

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2020.0006.008

基于多种分布对云南山区风速的综合评估*

夏丽丽¹, 苏 华²

(1. 西南交通大学 数学学院, 成都 610031; 2. 四川航天长征装备制造有限公司, 成都 610199)

摘 要:风速分布的准确评估在风能估算中起着十分重要的作用,选择合适的概率密度函数可以减小风能的估算误差。为了确定最适合云南山区风速数据的概率分布,提出使用多种常规分布进行建模;采用极大似然理论进行参数估计,提出一个综合评估准则,包括决定系数 R^2 、Kolmogorov-Smirnov 检验、卡方检验、均方根误差(RMSE)和贝叶斯信息准则(BIC)用于拟合优度检验,直方图和 QQ 图用于直观分析,与标准空气密度下风功率密度的相对误差用于比较。结果显示:威布尔分布对于云南山区的风速数据拟合效果最好,这也为下一步对云南山区风能的准确评估打好了基础。

关键词:威布尔分布;山区风速;极大似然;风功率密度

中图分类号:N34 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-058X(2020)06-0048-08

0 引 言

风能是清洁的可再生能源,发展风能对于改善能源结构、保护生态环境等方面有及其重要的意义。中国地形分布复杂,除了沿海地区、高原地区存在丰富的风能源,山区的风能源也很值得研究,本文对云南山区的风速数据进行研究。在实际研究中发现,准确得到风速数据的概率密度函数将减少风能输出估算的不确定性。现在许多概率分布都用于风速分布的研究,张盼盼^[1]比较了正态分布和威布尔分布,分析哪种分布函数模拟风速分布的效果比较理想,得到的结果是两参数威布尔分布是拟合风速较好的模型;杨晓鹏等^[2]通过数值模拟一年云南风速,对云南风能资源分布进行研究;洪祖兰等^[3]对云南省 356 个测风塔的地理分布以及风速风况特征进行研究;Nage^[4]比较了威布尔分布和瑞利分布,从分布的统计分析来看,威布尔分布在拟合概率密度分布方面比瑞利分布更好;Wais^[5]提出

使用三参数威布尔分布用于拟合风速数据,结果表明:对于零风速的较高概率,三参数威布尔分布与双参数威布尔分布相比给出了更好的结果;Kantar 等^[6]提出扩展广义 Lindley 分布可替代风速分布用于评估风能潜力;Morgan 等^[7]在评估海上风电场时,认为两参数对数正态分布在估计极端风速方面表现最佳;Pishgar-Komleh 等^[8]在分析 Firouzkooh 地区的风速数据时,在威布尔和瑞利分布函数的基础上很好地得到了风速的实际值。

本研究的主要目的是评估各类分布对于云南风速的适用性,并确定最适合在云南山区建模的风速数据的分布。本文选取了几种常规分布,应用极大似然方法进行参数估计,选取决定系数 R^2 、Kolmogorov-Smirnov 检验、卡方检验、均方根误差(RMSE)和贝叶斯信息准则(BIC)进行拟合优度检验,在直方图画出拟合曲线以及 QQ 图进行直观分析,并利用所选分布计算各个站点理论风功率密度与实际风功率密度比较相对误差。

收稿日期:2019-11-28;修回日期:2020-01-14.

* 基金项目:国家自然科学基金资助(51578471).

作者简介:夏丽丽(1995—),女,四川内江人,硕士研究生,从事时空数据研究.

1 风速分布

最常用的分布有威布尔分布、伽马分布^[9]、对数正态分布、正态分布、瑞利分布^[10],它们的概率密度函数由表 1 给出。

表 1 所选分布的概率密度函数和风功率密度函数

Table 1 Probability density function and wind power density function of selected distribution

分布	概率密度函数	风功率密度
威布尔分布	$f_w(v; k, c) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]$ for $k; c > 0$	$P_d^w = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(\frac{3}{k} + 1\right)$
正态分布	$f_N(v; u, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(v-u)^2}{2\sigma^2}\right]$	$P_d^N = \frac{\rho}{2} (u^3 + 3u\sigma^2)$
伽马分布	$f_{Ga}(v; \alpha, \beta) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} v^{\alpha-1} \exp(-\beta v)$	$P_d^G = \frac{\rho \alpha (\alpha + 2) (\alpha + 1)}{2\beta^3}$
对数正态分布	$f_{LN}(v; \gamma, \lambda^2) = \frac{1}{v\lambda\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln v - \gamma)^2}{2\lambda^2}\right]$	$P_d^{LN} = \frac{\rho}{2} e^{3\gamma + 4.5\lambda^2}$
瑞利分布	$f(x; \delta^2) = \frac{x}{\delta^2} \exp(-x^2/(2\delta^2))$	$P_d^R = \frac{3}{2} \rho \delta^3 \sqrt{\frac{\pi}{2}}$

