

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]. Meteor Mon, 49(7):868-880(in Chinese).

2021 年汉江秋汛的水雨情及环流异常特征研究^{*}

高 琦^{1,2,3,4} 吴翠红¹ 徐 明³ 刘佳明⁵ 彭 涛^{3,4}

1 武汉中心气象台,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 长江勘测规划设计研究有限责任公司,武汉 430010

提 要: 利用 NCEP/NCAR 再分析资料及常规气象水文实况观测资料,研究 2021 年汉江秋汛的水雨情及环流异常特征,并初步分析致洪成因,结果表明:2021 年汉江流域降水呈“西多东少”分布,汉江上游累计降水量为 400~985 mm,累计面雨量居 1961 年以来第一位。秋汛期间丹江口水库出现 $10\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的洪峰过程 7 次,汉江中下游主要水文控制站点累计超警时间为 151~580 h,最大超警幅度为 0.29~1.56 m,呈现越到下游超警时间越长、超警幅度越大的特征。与 2011 年和 2017 年水情对比表明,2021 年汉江上游洪峰出现时间最早,洪峰次数最多,上游高水位流量持续时间最长,汉江中下游累计超警时间也最长,水情异常程度明显更强。在大气环流形势方面,巴尔喀什湖—贝加尔湖地区为负异常,我国大陆东部至西北太平洋为正异常,日本岛以东地区为负异常,副热带高压、南亚高压、东亚副热带西风急流较历史同期偏强,异常的低层流场及水汽辐合中心的形成,以及对流层高层的辐散抽吸,是汉江上游降水得以持续并阶段性增强的有利环流配置。当丹江口水库入库流量接近 $2000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 后,汉江上游超过 60 mm 的 5 d 累计面雨量与 $10\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 以上洪峰的出现密切相关。上游来水增大后,汉江中下游河道逐级收窄是导致此地降水并不明显却出现超警洪水的主要原因。

关键词: 汉江秋汛,华西秋雨,环流异常,水文特征,致洪成因

中图分类号: P461, P339

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.042601

Study on Hydrological and Rainfall Characteristics and Circulation Anomalies in Autumn Flood Season of Hanjiang River in 2021

GAO Qi^{1,2,3,4} WU Cuihong¹ XU Ming³ LIU Jiaming⁵ PENG Tao^{3,4}

1 Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

2 Key Laboratory of Hydrology and Meteorology, CMA, Beijing 100081

3 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 Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co. Ltd., Wuhan 430010

Abstract: Based on NCEP/NCAR reanalysis data and conventional meteorological and hydrological observation data, the meteorological and hydrological characteristics as well as circulation anomalies and possible causes of the autumn floods in Hanjiang River in 2021 are analyzed. The results show that the precipitation in Hanjiang River in 2021 was more in the west and less in the east. The accumulated rainfall in the

^{*} 湖北省重点研发计划(2020BCA087)、湖北省气象局科技基金项目(2022Z01-04)共同资助

2022 年 3 月 7 日收稿; 2023 年 5 月 24 日收修定稿

第一作者:高琦,主要从事流域水文气象及旱涝灾害天气研究. E-mail:20421268@qq.com

通讯作者:吴翠红,主要从事决策气象服务及灾害性天气预报技术研究. E-mail:475211219@qq.com

upper reaches of Hanjiang River was 400—985 mm, and the accumulated areal rainfall ranked the first since 1961. During the autumn flood season, the Danjiangkou Reservoir experienced the flood peak processes of more than $10\,000\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ for 7 times. The accumulated alarm time of the major hydrological control stations in the middle and lower reaches of the Hanjiang River got to 151—580 h, with the maximum amplitude beyond warning line being 0.29—1.56 m, showing the characteristics of the longer alarm time, the higher amplitude over warnig line in the lower reaches. The comparison with the hydrological conditions in 2011 and 2017 shows that in 2021 the flood peak in the upper reaches of Hanjiang River came the earliest, the number of flood peaks was the largest, the duration of high water level in the upper reaches was the longest, the accumulated alarm time in the middle and lower reaches of Hanjiang River was also the longest, and the abnormal degree of water regime was significantly much stronger. In terms of atmospheric circulation, the low trough of Lake Balkhash and Lake Baikal region, the high ridge from the east of mainland China to the Northwest Pacific, the low trough in the areas to the east of Japan Island, the subtropical high, the South Asian high and the East Asia subtropical westerly jet were all abnormally stronger than those in the same period in history. The formations of abnormal low-level flow field and water vapor convergence center, combined with the divergence and suction of high-level flow field, were the large-scale circulation background favorable for the continuous and enhancement of precipitation. When the inflow of Danjiangkou Reservoir was close to $2000\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, the 5 d accumulated areal rainfall exceeding 60 mm in the upper reaches of Hanjiang River was closely related to the appearance of flood peaks above $10\,000\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. After the upstream inflow increased, the narrowing river coarse of the middle and lower reaches of the Hanjiang River was the main reason for the over-alarm-line floods in this area where the precipitation was not so heavy.

Key words: Hanjiang River autumn flood, autumn rainfall in West China, circulation anomaly, hydrological characteristic, cause of flood

引言

汉江为长江中游最大支流,其地势西高东低(图1),以湖北省丹江口水库以上为上游,河谷狭窄,长约925 km;丹江口至钟祥为中游,河谷较宽,沙滩多,长约270 km;钟祥至汉口为下游,长约382 km,流经江汉平原。汉江中下游河道呈“漏斗型”,河道逐级收窄,其中皇庄至泽口段河道宽度为600~2500 m,泽口至仙桃段河道宽度为300~600 m,至仙桃以下河道宽度仅为200~300 m,因而过洪能力有限。汉江上游大部地区处于华西秋雨区内,某些年份由于降水持续时间长、累计雨量大,易造成秋汛。汉江上游来水增大后,由于河道断面越到下游越窄,又受长江水位顶托的影响,往往导致泄洪能力不足,造成汉江中下游也泛滥成灾,历史上为了确保汉江中下游城市安全,曾21次启用分蓄洪区。

汉江秋汛一般发生于华西秋雨偏强的年份(殷

淑燕和黄春长,2012;肖莺等,2013)。一系列研究表明,华西秋雨的强弱多寡与东亚大气环流异常密切相关,西太平洋副热带高压(以下简称副高)、南亚高压和东亚副热带西风急流等季风环流成员对华西秋雨的维持及增强具有重要作用。鲍媛媛等(2003)、李传浩等(2015)的研究均表明,巴尔喀什湖地区500 hPa准稳定的低压槽及距平场上的负异常,以及偏西偏北的副高,是导致华西地区持续阴雨的典型环流特征。白虎志和董文杰(2004)指出,副高、印缅槽、贝加尔湖低槽是华西秋雨的主要影响系统,当贝加尔湖、印缅槽深且副高强时,有利于华西多秋雨。俞亚勋等(2013)、吴瑶和杜良敏(2016)的研究表明,副高的西伸滞留及其脊线的准双周振荡对华西秋雨具有重要作用,当脊线准双周周期较强时,汉江上游9—10月容易降水偏多。罗霄等(2013)总结了近50年华西秋雨的典型环流后发现,东亚副热带西风急流对华西地区的垂直运动有较大影响,当东亚副热带西风急流中心西移,中心强风速带偏窄时,华西北部地区上升运动加强,华西秋雨出现北多南

少的异常型。进一步研究表明,青藏高原地表热状况(陈忠明等,2001;鲍媛媛等,2020)、海温(韩晋平等,2013;郑然等,2018;彭韵萌和徐涂明,2021)、印度洋偶极子(刘佳等,2015)、热带大气季节内振荡(赵佳玉等,2016)等是季风系统及大气环流异常形成的深层机制。此外,华西秋雨年际及年代际差异明显,存在 4~8 a(王春学等,2015),5~8 a(蒋竹将等,2014),3、13、17 a(冯丽文和郭其蕴,1983)以及 10~15 a(梁健洪,1989)的周期。由于这种周期性的存在,使得汉江秋汛发生频次相对较少,因此对于秋汛期降水特征、洪水演变及可能造成的影响,预报员往往认识相对有限。随着气候变暖背景加强,进入 21 世纪后,华西秋雨强度明显增强(罗霄等,2013;俞亚勋等,2013),这使得进一步深入认识和了解汉江秋汛的特点和成因迫在眉睫。

