

文章编号: 2021153B

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2204.21153

新疆塔里木盆地 2021 “7·19” 暴雨水汽特征的初步分析¹

张俊兰, 李如琦, 李娜, 李海花, 施俊杰

新疆维吾尔自治区气象台, 新疆 乌鲁木齐 830002

摘要: 新疆塔里木盆地是世界著名干旱区, 年均降水量不足 100 mm, 2021 年 7 月 19 日前后盆地出现罕见暴雨过程, 最大累积雨量和日雨量为 107.3 mm 和 78.5 mm (均达新疆大暴雨量级), 通过分析此次暴雨水汽特征得出以下结论:

(1) 首次提出南亚高压“匀双体”概念, 100 hPa 南亚高压“西高东低”转“匀双体”过程中, 500 hPa 伊朗高压与高原反气旋、中亚低压与印度低压以及高原涡共同架构了“两高夹一低”环流形势; (2) 揭示了在伊朗高压稳定反气旋环流下, 阿拉伯海与孟加拉湾北部洋面的水汽进入盆地的大尺度环流及物理机制。阐明盆地暴雨水汽主源地为地中海及以西洋面、中亚地区、阿拉伯海和孟加拉湾, 水汽输送有西方、东转西、西南+南方 3 条路径与轨迹, 指出伊朗高压南侧东风和中亚地区西风在“东转西”水汽输送中具有关键作用, 阿拉伯海和孟加拉湾的东风北上后与西风带汇合形成的水汽输送带是此次暴雨发生的重要条件。(3) 水汽由西、南、东 3 个边界输入, 东边界水汽收入主要源于低层东风, 西和南 2 个边界水汽收入源于中高层 3 条路径, “西南+南方”路径水汽输送致使南边界水汽输入贡献明显大于西边界。塔里木盆地暴雨既要重视中亚低压, 更要关注能否出现中亚低压与印度低压、高原涡共存并影响的大气环流场。

关键词 塔里木盆地暴雨 “东高西低”转“匀双体” “两高夹一低” 水汽

Preliminary Analysis of the Water Vapor Characteristics of the "July 19" Storm in 2021 in the Tarim Basin, Xinjiang

ZHANG Junlan, LI Ruqi, LI Haihua, LI Na

Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002

资助项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0102) 和 2020 年度国家自然科学基金重点项目 (42030612)

作者简介: 张俊兰 (1967-), 女, 正研级高级工程师, 从事天气预报研究. E-mail: zjl_0997@sina.com

Abstract: The Tarim Basin in Xinjiang is a world-renowned arid area with an average annual precipitation of less than 100 mm. A rare rainstorm occurs in the basin around July 19, 2021. The maximum cumulative rainfall and daily rainfall are 107.3 mm and 78.5 mm (both up to the magnitude of Xinjiang's heavy rainstorm), the following conclusions are drawn by analyzing the characteristics of the storm water vapor. For the first time, the concept of the "uniform twin" of the South Asian High was proposed. During the transition of the 100 hPa South Asian High from the "high in the west to the low in the East", the 500 hPa Iranian high and the plateau anticyclone, the Central Asian low and the Indian low, and the plateau vortex were jointly structured. "Two highs and one low" circulation situation; reveals the large-scale circulation and physical mechanism of the water vapor from the Arabian Sea and the northern Bay of Bengal entering the basin under the stable anticyclonic circulation of Iran under high pressure. Clarify that the main sources of storm water vapor in the basin are the Mediterranean Sea and the western ocean, Central Asia, the Arabian Sea and the Bay of Bengal. The water vapor transport has three paths and trajectories: west, east to west, southwest + south, and pointed out that the easterly wind on the south side of Iranian high pressure and Central Asia Regional westerly winds play a key role in the "east-to-west" water vapor transport. The easterly winds in the Arabian Sea and the Bay of Bengal merge with the west wind belt to form a water vapor conveyor belt that is an important condition for the occurrence of this heavy rain. Water vapor is input from the west, south, and east boundaries. The water vapor income from the east boundary mainly comes from the low-level east wind. The water vapor income from the west and south boundaries comes from three middle and high-level paths. The "southwest + south" path water vapor transport causes water vapor at the south boundary. The input contribution is significantly greater than the western boundary. The heavy rain in the Tarim Basin should not only pay attention to the Central Asian low pressure, but also pay attention to whether the Central Asian low pressure, the Indian low pressure, and the plateau vortex coexist and affect the atmospheric circulation field.

Key words: Tarim Basin heavy rain, "high in the east and low in the west" to "uniform double body", "two highs and one low", water vapor

1 引言

新疆塔里木盆地位于天山以南和昆仑山以北的广袤区域,中部为浩瀚的塔克拉玛干沙漠,沙漠周围镶嵌有许多绿洲,是中国向西开放的大通道和“桥头堡”,地缘和区位优势明显。由于地处沙漠干旱区,降水稀少,盆地及周围绿洲平原区年均降水量不足 100 mm。中国气象局地面台站观测资料显示,1961—2018 年近 60 年间,新疆降水增加百分比超过了全国其他地区,南疆降水增速更快,部分区域年平均降水量和极端降水增速达 $8\% \cdot 10 a^{-1}$ 。在变暖变湿大背景下,塔里木盆地春夏季暴雨频发,近年来有愈演愈烈之势,一次强暴雨产生的降水量会超过年均降水量,如 2018 年 5 月 21 日 18:00—19:00,和田地区皮山县 1 h 降水量 53.8 mm,接近年平均降水量,2019 年 6 月 25 日、2021 年 6 月 16 日和和田地区民丰县和洛浦县最大累计雨量 97.6 mm、121.6 mm,多个国家站日降水量屡屡突破历史

极值。盆地暴雨天气增多利弊兼有，有利方面是增加了绿洲区农田及山区牧草水份补给，增大河流径流，在一定程度上缓解干旱；不利方面是极端暴雨致灾性很强，除了造成城市内涝，还会引发局地山洪、泥石流和山体滑坡等次生地质灾害，对农牧业和能源生产、交通运输、城市运行等均有不利影响，严重影响人民生活，暴雨洪涝成为近年来塔里木盆地最严重的气象灾害之一。

以往塔里木盆地暴雨研究大多聚焦在环流形势、天气系统及配置、动力和热力条件等（张家宝，1987；张云惠，2013，2015；黄艳，2018；李如琦，2018；王江，2015；努尔比亚·吐尼亚孜，2017；热孜瓦古·孜比布拉，2021；郭楠楠，2019；周雪英，2018；杨霞，2020），还涉及卫星云图、雷达回波等中尺度系统（李如琦，2016；刘雯，2017；张云惠，2009）。在新疆暴雨的水汽输送方面，新疆春季降水异常时，4月会出现西伯利亚向里海、咸海地区和阿拉伯半岛向里海、咸海水汽输送异常（杨莲梅，2010）；“96·7”新疆特大暴雨的水汽主要源于中亚一带、青藏高原和河西走廊，分别对应西、南、东三个方向的水汽输送，500 hPa 以下几乎为整层辐合（肖开提·多莱特，1997）；新疆东部暴雨的水汽输送有西、东、南、北4条路径，4支水汽在东-西向和南-北向的强辐合下引发暴雨（杨莲梅，2012）。近年来研究认为，塔里木盆地北部-阿克苏地区暴雨的水汽主要源于中亚地区（曾勇，2017）；南疆暴雨水汽源于黑海和里海，后向轨迹分为偏西路径和转向路径（孙颖姝，2019），南疆西部暴雨水汽主源地在阿拉伯海和孟加拉湾，有西方、西南和偏东3条水汽输送路径（赵克明，2017）、水汽源于巴伦支海、喀拉海、挪威海和地中海，并有西北和偏西两条输送路径（牟欢，2021），天山南坡暖季暴雨的水汽主要源自中亚、大西洋及其沿岸、地中海和黑海及其附近（庄晓翠，2022）。在水汽含量和收支方面，1976—2009年塔里木盆地水汽含量的两个高值区分布在盆地西部和北部边缘地带，中心水汽含量13~14 mm（杨青，2010）；1961—2000年塔里木盆地夏季水汽输入、输出主要为东、西边界，水汽输送量东、西边界减少，南、北边界略有增加（李霞，2011）。

以上研究大大丰富了塔里木盆地暴雨成果，但有一定局限性。首先，提出新疆暴雨的大尺度环流背景为100 hPa南亚高压双体型，但对双体型布局分析较粗，极少关注南亚高压两个高中心的形态、强度、位置等变化对暴雨落区、强度影响；其次更为关键，以往盆地暴雨研究更多涉及中高纬槽脊系统，影响系统多为中纬

地区的中亚低压、低涡、低槽等中亚低值系统，极少关注低纬度天气系统、高原涡与中亚低值系统共存情况下对盆地暴雨的影响。但上述列举的暴雨大中心多位于昆仑山北坡，较 2018 年之前暴雨落区位置偏南，这些暴雨过程的影响系统除有中亚低压外，还有中纬地区高原天气系统的参与，如高原低涡和切变线等高原天气系统对 2019 年 6 月 24—26 日昆仑山北坡暴雨过程有直接影响（张俊兰，2021）。因此需调整对盆地暴雨的研究思路，视线从中高纬天气系统拓展到中低纬地区。

2021 年 7 月 18—22 日，新疆塔里木盆地出现了罕见暴雨过程，最大累积雨量 107.3 mm，最大日降雨 78.5 mm，均达新疆大暴雨量级。本文的目的是回答以下问题：（1）本次盆地暴雨的观测特征怎样？（2）决定本次暴雨过程的大气环流异常特征如何？中亚低压、印度低压和高原涡共同存在对盆地暴雨有何作用？（3）决定本次暴雨的水汽来源和输送路径如何？南亚高压双体型的形态、位置、强度对水汽输送有何影响？对于上述问题的回答，有助于厘清水汽进入盆地的大尺度环流及物理机制，增强对盆地暴雨变化的新认识，为精细化预报预警提供技术支撑，更好助力当地经济社会高质量发展。

2 资料与方法

2.1 标准及定义

按照“某站 24 h 降雨量 24.1~48.0 mm 为暴雨、48.1~96.0 mm 为大暴雨、 ≥ 96.1 mm 为特大暴雨”的新疆降水量级标准（肖开提·多莱特，1997），确定本次过程 24 h 暴雨量级；某站小时雨强 $\geq 10.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 为短时强降水。

张家宝（1987）将中亚低压定义为，500 hPa 上 60°E 、 40°N 范围内出现的气旋式低压环流及低槽或切变线，未必有闭合等高线；采用梁梅（2020）北印度洋热带气旋的定义，印度低压指 500 hPa 阿拉伯海域（ 0°N 、 50°E ）和孟加拉湾海域（ 0°N 、 75°E ）出现的气旋性环流及低槽或切变线，未必有闭合等高线；高原涡指 500 hPa 上 70°E 、 27°N 内，出现闭合等高线的低压或者 3 站风向呈气旋性环流的涡旋系统（青藏高原气象科学研究拉萨会战组，1981）。依据上述定义分析中亚低压、印度低压以及高原涡低值系统对此次暴雨的影响。

2.2 资料与方法

采用 2021 年 7 月 18—22 日塔里木盆地喀什地区、克州、和田地区、阿克苏地区加密自动气象站小时降水资料；选取 7 月 12—22 日 L 波段雷达高空探测大气环流实况场和 GRAPES_GFS 模式分析场（时间分辨率 6 h、空间分辨率 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ，间隔 50 hPa、共 16 层），分析高低空环流形势及水汽输送、辐合；依据 7 月 12—22 日 NCEP 再分析数据（时间分辨率 6 h、空间分辨率 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ，850~300 hPa 相对湿度、气温、U 分量、V 分量和地面气压 6 个气象要素），参照刘蕊（2010）方法，计算水汽收支；使用全球同化资料（GDAS），引入拉格朗日水汽后向轨迹模式（HYSPLIT，时间分辨率 12 h，空间分辨率 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ）（孙颖姝，2019；曾钰婷，2020；任伟，2019），在盆地暴雨点上空向后推出一段时间的水汽输送轨迹；依据 7 月 17—22 日 FY2G 红外云图资料分析云系演变。本文环流形势中涉及地图底图来自中国气象信息综合分析处理系统（MICAPS 4），底图无修改。

3 暴雨实况

2021 年 7 月 18 日夜间至 22 日白天，塔里木盆地的喀什地区、克州、和田地区、阿克苏地区均出现暴雨，19 日夜间最强。此次暴雨过程有以下特征：（1）累计雨量大，强降雨集中在塔里木盆地，北疆和东疆降雨较弱。盆地累计降雨量 155 站 12.1~23.5 mm、67 站 24.1~47.8 mm、9 站 51.2~92.2 mm、2 站 101.1~107.3 mm，最大中心在阿克苏地区拜城县康其乡黄山羊沟站（图 1a）。（2）暴雨站次多。共 40 站暴雨（阿克苏地区 3 县、喀什地区 4 县、克州 2 县、和田地区 3 县）、6 站大暴雨（喀什地区疏附县、克州阿图什市、阿克苏地区拜城县）。（3）最大和次大日雨量超过新疆 24 h 大暴雨标准，最大日雨量为 78.5 mm（克州阿图什市上阿图什乡铁提尔村站，19 日夜间 6 h 降雨量 77.1 mm），次大日雨量为 74.6 mm（喀什地区疏附县明尧勒村站，19 日 20:00—20 日 20:00）。（4）小时雨强强。共 57 站次出现短时强降水，11 站次小时雨强 $\geq 20.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

