

赵嘉琪,张春来,魏国茹.阿拉善右旗不同时间尺度的风速概率分布[J].中国沙漠,2023,43(2):37-42.

阿拉善右旗不同时间尺度的风速概率分布

赵嘉琪,张春来,魏国茹

(北京师范大学 地理科学学部 地表过程与资源生态国家重点实验室/防沙治沙教育部工程研究中心,北京 100875)

摘要: 利用阿拉善右旗1960—2015年整点风速数据,分析了日、月、年风速累积概率分布。结果表明:WeibullCum分布函数在描述风速累积概率分布时具有不同时间尺度的普适性。在多年平均逐日和逐月风速累积概率分布函数中,4个常数项存在周期性变化规律,而在1960—2015年逐年分布函数中,4个常数项分别具有周期性变化规律和减小趋势。对比2016—2020年不同时间尺度起沙风速频率统计结果和利用风速累积概率分布函数计算的结果发现,分布函数对月和年起沙风的频率具有很高的预测精度,而对日起沙风频率的预测能力不足,这是由日时间尺度上风的不确定性造成的。

关键词: 风速累积概率分布; WeibullCum分布函数; 起沙风

文章编号: 1000-694X(2023)02-037-06

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00115

中图分类号: P425

文献标志码: A

0 引言

风是塑造地表形态的主要驱动力和地球表面重要的可再生资源,风力及其在时空尺度上的变异特征,是风沙地貌、土壤风蚀和沙漠化等领域研究的重要内容,也是风能资源开发利用重点关注的问题。风速概率分布是统计风速数据、进行风能资源评价的重要手段。其中,Weibull分布函数^[1]由于能够较好地反映实际风速频率分布而得到广泛应用^[2-11]。然而,相关研究主要证实了Weibull分布函数对描述风速概率分布的适用性,没有对该函数中的常数项可能存在的时空变化规律进行更深入的挖掘。陈练等^[12]利用中国557个气象站点长达40年的日均风速,统计得到日均风速的Weibull分布函数,并计算了平均风能密度和可利用风能时数,但没有考虑分布函数中参数的月际变化规律。有些学者虽然给出了Weibull分布函数中逐月、逐年不同的参数固定值^[13-14],以及参数的月际变化规律^[15],但未能建立能够反映月、年变化的统一概率分布函数,导致不同时间尺度风速分布之间缺乏应有的联系。此外,已有研究大多为日平均甚至月平均风速的概率分布,由于数据时间分辨率太低,导致在起沙风速统

计、风能资源评价等应用中存在计算精度不足。

本文以地处内蒙古高原西部、风沙活动频发、风能资源丰富的阿拉善右旗为例,通过分析不同时间尺度整点风速的概率分布,尝试建立不同时间尺度的风速概率分布函数,以期为中国北方沙区风况数据的高效统计以及风能资源的快捷评价和预测提供有益参考。

1 研究方法

采用的气象数据为阿拉善右旗气象站(39°13'N、101°41'E,海拔1 510 m)1960年1月1日至2020年12月31日整点风速数据。数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。其中,1960—2015年数据用于统计不同时间尺度的风速累积频率分布,2016—2020年数据用于对所得到的风速累积概率分布函数进行检验。

不同时间尺度的平均风速,采用相应时段内的全部整点风速进行统计得到,包括1960—2015年逐年平均风速、1—12月逐月和1~365 d逐日多年平均风速。1960—2015年逐年、月、日风速频率分布,采用相应时段内的风速进行统计。将统计得到的频

收稿日期:2022-05-08; 改回日期:2022-08-01

资助项目:国家自然科学基金重点项目(41630747)

作者简介:赵嘉琪(1999—),女,内蒙古乌海人,硕士研究生,研究方向为土壤风蚀。E-mail: 202121051013@mail.bnu.edu.cn

通信作者:张春来(E-mail: clzhang@bnu.edu.cn)

率数据,利用 TableCurve 2D v5.01 软件(SYSTAT Software Inc.)进行拟合分析,分别得到各时间尺度的风速概率分布函数,用均方根误差来检验风速概率分布函数对实际风速频率的拟合优度。

2 结果与分析

2.1 月平均和年平均风速频率分布

阿拉善右旗多年平均风速为 $3.63\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 年均风速最大为 $5.00\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (1972 年), 最小为 $2.86\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (1992 年)。总体而言, 月平均风速以 4—5 月最大, 在 56 年内只有 5 月和 6 月出现过平均风速大于 6.0

