

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]. Meteor Mon, 51(2):207-220 (in Chinese).

秋汛期汉江上游致洪暴雨过程特征及 天气概念模型分析^{*}

王孝慈^{1,2,3,4} 田 刚^{1,2,3} 孟英杰^{1,2,4} 王海燕^{1,2} 王继竹^{1,2}
周耘逸^{1,2} 徐卫立⁵ 祁海霞^{3,4}

1 湖北省气象台, 武汉 430074

2 长江流域气象中心, 武汉 430074

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, 湖北 宜昌 443099

5 三峡水利枢纽梯级调度通信中心, 湖北 宜昌 443000

提 要: 利用 NCAR/NCEP 再分析资料及常规气象、水文观测资料, 以秋汛期汉江上游 15 例编号洪水为研究对象, 研究其洪水峰型特征及对应天气系统的演变规律, 构建了致洪暴雨天气概念模型。结果表明: 秋汛期汉江上游编号洪水单峰型过程最多, 洪水过程线具有多样性; 双峰型洪量大、洪峰高、涨水和退水较为迅速, 形态多为尖瘦型; 多峰型洪量最大, 历时最长, 峰值高低不等。单峰型洪水过程持续时间短, 逐日面累计降水量起伏较大, 成峰迅速, 均为尖瘦型; 双峰型过程持续时间一般不少于 11 d, 暴雨过程间隔较短, 主峰和副峰差值不大, 峰值在 $20\,000\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 以上; 多峰型降水过程历时最长, 阴雨天气可持续 20 d 以上, 主峰峰值低于双峰型。从大尺度环流形势来看, 中高纬地区: 双峰型一般会出现 3 次较为明显的形势调整, 环流经向度较大; 多峰型环流形势调整较少, 贝加尔湖南侧多为小槽小脊活动; 单峰型无明显形势调整。中低纬地区: 多峰型西太平洋副热带高压(以下简称副高)西进发展最为强盛, 无台风或热带气旋活动; 双峰型副高东西摆动频繁, 常有热带气旋参与; 单峰型多伴有大陆高压与海洋高压合并现象, 少有台风或热带气旋活动。秋汛期汉江上游致洪暴雨天气概念模型主要有 5 类: 高空槽-急流强迫型(A-I)、高空槽-低涡切变型(A-III)、副高外围-急流强迫型(B-I)、副高外围-偏南气流弱强迫型(B-II)和副高内部-低涡切变型(C-III), 其中, 双峰型洪水多以 A 型为主、多峰型多以 B 型为主、单峰型 A 型和 B 型均有出现, 且 C 型仅为单峰型所特有。此外, 地面 I 型和 II 型也常与 A-I、A-III、B-I 等组合出现, 当 3 层天气系统配置较好时, 致洪概率将会大幅度增加。

关键词: 汉江上游, 编号洪水, 洪水峰型, 致洪暴雨过程, 致洪天气概念模型

中图分类号: P49, P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.122301

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

WANG Xiaoci^{1,2,3,4} TIAN Gang^{1,2,3} MENG Yingjie^{1,2,4} WANG Haiyan^{1,2}
WANG Jizhu^{1,2} ZHOU Yunyi^{1,2} XU Weili⁵ QI Haixia^{3,4}

^{*} 湖北省自然科学基金项目(2023AFD094、2023AFD099)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J018、CXFZ2024P043)、中国气象局水文气象重点开放实验室开放研究课题(24SWQXZ029)和中国长江电力股份有限公司科研项目(2423020002)共同资助

2024 年 6 月 19 日收稿; 2024 年 12 月 23 日收修定稿

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

通讯作者: 田刚, 主要从事天气预报及流域气象服务研究. E-mail: 56916071@qq.com

1 Hubei Meteorological Observatory, Wuhan 430074

2 Meteorological Center of the Yangtze River Basin, Wuhan 430074

3 National Rainstorm Research Center/CMA 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 Observatory, Hubei, Yichang 443099

5 Three Gorges Cascade Dispatch & Communication Center, Hubei, Yichang 443000

Abstract: Based on the NCAR/NCEP reanalysis data and conventional meteorological and hydrological observation data, 15 cases of numbered floods in the upper reaches of the Hanjiang River in the autumn flood season are taken as the research object to study the characteristics of flood peak patterns and the evolution laws of corresponding weather systems, and a weather conceptual model of flood-causing rainstorm is constructed. The results shown that during the autumn flood season, single peak flood processes occur most frequently in the upper reaches of the Hanjiang River, and the flood hydrograph has diversity. The bimodal pattern has a large flood volume, high peak, and rapid rise and fall of water level, with a mostly pointed and thin shape. The multi-peak flood has the largest volume and longest duration, with varying peak heights. The duration of the unimodal flood process is short, and the daily accumulated precipitation fluctuates greatly, with rapid peak formation, and all of them are sharp and thin. The duration of the bimodal process is generally no less than 11 d, the interval between rainstorm processes is short, the difference between the main peak and the secondary peak is small, and the peak value is more than $20000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. The duration of the multi-peak precipitation process is the longest, and in the continuous cloudy and rainy weather can last for more than 20 d, but the main peak value is lower than that of the bimodal pattern. From the perspective of large-scale circulation patterns, in mid to high latitudes, there are generally three more obvious pattern adjustments in the bimodal pattern, with a larger meridional degree of circulation. There are fewer adjustments to the multi-peak circulation pattern, and the southern side of Lake Baikal is mostly characterized by small trough and ridge activities. There is no significant adjustment in the unimodal pattern. In the middle and low latitudes, the western Pacific subtropical high with multiple peaks moves most strongly westward, without typhoon or tropical cyclone activities. The bimodal subtropical high oscillates frequently from east to west, often involving tropical cyclones. The unimodal pattern is often accompanied by the merging of continental and oceanic high-pressure systems, with few activities of typhoons or tropical cyclones. The weather conceptual models of flood-causing rainstorm in the upper reaches of the Hanjiang River during the autumn flood season can be divided into five categories: high trough jet forcing (A-I), high trough low vortex shear (A-III), subtropical high periphery jet forcing (B-I), subtropical high periphery southerly flow weak forcing (B-II) and subtropical high interior low vortex shear (C-III). Bimodal floods are mostly dominated by pattern A, while multimodal floods are mostly dominated by pattern B, with both single peak pattern A and pattern B appearing, and pattern C is only unique to single peak pattern. In addition, ground pattern I and pattern II are often combined with A-I, A-III, B-I, etc. When the three-layer weather system is well configured, the probability of flooding will be significantly increased.

Key words: the upper reaches of Hanjiang River, numbered flood, flood peak pattern, flood-causing rainstorm process, flood-causing weather conceptual model

引 言

我国地震、台风、干旱、雪灾、冰冻、泥石流、洪涝

等灾害频发,其中以洪涝灾害影响最甚(段唯鑫, 2017),尤其是全流域型的大洪水。在汛期洪水发生时,水库调度首先是尽最大力度保障防洪安全,然后在此基础上优先考虑弃水量小、发电效益最大的原

则,这就需要合理预测判断洪水的峰型(汪丽娜等, 2014)。峰型是单峰、双峰还是多峰型特征对水库防洪安全有重要意义。若实际洪水过程为单峰型洪水,而预测可能为主峰在后的双峰型,制定防洪决策时很大可能会考虑为第2次主峰到来前而预留库容,开闸泄洪,这就会造成对第1次主峰的不必要弃水,而后又导致无法增蓄,难以实现洪水资源的利用和优化。在实际预测中,与洪水最直接、关系最大的必然是降水量,降水量是制约来水最重要的因素。这要求在分析致洪暴雨过程时,不仅要考虑天气系统的演变规律、天气机理及各种影响系统的配置,还需从洪水峰型的角度出发,进一步探讨分析不同峰型下可能的环流配置条件,从而更好地实现对洪水峰型的提前预判,为水库防洪调度及水资源合理利用提供科学依据。

致洪暴雨的预报相对普通暴雨过程预报难度更大,既要考虑气象因素,又需叠加水文因素,同时还需关注雨强、降水历时及落区范围。目前,国内许多学者在分析洪水形成原因时,基于致洪暴雨的主要天气系统,将过程进行分型研究。如蔡俊峰等(2017)根据大气环流及各层天气系统配置,将江西东北部致洪暴雨分为台风类、西太平洋副热带高压(以下简称副高)边缘类及西风带类;王本德和张静(2008)以大伙房水库流域为研究对象,分析了特定流域内产生暴雨的天气系统规律,归纳出华北气旋、江淮气旋、低压冷锋等6类暴雨天气类型;赵忠飞等(2014)、张福然(2014)综合致洪暴雨发生的天气成因、洪水特性及灾害等因素对辽河流域内多种类型暴雨进行了分型研究;喻松阳(2005)、徐炜等(2013)、张静(2008)对东北地区致洪暴雨也做了详细分型,包括冷锋加高空槽型、华北气旋单独影响型及复合华北气旋副高影响型等。国外的 Maddox et al(1979)通过研究美国地区的致洪暴雨个例,将多尺度空间分层的天气系统最终归纳为西部型、静止锋型、中高压型及天气尺度强迫型4类,在美国气象业务中一直被广泛应用。部分学者对汉江流域致洪暴雨天气系统及概念模型进行了相关研究,如党红梅等(1997)通过对发生在汉江上游安康地区的56次致灾暴雨过程进行环流客观分析,经过聚类分析得到4种暴雨类型;另外,党红梅等(2011)还对汉江流域49次致灾暴雨进行统计分析,将暴雨过程分成连阴雨中暴雨型、局地突发暴雨型及上下游洪水叠加型,应用天气学原理总结出3类暴雨型与天气型之间的对应关系,最终构建了与之对应的3类致

