

# 四川地区风能资源时空特征分析

张城语, 蔡宏珂, 刘京, 潘子豪

成都信息工程大学, 四川 成都

Email: 360316049@qq.com

收稿日期: 2020年11月4日; 录用日期: 2020年11月19日; 发布日期: 2020年11月26日

## 摘要

使用四川省1979~2018年逐小时风速观测资料,通过统计分析的方法研究四川省10 m和100 m处平均风速的水平分布特征,季节平均的风速分布特征,并且选取平均风速大值区为代表研究平均风速大值区的小时平均风速的变化趋势,月平均风速的变化趋势以及年平均风速的变化趋势。通过计算风功率密度,分析风功率密度的分布特征,选取风功率密度大值区为代表性的研究其月变化特征和年变化特征从而得出适合风能利用的年月以及地区。并研究了风的无量纲幂指数。结果表明:(1)年平均风速在四川省表现出西南至东北的空间分布特征,这和四川省季节平均的风速水平分布是一致的。且春天的平均风速高于其他季节。(2)通过分析风速大值区平均风速可知,最大值均出现在8时左右,最小值出现在10~12时。三地月平均风速最小值均出现在5~6月,月平均风速成最大值出现在10~12月。(3)四川省年平均风功率密度呈东西型的空间分布特征,四川省年平均风功率密度也呈现出东北-西南型的空间分布特征。(4)选取丹巴和德昌两个风功率密度大值区研究风功率密度大值区月平均风功率密度和年平均风功率密度的变化,通过分析可知德昌和丹巴两地的月平均风功率密度最大值均出现在10月左右,上半年即1~6月相比于下半年即7~12月的平均风功率密度的值较小。(5)四川省平均风速的无量纲幂指数 $a$ 在低风速下较不平定,表现出很强的随机性,随着风速的增大,幂指数 $a$ 呈现出明显增大的趋势并趋于平定。

## 关键词

四川省平均风速, 季节平均风速, 风速大值区的变化, 风功率密度, 无量纲幂指数

# Spatio-Temporal Characteristics Analysis of Wind Energy Resources in Sichuan Province

Chengyu Zhang, Hongke Cai, Jing Liu, Zihao Pan

Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Email: 360316049@qq.com

Received: Nov. 4<sup>th</sup>, 2020; accepted: Nov. 19<sup>th</sup>, 2020; published: Nov. 26<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

Use hour wind observation data from 1979 to 2018 in Sichuan province, by using the method of statistical analysis research in Sichuan province, 10 m and 100 m in the level of the average wind speed distribution, seasonal average wind speed distribution characteristics, and select the average wind speed greater value represented by research the hours of the average wind speed big value change trend of average wind speed, the change trend of monthly average wind speed and the change trend of annual average wind speed. By calculating the wind power density, the distribution characteristics of wind power density were analyzed. The monthly and annual variation characteristics of wind power density regions were selected as the representative areas to obtain the years and regions suitable for wind energy utilization. The dimensionless exponential function of wind is studied. The results show that: (1) the annual average wind speed shows the spatial distribution from southwest to northeast in Sichuan province, which is consistent with the seasonal average wind speed level distribution in Sichuan province. And the average wind speed in spring is higher than other seasons. (2) according to the analysis of the average wind speed in the region with high value of wind speed, the maximum value all appeared at about 8 o'clock, and the minimum value appeared at 10 - 12 o'clock. The minimum value of monthly average wind speed in the three places appeared in May to June, while the maximum value of monthly average wind speed appeared in October to December. (3) the annual average wind power density of Sichuan province presents the spatial distribution characteristics of east-west type, and the annual average wind power density of Sichuan province also presents the spatial distribution characteristics of the east-southwest type. (4) select Danba and Dechang two wind power density greater value on the wind power density greater value monthly average wind power density and the change of annual average wind power density, through analysis on Johnson and Danba monthly average wind power density maximum value appeared in October or so, the first half of the June 1-compared to the second half of the 7 to 12 month average wind power density of the value of the smaller. (5) the exponential function of the dimensionless average wind speed in Sichuan a less pacify under low wind speed, showed a strong randomness, with the increase of wind speed, the power a presents obvious increase trend and tend to be pacified.

## Keywords

Sichuan Province Average Wind Speed, Seasonal Average Wind Speed, Wind Speed Big Value Area Change, Wind Power Density, Dimensionless Power Index Function

Copyright © 2020 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

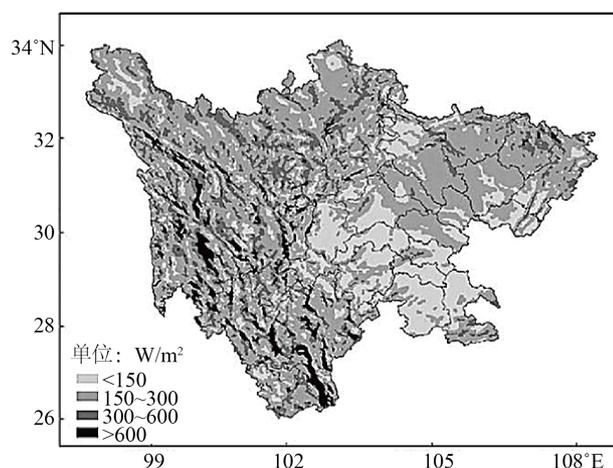
## 1. 引言

日照引起地表不均匀的加热,使大气中的压力分布不均匀,从而使空气沿水平方向移动,空气流动形成的动能被称为风能。风能是太阳能的变形,是清洁可再生的自然能源。风能的开发和利用有几千年的历史。在制造蒸汽发动机之前,风能被用作船舶航行、饮用水和灌溉、排水和野外生产、表面抛光和木材切断的重要动力。20世纪70年代中期以后,受化石能源、能源供应安全保障、环境保护贫困加剧的影响,主要发达国家和世界上一些发展中国家重视风能资源的开发和利用[1]。风能开发利用的成本比太阳能开发利用的成本要低。研究表明[2]:风能发电基本上不影响地方的使用。风能作为一种可持续利

用的能源, 将产生明显的生态效益和社会效益。目前, 风力发电的成本已经降到了 20 世纪 80 年代的六分之一, 并且继续下降[3]。风力能源是 21 世纪最有希望的绿色能源, 也是人类社会和经济可持续发展的新能源之一。

大风天气给人们带来了经济和人员损失[4]。但同时, 风能也是一种可再生的资源[5] [6]。合理开发和利用风能, 是解决资源短缺, 实现可持续发展的有效途径[7] [8]。目前我们正在普遍关注和研究这一重要的气象因子——风速[9] [10]。目前, 许多国内学者都在研究其他地区的风能, 帅士章[11]等对贵州省风能数据进行了普查与评估。李德友[12]等利用四川茂县地区平均风速资料, 研究了四川省茂县风速的变化, 研究得出, 茂县年平均风速具有显著的季节性差异。李艳[13]等使用传统的风速测定数据, 采用线性测绘, 趋势分析及其他方法研究中国的年平均风速变化, 发现中国的年平均风速在过去 40 年间逐年下降。王婷[14]等利用风能资源数据评估系统, 改善了每个变量系统, 以研究广东省风能资源的变化趋势。张素云[15]等发现, 河北省地面平均风速在 4 个季节里均呈递减的变化趋势。田莉[16]研究表明, 西北的风速, 根据地区有相当大的差异, 北方的风速高, 南方的风速低, 中蒙边境的风速达到最高值。任国玉[17]等以日平均风速数据为基础, 分析研究中国平均风速的季节性差异, 结果显示中国的平均风速存在相当大的季节性差异。可见以前对风能资源进行了很多研究, 风能资源的时间变化和空间分布会根据各种地形变化, 这是研究的困难之一。

风功率密度指的是气流在单位时间内垂直通过单位截面积的风能, 是在一个地方说明风能潜力最便利、最有价值的量。评估一个地方风能资源的丰富可以用风功率密度的大小来评估。从图 1 中可以看出, 四川的风能资源状况相对较差, 满足风能资源利用水平的地区主要在西部四川省高原、西南山区和北部山区。特别是山脊及河谷地区; 盆地东侧地形具有明显的屏风效果和较低的风功率密度, 西北部四川省高原具有较高的高度、较低的空气密度和较低的风功率密度。四川省的年平均风功率密度显示出东西类型的空间分布。四川省年平均风功率密度也呈现出东北 - 西南型的空间分布特征。风能资源的开发利用领域, 不仅取决于风能资源的丰富, 而且与地貌、地形、交通状况等有关。



