胡鹏宇,徐爽,杨磊,等.2024.副高边缘辽宁短时强降水过程的水汽特征分析[J].暴雨灾害,43(5):532-541. HU Pengyu, XU Shuang, YANG Lei, et al. 2024. Analysis of water vapor during short-time heavy rainfall events at the edge of subtropical high in Liaoning Province [J]. Torrential Rain and Disasters,43(5):532-541 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-116

副高边缘辽宁短时强降水过程的水汽特征分析

胡鹏宇[1],徐爽[2,3],杨磊[1],王月[2],袁宁乐[2],严俊[1]

(1. 辽宁省气象灾害监测预警中心,沈阳 110166;2. 沈阳市气象局,沈阳 110168;3. 盘锦国家气候观测台,盘锦 124000)

摘　要: 西太平洋副热带高压(简称副高)边缘的短时强降水突发性强、降水集中、可预报性低,常常给预报带来挑战。筛选出2021—2022年5—10月发生在副高边缘的辽宁8次区域性短时强降水过程,基于副高及西风带影响系统将上述强降水过程分为副高边缘低槽和副高边缘涡旋两类。利用常规气象观测资料、ERA5再分析资料和GDAS气象数据,应用HYSPLIT4轨迹模式,重点分析上述两类短时强降水过程中的水汽输送特征,并分别挑选其中强降水覆盖范围大且出现短时强降水站数最多的一次过程作为典型短时强降水个例分析水汽通量变化和低空急流的作用。结果表明,受副高和低涡、高空槽的共同影响,辽宁上空水汽多来自于欧亚大陆中部、我国东部沿海、内蒙古和华北地区。尽管受相似的天气系统影响,不同天气过程的水汽输送通道仍表现出明显差异,对应为气团的源地、移动轨迹和气团获得水汽的途径不同。水汽通量大值区的演变与850 hPa风场的演变趋势一致。短时强降水过程中,在低空急流的动力抬升和水汽输送作用下,水汽辐合大值区、强上升气流区和水汽输送通道三者的位置均与低空急流所处的位置密切相关。辽宁副高边缘典型短时强降水过程中,来自欧亚大陆中部和内蒙古地区的气团在水汽供应方面占比约为32%。

关键词: 短时强降水;水汽输送;HYSPLIT;辽宁

中图法分类号: P458.1　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023-116

Analysis of water vapor during short-time heavy rainfall events at the edge of subtropical high in Liaoning Province

HU Pengyu[1], XU Shuang[2,3], YANG Lei[1], WANG Yue[2], YUAN Ningle[2], YAN Jun[1]

(1. *Liaoning Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning Centre, Shenyang* 110166; 2. *Shenyang Meteorological Administration, Shenyang* 110168; 3. *panjin national climate observatong panjin* 124000)

Abstract: The short-time severe rainfall at the edge of the western Pacific subtropical high (referred to as the Subtropical High) is characterized by strong bursts, concentrated precipitation, and low predictability, often posing challenges for forecasting. Eight regional short-time severe rainfall events at the edge of subtropical high in Liaoning from May to October during 2021 and 2022 were examined. The synoptic situations of these events are divided into two categories according to the synoptic systems that cooperate with the subtropical high, which are the low trough at the edge of the subtropical high and the vortex at the edge of the subtropical high. Based on the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ERA5 reanalysis data, NCAR/NCEP GDAS data, conventional observation data, and HYSPLT4 model, the variation characteristics of the water vapor transport of the short-time heavy rainfall events during these two categories are studied. The changes in water vapor flux and the role of low-level jets were analyzed by investigating typical rainfall cases with the largest coverage of heavy precipitation and the most number of short-term heavy precipitation stations. The results are as follows. Under the upper-level trough and the cold vortex at the edge of the subtropical high, the water vapor over Liaoning mainly comes from the Central Eurasian continent, the eastern coast of China, the Inner Mongolian area, and North China. Despite the influence of similar synoptic systems, the water vapor transport pathways are significantly different, corresponding to differences in air mass sources, movement trajectories, and the way air mass obtains water vapor. The evolution of the high-value area of water vapor flux is consistent with the variation of the wind field at 850

收稿日期: 2023-06-06;**定稿日期:** 2023-10-20

资助项目: 中国气象局复盘总结专项(FPZJ2023-031);辽宁省气象局科学技术项目(202204, 202417);辽宁省气象局关键技术项目(LNGJ201908);东北冷涡研究重点开放实验室开放基金面上项目(2022SYIAEKFMS03);中国气象局青年创新团队项目(CMA2024QN05);中国气象局发展专项(CXFZ2022J003, CXFZ2023J013, CXFZ2024J019)

第一作者: 胡鹏宇,主要从事短临预报预警研究。E-mail: hu471064185@163.com

通信作者: 徐爽,主要从事灾害性天气短期预报预警技术研究。E-mail: xu249630504@163.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

hPa. During short-time heavy rainfall events, under the situation of low-level jet uplift and water vapor transport, the positions of the high-value area of water vapor convergence, strong updraft area, and water vapor transport pathways are closely related to the position of the low-level jet. The air mass from the Central Eurasian continent and the Inner Mongolian area contribute to 32% of the water vapor supply during the short-time severe rainfall events at the edge of the subtropical high in Liaoning.

Key words: short-time severe rainfall; water vapor transport; HYSPLIT; Liaoning Province

引 言

短时强降水具有突发性和局地性强等特点，预报难度大，已引起气象工作者的广泛关注(廖胜石等，2022；陈云辉等，2023；刘嘉慧敏等，2023)。水汽是导致降水形成的重要条件之一(凌婷等，2020；王成鑫等，2022；徐爽等，2023)，水汽含量的演变是导致天气和气候变化的内在动力(杨璐瑛等，2018；秦鑫等，2020；蒋帅等，2021)。因此分析短时强降水过程中的水汽输送特征有利于研究水汽是在何种条件下通过远距离进行输送和集中的，从而加深对短时强降水过程中水汽输送和变化特征的认识。

近年来许多学者通过对不同地区的强降水过程展开分析，揭示出在不同的降水过程及降水的不同阶段水汽输送均扮演着重要的角色(梁萍等，2007；Perry et al.，2007；曲姝霖等，2021；陈亚玲等，2022)。江志红等(2011)在气流轨迹模式中利用拉格朗日方法，对2007年淮河流域一次强降水过程中三个不同阶段的水汽输送通道及源地展开研究，表明影响此次过程的水汽通道共三支，分别来自西太平洋、南海和索马里至孟加拉湾地区。叶成志等(2009)采用同样的方法对比两次台风系统影响期间水汽场的分布，结果表明两次降水过程中主要的水汽输送通道均为两条，但水汽的来源和输送路径却有明显的差异，从而导致台风暴雨的范围、强度和持续时间差异显著。王佳津等(2015)在对四川地区一次强降水过程的分析中发现，水汽主要来自于950 hPa和850 hPa，然而两者的水汽路径和来源存在显著差异，其中950 hPa的水汽源地为贝加尔湖、巴尔喀什湖、中南半岛-南海和阿拉伯海-孟加拉湾地区，850 hPa的水汽源地为阿拉伯海、贝加尔湖-巴尔喀什湖、孟加拉湾和其他地区。陈红专等(2019)定量计算了2017年湖南地区一次强降水过程不同阶段水汽输送路径的贡献，结果显示西南季风和南海夏季风输送是暴雨区降水的主要来源。针对东北地区水汽来源的研究工作多是针对暴雨过程展开。孙力等(2016)通过分析500 hPa高空槽、850 hPa低涡切变和东北冷涡三类天气系统影响下东北地区暴雨过程的水汽输送特征，揭示出东北地区暴雨过程的水汽输送通道有三支，分别为西太平洋副热带高压(以下简称副高)边缘的水汽输送，来自南海北部的水汽输送，以及西风带西北气流的水汽输送。魏铁鑫等(2015)针对东北地区冷涡暴雨的水汽源地和水汽贡献率展开分析，结果表明水汽贡献最大的区域是西太平洋海域，其次是孟加拉湾-南海海域，欧亚大陆和东北地区的水汽贡献率相对较小。马梁臣等(2017)挑选东北地区四次典型暴雨个例，分析发现暴雨过程中的水汽输送通道分别来源于西太平洋或南海的海上水汽输送和西北气流的水汽输送。综上，不同天气系统影响下强降水天气过程的水汽输送特征各有差异，且由于降水过程中天气系统的强弱和位置等因素的影响，降水的不同阶段水汽输送特征也存在差异。

