

# 基于三种不同分布函数的西藏东部地区 极大风速估算研究

朱薇薇 郭龙光 泽仁罗布 永青卓嘎  
(西藏昌都市气象局, 昌都 854000)

**摘要:** 基于西藏东部地区9个站点40~67 a的长期观测数据(最早自1953年起)与61个站点2014年后的短期观测数据, 利用三种不同概率密度分布函数, 估算西藏东部地区极大风速并研究其时空分布情况。结果表明: 长期来看, 西藏东部地区位于西风带与季风共同影响区域, 主要以西北风(频率达27%)为主, 99%的样本风速不超过9.0 m/s, 风速超过15.0 m/s的仅占万分之1.6; 对实测极大风速分别进行极值I型、极值II型和极值III型分布函数拟合, 发现不同时期数据拟合后的参数无显著差异; 利用最小二乘法进行检验订正, 可使估算的极大风速的平均绝对偏差和均方根误差大幅降低, 观测数据时间序列越长整体估算效果越好; 基于极值II型函数估算的西藏东部地区极大风速分布能更好地表征该地区实际极大风速的空间分布, 极大风速变化范围为13.2~30.9 m/s。

**关键词:** 西藏东部, 极大风速, 概率密度函数, 累积概率密度, 极值II型(Frechet)分布

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.02.009

## Maximum Wind Speed Estimation in Eastern Tibet Based on Three Different Distribution Functions

Zhu Weiwei, Guo Longguang, Zerenluobu, Yongqingzhuoga  
(Changdu Meteorological Bureau of Tibet Autonomous Region, Changdu 854000)

**Abstract:** Based on the long-term observation data from 9 stations in Eastern Tibet (the earliest since 1953) and the short-term observation data after 2014 from 61 stations, three different probability density distribution functions are used to estimate the maximum wind speed in Eastern Tibet and analyze its spatiotemporal distribution. The results show that in the long term, Eastern Tibet is jointly influenced by the westerly zone and monsoon, with the northwest wind (with a frequency of 27%) as the main wind direction. 99% of the sample wind speeds are no more than 9.0 m/s, and wind speeds exceeding 15.0 m/s only account for 0.016%. Type I, II and III distribution functions are used to fit the measured maximum wind speeds, and it is found that the parameters fitted for different time periods are not significantly different. Using the least squares method for verification and correction can greatly reduce the mean absolute deviation and root mean square error of the estimated maximum wind speed, and the prolonged time series of the observation data brings better overall estimation effect. The estimated distribution of the maximum wind speed in Eastern Tibet that is based on type II function can better reflect the actual spatial distribution of the maximum wind speed in the region, with a range of 13.2 to 30.9 m/s.

**Keywords:** Eastern Tibet, maximum wind speed, probability density function, cumulative density function, Frechet distribution

### 0 引言

风是反映大气流场特征最重要的气象要素之一。由于风的随机性非常强, 风速风向分布在不同站点内也存在较为显著的时空差异。随着全球环境污染日益加重, 风能由于具备储量丰富、分布广泛等优点, 也成为替代传统化石燃料的重要气候资源<sup>[1]</sup>。强风天气

会随着风力的增强对地表植被与设施造成破坏性的影响, 甚至引起人员伤亡。极大风速不仅在风能资源评估时有重要的参考价值, 在植被稀疏地区的风沙活动过程中, 也是重要的影响因子之一<sup>[2]</sup>。研究近地面极大风速的空间分布特征对风能资源开发和生态环境保护均有重要意义。

我国极大风速偏大的地区多集中分布在青藏高原中部、新疆东部以及内蒙古中西部等地<sup>[3]</sup>。青藏高原是我国西南地区生态环境的重要屏障, 也是全球变暖影响最敏感的区域之一<sup>[4]</sup>。近年来, 由于青藏高原的加速增温导致了积雪迅速融化, 降水明显增多, 而高

收稿日期: 2022年10月13日; 修回日期: 2023年3月14日  
第一作者: 朱薇薇(1981—), Email: 14052850@qq.com  
资助信息: 西藏自治区自然科学基金项目(XZ202001ZR0028G, XZ202101ZR0041G); 甘肃省青年人才(团队)项目(2022LQTD55)

原热源却随着全球变暖出现减弱趋势<sup>[5-6]</sup>。青藏高原处于西风和季风的共同影响下<sup>[7]</sup>，地广人稀，风场主要受自然因素影响较大<sup>[8]</sup>，可作为自然背景场开展极大风速研究。

丁一汇等<sup>[8]</sup>研究发现，在全球气候变暖背景下，由于海陆热力-气压差异、东亚季风变率以及相关气候因子的改变等诸多因素，尽管中国地面风速在过去几十年间整体呈现出减弱趋势，但其平均减小速率仅为0.10~0.22 m/(s·10 a)。李艳等<sup>[9]</sup>基于中国地面观测资料与美国国家大气研究中心(NCAR)再分析资料进行长期差异比较，将中国陆地地面风能变化的主要原因归因于人类活动影响。国内诸多科研人员对青藏高原的极大风速分布开展了相关研究。李林等<sup>[10]</sup>利用1971—2001年青藏高原东边缘地区12个气象站风资料，建立了极大风速随海拔高度和地形参数变化的拟合模型。姚慧茹等<sup>[11]</sup>引入集中期和集中度的概念，基于青藏高原气象站极大风速数据和JRA-55再分析资料，分析了1971—2012年高原大风在风季的分布形态及其环流背景。

风速分布本身理应符合极值统计方法的概念模型。在气候统计学上，常用极值I型(Gumbel)分布、极值II型(Frechet)分布与极值III型(Weibull)分布函数对极端气候要素的分布进行拟合<sup>[12-13]</sup>。张铁军等<sup>[14]</sup>在进行西北地区风速模拟订正时使用极值III型分布来描述风速分型；韩爽等<sup>[15]</sup>也在风速预测工作中验证了风速在不同月的分布符合极值III型分布的结论。由此可见，极值分布函数可用来研究风速特征。

