"21.7"河南暴雨暖湿季风输送带加强 1 及关键天气流型的准地转位涡反演 2 谢作威^{1*}, 布和朝鲁¹, 诸葛安然¹, 连汝续¹, 廖振杨², 阎洁³ 3 1 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029 4 5 2 浙江省杭州市萧山区气象局,浙江 311200 6 3 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206 7 4 中国气象局人工影响天气中心,北京 100081 摘要 本文使用站点降水资料和欧洲中期天气预报中心第五代再分析数据,利用 8 准地转位涡分部反演,重点分析了"21.7"河南暴雨中暖湿季风输送带加强的机 9 理及其关键环流特征。结果表明:副热带高压持续西伸至中国东部地区,其西南 10 部宽广的东南风将暖湿气流和河南地区高位涡输送至西北地区;同时,西北地区 11 阿拉善高原热低压受感热加热而加强,在近地面层及其东侧的河套地区对流层中 12 低层(750-650 hPa)产生正位涡异常,与河南地区低压环流形成大范围高位涡 13 异常,从而与副热带高压形成较大范围的对峙。准地转位涡反演结果表明,对流 14 层中低层这一天气流型导致河南南部南风的加强,有效地将高温高湿的气块输送 15 至河南地区,成为7月20日极端暴雨发生的关键因子之一。对于7月20日河南 16 地区的南风,主要来自于副热带高压的贡献,其次是河套地区对流层中低层高位 17 涡异常,而河南局地低压环流的贡献略小。 18 关键词 河南暴雨 暖湿输送带 位涡反演 副热带高压 低压 19

- 20 文章编号 2022039C
- 21 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2205.22093

收稿日期 2022-02-17; 网络预出版日期

* 通讯作者 谢作威, 男, 1986年出生, 副研究员, 主要从事中高纬大气动力学研究。E-mail: xiezuowei@mail.iap.ac.cn.

Funded by National Natural Science Foundation of China (41630424 and 41875078); Huaneng Group Technology Project (Phase 1) "Offshore Wind Power and Intelligent Energy System" (HNKJ20-H88)

资助项目 国家自然科学基金项目(41630424 和 41875078);华能集团总部科技项目"海上风电与智慧能源 系统"科技专线(一期)(HNKJ20-H88)

| 22 | An intensification of warm and moist convey belt of Asian summer |
|----|--|
| 23 | moonson in "21.7" Henan rainstorm and its key circulation from |
| 24 | quasi-geostrophic potential vorticity perspective |
| 25 | XIE Zuowei ¹ , BUEH Cholaw ¹ , ZHUGE Anran ¹ , LIAN Ruxu ¹ , LIAO Zhenyang ² , YAN Jie ³ , |
| 26 | LIN Dawei ¹ |
| 27 | 1 International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, |
| 28 | Beijing 100029 |
| 29 | 2 Hangzhou Xiaoshan Meteorological Bureau, Zhengjiang, 311200 |
| 30 | 3 State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power |
| 31 | University, Beijing 102206 |
| 32 | 4 China Meteorological Administration Weather Modifcaition Centre, Beijing 100081 |
| 33 | Abstract This study uses rain-gauge observation data, the fifth reanalysis dataset of the |
| 34 | European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, and the piecewise quasi-geostrophic |
| 35 | potential vorticity (QGPV) inversion to mainly investigate the intensification of warm and moist |
| 36 | convey belt of Asian summer monsoon in the "21.7" Henan rainstorm and its key circulation. The |
| 37 | result shows that the continually westward extension of the subtropical high covered eastern China, |
| 38 | in whose southwestern flank broad southwesterlies transported not only warm and moist air mass |
| 39 | but also high QGPV over Henan to northwestern China. Meanwhile, in northwestern China, the |
| 40 | sensible heating of the Alxa Plateau maintained and deepened the local thermal low, which |
| 41 | generated high QGPV anomalies in the near-surface layer of the low pressure center and the |
| 42 | middle and low troposphere (750-650 hPa) over the Hetao area. As a result, such high QGPV |
| 43 | formed an extensive high QGPV with the low pressure circulation over Henan, which yielded an |
| 44 | extensive confrontation with the subtropical high. The QGPV inversion results show that such |
| 45 | meteorological circulation pattern in the middle and lower troposphere intensified the southerly |
| 46 | wind over Henan. The amplified southerly effectively transported hot and humid air mass to the |
| 47 | Henan region, which was one of the key factors for the extreme downpour on 20 July. The |
| 48 | southerly over Henan on 20 July is primarily contributed by the subtropical high with secondary |
| 49 | contributions from the positive QGPV anomaly at middle and low troposphere over Hetao, while |
| 50 | the contribution of the local low pressure circulation over Henan is slightly smaller. |
| 51 | Key Words Rainstorm, warm convey belt, potential vorticity inversion, Subtropical high, low |

52 pressure

53 1 引言

| 54 | 环流多尺度相互作用和有利的地形使河南地区于 2021 年 7 月 18-21 日遭遇 |
|----|---|
| 55 | 了历史上罕见的极端暴雨,简称"21.7"河南暴雨(河南极端暴雨研究小组,2021)。 |
| 56 | 与"75.8"极端暴雨相类似,这次暴雨也具有持续时间长、累积雨量大和强降水 |
| 57 | 范围广的特点(丁一汇,2015,2019;苏爱芳等,2021)。此次极端暴雨以20日 |
| 58 | 最为明显,郑州单日降水量为 624.1 mm,在 15-18 时有 12 站小时降水量超过 100 |
| 59 | mm 的极端短时强降水,给人民生命财产安全和社会经济带来了巨大的损失,引 |
| 60 | 起了国家的高度重视(Fu et al., 2022; Li et al., 2022)。 |
| 61 | 丁一汇(2015, 2019)指出暖湿季风输送带是华北地区发生大暴雨或极端降 |
| 62 | 水的必要条件,这种暖湿季风输送带是热带辐合带及其关联的夏季风明显加强北 |
| 63 | 推的结果,它把低纬度的水汽和热量持续输送到华北地区。稳定大尺度背景环流 |
| 64 | 下的多条水汽供应及辐合,造成了"21.7"河南极端暴雨(Yin et al., 2021)。黄 |
| 65 | 淮地区低压东南侧的西南气流和副热带高压与台风"烟花"之间的东南气流是此 |
| 66 | 次极端暴雨的两条异常强盛的水汽输送带,这两条水汽输送带在太行山和嵩山地 |
| 67 | 形阻挡下汇合在河南北部,为极端暴雨供应充沛的水汽(冉令坤等,2021;张霞 |
| 68 | 等,2021)。与东南气流相比,西南气流的可降水量偏高(冉令坤等,2022),且 |
| 69 | 进入河南气块的轨迹也偏多(Nie and Sun, 2022)。对于 20 日极端性降水来说, |
| 70 | 在这两条水汽中,河南南部的经向水汽通量带(850 hPa 以上)有明显的加强, |
| 71 | 这为极端降水提供了更有利的水汽供应(布和朝鲁等, 2022)。在上述研究中, |
| 72 | 都注意到了 20 日有明显的偏南风加强,实际上它是形成含水量极高暖湿季风输 |
| 73 | 送带的直接原因。 |

强偏南风不仅为河南暴雨输送了暖湿气流,也为发生暴雨的天气系统提供了 74 有利的动力条件(齐道日娜等,2022;苏爱芳等,2022)。低涡、切变线、中低 75 层低槽和锋面等是河南暴雨的主要天气系统(罗亚丽等, 2020; 梁钰等, 2020; 76 冉令坤等, 2021)。在"21.7"极端暴雨过程中, 东风和偏东南风在河南地区低 77 层形成稳定少动的切变线;同时,加强的偏南风低空急流,其西侧的强烈气旋式 78 切变,有利于黄淮地区低压的形成和维持;而对流层中低层的切变线和低压是此 79 次极端暴雨的主导系统(苏爱芳等, 2021, 2022; 齐道日娜等, 2022)。上述研 80 究还指出,南支气流与低层偏东气流形成对峙,使河南地区处于中性层结,有利 81 82 于上升运动的维持和发展,进而造成极端降水事件;同时,偏南气流不仅有利于 河南南部的高涡度平流至郑州地区,还有利于多个分散单体快速北移至郑州地区。 83 数值模拟研究表明,准确刻画出这支对流层中低层的偏南气流可准确预报出极端 84 85 降水的落区(Xu et al., 2022)。

