



河西走廊西部两类极端暴雨过程的水汽输送特征个例对比分析

李健 孔祥伟 马莉 傅朝 陈丽娜 王基鑫

Comparative analysis of water vapor transport characteristics for two types of extreme rainstorm processes in the western Hexi Corridor

LI Jian, KONG Xiangwei, MA Li, FU Zhao, CHEN Lina, WANG Jixin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-106>

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

南疆西部暴雨过程水汽来源及输送特征

Characteristics of water vapor source and transport during rainstorm in western southern Xinjiang

暴雨灾害. 2022, 41(5): 544-555 <https://doi.org/10.12406/byzh.2021-142>

湖南一次持续性暴雨过程的水汽输送与收支特征

Analysis on transport and budget characteristics of water vapor in a sustained heavy rain event in Hunan Province

暴雨灾害. 2021, 40(5): 513-522 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.05.008>

河西走廊降水预报模型的建立与样本检验

Study on precipitation forecast model in the Hexi Corridor and sample test

暴雨灾害. 2022, 41(5): 564-570 <https://doi.org/10.12406/byzh.2020-157>

副高边缘辽宁短时强降水过程的水汽特征分析

Analysis of water vapor during short-time heavy rainfall events at the edge of subtropical high in Liaoning Province

暴雨灾害. 2024, 43(5): 532-541 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-116>

贵州铜仁一次持续性暴雨水汽收支定量分析

Quantitative analysis of water vapor budget of a persistent rainstorm event in Tongren of Guizhou Province

暴雨灾害. 2023, 42(6): 648-658 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-064>

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

Analyses of moisture sources and transport characteristics in a rainstorm event in Jiangxia, Wuhan during July 5-6, 2020

暴雨灾害. 2022, 41(4): 375-383 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.04.002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

李健,孔祥伟,马莉,等.2026.河西走廊西部两类极端暴雨过程的水汽输送特征个例对比分析[J].暴雨灾害,45(5):680–691. LI Jian, KONG Xiangwei, MA Li, et al. 2026. Comparative analysis of water vapor transport characteristics for two types of extreme rainstorm processes in the western Hexi Corridor [J]. *Torrential Rain and Disasters*,45(5):680–691 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025–106

河西走廊西部两类极端暴雨过程的水汽输送特征 个例对比分析

李健¹, 孔祥伟^{1, 2}, 马莉¹, 傅朝¹, 陈丽娜³, 王基鑫¹

(1. 兰州中心气象台, 兰州 730020; 2. 甘肃省陇南市气象局, 陇南 742500; 3. 甘肃省酒泉市气象局, 酒泉 735000)

摘 要: 充沛的水汽供应是暴雨发生和维持的必要条件, 河西走廊西部 (以下简称为河西西部) 地处我国西北内陆深处, 但近年来极端天气事件频发, 为揭示该地区极端暴雨过程中的水汽输送特征, 利用气象观测站降水、ERA5 再分析和 GDAS (Global Data Assimilation System) 资料, 首先筛选出 2010—2024 年河西西部 4 次极端暴雨过程, 对比分析环流形势、水汽输送和收支特征, 然后基于 HYSPLIT 模式模拟计算水汽轨迹及不同源地的水汽贡献。最后, 建立了河西西部两类极端暴雨过程水汽来源及路径的三维结构模型, 明确了各层水汽的源地及贡献率。结果表明: (1) 根据环流形势, 4 次过程可分为两类, 一是低涡型暴雨, 500 hPa 高度场为东高西低, 青藏高原北部的低涡为其主要影响系统; 二是西北太平洋副热带高压 (以下简称为副高) 边缘型暴雨, 500 hPa 高度场为南高北低, 副高压为其主要影响系统。(2) 两类暴雨均有西、南两支水汽输送带, 西路输送带的水汽来源相同, 而南路不同。低涡型暴雨, 大气低层的西路水汽输送强度强, 中层以南路水汽输送为主; 副高边缘型暴雨, 低层南路水汽输送强度强, 中层以西路水汽输送为主。(3) 两类暴雨中, 低层水汽净输入量占整层净输入量的比重均超过 60%。低涡型暴雨, 水汽输入主要为低层西、北两边界和中层东边界; 副高边缘型暴雨, 水汽输入主要是低层东边界和高层西边界。(4) 低涡型暴雨 500 hPa 水汽源地主要是新疆北部、西南东部以及地中海 (黑海), 700 hPa 水汽源地主要是中亚 (里海) 和西南东部; 副高边缘型暴雨 500 hPa 水汽源地主要是地中海, 700 hPa 水汽源地主要是南亚、华南西部。该研究结果可以为进一步理解河西西部极端暴雨的形成机理和为该地区未来暴雨预报提供一定参考。

关键词: 水汽输送; 水汽源地; 河西走廊; 极端暴雨; HYSPLIT

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2025–106

Comparative analysis of water vapor transport characteristics for two types of extreme rainstorm processes in the western Hexi Corridor

LI Jian¹, KONG Xiangwei^{1, 2}, MA Li¹, FU Zhao¹, CHEN Lina³, WANG Jixin¹

(1. Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou 730020; 2. Longnan Meteorological Bureau of Gansu Province, Longnan 742500; 3. Jiuquan Meteorological Bureau of Gansu Province, Jiuquan 735000)

Abstract: Abundant water vapor supply is a necessary condition for the occurrence and maintenance of rainstorms. The western Hexi Corridor is located in the deep arid area in the northwest inland of China, but extreme weather events have occurred frequently in recent years. In order to reveal the characteristics of water vapor transport in the extreme rainstorm in this region, this paper first selected 4 extreme rainstorm processes in the western Hexi Corridor from 2010 to 2024 by using the precipitation data of meteorological observation stations, ERA5 reanalysis data and GDAS (Global Data Assimilation System) data, and then compared and analyzed the circulation situation, water vapor transport and budget characteristics. Then, based on HYSPLIT mode to simulate and calculate the water vapor trajectory of rainstorms and the contribution of water vapor from different sources. Finally, the three-dimensional structure models of water vapor sources and paths of two kinds of extreme rainstorms in the western Hexi Corridor were established, and the sources and

收稿日期: 2025–06–11; 定稿日期: 2025–11–30

资助项目: 甘肃省自然科学基金项目 (25JRRA323); 甘肃省自然科学联合基金项目 (25JRRA1107); 中国气象局复盘总结专项 (FPZJ2025-139); 黄河流域气象联合开放基金项目 (HHJJ2026M12); 甘肃省气象局创新团队项目 (GSQXCXTD-2024-01); 甘肃省气象局气象科研项目 (Ms2023-10)

第一作者: 李健, 主要从事灾害性天气机理研究。E-mail: lijiancln@163.com

通信作者: 孔祥伟, 主要从事强对流天气预报预警技术研究。E-mail: xiangwei580@163.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY–NC–ND 4.0

contribution rates of water vapor in each layer were determined. The results are as follows. (1) According to the circulation situation, there are two types for the 4 extreme rainstorms. The first is the low vortex type rainstorm, the 500 hPa height field high in the east and low in the west, and the low vortex in the north of the Qinghai Tibet Plateau is the main influence system. The second is the subtropical high marginal type rainstorm, the 500 hPa height field high in the south and low in the north, and the Western Pacific subtropical high is the main influence system. (2) The two types of rainstorms have west and south water vapor transport belts. The water vapor source of the west transport belt is the same, but the south transport belt is different. In the low vortex type rainstorm, the west of the lower layer has strong water vapor transport intensity, and the middle layer is dominated by the south. In the subtropical high marginal type rainstorm, the south of the lower layer has strong water vapor transport intensity, and the middle layer is dominated by the west. (3) In the two types of rainstorms, the proportion of the net input of water vapor in the lower layer to the net input of the whole layer is more than 60%. In the low vortex type rainstorm, the water vapor input is mainly the west and north boundaries of the low layer and the east boundary of the middle layer. In the subtropical high marginal type rainstorm, the water vapor input is mainly the east boundary of the low layer and the west boundary of the high layer. (4) The water vapor sources of low vortex type rainstorm at 500 hPa are mainly the northern Xinjiang, the east of Southwest and the Mediterranean sea (Black Sea), while water vapor sources of at 700 hPa are mainly in Central Asia (Caspian Sea) and the east of Southwest. The water vapor sources of the subtropical high marginal type rainstorm at 500 hPa are mainly from the Mediterranean sea, while water vapor sources at 700 hPa are mainly from South Asia and western South China. The results will help to understand the formation mechanism of extreme rainstorm in the western Hexi Corridor, and provide some reference for the rainstorm forecast in this area in the future.