$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速; 11 月至次年 1 月风速最小(表 1)。2—6 月, 高风速频率逐渐增加, 7 月至次年 1 月高风速频率逐渐降低(图 1)。

2.2 整点风速概率分布

统计表明, 逐日、逐月、逐年风速累积概率分布均符合 WeibullCum 函数分布:

$$P_{(d,m,y)} = A \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{U + C \ln 2^{1/D} - B}{C} \right)^D \right] \right\} \quad (1)$$

式中: $P_{(d,m,y)}$ 为某日(1~365)或某月或某年风速小于 $U(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 的累积概率(%); A 、 B 、 C 、 D 为分布函数中的常数项。

表 1 逐月平均风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)统计特征

Table 1 Statistical characteristics of monthly average wind speed

风速指标	月 份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
多年平均	2.95	3.42	3.92	4.15	4.23	4.09	3.98	4.06	3.59	3.15	3.03	2.98
最大值	5.49	4.58	5.78	5.78	6.13	6.34	5.73	5.85	5.03	4.28	5.02	4.80
最小值	1.48	2.28	2.60	2.83	2.60	2.86	2.90	2.42	2.23	2.12	1.91	1.76
标准偏差	0.78	0.63	0.75	0.78	0.81	0.77	0.71	0.78	0.64	0.59	0.71	0.64

