

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2018.01.006

2015年9月西安一次强降水过程及成因的综合诊断研究

李 博, 张 铭, 邹瑞森, 华灯鑫

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 借助西安理工大学教12楼气象站观测资料、全国气象台站常规观测资料以及NCEP全球分析资料,对2015年9月9日~11日发生在西安地区的一次强降雨个例进行了综合诊断研究。结果表明:①200 hPa高空急流与700 hPa低空急流的耦合为本次强降雨提供了动力条件;②降雨过程中存在有利于云和降雨形成的低压槽系统;③源自东海与三峡两个源地的水汽在西安低空发生辐合,促使空气趋于饱和,同时北方干冷空气沿东南路径侵袭西安,造成冷暖空气交汇,进而形成降雨;④综合分析结果,建立了本次强降雨发生的物理模型。

关键词: 低压槽; 水汽通量散度; 高低空急流; 物理模型

中图分类号: P426.615

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2018)01-0036-07

Study of a heavy rainfall case in Xi'an in September 2015 by using SACDM

LI Bo, ZHANG Ming, ZOU Ruisen, HUA Dengxin

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on the Xi'an University of Technology weather station data, the conventional observation data and the NCEP reanalysis data, a heavy rainfall case occurred during 9~11 September 2015 is studied by using the Synthetical Analysis and Classifying Diagnosis Method(SACDM). The main results are as follows:① The coupling between the 200 hPa high-level jet and the 700 hPa low-level jet plays an important dynamical condition for this rainfall. ② The trough and wind shear together cause the heavy rainfall. ③ The physical conditions are favorable of the occurrence of heavy rainfall. A negative center on water vapor flux divergence is also discovered, which takes abundant water vapor and causes the air to be saturated above Xi'an. ④ Based on these results, a physical model for this heavy rainfall case is established.

Key words: trough; water vapor flux divergence; high-level jet and low-level jet; physical model

陕西暴雨多发生在陕南与关中地区^[1-3],比如1998年7月9日陕南丹凤县出现的罕见特大暴雨灾害^[1],比如2003年8月~10月“造成关中渭河流域50年来最严重洪涝灾害”的连续强降雨^[2]。近年来,陕西省的强降雨频次也有逐渐增多的趋势,如2015年和2017年的强降雨频发。由此可见,虽然陕西省位于我国干旱少雨的西北地区,但这并不意味着此地就不发生暴雨灾害。然而,与华北、江淮、华南三大雨带相比,有关陕西省的强降雨研究基础

较为薄弱,相关研究亟待开展。一方面,有效借鉴其它类似雨区(如与陕西位于相同纬度带的华北地区)的已有研究成果显得尤为必要。华北发生过多次致洪暴雨灾害^[4-7],丁一汇等^[5]统计了1958—1976年华北暴雨的天气形势特点:①暴雨主要发生在东高西低、两高对峙等环流形势下;②低涡、暖切变线、低槽以及冷锋是暴雨的主要影响系统;③特大暴雨多出现在两个或两个以上天气系统相互叠加下。另一方面,我国学者近年来总结出了多类暴雨发生的物理

收稿日期: 2016-12-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41627807,61275185);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2014JQ5176);陕西省教育厅自然科学专项资助项目(15JK1506)

作者简介: 李博,男,博士,研究方向为大气探测资料分析与质量控制。E-mail:doctorlee@xaut.edu.cn

通讯作者: 华灯鑫,男,教授,博导,博士,研究方向为激光雷达遥感探测技术及光电检测技术等。E-mail:dengxinhua@xaut.edu.cn

模型^[8-13],在这些模型中,有的侧重于暴雨与低纬季风涡的关联^[8],有的侧重于暖切变上形成的多个中尺度对流系统的作用^[9],有的侧重于诱发暴雨的各种尺度系统及其相互作用^[10],有的侧重于中尺度天气系统的影响^[11],有的侧重于中尺度低涡的作用^[12],有的侧重于暴雨预报指标及其阈值的描述^[13]。

本文在参考上述研究成果与研究方法的基础上,拟借助全国气象台站常规观测资料、西安理工大学气象站观测资料以及 NCEP 全球分析资料,对 2015 年 9 月 9 日~11 日西安一次强降雨进行综合诊断研究。旨在通过这种典型个例的研究,逐步丰富对陕西强降雨灾害的科学认识。

