马洪燕,蒋松林,盛升旺,等. 一次东北冷涡的天气学分析及基于 HYSPLIT_4 模式的水汽通道特征[J]. 中低纬山地气象,2023,47(4):1 - 10.

# 一次东北冷涡的天气学分析及基于 HYSPLIT_4 模式的水汽通道特征

马洪燕[1],蒋松林[1],盛升旺[2],龙凌云[1]

(1. 贵州省岑巩县气象局,贵州　岑巩　557800;2. 贵州省丹寨县气象局,贵州　丹寨　557500)

**摘　要:**该文基于拉格朗日方法的水汽追踪模式(HYSPLIT_4)后向追踪 2016 年 7 月 23—29 日东北冷涡降水过程的水汽输送及来源情况,结合高低空环流形势及物理量场的分析,简述此次过程中东北冷涡的结构特征。结果表明:(1)东北冷涡发生发展过程中,雨带逐渐呈现东北—西南走向,并向东移动。(2)高低空的影响系统在垂直方向上呈后倾结构,高低空急流的配置、冷暖平流的交汇及低层水汽的辐合上升运动造成此次降水。(3)水汽主要来源于孟加拉湾和南海,中层少部分水汽来自西部里海。

**关键词:**东北冷涡;水汽输送;拉格朗日水汽追踪模式

**中图分类号:**P458.1+21　**文献标识码:**A

## Synoptic Analysis of a Northeast Cold Vortex and Characteristics of Water Vapor Channels Based on HYSPLIT_4

MA Hongyan[1], JIANG Songlin[1], SHENG Shengwang[2], LONG Lingyun[1]

(1. Cengong County Meteorological Bureau of Guizhou Province, Cengong 557800, China;
2. Danzhai County Meteorological Bureau of Guizhou Province, Danzhai 557500, China)

**Abstract:** Based on the HYSPLIT_4, this paper tracks the water vapor transport and the source of a Northeastern Cold Vortex precipitation from July 23 to 29, 2016, and analyze the structural characteristics of this process by combining the analysis of high and low circulation and physical field. The results showed that: (1) when the Northeastern Cold Vortex is developing, the rain belt shows northeast - southwest direction, and moves eastward. (2) Impact system of high and low layer is a backward structure in vertical direction. Three factors, jet of high and low layer, the convergence of cold and warm air, water vapor convergence over low layer, commonly cause the precipitation. (3) Water vapor are mainly from the Bay of Bengal and the South China Sea, meanwhile, a small part of the water vapor over middle - layer are from the western Caspian Sea.

**Key words:** Northeast Cold Vortex; water vapor transportation; HYSPLIT_4

## 0　引言

东北冷涡是影响我国东北地区重要的天气系统,常引发强降水、雷暴大风、冰雹等突发性强对流灾害性天气,对东北地区经济造成一定的影响。我国气象学者对东北冷涡进行天气学诊断和数值模拟并研究东北冷涡的气候效应[1]。由于东北冷涡系统深厚,移动缓慢且持续时间较长,常引发持续性降水天气,为了更全面地了解东北冷涡发生发展对东北地区降水的影响,本文主要应用拉格朗日追踪方法追踪 2016 年 7 月一次东北冷降水的水汽输送特征。

**收稿日期:**2022 - 11 - 23
**第一作者简介:**马洪燕(1994—),女,助工,主要从事气象服务和农业气象服务工作,E - mail:1570887515@ qq. com。

东北冷涡的定义:500 hPa 天气图上,35 ~ 60°N,115 ~ 145°E 范围内,有一条或一条以上闭合等高线,并且伴有冷空气和明显的冷槽配合,维持 3 d 或 3 d 以上的冷性涡旋[2]。张廷治等[3]对东北冷涡造成的东北地区暴雨进行了研究。孙力等[4]研究指出,夏季东北冷涡持续性的活动会造成东北地区低温冷害,对东北地区的降水也有重要影响。陈力强等[5]诊断分析了东北冷涡诱发的一次连续强风暴的形成条件,指出低层暖湿气流是冷涡引发强对流的预报关键。张立祥等[6]简述了东北冷涡的形势特征、气候特征和强对流特征。李春影等[7]指出,高层阻塞形势影响着冷涡的形成和消亡,副热带高压脊线南北向的活动对冷涡的活动也有影响,同时偏南的暖湿气流和冷涡中心西南方向的干切入是造成冷涡活动强降水的重要原因。林中冠[8]研究得出,夏季东北冷涡活跃时期,东北地区对流层维持着深厚的偶极型位势高度异常,低纬地区西北太平洋反气旋异常和中纬地区的东风异常,这种异常有利于东北地区局地水汽通量的辐合。王黎黎等[9]研究得出,东北冷涡引发暴雨的水汽主要源地为西太平洋副热带高压南部低纬热带地区和孟加拉湾地区,还有一小部分水汽来自日本海回流。与东北冷涡相似,国外研究学者主要研究切断低涡(COL),即位于对流层中上层 300 hPa 层面上的孤立涡旋,它是从西风急流中分离出来的[10]。NIETO 等[11]指出,当对流层中下层有充足的水汽时,COL 是引发极端降水的一个重要因素。HIROTA 等[12]研究了 2014 年 8 月 19 日广岛极端降水过程中水汽通道(AR)和 COL 的作用得出,伴随着冷中心的 COL 及其前部的上升运动诱发的不稳定能量,与 AR 自由对流层的水汽共同作用造成广岛强降水。

许多学者对降水的相关水汽通道特征进行了研究[13-16]。近年,越来越多的学者通过基于拉格朗日方法的水汽轨迹追踪模式(HYSPLIT),对水汽输送及其来源情况进行研究。如梁卓然等[17]模拟追踪南海区域低层 4—6 月逐日的气流,定义了 1948—2009 年南海夏季风的爆发日期。杨浩等[18]对淮北雨季和江淮梅雨平均水汽通道特征进行了对比,最后得出淮北雨季的水汽来自欧亚大陆、印度洋、孟湾—南海和太平洋,它们的水汽贡献差别不大;江淮梅雨的水汽主要来源于太平洋、印度洋和孟湾—南海,来自印度洋的水汽贡献最大。王佳津等[19]应用 HYSPLIT4 模式对四川盆地一次夏季暴雨的水汽输送特征和源地进行模拟追踪,指出此次暴雨过程的水汽主要来源于对流层低层 950 hPa 和 850 hPa,950 hPa 上有 5 条水汽输送路径,其中 2 条来自于北方,另外 3 条来自于南方。850 hPa 的水汽输送路径主要有 2 条,分别为北方路径和南方路径。

本文旨在应用基于拉格朗日方法的轨迹模式(HYSPLIT_4),后向追踪 2016 年 7 月 23—29 日东北地区降水的水汽输送轨迹及其来源情况,结合高低空环流形势及物理量场的分析,研究此次过程东北冷涡降水的结构特征。