2.1 极大似然理论

极大似然方法是常用的分布参数估计方法之一,在该方法中,通过最大化似然函数或对数似然函数来估计参数。似然函数是模型参数的函数,由式(1)给出:

$$l(\theta; v) = \prod_{i=1}^n f(v_i; \theta) \quad (1)$$

其中, $f(v_i; \theta)$ 是概率密度函数, v_i 是第 i 个风速数据, n 是数据点的数量, θ 是分布的参数向量。为了减小计算的复杂性,通常采用对数似然函数来估计概率分布的参数。对数似然函数表示为

$$ll(\theta; v) = \log \sum_{i=1}^n f(v_i; \theta) \quad (2)$$

2.2 模型评估准则

为了评估不同模型在确定风速分布方面的准确性,选择以下 5 个指标:决定系数 R^2 、卡方统计量 χ^2 、K-S 检验、RMSE 以及 BIC 准则进行分布的拟合优度评估^[11]。

(1) 决定系数 R^2 。决定系数 R^2 , 也称为 Pearson 相关系数的平方,用于量化观测累积概率 F 与风速分布的预测累积概率 \hat{F} 之间的相关性。 R^2 的值越大,优越性越好,经验累积概率 F 与风速分

2 参数估计

常用的参数估计方法有最大似然估计、矩法估计和最小二乘法^[7-9]。考虑数据的量比较大,此处选用极大似然估计来进行参数估计。

布的预测累积概率 \hat{F} 拟合越好,定义为

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{F}_i - \bar{F})^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{F}_i - \bar{F})^2 + \sum_{i=1}^n (F_i - \hat{F}_i)^2} \quad (3)$$

其中, $\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i$ 。

(2) 卡方统计量 χ^2 。卡方统计量 χ^2 ,用于评估观测概率 F 和预测概率 \hat{F} 是否存在差异。 χ^2 值越小表示观测概率与预测概率拟合较好,定义为

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(F_i - \hat{F}_i)^2}{\hat{F}_i} \quad (4)$$

(3) Kolmogorov-Smirnov 检验。Kolmogorov - Smirnov 检验,简称 K-S 检验,评估观测累积概率 F 与预测累积概率 \hat{F} 之间的差异,K-S 值 S_{K-S} 越小说明拟合度越好^[6],其被定义为

$$S_{K-S} = \max_{1 \leq i \leq n} |F_i - \hat{F}_i| \quad (5)$$

(4) 均方根误差检验(RMSE)。均方根误差检验(RMSE)描述了观测概率与预测概率之间实际偏差的逐项比较,RMSE 值 S_{RMSE} 越小表示分布拟合越好^[1]。均方根误差检验值定义为

$$S_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - \hat{F}_i)^2} \quad (6)$$

(5) 贝叶斯信息(BIC)准则。衡量统计模型拟

合优良性的一种标准, BIC 值越小, 说明模型拟合越好。BIC 值定义为

$$S_{\text{BIC}} = -2\ln L + k\ln n \quad (7)$$

其中 n 是数据的个数, L 是似然函数, k 是参数个数。

3 案例应用与分析

3.1 数据的来源

数据来自云南山区的 4 个气象站点, 站点 0579

位于双柏县爱尼山乡(南), 站点 8415 位于马龙县纳章镇瓦古冲村, 站点 0229 曲靖市富源县墨红镇, 站点 8013 位于云县。在本研究中, 使用 10 m 高度的每 10 min 平均风速。这些风速数据记录在云南的 4 个气象站。高度、记录周期、经纬度以及海拔等信息如表 2 所示。表 3 列出了各站点中风速数据的最大值、平均值、中值、标准差、偏度系数和峰度系数等统计数据, 从表 3 可以看出, 所有偏度系数均大于 0, 说明风速分布均是右偏分布。