短时强降水是辽宁汛期主要的灾害性天气之一(贾旭轩等，2023)。比如，2010年7月30日—8月1日辽宁多地出现短时强降水，抚顺出现严重洪灾，紧急转移2.5万受灾人口；2013年8月15—17日辽宁出现区域性暴雨到大暴雨，抚顺、锦州等地出现短时强降水，当地通讯中断、路桥损毁。以往关于辽宁短时强降水的研究多集中在时空分布特征及针对个例的诊断分析(陈传雷等，2013)，对短时强降水过程的水汽来源及输送特征的分析较少，而短时强降水过程中水汽的来源及输送特征是重要的科学问题之一(冯志刚，2012；王慧清等，2019；熊秋芬等，2022)。此外，研究发现低空急流在强降水过程中扮演着重要的角色。低空急流与强降水过程在时间和空间上表现出良好的一致性，其在强降水发生和增强阶段均起到重要的作用(苏洋等，2023)，而且低空急流还能够为强降水过程带来充足的水汽供应(许彬等，2019)。2021—2022年5—10月辽宁短时强降水过程频发，在此期间副高系统为短时强降水过程的发生提供了有利的条件，为追踪副高边缘的短时强降水过程中的水汽来源，本文应用HYSPLIT4轨迹模式，根据与副高共同配合的西风带天气影响系统，将强降水过程分为副高边缘低槽和副高边缘涡旋两类，统计分析2021—2022年5—10月两类天气形势影响下，辽宁8次区域性短时强降水过程中水汽输送特征的异同，研究在不同大气环流背景下水汽输送路径的差异、不同水汽来源对短时强降水过程的贡献及低空急流在短时强降水过程中的作用，以期加深对辽宁短时强降水天气过程中水汽输送特征的认识，为该地区的短时强降水天气过程的预报和预警提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文所用资料时段均为2021年7月—2022年8

月，主要包括：(1) 欧洲中期天气预报中心的ERA5再分析资料，时空分辨率分别为1 h和0.25°×0.25°，包括37层位势高度、温度、水平风场、比湿、相对湿度等气象要素，用来分析环流背景场和水汽通量分布。(2) 辽宁1 687个国家和区域气象观测站的逐时降水观测资料，用来分析辽宁降水分布；(3) 美国国家大气研究中心(NCAR)和美国气象环境预报中心(NCEP)全球资料同化系统(GDAS)的再分析资料，该资料经美国国家海洋和大气管理局(NOAA)转换成ARL格式，可直接应用于HYSPLIT4轨迹模式，空间分辨率为1°×1°。

1.2 研究方法

将1 h降水量≥20 mm的降水事件定义为短时强降水事件，统计分析副高系统配合低涡和高空槽两类天气形势下，辽宁8次区域性短时强降水(62个国家站中超过30站出现短时强降水)过程中水汽来源的异同和传输特征，将其中强降水区域范围大且出现短时强降水站数最多的一次过程作为典型个例进行分析。

水汽通量是指流经某一单位截面积的单位时间内的水汽质量(王娜等，2021)，分为水平输送通量和垂直输送通量，本文仅针对水汽的水平输送通量进行讨论。

后向轨迹分析采用NOAA空气资源实验室开发的HYSPLIT4模式，在平流和扩散等计算中延用拉格朗日方法。该模式能够对粒子轨迹进行聚类，并按轨迹最接近原则进行分组(Draxler et al.，1998；毛紫怡等，2011；葛家荣等，2019)。选取辽宁61个国家气象观测站点所在位置，从降水开始时间进行72 h轨迹后向追踪模拟，气团初始高度为1 km，聚类后得到不同天气系统影响下水汽输送路径。文中不同路径的水汽贡献率(江志红等，2011；陈红专等，2019)计算公式如下

$$Q_s = \frac{\sum_1^m q_{last}}{\sum_1^n q_{last}} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中，Q_s表示该路径的水汽贡献率，q_{last}表示粒子最终所在位置的比湿，m为当前路径所包含的轨迹数，n为模拟的总轨迹数。

1.3 天气过程分类

影响辽宁出现强降水过程的天气系统主要包括南方气旋、东北冷涡、低空急流和切变线等(杨磊等，2016)。副高是影响中国夏季天气和气候的重要系统，西风槽、低涡等天气系统与副高配合常常会引发强降水天气(栗晗等，2023)。本文筛选出2021—2022年5—10月受副高影响辽宁的8次区域性短时强降水天气过程(表1)，结合短时强降水天气过程的影响系统，将8次过程分为副高边缘低槽类(副高位于山东地区以北，同时受高空低槽影响)和副高边缘涡旋类(副高位于山东地区以北，同时受涡旋影响)两类。表2为8

表1 2021年7月—2022年8月辽宁8次区域性短时强降水天气过程概况

Table 1 The synopsis of eight short-time severe rainfall events in Liaoning Province from July 2021 to August 2022

类型	过程编号	发生日期/(年-月-日-时)	降水概况		
			降水区域	短时强降水出现站数/个	最大小时降水量/mm
副高边缘低槽类	1	2022-07-28-00—2022-07-30-07	中西部和东南部地区出现暴雨到大暴雨	518	63.6
	2	2022-08-14-08—2022-08-15-11	东南部出现暴雨到大暴雨	459	106.1
	3	2022-08-18-08—2022-08-19-10	大连、葫芦岛出现暴雨到大暴雨	165	52.1
副高边缘涡旋类	4	2021-07-12-08—2021-07-15-08	西部和东南部出现暴雨到大暴雨	381	89.0
	5	2021-08-23-08—2021-08-26-00	大部出现中雨到大雨，局部暴雨	245	102.7
	6	2021-10-02-20—2021-10-03-08	东南部出现暴雨，局部大暴雨	555	79.0
	7	2021-10-09-05—2021-10-10-08	中东部出现大雨到暴雨	29	48.6
	8	2022-08-07-00—2022-08-08-08	东南部出现暴雨到大暴雨	355	85.6

次区域性短时强降水天气过程水汽输送来源及水汽贡献率，可见受副高系统配合高空槽和低涡影响，辽宁区域性短时强降水过程中水汽主要来自欧亚大陆中部、我国东部沿海(渤海、黄海和东海)、内蒙古地区和华北地区，来自其他地区的水汽输送相对较少。副高边缘低槽和涡旋系统影响下的辽宁区域性短时强降水过程中，除关注副高边缘的输送水汽外，还应关注来自欧亚大陆中部和内蒙古地区气团的贡献。

