

# 不同下垫面条件下风随高度的变化特征

刘焕彬, 董旭光

山东省气候中心, 山东 济南  
Email: hb\_liu@126.com

收稿日期: 2020年11月30日; 录用日期: 2020年12月24日; 发布日期: 2020年12月31日

## 摘要

选取山东省威海海上、昌邑下营、海阳里口三座70 m高度测风塔连续一整年的观测数据, 采用最小二乘法拟合等方法, 对不同下垫面条件下风随高度的变化特征进行了分析。结果表明: 三座测风塔风速随高度的变化有着显著差异, 位于山区的里口测风塔风随高度变化最复杂, 风切变指数最大, 下营测风塔次之, 海上测风塔风随高度变化相对最不明显, 风切变指数最小, 大风情况下, 陆上测风塔风切变指数显著减小, 但海上测风塔风切变指数变化不大。

## 关键词

风切变指数, 测风塔, 湍流交换

# Variation Characteristics of Wind with Height under Different Underlying Surface Conditions

Huanbin Liu, Xuguang Dong

Shandong Climate Center, Jinan Shandong  
Email: hb\_liu@126.com

Received: Nov. 30<sup>th</sup>, 2020; accepted: Dec. 24<sup>th</sup>, 2020; published: Dec. 31<sup>st</sup>, 2020

## Abstract

Variations on wind speed with height under land and offshore terrain conditions were analyzed by

selecting the observed wind tower data of a whole year in offshore of Weihai, Xiaying of Changyi and Likou of Haiyang and using the least-squares fitting method. Results showed that variations on wind speed with height of the three wind tower have significant difference. Variations on wind speed with height of Likou wind tower was the complicated and wind shear index was maximum, followed by Xiaying wind tower, and variations on wind speed with height of offshore wind tower were not obvious and wind shear index was minimum. Wind shear index of land wind tower obviously decreased under strong wind conditions, but that of offshore wind tower little changed.

## Keywords

Wind Shear Index, Wind Tower, Turbulent Exchange

Copyright © 2021 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

风电场发电机组的发电量是基于风力机轮毂高度处的风能参数特征,但在实际测风中测风仪器的高度并不完全能够满足风力机的轮毂高度,因此根据测风塔实测测风资料推算得到风力机轮毂高度的风参数就显得尤为重要,研究不同地形条件下风随高度垂直分布特征对于风电场的风能资源评估具有重要意义。风速随高度而变化,形成一个风切变剖面,风切变的大小可以用风切变指数来定量表示,风切变指数是风力机安全的一种重要指标,风力机的设计和选型都要考虑风切变指数的大小,大的或极端风切变,都将对风力机造成极大地风负载和疲劳损失,影响风机使用寿命和运行安全[1] [2] [3] [4]。

近地层风的垂直分布主要取决于地表粗糙度和低层大气的层结状态[5] [6],国内外诸多学者研究发现不同的下垫面特征对风的垂直分布影响显著[7]-[15],海上、乡村、城市、大城市等不同类型的地面粗糙度分别取 0.12、0.15、0.22、0.30 [16]。但是不同的大气稳定度、风速等都会改变风切变指数,需要针对不同天气情况区别分析[12]、[17]。彭怀午等[18]发现分风速段计算不同高度层的风切变指数精度较高。龚玺等[19]发现当大气处于稳定层结时,要按照不同高度层分别研究其风速的变化规律。李雁等[20]发现风切变指数可以分为典型陆地型、海陆效应差异型、湖陆效应差异型、特殊地形型、切变指数偏大型和特殊型。符平等[21]根据江苏响水海上测风塔和滩涂测风塔的实测风资料,获得响水海上风资源的时间分布特点、风速垂直分布规律。雷杨娜等[22]分析发现陕北黄土高原复杂地形下风切变指数均为正值,地形起伏和下垫面对风廓线影响明显,风切变指数季节差异明显。龚强等[23]发现辽宁省近地层风速随高度变化基本遵循幂指数规律,各地的风切变指数主要受局地地形、地貌环境影响。金莉莉等[15]分析发现乌鲁木齐的风切变指数呈正态分布,和风速大小关系密切,受到城市边界层的影响,风切变指数日变化规律不明显。许向春等[24]拟合了冷空气和热带气旋时的风切变指数,发现风速大小对风切变指数有较大影响。史军等[25]发现当上海海面受台风影响时,风速垂直变化基本符合指数律分布。因此,研究不同地形条件下风随高度的变化是风能利用中十分重要的问题[26]。

