庄晓翠,赵江伟,李博渊,等.伊犁河谷暴雪过程水汽特征[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(2):15-25. doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2023.02.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 伊犁河谷暴雪过程水汽特征

庄晓翠1,赵江伟1,李博渊1,周鸿奎2\*,李建刚3,4

(1.阿勒泰地区气象局,新疆 阿勒泰 836500;2.新疆气象信息中心,新疆 乌鲁木齐 830002;3.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,新疆 乌鲁木齐 830002;4.中亚大气科学研究中心,新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要:利用 NCEP 再分析资料,分析了伊犁河谷 2000—2020 年 10 月—次年 4 月发生的 23 次暴雪过程大尺度环流背景,运用 HYSPLIT 模式(拉格朗日)方法模拟追踪水汽后向轨迹,定量 确定了不同源地水汽输送路径及其贡献。结果表明,伊犁河谷暴雪区位于高空西南急流轴右侧、 槽前西南强锋区、低空西南急流出口区前部辐合区、水汽通量散度辐合及地面冷锋附近的重叠区 域。HYSPLIT 模式分析表明,暴雪过程水汽主要来自地中海和黑海附近、西南亚、中亚、大西洋及 其沿岸;水汽自源地出发经关键区,分别从西南(偏西)、西北(偏北)路径输入暴雪区;各路径、各 源地对暴雪的贡献不同层存在较大的差异,来自中亚、西南亚的水汽主要输送至 700 hPa 以下,地 中海和黑海附近、大西洋及其沿岸、加拿大等地的水汽主要输送至 700 hPa 及以上;源自加拿大的 水汽是湿地蒸发的结果,且与北美洲北部冬半年为极涡频发区有关。基于上述特征,建立了伊犁 河谷暴雪过程水汽输送的三维结构模型。

关键词:伊犁河谷;暴雪过程;水汽特征;HYSPLIT 模式

中图分类号:P422.1 文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2023)02-0015-11

新疆地处欧亚大陆腹地、中国西北部,远离海 洋,年均降水量约147 mm,不到全国平均值的1/4, 属典型的内陆干旱区。随着全球显著变暖和水循环 加快,新疆气候由暖干向暖湿转变<sup>[1]</sup>,暴雪发生频次 也相应增多<sup>[2-3]</sup>。其中,伊犁河谷三面环山,是新疆暴 雪频发区之一,也是雪灾的高发区<sup>[4]</sup>。而水汽是造成 暴雪(雨)的重要因素之一<sup>[5]</sup>,定量确定暴雪(雨)过 程的水汽来源、输送是一个热点和难点问题<sup>[6]</sup>。因 此,研究伊犁河谷暴雪过程水汽特征,对深入研究新 疆暴雪机理具有重要意义。

关于暴雪水汽的研究,国内外已取得大量成果。

收稿日期:2022-08-03;修回日期:2022-10-31

对辽宁省区域暴雪研究表明<sup>17</sup>,水汽主要来自西边 界中纬度西风气流的输入,区域暴雪的发生是经向水 汽异常输送的结果,水汽源地主要有西太平洋、日本 海、东海和黄海。对陕西 2018 年1月一次区域性暴 雪研究表明<sup>18</sup>,500 hPa 切断低压分裂低槽、700 hPa 西南急流和 850 hPa 东风回流是暴雪发生的主要影 响系统;700 hPa 强西南急流、偏东气流分别携带来 自孟加拉湾和东海的充沛水汽是产生区域性暴雪的 重要原因之一。对北京 2018 年 4 月罕见暴雪过程 的研究表明<sup>19</sup>,低层强冷空气入侵形成冷垫,700 hPa 强西南低空急流输送充沛水汽,使暴雪区上空 800~ 500 hPa 形成条件性对称不稳定是产生暴雪主要动 力机制。对 2009 年 11 月华北地区破纪录大暴雪讨 程研究表明100,暴雪过程中出现回流天气,有利于水 汽输送和水平辐合的加强,冷高压的南侧低层有"倒 槽"存在,对暴雪的形成有重要的作用,水汽主要来 自孟加拉湾较低纬度。对西藏高原南部3次暴雪天 气研究表明回,3次暴雪天气中高纬度均以经向环

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金(2021D01A01);中亚大 气科学研究基金(CASS201715)

作者简介:庄晓翠(1964—),女,正高级工程师,主要从事天气预报及 灾害性天气机理研究。E-mail:<u>zxcxjalt@163.com</u>

**通信作者:**周鸿奎(1977—),男,高级工程师,主要从事气象信息技术 研究。E-mail:12558692@qq.com

流为主,从长波槽脊配置可分为长波槽型和横槽型 两大类;水汽主要源于阿拉伯海,孟加拉湾对东部降 雪起到补充作用,南支槽前高空西南急流对水汽输 送起关键作用,同时喜马拉雅山脉大地形抬升,有利 于上升运动和水汽凝结成云;水汽通量、水汽通量散 度等变化及中心的移动方向,对降雪的强度、落区和 时段具有较好的预报指示意义。河南"75·8"极端降 水过程水汽主要源自中国北方的偏西风输送的水 汽,占 22.5%,台风和副热带高压的共同作用向中国 东部地区输送水汽,占 77.5%<sup>[12]</sup>。

