

孟思彤,尹晔,白爱娟,等,2024.白鹤滩水电站干季偏北大风环流形势分析和客观判识[J].气象,50(10):1243-1255. Meng S T, Yin Y, Bai A J, et al, 2024. Analysis and objective identification of northerly strong wind circulation pattern for Baihetan Hydroelectric Power Station in dry season[J]. Meteor Mon, 50(10):1243-1255(in Chinese).

白鹤滩水电站干季偏北大风环流形势 分析和客观判识*

孟思彤^{1,2} 尹 晔³ 白爱娟¹ 刘 皓⁴ 郑自君⁴

1 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225

2 吉林省气象科学研究所/长白山气象与气候变化吉林省重点实验室, 长春 130062

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 四川省凉山州气象局, 西昌 615000

提 要: 基于 2018—2020 年 11 月至次年 4 月金沙江下游峡谷区 139 次干季偏北大风天气个例开展大风天气环流形势的分析, 并参考 Lamb-Jenkinson 方法建立客观判识条件, 并对判识条件进行检验和修正。获得以下结论: 选择水电站 15 次典型偏北大风天气, 通过对环流形势特征分析, 将影响大风的高空环流概括为: 南支槽型、高原槽型和横槽型。15 次个例中南支槽型和高原槽型均出现了 6 次, 横槽型出现了 3 次。基于 Lamb-Jenkinson 方法的环流特征参数分析, 确定了干季大风环流客观判识的关键区和初步判识条件。南支槽型和高原槽型判识条件为关键区地转风纬向分量 $u > 10 \text{ dagpm}/10^\circ$ (经度), 且与经向分量 v 的差 $(u-v) > 10 \text{ dagpm}/10^\circ$ (经度), 同时地转涡度 $\xi > 0 \text{ dagpm}/10^\circ$; 横槽型判识条件为关键区 $u < 20 \text{ dagpm}/10^\circ$ (经度), 且要求 $\xi > u$ 。另选取 2021 年干季 14 次大风个例检验以上环流判识条件, 发现有 11 次准确识别出环流类型。根据未识别出环流类型的原因, 对 u 和 $u-v$ 的阈值进行修正, 结果表明修正后的判识条件准确可行。最终建立的环流形势客观判识方法可为白鹤滩水电站大风预警提供参考。

关键词: 白鹤滩水电站, 干季偏北大风, 环流形势, 客观分型

中图分类号: P448, P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.040701

Analysis and Objective Identification of Northerly Strong Wind Circulation Pattern for Baihetan Hydroelectric Power Station in Dry Season

MENG Sitong^{1,2} YIN Ye³ BAI Aijuan¹ LIU Hao⁴ ZHENG Zijun⁴

1 School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 Institute of Meteorological Sciences of Jilin Province/Jilin Provincial Key Laboratory of Changbai Mountain Meteorological & Climate Change, Changchun 130062

3 Hubei Key Laboratory of Intelligent Yangtze and Hydroelectric Science, China Yangtze Power Co. Ltd., Yichang 443000

4 Liangshan Meteorological Office of Sichuan Province, Xichang 615000

Abstract: Baihetan Hydroelectric Power Station is located in the canyon area of the lower reaches of the Jinsha River, with frequent northerly strong wind weather in the dry season. Objectively identifying the circulation system that affects the strong winds of the hydroelectric power station is beneficial for revealing the formation mechanism of strong winds in special areas. Based on 139 cases of northerly strong wind

* 国家自然科学基金项目(U2242202、U2040212)、成都信息工程大学教师科技创新能力提升计划重大项目(KYTD202201)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J012)和高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金项目(SCQXKJYJXMS2022210)共同资助

2023 年 6 月 26 日收稿; 2024 年 7 月 3 日收修定稿

第一作者: 孟思彤, 主要从事天气气候学研究. E-mail: mstong0418@163.com

通讯作者: 白爱娟, 主要从事天气气候学及强对流天气的监测和预警研究. E-mail: baiaj@cuit.edu.cn

weather in the dry season in the canyon area from November to April of 2018–2020, this paper analyzes the circulation situation of strong wind weather, and establishes objective identification conditions with reference to the Lamb-Jenkinson (L-J) method. Moreover, the identification conditions are tested and corrected. The results show that 15 cases of typical northerly strong winds at the hydropower station are selected. According to the analysis of the characteristics of circulation situation, the upper-air circulation affecting strong winds is summarized as southern branch trough, plateau trough and transverse trough. In the 15 cases, the first two types appeared 6 times each and the transverse trough type appeared 3 times. Based on the analysis of circulation characteristic parameters by L-J method, the key areas and preliminary identification conditions of strong wind circulation in dry season are determined. The identification conditions of the southern branch trough and plateau trough types are that the zonal component u of the geostrophic wind in the key area is greater than $10 \text{ dagpm}/10^\circ\text{longitude}^{-1}$, and its difference from the meridional component v is greater than $10 \text{ dagpm}/10^\circ\text{longitude}^{-1}$. At the same time, the vorticity of the geostrophic wind is greater than $0 \text{ dagpm}/10^\circ\text{longitude}^{-1}$. The identification condition of transverse trough type is that the critical area u is less than $20 \text{ dagpm}/10^\circ\text{longitude}^{-1}$, and it is required to be greater than u . In addition, 14 cases of strong winds in the dry season of 2021 are selected to test the above circulation identification conditions. It is found that from 11 of the 14 cases, the circulation types are identified accurately. According to the reason that the circulation type is not recognized, the thresholds of u and the difference between u and v are corrected. The results show that the corrected discrimination conditions are accurate and feasible. The objective identification method of circulation situation could provide a reference for strong wind warning at the Baihetan Hydroelectric Power Station.

Key words: Baihetan Hydroelectric Power Station, northerly strong wind in the dry season, circulation pattern, objective typing

引 言

大风天气在沿海地区、山区和特殊地形区频繁发生。影响大风的天气系统复杂,天气系统的位置和强弱变化是分析大风形成机制的关键。随着现代气象预报业务快速发展和计算机应用技术的显著提高,观测资料和模式预报产品越来越丰富,使得对天气系统的分析日趋客观化和定量化(陈静静等, 2016)。大气环流分型方法就是在计算地转风和涡度等相关参数的基础上,对于与区域气候变化相关的大尺度大气环流进行分类研究(范丽军等, 2005)。通过环流形势的客观分型有利于建立天气系统概念模型,并且有利于探究天气现象的形成机制。环流形势的客观分型是天气学分析的关键依据,该方法已经应用在沙尘暴(高涛等, 2016;赵翠光和刘还珠, 2004)、空气污染(陈龙等, 2016;戴竹君等, 2016;江琪等, 2022;郑凤琴等, 2019)、寒潮(段雯瑜和邓伟涛, 2014)、气温变化(陈海山等, 2004)、大风(滕华超等, 2018;于慧珍等, 2023;曲巧娜和吴炜, 2024)和强

降水(查书瑶等, 2015;钟利华等, 2017;谭桂容等, 2018;蔡金圻等, 2021)等多种天气过程的辨识和预报中。

对各种天气环流形势的客观分型方法中, Jenkinson and Collison(1977)通过定义指数和量化分型标准将 Lamb 主观分型法客观化发展成为 Jenkinson-Collison 法(以下简称 L-J 法)。该方法针对大气环流指数的客观数值分析,从天气气候学上研究局地环流变化,及环流变化与气候变化的联系。国外,其广泛应用于区域环流分型及降尺度分析(Goodess and Jones, 2002)、气候预测(Omstedt and Chen, 2001)和气候变化情景的研究中(Linderson et al, 2004)。例如,Conway and Jones(1998)利用 L-J 法在北欧地区进行了经验统计降尺度的气候型研究;Chen(2000)利用 L-J 法研究了环流型与冬季气温的关系,建立了环流指数与温度距平的回归方程,其拟合曲线可以较好地模拟瑞典 1 月的气温动态变化。国内,在多类天气学分析和气候特征研究中 L-J 法得到推广应用,如朱艳峰等(2007)采用该方法分析了中国 16 个区域不同季节各种环流类