## 1　资料方法

### 1.1　资料

本文所用的资料有:欧洲中心(ECWMF)ERA－Interim 水平分辨率为 1°×1°的逐 12 h 预报降水资料;NCEP FNL 逐 6 h 水平分辨率为 1°×1°的纬向风、径向风、温度、相对湿度和垂直速度等再分析资料;驱动基于拉格朗日方法的轨迹模式的 NOAA Reanalysis 水平分辨率为 2.5°×2.5°的再分析资料。

### 1.2　轨迹模式(HYSPLIT_4)简介

基于拉格朗日方法的气流追踪模式(HYSPLIT－Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model)是由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的空气资源实验室和澳大利亚气象局在过去 20 a 间联合研发的一种用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的专业模型。

假设空气中的粒子随风飘动,HYSPLIT_4 的模拟方法[20]是对气块移动轨迹的时间和空间上位置矢量进行积分。模式利用 NCEP 再分析资料,对每一次空气粒子所在位置的物理量进行差值计算,气块的最终位置通过初始位置($P$)和第一猜测位置($P_1$)的平均速率计算得到:

$$P_1(t+\triangle t) = P(t) + V(P,t)\triangle t \tag{1}$$

$$P(t+\triangle t) = P(t) + 0.5\times[V(P,t) + V(P_1,t+\triangle t)]\triangle t \tag{2}$$

式中,$V$ 为平均速率,$\triangle t$ 为时间步长,本文选择 $\triangle t$ 为 6 h。

### 1.3　轨迹模拟方案

本文 24 h 累积的最大降水量的时间为 7 月 25 日 00 时—7 月 26 日 00 时(世界标准时间 UTC,下同),故选取 7 月 26 日 00 时为轨迹追踪的初始时间,同时该时间对应的前 24 h 累积降水量最大区域(41.0 ~ 42.5°N,122.5 ~ 126.0°E)为轨迹模拟的初始位置。垂直方向上分别选取 500 m、1000 m、2000 m、5500 m 和 10 000 m 作为模拟的初始高度,每一初始高度选取 15 个点作为起始追踪点,后向追踪模拟 7 d,每隔 6 h 所有轨迹点重新后向追踪模拟,每隔 12 h 输出一次轨迹点的位置。

## 2　过程分析及环流形势

### 2.1　过程简介

本次东北冷涡活动维持的时间较长,从 7 月 23 日 12 时低涡形成持续到 29 日 18 时,由西北缓慢向东南移动,冷涡中心活动的主要范围为 50 ~ 60°N, 110 ~ 130°E。受东北冷涡的影响,东北地区及内蒙古东北部局地有降水发生,较强的降水时期,雨带主要呈东北—西南走向。23 日 12 时东北冷涡开始形成,对应 24 日 00 时(图 1a)前 24 h 累积日降水量主要位于黑龙江北部、吉林及辽宁东部,日降水量 ≥10 mm。24 日冷涡迅速发展,雨带向东移且逐步形成东北—西南走向,东北地区的雨量相对较小(图 1b,24 日 00 时—25 日 00 时)。25—26 日凌晨东北冷涡稳定维持并向东南方向移动,对应 26 日 00 时(图 1c)前 24 h 日降水量最大,降水区域主要在冷涡外围东南部地区(黑龙江东部,吉林省东部及辽宁省),平均日降水量为 40 mm 左右,降水大值中心位于辽宁中部,最大日降水量达到 65 mm 以上。26 日夜间—27 日白天冷涡稳定少动,冷涡中心基本维持在黑龙江西北部,雨带东移位于东北地区东部沿岸,降水量减少(图 1d)。28 日后冷涡快速消亡,降水明显减弱,东北大部分地区还有少量降水,平均日降水量为 12 mm 左右,30 日 00 时东北冷涡已完全消失。

在本次东北冷涡降水过程中,冷涡形成初期开始有少量降水。随着冷涡的发展降水强度增强,在冷涡快速发展期间,降水区域狭窄位于冷涡中心东侧和东南侧,雨带呈东北—西南走向。冷涡成熟时期,强度稳定维持并向东南方向移动,雨量相对较大,雨带东移。而冷涡消亡时期,降水显著减弱,但降水区域相对较大,东北大部分地区都有降水的发生。

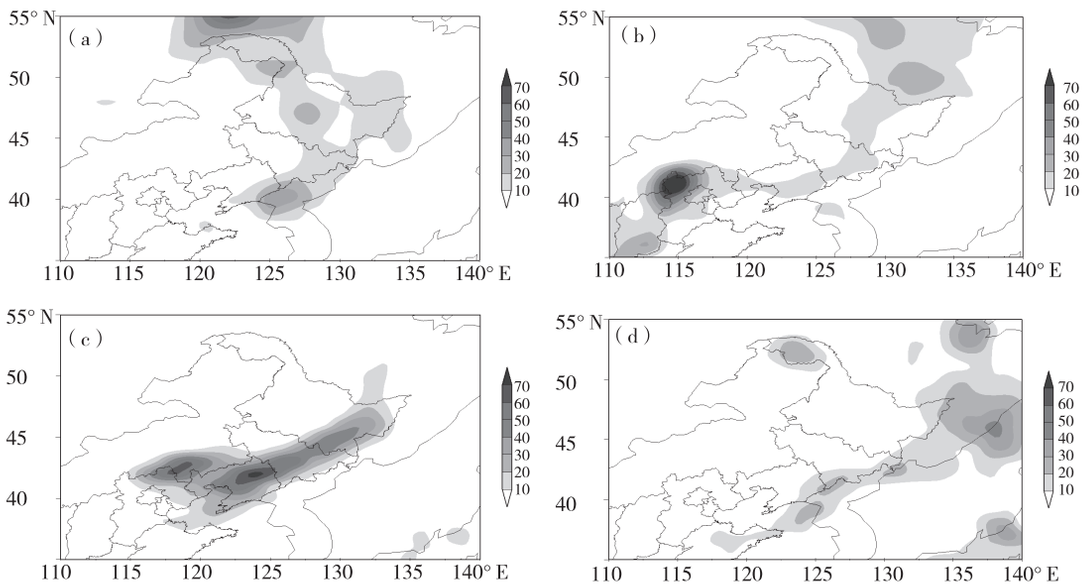


图 1　2016 年 7 月 24 日 00 时(a)、25 日 00 时(b)、26 日 00 时(c)、27 日 00 时(d)前 24 h 累积降水(阴影,单位:mm)

Fig. 1　Accumulated precipitation 24 hours before 00:00 on July 24(a), 00:00 on July 25(b), 00:00 on July 26(c) and 00:00 on July 27(d), 2016(shadow, unit: mm)

### 2.2　环流形势分析

23 日 06 时对应冷涡形成前期,东亚中高纬地区高空 200 hPa 上主要呈现两脊一槽的形势,蒙新高地高压脊,贝加尔湖上空有一低压槽,低压槽前有风速≥40 m · s$^{-1}$的高空西风急流,暖中心在内蒙古东北部与东北三省的交界处,其西南侧有高空急流,黑龙江、吉林、辽宁中东部有一呈东北—西南走向的高压脊,温度脊落后于高度脊。贝加尔湖槽向南加深,而东北东部的脊向北发展,23 日 12 时,低压槽被切断,在贝加尔湖东北侧形成闭合低压,与之相配的是温度为 -44 ℃的暖中心,低压外围南侧的高空急流带向东移动。24 日 18 时低压稍稍南压东移发展加强,低压中心南部等高线逐渐变得密集,暖中心也有所加强,其中心温度为 -40 ℃。但是暖中心稍稍超前于低压中心,其南侧的高空急流也向东移发展,急流中心最大风速达到 50 m · s$^{-1}$以上。25 日 00—06 时低压维持在黑龙江西北侧,暖中心与低压中心基本重合,低压中心强度继续维持,急流带位于黑龙江中部及辽宁北部,且急流带由位于低压中心南侧转为东南侧。25 日 12 时后,