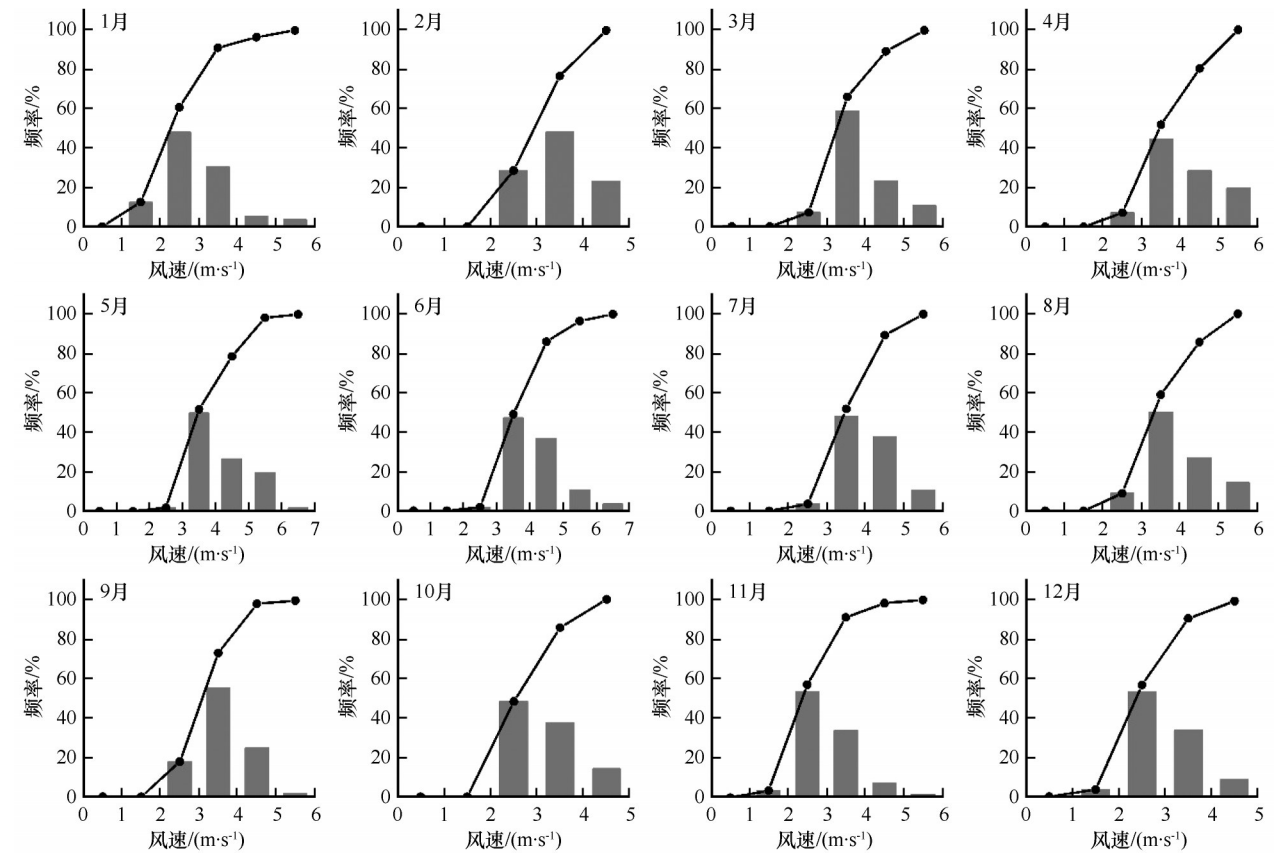


图 1 阿拉善右旗逐月平均风速频率分布和累积频率分布

Fig.1 Monthly average wind speed frequency distribution and cumulative frequency distribution in Alxa Youqi

2.2.1 逐日风速累积概率分布

将逐日风速累积概率分布函数中的常数项 A 、 B 、 C 和 D 分别命名为 A_d 、 B_d 、 C_d 和 D_d 。其中, A_d 在1~365 d中呈微小波动变化特征(标准差为0.31),不随日期发生趋势性变化,而是接近于一个定值99.94; B_d 、 C_d 、 D_d 则不同,均随日期变化而表现为1—4月逐渐增大,5—7月处于峰值,8—12月逐渐减小至1月初的水平(图2)。进一步统计表明, B_d 、 C_d 、 D_d 逐日变化趋势满足关系式(2):

$$(B_d, C_d, D_d) = a + \frac{b}{1 + \left(\frac{x - c}{d}\right)^2} \quad (2)$$

式中: x 为日,介于1~365。 B_d 的函数关系式中, $a=0.9285$ 、 $b=2.7317$ 、 $c=162.78$ 、 $d=157.52$; C_d 的函数关系式中, $a=1.5897$ 、 $b=3.9262$ 、 $c=172.51$ 、 $d=165.49$; D_d 的函数关系式中, $a=1.1872$ 、 $b=0.7249$ 、 $c=182.23$ 、 $d=85.66$ 。

将 $A_d=99.94$ 代入(1)式,同时联立 B_d 、 C_d 、 D_d 的函数关系式,即可计算任意日期、任意风速范围内的风发生的概率。以4月10日为例($d=101$),该日期10 m·s⁻¹以下风速发生的累积概率为 $P_{d(U=10)}=95.89\%$, 11 m·s⁻¹以下风速发生的累积概率为 $P_{d(U=11)}=97.29\%$,

$$\begin{cases} A_m = 99.94 \\ B_m = 0.742\sin(2\pi x/11.996 + 4.807) + 2.937 \quad (R^2 = 0.77, P < 0.05) \\ C_m = 0.986\sin(2\pi x/11.994 + 4.680) + 4.418 \quad (R^2 = 0.49, P < 0.05) \\ D_m = 0.264\sin(2\pi x/11.995 + 4.455) + 1.506 \quad (R^2 = 0.34, P < 0.05) \end{cases} \quad (3)$$

式中: x 为月份。联立 WeibullCum 分布函数和(3)式,即可计算任意月份、任意风速范围内的风发生的概率。

2.2.3 逐年风速累积概率分布

将逐年风速累积概率分布函数中的常数项 A 、

$$\begin{cases} A_y = 0.371\sin(2\pi x/88.313 + 1.960) + 100.15 \quad (R^2 = 0.44, P < 0.05) \\ B_y = 0.612\sin(2\pi x/57.278 + 5.375) + 2.470 \quad (R^2 = 0.74, P < 0.05) \\ C_y = (4.091 \times 10^7/x^2 - 8.185)^2 \quad (R^2 = 0.59, P < 0.05) \\ D_y = -0.00376x + 9.065 \quad (R^2 = 0.1, P < 0.05) \end{cases} \quad (4)$$

式中: x 为年份。联立 WeibullCum 分布函数和(4)式,即可计算任意年份、任意风速范围内的风发生的概率。同时,利用(4)式,估算 A_y 和 B_y 的变化周期分别约为89年和57年。