**Figure 1.** Distribution of annual average wind power density in Sichuan province 50 m [9]

**图 1.** 50 m 处四川省年平均风功率密度的分布[9]

中国的风能资源主要集中于西北、华北、东北、青藏高原及东部沿海地区[1], 由于高原阻挡效应, 四川盆地在中国拥有相对较高的静风频率, 是中国最小的风能区之一[11], 但在四川高原盆地周边和西部地区的山区, 有高山、溪谷等特殊地形, 也有潜在的风能开发区。四川省风能资源资源的详细调查主要

在四川西部高原山区和流域周边山区进行。本文分析四川省风速的空间分布特征,包括多年平均分布、不同季节分布;分析风场的时间演变特征,包括日变化、年变化、年际变化和长期趋势;分析风功率密度的空间分布特征以及时间演变特征。分析风速的无量纲幂指数函数特征。研究结果能够通过平均风速的时间和空间的分布特征对四川省风能资源进行很好的利用。

## 2. 资料与方法

### 2.1. 数据介绍

收集最新的欧洲中期数值预报中心(ECMWF)风速再分析数据即 ERA5 风速再分析数据,本文使用四川省 1979~2018 年逐小时风速观测资料,包括 10 m 和 100 m 高度上 u 和 v 方向上的风速。

ERA5 在其前身 ERA-Interim 的基础上实现了很大晋级。首先是时空分辨率的大幅提升,用户将首次水平分辨率为 31 km、从地表开始降至 0.01 hPa (距地面约 80 km)共 137 模式层的情况下获取大气变量的每小时估计数据,再次,ERA5 将更多的历史观测数据尤其是卫星数据利用到先进的数据同化和模式系统中,用以估计更为准确的大气状况,最终这些同化数据以及它们如何被使用的信息也将全部公开供用户使用。此外,ERA5 提供的变量将由 ERA-Interim 的 100 种增加到 240 种,这其中包括由耦合的海浪模式所提供的波高、波向等变量,方便用户更准确地分析过去的大气甚至海洋状态[18]。

通过 ERA5 风速再数据来研究风速的空间和时间上的分布。在计算风功率时根据《Q/GDW 588-2011 风电功率预测功能规范》计算风功率。季候划分范围为:春季(3~5 月)、夏季(6~8 月)、秋季(9~11 月)、冬季(12 月~次年 2 月)。

### 2.2. 方法

使用四川省 1979~2018 年逐小时风速观测资料,分析风速的空间分布特征,包括多年平均分布、不同季节分布;根据空间分布特征,选取 2~3 个风速大值区,分析风速和风向的时间演变特征,包括日变化、年变化、年际变化和长期趋势。

其中风功率密度的计算公式为  $\rho v^3 A / 2$  (其中  $\rho$  为空气的密度,因为空气的密度随着不同因素的变化而变化不太容易确定,而且密度的变化相对于速度的三次方的变化来讲小的可以忽略故在此密度选用标准海平面密度  $1.29 \text{ kg/m}^3$ 。A 为气流通过的面积,这里为计算简便当作单位面积即 1 来计算,单位为  $\text{m}^2$ 。v 为气流速度的大小即风速的大小,单位为  $\text{m/s}$ 。平均风功率密度的计算公式为(1)。从现有气象站 10 米高的观测数据中获得的四川省风能资源属于贫乏地区,不能满足风力能源利用地区的相关要求。故在接下来的研究中选用 100 m 处的风速资料来研究风功率密度。分析风功率密度的空间和时间分布特征,包括多年平均分布、不同季节分布;在风功率大值区,分析风功率的时间演变特征,包括月平均风功率密度的变化,年平均风功率密度的变化以及长期的变化情况。

在大气边界层,风速从地表向上逐渐增大。基于理论推导和经验修正,研究人员提出了风速曲线的各种表现。这个主要分为指数型和对数型。其中我们现在要用的表达式为(2)。这里利用 10 m 和 100 m 高度处的平均风速计算。无量纲幂指数函数的计算方法为  $\alpha = \log U_{100}[i] - \log U_{10}[i]$ 。式中:  $U_1$  和  $U_2$  分别为高度  $Z_1$  (10 m)和  $Z_2$  (100 m)处的平均风速,  $\alpha$  为考虑地表粗糙度影响的无量纲幂指数。

## 3. 平均风速的特征分析

### 3.1. 年平均风速水平分布的特征分析

通过处理四川省 1979~2018 年逐小时风速观测资料,求得风速的年平均水平分布图。图 2 为 10 m 高度处风速的年平均水平分布图,如图 2 和表 1 可知川东地区、川西地区、川南地区和川北地区的平均风

速以及最大平均风速的水平分布以及值的大小。

如图 2, 在 100 m 处风速的大值区与小值区与 10 m 处的分布基本一致, 但是风速的大小在 100 m 处要比 10 m 处有明显的增加, 这说明风速大小随高度增加, 在边界层内风速的变化规律也正是随高度而增加。但总体来说四川省年平均风速值还是较小。青藏高原阻断效应形成的复杂多样的地形特征和特殊的环流状况, 使四川省成为中国风速较低的地区之一。通过对四川省气象站 1979~2018 年测风数据统计分析可见, 四川省各点平均风速介于 0.57~3.6 m/s 之间, 全域年均值为 1.5 m/s 与全国年平均风速 2.5 m/s 相比明显偏小。尤其是四川省东部盆地, 因地形封闭、凹陷, 盆周山峦叠嶂, 气流受阻, 静风频率较高, 各站点年平均风速均低于 2 m/s。阻挡风的地形使风速降低, 相反, 山的山脊等突出的地形和喇叭口地形的狭管效果使风速大幅度上升[9]。四川省年平均风速呈东西型空间分布特点, 即西部地区平均年风速较高, 东部地区年平均风速较小, 与大规模气象系统的影响密切相关。在特征向量正(负)值中心位置附近年平均风速相对较高(较低) [8]。四川省年平均风速也呈现出东北-西南型的空间分布特征, 即东北域(包括广元市、巴中市、达州市)年平均风速较高, 而西南部区域年平均风速较小。

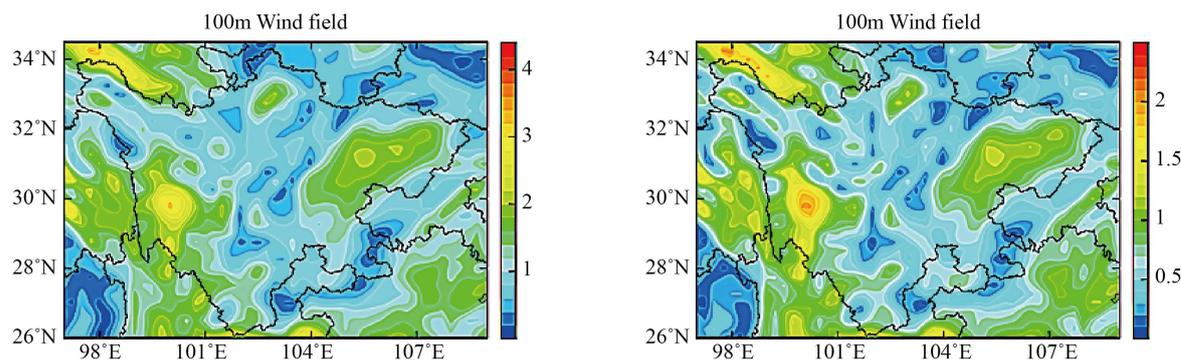


Figure 2. Horizontal distribution diagram of average wind speed at 10 m and 100 m

图 2. 10 m、100 m 处风速平均的水平分布图

Table 1. Wind speed distribution in various regions of Sichuan

表 1. 四川各地区风速分布情况

地区	平均风速	最大风速
川东	1.35 m/s	1.51 m/s
川西	1.73 m/s	2.17 m/s
川南	1.52 m/s	1.94 m/s
川北	1.70 m/s	2.16 m/s

### 3.2. 各季节风速平均的水平分布

通过处理 10 m 和 100 m 处的风速数据得到四川省风速季节平均的水平分布图。四川省的各季节平均风速的分布基本一致即春季的风速大值区域与小值区域与夏季, 秋季, 冬季的大值和小值区位置基本一致。由图 3 和图 4 可知, 春季的最大风速区主要位于四川的西部地区, 风速最小值区主要位于四川的东部地区。同样的情况出现在夏季, 秋季, 冬季中, 且春季的平均风速要比其他的三个季候对应地方的平均风速大一些, 原因是春天是从隆冬到夏天的过渡时期, 暖风和冷风的交汇很活跃, 所以平均风速高, 并且加热较快, 于是形成了比较强烈的冷空气下沉、暖空气上升运动。由于高空风通常比地面风大得多, 所以这种上下对流运动, 使地面风速加大(气象学上称为动量下传), 形成较强的北风。各季节的风速水平

