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).

基于 HYSPLIT 模式分析的塔克拉玛干沙漠南缘暴雨水汽特征*

庄晓翠[1] 李博渊[1] 赵江伟[1] 张云惠[2] 张林梅[2]

1 新疆阿勒泰地区气象局,阿勒泰 836500

2 新疆气象台,乌鲁木齐 830002

提 要: 利用 NCEP/NCAR 再分析资料,分析了 2001—2020 年 5—9 月(暖季)塔克拉玛干沙漠南缘(简称沙漠南缘)发生的 5 次暴雨天气大尺度环流背景和水汽特征,再运用 HYSPLIT 模式(拉格朗日)方法模拟计算了该区域暴雨天气的水汽轨迹、主要路径及不同源地的水汽贡献。结果表明:暴雨天气的水汽源地主要来自西南亚、中亚、北疆;水汽自源地出发经巴基斯坦北部、印度西北部、阿富汗东北部(简称 IPA 关键区)和南疆关键区,分别从西南和偏北路径进入暴雨区,途经南疆关键区的水汽来源对暴雨的贡献较大。沙漠南缘暴雨过程中,大气中层(500 hPa)的水汽主要源自西南亚,但沿途损失很大,而低层(700 hPa)的主要水汽贡献来自北疆,且沿途损失较小。来自北疆和南疆盆地的水汽主要从近地层输送至 700 hPa;来自西南亚、大西洋及其沿岸等地的水汽主要输送至 700 hPa 以上。基于上述特征,建立了沙漠南缘暴雨过程水汽来源及路径的三维结构模型,并对各层水汽贡献和来源做了更细致的描述。

关键词: 塔克拉玛干沙漠南缘,暴雨过程,水汽特征,HYSPLIT 模式

中图分类号: P426 **文献标志码:** A **DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.011801

Water Vapor Characteristics of Rainstorm in Southern Taklimakan Desert Based on HYSPLIT Model Analysis

ZHUANG Xiaocui[1] LI Boyuan[1] ZHAO Jiangwei[1] ZHANG Yunhui[2] ZHANG Linmei[2]

1 Altai Meteorological Office of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Altai 836500

2 Meteorological Observatory of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830002

Abstract: Based on the NCEP/NCAR reanalysis data, the large-scale circulation background and water vapor characteristics of five rainstorm processes in the southern margin of the Taklimakan Desert during May—September (warm season) in 2001—2020 are analyzed and then HYSPLIT (Lagrangian method) method is used to calculate the water vapor trajectory and main path as well as the water vapor contribution of different sources. The results show that the water vapor sources of the rainstorms are mainly the Southwest Asia, central Asia and northern Xinjiang. Water vapor from the source areas passes through northern Pakistan, northwest India, northeast Afghanistan (IPA) and the key areas of southern Xinjiang, respectively into the rainstorm areas from the southwest and north path, the water vapor passing through the key areas of southern Xinjiang contributes a lot to the rainstorm. During the rainstorms on the southern edge of the desert, water vapor in the middle layer of the atmosphere (500 hPa) originates mainly from Southwest Asia, but there is a lot of loss along the way. While in the lower layer (700 hPa), the main contribution of

* 国家自然科学基金项目(41965002)和新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2021D01A01)共同资助

2021 年 7 月 4 日收稿; 2022 年 1 月 18 日收修定稿

第一作者:庄晓翠,主要从事天气预报及灾害性天气机理研究. E-mail:zxcxjalt@163.com

water vapor is from northern Xinjiang, and the loss along the way is small. The water vapor from the northern and southern Xinjiang Basins is mainly transported to 700 hPa from the near-surface layer. The water vapor from Southwest Asia, the Atlantic Ocean and its coast is transported to the height above 700 hPa. Based on the above features, the three dimensional structure model of water vapor source and path during rainstorm process on the southern edge of the desert is established, and also a more detailed descriptions of the contribution and source of each layer of water vapor are provided.

Key words: the southern edge of the Taklamakan Desert, rainstorm process, characteristic of water vapor, HYSPLIT model

引 言

水汽是影响降水,尤其是强降水的重要因素(Trenberth,1998)。关于导致暴雨的水汽问题研究有两个关键的方面,一是水汽的来源和路径;二是各路径水汽输送在暴雨中的贡献大小(江志红等,2011)。定量确定暴雨过程水汽输送及路径是一个热点和难点问题(陈斌等,2011),尤其是在极端干旱荒漠区。因此,研究塔克拉玛干沙漠南缘(简称沙漠南缘)暴雨过程水汽特征(来源及输送),揭示沙漠南缘大气水汽循环机理,是该区大气水循环研究的一个重要课题。

暴雨水汽来源及输送路径的研究主要有两种方法,即欧拉方法和拉格朗日(HYSPLIT 模式)方法(杨浩等,2014)。由于欧拉方法是基于水汽通量来研究暴雨的水汽来源及输送,着眼于空间的某些确定点,在固定点上观察流体的运动,因此无法定量区分各水汽来源的贡献,最终只能给出简单的水汽输送路径(James et al,2004;陈斌等,2011;孙力等,2016;孔祥伟等,2021)。HYSPLIT 模式方法通过计算空气块的运动轨迹,即拉格朗日轨迹,定量统计出各水汽源地的贡献,弥补欧拉方法的不足(江志红等,2011;杨浩等,2014;孙颖姝等,2019)。目前,对中国中东部季风区基于 HYSPLIT 模式方法定量研究水汽来源及输送路径的相对较多,西北干旱区较少(姚俊强等,2018)。如江志红等(2011)针对 2007 年淮河流域强降水水汽输送研究表明,受三支水汽通道影响,在强降水的不同阶段、不同通道对暴雨的贡献不同,不同源地的水汽通道输送至暴雨区的高度不同。在气候态下,江淮梅雨的水汽主要来自印度洋、孟加拉湾—中国南海、太平洋和欧亚大陆,对江淮梅雨的贡献分别是 35%、19%、22%和 19%;欧亚大陆的水汽输送主要来自 600 hPa 左右的对流层中层,其他源地主要来自 850 hPa 以下的对流层低层;梅雨异常偏多年和偏少年各源地水汽输送贡献存在差异(江志红等,2013)。孙建华等(2016)对江淮区域江南型和江北型持续性暴雨过程的水汽源地和输送研究指出,两类暴雨水汽主要源自印度半岛以南的热带印度洋的西南路径和来自印度尼西亚与中国南海的偏南路径,此外,江北型还有来自西太平洋的东南路径水汽输送;来自南方的水汽输送主要受索马里越赤道急流、孟加拉湾南部和印度尼西亚群岛附近越赤道气流,以及受西太平洋副热带高压系统的影响。孙力等(2016)对东北地区 2010 年 7—8 月出现的三类暴雨研究表明,水汽主要来自西太平洋、南海、北方通道,占主导地位的是西太平洋通道;另外,第一类暴雨南海通道,第三类暴雨北方通道的水汽输送也不可忽视;西太平洋通道的水汽沿途损失较小,主要被输送到东北地区 850 hPa 及以下的大气之中,而南海通道的水汽沿途损失较多,主要被输送到东北地区 850 hPa 以上的大气。曾钰婷等(2020)对青藏高原那曲地区夏季水汽来源及输送研究表明,小雨和中雨的水汽主要来自阿拉伯海、孟加拉湾、印度、新疆以及中亚地区,另外,中雨还有来自印度洋的水汽;大雨主要来自阿拉伯海和孟加拉湾。陈红专等(2019)对 2017 年盛夏湖南持续性暴雨过程的水汽输送研究表明,强降水过程的水汽通道主要有三支,首先由索马里越赤道急流经孟加拉湾和中国西南地区输入暴雨区,其次由印度洋中东部越赤道气流经孟加拉湾南部和南海北部输入暴雨区,第三支来自南半球的越赤道气流自南海南部一路北上输入暴雨区;强降水时段不同,各通道对暴雨的贡献不同。受地形影响,孟加拉湾通道的水汽主要输送至暴雨区 700 hPa,其他来自低纬洋面的水汽主要输送到 850 hPa 及以下各层。李晓容等