山东省地处沿海,辖区内包括沿海、平原、丘陵、山区等多种地形,因此本文分别选取海上、沿海平原、山区的三座 70 m 高度测风塔一整年的测风数据,研究山东省不同地形条件下风速随高度变化特征,这对风电场风力机选型和运行安全均有积极地指导作用。

## 2. 资料和方法

### 2.1. 资料

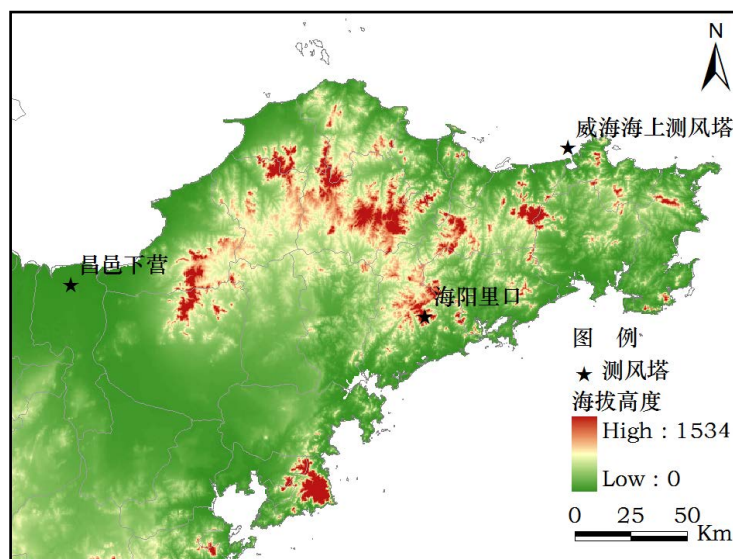
选取山东省威海海上测风塔、昌邑下营测风塔、海阳里口测风塔分别代表海面、平原、山区等三种不同下垫面, 测风塔具体位置见图 1, 威海海上测风塔位于威海市以西海面上, 距海岸线超过 6 km, 可以很好地代表海面的下垫面特征, 昌邑下营测风塔位于胶莱平原, 北距海岸线约 10 km, 以农田为主, 海阳里口测风塔位于海阳市以北山区内, 三座测风塔高度均为 70 m, 测风塔具体信息见表 1。

**Table 1.** Information of wind tower

**表 1.** 测风塔基本信息

测风塔	高度 (m)	测风仪器高度(m)		观测时间	下垫面	海拔高度 (m)
		风速	风向			
威海海上	70	20、40、50、60、70	40、70	2015.03~2016.02	海面	0.0
昌邑下营	70	10、30、50、70	10、50、70	2015.06~2016.05	平原	1.2
海阳里口	70	10、30、50、70	10、50、70	2015.06~2016.05	山区	460.0

测风塔测风资料均经过气象观测资料质量控制, 剔除错误和不合理的数据, 测风塔数据的检查主要包括: 相隔高度在 1 m~20 m 下风速差小于 5 m/s; 相隔高度在 21 m~40 m 下风速差小于 10 m/s; 当风速大于 50 m/s 时, 风速标准差小于 10 m/s; 两高度风向差小于 22.5°; 小时平均风速变化小于 10 m/s; 风速 0.4 m/s 持续小于 3 小时; 数据超过仪器测量范围被认为无效等方面。



**Figure 1.** Location of wind tower

**图 1.** 测风塔地理位置图

### 2.2. 计算方法

在大气边界层中, 平均风速随高度发生变化, 其变化规律称为风速廓线, 风速廓线可采用对数律或指数律分布[1]。造成风在近地层中垂直变化的原因有动力因素和热力因素, 前者主要来源于地面的摩擦效应, 即地面的粗糙度, 后则主要表现为与近地层大气垂直稳定度的关系[2] [3] [4]。在中性层结条件下,

湍流完全依靠动力发展, 风速廓线可用普朗特对数律分布表示。

$$u(z) = \left(\frac{u^*}{k}\right) \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