2021 年秋季汉江上游出现了超过 20 年一遇的大洪水,丹江口水库发生 7 次超过 $10\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 的入库洪水过程,8 月下旬至 10 月上旬,丹江口水库秋汛累计来水量约为 340 亿 m^3 ,较常年同期偏多约 4 倍,为 1969 年建库以来历史同期第一位。通过研究 2021 年汉江秋汛期间降水的时空分布及历史极端性特征,汉江流域水位、流量的演变特征,并与典型秋汛年(2011 年和 2017 年)的水情进行对比,分析致洪降水的大尺度环流及水汽输送异常,从气象、水文等多角度揭示了 2021 年汉江秋汛的致洪成因,有助于加深对于汉江秋汛发生发展规律的认识,促进流域上下游、左右岸联动防洪工作的开展。

1 资料和方法

根据长江水利委员会水文局提供的汉江流域水系划分,将汉江流域细分为石泉以上、石泉安康、安康丹江口、丹皇区间和皇庄以下等 5 个子流域(图 1),该区域内包含气象站 63 个。文中所指的汉江上游为石泉以上、石泉安康、安康丹江口 3 个子流域组成的区域。文中涉及的汉江流域水文站有 6 个,其中丹江口水库代表汉江上游来水情况,皇庄、沙洋、岳口、仙桃、汉川为汉江中下游干流主要水文控制站。

采用的资料包括:NCEP/NCAR 再分析资料,1 日 4 次(02、08、14、20 时,北京时,下同),分辨率为 $2.5^\circ\times 2.5^\circ$;汉江流域 1961—2021 年国家气象站逐日降水资料;汉江流域主要水文控制站的水位、流量

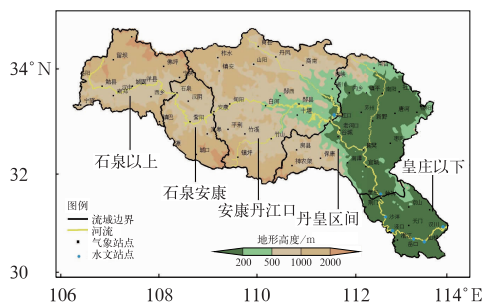


图 1 汉江流域分区及气象、水文站点分布

Fig. 1 Distribution of sub-basin and meteorological and hydrological stations in the Hanjiang River Basin

资料。文中所指的历史平均为 1991—2020 年的 30 年平均。面雨量(毕宝贵等,2003;徐晶和姚学祥,2007;高琦等,2014)的计算采用站点平均法。

2 致洪降水的时空分布特征

根据国家气候中心监测,2021 年华西秋雨北区雨期自 8 月 23 日开始,至 10 月 16 日结束。汉江流域上游所有站点均处于华西秋雨监测区内,其中大部分站点属华西秋雨监测北区,少数站点属监测南区。若以整个汉江上游为研究对象,参照华西秋雨行业标准(中国气象局,2019),则自 8 月 21 日起,即已满足 50%以上站点降水量 $\geq 0.1\text{ mm}$ 的秋雨日判定标准,且 10 月 8 日后不再满足,考虑该时间与汉江流域汛情的发展有较好的对应关系,因此本文选取 8 月 21 日至 10 月 7 月为降水研究时段。

2.1 致洪降水的空间分布特征

从 2021 年 8 月 21 日至 10 月 7 日汉江流域累计降水量空间分布可见(图 2a),汉江流域降水呈现西多东少分布特征,汉江下游累计降水量仅为 50~150 mm,中游为 150~400 mm,上游则为 400~800 mm,局部站点可达 900 mm 以上,最强降水中心位于石泉以上子流域的镇巴站,达 985 mm。分析累计降水量距平分布(图 2b),除汉江中下游部分地区接近历史同期或略偏少外,汉江中游北部及汉江上游的大部地区较历史同期偏多 1~2 倍,局地偏多 2 倍以上,由此可见 2021 年秋汛期的降水主要来自于汉江上游地区,因此下文将重点针对汉江上游,研究其降水的时间演变及极端性特征。

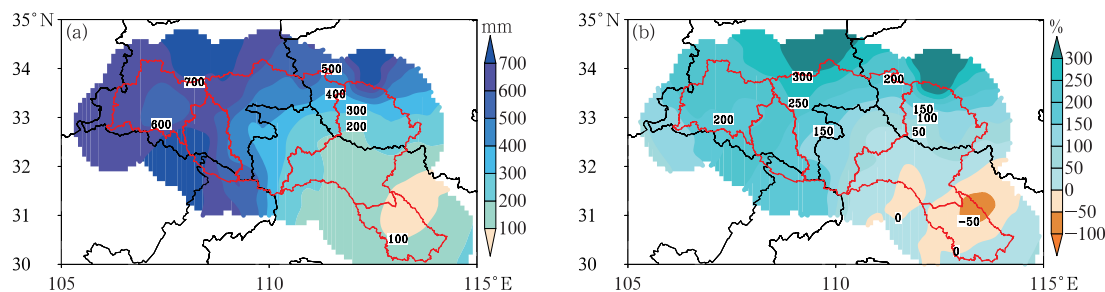


图2 2021年8月21日至10月7日汉江流域(a)总降水量和(b)降水距平百分率分布

Fig. 2 (a) Accumulated precipitation and (b) precipitation anomaly percentage in the Hanjiang River Basin from 21 August to 7 October 2021

2.2 致洪降水的时间演变特征

从汉江上游出现 0.1 mm 以上降水站点数占比的逐日演变可见(图 3,虚线),2021 年 8 月 21 日至 10 月 7 日,汉江上游降水过程频繁,雨日较多,定义单日 50%以上站点出现 0.1 mm 以上降水为一个雨日,则期间雨日约占总日数的 60.4%。从逐日面雨量演变可以看出(图 3,柱状),大致可分为 4 个集中期,分别在 8 月 21 日至 9 月 6 日、9 月 15—19 日、9 月 22—28 日、10 月 3—6 日,其中 8 月 21 日至 9 月 6 日为降水持续时间最长、过程最为频繁和集中的时段。从 5 d 累计面雨量的演变(图 3,实线)可以看出,汉江上游 5 d 累计面雨量 ≥ 60 mm 的峰值有 7 次,其中 ≥ 90 mm 峰值有 3 次,分别为 8 月 28 日至 9 月 1 日(98.7 mm)、9 月 15—19 日(98.6 mm)、9 月 23—27 日(94.6 mm),对比丹江口水库的入库流量发现,在入库流量接近 $2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 后,60 mm 以上的 5 d 累计面雨量与 $10000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的洪

峰有较好的对应关系,而 90 mm 以上的 5 d 累计面雨量与 $20000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的洪峰有较好的对应关系。

2.3 致洪降水的极端性特征

高琦等(2020)基于近 60 年降水数据,利用相对阈值法(百分位法)统计了汉江子流域极端面雨量阈值及 5 d 累计面雨量极值,2021 年 8 月 21 日至 10 月 7 日汉江上游 3 个子流域(石泉以上、石泉安康、安康丹江口)的逐日面雨量超过极端面雨量 95% 分位阈值的日数分别占总日数的 29.1%、22.9%、16.7%,表明秋汛期间汉江上游子流域约有 1/5~1/3 的日数有强降水发生。9 月 1—5 日石泉以上的 5 d 累计面雨量达 117.2 mm,8 月 28 日至 9 月 1 日安康丹江口的 5 d 累计面雨量达 115.5 mm,均突破了两子流域自 1961 年以来 5 d 累计面雨量的极值。