(2020)对四川东北部三次暴雨研究表明,水汽来自孟加拉湾、南海、西太平洋和阿拉伯海;水汽输送通道在不同层次、不同个例中的主次作用等存在差异。许彬等(2019)对一次热带风暴背景下南昌暴雨的水汽特征研究表明,水汽主要源自西北太平洋西部,位于 1500 m 以上的层次;其次是从南海东部北上,位于 3000 m 以下的层次;还有孟加拉湾东部、中南半岛南部和云南南部等西南方向的通道。

充沛的水汽在干旱区暴雨形成和发展中,显得尤为重要,因此水汽来源及输送是该区暴雨形成机制及其预报的重要因素。新疆地域广袤,地形复杂,各地水汽来源及输送路径差别较大,不仅在北疆和南疆存在差异,南疆盆地的各区域也存在一些差别(杨莲梅等,2011;李如琦等,2015;张云惠等,2015;庄晓翠等,2014;2017;2020;刘国强等,2017)。南疆西部暴雨过程存在西风气流以及来自阿拉伯海、孟加拉湾、南海的偏南气流及对流层低层偏东气流输送的水汽,南边界水汽输送是南疆西部暴雨的重要水汽来源,东边界水汽输送是该区域短时强降水的重要补给(张云惠等,2015;曾勇和杨莲梅,2017a;2017b;2018;努尔比亚·吐尼牙孜等,2019),除上述水汽源地外,新疆东部暴雨还存在西太平洋及中亚低涡自带的水汽,形成西、南、东边界均具有较强的水汽输入量,并迅速辐合聚集加强,为暴雨的产生提供了充足的水汽(庄晓翠等,2020)。对巴音郭楞蒙古自治州(简称巴州)一次强降水研究表明(刘国强等,2017),乌拉尔山脊前偏北风引导冷空气南下与西风气流汇合于南疆西部地区的西路水汽输送、青藏高原西南侧低涡前部西南气流引导的西南路水汽输送及西太平洋副热带高压引导的偏南水汽输送,主要来源于偏西与偏南气流。近年来,基于 HYSPLIT 模式方法,对南疆暴雨水汽来源及输送路径也开展了一些定量研究,如孙颖姝等(2019)对南疆西部一次暴雨过程研究表明,主要有两条水汽通道,均源于新疆西部的欧亚大陆但输送路径有所差异,偏西路径和转向路径分别主要输送 800 hPa 以上和以下的水汽。牟欢等(2021)对南疆西部一次特大暴雨过程研究表明,水汽来自巴伦支海、喀拉海、挪威海和地中海;水汽轨迹在哈萨克丘陵汇聚后进入北疆,再绕过天山东侧到达罗布泊地区后随低层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%。由此可见,基于 HYSPLIT 模式方法对南疆暴雨水汽的定量研究仅为少数个例,而对极端干旱区塔克拉马干沙漠南缘暴雨过程水汽来源及输送的研究至今几乎没有。因此,开展对极端干旱区沙漠南缘暴雨过程的水汽研究,有利于更好地评估极端干旱区气候特征,为中国沙漠区降水研究和新疆暴雨预报预警提供科技支撑,为防灾减灾救灾和生态文明建设提供决策依据。

1　研究区概况

塔克拉玛干沙漠南缘(36°～39°N、80°～86°E)(以下简称沙漠南缘)主要包括和田地区中东部(洛浦、策勒、于田、民丰站)和巴州南部(且末站),位于欧亚大陆腹地,帕米尔高原西部和天山屏障北部,西伯利亚冷空气不易侵入;昆仑山、喀喇昆仑山绵亘于南部(图 1),几乎阻隔了来自印度洋的暖湿气流,形成了暖温带极端干旱荒漠气候,四季分明,冬季冷而不寒,春季多沙尘暴、浮尘天气,夏季炎热干燥,秋季降温快。全年降水稀少,光照充足,热量丰富。历年年均降水量为 44 mm,年蒸发量为 2480 mm。

2　资料和方法

2.1　资　料

选取 2001—2020 年暖季 5—9 月 5 个国家级气象观测站(图 1)逐日降水量(20 时至次日 20 时,北京时),按新疆暴雨标准(24 h 日降水量 R,24.0 mm $<R\leqslant$48.0 mm 为暴雨,$R\geqslant$48.1 mm 为大暴雨),筛选出沙漠南缘暴雨过程 5 个。利用 NCEP/NCAR(1°×1°)资料,运用欧拉方法分析暴雨过程的水汽输送和收支特征,再利用 GDAS 资料(时间分辨率为6 h,水平分辨率为 2.5°×2.5°,包括 1000～10 hPa 共 17 层上的位势高度、纬向风、经向风和 1000～300 hPa 各层比湿等要素),运用 HYSPLIT 模式模拟暴雨过程水汽的后向追踪运动轨迹,得出影响沙漠南缘暴雨过程的主要水汽来源、输送及其对暴雨的贡献,并与欧拉方法得到的结果进行对比,探讨沙漠南缘暴雨发生期间的水汽特征。

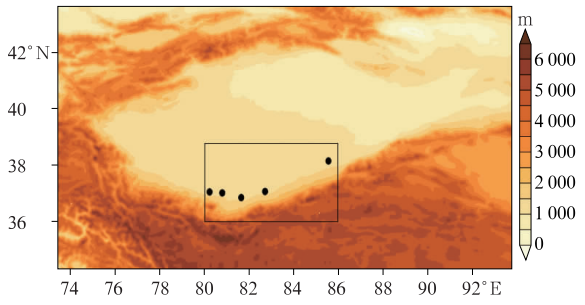


图 1 南疆地形(填色)、研究区域(方框)及其暴雨中心站点(黑点)分布

Fig. 1 Terrain (colored) of southern Xinjiang, study area (box) and station distribution (black dot) of the rainstorm centers

2.2 方 法

利用 HYSPLIT(Draxler and Hess,1998)模式后向模拟追踪沙漠南缘暴雨水汽源地和输送特征。HYSPLIT 是 NOAA 等机构联合开发的一种可处理不同气象要素输入,不同排放源,不同物理过程的输送、扩散、沉降过程的模式系统,能够追踪气块的来源(Stohl and James,2004;Makra et al,2011)。沙漠南缘国家站海拔高度多在 1 300 m 以上,因此,选取站点(暴雨中心)初始高度时考虑测站海拔高度,模拟追踪暴雨中心 500 hPa(5 000 m)、700 hPa(3 000 m)距地面的初始高度。取 GDAS 资料运用 HYSPLIT 模式模拟每次暴雨过程初始点向后追踪 7 d 的水汽三维运动轨迹,每隔 6 h 重新向后追踪 7 d,得到无数条轨迹。因 HYSPLIT 模式输出的轨迹条数较多,为了更加直观清晰地分辨出初始点(暴雨中心)的水汽来向、源地及其对暴雨的贡献,采用聚类分析法对大量轨迹按照最近的原则进行合并分组。根据总空间方差(TSV)的变化和总空间变化率确定轨迹聚类的条数,随着聚类条数的减少,TSV 的变化迅速上升,将 TSV 大幅度增加的几个点之前的数暂定为聚类条数,进一步计算 TSV 的变化率,最终将轨迹数小,变化率小的数作为轨迹聚类数。

3 结果分析

3.1 平均环流背景

分析沙漠南缘 5 次暴雨过程的平均场(对 5 次暴雨过程前一日 4 次要素场进行平均)可知,100 hPa 南亚高压呈带状或单体型较多(4 例),高压主体位于 20°N 以南,不同于南疆西部和天山两侧暴雨(张家宝和邓子风,1987);200 hPa 高空西南急流位于南疆盆地(图 2a)。500 hPa 为两脊两槽的经

