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

汉江上游致洪暴雨天气概念模型客观识别算法的应用与检验

王孝慈 王继竹 王海燕 孟英杰 徐卫立 周耘逸

Application and verification of objective identification for the conceptual weather model of flood-causing rainstorm in the upper reaches of Hanjiang River

WANG Xiaoci，WANG Jizhu，WANG Haiyan，MENG Yingjie，XU Weili，ZHOU Yunyi

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2025-036

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

2021年汉江秋汛异常水雨情特征及风险管理机制探讨

Discussion on the characteristics and risk management strategies of abnormal rainfall-flood regime in the Hanjiang River Basin during the autumn flood season of 2021

暴雨灾害. 2022, 41(5): 501-505 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-158

贵州2020年汛期不同历时强降水雨量特征分析

Characteristics of rainstorm with different time scales in Guizhou during 2020 flood season

暴雨灾害. 2020, 39(6): 586-592 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.06.006

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

引发内蒙古汛期暴雨洪涝灾害的降水事件雨强特征分析

Analysis of rainfall intensity characteristics of precipitation events causing rainstorm and flood disaster in flood season in Inner Mongolia

暴雨灾害. 2023, 42(3): 346-352 https://doi.org/10.12406/byzh.2021-224

华南区域性暴雨过程的客观评估及异常机理分析

Objective assessment and analysis of abnormal causes of regional rainstorm events in South China

暴雨灾害. 2021, 40(3): 306-315 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.03.009

基于年际增量和EOF迭代法的长江流域汛期降水预测

Precipitation prediction during flood season in the Yangtze River Basin based on interannual increment and EOF iteration method

暴雨灾害. 2022, 41(6): 651-661 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-003

关注微信公众号，获得更多资讯信息

王孝慈,王继竹,王海燕,等.2025.汉江上游致洪暴雨天气概念模型客观识别算法的应用与检验[J].暴雨灾害,44(6):713−722. WANG Xiaoci, WANG Jizhu, WANG Haiyan, et al. 2025. Application and verification of objective identification for the conceptual weather model of flood-causing rainstorm in the upper reaches of Hanjiang River [J]. Torrential Rain and Disasters,44(6):713−722 (in Chinese). doi: 10.12406/byzh.2025−036

汉江上游致洪暴雨天气概念模型客观识别算法的应用与检验

王孝慈[1, 2, 3], 王继竹[1, 4], 王海燕[1, 3], 孟英杰[1, 3, 4], 徐卫立[5], 周耘逸[1]

(1. 湖北省气象台, 武汉 430074; 2. 中国气象局水文气象重点开放实验室, 北京 100081; 3. 中国气象局武汉暴雨研究所全国暴雨研究中心/中国气象局流域强降水重点开放实验室/暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430205; 4. 三峡国家气候观象台, 宜昌 443099; 5. 三峡水利枢纽梯级调度通信中心, 宜昌 443000)

摘　要: 为解决单一天气系统识别算法不能实现对致洪暴雨天气过程准确判定的问题, 以 2000 年以来发生在汉江上游秋汛期致洪暴雨天气过程为研究对象, 基于数值预报产品和 MICAPS 格点数据, 应用曲率值追踪算法、领域查找法等主流客观识别算法, 设计了能同时识别多种天气系统的客观算法, 并基于致洪暴雨天气概念模型, 进一步构建了可用于致洪暴雨天气概念模型的识别算法, 从而实现对致洪暴雨天气概念模型的客观识别。对汉江上游的 15 例大洪水事件中 27 次致洪暴雨过程进行历史个例回代检验。结果表明: 领域查找法等客观识别算法对大尺度天气系统的位置、强度、移动路径等方面的客观识别都较为准确, 天气系统命中率都在 90% 以上。在进行致洪暴雨天气概念模型客观识别检验时, 效果良好, 命中率都在 70% 以上。客观识别算法不仅能够快速识别汉江上游秋汛期的致洪暴雨天气概念模型, 在其他流域洪水预报业务中也具有较好的应用前景。

关键词: 秋汛期; 汉江上游; 洪水; 致洪暴雨; 客观识别

中图法分类号: P456.1　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2025−036

Application and verification of objective identification for the conceptual weather model of flood-causing rainstorm in the upper reaches of Hanjiang River

WANG Xiaoci[1, 2, 3], WANG Jizhu[1, 4], WANG Haiyan[1, 3], MENG Yingjie[1, 3, 4], XU Weili[5], ZHOU Yunyi[1]

(1. *Hubei Meteorological Observatory*, *Wuhan* 430074; 2. *China Meteorological Administration Hydro-Meteorology Key Laboratory*, *Beijing* 100081; 3. *China Meteorological Administration Basin Heavy Rainfall Key Laboratory/Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research*, *Institute of Heavy Rain*, *CMA*, *Wuhan* 430205; 4. *Sanxia National Climate Observatoory*, *Yichang* 443099; 5. *Three Gorges Cascade Dispatch & Communication Center*,*Yichang* 443000)

Abstract: A single identification algorithm usually cannot accurately identify the flood-causing rainstorm weather system. To solve the problem this paper studies the flood-causing rainstorm weather process in the upper reaches of the Han River in the autumn flood season since 2000. Based on the MICAPS grid data and numerical forecasting products, combining the curvature value tracking algorithm, domain search method and other mainstream objective identification algorithms, we design an objective identification algorithm that can simultaneously identify multiple weather systems, and builds a digital model that can be used for computer identification based on the flood-causing rainstorm weather conceptual model. By doing so, we realize the objective identification of the flood-causing rainstorm weather conceptual model. A historical case study of the flood-causing rainstorm processes of 15 major flood events in the upper reaches of the Hanjiang River was carried out. The results show that the algorithm is relatively accurate in the objective identification of the

收稿日期: 2025−02−26; **定稿日期**: 2025−06−27

资助项目: 中国气象局水文气象重点开放实验室开放课题 (24SWQXZ029); 全国暴雨研究开放基金项目 (BYKJ2024Z06); 湖北省自然科学基金项目 (2025AFD139, 2023AFD099); 中国长江电力股份有限公司科研项目 (2423020002)

第一作者: 王孝慈, 主要从事天气预报及流域气象服务研究。E-mail: wxc327@163.com

通信作者: 王继竹, 主要从事天气预报及流域气象服务研究。E-mail: 18814863@qq.com

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

location, intensity, moving path and other aspects of large-scale weather systems, and the hit rate is more than 90%. When conducting the objective identification test of the flood-causing rainstorm weather concept model, the hit rate is more than 70%. The objective recognition algorithm of weather conceptual model can be applied to quickly identify the flood-causing rainstorm weather pattern in the upper reaches of the Hanjiang River in the autumn flood season, and also can be applied to flood forecasting operations in other basins.