受经济发展水平与自然条件限制，我国气象站点分布存在东多西少的客观现状，分布极不均匀。青藏高原的长期观测数据尤其缺少<sup>[16]</sup>。西藏东部地区只有9个站点拥有40 a以上的极大风速观测，对极大风速的空间代表性极为不足。同时气象站点可能在城市化进程中受到影响，这可能在一定程度上影响极大风速分布的判断。虽然中国极端气候事件的群发性规律研究及估算、计算已经较多<sup>[17-18]</sup>。但由于青藏高原观测网的建设能力不足，前人对西藏东部地区极大风速的认知工作还相对欠缺。

本文研究区域位于地势开阔的青藏高原东侧，可以在一定程度上排除人为因素产生的影响。研究以西藏东部地区长期观测的历史风速资料与2014年后新建站点的短期观测风速资料为基础，利用极值I型分布、极值II型分布与极值III型分布三种不同极值概率分布模型，对青藏高原东部区域极大风速进行探索性的估算研究。相关结果对西藏东部地区的极大风速空间分布认知和风能资源利用均具有一定的科学意义。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据来源

本研究使用的观测站点主要位于青藏高原东部区域(91°—100°E、25°—35°N)，分布如图1所示。其中，红色标记的观测站点有7个，为长期观测站点，主要用于极大风速反演建模；蓝色标记的观测站点有2个，同样为长期观测站点，主要用于估算方案验证。所有观测资料均为逐小时资料，站点信息与数据起始年份如表1所示。这9个长期观测站点观测数据最早自1953年起，风速总观测样本数达122.7万余次。2014年后，西藏自治区在前期观测网基础上先后增设了大量自动观测站点。基于这些自动观测站，本文的短期观测站点主要包括两类：橙色点为2016年起观测时间达3 a的站点，黑色点为2018年起观测时间达1 a的站点。在估算过程中，长期站点分别使用2016—2018年的3 a资料与2019年的1 a资料进行相关计算，与短期站点的时间选取范围相一致，最后将估算得到的极大风速与长期观测得到的极大风速值进行检验与拟合订正。

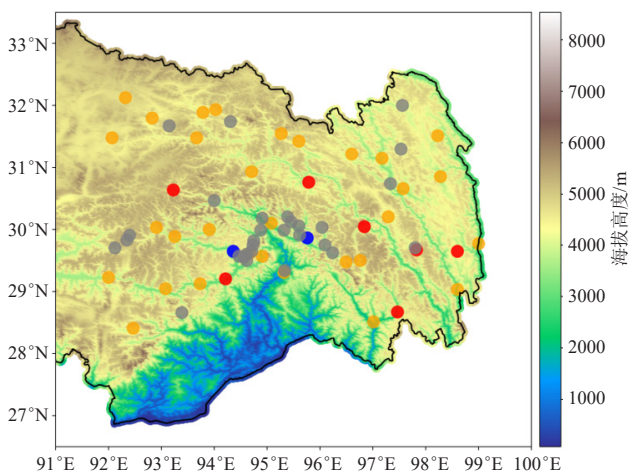


图1 研究区观测站点分布(红点: 40 a以上观测站点, 建模组; 蓝点: 40 a以上观测站点, 验证组; 橙点: 3 a以上观测站点; 灰点: 1 a以上观测站点)

Fig. 1 Distribution of observation stations in the study area (the red dots: observation stations over 40 years used for modeling; the blue dots: observation stations over 40 years used for validation; the orange dots: observation stations over 3 years; the grey dots: observation stations over 1 year)

本研究使用的地面观测风速资料由中国气象局全国综合气象信息共享平台(CIMISS)系统获取，数据经过气候界限值或允许值检查，台站极值检查，定时值、日平均值与日极值间内部一致性检查，时间一致性检查，空间一致性检查，人工核查与更正等质量控制<sup>[19-20]</sup>。数据具有较高的精度与信度，广泛应用于国内外气象科学研究<sup>[21]</sup>。

表1 研究区长期观测站点信息及数据观测说明  
Table 1 Information of long-term observation stations in the study area and observation data description

站点名称	经度/°E	纬度/°N	海拔/m	数据起始年份	功用
林芝	29.65	94.36	2988	1953	验证
波密	29.86	95.76	2728	1954	验证
嘉黎	30.64	93.23	4498	1954	建模
察隅	28.67	97.47	2408	1968	建模
左贡	29.67	97.83	3780	1977	建模
洛隆	30.76	95.79	3611	1978	建模
芒康	29.65	98.6	3846	1978	建模
八宿	30.05	96.84	3454	1979	建模
米林	29.21	94.21	2935	1979	建模

## 1.2 方法介绍

风速观测序列可以表示为  $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ ，在某个固定站点风速多年观测的分布型一般变化幅度不大，符合广义极值分布的概念模型。风速分布理论上应更接近极值I型分布，但由于风速序列的非平稳性、样本量的大小可能使得极值分布函数存在差异性<sup>[20]</sup>。因此，本研究使用极值I型、极值II型和极值III型分布对极大风速值进行估算。三种分布函数计算公式如下：

极值I型概率密度函数：

$$f(x | \mu, \sigma) = \sigma^{-1} \times \exp\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right) \times \exp\left(-\exp\left(-\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right), \quad (1)$$

极值II型概率密度函数：

$$f(x | \mu, \sigma, \kappa) = \sigma^{-1} \times \exp\left(-\left(1 + \kappa \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{\frac{1}{\kappa}}\right) \times \left(1 + \kappa \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\kappa}}, \quad (2)$$

极值III型概率密度函数：

$$\begin{cases} f(x | \sigma, \kappa) = \frac{\kappa}{\sigma} \times \left(\frac{x}{\sigma}\right)^{\kappa-1} \times \exp\left(-\left(\frac{x}{\sigma}\right)^{\kappa}\right) & (x \geq 0) \\ f(x | \sigma, \kappa) = 0 & (x < 0) \end{cases}, \quad (3)$$