1 资料与方法

1.1 综合诊断方法与研究资料

采用综合诊断方法研究这次强降雨,该方法在文献^[8]中有详细论述,主要是通过事先对不同个例设计不同研究方案,进而借助不同类别资料分类诊断不同结构特征。依据综合诊断技术路线,结合此次个例特征(非对流性强降雨),本文选取的原始资料包括美国 NCEP(the National Centers for Environmental Prediction)全球分析资料、西安理工大学气象站观测资料以及全国气象台站常规观测资料。以这些原始资料为基础,按综合诊断技术路线,继续通过数值计算的方法获取二次处理资料,并用于强降雨分析研究中。

1.2 水汽通量散度的数值计算

表述大气水汽状态的参数较多,如露点温度、相对湿度、比湿、水汽通量散度、混合比、水汽压、绝对湿度以及温度露点差等。其中,水汽通量散度是较为综合的反映大气水汽含量及其来源的参数,其计算过程为:

饱和水汽压:

$$e_s(T) = 6.1078 \times \exp\left[\frac{a(T-273.16)}{(T-b)}\right] \quad (1)$$

饱和比湿:

$$q_s = 0.622 \times e_s(T) / [p - 0.378 \times e_s(T)] \quad (2)$$

比湿:

$$q = q_s \times r / 100 \quad (3)$$

东西方向水汽输送:

$$q_u = q \times u / 9.8 \quad (4)$$

南北方向水汽输送:

$$q_v = q \times v / 9.8 \quad (5)$$

式中, T 为温度; a 、 b 为常数($a=17.27$, $b=35.86$); u 、 v 分别指风在东西方向与南北方向的水平分量; p 为气压; r 为相对湿度。最后由式(4)、(5)求取水汽通量散度。

2 强降雨的综合诊断

我国雨量等级以 24 小时累计雨量为依据,划分标准为:0~10 mm 小雨、10~25 mm 中雨、25~50 mm 大雨、大于 50 mm 暴雨。对于内陆或干旱地区,相应等级的雨量取值还要再低些。

图 1 绘出了陕西省本次降雨 24 小时实况降雨量(单位为 mm),图中黑色小方块表示西安位置(其余图与此相同)。强降雨主要发生在 2015 年 9 月 9 日~12 日,涉及陕西、甘肃、四川、山西、河北等省份;强降雨集中影响陕西的时间为 9 日~11 日。9 月 8 日~9 日,四川、甘肃已经出现了暴雨,受其影响,陕南、陕北局部开始出现降雨(图 1(a));9 月 9 日~10 日,强降雨区整体进入陕西,雨带范围扩大至关中、陕南以及陕北东部区域,西安 24 小时降雨量达到了 20 mm 以上(图 1(b));9 月 10 日~11 日,强降雨区继续影响陕西大部分地区,西安的降雨仍属于中到大雨级别(图 1(c));11 日以后,降雨消失(图略),西安地区持续 3 天的强降雨结束。

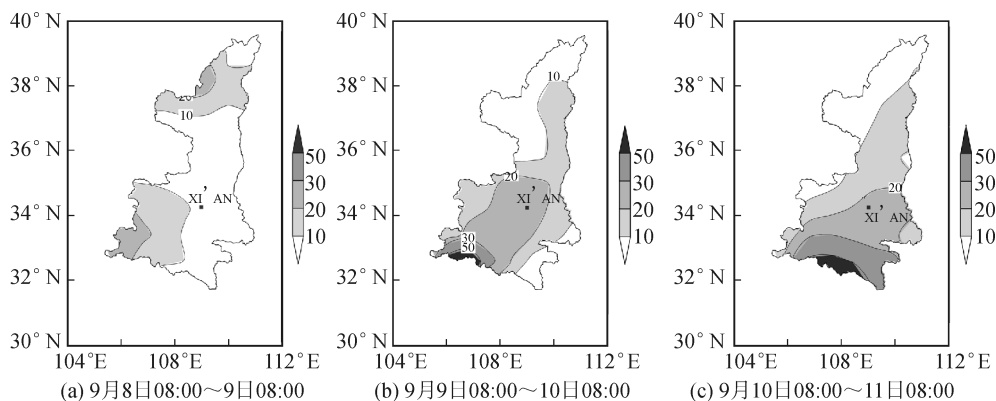


图 1 2015 年 9 月 8 日~11 日 24 小时雨量分布

Fig. 1 The 24 hours accumulated precipitation during 8~11 September 2015

进一步分析逐 6 小时降雨图可以看出,强降雨主要集中于 9 月 9 日 08:00~14:00 和 9 月 10 日 08:00~14:00(全文统一采用北京时间)两个时段,后文将重点分析这两个时段的降雨。