表 2 研究站点的地理位置

Table 2 The geographical location of the research stations

测点名称	经 度/°	纬 度/°	测量时间	海拔/m	测试高度/m
双柏县	101.571 2	24.538 1	2013.3—2016.4	2 249	10
马龙县	103.596 9	25.202 8	2014.6—2016.4	2 446	10
富源县	104.139 2	25.473 1	2011.3—2012.9	2681	10
云县	100.283 3	24.662 1	2012.9—2013.10	2 845	10

表 3 站点风速数据的描述性统计

Table 3 Descriptive statistics of wind speed data at the stations

测试站点	均值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	中位数/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	众数/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	标准差	偏 度	峰 度
双柏县	5.092 1	4.8	5.2	17.2	2.422 9	0.535 1	2.988 1
马龙县	6.779 3	6.7	7	19.1	2.812 0	0.351 8	3.110 8
富源县	8.033 9	7.3	5.7	22.3	3.779 9	0.580 4	2.855 8
云县	7.690 0	7.7	7.9	19	3.010 8	0.054 5	2.682 7

表 4 所有站点不同分布的参数估计值

Table 4 Estimated values of the parameters of different distributions of all stations

分 布	双柏县	富源县	云县	马龙县	
威布尔分布	k	2.200 1	1.953 6	2.770 5	2.578 5
	c	5.728 3	8.649 0	8.628 2	7.630 1
正态分布	u	5.071 1	7.263 0	7.690 0	6.779 3
	σ	2.437 1	3.660 4	3.010 7	2.811 9
伽马分布	α	3.742 8	3.459 7	5.116 7	4.913 3
	β	0.738 1	0.476 4	0.665 4	0.724 7
对数正态分布	γ	1.484 0	1.831 4	1.939 0	1.808 7
	λ	0.575 2	0.599 9	0.498 4	0.499 6
瑞利分布	δ	3.978 4	5.751 1	5.839 5	5.189 7

3.2 拟合结果

3.2.1 模型评估

对于每个站点, 基于不同分布, 采用极大似然方法估计每种分布的参数, 表 4 中给出了极大似然理论对于混合分布和威布尔分布的参数估计值。表 5 分别给出双柏县站点、富源县站点、云县站点、马龙县站点包含威布尔分布在内的 5 个分布, 基于 RMSE、卡方统计量 χ^2 、K-S 检验, 决定系数 (R^2) 以及 BIC 准则, 通过式(4)一式(7)进行拟合优度值计算。

表 5 所有站点拟合优度检验的值

Table 5 All stations goodness of fit test value

测量站点	分 布	R^2	S_{K-S}	χ^2	S_{RMSE}	S_{BIC}
双柏县	威布尔分布	0.976 4	0.003 9	0.005 1	0.001 6	232 920.408 9
	正态分布	0.351 1	0.015 7	0.193 5	0.009 7	237 736.673
	伽马分布	0.436 7	0.016 6	0.435 0	0.014 4	235 451.696 5
	对数正态分布	0.120 8	0.043 3	3.471 0	0.040 0	241 878.737 5
	瑞利分布	0.767 5	0.008 3	0.093 2	0.006 7	234 433.200 0
马龙县	威布尔分布	0.964 3	0.016 5	0.549 3	0.008 5	251 225.649 8
	正态分布	0.985 2	0.009 3	0.194 7	0.005 2	252 794.597 7
	伽马分布	0.774 6	0.028 4	3.762 5	0.022 4	254 107.101 9
	对数正态分布	0.438 6	0.052 3	15.642 8	0.045 0	261 128.598 3
	瑞利分布	0.666 0	0.040 6	7.949 0	0.032 1	256 069.800 0
云县	威布尔分布	0.995 7	0.009 9	0.267 2	0.004 3	262 917.128 6
	正态分布	0.995 5	0.010 5	0.307 1	0.004 5	263 197.238 9
	伽马分布	0.855 1	0.037 7	7.627 6	0.023 4	268 737.437 3
	对数正态分布	0.552 5	0.068 0	30.121 6	0.045 6	277 872.548 3
	瑞利分布	0.762 1	0.047 8	14.878 7	0.032 3	27 0404.600 0
富源县	威布尔分布	0.992 8	0.014 0	0.429 6	0.005 8	267 805.442 5
	正态分布	0.960 9	0.022 7	2.634 9	0.014 8	268 555.746 6
	伽马分布	0.989 9	0.011 8	0.429 9	0.006 1	264 705.400 2
	对数正态分布	0.806 0	0.039 4	8.318 5	0.026 2	270 805.223 2
	瑞利分布	0.994 5	0.013 8	0.336 5	0.005 0	263 687.800 0