低压中心等高线渐渐变得稀疏，但强度变化不大，急流最大风速减弱为 40 m·s$^{-1}$。26 日 00 时东北地区东北—西南向的显著流线最大风速为 30 m·s$^{-1}$，急流消失，且低压中心也开始减弱。27 日 12 时—28 日 00 时，低压又稍稍增强，与 －44 ℃的暖中心重合。随后，低压东移减弱，29 日 18 时低压闭合中心已消失（图略）。

对流层中层 500 hPa 上，23 日 06 时冷涡形成前期，贝加尔湖北侧有一呈东西走向的高压脊，贝加尔湖东侧有一大槽并且有一温度槽与之相配，副热带高压脊北伸到了东北北部地区，中空急流不是很显著。贝加尔湖东侧的冷槽向南加深发展，加上副热带高压北抬，其脊线向西北方向加深，冷槽被切断。23 日 12 时（图 2a）在贝加尔湖与我国东北地区的西北侧之间形成闭合的低压，与之对应的冷中心为 －16℃，即东北冷涡生成，冷涡中心位于（56°N，116°E），中心强度为 560 dagpm。随后，冷涡开始发展并向东南方向移动，冷涡中心的等高线渐渐趋于密集，其南侧有风速≥20 m·s$^{-1}$的西风急流，副热带高压 588 线已位于日本海南部 40°N 左右，脊线继续向北伸。24 日 00—18 时（图 2b），冷涡迅速增强，中心强度变为 556 dagpm，冷涡中心等高线也相对密集，伴随着冷涡的增强其中心南侧的西风急流也增强，最大风速达到 24 m·s$^{-1}$以上，副热带高压强度加强，4 日 12 时副热带高压中心强度达到 592 dagpm，并且在冷涡迅速发展期间稍稍向西推进。25 日 00 时，冷涡中心强度还是 556 dagpm，但其南侧中空急流相对减弱风速为 20 m·s$^{-1}$，副热带高压强度不变（图略）。25 日 06 时—27 日期间，东北冷涡中心强度都维持在 560 dagpm 左右，冷涡及副热带高压外围的影响，东北地区主要受西南风气流的影响，且在冷涡维持的过程中。25 日 06—18 时吉林省和辽宁省交界处生成一较短的偏西南风中空急流带（如图 2c），同时冷涡向东南方向移动，副热带高压逐渐南退。27 日 06 时—28 日凌晨东北冷涡中心强度变为 564 dagpm，温度中心也减弱到 －12℃，冷涡稳定少动，基本维持在 52.5°N，125°E 左右，等高线变得相对稀疏，副热带高压 588 线南退至 35°N 位置，东北地区主要受偏西风气流的影响（如图 2d）。28 日白天后冷涡迅速东南方向移动减弱，30 日 00 时冷涡已完全消失。

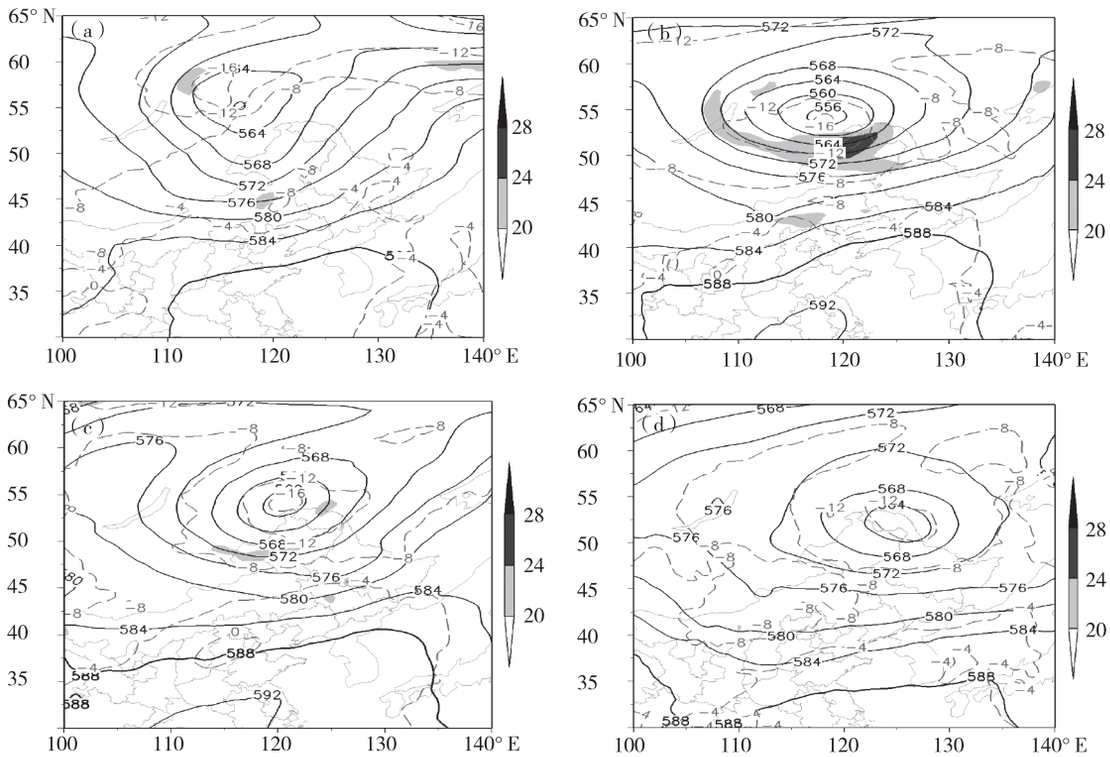


图 2　2016 年 7 月 23 日 12 时（a）、24 日 18 时（b）、25 日 12 时（c）、27 日 12 时（d）500 hPa 位势高度场（实线，单位：dagpm）、温度场（虚线，单位：℃）和≥20 m 的中空急流（阴影，单位：s$^{-1}$）

Fig. 2　At 12:00 on July 23（a），18:00 on July 24（b），12:00 on July 25（c），and 12:00 on July 27（d），2016，500 hPa potential height field（solid line，unit：dagpm），temperature field（dotted line，unit：℃）and hollow jet stream ≥ 20 m（shadow，unit：s$^{-1}$）

