

西安一次强局地突发暴雨成因分析

高雅黎，庞菲菲

(西安市气象局 公共气象服务中心,陕西 西安, 710016)

摘要：2020 年 7 月 10 日西安出现了一次强局地突发暴雨过程。本文利用实测降水量给出了此次暴雨过程的落区分布和小时雨强演变；利用气象常规探测、气象卫星云图和新一代天气雷达等探测资料，从环流形势配置演变、物理量场和中尺度特征结构、云图和雷达回波产品的应用等方面，对此次天气过程的特点、成因等做了系统地总结分析，凝练出此类暴雨的环流形势和天气系统的配置特点、中尺度特征和预报着眼点。

关键词：强局地性；突发暴雨；预报着眼点

1. 降水过程概况

2020 年 10 日 07 时-11 日 07 时，陕北南部、关中中西部、陕南西部共 83 个区县 1566 个监测站出现降雨（图 1），强降雨主要分布在汉中、宝鸡和西安市，其中 16 站大暴雨，最大宁强广坪 160.8 毫米，其次宁强青木川 151.2 毫米、略阳郭镇 146.8 毫米；79 站暴雨，西安站 72.2 毫米，西安城区汉城湖公园站最大 83.3 毫米；201 站大雨。全省共 22 个监测站 1 小时雨量超过 30 毫米（见表 1），其中最大 10 日 13-14 时三原马额小时雨量达 58.6 毫米，其次 10 日 15-16 时西安大明宫小时雨量为 54.7 毫米、13-14 时城固月明小时雨量为 50.2 毫米。此次暴雨落区分散、雨强大、来势猛、历时短和局地性强，尤其在西安主城区的小时雨强超过 50 毫米，为历史罕见，引发城区洪涝，造成道路积水严重，车辆淹没交通瘫痪。

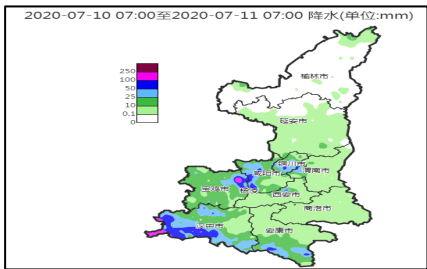


图 1. 2020 年 7 月 10 日 07 时--11 日 07 时陕西省 24 小时降水量

区县	站点	时间	小时雨强	区县	站点	时间	小时雨强
三原	三原马额	14 时	58.6	乾县	乾县王村	17 时	38.8
西安	大明宫*	16 时	54.7	南郑	黄官	13 时	37.7
城固	月明	14 时	50.2	西安	汉城湖公园*	16 时	37.4
灞桥	十里铺韩耳垛小学	16 时	49.2	扶风	扶风法门寺	16 时	34.9
新区	张家沟	14 时	47.8	麟游	麟游峡口水库	10 时	34.1
西安	西安中学	16 时	46.5	耀州	吴庄	13 时	33.5
西安	市政府*	16 时	42.1	紫阳	斑桃	15 时	33.5
印台	双碑	13 时	41.7	西安	兴庆公园*	16 时	33.2
西安	汉城湖公园*	15 时	41	岐山	岐山京当乡	17 时	33.1
武功	武功武功镇	15 时	40.2	武功	武功县苏坊	16 时	30.8
西安	西安	16 时	39.6	南郑	红庙	13 时	30.6

表 1. 202 年 7 月 10 日 07 时-11 日 07 时全省小时雨量 ≥ 30 毫米监测站

单站降水的逐小时演变图（图 2）可以看出，汉中和宝鸡地区降水持续时间较长，降水以稳定性降水夹杂短时强降水为主，而西安城区降水发生在 10 日下午 14-16 时，以短时暴雨为主，集中在 1-2 小时内，具有强局地、突发性强和雨强大的特点，从而致灾强。

此次过程降雨特点主要为：一是强降水时段集中、雨强大且持续时间较短，二是局地性强，分布区域分散，较大雨强主要在汉中西部、宝鸡东部等地区。尤其是西安城区降水表现为明显短时强对流，强降水主要集中在 14-16 时，瞬时降水量大，降水时间集中，超过了城市排水能力，造成部分城区道路积水严重。西安城区发生如此剧烈的短时大暴雨为历史少见，也是预报预警的难点，有必要对此类短时大暴雨的环流背景、天气系统配置、动力场特征、热力特征和雷达回波特征进行系统分析，提高对此类暴雨成因的认识，凝练预报着眼点，为准确预报此类暴雨提供科学参考。

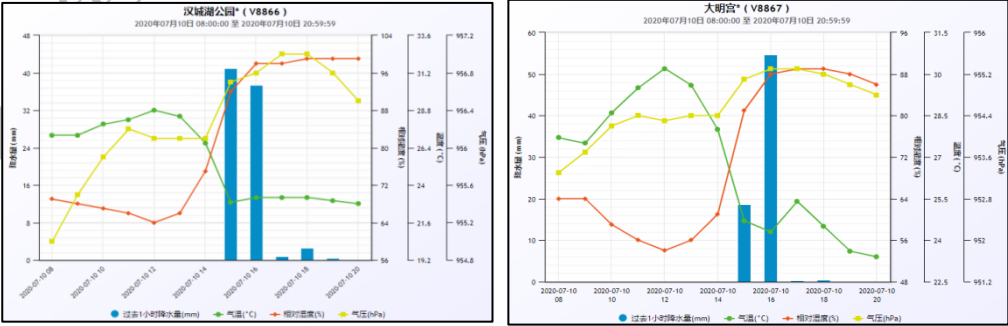


图 2 西安市汉城湖、大明宫遗址公园雨量监测站逐小时降水量（单位：mm，绿柱）、气温（单位：℃，红点线）、相对湿度（单位：% ，黄点线）、气压（单位：Hpa，绿点线）

