

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0037

MOU Huan, ZHAO Li, WANG Xu, et al. Water vapor source analysis of a severe torrential rain in the west of southern Xinjiang based on the Lagrangian Method[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(4):1157-1165. [牟欢, 赵丽, 王旭, 等. 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, 2021, 43(4):1157-1165.]

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

牟欢^{1,2}, 赵丽³, 王旭⁴, 安大维^{1,2}

(1. 新疆维吾尔自治区气象台, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2. 中亚大气科学研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830002; 3. 新疆信息工程学校, 新疆 乌鲁木齐 830013; 4. 新疆维吾尔自治区人工影响天气办公室, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要: 利用新疆自动气象站资料、NCEP/NCAR再分析资料、GDAS数据, 基于拉格朗日方法的气流轨迹模式(HYSPLITv4.9), 对2018年5月16—22日南疆西部特大暴雨过程的水汽源地和输送路径进行了分析。此次HYSPLIT后向轨迹模拟结果表明, 暴雨水汽源于巴伦支海、喀拉海、挪威海和地中海, 两地的水汽先分别沿西北气流和偏西气流向下游地区输送。水汽轨迹在哈萨克丘陵汇聚后进入北疆, 再绕过山山东侧到达罗布泊地区后随低层的偏东急流抵达暴雨区上空。虽然从巴伦支海、喀拉海、挪威海出发的水汽轨迹略多于地中海, 但两地的水汽贡献率分别占62%和38%。因此, 巴伦支海、喀拉海、挪威海的水汽对于此次暴雨起到明显的增强作用。另外, 后向轨迹模拟结果中并未出现从孟加拉湾出发的低层东南路径水汽, 说明该区域的水汽并不是构成南疆西部暴雨水汽的必要条件。北极挪威海、巴伦支海、喀拉海地区海表温度异常偏高, 有利于水汽源地蒸发增强和上升气流背景场的形成, 北极海域的温度异常对于区域气候变化有很好的指示意义。

关键词: 南疆; 特大暴雨; 拉格朗日方法; 水汽轨迹; 水汽贡献

中图分类号: P458.1+21.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)04-1157-09

0 引言

暴雨是指短时期内出现的大量降水, 是我国夏季常见的一种灾害性天气^[1]。近半个世纪, 我国西北地区的夏季降水量和极端暴雨事件均显著增加。徐栋等^[2]通过对近50 a的资料计算分析后发现, 由于蒸发增大和水汽辐合增强使得西北干旱地区降水量增加, 而在夏季增加最为显著。Zhai等^[3]研究发现1951—2000年间中国西北部地区年、季降水量和极端降水事件均显著增加。杨莲梅等^[4]研究发现新疆以夏季降水为主, 近百年来呈增湿的趋势。

新疆处于西北半干旱地区, 近些年来极端暴雨事件频发。水汽输送决定了干旱地区降水量的变化趋势^[5]。充足的水汽是形成暴雨的必要条件之

一^[6], 任何一场暴雨过程都需要水汽的输送和集中, 源源不断的水汽供应才能形成长时间的暴雨, 因此水汽的来源和输送是暴雨天气机理研究中的重要问题。新疆境内缺少湖泊、河流等水源, 因此外部输送是暴雨水汽的重要组成部分。

通过研究水汽的来源、路径、贡献率等方面可以更好的揭示暴雨形成机理。关于水汽输送问题的研究, 先前一些科研人员主要是通过计算区域内水汽通量、云中液态水含量、水汽收支和模式模拟等传统的研究方法得出以下结论: 针对我国华东、华南、西南、华北、东北等地的水汽输送研究发现, 降水主要源自孟加拉湾和中国南海, 水汽由偏南气流输送, 影响中国夏季的强降水^[7-8]。而对西北半干旱地区的水汽输送研究表明, 由于降水影响系统不

收稿日期: 2020-04-22; 修订日期: 2020-10-23

基金项目: 新疆维吾尔自治区气象局中亚大气科学研究基金项目(CAAS201910); 国家自然科学基金项目(41965002)资助

作者简介: 牟欢, 高级工程师, 主要从事灾害性天气预报和机理研究. E-mail: 213de88@163.com

通信作者: 王旭, 研究员, 主要从事人工影响天气和灾害性天气形成机理研究. E-mail: wangxu2323@vip.163.com

同,通常西北地区夏季降水异常与东部沿海地区降水分布相反,研究表明来自北冰洋和孟加拉湾的水汽输送与汇合对于降水的异常分布至关重要^[9]。王研峰等^[10]利用2006年7月至2012年7月 AERONET 观测网 SCAOL 站点观测资料,分析得出黄土高原半干旱地区大气可降水量及其与地面水汽压之间为正相关,且可降水量和降水量二者变化趋势相同。蒋靖海等^[11]采用奇异值分解方法,分析了1981—2010年 ERA5 的月降水和土壤湿度资料。结果发现春季北半球土壤湿度与夏季降水之间呈显著的正相关,季节性冻融区春季土壤湿度的增加会引起该地区夏季降水的增加。