从表 5 中可以看出:双柏县站点基于 R^2 , S_{K-S} 、卡方统计量、 S_{RMSE} 以及 S_{BIC} , 威布尔分布表现最好; 马龙县站点基于上述 5 个检验得出正态分布表现最好; 云县基于 5 个检验得出威布尔分布和正态分布表现都好, 从数值上来看差别不大; 富源县站点瑞利分布表现较好, 其次是威布尔分布和伽马分布, 三者差别较小。为了准确判别云南山区风速最合适的频率分布, 考虑引入直方图和 QQ 图进行更直观的比较。

3.2.2 模型直方图和 QQ 图的比较

一般来说, 样本容量越大, 频率分布直方图就会无限接近总体密度曲线, 就越精确地反映总体的

分布规律, 即越精确地反映总体在各个范围内取值百分比。在直方图中画出拟合分布的密度曲线可以直观看出拟合曲线与样本直方图的拟合程度, 从而直观地判断分布对于样本数据拟合的优良性。除此之外, 在统计学中, QQ (分位数-分位数) 是通过图形比较两个概率分布的方法。如果被比较的两个分布相似, 则 QQ 图中的点将大致位于线 $y=x$ 上。此处 QQ 图用于比较站点数据与理论分布的拟合程度, 图中的点越接近线 $y=x$, 则说明该理论分布对数据拟合较好。

针对表 4 得出的结论, 在直方图中画出各个理论分布的密度曲线比较拟合结果。图 1—图 4 分别

针对各个站点画出直方图以及数据与理论分布的 QQ 图,以进行更直观的比较。

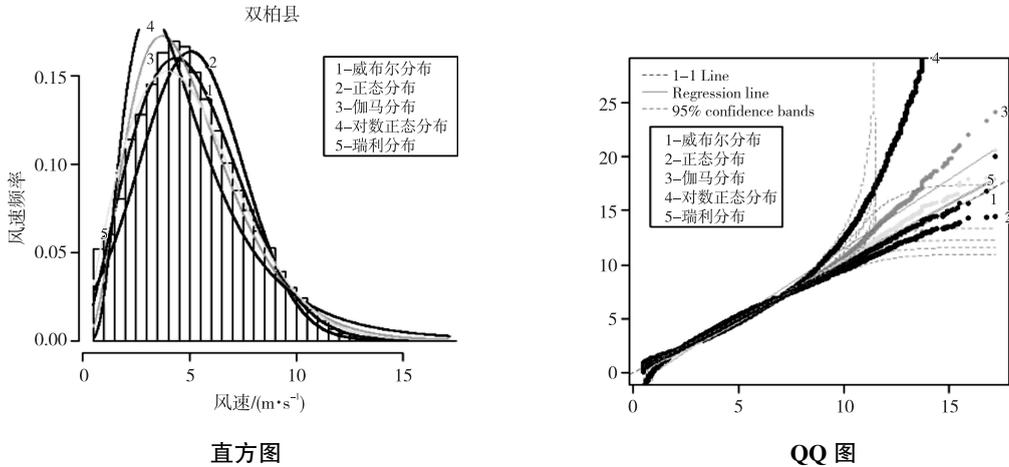


图 1 双柏县站点各种分布的经验频率直方图(左)和 QQ 图(右)

Fig. 1 Empirical frequency histogram (left) and QQ plot (right) for various distributions of Shuangbai Station

