

白鹤滩水电站干热河谷区2018—2021年湿季暴雨大风的环流形势特征研究

张敏^{1,2} 王汉涛³ 白爱娟¹ 张强^{1,4} 程志刚⁵ 刘雪宇⁴

(1 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225; 2 中国气象局兰州干旱气象研究所, 兰州 730020; 3 中国长江电力股份有限公司, 智慧长江与水电科学湖北省重点实验室, 宜昌 443000; 4 张掖市气象局, 张掖 734000; 5 中国民用航空飞行学院广汉分院, 广汉 618307)

摘要: 白鹤滩水电站位于金沙江下游的干热河谷区, 大风天气频发, 且湿季经常伴随强降雨的发生。为了探究该特殊地形下湿季暴雨大风发生时大气环流及低空急流的演变特征, 利用地面观测资料和ERA5再分析资料, 分析了2018—2021年白鹤滩坝区湿季13次暴雨大风事件的形成机理。结果表明: 1) 依据500 hPa环流形势特征可将该地区13次暴雨大风过程分为低槽东移型、副热带高压型、低槽和副热带高压共同影响型, 以及热带低压型。2) 4类暴雨大风过程700 hPa均伴随显著的低空急流发展, 表现为受夏季风影响的西南风急流呈现出东移减弱的趋势, 副热带高压西北侧的偏西风急流和偏东南风急流, 以及孟加拉湾地区热带低压北侧的偏南风急流, 在暴雨过程中起到水汽输送的作用。3) 根据暴雨大风的关键影响系统和低空急流演变, 建立白鹤滩水电站坝区4类暴雨大风的概念模型。暴雨大风主要受西风槽东移的影响, 以及在副热带高压边缘和热带低压北侧充沛水汽输送的条件下发生, 低空急流对暴雨大风的触发与维持起到重要作用。

关键词: 白鹤滩水电站, 暴雨大风, 环流形势, 低空急流, 概念模型

中图分类号: P4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2025.01.005

Circulation Characteristics of Wet Season Rainstorm and Gale in the Dry-Hot River Valley of Baihetan Hydropower Station

Zhang Min^{1,2}, Wang Hantao³, Bai Aijuan¹, Zhang Qiang^{1,4}, Cheng Zhigang⁵, Liu Xueyu⁴

(1 College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225; 2 Lanzhou Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020; 3 Hubei Key Laboratory of Intelligent Yangtze and Hydroelectric Science, China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443000; 4 Zhangye Meteorological Bureau, Zhangye 734000; 5 Civil Aviation Flight University of China Guanghan Flight College, Guanghan 618307)

Abstract: The Baihetan Hydropower Station (BHS) is located in the dry-hot river valley downstream of the Jinsha River, where frequent windy weather and rainstorm during the wet season are common. In order to explore the characteristics of the evolution of atmospheric circulation and low-level jet during wet season rainstorm and gale events in this particular terrain, ground observation data and ERA5 reanalysis data are used to analyze the formation mechanism of 13 wet season rainstorm and gale events in the dam area of BHS from 2018 to 2021. The results show that based on the characteristics of the 500 hPa circulation pattern, the 13 rainstorm and gale events can be classified into 4 types: eastward-moving low trough type, subtropical high type, joint influence of low trough and subtropical high type, and tropical depression type. In all 4 types of rainstorm and gale events, there is always a significant development of low-level jets at 700 hPa, characterized by the weakening and eastward movement of the southwest jet stream due to the influence by the summer monsoon. The westward jet stream and the southeastward jet stream on the northwest side of the subtropical high as well as the southward jet stream on the northern side of the tropical depression in the Bay of Bengal are responsible for water vapor transport during rainstorm events. Based on the key influencing systems and low-level jet evolution, conceptual models of the 4 types of rainstorm and gale events in the dam area of BHS are established. The occurrence of the 4 types of rainstorm and gale events is mainly influenced by the eastward movement of the westerly trough, as well as favorable conditions of abundant water vapor transport on the edge of the subtropical high and the northern side of the tropical depression. Low-level jets play an important role in triggering and maintaining rainstorm and gale.

Keywords: Baihetan Hydropower Station (BHS), rainstorm and gale, circulation situation, low-level jet, conceptual model

收稿日期: 2023年12月12日; 修回日期: 2024年5月19日
第一作者: 张敏 (1994—), Email: 2506435039@qq.com
通信作者: 白爱娟 (1971—), Email: baiaj@cuit.edu.cn
资助信息: 国家重点研发计划(2024YFC3014401); 国家自然科学基金项目(U2242202); 陕西省科技厅自然科学面上项目(2023-JC-YB-279)

0 引言

白鹤滩水电站位于金沙江下游的干热河谷区,坝址在四川省凉山彝族自治州宁南县和云南省昭通市巧家县境内,上游与乌东德梯级电站相接,下游尾水与溪洛渡梯级电站相连,是金沙江下游河段四个水电梯级中的第二梯级。水电站所处的河谷地形近似南北向,东西两侧高,中间低,上游为“U”形谷湖泊,下游为“V”形河谷,这种独特地形使得水电站河谷“狭管效应”显著^[1]。在干热气候背景和峡谷地形的共同影响下,水电站坝区湿季对流大风和强降水频发,这种极端天气对水电站的安全稳定运行构成严重威胁。

夏季的大风通常与强降水天气密切相关,在这种极端天气条件下,不仅会发生强降水,而且还伴随强劲的大风。暴雨是中国主要的气象灾害之一^[2],学者们已对暴雨的影响系统做了较多研究^[3]。Miller^[4]和Crisp^[5]在分析大量强对流个例基础上总结出天气型识别方法。陈春艳等^[6]对新疆天山北坡特大暴雨进行了研究,结果表明暴雨过程与中亚低槽存在密切联系,在暴雨天气过程中,槽前的西南气流是水汽接力输送的主要通道,对暴雨的触发和维持起到了关键作用。李超等^[7]对贺兰山东麓20次暴雨过程的形成机理进行了综合分析,结果表明该地区暴雨主要受高空西风槽和西太平洋副热带高压的影响。田莹等^[8]对江南暖区2008—2018年65次暴雨过程分析后指出,影响暖区暴雨的主要天气和次天气尺度系统主要包括高空低压槽、副热带高压、低空切变线、低空急流、超低空急流、冷锋以及地面辐合线等。肖递祥等^[9]和张芳丽等^[10]的研究表明,四川盆地的极端暴雨过程主要表现为500 hPa为东高西低型和两高切变型的环流背景形势下,由500 hPa中纬度地区东移低压槽、西伸的西太平洋副热带高压、对流层中低层的西南低空急流,以及低层切变线等影响。肖红茹等^[11]根据天气形势和影响系统,将四川盆地暖区暴雨分为西南涡型、副热带高压边缘型、西南急流型和东南风型。何丽华等^[12]研究表明,江南暖区暴雨主要受低涡切变线、低空急流、地形等影响。段中夏^[13]研究表明,雷雨大风过程中,高空冷槽叠加低层暖空气,造成较强的层结不稳定,对流沿地面辐合线尾向传播,导致对流西南向发展。王丽芳等^[14]针对暴雨的热力和动力学条件与机理做了研究。朱娟等^[15]研究表明,对流强降水过程中500 hPa呈两槽一脊或西太平洋副热带高压西伸,700 hPa和850 hPa存在急流和大风核。还有研究^[16]表明,低空西南风急流是暴雨产生的重要影响因子。低空急流不仅是强降水事件中水汽输送的主要通道^[17-18],而且还为

暴雨提供了充足的水汽和有利的背景场^[19]。此外,低空急流对暴雨还有触发作用^[20],统计结果显示,低空急流与暴雨发生的相关系数约达0.8^[21]。当双低空急流协同作用时,其产生的上升运动也是暴雨的重要触发机制^[22]。

