

王雯静,任福民,贾莉,等.超强台风“利奇马”(1909)极端降水研究回顾[J].海洋气象学报,2025,45(1):90-103.

WANG Wenjing, REN Fumin, JIA Li, et al. Review of research on extreme precipitation induced by Super Typhoon Lekima (1909) [J]. Journal of Marine Meteorology, 2025, 45(1): 90-103. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20231122001. (in Chinese)

## 超强台风“利奇马”(1909)极端降水研究回顾

王雯静<sup>1</sup>,任福民<sup>1</sup>,贾莉<sup>2</sup>,马蕴琦<sup>3,4</sup>

(1.中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081;2.国家气象中心,北京 100081;3.中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室,河南 郑州 450003;4.河南省气象台,河南 郑州 450003)

**摘要** 1909号台风“利奇马”是1949—2019年登陆浙江的第三强台风,影响中国中东部大部分省份,风雨强度大、极端性显著、灾害损失严重。台风降水主要影响浙江和山东两地,分别对应两大降水阶段。为更全面地认识此次过程,从大尺度天气形势、台风自身强度、动热力因子、云微物理、水汽和能量输送以及地形等方面对“利奇马”引发的两个阶段极端降水的异同成因进行回顾总结。稳定的环流形势及其良好配置、充足的水汽和能量以及双台风作用均是贯穿整个极端降水过程的有效因子。台风自身高强度、地形增幅作用、良好的动热力条件以及云微物理过程的有效影响是造成第一阶段浙江极端降水的独特成因;而第二阶段山东极端降水的独特成因是西风槽冷空气入侵和台风长时间影响。此外,对“利奇马”极端降水过程进一步研究方向进行讨论。

**关键词** 台风“利奇马”;极端降水;成因;研究回顾

中图分类号: P458.124 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2025)01-0090-14

DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20231122001

## Review of research on extreme precipitation induced by Super Typhoon Lekima (1909)

WANG Wenjing<sup>1</sup>, REN Fumin<sup>1</sup>, JIA Li<sup>2</sup>, MA Yunqi<sup>3,4</sup>

(1. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 2. National Meteorological Center, Beijing 100081, China; 3. CMA·Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, Zhengzhou 450003, China; 4. Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003, China)

**Abstract** Typhoon Lekima (1909) is the third strongest typhoon among those that make landfall in Zhejiang from 1949 to 2019. It affects most provinces in central and eastern China with high intensity and significant extremity of rainstorms, causing serious disaster losses. The typhoon-induced precipitation mainly affects Zhejiang and Shandong, corresponding to the two major precipitation stages. To understand this process more comprehensively, this paper reviews and summarizes the common and different reasons between the two precipitation stages in terms of large-scale weather situation, the intensity of Lekima, dynamic and thermal factors, cloud microphysics, transport of water vapor and energy, and topography. The stable circulation with good configuration, sufficient water vapor and energy, as well as the effect of binary typhoons are favorable factors throughout the whole process. The high intensity of Lekima, the amplification of topography, good dynamic and thermal conditions and beneficial effects of cloud

收稿日期:2023-11-22;修回日期:2024-05-24

基金项目:国家自然科学基金项目(42275037);中国气象科学研究院基本科研业务费专项(2023Z016)

第一作者简介:王雯静,女,硕士研究生,主要从事台风降水和灾害研究,1546098650@qq.com。

通信作者简介:任福民,男,博士,研究员,主要从事台风及其影响研究,fmren@163.com。

microphysical process are the characteristic causes of the first precipitation stage in Zhejiang, while the special causes of the second precipitation stage in Shandong are the invasion of cold air from the westerly trough and the prolonged effects of the typhoon. In addition, the directions for further research on the extreme precipitation induced by Lekima are discussed.

**Keywords** Typhoon Lekima; extreme precipitation; cause; review

## 引言

中国是世界上台风登陆最多且灾害最严重的国家之一<sup>[1]</sup>。台风的致灾因子主要来自于其引起的大风、暴雨和风暴潮<sup>[2-3]</sup>。在气候变化背景下,台风极端降水是越来越受到重视的研究热点之一,如 1614 号超强台风“莫兰蒂”重创厦门,闽浙粤受到严重影响,1818 号强热带风暴“温比亚”给豫皖鲁苏等地带来严重洪涝,2305 号超强台风“杜苏芮”在京津冀地区引发特大暴雨和洪涝等。这些极端降水事件造成了严重灾害,受到社会各界的广泛关注。

近几十年来,国内外的气象学者针对台风极端降水成因进行了大量研究,主要包括环境大气<sup>[4-5]</sup>、台风自身因子<sup>[6-7]</sup>、下垫面影响<sup>[8]</sup>等方面,所得成果为提高预报精度、防台减灾做出重要贡献。台风与环境中的多尺度天气系统,如西风槽或冷空气、副热带高压(以下简称“副高”)和大陆高压、低空急流以及中尺度云团等相互作用往往是极端降水产生的重要原因<sup>[9]</sup>。两个台风同时出现时,双台风作用也不容忽视<sup>[10]</sup>。台风自身移速<sup>[3]</sup>、强度<sup>[11]</sup>、路径及动热力结构<sup>[6]</sup>等直接影响降水的强度和分布;另外,台风倒槽在有利的条件下易产生强降水<sup>[12]</sup>。下垫面的影响常常使台风降水增幅,许多台风登陆后遇到沿海山地地形都出现了降水增幅和分布不均等明显变化<sup>[13-14]</sup>。云微物理过程与台风极端降水也密切相关<sup>[3]</sup>,如高空较强的冰相过程和大量冰粒子、霰粒子使 0908 号台风“莫拉克”降雨增强<sup>[15]</sup>。

1909 号台风“利奇马”作为 1949—2019 年登陆浙江的第三强台风<sup>[16]</sup>,是台风极端降水的典型个例,影响了中国中东部大部分省份,其中浙江及山东等地 135 县(市)日降水量突破极端降水阈值( $P \geq 95\%$ <sup>[17]</sup>),22 个县(市)突破历史极值,造成严重的内涝和山体滑坡<sup>[18]</sup>,共造成 1 400 万人受灾、56 人死亡、14 人失踪,直接经济损失达 515 亿元,具有北上影响范围广、陆上滞留时间长、风雨强度大、暴雨极端性显著、灾害损失严重等特点<sup>[19]</sup>。“利奇马”

强降水成因诊断分析<sup>[18-19]</sup>表明浙江和山东的极端降水明显不同。高海面温度、弱环境垂直风切变以及强低空急流<sup>[20]</sup>,给台风的强势登陆提供有力支持;较大的对流雨滴<sup>[21]</sup>和强暖心结构<sup>[22]</sup>均表明“利奇马”具备形成极端降水的条件。登陆后中纬度高空槽与台风的相互作用<sup>[23]</sup>以及高空冷涡南下与台风倒槽或其残涡的相互作用又相继造成山东、东北地区的强降水<sup>[24]</sup>。另外,陈涛等<sup>[25]</sup>研究表明地形、眼墙处非对称性的对流分布等对台风中心移动方向左前侧降水有增强效应。

为系统地梳理“利奇马”极端降水的成因,此文对相关研究进行回顾总结,从而增加对此次过程的认识,为未来台风个例的预报及全面分析提供思路。文章第一部分介绍“利奇马”概况并对比浙江、山东两地降水的不同特征,将“利奇马”极端降水分为两大阶段;第二部分从环流形势及其配置、水汽和能量输送、双台风作用等方面入手分析两阶段极端降水共同的有利因素;第三部分根据两阶段降水不同的特征对各自的成因进行回顾总结;最后对“利奇马”极端降水可能的进一步研究方向进行讨论。

## 1 “利奇马”概况

1909 号台风“利奇马”于 2019 年 8 月 4 日 06:00(世界时,下同)在西北太平洋生成,8 月 5—7 日在海上迅速发展增强并保持向西北方向移动,9 日 17:45 以中心附近最大风力为 16 级、最低气压为 930 hPa<sup>[26]</sup>的超强台风强度在浙江台州温岭城南镇登陆(图 1a)。随后继续向西北方向移动并迅速减弱,9 日 20:00 减弱为强台风,23:00 减弱为台风并转向偏北方向移动,经过浙江、江苏后进入黄海海域<sup>[27]</sup>。11 日 12:50,在山东青岛沿海二次登陆( $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,热带风暴),随后穿过山东半岛西部进入莱州湾回旋,直至 8 月 13 日 00:00 减弱为热带低压后停止编号<sup>[28-29]</sup>。受“利奇马”影响,浙江、江苏、安徽、山东等超 11 省份均出现暴雨以上级别的降水。利用客观天气图分析法<sup>[30-31]</sup>(objective synoptic

analysis technique, OSAT) 分离台风降水, 得到“利奇马”产生的7—13日累计降水量如图1a所示, 此文即针对OSAT分离所得的台风相关降水进行讨论和总结, 不包含远距离降水。可以看到, 多地

累计台风降水量超过250.0 mm, 其中浙江东部沿海地区以及山东中部地区是此次过程的两个极端强降水中心, 且对比发现两个极端降水中心附近均有丘陵或山地地形(图1b)。

