

四川盆地夏季一次特大暴雨水汽特征

丛芳^{1, 2} 曹萍萍^{1, 2} 王佳津^{1, 2} 肖红茹^{1, 2} 王春学^{2, 31}

(1. 四川省气象台, 四川 成都 610072; 2. 中国气象局成都高原气象研究所/

高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 四川 成都 610072;

3. 四川省气候中心, 四川 成都 610072)

【摘要】: 利用四川省 5001 站气象资料、全球同化系统(GDAS)资料, NCEP 再分析资料, 基于拉格朗日混合单粒子轨道模型(HYSPLIT4), 分析了 2020 年 8 月 14~17 日四川盆地西部特大暴雨的水汽输送情况。结果表明: 2020 年 8 月 14~17 日四川盆地特大暴雨存在明显日变化, 夜间降水显著, 共出现 4 次峰值。特大暴雨初期水汽主要来自于孟加拉湾, 随着降水过程的持续, 阿拉伯海东部、孟加拉湾南部及泰国湾的水汽源源不断地向盆地西部输送。定量分析不同水汽源地的贡献可知孟加拉湾的水汽占主导地位, 阿拉伯海次之, 泰国湾的水汽贡献最低。

【关键词】: 拉格朗日 水汽输送 暴雨 水汽路径

【中图分类号】: P458 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)08-2028-10

2020 年 8 月 14 日夜间到 17 日夜间, 四川盆地发生一次特大暴雨, 此次暴雨过程出现范围广, 降雨强度大, 暴雨综合评估指数位列四川 1961 年以来历史第 2 位, 并且距离 8 月 10~13 日大暴雨过程只相隔一天, 暴雨落区多处重叠。本次暴雨过程共造成约 34 万人受灾, 直接经济损失达 200 余万元。在全球变暖的背景下, 极端天气事件频发^[1~3], 因暴雨导致的滑坡泥石流、城市内涝等次生灾害严重危害人民生命财产安全^[4]。准确预报极端天气的发生, 做好预报服务工作, 可以为防灾减灾工作提供重要参考, 减少人员伤亡和财产损失。

充沛的水汽输送是持续性强降水形成的必要条件^[5,6]。因此分析特大暴雨的水汽特征对于分析降水成因及研究机理有重要意义, 也可为预报员预报相似暴雨过程提供有力理论支撑。已有一些学者对四川暴雨水汽特征开展了相关研究。蒋兴文等^[7]指出四川盆地夏季暴雨的主要来源是孟加拉湾和南海, 其中孟加拉湾更为重要。陈栋等^[8]研究表明盆地东部大暴雨水汽来源有三支, 分别是孟加拉湾、中印半岛-南海和西风带。李永华等^[9]指出西南地区东部水汽路径有 2 条, 一条来自青藏高原转向孟加拉湾经缅甸和云南进入西南地区东部, 一条由孟加拉湾南部强大的水汽输送带, 继续向东输送至中南半岛及南海, 与南海越赤道气流所携带的水汽汇合后转向至西南地区东部, 而由副高西侧转向的偏南水汽对西南地区东部的水汽输送也有影响。陈鹏等^[10]通过对比分析指出盆地中部暴雨的水汽主要来自孟加拉湾, 而盆地中东部暴雨的水汽则主要从孟加拉湾经中南半岛到达南海, 与南海偏南气流汇合加强后再输送至盆地中东部。周长艳等^[6]通过分析一次四川盆地西部暴雨发现除南海、西太平洋地区的偏南水汽输送, 孟加拉湾北部的西南风水汽输送以及高原主体上空偏西风水汽输送外, 还有一条新的水汽输送路径, 即阿拉伯海北部的西

作者简介: 丛芳(1984~), 女, 工程师, 主要研究方向为气象预报与模式解释释用。E-mail: cf2020cdyb@163.com

王佳津 E-mail: w_jiajin@163.com

基金项目: 中国气象局预报员专项(CMAYBY2020-109); 中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z033)子项目; 2020 年盛夏四川盆地二次致洪暴雨过程分析; 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室青年专项(SCQXKJQN2020024)

南风水汽输送途径高原主体、高原东南部进入四川。通过以往研究可知，孟加拉湾和阿拉伯海是四川盆地暴雨比较重要的水汽源地。

为定量分析各水汽来源对降水的贡献，则需引入拉格朗日方法^[11~13]。拉格朗日方法以气块作为分析主体，可以得到气块在每个位置的高度、湿度、温度等要素值。王佳津等^[14,15]分析指出水汽主要来自低层 950 和 850hPa,阿拉伯海是非常重要的水汽源地，而且该源地的水汽大都经过孟加拉湾地区而输入到盆地西部。岳俊等^[16]通过分析盆地三次过程指出孟加拉湾是主要的水汽通道，一部分直接越过云贵高原输送到四川盆地，另一部分绕过云贵高原在南海地区与南海水汽以及越赤道水汽在西太副高外围东南气流作用下一并输入四川盆地。

