

1979-2017 年冬季新疆北部各区域型暴雪日水汽输送特征分析

李亚云¹ 杨莲梅^{2,3} 成巍¹ 邓志武¹ 李欣⁴

1 北京应用气象研究所, 北京 100029

2 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002

3 中亚大气科学研究中心, 乌鲁木齐 830002

4 新疆乌鲁木齐市第八中学, 乌鲁木齐 830002

摘要 北疆地处内陆干旱半干旱区, 降水的多少对其影响十分巨大。尤其在全球变暖背景下, 北疆地区的降水异常增多。本研究利用 1979-2017 年北疆 40 个站点冬季降水资料、ECMWF ERA-Interim 和 NCEP/NCAR 再分析资料, 基于 HYSPLIT v4.9 模式讨论北疆 4 个区域型暴雪日的水汽输送特征及可能影响机制。研究发现: (1) 各区域型水汽以西边界输入为主, 但西天山型有少量水汽从北边界输入, 天山型有部分水汽从高层南边界输入; (2) 北部型、西部型和西天山型的水汽通道均位于中纬西风带, 但具体位置有所差异。北部型以地中海和黑海水汽输送为主, 贡献率为 58.8%; 西部型以里海西南侧水汽输送为主, 贡献率为 70.8%; 西天山型以黑海和里海东南侧水汽输送为主, 总贡献率为 72.9%; 天山型的水汽源地主要位于印度、伊朗附近, 贡献率为 64.2%; (3) 各区域型位势高度的距平南北均呈现“正-负”分布, 西东均呈现“负-正-负”分布, 但中心强度、位置及范围有所不同, 这种差异导致影响区域的不同。

关键词 暴雪日 水汽输送 北疆 拉格朗日轨迹 环流特征

文章编号

中图分类号 P445

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2204.21137

A Diagnostic Study of Water Vapor Transport and Budget during wintertime snowstorm days over the different regions of Northern Xinjiang in 1979-2017

LI Yayun¹, YANG Lianmei^{2,3}, CHENG Wei¹, DENG Zhiwu¹, and LI Xin⁴

1 Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029

2 Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002

3 Central-Asia Research Center of Atmosphere Science, Urumqi 830002

4 Urumqi NO.8 middle school, Urumqi 830002

Abstract China's Northern Xinjiang is located in a typical inland arid and semi-arid area, over which anomalous precipitation plays an main role. In recent years, anomalous precipitation events have increased with rising global temperatures. In this study, the inter-decadal variability of the wintertime precipitation in Northern Xinjiang have been investigated by using the observational rainfall data of 40 stations、ECMWF ERA-Interim and NCEP/NCAR reanalysis dataset for 1979-2017. This study discusses water vapor transport characteristics of wintertime snowstorm days and possible mechanisms in four regions based on the HYSPLIT v4.9 model. Our main results are as follows: (1) The west boundary input of water vapor is mainly in each region, but a small amount of water vapor is imported from the northern boundary in the western TianShan, and some water vapor is imported from the southern boundary in the upper in the

收稿日期 2022-07-11; **网络预出版日期**

作者简介 李亚云, 女, 1991 年出生, 助理工程师, 主要从事干旱区气候变化及大气环境研究。E-mail: 13262266768@163.com

通讯作者 李亚云, E-mail: 13262266768@163.com

TianShan; (2) the water vapor passages are mainly located in the Eurasia of the mid-latitude westerlies in the north、the west and the western TianShan, but their exact locations are different. The water vapor transport mainly come from the Mediterranean and the Black Sea in the north, and their contribution ratios are 58.8%; The water vapor transport mainly come from the Southwest of the Caspian Sea in the west, and their contribution ratios are 70.8%; The water vapor transport mainly come from The Black Sea and the Southeast of the Caspian Sea in the western TianShan, total contribution ratios are 72.9%; The water vapor mainly come from the India and the Iran in the TianShan, and their contribution ratios are 64.2%. (3) The geopotential height anomaly shows “+ -” from south to north, and shows “- + -” from west to east in the different regions, but the intensity、the range and the location of the anomaly center are different, this difference leads to difference of influential regions.

Keywords Snowstorm days, Water vapor transport, Northern Xinjiang, Lagrange trajectory, Circulation characteristics

1 引言

新疆地处中国西北地区,为典型的内陆干旱半干旱区,年降水量相对较少。加之,“三山夹两盆”的独特地形,使得新疆地区对气候变化反映十分敏感(胡汝骥等,2001)。已有研究表明,新疆地区气候在20世纪80年代前后由暖干向暖湿转变,年降水明显增加(翟盘茂等,1999;姜逢清等,2002;张存杰等,2003;施雅风等,2003;戴新刚等,2006)。同时,极端降水事件发生的频率也明显增加(杨莲梅,2003;孙桂丽等,2011;慈晖等,2014),且北疆高于南疆(杨晓丹和翟盘茂,2005;张延伟等,2012;李佳秀等,2015)。

众所周知,充沛的水汽输送是降水事件形成的必要条件,因此分析新疆降水事件的水汽来源及输送状况对于研究新疆降水成因和机理有重要的意义。史玉光等(2008)指出新疆地区年平均净水汽收入量为 $467.1 \times 10^8 \text{t}$,西、南和北边界为流入边界,东边界为流出边界。刘蕊等(2010)研究了1948–2007年新疆大气水汽通量和其净收支情况,指出了新疆大气水汽输送主要受西伯利亚和蒙古方向的西北风水汽输送带、孟加拉湾路径达到新疆南部的西南风水汽输送带和来自大西洋的西风水汽输送带影响。戴新刚等(2006)研究了影响新疆的定常水汽输送特征和水汽源地,指出了新疆冬、春季水汽源地为里海和地中海,秋季为黑海和里海,夏季为北大西洋和北冰洋。

近年来,随着国内气象界对我国北疆冬季降水的水汽输送及环流特征的高度重视,众多气象学者将目光聚焦到北疆冬季降水方面。杨莲梅等(2010)、赵勇等(2011)、敖娟和孙建奇(2014)、李亚云和杨莲梅(2018)从气候角度研究北疆冬季降水的水汽输送特征,指出了北疆冬季降水的水汽输送路径以西方和西南方为主。张书萍和祝从文(2011)、张俊兰等(2013)、李如琦等(2015)、杨莲梅和刘雯(2016)、王遵娅和

周波涛(2018)从北疆强暴雪角度研究其水汽源地,指出了北疆冬季降水的水汽源地主要是地中海、里海、红海和阿拉伯海湾。上述有关水汽输送及来源的研究均基于欧拉方法,但由于大气风场往往具有瞬时变化特征,使得欧拉方法给出的水汽通量随时间变化往往也具有瞬时特征,无法定量的区分各水汽源对冬季降水的贡献。

拉格朗日方法可以通过模拟气团在一定时间内的三维运动轨迹,从而定量研究各源地和路径的水汽输送贡献,因此在大气输送和扩散中得到广泛使用(Brimelow and Reuter, 2005; Gimeno et al., 2010; 陈斌等, 2011; 杨浩等, 2014; 朱丽等, 2019; 李永华等, 2021)。目前,部分学者已将拉格朗日方法用到新疆降水水汽输送研究中(姚志强等, 2018; 孙颖姝等, 2019; 刘晶等, 2019; 姜晓飞等, 2021; 牟欢等, 2021),但他们更多的是基于某次强降水过程进行水汽输送的定量分析,从气候角度定量分析水汽输送情况较少。因此,本文将基于拉格朗日轨迹模式HYSPLIT v4.9,结合1979–2017年冬季站点降水特征对北疆进行分区,从而得出各区域型暴雪日的主要水汽输送通道及其贡献。以期更加系统的、科学的认识北疆各区域冬季暴雪日的水汽输送特征,并为该地区开展相关科学研究和降水预报提供更加有效的参考价值。