从 1961 年以来汉江 5 个子流域 8 月 21 日至 10 月 7 日累计面雨量的时间演变(图 4)可以看出,2021 年

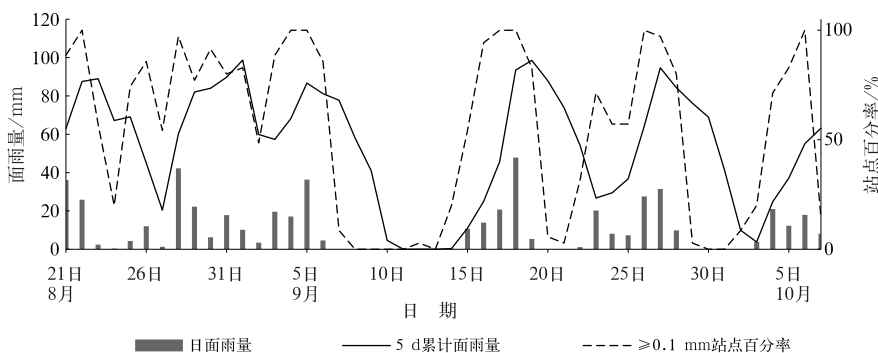


图3 2021年8月21日至10月7日汉江上游日面雨量、5 d 累计面雨量、 ≥ 0.1 mm 站点百分率的逐日演变

Fig. 3 Daily variation of areal rainfall, 5 d accumulated areal rainfall and percentage of site rainfall ≥ 0.1 mm from 21 August to 7 October 2021

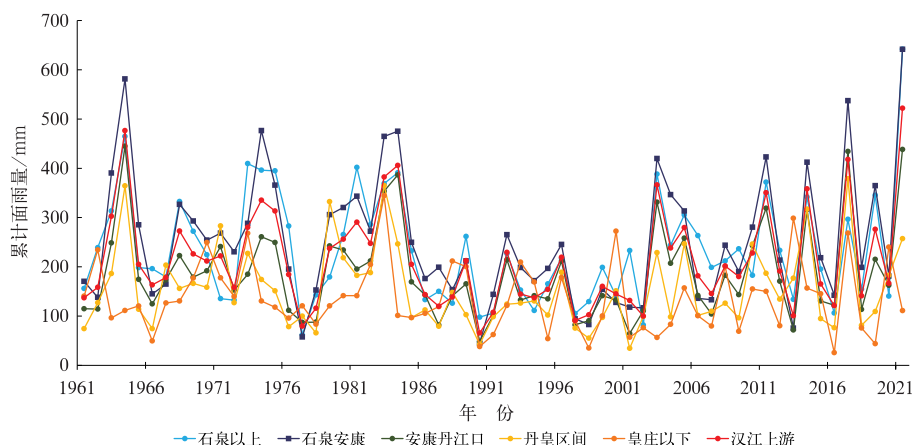


图 4 1961—2021 年 8 月 21 日至 10 月 7 日汉江流域 5 个子流域及汉江上游累计面雨量逐年演变

Fig. 4 The yearly evolution of accumulated areal rainfall in five sub-basins of the Hanjiang River Basin and the upper reaches of the Hanjiang River in the 21 August to 7 October periods of 1961—2021

汉江上游的石泉以上、石泉安康、安康丹江口累计面雨量分别为 641.8、641.5、438.4 mm, 分别位居 1961 年以来的第一、第一、第二位, 且由石泉以上、石泉安康、安康丹江口 3 个子流域组成的汉江上游流域累计面雨量位居 1961 年以来第一位。

综上所述, 2021 年汉江秋汛致洪降水主要有以下特征: 一是降水开始时间早、持续时间长, 从 8 月 21 日开始发展, 至 10 月上旬减弱; 二是降水的累计强度大, 汉江上游累计降水量普遍在 400 ~ 800 mm, 其中局部站点达 900 mm 以上; 三是降水历史极端性强, 汉江上游流域累计面雨量居 1961 年以来第一位。

3 汉江秋汛的水情演变特征

3.1 2021 年汉江流域水情特征分析

丹江口水库的入库流量可反映汉江上游来水的总体情况, 从其 8 月初至 10 月上旬的演变(图 5a)可以看出, 丹江口的入库流量大致可分为 4 个阶段, 8 月 21 日起, 随着降水进入第一个集中期, 丹江口的入库流量也出现显著上涨, 并在短短的 17 d 内先后在 8 月 23 日($14400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)、8 月 30 日($23400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)、9 月 2 日($16400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)、9 月 6 日($18800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)出现 4 次 $10000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的洪峰过程; 9 月 15 日起, 随着第 2~4 个降水集中期

发展, 汉江上游来水再度出现 3 轮明显上涨, 丹江口水库分别在 9 月 19 日($22800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)、9 月 29 日($24900 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)、10 月 7 日($10500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)出现 3 次洪峰过程。结合丹江口水库的出库流量可以看出, 丹江口水库对 7 次洪峰的削峰率分别为 46.5%、67.0%、47.0%、46.3%、71.0%、55.8%、2.0%, 有效减轻了上游洪水对汉江中下游的影响, 并在 10 月 10 日 14 时首次实现 170 m 的蓄水目标。

从中下游干流主要水文控制站的水位流量演变(图 5b~5f)可以看出, 受汉江上游来水影响, 皇庄以下主要水文控制站点在 8 月下旬至 9 月上中旬、9 月下旬至 10 月上旬均存在 2 个超警戒阶段, 其中皇庄、沙洋、岳口、仙桃、汉川累计超警时间分别为 151、255、228、232、580 h, 最大超警幅度分别为 0.29、0.40、0.50、0.53、1.56 m, 呈现越到下游超警时间越长、超警幅度越大的特征, 这与中下游河道落差小, 断面愈下愈小, 导致的泄洪能力不足有关。此外, 由于长江上游秋汛也较为明显, 长江上游来水造成汉口水位升高, 也对汉江来水形成顶托作用。

3.2 2021 年汉江流域水情与 2011 年、2017 年的对比

2010 年以来, 汉江秋汛比较严重的年份还出现在 2011 年(蔡芴宁等, 2012; 柳艳菊等, 2012; 蔡新玲等, 2013)、2017 年(梁萍等, 2019; 李玉荣等, 2017), 其中 2011 年为减轻汉江上游来水对下游城市尤其

