

熊秋芬,张玉婷,姜晓飞,等,2018. 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,44(10):1267-1274.

锢囚气旋钩状云区暴雪过程的 水汽源地及输送分析*

熊秋芬¹ 张玉婷² 姜晓飞¹ 张雅乐¹

1 中国气象局气象干部培训学院,北京 100081

2 河北省衡水市气象局,衡水 053000

提 要: 利用常规高空、地面观测资料、FY-2E 卫星云图和 NCEP 再分析场,分析了 2013 年 11 月 25 日发生在中国东北东部的暴雪天气过程,并用 HYSPLIT 模式模拟了暴雪区上空气块的轨迹。结果表明:卫星云图显示暴雪发生在锢囚气旋的钩状云区中,且具有中尺度特征。钩状云区不同代表点、不同层次 25 日 08 时 120 h 气块的后向轨迹计算结果表明,在每个代表点的 6 条轨迹中,只有 1 条轨迹来自新疆以西地区的对流层上层,其他 5 条轨迹均来自蒙古国或我国北方地区的对流层中低层。几乎每条轨迹对应的气块在东移或南移时先以水平运动为主,伴有弱的下沉;中低层气块在 72~24 h 经过渤海湾和日本海;而中上层气块则主要经过黄海或东海,到达降雪区前几小时气块移速快并有明显的上升运动。对钩状云区不同代表点 1500 和 3000 m 上空 120 h 后向轨迹中气块湿度分析表明,来自东亚大陆的气块水汽含量并不大、相对湿度也小于 60%,但在经过渤海湾和日本海时,海气交换使得气块的含水量和相对湿度均呈增加的趋势;特别是气块途经日本海的时间和距离越长,水汽含量越多。因此暴雪区的水汽主要来自日本海,其次是渤海湾。在降雪发生前几小时,气块随偏南风或东南风快速北移,相对湿度接近饱和并伴有上升运动,从而引起降雪。

关键词: 锢囚气旋,钩状云区,暴雪,水汽,轨迹

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.10.003

Analysis of Moisture Source and Transport of Snowstorm in Hooked Cloud Area of an Occluded Cyclone

XIONG Qiufen¹ ZHANG Yuting² JIANG Xiaofei¹ ZHANG Yale¹

1 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

2 Hengshui Meteorological Office of Hebei Province, Hengshui 053000

Abstract: The snowstorm that occurred with an occluded cyclone on 25 November 2013 was analyzed using conventional observations, FY-2E satellite images and NCEP reanalysis data. The 120 h backward trajectories ending at 08:00 BT 25 November 2013 were simulated with HYSPLIT model. The results showed that the snowstorm was located in hooked cloud area of an occluded cyclone with mesoscale features. Of the 6 backward trajectories at each release point, only one trajectory came from the upper troposphere over the region to the west of Xinjiang and 5 trajectories originated from the low-middle troposphere over Mongolia or northern China. The air parcels along trajectory moved horizontally with weak descending towards eastern or southeastern regions. Then the air parcels in the low-middle troposphere went through Bohai Sea and Sea of Japan during 72—24 h while the air parcels in the middle-upper troposphere passed over Yellow Sea or East Sea of China. Finally all parcels went up to snow area in several hours. Sea of Japan

* 中国气象局预报员专项(CMAYBY2018-096 和 CMAYBY2016-092)、国家自然科学基金重大项目(91637105)及中国气象局气象干部培训学院项目(内 2017-008)共同资助

2018年2月28日收稿; 2018年5月10日收修定稿

第一作者:熊秋芬,主要从事天气分析预报教学及研究. Email: xiongqf@cma.gov.cn

was an important source of moisture and Bohai Sea was the second source with air-sea interaction while air parcels from East Asia land contained less water vapour. The longer distance and persisting time in Sea of Japan, the more moisture of the air parcel. The air parcels with high specific humidity and relative humidity moving quickly with southerly or southeast winds resulted in the snowstorm event.

Key words: occluded cyclone, hooked cloud area, snowstorm, moisture, trajectory

引 言

暴雪是我国冬半年主要的灾害性天气之一,近年来有关降雪过程的研究主要表现在降雪机理研究(阿衣夏木·尼亚孜等,2007;赵桂香,2007;周雪松和谈哲敏,2008;蔡丽娜等,2009;刘宁微等,2009;陈涛和崔彩霞,2012;王东海等,2013;任丽等,2015;朱乾根等,2007;丁一汇,2005;周淑玲等,2016;阎琦等,2016;田秀霞等,2016;杨莲梅和刘雯,2016;翟亮等,2018)和数值模拟(秦华锋和金荣花,2008;梁军等,2010;孙艳辉等,2017)等方面。在上述关于降雪过程的水汽问题研究中,基本上都是从欧拉观点出发,如计算某一时刻比湿、水汽通量、水汽通量的辐合辐散等变量(任丽等,2015;蔡丽娜等,2009;王东海等,2013),以此分析水汽输送特征。由于欧拉方法着眼于某一时刻、空间的某些确定点,即在固定点上观察流体的运动,而大气运动具有瞬时变化特征,由欧拉方法计算的水汽通量随时间变化也具有瞬变特征,因此只能给出简单的水汽输送路径,无法定量给出水汽源汇关系,也无法区分各水汽源地对降水贡献的大小。而在研究流体运动时,还存在拉格朗日方法,它可以通过计算空气块运行的拉格朗日轨迹,该方法的优势在于能够模拟气块在一定时间内的三维运动轨迹,定量统计出各源地的水汽输送贡献,以克服欧拉方法的不足。