灾暴雨天气概念模型。訾丽等(2023)根据暴雨特征将汉江暴雨划分为流域型暴雨、上中游型暴雨和下游型暴雨,根据不同暴雨型,分别建立了2~4种对应不同暴雨型的天气学概念模型。

以往对致洪暴雨的研究仅从暴雨特征、环流背景或天气系统角度出发,而与洪水特征相结合的研究并不多见,考虑到不同洪水类型对水库调度及防洪安全的影响,本文以2000年以来秋汛期发生在汉江上游的编号洪水为例,从洪水峰型角度出发,基于天气学机理,分类研究对应峰型下的天气环流特征,构建致洪暴雨天气概念模型并归纳出预报要点,加深预报业务人员对致洪暴雨的认识,以期秋汛期汉江上游致洪暴雨天气的预报提供参考依据。

1 资料与方法

致洪暴雨过程依据《江河流域面雨量等级》(GB/T 20486—2017)来定义:当丹江口水库入库流量达到 $15\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 以上且汉江上游或3个分区(石泉以上、石泉—安康、安康—丹江口)中有1个分区出现24 h流域累计面雨量 $\geq 30\text{ mm}$ 或12 h累计面雨量 $\geq 20\text{ mm}$ 时,计为汉江上游出现1次致洪暴雨过程。经统计发现,2000年以来丹江口水库入库流量达到 $15\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 的编号洪水过程共计15次,期间满足条件的致洪暴雨过程共计27例。

所用资料包括:美国国家环境预报中心(NCEP)和美国国家大气科学研究中心(NCAR)2000—2023年的1日4次的再分析资料[02、08、14、20时(北京时,下同),分辨率为 $2.5^\circ\times 2.5^\circ$]。包含要素有:500~200 hPa的位势高度、风场、气温等;2000—2023年国家气象观测站逐日降水量资料,数据由国家气象信息中心质量控制并发布;丹江口水库水位、流量资料。文中所用历史平均指1991—2020年的30年均值。面雨量计算参考毕宝贵等(2003)和高琦等(2014)提到的算术平均法。地形数据来自国家地理信息公共服务平台下载的审图号为GS(2019)3266号的标准地图制作且底图无修改。

洪水过程线可以很直观地观察到洪水历时、洪峰个数、峰值形态等物理量的特征。以多峰型洪水概念图为例,将流量最大的峰1定为主峰,流量次大的峰定为副峰2,依次类推定为副峰3、副峰4等。设定各个洪峰出现的时间分别为 $t_1, t_2, t_3, \dots, T$ 为洪水全过程历时,用 $t_1/T, t_2/T, t_3/T, \dots$ 表示主

峰和副峰出现时间占洪水的历时比例(图 1)。

衡量洪水峰型的第 1 个指标为洪峰出现次数。当 $t_1 \neq 0$, 但 $t_2/T=0, t_3/T=0$ 时, 为单峰型洪水; 当 $t_1 \neq 0, t_2 \neq 0$, 但 $t_3/T=0$ 时, 为双峰型洪水; 同时 $t_1/T, t_2/T, t_3/T \cdots \cdots$ 的数值也可以分辨出主、副峰出现的先后顺序, 这对水库调度来说是非常重要的。

洪水峰型衡量的第 2 个重要指标为峰值形态 (F), 其表达式为:

$$F = \frac{Q_i - \text{Min}(Q_{\text{start}}, Q_{\text{end}})}{T_i} \quad (1)$$

式中: Q_i 为流量 ($i=1$ -单峰, 2 -双峰, 3 -多峰, $\cdots \cdots$), $\text{Min}(Q_{\text{start}}, Q_{\text{end}})$ 为洪水初始涨水点流量 Q_{start} 和洪水退水点流量 Q_{end} 中的较低值。式(1)可反映洪水峰型的形态, 值越大, 洪水呈现尖瘦的程度越明显。表 1 中涉及的峰量关系及洪峰个数是根据式(1)计算得到的。

第 3 个指标为起始涨水点与洪峰仰角的正切值。该值用来描述洪水的陡涨特征, 值越大表明洪峰涨幅越大, 峰型越陡。如图 1 中的 $\angle AOB$ 、 $\angle BOD$ 分别代表主峰和副峰的仰角, 其正切值反映的是起始涨水点与洪峰之间的差异(汪丽娜等, 2014)。

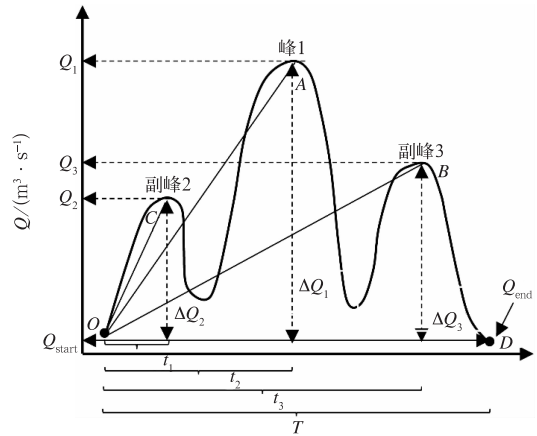


图 1 洪水峰值时间和洪峰形态度量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of flood peak time and flood peak shape measurement

2 洪水峰型分类

暴雨洪水分类是根据洪水发生季节、暴雨的移动路径、天气系统及洪水过程线等特征进行的(张静, 2008; 张梦莹, 2021)。根据洪水过程线的特征指标, 对 15 次编号洪水进行分类(表 1)。以洪水过程

表 1 2000 以来秋汛期汉江上游编号洪水的洪水特征

Table 1 Flood characteristics of numbered floods in the upper reaches of the Hanjiang River during the autumn flood season since 2000

洪水过程日期	洪峰峰值 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	洪水历时 T/d	峰量关系	峰型
2003 年(8 月 30 日至 9 月 11 日)	26 500, 28 100	12	峰高量大快涨退-尖峰型	双峰
2011 年(9 月 11—23 日)	22 100, 26 600	13	峰高量大缓涨退-尖峰型	双峰
2021 年(8 月 21 日至 9 月 9 日)	14 400, 23 400, 16 400	20	多峰谷长历时-宽峰型	多峰
2023 年(9 月 28 日至 10 月 8 日)	16 400, 14 000, 9610	11	多峰谷短历时-尖峰型	多峰
2005 年(8 月 16—24 日)	22 600	9	峰低量大缓涨退-尖峰型	单峰
2005 年(10 月 1—5 日)	30 000	5	峰高量大快涨退-尖峰型	单峰
2010 年(8 月 21—28 日)	16 300	8	峰低量大形态宽-宽峰型	单峰
2017 年(9 月 25—30 日)	22 000	6	峰高量大缓涨退-尖峰型	单峰
2019 年(9 月 14—20 日)	15 600	7	峰低量大形态宽-宽峰型	单峰
2021 年(9 月 17—23 日)	22 800	7	峰高量大快涨缓退-尖峰型	单峰
2021 年(9 月 25 日至 10 月 2 日)	24 900	8	峰高量大缓涨退-尖峰型	单峰

线(图略)特征指标进行分类, 是因为过程线的形态、洪峰历时及峰量个数能更直观地反映流域洪水的演变特征。

通过计算洪水峰值的洪水历时比例、峰值形态及起始涨水点与洪峰仰角的正切值等 3 个指标, 将 15 次编号洪水分为单峰、双峰、多峰 3 个类型(表 1)。双峰型有 2 次致洪过程, 分别出现在 2003 年和 2011 年(对应 4 次编号洪水), 主要特征为洪量大、洪峰高、历时长、涨水和退水过程较为迅速, 形态

为尖峰型; 多峰型有 2 次致洪过程, 出现在 2021 年和 2023 年(对应 4 次编号洪水), 与双峰型不同的是, 多峰型洪水过程线会经历多个波峰和波谷, 且每个峰谷之间有不等长的过渡期, 累积洪量最大, 历时最长, 涨退水时间较长, 峰值高低不等, 低于双峰型; 单峰型过程数最多, 致洪暴雨过程有 7 次, 洪水过程线特征具有多样性(张永勇和陈秋潭, 2020)。