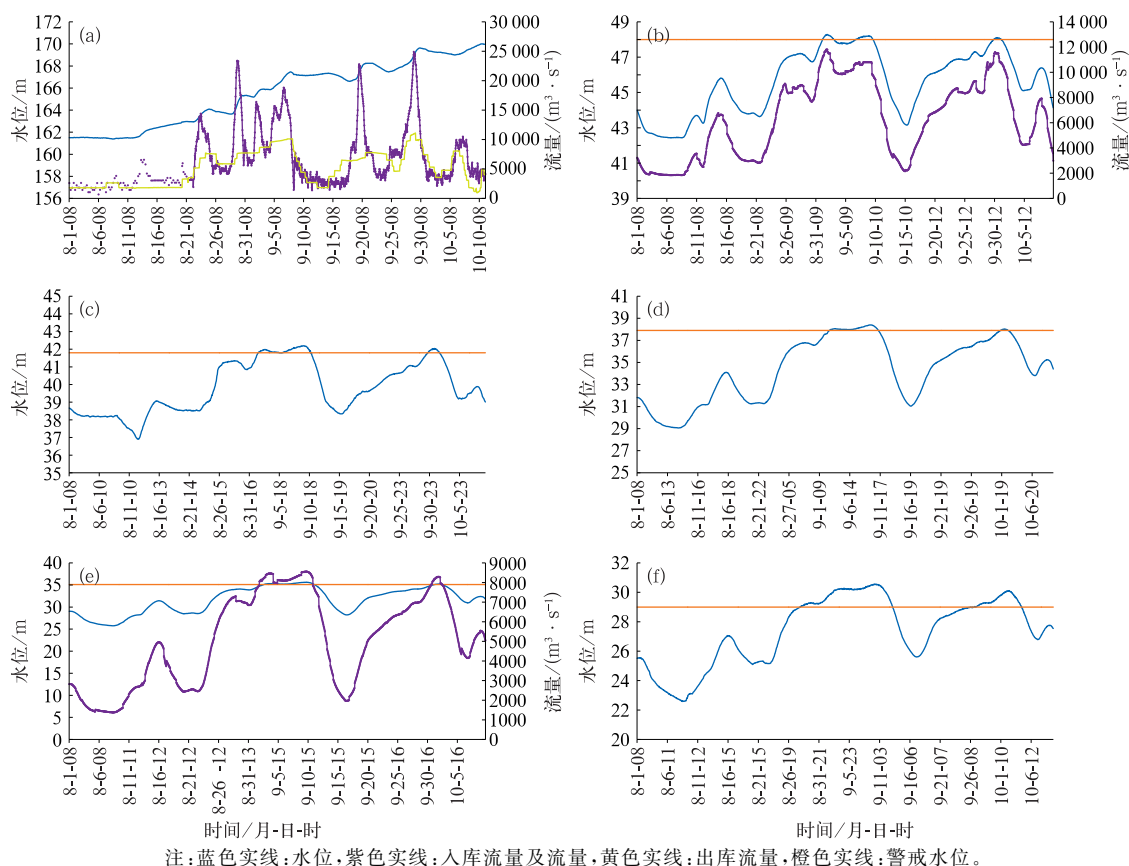


图5 2021年8月初至10月上旬洪峰前后汉江主要控制站水位流量演变

(a) 丹江口水库, (b) 皇庄, (c) 沙洋, (d) 岳口, (e) 仙桃, (f) 汉川

Fig. 5 The temporal variation of water level (blue line), inflow and flow (purple line), outflow (yellow line) with its alert water level (orange line) before and after the flood peak in the Hanjing River Basin in 2021

(a) Danjiangkou Reservoir, (b) Huangzhuang, (c) Shayang, (d) Yuekou, (e) Xiantao, (f) Hanchuan

是对武汉的影响,曾采用杜家台分蓄洪区进行分洪(刘志文,2012)。对比此3年丹江口水库超过 $10000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 洪峰出现次数可见(表1),2011年次数最少,仅为2次;2017年为3次;2021年最多,达7次。从首次洪峰出现时间来看,2021年最早,在8月末就有洪峰出现,而2011年、2017年则分别出现在9月中旬和9月下旬。在3个典型秋汛年中,最大洪峰流量出现在2011年9月19日,达 $26600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,且此次过程流量涨幅也最大,达 $22980 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,2021年9月29日洪峰次之,为 $24900 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,流量过程涨幅居第二位,为 $21850 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,2017年的洪峰流量均在 $20000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 以下。从丹江口水库洪峰水位来看,2021年普遍高于2011年和2017年。

对2011、2017、2021年汉江中下游主要水位控制站的水文特征值(表2)进行对比,从超警戒站点

数量来看,2021年、2017年皇庄以下江段均为全线超警,但在2011年超警戒站点略少,警戒主要发生在沙洋以下江段。从最高水位的情况来看,皇庄站以2017年为最高,为48.62 m;沙洋、岳口、仙桃站均是以2011年为最高;而汉川站,则以2021年为最高,为30.56 m,2011年次之,为30.55 m。从累计超警戒时长来看,均是以2021年为最长,但从超保证时长来看,在2011年仙桃站还出现了超保证的情况。

对比此3年的水情特征后发现,2011年汉江上游洪峰集中发生于9月中旬,洪峰次数最少(2次),但流量涨幅迅猛,洪峰流量及过程流量涨幅最大均出现在这一年。此外,2011年汉江中下游水位高、流量大,其超警戒站数及持续时间虽不及2021年,但沙洋、岳口、仙桃等站水位均为3年中最高,且出现了1个站超保证;2017年汉江上游洪峰发生在9月

表 1 2021、2017、2011 年丹江口水库水文特征值

Table 1 Key hydrological values of the Danjiangkou Reservoir in 2021, 2017 and 2011

年份	洪峰流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	洪峰出现 时间/BT	洪峰 水位/m	洪峰水位出现 时间/BT	起涨时间/BT	起涨流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	过程流量 涨幅/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
2021	14 400	8 月 23 日 08:00	164.09	8 月 25 日 04:00	8 月 22 日 12:00	1930	12 470
	23 400	8 月 30 日 00:00	165.34	8 月 31 日 07:00	8 月 28 日 11:00	4230	19 170
	16 400	9 月 2 日 06:00	165.91	9 月 3 日 09:00	9 月 1 日 10:00	5590	10 810
	18 800	9 月 6 日 22:00	167.46	9 月 8 日 01:00	9 月 4 日 14:00	7840	10 960
	22 800	9 月 19 日 19:00	168.25	9 月 20 日 22:00	9 月 19 日 14:00	7800	15 000
	24 900	9 月 29 日 03:00	169.63	9 月 30 日 02:00	9 月 24 日 06:00	3050	21 850
	10 500	10 月 7 日 12:00	170.00	10 月 10 日 14:00	10 月 3 日 02:00	2160	8340
2017	17 300	9 月 28 日 10:00	164.63	9 月 29 日 06:00	9 月 26 日 08:00	2500	14 800
	17 300	10 月 5 日 10:00	165.84	10 月 6 日 08:00	10 月 3 日 08:00	5610	11 690
	18 600	10 月 12 日 18:00	165.82	10 月 14 日 00:00	10 月 11 日 08:00	2740	15 860
2011	22 100	9 月 14 日 23:00	155.48	9 月 15 日 23:00	9 月 11 日 14:00	1820	20 280
	26 600	9 月 19 日 14:00	156.60	9 月 21 日 17:00	9 月 17 日 02:00	3620	22 980

表 2 2021、2017、2011 年汉江中下游主要水文控制站特征值

Table 2 Key hydrological values of the control stations in the middle and lower reaches of Hanjiang River in 2021, 2017 and 2011

年份	站名	最大洪峰流量 /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	洪峰流量出现 时间/BT	最高 水位/m	最高水位出现 时间/BT	最大超警 幅度/m	超警戒时长, 超保证时长/h
2021	皇庄	11 800	9 月 2 日 02:00	48.29	9 月 2 日 06:00	0.29	151.0
	沙洋	—	—	42.20	9 月 9 日 19:00	0.40	255.0
	岳口	—	—	38.40	9 月 9 日 23:00	0.50	228.0
	仙桃	8560	9 月 9 日 10:32	35.63	9 月 10 日 7:00	0.53	232.0
	汉川	—	—	30.56	9 月 10 日 12:00	1.56	580.0
2017	皇庄	14 100	10 月 6 日 16:00	48.62	10 月 6 日 21:00	0.62	62.0
	沙洋	—	—	42.27	10 月 7 日 17:00	0.47	67.0
	岳口	—	—	38.51	10 月 8 日 10:00	0.61	82.0
	仙桃	9240	10 月 8 日 08:40	35.64	10 月 8 日 12:00	0.54	74.0
	汉川	—	—	29.95	10 月 9 日 06:00	0.95	250.0
2011	皇庄	14 600	9 月 21 日 13:00	47.35	9 月 21 日 13:00	−0.65	0.0
	沙洋	13 600	9 月 18 日 07:00	42.45	9 月 21 日 07:00	0.65	104.0
	岳口	—	—	39.05	9 月 21 日 08:00	1.15	119.0
	仙桃	10 800	9 月 21 日 05:00	36.23	9 月 21 日 09:00	1.13	112.4
	汉川	—	—	30.55	9 月 21 日 14:00	1.55	154.0

注:—表示无观测数据。

末至 10 月中旬前期,次数为 3 次,略高于 2011 年,但在峰值流量、中下游主要站点洪峰水位及超警戒时长上来看,普遍不及 2011 年和 2021 年;2021 年汉江上游洪峰出现在 8 月下旬至 10 月上旬,洪峰出现时间最早,洪峰次数最多(7 次),上游高水位流量持续时间最长,中下游累计超警时间也最长,其下游的汉川站水位为 3 年中最高,其超警幅度也最大。

