

引用格式: 许杨, 陈正洪, 申彦波, 等. 基于高塔数据的山区丘陵与平原湖区风能参数差异分析[J]. 南方能源建设, 2024, 11(1): 19-32. XU Yang, CHEN Zhenghong, SHEN Yanbo, et al. Analysis of differences in wind energy parameters between mountainous, hilly, plain and lake areas based on mast data [J]. Southern energy construction, 2024, 11(1): 19-32. DOI: 10.16516/j.cec.2024.1.03.

# 基于高塔数据的山区丘陵与平原湖区风能参数差异分析

许杨<sup>1,2</sup>, 陈正洪<sup>1,2,✉</sup>, 申彦波<sup>3</sup>, 孟丹<sup>1,2</sup>

(1. 湖北省气象服务中心, 湖北武汉 430205; 2. 湖北省气象能源技术开发中心, 湖北武汉 430205;  
3. 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081)

**摘要:** [目的]为促进风能资源开发的持续健康发展,为内陆地区风能资源的合理开发及利用提供科学依据,文章重点分析山区丘陵与平原湖区主要风能参数特征及差异。[方法]选用11个塔高为90~150 m的测风塔1整年观测资料,对湖北省山区、丘陵、平原及湖区等5种不同地形形态下的主要风能参数特征及差异进行探讨。[结果]分析结果表明:(1)各塔高层风速日变幅在1.0~2.3 m/s,山区丘陵地形下变幅明显大于平原湖区,且各层变化趋于一致,均为白天小晚上大,平原湖区低层风速日变化与高层特征相反,为白天大晚上小;(2)各塔综合风切变指数在0.055~0.328之间,在山区丘陵地形下大于平原湖区,风切变指数日变幅在0.063~0.378,变化特征为白天小晚上大,平原湖区风切变日变幅明显大于山区丘陵,大风情况下的风切变在山区丘陵地形下分布较为离散,平原湖区地形下则相对较为集中,基本稳定在0.1~0.2之间;(3)各塔高层有效风速段年平均湍流强度为0.13~0.18,山区地形下大于平原湖区,各塔湍流强度日变幅在0.07~0.15,变化特征均为白天大晚上小,但山区丘陵地形下变幅明显大于平原湖区。[结论]不同地形下的风能资源特征在动力和热力作用下表现出明显的时空变化差异,分析结果可为风能资源开发利用提供指导。

**关键词:** 风能资源; 测风塔; 特征分析; 山区丘陵; 平原湖区; 参数差异

中图分类号: TK89; TM614

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)01-0019-14

DOI: 10.16516/j.cec.2024.1.03

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

## Analysis of Differences in Wind Energy Parameters Between Mountainous, Hilly, Plain and Lake Areas Based on Mast Data

XU Yang<sup>1,2</sup>, CHEN Zhenghong<sup>1,2,✉</sup>, SHEN Yanbo<sup>3</sup>, MENG Dan<sup>1,2</sup>

(1. Hubei Meteorological Service Center, Wuhan 430205, Hubei, China;

2. Meteorological Energy Development Center of Hubei Province, Wuhan 430205, Hubei, China;

3. CMA Public Meteorological Service Centre, Beijing 100081, China)

**Abstract:** [Introduction] In order to promote the sustainable and healthy development of wind energy resources and provide a scientific basis for the rational development and use of wind energy resources in the inland areas, the paper analyzes the characteristics of the main wind energy parameters and their differences between the mountainous, hilly, plain and lake areas. [Method] We used the observation data of 11 wind masts with heights of 90~150 m distributed in five different terrains of mountainous, hilly, plain and lake areas in Hubei

收稿日期: 2023-07-21 修回日期: 2023-08-08

基金项目: 湖北省自然科学基金项目“风光水能互补协同机理及耦合预报方法研究”(2022CFD017); 湖北省气象局科研项目“湖北省大气边界层风能资源特性分析及开发潜力评估”(2023Y08)

Province for a whole year, analyzed the characteristics of the main wind energy parameters and their differences between the mountainous, hilly, plain and lake areas. **[Result]** The analysis results show that: (1) the daily variation of wind speed at the upper level of each mast is in the range of 1.0~2.3 m/s and is significantly larger in the mountainous and hilly terrain than in the plain and lake areas, and the variation tends to be consistent at various levels in that it is small during the day and large at night, while in the plain and lake areas, the daily variation at the lower level has opposite characteristics to the upper level and is large during the day and small at night; (2) the composite wind shear index of each mast ranges from 0.055~0.328, which is greater in the mountainous and hilly terrain than in the plain and lake areas, the daily variation of wind shear index is from 0.063~0.378, which is small during the day and large at night and significantly larger in the plain and lake areas than in the mountainous and hilly areas, and wind shear under high wind conditions is more discrete in the mountainous and hilly terrain and more concentrated in the plain and lake terrain, basically stable between 0.1~0.2; (3) the annual mean turbulence intensity in the effective wind speed section at the upper level of each mast is 0.13~0.18, which is greater in the mountainous terrain than in the plain and lake areas, and the daily variation of turbulence intensity in each mast is from 0.07~0.15, characterized in that the turbulence intensity is large during the day and small at night and the daily variation is significantly larger in the mountainous and hilly terrain than in the plain and lake areas. **[Conclusion]** It can be seen that the characteristics of wind energy resources under different terrains show obvious spatial and temporal variations under the action of power and heat, the results of the analyses can provide guidance for the development and utilization of wind energy resources.

**Key words:** wind energy resources; wind masts; characterization; mountainous and hilly areas; plain and lake areas; parameter differences

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 0 引言

大力发展可再生能源已成为全球能源转型和应对气候变化的重大战略方向和一致宏大行动<sup>[1]</sup>。风能因其储量大、分布广的优势成为重要的可再生能源之一,2022 年全球风电累计装机容量达到 906 GW<sup>[2]</sup>。我国风电产业经过 10 多年的高速发展,在“十三五”期间实现了跨越式推进,截至 2022 年总装机容量达 390 GW<sup>[3]</sup>。为如期实现“双碳”目标,我国的可再生能源装机规模将大幅度提升,到 2030 年风能太阳能发电总装机容量将达 1.2 TW 以上<sup>[4]</sup>,以风能太阳能为代表的新能源将迈入高质量发展阶段。

自 2007 年华中区域第一个风电场——九宫山风电场在湖北通山建成投产至今,风电开发已遍布湖北全省,随着湖北省山区和丘陵地带风能资源相对丰富区域的逐步深入开发以及低风速风力发电技术、风机轮毂高度和叶片直径的不断提升,风电开发也从集中式发展到分布式、从山区丘陵发展到平原湖区,这些随着时间推移发生的不断突破资源、技术和地形的发展方式,对风能资源评估方法及特征分析也提出了更迫切的需求。国内相关文献对我国及部分省份风能资源评估及特征进行了研究分析,陈欣等<sup>[5]</sup>利用西北地区和东南沿海地区具有代表性的测

