

蔡芎宁,陈涛,谌芸,等,2022. 对流层高层冷涡对“21·7”河南持续性极端暴雨影响分析[J]. 气象,48(5):545-555. Cai X N, Chen T, Chen Y, et al, 2022. Dynamic impact of upper tropospheric cold low on persistent extreme rainstorm of Henan during 17–22 July 2021[J]. Meteor Mon, 48(5):545-555(in Chinese).

对流层高层冷涡对“21·7”河南持续性 极端暴雨影响分析*

蔡芎宁¹ 陈 涛^{1,2,3} 谌 芸^{1,2,3} 符娇兰^{1,2} 胡 宁^{1,2}

1 国家气象中心,北京 100081

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081

3 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海),珠海 519082

提 要: 2021 年 7 月 17—22 日河南出现历史罕见持续性特大暴雨,期间我国东部海区上空的对流层高层冷涡(upper tropospheric cold low, UTCL)与河南降水几乎同步增强,对降水天气形势发展存在影响。强降水过程期间河套高空短波槽、黄淮高压脊、UTCL 以及日本海阻塞高压形成准静止波列,环流系统异常稳定,由于 UTCL 在我国东部海区上空停滞,导致西风急流在河南及其以东地区形成大尺度持续性辐散分流。河南暴雨高空辐散区的建立和增强与 UTCL 西侧的西北风急流增强直接相关;UTCL 东侧急流增强了台风烟花的高层流出,有利于台风加强进而影响河南暴雨区水汽输送;UTCL 引起的高空下沉运动增强了副热带高压的稳定性,间接增强了从东部海区向河南的偏东风水汽输送。UTCL 数值预报不确定性较大,随着预报时效临近,UTCL 环流中心不断向偏北方向调整、强度增强,对应河南暴雨落区有向东调整的趋势。集合预报成员中强、弱 UTCL 环流分组对比表明,较强的 UTCL 环流有利于增强河南上空的反气旋性辐散流出,对降水增强较为有利,基于集合预报敏感性的诊断进一步证实了上述结论。

关键词: 对流层高层冷涡(UTCL),极端暴雨,集合预报

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.021802

Dynamic Impact of Upper Tropospheric Cold Low on Persistent Extreme Rainstorm of Henan During 17–22 July 2021

CAI Xiangning¹ CHEN Tao^{1,2,3} CHEN Yun^{1,2,3} FU Jiaolan^{1,2} HU Ning^{1,2}

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082

Abstract: Extreme rainstorms struck Henan Province during 17 to 22 July 2021. With the enhancing of the upper tropospheric cold low (UTCL) over the China East Sea, the precipitation in Henan burst almost simultaneously, indicating that UTCL has potential impact on the development of the precipitation. From 19 to 22 July, the upper-level short-wave trough over Hetao Area, the high ridge over Huanghuai Region, UTCL and the blocking high over Japan Sea formed a wave train which led to the almost stationary synoptic circulations. During the heavy rainfall, UTCL stagnated over the eastern seas of China, resulting in large-scale divergence in westerly jet over Henan Province and its eastern region. The establishment and

* 国家重点研发计划(2019YFC151040),灾害天气国家重点实验室开放课题(2021LASW-A16)共同资助

2021 年 11 月 1 日收稿; 2022 年 2 月 18 日收修定稿

第一作者:蔡芎宁,从事中长期天气预报及相关技术方法研究. E-mail:cxn@cma.gov.cn

通讯作者:陈涛,从事定量降水预报与中尺度对流系统诊断分析研究. E-mail:chentao@cma.gov.cn

enhancement of the upper-level divergence over Henan was clearly related to the acceleration of northwest jet on the west part of UTCL. Meanwhile, south flow jet on the eastside of UTCL enhanced the upper-level outflows of Typhoon In-fa, which was conducive to the growth of In-fa's circulation and the water vapor transportation to the rainstorm area of Henan. On the other hand, the upper-level sinking caused by UTCL enhanced the stability of the subtropical high, and also enhanced the low-level water vapor transportation from the East China Sea to Henan. The UTCL showed obvious forecast uncertainty. From adjacent forecast cycles, the center of UTCL continued to adjust to the north, intensifying and the heavy rainfall area in Henan also tended to adjust to the east direction. The comparison between strong and weak UTCL circulation among ensemble members shows that, strong UTCL circulation was conducive to enhance the anticyclonic divergent outflow over Henan and was more conducive to the enhancement of precipitation in Henan, which has been also proved by ensemble sensitivity analysis.

Key words: upper tropospheric cold low (UTCL), extreme rainstorm, ensemble forecast

引言

“21·7”河南极端暴雨是东亚大气环流异常协同作用下的结果,涉及高中低层多种类、多尺度天气系统间的相互作用。此次极端降水过程中出现了以往研究较少、但具有重要影响的对流层高层冷涡(upper tropospheric cold low, UTCL)天气系统。UTCL是对流层高层大尺度、长生命史的气旋性环流系统,对大尺度环流形势和上下游天气系统的稳定性有显著影响,并与中低层气旋和冷涡天气系统有显著区别(汪小康等,2022;苏爱芳等,2022;杨浩等,2022)。Riehl(1948)首先在夏季副热带北太平洋和北大西洋的对流层高层发现了UTCL,指出UTCL增强了对流层高层流出气流,有利于低空低值系统发展。Kelley and Mock(1982)研究表明UTCL大致位于700~100 hPa高度层,下沉气流占优势。Chen and Chou(1994)统计表明UTCL平均生命史为6.3 d,8月出现频率最多,10月最少,具有明显的年际变化和月际变化,并且87%的UTCL在西北部或者南部象限都存在高空急流。Wang et al(2012)系统研究了UTCL的生成历程,指出UTCL可从西风槽切断冷涡(Palmer,1953),或从太平洋、大西洋洋中槽中产生(Colton,1973;Thorncroft et al,1993)。Chen et al(2001)研究了1998年7月上旬西太平洋一次长生命史UTCL活动事件,UTCL间接导致西太平洋台风活动中断,其西侧高空急流与南亚高压东南侧急流合并,加强了我国长江中下

游地区的高空辐散条件,与1998年7月上旬我国长江中下游极端暴雨过程有显著相关。

2021年7月17—22日河南发生了历史罕见的特大暴雨,期间UTCL在我国东部海区上空稳定维持,UTCL等高层天气系统对于大尺度天气环流形势的稳定性、河南暴雨区高空辐散以及高低空急流耦合配置关系有直接影响,并与台风烟花、西太平洋副热带高压(以下简称副高)以及低层偏东风急流等关键暴雨系统存在复杂相互作用。本文将研究此次河南极端降水过程中UTCL的发展特征和变化机制,重点分析UTCL对河南暴雨天气发展的影响,基于集合预报分析UTCL天气系统数值可预报性,深化对河南极端暴雨过程中多尺度天气系统特征和发展机制的科学认识。