暴雨点选取以能代表塔里木盆地西（喀什地区和克州）、北（阿克苏地区）、南（和田地区）3 个方位、并以累计雨量居前 3 为标准，由于盆地西部的喀什地区疏附县和克州阿图什市很近，阿图什市上阿图什乡铁提尔村站虽日雨量最大，但累积雨量 86.6 mm 居第 5，因此盆地西部选疏附县站点。综合考虑后，选取阿克苏地区、喀什地区、和田地区所辖境内最大累计雨量站为 3 个暴雨点，依次为

阿克苏地区拜城县康其乡黄山羊沟站（Y8608，累计雨量 107.3 mm）、喀什地区疏附县明尧勒村站（Y6130，累计雨量 98.3 mm）、和田地区于田县皮什盖村（Y6252，累计雨量 69.6 mm）（图 1a、b），图 1b 中可看出，最大小时雨强 Y6130 为 48.4 mm(20 日 01:00—02:00)、Y8608 为 23.6 mm(21 日 13:00—14:00)、Y6252 为 15.6 mm（19 日 18:00—19:00）。

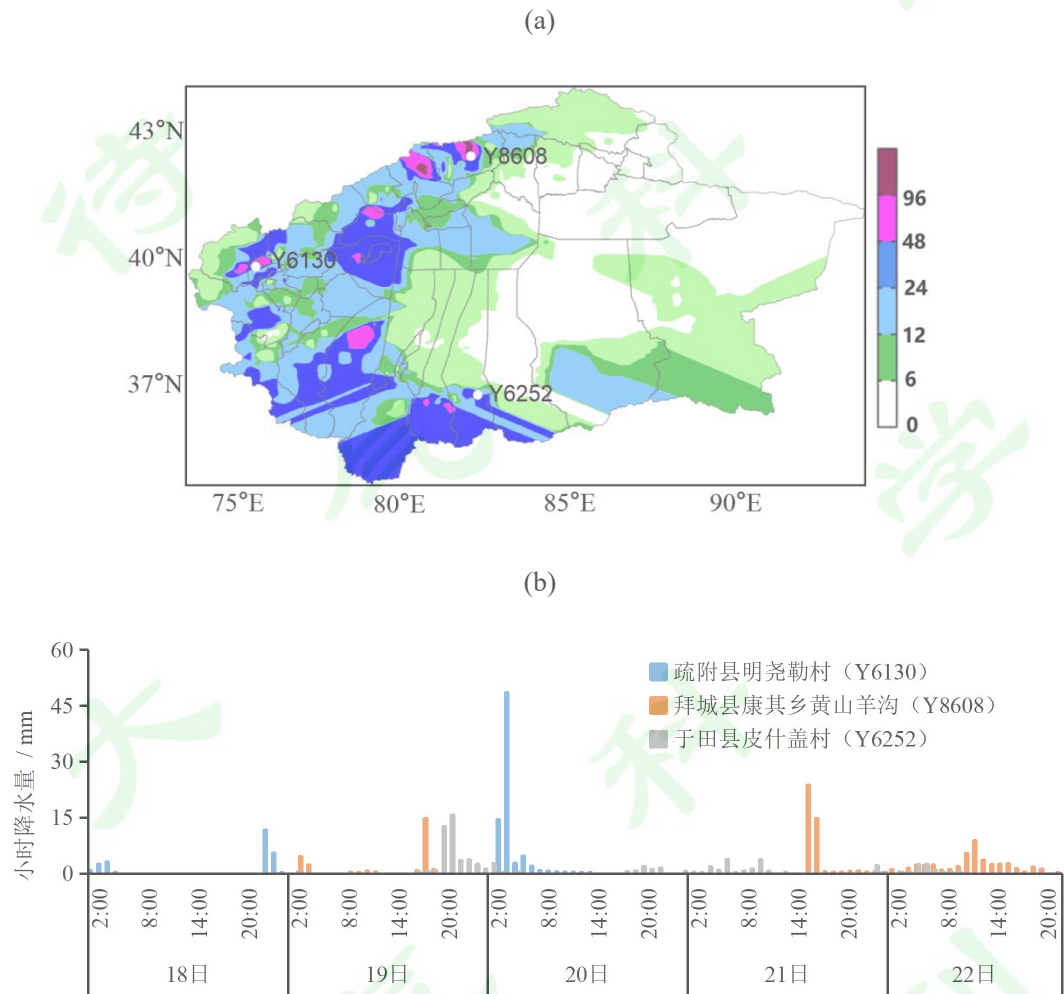


图 1 2021 年 7 月 18 日 20:00—22 日 20:00 塔里木盆地累计降雨量分布（a，白色圆点为 3 个暴雨点，右侧黑色字体为站名）和 3 个暴雨点逐小时雨量（b）（单位：mm）

Figure1 The cumulative rainfall distribution (a, the white “•” is three rainstorm spots, The black font on the right is the station number) and hourly rainfall of three ainstorm spots (b) in the Tarim Basin from 20:00 on July 18th to 20:00 on 22nd July 2021(unit: mm)

本次暴雨引发局地山洪，喀什地区喀什市、疏附县和巴楚县玉米等农作物和房屋不同程度损毁；阿克苏地区阿瓦提县英艾日克镇 8 个村 503 户 2442 人受灾；拜城县克孜尔乡四村黑孜河河段（黑孜水文站）水势明显上涨，7 月 22 日 20:00

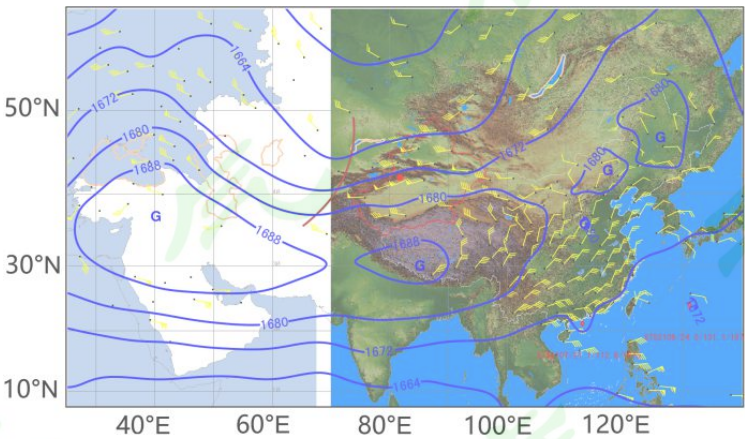
流量 $337 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，超过 $320 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的蓝色预警流量。

4 大尺度环流形势

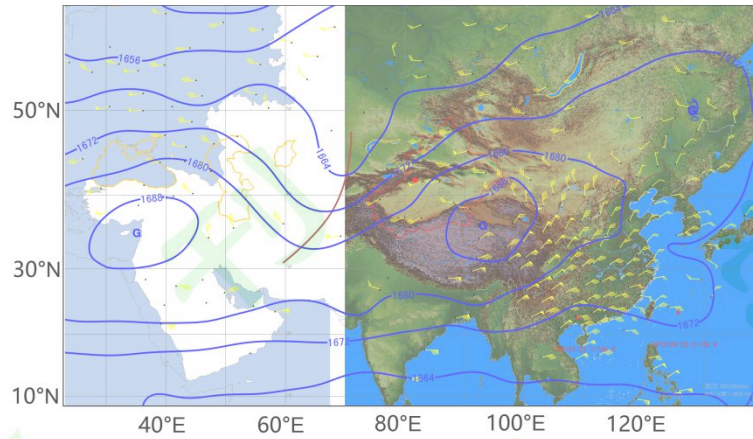
4.1 100 hPa 南亚高压“西高东低”转“匀双体”分布

南疆多雨时段，100 hPa 南亚高压呈双体型，存在东西震荡，两个高压中心在伊朗高原和青藏高原东部上空（张学文，2006；杨莲梅，2020），未提及强度变化。本文首次提出南亚高压“匀双体”概念，指 100 hPa 伊朗高原和青藏高原两个高压中心基本位于同一纬度、最强高压等值线闭合圈面积大体一致的均匀双体型分布形态。此次暴雨南亚高压也呈双体型，但两个高中心变化与以往不同，由“东高西低”转“匀双体”分布，青藏高压明显发展、北抬。7 月 15 日前，南亚高压呈带状分布，15 日 08:00 两个高中心（均 1680 dagpm）在伊朗高原西部和青藏高原东部上空；18 日 08:00—20 日 08:00，伊朗高压加强北抬，呈“西高东低”双体分布，其中 19 日 20:00 两个高中心均 1688 dagpm，伊朗高压明显偏强、高中心偏北（图 2a），20 日 20:00 两个高中心为 1696 dagpm、1688 dagpm，中心压差最大。21 日 02:00 青藏高压继续加强北扩，“西高东低”转“匀双体”，22 日 08:00，两个高中心均为 1688 dagpm 且等高线闭合圈面积相当（图 2b），“匀双体”分布持续至 22 日 14:00，20:00 “匀双体”有所减弱，盆地始终处于中亚低压底部西南气流中。

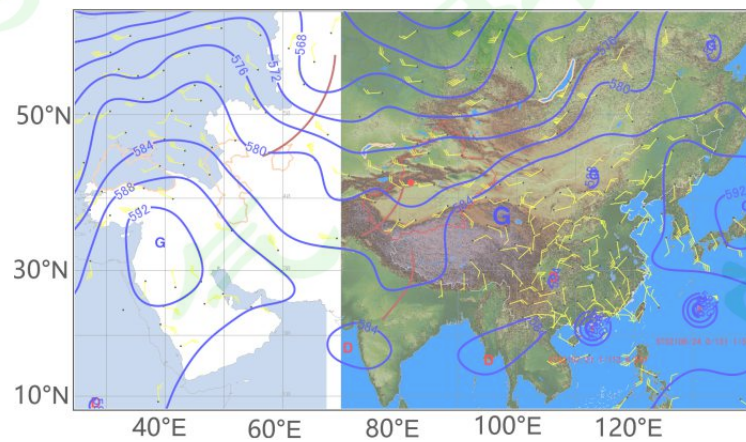
(a) 2021-07-19-20:00 100 hPa



(b) 2021-07-22-08:00 100 hPa



(b) 2021-07-19-20:00 500 hPa



(d) 2021-07-22-08:00 500 hPa

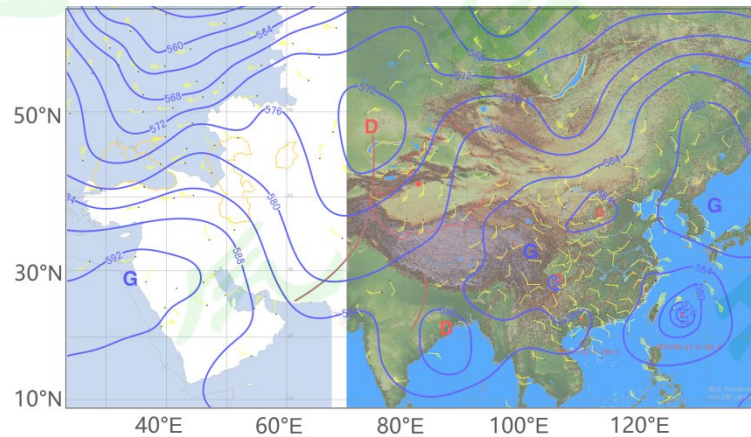


图 2 2021 年 7 月 19 日和 22 日 100 hPa (a, b) 和 500 hPa (c, d) 位势高度 (dagpm) 叠加风场 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), 棕色实线为槽线, “D” 为气旋低中心, “G” 为反气旋高中心, 红 “•” 为阿克苏地区 Y8608 暴雨点

Figure 2 The geopotential height (unit:dagpm) superimposed wind field (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) of 100 hPa (a, b) and 500 hPa (c, d) on July 19 and 22, 2021, The solid brown line is the groove line, "D" is the low center of the cyclone, and "G" is the high center of the anticyclone, the red "•" is the Y8608 rainstorm spot in Aksu area

4.2 500 hPa “两高夹一低” 环流下中亚低压与印度低压共存并影响

图 3 为主要天气系统变化轨迹，500 hPa 上 GRAPES_GFS 位势高度场叠加风场中，点绘 7 月 15 日 08:00—22 日 20:00 主要高压和低压天气系统逐 6 h 所在位置，连接这些天气系统随时间变化的位置点，得出主要天气系统变化轨迹，每个天气系统移速不同，造成变化轨迹线长短不一。主要天气系统变化轨迹为，低值系统中，中亚低压南下、印度低压西移北上、高原涡缓慢东北移；高压系统中，伊朗高压西退北上、西太副高西移过程中逐渐北上、高原反气旋北上东移。