上式中:  $u(z)$  为离地高度  $z$  处的平均风速;  $u^*$  为摩擦速度;  $k$  为卡门常数, 一般取 0.4。在假定混合长度随高度变化有简单的指数关系, 可得到风切变指数律为:

$$\frac{u_z}{u_0} = \left(\frac{z}{z_0}\right)^\alpha \quad (2)$$

上式中:  $u_z$  和  $u_0$  分别为  $z$  和  $z_0$  高度处的风速;  $\alpha$  为风切变指数。目前, 计算近地层中平均风速切变指数多采用经验的指数率分布方法。

将公式(2)进行变换得到:

$$\alpha = \ln\left(\frac{u_z}{u_0}\right) / \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (3)$$

令  $y = \ln\left(\frac{u_z}{u_0}\right)$ ,  $x = \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$ , 则得到线性方程  $y = \alpha x$  [12] [13] [14]。将实测资料序列代入上式, 得

到序列  $y_1, y_2, \dots, y_n, \dots$ ;  $x_1, x_2, \dots, x_n, \dots$ , 用最小二乘法拟合回归系数, 得到风切变指数  $\alpha$  的计算公式:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{x}_i \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{x}_i^2} \quad (4)$$

测风塔相邻两层的风切变指数  $\alpha$  可由公式(1)计算得到, 此外的风切变指数有公式(4)计算。

### 3. 风随高度的年变化特征

三座测风塔各高度年平均风速变化曲线见表 2, 可以看出, 三座测风塔年平均风速随高度的变化趋势相似, 风速从低层向高层增大, 但变率明显不同, 位于山区的海阳里口测风塔从 10 m 的 3.6 m/s 增加到 70 m 的 6.0 m/s, 增大了 2.4 m/s, 昌邑下营测风塔则增大了 1.6 m/s, 相对应的威海海上测风塔从 20 m 的 6.0 m/s 增加到 70 m 的 6.6 m/s, 仅增加了 0.6 m/s, 风随高度的变化最不明显, 从各测风塔年平均风速结果可以看出, 不同地形条件下风随高度的变化明显不同, 海洋类型的下垫面最简单, 风随高度变化最小, 各层间风速变化均较小, 平原次之, 山区类型的下垫面最复杂, 风随高度变化最大, 尤其低层变化大。

三座测风塔风切变指数  $\alpha$  分别见表 2, 可以看出, 里口、下营测风塔 10~30 m、30~50 m、50~70 m 的  $\alpha$  值随高度的增加而减小, 低层的  $\alpha$  值大, 越向高层,  $\alpha$  值越小, 里口测风塔 10 m 与其他层之间的  $\alpha$  值最大, 几乎分别是下营的两倍, 里口的  $\alpha$  值在低层减小的较快, 从 10~30 m 层的 0.335 减小到 30~50 m 层的 0.180, 下营的风切变指数  $\alpha$  在高层减小的较快, 从 30~50 m 层的 0.167 减小到 50~70 m 层的 0.048, 海上测风塔各层间的风切变指数  $\alpha$  较小, 除了 40~50 m 层位 0.140 外, 其他各层间均小于 0.1。里口测风塔位于山区, 地形起伏和地表粗糙度均较大, 下垫面及其复杂, 因此该处低层风速受下垫面的影响显著, 风速明显比平原和海面上相应值低, 因此  $\alpha$  值很大, 而在 50~70 m 层,  $\alpha$  值则明显减小, 风速受下垫面的影响减弱, 下营测风塔 50~70 m 层间  $\alpha$  值最小, 为 0.048, 其它各层间  $\alpha$  变化不大, 该处低层风速受地形的影响已经明显低于里口, 海上测风塔低层和高层风速差很小, 对应的  $\alpha$  值也小, 说明下垫面对该处测风影响较弱。

