

文章编号: 2096-1618(2025)03-0397-06

欧拉方法与拉格朗日方法相结合的四川凉山一次引发山洪的暴雨水汽输送分析

边茜, 李春忱

(四川省凉山州气象局, 四川 西昌 615000)

摘要:为分析四川凉山2023年8月21日一次引发山洪灾害的暴雨天气过程的水汽输送特征,利用高空、地面观测资料、NCEP再分析资料和GDAS资料,结合欧拉方法和拉格朗日方法(HYSPLIT模式),研究得出短波槽、切变线、地面冷空气及强烈的不稳定能量是此次暴雨产生的有利条件。暴雨发生前凉山州的水汽主要来源于西太平洋、南海及孟加拉湾。暴雨发生时水汽主要来源于西太平洋、南海、孟加拉湾及北方。结合HYSPLIT模式得出,700 hPa、600 hPa的水汽主要来源于凉山州本地及周边地区,其次是孟加拉湾和周边地区,两者的水汽贡献率之和高达90%以上。500 hPa的水汽主要来源于孟加拉湾和周边地区及青藏高原东侧,两者的水汽贡献率占79%。越往低层凉山本地及周边地区在暴雨过程中的水汽贡献越高。

关键词:暴雨;水汽特征;HYSPLIT模式;水汽贡献

中图分类号:P456.4

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2025.03.022

0 引言

水汽是影响强降水的重要因素,许多学者对暴雨的水汽输送特征进行研究分析^[1]。岳俊等^[7-8]对四川盆地暴雨水汽来源的研究指出,孟加拉湾水汽输送在低空环流的作用下通过不同的路径向四川盆地输送水汽,为主要水汽输送通道。杨浩等^[9]的研究指出,欧拉方法和拉格朗日(HYSPLIT)方法是暴雨水汽来源及输送路径研究的主要两种方法,HYSPLIT模式通过计算空气块的运动轨迹(拉格朗日轨迹),定量统计出各水汽源地的贡献来弥补欧拉方法的不足。戴竹君等^[10]利用HYSPLIT轨迹追踪揭示了热带风暴Bilis暴雨过程的重要影响因子是来自孟加拉湾地区的水汽。庄晓翠等^[11]利用HYSPLIT方法模拟计算了塔克拉玛干沙漠南缘的区域暴雨天气的水汽轨迹,得出中亚、西南亚、北疆是其水汽的主要源地。目前已有许多学者利用HYSPLIT方法模拟不同地区暴雨天气过程的水汽输送特征^[12],但对凉山州的相关研究尚未开展。

凉山州位于青藏高原东南侧,境内丘壑纵横,地貌复杂多样,海拔差异极大,最大可相差5 km以上,山地局地小气候特征明显,由于特殊的地形地貌和气候特征,夏季暴雨和短时强降水极易引发山洪、泥石流、滑坡等灾害。2023年8月20日夜间凉山州出现一次区域性暴雨天气过程,其中金阳县大暴雨,21日凌晨大暴雨引发金阳境内山洪,造成极其严重的人员伤亡和

财产损失。

综上,本文通过利用HYSPLIT模式对此次过程的水汽轨迹进行跟踪模拟,加深对本地区此类暴雨天气过程水汽输送特征的认识,为今后的预报思路提供一定的参考。

1 资料来源与方法

1.1 资料来源

地面高空常规气象观测资料,天气尺度环流背景分析采用逐日6 h一次的NCEP2.5°×2.5°再分析资料,由于NCEP 2.5°×2.5°再分析资料的空间分辨率较低,分析小范围凉山本地及周边地区水汽输送特征的相关物理量场时采用逐日6 h一次的NCEP 1°×1°再分析资料;轨迹模式HYSPLIT所用的资料是时间分辨率为3 h、水平分辨率为0.5°×0.5°的NCEP GDAS资料。