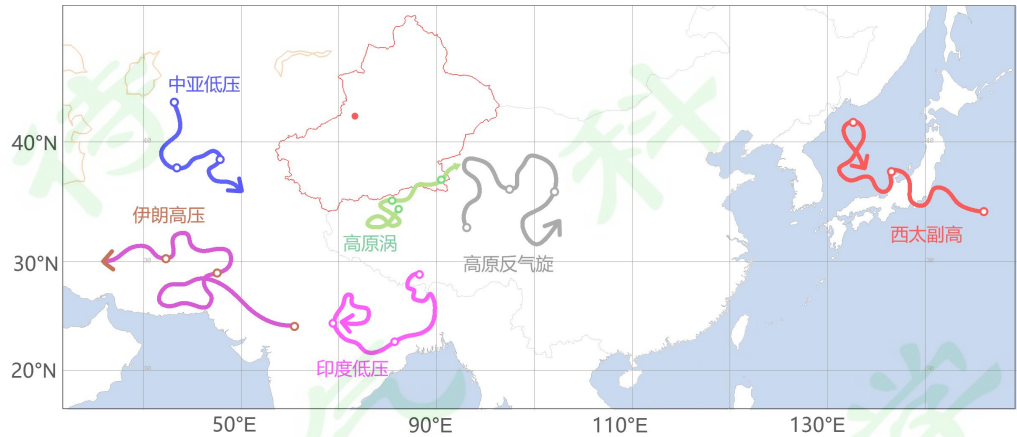


图 3 2021 年 7 月 15—22 日欧亚范围 500 hPa 主要天气系统变化轨迹，箭头方向代表天气系统移动方向、箭头位置为系统最终位置，轨迹线中空圆圈依次代表 15 日 08:00、19 日 20:00 和 21 日 20:00，红“·”为阿克苏地区 Y8608 暴雨点

Figure 3 The change track of major weather systems at 500hPa in the Eurasian range from July 15 to 22, 2021, The direction of the arrow represents the moving direction of the weather system, the position of the arrow is the final position of the system, The hollow circles in the trajectory represent 08:00 on the 15th, 20:00 on the 19th, and 20:00 on the 21st in turn, and the red "·" is the Y8608 rainstorm spot in Aksu area

500 hPa 上，7 月 17 日前中高纬为“两脊一槽”（欧洲和贝加尔湖为脊区、西西伯利亚为槽区），新疆 40° N 以南为带状高压。17 日后，高中低纬槽脊位相逐渐同步，18—19 日“两高夹一低”环流形势下，副高南侧台风“烟花”和华南台风“查帕卡”生成后长时间维持。结合图 3，主要环流形势和天气系统演变如下：（1）伊朗高压（“西高”）的变化。变化轨迹呈先西退、后加强北上、再西退态势。15—17 日伊朗高压西退，18—20 日加强北上、面积扩大，其南部维持东风，其中 18 日 08:00，伊朗高压与黑海、里海高压叠加发展，明显发展北挺，脊前冷空气南下，促使中亚低压维持并加深。19 日 20:00，588 dagpm 线继续北抬、范围增大，出现 592 dagpm 中心，阿拉伯海北部东风 12~16 m·s⁻¹（图 2c）。21—22 日伊朗高压减弱西退（图 2d）。（2）青藏高原反气旋高压环流和

西太副高（“东高”）的变化。青藏高原东部的反气旋高压环流 12—23 日长时间维持，反气旋西部为偏南风，变化轨迹先北上、后东移、再南下。西太副高变化轨迹总体呈西进北上态势，15 日 08:00，西太副高中心由 14 日 20:00 的 34°N 、 144°E 西北进至 35°N 、 145°E 附近，中心强度 588~592 dagpm。15 日 08:00—21 日 02:00，波动西进过程中逐渐北上，其中 19 日 20:00 移至 38°N 、 137°E 附近，与 15 日相比，北上 3 个纬距、西进 8 个经距，中心强度 592 dagpm，588 dagpm 线西界、北界伸至 125°E 和 48°N 左右；20 日 02:00—21 日 02:00，西太副高继续西进北上，588 dagpm 线西界、北界伸至 119°E 和 53°N 左右。22 日 02:00 西太副高开始东退减弱。15—22 日，青藏高原反气旋环流与西太副高共同形成东部高压脊，有阻挡作用。（3）中亚低压、印度低压、高原涡（“一低”）变化。中亚低压南下、印度低压西退北上、高原涡缓慢东北上，三者共存与影响形成“一低”。12—18 日，西西伯利亚维持低槽，随伊朗高压北挺和脊线顺转，脊前冷平流南下，巴尔喀什湖西北部形成气旋性环流—中亚低压，19—21 日中亚低压南压。印度低压 15 日起由青藏高原气旋性环流南下至印度半岛形成，19 日 20:00，印度低压西退至阿拉伯海东部出现 584 dagpm 闭合圈，中亚低压、印度低压呈阶梯槽分布（图 2c）。20—21 日印度低压北上，22 日 08:00，中亚低压底部 580 dagpm 南界压至 29°N ，印度低压中心北上至恒河南部（图 2d）。

中亚低压、印度低压和高原涡共同构成“一低”，中亚低压、印度低压前沿维持西南风，此西南风带上正涡度平流和暖湿气流是形成动力抬升、水汽输送和热力条件的重要机制。图 4 中，500 hPa 正涡度平流主要分布在低值系统前西南或偏南气流中，中亚低压和印度低压附近均有正涡度平流。印度低压在青藏高原时，低压附近向西北方输送至盆地的正涡度平流 $0.5 \times 10^{-8}\text{s}^{-2}$ ，最大中心 $1.2 \times 10^{-8}\text{s}^{-2}$ 位于低压北部（图 4a）；印度低压南下过程中，低压附近及北部正涡度平流区向高原输送，随印度低压东侧偏南风加强， $0.5 \times 10^{-8}\text{s}^{-2}$ 向北移动的正涡度平流范围扩大，受盆地东部脊阻挡，正涡度平流经过高原进入盆地，与中亚低压外围部分正涡度平流在盆地汇合（图 4b、c）；随中亚低压南下和印度低压北上，印度低压周边北上的正涡度平流与中亚低压外围南压的正涡度平流部分汇合进入盆地，进入盆地的正涡度平流不低于 $0.5 \times 10^{-8}\text{s}^{-2}$ ，最强 $1.2 \times 10^{-8}\text{s}^{-2}$ （图 4d）。

(a) 2021-07-17-08:00

(b) 2021-07-19-08:00

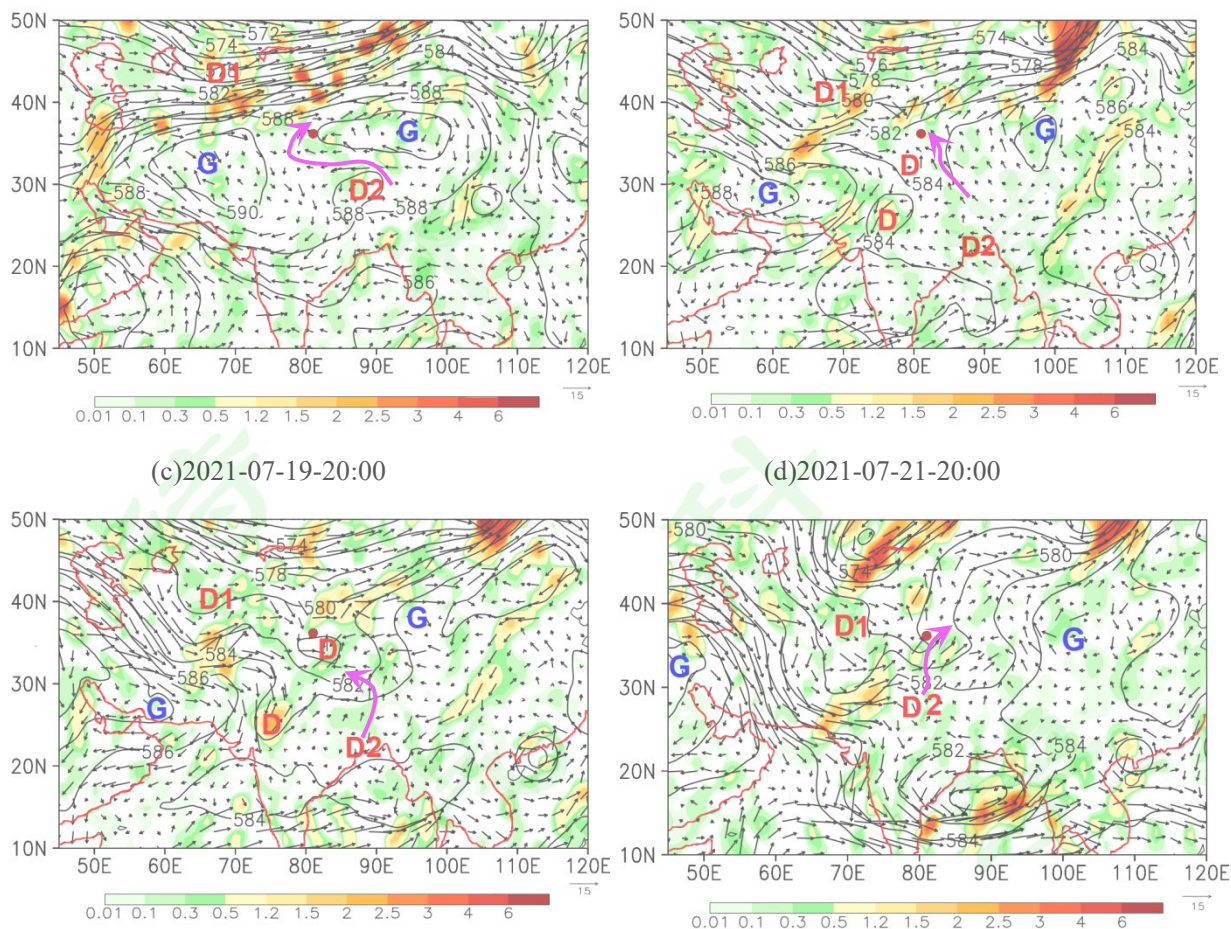


图4 2021年7月17—19日500 hPa高度场（等值线，单位：dagpm）、风场（箭头，单位： $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）和正涡度平流（填色，单位： $10^{-8} \times \text{s}^{-2}$ ），“D1”和“D2”代表中亚低压和印度低压，玫红带箭头线代表印度低压附近正涡度平流输送，褐色“•”为Y8608暴雨点

Fig.4 The height (the contour, unit: dagpm), wind (the arrow, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and positive vorticity advection (the shaded, unit: $10^{-8} \times \text{s}^{-2}$) at 500 hPa from 17 Jul to 19 in 2021, "D1" and "D2" represent the Central Asian low pressure and the Indian low pressure, the rose-red arrow line represents the advective transport of positive vorticity near the Indian low pressure, and the brown "•" is the rainstorm point of Y8608

500 hPa 中亚低压气旋式曲率外围正涡度平流的维持和加强可造成低层减压，是中亚低压发展、维持和移动的重要因素，而印度低压附近正涡度平流向北输送、与中亚低压外围部分正涡度平流汇合进入盆地，可使中亚低压外围正涡度平流维持并加强，利于盆地暴雨发生与加强。

印度低压南下和北上有两个作用，其一是印度低压附近的正涡度平流不断向北输送，虽强度弱于中亚低压外围正涡度平流，但会使中亚低压外围正涡度平流区强度和位置发生变化，致使中亚低压外围和盆地内气旋性涡度增加，有利于中亚低压发展、移动和盆地上升运动的维持；其二在印度低压东侧偏南风携带水汽

部分流向盆地上空,增加降水强度。高原涡在暴雨过程中沿藏北高原缓慢东北移,主要作用为,一是使西南风在盆地南部折向为南风,将水汽输送至盆地;二是有利于中亚低压维持与发展。普查近几年塔里木盆地暴雨过程资料,中亚低压、印度低压和高原涡的协同作用与共同影响除在本次暴雨中出现外,还出现在 2019 年 6 月 24—26 日、2020 年 4 月 18—21 日和 5 月 6—8 日、2021 年 6 月 14—17 日 4 场盆地暴雨中,盆地暴雨的研究思路除要关注上下游高压系统和中亚低压天气系统,还要重视低纬地区印度低压、高原涡与中亚低压的共存和协同作用。

4.3 高低空天气系统空间配置

此次暴雨的环流形势及高低空主要天气系统的三维空间结构(图 5)中,100 hPa 南亚高压双体型由“西高东低”转“匀双体”分布,500 hPa 为“两高夹一低”形势,伊朗高压西退北挺(“西高”),青藏高原反气旋环流东北上、西太副高偏北偏强长时间维持(“东高”),南下的中亚低压、北上的印度低压和高原涡共同存在并相互影响(“一低”)。

