

刘晶,刘兆旭,杨莲梅,等,2023. 西风带大陆高压外围新疆哈密地区典型暴雨事件水汽输送特征对比分析[J]. 气象,49(9): 1045-1062. Liu J, Liu Z X, Yang L M, et al, 2023. Water vapor transport characteristics during typical rainstorm events around westerlies continental high in Hami Area, Xinjiang[J]. Meteor Mon, 49(9):1045-1062(in Chinese).

西风带大陆高压外围新疆哈密地区典型 暴雨事件水汽输送特征对比分析*

刘 晶^{1,2,3,4} 刘兆旭^{1,5} 杨莲梅^{1,2,3,4} 李建刚^{1,2,3,4}
曾 勇^{1,2,3,4} 仝泽鹏^{1,2,3,4} 江雨霏^{1,2,3,4} 周玉淑^{1,6,7}

- 1 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002
- 2 中亚大气科学研究中心, 乌鲁木齐 830002
- 3 新疆云降水物理与云水资源开发实验室, 乌鲁木齐 830002
- 4 西天山云降水物理野外科学观测基地, 乌鲁木齐 830002
- 5 新疆维吾尔自治区防雷减灾中心, 乌鲁木齐 830002
- 6 中国科学院大气物理研究所, 云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029
- 7 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049

提 要: 选取 2018 年 7 月 31 日和 2016 年 8 月 8 日两次东天山哈密地区强降水天气过程(分别简称“7·31”过程和“8·8”过程), 利用 NCEP/NCAR FNL $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 和 GDAS $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 再分析资料、中国地面卫星雷达三源融合逐小时降水产品、新疆地区常规观测资料、FY-2G 卫星产品、基于地基 GPS 观测的大气可降水量(PWV)资料及基于拉格朗日方法的 HYSPLIT 轨迹模式, 通过对水汽输送流函数、势函数、水汽输送轨迹、暴雨区水汽收支计算诊断, 揭示两次强降水期间的大尺度水汽输送、辐合特征, 得到如下主要结果: 两次强降水过程均发生在大陆高压位置异常情况下, 为水汽长距离输送提供了有利的环流背景条件; 两次过程水汽输送均由三个阶段构成, 且河西走廊水汽输送均对两次暴雨天气过程具有贡献, “7·31”过程降水前和降水期间, 河西走廊偏东水汽接力输送通道建立, 造成河西走廊—暴雨区自东南向西北先后增湿, 较低纬度南海和高压南侧水汽输送和补充为哈密东南部短时强降水天气提供充沛的水汽供应条件。“8·8”过程青藏高原北部—新疆巴州南部水汽接力输送通道建立, 高原北部水汽沿高压外围偏南气流向北输送, 与中纬度低槽前西南气流在暴雨区有所汇合, 同时对流层低层河西走廊偏东水汽进一步补充, 造成哈密北部测站 PWV 出现三次增湿过程。

关键词: 哈密地区, 短时强降水, 水汽输送

中图分类号: P441, P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.062801

Water Vapor Transport Characteristics During Typical Rainstorm Events Around Westerlies Continental High in Hami Area, Xinjiang

LIU Jing^{1,2,3,4} LIU Zhaoxu^{1,5} YANG Lianmei^{1,2,3,4} LI Jiangan^{1,2,3,4} ZENG Yong^{1,2,3,4}
TONG Zepeng^{1,2,3,4} JIANG Yufei^{1,2,3,4} ZHOU Yushu^{1,6,7}

* 国家重点研发计划(2018YFC1507102)、新疆气象局引导性计划项目(YD202301)和新疆维吾尔自治区引进高层次人才天池计划项目(2019)共同资助

2021 年 12 月 2 日收稿; 2023 年 6 月 27 日收修定稿

第一作者: 刘晶, 主要从事灾害性天气研究. E-mail: 994365768@qq.com

通讯作者: 杨莲梅, 主要从事暴雨诊断和灾害性天气研究. E-mail: yanglm@idm.cn

- 1 Institute of Desert Meteorology, CMA, Urumqi 830002
- 2 Center for Central Asia Atmosphere Science Research, Urumqi 830002
- 3 Xinjiang Cloud Precipitation Physics and Cloud Water Resources Development Laboratory, Urumqi 830002
- 4 Field Scientific Observation Base of Cloud Precipitation Physics in West Tianshan Mountains, Urumqi 830002
- 5 Center for Xinjiang Lightning Protection and Disaster Reduction, Urumqi 830002
- 6 Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
- 7 School of Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: In this study, NCEP/NCAR FNL $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ reanalysis data, GDAS $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ reanalysis data, the fused hourly precipitation of satellite and radar, conventional weather data of Xinjiang, FY-2G satellite data, the GPS-observed PWV data and the HYSPLIT trajectory model are used to conduct an in-depth analysis of extreme precipitation events that occurred in the southeastern Hami Area of Xinjiang on 31 July 2018 (hereinafter referred to as the 31 July process) and in the northern Hami Area on 8 August 2016 (hereinafter referred to as the 8 August process). Based on calculations of water vapor transport stream function, potential function, water vapor transport trajectories, water vapor budget, the characteristics of large-scale water vapor transport and convergence during two severe rainfall events are analyzed. The results show that the two events both occurred in the situation of abnormal continental high, which provided a favorable circulation background for long-distance water vapor transport. The water vapor transports in both of the severe rainfall events consisted of three stages, and the Hexi Corridor water vapor transport contributed to the water vapor supply in both events. Before and during the 31 July process, affected by the easterly water vapor transport channel, there was an obviously humidification at stations of Hami Area and Gansu Province from southeast to northwest. The transport and supplement of water vapor from low latitude provided an abundant water vapor supply for the short-time severe rainfall in southeastern Hami Area. Comparatively, before and during the 8 August process, the water vapor transport channel from northern Tibetan Plateau to southern Bazhou Area in Xinjiang was established. The water vapor in Tibetan Plateau was carried toward north, joining in the water vapor taken by southwest airflow in front of the trough. At the same time, with the low-level water vapor from Hexi Corridor, three humidification processes were triggered in northern Hami Area.

Key words: Hami Area, short-time severe precipitation, water vapor transport

引 言

新疆地处欧亚大陆中部干旱、半干旱地区,远离海洋,拥有独特的“三山夹两盆”复杂地形,不受季风系统的直接影响(张家宝,1986),降水主要发生在夏季和山地(史玉光,2014),分布极不均匀。进入 21 世纪后,中国 110°E 以西的干旱、半干旱地区春夏季的极端降水事件的日数有所增多(施雅风等,2003;黄建平等,2014),已有研究表明(戴新刚等,2007;杨莲梅,2003;王少平等,2016),新疆虽然小雨日数显著减少,但局地暴雨频发,强降水日数和强度均呈上升态势。由于复杂地形应对暴雨的形成和防御能力

不同,当局地出现极端暴雨(24 h 降水量 $>48\text{ mm}$),特别是短时强降水(雨强 $>20\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)时,时间集中,强度大,容易引发山洪、泥石流、山体滑坡等次生灾害,造成重大人员伤亡和经济损失,给当地经济建设和社会发展造成严重灾害(黄艳等,2018;庄晓翠等,2021)。

哈密地区位于新疆最东端,与甘肃河西走廊相邻,是新疆通向中国内地的要道,也是“一带一路”战略的重要节点城市。近年来哈密地区暴雨频发,该地区的极端暴雨天气逐渐引起各方关注。据统计,哈密地区各站夏季平均气温在过去 50 多年内均呈上升趋势,达 $0.42\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$,增温率是 IPCC 第四次报告中全球近 50 年增温率的三倍多(王文涛等,

2014),且干湿年际变化与甘肃河西走廊干湿变化存在紧密联系(陈峰等,2016)。哈密地区以农牧业为主,农牧业的丰欠在很大程度上决定于降水的多少。温度升高、降水增多为当地地区经济发展和城市建设提供了宝贵的水资源,但同时局地短时强降水的增加也给当地气象防灾减灾带来了严重挑战。已有研究表明,在西风槽与副热带高压相互作用过程中,高压外围暖湿输送带能够将水汽从洋面经河西走廊地区接力输送至新疆暴雨区(杨莲梅等,2012),为暴雨的产生提供了充沛的水汽供应,而还未有涉及到西风带与西风带大陆高压相互作用下哈密地区水汽聚集机理等方面的研究成果。此外,季风区与干旱、半干旱地区气候背景、地形条件各不相同,造成短时强降水的水汽输送特征也存在差异,因而研究该地区暴雨发生期间的水汽来源、水汽输送特性对于增强对干旱、半干旱区暴雨形成的认识和该地区防汛抗旱方面尤为重要。

无论是季风区还是干旱区,大气中充沛的水汽和持续的水汽输送都是形成强降水的必要条件。已有研究揭示了东亚地区水汽输送与东亚地区降水变化间的关系,指出东亚水汽输送是东亚季风的重要组成部分(Park and Schubert, 1997; Zhou and Wang, 2006; Zhao et al, 2007),并发现来自中国南海水汽在东亚降水水汽供应中起至关重要的“中转”作用(Ding and Chan, 2005; Jin et al, 2007; 孙力等, 2016)。另外也有研究针对中国极端暴雨事件的水汽输送特征开展相关分析(王婧羽等, 2014; 孔祥伟等, 2021),发现水汽输送通道分布主要受纬度、季节、地形以及季风影响(徐洪雄等, 2014; 孙建华等, 2016)。近年来针对季风区暴雨天气水汽输送、聚集机制等方面,国内外多位研究学者(Stohl and James, 2004; 江志红等, 2011; 庄晓翠等, 2022)利用基于拉格朗日方法的轨迹模式(HYSPLIT v4.9)模拟计算了暴雨区几类暴雨的水汽输送轨迹、主要通道,给出了不同源地的水汽贡献,并分析了暴雨期间水汽输送和收支特征(周玉淑等, 2005; 李超等, 2022; 杨柳等, 2018; 陈红专等, 2019),阐明了季风区夏季暴雨期间水汽输送和聚集机制。针对新疆极端降水天气的水汽输送和聚集特征有不少研究成果,提出了新疆区域产生降水的水汽在合适的环流条件下,在中亚地区集中,并通过接力输送机制输送至暴雨区的概念(张家宝和邓子风, 1987; 刘晶和杨莲梅, 2017; 杨莲梅等, 2012)。在此基础上,也有研究分析