式中， $\mu$ 为位置参数； $\sigma$ 为尺度参数； $\kappa$ 为形状参数。这是描述概率密度分布函数的三个主要参数，可通过短期观测资料计算获得。本研究计算参数时参考了赵林等<sup>[22]</sup>与万仕全等<sup>[23]</sup>的研究，使用极大似然法通过逐步迭代进行估算。图2给出了当 $\mu$ 为2.0， $\kappa$ 为1.0， $\sigma$ 为1.5时，三种极值分布函数的理想曲线。从3种极值分布函数特征来看，极值III型分布值在0值后是逐步下降的，最大值不能超过某个固定值，尾端相对较短；极值I型与极值II型均为先增后减的形态，其中极值II型的峰值出现更早，峰值更高，极值I型的尾端相对最短。极值II型分布函数比极值I型和极值III型概率密度分布尾部更长，理论极值更大。

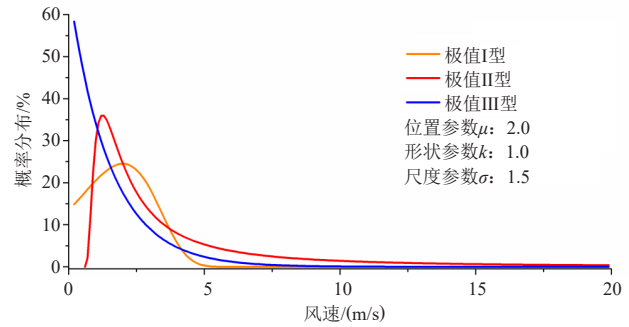


图2 三种极值分布函数理想曲线分布图  
Fig. 2 Ideal linear distribution of three extreme distribution functions

## 1.3 极大风速估算

对于风速极大值  $M_n = \max\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ，当累积概率密度分布  $P(x \leq M_{\max}) \rightarrow 1$  时， $M_{\max}$  应当与  $M_n$  趋于一致。本研究在求得的7个长期建模站点  $M_{\max}$  基础上，进一步采用最小二乘法对不同极值分布型进行线性拟合，得到适用于西藏东部地区的极大风速拟合最优估算算法，并在2个检验站上进行验证对比。利用西藏东部地区长期站与短期站的风速数据样本，拟合三种分布函数的参数，并以平均绝对偏差 (MAD) 和均方根误差 (RMSE) 作为标准，衡量拟合结果的相关程度。拟合出来的分布模型函数，可以得到一定重现期的极大风速值。由于本文所使用的长期观测数据一般为40~67 a，因此采用了50 a作为重现期对极大风速进行估算和验证。由于拟合结果存在一定偏差，需要使用最小二乘法进行拟合修正，结合所有70个站点拟合的三种分布函数的参数，对最后应用至整个地区的站点上进行极大风速估算，得到基于观测结果反演的极大风速空间分布。并对最后结果用MAD和RMSE两个变量进行检验评估。

将每个站点实际观测到的多年风速极大值定义为  $Y\{1, 2, \dots, 7\}$ ，当累积概率密度  $P(x \leq M_{\max}) \rightarrow 1$  时的  $M_{\max}$  定义对应的  $X\{1, 2, \dots, 7\}$ ，然后依最小二乘法对观测值与模拟值进行线性拟合，得到拟合理想值。计算和比较所有9个站点观测值和拟合估算值的偏差情况。以MAD和建模组7站的RMSE进行评价。

$$\text{MAD} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |M_{\max_i} - Y_i|, \quad (4)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{\text{mean}})^2}{n}}. \quad (5)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 风速、风向分布

首先分析西藏东部地区风速风向基本特征，图3

和图4是9个长期观测站风速和风向分布状况。结果表明,该地区近地面风速频次分布呈现明显的极值分布特征,其中风速频次极大值主要为2~3 m/s。从风速箱盒图(图3a)来看,1~7 m/s为西藏东部地区的主要风速范围,占风速观测总样本数的75%;其中有50%样本的风速<4 m/s,风速<9 m/s的样本达到99%;风速极大值为24 m/s。风速>10 m/s的样本为3384次(0.28%),风速>15 m/s的样本为155次(0.016%)。风向玫瑰图(图4)表明该地区主要呈西北风(包括NW、NNW、WNW风向),频率达到27%;其次是东北风(18%)和东风(17%)。受高原南侧地形阻挡,该地区南风偏少,频率不足10%。总体来说,该地区风速与风向分布与地形、西风带和季风共同影响有关。

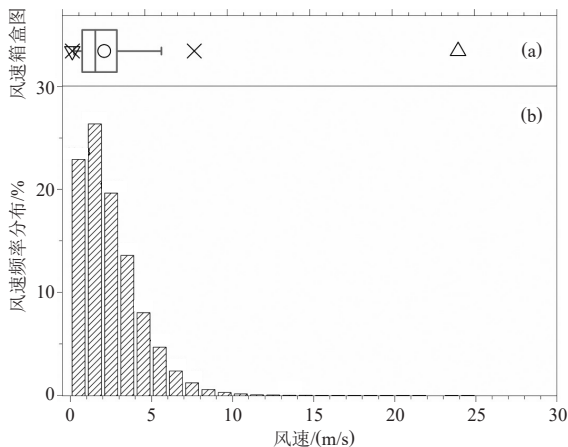


图3 西藏东部地区9个长期观测站点风速频率分布统计  
Fig. 3 Frequency distribution of wind speed at 9 long-term observation stations in Eastern Tibet

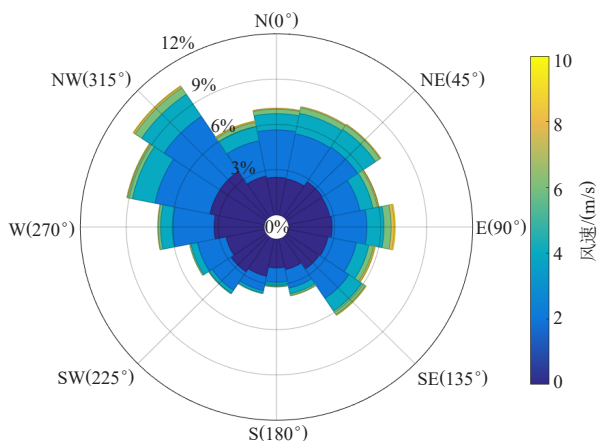


图4 西藏东部地区9个长期观测站点的累计风向玫瑰图  
Fig. 4 Cumulative wind direction rose chart of 9 long-term observation stations in Eastern Tibet

