

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2019.01.016

四川省布拖县风能资源局地调查评估^①

钟燕川^{1,2}, 马振峰¹, 郭海燕¹, 徐金霞¹, 邓国卫¹

1. 四川省气候中心, 成都 610000; 2. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610000

摘要: 采用四川省布拖县 2012 年 1 月 1 日—2012 年 12 月 31 日期间的 A 和 B 测风 70 m 和 10 m 高度实测逐时数据, 通过布拖县气象站 1981—2010 年间的逐时风速观测数据, 用长年代法进行订正和推算, 对该研究区域风能资源参数进行计算. 结果表明: A 测风塔区域 10 m 高度风能资源应用于并网风力发电为“好”的等级, B 测风塔区域 70 m 和 10 m 高度分别为“好”和“很好”的等级, 具有较好开发潜力, 且风能和风向较为集中, 有利于风机布设. 测风塔地处高海拔地形较为平坦的山脊地带, 临近公路, 不占用耕地, 气候较为温和, 利于风电场修建.

关键词: 四川; 布拖; 风能; 风速; 风功率密度

中图分类号: P425; TK81

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2019)01-0105-09

风能资源是气候资源的重要组成部分, 相对于不可再生的化石燃料, 风能是最具潜力的替代能源, 也是永久性的、清洁的可再生能源^[1-4]. 进行大型风能资源的开发时, 前期风资源评估和风电场选址十分关键, 通常复杂地形应根据实际情况布设测风塔进行观测, 评估后再进行开发^[5]. 在面积辽阔的四川省, 盆地内气候特点为少风多云, 通常被认为风能资源不佳^[4,6-8]; 在部分盆地周围的高山和高原地区, 气候和地形与盆地截然不同, 仍然存在部分风能资源较好地带^[8-10], 且地广人稀的特点利于修建风电场. 以往四川省风能资源评估的研究, 大多基于四川省基本气象站 10 m 高度观测数据, 采用插值方法来研究空间分布情况. 传统方法不能满足现有风能资源开发的要求: 气象站本身数量分布有限, 随着城市发展, 现多位于城区附近, 地理位置不满足开展风电机安装的要求^[11]; 传统气象站测风高度不能满足现有风电发电机要求; 风能资源具有很强的局地性, 传统插值方法无法满足现有开发要求^[12-15]. 对于风能资源实地开发, 还需实地竖立测风塔, 进行为期一年以上的风能数据观测, 才能更好地反应局地风能资源是否满足开发的情况. 目前, 关于四川省“三州”地区风能资源的研究较少, 关于布拖县风能资源目前尚无探寻^[16-19]. 本研究基于位于四川省凉山州南部的布拖县测风塔的实测数据和气象观测站长期数据, 对布拖县局地风资源情况予以分析和评估, 以此揭示布拖县该区域内的风资源特点, 为该区域的风能资源评估提供方法和资料, 为风电场选址、规划和建站等风能资源开发工作提供相应参考材料.

1 资料和方法

1.1 数据来源

本研究所用的测风塔风速资料来源于四川省发展改革委员会风能资源数据库, 为四川省凉山州彝族自治州布拖县两座测风塔(A,B)2012 年为期一年的逐时实测风速资料; 订正数据来自四川省气象局, 为布拖

① 收稿日期: 2017-06-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41275097); 四川省科技支撑计划项目(15ZC0098); 四川省气象局项目(川气课题 2013-开发-09).
作者简介: 钟燕川(1984-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事气候资源应用、气象和地质灾害研究.

气象观测站 1981—2010 年共计 30 年的风速逐时数据; 本研究所用分析数据为 A, B 测风塔经距离最近的布拖县气象局风速资料, 采用长年代法^[5]订正推算后的代表年数据. 测风塔 A, B 高 70 m, 地处海拔 3 300 m 左右的较为平坦的高山山脊, 与布拖气象站距离在 25 km 以内; 设备的安装无塔影效应, 测风仪器为美国 NRG 系统, 测风仪均经过标定, 风向标安装位置根据当地磁偏角修正.

1.2 计算方法

1.2.1 空气密度

空气密度直接影响风能的大小, 在同等风速条件下, 空气密度越大风能越大. 空气密度计算公式如下:

$$\rho = \frac{1.276}{1 + 0.0366t} \frac{p - 0.378e}{1000} \quad (1)$$

式中: ρ 为气密度(kg/m^3); P 为气压(hPa); t 为气温($^{\circ}\text{C}$); e 为水汽压(hPa).

根据测风塔的实测气温、气压、相对湿度观测数据, 计算测风塔空气密度值.