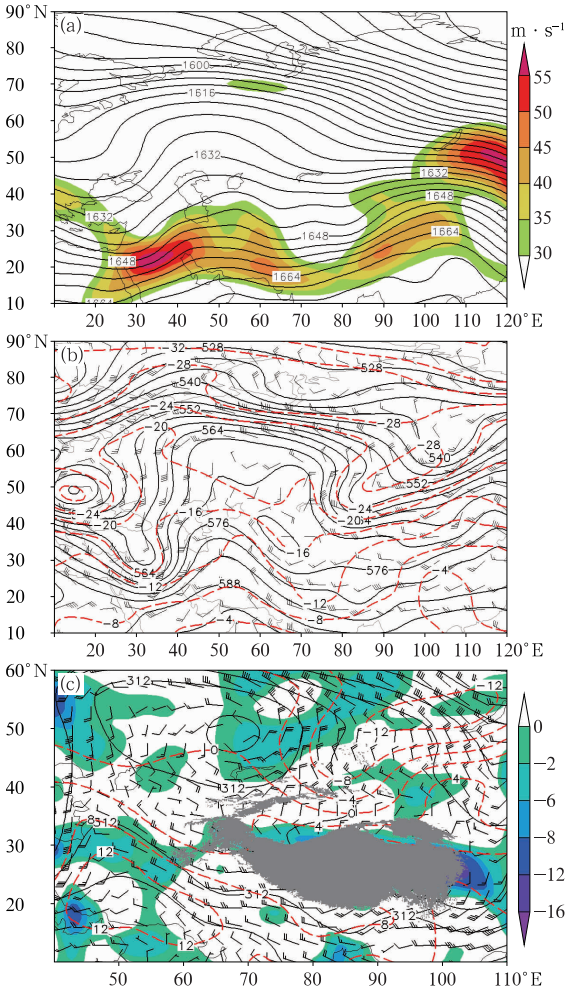


图 2 沙漠南缘 5 次暴雨过程平均环流场

(a)100 hPa 高度场(等值线,单位:dagpm)和 200 hPa 高空急流(填色),(b)500 hPa 高度场(黑色实线,单位:dagpm)、风场(风羽,单位:m·s^{-1})、温度场(红色虚线,单位:℃),(c)700 hPa 高度场(实线,单位:dagpm)、风场(风羽,单位:m·s^{-1})、温度场(红色虚线,单位:℃)、水汽通量散度(填色,单位:10^{-6} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1})

(浅灰色为大于 3 000 m 地形)

Fig. 2 Average circulation field of 5 rainstorm processes in the southern margin of the desert

(a) 100 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm) and 200 hPa upper-level jet stream (colored), (b) 500 hPa geopotential height (black solid line, unit: dagpm), wind field (barb, unit: m·s^{-1}), temperature field (red dashed line, unit: ℃), (c) 700 hPa geopotential height (black solid line, unit: dagpm), wind field (barb, unit: m·s^{-1}), temperature field (red dashed line, unit: ℃), and water rapor flux divergence (colored, unit: 10^{-6} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1})

(light gray shaded for above 3 000 m terrain)

向环流,西欧和西伯利亚至中亚的高、中、低纬度为低压活动区,槽底南伸至 30°N 附近,槽前西南气流分裂短波槽东移北上,是造成沙漠南缘暴雨的主要影响系统。伊朗副热带高压与里海、咸海高脊同位相叠加,环流经向度加大,东亚为高压脊区(图 2b)。700 hPa新疆为脊前偏北气流,偏北气流与高原大地形垂直,在沙漠南缘形成明显的辐合(图 2c),有利于水汽辐合抬升,为暴雨的产生提供充足的水汽和动力条件。

3.2　欧拉方法的水汽输送和收支

3.2.1　水汽源地及输送

图 3 是沙漠南缘 5 个暴雨过程从地面到 300 hPa 积分的平均水汽通量分布。由此可见,暴雨前期(暴雨发生前 48 h,每日 4 次的平均)、初期(暴雨发生时,最近时次的平均)、期间(暴雨期间每日 4 次的平均)输送至暴雨区的水汽均较少。来自挪威海的水汽北上至北欧北部,然后东南下,沿途得到黑海、里海的水汽补充,三支水汽在东欧汇合,强度增强,在西西伯利亚部分水汽南下,经巴尔喀什湖和咸海,强度略有增强;在中亚中纬度分为两支,一支在阿富汗东北部沿槽底偏西气流,翻越帕米尔高原大地形,只有很少的水汽输送至暴雨区(图 3a)。另一支继续南下至伊朗东南部得到阿拉伯海北上水汽补充,再沿槽前西南气流从巴基斯坦北部,翻越昆仑山大地形损失很多,少量的水汽输送至暴雨区(图 3b)。另外一支是从阿拉伯海—印度半岛—孟加拉湾,沿青藏高原东部北上至河西走廊—哈密(简称东路),东灌进入南疆盆地,部分水汽从西北、偏北、东北路径输入暴雨区(图 3c)。总之,来自北欧、黑海及中亚的水汽,由于沿途地形复杂,损失很多,只有很少的一部分水汽到达暴雨区,相对而言,阿拉伯海、孟加拉湾的东路水汽在环流合适的条件下,对沙漠南缘暴雨贡献较大。可见,该结论无法定量说明各路径水汽对暴雨的贡献大小。

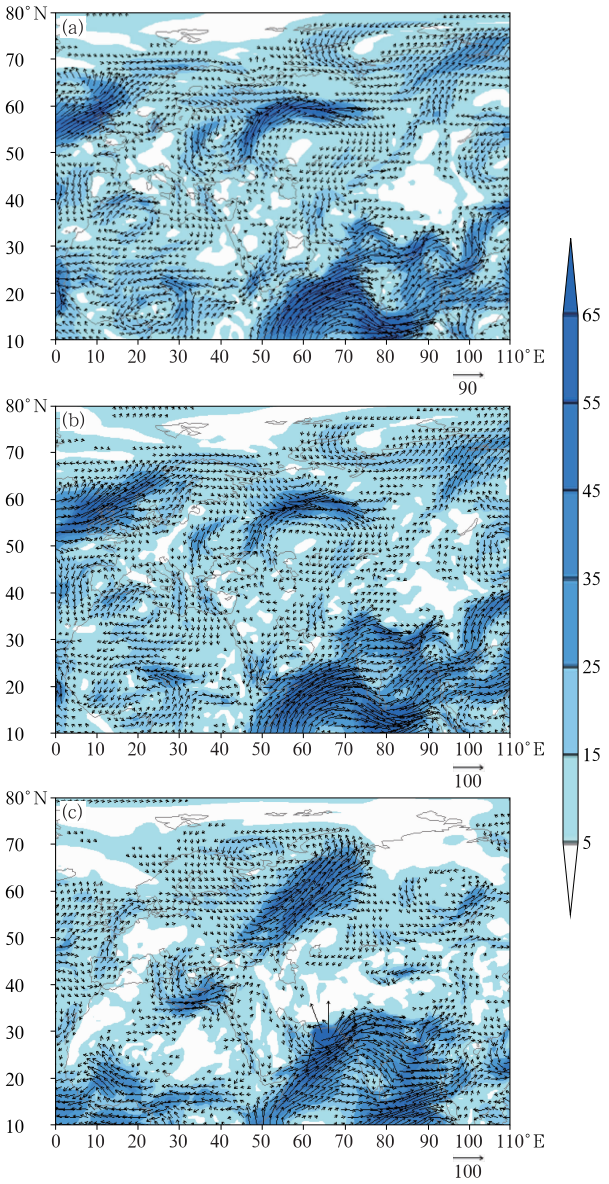


图 3　沙漠南缘暴雨过程地面至 300 hPa 积分的平均水汽通量(矢量,填色,单位:kg·m^{-1}·s^{-1})
(a)暴雨前期,(b)暴雨初期,(c)暴雨期间

Fig. 3　Average water vapor flux from surface to 300 hPa integral during rainstorm in the southern margin of desert (vector, colored, unit: kg·m^{-1}·s^{-1})
(a) early stage of the rainstorm, (b) beginning of the rainstorm, (c) during the rainstorm