1.2 HYSPLIT模式简介

HYSPLIT模式是由美国国家海洋大气局(NOAA)和澳大利亚气象局合作开发的,可用来计算简单的气团轨迹及模拟复杂的扩散和沉积。HYSPLIT模式中假定空气团的轨迹是随着风场运动的,轨迹是空气团在时间和空间上的积分,气团所在位置的矢量速度在时间和空间上都是线性插值得出的,计算公式如下^[15]:

$$P'(t+\Delta t)=P(t)+V(P,t)\Delta t \quad (1)$$

$$P(t+\Delta t)=P(t)+0.5[V(P,t)+V(P',t+\Delta t)]\Delta t \quad (2)$$

式中 Δt 是积分时间步长,其大小是变化的(1 min~1 h),

满足公式 $\Delta t < 0.75 U_{\max}$, U_{\max} 为最大风速^[15]。其中下一时刻质点的位置是由上一时刻的平均速度和第一猜值所在点的速度平均后与时间步长的乘积而得到的。

2 过程概况

2023 年 8 月 20-21 日凉山州出现一次区域性暴雨天气过程,20 日 20 时-21 日 20 时全州降水量 100 ~ 249.9 mm 的共有 5 个站,50 ~ 99.9 mm 的共有 92 个站,25 ~ 49.9 mm 的共有 280 个站,10 ~ 24.9 mm 的共有 210 个站,最大小时雨强 21 日 04-05 时出现在普格县花山乡河东村为 48.1 mm,过程最大降水量出现在金阳县甲依乡寨子村为 129 mm,洪灾主要出现在甲依乡下游的芦稿镇。此次过程以夜间降水为主,强降雨带自北向南压,小时雨强大,降水范围广。

3 环流背景分析

20 日 08 时 200 hPa (图略) 凉山州为南亚高压 1264 gpm 线外围东北气流控制,处于辐散场。500 hPa (图 1a) 上,欧亚中高纬以纬向环流为主,蒙古为一宽广浅

槽,新疆到河西走廊为槽后西北气流控制。西藏南部、贵州中部各有一高压中心,甘肃南部到川西高原南部有短波槽,槽后伴有强冷平流,冷平流中心强度小于-16(单位:10⁻⁵℃/s,下同),凉山州北部到盆地西部沿山为一一致的西南气流控制,并伴有风速的脉动,州中部到南部为东南气流控制。700 hPa (图 1c) 上陕甘南部到盆地西北部有切变线,滇西—凉山—盆地为一致的西南气流控制,本地的暖湿气流输送通道畅通。西昌站的 $T-T_d=1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $q=13\text{ g/kg}$,本地湿度条件好。20 时 500 hPa (图 1b) 上,蒙古浅槽加深东移,槽后西北气流增强,引导冷平流从西北路径影响凉山州,凉山州转为偏北气流控制。700 hPa (图 1d) 上盆地切变快速加强南压到凉山州东北部,切变线前侧仍维持一致的偏南气流,西昌站的 $T-T_d=2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $q=12\text{ g/kg}$ 。地面图(图略)上暴雨发生过程中有冷空气从青海经川西高原南下影响凉山州,对降雨起增幅作用。从 20 日 20 时西昌站及凉山周边站点丽江站的探空图(图略)可以看出,西昌、丽江两站的 CAPE 值分别为 1445.5 J/kg、1184 J/kg,SI 分别为-1.07、-1.73,两站均有强的不稳定能量和不稳定层结,且湿层均深厚,高能高湿的不稳定层结有利于暴雨天气的发生。