表2　2021年7月—2022年8月辽宁8次区域性短时强降水水汽源地及水汽贡献率

Table 2 The water vapor source and water vapor contribution rate of eight short-time severe rainfall in Liaoning selected from July 2021 to August 2022

类型	过程编号	水汽源地	水汽贡献率/%
副高边缘低槽类	1	黄海	79.49
		东海北部	20.51
	2	欧亚大陆中部	68.85
		黄海	18.03
		华北	8.2
		内蒙古	4.92
	3	内蒙古	70.49
		黑龙江	29.51
副高边缘涡旋类	4	长江流域	78.69
		内蒙古	21.31
	5	华北	70.49
		欧亚大陆中部	19.67
		内蒙古	9.84
	6	欧亚大陆中部	76.93
		长江流域	23.06
	7	欧亚大陆中部	31.15
		日本海附近	31.15
		吉林	31.15
		渤海	6.5
	8	长江流域	50.82
		欧亚大陆中部	49.18

2　副高边缘低槽类短时强降水个例分析

2.1　降水概况和天气形势

受高空槽和副高共同影响，2022年7月28日00时—30日07时(北京时，下同)辽宁中西部和东南部出现暴雨到大暴雨，全省平均降水量54.1 mm，短时强降水时段出现在7月28日09时—29日08时，共518个国家和区域气象观测站出现短时强降水(图1)。

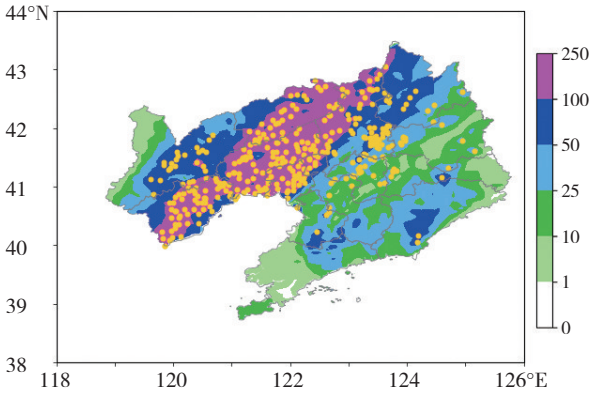


图1 2022年7月28日00时—30日07时辽宁降水量(填色，单位：mm)和站点短时强降水(黄色实心点)分布图

Fig. 1 The distribution of accumulated precipitation (color-filled, unit: mm) and short-time heavy rainfall of weather stations (yellow solid dots) from 00:00 BT on 28 July to 07:00 BT on 30 July 2022

2022年7月27日20时，500 hPa蒙古国至河套地区存在高空槽，588 dagpm等高线位于中国和朝鲜交界附近。850 hPa切变线位于河套地区上空(图2a)。此后，副高稳定维持，低槽在东移过程中强度增强、移速缓慢。副高与高空槽之间偏南急流建立，配合低空西南急流不断增强，水汽条件充沛。辽宁中西部地区冷暖空气交汇，斜压锋生作用强(图2b)，辽宁大部地区整层可降水量超过45 mm，有利于出现短时强降水等强对流天气。

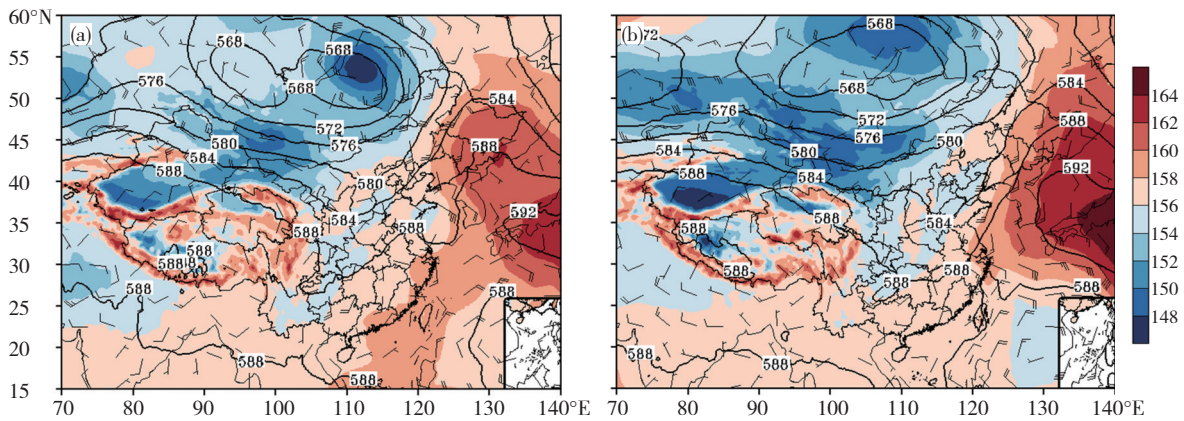


图2 2022年7月27日20时(a)、28日20时(b) 500 hPa高度场(等值线，单位：dagpm)及850 hPa风场(风羽，单位：m·s^{-1})和高度场(填色，单位：dagpm)

Fig. 2 The geopotential height field at 500 hPa (contour, unit: dagpm), the wind field (arrow, unit: m·s^{-1}) and the geopotential height field (color-filled, unit: dagpm) at 850 hPa at (a) 20:00 BT on 27 July and (b) 20:00 BT on 28 July 2022

2.2 水汽通量变化和水汽输送特征

图3为2022年7月28日02时和14时地面(1 000 hPa)至对流层中层(500 hPa)水汽通量分布。27日20时低槽系统前侧偏南气流区和588 dagpm等高线外围各自存在水汽通量大值区。此时两系统距离较远，水汽通道尚未打通。随着低槽系统不断东移，28日02时两系统不断靠近，水汽通道逐渐接合，水汽输送强度逐渐增强(图3a)。14时，辽宁上空为水汽通量大值区，且该地区850 hPa水汽通量散度低于−12 g·cm^{-2}·s^{-1}·hPa^{-1}(图3b)，水汽辐合较强，充足的水汽供应配合水汽辐合为区域性短时强降水的发生提供充足水汽。

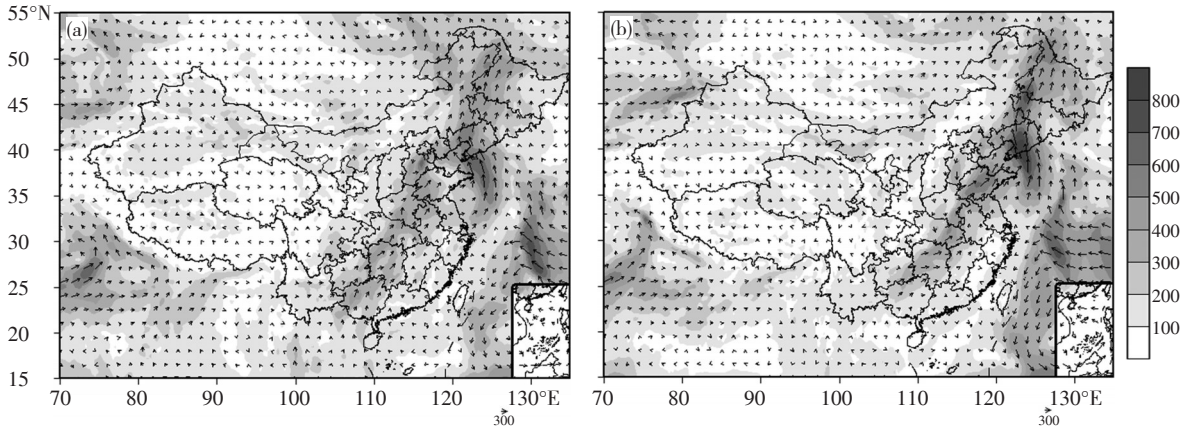


图3 2022年7月28日02时(a)、14时(b)1 000—500 hPa层水汽通量(阴影，单位：kg·m^{-1}·s^{-1})空间分布

Fig. 3 The spatial distribution of vertical integrated water vapor flux (shaded, unit: kg·m^{-1}·s^{-1}) on 1 000—500 hPa at (a) 02:00 BT and (b) 14:00 BT on 28 July 2022 (The vector arrows represent the directions of water vapor flux)

