

测风塔风速的长程持续性特征研究

李庆雷^{1,2} 陈丽凡¹ 张志森¹ 刘卫平²

(1 国家气象信息中心,北京 100081; 2 新疆气象信息中心,乌鲁木齐 830002)

摘要 基于中国陆上风能资源专业观测网提供的测风塔风速资料,本文利用去趋势波动分析(Detrended Fluctuation Analysis, DFA)方法,研究了 103 座测风塔在不同高度处观测的、不同分辨率的风速时间序列的长程持续性特征。结果表明:①同一测风塔观测的不同高度处的风速时间序列,存在一致的标度行为,与数据时间分辨率无关;②对于 6 h 平均风速序列而言,103 座测风塔观测风速的 DFA 指数 α 数值范围基本在 0.55~0.91 之间,都表现出较强的长程持续性,区域特征不明显;③对于 10 min 平均风速序列,DFA 标度指数曲线存在弯折,以 24 h 尺度为界,呈现出 2 个明显的独立标度区间:在较大的时间尺度上,标度指数 α 的数值大小为 0.80,而在较小的时间尺度上, α 的数值大小约为 1.38。

关键词 风速;长程持续性;去趋势波动分析;标度一致性;测风塔

中图分类号: P412.16 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20210433 **文献标识码:** A

引言

风能是一种重要的可再生资源。风能既不同于石油、煤炭等传统化石能源,其捕获受风速波动影响极大;又不同于太阳能、潮汐能等新型能源,其日变化规律特征不明显。因此,风能具有显著的不稳定性,对风机功率输出和能源有效利用产生较大影响^[1-4]。由于受地表和不同时空尺度物理过程等因素的综合影响,大气边界层风速表现出明显的非平稳性、间歇性、长程持续性等特征。深入研究风速的上述变化特征,对于构建风速模型、准确预测风速,减少或阻止对风机、建筑等实物的损坏,具有重要意义^[5-10]。

风速的长程持续性,从气象学意义上可以简单理解为,大风速之后更倾向于出现风速大值,而小风速之后更倾向于出现小值风速这种变化规律特征。而从数理角度看,风速的长程持续性(也称长程幂律相关性、长程记忆性)^[11-13]是指,风速序列的自相关函数以幂律形式缓慢衰减 $C(s) \sim s^{-\gamma}$ (s 代表时间尺度, γ 为衰减指数),转换到频域,即功率谱函数

$S(f)$ 以幂律标度律形式 $S(f) \sim f^{-\beta}$ 缓慢衰减(f 为频率, β 为衰减指数)。由于自相关函数以幂律形式缓慢衰减,相隔较长时间的风速大小涨落之间,仍然存在时域相关——过去时刻风速可以持续影响当期和下一时刻的风速大小,即风速存在记忆性(此时 $0 < \beta < 1$, DFA 标度指数 α 满足 $0.50 < \alpha < 1.0$)。Peng 等^[14]提出去趋势波动分析方法(Detrended Fluctuation Analysis, DFA),得到标度指数 $\alpha = (\beta + 1)/2$,可以便捷地研究时间序列的长程记忆性。该方法可以有效克服序列非线性和非平稳性的影响,已广泛应用于量化风速长程持续性的标度特征^[15-25]。

标度分析可以表征风速变化的基本动力特征,研究风速标度行为,可以更好地理解风速变化背后的物理机制,有助于风能的评估和管理^[4-5, 7]。近年来,国外不同领域的学者基于不同地点、不同分辨率风速序列,对其标度行为开展持续深入研究。Govindan 等^[15]指出非平稳的高频风速资料(2 Hz)表现出明显的长程相关性,其 DFA 标度指数约为 1.1。Kavasseri 等^[16-18]持续研究了美国北达科他州

国家气象科技创新工程(CMAGGTD003-5)、新疆气象科技发展基金重点项目(ZD202304)、第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk1300)共同资助