分布与上面分析的年平均风速水平分布也较为一致即四川省季节平均风速呈东 - 西型的空间分布特征，即西部区域季节平均风速较高，而东部区域季节平均风速较小，这与大尺度天气系统的影响密切相关，在特征向量正(负)值中心位置附近年平均风速相对较高(较低)，在(105.5E, 32N)位置处的季节平均风速最小。四川省季候平均风速也呈现出东北 - 西南型的空间分布特征，即东北域年平均风速较高，而西南部区域年平均风速较小。由图 3 和图 4 两图分析可知 10 m 处风速的季节水平分布图与 100 m 处风速的季节水平分布图是一致的，且 100 m 处的风速相较于 10 m 的风速较大。

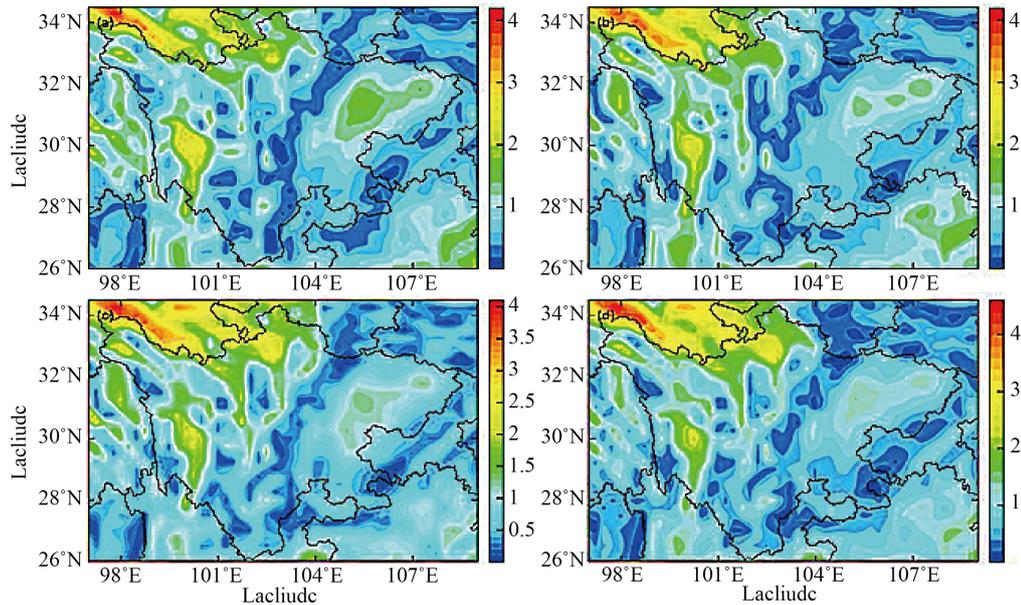


Figure 3. Horizontal distribution diagram of seasonal mean at 10 m  
图 3. 10 m 处各季节平均的水平分布图

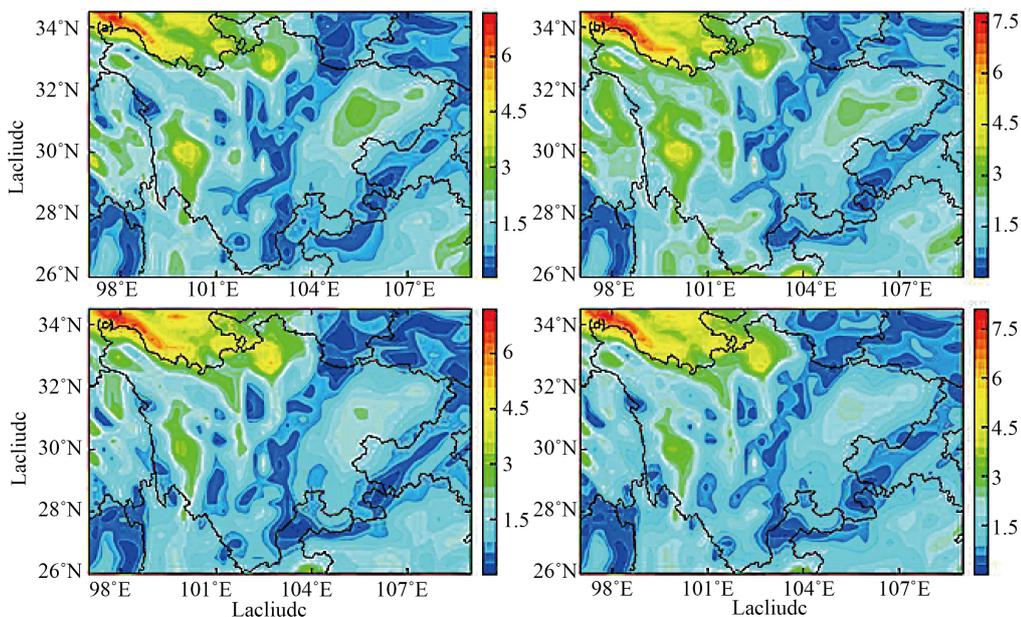


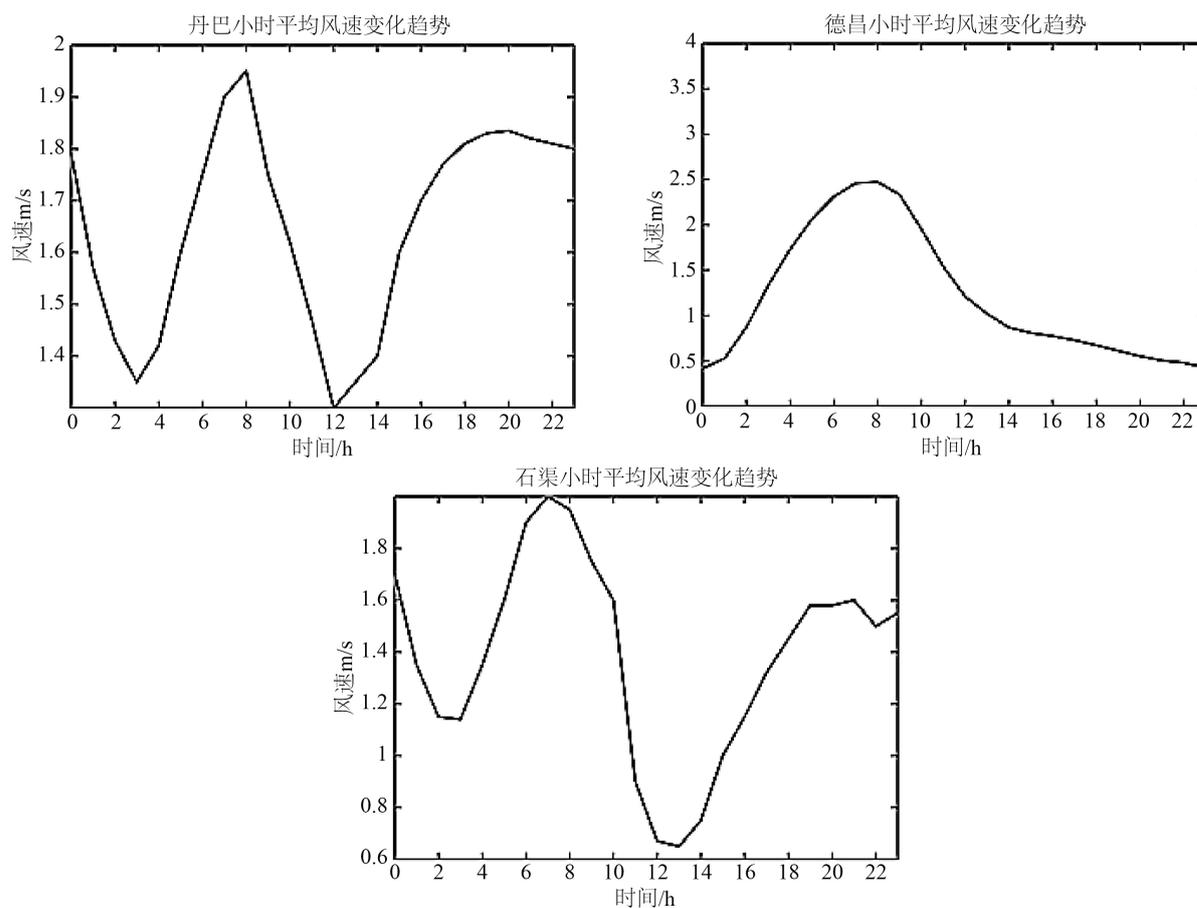
Figure 4. Horizontal distribution of seasonal mean at 100 m  
图 4. 100 m 处各季节平均的水平分布图