针对干旱、半干旱的新疆暴雪天气水汽特征也 有不少研究成果。对北疆典型暴雪过程水汽研究表 明<sup>[13-14]</sup>,水汽源地主要分布在地中海、红海和波斯湾 附近,主要从西方、西南、西北3条路径输送,西南路 径最多,西北路径最少。造成新疆持续性暴雪的水汽 源地有高纬北大西洋、巴伦支海,中纬地中海、里咸 海,低纬红海,环流配置不同水汽输送路径有所差 异,但主要以中低纬水汽输送为主<sup>[2-3]</sup>。对新疆北部 暴雪个例研究表明<sup>[15-20]</sup>,水汽主要来自大西洋的偏 西路径和波斯湾、阿拉伯海北上的水汽在咸海至巴 尔喀什湖汇合后接力输送至新疆北部暴雪区。

上述关于暴雪过程的水汽来源及输送的研究主 要是基于欧拉方法,通过计算水汽通量以及大尺度 环流,确定水汽输送特征,但该方法无法定量给出远 距离水汽源汇关系及各源地水汽贡献大小[22-26]。水 汽来源及输送的研究还有 HYSPLIT (拉格朗日)轨 迹模式方法[27-29],该方法能够模拟追踪气块运动的 三维轨迹,提供水汽轨迹及沿水汽轨迹变化的细节, 定量的给出水汽源地对暴雨(雪)的贡献大小,弥补 了欧拉方法的不足<sup>[22-23]</sup>。基于 HYSPLIT 模式在新疆 暴雨过程水汽来源及输送方面已有一些研究[24-29],在 暴雪过程方面至今很少,因此,本文基于 HYSPLIT 模式方法研究伊犁河谷暴雪过程不同高度层上水汽 来源及输送特征,揭示水汽输送的三维结构特征,对 理解该区域暴雪的形成及维持机制必不可少,为新 疆降水研究和暴雪预报预警提供科技支撑,为防灾 减灾救灾和社会生态文明建设提供决策依据。

#### 1 研究区概况及暴雪过程定义

# 1.1 研究区概况

伊犁河谷位于新疆西部,欧亚大陆腹地,南部为 天山山脉,海拔4000~6000 m,北部为博罗科努山 (天山余脉),海拔2000~5000 m,构成典型向西开 口的喇叭口地形,河谷海拔在330~4220 m。天 山几乎阻滞了南来的水汽,横亘于北部的天山余脉, 使北方南下的冷空气不易侵入。伊犁河谷地处中纬 度西风带,冬季受极锋锋区和副热带锋区的共同影 响,西来的水汽可贯穿整个河谷,因此,降水相对较 多,年降水量远高于准噶尔盆地和塔里木盆地,素有 "中亚湿岛"之称<sup>[30-31]</sup>。

该区域共有 10 个国家级气象观测站(图 1),其 中昭苏为山区站(海拔 1 851 m),是伊犁河谷海拔 最高的国家站,不在本研究范围。



## 1.2 暴雪标准及过程定义

按照新疆暴雪标准(12.0 mm<R(日降雪量)≤ 24.0 mm 为暴雪,R≥24.1 mm 为大暴雪);满足条 件:(1)1 d 内有 2 站或以上出现暴雪;(2)雨夹雪天 气过程,还需满足≥1个站积雪深度≥10 cm。符合 两个条件之一的为一次暴雪过程;共筛选出伊犁河 谷 23 次暴雪过程。

#### 2 资料及方法

利用 2000—2020 年 10 月—次年 4 月 10 个国 家级气象观测站(图 1)逐日(20:00—次日 20:00,北 京时)降水量、天气现象,并参考积雪深度。环流背景 利用 NCEP/NCAR 2.5°×2.5°再分析资料。

后向轨迹追踪(HYSPLIT)模式利用 GDAS 2.5° ×2.5°逐6h再分析资料,模拟追踪伊犁河谷暴雪过 程的水汽源地及输送特征。HYSPLIT 是 NOAA 空气 资源实验室和澳大利亚气象局联合研发的一种可处 理不同气象要素输入、不同排放源和不同物理过程 的输送、扩散、沉降过程的模式系统,能够追踪气块 的来源<sup>[27-29]</sup>。该模型的轨迹模拟方法通过质点移动 路径的空间和时间上的位置矢量进行积分,由质点 的初始位置和第一猜测位置的平均速率计算得到气 块的追踪位置,对气块进行后向积分得到水汽来源、 输送路径及其对暴雪的贡献<sup>[32-36]</sup>。