综上所述,暖湿季风输送带对极端暴雨非常重要。而对它的加强原因,已有 86 研究关注到了热带系统的作用,如热带辐合带的北推、南支槽的向南加深和季风 87 涌的季节内低频振荡等(柳艳菊等, 2015; 丁一汇, 2019)。但仅以热带系统难 88 以解释中纬度河南南部地区在 20 日偏南风 "突然"加强的现象。同时,近年来 89 90 国内外发现,中高纬大气环流系统和对流层中高层波破碎对暖湿输送带或大气河 形成起着很重要的作用(Zhang et al., 2017, 2022; 张若楠等, 2018; 丁一汇, 2019; 91 Wang et al., 2021; 布和朝鲁等, 2022)。那么, "21.7" 极端暴雨的暖湿季风输送 92 带中偏南风的加强,主要是来自高层还是低层环流的贡献?具体是什么环流的影 93 响?同时,这种高湿高温的气流往中高纬输送过程中,是否有来自于潜热释放后 94

95 对环流的反馈作用使得偏南风加强?围绕上述三个问题,本文以"21.7"极端暴雨
96 河南地区偏南风加强为研究对象,使用准地转位涡反演考察逐层环流对偏南风加
97 强的贡献,分析关键层次的环流对偏南风加强的作用,力图为河南等华北地区的
98 极端暴雨发生机理提供一些新的线索和依据。

- 99 2 资料和方法
- 100 2.1 资料



本文使用的降水量资料为国家气象科学数据中心提供的中国地面气象站逐 101 小 时 观 测 资 料 共 2170 详 见 个 站 点 102 http://data.cma.cn/data/detail/dataCode/A.0012.0001.html。逐日累积降水量为 08 时 103 (UTC+8) 至次日 08 时(UTC+8) 的逐小时降水量之和。 104

本文使用的再分析资料为同期欧洲中期天气预报中心提供的第五代大气再 105 分析全球气候数据(ERA5; Hersbach et al., 2020), ERA5 是欧洲中期天气预报 106 中心的 Integrated Forecast System 的四维变分资料同化和 CY41R2 模型预报产生 107 的。本文所采用的分析资料包括地表平均感热通量、气压层的三维风场、比湿及 108 位势场和模式层的非绝热加热率,水平分辨率为1°×1°。气压层的垂直分辨率为 109 1000 hPa 至 100 hPa 之间每隔 50 hPa 取一层,共 19 层,时间分辨率为一日四次。 110 而模式层的非绝热加热资料在垂直方向上共 137 层 111 (https://confluence.ecmwf.int/display/UDOC/L137+model+level+definitions), 为模 112 式预报结果,该非绝热加热率考虑了长短波辐射、垂直扩散、大尺度凝结和对流 113 加热等诸多物理过程的参数化方案,但没有考虑数值耗散的影响。我们使用德国 114 马普气象研究所的 Climate Data Operators 软件的"ml2pl"参数将模式层资料插 115 值到上述 19 层气压层上,为了使非绝热加热的累计效应更为精确,使用逐小时 116 资料进行累加。 117

119本文采用准地转位涡分部反演来描述不同层次位涡对某一层次环流异常的120贡献 (Nielsen-Gammon and Leferver, 1996; Evans and Black, 2003; 施宁和布和朝121鲁, 2015; Xie et al., 2019), 位涡异常的计算公式为:122 $q' = \frac{1}{fa^2 cos^2 \varphi} \frac{\partial^2 \Phi'}{\partial \lambda^2} + \frac{1}{a^2 cos \varphi} \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi} \left(\frac{cos \varphi}{f} \frac{\partial \Phi'}{\partial \varphi} \right) + f \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{1}{\sigma_p} \frac{\partial \Phi'}{\partial p} \right) = \mathcal{L}(\Phi')$ (1)

123 其中 ϕ '为相对于 1991–2020 气候平均的位势高度异常, σ_p 为标准大气的静力稳定 124 度参数, ϕ 、 λ 分别表示纬度和经度,a代表地球半径,f为科氏力参数。可见, 125 准地转位涡为位势高度的类拉普拉斯算子(L),在合理的边界条件下,位势高度 126 异常可以通过位涡反演而来,与 Evans and Black (2003)一致, $L(p_0)$ 和下(p_t) 127 边界的位温异常作为位涡的强迫项:

$$q' - \left(f \frac{\theta'}{\frac{d\theta_{ref}}{dp}}\right) \delta(p - p_0) + \left(f \frac{\theta'}{\frac{d\theta_{ref}}{dp}}\right) \delta(p - p_t) = \mathcal{L}(\Phi') \quad (2)$$

129 其中 θ' 和 θ_{ref} 分别为位温异常和标准大气位温, $\delta(x) = \begin{cases} 0, x \neq 0 \\ 1, x = 0 \end{cases}$,在实际计算过程 130 中,公式1中的垂直偏导项无法在边界上继续差分,因此,我们通过静力平衡把 131 上下边界条件的温度强迫包含在了冯伊曼边界条件,并移到了公式1的左边,即 132 公式2。位涡反演具体计算过程详见 Nielsen-Gammon and Leferver (1996)的附 133 录部分。

134 本文还使用了 Evans and Black (2003)由非绝热加热造成的位势高度倾向,
 135 计算公式为:

 $\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \mathcal{L}^{-1}\left(\frac{\partial q}{\partial t}\right) = \mathcal{L}^{-1}\left[f\frac{\partial}{\partial p}\left(\frac{-QR}{\sigma_n p}\right)\right] \quad (3)$

136

128

137 其中 Q 为非绝热加热率, R 为气体常数, 边界条件同样为冯伊曼边界条件。

138 3 结果

139 3.1 降水和风场分布特征

已有研究表明(冉令坤等, 2021; 苏爱芳等, 2021; 齐道日娜等; 2022), 140 此次河南极端暴雨过程具有持续时间长、范围广、累积雨量大、短时降水强等特 141 征。图1所示为此次极端暴雨过程的日累计降水分布特征,使用国家气象中心预 142 报技术研发室检验科研发的 meteva 程序库中的 cressman 插值算法把站点资料插 143 值到了格点上。日累计降水量分析表明,暴雨在18日主要分布于河南的周边地 144 区(图 1a), 19 日聚集在河南中南部地区(图 1b), 20 日暴雨中心移至郑州,郑 145 州地区平均降水量超过 500 mm (图 1c), 21 日暴雨区域向北扩展,中心北移至 146 河南北部(图1d)。 147

2021 年 7 月 18 日-21 日逐日 08 时至次日 08 时累积降水量 (单位: mm day⁻¹), (a) - (d) 148 图 1 分别为18日、19日、20日和21日 149 Figure 1 Daily accumulated precipitation (units: mm day¹) during the period from 08 (UTC+8) to 08 150 151 (UTC+8) of the following day for 18–21, July 2021. (a)–(d) are for 18, 19, 20 and 21, respectively 152 对于这样大范围和高强度的极端暴雨,特别是 20 日,大气环流对水汽的输 153 送和组织尤为重要。布和朝鲁等(2022)研究表明,河南南侧 850 hPa 以上的强 154 经向水汽通量带在 20 日河南极端暴雨中起着非常重要的作用。为了考察这一经 155 向风的特征,图2给出了7月18-21日800hPa逐日平均比湿场和水平风场。18 156 日(图2a),有一明显的湿舌由缅甸沿着青藏高原东麓向北伸至黄土高原和河南 157 地区,这表明,东亚夏季风或暖湿季风输送带向北推至我国北方,将暖湿气流源 158 源不断供应至北方地区。在这一湿舌内,18 日至 21 日由西南风逐渐转为南风。 159

160 同时,我国南部沿海的台风"查帕卡"逐渐西行,其携带的暖湿气流与西南季风
161 的湿舌合并,为河南暴雨进一步提供了水汽来源。而在该湿舌的东北侧,有一宽
162 广的东南风分布于东海至内蒙古地区(图 2a)。随着副热带高压的西伸和台湾东
163 部海面上台风"烟花"的西进,该东南风逐渐加强向西南和东北扩展,将湿舌进
164 一步向北推至河套地区(图 2b-d)。



167 和黄河,灰色为 3000 m 以上的青藏高原

Figure 2 Daily mean 800-hPa specific humidity (shaded, units: kg kg⁻¹) and horizontal wind (arrows, units: m s⁻¹) on (a) 18, (b) 19, (c) 20 and (d) 21 July, 2021. The red and two black curved lines mark the boundary of Henan Province, Changjiang and Huanhe rivers, respectively. The gray shaded area designates the Tibet Plateau above 3000 m