### 3.3. 风速大值区的风速变化特征

#### 3.3.1. 风速大值区的日变化

通过上面的研究,为研究风速大值区的日变化趋势选取了丹巴,德昌,石渠三个风速较大值区为代表研究 100 m 和 10 m 处风速的日变化趋势。分别求 24 小时风速平均得到图 5 即丹巴,德昌,石渠 10 m 和 100 m 处风速的日变化。

如图 5 和表 2 所示,丹巴 10 m 最大风速出现在 8 时左右,最大风速值为 1.96 m/s,最小风速值出现在 12 时左右,最小风速值为 0.0196 m/s,甚至出现了静风的现象。如图 6 可知 100 m 处小时平均风速最大值出现在 7~8 时,最大风速值为 1.86 m/s。风速最小值出现在 11 时左右,最小风速值约为 1.03 m/s,相比于 10 m 处的平均风速值明显偏大,这是由于高度越低受地面摩擦影响越大的缘故。



**Figure 5.** Variation trend of average hourly wind speed at 10 m  
**图 5.** 10 m 处小时平均风速的变化趋势

**Table 2.** Hourly average maximum wind speed of three places at 10 m  
**表 2.** 10 m 处三地小时平均最大风速情况

地点	10 m 处小时平均最大风速	10 m 处小时平均最小风速	100 m 处小时平均最大风速	100 m 处小时平均最小风速
丹巴	1.96 m/s	0.0196 m/s	1.86 m/s	1.03 m/s
德昌	2.5 m/s	0.4 m/s	3.5 m/s	1 m/s
石渠	2.02 m/s	0.66 m/s	2.1 m/s	0.45 m/s

由图5和表2可知,德昌小时平均风速最大值出现在7~8时左右,风速最大值为2.5 m/s,风速最小值出现在23~0时左右,最小风速值为0.4 m/s。由图6可知德昌100 m处小时平均风速最大值出现在7~8时左右,最大值为3.5 m/s。最小值出现在23~0时左右,最小值约为1 m/s。

由图5和表2可知石渠风速最大值出现在7~8时左右,风速最大值为2.02 m/s,风速最小值出现在十三时左右,最小风速值为0.66 m/s。由图6可知100 m处石渠小时平均风速最大值出现在8时左右,最大值约为2.1 m/s。最小值出现在12~13时左右,最小值为0.45 m/s。

通过研究发现10 m和100 m处的风速最大最小值几乎出现在同一个时间且100 m处的风速要比10 m处的风速略大些。通过将三地的小时平均风速放在一起比较可知,丹巴,德昌,石渠的小时平均风速最大值均出现在8时左右,最小值出现在10~12时。四川盆地各个地方小时平均风速相较于我国的其它地方的小时平均风速都较小。主要原因是封闭的地形,导致四川盆地常年风速偏低,是我国小时平均风速最小的地区之一。

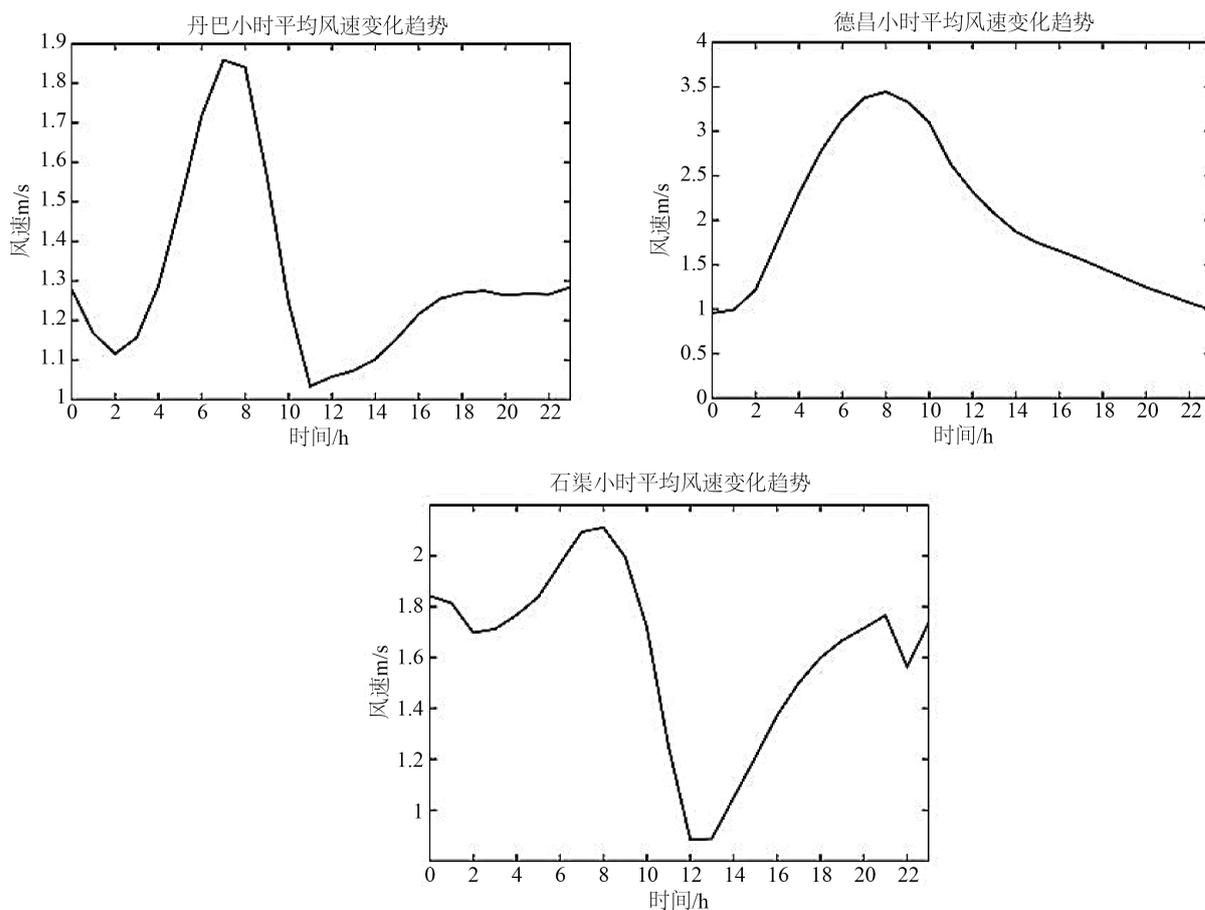


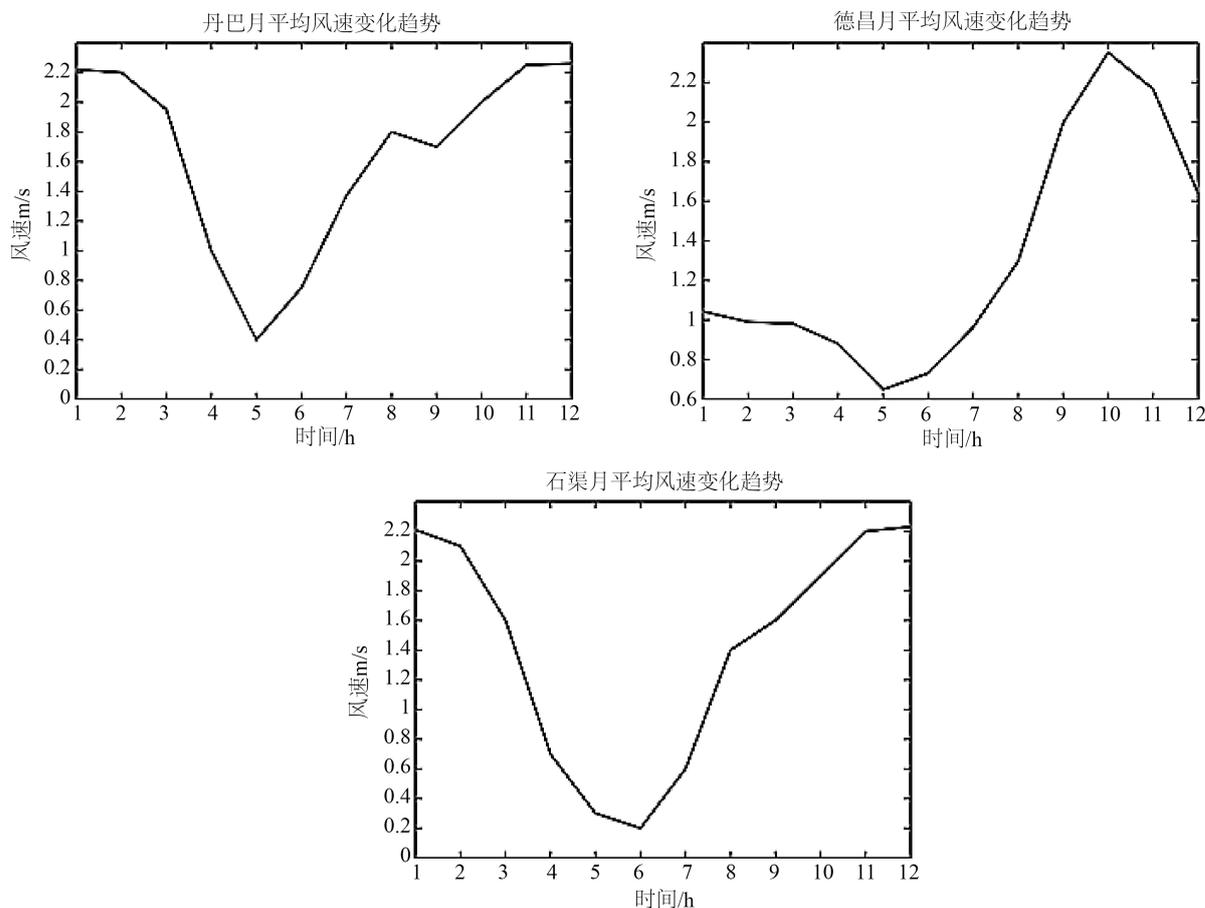
Figure 6. Variation trend of hourly average wind speed at 100 m