美国国家海洋和大气管理局 NOAA 开发的拉格朗日轨迹模式 HYSPLIT (Draxler and Hess, 1998) 被用于追踪暴雨和暴雪过程的水汽来源 (Stohl et al, 1998; James et al, 2004; Brimelow and Reuter, 2005; Perry et al, 2007; Sodemann and Stohl, 2009; Gustafsson et al, 2010; Drumond et al, 2011), 近年来被我国学者逐步应用到华北、淮河流域、江淮、四川和东北暴雨过程水汽输送的研究中 (马京津等, 2008; 陈斌等, 2011; 江志红等, 2011; 2013; 王佳津等, 2015; 马梁臣等, 2017)。但将该方法用于追踪东北暴雪过程中水汽来源的不多。

2013 年 11 月 24—26 日在中国东北地区发生了一次由北上的江淮气旋引发雨雪天气过程,在江淮气旋到达东北地区的过程中,25 日 08 时地面冷锋赶上暖锋形成了锢囚锋,暴雪过程就发生在与气旋锢囚锋对应的钩状云区中。本文利用常规高空、地面观测资料、AWX 格式的 FY-2E 卫星云图,先介绍了此次暴雪过程的中尺度特点,再利用 HYSPLIT 模式和 6 h 一次的 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析场模拟钩状云区中气块的 120 h 后向轨迹,向后的时间步长为 1 h,逐小时输出一次轨迹点的位置及相应位置上气块的物理属性(位温、气压、相对湿度、比湿、风场等),以揭示暴雪过程中不同气块的路径及高低空配置,重点分析了对流层低层水汽的源地及输送特征。以期提高对东北暴雪过程水汽来源的认识以及对该类天气的预报能力。

1 暴雪中尺度特征

此次过程自 2013 年 11 月 24 日 08 时从辽宁大连降雨开始,逐渐向东向北发展,降水相态由雨转为雪,至 26 日 08 时黑龙江北部降雪结束,过程具有雪(雨)量大、持续时间长、范围广、多种灾害性天气并存(图略)等特点。任丽等(2015)详细分析了这次由北上江淮气旋引发的暴雪过程发生发展的环流背景、影响系统及形成机理,但其中没有分析降雪的中尺度特征。下面借助 FY-2E 卫星图像揭示 25 日发生在吉林和黑龙江东部降雪过程的中尺度特点,为第 2、3 节重点分析钩状云区降雪的水汽条件提供帮助。

从 25 日每 3 h 一次人工观测的云状(图略)来看,吉林、黑龙江上空存在蔽光高层云、雨层云,同时也有积云性层积云、积云,表明该次降水过程既有层状云稳定性降水、也有积云对流性降水的特点。虽然凌晨吉林、黑龙江已经开始降雪,但从 6 h 降水量观测(图略)可知,08 时以前降雪量大多在 10 mm 以下;08—14 时、14—20 时在吉林和黑龙江东部分别出现了 10 mm 以上的暴雪,其中 08—14 时为 15 mm 以上的暴雪(图 1 中蓝色数字所示)。强降

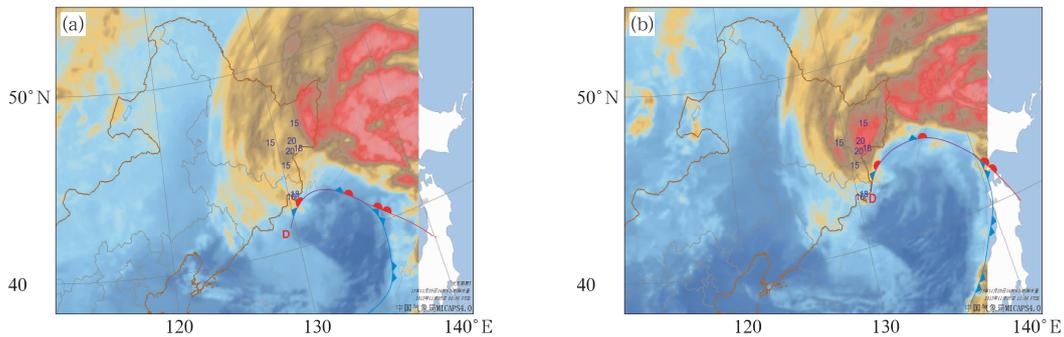


图 1 2013 年 11 月 25 日 08 时(a)、11 时(b)FY-2E 红外云图及锢囚锋
(蓝色数值指 25 日 08—14 时 ≥ 15 mm 降雪量)

Fig. 1 IR images from FY-2E and occluded front at 08:00 BT (a) and 11:00 BT (b) 25 November 2013
(Digitals show snowfall over 15 mm at the time interval from 08:00 BT to 14:00 BT 25 November 2013)

雪与锢囚锋相伴的钩状云有关,钩状云区中出现明显的条状中尺度云带和块状的云团(图 1a),其中棕色表示 $TBB \leq -43^\circ\text{C}$,红色表示 $TBB \leq -53^\circ\text{C}$,表示有对流云存在;至 11 时(图 1b),在锢囚锋缓慢往北推进过程中,钩状云区的中尺度云带和块状对流云团发展,TBB 值降低、面积扩大,因此强降雪维持;14 时以后(图略),钩状云区变得松散并逐渐北移,降雪区往北扩展但强度有所减弱。正是由于钩状云区中尺度云带或对流云团的发展及缓慢北移,造成了 25 日吉林和黑龙江东部的强降雪。