Key words: water vapor transport; water vapor source; Hexi corridor; extreme rainstorm; HYSPLIT

引言

随着全球气候变暖,我国西北地区夏季降水量和极端暴雨事件均显著增加,造成的损失日趋严重(徐栋等, 2016; Han et al., 2019; Hegerl et al., 2019)。充沛的水汽供应是暴雨发生和维持的必要条件(王佳津等, 2023),暴雨的发生不仅需要大气柱中的水汽含量高,还需要大气环流将外部水汽源源不断地向暴雨区输送并产生局地辐合(吕春艳等, 2023),特别是西北地区远离海洋,大气柱中水汽只及同纬度华北地区气柱水汽的 1/3~1/2(钱正安等, 2018),若无外来水汽补充,很难形成暴雨。因此,研究该地区暴雨的水汽输送和收支特征,有助于加深对西北地区暴雨形成机理的认识。

针对暴雨的水汽输送及源地等问题,目前学者们常用的分析方法有欧拉方法和拉格朗日方法(杨浩等, 2014; Munday et al., 2021; 周秀美等, 2025)。欧拉方法主要是描述物理量的瞬时特征,常用来分析暴雨过程中水汽通量、水汽收支等特征,但难以准确分析不同水汽输送路径及源地的水汽贡献(Sun and Wang, 2014; Zhang et al., 2019; 安琳等, 2025)。拉格朗日方法主要是描述单个质点的运动过程,常用 HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrating Trajectory) 模型,通过计算空气质点的运动轨迹,定量分析暴雨的水汽输送路径及源区贡献,可弥补欧拉方法的不足(孙力等, 2016; 边茜等, 2024)。目前关于西北地区暴雨的水汽输送、收支及源地贡献的研究,主要集中在陕西、新疆及甘肃东部(Huang et al.,

2015; 杨镒如等, 2025)。如庄晓翠等(2022)分析发现新疆塔克拉玛干沙漠南缘暴雨过程,水汽源地主要是西南亚、中亚、北疆,水汽自源地出发分别从西南和偏北路径进入暴雨区,其中途经南疆的水汽来源对暴雨的贡献较大;黄玉霞等(2026)对甘肃省东南部一次特大暴雨的水汽输送特征分析表明,暴雨发生前,水汽主要源于南海和孟加拉湾上空,水汽输送贡献率分别 51.45% 和 43.31%。暴雨发生时,水汽主要源于南海上空,水汽输送贡献率为 57.98%。

河西走廊西部(以下简称为河西西部)(图 1)北接马鬃山,海拔 1 500~2 500 m,南倚阿尔金山和祁连山,平均海拔 3 500 m 以上,中部为狭长的走廊平原及戈壁荒漠,海拔 900~1 600 m。境内大部分区域年均降水量在 100 mm 以下,属于极端干旱区,暴雨的发生在该地区属于小概率事件,年均发生次数不足 1 次(孔祥伟和陶健红, 2012)。但近年来,在全球变暖背景下,该地区极端暴雨事件发生频数增多,极端降水量与东部地区相比虽偏少,但相对强度很大,一次暴雨过程的降水量接近甚至超过当地的年平均降水量,常造成重大经济损失(陈静等, 2026)。目前针对河西西部暴雨水汽输送的研究较少,现有的研究多是针对孤立个例中比湿、水汽通量等场变量的分析(陶健红等, 2016; 孔祥伟等, 2021),缺乏对极端暴雨水汽输送及源地贡献系统性的研究。因此,本文利用气象观测站降水、ERA5 再分析和 GDAS 资料,筛选出 2010—2024 年河西西部 4 次极端暴雨过程,对比分析环流形势、水汽输送和收支特征;基于

HYSPLIT 计算水汽轨迹及不同源地的水汽贡献;建立河西西部两类极端暴雨过程水汽来源及路径的三维结构模型。以期加深对本地区暴雨形成机理的认识,为提高干旱区暴雨预报预警及服务能力提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文所用资料包括: (1) 来源于甘肃省气象信息与技术装备保障中心经质控后的河西西部 154 个国家及区域气象观测站 2010—2024 年降水资料,用于挑选极端暴雨个例实况分析; (2) 欧洲中期天气预报中心第 5 代全球大气再分析资料 ERA5 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis v5), 水平分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 时间分辨率 1 h, 垂直方向 37 层, 主要包括高度场、风场、比湿等资料,用于分析极端暴雨的环流形势、水汽输送及收支特征; (3) 美国国家环境预报中心提供的 GDAS (Global Data Assimilation System) 资料, 水平分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$, 时间分辨率 6 h, 垂直方向 17 层, 数据格式与 HYSPLIT 模式兼容性好, 用于驱动 HYSPLIT4 模型对气块轨迹进行追踪。

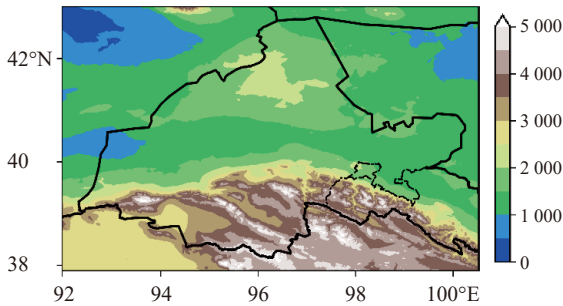


图 1 河西西部地形高度 (填色, 单位: m) 分布 (黑色轮廓实线表示省界, 黑色轮廓点线表示市界)

Fig. 1 Terrain height distribution (shaded, unit: m) in the western Hexi Corridor (black solid outline indicates provincial boundaries, black dotted outline indicates municipal boundaries)

1.2 研究方法

1.2.1 极端暴雨标准

本文参考陈豫英等 (2021) 对西北地区极端暴雨过程的选取标准及甘肃省气象局业务规范, 按甘肃河西地区暴雨标准 ($30 \text{ mm} \leq 24 \text{ h 降水量} < 70 \text{ mm}$ 为暴雨, $24 \text{ h 降水量} \geq 70 \text{ mm}$ 为大暴雨), 定义河西西部极端暴雨过程: 当日 08 时至次日 08 时 (北京时, 下同) 或当日 20 时至次日 20 时任意一个时段内, 24 h 降雨量有 3 个及以上气象观测站达到暴雨, 其中至

少有 1 站大暴雨。按照上述标准, 2010—2024 年在该地区共挑选出 4 次极端暴雨过程: 2011 年 6 月 15 日 20 时至 16 日 20 时 (以下简称过程 1)、2012 年 6 月 4 日 20 时至 5 日 20 时 (以下简称过程 2)、2019 年 6 月 20 日 08 时至 21 日 08 时 (以下简称过程 3)、2022 年 8 月 12 日 20 时至 13 日 20 时 (以下简称过程 4)。

1.2.2 水汽输送和收支计算

单位大气柱上整层水汽输送通量 (Q) 计算公式 (Sun et al., 2011) 为

$$Q = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s} q V dp \quad (1)$$

式中, g 为重力加速度 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$), q 为各层大气比湿 (单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); V 为单位气柱内各层大气的风速矢量 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); P_s 和 P_t 分别为地表和大气顶层的气压 (单位: hPa), 由于大气中的水汽主要集中在对流层中下层, 300 hPa 高度以上的大气中水汽可忽略不计, 故 P_t 取 300 hPa。

为了解暴雨区上空的水汽收支情况, 分别计算西、东、南、北 4 个边界水汽通量及区域水汽收支, 各边界水汽通量的计算公式 (Liu et al., 2023) 为

$$Q_W = \int_{\lambda_S}^{\lambda_N} Q_u R d\lambda \quad (2)$$

$$Q_E = - \int_{\lambda_S}^{\lambda_N} Q_u R d\lambda \quad (3)$$

$$Q_S = \int_{\lambda_W}^{\lambda_E} Q_v R \cos \lambda_S d\lambda \quad (4)$$

$$Q_N = - \int_{\lambda_W}^{\lambda_E} Q_v R \cos \lambda_N d\lambda \quad (5)$$

式中, Q_W 、 Q_E 、 Q_S 和 Q_N 分别为西、东、南、北边界的水汽通量, 正值为净收入, 负值为净流出, 上述 4 项之和代表整个区域的水汽收支; Q_u 为纬向整层水汽通量, Q_v 为经向整层水汽通量; λ_W 、 λ_E 、 λ_S 、 λ_N 分别为区域最小经度值、最大经度值、最小纬度值和最大纬度值; R 为地球平均半径, 取 $6.37 \times 10^6 \text{ m}$ 。

1.2.3 HYSPLIT 模型

HYSPLIT 模型是一种基于混合单粒子拉格朗日方法的扩散传输模型, 采用地形追随坐标, 能够追溯气块的来源, 在水汽来源及其输送路径的研究领域得到了广泛应用 (Makra et al., 2011; Liu et al., 2020; 张林梅等, 2025)。

应用 HYSPLIT 后向模拟追踪河西西部极端暴雨的水汽来源及路径。研究区域气象观测站海拔高度多在 1 200~2 000 m, 在垂直方向上选取 3 000 m (700 hPa) 和 5 500 m (500 hPa) 的高度为模拟的起始