图6. 100 m处三地小时平均风速的变化趋势

### 3.3.2. 风速大值区的年变化趋势

为研究风速大值区的年变化趋势依然选取了丹巴,德昌,石渠三地为代表研究10 m和100 m处的月平均风速变化趋势。分别求12个月每月的风速平均得到图7,图8即三个地方10 m和100 m处风速的月平均变化趋势。

如图 7 和表 3 所示, 丹巴月平均最大风速出现在 11 月左右, 最大月平均风速值为 2.25 m/s, 最小月平均风速值出现在 5 月左右, 最小月平均风速值为 0.3 m/s。如图 8, 100 m 处丹巴的月平均最大风速出现在 11 月左右, 风速最大值约为 3 m/s。最小值出现在 5 月左右, 风速最小值为 0.5 m/s。



**Figure 7.** Variation trend of monthly average wind speed at 10 m

**图 7.** 10 m 处月平均风速的变化趋势

**Table 3.** Monthly average maximum wind speed of three places at 10 m

**表 3.** 10 m 处三地月平均最大风速情况

地点	10 m 处月平均最大风速	10 m 处月平均最小风速	100 m 处月平均最大风速	100 m 处月平均最小风速
丹巴	2.25 m/s	0.3 m/s	3 m/s	0.5 m/s
德昌	2.35 m/s	0.63 m/s	3.7 m/s	1.1 m/s
石渠	2.27 m/s	0.2 m/s	3.3 m/s	0.5 m/s

由图 7 和表 3 可知, 德昌月平均风速最大值出现在 10 月左右, 风速最大值为 2.35 m/s, 风速最小值出现在 5 月左右, 最小风速值约为 0.63 m/s。图 8 研究的是 100 m 处德昌的月平均风速变化趋势, 由图可知月平均风速最大值出现在 10 月左右, 最大值约为 3.7 m/s。风速最小值出现在 5 月左右, 最小值约为 1.1 m/s。

图 3 研究的是 10 m 处石渠月平均风速的变化趋势, 由图可知石渠月平均风速最大值出现在 12 月左

右, 月平均风速最大值为 2.27 m/s, 月平均风速最小值出现在六月左右, 最小风速值为 0.2 m/s。由图 8 可知 100 m 处石渠月平均风速最大值出现在 11 月左右, 风速最大值为 3.3 m/s。最小值出现在 7 月左右, 最小值约为 0.5 m/s。

通过研究发现 10 m 和 100 m 处风速的最大, 最小值几乎出现在相同的月份。通过对比比较三地的月平均风速可知, 三地月平均风速最小值均出现在 5~6 月, 月平均风速成最大值出现在 10~12 月。四川盆地风速大值区的月平均风速相较于我国其他地方都较小, 所以四川盆地的月平均风速较其他地方也较小。