2. 天气尺度环流演变

2020年7月10日08时, 500hPa上欧亚中高纬上空呈两脊一槽型, 陕西受低涡底部分裂的短波槽影响(图3a), 500hPa陕西中南部地区盛行一致西南风, 槽后有强的冷平流输送, 随着短波槽缓慢东移造成陕西中南部地区冷空气过境, 增加了大气层结的不稳定。700hPa(图3b)上, 四川、重庆经湖北、安徽、江苏有东西向暖切变, 陕西处在暖切前部的东南气流中, 中南部为偏东气流, 白天有明显的东南风增强, 08时偏东风风速约4-6m/s, 20时陕南地区增强到12m/s, 西安地区8m/s。850hPa(图3c)与700hPa切变线位置较一致, 10日白天陕西中南部风速显著增大, 汉中偏东风从6m/s增强到16m/s, 且在汉中西部宁强形成了偏东气流和偏西气流汇合, 形成气旋性辐合, 整层大气均处在暖气团控制下, 为对流的发生提供动力和热力条件。

这次过程主要影响系统为高空冷涡后部的干冷空气, 随短波槽东移南下到陕西上空; 低层存在切变辐合和强盛的偏南暖湿气流, 高层干冷和低空暖湿造成以雷电强降水为主的强对流天气; 特别关注低空的东南暖湿气流的突发增强引发强对流降水加强维持。