型出现的频率和变化特征;陈龙等(2016)、常美玉等(2020)分别对武汉和成都地区的环流类型进行分析;俞科爱等(2015)运用 L-J 法分析了宁波区域霾的环流类型;刘慧等(2022)采用 Lamb-Jenkinson 客观环流分型方法对影响汾渭平原地区的环流形势进行分型,分析 $\text{PM}_{2.5}$ 污染季影响汾渭平原地区的主要环流形势,发现不同环流型出现的频率不同且各环流型控制下 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度有所差异。

白鹤滩水电站干季大风天气频繁,且以偏北大风为主(范维和居志刚,2013)。选取白鹤滩水电站干季偏北大风个例,采用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 ERA5 再分析数据,从 500 hPa 高度上分析影响大风发生的天气系统类型和位置,利用 L-J 法客观分型的环流特征参数确定影响大风的天气系统关键区和环流形势客观判识条件,并对判识条件进行检验和修正。本文对白鹤滩水电站大风环流形势的分型判识不仅有利于掌握不同大气环流型下大风天气的气候特点,而且有利于获取大风天气的生消和发展机制,同时建立白鹤滩水电站大风概念模型,为该水电站灾害性大风的监测预报预警提供思路。

1 资料和方法

1.1 资料

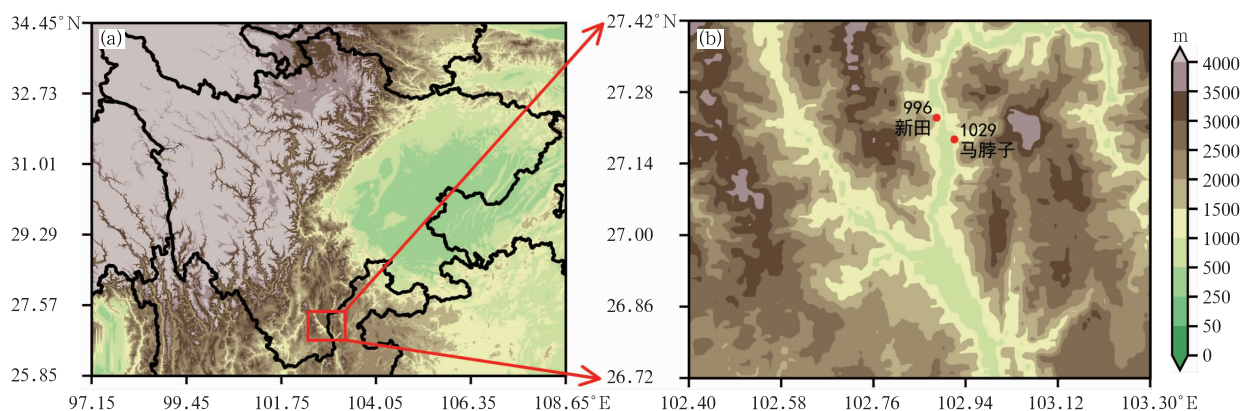
使用 2018—2021 年 ECMWF ERA5 再分析数据计算环流分型指数,数据分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,

包含每日 24 h 数据,垂直方向为 37 个气压层,在此使用气温、垂直速度、位势高度、比湿、涡度和散度等多个气象要素。白鹤滩水电站位于青藏高原东南侧金沙江下游的云南省和四川省交界处,水电站周边地形如图 1a 所示。金沙江南向北经过白鹤滩水电站所在峡谷后,在下游向东转向流出白鹤滩水电站,峡谷地形见图 1b。文中使用白鹤滩水电站左岸的新田和右岸的马脖子区域级气象观测站数据,观测站位置如图 1b 所示,水电大坝横跨于新田和马脖子站中间的河谷。

1.2 研究区域范围和环流分型方法

考虑影响水电站大风的环流系统位置和移动范围,在 $17^\circ \sim 52^\circ \text{N}$ 、 $75^\circ \sim 110^\circ \text{E}$ 区域内,纬度和经度分别每隔 5° 和 10° 选取一个格点,共选取 32 个格点(图 2a),这些格点能够覆盖影响我国各纬度带上的天气系统,选取的格点经纬度见表 1。

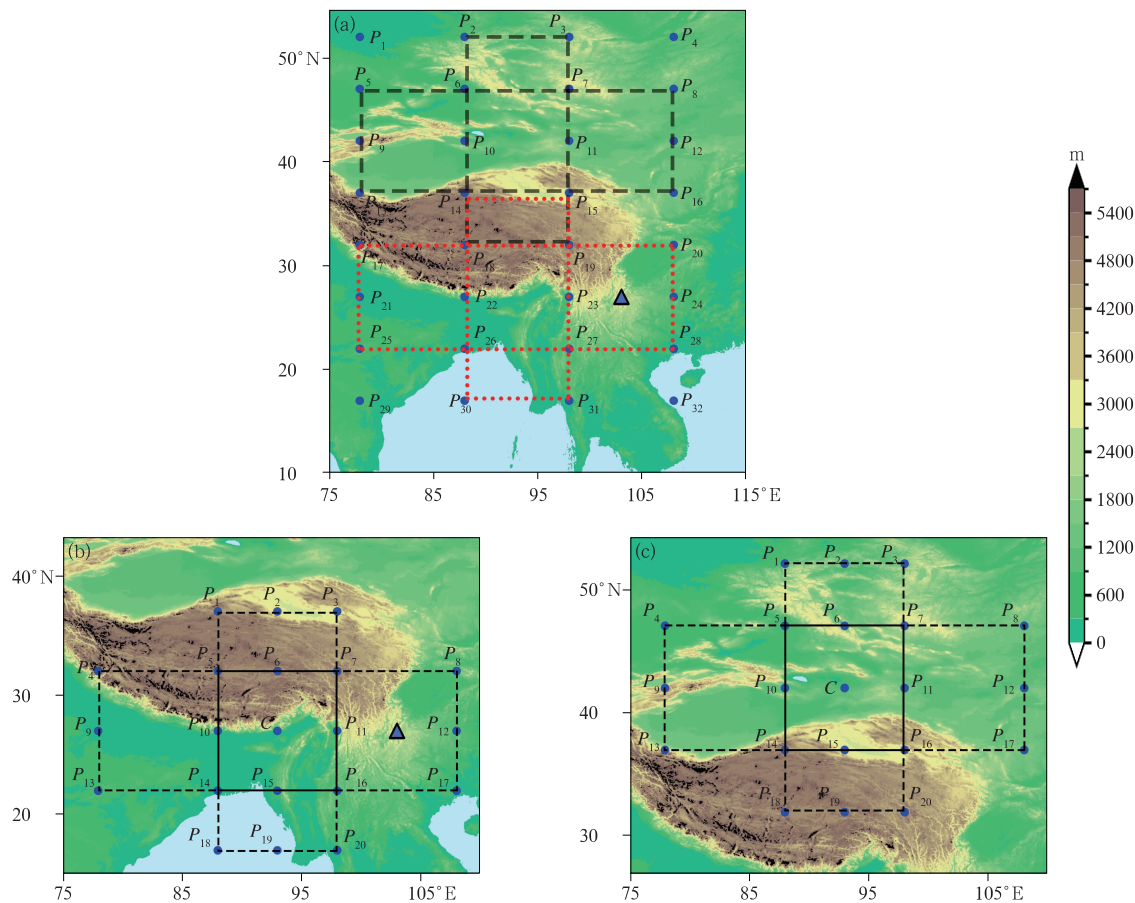
在已有对天气系统的判识研究中多采用海平面气压场(段雯瑜等,2020;朱艳峰等,2007),考虑白鹤滩水电站地形起伏剧烈,边界层大气环流运动复杂多变,并且海平面气压场代表性有限,对大风天气系统的表征作用低,因而此处采用 500 hPa 位势高度场,参照 L-J 法计算环流指数,进行环流形势的分型。参照朱艳峰等(2007)的 L-J 法环流特征参数设置,首先在影响白鹤滩水电站大风的天气系统关键区,计算 500 hPa 高度上的地转风和地转涡度;再根据多次大风中环流特征参数的分布,确定每种类型大风环流形势的判识条件;最后采用大风天气个例,



注:填色为海拔。图 a 中方框为水电站位置。图 b 为图 a 方框放大;红点为观测站;数值为观测站海拔,单位:m。

图 1 白鹤滩水电站(a)周边地形和(b)观测站位置

Fig. 1 (a) The surrounding topography of Baihetan Hydroelectric Power Station and (b) locations of observation stations



