

姜晓飞,熊秋芬,周雅蔓,等.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,2021,41(3):52-59.
JIANG Xiaofei, XIONG Qiufen, ZHOU Yaman, et al. Analysis of moisture source and transport pathway of two intense precipitation in Xinjiang [J]. Journal of Marine Meteorology, 2021, 41(3): 52-59. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.03.005. (in Chinese)

新疆冬春季强降水过程的水汽来源及输送特征分析

姜晓飞^{1,2},熊秋芬²,周雅蔓³,吐莉尼沙³

(1.中西亚大气科学研究中心,新疆乌鲁木齐 830002;2.中国气象局气象干部培训学院,北京 100081;3.新疆维吾尔自治区气象台,新疆乌鲁木齐 830002)

摘要:利用常规观测资料和6 h 一次的NCEP 1°×1°再分析场资料对新疆2015年2月12—14日北疆暴雪过程和2015年5月17—21日南疆暴雨过程的环流形势和主要影响系统进行分析,并基于HYSPLIT模式模拟的后向轨迹分析强降水的水汽来源和输送特征。结果表明:1)2次强降水过程均发生在高空低槽东移,低层有低涡,地面有锋面气旋,高空有辐散的天气背景下。2)冬季暴雪过程中,北疆水汽主要源自西亚和中亚地区。其中源自西亚地区的干气块下沉到近地面时从下垫面获得水汽,对强降雪的贡献最大;其次是起源于中亚西南部地区近地层的湿气块对强降雪的贡献。3)春季暴雨过程中,南疆的水汽主要来自中亚的哈萨克斯坦。其中来自哈萨克斯坦南部上空的干空气下沉到近地层时从下垫面获得水汽,对强降雨的贡献最大;其次是源自哈萨克斯坦东部和东南部对流层低层的湿气块对强降雨的贡献大。4)2次强降水过程中水汽主要来自陆地而不是海洋,气块在近地层移动或下沉到近地层时,下垫面水汽蒸发使气块变湿,是强降水的水汽主要贡献者;表明春季和冬季的水汽输送通道与夏季来自阿拉伯海等低纬的水汽通道不同。

关键词:强降水;水汽来源;后向轨迹;新疆;中亚;西亚

中图分类号: P458 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2021)03-0052-08

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.03.005

Analysis of moisture source and transport pathway of two intense precipitation in Xinjiang

JIANG Xiaofei^{1,2}, XIONG Qiufen², ZHOU Yaman³, Tulinisha³

(1. Central-Asia Atmospheric Science Research Center, Urumqi 830002, China; 2. China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081, China; 3. Xinjiang Uygur Autonomous Region Meteorological Observatory, Urumqi 830002, China)

Abstract Synoptic situations of two intense precipitation processes occurred on 12–14 February 2015 (snow) and on 17–21 May 2015 (rain) in Xinjiang are analyzed using conventional observations and 6-hourly NCEP reanalysis data. Moisture sources and transportation are simulated and studied based on backward trajectories from the HYSPLIT model output. The results show that both cases happened under the conditions of an eastward moving trough at 500 hPa, vortex and cyclone in the middle-low level and divergence in the upper-level troposphere. 2) In the snow case in February 2015, moisture air mainly comes from west Asia and central-Asia. Dry air is originated from west Asia, descends to surface and

收稿日期:2021-03-24; 修订日期:2021-07-27

基金项目:中西亚大气科学研究基金项目(CAAS201906);国家自然科学基金(41705031);中国气象局预报员专项(CMAYBY2020-169)

第一作者:姜晓飞,男,工程师,主要从事天气分析预报教学,276708007@qq.com。

通信作者:熊秋芬,女,教授,主要从事天气分析预报教学及研究,xiongqf@cma.gov.cn。

absorbing moisture from land surface, and contributes much to the snow case. Moisture air coming from southwest central-Asia also plays a role. 3) In the rain case in May 2015, moisture is mainly originated from Kazakhstan. Dry air from southern Kazakhstan goes down to surface and absorbs moisture from land surface, contributes much to the rainfall. Air parcels with high water vapor content originated from east and southeast Kazakhstan also play a part. 4) In general, water vapor mainly comes from surface in winter and spring, which is different from that in summer precipitation processes, when moisture air originates from Arabian Sea.

Key words intense precipitation; moisture source; trajectory; simulation; Xinjiang

引言

新疆地处中亚地区, 远离海洋, 其降水的水汽来源一直广受学者的关注。从气候平均讲, 新疆水汽主要来自地中海、里海、黑海、大西洋和北冰洋^[1-2]。由暴雨个例分析来看, 水汽主源地主要分布在阿拉伯海、孟加拉湾和波斯湾^[3-6]; 来自河西走廊、贝加尔湖等地的低空偏东气流也为暴雨提供了较好的水汽输送条件^[5,7]。而对暴雪个例的研究得到水汽源地主要分布在地中海、红海或波斯湾附近两个海域^[7-9]; 但暴雪期间河西走廊—新疆低空偏东气流比暴雨期间更强^[10-11]。由此可见不同的降水天气过程, 水汽的来源并不完全相同, 反映了新疆水汽来源的复杂性^[7]。