作者简介:李庆雷,男,1987,博士,高级工程师,主要从事气象资料质量控制与偏差分析工作,Email:liql@cma.gov.cn

收稿日期:2021 年 10 月 18 日;定稿日期:2022 年 11 月 21 日

28个气象观测站的逐小时平均风速数据,发现风速在小尺度上类似布朗噪声,标度指数约为1.40,而在大尺度上标度指数约为0.7,表现出长程记忆性。Kocak^[19]研究了土耳其西北部20个气象观测站的逐小时平均风速数据,指出标度曲线存在弯折现象,标度指数大小与距海洋远近及观测高度等地理因素无关。De Oliveira等^[20]研究了巴西东北部的伯南布哥州的4个气象观测站的逐小时最大风速和平均风速序列,指出这些序列存在相近的长程幂律相关,且呈现两种不同的标度区间。Telesca等^[21]指出瑞士山区6个气象观测站的10 min平均风速时间序列,存在2个不同的标度区间,且标度特征与台站海拔高度无关。国内,Feng等^[5]研究了中国4个气象观测站的日平均风速序列,指出长程幂律相关普遍存在;Li等^[7]研究了淮河试验(HUBEX)中观测得到的大气湍流风速垂直分量,指出风速的非平稳性特征影响其标度行为,可以导致标度曲线出现弯折现象;孙斌等^[8]研究了中国东北某风场逐小时风速时间序列,指出风速波动具有长程相关性,且呈现显著多重分形特征;Wang等^[22]研究了中国云南省10个气象站点的10 min平均风速序列,发现的风速标度区间转折点在 $s = 24\text{ h}$ 这一时间尺度上,并建议应用DFA方法时,所研究时间序列长度应该超过1天,以避免标度指数出现异常;Zeng等^[23-24]研究了天津大学校园内观测得到的高频风速(1 Hz)时间序列,指出高频风速的标度行为更加复杂,其DFA标度指数大于1.0,并建议样本序列时间长度应达到20 min,以更好地研究高频风速的多尺度多分型特征;袁全勇等^[25]研究了在测风塔某一固定高度处观测得到的6组风速时间序列,指出其间存在显著的自相似性和长程正相关性。然而,已有研究大多基于地面气象观测站,或者大气外场的固定高度观测点,较少有研究聚焦在同一观测点不同高度处观测到的风速时间序列,及其内部结构特征分析,尤其缺乏对不同高度处的风速长程持续性特征的定量刻画;同时,也较少研究关注风速的不同分辨率对DFA统计结果的影响。

本文借助测风塔观测资料,既研究了不同地理位置处风速序列的长程持续性,又对同一地点不同垂直高度处的风速序列的标度行为开展对比分析,还研究了数据分辨率对风速标度行为的影响,较已有研究结果,更系统全面地对比分析了近地面风速

的长程持续性特征。

1 资料和方法

1.1 研究资料

数据来源于2009年正式建成的中国陆上风能资源专业观测网^[26-27]。如图1所示,全国400座测风塔的分布主要集中在我国风能资源较为丰富的北方以及东南沿海,而在广阔的中部和南部地区,测风塔的分布较为稀疏。测风仪器均采用江苏省无线电科学研究所生产的ZQZ-TF风速风向传感器(采样频率1 Hz,风速观测精度±0.3 m/s,风向观测精度±3°)。

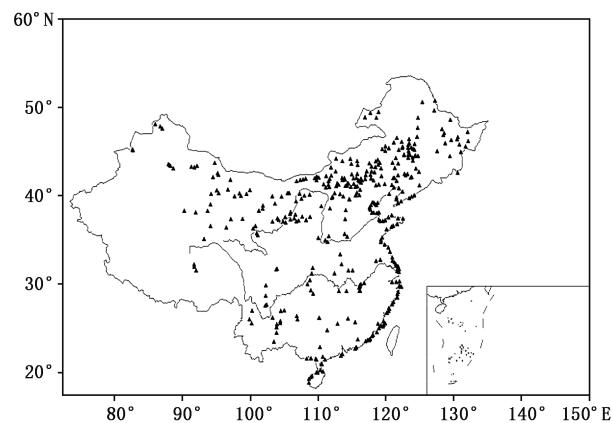


图1 全国400座测风塔空间分布

所用资料为逐10 min平均风速(给定10 min时段内测风塔记录的瞬时风速的平均值)和6 h平均风速资料(02:00, 08:00, 14:00, 20:00 4个整点时次的前10 min平均风速)。所有风速数据经过系统质量控制^[27],包括界限值检查、极值检查、内部一致性检查、时空一致性检查以及人工干预检查等具体步骤。本文主要选取2009—2018年这一时间段内、具有较长连续观测记录的103座测风塔的观测资料,以排除风速序列过短对DFA分析结果的影响。

