

《气象科技进展》网络优先发表

DOI:10.3969/j.issn.2095-1973.2024.00.002

# 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<sup>1,2</sup> 王汉涛<sup>3</sup> 白爱娟<sup>1</sup> 张强<sup>1,4</sup> 刘雪宇<sup>4</sup>

(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)

**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水的发生, 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, 对 2018—2021 年白鹤滩坝区湿季 13 次暴雨大风事件的形成机理进行了分析。结果表明: (1) 依据 500hPa 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、副高型、低槽和副高共同影响型, 以及热带低压型。(2) 四类暴雨大风过程 700hPa 均伴随显著的 low-level jet 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, 副高西北侧的偏西风急流和偏东南风急流, 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) 根据四类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暴雨大风的概念模型。四类暴雨大风主要受西风槽东移的影响, 以及副高边缘和热带低压北侧充沛水汽输送的有利条件下发生的, 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

## Study on the Circulation Characteristics of

投稿日期: 2023-12-12; 修回日期: 2024-5-19

第一作者: 张敏 (1994-), E-mail: 2506435039@qq.com

通信作者: 白爱娟 (1971-), E-mail: baiaj@cuit.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (U2242202)、中国气象局创新发展专项 (CXFZ2022J012)、四川省科技计划资助项目 (2021YJ0310)、高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室基金 (SCQXKJYJXMS202210) 共同资助

# Rainstorm and Gale in Dry-hot Valley of Baihetan Hydropower Station in Wet Season

ZHANG Min<sup>[1,2]</sup>, WANG Hantao<sup>[3]</sup>, BAI Aijuan<sup>[1]</sup>, ZHANG Qiang<sup>[1,4]</sup>, LIU  
Xueyu<sup>[4]</sup>

(1 College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)

2 Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, 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)

**Abstract:** The Baihetan Hydropower Station is located in the dry-hot river valley area downstream of the Jinsha River, where frequent windy weather and heavy rainfall during the wet season are common. In order to explore the characteristics of the evolution of atmospheric circulation and low-level jets during heavy rainfall and strong wind events in this particular terrain, ground observation data and ERA5 reanalysis data were used to analyze the formation mechanism of 13 heavy rainfall and strong wind events in the Baihetan Dam area during the wet season from 2018 to 2021. The results show that: (1) Based on the characteristics of the 500hPa circulation pattern, the 13 heavy rainfall and strong wind events in this area can be classified into four types: eastward-moving low trough type, subtropical high type, joint influence of trough and subtropical high type, and tropical depression type. (2) In all four types of heavy rainfall and strong wind events, there is a significant development of low-level jets at 700hPa, characterized by the weakening and eastward movement of the southwest jet stream influenced by the summer monsoon, the westward jet stream on the northwest side of the subtropical high, the southeastward jet stream on the southeast side of the subtropical high, and the southward jet stream on the northern side of the tropical cyclone in the Bay of Bengal, which plays a role in transporting water vapor during heavy rainfall events. (3) Based on the key influencing systems of the four types of heavy rainfall and strong wind events and the evolution of low-level jets, a conceptual model of heavy rainfall and strong wind events in the Baihetan Hydropower Station dam area is established. The occurrence of the four types of heavy rainfall and strong wind events is mainly influenced by the eastward movement of the westerly trough, as well as favorable conditions for abundant water vapor transport on the edge of the subtropical high and the northern side of the tropical cyclone, and low-level jets play an important role in triggering and maintaining heavy rainfall and strong wind events.

**Keywords:** Baihetan hydropower station, rainstorm and gale, circulation situation, low-level jet, conceptual model

## 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个梯级。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”型谷湖泊，下游为“V”型河谷，这种独特地形使得水电站河谷峡管效应显著<sup>[1]</sup>。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性大风和强降水频发，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，暴雨和大风不仅会带来剧烈降水，还伴随着强劲的大风。暴雨是中国主要的气象灾害之一<sup>[2]</sup>，学者们利用天气学分析方法已对暴雨的影响系统做了诸多研究<sup>[3]</sup>。Miller<sup>[4]</sup>和 Crisp<sup>[5]</sup>在大量强对流个例基础上总结出天气型识别方法。陈春艳等<sup>[6]</sup>对新疆天山北坡特大暴雨进行了深入研究，结果表明暴雨过程与中亚低槽存在密切联系，在暴雨过程中，槽前的西南气流成为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<sup>[7]</sup>对贺兰山东麓 20 次暴雨过程的形成机理进行综合分析，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<sup>[8]</sup>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槽、副高、低空切变、低空急流、超低空急流、冷锋以及地面辐合线等。肖递祥等<sup>[9]</sup>和张芳丽等<sup>[10]</sup>的研究表明，四川盆地的极端暴雨过程主要表现为 500hPa 为东高西低型和两高切变型的环流背景形势下，由 500hPa 中纬度地区东移低槽、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<sup>[11]</sup>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四类。何丽华等<sup>[12]</sup>研究表明，江南暖区暴雨主要受低涡切变、低空急流、地形等作用。段中夏<sup>[13]</sup>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性，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<sup>[14]</sup>针对暴雨的热力和动力学条件与机理做了研究。朱娟等<sup>[15]</sup>研究表明，对流性强降水中 500hPa 呈两槽一脊或西太副高西伸，700hPa 和 850hPa 存在急流和大风核。研究表明，低空西南风急流是暴雨产生的重要因子<sup>[16]</sup>。低空急流不仅是强降水事件中水汽输送的主要通道<sup>[17-18]</sup>，还为暴雨提供充足的水汽和有利的背景场<sup>[19]</sup>。此外，低空急流对暴雨有触发作用<sup>[20]</sup>，统计结果显示，低空急流与暴雨发生的相关系数约达 0.8<sup>[21]</sup>。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<sup>[22]</sup>。

有关暴雨的研究较多，且大多是针对区域性暴雨。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，对该地区灾害性天气的预报预警尤为重要，2012年6月28日白鹤滩暴雨大风天气诱发的山洪泥石流灾害造成41人遇难或失踪<sup>[23-24]</sup>。因此本文选取坝区近年来的湿季暴雨大风事件，根据暴雨大风事件的环流形势分析，研究了影响系统及高低空配合和低空急流的演变特征。