1.2.2 年平均风速和年平均风功率密度

年平均风速计算方法为^[5,9-10]:

$$\bar{V}_E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (2)$$

式中: \bar{V}_E 为平均风速; n 为计算时段内(年、月)平均风速序列的个数; V_i 为观测的风速序列^[9].

空气密度计算公式为:

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (3)$$

式中: ρ 为空气密度(kg/m^3); R 为气体常数; T 为年平均开氏温标绝对温度; P 为年平均气压(Pa)^[14].

用(2)式计算所得实际观测高度处的空气密度结果, 依据以下公式推算轮毂高度处的空气密度:

$$\rho_z = \rho_h e^{-0.0001(z-h)} \quad (4)$$

式中: ρ_z 为订正轮毂高度处 z 的空气密度; ρ_h 为实地观测高度处的空气密度^[20].

年平均风功率密度为:

$$D = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \rho v_i^3 \quad (5)$$

式中: v_i 为风速观测序列(m/s); D 为年平均风功率密度(W/m^2); ρ 为空气密度(kg/m^3); v_i 为逐小时风速(m/s); n 为统计时段小时数(h)^[11].

1.2.3 风能资源长年代订正

由于目前测风塔观测时间一般比较短, 难以代表当地长年平均风况特征, 为满足运行期长达 20 年的风电场风能资源评估需要, 利用布拖气象观测站 30 年风速资料, 对测风塔一年的风速实测资料进行订正, 对拟建风电场区域的风能资源进行长年代评估. 计算各参证站观测年度年平均风速相对本站近 20 年累年平均风速距平百分率, 计算公式为:

$$\eta = \frac{V - \bar{V}}{\bar{V}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: η 为累年平均风速距平百分率; V 为参证站在现场观测时段的平均风速; \bar{V} 为参证站累年平均风速. 根据算出的参证站风速距平百分率 η 和测风塔观测年度的风速值 V , 得出测风塔长年代风速订正公式:

$$\bar{V} = V \cdot (1 - \eta) \quad (7)$$

长年代风功率密度的计算公式为:

$$\bar{D}_{WP} = D \cdot (1 - \eta)^3 \quad (8)$$

式中: D 为测风塔观测时段的风功率密度.

1.2.4 风向和风能密度分布

某处风向分布特征通常用风向在 16 方位出现的频率来描述, 这里的风向频率指在一定时段内, 风出现在各个方位的次数占风向在全方位出现的总次数比值。

风能密度计算公式为:

$$D_{WE} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \rho \cdot v_i^3 \quad (9)$$

式中: D_{WE} 为一定时段内风能密度 ($W \cdot h/m^2$); v_i 为第 i 个记录的风速 (m/s) 值; n 为一定时段内记录总数; ρ 为空气密度, 由空气密度公式(2)和(3)给出。

风能的密度分布情况通常由一定时间段内, 风能密度在各方向上与全方位的总风能密度比值来描述。

1.2.5 风向频率、风能方向频率和风速平率计算

风向频率通过统计观测时间段内所观测的风向资料计算。16 个方位各风向在统计时间段内(年或月)小时数量与总观测小时数的比值就是该点风向频率。

风能方向频率的计算: 根据一定时间段内风速和风向的逐时观测资料, 计算 16 个方位统计需计算各方位具有的风能能量和总能量的比值, 该值即为此方向的风能频率^[9,13]。年风能方向频率计算公式如下:

$$F_{东} = \frac{\sum_{i=1}^m \rho_i V_i^3}{\sum_{j=1}^n \rho_j V_j^3} \quad (10)$$

式中: $F_{东}$ 为一年内东方位的风所具有能量与该处总能量的比值; i 为东风风向出现风的小时数量。

风速频率指的是每 1 m/s 即为一个风速区间, 在要统计计算年份的测风序列中, 各风速区间内风速出现的频率。每个风速区间取的中间值, 比如风速区间 6.6 m/s 到 7.5 m/s ^[13] 则取中间值 7 m/s 。

1.2.6 风频曲线及威布尔参数计算

通常用平均风速和标准差来估算 K 和 A 威布尔参数。

平均风速 \bar{v} 用 μ 来估算, σ 用准差 S_v 来估算:

$$\mu = \bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (11)$$

$$\sigma = S_v = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i - \mu)^2} \quad (12)$$

式中: V_i 为风速观测数据序列; n 为特定时段内的风速序列个数^[20]。

Weibull 两参数 K, A 通过以下两式计算:

$$K = \left(\frac{\sigma}{\mu} \right) - 1.086 \quad (13)$$

$$A = \frac{\mu}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (14)$$

式中: $\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$ 为伽马函数。

采用威布尔分布曲线来与风速频率曲线拟合, 其中概率密度函数由下式来计算:

$$f(x) = \frac{K}{A} \left(\frac{x}{A} \right)^{K-1} \exp \left[- \left(\frac{x}{A} \right)^K \right] \quad (15)$$