1.2 研究方法

DFA方法是研究时间序列长程持续性的一种简单快捷的非线性分析方法,它是由Peng等^[14]在分析DNA序列特征时提出。这种方法的优点是充分克服原始序列数据的非平稳和非线性影响,给出物理变量时间序列中真实的标度律。DFA分析方法的具体步骤如下:

(1)对于给定的原始序列 $\{x_i\}; i = 1, 2, \dots, N$,

对其距平序列 $x'_i = x_i - \bar{x}$ ($\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$) 进行累加, 得到廓线序列:

$$Y(j) = \sum_{i=1}^j x'_i, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

(2) 将廓线序列 $\{Y(j)\}$ 分解到等时间长度 s , 且互相不重叠的 $N_s = N/s$ 个窗口中。为了充分利用在分窗口时廓线序列尾部可能余下的、没有被考虑进去的数据, 需要从序列的尾部反方向再进行一次窗口划分, 同样得到互相不重叠的 N_s 个窗口。这样便得到 $2N_s$ 个窗口, 并对窗口编号为 v ($v=1, 2, 3, \dots, 2N_s$)。

(3) 在每个窗口 v 内, 对廓线序列利用 k 阶多项式进行拟合得到 P_v^k (使用 k 阶多项式拟合去趋势, 称为 k 阶 DFA 方法, 本文 k 取值为 2), 在所有窗口中用廓线序列 $\{Y(j)\}$ 减去拟合的趋势序列 $\{P_v^k\}$, 就得到去趋势的序列 $\{Y_s(j)\}$:

$$Y_s(j) = Y(j) - P_v^k \quad (2)$$

(4) 对于去趋势序列, 计算每个窗口中的方差函数 $F_s^2(v)$:

$$F_s^2(v) = \langle Y_s^2(j) \rangle = \frac{1}{s} \sum_{j=1}^s Y_s^2[(v-1)s+j] \quad (3)$$

(5) 将 $2N_s$ 个窗口计算得到的方差函数累加后, 开平方就得到波动函数 $F(s)$:

$$F(s) = \left[\frac{1}{2N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} F_s^2(v) \right]^{1/2} \quad (4)$$

在 DFA 方法中, 波动函数 $F(s)$ 会随着窗口大小 s 的增大而增大。若原始序列 $\{x_i\}$ 是长程相关的, 函数 $F(s)$ 和窗口 s 之间应该满足幂律标度关系:

$$F(s) = s^\alpha \quad (5)$$

其中, α 即为 DFA 方法的标度指数。

若 $\alpha = 0.5$, 表示序列是白噪声; 若 $\alpha > 0.5$, 表示序列是长程正相关的, 且 α 值越大, 相关性越强; 若 $\alpha < 0.5$, 表示序列是长程反相关的。这里的标度指数 α 与自相关函数中的标度指数 γ 、功率谱标度指数 β 三者之间存在如下关系:

$$\alpha = 1 - \frac{\gamma}{2} \quad (6)$$

$$\beta = 2\alpha - 1 \quad (7)$$

为了验证 DFA 方法的可靠性, 通常需要对序

列进行洗牌, 即通过随机函数打乱时间序列中各个数值出现的位置, 从而除掉时间序列的长程持续性特征等标度行为。一般情况下, 对风速时间序列进行随机洗牌, 再进行 DFA 分析, 其 $\alpha = 0.5$, 表现出白噪声的特征。