4 2021 年汉江秋汛的异常环流特征

4.1 500 hPa 环流异常特征

秋汛的形成与大尺度环流的异常稳定维持密切相关。2021 年 8 月 21 日至 10 月 7 日(图 6,等值

线),极涡呈偏心型,其中心位于 78°N 、 180°E 附近,亚欧中高纬呈现“两槽一脊”环流型,我国东北及其以北地区有高压脊维持,巴尔喀什湖—贝加尔湖地区、日本以东—白令海地区各有一低槽发展。中低纬地区,副高较历史同期明显偏强、偏西,其平均西伸脊点位于 27°N 、 100°E 附近。对应的距平场显示(图 6,填色),欧亚地区中高纬从西南至东北呈现经向“一十一”波列分布,即巴尔喀什湖—贝加尔湖地区为明显的负异常,欧洲大陆北部为显著的正异常,白令海峡以北的大部地区为显著的负异常,其负异常中心较历史同期差值在 -7 dagpm 以上。此外,纬向上同样存在明显的“一十一”波列分布,即巴尔喀什湖—贝加尔湖地区为负异常,我国大陆东部至西北太平洋为正异常,日本岛以东地区为负异常。中

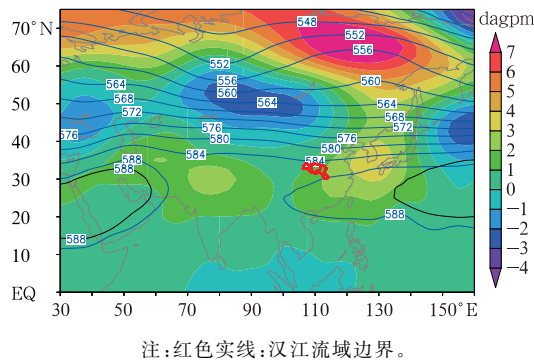


图6 2021年8月21日至10月7日

500 hPa平均位势高度(等值线,

单位:dagpm)及距平场(填色)

Fig. 6 The 500 hPa mean geopotential height (isoline, unit: dagpm) and anomaly field (colored) from 21 August to 7 October 2021

高纬地区的环流异常有利于冷空气在巴尔喀什湖—贝加尔湖地区堆积并不断分裂南下,与异常偏西的副高外围暖湿气流交汇于汉江上游地区。2021年

在巴尔喀什湖—贝加尔湖地区高度场的负异常、欧洲北部的正异常、我国大陆东部至西北太平洋的正异常,与白虎志和董文杰(2004)、罗霄等(2013)、王春学等(2015)研究的华西秋雨偏强年的典型大尺度异常环流相比,基本一致,主要差异表现在低纬度孟加拉湾至南海地区高度场仍以正距平为主,而非典型环流中的明显负距平。

4.2 西太平洋副高异常特征

500 hPa副高的变化是影响秋雨多少的主要因子之一,从2021年8月21日至10月7日期间逐日副高强度及面积指数演变(图7a)可见,副高异常偏强、面积偏大,秋汛期间平均的强度指数和面积指数分别为历史同期的1.5倍和1.7倍。从秋汛期间副高脊线、西伸脊点演变可见(图7b),副高呈现出阶段性的南北及东西摆动,对比逐日降水演变可见,副高西伸脊线在 $26^{\circ}\sim 28^{\circ}\text{N}$ 、西伸脊点在 $90^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$

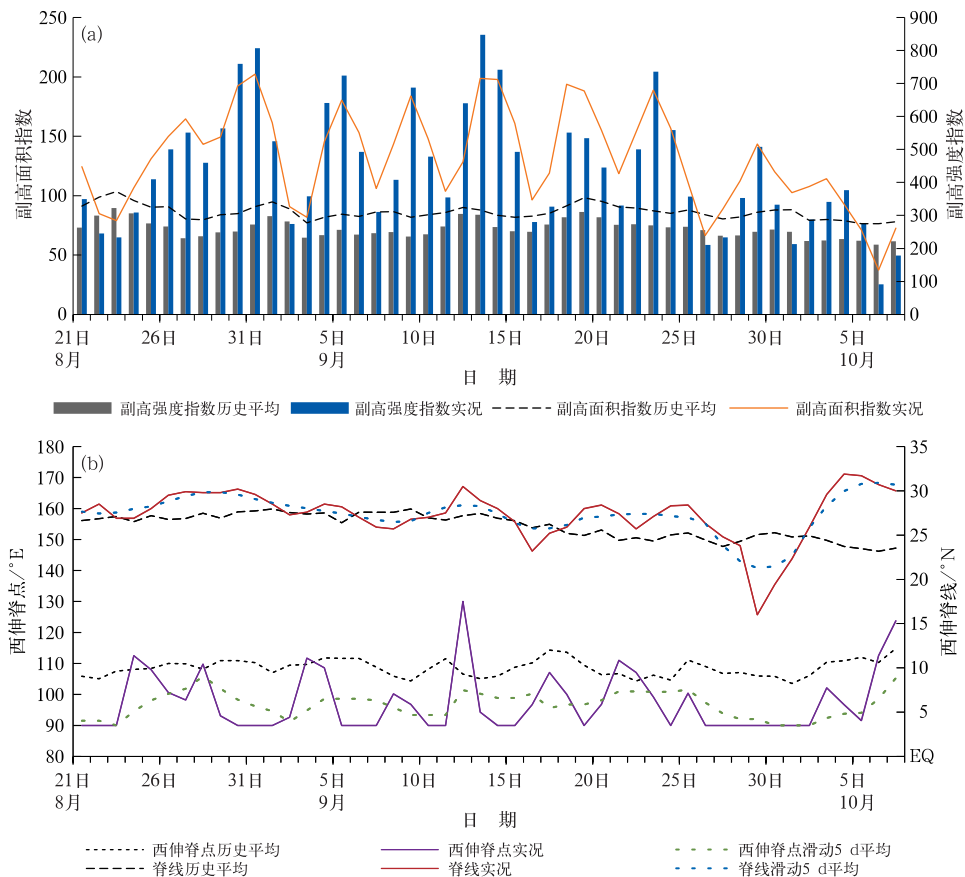


图7 2021年8月21日至10月7日逐日500 hPa(a)副高面积指数和强度指数及(b)西伸脊点和脊线演变

Fig. 7 Daily variation of (a) subtropical high intensity and area index and (b) westward extension ridge point and ridge line at 500 hPa from 21 August to 7 October 2021