3.2.2　水汽收支

计算沙漠南缘暴雨区(图 1 方框)5 个暴雨过程期间逐 6 h 各边界的水汽输入(西边界和南边界正值、东边界和北边界负值为输入)和输出量(西边界和南边界负值、东边界和北边界正值为输出),地面~700 hPa(对流层低层,简称低层)、700~500 hPa(对流层中层,简称中层)、500~300 hPa(对流层高层,简称高层),分析暴雨区水汽输送和收支特征。由表1可知,总体上,暴雨期间对流层低层西、北、东边界均为水汽输入,其中,东边界最大,西边界最小;南边界无水汽输入,主要是南边界昆仑山海拔多在 3000 m 以上,阻滞了水汽北上,西边界海拔高度相对较低。中层西、东边界为输入,后者较多;其他边界为输出。高层西、南边界为输入(可能是影响系统自带的水汽);其他边界为输出。可见,沙漠南缘暴

雨整层水汽西边界输入最多(3.85×10^8 t),北边界最少(0.43×10^8 t)。与上节的结论一致,但无法区分各水汽源地对暴雨的贡献大小。在不同的暴雨个例中各边界水汽收支存在一些差异,尤其是第1例(表1)。分析表明,该次过程只有于田站达暴雨,且100 hPa南亚高压为双体型(图略)与该区域100 hPa平均场(图2a)明显不同,而南亚高压在新疆暴雨中具有重要的作用(张家宝和邓子风,1987)。

表1 沙漠南缘5次暴雨期间暴雨区水汽收支情况(单位:10^8 t)

Table 1 Water vapor budget (unit: 10^8 t) in the rainstorm area during 5 rainstorm processes in the southern margin of desert

日期/(年月日-日)	西边界			北边界			东边界			南边界		
	低	中	高	低	中	高	低	中	高	低	中	高
20010729-30	−1.39	−0.06	3.58	−2.82	1.82	3.88	−2.92	−0.72	2.33	0	0.28	3.00
20100605-06	3.81	2.49	0.15	−5.79	1.43	0.82	−6.69	−4.27	−0.24	0	−0.80	−0.25
20160902-03	2.41	1.72	1.08	−1.55	2.19	0.83	−2.20	−1.13	1.30	0	−1.44	1.16
20190625-27	2.39	0.72	1.51	−0.74	−0.17	1.28	0.45	0.97	2.74	0	−0.47	2.91
20200506-07	1.72	−0.97	0.10	−1.71	−1.56	−0.06	−4.08	−0.07	0.54	0	−0.57	−0.27
平均	1.79	0.78	1.28	−2.52	0.74	1.35	−3.09	−1.04	1.33	0	−0.60	1.31

注:表中低、中、高分别表示对流层低层、中层、高层。

Note: low, middle and high indicate lower troposphere, middle troposphere, upper troposphere.

3.3 HYSPLIT模式水汽轨迹分析

3.3.1 500 hPa水汽特征

用HYSPLIT模式模拟沙漠南缘5次暴雨个例,追踪其500 hPa高度7 d的后向水汽轨迹,对每次暴雨的轨迹聚类后水汽轨迹为4～6条,共24条(图4)。其中20条轨迹经IPA关键区(即水汽自源地出发主要经巴基斯坦北部、印度西北部、阿富汗东北部,简称IPA关键区)(图4f),翻越昆仑山(或帕米尔高原)从偏西(西南、西北)路径(18条)进入沙漠南缘暴雨区。有4条轨迹自源地经北疆,翻越天山后进入南疆盆地(简称南疆关键区;图4f),主要从东北(1条)、偏西(3条)路径进入暴雨区(图4b、4d)。

图5对应给出各暴雨过程不同水汽后向轨迹比湿随时间的变化,即图5中C1、C2、C3、C4、C5、C6分别对应图4中水汽轨迹1、2、3、4、5、6的比湿。另外,统计分析图4a～4e沙漠南缘5例暴雨500 hPa水汽轨迹的空间分布和高度变化,以及水汽轨迹的比湿变化(图5),其结果见表2。

3.3.1.1 IPA关键区500 hPa对暴雨的贡献

由图4a～4e可知,沙漠南缘暴雨的水汽源地主要来自西南亚(亚洲西南部8个国家及其海域,包括红海和非洲东海岸的索马里及其沿岸)共12条轨迹,称水汽源地Ⅰ(简称源地Ⅰ);地中海和黑海及其附近3条(简称源地Ⅱ)、大西洋及其沿岸2条(简称源地Ⅲ)、中亚(2条)和中欧(1条)共8条轨迹称其他源地,简称其他。从表2可知,源地Ⅰ对沙漠南缘暴雨的贡献是4%～50%,平均为19%;水汽从2～3478 m的高度(平均为768 m)向500 hPa暴雨区输送;水汽在源地的比湿为2.15～18.70 g·kg^{-1},平均为11.08 g·kg^{-1},到达暴雨区的比湿为1.10～4.43 g·kg^{-1},平均为2.69 g·kg^{-1};水汽从源地Ⅰ到达暴雨区的过程中减少了8.39 g·kg^{-1},损失达

表2 沙漠南缘暖季暴雨500 hPa高度水汽源地及其对暴雨的贡献

Table 2 Water vapor source at 500 hPa height and its contribution to rainstorm in the warm season in the southern margin of desert

关键区	水汽源地	轨迹数	R/%		h/m		q_1/(g·kg^{-1})		q_2/(g·kg^{-1})		损失/%
			范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	
IPA	源地Ⅰ	12	4～50	19	2～3478	768	2.15～18.70	11.08	1.10～4.43	2.69	76
	其他	8	4～39	23	342～7524	4699	0.25～4.36	1.68	0.55～3.30	1.60	5
南疆		4	18～29	22	5～128	41	5.24～7.51	6.52	1.58～3.54	2.84	56

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$(q_1-q_2)/q_1\times100\%$;下同。

Note: R, h and q_1 respectively represent the contribution rate, height and specific humidity of water vapor source area to the rainstorm, while q_2 represents specific humidity of rainstorm area, loss is average $(q_1-q_2)/q_1\times100\%$; the same below.