受此次特大暴雨影响，成都、绵阳等市部分地方积水严重，青衣江雅安城区出现 100 年一遇洪水。此次特大暴雨水汽输送特征如何?水汽源地可以追溯到哪里?孟加拉湾又在本次暴雨的水汽输送中扮演怎样的角色?为了解决以上问题，本文应用欧拉方法和拉格朗日方法详细分析了此次特大暴雨水汽特征。

1 资料与方法

1.1 资料

本文使用的资料为：2020 年 8 月四川省 5001 站逐日降水资料(其中 156 站为国家自动站);同期全球资料同化系统(Global Data Assimilation System, GDAS)6h 一次的分析资料，水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ，垂直方向 21 层，包括位势高度、温度、风和比湿等要素；同期美国国家环境预测中心提供的(NCEP/NCAR)6h 一次的再分析资料，包括风场(u、v)、高度、比湿等要素，水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ，时段为 2020 年 8 月 14 日 08:00~17 日 20:00;温江探空站 2020 年 8 月 13 日 20:00~18 日 20:00 观测资料。

1.2 轨迹模式简介

HYSPLITv4(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model)是供质点轨迹、扩散及沉降分析使用的综合模拟系统，平流和扩散计算皆采用拉格朗日方法，由 NOAA 空气资源实验室和澳大利亚气象局联合开发。更详细信息可参考相关文献^[11,14]，或网站(<https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>)。

1.3 水汽输送贡献

通过气块后向追踪过程中不同时刻位置得到相应位置气块物理属性，可以进一步得到不同层次气块水汽输送贡献。

水汽输送贡献：

$$Q_l = \sum_l^m q_{il} \quad (1)$$

式中： q_i 为某一时刻某一位置比湿； m 为后向追踪的所有时刻； l 为某一层次。

2 降水实况与环流背景

2.1 降水实况

2020年8月14~17日(8月14日08时至8月18日08时)四川出现持续性强降水过程,从过程累计雨量分布(图1a)上可以看出,强降雨主要发生在盆地西部,过程累计雨量大部分在100mm以上,川西高原东部和攀西地区部分累计降雨量也在50mm以上,最大降雨量出现在绵阳北川,为536mm,过程降水强度为133.2mm/d(最大日降水量平均),持续时间为4d,位列1961年以来第2位(仅次于1961年6月24~28日过程)。其中14日08:00~15日08:00(图1b)的暴雨中心位于德阳中江附近,共有6个站日雨量超过100mm,最大降雨量达132.3mm。15日08:00~16日08:00(图1c)的暴雨中心位于绵阳安县附近,共有445个站降雨量超过100mm,53个站超过250mm,最大降雨量达466.7mm。16日08:00~17日08:00(图1d)的暴雨中心位于德阳什邡附近,共有540个站降雨量超过100mm,8个站超过250mm,最大降雨量达276.9mm。17日08:00~18日08:00(图1e)的暴雨中心位于乐山市附近,共有407个站降雨量超过100mm,2个站超过250mm,最大降雨量达252mm。整个过程,前三天强降雨中心位于盆地西北部,第四天南移到盆地西南部,暴雨区重复叠加,从而形成强降雨范围广、强度大、灾害重的特点。从降水中心绵阳北川的逐小时降雨演变图上看到(图2),此次强降雨过程从14日夜间开始,存在显著日变化,夜间降雨增强,白天降雨减弱,有4次降水峰值均出现在夜间(20:00至次日05:00),其中有9个时次达到短时强降水(小时降雨量 ≥ 20 mm),最大小时雨强为52.2mm/h,出现在17日01时。

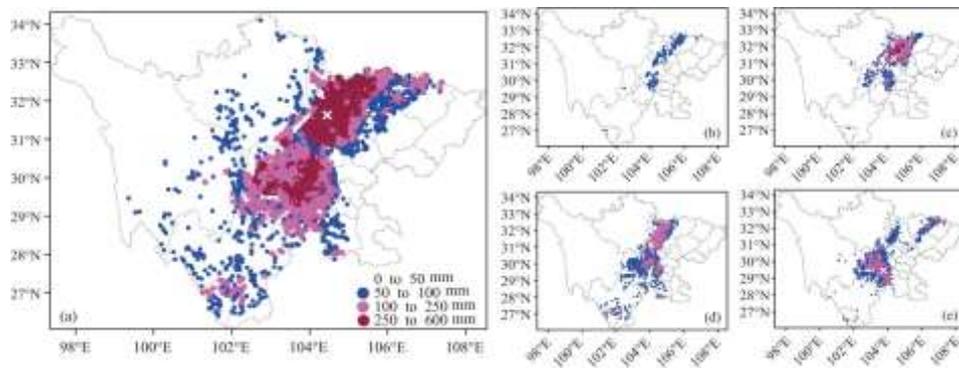


图1 四川省降水量空间分布图

(a2020年8月14日08:00~18日08:00,b14日08:00~15日08:00,c15日08:00~16日08:00,d16日08:00~17日08:00,e17日08:00~18日08:00)(单位: mm,白色×为降水中心)