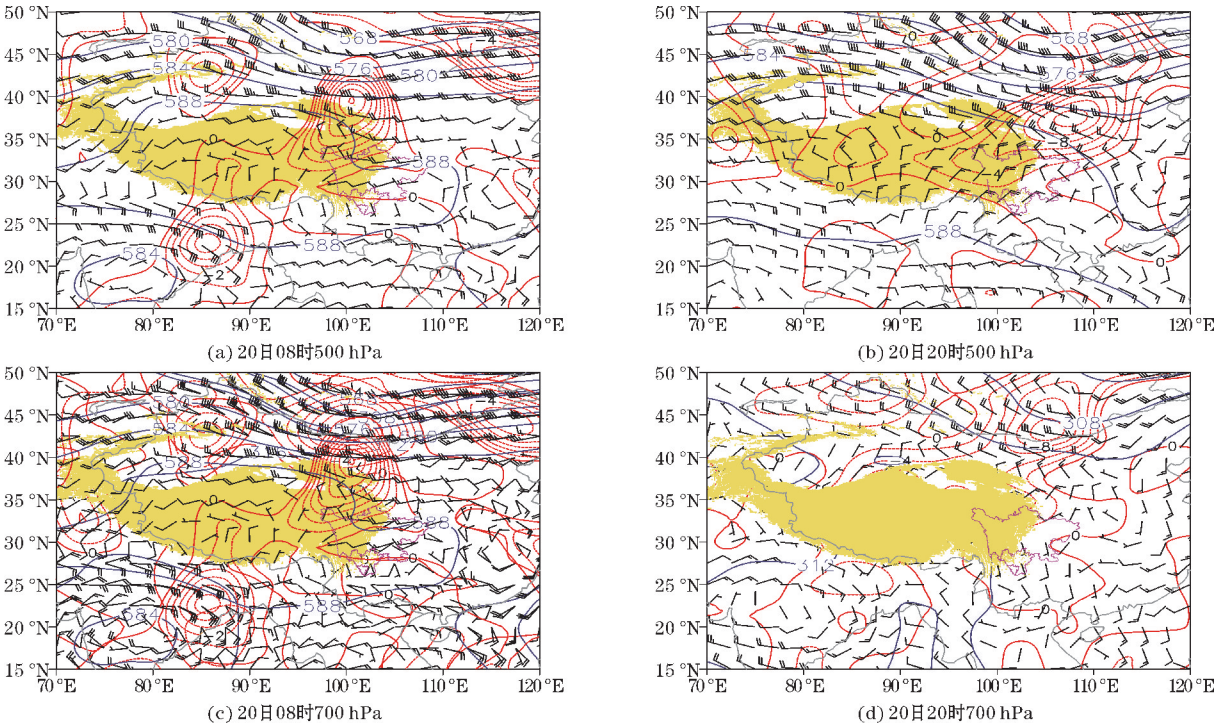


图 1 8 月 20 日高度场(黑色等值实线)+风场+温度平流场(红色等值虚线)(黄色阴影为海拔 3000 m 以上地形)

4 水汽输送特征分析

4.1 低层风场与湿度

从 20 日 08 时 700 hPa 的比湿场来看(图 2a),凉

山州的比湿在 11(单位:g/kg,下同)以上,州北部到中部的相对湿度在 90% 以上,切变线的主体位于甘肃南部到四川盆地北部,20 日 20 时(图 2b)四川盆地切变线快速南压,州东北部有风场的辐合切变,对应此时的相对湿度均在 90% 以上,比湿大于 12,亦为相对湿度和比湿大值区,此时在州东北部有小时雨量大于 20 mm 的

强降水。随着偏北急流的加强,切变线快速南压,21日02时(图2c)切变线主体位于州中部到金阳一带,相对湿度大于90%的高湿区范围扩大,全州大部仍维持12左右的高比湿,21日08时(图2d)切变线南压至州南部,相对湿度大于90%的高湿区亦扩大至州南部,

比湿在11~12。暴雨前期凉山本地低层的湿度条件好,尤其是州东北部的湿度条件更佳,随着低层切变线的南压,高湿区亦南扩,对应的强降雨带自北向南移动。本地良好的湿度为暴雨产生提供有利的水汽条件。