本文逻辑框架如图1所示。

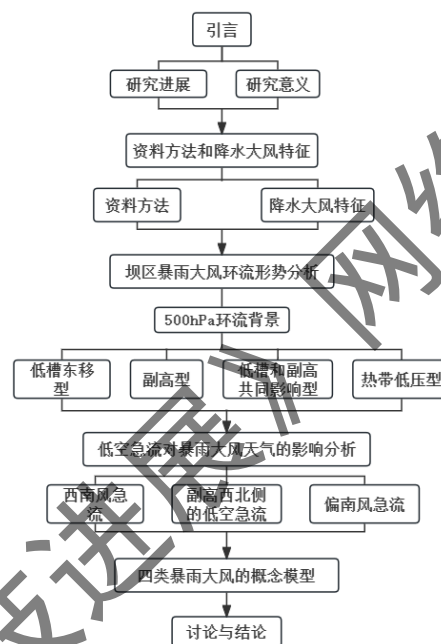


图1 逻辑框架图

Fig. 1 Logical framework diagram

## 1 资料方法和降水大风特征

### 1.1 资料方法

本文所用资料包括：(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月的小时数据和日数据。(2) 再分析资料：使用ECMWF（欧洲中期天气预报中心）的ERA5全球再分析资料，时间分辨率为逐小时，水

分辨率 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ，垂直方向上共 37 层。本文用到的气象要素为位势高度、水平风场、温度和湿度等。文中所用时间均为北京时。

根据沈浒英等<sup>[25]</sup>提出的金沙江下段流域的暴雨统计标准：单站日雨量 08:00 至次日 08:00，24 h 降雨量大于或等于 50 mm 定义为一个暴雨日。据此标准，本文将至少有一个站点 24 h 累积降雨量达到暴雨标准（24 h 累积降雨量 $\geq 50$  mm）的降水过程称为一次暴雨过程，同时，至少有一个站点日极大风速大于 13.9 m/s，确定为一次暴雨大风过程，在 2018—2021 年湿季 5—10 月，共筛选出了 13 次大风强降水事件。

## 1.2 降水和大风特征

通过统计 13 次个例的暴雨日期、持续小时数、最大过程降水量、最大小时雨量和日极大风速值，如表 1 所示。坝区雨日集中，主要集中在 6-7 月和 9 月。暴雨持续时间均在 6 h 以上，最长为 15 h。坝区最大过程降水量出现在马脖子站，为 119.6 mm。坝区极端短时强降水过程的最大小时雨量为新田站的 60.1 mm，日极大风速最大为葫芦口大桥站的 21.7 m/s。坝区暴雨大风的突发性和极端性强，如 2018 年 5 月 17 日的短时强降水，同时连续性的强降水大风也时有发生，如 2021 年 7 月 5 日的暴雨过程，持续了 15 小时，过程降水量达到 119.6mm。

表 1 白鹤滩坝区 2018—2021 年湿季暴雨大风事件概况

Tab.1 Overview of rainstorm and gale processes in wet season from 2018 to 2021 in the Dam Area of Baihetan.

个例	暴雨日期（北京时）	持续时间/h	最大过程降水量/mm	最大小时雨量/mm	日极大风速/m • s <sup>-1</sup>
个例 1	2018.5.17 15-16 19	3	新田 60.1	新田 60.1	新田 13.9
个例 2	2018.6.21 22-22 08	10	荒田水厂 60.1	马脖子 25.6	葫芦口大桥 21.2
个例 3	2018.7.27 22-28 07	9	新田 67.6	新田 48.1	新田站 16.7
个例 4	2019.9.8 02-14	12	新田 50.0	新田 32.0	马脖子 16.7
个例 5	2020.6.30 0-13	13	葫芦口大桥 78.8	荒田水厂 23.8	葫芦口大桥 21.7
个例 6	2020.7.9 02-09	7	葫芦口大桥 82.4	葫芦口大桥 30.8	马脖子 14.3
个例 7	2020.9.5 23-6 13	14	马脖子 97.0	马脖子 43.1	葫芦口大桥 15.2
个例 8	2020.9.15 01-12	11	葫芦口大桥 78.1	葫芦口大桥 39.4	新田 15.7
个例 9	2020.9.16 01-07	6	葫芦口大桥 51.6	葫芦口大桥 24.1	新田 15.7
个例 10	2021.6.24 23-25 09	10	荒田水厂 70.6	荒田水厂 44.3	马脖子 14.4
个例 11	2021.7.5 01-16	15	马脖子 119.6	马脖子 19.3	新田 16.7

个例 12	2021.9.2 01-10	9	新田 72.7	荒田水厂 37.0	新田 16.0
个例 13	2021.10.6 23-7 11	12	上村梁子 89.9	上村梁子 25.4	新田 15.7

白鹤滩水电站坝区为南北纵向的深切河谷，天气的局地性变化强，对比分析表 1 中 13 次暴雨大风过程 5 个站暴雨的发生频次和风向风速差异，结果如图 2 所示，新田、马脖子和荒田水厂站暴雨各出现 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。坝区暴雨大风的局地性强，降水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征，大坝及下游为西北偏北风，上村梁子营地为东北风，葫芦口大桥为偏东风，受峡谷地形的影响，低空气流为顺着峡谷的偏北风，在上游的葫芦口大桥转向为东北风。

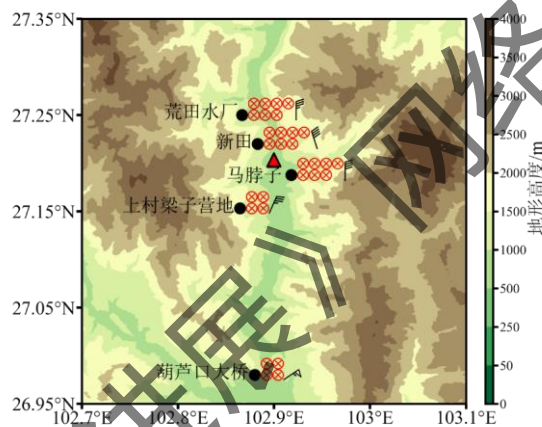


图 2 坝区 13 次暴雨大风个例的暴雨位置、各站最大风速及风向 (“●”为自动站位置，“△”为白鹤滩位置，“⊗”为一次暴雨大风过程)