图4a为经HYSPLIT4模式模拟后得到的不同高度上共61条水汽输送轨迹，聚类后水汽来源共有5条路径(路径A—E) (图4b)。分析发现，短时强降水过程中水汽可来源于不同高度(图4c)，路径A和B自黄海中东部向西北方向输送至辽宁南部和西部，水汽贡献率为29.53%；其中路径A在传输途中自800 hPa逐渐降低至900 hPa，路径B自850 hPa降低至950 hPa后又向上抬升至850 hPa。路径D自黄海北部向北输送至辽宁东北部，这一部分的水汽来源贡献率仅为6.69%，这是因为路径D自黄海北部海面向北输送过程中，受到地形抬升作用，气团高度不断爬升至850 hPa，致使水汽在输送过程中存在一定程度的损耗。路径E自黄海东部上空沿北偏西方向输送至辽宁东部，水汽贡献率为43.27%；路径E途径海洋上空时水汽含量逐渐增

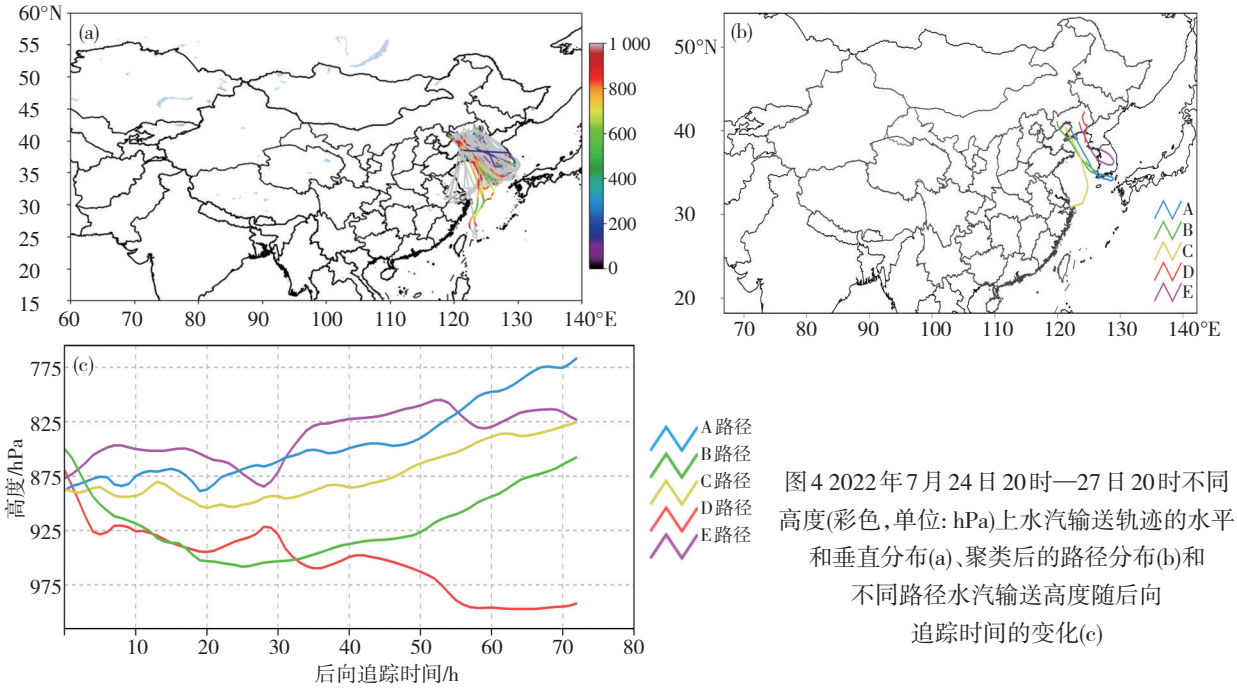


图4 2022年7月24日20时—27日20时不同高度(彩色，单位：hPa)上水汽输送轨迹的水平和垂直分布(a)、聚类后的路径分布(b)和不同路径水汽输送高度随后向追踪时间的变化(c)

Fig. 4 (a) The horizontal and vertical distribution of water vapor transport trajectories at different heights (color, unit: hPa), (b) pathways distribution with clustering, and (c) water vapor transport height changes with the tracking time from 20:00 BT on 24 July to 20:00 BT on 27 July 2022

多，因此水汽贡献率最高。以上4条路径均为副高西侧偏南气流的水汽输送。路径C自东海北部向北偏西方向输送至辽宁中南部，相对而言为远距离输送，水汽贡献率偏低，为20.51%，在其不断向北输送的过程中高度略有降低，该输送路径为低槽前侧偏南气流汇入副高系统西侧进入强降水区。

2.3 低空急流与上升气流区和水汽辐合区的空间一致性

低空急流不仅能为强降水区输送水汽，同时低空急流轴上风速的脉动有利于降水过程的形成和增强。为进一步分析低空急流在此类过程中对水汽的输送作用，以及低空急流与上升气流区的空间一致性，图5为2022年7月28日14时850 hPa低空风场、925 hPa垂直速度场和水汽通量散度的空间分布，可见随着850 hPa风场的不断增强，辽宁中部和东南部地区开始出现低空急流，低空急流出口区的前侧和急流核的位置与强上升运动区和强水汽辐合区位置对应。

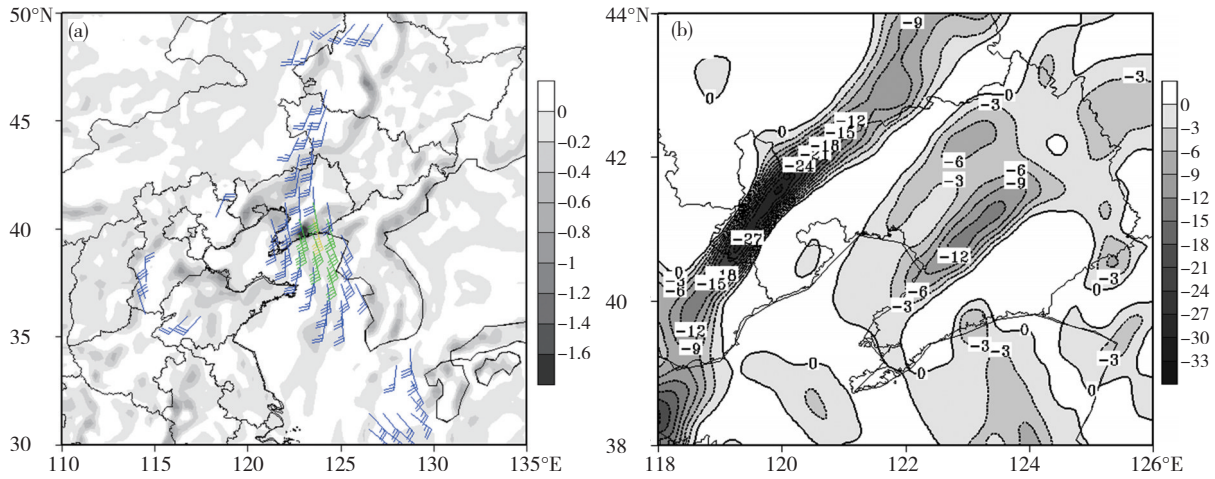


图5 2022年7月28日14时925 hPa垂直速度(阴影，单位：Pa·s^{-1})和850 hPa风场(风羽，单位：m·s^{-1}) (a)及850 hPa水汽通量散度(阴影，单位：g·cm^{-2}·s^{-1}·hPa^{-1}) (b)分布 (图a中蓝色、绿色和黄色风羽分别代表10 m·s^{-1}≤风速＜14 m·s^{-1}、14 m·s^{-1}≤风速＜18 m·s^{-1}和18 m·s^{-1}≤风速＜22 m·s^{-1})