## 2.2 概率密度函数参数计算

以逐小时观测到的极大风速作为样本序列,依照不同站点生成不同时间范围的观测序列,再利用极

大似然法估算不同站点的三种极值分布函数的参数(表2)。考虑到数据为非正态分布,为消除极值影响,采用了中位数(而不是平均数)对结果进行分析。极值I型分布的尺度参数与位置参数分别为1.65和2.38;极值II型分布的形状参数、尺度参数与位置参数分别为0.21, 0.82和1.17;极值III型的形状参数和尺度参数分别为1.42和1.99。可见大多数站点,风速在1 a间(2019年)和3 a间(2016—2018年)的拟合参数数值差异很小,无论是基于极值I型、II型或III型得到的参数差异都较小(相对误差绝对值小于5%),且1 a与3 a结果类似,表明风速的分布状况在不同年份差异不大。值得注意的是,八宿站1 a与3 a情况下估算的参数存在较大差异;特别是极值II型的参数不同情况下估算值存在明显差异。

表2 研究区9个长期观测站点2种时间尺度参数计算结果对比

Table 2 Comparison of calculation results of two time scale parameters for 9 long-term observation stations in the study area

站点	数据年限/a	极值 I 型		极值 II 型		极值 III 型		
		$\sigma$	$\mu$	$\kappa$	$\sigma$	$\mu$	$\kappa$	$\sigma$
嘉黎	1	2.011	2.994	0.193	1.004	1.367	1.456	2.385
	3	2.275	2.927	0.307	0.946	1.140	1.264	2.175
洛隆	1	1.993	3.205	0.136	1.117	1.521	1.479	2.578
	3	2.023	3.226	0.112	1.117	1.583	1.532	2.626
波密	1	1.523	2.198	0.307	0.660	0.93	1.411	1.712
	3	1.608	2.118	0.295	0.642	0.864	1.341	1.601
八宿	1	2.850	5.490	-0.093	2.321	2.938	1.474	4.518
	3	1.001	1.673	0.117	0.553	0.856	1.649	1.396
林芝	1	1.756	3.092	0.129	0.983	1.616	1.731	2.614
	3	1.508	2.365	0.105	0.779	1.236	1.679	1.992
米林	1	1.382	1.859	0.227	0.618	0.797	1.365	1.433
	3	1.305	1.775	0.244	0.586	0.748	1.346	1.361
左贡	1	1.595	2.305	0.334	0.707	0.937	1.359	1.775
	3	1.686	2.342	0.406	0.713	0.847	1.228	1.717
芒康	1	2.400	4.208	0.062	1.621	2.043	1.435	3.394
	3	2.466	3.708	0.291	1.245	1.495	1.293	2.824
察隅	1	1.576	2.391	0.115	0.839	1.193	1.567	1.984
	3	1.442	2.239	0.234	0.797	0.942	1.302	1.731

为进一步分析不同分布函数参数估算差异的原因,分别选择了参数差异最小的洛隆站与差异最大的八宿站分别绘制风向风速玫瑰图(图5)与风速累积概率密度分布图(图6)。洛隆站在1 a与3 a结果中无明显差别,这主要是因为洛隆县位于怒江河谷地区,风速风向受地形强迫明显,主要呈现风向沿河谷方向的特征。而八宿站1 a与3 a风向风速玫瑰图则存在显著差异,虽然风向差异不大,但风速的分布存在较明显差异。这会间接导致风速本身的分布形态最接近的极值分布函数的形态和类型发生改变,进而出现在不同极