Key words: autumn flood season; upper reaches of the Han River; flood; flash-flood-producing rainstorm; objective recognition

引　言

进入 21 世纪以来，秋季汉江流域洪水频发，具有极强的破坏性与致灾性，给预报员作出准确预报带来了较大的挑战 (刘春腊等, 2014; 柯怡明等, 2022)。致洪暴雨的预报相对普通暴雨过程预报难度更大。

国内学者对汉江流域致洪暴雨特征及天气概念模型进行了多方面研究: 一是研究特定洪水年致洪暴雨过程，通过对比相似年大气环流特征，分析秋汛发生与西太平洋副热带高压 (以下简称副高) 强度、印缅槽活动及对流层中层阻塞高压等具有较好的相关性 (卢珊等, 2013; 范维等, 2018; 高琦等, 2023); 二是研究华西秋雨对汉江流域秋季洪水频发的影响，秋雨偏多年份在低层菲律宾北部存在异常反气旋，其西部异常南风输送的暖湿水汽利于秋雨的维持 (鲍媛媛等, 2003; 殷淑燕等, 2012; 肖莺等, 2013; 徐金霞等, 2019)，并且华西秋雨偏多的年份一般存在 4~8 a 的周期 (蒋竹将等, 2014; 王春学等, 2015); 三是通过分析多个致洪暴雨过程特征来构建天气学概念模型，如党红梅等 (1997)、訾丽等 (2023) 对发生在汉江流域致洪暴雨过程进行环流客观分析，通过划分暴雨类型，构建了与之对应的致洪暴雨天气概念模型。致洪暴雨天气概念模型的建立为洪水天气预报业务提供了科学的预报依据。王孝慈等 (2025a, 2025b) 对 2000 年以来发生在汉江流域秋汛期大洪水进行深入研究，从天气、水文双角度进行洪水类型判别，构建了汉江上游秋季致洪暴雨天气概念模型，综合考虑了洪水峰型特征、流量增幅等信息，有效提升了汉江流域致洪降水预报准确率和预见期。

虽然日益丰富的数值预报模式产品为提高致洪降水预报能力提供了有力的支撑，但随着天气预报技术的发展，预报时效越来越长，预报产品数量呈现几何级增长，仅依靠预报员人工分析方式来判定天气环流形势等工作量相当巨大，难以满足现代天气预报要求 (陈静等, 2002)。对单个天气系统的客观识别，近年来已有不少尝试。其中，对高低压区域、中心和强度提取技术的发展已较为成熟，但是对受诸多气象条件影响的槽线、切变线、低涡路径的判定，人工参与度仍然较高 (李国平和张万诚, 2019)。以槽线客观识别算法为例，传统方法中槽线的分析一般利用位势高度场数据对等值线进行追踪，但是该方法分析效率较低，槽线判断准确度不高 (Huang and Zhao, 2000; Wong et al., 2008)。黄岩等 (2019) 设计了基于曲率值追踪的槽线客观识别法，通过直接计算格点处曲率值，避免复杂的等值线追踪过程，该方法在预报准确度和计算时效上都有所提高。目前针对汉江流域致洪暴雨多个天气系统的识别算法研究仍为空白，单一的天气系统识别难以实现对致洪暴雨过程的准确判定。

鉴于上述问题，本文应用曲率值追踪算法、领域查找法等多种主流的单一天气系统客观识别算法，设计了能同时识别多种天气系统 (涵盖高低压区域、中心和强度、槽线、切变线、急流、低涡等) 的客观算法，在王孝慈等 (2025a) 构建的秋汛期汉江上游致洪暴雨天气概念模型的基础上，进一步设计模型客观识别算法，从而实现对致洪天气概念模型的快速识别。对汉江上游的 15 例大洪水过程中 27 次致洪暴雨过程的天气概念模型进行历史个例回代检验，以期实现天气系统的客观分析与预报业务的深度融合，为预报业务的智能化发展拓展应用空间。

1　资料说明

本文识别天气系统所使用的再分析数据来自欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 的第五代大气再分析数据集 ERA5 (https://cds.climate.copernicus.eu/)，时间分辨率 6 h，分别为 00 时、06 时、12 时、18 时 (世界时，下同)，空间分辨率 1°×1°。气象要素包括: 2000—2023 年 200 hPa、500 hPa、700 hPa 和 850 hPa 的位势高度场和风场数据。考虑到目前 MICAPS 数据格式为国内气象部门统一的业务标准，为方便预报员调用查看，上述再分析资料全部按 MICAPS 第四类格点数据要求进行预处理，同时用于识别的输入、输出产品也均为 MICAPS 第四类格点数据文件。文中涉及到的秋汛期汉江流域致洪暴雨过程全部选自王孝慈等 (2025a, 2025b) 的相关研究。

2　致洪暴雨天气概念模型客观识别算法

实现致洪暴雨天气概念模型客观识别有 4 个功能层次 (图 1)。第一层为信息数据获取层，提供与致

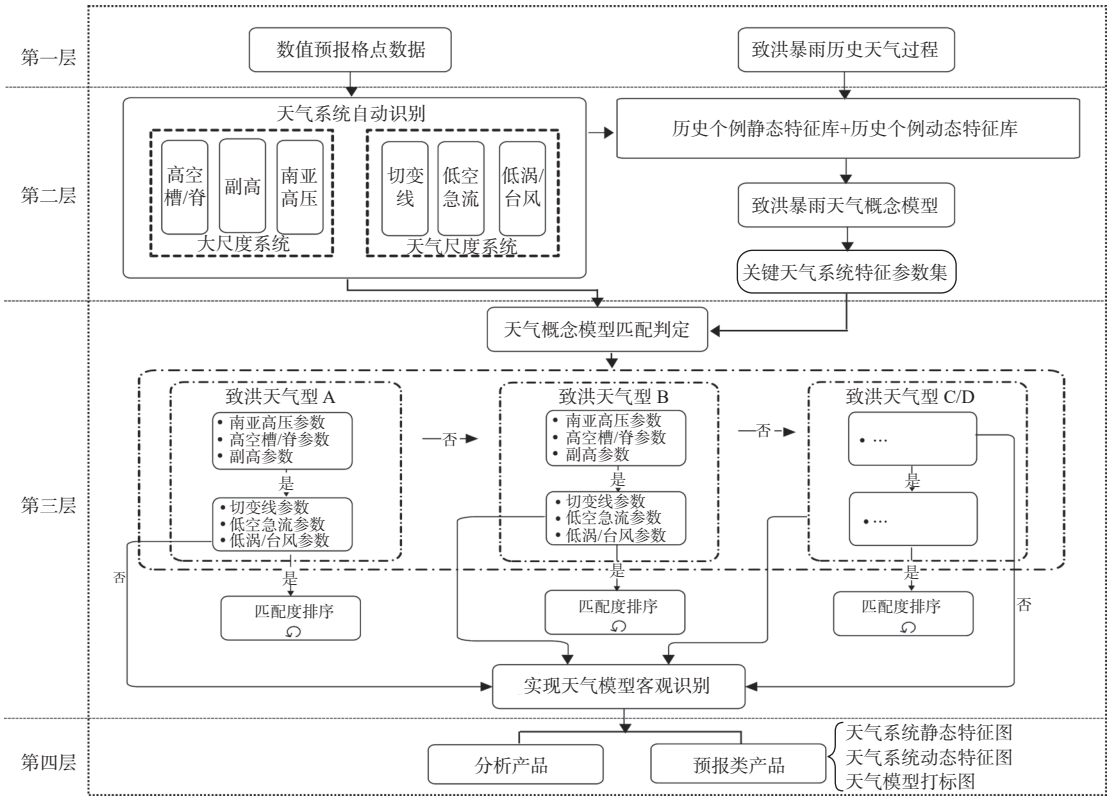


图 1 汉江上游致洪暴雨天气概念模型客观识别流程图

Fig. 1 Flow chart of automatic identification of flood-causing rainstorm weather conceptual mode in the upper reaches of Hanjiang River

