

# 塔城地区风速及风口区域风能资源特征分析

马亚林<sup>1</sup>, 孙 蕾<sup>2</sup>, 热米拉·阿力木<sup>3</sup>, 杨国辉<sup>1</sup>, 冯 涛<sup>4</sup>

<sup>1</sup>托里县气象局, 新疆 托里

<sup>2</sup>精河县气象局, 新疆 精河

<sup>3</sup>额敏县气象局, 新疆 额敏

<sup>4</sup>乌苏市气象局, 新疆 乌苏

收稿日期: 2023年6月5日; 录用日期: 2023年7月22日; 发布日期: 2023年7月28日

## 摘 要

本文利用塔城地区1960~2020年7个国家地面气象观测站逐日平均风速和2018~2021年3个区域自动气象站逐日10分钟平均风速观测资料, 分析了近61年塔城地区平均风速的变化趋势, 以及近4年风口区域有效风速时数和有效风能密度。结果表明: 1) 近61年来, 塔城地区年平均风速呈减少趋势, 递减率为 $-0.174 \text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{a})$ , 其中南部地区递减率高于北部; 四季风速递减率为夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季。2) 由M-K检验可知, 塔城地区年和秋季平均风速未发生突变, 春、夏季均在1980年前后发生突变, 冬季在1973年发生突变。3) 小波分析表明, 年平均风速变化存在以7年、18年和30年左右的周期变化。4) 塔城地区风口区域年平均有效风速时数为4527 h, 年平均有效风能密度为 $195 \text{ W}/\text{m}^2$ , 属风能较丰富区。

## 关键词

平均风速, 变化趋势, 小波分析, 风能资源, 塔城地区

# Analysis of Wind Speed and Wind Energy Resource Characteristics in Tuyere Area of Tacheng Area

Yalin Ma<sup>1</sup>, Lei Sun<sup>2</sup>, Ramila Alim<sup>3</sup>, Guohui Yang<sup>1</sup>, Tao Feng<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Tuoli Meteorological Bureau, Tuoli Xinjiang

<sup>2</sup>Jinghe Meteorological Bureau, Jinghe Xinjiang

<sup>3</sup>Emin Meteorological Bureau, Emin Xinjiang

<sup>4</sup>Wusu Meteorological Bureau, Wusu Xinjiang

Received: Jun. 5<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jul. 22<sup>nd</sup>, 2023; published: Jul. 28<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In this paper, based on the daily average wind speed observation data of seven national surface meteorological observation stations in the Tacheng area from 1960 to 2020 and the daily 10-minute average wind speed observation data of three regional automatic weather stations from 2018 to 2021, the variation trend of average wind speed in the Tacheng area in recent 61 years, as well as the effective wind speed hours and effective wind energy density in the tuyere area in recent 4 years were analyzed. The results show that: 1) The annual average wind speed in the Tacheng area has been decreasing in the past 61 years, with a decreasing rate of  $-0.174 \text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{a})$ , and the decreasing rate in the southern region is higher than that in the northern region. The decreasing rate of wind speed in the four seasons is summer > spring > autumn > winter. 2) The M-K test shows that there is no mutation in the annual and autumn average wind speed in the Tacheng area. The mutation occurs around 1980 in spring and summer, and in 1973 in winter. 3) Wavelet analysis shows that the annual average wind speed changes have periodic changes of 7 years, 18 years and 30 years. 4) The annual average effective wind speed hours in the tuyere area of Tacheng area is 4527 h, and the annual average effective wind energy density is  $195 \text{ W}/\text{m}^2$ , which belongs to the wind energy-rich area.

## Keywords

Average Wind Speed, Variation Trend, Wavelet Analysis, Wind Energy Resources, Tacheng Area

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

风速是评价气候变化、大气循环、污染物扩散和风能资源开发的重要指标[1]。面向“双碳”目标，增强气候资源开发利用，充分利用风能和太阳能等可再生清洁能源，是实现碳达峰和碳中和的重要途径，也是近年来人类社会可持续发展的主要能源[2]。因此，研究风速变化特征对于合理开发利用风能资源具有重要意义。Feng 等[3]研究表明，近五十多年以来，中国区域年平均风速和年有效风能密度的主要空间分布模态表现出高度的一致性，均呈现逐年减小的趋势。王遵娅等[4]研究发现，中国几乎全部地区的风速都在显著减小，指出冬、春季和西北西部减少最明显。黄小燕等[5]研究表明，中国西北地区大部分地区日照时数、风速均呈明显的减少趋势。有学者[6][7]研究发现，随着海拔高度增加，风速逐渐增大，风能资源也较为丰富，是因为风速变化与地形有关。何毅等[8]研究发现，近 50a 来，南北疆年平均风速变化存在显著的减少趋势，主要原因是受大气环流变化和气候变暖的影响。何东坡等[9]对四川省年平均风速时空演变规律进行分析，得出年平均风速存在 9~13a 小尺度、8~18a 中尺度的周期变化规律。刘艳艳等[10]研究表明，河西地区平均风速、有效风速时数、有效风能均呈减少趋势，对风能利用有一定的影响。有学者[11]研究表明，风能的大小主要取决于风速的大小，风速的减小对风能影响很大。孙蕾等[12]研究表明，阿拉山口地区属风能较丰富区，其风能储量有一定的开发价值。