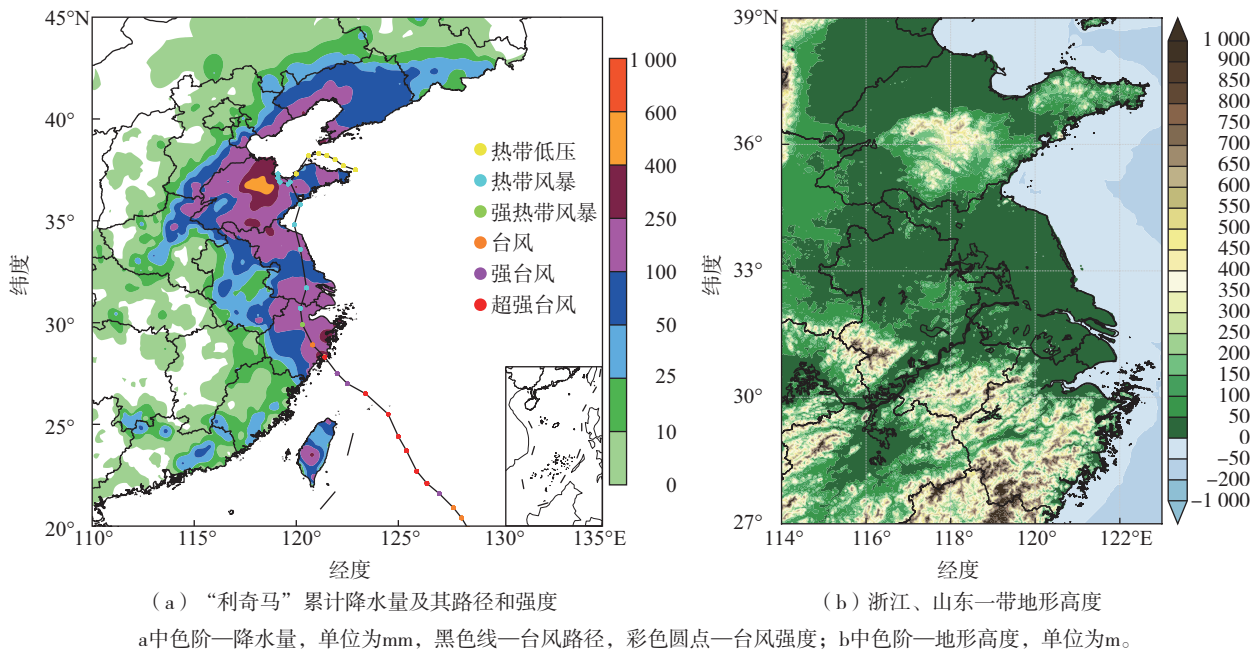


图1 2019年8月7—13日台风“利奇马”实况和浙江、山东一带地形高度分布

Fig.1 Actual situation of Typhoon Lekima from 7 to 13 August 2019 and distribution of terrains in Zhejiang and Shandong

浙江全省平均面雨量为165.0 mm, 部分地区降水强度为 $80\sim 100\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ , 40个站点过程降水量大于 $500.0\text{ mm}$ <sup>[32]</sup>, 其中最大值出现在台州括苍山( $833.0\text{ mm}$ )<sup>[19]</sup>, 温岭、北仑、玉环站台风过程降水量( $473.0$ 、 $405.0$ 、 $318.0\text{ mm}$ )均破纪录, 临海站10日00时24h降水量达 $326.0\text{ mm}$ , 破当地纪录<sup>[26]</sup>, 造成严重洪涝灾害。山东全省平均降水量达 $160.1\text{ mm}$ , 居有气象记录以来首位, 其中淄博、东营、滨州、潍坊等地平均降水量均超过 $250.0\text{ mm}$ , 长达80h的台风降水持续时间也是山东有气象记录以来最长<sup>[29]</sup>, 21个国家气象观测站日降水量突破历史极值<sup>[27]</sup>, 最大过程降水量为淄川西河镇梨峪口的 $676.6\text{ mm}$ , 最大降水强度为潍坊临朐辛寨镇丹河水水库的 $67.6\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。总之, 两省降水的极端性均十分显著。然而, 两地极端降水的特征有明显差异: 浙江9—14日降水强度大于 $10\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 尤其是 $10\sim 40\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的站点频次明显偏多, 而山东降水强度小于 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的站点平均降水持续时间明显更长; 同时, 浙江括苍山大部分降水时段降水强度超过

$30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ , 但主要降水过程仅持续24h左右, 而山东章丘降水持续时间超过2d, 但最大降水强度不到 $25\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。可见此次降水过程中, 浙江体现为极端的短时强降水, 效率高、强度大; 而山东则体现为极端过程降水, 降水强度相对较弱但持续时间异常长<sup>[18]</sup>。

根据极端降水的时空分布特征, 将“利奇马”降水分为两大阶段。第一阶段(8月9日00时—10日12时)为发生在浙江东部沿海和西北山区的降水: 前期是9日00—15时台风进入东海并逐渐靠近浙江沿海时, 在外围螺旋雨带影响下浙江东部沿海发生降水, 其中10—14时出现降水峰值; 后期是9日15时—10日12时台风登陆前后到减弱为热带风暴期间带来的台风中心附近眼墙强对流降水, 其中登陆后即9日18时—10日00时出现峰值<sup>[25-26]</sup>。第二阶段(10日03时—13日00时)主要是山东地区的降水: 前期(10日03时—11日06时)为台风外围云系与西风槽云系相互作用, 而后叠加影响, 冷暖空气碰撞对峙形成倒槽对流强降水; 后期(11日



06 时—13 日 00 时)则是台风本体长时间在莱州湾盘旋产生的持续性降水<sup>[33-34]</sup>。

### 2 “利奇马”极端降水过程成因分析

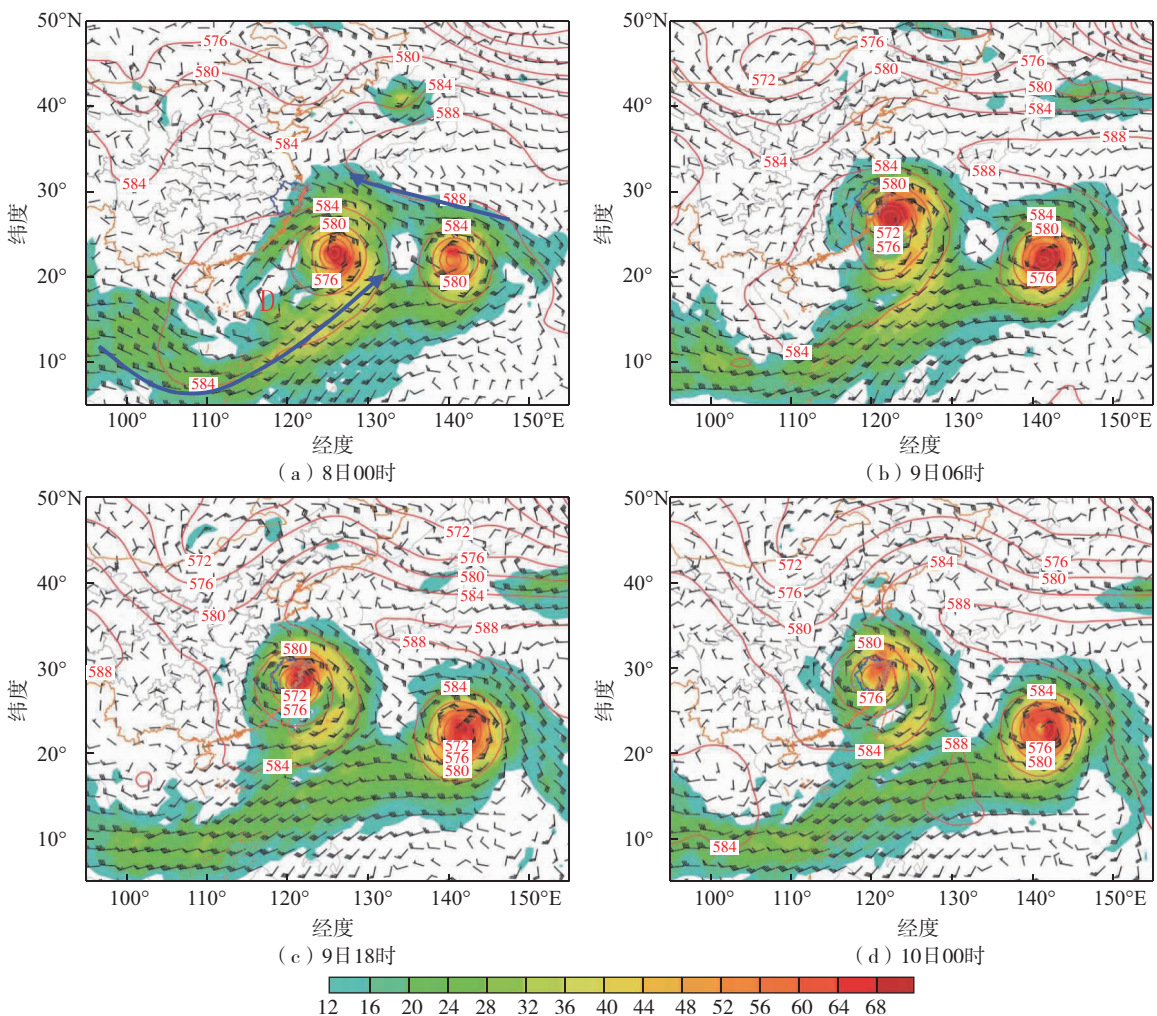
此次“利奇马”极端降水发生在有利的大尺度环境背景下,伴有充足的水汽和能量输送,同时 1910 号台风“罗莎”也起到积极作用。本节主要对整个降水过程中均产生了重要影响的 3 个因子进行回顾分析,同时关注每个因子在不同阶段发挥的不同作用。