172

值得注意的是,随着这一宽广的东南风逐渐向西南扩展,在河南地区南风逐 173 渐加强和向北推进,并与这一东南风形成切变线。19日至20日,长江中游地区 174 的偏南风明显加强并向北移至河南中部地区,河南中部地区切变线特征明显(图 175 2c),恰好对应着极端降水中心(图 1c)。在 21 日(图 2d),南风进一步向北推 176 进,与之对应,切变线移至河南北边的省界,极端降水中心也向北移动(图1d)。 177 河南地区的东南风向南风的转变,对水汽的输送起着重要的作用。布和朝鲁等 178 (2022)的研究结果表明, 19日至20日,由东向西进入河南东侧的高湿气块轨 179 迹数量减少一半以上,而由南向北进入河南南侧的高湿气块轨迹数量增加了近一 180 倍,这一转变,更有效地将南边高湿的水汽输送至河南地区。本文提及的800hPa 181 东南风和南风的切变线,与齐道日娜等(2022)所指出的 850 hPa 东南风与东风 182

183 的切变线并不相矛盾,这主要是由于经向风和纬向风的垂直分布差异造成的。由184 下文水平风垂直剖面分析可知,在对流层中低层,东风中心位于 850 hPa 附近,

185 而南风中心位于 800 hPa 附近。

布和朝鲁等(2022)发现,由河南南侧进入的高湿气块轨迹线主要位于对流 186 层 850-700 hPa, 而东侧进入的轨迹线主要位于对流层 900-850 hPa。那么, 河南 187 地区的风场有什么样的垂直分布特征,导致了进入河南地区的轨迹线数量在不同 188 层次上的变化,以及造成了切变线在不同层次不同方向的切变?此外,与气候态 189 相比,风场的异常是否出现在平均的大值区?为了回答这些问题,图3给出了河 190 191 南地区(31-36°N, 110-116°E)区域平均的风场及其异常的气压--时间剖面图。 整体上,暴雨期间河南地区的东风和南风明显加强,南风的加强分布于对流层低 192 层至高层,而东风的加强主要出现在对流层中低层。 193

就经向风而言,在18日,北风转为南风首先出现于对流层低层,然后是对 194 流层中层(图 3a),而其异常仍主要为北风(图 3b)。在19日,南风进一步加强, 195 高度可至 150 hPa,有两个中心分别位于 800 hPa 和 250 hPa 附近,南风异常整体 196 197 分布的气压层略偏高,异常中心分别为 750 hPa 和 200 hPa 附近。在 20 日,低层 南风中心达到了峰值,平均强度为8ms⁻¹,其异常值为5ms⁻¹,正与河南极端暴 198 雨时段相对应。尽管高层南风也显著加强,但在 21 日初达到了峰值。之后,整 199 层南风迅速减弱,在22日为北风异常。尽管有很明显的非地转风,但准地转风 200 的分布特征与实际风场比较相似,也能反映出 20 日对流层中低层南风加强这一 201 关键特征。 202

203 与南风明显不同的是,东风主要出现在对流层中低层(图 3c),并且其范围
204 由 400 hPa 以下逐渐缩小到了 20 日晚的 750 hPa 以下,其中心主要位于 850 hPa
205 附近。纬向风异常整层基本为偏东风,其强度表现出自上而下逐步减弱的分布特
206 征,18 日东风异常中心位于对流层中高层,而后主要分布于对流层中低层。尽
207 管 20 日对流层低层有东风及其异常中心,但其异常较 19 日有所偏弱。这表明,
208 对于 20 日的河南极端暴雨而言,南风的加强可能更为重要。

研究表明,在河南暴雨过程中,对流层中层有低压活动(苏爱芳等,2021; 209 Yin et al., 2022), 那么对流层中层南风是否受其影响而使得区域平均值偏小呢? 210 实际上,在 500 hPa,低压中心主要位于河南地区的外围,18 日为东南侧,19 日 211 为西侧, 20--21 日为西北侧(苏爱芳等, 2021), 因此, 河南区域平均风场基本 212 上没有受到低压中心两侧不同方向风场相互抵消的影响。另外,在20-21日,受 213 副热带高压西伸的影响,5840 gpm 等值线已伸至河南南侧地区(齐道日娜,2022), 214 并且该地区在 400 hPa 有闭合高压中心 (图略),这种高低压配置使得河南地区 215 在对流层中层以纬向风为主,经向风较弱。而在对流层高层,受河套槽或反气旋 216 式波破碎的影响(苏爱芳等, 2021; 布和朝鲁等, 2022),河南地区有明显的南 217 风。因此,南风在对流层低层和高层分别有一中心。 218

219 综上所述,河南以南地区有明显的偏南风加强,一方面它将高温高湿空气输
220 送至河南地区,另一方面与副热带高压边缘的东南气流形成切变线,特别是 20
221 日,这两者共同为极端暴雨提供了非常有利的条件。与偏东风相比,南风及其加
222 强不仅仅出现在对流层低层,而且向上扩展至 150 hPa 高度,可见,它可能对极
223 端暴雨起着更为重要的作用。

图 3 河南地区 (31–36°N, 110–116°E) 区域平均的经向风 (a, 单位 m s⁻¹)及其异常 (b)
和纬向风 (c)及其异常 (d) 的气压—时间剖面图,其中填色和等值线分别为原始风场和地
转风,等值线间隔为 1 m s⁻¹
Figure 3 The pressure-time corss section areal mean of (a) meiridional wind (units: m s⁻¹) and (b) its
anomaly and (c) zonal wind and (d) its anomaly over the Henan region (31–36°N, 110–116°E).
Shading and countour are wind and geostrophic wind, respectively. The interval of contour is 1 m s⁻¹

231 3.2 南风异常及其主导环流



232 根据 3.1 节分析, 20 日南风的加强对极端暴雨尤为重要,同时,地转风场与
233 实际风场的变化也较为相似,也能反映 20 日南风加强这一关键特征。我们采用
234 准地转位涡分部反演,来研究造成这种变化的关键气压层环流。首先,由位势高
235 度异常计算得到准地转位涡异常,然后把逐个气压层的位涡异常反演得到位势高
236 度异常场,最后通过地转近似得到地转风异常。考虑到经向风异常中心所在的气
237 压层较经向风偏高 50 hPa,即由 800 hPa 升至 750 hPa (图 3a 和 3b),我们选取
238 经向风异常中心所在的 750 hPa 气压层来验证准地转位涡反演风场的准确性。

图 4 给出了 750 hPa 地转风异常及其来自于 1000-100 hPa 准地转位涡异常的 239 反演结果。整体而言, 它与上述 800 hPa 风场的分布(图 2) 也较为一致。我国 240 中东部地区,地转风异常和实际风异常的分布比较吻合,其偏差主要表现为南北 241 风异常偏强,这种偏差在低纬度地区更为明显。由准位涡反演得到的地转风异常 242 的分布与地转风异常分布基本一致,偏差主要出现在两个台风环流中。在18-19 243 日期间(图 4a 和 4b),中国东部至河南地区主要为偏东风异常;而在 20 日(图 244 4c),尽管中国东部地区主要为偏东风异常,但河南的中南部地区有明显的偏南 245 246 风异常:偏南风异常在 21 日进一步向北扩展(图 4d)。准地转位涡反演得到的

247 地转风异常略有偏差(图 4e-4h),而河南地区的地转风偏差主要出现在 19-20
248 日,特别是 20 日,在河南的东南和西部地区南风异常偏大1 m s⁻¹,而河南的北
249 部地区南风异常偏小1 m s⁻¹,但这些偏差与地转风和实际风之间的偏差分布相反。
250 尽管准地转位涡反演在河南地区略有偏差,但基本上反映了该地区的风场特征。

251 图 4 2021 年 7 月 (a) 18 日、(b) 19 日、(c) 20 日和 (d) 21 日的 750 hPa 地转风异常场 (箭
252 头,单位: ms⁻¹)和地转经向风偏差 (填色),蓝色曲线为河南省界,黑色曲线分别为长江和黄
253 河,灰色为 3000 m 以上的青藏高原。(e) – (f) 如 (a) – (d),但为准地转位涡反演得到的地
254 转异常风和地转经向风偏差 (填色)

Figure 4 Daily mean 750-hPa geostrophic wind anomaly (arrows, units: m s⁻¹) and ageostrophic meridional wind (shading) on (a) 18, (b) 19, (c) 20 and (d) 21 July, 2021. The blue and two black curved lines mark the boundary of Henan Province, Changjiang and Huanhe rivers, respectively. The gray shaded area designates the Tibet Plateau above 3000 m. (e)-(h) as per (a)-(d), but for geostrophic wind anomaly inverted from QGPV and the bias of meridional geostrophic wind to the original meridional geostrophic wind