Fig. 5 The distribution of (a) vertical velocity (shaded, unit: Pa·s^{-1}) at 925 hPa, the wind field at 850 hPa (arrow, unit: m·s^{-1}) and (b) water vapor flux divergence at 850 hPa (shaded, unit: g·cm^{-2}·s^{-1}·hPa^{-1}) at 14:00 BT on 28 July 2022 (The blue, green, and yellow arrows represent the 10 m·s^{-1}≤wind speed＜14 m·s^{-1}, 14 m·s^{-1}≤wind speed＜18 m·s^{-1}and 18 m·s^{-1}≤wind speed＜22 m·s^{-1}, respectively in Fig. 5a)

3 副高边缘低涡类短时强降水个例分析

3.1 降水概况和天气形势

受东北冷涡和副高系统共同影响，2021年10月2日20时—4日08时辽宁出现历史同期罕见的暴雨和风雹天气过程，东南部出现暴雨、局部大暴雨。全省平均降水量43.5 mm，短时强降水时段出现在3日08时—4日03时，共555个国家和区域气象观测站出现短时强降水(图6)。

2021年10月2日20时，500 hPa贝加尔湖至内蒙古东北部之间存在一冷性低涡，中心高度548 dagpm；588 dagpm等高线位于长江流域附近；850 hPa低涡中心位置较500 hPa略偏东，冷式切变线位于内蒙古中部地区上空，切变线前侧西南低空急流强度较强，风速达16 m·s^{-1} (图7a)。此后冷涡向东偏南方向移动，588 dagpm等高线北移至山东省上空，且强度增强。副高与冷涡低槽间偏南气流强劲，源源不断向辽宁提供暖湿气流。同时，850 hPa切变线和低空急流也显著增强，水汽条件充沛(图7b)。

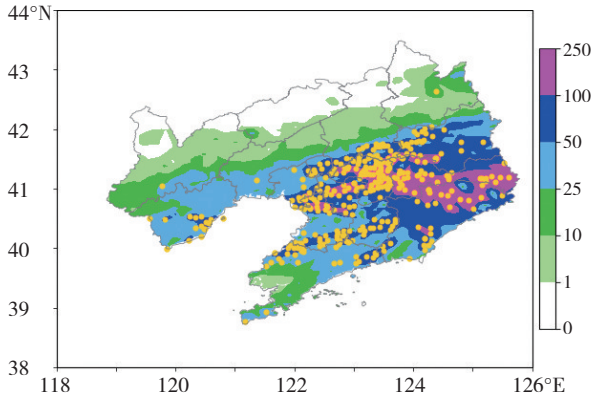


图6 同图1，但为2021年10月2日20时—4日08时

Fig. 6 Same as Fig. 1, but for the time from 20:00 BT on 2 October to 08:00 BT on 4 October 2021

3.2 水汽通量变化和水汽输送特征

2021年10月2日20时，850 hPa低涡切变线前侧西南气流与副高系统外围西南气流汇合，水汽自南海上空向北输送，大值区位于中国中东部，内蒙古北部也存在一水汽通量较强区域，自内蒙古向东偏北方向延伸至东北地区(图8a)。此后，低涡系统东移南压配

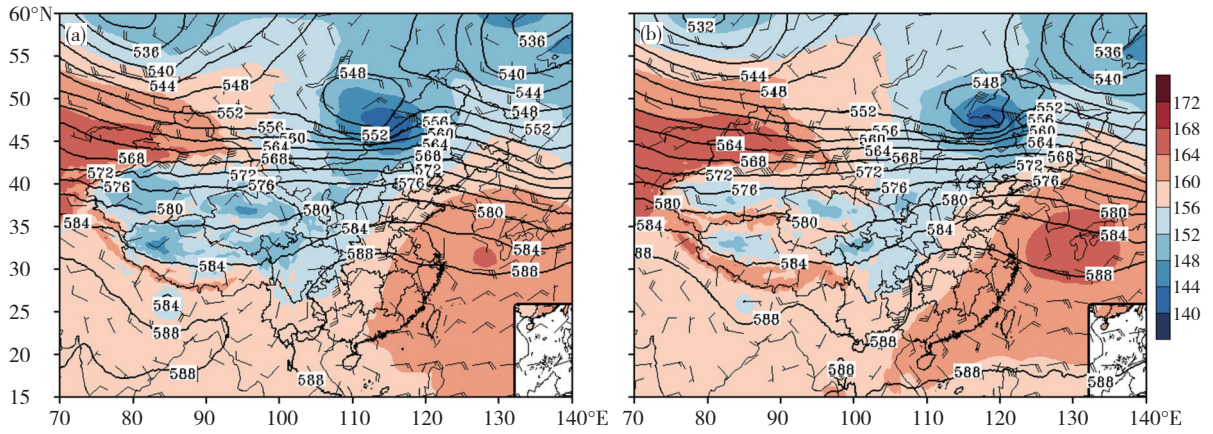


图7 同图2,但为2021年10月2日20时(a)、3日08时(b)

Fig. 7 Same as Fig. 2, but for the time at (a) 20:00 BT on 2 October and (b) 08:00 BT on 3 October 2021

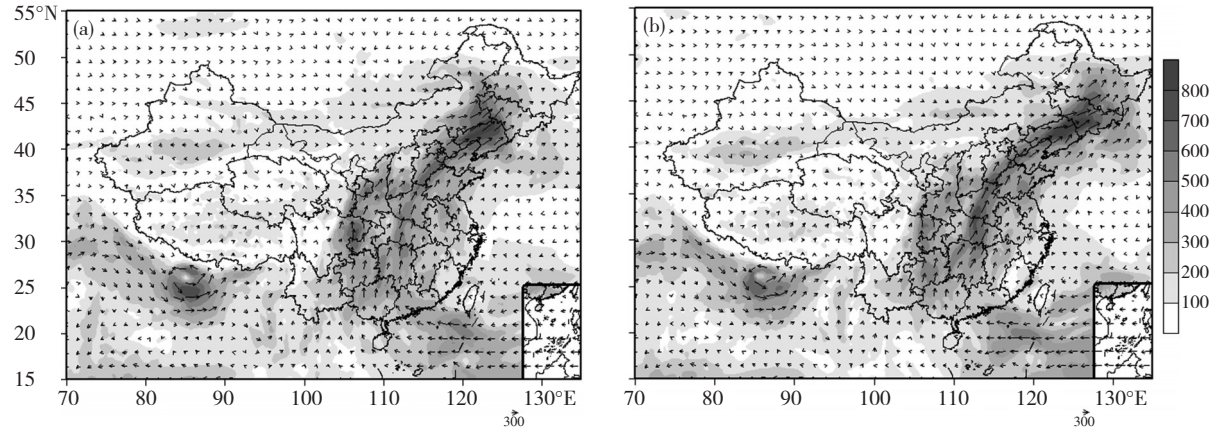


图8 同图3,但为2021年10月2日20时(a)、3日08时(b)