#### 2.1 稳定的环流形势及其良好配置

稳定的环流形势及其良好配置既是第一阶段浙江高强度高效率降水产生的前提,也是第二阶段台风在山东经久不消的原因,副高、西风槽、大陆高压

以及低空急流等天气系统从多方面影响台风的移动和发展。

登陆前“利奇马”在东南气流的引导下向西北方向稳定移动(图 2)<sup>[35]</sup>,所经暖海面一直保持在 28℃ 以上<sup>[36]</sup>,是台风增强和维持的重要条件。Ding 等<sup>[37]</sup>将“利奇马”与其他台风对比发现其不仅登陆时强度更强,高强度维持时间更持久,且登陆后移动路径明显距海岸更近,陆上停留时间更长,降水量也更大。这是由于南亚高压加强东伸<sup>[38]</sup>、高空槽东移阻止副高西伸,台风在鞍型场中缓慢转向偏北方向移动,且引导气流相对较弱,“利奇马”分别以超强台风、强台风、台风强度在浙江境内维持 1 h、2 h、4 h<sup>[32]</sup>,直接导致极端降水的产生。



红色等值线—位势高度, 单位为dagpm; 风矢—风场, 风速单位为 $m \cdot s^{-1}$ ; 色阶—水汽通量, 单位为 $g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$ ; a中蓝色箭头—水汽通道, 字母“D”—南海低压。

图 2 500 hPa 位势高度场及 850 hPa 风场和水汽通量<sup>[35]</sup>  
Fig.2 Geopotential height field at 500 hPa and wind/vapor flux at 850 hPa<sup>[35]</sup>



10日12时—11日06时,200 hPa台风位于高空槽和南亚高压东部中心之间的西南急流入口区右侧,该气流最大达 $60\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (11日03时),此处的强辐散和抽吸作用及较弱的垂直风切变阻止了台风快速衰减,激发了次级环流的发展<sup>[23]</sup>。500 hPa台风逐渐并入槽区,高空槽造成的弱正位势涡度异常<sup>[23]</sup>及其下传<sup>[39]</sup>有利于释放不稳定能量,增强台风北部对流运动,并使高空急流与台风间的动力作用增强<sup>[40]</sup>。低空850 hPa增强的东南急流促进了辐合<sup>[34]</sup>。这样的环流配置使“利奇马”的动力条件比相似路径的0108号台风“桃芝”更有利<sup>[41]</sup>,表现为明显更强的低层辐合高层辐散、更剧烈的上升运动及400 hPa更大的正涡度值,有利于暴雨中心深厚垂直结构的长时间维持。

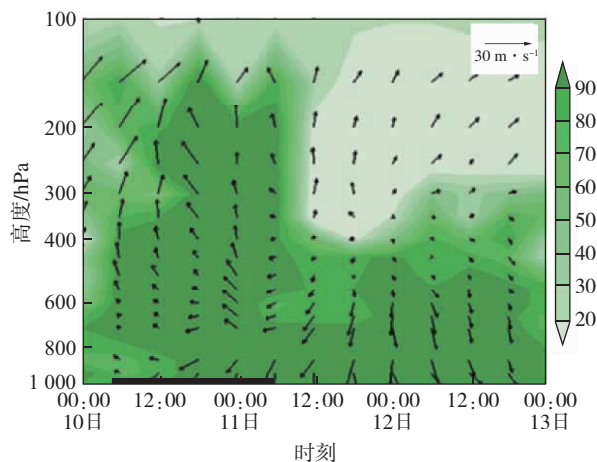
## 2.2 充足的水汽和能量

“利奇马”整个生命史均具备异常丰富的水汽条件,比湿维持在 $15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,整层大气可降水量维持在 $70\sim 80\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ 长达36 h<sup>[26]</sup>。除了登陆前从所经暖海面获得的水汽和能量储备<sup>[16]</sup>，“利奇马”主要通过两条水汽输送通道获得源源不断的水汽和能量(图2a):一条是来自南海和孟加拉湾的西南气流,另一条是西太平洋副高与“罗莎”之间的偏东气流。

8日(图2a)南海低压增强,西南季风占主导地位,风速最高为 $32\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,强水汽输送激发了对流不稳定能量的释放,有利于台风登陆前的加强。06—12时,偏东气流开始增强并起着引导汇流的作用<sup>[39]</sup>。翁之梅等<sup>[38]</sup>通过计算48 h后向追踪轨迹发现9日00—06时(图2b)水汽仍主要来自南海热带暖湿西南季风,这可能是由于台风从生成到登陆后直至离开浙江,正值南海夏季风爆发期间<sup>[6]</sup>。研究<sup>[42]</sup>发现浙江地区最强降水时段(9日18时—10日00时)的水汽辐合大值中心与水汽输送中心不一致,但与未来6 h实际暴雨落区相对应,且水汽通量辐合超过气候平均值5~6个标准差<sup>[35]</sup>,表明极端降水不仅需要充足的水汽,强水汽辐合也至关重要。另外,10日06时浙江西北部高达 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的K指数大值中心、强对流有效位能和较大抬升指数<sup>[32]</sup>等不稳定能量条件为西北山区的强降水做出贡献。

台风登陆后长时间维持同样离不开水汽和能量输送。高晓梅等<sup>[29]</sup>分析了暖云层厚度、大气可降水量、比湿以及低空风场等,表明10—11日山东上空集

聚充沛水汽,且“利奇马”较靠近海岸的特殊路径使输送过程变得更容易<sup>[37]</sup>。由图3可知,10日06时左右相对湿度从低层迅速增大,12时相对湿度大于90%的湿层向上扩展至150 hPa附近,且风随高度顺转有暖平流,强暖湿条件一直保持到11日06时之后,与强降水时段对应。与浙江地区类似,山东特大暴雨区与水汽辐合中心相吻合<sup>[27]</sup>。强水汽辐合区持续稳定地维持在台风倒槽及东南气流辐合处,加上台风西侧干冷气流与来自黄海的强盛暖湿气流交汇以及锋生作用,对流雨带发展旺盛<sup>[19]</sup>。11日00时台风发生变性,使暴雨区上空的锋区加强、湿层增厚,能量和水汽辐合程度均有所加强<sup>[27]</sup>。山东暴雨地区存在假相当位温( $\theta_{se}$ )锋区<sup>[34]</sup>,表现为高温高湿和弱湿对流不稳定,900~700 hPa东南气流与该锋区几乎垂直,暖空气与冷空气碰撞后被抬升,垂直速度达 $-6\text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ ,形成达 $-15\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 的强辐合中心,不稳定能量聚集,配合强水汽辐合上升释放凝结潜热,高层增暖,低层减压,又加强了辐合上升运动,正反馈作用有利于云带发展和降水增强<sup>[43]</sup>。



色阶—相对湿度,单位为%; 箭矢—风场,风速单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 横坐标粗线段—强降水时段。

图3 2019年8月10日—13日山东暴雨区域( $117.9^{\circ}\text{E}$ ,  $36.6^{\circ}\text{N}$ )风场和相对湿度的高度-时间演变<sup>[27]</sup>

Fig.3 Altitude-temporal evolution of wind field and relative humidity of the rainstorm area ( $117.9^{\circ}\text{E}$ ,  $36.6^{\circ}\text{N}$ ) in Shandong from 10 to 13 August 2019<sup>[27]</sup>

## 2.3 双台风的作用

虽然有研究<sup>[32]</sup>表明由于距离较远,“利奇马”与“罗莎”两台风之间直接的藤原效应并不明显,但台风“罗莎”仍然不同程度地影响了“利奇马”的移动、发展以及水汽输送。首先,在双台风系统的挤压

下,副高呈狭长状且位置偏东偏北致“利奇马”路径偏北而未经台湾地形削弱<sup>[6]</sup>并以高强度登陆。其次,对于“利奇马”的两个水汽通道,“罗莎”既能分流南部的的水汽,又能补充和增强东侧水汽,两种作用的强弱变化取决于两台风的相对位置<sup>[6]</sup>。11日00时之后,“罗莎”逐渐使“利奇马”与西南急流水汽输送通道隔断<sup>[29]</sup>,而两台风之间的东南气流明显加强,台风北侧水汽输送旺盛<sup>[23]</sup>,这可能是“利奇马”南部云系消失殆尽而东侧水汽通量大值中心及北侧强垂直运动中心得以长期维持的重要原因。同时,“罗莎”阻止了副高南落,减弱了引导气流向北的分量,是“利奇马”移速偏慢的重要原因之一。