在上述关于降水过程水汽问题的研究中, 主要是基于欧拉观点, 即在某一时刻、固定的空间上观测流体的运动, 如计算某一时刻和一定的范围内的比湿、水汽通量及其散度等^[4-12]。然而大气运动具有瞬时变化特征, 因此近年来许多学者基于拉格朗日的观点, 结合 HYSPLIT 模式^[13-19]来追踪降水过程中水汽的来源及输送特征。有些学者^[20-21]用该模式对夏季新疆暴雨过程中的水汽进行了追踪, 结果表明中亚地区是水汽输送通道的关键区域, 水汽主要来自阿拉伯海以北、波罗的海、鄂霍次克海等地区。但目前少有文献用 HYSPLIT 模式讨论新疆冬季和春季强降水水汽来源及输送路径等问题, 鉴于该模式能追踪不同高度气块轨迹和定量统计水汽等优点, 本文将 HYSPLIT 模式引入 2 次由锋面气旋引发的新疆强降水过程水汽的研究中。

本文利用常规地面观测资料, 按照新疆当地降雨和降雪过程标准^[22-24], 选取了新疆 2015 年 2 月 12—14 日北疆暴雪过程、2015 年 5 月 17—21 日南疆暴雨过程, 先分析了 2 次强降水过程的环流背景和主要影响系统, 再基于 HYSPLIT 模式模拟了 2 次过程中大降水中心(分别为塔城和和硕)上空不同

高度气块的后向轨迹, 给出了气块运动过程中物理属性(高度、气压、比湿、相对湿度等), 以揭示新疆强降水过程中不同高度气块的移动路径及高低空垂直配置, 定量分析气块中水汽变化特征, 讨论新疆冬季和春季强降水过程的水汽来源的异同等, 以期提高对冬季和春季强降水天气的认识和预报能力, 为“丝绸之路”精细化的预报服务提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料

所用资料有常规高空、地面观测资料和 6 h 一次的 NCEP 1°×1°再分析场资料。

1.2 轨迹模拟方案

借鉴美国 NOAA 开发的气流轨迹模式 HYSPLIT^[13]模拟分析气流路径的思路, 假设空气中的粒子随风飘动(以下简称气块), 那么它的移动轨迹就是其在时间和空间上位置矢量的积分。最终的位置由初始位置(P)和第一猜测位置(P')的平均速率(V)计算得到气块的第一猜测位置:

$$P'(t + \Delta t) = P(t) + V(P, t)\Delta t \quad (1)$$

气块的最终位置:

$$P(t + \Delta t) = P(t) + 0.5 \times [V(P, t) + V(P', t + \Delta t)]\Delta t \quad (2)$$

式(1)和式(2)中, Δt (单位:h)为时间步长, 本文 Δt 选取为 1 h, V (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)代表平均速率。

由于 HYSPLIT 模式采用的是地形追随坐标, 因此输入的气象数据在垂直方向上需要内插到地形追随坐标系统, 而在水平方向则保持其原来格式。

$$\sigma = \frac{Z_{\text{top}} - Z_{\text{mst}}}{Z_{\text{top}} - Z_{\text{gl}}} \quad (3)$$

式(3)中, Z_{top} (单位:m)为轨迹模式坐标系统的顶部, Z_{gl} (单位:m)为地形高度, Z_{mst} (单位:m)为坐标下边界高度。地形追随坐标适合讨论新疆及其附近地区复杂的下垫面情况, 本文模拟的气块高度均是相对于地面以上的高度(above ground level,

AGL)。模拟过程中输入 HYSPLIT 模式的资料均为 NCEP 每 6 h 一次的 $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析场。

考虑到驱动轨迹模式的 NCEP 资料时空分辨率较低,为了分析模式分辨率误差,采用类似于样本误差分析的方法,即通过初始点在水平和垂直方向上偏移所模拟出的轨迹进行估计^[13]。分别选取上述 2 次天气过程中强降水中心塔城站(46.44°N , 83.00°E , 海拔高度为 1 500 m)、和硕站(42.15°N , 86.48°E , 海拔高度为 1 500 m)作为代表,将这 2 个站点的初始位置分别在纬向(x)、经向(y)偏移 0.5° ,垂直方向(z)偏向 0.01σ ,初始时间选取为 2015 年 2 月 13 日 02:00 和 2015 年 5 月 19 日 02:00,用 HYSPLIT 模式分别进行 240 h (10 d) 的后向轨迹模拟。通过上述偏移后均可得到 27 条轨迹样本,分别计算这 27 条样本在各个时刻 x 、 y 和 z 的平均值和标准差,通过标准差与平均值的比值(即变差系数)来评估模式的分辨率误差。通过计算(图略)表明 2 次强降水过程分别在 7 d 和 8 d (168 h 和 192 h) 以内变差系数较小,因此确定对 2 次强降水过程进行后向 168 d 和 192 d 的轨迹模拟。