式中: $f(x)$ 为概率密度函数; A 和 K 分别为尺度参数和为形状参数^[20]。

1.2.7 风速垂直切变

底层大气的层结状态和地表的粗糙度极大地决定了近地层风速垂直分布情况。若大气层结为中性, 无

论采用幂指数还是对数方程来描述风速的垂直廓线, 都可以获得较好的效果. 我国《建筑结构设计规范》中推荐采用幂指数公式, 而根据相关研究所得实地测量数据, 经多次检验结果表明, 相对于对数公式, 幂指数公式能够更加精确地拟合风速的垂直廓线, 其表达式如下:

$$V_2 = V_1 \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right)^\alpha \quad (16)$$

式中: V_1 和 V_2 分别为高度 Z_1 和 Z_2 处的风速(m/s); 此处 Z_1 取 10 m 高度; α 为风切变指数, 其值的大小可以体现风速垂直切变的强度^[13].

2 布拖县风能资源分析

2.1 布拖气象站风参数背景分析

2.1.1 风速年际和年内变化分析

据布拖县气象站数据所得, 布拖县 1981—2010 年风速为 2.1 m/s, 其平均风速变化情况如图 1 所示. 近 30 年来, 布拖县年平均风速呈下降趋势, 2010 年较 1981 年相比, 年均风速降低 41%, 与四川省大多数气象站近年来的变化趋势一致. 这可能与气象站周围建筑物逐年增多, 城市化进程加快有关^[12]. 故在新建风电场的局地区域设立测风塔进行观测十分必要, 因为长年代气象站所测风速并不能很好地反应局地风资源情况.

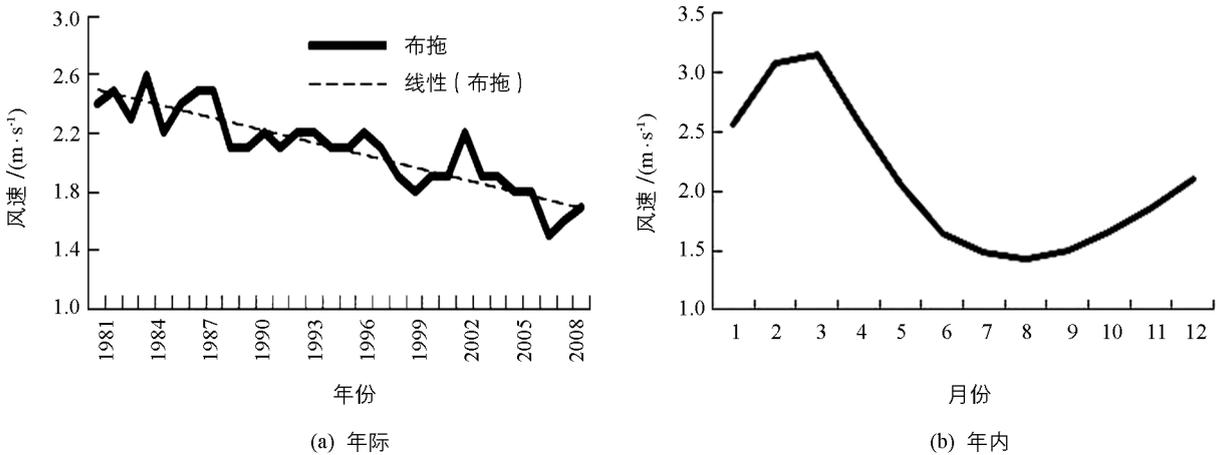


图 1 气象站风速年际和年内变化

由布拖县 1981—2010 年平均风速月变化情况可知, 1—4 月风速较大, 3 月最大, 风速为 3.2 m/s; 7—9 月风速较小, 8 月最小, 为 1.4 m/s.

2.1.2 风向频率

图 2 所示为布拖县风向频率分布情况. 根据布拖县气象站多年相关气象资料统计计算, 该地区主要风向出现在 ENE, 出现的频率为 11%; 在 WSW 方向次数也较多, 出现频率都为 9%, 该处静风频率为 27%.