Fig. 2 The location of rainstorm, maximum wind speed and direction at each station of 13 cases ("●" is the position of the automatic station, "△" is the position of Baihetan, "⊗" is the process of a rainstorm and gale)

由于白鹤滩水电站坝区天气日变化特征显著，分析 13 次暴雨大风事件中平均降水次数和各站小时最大雨量的日变化。由图 3 可知，坝区暴雨大风事件中，降水主要发生在夜间的 01:00—09:00，9 个时次的平均降水次数均在 45 次及以上，10:00 后降水次数迅速降低到 20 次以下，17:00—18:00 无降水出现，由此可见，坝区暴雨大风日变化显著，以夜间的强风降水为主。通过分析 13 次暴雨大风事件小时最大降水量的日变化，其中有 14 个时次小时最大降水量在 20 mm 以上，19 时最大小时降水量为 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降水剧烈，短时强降水频发。

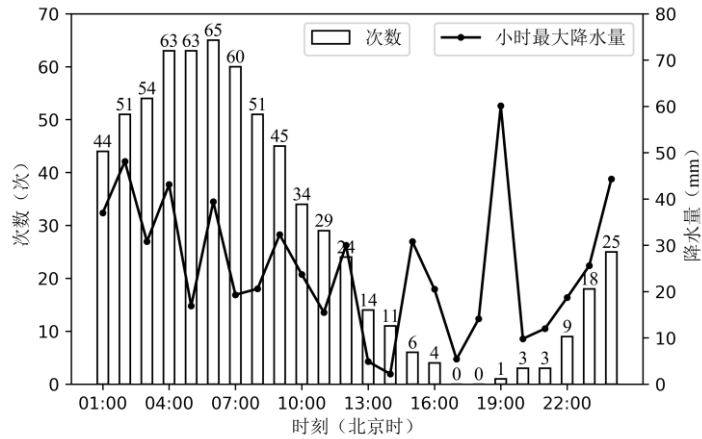


图 3 坝区 13 次暴雨大风个例中 5 个站的平均降水次数日变化和小时最大雨量

Fig. 3 Daily variation of average precipitation times and maximum hourly rainfall at 5 stations in 13 rainstorm and gale cases in the Dam Area

## 2 坝区暴雨大风的环流形势分析

### 2.1 关键影响系统

利用 ECMWF 的 ERA5 再分析数据，通过分析 13 次暴雨大风过程各高度上的环流系统，总结出暴雨大风的关键影响系统，并进行分类。如表 2 所示，坝区暴雨大风过程 200hPa 上主要的影响系统为南亚高压，500hPa 上主要的天气系统有高空低槽、副高和热带低压，700hPa 上主要受低空急流的影响，低层主要的天气系统有气旋和锋面。

对白鹤滩水电站坝区 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 13 次暴雨大风个例中，观察到 500hPa 高空环流形势存在明显差异。此外，低槽、副高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。这与“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”<sup>[26]</sup>的结论一致。对白鹤滩水电站坝区 13 次暴雨大风个例进行天气学分析和合成分析<sup>[27]</sup>，可将其概括为四类，第一类为低槽东移型，共出现 2 次，主要是受高空低槽东移的影响，坝区位于高空槽前；第二类主要受到副热带高压的影响，共出现 4 次，坝区位于副高以西，副高带来的暖湿气流与东移南下的冷空气交汇，产生暴雨大风。第三类坝区受高空低槽和副高共同影响，共出现 5 次。第四类该地区受热带低压或气旋的影响，共出现 2 次。

表 2 白鹤滩坝区 13 次暴雨大风各个高度上的影响天气系统

Tab.2 The impact weather systems of the 13 rainstorm and gale processes at different altitudes in the Dam Area of Baihetan

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+副高	副高西北侧西南风急流	气旋
个例 5	南亚高压	低槽+副高	副高西北侧西南风急流	锋面
个例 6	南亚高压	低槽+副高	副高西北侧西南风急流	锋面
个例 7	南亚高压	低槽+副高	-	锋面
个例 8	南亚高压	副高	副高西侧偏东南风急流	锋面
个例 9	南亚高压	副高	副高西侧偏东南风急流	锋面
个例 11	南亚高压	副高	副高西侧偏东南风急流	锋面
个例 12	南亚高压	副高	副高西侧偏东南风急流	气旋
个例 13	南亚高压	副高	副高西侧偏东南风急流	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。

## 2.2 暴雨大风天气的各类环流形势特征分析

根据表 1 的内容，本文挑选了低槽东移型、副高型、低槽和副高共同影响型以及热带低压型四种环流形势的典型个例。这四个暴雨大风个例分别为：2018 年 6 月 21 至 22 日、2020 年 9 月 15 日、2019 年 9 月 8 日以及 2018 年 7 月 27 至 28 日，通过对四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。

### 2.2.1 低槽东移型

2018 年 6 月 21 日 22 时至 22 日 08 时，白鹤滩水电站坝区出现暴雨大风过程。通过分析此次暴雨大风过程 500hPa 环流形势，在 21 日 23:00 的环流图中（图 4a），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，四川以北地区有高脊发展，形成了显著的北脊南槽形势。22 日 02:00（图 4b），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暖湿气流相交汇，使得槽前上升运动加强，有利于强降