为了定量考察塔城站、和硕站上空水汽来源与水汽含量大小,以塔城、和硕站点的地理位置为基础,用 HYSPLIT 模式分别模拟 2015 年 2 月 13 日 02:00 塔城站和 2015 年 5 月 19 日 02:00 和硕站不同层次(1 500、3 000、5 000、7 000 和 9 000 m)上空气块的 168 h、192 h 后向轨迹,并逐小时输出一次轨迹点的位置,模拟结果见第 3 节。

2 过程概况

2.1 降水实况

2.1.1 2015 年 2 月 12—14 日降雪实况

2015 年 2 月 12 日 14:00—14 日 14:00 (北京时间,下同),北疆大部、天山山区和南疆西部山区,以及哈密的部分地区出现小雪。其中伊犁河谷、塔城、阿勒泰、北疆沿天山一带、天山山区等地中到大雪;塔城、北疆沿天山一带等出现了暴雪(图 1a),积雪深度超过 20 cm (图略);而塔城 12 日 14:00—13 日 14:00 出现了持续性降雪,降雪量达 16 mm,积雪深度为 21 cm。

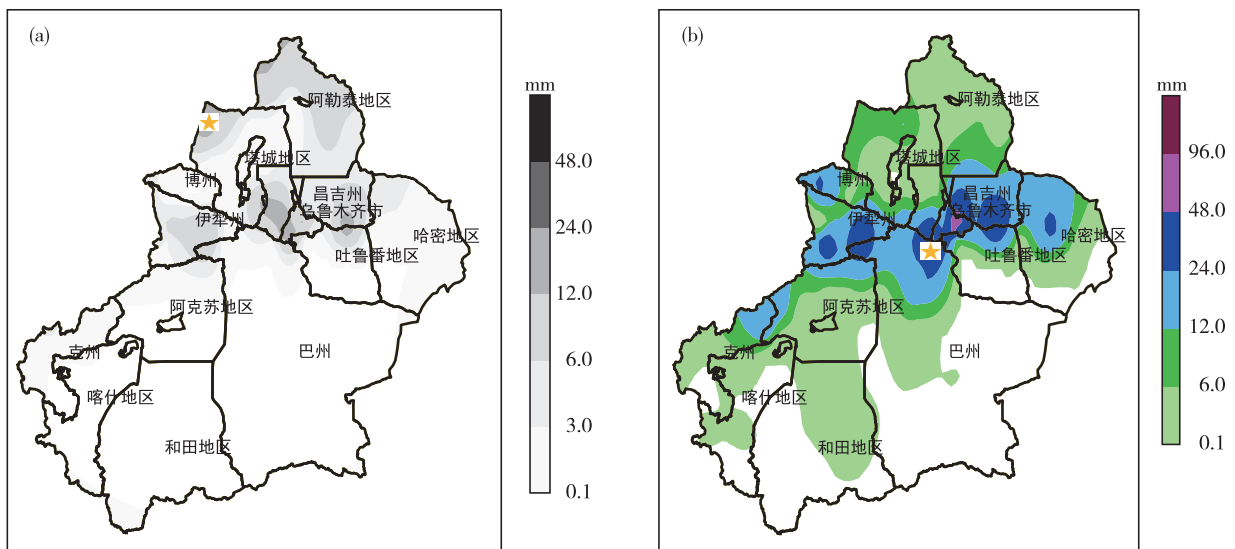


图 1 2015 年 2 月 12 日 14:00—14 日 14:00(a) 和 2015 年 5 月 17 日 08:00—21 日 05:00(b) 降水量(单位:mm;★分别为塔城、和硕站)分布图

Fig.1 Distribution of precipitation (units:mm; the locations of Tacheng and Heshuo station are marked with ★) from 14:00 BST 12 to 14:00 BST 13 January 2015 (a), from 08:00 BST 17 to 05:00 BST 21 May 2015 (b)

2.1.2 2015 年 5 月 17—21 日降雨实况

2015 年 5 月 17 日 08:00—21 日 05:00,北疆各地、天山山区、阿克苏、哈密和南疆西部、吐鲁托盆地、巴州等地的部分地区出现小到中雨,其中伊犁河谷、博州、北疆沿天山一带、天山山区、巴州北部等

地的部分地区,以及塔城、哈密、阿克苏、克州等地的局部出现大到暴雨(图 1b);而位于南疆盆地北部的和硕站 19 日 02:00—19 日 20:00 产生了持续性强降雨,累计雨量为 28 mm。

2.2 降水过程的环流形势及主要影响系统

2.2.1 2015年2月12—14日强降雪过程

2015年2月12日08:00(图略),500 hPa 巴尔喀什湖西部有低槽,槽前中低层有切变线。700 hPa 和850 hPa 分别有偏南急流和偏东暖湿气流向北疆输送水汽。地面冷锋在巴尔喀什湖东部但未进入新疆。至12日下午位于冷锋前暖区的北疆西部已有降雪发生(图略)。13日08:00(图2a),500 hPa 冷槽继续加深东移。850 hPa 上有低涡在北疆生成,低涡东侧偏东风维持,湿度增大。地面图上北