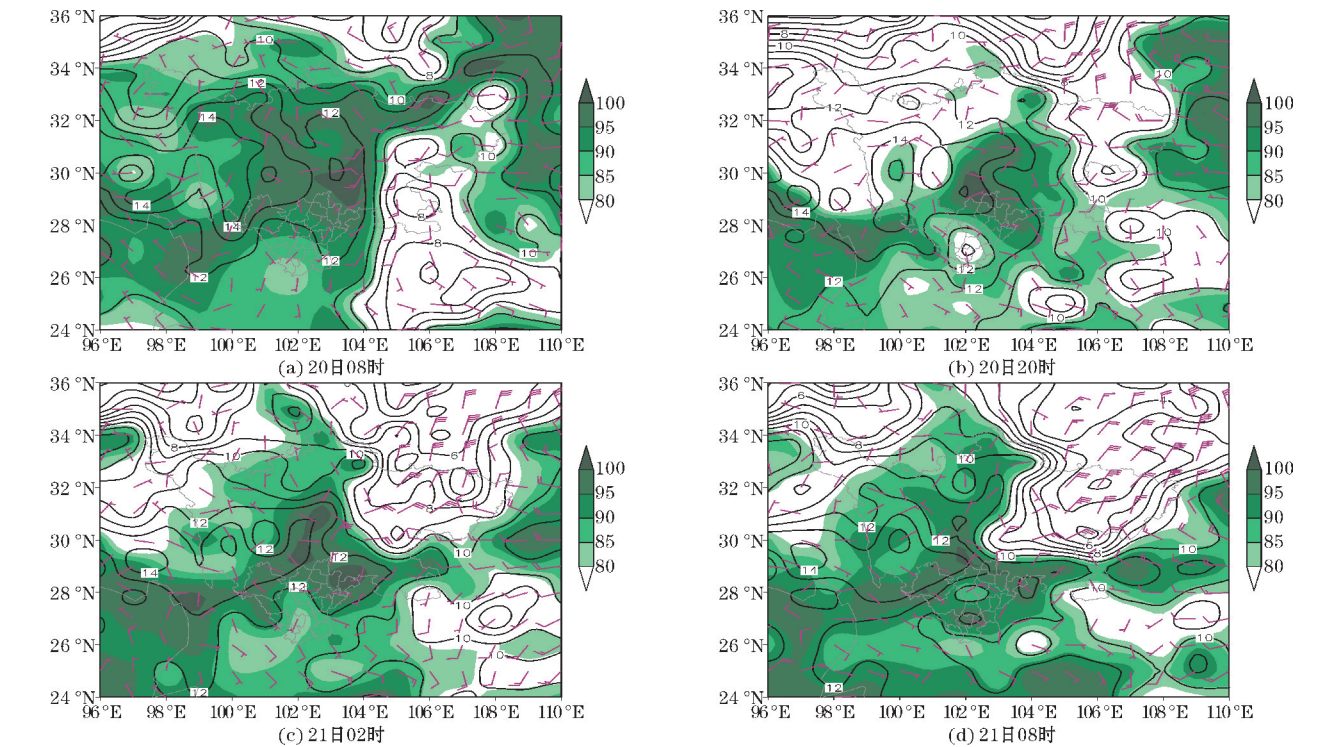


图2 700 hPa 比湿场(等值线)、相对湿度场(阴影)与风场分布图

4.2 水汽通量与水汽通量散度

计算凉山州暴雨发生前(8月20日02时、08时、14时)和暴雨过程中(8月20日20时,21日02时,21日08时),对流层低层地面~700 hPa,对流层中层700~500 hPa,对流层高层500~300 hPa逐6 h的3个时次平均各层水汽通量散度(图3)可知:在低层,暴雨前期凉山州均处于水汽通量散度负值区,即为水汽辐合区,且水汽通量散度值小于-0.9(单位: $10^{-5} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$,下同),州北部到中部的辐合程度更强,水汽通量散度值

小于-1.2。暴雨期间(8月20日20时,21日02时,21日08时),凉山州仍处于水汽辐合区,但辐合强度减弱。中层700~500 hPa(图略),暴雨发生前和发生时,凉山州均处于水汽辐合区,但辐合程度低于低层,且随着暴雨的发生,水汽辐合强度也在降低,水汽通量散度趋近于0。高层500~300 hPa(图略),暴雨发生前及发生时,凉山州均处于水汽通量散度正值区,无明显的水汽辐合,且随着暴雨的发生,水汽辐散程度增强。综上可知,此次暴雨过程的水汽主要集中在对流层中低层,中低层有水汽的辐合,高层有水汽的辐散。