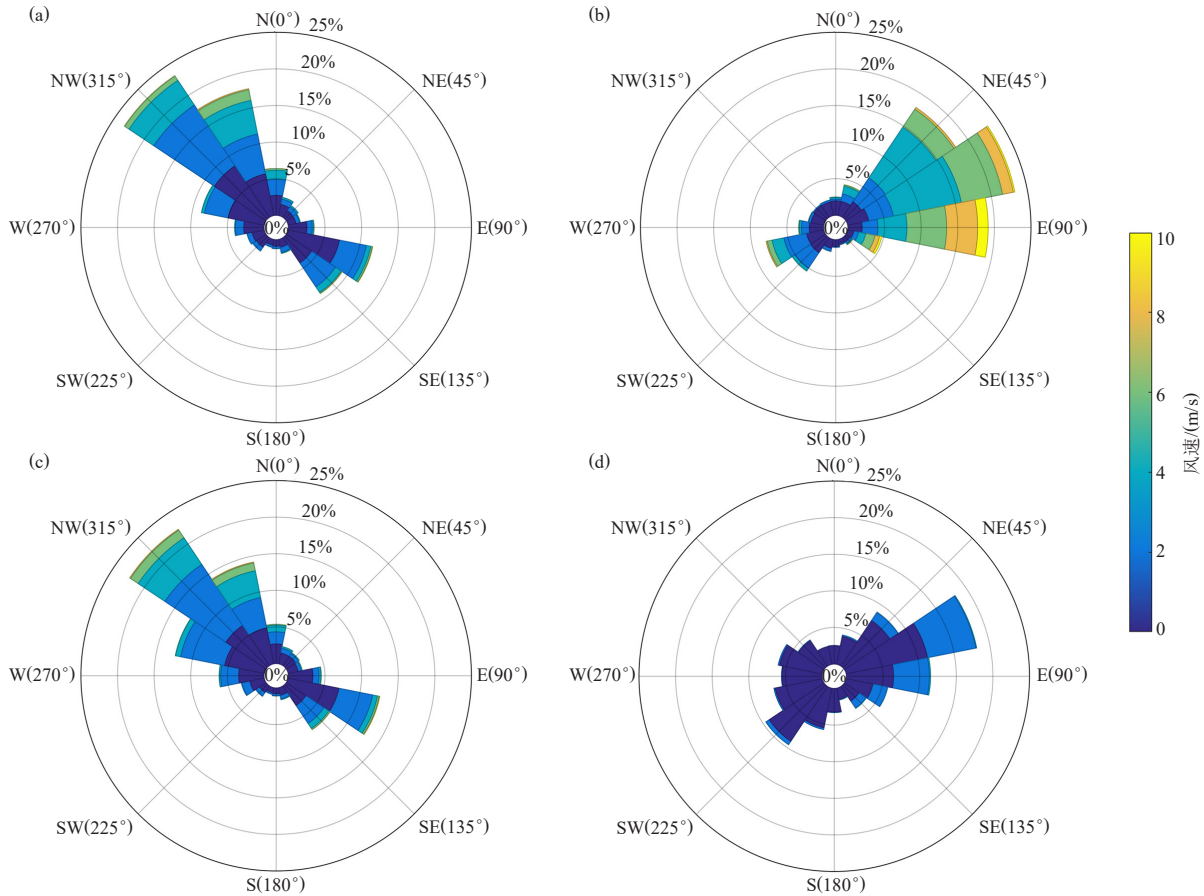


图5 洛隆站、八宿站两种时间尺度风向风速玫瑰图对比  
(a) 洛隆站1 a期; (b) 八宿站1 a期; (c) 洛隆站3 a期; (d) 八宿站3 a期

Fig. 5 Rose charts comparison of wind direction and wind speed at Luolong and Basu Stations  
(a) 1 a period at Luolong; (b) 1 a period at Basu; (c) 3 a period at Luolong; (d) 3 a period at Basu

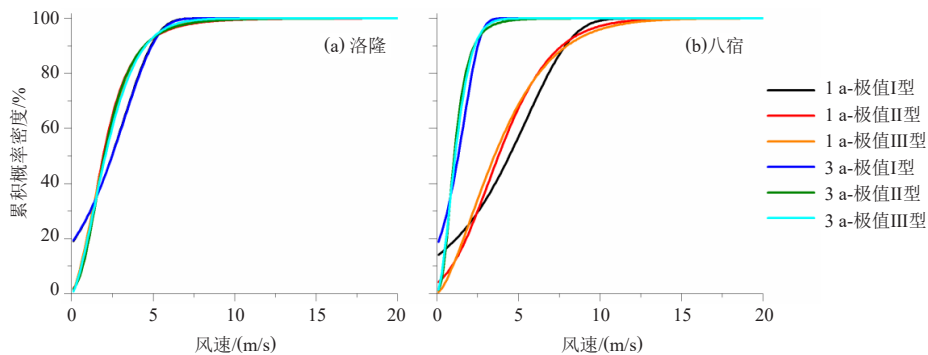


图6 洛隆站、八宿站风速累积概率密度分布图

Fig. 6 Cumulative probability density distribution of Luolong and Basu Stations

值分布函数反演参数拟合上的显著差异, 并对最终极大风速的估算结果产生较大影响。八宿站3 a间风速明显偏低, 这应当与该地区的气候背景发生改变有关, 例如可能与季风强度的变化有关<sup>[24]</sup>。由于八宿站风速风向本身随时间的差异性较为显著, 进而造成不同时间段的概率密度极值分布函数参数差异较大。从累积概率密度分布来看, 洛隆站两种时间段的累积概率密度

分布曲线几乎一致, 由此可见观测风速分布情况对极大风速的估算产生影响。当单站短期风速分布型与长期分布型相一致时, 极大风速的估算会更为准确。

### 2.3 长期站点极大风速估算、订正及验证

进一步分析参数的估算结果, 分别依长期站点得到了不同的累积概率密度分布曲线, 并进一步分为建模组(7个站点)和验证组(2个站点)。其中验证组2个

站点分别为林芝站与波密站。这两个站的观测时间比较早，风速的观测年限为67 a，极大风速相对而言较为准确，更具代表性；另一方面这两个站点位于所有9个长期站点经度靠中部的的位置，与其他站点的空间距离相对更近，风速形态差异相对较小。

平均绝对偏差结果如图7所示。原始结果整体以极大风速的估值偏低为主，平均绝对偏差可达6~11 m/s，无法正确反映西藏东部地区多站点的极大风速分布情况，这主要受模型本身累积概率密度的客观分布影响。经过最小二乘法的拟合修正后，整体的平均绝对偏差有了明显降低。将建模用的观测数据时限设定为1 a，估算结果订正后平均绝对偏差降至2.8~4.0 m/s，均方根误差为0.8~1.5 m/s；将建模用的观测数据时限扩展至3 a时，订正后的平均绝对偏差将进一步降至2.4~2.8 m/s，均方根误差则为1.1~1.8 m/s（表3）。验证站结果表明，基于西藏东部地区7站得到的最大风速估算较为准确，平均绝对误差为1.6~1.8 m/s。

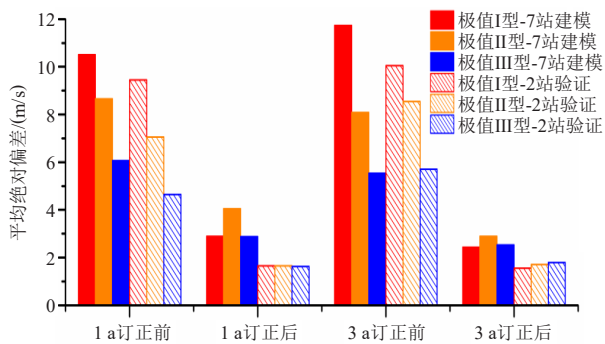


图7 研究区长期观测站点订正前后的平均绝对偏差对比  
Fig. 7 Comparison of mean absolute deviations before and after correction of long-term observation stations in the study area