的阶段,也是汉江上游降水显著增强的阶段。

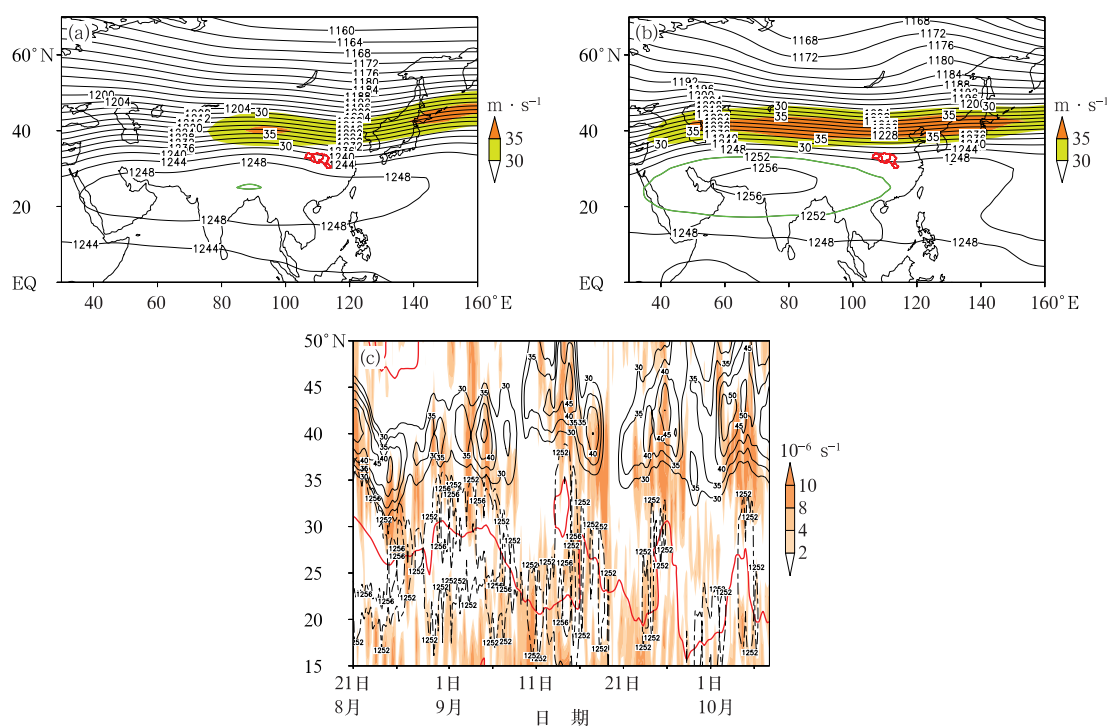
4.3 东亚副热带西风急流和南亚高压

南亚高压及其北侧的东亚副热带西风急流是中高纬度地区对流层中上层大气环流的重要组成部分,其对大范围雨带形成及维持具有重要作用(张琼和吴国雄,2001;况雪源和张耀存,2006;陆晓娟等,2022)。从历史平均的8月21日至10月7日200 hPa南亚高压及平均纬向风的历史平均分布特征(图8a)可见,南亚高压1252 dagpm所控制的范围很小,仅在高原西侧90°E附近区域东亚副热带西风急流轴($u \geq 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)呈准东西向带状分布,在90°E、150°E存在两个 $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的急流中心。从2021年8月21日至10月7日秋汛期间200 hPa南亚高压及平均纬向风(图8b)分布可见,南亚高压较历史同期异常偏强、范围偏大,1252 dagpm覆盖了20°~130°E

的广大地区,且其中心值超过1256 dagpm。东亚副热带西风急流较历史同期范围更广,覆盖了37°~42°N、35°~160°E大部区域,并且强度更强,在60°~140°E的大范围区域内其中心强度均超过了 $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从2021年秋汛期105°~112°E平均的200 hPa位势高度、纬向风及水平散度随时间演变来看(图8c),南亚高压及东亚副热带西风急流经历了4次加强北抬随后又减弱南撤的过程,当东亚副热带西风急流轴与南亚高压脊线分别稳定在35°~40°N、25°~30°N时,在30°~35°N(即汉江上游所在区域)有明显的高空辐散发展,对应的降水也进入显著增强阶段。

4.4 低层流场及水汽输送异常

由2021年8月21日至10月7日700 hPa距平流场(图9)可见,在中高纬度巴尔喀什湖—贝加



注:图 a、b 中红色实线:汉江流域边界;图 c 中红色实线:南亚高压脊线。

图 8 (a)1991—2021 年历史平均和(b)2021 年 8 月 21 日至 10 月 7 日 200 hPa 平均位势高度(黑色实线,单位:dagpm,绿色实线:1252 dagpm)及纬向风(填色: $\geq 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), (c)2021 年 105°~112°E 的 200 hPa 平均位势高度(黑色虚线,单位:dagpm)、纬向风(黑色实线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和水平散度(填色)的时间-纬度剖面

Fig. 8 (a, b) The 200 hPa average geopotential height (black solid line, unit: dagpm; green solid line: 1252 dagpm) and u -wind (colored: $\geq 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) from 21 August to 7 October (a) of climate mean (1991–2021) and (b) in 2021, (c) the time-latitude cross-section of geopotential height (black dashed line, unit: dagpm), u -wind (black solid line, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and horizontal divergence (colored)

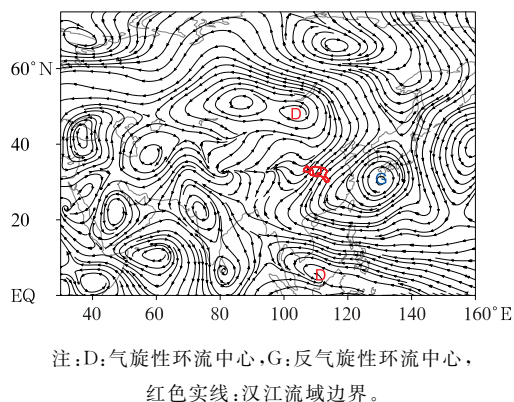


图9 2021年8月21日至10月7日

700 hPa 距平流场

Fig. 9 The 700 hPa streamline field of anomalies from 21 August to 7 October 2021

尔湖地区有异常的气旋性环流存在,而我国东部沿海地区处于与副高相关的异常反气旋环流控制下,在其南侧的 $0^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 、 $100^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 区域内,可以看到存在明显的气旋性环流,其与越赤道气流、高压底部的偏东气流汇合成一支偏东气流,在进入陆地后转向形成一支异常的西南气流,最终与中高纬气旋性环流底部的偏北气流在汉江上游地区交汇。

从气候平均的8月21日至10月7日700 hPa水汽通量及水汽通量散度(图10a)分布特征可以看出,水汽辐合区主要位于 $28^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $80^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$ 附近,即汉江流域以西的四川盆地附近地区,此外在

汉江流域以东地区也存在一个弱水汽辐合中心,汉江上游流域无明显的水汽辐合。但在2021年秋汛期(图10b),水汽辐合中心范围明显增大,东扩至 118°E 附近,汉江上游地区处于明显的水汽辐合区中,这与李多和顾薇(2022)的研究结论较为一致。水汽的输送路径主要有4支,来自南海、阿拉伯海的水汽首先在 $0^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 、 $100^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 形成一个水汽辐合中心,而后经由副高南侧的偏东南气流与孟加拉湾水汽汇合成一条西南水汽输送带,最终与来自西风带的水汽在汉江上游形成强烈的辐合,为秋汛期持续降水提供了充分的水汽供应。

5 2021年汉江秋汛成因概念模型

综合上文对2021年汉江秋汛水文气象演变特征和大气环流异常分析结果,得到2021年汉江秋汛成因概念模型(图11)。

当200 hPa南亚高压、东亚副热带西风急流较同期异常偏强;500 hPa巴尔喀什湖—贝加尔湖地区有低槽发展,其距平场呈明显负距平,我国大陆东部有高压脊发展、副高异常偏西偏北,且中东部大部地区在距平场上呈明显正距平;对流层中低层,汉江上游地区有异常的水汽辐合中心发展,并且上述异常大尺度环流配置稳定维持时,有利于汉江上游出现大范围持续性降水。当东亚副热带西风急流轴位于 $35^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$,南亚高压脊线位于 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 时,副

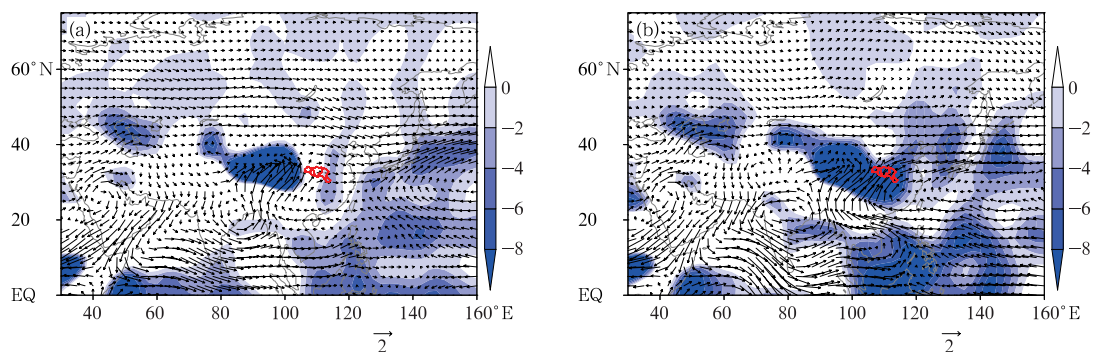


图10 (a)1991—2021年历史平均和(b)2021年8月21日至10月7日700 hPa

平均水汽通量(箭矢,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)及水汽通量散度(填色,单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)Fig. 10 The 700 hPa water vapor flux (arrow, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and water vapor flux divergence (colored, unit: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) from 21 August to 7 October