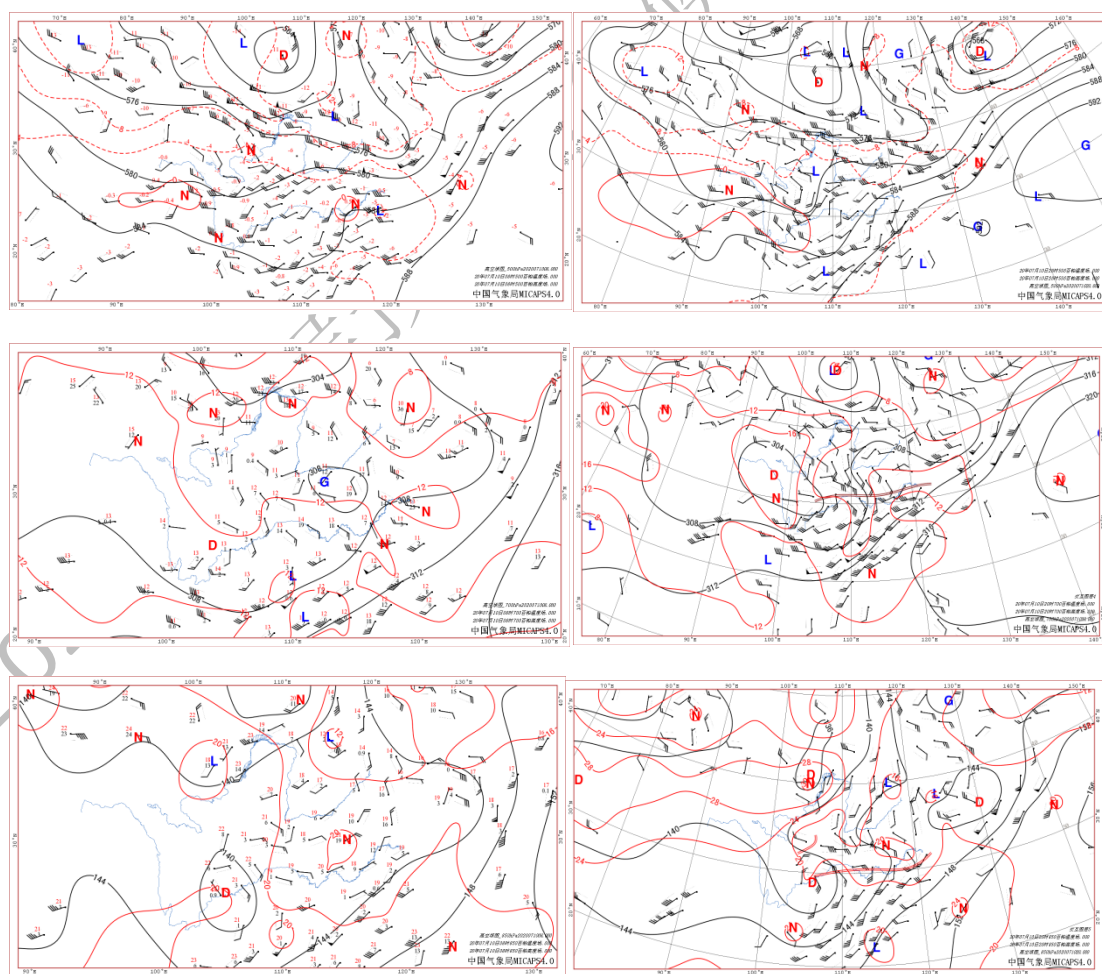


图3 2020年7月10日08-20时高空天气环流形势图

3. 物理量条件分析

3.1 水汽条件

3.1.1 整层大气水汽通量

能造成陕西大面积出现强降水，水汽供应十分必要。10日08时(图5a)，陕西均处于低水汽供应区，水汽通量值大于 $5000\text{g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{hPa})^{-1}$ 强水汽中心位于我国华南地区，其上空偏西南气流一直向长江淮河一带输送水汽。14时-20时(图5b-c)西南气流明显增强且北推，陕南汉中处在了该水汽输送的前端，水汽通量明显增强，处于 $3000\text{--}4000\text{g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{hPa})^{-1}$ 的水汽通量中。陕西地区降水增强，但西安北郊局地出现如此大的短时暴雨，水汽通道上无明显水汽突增，11日02时(图5d)水汽输送带继续在陕西维持。由以上分析可以看出，大气整层水汽通量在局地短时暴雨预报中具有一定的意义，水汽通量的突增对应降水的出现。但局地强降水并不需要很强的水汽供应，一定的水汽供应在适当的环境下即可产生短时大暴雨。

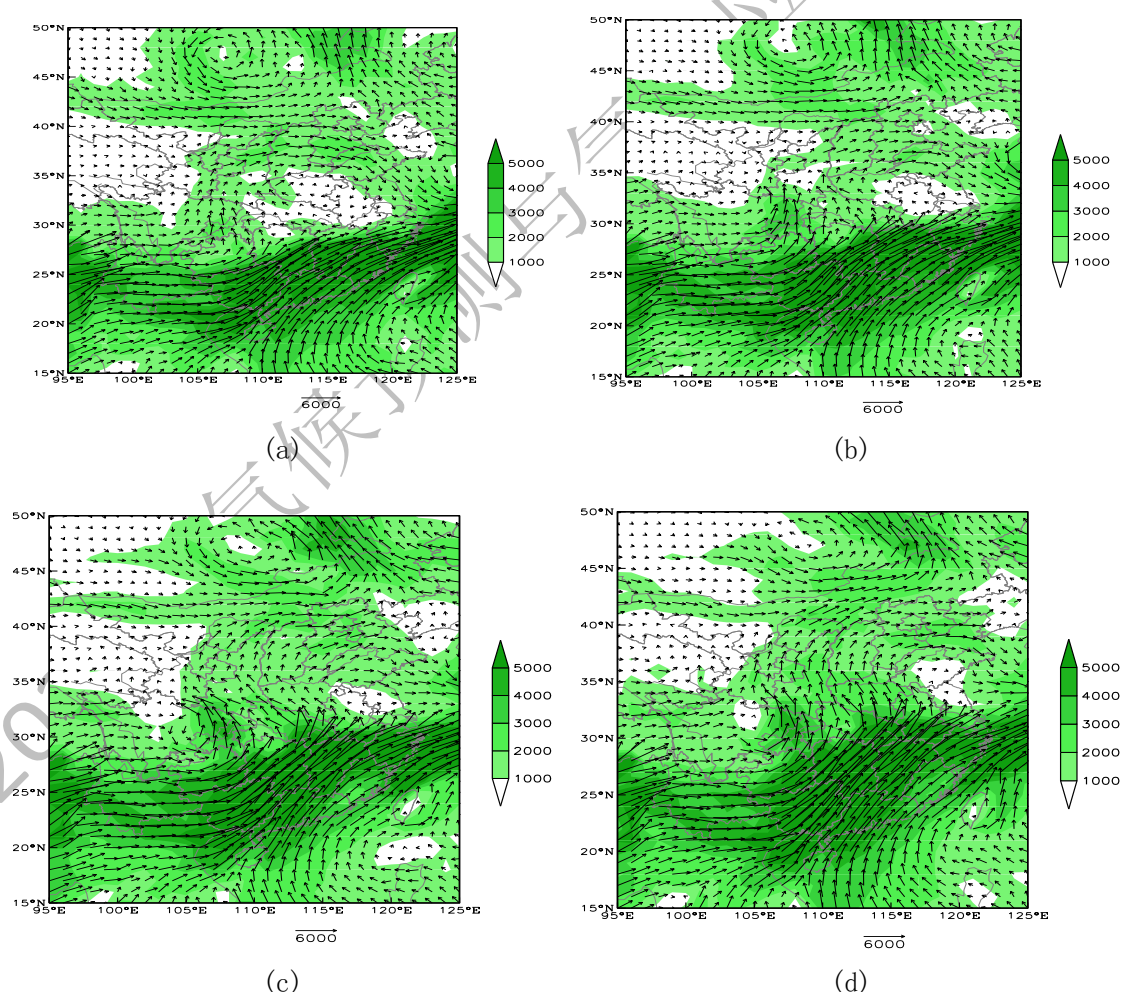


图4 2020年7月10日整层大气水汽通量 (a. 10日08时; b. 10日14时; c. 10日20时; d. 11日02时)

3.1.2 低层水汽通量及散度

与持续性的区域性暴雨相同，要产生短时局地强降水，必须要有水汽输送和辐合。对水汽通量散度进行分析发现 700hPa 水汽通量散度对降水落区有较好指示意义，10 日 08-14 时 700hPa 水汽通量散度在宝鸡北部及陕北南部地区小于 0，14-20 时辐合强度明显增强，汉中地区出现了-20 的水汽辐合中心（图 6b），低层大气水汽辐合达到最强，与降水落区对比，发现该时段降水落区与水汽通量辐合区位置完成吻合。14 时-20（图略）700hPa 关中东部地区已经由辐合区变成水汽辐散区，说明该地水汽辐合持续时间短，以短时降水为主，20 时-11 日 02 时陕南地区的水汽辐合区一直维持，对应陕南地区的降水天气。因此低层 700hPa 水汽通量散度在大范围降水中具有一定的预报参考意义。水汽辐合区对应着降水落区，水汽辐合最强处对应降水强度最大处，水汽辐合区的东移对应和降水落区的东移，两者从时间和位置上完全吻合。