水和大风的形成。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，副高稳定存在（图略）。

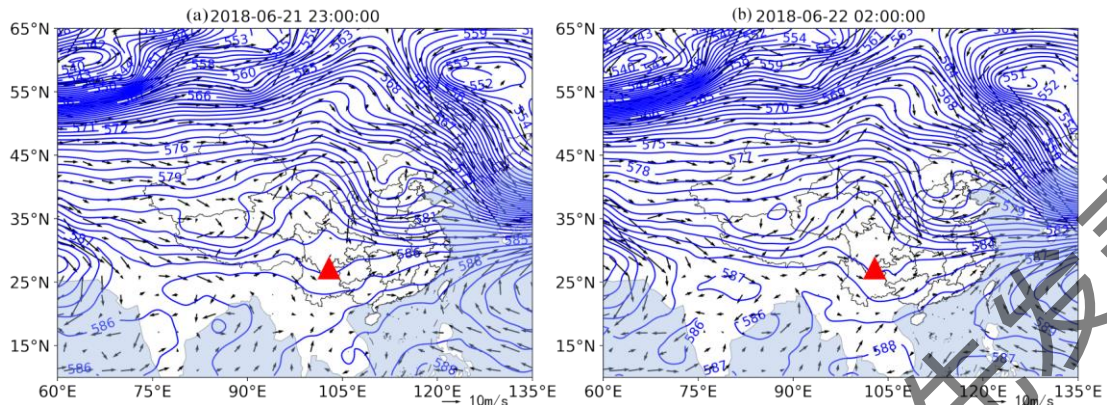


图 4 2018 年 6 月 21 日 23:00 (a) 和 22 日 02:00 (b) 的 500hPa 位势高度场（蓝色等值线，单位：dagpm）及风场（矢量，单位： $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）叠加图（“ $\Delta$ ”为白鹤滩位置）

Fig. 4 Overlay of 500hPa geopotential height field (blue contour line, unit: dagpm) and wind field (vector, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) from 23:00 (a) on June 21 and 02:00 (b) on June 22, 2018 (" $\Delta$ " is the position of Baihetan)

## 2.2.2 副高型

夏季强对流暖区暴雨的主要系统以副高环流为主，田莹等<sup>[8]</sup>研究表明，暴雨区常位于副高内部或距离副高 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 时至 12 时的副高型暴雨大风过程为例，500hPa 上亚欧大陆中高纬地区呈现出两槽一脊的稳定环流形势。降水开始时（图 5a），副高 588dagpm 线的西脊点位于  $60^\circ\text{E}$ ， $25^\circ\text{N}$  附近，中心气压大于 590dagpm，控制我国华南地区。随着降水的持续副高维持（图 5b），588dagpm 线的西脊点东移至  $70^\circ\text{E}$ ， $25^\circ\text{N}$  附近，中心气压大于 589dagpm。在环流图上，蒙古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。副高型暴雨大风共有 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，坝区均位于副高内部，588dagpm 线西脊点稳定在  $75^\circ\text{E}$ ， $25^\circ\text{N}$  附近，中心气压分别超过 593dagpm 和 591dagpm。而 2021 年 10 月 6 日，副高呈条状分布，控制我国南方地区（图

略)。

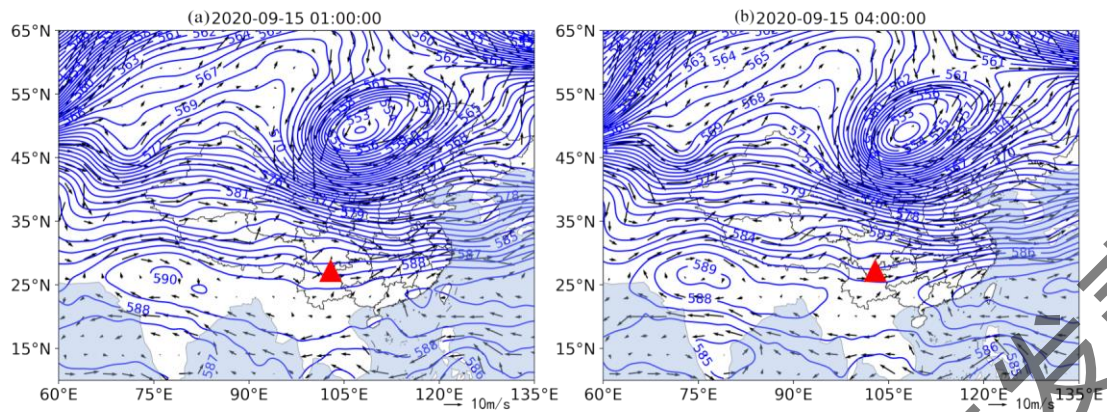


图 5 2020 年 9 月 15 日 01:00 (a) 和 04:00 (b) 的 500hPa 位势高度场 (蓝色等值线, 单位: dagpm) 及风场 (矢量, 单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 叠加图 (“ $\Delta$ ” 为白鹤滩位置)

Fig. 5 Overlay of 500hPa geopotential height field (blue contour line, unit: dagpm) and wind field (vector, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) from 01:00 (a) and 04:00 (b) on September 15, 2020 (“ $\Delta$ ” is the position of Baihetan)

### 2.2.3 低槽和副高共同影响型

在 2019 年 9 月 8 日 02 时至 14 时的暴雨大风过程中, 500hPa 上低纬度的副高向北伸展, 588 线延伸至坝区南侧, 副高北侧有低槽向东发展, 使得坝区的等值线变密集。同时东亚大槽在东海和南海不断加深, 形成显著的“东高西低”环流形势 (图 6a)。而在印度和孟加拉地区有低压气旋发展。随着降水的持续, 副高维持, 低槽进一步加深 (图 6b)。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, 与副高西侧的暖湿空气在四川与云南交界地区交汇, 直接导致强降水和大风天气发生。低槽和副高共同影响型共有 4 个个例, 除上述个例外, 其余三个个例也主要受低槽和副高的影响, 副高带来的暖湿气流与东移南下的冷空气相交汇, 产生强降水大风 (图略)。