疆有气旋生成,同时气旋及冷、暖锋附近的降雪加强。13日20:00(图略),500 hPa 冷槽移到新疆中部,对应850 hPa 低涡快速移到新疆东部,地面气旋已移过北疆,与其相伴的冷锋已翻过天山,降雪区向东、向南扩展。过程期间,新疆大部分地区处于300 hPa 偏南极锋急流入口区右侧的辐散区中(图2a),有利于低层辐合上升运动和降雪的加强。塔城站先是冷锋前暖区降雪,后转为气旋及冷锋降雪,因此降雪持续时间长。

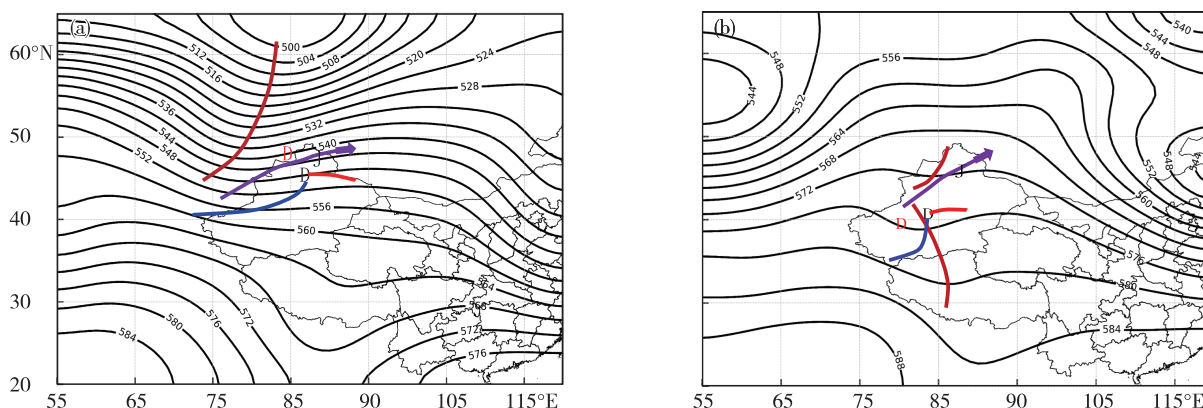


图2 2015年2月13日08:00(a)和2015年5月18日20:00(b)500 hPa 高度场(黑色实线,单位: dagpm)高、低空系统综合配置图(紫色箭头为高空急流轴,棕色实线为500 hPa 槽,红色“D”为850 hPa 低压中心,“J”为高空急流中心,黑色“D”为地面气旋,蓝色粗实线和红色粗实线为与其相伴的冷锋和暖锋)

Fig.2 Geopotential height at 500 hPa (black contours, units: dagpm) and positions of upper and lower level systems at 08:00 BST 13 January 2015 (a) and 20:00 BST 18 May 2015 (b) (purple arrows for upper jet axis, brown line for 500 hPa trough, red “D” for low center at 850 hPa, “J” for center of upper level jet, black “D” for surface cyclone, bold blue line and bold red line for its associated cold front and warm front)

2.2.2 2015年5月17—21日强降雨过程

18日08:00(图略),500 hPa 从西西伯利亚地区低涡中分裂的短波槽已到达北疆。原位于巴尔喀什湖南部—伊朗的冷槽越过帕米尔高原已移到南疆西部—青藏高原西部,冷槽前中低层南疆盆地有低涡、切变线存在,850 hPa 上有偏东暖湿气流输送水汽。南疆地面有气旋生成并伴有降水。18日20:00(图2b),500 hPa 北疆的槽加深东移,而南疆的冷槽也移到了南疆中部—高原中部,对应中低层地区低涡及地面气旋同时东移。19日20:00以后500 hPa 冷槽在新疆东部发展成低涡,850 hPa 低涡和地面气旋已移过新疆,降水逐渐减弱(图略)。过程期间,新疆大部分地区处于250 hPa 西南极锋急流入口区的右侧辐散区中(图2b),有利于低层辐合上升运动和强降雨的产生。和硕站一直在气旋东北侧的暖锋锋区中,锋区的存在也加强了降雨。

综上所述,2次强降水过程均发生在500 hPa 低槽东移,850 hPa 有低涡,地面有锋面气旋的背景下,且伴有高空辐散,加强了低层辐合和降水。

3 模拟结果及分析

3.1 2015年2月13日02时塔城站上空气块轨迹及水汽演变特征

图3a为塔城站上空不同层次气块168 h后向轨迹,图中红色轨迹代表6日02:00来自西亚4 000 m(图3b)的干气块,比湿仅为 $1.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,相对湿度为55.3%(图4)。气块在北上过程中先上升后下沉,其间比湿在 $0.5 \sim 3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间波动,相对湿度起伏较大。12日20:00气块下沉到近地层时从下垫面获得水汽,比湿达到 $4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,相对湿度在90%以上,13日02:00到达塔城1 500 m上空时比湿减小到 $3.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,相对湿度为96.5%,表明有水汽的凝结发生。