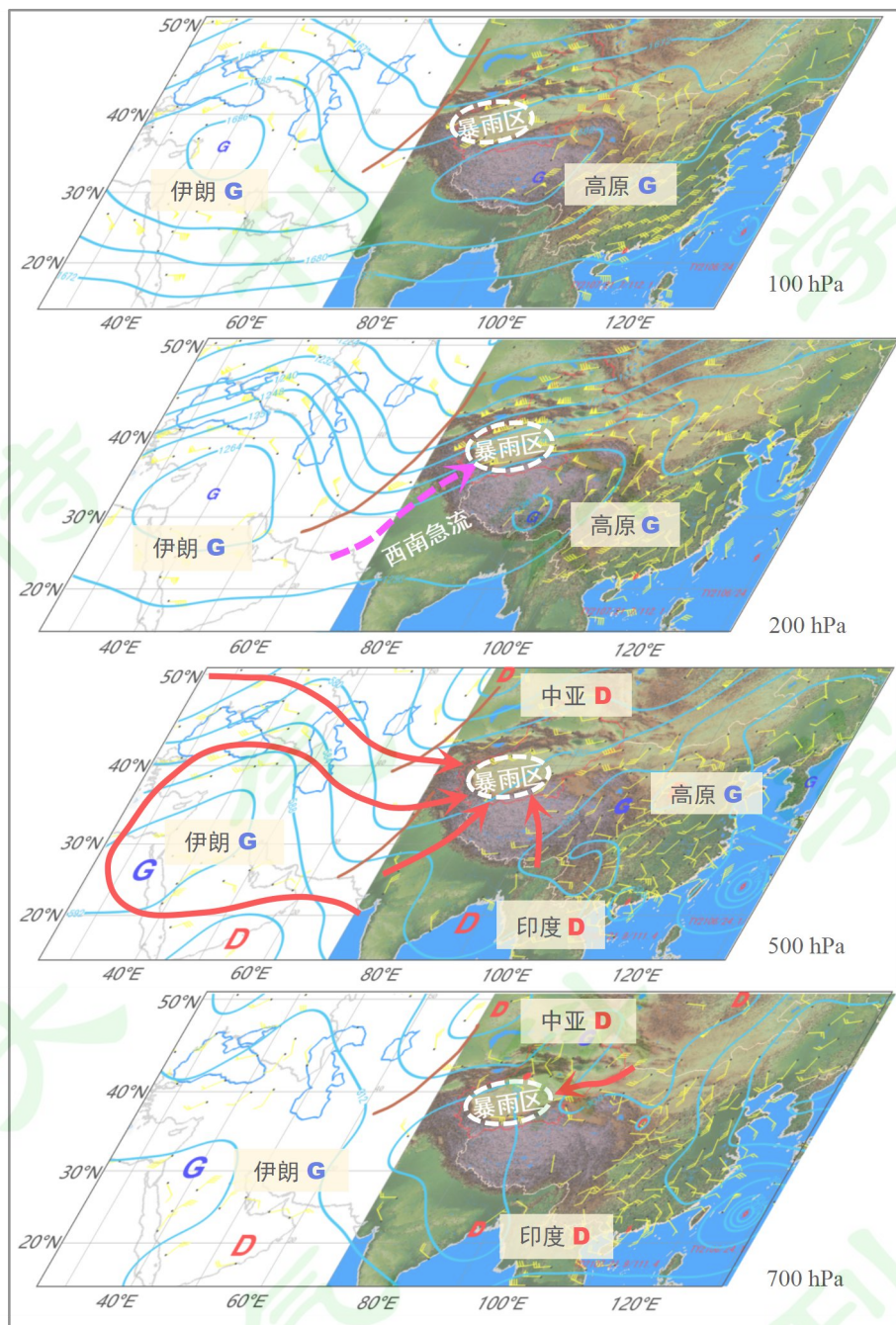


图5 新疆塔里木盆地2021年“7·19”暴雨高低空天气系统三维空间结构（蓝色实线为位势高度，棕色实线为槽线，“D”和“G”表示位势高度“低中心”和“高中心”，红色带箭头实线为水汽输送路径，玫红色带箭头虚线为西南急流，白色虚线圆圈为暴雨区）

Figure 5 Three-dimensional spatial structure of high and low altitude weather system of "July 19" rainstorm in Xinjiang Tarim Basin in 2021

(The blue solid line is the geopotential height, the brown solid line is the trough line, "D" and "G" indicate the geopotential height "low center" and "high center", the red solid line with arrow is the water vapor transmission path, rose red The dotted line with arrow is the southwest jet, and the white dotted circle is the rainstorm area)

500 hPa 水汽输送路径与 100 hPa 南亚高压双体型的位置、强度变化密切相关，当 100 hPa 南亚高压“西高东低”时，500 hPa 阿拉伯海水汽沿伊朗高压底部东风先折向北上、后东移进入盆地；当南亚高压“匀双体”时，500 hPa 青藏高原反气旋环流先北上后东南下过程中，其后部偏南风维持，使高原水汽沿偏南风部分进入盆地，高原涡的存在决定了高原南风在藏北高原折向盆地。低层 650~850 hPa 偏东风为高层西南风维持起冷垫作用，并通过东风携带水汽进入盆地。

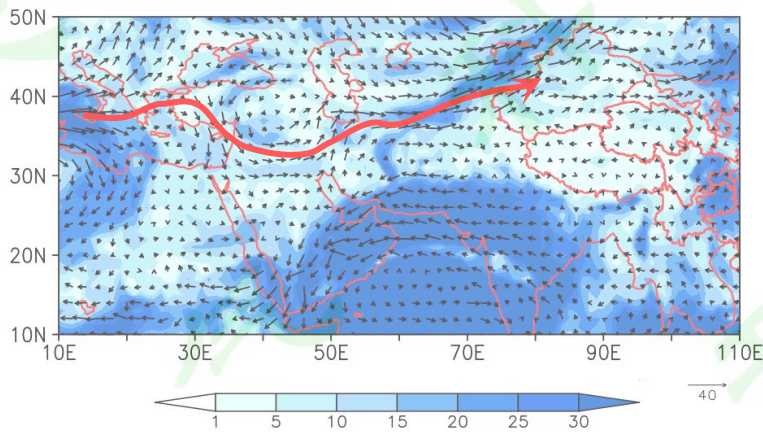
5 水汽特征

5.1 水汽输送

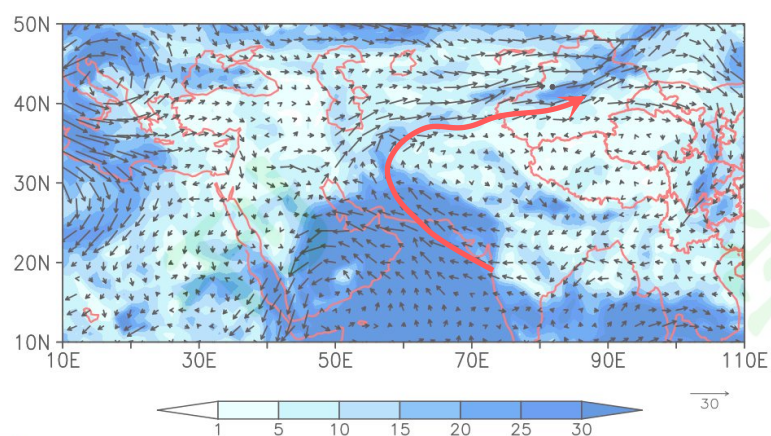
5.1.1 整层水汽输送

地面~300 hPa 整层水汽通量叠加 500 hPa 风场（图 5）分布中，整层水汽通量大值区集中在阿拉伯海、孟加拉湾、地中海以及中亚地区，这些区域水汽输送较强，其中阿拉伯海最强、孟加拉湾次之、地中海和中亚地区较弱。图 5 中配有西方（图 6a）、东转西 I（图 6b）、东转西 II（图 6c）和西南+南方（图 6d）3 条路径的水汽输送。

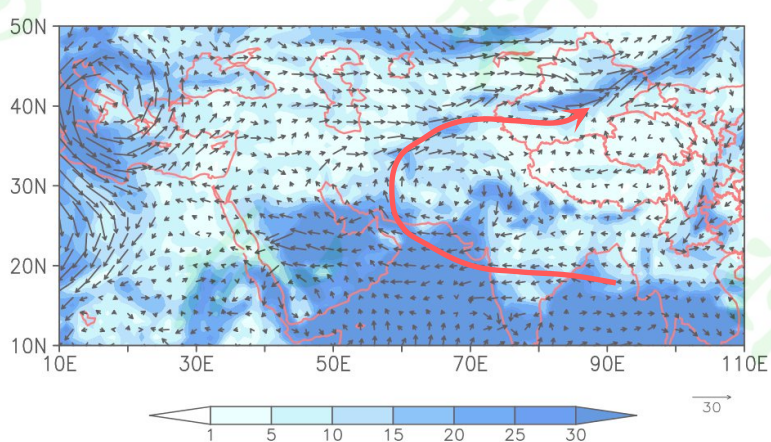
(a) 2021-07-16-08:00



(b) 2021-07-17-14:00



(c) 2021-07-18-14:00



(d) 2021-07-21-08:00

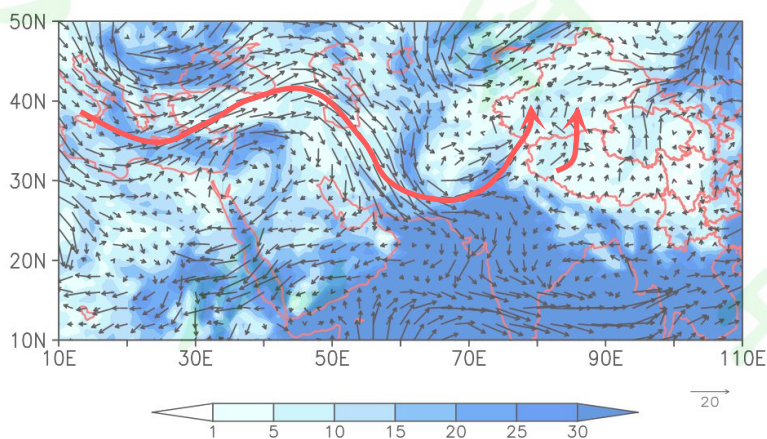


图 6 2021 年 7 月 16—21 日地面~300 hPa 水汽通量整层积分(填充, $10^{-1} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 叠加 500 hPa 风场(带箭头短线, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), 红色带箭头实线为水汽输送路径
Figure 6 The water vapor flux of integral layer (filling, $10^{-1} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) superimposed 500 hPa wind field (short line with arrow, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) on the ground ~300 hPa from July 16-21, 2021, the red solid line with arrow is the water vapor transmission path

5.1.2 水汽输送路径

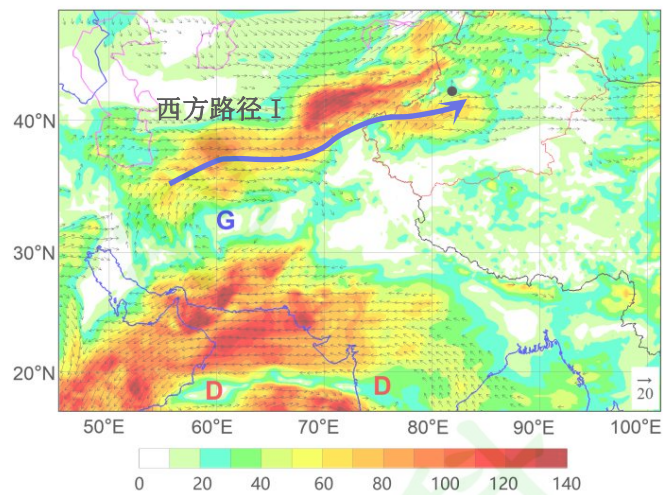
300~650 hPa 不同层次中,除有地中海及以西、中亚地区的水汽沿西风向盆地输送外,还有来自阿拉伯海和孟加拉湾的水汽输送,主要有以下 3 条路径。

(1) 西方路径。以自地中海及以西、中亚地区沿西风向盆地输送水汽的强弱划分为两个阶段,第 1 阶段为 7 月 12 日 08:00—16 日 08:00,第 2 阶段为 18 日 20:00—19 日 14:00,共持续约 214 h。两个阶段 350~650 hPa 均有西方水汽输送,水汽输送厚度 300 hPa 左右,进入盆地水汽通量均达 90×10^{-1} ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 左右。西方路径在两个阶段内 500~600 hPa 水汽输送较强,选取西方路径水汽输送的最强层次,图 7a 为第 1 阶段最强层—600 hPa,图 7b 为第 2 阶段最强层—500 hPa。