发现新疆暴雨天气与低纬度阿拉伯海偏南水汽输送密切相关(Huang et al, 2015; Akiyo and Tetsuzo, 1998),偏南气流与中纬度偏西气流共同构成强降水期间水汽输送通道,为暴雨区提供充沛的水汽供应(刘晶等, 2019b)。

由于国家降水量级标准不适合干旱、半干旱气候背景的新疆地区,因而本文采用肖开提·多莱特(2005)提出的更适合新疆气候特点的降水量级标准:24 h降水量 R , $0.1 \text{ mm} \leq R < 6.0 \text{ mm}$ 为小雨, $6.1 \text{ mm} \leq R < 12.0 \text{ mm}$ 为中雨, $12.1 \text{ mm} \leq R \leq 24.0 \text{ mm}$ 为大雨, $> 24.0 \text{ mm}$ 为暴雨, $> 48.0 \text{ mm}$ 为大暴雨。2016年8月8日和2018年7月31日,哈密地区出现两次极端暴雨天气事件(以下分别简称“8·8”过程和“7·31”过程),两次暴雨均发生在大陆高压位置异常背景下,中尺度云团在高压外围生成并影响暴雨区,而暴雨落区、雨强各不相同,本文通过计算诊断水汽输送流函数、势函数、水汽输送轨迹和暴雨区水汽收支情况,对两次极端暴雨天气水汽输送和聚集特征进行对比分析,探讨干旱、半干旱地区极端暴雨天气水汽来源、水汽输送特征的异同,弄清在大陆高压位置异常环流背景下,水汽是如何输送和快速聚集在东天山哈密地区,为更好理解该地区极端暴雨天气提供一定参考依据。

1 资料与方法

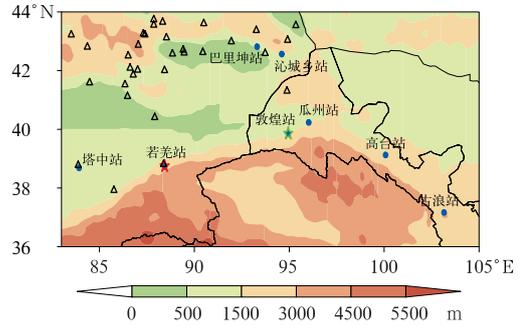
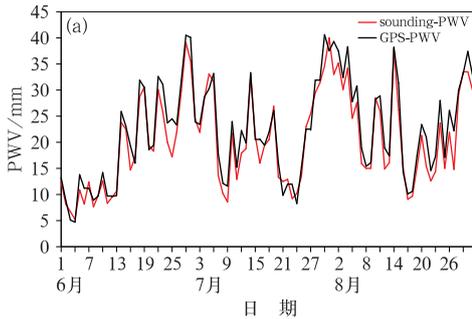
1.1 资料

本研究中使用观测站数据、再分析资料、风云2G卫星产品、三源融合降水产品以及GPS大气可降水量资料。观测站数据选用新疆和甘肃地区8个地基GPS大气可降水量数据、甘肃敦煌和新疆若羌探空站、新疆地区32个国家级气象观测站和81个区域观测站小时降水量数据。降水量采用了中国地面、卫星和雷达三源融合的逐小时降水产品,其空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。

再分析资料用于大尺度环流形势、大尺度水汽输送特征等分析,选取美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)的 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ FNL再分析资料,时间分辨率为6 h,垂直共为31层。选用风云2G逐小时云顶亮温产品用于对流云团演变特征分析。采用新疆及甘肃地区共8个GPS观测站的大气可降水量(GPS-PWV)资料(图1)分析局地

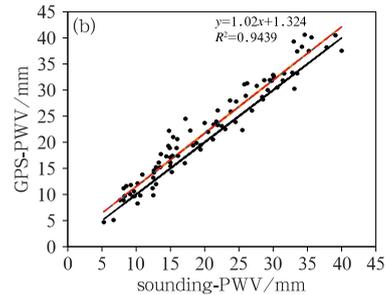
水汽变化与大尺度水汽输送间的关系。

GPS-PWV 与降水过程关系密切,当 GPS-PWV 超过一定阈值后,对应地面会有降水发生(杨晓霞等,2012;刘晶等,2019a;程鹏等,2021)。赵玲等(2010)将探空观测资料计算的大气可降水量(sounding-PWV)和利用 GAMIT 软件处理反演得到 1 h 间隔的 GPS-PWV 进行对比分析,发现两者间的误差在 2 mm 内,说明 GPS-PWV 具有较高的准确性。通过分析甘肃敦煌站(图 2)2018 年 6—8 月 GPS-PWV 与探空站计算的可降水量时间变化,发现两者间相关系数达 0.94。这也证实了 GPS-PWV 数据的可靠性,说明该数据可作为描述水汽变化细节的有效手段,补充常规探空资料在时间和空间密度上的不足。



注:△代表国家级气象观测站,★代表敦煌探空站,★代表若羌探空站,•代表地基 GPS 测站。

图 1 研究区域地面气象观测站、探空站和水汽输送通道地基 GPS 测站分布
Fig. 1 Location of ground meteorological observation stations, sounding stations and the ground-based GPS stations



注:图 b 中,黑线代表 1 : 1 线,红线代表线性回归拟合线。

图 2 2018 年 6—8 月敦煌站 GPS-PWV 和探空计算可降水量 (sounding-PWV) 的(a)时间变化和(b)散点分布

Fig. 2 (a) Time series and (b) scatter plots of GPS-PWV and sounding-PWV at Dunhuang Station from 1 June to 31 August 2018

1.2 方法

1.2.1 水汽收支计算

文中采用水汽收支方程计算暴雨区(面积约为 $1.64 \times 10^{10} \text{ m}^2$)水汽收支情况,水汽收支方程为:

$$P - E_s = -\frac{1}{\sigma g} \int_{p_s}^{p_t} \int_{\sigma} \left(\frac{\partial q}{\partial t} + \nabla \cdot qv + \frac{\partial \omega q}{\partial p} \right) dp d\sigma \quad (1)$$

式中: P 和 E_s 分别为降水量和蒸发量, g 是重力加速度, p_t 取 100 hPa 为顶层气压, p_s 为地面气压,水汽的局地变化 $\partial q/\partial t$ 采用时间中央差求得,垂直运动对水汽的输送 $\partial \omega q/\partial p$ 由直接差分可得,水汽通量辐合项 $\nabla \cdot qv$ 化为线积分计算:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot qv &= \frac{1}{\sigma} \oint v_n q dl \\ &= \frac{1}{\sigma} \left(\sum_{i=1}^m -\overline{v_i q_i} \Delta l_s + \sum_{j=1}^n \overline{u_j q_j} \Delta l_e + \sum_{i=1}^m \overline{v_i q_i} \Delta l_n + \sum_{j=1}^n -\overline{u_j q_j} \Delta l_w \right) \quad (2) \end{aligned}$$

式中:右边四项分别表示水汽从不同边界进入选定区域的值,其中 $v_n q$ 是边界的法向分量, m 和 n 是选取区域沿经向和纬向的格点数, Δl_s 、 Δl_e 、 Δl_n 、 Δl_w 分别是各边界上的格距,“—”表示空间步长的平均值。

1.2.2 HYSPLIT 轨迹追踪方法

利用 HYSPLIT_4 模式系统追踪气团进一步证实两次强降雨过程水汽源地。HYSPLIT 是 NOAA 等机构联合开发的一种可处理不同气象数据输入和

不同物理过程及不同排放源的包含输送、扩散、沉降过程的模式系统,能够对气块来源进行追溯(Makra et al, 2011; Stohl and James, 2004)。在本研究中, HYSPLIT 模式系统使用 NCEP GDAS 资料作为初始场数据,数据时间分辨率为 6 h,水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。

针对“7·31”和“8·8”过程,分别选取哈密东南

地区代表点(暴雨中心哈密沁城乡小堡站, 42.85°N 、 94.71°E ,海拔高度为 1903 m)和哈密北部地区代表点(暴雨中心巴里坤镇大直沟站, 43.57°N 、 93.01°E ,海拔高度为 1934 m)作为模拟初始点,具体模拟参数见表 1。为了更直观地看出各条轨迹路径,采用簇分析法对两次过程轨迹路径进行聚类,具体方法见孙力等(2016)。

表 1 “7·31”和“8·8”过程 HYSPLIT 水汽追踪模式模拟参数表

Table 1 The simulation parameters in HYSPLIT_4 model in the 31 July and the 8 August processes

模拟参数	“7·31”过程	“8·8”过程
模拟区域	哈密东南地区	哈密北部地区
模拟初始位置	42.85°N 、 94.71°E	43.57°N 、 93.01°E
模拟初始高度	3000 m 和 5000 m	3000 m 和 5000 m
模拟初始时间	7月31日08时	8月8日08时
模拟时长	144 h	120 h
模拟方向	后向	后向
轨迹数	25 个	21 个

2 天气过程概况及环流形势分析

2018年7月30—31日,西风带大陆高压位置异常偏北(图3a),同时暴雨区位于200 hPa急流入口区左侧和700 hPa低空东南急流左前方(图3b),暴雨区处于西北风和东南风辐合区。低层水汽强烈辐合,对流云团在低空急流出口区左侧生成,在向东北方向移动过程中不断发展,造成哈密东南部出现短时强降水天气(“7·31”过程)。2016年8月8—9日,500 hPa大陆高压位置异常偏西(图3c),中心位于 95°E 附近,高压西侧偏南气流将青藏高原北部水汽向北输送,与中纬度低槽前西南气流交汇于新疆巴州北部—吐鄯托盆地一线,同时700 hPa巴州北部—吐鄯托盆地—哈密北部一线有明显的风场切变线(图3d),两个中尺度对流云团在巴州北部生成,在沿低层风场切变线向东北方向移动过程中合并发展,造成哈密北部出现短时强降水天气(“8·8”过程)。

两次降水天气过程中哈密地区多站均达到暴雨量级(图4),其中“7·31”过程哈密区域气象观测站共15个站达到暴雨,4个站12 h累计降水量超过48 mm(量级达到大暴雨),降水中心哈密沁城乡小堡站31日00—14时(北京时,下同)14 h累计降水