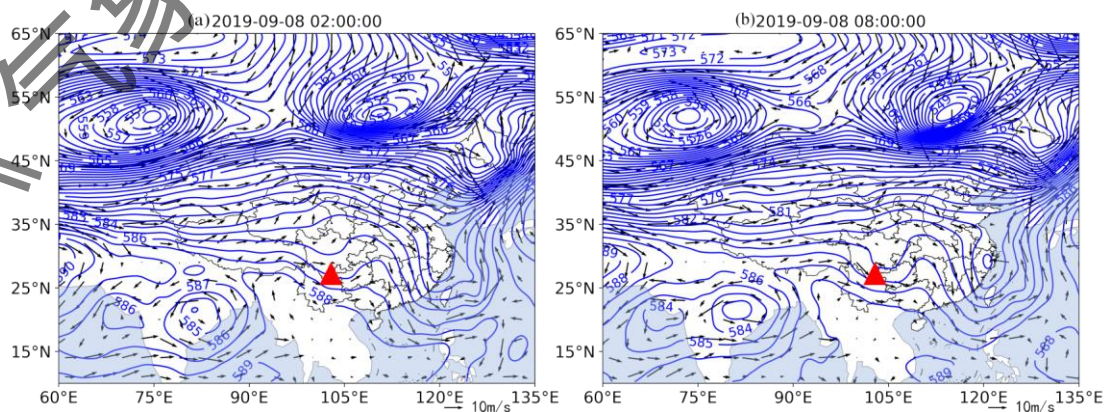


图 6 2019 年 9 月 8 日 02:00 (a) 和 08:00 (b) 的 500hPa 位势高度场 (蓝色等值线, 单位: dagpm) 及风场 (矢量, 单位:  $m \cdot s^{-1}$ ) 叠加图 ("△" 为白鹤滩位置)

Fig. 6 Overlay of 500hPa geopotential height field (blue contour line, unit: dagpm) and wind field (vector, unit:  $m \cdot s^{-1}$ ) from 02:00 (a) and 08:00 (b) on September 8, 2019 ("△" is the position of Baihetan)

## 2.2.4 热带低压型

在 2018 年 7 月 27 日 22 时至 28 日 07 时的暴雨大风过程中, 降水开始时, 中南半岛东部有热带低压发展, 其中心强度小于 586dagpm (图 7a)。随着降水的持续, 坝区南侧的热带低压不断增强, 中心强度小于 584dagpm (图 7b)。受热带低压影响, 其东侧的东南风显著增强, 引导南海的东南暖湿气流向坝区输送, 并在坝区产生强烈的风辐合, 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 2 个个例, 这两个个例的环流形势相似, 主要受热带低压的影响 (图略)。

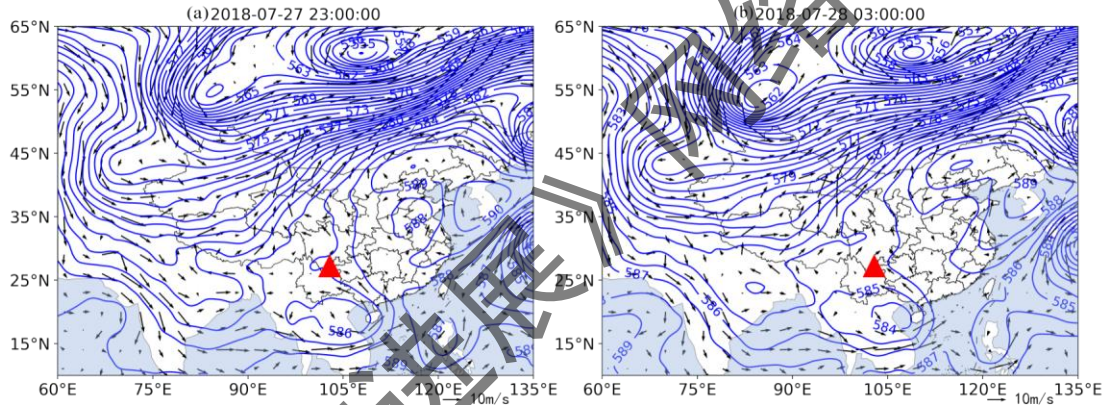


图 7 2018 年 7 月 27 日 23:00 (a) 和 28 日 03:00 (b) 的 500hPa 位势高度场 (蓝色等值线, 单位: dagpm) 及风场 (矢量, 单位:  $m \cdot s^{-1}$ ) 叠加图 ("△" 为白鹤滩位置)

Fig. 7 Overlay of 500hPa geopotential height field (blue contour line, unit: dagpm) and wind field (vector, unit:  $m \cdot s^{-1}$ ) from 23:00 (a) on June 27 to 03:00 (b) on June 28, 2018 ("△" is the position of Baihetan)

根据 500hPa 环流形势, 白鹤滩水电站坝区湿季 13 次暴雨大风事件可概括为低槽东移型、副高型、低槽和副高共同影响型, 以及热带低压型四类。低槽东移型主要受短波槽东移的影响。副高型是在副高输送充沛水汽的有利条件下发生的。副高和低槽共同影响型主要受二者共同影响, 副高带来的暖湿气流与东移南下的冷空气相交汇, 产生强降水大风。热带低压型主要受坝区南部热带低压的影响, 从南海向坝区有东南气流输送, 在坝区有明显的风速辐合, 产生暴雨大风天气。

## 2.3 低空急流对湿季暴雨大风天气的影响分析

杨小波等<sup>[27]</sup>指出东亚副热带西风急流南北位置异常对川渝降水有重要影响。通过分析白鹤滩水电站坝区 13 次暴雨大风事件 700hPa 上的环流形势，发现在这些过程中，坝区周边 500 km 范围内常存在风速超过 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 12m/s 的风速，但风速带相对于周边地区明显偏强。根据表 2 所示，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三类，第一类主要是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。第二类为副高西北侧的偏西风急流和偏东南风急流，与副高的位置和强度密切相关。第三类则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，本文选择了暴雨大风的四类环流形势中的典型个例，进而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。

### 2.3.1 西南风急流

在 2018 年 5 月 17 日的低槽型暴雨大风天气中，16:00 降水开始时，700hPa 的急流中心位于坝区南侧，中心风速达到 20 m/s 以上，呈现出强烈的西南风特征（图 8a）。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省和云南省的交界处，白鹤滩水电站坝区正处于这一水汽辐合区的范围之内（图 8b）。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，使得水汽辐合进一步增强。这种水汽输送与上升运动的配合，使得降水得以维持并发展，降水大风天气发生。到了 20:00，虽然西南风的低空急流东移减弱，水汽通量也有所减弱，但仍然存在明显的水汽辐合，坝区此次降水过程结束（图略）。