2.3 风速累积概率分布在起沙风概率计算中的应用

大于临界起沙风速的风称为起沙风。临界起

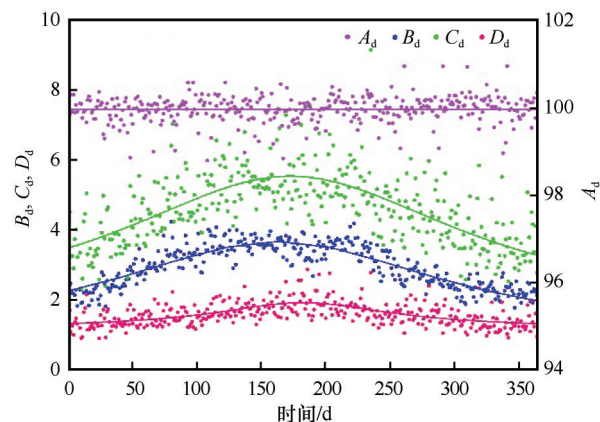


图2 A_d 、 B_d 、 C_d 、 D_d 逐日变化

Fig.2 Daily variation of A_d , B_d , C_d and D_d

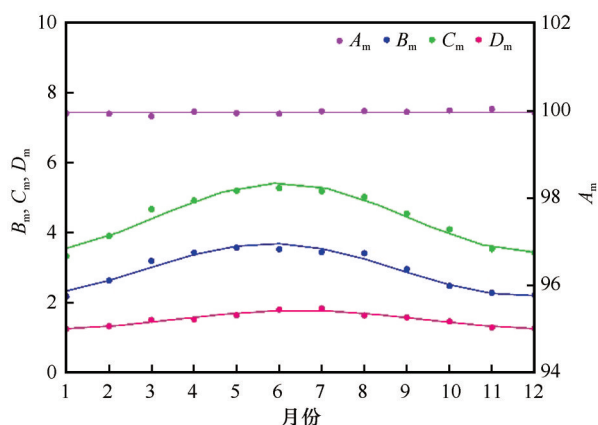
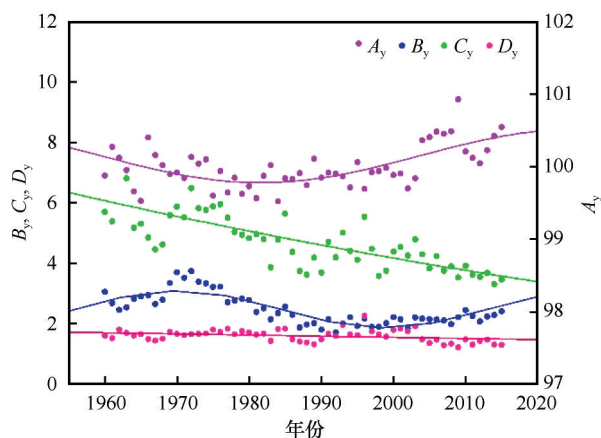
则4月10日10~11 m·s⁻¹风速发生的概率为 $P_{d(U=11)} - P_{d(U=10)}=1.4\%$ 。17 m·s⁻¹以下风速发生的累积概率为 $P_{d(U=17)}=99.33\%$,则当日大风概率为 $1 - P_{d(U=17)}=0.67\%$ 。

2.2.2 逐月风速累积概率分布

将逐月风速累积概率分布函数中的常数项 A 、 B 、 C 和 D 分别命名为 A_m 、 B_m 、 C_m 和 D_m 。其中, A_m 为定值($A_m=99.94 \pm 0.09$),不随月份而变化; B_m 、 C_m 、 D_m 随月份不同而变化(图3),且满足相同形式的函数关系式(3):

B 、 C 和 D 分别命名为 A_y 、 B_y 、 C_y 和 D_y 。结果表明,1960—2015年4个常数项均发生有规律的变化(图4)。其中, A_y 和 B_y 的变化显示出一定的周期性, C_y 和 D_y 略具减小趋势。 A_y 、 B_y 、 C_y 、 D_y 分别与年份之间大致满足如下相关关系:

沙风速取决于地表植被覆盖和沙粒粒径、含水率等诸多因素^[16],但在起沙风的统计中,一般并不考虑植被覆盖和沙面含水率等因素。陈渭南等^[17]在塔克拉玛干沙漠腹地的观测表明,该地区干燥、裸露沙丘沙的冲击起动风速约为6 m·s⁻¹(气象站观测的10 min平均风速,与整点风速记录相同)。在阿拉善右旗邻近的巴沙丹吉林沙漠,2 m高度的临界起沙风速被确定为5 m·s⁻¹^[18],同样接近于气象站观测的

