暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

豫南汛期暖区暴雨环流分型与环境参量分析

王哲雯 黄思华

Classification of circulation and analysis of the environmental parameters of warm-sector rainstorms over southern Henan in flood season

WANG Zhewen，HUANG Sihua

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-041

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

湖南6月区域持续性暴雨的强信号及预报概念模型

The strong signals and forecast conceptual model for regional persistent torrential rain in Hunan in June

暴雨灾害. 2021, 40(1): 37-43 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.01.005

强对流天气概念模型在江西“3·4”极端大风预报中的应用

Application of severe convection weather conceptual model to forecast of an extreme gale event occurred in Jiangxi on 4 March 2018

暴雨灾害. 2019, 38(2): 144-151 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2019.02.006

中国暖区暴雨的研究进展

A review of the warm-sector rainstorms in China

暴雨灾害. 2019, 38(5): 483-493 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2019.05.010

豫东北一次春季大暴雨的环境条件与中尺度特征分析

Analysis of environmental condition and mesoscale characteristics for a heavy rainstorm event in Spring in northeast Henan

暴雨灾害. 2022, 41(1): 76-85 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.009

苏南一次梅雨锋大暴雨的环境条件及对流系统演变特征

Analysis of environmental conditions and characteristics of convective system evolution of a Mei-Yu Front heavy rainstorm in southern Jiangsu

暴雨灾害. 2023, 42(5): 532-540 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-128

梵净山东南侧夏季暖区暴雨中尺度系统演变与环境场特征个例分析

Analysis on mesoscale system evolution and environmental field characteristics of a warm-sector heavy rainfall event in summer in the southeast of Fanjing Mountains

暴雨灾害. 2021, 40(2): 125-135 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.02.003

关注微信公众号，获得更多资讯信息

王哲雯,黄思华.2025.豫南汛期暖区暴雨环流分型与环境参量分析[J].暴雨灾害,44(2):167−176. WANG Zhewen, HUANG Sihua. 2025. Classification of circulation and analysis of the environmental parameters of warm-sector rainstorms over southern Henan in flood season [J]. Torrential Rain and Disasters,44(2):167−176 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−041

豫南汛期暖区暴雨环流分型与环境参量分析

王哲雯[1, 2], 黄思华[3]

(1. 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点实验室, 郑州 450003; 2. 河南省驻马店市气象局, 驻马店 463000; 3. 上海市气候中心, 上海 200030)

摘　要: 为揭示豫南暖区暴雨的天气学特征, 利用常规高空、地面观测和欧洲中心大气再分析 (ERA5) 等资料, 对 2011—2020 年豫南汛期 5—9 月暖区暴雨的天气形势进行中尺度分析和归纳, 并利用百分位法提炼出不同环流型暖区暴雨的环境参量阈值。结果表明: (1) 暖区暴雨是豫南汛期重要的降水过程, 2011—2020 年汛期 5—9 月共识别出 36 个暖区暴雨日, 约占豫南暴雨日总数的 53%; (2) 豫南暖区暴雨归纳为暖切变型、切变-副高相互作用型、强西南急流型和冷锋型四类天气环流型, 其中以切变-副高相互作用型为主, 冷锋型最少, 各类型暴雨站点频次分布与主要影响系统位置密切相关; (3) 当大气环境条件满足整层大气水汽含量充沛、中等及以上强度的深层垂直风切变、适当强度的大气不稳定能量和低空偏南急流时, 有利于暖区暴雨发生, 其中 850 hPa 比湿、500 hPa 温度露点差、K 指数和低层最大偏南风速对豫南四类暖区暴雨预报具有一定指示意义。

关键词: 暖区暴雨; 环流分型; 环境参量; 豫南

中图法分类号: P458.1+21.1　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−041

Classification of circulation and analysis of the environmental parameters of warm-sector rainstorms over southern Henan in flood season

WANG Zhewen[1, 2], HUANG Sihua[3]

(1. *Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique*, *CMA*, *Zhengzhou* 450003; 2. *Zhumadian Meteorological Bureau*, *Zhumadian* 463000; 3. *Shanghai Climate Center*, *Shanghai* 200030)

Abstract: Based on the surface station observation and sounding data, and the fifth-generation European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) atmospheric reanalysis datasets (ERA-5), the synoptic characteristics of warm-sector rainstorms in southern Henan are investigated by the mesoscale analysis and induction for the weather condition of warm-sector rainstorms from May to September during the 2011—2020 flood season. The thresholds of environmental condition parameters related to warm-sector rainstorms with different circulation patterns are extracted by the percentile method. The results show that: (1) The warm-sector rainstorm plays a major during the flood season in southern Henan. Thirty-six warm-sector rainstorm days are identified from May to September during 2011—2020, accounting for about 53% of the total heavy precipitation days. (2) Warm-sector heavy rainfalls in southern Henan can be categorized into four types of synoptic conceptual models, including warm shear line, shear-subtropical high, strong southwest jet and cold front types. The shear-subtropical high type occurs most frequently, while the cold front type is the least frequent. The frequency distribution of warm-sector rainstorms for four types is closely related to the locations of their major weather systems. (3) Conditions with abundant water vapor in the whole layer, relatively strong deep vertical wind shear, moderate instability energy of the atmosphere and low-level southerly jet are favorable for the generation of warm-sector rainstorms in southern Henan. The specific humidity at 850 hPa, the depression of the dew point at 500 hPa, K-index, and the maximum lower-level southerly wind speed can serve as predictive indicators for the forecast of warm-sector rainstorms over southern Henan.

Key words: warm-sector rainstorms; classification of circulation; environmental parameter; southern Henan

收稿日期: 2024−03−08; **定稿日期**: 2024−08−20

资助项目: 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点实验室应用技术研究基金项目 (KQ202160); 河南省科技研发计划联合基金 (应用攻关类) 项目 (242103810097)

第一作者: 王哲雯, 主要从事天气预报技术研究。E-mail: wangzhw09@163.com

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

引　言

暖区暴雨是指发生在地面锋面南侧暖区内的暴雨，一般而言暴雨落区与锋面距离较远 (200~300 km 甚至更远) (黄士松等, 1986)。暖区暴雨多发生在南方，通常产生于高温高湿的不稳定环境，中尺度特征明显，具有突发性强、对流强度大、局地特征显著及降水集中等特点 (林良勋, 2006; 李欣等, 2021)。近年来不少研究指出发生在我国江淮流域及其以北地区的部分暴雨也存在暖区暴雨的特征，比如 2012 年北京“7·21”特大暴雨第一阶段的降水峰值就是暖区暴雨造成 (谌芸等, 2012, 2019; 吕伟绮等, 2017; Sun et al., 2019)。2016 年 7 月 9 日河南新乡也发生了一次暖区暴雨，降水范围广、分布不均且极端性强，对当地人民生产生活造成了严重影响 (马月枝等, 2017)。江淮流域及其以北地区暖区暴雨与华南暖区暴雨存在一定差异，后者通常与锋面系统、冷空气无关，且天气尺度斜压强迫较弱 (吴乃庚等, 2020)，华南暖区暴雨发生的大尺度背景条件、触发机制等可能不完全适用于北方暖区暴雨。另外，暖区暴雨天气尺度扰动的信号较弱，触发机制不明显，数值模式捕捉能力较差，集合预报的不确定性也很明显 (吕伟绮, 2017; 伍志方等, 2018; 万轶婧等, 2020)，导致在预报预测过程中，对暖区暴雨降水估计不足，给预报带来较大难度 (谌芸等, 2012, 2019)。因此，进一步厘清北方暖区暴雨的统计学特征，分析影响北方暖区暴雨的主要天气系统配置，有助于提高北方地区暖区暴雨的预报预测能力。