**Table 2.** Wind shear index of three wind tower**表 2.** 三座测风塔风切变指数  $\alpha$ 

测风塔	高度(m)	平均风速(m/s)	10 m	30 m	50 m	
昌邑下营(平原)	10	4.6				
	30	5.6	0.179			
	50	6.1	0.177	0.167		
	70	6.2	0.165	0.131	0.048	
海阳里口(山区)	10	3.6				
	30	5.3	0.335			
	50	5.7	0.307	0.180		
	70	6.0	0.272	0.171	0.152	
测风塔	高度(m)	平均风速(m/s)	20	40	50	60
海上测风塔(海面)	20	6.0				
	40	6.3	0.070			
	50	6.5	0.077	0.140		
	60	6.5	0.081	0.084	0.000	
	70	6.6	0.044	0.071	0.041	0.099

#### 4. 风随高度的月变化特征

图 2 给出了三座测风塔各高度平均风速的逐月变化特征, 可以看出, 各测风塔各高度平均风速逐月变化趋势一致, 里口测风塔 10 m 高度与上层逐月平均风速差最大, 海上测风塔风速差最小, 山东省冬春季平均风速较大, 夏秋季平均风速较小, 虽然三座测风塔分别位于不同的地形条件下, 但均处于相同的大气环流背景下, 三座测风塔受到相同的大尺度环流场的影响, 因此, 较长时间尺度的气象要素变化趋势相似。

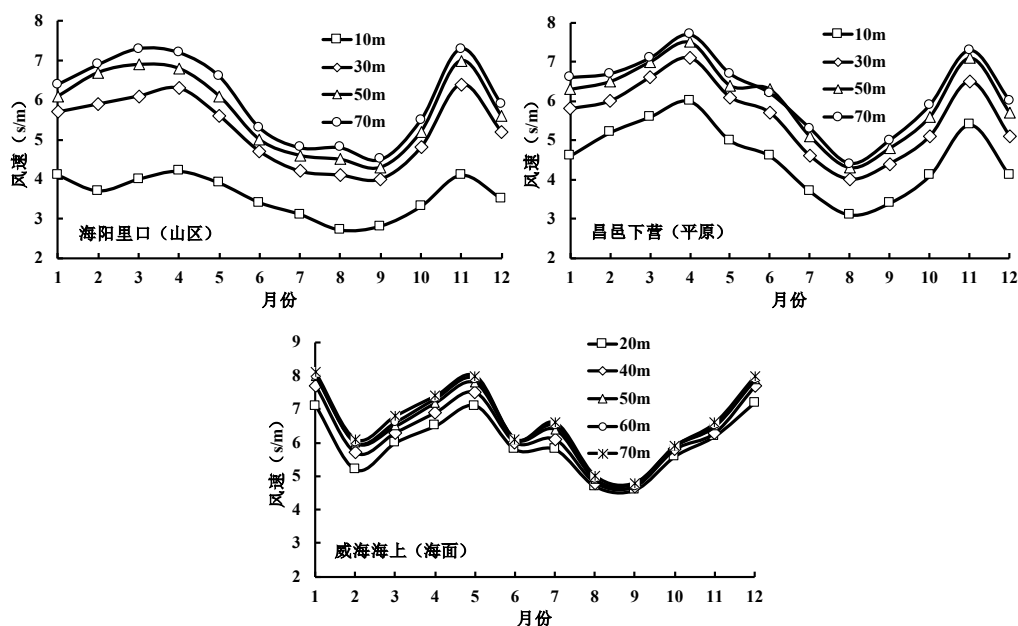
**Figure 2.** Monthly variation of wind speed at each height of three wind tower**图 2.** 三座测风塔各高度平均风速月变化曲线图