1 数据与方法

本文观测数据主要采用国家气象信息中心整编全国区域站降水量观测、国家卫星气象中心FY-4A卫星10.8 μm 红外辐射亮温和6.25 μm 水汽通道云导风数据产品。天气形势分析诊断基于ERA5($0.25^\circ \times 0.25^\circ$,逐1 h)再分析数据。应用EC-EPS集合预报产品($0.5^\circ \times 0.5^\circ$,逐6 h;1个控制成员和50个扰动成员预报)分析UTCL和河南降水预报稳定性,基于集合分组对比(Schumacher et al,2013)、集合预报敏感性方法(Torn and Hakim,2008;陈涛等,2019)分析UTCL对河南暴雨天气过程的可能影响。

2 河南“21·7”极端降水特征和天气形势

2.1 降水特征

2021年7月17—22日,河南省出现历史罕见的特大暴雨,强降水范围广、持续时间长、累计雨量大、短时降雨极强,在累计降水量、日雨量、小时雨量等方面都表现出明显极端性。19—21日河南省中北部连续3天出现大暴雨,累计降水量普遍超过400 mm(图1a);郑州、新乡、鹤壁和安阳等20个国家气象站日降水量突破建站以来历史极值;过程最大降水量1122.6 mm(鹤壁科创中心站),郑州站20日08时至21日08时(北京时,以下皆同)日降水量达624.1 mm,达建站以来最大日降水量的3.4倍。从逐时降水特征看(图1b),郑州站降水集中在20日,最大小时降水量达201.9 mm(20日16—17时),创下中国大陆地区国家气象站逐小时降水量历史极值;河南北部的鹤壁地区降水集中在20—21日,最大小时降水量为120.5 mm(21日13—14时),由于降水时间更长,累计降水量也更大。

2.2 大气环流持续性异常特征

历史上“75·8”“63·8”极端降水过程都出现在

大尺度东风气流稳定维持、东部海区有热带气旋活动的天气环流背景下(陶诗言,1980;李泽椿等,2015;丁一汇,2015),此次河南极端暴雨过程天气形势与其有相似之处。河南暴雨过程前东亚中高层天气环流形势出现持续性异常,7月15日前后副高北跳至日本海,副高西段脊线稳定在 42°N 左右,较气候平均的副高位置偏北约14个纬距,脊线偏北幅度达到2倍气候标准差以上(图2a)。持续偏北的副高在其南侧形成宽广的东风气流区,将水汽从海区向我国中东部内陆地区输送,有利于在太行山等大尺度地形前形成持续性降水过程。河南强降水过程期间,台风烟花与其北侧副高之间形成显著气压梯度,进一步加强了偏东风水汽向河南的输送。我国大陆地区500 hPa环流为明显的“鞍型场”形势,河南处于“鞍型场”南侧低压倒槽区内,未受到明显高空槽、锋面气旋等典型中纬度斜压天气系统影响,不利于出现典型西风带锋面暴雨。

200 hPa上显著位势高度场距平出现在东亚远东地区 50°N 附近(图2b),高度场异常与东北亚地区的阻塞形势有直接关系。河南暴雨期间,我国东部海区上空出现稳定维持的UTCL系统,平均环流中心位于 35°N 、 125°E 附近,以200 hPa环流场上最大风速半径估计,UTCL环流的水平尺度约1000 km左右;在UTCL东侧还存在庞大稳定的日本海阻塞高压,其高压脊北侧高度距平超过250 gpm。

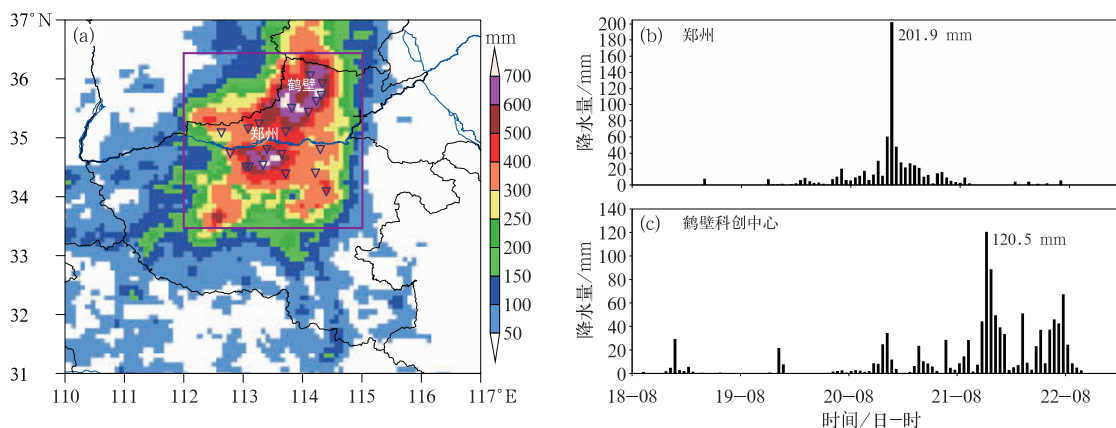


图1 2021年7月(a)17日08时至23日08时区域自动站累计降水量(填色),
(b)18日08时至22日20时郑州站和(c)鹤壁科创中心站逐小时降水量
(图1a中“▽”标志为日降水量突破建站以来极值站点,方框为降水关键区)

Fig. 1 (a) Accumulated precipitation (colored) from 08:00 BT 17 to 08:00 BT 23 July, (b, c) hourly precipitation at (b) Zhengzhou Station and (c) Hebi Kechuangzhongxin Station from 08:00 BT 18 to 20:00 BT 22 July 2021
(Daily rainfall record-breaking stations are marked with “▽”, and the box is the major rainstorm area in Henan Province in Fig. 1a)

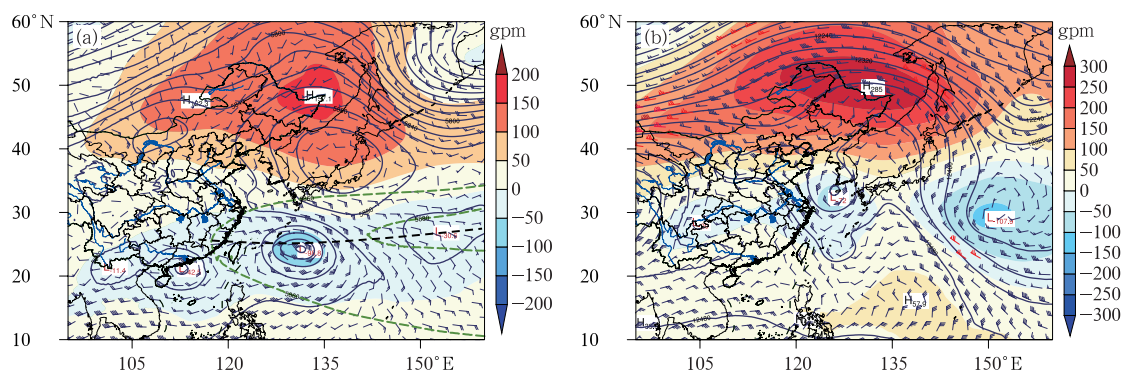


图 2 2021 年 7 月 17—22 日 (a) 500 hPa 平均位势高度场(等值线, 单位: gpm)、距平(填色)以及 850 hPa 风场, (b) 同图 2a, 但为 200 hPa 位势高度场、距平以及 200 hPa 风场
(图 2a 中绿色等值线为 7 月下旬气候平均 500 hPa 高度场, 黑色粗断线为气候平均副高脊线位置)