暖区暴雨是多尺度天气系统共同作用的结果，通常与低空急流、季风气流、中尺度辐合线等系统有关 (杨晓亮等, 2021; 崔梦雪等, 2024)。不少研究对华南暖区暴雨分类，以揭示不同天气系统对华南暖区暴雨的影响。例如，何立富等 (2016) 通过梳理近 40 a 华南前汛期暴雨的研究成果，提炼出边界层辐合线型、偏南风风速耦合型和强西南急流型三类影响华南暖区暴雨的主要天气系统配置和触发因子。刘瑞鑫等 (2019) 利用客观方法将 177 例华南暖区暴雨事件的天气形势分为切变线型、低涡型、南风型和回流型四种，其中南风型占比最高、影响较大。汪玲瑶等 (2018) 对江南暖区暴雨进行统计分析，归纳出暖切变型、冷锋锋前型、副热带高压型 (简称“副高”) 和强西南急流型四类主要天气型暖区暴雨。田莹等 (2022) 进一步将上述四类江南暖区暴雨细分为暖切变型、冷切变型、暖切变与副高相互作用型、冷切变与副高相互作用型、副高边缘型、副高内部型和西南急流型，可见低层切变和副高对江南暖区暴雨的发生有重要作用。周宜卿等 (2024) 在分析湖南东南部的暖区暴雨特征时，则主要强调了冷锋、南风和暖切变系统的影响，副高在三类暖区暴雨中无明显差异。对于北方暖区暴雨，其形成机制既有与华南暖区暴雨相似的过程，也受暖切变、副高和冷锋等系统的影响 (陈玥等, 2016; 张芹等, 2023)。马月枝等 (2017) 研究表明，2016 年 7 月 9 日河南新乡暖区特大暴雨主要受 500 hPa 低涡和 700 hPa 切变线的影响，同时台风外围的水汽输送、低层气流辐合及高层辐散抽吸为暖区暴雨的形成提供了水汽和动力条件。上述结果显示，暖区暴雨的影响系统存在区域性差异，所得研究成果也具备一定的本地特征。

豫南是指河南省南部地区，地势西高东低，地形复杂，平原、山脉、盆地交错分布。豫南受大陆性季风气候控制，夏季多雨，且暴雨多发频发，加上下垫面不均匀分布的影响，河南地区的区域暴雨过程约有 20% 发生在豫南地区 (谷秀杰等, 2023)。暖区暴雨是暴雨研究中的一个热点问题，但针对河南或豫南地区暖区暴雨的研究还很少，其特征和预报着眼点尚不清晰，实际业务预报中，暖区暴雨的 24 h 评分明显也低于其他暴雨，漏报、误报问题更为突出。本文利用常规高空观测数据、地面观测数据和探空数据，对 2011—2020 年豫南典型暖区暴雨进行统计和环流分型，然后对表征不稳定、水汽、能量和动力等条件的 9 种物理量进行对比分析，探究不同类型天气系统配置下暖区暴雨的环境场差异，揭示豫南暖区暴雨的要素特征，建立关键环境参量预报阈值指标，为预报此类暴雨提供借鉴与参考。

1 资料与方法

1.1 资料与研究区域

本文所使用的资料包括：(1)2011—2020 年 5—9 月常规地面和高空观测资料、南阳站和阜阳站探空资料 (08 时和 20 时，北京时，下同)；(2) 从 CIMISS 获取的豫南 32 个国家级气象观测站 (图 1) 日降水量 (08 时至次日 08 时) 资料；(3) 欧洲中心第 5 代大气再分析逐日数据 (ERA-5，取 08 时和 20 时两个时次平均值)，水平分辨率 1°×1°，垂直方向共 3 层 (500 hPa、850 hPa 和 925 hPa)，以上三种资料用以分析暖区暴雨的环流场配置。

本文研究区域为豫南地区 (图 1)，位于淮河中上游北岸，包括河南省南阳市、驻马店市和信阳市三地市，共 6 个区和 28 个县。豫南地势西高东低，其西部为伏牛山、桐柏山余脉，东部是淮北冲击湖平原。

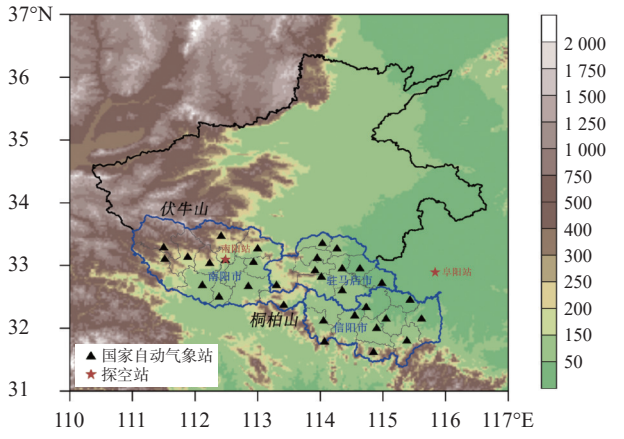


图 1 豫南 32 个国家级气象站 (黑色三角)、南阳和阜阳探空站位置 (红色五角星) 及地形 (填色, 单位: m) 分布 (粗黑线、蓝线和灰线分别为河南省界、豫南市界和区县界, 下同)

Fig. 1 Distribution of 32 national weather stations (black triangles), the Nanyang and Fuyang radiosonde stations (red five-pointed stars) and the terrain (the shaded, unit: m; the thick black line, the blue line, and the grey line denote the boundary of Henan Province, cities and counties in southern Henan, respectively, the same hereinafter)

1.2 研究方法

1.2.1 豫南暖区暴雨定义

汪玲瑶等 (2018) 和张芹等 (2023) 分别对江南和山东暖区暴雨进行分类时, 强调了暖性切变、冷锋、副高和西南急流的作用。本文参考上述研究的分类方法, 在筛选出豫南暴雨日后, 结合地面冷锋位置、暖切变和低空急流位置, 进一步筛选出豫南暖区暴雨日。其中, 豫南暴雨日定义为豫南 32 个国家级气象站中出现相邻 3 站及以上 (确保暴雨范围达到一定区域面积) 的 08 时至次日 08 时 24 h 累积降水量达到 50 mm 及以上。在此基础上, 根据以下两个条件进行判断: ①当地面冷锋存在时, 发生在锋区前侧暖区 100~300 km 范围内的暴雨确定为暖区暴雨; ②当无地面冷锋时, 发生在 850 hPa 暖切变以南或降水区低空为一致偏南风时的暴雨, 也确定为暖区暴雨。根据此定义, 共筛选出 2011—2020 年豫南暴雨日 68 个、暖区暴雨日 36 个。豫南暖区暴雨日约占暴雨日的 53%, 表明暖区暴雨是豫南汛期暴雨的常见暴雨类型。

1.2.2 豫南暖区暴雨分类

影响暖区暴雨的主要天气和次天气尺度系统有高空槽、副高、低空切变、低空急流、冷锋和地面辐合线等 (田莹等, 2022)。依据豫南暖区暴雨发生时的主要天气形势, 将 36 个豫南暖区暴雨日分为暖切变型、切变-副高相互作用型、强西南急流型和冷锋型四类:

(1) 暖切变型: 主要影响系统为 850 hPa 暖式切变线, 常伴有弱的低空或超低空急流 (风速<16 m·s^{-1}), 副高主体一般位于 30°N 以南, 与豫南距离较远。

