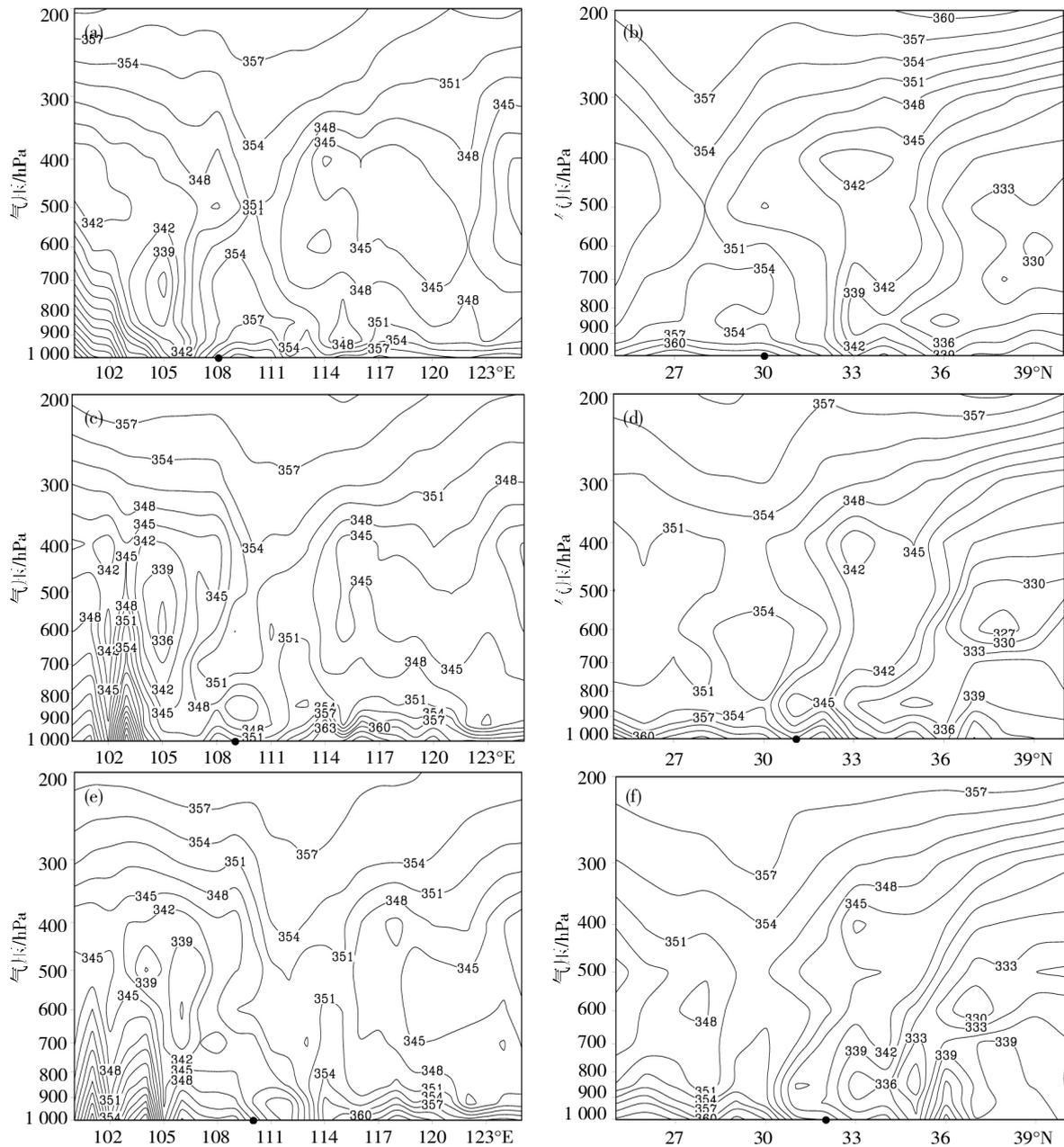


图 8 2008 年 7 月 22 日 08:00 (a, b)、14:00 (c, d)、20:00 (e, f)经西南涡中心(黑点为 700 hPa 西南涡中心位置)的假相当位温垂直剖面图(单位:K)