高度,分别选取4次极端暴雨过程中最大降水量出现的气象观测站为模拟初始点,过程开始时间为模拟起始时间,模拟后向8 d (192 h)的三维运动轨迹,模式间隔时间6 h,轨迹点位置1 h输出一次,同时插值得到相应位置的各气象要素值。分析出的所有轨迹根据空间总方差(TVS)为30.0%分别对4次过程进行聚类分析,得出4次过程在500 hPa和700 hPa高度上的水汽来源和输送特征,模拟参数见表1。

表1 2010—2024年河西西部4次极端暴雨过程HYSPLIT水汽追踪起始点和时间

Table 1 Starting point and time of HYSPLIT water vapor tracking for 4 extreme rainstorms in the western Hexi Corridor during 2010-2024

过程名称	初始点经纬度	起始时间
过程1	94.68°E, 40.15°N	2011年6月15日20时
过程2	97.02°E, 40.28°N	2012年6月4日20时
过程3	98.48°E, 39.77°N	2019年6月20日08时
过程4	98.89°E, 40.00°N	2022年8月12日20时

2 降水概况与天气形势

2.1 极端暴雨实况

由图2可见,河西西部极端暴雨过程影响范围小,局地性强,暴雨区集中。在4次过程中,过程1有4站暴雨,位于酒泉市西部,肃北国家站24 h降水量为73.1 mm (图2a);过程2有15站暴雨,位于酒

泉市中东部和张掖市西部,玉门农机中心农场站和玉门国家站24 h降水量分别为96.4 mm和79.5 mm,玉门国家站突破建站以来日降水量极值,暴雨极大值超过该站年平均降水量(图2b);过程3有17站暴雨,集中在酒泉市东部,肃州二墩站和酒泉国家站24 h降水量分别为93.5 mm和84.4 mm,酒泉国家站突破建站以来日降水量极值(图2c);过程4有9站暴雨,位于酒泉市东部和张掖市西部,金塔国家站和金塔森林公园站24 h降水量分别为88.0 mm和71.1 mm,金塔国家站突破建站以来日降水量极值,暴雨极大值超过该站年平均降水量(图2d)。

2.2 环流形势

对比4次极端暴雨过程的环流形势(图3),结合以往学者对该地区暴雨个例天气形势的分析(陶健红等,2016;孔祥伟等,2021)可知,过程1、过程2、过程3的环流特征都属于低涡型暴雨,500 hPa高度场均为东高西低,内蒙古西部至河套地区有暖性高压脊,青藏高原北部有低涡形成,低涡进入河西西部后移动缓慢(图3a—c);过程4的环流特征与西北地区东部暴雨的主要环流型“副高西北侧西南气流型”相似(黄玉霞等,2019;傅朝等,2022),属于副高边缘型暴雨,500 hPa高度场为南高北低,西风带短波槽后干冷气流东移南下,与西北太平洋副热带高压(以下简称副高)外围的西南暖湿气流在暴雨区交汇。

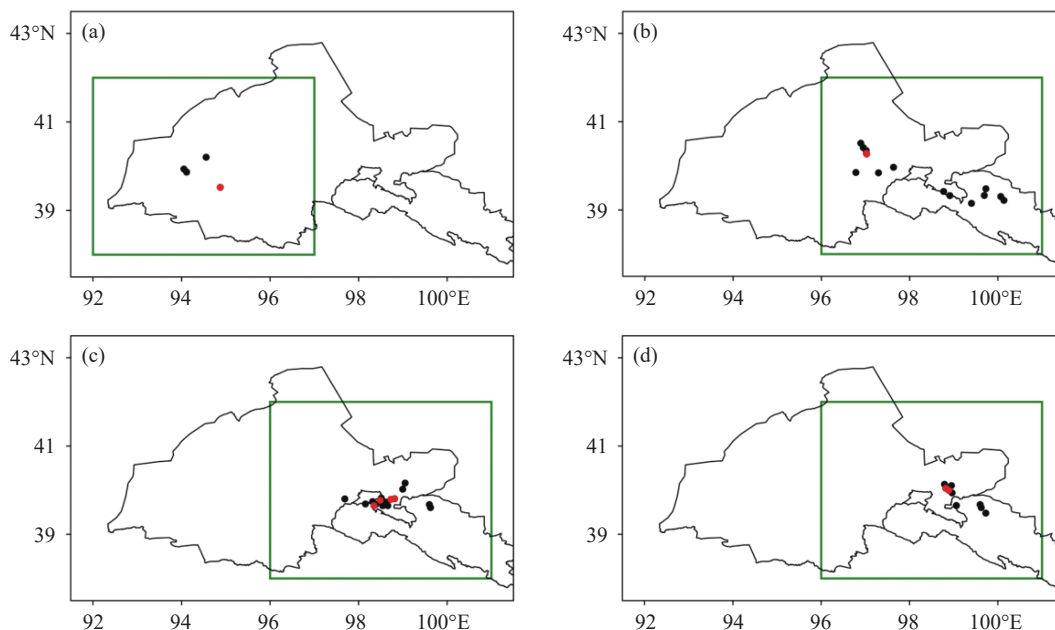


图2 2010—2024年河西西部过程1(a)、过程2(b)、过程3(c)、过程4(d)暴雨(黑色圆点)和大暴雨(红色圆点)站点空间分布(绿色方框表示4次过程中计算暴雨区水汽收支的边界范围,下同)

Fig. 2 Spatial distribution of rainstorm (black dot) and heavy rainstorm (red dot) stations in (a) process 1, (b) process 2, (c) process 3, (d) process 4 in the western Hexi Corridor during 2010-2024 (The green box indicates the boundary range for calculating the water vapor budget in the rainstorm area during the 4 processes, the same below)

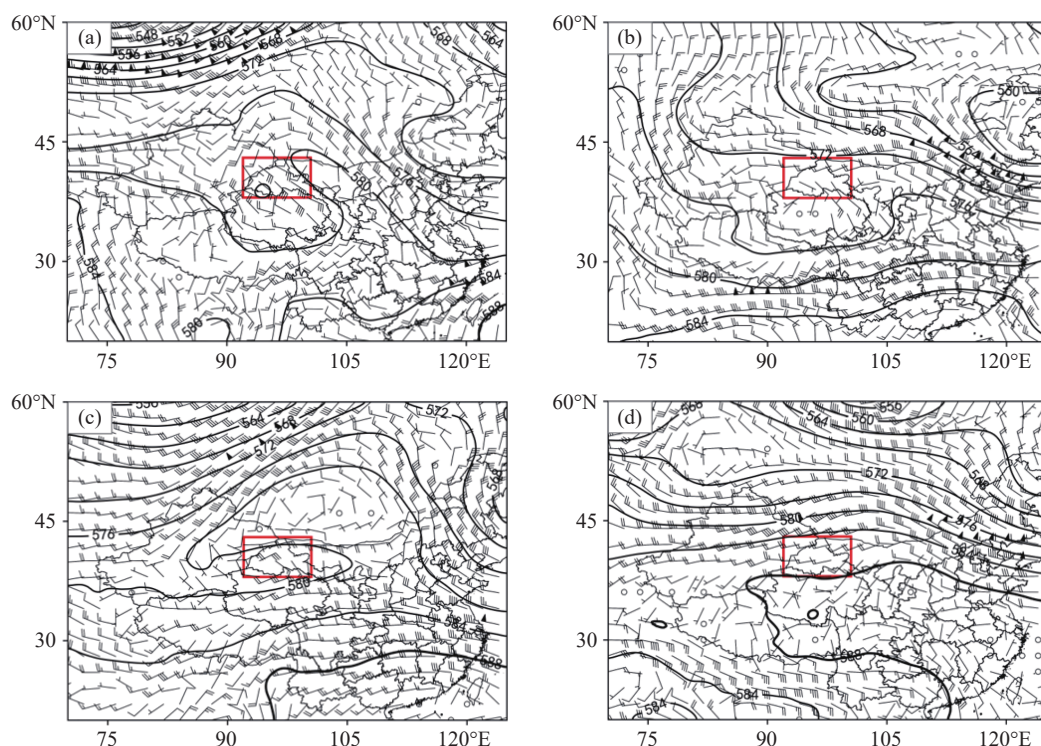


图 3 2010—2024 年河西西部过程 1 (a)、过程 2 (b)、过程 3 (c)、过程 4 (d) 起始时刻 500 hPa 位势高度 (等值线, 单位: dagpm)、风场 (矢量, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) (红色方框表示河西西部, 下同)

Fig. 3 The 500 hPa geopotential height (isoline, unit: dagpm) and wind field (vector, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) at the beginning of (a) process 1, (b) process 2, (c) process 3, (d) process 4 in the western Hexi Corridor during 2010–2024 (The red framed area is western Hexi Corridor, the same below)

3 水汽输送和暴雨区水汽收支

3.1 水汽输送特征

4 次极端暴雨过程期间, 地面至 300 hPa 水汽通量积分的平均分布 (图 4) 显示, 在阿拉伯海-孟加拉

湾-南海-华南地区有西南风水汽通量大值输送带, 受青藏高原东侧偏南气流影响, 在华南-西南-西北东部有 1 支水汽通量输送带形成。随着高原东侧偏南气流的加强, 输送到西北地区东部的水汽通量增强至