2 研究结果

2.1 不同分辨率风速序列特征

选择天津市汉沽区的大神堂测风塔(站号 02001)为代表站点, 开展不同分辨率风速序列特征对比研究。图 2 给出了测风塔逐 6 h 和 10 min 平均风速时间序列。可以看出, 相较于图 2a 中的白噪声, 两种频率的风速序列都表现出明显的结构特征。白噪声序列中风速大小值随机均匀分布在整个时间轴上, 而真实风速观测序列, 则表现出较强的团簇特征, 即风速的大值和小值更倾向于集中出现。同时, 对比图 2b 和图 2c 可以看出, 尽管两种不同分辨率的风速时间序列都表现出团簇特征, 但是在分辨率更高的 10 min 平均风速序列中, 呈现出较大时间尺度的结构, 在小尺度时间上, 风速的持续性更强, 较大风速后面更可能出现较大风速, 而较小风速后面则出现较小风速的几率更大。

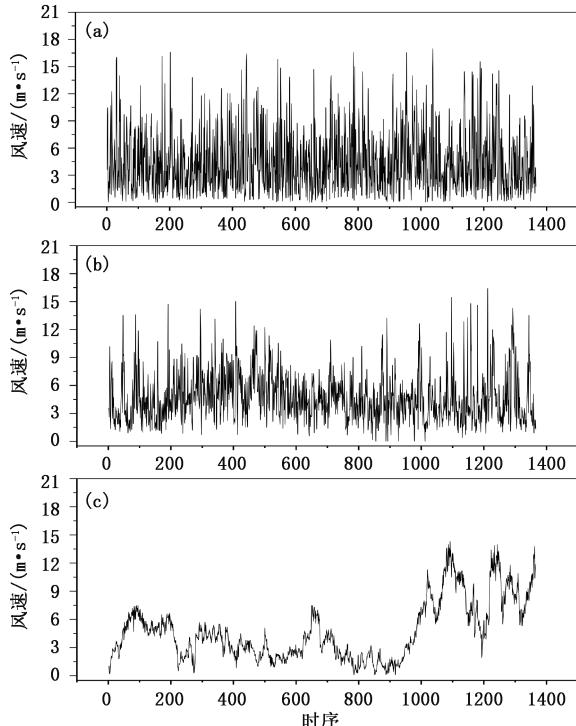


图 2 天津大神堂测风塔 3 种不同特征的风速时间序列:
(a) 白噪声, (b) 6 h 平均, (c) 10 min 平均

2.2 不同分辨率风速长程持续性对比分析

以上对比给出了不同分辨率风速序列的定性差异,如何量化上述风速内部结构差异特征,需要利用DFA方法进一步展开分析。图3定量给出了该测风塔(02001)不同分辨率风速在不同时间尺度上的结构特征差异。可以看出,对于6 h分辨率的测风塔风速资料而言,其标度指数在整个标度区间近似为0.80,表现出较好的长程持续性。而对于10 min分辨率的测风塔风速资料而言,以尺度 $s=24$ h为界,可以找到两段明显的标度区间,即标度指数存在拐点:在小尺度上,标度指数为 $\alpha=1.38$,近似布朗噪声;在大尺度上,与6 h分辨率资料的标度指数相同 $\alpha=0.8$,表现出较好的长程持续性;与已有的研究结果吻合^[16-18, 22]。标度指数存在拐点现象,往往是由于序列在不同的时间尺度上的相关性发生转变。小尺度行为可以理解为大气湍流中小涡的运动,由于小涡的时间和空间尺度都很小,因此运动性质与分子运动很相似;而大尺度运动(即大涡的运动)则表现出一定的长程相关性。大小尺度上受不同主导因素控制,使得DFA曲线发生了弯折。对两种分辨率的风速序列进行洗牌后,都可以得到与白噪声序列相同的标度指数,即 $\alpha=0.5$ 。