有关暴雨的研究较多,且大多是针对区域性暴雨。白鹤滩水电站坝区干季大风持续,风力等级高,学者们对干季大风的研究已十分充分,但对湿季暴雨伴随大风天气,尤其是对干热河谷地区的暴雨伴随大风的关键天气系统,以及不同高度系统的配合研究较少。由于白鹤滩水电站坝区地理位置特殊,暴雨大风日集中,突发性强,对该地区灾害天气的预报、预警尤为重要,例如2012年6月28日白鹤滩暴雨大风天气诱发的山洪泥石流造成41人遇难或失踪^[23-24]。本研究选取白鹤滩水电站坝区近年来的湿季暴雨大风事件,根据对暴雨大风事件的环流形势分析,研究影响系统及高低空配合和低空急流的演变特征。

1 资料与方法

所用资料包括:1)地面观测资料:选取白鹤滩水电站坝区稳定性和完整性较好的5个气象站的地面观测资料,分别为新田、马脖子、葫芦口大桥、荒田水厂和上村梁子营地站,时间为2018—2021年湿季(5—10月)的逐时数据和日数据。2)再分析资料:使用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的ERA5全球再分析资料,时间分辨率为逐时,水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,垂直方向上共37层。文中使用的气象要素为位势高度、水平风场、温度和湿度等;时间均为北京时。

根据沈浒英等^[25]提出的金沙江下段流域的暴雨统计标准:单站24 h降雨量 ≥ 50 mm定义为一个暴雨日。据此标准,文中将至少有一个站24 h累计降雨量达到暴雨标准(24 h累计降雨量 ≥ 50 mm)的降雨过程称为一次暴雨过程,同时,至少有一个站日极大风速 > 13.9 m/s,确定为一次暴雨大风过程。2018—2021年湿季共筛选出13次暴雨大风事件。

2 暴雨大风特征

统计13个个例的暴雨日期、持续小时数、最大过程降雨量、最大小时降雨量和日极大风速,结果见表1。坝区雨日集中,主要集中在6—7月和9月;暴雨持续时间均超过6 h,最长为15 h;坝区最大过程降雨量出现在马脖子站,为119.6 mm;坝区极端短时强降雨过程的最大小时降雨量在新田站(60.1 mm),日极大风速最大在葫芦口大桥站(21.7 m/s)。坝区暴雨大风的突发性和极端性强,如2021年7月5日的暴雨过

表1 白鹤滩水电站坝区2018—2021年湿季暴雨大风过程概况

Table 1 Overview of wet season rainstorm and gale processes in the dam area of BHS from 2018 to 2021

个例	时间/BT	持续时间/h	最大过程降雨量/mm	最大小时降雨量/mm	日极大风速/(m/s)
个例1	2018年5月17日15:00—19:00	4	60.1(新田)	60.1(新田)	13.9(新田)
个例2	2018年6月21日22:00—22日08:00	10	60.1(荒田水厂)	25.6(马脖子)	21.2(葫芦口大桥)
个例3	2018年7月27日22:00—28日07:00	9	67.6(新田)	48.1(新田)	16.7(新田)
个例4	2019年9月8日02:00—14:00	12	50.0(新田)	32.0(新田)	16.7(马脖子)
个例5	2020年6月30日00:00—13:00	13	78.8(葫芦口大桥)	23.8(荒田水厂)	21.7(葫芦口大桥)
个例6	2020年7月9日02:00—09:00	7	82.4(葫芦口大桥)	30.8(葫芦口大桥)	14.3(马脖子)
个例7	2020年9月5日23:00—6日13:00	14	97.0(马脖子)	43.1(马脖子)	15.2(葫芦口大桥)
个例8	2020年9月15日01:00—12:00	11	78.1(葫芦口大桥)	39.4(葫芦口大桥)	15.7(新田)
个例9	2020年9月16日01:00—07:00	6	51.6(葫芦口大桥)	24.1(葫芦口大桥)	15.7(新田)
个例10	2021年6月24日23:00—25日09:00	10	70.6(荒田水厂)	44.3(荒田水厂)	14.4(马脖子)
个例11	2021年7月5日01:00—16:00	15	119.6(马脖子)	19.3(马脖子)	16.7(新田)
个例12	2021年9月2日01:00—10:00	9	72.7(新田)	37.0(荒田水厂)	16.0(新田)
个例13	2021年10月6日23:00—7日11:00	12	89.9(上村梁子营地)	25.4(上村梁子营地)	15.7(新田)

程,持续了15 h,过程降雨量达到119.6 mm。

白鹤滩水电站坝区为南北纵向的深切河谷,天气局地性变化大,对比分析表1中13次暴雨大风过程在5个站的暴雨发生频次和风向、风速差异(图1)。新田、马脖子和荒田水厂站各出现暴雨7次,葫芦口大桥和上村梁子营地站各出现4次。分析各站日极大风速的最大值,新田站为16.7 m/s,马脖子站为16.7 m/s,葫芦口大桥站为21.7 m/s,荒田水厂站为13.5 m/s,上村梁子营地站为14.4 m/s。坝区暴雨大风的局地性强,降雨次数以下游的荒田水厂、新田和马脖子站最多,上游葫芦口大桥风速最大。分析最大风速的风向特

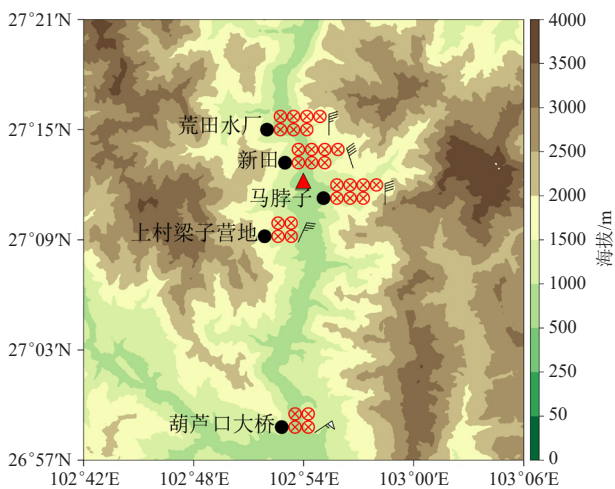


图1 白鹤滩水电站坝区13次暴雨大风过程的暴雨位置、各站最大风速及风向(▲:白鹤滩水电站大坝位置;⊗:一次暴雨大风过程)

Fig. 1 Rainstorm location, maximum wind speed and maximum wind direction of each weather station during 13 rainstorm and gale processes in the dam area of BHS (▲: the location of the BHS dam; ⊗: a rainstorm and gale process)

征,大坝及下游为西北偏北,上村梁子营地为东北,葫芦口大桥为偏东;受峡谷地形的影响,低空为顺着峡谷的偏北风,上游的葫芦口大桥转为东北风。

由于白鹤滩水电站坝区天气日变化显著,分析13次暴雨大风过程中平均降雨次数和各站小时最大降雨量的日变化(图2)。坝区暴雨大风事件中,降雨主要发生在01:00—09:00,9个时次的平均降雨次数均超过45次,10:00后降雨次数迅速减少,17:00—18:00无降雨,由此可见,坝区暴雨大风日变化显著,以夜间的强风降雨为主。分析13次暴雨大风事件小时最大降雨量的日变化,其中有14个时次小时最大降雨量>20 mm,19:00最大小时降雨量为60.1 mm,属于极端短时强降水过程,故白鹤滩水电站坝区暴雨过程剧烈,短时强降雨频发。