Fig. 2 (a) Averaged geopotential height (contour, unit: gpm) with height anomaly (colored) at 500 hPa and 850 hPa wind field from 17 to 22 July 2021, (b) same as Fig. 2a, but for 200 hPa and 200 hPa wind field

(In Fig. 2a, green line is climatically averaged 500 hPa geopotential height in the last dekad of July and thick dashed line is for subtropical high ridge)

由于 UTCL 以及日本海阻塞高压系统在东亚东部海区上空异常稳定维持, 南亚高压北侧的西风急流在东亚地区出现大尺度分流, 形成有利于持续性降水过程的高空辐散流场。UTCL 作为构成高空大尺度稳定环流形势的重要成员之一, 其发展特征及其对河南暴雨天气形势的影响值得进一步分析研究。

3 UTCL 发展过程及其对河南暴雨过程的影响

3.1 UTCL 发展过程

此次 UTCL 的生成与北太平洋中部长波槽切断过程相关。7 月 14 日南亚高压东段在远东地区切断出一个高压中心, 并逐渐向东北方向的阿留申低压槽区移动(图 3a); 同时日本海南部的高压脊逐渐向北伸展加强, 在这两个高压的切断作用下, 阿留申长波槽底部逐步切断出一个闭合高空涡旋, 在其北侧高压系统底部的偏东风引导下, 缓慢向我国东部海区移动(图 3b); 16 日 UTCL 移入东海, 17—22 日以 UTCL 为中心, UTCL 上下游天气系统异常稳定, 河套高空槽、黄淮高压脊、UTCL 与日本海阻塞高压的空间位置基本保持不变, 形成较为罕见的准静止驻波结构(图 3c, 3d)。丁一汇(1994)指出, 持续性大暴雨出现在长波系统稳定时期, 区域性特大暴雨的形成一定有稳定的天气环流形势配合。此次

过程中 UTCL 生命史长达 9 d, 以其为中心的上下游多个天气系统稳定维持, 是此次河南极端暴雨过程较为特殊的天气特征之一。

从 200 hPa 相对涡度和水平风场的经度-时间演变特征分析(图 4), 7 月 19—21 日 UTCL 环流中心位于 125°E 附近, 有缓慢东移趋势。19 日开始, UTCL 相对涡度迅速增强, UTCL 中心东西两侧的急流增强到 $25 \sim 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 其中西侧急流增强更为明显。与此同时, 河南暴雨区的 200 hPa 高空辐散、低层 850 hPa 垂直运动几乎同步增强, 其中高空辐散区出现在 113°~117°E 的偏西气流中, 暴雨区上空高空流出气流与 UTCL 西侧急流区汇合; 850 hPa 上升运动在郑州站附近准静止维持, 与高空辐散气流形成明显耦合关系并维持将近 72 h, 长时间维持的有利环境动力条件是导致河南极端性降水的重要原因之一。

3.2 UTCL 对周边天气系统的影响

7 月 20 日 08 时河南中东部高空辐散区显著增强(图 5a), 其中向东北方向的高空出流与河套高空槽前的西南气流相关, 由于 19—20 日河套高空槽、黄淮高压脊有所加强, 高空槽前的西南风增强有利于河南暴雨关键区上空的辐散流出; 而河南暴雨区上空向东南方向的高空出流分支与 UTCL 西侧的西北急流汇合, 构成最主要的高空流出气流, 因此 UTCL 对其上游河南上空大尺度辐散区的维持和加强有重要影响。对比同时刻 FY-4A 云导风(图 5b),

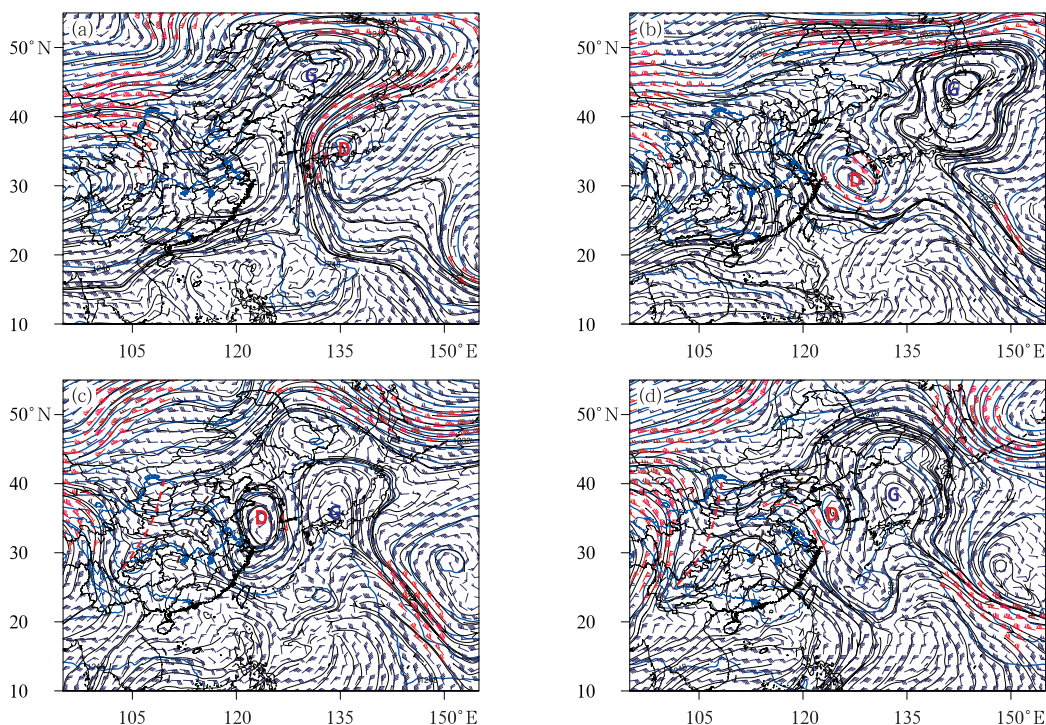


图3 2021年7月(a)14日08时,(b)17日08时,(c)19日08时,
(d)20日08时200 hPa位势高度(蓝线,单位:dagpm)和流场(黑线)

(红色、棕色粗断线分别为槽线和脊线,红色风羽表示风速 $>25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 3 Geopotential height (blue line, unit: dagpm) and wind stream (black line)
at 200 hPa at 08:00 BT of (a) 14, (b) 17, (c) 19 and (d) 20 July 2021
(thick red dashed line: trough, brown dashed line: ridge, red wind barb: wind speed over $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