先前多以欧拉方法来研究水汽源地和水汽输送的问题,但水汽随时间往往具有突变性和地域性^[12],而欧拉方法难以对水汽轨迹进行精确的描述,更无法计算水汽贡献率大小。本文采用的拉格朗日方法是以气块为单元,可追踪三维空间中流体的运动轨迹和来源,因此可以将水汽的高度、温度、相对湿度等物理量随时间清晰的展现,也可以计算出不同的水汽轨迹数和贡献率。近些年来,国内外部分学者将拉格朗日方法在气象领域进行了拓展应用。Malin 等^[13]通过对暴雨水汽轨迹研究后发现,瑞典南部地区大暴雨过程的水汽输送路径和贡献率大小与一般暴雨过程的明显不同。Sodemann 等^[14]在降水贡献率和降水路径定量评估等方面展开了研究。江志红等^[15-16]将淮河流域强降雨过程分为三个阶段,并分析了不同阶段水汽输送轨迹、主要通道及不同水汽源地的水汽贡献。王婧羽等^[17]通过对北京特大暴雨过程进行后向轨迹模拟得到结果,从水汽路径和源地看,从东部海域到达暴雨区的水汽贡献率最大,而孟加拉湾、南海的水汽输送对于强降水起到明显的增强作用。杨浩等^[18]基于拉格朗日方法对比了江淮梅雨和淮北雨季平均水汽的输送特征后发现,江淮梅雨的水汽主要来自印度洋、太平洋、孟加拉湾和南海,其中印度洋的水汽贡献超过50%;而淮北雨季的水汽来自印度洋、欧亚大陆、孟加拉湾和南海、太平洋,且贡献差异不大。孙建华等^[19]认为中国江淮流域持续性降雨过程中,来自南方的水汽输送主要由索马里越赤道急流、孟加拉湾南部和印度尼西亚群岛附近的越赤道气流提供。王佳津等^[20]对四川盆地暴雨的水汽输送进行后向轨道追踪模拟发现,暴雨过程水汽主要集中在950 hPa和850 hPa,并且二者的水汽路径和

来源有着显著差别。950 hPa的水汽来源于阿拉伯海和我国南海,而850 hPa的水汽来源于索马里半岛附近,其中阿拉伯海至孟加拉湾的水汽贡献率最大。Hua 等^[21]发现中国西北角的降水在1982—2000年呈上升趋势,而在2001—2010年呈下降趋势。降水趋势的变化与北大西洋到中亚之间有组织的波列传播密切相关。北大西洋涛动消亡时引发的能量分散决定了欧亚大陆上空波动异常的阶段和强度,进而影响西北地区降水中心的变化。

通过拉格朗日方法对水汽轨迹的研究主要集中在我国的季风区,而针对新疆特别是南疆地区的研究几乎还是空白。南疆盆地三面环山,山区的海拔在3 500 m以上,由于高山地形的阻挡使得低层水汽难以进入南疆盆地,大多数测站年降水量不足100 mm且时空分布极不均匀,一次暴雨过程的降水量就可能超过年降水量的70%,极易引发地质灾害,对经济和人民生命财产造成巨大损失。先前的研究认为,南疆盆地的水汽主要集中在700 hPa以下,水汽路径主要有东方路径、西方路径、西北路径,相对应的水汽源地有青藏高原、孟加拉湾、河西走廊、阿拉伯海、巴尔喀什湖、里海、咸海等地,来自孟加拉湾和青藏高原的东方路径水汽有着极其重要地位^[22-23]。受数据和方法的限制,研究结果缺乏说服力,因此关于南疆暴雨的水汽源地和输送路径一直存有争议,关于南疆水汽源地的问题成为气象工作者的难点。

本文主要利用拉格朗日的方法来研究南疆西部暴雨水汽的输送问题。通过计算和分析水汽源地、路径、贡献率、收支等方面,较全面展示此次暴雨过程的水汽输送特征,并讨论与先前研究结果的异同。分析结果可提高对新疆上游地区水汽输送的认识和改进暴雨预报的思路。

1 资料和方法

1.1 资料介绍

提取2018年5月新疆841个国家及区域观测站降水数据、NCEP/NCAR 水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的逐6 h再分析资料用于高空环流形势和水汽收支分析、NCEP水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的月平均和日平均海表温度再分析资料用于分析其异常分布特征、全球资料同化系统的水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 逐6 h资料(GDAS, global data assimilation system)用于后向轨迹计算。

1.2 研究方法

(1) 单位气柱大气水汽输送通量矢量的计算公式为:

$$\mathbf{Q} = \frac{1}{g} \int_{P_t}^{P_s} q \mathbf{V} dp \quad (1)$$

式中: \mathbf{Q} 为大气内水汽输送通量矢量(单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$); g 为重力加速度(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$); q 为比湿(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); \mathbf{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 分别为底层和顶层的气压(单位: hPa)。

(2) HYSPLIT4 轨迹追踪方法

HYSPLIT4 模型是由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的空气资源实验室和澳大利亚气象局在过去 20 年间联合研发的一种用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的专业模型。该模型具有处理多种气象要素输入场、多种物理过程和不同类型污染物排放源功能的较为完整的输送、扩散和沉降模式, 已经被广泛地应用于多种污染物在各个地区的传输和扩散的研究中。其平流和扩散计算采用拉格朗日方法, 假设气块随气流移动, 轨迹是气块在空间和时间上的积分。气块所在位置的矢量速度在时间和空间上都是线性插值得出的^[24]。其具体计算公式如下:

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

$$P(t + \Delta t) = P(t) + 0.5 [V(P, t) + V(P', t + \Delta t)] \Delta t \quad (3)$$