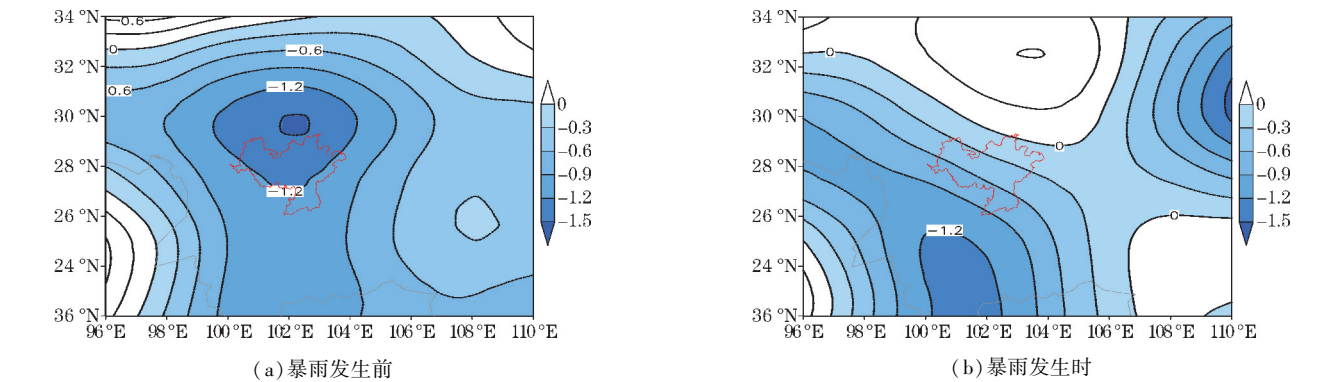
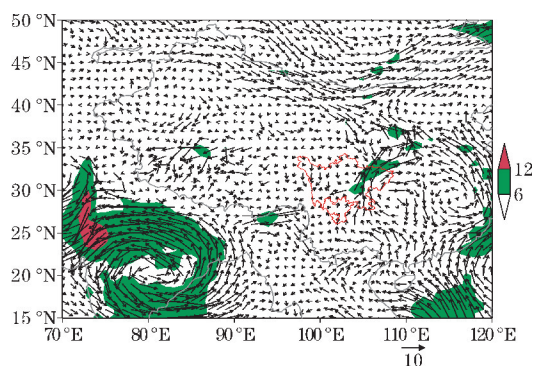
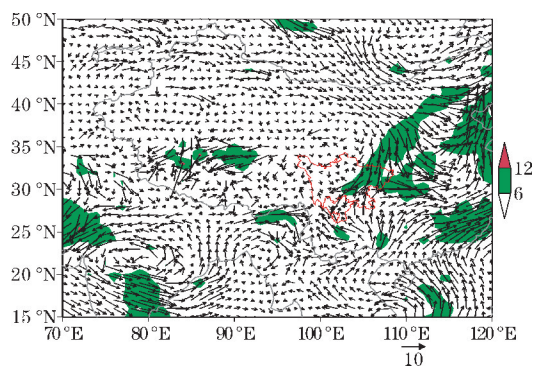


图3 暴雨发生前和暴雨期间逐6 h 3个时次近地面层到700 hPa层的水汽通量散度图

综上可知此次暴雨的水汽主要集中在中低层,图4为暴雨发生前及暴雨期间700 hPa的水汽通量的分布图,由图可知暴雨发生前8月20日08时(图4a)进入凉山州的水气流主要有两支:一支是来自西太平洋和南海的东南气流,先向西扩展至两广一带,再继续西进,经滇东到滇中转向北移或东北移输送至凉山州。另一支是来自孟加拉湾的水汽遇青藏高原分流成南北两支气流,北支气流通过绕流从青海南部经川西高原南下从西北路径向凉山州输送水汽,南支气流沿青藏高原南界经滇东北从偏西路径向凉山州输送水汽。暴雨发生时21日02时(图4b)进入凉山州的水气流主要有3支,暴雨发生前来自西太平洋及孟加拉湾的两支主气流带仍向凉山州输送水汽,同时来自新疆以西的偏西及西北气流与来自西西伯利亚的西北气流在河西走廊一带交汇,沿西北路径南下进入四川盆地,并在盆地形成一水汽通量大值带,进而向凉山州输送水汽。



(a) 20日08时



(b) 21日02时

图4 700 hPa水汽通量(矢量,填色为水汽通量>6)

4.3 HYSPLIT 模式水汽输送的轨迹分析

为进一步分析此次暴雨过程的水汽条件,引入拉格朗日轨迹模式(HYSPLIT)在凉山州以金阳县(103.2°E,27.7°N)为暴雨中心追踪气团的后向轨迹。模拟的起始点为8月20日20时(北京时)暴雨初期,由于水汽的辐合主要位于对流层中低层,而凉山的海拔高度较高,综合选取3000 m、4000 m、5500 m作为气团后向轨迹模拟的起始高度^[13]。追踪时长为