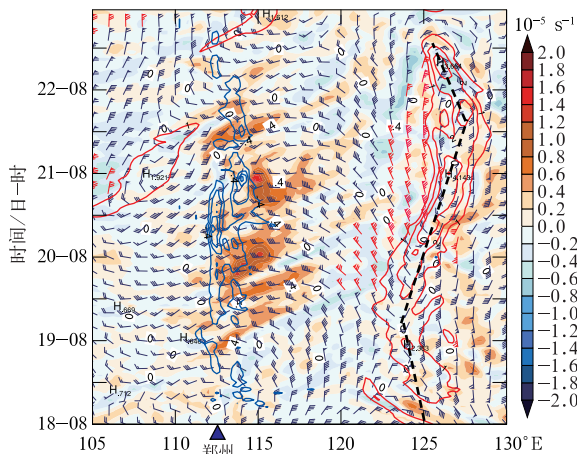


图4 2021年7月19—21日33°~36°N纬度平均200 hPa
风场(风羽)和水平散度(填色)经度-时间演变
(红色等值线为200 hPa相对涡度, $>1.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$;
蓝色等值线为850 hPa垂直速度, $<-0.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$;
蓝色实心三角处为郑州站经度113.7°E位置)

Fig. 4 Zonal-averaged wind (wind barb) and
horizontal divergence (colored) between
33°—36°N at 200 hPa from 19 to 21 July 2021

(red contour: relative vorticity above $1.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ at 200 hPa,
blue contour: vertical velocity below $-0.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ at 850 hPa,
blue solid triangle: longitude of Zhengzhou Station, the same below)

河南上空的高空辐散流场、UTCL 环流等天气系统特征与 ERA5 再分析基本一致,但河南暴雨区上空的云导风风速较 ERA5 分析场偏强 $2 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, UTCL 中心西侧和东侧的云导风急流较 ERA5 分析场偏强 $4 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,位置稳定、旋转更强的 UTCL 通过高空急流的“抽吸”作用,有利于其上游方向河南暴雨区高空辐散流出、增强。

此外,UTCL 对台风烟花的强度、移动路径也有潜在影响。7月19—21日,台风烟花、UTCL 都处于东西两环高压之间的高空深槽区内,台风烟花中高层引导气流较弱,是导致台风移动缓慢的原因之一,台风在西太平洋暖池区有充分的回旋加强时间。20日08时FY-4A卫星观测表明(图5b),UTCL 环流在下沉气流控制下一般为少云区;台风烟花北侧高层流出气流与 UTCL 东侧的偏南急流联通,建立了优越的高层流出条件,有利于台风强度加强。在上述多重因素作用下,19日白天至20日中午“烟花”增强为台风级,在副高南侧东南风与“烟花”北侧偏东风共同作用下,东海至黄淮地区建立深厚、稳定的东南风气流,为河南强降雨提供了充沛的水汽来源。

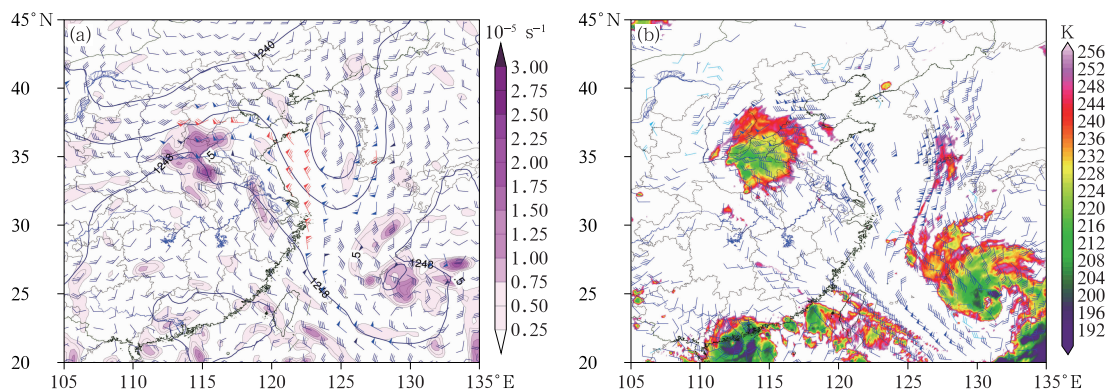


图 5 2021 年 7 月 20 日 08 时 (a) 200 hPa 位势高度 (等值线, 单位: dagpm), 风场 (风羽) 和水平散度 (填色), (b) FY-4A 10.8 μm 红外辐射亮温 (填色) 和 6.25 μm 水汽通道云导风

Fig. 5 (a) Geopotential height (contour, unit: dagpm), wind (wind barb) and horizontal divergence (colored) at 200 hPa, (b) infrared bright temperature (colored) at 10.8 μm and cloud drift wind of 6.25 μm (water vapour) channel from FY-4A at 08:00 BT 20 July 2021

UTCL 环流中心与郑州基本处于同一纬度, 从过郑州站纬度的垂直剖面分析 (图 6) 可见, 125°E 附近 UTCL 环流的正相对涡度区位于 400~150 hPa, 环流中心处于 200 hPa, 天气系统在垂直方向基本保持直立, 没有明显的倾斜结构特征, UTCL 两侧急流风速达 28~32 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在东部海区至黄淮内陆地区的 110°~130°E 间, 对流层低层有稳定的偏东风急流; 在河南中部郑州附近, 700 hPa 以下有显著的辐合区, 并有与正相对涡度区对应的中尺度低涡系统, 进一步增强了水汽聚集和对流组织化程度, 强烈的对流上升运动高度达到 200 hPa 以上。河南暴雨区上空 500 hPa 以上出现强烈辐散, 其中 200 hPa 附近的高空偏西流出气流与 UTCL 西侧的高空急流汇合, 建立起低层东风急流辐合抬升、高空西北急流辐散流出的高低空急流耦合关系。由于河南暴雨区上空上下游天气系统的稳定维持, 高低空急流耦合关系从 19 日夜间建立后, 一直维持到 21 日, 造成了河南中部地区的长时间强降水。

3.3 UTCL 环流增强特征和机制分析

从 19 日 08 时至 21 日 08 时, 河南暴雨关键区上空 200 hPa 辐散有显著增强趋势 (图 7); 从 UTCL 环流平均相对涡度变化特征看, UTCL 中心相对涡度由 $2.4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 增强至 $4.6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 48 h 内增强了将近 1 倍, 两者之间时间序列相关系数达 0.94, 表明 UTCL 环流增强与河南暴雨关键区上空高空

辐散之间有良好的相关性。

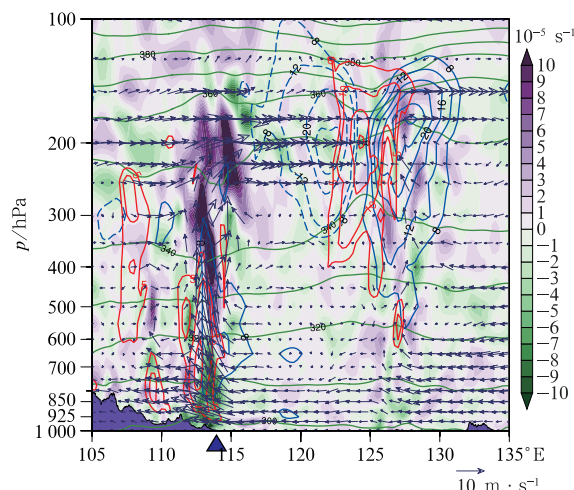


图 6 2021 年 7 月 20 日 08 时过郑州站附近 34.75°N 垂直剖面的位温 (绿线, 单位: K)、相对涡度 (红线, 单位: 10^{-5} s^{-1})、经向风速 (蓝线, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和水平散度 (填色)