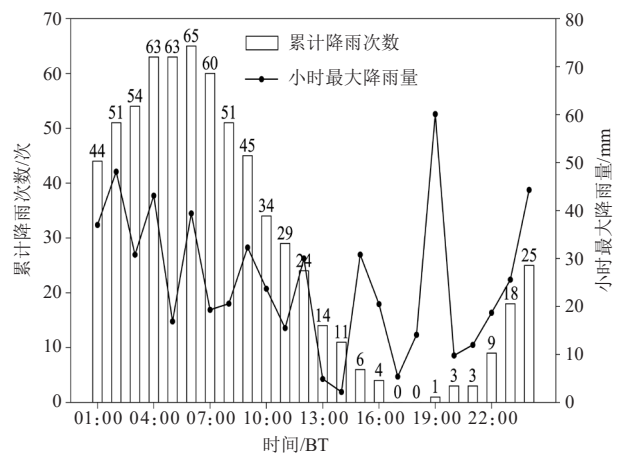


图2 白鹤滩水电站坝区13次暴雨大风过程5个站的累计降雨次数和小时最大降雨量日变化

Fig. 2 Diurnal variation of total precipitation times and maximum hourly rainfall at 5 stations in 13 rainstorm and gale processes in the dam area of BHS

3 暴雨大风的环流形势分析

3.1 关键影响系统

利用ERA5再分析资料，分析13次暴雨大风过程各高度上的环流系统，总结暴雨大风的关键影响系统，并进行分类。如表2所示，白鹤滩水电站坝区暴雨大风过程200 hPa上主要影响系统为南亚高压，500 hPa上主要天气系统有高空低压槽、副热带高压和热带低压，700 hPa上主要受低空急流的影响，低层主要天气系统有气旋和锋面。

表2 白鹤滩水电站坝区13次暴雨大风过程的影响天气系统
Table 2 The impact weather systems of the 13 rainstorm and gale processes in the dam area of BHS

个例	200 hPa	500 hPa	700 hPa	地面层
个例1	西风槽	低槽东移	西南风急流	气旋
个例2	南亚高压	低槽东移	西南风急流	气旋
个例4	南亚高压	低槽+副热带高压	副热带高压西北侧西南风急流	气旋
个例5	南亚高压	低槽+副热带高压	副热带高压西北侧西南风急流	锋面
个例6	南亚高压	低槽+副热带高压	副热带高压西北侧西南风急流	锋面
个例7	南亚高压	低槽+副热带高压	-	锋面
个例8	南亚高压	副热带高压	副热带高压西侧偏东南风急流	锋面
个例9	南亚高压	副热带高压	副热带高压西侧偏东南风急流	锋面
个例11	南亚高压	副热带高压	副热带高压西侧偏东南风急流	锋面
个例12	南亚高压	副热带高压	副热带高压西侧偏东南风急流	气旋
个例13	南亚高压	副热带高压	副热带高压西侧偏东南风急流	锋面
个例3	南亚高压	热带低压	热带低压北侧偏南风急流	锋面
个例10	南亚高压	热带低压	热带低压北侧偏南风急流	气旋

注：--代表无急流或强风速带系统。

对13次暴雨大风过程进行综合分析，以确定其关键影响系统。在这13次暴雨大风过程中，观察到500 hPa高空环流形势存在明显差异。此外，低压槽、副热带高压和热带低压等关键系统对暴雨大风的形成

起着至关重要的作用。这和“四川盆地东部暴雨事件与西太平洋副热带高压偏南、西风槽的位置偏东有关”^[26]的结论一致。对13次暴雨大风个例进行天气学分析和合成分析^[27]，可将其概括为4类：第一类为低槽东移型，共出现2次，主要受高空低槽东移的影响，坝区位于高空槽前；第二类为低槽和副热带高压共同影响型，坝区受高空低槽和副热带高压共同影响，共出现4次；第三类为副热带高压型，主要受副热带高压影响，共出现5次，坝区位于副热带高压以西，副热带高压带来的暖湿气流与东移南下的冷空气交汇，产生暴雨大风；第四类为热带低压型，主要受热带低压或气旋的影响，共出现2次。

3.2 各类环流形势特征分析

从表1中挑选低槽东移型、副热带高压型、低槽和副热带高压共同影响型以及热带低压型这4种环流形势的典型个例，分别为2018年6月21—22日、2020年9月15日、2019年9月8日以及2018年7月27—28日的暴雨大风过程。通过对这4个典型个例进行分析，进而探讨各类暴雨大风过程的环流形势特征和差异。

3.2.1 低槽东移型

2018年6月21日22:00—22日08:00，白鹤滩水电站坝区出现暴雨大风过程。分析此次暴雨大风过程的500 hPa环流形势，在21日23:00的环流中（图3a），四川盆地南部、云南以及贵州地区有西风槽发展，坝区处于西风槽前的西南风控制区；同时，四川以北地区有高压脊发展，形成了显著的北脊南槽形势。22日02:00（图3b），低槽东移发展，坝区转为低槽后部，受高空偏北风控制；在对流层中层，西风带短波槽东移过程中，槽前不断有南下的冷空气与高原东南侧的

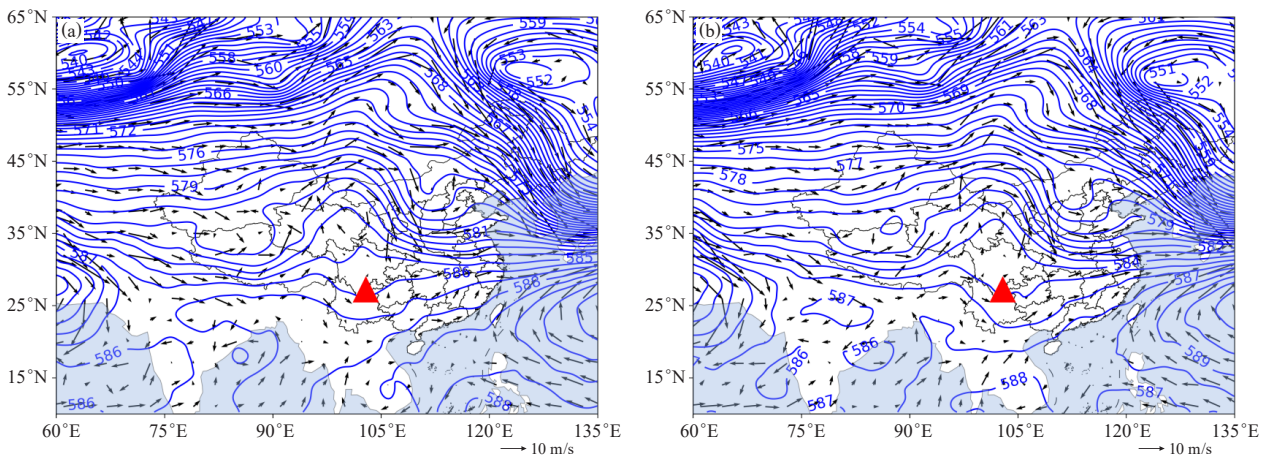


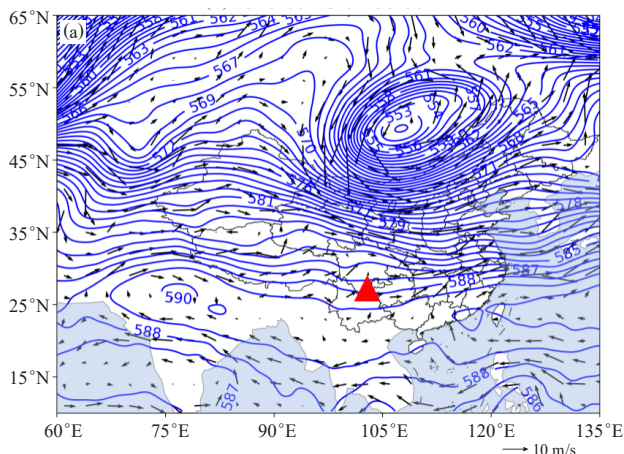
图3 2018年6月21日23:00 (a) 和22日02:00 (b) 的500 hPa位势高度场 (蓝色等值线, 单位: dagpm) 及风场 (矢量) (▲: 白鹤滩水电站坝区位置)