可见，国内已有许多学者都对不同区域风速及风能资源进行了分析，发现许多地区的风速都有明显减小的现象。本文在前人关于平均风速研究的基础上，将该地区风速变化特征进行系统的分析，并对前人很少涉及风口区域的有效风速时数和有效风能密度进行细致研究，以期掌握塔城地区风速变化趋势，评估其风能资源，为合理开发利用风能资源、气候可行性论证、防灾减灾方面提供可靠的科学依据。

## 2. 研究区概况

塔城地区位于新疆西北部,中纬度内陆区,地处东经 82°16'~87°21'、北纬 43°25'~47°15'之间。独特的地形形成了塔城地区南北两大气候区,南部地区为乌苏、沙湾,位于新疆天山北坡,准噶尔盆地西南缘,气候属中温带准噶尔盆地干旱气候;北部地区为塔城、额敏、托里、裕民、和布克赛尔五站,位于塔额盆地,气候属中温带半干旱气候[13]。

## 3. 资料和方法

### 3.1. 资料

使用塔城地区 1960~2020 年 7 个国家地面气象观测站逐日平均风速观测资料,分析平均风速的变化趋势、突变和周期特征;在选取风口区域自动气象站资料时,进行了质量控制,剔除不完整资料及错误数据,选取 2018~2021 年 3 个风口区域自动气象站逐日 10 分钟平均风速观测资料,分析近 4 年风口区域有效风速时数和有效风能密度。季节划分为:春季(3~5 月)、夏季(6~8 月)、秋季(9~11 月)和冬季(12 月~翌年 2 月)。

### 3.2. 研究方法

#### 3.2.1. 线性倾向率法

运用一元线性回归方程方法对气象要素时间序列进行线性拟合[14],  $y(t) = a + bt$  为线性趋势方程,其中  $y$  为气象要素,  $a$  为常数,  $b$  为回归系数,  $t$  为时间序列(1960~2020),  $b \times 10a$  为气候倾向率。 $b > 0$  表示要素呈上升(增加)趋势,  $b < 0$  表示要素呈下降(减少)趋势,  $|b \times 10|$  大小表示要素变化速率,单位为:  $m/(s \cdot 10a)$ 。

#### 3.2.2. Mann-Kendall 突变检验

运用 Mann-Kendall 突变检验判断塔城地区近 61a 来风速时间序列是否发生过突变,如有,则求出突变点。Mann-Kendall 是一种非参数的统计检验方法[15],在 M-K 突变检测中,给定显著性水平  $\alpha = 0.05$ ,则临界值  $U_{0.05} = \pm 1.96$ ,将 UF 和 UB 曲线图与  $\pm 1.96$  的 2 条临界直线绘在一张图上,若 UF 或 UB 超过临界直线,表明上升或下降趋势显著。如果 UF 和 UB 2 条曲线出现交点,且交点在临界线之间,则可以判定交点便是突变点。

#### 3.2.3. 小波分析法

小波分析方法能够反映时间序列的局部变化特征,可以看到每一时刻在各周期中所处的位置,能够更好地分析序列随时间的变化情况[16]。在一定的尺度下,小波系数能反映时间序列中所包含的某一时间尺度的周期震荡的强弱,而小波方差对应峰值处的尺度即为该序列的主周期[17]。利用平均风速来计算 Morlet 复小波系数的实部,借助 Matlab、Suffer 软件绘制小波系数实部等值线图,分析风速的周期变化。

#### 3.2.4. 有效风能密度

风能密度指的是气流在单位时间内垂直通过单位面积的风能,是描述风能的一个重要参数[6] [18]。

$$W = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (1)$$

式中,  $W$  为该时刻的风能密度,单位:  $W/m^2$ ;  $V$  为风速,单位:  $m/s$ ;  $\rho$  为空气密度,单位:  $kg/m^3$ 。

根据逐日 10 分钟平均风速观测资料,利用风能密度公式计算各级风速下的能量,再将各等级风能之和除以总时数,即得到平均风能密度:

$$\bar{W} = \frac{\sum \frac{1}{2} N_i \rho V_i^3}{N} \quad (2)$$

式中,  $V_i$  为根据观测记录将 10 分钟平均风速分成的若干个等级值, 如 3, 4, 5...13 m/s (在实际计算时为消除误差,  $V_i$  应分别取其中间值 3.5, 4.5, 5.5...13.5 m/s);  $N_i$  为相应等级风速  $V_i$  的出现次数, 即累积小时数;  $N$  为总时数。最后利用有效风速进行计算得到有效风能密度[6] [18] [19] [20]。