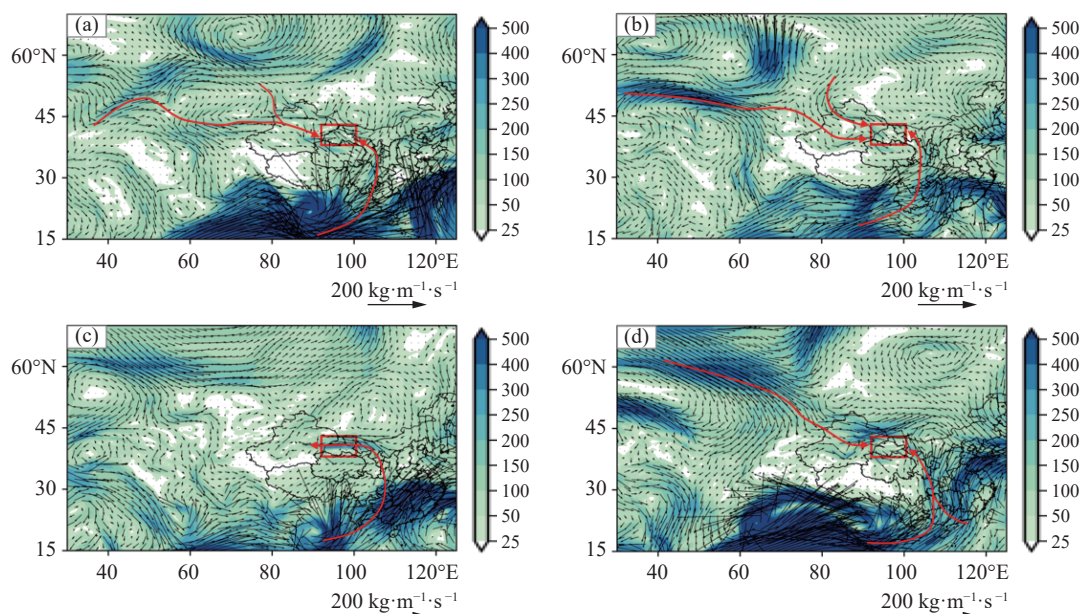


图 4 2010—2024 年河西西部过程 1 (a)、过程 2 (b)、过程 3 (c)、过程 4 (d) 地面至 300 hPa 整层水汽通量 (填色, 单位: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) 和方向 (箭头) (红色粗箭头为水汽输送示意路径, 下同)

Fig. 4 Water vapor flux magnitude (shaded, unit: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) and direction (arrows) from the ground to 300 hPa for (a) process 1, (b) process 2, (c) process 3, (d) process 4 in the western Hexi Corridor during 2010–2024 (The red and thick arrows indicate water vapor transport path, the same below)

$150\sim 300\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。同时,由于甘肃中部偏东风增强,偏东气流向西扩展到达了河西西部,将水汽从西北地区东部输送至暴雨区。另外,来自地中海(黑海)、东欧及中亚附近的水汽,在合适的环流条件下,随西风气流东移输送至河西西部(有时会在巴尔喀什湖及新疆北部附近获得水汽补充),水汽输送强度弱于偏南路径的水汽输送带。综上,4次极端暴雨过程的水汽源地大致相同。两类过程的水汽输送路径的异同点将在下文详细分析。

低涡型暴雨的分析以过程1为例。该过程期间主要有2支水汽输送带(图4a),1支是西路水汽输送带,进入西边界的水汽通量为 $50\sim 100\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$;另1支是绕高原的南路水汽输送带,在高原南侧的西南气流、高原东侧的偏南气流、河西走廊的偏东气流3支气流的接力作用下,将孟加拉湾附近的水汽远距离输送到河西西部,进入东边界的水汽通量达到 $150\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,是夏季中国大陆水汽通量平均值的1.5倍。700 hPa水汽通量分析表明(图5a),大气低层西路水汽输送带,自里海向东经中亚、新疆进入西边界,水汽通量达到 $6\text{ g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。南路水汽输送带,水汽由西北地区东部向河西西部输送的过程中损失较多,进入东边界的水汽通量只有 $4\text{ g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。同时还有1支来自贝加尔湖附近的偏北气流,经蒙古-内蒙古西部向暴雨区输送水汽;从500 hPa水汽通量分布可知(图5c),大气中层以南路水汽输送为主,来自孟加拉湾的水汽在3支气流的接力下进入东边

界和南边界,水汽通量达到 $6\sim 8\text{ g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,超过了大气低层的南路水汽输送强度。西路水汽输送带很弱,进入西边界的水汽通量不足 $2\text{ g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。此外,其余2次低涡型暴雨过程,过程2与过程1类似,也存在西、南2路水汽输送带(图4b);过程3则不同,只有1支明显的绕高原“半圆形”南路水汽输送带,偏东气流异常强盛,一直向西扩展至南疆盆地(图4c)。

以过程4为例,分析副高边缘型暴雨的水汽输送特征。南路输送带的水汽来源与低涡型暴雨不同(图4d),来自孟加拉湾的西南气流和来自南海的偏南气流在华南汇集后,沿华南-西南将水汽输送至西北地区东部,再由偏东气流将水汽接力输送至河西西部,进入东边界的水汽通量超过 $200\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,高于低涡型暴雨的南路水汽输送强度。西路水汽输送带与低涡型暴雨类似,进入西边界的水汽通量达到 $150\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,超过了“低涡型”暴雨的西路水汽输送强度。700 hPa水汽通量分布显示(图5b),南路水汽输送带进入东边界的水汽通量达到 $8\sim 10\text{ g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,是低涡型暴雨南路水汽输送强度的2.0~2.5倍;500 hPa水汽通量分析表明(图5d),中层以西路水汽输送为主,进入西边界的水汽通量为 $6\sim 8\text{ g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

综上,副高边缘型暴雨的水汽输送强度强于低涡型暴雨,其南路水汽来源有孟加拉湾和南海两个区域,而低涡型暴雨,南路水汽主要来源于孟加拉湾。在低层,副高边缘型暴雨的南路水汽输送强度

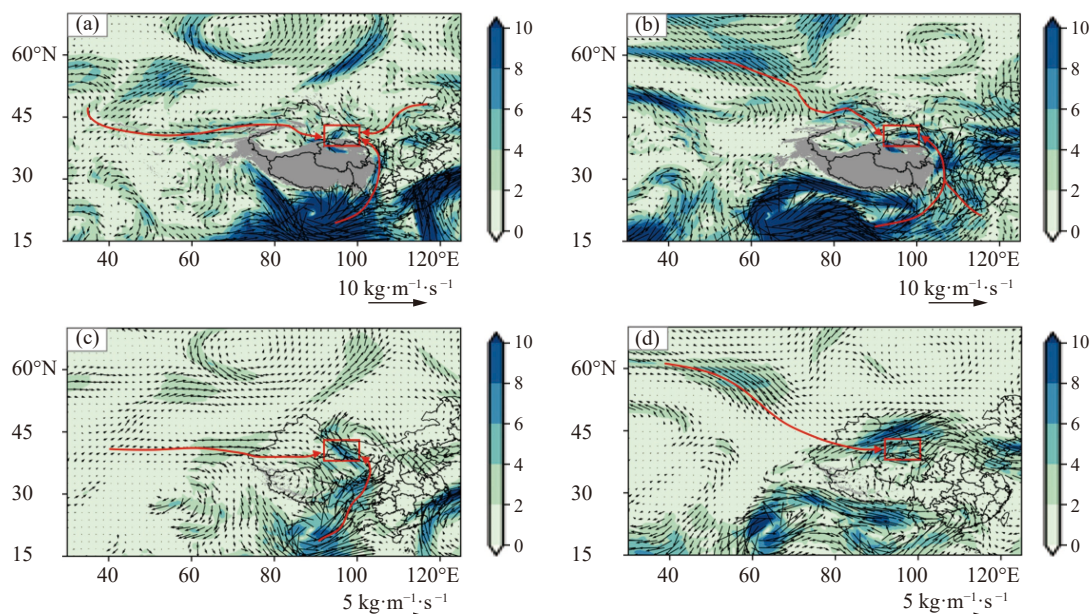


图5 2010—2024年河西西部过程1(a、c)和过程4(b、d)700 hPa(a、b)和500 hPa(c、d)水汽通量大小(填色,单位: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)和方向(箭头)(a、b图灰色填充区的地面气压小于700 hPa,c、d图灰色填充区的地面气压小于500 hPa)

Fig. 5 Water vapor flux magnitude (shaded, unit: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) and direction (arrows) at (a, b) 700 hPa and (c, d) 500 hPa for (a, c) process 1, (b, d) process 2 in the western Hexi Corridor during 2010-2024 (The surface pressure in the gray filled area is less than 700 hPa in Fig. 5a, Fig. 5b and the surface pressure in the gray filled area is less than 500 hPa in Fig. 5c, Fig. 5d)