经过对长期站点进行拟合订正，并对订正前后偏差进行评估分析，可以得到以下结论：基于3 a数据估算的极大风速整体优于1 a期估算结果，3种分布函数对极大风速估算整体效果都较好，极值II型分布效果最好，其次是极值III型分布，最后是极值I型分布。进一步设定了两组方案，方案1的3 a与1 a估算结果均选择了极值II型方案，方案2则选择了极值II型方案的3 a估算结果与极值III型方案的1 a估算结果进行集成，使用Kriging空间局部插值法求得西藏东部地区极大风速分布情况（图8）。整体来看，与均采用极值II型分布的方案1相比，极值II型与III型结合的方案2反演得到的极大风速值范围更为集中。方案1反演得到的极大风速范围为13.2~30.9 m/s，方案2反演得到的极大风速范围为16.7~23.2 m/s。在整个西藏东部地区，方案

表3 研究区长期观测站点订正系数与订正前后偏差评估  
Table 3 Correction coefficient of long-term observation stations in the study area and bias estimation before and after correction

年限/a	拟合函数	拟合系数a	拟合系数b	平均绝对偏差/(m/s)		均方根误差/(m/s)	
				订正前	订正后	订正前	订正后
1	极值I型	0.39	15.41	10.27	2.61	10.48	0.82
	极值II型	0.42	11.50	8.32	2.20	3.82	1.46
	极值III型	0.15	16.32	5.76	2.59	6.25	0.82
3	极值I型	1.07	10.81	11.36	2.23	11.48	1.84
	极值II型	0.18	16.02	8.47	2.23	7.11	1.08
	极值III型	0.29	14.59	5.58	2.37	6.36	1.25

1表现为西侧与东侧各有极大风速值偏高的区域，中部地区极大风速值偏低。其中，西侧极大风速值偏高的结论与孔锋等<sup>[3]</sup>对我国极大风速偏大的地区多集中在青藏高原中部的结论相一致。方案2虽然在西侧地区也有极大风速偏大区域，但表现并不明显。整体来看，全面使用极值II型的方案1对极大风速进行估算，表现可能更接近西藏东部地区实际风速分布状况。具体原因如下，从西藏东部地区9个观测站点长期风速频次分布统计图（图3）来看，西藏东部风速高频区主要集中在3.0 m/s之下，频率峰值在2.0 m/s。西藏东部这种单侧分布较突出的风速型，最接近图2中极值II型分布的理想曲线，其次接近于极值III型分布的理想曲线。由于极值II型分布可以获得更高一些的风速极值，这也是极值II型方案在西藏东部模拟效果优于极值III型和极值I型方案的理论原因。由于风速分布本身的区域差异性，造成了不同的区域应当选择适应当地的最优方案，才能获得更好的风速极值估算结果。例如，甘肃在风电研究中发现，甘肃多地风速更适用于极值III型方案<sup>[25]</sup>；而对于中国台风在东南沿海地区的最适极值分布，极值I型方案明显优于其他两种分布<sup>[26]</sup>。这也对中国不同区域的极大风速估算模型提出更精细化的要求。

### 3 结论

以西藏东部地区9个观测站点的长期观测数据与61个观测站的1~3 a短期观测数据为基础，分析了西藏东部多年风速分布状况。结合广义极值分布3种不同函数，分别估算了多年观测下极大风速的分布状况，并通过短期观测站点将极大风速估算算法推广到西藏东部地区，研究结论如下。

1) 西藏东部地区主导风向为西北风，西北风的总频率分布可达27%，南风为频率最低的主导风向，不足10%。风速与风向的整体分布与地处高原与西风带的位置相符合，同时也受季风影响。长期观测

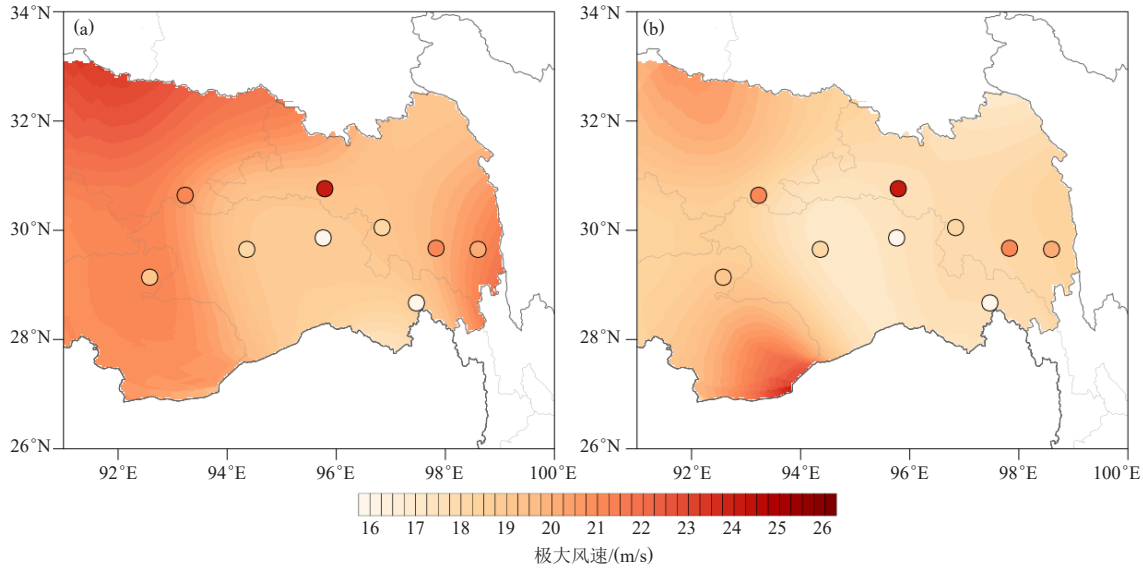


图8 西藏东部地区极大风速估算结果

(a) 极值II型方案3 a估算结果+极值II型方案1 a估算结果; (b) 极值II型方案3 a估算结果+极值III型方案1 a估算结果

Fig. 8 Estimate results of maximum wind speed in Eastern Tibet

(a) 3 a estimation result of type II maximum wind speed+1 a estimation result of type II maximum wind speed;  
(b) 3 a estimation result of type II maximum wind speed+1 a estimation result of type III maximum wind speed