### 3 分阶段极端降水成因

#### 3.1 第一阶段浙江极端降水成因

除了上述有利的大气环境以及充足的水汽和能量作为前提条件,“利奇马”在浙江地区产生如此高效率、高强度的降水,台风自身超强的强度和云系是主要原因,地形是造成降水增幅的重要因素,良好的动热力条件和云微物理过程的有利影响也起到了关键作用。

##### 3.1.1 超强的台风强度

“利奇马”登陆前迅速发展为超强台风,并维持长达51 h之后以风力为16级、最低气压为930 hPa的强度登陆,势必给沿海地区带来狂风暴雨。除此之外,“利奇马”的超强强度还体现为独特的双眼墙结构、强暖心强度以及强盛发展的中尺度对流云团。“利奇马”的双眼墙结构在8日06时左右形成,登陆前后即9日17时左右消失,内、外眼墙共存时间长达35 h,是典型的双眼墙结构维持型(concentric eyewall maintained, CEM)<sup>[44]</sup>台风,统计结果<sup>[45]</sup>表明这种特殊双眼壁结构的“9”字形台风<sup>[6]</sup>具有高强度、高湿度等特征,易产生强降水。研究<sup>[22]</sup>发现“利奇马”暖心强度与其等级呈明显正相关,登陆前23 h内暖心一直维持在10~14℃的极值附近,即使在登陆后台风强度迅速减弱的情况下,浙江极端降水期间暖心强度仍保持在5℃以上,表明台风具有大量热能聚集<sup>[46]</sup>,反映台风强度之强和维持之久。

强盛发展的中尺度对流云团是超强台风的一个重要特征,何立富等<sup>[19]</sup>研究发现台风深对流区的水平分布与强降水落区形成很好的对应(图4)。9日

12时登陆前台风北侧的螺旋云带对流发展旺盛并逐渐由东南侧逆时针向浙江旋转(图4a),沿海地区的降水强度为30~50 mm·h<sup>-1</sup>(图4e),17时登陆前后,中心附近雨带快速增强发展<sup>[38]</sup>(图4b、c),这可能与外眼墙半径缩小并和内眼墙汇合后增强增宽有关<sup>[45]</sup>。乐清湾附近台风核心密闭云区有黑体亮温小于或等于-70℃的中尺度对流云团以最高60~80 mm·h<sup>-1</sup>的强度维持长达5 h(图4f、g),对括苍山833.0 mm总降水量的贡献达40%左右<sup>[35]</sup>。登陆后5 h台风已逐渐减弱(图4d),但核心区及其北侧旺盛发展的对流云团仍然分别造成台州大部至宁波西南部、宁波东北部强度为25~70 mm·h<sup>-1</sup>的大暴雨(图4h)。国家气候中心台风灾害风险评估模型统计显示,“利奇马”风雨综合强度指数为158.6,为1961年至当时最大<sup>[18]</sup>。可见结构紧密而强盛发展的台风本体是造成浙江沿海极端暴雨的根本原因<sup>[26]</sup>。

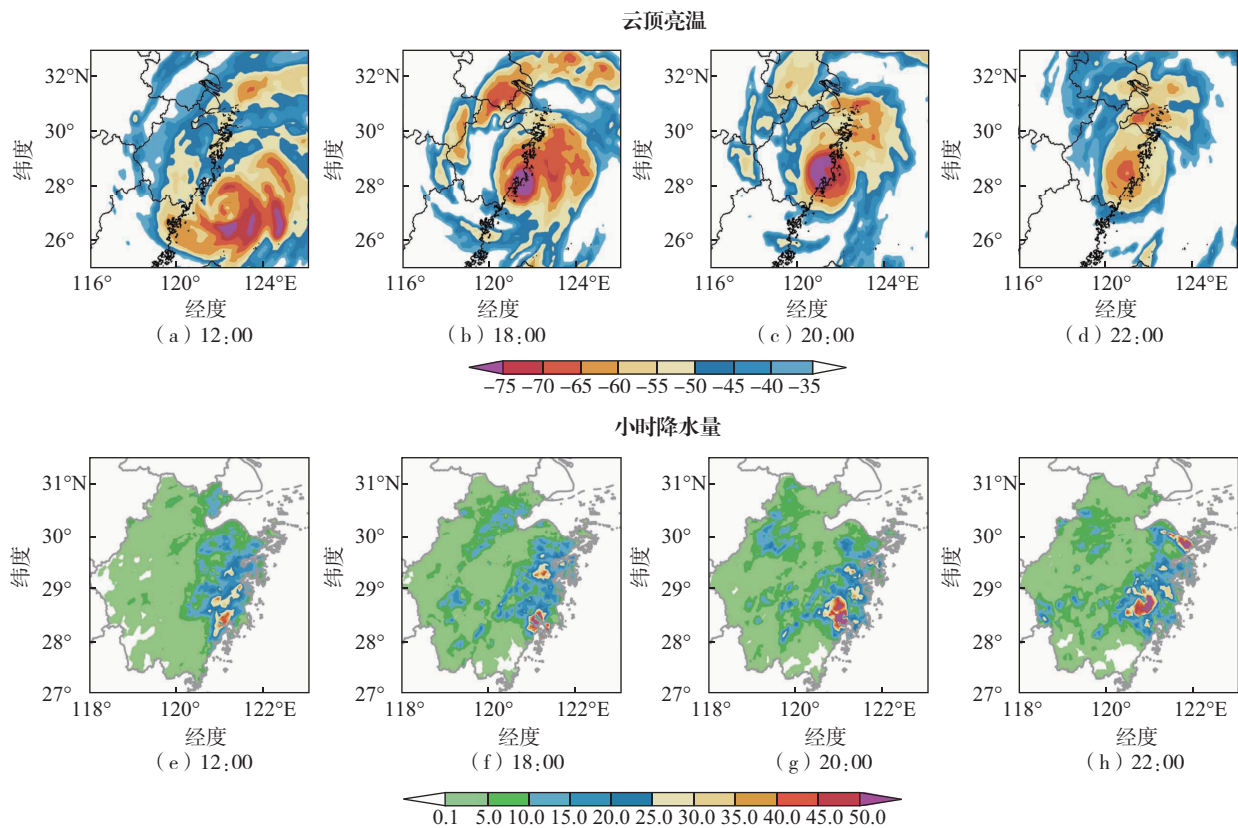
##### 3.1.2 地形的增幅作用

浙江极端降水的中心位于浙江东部沿海丘陵东南部和浙江西北山区北侧(图1a、b),表明地形是造成浙江台风暴雨增幅的重要原因<sup>[8,25]</sup>。浙闽丘陵地带西南部高,台州南部到温州北部地势自东向西逐渐增高,且在温州和台州交界处存在喇叭口<sup>[35]</sup>。一方面,地形的阻滞作用使台风系统移动减缓、降水持续时间延长、降水总量更大。“利奇马”西北行移速较同期台风偏慢<sup>[18]</sup>,根据中央气象台数据记录,“利奇马”在海面上移速基本保持在20 km·h<sup>-1</sup>以上,但从近海(钓鱼岛附近)到登陆后12 h,由于受到浙江东部地形的摩擦和山脉的阻挡,移速仅为15 km·h<sup>-1</sup>左右<sup>[32]</sup>,而越台州西部山区后经过相对平坦的地势时在偏南气流引导下移速迅速加快,以20~30 km·h<sup>-1</sup>的速度北上。

另一方面,山地地形的动力抬升和辐合作用对降水的增益解释了约50%的总降水强度差异,登陆前后正地形增益区在水汽条件相对劣势的情况下均出现强度明显超过水汽辐合中心的降水<sup>[42]</sup>。括苍山站(海拔1382 m)总降水量达833.0 mm,而距离最近的羊棚头村站(海拔142 m)降水量与之悬殊,仅为215.7 mm。王凯等<sup>[8]</sup>通过对比试验发现削减浙江东部地形后降水分布变得均匀,雨量明显减小,天台山、四明山和括苍山附近的雨量中心基本消失,原辐合中心也减弱或消失,体现了浙江东部地形在

此次极端降水过程的重要作用。根据图1,浙江东部沿海两个高山区附近各有一强降水中心与之对应,结合台风流场过境风向分析发现,温州台州交界处的喇叭口地形对登陆前台风北侧与山脉东北—西南走向几乎垂直的偏东气流起到显著的抬升与辐合

作用,因此总降水量最大的站点大多分布在迎风坡<sup>[8]</sup>。台风登陆后,浙江西北部东北—西南走向的天目山对偏西偏北风的抬升作用导致迎风坡降水增幅明显<sup>[32,35]</sup>。另外,海岸线附近的摩擦辐合和抬升也是台风次级环流产生和降水增强的重要原因<sup>[38]</sup>。



a、b、c、d中色阶—云顶亮温,单位为 $^{\circ}\text{C}$ ; e、f、g、h中色阶—小时降水量,单位为 $\text{mm}$ 。

图4 2019年8月9日FY-2G卫星云顶亮温和小时降水量演变<sup>[26]</sup>

Fig.4 Evolution of black body temperature from FY-2G satellite and hourly precipitation on 9 August 2019<sup>[26]</sup>