2.1 温、压、风、湿的分析

图 2 是最强降雨时期 700 hPa 位势高度(等值线,单位为 gpm),图中深灰色阴影表示海拔大于 3000 m 的地形(即青藏高原),黑色小方块表示西安位置。9 月 10 日 08:00,西安地区受低压系统控制,低压中心位于外蒙古国(图 2(a),字母 D,位置 122°E, 56°N);6 小时以后,此低压系统发展为一明显的高空槽系统(图 2(b),点虚线),槽线南段直逼西安(黑色小方块)。在这类低值系统控制区域,低层空气从周围流向中心,造成空气堆积并辐合上升,气团在上升过程中体积膨胀温度降低,水蒸汽凝结,易形成云雨。

图 3 为 850 hPa 温度(单位为 K),图中深灰色阴影表示海拔大于 3000 m 的地形(即青藏高原)。

图 3 中,在西安的偏西方向存在暖气团,西安位于由暖气团延伸出来的暖舌(点虚线)的东南侧区域,而西安东北侧存在冷气团中心(图 3(b),字母 L),西安地处高温与低温过渡带(冷暖空气交汇区域)。高温与低温的相对温差可以加速空气流动,进而导致冷空气与暖空气相遇并形成降雨。

相对湿度表示湿空气中所含水蒸汽接近饱和的程度。空气在温度降低的过程中,只要其中的水分未被吸出,则其含水量不变,但空气的相对湿度值却会增加(反之,温度升高,其相对湿度值降低),如果温度降低到一定程度,就会使饱和水蒸汽凝结成水珠,从而产生降雨。图 4 为 850 hPa 相对湿度,浅色表示相对湿度 90% 以上的区域,深灰色阴影表示海拔大于 1500 m 的地形(即青藏高原)。由图 4 可见,西安处于高湿区域,相对湿度达到 90% 以上,再结合图 3 的温度分布可知,此处是冷暖空气交汇区域,水蒸汽易凝结成水珠形成降雨。