风塔资料,对比分析其风能资源特性差异;周青等<sup>[6]</sup>利用中国风能资源专业观测网的观测数据分析了全国近地层风速及风功率密度的时空、方位及梯度分布特征;朱蓉等<sup>[7]</sup>基于中国气象局风能资源高时空分辨率数据集及测风塔实测数据分析了中国风能资源气候特征及成因;吴琼<sup>[8]</sup>、许杨等<sup>[9]</sup>采用分布在山区的测风塔对山地风能资源特征进行了分析。此外,还有相关文献利用不同地形下的测风塔观测数据针对风切变<sup>[10-12]</sup>或湍流强度<sup>[13-15]</sup>等单一特征研究成果进行论述。这些研究所用测风塔资料观测高度基本在 100 m 以下,或针对某一风能资源特征参数展开分析,因此有必要结合内陆地区风电发展现状,采用更高观测高度的测风塔观测数据,对不同地形条件下的风能资源特征进行全面深入的研究分析。

近年来,为适应风电开发持续发展的需求,湖北省内在平原及湖区设立的测风塔不断增多,且塔高逐渐从 70 m 上升到 150 m,以这些分布更为广泛且塔高更高的风能资源观测网为基础,本文筛选了湖北省内代表不同地形条件下的测风塔观测数据,对山区丘陵和平原湖区的风能资源特征进行分析比较,以期了解不同地形条件下各项主要风能参数的变化特征,为内陆地区风能资源的合理开发及利用提供科学依据。

## 1 资料说明及处理

### 1.1 测风塔选取及资料说明

湖北省处于中国地势第二级阶梯向第三级阶梯过渡地带,地势呈三面环山、中间低平、向南敞开、北有缺口的不完整盆地,兼具山地、丘陵、岗地和平原多种类的地形。综合考虑湖北省地形地貌及测风塔布设情况,筛选出代表 5 种地形条件下的 11 个测风塔(如表 1 所示)进行风能资源特征分析,数据观测时段基本为完整 1 年,塔高在 90~150 m 之间,其

中平原湖区的塔高均为 150 m,各塔均采用美国 NRG 测风设备进行观测,风速观测层在 10~150 m 之间。测风塔地理分布位置如图 1 所示。

为了分析不同地形下风能资源特征,按海拔高度将测风塔划分为高山、中低山、丘陵、平原、湖区 5 种地形<sup>[16]</sup>。属于高山地形的 G1 和 G2 测风塔位于鄂西南巫山流脉和武陵山余脉,海拔高度在 1 850 m 左右;属于中低山地形的 Z1 测风塔位于鄂东大别山南麓,Z2 测风塔位于鄂西荆山余脉,海拔高度在

表 1 测风塔基本信息及数据情况  
Tab. 1 Basic information and data of wind masts

地形分类	编号	区域	观测数据时间段	塔高/m	海拔高度/m	观测风速层/m	观测风向层/m	有效数据完整率/%	
								实测	订正
高山	G1	利川	2012.10.01~2013.09.30	100	1 876	10/30/50/70/100	10/50/100	88.2	95.3
	G2	长阳	2015.10.01~2016.09.30	90	1 848	30/50/70/80/90	30/90	85.0	97.8
中低山	Z1	蕲春	2018.09.13~2019.09.12	120	957	10/50/80/90/100/110/120	10/80/120	92.3	92.3
	Z2	荆门	2018.04.08~2019.03.06	150	555	30/50/70/90/100/120/140/150	30/150	87.6	96.0
丘陵	Q1	红安	2016.08.01~2017.07.31	100	478	10/30/60/80/100	10/78/98	95.4	97.9
	Q2	荆门	2016.09.01~2017.08.31	100	443	10/30/50/70/90/100	10/50/100	99.1	99.1
	Q3	当阳	2016.06.01~2017.05.31	100	256	10/40/60/80/100	10/80/100	99.8	99.8
平原	P1	公安	2018.04.01~2019.03.31	150	23	50/70/90/120/140/150	50/100/145	96.9	96.9
	P2	监利	2016.02.01~2017.01.31	150	42	50/80/100/120/135/150	50/120/150	99.0	99.0
湖区	H1	潜江	2017.03.11~2018.01.14	150	37	10/50/80/90/100/120/150	10/100/150	95.1	95.1
	H2	黄梅	2018.12.27~2019.12.01	150	25	30/50/80/120/140/150	30/100/120/150	97.7	100.0

注:有效数据完整率为各测风塔最高层逐小时风速数据完整率。其中,Z1测风塔120 m风速因仪器故障缺失较多(有效数据完整率为51.2%),故该塔最高层风速采用110 m进行分析。

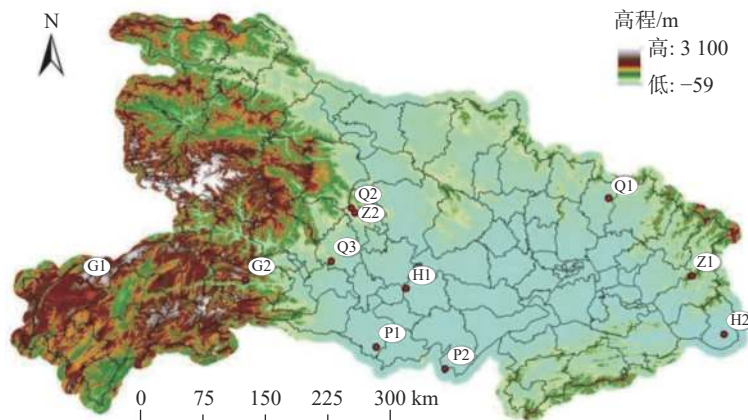


图 1 湖北省 11 个测风塔地理位置分布图

Fig. 1 Geographical location of eleven wind masts in Hubei Province

550 ~ 1000 m; 属于丘陵地形的 Q1 测风塔位于鄂东北大别山支脉, Q2 测风塔位于鄂西荆山余脉, Q3 测风塔位于大巴山脉东麓, 属于鄂西山地向江汉平原过渡地带, 海拔高度在 250 ~ 500 m; 属于平原地区的 P1 测风塔位于鄂南洞庭湖平原, P2 位于江汉平原南端; 属于湖区的 H1 位于江汉平原荆州长湖东侧, H2 位于鄂东南黄梅龙感湖西侧。

## 1.2 资料处理

11 个测风塔原始数据时间分辨率为 10 min, 对其完整性和合理性进行检验后处理成时间分辨率为 1 h 的完整 1 年的数据, 测风数据处理均按照《风电场风能资源评估方法》(GB/T 18710—2002)<sup>[17]</sup> 中的数据检验方法进行, 并且剔除了因冬季冰冻造成仪器故障而致使观测风速长时间静风的异常数据。从表 1 可见, 各塔最高层风速实测有效数据完整率在 85% 以上, 其中高山及中低山测风塔实测有效数据完整率相对较低, 在 85% ~ 92% 之间, 主要是由于高海拔地区冬季气温相对较低, 仪器受低温冰冻影响较大, 导致观测数据长期无效, 海拔较低的丘陵、平原和湖区实测有效数据完整率均在 95% 以上。

本文所用风速数据在检验剔除了无效数据后进行了插补订正<sup>[9]</sup>, 首先利用同一测风塔完整率相对较高的某一高度测风资料对其他高度缺测资料进行同塔插补订正; 然后对同塔订正后仍缺测较多的数据, 采用周边相关性较好的测风塔或区域自动气象站同期小时观测风速, 建立线性方程进行插补订正, 订正后风速有效数据完整率除 Z1 测风塔外均在 95% 以上。