中, 9.0 m/s以下的风速达到了总观测样本数的99%, 15.0 m/s以上的风速出现的占比非常低, 仅有万分之1.6。

2) 大多数站点, 风速在1 a (2019年)和3 a (2016—2018年)使用极值I型、II型或是III型反演后的参数并不存在显著差异, 可以满足极大风速的估算假设。也有个别站点1 a与3 a概率密度拟合参数由于风速分布形态上存在一定程度的差异, 导致出现较大差异的反演参数, 这会对进一步估算极大风速产生影响。

3) 基于累积概率密度分布函数结果和最小二乘法对长期观测站点的极大风速订正后平均绝对偏差和均方根误差有了大幅降低。1 a结果订正后平均绝对偏差降至2.8~4.0 m/s, 3 a结果订正后的平均绝对偏差进一步降至2.4~2.8 m/s。验证组的结果平均绝对偏差也低至1.6~1.8 m/s。结果证明1 a及3 a方案均可用于极大风速推算, 数据时期越长对极大风速的估算效果越好。

4) 极值II型分布的理想分布曲线更接近于西藏东部地区的实际风速分布, 极值III型分布的效果次之。西藏东部地区的西侧与东侧各有极大风速值偏高的区域, 中部地区极大风速值偏低, 极大风速范围为13.2~30.9 m/s。

影响我国极大风速分布的原因多种多样, 主要表现为地面拖曳力的变化、气候变暖对气压梯度与热力梯度力的影响、东亚季风的变化、气候因子的变化等

诸多因素。在西藏东部地区, 地形强迫影响是需要考虑的重要影响因子之一。在未来的工作中, 我们将针对具体因子去评价不同因子对西藏东部地区极大风速的影响, 以求获得更好的西藏东部地区极大风速空间分布状况。

致谢: 感谢西藏自治区气象信息中心提供的西藏东部地区站点多年气象观测资料及质量控制工作。

#### 参考文献

- [1] 贺德馨. 中国风能发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2011, 13(6): 95-100.
- [2] 马鹏飞, 张正偲, 论珠群培, 等. 雅鲁藏布江曲水—泽当段风沙活动动力条件分析与风沙灾害防治建议[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 10-18.
- [3] 孔锋, 孙劭, 王鹏. 1961—2018年中国风速均值和极端值的时空演变特征[J]. 灾害学, 2021, 36(2): 89-96.
- [4] 段安民, 肖志祥, 吴国雄. 1979—2014年全球变暖背景下青藏高原气候变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(5): 374-381.
- [5] 吴浩, 颜鹏程, 侯威, 等. 近百年及未来百年PDO位相年代际转变检测及其早期预警信号研究[J]. 大气科学, 2022, 46(2): 225-236.
- [6] 杨萍, 侯威, 颜鹏程. 亚洲季风区过去700年来夏季极端干/湿事件多尺度变化特征分析[J]. 灾害学, 2016, 31(4): 95-102.
- [7] 郭莉, 祝从文. 西风与季风在青藏高原的耦合模态及其季节性变化特征[J]. 大气科学, 2022, 46(4): 1017-1029.
- [8] 丁一汇, 李霄, 李巧萍. 气候变暖背景下中国地面风速变化研究进展[J]. 应用气象学报, 2020, 31(1): 1-12.
- [9] 李艳, 王元, 储惠芸, 等. 中国陆域近地层风能资源的气候变异和下垫面人为改变的影响[J]. 科学通报, 2008, 53(21): 2646-2653.
- [10] 李林, 李卫林, 王振宇, 等. 青藏高原东边缘山区极值风速推算方法的研究[J]. 高原气象, 2006, 25(6): 1028-1033.
- [11] 姚慧茹, 李栋梁. 青藏高原风季大风集中期、集中度及环流特征

(下转73页)

2) 丽江机场强降水天气形势主要有7种, 其中切变冷锋型和两高合并型是丽江机场强降水的最主要天气形势, 占比40%; 切变冷锋型主要出现在夏初至盛夏的5—8月; 两高合并型主要出现在夏末初秋的8—10月; 两高辐合型和副高西伸型均出现在6—9月副高强盛期间; 南支槽型主要出现在春末夏初的4—6月和夏末初秋的8—11月; 孟加拉湾低压型和台风外围型主要出现在盛夏的7—8月。

3) 强降水期间丽江机场上空整层为垂直上升速度大值区, 是产生强降水的必要条件。强降水的水汽主要来自700 hPa高度, 低层水汽辐合, 高层辐散, 有利于水汽向上垂直运动, 从而产生强降水天气。

4) 通过HYSPLIT模式分析, 丽江机场雨季700 hPa水汽输送通道中西南路径占比最大, 孟加拉湾是丽江机场雨季最主要的水汽来源; 7—8月副高强盛、台风活动频繁, 有一定的南海方向水汽输送; 8—9月受川滇切变线和西南涡影响有少量来自川渝地区的水汽输送; 9月因高空切变线和地面冷空气开始活动, 有少量冷空气沿东北路径入侵, 常造成丽江机场出现锋面过境的连阴雨天气。