图3 A_m 、 B_m 、 C_m 、 D_m 逐月变化Fig.3 Monthly variation of A_m , B_m , C_m and D_m 图4 A_y 、 B_y 、 C_y 、 D_y 逐年变化(1960—2015年)Fig.4 Variation of A_y , B_y , C_y and D_y from 1960 to 2015

$6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速。本文采用的风速数据全部为气象站观测资料,因此将研究区临界起沙风速确定为 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 风速 $\geq 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风为起沙风。

2.3.1 逐日起沙风概率和可能时数计算

利用逐日风速累积概率分布函数,计算逐日起沙风概率和可能时数。方法如下:

$$P_{d(U \geq 6)} = 1 - P_{d(U=6)} \quad (5)$$

$$T_{d(U \geq 6)} = T_{d0} [1 - P_{d(U=6)}] \quad (6)$$

式中, $P_{d(U \geq 6)}$ 为某日起沙风概率; $P_{d(U=6)}$ 为当日风速等于 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的累积概率; T_d 为当日起沙风可能时数(h); T_{d0} 为每日小时数(24 h)。计算表明,逐日起沙风发生概率和可能时数表现为第1~147天小幅度上升,第139~149天(5月18—28日)出现日起沙风概率和可能时数峰值($P_{d(U \geq 6)} = 22.3\%$, $T_{d(U \geq 6)} = 5.4 \text{ h}$); 147天以后日起沙风概率和可能时数逐渐减小至全年最低水平。逐日起沙风概率和可能时数最小值($P_{d(U \geq 6)} = 8.4\%$, $T_{d(U \geq 6)} = 2.0 \text{ h}$)出现在第354~364天(12月19日至12月29日)。对比2016—2020年逐日实

际起沙风频率与逐日风速概率分布函数计算得到的逐日起沙风概率,两者差异较大(图5),说明逐日风速分布具有很大的不确定性,利用概率分布函数进行日风速预测有局限性。

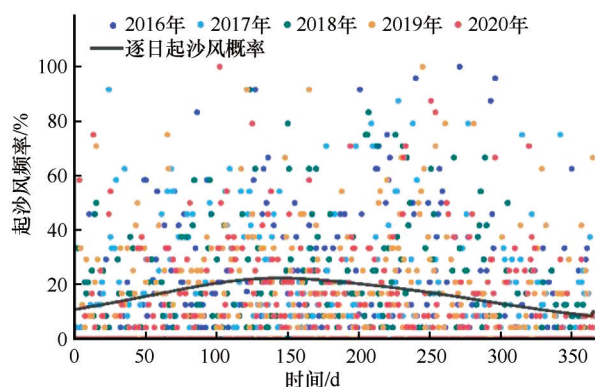


图5 逐日起沙风概率与2016—2020年逐日实际起沙风频率的比较

Fig.5 Comparison between probability and actual frequency of daily sand-driving wind from 2016 to 2020

2.3.2 逐月起沙风概率计算

利用月风速累积概率分布函数,计算逐月起沙风概率和可能时数。方法如下:

$$P_{m(U \geq 6)} = 1 - P_{m(U=6)} \quad (7)$$

$$T_{m(U \geq 6)} = T_{m0} [1 - P_{m(U=6)}] \quad (8)$$

式中: $P_{m(U \geq 6)}$ 为某月起沙风概率; $P_{m(U=6)}$ 为当月风速等于 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的累积概率; T_m 为当月起沙风可能时数(h); T_{m0} 为每月小时数。逐月起沙风发生概率和可能时数表现为1—6月逐渐增大,6月出现全年起沙风概率的第一个峰值($P_{m(U \geq 6)} = 23.1\%$, $T_m = 166.3 \text{ h}$); 7—12月起沙风概率和可能时数持续降低。起沙风概率最低月份是11月($P_{m(U \geq 6)} = 11.4\%$, $T_m = 82.1 \text{ h}$)。对比2016—2020年逐月起沙风统计频率与采用逐月风速概率分布函数计算得到的逐月起沙风概率发现,前者符合后者的变化趋势(图6),均方根误差较小(2016—2020年均方根误差依次为0.027、0.026、0.026、0.027、0.030),说明逐月风速概率分布函数的预测能力较好。根据2016—2020年统计结果,逐月风速概率分布函数对5、6月的预测偏高;起沙风频率在8月份出现第二个峰值,但风速概率分布函数没有检测出该峰值,表明该分布函数对8月风速的预测能力欠佳。