更强,低涡型暴雨的西路水汽输送强度更强;在中层,副高边缘型暴雨以西路水汽输送为主,低涡型暴雨以南路水汽输送为主。

3.2 暴雨区水汽收支

计算河西西部 4 次极端暴雨过程期间暴雨区(图 2 绿色方框)逐 1 h 各边界的水汽流入量,分析水汽收支特征。将整层大气分成地面至 700 hPa (对流层低层,简称低层)、700—500 hPa (对流层中层,以下简称中层)、500—300 hPa (对流层高层,以下简称高层) 进行计算。从对流层整层各边界的水汽收支演

变可知(图 6),在暴雨开始前 12 h,暴雨区就有水汽净输入,之后输入强度不断增大,暴雨开始时水汽输入强度最大,因此前期暴雨区积累了充沛的水汽。之后,在主要暴雨时段,暴雨区一直维持高的水汽净输入,为暴雨的发生提供了源源不断的水汽供应。另外,过程 1、过程 2 和过程 4 均有 2 路(西、南路)水汽输送带,所以暴雨区水汽净输入强度较大,都在 $30 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。而过程 3 以南路水汽输送为主,西边界一直维持水汽输出,故暴雨区水汽净输入强度最低,仅有 $23 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

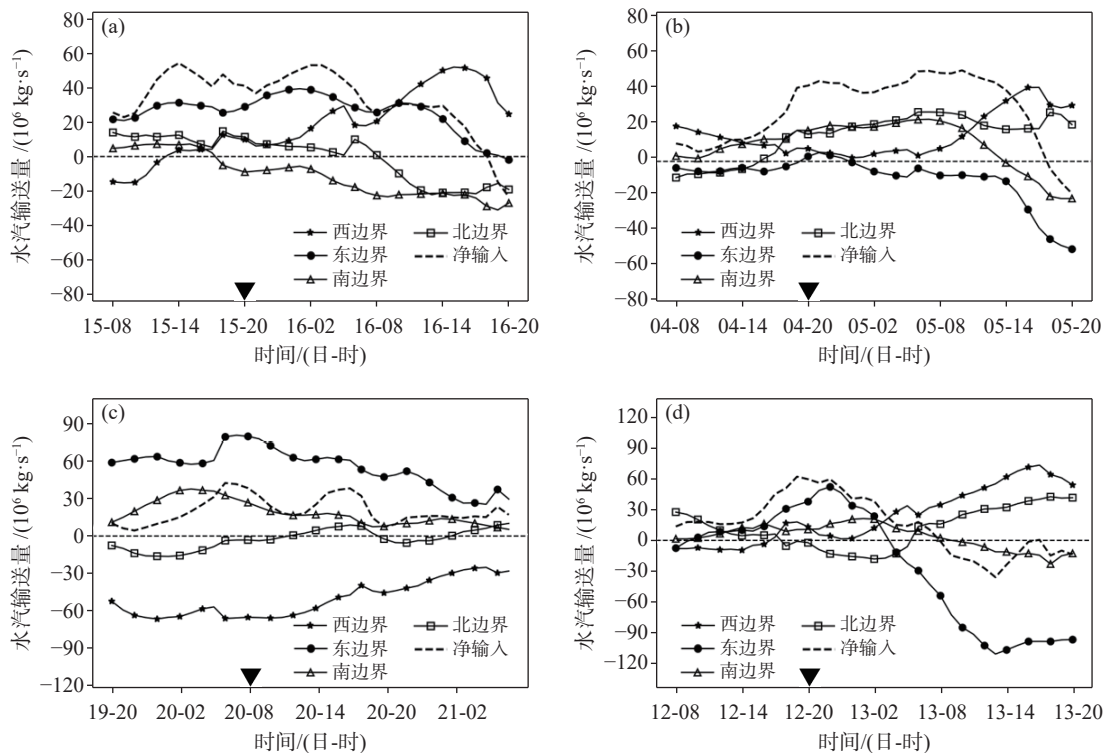


图 6 2010—2024 年河西西部过程 1 (a)、过程 2 (b)、过程 3 (c)、过程 4 (d) 各边界整层水汽收支演变(横坐标轴上实心正三角标记位置为过程开始时间,纵坐标数值正值表示输入,负值表示输出)

Fig. 6 Evolution of water vapor budget in the whole boundary layer of (a) process 1, (b) process 2, (c) process 3, (d) process 4 in the western Hexi Corridor during 2010–2024 (The position of the black positive triangle mark on the abscissa axis is the start time of the process. Positive value in vertical coordinate indicates input, negative value indicates output)

分析表 2 可知,总体上暴雨区的水汽东边界输入最多,其次为南边界,再次是西边界,北边界最少。此外,两类暴雨的水汽收支差异明显。低涡型暴雨的分析以过程 1 为例。低层的水汽净输入量最大,占整层净输入量的 70.5%,水汽输入为西、北两边界,东边界为水汽输出,南边界无水汽输入,主要是南边界祁连山海拔多在 3 500 m 以上,阻滞了水汽北上;700 hPa 以上,水汽输入主要是东边界,西、北两边界均为水汽输出。副高边缘型暴雨的分析以过程 4 为例。低层的水汽净输入量占整层净输入量的比重为 63.4%,水汽输入主要是东边界,西边界为水汽

输出;700 hPa 以上的水汽输入,中层以东、南两边界为主,高层以西边界为主。

综上,两类暴雨中,低层水汽净输入量占整层净输入量的百分比均超过 60%。低涡型暴雨,水汽输入主要为低层西、北两边界和中层东边界;副高边缘型暴雨,水汽输入主要是低层东边界和高层西边界。

4 水汽源地贡献

上文分析表明,影响河西西部极端暴雨的水汽流向南可追溯到阿拉伯海、孟加拉湾及南海,向西可追溯至地中海(黑海)、东欧、中亚以及新疆北部等地

表 2 2010—2024 年河西西部 4 次极端暴雨过程期间暴雨区分层垂直积分的平均水汽通量 (单位: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)
Table 2 Average water vapor flux of stratification vertical integration in rainstorm area during 4 extreme rainstorms in the western Hexi Corridor during 2010-2024 (unit: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

暴雨过程	层次	净输入	西边界	东边界	南边界	北边界	暴雨过程	层次	净输入	西边界	东边界	南边界	北边界
过程1	低层	29.23	15.10	-7.64	0.00	21.77	过程3	低层	13.79	-10.82	26.17	0.00	-1.56
	中层	6.16	-5.24	26.77	-11.69	-3.68		中层	10.15	-34.45	31.83	7.98	4.78
	高层	6.07	-2.62	11.07	7.38	-9.76		高层	-0.80	-2.70	-4.17	9.28	-3.21
过程2	低层	17.15	6.85	-6.27	0.00	16.56	过程4	低层	19.11	-17.57	26.97	0.00	9.71
	中层	11.06	3.39	5.40	2.43	-0.16		中层	4.69	-9.27	9.59	7.63	-3.26
	高层	3.89	3.13	-5.60	9.52	-3.16		高层	6.36	34.30	-26.16	3.12	-4.90

区,但水汽通量分析无法定量说明各个水汽源地对暴雨区的贡献大小,所以进一步开展水汽源地分析。

4.1 500 hPa 水汽源地贡献率对比

用 HYSPLIT 模式模拟河西西部 4 次极端暴雨过程,追踪其 500 hPa 高度 8 d 的后向水汽轨迹,每次过程的轨迹聚类后的水汽轨迹均为 3~4 条,4 次过程共 15 条轨迹 (图 7)。可见研究区的水汽源地有 4 个,水汽源地 I (以下简称源地 I) 主要在地中海、黑海及东欧,有 6 条轨迹,水汽以偏西路径输送;源地 II 为新疆北部、蒙古西部,有 4 条轨迹,水汽以偏北路径输送;源地 III 在西南地区东部 (包括华中西部),有 3 条轨迹,水汽以偏南路径输送;源地 IV 为阿拉伯海、南亚,有 2 条轨迹,水汽以西南路径输送。

分析表 3 可知,对暴雨贡献最大的水汽源地为源地 II,平均贡献率高达 51%,水汽在源地的平均比湿为 $3.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,到达暴雨区的平均比湿为 $4.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,比

湿增加了 $1.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,水汽增加 37%。源地 I、III 和 IV 对暴雨的平均贡献率分别是 18%、19% 和 12%,水汽在源地的平均比湿分别为 $1.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $7.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $16.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,到达暴雨区的平均比湿分别为 $4.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $5.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $5.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;其中,源地 I 水汽输送过程中比湿增加了 $2.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,水汽增加 153%,而源地 III 和源地 IV 比湿减小了 $2.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $10.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,水汽损失 34% 和 64%。另外,来自地中海、黑海及东欧的水汽,主要从 $>4500 \text{ m}$ 的高度向 500 hPa 暴雨区上空输送;来自西南地区东部、阿拉伯海及南亚的水汽,主要从 $<1500 \text{ m}$ 的高度向 500 hPa 暴雨区上空输送。以下将分析 500 hPa 上两类暴雨的水汽来源及各源地贡献的差异。