(2) 切变-副高相互作用型: 影响系统为低空切变线和副高, 江南至华南地区被副高控制, 低空、超低空偏南气流显著。

(3) 强西南急流型: 850 hPa 及以下低空强西南急流 (风速≥16 m·s^{-1}) 推进至豫南上空, 不受副高直接影响, 且地面无明显冷空气活动。

(4) 冷锋型: 黄河流域附近有地面冷锋活动, 豫南无明显冷平流影响。

虽然分类标准为不同层次的天气系统, 但是从最后分类结果来看, 未出现同一个暴雨日分属不同天气型的情况。

1.2.3 环境参量计算

暴雨通常发生在具备一定的水汽条件、不稳定能量和动力抬升作用的环境中。为了探究不同天气型暖区暴雨过程中的环境物理量条件, 从南阳站和阜阳站探空资料中选取气象业务中常用的 9 种物理量进行诊断 (表 1)。在提取环境条件参量时, 根据暴雨落区位置选取探空资料, 即: 如果暴雨落区主要在桐柏山以东, 选取南阳站探空资料进行分析; 如果暴雨落区主要在桐柏山以西, 则选取南阳站探空资料; 如果暴雨落区在桐柏山东西两侧, 则选取两个探空站资料的平均值; 最后再计算 08 时和 20 时资料的平均值作为各物理量值 (研究主要对日降水量进行分析, 不能明确降水峰值时间, 因此使用日平均数据)。本文所用的环境参量如表 1 所示。

表 1 不同类型环境参量说明

Table 1 Different environmental parameter descriptions

类型	环境参量名称(符号)/单位
水汽类	850 hPa比湿(Q_{850})/(g·kg^{-1}) 500 hPa温度露点差($T-T_d$)$_{500}$/℃ 整层比湿积分(IQ)/(g·kg^{-1})
层结不稳定类	850与500 hPa温差(ΔT_{85})/℃ 沙氏指数(SI)/℃
能量类	对流有效位能(CAPE)/(J·kg^{-1}) K指数(K)/℃
动力类	0—6 km垂直风切变($SHRL_{0\sim6\ km}$)/(m·s^{-1}) 850 hPa最大偏南风(V_{max})/(m·s^{-1})

为了得到可用于预报业务的特征指标和阈值, 参照高晓梅等 (2018) 和万轶婧等 (2020) 的分析方法, 豫南暖区暴雨中各环境物理量的阈值选用该物理量的第 25 百分位或第 75 百分位数值。相比于直接用最低或最高值, 该方法在虚警率和漏报率之间考虑了一个折中, 总体上更为合理。

2 豫南暖区暴雨环流分型

以主要影响系统为依据，对豫南 2011—2020 年 5—9 月共 36 个暖区暴雨日分类，共得到四类天气型暖区暴雨，包括暖切变型 9 个、切变-副高相互作用型 16 个、强西南急流型 9 个和冷锋型 2 个。四类天气型暖区暴雨中，暖切变型分布范围较广，沿淮河流域驻马店与信阳交界处最多 (图略)。切变-副高相互作用型的暴雨高频区较为分散，主要位于切变与副高之间、副高西北侧的西南暖湿急流中，整体表现为西南-东北走向。强西南急流型多出现在豫南沿淮河两侧，暴雨点相对集中，该类型暖区暴雨降水分布与低空、超低空强西南急流有关。冷锋型暖区暴雨较少，主要发生在驻马店和信阳之间，降水落区位于地面冷锋前侧的偏南暖湿气流中。基于张小玲等 (2012) 的中尺度天气技术规范，对豫南四类天气型暖区暴雨的大气环流配置和水汽条件进行归纳，最终形成豫南汛期暖区暴雨的环流概念模型 (图 2)。

2.1 暖区暴雨环流分型

2.1.1 暖切变型

暖切变型主要受到低涡东侧暖式切变线的影响 (图 2a)。在对流层中层，河南上游存在东移发展的低压槽，副高位置偏南，副高西侧的西南暖湿气流可影响豫南。在对流层低层，豫南以南为西南或偏南气流，在河南中北部有东—西向的暖式切变线维持，该暖式切变线主要由低压槽槽前低涡伴随的西南气流与东南气流形成。在低空和超低空，西南或偏南急流将大量水汽和能量汇集到豫南，形成明显湿舌，豫南正好位于湿舌顶端。在近地面，豫南处于低压倒槽中，暖平流使得近地面温度升高，大气层结不稳定增强，与湿舌共同形成高温高湿的不稳定条件，有利于暖区暴雨发生。此外，豫南位于 200 hPa 高空急流出口分流辐散区内，高、低空急流的耦合作用为对流层整层提供了良好的动力抬升条件。同时，高空急流还将带走降水产生的凝结潜热，使不稳定层结维持。

2.1.2 切变-副高相互作用型

切变-副高相互作用型主要受到低涡切变线和副高共同影响 (图 2b)。暴雨发生时副高强盛，5 880 gpm 线西伸北抬至 30°N 附近。500 hPa 高原槽东移南压，与副高形成对峙后移动缓慢，使降水在豫南维持。同时，中低层西南低涡发展东移，增大其与副高之间位势梯度，使低空急流的强度不断增强，并超过暖切变型的急流强度。低涡以东的暖式切变线延伸至河南中北部，豫南暴雨区一般位于切变线与副高

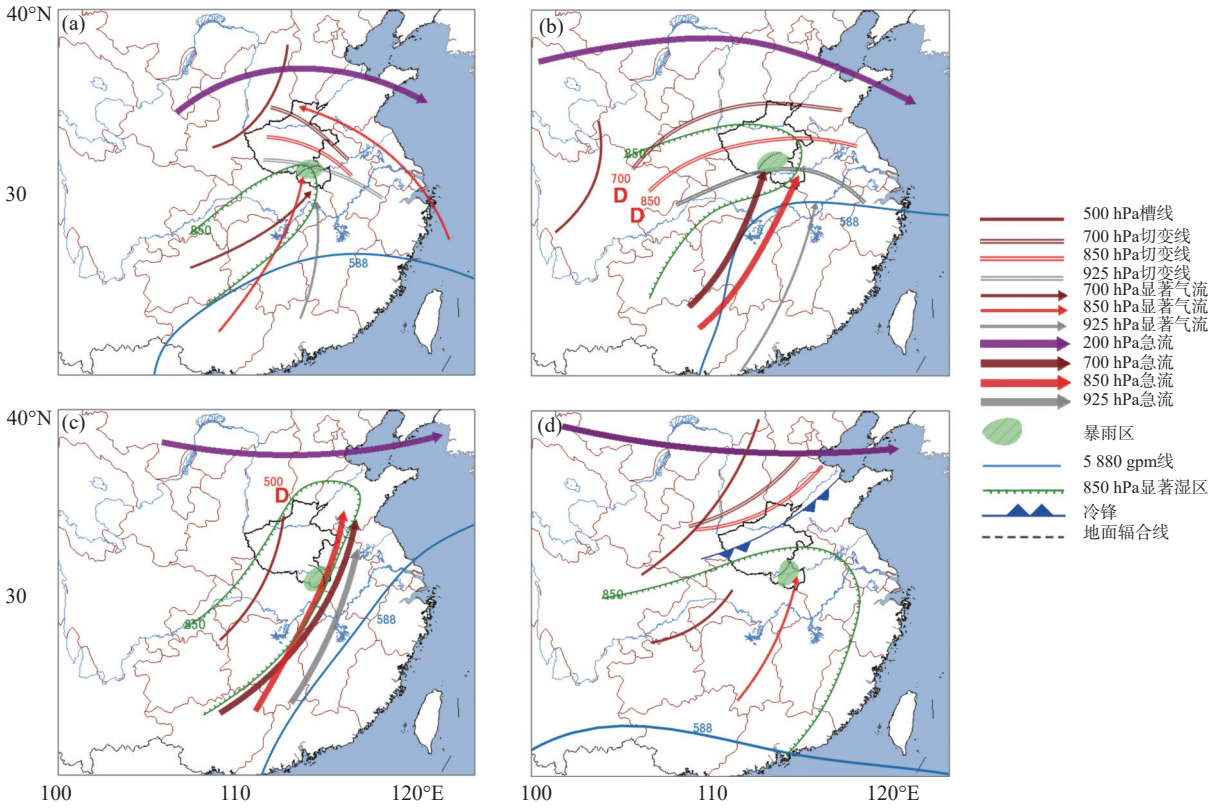


图 2 豫南暖切变型 (a)、切变-副高相互作用型 (b)、强西南急流型 (c) 和冷锋型 (d) 四类暖区暴雨环流分型

Fig. 2 Circulation classification of four types warm-sector rainstorms (a) Warm shear line type, (b) Shear-subtropical high type, (c) Strong southwest jet type and (d) Cold front type in Southern Henan