在冷涡降水过程中,冷涡生成前期,中空冷槽发展,其槽前对应的对流层低层 850 hPa 上,我国东北地区西北侧有涡旋生成,涡旋的四周风速都较大,风速≥12 m·s$^{-1}$。直到冷涡的生成(23 日 12 时),500 hPa 上西南气流引导 850 hPa 上低空涡旋发展,并向东北方向移动,该涡旋向南伸展一低压槽(图 3a)。冷涡发展期间,低空涡旋逐渐减弱,并向北移动,海上高压北抬,低槽也随之向东北方向移动,到 24 日 18 时(图 3b)冷涡发展强盛时期,底层涡旋移动到黑龙江西北部,低槽影响东北中东部地区。冷涡成熟稳定期间,低空涡旋相对较弱,等高线逐渐变得稀疏,在华北北部有新的涡旋生成。25 日 12 时(图3c)华北北部生成的涡旋移动到吉林和辽宁的交界处,其东南部的西南风低空急流风速达到 16 m·s$^{-1}$及以上,对应 25 日 00 时—26 日 00 时的降水大值区域。26 日 00 时(图 3d),东北西北部的涡旋向东南方向移动减弱,但影响范围扩大,东北东部沿海地区维持着狭长的西南风低空急流带,海上高压也向东南方向移动。26 日 12 时以后,东北地区大部分受涡旋控制,急流不明显。

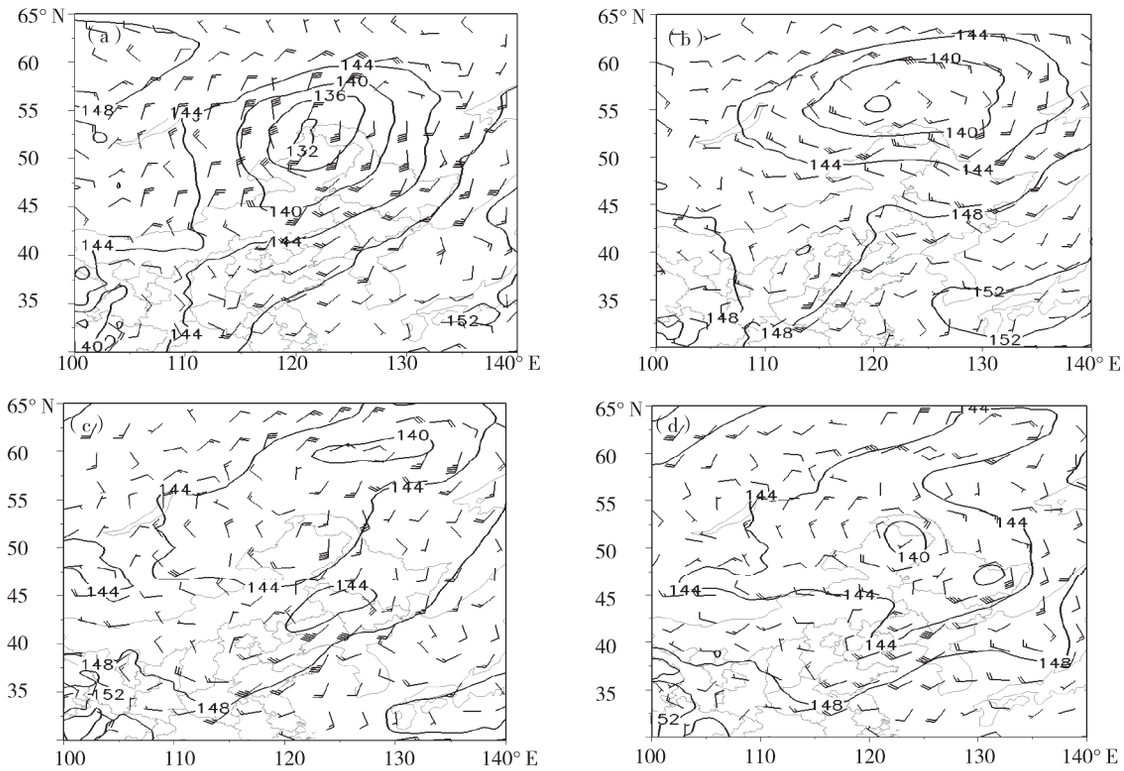


图 3　2016 年 7 月 23 日 12 时(a)、24 日 18 时(b)、25 日 12 时(c)、26 日 00 时(d)850 hPa 位势高度场(实线,单位:dagpm)和风场

Fig. 3　At 12:00 on July 23 (a), 18:00 on July 24(b), 12:00 on July 25(c), and 00:00 on July 26(d), 2016,850 hPa geopotential height field (solid line, unit: dagpm) and wind field

冷涡形成前期对应的 925 hPa 上,东北地区西北部有涡旋向东北方向移动,涡旋东侧西南风急流轴显著。在冷涡形成之后,低空涡旋有减弱的趋势,且东侧急流轴风速也有所减弱。冷涡成熟期,低空涡旋向东扩散,强度减弱,其东侧急流轴向东移动,而在华北地区北部有新的涡旋生成,向东北方向移动,在降水较大时期(25 日 00 时—26 日 00 时)华北一带的涡旋移动到东北东南部地区,伴有较强的低空西南风急流,与降水大值区域相对应。随后东北西北部的涡旋与东南部的涡旋合并,东移影响整个东北地区,且东北东部保持着显著的西南风流线(图略)。

综合上述,冷涡生成前,对流层上层西部贝加尔湖的槽加深发展,温度槽落后于高度槽,对应的中层槽也加强,同时副热带高压脊线向西北方向延伸,冷槽被切断形成冷涡,此时低空涡旋也得到加强,并受高空西南气流的影响向东北方向移动。在冷涡发展时期,中层及高层的急流也随之加强,而低空急流却有减弱的倾向,所以冷涡发展期间降水相对较弱,但高低空的急流都为西南风,雨带在冷涡发展期间逐渐形成东北—西南走向。在冷涡成熟稳定后,高空维持偏西风急流,低层东北东南侧

为西南风低空急流，且辽宁中部处于低空急流左侧，对应着降水大值中心。在冷涡的消亡阶段，中高层副热带高压南退，低层东北主要受涡旋控制，大部分地区有降水，但降水量减小。

### 2.3　物理量场分析

沿东北冷涡中心的涡度平流和温度平流的经向垂直剖面（图 4）分析本次冷涡发生发展的热力、动力条件。冷涡发展初期 23 日 12 时（图 4a），即刚生成的时刻，冷涡西侧为正涡度平流区域，中心在 400～300 hPa 之间，其东侧为负涡度平流，冷涡向东移动，同时，对流层中上层冷涡后部为冷平流，为冷涡的发展提供有利条件，冷涡的东侧为暖平流。24 日冷涡迅速加强，18 时（图 4b）达到最强，此时冷涡中心及东侧都为正涡度平流，其中心在 500～400 hPa 之间，对流层中低层的冷平流加强并东移扩散，冷涡在一定程度上稳定维持，对流层上层为弱的暖平流和正涡度平流控制，而低层为负涡度平流，随高度呈现西倾结构，有利于对流的发生。25 日 12 时（图 4c）正涡度平流减小，对流层中低层东西两侧都为负涡度平流，低层西侧由冷平流转为暖平流，冷涡仍向东移动，但强度有所减弱。27 日 12 时（图 4d），冷涡大部为正涡度平流区域，中低层都是弱的暖平流控制，低层 1000～900 hPa 上还有弱的冷平流，对流层上层为负涡度平流和冷平流，冷涡减弱。冷涡发展初期，对流层中高层槽前的正涡度平流和槽上冷平流对冷涡的发展加强起着重要作用；冷涡成熟期间对流层低层开始转为暖平流，中层的冷平流使冷涡强度继续维持；在冷涡消亡时期，高低空冷暖平流交汇，造成弱的降水。