2.2 观测塔长年代风能参数分析

2.2.1 风速和风功率密度年内变化

A 测风塔平均风速和风功率密度月变化情况如图 3 所

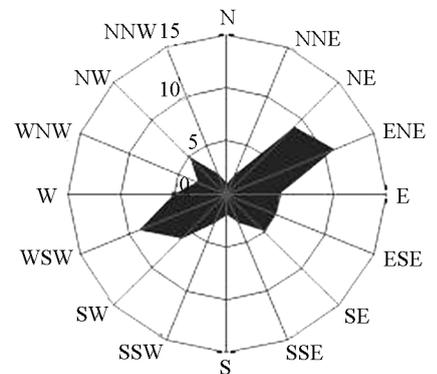


图 2 布拖县气象站多年平均风向频率图

示, B 测风塔平均风速和风功率密度数值和月变化情况与 A 塔一致. 测风塔 A 塔 70 m 和 10 m 高度年平均风速分别为 7.3, 6.7 m/s, 年均风功率密度分别为 338, 271 W/m²; B 塔 70 m 和 10 m 高度年平均风速分别为 8.8, 9.1 m/s, 年均风功率密度分别为 511, 586 W/m². A 和 B 测风塔在 10 m 高度和 70 m 高度的平均风速和风功率密度月变化情况高度相似, 在 4—6 月为低值月份, 在 11—次年 3 月为高值月份, 最大值都为 2 月, A 塔 70 m 高度该月平均风速和风功率密度为 10.6 m/s 和 804 W/m², B 塔为 13 m/s 和 1121 W/m². A 塔和 B 塔的平均风速和风功率密度均呈现出冬季较大, 夏季较小的规律.

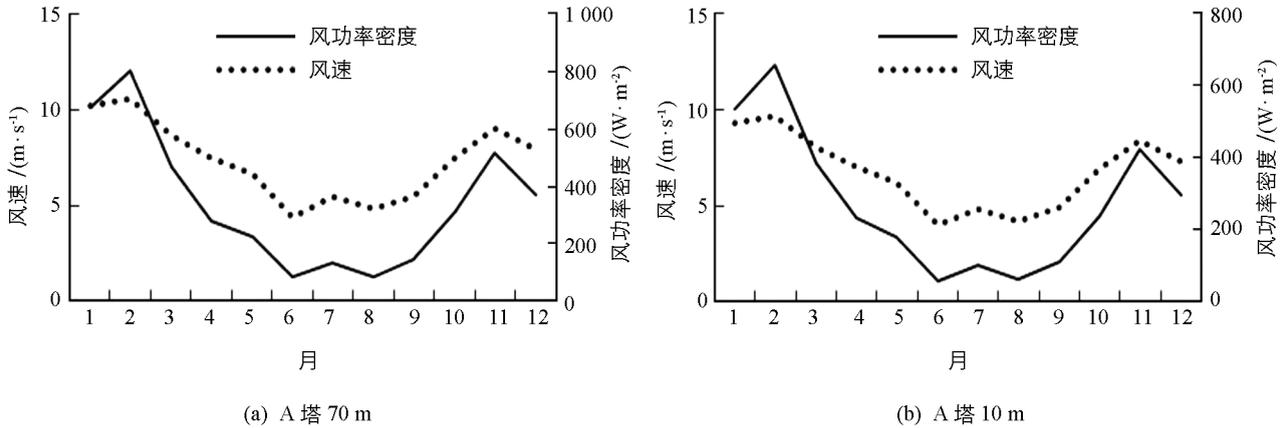


图 3 风速和风功率密度月变化情况曲线图

2.2.2 风速和风功率密度小时变化

由图 4 可知 A 测风塔平均风速和风功率密度日变化情况, B 测风塔平均风速和风功率密度数值和日变化情况和 A 塔一致. A 测风塔 70 m 和 10 m 高度平均风速和风功率密度日变化规律高度相似, 均呈现出了白天较小, 夜间较大的规律; 最小值出现在 12 时, 此时的 70 m 平均风速和风功率密度分别为 6.2 m/s 和 208 W/m², 10 m 平均风速和风功率密度分别为 5.7 m/s 和 171 W/m²; 最大值出现在晚上 20 时, 此时的 70 m 平均风速和风功率密度分别为 8.9 m/s 和 489 W/m², 10 m 平均风速和风功率密度分别为 8.2 m/s 和 400 W/m². B 测风塔的平均风速和风功率密度日变化情况不大, 较为稳定, 但风速和风功率密度间日变化规律一致性较差, 且无明显规律. 平均风速最大值出现在 20 时和 21 时, 70 m 和 10 m 分别为 9.1, 9.4 m/s; 平均风功率密度最大值出现在 9 时, 70 m 和 10 m 分别为 561, 650 W/m².