2 暴雪区气块的来源及高低空配置

由第 1 节的分析可知,25 日暴雪主要发生在与锢囚锋相伴的钩状云区中,降雪强度虽然很大,但范围不大。在分析暴雪区水汽的来源之前,首先要研究钩状云区气块不同层次的来源及其配置关系,为此选取了 08 时降雪发生时三个代表点 P1(45.3°N、130.7°E)、P2(46.6°N、131.0°E)和 P3(47.2°N、131.9°E),分别对应图 1 中 20 mm 降雪中心、20 mm 降雪中心北侧和 15 mm 降雪中心北侧,见图 2~图 4 中五角星★的位置。再采用 HYSPLIT 模式分别模拟了这三个代表点 08 时 500、1500、3000、5000、7000、9000 m 上空气块的 120 h 后向(即前 5 天)轨迹,向后的时间步长为 1 h,逐小时输出一组轨迹点的位置及相应位置上气块的物理属性(位温、气压、相对湿度、比湿和风场等),图中不同颜色线条代表不同层次气块的轨迹。

从图 2 可以看到 P1 上空不同高度气块 120 h 的后向轨迹。红色轨迹代表有来自东北对流层低层

500 m 以下的气块,先东南移到朝鲜半岛北部,72 h(22 日 08 时)再向东北移动到长白山北侧,最后 12 h(24 日 20 时以后)转向西北移动到钩状云区;且以水平运动为主。蓝色轨迹代表来自蒙古国东部 1000 m 的气块,先缓慢下沉并南下到达河北中部,72~48 h(22 日 08 时至 23 日 08 时)从天津东移经过渤海湾、辽东半岛、朝鲜半岛北部后到达日本海,并继续下沉接近海面,24 h(24 日 08 时)以后转向北上并由近地层上升到 1500 m。绿色轨迹代表来自内蒙古中部 2000 m 上空的气块,该气块也缓慢下沉并一直向东南方向移动到日本海,24 h(24 日 08 时)再转向北上并上升到 3000 m。天蓝色轨迹表明有来自内蒙古东部上空 2000 m 的气块,向东南方向移动并下沉先进入渤海湾,84~48 h(21 日 20 时至 23 日 08 时)再经过辽东半岛南部、黄海、朝鲜半岛、并继续下沉东移到日本海,24 h(24 日 08 时)以后转向北上且快速上升到 5000 m。玫瑰红色轨迹表明来自东北地区 1000 m 上空的气块,先南下并缓慢下沉到黄海、东海,60~24 h(22 日 20 时至 24 日 08 时)在东海转向西北移动,移经杭州湾、长江口以北,24 h(24 日 08 时)以后再转向东北移动,接近钩状云区时快速上升到了 7000 m。黄色轨迹表明 48 h 前气块来自 9000 m 以上的巴尔喀什湖以西地区,48~12 h(23 日 08 时至 24 日 20 时)先快速向东南方向移动,到达江苏沿海后转向并快速移向降雪区,在移动时经历了由下沉运动转为上升运动、再下沉和再上升的过程,但上升和下沉均出现在对流层上层 7000 m 以上。

图 3 显示 P2 上空气块 120 h 的后向轨迹。与图 2 有类似的特点:5 条轨迹的起始高度在对流层

中低层、1 条轨迹(黄色轨迹)在新疆以西的对流层高层且气块移速快、上升和下沉均在 6000 m 以上;大多数轨迹先以水平运动为主、伴有弱的上升和下沉运动,向东或向南移动、72~24 h(22 日 08 时至 24 日 08 时)经过渤海湾或黄海到达日本海、再转向北上并伴有强上升运动的趋势。不同的是气块的起始位置和移动速度有差别,特别是 500、3000、5000、7000 m 上空气块的 120 h 的后向轨迹的起始位置均比图 2 中的明显偏南,分别来自天津近地层(红色)、内蒙古西部(绿色)、内蒙古东部(天蓝色)和山东西部(玫瑰红色)2000 m 以下,且 3000、5000 m 气块移速快。1500 m 上空 120 h 后向轨迹(蓝色)对应的气块经过日本海的距离和时间较图 2 中的短,约为 24 h;3000、5000 m 的轨迹(绿色和天蓝色轨迹)在日本海停留时间则不足 24 h;7000 m 轨迹(玫瑰红色)在东海历时也较短且经日本海南部直接北上而没有西折。

P3 上空气块 120 h 的后向轨迹(图 4)中也有 5 条来自对流层中低层、1 条轨迹(黄色轨迹)来自新疆以西的对流层高层且气块移速快、上升和下沉同样在 6000 m 以上。图中的大多数轨迹先以水平运动为主、伴有弱的上升和下沉运动,向东或向南移动、72~24 h(22 日 08 时至 24 日 08 时)经过渤海湾或黄海到达日本海、再转向北上并伴有强上升运动的趋势与图 2 相似,也只是气块的起始位置和移动速度有差别,特别是 500、7000 m 上空 120 h 后向轨迹对应的气块起始位置差别较大,分别来自山东西北部的近地层(红色)和蒙古国东南部 3000 m 的上空(玫瑰红色),且 500 m 轨迹移动速度稍快而 7000 m 轨迹西折不明显。1500、5000 m 上空 120 h 后向轨迹(蓝色和天蓝色)对应的气块经过日本海的时间和距离也较短,约为 24 h;3000、7000 m 上空 120 h 后向轨迹(绿色和玫瑰红色)对应的气块在东海或日本海经过的时间也比图 2 中的短。