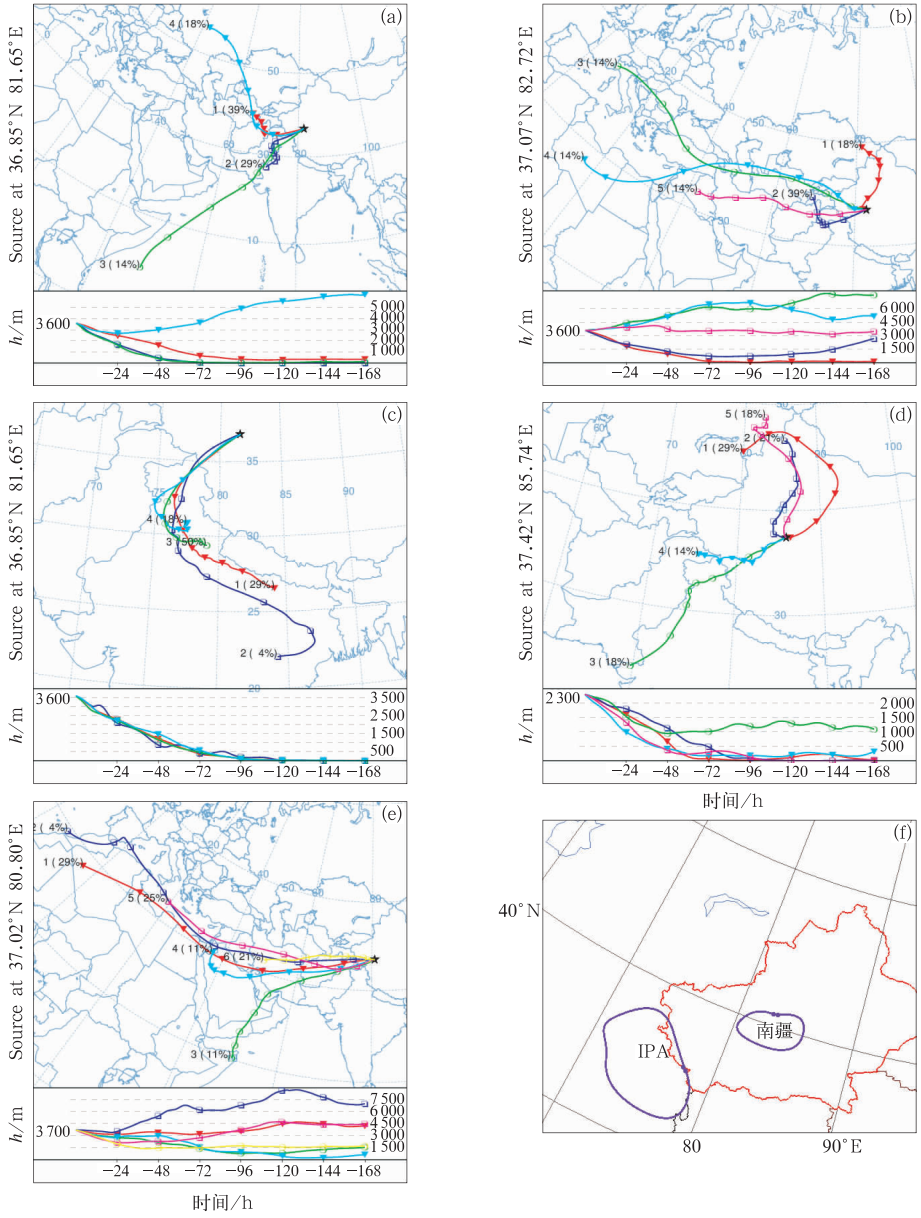


图 4　沙漠南缘 5 次暴雨过程

(a)2001 年 7 月 30 日,(b)2010 年 6 月 6 日,(c)2016 年 9 月 3 日,(d)2019 年 6 月 27 日,(e)2020 年 5 月 7 日的 500 hPa 水汽轨迹的空间分布及高度变化和(f)水汽主要关键区

(数字 1,2,3,4,5,6 表示水汽的轨迹序数,括号中的百分率是水汽源地对暴雨的贡献率)

Fig. 4　Spatial distribution and height variation of 500 hPa water vapor transport channels in the southern margin of deseat during five rainstorm processes respectively

(a) 30 July 2001, (b) 6 June 2010, (c) 3 September 2016, (d) 27 June 2019 and (e) 7 May 2020, as well as (f) water vapor main key area

(Numbers 1, 2, 3, 4, 5, 6 indicate the ordinal number of water vapor tracks, and the percentages in brackets represent the contribution rate of water vapor source to rainstorm)

76%。其他源地的水汽对暴雨的贡献是 4%～39%,平均为 23%;水汽在源地的比湿为 0.25～4.36 g·kg^{-1},平均为 1.68 g·kg^{-1},到达暴雨区的比湿为 0.55～3.30 g·kg^{-1},平均为 1.60 g·kg^{-1};水汽从源地到达暴雨区的过程中减少了 0.08 g·kg^{-1},损失较小(5%)。

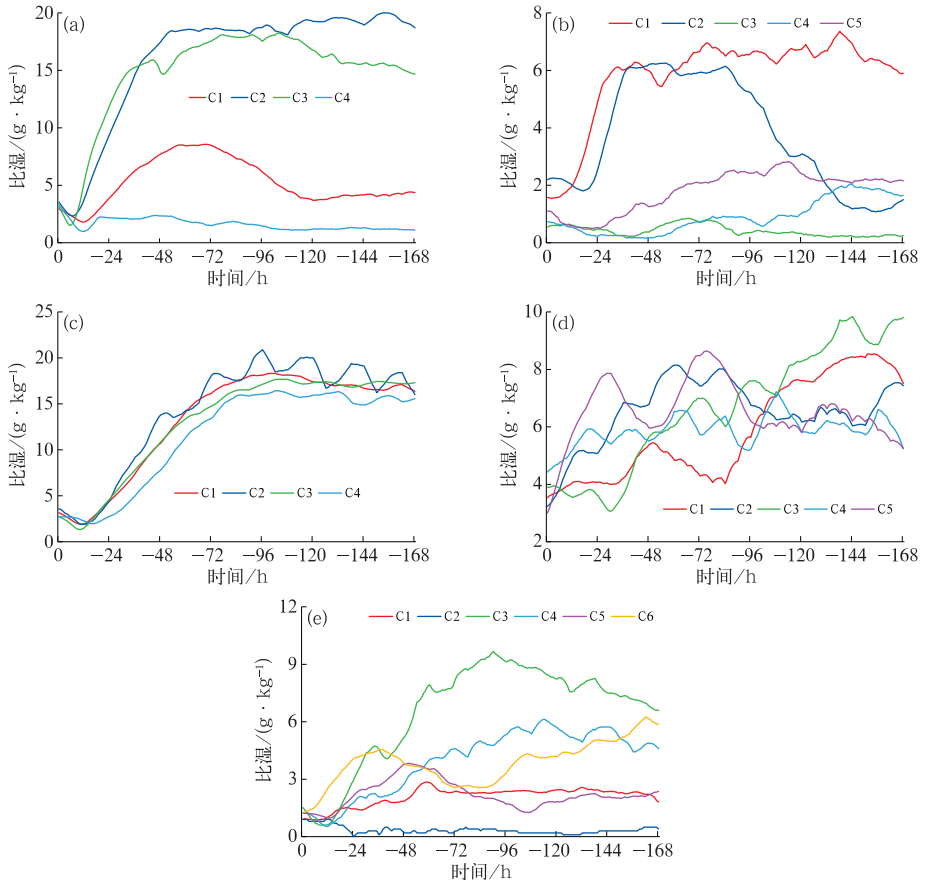


图 5 同图 4a～4e,但为 500 hPa 水汽轨迹的比湿变化

(图中 C1,C2,…,C6 对应图 4 中 1,2,…,6 轨迹的比湿)

Fig. 5 Same as Figs. 4a－4e, but for variation of the specific humidity of water vapor track at 500 hPa

(C1, C2, …, C6 correspond to the specific humidity of trajectory 1, 2, …, 6 in Fig. 4)

3.3.1.2 南疆关键区 500 hPa 对暴雨的贡献

如表 2 所示,水汽来自中亚(3 条)和北疆(1 条)共 4 条轨迹,对暴雨的贡献是 18%～29%,平均为 22%。水汽从 5～128 m 的近地层(平均为 41 m)向 500 hPa 的暴雨区输送。水汽在源地的比湿为 5.24～7.51 g·kg^{-1},平均为 6.52 g·kg^{-1},到达暴雨区为 1.58～3.54 g·kg^{-1},平均为 2.84 g·kg^{-1};水汽从源地到达暴雨区的过程减少了 3.68 g·kg^{-1},损失较多,达 56%。

500 hPa 上影响沙漠南缘暴雨的水汽自源地主要经 IPA 和南疆关键区,后者对暴雨的贡献较大,损失较小。来自源地Ⅰ的水汽,由于沿途地形复杂损失很大,对暴雨的贡献较小,其他源地水汽损失较小。分析图 4a～4e 可知,影响沙漠南缘的源地Ⅰ(91.7%)、中亚(80.0%)及北疆的水汽主要从≤2000 m 的高度向 500 hPa 暴雨区上空输送,来自地中海附近、大西洋及其沿岸、中欧的水汽主要从>2000 m 的高度向 500 hPa 暴雨区上空输送。

3.3.2 700 hPa 水汽特征

用 HYSPLIT 模式模拟沙漠南缘 5 个暴雨过程,追踪其 700 hPa 7 d 的后向水汽轨迹,对每次暴雨的轨迹聚类后得出水汽轨迹为 2～5 条,共 16 条(图 6)。其中 9 条轨迹自源地出发经北疆,翻越天山进入南疆关键区(图 4f),在环流合适的条件下,主要从偏北(东北)路径(8 条)、西南(偏西)(1 条)路径接力输送至暴雨区。7 条轨迹自源地出发,经 IPA 关键区(图 4f)翻越昆仑山或西天山,从西南(偏西)路径进入暴雨区(图 6)。

图 7 对应给出各暴雨过程不同水汽后向轨迹比湿随时间的变化。另外,统计分析图 6 沙漠南缘 5 例暴雨 700 hPa 水汽轨迹的空间分布和高度变化以及水汽轨迹的比湿变化(图 7),其结果见表 3。