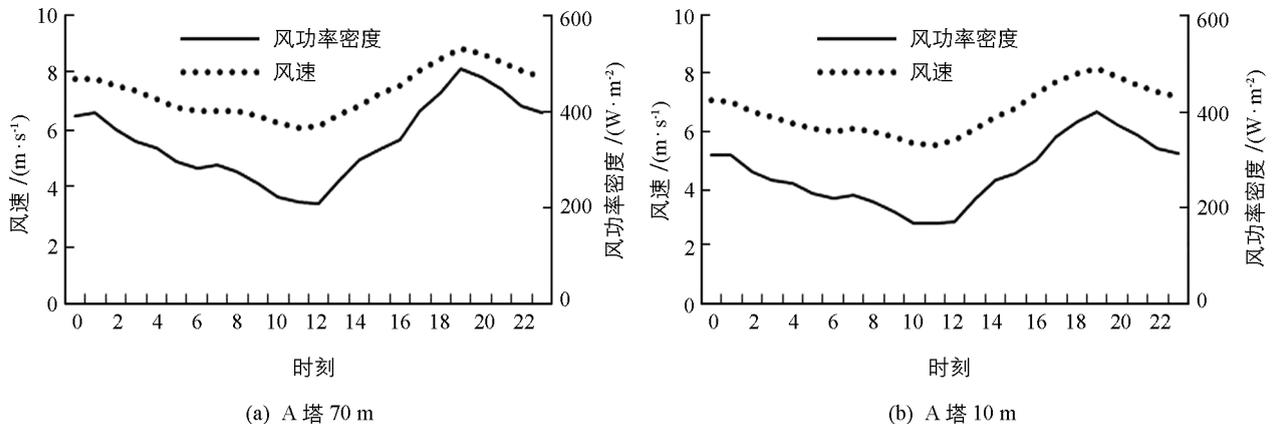


图 4 风速和风功率密度日变化情况曲线图

2.2.3 风速频率分布

风电机启动风速至破坏风速间的风速成为有效风速, 范围通常为 3~25 m/s. 测风塔等级风速频率分布如

图 5 所示. 由图可知, A 塔 70 m 和 10 m 的有效风速出现频率之和分别达到了 86% 和 84%, 风速主要分布区间在 1~16 m/s, 70 m 和 10 m 的风速频率出现最高的速段分别为 5.4 m/s; B 塔 70 m 和 10 m 的有效风速出现频率分别达到 89%, 风速均主要分布区间在 1~18 m/s 区间, 为 70 m 风速频率出现最高的速段, 10 m 风速频率最高速段为 11 m/s.

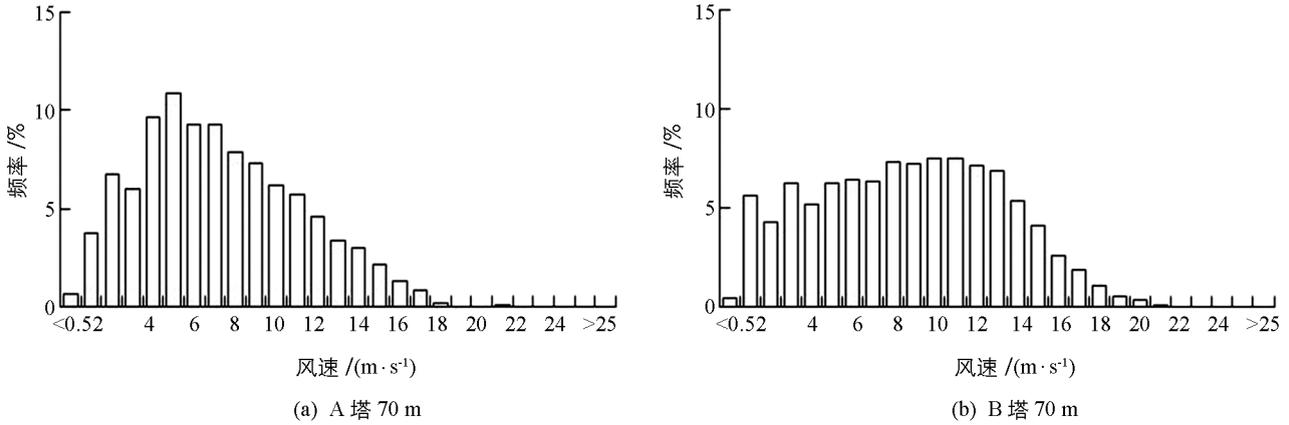


图 5 70 m 高度风速频率分布图

2.2.4 风向频率和风能密度比例分布

A 和 B 风塔 70 m 高度风向和风能密度方向分布如图 6 所示. A, B 两塔风向和风能密度都分布在西南方向. 其中, A 塔 70 m 和 10 m 主导风向均为 SSW, 频率均为 26%; 风能密度方向均为 SW, 频率分别为 40% 和 66%; B 塔 70 m 和 10 m 主导风向为 SW, 在该风向出现的频率均为 41%, 风能密度主要方向与主导风向同向为 SW, 在改方向出现的频率分别均为 66%. 不同高度层的风向和风能密度方向都较为集中, 利于风能资源的有效开发和利用.