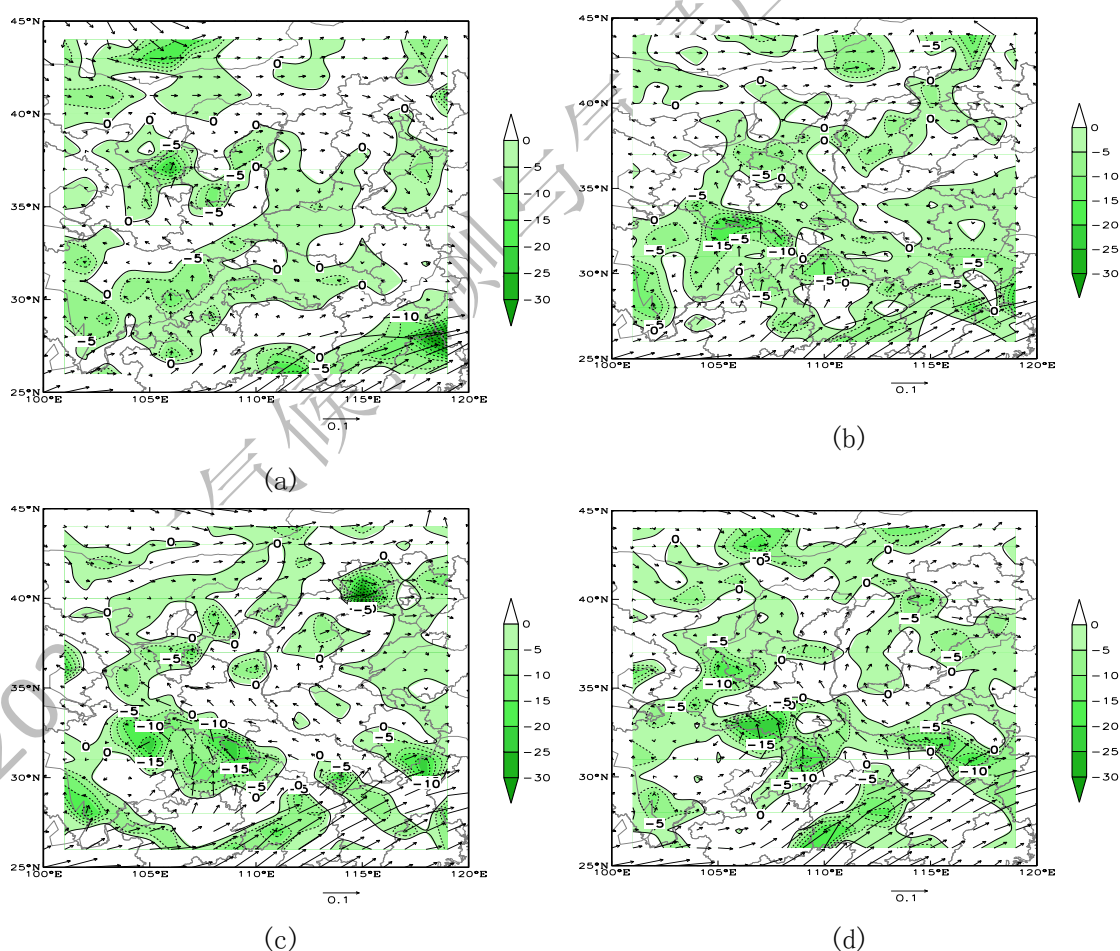


图 5 2020 年 7 月 10 整层大气水汽通量（单位： $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ ）

(a. 10 日 08 时；b. 10 日 14 时；c. 10 日 20 时；d. 11 日 02 时)

3.3.2 假相当位温

假相当位温水平分布和垂直分布与对流天气的发生发展有极大关系，也反映了大气中能量的分布。10 日 08 时 850hPa 假相当位温的值在我省境内约 70–75℃（图 7a），全省能量值较高。到了下午， θ_{se} 较 08 时分布基本一致（图 7b），但汉中及宝鸡地区 θ_{se} 处在 70–80℃ 高能舌区。700hPa 的假相当位温变化与 850hPa 基本同步，该能量舌反映了高能、高湿、不稳定的暖湿气流，说明有明显偏南气流向陕南汉中地区输送大量的水汽和不稳定能量。

值得注意的是大气中低层，在关中东部即能量舌东处有一低假相当位温区，说明此地有较弱冷空气，东路弱冷空气与高能舌对峙，触发了陕西汉中及宝鸡东部地区的短时暴雨天气，暴雨区就位于冷暖交汇处。根据上面分析可见本次过程中 850hPa 与 700hPa 假相当位温在短时暴雨落区和强度预报方面具有较好指示，尤其是 850hPa 低能干冷空气夹击能量舌的位置，能较好的判断出落区位置。