洪暴雨历史个例有关的气象产品, 包括位势高度场、风场等相关气象要素; 第二层为天气系统客观识别层, 主要包含对预报和实况数据的识别。通过对历史个例大尺度及天气尺度系统的识别, 分别建立静态和动态特征库, 并用统计学方法对构建的致洪暴雨天气概念模型进行关键天气系统分类特征参数的提取; 第三层为天气概念模型客观识别层, 基于第二层中统计出的不同类型致洪暴雨过程天气系统的特征参数, 采用反映天气系统位置、移动趋势、中心强度等相似计算方法分别计算各层天气系统的相似系数, 结合各类天气概念模型特征, 进行匹配度判定; 第四层为预报产品层, 显示自动识别的客观分析结果及预报结果。其中第二和第三层为关键技术核心层。

2.1 天气系统客观识别步骤

结合致洪暴雨天气概念模型 (王孝慈等, 2025a) 特征, 需要对高低压中心、高空槽、副高、切变线、低空急流/西风急流、南亚高压、西南涡、高原涡、热带气旋/台风等几大类天气系统进行客观识别。从客观识别所需分析的数据来看, 上述识别的天气系统中, 基于单一的位势高度场数据分析的天气系统有: 南亚高压和副高位置及特征线; 基于单一的风场数据分析的天气系统有: 切变线、急流和低涡; 基于位势高度场和风场两种分析数据的天气系统有: 槽线、副高和南亚高压脊线。具体使用资料和特征量如表 1 所示。

2.1.1 高低压客观识别步骤

客观识别位势高度场格点资料对应的高低压区域步骤为: (1) 按梯度下降法 (颜长建等, 2016; 任靖豪等, 2023) 获得高压和低压的分区, 合并尺度较小的高低压分区; (2) 保留高低压中心点附近 1/3 的核心面积作为高低压区; (3) 对于一个区域, 只有高压区覆盖, 定义为高压区, 反之则定义为低压区, 如果都不覆盖则定义为过渡区, 如果同时覆盖则分别划分高压区和低压区。对于高低压中心的识别与区域类似, 通过判断每一个闭合圈内部有无中心点 (袁美英等, 1994) 识别中心位置。

2.1.2 高空槽客观识别步骤

近年来主流的槽线客观识别算法有 3 种: 分别基于蚁群理论 (牟丽雅, 2020)、DP (Douglas Peucker) 算法 (代曦等, 2016) 及曲率值追踪算法 (黄岩等, 2019)。其中曲率值追踪算法基于天气学理论 (朱乾根等, 2000), 该算法与蚁群理论比, 不易引入噪声数据, 避免失真情况; 与 DP 算法比, 避免复杂的等值线追踪, 相对前 2 种方法, 在分析准确性和预报时效上都有改善 (黄岩等, 2019)。本文采用该方法进行槽线的客观识别。其步骤为: (1) 直接计算位势高度场格

表 1 影响致洪暴雨的不同天气系统识别所用资料及特征量

Table 1 Data and feature quantities used for identifying different weather systems of flood-causing rainstorm

天气系统	使用资料	特征量
高低压中心	500 hPa、700 hPa位势高度场	极大值/极小值区域
高空槽	500 hPa位势高度场、风场	曲率涡度平流零线组成的曲线
副高	500 hPa位势高度场、风场	特征值组成的曲线
切变线	700 hPa、850 hPa风场	全风速切变的极大值组成的曲线
低空急流/西风急流	850 hPa风场、200 hPa风场	风速的极大值组成的曲线
南亚高压	200 hPa位势高度场、风场	特征值组成的曲线
西南涡	850 hPa风场	风场气旋性旋转中心
高原涡	700 hPa风场	风场气旋性旋转中心
热带气旋/台风	700 hPa风场	风场气旋性旋转中心

点数据的曲率涡度 (Berry et al., 2007); (2) 将曲率涡度作为特征量, 以地转风方向作为平流风, 初步确定槽线位置; (3) 剔除风速小于阈值的部分, 删除曲率涡度为负的部分, 对该格点进行判别并提取候选槽点, 对槽点进行追踪提取原始槽线; (4) 对原始槽线进行噪声剔除和平滑处理, 实现槽线的自动识别。

2.1.3 切变线客观识别步骤

风切变即空间任意两点之间风向和风速的突然变化 (朱乾根等, 2000)。传统的切变线客观识别方法是通过计算经/纬向风切变量来确定切变线的位置 (宋柳贤, 2023)。本文切变线客观识别方法参考黄岚等 (2013)和顾荣直等 (2019) 的相关研究, 具体步骤为: (1) 设定初猜场的平流风为西北风, 根据风场计算出每个格点的切变值; (2) 以风向切变作为初猜的特征量, 结合初猜平流风作为输入场, 以此获得初猜的切变线; (3) 根据初猜的切变线更正平流风方向, 计算切变线两侧的全风速切变, 以及切变线两侧风速朝切变线方向的辐合, 并以它们的和作为切变线的特征量, 切变线就位于切变高值区, 当高值区呈带状时, 该高值区的脊线位置即是切变线的位置; (4) 以步骤 (3) 更正的平流方向和特征量, 获得切变线, 并计算切变线的范围分区。

2.1.4 急流客观识别步骤

急流是水平动量集中的气流带, 具有强大的水平风速切变和垂直风速切变。按风速大值范围及所在层次的不同分为: 大尺度急流如西风急流 (表 1)、天气尺度急流如低空急流等。在急流系统中最重要的特征就是急流的轴线, 通过分析急流轴线可以明确急流的中心位置和动力热力的输送方向。结合其原理, 急流客观识别步骤为: (1) 将风速作为特征量, 以垂直急流风向的方向作为平流风, 确定急流轴线; (2) 删除风速小于阈值的部分; (3) 以风速作为特征量将急流进行分区操作。我国日常业务中, 850 hPa 低空急流风速判定要达到 12 $m\cdot s^{-1}$, 200 hPa 高空西风急流则需达到 40 $m\cdot s^{-1}$。

2.1.5 低涡客观识别步骤

不同学者在对低涡中心 (以下简称涡心) 位置的客观识别算法的设定时各有侧重, 分别基于位势高度、涡度、流场资料这三类。其中, 基于位势高度和涡度数据的识别方法是以最内圈闭合等值线内所有点的平均位置作为涡心位置, 在不同插值方法及精度设置下, 涡心的位置会发生变化, 并非为精准结果 (秦贺等, 2014; 林志强等, 2015; Curio et al., 2018)。张博和李国平 (2017) 将流场作为特征参量, 设计低涡客观识别的气旋性条件, 该方法有效降低了对低涡识别的经向偏差, 为本文中所用的低涡客观识别算法。低涡客观识别步骤为: 以气旋性旋转区域的质心作为涡心, 质心的计算方法以区域内格点经度的平均作为涡心的经度值, 纬度的平均作为涡心的纬度值。将涡心经纬度值线性依次连接作为其移动路径, 具体算法参考张博和李国平 (2017) 的领域查找法。