低涡型暴雨和副高边缘型暴雨分别以过程 1、过程 4 为例进行分析。前者的水汽输送通道 2 条来自源地 I,1 条来自源地 II,1 条来自源地 III;后

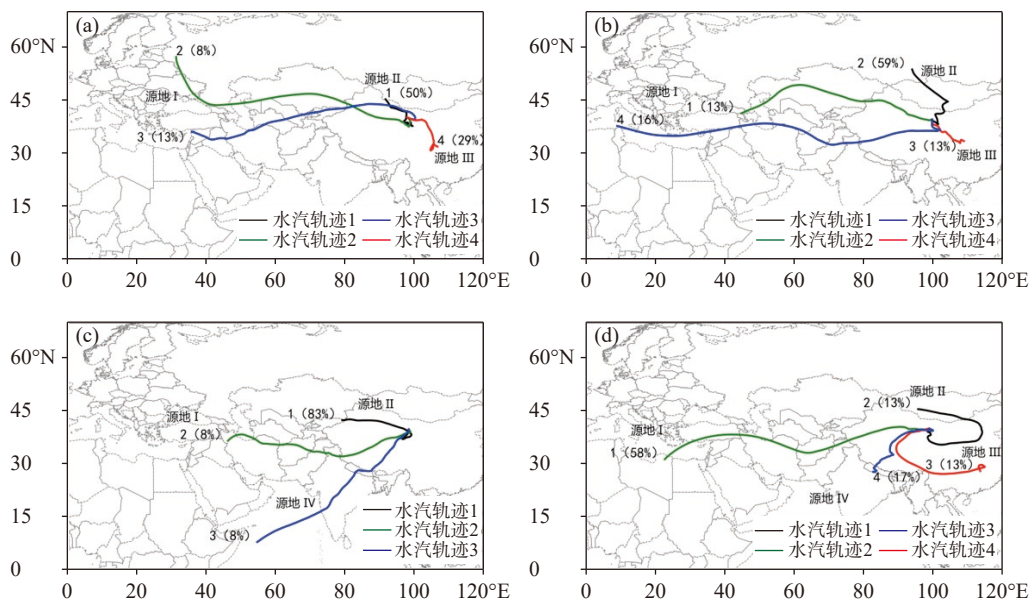


图 7 2010—2024 年河西西部过程 1 (a)、过程 2 (b)、过程 3 (c)、过程 4 (d) 500 hPa 水汽轨迹空间分布 (括号中的数字是各水汽源地对极端暴雨的贡献率)

Fig. 7 Spatial distribution of 500 hPa water vapor trajectories of (a) process 1, (b) process 2, (c) process 3, (d) process 4 in the western Hexi Corridor during 2010-2024 (The figures in brackets is the contribution rate of each water vapor source to extreme rainstorm)

表 3 2010—2024 年河西西部 4 次极端暴雨 500 hPa 水汽源地的高度、比湿、水汽损失及贡献率

Table 3 Height, specific humidity, water vapor loss and contribution rate of 500 hPa water vapor source for 4 extreme rainstorms in the western Hexi Corridor during 2010-2024

水汽源地	轨迹数	R/%		h/m		$q_1/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$		$q_2/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$		水汽损失/%
		数值范围	平均值	数值范围	平均值	数值范围	平均值	数值范围	平均值	
源地 I	6	8~58	18	3 511~9 772	7 104	0.1~6.3	1.7	2.3~6.9	4.3	-153
源地 II	4	13~83	51	460~4 901	2 735	1.1~6.0	3.5	3.2~7.7	4.8	-37
源地 III	3	13~29	19	372~5 305	2 228	6.0~9.8	7.9	3.3~7.0	5.2	34
源地 IV	2	8~17	12	94~1 188	641	14.6~17.3	16.0	3.8~7.6	5.7	64

注: R 、 h 、 q_1 分别表示水汽源地对暴雨的贡献率、源地高度和比湿, q_2 表示暴雨区的比湿; 损失为平均 $(q_1 - q_2)/q_1 \times 100\%$; 下同

者各有 1 条分别来自 4 个源地的水汽输送通道。副高边缘型暴雨和低涡型暴雨中, 偏南路径输送的水汽对暴雨的贡献率分别为 30% 和 29%, 表明南部水汽源地对两类暴雨的贡献相当, 而西部 (源地 I)、北部 (源地 II) 水汽源地对两类暴雨的贡献更为重要。其中低涡型暴雨, 来自新疆北部 (源地 II) 的水汽对暴雨的贡献率最大 (50%); 副高边缘型暴雨, 来自地中海 (源地 I) 的水汽对暴雨的贡献率最大 (58%)。

4.2 700 hPa 水汽源地贡献率对比

对 4 次极端暴雨过程追踪其 700 hPa 高度 8 d 的后向水汽轨迹, 每次过程的轨迹聚类后水汽轨迹均为 2~3 条, 4 次过程共 11 条轨迹 (图 8)。可见与 500 hPa 不同, 暴雨区在 700 hPa 高度的水汽源地有 3 个, 源地 I 为里海、中亚, 水汽以偏西路径输送; 源地 II 为新疆北部、贝加尔湖, 水汽以偏北路径输送; 源地 III 为孟加拉湾、华南西部 (包括西南东部), 水汽以偏

南路径输送。

由表 4 分析可知, 对暴雨贡献最大的水汽源地是源地 III, 平均贡献率为 41%, 水汽在源地的平均比湿是 $13.9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 到达暴雨区的平均比湿是 $8.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 比湿减小了 $5.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 水汽损失 36%; 源地 I 对暴雨的贡献率与源地 III 相当, 平均为 40%, 但水汽在源地的平均比湿小于到达暴雨区的平均比湿, 水汽输送过程中比湿增加了 $6.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 水汽增加 353%; 源地 II 对暴雨的贡献最小, 平均贡献率仅 18%。此外, 来自里海、中亚附近水汽, 主要从 $>4\,000 \text{ m}$ 的高度向 700 hPa 暴雨区上空输送; 来自孟加拉湾、华南西部的水汽, 主要从 $<1\,500 \text{ m}$ 的高度向 700 hPa 暴雨区上空输送。下文仍以过程 1、过程 4 为例, 分析两类暴雨在 700 hPa 上的水汽源地及贡献差异。

低涡型暴雨的水汽输送通道 2 条来自源地 I, 1 条来自源地 II (3 个低涡型个例中仅过程 3 有来自源地 III 的水汽), 其中, 里海及中亚 (源地 I) 的水汽

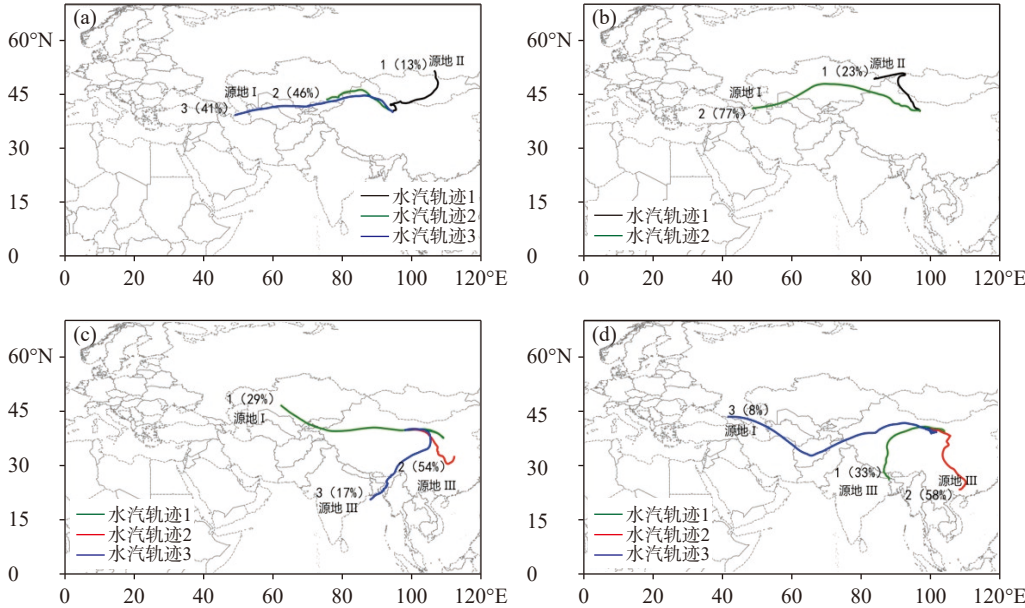


图 8 同图 7, 但为 700 hPa

Fig. 8 Same as Fig. 7, but at 700 hPa

表4 同表3, 但为 700 hPa
Table 4 Same as Table 3, but for 700 hPa

水汽源地	轨迹数	$R/\%$		h/m		$q_1/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$		$q_2/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$		水汽损失/%
		数值范围	平均值	数值范围	平均值	数值范围	平均值	数值范围	平均值	
源地 I	5	8~77	40	4 309~8 966	6 384	0.1~2.6	1.7	5.6~10.6	7.7	-353
源地 II	2	13~23	18	82~1 200	656	2.4~6.8	4.6	6.5~8.8	7.6	-65
源地 III	4	17~58	41	186~1 480	992	8.8~17.5	13.9	6.8~11.2	8.8	36