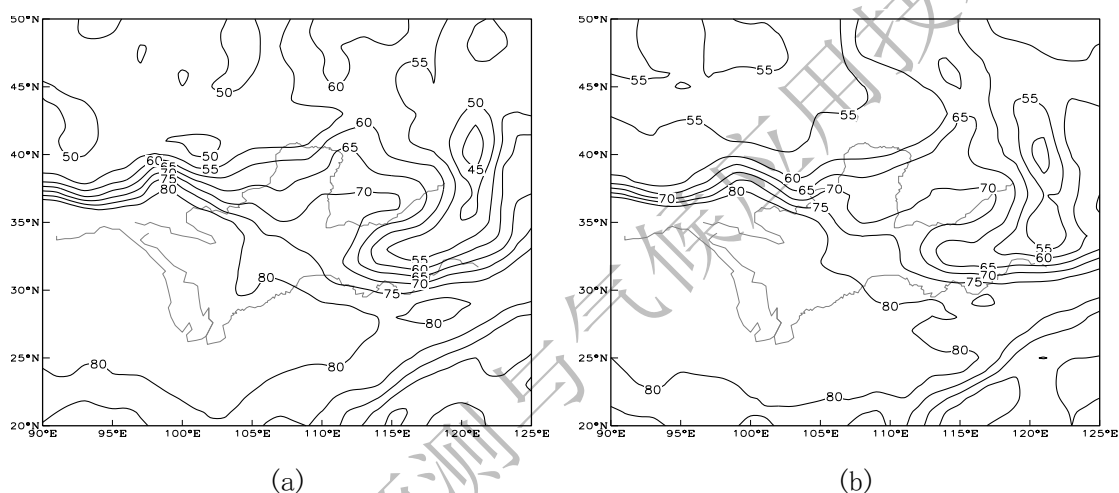


图 6 2020 年 7 月 10 日 850hPa 假相当位温分布（单位：℃）（a. 10 日 08 时；b. 10 日 20 时）

4. 动力条件分析

计算整层大气散度场，发现本次过程辐合区主要发生在大气低层 700hPa 上下（图 8a），10 日 08–14 时 700hPa 汉中、关中东部境内均为辐合区，对应高层 200hPa 该地有明显辐散（图 8b），高层辐散低层辐合的大气层结，对上升运动非常有利。西安地区强降水发生在 10 日下午，从上升运动的剖面图可以看出（图 8c），14 时西安站上空出现了明显上升运动，整个上升气流发展高度达 400hPa，强上升区约 -0.6 pa/s 位于 500hPa 附近。17 时后很快转为下沉气流，可见强降水持续时间不会太长，同时由于大气辐合较强，上升运动发展高度高，有利于中尺度对流系统的上升发展。