Fig. 3 The 500 hPa geopotential height field (blue contour line, unit: dagpm) and wind field (vector) at 23:00 BT on 21 June (a) and 02:00 BT on 22 June (b) 2018 (▲: the position of the dam area of BHS)

暖湿气流交汇,使槽前上升运动加强,有利于暴雨大风的形成。低槽东移型暴雨大风共有2个个例,其中2018年5月17日的天气形势也呈现出北脊南槽的特点,短波槽东移,副热带高压稳定存在(图略)。

3.2.2 副热带高压型

夏季强对流暖区暴雨的主要系统以副热带高压环流为主,田莹等^[8]研究表明,暴雨区常位于副热带高压内部或距离副热带高压200 km以内受其影响大的区域。以白鹤滩水电站坝区2020年9月15日01:00—12:00的副热带高压型暴雨大风过程为例,500 hPa上亚欧大陆中、高纬度地区呈现出两槽一脊的稳定环流形势。降雨开始时(图4a),副热带高压588 dagpm等值线的西脊点位于(25°N, 60°E)附



近,中心大于590 dagpm,控制华南地区。随着降雨的持续,副热带高压维持(图4b),588 dagpm等值线的西脊点东移至(25°N, 70°E)附近,中心大于589 dagpm。在环流图上,蒙古高原东部的一个明显低涡向南发展影响我国北方地区,高压脊位于贝加尔湖西侧,冷空气不断沿高压脊南下。南下的冷空气与副热带高压系统带来的暖湿空气交汇于白鹤滩水电站坝区,有利于产生强对流天气。副热带高压型暴雨大风共有5个个例,其中2020年9月15日和16日的天气形势相似,同属一个过程;在2021年7月5日和9月2日的个例中,坝区均位于副热带高压内部,588 dagpm等值线西脊点稳定在(25°N, 75°E)附近,中心分别超过593 dagpm和591 dagpm;而2021年10月6日,副热带高压呈条状分布,控制我国南方地区(图略)。

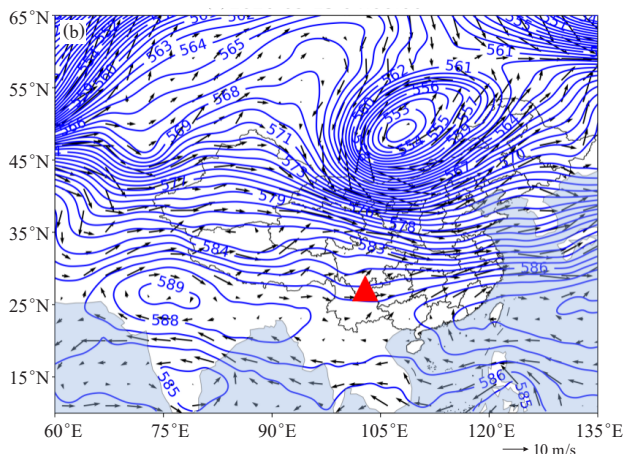


图4 同图3, 但为2020年9月15日01:00 (a) 和04:00 (b)

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for 01:00 BT (a) and 04:00 BT (b) on 15 September 2020

3.2.3 低槽和副热带高压共同影响型

在2019年9月8日02:00—14:00的暴雨大风过程中,500 hPa上低纬度地区的副热带高压向北伸展,588 dagpm等值线延伸至坝区南侧,副热带高压北侧有低槽向东发展,使坝区的位势高度等值线变密集;同时东亚大槽在中国东海和南海不断加深,形成显著的“东高西低”环流形势(图5a);而在印度和孟加拉湾地区有低压气旋发展。随着降雨的持续,副热带高压维持,低槽进一步加深(图5b);同时,印度和孟加拉湾地区的低压气旋也在增强。在这样的环流背景下,低槽东移加深带来的冷空气与副热带高压西侧的暖湿空气在四川与云南交界地区交汇,直接导致强降雨和大风天气发生。低槽和副热带高压共同影响型共有4个个例,除上述个例外,其余3个个例也主要受低槽和副热带高压的影响,副热带高压带来的暖湿气流与东移南下的冷空气交汇,产生强降雨大风(图略)。

3.2.4 热带低压型

在2018年7月27日22:00—28日07:00的暴雨大风

过程中,降雨开始时,500 hPa中南半岛东部有热带低压发展,其中心强度小于586 dagpm(图6a)。随着降雨的持续,坝区南侧的热带低压不断增强,中心强度小于584 dagpm(图6b)。受热带低压影响,其东侧的东南风显著增强,引导中国南海的东南暖湿气流向坝区输送,并在坝区产生强烈的辐合,为暴雨和大风的形成提供了有利条件。热带低压型暴雨大风过程共有两个个例,其环流形势相似,主要受热带低压的影响(图略)。

3.3 低空急流对湿季暴雨大风天气的影响

杨小波等^[27]指出,东亚副热带西风急流南北位置异常对川渝降雨有重要影响。通过分析白鹤滩水电站坝区13次暴雨大风过程700 hPa的环流形势,发现在这些过程中,坝区周边500 km范围内常存在风速>12 m/s的急流带,即暴雨大风过程往往伴随对流层中的低空急流。尽管有些个例的风速未达到12 m/s,但风速带相对于周边地区明显偏强。根据表2可知,

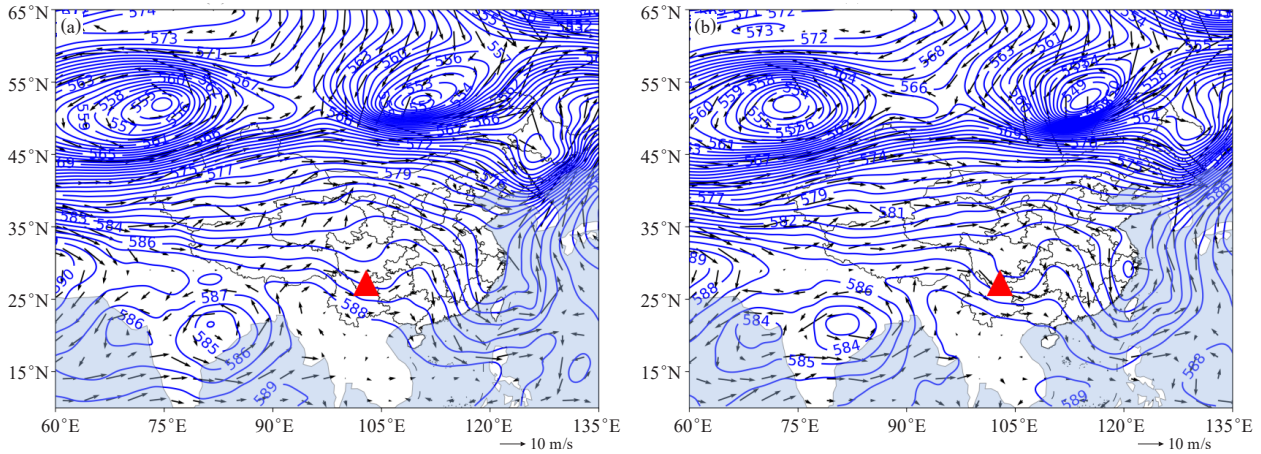


图5 同图3, 但为2019年9月8日02: 00 (a) 和08: 00 (b)
Fig. 5 Same as Fig. 3, but for 02: 00 BT (a) and 08: 00 BT (b) on 8 September 2019