2 资料与方法

2.1 资料

本文使用的日降水资料是新疆气象局提供的1979–2017年北疆40个气象观测站点逐日降水资料,用于选取北疆暴雪过程,并对其进行区域划分。其它资料包括同期ECMWF ERA-Interim的6h一次、水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的大气环流资料(包括1000~300hPa共20层的位势高度、温度、比湿、垂直

速度、纬向风和经向风) (<https://apps.ecmwf.int/datasets/> [2021-09-14]), 主要用于水汽通量的计算及大气环流特征研究。除此之外, 还包括同期 NCEP/NCAR 的 6h 一次、水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的大气环流资料 (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> [2021-09-14]), 用于 HYSPLIT v4.9 模式的 7 天后向轨迹追踪。

暴雪是指某天某测站点出现降雪, 且 24h 累计降雪量 $\geq 12.1\text{mm}$ 的降雪天气 (新疆气象局 2004 年制定的标准), 暴雪日的入选条件是某天北疆至少 2 个测站点出现暴雪天气, 共选取 44 个暴雪日。本文在前

人 (辛渝等, 2008; 张俊兰等, 2013) 研究基础上, 结合 44 个暴雪日的特征对其进行区域划分, 具体步骤如下:

分别画出 44 个暴雪日的暴雪站点分布图 (图略);

根据各暴雪日最大降雪站点位置及暴雪站点落区范围确定划分类型 (一般各类型区域要包含各暴雪日 3/4 以上的暴雪站点)。

最终将北疆暴雪划分为 4 类 (如图 1), 即北部型、西部型、西天山型和天山型。其中, 北部型有 12 个暴雪日、西部型有 13 个暴雪日、西天山型有 9 个暴雪日、天山型有 10 个暴雪日 (如表 1)。

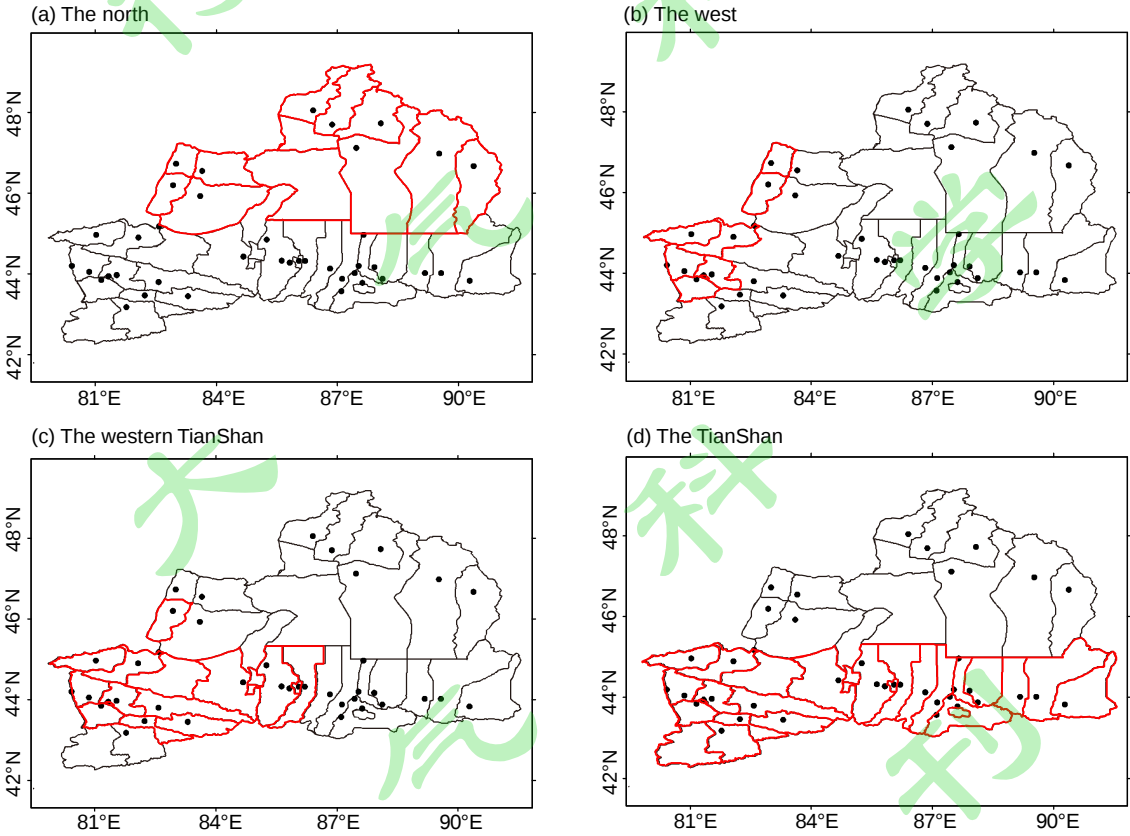


图 1 北疆暴雪日划分的四个区域分布图 (红色区域) ((a) 北部型; (b) 西部型; (c) 西天山型; (d) 天山型) (黑点表示北疆气象观测站点)

Fig.1 The distribution of four different regions in Northern Xinjiang (red regions) ((a) the north; (b) the west; (c) the western TianShan; (d) the TianShan) (The black dots represent meteorological observation stations in Northern Xinjiang)

2.2 HYSPLIT v4.9 模式轨迹模拟方案

本文以每个区域型暴雪日的暴雪站点为 HYSPLIT v4.9 模式 (https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php [2021-09-14]) 后向轨迹追踪模拟的起点, 水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 垂直方向选取 1500,

3000, 5000m 三个高度层作为模拟的初始高度。然后进行后向轨迹追踪, 步骤如下:

(1) 判断后向轨迹追踪天数。考虑到以往类似研究和大规模环流系统持续时间, 本文首先进行后向 7 天和 10 天轨迹追踪, 分别得到北疆后向 7 天和 10 天轨迹条数。然后采用簇分析方法对其轨迹条数进行聚

类分析，结果发现（图略），10 天后向轨迹追踪的空间方差增长率（TSV）很不稳定，无法找到最佳聚类条数；而 7 天后向轨迹追踪的空间方差增长率（TSV）相对比较稳定，最佳聚类条数为 3。因此，本文最终选取 7 天为后向轨迹追踪天数。

（2）对各区域型暴雪日暴雪站点进行 7 天后向轨迹追踪，得到各区域型暴雪日的三维运动轨迹，每 1h 输出一组轨迹点的位置，并插值得到相应位置上的物理量（气压、降水量、比湿），从而得到各区域型的轨迹条数分别为：北部型 552 条、西部型 564 条、西天山型 552 条、天山型 744 条。由于模拟出的轨迹数较多，同样采用簇分析方法对各区域型的轨迹条数进行聚类分析，其研究思想类似于江志红等（2011）和孙力等（2016）。