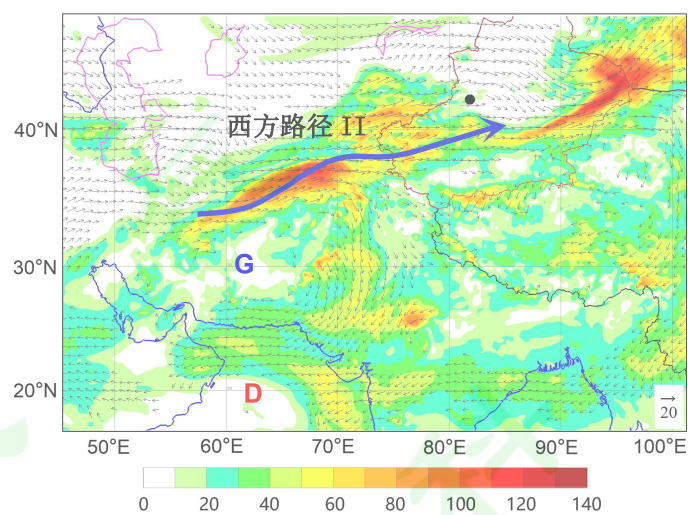
(2) 东转西路径。伊朗高压反气旋环流在西退北抬中,其南部东风强弱和源头均有变化,依据东风源头位置,分为第 1 阶段(16 日 14:00—17 日 02:00)和第 2 阶段(17 日 08:00—18 日 14:00)两个阶段,持续约 42 h。两个阶段中 350~650 hPa 均有水汽输送,水汽输送厚度 300 hPa 左右。第 1 阶段中,水汽主要源于阿拉伯海北部洋面,伊朗高压反气旋式环流发展,高压底部偏东风将阿拉伯海北部洋面水汽向西输送,部分孟加拉湾水汽沿东风并入,后北折至中亚地区,再随西风进入盆地,其中 600 hPa 水汽输送最强,进入盆地最强水汽通量 110×10^{-1} ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) (图 7c);第 2 阶段中,源于孟加拉湾的水汽输送明显增强,500 hPa 最强,进入盆地最强水汽通量 90×10^{-1} ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) (图 7d),输送路径同第 1 阶段。

(3) 西南+南方路径。中亚低压南下至境外高原西部时,低压底部出现西北风与西南风气旋式曲率,以此判定西南路径。20 日 02:00—21 日 20:00 为此路径水汽输送,水汽输送层更高,300~500 hPa 均有、且 500 hPa 最强,水汽输送厚度 200 hPa 左右,持续约 42 h。随中亚低压南下,印度半岛北部水汽沿西南风进入盆地,最强水汽通量 $40 \sim 70 \times (10^{-1} (\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}))$;同时出现南方路径水汽输送,因青藏高原偏南风加强,在高原涡作用下,高原部分水汽北上、西折转向进入盆地(图 7e、7f),最强水汽通量 $30 \sim 50 \times (10^{-1} (\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}))$ 。

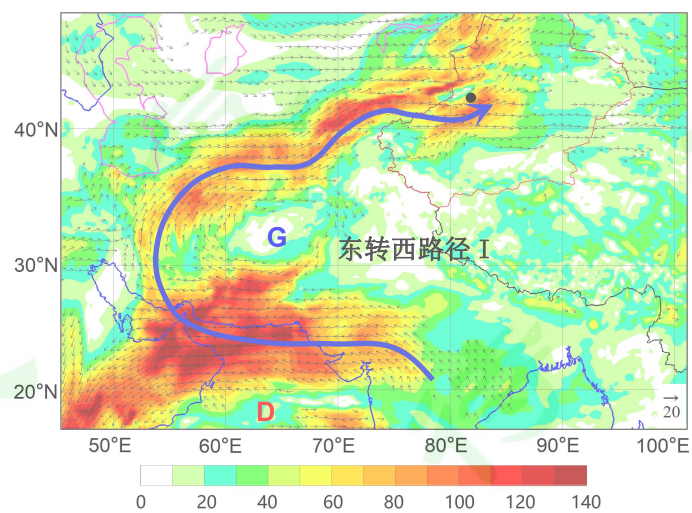
(a) 2021-07-17-08:00 600 hPa



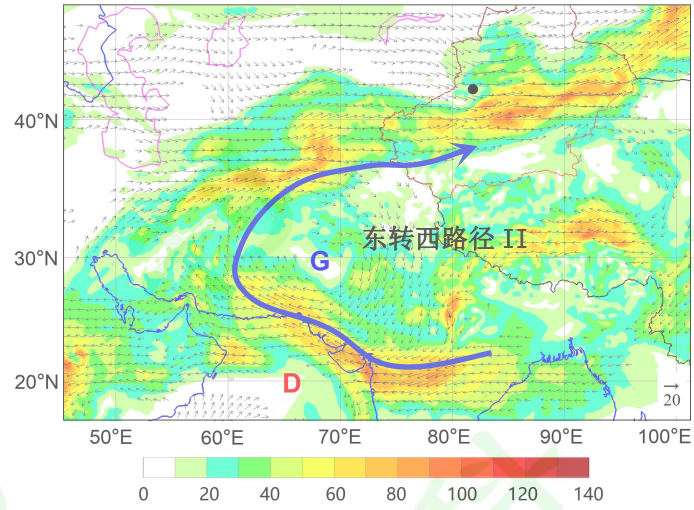
(b) 2021-07-18-20:00 500 hPa



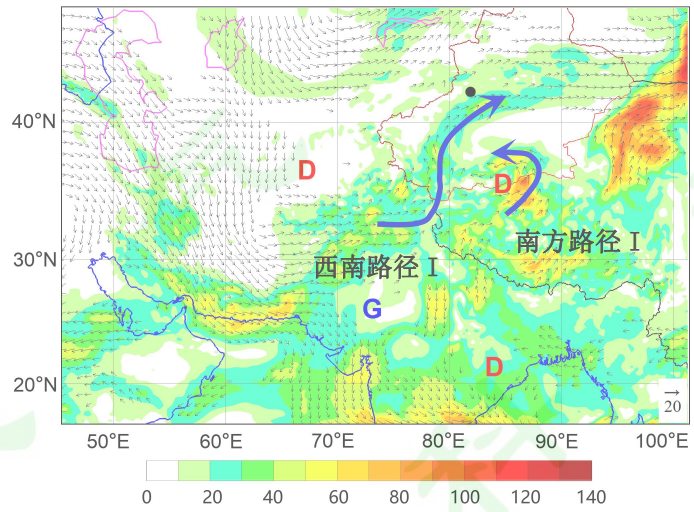
(c) 2021-07-16-14:00 600 hPa



(d) 2021-07-18-08:00 500 hPa



(e) 2021-07-21-08:00 500 hPa



(f) 2021-07-21-14:00 500 hPa

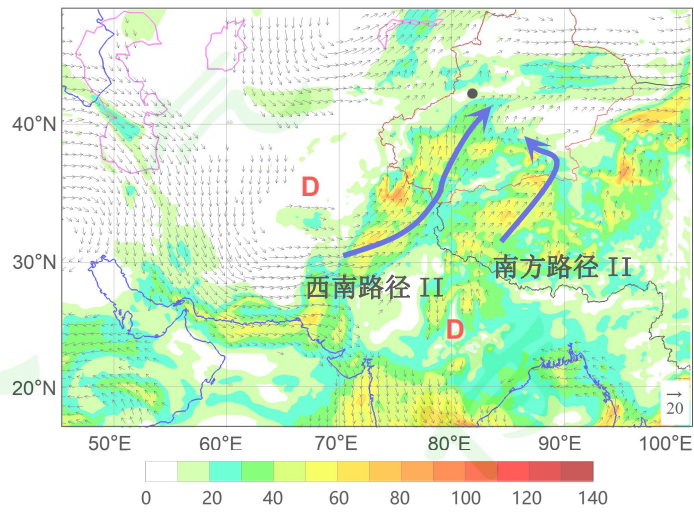


图7 2021年7月16—21日500~600 hPa水汽通量(填充, $10^{-1} \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)叠加风场(风羽, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), 蓝色带箭头实线为水汽输送路径, “D”为气旋低中心, “G”

为反气旋高中心，黑“•”为阿克苏地区 Y8608 暴雨点

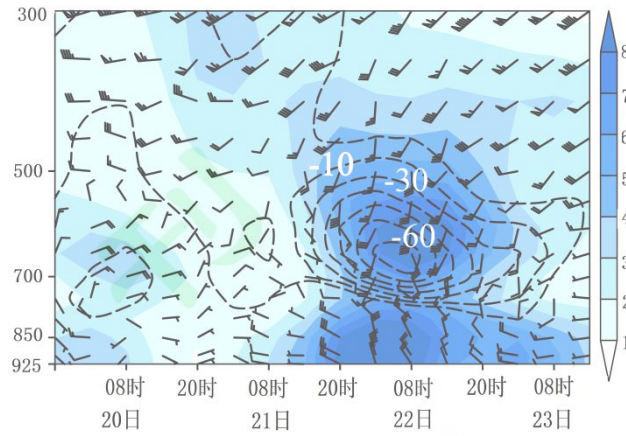
Figure 7 The water vapor flux (filling, $10^{-1} \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) superimposed wind field (wind plume, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) of the 500~600 hPa on July 16-21, 2021, The blue solid line with arrows is the water vapor transport path, "D" is the low center of the cyclone, "G" is the high center of the anticyclone, and the black "•" is the Y8608 rainstorm spot in Aksu area

本文首次提出“东转西”水汽输送路径。此次暴雨除有西方、西南方和南方的水汽输送路径外，还有“东转西”路径，这是与以往研究最大的不同。此路径水汽源于阿拉伯海和孟加拉湾北部洋面，水汽在伊朗持续性高压的特定环流下进入塔里木盆地，高压南部东风形成的东路水汽输送带北上后、与中亚低压环流底部偏西风在南疆西部境外汇合，形成较强的水汽输送进入盆地。西方、西南方路径的水汽源于地中海及以西和中亚地区，与西方路径的不同在于，西南路径在中亚低压南下过程中，风场在中亚地区形成明显气旋式曲率，西风转西北风后再转为西南风，由西南风携水汽进入盆地。南方路径的水汽主要源于青藏高原，在高原涡风场作用下，偏南风折向进入盆地。

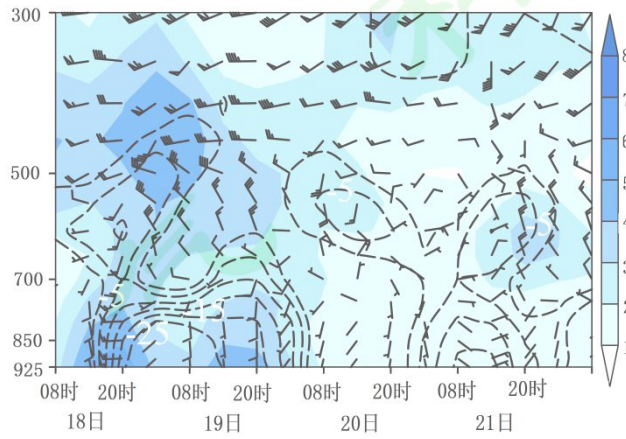
5.1.3 水汽输送垂直结构

沿 3 个暴雨点 Y8608 (42.07°N 、 81.84°E)、Y6130 (39.57°N 、 75.55°E) 和 Y6252 (36.51°N 、 82.05°E)，作 7 月 18—23 日水汽通量、水汽通量散度叠加风场的时间-高度剖面图 (图 8)。可看出，3 个点 925~300 hPa 均有水汽输送，其中，Y8608 上空水汽输送时间较长，600 hPa 最强，21 日 02:00—22 日 08:00 达 $8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 8a)，21 日 13:00—15:00，2 小时雨量 38.3 mm；Y6130 水汽输送 450 hPa 最强，18 日 20:00—19 日 14:00 为 $4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 8b)，20 日 00:00—02:00，2 小时雨量 62.8 mm；Y6252 水汽输送 400 hPa 和 800 hPa 附近较强，400 hPa 为 $4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (19 日 14:00—22 日 08:00)，800 hPa 达 $7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (18 日 14:00—19 日 14:00) (图 8c)，19 日 17:00—19:00，2 小时雨量 28.1 mm。3 个暴雨点的较强水汽输送均早于强降水出现，水汽输送强度越强、厚度越厚，降水越强 (Y8608 代表性最好)。

(a) 沿 Y8608 站



(b) 沿 Y6130 站



(c) 沿 Y6252 站

图 8 2021 年 7 月 18—23 日沿 Y8608、Y6130 和 Y6252 水汽通量（填充， $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ）和水汽通量散度（黑虚线， $10^{-8} \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ）叠加风场（ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）时间-高度剖面
Figure 8 Time-height vertical section of water vapor flux (filling, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and water vapor flux divergence (dotted line, $10^{-8} \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) superimposed wind field ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