综上所述,在上述三个点上空不同层次气块轨迹中,除了 1 条轨迹中的气块来自对流层上层的新疆以西地区外,其他 5 条轨迹中的气块均来自对流层中低层蒙古国及我国北方地区。从移动路径看,除图 2~图 4 中的玫瑰红色轨迹显示 7000 m 上空的气块后向轨迹是先向南或向东、再转向西或向西北、最后向东北的旋转式路径之外,其他气块几乎都是先向东或向南移动,然后转向北上。从移动速度来看,对流层高层移动快、中低层移动慢,500 m 的

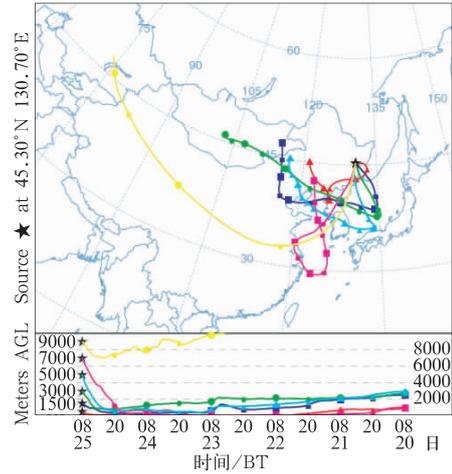


图 2 2013 年 11 月 25 日 08 时代表点 P1(图中★)不同层次 120 h 后向轨迹图
Fig. 2 120 h backward trajectories ending at different levels for P1 (★) at 08:00 BT 25 November 2013

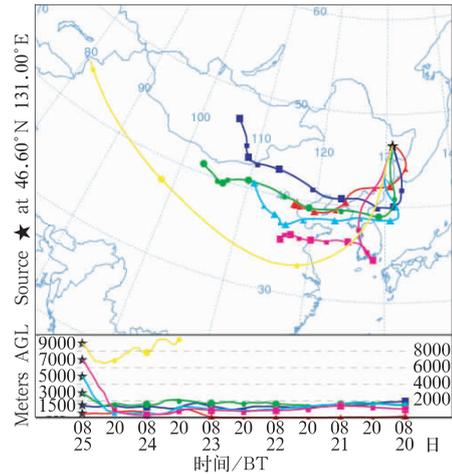


图 3 同图 2, 但为点 P2(图中★)
Fig. 3 Same as Fig. 2, but for P2 (★)

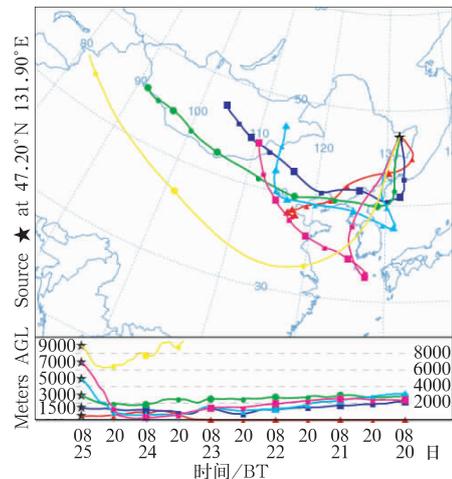


图 4 同图 2, 但为点 P3(图中★)
Fig. 4 Same as Fig. 2, but for P3 (★)

气块移动最慢。从途经的海域来看, 9000、7000 m 上空的气块主要经过黄海、东海或日本海南部; 近地面 500 m 的气块只经过渤海湾和东北东部, 其他层次(5000、3000、1500 m) 的大多数气块到达降雪区前 72~48 h(22 日 08 时至 24 日 08 时) 先进入渤海湾, 再东移进入日本海中西部, 经过日本海的时间较长(12~36 h)。从图 2~图 4 还可以看出, 只有对流层上层气块的上升和下沉运动均在 6000 m 以上, 其他气块从开始向降雪区移动时, 主要在 3000 m 以下、以水平运动为主, 伴有弱下沉, 遇到朝鲜半岛时等山脉地形时有弱的上升运动, 随后下沉进入日本海, 在移向降雪区前几小时有强的上升运动, 最高可达 7000 m。

3 暴雪区水汽来源及输送

在第 1 节中提到这次降雪主要由蔽光高层云、积云性层积云等中低云引起, 因此轨迹计算中对流层上层 7000、9000 m 气块的后向轨迹与钩状云区之间关联度小。且 9000 m 后向轨迹对应的气块一直在对流层上层, 水汽含量低(图略); 7000 m 的后向轨迹表明气块虽然经过东海或黄海, 但到达钩状云区之前已变干(图略), 对暴雪区水汽的贡献小; 而绝大多数气块轨迹都集中在对流层中下层 3000 m 以下, 因此与暴雪相伴的钩状云区水汽也主要集中在对流层中下层。对地面三线图(图略)的分析发现, 暴雪区在下雪之前几个小时才增温增湿, 且探空资料显示 1500、3000 m 上空 24 日 20 时比湿分别只有 $2.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图略), 因此仅依赖本地上空水汽的凝结不足以形成 $\geq 15 \text{ mm} \cdot (6 \text{ h})^{-1}$ 的暴雪, 必须有外来的水汽不断的补充且辐合上升凝结成雪。这