### 3.1.3 良好的动热力条件

台风在近海的高强度维持得益于环境水平风垂直切变维持较小值<sup>[6]</sup>、高低空散度场配合<sup>[19]</sup>及正涡度加强和下传<sup>[16]</sup>等多方面因子。浙江东部沿海山区地形附近特大暴雨区(120.5°~122.0°E, 28°~30°N)的涡度、散度和垂直速度时空分布如图5所示,该地区对流层整层维持正涡度,台风登陆前10h左右500 hPa以上高空垂直运动和辐散出现峰值,700 hPa以下的上升运动和辐合也在此时开始迅速增强,为第一阶段前期降水的峰值奠定基础。登陆前后垂直运动、低层辐合高层辐散和正涡度先后达到最强,其中垂直上升运动集中在900~500 hPa并延伸至100 hPa以上,抽吸作用明显,对流深厚而旺盛,且12—20时垂直差分涡度平流的分布有利于于台

风内核区左前象限出现最强对流<sup>[25]</sup>,致第一阶段后期降水达到更强的峰值。另外,垂直风切变(vertical wind shear, VWS)强度与雨带降水率呈反相变化关系<sup>[38]</sup>,9日00—12时VWS持续减小而台风雨带降水率快速发展加强,与浙江前期降水迅速增强时段对应;登陆前环境水平风垂直切变维持在 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,登陆时仅为 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ <sup>[6]</sup>,内部通风作用减弱至最小。其间强降水上空700 hPa以下被高温高湿弱不稳定层结或中性层结大气控制,配合700 hPa附近中心值达 $-8\text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ 的剧烈上升运动中心,易激发深层对流<sup>[35]</sup>。

热力条件对浙江降水有重要贡献。登陆前台风从高海面温度(29.6~30.4 $^{\circ}\text{C}$ )的洋面获得了感热和大量潜热<sup>[20]</sup>,直至登陆后2h暖心强度都一直维持

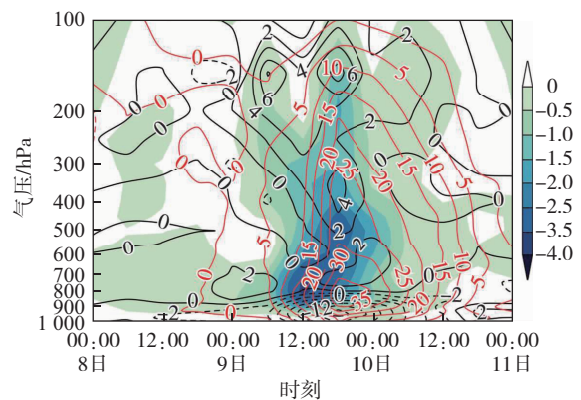


在 10 °C 以上,最高超过 12 °C<sup>[22]</sup>。综合考虑了动、热力作用的非地转湿  $Q$  矢量的辐合大值区(大于  $10 \times 10^{-6} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ )与台风短时强降水落区有很好的对应<sup>[6]</sup>。浙江沿海特大暴雨区的大气热源主要来自垂直运动释放的凝结潜热<sup>[26]</sup>,即低层暖湿空气被强烈抬升,大量积云对流发展并增强从而释放潜热增暖,对强降水的发生和低压环流的维持有积极作用。另外,旋转风和辐散风对水汽、能量和热量的输送起着再分配作用,二者分别发挥输送和聚集的功能<sup>[6]</sup>。同时,台风中心湿层高能区深厚发展(最高可至 150 hPa),急流特征明显,加上强烈上升运动和水汽辐合及持续的锋生强迫<sup>[25]</sup>,理想的热动力条件给浙江带来高效率、高强度的热带深对流降水<sup>[19]</sup>。

3.1.4 云微物理过程的可利影响

浙江极端降水与云微物理过程有关,温州双偏振雷达资料分析<sup>[36]</sup>表明台风登陆后北仑地区上空富含大水滴;全球降水测量卫星遥感反演结果<sup>[25]</sup>表明近岸时台风的眼墙区域以热带暖云对流型降水为主,雨滴具有更大的有效直径、更高的雨滴数密度,有利于第一阶段降水峰值的出现。Zhao 等<sup>[47]</sup>采用冷暖雨与总降水定量分离方法分析发现“利奇马”冷雨量占总降水量的 3/4,在降水快速增强中起主导作用。由图 6 可知,自 9 日 00 时起,由于上升运动(图 6b)造成水汽凝结,中低层云水和雨水以及高层冰晶逐渐增加(图 6a),10 时左右上升运动迅速增强,对应的水成物含量也快速增加并维持了较长

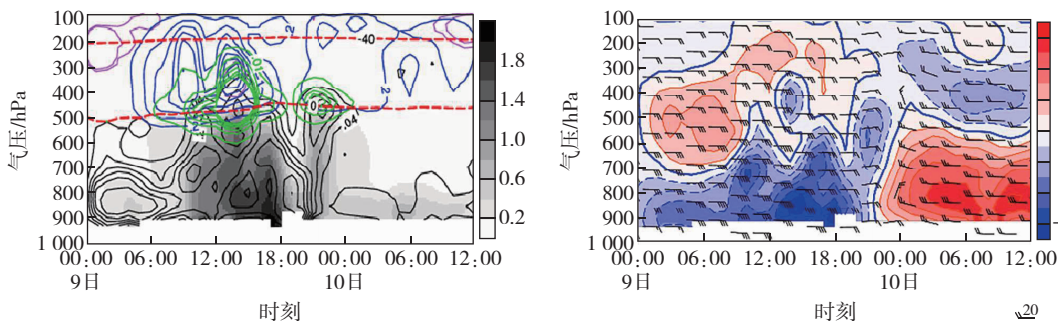
时间,登陆前后达到最盛,其中水汽凝结过程及雨滴对云滴的吸积最活跃。另外,雨滴收集霰然后融化的过程以及雨滴的微弱蒸发对极端降水的形成有相当大的贡献,使得“利奇马”在浙江造成了比与之相似的两个台风(1814 号台风“摩羯”和 2004 号台风“黑格比”)更极端的降水。还有研究<sup>[48-49]</sup>采用不同的云微物理参数化方案对“利奇马”进行模拟得到的结果有显著差异,表明云微物理过程与“利奇马”降水的强度、结构演变和云系中水凝物的变化密切相关。



色阶—平均垂直速度,单位为  $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 红色等值线—涡度,单位为  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ; 黑色等值线—散度,单位为  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。

图 5 2019 年 8 月 8 日 00:00—11 日 00:00 特大暴雨区 ( $120.5^\circ \sim 122^\circ \text{E}, 28^\circ \sim 30^\circ \text{N}$ ) 的平均垂直速度、涡度及散度的垂直剖面<sup>[26]</sup>

Fig.5 Vertical profile of mean vertical velocity, vorticity and divergence over extremely torrential rain area ( $120.5^\circ - 122^\circ \text{E}, 28^\circ - 30^\circ \text{N}$ ) from 00:00 UTC 8 to 00:00 UTC 11 August 2019<sup>[26]</sup>



(a) 水成物混合比及温度的高度-时间剖面

(b) 垂直速度和水平风矢量的高度-时间剖面

a 中色阶—云水的水成物混合比,黑色等值线—雨水的水成物混合比,紫色实线—冰晶的水成物混合比,蓝色实线—雪的水成物混合比,绿色实线—霰的水成物混合比,单位为  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; a 中红色虚线—温度,单位为  $^\circ \text{C}$ ; b 中色阶和等值线—垂直速度,其中蓝色表示上升气流,红色表示下降气流,蓝色粗实线—零等值线,单位为  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; b 中风矢—风场,风速单位为  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

图 6 “利奇马”影响期间括苍山站水成物混合比及相应动力场的高度-时间剖面<sup>[47]</sup>

Fig.6 Height-time cross section of hydrometeor mixing ratios and corresponding dynamic field at Kuocangshan station during the Lekima period<sup>[47]</sup>

综上,浙江极端降水的天气学概念图如图7所示,在双台风系统挤压以及西风槽和南亚高压阻挡下,副高偏东偏北,引导气流偏弱,南海低压增强了西南季风输送,配合偏东气流使充满水汽和能量的“利奇马”绕

过台湾经过暖海面以超强台风登陆,台风螺旋雨带及中心附近深对流区在浙江东部沿海和西北山区又因有利地形得到降水增幅,再加上有利的动热力条件和云微物理过程,共同造成第一阶段的浙江极端降水。