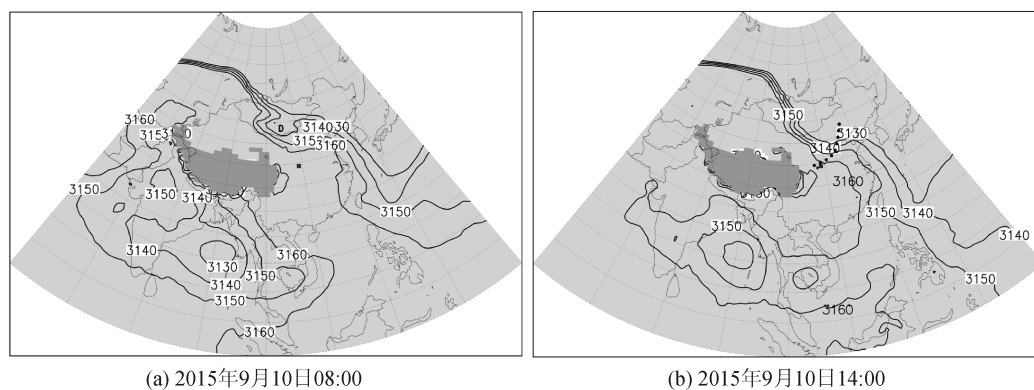


图 2 700 hPa 位势高度
Fig. 2 The 700 hPa potential height

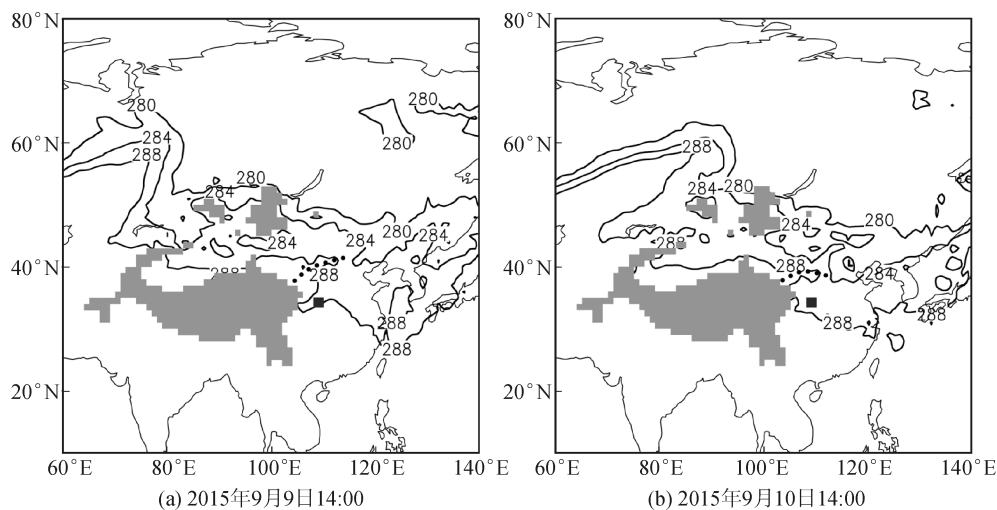


图 3 850 hPa 温度
Fig. 3 The 850 hPa temperature

图5为850 hPa风场(单位为 m/s),图中黑色加粗箭头表示影响西安的气流。由图5(a)可见,西安东北侧区域有一小股冷空气向西南方向移动(粗箭头)并侵入西安,冷空气与南方较暖气团在西安上空交汇,这种冷暖空气的交汇有利于云层厚度的增

加和降雨的产生。由图5(b)可见,冷气团主体位于蒙古新疆一带,从中分离出一股较为强劲的冷空气沿东南路径侵袭西安(粗箭头),而此时西安恰受东南暖风(细箭头)的影响,冷暖空气的交汇更为明显。