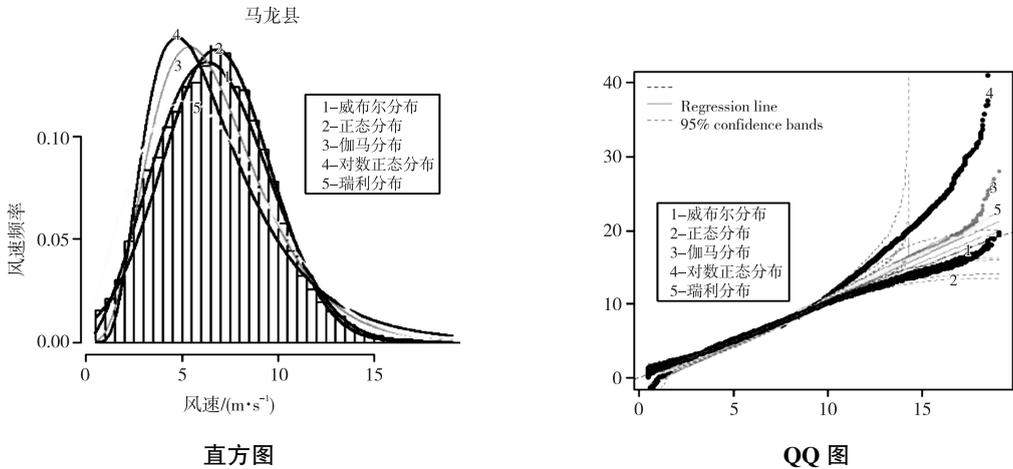


图 2 马龙县站点的各种分布的经验频率直方图(左)和 QQ 图(右)

Fig. 2 Empirical frequency histogram (left) and QQ plot (right) for various distributions of Malong Station

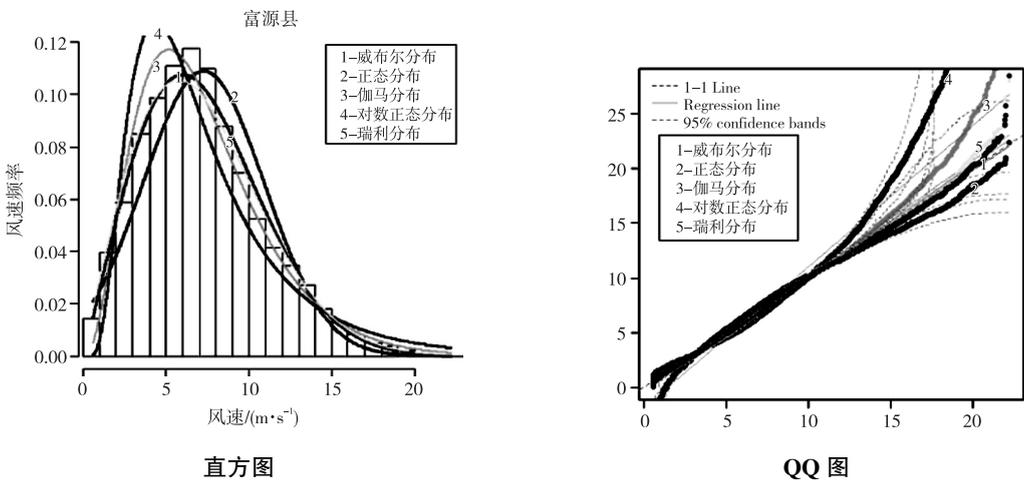


图 3 富源县站点的各种分布的经验频率直方图(左)和 QQ 图(右)

Fig. 3 Empirical frequency histogram (left) and QQ plot (right) for various distributions of Fuyuan Station

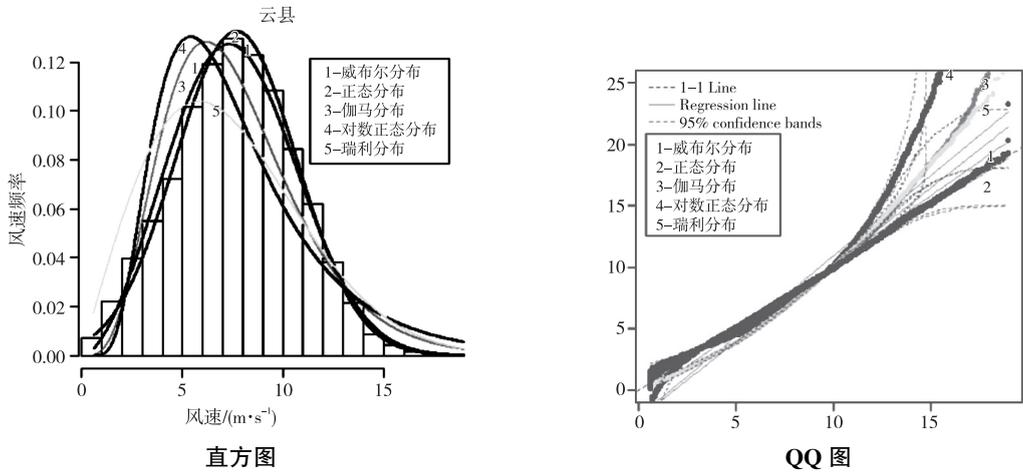


图 4 云县站点的各种分布的经验频率直方图(左)和 QQ 图(右)