其中下一时刻气块的位置是由上一时刻的平均速度和第一猜测值所在点的速度平均后与时间步长的乘积而得到的。 $P'(t + \Delta t)$ 为气块第一猜测值, $P(t + \Delta t)$ 为气块最终位置, $P(t)$ 为上一时刻气块位置, V 为在某一时间位置的速度。

(3) 误差分析算法

变异系数是可以用来评估模式轨迹模拟结果变异(偏差)程度的无量纲数。轨迹变异系数越小, 则变异程度小, 说明模拟效果较好。变异系数会随着轨迹向后追踪时间逐渐增大。

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (5)$$

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu} \quad (6)$$

式中: x_i 表示样本中的物理量; μ 表示平均值; N 表示样本总数的总和; σ 表示总体标准差; C_v 表示变异系数。

(4) 水汽贡献率算法

江志红^[15]提出一种定量计算水汽贡献率的方法。可以通过计算不同路径到达暴雨区的轨迹水汽比湿与暴雨区全部轨迹比湿之和的比值得出不同路径的水汽贡献率。

$$Q_s = \left(\sum_1^m q_{\text{last}} / \sum_1^n q_{\text{last}} \right) \times 100\% \quad (7)$$

式中: Q_s 表示某一源地的水汽贡献率; q_{last} 表示气块到达目标区域的比湿; m 表示在某一源地所包含的气块个数; n 表示所有源地气块到达目标区域的总个数。

(5) t 检验

利用双边 student t 检验方法^[25]对 2018 年 5 月和气候态的流函数、海表温度异常进行显著性检验。

2 降水实况及环流特征分析

2.1 降水实况

受中亚低槽南伸的影响, 2018 年 5 月 16—22 日南疆西部出现了一次特大暴雨过程。从过程累计降水量分布可以看到(图 1), 暴雨区呈西北—东南向的分布, 暴雨中心位于南疆喀什北部和克州中部的区域。根据新疆 24 h 暴雨标准, 共有 96 个测站出现暴雨($\geq 24.1 \text{ mm}$), 其中 5 个国家级测站的日降水量突破有历史记录以来的最大值。

从图 2 中可以看出 5 月 16—22 日南疆西部暴雨站逐日累计降水量和累计数的变化, 二者在暴雨过

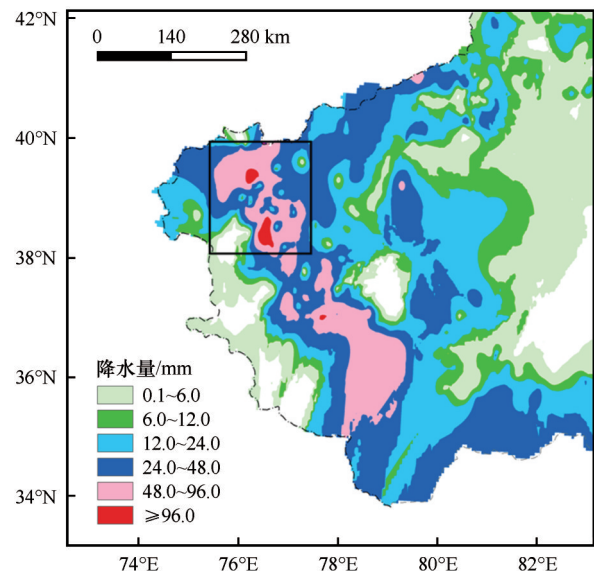


图 1 2018 年 5 月 16—22 日南疆西部暴雨过程累计降水量分布(单位: mm), 黑色矩形为暴雨中心

Fig. 1 The spatial distribution of accumulated precipitation in west of southern Xinjiang from 16 to 22 May, 2018 (unit: mm), the black rectangle indicating a severe torrential center

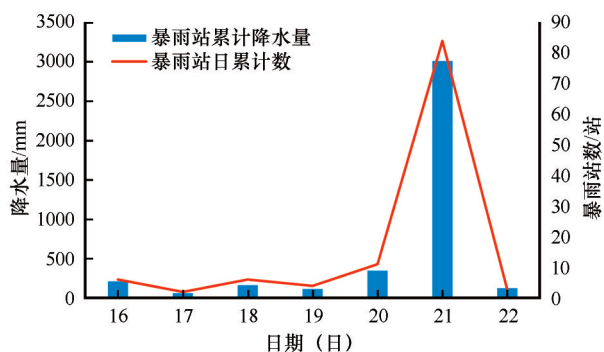


图2 2018年5月16—22日南疆西部暴雨站日累计降水量及日累计站数变化(单位:mm)

Fig. 2 The change of precipitation and accumulated precipitation and total number of daily severe torrential stations in the west of southern Xinjiang from 16 to 22 May 2018 (unit: mm)

程的前中期的变化不明显,而到21日暴雨站逐日累计降水量和累计站数均骤升至峰值,因此下文重点对21日的天气形势和水汽轨迹做具体分析。

2.2 暴雨过程环流特征分析

2018年5月,中纬度环流异常以相当正压结构为主,其大值中心位于300 hPa(图3)。南疆地区始

终位于准定常相当正压槽前,高度场的异常偏高,为极端降水的发生提供了有利的动力条件。波作用活动通量诊断说明,该正压槽位于欧亚大陆上空的高空波列内。其中,波源位于格陵兰岛南部,当波能量沿着极锋急流向下游频散时,相继在欧洲上空形成高压脊、在南疆上空形成低压槽。2018年春、夏季极强的NAO正位相直接导致了格陵兰岛南部的高空波源,这是2018年5月下旬南疆地区发生极端降水的重要气候背景。