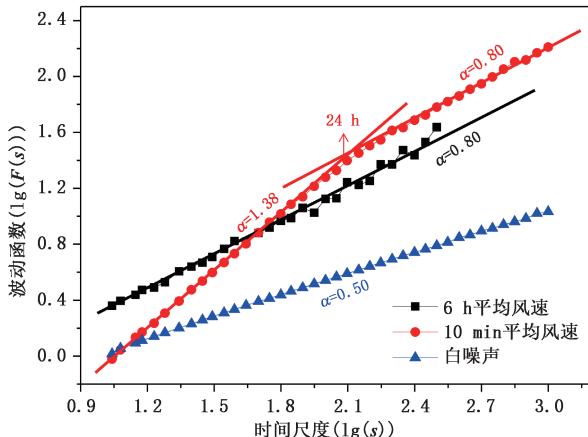


图3 天津大神堂测风塔不同分辨率风速的长程持续性指数特征

2.3 不同高度处的风速序列特征

图4所示为大神堂测风塔(02001)在不同高度处观测的逐6 h平均风速资料。可以看出,不同高度处的风速大小变化规律近似一致。在任一时刻,随观测高度逐渐增高,风速逐渐变大。在极小风速时刻,不同高度处的风速差值较小;而在极大风速时

刻,不同高度处的风速差值较大。还可以看出,在任一高度处观测得到平均风速时间序列,都存在明显的日循环变化特征——白天风速的平均值较大,而夜间风速平均值较小,与已有的观测事实和统计结果相一致^[2, 4, 27]。

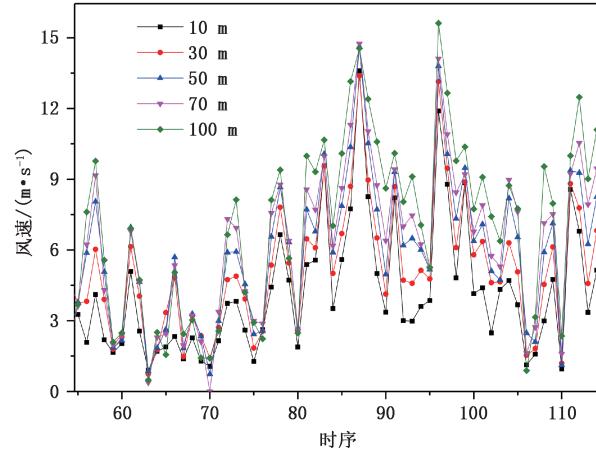


图4 天津大神堂测风塔不同高度处的6 h平均风速变化时间序列

2.4 不同高度处风速长程持续性对比分析

图5对比了大神堂测风塔(02001)不同高度处观测风速的长程持续性特征。从图中看出,在图3中得到的分段标度行为,并不随着观测高度(10~100 m)的改变而发生变化,风速的长程持续性在测风塔垂直上下层之间有着很好的一致性。利用这一普适性,可以有效检验测风塔资料的质量,发现数据中存在的异常问题。例如,若某一高度处的观测仪器损坏,其风速序列出现明显的错误,这势必会影响到长程持续性,导致其DFA曲线上表现出与其他高度层观测数据不同的标度特征。值得一提的是,由于不同分辨率风速的长程持续性指数都不随观测高度变化而变化,这里仅给出10 min平均风速的DFA曲线结果,其余不赘述。

2.5 测风塔风速长程持续性的空间分布特征

图6展示了103座测风塔70 m高度处、6 h平均风速的长程持续性指数空间分布情况。可以看出,DFA指数数值范围在0.55~0.91之间(满足 $0.50 < \alpha < 1.0$),都表现出较强的长程持续性,区域特征不明显。一般而言,彼此距离较近的测风塔,由于其局地环境相似,其标度指数大小也更相近。标度指数的大小与测风塔距海岸线远近,及其海拔高度的关系不明显,与已有的国外研究结果相