之间、低空急流前端辐合区及副高边缘西北侧地区。与暖切变型类似, 200 hPa 急流出口区的抽吸作用利于垂直运动发展, 豫南上空的地面低压倒槽、地面辐合线及地形抬升作用均促使暖区暴雨产生。

2.1.3 强西南急流型

强西南急流型的主要特点是低空急流、超低空西南急流强度大、影响范围广, 表现为急流中心风速超过 16 m·s^{-1}, 急流北界可推进至河南北部—黄河以北地区上空 (图 2c)。强西南急流为豫南带来充沛的水汽和能量, 有利于在豫南形成深厚的湿层和不稳定的大气层结。500 hPa 以经向环流型为主, 河南上游有低压槽不断东移靠近副高, 使低压槽与副高之间的气压梯度增大, 为中低层急流不断发展北伸提供良好条件。此外, 200 hPa 高空西风急流出口辐散区与低空、超低空强急流耦合, 近地面存在中尺度辐合线, 均有利于暖区暴雨的触发。

2.1.4 冷锋型

冷锋型在豫南出现较少 (图 2d), 此类过程中豫北有明显冷空气活动, 但冷锋尚未南压至豫南。500 hPa 常有低压槽加深发展, 引导强冷空气扩散南下, 中低层伴有冷式切变线; 地面冷锋抵达沿黄一带, 豫南暴雨区位于地面冷锋前侧的显著湿区内。200 hPa 高空西风急流强盛, 急流出口辐散分流区位于豫南上空, 可加强豫南的垂直运动。同时, 高空急流叠加于冷锋南部的西南暖湿气流之上, 有利于大气不稳定层结建立。在冷锋前侧暖区内, 有中尺度辐合线触发暴雨产生, 地形增幅作用也会导致降水加强。

2.2 暖区暴雨天气形势合成分析

对四类暖区暴雨的环流和物理量进行合成分析, 各主要系统配置在平均场中也能较好体现 (图 3): 暖切变型暖区暴雨的 850 hPa 暖式切变线位于河南中北部、其南侧西南气流显著, 副高主体居于海上; 切变-副高相互作用型环流场中 5 880 gpm 线控制江南地区, 豫南北部有 850 hPa 切变线, 二者之间形成西南暖湿急流; 强西南急流型表现为副高西伸至中国东南沿海, 其西北侧存在显著的低空急流; 冷锋型 850 hPa 风场上可见河南中北部有偏北风与西南气流对峙, 副高无直接影响。同时, 四类暴雨中豫南均处于 850 hPa 显著湿区内, 与概念模型基本一致。

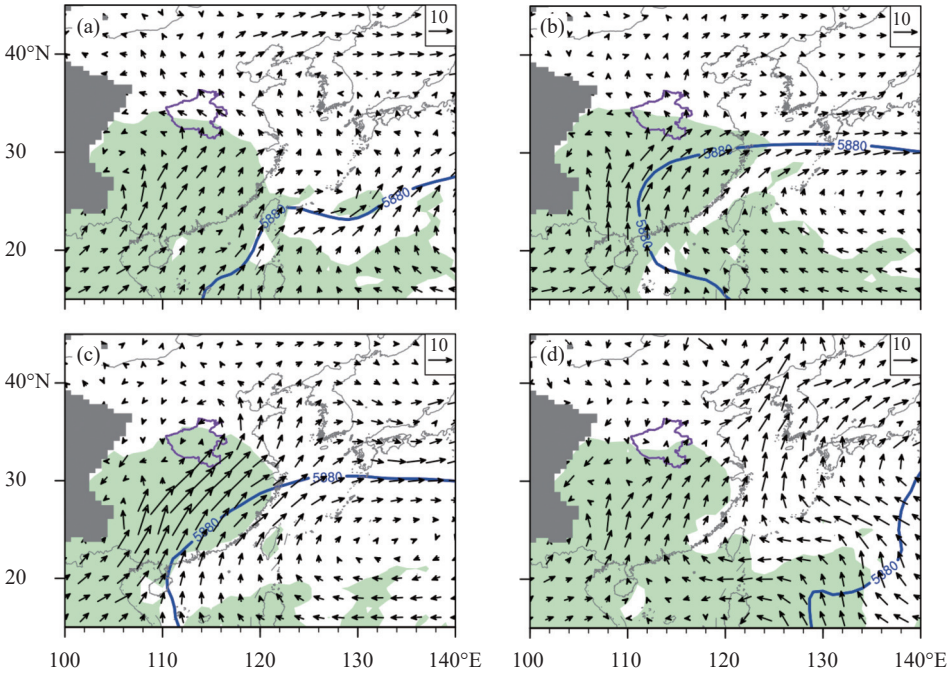


图 3 豫南暖切变型 (a)、切变-副高相互作用型 (b)、强西南急流型 (c) 和冷锋型 (d) 四类暖区暴雨的平均 5 880 gpm 线(蓝线)、850 hPa 风场(矢量, 单位: m·s^{-1})及 850 hPa 比湿(填色, ≥12 g·kg^{-1})

Fig. 3 Average 5 880 gpm line (blue line), horizontal wind (vector, unit: m·s^{-1}) and specific humidity (shaded, ≥12 g·kg^{-1}) at 850 hPa of four types warm-sector rainstorms (a) warm shear line type, (b) shear-subtropical high type, (c) strong southwest jet type and (d) cold front type in Southern Henan

3 豫南暖区暴雨的环境参量特征分析

流型辨识方法 (Maddox et al., 1979) 和基于构成要素的"配料法" (Doswell et al., 1996) 常被用以预报强对流天气, 两种方法具有很强的互补性 (俞小鼎, 2011)。为建立豫南暖区暴雨的预报指标, 进一步分析表 1 给出的四类不同天气型豫南暖区暴雨的环境参量特征。需要说明的是, 由于冷锋型暖区暴雨日仅有 2 个, 以下分析各物理量的第 25 和 75 百分位值

分别与相应物理量的较小值和较大值对应，中位数值即为平均值。

3.1 表征水汽条件的环境参量

强降水过程中，大气中的水汽含量、水汽饱和程度及其垂直分布是影响降水强度和效率的重要因素。比较四类暖区暴雨表征水汽条件的环境参量，从图 4a 可见，切变-副高相互作用型和强西南急流型的 Q_{850} 箱线图高度重叠，二者 25%~75% 范围分别为 13.0~16.0 g·kg^{-1} 和 12.0~15.0 g·kg^{-1}，箱体位置均高于其他两类暖区暴雨。暖切变型和冷锋型的低层比湿 25 至 75 百分位值分别为 10.0~14.0 g·kg^{-1} 和 12.0~13.0 g·kg^{-1}。暖区暴雨发生时低层水汽充沛，其中切变-副高相互作用型和强西南急流型对低层水汽含量要求较高。从中层大气饱和程度来看 (图 4b)，四类暖区暴雨的 $(T\text{-}T_d)_{500}$ 中位数值均较小，表明暖区暴雨多发生于中层高湿的环境中。相比其他三类暖区暴雨，强西南急流型的 $(T-T_d)_{500}$ 箱体较宽，其第 25 到 75 百分位值为 1.0~9.0 ℃、离散度大。