在海拔高度 500 m 以下时, 一般取常温标准大气压下空气密度  $1.225 \text{ kg/m}^3$ , 由于 3 个区域自动气象站海拔高度高于 500 m, 老风口区域自动气象站海拔 598 m, 铁厂沟区域自动气象站海拔 869 m, 乌雪特区域自动气象站海拔 985 m, 根据空气密度公式计算得出[21]:

$$\rho = [1.276 / (1 + 0.00366t)] \times [(p - 0.378e) / 1000] \quad (3)$$

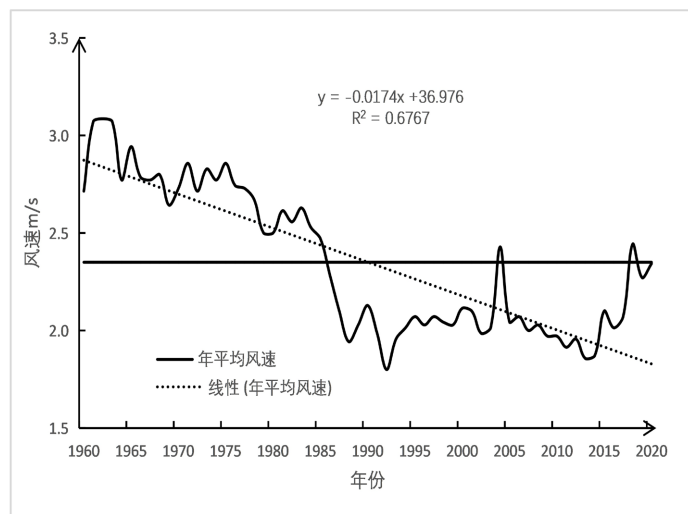
式中,  $p$  为平均大气压(hPa);  $e$  为平均水汽压(hPa);  $t$  为平均气温( $^{\circ}\text{C}$ )。

老风口区域自动气象站空气密度为  $1.162 \text{ kg/m}^3$ , 铁厂沟区域自动气象站空气密度为  $1.131 \text{ kg/m}^3$ , 乌雪特区域自动气象站空气密度为  $1.115 \text{ kg/m}^3$ 。

## 4. 结果与分析

### 4.1. 风速的年际变化趋势

由图 1 可知, 1960~2020 年塔城地区年平均风速为 2.35 m/s, 最大风速为 3.09 m/s (1962 年), 最小风速为 1.80 m/s (1992 年), 极差为 1.29 m/s。塔城地区年平均风速总体呈减少趋势, 气候倾向率为  $-0.174 \text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{a})$ , 这与何毅等[8]研究南北疆年平均风速存在明显减少趋势的结果相一致。1960~1982 年平均风速呈波动下降趋势, 平均风速为 2.77 m/s, 1983~1992 年呈直线下降趋势, 最低降至为最小风速 1.80 m/s, 1993~2020 年平均风速波动幅度较大, 出现 2 个波峰、1 个波谷, 第 1 峰值在 2004 年(2.43 m/s), 第 2 峰值在 2018 年(2.44 m/s), 波谷在 2013 年(1.86 m/s)。



**Figure 1.** Variation trend of annual mean wind speed in the Tacheng area  
**图 1.** 塔城地区年平均风速变化趋势

由表 1 可以看出, 北部地区年平均风速偏大为 2.48 m/s, 最大值出现在托里(2.86 m/s), 南部地区年平均风速偏小为 2.02 m/s, 最小值出现在沙湾(1.98 m/s)。塔城地区北部、南部年均风速均表现为减小趋

势，北部气候倾向率为 $-0.15\text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{a})$ ，南部气候倾向率为 $-0.23\text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{a})$ ，其中南部乌苏减幅最大，北部额敏减幅最小。受独特地形和大气环流的共同影响，风速变化表现出显著的地域差异，年平均风速分布呈现出由南部向北部逐渐递减的趋势，其递减速率南部高于北部。

**Table 1.** Average wind speeds and climatic tendency rate in the northern and southern parts of the Tacheng region

**表 1.** 塔城地区北部、南部平均风速及气候倾向率

北部台站	年平均 m/s	倾向率 m/(s·10a)	南部台站	年平均 m/s	倾向率 m/(s·10a)
塔城	2.29	-0.14	乌苏	2.05	-0.25
额敏	2.28	-0.10	沙湾	1.98	-0.22
裕民	2.38	-0.19	平均	2.02	-0.23
托里	2.86	-0.20			
和布克赛尔	2.61	-0.12			
平均	2.48	-0.15			

#### 4.2. 风速的年代际变化趋势

从表 2 可以看出，塔城地区年均和季节平均风速的年代际变化总体均呈减少趋势，距平值在 1960~1969、1970~1979 和 1980~1989 年为正，表明年平均风速偏大，其中 1960~1969 年风速偏大最为明显；1990~1999、2000~2009 和 2010~2020 年距平值为负，表明年平均风速偏小，其中 1990~1999 年风速偏小最为明显。春、夏、秋季平均风速距平值与年平均风速距平值的变化趋势相同，只有冬季平均风速距平值在 1980~1989 年开始为负，较其他季节开始减少早 10 年。