吻合^[19, 21]。

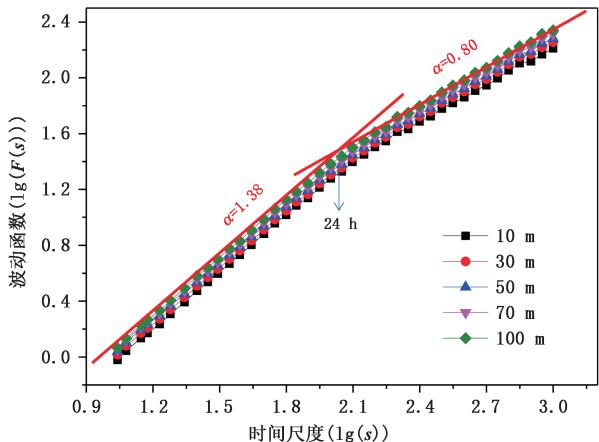


图 5 天津大神堂测风塔 10 min 平均风速不同高度处的风速序列的 DFA 曲线

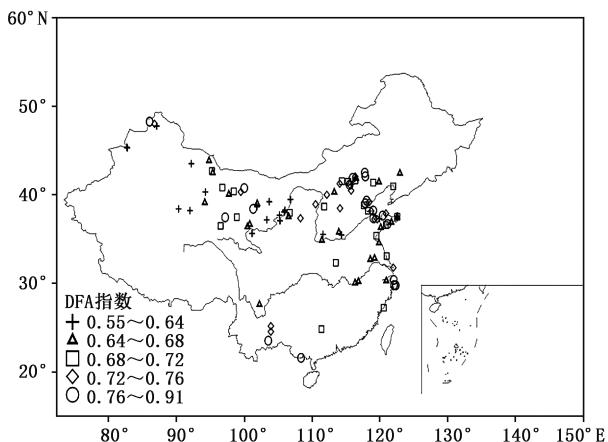


图 6 103 座测风塔 70 m 高度处 6 h 平均风速的长程持续性指数的空间分布

3 结论与讨论

大气边界层风速场始终处于湍流状态, 是高雷诺数的流体, 呈现出时空多尺度结构特征。相对于温度场和湿度场等标量场而言, 风场更易受到局地环流、小尺度地形等因素的影响, 更加表现出复杂性。本文结果表明: ①同一测风塔观测的不同高度处的风速时间序列, 存在一致的标度行为, 与数据时间分辨率无关。②对于 6 h 平均风速序列而言, 103 座测风塔观测风速的 DFA 指数 (α) 数值范围基本在 0.55~0.91 之间, 都表现出较强的长程持续性, 区域特征不明显; 标度指数的大小与测风塔距海岸线远近, 及其海拔高度的关系不明显, 与已有的国外

研究结果相吻合^[19, 21]。③对于 10 min 平均风速序列, DFA 标度指数曲线存在弯折, 以 24 h 尺度为界, 呈现出 2 个明显的独立标度区间: 在较大的时间尺度上, 标度指数 α 的数值大小为 0.80, 而在较小的时间尺度上, α 的数值大小约为 1.38。利用测风塔观测得到的不同高度处的风速数据, 研究风场的标度特征及其空间分布特征, 一方面可以更清楚地揭示大气边界层风场空间结构的复杂性; 另一方面, 有助于理解风速的持续性和间歇性特征, 对于风能资源的统计分析与建模模拟, 有重要参考意义。

利用测风塔观测资料对风能资源开展评估, 是目前常用的 3 种风能资源评估手段之一^[1, 3]。已有基于测风塔风速资料的研究, 大多聚焦在风能资源评估、风速变化趋势研究、风切变指数统计分析等方面, 而较少利用测风塔资料来重点关注大气边界层不同高度处风速时间序列的内部结构特征。一方面, 相对于传统地面气象站观测的近地面 2 m 或 10 m 风速, 测风塔可以观测到不同高度处的风速, 可以更清楚地展示大气风场的垂直变化结构特征。另一方面, 相比于探空观测得到的近似瞬时的垂直风速廓线^[28~30], 测风塔又有持续观测的优势, 可以得到较长时间的风速变化序列。可以说, 测风塔对大气边界层风速观测的上述特点和优势, 支撑了本文研究内容, 也丰富和拓展了前人关于风速长程持续性特征的研究结果^[5, 7~8, 15~25]。