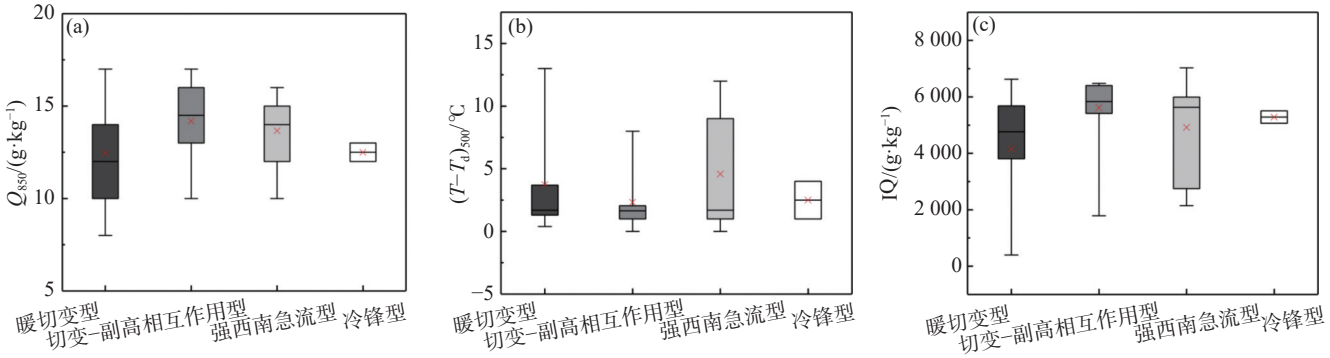


图 4 豫南四类暖区暴雨的 Q_{850} (a)、$(T-T_d)_{500}$ (b) 和 IQ (c) 水汽环境参量箱线图 (线段最高处为最大值，最低处为最小值；箱体上框线为第 75% 分位值，下框线为第 25% 分位值，箱内线为中位数值，×为平均值，下同)

Fig. 4 The box diagram for (a) Q_{850}, (b) $(T-T_d)_{500}$, and (c) IQ environmental parameters in water vapor of the four types of warm-sector rainstorm in southern Henan (The highest and lowest points show the maximum and minimum value. The box upper and lower frame lines denote the upper and lower quartile. The line inside the box is the median, with "×" indicating the average value, the same hereinafter)

用 IQ 表征大气柱的绝对含水量 (图 4c)，切变-副高相互作用型的 IQ 箱体上下间隔很窄，中位数值为 5 837.0 g·kg^{-1}。暖切变型 IQ 相对较小，中位数值为 4 767.0 g·kg^{-1}，冷锋型 IQ 均值为 5 284.5 g·kg^{-1}。强西南急流型 IQ 箱体与其他三类暖区暴雨均有较大程度的重叠，且箱体较长，第 25 百分位值仅 2 749.0 g·kg^{-1}。总体来看，豫南四类天气型暖区暴雨中，切变-副高相互作用型多发生于湿层深厚、整层大气水汽含量充沛的条件下，暖切变型主要对中层水汽条件要求较高，强西南急流型需要充沛的低层大气水汽含量、中层相对偏干，冷锋型则常发生于低层偏湿、中层相对干的环境中。

3.2 表征层结不稳定条件的环境参量

大气层结稳定度是影响强降水的基本因素之一，预报业务中多使用 ΔT_{85} 分析大气温度垂直分布变化，进而判断大气静力稳定度 (图 5a)。结果显示，豫南暖区暴雨发生时大气层结多处于弱的不稳定状态，冷锋型 ΔT_{85} 均值为 25.0 ℃，其他三类暖区暴雨的中位数值相差不大。暖切变型 ΔT_{85} 箱体最窄，切变-副高相互作用型离散度较大、且其箱体与强西南急流型高度重叠。

结合业务常用的稳定度指标 SI，进一步分析暖区暴雨中大气层结稳定度的大小：SI<0 表示气层不稳定，绝对值越大、大气层结越不稳定。图 5b 中，暖切变型的 IS 箱体最宽、中位数值最高为 1.8 ℃，其他三类箱体位置相对偏低，中位数值在−1~0 ℃。以上分析说明，豫南四类天气型暖区暴雨的大气层结整体处于弱不稳定状态，区别在于：暖切变型 ΔT_{85} 小、SI 最大，不稳定性最弱；强西南急流型 ΔT_{85} 较大、SI 代数值较小；冷锋型 ΔT_{85} 最大、SI 接近 0 ℃；切变-副高相互作用型的 ΔT_{85} 较大、SI 较小，三者不稳定性相对强于暖切变型，具体判断时还需参考其他物理量指标。

3.3 能量环境参量

相比水汽条件和层结稳定度，CAPE 是判断强天气中深厚湿对流潜势最具综合性的指标 (高晓梅等，2018)。图 6a 显示冷锋型 CAPE 箱体最窄、暖切变型次之；切变-副高相互作用型 CAPE 的 25 到 75 百分位范围为 0~2 010.5 J·kg^{-1}，其箱体最宽且离散度最大；四类暖区暴雨的 CAPE 中位数值均小于 200 J·kg^{-1}。因此，即使 CAPE 不强，当其他环境条件有利时，豫南暖区暴雨也可以发生，很难仅通过 CAPE 识别不同类型暖区暴雨。

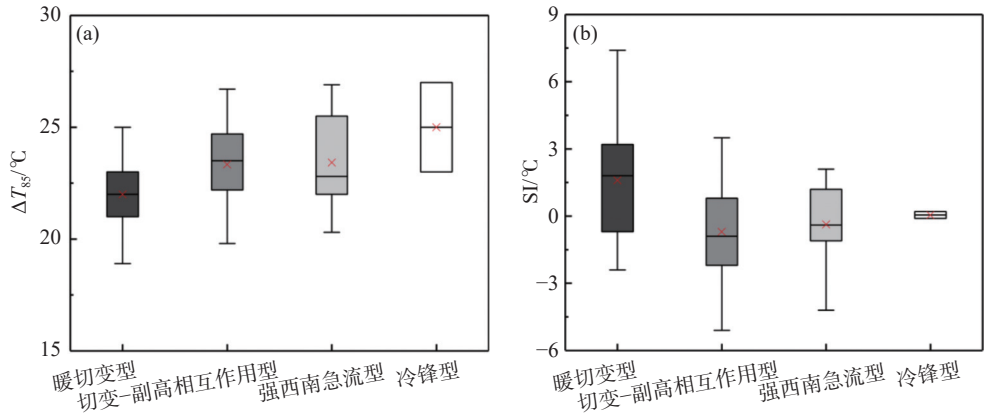


图 5 豫南四类暖区暴雨的 ΔT_{85} (a) 和 SI (b) 层结稳定度环境条件参量箱线图

Fig. 5 Box diagram for (a) ΔT_{85} and (b) SI environmental parameters in stratified stability of the four types of warm-sector rainstorms in Southern Henan