Fig. 4 Empirical frequency histogram (left) and QQ plot (right) for various distributions of Yun Station

由图 1—图 4 可以看出:富源县站点和双柏县站点直方图和 QQ 图显示威布尔分布更合适在直方图的拟合密度曲线中表现出最好的结果。虽然马龙县和云县的威布尔分布密度曲线和正态分布曲线在直方图中表现有所差别,但是发现二者的 QQ 图曲线几乎重合在一起。为了对云南山区风速分布的选择更加合理,下面从风功率密度的角度来分析。

4 风功率密度

对于观测区域的风况特征进行分析,有助于估算风能潜力。风功率概率密度函数在风力涡轮机的设计过程和潜在场地可用的风力资源评估过程中都是有用的。在科学文献中,通常使用对应于标准条件(海平面,15 °C)的恒定值空气密度 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ 。通过叶片扫掠区域 S_w 以速

度 V 飞行的风力随着其速度的立方增加,因此每单位面积的风流中可用的功率(风功率密度)可表示为^[12]

$$P(V) = \frac{\frac{1}{2} S_w \rho V^3}{S_w} = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (8)$$

其中: ρ 是空气密度,取决于海拔高度、气压和温度。平均风功率密度基于风速的分布函数 $f(V)$ 定义为

$$P_d = E\left(\frac{1}{2} \rho V^3\right) =$$

$$\int_0^{\infty} P(V) f(V) dV = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} V^3 f(V) dV \quad (9)$$

实际样本的风功率密度计算公式为

$$P_d = \frac{1}{2n} \cdot \rho \sum_{i=1}^n V_i^3 \quad (10)$$

其中: n 是观测样本的个数。表 6 给出了 4 个站点风功率密度值与真实值的比较结果。

表 6 4 个站点基于分布的风功率密度理论值与实际风功率密度及其相对误差

Table 6 Theoretical values of wind power density and actual wind power density values at four stations and their relative errors

测量站点		威布尔分布	正态分布	伽马分布	对数正态分布	瑞利分布	实际风功率密度
双柏县	P_d	139.696 3	135.221 2	155.292 2	232.971 9	145.017 4	139.819 2
	ε	0.09	3.29	11.07	66.62	3.72	*
富源县	P_d	430.621 8	413.486 2	477.282 8	752.376 2	438.064 0	432.924 5
	ε	0.53	4.49	10.25	73.79	1.19	*
云县	P_d	408.339 5	406.624 1	462.964 3	629.486 4	458.590 7	407.534 8
	ε	54.46	0.22	13.60	54.46	12.53	*
马龙县	P_d	293.989 6	289.337 9	323.182 0	427.969 2	321.899 5	294.128 5
	ε	0.05	1.63	9.88	45.5	9.44	*

注: ε 为误差值。

使用真实数据获得的结果与各个分布的解析式获得的结果之间的比较是通过相对百分比误差来评估的,该值显示了对应分布的准确性,定义为

$$\varepsilon = \left| \frac{P - P_{\text{real}}}{P_{\text{real}}} \right| \times 100\% \quad (11)$$

从表 6 中可以看出:威布尔分布下的理论风功率密度与实际相对误差富源县为 0.53,马龙县为 0.05,双柏县为 0.09,云县为 0.197,故威布尔分布为 4 个站点中所选分布对于实际分布拟合最好的分布,对于风功率密度的估算最接近实际值。

5 结 论

使用 5 种常规分布对云南山区风速做拟合,并给出综合评价。拟合优度从数值大小的角度看,威布尔分布、正态分布以及瑞利分布在 4 个站点呈现较好结果,但数值角度的结果说服力不够强。为了更加直观,选取实际数据直方图与分布密度曲线拟合性进行比较,发现威布尔分布在富源县和双柏县站点呈现较好结果,在马龙县和云县正态分布和威布尔分布的结果都比较好。为了仔细区分,从实际角度出发,利用标准空气密度下风功率密度来比较,根据理论分布数据和实际数据相对误差图可以看出威布尔分布的结果最好。综合上述比较,威布尔分布最适合云南山区的风速。

参考文献(References):

- [1] 张盼盼. 基于正态分布和两参数威布尔分布的风速曲线拟合方法研究[J]. 电气开关, 2015, 53(4): 47—49
ZHANG P P. Research on the Fitting Method of Wind Curves Based on Normal Distribution and Two Parameter Weibull Distributions [J]. Electric Switchgear, 2015, 53(4): 47—49 (in Chinese)
- [2] 杨晓鹏, 杨鹏武. 基于数值模拟的云南省风能资源分布研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2012, 34(6): 684—688