2.2.5 风频曲线及威布尔参数

A 和 B 测风塔 70 m 高度的威布尔尺度和形状参数如表 1 所示, 风速威布尔分布曲线如图 7 所示, A 和 B 测风塔 10 m 高度分布曲线与 70 m 高度一致. 可以看出 A 塔风速威布尔分布中, 出现频率最高风速段为 6 m/s; B 塔出现频率最高风速段则为 7 m/s. A, B 两塔就与威布尔函数分布曲线吻合度而言, 70 m 高度比 10 m 高度好.

表 1 各测风塔 70 m 处风速威布尔尺度和形状参数

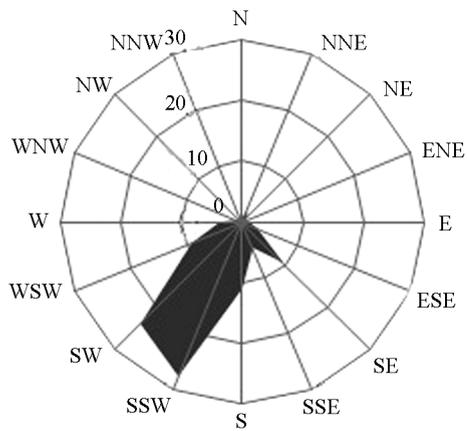
观测塔	形状参数 K	尺度参数 $A/(m \cdot s^{-1})$
A	1.96	8.23
B	2.06	9.81

2.2.6 风速垂直切变

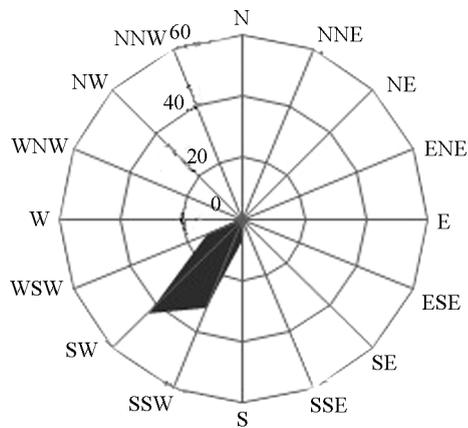
据幂指数方法, 计算得 A 和 B 测风塔风切变指数如图 8 所示. A 塔模拟风速随着高度增加而增大, 而 B 塔则出现了负切变, 这可能与测风塔所在的地形复杂有关.

3 结果与讨论

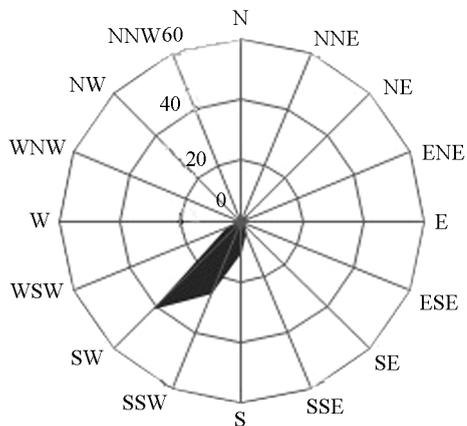
1) 经分析, 本研究中布拖县气象站的多年观测值结果与布拖县测风塔实际测量的平均风速和风向值差异较大. 结果反映了布拖县风能资源较强的局地性, 这与其他地区实测风能资源评估结果类似. 研究结果也说明, 在布拖县地区进行风能资源开发, 于修建风电场之前, 必须先设立测风塔, 采用实地观测资料. 此举可较大避免风机布设和修建场址的不合理性^[20].



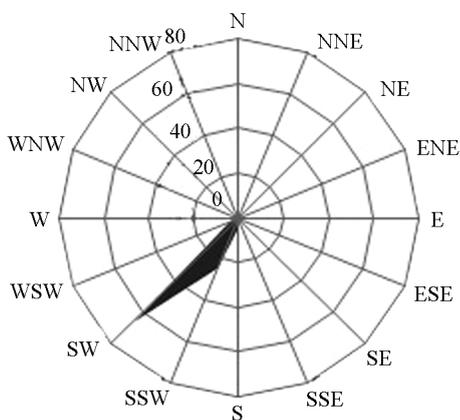
(a) A 站 70 cm 高风向玫瑰图 (C=0%)