2.3 不同轨迹通道的水汽输送贡献率

某条轨迹通道的水汽输送贡献率为

$$R = \sum_1^m q_{last} / \sum_1^n q_{last} \times 100\%$$

其中， R 为轨迹通道的水汽输送贡献率， q_{last} 表示轨迹通道上最终位置的比湿， m 和 n 分别表示该轨迹通道所包含的轨迹条数和同一区域型的所有轨迹条数。

2.4 欧拉方法的水汽输送通量计算

单位边长的大气水汽输送通量的计算式为：

$$\vec{Q} = -1/g \int_{p_0}^{p_1} q \vec{V} dp$$

其中， $\vec{Q}$ 表示水汽输送通量， p_1 表示顶层大气层， p_0 表示 1000hPa， q 表示比湿， $\vec{V}$ 表示水平风速矢量（单位： m/s ）， g 表示重力加速度（单位： m/s^2 ）。

表 1 1979-2017 年北疆 44 个暴雪日的分布
Table 1 The distribution of 44 snowstorm days in Northern Xinjiang during 1979-2017

区域	暴雪日/（年-月-日）			
北部型	1986-12-28	1996-12-28	1996-12-29	1997-12-17
	2009-01-16	2009-12-23	2010-01-02	2010-01-06
	2010-01-07	2010-12-03	2010-12-21	2014-01-30
西部型	1980-12-14	1988-02-03	1992-02-27	1996-02-12
	1997-01-11	1998-12-20	2004-12-19	2008-02-22
	2014-01-28	2014-01-29	2014-01-31	2015-12-06
	2016-12-30			
西天山型	1981-12-26	1985-02-25	1988-02-04	1996-12-30
	2000-01-02	2007-12-08	2010-02-23	2012-12-01
	2017-02-19			
天山型	1987-02-13	1990-01-27	1994-12-08	2000-01-03
	2006-02-07	2006-02-11	2014-12-08	2015-02-13
	2015-12-11	2017-02-20		

3 各区域型暴雪日的水汽输送和收支分析

图 2 给出了 4 个区域型暴雪日期间从 1000hPa 至 300hPa 的整层水汽输送通量矢量分布及相对于气候态的水汽输送量的距平分布。可以看出，各区域型暴

雪日期间，北疆地区整层水汽通量相对于气候态（1979-2017 年平均整层水汽通量）均增多，但增多程度有所不同。其中，北部型增多幅度较大，以中纬度西风带地中海以西的水汽输送为主，同时也存在少量来自红海的水汽；西部型，北疆西南部的水汽增多较多，水汽主要来自中纬西南及地中海南侧，且在红海汇集向东北方向输送到北疆西南部；西天山型，水汽以 $20^{\circ}-30^{\circ}\text{N}$ 西侧水汽向东北方向输送为主，同时还存在少量来自东欧平原的水汽；天山型，虽北疆地区的水汽增多幅度最小，但水汽输送却包括中高低纬三个方向，中纬地中海南侧水汽在里海西侧北上与高纬水汽汇合，低纬水汽从伊朗地区北上，最终输送到北疆南部。

结合表 2 进一步发现，各区域型暴雪日期间，水汽均以西边界输入为主，东边界输出为主；西天山型中，存在少量从北边界输入的水汽；天山型中，高层有部分水汽从南边界输入，这可能是来自伊朗地区的水汽北上翻山。

4 各区域型暴雪日水汽来源的轨迹分析

本文第三部分通过欧拉方法计算分析各区域型暴雪日期间水汽输送的特征，定性地描述水汽输送的源地和高度，但却较难准确地分离出不同水汽通道的信息及定量分析不同水汽通道的贡献率。因此，本部分采用 HYSPLIT v4.9 模式对各区域型暴雪日水汽进行追踪，然后根据簇分析方法对各区域型的所有轨迹进行聚类，并通过分析空间方差增长率（TSV）得到各区域型的水汽轨迹通道数，从而定量分析不同水汽轨迹通道对研究区域降雪的贡献率。孙力等（2016）和江志红等（2011）分别对 HYSPLIT v4.9 轨迹模式误差进行分析，虽存在一定偏差，但均认为该模式可较为一致地表征水汽的来向和高度变化。因此，本文对其将不再进行解释说明。图 3 描述了北部型（第一行）、西部型（第二行）、西天山型（第三行）和天山型（第四行）的水汽轨迹通道情况。从空间方差增长率图来看（图 3a1、b1、c1 和 d1），北部型、西部型、西天山型和天山型的轨迹在聚类过程中的方差增长率分别在聚类结果 <5 条、 <3 条、 <4 条和 <3 条以后迅速增长，故确定模拟出的轨迹最终聚类分别为 5 条、3 条、4 条和 3 条。

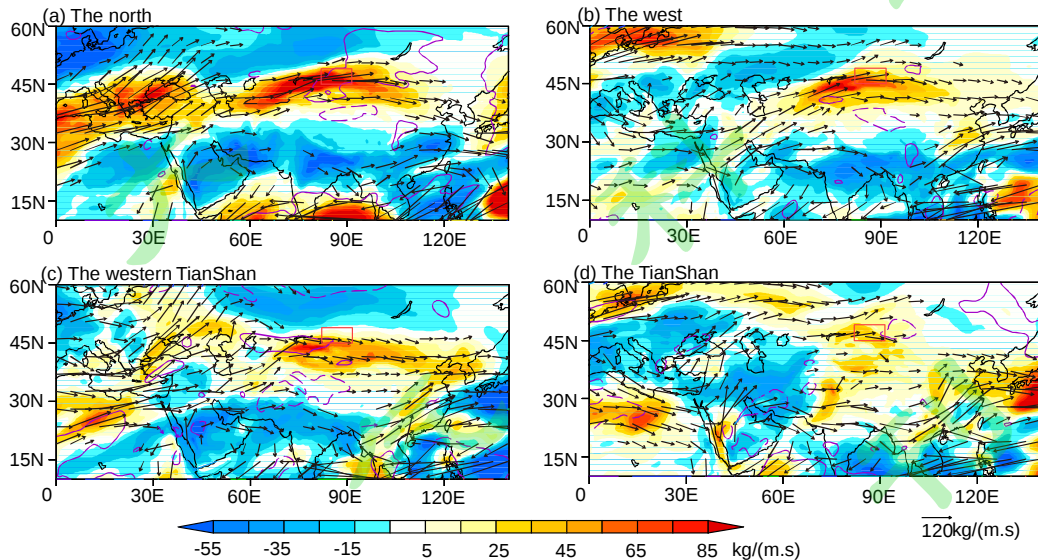


图 2 1979-2017 年各区域型暴雪日整层水汽输送特征 ((a) 北部型; (b) 西部型; (c) 西天山型; (d) 天山型) (箭头表示暴雪日平均整层水汽输送通量; 填充表示暴雪日平均整层水汽输送通量与气候整层水汽输送通量 (1979-2017 年平均整层水汽输送通量) 之差 ($\geq 10\text{kg}/(\text{m.s})$); 紫色等值线表示各暴雪日与对应时间各点整层水汽输送通量的相关系数通过 0.05 显著性检验)

Fig.2 The integrated water vapor fluxes of snowstorm days in different regions during 1979-2017 ((a) the north; (b) the west; (c) the western TianShan; (d) the TianShan) (The arrow represents the mean integrated water vapor fluxes of snowstorm days; The filling represents the difference between the mean integrated water vapor fluxes of snowstorm days and the climatic integrated water vapor fluxes ($\geq 10\text{kg}/(\text{m.s})$); The purple contour represents the correlation coefficient between the mean integrated water vapor fluxes of snowstorm days at each point and the corresponding snowstorm days passes the significance test of 0.05)