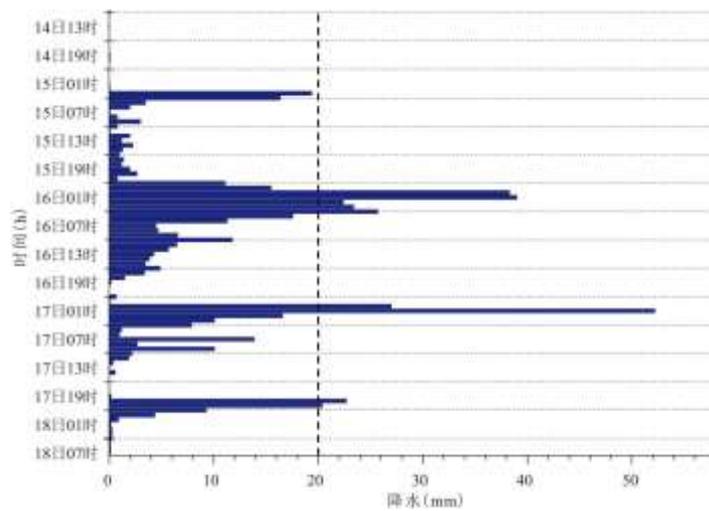


图2 绵阳北川2020年8月14日08时-18日08时逐小时降雨量(单位: mm)

2.2 环流背景

过程开始前的 14 日 08 时, 500hPa 环流上(图 3a), 欧亚中高纬地区为两槽一脊的形势, 我国西北地区和青藏高原多短波槽活动, 槽后伴有明显的冷平流, 该形势在过程中稳定维持, 副高 588dagpm 线西脊点一直位于 110° E 附近, 但脊线 14 日位于 30° N 附近, 随着过程的开始, 脊线逐渐北抬, 17 日脊线位于 35° N 附近, 同时, 青藏高原上空形成一闭合高压环流, 两高之间的切变线与河套地区的西风槽连接形成一深槽(17 日 20 时的环流形势图), 槽后强西北气流伴有较强冷平流, 导致强降雨落区南压, 18 日开始, 随着 7 号台风西行登陆, 过程结束。由于副高的阻塞作用, 导致冷暖气流持续在盆地西部交汇, 形成了持续的强降雨。700hPa 风场上, 过程前期云贵地区到盆地受西南急流控制, 16 日 20 时开始转为东南急流, 而河套一带一直存在一条东北-西南走向的切变线, 17 日 20 时开始受高层引导气流影响, 切变线北侧的西北气流开始入侵进入盆地, 使得东南气流在盆地西部的辐合向南移动, 强降雨落区南压到盆地西南部; 850hPa 风场上(图 3b、图 4b)南海至盆地始终维持一支东南急流, 且在盆地西部存在明显的风向风速辐合, 导致强降雨持续维持在盆地西部。综上所述, 副高的稳定阻挡导致盆地西部一直处于西风带低槽前部, 低层偏南风急流长时间维持, 在盆地西部形成明显风向风速辐合是造成此次大暴雨过程的主要原因。

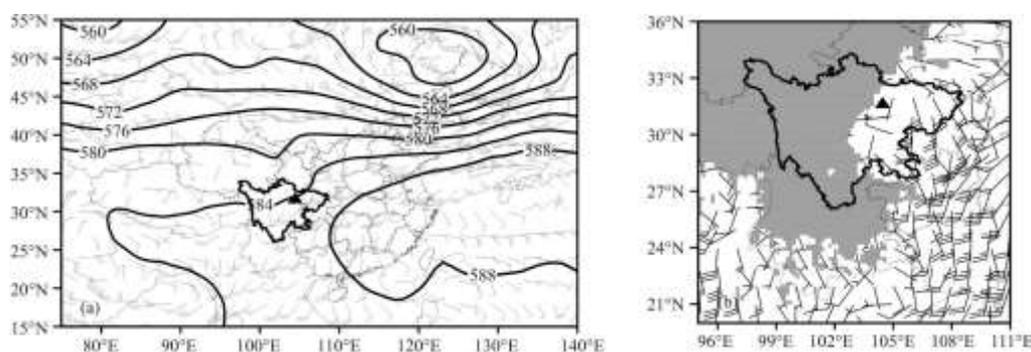


图 3 2020 年 8 月 14 日 08:00 高空 500hPa 高度场与 700hPa 风场叠加(a) (单位: dagpm) 和四川地区 850hPa 风场(b) (三角形为绵阳北川站, 阴影为高原地形)