2.1.6 副高和南亚高压客观识别步骤

在 2.1.1 中对高压区域和中心的识别步骤已做了简要介绍。这里还需对环流特征曲线、高压脊线和脊点位置的识别进行简要说明。高压脊线位置为纬向风为零的等值线位置。将 105°—150°E、0°—45°N 范围内的西风零线的平均纬度记为副高脊线位置。等高线的最西端点所在位置 (即脊点位置) 必然是和经度线相切的, 此处位势高度的梯度方向和经线垂直, 即南北向的梯度为 0, 其中正南风对高度场的平流场的 0 线位置是副高脊线的位置。客观识别步骤为: (1) 筛选出位势高度大于 5 840 gpm 的部分, 并以高度场为特征量进行分区计算; (2) 删除分区中心点

在 0º—45ºN 以外的高压分区, 并将获得的高压分区按相邻的紧密程度进行合并; (3) 以位势高度为特征量, 以正南风为平流方向, 计算副高脊线及脊点位置。

南亚高压的识别步骤与副高一致, 区别在于西风零线搜索范围为 70º—130ºE、0º—45ºN, 特征线一般选取 200 hPa 上位势高度大于等于 12 400 gpm, 而阻塞高压搜索范围为与前两者略有区别, 其脊线为经向风零线, 搜索范围为 50º—70ºN, 特征线一般选取 500 hPa 上位势高度大于 5 680 gpm 的部分 (王晓芳等, 2011), 这里不再赘述。

2.2 致洪暴雨天气概念模型客观识别

应用 2.1 节中天气系统识别算法, 提取致洪暴雨天气概念模型中各个关键影响天气系统作为基本单元, 并对各天气系统设定特定区域范围, 称之为关键区 (大尺度天气系统区域设定参考国家气候中心提供的 1980—2020 年新百项气候指数区域) (https://cmdp.ncc-cma.net/Monitoring/cn_index_130.php), 结合本文天气系统特点设定关键区 (图 2); 天气尺度影响系统区域的设定参考秋汛期汉江上游致洪暴雨过程中主要系统区域的统计结果, 如图 3b。应用 MICAPS 格点数据文件, 对文件内各天气系统进行客观识别, 并判断是否在关键区内, 如满足相关条件, 则认为当前天气形势符合对应的致洪暴雨天气模型。

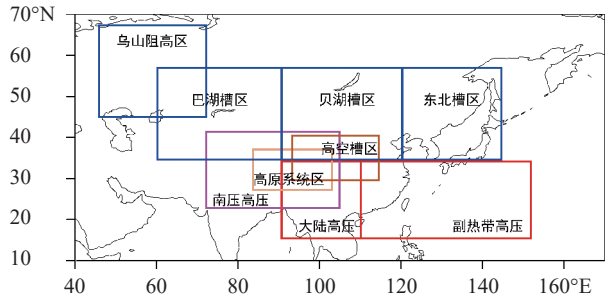


图 2 天气系统静态特征库的分区示意图 (不同颜色代表不同区域, 下同)

Fig. 2 Schematic diagram of key zones in the weather system (different colors represent different regions, the same applies below)

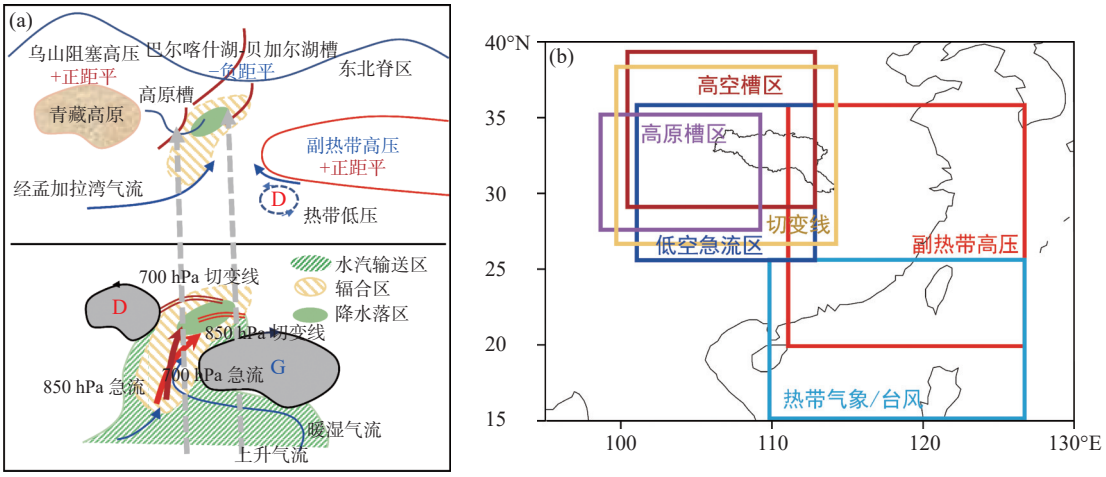


图 3 高空槽-急流强迫型主要影响天气系统 (a) 及关键区 (b) 示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the high-altitude trough low altitude shear jet type (a) and key areas of the main influencing weather system (b)

秋汛期汉江上游致洪暴雨天气概念模型分为 5 类 (王孝慈等, 2025a), 通过分析 500 hPa、700 hPa 和 850 hPa 位势高度场及风场数据, 运用“标记法”(蒋黎莉, 2017) 来进行天气流型识别的命中率的判定: 将 500 hPa 中高纬度影响系统共设置 3 类: 高空槽型标记为 A、副高外围型标记为 B、副高内部型标记为 C; 中低纬度 700/850 hPa 天气影响系统设置 3 类: 急流强迫型Ⅰ、偏南气流弱强迫型Ⅱ、低涡切变线型Ⅲ, 一旦系统判定某一时次出现满足对于上述致洪暴雨过程类型, 例如, 当致洪暴雨过程为高空槽-急流强迫型时, 客观识别判定为 A-Ⅰ, 并记为命中 1 次。

从各类致洪暴雨天气模型环流特征来看, 高纬地区 (40°N 以北) 主要影响天气系统为乌拉尔山阻塞高压、巴湖槽、贝湖槽、东北冷槽; 中纬地区 (20°—40°N) 为南亚高压、副高、高原槽、西风槽、大陆高压 (青藏高压、伊朗高压)、低涡、切变线、急流; 低纬地区主要是热带气旋 (台风)。因此, 在进行天气概念模型识别判断时, 步骤如下: (1) 以大尺度背景天气系统识别为基础, 主要识别对象为副高、南亚高压及高纬度天气系统, 采用合成分析的方法, 建立每个洪水天气个例对应关键区 (张丰启, 2001) 天气系统的位置、强度等特征信息, 形成历史静态特征库 (图 2), 这一步为天气型匹配的基本分型依据; (2) 进行中低层天气系统识别, 主要识别对象为高空槽、切变线、低涡、急流等, 基于天气系统识别结果, 采用目标系统追踪的方式, 记录每个致洪天气个例关键系统动态特征信息, 形成历史个例库动态特征库; (3) 根据不同概念模型天气要素特征的统计结果来划分识别关键