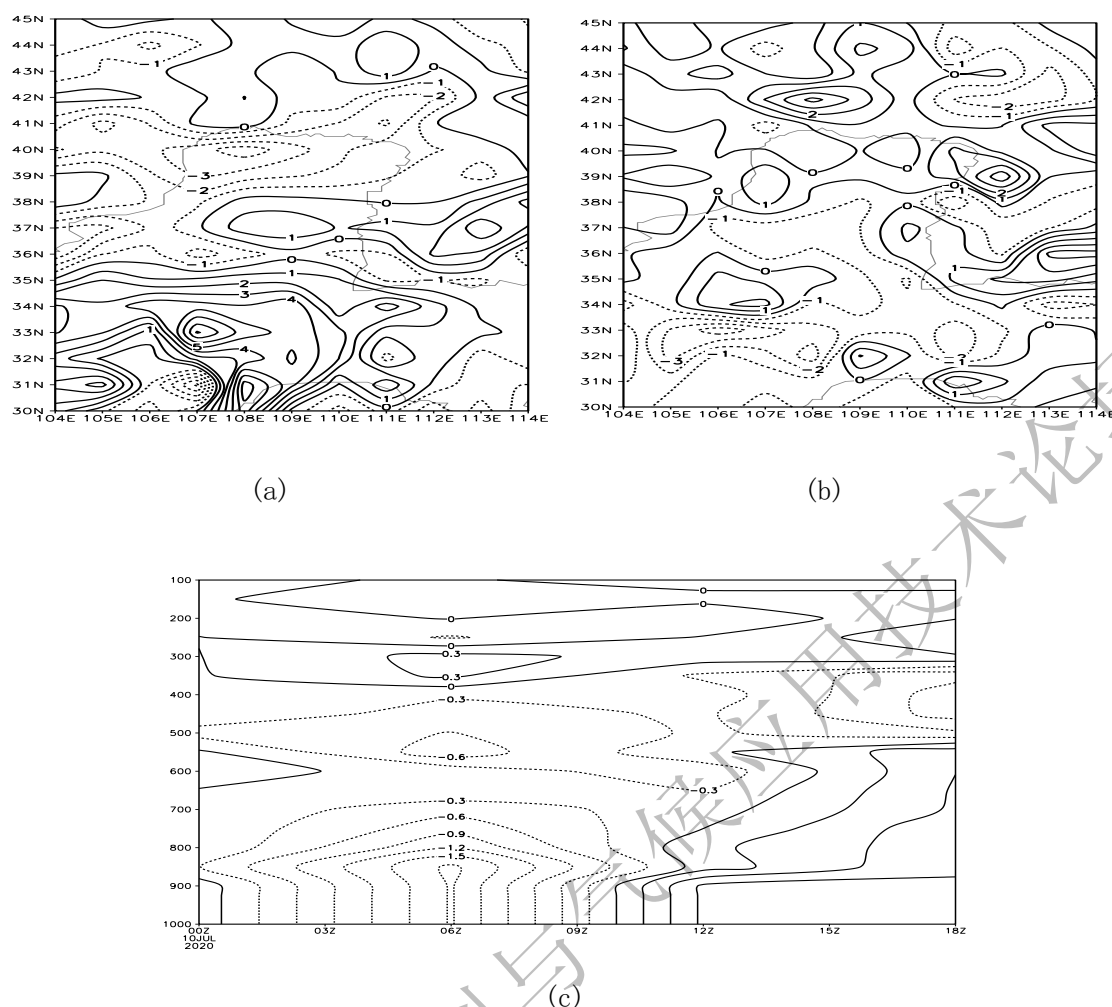


图7 2020年7月10日14时700hPa及200hPa散度(a)和(b) (单位: $1/s$), 西安上升运动时间剖面(c) (单位: pa/s)

5. 地面辐合线可能是造成西安地区强降水的触发系统

从地面形势场的演变来看(图9), 10日14时西安强降水发生前, 武功至西安有一东西向地面中尺度辐合线, 长度约200km, 辐合线两侧西安地区温度差异并不明显, 但从温度平流差异来看, 西安东部有明显的东北气流, 有暖平流输送, 而在辐合线南侧, 从宝鸡到西安一带有弱的偏西北风, 有冷平流输送。西安地区受上游宝鸡地区降水影响, 出现了降温增湿情况, 辐合线附近温度平流差异较大, 该辐合线一致维持在原地稳定少动, 辐合线南侧偏西北弱冷空气流受秦岭地形阻挡, 在该地区堆积, 起到冷垫作用。辐合线的维持有利于偏东北暖空气在冷垫上辐合上升, 产生强降水。

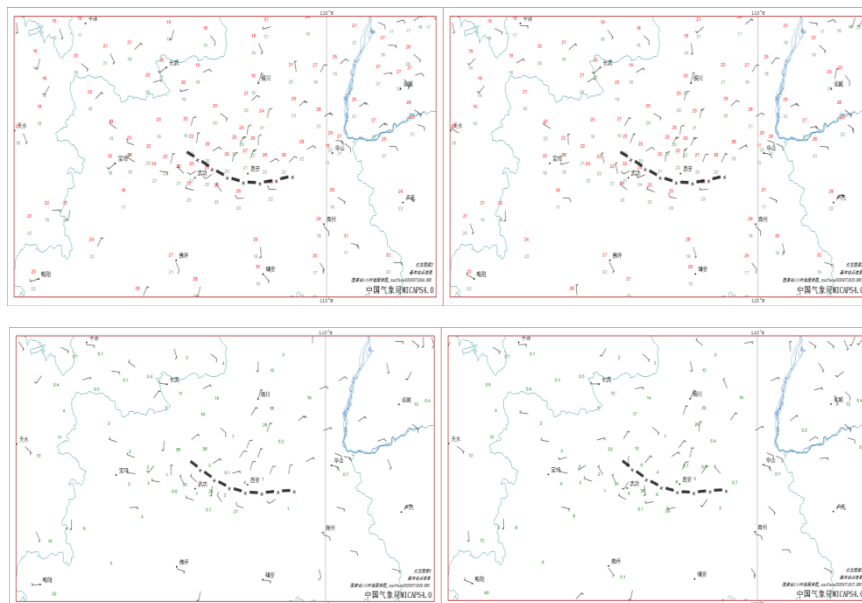


图8 2020年7月10日14-17时地面风场和辐合线

6. 中小尺度特征分析

6.1 卫星云图演变特征

从TBB逐小时演变图可以看出(图10),7月10日08时从甘肃东部—山西北部存在东北—西南向云带,云带中镶嵌多个中尺度云团。之后云带北段迅速东移,南段在东移过程中迅速发展,TBB低于 -46°C 区域显著增大并向陕西境内发展。14:00—15:00西安境内强降水区TBB低于 -46°C 云区影响。16:00之后云带在东移过程中逐渐减弱。