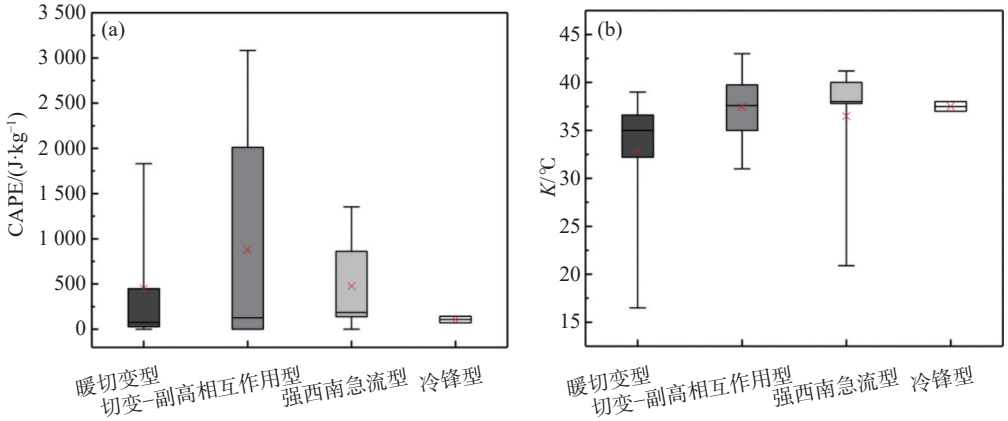


图 6 豫南四类暖区暴雨的 CAPE (a) 和 K (b) 能量条件环境参量箱线图

Fig. 6 Box diagram for (a) CAPE and (b) K environmental parameters in energy condition of the four types of warm-sector rainstorms in southern Henan

K 指数也是表征大气层结稳定性的综合性指标之一 (图 6b), 其数值越大代表层结越不稳定, 对应低层水汽为近饱和状态, 大气温度垂直递减率增大、不稳定能量累积。分析发现, 切变-副高相互作用型与强西南急流型的 K 指数箱体重合度较高, 二者中位数值均达 38 ℃; 冷锋型 K 指数的中位数值为 37.5 ℃、暖切变型最小为 35 ℃。同时, 暖切变型和强西南急流型的 K 指数离散度较大。由此可见, 豫南暖区暴雨发生均需要一定强度的不稳定能量, 当不稳定能量较大时, 有利于强西南急流型暖区暴雨的发生。

3.4 动力环境参量

在一定的湿度、大气不稳定和抬升触发条件下, 环境水平风的垂直切变对对流风暴的强弱、风暴组织和特征的影响最大 (俞小鼎等, 2006)。在豫南暖区暴雨中, 冷锋型 $\mathrm{SHRL}_{0\sim6\ \mathrm{km}}$ 中位数值仅为 7.3 m·s^{-1}, 相比其他三类型明显偏低 (图 7a)。强西南急流型 $\mathrm{SHRL}_{0\sim6\ \mathrm{km}}$ 箱体最宽、上下界为 11.3~23.3 m·s^{-1}, 暖切变型和切变-副高相互作用型箱体与之高度重合, 三者 $\mathrm{SHRL}_{0\sim6\ \mathrm{km}}$ 离散程度都偏大。在分析短时强对流天气的环境条件参量时, 樊李苗和余小鼎 (2013) 将 0~6 km 深层垂直风切变分为弱 (<12 m·s^{-1})、中 (12~20 m·s^{-1})、强 (>20 m·s^{-1}) 三档。以此为依据, 豫南暖区暴雨的 $\mathrm{SHRL}_{0\sim6\ \mathrm{km}}$ 平均达到中等强度, 其中冷锋型倾向于发生在弱强度的 $\mathrm{SHRL}_{0\sim6\ \mathrm{km}}$ 环境下, 强西南急流型倾向于中等到强的 $\mathrm{SHRL}_{0\sim6\ \mathrm{km}}$ 中, 其他两类多发生于中等强度的 $\mathrm{SHRL}_{0\sim6\ \mathrm{km}}$ 中。

强降水期间, 低空急流的作用十分关键: 低空急流输送暖湿平流, 造成位势不稳定; 急流中心前方水汽和质量辐合, 是强上升区; 同时, 急流的中尺度扰动对暴雨有一定触发作用, 高、低空急流耦合使低层系统发展。用 $V_{\max}$ 表征低空西南或偏南急流的强度。由图 7b 可知, 强西南急流型箱体高且窄, 中位数值为 19.0 m·s^{-1}, 25 到 75 百分位范围为 17.0~20.0 m·s^{-1}; 切变-副高相互作用型箱体上下界为 5.0~8.8 m·s^{-1}; 暖切变型箱体窄且最低, 上下界为 7.5~8.5 m·s^{-1}; 冷锋型均值为 6.0 m·s^{-1}。由于 $V_{\max}$ 仅为南风分量, 比真实水平风速偏小, 实况约半数以上的豫南暖区暴雨都伴随低空西南或偏南急流。总体而

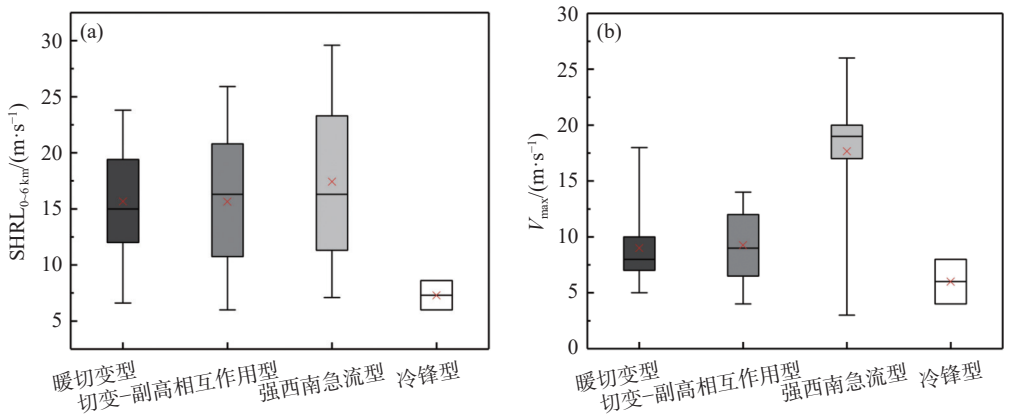


图 7 豫南四类暖区暴雨的 $SHRL_{0\sim6\ km}$ (a) 和 V_{max} (b) 动力条件环境参量箱线图

Fig. 7 The box diagram for (a) $SHRL_{0\sim6\ km}$ and (b) V_{max} environmental parameters in the dynamic condition of the four types of warm-sector rainstorms in southern Henan

言，当低层出现偏南急流时，更利于强西南急流型发生。

3.5 豫南四类暖区暴雨的主要环境参量阈值

通过对比豫南暖区暴雨的环境条件参量特征，发现用单一环境要素指标难以明确识别不同类型暖区暴雨。在实际业务预报工作中，需结合文中提及的多项参量进行判断。当大气环境满足整层大气水汽含量充沛、中等及以上强度的深层垂直风切变、适当强度的大气不稳定能量和低空偏南急流时，有利于豫南暖区暴雨的发生发展。

针对四类暖区暴雨，选取各物理量箱线图中 25 或 75 百分位值作为参考，表 2 给出了四类暖区暴雨事件中 9 项环境参量的阈值。其中，Q_{850}、IQ、ΔT_{85}、CAPE、K 指数、$SHRL_{0\sim6\ km}$ 和 V_{max} 以 25 百分位值为参考阈值，$(T\text{-}T_d)_{500}$ 和 SI 以 75 百分位值为参考阈值。结合前文分析，四类暖区暴雨在中低层水汽条件、K 指数和 V_{max} 方面存在较明显的区别，而对层结稳定度的要求不高。对于豫南汛期暖区暴雨而言，大气环境满足以下条件：当 $Q_{850}\geqslant10$ g·kg^{-1}、$(T-T_d)_{500}\leqslant3$ ℃、$K\geqslant32$ ℃、$V_{max}\geqslant7$ m·s^{-1} 时，利于暖切变型暖区暴雨发生；当 $Q_{850}\geqslant13$ g·kg^{-1}、$(T\text{-}T_d)_{500}\leqslant2$ ℃、$K\geqslant35$ ℃、$V_{max}\geqslant7$ m·s^{-1} 时，利于切变-副高相互作用型暖区暴雨发生；当 $Q_{850}\geqslant12$ g·kg^{-1}、$(T-T_d)_{500}\leqslant9$ ℃、$K\geqslant38$ ℃、$V_{max}\geqslant17$ m·s^{-1} 时，利于强西南急流型暖区暴雨发生；当 $Q_{850}\geqslant12$ g·kg^{-1}、$(T\text{-}T_d)_{500}\leqslant4$ ℃、$K\geqslant37$ ℃、$V_{max}\geqslant4$ m·s^{-1} 时，更利于冷锋型暖区暴雨出现。