Fig. 8 Same as Fig. 3, but for the time at (a) 20:00 BT on 2 October and (b) 08:00 BT on 3 October 2021

合副高系统北抬,槽前西南气流与副高外围西南气流合并加强,低空急流增强至18 m·s^{-1},自华南至东北地区形成一大范围水汽通量大值区,大量水汽持续向东北地区输送,内蒙古地区的水汽通量无明显变化(图8b)。

经聚类,水汽来源共有3条路径(图9b),其中路径A和C自欧亚大陆中部向东偏南方向分别输送至辽宁

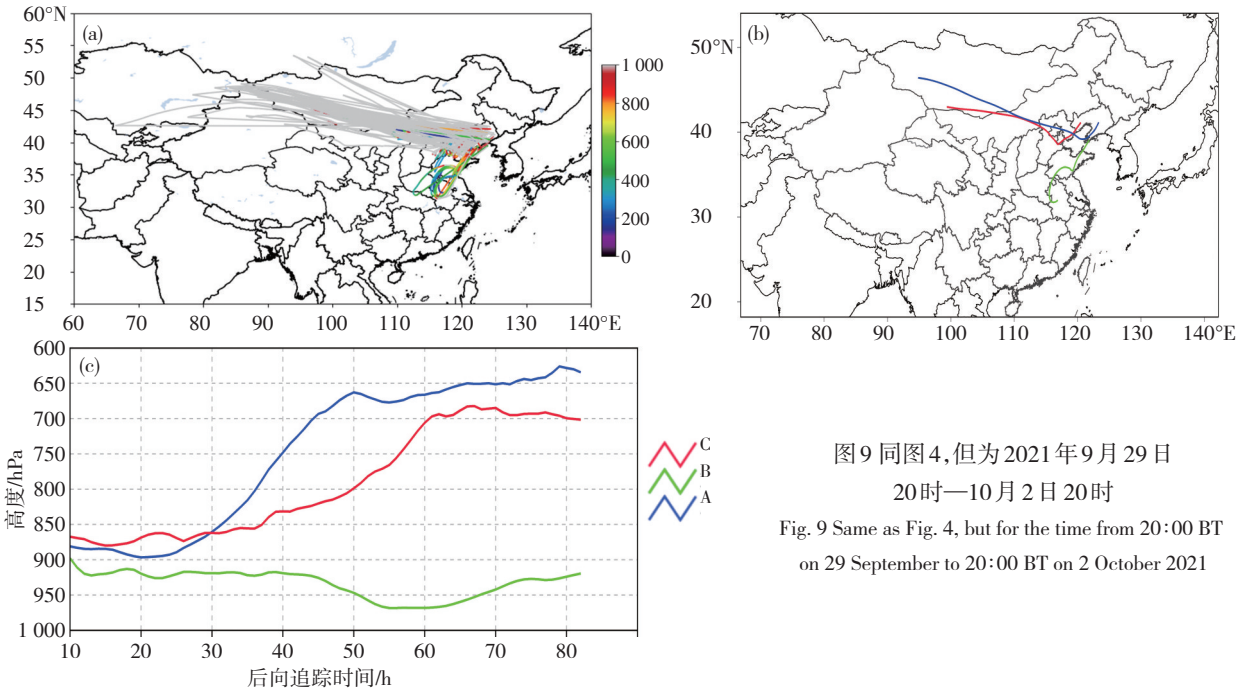


图9 同图4,但为2021年9月29日20时—10月2日20时

Fig. 9 Same as Fig. 4, but for the time from 20:00 BT on 29 September to 20:00 BT on 2 October 2021

东部和西部，水汽贡献率分别为26.70%和50.23%，两条路径均自高空650 hPa逐渐向低层传输，最终位于850 hPa附近；尽管传播距离较远，且来自于陆地，却是此次降水过程的主要水汽源地，受冷涡系统切变线前侧偏西气流影响进入强降水区。路径B自长江流域沿东北方向输送至辽宁南部，水汽贡献率为23.06%，路径上气团高度始终位于900 hPa附近，高度变化较小，为副高系统西北侧西南气流的水汽输送(图9c)。综上，此次降水过程水汽主要来源于欧亚大陆中部的远距离输送，并且水汽均来源于陆地，尽管有副高系统相配合，但副高系统位置距离辽宁较远，因此水汽条件较上文分析的降水过程偏弱。尽管两次个例过程均位于副高系统外围，但由于副高所处位置以及系统强弱的差异，副高系统外围的水汽输送仍呈现出较大差异，水汽贡献率明显不同。

3.3 低空急流与上升气流区和水汽辐合区的空间一致性

研究表明，低空急流与强降水关系密切，不仅能够带来充足的水汽，其具有的强烈不稳定性有利于触发暴雨雨团发生。

此次过程中，850 hPa辽宁中北部地区上空受切变线影响，强上升区位于切变线前侧。切变线前侧西南低空急流强劲，随着低空急流增强，水汽辐合区也增强，强上升区位于低空急流核下方。强降水时段，上升区中心速度超过28 m·s^{-1}，水汽辐合大值区位于急流核下方(图10)。

通过分析低空急流与上升气流区和水汽辐合区在空间分布上的一致性，可以直观地显示低空急流能够为强降水区带来充沛水汽，随着低空急流的建立和加强，上升运动也随之增强。

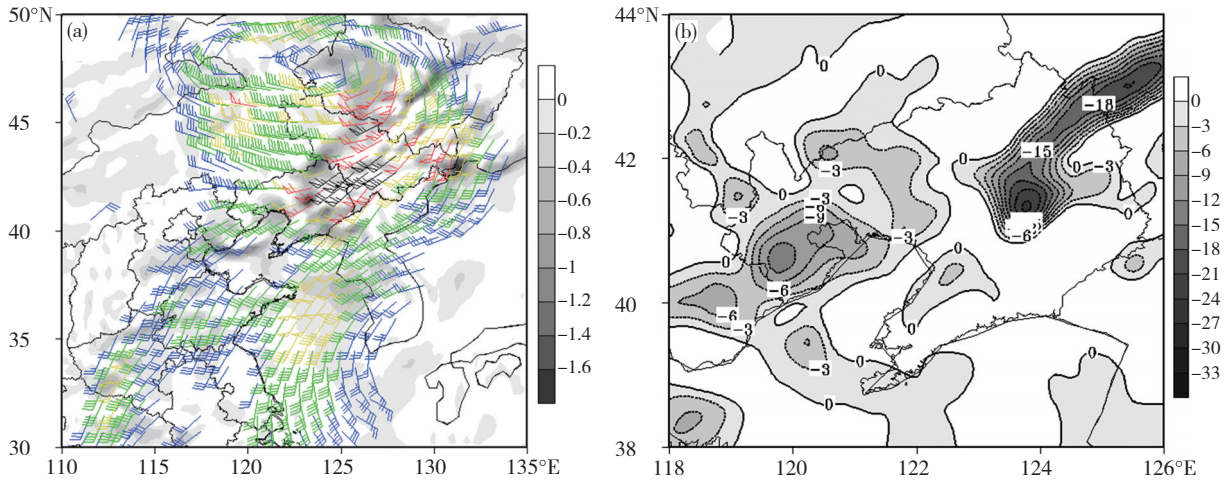


图10 同图5，但为2021年10月3日08时

Fig. 10 Same as Fig. 5, but for the time at 08:00 BT on 30 October 2021

4 结论与讨论

本文选取2021—2022年5—10月副高边缘辽宁8次区域性短时强降水过程，利用ERA5再分析资料、GDAS气象数据和辽宁1 687个国家及区域气象观测站逐时降水观测资料，结合HYSPLIT4轨迹模式，分析副高边缘低槽和副高边缘涡旋环流背景下辽宁短时强降水过程中的水汽输送特征，研究低空急流在此类过程中对水汽的输送作用及低空急流与上升气流区和水汽辐合区的空间一致性。得到主要结论如下：