表 2 1979-2017 年各区域型暴雪日边界的平均水汽收支 (单位: $\times 10^2 \text{ kg/m.s}$)
Table 2 The average water vapor budget on the four boundaries of snowstorm days in different regions of Northern Xinjiang during 1979-2017 (units: $\times 10^2 \text{ kg/m.s}$)

		西边界	东边界	北边界	南边界	总收支
北部型	低层	7.10	-3.39	-3.31	-0.22	0.18
	中层	7.38	-5.90	-0.84	-1.24	-0.60
	高层	2.09	-1.72	0.13	-0.37	0.13
	整层	16.57	-11.00	-4.02	-1.83	-0.28
西部型	低层	4.92	-2.43	-0.98	-2.17	-0.66
	中层	5.64	-4.47	-0.99	-0.48	-0.30
	高层	2.05	-1.77	-0.47	0.26	0.07
	整层	12.61	-8.67	-2.44	-2.39	-0.89
西天山型	低层	4.07	-1.98	0.42	-2.90	-0.39
	中层	4.22	-3.42	0.33	-2.14	-1.01
	高层	1.65	-1.56	0.07	-0.40	-0.24
	整层	9.94	-6.96	0.82	-5.44	-1.64
天山型	低层	3.83	-2.49	-0.28	-4.11	-3.05
	中层	2.87	-2.40	-0.46	-0.92	-0.91
	高层	1.02	-1.31	-0.58	0.79	-0.08
	整层	7.72	-6.20	-1.32	-4.24	-4.04

注：低层表示 1000-700hPa；中层表示 700-500hPa；高层表示 500-300hPa；整层表示 1000-300hPa。

图 3a2、b2、c2 和 d2 分别给出了各区域型暴雪日期间水汽输送通道的空间分布特征。北部型(图 3a2) 5 条水汽输送通道中, 4 条通道位于中纬西风带, 贡献率为 99.4%; 其中通道 2 (Pass2) 为远距离输送, 水汽源于大西洋, 贡献率为 25.7%; 通道 1 (Pass1) 和通道 3 (Pass3) 为中距离输送, 水汽分别源于黑海和地中海, 贡献率分别为 27.2%和 31.6%; 通道 5(Pass5) 为近距离输送, 水汽源于里海东部, 贡献率为 14.9%; 通道 4(Pass4)的水汽源于霍尔茨克海, 贡献率为 0.6%。结合图 3a3 和图 3a4 可知,来自中纬西风带的水汽(通道 1、通道 2、通道 3 和通道 5) 均来自于 700hPa 至

800hPa 的中低层大气, 输送到北疆北部地区后, 通道 2 和通道 3 的水汽被抬升至 500hPa 左右的高度, 通道 1 和通道 5 的水汽被抬升到 650hPa 左右的高度。这四支气流初始水汽含量较高, 但在输送过程中受中纬亚洲内陆地区地势的影响, 水汽含量在到北疆北部地区的前 24h 明显下降。通道 4 的水汽主要来自高纬高层霍尔茨克海地区, 水汽含量较少。

西部型(图 3b2) 的 3 条水汽输送通道均位于中纬西风带欧亚大陆。其中, 通道 1 (Pass1) 为近距离输送, 水汽源于里海西南侧, 贡献率为 70.8%; 通道 2 (Pass2) 为中距离输送, 水汽源于地中海北侧, 贡

献率为 21.5%；通道 3（Pass3）为远距离输送，水汽源于大西洋西岸，贡献率为 7.7%。由图 3b3 和图 3b4 可知，通道 1 的水汽来自于 850hPa 左右的低层大气且初始水汽含量最高，在到北疆西部的前 24h，水汽明显被抬升、含量明显下降，在 600hPa 左右的高度输送到北疆西部，这主要由于北疆西侧高地形的影响，

水汽在爬升的过程明显损失；通道 2 和通道 3 的水汽分别来自于 650hPa 和 600hPa 左右的中层大气且初始水汽含量低于通道 1，同样，在到北疆西部的前 24h，水汽明显被抬升，且含量下降，分别在 500hPa 和 400hPa 左右的高度输送到北疆西部，水汽含量降到 1.0g/kg 以下。

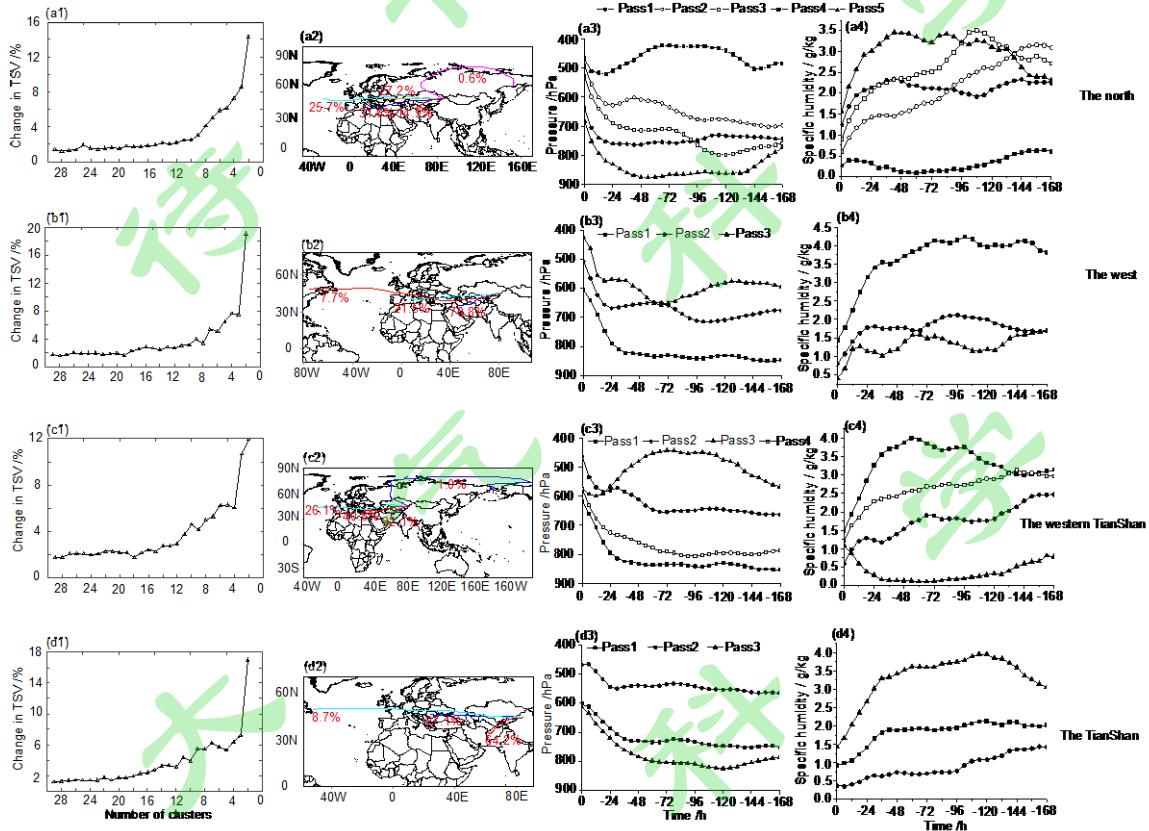


图 3 各区域型暴雪日的 (a) 轨迹聚类空间方差增长率、(b) 水汽输送通道空间分布、(c) 水汽输送通道的高度变化和 (d) 水汽输送通道的比湿变化

Fig.3 (a) Change in TSV (total spatial variance) as clusters combined, (b) the spatial distribution of water vapor passages, (c) change in height of water vapor passages, and (d) change in specific humidity of water vapor passages on the snowstorm days in the different regions.