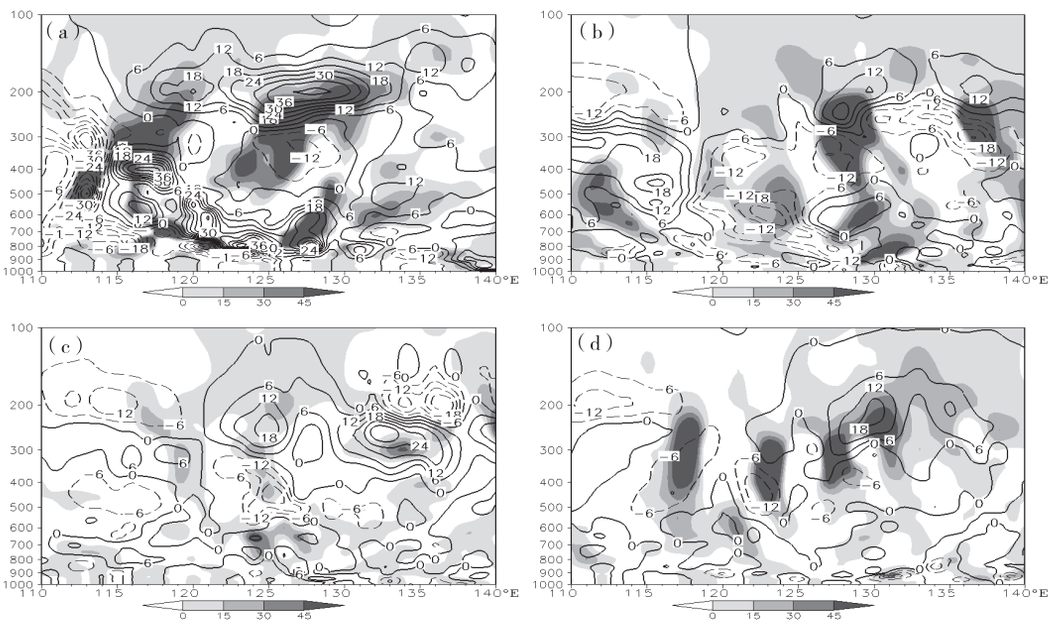


图 4　2016 年 7 月 23 日 12 时（a）、24 日 18 时（b）、25 日 12 时（c）、27 日 12 时（d）沿冷涡中心 56°N、54°N、54°N、52.5°N 的涡度平流（阴影，单位：$10^{-5}K \cdot s^{-1}$）和温度平流（实线，单位：$10^{-10} \cdot s^{-2}$）的经向垂直剖面

Fig. 4　At 12:00 on July 23 (a), 18:00 on July 24 (b), 12:00 on July 25 (c) and 12:00 on July 27 (d), 2016, meridional vertical cross－section of vorticity advection (shadow, unit: $10^{-5}K \cdot s^{-1}$) and temperature advection (solid line, unit: $10^{-10} \cdot s^{-2}$) along 56°N, 54°N, 54°N, 52.5°N

图 5 给出了本次低涡过程 4 个代表时次的低空急流、高空急流、200 hPa 与 850 hPa 散度差的特点。在 23 日 12 时（图 5a），低层有明显的低空急流，不断向东北地区输送水汽，使得整个东北地区处于充沛水汽中。高层，在东北地区西侧，有高空急流存在，急流中心值维持在 45 $m \cdot s^{-1}$ 以上，东北地区中心位于急流轴前方。在 24 日 18 时（图 5b），低层明显的低空急流消失，低空急流向东北移动，离开我国。高层，高空急流中心值加强到 50 $m \cdot s^{-1}$ 以上，并向东北移动到东北地区中西部，影响东北地区。在 25 日 12 时（图 5c），低层低空急流再次出现，位于东北地区东南部，不断向东北地区输送水汽。高层，高空急流继续东移，急流中心值减小，维持在 45 $m \cdot s^{-1}$ 以上，东北地区中心位于急流轴左后方。27 日 12 时（图 5d），高低空急流基本消失，过程强度减弱，降水减弱。

200 hPa 与 850 hPa 的散度差，反映过程的垂直运动情况。23 日 12 时（图 5a），东北大部处于散度

差的正值区域,即为较强的上升运动,有利于对流的发展。24 日 18 时(图 5b)黑龙江北部和东部及辽宁大部仍然处于散度差的正值区域,低层辐合高层辐散,处于良好的上升运动区域,且数值也有所上升,说明上升运动略有增强,有利于降水。25 日 12 时(图 5c)散度差正值区域向东移动,在东北地区东部处于上升运动区域,辽宁中部散度差值最大。27 日 12 时(图 5d),散度差正值区域明显减弱,上升运动减弱,降水减弱。

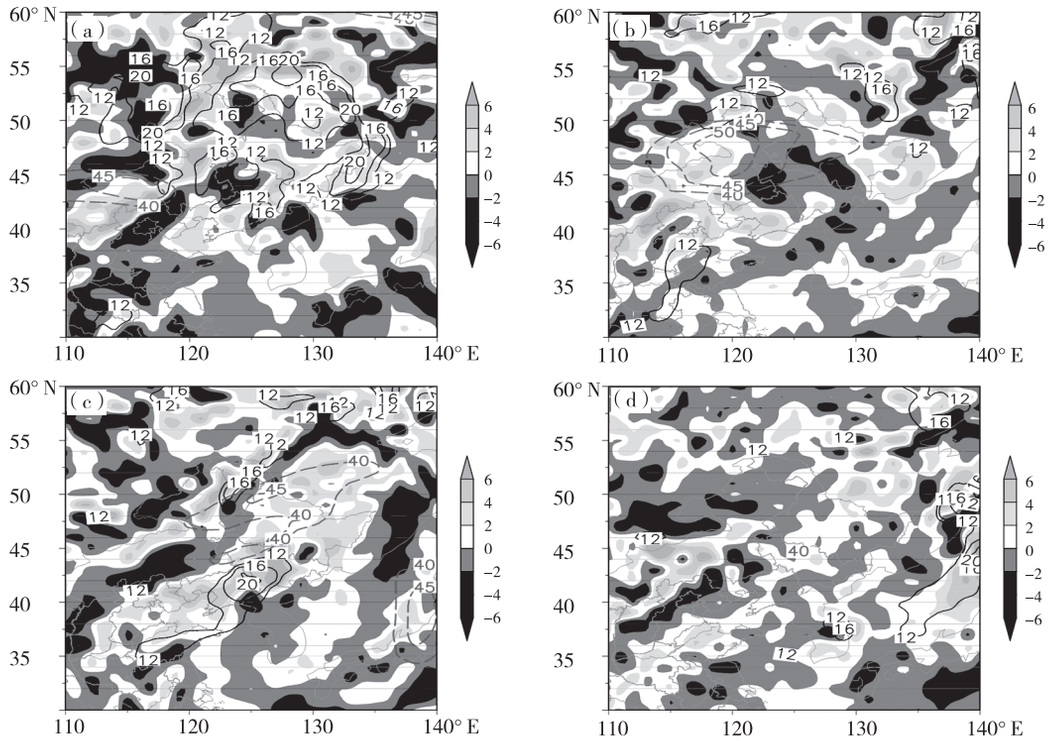


图 5　2016 年 7 月 23 日 12 时(a)、24 日 18 时(b)、25 日 12 时(c)、27 日 12 时(d)200 hPa 风速≥40 m·s$^{-1}$的高空急流(虚线)、850 hPa 风速≥12 m·s$^{-1}$的低空急流(实线)和 200 hPa 与 850 hPa 的散度差(阴影,单位:s$^{-1}$)