261

262 为了考察不同气压层环流对河南地区平均经向风的贡献,我们对 950-150 hPa 逐层准地转位涡异常进行了反演,并利用地转近似计算出了 750 hPa 和 200 263 hPa 地转风异常。考虑到准地转位涡在 950 hPa 和 150 hPa 层次上的垂直方向上 264 二阶差分涉及到边界条件,我们将边界条件的影响(即边界上的热力影响)放入 265 到了这两层中,而在其它层位涡的反演过程中,冯伊曼边界条件中的设为 0。实 266 际上,上边界条件的影响几乎可忽略,而下边界条件有非常强的偏北风影响,使 267 得 950 hPa 准地转位涡对风场的贡献为偏北风。图 5 给出了逐层准地转位涡异常 268 反演得到 750 hPa 和 250 hPa 河南地区(31-36°N, 110-116°E)区域平均的经向 269 风异常。可见,对流层中低层准地转位涡异常对河南地区经向风的贡献主要为南 270 风,而对流层高层及以上的准地转位涡异常对河南地区经向风的贡献为北风。 271

对于河南地区 750 hPa 南风而言,从 18 日至 19 日(图 5a 和 5b),最大的贡 272 献来自于 600 hPa 准地转位涡异常,来自于对流层 900-650 hPa 准地转位涡异常 273 的贡献明显增加,并且在 20 日进一步增加(图 5c),其中 650 hPa 准地转位涡异 274 常对河南地区南风的贡献超过了 600 hPa,成为南风的最大来源,同时,900 hPa 275 准地转位涡对河南地区南风的贡献仅次于 650 hPa。在 21 日(图 5d), 650-600 hPa 276 准地转位涡异常对河南地区南风的贡献明显减弱,而 900 hPa 准地转位涡异常的 277 贡献进一步加强,成为最大的贡献。在这次过程中,高层 300 hPa 及以上的位涡 278 异常对河南地区 750 hPa 南风起着减弱或抵消的作用。 279

不同气压层准地转位涡异常对河南地区 250 hPa 南风的贡献表现出与 750
hPa 相似的特征,尽管主要的贡献来自于对流层中低层,但其幅度较对 750 hPa
的贡献偏弱,这说明对流层中低层不仅是低层南风的主要贡献,也是高层南风的
主要贡献。与 750 hPa 南风来源不同的是,在 20 日和 21 日,高层 200 hPa 的准
地转位涡异常对 250 hPa 河南地区南风起着正的贡献,这可能受到高层受河套槽
或反气旋式波破碎的影响(苏爱芳等, 2021; 布和朝鲁等, 2022)。

286 图 5 2021 年 7 月 (a) 18 日、(b) 19 日、(c) 20 日和 (d) 21 日逐层气压面上的准地转位涡异 常反演得到的河南地区 (31-36°N, 110-116°E) 区域平均 750 hPa 和 250 hPa 经向风异常 (单 位: m s⁻¹)
289 Figure 5 Daily mean 750-hPa and 250-hPa geostrophic meridional wind anomaly (units: m s⁻¹)
290 averaged over the Henan region (31-36°N, 110-116°E) inverted from QGPV anomaly on each pressure
291 level on (a) 18, (b) 19, (c) 20 and (d) 21 July, 2021

为了说明 650 hPa 环流对 750 hPa 风场异常的影响,图 6 给出了 650 hPa 位 293 势高度和准地转位涡异常及其反演得到的 750 hPa 位势高度和地转风异常。整体 294 来看,河南地区的风场主要是受副热带高压西进和河南西侧低压环流加强的共同 295 影响。从 18 日至 19 日(图 6a 和 6b),蒙古地区高压中心和副热带高压相向而 296 行,高压范围明显向河南地区扩展,而河南南部的低涡减弱为槽,这种高低压环 297 流配置不仅有利于 650 hPa 河南地区东南风的加强, 还会通过改变静力稳定度而 298 影响到其上下层环流。在 650 hPa 准地转位涡异常上(图 6e 和 6f),以河南地区 299 的东北边为界,其东北一侧高压区域内主要为负位涡异常,河南至西北地区为正 300 301 位涡异常。由 650 hPa 位涡异常反演的 750 hPa 环流异常可见,中国东部区域盛 行东南风异常。另外,台湾以东的台风明显加强,与台风相联系的北侧偏东风也 302 明显加强,偏东风有利于副热带高压西南部由日本地区向河南地区伸展。 303

在 20 日,随着台湾以东的台风加强和西进,副热带高压进一步向河南地区 304 扩展(图 6c);与副热带高压相联系的负位涡异常由黄海地区扩展至河南地区东 305 侧(图 6g)。同时,河南西侧的低压槽北移至其西北部,并与青藏高原东北侧的 306 低压槽相并; 与低压环流相联系的正位涡异常进一步加强, 分布于河南至青藏高 307 原东侧。东高西低环流配置的加强有利于 650 hPa 异常环流对河南地区偏南风的 308 影响进一步加强。在 21 日 (图 6d),随着台湾以东的台风进一步加强和西进, 309 副热带高压有所北抬,河南西部至青藏高原东侧的低压槽北移至山西地区。 与此 310 相应,正负位涡中心主要分布于河南北边地区和渤海湾地区,从而造成 650 hPa 311 环流对河南地区偏南风的影响减弱。 312

314 图 6 2021 年 7 月 (a) 18 日、(b) 19 日、(c) 20 日和 (d) 21 日 650 hPa 位势高度(等值线, 315 单位:gpm)及其异常(填色),蓝色曲线为河南省界,黑色曲线分别为长江和黄河,灰色为3000 m以上的青藏高原,等值线间隔为10gpm。(e) - (h)如(a) - (d),但为650hPa准地转位 316 涡异常(填色,单位: s⁻¹)及其反演得到的 750 hPa 位势高度异常(等值线)和地转风异常(箭 317 头,单位:ms⁻¹) 318 319 Figure 6 Daily mean 650-hPa geopotential height anomaly (contours, unit: gpm) and its anomalies 320 (shading) on (a) 18, (b) 19, (c) 20 and (d) 21 July, 2021. The blue and two black curved lines mark the 321 boundary of Henan Province, Changjiang and Huanhe rivers, respectively. The gray shaded area designates the Tibet Plateau above 3000 m. The contour is drawn for every 10 gpm. (e)-(h) as per 322 (a)-(d), but for 650-hPa QGPV anomaly (shading, unit: s^{-1}) and 750-hPa geopotential height anomaly 323 (contours) as well as the geostrophic wind anomaly (arrows, units: m s⁻¹) inverted from 650-hPa QGPV 324 325 anomaly 326 与 650 hPa 环流异常相比, 900 hPa 环流异常对 750 hPa 风场异常的影响表现 327 出明显的经向性特征(图 7)。这主要由于副热带高压的西伸位置更为偏西,负 328 位涡异常分布于河南以西地区。同时,蒙古地区的高压比较浅薄,在 900 hPa 无 329 明显特征,而 650 hPa 上祁连山西北侧至贝加尔湖的正位涡异常在 900 hPa 上位 330 置偏东,分布于祁连山东北侧至内蒙古高原,随着东南风的暖湿气流输送的加强 331 (图 2 和图 4),这一低压不断加深并向东北方向扩展,与西伸的副热带高压形 332 成对峙(图 7c 和图 7d)。因此,900 hPa 环流配置在河南及其北侧表现为纬向梯 333 度不断加强的特征,这有利于河南地区南风不断加强。 334

| 335 | 图 7 如图 6,但为 900 hPa 位势高度及其异常和准地转位涡异常 |
|-----|---|
| 336 | Figure 7 as Figure 6, but for 900-hPa geopotential height as well as its anomaly and QGPV anomaly |
| 337 | |
| 338 | 对比 900 hPa 和 650 hPa 的位涡异常可见,河套地区的正位涡异常随着高度 |
| 339 | 的下降而迅速减弱,而河南地区的正位涡异常减弱较不明显,这可能导致在这两 |

340 层中间,河南地区局地的正位涡异常对河南地区风场的起着主要的贡献。为了说
341 明影响河南地区的位涡异常分布特征,图 8 给出了沿着河南和河套地区两个正位
342 涡异常中心连线(图 6f)位涡异常和风场的垂直剖面图,同时,为了说明热力对
343 位涡的贡献,也给出了静力稳定度(f ∂/∂p (1/∂p ∂p)))造成的位涡异常。可见,河套
344 地区的正位涡异常主要分布在对流层 750–600 hPa,主要来自于热力的贡献,而
345 河南地区的正位涡异常较为深厚,分布于对流层中下层,中心位于 750 hPa。