对暴雨的贡献率达到 87%, 表明低涡型暴雨的水汽主要来自西部(源地 I)和北部(源地 II)源地; 副高边缘型暴雨的水汽输送通道 1 条来自源地 I, 2 条来自源地 III, 南亚及华南西部(源地 III)的水汽对暴雨的贡献率高达 92%, 表明副高边缘型暴雨的水汽主要来自南部源地(源地 III)。

4.3 河西西部极端暴雨过程水汽输送三维结构

通过上述研究, 概括出河西西部两类极端暴雨过程水汽三维结构模型(图 9)。3 次低涡型暴雨(图 9a), 500 hPa 来自新疆北部、蒙古西部的水汽, 对暴雨的平均贡献率最大, 达 64%, 来自地中海、黑海

及东欧的水汽与来自阿拉伯海、南亚及西南东部的水汽对暴雨的平均贡献率相同, 均为 18%; 700 hPa 来自里海、中亚的水汽对暴雨的平均贡献率最大, 为 64%, 来自孟加拉湾、西南东部的水汽和来自新疆北部、贝加尔湖的水汽对暴雨的平均贡献率为 24% 和 12%。1 次副高边缘型暴雨(图 9b), 500 hPa 来自地中海的水汽, 对暴雨的贡献率最大, 达到 58%, 其次, 来自南亚及西南东部的水汽贡献率为 30%, 来自蒙古西部的水汽贡献率最小(13%); 700 hPa 来自南亚及华南西部的水汽贡献率高达 92%, 来自里海的水汽贡献率仅 8%。

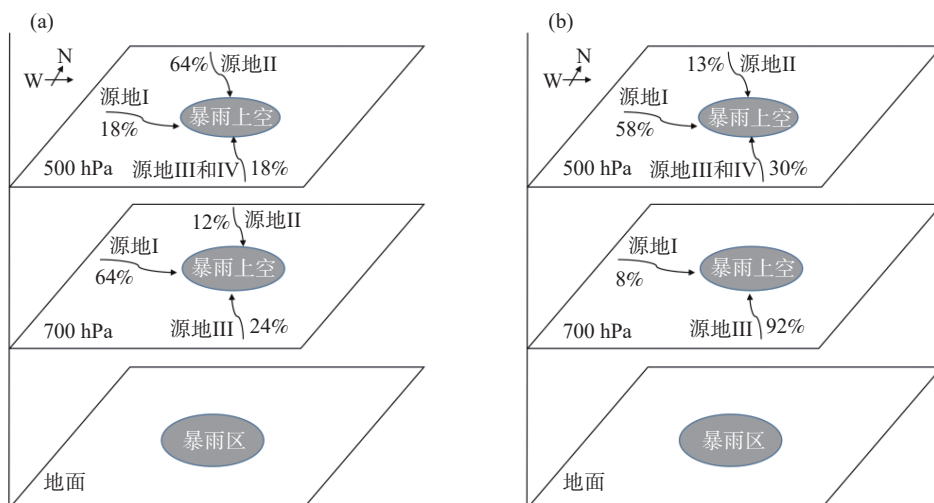


图9 河西西部低涡型暴雨(a)和副高边缘型暴雨(b)水汽输送路径和水汽源地贡献三维结构图

Fig. 9 Three dimensional water vapor structure of (a) the low vortex type rainstorm and (b) the subtropical high marginal type rainstorm in the western Hexi Corridor

综上, 河西西部低涡型暴雨无论在大气中层(500 hPa)和低层(700 hPa), 偏西和偏北路径的水汽输送对暴雨有重要贡献, 而偏南路径水汽输送贡献较弱。副高边缘型暴雨在大气中层, 偏西路径水汽输送对暴雨的贡献最大; 在低层, 偏南路径的水汽输送对暴雨贡献率超过 90%。

5 结论与讨论

本文利用气象观测站降水、ERA5 再分析和 GDAS 资料, 针对 2010—2024 年河西西部 4 次极端暴雨过

程的环流形势、水汽输送和收支特征等进行了分析, 并定量分析了暴雨的水汽来源及贡献率; 建立了河西西部两类极端暴雨过程水汽来源及路径的三维结构模型, 明确了各层水汽的源地及贡献率。得到以下主要结论:

(1) 河西西部 4 次极端暴雨过程的环流形势有低涡型和副高边缘型两类, 低涡型为主要环流型。低涡型暴雨 500 hPa 高度场为东高西低, 内蒙古西部至河套地区有暖性高压脊, 青藏高原北部有低涡形成, 低涡进入河西西部后移动缓慢; 副高边缘型暴雨

500 hPa 高度场为南高北低, 西风带短波槽后干冷气流东移南下, 与副高外围的西南暖湿气流在暴雨区交汇。

(2) 两类暴雨均有西、南两路水汽输送带。在合适的环流条件下, 西路输送带将地中海(黑海)、东欧及中亚附近的水汽, 向东输送至暴雨区; 南路输送带主要是在青藏高原南侧西南气流、高原东侧偏南气流、河西走廊偏东气流 3 支气流的接力作用下, 将阿拉伯海、孟加拉湾及南海附近的水汽输送至暴雨区。西路输送带的水汽来源相同, 而南路不同。低涡型暴雨, 大气低层的西路水汽输送强度强, 中层以南路水汽输送为主; 副高边缘型暴雨则不同, 低层南路水汽输送强度强, 中层以西路水汽输送为主。

(3) 从暴雨开始前 12 h 至结束, 暴雨区一直维持高的水汽净输入强度, 为暴雨的发生提供了源源不断的水汽供应。两类暴雨中, 低层水汽净输入量占整层净输入量的比重均超过 60%。低涡型暴雨, 水汽输入主要为低层西、北两边界和中层东边界; 副高边缘型暴雨, 水汽输入主要是低层东边界和高层西边界。

(4) 低涡型暴雨 500 hPa 的水汽源地主要是新疆北部、西南东部以及地中海(黑海), 700 hPa 的水汽源地主要是中亚(里海)和西南东部; 副高边缘型暴雨 500 hPa 的水汽源地主要是地中海, 700 hPa 的水汽源地主要是南亚、华南西部。

本文选取了 2010—2024 年河西西部的 4 次极端暴雨个例, 依据环流特征将其分为两类, 并利用欧拉方法和拉格朗日方法探讨极端暴雨的水汽特征, 分析结果反映了该地区两类极端暴雨在水汽输送、收支及源地贡献方面的特征及差异, 一定程度上有助于增强对该地区暴雨形成的认识、提高暴雨预报准确率。另外, 针对同一类型的个例, 两种方法的分析结果有一定差异, 可能是由于两种方法的观测视角及物理量描述的处理方式不同, 欧拉方法反映的是固定空间点上的物理量, 拉格朗日方法是追踪单个粒子的轨迹, 记录其物理量随时间的演变, 即欧拉方法关注“哪里水汽多”, 拉格朗日方法回答“水汽从哪里来”, 视角的差异导致分析结论可能不同。由于河西西部极端暴雨天气为小概率事件, 近 15 a 只发生了 4 次, 结论后期有待于更多个例进行验证。此外, 关于河西西部特殊地形对水汽输送、抬升及辐合的作用, 有待在今后的工作中探讨。

参考文献 (References):

安琳, 权晨, 沈晓燕, 等. 2025. 青海“8·18”短时强降水过程的水汽特征分析[J]. *暴雨灾害*, 44(1): 41–51. An L, Quan C, Shen X Y, et al. 2025.