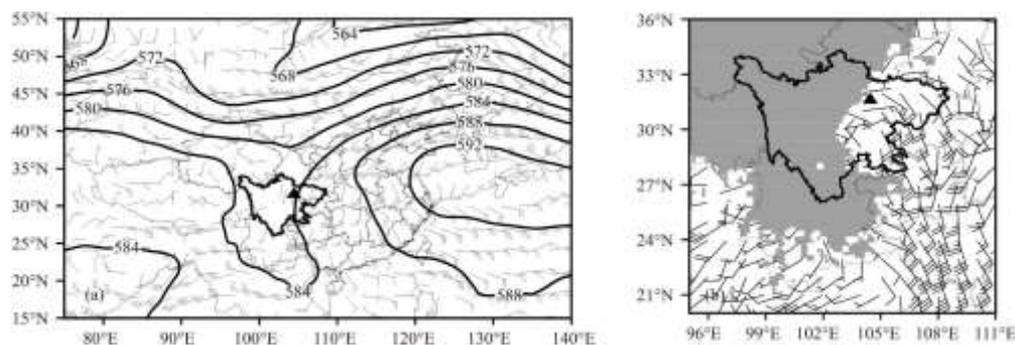


图 4 2020 年 8 月 17 日 08:00 高空 500hPa 高度场与 700hPa 风场叠加(a) (单位: dagpm) 和四川地区 850hPa 风场(b) (三角形为绵阳北川站, 阴影为高原地形)

3 水汽路径与特征

大规模降水的产生离不开充沛的水汽输送和水汽辐合^[14,15,17,18], 本次四川特大暴雨过程水汽特征如何?下文将通过欧拉方法和拉格朗日方法分别对本次暴雨过程的水汽特征进行分析。

3.1 水汽通量及比湿变化

图5是本次暴雨期间850和700hPa的水汽通量分布。从图中可以看到,暴雨期间进入四川盆地的水汽流主要有3支:一支是热带西南季风气流从阿拉伯海经印度半岛、孟加拉湾绕过青藏高原大地形进入盆地;一支是热带西南季风气流经孟加拉湾、中南半岛进入南海,再继续北上进入盆地;一支是西太平洋副高外围的东南风气流。水汽通量的显著大值区在850hPa(图5a)上表现的更为明显,三支气流在广西、贵州、重庆等地汇聚加强形成水汽通量大值区。

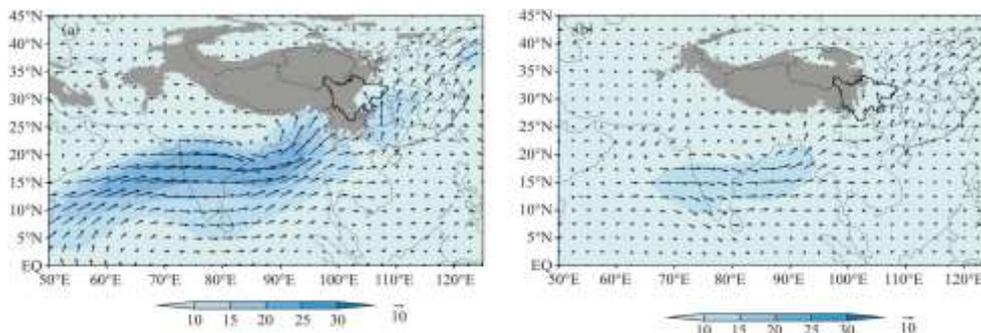


图5 2020年8月14-17日平均水汽通量(a. 850hPa, b. 700hPa;单位: $g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$;阴影为高原地形)

暴雨过程中高空观测的水汽条件是如何变化的呢?接下来以盆地西部温江探空站为代表分析暴雨过程中比湿随时间的变化(图6)。从图中可以看出,850、700hPa的比湿随时间的变化趋势较为一致,在14日夜间逐渐增加,随后在暴雨期间一直维持在较高值,850hPa比湿高于15g/kg,700hPa比湿高于10g/kg,变化趋势与肖递祥等^[19]对四川盆地极端暴雨过程的基本结论一致,且850、700hPa比湿值接近极端暴雨临近平均值16、11.4g/kg。在17日夜间比湿逐渐降低,18日08:00时850hPa比湿已低于11g/kg,此时降水过程基本结束(图2)。

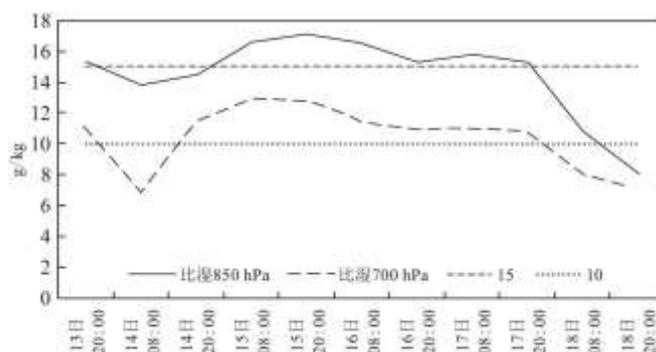


图6 温江探空站比湿时间变化

注:实线为850hPa比湿,虚线为700hPa比湿(单位: g/kg).