里重点分析 25 日 08 时降雪过程中 P1、P2 和 P3 三个代表点 1500、3000 m 上空 120 h 后向轨迹中气块的比湿和相对湿度等的变化, 以揭示暴雪区水汽的来源和输送。为了方便讨论, 将图 2~图 4 中的 1500 m 蓝色轨迹归入图 5a 中, 代表点 P1、P2 和 P3 分别对应轨迹 1~3; 而 3000 m 绿色轨迹归入图 5b, 代表点 P1、P2 和 P3 分别对应轨迹 4~6。

3.1 1500 m 轨迹分析

轨迹 1 是 25 日 08 时 20 mm 暴雪中心代表点 P1 对应的 120 h 后向轨迹, 该轨迹中的气块在 72 h(22 日 08 时) 之前从内蒙古中部开始下沉(图 5a), 期间比湿缓慢增加(图 6a), 相对湿度在 35% 以下(图 6b); 72 h(22 日 08 时) 之后从天津下沉进入渤海湾, 比湿由 $0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 缓慢增加到 $1.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 约 66~60 h(22 日 14—20 时) 比湿迅速增加到 $2.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 60 h(22 日 20 时) 到达辽东半岛, 比湿和相对湿度均减小, 之后气块经过辽东半岛到达朝鲜半岛东部, 比湿降到 $1.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相对湿度也减小到 41%; 48 h(23 日 08 时) 气块达到日本海; 48~36 h(23 日 08—20 时) 气块在日本海东移时比湿迅速增加到 $4.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相对湿度增加到 70%; 36~12 h(23 日 20 时至 24 日 20 时) 气块继续随西风(图略)东移, 再随南风转向北上时比湿缓慢上升至 $5.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 12~0 h(24 日 20 时至 25 日 08 时) 气块随东南风快速向西北方向移动到降雪中心, 并伴有上升运动, 相对湿度也迅速增加; 降雪开始时比湿快速下降而相对湿度接近 100%。

相对于轨迹 1, 轨迹 2、3 对应的气块均来自蒙古国中部(图 5a), 比湿和相对湿度的变化总体上变化平缓(图 6)。轨迹 2、3 在 120 h(20 日 08 时) 比湿

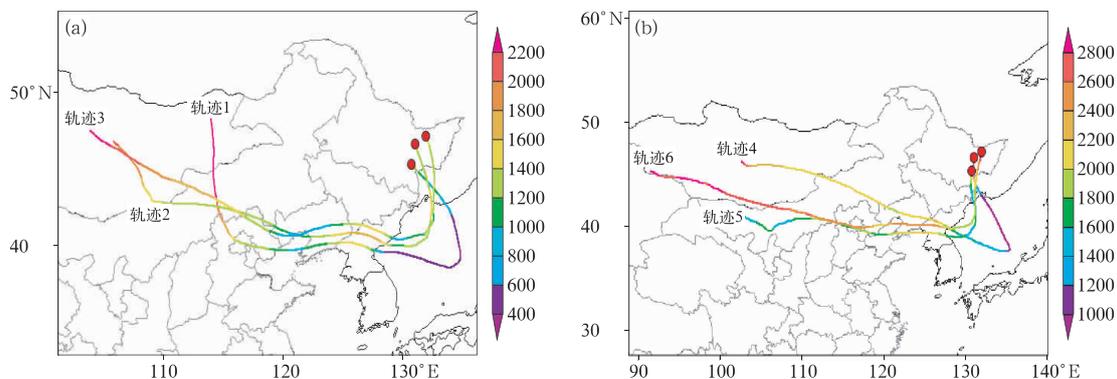


图 5 2013 年 11 月 25 日 08 时 P1、P2 和 P3 代表点 120 h 后向轨迹: (a) 1500 m, (b) 3000 m

Fig. 5 120 h backward trajectories ending for P1, P2, P3 at 08:00 BT 25 November 2013

(a) 1500 m, (b) 3000 m

分别为 1.13 、 $0.72 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 高于轨迹 1 的 $0.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相对湿度也是轨迹 2、3 大于轨迹 1。但这种状况仅维持到 84 h(21 日 20 时)前后; 84 h(21 日 20 时)三个气块均达到内蒙古, 轨迹 1 的比湿快速增加而轨迹 2、3 的比湿维持在 $1.3 \sim 1.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 72~48 h(22 日 08 时至 23 日 08 时)轨迹 2、3 对应的气块经辽宁到达朝鲜半岛的东北部, 轨迹 2 比湿变化不大而轨迹 3 比湿增加到 $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在此期间相对湿度均下降到了 35%; 48~36 h(23 日 08—20 时)在经过朝鲜半岛时比湿下降到了 $1.2 \sim 1.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相对湿度略有上升, 但轨迹 3 的移动速度快于轨迹 2, 因此轨迹 3(42 h, 23 日 24 时)先于轨迹 2(36 h, 23 日 20 时)到达日本海, 对应比湿都增加到 $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相对湿度略有下降; 轨迹 2、3 在日本海先随西风(图略)东移再随南风转向北上, 在日本海停留时间大约为 24 h, 相对湿度快速增加到 80%; 12~0 h(24 日 20 时至 25 日 08 时)气块从日本海快速北上到黑龙江东部, 降水开始前比湿迅速增加到 $2.9 \sim 3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相对湿度也达到 95% 以上。