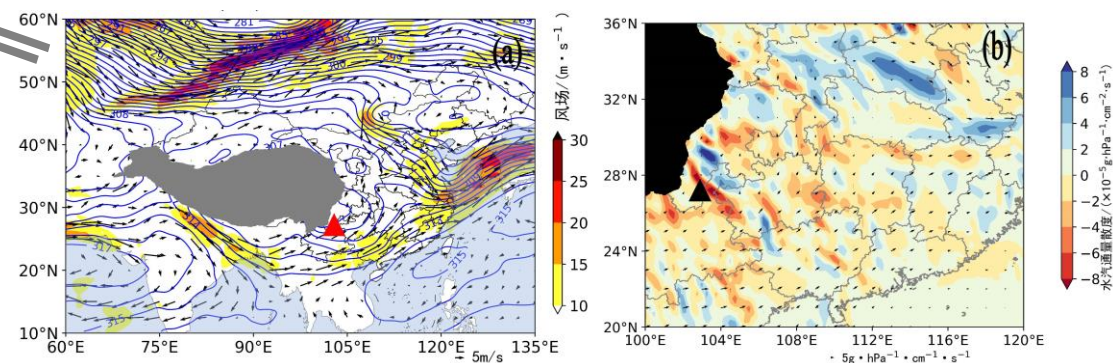


图 8 2018 年 5 月 17 日 16 时 700hPa (a) 位势高度场 (等值线, 单位: dagpm) 及风场 (矢量, 单位:

$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 彩色区为风速大于  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  区域, 单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); (b) 水汽通量 (矢量,

单位:  $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 及水汽通量散度 (彩色区, 单位:  $\times 10^{-5} \cdot \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$\Delta$  为白鹤滩位置, 阴影为青藏高原

Fig. 8 At 16:00 on May 17, 2018, the 700hPa (a) geopotential height field (contour lines, unit: dagpm) and wind field (vectors, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; colored areas represent wind speeds greater than  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); (b) water vapor flux (vectors, unit:  $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and water vapor flux divergence (colored areas, unit:  $\times 10^{-5} \cdot \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$\Delta$  is the position of Baihetan, Shades of grey for the Qinghai-Xizang Plateau

### 2.3.2 副高西北侧的低空急流

在 2021 年 9 月 2 日的副高型暴雨大风天气中, 700hPa 环流图上, 低空急流主要表现为副高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高北侧, 而白鹤滩水电站坝区位于副高西伸脊点上。当坝区暴雨大风天气开始时副高西侧的偏东南风开始明显增强 (图 9a)。随着降水的持续, 低空急流范围不断扩大, 副高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, 水汽从南海沿着东南路径源源不断输送到坝区, 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 9b)。到了 11:00, 坝区东南侧的急流区逐渐消失, 副高北侧的低空急流也开始向东退去。随着水汽通量的减小, 坝区的水汽通量散度变为正值, 降水最终结束 (图略)。因此, 在副高型暴雨大风天气的发展过程中, 副高南侧急流核的增强以及偏东南风急流的加强, 使得南海暖湿气流源源不断输送到坝区, 是引发暴雨大风天气的关键因素。

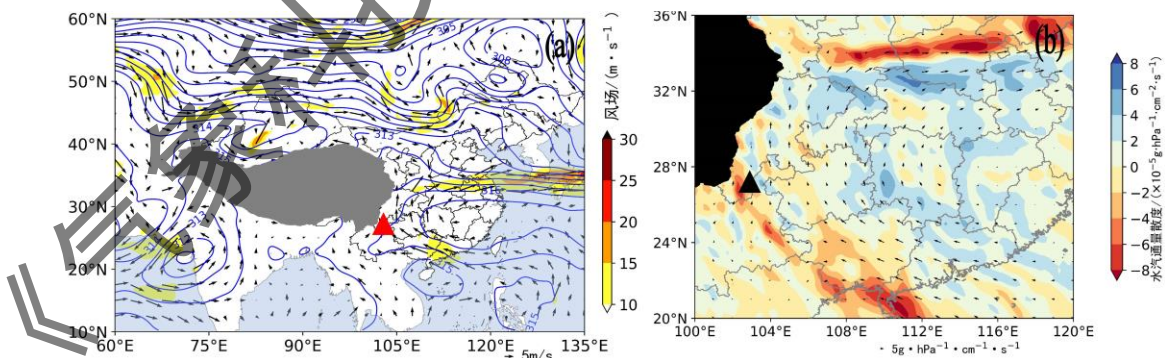


图 9 2021 年 9 月 2 日 01 时 700hPa (a) 位势高度场 (等值线, 单位: dagpm) 及风场 (矢量, 单位:

$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 彩色区为风速大于  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  区域, 单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); (b) 水汽通量 (矢量,

单位:  $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 及水汽通量散度 (彩色区, 单位:  $\times 10^{-5} \cdot \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$\Delta$  为白鹤滩位置, 阴影为青藏高原

Fig. 9 At 01:00 on September 2, 2021, the 700hPa (a) geopotential height field (contour lines, unit: dagpm) and wind field (vectors, unit:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; colored areas represent wind speeds greater than  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , unit:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ); (b) water vapor flux (vectors, unit:  $\text{g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) and water vapor flux divergence (colored areas, unit:  $\times 10^{-5}\cdot\text{g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )

△ is the position of Baihetan, Shades of grey for the Qinghai-Xizang Plateau

在 2020 年 7 月 9 日的暴雨大风天气中，700hPa 环流图上，低空急流主要为副高西北侧的偏西南风急流。9 日 02:00 时降水开始时，坝区南侧存在强烈的西南风低空急流，急流中心风速达到  $15 \text{ m/s}$ ，这股低空急流一直维持较强的强度，为降水的持续提供了有力的动力条件（图 10a）。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省和云南省的交界处，白鹤滩水电站坝区正处于这一水汽辐合区的范围之内（图 10b），此次暴雨过程与西南暖湿气流的输送密切相关。到了 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，降水过程结束（图略）。