(1) 辽宁区域性短时强降水过程的水汽主要来自欧亚大陆中部、我国东部沿海(渤海、黄海和东海)、内蒙古地区和华北地区。来自欧亚大陆中部和内蒙古地区的气团在辽宁短时强降水过程水汽供应方面占比约为32%。

(2) 副高边缘低槽类强降水个例中，经聚类后水汽来源共5条路径。其中4条路径为副高系统西侧偏南气流的水汽输送，水汽主体来自于黄海上空，水汽贡献率高达79.49%；1条路径自低槽前侧偏南气流汇入副高系统西侧进入强降水区，水汽来源于东海北部，水汽贡献率仅占20.51%。副高系统边缘涡旋类强降水个例中，经聚类后水汽来源共有3条路径。其中2条路径为冷涡系统切变线前侧偏西气流进入强降水区，水汽主体来自于欧亚中高纬，水汽贡献率达76.93%；1条路径为副高系统西北侧西南气流的水汽输送，水汽来源于长江流域附近，水汽贡献率仅占23.06%。

(3) 尽管受相似的天气系统影响，不同天气过程水汽输送通道仍表现出明显差异。对流层中下层水汽通量大值区的演变与850 hPa风场的演变趋势较为一致，同时水汽辐合大值区、强上升气流区以及水汽输送通道的位置也与低空急流的位置密切相关。

文中着重分析了副高边缘两类天气系统影响下辽宁典型短时强降水过程中的水汽来源和水汽输送特征，初步探讨了副高边缘低槽和涡旋两类天气系统影响下水汽通量和水汽输送特征的异同，而针对输送至辽宁的水汽与降水量之间的转化尚需进一步讨论。此外，尽管文中揭示了低空急流与水汽辐合区大值和强上升气流区空间位置上的一致性，但低空急流在促进水汽辐合并触发上升运动中的机理作用尚需更加深入的机理分析和探讨。

参考文献(References)：

陈传雷,孙欣,李玉鸣,等.2013. 2010年辽宁主汛期暴雨过程副高、急流及层级特征分析[J].气象科技,41(1):146-152. Chen C L, Sun X, Li Y M, et al. 2013. Subtropical high, jet and stratification characteristics of six torrential rainfall processes in 2010 flood period in Liaoning Province [J]. Meteorological Science and Technology,41(1):146-152 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2013.01.027

陈红专,叶成志,陈静静,等.2019. 2017年盛夏湖南持续性暴雨过程的水汽输送和收支特征分析[J].气象,45(9):1213-1226. Chen H Z, Ye C Z, Chen J J, et al. 2019. Analysis of water vapor transport and budget during persistent heavy rainfall over Hunan Province in June 2017 [J]. Meteorological Monthly,45(9):1213-1226 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.09.003

陈亚玲,文军,刘蓉,等.2022.江河源区水汽输送与收支的时空演变特征分析[J].高原气象,41(1):167-176. Chen Y L, Wen J, Liu R, et al. 2022. Analysis on the temporal and spatial evolution characteristics of water vapor transport and budget over the Source Region of the Three-River [J]. Plateau Meteorology,41(1):167-176 (in Chinese). doi:10. 7522/j.issn.1000-0534.2021.00049

陈云辉,单九生,李婕,等.2023.南昌“6.29”短历时暴雨过程的成因及其中尺度特征[J].暴雨灾害,42(2):124-133. Chen Y H, Shan J S, Li J, et al. 2023. Causes and meso-scale characteristics of the short-duration rainstrom in Nanchang on 29 June 2022 [J]. Torrential Rain and Disasters,42(2):124-133 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022-145

冯志刚.2012.淮河流域暴雨的气候特征和环流分型[D].南京:南京大学. Feng Z G. 2012. The climatic characteristics of rainstorms in Huaihe River Basin and circulation patterns [D]. Nanjing:Nanjing University (in Chinese)

葛家荣,任雪娟.2019.南亚高压次季节尺度东西振荡对我国长江流域降水及水汽输送的影响[J].气象科学,39(6):711-720. Ge J R, Ren X J. 2019. The influence of subseasonal zonal oscillation of South Asian High on precipitation and moisture transportation over Yangtze River Valley [J]. Journal of the Meteorological Sciences,39(6):711-720 (in Chinese). doi:10.3969/2018jms.0082

贾旭轩,张立鹏,王赛頔,等.2023.基于邻域法的区域模式环渤海短时强降水预报评估[J].气象与环境学报,39(3):40-46. Jia X X, Zhang L P, Wang S D, et al. 2023. Prediction and evaluation of short-term heavy precipitation around the Bohai Sea by a regional model based on the neighborhood method [J]. Journal of Meteorology and Environment,39(3):40-46 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2023.03.005

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 Z H, Liang Z R, Liu Z Y, 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,35(2):361-372 (in Chinese). doi:1006-9895(2011)02- 0361-12

蒋帅,尹依雯,陈世文,等.2021.洞庭湖地区的水汽输送来源特征分析[J].沙漠与绿洲气象,15(5):55-63. Jiang S, Yin Y W, Chen S W, et al. 2021. Analysis of water vapor transport sources of Dongting Lake Region [J]. Desert and Oasis Meteorology,15(5):55-63 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2021.05.008

栗晗,王新敏,吕林宜,等.2023.黄淮地区副高边缘型降水数值预报精细化检验[J].应用气象学报,34(4):413-425. Li H, Wang X M, L ü L Y, et al. 2023. Refined verification of numerical forecast of subtropical high edge precipitation in Huanghuai Region [J]. Journal of Applied Meteorological Science,34(4):413-425 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313.20230403.