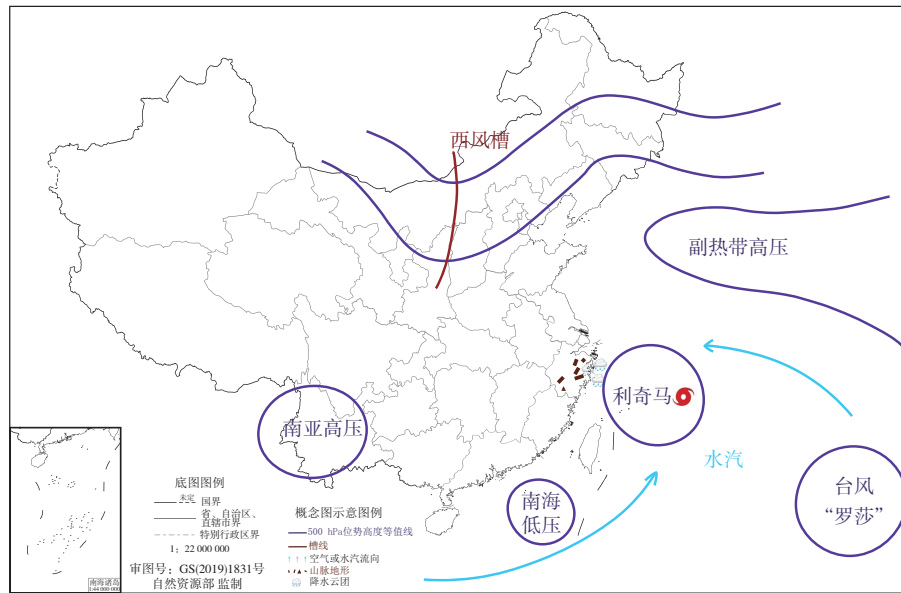


图7 第一阶段浙江极端降水天气概念模型

Fig.7 Conceptual diagram of the first stage of extreme precipitation in Zhejiang

### 3.2 第二阶段山东极端降水成因

山东极端降水中心基本在高度为300~600 m的鲁中地形区北侧和东南侧迎风坡(图1),但鲁中地形影响的主要是极端降水中心的位置(淄博西河镇)和强度,对山东大范围降水的增强作用并不明显且相对次要<sup>[29,33]</sup>,下文将不对此单独讨论。台风登陆后非对称性结构明显增强,北侧螺旋云带发展旺盛,先后有5条中尺度雨带(RB1—5)影响山东(图8),形成“列车效应”<sup>[18]</sup>。RB1—4的生成均与西风槽有关,属于第二阶段前期,其中受RB3—4影响时山东降水最强,鲁中、鲁西北及鲁南等地区均出现6 h内超100.0 mm的强降水<sup>[29]</sup>。位于台风中心北侧的RB5则属于第二阶段后期,于11日06时左右开始影响山东,而后台风本体长时间维持直至13日才逐渐消亡。因此山东的极端降水除了上述有利的大气环境和丰富的水汽能量输送作为必要条件以及双台风和地形起到的辅助作用,直接原因是台风倒槽被西风槽冷空气入侵并产生相互作用,而后期最重要的原因是台风在山东长时间停滞。

#### 3.2.1 西风槽冷空气入侵

山东此次强降水与冷空气密切相关<sup>[27,29]</sup>。第二

阶段初,山东东北侧一东北—西南向槽前雨带引起的冷池由于热力、湿度梯度而形成辐散性出流,向东南与台风北侧边缘的暖湿气流汇合,相继产生RB1、RB2两条线性对流雨带。冷空气穿过RB2由中层侵入后下沉而暖湿气流倾斜上升,因此在不同高度触发了RB3(700 hPa)和RB4(850 hPa),后者更强<sup>[33]</sup>。

随着中纬度槽加深(图9),其南部偏西风冷平流由台风西侧逐渐靠近并入侵,其中500 hPa冷平流强度更强而低层850 hPa范围更广(图9a、c),台风北侧温度梯度不断加大,对称不稳定性增强<sup>[23]</sup>。11日00时(图9b、d),西风槽后冷平流明显增强,台风在水平方向呈“半冷半暖”,尤其是500 hPa冷平流的范围和强度均增强,与台风北侧东南暖湿气流碰撞、辐合造成锋生,RB3、RB4相继向西北方向发展和传播,造成鲁中地区此次最强降水。冷空气由低层渗透进暖湿气流底部形成东北风冷垫,增强了动力辐合和上升运动,降水得到增强和维持<sup>[29]</sup>。11—12日,低层冷空气侵蚀程度比中层更强,结合热力锋参数(thermal front parameter,TFP)和锋生函数可知“利奇马”斜压性变得更明显,形成一支与气旋中心相连的暖锋,至此已完全变性为保持一定强度暖心结构的温带气

旋<sup>[22]</sup>。其间山东直接受到台风螺旋雨带 RB5 影响,与典型台风主雨带不同<sup>[33]</sup>,这种中纬度极锋云带与台风云团发生连结而形成的稳定维持云带将减缓台风移速并带来持续暴雨<sup>[50]</sup>。由于此次冷空气与台风环流的辐合抬升同时造成了水平锋生和垂直锋消,前

者有利于水汽输送和辐合抬升,后者不利于对流不稳定能量的累积和触发,因此系统稳定维持<sup>[43]</sup>,锋区保持少动,随高度明显西倾,海上暖湿气流沿锋面维持较弱的倾斜上升运动,造成第二阶段后期持续时间相当长的稳定性降水<sup>[19]</sup>。

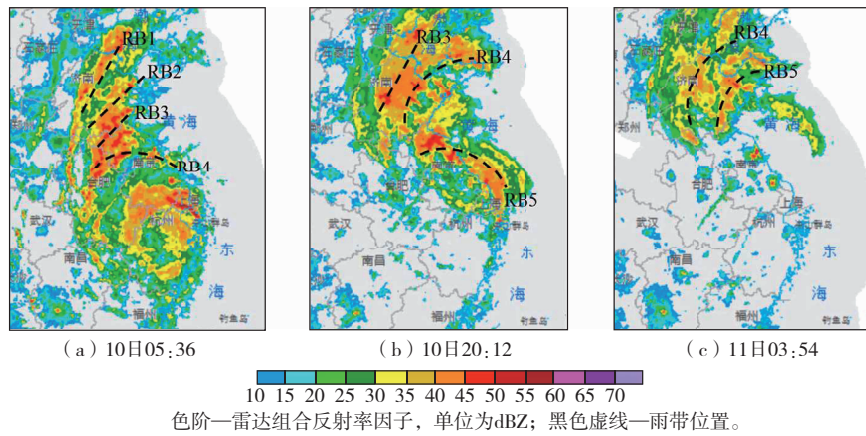


图 8 观测的雷达组合反射率因子<sup>[33]</sup>  
Fig.8 Observed composite radar reflectivities<sup>[33]</sup>

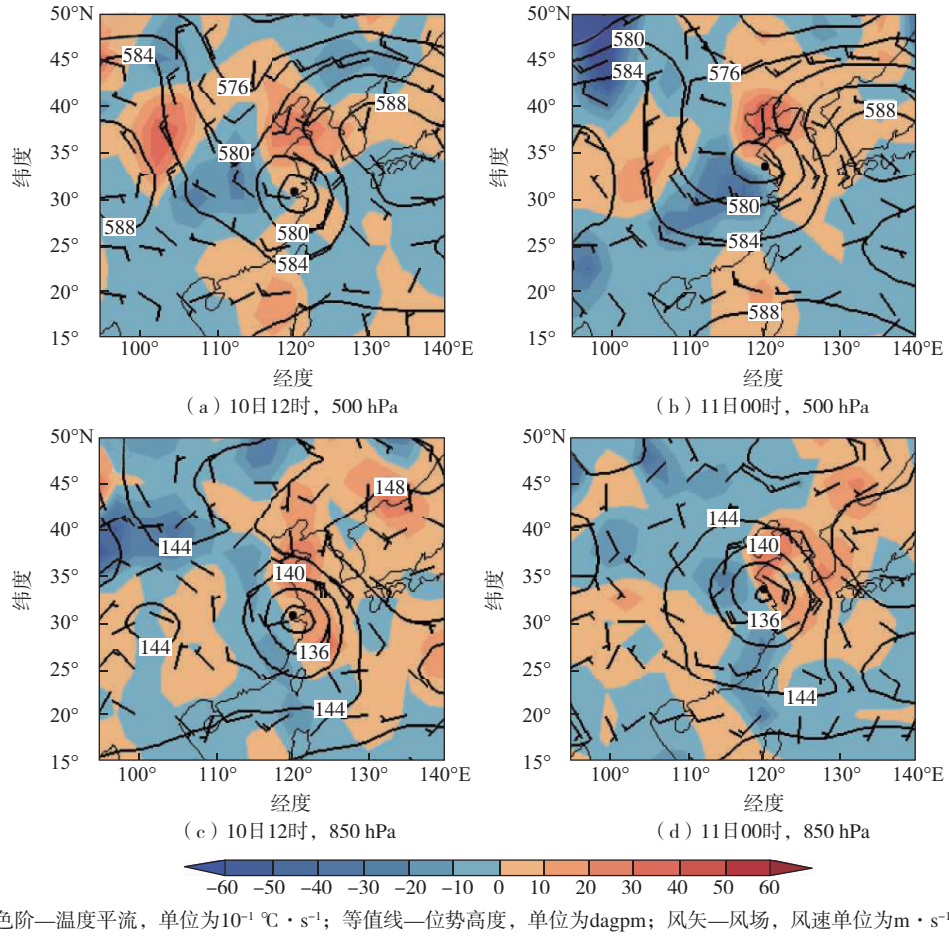


图 9 10 日 12 时、11 日 00 时 500 hPa 和 850 hPa 位势高度、风场和温度平流<sup>[27]</sup>  
Fig.9 Geopotential height, wind field and temperature advection at 500/850 hPa at 12:00 UTC 10 and 00:00 UTC 11<sup>[27]</sup>