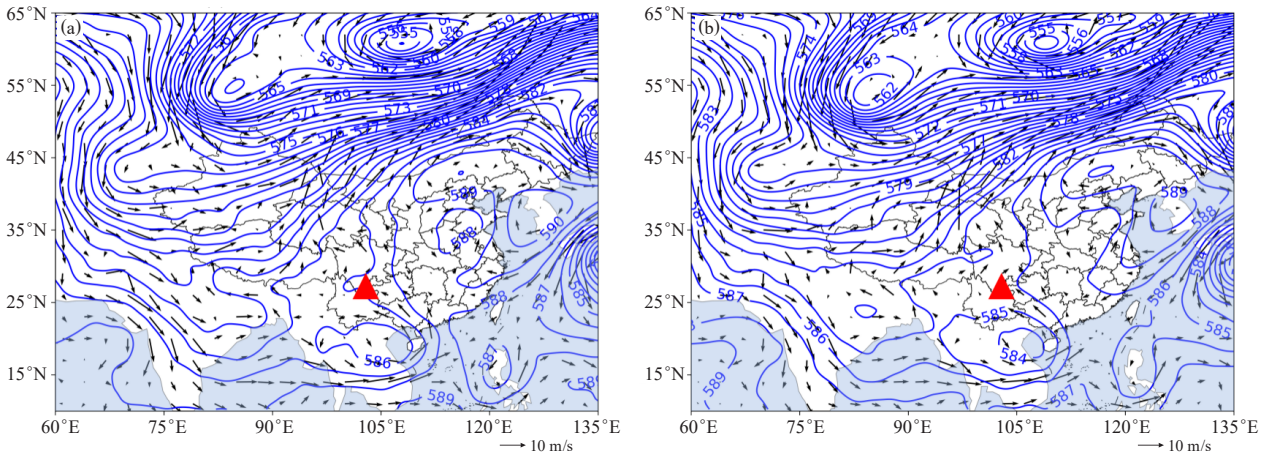


图6 同图3, 但为2018年7月27日23: 00 (a) 和28日03: 00 (b)
Fig. 6 Same as Fig. 3, but for 23: 00 BT on 27 July (a) and 03: 00 BT on 28 July (b) 2018

白鹤滩水电站坝区的暴雨大风所伴随的低空急流可以分为3类: 第一类是主要受西南季风影响的西南风急流, 其特点为急流东移并逐渐减弱; 第二类为副热带高压西北侧的偏西风急流和偏东南风急流, 与副热带高压的位置和强度密切相关; 第三类是热带低压北侧的偏南风急流, 这类急流在暴雨大风发生时会在坝区北侧增强。这些不同天气系统作用下的急流起到输送水汽和引起低层风场辐合的作用, 这些低空急流的发展演变与坝区暴雨大风的形成与维持密切相关。

为了进一步深入研究低空急流在白鹤滩水电站坝区暴雨大风过程中的作用, 文中选取暴雨大风的4类环流形势中的典型个例, 分析暴雨大风过程中低空急流的演变特征, 并探究其在水汽输送方面的作用。

3.3.1 西南风急流

在2018年5月17日的低槽东移型暴雨大风天气过程中, 16: 00降雨开始时, 700 hPa的急流中心位于坝区南侧, 中心风速超过20 m/s, 呈现出强的西南风特

征(图7a)。与此同时, 水汽通量沿着西南方向输送到坝区, 低空水汽辐合大值区位于四川和云南的交界处, 白鹤滩水电站坝区处于这一水汽辐合区的范围内(图7b)。随着低槽的东移, 水汽强辐合中心逐渐影响到坝区, 西南暖湿气流和冷空气在此交汇, 使水汽辐合进一步增强。这种水汽输送与上升运动的配合, 使降雨得以维持并发展, 暴雨大风天气发生。到20: 00, 虽然西南风的低空急流东移减弱, 水汽通量也有所减小, 但仍然存在明显的水汽辐合, 坝区此次降雨过程结束(图略)。

3.3.2 副热带高压西北侧的低空急流

在2021年9月2日的副热带高压型暴雨大风天气过程中, 700 hPa环流图上, 低空急流主要为副热带高压西北侧的偏西和偏东南风急流。此时, 低空急流中心出现在副热带高压北侧, 而白鹤滩水电站坝区位于副热带高压西伸脊点处。当坝区暴雨大风天气开始时, 副热带高压西侧的偏东南风开始明显增强(图8a)。随

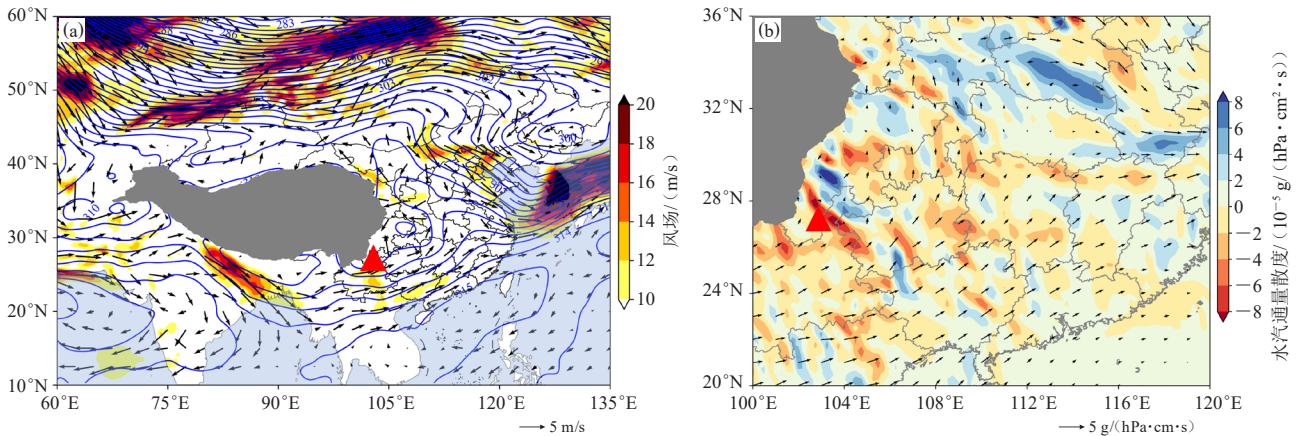


图7 2018年5月17日16: 00的700 hPa位势高度场 (蓝色等值线, 单位: dagpm) 和风场 (矢量, 色阶大于10 m/s) (a), 以及水汽通量 (矢量) 和水汽通量散度 (色阶) (b) (▲: 白鹤滩水电站坝区位置; 灰色阴影: 青藏高原)

Fig. 7 The 700 hPa geopotential height field (blue contour lines, unit: dagpm) and wind field (vector, shaded > 10 m/s) (a), and water vapor flux (vector) and water vapor flux divergence (colored shaded) (b) at 16: 00 BT on 17 May 2018 (▲: the position of the dam area of BHS; shades of grey: the Tibetan Plateau)