3.2 水汽输送轨迹分析

本次暴雨过程共出现过4次降水峰值(图2),且中低层较好的水汽环境持续了较长时间(图6),为了分析4次降水峰值水汽输送路径和持续水汽供应源地特征,并试图解答中低层比湿长时间维持在高值的原因,本文引入拉格朗日轨迹模式(HYSPLIT),对本次特大暴雨过程开展定量水汽输送条件分析。

3.2.1 误差分析及模拟方案

(1) 误差分析

为了保证本文水汽后向追踪数据的可靠性,需要首先确定后向追踪时间,根据不同方向上变差系数的时间变化可以确定轨迹模拟后向追踪时间^[5,14]。本文以模拟区域中心点(32° N, 105° E; 1500m)为起点,分别在纬向(X),经向(Y)上偏移 0.5 个格距,垂直方向(Z)上偏移 500m,8月16日为初始时间,向后进行 264h 的轨迹模拟。共获得 27 条轨迹样本,分别计算各个方向各个时刻的标准差与平均值比值(变差系数),进而评估模式的分辨率误差^[14]。图 7 是变差系数随后向追踪时间的变化。从图中可以看出 X 方向的变差系数随后向时间的增长变化最大,在第 9 天(8月8日)迅速增加,达到 0.96。考虑模拟结果的可信度,对本次特大暴雨进行后向追踪 8 天(192h)的轨迹模拟。

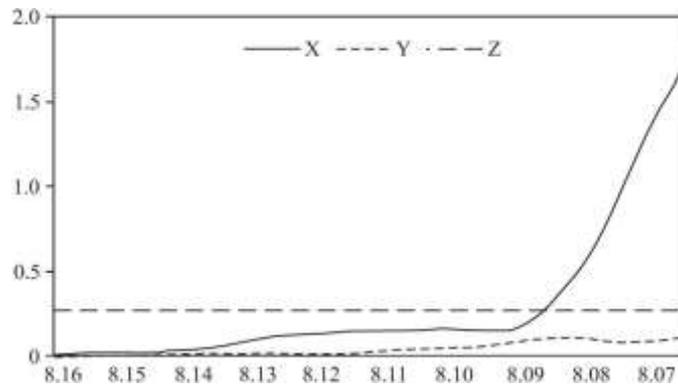


图 7 纬向(X)、经向(Y)和垂直方向(Z)的变差系数随后向模拟时间长度的变化

(2) 模拟方案

根据 2020 年 8 月 14~17 日四川盆地降水分布图(图 1),选取 4 天暴雨中心为轨迹初始点,因为本次暴雨过程日变化明显,夜间暴雨强度明显增加,所以分别选择 14 日 20:00、15 日 20:00、16 日 20:00、17 日 20:00 为起始时间,模拟高度为 925、850、700hPa,模拟空气块后向 8 天(192h)追踪的三维运动轨迹。具体说明如下:

3.2.2 水汽输送轨迹

根据 3.2.1(2)模拟方案,得到 4 次降水峰值出现前,后向追踪 8 天的各层水汽输送轨迹,(图 8)。从图 8 中可以看出,与 3.1 分析一致,4 次降水峰值出现前,大部分水汽来自孟加拉湾和阿拉伯海,其中 700hPa 水汽输送轨迹最为偏西,斜穿横断山脉,经过高原地形到达盆地;925hPa 水汽输送轨迹最为偏东,经云贵交界进入盆地;850hPa 水汽输送轨迹为中间路径。但各方案的轨迹输送特征又略有不同:8月14日 20:00(图 8a)3 层水汽都来自孟加拉湾中东部,其中 850hPa 水汽输送轨迹起始位置最为偏西、偏南,700 和 850hPa 水汽输送轨迹皆为斜穿横断山脉,经过高原地形,进入盆地西部,而 925hPa 水汽输送轨迹斜穿中南半岛,经过北部湾,绕过高原地形进入盆地西部;8月15日 20:00(图 8b)700 与 850hPa 的水汽输送轨迹较为一致,但 700hPa 水汽输送轨迹最为偏西,始于阿拉伯海东部,而 925hPa 水汽输送轨迹与其他三个方案都有所不同,穿过中南半岛西北部经云南东部进入盆地西部,并没有经过北部湾上空;8月16日 20:00(图 8c)700hPa 水汽输送轨迹与 8月15日 20:00 的相似,但 850hPa 水汽输送轨迹的起始点较为偏北,始于孟加拉湾东部,925hPa 的水汽输送轨迹与 8月14日 20:00 的相似;8月17日 20:00(图 8d)700hPa 水汽输送轨迹最为偏西,起始于阿拉伯海中东部,途径孟加拉湾,斜穿横断山脉,绕过高原地形到达盆地西南部,850hPa 的水汽输送轨迹也有所不同,明显区别于 700hPa,起始位置最为偏南,起始于孟加拉湾南部,斜穿中南半岛,绕过高原地形到达