### 3.2.2 台风本体长时间停滞

山东地区形成极端过程降水量的主要原因是第二阶段后期台风本体超长时间的影响。“利奇马”经过浙江丘陵地区之后在西风槽前和副高西侧偏南气流共同引导下以  $20 \sim 30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的移速迅速经过地形相对平坦的江苏并北上,而进入黄海后台风移速迅速减慢至  $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  左右二次登陆,以  $5 \sim 10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的移速在山东半岛回旋徘徊超过 24 h 并最终消亡,直接造成山东及周边地区持续性弱降水的发生。

与台风在浙江移速减缓主要受地形摩擦不同,“利奇马”影响山东期间缓慢移动主要受环流形势制约。“利奇马”从青岛二次登陆到在莱州湾停止编号经历长达 38 h,相比之下,与之路径相似的台风“桃芝”仅 3 h 就经过了山东(2001 年 8 月 1 日),从而造成显著不同的累计降水量<sup>[41]</sup>。二者影响时间的不同正是由环流形势的显著差异所造成的:“桃芝”和“利奇马”两台风影响山东期间均有两高(副高和大陆高压,下同)对峙,形状和位置也基本相

似,但“利奇马”期间两高强度明显偏弱,台风与副高的距离明显更远,另有一台风“罗莎”阻挡副高南落,使这一形势更加稳定,偏南引导气流十分弱<sup>[41]</sup>,且相对较弱的西风槽并入产生的华北弱反气旋环流更阻止了台风北上。总之,有利的阻塞形势配合上述冷暖空气对峙和锋生锋消等因素使“利奇马”在山东地区打转停滞,超长的影响时间导致极端的过程降水。

综上,山东极端降水的天气学概念图如图 10 所示,在两高一低的阻塞形势下“利奇马”沿靠近海岸的路径向偏北方向缓慢移动。“罗莎”引导西南水汽并增强东南水汽输送,高空南亚高压东部中心北侧急流入口区有强辐散,中低层来自海上的暖湿空气与槽后干冷空气碰撞,均有利于对流复合体发生发展,台风倒槽与西风槽云系相互作用产生前期强降水。后期冷空气入侵台风内部,暖湿空气沿冷垫爬行,台风在水汽和能量补充下盘旋并维持,持续的锋面性降水造成极端过程降水量。地形仅主要影响降水中心的降水量和位置,增幅作用不显著。

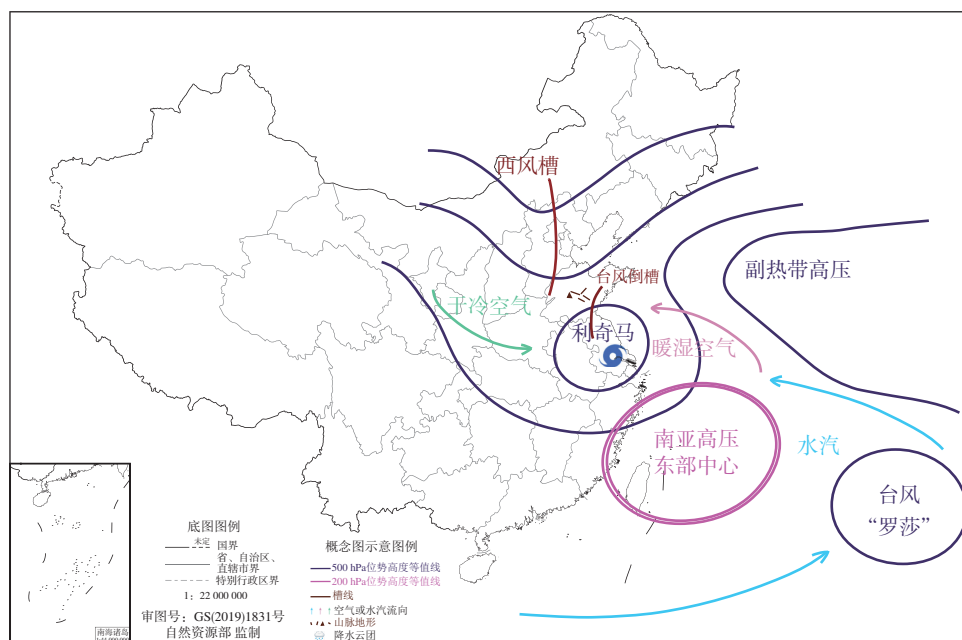


图 10 第二阶段山东极端降水天气概念模型

Fig.10 Conceptual diagram of the second stage of extreme precipitation in Shandong

## 4 总结与讨论

基于国内外对 1909 号超强台风“利奇马”的部分研究成果,此文从大尺度天气形势、台风自身强

度、动热力因子、云微物理、水汽和能量以及地形等方面,对两个降水中心即浙江、山东对应的两大阶段极端降水异同成因分别进行了总结。

(1) 影响极端降水全过程的因子:①西风槽、大

陆高压、副高组成的阻塞形势减缓了台风移速,同时影响台风路径;②西南季风和东南气流两个水汽输送通道为台风强度维持和降水的发生提供充沛的水汽和能量,其中浙江降水主要由西南季风输送水汽,山东极端降水主要受偏东气流影响;③另有台风“罗莎”通过影响副高位置、台风移速以及对水汽的引导和增强作用直接或间接地影响着“利奇马”极端降水。

(2)两阶段各自的特征及成因:①第一阶段浙江极端降水分为前期外围螺旋云带降水和后期眼墙强对流降水,特点是高效率、高强度。“利奇马”在有利条件下以超强强度登陆,较慢的移速使其从前期的外围螺旋云带到后期旺盛的内部云墙均严重影响了浙江。地形的抬升使降水进一步增幅,同时降水中心附近还具备较好的云微物理条件和动热力条件。②第二阶段山东极端降水又可分为前期倒槽降水以及后期锋面性持续降水,超长的降水时间和极端的过程降水量是其独特之处。前期台风倒槽被西风槽冷空气入侵并相互作用产生降水,而后二者叠加影响使台风倒槽降水达到峰值,后期变性的台风在阻塞形势下以极缓的移速在山东地区盘旋,暖湿空气在冷垫上爬升而带来持续性锋面降水,地形仅主要影响极端降水中心的降水量和位置。

虽然“利奇马”极端降水成因的研究取得了众多成果,但目前对该个例仍有值得深入探究的问题。(1)多数研究围绕浙江、山东极端降水开展,极少数研究<sup>[51]</sup>对台风残涡给东北地区带来的大暴雨进行分析,而台风所经江苏南部和东北部、安徽东南部等地区也产生了极端降水并造成严重灾害,相关研究却更少,这些地区降水的成因和独特性有待进一步研究和探讨。(2)“利奇马”降水时空分布不均匀,不同时期、不同区域的中小尺度结构和湍流特征有所不同<sup>[52]</sup>,其变化机理及对降水的影响仍待更详细地研究和讨论,如台风经过湖泊、山脉等不同下垫面对“利奇马”内部的中小尺度结构发展演变有哪些作用?(3)山东极端降水主要发生在台风变性前12 h与台风变性后6 h,部分研究<sup>[22,27]</sup>对台风变性进行了分析,但关于变性对台风降水产生影响的动力过程有待进一步探究。(4)前期研究对台风远距离降水在概念上存在模糊不清的现象,如个别研究

以降水站点与台风中心之间的距离大于800 km来判断远距离降水<sup>[33]</sup>,而台风远距离降水的定义是:①降水发生在台风的环流之外,②降水与台风本体降水之间有间隔,③降水与台风存在密切的内在联系<sup>[53]</sup>。因此,在之后的研究中对台风远距离降水的界定还需谨慎与统一。

现已有学者基于“利奇马”对台风极端降水的预报方法进行了改进研究,如Jia等<sup>[28]</sup>将台风强度引入登陆台风降水的动力统计相似集合预报模型(the Dynamical-Statistical-Analog Ensemble Forecast model for Landfalling Typhoon Precipitation, the DSAEF\_LTP model)对“利奇马”开展试验使模型得到改进,赵琳娜等<sup>[54]</sup>建立欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)降水集合预报的贝叶斯模型平均(Bayesian model averaging, BMA)模型并发现该模型对“利奇马”降水集合预报有较好的订正效果,能有效改善预报离散度,提高了暴雨及以上降水落区预报的准确性。但数值模式对此次极端降水量的预报偏小,需后期主观订正调整<sup>[55]</sup>。一方面,目前数值模式预报精度仍需提高,另一方面,台风极端降水成因复杂,且对台风的观测仍然有限。因此,台风极端降水的形成机理及其预报方法的提高仍是需要长期探索的科学问题。

## 参考文献:

- [1] 陈联寿,孟智勇.我国热带气旋研究十年进展[J].大气科学,2001,25(3):420-431.
- [2] CHEN L S, LI Y, CHENG Z Q. An overview of research and forecasting on rainfall associated with landfalling tropical cyclones [J]. Adv Atmos Sci, 2010, 27(5): 967-976.
- [3] 陈联寿,许映龙.中国台风特大暴雨综述[J].气象与环境科学,2017,40(1):3-10.
- [4] 雷小途,陈联寿.热带气旋的登陆及其与中纬度环流系统相互作用的研究[J].气象学报,2001,59(5):602-615.
- [5] 王军,席乐,王超杰,等.“温比亚”引发河南特大暴雨的中尺度系统特征分析[J].气象与环境科学,2021,44(4):16-23.
- [6] 韩芙蓉,鹿翔,冯晓钰,等.台风 Lekima(1909)登陆前