(a) of climate mean (1991—2021) and (b) in 2021

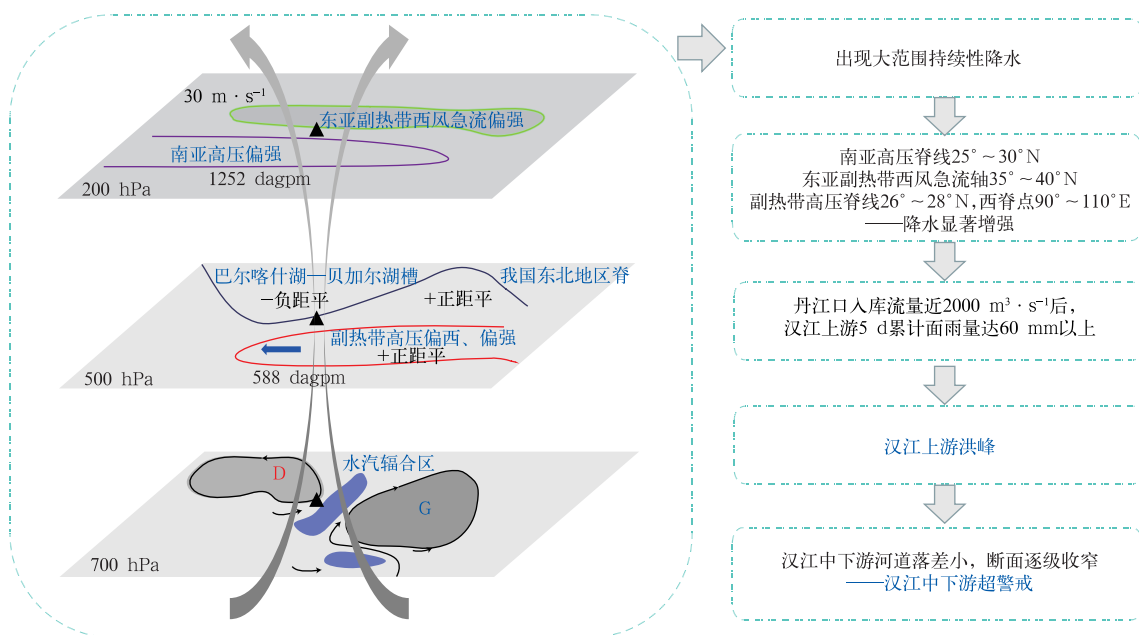


图 11 2021 年汉江秋汛成因示意图

Fig. 11 Schematic diagram of causes for autumn floods in Hanjiang River in 2021

高脊线在 $26^{\circ}\sim 28^{\circ}\text{N}$ 、西伸脊点在 $90^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ 时,有利于汉江上游降水显著增强。在丹江口水库入库流量接近 $2000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 后,当汉江上游 5 d 累计面雨量达 60 mm 以上时,往往造成汉江上游流域 $10000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的洪峰过程。汉江上游洪峰形成后,在其向中下游的移动过程中,由于河道落差小,断面逐级收窄,导致降水并不明显的汉江中下游地区出现超警戒洪水。

6 结 论

本文分析了 2021 年汉江秋汛降水的时空分布及历史极端性特征,汉江流域主要水文控制站水情演变及大尺度环流异常特征,并初步探讨了致洪的环流特征,得出以下结论:

(1) 2021 年汉江秋汛致洪降水主要分布在汉江上游地区,具有开始时间早、持续时间长、降水的累计强度大及历史极端性强等特征,降水自 8 月 21 日开始发展,至 10 月上旬方减弱,持续近 50 d,期间经历了 4 个降水的集中时段。汉江上游 3 个子流域石泉以上、石泉安康、安康丹江口累计面雨量分别为 1961 年以来的第一、第一、第二位,且整个汉江上游流域累计面雨量居 1961 年以来第一位。

(2) 受汉江上游降水影响,丹江口水库出现 $10000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的洪峰过程 7 次,最大洪峰流

量出现在 9 月 29 日,为 $24900\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。汉江中下游主要水文控制站点累计超警时间在 151~580 h,最大超警幅度分别为 0.29~1.56 m,呈现越到下游超警时间越长、超警幅度越大的特征。与典型秋汛年水情的对比分析表明,2021 年水情的异常程度明显超过 2011 年、2017 年。2021 年汉江上游洪峰出现在 8 月下旬至 10 月上旬,洪峰出现时间最早,洪峰次数最多(7 次),上游高水位流量持续时间最长,中下游累计超警时间也最长,其下游的汉川站水位为 3 年中最高,超警幅度也最大。

(3) 副高异常偏西偏北,是导致秋汛期间汉江流域降水“西多东少”的主要原因。在同期异常偏强的南亚高压、东亚副热带西风急流及对流层中低层异常的西南气流的共同作用下,汉江上游地区形成了持续的高空辐散及低层水汽辐合中心,这为降水的长期维持起到重要作用。当副高脊线在 $26^{\circ}\sim 28^{\circ}\text{N}$ 、西伸脊点在 $90^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$,且西风急流轴与南亚高压脊线分别稳定在 $35^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 时,对应的汉江上游降水也进入显著增强阶段。当丹江口水库入库流量接近 $2000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 后,汉江上游 60 mm 以上的 5 d 累计面雨量往往能造成 $10000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的洪峰过程。上游来水增大后,汉江中下游河道逐级收窄,是导致降水并不明显的汉江中下游地区出现超警戒洪水的主要原因。