**Table 2.** Annual and seasonal interdecadal wind speed averages and distance levels in the Tacheng area (unit: m/s)

**表 2.** 塔城地区年、季节的年代际风速均值和距平值(单位: m/s)

年代		1960~1969	1970~1979	1980~1989	1990~1999	2000~2009	2010~2020
全年	均值	2.87	2.74	2.37	2.01	2.08	2.07
	距平	0.52	0.39	0.02	-0.34	-0.27	-0.28
春季	均值	3.36	3.25	2.84	2.48	2.57	2.49
	距平	0.53	0.42	0.01	-0.35	-0.26	-0.34
夏季	均值	3.34	3.23	2.86	2.4	2.54	2.39
	距平	0.55	0.44	0.07	-0.39	-0.25	-0.4
秋季	均值	2.67	2.54	2.16	1.78	1.8	1.89
	距平	0.53	0.4	0.02	-0.36	-0.34	-0.25
冬季	均值	2.08	1.88	1.6	1.35	1.41	1.55
	距平	0.44	0.24	-0.04	-0.29	-0.23	-0.09

#### 4.3. 风速的季节变化趋势

采用气候倾向率法对塔城地区 1960~2020 年各季节平均风速的变化趋势进行分析，由图 2(a)可以得出，春季平均风速为 2.83 m/s，最大风速为 3.76 m/s (1963 年)，最小风速为 2.24 m/s (2011 年)，气候倾向率为 $-0.188\text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{a})$ ；夏季平均风速为 2.79 m/s，最大风速为 3.74 m/s (1962 年)，最小风速为 2.08 m/s (1992 年)，气候倾向率为 $-0.201\text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{a})$  (图 2(b))；秋季平均风速为 2.14 m/s，最大风速为 2.84 m/s (1961 年)，

最小风速为 1.58 m/s (1992 年), 气候倾向率为 $-0.179 \text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{a})$  (图 2(c)); 冬季平均风速为 1.64 m/s, 最大风速为 2.31 m/s (1960 年), 最小风速为 1.18 m/s (1992 年), 气候倾向率为 $-0.117 \text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{a})$  (图 2(d))。通过分析年均和四季平均风速的趋势变化发现, 最大风速都在 1962 年左右, 最小风速除春季在 2011 年, 其他都出现在 1992 年, 四季风速变化趋势与年平均风速变化趋势基本一致, 均呈减小趋势, 减幅夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季, 这与张明军等[22]研究天山山区四季风速均呈减小趋势的结论相一致。