西天山型（图 3c2）的 4 条水汽输送通道中 3 条均位于中纬西风带。其中，通道 1（Pass1）为近距离输送，水汽源于里海东南侧，贡献率为 32.1%；通道 4（Pass4）为中距离输送，水汽源于黑海，贡献率为 40.8%；通道 2（Pass2）为远距离输送，水汽源于大西洋，贡献率为 26.1%。通道 3（Pass3）的水汽源于太平洋，贡献率为 1.0%。由图 3c3 和图 3c4 可知，通道 1 和通道 4 的水汽来自于 800hPa 至 850hPa 的低层大气且初始水汽含量较高，在到北疆西天山的前 24h，水汽明显被抬升、含量明显下降，在 600hPa 左右的高度输送到北疆西天山，这主要由于北疆西侧和南侧高地形的影响，水汽在爬升的过程明显损失；通道 2

的水汽来自于 650hPa 左右的中层大气且初始水汽含量低于通道 1 和通道 4，同样，在到北疆西天山的前 24h，水汽被抬升，含量明显下降，在 450hPa 左右的高度输送到北疆西天山，水汽含量降到 0.5g/kg 以下；通道 3 的水汽来自于 550hPa 左右的高层大气且初始水汽含量最低，在到北疆西天山的前 24h，水汽高度下降，水汽含量增加，最终水汽高于初始含量在 570hPa 左右的高度输送到北疆西天山。

天山型（图 3d2）的 3 条水汽输送通道中，2 条位于中纬西风带。其中，通道 1（Pass1）为中距离输送，水汽源于黑海西侧，贡献率为 27.1%；通道 2（Pass2）为远距离输送，水汽源于大西洋西岸，贡献率为 8.7%；

通道 3 (Pass3) 位于低纬地区, 水汽源于伊朗东侧, 贡献率为 64.2%。由图 3d3 和图 3d4 可知, 通道 1 的水汽来自于 750hPa 左右的中低层大气且初始水汽含量在 2g/kg 左右, 在到北疆天山的前 36h, 水汽明显被抬升、含量下降到 1.0g/kg 左右, 在 600hPa 左右的高度输送到北疆天山; 通道 2 的水汽来自于 580hPa 左右的中层大气且初始水汽含量最低, 在到北疆天山的前 24h, 水汽被抬升, 含量下降到 0.5g/kg 以下, 在 470hPa 左右的高度输送到北疆天山; 通道 3 的水汽来自于 800hPa 左右的低层大气且初始水汽含量最高, 在到北疆天山的前 36h, 水汽被抬升, 水汽含量下降到 1.5g/kg 左右, 在 600hPa 左右的高度输送到北疆天山。

5 各区域型暴雪日的大气环流特征

前人研究表明, 新疆北部冬季降水异常与冬季大气环流有密切关系(杨莲梅等, 2010; 张书萍和祝从文, 2011; 李茹琦等, 2015)。因此, 本文将从 500hPa 位势高度异常变化、垂直速度和温度场的异常变化来分析各区域型暴雪日期间的大气环流特征。图 4 表示各区域型暴雪日期间 500hPa 位势高度距平分布(即各区

域型暴雪日 500hPa 位势高度与整时段 500hPa 位势高度之差)及 700hPa 风场。可以看出, 各区域型位势高度的距平南北均呈现“正-负”分布, 西东均呈现“负-正-负”分布, 但距平中心强度、位置及范围有所不同。北部型(图 4a), 南北距平“正-负”中心主要位于伊朗高原周边和中纬度中、西西伯利亚, 促使南北水汽在中纬度地区汇合, 沿西风带输送到研究区域, 加之纬向垂直上升速度的作用(图 5a), 使得该区域冬季降雪增加。西部型(图 4b), 南北距平“正-负”中心相比于北部型范围增大, 但强度有所减弱; 负距平中心向北延伸到高纬度地区, 正距平中心变为 2 个, 分别位于东欧平原和伊朗高原, 促使高纬西北气流向东、低纬西南气流向东北方向输送, 加之纬向垂直上升速度的作用(图 5b), 使得该地区降雪有所增加。西天山型(图 4c), 负距平中心主要位于蒙古高原及以北的中西伯利亚地区, 正距平中心位于东欧平原至伊朗高原地区, 有利于高纬和低纬水汽的输送。天山型(图 4d), 位势高度距平中心范围最小、强度最弱, 且位势高度显著异常区域主要位于阿拉伯海至里海以及伊朗高原地区, 使得低纬水汽东北向输送到研究区域。

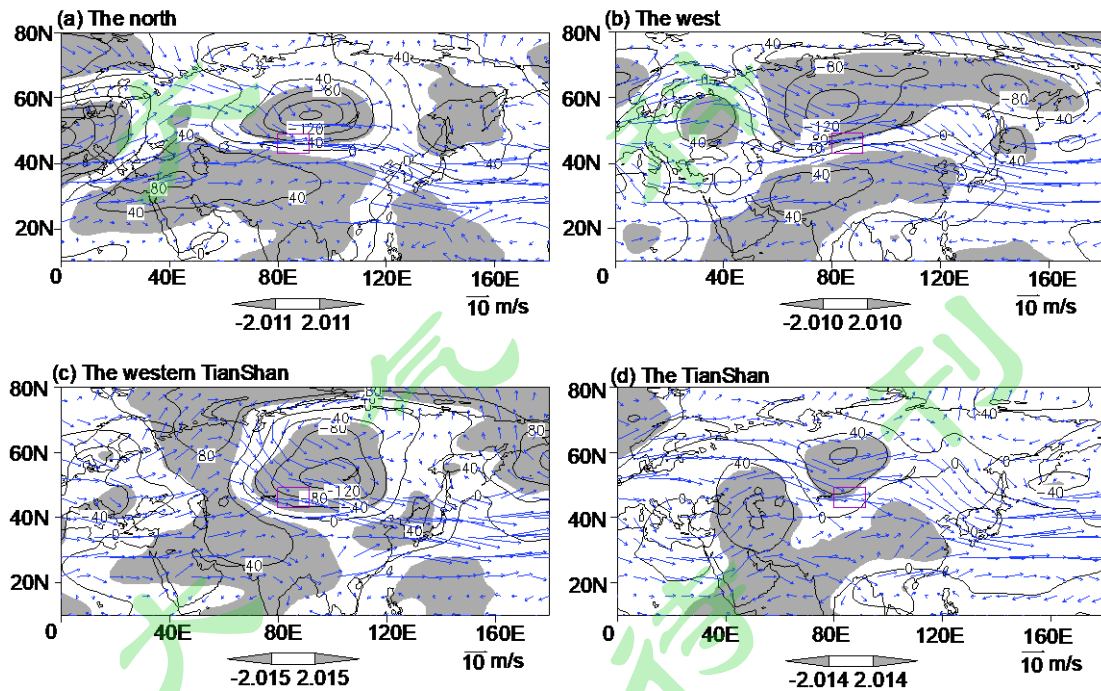


图 4 各区域型暴雪日 500hPa 位势高度距平分布(等值线: 均值通过 0.05 显著性检验)和 700hPa 风场(箭头)((a) 北部型; (b) 西部型; (c) 西天山型; (d) 天山型)