(风矢量为纬向风 u 和垂直速度 w 的合成, w 放大 10 倍)
Fig. 6 Potential temperature (green line, unit: K), relative vorticity (red line, unit: 10^{-5} s^{-1}), meridional wind speed (blue line, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and horizontal divergence (colored) on the vertical cross-section along 34.75°N near Zhengzhou Station at 08:00 BT 20 July 2021

(Wind vector is composed by zonal wind and vertical velocity amplified by 10 times)

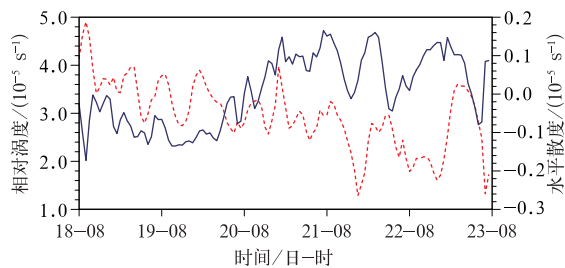


图7 2021年7月18—22日UTCL中心500 km范围内200 hPa区域平均相对涡度(实线)和降水关键区平均200 hPa水平散度(虚线)时间演变
Fig. 7 Temporal evolutions of the 200 hPa area-averaged relative vorticity (solid line) in 500 km range to UTCL center and the 200 hPa averaged horizontal divergence (dashed line) in the key precipitation area from 18 to 22 July 2021

绝热条件下,天气系统相对涡度的局地变化取决于相对涡度倾向方程右侧的平流项、垂直输送项、伸展项(与水平风场辐合辐散相关)和倾侧项(Holton, 2004):

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \underbrace{-\mathbf{V} \cdot \nabla (\xi + f)}_{\text{平流项}} - \underbrace{\omega \frac{\partial \xi}{\partial p}}_{\text{垂直输送项}} - \underbrace{(\xi + f) \nabla \cdot \mathbf{V}}_{\text{伸展项}} + \underbrace{\mathbf{k} \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial p} \times \nabla \omega \right)}_{\text{倾侧项}} \quad (1)$$

式中: ξ 为相对涡度, $(\xi + f)$ 为绝对涡度, $\mathbf{V}$ 为水平风速矢量, $\mathbf{k}$ 为垂直方向单位矢量。针对UTCL主要活动区域内诊断相对涡度方程各项,平流项和伸展项的时间-高度演变特征表明(图8a, 8b),19日夜开始,300~150 hPa的相对涡度有显著增强,正相对涡度中心位于200 hPa附近,其中平流项和伸展项高值区也都集中在200 hPa左右并且符号相反,而垂直输送项和倾侧项比平流项和伸展项小1个数量级,因此UTCL相对涡度倾向主要取决于平流项和伸展项的相对大小。在UTCL控制下,400~200 hPa以下沉运动为主(图8c),下沉运动中心位于300 hPa左右,中高层下沉运动对中层500 hPa副高的稳定维持较为有利,也间接有利于副高南侧东风气流水汽输送的稳定性;以往对台风个例研究也表明(许映龙等, 2015),大洋槽切断低涡西移有利于副高的增强西伸。

200 hPa上UTCL环流控制区内相对涡度方程各项诊断表明(图9),式(1)右侧4项之和的诊断相对涡度倾向与实际值误差不超过10%,在UTCL相对涡度增长较明显的19日夜至20日早上,平流项以负值为主,伸展项以正值为主,伸展项代表的水平风场辐合作用对UTCL的涡度增长贡献最大。

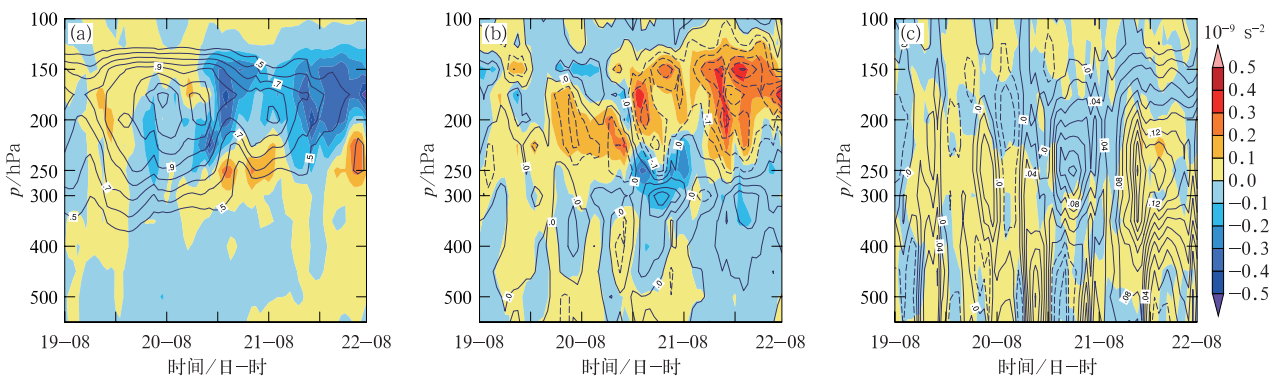


图8 2021年7月19—22日30°~40°N、120°~130°E区域平均(a)相对涡度(等值线,单位: 10^{-5} s^{-1})和平流项(填色), (b)水平散度(等值线,单位: 10^{-5} s^{-1})和伸展项(填色),以及(c)垂直运动(等值线,单位: $10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)和垂直输送项(填色)的时间-高度演变

Fig. 8 Time-height evolutions of (a) relative vorticity (contour, unit: 10^{-5} s^{-1}) with vorticity advection term (colored), (b) horizontal divergence (contour, unit: 10^{-5} s^{-1}) with stretching term (colored), (c) vertical velocity (contour, unit: $10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) with vertical transportation term (colored) averaged on the box of 30°~40°N, 120°~130°E from 19 to 22 July 2021

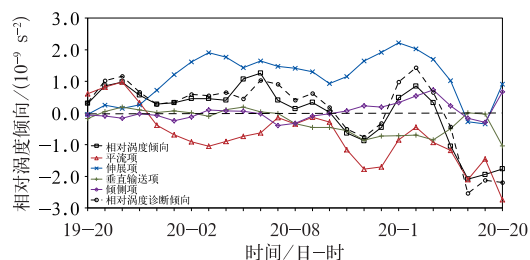


图9 2021年7月19日20时至20日20时200 hPa UTCL中心附近 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $120^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$ 相对涡度方程各项时间演变
Fig. 9 Time evolution of terms in relative vorticity equation averaged on the box of $30^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$ around the center of UTCL circulation at 200 hPa from 20:00 BT 19 to 20:00 BT 20 July 2021

4 UTCL数值可预报性分析

4.1 集合预报天气环流形势和降水预报调整

EC等主流业务模式对河南暴雨过程期间UTCL、副高以及台风烟花的路径和强度都表现出显著的预报调整和预报不连续,天气系统位置、强度不确定性也导致河南暴雨具有高度预报不确定性。