在 18 日 (图 8a),河套至西北地区有浅薄的近地层正位涡异常,主要来自 346 于热力的贡献,在偏南风和上升运动影响下,这一正位涡异常逐渐加强并向西北 347 348 和中层扩展,发展成为上述近地层热低压(图 7b-d 和 8b-d)。而在其之上的 750-600 hPa, 19 日有明显的南风加强,将河南地区的高位涡输送至河套地区, 20 日 349 南风对高位涡的平流进一步加强,中心位于 650 hPa,这使得正位涡异常在 750-350 600 hPa 较为宽广,有利于对河南地区偏南风产生较大的贡献。与此不同的是, 351 在 700 hPa 以下,河南地区以西地区为负位涡异常,使得河南地区主要受其局地 352 的正位涡异常影响,当正位涡异常(低压环流)由河南的东南部向西北部移动过 353 程中, 800 hPa 及其上下层次的位涡异常对河南地区风场的影响由偏北风转为偏 354 西南风 (图 5)。已有研究主要强调黄淮低压外围的东南气流与副热带高压和台 355 风"烟花"之间的东南气流形成一条连贯的东南水汽输送带(苏爱芳等, 2021; 356 Yin et al., 2021), 而我们的研究更为关注直接进入郑州的河南南部偏南风, 尽管 357 黄淮低压能引起河南地区的偏南风,但仅以它难以解释河南南部偏南风的突然加 358 强,还需结合祁连山北侧的热低压与副热带高压形成较大范围的对峙。 359

360

图 8 2021 年 7 月 (a) 18 日、(b) 19 日、(c) 20 日和 (d) 21 日沿图 6g 蓝粗线准地转位涡异 361 常(填色,单位:s⁻¹)及其热力部分(等值线)和风矢量(单位:ms⁻¹)的剖面图。其中垂直速 362 度被放大了100倍,等值线间隔为0.2×10⁻⁴ s⁻¹ 363 Figure 8 Cross-sections of QGPV anomaly (shading; unit: s⁻¹) as well as its contribution by static 364 stability (contour) and wind (units: m s⁻¹) along the blue line in Figure 6g on (a) 18, (b) 19, (c) 20 and 365 (d) 21 July 2021. The vertical velocity is scaled by 100, and the contour is drawn for every 0.2×10^{-4} s⁻¹ 366 367 综上所述,河南地区南风的贡献主要来自于对流层中低层的位涡,这是由副 368 热带高压的西伸与河南至祁连山北侧低压环流形成对峙,在河南地区形成强烈的 369 位势高度纬向梯度,进而有利于偏南风的加强。祁连山北侧热低压环流较为浅薄, 370 与其相联系正位涡异常分布于祁连山北侧和河套地区,正位涡异常中心分别位于 371 900 hPa 和 650 hPa,这有利于这两层环流对河南地区南风的贡献最为明显。 372

373 3.3 低压环流的影响

374 为了说明河南至祁连山北侧低压环流对河南地区南风有影响,本小节将与其 375 相联系的正位涡异常进行分部反演来分析对河南地区南风的贡献。首先,我们分 376 析祁连山北侧热低压环流的特征及其影响,图9给出了沿40°N的位温、风场和 377 位涡异常的垂直剖面图,图8分析表明,西北地区位涡异常主要由热力贡献,因 378 此,此处位涡异常为静力稳定度部分 $(f \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{1}{\sigma_p} \frac{\partial \Phi'}{\sigma_p} \right))$ 。

379 如图 9a 所示,从位温场可见 18 日阿拉善高原为一典型热低压,中性层结由
380 地面向上伸至 600 hPa,该层以下为辐合上升运动,而之上为辐合下沉运动,等
381 位温线密集区主要分布于低压中心的近地层及其东西两侧,位温梯度增加有利于
382 正位涡异常的形成。从 19 日至 20 日(图 9b 和 9c),热低压环流明显加强并东

383 移,风场辐合运动增加,其东西两侧等位温线变得更为密集,即层结稳定度增强,
384 相应的正位涡异常明显增加,并扩展至对流层中层 500 hPa,其中热低压东部上
385 空正位涡异常中心位于 650 hPa,即上述的河套地区正位涡异常。在 21 日,热低
386 压有所减弱,中心的辐合运动减弱,700 hPa 以上的等温线变得较为平直,中心
387 西侧的高稳定度层有所下降,而中心东侧的河套地区上空高稳定度层有所上升。

图 9 2021 年 7 月 (a) 18 日、(b) 19 日、(c) 20 日和 (d) 21 日沿 40 °N 位温 (等值线,单位:
K)、风矢量 (箭头, m s⁻¹)和热力部分的位涡异常 (填色,单位: s⁻¹)的剖面图,其中垂直速
度被放大了 100 倍 **Figure 9** Cross-sections of potential temperature (contour, unit: K), wind (arrows, units: m s⁻¹) and
QGPV anomaly of static stability (shading; unit: s⁻¹) along 40 °N on (a) 18, (b) 19, (c) 20 and (d) 21
July 2021. The vertical velocity is scaled by 100

394

395 图 10 沿 40°N 的地表平均感热通量(单位: W m⁻²)的 Hovmöller 图,向上通量为正
396 Figure 10 Hovmöller diagram of mean surface sensible heat flux (units: W m⁻²), upward fluxes are

397

positive

为了说明热低压形成的可能原因,图 10 给出了沿 40 °N 的地表平均感热通 398 量的 Hovmöller 图。高原上(90–115 ℃)的向上感热通量明显偏强,在 18 日至 399 19 日,最大加热中心位于甘肃省西部并东移,在其东侧阿拉善高原西部有新的 400 加热中心; 20 日加热中心进一步加强并东移至阿拉善高原; 21 日加热中心强度 401 明显减弱。由非绝热加热反演的位势高度倾向可见(图 12),这一加热中心在近 402 地层 850 hPa 的祁连山北侧至河套地区产生明显的低压环流,随着感热加热的加 403 强和东移,低压倾向中心也加强和东移(图 12a-c),这有利于祁连山北侧的低 404 压加强(图 7 a-c)。而后,随着感热加热的减弱,低压倾向有所减弱(图 12d)。 405

| 406 | 为了说明副热带高压、河套和河南地区高位涡对河南地区偏南风的相对贡献, |
|-----|---|
| 407 | 我们选取7月20日的750-600 hPa准地转位涡异常,分别反演不同环流相联系 |
| 408 | 的位涡异常(图11),其中副热带高压粗略选为(30-55°N,115-140°E)区域, |
| 409 | 并计算其河南地区(31-36°N, 110-116°E)经向风的平均(表1)。750-600 hPa |
| 410 | 准地转位涡异常反演的风场与与整层位涡异常反演的风场较为相似(图 11a 和 |
| 411 | 4g),但南风分量明显偏强,特别是河南地区,这主要是少了对流层高层位涡异 |
| 412 | 常对 750 hPa 南风的抵消作用(图 5c),河南地区平均南风为 6.19 m s ⁻¹ 。 |

413 图 11 (a) 2021 年 7 月 20 日 750-600 hPa 平均准地转位涡异常(填色,单位: s⁻¹)及其反演
414 的 750 hPa 地转风异常(箭头,单位: m s⁻¹),蓝色和黑色曲线分别为河南省界和黄河,灰色为
415 3000 m 以上的青藏高原,(c)、(e)和(f)分别为副热带高压、河套和河南位涡异常及其反演的
416 地转风异常,(b)为(c)、(e)和(f)之和,(d)为(e)和(f)之和

417 **Figure 11** (a) Daily mean 750–600 hPa QGPV anomaly (shading, unit: s^{-1}) and geostrophic wind 418 anomaly (arrows, units: $m s^{-1}$) inverted from the QGPV anomaly on 20 July, 2021. The blue and black 419 curved lines mark the boundary of Henan Province and Huanhe rivers, respectively. The gray shaded 420 area designates the Tibet Plateau above 3000 m. (c), (e) and (f) are geostrophic wind anomalies 421 inverted from QGPV anomalies associated with subtropical high, lows over Hetao and Henan. (b) is the 422 sum of ((c), (e) and (f), while (d) is the sum the (e) and (f)

| 424 | 河南至河套地区和副热带高压的位涡异常反演的风场主要为偏南风分布(图 |
|-----|--|
| 425 | 11b),河南地区平均南风为4.80 m s ⁻¹ ,占总额的77.5%。这主要来自于副热带高 |
| 426 | 压的贡献,与其相联系的风场主要为偏东南风(图 11c),河南地区平均南风为 |
| 427 | 2.90 m s ⁻¹ 。而河套至河南的正位涡异常反演的地转风为泊松分布,其中河南地区 |
| 428 | 为西南风 (图 11d), 平均南风为 1.90 m s ⁻¹ , 尽管南风强度较副热带高压偏小, |
| 429 | 但西风分量抵消了副热带高压的东风分量,使得整个风场表现为偏西南风特征。 |