120 h,每间隔6 h输出一次空气团的地理位置,将相应的位置差值到数据间隔为1h的轨迹点上,再分别对每个高度上产生的轨迹进行聚类分析^[13]。

从各个高度向前追踪120 h的水汽轨迹图(图5a)可以看出,3000 m高度的水汽主要来源于东南气流,4000 m高度的水汽主要来源于西南或偏南气流,而5500 m高度的水汽则主要来自北方,形成了“上冷下暖”的不稳定层结。随着中高纬高空低槽的东移,槽后的西北气流引导冷平流南下,与低层西南或东南暖湿气流在凉山交汇,形成不稳定层结,有利于触发对流天气。

对于各个高度气团轨迹的聚类可以看出,3000 m高度上(图5b),气团的第一路径为东南路径,在东南气流的引导下将云贵本地的水汽向凉山州输送,水汽贡献率达到71%,为主要的水汽通道源地。其次是3号西南路径的水汽通道,将来自孟加拉湾的水汽向凉山州输送,水汽贡献率达到25%。2号西北路径的主要将阿富汗附近的水汽向凉山州输送,但水汽贡献率低,仅为4%。

4000 m高度上(图5c)得到的3条聚类水汽传输通道路径与3000 m高度相似,主要分为东南路径、西南路径和西北路径,其中1号水汽通道的水汽主要来自凉山州本地及临近省份云南本地,水汽贡献率最高,达到57%。3号通道水汽贡献率次之为36%,水汽主要来源于孟加拉湾。来源于阿富汗附近的2号水汽通道的贡献率最低,为7%。

5500 m高度上(图5d)得到的3条聚类水汽传输通道与3000 m和4000 m在水汽通道路径和各水汽通道所占的贡献率差距有所不同。2号通道的水汽主要来源于孟加拉湾及周边国家,水汽贡献率最高,为43%。1号通道的水汽贡献率次之为36%,其水汽主要来源于与凉山州相邻较近的青藏高原东侧,主要通过偏西或西北路径向凉山州输送水汽。西北路径的3号水汽通道水汽贡献率为21%,主要源自伊朗。

综上,中低层700~600 hPa凉山州本地及周边地区是提供水汽的主要源地,其次是孟加拉湾和周边国家,两者的水汽贡献率之和高达90%以上,而通过西北路径从阿富汗一带向凉山州输送的水汽相比极少。500 hPa的水汽主要来自西南路径的孟加拉湾和周边国家及偏西路径的青藏高原东侧,两者的水汽贡献率占79%,较少的水汽来源于距离凉山州较远的伊朗高原附近。此次暴雨过程主要由于中低层凉山州周边地区及孟加拉湾附近通过不同路径输送的暖湿空气在凉山州上空不断抬升,与通过西北路径将远在西侧的阿富汗到伊朗一带的水汽输送到凉山州的下沉干冷空气,在凉山州上空交汇,形成暴雨及大暴雨。