Govindan 等^[15]曾在研究中指出, 为了验证风速标度指数的普适性, 宜对更多地点的风速观测资料开展分析。本文基于中国陆上风能资源专业观测网获得的数据, 研究了 103 座测风塔在不同垂直高度、不同时间分辨率的风速序列的长程持续性, 极大拓展了风速长程持续性研究的时空范围, 并得到了与前人研究相吻合的结果, 同时给出了风速标度行为受时间分辨率影响, 以及在同一地点的风速的标度特征与垂直观测高度无关等新结论。因此, 为了验证同一地点不同高度风速标度指数的一致性, 在今后的研究中, 可以对更多地点的不同高度处的风速观测资料开展对比研究。值得一提的是, DFA 方法仅仅是研究风速序列的长程持续性的一种方法, 后续可以利用 MF-DFA(Multifractal Detrended Fluctuation Analysis)^[5, 15, 17, 21~22]方法, 通过拓展式(2)中 k 的取值范围, 继续对测风塔风速资料的多尺度、多分型结构特征开展深入研究。

参考文献

- [1] 李泽椿, 朱蓉, 何晓凤, 等. 风能资源评估技术方法研究[J]. 气象学报, 2007, 65(5): 708-717.
- [2] 李柯, 何凡能, 席建超. 中国陆地风能资源开发潜力区域分析[J]. 资源科学, 2010, 32(9): 1672-1678.
- [3] 何晓凤, 周荣卫, 朱蓉. 风能资源数值模拟评估的分型方法研究[J]. 气象学报, 2015, 73(5): 975-984.
- [4] 关兴民. 风能太阳能开发利用[M]. 北京: 气象出版社, 2018.
- [5] Feng T, Fu Z T, Deng X, et al., A brief description to different multi-fractal behaviors of daily wind speed records over China [J]. Physics Letters A, 2009, 373(45): 4134-4141.
- [6] 冯涛, 付遵涛, 毛江玉. 北京地区气候变量的多分形特征研究[J]. 地球物理学报, 2010, 53(9): 2037-2044.
- [7] Li Q L, Fu Z T, Yuan N M, et al. Effects of non-stationarity on the magnitude and sign scaling in the multi-scale vertical velocity increment [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2014, 410: 9-16.
- [8] 孙斌, 姚海涛. 风电场风速时间序列的多重分形去趋势波动分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 204-210.
- [9] 张红华, 王桂臣, 曾明剑, 等. 风廓线与测风塔资料在地面风场预报中的应用研究[J]. 气象科技, 2014, 42(3): 451-459.
- [10] 蔡晓杰, 戴建华, 朱智慧, 等. 上海沿岸海域风场质量控制与预报检验[J]. 气象科技, 2019, 47(2): 214-221.
- [11] Koscielny-Bunde E, Bunde A, Havlin S, et al. Indication of a universal persistence law governing atmospheric variability [J]. Phys Rev Lett, 1998, 81(3): 729-732.
- [12] 刘式达, 时少英, 刘式适, 等. 天气和气候之间的桥梁——分数阶导数[J]. 气象科技, 2007, 35(1): 15-19.
- [13] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京: 气象出版社, 2004.
- [14] Peng C K, Buldyrev S V, Havlin S, et al. Mosaic organization of DNA nucleotides [J]. Physical Review E, 1994, 49(2): 1685.
- [15] Govindan R B, Kantz H. Long-term correlations and multi-fractality in surface wind speed [J]. Europhysics Letters, 2004, 68(2): 184-190.
- [16] Kavasseri R G, Nagarajan R. Evidence of crossover phenomena in wind-speed data [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2004, 51(11): 2255-2262.
- [17] Kavasseri R, Nagarajan R. A multifractal description of wind speed records [J]. Chaos Solitons & Fractals, 2005, 24(1): 165-173.
- [18] Kavasseri R G, Nagarajan R. A qualitative description of boundary layer wind speed records [J]. Fluctuation & Noise Letters, 2006, 6(2): L201-L213.
- [19] Kocak K. Examination of persistence properties of wind speed records using detrended fluctuation analysis [J]. Energy, 2009, 34(11): 1980-1985.
- [20] De Oliveira S M, Stosic T, Stosic B D. Long-term correlations in hourly wind speed records in Pernambuco, Brazil [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2012, 391(4): 1546-1552.
- [21] Telesca L, Lovallo M, Kanevski M. Power spectrum and multifractal detrended fluctuation analysis of high-frequency wind measurements in mountainous regions [J]. Applied Energy, 2016, 162: 1052-1061.
- [22] Wang X, Mei Y, Li W, et al. Influence of sub-daily variation on multi-fractal detrended fluctuation analysis of wind speed time series [J]. PLoS One, 2016, 11(1): e0146284.
- [23] Zeng M, Zhang X N, Li J H, et al. The scaling properties of high-frequency wind speed records based on multiscale multi-fractal analysis [J]. Acta Physica Polonica B, 2016, 47(9): 2205.
- [24] Zeng M, Li J H, Meng Q H, et al. Temporal-spatial cross-correlation analysis of non-stationary near-surface wind speed time series [J]. Journal of Central South University, 2017, 24(3): 692-698.
- [25] 袁全勇, 杨阳, 李春, 等. 基于Hurst指数的风速时间序列研究[J]. 应用数学和力学, 2018, 39(7): 798-810.
- [26] 李雁, 裴翀, 郭亚田, 等. 中国风能资源专业观测网运行监控系统建设及应用[J]. 资源科学, 2010, 32(9): 1679-1684.
- [27] 李雁, 梁海河, 王曙东, 等. 基于中国风能资源专业观测网的近地层风切变日变化特征[J]. 自然资源学报, 2012, 27(8): 1362-1372.
- [28] 刘立辉, 徐爽, 董晓雁, 等. L波段雷达测风特殊情况处理技术[J]. 气象科技, 2014, 42(2): 240-244.
- [29] 梁建平, 李宇中, 黎洁波, 等. L波段高空气象探测系统测风算法改进探讨[J]. 气象科技, 2014, 42(5): 753-758.
- [30] 李庆雷, 远芳, 廖捷, 等. 基于ERA-Interim的L波段探空秒级风速算法检验[J]. 气象科技, 2018, 46(5): 855-859.