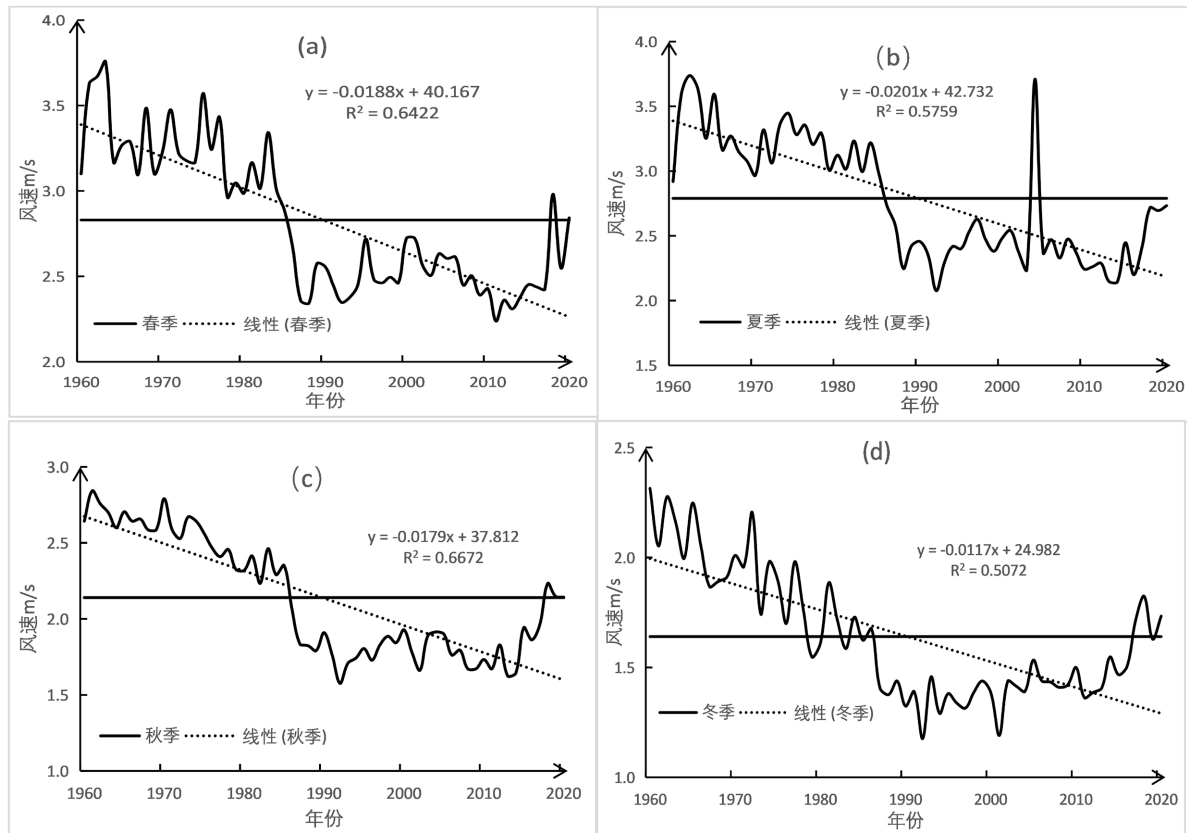


Figure 2. Variation trend of mean wind speed in the Tacheng region over the four seasons

图 2. 塔城地区四季平均风速变化趋势

#### 4.4. 风速的月变化趋势

由表 3 可以看出, 近 61 年塔城地区月平均风速变化范围在 1.6~3.1 m/s 之间, 4 月、5 月平均风速最大, 均为 3.1 m/s, 次大值 6 月为 2.9 m/s, 1 月和 12 月平均风速最小, 均为 1.6 m/s。1~12 月平均风速均呈减少趋势, 4 月平均风速减少趋势最快, 其气候倾向率为 $-0.23 \text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{a})$ , 其次 9 月为 $-0.22 \text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{a})$ , 12 月平均风速减少趋势最慢, 其气候倾向率为 $-0.11 \text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{a})$ , 这也印证了季节分析的结论。

Table 3. Monthly average wind speed in the Tacheng area

表 3. 塔城地区月平均风速

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
月平均 m/s	1.6	1.8	2.2	3.1	3.1	2.9	2.7	2.7	2.5	2.1	1.8	1.6
倾向率 m/(s·10a)	-0.14	-0.13	-0.13	-0.23	-0.21	-0.20	-0.20	-0.21	-0.22	-0.19	-0.12	-0.11

### 4.5. 风速的突变检验分析

利用 Mann-Kendall 法对塔城地区年、季节平均风速进行突变检验分析, 由图 3 可以看出, 虽然年平均风速 UF、UB 值曲线相交于 1980 年, 但交点在  $\pm 1.96$  临界线外, 表明近 61 年塔城地区年平均风速无突变发生。

从季节突变来看, 春季、夏季和冬季平均风速的突变时间分别为 1981 年、1983 年和 1973 年, 其中冬季突变时间早于春、夏季, 秋季平均风速 UF、UB 值曲线相交于 1977 年, 交点在  $\pm 1.96$  临界线外, 表明秋季无突变发生。春、夏季突变年份与新疆风速突变发生在 1983 年左右的结果基本一致[5], 但与全国范围平均得到的突变点 1969 年结论不一致, 说明风速的突变存在区域的差异性[23]。