统计分析伊犁河谷 23 次暴雪过程可知,暴雪中 心主要出现在伊宁县站(10次)、伊宁站(7次)、霍城 站(3次)、新源站(2次)、尼勒克站(1次),测站海拔 高度为 603~1 106 m;因此,暴雪中心初始高度定义 为距离测站的高度,模拟追踪其 500 hPa(5 000 m)、 700 hPa(3 000 m)、850 hPa(1 500 m)至地面的水汽 三维运动轨迹。模拟开始时间为暴雪日 20:00,向后 追踪 168 h(7 d),每隔 6 h 所有轨迹初始点重新向 后追踪 168 h,分别将各高度层的后向轨迹路径进 行聚类分析,遵循类与类间差异极大而同一类内部 差异极小的原则<sup>[27-29]</sup>,得到 168 h 后向追踪的平均轨 迹,以此分析伊犁河谷暴雪过程在 3 个高度上水汽 来源及输送特征。

#### 3 结果分析

#### 3.1 典型环流背景

伊犁河谷 23 次暴雪过程 500 hPa 影响系统有 3 类:西西伯利亚低涡(槽)型,占 73.9%;中亚低涡 (槽)型,占 17.4%;锋区波动型,仅占 8.7%。西西伯 利亚低涡(槽)型是造成伊犁河谷暴雪天气的主要天 气尺度系统。分析其典型环流背景可知,500 hPa 欧 亚范围为两脊一槽的经向环流,欧洲为高压脊,贝加 尔湖为浅脊,西西伯利亚至里海、咸海一地中海东部 为低压槽活动区,槽前2支锋区在咸海一巴尔喀什 湖一新疆北部汇合,北疆受槽前西南强锋区控制 (图2a),其上不断有短波槽东移北上造成伊犁河谷 暴雪天气。300 hPa 北疆处于>40 m/s 的高空西南急 流轴右侧辐散区,急流核>50 m/s (图 2b);700 hPa 暴雪区位于低空西南急流前部辐合及水汽通量散度 辐合大值区 (图 2c);地面图上暴雪发生在冷锋附 近。因此,伊犁河谷暴雪区位于高空西南急流轴右侧 辐散区、槽前西南强锋区、低空西南急流出口区前部 辐合和水汽通量散度辐合大值区及地面冷锋附近的 重叠区域。

## 3.2 HYSPLIT 模式水汽后向轨迹分析

水汽源地来自地中海和黑海及其附近区域简称 源地Ⅰ;水汽源地来自西南亚,即亚洲西南部国家, 包括波斯湾、红海、阿拉伯海及其附近区域简称源地 Ⅱ;水汽源地来自中亚,即中亚五国,包括里海、咸海 及乌拉尔山 60°N 以南的区域为源地Ⅲ;水汽源自



(a为500 hPa高度场(实线,单位:dagpm)、风场(单位:m/s)、温度场(虚线,单位:℃);b为300 hPa高度场(等值线,单位:dagpm)和高空急流(阴影,单位:m/s);c为700 hPa高度场(实线,单位:dagpm)、风场(单位:m/s)、温度场(虚线,单位:℃)、水汽通量散度(阴影,单位:10<sup>-6</sup>g/(cm<sup>2</sup>·hPa·s),浅灰色为>3000 m 地形)

大西洋及其沿岸,即大西洋及其沿岸的国家简称源 地Ⅳ。另外,还有来自欧洲各地的水汽(简称"欧 洲"),冰岛及其附近的水汽(简称"冰岛"),极地北冰 洋及其沿岸的水汽(简称"北冰洋")以及来自北美洲 北部加拿大各地的水汽(简称"加拿大")。吉尔吉斯 斯坦北部边界至巴尔喀什湖南部区域为水汽关键区 (简称"关键区")。

3.2.1 500 hPa 水汽特征

用 HYSPLIT 模式模拟伊犁河谷 23 次暴雪过程,追踪暴雪中心 500 hPa 高度 168 h 的后向轨迹, 对各暴雪中心轨迹聚类后,共得 23 条轨迹,其中,来 自源地 I(8条)、源地 II(3条)、源地 IV(7条)、加拿 大(4条)、北冰洋(1条)的水汽经关键区,主要从西 南(偏西)路径输入暴雪区(图 3)。

图 4 对应给出了伊犁河谷各暴雪中心经聚类 后每条水汽轨迹比湿随时间变化情况,即图 3 中 1、



图 3 伊犁河谷各暴雪中心 500 hPa 水汽轨迹的空间分布及高度变化 (a为伊宁县,b为伊宁市,c为霍城县,d为新源县,e为尼勒克县;图中数字为轨迹序号, 括号中的值为该条水汽轨迹对暴雪的贡献)



图 4 500 hPa 水汽轨迹比湿的时间变化

(a为伊宁县,b为伊宁市,c为霍城县,d为新源县,e为尼勒克县;C1、C2、…、C6分别对应图3中1、2、…、6轨迹的比湿)

2、…6水汽轨迹分别是图 4 中 C1、C2、…C6 的比 湿。统计分析伊犁河谷各暴雪中心 500 hPa 水汽轨 迹的空间分布及高度变化(图 3),以及水汽轨迹的 比湿变化(图 4)得表 1。