分析还发现, 多峰型和双峰型所在年份的年累计面雨量大于单峰型年份, 单峰型年份中除了 2017

年排位较高,其他洪水年面累计雨量接近或略高于历史平均态。双峰型洪水的峰值普遍较高,但多峰型和单峰型的峰值跨度范围较大(图2,其中2014年及2022年因丹江口日最大入库流量小于 $15\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,未列为本文的研究对象),8个编号洪水年年累计雨量均高于历史平均态,且位列前位。洪水峰值与年累计雨量并非呈线性关系,如2005年年累计雨量排位第7,但峰值却达到最大。因此,仅根据累计雨量来预测峰型或洪水峰值是比较困难的。

3 不同峰型下致洪暴雨过程天气学机理分析

致洪暴雨过程具有随机性、模糊性,其复杂的特征给流域防洪及水资源利用工作带来了诸多困难。但对于固定的季节和流域,影响天气的气象条件、气候背景、水汽来源、热动力条件等具有相似性,在相似的天气系统配置下,致洪暴雨过程可能会重复出现。因此,本文根据汉江流域编号洪水的峰型分类,分析各类天气系统配置类型,找出异同点,总结各种致洪暴雨型的特性,分析其天气学机理,为汉江秋汛期可能再现同一类型大洪水过程的预报提供科学的客观依据。

3.1 双峰型洪水过程大尺度环流背景特征

双峰型过程有2次,分别出现在2003年8月

28日至9月7日和2011年9月4—19日。2003年降水持续了11 d(朱明等,2004),期间有2次致洪暴雨过程,出现3次明显的环流形势调整(图3)。最初500 hPa中高纬度乌拉尔山以东地区存在阻塞高压,高压脊发展加强,并缓慢东扩。巴尔喀什湖以东、贝加尔湖南部地区不断有低值系统分裂南下, $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 地区盛行西风气流。副高脊线在 $25^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$ 附近摆动,其西伸脊点在 $100^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$,副高稳定维持,略有西进,银川至格尔木有短波槽东移南下与副高外围的西南气流汇合(图3a),第1次致洪暴雨产生。随着西风带短波系统的发展东移,9月2日副高开始减弱东移,本该结束的阴雨天气受台风杜鹃北上的影响,在经历短暂2 d的弱降水后,又再度增强。随着台风的西移,副高脊线再次北抬西伸至 30°N 及 100°E 附近(图3b),北缘有平直锋区,阴雨形势再次建立。9月5日起,中高纬环流形势再次发生明显调整,贝加尔湖地区经向度加大,由之前的短波小槽发展为较为深邃的低槽,加上日本海高压脊的建立,阻碍了冷空气进一步东移,使得冷空气频繁且持续影响汉江上游,并在9月6日于菲律宾以东洋面生成的热带风暴鸣蝉的影响下,副高开始东退,海南岛附近生成一个热带低压并长时间维持。台风位于副高南缘,其东侧的暖湿气流自东南方向沿副高西侧气流北上(图3c),给汉江上游带来第2轮暴雨,因受副高东移影响,雨带呈移动性特征,汉江上游于9月8日再次形成洪峰。至此,完成较为明显的3次环流形势转化。

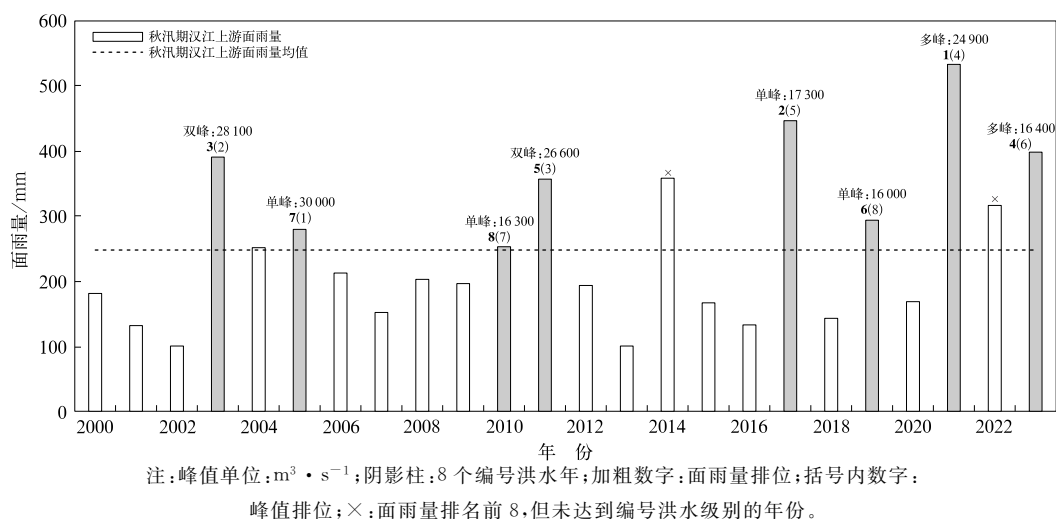


图2 2000年以来秋汛期汉江上游逐年面雨量排位

Fig. 2 Ranking chart of annual surface rainfall in the upper reaches of the Hanjiang River during the autumn flood season since 2000

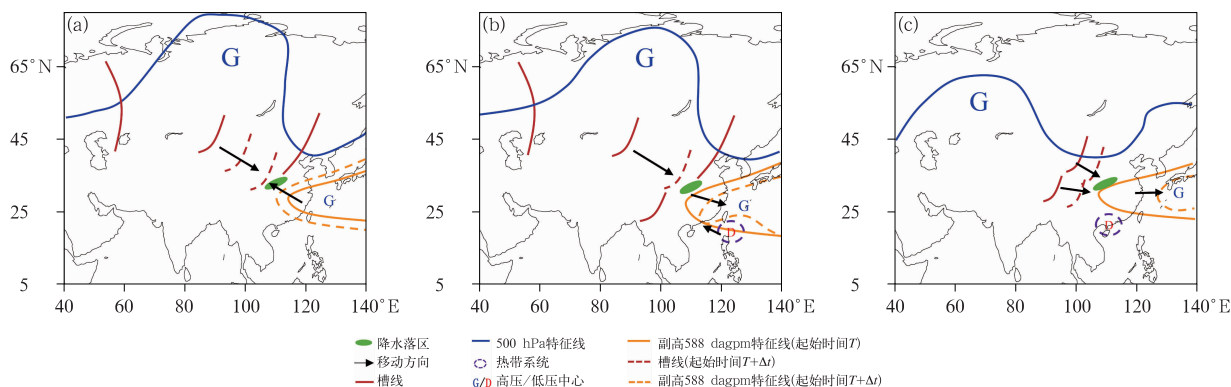


图 3 2003 年(a)8月 28—29 日,(b)8月 30 日至 9 月 3 日,

(c)9 月 5—7 日双峰型洪水过程 500 hPa 环流形势演变示意图

Fig. 3 Schematic diagram of evolution of the 500 hPa circulation pattern during the bimodal flood process from (a) 28 to 29 August, (b) 30 August to 3 September and (c) 5 to 7 September 2003

2011 年汉江上游出现了长达 16 d 的连阴雨天气(孙又欣等,2011;柳艳菊等,2012;刘志文,2012;蔡新玲等,2013;卢珊等,2013),较 2003 年的持续时间更长,出现 3 次大范围暴雨过程。9 月 4—7 日,中高纬地区乌拉尔山以东有弱脊发展,位于中西伯利亚的槽区较为宽广(李莹等,2012),锋区呈西北—东南走向,其上不断有西风槽分裂东移,长江及以南大部地区为 584 dagpm 线控制(图 4a),副高一直位居海上,中心多在 140°E 以东海域徘徊,受西风带系统不断东移影响,雨带具有移动特征,第 1 轮降水出现在汉江上中游。10—14 日,中高纬度环流经向度加大,乌拉尔山阻塞高压稳定强盛,中纬度锋区多西风槽活动,同时青藏高原上短波低值系统也较为活跃,与北支锋区系统叠加,带动中低层急流明显加强(图 4b)。与第 1 次致洪暴雨过程有显著区别,降水是在副高不断加强西伸并稳定维持的阶段下产生

的,雨带稳定,11 日开始在菲律宾以东热带洋面上一直盘旋着热带气旋,受其顶托作用,副高维持在 26°N、100°E 附近。16—19 日,位于贝加尔湖的低值系统东移南压,冷空气主体下渗至中纬度地区,与暖湿气流在汉江流域汇合。西太平洋上又有一热带扰动生成,随着西风带系统东移,副高再次东退至 22°N、135°E 附近。16 d 连阴雨过程中同样出现了 3 次明显的环流形势调整(图 4)。

通过对 2003 年和 2011 年 2 次洪水天气过程的分析,可以看出双峰型洪水的大尺度环流背景的共同特征是:洪水的形成需要有 10 d 以上的连续阴雨过程和至少 2 次及以上的暴雨过程。中高纬度大尺度环流一般会出现 3 次明显的形势调整。每次连阴雨过程,乌拉尔山附近存在阻塞系统,持续 5~7 d,贝加尔湖南侧多浅槽缓慢东移发展,环流经向度较大,雨带多呈移动性特征。中纬度地区副高东西进