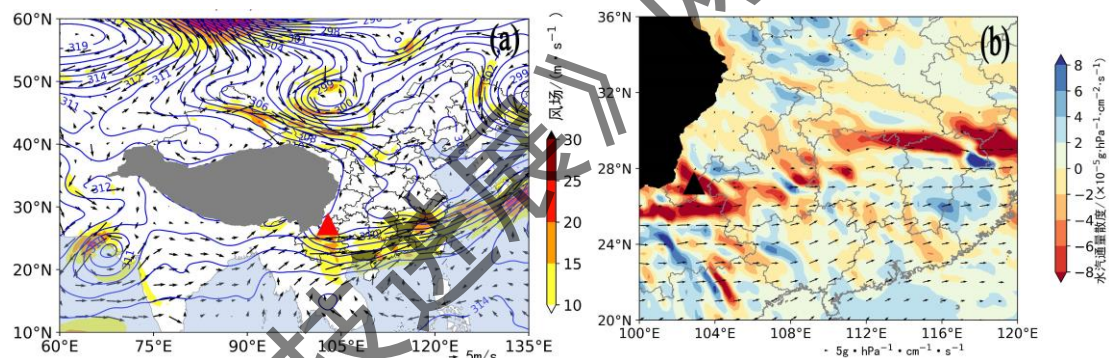


图 10 2020 年 7 月 9 日 02 时 700hPa (a) 位势高度场（等值线，单位：dagpm）及风场（矢量，单位： $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；彩色区为风速大于  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  区域，单位： $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）；(b) 水汽通量（矢量，单位： $\text{g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ）及水汽通量散度（彩色区，单位： $\times 10^{-5}\cdot\text{g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ）

△ 为白鹤滩位置，阴影为青藏高原

Fig. 10 At 02:00 on July 9, 2020, the 700hPa (a) geopotential height field (contour lines, unit: dagpm) and wind field (vectors, unit:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; colored areas represent wind speeds greater than  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , unit:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ); (b) water vapor flux (vectors, unit:  $\text{g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) and water vapor flux divergence (colored areas, unit:  $\times 10^{-5}\cdot\text{g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )

△ is the position of Baihetan, Shades of grey for the Qinghai-Xizang Plateau

### 2.3.3 热带低压北侧偏南风急流

对于白鹤滩水电站坝区热带低压型暴雨大风天气中，以 2018 年 7 月 27 日为例。如图 11a 所示，低空急流出现在热带低压的北侧，22:00 降水开始时，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 11b）。随着降水减弱停止，热带低压北侧的大风区减弱消失，水汽通量减弱（图略）。

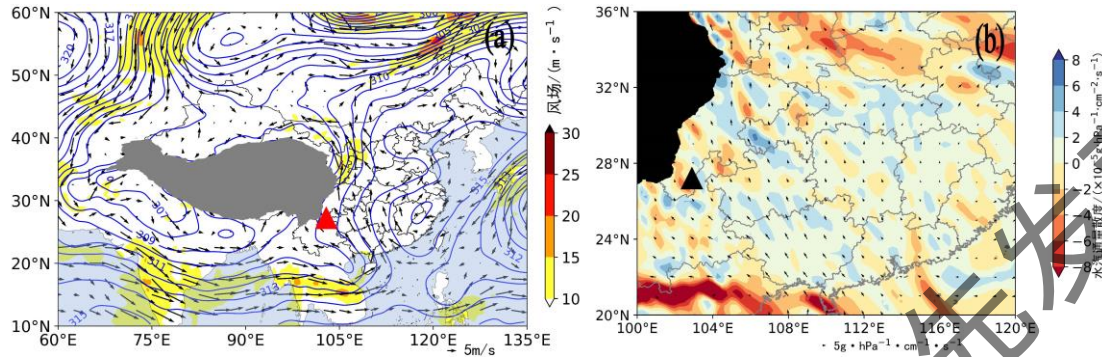


图 11 2018 年 7 月 27 日 22 时 700hPa (a) 位势高度场（等值线，单位：dagpm）及风场（矢量，单位： $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；彩色区为风速大于  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  区域，单位： $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）；(b) 水汽通量（矢量，单位： $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ）及水汽通量散度（彩色区，单位： $\times 10^{-5} \cdot \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ）

$\triangle$  为白鹤滩位置，阴影为青藏高原

Fig. 11 At 22:00 on July 27, 2018, the 700hPa (a) geopotential height field (contour lines, unit: dagpm) and wind field (vectors, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; colored areas represent wind speeds greater than  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); (b) water vapor flux (vectors, unit:  $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and water vapor flux divergence (colored areas, unit:  $\times 10^{-5} \cdot \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )  $\triangle$  is the position of Baihetan, Shades of grey for the Qinghai-Xizang Plateau

## 2.4 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<sup>[28]</sup>，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，500hPa 高度上短波槽东移，与此同时，700hPa 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，使得水汽在坝区辐合，为暴雨大风的发生提供了充足的水汽条件（图 12a）。在副高型暴雨大风中，夏季副高向西移动，坝区位于副高西侧，此时，副高边缘的东南风急流从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 12b）。当坝区受低槽和副高共同影响时，副高边缘的暖湿气流与东移南下的冷空气在坝区上空交汇，形成强烈的对流天气。同时，西南风急流持续输送水汽至坝区，使得水汽此地辐合（如图 12c 所示）。此外，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 12d）。