Fig.4 The geopotential height anomaly of different regions at 500hPa (isoline: the average passed 0.05 significance test), and the wind field of different regions at 700hPa (arrow) ((a) the north; (b) the west; (c) the western TianShan; (d) the TianShan)

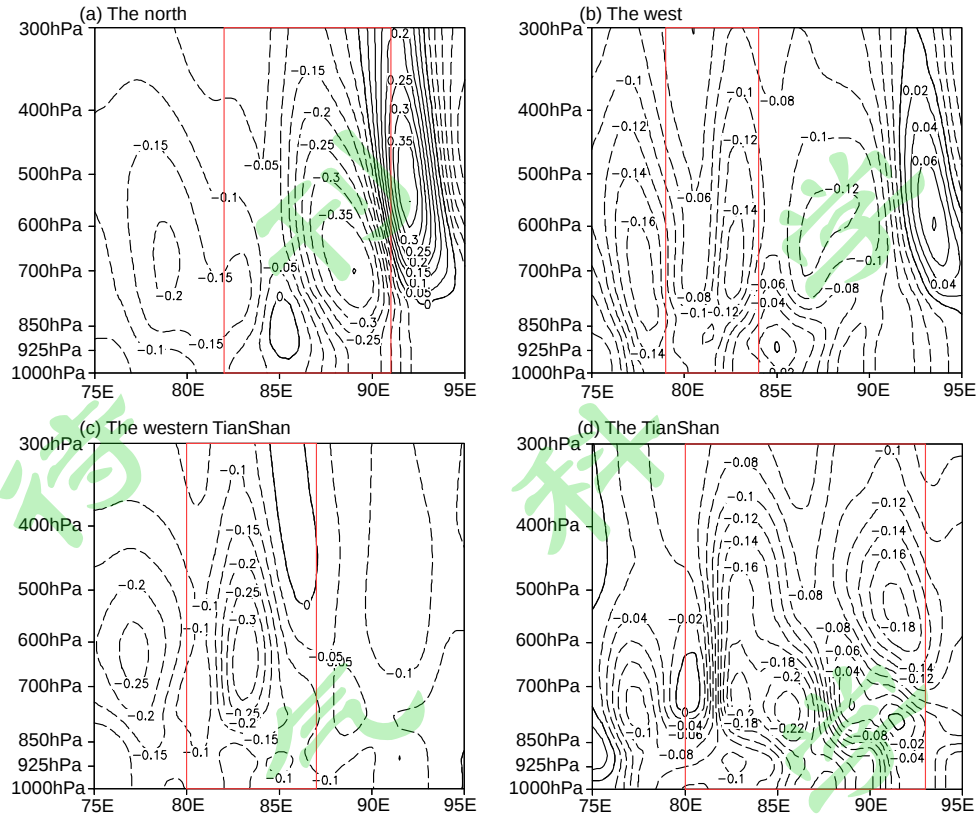


图5 北部型 (a) 45–48°N 平均垂直速度距平；西部型 (b) 43–47°N 平均垂直速度距平；西天山型 (c) 43–45°N 平均垂直速度距平；天山型 (d) 43–45°N 平均垂直速度距平（正/负值表示下降/上升运动）

Fig.5 (a) vertical velocity (m/s) anomaly averaged between 45–48°N in the north; (b) vertical velocity (m/s) anomaly averaged between 43–47°N in the west; (c) vertical velocity (m/s) anomaly averaged between 43–45°N in the western TianShan; (d) vertical velocity (m/s) anomaly averaged between 43–45°N in the TianShan; (positive/negative values indicate descending/ascending motion)

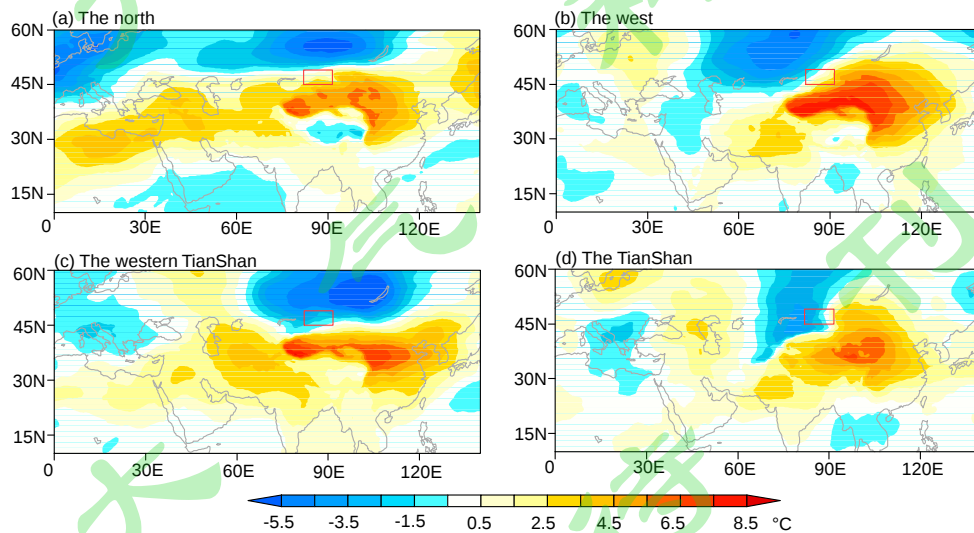


图6 北疆各区域型暴雪日 700hPa 温度距平场（暴雪日温度与气候态温度之差）((a) 北部型；(b) 西部型；(c) 西天山型；(d) 天山型)

Fig.6 The temperature anomaly field of different regions at 700hPa ((a) the north; (b) the west; (c) the western TianShan; (d) the TianShan)

从图 6 可知,不同区域型 700hPa 温度距平分布均为北负南正,且相应区域的气温相对气候态均偏低,但距平中心强度、位置及范围有所不同。结合图 4 可以发现,700hPa 温度距平正/负分布与 500hPa 位势高度距平正/负分布基本一致,但相比图 2 整层水汽通量距平场的中心位置向南向东有所偏移。即不同区域暴雪日期间,异常气旋导致北方冷空气南下路径有所差异,并于来自西边和西南方向的水汽输送交汇,导致暴雪的发生。

6 结论

本文首先以欧拉方法分析 1979-2017 年北疆各区域型暴雪日的水汽输送和收支特征,然后利用 HYSPLIT v4.9 轨迹模式,模拟影响各区域型暴雪日的主要水汽输送通道以及不同通道对水汽输送的贡献,最后分析各区域型暴雪日的环流特征,得到如下结论:

(1) 北疆各区域型暴雪日期间,水汽均以西边界输入为主,东边界输出为主。但西天山型存在少量从北边界输入的水汽;天山型高层有部分水汽从南边界输入。

(2) 北部型、西部型和西天山型暴雪日的水汽输送通道均主要位于中纬西风带,但源地有所差异。北部型源地包括大西洋、地中海、黑海和里海东部,水汽贡献率共计 99.4%,其中地中海、黑海的中距离水汽输送占主导地位,水汽贡献率为 58.8%;西部型源地包括大西洋西岸、地中海北侧、里海西南侧,其中里海西南侧的近距离输送占主导地位,水汽贡献率为 70.8%;西天山型源地包括大西洋、黑海、里海东南侧,其中黑海的中距离输送占主导地位,水汽贡献率为 40.8%,里海东南侧的近距离水汽输送的贡献率为 32.1%,大西洋的远距离水汽输送的贡献率为 26.1%。