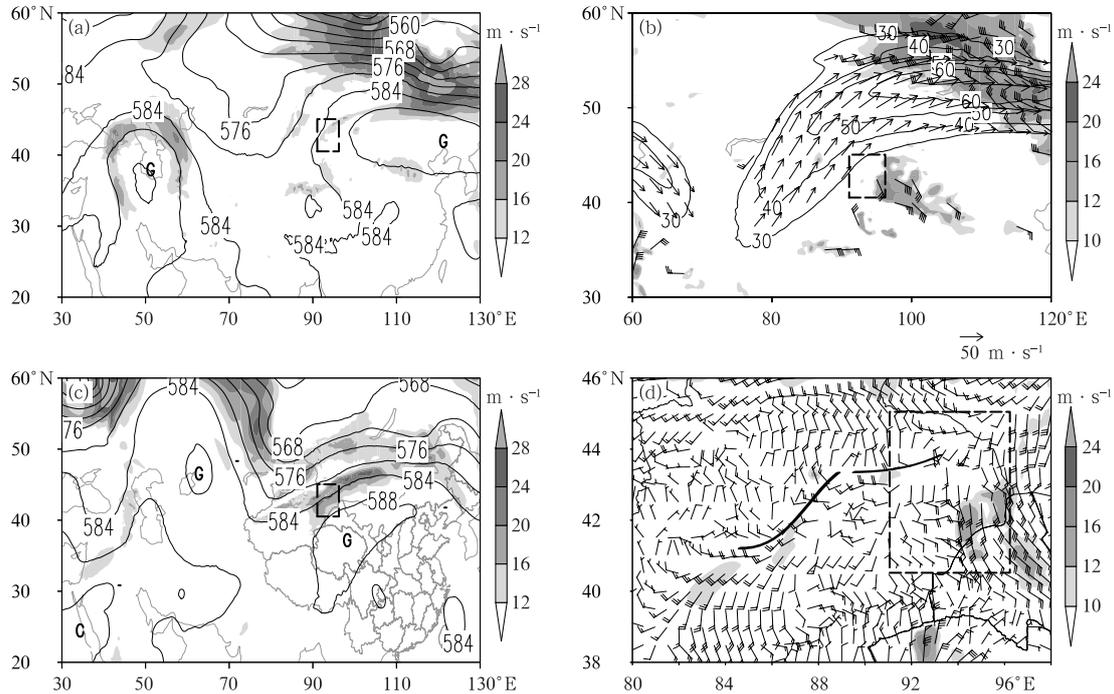
量达到115.5 mm(图4c)。“8·8”过程哈密区域气象观测站共10个站24 h累计降水量超过48 mm(大暴雨),降水中心巴里坤镇大直沟站累计降水量达到41.1 mm(图4d)。两次天气过程均发生在西风带大陆高压位置异常环流背景下,且多站出现大暴雨天气,因而下文将重点分析“7·31”和“8·8”暴雨过程水汽输送和聚集特征等异同。

3 强降水期间水汽输送特征分析

以往的研究表明(杨莲梅,2003;刘晶和杨莲梅,2017),在合适的环流条件下,水汽能够在新疆中亚地区集中,并通过接力输送机制输送至暴雨区。下文通过对比分析暴雨区大气可降水量分布特征、水汽输送特征、水汽收支和 HYSPLIT 水汽追踪结果,针对“7·31”和“8·8”两次降水过程暴雨区水汽接力输送、汇集及水汽源地等分布特征,探讨两次过程水汽输送特征的异同。

3.1 GPS-PWV 分布特征

利用2015—2018年7月和8月8个站GPS-PWV资料计算得出7月PWV平均值(敦煌站为23.31 mm,瓜州站为23.37 mm,古浪站为22.43 mm,高台站为25.86 mm,哈密沁城乡站为19.66 mm),



注:矩形代表哈密地区,G代表大陆高压,粗实线代表低层切变线。

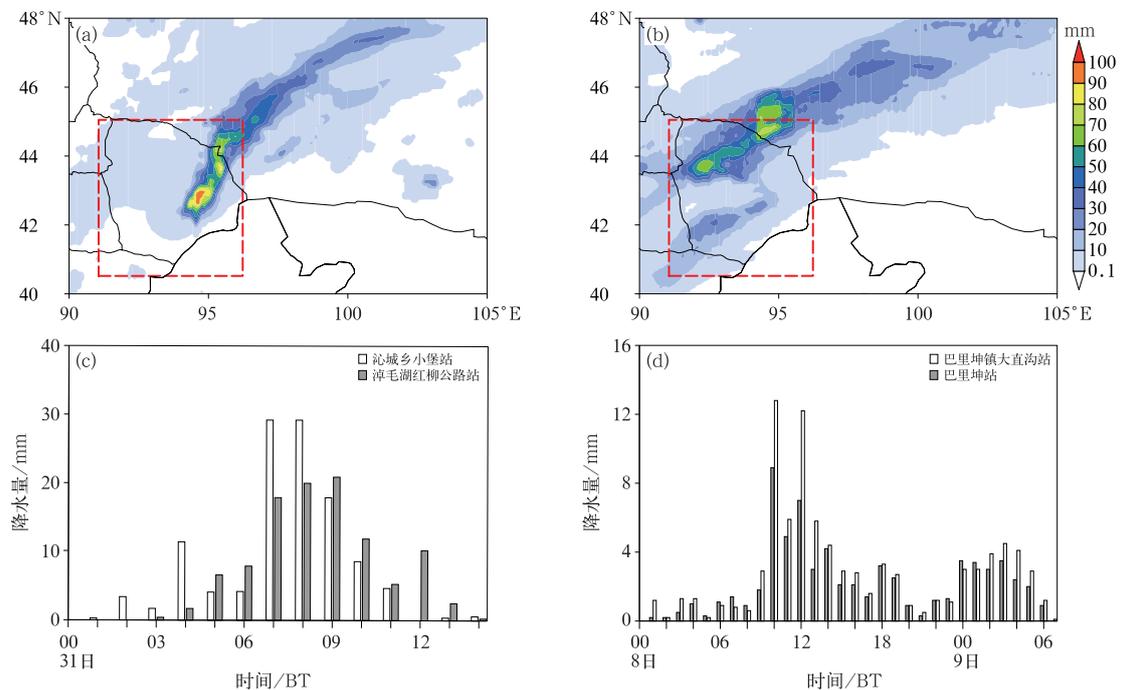
图 3 (a,b)2018 年 7 月 31 日 02 时(a)500 hPa 位势高度场(等值线,单位:dagpm)和
风场(阴影),(b)200 hPa 急流(等值线和风矢,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
和 700 hPa 急流(阴影和风羽)分布;(c,d)2016 年 8 月 8 日 02 时
(c)500 hPa 位势高度场(等值线,单位:dagpm)和风场(阴影),
(d)700 hPa 风场(阴影和风羽)分布

Fig. 3 (a, b) Distribution of (a) the 500 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm) and wind field
(shaded), and (b) 200 hPa jet stream (contour and wind vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
and 700 hPa jet stream (shaded and barb) at 02:00 BT 31 July 2018;
(c, d) distribution of (c) the 500 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm)
and wind field (shaded), and (d) 700 hPa wind field
(shaded and barb) at 02:00 BT 8 August 2016

8 月 PWV 平均值(敦煌站为 23.31 mm,若羌站为 25.8 mm,塔中站为 24.3 mm)。通过分析暴雨区与河西走廊测站 PWV 月距平变化特征发现,两次暴雨天气均与水汽接力输送密切相关。

“7·31”过程降水前(28 日 20 时至 30 日 14 时),受高压南侧偏东气流影响,河西走廊自东南向西北出现一次缓慢增湿过程,东南部(图 5a)古浪站和高台站 PWV 月距平值(Δ PWV)为 5~10 mm,西北部(图 5b)敦煌站和瓜州站 Δ PWV 增幅异常明显,由 5 mm 增至 20 mm,同时暴雨区受 500 hPa 中纬度低槽(28—29 日)和高压南部偏东气流(30 日)先后影响,沁城乡站 PWV 也出现缓慢增长。30 日 14—20 时河西走廊和暴雨区 GPS 测站出现一次快

速增长过程,古浪站和高台站先后在 17 时和 20 时达到峰值,其中古浪站 14—17 时 Δ PWV 3 h 增幅达 7 mm,敦煌站和瓜州站 Δ PWV 分别在 22 时和 23 时达到峰值,哈密沁城乡站 14—20 时 Δ PWV 由 12 mm 快速增长至 17 mm,河西走廊至暴雨区自东南向西北先后增湿,可能与低空偏东水汽输送通道有关。31 日 02 时,河西走廊低空东南急流迅速增强,700 hPa 最大风速达 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,低纬度地区暖湿气流经河西走廊后,进一步输送聚集在哈密地区,造成测站 02—08 时 PWV 6 h 增幅 5.41 mm(图 5c),PWV 峰值(08 时,49.7 mm)是 7 月 PWV 平均值的 2 倍多,降水前暴雨测站 PWV 持续增长和一次急剧增加过程,为局地强降水提供了充沛的



注:红色矩形为哈密地区。

图 4 (a)2018 年 7 月 31 日 02—14 时和(b)2016 年 8 月 8 日 01 时至 9 日 08 时降水分布,
(c)“7·31”和(d)“8·8”过程暴雨中心站逐小时降水演变

Fig. 4 (a, b) Distribution of precipitation (a) from 02:00 BT to 14:00 BT 31 July 2018 and
(b) from 01:00 BT 8 to 08:00 BT 9 August 2016, and (c, d) hourly precipitation
variation in rainstorm stations during (c) the 31 July and (d) the 8 August processes

水汽。这也说明大尺度水汽输送、局地 PWV 变化与测站降水有较好的对应关系,同时也能反映出本次降水过程偏东水汽输送的情况。

“8·8”过程降水期间,受 500 hPa 大陆高压外围水汽输送影响,8 月 4 日 08 时至 5 日 20 时(图 6a),新疆巴州南部塔中站和若羌站出现一次持续增湿过程,塔中站 Δ PWV 增幅异常明显(由 1 mm 波动增长至 15 mm),若羌站 Δ PWV 由 6.8 mm 波动增长至 15.1 mm。来自高原北部的水汽沿高压外围偏南气流向北输送,经巴州南部接力输送至哈密北部地区,5 日 02—21 时巴里坤站 PWV 由 17.3 mm 持续增至 32.3 mm(图 6c)。6 日 02 时受高压外围水汽输送持续影响,巴州南部塔中站和若羌站 Δ PWV 持续增长,同时 700 hPa 哈密东北侧高压底部偏东气流将河西走廊一线水汽向西输送至甘肃西北部—哈密北部地区,在对流层中层高压外围西南气流和对流层低层偏东气流共同影响下,甘肃西北部敦煌站和巴里坤站 PWV 均出现波动增长过程,