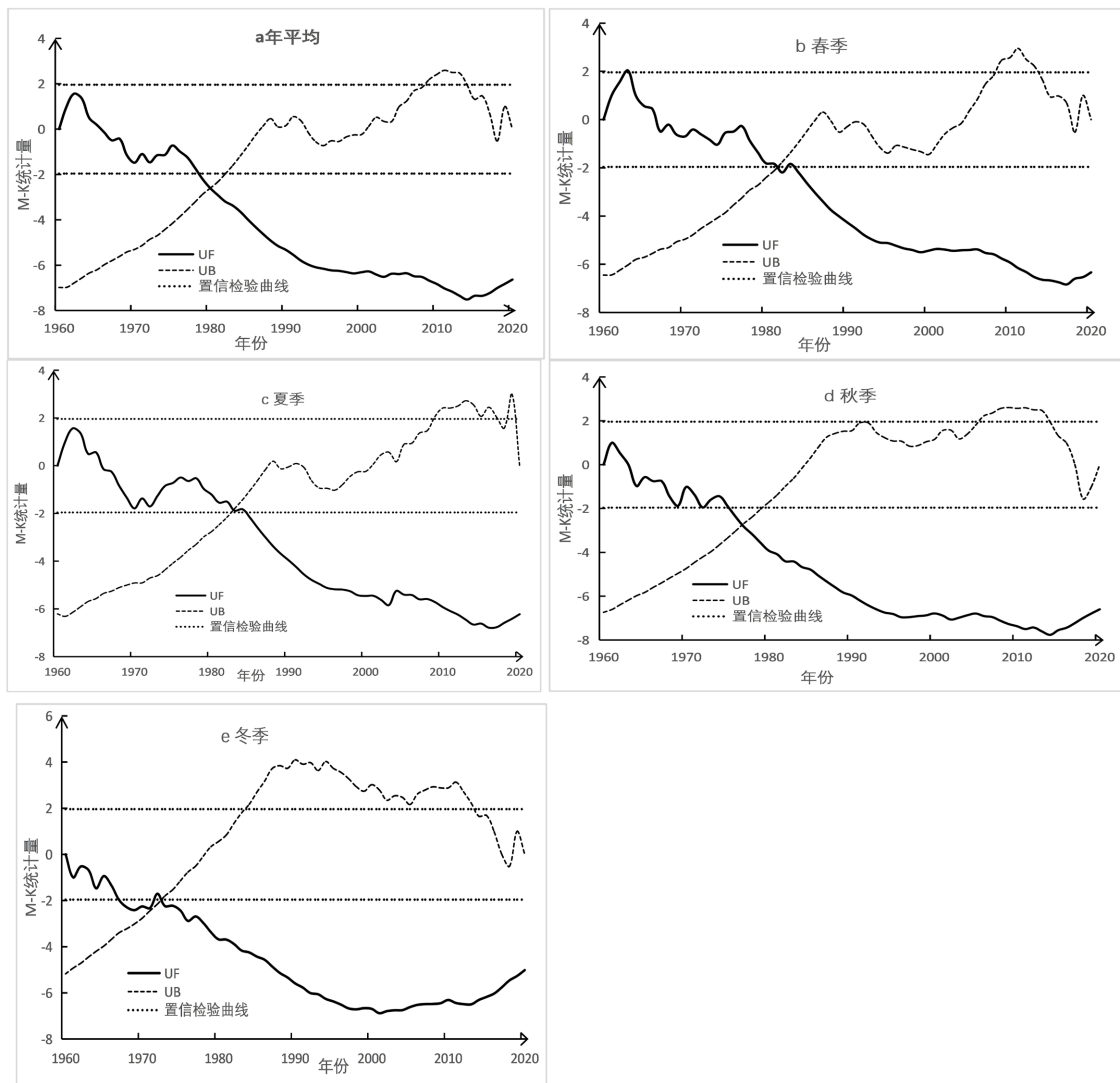


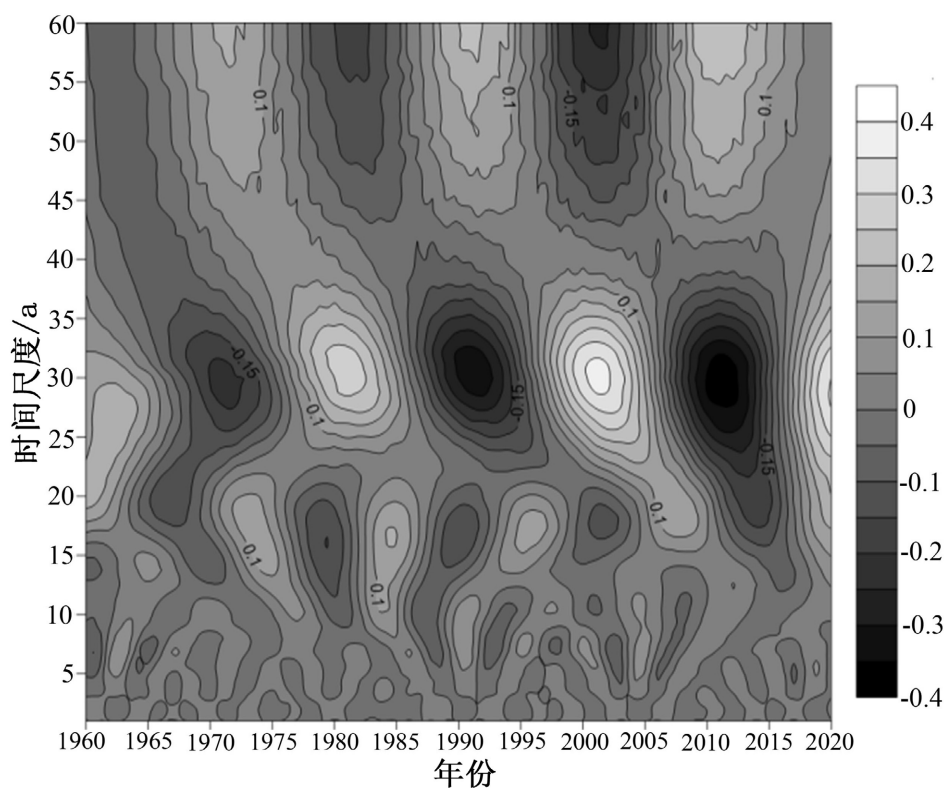
Figure 3. M-K mutation test maps for annual and seasonal mean wind speed in the Tacheng area

图 3. 塔城地区年及四季平均风速 M-K 突变检验图

### 4.6. 风速的周期分析

采用 Morlet 小波对塔城地区年平均风速时间序列尺度的周期性进行分析, 从图 4 可以看出, 塔城地

区年平均风速在 5~8 年、15~20 年和 25~30 年的时间尺度上存在周期性。以 25~30 年为周期的时间尺度变化最强, 振荡中心的时间尺度为 30 年左右; 以 15~20 年为周期的时间尺度变化次之, 振荡中心的时间尺度为 18 年左右; 以 5~8 年为周期的时间尺度变化最弱, 振荡中心的时间尺度为 7 年左右。由以上分析可知, 塔城地区年平均风速在整个时间尺度上存在 7、18 和 30 年左右的周期性规律, 其中风速在 30 年左右的周期震荡最明显, 说明 30 年左右为风速变化的主周期。