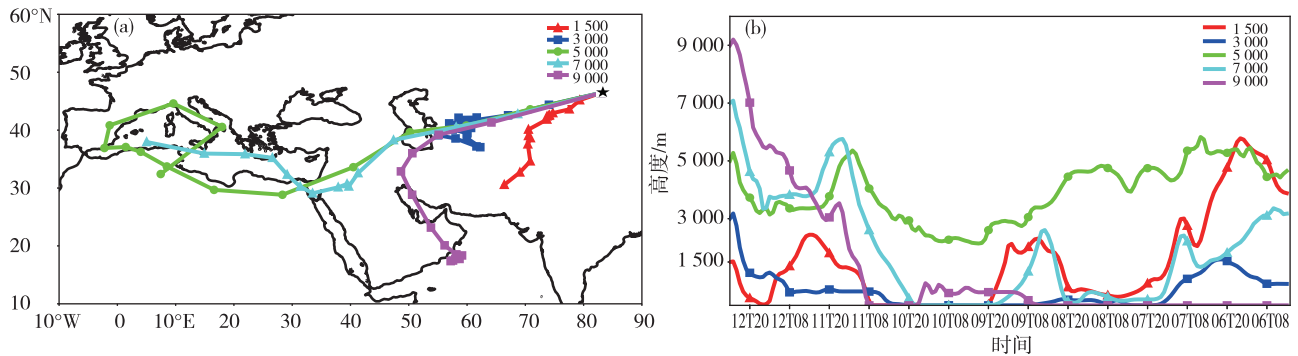


图3 2015年2月13日02:00塔城站(★)不同高度气块的168 h后向轨迹(a)及每条轨迹气块所在高度(b;单位:m)
Fig.3 The 168 h backward trajectories at Tacheng weather station at 02:00 BST 13 February 2015 (a. the backward trajectories of air masses at different height levels; b. the heights of air masses of different levels along each trajectory, units:m; Tacheng station is marked with ★, and different colors represent air masses at different levels)

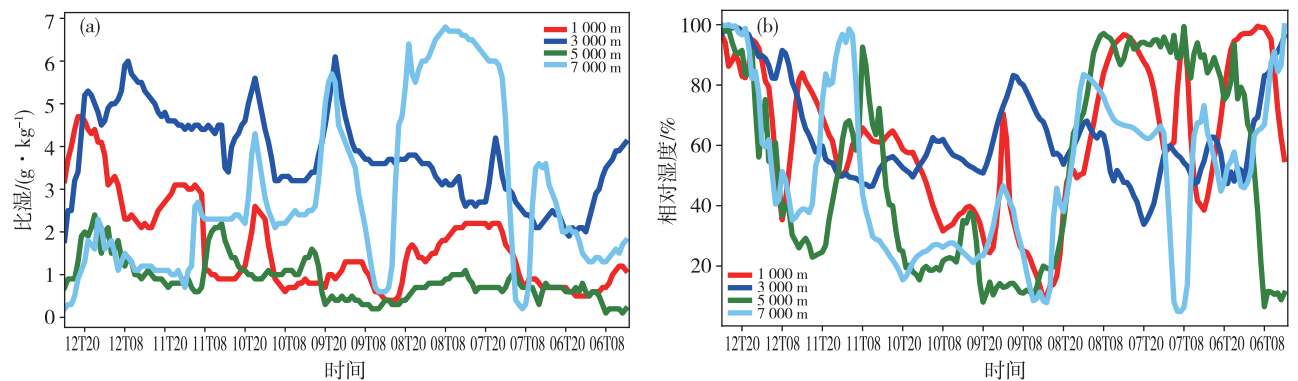


图4 2015年2月13日02:00塔城站不同高度气块的168 h比湿(a;单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和相对湿度(b;单位:%)演变特征
Fig.4 Same as Fig.3 but for specific humidity (a; units: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and relative humidity (b; units:%)

蓝色轨迹表明6日02:00来自中亚西南部地区(图3a)1000 m上空的气块(图3b),比湿为 $4.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,相对湿度为96.2%(图4)。气块在中亚地区回旋,先上升到2000 m,比湿和相对湿度均呈下降趋势,后下沉到近地层,比湿和相对湿度波动较大,11日08:00以后气块开始在近地层东移,比湿和相对湿度分别增加到 $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和90%以上。13日02:00到达塔城3000 m上空时比湿减小到 $1.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,相对湿度为97.1%。

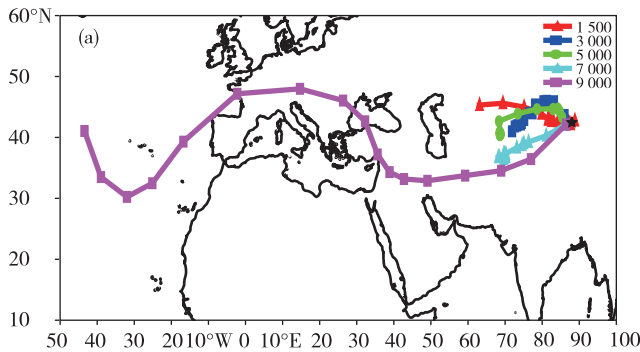
绿色轨迹表示6日02:00源自非洲北部的对流层中层干气块(图3a),水汽含量极低(图4),气块在向东北方向移动到地中海后转向西移,并伴有上升运动(图3b)。7日20:00到达欧洲西南部后又转向下沉东移到非洲北部,其间比湿略有增加,而相对湿度达90%以上。气块继续缓慢东移经过非洲大陆时先下沉后上升,其间比湿变化不大,但相对湿度起伏较大,13日02:00到达塔城5000 m上空时比湿减小到 $0.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,相对湿度为99.2%。