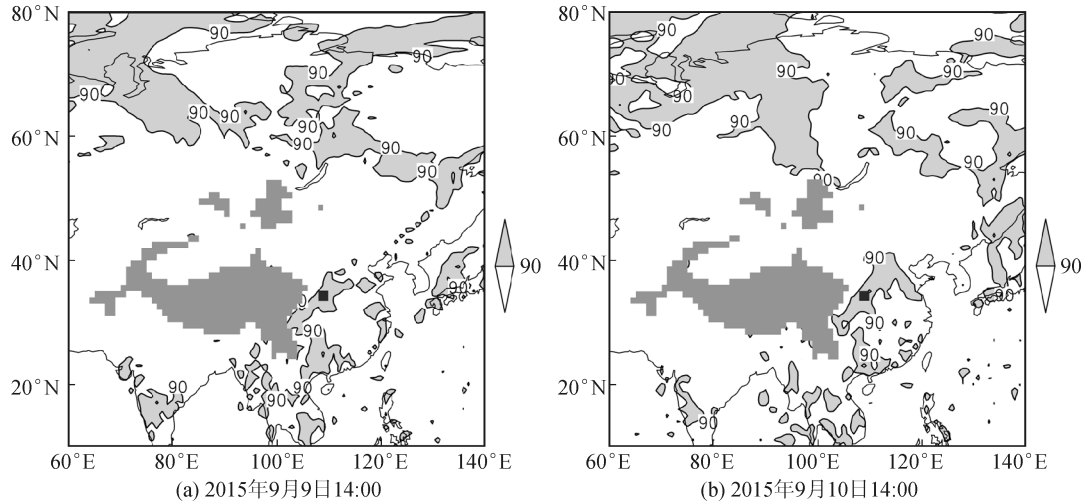


图4 850 hPa 相对湿度
Fig. 4 The 850 hPa relative humidity

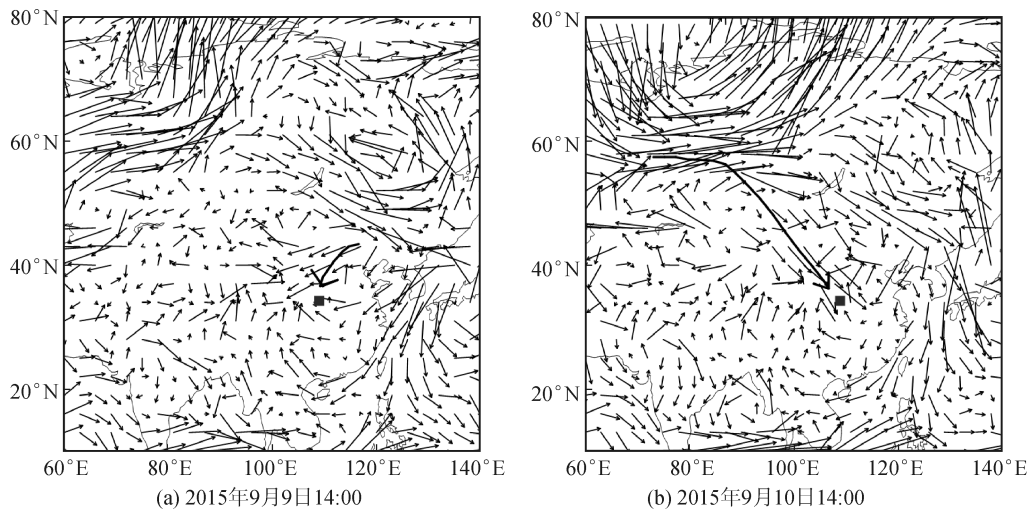


图5 850 hPa 风场
Fig. 5 The 850 hPa wind field

2.2 水汽通量散度的分析

由上一节分析已经知道,形成降雨的必要条件之一是要有足够多的水分。然而,这些水分是西安局地就有还是靠外围流入? 计算表明,单靠当地已有的水分,是难以形成强降雨的。因此,必须要有水汽不断地输入降雨区。

此处引入水汽通量散度的概念。该参数可定量描述水汽输送源地、方向、大小以及水汽在何处集中^[14],其意义是单位时间、单位体积中水汽的净流失量,其值为正的地区表示水汽自该地区向四周辐散,称该地区为水汽源,反之,称该地区为水汽汇合。图6为降雨强盛期的水

汽通量(箭头)及水汽通量散度(虚线等值线)分布,水汽通量散度单位为 $10^{-9} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$,箭头表示大于 0.002 6 的水汽通量,单位为 $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$,黑色阴影表示海拔大于 3 000 m 的地形(即青藏高原)。

由图6可知,西安地区(黑色小方块)水汽通量散度呈负值分布,代表该地有水汽吸收、有外来的水汽供应。

进一步分析图6可发现,西安地区水汽主要是来自于西安的东部,即东海所在区域(长虚线箭头);同时,西安地区还受东南方向水汽的影响(短虚线箭头),其东南方向是三峡大坝所在区域(黑色小圆点)。

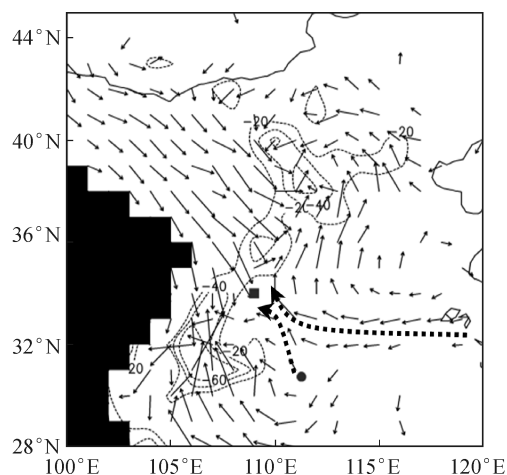


图 6 2015 年 9 月 10 日 14:00 700 hPa 水汽通量和水汽通量散度分布

Fig. 6 The distribution of 700 hPa water vapor flux and its divergence at 14:00 September 10th 2015