445 的偏南风距平)是否具有贡献?图 12 给出了由非绝热加热造成的 750 hPa 和 250
446 hPa 位势高度倾向和地转风倾向。整体来看,在低层为负的位势倾向,在高层为
447 正的位势倾向,这有利于河南地区低涡的维持和上升运动,与以往研究结果相吻
448 合(Davis and Emanual, 1991;姜立智等, 2019)。

在对流层低层 850 hPa 和 750 hPa (图 12a-h),有一负位势倾向中心分布于
河南地区北部,它对河南地区风场的影响主要为偏西北风。随着降水潜热释放的
增加,这一负位势高度倾向逐渐加强,20日 750 hPa 为-30.3 gpm day⁻¹,偏北风
的影响也逐步增强。负位势高度倾向在 21 日向北移动,对河南偏北风的影响有
所减弱。如前一小节所述,在 850 hPa,河套至祁连山北侧为一宽广的低压倾向,
这主要是受高原地面感热加热而出现在近地层,从而有利局地热低压的维持和加
强。

在高层 250 hPa, 河南地区有明显的正位势高度倾向异常, 其中心分布于河 456 南东北方向的河北地区,18日强度与湖北地区正异常中心的强度相当(图 10i), 457 导致河南地区受其东侧偏北风的影响。19日至20日(图 10j 和 10k),河南地区 458 正异常中心强度明显加强,局地的顺时针旋转的风场也变得更为明显,这使得河 459 南地区受偏南风的影响较为明显,20日河南区域平均南风倾向为2.6 m s⁻¹ day⁻¹。 460 21 日该正异常中心向东北移动(图 101),河南地区受偏南风的影响有所减弱。 461 综上所述,河南地区持续性暴雨释放的潜热造成了河南地区对流层中低层负 462 位势高度倾向,高层为正位势高度倾向,有利于河南地区对流层中层低压环流的 463

464 维持和上升运动,但以潜热加热强迫难以直接解释低层河南地区经向风变化特征。

465 而加热产生的正位涡有利于了河南地区正位涡的维持,在东南风影响下,可为河

466 套地区提供了正位涡平流,从而对河南地区的风场产生影响。

| 467 | 图 12 2021 年 7 月 (a) 18 日、(b) 19 日、(c) 20 日和 (d) 21 日由非绝热加热造成的 750 hPa |
|-----|---|
| 468 | 位势高度倾向(填色,单位: gpm day ⁻¹)和地转风倾向(箭头,单位: $m s^{-1} day^{-1}$),橙色曲线为 |
| 469 | 河南省界,黑色曲线分别为长江和黄河,灰色为3000m以上的青藏高原。(e)-(h)如(a)- |
| 470 | (d),但为250hPa |
| 471 | Figure 12 Daily mean 750-hPa geopotential height tendency (contours, units: gpm day ⁻¹) and |
| 472 | geostrophic wind tendency due to diabatic heating on (a) 18, (b) 19, (c) 20 and (d) 21 July, 2021. The |
| 473 | orange and two black curved line mark the boundary of Henan Province, Changjiang and Huanhe rivers |
| 474 | respectively. The gray shaded area designates the Tibet Plateau above 3000 m. (e)-(h) as per (a)-(d), but |
| 475 | for 250 hPa |
| | |

476 4 结论与讨论



478 再分析数据,利用准地转位涡分部反演,重点分析了"21.7"河南暴雨中暖湿季

479 风输送带中偏南风的加强机理及其关键环流。

480 暖湿季风输送带中的偏南风加强是发生7月20日极端暴雨的关键因子之一,
481 偏南风的加强不仅出现在对流层中低层,还向上扩展至150hPa高度,它高效地
482 将季风输送带中高温高湿的气流输送至河南地区,同时,与副热带高压边缘的东
483 南气流形成切变线,为极端暴雨的发生提供有利的水汽条件和天气系统。

484 副热带高压和台风"烟花"相互促进西进,副热带高压西伸至中国东部地区,
485 同时,蒙古地区的高压东移与副热带高压合并,从中国东部沿海至西北地区形成
486 了一条宽广的东南风,不仅将暖湿气流输送至西北地区,也把河南地区高位涡输
487 送至西北地区。另外,阿拉善高原的感热加热有利于局地热低压的维持和加强,

不仅在低压中心近地面层产生正位涡异常,还在其东侧的河套地区对流层中低层 488 产生正位涡异常,中心位于650 hPa,这有利于河南及其以西地区大范围高位涡 489 的维持,从而与副热带高压形成较大范围的对峙。准地转位涡分部反演表明,对 490 流层中低层这一天气流型导致暖湿季风输送带中的偏南风加强,影响可至 250 491 hPa。对于7月20日河南地区的南风,主要来自于副热带高压的贡献,其次是河 492 套地区 750-650 hPa 的正位涡异常,而河南局地低压环流的贡献略小。尽管副热 493 带高压是河南地区南风的主要贡献,但 Xu et al. (2022)数值结果表明,副热带高 494 压偏强偏西却不利于对流层低层强烈的水汽输送带的形成,进而导致降水落区预 495 报的偏差。 496

本文对"21.7"河南极端暴雨的暖湿季风输送带中偏南风的细致分析表明, 497 河南地区南风的加强不仅受副热带高压和河南地区局地环流的影响,还有来自于 498 西北地区热低压环流的贡献,它们共同作用有利于7月20日河南地区南风的加 499 强,为极端暴雨提供了有利的高温高湿水汽。极端降水释放的大量潜热有利于河 500 南地区低压环流的维持和上升运动,同时,加热产生的高位涡也为其向西北输送 501 提供了来源,但对于暖湿季风输送带中偏南风加强的直接贡献不明显。至于高层 502 天气尺度波破碎的影响可能体现在其它方面,例如波破碎具有强烈的经向通量的 503 输送和非线性过程,在以后的工作中我们还需使用数值模式来开展这方面的研究。 504 致谢 感谢两位匿名审稿专家对本文提出的宝贵意见,感谢国家重大科技基础设 505 施项目"地球系统数值模拟装置"提供支持。 506 507

508 参考文献(References)

| 509 | [1] | 布和朝鲁,诸葛安然,谢作威,等. 2022. "7.20"河南暴雨水汽输送特征及其关键天气尺 |
|-----|------|--|
| 510 | | 度系统 [J]. 大气科学,46(3):725-744.doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2202.21226 |
| 511 | | Bueh Cholaw, Zhuge Anran, Xie Zuowei, et al. 2022. Water Vapor Transportation Features |
| 512 | | and Key Synoptic-scale Systems of the "7.20" Rainstorm in Henan Province [J]. Chinese |
| 513 | | Journal of Atmospheric Sciences, 46(3): 725–744. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2202.21226 |
| 514 | [2] | Davis C A, Emanuel K A. 1991. Potential vorticity diagnostics of cyclogenesis [J]. Mon. Wea. |
| 515 | | Rev., 119, 1929–1953. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1991)119<1929:PVDOC>2.0.CO;2 |
| 516 | [3] | 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- |
| 517 | | 424. |
| 518 | | Ding Yihui. 2015. On the study of the unprecedented heavy rainfall in Henan Province during |
| 519 | | 4-8 August 1975: Review and assessment. Acta Meteorologica Sinica, 73(3): 411-424. |
| 520 | [4] | 丁一汇.2019. 中国暴雨理论的发展历程与重要进展 [J]. 暴雨灾害,38(5):395-406. |
| 521 | | Ding Yihui. 2019. The major advances and development process of the theory of heavy |
| 522 | | rainfalls in China [J]. Torrential Rain and Disasters, 38(5): 395–406. |
| 523 | [5] | Evans K J, Black R X. 2003. Piecewise tendency diagnosis of weather regime transitions [J]. |
| 524 | | J. Atmos. Sci., 60, 1941–1959. |
| 525 | | https://doi.org/10.1175/1520-0469(2003)060<1941:PTDOWR>2.0.CO;2 |
| 526 | [6] | Fu S-M, Zhang Y-C, Wang H-J, et al. 2022. On the evolution of a long-lived mesoscale |
| 527 | | convective vortex that acted as a crucial condition for the extremely strong hourly |
| 528 | | precipitation in Zhengzhou [J]. J. Geophys. Res. Atmos., DOI: 10.1029/2021JD036233 |
| 529 | [7] | Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. Quart. J. Roy. |
| 530 | | Meteor. Soc., 146(730): 1999–2049. doi: 10.1002/qj.3803 |
| 531 | [8] | 河南极端暴雨研究小组. 2021. "21.7"河南极端暴雨一天气实况分析和预报思考 ."21.7" |
| 532 | | 河南极端暴雨研讨会. |
| 533 | [9] | Li W, Ma H, Fu R, et al. 2022. Development and maintenance mechanisms of a long-lived |
| 534 | | mesoscale vortex which governed the earlier stage of the "21.7" Henan torrential rainfall |
| 535 | | event [J], Front. Earth Sci., doi: 10.3389/feart.2022.909662 |
| 536 | [10] | 梁钰, 乔春贵, 董俊玲. 2020. 近 34 年河南首场暴雨时空分布特征及环流背景分析 |
| 537 | | [J]. 气象与环境科学, 43(2): 26-32. doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2020.02.004 |
| 538 | | Liang Yu, Qiao Chungui, Dong Junling. 2020. Spatial-temporal distribution and impact |
| 539 | | analysis of the first rainstorm in Henan Province over the recent 34 years [J]. Meteorological |
| 540 | | and Environmental Sciences, 43(2): 26-32. doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2020.02.004 |
| 541 | [11] | 柳艳菊,丁一汇,张颖娴,等. 2015. 季风暖湿输送带与北方冷空气对"7·21"暴雨 |
| 542 | | 的作用 [J]. 热带气象学报,31(6): 721–732. |
| 543 | | Liu Yan-ju, Ding Yi-hui, Zhang Ying-xian et al. 2015. Role of a warm and wet transport belt |