5.2 水汽辐合

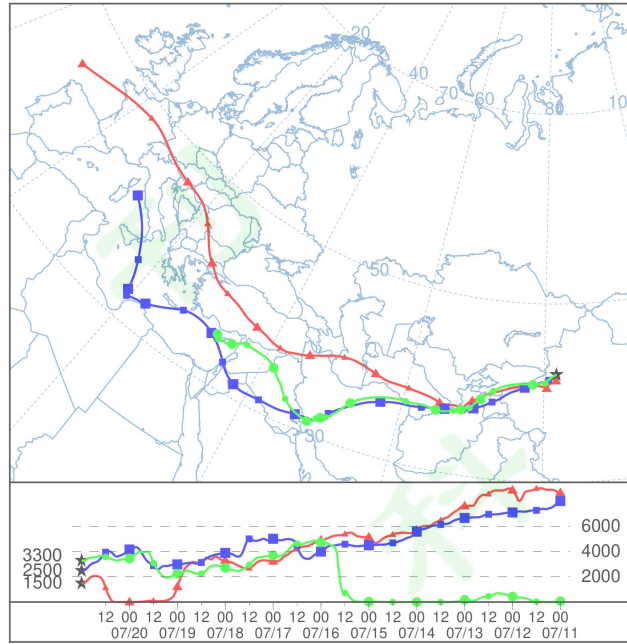
此次盆地暴雨中 550~850 hPa 上空均有水汽辐合，暴雨区位于最大负值中心边缘的梯度密集带上（图略）。分析 Y8608、Y6130、Y6252 站 3 个暴雨点上

空的水汽辐合剖面（图 8，黑虚线）发现，水汽辐合发生在 500 hPa 以下，Y8608 强辐合中心位于 650 hPa，最强达 $-60 \times 10^{-8} \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ，辐合高度 750~500 hPa（21 日 14:00—22 日 20:00）（图 8a）；Y6130 强辐合中心位于 700 hPa 以下，最强 $-15 \times 10^{-8} \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ （18 日 14:00—20 日 02:00）（图 7b）；Y6252 强辐合中心位于 700 hPa 以下，最强 $-15 \sim -30 \times (10^{-8} \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$ ，出现在 19 日 02:00—20 日 02:00 和 21 日 08:00—22 日 08:00（图 8c）。可见，650 hPa 以下水汽辐合较强，且辐合越强、辐合层越厚、降水强度越大。

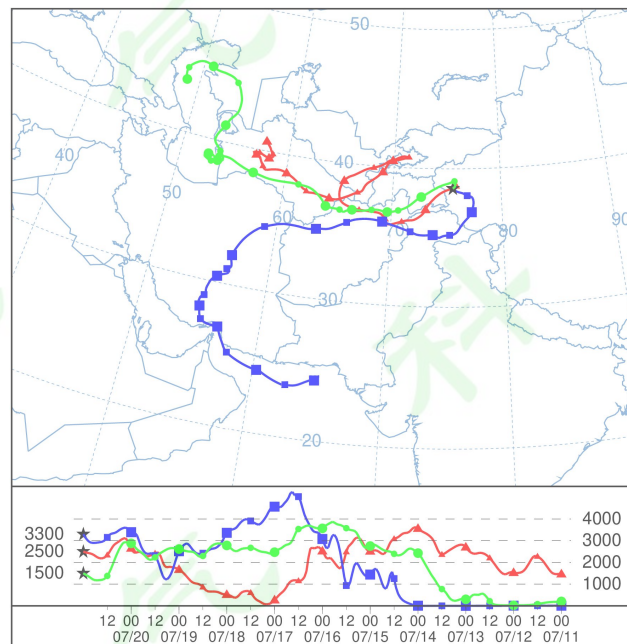
5.3 水汽追踪轨迹

运用 HYSPLIT 模式作水汽后向轨迹追踪，依据 Y8608（42.07° N、81.84° E）和 Y6130（39.57° N、75.55° E）、Y6252（36.51° N、82.05° E）3 个暴雨点位置，以及 3 个暴雨点纬度各偏西、偏东 1 个纬距并保持经度不变，得到 9 个点；选取 1500 m、2500 m、3300 m 和 3000 m、5500 m、7000 m 以及 4100 m、4900 m、5700 m 三组高度作为气团后向轨迹模拟的最终高度，向后推出 9 个点 240 h 水汽追踪轨迹，通过轨迹聚类分析方法，由于聚类过程中的空间方差增长率在聚类结果小于 3 条后迅速增长，因此轨迹最终聚类为 3 条，筛选代表性较好的水汽追踪轨迹（图 9）。盆地上空水汽轨迹有西方、东转西和西南 3 条（无南方轨迹，可能与高原海拔高和水汽输入量少有关），西方轨迹水汽主要来自地中海及以西、中亚地区（图 9a）；东转西轨迹 I 的水汽起源于阿拉伯海北部洋面，西退北上至中亚地区向东输送至盆地（图 9b）；东转西轨迹 II 的水汽源地为孟加拉湾北部洋面，在东风输送下先北折再向东输送至盆地（图 9c）；东转西轨迹 III 的水汽源地为阿拉伯海和孟加拉湾北部洋面，分别在东风转西风路径下将水汽输送至盆地（图 9d）；西南轨迹中，水汽轨迹起源于地中海及以西洋面，先沿西方路径传输，在中亚南部转为西南路径进入盆地（图 9e）。

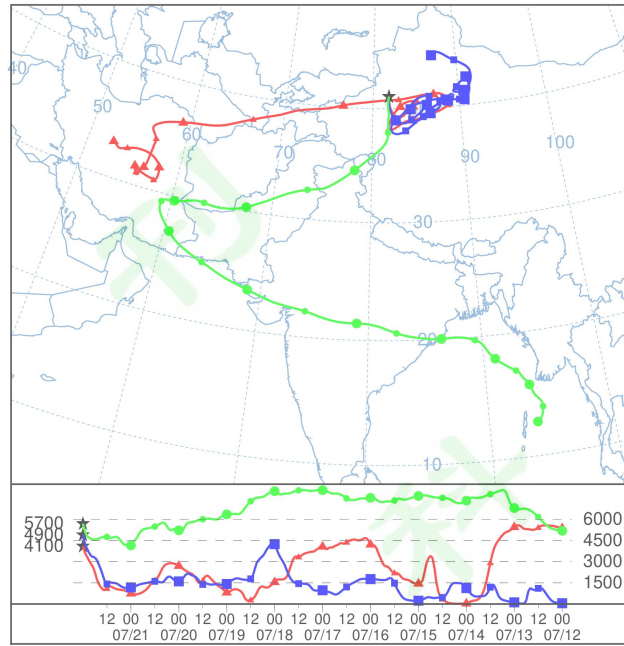
(a) 西方轨迹（源于地中海及以西），沿 42° N、81° E



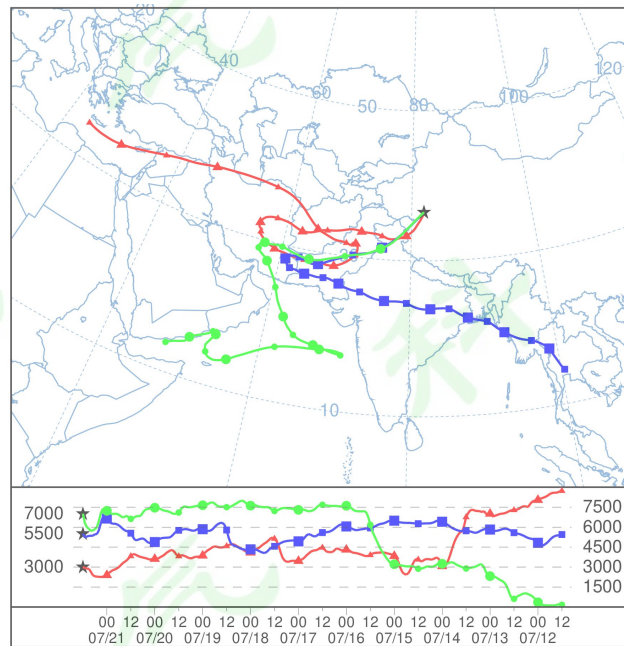
(b)东转西轨迹 I（蓝线，源于阿拉伯海），沿 39° N、 76° E



(c)东转西轨迹 II（绿线，源于孟加拉湾），沿 41° N、 83° E



(d)东转西轨迹 III（绿线和蓝线，源于阿拉伯海和孟加拉湾），沿 37° N、82° E



(e)西南轨迹（蓝线和绿线，源于地中海及以西），沿 42° N、82° E

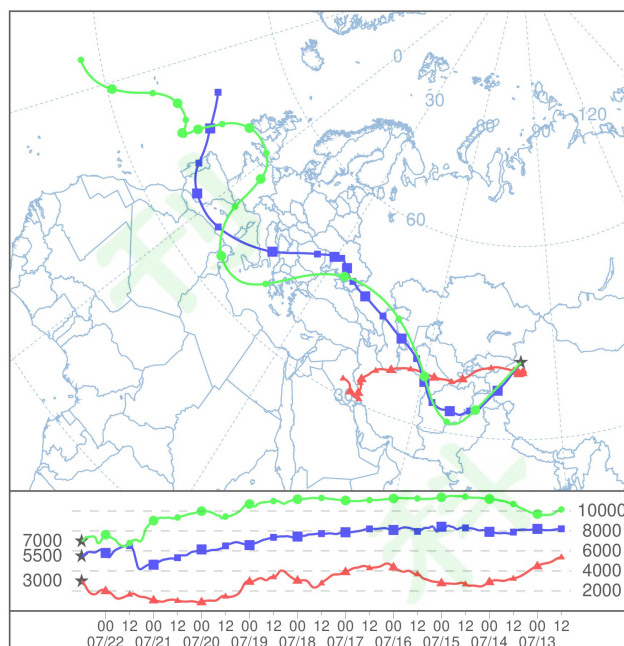


图9 HYSPLIT 后向轨迹模式后推暴雨点附近 240 h 的水汽输送轨迹

Figure 9 The HYSPLIT backward trajectory model pushes forward the water vapor transport trajectory of the largest and second heavy rainstorm points for 240 h

水汽追踪轨迹与输送路径基本吻合，西方和西南轨迹的水汽源于地中海以西及中亚地区，东转西轨迹的水汽源自阿拉伯海、孟加拉湾或两者兼有。其中，东转西轨迹的水汽依托伊朗高压环流风场进入盆地，西南轨迹的水汽途经黑海和中亚，在中亚南部转西南方向进入盆地。

5.4 水汽收支

某一边界水汽收支多少由不同路径水汽输送强弱决定，分析东、西、南、北 4 个边界的水汽收支可阐明 3 条路径水汽输送的强弱。与“5.1.2 水汽输送路径”的输送层次相对应，选取整层（地面~300 hPa）、地面~650 hPa、650~350 hPa、500~300 hPa 四个层次，计算 7 月 16 日 08:00—22 日 20:00 时段 $34^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$ 、 $73^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{E}$ 长方形范围内西、北、东、南 4 个边界逐 6 h 的水汽收支（图 10），规定当西边界、南边界为正值时和北边界和东边界为负值时为水汽输入，反之则为输出。

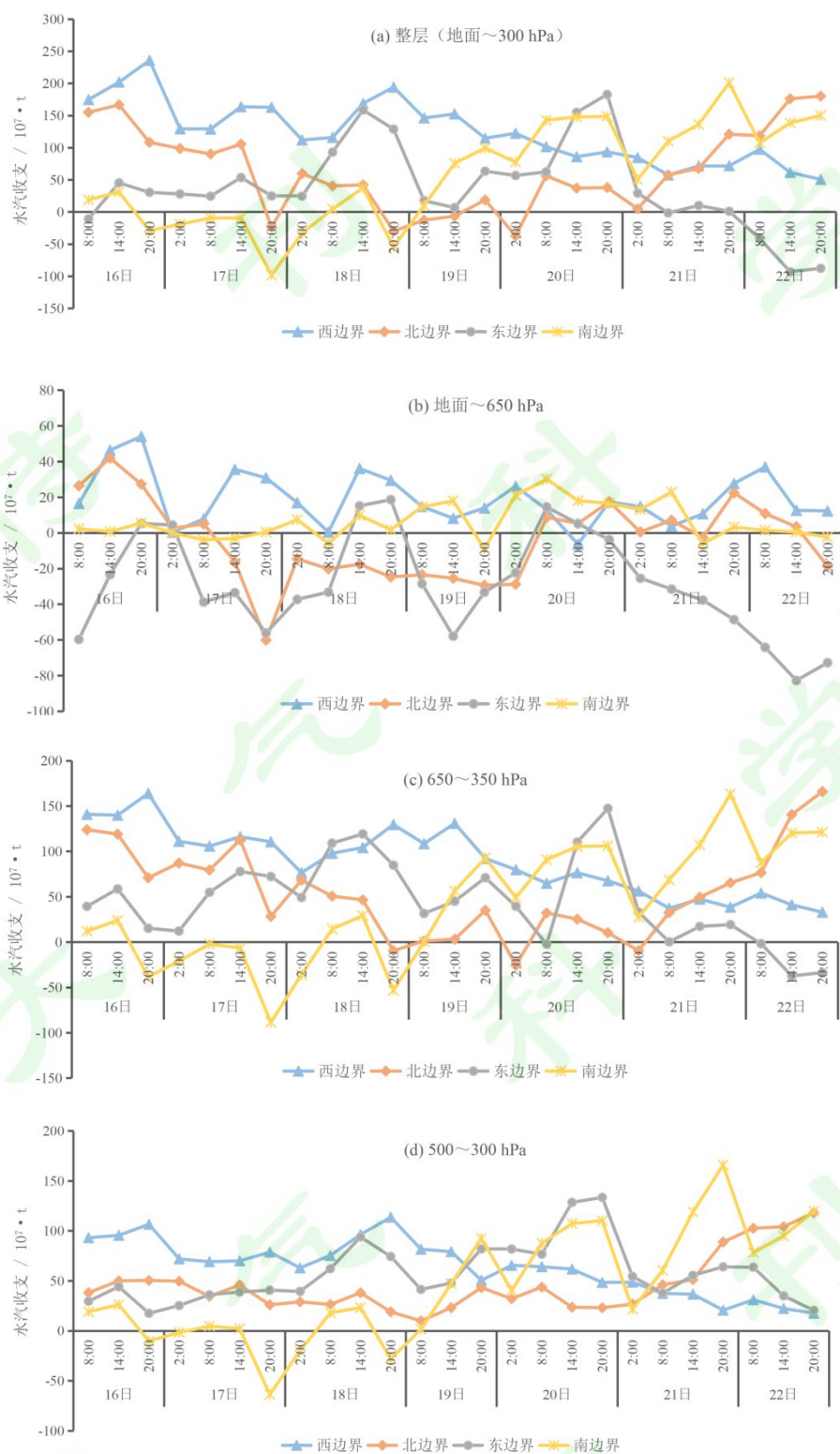


图 10 2021 年 7 月 16 日 08:00—22 日 20:00 在 $34^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$ 、 $73^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{E}$ 长方形内塔里木盆地 4 个边界水汽收支变化 ($10^7 \cdot t$)