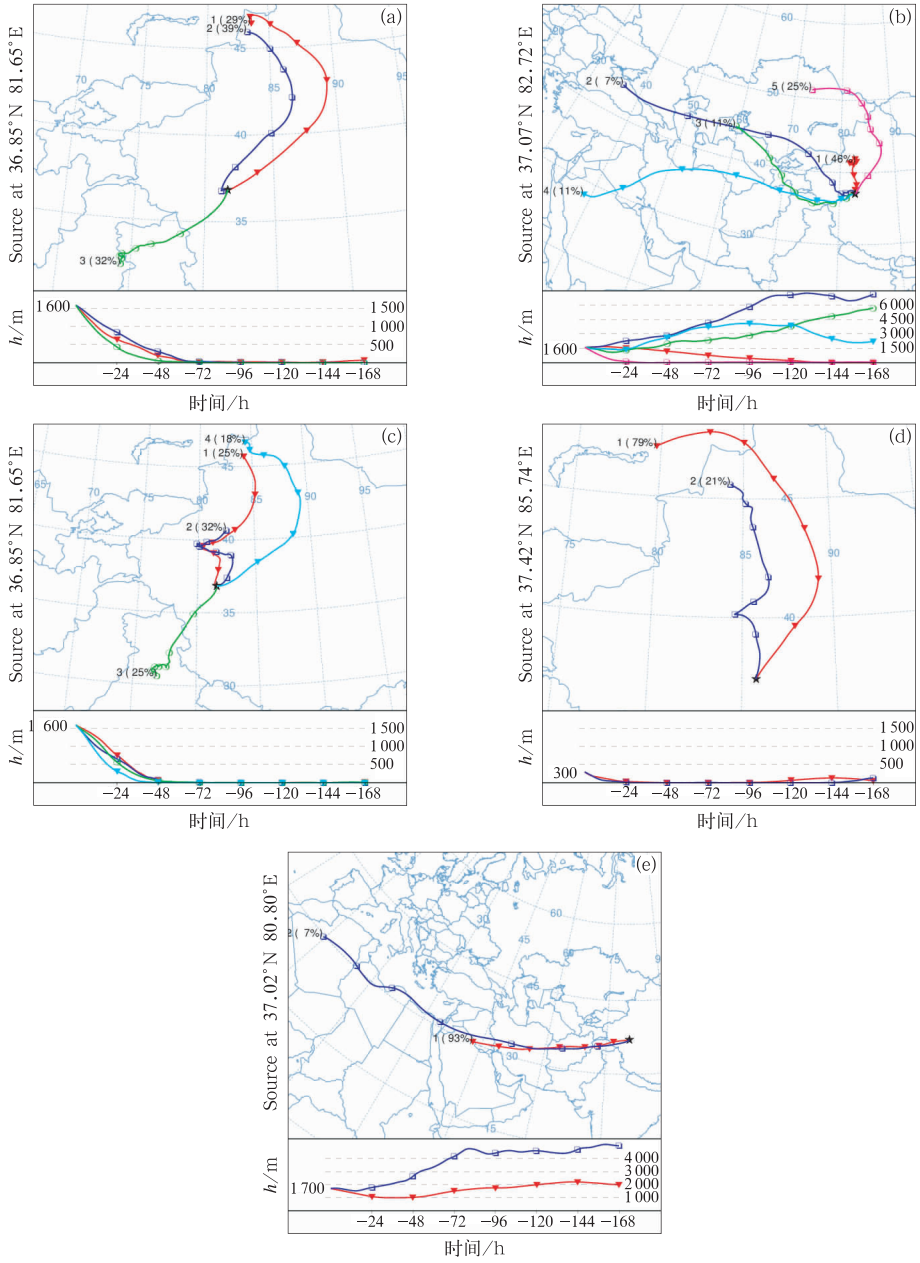


图 6　同图 4a～4e，但为 700 hPa

Fig. 6　Same as Figs. 4a—4e, but at 700 hPa

下文分析 700 hPa 上，IPA 关键区和南疆关键区对暴雨的贡献。

3.3.2.1　IPA 关键区 700 hPa 对暴雨的贡献

如表 3 所示，IPA 关键区，水汽源地Ⅰ(4 条)、中亚(1 条)和源地Ⅱ(2 条)共 7 条轨迹(图 6a、6b、6c、6e)，对暴雨的贡献是 7%～93%，平均为 30%。水汽从 0～7136 m 的高度(平均为 3 106 m)向 700 hPa 的暴雨区输送。水汽在源地的比湿为 0.15～17.33 g·kg^{-1}，平均为 5.73 g·kg^{-1}，到达暴雨区为 1.85～6.47 g·kg^{-1}，平均为 3.81 g·kg^{-1}。水汽从源地到达暴雨区的过程损失较多(34%)。

3.3.2.2　南疆关键区 700 hPa 对暴雨的贡献

由表 3 可知，水汽源地主要来自北疆—塔额盆地(5 条)，对暴雨的贡献是 18%～39%，平均为 26%。水汽从 3～135 m 的近地层(平均为 75 m)向 700 hPa 的暴雨区输送(图 6a、6c、6d)。水汽在源地的比湿为 6.18～9.20 g·kg^{-1}，平均为 7.15 g·kg^{-1}，到达暴雨区为 5.56～7.98 g·kg^{-1}，平均为 6.35 g·kg^{-1}。水汽从源地到达暴雨区的过程减少了 0.80 g·kg^{-1}，损失较少(11%)。

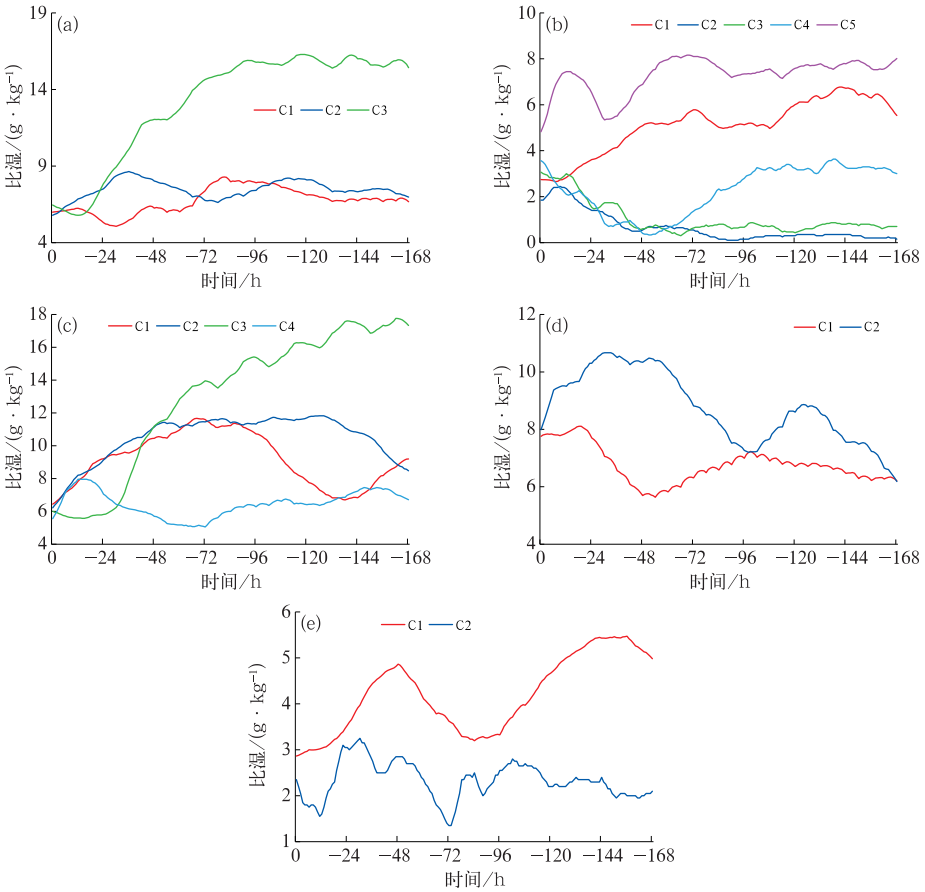


图 7 同图 5,但为 700 hPa

Fig. 7 Same as Fig. 5, but at 700 hPa

表 3 同表 2,但为 700 hPa

Table 3 Same as Table 2, but for 700 hPa height

关键区	水汽源地	轨迹数	R/%		h/m		q_1/(g·kg^{-1})		q_2/(g·kg^{-1})		损失/%
			范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	
南疆	北疆	5	18～39	26	3～135	75	6.18～9.20	7.15	5.56～7.98	6.35	11
	其他Ⅰ	4	25～79	46	9～82	52	5.53～8.48	7.06	2.75～7.75	5.39	24
IPA		7	7～93	30	0～7136	3106	0.15～17.33	5.73	1.85～6.47	3.81	34