- of Asian summer monsoon and cold air from north in the Beijing july 21 heavy rainstorm [J].
 Journal of Tropical Meteorology, 31(6): 721–732.
- 546 [12] 罗亚丽,孙继松,李英,等. 2020. 中国暴雨的科学与预报:改革开放 40 年研究
 547 成果 [J]. 气象学报,78(3):419-450.
- Luo Yali, Sun Jisong, Li Ying, et al. 2020. Science and prediction of heavy rainfall over
 China: Research progress since the reform and opening-up of the People's Republic of China
 [J]. Acta Meteorologica Sinica, 78(3): 419–450
- 551 [13] 姜立智,傅慎明,孙建华,等. 2019. 2014 年 11 月上旬西北太平洋一次极端强度爆
 552 发气旋的数值模拟和分片位涡反演分析[J]. 气候与环境研究,24(2): 152–168. doi:
 553 10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17174
- Jiang Lizhi, Fu Shenming, Sun Jianhua, et al. 2019. Numerical Simulation and Piecewise
 Potential Vorticity Inversion Analysis of an Extreme Explosive Cyclone over the Northwest
 Pacific Ocean in Early November of 2014[J]. Climatic and Environmental Research, 24(2):
 152–168. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17174
- 558[14]Nie Y, Sun J. 2022. Moisture sources and transport for extreme precipitation over Henan559in July 2021 [J]. Geophys. Res. Lett, 49. https://doi.org/10.1029/2021GL097446
- 560 [15] Nielsen-Gammon J W, Lefevre R J. 1996. Piecewise tendency diagnosis of dynamical
 561 processes governing the development of an upper-tropospheric mobile trough [J]. J. Atmos.
 562 Sci., 53, 3120–3142. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1996)053<3120:PTDODP>2.0.CO;2
- 563 [16] 齐道日娜,何立富,王秀明,等. 2022. "7 20" 河南极端暴雨精细观测及热动力
 564 成因[J].应用气象学报, 33(1): 1–15. Doi: 10.11989/1001-7313.20220101
 565 Chyi Dorina, He Lifu, Wang Xiuming, et al. 2022. Fine observation characteristics and
 566 thermodynamics mechanisms of extreme heavy rainfall in Hena on 20 July 2021 [J]. Journal
- 566thermodynamics mechanisms of extreme heavy rainfall in Hena on 20 July 2021 [J]. Journa567of Applied Meteorological Science, 33(1): 1–15. Doi: 10.11989/1001-7313.20220101
- 568
 [17]
 冉令坤,李舒文,周玉淑,等. 2021. 2021 年河南"7.20"极端暴雨动、热力和水汽特

 569
 征观测分析[J]. 大气科学,45(6): 1366-1383 doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2109.21160
- Ran Lingkun, Li Shuwen, Zhou Yushu, et al. 2021. Observational Analysis of the Dynamic,
 Thermal, and Water Vapor Characteristics of the "7.20" Extreme Rainstorm Event in Henan
 Province, 2021 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 45(6): 1366–1383 doi:
 10.3878/j.issn.1006-9895.2109.21160
- 574 [18] 施宁,布和朝鲁.中国大范围持续性极端低温事件的一类平流层前兆信号[J].大气575 科学,2015,39(1):210-220.doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1403.13309
- Shi Ning, Bueh Cholaw. A specific stratospheric precursory signal for the extensive and
 persistent extreme cold events in China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015,
 39(1): 210–220. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1403.13309
- 579 [19] 苏爱芳,吕小娜,崔丽曼,等. 2021. 郑州"720"极端暴雨天气的基本观测分析[J]. 暴
 580 雨灾害,40(5):445-454.

- 581 Su Aifang, Lv Xiaona, Cui Liman, et al. 2021. Prediction and test of optimal integrated 582 precipitation based on similar spatial distribution of precipitation [J]. Torrential Rain and 583 Disasters, 40(5): 445–454.
- 584 [20] 苏爱芳, 席乐, 吕小娜, 等. 2022. 豫北"21.7"极端暴雨过程特征及成因初探 [J]. 气
 585 象, 待刊. DOI:10.7519/j.issn.1000-0526.2022.032501
- Su Aifang, Xi Le, Lv Xiaona, et al. 2022. Preliminary analysis on characteristics and causes
 of "21.7" extreme rainstorm in Northern Henan. Meteorological Monthly. In press.
 DOI:10.7519/j.issn.1000-0526.2022.032501
- [21] Wang T, Wei K, Ma J, 2021. Atmospheric rivers and mei-yu rainfall in China: A case
 study of summer 2020 [J]. Adv. Atmos. Sci., 38(12): 2137–2152.
 https://doi.org/10.1007/s00376-021-1096-9
- 592 [22] Xie Z, Black R X, Deng Y. 2019. Planetary and synoptic-scale dynamic control of
 593 extreme cold wave patterns over the United States [J]. Climate Dyn., 53: 1477–1495,
 594 https://doi.org/10.1007/s00382-019-04683-7
- [23] Xu L, Cheng W, Deng Z R, et al. 2022. Assimilation of the FY-4A AGRI clear-sky
 radiance data in a regional numerical model and its impact on the forecast of the "21·7"
 Henan extremely persistent heavy rainfall [J]. Adv. Atmos. Sci., In press. doi:
 10.1007/s00376-022-1380-3
- 599 [24] Yin J F, Gu H D, Liang X D, et al. 2022. A possible dynamic mechanism for rapid
 600 production of the extreme hourly rainfall in Zhengzhou City on 20 July 2021 [J]. J. Meteor.
 601 Res., 36(1): 1–20, doi: 10.1007/s13351-022-1166-7
- 602 [25] 张霞,杨慧,王新敏,等. 2021. "21·7"河南极端强降水特征及环流异常性分析[J]. 大
 603 气科学学报,44(5):672-687.
- Zhang X, Yang H, Wang X M, et al. 2021. Analysis on characteristic and abnormality of
 atmospheric circulations of the July 2021 extreme precipitation in Henan[J]. Trans. Atmos.
 Sci., 44(5): 672–687.
- [26] Zhang R N, Chu Q, Zuo Z, et al. 2022. Summertime moisture sources and transportation
 pathways for china and associated atmospheric circulation patterns[J]. Front. Earth Sci.,
 9:756943. doi: 10.3389/feart.2021.756943
- 610 [27] 张若楠, 孙丞虎, 李维京. 2018. 北极海冰与夏季欧亚遥相关型年际变化的联系及
 611 对我国夏季降水的影响[J]. 地球物理学报, 61(1): 91–105, doi: 10.6038/cjg2018K0755
- Zhang R N, Sun C H, Li W J. 2018. Relationship between the interannual variations of Arctic
 sea ice and summer Eurasian teleconnection and associated influence on summer
 precipitation over China[J]. Chinese J. Geophys., 61(1): 91–105, doi: 10.6038/cjg2018K0755
- East Asian summer precipitation[J]. J. Climate, 30, 3421–3437, doi:
 10.1175/JCLI-D-16-0214.1