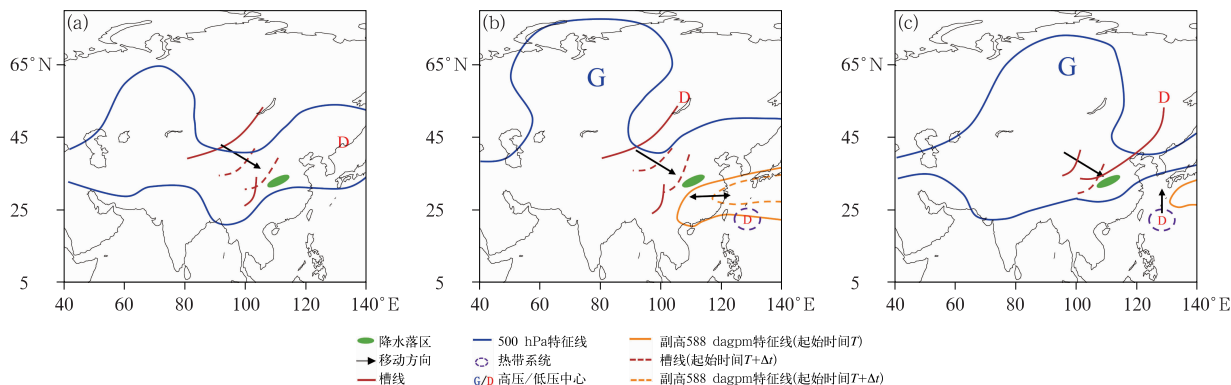


图 4 2011 年 9 月(a)4—7 日,(b)10—14 日,(c)16—19 日双峰型洪水过程 500 hPa 环流形势演变示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the evolution of the 500 hPa circulation pattern during the bimodal flood process from (a) 4 to 7, (b) 10 to 14 and (c) 16 to 19 September 2011

退活动频繁,脊点稳定在 $100^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$,脊线位于 $26^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$,副高偏西、偏北、偏强。中纬度锋区上多西风槽活动,青藏高原上的短波系统较为活跃,对流层低层常有东路下来的回流冷空气参与;低纬度地区会有台风或热带气旋的参与。

3.2 多峰型洪水过程大尺度环流背景特征

多峰型过程有2次,分别出现在2021年8月21日至9月6日和2023年9月17日至10月6日(图5)。2021年过程持续17d,先后出现4次致洪暴雨过程,降水集中,历时长。500 hPa中高纬度大气环流形势稳定,变动较少,历经2次调整。第1次出现在8月22—29日,欧亚大陆中高纬为“两脊一槽”的形势,乌拉尔山高压脊发展旺盛,经向度大,西伯利亚地区有冷涡活动,贝加尔湖附近为宽广的低值区,受乌山高压脊影响,不断有横槽转竖东移南下,在其影响下,副高略有西退,降水具有移动性,影响全流域范围;第2次于8月30日开始,乌拉尔山地区有新一轮的高压脊形成,在不断东移过程中发展壮大,但强度小于第1次。随着系统的发展,9月4日在贝加尔湖地区形成切断低压,低压中心延出的深邃低槽系统与西伸的副高在汉江中游相遇,第2次副高强度强于第1次,带来连续8d的阴雨天气,降水落区一直稳定在石泉以上及石泉—安康区间,局限于汉江上游。在连续17d的降水中,有8d副高的西伸脊点位于 90°E 以西地区,脊线长时间稳

定维持在 $26^{\circ}\sim 28^{\circ}\text{N}$,位置偏南(图5a),3次与东伸至 90°E 以东地区的伊朗高压合并加强。

2023年9月上中旬至10月上旬,汉江上游一直持续阴雨天气,降水日数达20d,出现9月17—20日、9月22—29日、10月1—2日及10月3—6日4轮暴雨过程,中高纬环流形势稳定少变。自9月开始,500 hPa欧亚大陆中高纬大气环流以纬向型为主,经向度较小,多移动性小槽小脊,冷空气势力不强,受典型的西低东高的形势影响,冷暖空气在汉江上游交汇时间长且次数频繁,每次过程降水强度相差不大,过程峰量基本相当,降水落区稳定,略有东西摆动。副高异常偏强、位置偏西,脊线位置稳定在 $25^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$ 附近,脊点一直位于 90°E 以西地区,多次与伊朗高压合并(图5b),呈带状分布。南下的中支槽与东移的高原槽受阻于副高西北侧,槽后冷空气与副高西侧暖湿气流频繁交汇,水汽和能量供应都较好,利于汉江上游强降水的持续。

通过对2021年和2023年2次多峰型洪水的分析发现,秋汛期多峰型洪水的形成一般需要有20d以上的连续降水日出现,暴雨过程出现的频率也高。多峰型降水过程的中高纬大尺度环流形势调整较少,2021年仅2次,2023年环流更是以纬向型为主,形势变动较小。贝加尔湖南侧多为低值区,以小槽小脊活动为主,冷空气势力不强,降水虽然频繁但日累计面雨量强度不大。副高强盛,位置偏西,活动以西进为主,很少出现大幅度东退,脊点位于 90°E 以

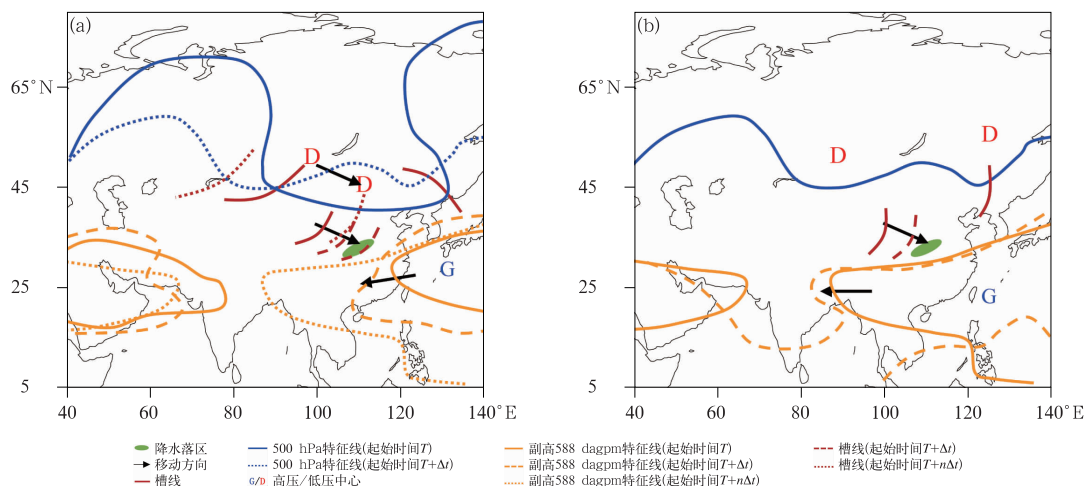


图5 (a)2021年8月21日至9月6日和(b)2023年9月22日至10月1日
多峰型洪水过程500 hPa环流形势演变示意图

Fig. 5 Schematic diagram of evolution of the 500 hPa circulation pattern during the multi-peak flood process from (a) 21 August to 6 September 2021 and (b) 22 September to 1 October 2023

西地区,脊线稳定在 $25^{\circ}\sim 28^{\circ}\text{N}$ 附近,其西北侧常向北凸起影响汉江上游地区。同时,伊朗南部高压时常东伸,其东部脊点可达 90°E 以东地区,孟加拉湾地区常位于两个高压之间的辐合区,西南气流更为强盛,水汽从孟加拉湾北上输送至 27°N 以北地区,为汉江上游带来充沛的水汽,阴雨天气频繁出现,且得以长时间维持。另外,受强盛副高的影响,洋面上大部地区受下沉气流控制,低纬度地区少有台风或热带气旋活动。

3.3 单峰型洪水过程大尺度环流背景特征

单峰型洪水出现的次数最为频繁,共 7 次,分别在 2005 年 8 月 21 日和 10 月 3 日、2010 年 8 月 25 日、2017 年 9 月 28 日、2019 年 9 月 17 日、2021 年 9 月 19 日和 9 月 29 日。致洪暴雨过程持续时间为 $3\sim 13\text{ d}$,其中以 $3\sim 7\text{ d}$ 为主,过程占比达 71%,过程历时远小于双峰或多峰型。虽然过程持续时间短,但每次致洪过程的单日累计面雨量在 $30.13\sim 43.25\text{ mm}$,面上的过程累积强度非常大,产生的洪量增幅显著。