区, 当模式预报汉江上游将出现 3 d 以上的连续强降水, 且汉江上游过程累积面雨量大于 32 mm, 或石泉以上、石泉-安康、安康-丹江口三个分区面雨量分别超过 52 mm、31 mm、24 mm 时 (王孝慈等, 2025b), 开始进行致洪暴雨天气过程的客观识别。在关键区内对致洪暴雨过程的天气系统进行静态和动态特征参数比对, 并判断是否在关键区内 (图 3b), 如满足相关条件, 则认为当前天气形势符合对应的致洪暴雨天气概念模型。

以高空槽-急流强迫型 (A-Ⅰ型) 为例: 定义 A-Ⅰ型主要天气系统特征 (图 3a), 识别包括切变线、高空槽、高原槽、低空急流、热带气旋/台风、副高等天气系统的关键区位置 (图 3b)。客观识别的主要天气系统关键区特征量参数见表 2 (其中 40°N 以北大尺度天气系统的关键区如图 2 所示)。该型暴雨落区常位于西风槽前、低层切变线附近或其南侧低空急流出口左侧, 需要说明的是, 对于该类概念模型的识别, 首先要判定高空槽与副高的相对位置, 其次只要在对应关键区识别出高空槽、高原槽或者 700 hPa、850 hPa 某一层识别出切变线或急流, 就判定为 A-Ⅰ型 (图 3a), 如果同时在低涡关键区内识别出高原涡或西南涡, 则进一步判定该型为 A-Ⅲ型。

表 2 高空槽-急流强迫型主要影响天气系统及关键区特征量参数

Table 2 Main influential weather systems and key area parameters of high-altitude trough low altitude shear jet type

天气系统	识别资料	关键区特征量参数			
		最小纬度/°N	最大纬度/°N	最小经度/°E	最大经度/°E
切变线	700 hPa、850 hPa风场	27.7	36.7	100.0	114.5
低空急流	850 hPa风场	25.6	35.7	101.0	113.3
热带气旋/台风	700 hPa风场	17.0	26.0	110.0	126.0
副高脊线	500 hPa高度场	22.0	25.0	—	—
高空槽	500 hPa高度场、风场	30.0	37.0	100.5	113.5
高原槽/涡	500 hPa高度场、风场	29.0	35.0	99.0	109.2

注: 表中“—”表示无值

3 致洪暴雨天气概念模型主客观识别对比分析

2000—2023 年汉江上游地区 15 次大洪水事件期间有 27 次致洪暴雨过程, 共计 139 d, 一日 2 次 (00 时、12 时), 即 278 个时次。利用本文设计的客观识别算法, 对槽脊、急流、切变线、涡旋等基本天气系统的识别效果如表 3。其中对副高、南亚高压、低涡等系统的识别命中率均可达到 100%, 高空槽相对其他天气系统来说识别率略低, 但也接近 90%。

表 3 汉江上游致洪暴雨过程天气系统主观和客观识别结果

Table 3 Subjective and objective identification results of weather system in flood-causing rainstorm process in the upper reaches of Hanjiang River

系统	主观识别/次	客观识别/次	命中率/%
副高	261	261	100.0
低空急流	98	91	92.9
切变线	282	275	97.5
低涡/热带	198	198	100.0
高空槽	405	364	89.9
南压高压	151	151	100.0

基于成功识别的天气系统, 根据模型配置的关键区和关键影响系统判据, 可实现对应天气概念模型的客观识别。识别结果如表 4 所示, 针对不同模型个例, 成功识别高空槽型 7 例, 命中率达 77.8%, 副高外围型 7 例, 命中率 70%, 副高内部型 3 例, 命中率 75%, 漏报率在 20% 左右, 与槽线的漏识和急流末端位置判定有关, 上述模型识别率在秋汛期汉江上游致洪暴雨天气预报业务中有较好的示警意义。在实际业务预报中, 致洪暴雨过程模型识别的启动还需结合分区面雨量预报数据进行模型识别及判定。

以 2021 年发生在汉江上游的大洪水过程为例,

表 4 汉江上游致洪暴雨过程天气概念模型客观识别和主观识别结果

Table 4 Experimental results of objective and subjective identification of weather model for flood generating rainstorm process in the upper reaches of Hanjiang River

天气概念模型	客观识别/次	主观识别/次	命中率/%
A-I	4	5	77.8
A-III	3	4	
B-I	4	6	70.0
B-III	3	4	
C-III	3	4	75.0

注: A、B、C分别为高空槽型、副高外围型、副高内部型, Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ分别为急流强迫型、偏南气流弱强迫型、低涡切变型

做历史回算识别检验。选取了 3 类致洪暴雨天气概念模型实例进行主、客观对比分析。

过程 1 发生在 2021 年 9 月 4 日 00 时—6 日 00 时, 为副高外围-低涡切变型, 客观识别判定为 B-Ⅲ型, 与主观识别概念模型一致 (图 4)。关键区内识别出切变线、低涡, 副高脊线及西脊点位置与 B 型特征值范围吻合, 为判定副高外围型的关键因素。过程期间未出现急流, 但存在西南涡和切变系统, 识别算法成功判定为一次 B-Ⅲ型过程。可以看出, 对低涡中心的识别, 客观识别的位置更为精准, 涡旋中心个数多于主观识别; 主客观识别的切变线位置均集中在副高外围, 但客观识别切变线的断裂方式与主观识别习惯略有差别。

过程 2 发生在 2021 年 9 月 18 日 00 时—20 日 00 时, 为高空槽-急流强迫型过程, 客观识别判定为 A-Ⅰ型, 与主观识别概念模型一致 (图 5)。首先判定高空槽与副热带高压的相对位置及关键区内是否存在高空槽, 是否具有向东移动的特征。结合中低层天气系统配置与识别关键区, 对应不同天气系统关键区能分别识别出低槽、高原槽、低空急流, 并且副热带高压脊线位置满足特征值范围, 与 A-Ⅰ型吻合, 在完成对天气系统成功识别的同时, 还能表现出天气系统自西向东移动的演变趋势, 是一次成功的识别过程。但客观识别槽线的起始位置、平滑度及深度与主观识别还是有所差别。

过程 3 发生在 2021 年 9 月 25 日 12 时—27 日 00 时, 为副高内部-低涡切变型, 客观识别智能判定为 C-Ⅲ型, 与主观识别概念模型一致 (图 6)。关键区内识别出切变线、低涡、急流, 并且副高脊线位置与 C 型特征值范围吻合, 为判定副高内部型的关键信息。主观识别中, 汉江上中游在 700 hPa 和 850 hPa 均存在急流影响的, 客观识别算法漏识别了 700 hPa 的急流, 但未影响对概念模型的判定, 成功判定出 C-Ⅲ型。