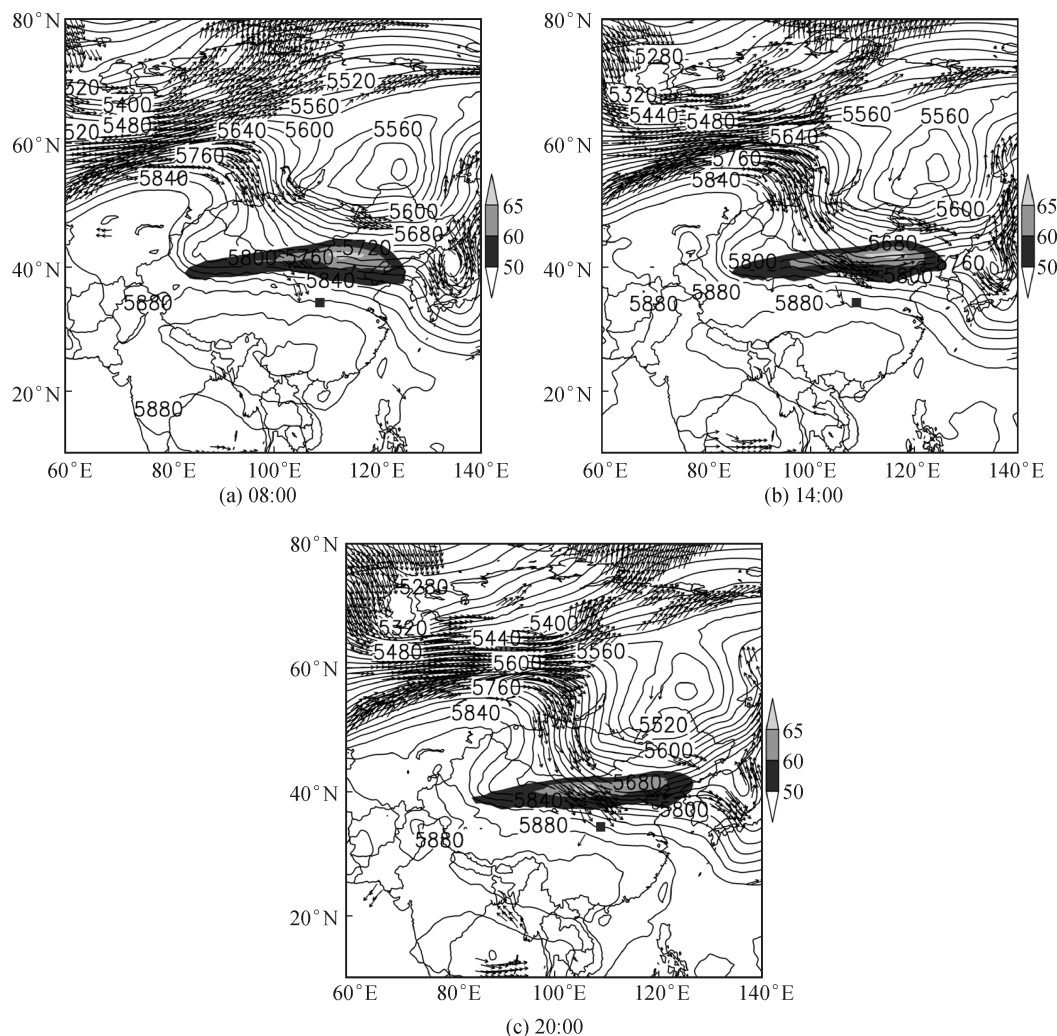


图 7 2015 年 9 月 10 日 08:00~20:00 天气形势

Fig. 7 The composite synoptic weather pattern from 08:00 to 20:00 September 10th 2015

图 7(a)中,2015 年 9 月 10 日 8:00,西安正北方有强劲的、较大范围的高空急流带,最低风速达到 50 m/s,中心风速突破 65 m/s,跨越 40 个纬度区

域,急流中心区域位于西安东北方向,如此强烈的高空急流与低层从西北方向分支出来的急流相互耦合;6 小时以后(图 7(b)),60~65 m/s 的强风速中

2.3 高低空急流的分析

急流是指大气中“风速强、宽度窄”的气流带,按急流出现的高度不同,可以分为高空急流(ULJ)和低空急流(LLJ),通常将 300 hPa 或 200 hPa 层风速不低于 30 m/s 的强风区称为高空急流;将出现在对流层中低层,风速不低于 12 m/s 以上的强风区称为低空急流^[15-16]。

图 7 为本次强降雨期间的大尺度天气形势,图中填色区表示 200 hPa 高空急流,箭矢线表示 700 hPa 低空急流,等值线代表 500 hPa 等高线(单位为 gpm)。

心向西蔓延,而大于 65 m/s 的中心急流带位置维持稳定,低空急流不仅与 $50 \sim 60 \text{ m/s}$ 的高空急流带相互耦合,还与 $60 \sim 65 \text{ m/s}$ 的高空急流中心有耦合现象;再过 6 小时(图 7(c)),高空急流继续向西蔓延,强风速中心从之前西安的东北方向发展到了西安的西北方向,另一方面,从西北方向分支出来的低空急流范围进一步扩大,与大于 65 m/s 的高空急流中心发生耦合,可见,高低空耦合区域进一步增大。诸多研究已表明^[4,8,10],高低空急流的耦合可以大大增强空气的上升运动,有助于降雨的增强。