通过对 7 次单峰型洪水天气形势的分析发现,在中高纬地区致洪过程的天气形势主要有:“两槽一脊”型,如过程 2010 年 8 月 21—25 日和 2021 年 9 月 15—19 日;“两槽两脊”型,如过程 2021 年 9 月 23—28 日;乌拉尔山阻塞高压型,如过程 2017 年 9 月 23—27 日和 2019 年 9 月 9—16 日;还有贝加尔湖阻塞高压型等。过程的环流经向度有较大差异(图 6)。中低纬地区主要影响系统为西风带低槽、高原槽、副高及热带气旋等,其中西风带短波槽或高原槽出现在每次致洪过程中。副高整体来说都是较气候平均态偏西、偏强的,脊线稳定在 $25^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$,西伸脊点都位于 105°E 以西地区,其中有 57% 的过程大陆高压与海洋高压合并,形成范围较广的高压带状区,汉江上游常位于其西北侧。受强盛副高影响,热带气旋参与的过程很少。

3.4 各类峰型致洪过程特征及环流形势对比分析

总体来说,秋汛期间大气环流形势变化相对缓慢,副高较夏季西伸更明显,主体面积也更大,以副高与其他天气系统的相互作用来分,主要有 3 种类型:高空槽型(A 型)、副高外围短波槽型(B 型)和副高内部型(C 型)。秋季北方冷空气势力有所加强,当极地变性气团南下进入暖湿气流底部时,地面冷

锋活动频繁。而汉江上游即丹江口以上地区的北部山脉阻挡了西北路冷空气,使得冷空气停滞时间较长,外放山和伏牛山还对偏东南暖湿气流有抬升和屏障作用,加上南部山脉对西南暖湿气流有抬升作用,地形的叠加效应增加了汉江上游秋季暴雨过程的持续时间和强度,容易产生连续而稳定的连阴雨天气。虽然秋汛期单日强度比夏汛期小很多,但累计降水量并不小,形成的洪峰大多能超过 $15\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。

从暴雨过程及洪峰特征来看,单峰型致洪过程持续时间较短,仅 $3\sim 7\text{ d}$,暴雨过程频次低,一般仅 $1\sim 2$ 次,但面降水强度非常大,汉江上游的累计面雨量都不低于 30 mm ,逐日面雨量起伏较大,有 57% 的峰值超过 $20\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,均为尖瘦型,成峰迅速。双峰型过程持续时间一般不少于 11 d ,暴雨过程不低于 2 次,过程之间的间隔时间较短,不会超过 2 d 以上。双峰的主峰和副峰差值不大,均在 $20\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 以上。多峰型降水过程历时最长,阴雨天气可持续 20 d 以上,甚至可以高达 40 d ,至少会出现 4 场以上的暴雨过程。虽然单峰型、双峰型及多峰型暴雨过程持续时间相差较大,但过程累计面雨量相当。

从环流形势来看,中高纬地区双峰型一般会出现 3 次明显的形势调整。乌拉尔山地区有维持 $5\sim 7\text{ d}$ 的阻塞系统存在,贝加尔湖南侧多为宽广的低值区缓慢东移发展,环流经向度较大。多峰型过程在中高纬地区的大尺度环流形势调整较少,贝加尔湖南侧虽为低值区,但多为小槽小脊活动,冷空气势力不强,强度小于双峰型天气过程。中低纬地区,双峰型副高进退活动频繁,脊点位置稳定在 $100^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$,脊线位于 $26^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$,副高整体偏西、偏北、偏强,且低纬地区常有台风或热带气旋的参与。多峰型洪水的副高更为强盛,位置更为偏西,且副高活动多以西进为主,很少出现大幅度东退的现象,脊点位于 90°E 以西地区,位置与双峰型相比略偏南。伊朗南部高压时常东伸,东部脊点可达 90°E 以东地区,此时的孟加拉湾地区常位于两个高压之间的辐合区内,西南气流更为强盛。受强盛副高的影响,洋面上基本受下沉气流控制,低纬地区少有台风或热带气旋的活动。与双峰型和多峰型相比,单峰型由于过程持续时间较短,在中高纬无明显环流形势的调整,但天气形势多样。副高脊线稳定在 $25^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$,西伸脊点都位于 105°E 以西地区,其中有 57% 的过程

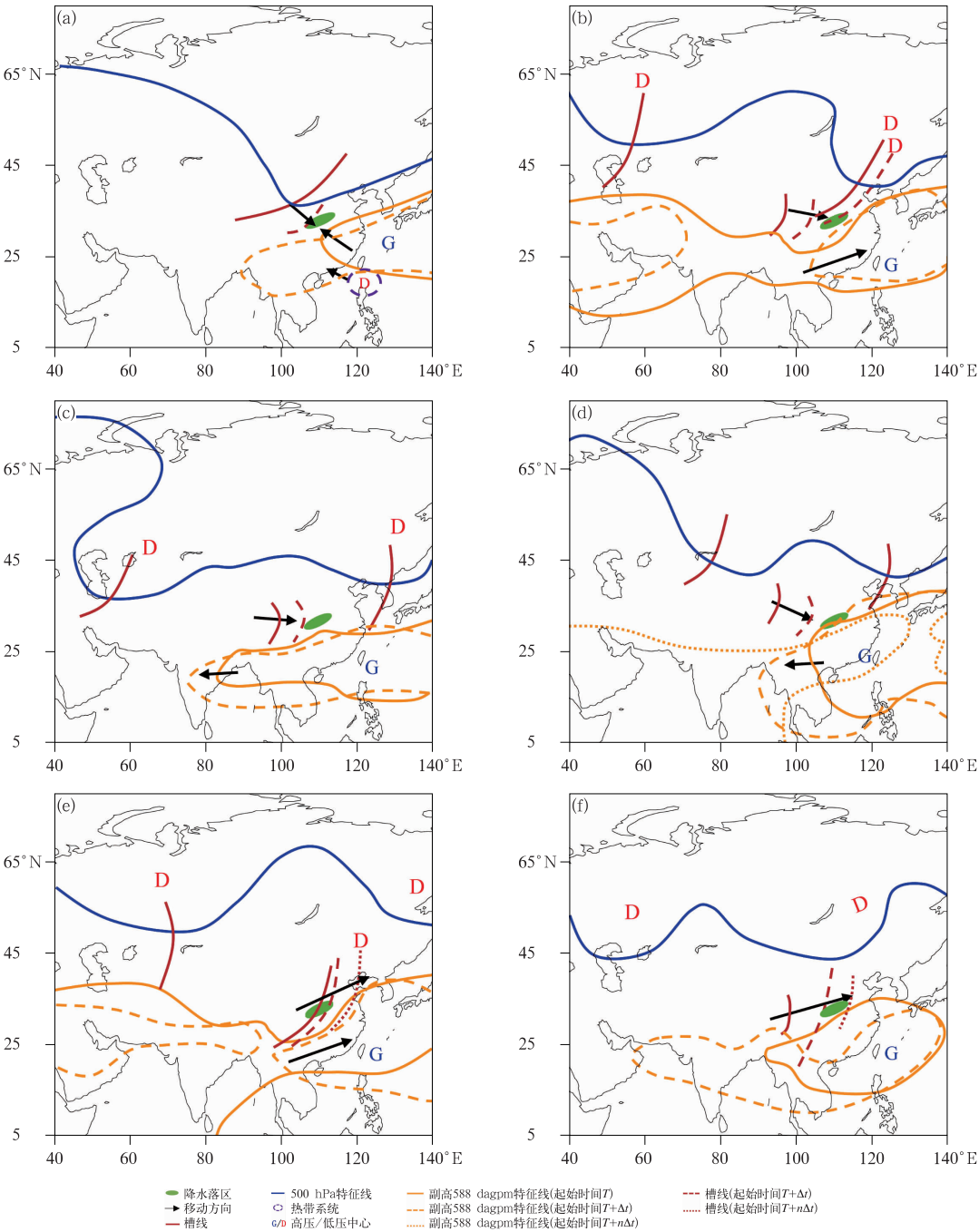


图 6 (a)2005 年 9 月 30 至 10 月 2 日,(b)2010 年 8 月 21—25 日,(c)2017 年 9 月 23—27 日,
(d)2019 年 9 月 9—16 日,(e)2021 年 9 月 15—19 日,(f)2021 年 9 月 23—28 日
单峰型洪水过程 500 hPa 环流形势演变示意图

Fig. 6 Schematic diagram of evolution of the 500 hPa circulation pattern during a
unimodal flood process from (a) 30 September to 2 October 2005, (b) 21 to 25
August 2010, (c) 23 to 27 September 2017, (d) 9 to 16 September 2019,
(e) 15 to 19 September 2021 and (f) 23 to 28 September 2021

存在大陆高压与海洋高压合并现象,很少有热带系统参与(表 2)。无论哪种峰型的洪水过程,在中纬度锋区上均多西风槽活动,青藏高原上的短波系统

也较为活跃。对流层低层常有中路或东路回流冷空气参与(图略)。

表 2 不同峰型的洪水特征及相应大尺度天气环流形势

Table 2 Flood characteristics and corresponding large-scale weather circulations of floods with different peak patterns