由此可见, 虽然轨迹 1~3 所对应的气块在经过

渤海湾时相对湿度和绝对湿度均略有增加, 获得了一定的水汽, 但从辽东半岛到达朝鲜半岛东部时比湿和相对湿度都有所下降。在日本海移动缓慢, 经过日本海的时间约为 24~36 h, 比湿和相对湿度均增加较多。从 2 m 的温度来看(图略), 23—25 日日本海的气温维持在 7°C 左右, 比同纬度的中国大陆及朝鲜半岛高出约 10°C 。因此当气块经过日本海时, 海气热量交换(海水蒸发、感热)不仅使得气块获得了充分的水汽, 同时气块 48~12 h(23 日 08 时至 24 日 20 时)在日本海上空移动期间是升温的, 气块增温使得其可含水量也增加。其中轨迹 1 对应的气块在进入日本海最早、在海上经过的距离和时间最长、超过 36 h, 因此比湿增加最快最多; 而轨迹 2、3 对应的气块在日本海停留的时间约 24 h, 从海上获得的水汽相对较少, 比湿也小。

3.2 3000 m 轨迹分析

代表点 P1 对应的轨迹 4 中的气块来自蒙古国中部(图 5b), 在移向蒙古国东部时, 比湿由 $0.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 $0.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 7a), 相对湿度由 44%

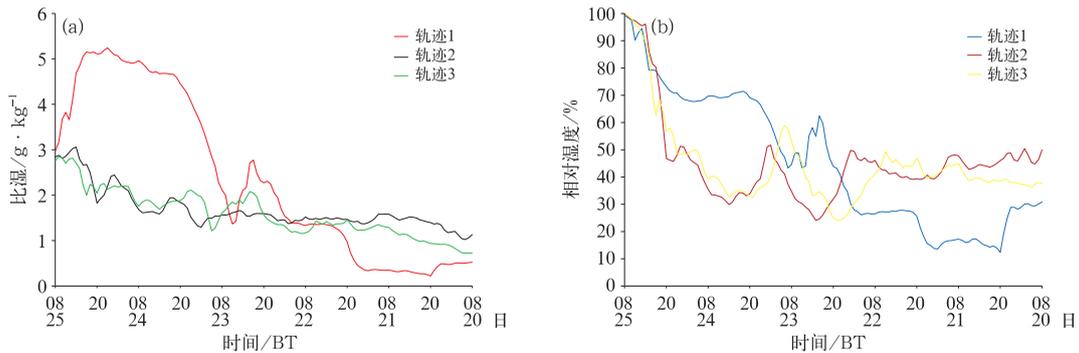


图 6 2013 年 11 月 25 日 08 时 P1、P2 和 P3 代表点 1500 m 上 120 h 后向轨迹中气块的比湿(a)和相对湿度(b)演变特征

Fig. 6 Distribution of specific humidity (a) and relative humidity (b) for 120 h backward trajectories ending at 08:00 BT 25 November 2013 for P1, P2, P3 over 1500 m

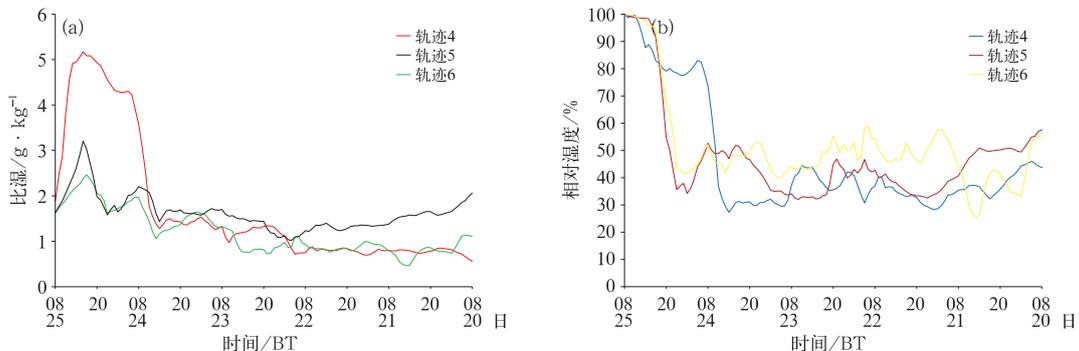


图 7 同图 6, 但为 3000 m

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for 3000 m

下降到 29% (图 7b); 84 h (21 日 20 时) 进入内蒙古中北部, 随后继续向东南移动, 比湿维持在 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下, 相对湿度有小幅的先升后降; 66~60 h (22 日 14—20 时) 经过渤海湾北部时比湿增加到 $1.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 60~48 h (22 日 20 时至 23 日 08 时) 再往东经过辽宁东部和朝鲜半岛时比湿又略有下降, 也伴随着相对湿度的小幅波动; 48 h (23 日 08 时) 从朝鲜半岛东北部进入日本海, 48~24 h (23 日 08 时至 24 日 08 时) 在日本海缓慢东移, 期间 30~24 h (24 日 02—08 时) 比湿从 $1.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 剧增到 $4.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相对湿度由 27% 上升到 81%; 24~9 h (24 日 08—23 时) 随偏南风 (图略) 转向北上, 比湿再增加到 $5.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相对湿度达 95% 以上; 9~0 h (24 日 23 时至 25 日 08 时) 快速移向暴雪区上空且比湿下降到 $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下, 相对湿度接近 100%。气块在日本海经过的距离长, 历时大于 36 h。