通过分析暴雨日中低层的环流形势可以看出(图4),500 hPa上偏西的伊朗高压和偏东的青藏高压使得南亚高压呈带状分布。当伊朗高压发展东移配合从欧洲东部不断东南下的短波,使得南疆西部上游的中亚地区经向度不断加大,并在咸海以南形成了低涡系统,南疆西部处于低涡前部的西南气流中,形成了有利于南疆暴雨的大尺度环流背景。700 hPa上南疆偏东急流有利于暴雨区水汽的输送、不稳定能量的释放和上升运动的增强。当外界的水汽输送至暴雨区,最终造成了此次南疆极端暴雨天气。

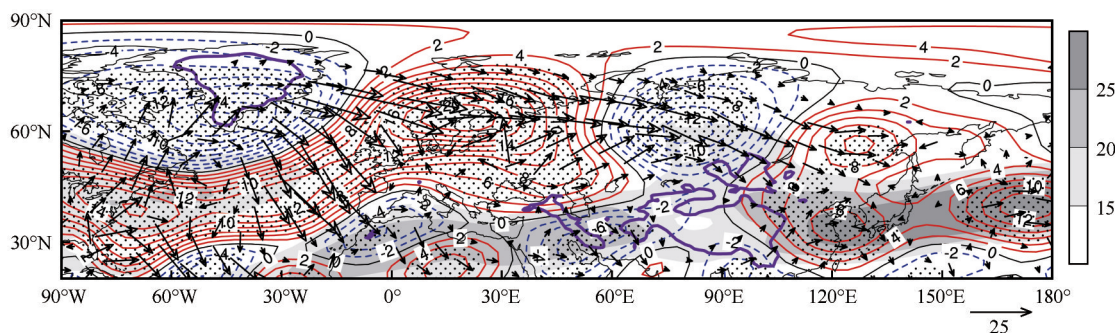


图3 2018年5月300 hPa流函数异常(等值线, $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)和波作用通量(矢量, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$): 阴影表示气候平均4—6月纬向西风大值带($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); 紫色实线表示地形高度大于1500 m地区; 打点区表示通过99.5%显著性检验的流函数异常区域(2018年5月与1981—2010年5月)

Fig. 3 Horizontal distribution of anomalous stream function (contours, $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) and wave activity flux (vectors, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) in May 2018: gray shading indicating the large value belt of climate-mean westerly wind in April-May-June ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); while solid purple line area indicating the area higher than 1500 m a. s. l., dot area representing an outlier region of a flow function that passes the 99.5% significance test (May 2018 and May 1981—2010)

3 暴雨区水汽收支分析

水汽收支可被用来量化分析不同因素对湿润趋势的贡献^[26]。通过计算研究区域的水汽收支发现(表1),暴雨发生前,区域内整层(地面至300 hPa)水汽维持净流出或少量流入的状态。在出现暴雨的5月21日,区域内整层的净收支增至 $0.49 \times 10^8 \text{ t}$,水汽主要从地面至700 hPa高度

的东边界流入,该高度水汽的净收支占整层收支的3倍多,而700 hPa以上高度水汽的流入较少。

计算区域内的水汽收支可以定量分析在单位时间内的水汽收支大小,但无法明确暴雨的水汽源地、路径、贡献等问题,基于拉格朗日轨迹追踪方法可以很好的解决相关问题,进而提高水汽收支和输送特征方面的研究水平。

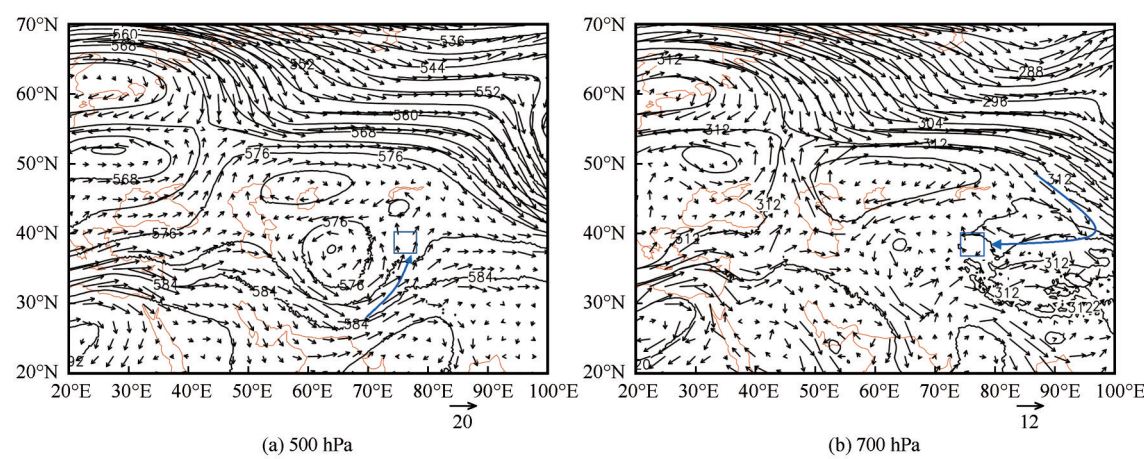


图4 2018年5月21日500 hPa(a)、700 hPa(b)的平均高度场(单位:gpm)和风场(单位:m·s⁻¹),蓝色矩形为暴雨区
Fig. 4 The mean geopotential height field (unit: gmp) and wind field (unit: m·s⁻¹) at 500 hPa (a), 700 hPa (b) on 21 May 2018, the blue rectangle being the torrential area