#### 参考文献

- [1] 周鹏康, 秦金梅. 云南1981—2010年雨季暴雨时空分布特征[J]. 云南地理环境研究, 2016, 28(4): 63-69.
- [2] 邹灵宇, 于璐, 杨柯, 等. 云南不同强度短时强降水和大风时空分布特征研究[J]. 高原山地气象研究, 2022, 42(2): 32-37.
- [3] 李耀孙, 原韦华, 孙绩华, 等. 云南雨季和干季小时降水的时空特性分析[J]. 高原山地气象研究, 2021, 41(3): 24-32.
- [4] 马志敏, 杨素雨, 王治国, 等. 云南局地暴雨分型研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2020, 42(1): 108-118.
- [5] 马文倩, 陈小华, 李华宏, 等. 云南一次极端强降水过程成因和地形影响分析[J]. 高原山地气象研究, 2021, 41(4): 25-34.
- [6] 陈小华, 李华宏, 何钰, 等. 云南切变线类短时强降水MCS特征分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2022, 44(3): 550-559.
- [7] 刘磊, 闵颖, 尹丽云. 云南地区强降水物理量场特征分析[J]. 云南地理环境研究, 2019, 31(6): 53-59.
- [8] 苏锦兰, 张万诚, 宋金梅, 等. 云南小时降水的时空分布变化研究[J]. 气象, 2021, 47(2): 133-142.
- [9] 王治国, 米瑞芝, 闵颖, 等. 云南一次两高辐合型短时强降水过程的成因分析[J]. 中低纬山地气象, 2021, 45(3): 48-55.
- [10] 马文倩, 向影, 牛法宝, 等. 云南盛夏一次低涡强降水天气过程诊断分析[J]. 中低纬山地气象, 2022, 46(1): 1-9.
- [11] Draxler R R, Hess G D. Description of the HYSPLIT\_4 modeling system: NOAA technical memorandum ERL ARL-224[R]. Silver Spring, Maryland: Air Resources Laboratory, 1997: 1-22.
- [12] Draxler R R, Hess G D. An overview of the HYSPLIT\_4 modeling system of trajectories, dispersion, and deposition[J]. Australian Meteorological Magazine, 1998, 47(4): 295-308.
- [13] 米瑞芝, 牛法宝, 向影, 等. MJO影响下2016年云南首场强降水过程的成因分析[J]. 干旱气象, 2017, 35(2): 232-238, 249.
- [14] 朱蒙, 康暑雨, 张艳玲. 豫东地区短时强降水时空分布特征及物理量指标分析[J]. 气象与环境科学, 2020, 43(3): 116-123.
- [15] 蓝俊倩, 张浩川, 徐月飞. 一次有冷空气侵入的梅汛期大暴雨过程诊断分析[J]. 气象与环境科学, 2018, 41(3): 71-80.
- [16] 王欢, 李晶, 庞玥, 等. 2013年重庆秋季连阴雨期间暴雨过程对比分析[J]. 气象与环境科学, 2018, 41(3): 89-97.
- [17] 李京梅. 2014年夏末秋初三门峡市连阴雨成因分析[J]. 气象与环境科学, 2017, 40(2): 115-119.
- [18] 刘林春, 刘炜, 孙鑫, 等. 内蒙古河套地区极端降水特征分析[J]. 干旱气象, 2020, 38(4): 535-542.
- [19] 姜艳. 热带气旋西行造成的远距离降雨特征分析[J]. 高原山地气象研究, 2019, 39(1): 20-25.
- [20] 高松, 陈贵川, 吴钰, 等. 一次西南低涡影响下的川渝地区暴雨个例分析[J]. 干旱气象, 2019, 37(4): 597-612.
- [21] 郑婧, 陈娟, 徐星生, 等. 一次低空急流加强下的暴雨过程成因分析[J]. 干旱气象, 2020, 38(3): 411-422.
- [22] 李扬, 张娇艳, 向波. 全球变暖背景下西太平洋副热带高压变化的探讨[J]. 高原山地气象研究, 2019, 39(2): 8-13.
- [23] 张万诚, 马涛, 郑建萌, 等. 秋季水汽输送特征及其与云南降水的关系[J]. 气象, 2014, 40(3): 336-348.

(编辑: 郑秋红)

(上接66页)

- [12] 陈兴旺. 广义极值分布理论在重现期计算的应用[J]. 气象与减灾研究, 2008, 31(4): 52-54.
- [13] 段忠东, 肖玉凤, 肖仪清, 等. 基于数值模拟的台风危险性分析综述(II)——随机抽样模拟与极值风速预测[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(2): 1-8.
- [14] 张铁军, 颜鹏程, 张正英, 等. 多种订正技术在风电场风速预报订正中的应用[J]. 干旱气象, 2018, 36(5): 835-844.
- [15] 韩爽, 杨勇平, 刘永前. 三种方法在风速预测中的应用研究[J]. 华北电力大学学报, 2008, 35(3): 57-61.
- [16] 刘媛媛, 何文春, 王妍, 等. 气象大数据云平台归档系统设计与实现[J]. 气象科技, 2021, 49(5): 697-706.
- [17] 杨萍, 侯威, 封国林. 中国极端气候事件的群发性规律研究[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 365-370.
- [18] 侯威, 章大全, 周云, 等. 一种确定极端事件阈值的新方法: 随机重排去趋势波动分析方法[J]. 物理学报, 2011, 60(10): 790-804.
- [19] 赵煜飞, 张强, 余予, 等. 中国小时风速数据集研制及在青藏高原地区的应用[J]. 高原气象, 2017, 36(4): 930-938.
- [20] 王晓惠, 巫黎明, 张洋, 等. 基于非平稳Gumbel分布模型的设计风速及抗风风险研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(11): 3309-3315.
- [21] 杨萍, 刘伟东, 王启光, 等. 近40年我国极端温度变化趋势和季节特征[J]. 应用气象学报, 2010, 21(1): 29-36.
- [22] 赵林, 葛耀君, 项海帆. 极值风速拟合优化策略[J]. 同济大学学报, 2003, 31(4): 383-388.
- [23] 万仕全. 中国降水与温度极值的时空分布规律模拟[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [24] 吴佳, 吴婕, 闫宇平. 1961—2020年青藏高原地表风速变化及动力降尺度模拟评估[J]. 高原气象, 2022, 41(4): 963-976.
- [25] 李万润, 张广隶, 李林, 等. 基于长期实测数据的西北地区风力发电场风速风向联合概率分布分析[J]. 兰州理工大学学报, 2022, 48(3): 115-124.
- [26] 曹诗嘉, 侯静雅, 方伟华, 等. 基于站点实测风速的中国台风大风重现期估计[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 229-234.

(编辑: 郑秋红)