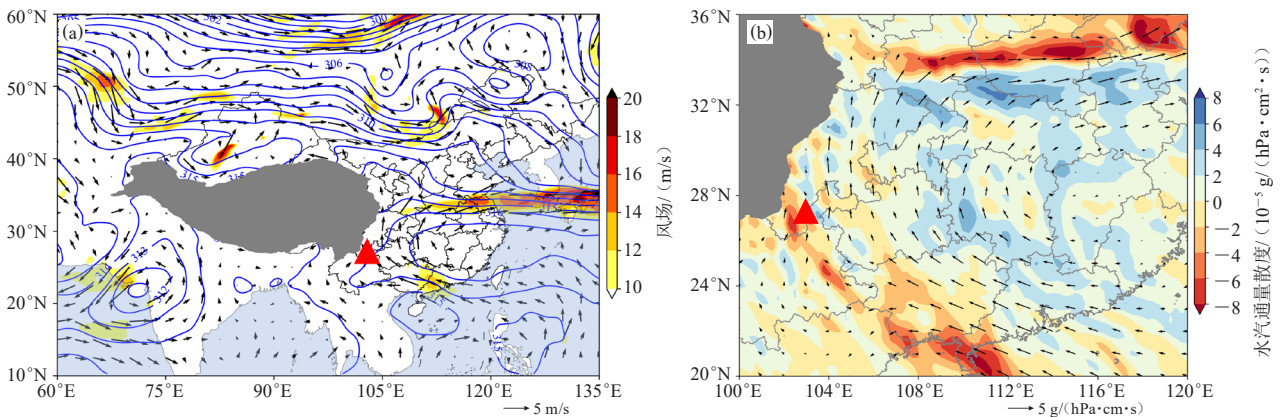


图8 同图7, 但为2021年9月2日01: 00

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for 01: 00 BT on 2 September 2021

着降雨的持续, 低空急流范围不断扩大, 副热带高压北侧的急流开始向西推进。这一过程中, 坝区东南侧的急流区逐渐向西北方向移动, 水汽从中国南海沿着东南路径源源不断地输送到坝区, 且坝区位于水汽辐合区, 使得坝区的暴雨天气进一步增强 (图8b)。到11: 00, 坝区东南侧的急流区逐渐消失, 副热带高压北侧的低空急流也开始向东撤退。随着水汽通量的减小, 坝区的水汽通量散度变为正值, 降雨最终结束 (图略)。因此, 在副热带高压型暴雨大风天气的发展过程中, 副热带高压南侧急流核的增强以及偏东南急流的加强, 使得中国南海暖湿气流源源不断地输送到坝区, 是引发暴雨大风天气的关键因素。

在2020年7月9日的暴雨大风天气中, 700 hPa环流图上, 低空急流主要为副热带高压西北侧的偏西南风急流。9日02: 00降雨开始时, 坝区南侧存在强西南风低空急流, 急流中心风速达到15 m/s, 这股低空急

流一直维持较强的强度, 为降雨的持续提供了有利动力条件 (图9a); 与此同时, 水汽通量主要沿着西南方向输送到坝区, 低空水汽辐合大值区位于四川和云南的交界处, 白鹤滩水电站坝区处于这一水汽辐合区内 (图9b), 此次暴雨大风过程与西南暖湿气流的输送密切相关。到10: 00, 坝区的低空急流强度开始减弱, 急流中心东移, 水汽通量和水汽通量散度仍维持一定强度, 降雨过程结束 (图略)。

3.3.3 热带低压北侧的偏南风急流

白鹤滩水电站坝区热带低压型暴雨大风天气以2018年7月27日为例。如图10a所示, 低空急流出现在热带低压的北侧, 22: 00降雨开始时, 热带气旋北侧出现大风区; 与此同时, 水汽通量的主要传输方向为偏南, 水汽被源源不断地从孟加拉湾输送到坝区, 水汽辐合大值区在热带低压北侧, 为暴雨大风的发生提供了充足的水汽条件 (图10b)。随着降雨减弱停

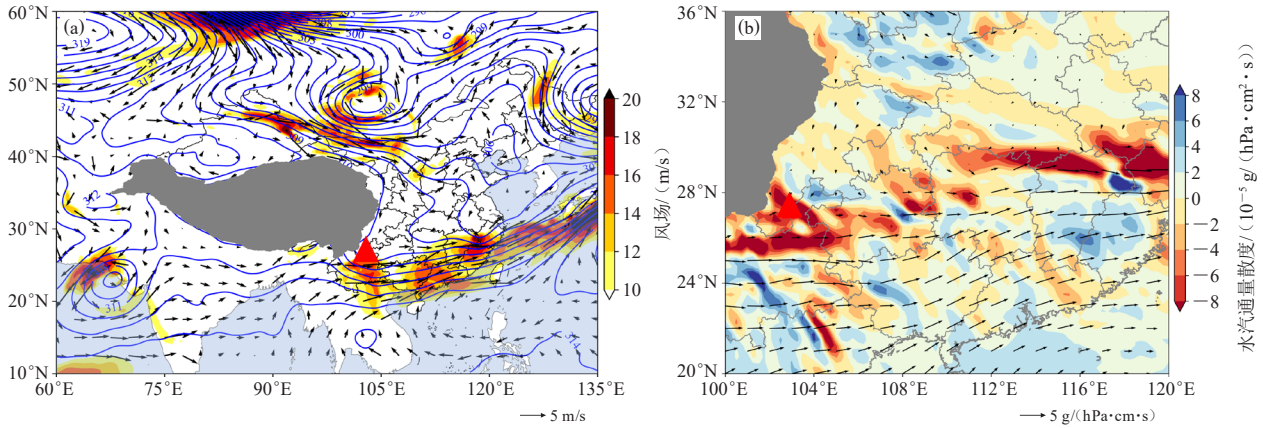


图9 同图7, 但为2020年7月9日02: 00
Fig. 9 Same as Fig. 7, but for 02: 00 BT on 9 July 2020

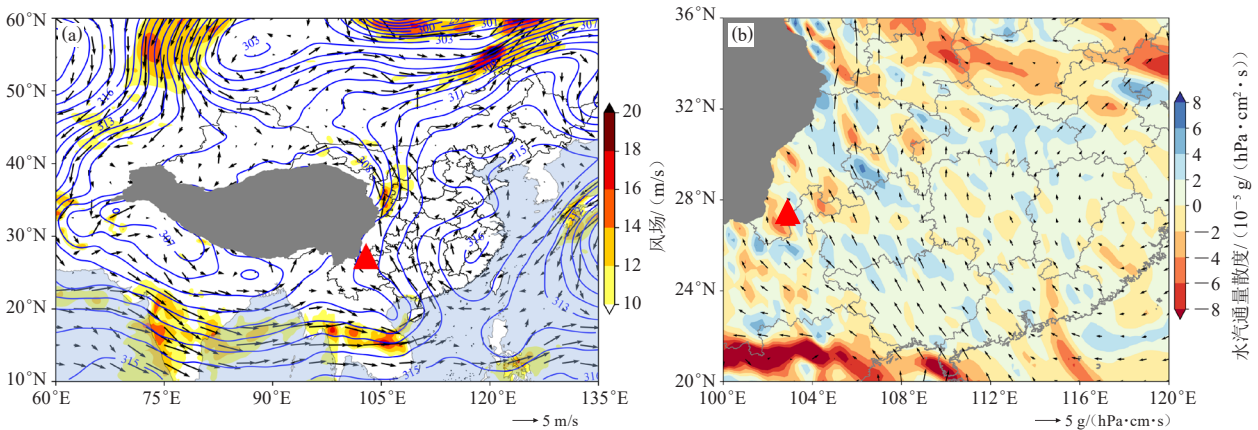


图10 同图7, 但为2018年7月27日22: 00
Fig. 10 Same as Fig. 7, but for 22: 00 BT on 27 July 2018

止, 热带低压北侧的大风区减弱消失, 水汽通量减弱(图略)。

3.4 暴雨大风天气的概念模型

基于以上对白鹤滩水电站坝区湿季暴雨大风过程中环流形势和低空急流特征的总结与分析, 利用中尺度天气分析技术规范^[28], 构建了坝区湿季暴雨大风的环流形势概念模型。