由表1可知,水汽源地I对伊犁河谷暴雪的贡 献最大,为12%~71%,主要从2521~6167m向暴 雪区输送;水汽在源地的比湿为0.41~3.43gkg,到达暴 雪区为0.28~1.30g/kg,沿途损失相对最小,占63%。 水汽源地II对暴雪的贡献次之,为14%~46%,主要 从273~2404m向暴雪区输送;水汽在源地的比湿 为3.88~7.49g/kg,到达暴雪区为0.63~1.25g/kg,沿 途损失最多,占82%。水汽源地IV对暴雪的贡献较 小,为7%~29%,主要从2888~6471m向暴雪区 输送;水汽在源地的比湿为0.80~4.18g/kg,到达暴 雪区为0.37~0.65g/kg,沿途损失较大,为76%。来自 加拿大的水汽对暴雪的贡献相对较小,为4%~33%, 主要从3690~4896m向暴雪区输送;水汽在源地 的比湿为1.40~2.04g/kg,到达暴雪区为0.34~

加拿大三面环海,西抵太平洋、东迄大西洋、北 至北冰洋,是世界上海岸线最长的国家,海岸线长 24×10<sup>4</sup> km,其湿地面积居世界首位,为1.27×10<sup>8</sup> m<sup>2</sup>, 占全球湿地面积的24%;主要有4大流域:哈得逊 湾流域约占国土面积的37%、北冰洋流域约占 33%、太平洋流域只占10%、大西洋流域约占19%。 因此,来自加拿大的水汽是湿地蒸发的结果。另外, 新疆北部冬季极锋锋区频繁南下,使得伊犁河谷暴 雪频繁,而极锋锋区位于极涡底部,其演变与极涡有 密切的关系。张家宝等<sup>171</sup>研究指出新疆冬半年极涡 中心主要有2个高频区域:亚洲北部(新地岛以东的 喀拉海、泰米尔半岛、中西伯利亚)和北美洲北部(加 拿大的维多利亚岛、哈德逊湾北部、巴芬湾和格陵兰 西北部)。来自加拿大的水汽是影响伊犁河谷暴雪的 水汽源地之一,该源地的水汽主要从北美洲北部、东 北部的中高纬地区在环流合适的情况下随极锋锋区 东移(图 3a、3b)到达暴雪区。因此,来自加拿大的水 汽与北美洲北部为极涡高频区一致。

500 hPa影响伊犁河谷暴雪过程的水汽自源地 经关键区,主要从偏西(西南)路径输入暴雪区,占 96%,西北(偏北)路径仅为4%。水汽主要来自源地 I、源地II、源地IV,其次是加拿大;对暴雪区贡献最 大的是源地I,损失最小;源地II对暴雪的贡献次 之,但损失最大(82%)。水汽主要从2500 m以上向 暴雪区输送。

3.2.2 700 hPa 水汽特征

用 HYSPLIT 模式模拟伊犁河谷 23 次暴雪过程,追踪其暴雪中心 700 hPa 高度 168 h 的后向轨迹,对各暴雪中心轨迹聚类后共得 26 条轨迹,其中来自源地 I (4条)、源地 II (5条)、源地 II (3条)、源地 V (4条)及冰岛(3条)的水汽经关键区,主要从西南(偏西)路径输入暴雪区;另外,来自欧洲(4条)、北冰洋(2条)及加拿大东南部(1条)到达关键区后,主要从西北(偏西)路径输入暴雪区(图 5)。

图 6 给出了伊犁河谷 700 hPa 各暴雪中心经聚 类后每条水汽轨迹比湿随时间变化的情况,即图 5 中 1、2、…、6 水汽轨迹的比湿分别对应图 6 中 C1、 C2、…、C6。统计分析图 5 中伊犁河谷各暴雪中心 700 hPa 水汽轨迹的空间分布及高度变,以及图 6 中水汽轨迹的比湿变化得表 2。

由表 2 可知,水汽源地 I 对伊犁河谷暴雪的贡献最大,为 21%~33%,主要从 1 548~3 543 m 向暴雪区输送;水汽在源地的比湿为 1.35~3.20 g/kg,到达暴雪区为 1.19~1.80 g/kg,沿途损失了 44%。水汽源地 II 对暴雪的贡献次之,为 18%~34%,主要从

| 水汽源地 | 轨迹数 | R/%   |    | h/m         |       | $q_{\rm l}/({\rm g/kg})$ |      | $q_2/(g/kg)$ |      | 坦生101  |
|------|-----|-------|----|-------------|-------|--------------------------|------|--------------|------|--------|
|      |     | 范围    | 平均 | 范围          | 平均    | 范围                       | 平均   | 范围           | 平均   | - 坝大/% |
| 源地 I | 8   | 12~71 | 28 | 2 521~6 167 | 4 515 | 0.41~3.43                | 1.90 | 0.28~1.30    | 0.70 | 63     |
| 源地Ⅱ  | 3   | 14~46 | 27 | 273~2 404   | 1 154 | 3.88~7.49                | 5.17 | 0.63~1.25    | 0.91 | 82     |
| 源地Ⅳ  | 7   | 7~29  | 19 | 2 888~6 471 | 4 535 | 0.80~4.18                | 2.02 | 0.37~0.65    | 0.48 | 76     |
| 加拿大  | 4   | 4~33  | 15 | 3 690~4 896 | 4 249 | 1.40~2.04                | 1.65 | 0.34~0.46    | 0.38 | 77     |
| 北冰洋  | 1   |       | 4  |             | 7 003 |                          | 0.10 |              | 0.40 |        |