注:填色为海拔;蓝点为选取的计算环流指数格点, P_n 为格点序号,三角形为白鹤滩水电站位置;
图 a 中黑色十字型框为北部区域,红色十字型框为南部区域;图 b,c 中 C 为选取的中心点。

图 2 影响白鹤滩水电站大风环流系统(a)全区域,(b)南部区域和(c)北部区域及对应的差分格点
Fig. 2 The strong wind circulation system affecting (a) the entire area, (b) the southern part and
(c) the northern part of Baihetan Hydroelectric Power Station as well as the corresponding differential grid points

表 1 影响白鹤滩水电站大风环流系统选取格点经、纬度

Table 1 Latitude and longitude of grid points for strong wind systems affecting Baihetan Hydroelectric Power Station					
格点	纬度/°N	经度/°E	格点	纬度/°N	经度/°E
P_1	52	78	P_{17}	32	78
P_2	52	88	P_{18}	32	88
P_3	52	98	P_{19}	32	78
P_4	52	108	P_{20}	32	88
P_5	47	78	P_{21}	27	78
P_6	47	88	P_{22}	27	88
P_7	47	98	P_{23}	27	98
P_8	47	108	P_{24}	27	108
P_9	42	78	P_{25}	22	78
P_{10}	42	88	P_{26}	22	88
P_{11}	42	98	P_{27}	22	98
P_{12}	42	108	P_{28}	22	108
P_{13}	37	78	P_{29}	17	78
P_{14}	37	88	P_{30}	17	88
P_{15}	37	98	P_{31}	17	98
P_{16}	37	108	P_{32}	17	108

检验以上判识条件;最终获得每类天气系统的判识条件。

在分析白鹤滩水电站大风的环流形势时,发现活动位置以白鹤滩上游的青藏高原及南侧为主(图 2a 中红色十字型框),其次是我国新疆及其以北地区的中高纬度地区(图 2a 黑色十字型框),将研究区格点划分为南区(图 2b)和北区(图 2c)。利用所选格点 500 hPa 位势高度值,通过中央差分计算方法(朱艳峰等,2007),按照式(1)~式(6),以图 2b 格点为例,将计算出的中心点 C 的地转风和地转涡度作为环流特征参数,用于判识天气系统类型。

$$u = \frac{1}{2}[P_{14} + P_{16} - P_5 - P_7] \quad (1)$$

$$v = \frac{1}{\cos\alpha} \times \frac{1}{4}[P_7 + 2P_{11} + P_{16} - P_5 - 2P_{10} - P_{14}] \quad (2)$$

$$V = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3)$$

$$\xi_u = -\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\sin\alpha}{\sin\alpha_1} \times \frac{1}{2}[P_{18} + P_{20} - P_{10} - P_{11}] - \frac{\sin\alpha}{\sin\alpha_2} \times \frac{1}{2}[P_{10} + P_{11} - P_1 - P_3] \quad (4)$$

$$\xi_v = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{2\cos^2\alpha_1} \times \frac{1}{4}[P_8 + 2P_{12} + P_{17} - P_7 - 2P_{11} - P_{16} + P_4 + 2P_9 + P_{13} - P_5 - 2P_{10} - P_{14}] \quad (5)$$

$$\xi = \xi_u + \xi_v \quad (6)$$

式中: P_n 是格点 n 上的 500 hPa 位势高度值, $n=1, 2, 3, \dots, 20$; $\alpha, \alpha_1, \alpha_2$ 分别为点 C、 P_{15} 和 P_6 的纬度值; u 和 v 分别是地转风(V)的纬向分量和经向分量; $\xi = \xi_u + \xi_v$ 是地转涡度,其中 ξ_u 是 u 的经向梯度, ξ_v 是 v 的纬向梯度。6 个环流特征参数的单位均为 $\text{dagpm}/10^\circ$ (经度)(下文简写为 $\text{dagpm}/10^\circ$)。

2 大风天气的环流系统分类和判识依据

在对风的常规观测中,2 min 平均风速比极大风速和最大风速稳定,而且风速连续性好。因此在大风环流形势的分型中,为了确保获取的结论正确,本文依据 2 min 平均风速值筛选大风事件个例。通常对于风力等级以极大风速 $\geq 13.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的 7 级

大风作为阈值,在此考虑 2 min 平均风速较极大风速小,以 $\geq 10.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的 6 级作为大风阈值。通过对 2018—2020 年白鹤滩水电站各站 2 min 平均风速资料进行普查,从中选取大坝附近的马脖子和新田站同时出现大风的个例。普查中选取大风持续时间超过 2 h 且风速超过 $10.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的个例,发现白鹤滩水电站共出现了 167 次大风天气过程。这些大风天气中有 139 次发生在干季的 11 月至次年 4 月,其中偏北大风有 93 次,其余 46 次为偏南大风,偏北大风中有 28 次出现在雨季的 5—10 月,说明白鹤滩水电站大风的风向以北风为主,即干季的偏北大风对于白鹤滩水电站具有代表性。分析 139 次大风过程,白鹤滩水电站在低层受北方冷空气南侵和南方暖空气北上的共同影响;高空急流出口或入口区,尤其是对流层顶的辐散区,该处强烈的次级环流导致垂直下沉运动增强,诱导高空强风速下沉,影响低空风场,从而导致大风的形成;对流层中层 500 hPa 高度上,高原或以南地区有低槽快速东移,且白鹤滩水电站位于西太平洋副热带高压的西北侧;在 500 hPa 和 700 hPa 高度上,盆地西部和北部有切变,高原东部等压线密集气压梯度力大,冷空气沿高原东部南下,白鹤滩水电站白天快速升温出现高温天气,在夜晚易出现大风天气(图略)。

2.1 大风天气系统的主观分析

利用 ERA5 再分析数据,选取 2018—2020 年新田站风速较大且高空环流系统明显的 15 次大风事件作为典型个例,分析白鹤滩水电站干季偏北大风的 500 hPa 环流形势,确定对流层中层的关键影响系统,过程天气概况和主观环流形势分析结果如表 2 所示。在这些个例中,500 hPa 上都伴随不同纬度带的低槽东移过境,表现为南支槽东移、高原槽东移和北方横槽发展等三类天气系统影响白鹤滩水电站,对应 700 hPa 上的天气系统主要为切变线、低槽和西南涡三类。由表 2 可知,在 15 次白鹤滩水电站干季偏北大风中,南支槽东移、高原槽东移、横槽产生的大风分别为 6、6、3 次,可分别归类为南支槽型、高原槽型和横槽型。

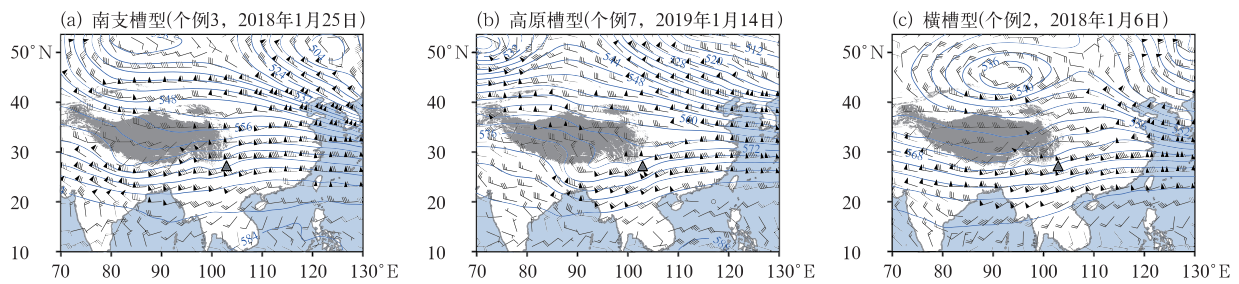
2.2 三类低槽型大风的环流形势分析

选取表 2 中序号为 2、3、7 的 3 次大风作为代表个例,分析大风天气中的环流形势和各类型天气系统特征。由图 3a 可见(个例 3,2018 年 1 月 25 日),

表 2 2018—2020 年白鹤滩水电站偏北大风天气典型个例概况和主观环流形势分析
Table 2 Typical case profiles and subjective circulation situation analysis of northerly strong wind
weather in Baihetan Hydroelectric Power Station from 2018 to 2020