## 2 风能参数差异分析

### 2.1 风速及风功率密度

#### 2.1.1 年变化特征

如图 2 所示, 各测风塔风速年变化无明显的一致规律, 年变化幅度在 1.4 ~ 2.9 m/s, 年平均风速较大的测风塔 (Z2、Q1) 年变化幅度相对更大; 各塔风功率密度年变化幅度在 90 ~ 440 W/m<sup>2</sup>, 可见各塔年变化幅度差异也较大。11 座测风塔观测资料年限跨越 2012 ~ 2019 年, 每年会带来大风的天气系统有所不同, 且各测风塔地形差异较大, 因此会造成这种风速年及季节变化无明显变化规律的现象, 这也在一定程度上说明风电场长期运行过程中风速中长期变化的波动性同样会比较大, 开展风速的中长期预报对指导风电场更高效地运维有重要作用。

各测风塔风速和风功率密度年变化趋势基本一致, 但也存在个别未同步变化的情况, 即一些风速较大的月份对应的风功率密度相对降低, 主要是由于影响风功率密度大小的因素不仅仅是平均风速值, 风速分布同样会造成一定影响, 在同样的平均风速情况下, 当风速分布更多地向高风速段偏移, 就会造成平均风速相同, 但风功率密度更大的情况。

#### 2.1.2 日变化特征

如图 3 所示, 各测风塔最高层风速和风功率密度日变化趋势基本一致, 均呈现出白天小、晚上大的 U 型变化特征, 17~次日 07 时风速相对较大, 09~16 时风速相对较小。各测风塔最高层风速日变

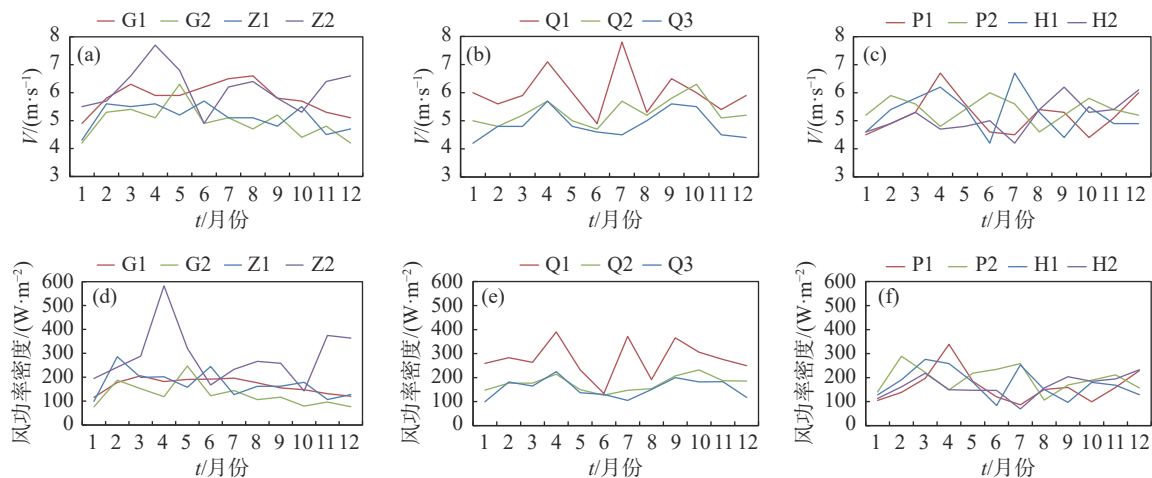


图 2 各测风塔最高层平均风速(a1~a3)及平均风功率密度(b1~b3)年变化

Fig. 2 Annual variation of average wind speed (a1~a3) and average wind power density (b1~b3) at the top of each wind mast

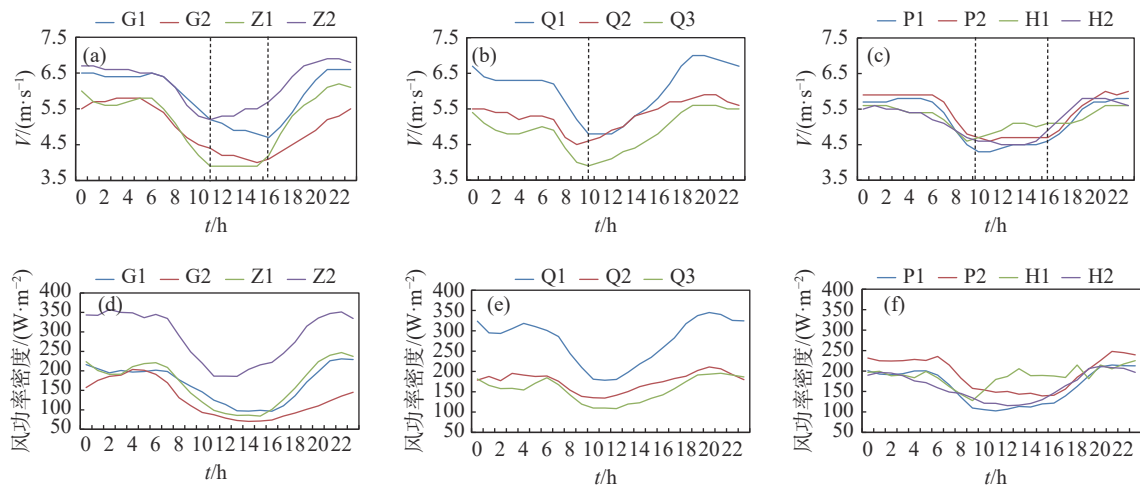


图 3 各测风塔最顶层平均风速(a1~a3)及平均风功率密度(b1~b3)日变化

Fig. 3 Daily variation of average wind speed (a1~a3) and average wind power density (b1~b3) at the highest level of wind masts

化幅度在 1.0~2.3 m/s, 风功率密度日变化幅度在 77~171 W/m<sup>2</sup>, 山区丘陵地形的日变幅明显大于平原湖区。不同地形下风速最低值在 1 天中的出现时间亦有所不同, 高山地形日风速最低值出现在 16 时左右, 中低山地形出现在 11 时左右, 丘陵地形出现在 10 时, 平原湖区地形出现在 10~16 时。

图 4 给出了 5 种地形下代表性测风塔各高度层的平均风速日变化, 山区丘陵地形下各层变化趋于一致, 均为白天小晚上大; 平原地形下高层和低层则呈现出相反的变化特征, 低层为白天大、晚上小; 湖区地形下低层白天大、晚上小的变化特征更加明显, 随着观测高度的增加日变化幅度趋于平缓, 日变化

特征不再明显。

通过分析发现山区和丘陵湖区风速日变化存在明显差异, 高层风速日变化均呈 U 型变化特征, 但随海拔高度的降低变幅减小, 可见内陆地区尤其是山区的高层风速日变化受下垫面影响较小, 其风速具有边界层上层的一些特征。由于湍流垂直交换, 导致边界层上层动量损失, 白天上层动量更快地向下传输, 使上层风速变小, 晚上动量传输较白天变慢, 上层风速开始变大, 边界层上层动量损失日间损失较多, 所以上层风速日间小于夜间<sup>[9,18]</sup>。平原湖区的近地面风速日变化受下垫面影响较大, 白天日出后地面逐渐受热, 近地面空气开始升温形成不稳定大