低槽东移型暴雨大风, 500 hPa高度上短波槽东移, 与此同时, 700 hPa上受西南季风影响, 形成强劲的西南风急流, 负责输送大量水汽, 使水汽在坝区辐合, 为暴雨大风的发生提供了充足的水汽条件(图11a)。在副热带高压型暴雨大风天气过程中, 夏季副热带高压向西移动, 坝区位于副热带高压西侧, 此时, 副热带高压边缘的东南风急流从中国南海源源不断地输送充沛的水汽至坝区, 为暴雨大风的发生提供了重要的水汽来源(图11b)。当坝区受低槽和副热带高压共同影响时, 副热带高压边缘的暖湿气流与东移南下的冷空气在坝区上空交汇, 形成强对流天气;

同时, 西南风急流持续输送水汽至坝区, 使得水汽在此地辐合(图11c)。热带低压型暴雨大风也是坝区湿季常见的天气类型。在孟加拉湾北部和中国南海地区, 热带低压发展北移, 坝区受热带低压北部偏南急流的影响, 水汽在中南半岛辐合, 输送到坝区, 为暴雨大风的发生提供了有利的水汽条件(图11d)。

4 结论与讨论

利用地面观测资料和ERA5逐时再分析资料, 对2018—2021年湿季(5—10月)白鹤滩水电站坝区暴雨大风过程的环流形势、低空急流以及水汽特征进行了综合分析, 主要结论如下。

1) 所选个例的降雨日变化显著, 主要以夜间的强风暴雨为主。根据500 hPa环流形势可将暴雨大风过程分为4类, 分别为低槽东移型、副热带高压型、低槽和副热带高压共同影响型, 以及热带低压型。低槽东移型主要受短波槽东移的影响。副热带高压型是在副热带高压输送充沛水汽的有利条件下发生的。低槽和副热带高压共同影响型主要受二者共同影响, 低槽东

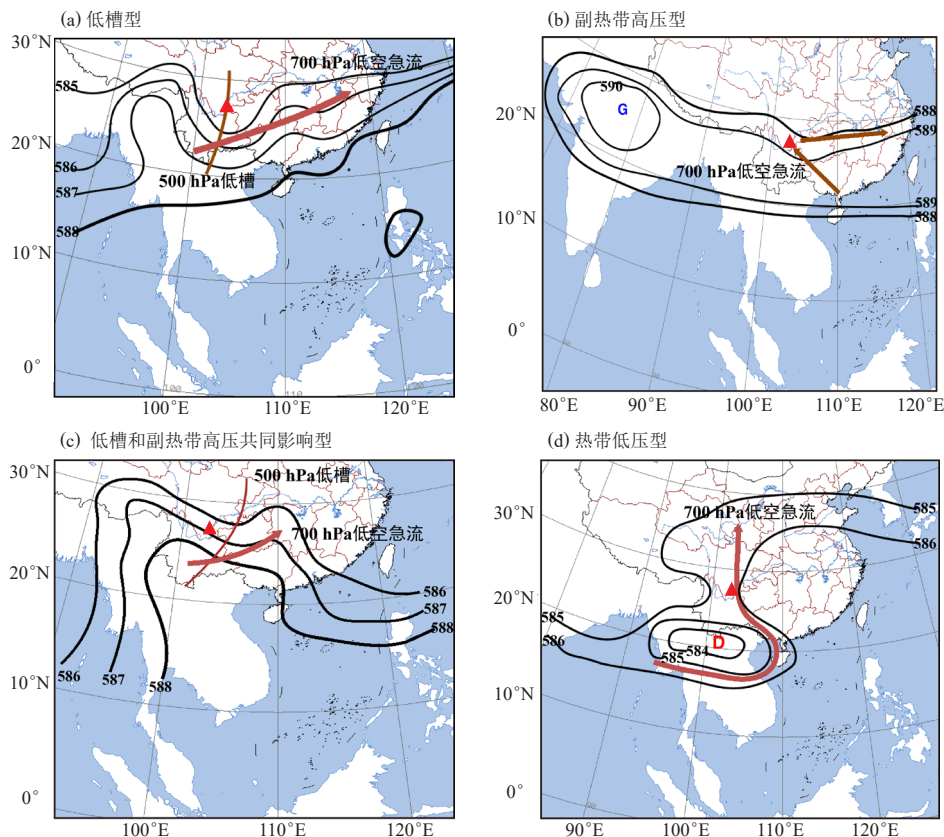


图11 4类暴雨大风的概念模型 (▲: 白鹤滩水电站坝区位置)

Fig. 11 Conceptual models of the 4 types of rainstorm and gale (▲: the position of the dam area of BHS)

移带来的冷空气与副热带高压输送的暖湿气流在坝区交汇,产生暴雨大风。热带低压型主要受坝区南部热带低压的影响。

2) 4类暴雨大风过程700 hPa均伴随显著的低空急流发展,表现为:受夏季风影响的西南风急流呈现出东移减弱的趋势,副热带高压西北侧的偏西风急流和偏东南风急流,以及孟加拉湾地区热带低压北侧的偏南风急流,在暴雨过程中起到水汽输送的作用。

3) 构建了白鹤滩水电站坝区湿季暴雨大风天气的概念模型。研究表明,暴雨大风天气的形成受到多种气象因素的共同影响,包括高空槽、副热带高压、热带低压、西南季风和低空急流等。500 hPa西风槽东移提供了动力抬升条件,700 hPa水汽辐合和副热带高压边缘的水汽输送确保有充足的水汽供应,热带低压的发展增强了系统的动力和热力条件,西南季风和低空急流促进了对流和能量输送,共同为暴雨大风天气的发生提供了有利条件。

暴雨是大尺度环流背景下,多尺度系统协同作用的结果,低空急流不仅对暴雨有触发作用,而且也为暴雨输送了充足的水汽。已有研究指出,四川盆地夏季暴雨的水汽源地主要有孟加拉湾、中国南海和西风

带等^[29-31],这与本研究的结果一致,但本研究主要基于大气动力学的基础知识,并未涉及对水汽输送路径与源地贡献的定量分析。已有研究利用雷达资料分析了白鹤滩水电站极端大风天气的成因^[32],并采用次网格地形方案对水电站坝区一次大风天气进行了数值模拟^[33],分析了大风的成因。本研究仅用天气学的方法进行了分析,并未利用雷达资料和数值模拟来分析白鹤滩水电站坝区大风的成因,这将是下一步工作的重点。本研究虽取得了一些成果,但低空急流对白鹤滩水电站坝区暴雨落区和强度的影响机制并未做深入分析,有待进一步研究。此外,白鹤滩水电站坝区位于金沙江下游的干热河谷区,特殊地形对暴雨大风的影响也十分重要,这也是未来研究的重点。

参考文献

- [1] 尹晔,王汉涛,程志刚,等.大型水电站灾害性大风特征及预报:以白鹤滩水电站为例[M].北京:气象出版社,2023.
- [2] 陶诗言.中国之暴雨[M].北京:科学出版社,1980.
- [3] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.天气学原理和方法(第四版)[M].北京:气象出版社,2007.
- [4] Miller R C. Notes on analysis and severe-storm forecasting procedures of the air force global weather central, technical report 200 (Rev)[R]. Scott Air Force Base, 1972.