Fig. 5　At 12:00 on July 23(a), 18:00 on July 24(b), 12:00 on July 25(c), and 12:00 on July 27(d), 2016, high altitude jet with wind speed ≥ 40 m·s$^{-1}$ at 200 hPa (dotted line), low altitude jet with wind speed ≥ 12 m·s$^{-1}$ at 850 hPa (solid line), and divergence difference between 200 hPa and 850 hPa (shadow, unit: s$^{-1}$)

分析本次降水过程 850 hPa 上水汽通量(图 6),可以看到明显的水汽带演变特征。从孟加拉湾分支向东北方向输送水汽,在我国西南部与南海过来的水汽合并,共同继续向东北方向输送,途经渤海在东北地区交汇,还有少量水汽来自日本海的回流。23 日 12 时(图 6a),水汽带相对强盛,主要交汇于黑龙江东北部,整个东北地区水汽较充足。24 日 18 时(图 6b),由于低层涡旋的东移发展和华北一带切变的影响,水汽主要交汇于华北地区,东北东部沿岸有少量的渤海支流和日本海的回流,东北地区的水汽带向东推移,也是造成本次降水雨带东移的原因。25 日 12 时(图 6c),对应低空急流轴左侧,在吉林南部和辽宁中北部地区水汽交汇,并且形成水汽大值区,水汽输送带狭长,水汽主要来源于渤海。27 日 12 时(图 6d),水汽输送薄弱,东北地区水汽输送不明显。

根据以上水汽实况和相关环流形势及物理量的分析,25 日 00 时—26 日 00 时期间 24 h 累积日降水量相对较大,因此通过这期间降水大值区域中心沿 42°N 的相对湿度和垂直速度的经向垂直剖面图来分析此次过程降水的上升运动和湿度状况。选择东北地区 115 ~ 135°E 区域,图中黑色实线框为降水大值中心区域。25 日 00 时(图 7a),整个对流层的相对湿度都在 80% 以上,水汽充足,降水大值区域的垂直上升运动相对较强,有利于对流的发生。25 日 06 时(图 7b),低层的相对湿度维持在 70% 以上,中层出现小范围的干区,高层水汽状况相对较好,而降水大值区域东侧为弱的下沉运动,西侧上升运动较强,对流在一定程度上受到限制。25 日 12 时(图 7c),中层干区向西扩张,低层转为弱的

下沉运动,降水减少。25 日 18 时(图 7d),相对湿度为 90% 及以上,湿度相对较好,垂直运动较弱,降水减小。通过这 4 个时次的分析,本降水过程为一个减弱的过程,但对流层高层湿度高,基本维持在 90% 及以上,中层后期有干区入侵,不利于对流发展。垂直运动方面,西侧基本处于上升运动区域,东侧中低层由上升运动转为下沉运动,25 日 18 时后低层维持一个较弱的垂直运动,水汽也相对较好,有相对弱的对流运动,造成少量降水。

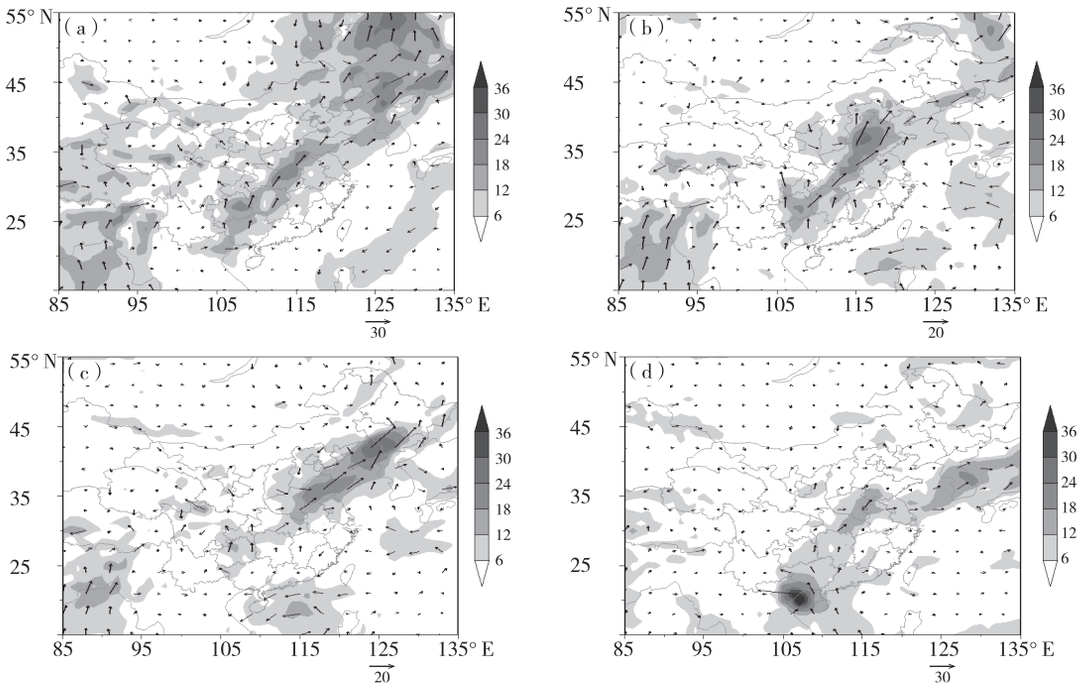


图 6　2016 年 7 月 23 日 12 时(a)、24 日 18 时(b)、25 日 12 时(c)、27 日 12 时(d)850 hPa 水汽通量
(矢量,单位:$g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$;阴影部分为水汽通量矢量和≥6 $g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$)
Fig. 6　850 hPa water vapor flux at 12:00 on July 23(a), 18:00 on July 24(b), 12:00 on July 25(c), and 12:00 on July 27(d), 2016 (vector, unit: $g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$; shaded portion is the sum of the water vapor flux vector≥6 $g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$)