表1 暴雨中心上空各边界的水汽收支(单位: 10⁸ t)

Table 1 Water vapor budgets of each boundary over the severe torrential center for whole layer and various sub-layers on May 21 (unit: 10 ⁸ t)								
时间	层次	西边界	北边界	东边界	南边界	总流入	总流出	净收支
5月21日	整层	-2. 51	0. 78	-3. 42	0. 36	3. 78	3. 29	0. 49
	地面~700 hPa	-0. 99	-0. 57	-3. 75	-1. 75	4. 32	2. 74	1. 58
	700~500 hPa	-2. 19	0. 77	-0. 38	1. 34	1. 72	2. 96	-1. 24
	500~300 hPa	0. 67	0. 58	0. 71	0. 77	1. 44	1. 29	0. 15

4 暴雨水汽源地与输送特征分析

4.1 轨迹模拟方案

选取暴雨中心76°~78°E,38°~40°N的范围作为研究区域,区域在单位时间内追踪轨迹的格点数为25个。南疆暴雨水汽输送主要集中在700 hPa以下的高度^[22]。研究区域内地形海拔多在1 200~1 500 m,模拟起始追踪高度至少高于地形表面250 m,因此将轨迹追踪高度设定在海平面以上2 000、2 500、3 000 m的高度。追踪时间选取过程最强暴雨日(5月21日),每隔3 h重新做一次240 h的后向轨迹追踪模拟,计算共得到600条轨迹的集合。

轨迹的变异系数可以用来确定后向轨迹追踪的时间长度。根据水平方向上偏移(初始偏移为0. 01 sigma),通过样本计算出过程中逐小时的轨迹变异系数(图5),变异系数随时间的倒推而逐渐增大,说明后向追踪模拟结果不确定性会随时间变大,因而不适合继续追踪模拟。经分析后发现,此次暴雨过程的纬向变异系数在-192 h(8 d)后开始明显增大,而经向变异系数变化不明显,因此确定此次暴雨过程对8 d的后向模拟轨迹进行分析。

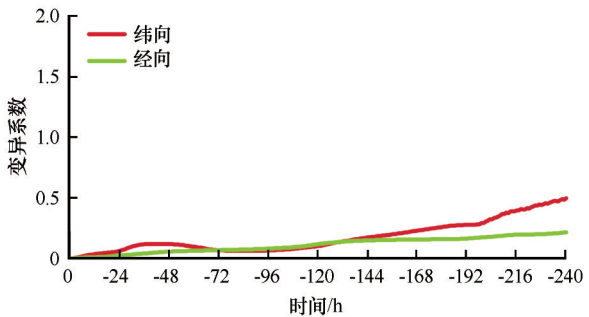


图5 水汽轨迹的变异系数
Fig. 5 Variation coefficient of water vapor trajectories

4.2 水汽源地贡献率和输送轨迹分析

以往的研究认为,南疆暴雨的水汽主要是从孟加拉湾出发后翻越青藏高原再沿偏东气流到达暴雨区,该区域水汽在南疆暴雨过程中占主要贡献^[23]。但与以往研究不同的是,此次HYSPLIT模拟结果中并未出现来源于孟加拉湾的水汽轨迹。按源地和输送路径划分(图6),暴雨水汽主要来源于北极的巴伦支海、喀拉海、挪威海(以下简称BKS,A区)和地中海(B区)。两条水汽轨迹先分别沿西北气流和偏西气流向下游输送,并在到达哈萨克丘陵后水汽轨迹发生了明显的汇聚。汇聚后的水汽轨

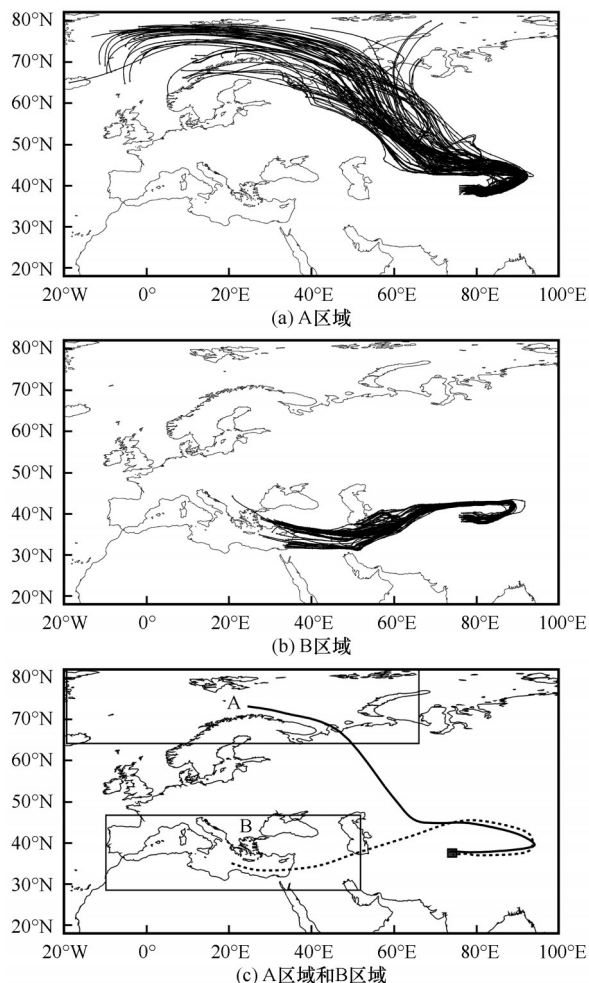


图6 不同区域水汽输送轨迹: A区域(a), B区域(b), A区域和B区域(c); A区轨迹为实线, B区轨迹为虚线, 黑色矩形为暴雨中心

Fig. 6 Water vapor transmission trajectories in different regions: Region A (a), Region B (b), Region A and Region B (c); solid line being Region A trajectories, dotted line being Region B trajectories, black rectangle being the severe torrential center