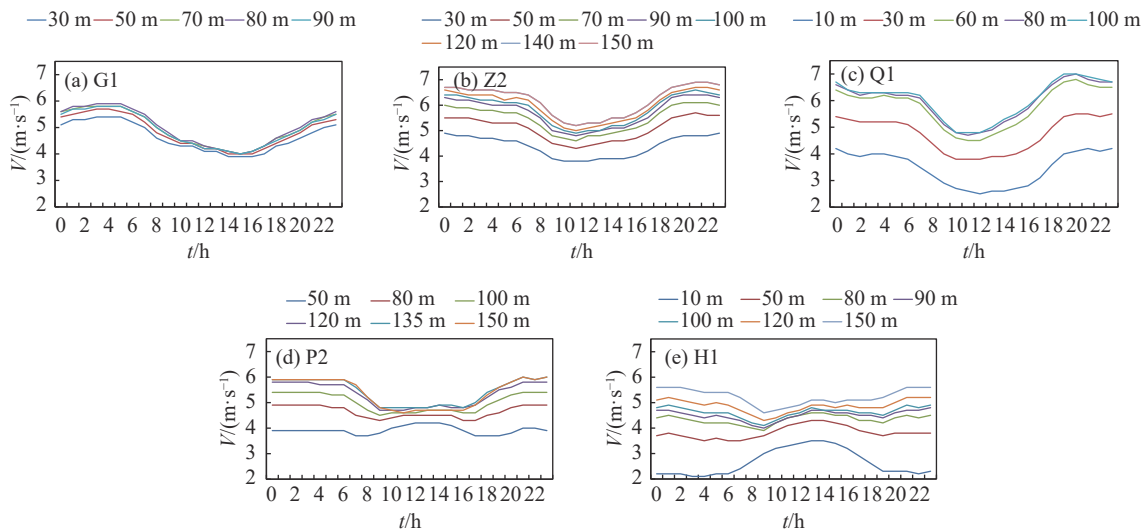


图 4 各测风塔各高度层平均风速日变化

Fig. 4 Daily variation of average wind speed at each height level of wind masts

气层结,上下层空气的湍流交换开始加强,上层空气的动量下传使得近地层空气获得动量,风速逐渐增大,风速在午后达到最大;午后地面温度逐渐下降,湍流交换逐渐减弱,风速开始减小;晚上由于地面辐射冷却作用,近地面空气降温,易形成稳定大气层结,不利于空气动量下传,而地面摩擦作用使得近地面风速减小<sup>[7]</sup>。湖泊附近的风速变化会受到大型水体的影响,水体对大气起到保温作用,近地层气温的日变化幅度变小,也降低了风速的日变化幅度,且水陆的热力差异会形成湖陆风等局地气候特征,导致风速日变化特征的不一致性。

### 2.1.3 风速和风能频率分布

风机一般在 3 ~ 25 m/s 风速区间内正常运行发电,该区间内各测风塔有效风速频率在 75.7% ~ 88.6%,有效风能频率在 99.4% ~ 99.9%;风机额定风速基本在 9 ~ 13 m/s 之间,在额定风速和切出风速之间风机处于满发状态,风速阈值在 10 m/s 以上的风速频率为 6.9 ~ 17.8 m/s,风能频率为 39.3% ~ 66.8%,如表 2 所示。可见虽然大风出现频率不高,但其对应的风能频率却较大,基本可以达到一半以上,因此,在地形相近且平均风速相当的情况下,大风占比越高则风能资源更优,更有利于风电开发。

表 2 各测风塔最高层风速和风能频率

Tab. 2 Wind speed and wind energy frequency at the highest level of each wind mast

测风塔编号		G1	G2	Z1	Z2	Q1	Q2	Q3	P1	P2	H1	H2
有效频率/%	风速	88.6	80.3	76.9	84.2	82.1	83.1	75.7	82.0	79.2	80.6	82.8
	风能	99.9	99.4	99.5	99.9	99.9	99.5	99.7	99.4	99.7	99.8	99.5
10 m/s以上频率/%	风速	10.1	6.9	8.2	17.8	17.3	8.7	7.4	7.6	10.4	8.5	7.4
	风能	39.3	43.1	47.3	66.8	65.7	46.1	46.9	39.5	48.2	48.5	41.9

各测风塔风速频率均呈现为正偏态分布,即风速分布高峰偏左,风能频率分布的峰值较风速频率明显滞后,风速频率较高的风速段出现在 3 ~ 8 m/s,而风能频率较高的风速段则出现在 6 ~ 13 m/s,如图 5 所示。此外,双参数威布尔分布能较好地拟合实际风速分布<sup>[19]</sup>,采用此分布计算得到各测风塔最高层风速威布尔分布形状参数  $K$  在 1.7 ~ 2.3,尺度参数  $A$  在 5.4 ~ 7.0(如表 3 所示)。形状参数和尺度参数组合

是可以表示数据变化特性的度量,形状参数决定了该分布属于威布尔分布族中的类型,是描述风速频率随风速的变化率,参数值越大说明风速频率越集中;尺度参数描述影响风速频率的增长速度,起到拉伸或压缩整个分布的作用,参数值越小增长速度越快。将图 5 中对应的曲线形状和参数值对比分析,可以发现 Z1 的风速分布相对最为集中,形状参数也相应最大,H1 的风速分布增长速度相对最快,尺度参数也相应最小。

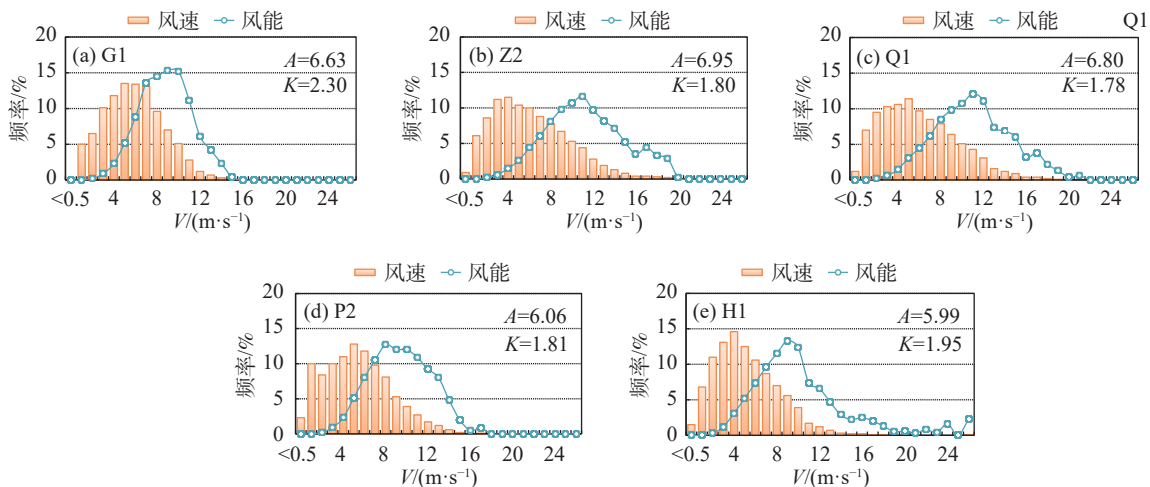


图 5 5 种地形下测风塔最高层风速和风能频率分布

Fig. 5 Wind speed and wind energy frequency distribution at the highest level of wind masts under five kinds of terrain

表 3 各测风塔最高层风速威布尔分布参数

Tab. 3 Weibull distribution parameters of wind speed at the highest level of each wind mast