(3) 天山型暴雪日的水汽输送主要位于西南方向的伊朗东侧地区,水汽主要源于阿拉伯海、红海,其贡献率为 64.2%;位于中纬西风带的水汽通道贡献率仅为 27.1%。

(4) 各区域型暴雪日位势高度的异常中心南北向和东向西分布较一致,但位置、范围和强度有所不同。其中北部型以南北向距平中心为主;西部型受南北向和东向西距平中心共同作用;西天山型以东西向距平中心为主;天山型距平中心最弱,且位势高度显著差异主要位于阿拉伯海至里海和伊朗高原地区。同时,不同区域型 700hPa 温度距平分布均为北负南正,

且相应区域的气温相对气候态均偏低。说明不同区域暴雪日期间,异常气旋导致北方冷空气南下路径有所差异,并于来自西边和西南方向的水汽输送交汇,导致暴雪的发生。

致谢 感谢新疆气象局提供的日降水数据,ECMWF 和 NCEP/NCAR 提供的再分析资料,感谢各位专家老师提出的宝贵意见。

参考文献 (References)

- 敖娟,孙建奇. 2014. 中国西部冬季降水年际与年代际变化的水汽输送差异 [J]. 气候与环境研究, 19(4): 497-506. Ao Juan, Sun Jianqi. 2014. Difference of water vapour transportation in the interannual and decadal variations of winter precipitation over Western China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19(4): 497-506. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12183
- Brimelow J C, Reuter G W. 2005. Transport of atmospheric moisture during three extreme rainfall events over the Mackenzie River basin [J]. Journal of Hydrometeorology, 6(4): 423-440, doi:10.1175/JHM430.1
- 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 Bin, Xu Xiangde, Shi Xiaohui. 2011. Estimating the water vapor transport pathways and associated sources of water vapor for the extreme rainfall event over of China in July 2007 using the Lagrangian method [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 69(5): 810-818. doi:10.11676/qxxb2011.071
- 慈晖,张强,张江辉,等. 2014. 1961-2010 年新疆极端降水过程时空特征 [J]. 地理研究, 33(10): 1881-1891. Ci Hui, Zhang Qiang, Zhang Jianghui, et al. 2014. Spatiotemporal variations of extreme precipitation events within Xinjiang during 1961-2010 [J]. Geographical Research (in Chinese), 33(10): 1881-1891. doi:10.11821/dlyj201410009
- 戴新刚,李维京,马柱国. 2006. 近十几年新疆水汽源地变化特征 [J]. 自然科学进展, 16(12): 1651-1656. Dai Xingang, Li Weijing, Ma Zhuguo. 2006. Variation characteristics of water vapor source in Xinjiang during the past decade [J]. Progress in Nature Science (in Chinese), 16(12): 1651-1656. doi:10.3321/j.issn:1002-008X.2006.12.018
- Gimeno L, Drumond A, Nieto R, et al. 2010. On the origin of

- continental precipitation [J]. Geophysical Research Letters, 37, L13804, doi:10.1029/2010GL043712
- 胡汝骥, 樊自立, 王亚俊, 等. 2001. 近 50a 新疆气候变化对环境
影响评估 [J]. 干旱区地理, 24(2): 97-103. Hu Ruji, Fan
Zili, Wang Yajun, et al. 2001. Assessment about the impact of
climate change on environment in Xinjiang since recent 50 years
[J]. Arid Land Geography (in Chinese), 24(2): 97-103.
doi:10.3321/j.issn:1000-6060.2001.02.001
- 姜逢清, 朱诚, 胡汝骥. 2002. 1960~1997 年新疆北部降水序列的
趋势探测 [J]. 地理科学, 22(6): 669-672. Jiang Fengqing,
Zhu Cheng, Hu Ruji. 2002. Trend analysis of precipitation over
Northern Xinjiang for the period 1960-1997 [J]. Scientia
Geographica Sinica (in Chinese), 22(6): 667-672.
doi:10.13249/j.cnki.sgs.2002.06.669
- 姜晓飞, 熊秋芬, 周雅蔓, 等. 2021. 新疆冬春季强降水过程的
水汽来源及输送特征分析 [J]. 海洋气象学报, 41(3): 52-59.
Jiang Xiaofei, Xiong Qiufen, Zhou Yaman, et al. 2021. Analysis
of moisture source and transport pathway of two intense
precipitation in Xinjiang [J]. Journal of Shandong Meteorology
(in Chinese), 41(3): 52-59. doi: 10.19513/j.cnki.issn2096-
3599.2021.03.005
- 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 Zhihong, Liang Zhuoran, Liu Zhengyu, et al. 2011. A
diagnostic study of water vapor transport and budget during
heavy precipitation over the Huaihe River basin in 2007 [J].
Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(2):
361-372. doi:CNKI:SUN:DQXK.0.2011-02-015
- 李佳秀, 杜春雨, 杜世飞, 等. 2015. 新疆极端降水事件的时空
变化及趋势预测 [J]. 干旱区研究, 32(6): 1103-1112. Li
Jiaxiu, Du Chunyu, Du Shifei, et al. 2015. Temporal-spatial
variation and trend prediction of extreme precipitation events in
Xinjiang [J]. Arid Zone Research (in Chinese), 32(6): 1103-
1112. doi:10.13866/j.azr.2015.06.09
- 李如琦, 唐治, 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
Ruqi, Tang Ye, Rouzi·Aji. 2015. Atmospheric Circulation and
Water Vapor Characteristics of Snowstorm Anomalies in
Northern Xinjiang in 2010 [J]. Plateau Meteorology, 34(1):
155-162. https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00163
- 李亚云, 杨莲梅. 2018. 北疆冬季降水异常的环流特征和水汽输
送分析 [J]. 气候变化研究进展, 14(5): 465-474. Li Yayun,
Yang Lianmei. 2018. Analysis of circulation feature and water
vapor transport of winter precipitation anomaly in Northern
Xinjiang [J]. Climate Change Research (in Chinese), 14(5): 465-
474. doi:10.12006/j.issn.1673-1719.2018.044
- 李永华, 周杰, 何卷雄, 等. 2021. 2020 年 6~7 月西南地区东部
降水异常偏多的水汽输送特征[J]. 大气科学, 45(6): 1-17 .
Li Yonghua, Zhou Jie, He Juanxiong, et al. 2021. Characteristics
of Water Vapor Transport Associated with Abnormal
Precipitation over the East of Southwestern China in June and
July 2020 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in
Chinese), 45(6): 1-17 doi: 10.3878/j.issn.1006-
9895.2105.21002
- 刘晶, 周玉淑, 杨莲梅, 等. 2019. 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 Jing,
Zhou Yushu, Yang Lianmei, et al. 2019. A diagnostic study of
water vapor during an extreme precipitation event in the Yili
River Valley [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in
Chinese), 43(5): 959-974. doi: 10.3878/j.issn.1006-
9895.1901.18114
- 刘蕊, 杨青. 2010. 新疆大气水汽通量及其净收支的计算和分
析 [J]. 中国沙漠, 30(5): 1221-1228. Liu Rui, Yang Qing.
2010. Calculation and Analysis of Water Vapor Transportation
and its Net Income in Xinjiang [J]. JOURNAL OF DESERT
RESEARCH, 30(5): 1221-1228
- 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 Huan, Zhao Li, Wang Xu, et al. 2021. Water vapor source
analysis of a severe torrential rain in the west of southern
Xinjiang based on the Lagrangian Method [J]. Journal of
Glaciology and Geocryology (in Chinese), 43(4): 1157-1165
- 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 2003. 中国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 Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. 2003.
Discussion on the present climate change from warm-dry to
warm-wet in Northwest China [J]. Quaternary Sciences (in
Chinese), 23(2): 152-164. doi: 10.3321/j.issn:1001-
7410.2003.02.005
- 史玉光, 孙照渤. 2008. 新疆水汽输送的气候特征及其变化
[J]. 高原气象, 27(2): 310-319. Shi Yuguang, Sun Zhaobo.
2008. Climate Characteristics of Water Vapor Transportation