图3给出了各测风塔风切变指数 $\alpha$ 的月变化特征,可以看出,不同地形条件下各测风塔 $\alpha$ 存在明显的差异,山区测风塔各月 $\alpha$ 均最大,海上测风塔均最小,此外,在这三种地形条件下,各测风塔风逐月 $\alpha$ 有较大差异,下营测风塔3月 $\alpha$ 最小,从3月开始 $\alpha$ 逐渐变大,至12月达到最大,从季节上看,春季 $\alpha$ 最小,秋冬季最大,里口测风塔7月 $\alpha$ 最小,3月最大,月变化不同于下营测风塔,从季节上看,夏季 $\alpha$ 最小,冬春季最大,威海海上测风塔9月 $\alpha$ 最小,2月最大,冬季 $\alpha$ 最大,秋季最小,三种地形下的三座测风塔风切变指数 $\alpha$ 逐月和季节变化存在着明显的差异,下营地处平原,年内 $\alpha$ 值波动小,测风塔测风受地面摩擦效应的影响比山区弱,地面摩擦对低层风速的衰减较小,上下层间风速差变化较小,里口位于山区,冬春季各月的平均风速较大,而低层受地面摩擦效应的影响,风速衰减的更大,造成上下层间更大的风速差,因而风切变指数 $\alpha$ 更大,夏秋季各月平均风速较小,同时由于湍流作用加强使得上下层风速差减小,从而 $\alpha$ 也相应减小。从时间上讲,由于海面上温度场的变化滞后于陆地,因此海上湍流交换晚于陆地,秋季各层的风速差更小, $\alpha$ 亦更小,随着湍流交换减弱,冬春季上下层间风速差增大, $\alpha$ 亦增大。

从理论上讲,风切变指数 $\alpha$ 应在冬春季较大,夏秋季较小,但从上述三座测风塔逐月风切变指数的分析结果看,不同地形条件下的风切变指数逐月变化明显不同,说明地形和下垫面情况是影响风随高度变化的重要因素之一,各测风塔风切变指数 $\alpha$ 的逐月变化受年内湍流交换强弱的影响更显著,各测风塔之间的 $\alpha$ 值的逐月变化差异受地形和下垫面情况的影响更加明显。

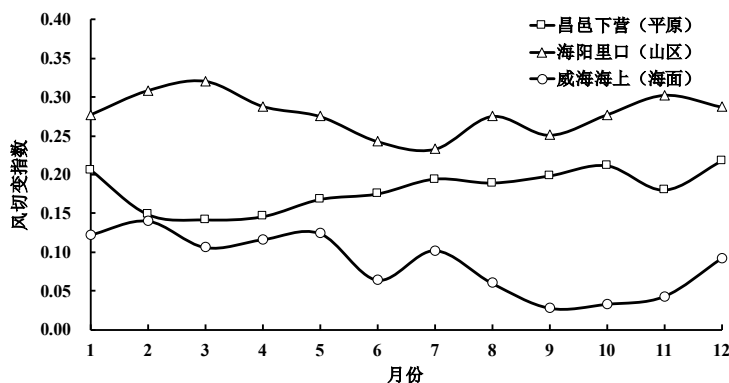


Figure 3. Month variations of wind shear index of three wind tower  
图3. 三座测风塔风切变指数月变化曲线图

## 5. 风随高度的日变化特征

引起风的日变化的机制是由于湍流交换系数的日变化,湍流交换系数越大,说明上下层间的湍流越强,从而上下层间的风速差越小,白天由于湍流交换强,上层动量向下传输更快,使低层风速增大,夜间动量传输慢,于是低层风速变小,上层风速变大。因此,在低层风速白天变大,夜间变小,高层则相反,中间存在一个转换高度[27]。

三座测风塔年平均风速日变化曲线见图4,可以看出,各测风塔风速的日变化明显不同,下营测风塔10m高度夜间风速低且较稳定,日出后风速快速增大,至14~15时左右达到最大,随着太阳辐射强度的减弱,上下层间的动量交换也减弱,低层风速受地面摩擦影响增大,风速开始减小,直至在午夜前后达到最小。30m高度风速变化与10m类似,只是变化更小,从50m高度向上,风速在日出后最小,说明日出后随着湍流增强,动量向下传输加快,使得该层以上风速减小,下层风速增加,30m至50m间存在转换高度,随着太阳辐射增强,各层风速均开始增大,由于湍流混合作用,上下层间的风速差明显

变小。里口测风塔 10 m 高度风速明显低于其他各层, 下垫面特征对该层风速的影响强于湍流交换, 30 m 至 70 m 间风速差较小, 受地形的影响, 风速日变化较复杂, 从 30 m 高度开始在日出后风速减小, 因此转换高度在 10 m 至 30 m 之间, 这低于下营测风塔的转换高度。海上测风塔各高度风速变化相似, 高层风速减小不明显, 风速在午夜前后至中午 10 时稳定少变, 10 时后低层风速增加, 高层减小, 至 17 时左右达到最大, 各层间的风速差在午后最小, 海上测风塔风速开始增大的时间晚于下营、里口测风塔, 最主要的原因是海上温度场变化滞后于陆上, 而温度场的变化是湍流交换的根本原因, 海面等下垫面对温度变化的响应远低于陆地, 因此, 湍流交换开始时间也相应地滞后一段时间。