(下转54页)

- development[J]. Conservation Biology, 1992, 6(1): 37-46.
- [3] Gómez-Baggethun E, Ruiz-Pérez M. Economic valuation and the commodification of ecosystem services[J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2011, 35(5): 613-628.
- [4] 廖菊阳, 祁承经, 冯贵祥, 等. 国外生态系统服务的科学意义及其价值评估研究进展[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(12): 77-85.
- [5] 朱春全. “以自然为本”推进生态文明[M]//赵庆忠. 生态文明看聊城. 北京: 中国社会科学出版社, 2012.
- [6] 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务的生态学机制研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 6183-6188.
- [7] 欧阳志云, 朱春全, 杨广斌, 等. 生态系统生产总值核算: 概念、核算方法与案例研究[J]. 生态学报, 2013, 33(21): 6747-6761.
- [8] 马国霞, 赵学涛, 吴琼, 等. 生态系统生产总值核算概念界定和体系构建[J]. 资源科学, 2015, 37(9): 1709-1715.
- [9] 马国霞, 於方, 王金南, 等. 中国2015年陆地生态系统生产总值核算研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(4): 1474-1482.
- [10] 欧阳志云, 林亦晴, 宋昌素. 生态系统生产总值(GEP)核算研究——以浙江省丽水市为例[J]. 环境与可持续发展, 2020, 45(6): 80-85.
- [11] 程翠云, 葛察忠, 杜艳春, 等. 浙江省衢州市绿金指数核算研究[J]. 生态学报, 2019, 39(1): 37-44.
- [12] 宋昌素, 欧阳志云. 面向生态效益评估的生态系统生产总值GEP核算研究——以青海省为例[J]. 生态学报, 2020, 40(10): 3207-3217.
- [13] 董天, 张路, 肖焱, 等. 鄂尔多斯市生态资产和生态系统生产总值评估[J]. 生态学报, 2019, 39(9): 3062-3074.
- [14] 《中国大百科全书·环境科学》编委会. 中国大百科全书: 环境科学[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 2002.
- [15] 赵寅成, 孙雷, 岳正波, 等. 安徽省六安市生态系统生产总值核算研究[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(4): 73-77.
- [16] 安徽省气候中心. 2021年安徽省气候公报[EB/OL]. (2022-01-01)[2023-04-10]. http://ah.cma.gov.cn/zfxxgk/zwgk/qxbg/qxbg1/202205/t20220523_4847956.html.
- [17] 宣城市人民政府. 宣城市养殖水域滩涂规划(2018—2030年)[EB/OL]. (2021-07-25)[2023-04-10]. <https://www.xuancheng.gov.cn/OpennessContent/show/2197150.html>.
- [18] 宣城市统计局, 国家统计局宣城调查队. 2021宣城统计年鉴[EB/OL]. (2021-12-13)[2023-04-10]. <https://tjj.xuancheng.gov.cn/News/show/1307205.html>.

(编辑: 卢冰)

(上接47页)

- [5] Crisp C A. Training guide for severe weather forecasters[R]. Offutt AFB, NE: Air Weather Service (MAC), Air Force Global Weather Central, 1979.
- [6] 陈春艳, 孔期, 李如琦. 天山北坡一次特大暴雨过程诊断分析[J]. 气象, 2012, 38(1): 72-80.
- [7] 李超, 隆霄, 曹怡清, 等. 贺兰山东麓20次暴雨过程环流形势及低空急流特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1753-1767.
- [8] 田莹, 叶成志, 姚蓉. 2008—2018年江南暖区暴雨特征[J]. 大气科学学报, 2022, 45(1): 51-64.
- [9] 肖逸祥, 杨康权, 俞小鼎, 等. 四川盆地极端暴雨过程基本特征分析[J]. 气象, 2017, 43(10): 1165-1175.
- [10] 张芳丽, 李国平, 罗潇. 四川盆地东北部一次突发性暴雨事件的影响系统分析[J]. 高原气象, 2020, 39(2): 321-332.
- [11] 肖红茹, 王佳津, 肖逸祥, 等. 四川盆地暖区暴雨特征分析[J]. 气象, 2021, 47(3): 303-316.
- [12] 何丽华, 王咏青, 隆璘雪, 等. 弱天气强迫下一次暖区MCSs发生发展研究[J]. 大气科学学报, 2020, 43(5): 810-823.
- [13] 段中夏. 豫北一次夏季雷雨大风过程分析[J]. 气象科技进展, 2018, 8(6): 33-38.
- [14] 王丽芳, 张雪蓉, 廖一帆, 等. 一次秋季台风倒槽大暴雨过程诊断及中尺度分析[J]. 气象科学, 2021, 41(2): 209-220.
- [15] 朱娟, 张立凤, 张铭. 一次对流性强降水过程的分析及诊断[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2016, 17(3): 270-277.
- [16] 赵娴婷, 魏建苏, 朱定真. 急流在梅雨期持续暴雨过程中的作用[J]. 气象科学, 2011, 31(2): 211-216.
- [17] Saulo C, Ruiz J, Skabar Y G. Synergism between the low-level jet and organized convection at its exit region[J]. Monthly Weather Review, 2007, 135(4): 1310-1326.
- [18] Findlater J. A major low-level air current near the Indian Ocean during the northern summer[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1969, 95(404): 362-380.
- [19] 刘鸿波, 何明洋, 王斌, 等. 低空急流的研究进展与展望[J]. 气象学报, 2014, 72(2): 191-206.
- [20] 张芹, 王洪明, 张秀珍, 等. 2017年山东雨季首场暖区暴雨的特征分析[J]. 高原气象, 2018, 37(6): 1696-1704.
- [21] 陶诗言, 丁一汇, 周晓平. 暴雨和强对流天气的研究[J]. 大气科学, 1979, 3(3): 227-238.
- [22] Du Y, Chen G X. Heavy rainfall associated with double low-level jets over southern China. Part I: Ensemble-based analysis[J]. Monthly Weather Review, 2018, 146(11): 3827-3844.
- [23] 沈向阳. 某水电站局部强降雨灾害应急处置及体会[J]. 福建水力发电, 2017(2): 61-62.
- [24] 钱维宏. 气候变化与中国极端气候事件图集[M]. 北京: 气象出版社, 2011.
- [25] 沈游英, 杨文发. 金沙江流域下段暴雨特征分析[J]. 水资源研究, 2007, 28(1): 39-41.
- [26] 陈丹, 周长艳, 熊光明, 等. 近53年四川盆地夏季暴雨变化特征分析[J]. 高原气象, 2018, 37(1): 197-206.
- [27] 杨小波, 杨淑群, 马振峰. 夏季东亚副热带西风急流位置对川渝地区降水的影响[J]. 高原气象, 2014, 33(2): 384-393.
- [28] 张小玲, 谌芸, 张涛. 对流天气预报中的环境场条件分析[J]. 气象学报, 2012, 70(4): 642-654.
- [29] 蒋兴文, 李跃清, 李春, 等. 四川盆地夏季水汽输送特征及其对旱涝的影响[J]. 高原气象, 2007, 26(3): 476-484.
- [30] 陈栋, 李跃清, 黄荣辉. 在“鞍”型大尺度环流背景下西南低涡发展的物理过程分析及其对川东暴雨发生的作用[J]. 大气科学, 2007, 31(2): 185-201.
- [31] 陈鹏, 刘德, 李强, 等. 2009年夏季四川盆地两次暴雨过程对比分析[J]. 暴雨灾害, 2014, 33(2): 112-120.
- [32] 陈艳, 邓国卫, 边茜, 等. 白鹤滩水电站坝区极端大风天气分析[J]. 高原山地气象研究, 2023, 43(S1): 75-80.
- [33] 吴安南, 李国平, 师义成, 等. 采用次网格地形方案对白鹤滩水电站坝区一次大风天气的数值模拟[J]. 高原山地气象研究, 2022, 42(3): 22-30.

(编辑: 郑秋红)