迹绕过天山东侧,在到达罗布泊地区后随低层的偏东急流抵达暴雨区上空。气流轨迹东折是由于新疆“三山夹两盆”的特殊地形和南疆盆地东高西低的气压差共同造成的。所以,进入暴雨区的水汽轨迹是先沿西北气流和西方气流输送之后在罗布泊地区东折形成的,而孟加拉湾的水汽并不是构成南疆西部暴雨的必要条件。

分析不同输送路径的水汽贡献率和轨迹比重可以看出(图7),源于BKS区域的水汽轨迹略多于从地中海出发的水汽轨迹。但从水汽贡献率方面看,BKS区域和地中海的水汽贡献率分别是62%和38%,前者的水汽贡献率明显大于后者,因此,BKS区域的水汽是此次南疆暴雨水汽的主要补充。

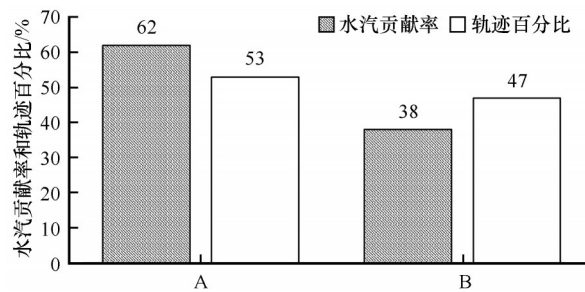


图7 不同区域的水汽贡献率和轨迹百分比

Fig. 7 Water vapor contribution rate (shadow) and trajectories percentage (white) from Region A and Region B

4.3 海表面温度异常与水汽输送的相关性

海表面温度异常偏高可使水汽输送和能量分配发生很大变化,进而加剧干旱区域的水分循环。从2018年5月海表温度距平分布可见(图8),BKS地区海表温度(SST)异常偏高,距平中心超过 1.5°C ,偏高的区域与4.2节中描述的水汽源地基本重合,同时北大西洋海表温度异常呈现明显的正三极子型分布特征。以上分析表明,一方面,北极地区海表温度异常升高,有利于水汽从海表通过蒸发作用进入大气,形成南疆地区极端降水的重要水源地;另一方面,北大西洋正三极子型温度异常能够维持北大西洋涛动(NAO)正位相,通过中纬度波列加深南疆地区的高空槽,为极端降水的发生提供有利的上升气流背景。北极对环境变化高度敏感,可通过相互的物理过程与气候系统形成反馈作用^[27]。在全球气候暖湿化加剧的背景下,北极的海表温度异常对关系区域气候变化有很好的指示意义。

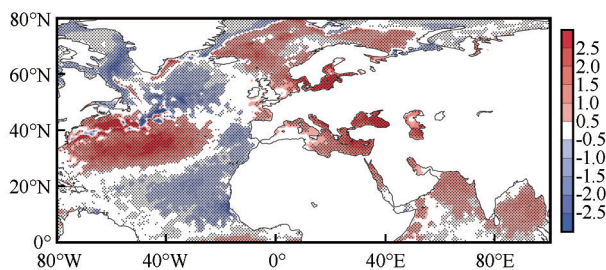


图8 2018年5月海表温度距平分布(单位: $^{\circ}\text{C}$),打点区表示通过99.5%显著性检验的海表温度异常区域(2018年5月与1981—2010年5月)

Fig. 8 Map showing the distribution of sea surface temperature anomalies in May 2018 (unit: $^{\circ}\text{C}$); anomalies SST exceeding the 99.5% confidence level being stippled (May 2018 and May, 1981—2010)

5 结论

本文主要基于拉格朗日轨迹追踪方法,从水汽

源地、水汽输送路径、水汽贡献率、水汽收支等方面对南疆西部2018年5月中旬一次特大暴雨过程做出客观定量的分析,得到以下结论:

(1)2018年5月南疆高空位于准定常相当正压槽前,其高度场异常偏高为极端降水的发生提供了有利的动力条件。500 hPa上从欧洲东部不断东南下的短波,在威海以南地区形成的低涡系统是此次暴雨过程的影响系统。

(2)利用HYSPLIT进行后向轨迹模拟的结果表明,此次南疆暴雨的水汽输送主要来源于高纬度的BKS区域和中纬度的地中海,两地水汽分别随西北气流和偏西气流向下游输送,轨迹在哈萨克丘陵汇聚后进入北疆。汇聚后的水汽绕过天山东侧到达罗布泊地区后再随低层的偏东急流抵达暴雨区上空。从BKS区域出发的轨迹略多于地中海,但二者的水汽贡献率分别为62%和38%,因此,从BKS区域出发的水汽对此次南疆暴雨起到主要的补充作用。另外,模拟结果中没有发现从孟加拉湾出发的轨迹,所以该区域的水汽并不是构成南疆西部暴雨的必要条件。