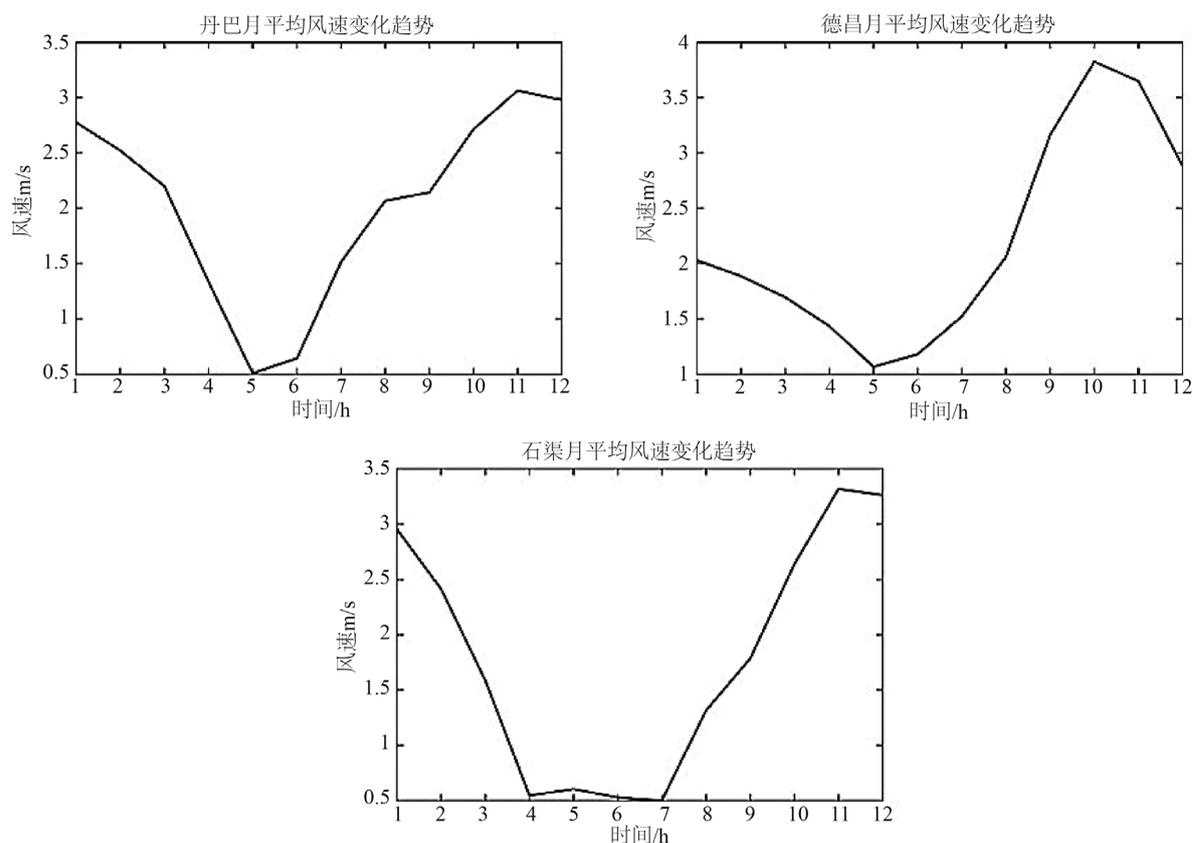


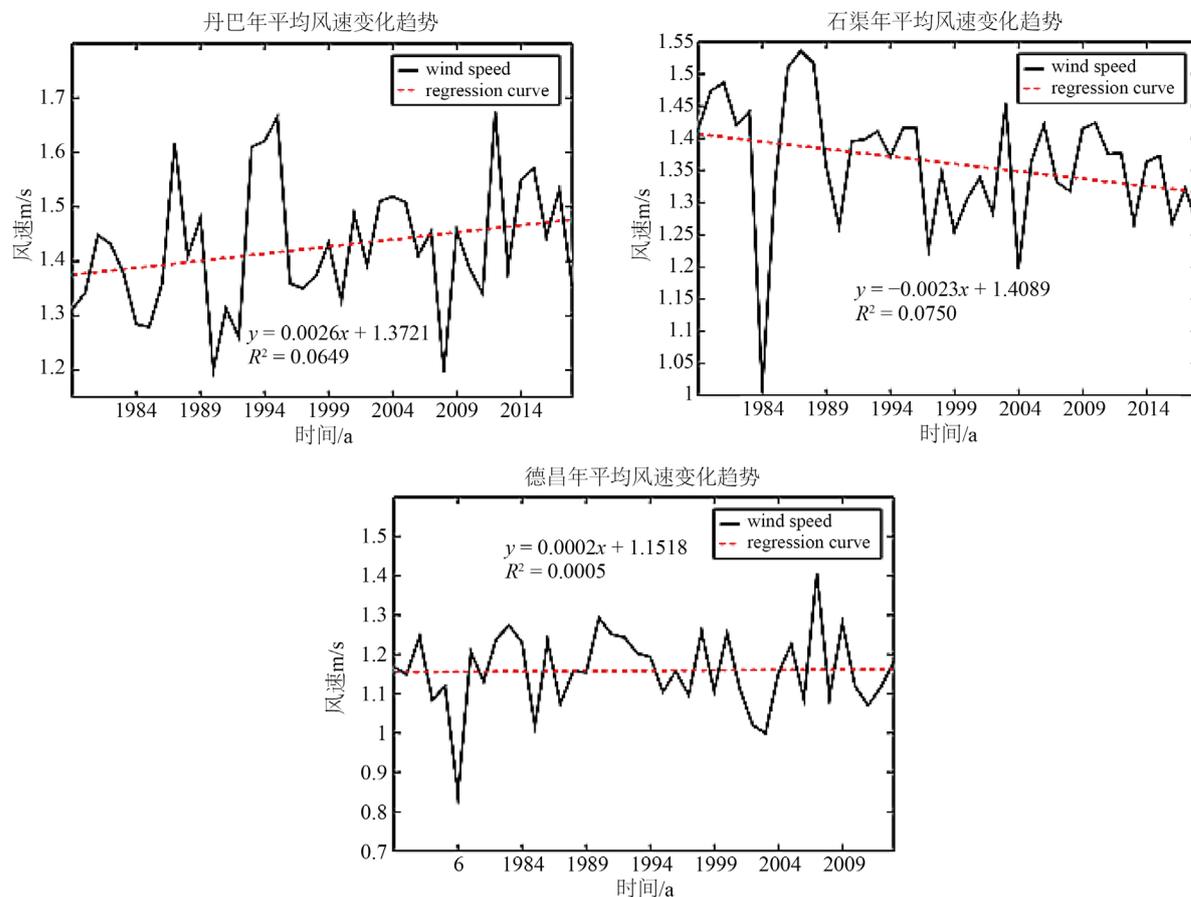
Figure 8. Variation trend of monthly average wind speed at 100 m

图 8. 100 m 处三地月平均风速的变化趋势

### 3.3.3. 风速大值区的年际变化

为研究风速的年际变化趋势依然选取丹巴, 德昌, 石渠三个风速大值区为代表研究 10 m 和 100 m 处的年平均风速变化趋势。分别求 1979~2018 风速的年平均得到图 9, 图 10 即丹巴, 德昌, 石渠风速的年平均风速的变化。

如图 9 所示, 10 m 处丹巴年平均最大风速出现在 2012 年左右, 最大年平均风速值约为 1.98 m/s, 最小年平均风速值出现在 2018 年左右, 最小年平均风速值约为 1.3 m/s。从回归方程可以看出 10 m 处丹巴年平均风速在动摇中呈现递增的趋势, 求出的年平均风速气候倾向率为 0.0045 (m/s)/10 年, 即每十年年平均风速增加 0.0045 m/s。可以看出年平均风速的变化极其慢。如图 10 所示, 100 m 处丹巴年平均最大风速出现在 1994 和 2012 年左右, 最大年平均风速值约为 2.35 m/s, 最小年平均风速值出现在 1990 年左右, 最小年平均风速值约为 1.65 m/s。从回归方程可以看出 100 m 处丹巴年平均风速在动摇中呈现递增的趋势, 求出的年平均风速气候倾向率为 0.0022 (m/s)/10 年, 即每十年年平均风速增加 0.0022 m/s。



**Figure 9.** Variation trend of annual average wind speed at 10 m  
**图 9.** 10 m 处年平均风速的变化趋势

图 9 研究的是 10 m 处德昌年平均风速的变化趋势，由图可知，德昌年平均风速最大值出现在 2012 年左右，年平均风速最大值约为 1.4 m/s，年平均风速最小值出现在 1981 年左右，年平均最小风速值为 0.83 m/s。从回归方程可以看出德昌年平均风速在动摇中呈现递增的趋势，求出的年平均风速气候倾向率为 0.0004 (m/s)/10 年，即十年年平均风速增加 0.0004 m/s。图 10 研究的是 100 m 处德昌年平均风速的变化趋势，由图可知，德昌年平均风速最大值出现在 2012 年左右，年平均风速最大值约为 2.35 m/s，年平均风速最小值出现在 2008 年左右，年平均最小风速值约为 1.7 m/s。从回归方程可以看出 100 m 处德昌年平均风速在波动中呈现递减的趋势，求出的年平均风速气候倾向率为 -0.0002 (m/s)/10 年，即十年年平均风速减少 0.0002 m/s。

图 9 研究的是 10 m 处石渠年平均风速的变化趋势，由图可知石渠年平均风速最大值出现在 1987 年左右，年平均风速最大值为 1.56 m/s，年平均风速最小值出现在 2018 年左右，最小风速值为 0.5 m/s。从一元线性回归方程可以看出石渠年平均风速在波动中呈现递减的趋势，求出的年平均风速气候倾向率为 -0.0054 (m/s)/10 年，即每十年风速减少 0.0054 m/s。图 10 研究的是 100 m 处石渠年平均风速的变化趋势，由图可知石渠年平均风速最大值出现在 1987 年左右，年平均风速最大值为 1.95 m/s，年平均风速最小值出现在 1990 年左右，最小风速值为 1.3 m/s。从一元线性回归方程可以看出石渠年平均风速在波动中呈现递减的趋势，求出的年平均风速气候倾向率为 -0.0146 (m/s)/10 年，即每十年风速减少 0.0146 m/s。

通过对三地年平均风速变化趋势的比较可知在 10 m 处德昌的年平均风速的气候倾向率最小，但是三

者比较起来气候倾向率都较小。丹巴年平均风速的最大值最大，德昌年平均风速的最小值最小。在 100 m 处石渠的气候倾向率的绝对值最大。通过研究发现四川盆地各个地方年平均风速相较于我国的其它地方的年平均风速都较小且年平均风速的气候倾向率也较小即风速的波动范围小。

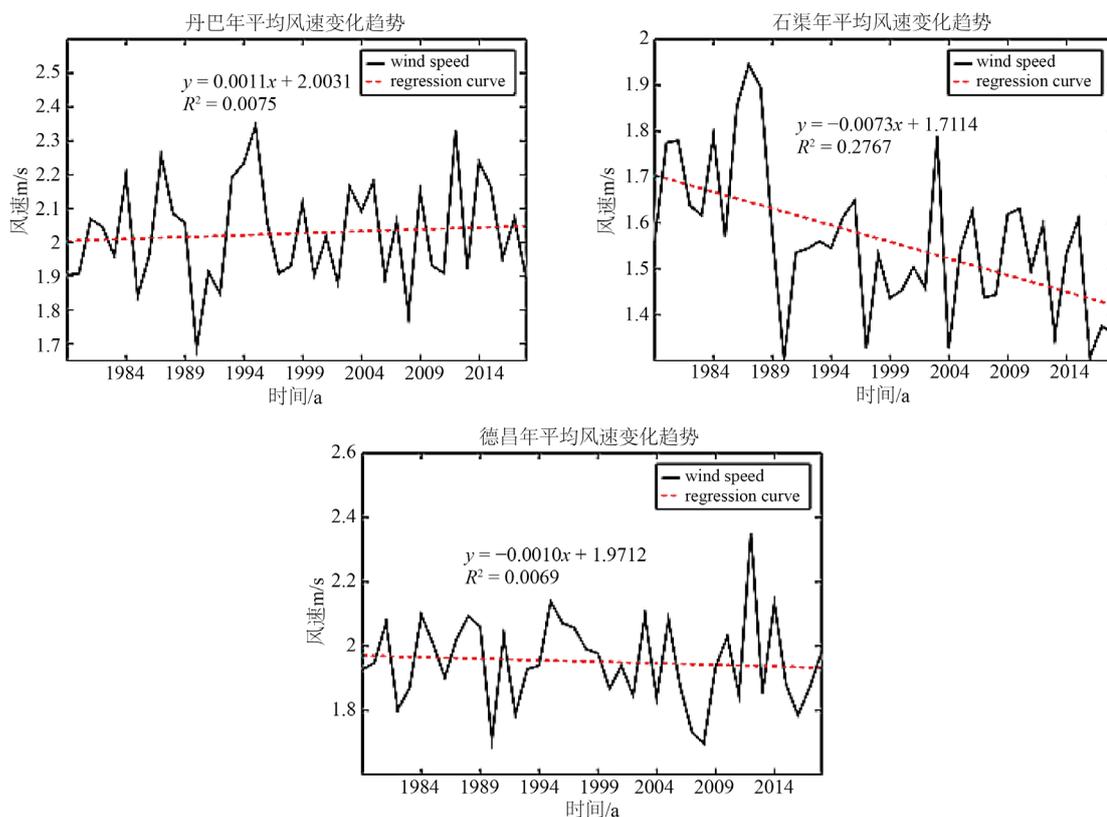


Figure 10. Variation trend of annual average wind speed in Danba, Dechang, and Shiqu at 100 m