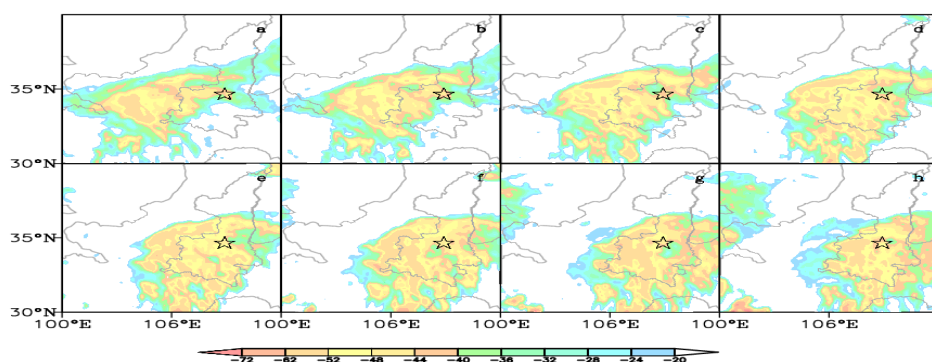


图9 7月10日11:00—18:00TBB(云顶亮温)演变

6.2 雷达回波演变特征

2020年7月10日08时,蒙古冷涡底部下滑冷空气与副高北侧偏南气流在甘肃东部形成切变,700 hPa湖北至甘肃东部为较一致的东南气流,此时降水区

主要分布在甘肃与陕西交界附近；500 hPa 切变逐渐东移，700 hPa 东南气流逐渐加强，降水区逐渐东移。综合分析雷达回波与速度图发现在 500 hPa 切变东侧和 700 hPa 东南气流前方的风速辐合区有回波生成发展，回波强度一般为 30~45 dBz。13:30 在东北-西南向回波主体前方强中心大于 45 dBz，因关中南部分为秦岭山区，降水区前侧出流逐渐在咸阳西侧形成偏西气流，与地面渭南—西安的偏东气流在咸阳附近形成辐合区，在偏西气流前方有多个零散的单体回波生成，中心强度迅速增大至 45 dBz 以上。单体回波迅速发展 14:48 在咸阳—西安附近合并为东西向回波块，中心强度增大至 55 dBz 以上，西安附近降水增强，西安附近转为较一致的偏东气流。之后回波块稳定维持在咸阳—西安附近，面积逐渐增大。15:30 以后回波块结构逐渐松散，中心强度逐渐减弱，降水随之减弱（图 11，12）。

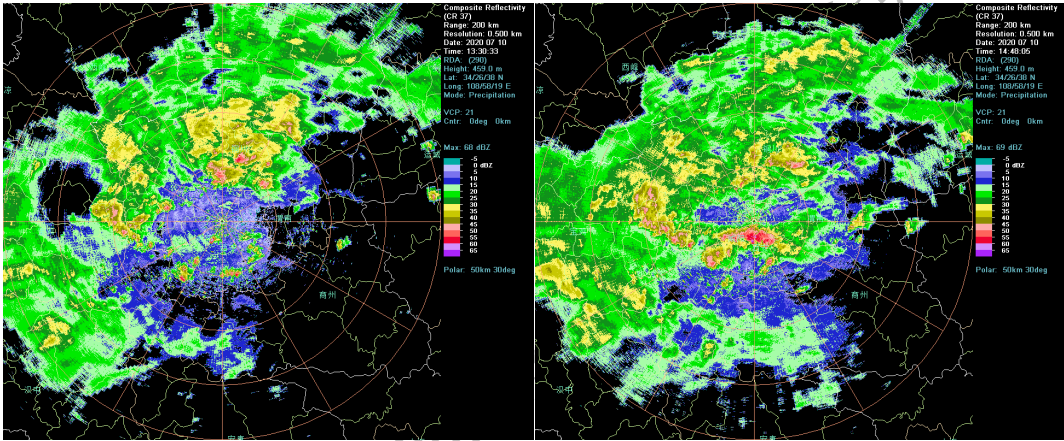


图 10 2020.07.10 组合反射率 13:30(a)，14:48(b)

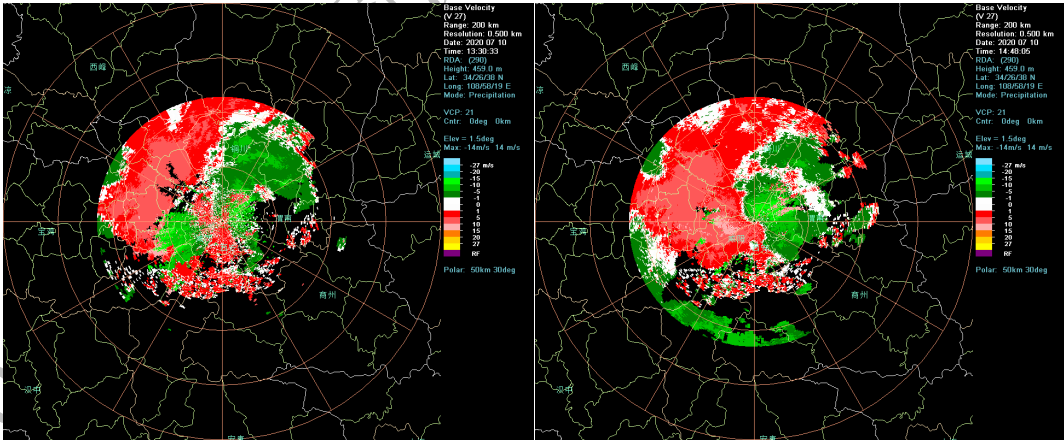


图 11.2020.年 7 月 10 日径向速度图 13:30(a)，14:48(b)

6.3 K 指数和 CAPE 特征

K 指数侧重反映对流层中低层温湿分布对静力稳定度的影响。沙氏指数 (SI) 表示气块从 850 hPa 抬升到 500 hPa 后与环境大气的温度差异，指数为负值时说明层结不稳定。850 与 500 hPa 温差 ($T_{850-500}$) 表征温度随高度垂直递减特

性，T850-500 越大，环境大气温度垂直递减越剧烈，层结不稳定越明显。7 月 10 日 13:00 强降水发生之前 K 指数为 36.2, SI 指数为 -0.55, T850-500 为 22.8℃。

对流有效位能（CAPE）表征了热对流上升运动可能达到的理论最大强度，是反映对流发生潜势的重要能量参数。7 月 10 日 13:00 强降水发生之前 CAPE 为 225.34，CIN 为 52.81。