对比EC-EPS不同起报时刻的20日08时200 hPa环流形势,7月16日20时起报的环流形势(图10a)与ERA5分析场(图5a)相比,UTCL中心

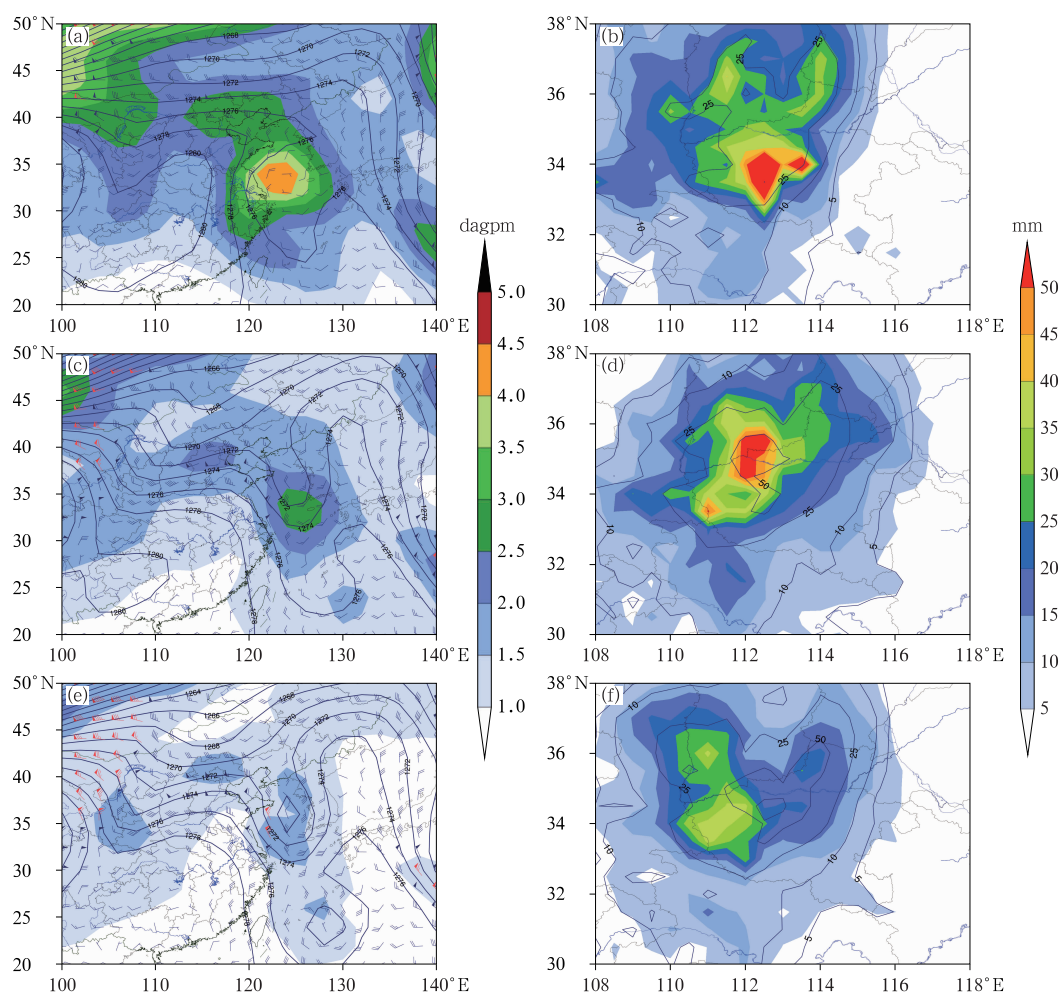


图10 2021年7月(a,c,e)20日20时200 hPa集合平均风场(红色风羽为风速 $>25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)、位势高度场(等值线,单位:dagpm)和离散度(填色),(b,d,f)20日08时至21日08时累计降水量集合平均(等值线,单位:mm)和离散度(填色)
(a,b)16日20时起报,(c,d)17日20时起报,(e,f)18日20时起报

Fig. 10 (a, c, e) Ensemble-mean wind (red wind barb: wind speed over $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), geopotential height (contour, unit: dagpm) with spread (colored) at 200 hPa at 20:00 BT 20 July; (b, d, f) ensemble-mean precipitation (contour, unit: mm) and spread (colored, red barbs: wind speed over $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) from 08:00 BT 20 to 08:00 BT 21 July from EC-EPS forecast cycles initialized at 20:00 BT of (a, b) 16, (c, d) 17 and (e, f) 18 July 2021

位置偏南、环流偏弱,位势高度离散度高值区位于 UTCL 环流中心偏西侧,表明 UTCL 具有较高预报不确定性。17 日 20 时起报(图 10c)、18 日 20 时起报(图 10e)的 UTCL 环流中心向偏北方向调整但中心经度变动不大,同时位势高度降低明显,环流中心东西两侧急流有明显增强。此外,河套地区高空槽东移略有加快、系统经向度增大;日本上空的阻塞高压也在逐步增强。EC-EPS 形势预报调整趋势整体表现为东亚地区高空天气系统振幅和环流强度增强、系统位相变动不大。

从 EC-EPS 不同起报时刻的 20 日累计降水量预报集合平均和离散度分析(图 10b, 10d, 10f),河南暴雨降水落区均较实况显著偏西、强度均显著偏弱,强降水落区和强度具有高度不确定性;随着天气系统预报调整,20 日降水量预报增大、暴雨区范围有向东扩展趋势,其中 18 日 20 时起报的暴雨落区预报与实况较为接近,但集合平均降水量较实况显著偏小;降水量离散度中心与集合平均显著分离,体现了降水落区具有高度不确定性。

4.2 集合预报成员分组对比

基于集合成员分组环流对比,可对比分析 UTCL 对天气形势的影响。以 20 日 08 时 UTCL 中心附近区域平均相对涡度作为基准,计算各个成员 UTCL 区域平均相对涡度的距平(图 11),第 20、22、36 和 49 号集合成员对应较强 UTCL 环流,记为 C1 组;第 25、31、45 和 47 号成员对应较弱的 UTCL 环流,记为 C2 组。

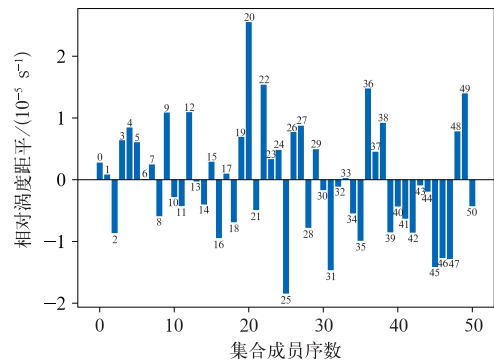


图 11 2021 年 7 月 20 日 08 时 EC-EPS(19 日 20 时起报)各成员预报 UTCL 区域平均(30°~40°N、120°~130°E)

相对涡度距平(图上数字代表集合成员序号)

Fig. 11 Relative vorticity anomaly averaged on box of (30°-40°N, 120°-130°E) from members of EC-EPS at 08:00 BT 20 initialized at 20:00 BT 19 July 2021