梁萍,何金海,陈隆勋,等.2007.华北夏季强降水的水汽来源[J].高原气象,26(3):460-465. Liang P, He J H, Chen L X, et al. 2007. Anomalous mositure sources for the severe precipitation over North China during summer [J]. Plateau Meteorology,26(3):460-465 (in Chinese). doi:1000-0534(2007)03-0460-06

廖胜石,卓健,罗建英,等.2022.广西汛期极端短时强降水特征分析[J].暴雨灾害,41(3):308-314. Liao S S, Zhuo J, Luo J Y, et al. 2022. Analysis of characteristics of the extreme short-time heavy rainfall in Guangxi in rain season [J]. Torrential Rain and Disasters,41(3):308-314 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.007

凌婷,肖雯,邓德文,等.2020. 2019年6月上旬江西一次持续性暴雨天气过程成因[J].气象与减灾研究,43(4):284-291. Ling T, Xiao W, Deng D W, et al. 2020. Analysis of the cause of a continuous rainstorm in Jiangxi in early June 2019 [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research,43(4):284-291 (in Chinese). doi:10.12013/qxyjzyj2020-040

刘嘉慧敏,潘留杰,郭大梅,等.2023.商洛金丝峡“6.26”极端短时强降水成因分析[J].暴雨灾害,42(6):659-669. Liu J H M, Pan L J, Guo D M, et al. 2023. Comprehensive analysis of the extreme short-time heavy rain event on 26 June 2022 in Jinsi Gorge, Shangluo [J]. Torrential Rain and Disasters,42(6):659-669(in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022-256

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. Ma L C, Sun L, Wang N. 2017. Analysis of water vapor transport characteristics of typical rainstorm cases in Northeast China [J]. Plateau Meteorology,36(4):960-970 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00078

毛紫怡,李国平,许霖.2011.湖南一次持续性暴雨过程的水汽输送与收支特征[J].暴雨灾害,40(5):513-522. Mao Z Y, Li G P, Xu L. 2021. Analysis on transport and budget characteristics of water vapor in a sustained heavy rain event in Hunan Province [J]. Torrential Rain and Disasters,40(5):513-522 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2021.05.008

秦鑫,赵姝慧,马嘉理,等.2020.辽宁地区大气可降水量与降水关系的研究[J].气象,46(1):80-88. Qin X, Zhao S H, MA J L, et al. 2020. Relationship between atmospheric precipitable water vapor and precipitaton in Liaoning Province [J]. Meteorological Monthly,46(1):80-88 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000 0526.2020.01.008

曲姝霖,苏涛,韩子轩,等.2021.华南夏季降水两次年代际转折的水汽输

送异常成因初探[J].大气科学,45(2):273–286. Qu S L, Su T, Han Z X, et al. 2021. Preliminary research on moisture transport anomalies in two inerdecadal changes in summer precipitation in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,45(2):273–286 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2005.19231

苏洋,陈豫英,杨侃,等.2023.低空急流与贺兰山东麓暴雨过程的相关性[J].气象,49(10):1171–1186. Su Y, Chen Y Y, Yang K, et al. 2023. Correlations between low level jet and rainstorm process in the eastern foot of Helan Mountains [J]. Meteorological Monthly,49(10):1171–1186 (in Chinese). doi: 10.7519/j.issn.1000–0526.2023.051601

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 L, Ma L C, Shen B Z, 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,40(3):630–646 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.1506.15101.

王成鑫,杨晓丹,师义成,等.2022. GSI同化GPS可降水量对四川盆地不同类型降水模拟影响[J].科技导报,40(13):96–106. Wang C X, Yang X D, Shi Y C, et al. 2022. The impact of assimilation of GPS precipitable water vapor in GSI on the simulation of different precipitation types in Sichuan Basin [J]. Science and Technology review,40(13):96–106 (in Chinese). doi:10.3981/j.issn. 1000–7857.2022.13.010

王慧清,付亚男,孟雪峰.2019.内蒙古东北部地区一次极端降雪过程的水汽输送特征[J].干旱气象,37(2):277–287. Wang H Q, Fu Y N, Meng X D. 2019. Analysis on characteristics of water vapor transportation during an extreme snowfall process in the northeast of Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Meteorology,37(2):277–287 (in Chinese). doi:10.11755 / j.issn.1006–7639(2019)– 02–0277

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.Wang J J, Wang C X, Chen Z P, et al. 2015.Analysis of a summer rainstorm water vapor paths and sources in Sichuan Basin based on HYSPLIT4 model [J]. Meteorological Monthly,41(11):1315–1327 (in Chinese). doi:10.7519/j. issn.1000 0526.2015.11.00

王娜,顾伟宗,邱粲,等.2021.山东夏季空中水汽分布和水汽输送特征[J].高原气象,40(1):159–168. Wang N, Gu W Z, Qiu C, et al. 2021. Characteristics of atmospheric water vapor distribution and transport during summer over Shandong Province [J]. Plateau Meteorology,40(1):159–168 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2019.00119

熊秋芬,姜晓飞,鞠英芹,等.2022.湖北省三次春季暴雨过程水汽来源与输送特征分析[J].气象科技进展,12(3):25–33. Xiong Q F, Jiang X F, Ju Y Q, et al. 2022. Analysis of moisture source and transport pathway of three rainstorms in Hubei Province in spring [J]. Advances in Meteorological Science and Technology,12(3):25–33 (in Chinese). doi:10.3969 /j.issn.2095–1973.2022.03.005

徐爽,胡鹏宇,贾越,等.2023. 2020—2021年沈阳地区4次短时强降水过程的大气可降水量变化对比分析[J].气象与环境学报,39(2):28–34. Xu S, Hu P Y, Jia Y, et al. 2023. Variation characteristics of GPS precipitable water vapor during short–time heavy rainfall processes under different synoptic systems in Shenyang [J]. Journal of Meteorology and Environment,39(2):28–34 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673–503X. 2023.02.004

杨磊,蒋大凯,王瀛,等.2016.辽宁省汛期GPS大气可降水量的特征分析[J].干旱气象,34(1):82–87. Yang L, Jiang D K, Wang Y, et al. 2016. Analysis of atmospheric precipitable water vapor characteristics during flood season in Liaoning Province based on GPS remote sensing data [J]. Journal of Arid Meteorology,34(1):82–87 (in Chinese). doi:10.117 55 /j.issn.1006–7639(2016)–01–0082

杨璐瑛,刘畅,杨成芳,等.2018.不同天气系统影响下强降雨过程GPS可降水量变化特征对比[J].干旱气象,36(3):475–482. Yang L Y, Liu C, Yang C F, et al. 2018. Variation characteristics of GPS precipitable water vapor during typical heavy rainfall processes under different synoptic systems [J]. Journal of Arid Meteorology,36(3):475–482 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006–7639(2018) –03–0475

叶成志,李昀英,黎祖贤.2009.两次严重影响湖南的登陆台风水汽场特征数值模拟[J].高原气象,28(1):98–107. Ye C Z, Li Y Y, Li Z X. 2009. Numerical study on the water vapor transports of the two landfalling cyclones affecting Hunan Province [J]. Plateau Meteorology,28(1):98–107 (in Chinese). doi:1000–0534 (2009)–01–0098–10

魏铁鑫,缪启龙,段春锋,等.2015.近50 a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,35(1):60–65. Wei T X, Miao Q L, Duan C F, et al. 2015. Water vapor sources distribution of cold eddy rainstorm in northeast China and its contribution analysis in recent fifty years [J]. Journal of the Meteorological Sciences,35(1):60–65 (in Chinese). doi:10.3969/2013jms.0080

许彬,熊秋芬,张玉婷.2019.一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,45(10):1392–1401. Xu B, Xiong Q F, Zhang Y T. 2019. Analysis of moisture source and transport pathways of a rainstorm with tropical cyclone in Nanchang [J]. Meteorological Monthly,45(10): 1392–1401 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2019.10.006

Draxler R R, Hess G D.1998.An overview of the HYSPLIT–4 modeling system for trajectories, dispersion and deposition [J]. Australian Meteorological Magazine,47:295–308

Perry L B, Konrad C E, Schmidlin T, et al. 2007. Antecedent upstream air trajectories associated with northwest flow snowfall in the southern Appalachian s [J]. Weather and Forecasting,22(2):334–351. doi:10.1175/ WAF978.1

（责任编辑　唐国瑛）