代表点 P2 对应的轨迹 5 中的气块来自内蒙古西部 (图 5b), 比湿 $2.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 7a), 相对湿度 58% (图 7b); 120~72 h (20 日 08 时至 22 日 08 时) 缓慢移动到内蒙古中部, 比湿和相对湿度呈下降趋势; 72~48 h (22 日 08 时至 23 日 08 时) 东移经过华北中北部, 期间比湿先下降到 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 后又有所上升, 相对湿度在 40% 上下波动; 48 h (23 日 08 时) 进入渤海湾, 比湿继续上升到 $1.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相对湿度上升到 49%; 此后跨越辽东半岛和朝鲜半岛, 24 h (22 日 08 时) 进入日本海, 先随西风 (图略) 东移后随南风 (图略) 转向北上, 比湿先上升到 $2.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 后小幅下降, 相对湿度也降至 36%; 12~0 h (24 日 20 时至 25 日 08 时) 进入暴雪区上空, 比湿达 $3.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相对湿度迅速接近饱和。可见气块在日本海经过的距离相对短, 历时小于 24 h。

代表点 P3 对应的轨迹 6 中的气块来自新疆东部与蒙古国交界处 (图 5b), 比湿 $1.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 7a), 相对湿度 55% (图 7b); 120~72 h (20 日 08 时至 22 日 08 时) 沿中蒙边界向东移动, 比湿和相对湿度先小幅下降后缓慢上升; 72 h (22 日 08 时) 进入内蒙古中北部, 东南向移经河北北部, 比湿 ($1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 变化不大, 相对湿度在 43%~59% 波动; 42~36 h (23 日 14—20 时) 进入渤海湾北部, 再到达辽东半岛, 比湿 ($1.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和相对湿度 (50%) 略有增加; 36~24 h (23 日 20 时至 24 日 08 时) 跨越朝鲜半岛北部进入日本海, 比湿增加到 $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相对湿度在

50% 左右; 24~12 h (24 日 08—20 时) 在日本海随偏南风北上, 移速减慢, 比湿和相对湿度均有小幅下降; 12~0 h (24 日 20 时至 25 日 08 时) 进入暴雪区上空 (停留时间小于 24 h), 比湿达 $2.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相对湿度 95% 以上。该气块在日本海经过的距离也相对短, 历时小于 24 h。

同 1500 m 的轨迹 1、2、3 类似, 虽然 3000 m 轨迹 4、5、6 对应的气块均来自东亚大陆, 初始比湿都不大, 相对湿度小, 但在东移到渤海湾时比湿和相对湿度都是增加的趋势, 而经过辽东半岛和朝鲜半岛时有小幅下降, 只有在经过日本海时, 海气交换使得比湿明显增加。其中轨迹 4 对应的气块在日本海经过的时间最长、超过 36 h, 比湿达 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上; 而轨迹 5、6 对应的气块在日本海停留的时间不足 24 h, 比湿相对较小。

综上所述, 来自东亚大陆的气块水汽含量并不大, 但东移时均经过渤海湾和日本海, 海气交换使得气块的比湿增加。因此钩状云区降雪的水汽主要来自对流层中低层的日本海, 渤海湾也有少量的水汽供应; 水汽随偏南风或东南风快速北上到降雪区。另外, 代表点 P1 上空 1500 m (轨迹 1)、3000 m (轨迹 4) 对应的气块在日本海经过的距离长、历时均超过 36 h, 因此水汽含量大; 代表点 P2 上空轨迹 2、轨迹 5 以及代表点 P3 上空轨迹 3、轨迹 6 在日本海经过的距离短、历时 $\leq 24 \text{ h}$, 水汽含量相对较小。而这三个点都处在气旋西侧的钩状云区中, 在动力条件相似的情况下, 水汽含量大的代表点 P1 降雪量大。

4 结论和讨论

4.1 结论

通过对高空、地面观测资料、卫星云图的分析 and 25 日 08 时 120 h 的后向轨迹模拟, 得到以下结论:

(1) 卫星云图表明这次暴雪发生在锢囚锋钩状云区内, 具有明显的中尺度特征。

(2) 对钩状云区内暴雪中心及周围代表点不同层次 120 h 气块轨迹分析表明, 在每个代表点的 6 条轨迹中, 只有 1 条轨迹来自新疆以西地区的对流层上层, 其他 5 条轨迹均来自蒙古国或我国北方地区的对流层中低层。几乎每条轨迹对应的气块在东移或南移时以水平运动为主, 伴有弱的下沉, 中低层气块在 48~72 h 经过渤海湾和日本海; 而中上层气

块则主要经过黄海或东海,到达降雪区前几小时气块均有明显的上升运动。

(3) 对钩状云区不同代表点 1500 和 3000 m 上空 120 h 后向轨迹中气块比湿分析表明:降雪区水汽主要来自日本海,其次是渤海湾,而来自东亚大陆的水汽对降雪区的贡献并不大。最强降雪中心的气块在日本海经过的距离和停留的时间最长,海气交换的时间长,水汽含量高并随偏南风或东南风快速移向暴雪区。