Fig.8 The vertical cross section of the potential pseudo-equivalent potential temperature (unit:K) through the vortex center (the black dot is the vortex center on 700 hPa) at (a,b) 08:00 ,(c,d) 14:00 ,(e,f) 20:00 BT on 22 July 2008

东方向移动,暴雨、大暴雨出现在锋区暖湿气团一侧。

3 西南涡暴雨过程中的中尺度对流活动

卫星云图显示,22日在低层切变线与副高之间有一条东北-西南向的对流云带,该云带中镶嵌有多个对流单体(图略)。利用区域自动观测站资料分析地面风场

与中尺度雨团活动发现(图 9),在西南涡移动路径右前方、低层切变线附近,对应多条中尺度辐合线和多个辐合中心,并伴有中尺度雨团的生消和合并。22日03时(图9a),西南涡右前方湖北中南部有一中尺度辐合中心,两湖之间及河南东南部分别有两条中尺度辐合线,辐合线两侧风场较弱,10 mm·h⁻¹ 以上的中尺度雨团

主要分布在该辐合中心第四象限的东北气流中,雨强为 10~20 mm·h⁻¹;此后该中尺度辐合中心一直维持。06 时(图 9b),由于东北冷涡后部冷空气的入侵,西南涡东移并加强,中尺度辐合线南北两侧的偏南气流和东北气流均明显增强,辐合中心附近、中尺度辐合线北侧有中尺度雨团生成和维持。08 时(图 9c),辐合中心移至河南省东南部信阳境内,中尺度雨团分布于辐合中心北侧偏冷空气一侧。辐合中心移动缓慢。12 时后(图 9d)中尺度雨团移至河南信阳与安徽阜阳交界处,中尺度辐合线亦逐渐东移,对应强降水区也缓慢东移。18 时

(图略),中尺度系统移至安徽境内,中尺度雨团一并移入安徽,河南省东南部的强降水明显减弱。

自 22 日 08 时起,中尺度辐合中心自湖北缓慢向东北移,经河南信阳境内,于 22 日 18 时移至安徽,其间伴有中尺度辐合线;在辐合中心附近,辐合线北侧不断有中尺度雨团新生、合并,影响河南东部和东南部约 10 h 左右,造成影响区域暴雨、大暴雨天气,淮阳自 08—14 时 6 h 雨量达 107 mm·h⁻¹,这一结果与张一平^[22]等研究结果“暴雨、大暴雨落区大都出现在地面中尺度气旋中心移动方向东南侧和西北侧 30~80 km 处”略有不同。