以上阈值指标对于大部分豫南暖区暴雨有较好的参考性，但实际业务中存在个别暴雨日环境条件参量明显偏离阈值范围的情况，例如 2016 年 6 月 20 日暖切变型暖区暴雨 (过程Ⅰ) 和 2019 年 6 月 5 日强西南急流型暖区暴雨 (过程Ⅱ)。过程Ⅰ中 $(T-T_d)_{500}$ 为 13 ℃、较阈值 3 ℃ 明显偏大。该过程主要受到中低层低涡切变影响，暴雨区位于低空西南急流(12~16 m·s^{-1})左前侧出口区，中层 500 hPa 偏干，但低层水汽及能量条件优越，Q_{850} 达到 16 g·kg^{-1}、K 指数高达 39 ℃，配合较好的动力条件(SI 为-0.7 ℃)，致使信阳、驻马店交界处出现暴雨到大暴雨。过程Ⅱ的 K 指数仅为 20.9 ℃、较阈值显著偏小。K 指数与大气温度垂直递减率和低层水汽条件有关，此过程发生时 ΔT_{85} 为 26.9 ℃，850 hPa 比湿为 10 g·kg^{-1}、露点温度为 14 ℃，700 hPa 温度露点差为 11 ℃，低层水汽条件一般，但大气层结不稳定条件好，同时低空强西南急流风速达 20 m·s^{-1}，动力抬升作用强且水汽能量辐合强，最终也可产生暴雨。因此，各环境条件参量阈值对豫南暖区暴雨具有较好的指示意义，针

表 2 豫南四类暖区暴雨环境参量阈值

Table 2 Environmental parameter thresholds of the four types of warm-sector rainstorms in southern Henan.

暴雨类型	水汽条件			层结不稳定条件		能量条件		动力条件	
	Q_{850}/(g·kg^{-1})	$(T\text{-}T_d)_{500}$/℃	IQ/(g·kg^{-1})	ΔT_{85}/℃	SI/℃	CAPE/(J·kg^{-1})	K/℃	$SHRL_{0\sim6\ km}$/(m·s^{-1})	V_{max}/(m·s^{-1})
暖切变型	10	3	3 807	21	3	28	32	12	7
切变-副高相互作用型	13	2	5 417	22	1	0	35	11	7
强西南急流型	12	9	2 749	22	1	139	38	11	17
冷锋型	12	4	5 063	23	0	72	37	6	4

对个别离散度大的暴雨事件, 同时参考多个物理量指标判断更为合理。

4 结论与讨论

本文使用 2011—2020 年常规地面高空观测、逐日降水、探空和 ERA5 再分析等资料, 对豫南汛期 5—9 月暖区暴雨进行中尺度分析和环流分类, 并统计了各类天气型暖区暴雨的环境参量分布特征, 进而提炼出不同天气型暖区暴雨的环境参量阈值。主要结论如下:

(1) 2011—2020 年豫南汛期 5—9 月共 36 个暖区暴雨日, 约占豫南汛期暴雨日总数的 53%, 分为四类天气型, 包括暖切变型 9 个、切变-副高相互作用型 16 个、强西南急流型 9 个和冷锋型 2 个。四类暖区暴雨站点频次的空间分布与其主要影响系统的位置有关, 暖切变型分布范围广, 沿淮河流域驻马店与信阳交界处最多; 切变-副高相互作用型的暴雨高频区较分散; 强西南急流型多出现在沿淮河两侧, 暴雨点集中; 冷锋型暖区暴雨主要发生在驻马店和信阳之间。

(2) 豫南暖区暴雨产生于高空槽、低涡切变、副高、高低空急流耦合和边界层中尺度辐合线等多系统的协同作用下, 同时需满足低空高湿环境以及适当的大气不稳定能量。暖切变型的暴雨区常位于 850 hPa 西南气流与东南气流形成的暖切变南侧; 切变-副高相互作用型的低涡切变线位于河南省中北部, 暴雨区位于二者之间的副高边缘西北侧地区; 低空西南急流强盛 (≥16 $m\cdot s^{-1}$) 时, 强西南急流型暖区暴雨出现在急流轴左前侧的水汽、能量聚集区; 当地面冷锋抵达河南省北部-黄河以南, 冷锋型暖区暴雨多发生于其前侧的显著湿区内。

(3) 当环境条件满足整层大气水汽含量充沛、中等及以上强度的深层垂直风切变、适当强度的大气不稳定能量和低空偏南急流时, 有利于豫南暖区暴雨的发生发展。相比暖切变型, 其他三个类型暖区暴雨对低层水汽含量需求更高; 强西南急流型和冷锋型暖区暴雨产生需要具备较强的大气不稳定能量, 暖切变型所需不稳定能量最弱; 四类暖区暴雨多发生于中层高湿的环境中, 且通常伴随低空显著偏南风, 其中强西南急流型的中层大气较干, 但强盛的偏南急流促使低层水汽大量积聚, 也能为暴雨产生提供有利的水汽条件。

本文主要从暴雨过程发生时的环流系统分型和环境参量特征两个方面, 对豫南汛期暖区暴雨进行了研究, 以期提升该地区暖区暴雨的认识。但由于资料限制, 本文研究时段仅有 10 a, 暴雨日数量较少, 统计分析结果存在一定的局限性, 下一步需要获取更长时段资料进行补充分析。同时, 本文主要针对业务常用的 9 种环境参量进行归纳分析, 研究暖区暴雨过程依然不够全面, 未来仍需继续探讨其他指示意义的相关环境参量, 实际业务中可综合多个关键环境参量进行分析研判。

参考文献 (References):

谌芸,孙军,徐珺,等.2012.北京 721 特大暴雨极端性分析及思考 (一) 观测分析及思考[J].气象,38(10):1255−1266. Chen Y, Sun J, Xu J, et al. 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part Ⅰ: Observation and thinking [J]. Meteorological Monthly,38(10):1255−1266 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2012.10.012

谌芸,陈涛,汪玲瑶,等.2019.中国暖区暴雨的研究进展[J].暴雨灾害,38(5):483−493. Chen Y, Chen T, Wang L Y, et al. 2019. A review of the warm-sector rainstorms in China [J]. Torrential Rain and Disasters,38(5):483−493 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.05.010

陈玥,谌芸,陈涛,等.2016.长江中下游地区暖区暴雨特征分析[J].气象,42(6):724−731. Chen Y, Chen Y, Chen T, et al. 2016. Characteristics analysis of warm sector rainstorms over the middle lower reaches of the Yangtze river [J]. Meteorological Monthly,42(6):724−731 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2016.06.008

崔梦雪,张晗昀,陈德花,等.2024. 2023 年 4 月 18 日厦门暖区特大暴雨的中尺度特征及低空急流的作用[J].暴雨灾害,43(5):521−531. Cui M X, Zhang H Y, Chen D H, et al. 2024. Mesoscale characteristics and role of low-level jets in a warm-sector severe torrential rain event in Xiamen on 18 April 2023 [J]. Torrential Rain and Disasters,43(5):521−531(in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−107