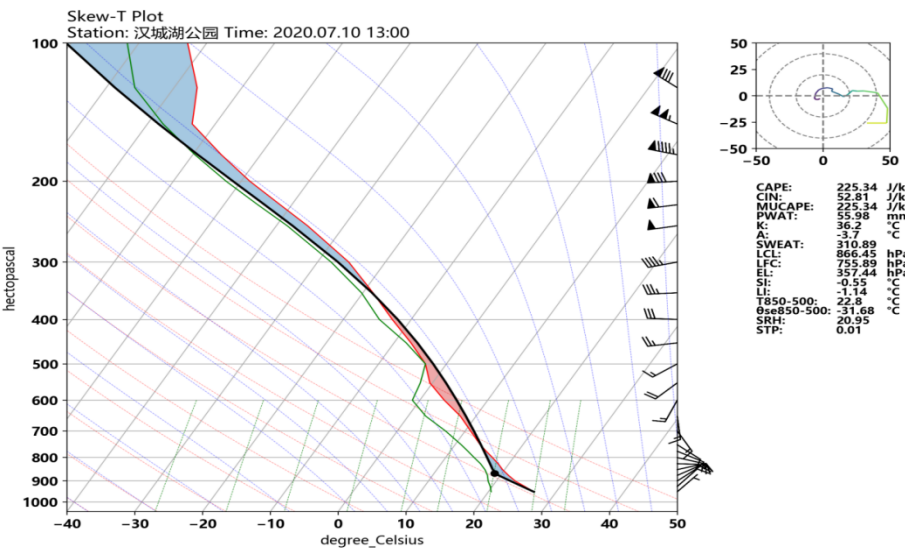


图 12 2020 年 7 月 10 日 13:00 汉城湖公园 T-logp 图

7 小结

7.1 此次暴雨落区分散、雨强大、来势猛、历时短和局地性强，成因复杂和预报难度大，极易引发城区洪涝和道路积水严重。

7.2 暴雨响系统为高空冷涡后部的干冷空气，东移南下短波槽，低层切变辐合强烈、东南暖湿气流快速增强和地面辐合线是造成西安地区强降水的触发系统，低层辐合切变线狭窄，移速发展快速，造成以雷电强对流降水为主的短时大暴雨天气。

7.3 整层水汽通量的突增和辐合对应短时大暴雨的出现，大气强辐合、上升运动发展高度高，有利于中尺度对流系统的上升发展而产生强对流强降水。

7.4 云图上 TBB 低于 -46℃ 的多个中尺度云团随着引导气流向东移动合并迅速发展，雷达回波强度达到 45 dBz--55 dB，并配合速度图上 500 hPa 切变东侧和 700 hPa 东南气流前方的风速辐合，对此次暴雨有明显的预报指示意义，随着回波块结构逐渐松散，中心强度逐渐减弱，降水随之减弱结束。

7.5 总之，此类强对流暴雨是在环流系统前期配置相对不完整的形势下，500hPa 短波槽东移发展，与偏南气流叠加促使大气斜压性和不稳定大气层结加强，低层偏南气流突增为急流加强低层水汽输送和汇聚，地面附近的辐合线激发

不稳定能量释放形成的；此类暴雨形成发生时间短，预报难度高，要利用云图、雷达和天气实况加强监测和预警。

参考文献(References):

- [1]陶诗言.暴雨和强对流天气的研究[J].大气科学,1979,3(3)227-238.
- [2]王繁强,戴进.一次特大暴雨天气的数值模拟试验研究[J].西北大学学报:自然科学版,2007,03:483-488.
- [3]李社宏,胡淑兰,王旭仙,等.渭河流域致洪暴雨的天气学分析[J].西北大学学报:自然科学版,2007,01:145-148+152
- [4]张行南,罗建,陈雷,等.中国洪水灾害危险程度区划[J].水利学报,2000,(3):1-7.
- [5]杜继稳,侯明全,梁生俊,等.陕西省短期天气预报技术手册[M].北京:气象出版社,2007:65-75.
- [6]王明华,杜继稳.秦岭山脉与陕西降水[C]//山地气候编委会编.山地气候文集.北京:气象出版社,1983:97-101.
- [7]王旭仙,胡淑兰,吕俊杰,等.渭河流域严重洪涝灾害的天气学分析[J].西北大学学报:自然科学版,2002,32(专辑):191-195.
- [8]汪小康,闵爱荣,廖移山.2018年4-10月我国主要暴雨天气过程简述[J].暴雨灾害,2019,38(2):182-1923
- [9]巩敏莹,靳英燕.西北地区东部一次雷暴天气过程的诊断分析[J].高原气象,2009 28(1): 203-208
- [10]马晓华,梁生俊.2011年秦巴山区秋季区域性暴雨数值模拟及诊断分析[J].陕西气象,2019(3):8-17.
- [11]赵强,韩洁,陈小婷.黄土高原一次副高外围暴雨的对流环境及触发条件分析[J].陕西气象,2020(3):1-8
- [12]李静睿,刘佩佩,陈小婷,等.秦巴山区一次罕见雷暴大风天气成因分析[J].陕西气象,2020(3):9-15
- [13]李明娟,井宇,王瑾,等.2019年陕西汛期暴雨预报检验评估[J].陕西气象,2020(3):16-19.
- [14]赵榆飞,杜继稳,2005.陕北地区突发性暴雨和系统性暴雨的对比分析[J].气象科技, 33(5): 413-418.
- [15]刘还珠,王维国,邵明轩,等.2007.西太平洋副热带高压影响下北京区域性暴雨的个例分析[J].大气科学,31(4): 727-734.
- [16]任泽君,1986.几类突发性暴雨成因的初步分析[J].气象,12(6):7-11.