其中巴里坤站 PWV 6 日 04—14 时期间 10 h 增幅达 10.9 mm,对应测站出现少量降水,此后巴里坤站 PWV 稳定维持在一高值附近(34.3~38.0 mm)。随着中纬度低槽缓慢东移,7 日 20 时槽前西南气流与高压外围西南气流汇集于哈密北部地区,来自高原北部的水汽与中纬度低槽携带的水汽快速聚集在哈密北部上空,巴里坤站 PWV 从 7 日 20 时至 8 日 02 时出现缓慢波动增长过程(图 6c),并达到峰值 40 mm,是 8 月 PWV 平均值的 2 倍多,对应测站 8 日 00 时开始出现强降水天气。降水前巴里坤站 PWV 出现三次增湿过程,持续的水汽补充使得巴里坤站 GPS-PWV 稳定在高值附近。

3.2 两次暴雨过程的水汽输送特征

通过地基 GPS-PWV 演变特征分析发现,两次过程均存在水汽接力输送过程,暴雨区水汽均存在 2~3 次波动增湿过程,为证实充沛的水汽是如何输送至暴雨区,下文通过对比分析两次过程水汽输送

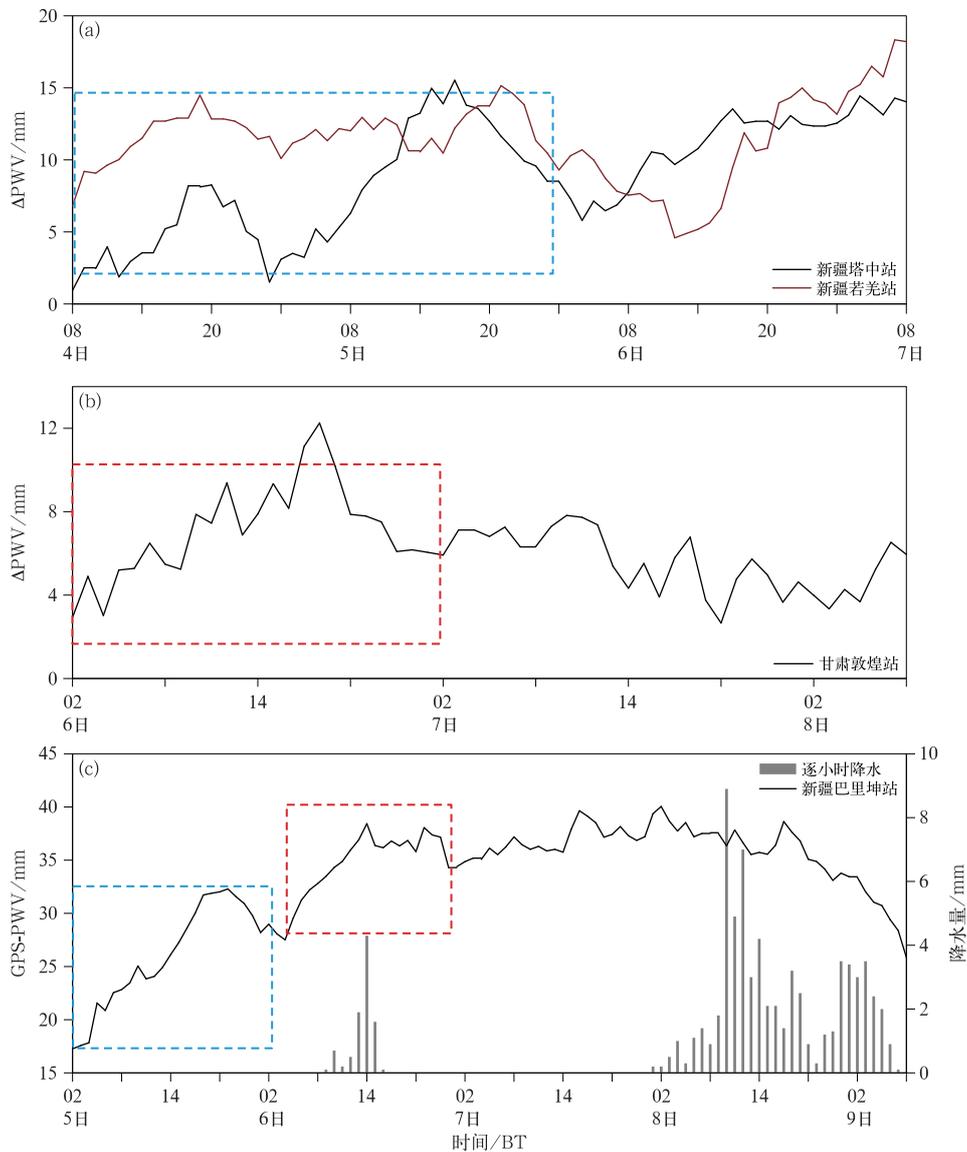


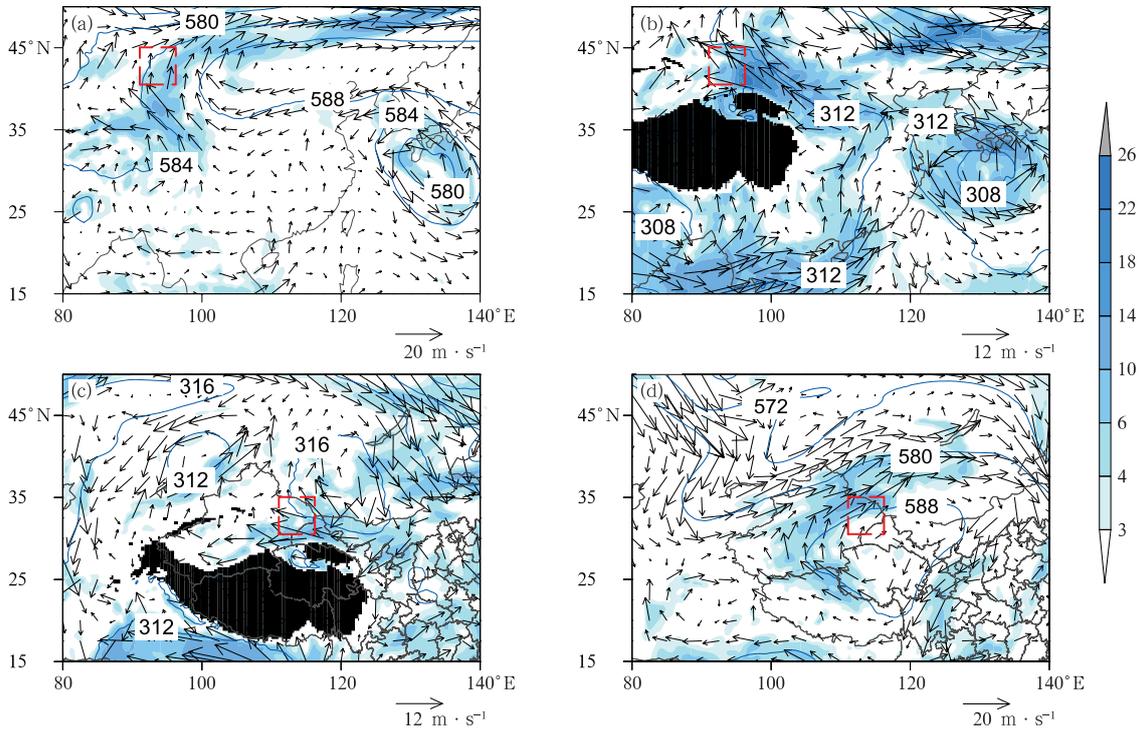
图 6 2016 年 8 月 (a)4—7 日新疆巴州南部 2 个站, (b)6—8 日甘肃敦煌站 Δ PWV 演变, (c)5—9 日新疆哈密巴里坤站 GPS-PWV 和逐小时降水量演变

Fig. 6 Evolution of GPS-PWV at (a) two stations located in the southern Bazhou Area and (b) Dunhuang Station from 4 to 8 August, and (c) evolution of GPS-PWV and precipitation in Balikun Station from 5 to 9 August 2016

充沛的水汽在合适的动力、热力条件下快速聚集,水汽通量大值区附近多个对流云团生成、合并和发展,造成哈密东南部极端强降水天气。

“8·8”过程强降水前(8月4日08时至5日20时,图略),大陆高压位置异常偏西,并由带状断裂成块状分布,受高压外围偏南气流影响,高原北部水汽经巴州南部向哈密北部输送,造成塔中站、若羌站和哈密巴里坤 GPS-PWV 先后出现增湿过程,若羌探空站 700 hPa 比湿达 $7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图略)。6日02时(图 7c),700 hPa 哈密东北侧高压中心强度增

至 316 dagpm ,甘肃西北部—哈密北部均受高压底部偏东气流控制,内蒙古中部地区水汽经偏东气流输送至甘肃西北部—哈密北部地区,造成甘肃西北部最大水汽通量达 $10 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。随着 700 hPa 高压中心向南移动,高压西侧东南气流与 500 hPa 高压外围西南气流交汇于哈密北部地区,造成暴雨区再次出现快速增湿过程。7日08时(图 7d),500 hPa 低槽移速缓慢,槽前西南气流与高压外围西南气流交汇,两支气流合并为暴雨区带来充沛的水汽,巴州北部—哈密北部最大水汽通量达



注:红色矩形代表哈密地区,黑色阴影为海拔高度超过 3000 m 地形。

图 7 位势高度场(等值线,单位:dagpm)、水汽通量(填色,单位: $g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$)和风场(风矢)分布

(a)2018 年 7 月 30 日 02 时 500 hPa,(b)2018 年 7 月 31 日 02 时 700 hPa,
(c)2016 年 8 月 6 日 02 时 700 hPa,(d)2016 年 8 月 7 日 08 时 500 hPa

Fig. 7 Distribution of geopotential height (contour, unit: dagpm), water vapor flux (colored, unit: $g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$) and wind field (wind vector) at (a) 500 hPa, 02:00 BT 30 and (b) 700 hPa, 02:00 BT 31 July 2018, (c) 700 hPa, 02:00 BT 6 and (d) 500 hPa, 08:00 BT 7 August 2016