序号	日期/ 年-月-日	最强风速出 现时间/BT	新田站 2 min 最 大风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	马脖子站 2 min 最 大风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	持续时 间/h	500 hPa 系统	700 hPa 系统
1	2018-1-2	21	11.6	10.8	2	南支槽	切变线
2	2018-1-6	16	13.5	10.9	4	横槽	低槽
3	2018-1-25	07	13.7	13.0	6	南支槽	西南涡
4	2018-2-15	06	13.4	12.1	4	高原槽	低槽
5	2018-12-6	21	12.4	12.1	4	高原槽	低槽
6	2018-12-10	16	11.4	13.3	4	横槽	切变线
7	2019-1-14	21	12.5	12.0	2	高原槽	切变线
8	2019-1-19	15	13.3	12.2	4	横槽	低槽
9	2019-1-27	20	13.0	10.9	4	南支槽	低槽
10	2020-1-8	17	12.6	10.9	4	高原槽	低槽
11	2020-1-10	16	13.8	11.2	6	南支槽	切变线
12	2020-1-16	08	14.0	15.5	1	高原槽	切变线
13	2020-1-20	20	13.1	12.4	6	南支槽	低槽
14	2020-1-24	19	13.5	13.9	7	南支槽	切变线
15	2020-12-16	11	13.2	14.2	4	高原槽	切变线

注:阴影为分析代表个例。



注:三角形为白鹤滩水电站位置,阴影为青藏高原地形高度 4000 m 遮蔽。

图 3 白鹤滩水电站三类大风环流形势的 500 hPa 位势高度场(等值线)和风场(风羽)

Fig. 3 The 500 hPa geopotential height field (contour) and wind field (wind barb) of three types of strong wind circulation patterns at Baihetan Hydroelectric Power Station

500 hPa 高度上低槽位于孟加拉湾以西的印度北部,白鹤滩水电站处于低槽前的强西南急流带中,等高线密集。由图 3b 可见(个例 7,2019 年 1 月 14 日),高原低槽从西向东发展,在高原东南侧加强南压,白鹤滩水电站位于低槽前的急流带中。由图 3c 可见(个例 2,2018 年 1 月 6 日),高纬度地区有切断低压发展,低压中心向西延伸成东西向横槽。高原上空浅槽发展,白鹤滩水电站位于横槽南侧的西风带上。由上可见,对于典型大风天气的 500 hPa 环流形势,白鹤滩水电站均处于西风急流带上等高线相对密集区。比较 3 个典型过程,各次过程的低槽位置不同,前两者低槽出现在 $22^{\circ} \sim 35^{\circ} \text{N}$ 的中低纬度,后者位于 40°N 以北的高纬度地区;其次,不同环

流类型的急流风向有差异,前两者以西南风为主,后者为西风;同时,高原槽型和南支槽型大风的环流形势相似,而且高原槽东移中会转换成南支槽,并且两者有合并增强的现象。因此,在环流形势分类中可将低槽最初发展的位置作为依据,用以区分大风环流形势的高原槽型和南支槽型。

3 客观判识方法的建立

针对表 2 中的 15 次大风天气个例,按照 L-J 法获得各环流指数值,并根据环流指数的分布特征分析影响大风天气的环流形势类型,得到环流形势的客观判识条件。

3.1 环流形势客观分型的判识条件

三种低槽型大风低值中心出现位置不同,横槽型的低值中心出现位置位于青藏高原以北,南支槽型和高原槽型的低值中心分别位于高原上和高原南部,因此对表 2 中的个例分型计算环流指数时,南支槽型与高原槽型使用图 2b 中的南部区域格点,横槽型使用图 2c 中的北部区域格点。计算 15 次个例中对应格点的 5 个环流指数(u 、 v 、 ξ_u 、 ξ_v 、 ξ)。

从南支槽型大风的环流指数分布(图 4a)发现,在该类型大风天气 500 hPa 高度上, u 非常高,均大于 $20 \text{ dagpm}/10^\circ$,最小值为 $24.1 \text{ dagpm}/10^\circ$ 。对应的 v 较小,均小于 $5 \text{ dagpm}/10^\circ$,且 u 与 v 的差($u-v$)均大于 $20 \text{ dagpm}/10^\circ$,表明在白鹤滩水电站受南支槽型影响的大风天气中,500 hPa 气流以强盛的纬向风为主,气流经向强度弱,与前文主观分析南支槽型大风白鹤滩水电站受西南风急流一致。同时,所有大风天气中 ξ 均为正值,表明 500 hPa 高度上受到气旋环流系统的控制。分析南支槽型大风中 5 个环流指数分布的差异,发现 ξ_v 的箱型图较短,值多集中分布在 $-1.0 \sim 3.9 \text{ dagpm}/10^\circ$ 。除此之外,在大风发生前后,存在 ξ 由正转负的情现象,说明在大风发生前,有高脊移过该地区。根据以上分析,初步确定判识影响白鹤滩水电站大风天气的南支槽型环流条件为 $u > 20 \text{ dagpm}/10^\circ$, $u-v > 20 \text{ dagpm}/10^\circ$ 。

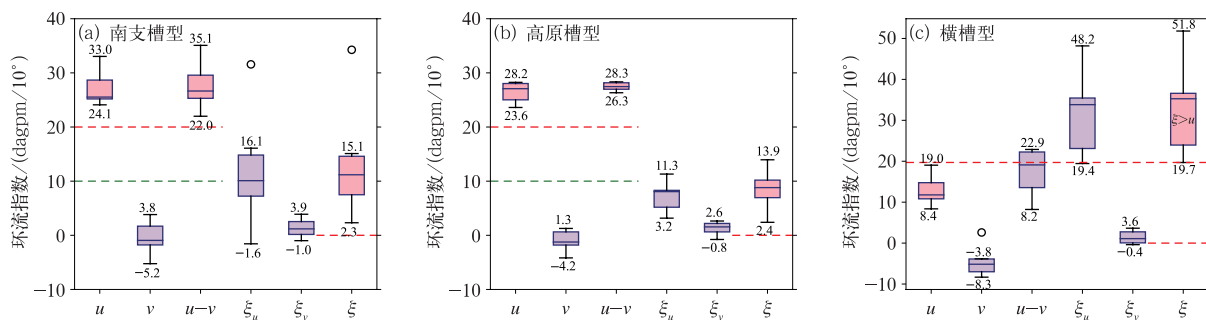
分析高原槽型大风的环流指数分布特征,图 4b 上 500 hPa 高度上地转风 u 均在 $20 \text{ dagpm}/10^\circ$ 以上,最小值为 $23.6 \text{ dagpm}/10^\circ$,而且 v 较小,集中在 $-4.2 \sim 1.3 \text{ dagpm}/10^\circ$,表明在白鹤滩水电站高原槽型大风天气中,与南支槽型大风的环流形势相似,

对流层中层气流以纬向西风为主,经向运动较弱。同时, u 与 ξ 均为正值, $u-v$ 最小值为 $26.3 \text{ dagpm}/10^\circ$ 。综合所述,初步把 $u > 20 \text{ dagpm}/10^\circ$, $u-v > 20 \text{ dagpm}/10^\circ$,且 $\xi > 0 \text{ dagpm}/10^\circ$ 作为这两类低槽型环流形势的判识条件。

对于白鹤滩水电站的横槽型大风天气,图 4c 显示, v 稳定为负值,且最大值为 $-3.8 \text{ dagpm}/10^\circ$,表明偏北风强盛。同时发现横槽型大风的环流指数中 ξ 明显偏大,且都大于 u , u 普遍比南支槽型和高原槽型的 u 值小,说明与南支槽型和高原槽型大风相比,横槽型大风在 500 hPa 高度环流场上,气流的经向运动明显增强,且以偏北风为主,同时北方地区气旋性环流强烈发展。因此,将 $u < 20 \text{ dagpm}/10^\circ$, $\xi > u$ 且对流层中层低压中心处于高原以北,满足以上条件可判识为横槽型。在识别白鹤滩水电站的环流系统时,优先识别其上游的南支槽型与高原槽型,若计算结果未满足判识条件阈值,再进行横槽型的识别。