2.3.3 年起沙风概率计算

利用年风速累积概率分布函数,计算阿拉善右旗逐年起沙风概率和可能时数,方法如下:

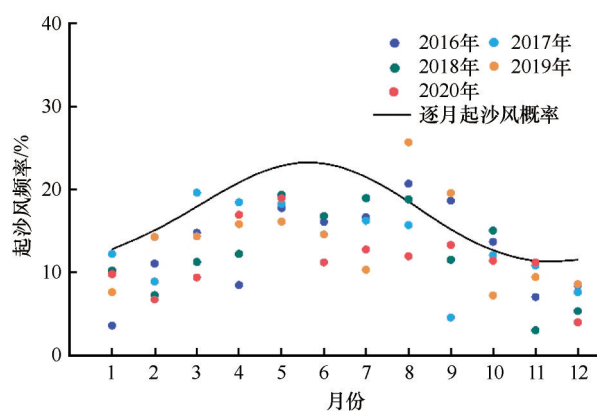


图6 逐月起沙风概率与2016—2020年逐月实际起沙风频率的比较

Fig.6 Comparison between probability and actual frequency of monthly sand-driving wind from 2016 to 2020

$$P_{y(U \geq 6)} = 1 - P_{y(U=6)} \quad (9)$$

$$T_{y(U \geq 6)} = T_{y0} [1 - P_{y(U=6)}] \quad (10)$$

式中: $P_{y(U \geq 6)}$ 为某年起沙风概率; $P_{y(U=6)}$ 为当年风速等于 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的累积概率; T_y 为当年起沙风可能时数(h); T_{y0} 为每年小时数(8 760 h)。结果表明(图7), 逐年起沙风发生概率和可能时数表现为1960—1968年逐渐增大, 1968年出现多年起沙风概率和可能时数峰值($P_{y(U \geq 6)} = 21.5\%$, $T_y = 1883.4 \text{ h}$); 1969—2003年起沙风概率逐渐降低, 2003—2015年起沙风概率逐渐增加, 2003年是起沙风概率和可能时数最低年份($P_{y(U \geq 6)} = 9.7\%$, $T_y = 849.7 \text{ h}$)。多年年平均起沙风概率为15.0%, 可能时数为 $T_y = 1316.4 \text{ h}$ 。

利用2016—2020年起沙风统计频率对上述逐年风速概率分布函数进行检验, 发现该函数预测能

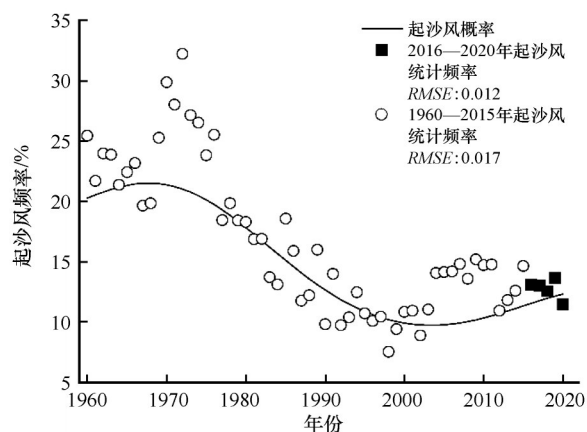


图7 逐年起沙风概率与2016—2020年实际起沙风频率的比较

Fig.7 Comparison between probability and actual frequency of annual sand-driving wind from 2016 to 2020

力非常好, 2016—2020年起沙风统计结果与函数预测结果之间的均方根误差(RMSE)仅为0.012(图7)。此外还可以看出, 2016—2020年起沙风发生频率低于前56年平均水平。

3 结论

阿拉善右旗风速在不同时间尺度上的累积概率都符合WeibullCum分布函数, 表明该函数在描述风速累积概率分布时具有一定的普适性。函数中的4个常数项在逐日、逐月和逐年变化方面都表现出一定的规律性, 这一特征使得该分布函数在引入时间变量后具备了预测能力。根据各时间尺度起沙风概率预测结果和实际发生频率统计结果, 日起沙风概率预测效果较差, 逐月起沙风概率预测能力明显提高, 年尺度上的起沙风概率预测效果最好。