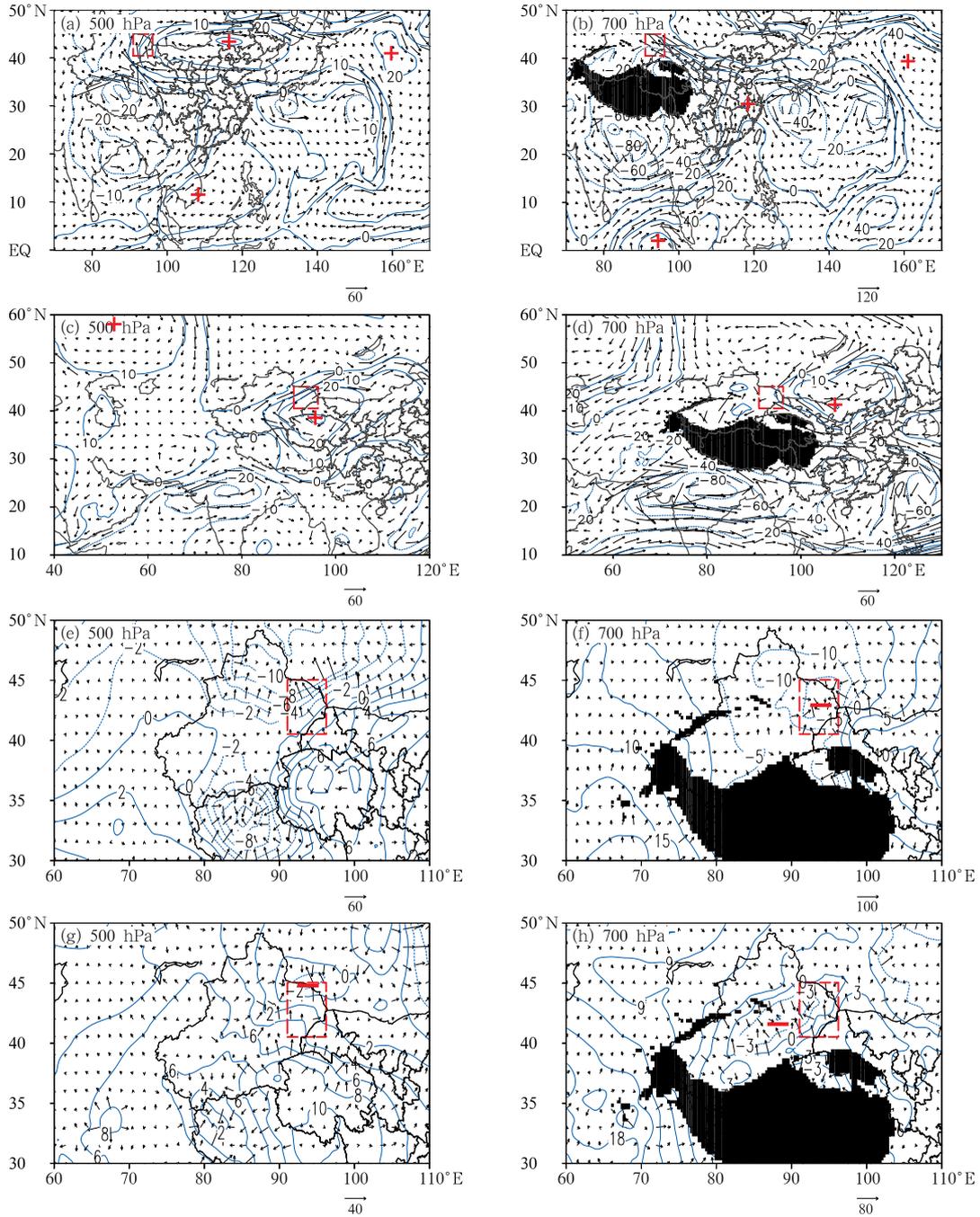
$10 g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$ 。同时 700 hPa 高压西侧偏南气流经河西走廊向暴雨区接力输送(图略),充沛水汽进一步向暴雨区补充,哈密北部巴里坤站 GPS-PWV 稳定维持较高值附近。

通过求解泊松方程(丁一汇,1989)计算和分析哈密地区两次暴雨过程水汽流函数、势函数分布发现,两次暴雨天气过程水汽输送通道各有不同。“7·31”过程中,700 hPa 与 500 hPa 来自低纬度中国南海的水汽补充到大陆高压南侧偏东气流中,两支水汽在河西走廊南侧交汇继续向西北方向输送(图 8a,8b),暴雨区附近对流层低层出现强的水汽辐合中心(图 8e,8f),其中对流层低层水汽通量的非辐散分量是中层的 2 倍。南海水汽与大陆高压外侧水汽在河西走廊交汇加强,共同构成对流层中低层偏东水汽接力输送通道。强降水发生期间水汽源自中国南海和河西走廊一线(即西风带大陆高压南

侧),水汽在暴雨区快速聚集汇合造成强降水天气,一定程度上说明副热带地区暖湿气流能够影响到干旱、半干旱内陆地区。

“8·8”过程降水期间,500 hPa 来自青海—青藏高原北部的的水汽沿大陆高压外围偏南气流向东北方向输送,与中纬度低槽前偏南气流交汇于巴州北部—哈密北部(图 8c),水汽经河西走廊向暴雨区输送,同时 700 hPa 河西走廊的水汽进一步向哈密地区补充(图 8d),造成巴州北部—哈密北部均处于水汽的辐合区(图 8g,8h),并伴有中心强度为 $-3 \times 10^6 kg \cdot s^{-1}$ 的强水汽辐合中心(图 8h)。对流层中层高原北部水汽经大陆高压外侧向北输送,与中纬度低槽前偏南气流交汇,同时对流层低层存在偏东水汽输送,共同构成“8·8”过程对流层中低层偏东水汽接力输送通道。

综合上述分析发现,“7·31”过程降水前河西走



注: 红色矩形为哈密地区, 图 a~d 中“+”表示水汽流函数大值区, 图 e~f 中“-”表示水汽势函数大值区, 黑色阴影为海拔高度超过 3000 m 的地形。

图 8 (a~d) 水汽流函数(等值线, 单位: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)及其非辐散分量(箭矢, 单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), (e~h) 水汽势函数(等值线, 单位: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)及其辐散分量(箭矢, 单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)分布
(a, b, e, f) 2018 年 7 月 31 日 02 时, (c, d, g, h) 2016 年 8 月 8 日 02 时

Fig. 8 Distribution of (a~d) stream function (contour, unit: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$) and its non-divergent component (vector, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), and (e~h) potential function (contour, unit: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$) and its divergent component (vector, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) of water vapor transport
(a, b, e, f) 02:00 BT 31 July 2018, (c, d, g, h) 02:00 BT 8 August 2016

廊和暴雨区出现持续异常增湿过程,河西走廊受大陆高压南侧偏东气流影响早,测站自东南向西北 Δ PWV 先后达到峰值。PWV 持续增湿过程与 700 hPa 高压南侧偏东气流和南支槽前偏南气流的汇合有较好对应关系,进一步说明本次强降水过程存在强盛的偏东水汽接力输送,也反映出副热带洋面水汽在一定环流形势下能够影响到干旱、半干旱的新疆东部地区。而“8·8”过程强降水发生前和降水期间暴雨区先后受对流层中层大陆高压外围偏南气流、对流层低层偏东气流和对流层中层低槽前西南气流影响,使得暴雨区 PWV 出现三次增湿过程,相较“7·31”降水过程,“8·8”过程降水前 2~3 d PWV 增湿明显,降水前 1 d PWV 稳定在一较高值附近并缓慢波动增长,而“7·31”过程哈密东南部强降水前 2~3 d 测站 PWV 增长缓慢,降水前 1 d PWV 出现迅速增长过程,两次降水过程水汽输送特征差异明显。

3.3 水汽收支分析

除了充沛的水汽供应和输送外,暴雨的产生离不开水汽的局地聚集。为进一步对水汽局地聚集和变化特征进行分析,下文计算了两次降水过程期间哈密地区(40.5°~45°N,94°~97°E)的水汽收支情况。通过分析发现,“7·31”过程降水前和降水期间(7月28—31日,图9a~9d),暴雨区纬向水汽主要由对流层低层东边界流入,经向水汽主要由对流层低层南边界流入。随着低空东南急流建立,来自河西走廊的充沛水汽被输送至暴雨区上空,31日02时—08时水汽流入集中在800~600 hPa,其中700 hPa东边界和南边界最强水汽流入分别达 $5 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $6 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。“8·8”过程降水前和降水期间(图9e~9h),低槽前西南气流与高压外围偏西气流交汇,造成暴雨区对流层中层西边界水汽流入迅速增大(图9e),受对流层低层哈密东北侧高压底部东南气流影响,8月6日20时至8日08时700 hPa东边界和南边界水汽流入逐渐增大,随着高压逐渐向南移动,8日02时暴雨区上空偏南气流迅速增大,南边界水汽流入达 $4.5 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图9g)。

从图10可以看出两次降水过程暴雨区水汽收支主要由垂直输送和散度项决定,水汽的局地变化很小,可以忽略。降水期间水汽散度项存在明显变化,“7·31”过程降水水汽主要集中在900~600 hPa(图10a,10b),其中700 hPa东边界和南边界最大

水汽流入分别达 $5.5 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $6.0 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图10c,10d),对流层低层充沛的水汽输送至600 hPa以上,对应850~650 hPa存在明显的水汽垂直输送。而“8·8”过程降水前和降水期间整层大气均存在水汽流入,其中水汽最大流入集中在850~700 hPa(图10e,10f),降水前500 hPa西边界和降水期间700 hPa南边界最大水汽流入分别为 $3.0 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $4.5 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图10g,10h)。

3.4 HYSPLIT 水汽追踪

通过分析两次东天山暴雨天气水汽源地发现,河西走廊水汽输送均对两次暴雨天气过程具有贡献,而其他水汽源地略有不同。

“7·31”过程降水期间暴雨区上空3000 m高度水汽主要源自哈萨克斯坦南部(轨迹1)、南疆西部山区(轨迹2)、西西伯利亚平原(轨迹3)、塔里木盆地(轨迹4)和中国南海(轨迹5),分别占3000 m高度水汽输送总量的28%、32%、12%、16%和12%。轨迹1和轨迹2,来自哈萨克斯坦南部和南疆西部山区的水汽沿中纬度低槽前偏南气流向北输送,翻越天山大地形后进入暴雨区上空,最大比湿由 $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增至 $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图11c)。此外低空南海水汽(轨迹5占3000 m水汽输送总量12%)向北输送,经河西走廊地区后进入暴雨区,气团最大比湿达 $9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图11e)。“7·31”过程降水期间,暴雨区上空5000 m高度水汽主要源自塔吉克斯坦(轨迹1)和广东沿海地区(轨迹2)(图11b),分别占5000 m高度水汽输送总量的72%和28%。轨迹1,气团自塔吉克斯坦2500 m高度沿中纬度低槽前偏南气流翻越昆仑山和天山后,气团高度增至5000 m附近(图11d),比湿维持在 $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。轨迹2,气团自副热带地区向北经河西走廊进入暴雨区,气团比湿增至 $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图12f)。