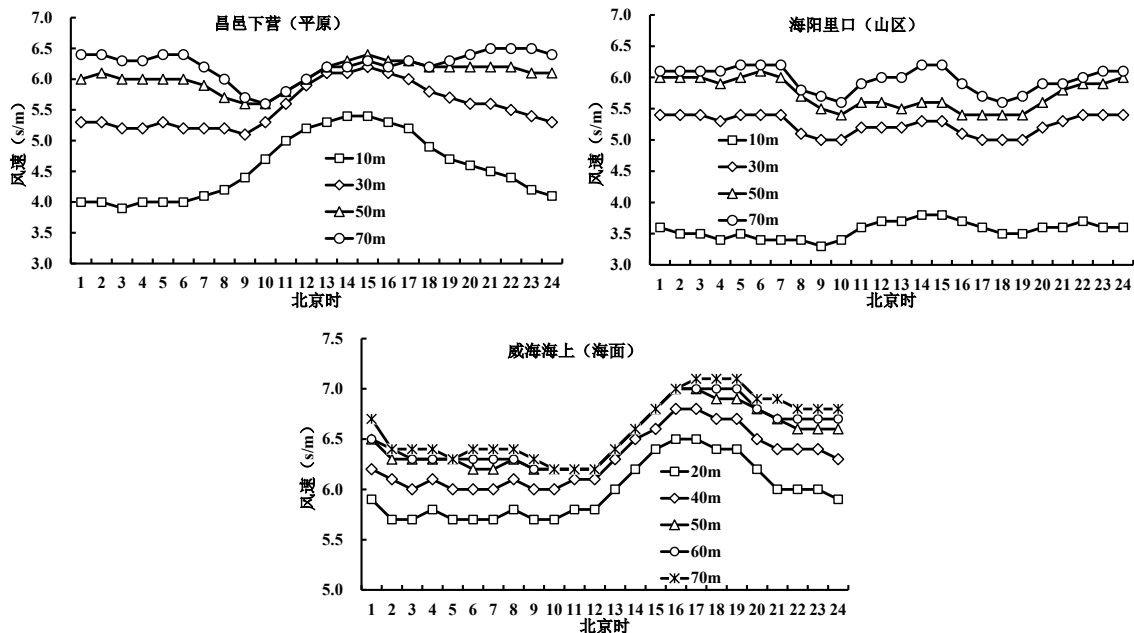


Figure 4. Daily variation of wind speed at each height of three wind tower

图 4. 三座测风塔各高度平均风速日变化曲线图

图 5 给出的是各测风塔风切变指数  $\alpha$  的日变化, 可以看出, 三种类型的地形特征下风切变特征明显不同, 里口测风塔各时次  $\alpha$  值均最大, 下营测风塔次之, 海上测风塔  $\alpha$  值最小, 下营测风塔  $\alpha$  值日变化最大, 达到 0.2 左右, 夜间大气层结较稳定, 湍流交换最弱,  $\alpha$  稳定少变, 日出后随着上下层间湍流交换加强,  $\alpha$  迅速减小, 正午前后达到最小, 动量充分混合后, 上下层间风速差最小,  $\alpha$  也最小, 随着太阳辐射的减弱, 上下层间动量交换也减弱, 低层风速受地面摩擦作用开始增大, 上下层风速差增大,  $\alpha$  亦随之增大。里口测风塔  $\alpha$  日变化与下营测风塔类似, 只是没那么剧烈, 由于里口地处山区, 下垫面极复杂, 地面摩擦对低层风速的影响更大, 上下层风速差从日落至日出一直呈增大的变化趋势, 相应地  $\alpha$  也变大, 午夜至日出前  $\alpha$  均超过 0.3。海上测风塔  $\alpha$  值较小且稳定, 夜间略大些, 基本在 0.1 上下, 湍流交换明显低于陆地。