盆地西南部，与图 8a 中 925hPa 的水汽输送轨迹更为相似，925hPa 的水汽输送轨迹最为偏东，起始于泰国湾，穿过越南半岛，途经北部湾东部，经过广西西部、贵州中部，最后到达盆地西南部。

表 1 轨迹模拟起始时间和初始点

	方案 I	方案 II	方案 III	方案 IV
起始时间	14 日 20 : 00	15 日 20 : 00	16 日 20 : 00	17 日 20 : 00
初始点	30.92° N, 104.62° E	31.3° N, 104.4° E	31.14° N, 104.05° E	29.5° N, 103.76° E

综上所述，本次特大暴雨低层水汽输送 700hPa 水汽输送轨迹最为偏西，925hPa 最为偏东，850hPa 为中间路径。暴雨开始水汽主要来自于孟加拉湾，随着暴雨过程的持续，阿拉伯海东部、孟加拉湾南部及泰国湾的水汽源源不断地向盆地西部输送。

3.3 水汽路径贡献

为了进一步分析不同水汽路径的水汽贡献情况，将图 8 中 4 种方案的 12 条轨迹根据源地不同分成 3 类，分别是来自于阿拉伯海 4 条轨迹(方案 II 中 700、850hPa, 方案 III 中 700hPa, 方案 IV 中 700hPa)、孟加拉湾 7 条轨迹(方案 I 中 700、850、925hPa, 方案 II 中 925hPa, 方案 III 中 700、925hPa, 方案 IV 中 850hPa)和泰国湾 1 条轨迹(方案 IV 中 925hPa)。运用公式(1)分别计算了不同源地轨迹对本次特大暴雨的水汽贡献率(图 9)。从计算结果可以看出，孟加拉湾的水汽输送贡献最大，其输送的水汽占比为 59.3%，其次是阿拉伯海的水汽输送，占比为 31.7%，泰国湾的水汽输送最小，为 8.9%。综上分析，对于本次特大暴雨过程，水汽主要来自于孟加拉湾和阿拉伯海。

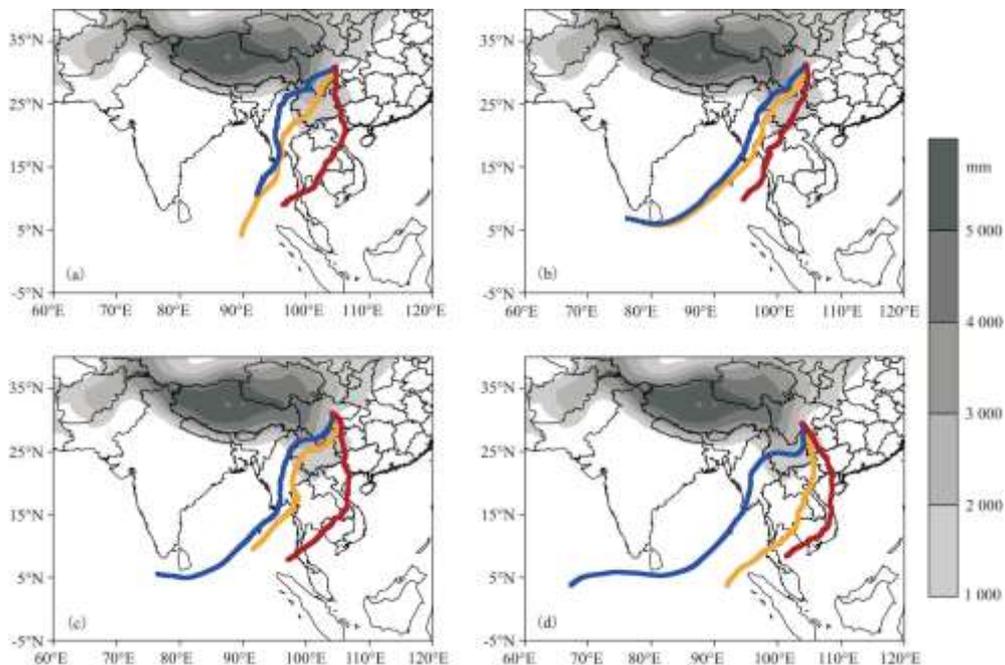


图 8 水汽输送轨迹

注：a. 方案 I, b. 方案 II, c. 方案 III, d. 方案 IV; 红色. 925hPa, 橙色. 850hPa, 蓝色. 700hPa; 阴影为高原地形。