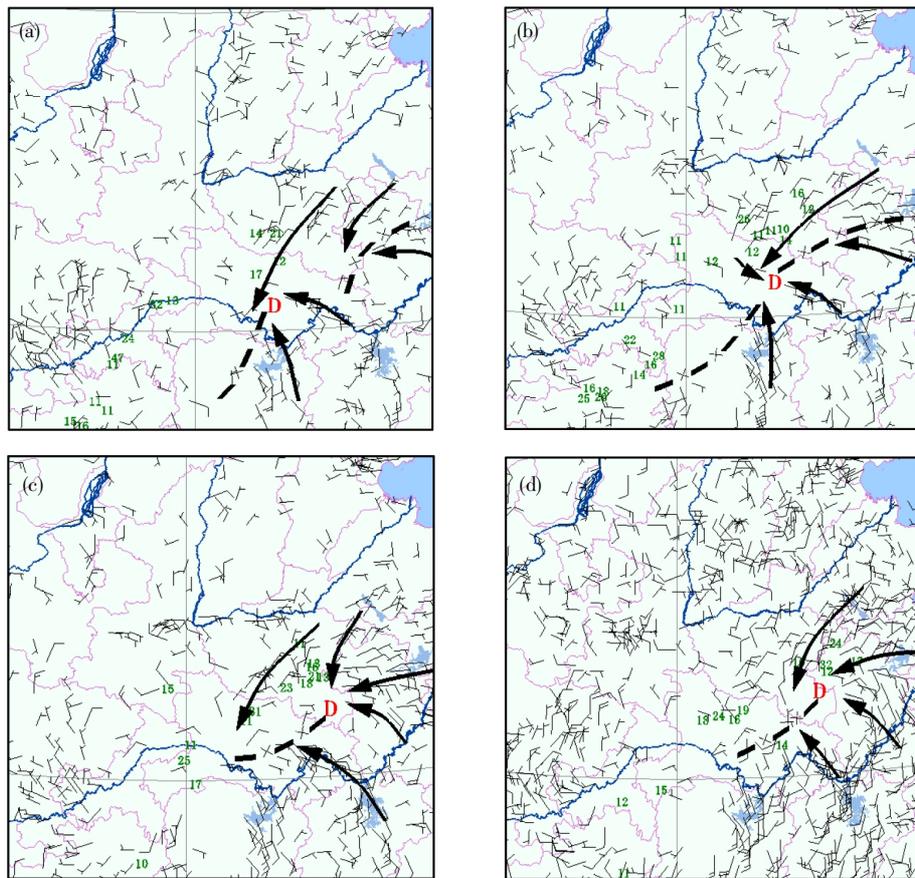


图 9 2008 年 7 月 22 日 03:00 (a)、06:00 (b)、08:00 (c)、12:00 (d)地面逐时风场(黑色箭头为显著流线,D 为地面中尺度辐合中心和 $\geq 10 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ (绿色数字)降水量叠加图

Fig. 9 The hourly surface wind (the black arrow is streamline, D is the surface mesoscale convergence center) and the precipitation over $10 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ (the green numbers) at (a) 03:00, (b) 06:00, (c) 08:00 and (d) 12:00 BT on 22 July 2008

4 凝结潜热分析

濮梅娟等^[23]对一次江淮梅雨期暴雨进行有、无凝结潜热加热的数值模拟研究指出,凝结潜热释放能使高层负涡度和低层正涡度强烈发展,形成地面至 500 hPa 深厚的正涡度柱;使高层辐散、低层辐合和垂直上升运动显著增大一个量级,诱发低空中尺度涡旋发生发展,使降水量增幅一个量级。

凝结潜热释放有两种不同途径:(1)由大尺度垂直运动产生的稳定性降水加热 H_s (简称大尺度凝结潜热);

(2)通过小尺度的深厚积云对流性加热 H_c (简称对流凝结潜热)。采用文献[24]的方法计算凝结潜热 H ,计算式为:

$$H=H_s+H_c \quad (1)$$

其中,计算大尺度凝结潜热 H_s 需满足三个条件:讨论区域内饱和或准饱和;层结稳定或湿静力层结中性;存在上升运动,其计算公式为

$$H_s = -L\omega \frac{\partial q_s}{\partial p} \quad (2)$$

式(2)中, $L=257 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为凝结潜热, ω 为垂直速

度, q_s 为饱和比湿。

计算对流凝结潜热的必要条件是:层结呈条件不稳定,水汽是辐合的。其计算公式为

$$H_c = \frac{I}{M} c_p (T_s - T); I > 0, T < T_s \quad (3)$$

式(3)中, I 为单位空气柱的净水汽辐合量, M 为积云生成所需的总水汽量, 二者的计算公式为

$$I = -\frac{1}{g} \int_{p_b}^{p_t} \nabla \cdot (Vq) dp - \frac{\omega_b q_b}{g} \quad (4)$$

$$M = -\frac{c_p}{L} \int_{p_b}^{p_t} (T_s - T) dp - \int_{p_b}^{p_t} (q_s - q) dp \quad (5)$$