## 6. 不同风速等级下的风随高度变化特征

三座测风塔不同风速等级下的风切变指数  $\alpha$  见表 3, 表 3 给出的各风速等级是根据 10 m 高度平均风速划分的, 共划分为 4 个风速等级, 各测风塔的  $\alpha$  值均在小风条件下最大, 昌邑下营和海阳里口测风塔  $\alpha$  值随着风速的增大而减小, 由于地表粗糙度是固定的, 地表对风速的衰减程度不会因为风速的增大而增大, 或者说地表对风速的衰减速度没有风速增大的速度快, 同时, 对于相同的  $z/z_0$  和风速差, 风速越大,

$v/v_0$  越小, 相应地  $\alpha$  值越小, 因此随着风速增大, 风切变指数  $\alpha$  值迅速减小。海阳里口测风塔 10 m 高度观测期间没有出现超过 12.0 m/s 的风速。威海海上测风塔在风速 < 2.0 m/s 时  $\alpha$  值相对较大, 风速超过 2.0 m/s 时的  $\alpha$  值变化不大, 在海上, 风速越大, 海面的粗糙度相应地也越大, 使得上下层间的风速差变大, 因此, 海面上风速增加会导致风切变指数  $\alpha$  值增大, 结合对于相同的  $z/z_0$  和风速差, 风速越大,  $v/v_0$  越小, 相应地  $\alpha$  值越小的变化规律, 两者相互作用的结果使得在海上风切变指数  $\alpha$  随风速增加而变化不大。

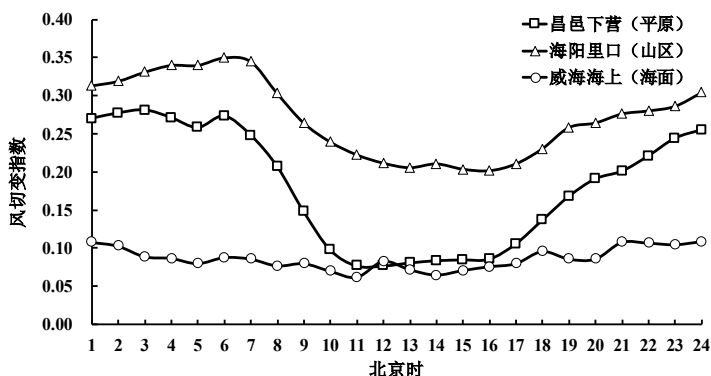


Figure 5. Diurnal variations of wind shear index of three wind tower  
图 5. 三座测风塔风切变指数日变化曲线图

Table 3. Wind shear index under different wind classification

表 3. 不同风速等级下的风切变指数  $\alpha$

风速等级(m/s)	<2.0	2.0~6.0	6.0~12.0	>12.0
昌邑下营(平原)	0.237	0.205	0.098	0.057
海阳里口(山区)	0.336	0.275	0.202	--
海上测风塔(海面)	0.110	0.081	0.085	0.081

## 7. 结论

山东省不同地形条件下的近地层平均风具有以下主要特点:

1) 地形起伏和地表粗糙度均较大的山区低层风速受下垫面的影响显著, 平原次之, 海面等下垫面对风速的影响较弱, 风切变指数较小。

2) 各测风塔风切变指数  $\alpha$  的逐月变化受年内湍流交换强弱的影响更显著,  $\alpha$  值的逐月变化差异受地形和下垫面情况的影响更加明显。

3) 里口测风塔各时次  $\alpha$  值均最大, 下营测风塔次之, 海上测风塔  $\alpha$  值最小, 下营  $\alpha$  值日变化最大, 里口  $\alpha$  日变化与下营类似, 只是没那么剧烈, 海上测风塔  $\alpha$  值较小且稳定, 夜间略大些。

4) 各测风塔的  $\alpha$  值均在小风条件下最大, 昌邑下营和海阳里口测风塔  $\alpha$  值随着风速的增大而减小, 威海海上测风塔在风速 < 2.0 m/s 时  $\alpha$  值相对较大, 风速超过 2.0 m/s 时的  $\alpha$  值变化不大。

总之, 不同地形条件下的风速随高度年、月、日等变化特征明显不同, 地形、下垫面特征是影响风速垂直变化的重要因素。

## 基金项目

公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306034); 山东省气象局研究项目(2018sdqxm22)。