**Figure 4.** Real part contour of Morlet wavelet coefficient of annual average wind speed in Tacheng area  
**图 4.** 塔城地区年平均风速 Morlet 小波系数实部等值线

#### 4.7. 风口区域风能资源状况

近 4 年塔城地区风口区域年平均风速为 5.0 m/s, 铁厂沟站最大(5.56 m/s), 其次为乌雪特站(5.11 m/s), 老风口站最小(4.36 m/s); 风口区域年平均大风日数为 103 d, 瞬间风速  $\geq 17.2$  m/s 的风。由此可以看出, 风口区域年平均风速明显高于平原地区, 并且年平均风速也达到风力机的起动风速(3 m/s), 因此对该区域风能资源有效持续开发利用有重要参考价值。

##### 4.7.1. 风能资源分区划分标准

根据有效风能密度的大小和全年有效风速累积小时数作为区划指标, 把我国风能划分风能丰富区、较丰富区、可利用区和风能贫乏区 4 个区[24] [25]。

##### 4.7.2. 风口区域有效风速时数

风力发电机的起动风速是 3 m/s, 终止风速是 25 m/s, 在风口区域 10 分钟平均风速达到 12 m/s 以上时, 极大风速往往会超过 25 m/s, 风力机就要停机[12]; 因而有效风速时数则是统计出 10 分钟平均风速在 3~12 m/s 之间的小时数。由表 4 统计得出, 3 个风口区域气象自动站年平均有效风速时数为 4527 h。



**Table 4.** Effective wind speed hours of 10 min average wind speed between 3~12 m/s in the tuyere area (unit: h)**表 4.** 风口区域 10 min 平均风速在 3~12 m/s 之间的有效风速时数(单位: h)

年份	3 m/s	4 m/s	5 m/s	6 m/s	7 m/s	8 m/s	9 m/s	10 m/s	11 m/s	12 m/s	合计
2018	813	660	585	469	361	317	278	217	167	142	4009
2019	998	804	642	504	403	357	308	249	217	165	4647
2020	988	793	645	476	380	327	280	251	212	155	4508
2021	1037	843	685	543	439	372	314	273	239	197	4942
平均	959	775	639	498	396	343	295	247	209	165	4527

#### 4.7.3. 风口区域各月及年平均有效风能密度

由表 5 可以得出, 风口区域平均有效风能密度 2018 年是 190 W/m<sup>2</sup>, 2019 年是 193 W/m<sup>2</sup>, 2020 年是 196 W/m<sup>2</sup>, 2021 年是 202 W/m<sup>2</sup>, 年平均有效风能密度是 195 W/m<sup>2</sup>。

近 4 年风口区域平均有效风能密度 12 月最大(268 W/m<sup>2</sup>), 其次是 3 月(237 W/m<sup>2</sup>), 8 月最小(127 W/m<sup>2</sup>)。根据风口区域年平均有效风速时数 4527 h 和年平均有效风能密度 195 W/m<sup>2</sup>, 符合风能资源区划指标较丰富区(见表 6)。

**Table 5.** Monthly effective wind energy density in the tuyere area (unit: W/m<sup>2</sup>)**表 5.** 风口区域各月有效风能密度(单位: W/m<sup>2</sup>)

年份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	平均
2018	210	245	221	217	121	66	137	137	186	185	233	325	190
2019	232	201	235	208	209	173	167	139	145	168	180	256	193
2020	207	263	230	160	205	169	121	113	174	221	257	229	196
2021	249	226	264	168	224	168	151	121	137	220	237	261	202
平均	225	234	237	189	190	144	144	127	161	199	227	268	195

**Table 6.** Wind energy zoning indexes**表 6.** 风能分区指标

指标	丰富区	较丰富区	可利用区	贫乏区
年有效风能密度(W/m <sup>2</sup> )	≥200	200~150	150~50	≤50
年平均风速 ≥ 3 m/s 小时数	≥5000	5000~4000	4000~2000	≤2000

## 5. 结论

1) 1960~2020 年, 塔城地区年均和各季节平均风速均表现出不同程度减小的趋势, 年均和春、夏、秋季平均风速在 90 年代后风速开始减少, 冬季较其他季节开始减少早 10 年。年平均风速分布特征呈现出由南部向北部逐渐递减的趋势。

2) 由 M-K 法分析得到, 塔城地区年和秋季平均风速均未发生突变, 春、夏季突变年份与新疆风速突变发生在 1983 年左右的的结果基本一致, 冬季在 1973 年发生突变, 早于春、夏季, 说明风速的突变存在区域的差异性。