来自副热带地区暖湿气团汇集于河西走廊接力输送区,在低空偏东急流输送下再次向西输送至暴雨区,对流层中低层偏东水汽接力输送通道的建立为暴雨区输送充沛的洋面水汽,暖湿不稳定能量在暴雨区有效释放对暴雨的发生具有不可忽视的作用(Akiyo and Yasunari, 1998),造成暴雨区出现强降水,这与前文分析结果较为一致。

“8·8”过程暴雨期间3000 m高度水汽源自青

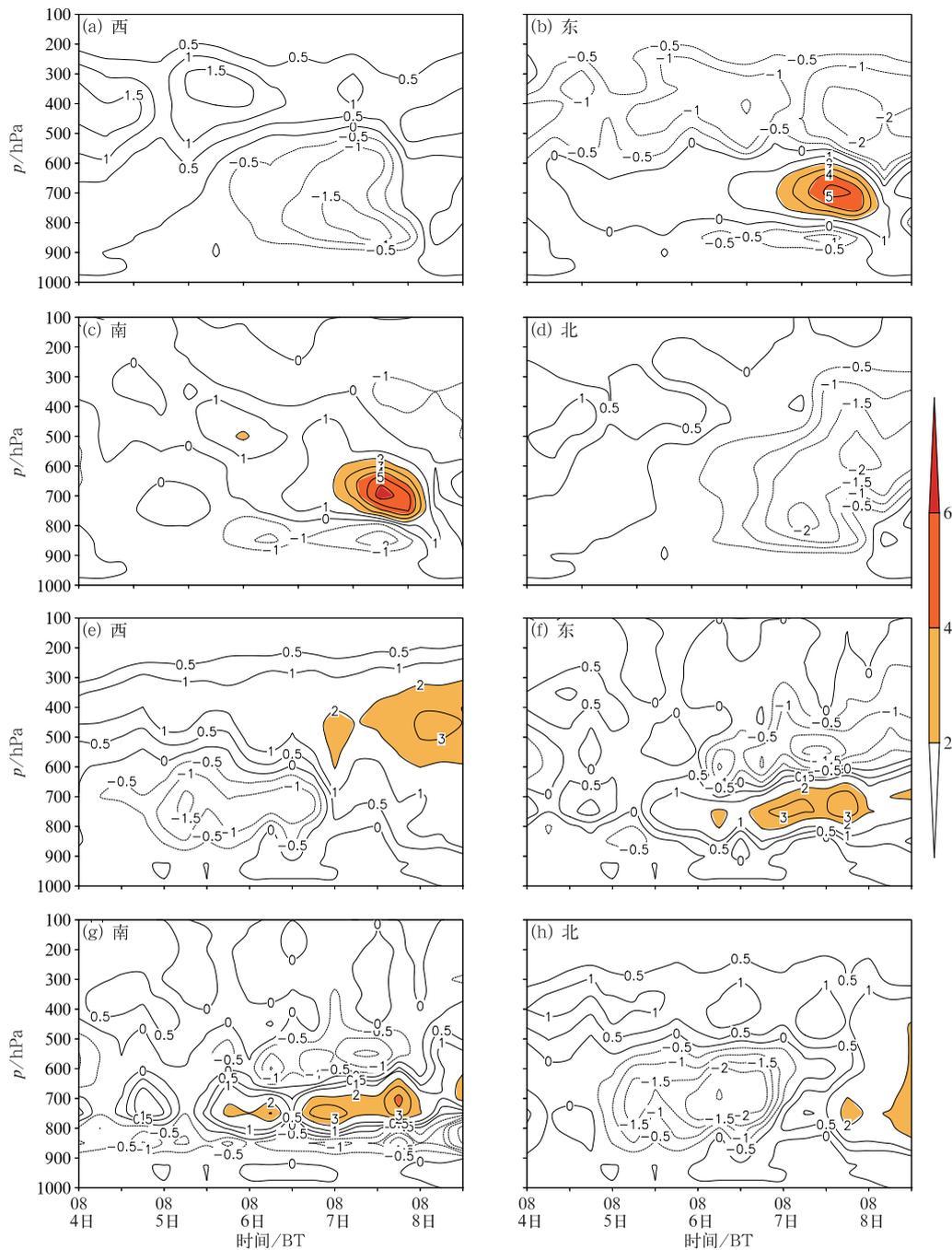
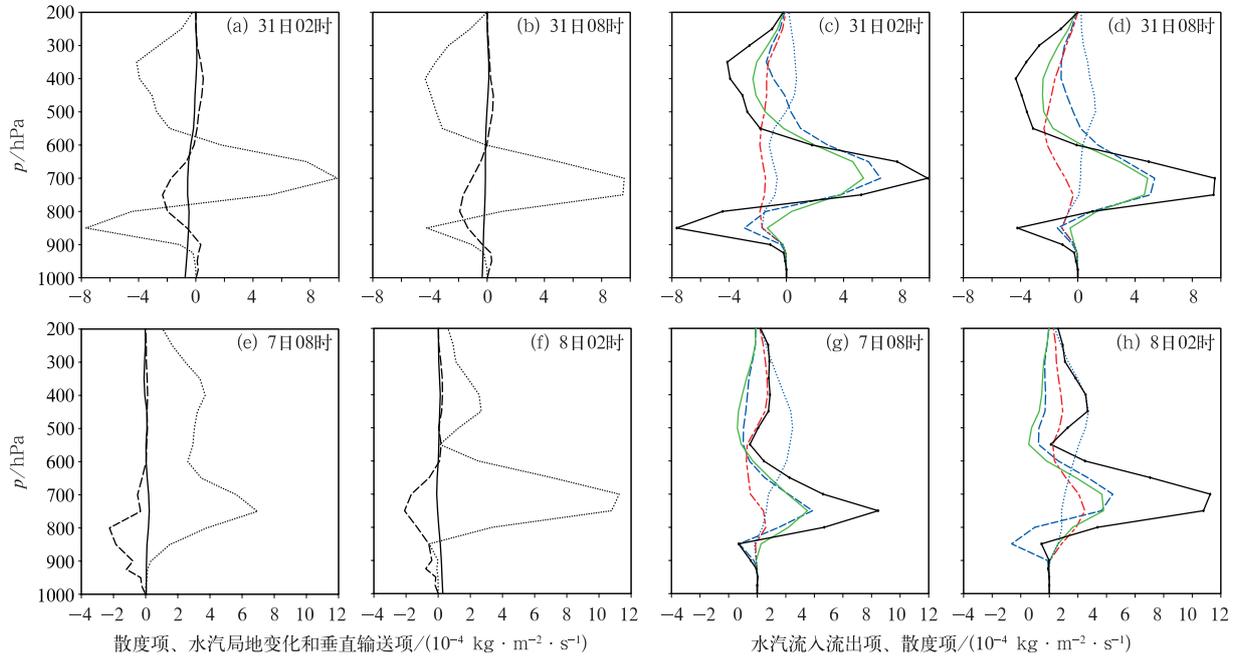


图 9 (a~d)“7·31”和(e~h)“8·8”过程暴雨区(a,e)西,(b,f)东,(c,g)南,(d,h)北边界水汽流入(等值线和填色,单位: $10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)的时间变化

Fig. 9 Water vapor inflows (contour and colored, unit: $10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) from (a, e) west, (b, f) east, (c, g) south and (d, h) north into the Hami Area through horizontal advection during (a~d) the 31 July and (e~h) the 8 August processes

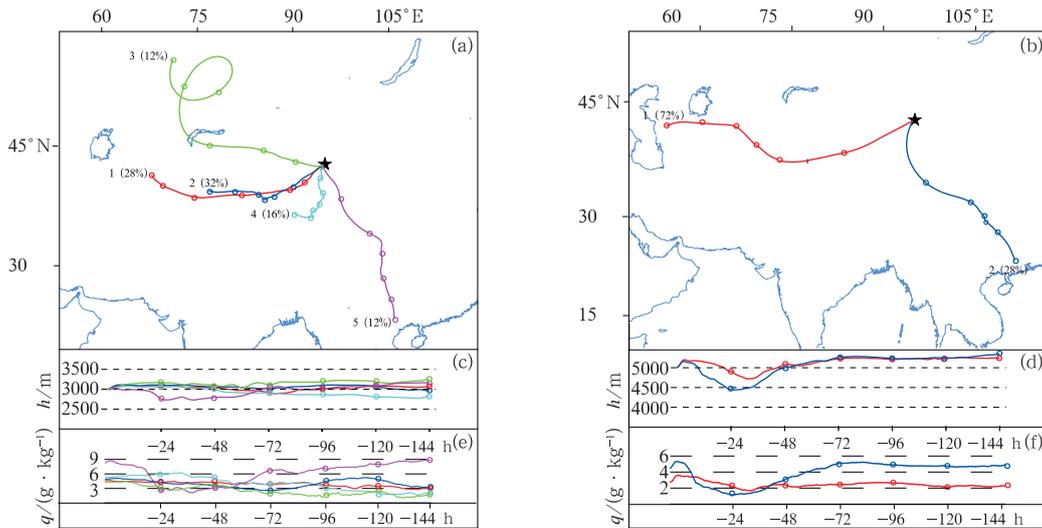
藏高原东部(轨迹 1)、河西走廊(轨迹 2)、新疆巴州东部(轨迹 3)和内蒙古中部(轨迹 4),分别占 3000 m 高度水汽输送总量的 14%、52%、24% 和 10% (图 12a,12c),其中:轨迹 1 和轨迹 2,来自高原东部和河西走廊的气块沿河西走廊偏东气流进入暴雨

区,最大气块比湿达 $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 12e);轨迹 3,气块自新疆巴州南部沿大陆高压西侧偏南气流向暴雨区输送,最大比湿由 $4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增至 $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。“8·8”降水期间暴雨区上空 5000 m 高度水汽源自偏西、偏东和偏南路径(图 12b),其中:轨迹 1,来自蒙古、河西