峰型	过程持续时间/d	致洪暴雨频次/次	洪峰峰值≥ 20 000 m ³ ·s ⁻¹ 的占比/%	大尺度环流特征		
				副高	西风带天气系统	热带系统
单峰	3~7	1~2	57	西伸脊点都位于 105°E 以西地区,脊线稳定在 25°~27°N,有 57% 的过程存在大陆高压与海洋高压合并现象	中高纬无明显形势调整,但种类多样,阻塞高压仍存在于大多数过程中	少
双峰	≥11	≥2	100	东西进退活动频繁,脊点稳定在 100°~110°E,脊线位于 26°~30°N、较常年位置偏北,强度偏强	一般经历 3 次环流调整,乌拉尔山阻塞高压维持 5~7 d,环流经向度大	多
多峰	≥20	4	14	以西进或稳定少动活动为主,脊点位于 90°E 以西,脊线稳定在 25°~28°N 附近,经常与伊朗高压打通,位置最西、强度最强,孟加拉湾地区位于两个高压之间的辐合区,西南气流更为强盛	大尺度环流形势调整少于 2 次,贝加尔湖南侧多为小槽小脊活动,冷空气势力不强。环流多为纬向型	无

4 致洪暴雨过程天气概念模型

4.1 致洪天气过程对流层中低层天气系统特征

通过对对流层中下层 700 hPa 和 850 hPa 天气系统的分析,归纳出 3 种环流配置类型:急流强迫型(I 型)、偏南气流弱强迫型(II 型)、低涡切变型(III 型)(图 7)。此外,还有气旋东移北上型和台风倒槽型,仅 4 例,占比较少,这里不做具体分析。

急流强迫型(I 型)的天气系统配置为:700 hPa 在白河以上有切变线东移南压至丹江口附近,切变线位置稳定,变动较少。长江干流以南地区有大范围的西南气流;850 hPa 切变线相对 700 hPa 位置偏南,其南侧多为西南急流,低层水汽和热力输送条件较好,和低空急流密切相关。地面在前期有强烈发展的暖低压倒槽存在,后期多有冷空气从中路或东路南下影响汉江上中游地区。受较为稳定的切变线影响,系统往往在汉江上游维持时间较长,再加上充足的水汽和能量供应,该类型的降水强度和持续时间都较强。

偏南气流弱强迫型(II 型)的天气系统配置为:汉江上游以西地区,整个中低层受大片偏南风控制(訾丽等,2023),有时在某一层存在切变线,其南侧为西南风或偏南风,大多未达到急流强度,不一定存在风向辐合,但常伴有风速辐合。冷空气多从东路影响汉江上中游。偏南气流型产生的暴雨过程的强降水中心多为局地散发,降水出现在风速辐合强的

脉动区,低层常有强暖湿平流输送,使得等温线与风向交角较大,利于不稳定热力层结的建立(许爱华等,2014),降水多以短时强降水为主。

低涡切变型(III 型)的天气系统配置为:700 hPa 在四川盆地东部有低涡东移发展,川渝一带有冷切变线,低涡东侧有暖切变线横穿重庆北部并延伸至汉江上中游一带,暖切变线南侧多伴有 12 m·s⁻¹ 的偏南或西南急流;在 850 hPa 上贵州北部—重庆南部一带有低涡,汉江上中游一般位于北支切变线附近或北侧、700 hPa 及 850 hPa 切变线之间。北支切变线南侧及南支切变线的东侧常伴有强盛的西南暖湿气流(蔡成瑶等,2022),强度都在 12 m·s⁻¹ 以上。该类型降水多具有移动性,往往从汉江上游开始逐渐影响至全流域。

4.2 致洪天气过程地面天气系统特征

从地面天气系统分析来看,如果只有冷锋过境,而无其他各层天气系统配置良好的情况下,锋面所产生的降水强度都较弱。降水强度需综合考虑副高位置、冷空气来源、强度、路径以及 700 hPa 和 850 hPa 环流配置。统计发现致洪暴雨过程的地面影响系统主要分为冷锋配合高空槽型(I 型)、冷锋入暖倒槽型(II 型)和锋面气旋型(III 型)3 种类型(图 7)。

冷锋配合高空槽型(I 型)天气系统配置为:当副高位置偏北且少动,汉江上游位于其西北侧,有大量暖湿气流输送,伴随西风冷槽东移南下,当低值系统受阻于副高形成静止锋,低层切变系统也稳定滞留时,常会形成范围较大、持续时间长且降水强度可

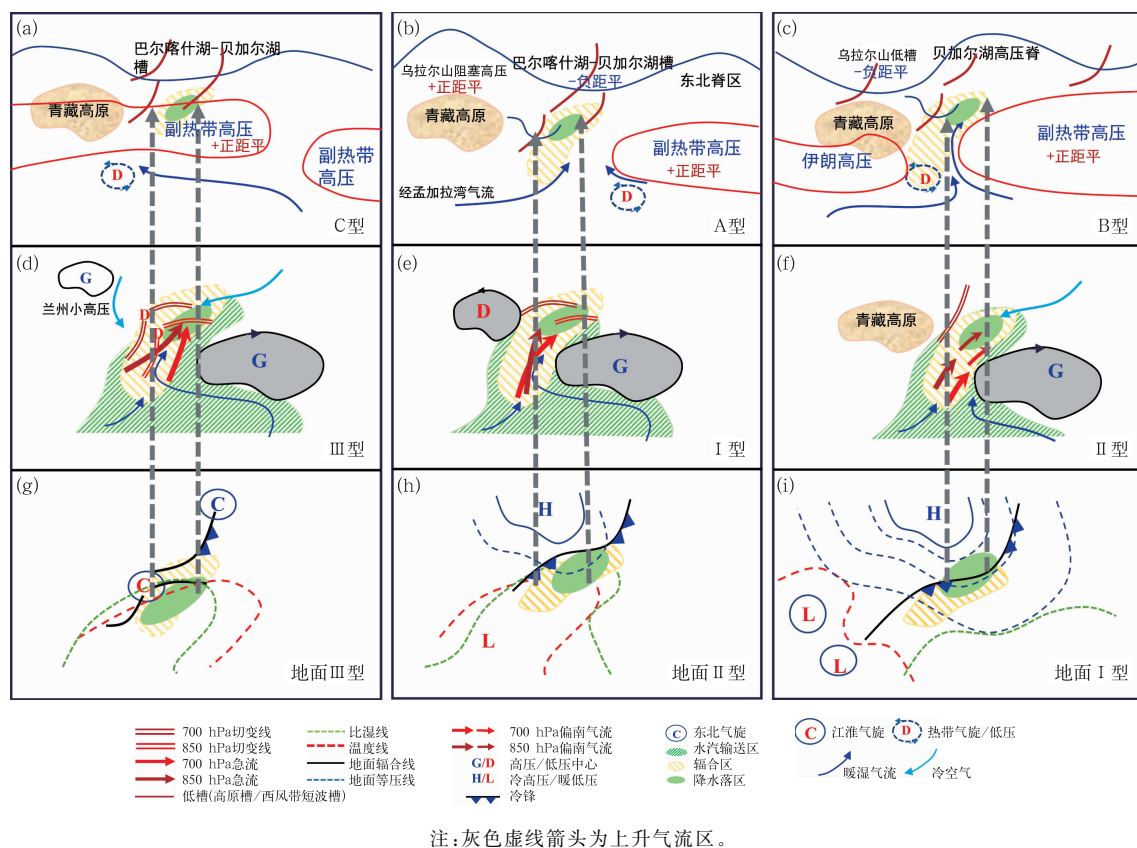


图7 秋汛期汉江上游致洪暴雨天气概念模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram of weather conceptual model of flood causing rainstorm in the upper reaches of Hanjiang River in autumn flood season

观的暴雨过程。冷锋入暖倒槽型(Ⅱ型)天气系统配置为:700 hPa 常为旺盛的西南暖湿气流控制,地面 32°N 附近有从川东地区或湖南南部伸到长江中下游的暖倒槽发展,850 hPa 常为弱低压暖切变系统,此时500 hPa 在华北地区有一华北高压存在,与东西向发展的副高之间形成辐合切变,暖倒槽正好位于两高之间,当其发展时,中层辐合加强,降水也会随之发展,产生小股冷空气南下进入暖倒槽,从而加大层结不稳定性,反过来促进降水发展。锋面气旋型(Ⅲ型)天气系统配置为:中高纬东北地区有低涡发展,其后部弱冷空气南下并渗入长江中游的暖倒槽中,使得江淮气旋发展而引发强降水出现(张家国等,2018),有时受副高的阻挡作用,江淮气旋移动缓慢,锋面转横或停滞,有利于强降水在汉江上游持续。Ⅰ型和Ⅲ型冷锋型降水范围较大、历时长,Ⅱ型降水多具局地性,降水多以短历时为主。