(The number on the bar graph represents the corresponding ordinal number of EC-EPS members)

C1 与 C2 组 200 hPa 高度场差异表明(图 12a),由于 C1 组成员中 UTCL 位势高度更低、环流更强,因此 UTCL 环流区对应的高度场差值为负值区,C1 组成员 UTCL 西侧高空急流较 C2 组成员平均高出 6~14 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;在河南中北部上空的风场差异表现为反气旋性风场,有利于辐散流出。此外,河套地区高度场差异表明 C1 组成员中高空槽位置更为偏东,同样有利于加强河南上空的辐散流出。对比 C1、C2 组低层 850 hPa 环流(图 12b),由于 C1 组成员中有较强的 UTCL 环流,对应中高层有更强的

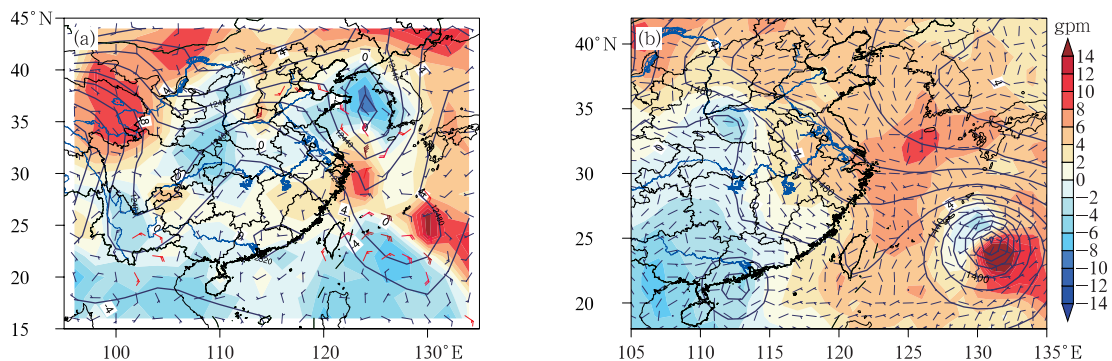


图 12 2021 年 7 月 20 日 08 时 EC-EPS(19 日 20 时起报)(a)200 hPa 和(b)850 hPa 上 C1 组成员平均位势高度场(等值线,单位:gpm),以及 C1 与 C2 组成员平均高度场差异(填色)和风场差异

Fig. 12 Mean geopotential height (contour, unit: gpm) of C1 group, and geopotential height difference (colored) and wind difference between C1 and C2 groups at (a) 200 hPa and (b) 850 hPa at 08:00 BT 20 initialized at 20:00 BT 19 July 2021 from EC-EPS

下沉运动,造成我国东部海区位势高度场升高,有利于 30°N 附近的副高增强,因此 C1 组成员在 UTCL 环流中心南侧的低层偏东气流有所增强,有利于从东部海区向我国内陆黄淮地区的水汽输送;河南暴雨关键区出现了气旋式环流异常,有利于 C1 组预报出较强降水。

4.3 降水预报集合敏感性分析

在集合预报空间中,以降水关键区 20 日 08—20 时区域平均降水量作为预报目标,以 200 hPa 位势高度场作为预报因子,降水预报对高空形势的集合预报敏感性可定义为(王毅等,2020):

$$ESA = \frac{\text{cov}(J, x_t)}{\sqrt{\text{var}(x_t)\text{var}(J)}}$$

上述公式在集合预报空间中进行计算诊断,其中 J 为集合成员的关键区区域平均降水量, x_t 为预报 t 时刻的 200 hPa 高度场, cov 为协方差算子, var 为方差算子, ESA 即为预报目标对 t 时刻集合预报变量的敏感性,形式上与相关系数一致。20 日 08 时预报敏感区分布与天气系统配置关系密切(图 13),在 105°E 附近的河套短波槽活动区域,高预报敏感区相对槽线位置表现为准对称分布,因此关键区降水与短波槽的空间位置具有较高预报相关性。在黄淮高压脊和 UTCL 环流系统附近,高预报敏感区与天气系统环流中心轴线的空间位置基本一致,因此关键区降水与对应天气系统波动的强度具有较高预报相关性。总体而言,当河套短波槽位置偏东、黄淮高压脊和 UTCL 环流经向度更大时,有利于河南预报关键区出现更强降水,与通过集合预报 UTCL 环流特征分组对比分析的结论基本一致。

5 结论与讨论

“21·7”河南极端暴雨过程受多尺度天气系统的共同影响,其中 UTCL 对河南暴雨过程中天气系统的稳定维持、高空辐散增强等方面有重要作用,并与副高、台风等天气系统有复杂的相互影响,综合以上分析得出河南极端暴雨概念模型(图 14)及主要结论,供今后暴雨预报参考。

(1)概括描述了河南极端暴雨期间的天气系统配置模型。在台风烟花和副高共同作用下,从东海至黄淮地区形成持续性偏东风水汽输送,在河南中西部地形抬升及中尺度低涡等因素共同作用下形成

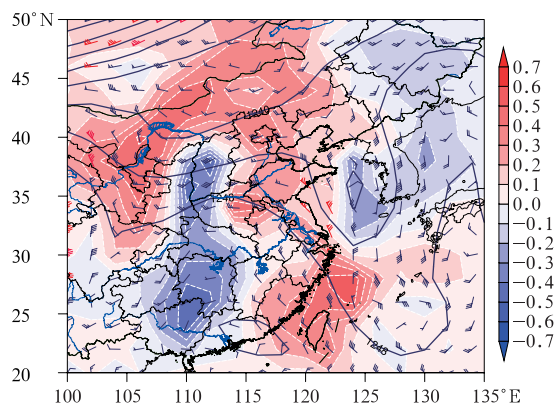


图 13 2021 年 7 月 20 日 08 时 EC-EPS(19 日 20 时起报) 200 hPa 集合平均高度场(等值线,单位: dagpm), 风场和关键区降水量集合预报敏感性(填色)
Fig. 13 EPS-mean geopotential height (contour, unit: dagpm) and wind at 200 hPa with ensemble sensitivity (colored) at 08:00 BT 20 initialized at 20:00 BT 19 July 2021 from EC-EPS

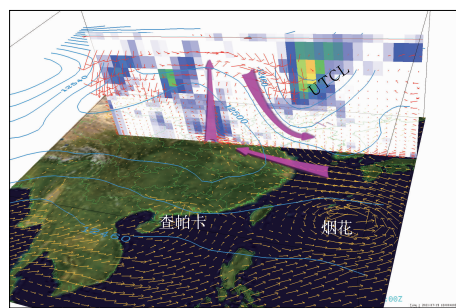


图 14 河南“21·7”极端暴雨三维天气概念模型 (黄色箭头为 925 hPa 风场、蓝线为 200 hPa 高度场, 粉色粗箭头: 显著气流, 填色和红色箭头为过郑州站 34.75°N 垂直截面上的正相对涡度和合成垂直风场)
Fig. 14 Concept model for the “21·7” extreme rainstorm event in Henan Province (yellow arrow: horizontal wind on 925 hPa, blue line: geopotential height on 200 hPa, pink thick arrow: dominant airflows; colored and red arrow represent positive relative vorticity and flow vectors on the vertical section along 34.75°N near Zhengzhou Station, respectively)