3 物理模型的建立

根据上述研究结果,可以建立此次西安强降雨发生的物理模型,如图 8 所示。

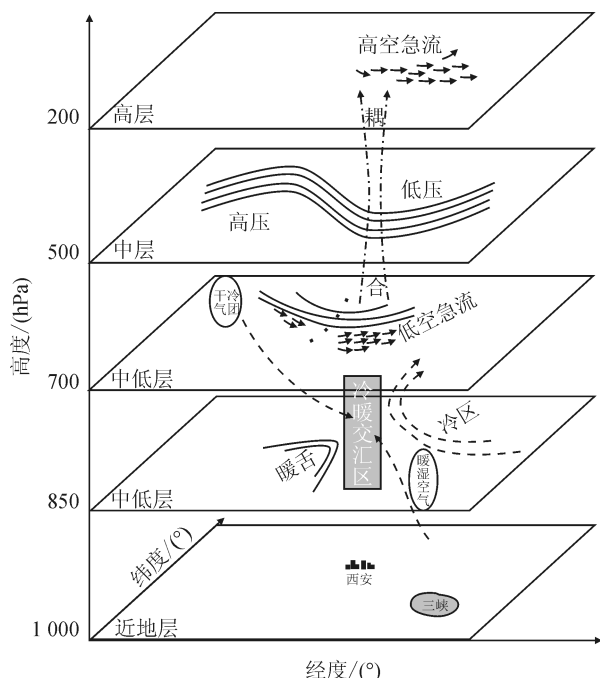


图 8 2015 年 9 月 9 日~11 日西安强降雨物理模型

Fig. 8 The physical model for a heavy rainfall case occurred during September 9~11th 2015 in Xi'an

本次降雨发生在高空急流(200 hPa)和低空急流(700 hPa)耦合(点虚线)的有利条件下。西安上空受低值系统影响(500 hPa 低压),特别是在 700 hPa 存在一明显的低空槽线(粗点线),这是造成此次强降雨的主要天气系统。在对流层中低层(700~850 hPa),由东海区域(灰色带箭头的双虚线)与三峡区域(黑色带箭头的单虚线)将暖湿空气输送至西安,导致西安地区相对湿度达 90% 以上;同时,北方干冷空气由 700 hPa 向下侵入,并沿东南路径进入西安,西安成为冷暖空气交汇区。在 850 hPa,西安西偏北方向存在一暖舌区域,东北侧则是较冷中心,

中间(即西安所处位置)是暖气团的过渡带。高低空急流的耦合、槽前各股气流的辐合,均增强了西安上空气流的上升运动。由此,较为充沛的水汽、较强的上升运动以及冷暖空气的交汇带共同作用形成了此次强降雨。

4 结 论

借助 NCEP 全球分析资料、西安理工大学气象站观测资料以及全国气象台站常规观测资料,对西安 2015 年 9 月初的一次强降雨过程开展了综合诊断研究,得出了几点结论。

1) 强降雨的产生是多种有利的气象要素共同作用的结果,包含位势高度图中槽线附近的辐合上升气流、温度图中冷暖空气的交汇、相对湿度图中的较大相对湿度等。

2) 强降雨水汽来源于两条输送通道,主通道为东部沿海,次通道为位于西安东南方位的三峡大坝。需要指出的是,由此个例分析可见,强降雨期间,西安降雨的部分水汽源自于三峡地区,当地水汽沿西北路径翻越秦岭,并经 3000 m 左右高空输送至西安上空。

3) 对急流的分析研究表明,此次个例存在明显的急流耦合,即西安高空 200 hPa 强风速带向西扩展,并与低空 700 hPa 由西北方位的强风速带中分离出来的急流相互耦合。

4) 本文在上述研究的基础上,构建了此次强降雨发生的物理模型。模型对今后西安地区类似暴雨灾害的预报具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 赵世发, 王俊, 周军元, 等. 陕南两次罕见的特大暴雨对比分析 [J]. 气象, 2001, 27(10): 28-32.
ZHAO Shifa, WANG Jun, ZHOU Junyuan, et al. Contrast analysis between two rare torrential rains over the south of Shaanxi province [J]. Meteorological Monthly, 2001, 27(10): 28-32.
- [2] 段桂兰, 陶建玲. 对 2000—2003 年陕西三场洪灾暴雨天气的对比分析 [J]. 灾害学, 2004, 19(S0): 24-28.
DUAN Guilan, TAO Jianling. Comparative analysis of three rainstorms in Shaanxi province from 2000 to 2003 [J]. Journal of Catastrophology, 2004, 19(S0): 24-28.
- [3] 白涛, 李崇银, 王铁, 等. 干侵入对陕西“2008.07.21”暴雨过程的影响分析 [J]. 高原气象, 2013, 32(2): 345-356.
BAI Tao, LI Chongyin, WANG Tie, et al. Dry intrusion in shaanxi province “2008.07.21” impact analysis