图 10. 100 m 处丹巴、石渠、德昌三地年平均风速的变化趋势

### 3.4. 无量纲幂指数随风速的变化

通过算法  $\alpha = \log U_{100}[i] - \log U_{10}[i]$  求解无量纲幂指数得到图 11, 如图所示无量纲幂指数随 10 m 处四川省的平均风速的分布图。由图可知, 幂指数  $\alpha$  在低风速下较不稳定, 表现出很强的随机性, 随着风速的增大, 幂指数  $\alpha$  呈现出明显增大的趋势并趋于平定。

幂指数随风速增加有递增的趋势, 随 10 m 处平均风速的增大, 无量纲幂指数递增, 求出的线性拟合系数为 0.023565。同时工程中往往关注强风的特性, 对平均风速大于 6 m/s 时的实测幂指数进行统计分析, 得到  $\alpha$  的平均值为 0.162, 标准差为 0.075。

可见无量纲幂指数也可指示强风的发生。当无量纲幂指数超过了一定的界线可能就会有强风的发生。由于四川省常年平均风速较小, 所以无量纲幂指数也较小。

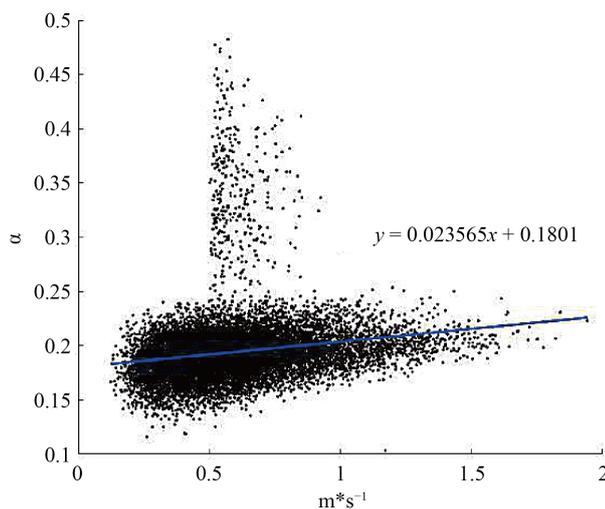
## 4. 风功率密度的时间变化特征

### 4.1. 风功率大值区的变化趋势

#### 4.1.1. 风功率大值区的年变化趋势

由国际“风力发电风力能源资源评价法”等级标准, 由现有的气象观测 10 米高的观测数据计算, 四

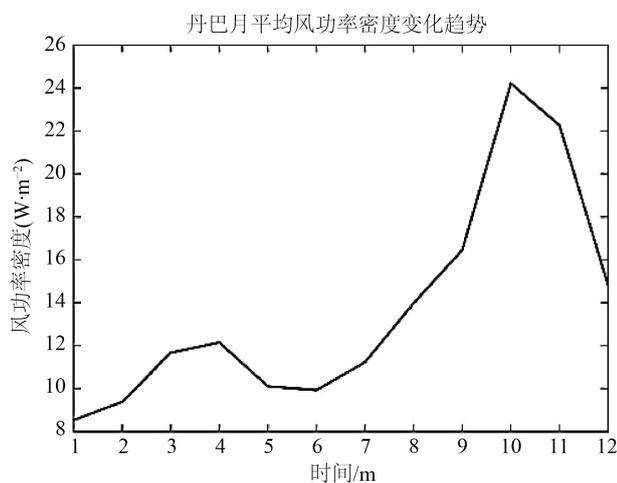
川省的风力能源资源属于贫困地区，风力能源资源可利用地区的相关条件达不到标准。故在接下来的研究中选用 100 m 处的风速资料来研究风功率密度。由图 1 可知风功率大值区主要分布在德昌县为中心的安宁河谷、以茂县为中心的岷江河谷和以丹巴县为中心的大渡河谷。选取丹巴和德昌两个风功率密度大值区研究风功率密度的年变化。通过对 100 m 处数据的处理得到 40 年 100 m 处风功率密度的月平均变化即月平均风功率密度的变化。



**Figure 11.** Change of dimensionless power index function with wind speed

**图 11.** 无量纲幂指函数随风速的变化

由图 12 可知丹巴月平均风功率密度最大值出现在 10 月，月平均风功率密度最大值为  $24 \text{ W/m}^2$ 。月平均风功率密度最小值出现在 1 月，月平均风功率密度最小值约为  $8.4 \text{ W/m}^2$ 。月平均风功率密度从一月到十二月有递增的趋势。由图 13 可知德昌月平均风功率密度的最大值出现在 10 月，月平均风功率密度最大值约为  $87 \text{ W/m}^2$ 。月平均风功率密度最小值出现在 6 月左右，月平均风功率密度最小值不到  $10 \text{ W/m}^2$ 。



**Figure 12.** Variation trend of monthly mean wind energy density in Danba

**图 12.** 丹巴月平均风功率密度的变化趋势

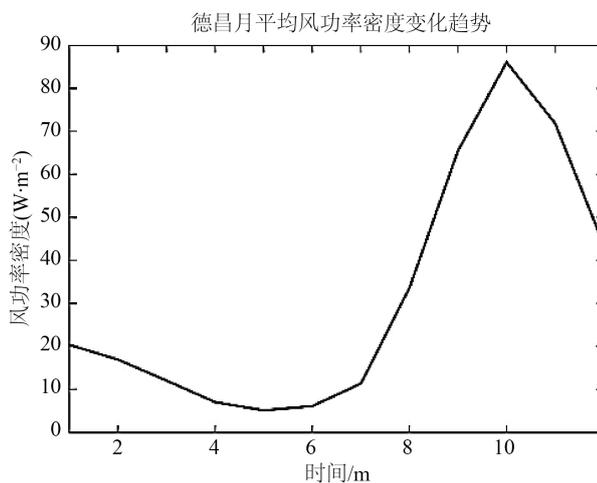


Figure 13. Variation trend of monthly average wind power density in Dechang

图 13. 德昌月平均风功率密度的变化趋势

由上面两地月平均风功率密度的分析可知, 各个月的平均风功率密度有很大的差异。其中德昌和丹巴两地的月平均风功率密度最大值均出现在 10 月左右, 说明 10 月更适合风能发电和风能的利用。上半年即 1~6 月相比于下半年即 7~12 月的平均风功率密度的值较小说明下半年更适合风能的开发利用。通过分析可知年平均风功率密度的最大值和风功率密度的最小值和年平均风速的最大最小值是对应的。

#### 4.1.2. 风功率密度大值区的年际变化

由图 1 可知风功率大值区主要分布在德昌县为中心的安宁河谷、以茂县为中心的岷江河谷和以丹巴县为中心的大渡河谷。选取丹巴和德昌两个风功率密度大值区研究风功率密度的年季变化。

如图 14 所示, 100 m 处丹巴年平均风功率密度最大值出现在 2012 年左右, 最大年平均风功率密度值约为  $21.5 \text{ W/m}^2$ , 最小年平均风功率密度出现在 1990~1991 年左右, 最小年年平均风功率密度值约为  $6.3 \text{ W/m}^2$ 。从一元线性回归方程可以看出 100 m 处丹巴年平均风功率密度在波动中呈现递增的趋势, 求出的年平均风功率密度气候倾向率为  $0.0532 \text{ (W/m}^2\text{)/5 年}$ , 即每 5 年年平均风功率密度增加  $0.0532 \text{ W/m}^2$ 。可以看出年平均风功率密度的变化极其慢。年平均风功率密度存在两个峰值分别位于 1994 年左右和 2012 年, 近几年的年平均风功率密度并未达到最大值。