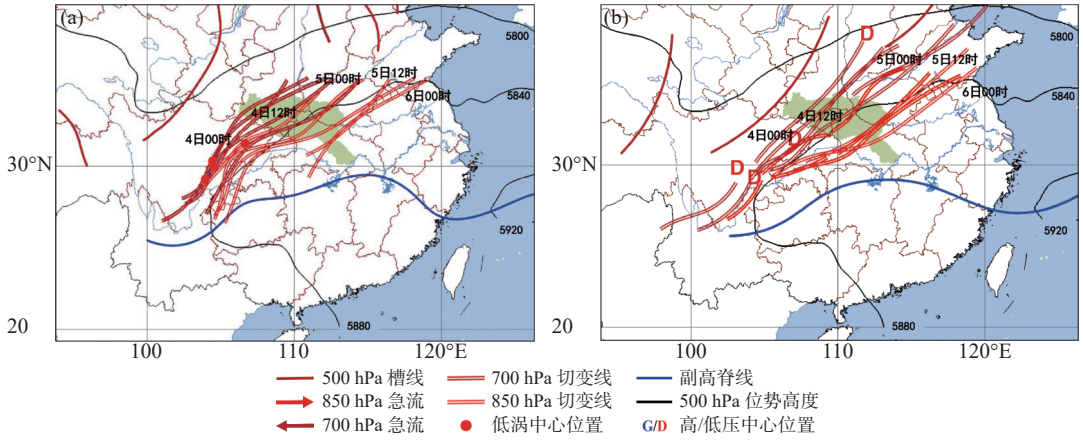


图 4 2021 年 9 月 4 日 00 时—6 日 00 时副高外围-低涡切变型 (B-Ⅲ) 个例的客观识别 (a) 和主观识别 (b) 判定结果

Fig. 4 Judgment results of (a) objective identification and (b) subjective identification for peripheral subtropical high-low vortex shear type (B-Ⅲ) from 00:00 BT on September 4, 2021 to 00:00 BT on September 6, 2021

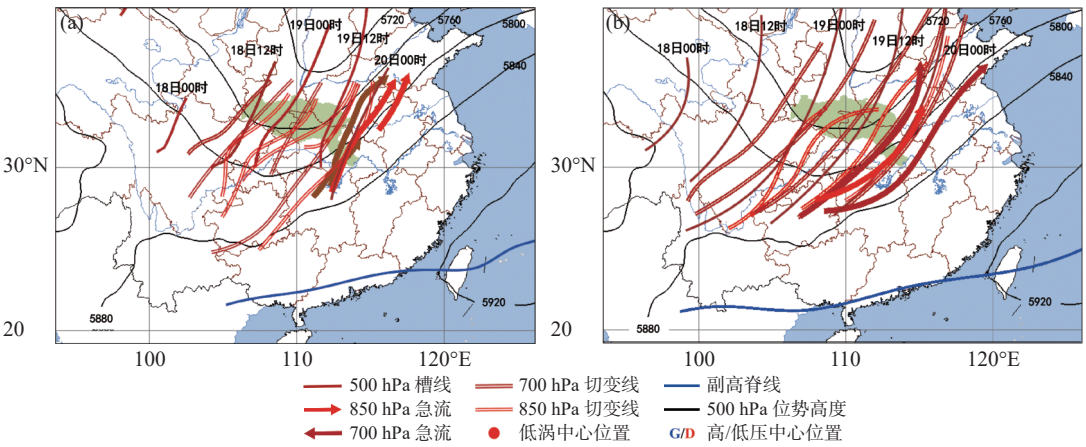


图 5 同图 4, 但为 2021 年 9 月 18 日 00 时—20 日 00 时高空槽-急流强迫型 (A-I) 个例

Fig. 5 Same as Fig.4, but for high-altitude trough low altitude shear jet type (A-I) from 00:00 BT on September 18 to 00:00 BT on September 20, 2021

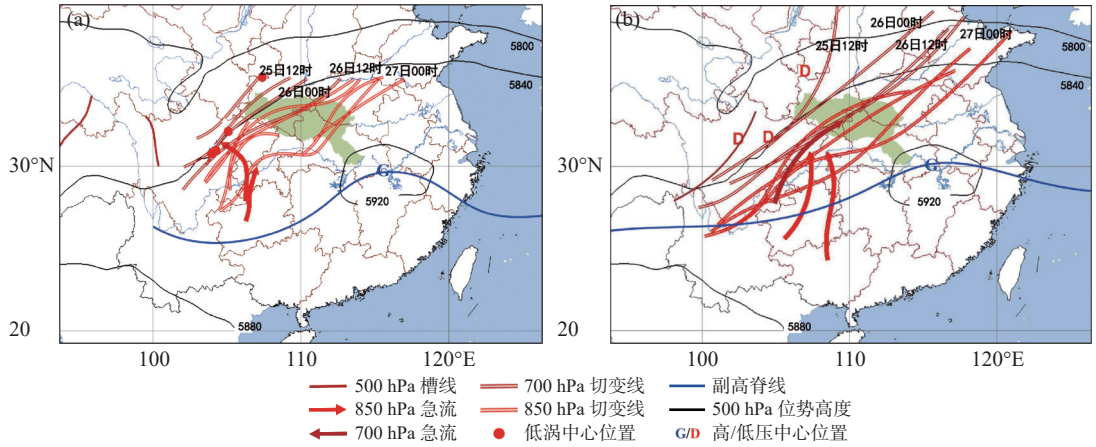


图 6 同图 4, 但为 2021 年 9 月 25 日 12 时—27 日 00 时副高内部-低涡切变型 (C-Ⅲ) 个例

Fig. 6 Same as Fig. 4, but for internal subtropical high-low vortex shear type (C - Ⅲ) from 12:00 BT on September 25 to 00:00 BT on September 27, 2021

通过对上述历史个例的客观识别结果与主观识别对比来看, 算法对切变线、急流和低涡中心的识别精度、位置等效果都非常好, 而对于线条类相关的系统, 如槽线、脊线、急流轴线其起始和结束位置、弯曲度、平滑性、发展深度等特征相较于日常主观分析习惯尚存在一定的差异, 还需进一步改善。

4 结论与讨论

本文利用位势高度场、风场等 MICAPS 格点数据, 针对 2000—2023 年汉江上游 15 例大洪水事件中的 27 次致洪暴雨过程, 基于致洪暴雨天气概念模型, 应用主流天气系统客观识别算法, 实现了对致洪暴雨天气概念模型的客观识别。得出以下结论:

(1) 利用曲率值追踪算法、领域查找法等主流客观识别算法, 识别出包括高低压中心、高空槽、副高、切变线、急流、西南涡等多种天气系统, 实现了与致洪暴雨天气过程相关的主要影响天气系统的客观识别。

(2) 基于致洪暴雨天气概念模型, 定义关键影响天气系统和关键区范围, 开发了致洪暴雨天气概念模型客观识别算法, 该算法可以客观、定量地分析出主要影响系统的活动特征, 与主观识别的结果相比, 准确率较高, 具有良好的应用前景。