测风塔编号	G1	G2	Z1	Z2	Q1	Q2	Q3	P1	P2	H1	H2
尺度参数 $A$	6.63	5.59	5.76	6.95	6.80	6.00	5.44	5.85	6.06	5.99	5.83
形状参数 $K$	2.30	1.87	1.73	1.80	1.78	1.94	1.70	1.97	1.81	1.95	1.95

## 2.2 风向频率及风能密度方向分布

风能密度方向分布和地形是决定风电场内机组位置排列的重要因素。从表 4 的统计结果可见, 各测风塔高层主导风向频率在 10.2% ~ 29.4% 之间, 最多风能密度方向频率为 14.5% ~ 59.8%, 且主导风向

下对应的风能密度方向频率一般也最大, 其中仅 P2 测风塔主导风向为 NNE, 而风能密度最多风向为 S, 分析该塔各方向下的平均风速发现 NNE 方向为 5.8 m/s, S 方向为 7.1 m/s, 因此导致了主导风向和风能密度最多风向的不一致。

表 4 各测风塔高层主导风向频率及风能密度方向频率

Tab. 4 Dominant wind direction frequency and wind energy density direction frequency of each wind mast

测风塔编号		G1	G2	Z1	Z2	Q1	Q2	Q3	P1	P2	H1	H2
风向高度层/m		100	90	120	150	98	100	100	145	150	150	150
风向	主导风向	SE	W	E	N	NE	NNE	NNE	NNE	NNE	N	NE
	频率/%	29.4	10.2	10.5	28.2	22.8	27.0	20.6	25.0	21.6	19.7	25.3
风能密度方向	最多风向	SE	W	E	N	NE	NNE	NNE	NNE	S	N	NE
	频率/%	42.8	19.9	14.5	59.8	46.0	51.2	50.1	33.1	25.2	34.8	52.1

各测风塔的风向频率及风能密度方向频率分布基本一致, 频率较高风向下的风能密度方向频率一般也较大, 且风能密度方向频率会较风向频率明显增加, 甚至增大至 1 倍以上。G2、Z1 和 P2 测风塔风向频率及风能密度方向频率分布较为分散, 其中 G2 和 P2 测风塔分散在两个基本相反的方向, 其余 8 个测风塔则相对集中在 1 个方向, 这种有明确主导分布方向或两个相反主风向的分布更有利于风能资源利用, 如图 6 所示。鄂北、江汉平原及中部地区风向主要为偏北和偏南风, 主要是由于我省冬半年受大陆冷高压控制以北风为主, 夏半年受副高及亚洲季风影响以南风为主, 这些区域地势较高或周边较为空旷, 南来和北来的气流畅通无阻, 尤其是江汉平原地区地势开阔, 有利于气流加速。此外, 宜钟夹道及北部山区形成多个与主导风向一致的南北向通道, 狭管效应使长驱直入的气流在此处不断加速, 致使这些区域风速较大且主导风向特征明显<sup>[9]</sup>; 鄂西南山区风向明显受地形影响较大, G1 测风塔受西北方向山脉阻挡风向基本集中在东南方向, G2 测风塔受北部大巴山脉阻挡, 风向主要集中在西和东北方向; 鄂

东大别山和幕阜山的山地地形对该区域风向影响也较大, Z1 测风塔风向主要集中在东-东南方向, H2 测风塔风向主要集中在东北方向, 该塔东侧的龙感湖大面积的空旷水域有利于气流加速。

## 2.3 风切变指数

风切变指数是表征风速随垂直高度变化的特征参数。大气边界层的风场受大气运动自身特性以及下垫面环境的影响, 在多变的动力和热力作用下往往呈现气流随高度变化不均匀分布的特性, 导致风切变特征复杂多样。由于各测风塔风速观测层次各不相同, 因此采用多个高度层计算的综合风切变指数进行特征分析<sup>[11]</sup>。

### 2.3.1 年平均风切变

利用各测风塔全部观测高度的平均风速计算风切变指数为 0.049 ~ 0.516, 如表 5 所示。从图 7 中可以看出, 10 m 高度的观测风速普遍明显较小, 可能受周边植被影响较大, 因此撇除 10 m 高度的风速计算风切变指数, Z1 和 Q2 测风塔风切变明显变小, 各塔的风切变指数为 0.055 ~ 0.328(表 5)。从图 7(a)可以看出海拔较高的山区风切变指数较小, G1、G2 和

Z1 测风塔海拔高度均在 900 m 以上, 30 ~ 110 m 高度的风速随高度增加缓慢, 且在某些高度之间存在等风层, 除 10 m 高度的风切变指数在 0.055 ~ 0.094;

600 m 以下的低山丘陵地形下除 10 m 高度的风切变指数为 0.167 ~ 0.227, Q1 测风塔在高层也存在等风层的情况。图 7(b)平原湖区地形下的 4 个测风塔均