表1 伊犁河谷暴雪过程 500 hPa 高度水汽源地及其对暴雪的贡献

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( $q_1$ 平均– $q_2$ 平均)/ $q_1$ 平均× 100%;下同。



(a为伊宁县,b为伊宁市,c为霍城县,d为新源县,e为尼勒克县)

395~2 382 m 向暴雪输送;水汽在源地的比湿为 3.24~6.12 g/kg,到达暴雪区为 1.37~2.35 g/kg,沿途 损失最多,占 59%。水汽源地Ⅲ对暴雪的贡献较小, 为 13%~29%,主要从 1 129~3 349 m 向暴雪区输送; 水汽在源地的比湿为 2.14~3.84 g/kg,到达暴雪区为 1.44~2.80 g/kg,沿途损失较小,占 33%。水汽源地Ⅳ 对暴雪的贡献较小,为13%~26%,主要从3258~ 3777 m向暴雪区输送;水汽在源地的比湿为1.78~ 2.06 g/kg,到达暴雪区为0.77~1.47 g/kg,沿途损失 较大,占47%。来自欧洲的水汽对暴雪的贡献也较 小,但沿途损失仅为8%。来自冰岛及其他源地的水 汽对暴雪的贡献小,沿途无损失。

| 水汽源地 | 轨迹数 | R/%   |    | h/m         |       | $q_{1/}(g/kg)$ |      | $q_2/(g/kg)$ |      | 把件你    |  |
|------|-----|-------|----|-------------|-------|----------------|------|--------------|------|--------|--|
|      |     | 范围    | 平均 | 范围          | 平均    | 范围             | 平均   | 范围           | 平均   | - 狈大/% |  |
| 源地 I | 4   | 21~33 | 28 | 1 548~3 543 | 2 588 | 1.35~3.20      | 2.61 | 1.19~1.80    | 1.47 | 44     |  |
| 源地Ⅱ  | 5   | 18~34 | 27 | 395~2 382   | 1 394 | 3.24~6.12      | 4.69 | 1.37~2.35    | 1.91 | 59     |  |
| 源地Ⅲ  | 3   | 13~29 | 21 | 1 129~3 349 | 2 065 | 2.14~3.84      | 3.01 | 1.44~2.80    | 2.02 | 33     |  |
| 源地Ⅳ  | 4   | 13~26 | 20 | 3 258~3 777 | 3 535 | 1.78~2.06      | 1.99 | 0.77~1.47    | 1.05 | 47     |  |
| 欧洲   | 4   | 7~21  | 16 | 2 117~4 935 | 3 641 | 0.70~2.18      | 1.18 | 0.74~1.50    | 1.09 | 8      |  |
| 冰岛   | 3   | 7~11  | 8  | 3 456~4 335 | 3 984 | 0.85~1.93      | 1.26 | 1.00~1.50    | 1.30 | -3     |  |
| 其他   | 3   | 2~15  | 7  | 4 241~7 429 | 5 664 | 0.08~1.56      | 0.64 | 0.38~0.90    | 0.68 | -6     |  |

表 2 伊犁河谷暴雪过程 700 hPa 高度水汽源地及其对暴雪的贡献

注:表中其他是北冰洋(2条)及加拿大东南部(1条)的水汽。

700 hPa上影响伊犁河谷暴雪过程的水汽自源 地经关键区,主要从偏西(西南)路径输入暴雪区(占 88%),从西北(偏西)路径输入的占 12%。水汽主要 来自源地 I、源地 II、源地 II、源地 IV及欧洲。对暴雪 区贡献最大的是源地 I,其次是源地 II;损失最大为 源地 II,其次是源地 IV,与 500 hPa 排序一致,但损 失率明显<500 hPa。可能是因为新疆水汽主要集中 在 700 hPa 附近<sup>[37]</sup>,低层水汽自源地向暴雪区输送 过程中路途相对较近。源地 II 和 III 的水汽主要从 2 500 m 以下向 700 hPa 的暴雪区输送;其他源地则 相反。 3.2.3 850 hPa 水汽特征

用 HYSPLIT 模式模拟伊犁河谷 23 次暴雪过程,追踪其暴雪中心 850 hPa 高度 168 h 的后向轨迹,对各暴雪中心轨迹聚类后共得 20 条轨迹,其中来自源地 I(2条)、源地 II(3条)、源地 II(8条)、源地 IV(2条)的水汽经关键区主要从偏西(西南)路径入暴雪区;来自北冰洋(2条)、北欧及加拿大东南部和冰岛(各1条)的水汽经关键区,主要从西北路径输入暴雪区(图7)。

图 8 对应给出了伊犁河谷各暴雪中心经聚类后 每条水汽轨迹比湿随的时间变化情况,即图 8 中 1、



图 7 伊犁河谷各暴雪中心 850 hPa 水汽轨迹的空间分布及高度变化 (a为伊宁县,b为伊宁市,c为霍城县,d为新源县,e为尼勒克县)