天蓝色轨迹代表6日02:00来自地中海西部(图3a)3000 m上空的气块(图3b),比湿为 $1.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,相对湿度为99.6%(图4)。气块先下沉东移到地中海东部的近地层(图3b),比湿增加到 $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,相对湿度先下降后上升。7日20:00以后向东南移到阿拉伯半岛,其间比湿和相对湿度变化较大。10日08:00开始从阿拉伯半岛上升并向东北方向移动,比湿逐渐减小,相对湿度达100%,表明有水汽的凝结发生。气块于13日02:00上升到塔城7000 m上空,比湿继续下降到 $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,相对湿度达99.9%。

紫色轨迹代表6日02:00来自阿拉伯海近海面的湿气块(图3a),具有较高的水汽含量($10.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和57.9%的相对湿度(图略)。气块先在近海面停留,比湿和相对湿度变化不大。8日08:00气块在近地层向西北方向移动,11日08:00到达西亚,比湿逐渐减小,相对湿度略有增加。此后气块转向东北移动并快速上升(图3b),伴有水汽的凝结

发生,比湿下降。气块于13日02:00达到塔城9 000 m上空时比湿减小到几乎为0,相对湿度为84%。

由以上分析可知,塔城站上空气块的轨迹比较分散,分别有来自西亚和阿拉伯海北上的气块,源自中亚西南部、非洲北部及地中海东移的气块。而终点达到塔城上空1 500 m和3 000 m的气块移速相对较慢。由每条轨迹中比湿的演变特征可以得到源自西亚的干气块下沉到近地面时从下垫面获得水汽,对强降雪的贡献大。中亚南部地区近地层的湿气块,水汽含量高且一直在近地层移动,对强降雪的贡献也大。源自非洲北部的对流层中层干气块对强降雪的贡献小。而来自地中海西部的气块,在下沉东移经过地中海后水汽含量增加,但到达塔城上空之前由于水汽凝结而变干,对强降雪的贡献小。同样源自阿拉伯海近海面的湿气块到



达塔城上空之前由于水汽凝结而变干,对强降雪的贡献很小。因此冬季北疆降雪过程中的水汽主要来源于西亚和中亚。

3.2 2015年5月19日02时和硕站上空气块轨迹及水汽演变特征

图5显示了和硕站上空不同层次气块192 h后向轨迹,图中红色轨迹(图5a)代表11日02:00来自中亚哈萨克斯坦南部地区6 000 m上空的干空气(图6),气块逐渐下沉于13日08:00左右到达近地层(图5b),气块在近地层缓慢东移,下垫面水汽蒸发使气块变湿,比湿和相对湿度先分别增加到 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和60%以上。至16日20:00气块又开始上升,17日20:00到达4 000 m上空后下沉,其间比湿缓慢下降而相对湿度呈现上升的趋势。气块于19日02:00下沉到1 500 m上空,比湿为 $6.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,相对湿度为92.6%。

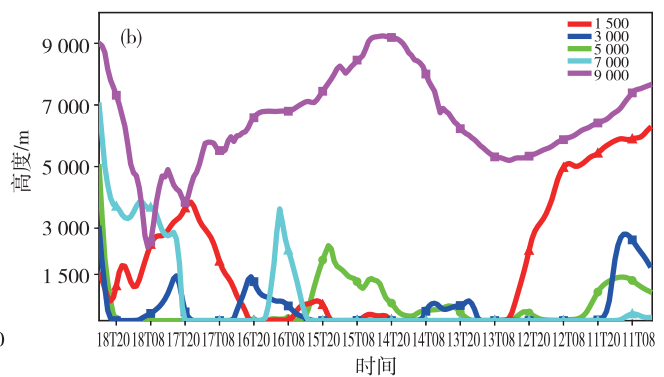


图5 2015年5月19日02:00和硕站(★)不同高度气块的192 h后向轨迹(a)及每条轨迹气块所在高度(b;单位:m)

Fig.5 The 192 h backward trajectories at Heshuo weather station at 02:00 BST 19 May 2015 (a. the backward trajectories of air masses at different height levels; b. the heights of air masses of different levels along each trajectory, units:m; Heshuo station is marked with ★, and different colors represent air masses at different levels)