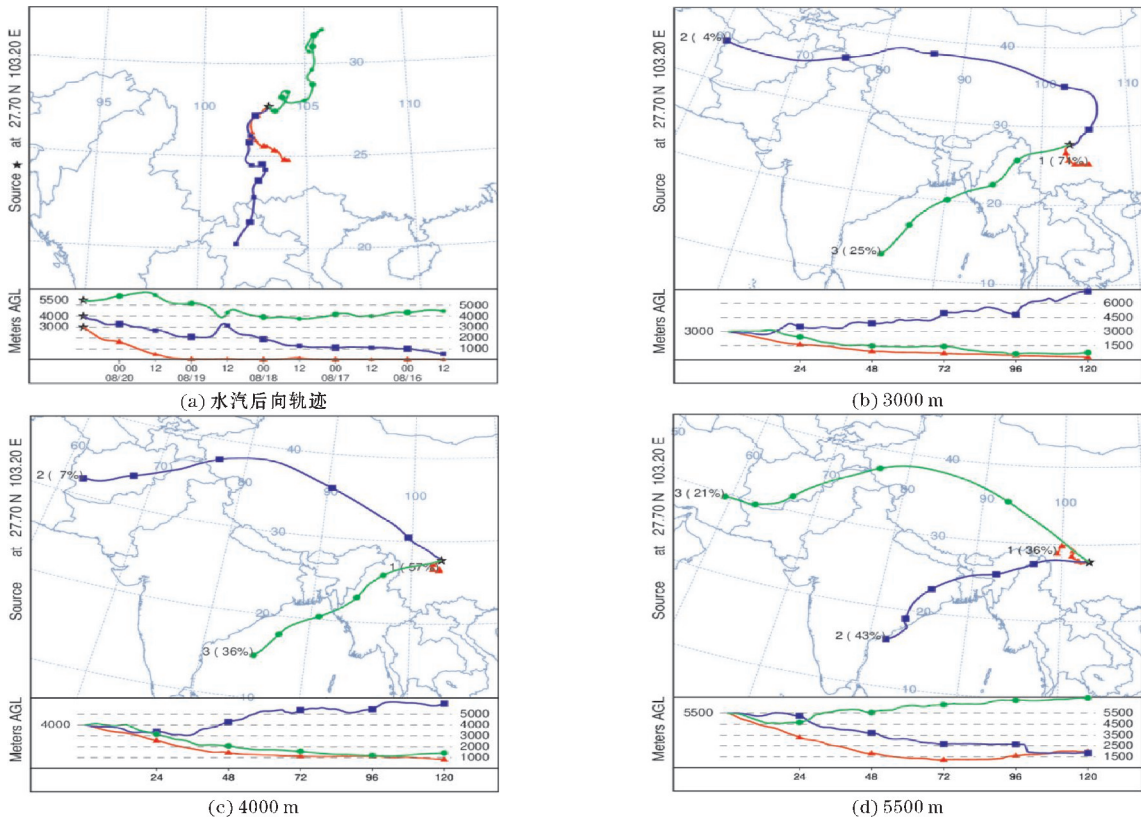


图5 暴雨水汽后向轨迹图及各高度水汽通道到达暴雨区的空间分布和水汽贡献率

5 结论

本文利用常规地面高空气象观测资料、NCEP 再分析资料和 GDAS 资料,利用欧拉方法和 HYSPLIT 模式对凉山州 2023 年 8 月 21 日致洪暴雨天气过程的环流形势和水汽特征进行分析,得出以下结论:

(1)500 hPa 短波槽东移,700 hPa 切变线南压,地面冷空气侵入及槽后携带北下的冷平流与低层偏南气流带来的暖湿气流在凉山州本地交汇,配合本地良好的水汽条件及强烈的不稳定能量共同造成此次暴雨天气过程。

(2)利用欧拉方法对此次暴雨天气过程的水汽输送分析结果表明,暴雨发生前凉山州的水汽主要来源于西太平洋和南海的东南气流及孟加拉湾的西南气流。暴雨发生时凉山州的水汽主要来源于西太平洋和南海、孟加拉湾及北方。

(3)运用 HYSPLIT 模式对各层水汽输送轨迹及贡献率分析可知,中低层700 hPa、600 hPa凉山州本地及周边地区是提供水汽的主要源地,其次是孟加拉湾和周边地区,两者的水汽贡献率之和高达 90% 以上。500 hPa的水汽主要来源于西南路径的孟加拉湾和周边地区及偏西路径的青藏高原东侧,两者的水汽贡献率占 79%,来自北方的水汽贡献率占 21%。越往低层凉山本

地及周边地区在暴雨过程中的水汽贡献越高。

参考文献:

[1] 竺可桢. 东南季风与中国之雨量[J]. 地理学报, 1934(1):1-28.

[2] 马京津,高晓清. 华北地区夏季平均水汽输送通量和轨迹的分析[J]. 高原气象,2006,25(5): 893-899.

[3] 梁萍,何金梅,陈隆勋,等. 华北夏季强降水的水汽来源[J]. 高原气象,2007,26(3):460-465.

[4] 孙建华,汪汇洁,卫捷,等. 江淮区域持续性暴雨过程的水汽源地和输送特征[J]. 气象学报, 2016,74(4):542-555.

[5] 周长艳,李跃清,李薇,等. 青藏高原东部及邻近地区水汽输送的气候特征[J]. 高原气象,2005, 24(6):880-888.

[6] 张芳丽,李国平,李武阶. 2020 年 7 月 5-6 日武汉江夏特大暴雨水汽源地和输送特征分析[J]. 暴雨灾害,2022,41(4):375-383.

[7] 岳俊,李国平. 大气河对 2013 年“7.9”四川盆地持续性暴雨作用的诊断分析[J]. 成都信息工程学院学报,2015,30(1):72-80.