水汽源自中亚(2 条)、南疆盆地(2 条)(称其他源地Ⅰ,简称其他Ⅰ)共 4 条轨迹,经南疆关键区,主要从偏北(东北)路径进入暴雨区(图 6b、6c、6d)。对暴雨的贡献是 25%～79%,平均为 46%。水汽从 9～82 m 的近地层(平均为 52 m)向 700 hPa 的暴雨区输送。水汽在源地的比湿为 5.53～8.48 g·kg^{-1},平均为 7.06 g·kg^{-1},到达暴雨区为 2.75～7.75 g·kg^{-1},平均为 5.39 g·kg^{-1}。水汽从源地到达暴雨区的过程中损失较多,达 24%(表 3)。

700 hPa 上影响沙漠南缘暴雨的水汽自源地出发主要经南疆和 IPA 关键区,前者贡献较大。经 IPA 关键区的水汽自源地到达关键区后由于翻越昆仑山脉,因此沿途损失较大。水汽主要源地是北疆,对暴雨的贡献最大,沿途损失较小。分析图 6 可知,来自北疆和南疆盆地的水汽主要从近地层向 700 hPa 的暴雨区输送;地中海和黑海附近的水汽主要从≥2000 m 的高度向暴雨区输送;来自中亚和西南亚的水汽 50%从近地层向 700 hPa,另 50%从≥2000 m 的高度向暴雨区输送。

在研究时段内沙漠南缘发生暴雨过程,只有 1 例暴雨落区位于 850 hPa 高度以下,后向追踪得 5 条水汽轨迹,个例较少本文未做统计。

3.4　沙漠南缘暴雨过程水汽三维结构

通过上述研究概括出沙漠南缘暴雨过程水汽三维结构模型(图 8)。该模型清晰地反映了沙漠南缘暴雨过程水汽的结构:500 hPa 来自西南亚及大西洋和地中海及其附近等随西风气流东移的水汽汇聚在 IPA 关键区,在环流合适的情况下翻越昆仑山(或帕米尔高原)大地形,主要从西南(偏西)路径输送至沙漠南缘暴雨区上空(86.2%);来自巴尔喀什湖及阿勒泰西南部的水汽经北疆,翻越天山进入南疆关键区,在环流合适的条件下,从偏北路径接力输送至沙漠南缘暴雨区上空,该部分相对较少(16.7%)。700 hPa 来自北疆、中亚、地中海和黑海附近的水汽自源地出发经北疆,翻越天山进入南疆盆地,以及盆地自身的水汽,在环流合适时从偏北路径进入暴雨区(56.3%);来自西南亚、中亚等地的水汽自源地出发到达 IPA 关键区,再翻越昆仑山(或帕米尔高原)从西南路径输入暴雨区(43.8%),可见 700 hPa 经南疆盆地、IPA 关键区的水汽均不容忽视。杨莲梅等(2011)研究指出,新疆境内的暴雨所需水汽主要在 500 hPa 以下,水汽自源地至巴尔喀什湖和四川盆地(关键区)聚集,在环流合适条件下,接力输送至暴雨区;而沙漠南缘暴雨过程在对流层中低层,水汽自源地出发经 IPA 和南疆关键区,在环流合适时,再接力输送至暴雨区,且 2 个关键区在中层(500 hPa)和低层(700 hPa)对暴雨的贡献明显不同(图8)。由此可见,沙漠南缘暴雨过程水汽输送

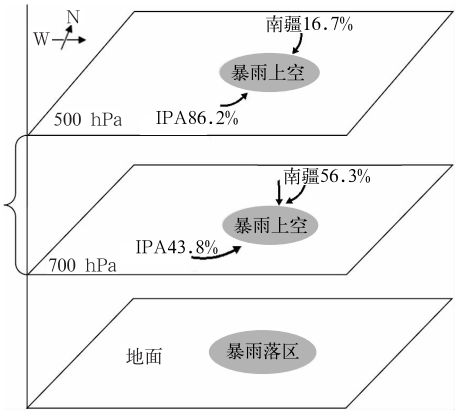


图 8　塔克拉玛干沙漠南缘暴雨过程水汽三维精细结构

Fig. 8　Three-dimensional refined structure of water vapor during rainstorm processes in the southern margin of the Taklimakan Desert

与已有研究成果存在明显的差异(杨莲梅等,2011;牟欢等,2021),这与该区域下垫面特殊的地形及地理位置有密切关系。

4　结论与讨论

本文首先对沙漠南缘暴雨的环流背景进行了分析,然后运用欧拉方法分析了沙漠南缘暴雨天气的水汽,再运用 HYSPLIT 模式方法模拟计算分析了该区暴雨天气的水汽来源及输送特征。主要结论如下:

(1)沙漠南缘暴雨主要发生在 100 hPa 南亚高压单体型,200 hPa 高空西南急流辐散区;500 hPa 西伯利亚至中亚的高、中、低纬度为低压活动区,南疆处于槽前西南气流控制;700 hPa 为脊前偏北气流的高低空配置,为“后倾槽”结构。欧拉方法分析表明,来自北欧、黑海及中亚的水汽,沿途由于地形复杂损失很多,只有很少的一部分水汽到达暴雨区;而阿拉伯海、孟加拉湾的东路水汽在环流合适的条件下,对沙漠南缘暴雨贡献较大。水汽东边界输入最多,其次为西边界,再次是北边界,南边界最少。该结论无法定量说明水汽源地及其路径对暴雨的贡献大小。

(2)HYSPLIT 模式方法分析表明:影响沙漠南缘暴雨天气的水汽源地主要是西南亚、中亚、北疆,其他源地的较少;水汽自源地出发经 IPA 和南疆关键区,在环流合适的条件下,分别从西南和偏北路径进入暴雨区。南疆关键区对暴雨的贡献较大;500 hPa 南疆关键区的水汽损失较小,700 hPa 两个关键区的贡献基本一致。500 hPa 源自西南亚的水汽对暴雨的贡献较大,由于沿途地形复杂损失很大;700 hPa 水汽主要源地是北疆,对暴雨的贡献最大,沿途损失较小。来自北疆和南疆盆地的水汽主要从近地层向 700 hPa 的暴雨区输送;来自西南亚、地中海和黑海及其附近、大西洋及其沿岸等地的水汽主要向 700 hPa 以上的高度输送。

(3)建立了沙漠南缘暴雨过程水汽的三维结构模型:沙漠南缘暴雨过程在对流层中低层,水汽自源地出发经 IPA 和南疆关键区,再接力输送至暴雨区,且两个关键区在中层(500 hPa)和低层(700 hPa)对暴雨的贡献明显不同。500 hPa 水汽自源地出发,主要随西风气流东移至 IPA 关键区,在环流合适的情况下翻越昆仑山大地形,从西南(偏西)路径输入暴雨区(86.2%),少部分(16.7%)水汽自源地

出发翻越天山经南疆关键区，从偏北路径进入暴雨区。700 hPa水汽输送相对较复杂，56.3%的水汽自源地出发，进入南疆关键区，在环流合适时从偏北路径进入暴雨区；43.8%的水汽自源地出发到达IPA关键区，再翻越昆仑山从西南路径到达暴雨区。即中层IPA关键区占主导地位，低层两个关键区的作用均不容忽视，这与以往的研究成果不同(杨莲梅等，2011；牟欢等，2021)。

由于塔克拉玛干沙漠南缘暴雨天气为小概率事件，近20年只发生了5次。本文主要对5次过程的暴雨中心追踪7 d的后向水汽轨迹进行了讨论，后期有待于更多的暴雨个例进行验证。另外，由于沙漠南缘地形复杂，偏北气流有利于地形的辐合抬升，但水汽是如何迅速辐合集中的有待在今后的工作中探讨。

参考文献

陈斌，徐祥德，施晓晖，2011. 拉格朗日方法诊断2007年7月中国东部系列极端降水的水汽输送路径及其可能蒸发源区[J]. 气象学报，69(5)：810-818. Chen B，Xu X D，Shi X H，2011. Estimating the water vapor transport pathways and associated sources of water vapor for the extreme rainfall event over east of China in July 2007 using the Lagrangian method[J]. Acta Meteor Sin，69(5)：810-818(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).