Figure 10 The changes of the water vapor budget in the $34^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$, $73^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{E}$ rectangle in 4 borders of Tarim Basin from 08:00 to 22:00 on July 16, 2021(unit: $10^7 \cdot t$)

分析图 10 得出，（1）整层中，4 个边界中仅西边界为正值，说明西边界均为水汽输入，输入峰值 $235.7 \times 10^7 \cdot t$ （16 日 20:00），19 日前水汽输入多于 19 日后，总体呈减少趋势；南边界 19 日 08:00 前有 3 个时次负值，14:00 起转为正值，说明 19 日午后转为输入，输入峰值 $200.9 \times 10^7 \cdot t$ （21 日 20:00），19 日后水汽输入量较西边界大。（2）地面~650 hPa，西边界和南边界水汽收支大都为正，有水汽输入但量不多；东边界大都为负，有水汽输入，最大输入峰值 $82.8 \times 10^7 \cdot t$ （16 日 14:00），这是由于 650~850 hPa 低层 15—21 日盆地中东部出现东风，800 hPa 东风最强（ $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 急流核面积最大），随高度增加东风减弱、持续时间缩短。盆地低层东风不仅携带水汽，还为高层偏南风维持起垫高作用。（3）650~350 hPa，变化趋势与整层类似，北边界和东边界基本为水汽输出；西边界为一致正值即水汽输入，输入峰值 $163.9 \times 10^7 \cdot t$ （16 日 20:00）；南边界 19 日 14:00 前大都为水汽输出，19 日 14:00 起为水汽输入，最大输入峰值 $163.2 \times 10^7 \cdot t$ （21 日 20:00），与“5.1 水汽输送”中西方路径的水汽输送时间最长相吻合。（4）500~300 hPa，变化与 650~350 hPa 相似，西、北、东 3 个边界均为正，说明北边界和东边界为水汽输出，西边界为输入，输入峰值 $113.6 \times 10^7 \cdot t$ （18 日 20:00）。仅南边界 16—18 日个别时段为负，19 日 14:00 转为正，说明南边界 19 日 14:00 起转为输入，且呈上升趋势，输入峰值 $165.8 \times 10^7 \cdot t$ （21 日 20:00）；19 日 08:00 后西边界输入量减少，为 $20 \sim 80 \times 10^7 \cdot t$ ，与“西南+南方路径”水汽输送时间基本吻合，说明南边界水汽输入大于西边界，进一步印证 19 日午后“西南+南方路径”水汽输送使南边界水汽输入贡献明显大于西边界。

此次暴雨过程的水汽输入主要为西、南、东 3 个边界。650~350 hPa 和 500~300 hPa 变化相同，东边界水汽输送在 650 hPa 以下低层，西、南 2 个边界的水汽输送主要发生在中高层，西边界均为水汽输入、且持续时间长，19 日 08:00 后减少。南边界 19 日午后转为水汽输入、且呈增多趋势，水汽输入量明显多于西边界。650 hPa 以下，西边界和南边界水汽输入较少，主要由低层东风带来东边界的水汽输入。

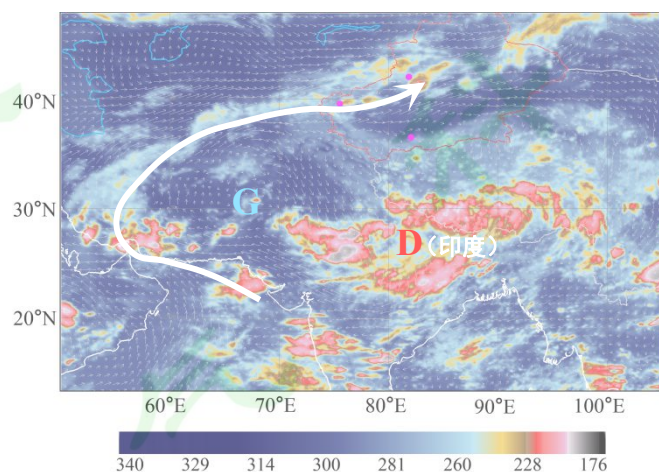
6 FY2G 红外云图特征

气象卫星资料能有效地监测盆地暴雨区周边云系生消、发展和移动等，图 10 为东转西、西方、西南+南方 3 条水汽输送路径时的 FY2G 红外云图云系演变。

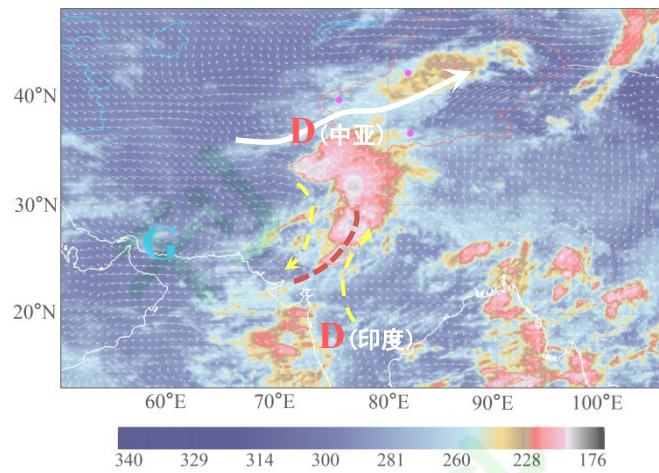
(1) “东转西”水汽输送路径下, 16 日 14:00—18 日 14:00, 伊朗高压反气旋中心在阿拉伯海北部上空, 17 日 08:00, 其洋面有云团生成和发展, 20:00 阿拉伯海北部局地云顶亮温降至 200 K 左右, 云团北上后在中亚转向移入盆地(图 11a);

(2) 西方水汽输送路径下, 12 日 08:00—16 日 08:00 和 18 日 20:00—19 日 14:00, 中亚地区中高云系移至青藏高原西部后, 生成一盾状中尺度云团, 云团发展旺盛, 西边缘轮廓清晰, 19 日发展为盾状, 14:00 盾状云团最低亮温降至 180 K 左右, 逐渐移入盆地。印度低压移至阿拉伯海东部, 其东侧偏南风与中亚低压底部的偏北风形成冷式切变线(图 11b), 由于地中海位置偏西, 云图无法监测; (3) 西南+南方水汽输送路径下, 20 日 08:00—21 日 20:00, 中亚低压、印度低压、高原涡形成的“一低”维持, 降水云系沿西南路径移进南疆。21 日 14:00, 中亚低压前的西南风与高原南风的暖式切变维持, 东南移和北上云系覆盖盆地大部, 最低亮温 250 K 左右(图 11c)。可看出, 在大尺度环流形势与水汽输送路径下, 中亚地区云系随西风、西南风进入盆地, 阿拉伯海北部上空云系在“东转西”流场下, 可接力移入盆地上空。

(a)2021-07-17-20:00



(b)2021-07-19-14:00



(c)2021-07-21-14:00

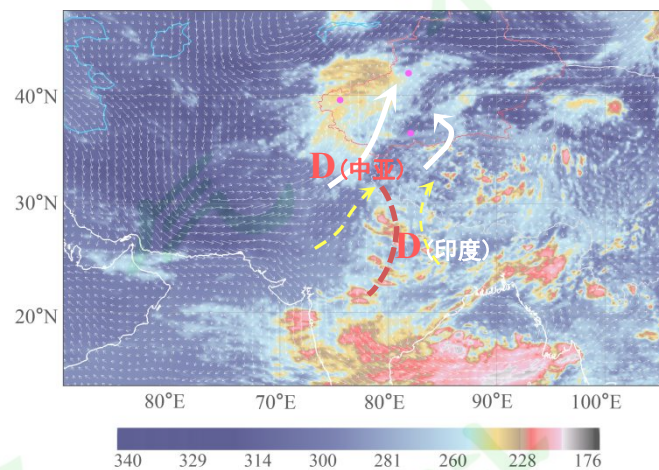


图 10 2021 年 7 月 17—21 日 FY2G 红外云图 (K) 叠加 500 hPa 风场 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)，白色带箭头实线为云系路径，“G”为伊朗高压中心，“D”为中亚和印度低压中心，带箭头黄虚线为风矢方向，棕色虚线为切变线

Figure 10 The FY2G infrared cloud image (K) superimposed on 500 hPa wind field ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) on July 17-21, 2021. The white solid line with arrow is the path of the cloud system, "G" is the Iranian high-pressure center, "D" is the Central Asian and Indian low-pressure center, the yellow dashed line with arrow is the wind vector direction, and the brown dashed line is the shear line

7 结论

通过分析新疆塔里木盆地 2021 年“7·19”暴雨天气的高低空环流形势、天气系统变化轨迹、水汽输送和辐合、水汽轨迹以及水汽收支等，得出如下结论：

(1) 首次提出南亚高压“匀双体”概念。此次暴雨发生在 100 hPa 南亚高压“西高东低”转“匀双体”大尺度环流背景下，500 hPa 为“两高夹一低”环流形势，伊朗高压西退北上且稳定（“西高”），西太副高北上南下再西移、高原反气旋北上东移（“东高”），中亚低压南下、印度低压西移北上、高原涡缓

慢东北移，三者共同存在、相互作用与影响，构成“一低”。100 hPa 南亚高压“西高东低”转“匀双体”过程中，500 hPa 阿拉伯海和孟加拉湾水汽在伊朗高压稳定反气旋环流下、先西退、再北上、后东移进入盆地，高原水汽在高原涡和高原反气旋风场下、沿偏南风北折进入盆地。塔里木盆地暴雨分析及预报除需关注上下游高压系统和中亚低压天气系统，还要重视低纬地区印度低压以及高原涡等变化和发展，如共存并相互作用，对盆地暴雨更为有利。

(2) 首次提出“东转西”水汽输送路径。此次暴雨的水汽主源地为地中海及以西洋面、中亚地区、阿拉伯海和孟加拉湾，水汽输送路径和轨迹有西方、东转西、西南+南方 3 条。“东转西”路径水汽输送过程中，阿拉伯海和孟加拉湾水汽在伊朗高压稳定的环流形势下进入盆地，伊朗高压南侧东风和中亚地区西风在“东转西”水汽输送中具有关键作用，阿拉伯海和孟加拉湾的东风北上后与西风带汇合形成的水汽输送带是此次暴雨发生的重要条件。

(3) 此次暴雨过程的水汽主要由西、南、东 3 个边界输入，东边界水汽收入由低层东风带入（650 hPa 以下，西边界和南边界水汽输入较少），西、南 2 个边界的水汽收入由中高层 3 条水汽路径带入。在中高层，西方和东转西路径的水汽输送在 650~350 hPa、西南+南方路径在 500~300 hPa，西方路径水汽输送时间最长，输送高度、厚度与东转西路径基本相同，西南+南方路径水汽输送的高度较高，但厚度较薄。19 日前西边界水汽输入多于南边界，19 日午后由于“西南+南方路径”的水汽输送后，致使南边界水汽输入贡献明显大于西边界。

(4) 水汽较强辐合发生在 650 hPa 以下，暴雨区位于水汽辐合大值中心边缘的梯度密集带上。同时，FY2G 云图云系变化也印证了阿拉伯海和孟加拉湾北部云系在“东转西”大尺度流场下，可接力移入盆地上空。

参考文献:

- 张家宝, 邓子枫. 1987. 新疆降水概论[M].北京:气象出版社, 22-24. ZHANG Jiabao , DENG Zifeng . 1987. Introduction to Xinjiang Precipitation[M].Beijing: Meteorological Press, 22-24.
- 张云惠, 陈春艳, 杨莲梅, 等. 2013. 南疆西部一次罕见暴雨过程的成因分析[J]. 高原气象, 32(1):191-200. ZHANG Yunhui, Chen Chunyan, Yang Lianmei, et al. 2013. Cause Analysis on Rare Rainstorm in West of Southern Xinjiang[J].Plateau Meteorology, 32(1):191-200.