式(3)~(5)中, T 为云外环境温度, T_s 为云中湿绝热温度, p_t 云顶高度, p_b 为云底高度, $C_p=1\ 004.07\ \text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ 为干空气定压比热容, q 为比湿, ω_b 、 q_b 分别为云底高度

处的垂直速度和比湿, $g=9.8\ \text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$, 为重力加速度, 其它物理量说明同式(2)。

21—22 日大尺度凝结潜热 H_s 和对流凝结潜热 H_c 的水平、垂直分布及时间演变(图略)表明, H_c 在 22 日 14:00 的中层 700 hPa 附近表现最为明显。图 10 给出 22 日 14:00 700 hPa 的 H 、 H_s 、 H_c 及沿 114°E 淮阳站经暴雨中心的 H_c 随时间的演变, 结合图 3、图 6、图 10 发现, 凝结潜热 H 沿暴雨区分布, 大尺度凝结潜热 H_s 与大尺度运动区有一致配合, 凝结潜热 H 释放使温度梯度加大, 导致锋生, 而对流凝结潜热 H_c 与中尺度对流相对应。说明正涡度增强至最大值、上升运动最强也正值凝结潜热释放显著增大时段。这与濮梅娟等^[25]对夏季西南涡形成机理的数值试验得出的“潜热释放能触发西南涡产生、发展, 并使降水量明显增强”结论一致。