(3)北极地区海表面温度偏高有利于水源地的水汽含量增加。北大西洋正三极子型温度异常结构能够维持NAO正位相,为极端降水的发生提供有利的上升气流背景。

此次暴雨水汽轨迹模拟结果表明,低层偏东气流对南疆暴雨水汽输送起到重要作用。暴雨发生前2日,暴雨区已出现少量阵雨,当低层偏东气流将暖湿空气输送至较冷的暴雨区上空时,大气迅速接近饱和,并在动力和热力条件的作用下形成了此次南疆西部的特大暴雨过程。另外,在不同的环流背景下是否还能得到与此次暴雨过程相似的结论,并以此归纳出南疆暴雨的形成机制。因此解决这些问题还需要进一步开展相关的数值模拟工作。

参考文献(References):

- [1] Tao Shiyang. Heavy rainfalls in China[M]. Beijing: Science Press, 1980: 1-12. [陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 1-12.]
- [2] Xu Dong, Kong Ying, Wang Chenghai. Changes of water vapor budget in arid area of northwest China and its relationship with precipitation[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(3): 431-439. [徐栋, 孔莹, 王澄海. 西北干旱区水汽收支变化及其与降水的关系[J]. 干旱气象, 2016, 34(3): 431-439.]
- [3] Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China[J]. Journal of Climate, 2005, 18: 1096-1108.
- [4] Yang Lianmei, Guan Xuefeng, Zhang Yingxin. Study on atmospheric circulation characteristics of precipitation anomalies in arid region of Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 249-259. [杨莲梅, 关学锋, 张迎新. 亚洲中部干旱区降水异常的大气环流特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 249-259.]
- [5] Yao Junqiang, Yang Qing, Mao Weiyi, et al. Characteristics of water cycle in atmosphere in the arid region of northwestern China[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 269-276. [姚俊强, 杨青, 毛伟峰, 等. 西北干旱区大气水分循环要素变化研究进展[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 269-276.]
- [6] Ding Yihui, Hu Guoquan. A study on water vapor budget over China during the 1998 severe flood periods[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 61(2): 129-145. [丁一汇, 胡国全. 1998年中国大洪水时期的水汽收支研究[J]. 气象学报, 2003, 61(2): 129-145.]
- [7] Tao Shiyang, Ni Yunqi, Zhao Sixiong, et al. The study on formation mechanism and forecasting of heavy rain in the summer 1998[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2001: 1-26. [陶诗言, 倪允琪, 赵思雄, 等. 1998年夏季中国暴雨的形成机理与预报研究[M]. 北京: 气象出版社, 2001: 1-26.]
- [8] Bai Rui, Liu Ren, Wu Tonghua, et al. Air moisture condition and change trend in northeast China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(6): 1441-1447. [柏睿, 李韧, 吴通华, 等. 1979—2016年我国东北地区空中水汽状况及变化趋势分析[J]. 冰川冻土, 2019, 41(6): 1441-1447.]
- [9] He Jinhai, Liu Yunyun, Chang Yue. Analysis of summer precipitation anomaly and the feature of water vapor transport and circulation in northwest China[J]. Journal of Arid Meteorology, 2005, 23(1): 10-16. [何金海, 刘芸芸, 常越. 西北地区夏季降水异常及其水汽输送和环流特征分析[J]. 干旱气象, 2005, 23(1): 10-16.]
- [10] Wang Yanfeng, Yin Xianzhi, Huang Wubin, et al. Study of the precipitable water over the semi-arid regions of the Loess Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(3): 643-649. [王研峰, 尹宪志, 黄武斌, 等. 黄土高原半干旱地区大气可降水量研究[J]. 冰川冻土, 2015, 37(3): 643-649.]
- [11] Jiang Jinghai, Wang Chenghai. Study on the relationship between seasonal freezing-thawing areas and summer precipitation in the Northern Hemisphere[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1): 53-61. [蒋靖海, 王澄海. 北半球季节性冻融区与北半球夏季降水关系的研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 53-61.]
- [12] Brimelow C J, Return W G. Transport of atmospheric moisture during three extreme rainfall events over the Mackenzie river basin[J]. Journal of Hydrometeorology, 2005, 6(4): 423-440.
- [13] Malin G, David R, Chen D L. Extreme rainfall events in southern Sweden: where does the moisture come from?[J]. Tellus, 2010, 62A: 605-616.
- [14] Sodemann H, Schwiertz C, Wernli H. Interannual variability of Greenland winter precipitation sources: Lagrangian moisture diagnostic and North Atlantic Oscillation influence[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113: D03107.
- [15] Jiang Zhihong, Reng Wei, Liu Zhengyu, et al. Analysis of water vapor transport characteristics during the Vleiyyu over the Yangtze-Huaihe River valley using the Lagrangian method[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2013, 71(2): 295-304. [江志红, 任伟, 刘征宇, 等. 基于拉格朗日方法的江淮梅雨水汽输送特征分析[J]. 气象学报, 2013, 71(2): 295-304.]
- [16] Jiang Zhihong, Liang Zhuoran, Liu Zhengyu, et al. A diagnosis