4.3 天气概念模型的构建及典型实例分析

综合以上分析,归纳出5种秋汛期汉江上游致

洪暴雨天气概念模型:高空槽-急流强迫型(A-Ⅰ型)、高空槽-低涡切变型(A-Ⅲ型)、副高外围短波槽-急流强迫型(B-Ⅰ型)、副高外围短波槽-偏南气流弱强迫型(B-Ⅱ型)和高压内部-低涡切变型(C-Ⅲ型)(图7)。统计发现,双峰型洪水500 hPa 多为高空槽型,仅1例为副高外围短波槽型,多峰型洪水正好与之相反,以副高外围型为主,高空槽型仅出现1例。因此,结合天气概念模型及不同峰型过程持续时间(表2),可以较好地预测洪水及其峰型特征。

概念模型A-Ⅰ型的致洪暴雨过程有:2003年9月4—7日、2005年9月24—29日、2011年9月16—19日、2021年10月3—10日等,其天气系统配置特征为:乌拉尔山以东的贝加尔湖一带为稳定低槽区,在河套至成都东部经常有经向度较大的深槽,东北地区为阻塞高压形势。副高主体位于我国东部地区,西风槽低值系统东移较为缓慢,有利于槽加深发展。850~700 hPa 高原以东地区维持大片低值区,低空偏南急流的发展使得水汽沿着槽前向汉江上游输送,这种配置使得降水持续时间长,暴雨形成

的条件优越。A-I 型常与地面 II 型结合出现,降水前期,在 30°N 附近的地面从川渝地区至长江中游有暖倒槽发展,为对流性降水的触发提供有利的热动力环境,配合 850 hPa 有弱气旋性弯曲的暖式切变线。暖倒槽一般位于大陆高压与副高之间,其北侧往往受大陆高压控制。随着暖倒槽发展及高压南部冷空气的不断渗入,锋面系统斜压性发展加强,容易形成暴雨以上量级的降水。

概念模型 A-III 的致洪暴雨过程有:2003 年 8 月 28—30 日、2005 年 10 月 2—3 日、2011 年 9 月 4—7 日、2021 年 9 月 2—6 日等。A-III 型与 A-I 型中层系统配置特征类似,主要区别在于 A-III 型高原东侧或四川盆地东部 700 hPa 和 850 hPa 存在明显的低涡(值)系统或气旋性环流,其西北侧往往存在兰州小高压,高压前部南下的偏北气流与低涡前部明显的西南气流配合,往往加强低涡系统强度,动力抬升作用明显。与此同时,来自孟加拉湾的水汽沿高原北上,向川东至汉江上游一带持续输送水汽,为致洪暴雨天气的形成提供充足的水汽及热量。总体而言,A 型多以自西向东移动性降水为主,降水强度大,过程持续时间较长,所引发的双峰型洪水概率较高,累计高达 50%。

概念模型 B-I 型的致洪暴雨过程有:2005 年 9 月 30 日至 10 月 1 日、2017 年 9 月 29 日至 10 月 3 日、2021 年 8 月 24—29 日、2023 年 9 月 17—20 日、9 月 22—29 日及 10 月 1—6 日,其天气配置特征为:500 hPa 副高异常强大,呈纬向型分布,汉江流域常位于副高外围与伊朗高压辐合环流之间。西风短波槽及高原槽活跃,当西风小槽东移并移入中高纬低槽底部时,槽后冷空气不断下滑且与副高外围的暖湿气流在汉江上游交汇。700 hPa 和 850 hPa 中至少有一层存在切变系统与低空急流相配合。700 hPa 在川北至陕南一带有切变,850 hPa 切变线相对 700 hPa 略微偏南,且多以暖切变为主,其以南大部地区受宽广、强盛的南风急流或西南急流控制,给汉江上游输送大量的热量和水汽。B-I 型常与地面 I 型结合出现,该型在地面图上存在一条明显的冷锋,由于降水多发生于大巴山北坡,正好处于冷空气的迎风面上,受地形抬升作用,在丹江口附近流域多发暴雨。与 B-I 型略有不同,B-II 型在中低层为偏南风气流发展旺盛,但并没有达到急流的标准,其北侧在 700 hPa 或 850 hPa 某一层有切变线存在,降水往往发生在切变线附近、南侧气流脉动区或水

汽辐合大区域。B-II 型洪水过程有:2003 年 9 月 28 日至 10 月 3 日、2010 年 8 月 18—20 日、2019 年 9 月 18—19 日、2021 年 8 月 30 日至 9 月 1 日。B 型降水多以稳定少动型雨带或雨团为主,当过程持续时间较长时,多峰型洪水多发,洪水概率高达 46.2%。

概念模型 C-III 型的致洪暴雨过程有:2010 年 8 月 21—23 日、2017 年 9 月 26—27 日、2019 年 9 月 10—18 日、2021 年 9 月 25—27 日,其天气配置特征为:500 hPa 副高西伸脊点越过 110°E 以西,整个汉江流域位于副高内部。通常情况下副高内部为下沉气流,抑制对流运动发展,但尹红萍和曹晓岗(2010)、曹美兰和俞燎霓(2012)、傅云飞和洗桃(2017)研究表明,副高内部的水汽、能量和不稳定条件都很强,当中低层有好的系统配置,边界层存在中尺度辐合线时,即会达成合适的触发条件,从而导致大规模强对流天气的发展。与上述 A 型或 B 型天气模型不同的是,该型产生的降水往往具有局部点强、范围较小、过程累加面雨量偏小且过程持续时间比较短的特征,形成的洪水基本全为陡涨尖瘦的单峰型。

5 结 论

通过对 2000 年以来秋汛期汉江上游 15 次编号洪水过程的分析,研究不同洪水峰型下水文特征、暴雨特性及对应天气系统之间的关系,得到研究结论如下。

(1)秋汛期汉江上游编号洪水有单峰型、双峰型和多峰型。单峰型过程数量最多,洪水过程线特征具有多样性;双峰型过程主要特征为洪量大、峰值高、历时长、涨水和退水过程较为迅速,形态多为尖峰型;多峰型洪水过程线会经历多个波峰和波谷,并且每个峰谷之间有不等时长的过渡期,累积洪量最大,历时最长,峰值高低不等,涨退水时间较长。

(2)不同峰型之间的洪水特性及暴雨特征差异明显。单峰型过程持续时间最短,仅 3~7 d,日降水强度大,逐日面雨量起伏较大,有 57% 的过程峰值超过 $20\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,均为尖瘦型,成峰迅速;双峰型过程持续时间一般不少于 11 d,过程间隔较短,双峰型的主峰和副峰差值不大,均在 $20\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 以上;多峰型降水过程历时最长,阴雨天气可持续 20 d 以上,一般至少会出现 4 场以上的暴雨过程。需要注意的是,短时间内暴雨强度越大,过程日面雨

量起伏越大,成峰越迅速,主峰和副峰峰值越高;而对于起伏不大,日累计面雨量分布均匀,过程间隔时间较长的过程来说,虽然会出现多个洪峰,但峰值强度会相对较小。

(3)从环流角度来看,双峰型环流形势调整频繁,乌拉尔山附近有阻塞系统存在,环流经向度较大。副高东西进退活动频繁,副高偏西、偏北、偏强,且低纬地区常有台风或热带气旋参与;多峰型的大尺度环流形势调整较少,贝加尔湖南侧多为小槽小脊活动,副高最为强盛,位置最为偏西,副高活动多以西进为主,很少出现大幅度东退现象,脊线偏南,低纬地区基本无台风或热带气旋活动;单峰型由于过程持续时间较短,一般无明显的形势调整,但天气形势种类多样,副高脊线稳定在 $25^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$,有57%的过程发生大陆高压与海洋高压合并现象,低纬地区很少有热带系统的参与。除此之外,无论哪种峰型的致洪暴雨过程,在中纬锋区上均多西风槽活动,青藏高原上的短波系统也较为活跃。对流层低层常有中路或东路回流冷空气参与。

(4)秋汛期汉江上游编号洪水中高纬度的天气型主要为高空槽型、副高外围短波槽型及高压内部型3类。其中,双峰型洪水多为高空槽型;多峰型多为副高外围短波槽型;这两种形势在单峰型中出现概率相当,而副高内部型,为单峰型所特有。对流层中低层主要天气系统可分为:急流强迫型、偏南气流弱强迫型、低涡切变型3类。从地面的天气系统分析来看,如果只有冷锋过境,而无其他各层天气系统配置良好的情况下,产生的降水强度都较弱,要综合考虑副高位置、冷空气来源、强度、路径及700 hPa和850 hPa环流配置。

(5)综合各层影响系统构建了5种天气概念模型:高空槽-急流强迫型(A-I)、高空槽-低涡切变型(A-III)、副高外围-急流强迫型(B-I)、副高外围-偏南气流弱强迫型(B-II)和副高内部-低涡切变型(C-III)。此外,地面I型和II型也常与A-I、A-III、B-I等组合出现成A-I-地面II型、B-I-地面II型,在3层天气系统配置较好的情况下,加上良好的热、动力和水汽条件,致洪暴雨的发生概率会大大增加。

参考文献

毕宝贵,徐晶,林建,2003. 面雨量计算方法及其在海河流域的应用[J]. 气象,29(8):39-42. Bi B G, Xu J, Lin J, 2003. Method of area rainfall calculation and its application to Haihe Valley[J].