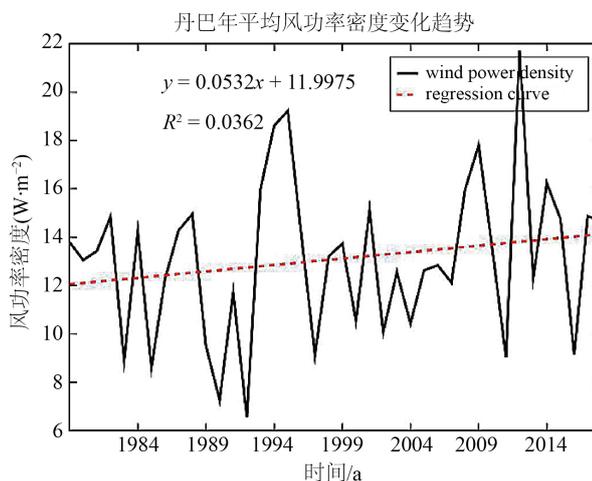
图 15 研究的是 100 m 处德昌年平均风功率密度的变化趋势, 由图可知, 德昌年平均风功率密度最大值出现在 2012 年左右, 年平均风功率密度最大值约为  $44 \text{ W/m}^2$ , 年平均风功率密度最小值出现在 2008 年左右, 年平均最小风速值约为  $24 \text{ W/m}^2$ 。从一元线性回归方程可以看出 100 m 处德昌年平均风功率密度在波动中呈现递减的趋势, 求出的年平均风功率密度气候倾向率为  $-0.0697 \text{ (W/m}^2\text{)/5 年}$ , 即 5 年年平均风功率密度减少  $0.0697 \text{ W/m}^2$ 。

通过分析可知年平均风功率密度的最大值和年平均风功率密度的最小值和年平均风速的最大最小值是对应的。且近年来风功率密度即风能资源未达到开发利用的最高值。

## 5. 结论

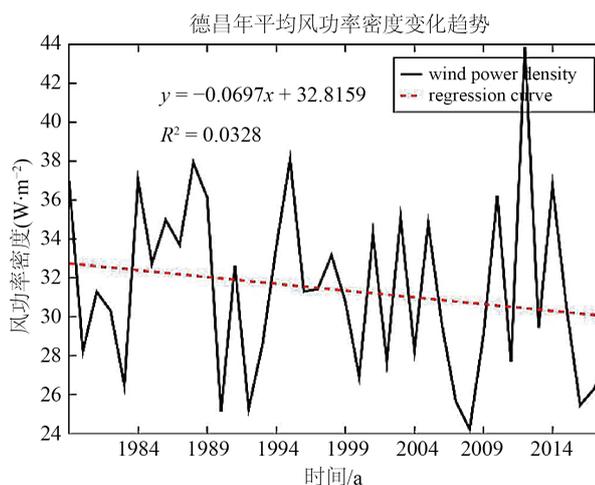
1. 通过对 10 m 和 100 m 处风速资料的处理得到四川省年平均风速的空间分布特征即四川省年平均风速也呈现出东北 - 西南型的空间分布特征, 即东北域年平均风速较高, 而西南部区域年平均风速较小。
2. 通过求季节平均的风速水平分布可以看出, 四川省季节平均的风速水平分布和年平均风速的水平

分布是一致的即东北域季节平均风速较高，而西南部区域季节平均风速较小。且春季的平均风速相对于其他季节较大。



**Figure 14.** Variation trend of annual average wind power density of Danba at 100 m

**图 14.** 100 m 处丹巴年平均风功率密度的变化趋势



**Figure 15.** Variation trend of annual average wind power density at 100 m

**图 15.** 100 m 处德昌年平均风功率密度的变化趋势

3. 通过上面对四川省风速空间分布的分析可以确定风速大值区的位置，选取丹巴，石渠，德州三个风速大值区为代表研究风速大值区的小时平均风速，月平均风速，以及年平均风速的变化。通过分析可知丹巴，德昌，石渠的小时平均风速最大值均出现在 8 时左右，最小值出现在 10~12 时。说明 8 时左右三地的风力资源开发利用较好，而 10~12 时风能的开发较贫乏。三地月平均风速最小值均出现在 5~6 月，月平均风速成最大值出现在 10~12 月，说明 10~12 月开发利用风能较好。三地年平均风速的变化幅度相当小，年平均风速的值也较小。通过对风速大值区的年平均风速，月平均风速，小时平均风速的变化分析可知四川盆地各个地方平均风速相较于我国的其它地方的平均风速都较小且风速的波动也范围小。

4. 风功率密度指的是气流在单位时间内垂直通过单位截面积的风能，他是描述一个地方风能潜力的

最方便最有价值的量。通过对四川省年平均风功率密度的分析可知四川省年平均风功率呈东 - 西型的空间分布特征, 即西部区域年平均风速较高, 相应的年平均风功率密度也较高。而东部区域年平均风速较小, 相应的年平均风功率密度也较小。四川省年平均风功率密度也呈现出东北 - 西南型的空间分布特征, 即东北域年平均风速较高, 相应的年平均风功率密度也较高。而西南部区域年平均风速较小, 相应的年平均风功率密度也较小。

5. 选取丹巴和德州两个风功率密度大值区研究风功率密度大值区月平均风功率密度和年平均风功率密度的变化, 通过分析可知德昌和丹巴两地的月平均风功率密度最大值均出现在 10 月左右, 说明 10 月更适合风能发电和风能的利用。前半年即 1~6 月相比于后半年即 7~12 月的平均风功率密度的值较小说明后半年更适合风能的开发利用。通过分析可知年平均风功率密度的最大值和年平均风功率密度的最小值和年平均风速的最大最小值是对应的。两个风功率密度大值区年平均风功率密度的值很小, 可知四川省大部分地区风能资源状况较差, 无法满足风能资源的相关要求。

6. 四川省平均风速的无量纲幂指数  $\alpha$  在低风速下较不稳定, 表现出很强的随机性, 随着风速的增大, 幂指数  $\alpha$  呈现出明显增大的趋势并趋于平定。当无量纲幂指数超过了一定的界线可能就会有强风的发生。由于四川省常年平均风速较小, 所以无量纲幂指数也较小。

## 参考文献

- [1] 廖顺宝, 刘凯, 李泽辉. 中国风能资源空间分布的估算[J]. 地球信息科学学报, 2008, 10(5): 551-556.
- [2] Nguyen, K.Q. (2007) Wind Energy in Vietnam: Resource Assessment, Development Status and Future Implications. *Energy Policy*, **35**, 1405-1413. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.04.011>
- [3] Mirza, U.K., Ahmad, N., Majeed, T., et al. (2007) Wind Energy Development in Pakistan. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **11**, 2179-2190. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.03.003>
- [4] 李路长, 白慧, 顾欣, 等. 贵州镇远“4·17”大风冰雹天气过程多普勒雷达回波特征分析[J]. 贵州气象, 2014, 38(4): 28-31.
- [5] 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.
- [6] 邓国卫, 高晓清, 惠小英, 等. 酒泉地区风能资源开发优势度分析[J]. 高原气象, 2010(6): 280-286.
- [7] 李艳, 耿丹, 董新宁, 等. 1961-2007 年重庆风速的气候变化特征[J]. 大气科学学报, 2010, 33(3): 82-86.
- [8] 黄世成, 姜爱军, 刘聪, 等. 江苏省风能资源重新估算与分布研究[J]. 气象科学, 2007, 27(4): 57-62.
- [9] 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析[J]. 气象学报, 2004(2): 101-109.
- [10] 张民. 近 50 年中国地面气候变化基本特征[J]. 科技资讯, 2014, 12(13): 238-238.
- [11] 帅士章, 潘徐燕, 罗楠. 贵州省风能资源评价的相关计算[J]. 贵州气象, 2007(3): 15-18.
- [12] 李德友, 郭斌. 四川省茂县风能资源初步分析[J]. 高原山地气象研究, 2009(4): 72-75.
- [13] 李艳, 王元, 汤剑平. 中国近地层风能资源的时空变化特征[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2007, 43(3): 67-78.
- [14] 王婷, 李翠华, 胡娅敏, 等. 广东省风能资源分布的数值模拟[J]. 热带地理, 2013, 33(1): 1-8.
- [15] 张素云, 周顺武, 郭艳岭, 等. 近 47a 河北风速季节变化特征及影响因子分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(12): 93-99.
- [16] 田莉. 近 50 年西北地区风速的气候变化特征[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(32): 20065-20068.
- [17] 张爱英, 任国玉, 郭军, 等. 近 30 年我国高空风速变化趋势分析[J]. 高原气象, 2009, 28(3): 680-687.
- [18] 孟宪贵, 郭俊建, 韩永清. ERA5 再分析数据适用性初步评估[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(1): 91-99.