参考文献

- 白虎志,董文杰,2004. 华西秋雨的气候特征及成因分析[J]. 高原气象,23(6):884-889. Bai H Z, Dong W J, 2004. Climate features and formation causes of autumn rain over Southwest China[J]. Plateau Meteor, 23(6):884-889(in Chinese).
- 鲍媛媛,阿布力米提,李峰,等,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, Abulimiti, Li F, et al, 2003. Space-time distribution and physical mechanisms of autumn rains in West China in 2001[J]. J Appl Meteor Sci, 14(2):215-222(in Chinese).
- 鲍媛媛,李勇,康志明,2020. 2017年华西极端秋雨的季风环流异常特征及机理[J]. 高原气象,39(3):560-569. Bao Y Y, Li Y, Kang Z M, 2020. Characteristics and mechanism of monsoon circulation anomalies in extreme autumn rain over West China in 2017[J]. Plateau Meteor, 39(3):560-569(in Chinese).
- 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).
- 蔡芎宁,康志明,牛若芸,等,2012. 2011年9月华西秋雨特征及成因分析[J]. 气象,38(7):828-833. Cai X N, Kang Z M, Niu R Y, et al, 2012. Analysis of features and physical mechanisms of 2011 autumn rainfall in West China[J]. Meteor Mon, 38(7):828-833(in Chinese).
- 蔡新玲,康岚,孙娴,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).
- 陈忠明,刘富明,赵平,等,2001. 青藏高原地表热状况与华西秋雨[J]. 高原气象,20(1):94-99. Chen Z M, Liu F M, Zhao P, et al, 2001. Relationship between the surface heating fields over Qinghai-Xizang Plateau and precipitation of Southwest China in autumn[J]. Plateau Meteor, 20(1):94-99(in Chinese).
- 冯丽文,郭其蕴,1983. 华西秋雨的多年变化[J]. 地理研究,2(1):74-84. Feng L W, Guo Q Y, 1983. The fluctuation of autumn rain in Southwest China[J]. Geogr Res, 2(1):74-84(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).
- 高琦,徐明,彭涛,等,2020. 汉江流域极端面雨量时空分布特征[J]. 暴雨灾害,39(5):516-523. Gao Q, Xu M, Peng T, et al, 2020. Spatial and temporal distribution characteristics of extreme area rainfall in Hanjiang River Basin[J]. Torr Rain Dis, 39(5):516-523(in Chinese).
- 韩晋平,张人禾,苏京志,2013. 中国北方秋雨与热带中太平洋海表冷却的关系[J]. 大气科学,37(5):1059-1071. Han J P, Zhang R H, Su J Z, 2013. Relationship between cooling of tropical Pacific sea surface temperature and autumn precipitation in China[J]. Chin J Atmos Sci, 37(5):1059-1071(in Chinese).
- 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. Improved index and climatological characteristics of the autumn rain in western China[J]. Chin J Atmos Sci, 38(1):32-44(in Chinese).
- 况雪源,张耀存,2006. 东亚副热带西风急流位置异常对长江中下游夏季降水的影响[J]. 高原气象,25(3):382-389. Kuang X Y, Zhang Y C, 2006. Impact of the position abnormalities of East Asian subtropical westerly jet on summer precipitation in middle-lower reaches of Yangtze River[J]. Plateau Meteor, 25(3):382-389(in Chinese).
- 李传浩,刘宣飞,李智,等,2015. 华西秋雨区域性极端降水的环流特征[J]. 热带气象学报,31(4):526-535. Li C H, Liu X F, Li Z, et al, 2015. Circulation patterns of regional mean daily precipitation extremes of persistent autumn rain over Western China[J]. J Trop Meteor, 31(4):526-535(in Chinese).
- 李多,顾薇,2022. 2021年秋季我国北方地区降水异常偏多的特征及成因分析[J]. 气象,48(4):494-503. Li D, Gu W, 2022. Analysis of characteristics and causes of precipitation anomalies over northern China in autumn 2021[J]. Meteor Mon, 48(4):494-503(in Chinese).
- 李玉荣,张俊,张潇,2017. 2017年汉江秋季洪水特性及预报调度分析[J]. 人民长江,48(24):1-5, 10. Li Y R, Zhang J, Zhang X, 2017. Autumnal flood analysis and forecast operation of Hanjiang River in 2017[J]. Yangtze River, 48(24):1-5, 10(in Chinese).
- 梁健洪,1989. 华西秋雨的时空分布[J]. 地理科学,9(1):51-59, 96. Liang J H, 1989. The regional and seasonal distribution of autumn rain in West China[J]. Sci Geogr Sin, 9(1):51-59, 96(in Chinese).
- 梁萍,周兵,马悦,等,2019. 2017年秋季华西秋雨的多时间尺度变化特征及成因分析[J]. 气象,45(8):1104-1112. Liang P, Zhou B, Ma Y, et al, 2019. Characteristics of variability on multiple time-scales and cause analysis of autumn rainfall in West China during 2017[J]. Meteor Mon, 45(8):1104-1112(in Chinese).
- 刘佳,马振峰,杨淑群,等,2015. 印度洋偶极子和华西秋雨的关系[J]. 高原气象,34(4):950-962. Liu J, Ma Z F, Yang S Q, et al, 2015. Relationship between Indian Ocean dipole and autumn rainfall in West China[J]. Plateau Meteor, 34(4):950-962(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. Hydrological characteristics of Dujiatai diversion in autumn flood season of Hanjiang River in 2011[J]. Yangtze River, 43(S2):48-50(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).

- 陆晓娟,房佳蓓,杨修群,等,2022.中国东部夏季季节内降水异常及其伴随的热带和中高纬度大气环流演变特征[J].气象学报,80(1):1-20. Lu X J, Fang J B, Yang X Q, et al, 2022. Intra-seasonal summer precipitation anomaly over eastern China and evolution characteristics of its associated tropical and mid-to-high latitudes atmospheric circulation[J]. Acta Meteor Sin, 80(1): 1-20 (in Chinese).
- 罗霄,李栋梁,王慧,2013.华西秋雨演变的新特征及其对大气环流的响应[J].高原气象,32(4):1019-1031. Luo X, Li D L, Wang H, 2013. New evolution features of autumn rainfall in West China and its responses to atmospheric circulation[J]. Plateau Meteor, 32(4): 1019-1031 (in Chinese).
- 彭韵萌,徐海明,2021.2017年华西秋雨异常偏多的环流特征及其成因分析[J].气象科学,41(3):363-373. Peng Y M, Xu H M, 2021. Circulation features and causes of the anomalous rainfall over the West China in 2017[J]. Sci Meteor Sin, 41(3): 363-373 (in Chinese).
- 王春学,马振峰,王佳津,等,2015.华西秋雨准4年周期特征及其与赤道太平洋海表温度的关系[J].大气科学,39(3):643-652. Wang C X, Ma Z F, Wang J J, et al, 2015. The characteristics of Huaxi autumn rain and its relationship with sea surface temperatures over the equatorial Pacific[J]. Chin J Atmos Sci, 39(3): 643-652 (in Chinese).
- 吴瑶,杜良敏,2016.副高脊线的月内振荡对汉江上游秋汛的影响[J].气象,42(11):1379-1386. Wu Y, Du L M, 2016. Impact of ridge line of the western Pacific subtropical high on the upper reaches of Hanjiang River in autumn flood season[J]. Meteor Mon, 42(11): 1379-1386 (in Chinese).
- 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. Xiao Y, Du L M, Ren Y J, 2013. Study on the relationship between typical drought/flood years in autumn flood season in Hanjiang River Basin and preceding sea surface temperature[J]. Torr Rain Dis, 32(2): 182-187 (in Chinese).
- 徐晶,姚学祥,2007.流域面雨量估算技术综述[J].气象,33(7): 15-21. Xu J, Yao X X, 2007. Watershed areal precipitation estimation technology: a review[J]. Meteor Mon, 33(7): 15-21 (in Chinese).
- 殷淑燕,黄春长,2012.汉江上游近50a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]. Bull Soil Water Conserv, 32(1): 19-25 (in Chinese).
- 俞亚勋,王式功,钱正安,等,2013.夏半年西太副高位置与东亚季风雨带(区)的气候联系[J].高原气象,32(5):1510-1525. Yu Y X, Wang S G, Qian Z A, et al, 2013. Climatic linkages between SH-WP position and EASM rainy-belts and-areas in east part of China in summer half year[J]. Plateau Meteor, 32(5): 1510-1525 (in Chinese).
- 张琼,吴国雄,2001.长江流域大范围旱涝与南亚高压的关系[J].气象学报,59(5):569-577. Zhang Q, Wu G X, 2001. The large area flood and drought over Yangtze River Valley and its relation to the South Asia high[J]. Acta Meteor Sin, 59(5): 569-577 (in Chinese).
- 赵佳玉,马振峰,范广洲,2016.热带大气季节内振荡对华西秋雨的影响[J].高原气象,35(6):1487-1497. Zhao J Y, Ma Z F, Fan G Z, 2016. Impact of the Madden-Julian oscillation on autumn rainfall in West China[J]. Plateau Meteor, 35(6): 1487-1497 (in Chinese).
- 郑然,刘嘉慧敏,马振峰,2018.夏季西太平洋暖池热含量对华西秋雨的影响及可能的物理机制[J].气象学报,76(5):714-725. Zheng R, Liu J H M, Ma Z F, 2018. Impacts of the summertime warm pool in the West Pacific on Huaxi autumn rain and its possible physical mechanism[J]. Acta Meteor Sin, 76(5): 714-725 (in Chinese).
- 中国气象局,2019.中国雨季监测指标 华西秋雨:QX/T 496—2019[S].北京:气象出版社. China Meteorological Administration, 2019. Monitoring indices of rainy season in China-autumn rain of West China: QX/T 496—2019[S]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).

(本文责编:何晓欢)