(b) A 站 70 cm 高风能密度玫瑰图

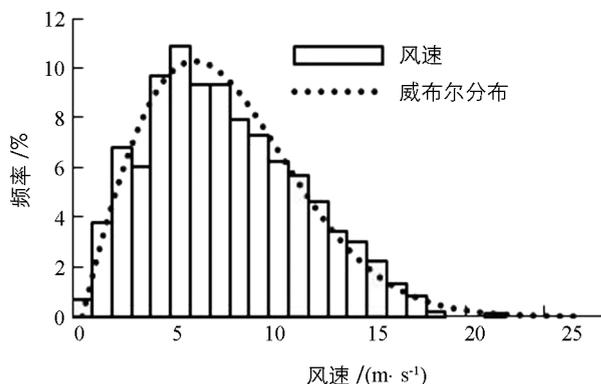


(c) B 站 70 cm 高风向玫瑰图 (C=0%)

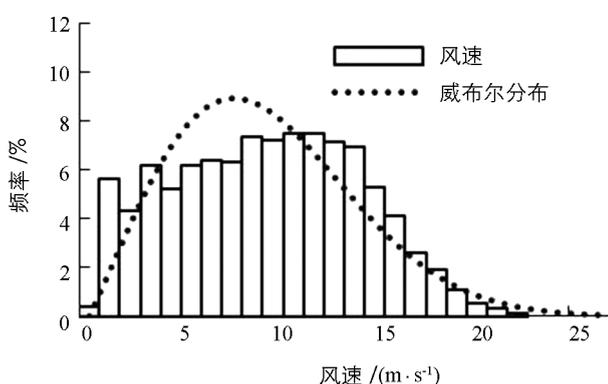


(d) B 站 70 cm 高风能密度玫瑰图

图 6 风向和风能密度方向分布图



(a) A 塔 70 m



(b) B 塔 70 m

图 7 风速威布尔分布曲线图

2) 布拖县的 A 塔 10 m、B 塔的 10 m 和 70 m 高度风能资源有很好的开发潜力。根据“风电场风能资源评估方法”^[9]中的标准: 布拖县 A 塔在 10 m 高度风能资源应用于并网风能发电达到“好”的等级, B 塔在 70 m 高度和 10 m 高度风能资源分别达到“好”和“很好”。且 A 和 B 测风塔区域风能在时间和方向的分布上都较为稳定和集中, 利于风能资源开发。

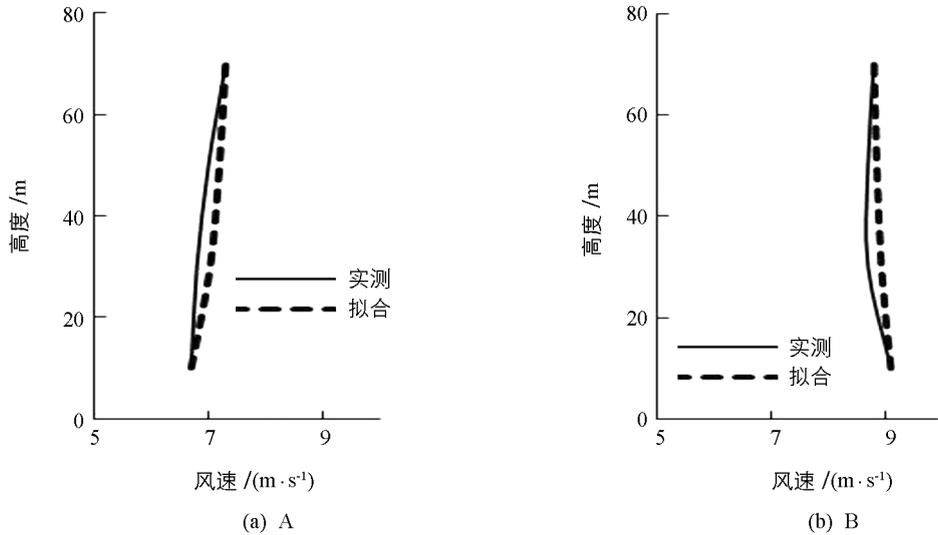


图 8 测风塔风速垂直廓线

3) 布拖县属亚热带湿润季风气候, 夏季高温多雨, 冬季温暖湿润. 年平均气温 $10.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 月均温 $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 7 月均温 $17.3\text{ }^{\circ}\text{C}$. 本研究区域位于地形较为平坦的高海拔山脊地带, 在该处设立风电场, 不仅附近公路顺畅, 便于运输修建材料, 还不占用耕地, 无需增加赔偿成本; 冬无严寒, 夏无酷暑, 气候温和, 无极端气象灾害, 便于设备安装和风电并网, 对修建风电场和建成后的运行维护有利. 挑选具体风电场址修建时, 可在风能资源较好的地区, 在复杂山地地形中挑选较为平坦的山脊地段沿线布设, 充分利用该地区的风能资源, 正常稳定运行风电机, 减少风机间的相互影响, 提高风电场的电量指标^[20].