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).

江志红，任伟，刘征宇，等，2013. 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，71(2)：295-304. Jiang Z H，Ren W，Liu Z Y，et al，2013. Analysis of water vapor transport characteristics during the Meiyu over the Yangtze-Huaihe River Valley using the Lagrangian method[J]. Acta Meteor Sin，71(2)：295-304(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).

李如琦，唐冶，肉孜·阿基，2015. 2010年新疆北部暴雪异常的环流和水汽特征分析[J]. 高原气象，34(1)：155-162. Li R Q，Tang Y，Rouzi A J，2015. Atmospheric circulation and water vapor characteristics of snowstorm anomalies in Northern Xinjiang in 2010[J]. Plateau Meteor，34(1)：155-162(in Chinese).

李晓容，高青云，付世军，2020. 四川盆地东北部三次持续性暴雨过程水汽输送特征分析[J]. 暴雨灾害，39(3)：234-240. Li X R，Gao Q Y，Fu S J，2020. Analysis of water vapor transport characteristics of the three persistent rainstorm processes in northeastern Sichuan Basin[J]. Torr Rain Dis，39(3)：234-240(in Chinese).

刘国强，佟欣怡，杨莲梅，等，2017. 巴州地区一次罕见短时强降水过程诊断分析[J]. 气象与环境学报，33(6)：16-24. Liu G Q，Tong X Y，Yang L M，et al，2017. Diagnostic analysis of an unusual flash heavy rain in Bayingolin Mongol Autonomous Prefecture[J]. J Meteor Environ，33(6)：16-24(in Chinese).

牟欢，赵丽，王旭，等，2021. 基于拉格朗日方法的一次南疆西部特大暴雨水汽来源分析[J]. 冰川冻土，43(4)：1157-1165. Mou H，Zhao L，Wang X，et al，2021. Water vapor source analysis of a severe torrential rain in the west of southern Xinjiang based on the Lagrangian method[J]. J Glaciol Geocryol，43(4)：1157-1165(in Chinese).

努尔比亚·吐尼牙孜，张超，李泽巍，等，2019. 南疆西部2016年8月4次暴雨过程特征分析[J]. 干旱气象，37(2)：301-311. Tunyaz N，Zhang C，Li Z W，et al，2019. Characteristics of four rainstorm processes in the west of southern Xinjiang in August 2016[J]. J Arid Meteor，37(2)：301-311(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).

孙颖姝，周玉淑，王咏青，2019. 一次双高空急流背景下南疆强降水事件的动力过程和水汽源分析[J]. 大气科学，43(5)：1041-1054. Sun Y S，Zhou Y S，Wang Y Q，2019. Analysis of dynamic process and moisture source on a heavy precipitation event in southern Xinjiang associated with the double upper-level jet[J]. Chin J Atmos Sci，43(5)：1041-1054(in Chinese).

许彬，熊秋芬，张玉婷，2019. 一次热带风暴背景下南昌暴雨的水汽来源及输送特征[J]. 气象，45(10)：1392-1401. Xu B，Xiong Q F，Zhang Y T，2019. Analysis of moisture source and transport pathways of a rainstorm with tropical cyclone in Nanchang[J]. Meteor Mon，45(10)：1392-1401(in Chinese).

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]. Chin J Atmos Sci，38(5)：965-973(in Chinese).

杨莲梅，李霞，张广兴，2011. 新疆夏季强降水研究若干进展及问题[J]. 气候与环境研究，16(2)：188-198. Yang L M，Li X，Zhang G

X,2011. Some advances and problems in the study of heavy rain in Xinjiang[J]. Climatic Environ Res,16(2):188-198(in Chinese).

姚俊强,杨青,毛炜峄,等,2018. 基于 HYSPLIT4 的一次新疆天山夏季特大暴雨水汽路径分析[J]. 高原气象,37(1):68-77. Yao J Q,Yang Q,Mao W Y,et al,2018. Analysis of a summer rainstorm water vapor paths in Tianshan Mountains (Xinjiang) based on HYSPLIT4 model[J]. Plateau Meteor,37(1):68-77(in Chinese).

曾勇,杨莲梅,2017a. 南疆西部两次短时强降水天气中尺度特征对比分析[J]. 暴雨灾害,36(5):410-421. Zeng Y,Yang L M,2017a. Comparative analysis on mesoscale characteristics of two severe short-time precipitation events in the west of southern Xinjiang[J]. Torr Rain Dis,36(5):410-421(in Chinese).

曾勇,杨莲梅,2017b. 南疆西部一次暴雨强对流过程的中尺度特征分析[J]. 干旱气象,35(3):475-484. Zeng Y,Yang L M,2017b. Mesoscale characteristic analysis of a severe convective weather with torrential rain in the west of southern Xinjiang[J]. J Arid Meteor,35(3):475-484(in Chinese).

曾勇,杨莲梅,2018. 新疆西部一次极端暴雨事件的成因分析[J]. 高原气象,37(5):1220-1232. Zeng Y,Yang L M,2018. Analysis on the causes of an extreme rainfall event in the west of Xinjiang[J]. Plateau Meteor,37(5):1220-1232(in Chinese).

曾钰婷,张宇,周可,等,2020. 青藏高原那曲地区夏季水汽来源及输送特征分析[J]. 高原气象,39(3):467-476. Zeng Y T,Zhang Y,Zhou K,et al,2020. Analysis on the source and transport characteristics of moisture in Naqu of the Qinghai-Tibetan Plateau in summer[J]. Plateau Meteor,39(3):467-476(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).

张云惠,李海燕,蔺喜禄,等,2015. 南疆西部持续性暴雨环流背景及天气尺度的动力过程分析[J]. 气象,41(7):816-824. Zhang Y H,Li H Y,Lin X L,et al,2015. Analysis of continuous rainstorm circulation background and the dynamic process of synoptic-scale in west of southern Xinjiang[J]. Meteor Mon,41(7):816-824(in Chinese).

庄晓翠,李博渊,秦榕,等,2020. 新疆东部一次区域极端暴雨环境场特征[J]. 高原气象,39(5):947-959. Zhuang X C,Li B Y,Qin R,et al,2020. Analysis on the causes of an extreme rainstorm in the eastern Xinjiang[J]. Plateau Meteor,39(5):947-959(in Chinese).

庄晓翠,李健丽,李博渊,等,2014. 北疆北部 2 次区域性暴雨的中尺度环境场分析[J]. 沙漠与绿洲气象,8(6):23-30. Zhuang X C,Li J L,Li B Y,et al,2014. Analysis of mesoscale ambient field of two heavy rainstorms in northern Xinjiang[J]. Desert Oasis Meteor,8(6):23-30(in Chinese).

庄晓翠,李如琦,李博渊,等,2017. 中亚低涡造成新疆北部区域暴雨成因分析[J]. 气象,43(8):924-935. Zhuang X C,Li R Q,Li B Y,et al,2017. Analysis on rainstorm caused by central Asian vortex in northern Xinjiang[J]. Meteor Mon,43(8):924-935(in Chinese).

Draxler R R,Hess G D,1998. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories,dispersion,and deposition[J]. Aust Meteor Mag,47(4):295-308.

James P,Stohl A,Spichtinger N,et al,2004. Climatological aspects of the extreme European rainfall of August 2002 and a trajectory method for estimating the associated evaporative source regions[J]. Nat Hazards Earth Syst Sci,4(5/6):733-746.

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.

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.

Trenberth K E,1998. Atmospheric moisture residence times and cycling:implications for rainfall rates and climate change[J]. Climatic Change,39(4):667-694.

(本文责编:王蕾)