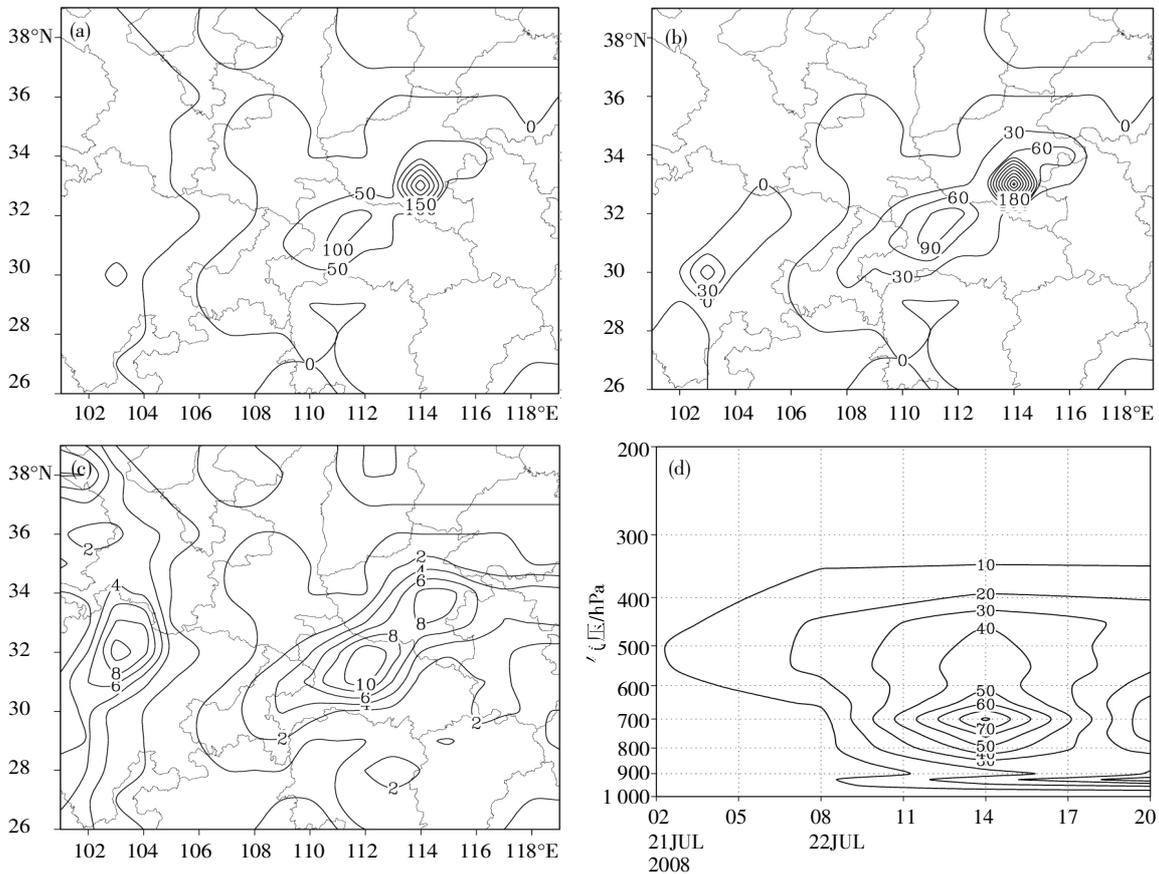


图 10 2008 年 7 月 22 日 14:00 700 hPa 总凝结潜热 H (a)、大尺度凝结潜热 H_s (b)、对流凝结潜热 H_c (c) 和沿暴雨中心淮阳站(114°E)的 H_c 随时间演变(d) (单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$)

Fig.10 (a) Condensation latent heat H , (b) large scale condensation latent heat H_s and (c) convective condensation latent heat H_c of 700 hPa at 14:00 BT on 22 July 2008, and (d) the time cross section of H_c along the heavy rain center HuaiYang (unit: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$)

5 结论

(1) 位涡演变和天气分析表明,西南涡的生成过程包含着高原涡的耦合诱发作用, 高层干位涡向对流层低层扰动下传,促使低层西南涡的生成和发展。

(2) 西南涡发展阶段, 对流层中层(500 hPa)正涡度

平流增强且正涡度平流中心明显领先于低层(700 hPa)正涡度中心; 西南涡成熟阶段, 500 hPa 正涡度平流减弱且正涡度平流中心和低层涡度中心位置接近; 西南涡再发展阶段, 500 hPa 正涡度平流再次加强并领先于 700 hPa 正涡度中心, 说明对流层中层正涡度平流是西南涡形成、发展和引导西南涡移动的重要因素。

(3) 动力、热力结构分析表明, 发展及成熟的西南涡结构具有中尺度非对称的显著斜压特征, 西南涡中心垂直向上伸展的位涡柱和正涡度柱, 在对流层上层具有明显向西倾斜的结构。成熟期的西南涡涡度场与垂直运动同相, 对应降水发生的旺盛期, 整层强上升运动区与西南涡暴雨区有较好对应关系, 暴雨和大暴雨区位于西南涡移向的右前方, 距西南涡中心 2~4 个经度。

(4) 副高边缘始终存在的一支强盛的低空急流, 它随着西南涡的东移北上将中低层和近地层来自孟加拉湾的水汽源源不断地输送到西南涡的右前象限(即暴雨区), 为暴雨的持续提供了充足的水汽, 成为河南暴雨水汽的主要来源。

(5) 正涡度中心有向下游和向低层传播的特征, 次正涡度中心能够预示着未来西南涡的移向, 二者的特征对西南涡的发展、移动及暴雨的预报具有指示意义。

(6) 凝结释放大量潜热, 使高层负涡度和低层正涡度强烈发展, 上升运动增强, 促使低层西南涡发展, 从而使降水增强。

参考文献:

- [1] 王作述, 汪迎辉, 梁益国. 一次西南低涡暴雨的数值试验研究[G]//暴雨科学、业务试验和天气动力学理论的研究. 北京: 气象出版社, 1996: 257-267
- [2] 陈忠明, 闵文彬, 崔春光. 西南低涡研究的一些新进展[J]. 高原气象, 2004, 23(增刊): 1-5
- [3] 卢敬华. 西南低涡概论[M]. 北京: 气象出版社, 1986
- [4] 李国平. 青藏高原动力气象学(第二版) [M]. 北京: 气象出版社, 2007: 23-26
- [5] 解明恩, 琚建华, 玉康. 西南低涡 Ekman 层流场特征分析[J]. 高原气象, 1992, 11 (1): 31-38
- [6] 陈忠明, 缪强, 闵文彬. 一次强烈发展西南低涡的中尺度结构分析[J]. 应用气象学报, 1998, 9(3): 273-282
- [7] 韦统建, 薛建军. 影响江淮地区的西南涡中尺度结构特征[J]. 高原气象, 1996(4): 457-463
- [8] 王晓芳, 廖移山, 闵爱荣, 等. 影响 2005.06.25 日长江流域暴雨的西南低涡特征[J]. 高原气象, 2007, 26(1): 197-205
- [9] 徐亚梅. 低空急流的加强对深厚西南低涡发展及稳定维持的作用[J]. 浙江大学学报(理学版), 2003(01): 98-102
- [10] 朱禾, 邓北胜, 吴洪. 湿位涡守恒条件下西南低涡的发展[J]. 气象学报, 2002, 60(3): 343-351
- [11] 屠妮妮, 何光碧, 陈静. 冷暖空气入侵对西南低涡发生发展影响研究[J]. 高原山地气象研究, 2012, 32(2): 10-19
- [12] 李国平, 刘行军. 西南低涡暴雨的湿位涡诊断分析[J]. 应用气象学报, 1994, 5(3): 354-360
- [13] 赵平, 梁海河. 西南低涡结构及潜热加热分析[J]. 成都气象学院学报, 1991(2): 16-21
- [14] 段海霞, 毕宝贵, 陆维松. 2004 年 9 月川渝暴雨的中尺度分析[J]. 气象, 2006, 32(5): 74-79
- [15] 屠妮妮, 李跃清. 一次引发川东暴雨的西南涡特征分析[J]. 干旱气象, 2014, 32 (6): 962-971
- [16] 湛伟, 岳阳, 邓红, 等. 2008 年 7 月 22 日梅雨锋西段襄阳特大暴雨成因分析[J]. 暴雨灾害, 2011, 30(3): 210-217
- [17] 廖移山, 冯新, 石燕, 等. 2008 年 "7.22" 襄樊特大暴雨的天气学机理分析及地形的影响[J]. 气象学报, 2011, 69(6): 945-955
- [18] 王新敏, 宋自福, 张霞, 等. 一次西南涡路径预报偏差分析及数值模拟[J]. 气象, 2009, 35(5): 18-25
- [19] 吴国雄, 刘环珠. 全型垂直涡度倾向方程和倾斜涡度发展[J]. 气象学报, 1999, 57: 1-14
- [20] 吴国雄, 蔡雅萍, 唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报, 1995, 53(4): 387-404
- [21] 卢萍, 李建, 李英. 重庆 2 次西南低涡暴雨过程的类比分析[J]. 暴雨灾害, 2014, 33(1): 34-40
- [22] 张一平, 王新敏, 梁俊平, 等. 黄淮地区两次低涡暴雨的中尺度特征分析[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(4): 303-313
- [23] 濮梅娟, 沈树勤, 夏瑛, 等. "03. 7" 江苏大暴雨凝结潜热的数值模拟[J]. 高原气象, 2007, 26(2): 333-343
- [24] 刘裕禄, 方祥生, 金飞胜, 等. 台风凤凰形成发展过程中对流凝结潜热和感热的作用[J]. 气象, 2009, 35(12): 51-57
- [25] 濮梅娟, 刘富明, 沈如金. 一次夏季西南低涡形成机理的数值试验[J]. 高原气象, 1989, 8(4): 321-330