4) 本研究受资料所限, 仅对位于凉山州中东部的布拖县测风点区域进行分析. 凉山州还存在大量地形和公路条件较好, 且风能资源有潜力的区域, 可继续对这些区域进行详实的实地调查实验, 竖塔观测, 结合气象资料, 对四川省风能潜力进行更加深入的挖掘.

参考文献:

- [1] 刘 怡, 杜流洪, 王 成, 等. 新型农村社区农户生态满意度影响因素分析——以整村推进示范区“大柱新村”为例 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2015, 40(7): 151—157.
- [2] 龚建原, 卢继平, 章耿勇, 等. 含储能系统及风电的电力系统动态经济调度 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2013, 30(6): 140—146.
- [3] 李剑波, 鲜学福. 基于灰色神经网络模型的重庆能源需求预测 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(6): 136—141.
- [4] 陈 浩, 蒋建红. 四川省风电开发特点及建议浅析 [J]. 低碳世界, 2014(7): 74—75.
- [5] 何 如, 谭敏玲, 罗红磊, 等. 南宁市横县地区风能资源评估 [J]. 气象研究与应用, 2016, 37(1): 59—63.
- [6] 何 一, 孙 庆, 陈 宇. 四川德昌安宁河谷风电场风能资源评估 [J]. 水电站设计, 2011, 27(4): 83—86.
- [7] 李德友. 高山峡谷地区风能资源利用探讨 [J]. 高原山地气象研究, 2010, 30(4): 72—75.
- [8] 中国气象局风能太阳能资源评估中心. 中国风能资源评估(2009) [M]. 北京: 气象出版社, 2010.
- [9] 科学技术部, 国家电力公司. 风电场风能资源评估方法: GB/T18710—2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [10] 邹立尧, 国世友, 王 冀, 等. 1961—2004 年黑龙江省近地层风速变化趋势分析 [J]. 气象, 2010, 36(10): 67—71.
- [11] 邢 婷, 郑有飞, 朱 勇, 等. 云南风能资源及其开发利用研究进展 [J]. 气象与环境科学, 2013, 36(4): 55—61.
- [12] 李泽椿, 朱 蓉, 何晓风, 等. 风能资源评估技术方法研究 [J]. 气象学报, 2007, 65(5): 708—717.

- [13] 李月高, 汪青春, 刘义花, 等. 泽库预选风电场风能资源特征及评估分析 [J]. 青海气象, 2009(1): 30—34.
- [14] 杨振斌, 薛 桁, 袁春红, 等. 用于风电场选址的风能资源评估软件 [J]. 气象科技, 2001, 29(3): 54—57.
- [15] 雷杨娜, 孙 娴, 姜创业. 测风塔选址对复杂地形风电场风资源评估的影响 [J]. 水电能源科学, 2013(4): 236—239.
- [16] 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): 407—412.
- [17] 毛慧琴, 宋丽莉, 黄浩辉, 等. 广东省风能资源区划研究 [J]. 自然资源学报, 2005, 20(5): 679—683.
- [18] 谢今范, 刘玉英, 王玉昆, 等. 东北地区风能资源空间分布特征与模拟 [J]. 地理科学, 2014, 34(12): 1497—1503.
- [19] MANWELL J F, MCGOWAN J G, ROGERS A L. Wind energy explained [J]. Wiley John and Sons, 2010, 30(2): 169—170.
- [20] 钟燕川, 马振峰, 郭海燕, 等. 四川省会理县风能资源分析研究 [J]. 高原山地气象研究, 2017, 37(2): 72—77.

Investigation and Assessment of Wind Energy Resources in Butuo of Sichuan Province

ZHONG Yan-chuan^{1,2}, MA Zhen-feng¹, GUO Hai-yan¹,
XU Jin-xia¹, DENG Guo-wei¹

1. Sichuan Provincial Climate Centre, Chengdu 610000, China;

2. Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610000, China

Abstract: The data of wind towers A and B in Butuo of Sichuan province from February 1st to January 31 st, 2012 at the height of 70 m and 10 m in Butuo which were corrected by the wind speed data of Butuo Weather Station during 1981—2010 were used to calculate the wind energy resource of Butuo. The results showed that the grade of the wind energy resource at wind tower A at the height of 10 m for the connecting wind power net was “good”, and that at wind tower B at the height of 70 m and 10 m was “good” and “very good”, respectively, suggesting a good potential for wind energy development. The wind direction and wind energy were relatively concentrated, which is beneficial for the construction of wind turbines. The wind towers are located in a high-altitude terrain and relatively flat area and are close to the highways with a moderate climate, which would not occupy arable land. All these factors are conducive to constructing wind power plants.

Key words: Sichuan; Butuo; wind energy; wind speed; wind power density

责任编辑 包 颖