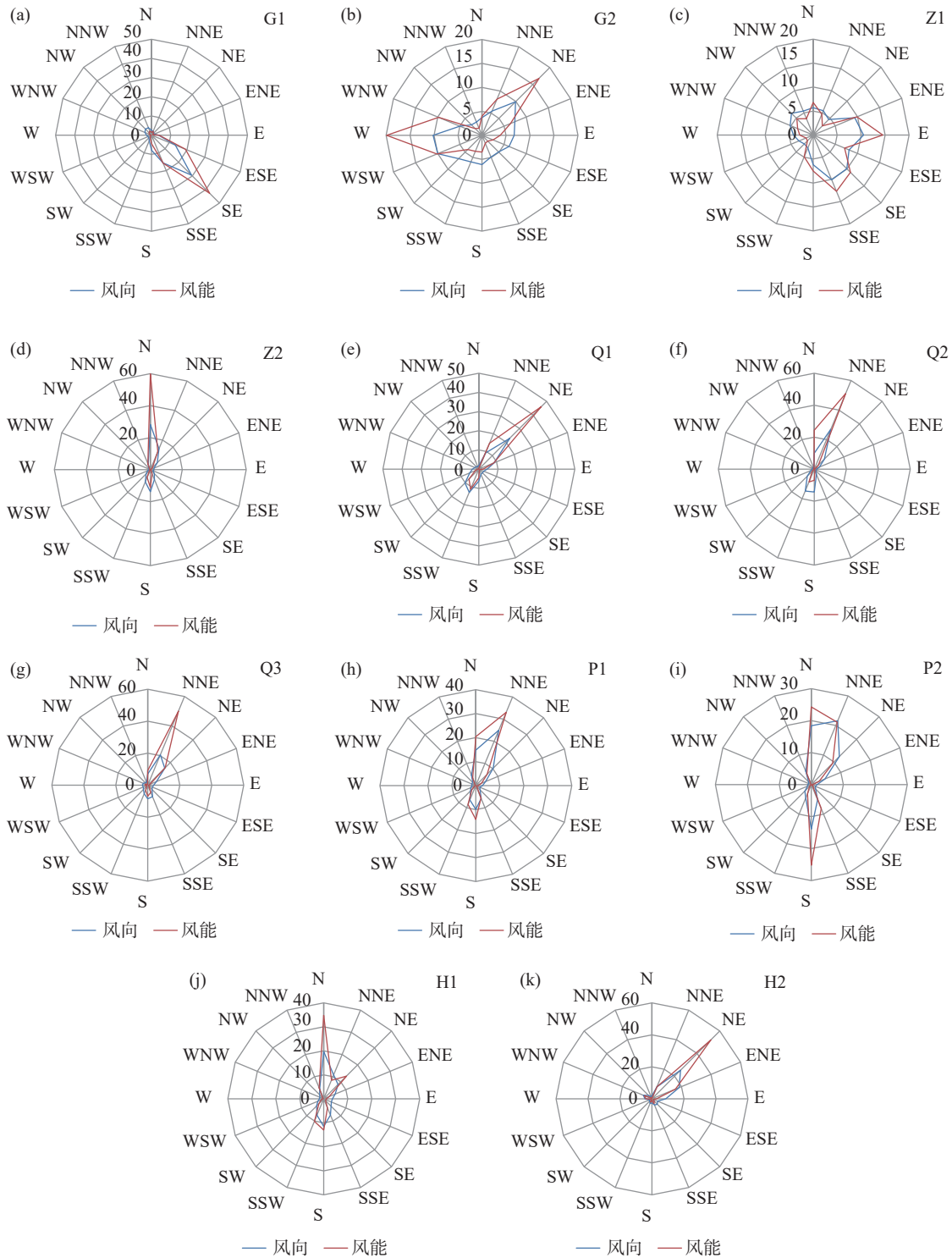


图 6 各测风塔高层风向频率及风能密度方向频率玫瑰图(单位:%)

Fig. 6 Rose diagram of wind direction frequency and wind energy density direction frequency of each wind mast (unit: %)



有 150 m, 各塔的风速垂直廓线变化趋势较为一致, 风切变指数为 0.209 ~ 0.328, 平原地形下的风切变指数大于湖区地形。表 6 中给出了测风塔各高度层与最低层(不包括 10 m 高度)之间的风切变指数, 也可看出高海拔山区测风塔的风切变明显低于丘陵及平原湖区地形。

将 5 种地形下的风切变指数进行横向比较, 可以发现综合风切变指数随海拔高度的降低而升高, 海拔较高的山区地形风切变指数最小, 平原地区的风切变指数最大, 因此平原地区更适宜提升风机轮毂高度, 从而有效利用更高层的风能资源; 不同高度层风速的切变在山区变化较为复杂, 平原湖区变化较为一致, 因此在复杂地形条件下, 风切变指数最好能够分层考虑。

### 2.3.2 日变化特征

测风塔风切变日变化幅度随着海拔高度的降低而增大, 山区丘陵地形下为 0.063 ~ 0.170, 平原湖区地形下为 0.274 ~ 0.378, 如表 7 所示。图 8 给出了各地形下风切变指数日变化曲线, 山区丘陵地形无明显日变化特征, 呈波动性变化, 平原湖区则呈现一致

且明显的 U 型变化, 即白天小夜间大, 谷值出现在 10 ~ 13 时, 峰值出现在 18 ~ 次日 06 时。

山区丘陵地形的测风塔一般设立在山脊或山顶, 风速受下垫面影响相对较小, 导致风速垂直变化趋势不明显, 但风切变指数日变化表现出频繁波动的特性, 尤其是在白天和夜晚交替的时段会出现明显的波动, 可见山区复杂地形下风切变指数的影响因素较为复杂。平原湖区地形下的风速变化受下垫面影响较大, 白天大气层结多处于不稳定状态, 大气湍流混合作用更强, 风速垂直梯度较小, 夜间大气层结较为稳定, 湍流较弱能量不易下传, 上下层风速垂直梯度变大。

### 2.3.3 大风情况下的风切变

由于个别测风塔 10 m 高度风速受周边植被影响较大, 因此按照《风电场工程风能资源测量与评估技术规范》(NB/T 31147—2018), 采用除 10 m 高度外的最低层小时平均风速  $\geq 10$  m/s 的各层风速为样本, 对测风塔大风情况下风切变指数变化进行分析。如图 9 所示, 山区丘陵地形大风下的风切变指数大部分情况较为离散, Q1 的风切变指数分散且偏大,

表 5 各测风塔综合风切变指数  
Tab. 5 Composite wind shear index of each wind mast

测风塔编号	G1	G2	Z1	Z2	Q1	Q2	Q3	P1	P2	H1	H2
全高度风切变指数	0.049	0.064	0.274	0.227	0.257	0.516	0.172	0.278	0.328	0.227	0.209
除 10 m 高度风切变指数	0.094	—	0.055	—	0.214	0.209	0.167	—	—	0.277	—

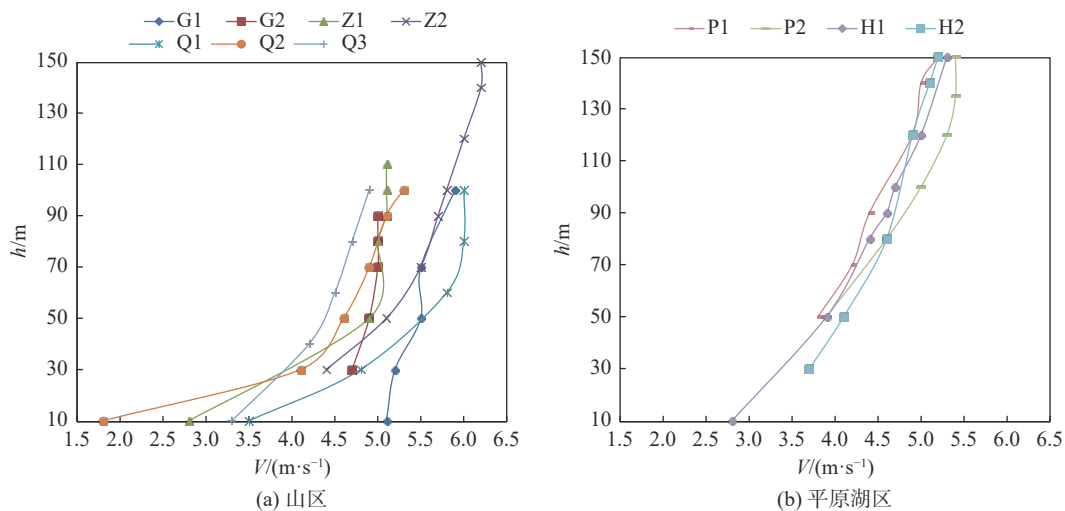


图 7 各测风塔年平均风速垂直风廓线

Fig. 7 Vertical wind profile of annual average wind speed of each wind mast

表 6 各测风塔各高层风切变指数  
Tab. 6 Wind shear index at each height level of each wind mast

测风塔编号	项目	高层及风切变						
G1	高度层/m	30~50	30~70	30~100	—	—	—	—
	风切变	0.110	0.066	0.105	—	—	—	—
G2	高度层/m	30~50	30~70	30~80	30~90	—	—	—
	风切变	0.082	0.073	0.063	0.056	—	—	—
Z1	高度层/m	50~80	50~90	50~100	50~110	—	—	—
	风切变	0.043	0.068	0.058	0.051	—	—	—
Z2	高度层/m	30~50	30~70	30~90	30~100	30~120	30~140	30~150
	风切变	0.289	0.263	0.236	0.229	0.224	0.223	0.213
Q1	高度层/m	30~60	30~80	30~100	—	—	—	—
	风切变	0.273	0.228	0.185	—	—	—	—
Q2	高度层/m	30~50	30~70	30~90	30~100	—	—	—
	风切变	0.225	0.210	0.199	0.213	—	—	—
Q3	高度层/m	40~60	40~80	40~100	—	—	—	—
	风切变	0.170	0.162	0.168	—	—	—	—
P1	高度层/m	50~70	50~90	50~120	50~140	50~150	—	—
	风切变	0.297	0.249	0.290	0.267	0.286	—	—
P2	高度层/m	50~80	50~100	50~120	50~135	50~150	—	—
	风切变	0.351	0.358	0.350	0.328	0.296	—	—
H1	高度层/m	50~80	50~90	50~100	50~120	50~150	—	—
	风切变	0.257	0.281	0.269	0.284	0.279	—	—
H2	高度层/m	30~50	30~80	30~120	30~140	30~150	—	—
	风切变	0.201	0.222	0.203	0.208	0.211	—	—