## 3　基于拉格朗日方法的水汽轨迹追踪

垂直高度为 500 m(图 8a)的水汽追踪,水汽主要来源于我国东部海岸带东海、黄海及渤海地区偏北路线输送,源于 900 ~ 850 hPa 的水汽块 7 月 19 日 00 时向北输送并下沉,22 日 00 时与 1000 ~ 950 hPa 的水汽块汇合并后水平向北输送,25 日 00 时水汽块开始抬升。垂直高度为 1000 m(图 8b)的水汽源主要分为 2 条,第一条来自于南海海域,向东北方向移动,23 日左右与另一条来自于东海海域的水汽块共同向北输送,到达辽宁地区。垂直高度为 2000 m(图 8c)的追踪水汽来源也分为 2 条,一条来自于孟加拉湾,另一条来自于南海,都向西北方向移动,来源于孟加拉湾的水汽在移动过程中先抬升后下沉,来源于南海的水汽主要以水平运动为主。垂直高度为 5500 m(图 8d)的水汽主要来源于孟加拉湾,有一小部分来源于里海,孟加拉湾水汽向东北方向输送,里海水汽纬向输送,在内蒙中部地区汇合,继续向东输送到东北地区。垂直高度为 10 000 m(图 8e)的水汽主要来源于里海,沿纬向向东输送到东北地区。

综合上述,从 500 m、1000 m、2000 m 高度的水汽轨迹图上可看出本次降水过程低层的水汽主要来源于南海和孟加拉湾,与上文分析的水汽通量的水汽带相对吻合。结合环流形势场的分析,水汽主要受海上高压外围气流的影响,向东北方向输送,到达华北地区后,在低涡和海上高压的共同作用下继续向东北方向输送,在东北地区辐合上升,造成东北地区东部的降水。对流层中层水汽主要来源于孟加拉湾,少部分来自里海,孟加拉湾源地的水汽是由副热带高压外围气流带动到东北地区,里海源地的水汽主要是在西风气流的影响下向东输送到达东北地区。对流层高层的水汽来源于里海,受高层西风气流引导影响东北地区。

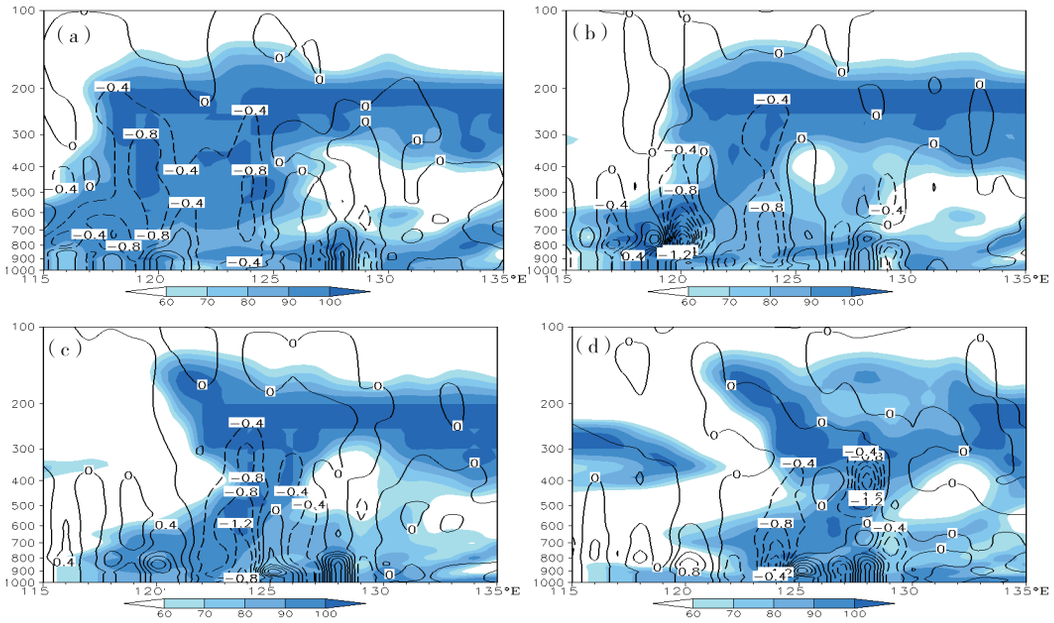


图 7　2016 年 7 月 25 日 00 时(a)、25 日 06 时(b)、25 日 12 时(c)、25 日 18 时(d)沿 42°N 的相对湿度(阴影,单位:%)和垂直速度(实线,单位:Pa · s$^{-1}$)的经向垂直剖面

Fig. 7　At 00:00 (a), 06:00 (b), 12:00 (c), and 18:00 (d) on July 25th, 2016, meridional vertical profile along 42°N relative humidity (shadow, unit:%) and vertical velocity (solid line, unit: Pa · s$^{-1}$)