注:图 a,b,e,f 中点线为散度项,实线为水汽局地变化,虚线为水汽垂直输送项;图 c,d,g,h 中紫色点线、绿色实线、蓝色虚线和红色虚线分别代表西、东、南和北边界水汽流入流出项,黑色实线代表水汽散度项。

图 10 (a~d)“7·31”和(e~h)“8·8”过程暴雨区降水期间(a,b,e,f)水汽收支和(c,d,g,h)散度项分布
Fig. 10 Distribution of (a, b, e, f) water vapor budget and (c, d, g, h) divergent term in Hami Area during (a~d) the 31 July and (e~h) the 8 August processes

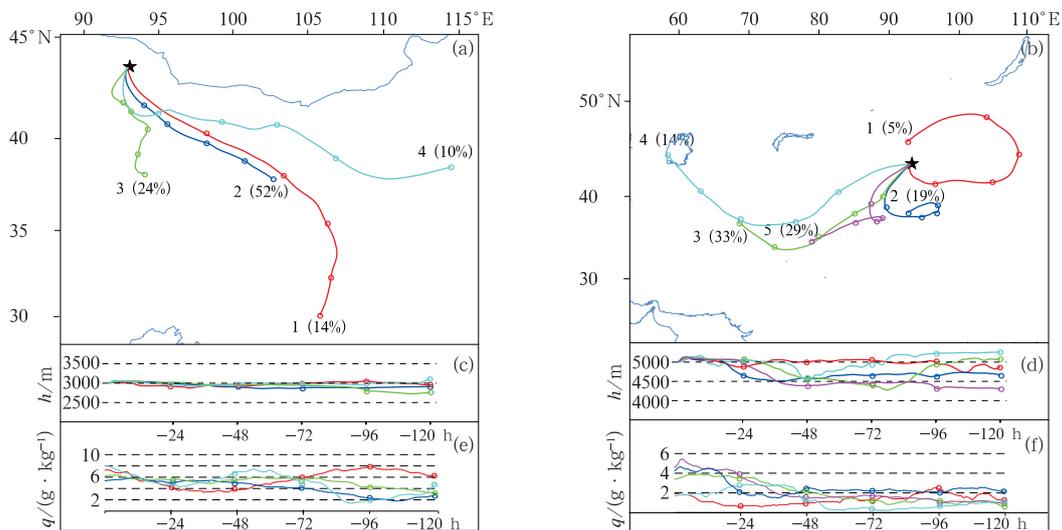


注:★代表暴雨中心哈密沁城乡小堡站。

图 11 “7·31”过程暴雨区上空(a,c,e)3000 m 和(b,d,f)5000 m 水汽输送通道的
(a,b)空间分布,(c,d)高度和(e,f)比湿变化
Fig. 11 (a, b) Spatial distribution, and changes in (c, d) height and
(e, f) specific humidity of the water vapor transport channel
at (a, c, e) 3000 m and (b, d, f) 5000 m in the Hami Area during the 31 July process

走廊的水汽沿高压底部偏东气流进入哈密地区;轨迹 2 和轨迹 5,源自昆仑山北坡 4500 m 高度的气块

向北输送至暴雨区,在翻越天山过程中比湿由 $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增至 $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,气团高度爬升至 5000 m 附近



注:★代表巴里坤镇大直沟站。

图12 “8·8”过程暴雨区上空(a,c,e)3000 m和(b,d,f)5000 m水汽输送通道的
(a,b)空间分布,(c,d)高度和(e,f)比湿变化

Fig. 12 (a, b) Spatial distribution, and changes in (c, d) height and
(e, f) specific humidity of the water vapor transport channel

at (a, c, e) 3000 m and (b, d, f) 5000 m in the Hami Area during the 8 August process

(图12d);轨迹3和轨迹4,来自中亚地区5000 m高度气团经帕米尔高原、天山山脉爬升后进入暴雨区,比湿增至 $4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图12f)。上述结果进一步证实了对流层中层中纬度低槽西南气流、大陆高压西侧偏南气流和对流层低层偏东气流对暴雨区水汽输送的影响。来自青藏高原东侧和北侧水汽沿高压外围偏南气流向北输送至暴雨区,与中纬度西南气流汇集于哈密北部,同时对流层低层水汽沿低层偏东气流进一步补充,造成哈密北部暴雨天气,这与前文分析结果较为一致。

4 结论与展望

通过分析“7·31”和“8·8”两次哈密地区暴雨天气过程的水汽输送特征,给出了两次强降水过程水汽输送、源地的异同点,得出以下结论:

(1)两次暴雨天气过程均发生在西风带大陆性高压位置异常情况下,“7·31”过程强降水期间,500 hPa 大陆高压位置异常偏北,700 hPa 高压南侧偏东急流稳定维持,较低纬度充沛水汽经河西走廊后继续向暴雨区输送。“8·8”过程强降水期间,500 hPa 大陆高压位置异常偏西,高原北部水汽沿高压外围西南气流向北输送,与中纬度低槽前西南

气流交汇,为暴雨区提供充沛的水汽条件。

(2)两次暴雨天气过程降水前和降水期间均存在三个阶段水汽输送过程(图13),其中“7·31”过程降水前分别受500 hPa 中纬度低槽前偏南气流、700 hPa 南支槽前偏南气流与大陆高压南侧偏东气流影响,甘肃地区及哈密东南部暴雨区自东南向西北出现先后增湿,强降水期间河西走廊低空偏东急流迅速增强,低纬度水汽经河西走廊再次补充到暴雨区上空。“8·8”过程降水前先后受高压外围偏南气流、河西走廊低空急流影响,高原北部水汽输送造成巴州南部—哈密北部出现增湿过程;对流层低层水汽补充造成哈密北部再次剧烈增湿;强降水期间,中纬度低槽前西南气流与大陆高压顶部偏西气流汇集,同时受对流层低层高压西侧东南气流影响,哈密北部测站 PWV 再次出现波动增湿过程。

(3)河西走廊水汽输送均对两次暴雨天气过程有贡献,除此之外,两次暴雨天气过程其他水汽源地略有不同,“7·31”暴雨天气过程水汽源地主要在南海、大陆高压南侧及河西走廊地区,低纬度洋面水汽经河西走廊向暴雨区输送,造成对流层低层哈密地区东边界和南边界出现水汽流入大值区,水汽在暴雨区快速聚集从而产生强降水天气。而“8·8”暴雨天气过程水汽主要源自对流层低层高原东部和河西

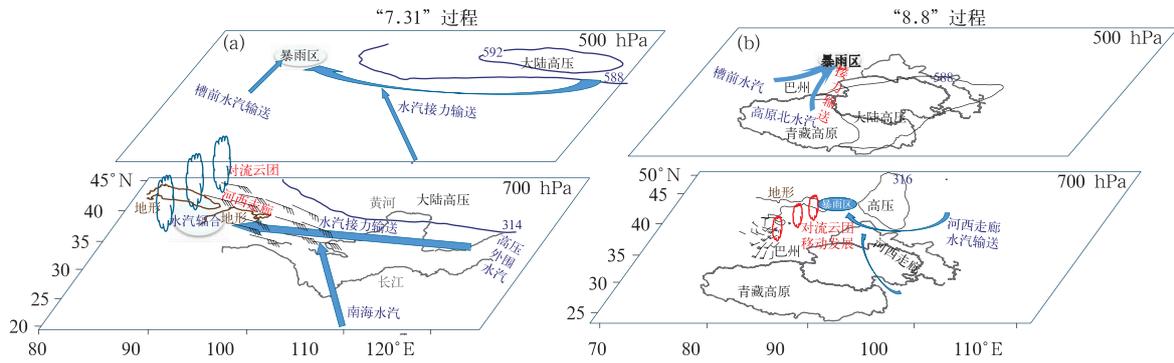


图 13 (a)“7·31”和(b)“8·8”过程暴雨水汽输送概念模型

Fig. 13 Conceptual model of water vapor transport and aggregation during (a) the 31 July and (b) the 8 August processes

走廊、对流层中层青藏高原北部和中纬度低槽自身携带的水汽,来自青藏高原北侧水汽沿大陆高压外围偏南气流向北输送至暴雨区,与中纬度西南气流汇集于哈密北部,造成哈密地区对流层低层东边界和南边界、对流层中层西边界出现水汽流入大值区,为哈密北部短时强降水天气提供充沛的水汽供应。

作为国家“丝绸之路经济带”重要节点城市,近年来哈密地区暴雨天气逐渐引起各方关注。同样在西风带大陆高压位置异常情况下,暴雨区落区、强度却有所不同,造成强降水的水汽源地、水汽输送特征差异较大,因而本文通过计算分析水汽输送流函数、势函数、暴雨区水汽收支、GPS-PWV 演变特征等,结合 HYSPLIT 轨迹模式,给出了大陆高压位置异常情况下哈密地区两次极端强降水天气水汽输送特征、水汽源地的异同特征,研究结果有助于增强对干旱、半干旱区暴雨形成的认识、提高哈密地区降水预报准确率。但研究工作仅针对了两次天气过程,样本量少,且水汽追踪利用 HYSPLIT 轨迹模式,其结果易受数据分辨率影响。今后,将针对干旱、半干旱区暴雨事件,加大研究样本,应用 WRF 数值模式深入探讨干旱区短时强降水水汽输送和聚集机理研究。此外,预报员在业务实践中也可重点关注河西走廊水汽输送和大陆高压异常对于局地降水的影响,同时结合多源气象探测数据,使哈密地区夏季暴雨定时、定量预报能够得到实质性的进展。

参考文献

陈峰,尚华明,袁玉江,2016. 新疆东部雪岭云杉与胡杨树轮记录的干湿变化对比分析[J]. 沙漠与绿洲气象,10(1):34-40. Chen F, Shang H M, Yuan Y J, 2016. Comparative analysis between tree ring-based drought records from the mountains and plains of the

arid zone; a case study in eastern Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 10(1): 34-40 (in Chinese).

陈红专,叶成志,陈静静,等,2019. 2017年盛夏湖南持续性暴雨过程的水汽输送和收支特征分析[J]. 气象,45(9):1213-1226. Chen H Z, Ye C Z, Chen J J, et al, 2019. Analysis of water vapor transport and budget during persistent heavy rainfall over Hunan Province in June 2017[J]. Meteor Mon, 45(9): 1213-1226 (in Chinese).

程鹏,罗汉,刘琴,等,2021. 基于地基 GPS 的祁连山大气可降水量特征[J]. 气象,47(9):1135-1145. Cheng P, Luo H, Liu Q, et al, 2021. Characteristics of precipitable water vapor in Qilian Mountains based on ground-based GPS data[J]. Meteor Mon, 47(9): 1135-1145 (in Chinese).