3.2 三类大风环流形势低槽关键区的确定

影响白鹤滩水电站大风天气的三种低槽系统按其位置不同,可分为低槽高原槽型、南支槽型和横槽型。图 5a 为南支槽型大风概念模型(个例 3,2018 年 1 月 25 日),500 hPa 青藏高原以南到孟加拉湾地区的低槽非常清晰,低槽向东移动经过白鹤滩水电站且存在明显的急流区域。大风发生前,高空西风增强;对应 700 hPa 高度上西南地区有低涡或切变发展,大风前白鹤滩水电站受冷空气影响,冷空气沿北方路径南下,地面降温明显,且气压梯度增强,最终导致大风天气的发生。



注:箱型图上、下横线分别为环流指数最大值和最小值,圆圈为极端值,中间线为中位数,箱体上、下线分别为上四分位数和下四分位数,粉色和紫色箱体分别为判识所用和未用环流指数;红线和绿线分别为调整前和调整中环流指数条件。

图 4 2018—2021 年白鹤滩水电站基于 15 次大风的三类大风环流形势的环流指数箱型分布

Fig. 4 Box plots of three types of strong wind circulation pattern indices based on 15 strong winds at Baihetan Hydroelectric Power Station from 2018 to 2021

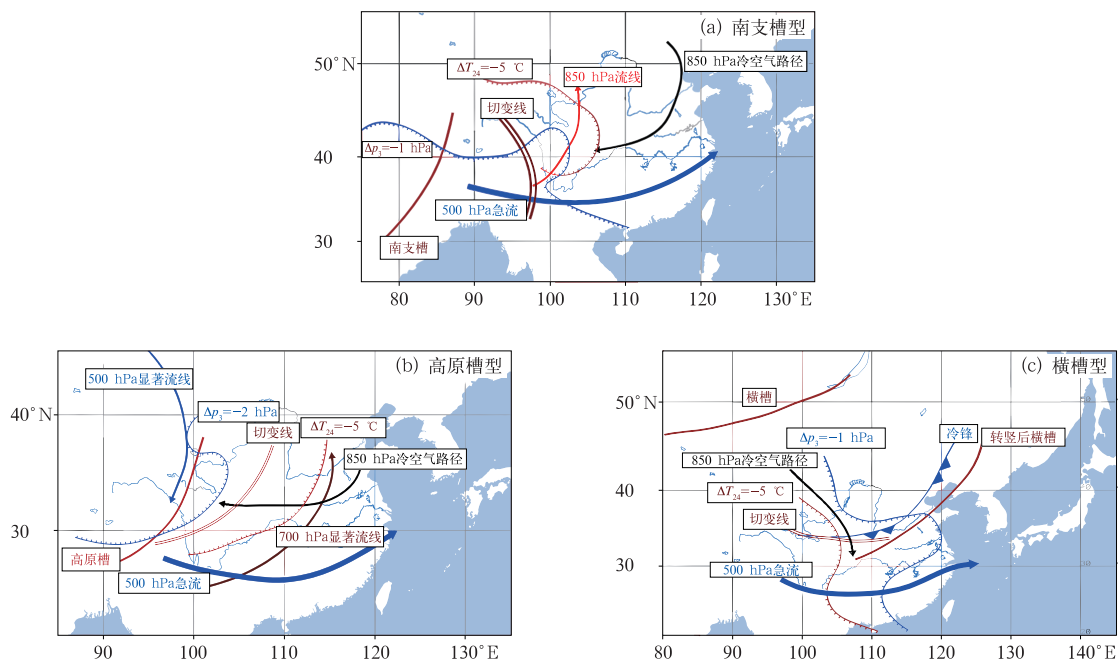


图 5 白鹤滩水电站三类大风环流形势概念模型

Fig. 5 Conceptual model of three types of strong wind circulation patterns at Baihetan Hydroelectric Power Station

图 5b 为高原槽型大风概念模型(个例 7, 2019 年 1 月 14 日), 500 hPa 上高原到白鹤滩水电站以纬向西风为主, 青海到西藏或高原主体有深厚的低槽东移形势。在 700 hPa 环流场上, 白鹤滩水电站位于切变线以南, 低槽与高空槽相对应, 易引发动力抬升。槽后有强的偏北气流, 使槽南压移过白鹤滩水电站。中低层我国北方和西南地区表现为受东部冷空气的影响, 偏北风与西南急流在白鹤滩水电站周边交汇, 白鹤滩水电站处于偏南风的影响区域, 青海东部至四川西部有 3 h 显著负变压, 河北至四川西部有显著负变温。

图 5c 为横槽型大风概念模型(个例 2, 2018 年 1 月 6 日), 横槽型大风发生前, 我国北部出现明显的低压中心, 且向东延伸出一个东西走向的横槽, 随着时间推移, 横槽转竖, 引导冷空气沿西北路径南下, 有明显冷锋出现。700 hPa 与 500 hPa 环流形势相似, 均有横槽出现, 3 h 显著变压区与南支槽型和高原槽型相比偏东。

为了准确识别出三种环流系统, 需要确定其活动的关键区。下文从三类大风 500 hPa 位势高度距平场分析天气系统活动关键区。

3.2.1 南支槽型

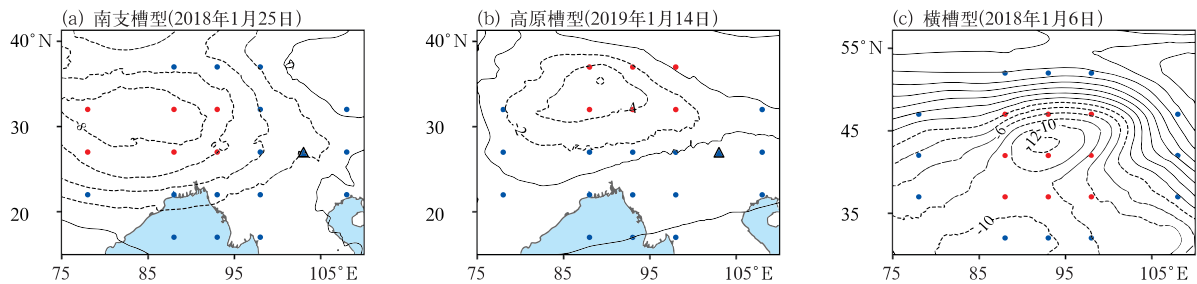
分析 6 次南支槽型大风 500 hPa 的位势高度场(表 2), 以及南支槽型大风时 500 hPa 位势高度相

对于当月平均值的距平, 发现南支槽型大风在距平场上表现出一致性, 因而可通过南支槽型大风典型个例中 500 hPa 距平场展示此类型大风低槽关键区。由图 6a 的 2018 年 1 月 25 日 500 hPa 高度距平场可见, 这次大风在对流层中层表现为东亚大陆为低值环流形势, 即高原及周围大范围地区位势高度值明显偏低, 高原西部是负距平的中心, 距平低于 -8 dagpm, 与我国东部距平差在 4 dagpm 以上。白鹤滩水电站距平为 -6 dagpm, 孟加拉湾距平为 -4 dagpm。

分析南支槽型大风天气的距平场, 可通过中东亚地区是否有一致的负距平场, 即是否存在高原主体向南延伸的大范围负距平区, 来判断是否有南支槽发展, 并且距平场有“东高西低”的特征。为了辨识南支槽型的环流形势特征, 以 500 hPa 高度场上 $P_4 \sim P_6$ 和 P_9 、 P_{10} 、C 格点区域(图 2b, 即图 6a 中 6 个红色格点)为南支槽型的关键区。

3.2.2 高原槽型

分析白鹤滩水电站高原槽型大风 500 hPa 位势高度距平场(图 6b), 在欧亚大陆东部, 距平分布与南支槽型相似, 且我国东部正距平值使“东高西低”距平形势更为清晰, 高原东侧负距平中心(即“西低”的范围缩小), 并且强度减弱。通过距平场的正负中心可判断是否有高原槽发展且达到高原低槽的强



注:红色圆点为负距平中心区域,蓝色圆点为计算环流指数选点,三角形为白鹤滩水电站位置。

图 6 白鹤滩水电站三类大风时 500 hPa 与 1 月平均位势高度距平分布(单位:dagpm)
Fig. 6 Distribution of the 500 hPa and January average geopotential height anomalies of three types of strong winds at Baihetan Hydroelectric Power Station (unit: dagpm)