## 参考文献

- [1] 贺德馨, 陈坤, 张亮亮, 等. 风工程与工业空气动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [2] 彭怀午, 冯长青, 包紫光. 风资源评价中风切变指数的研究[J]. 可再生能源, 2010, 28(1): 21-23.
- [3] 杜燕军, 冯长青. 风切变指数在风电场风能资源评估中的应用[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(5): 62-66.
- [4] 李鹏, 冯长青, 韩小平, 等. 风切变指数的确定对风电场风速推算的影响分析[J]. 电力科学与工程, 2012, 28(3): 7-12.
- [5] 廖明夫, 徐可, 吴斌, 等. 风切变对风力机功率的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2008, 30(2): 163-167.
- [6] 董安祥, 蔡忠兰, 方锋, 等. 2009-2010 年河西走廊大风日低空垂直切变和湍流统计特征[J]. 干旱气象, 2014, 32(2): 270-274.
- [7] 郭凤霞, 朱文越, 饶瑞中. 非均一地形近地层风速廓线特点及粗糙度的研究[J]. 气象, 2010, 36(6): 90-94.
- [8] 石雪峰, 夏建新, 吉祖稳. 植被条件对近地表风速廓线分布的影响[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2007, 16(1): 9-15.
- [9] 韩素芹, 刘彬贤, 解以扬, 等. 利用 255m 铁塔研究城市化对地面粗糙度的影响[J]. 气象, 2008, 34(1): 54-59.
- [10] 植石群, 钱光明, 罗金铃. 广东省沿海风随高度变化研究[J]. 热带地理, 2001, 21(2): 131-134.
- [11] 王志春, 宋丽莉, 何秋生, 等. 风速随高度变化的曲线模型分析[J]. 热带气象学报, 2007, 23(6): 690-692.
- [12] 刘敏, 孙杰, 杨宏青, 等. 湖北省不同地形条件下风随高度变化研究[J]. 气象, 2010, 36(4): 63-67.
- [13] 陈燕, 张宁, 许遐祯, 等. 江苏沿海近地层强风风切变指数特征研究[J]. 高原气象, 2019, 38(5): 1069-1081.
- [14] 孙淑芳, 张广兴. 新疆百里风区近地层垂直风切变指数特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(3): 99-104.
- [15] 金莉莉, 李振杰, 缪启龙, 等. 乌鲁木齐市近地层风切变指数特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(4): 81-86.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50009-2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 1-246.
- [17] 张双益, 胡非. 大气边界层与风力发电的相互作用研究综述[J]. 高原气象, 2017, 36(4): 1127-1137.
- [18] 彭怀午, 冯长青, 包紫光. 风资源评价中风切变指数的研究[J]. 可再生能源, 2010, 28(1): 21-28.
- [19] 龚玺, 朱蓉, 范广洲, 等. 内蒙古草原近地层垂直风速廓线的观测研究[J]. 气象学报, 2014, 72(4): 711-722.
- [20] 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.
- [21] 符平, 秦鹏飞, 张金接. 海上风资源时空特性研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2014, 12(2): 155-161.
- [22] 雷杨娜, 孙娴, 张侠, 等. 陕北黄土高原复杂地形风速廓线特性[J]. 可再生能源, 2015, 33(9): 1345-1350.
- [23] 龚强, 汪宏宇, 朱玲, 等. 辽宁省近地层风切变特征研究[J]. 自然资源学报, 2015, 30(9): 1560-1569.
- [24] 许向春, 辛吉武, 邢旭煌, 等. 琼州海峡南岸近地面层大风观测分析[J]. 热带气象学报, 2013, 29(3): 481-488.
- [25] 史军, 徐家良, 穆海振. 上海近海海上最大风速的估算及数值模拟[J]. 太阳能学报, 2017, 38(4): 991-998.
- [26] 申华羽, 吴思, 谢今范, 等. 近地层风能参数随高度分布的推算方法研究[J]. 气象, 2009, 35(7): 54-60.
- [27] 薛桁, 朱瑞兆, 冯守忠, 等. 我国北部草原地区近地层平均风特性分析[J]. 太阳能学报, 1992, 13(3): 232-238.