- 分别为18日、19日、20日和21日
- Figure 1 Daily accumulated precipitation (units: mm day⁻¹) during the period from 08 (UTC+8) to 08
- (UTC+8) of the following day for 18-21, July 2021. (a)-(d) are for 18, 19, 20 and 21, respectively









625

626 图 2 2021 年 7 月 (a) 18 日、(b) 19 日、(c) 20 日和 (d) 21 日的 800 hPa 日平均比湿 (填色,
627 单位: kg kg⁻¹)和水平风场 (箭头,单位: m s⁻¹),红色曲线为河南省界,黑色曲线分别为长江
628 和黄河,灰色为 3000 m 以上的青藏高原

Figure 2 Daily mean 800-hPa specific humidity (shaded, units: kg kg⁻¹) and horizontal wind (arrows, units: m s⁻¹) on (a) 18, (b) 19, (c) 20 and (d) 21 July, 2021. The red and two black curved lines mark the boundary of Henan Province, Changjiang and Huanhe rivers, respectively. The gray shaded area

632 designates the Tibet Plateau above 3000 m





634 图 3 河南地区 (31-36 °N, 110-116 °E) 区域平均的经向风 (a, 单位 m s⁻¹) 及其异常 (b)
635 和纬向风 (c) 及其异常 (d) 的气压一时间剖面图,其中填色和等值线分别为原始风场和地
636 转风,等值线间隔为 1 m s⁻¹

Figure 3 The pressure-time corss section of areal-mean (a) meiridional wind (units: $m s^{-1}$) and (b) its anomaly and (c) zonal wind and (d) its anomaly over the Henan region (31–36 °N, 110–116 °E). Shading and countour are wind and geostrophic wind, respectively. The interval of contour is 1 m s⁻¹

633

641

Z



643 图 4 2021 年 7 月 (a) 18 日、(b) 19 日、(c) 20 日和 (d) 21 日的 750 hPa 地转风异常场 (箭
644 头,单位: m s⁻¹)和非地转经向风 (填色),蓝色曲线为河南省界,黑色曲线分别为长江和黄河,
645 灰色为 3000 m 以上的青藏高原。(e) - (f) 如 (a) - (d),但为准地转位涡反演得到的地转异
646 常风及其与地转经向风偏差 (填色)

Figure 4 Daily mean 750-hPa geostrophic wind anomaly (arrows, units: m s⁻¹) and ageostrophic meridional wind (shading) on (a) 18, (b) 19, (c) 20 and (d) 21 July, 2021. The blue and two black curved lines mark the boundary of Henan Province, Changjiang and Huanhe rivers, respectively. The gray shaded area designates the Tibet Plateau above 3000 m. (e)-(h) as per (a)-(d), but for geostrophic wind anomaly inverted from QGPV and the bias of meridional geostrophic wind to the original meridional geostrophic wind (shading)



654 图 5 2021 年 7 月 (a) 18 日、(b) 19 日、(c) 20 日和 (d) 21 日逐层气压面上的准地转位涡异
655 常反演得到的河南地区 (31-36 °N, 110-116 °E) 区域平均 750 hPa 和 250 hPa 经向风异常(单
656 位: m s⁻¹)

Figure 5 Daily mean 750-hPa and 250-hPa geostrophic meridional wind anomaly (units: m s⁻¹)
averaged over the Henan region (31–36 °N, 110–116 °E) inverted from QGPV anomaly on each
pressure level on (a) 18, (b) 19, (c) 20 and (d) 21 July, 2021







662 图 6 2021 年 7 月 (a) 18 日、(b) 19 日、(c) 20 日和 (d) 21 日 650 hPa 位势高度 (等值线,
663 单位: gpm)及其异常 (填色),蓝色曲线为河南省界,黑色曲线分别为长江和黄河,灰色为 3000
664 m 以上的青藏高原,等值线间隔为 10 gpm。(e) - (h) 如 (a) - (d),但为 650 hPa 准地转位
665 涡异常 (填色,单位: s⁻¹)及其反演得到的 750 hPa 位势高度异常 (等值线)和地转风异常 (箭
666 头,单位: m s⁻¹)

Figure 6 Daily mean 650-hPa geopotential height anomaly (contours, unit: gpm) and its anomalies (shading) on (a) 18, (b) 19, (c) 20 and (d) 21 July, 2021. The blue and two black curved lines mark the boundary of Henan Province, Changjiang and Huanhe rivers, respectively. The gray shaded area designates the Tibet Plateau above 3000 m. The contour is drawn for every 10 gpm. (e)-(h) as per (a)-(d), but for 650-hPa QGPV anomaly (shading, unit: s⁻¹) and 750-hPa geopotential height anomaly (contours) as well as the geostrophic wind anomaly (arrows, units: m s⁻¹) inverted from 650-hPa QGPV anomaly



676 Figure 7 as Figure 6, but for 900-hPa geopotential height as well as its anomaly and QGPV anomaly



678 图 8 2021 年 7 月 (a) 18 日、(b) 19 日、(c) 20 日和 (d) 21 日沿图 6g 蓝粗线准地转位涡异
679 常(填色,单位: s⁻¹)及其热力部分(等值线)和风矢量(单位: m s⁻¹)的剖面图。其中垂直速
680 度被放大了 100 倍,等值线间隔为 0.2×10⁻⁴ s⁻¹

Figure 8 Cross-sections of QGPV anomaly (shading; unit: s^{-1}) as well as its contribution by static stability (contour) and wind (units: $m s^{-1}$) along the blue line in Figure 6g on (a) 18, (b) 19, (c) 20 and (d) 21 July 2021. The vertical velocity is scaled by 100, and the contour is drawn for every $0.2 \times 10^{-4} s^{-1}$

684

685 图 9 2021 年 7 月 (a) 18 日、(b) 19 日、(c) 20 日和 (d) 21 日沿 40 °N 位温 (等值线,单位:
686 K)、风矢量 (箭头, m s⁻¹)和热力部分的位涡异常 (填色,单位: s⁻¹)的剖面图,其中垂直速
687 度被放大了 100 倍

<sup>Figure 9 Cross-sections of potential temperature (contour, unit: K), wind (arrows, units: m s⁻¹) and
QGPV anomaly of static stability (shading; unit: s⁻¹) along 40 °N on (a) 18, (b) 19, (c) 20 and (d) 21
July 2021. The vertical velocity is scaled by 100</sup>

696 图 11 (a) 2021 年 7 月 20 日 750-600 hPa 平均准地转位涡异常(填色,单位: s⁻¹)及其反演
697 的 750 hPa 地转风异常(箭头,单位: m s⁻¹),蓝色和黑色曲线分别为河南省界和黄河,灰色为
698 3000 m 以上的青藏高原,(c)、(e)和(f)分别为副热带高压、河套和河南位涡异常及其反演的
699 地转风异常,(b)为(c)、(e)和(f)之和,(d)为(e)和(f)之和

Figure 11 (a) Daily mean 750–600 hPa QGPV anomaly (shading, unit: s^{-1}) and geostrophic wind anomaly (arrows, units: $m s^{-1}$) inverted from the QGPV anomaly on 20 July, 2021. The blue and black curved lines mark the boundary of Henan Province and Huanhe rivers, respectively. The gray shaded area designates the Tibet Plateau above 3000 m. (c), (e) and (f) are geostrophic wind anomalies inverted from QGPV anomalies associated with subtropical high, lows over Hetao and Henan. (b) is the sum of ((c), (e) and (f), while (d) is the sum the (e) and (f)

706

707 图 12 2021 年 7 月 (a) 18 日、(b) 19 日、(c) 20 日和 (d) 21 日由非绝热加热造成的 850 hPa
708 位势高度倾向(填色,单位: gpm day⁻¹)和地转风倾向(箭头,单位: m s⁻¹ day⁻¹),蓝色曲线为
709 河南省界,黑色曲线分别为长江和黄河,灰色为 3000 m 以上的青藏高原。(e) - (h)和 (i) (1)如 (a) - (d),但分别为 750 hPa 和 250 hPa.

Figure 12 Daily mean 850-hPa geopotential height tendency (contours, units: gpm day⁻¹) and geostrophic wind tendency (arrows, units: m s⁻¹ day⁻¹) due to diabatic heating on (a) 18, (b) 19, (c) 20 and (d) 21 July, 2021. The blue and two black curved lines mark the boundary of Henan Province, Changjiang and Huanhe rivers, respectively. The gray shaded area designates the Tibet Plateau above 3000 m. (e)-(h) and (i)-(l) as per (a)-(d), but for 750 hPa and 250 hPa, respectively