变化范围为 0.1 ~ 0.6, 除 Z2 和 Q1 之外其他塔均有出现不同程度的负切变情况, 说明山区风变化更复杂; 平原湖区地形下则相对较为集中, 随着风速增加基

本稳定在 0.1 ~ 0.2 之间, 更利于风机的稳定安全运行。

### 2.4 湍流强度

大气湍流强度是地表摩擦与风切变引起的动力

表 7 各测风塔风切变指数日变化幅度

Tab. 7 Daily variation of wind shear index of each wind mast

测风塔编号	G1	G2	Z1	Z2	Q1	Q2	Q3	P1	P2	H1	H2
日变化幅度	0.130	0.063	0.125	0.065	0.148	0.170	0.141	0.378	0.334	0.364	0.274

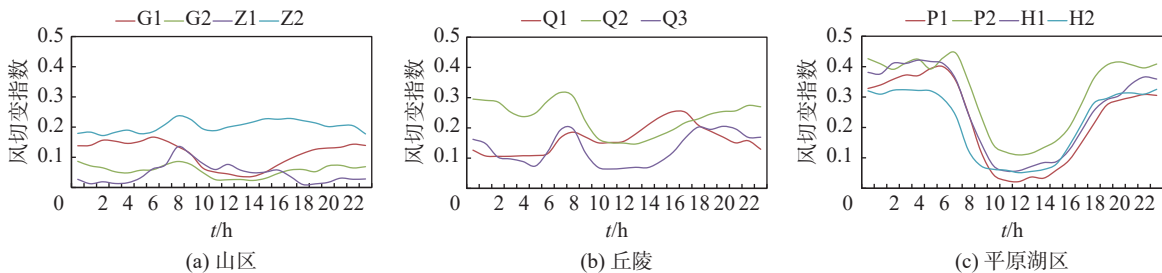


图 8 各测风塔风切变指数日变化

Fig. 8 Daily variation of wind shear index of each wind mast

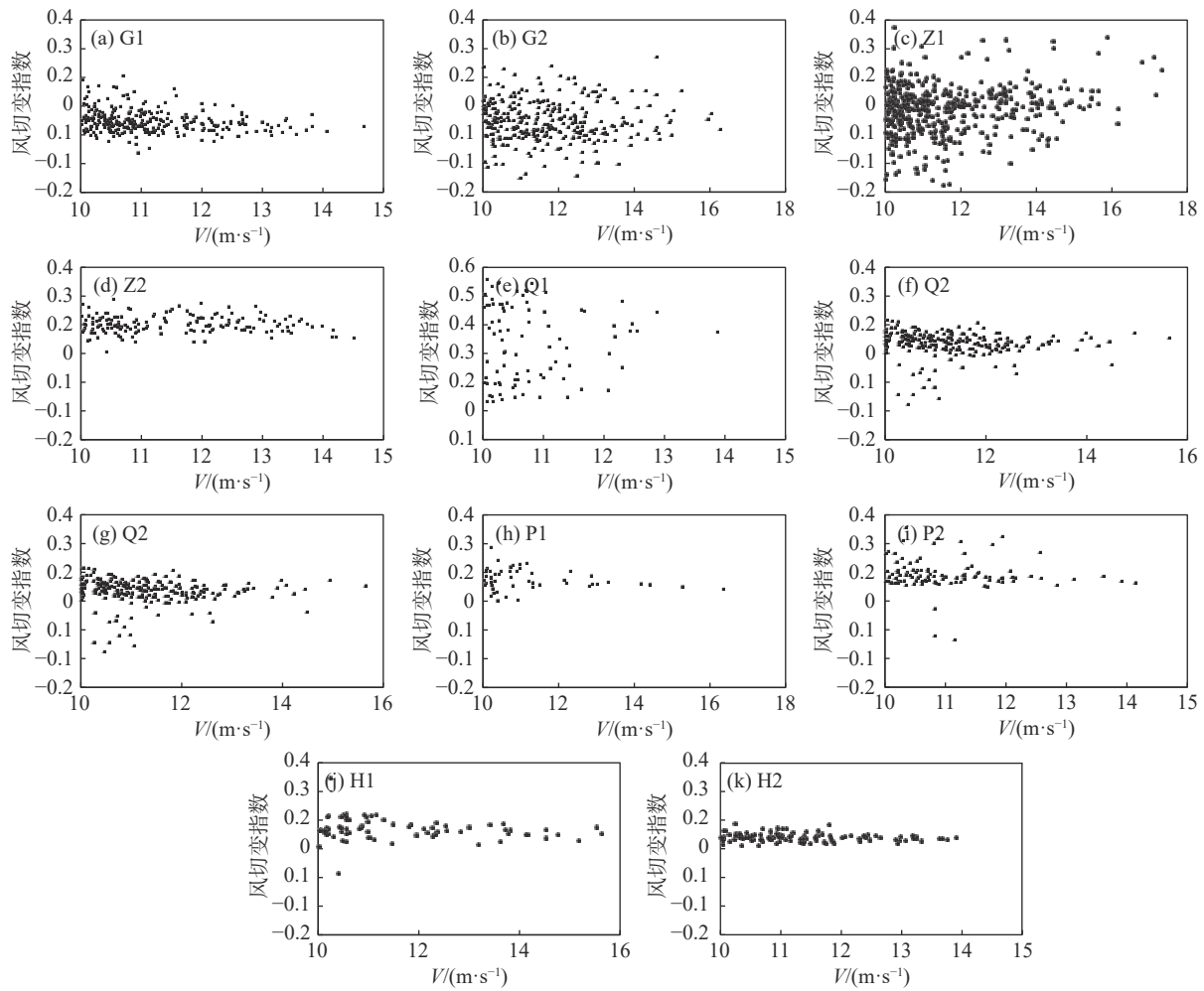


图 9 各测风塔大风情况下的风切变指数散点图

Fig. 9 Scatter diagram of wind shear index under high wind condition of each wind mast

因子和温度层结引起的热力因子而形成的<sup>[20]</sup>, 是评价气流稳定程度的指标, 其对风力发电机组性能会产生不利影响, 主要是减少输出功率, 还可能引起极端荷载, 对风机造成削弱或破坏。

#### 2.4.1 年平均值变化特征

各测风塔有效风速段(3 ~ 25 m/s)年平均湍流强度为 0.13 ~ 0.18, 15 m/s 风速段年平均湍流强度为 0.07 ~ 0.14, 如表 8 所示, 表明各种地形下湍流强度处于中等偏小的程度, 有效风速段湍流强度在海拔