度。为了判识影响白鹤滩水电站大风的高原槽型,以 500 hPa 高度场上 $P_1 \sim P_3$ 和 $P_5 \sim P_7$ 格点区域(图 2b,即图 6b 中 6 个红色格点)为高原槽型的关键区。

3.2.3 横槽型

分析白鹤滩水电站横槽型大风 500 hPa 距平场(图 6c),东亚大陆呈负距平分布,表现出明显的“北低”形势,白鹤滩水电站以西为宽广的负距平,达 -10 dagpm,白鹤滩水电站周边及以北地区中心距平值低于 4 dagpm,表明白鹤滩水电站附近低空气旋环流增强。与南支槽型大风的距平场相比,2 次个例环流形势的“北低”分布,负距平范围更大,负距平中心位于高原以北的我国新疆和内蒙古以外地区。根据以上分析,为了判识影响白鹤滩水电站大风的横槽,以 500 hPa 高度场上 $P_5 \sim P_7, P_{10}、C、P_{11}$,

$P_{14} \sim P_{16}$ 格点区域(图 2c,即图 6c 中 9 个红色格点)为横槽型的关键区。

根据以上分析结合环流指数分布,总结三类大风环流形势的客观判识条件。其中南支槽型的判识条件为 $u > 20$ dagpm/ 10° , $u - v > 20$ dagpm/ 10° , 且 $\xi > 0$ dagpm/ 10° ;同时距平场负中心出现在青藏高原西部地区。高原槽型的客观判识条件与南支槽型相似,区别在于环流系统的关键区不同,表现为高原槽型的负距平中心位于青藏高原东南部。横槽型的客观判识条件为 $u < 20$ dagpm/ 10° , 且 $\xi > u$, 负距平中心位于青藏高原以北的关键区。具体环流指数阈值和关键区如表 3 所示,在对关键区的判识中,负距平中心出现在任意选定格点处,即视为满足判识条件。

表 3 白鹤滩水电站大风环流形势分类和客观判识条件
Table 3 Classification and objective identification conditions of strong wind circulation pattern at Baihetan Hydroelectric Power Station

判识条件	南支槽型	高原槽型	横槽型
环流指数阈值/(dagpm/ 10°)	$u > 20, u - v > 20, \xi > 0$	$u > 20, u - v > 20, \xi > 0$	$u < 20, \xi > u$
负距平中心格点	图 2b 中 $P_4 \sim P_6$ 和 $P_9、P_{10}、C$	图 2b 中 $P_1 \sim P_3$ 和 $P_5 \sim P_7$	图 2c 中 $P_5 \sim P_7, P_{10}、C、P_{11}, P_{14} \sim P_{16}$
修正后环流指数阈值/(dagpm/ 10°)	$u > 10, u - v > 10, \xi > 0$	$u > 10, u - v > 10, \xi > 0$	$u < 20, \xi > u$

4 判识条件结果检验

上文建立的白鹤滩水电站大风环流形势客观判识方法,需要选择大风天气事件检验判识方法的正确性。选取 2021 年 1—2 月白鹤滩水电站 14 次大风天气个例计算环流指数,并分析 500 hPa 位势高度距平场特征,判识结果见表 4。表 4 中 u 的最大

值为 33.0 dagpm/ 10° ,平均值为 22.1 dagpm/ 10° ,基本符合表 3 的判识依据,但个例 10、12 和 13 未能达到 $u > 20$ dagpm/ 10° 的条件。 ξ 的平均值为 16.3 dagpm/ 10° ,且个例均大于 0 dagpm/ 10° ,满足基本条件。 $u - v$ 的平均值为 23.2 dagpm/ 10° ,有 2 次个例未满足 $u - v > 20$ dagpm/ 10° 的条件。总之,14 次白鹤滩水电站干季偏北大风个例中,仅有 3 次未判识到对应的天气系统,且都是南支槽型,说

表 4 白鹤滩水电站大风环流形势客观判识条件的检验

Table 4 Test of objective identification conditions of strong wind circulation pattern at Baihetan Hydroelectric Power Station

序号	日期/年-月-日	$u/(\text{dagpm}/10^\circ)$	$\xi/(\text{dagpm}/10^\circ)$	$u-v/(\text{dagpm}/10^\circ)$	负距平格点	负距平中心值/dagpm	客观判识	主观判识
1	2021-1-3	28.8	31.0	—	P_5, P_6, P_{10}, P_{11}	-10	横槽	横槽
2	2021-1-7	12.2	23.2	—	P_6, P_7, P_{11}, P_{12}	-10	横槽	横槽
3	2021-1-16	22.7	7.5	27.6	P_6, P_7, P_{11}, P_{12}	-2	南支槽/高原槽	高原槽
4	2021-1-17	33.0	13.1	35.1	$P_{11}, P_{12}, P_{16}, P_{17}$	-2	南支槽/高原槽	南支槽
5	2021-1-20	24.6	35.0	28.3	P_{10}, P_{11}, P_{12}	-8	南支槽	高原槽
6	2021-1-29	26.0	12.4	25.6	P_4, P_9	-4	南支槽	南支槽
7	2021-1-31	25.2	11.8	—	P_6, P_7	-10	横槽	横槽
8	2021-2-1	22.1	11.5	24.3	$P_{10}, P_{11}, P_{12}, P_{15}, P_{16}, P_{17}$	-2	南支槽	南支槽
9	2021-2-6	22.5	13.0	20.9	P_9	-14	南支槽	南支槽
10	2021-2-11	19.1	3.8	20.9	P_5	-6	未识别出	南支槽
11	2021-2-14	20.5	13.8	21.4	$P_9, P_{10}, P_{11}, P_{12}, P_{13}$	-4	南支槽	高原槽
12	2021-2-16	18.4	29.4	18.0	P_9, P_{14}	-8	未识别出	南支槽
13	2021-2-19	13.6	13.7	12.3	P_{14}	-8	未识别出	南支槽
14	2021-2-25	20.2	9.6	21.2	P_5, P_6	-4	南支槽	南支槽

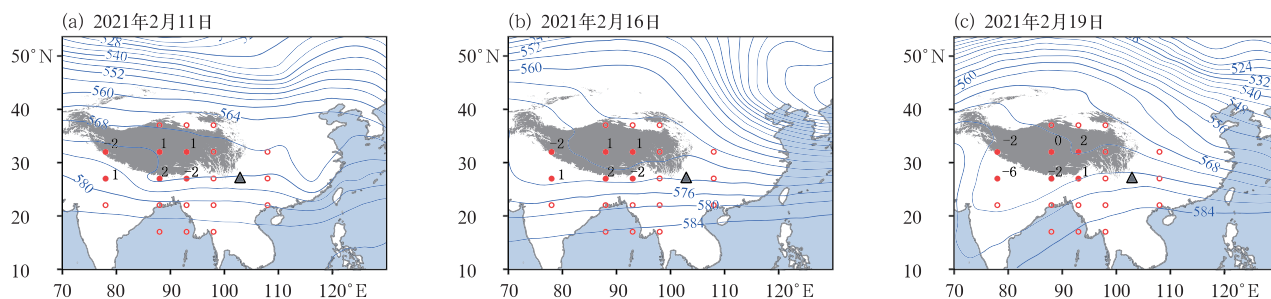
注:加粗数据为满足判识条件的环流指数及负距平中心出现格点,“—”表示横槽未使用环流指数 $u-v$ 。

明所建立的大风环流形势客观判识方法对横槽型的识别效果较好,对南支槽型判识不够准确。

对 14 次大风个例负距平出现的关键区进行分析(表 4),个例 13 的负距平中心未出现在关键区内,有 2 次个例负距平中心区既满足南支槽型又满足高原槽型判识条件的关键区,其余 11 次个例的负距平中心均出现在关键区格点上,且距平中心值最大为 -2 dagpm,最小为 -14 dagpm,值越小说明低槽越深厚。据此,前文确定的三类大风环流形势关键区基本合理,由于高原槽型和南支槽型位置相近,且南北向叠加,负距平中心可同时满足 2 个关键区。