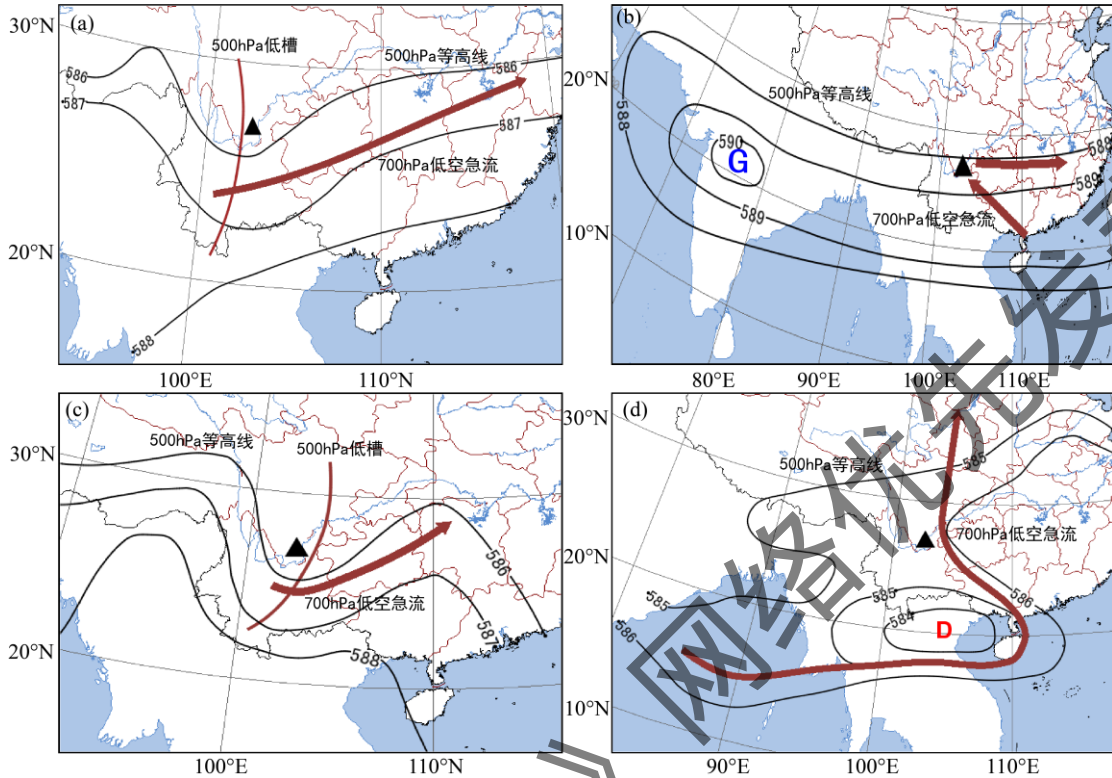


图 12 四类暴雨大风概念模型：(a) 低槽型；(b) 副高型；(c) 低槽和副高共同影响型；(d) 热带低压型（“△”为白鹤滩位置）

Fig. 12 Conceptual model of four types of rainstorm and gale: (a) trough-type; (b) subtropical high-type; (c) trough and subtropical high jointly affecting type; (d) tropical cyclone type ("△" is the position of Baihetan)

### 3 讨论

本文利用地面观测资料和 ERA5 逐小时再分析资料，对 2018—2021 年 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。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，也为暴雨输送充足水汽。已有研究指出<sup>[29-31]</sup>四川盆地夏季暴雨的水汽源地主要包括孟加拉湾、南海和西风带等，这与本文的研究结果一致，但本文的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<sup>[32]</sup>，并采用次网格地形方案对水电站坝区一次大风天气进行数值模拟<sup>[33]</sup>，分析

了大风的成因，本文仅从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。本文虽取得了一些研究成果，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研究，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。

#### 4 结论

本文利用地面观测资料和 ERA5 逐小时再分析资料，对 2018—2021 年湿季白鹤滩水电站坝区 13 次暴雨大风事件的环流形势和低空急流演变特征进行了分析。主要结论如下：

(1) 所选个例的降水日变化特征显著，主要以夜间的强风降水为主。根据 500hPa 环流形势可将暴雨大风过程分为四类，分别为低槽东移型、副高型、低槽和副高共同影响型，以及热带低压型。低槽东移型主要受短波槽东移的影响。副高型是在副高输送充沛水汽的有利条件下发生的。低槽和副高共同影响型主要受二者共同影响，低槽东移带来的冷空气与副高输送的暖湿气流在坝区交汇，产生强降水大风。热带低压型主要受坝区南部热带低压的影响。

(2) 四类暴雨大风过程 700hPa 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，副高西北侧的偏西风急流和偏东南风急流，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) 低槽东移型暴雨大风，500hPa 高度上短波槽东移，与此同时，700hPa 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，使得水汽在坝区辐合，为暴雨大风的发生提供了充足的水汽条件。在副高型暴雨大风中，夏季副高向西移动，坝区位于副高西侧，此时，副高边缘的东南风急流从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。当坝区受低槽和副高共同影响时，副高边缘的暖湿气流与东移南下的冷空气在坝区上空交汇，形成强烈的对流天气。同时，西南风急流持续输送水汽至坝区，使得水汽此地辐合。此外，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。

## 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: 1-2.
- [2] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 225.
- [3] 朱乾根, 林锦瑞, 寿邵文, 等. 天气学原理和方法[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 485-492.
- [4] Miller Robert C. Notes on analysis and severe-storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central, Technical Report 200 (Rev)[R]. Air Weather Service (MAC) United States Air Force, 1972.
- [5] Crisp Msgt Charlie A. Training Guide for Severe Weather Forecasters[R]. AFGWCTN-79/002. United States Air Force, 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(01): 51-64.
- [9] 肖递祥, 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, 肖递祥, 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, 隆麟雪, 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(06): 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(03): 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, et al. Synergism between the low-level jet and organized convection at its exit region[J]. Monthly Weather Review, 2007, 135(4): 1310-1326. DOI: <https://doi.org/10.1175/MWR3317.1>.
- [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: 362-380. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.49709540409>.
- [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): 250-258.
- [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. Heavy rainfall associated with double low-level jets over Southern China. Part I: Ensemble-based analysis[J]. Mon Wea Rev, 2018, 146(11): 3827-3844. DOI:10.1175/MWR-D-18-0101.1.
- [23] 沈向阳. 某水电站局部强降雨灾害应急处置及体会[J]. 福建水利发电, 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] 沈浒英, 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(01): 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(02): 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(04): 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(S01): 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.