(3) 对致洪暴雨历史个例的天气模型识别命中率都在 70% 以上, 空报率为 0, 漏报率在 20% 左右。对于单一天气系统, 在位置、精度等方面算法都能完成准确的识别, 识别命中率基本都在 90 % 以上。

对于历史个例回算中未能成功识别的个例, 经过对比分析, 发现其可能原因: (1) 关键天气系统并不都是在同一时次同时出现, 相较理想模型略有偏差, 且部分时次对天气系统的识别会出现漏报, 针对这个问题, 需要将时间范围拓宽, 加强对过程发生前后 2 个时次的判定; (2) 不是所有个例都具备模型所定义的天气系统, 有其独特性, 而本文设定的模型识别内容是针对大部分个例的共性所设, 这就导致了个别过程与模型识别判据不吻合, 后期根据实际业务需求, 对关键影响系统、关键区等识别条件需要进一步优化完善, 以提高客观识别命中率。此外, 该算法基于 MICAPS 格点数据便可实现对洪水天气概念模型的快速判定, 具备较强的移植性, 可应用于其他流域的洪水天气预报业务中。随着近些年来深度学习技术在气象中的应用, 选择合适的深度学习算法, 构建更完善的天气流型, 进行致洪暴雨天气模型分类识别客观建模, 实现更为精细、准确的模型匹配, 最终获得更精确的预报产品是今后工作的方向。

参考文献 (References):

鲍媛媛,阿布力米提,李峰.2003. 2001 年华西秋雨时空分布特点及其成因分析[J].应用气象学报,14(2):215−222. Bao Y Y, A B L M T, Li F. 2003. Analysis of the spatiotemporal distribution characteristics and causes of autumn rain in West China in 2001 [J]. Journal of Applied Meteorological Science,14(2):215−222 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001−7313.2003.02.009

陈静.2002.图形模式识别方法及其在中期雪灾天气预报中的应用[J].应用气象学报,13(1):109−116. Chen J. 2002. Graph pattern recognition method and its application in mid-term snow disaster weather forecasting [J]. Journal of Applied Meteorological Science,13(1):109−116 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001−7313.2002.01.013

代曦,李骞,顾大权.2016.基于 DP 算法的槽线自动判识[J].气象科技,44(1):36−40. Dai X, Li Q, Gu D Q. 2016. Automatic recognition of meteorological trough lines based on Douglas Peucker algorithm [J]. Meteorological science and technology,44(1):36−40 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.2016.01.007

党红梅,石明生,胡国玲,1997.安康暴雨客观分型及其应用[J].陕西气象,5:4−6. Dang H M, Shi M S, Hu G L. 1997. Ankang rainstorm objective classification and its application [J]. Journal of Shaanxi Meteorology,5:4−6 (in Chinese)

范维, 刘松, 丁洪亮.2018.2017 年汉江上游秋雨成因分析及与相似年比较[J].人民长江,49(S2):86−89. Fan W, Liu S, Ding H L. 2018. Analysis of the causes of autumn rain in the upper reaches of the Han River in 2017 and comparison with similar years [J]. Yangtze River, 49(S2):86−89 (in Chinese). doi:10.16232/j.cnki.1001−4179.2018.S2.022

高琦,吴翠红,徐明,等.2023. 2021 年汉江秋汛的水雨情及环流异常特征研究[J].气象,49(7):868−880. Gao Q, Wu C H, Xu M, et al. 2023. Study on hydrological and rainfall characteristics and circulation anomalies in autumn flood season of Hanjiang River in 2021 [J]. Meteorological Monthly,49(7):868−880 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2023.042601

顾荣直,禹梁玉,韩桂荣.2019.江淮切变线强度的定量化描述方法研究[J].气象科学,39(6):810−817. Gu R Z, Yu L Y, Han G R. 2019. A quantitative description method of shear line strength in Yangtze-Huaihe river Basin [J]. Journal of the Meteorological Sciences,39(6):810−817 (in Chinese). doi:10.3969/2019jms.0001

黄岚,李四放.2013.利用流场资料自动识别低槽 (切变线)[J]. 甘肃科技,29(18):61−62,97. Huang L, Li S F. 2013. Automatic identification of low troughs (shear lines) using flow field data [J]. Gansu Science and Technology,29(18):61−62,97 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000−0952.2013.18.023

黄岩,李骞,范茵.2019.基于曲率值追踪的气象槽线自动分析算法[J].计算机工程与应用,55(1):226−232. Huang Y, Li Q, Fan y. 2019. Automatic analysis of trough lines based on curvature tracking [J]. Computer Engineering and Applications,55(1):226−232 (in Chinese). doi:10.3778/j.issn.1002−8331.1709−0243

蒋竹将,马振峰,刘佳,等.2014.一种改进的华西秋雨指数及其气候特征[J].大气科学,38(1):32−44. Jiang Z J, Ma Z F, Liu J, et al. 2014. An improved west China autumn rain index and its climate characteristics [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,38(1):32−44 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2013.13120

蒋黎莉.2017.基于“标记法”的脑中地图构建探索[J].教学考试,27:30−31. Jiang L L. 2017. Exploration of brain map construction based on "tagging method" [J]. Achievement test,27:30−31 (in Chinese)

柯怡明,孙学军,孙元,等.2022. 2021 年汉江秋汛异常水雨情特征及风险管理机制探讨[J].暴雨灾害,41(5):501−505. Ke Y M, Sun X J, Sun Y, et al. 2022. Discussion on the characteristics and risk management strategies of abnormal rainfall-flood regime in the Hanjiang River Basin during the autumn flood season of 2021 [J]. Torrential Rain and Disasters,41(5):501−505 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−158

刘春腊,马丽,刘卫东.2014.洪水灾害社会经济损失评估方法研究述评[J].灾害学,29(2):136−141. Liu C L, Ma L, Liu W D. 2014. Evaluation methods on social and economic loss of flood disaster [J]. Journal of Catastrophology,29(2):136−141 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000−811X.2014.02.026

林志强.2015.南支槽的客观识别方法及其气候特征[J].高原气象,34(3):684−689. Lin Z Q. 2015. Objective identify method and climatic characteristics of southern branch trough [J]. Plateau Meteorology, 34(3):684−689 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2014.00016

卢珊,贺皓,高红燕.2013. 2011 年汉江流域秋汛气象水文特征分析[J].陕西气象,2:16−19. Lu S, He H, Gao H Y. 2013. Analysis of meteorological and hydrological characteristics of autumn floods in the Han River basin from 2013 to 2011 [J]. Journal of Shaanxi Meteorological,2:16−19 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1006−4354.2013.02.005

李国平,张万诚.2019.高原低涡、切变线暴雨研究新进展[J].暴雨灾害,38(4):464−471. Li G P, Zhang W C. 2019. Recent advances in the research of heavy rain associated with vortices and shear lines come from the Tibetan Plateau [J]. Torrential Rain and Disasters,38(4):464−471(in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.05.008