Meteor Mon,29(8):39-42(in Chinese).

蔡成瑶,张东琴,黄红伟,等,2022. 沿河县近20年低涡切变型暴雨过程研究[J]. 农业灾害研究,12(7):84-86. Cai C Y, Zhang D Q, Huang H W, et al, 2022. Study on low vortex shear rainstorm process in Yanhe County in recent 20 years [J]. J Agric Catastrophol,12(7):84-86(in Chinese).

蔡俊峰,陈鲍发,余欣,2017. 赣东北3类致洪暴雨的对比分析[J]. 江西科学,35(2):219-225. Cai J F, Chen B F, Yu X, 2017. Comparative analysis on three types of flood-inducing rainstorm in northeast Jiangxi[J]. Jiangxi Sci,35(2):219-225(in Chinese).

蔡新玲,康岚,孙娟,等,2013. 2011年渭河和汉江上游秋汛期环流特征及暴雨致洪成因[J]. 暴雨灾害,32(2):120-125. Cai X L, Kang L, Sun X, et al, 2013. Study of circulation characteristics in autumn flood period over Weihe and Hanjiang River basins and the causes of flood by the heavy rains in 2011[J]. Torr Rain Dis,32(2):120-125(in Chinese).

曹美兰,俞燎霓,2012. 一次发生在副高内的强对流天气的诊断分析[J]. 科技通报,28(1):58-61. Cao M L, Yu L N, 2012. The diagnosis of severe convective weather occurred in the subtropical high[J]. Bull Sci Technol,28(1):58-61(in Chinese).

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]. J Shaanxi Meteor,(5):4-6(in Chinese).

党红梅,周义兵,李定安,等,2011. 汉江流域致灾暴雨的天气学分析[J]. 陕西气象,(5):14-17. Dang H M, Zhou Y B, Li D A, et al, 2011. The synoptic analysis of rainstorm causing disasters in the Han River Basin[J]. J Shaanxi Meteor,(5):14-17(in Chinese).

段唯鑫,2017. 汉江流域控制性水库调度运行及影响研究[D]. 武汉:武汉大学;17. Duan W X, 2017. Controlling reservoir operation and impact study in Hanjiang Basin[D]. Wuhan: Wuhan University;17(in Chinese).

傅云飞,洗桃,2017. 副热带高压中心区域内云和降水气候特征研究回顾与展望[J]. 暴雨灾害,36(6):489-497. Fu Y F, Xian T, 2017. Review and prospect of climate characteristics of cloud and precipitation in subtropical high center[J]. Torr Rain Dis,36(6):489-497(in Chinese).

高琦,徐明,李武阶,等,2014. 我国面雨量研究及业务应用进展[J]. 气象科技进展,4(2):66-69. Gao Q, Xu M, Li W J, et al, 2014. Researches and applications on area precipitation in China[J]. Adv Meteor Sci Technol,4(2):66-69(in Chinese).

李莹,李维京,艾婉秀,等,2012. 2011年华西秋雨特征及其成因分析[J]. 气象科技进展,2(3):27-33. Li Y, Li W J, Ai W X, et al, 2012. Analysis of autumn rainfall characteristics and its causes in West China in 2011[J]. Adv Meteor Sci Technol,2(3):27-33(in Chinese).

柳艳菊,孙冷,孙丞虎,等,2012. 2011年秋季华西秋雨异常及成因分析[J]. 气象,38(4):456-463. Liu Y J, Sun L, Sun C H, et al, 2012. Analysis of anomalies of autumn rain in West China in 2011 and its possible mechanism[J]. Meteor Mon,38(4):456-463(in Chinese).

- 刘志文, 2012. 2011 年汉江秋汛杜家台分流水文特征浅析[J]. 人民长江, 43(S2): 48-50. Liu Z W, 2012. Analysis of hydrological characteristics of Dujiatai diversion during the autumn flood of the Han River in 2011[J]. Yangtze River, 43(S2): 48-50(in Chinese).
- 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 in 2011[J]. J Shaanxi Meteor, (2): 16-19(in Chinese).
- 孙又欣, 李嗣军, 谭巍, 2011. 2011 年汉江秋季洪水应急处置案例分析[J]. 中国防汛抗旱, 21(6): 64-67. Sun Y X, Li S J, Tan W, 2011. Analysis of emergency response cases for autumn floods in the Han River in 2011[J]. China Flood Drought Manag, 21(6): 64-67(in Chinese).
- 王本德, 张静, 2008. 考虑暴雨成因的大伙房水库洪水分类研究[J]. 水文, 28(1): 15-20. Wang B D, Zhang J, 2008. Flood classification of Dahuofang reservoir based on storm genesis[J]. J China Hydrol, 28(1): 15-20(in Chinese).
- 汪丽娜, 李艳, 陈晓宏, 2014. 聚类识别算法解读洪水峰型[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 46(1): 89-94. Wang L N, Li Y, Chen X H, 2014. Analysis of the flood peak type by clustering algorithms[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 46(1): 89-94(in Chinese).
- 许爱华, 孙继松, 许东蓓, 等, 2014. 中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J]. 气象, 40(4): 400-411. Xu A H, Sun J S, Xu D B, et al, 2014. Basic synoptic situation classification and element character of severe convection in China[J]. Meteor Mon, 40(4): 400-411(in Chinese).
- 徐炜, 梁国华, 王本德, 2013. 基于二阶聚类与粗糙集的实时洪水分类预报模型研究[J]. 水力发电学报, 32(2): 60-67. Xu W, Liang G H, Wang B D, 2013. Study and application of classified real-time flood forecasting based on two step cluster and rough set[J]. J Hydroelectric Eng, 32(2): 60-67(in Chinese).
- 尹红萍, 曹晓岗, 2010. 盛夏上海地区副热带高压型强对流特点分析[J]. 气象, 36(8): 19-25. Yin H P, Cao X G, 2010. Summary on subtropical high severe convection during midsummer in Shanghai Area[J]. Meteor Mon, 36(8): 19-25(in Chinese).
- 喻松阳, 2005. 流域分类预报方法研究与应用[D]. 大连: 大连理工大学. Yu S Y, 2005. The research of distribution of forecast water in drainage basin or application[D]. Dalian: Dalian University of Technology(in Chinese).
- 张福然, 2014. “8.16”浑河大伙房水库以上暴雨洪水分析[J]. 东北水利水电, 32(5): 45-46, 48. Zhang F R, 2014. “8.16” analysis of rainstorm flood above Dahuofang Reservoir on Hunhe River[J]. Water Resour Hydropower Northeast China, 32(5): 45-46, 48(in Chinese).
- 张家国, 王珏, 吴涛, 等, 2018. 长江中游地区极端降水主要天气系统类型分析[J]. 暴雨灾害, 37(1): 14-23. Zhang J G, Wang J, Wu T, et al, 2018. Weather system types of extreme precipitation in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Torr Rain Dis, 37(1): 14-23(in Chinese).
- 张静, 2008. 水库防洪分类预报调度方式研究及风险分析[D]. 大连: 大连理工大学. Zhang J, 2008. Research flood control classified forecast dispatching mode and risk analysis[D]. Dalian: Dalian University of Technology(in Chinese).
- 张梦莹, 2021. 基于水文气象预报信息的丹江口水库汛期起调水位分型研究[D]. 大连: 大连理工大学: 18-19. Zhang M Y, 2021. Study on flood original regulating water level classification of Danjiangkou Reservoir based on hydrometeorological forecast information[D]. Dalian: Dalian University of Technology: 18-19(in Chinese).
- 张永勇, 陈秋潭, 2020. 淮河中上游流域洪水主要类型及其时空分布特征[J]. 地理科学进展, 39(4): 627-635. Zhang Y Y, Chen Q T, 2020. Characteristics of main flood event types and their temporal-spatial variations in the upper and middle reaches of the Huai River Basin[J]. Prog Geog, 39(4): 627-635(in Chinese).
- 赵忠飞, 周仕江, 韩春雷, 2014. 浑河上游“2013.816”暴雨洪水灾害分析[J]. 东北水利水电, 32(3): 48-50. Zhao Z F, Zhou S J, Han C L, 2014. Analysis of “August 16, 2013” rainstorm flood disaster in the upper reaches of Hun River[J]. Water Resour Hydropower Northeast China, 32(3): 48-50(in Chinese).
- 朱明, 谭永秀, 徐远波, 等, 2004. 2003 年秋季汉江上游致洪天气过程分析[J]. 湖北气象, 23(3): 12-15. Zhu M, Tan Y X, Xu Y B, et al, 2004. Analysis of a weather event producing fall flood in upper-range of Hanjiang 2003[J]. Meteor J Hubei, 23(3): 12-15(in Chinese).
- 皆丽, 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).
- Maddox R A, Chappell C F, Hoxit L R, 1979. Synoptic and meso- α scale aspects of flash flood events[J]. Bull Amer Meteor Soc, 60(2): 115-123.

(本文责编: 侯翠梅)