- 后动热力结构变化对浙江极端降水的影响[J].热带气象学报,2021,37(1):34-48.
- [7] 王晶晶.台风“利奇马”边界层对称和非对称结构的特征分析[D].南京:南京信息工程大学,2021.
- [8] 王凯,李渊,高丽,等.浙东地形对台风性质的影响:以1909号台风“利奇马”为例[J].海洋预报,2022,39(1):11-20.
- [9] 冉令坤,李舒文,周玉淑,等.2021年河南“7.20”极端暴雨动、热力和水汽特征观测分析[J].大气科学,2021,45(6):1366-1383.
- [10] 张晓慧,张立凤,周海申,等.双台风相互作用及其影响[J].应用气象学报,2019,30(4):456-466.
- [11] 钮学新,杜惠良,滕代高,等.影响登陆台风降水量的主要因素分析[J].暴雨灾害,2010,29(1):76-80.
- [12] 杨晓亮,杨敏,金晓青,等.“23.7”河北罕见特大暴雨过程降水演变与中尺度特征分析[J].暴雨灾害,2024,43(1):1-12.
- [13] 余贞寿,廖胜石,黄克慧,等.0414号台风“云娜”的数值模拟[J].气象学报,2005,63(6):903-914.
- [14] 马蕴琦,任福民,冯恬,等.强热带风暴“碧利斯”(0604)极端降水研究回顾[J].海洋气象学报,2020,40(3):1-10.
- [15] XU H Y, ZHAI G Q, LI X F. Convective-stratiform rainfall separation of typhoon Fitow (2013): a 3D WRF modeling study[J]. Terr Atmos Ocean Sci,2018,29(3):315-329.
- [16] 陈龚梅,罗厚炙.1909台风“利奇马”大风成因分析[J].民航学报,2021,5(6):67-70.
- [17] 王晓,余晖,鲍旭炜,等.“菲特”(1323)台风降水的极端性分析[J].气象科学,2017,37(4):514-521.
- [18] 郭云谦,王毅,沈越婷,等.台风“利奇马”不同区域降水极端性特征及成因分析[J].气象科学,2020,40(1):65-77.
- [19] 何立富,陈双,郭云谦.台风利奇马(1909)极端强降雨观测特征及成因[J].应用气象学报,2020,31(5):513-526.
- [20] 李瑞,高帆,尹承美,等.超强台风“利奇马”(1909)强度变化与降水结构分析[J].应用海洋学学报,2022,41(1):136-148.
- [21] BAO X W, WU L G, ZHANG S, et al. A comparison of convective raindrop size distributions in the eyewall and spiral rainbands of Typhoon Lekima (2019)[J]. Geophys Res Lett,2020,47(23):e2020GL090729.
- [22] 沈阳,吴海英,孙燕,等.热带气旋“利奇马”(1909)暖心演变分析及变性过程探讨[J].气象科学,2020,40(1):53-64.
- [23] 李美颖,李艳,林曲凤,等.中纬度高空槽—台风相互作用对台风“利奇马”远距离暴雨的影响[J].气象科学,2022,42(1):89-98.
- [24] WANG Y P, WANG T. Numerical simulation of a heavy rainstorm in Northeast China caused by the residual vortex of typhoon 1909 (Lekima) [J]. Atmosphere, 2021, 12(1):120.
- [25] 陈涛,董林,罗玲,等.台风利奇马登陆期间的对流结构特征及对强降雨影响[J].气象,2021,47(12):1433-1443.
- [26] 郑铮,潘灵杰,钱燕珍,等.台风“利奇马”造成浙江沿海极端强降水的演变特征[J].干旱气象,2021,39(2):269-278.
- [27] 郑丽娜,王媛,张子涵.2019年台风利奇马引发山东特大暴雨成因分析[J].气象科技,2021,49(3):437-445.
- [28] JIA L, JIA Z, REN F M, et al. Introducing TC intensity into the DSAEF\_LTP model and simulating precipitation of super-typhoon Lekima (2019) [J]. Quart J Royal Meteor Soc,2020,146(733):3965-3979.
- [29] 高晓梅,李峰,王文波,等.台风“利奇马”引发山东极端暴雨的多尺度特征分析[J].海洋气象学报,2022,42(2):33-43.
- [30] 任福民,GLEASON B, EASTERLING D.一种识别热带气旋降水的数值方法[J].热带气象学报,2001,17(3):308-313.
- [31] REN F M, WANG Y M, WANG X L, et al. Estimating tropical cyclone precipitation from station observations [J]. Adv Atmos Sci,2007,24(4):700-711.
- [32] 项素清,周梅,徐亚钦,等.“利奇马”台风的特点及极端强降水的成因分析[J].海洋预报,2020,37(5):76-85.
- [33] GAO Y, ZHANG Y, LEI L L, et al. Multi-scale characteristics of an extreme rain event in Shandong Province, produced by Typhoon Lekima (2019) [J]. Front Earth Sci,2023,10:1093545.
- [34] 王楠喻,王雪,娄盼星,等.台风“利奇马”引发山东强降水成因分析[J].海洋气象学报,2021,41(1):119-128.
- [35] 娄小芬,马昊,黄旋旋,等.台风“利奇马”造成浙江极端降水的成因分析[J].气象科学,2020,40(1):78-88.
- [36] 余茁夫,马烁,胡雄,等.基于多源数据的“利奇马”台风大气环流、云及降水特征分析[J].气象科学,2020,



- 40(1):41-52.
- [37] DING Y F, LIU J P, CHEN S Z, et al. Uniqueness of Lekima compared to tropical cyclones landed in the east coast of China during 1979–2019[J]. *Acta Oceanol Sin*, 2020,39(8):121-124.
- [38] 翁之梅, 贲海荣, 高丽, 等. 台风“利奇马”登陆前后雨带强度与结构变化特征分析[J]. *气象科学*, 2020, 40(3):325-332.
- [39] 向纯怡, 赵海坤, 刘青元, 等. 1909号台风“利奇马”登陆后强降水分布特征[J]. *气象科学*, 2020, 40(3):294-302.
- [40] 李美颖. 高空槽对台风快速增强及远距离暴雨的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020.
- [41] 高留喜, 刘畅, 丛春华, 等. 两个相似路径台风造成山东降水明显差异的成因分析[J]. *海洋气象学报*, 2020, 40(4):60-68.
- [42] 刘晓汝, 谢作威. 2019年超强台风“利奇马”引发浙江特大暴雨过程分析[J]. *气象科学*, 2020, 40(1):89-96.
- [43] 孙密娜, 韩婷婷, 徐姝. 冷空气在北上台风“利奇马”致灾暴雨中的作用分析[J]. *自然灾害学报*, 2021, 30(1):201-212.
- [44] 程小平, 费建芳, 李湘成, 等. 台风双眼墙形成及眼墙替换过程的研究进展[J]. *地球物理学报*, 2021, 64(6):1857-1868.
- [45] HOUZE R A Jr, CHEN S S, SMULL B F, et al. Hurricane intensity and eyewall replacement [J]. *Science*, 2007, 315(5816):1235-1239.
- [46] 刘涛, 端义宏, 冯佳宁, 等. 台风利奇马(1909)双眼墙特征及长时间维持机制[J]. *应用气象学报*, 2021, 32(3):289-301.
- [47] ZHAO D J, GAO W H, XU H X, et al. A modeling study of cloud physical properties of extreme and non-extreme precipitation in landfalling typhoons over China [J]. *Atmos Res*, 2022, 277:106311.
- [48] 李冠秀, 吴宛真, 黄伟, 等. 不同微物理方案对台风“利奇马”雨带模拟的影响分析[J]. *热带气象学报*, 2022, 38(5):704-714.
- [49] XU F Y, YUAN H L, LIN L M, et al. Convective-scale ensemble forecasts of the heavy precipitation of Typhoon Lekima (2019) in Zhejiang Province [J]. *Atmos Res*, 2023, 283:106543.
- [50] 陈联寿. 登陆台风特大暴雨成因分析[J]. *气象*, 1977, 3(11):10-13.
- [51] 胥珈珈, 零磊, 程琳, 等. 台风“利奇马”引发东北地区大暴雨过程的异常环流分析[J]. *气象灾害防御*, 2021, 28(4):40-43.
- [52] 蔡菊珍, 徐集云, 邵鑫, 等. 利奇马台风风场与湍流特征分析[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2021, 57(5):896-903.
- [53] JIA L, REN F M, MCBRIDE J L, et al. Characteristics and preliminary causes of tropical cyclone remote precipitation over China [J]. *J Ocean Univ China*, 2024, 23(4):845-858.
- [54] 赵琳娜, 姚梦颖, 巩远发, 等. 基于贝叶斯模型平均法的“利奇马”台风暴雨预报订正研究[J]. *暴雨灾害*, 2020, 39(5):451-461.
- [55] 余霖枫, 姜建丰, 郭建鹰, 等. 超强台风利奇马过程分析及预报产品检验[J]. *河南科技*, 2020, 47(8):156-158.