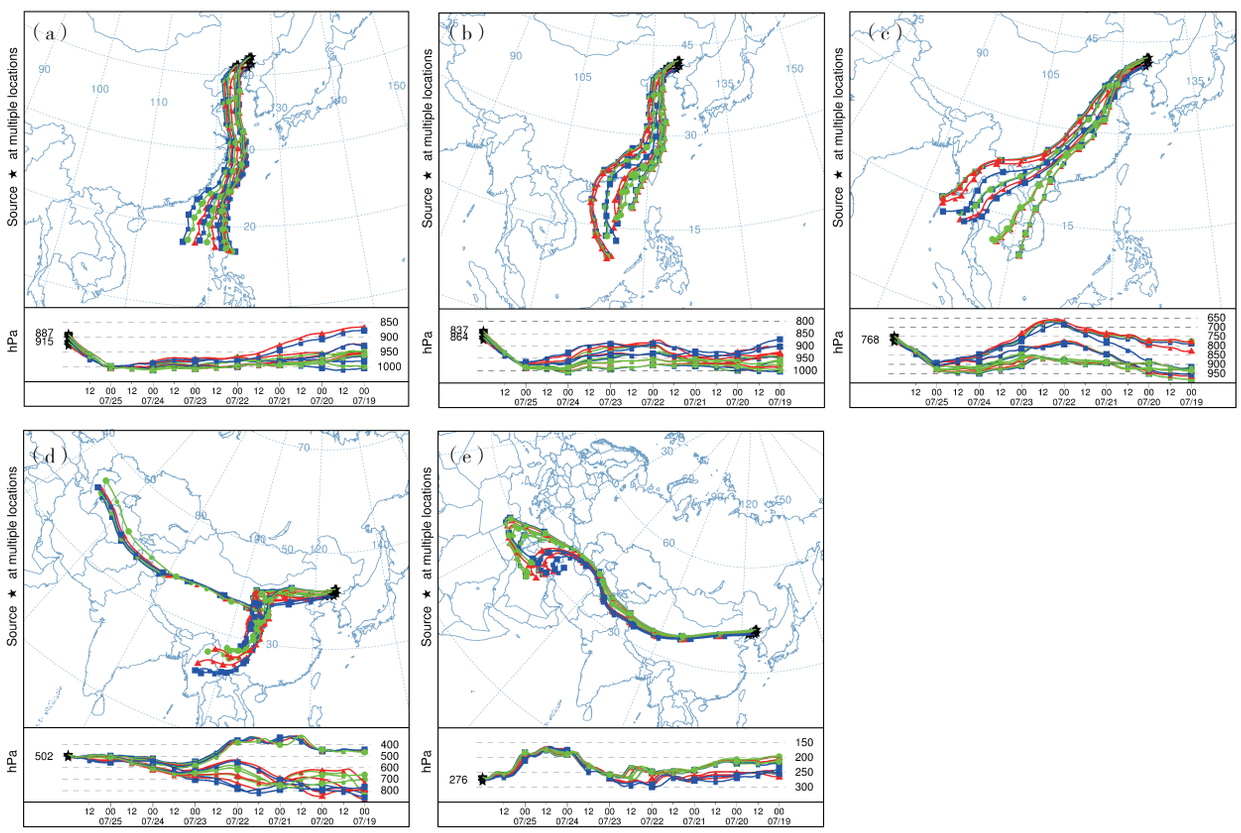


图 8　2016 年 7 月 26 日拉格朗日后向轨迹追踪模式,垂直方向高度为 500 m(a)、1000 m(b)、2000 m(c)、5500 m(d)、10 000 m(e)的水汽追踪轨迹图

Fig. 8　Lagrangian backward trajectory tracking mode, water vapor tracking trajectory diagram with vertical height of 500 m (a), 1000 m (b), 2000 m (c), 5500 m (d), 10 000 m (e) on July 26, 2016

## 4 结论与讨论

本文通过基于拉格朗日方法的水汽追踪模式(HYSPLIT_4)追踪 2016 年 7 月 23—29 日东北冷涡降水过程的水汽输送及其来源情况,并通过分析本次过程的环流形势和物理量场特征,对造成东北地区降水的影响因子进行总结,得出结论如下:

(1)本次东北冷涡降水过程中,随着冷涡的发展降水强度增强,雨带逐步呈现东北—西南走向并向东移动。冷涡成熟时期降水达到最大,而冷涡消亡期,降水显著减弱,但降水区域相对较大,东北大部分地区都有降水的发生。

(2)通过环流形势的分析,冷涡发生发展时期,东北地区影响系统在垂直方向上形成西倾的结构,有利于对流发展。成熟时期,西太平洋副热带高压的加强及北抬,冷涡稳定维持,高层西风急流与低层西南风急流的配置,对应着降水大值区。副热带高压南退减弱,冷涡快速东移消亡,低层受涡旋控制,东北大部分地区仍有降水。

(3)对流层中高层槽前的正涡度平流和槽上冷平流对冷涡的发展加强起着重要作用,同时东北地区东西两侧冷暖平流的交汇,对应低层急流区域湿气流的辐合上升运动,造成较强降水。而冷涡开始消亡时,低层暖湿空气与中层干冷空气作垂直运动,产生较弱的降水。

(4)通过水汽通量的分析和水汽追踪,得出本次东北冷涡降水低层水汽主要来源于南海和孟加拉湾,中层水汽主要来源于西北方向输送的孟加拉湾和少量来自于纬向输送的里海,而高层水汽受西风气流影响来源于里海一带。

本文主要通过 HYSPLIT_4 模式分析了 2016 年 7 月一次东北冷涡个例的降水通道特征及主要的影响系统,在后续工作中,将会深度研究多个个例,整合分析东北冷涡降水的水汽通道特征,并研究不同通道水汽的贡献率及不同水汽通道对东北冷涡降水强度的影响。

### 参考文献

[1] 朱占云,何金海. 东北冷涡的特征、影响及其可能机制的研究[J]. 气象与减灾研究,2010,33(4):1 - 7.

[2] 孙力,郑秀雅,王琪. 东北冷涡的时空分布特征及其与东亚大型环流系统之间的关系[J]. 应用气象学报,1994,5(3):297 - 303.

[3] 张廷治,李宁智. 东北冷涡暴雨的成因分析[J]. 辽宁气象,1996,2(2):9 - 11.

[4] 孙力,安刚,廉毅,等. 夏季东北冷涡持续活动及其大气环流异常特征的分析[J]. 气象学报,2000,58(6):704 - 714.

[5] 陈力强,张立祥,杨森. 东北冷涡诱发的一次连续风暴环境条件分析[J]. 气象与环境学报,2006,20(6):1 - 5.

[6] 张立祥,李泽椿. 东北冷涡研究概述[J]. 气候与环境研究,2009,14(2):218 - 228.

[7] 李春影,张春龙,刘亚玲,等. 一次持续缓动型东北冷涡及其强降水落区研究[J]. 黑龙江气象,2013,30(4):14 - 16.

[8] 林中冠. 东北冷涡对东北地区强降水的影响[J]. 经济研究导刊,2014(9):174 - 175.

[9] 王黎黎,魏婷婷. 近 50 年来东北冷涡暴雨过程动力条件诊断和水汽条件[J]. 吉林气象,2014,21(4):10 - 13.

[10] GIMENO L, TRIGO R M, RIBERA P, et al. Edi - torial: Special issue on cut - off low systems (COL) [J]. Meteorology and Atmospheric Physics,2007,96(1):1 - 2.

[11] NIETO R, GIMENO L, TORRE L D L. Climatological Features of Cutoff Low Systems in the Northern Hemisphere [J]. American Meteorological Society,2005,18(16):3085 - 3103.

[12] HIROTA N, TAKAYABU Y, KATO M, et al. Roles of an Atmospheric River and a Cutoff Low in the Extreme Precipitation Event in Hiroshima on 19 August 2014 [J]. American Meteorological Society,2016,144(3):1145 - 1160.

[13] 田红,郭品文,陆维松. 中国夏季降水的水汽通道特征及其影响因子分析[J]. 热带气象学报,2004,20(4):401 - 408.

[14] 曹士民,杨文艳. 辽宁一次区域暴雨水汽输送分析[J]. 安徽农业科学,2009,27(19):9047 - 9049.

[15] 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.

[16] 魏铁鑫,缪启龙,段春锋,等. 近 50a 东北冷涡暴雨水汽源地分布及其水汽贡献率分析[J]. 气象科学,2015,35(1):60 - 65.

[17] 梁卓然,江志红,刘征宇,等. 基于拉格朗日方法的气流轨迹模式在判定南海夏季风爆发时间中的应用分析[J]. 热带气象学报,2011,27(3):357 - 364.

[18] 杨浩,江志红,刘征宇,等. 基于拉格朗日法的水汽输送特征分析——江淮梅雨和淮北雨季的对比[J]. 大气科学,2014,38(5):965 - 973.

[19] 王佳津,王春学,陈朝平,等. 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,2015,41(11):1315 - 1327.

[20] DRAXLER R, STUNDE B, ROLPH G, et al. Hysolit_4 User's Guide. NOAA Technical Memorandum ERL ARL - 224[R]. 2009.

[21] 邓蓓,白慧,于飞,等. 影响贵州低频降水的主要气象因子特征[J]. 中低纬山地气象,2022,46(6):15 - 20.

[22] 马志敏,朱莉,连钰,等. 云南两次局地暴雨过程水汽输送特征分析[J]. 中低纬山地气象,2021,45(6):50 - 58.