2、…、6水汽轨迹的比湿分别对应图 7 中 C1、 C2、…、C6。统计分析图 7 中伊犁河谷各暴雪中心 850 hPa水汽轨迹的空间分布及高度变,以及图 8 中水汽轨迹的比湿变化得表 3。

由表 3 可知,水汽源地 I 对伊犁河谷暴雪的贡献为 16%~18%,主要从 1 740~3 494 m 向暴雪区输送;水汽在源地的比湿为 1.61~2.84 g/kg,到达暴雪区为2.39~3.10 g/kg,沿途增加了 23%。水汽源地 II 对暴雪的贡献为 12%~50%,主要从 576~1 501 m 向暴雪区输送;水汽在源地的比湿为 3.46~5.88 g/kg,到达暴雪区为 2.19~3.57 g/kg,沿途损失较多,占41%。水汽源地 III 对暴雪的贡献最大,为 7%~89%,主要从 21~1 840 m 向暴雪区输送;水汽在源地的比湿为 1.99~5.40 g/kg,到达暴雪区为 1.23~3.80 g/kg,沿途损失较小,占 21%。水汽源地 IV 对暴雪的贡献

较小,沿途损失最大,占49%。来自北冰洋的水汽对 暴雪的贡献仅占6%,而沿途增加最多达79%,表明 沿途的水汽起到主要作用。其他 I 源地的水汽对暴 雪的贡献较小,沿途损失较大。

850 hPa 影响伊犁河谷暴雪过程的水汽自源地 经关键区,从偏西(西南)路径输入暴雪区(占75%) 的占主导地位,西北(偏北)路径输入暴雪区的占 25%,也很重要。水汽主要来自源地Ⅲ,其次源地Ⅱ、 源地Ⅰ与700和500 hPa 明显不同,源地Ⅳ及北冰 洋的水汽对暴雪的贡献较小。对暴雪区贡献最大的 是源地Ⅲ,损失最小;源地Ⅱ对暴雪的贡献为次大, 损失相对较多;源地Ⅰ和北冰洋的水汽对暴雪的贡 献虽然较小,但沿途增加较多,因此,沿途水汽有很 好的补充作用。来自源地Ⅲ和Ⅱ的水汽主要从1 500 m以下向 850 hPa 的暴雪区输送,其他源地的



图 8 850 hPa 水汽轨迹比湿的时间变化

(a为伊宁县,b为伊宁市,c为霍城县,d为新源县,e为尼勒克县;C1、C2、…、C6分别对应图3中1、2、…、6轨迹的比湿)

| 表3 | 伊犁河谷暴 | 雪过程 850 | hPa 🖥 | 高度水汽 | 源地及 | 其对暴 | 雪的贡 | 贡献 |
|----|-------|---------|-------|------|-----|-----|-----|----|
|----|-------|---------|-------|------|-----|-----|-----|----|

| 水汽源地 | 轨迹数 | <i>R/%</i> |    | $h/{ m m}$  |       | $q_{\rm l}/({\rm g/kg})$ |      | $q_2/(g/kg)$ |      | 把件的 |
|------|-----|------------|----|-------------|-------|--------------------------|------|--------------|------|-----|
|      |     | 范围         | 平均 | 范围          | 平均    | 范围                       | 平均   | 范围           | 平均   | 一   |
| 源地 I | 2   | 16~18      | 17 | 1 740~3 494 | 2 617 | 1.61~2.84                | 2.23 | 2.39~3.10    | 2.75 | -23 |
| 源地Ⅱ  | 3   | 12~50      | 34 | 576~1 501   | 983   | 3.46~5.88                | 4.83 | 2.19~3.57    | 2.83 | 41  |
| 源地Ⅲ  | 8   | 7~89       | 37 | 21~1 840    | 1 228 | 1.99~5.40                | 3.04 | 1.23~3.80    | 2.40 | 21  |
| 源地Ⅳ  | 2   | 8~11       | 10 | 2 681~3 099 | 2 890 | 2.15~2.70                | 2.43 | 1.22~1.23    | 1.23 | 49  |
| 北冰洋  | 2   | 4~7        | 6  | 403~3 354   | 1 879 | 0.46~1.10                | 0.78 | 0.79~2.00    | 1.40 | -79 |
| 其他 I | 3   | 3~25       | 13 | 2 648~3 951 | 3 258 | 0.26~3.61                | 2.11 | 1.21~1.79    | 1.43 | 32  |