- tic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Huaihe River basin in 2007 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2011, 35 (2): 361-372. [江志红, 梁卓然, 刘征宇, 等. 2007年淮河流域强降水过程的水汽输送特征分析[J]. 大气科学, 2011, 35 (2): 361-372.]
- [17] Wang Jingyu, Cui Chunguang, Wang Xiaofang, et al. Analysis on water vapor transport and budget of the severe torrential rain over Beijing region on 21 July 2012 [J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(2): 133-145. [王婧羽, 崔春光, 王晓芳, 等. 2012年7月21日北京特大暴雨过程的水汽输送特征[J]. 气象, 2014, 40(2): 133-145.]
- [18] Yang Hao, Jiang Zhihong, Liu Zhengyu, et al. 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 (in Chinese), 2014, 38(5): 965-973. [杨浩, 江志红, 刘征宇, 等. 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, 2014, 38(5): 965-973.]
- [19] Sun Jianhua, Wang Huijie, Wei Jie, et al. The sources and transportation of water vapor in persistent heavy rainfall events in the Yangtze-Huaihe River valley [J]. Acta Meteorology Sinica, 2016, 74(4): 542-555. [孙建华, 汪汇洁, 卫捷, 等. 江淮区域持续性暴雨过程的水汽源地和输送特征[J]. 气象学报, 2016, 74(4): 542-555.]
- [20] Wang Jiajin, Wang Chunxue, Chen Chaoping, et al. Analysis of a summer rainstorm water vapor paths and sources in Sichuan basin based on HYSPLIT4 model [J]. Meteorological Monthly, 2015, 41(11): 1315-1327. [王佳津, 王春学, 陈朝平, 等. 基于HYSPLIT4的一次四川盆地夏季暴雨水汽路径和源地分析[J]. 气象, 2015, 41(11): 1315-1327.]
- [21] Hua L, Zhong L, Ma Z. Decadal transition of moisture sources and transport in northwestern China during summer from 1982 to 2010 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(23), 12522-12540.
- [22] Zhang Jiabao. Introduction to precipitation in Xinjiang [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1987: 113-117. [张家宝. 新疆降水概论[M]. 北京: 气象出版社, 1987: 113-117.]
- [23] Zhang Jiabao, Su Qiyuan, Sun Shenqing, et al. Guide handbook on Xinjiang short term weather forecast [M]. Urumqi: Xinjiang People Press, 1986: 218-270. [张家宝, 苏起元, 孙沈清, 等. 新疆短期天气预报指导手册[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1986: 218-270.]
- [24] Draxler R R, Hess G D. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories, dispersion, and deposition [J]. Australian Meteorological Magazine, 1998, 47: 295-308.
- [25] Wei Fengying. Modern diagnostic and predictive techniques for climate statistics [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2009: 27-28. [魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 27-28.]
- [26] Peng Dongdong, Zhou Tianjun. Why was the arid and semiarid northwest China getting wetter in the recent decades? [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2017, 122: 9060-9075.
- [27] Qin Dahe, Yao Tandong, Ding Yongjian, et al. The Cryospheric Science for sustainable development [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1): 1-10. [秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 等. 面向可持续发展的冰冻圈科学[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 1-10.]

Water vapor source analysis of a severe torrential rain in the west of southern Xinjiang based on the Lagrangian Method

MOU Huan^{1,2}, ZHAO Li³, WANG Xu⁴, AN Dawei^{1,2}

(1. Meteorological Observatory of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830002, China; 2. Center for Central Asia Atmosphere Science Research, Urumqi 830002, China; 3. Xinjiang Information Engineering School, Urumqi 830013, China; 4. Weather Modification Office of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830002, China)

Abstract: By using the data from automatic weather stations in Xinjiang, the NCEP/NCAR reanalysis data, GDAS data and the airflow trajectory model based on the Lagrangian Method (HYSPLITv4.9), the water vapor sources and moisture transport paths of a severe torrential rain in the western of southern Xinjiang from May 16 to 22, 2018 were analyzed. The results of HYSPLIT backward trajectories simulation showed that the severe torrential water vapor originates from the Barents Sea, the Kara Sea, the Norway Sea and the Mediterranean Sea, and the water vapor in the two regions first transported to the downstream along the northwest stream and the western stream, respectively. After converging in the Kazakh Hills, the water vapor trajectories entered the northern Xinjiang, then bypassed the eastern side of the Tianshan Mountains to reach the Lop Nur, and then reached the upper part of the severe torrential area with the lower level easterly jet. Although the water vapor trajectories from the Barents Sea, the Kara Sea and the Norway Sea were slightly more than those in the Mediterranean Sea, the contribution rates of water vapor were 62% and 38%, respectively, in the two regions. Therefore, the water vapor of Barents Sea, Kara Sea and Norway Sea played an obvious role in strengthening the rainstorm. In addition, there was no low-level eastward water vapor from the Bay of Bengal in the simulation result of backward trajectories, which indicated that the water vapor in this region was not a necessary condition for the formation of severe torrential water vapor in the western part of southern Xinjiang. It was found that the sea surface temperature anomalies in the Barents Sea, the Kara Sea, the Norway Sea of the Arctic were high, which basically coincide with the moisture source regions of the severe torrential. The results indicated that the anomalously high sea surface temperature in the Arctic was conducive to enhanced evaporation from the water vapor source and the formation of an updraft background field, and that the temperature anomalies in the Arctic waters were a good indicator of regional climate change.

Key words: southern Xinjiang; severe torrential rain; Lagrangian Method; water vapor trajectory; water vapor contribution

(责任编辑: 王澄海; 编辑: 周成林)