4.2 讨论

HYSPLIT 模式对初始条件和初始释放的位置等很敏感,本文仅选取了暴雪区中心及其附近的三个代表点进行讨论,有待于选取多个的参考点、用轨迹聚类以及更多类似的个例进一步验证。通过 120 h 后向轨迹的计算虽然得到这次暴雪过程的水汽源地来自渤海和日本海,但海气如何相互作用使得大气湿度增加值得进一步研究。另外,这次暴雪过程发生在长白山的北侧及小兴安岭的东侧,地形强迫对低层偏东、偏南气流抬升作用及降雪增幅的定量计算也需探讨。

参考文献

- 阿衣夏木·尼亚孜,孔期,杨贵名,2007. 2005 年 11 月哈密暴雪天气过程的诊断分析[J]. 气象,33(6):67-74.
- 蔡丽娜,隋迎欢,刘大庆,等,2009. 一次爆发性气旋引发的罕见暴风雪过程分析[J]. 北京大学学报(自然科学版),45(4):693-700.
- 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.
- 陈涛,崔彩霞,2012. “2010. 1. 6”新疆北部特大暴雪过程中的锋面结构及降水机制[J]. 气象,38(8):921-931.
- 丁一汇,2005. 高等天气学:第 2 版[M]. 北京:气象出版社.
- 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.
- 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.
- 梁军,张胜军,王树雄,等,2010. 大连地区一次区域暴雪的特征分析和数值模拟[J]. 高原气象,29(3):744-754.
- 刘宁微,齐琳琳,韩江文,2009. 北上低涡引发辽宁历史罕见暴雪天气过程的分析[J]. 大气科学,33(2):275-284.
- 马京津,于波,高晓清,等,2008. 大尺度环流变化对华北地区夏季水汽输送的影响[J]. 高原气象,27(3):517-523.
- 马梁臣,孙力,王宁,2017. 东北地区典型暴雨个例的水汽输送特征分析[J]. 高原气象,36(4):960-970.
- 秦华锋,金荣花,2008. “0703”东北暴雪成因的数值模拟研究[J]. 气象,34(4):30-38.

- 任丽,杨娃娃,唐熠,等,2015. 一次温带爆发性气旋引发的大暴雪过程诊断分析[J]. 气象与环境学报,31(5):45-52.
- 孙艳辉,李泽椿,寿绍文,2017. 东北地区两次历史罕见暴风雪天气过程的分析[J]. 高原气象,36(2):549-561.
- 田秀霞,李娟,何丽华,等,2016. 2011 年初冬华北南部回流暴雪诊断分析[J]. 暴雨灾害,34(3):243-251.
- 王东海,端义宏,刘英,等,2013. 一次秋季温带气旋的雨雪天气过程分析[J]. 气象学报,71(4):606-627.
- 王佳津,王春学,陈朝平,等,2015. 基于 HYSPLIT4 的一次四川盆地夏季暴雨水汽路径和源地分析[J]. 气象,41(11):1315-1327.
- 阎琦,温敏,陆井龙,等,2016. 两次引发辽宁暴雪过程低涡的动力发展机制[J]. 气象,42(4):406-414.
- 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.
- 翟亮,郭淳薇,马新成,等,2018. 北京 2016 年“11·20”初雪预报偏差分析[J]. 气象,44(1):151-158.
- 赵桂香,2007. 一次回流与倒槽共同作用产生的暴雪天气分析[J]. 气象,33(11):41-48.
- 周淑玲,王科,杨成芳,等,2016. 一次基于综合探测资料的山东半岛冷流暴雪特征分析[J]. 气象,42(10):1213-1222.
- 周雪松,谈哲敏,2008. 华北回流暴雪发展机理个例研究[J]. 气象,34(1):18-26.
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等,2007. 天气学原理和方法:第 4 版[M]. 北京:气象出版社.
- Brimelow C J, Reuter W G, 2005. Transport of atmospheric moisture during three extreme rainfall events over the Mackenzie River basin[J]. J Hydrometeorol, 6(4):423-440.
- Draxler R R, Hess G D, 1998. An overview of the HYSPLIT_4 modeling system of trajectories, dispersion, and deposition[J]. Aust Meteor Mag, 47(4):295-308.
- Drumond A, Nieto R, Gimeno L, 2011. 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, 116(D21):D00Q04.
- Gustafsson M, Rayner D, Chen DL, 2010. Extreme rainfall events in southern Sweden: Where does the moisture come from?[J]. Tellus A, 62(5):605-616.
- 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 Hazard Earth Syst Sci, 4(5/6):733-746.
- Perry L B, Konrad C E, Schmidlin T W, 2007. Antecedent upstream air trajectories associated with northwest flow snowfall in the southern Appalachians[J]. Wea Forecasting, 22(2):334-352.
- Sodemann H, Stohl A, 2009. Asymmetries in the moisture origin of Antarctic precipitation[J]. Geophys Res Lett, 36(22):L22803.
- Stohl A, Hittenberger M, Wotawa G, 1998. Validation of the Lagrangian particle dispersion model FLEXPART against large-scale tracer experiment data[J]. Atmos Environ, 32(24):4245-4264.