- YANG X P, YANG P W. An Research on the Distribution of Wind Energy Resources in Yunnan Province Based on Numerical Simulation [J]. Journal of Yunnan University (Natural Science Edition), 2012, 34(6): 684—688 (in Chinese)
- [3] 洪祖兰, 甘启娣, 张云杰. 云南省测风塔地理分布及其风况特征参数统计分析[J]. 云南水力发电, 2016, 32(6): 1—14
HONG Z L, GAN Q D, ZHANG Y J. Geographic Distribution of Anemometric Towers and Statistic Analysis of Their Wind Condition Characteristic Parameters in Yunnan Province [J]. Yunnan Water Power, 2016, 32(6): 1—14 (in Chinese)
- [4] NAGE G D. Analysis of Wind Speed Distribution: Comparative Study of Weibull to Rayleigh Probability Density Function; A Case of Two Sites in Ethiopia [J]. American Journal of Modern Energy, 2016, 2(3): 10—16
- [5] WAIS P. Two and Three-Parameter Weibull Distribution in Available Wind Power Analysis [J]. Renewable Energy, 2017, 103(9): 15—29
- [6] KANTAR Y M, USTA I, ARIK I, et al. Wind Speed Analysis Using the Extended Generalized Lindley Distribution [J]. Renewable Energy, 2018, 118(5): 1024—1030
- [7] MORGAN E C, LACKNER M, VOGEL R M, et al. Probability Distributions for Off shore Wind Speeds [J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(1): 15—26
- [8] PISHGAR-KOMLEH S H, KEYHANI A, SEFEEDPARI P. Wind Speed and Power Density Analysis Based on Weibull and Rayleigh Distributions (A Case Study: Firouzkooh County of Iran) [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 42: 313—322
- [9] OUARDA T B M J, CHARRON C, SHIN J Y, et al. Probability Distributions of Wind Speed in the UAE [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 93(11): 414—434
- [10] SALEH H, ALY A A E A, ABDEL-HADY S.

- Assessment of Different Methods Used to Estimate Weibull Distribution Parameters for Wind Speed in Zafarana Wind Farm, Suez Gulf, Egypt [J]. *Energy*, 2012, 44(1): 710—719
- [11] JUNG C, SCHINDLER D. Global Comparison of the Goodness-of-Fit of Wind Speed Distributions [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 133: 216—234
- [12] MASSERAN N, RAZALI A M, IBRAHIM K. An Analysis of Wind Power Density Derived from Several Wind Speed Density Functions: The Regional Assessment on Wind Power in Malaysia [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(8): 6476—6487

Comprehensive Assessment of Wind Speed in Mountainous Areas of Yunnan Based on Several Distributions

XIA Li-li¹, SU Hua²

(1. School of Mathematics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Sichuan Aerospace Long March Equipment Manufacturing Co., Ltd, Chengdu 610199, China)

Abstract: The accurate assessment of the wind speed distribution plays an important role in wind power estimation. The appropriate probability density function is chosen to reduce the estimation error of wind energy for accurate assessment of wind speed and wind energy in Yunnan mountainous areas, in order to determine most suitable distribution for wind speed data in mountainous areas of Yunnan, a variety of conventional distributions have been proposed for modelling. The maximum likelihood theory is used for parameter estimation. A comprehensive evaluation criterion is proposed, including five statistical determination coefficients R^2 , Kolmogorov-Smirnov test, chi-square test, root mean square error (RMSE) and Bayesian information criterion (BIC) for goodness-of-fit test, Histograms and QQ plots are used for intuitive analysis, and the relative errors in wind power density are used for comparison. The results show that the Weibull distribution fits the wind speed in the mountainous areas of Yunnan best. This conclusion provides the basis for next accurate assessment of wind energy in mountainous areas of Yunnan.

Key words: Weibull distribution; mountainous area wind speed; maximum likelihood; wind power density

责任编辑:李翠薇

引用本文/Cite this paper:

夏丽丽,苏 华. 基于多种分布对云南山区风速的综合评估[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版),2020,37(6):48—55
XIA L L, SU H. Comprehensive Assessment of Wind Speed in Mountainous Areas of Yunnan Based on Several Distributions[J].
Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2020, 37(6): 48—55