- Analysis of water vapor characteristics of the “8·18” short-duration heavy rainfall event in Qinghai [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 44(1): 41–51 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023–240
- 边茜, 李春忱, 唐毓玲, 等. 2024. 基于 HYSPLIT 模式的凉山“8·21”致洪暴雨水汽特征分析[J]. *高原山地气象研究*, 44(S1): 52–58. Bian Q, Li C C, Tang Y L, et al. 2024. Analysis of water vapor characteristics of “8·21” flood-causing rainstorm in Liangshan based on HYSPLIT model [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 44(S1): 52–58 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674–2184.2024.Z1.007
- 陈静, 杨晓玲, 卯生琼, 等. 2026. 河西走廊东部“8·13”暴雨极端性和成因[J]. *沙漠与绿洲气象*, 20(1): 83–90. Chen J, Yang X L, Mao S Q, et al. 2026. Extreme characteristics and formation mechanisms during the rainstorm process on 13 August 2022 in the eastern Hexi Corridor [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 20(1): 83–90 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.2097–6801.2409.09001
- 陈豫英, 苏洋, 杨银, 等. 2021. 贺兰山东麓极端暴雨的中尺度特征[J]. *高原气象*, 40(1): 47–60. Chen Y Y, Su Y, Yang Y, et al. 2021. The mesoscale characteristics of extreme rainstorm in the eastern region of Helan Mountain [J]. *Plateau Meteorology*, 40(1): 47–60 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2020.00012
- 傅朝, 刘维成, 宋兴宇, 等. 2022. 西北干旱区一次极端暴雨局地性增强的对流环境特征[J]. *干旱气象*, 40(6): 909–921. Fu Z, Lu W C, Song X Y, et al. 2022. Local enhanced convective environment characteristics of an extreme rainstorm event in arid region of Northwest China [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 40(6): 909–921 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006–7639(2022)–06–0909
- 黄玉霞, 王宝鉴, 黄武斌, 等. 2019. 我国西北暴雨的研究进展[J]. *暴雨灾害*, 38(5): 515–525. Huang Y X, Wang B J, Huang W B, et al. 2019. A review on rainstorm research in Northwest China [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 38(5): 515–525 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2019.05.013
- 黄玉霞, 范琦玮, 王勇, 等. 2026. 甘肃“7·22”特大暴雨水汽来源及定量贡献分析[J]. *高原气象*, 45(1): 261–275. Huang Y X, Fan Q W, Wang Y, et al. 2026. Moisture sources and quantitative contribution analysis of the “7·22” heavy rainstorm in Gansu Province [J]. *Plateau Meteorology*, 45(1): 261–275 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2025.00052
- 孔祥伟, 陶健红. 2012. 近 51a 甘肃夏季气温和降水极端事件变化[J]. *干旱区研究*, 29(6): 965–971. Kong X W, Tao J H. 2012. Change of extreme temperature and precipitation events in Gansu Province in summer in recent 51 years [J]. *Arid Zone Research*, 29(6): 965–971 (in Chinese). doi:10.13866/j.azr.2012.06.027
- 孔祥伟, 杨建才, 李红, 等. 2021. 河西走廊西部干旱区一次极端暴雨天气的水汽特征分析[J]. *气象*, 47(4): 412–423. Kong X W, Yang J C, Li H, et al. 2021. Analysis on water vapor characteristics of an extreme rainstorm in the arid region of western Hexi Corridor [J]. *Meteorological Monthly*, 47(4): 412–423 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2021.04.003
- 吕春艳, 陈军, 刘艺滕, 等. 2023. 贵州铜仁一次持续性暴雨水汽收支定量分析[J]. *暴雨灾害*, 42(6): 648–658. Lv C Y, Chen J, Liu Y M, et al. 2023. Quantitative analysis of water vapor budget of a persistent rainstorm event in Tongren of Guizhou Province [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 42(6): 648–658 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023–064
- 钱正安, 蔡英, 宋敏红, 等. 2018. 中国西北旱区暴雨水汽输送研究进展[J].

- 高原气象,37(3):577–590. Qian Z A, Cai Y, Song M H, et al. 2018. Review of advances in water vapor transport studies of rainstorm in Northwest China [J]. *Plateau Meteorology*,37(3):577–590 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00032
- 孙力,马梁臣,沈柏竹,等.2016.2010年7-8月东北地区暴雨过程的水汽输送特征分析[J].*大气科学*,40(3):630–646. Sun L, Ma L C, Shen B Z, et al. 2016. A diagnostic study of water vapor transport and budget of heavy rainfall over Northeast China during July to August 2010 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,40(3):630–646 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1506.15101
- 陶健红,孔祥伟,刘新伟.2016.河西走廊西部两次极端暴雨事件水汽特征分析[J].*高原气象*,35(1):107–117. Tao J H, Kong X W, Liu X W. 2016. Analysis on water vapor characteristics of two extreme rainstorm events in the western Hexi Corridor [J]. *Plateau Meteorology*, 35(1):107–117 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00144
- 王佳津,肖红茹,杨康权,等.2023.四川盆地一次持续性暴雨的水汽输送特征[J].*干旱气象*,41(3):474–482. Wang J J, Xiao H R, Yang K Q, et al. 2023. Water vapor transport characteristics of a continuous rainstorm in Sichuan Basin [J]. *Journal of Arid Meteorology*,41(3):474–482 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2023)-03-0474
- 徐栋,孔莹,王澄海.2016.西北干旱区水汽收支变化及其与降水的关系[J].*干旱气象*,34(3):431–439. Xu D, Kong Y, Wang C H. 2016. Changes of water vapor budget in arid area of Northwest China and its relationship with precipitation [J]. *Journal of Arid Meteorology*,34(3): 431–439 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-03-0431
- 杨浩,江志红,刘征宇,等.2014.基于拉格朗日法的水汽输送气候特征分析—江淮梅雨和淮北雨季的对比[J].*大气科学*,38(5):965–973. Yang H, Jiang Z H, Liu Z Y, et al. 2014. Analysis of climatic characteristics of water vapor transport based on the Lagrangian method: A comparison between Meiyu in the Yangtze-Huaihe River Region and the Huaibei rainy season [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,38(5):965–973 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1402.13228
- 杨镒如,王斌,李双双,等.2025.秦巴山区夏季降水异常年水汽输送特征分析[J].*高原气象*,44(2):421–434. Yang Y R, Wang B, Li S S, et al. 2025. Summer water vapor transport and sources in anomalous precipitation years over the Qinba Mountains [J]. *Plateau Meteorology*, 44(2):421–434 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2024.00079
- 张林梅,芮建文,李璐,等.2025.新疆中天山北坡暴雪过程水汽特征[J].*沙漠与绿洲气象*,19(3):69–78. Zhang L M, Rui J W, Li L, et al. 2025. Water vapor characteristics during blizzard processes on the northern slope of the Central Tianshan Mountains of Xinjiang [J]. *Desert and Oasis Meteorology*,19(3):69–78 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2310.16001
- 庄晓翠,李博渊,赵江伟,等.2022.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*,48(3):311–323. Zhuang X C, Li B Y, Zhao J W, et al. 2022. Water vapor characteristics of rainstorm in southern Taklimakan Desert based on HYSPLIT model analysis [J]. *Meteor Mon*,48(3):311–323 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2022.011801
- 周秀美,张万诚,朱莉,等.2025.滇东南一次单站极端强降水水汽特征分析[J].*高原山地气象研究*,45(3):86–93. Zhou X M, Zhang W C, Zhu L, et al. 2025. Analysis of water vapor characteristics of extreme heavy rainfall at a single station in Southeastern Yunnan [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*,45(3):86–93 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2025.03.009
- Han J, Du H, Wu Z, et al. 2019. Changes in extreme precipitation over dry and wet regions of China during 1961–2014 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,124:5847–5859. doi:10.1029/2018jd029974
- Hegerl G C, Broennimann S, Cowan T, et al. 2019. Causes of climate change over the historical record [J]. *Environmental Research Letters*, 14:123006. doi:10.1029/2018JD029974
- Huang W, Feng S, Chen J H, et al. 2015. Physical mechanisms of summer precipitation variations in the Tarim Basin in northwestern China [J]. *Journal of Climate*,28(9):3579–3591. doi:10.1175/JCLI-D-1400395.1
- Liu B, Tan X, Gan T Y, et al. 2020. Global atmospheric moisture transport associated with precipitation extremes: Mechanisms and climate change impacts [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*:7(2): e1412. doi:10.1002/wat2.1412
- Liu X, Yang M, Wang H, et al. 2023. Moisture sources and atmospheric circulation associated with the record-breaking rainstorm over Zhengzhou city in July 2021 [J]. *Atmospheric Research*, 283:106558. doi:10.1007/s11069-022-05700-5
- Makra L, Matyasovszky I, Guba Z, et al. 2011. Monitoring the long range transport effects on urban PM10 levels using 3D clusters of backward trajectories [J]. *Atmospheric Environment*,45(16):2630–2641. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.02.068
- Munday C, Washington R, Hart N. 2021. African low-level jets and their importance for water vapor transport and rainfall [J]. *Geophysical Research Letters*,48(13):e2021GL093478. doi:10.1029/2021GL093478
- Sun B, Zhu Y L, Wang H J. 2011. The recent interdecadal and interannual variation of water vapor transport over eastern China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*,28(5):1039–1048. doi:10.1007/s00376-010-00931
- Sun B, Wang H J. 2014. Moisture sources of semiarid grassland in China using the Lagrangian particle model FLEXPART [J]. *Journal of Climate*,27(6):2457–2474. doi:10.1175/JCLI-D-13-00517.1
- Zhang Y, Huang W Y, Zhong D. 2019. Major moisture pathways and their importance to rainy season precipitation over the Sanjiangyu an region of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Climate*,32(20):6837–6857. doi:10.1175/JCLI-D-19-0196.1

(责任编辑 唐国瑛)