- and Its Variation over Xinjiang [J]. Plateau Meteorology, 27(2): 310-319
- 孙桂丽, 陈亚宁, 李卫红. 2011. 新疆极端水文事件年际变化及对气候变化的响应 [J]. 地理科学, 31(11): 1389-1395.
- Sun Guili, Chen Yaning, Li Weihong. 2011. Interannual and interdecadal variations of extreme hydrological events and response to climate change in Xinjiang [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 31(11): 1389-1395. doi:10.13249/j.cnki.sgs.2011.011.1389
- 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 Li, Ma Liangchen, Shen Baizhu, 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 (in Chinese), 40(3): 630-646, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1506.15101
- 孙颖姝, 周玉淑, 王咏青. 2019. 一次双高空急流背景下南疆强降水事件的动力过程和水汽源分析 [J]. 大气科学, 43(5): 1041-1054.
- Sun Yingshu, Zhou Yushu, Wang Yongqing. 2019. Analysis of dynamic process and moisture source on a heavy precipitation event in Southern Xinjiang Associated with the doubleupper-level jet [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(5): 1041-1054. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1812.18168
- 王遵娅, 周波涛. 2018. 影响中国北方强降雪事件年际变化的典型环流背景和水汽收支特征分析 [J]. 地球物理学报, 61(7): 2654-2666.
- Wang Zunya, Zhou Botao. 2018. Large-scale atmospheric circulations and water vapor transport influencing interannual variations of intense snowfalls in northern China [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 61(7): 2654-2666, doi: 10.6038/cjg2018L0405
- 辛渝, 陈洪斌, 张广兴, 等. 2008. 新疆年降水量的时空变化特征 [J]. 高原气象, 27(5): 993-1003.
- Xin Yu, Chen Hongbin, Zhang Guangxing, et al. 2008. Characteristics of temporal and spatial distributions of annual precipitation in Xinjiang [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27(5): 993-1003. doi:CNKI:SUN:GYQX.0.2008-05-007
- 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 Hao, Jiang Zhihong, Liu Zhengyu, 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 (in Chinese), 38(5): 965-973. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1402.13228
- 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 Lianmei. 2003. Climate change of extreme precipitation in Xinjiang [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58(4): 577-583. doi:10.11821/xb200304012
- 杨莲梅, 史玉光, 汤浩. 2010. 新疆北部冬季降水异常成因 [J]. 应用气象学报, 21(4): 491-499.
- Yang Lianmei, Shi Yuguang, Tang Hao. 2010. Causes of winter precipitation anomalies in northern Xinjiang [J]. J Appl Meteor Sci, 21(4): 491-499.
- 杨莲梅, 刘雯. 2016. 新疆北部持续性暴雪过程成因分析 [J]. 高原气象, 35(2): 507-519.
- Yang Lianmei, Liu Wen. 2016. Cause analysis of persistent heavy snow processes in the Northern Xinjiang [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 35(2): 507-519. DOI:10.7522/J.ISSN.1000-0534.2014.00161
- 杨晓丹, 翟盘茂. 2005. 我国西北地区降水强度、频率和总量变化 [J]. 科技导报, 23(6): 24-26.
- Yang Xiaodan, Zhai Panmao. 2005. Changes in precipitation intensity, frequency and total in Northwest China [J]. Science&Technology Review (in Chinese), 23(6): 24-26. doi:10.3321/j.issn.1000-7857.2005.06.008
- 姚俊强, 杨青, 毛炜峰, 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 Junqiang, Yang Qing, Mao Weiye, et al. 2018. Analysis of a summer rainstorm water vapor paths in Tianshan Mountains (Xinjiang) based on HYSPLIT4 model [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 37(1): 68-77. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00031
- 翟盘茂, 任福民, 张强. 1999. 中国降水极值变化趋势检测 [J]. 气象学报, 57(2): 208-216.
- Zhai Panmao, Ren Fumin, Zhang Qiang. 1999. Detection of trends in china's precipitation extremes [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 57(2): 208-216. doi:10.11676/qxxb1999.019
- 张存杰, 高学杰, 赵红岩. 2003. 全球气候变暖对西北地区秋季降水的影响 [J]. 冰川冻土, 25(2): 157-164.
- Zhang Cunjie, Gao Xuejie, Zhao Hongyan. 2003. Impact of global warming on autumn precipitation in Northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 25(2): 157-164.

doi:10.3969/j.issn.1000-0240.2003.02.007

- 张俊兰, 崔彩霞, 陈春艳. 2013. 北疆典型暴雪天气的水汽特征研究 [J]. 高原气象, 32(4): 1115-1125. Zhang Junlan, Cui Caixia, Chen Chunyan. 2013. Study on water vapor characteristic of typical heavy snowstorm case in Northern anomalies associated with subsequent snowstorms over the north of Xinjiang during winter 2009 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(5): 833-846. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.05.04
- 张延伟, 魏文寿, 姜逢清, 等. 2012. 1961-2008 年新疆极端降水事件的变化趋势 [J]. 山地学报, 30(4): 417-424. Zhang Yanwei, Wei Wenshou, Jiang Fengqing, et al. 2012. Trends of extreme precipitation events over Xinjiang during 1961-2008 [J]. Journal of Mountain Science (in Chinese), 30(4): 417-424. doi:10.16089/j.cnki.1008-2786.2012.04.018
- 赵勇, 崔彩霞, 李霞. 2011. 北疆冬季降水的气候特征分析 [J]. 冰川冻土, 33(2): 292-299. Zhao Yong, Cui Caixia, Li Xia.

Xinjiang [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 32(4): 1115-1125. Doi:CNKI:SUN:GYQX.0.2013-04-021

- 张书萍, 祝从文. 2011. 2009 年冬季新疆北部持续性暴雪的环流特征及其成因分析 [J]. 大气科学, 35(5): 833-846. Zhang Shuping, Zhu Congwen. 2011. Possible causes of circulation 2011. Climatic characteristics of winter precipitation in Northern Xinjiang region [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 33(2): 292-299. doi:CNKI:SUN:BCDT.0.2011-02-012
- 朱丽, 刘蓉, 王欣, 等. 2019. 基于 FLEXPART 模式对黄河源区盛夏降水异常的水汽源地及输送特征研究 [J]. 高原气象, 38(3): 484-496. Zhu Li, Liu Rong, Wang Xin, et al. 2019. The Characteristics of the water vapor transport and associated sources under abnormal precipitation conditions in the source region of the Yellow River using FLEXPART [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 38(3): 484-496. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00015