牟丽雅.2010.基于蚁群系统理论的槽线识别研究与应用[D].武汉:武汉理工大学. Mou L Y. 2010. Research and application of slot line identification based on ant colony system theory [D]. Wuhan:Wuhan University of Technology,(in Chinese). doi:10.7666/d.D473613

秦贺,张云惠,黄秉光,等.2014.塔什干低涡天气系统自动识别方法的探讨[J].沙漠与绿洲气象,8(4):15−17. Qin H, Zhang Y H, Huang B G, et al. 2014. Automatic recognition method for Tashkent vortex weather process [J]. Desert and Oasis Meteorology,8(4):15−17 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1002−0799.2014.04.003

任靖豪,王强,李维浩,等.2023.基于梯度下降的水滴收集率计算方法[J].航空学报,44(4):6−15. Ren J H, Wang Q, Li W H, et al. 2023. Calculation method of water droplet collection rate based on gradient descent [J]. Journal of Aeronautics,44(4):6−15 (in Chinese). doi:10.7527/S1000−6893.2021.26381

宋柳贤,张玲,马茜雅,等.2023.江淮流域暖切变型暖区暴雨的客观识别与分析[J].大气科学,47(6):1709−1722. Song L X, Zhang L, Ma Q Y, et al. 2023. Objective identification and analysis of rainstorm in warm shear warm region of the Yangtze Huaihe River Basin [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,47(6):1709−1722 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2207.21220

王春学,马振峰,邵鹏程,等.2015.我国华西秋雨的气候变化规律及其影响因子[J].干旱区研究,32(6):1113−1121. Wang C X, Ma Z F, Shao P C, et al. 2015. The climate change patterns and influencing factors of autumn rain in western China [J]. Arid Zone Research,32(6):1113−1121 (in Chinese). doi:10.13866/j.azr.2015.06.10

王孝慈,田刚,孟英杰,等.2025.秋汛期汉江上游致洪暴雨过程特征及天气概念模型分析[J].气象,51(2):207−220. Wang X C, Tian G, Meng Y J, et al. 2025. Characteristics of flood-causing rainstorm process in the upper reaches of the Hanjiang River during the Autumn flood season and analysis of weather conceptual model [J]. Meteorological Monthly,51(2):207−220 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2024.122301

王孝慈,孟英杰,周耘逸,等.2025.秋汛期汉江上游大洪水时间特征及大尺度环流分析[J].气象,51(7):817−829. Wang X C, Meng Y J, Zhou Y Y, et al. 2025. Time characteristics and large-scale circulation analysis of major floods in the upper reaches of the Han River during the autumn flood season [J]. Meteorological Monthly,51(7):817−829 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2025.011502

王晓芳,黄华丽,黄治勇.2011. 2010 年 5—6 月南方持续性暴雨的成因分析[J].气象,37(10):1206−1215. Wang X F, Huang H L, Huang Z Y. 2011. The causation analysis of persistent heavy rain over southern China during May-June 2010 [J]. Meteorologica Monthly,37(10):1206−1215 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2011.10.003

肖莺,杜良敏,任永建.2013.汉江流域秋汛期典型旱涝年与前期海温的关系研究[J].暴雨灾害,32(2):182−187. XiaoY, Du L M, Ren Y J. 2013. Study on the relationship between typical drought/flood years in au-

tumn flood season in Hanjiang River Basin and preceding sea surface temperature [J]. Torrential Rain and Disasters,32(2):182−187 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2013.02.012

徐金霞,郭海燕,王钦.等.2019.华西秋雨的空间分型及其特征分析[J].高原山地气象研究,39(1):26−33. Xu J X, Guo H Y, Wang Q, et al. 2019. The spatial patterns and characteristic analysis of autumn rainfall in Southwest China [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,39(1):26−33 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2019.01.005

袁美英,徐南平,于振东.1994.高低压中心、槽线识别的初步试验[J].气象,6:15−19. Yuan M Y, Xu N P, Yu Z D. 1994. Preliminary experiment on identification of high and low voltage centers and slot lines [J]. Meteorological Monthly,6:15−19 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.1994.6.003

殷淑燕,黄春长.2012.汉江上游近 50 a 来降水变化与暴雨洪水发生规律[J].水土保持通报,32(1):19−25. Yin S Y, Huang C C. 2012. Precipitation change and occurrence of rainstorms and floods in upper reaches of Hanjiang River during last 50 years [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,32(1):19−25 (in Chinese)

颜长建,胡文东,张春梅,等.2016.基于梯度的 500hPa 槽线天气系统自动分析方法[J].应用气象学报,27(6):741−749. Yan C J, Hu W D, Zhang C M, et al. 2016. Auto-analysis of trough system at 500 hPa based on gradient algorithm [J]. Journal of Applied Meteorological Science,27(6):741−749 (in Chinese). doi:10.11891/1001−7313.20160611

訾丽,王志良,张方伟,等.2023.汉江流域暴雨天气学概念模型分析[J].人民长江,54(11):43−50. Zi L, Wang Z L, Zhang F W, et al. 2023. Analysis of conceptual synoptic model of typical rainstorm in Hanjiang River Basin [J]. Yangtze River,54(11):43−50 (in Chinese). doi:10.16232/j.cnki.1001−4179.2023.11.007

朱乾根,林锦瑞,寿绍文.2000.天气学原理和方法[M]. 北京:气象出版社. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W. 2000. Principles and Methods of Weather Science [M]. Beijing:Meteorological Publishing House (in Chinese).

张丰启.2001.东北冷涡特征及其关键区的计算机识别[J].气象,27(9):46−49. Zhang F Q. 2001. Computer identification of the characteristics and key areas of the Northeast cold vortex [J]. Meteorological Monthly,27(9):46−49 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2001.9.012

张博,李国平.2017.基于 CFSR 资料的青藏高原低涡客观识别技术及应用[J].兰州大学学报:自然科学版,53(1):106−111,118. Zhang B, Li G P. 2017. Objective identification technology and application of Tibetan Plateau vortex based on CFSR data [J]. Journal of Lanzhou University:Natural Science Edition,53(1):106−111,118 (in Chinese). doi:10.13885/j.issn.0455−2059.2017.01.016

Berry G, Thorncroft C, Hewson T. 2007. African easterly waves during 2004-Analysis using objective techniques [J]. Monthly Weather Review,135(4):1251−1267. doi:10.1175/MWR3343.1

Curio J, Chen Y R, Schiemann R, et al. 2018. Comparison of a manual and an automated tracking method for Tibetan Plateau vortices [J]. Advances in Atmospheric Sciences,35(8):965−980. doi:10.1007/s00376−018−7278−4

Huang X, Zhao F. 2000. Relation-based aggregation: finding objects in large spatial datasets [J]. Computers & Graphics,24(3):391−397. doi:10.1007/978−3−540−46333−9_16

Wong K Y, Yip C L, Li P W. 2008. Automatic identification of weather systems from numerical weather predication data using genetic algorithm [J]. Expert Systems with Applications,35(1/2):542−555. doi:10.1016/j.eswa.2007.07.032

(责任编辑 杨 浩)