樊李苗,俞小鼎.2013.中国短时强对流天气的若干环境参数特征分析[J].高原气象,32(1):156−165. Fan L M, Yu X D. 2013. Characteristics analyses on environmental parameters in short-term severe convective weather in China [J]. Plateau Meteorology,32(1):156−165 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2012.00016

高晓梅,俞小鼎,王令军,等.2018.鲁中地区分类强对流天气环境参量特征分析[J].气象学报,76(2):196−212. Gao X M, Yu X D, Wang L J, et al. 2018. Characteristics of environmental parameters for classified severe convective weather in central area of Shandong Province [J]. Acta Meteorologica Sinica,76(2):196−212 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2018.006

谷秀杰,郝晓珍,田金华,等. 2023. 河南区域暴雨时空分布特征[J]. 沙漠与绿洲气象,1−9. Gu X J, Hao X Z, Tian J H, et al. 2023. Temporal-spatial distribution characteristics of rainstorm in Henan Province [J]. Desert and Oasis Meteorology,1-9 (in Chinese). https://link.cnki.net/urlid/65.1265.P.20241024.1148.004

何立富,陈涛,孔期.2016.华南暖区暴雨研究进展[J].应用气象学报,27(5):559−569. He L F, Chen T, Kong Q. 2016. A review of studies on prefrontal torrential rain in South China [J]. Journal of Applied Meteorological Science,27(5):559−569 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20160505

黄士松,李真光,包澄澜,等. 1986. 华南前汛期暴雨[M]. 广州: 广东科技出版社. Huang S S,Li Z G,Bao C L,et al. 1986. The pre-flood season

rainstorm in South China [M]. Guangzhou:Guangdong Science and Technology Press (in Chinese)

李欣,张璐,江敦双.2021.青岛地区暖区暴雨特征研究分析[J].气象科学,41(2):270−277. Li X, Zhang L, Jiang D S. 2021. Characteristics of warm-sector rainstorms over the Qingdao area [J]. Journal of the Meteorological Sciences,41(2):270−277 (in Chinese). doi:10.12306/2019jms.0042

林良勋. 2006. 广东省天气预报技术手册[M]. 北京:气象出版社. Lin L X. 2006. Technical guidance on weather forecasting in Guangdong Province [M]. Beijing:China Meteorological Press: 143-152 (in Chinese)

刘瑞鑫,孙建华,陈鲍发.2019.华南暖区暴雨事件的筛选与分类研究[J].大气科学,43(1):119−130. Liu R X, Sun J H, Chen B F. 2019. Selection and classification of warm-sector heavy rainfall events over South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,43(1):119−130 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1803.17245

吕伟绮,谌芸,李晟祺,等.2017.黄淮地区一次暖区大暴雨的中尺度特征分析[J].成都信息工程大学学报,32(4):391−401. Lv W Q, Chen Y, Li C Q, et al. 2017. Mesoscale analysis on a warm sector torrential rain event in Huang-huai Area [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology,32(4):391−401 (in Chinese). doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2017.04.009

马月枝,张霞,胡燕平.2017.2016 年 7 月 9 日新乡暖区特大暴雨成因分析[J].暴雨灾害,36(6):557−565. Ma Y Z, Zhang X, Hu Y P. 2017. Cause analysis of a warm-sector excessive heavy rainfall event in Xinxiang on 9 July 2016 [J]. Torrential Rain and Disasters,36(6):557−565(in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2017.06.009

田莹,叶成志,姚蓉.2022.2008—2018 年江南暖区暴雨特征[J].大气科学学报,45(1):51−64. Tian Y, Ye C Z, Yao R. 2022. Statistical analysis of the characteristics of warm-sector rainstorms in the southern part of the Yangtze River during the period of 2008-2018 [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,45(1):51−64 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210825001

万轶婧,王东海,梁钊明,等.2020.华南暖区暴雨环境参量的统计分析[J].中山大学学报 (自然科学版),59(06):51−63. Wan Y J, Wang D H, Liang Z M, et al. 2020. Statistical analysis of the environmental parameters of warm-sector heavy rainfall in South China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni,59(06):51−63 (in Chinese). doi:10.13471/j.cnki.acta.snus.2020.04.08.2020d014

汪玲瑶,谌芸,肖天贵,等.2018.夏季江南地区暖区暴雨的统计分析[J].气象,44(6):771−780. Wang L Y, Chen Y, Xiao T G, et al. 2018. Statistical analysis of warm-sector rainstorm characteristics over the southern of middle and lower reaches of the Yangtze River in summer [J]. Meteorological Monthly,44(6):771−780 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2018.06.005

吴乃庚,温之平,邓文剑,等.2020.华南前汛期暖区暴雨研究新进展[J].气象科学,40(5):605−616. Wu N G, Wen Z P, Deng W J, et al. 2020. Advances in warm-sector heavy rainfall during the first rainy season in South China [J]. Journal of the Meteorological Sciences,40(5):605−616 (in Chinese). doi:10.3969/2020jms.0077

伍志方,蔡景就,林良勋,等.2018.2017 年广州“5·7”暖区特大暴雨的中尺度系统和可预报性[J].气象,44(4):485−499. Wu Z F, Cai J J, Lin L X, et al. 2018. Analysis of mesoscale systems and predictability of the torrential rain process in Guangzhou on 7 May 2017 [J]. Meteorological Monthly,44(4):485−499 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2018.04.002

杨晓亮,杨敏,段宇辉,等.2021.京津冀一次暖区大暴雨的成因分析[J].暴雨灾害,40(5):455−465. Yang X L, Yang M, Duan Y H, et al. 2021. Analysis on causes of a warm-sector torrential rain event in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Torrential Rain and Disasters,40(5):455−465 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2021.05.002

俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社:314 Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al. 2006. The principle and operational application of doppler radar [M]. Beijing:China Meteorological Press:314 (in Chinese)

俞小鼎.2011.基于构成要素的预报方法——配料法[J].气象,37(38):913−918. Yu X D. 2011. Ingredients based forecasting methodology [J]. Meteorological Monthly,37(38):913−918 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2011.8.001

张芹,赵海军,朱翠山.2023.山东暖区暴雨对流性特征和环境参量的统计分析[J].沙漠与绿洲气象,17(3):71−77. Zhang Q, Zhao H J, Zhu C S. 2023. Statistical analysis of the convection characteristics and environment parameters of warm-sector heavy rain in Shandong [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(3):71−77(in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.03.010

张小玲,谌芸,张涛.2012.对流天气预报中的环境场条件分析[J].气象学报,70(4):642−654. Zhang X L, Chen Y, Zhang T. 2012. Meso-scale convective weather analysis and severe convective weather forecasting [J]. Acta Meteorologica Sinica,70(4):642−654 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2012.052

周宜卿,宋楠,周长青.2024. 2012-2021 年湘南暖区暴雨特征分析[J].热带气象学报,40(3):425−435. Zhou Y Q, Song N, Zhou C Q. 2024. Characteristics of warm-sector rainstorms in southern Hunan Province from 2012 to 2021 [J]. Journal of Tropical Meteorology,40(3):425−435 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004−4965.2024.038

Doswell C A, Brooks H E, Maddox R A. 1996. Flash flood forecasting: an ingredients-based methodology [J]. Weather Forecasting,11(4):560−581. doi:10.1175/1520−0434(1996)0112.0.CO;2

Maddox R A, Chappell C F, Hoxit L R. 1979. Synoptic and mesoscale aspects of flash flooding events [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,60:115−123. doi:10.1175/1520−0477−60.2.115

Sun J H, Zhang Y C, Liu R X, et al. 2019. A review of research on warm-sector heavy rainfall in China [J]. Advances in Atmospheric Sciences,36:1299−1307. doi:10.1007/s00376−019−9021−1

(责任编辑 张 文)