戴新刚,任宜勇,陈洪武,2007. 近 50 年新疆温度降水配置演变及其尺度特征[J]. 气象学报,65(6):1003-1010. Dai X G, Ren Y Y, Chen H W, 2007. Multi-Scale feature of climate and climate shift in Xinjiang over the past 50 years[J]. Acta Meteor Sin, 65(6): 1003-1010 (in Chinese).

丁一汇,1989. 天气动力学中的诊断分析方法[M]. 北京:科学出版社:293. Ding Y H, 1989. The Dynamic Analysis Method of Diagnosis[M]. Beijing: Science Press: 293 (in Chinese).

黄建平,冉津江,季明霞,2014. 中国干旱半干旱区洪涝灾害的初步分析[J]. 气象学报,72(6):1096-1107. Huang J P, Ran J J, Ji M X, 2014. Preliminary analysis of the flood disaster over the arid and semi-arid regions in China[J]. Acta Meteor Sin, 72(6): 1096-1107 (in Chinese).

黄艳,俞小鼎,陈天宇,等,2018. 新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 Y, Yu X D, Chen T Y, et al, 2018. Analysis of conceptual models and ambient parameter of short time severe rainfall in South Xinjiang[J]. Meteor Mon, 44(8): 1033-1041 (in Chinese).

江志红,梁卓然,刘征宇,等,2011. 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,35(2):361-372. Jiang Z H, Liang Z R, Liu Z Y, et al, 2011. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Huaihe River Basin in 2007[J]. Chin J Atmos Sci, 35(2): 361-372 (in

- Chinese).
- 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]. Meteor Mon, 47(4):412-423(in Chinese).
- 李超,崔春光,徐慧燕,等,2022.河南“21·7”特大暴雨水汽输送、收支和转化特征对局地强降水的影响机制研究[J].气象,48(12):1497-1511. Li C, Cui C G, Xu H Y, et al, 2022. Characteristics associated with the transport, budget, conversion of water vapor and their impact on localized precipitation during the Henan severe torrential rain event on 20 July 2021[J]. Meteor Mon, 48(12):1497-1511(in Chinese).
- 刘晶,杨莲梅,2017.一次中亚低涡造成的天山北坡暴雨 GPS 大气水汽总量演变特征[J].气象,43(6):724-734. Liu J, Yang L M, 2017. Development features of GPS atmospheric precipitable water vapor in heavy rainfall caused by central asia vortex on the north slope of Tianshan Mountain[J]. Meteor Mon, 43(6):724-734(in Chinese).
- 刘晶,周雅蔓,杨莲梅,等,2019a.2016年伊犁河谷大气可降水量变化特征及其与降水的关系[J].干旱气象,37(4):565-576. Liu J, Zhou Y M, Yang L M, et al, 2019a. Temporal variation characteristics of precipitable water vapor based on GPS data and its relation with precipitation at Yili River Valley in 2016[J]. J Arid Meteor, 37(4):565-576(in Chinese).
- 刘晶,周玉淑,杨莲梅,等,2019b.伊犁河谷一次极端强降水事件水汽特征分析[J].大气科学,43(5):959-974. Liu J, Zhou Y S, Yang L M, et al, 2019b. A diagnostic study of water vapor during an extreme precipitation event in the Yili River Valley[J]. Chin J Atmos Sci, 43(5):959-974(in Chinese).
- 施雅风,沈永平,胡汝骥,2003.西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J].第四纪研究,23(2):152-164. Shi Y F, Shen Y P, Hu R J, 2003. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China[J]. Quater Sci, 23(2):152-164(in Chinese).
- 史玉光,2014.新疆降水与水汽的时空分布及变化研究[M].北京:气象出版社:79-81. Shi Y G, 2014. The Space-Time Distribution of Precipitation and Water Vapor and Change in Xinjiang[M]. Beijing: China Meteorological Press:79-81(in Chinese).
- 孙建华,汪汇洁,卫捷,等,2016.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,74(4):542-555. Sun J H, Wang H J, Wei J, et al, 2016. The sources and transportation of water vapor in persistent heavy rainfall events in the Yangtze-Huaihe River Valley[J]. Acta Meteor Sin, 74(4):542-555(in Chinese).
- 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]. Chin J Atmos Sci, 40(3):630-646(in Chinese).
- 王婧羽,崔春光,王晓芳,等,2014.2012年7月21日北京特大暴雨过程的水汽输送特征[J].气象,40(2):133-145. Wang J Y, Cui C G, Wang X F, et al, 2014. Analysis on water vapor transport and budget of the severe torrential rain over Beijing Region on 21 July 2012[J]. Meteor Mon, 40(2):133-145(in Chinese).
- 王少平,姜逢清,吴小波,等,2016.1961—2010年西北干旱区极端降水指数的时空变化分析[J].冰川冻土,36(2):318-326. Wang S P, Jiang F Q, Wu X B, et al, 2016. Temporal and spatial variability of the extreme precipitation indices over the arid regions in Northwest China from 1961 to 2010[J]. J Glaciol Geocryol, 36(2):318-326(in Chinese).
- 王文涛,田斌,李静,2014.新疆东部地区气候变化及对生态环境的影响[J].水土保持与研究,21(5):249-254. Wang W T, Tian B, Li J, 2014. Climate change in eastern region of Xinjiang in the past 50 years and its effects on the local ecological environment[J]. Res Soil Water Conser, 21(5):249-254(in Chinese).
- 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. X·Duolaite, 2005. Formulation of precipitation intensity standard of Xinjiang[J]. Bimon Xinjiang Meteor, 28(3):7-8(in Chinese).
- 徐洪雄,徐祥瑞,张胜军,等,2014.台风韦森特对季风水汽流的“转运”效应及其对北京“7·21”暴雨的影响[J].大气科学,38(3):537-550. Xu H X, Xu X D, Zhang S J, et al, 2014. Long-range moisture alteration of a typhoon and its impact on Beijing extreme rainfall[J]. Chin J Atmos Sci, 38(3):537-550(in Chinese).
- 杨莲梅,2003.新疆极端降水的气候变化[J].地理学报,58(4):577-583. Yang L M, 2003. Climate change of extreme precipitation in Xinjiang[J]. Acta Geograph Sin, 58(4):577-583(in Chinese).
- 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 L M, Zhang Y H, Tang H, 2012. Analyses on water vapor characteristics in three heavy rainstorm processes of Xinjiang in July 2007[J]. Plateau Meteor, 31(4):963-973(in Chinese).
- 杨柳,赵俊虎,封国林,2018.中国东部季风区夏季四类雨型的水汽输送特征及差异[J].大气科学,42(1):81-95. Yang L, Zhao J H, Feng G L, 2018. Characteristics and differences of summertime moisture transport associated with four rainfall patterns over eastern China monsoon region[J]. Chin J Atmos Sci, 42(1):81-95(in Chinese).
- 杨晓霞,吴炜,万明波,等,2012.山东省两次暴雪天气的对比分析[J].气象,38(7):868-876. Yang X X, Wu W, Wan M B, et al, 2012. A comparative analysis of two snowstorms in Shandong Province[J]. Meteor Mon, 38(7):868-876(in Chinese).
- 周玉淑,高守亭,邓国,等,2005.江淮流域2003年强梅雨期的水汽输送特征分析[J].大气科学,29(2):195-204. Zhou Y S, Gao S T, Deng G, et al, 2005. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Yangtze-Huaihe River basins in 2003[J]. Chin J Atmos Sci, 29(2):195-204(in Chinese).
- 张家宝,1986.新疆短期天气预报指导手册[M].乌鲁木齐:新疆人民出版社. Zhang J B, 1986. The Short-Term Weather Forecast

- Guide in Xinjiang[M]. Urumqi: Xinjiang People's Press (in Chinese).
- 张家宝, 邓子风, 1987. 新疆降水概论[M]. 北京: 气象出版社. Zhang J B, Deng Z F, 1987. Introduction to Precipitation in Xinjiang [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 赵玲, 安沙舟, 杨莲梅, 等, 2010. 1976—2007 年乌鲁木齐可降水量及其降水转化率[J]. 干旱区研究, 27(3): 433-437. Zhao L, An S Z, Yang L M, et al, 2010. Study on precipitable water and precipitation conversion efficiency in Urumqi during the period of 1976—2007[J]. Arid Zone Res, 27(3): 433-437 (in Chinese).
- 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).
- 庄晓翠, 张云惠, 周雪英, 等, 2021. 新疆短时强降水天气雷达回波特征[J]. 气象, 47(11): 1402-1415. Zhuang X C, Zhang Y H, Zhou X Y, et al, 2021. Radar echo characteristics of short-time severe precipitation in Xinjiang[J]. Meteor Mon, 47(11): 1402-1415 (in Chinese).
- Akiyo Y, Tetsuzo Y, 1998. Variation of summer water vapor transport related to precipitation over and around the arid region in the interior of the Eurasia Continent[J]. J Meteor Soc Japan, 76(5): 799-815 (in Chinese).
- Ding Y H, Chan J C L, 2005. The East Asian summer monsoon: an overview[J]. Meteor Atmos Phys, 89: 117-142.
- Huang W, Feng S, Chen J H, et al, 2015. Physical mechanisms of summer precipitation variations in the Tarim Basin in northwestern China[J]. Huang ET AL, 28: 3579-3591.
- Jin S G, Park J U, Cho J H, et al, 2007. Seasonal variability of GPS-derived zenith tropospheric delay (1994—2006) and climate implications[J]. J Geophys Res, 112: 1-11.
- 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]. Atmos Environ, 45(16): 2630-2641.
- Park C K, Schubert S D, 1997. On the nature of the 1994 East Asian summer drought[J]. J Climate, 10: 1056-1070.
- Stohl A, James P, 2004. A Lagrangian analysis of the atmospheric branch of the global water cycle. Part I: method description, validation, and demonstration for the August 2002 flooding in Central Europe[J]. J Hydrometeor, 5(4): 656-678.
- Zhao P, Zhang R H, Liu J P, et al, 2007. Onset of southwesterly wind over eastern China and associated atmospheric circulation and rainfall[J]. Climate Dyn, 28: 797-811.
- Zhou B T, Wang H J, 2006. Relationship between the boreal spring Hadley circulation and the summer precipitation in the Yangtze River Valley[J]. J Geophys Res, 111: 1-14.

(本文责编: 俞卫平 王蕾)