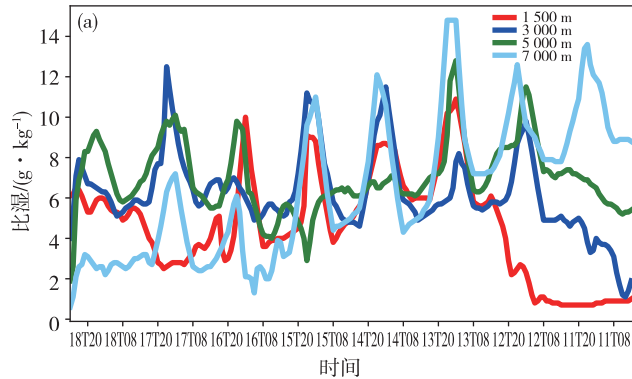
蓝色轨迹(图5a)显示11日02:00来自中亚哈萨克斯坦东部地区2 000 m气块(图5b),比湿为 $1.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,相对湿度为15.2%(图6),气块先略有上升然后下沉到近地层,并在哈萨克斯坦东部徘徊,17日20:00比湿和相对湿度分别增加到 $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和76%以上。18日20时以后气块东移并从近地层开始上升,于19日02:00到达3 000 m上空,比湿降为 $1.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,相对湿度接近100%,表明有水汽的凝结发生。

绿色轨迹(图5a)表示11日02:00源自中亚哈萨克斯坦东南部地区1 500 m上空的气块(图5b),比湿为 $5.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,相对湿度为36.4%(图6),气块在哈萨克斯坦东南部停留并逐渐下沉,于12日08:00到达近地层,随后气块在近地层缓慢向东移

动,其间比湿增加到 $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,相对湿度在20%~55%之间波动;14日20:00气块开始上升,于15日20:00到达2 000 m以上高度时(图5b)比湿下降而相对湿度上升。此后又开始下沉到近地层,比湿和相对湿度均呈增加的趋势。18日20:00—19日02:00气块继续东移并从近地层快速上升到了5 000 m,比湿下降到 $1.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,相对湿度也接近100%。

天蓝色轨迹(图5a)代表11日02:00起源于西亚北部地区近地层气块(图5b),比湿大($8.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、相对湿度为41.6%(图6),气块在原地停留时间长,其间比湿表现出明显的日变化,而相对湿度先升后降。15日夜间气块向东北方向移动并从近地层开始上升,于16日白天到达4 000 m左右

(图5b),比湿下降而相对湿度升高。此后又下沉到近地层,至17日20:00气块又开始上升,比湿快速下降而相对湿度在60%上下波动,气块于19日



02:00到达和硕7000 m上空,比湿下降到 $0.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,相对湿度达100%。

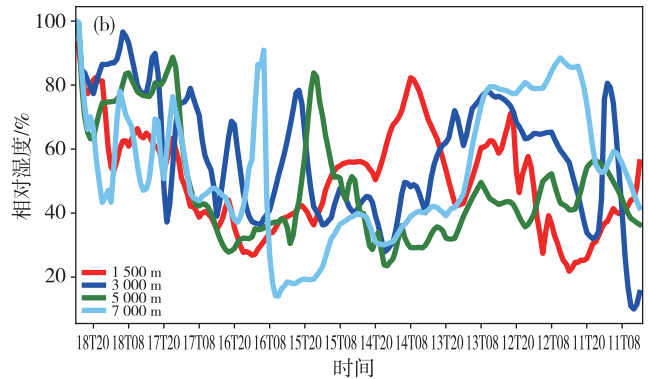


图6 2015年5月19日02:00和硕站不同高度气块的192 h比湿(a;单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和相对湿度(b;单位:%)变化特征
Fig.6 Same as Fig.5 but for specific humidity (a; units: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and relative humidity (b; units:%)

紫色轨迹(图5a)代表11日02:00源自大西洋7000 m上空的气块(图5b),其水汽含量少,仅为 $0.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,但饱和程度高,相对湿度达100%(图略),气块在东移过程中下沉(图5b),13日08时到达6000 m以下后又开始上升,其间比湿仍不足 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。14日20:00已上升到9000 m,比湿继续下降而相对湿度先升后降。气块于18日08:00再下沉到2000 m左右,比湿和相对湿度分别上升到 $2.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和80%。19日02:00快速上升到和硕9000 m上空,比湿仅为 $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,相对湿度为85.2%。

由此可见,和硕站上空的气块轨迹有3条来自中亚的哈萨克斯坦,1条来自西亚北部地区,1条来自大西洋。气块均沿偏西路径到达和硕,但源自中低层中亚和西亚的气块移速缓慢,而来自大西洋高层的气块移速快。其中来自哈萨克斯坦南部上空的对流层中层干空气,下沉到近地层时从下垫面获得水汽,对强降水的贡献大;源自哈萨克斯坦东部和东南部对流层低层的气块,在近地层停留时间长,水汽含量高,对强降水的贡献也大;而来自西亚北部近地层的气块在移向和硕的过程中由湿变干,对强降水的贡献小;起源于大西洋上空对流层高层的干气块对强降水的贡献极小。因此南疆春季暴雨过程中的水汽主要来自中亚的哈萨克斯坦。

4 结论与讨论

通过对新疆2015年2月12—14日暴雪过程和2015年5月17—21日暴雨过程的水汽来源及其输

送特征进行分析,得到如下结论:

1)2次强降水过程均发生在500 hPa低槽东移,850 hPa有低涡,地面有锋面气旋的天气背景下,高空辐散有利于低层辐合和降水的加强。

2)冬季的暴雪过程中,北疆的水汽主要源自西亚,其次是中亚。其中西亚的干气块下沉到近地面时从下垫面获得水汽,对强降雪的贡献最大;中亚南部地区近地层的湿气块,对强降雪也有较大贡献。