注:其他 I 为来自北欧、加拿大东南部和冰岛的水汽各1条。

水汽主要从1500m以上向暴雪区输送。

3.3 伊犁河谷暴雪水汽三维结构特征

图 9 为伊犁河谷暴雪水汽三维结构模型。该模 型清晰地反映了伊犁河谷暴雪过程水汽的结构, 500 hPa 水汽主要来自地中海和黑海附近、大西洋 及其沿岸、加拿大、西南亚等地随西风气流东移至关 键区,在环流合适的情况下,主要从西南(偏西)路径 输送至暴雪区,占96%,只有4%的水汽从西北路径 输送至暴雪区。700 hPa水汽自西南亚、地中海和黑 海附近、大西洋及其沿岸、欧洲等地随西风气流东移 至关键区,其接力输送路径与500hPa一致,所占比 例分别为88%和12%,西北路径的水汽不容忽视。 850 hPa 水汽主要自中亚、西南亚等地随西风气流 东移至关键期,从西南(偏西)路径输入的占75%, 西北(偏北)路径输入的占 25%,2 条路径都很重要。 可见,影响伊犁河谷暴雪过程的水汽主要有2条路 径,各路径在不同的层次(500、700、850 hPa)对暴雪 的贡献明显不同,各层中主要水汽源地也存在较大 的差异:与欧拉方法得到的结果明显不同[13-20]。



图 9 伊犁河谷暴雪水汽来源三维结构 (+表示西北和偏北路径占 25%)

#### 4 结论

本文对伊犁河谷暴雪过程的环流背景进行了分 析,利用 HYSPLIT 模式模拟后向追踪了暴雪过程的 水汽来源及输送特征。主要结论如下:

(1)伊犁河谷暴雪区位于高空西南急流轴右侧 辐散区、槽前西南强锋区、低空西南急流出口区前部 辐合区、水汽通量散度辐合大值区及地面冷锋附近 的重叠区域。

(2)影响伊犁河谷暴雪过程的水汽主要来自地 中海和黑海附近、西南亚。其他源地的水汽在各层存 在差异,500 hPa有大西洋及其沿岸、700 hPa有中 亚和大西洋及其沿岸和欧洲、850 hPa有中亚。500、 700 hPa对暴雪贡献最大的是来自地中海和黑海附 近的水汽,850 hPa为中亚的水汽;500、700 hPa损 失最大的是来自西南亚的水汽,850 hPa损失最大 的为大西洋及其沿岸的水汽。来自中亚、西南亚的水 汽主要输送至 700 hPa以下,地中海和黑海附近、 大西洋及其沿岸、加拿大等地的水汽主要输送至 700 hPa及以上。

(3)建立了伊犁河谷暴雪水汽输送的三维结构 模型。水汽自源地随西风气流东移到达关键区后,在 环流合适的条件下,主要有西南(偏西)、西北(偏北) 2条路径输入暴雪区,各层中其对暴雪的贡献存在 明显的差异,500 hPa 西南(偏西)路径贡献大,占 96%,西北(偏北)路径贡献仅占4%;700 hPa 也是西 南(偏西)路径贡献大,占 88%,但西北(偏北)路径 也不容忽视,占 12%;850 hPa 2条路径均很重要, 分别占 75%、25%。该结论与欧拉方法得到的明显不 同。

(4)伊犁河谷暴雪对流层有来自加拿大、北冰洋 等地的水汽;加拿大湿地面积占世界首位,因此,来 自加拿大的水汽是湿地蒸发的结果,并与北美洲北 部冬半年为极涡频发区一致。

#### 参考文献:

- [1] 施雅风.中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估[M]. 北京:气象出版社,2003.
- [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] 杨莲梅,刘雯.新疆北部持续性暴雪过程成因分析[J].高 原气象,2016,35(2):507-519.
- [4] 张云惠,贾丽红,崔彩霞,等.2000—2011 年新疆主要气 象灾害时空分布特征[J].沙漠与绿洲气象,2013,7(增): 20-23.
- [5] TRENBERTH K E. Atmospheric moisture residence times and cycling: implications for rainfall rates and climate change[J].Climatic Change, 1998, 39(4):667–649.
- [6] 陈斌,徐祥德,施晓晖.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.2011,69(5):810-818.
- [7] 高松影,赵婷婷,宋丽丽,等.辽宁省冬季区域暴雪水汽输送特征[J].冰川冻土,2020,42(2):439-446.
- [8] 徐娟娟,郝丽,刘佳慧敏,等.2018年1月陕西区域性暴

雪过程诊断[J].干旱气象,2020,38(1):117-125.