- 张云惠, 李海燕, 蔺喜禄, 等. 2015. 南疆西部持续性暴雨环流背景及天气尺度的动力过程分析[J]. 气象, 41(7):816-824. ZHANG Yunhui, LI Haihai, LIN Xilu, et al. 2015. Analysis of Continuous Rainstorm Circulation Background and the Dynamic Process of Synoptic-Scale in West of Southern Xinjiang[J]. Meteorological Monthly, 41(7):816-824.
- 黄艳, 俞小鼎, 陈天宇, 等. 2018. 南疆短时强降水概念模型及环境参数分析[J]. 气象, 44(8):1033-1041. HUANG Yan, YU Xiaoding, CHEN Tianyu, et al. 2018. Analysis of Conceptual Models and Ambient Parameter of Short-Time Severe Rainfall in South Xinjiang[J]. Meteorological Monthly, 44(8):1033-1041.
- 李如琦, 李建刚, 王江, 等. 2018. 南疆西部暴雨过程的动力热力结构分析[J]. 干旱区地理, 41(1):9-16. LI Ruqi, LI Jiangang, WANG Jiang, et al. 2018. Dynamic and thermal structure characteristics of the rainstorms in the west of south Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 41(1):9-16.
- 王江, 李如琦, 黄艳, 等. 2015. 2013 年南疆西部一次罕见暴雨的成因[J]. 干旱气象, 33(6):910-917. WANG Jiang, LI Ruqi, HUANG Yan, et al. 2015. Cause of a Rare Rainstorm in the West of Southern Xinjiang in 2013[J]. Journal of Arid Meteorology, 33(6):910-917.
- 努尔比亚·吐尼亚孜, 杨利鸿, 米日古丽·米吉提. 2017. 南疆西部一次突发极端暴雨成因分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 11(6):75-82. T. Nurbiye, YANG Lihong, M. Mehregul. 2017. Cause Analysis on a Sudden Extreme Rainstorm in the West of Southern Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 11(6):75-82.
- 热孜瓦古·孜比布拉, 吕新生, 王鹏飞, 等. 2021. 2020 年春季南疆西部一次极端暴雨成因分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 15(3):20-28. Z. Reziwagu, LV Xinsheng, WANG Pengfei, et al. 2021. Analysis of an Extreme Rainstorm in the West of Southern Xinjiang in Spring 2020 [J]. Desert and Oasis Meteorology, 15(3):20-28.
- 郭楠楠, 周玉淑, 邓国. 2019. 中亚低涡背景下阿克苏地区一次强降水天气分析[J]. 气象学报, 77(4):686-700. GUO Nannan, ZHOU Yushu, DENG Guo. 2019. Analysis of a Severe Precipitation Process in Aksu Area Under the Background of the Central Asian Vortex[J]. Acta Meteorologica Sinica, 77(4):686-700.
- 周雪英, 贾健, 刘国强, 等. 2018. 2017 年春季南疆中部两次强降水天气环流配置及干冷空气侵入特征对比[J]. 气象科技, 46(6):1201-1210. ZHOU Xueying, JIA Jian, LIU Guoqiang, et al. 2018. Comparative Analysis of Circulation Background and Dry Air Intrusion of Two Spring Heavy Events in South Xinjiang in 2017[J]. Meteorological Science and Technology, 46(6):1201-1210.
- 杨霞, 张云惠, 张超, 等. 2020. 南疆西部“5·21”极端大暴雨成因分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 14(1):21-30. YANG Xia, ZHANG Yunhui, ZHANG Chao, et al. 2020. Causation

- Analysis of the 21 May 2018 Torrential Rain in the West of Southern Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 14(1):21-30.
- 李如琦, 李建刚, 唐冶, 等. 2016. 中亚低涡引发的两次南疆西部暴雨中尺度特征对比分析[J]. 干旱气象, 34(2):297-304. LI Ruqi, LI Jiangang, TANG Ye, et al. 2016. Comparison Analysis on the Mesoscale Characteristics of Two Rainstorms Processes Caused by Central Asian Vortex in the West of South Xinjiang [J]. Journal of Arid Meteorology, 34(2):297-304.
- 刘雯, 李建刚, 杨莲梅. 2017. 2016 年夏末南疆地区中尺度对流系统 (MCS) 活动特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 11(4):9-16. LIU Wen, LI Jiangang, YANG Lianmei. 2017. Characteristics of the MCS over Southern Xinjiang During the Late Summer of 2016[J]. Desert and Oasis Meteorology, 11(4):9-16.
- 张云惠, 王勇, 支俊, 等. 2009. 南疆西部一次强降雨的多普勒天气雷达分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 6(3):17-20. ZHANG Yunhui, WANG Yong, ZHI Jun, et al. 2009. Analysis on the Doppler of a Strong Rain in the Western South-Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 6(3):17-20.
- 杨莲梅, 史玉光, 汤浩. 2010. 新疆春季降水异常的环流和水汽特征[J]. 高原气象, 29(6) : 1464- 1473. YANG Lianmei, SHI Yuguang, TANG Hao. 2010. Characteristics of Atmospheric Circulation and Water Vapor for Spring Precipitation Anomaly in Xinjiang[J]. Plateau Meteorology, 29(6) : 1464- 1473.
- 肖开提·多莱特, 汤浩, 李霞, 等. 1997. “96·7”新疆特大暴雨的水汽条件研究[J]. 新疆气象, 20(1):8-11. Duolaite Xiaokaiti, TANG Hao, LI Xia, et al. 1997. Research on Water Vapor Conditions of “96·7” Extreme Rainstorm in Xinjiang[J]. Xinjiang Meteorology, 20(1):8-11.
- 杨莲梅, 张云惠, 汤浩. 2012. 2007 年 7 月新疆三次暴雨过程的水汽特征分析[J]. 高原气象, 31(4):963-973. YANG Lianmei, ZHANG Yunhui, TANG Hao. 2012. Analyses on Water Vapet Characteristics in Three Heavy Rainstorm Processes of Xinjiang in July 2007[J]. Plateau Meteorology, 31(4):963-973.
- 曾勇, 杨莲梅, 张迎新. 2017. 新疆西部一次大暴雨过程水汽输送轨迹模拟[J]. 沙漠与绿洲气象, 11(3):47-54. ZENG Yong, YANG Lianmei, ZHANG Yinxin. 2017. Simulation of Water Vapor Transport Trajectories of a Heavy Rain in Western Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 11(3):47-54.
- 孙颖姝, 周玉淑, 王咏青. 2019. 一次双高空急流背景下南疆强降水事件的动力过程和水汽源分析[J]. 大气科学, 43(5): 1041-1054. SUN Yingshu, ZHOU Yushu, Wang Yongqing. 2019. Analysis of Dynamic Process and Moisture Source on a Heavy precipitation Event in Southern Xinjiang Associated with the Double Upper-level Jet [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(5): 1041-1054.

- 赵克明, 黄艳, 于碧馨. 2017. 2013 年南疆西部暴雨天气的水汽特征[J]. 气象科技, 45(1):121-129. ZHAO Keming, HUANG Yan, YU Bixin. 2017. Water Vapor Characteristics of Rainstorm Weather Processes over Western South Xingjing in 2013[J]. Meteorological Science and Technology, 45(1):121-129.
- 牟欢, 赵丽, 王旭, 等. 2021. 基于拉格朗日方法的一次南疆西部特大暴雨水汽来源分析[J]. 冰川冻土, 43(1):1-9. Mu Huan, Zhao Li, Wang Xu, et al. 2021. Water vapor source analysis of a severe torrential rain in the west of Southern Xinjiang based on the La-grangian Method [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 43(1):1-9.
- 庄晓翠, 李博渊, 赵江伟, 等. 2022. 天山南坡暖季暴雨过程的水汽来源及输送特征[J]. 干旱气象, 40(1):30-40. ZHUANG Xiaocui, LI Boyuan, ZHAO Jiangwei, et al. Water vapor source and transport characteristics of rainstorm processes in warm season on southern slope of the Tianshan Mountains[J]. Journal of Arid Meteorology, 40(1):30-40.
- 杨青, 刘晓阳, 崔彩霞, 等. 2010. 塔里木盆地水汽含量的计算与特征分析[J]. 地理学报, 65(7):853-862. YANG Qing, LIU Xiaoyang, CUI Caixia, et al. 2010. The Computation and Characteristics Analysis of Water Vapor Contents in the Tarim Basin, China[J]. Acta Geographica Sinica, 65(7):853-862.
- 李霞, 汤浩, 杨莲梅. 2011. 1961—2000 年塔里木盆地夏季空中水汽的变化[J]. 沙漠与绿洲气象, 5(2):6-11. LI Xia, TANG Hao, YANG Ganmei. 2011. Variation of Water Vapor over Tarim Basin in Summer during 1961-2000[J]. Desert and Oasis Meteorology, 5(2):6-11.
- 张俊兰, 杨霞, 施俊杰. 2021. 青藏高原天气系统对昆仑山北坡一次罕见暴雨过程影响分析[J]. 高原气象, 40(5):1002-1011. ZHANG Junlan, YANG Xia, SHI Junjie. 2021. Analysis of the Influence of the Qinghai-Xizang Plateau Weather System on a Rare Rainstorm Process on the Northern Slope of Kunlun Mountain[J]. Plateau Meteorology, 40(5):1002-1011.
- 肖开提·多莱特. 2005. 新疆降水量级标准的划分[J]. 新疆气象, 28(3):7-8. Duolaite Xiaokaiti. 2005. Formulation of Precipitation Intensity of Xinjiang[J]. Xinjiang Meteorology, 28(3):7-8.
- 张家宝, 邓子凤. 1987. 新疆降水概论[M]. 北京: 气象出版社, 400. Zhang Jiabao, Deng Zifeng. 1987:400. Introduction to Xinjiang Precipitation[M]. Beijing: Meteorological Press, 1987:400.
- 梁梅, 林卉娇, 徐建军, 等. 2020. 1990—2018 年北印度洋热带气旋统计特征[J]. 广东海洋大学学报, 40(4):51-60. Liang Mei, Lin Huijiao, Xu Jianjun, et al. 2020. Statistical Analysis on the Characteristics of Tropical Cyclone in the Northern Indian Ocean from 1990 to 2018[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 40(4):51-60.

- 青藏高原气象科学研究拉萨会战组, 1981. 夏半年 500hPa 青藏高原低涡切变线的研究 [J]. 北京: 科学出版社. Qinghai-Tibet Plateau Meteorological Science Research Lhasa Battle Team, 1981. Study on the 500hPa Shear Line of the Qinghai-Tibet Plateau Vortex in the Summer Half Year[J]. Beijing: Science Press.
- 刘蕊, 杨青. 2010. 新疆大气水汽通量及其净收支的计算和分析[J]. 中国沙漠, 30(5):1221-1228. Liu Rui, Yang Qing. 2010. Calculation and Analysis of Water Vapor Transportation and its Net Income in Xinjiang[J]. Journal of Desert Research, 30(5):1221-1228.
- 曾钰婷, 张宇, 周可, 等. 2020. 青藏高原那曲地区夏季水汽来源及输送特征分析[J]. 高原气象, 39(3):467-476. Zeng Y T, Zhang Y, Zhou k. 2020. Analysis on the Source and Transport Characteristics of Moisture in Naqa of the Qinghai-Tibetan in Summer[J]. Plateau Meteorology, 39(3):467-476.
- 任伟, 任燕, 李兰兰. 2019. 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. REN Wei, REN Yan, LI Lanlan. Analysis of water vapor transport characteristics during a torrential rain at Jinan Airport based on the HYSPLIT model[J]. Journal of Marine Meteorology, 2019, 39(1) : 116-122.
- 张学文, 张家宝. 2006. 新疆气象手册[M].北京:气象出版社, 91-92. Zhang Xue Wen, Zhang Jia Bao. 2006. Xinjiang Meteorological Manual[M]. Beijing: Meteorological Press, 91-92.
- 杨莲梅, 张云惠, 黄艳, 等. 2020. 新疆短时强降水诊断分析暨预报手册[M].北京:气象出版社, 129-130. Yang Lian Mei, Zhang Yun Hui, Huang Yan, et al. 2020. Xinjiang Short-term Heavy Rain Diagnostic Analysis and Forecast Manual[M]. Beijing: Meteorological Press, 129-130.