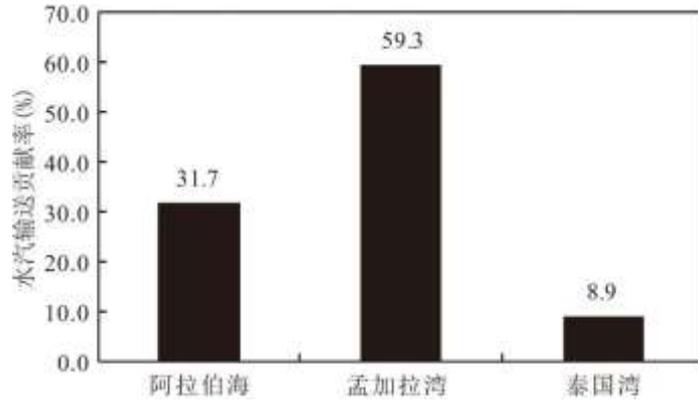


图9 不同源地水汽输送贡献率

对比分析不同方案水汽输送路径高度、湿度和温度的演变情况(图10),可以发现,不同方案相同层次的水汽路径高度、湿度和温度的变化较为一致,本次特大暴雨水汽气块都来自南方的洋面,气块在洋面上时(高度为0m),各层气块都属于高温高湿的状态,湿度维持在18g/kg以上,温度在300K左右,当气块在陆地上空时(高度大于0m),不同层次气块的温度、湿度有所差异,925hPa上的气块最为湿热,比湿在14g/kg以上,温度在280K以上,850hPa上的气块比湿在11g/kg以上,温度略低于925hPa,但也在280K以上,700hPa的气块相对来说最为干冷,比湿在7g/kg以上,温度与其他两层相差较大,在270K以上。通过上述分析可知,地形对于水汽输送有一定的影响。

4 结论与讨论

充沛的水汽输送是持续性强降雨形成的必要条件,水汽特征分析对降水成因及研究机理至关重要,因此本文应用HYSPLIT4模式,对四川1961年以来历史第2位的2020年8月14~17日盆地西部特大暴雨的水汽特征进行了详细分析,得到以下几点结论:

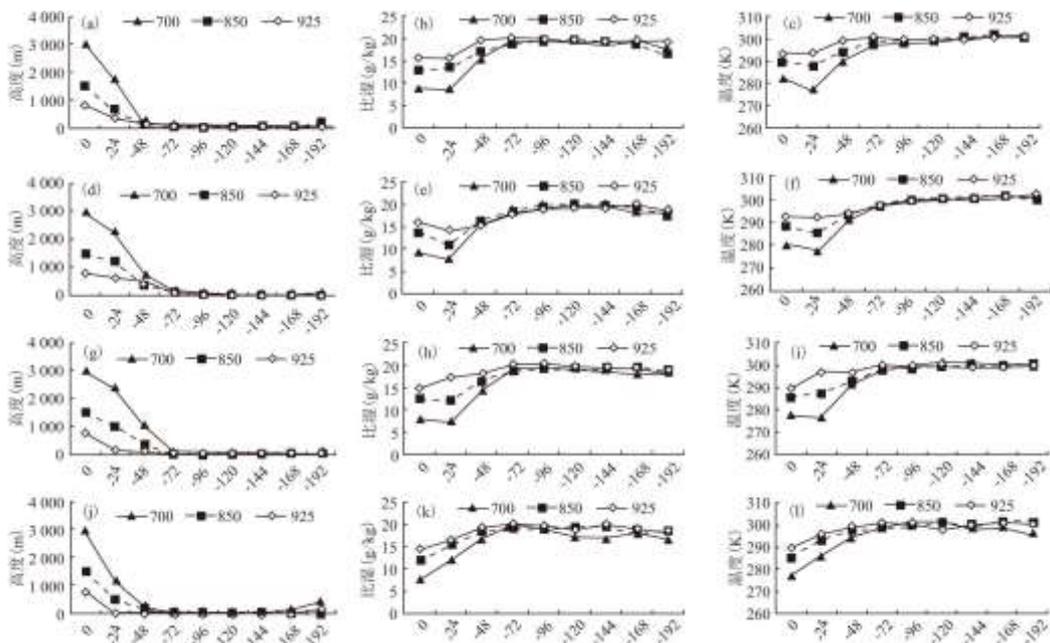


图 10 不同方案输送路径高度(a. 方案 I, d. 方案 II, g. 方案 III, j. 方案 IV)、比湿(b. 方案 I, e. d. 方案 II, h. 方案 III, k. 方案 IV)和温度(c. 方案 I, f. d. 方案 II, i. 方案 III, l. 方案 IV)变化

(1) 本次四川盆地强降水影响范围广、降水强度大、造成灾害重, 从逐日变化来看, 暴雨中心有一个从盆西北向盆西南缓慢移动的过程; 从逐小时降水来看, 夜间降水较白天显著, 4 次降水峰值均出现在当日 20:00 至次日 05:00 时, 最大小时雨强为 52.2mm/h, 出现在 17 日 01 时。

(2) 环流分析表明, 西太平洋副热带高压稳定少动, 导致四川盆地西部一直处于西风带低槽前部, 低层偏南风急流得以长时间维持, 并在盆地西部形成明显的风向风速辐合, 从而导致冷暖气流持续在盆地西部交汇, 形成持续强降水。