- [9] 杜佳,杨成芳,戴翼,等.北京地区 4 月一次罕见暴雪的形 成机制分析[J].气象,2019,45(10):1363-1374.
- [10] 李津,赵思雄,孙建华.一次华北破纪录暴雪成因的分析 研究[J].气候与环境研究.2017,22(6):683-698.
- [11] 罗布坚参,假拉,德庆,等.南支槽影响下西藏高原南部 3次暴雪天气特征分析[J].气象,2019,45(6):862-870.
- [12] 胡娅敏,翟盘茂,陈阳."75·8"持续强降水事件及其大尺 度水汽输送特征[J].气象与环境科学,2015,38(3):13-18.
- [13] 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.
- [14] 崔彩霞,庄晓翠,贾丽红,等.新疆北部暴雪天气预报预 警技术研究[M].北京:气象出版社,2017:91-101.
- [15] 庄晓翠,李博渊,陈春艳.新疆北部一次暖区与冷锋暴雪 并存的天气过程分析[J].气候与环境研究,2016,21(1): 17-28.
- [16] 庄晓翠,崔彩霞,李博渊,等.新疆北部暖区强降雪中尺 度环境与落区分析[J].高原气象,2016,35(1):129-142.
- [17] 庄晓翠,覃家秀,李博渊.2014 年新疆西部一次暴雪天 气的中尺度特征[J].干旱气象,2016,34(2):326-334.
- [18] 庄晓翠,李博渊,李如琦,等.新疆北部强降雪天气研究 若干进展[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(1):1-8.
- [19] 庄晓翠,崔彩霞,李博渊,等.新疆北部雪灾成因及预报 技术研究[M].北京:气象出版社,2018:108-165.
- [20] 庄晓翠,李健丽,李博渊,等.天山北坡2次暴雪过程机 理分析[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(1):29-38.
- [21] 张林梅,庄晓翠,李如琦.新疆北部 2 次罕见暖区暴雪过 程对比分析[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(2):1-9.
- [22] 孙力,马梁臣,沈柏竹,等.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,2016,40(3): 630-646.
- [23] 孙颖姝,周玉淑,王咏青.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,2019,43(5):1041-1054.
- [24] 庄晓翠,李博渊,赵江伟,等.天山南坡暖季暴雨过程的 水汽来源及输送特征[J].干旱气象,2022,40(1):30-40.
- [25] 庄晓翠,李博渊,赵江伟,等.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,2022,48 (3):311-323.

- [26] 庄晓翠,赵江伟,李博渊,等.南疆西部暴雨过程水汽来 源及输送特征[J].暴雨灾害,2022,41(6):544-555.
- [27] DRAXIER R R, HESS G D.An overview of HYSPLIT\_4 modeling system for trajectories dispersion and deposition
   [J]. Australian Meteorological Magazine, 1998, 47 (4): 295-308.
- [29] STOHL A, JA MES P.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].Journal of Hydro meteorology, 2004, 5(4):656–678.
- [30] 刘鹏飞,程祖强.伊犁河谷核桃生产中存在的几个问题 [J].北方果树,2014,(4):30-31.
- [31] 高小伟,郭芳.丝绸之路与伊犁[J].大众考古,2015,(1): 74-80.
- [32] PERRY L B, KONRAD C E, SCH MIDLIN T W. Anteccedent upstream air trajectories associated with northwest flow snowfall in the sonthern Appalachians[J]. Wea Forecasting, 2007, 22(2): 334–352.
- [33] 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.
- [34] Gustafsson M, Rayner D, Chen DL.Extreme rainfall events in southern Sweden: Where does the moisture come from? [J].Tellus A,2010,62(5):605–616.
- [35] 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.
- [36] 周玉淑,颜玲,吴天贻,等,高原涡和西南涡影响的两次
   四川暴雨过程的对比分析[J].大气科学,2019,43(4):
   813-830.
- [37] 张家宝,邓子风.新疆降水概论[M].北京:气象出版社, 1987:40-243.

# Characteristics of Water Vapor During Blizzard in Ili River Valley

ZHUANG Xiaocui<sup>1</sup>, ZHAO Jiangwei<sup>1</sup>, LI Boyuan<sup>1</sup>, ZHOU Hongkui<sup>2</sup>, LI Jiangang<sup>3,4</sup>

(1.Altai Meteorological Bureau, Altai 836500, China;

2. Xinjiang Meteorological Information Service, Urumqi 830002, China;

3.Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China;

4.Central Asia Atmospheric Science Research Center, Urumqi 830002, China)

Using NCEP reanalysis data, the large -scale circulation background of 23 snowstorm Abstract processes that occurred in Ili River Valley from October 2000 to April 2020 was diagnosed, and used the HYSPLIT model (Lagrangian) method to simulate and track the backward trajectory of water vapor, the water vapor transport paths and their contributions from different sources were quantitatively determined. The results show that; the snowstorm area of the Ili River Valley is located on the right side of the high-altitude southwest jet stream, the southwest strong front area in front of the trough, the front convergence area of the exit area of the low-level southwest jet, the convergence area of water vapor flux and the overlapping area near the surface cold front. The HYSPLIT model results show that the water vapor during the snowstorm mainly comes from the vicinity of the Mediterranean Sea and the Black Sea, Southwest Asia, Central Asia, the Atlantic Ocean, and its coasts. The water vapor originating from the source passes through the key area, enters the snowstorm area from the southwest (west) and northwest (north) paths respectively. The contribution of each path and source to snowstorm varies significantly among different layers. The water vapor from Central Asia and Southwest Asia is mainly transported below 700 hPa layer, the water vapor in the vicinity of the Mediterranean Sea and the Black Sea, the Atlantic Ocean and its coasts, and Canada is mainly transported to 700 hPa and above. Water vapor from Canada is the result of evaporation from wetlands, and it is related to the frequent polar vortex in northern North America in the winter half year.Based on the above characteristics, a 3D structural model of water vapor transport during snowstorms in Ili River Valley is established.

Key words Ili River Valley; snowstorm process; water vapor characteristics; HYSPLIT mode