通过对 14 次大风个例的检验发现,有 11 次大风个例计算的环流参数值满足判识条件,说明前文建立的方法能够判识到大风的各类环流形势。低槽是从低压区中延伸出来的狭长区域,槽中间的气压值比两侧气压低,而 L-J 法是通过中心点周围位势高度值的差计算环流指数,来确定中心点气压是否低于四周,从而判断附近是否有槽形成。在 14 次大风个例中,南支槽型和高原槽型大风个例中 u 均大于 $0 \text{ dagpm}/10^\circ$,这与白鹤滩水电站上空 500 hPa 高度上的西风气流吻合。对应的 $\xi > 0 \text{ dagpm}/10^\circ$,说明大风时高空环流表现为气旋性。通过环流指数的分析,确定大风天气确实受低槽气旋性环流的影响。分析对应高度位势高度的距平场分布,能够确定低

压中心出现的位置,对于区分南支槽和高原槽有重要意义。而表 4 中分析个例 3 和个例 4 时,同时识别出了高原槽与南支槽型,是因为两次均为特殊大风天气过程。由个例 3 的 500 hPa 环流形势可见(图略),2018 年 1 月 15 日 22 时南支槽出现在印度半岛,随后在 16 日 02 时发展东移到孟加拉湾附近,同时有高原槽生成,与南支槽在 92°E 上叠加。在个例 4 中,南支槽 2018 年 1 月 17 日 08 时在孟加拉湾形成发展并东移发展,在 14 时至 90°E 与高原槽同位相叠加。2 次个例中,由于高原及其南侧的低槽发展叠加,且同时东移影响到白鹤滩水电站,导致客观分析中同时识别出南支槽与高原槽。这与韦青(2011)提出的高原槽在 500 hPa 高度场上有时会与东移的南支槽同位相叠加的结论相一致。表 4 中个例 10、12 和 13 客观分析不满足判识依据,导致环流型判识失败。图 7a 的 500 hPa 高度显示南支槽在关键区中心附近确有弱槽发展,但由于低槽偏弱,位势高度等值线稀疏,表 4 中个例 10 的 u 为 $19.1 \text{ dagpm}/10^\circ$,未满足 $u > 20 \text{ dagpm}/10^\circ$ 的条件,导致客观方法没有识别出南支槽。图 7b 和 7c 中低槽系统位于印度半岛北部,较常见南支槽位置偏西,其中图 7b 在高原上仅有一条等值线, u 为 $18.4 \text{ dagpm}/10^\circ$ 和 $u-v$ 为 $18.0 \text{ dagpm}/10^\circ$,图 7c 对应 u 为 $13.6 \text{ dagpm}/10^\circ$, $u-v$ 为 $12.3 \text{ dagpm}/10^\circ$ 。3 次个例 u 均没有满足



注:红色空心点为计算环流指数选点;红色实心点为南支槽型判识条件中负距平中心格点区域,数值为该点距平值,单位:dagpm;三角形为白鹤滩水电站位置;阴影为青藏高原地形高度 4000 m 遮蔽。

图 7 白鹤滩水电站 3 次未识别大风个例 500 hPa 位势高度场(等值线,单位:dagpm)
Fig. 7 The 500 hPa geopotential height field (contour, unit: dagpm) of three unidentified strong wind cases at Baihetan Hydroelectric Power Station

大于 20 dagpm/10°的判识条件,且图 7b,7c 的 $u-v$ 值也不满足条件。总之,3 次个例 u 均未满足最初设定的环流指数判识条件,说明判识条件中 u 的要求偏强,从而影响到判识效果。

综上所述,前文确定的环流指数阈值不完全合理,考虑降低 u 及 $u-v$ 阈值来提高对南支槽型的判识效果。3 次个例中, u 的最小值为 13.6 dagpm/10°, $u-v$ 的最小值为 12.3 dagpm/10°,因此考虑将 u 的阈值下调至最接近 12.3 dagpm/10°的整数值 10 dagpm/10°, $u-v$ 阈值下调至 10 dagpm/10°,其余条件不变。经过调整和优化判识条件后,客观识别方法能够准确识别表 4 中的所有天气个例。优化后的环流指数阈值见表 3 中修正后的环流指数阈值。

5 结论和讨论

本文分析了影响白鹤滩水电站大风天气的环流形势,参照 L-J 法结合 500 hPa 的位势高度距平场确定了判识大风环流系统的关键区,建立了白鹤滩水电站大风天气系统的客观判识条件。得到以下结论:

(1)白鹤滩水电站的大风天气是在高低空多种环流系统配合下,由冷空气入侵、气压梯度力加强、高层动量下传、低层大气湍流和地形共同作用,最终导致了白鹤滩水电站大风天气的形成。以 2 min 最大风速大于 $10.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且大风持续时间超过 2 h 为 1 次大风过程,选择 2018—2020 年白鹤滩水电站 15 次大风作为典型个例,分析大风天气的环流形势特征,确定影响大风的环流形势表现为:南支槽型、高原槽型和横槽型。15 次个例中南支槽型与高原槽型出现次

数相同,均为 6 次,横槽型次数少,只有 3 次。

(2)分析典型大风个例的 500 hPa 环流指数和位势高度负距平中心位置,确定三类大风环流形势判识条件。南支槽型和高原槽型的客观判识条件为:地转风纬向分量大于 10 dagpm/10°,并且与经向分量的差大于 10 dagpm/10°,地转涡度大于 0 dagpm/10°。通过位势高度场上负距平中心确定的南支槽型关键区位于青藏高原西南部,高原槽型的关键区在高原东北部。横槽型的客观判识条件为:地转风纬向分量小于 20 dagpm/10°,地转涡度大于地转风纬向分量,负距平的关键区位于高原以北。

(3)选用白鹤滩水电站 2021 年的 14 次大风个例对以上大风环流形势的判识条件进行检验,准确识别出了 11 次对应的天气系统。根据 3 次未能识别出南支槽型大风的环流指数,对判识方法进行修正,将地转风纬向分量和纬向分量与经向分量差的阈值调整为 10 dagpm/10°。修正后的判识方法可作为白鹤滩水电站大风环流形势分析的参考依据。

本文选择 500 hPa 位势高度场对影响峡谷区的天气系统进行分型研究,建立的判识方法简单易行。但由于该区域地形地貌极其复杂,大风的环流形势复杂多变,客观判识方法还需在应用中进一步检验和提高。

参考文献

- 蔡金圻,谭桂容,牛若芸,2021. 基于迁移 CNN 的江淮持续性强降水环流分型[J]. 应用气象学报,32(2):233-244. Cai J Q, Tan G R, Niu R Y, 2021. Circulation pattern classification of persistent heavy rainfall in Jianghuai Region based on the transfer learning CNN model [J]. J Appl Meteor Sci, 32(2):233-244(in Chinese).