3) 小波分析发现, 塔城地区年平均风速在 5~8 年、15~20 和 25~30 年的时间尺度上存在周期性, 其中 30 年左右为风速变化的主周期。

4) 塔城地区风口区域属于风能资源较丰富区, 对塔城地区调整改善能源结构、风能资源有效持续开发利用具有很大的价值。

以上初步分析了风口区域风能资源状况, 相较于前人的研究, 本文选取的区域自动气象站多位于风

区一线,对风口区域有效风速时数和有效风能密度变化特征进行详细分析,更具有代表性;然而,影响风速变化的因子很多,大气环流、气候变暖以及城市化进程等因素都会对风能资源开发利用产生影响[10],在未来的研究中,要对影响风速变化的因素进行全面分析,为后期深入研究风能资源精细化评估提供参考。

## 参考文献

- [1] 杨君建. 1960-2021年商丘风速风向时空变化分析[J]. 农业灾害研究, 2022, 12(9): 132-135.
- [2] 徐金阁, 龚玺, 戴昌明. 近60年洞庭湖南部地区风速变化特征研究[J]. 气象与环境科学, 2022, 45(3): 83-88.  
<https://doi.org/10.16765/j.cnki.1673-7148.2022.03.011>
- [3] Feng, Y.C., Que, L.J. and Feng, J.M. (2019) Spatiotemporal Characteristics of Wind Energy Resources from 1960 to 2016 over China. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, **13**, 136-145.  
<https://doi.org/10.1080/16742834.2019.1705753>
- [4] 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 虞俊. 近50年来中国气候变化特征的再分析[J]. 气象学报, 2004, 62(2): 228-236.
- [5] 黄小燕, 张明军, 王圣杰, 辛宏, 贺晋云. 西北地区近50年日照时数和风速变化特征[J]. 自然资源学报, 2011, 26(5): 825-835.
- [6] 章永辉, 楼俊伟, 张鑫, 王勇. 金华市风能资源分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2023, 17(2): 98-105.
- [7] 贾诗超, 陈晓梅, 宋义和, 李世云. 1970-2013年新疆地区风速变化特征分析[J]. 鲁东大学学报(自然科学版), 2019, 35(4): 352-359+380.
- [8] 何毅, 杨太保, 陈杰, 冀琴, 王凯. 1960-2013年南北疆风速变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(2): 249-259.  
<https://doi.org/10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2015.02.006>
- [9] 何东坡, 齐大鹏, 万超, 韩晓令. 四川省风能资源时间及空间变化特征分析[J]. 贵州气象, 2017, 41(4): 1-8.
- [10] 刘艳艳, 张多勇, 张耀宗, 王国强. 1958~2012年河西走廊风能资源时空变化特征及影响因素分析[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(10): 188-195.
- [11] 郑玉萍, 李景林, 刘盛梅, 杜敏. 达坂城1961-2008年来风的气候特征及风能现状分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2009, 3(6): 29-33.
- [12] 孙蕾, 张金柱, 张远新. 阿拉山口地区风能资源特征及利用前景[J]. 气象科技, 2011, 39(6): 741-744.  
<https://doi.org/10.19517/j.1671-6345.2011.06.013>
- [13] 阿依努尔·孜牙别克, 高婧, 热依拉, 井立军. 塔城盆地1961-2009年气候变化特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2010, 4(6): 34-37.
- [14] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 第2版. 北京: 气象出版社, 2007.
- [15] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992, 16(4): 482-493.
- [16] 邵晓梅, 许月卿, 严昌荣. 黄河流域降水序列变化的小波分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 42(4): 503-509. <https://doi.org/10.13209/j.0479-8023.2006.093>
- [17] 徐欢. 长江上游气温时空变化特征分析[J]. 自然科学, 2021, 9(6): 892-909.
- [18] 刘克俭, 谷安国. 风能的计算方法[J]. 新疆农业科学, 1996(6): 276-278.
- [19] 王毅荣, 林纾, 李青春, 龚建福. 河西走廊风能变化及储量[J]. 气象科技, 2007, 35(4): 558-562.  
<https://doi.org/10.19517/j.1671-6345.2007.04.022>
- [20] 朱瑞兆, 薛桁. 风能的计算和我国风能的分布[J]. 气象, 1981(8): 26-28.
- [21] 杨娟, 帅士章, 蒋士华. 贵州省风能资源的计算及分析[C]//中国气象学会. 第26届中国气象学会年会气候资源应用研究分会场论文集: 2009年卷. 2009: 59-68.
- [22] 张明军, 李瑞雪, 黄小燕, 贾文雄. 中国天山山区风速变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(7): 78-83.  
<https://doi.org/10.13448/j.cnki.jalre.2012.07.028>
- [23] 任国玉, 郭军, 徐铭志等. 近50年中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报, 2005(6): 942-956.
- [24] 高绍风. 应用气候学[M]. 北京: 气象出版社, 2001.
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 18710-2002 风电场风能资源评估方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.