- of analysis of the heavy rain process [J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(2): 345-356.
- [4] 孙建华, 赵思雄, 傅慎明, 等. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨的多尺度特征 [J]. 大气科学, 2013, 37(3): 705-718.
- SUN Jianhua, ZHAO Sixiong, FU Shenming, et al. Multi-scale characteristic of record heavy rainfall over Beijing area on July 21, 2012 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2013, 37(3): 705-718.
- [5] 丁一汇, 席国跃, 李一寰. 黄河中游“58.7”大暴雨成因的天气学分析 [J]. 大气科学, 1987, 11(1): 100-107.
- DING Yihui, XI Guoyue, LI Yihuan. The root cause of the middle reaches of the Yellow River “58.7” torrential rain synoptic analysis [J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1987, 11(1): 100-107.
- [6] 刘盎然, 郭大敏, 辛宝恒, 等. 关于“75.7”华北暴雨的水汽问题 [J]. 气象学报, 1979, 37(2): 79-82.
- LIU Angran, GUO Damin, XIN Baoheng, et al. The water vapor related to the “75.7” heavy rainfall in North China [J]. Journal of Meteorological, 1979, 37(2): 79-82.
- [7] 江吉喜, 项续康. “96.8”河北特大暴雨成因的中尺度分析 [J]. 应用气象学报, 1998, 9(3): 304-313.
- JIANG Jixi, XIANG Xukang. Mesoscale analysis of causes for “96.8” extreme torrential rain of Hebei province [J]. Journal of Applied Meteorology, 1998, 9(3): 304-313.
- [8] 李博, 刘黎平, 王改利, 等. “0866”华南特大暴雨灾害的综合诊断 [J]. 科学通报, 2017, 62(13): 1-11.
- LI Bo, LIU Liping, WANG Gaili, et al. The meso- β scale characteristics during the “0866” extremely heavy rainfall in south China by using SACDM [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(13): 1-11.
- [9] 张立生, 孙建华, 赵思雄, 等. 长江中游暖切变型暴雨的分析研究 [J]. 气候与环境研究, 2007, 12(2): 166-180.
- ZHANG Lisheng, SUN Jianhua, ZHAO Sixiong, et al. A study on heavy rainfall associated with warm shear line in the middle reaches of the Yangtze River in summer [J]. Climatic and Environmental Research, 2007, 12(2): 166-180.
- [10] ZHAO Sixiong, BEI Naifang, SUN Jianhua. Mesoscale analysis of a heavy rainfall event over Hong Kong during a pre-rainy season in South China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2007, 24(4): 555-572.
- [11] 夏茹娣, 赵思雄. 2005 年 6 月广东锋前暖区暴雨 β 中尺度系统特征的诊断与模拟研究 [J]. 大气科学, 2009, 33(3): 468-488.
- XIA Rudi, ZHAO Sixiong. Diagnosis and modeling of meso- β scale systems of heavy rainfall in warm sector ahead of front in south China in June 2005 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 33(3): 468-488.
- [12] 傅慎明, 于翡, 王东海, 等. 2010 年梅雨期两类东移中尺度涡旋的对比研究 [J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(8): 1282-1300.
- FU Shenming, YU Fei, WANG Donghai, et al. A comparison of two kinds of eastward-moving mesoscale vortices during the Meiyu period of 2010 [J]. Science China: Earth Science, 2012, 42(8): 1282-1300.
- [13] 林爱兰, 谷德军, 郑彬, 等. 6 月广东持续性暴雨过程概念模型的建立 [J]. 热带气象学报, 2015, 31(3): 289-299.
- LIN Ailan, GU Dejun, ZHENG Bin, et al. Establishment of conceptual model for Guangdong persistent torrential rain in June [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2015, 31(3): 289-299.
- [14] 文宝安. 物理量计算及其在暴雨分析预报中的应用——水汽通量与水汽通量散度 [J]. 气象, 1980, (6): 34-36.
- WEN Baoan. Physical quantity calculation and its application in analysis forecast heavy rain water vapor flux and vapor flux divergence [J]. Meteorological Monthly, 1980, (6): 34-36.
- [15] 李博, 赵思雄. 2007 年入梅期由横槽与低涡切变引发淮河流域强降水的诊断研究 [J]. 大气科学, 2009, 33(6): 1148-1164.
- LI Bo, ZHAO Sixiong. A study of heavy rainfall resulting from transversal trough and shear line-low vortex in the Huaihe River during the Meiyu onset of 2007 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 33(6): 1148-1164.
- [16] 朱乾根, 周伟灿, 张海霞. 高低空急流耦合对长江中游强暴雨形成的机理研究 [J]. 南京气象学院学报, 2001, 24(3): 308-314.
- ZHU Qiangen, ZHOU Weican, ZHANG Haixia. Mechanism of the formation of torrential rain by coupled high/low level jets over the middle reaches of the Yangtze River [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2001, 24(3): 308-314.

(责任编辑 周 蓓)