[8] 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.
- [9] 杨浩, 江志红, 刘征宇, 等. 基于拉格朗日法的水汽输送特征分析-江淮梅雨和淮北雨季的对比[J]. 大气科学, 2014, 38(5): 965-973.
- [10] 戴竹君, 王黎娟, 管兆勇, 等. 热带风暴“Bilis”(0604)暴雨增幅前后的水汽输送轨迹路径模拟[J]. 大气科学, 2015, 39(2): 422-432.
- [11] 庄晓翠, 李博渊, 赵江伟, 等. 基于 HYSPLIT 模式分析的塔克拉玛干沙漠南缘暴雨水汽特征[J]. 气象, 2022, 48(3): 311-323.
- [12] 李江萍, 杜亮亮. 利用 HYSPLIT 轨迹模式分析西北涡降水的水汽轨迹[A]. 第35届中国气象学会年会 S5 气候变暖背景下干旱灾害形成机制变化与监测预测及其影响评估[C]. 安徽: 合肥, 2018.
- [13] 李玉婷, 谭贵蓉, 何兴潼, 等. 基于 HYSPLIT 模式的泸州特大暴雨水汽输送特征分析[J]. 气象, 2020, 40(2): 49-52.
- [14] 毛紫怡, 李国平, 许霖. 湖南一次持续性暴雨过程的水汽输送与收支特征[J]. 暴雨灾害, 2021, 40(5): 513-522.
- [15] Draxler R R, Hess G D. An overview of HYSPLIT_4 modeling system for trajectories dispersion and deposition[J]. Aust Meteor Mag, 1998(47): 295-308.
- [16] 崔恒立, 王东仙, 吴梦雯. 一次西南涡暴雨的湿位涡诊断分析[J]. 高原山地气象研究, 2019, 39(3): 14-19, 81.
- [17] 任伟, 任燕, 李兰兰, 等. 基于 HYSPLIT 模式的济南机场一次暴雨过程的水汽输送特征分析[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(1): 116-122.
- [18] 赵伟, 郝成元, 许传阳. 基于 HYSPLIT 的中国夏季风暖湿气流影响区域分界探讨[J]. 地理与地理信息科学, 2018, 34(2): 106-111.
- [19] 刘锋, 丁治英, 梁艳, 等. “莫拉克”台风暴雨过程中湿位涡场的演变特征[J]. 暴雨灾害, 2011, 30(2): 161-166.
- [20] 陈文龙, 竹利, 黄欣, 等. 凉山“6.26”致洪暴雨天气的成因分析[J]. 成都信息工程大学学报, 2022, 37(2): 202-207.
- [21] 姚俊强, 杨青, 毛炜峰, 等. 基于 HYSPLIT4 的一次新疆天山夏季特大暴雨水汽路径分析[J]. 高原气象, 2018, 37(1): 68-77.

Analysis of Rainstorm Water Vapor Transport Causing Mountain Torrents Sichuan Liangshan by Combining Eulerian and Lagrange Methods

BIAN Qian, LI Chunheng

(Liangshan Prefecture Meteorological Bureau, Xichang 615000, China)

Abstract: To analyze the characteristics of water vapor transport during a torrential rain process that caused flash floods in the Liangshan 2023 of Sichuan province in August 21, 2005, the high altitude and ground observation data, NCEP re-analysis data, and GDAS data were used, combining the AI-ULA method with the HYSPLIT model, it was found that the short-wave trough, the shear line, the surface cold air and the strong unstable energy were the favorable conditions for the Lagrangian. Before the rainstorm, the water vapor mainly came from the western Pacific, South China Sea, and the Bay of Bengal. Water vapor mainly comes from the western Pacific and the South China Sea, Bay of Bengal and the north. Combined with the Hysplit model, the water vapor of 700 hPa and 600 hPa mainly comes from Liangshan prefecture and its surrounding areas, followed by the Bay of Bengal and its surrounding areas. The combined contribution of water vapor of the two regions is more than 90%. 500 hPa of water vapor mainly comes from Bay of Bengal and its surrounding areas and the eastern side of the Qinghai-Tibet Plateau, and the contribution rate of water vapor is 79%. The contribution of water vapor to the local and surrounding areas in the process of heavy rainfall is higher.

Keywords: rainstorm; water vapor characteristics; HYSPLIT model; water vapor contribution