对流活动;暴雨区对流上升的高空辐散流出气流与 UTCL 西侧高空急流汇合,从而构成高低空急流的紧密耦合。

(2)此次过程中的 UTCL 由太平洋中部长波槽扰动切断、西移形成。19—22 日河南极端暴雨过程期间,河套高空短波槽、黄淮高压脊、UTCL 以及日本海阻塞高压形成准静止波列,由于 UTCL 在我国东部海区上空停滞,导致高层西风在黄淮地区维持

大尺度辐散分流。此外,UTCL 东侧急流增强了台风烟花的高层流出,有利于台风加强进而影响河南暴雨区水汽输送;UTCL 引起的高空下沉运动增强了副高的稳定性,间接增强了从东部海区向内陆黄淮地区的偏东风水汽输送。

(3) 此次过程中 UTCL 具有明显预报不确定性。连续 3 个预报循环中 UTCL 中心经度位置变动不大,但环流强度显著增强;集合预报中具有较强 UTCL 环流的成员组在河南暴雨区上空有更清楚的反气旋环流,UTCL 中心下方对流层低层的偏东风也更强,对河南强降水均较为有利;基于集合预报敏感性的分析进一步证实了上述结论。

通过此次河南极端暴雨期间高空环流形势进行分析,初步揭示了以往天气环流诊断分析和业务预报中关注较少的 UTCL 系统的重要作用。但 UTCL 作为对流层高层的天气环流系统,观测资料较少,预报不确定性较高,其与上下游、高低层天气系统之间的复杂相互作用仍需进一步深入分析。

参考文献

- 陈涛,孙军,湛芸,等,2019. 广州“5·7”局地突发特大暴雨过程的数值可预报性分析[J]. 气象,45(9):1199-1212. Chen T, Sun J, Chen Y, et al, 2019. Study on the numerical predictivity of localized severe mesoscale rainstorm in Guangzhou on 7 May 2017 [J]. Meteor Mon, 45(9):1199-1212(in Chinese).
- 丁一汇,1994. 暴雨和中尺度气象学问题[J]. 气象学报,52(3):274-284. Ding Y H, 1994. Some aspects of rainstorm and meso-scale meteorology[J]. Acta Meteor Sin, 52(3):274-284(in Chinese).
- 丁一汇,2015. 论河南“75·8”特大暴雨的研究:回顾与评述[J]. 气象学报,73(3):411-424. Ding Y H, 2015. On the study of the unprecedented heavy rainfall in Henan Province during 4—8 August 1975: review and assessment[J]. Acta Meteor Sin, 73(3):411-424(in Chinese).
- 李泽椿,湛芸,张芳华,等,2015. 由河南“75·8”特大暴雨引发的思考[J]. 气象与环境科学,38(3):1-12. Li Z C, Chen Y, Zhang F H, et al, 2015. Consideration by “75·8” extreme heavy rainfall event in Henan[J]. Meteor Environ Sci, 38(3):1-12(in Chinese).
- 苏爱芳,席乐,吕晓娜,等,2022. 豫北“21·7”极端暴雨过程特征及成因初探[J]. 气象,48(5):556-570. Su A F, Xi L, Lyu X N, et al, 2022. Preliminary analysis on characteristics and causes of the July 2021 extreme rainstorm in Northern Henan[J]. Meteor Mon, 48(5):556-570(in Chinese).
- 陶诗言,1980. 中国之暴雨[M]. 北京:气象出版社:147-166. Tao S Y, 1980. Rainstorms in China[M]. Beijing: China Meteorological Press:147-166(in Chinese).
- 王毅,张晓美,陶亦为,等,2020. 基于集合预报的台风利奇马登陆后远距离暴雨预报的敏感性分析[J]. 气象科学,40(1):22-29. Wang Y, Zhang X M, Tao Y W, et al, 2020. Sensitivity analysis of the long-distance rainstorm forecast after the landfall of Typhoon Lekima based on ensemble forecast[J]. J Meteor Sci, 40(1):22-29(in Chinese).
- 汪小康,崔春光,王婧羽,等,2022. “21·7”河南特大暴雨水汽和急流特征诊断分析[J]. 气象,48(5):533-544. Wang X K, Cui C G, Wang J Y, et al, 2022. Diagnostic analysis on water vapor and jet characteristics of the July 2021 severe torrential rain in Henan Province[J]. Meteor Mon, 48(5):533-544(in Chinese).
- 许映龙,吕心艳,张玲,等,2015. 1323 号强台风菲特特点及预报难点分析[J]. 气象,41(10):1222-1231. Xu Y L, Lv X Y, Zhang L, et al, 2015. Analysis on the characteristics and forecasting difficulty of severe Typhoon Fitow (No. 1323) [J]. Meteor Mon, 41(10):1222-1231(in Chinese).
- 杨浩,周文,汪小康,等,2022. “21·7”河南特大暴雨降水特征及极端性分析[J]. 气象,48(5):571-579. Yang H, Zhou W, Wang X K, et al, 2022. Analysis on extremity and characteristics of the “21·7” severe torrential rain in Henan Province[J]. Meteor Mon, 48(5):571-579(in Chinese).
- Chen G T J, Chou L F, 1994. An investigation of cold vortices in the upper troposphere over the western North Pacific during the warm season[J]. Mon Wea Rev, 122(7):1436-1448.
- Chen T C, Yen M C, Liu G R, et al, 2001. Summer upper-level vortex over the North Pacific[J]. Bull Amer Meteor Soc, 82(9):1991-2006.
- Colton D E, 1973. Barotropic scale interactions in the tropical upper troposphere during the northern summer[J]. J Atmos Sci, 30(7):1287-1302.
- Holton J R, 2004. An Introduction to Dynamic Meteorology[M]. 4th ed. London: Elsevier Academic Press:103.
- Kelley W E Jr, Mock D R, 1982. A diagnostic study of upper tropospheric cold lows over the western North Pacific[J]. Mon Wea Rev, 110(6):471-480.
- Palmer C E, 1953. The impulsive generation of certain changes in the tropospheric circulation[J]. J Atmos Sci, 10(1):1-9.
- Riehl H, 1948. On the formation of typhoons[J]. J Atmos Sci, 5(6):247-265.
- Schumacher R S, Clark A J, Xue M, et al, 2013. Factors influencing the development and maintenance of nocturnal heavy-rain-producing convective systems in a storm-scale ensemble[J]. Mon Wea Rev, 141(8):2778-2801.
- Thorncroft C D, Hoskins B J, McIntyre M E, 1993. Two paradigms of baroclinic-wave life-cycle behaviour[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 119(509):17-55.
- Torn R D, Hakim G J, 2008. Ensemble-based sensitivity analysis[J]. Mon Wea Rev, 136(2):663-677.
- Wang M Y M, Chen G T J, Wang C C, et al, 2012. A case study of the cutoff process and latent heating effect in an upper-level cold-core low during the Mei-Yu season in East Asia[J]. Mon Wea Rev, 140(6):1725-1747.

(本文责编:王蕾)