Research on Long-Range Persistence of Tower Wind Speed Based on DFA Method

LI Qinglei^{1,2} CHEN Lifan¹ ZHANG Zhisen¹ LIU Weiping²

(1 National Meteorological Information Center, Beijing 100081;

2 Xinjiang Meteorological Information Center, Urumqi 830002)

Abstract: Based on the Detrended Fluctuation Analysis (DFA) method, this paper focuses on the long-range correlation characteristics of wind speed time series observed by 103 wind measuring towers. The results show that: (1) The wind speed time series at different heights have almost consistent scale behaviour, regardless of the resolution. (2) For the 6-hour average wind speed series, the DFA index α has a numerical range basically of 0.55 to 0.91 for all 103 wind towers, showing strong long-range persistence. (3) For the 10-minute average wind speed series, taking the 24-hour scale as the boundary, the DFA curve shows two obvious independent scaling intervals: on the larger time scale, the numerical size of scaling index α is 0.80, while α is about 1.38 on the smaller time scale. This study quantifies the long-range persistence characteristics of wind speed using the nonlinear time series analysis method. It reveals the physical mechanism behind it, which is of great significance for building wind speed models and accurately predicting wind speed.

Keywords: wind speed; long-range persistence; Detrended Fluctuation Analysis; scale consistency; wind tower

=====

欢迎订阅《气象科技》

《气象科技》由中国气象局气象探测中心、中国气象科学研究院、北京市气象局、国家卫星气象中心及国家气象信息中心联合主办。报道大气科学和相关科学各领域新理论、新方法和新技术,也刊载反映大气科学各领域发展水平的综合评述。主要栏目:大气探测与信息技术,天气气候与数值预报,应用气象与科学试验,台站实用技术等。欢迎气象部门和相关学科的业务、科研、技术开发人员以及相关院校师生投稿和订阅。《气象科技》为大 16 开本双月刊,全年定价:120 元,全年随时订阅。

联系地址:北京市海淀区中关村南大街 46 号,中国气象局气象探测中心,《气象科技》编辑部

http://www.qxkj.net.cn, 邮政编码:100081, 电话:(010)68407256, Email: qxkj@cma.gov.cn

户名:中国气象局气象探测中心,账号:4043200001819900025525, 开户行:华夏银行北京紫竹桥支行