3)春季暴雨过程中,南疆的水汽主要来自中亚的哈萨克斯坦南部,其次是哈萨克斯坦东部和东南部。其中来自哈萨克斯坦南部上空的干空气下沉到近地层时从下垫面获得水汽,对强降雨的贡献最大;源自哈萨克斯坦东部和东南部对流层低层的湿气块,对强降雨的贡献较大;而来自西亚北部近地层的湿气块在移向和硕的过程中已经变干,对强降雨的贡献小。

4)2次过程中水汽主要来自陆地而不是海洋,尽管气块来自不同的层次和不同的源地,但其在近地层移动或下沉到近地层,下垫面水汽蒸发使气块变湿,是强降水的水汽主要贡献者。

上述结论从一定程度反映了南疆与北疆、冬季与春季水汽来源差异,有待于今后用更多的实例进行验证。塔城和和硕站周围地形比较复杂,地形对强降雨的增幅的定量计算也值得进一步研究。本文的模拟结果也证实了中亚地区是水汽输送通道的关键区域^[20],但气块的轨迹有所不同。与文献[1]中夏季强降水的水汽通道相比,新疆冬、春季来自低纬阿拉伯海的水汽通道贡献很小。不同季节

水汽来源的差异可能与大气环流的季节变化有关,如冬、春季由西风带环流主导,而夏季西风带环流北移,热带、副热带季风向陆地上推进。

参考文献:

- [1] 杨莲梅,李霞,张广兴.新疆夏季强降水研究若干进展及问题[J]. 气候与环境研究,2011,16(2):188-198.
- [2] 杨莲梅,刘晶.新疆水汽研究若干进展[J]. 自然灾害学报,2018,27(2):1-13.
- [3] 赵克明,黄艳,于碧馨.2013年南疆西部暴雨天气的水汽特征[J]. 气象科技,2017,45(1):122-130.
- [4] 张云惠,陈春艳,杨莲梅,等.南疆西部一次罕见暴雨过程的成因分析[J]. 高原气象,2013,32(1):191-200.
- [5] 陈春艳,孔期,李如琦.天山北坡一次特大暴雨过程诊断分析[J]. 气象,2012,38(1):72-80.
- [6] 曾勇,杨莲梅,张迎新.伊犁地区一次罕见特大暴雨中尺度系统的数值模拟[J]. 干旱气象,2020,38(2):290-300.
- [7] 杨莲梅,张云惠,汤浩.2007年7月新疆三次暴雨过程的水汽特征分析[J]. 高原气象,2012,31(4):963-973.
- [8] 张俊兰,崔彩霞,陈春艳.北疆典型暴雪天气的水汽特征研究[J]. 高原气象,2013,32(4):1115-1125.
- [9] 赵俊荣,郭金强.天山北坡中部一次罕见特大暴雪天气成因[J]. 干旱气象,2010,28(4):438-442.
- [10] 黄海波,徐海容.新疆一次秋季暴雪天气的诊断分析[J]. 高原气象,2007,26(3):624-629.
- [11] 阿衣夏木·尼亚孜,孔期,杨贵名.2005年11月哈密暴雪天气过程的诊断分析[J]. 气象,2007,33(6):67-74.
- [12] 郑婧,陈娟,徐星生,等.一次低空急流加强下的暴雨过程成因分析[J]. 干旱气象,2020,38(3):411-422.
- [13] DRAXLER R R, HESS G D. An overview of HYSPLIT_4 modeling system for trajectories, dispersion and deposition[J]. Aust Meteor Mag,1998,47(4):295-308.
- [14] DRUMOND A, NIETO R, GIMENO L. On the contribution of the tropical Western hemisphere warm pool source of moisture to the Northern Hemisphere precipitation through a Lagrangian approach [J]. J Geophys Res,2011,116(D21):D00Q04.
- [15] GUSTAFSSON M, RAYNER D, CHEN D L. Extreme rainfall events in southern Sweden: Where does the moisture come from? [J]. Tellus Ser A Dyn Meteor Oceanogr,2010,62(5):605-616.
- [16] 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):361-371.
- [17] 李晓容,高青云,付世军.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,2020,39(3):234-240.
- [18] 许彬,熊秋芬,张玉婷.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,2019,45(10):1392-1401.
- [19] 熊秋芬,张玉婷,姜晓飞,等.锢囚气旋钩状云区暴雪过程的水汽源地及输送分析[J]. 气象,2018,44(10):1267-1274.
- [20] 曾勇,杨莲梅,张迎新.新疆西部一次大暴雨过程水汽输送轨迹模拟[J]. 沙漠与绿洲气象,2017,11(3):47-54.
- [21] 姚俊强,杨青,毛炜峰,等.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,2018,37(1):68-77.
- [22] 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.
- [23] 张家宝,邓子凤.新疆降水概论[M]. 北京:气象出版社,1987.
- [24] 肖开提·多莱特.新疆降水量级标准的划分[J]. 新疆气象,2005,28(3):7-8.