- 常美玉, 向卫国, 钱骏, 等, 2020. 成渝地区空气重污染天气形势分析[J]. 环境科学学报, 40(1): 43-57. Chang M Y, Xiang W G, Qian J, et al, 2020. Analysis of the synoptic situation of heavy polluted weather in Chengdu-Chongqing Region[J]. Acta Sci Circu, 40(1): 43-57(in Chinese).
- 陈海山, 朱伟军, 邓自旺, 等, 2004. 江苏冬季气温的年代际变化及其背景场分析[J]. 南京气象学院学报, 27(4): 433-442. Chen H S, Zhu W J, Deng Z W, et al, 2004. Inter-decadal variations of winter air temperature in Jiangsu Province and their physical background[J]. Trans Atmos Sci, 27(4): 433-442(in Chinese).
- 陈静静, 叶成志, 吴贤云, 2016. 湖南汛期暴雨天气过程环流客观分型技术研究[J]. 暴雨灾害, 35(2): 119-125. Chen J J, Ye C Z, Wu X Y, 2016. Objectively classified patterns of atmospheric circulation for rainstorm events in flood season in Hunan[J]. Torr Rain Dis, 35(2): 119-125(in Chinese).
- 陈龙, 智协飞, 覃军, 等, 2016. 影响武汉市空气污染的地面环流形势及其与污染物浓度的关系[J]. 气象, 42(7): 819-826. Chen L, Zhi X F, Qin J, et al, 2016. Surface atmospheric circulation types of air pollution and its relationship with concentration of air pollutants in Wuhan[J]. Meteor Mon, 42(7): 819-826(in Chinese).
- 戴竹君, 刘端阳, 王宏斌, 等, 2016. 江苏秋冬季重度霾的分型研究[J]. 气象学报, 74(1): 133-148. Dai Z J, Liu D Y, Wang H B, et al, 2016. The classification study of the heavy haze during autumn and winter of Jiangsu[J]. Acta Meteor Sin, 74(1): 133-148(in Chinese).
- 段雯瑜, 陈敏东, 黄山江, 等, 2020. 融合 Lamb-Jenkinson 分型法和 LSTM 神经网络的 PM_{2.5} 预测研究[J]. 环境科学与技术, 43(1): 92-97. Duan W Y, Chen M D, Huang S J, et al, 2020. PM_{2.5} prediction based on Lamb-Jenkinson method and LSTM neural network[J]. Environ Sci Technol, 43(1): 92-97(in Chinese).
- 段雯瑜, 邓伟涛, 2014. 淮河流域大气环流型在冬季气温预测中的应用[J]. 气象与减灾研究, 37(1): 6-12. Duan W Y, Deng W T, 2014. Application of winter atmospheric circulation types over Huaihe Valley in temperature forecast[J]. Meteor Dis Red Res, 37(1): 6-12(in Chinese).
- 范丽军, 符淙斌, 陈德亮, 2005. 统计降尺度法对未来区域气候变化情景预估的研究进展[J]. 地球科学进展, 20(3): 320-329. Fan L J, Fu C B, Chen D L, 2005. Review on creating future climate change scenarios by statistical downscaling techniques[J]. Adv Atmos Sci, 20(3): 320-329(in Chinese).
- 范维, 居志刚, 2013. 白鹤滩水电站坝区大风特征分析[J]. 人民长江, 44(19): 32-35. Fan W, Ju Z G, 2013. Analysis on gale characteristics in dam area of Baihetan Hydropower Station[J]. Yangtze River, 44(19): 32-35(in Chinese).
- 高涛, 李一平, 王健, 等, 2016. 2002—2015 年内蒙古大范围、强沙尘暴环流形势的分型特征[J]. 内蒙古气象, (2): 3-8, 12. Gao T, Li Y P, Wang J, et al, 2016. Categorical characters of large and severe dust storm in Inner Mongolia during 2002—2016[J]. Meteor J Inner Mongolia, (2): 3-8, 12(in Chinese).
- 江琪, 桂海林, 花丛, 等, 2022. 济南市大气污染天气分型与冷空气对污染物的影响机制研究[J]. 气象, 48(10): 1281-1291. Jiang Q, Gui H L, Hua C, et al, 2022. Influence mechanisms and weather patterns of air pollution episodes in Jinan[J]. Meteor Mon, 48(10): 1281-1291(in Chinese).
- 刘慧, 张煦庭, 黄鑫, 等, 2022. 影响汾渭平原地区空气污染的地面环流形势及 PM_{2.5} 浓度预报研究[J]. 高原气象, 41(6): 1583-1598. Liu H, Zhang X T, Huang X, et al, 2022. The impact of surface synoptic circulation types on air quality and the PM_{2.5} concentration forecast in Fen-Wei Plains[J]. Plateau Meteor, 41(6): 1583-1598(in Chinese).
- 曲巧娜, 吴炜, 2024. 黄渤海海区风速推算方法及效果评估[J]. 气象, 50(2): 234-245. Qu Q N, Wu W, 2024. Calculation method for wind field in the Yellow Sea and Bohai Sea Area based on coastal actual condition and effect evaluation[J]. Meteor Mon, 50(2): 234-245(in Chinese).
- 谭桂容, 范艺媛, 牛若芸, 2018. 江淮地区强降水分型及其环流演变[J]. 应用气象学报, 29(4): 396-409. Tan G R, Fan Y Y, Niu R Y, 2018. Pattern classification of heavy rainfall in Jianghuai Region and associated circulations[J]. J Appl Meteor Sci, 29(4): 396-409(in Chinese).
- 滕华超, 陈艳春, 杨蕾, 等, 2018. 大气环流客观分型在渤海海峡大风气候特征分析中的应用[J]. 海洋气象学报, 38(3): 119-127. Teng H C, Chen Y C, Yang L, et al, 2018. Application of objective type classification of atmospheric circulation in analyzing climatic characteristics of gale processes over Bohai Strait[J]. J Mar Meteor, 38(3): 119-127(in Chinese).
- 韦青, 2011. 2011 年 1 月大气环流和天气分析[J]. 气象, 37(4): 508-512. Wei Q, 2011. Analysis of the January 2011 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon, 37(4): 508-512(in Chinese).
- 于慧珍, 马艳, 韩旭卿, 2023. 不同天气形势下山东半岛南部沿海大风特征及其成因[J]. 气象科技, 51(1): 94-103. Yu H Z, Ma Y, Han X Q, 2023. Characteristics and causes for gale at southern Shandong Peninsula coast of different circulation patterns[J]. Meteor Sci Technol, 51(1): 94-103(in Chinese).
- 俞科爱, 胡晓, 黄旋旋, 等, 2015. 宁波区域霾过程的天气分型及环流场特征[J]. 气象, 41(12): 1514-1524. Yu K A, Hu X, Huang X X, et al, 2015. Weather types and characteristics of atmospheric circulation for regional haze in Ningbo[J]. Meteor Mon, 41(12): 1514-1524(in Chinese).
- 查书瑶, 伊兰, 赵平, 2015. 冬季华南准静止锋的结构和类型特征研究[J]. 大气科学, 39(3): 513-525. Zha S Y, Yi L, Zhao P, 2015. Structure and type characteristics of the winter quasi-stationary front in South China[J]. Chin J Atmos Sci, 39(3): 513-525(in Chinese).
- 赵翠光, 刘还珠, 2004. 我国北方沙尘暴发生的环流形势分析[J]. 应用气象学报, 15(2): 245-250. Zhao C G, Liu H Z, 2004. Analysis of circulation situation occurring sandstorm in the northern China[J]. J Appl Meteor Sci, 15(2): 245-250(in Chinese).
- 郑凤琴, 曾鹏, 罗小莉, 等, 2019. 广西区域霾过程高低空大气环流型影响分析[J]. 气象科技, 47(4): 655-662. Zheng F Q, Zeng P, Luo X L, et al, 2019. Impact analysis of atmospheric circulation patterns for regional hazes at upper and lower levels in Guangxi[J]. Meteor Sci Technol, 47(4): 655-662(in Chinese).
- 钟利华, 曾鹏, 史彩霞, 等, 2017. 西江流域面雨量与区域大气环流型关

- 系[J]. 应用气象学报, 28(4): 470-480. Zhong L H, Zeng P, Shi C X, et al, 2017. Relationship between areal rainfall and circulation characteristics in Xijiang River basins[J]. J Appl Meteor Sci, 28(4): 470-480(in Chinese).
- 朱艳峰, 陈德亮, 李维京, 等, 2007. Lamb-Jenkinson 环流客观分型方法及其在中国的应用[J]. 南京气象学院学报, 30(3): 289-297. Zhu Y F, Chen D L, Li W J, et al, 2007. Lamb-Jenkinson circulation type classification system and its application in China[J]. J Nanjing Inst Meteor, 30(3): 289-297(in Chinese).
- Chen D L, 2000. A monthly circulation climatology for Sweden and its application to a winter temperature case study[J]. Int J Climatol, 20(10): 1067-1076.
- Conway D, Jones P D, 1998. The use of weather types and air flow indices for GCM downscaling[J]. J Hydrol, 212-213: 348-361.
- Goodess C M, Jones P D, 2002. Links between circulation and changes in the characteristics of Iberian rainfall[J]. Int J Climatol, 22(13): 1593-1615.
- Jenkinson A F, Collinson F P, 1977. An initial climatology of gales over the North Sea[R]. Synoptic Climatology Branch Memorandum, No. 62, Bracknell: Meteorological Office.
- Linderson M L, Achberger C, Chen D L, 2004. Statistical downscaling and scenario construction of precipitation in Scania, southern Sweden[J]. Hydrol Res, 35(3): 261-278.
- Omstedt A, Chen D L, 2001. Influence of atmospheric circulation on the maximum ice extent in the Baltic Sea[J]. J Geophys Res: Oceans, 106(C3): 4493-4500.

(本文责编:何晓欢)