中国国土面积广阔, 跨越不同的生物气候带, 风况环境差异很大, 虽然可以预期WeibullCum分布函数能够描述不同区域风速累积概率分布规律, 但该函数中的4个常数项是否具有时空变化规律, 尚需开展更深入和系统的研究。

参考文献:

- [1] Weibull W, Stockholm, Sweden. A statistical distribution function of wide applicability [J]. Journal of Applied Mechanics: Transactions of the ASME, 1951, 18(3): 293-297.
- [2] Justus C G, Hargraves W R, Mikhail A, et al. Methods for estimating wind speed frequency distributions [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1978, 17(3): 350-353.
- [3] 朱超群. Weibull分布在风能计算中的应用[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1983(2): 375-381.
- [4] 胡志华. Weibull分布及其在风能计算中的应用[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 1991(1): 50-53.
- [5] 丁明, 吴义纯, 张立军. 风电场风速概率分布参数计算方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 107-110.
- [6] Carta J A, Ramírez P, Velázquez S. A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis [J]. Case Studies in the Canary Islands, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(5): 933-955.
- [7] 李慧, 孙宏斌, 张芳. 风电场风速分布模型研究综述[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(8): 62-66.
- [8] Morgan E C, Lackner M A, Vogel R M, et al. Probability distributions for offshore wind speeds [J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(1): 15-26.
- [9] Garcia A, Torres J L, Prieto E, et al. Fitting wind speed distributions: a case study [J]. Solar Energy, 1998, 62(2): 139-144.
- [10] Ucar A, Balo F. Evaluation of wind energy potential and elec-

- tricity generation at six locations in Turkey[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(10): 1864–1872.
- [11] Wan J X, Zheng F F, Luan H L, et al. Assessment of wind energy resources in the urat area using optimized weibull distribution [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 47: 101351.
- [12] 陈练, 李栋梁, 吴洪宝. 中国风速概率分布及在风能评估中的应用[J]. *太阳能学报*, 2010, 31(9): 1209–1214.
- [13] Lun I Y F, Lam J C. A study of Weibull parameters using long-term wind observations [J]. *Renewable Energy*, 2000, 20(3): 145–153.
- [14] Bivona S, Burlon R, Leone C. Hourly wind speed analysis in Sicily [J]. *Renewable Energy*, 2003, 28(9): 1371–1385.
- [15] 王文新, 陈可欣, 白杨, 等. 基于实测数据的呼和浩特近郊风速分布模型对比研究[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(9): 370–376.
- [16] 吴正, 等. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [17] 陈渭南, 董治宝, 杨佐涛, 等. 塔克拉玛干沙漠的起沙风速[J]. *地理学报*, 1995, 50(4): 360–367.
- [18] 张克存, 奥迎焕, 屈建军, 等. 巴丹吉林沙漠湖泊-沙山近地表风沙动力环境[J]. *干旱区地理*, 2013, 36(5): 790–794.

Probability distribution of wind speed at different time scales in Alxa Right Banner, Inner Mongolia, China

Zhao Jiaqi, Zhang Chunlai, Wei Guoru

(State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology / MOE Engineering Research Center of Desertification and Blown-sand Control, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Based on the hourly wind speed data of Alxa Right Banner from 1960 to 2015, the cumulative probability distribution of wind speed in different time scales (day, month and year) was statistically analyzed. The results show that WeibullCum distribution function is universally applicable in different time scales when describing the cumulative probability distribution of wind speed. In the cumulative probability distribution functions of multi-year averaged daily and monthly wind speed, four constant terms in WeibullCum function changes periodically. In the functions of yearly from 1960 to 2015, two constant terms change periodically and the other two terms change in a decreasing trend. According to the statistics of daily, monthly and yearly sand-driving wind frequencies from 2016 to 2020, and the probabilities of sand-driving wind in the same period, the distribution function has high prediction accuracy for monthly and yearly sand-driving wind occurrence frequencies, but it doesn't work for daily sand-driving wind occurrence frequencies resulted from the great uncertainty of wind in the daily time scale.

Key words: cumulative probability distribution function of wind speed; WeibullCum distribution function; sand-driving wind