(3) 本次特大暴雨不同层次不同阶段的水汽输送轨迹均有所偏差, 其中暴雨开始阶段的水汽都来自孟加拉湾中东部, 700 与 850hPa 的水汽斜穿横断山脉, 经过高原地形进入盆地西部, 925hPa 的水汽斜穿中南半岛, 经过北部湾绕过高原地形进入盆地西部。随着暴雨过程的持续, 阿拉伯海东部、孟加拉湾南部及泰国湾的水汽源源不断地向盆地西部输送, 其中始于阿拉伯海中东部的的水汽途径孟加拉湾, 斜穿横断山脉, 绕过高原地形到达盆地西南部; 始于孟加拉湾南部的的水汽斜穿中南半岛, 绕过高原地形到达盆地西南部; 始于泰国湾的水汽穿过越南半岛, 途经北部湾东部, 最后北上到达盆地西南部。

(4) 对比分析不同方案发现, 相同层次的水汽路径高度、湿度和温度的变化较为一致, 水汽气块都来自南方的洋面, 气块在洋面上时都属于高温高湿的状态, 当气块运动到陆地上空时不同层次气块的温度、湿度差异逐渐增大, 表明地形对于水汽输送有一定的影响。从不同来源的水汽输送情况来看, 来自孟加拉湾的水汽占据主导地位(59.3%), 来自阿拉伯海的水汽贡献次之(31.7%), 来自泰国湾的水汽占比最小(8.9%)。

参考文献:

- [1] 秦大河, 罗勇, 陈振林, 等. 气候变化科学的最新进展: IPCC 第四次评估综合报告解析[J]. 气候变化研究进展, 2007(6):311-314.
- [2] 钱维宏, 符娇兰, 张玮玮, 等. 近 40 年中国平均气候与极值气候变化的概述[J]. 地球科学进展, 2007(7):673-684.
- [3] 翟盘茂, 王萃萃, 李威. 极端降水事件变化的观测研究[J]. 气候变化研究进展, 2007(3):144-148.
- [4] 贺山峰, 王欣. 变化环境下城市内涝灾害风险管理: 挑战与应对[J]. 河南理工大学学报(社会科学版), 2019, 20(3):48-53.
- [5] 江志红, 梁卓然, 刘征宇, 等. 2007 年淮河流域强降水过程的水汽输送特征分析[J]. 大气科学, 2011, 35(2):361-372.
- [6] 周长艳, 唐信英, 邓彪. 一次四川特大暴雨灾害降水特征及水汽来源分析[J]. 高原气象, 2015, 34(6):1636-1647.
- [7] 蒋兴文, 李跃清, 李春, 等. 四川盆地夏季水汽输送特征及其对旱涝的影响[J]. 高原气象, 2007(3):476-484.
- [8] 陈栋, 李跃清, 黄荣辉. 在“鞍”型大尺度环流背景下西南低涡发展的物理过程分析及其对川东暴雨发生的作用[J]. 大气科学, 2007(2):185-201.
- [9] 李永华, 徐海明, 高阳华, 等. 西南地区东部夏季旱涝的水汽输送特征[J]. 气象学报, 2010, 68(6):932-943.

-
- [10]陈鹏, 刘德, 李强, 等. 2009 年夏季四川盆地两次暴雨过程对比分析[J]. 暴雨灾害, 2014, 33(2):112-120.
- [11]DRAXLER R R, D H G. An overview of the HYSPLIT_4 modeling system for trajectories, dispersion, and deposition[J]. Australian Meteorological Magazine, 1998, 4(47):295-308.
- [12]HUANG Y J, CUI X P. Moisture sources of an extreme precipitation event in Sichuan, China, based on the Lagrangian method[J]. Atmospheric Science Letters, 2015(16):177-183.
- [13]HUANG Y J, CUI X P. Moisture sources of torrential rainfall events in the Sichuan Basin of China during summers of 2009-13[J]. Journal of Hydrometeorology, 2015(16):1906-1917.
- [14]王佳津, 王春学, 陈朝平, 等. 基于 HYSPLIT4 的一次四川盆地夏季暴雨水汽路径和源地分析[J]. 气象, 2015, 41(11):1315-1327.
- [15]王佳津, 肖递祥, 王春学. 四川盆地极端暴雨水汽输送特征分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(10):1768-1783.
- [16]岳俊, 李国平. 应用拉格朗日方法研究四川盆地暴雨的水汽来源[J]. 热带气象学报, 2016, 32(2):256-264.
- [17]宋桂英, 李孝泽, 江靖, 等. 2012 年 7 月内蒙古极端降水事件及成因[J]. 高原气象, 2015, 34(1):163-172.
- [18]王婧羽, 崔春光, 王晓芳, 等. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨过程的水汽输送特征[J]. 气象, 2014, 40(2):133-145.
- [19]肖递祥, 杨康权, 俞小鼎, 等. 四川盆地极端暴雨过程基本特征分析[J]. 气象, 2017, 43(10):1165-1175.