较高的山区大于平原湖区。从图 10 可见, 各测风塔湍流强度随离地高度增加基本呈明显的减小趋势, 其中海拔较高的 G1 测风塔有效风速段湍流强度在 30 ~ 70 m 高度出现明显波动, G2 测风塔在上层随高度略有减小, Z1 测风塔 15 m/s 风速段湍流强度较有效风速段湍流强度降低最为明显。

#### 2.4.2 日变化特征

各测风塔最高层湍流强度日变化为非常一致的单峰型变化特征, 峰值出现在 14 时左右, 谷值出现

表 8 各测风塔最高层湍流强度

Tab. 8 Turbulence intensity at the highest level of each wind mast

测风塔编号	G1	G2	Z1	Z2	Q1	Q2	Q3	P1	P2	H1	H2
有效风速段	0.179	0.178	0.160	0.143	0.135	0.167	0.154	0.135	0.131	0.134	0.145
15 m/s 风速段	0.094	0.106	0.070	0.091	0.088	0.139	0.109	0.102	0.099	0.099	0.097

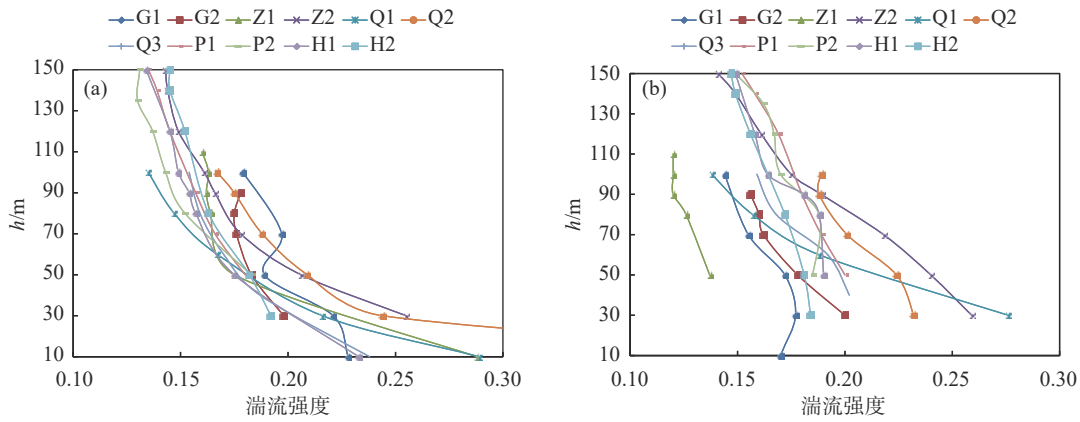


图 10 各测风塔有效风速段湍流强度(a)和 15 m/s 风速段湍流强度(b)随高度变化

Fig. 10 Turbulence intensity in effective wind speed section (a) and in 15 m/s wind speed section (b) of each wind mast changes with height

在 21~次日 6 时,这与风速的日变化特征恰好相反,日变化幅度山区丘陵地形下为 0.12~0.15,平原湖区地形下为 0.07~0.09,平原湖区地形的湍流日变化幅度明显更小,如图 11 所示。开阔地形的气流稳定度

优于复杂山区地形,白天动能传递一般要快于热能传递,对流作用强于晚上,因此出现湍流强度白天大晚上小的变化特征<sup>[13]</sup>。

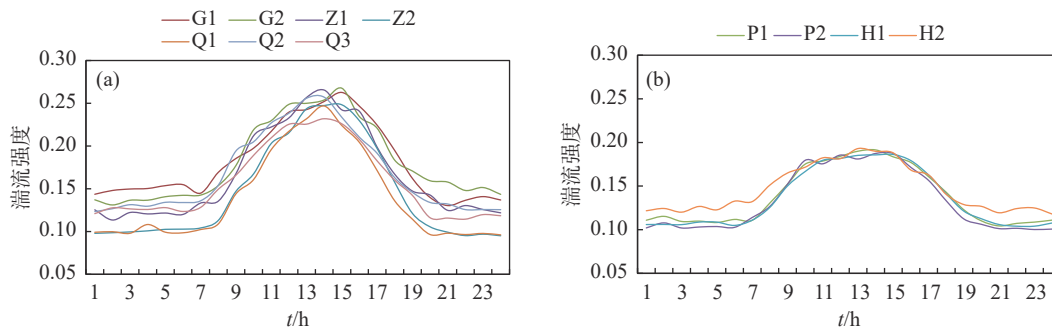


图 11 各测风塔最高层湍流强度日变化

Fig. 11 Daily variation of turbulence intensity at the highest level of each wind mast

### 2.4.3 不同风速段变化特征

各测风塔最高层不同风速段湍流强度随风速增加变化趋势基本一致,3~6 m/s 风速段内迅速下降,降幅在 0.1~0.2 之间,6 m/s 以上风速段呈波动性变化或一直较为稳定,但均在 0.17 以下,属于中等程度湍流强度,平原地形下大风速段湍流强度也会出现明显波动的情况,如 P1 测风塔在 12 m/s 以上风速段有较大波动,如图 12 所示。

并浅析了不同地形产生变化差异的可能原因,主要得到以下结论:

## 3 结论

本文采用湖北省内代表山区丘陵及平原湖区地形的 11 个测风塔观测资料,分析了各种地形下对风能资源利用较为重要的各项主要参数的变化特征,

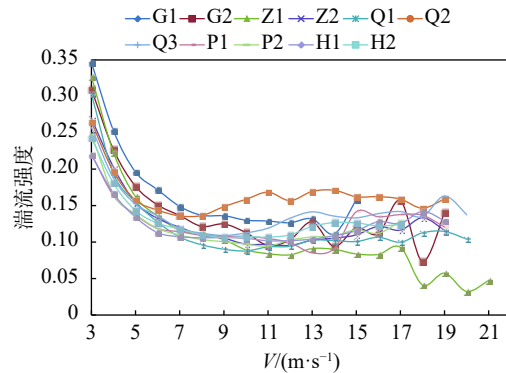


图 12 各测风塔最高层不同风速段湍流强度变化

Fig. 12 Variation of turbulence intensity in different wind speed sections at the highest level of each wind mast

1)各测风塔高层风速日变化特征一致为白天小晚上大,风速日变化幅度在 1.0~2.3 m/s,山区丘陵地形下的日变幅明显大于平原湖区;山区丘陵地形各层风速日变化特征基本一致,平原湖区低层风速日变化与高层变化特征则相反。

2)各测风塔综合风切变指数在 0.055~0.328 之间,在山区丘陵地形下明显大于平原湖区;平原湖区风切变日变幅明显大于山区丘陵,变化特征为白天小晚上大;大风情况下的风切变指数在山区丘陵地形下一般分布较为离散,平原湖区地形下则相对较为集中。

3)各测风塔高层有效风速段年平均湍流强度为 0.13~0.18,在海拔较高的山区地形下大于平原湖区,湍流强度随离地高度增加基本呈明显的减小趋势;湍流强度日变化特征均为白天大晚上小,山区丘陵地形下的日变幅明显大于平原湖区。

综上所述,以上各种地形下风能资源特征主要受天气系统、大尺度地形及局地地貌影响,造成不同的动力和热力作用而表现出空间和时间变化特征的差异。山区风能资源开发施工运维难度大但资源更丰富,平原湖区便于开发但资源相对匮乏,还需充分考虑风能资源差异并结合风电发展现状,深入开展风能资源特性分析研究:(1)早期山区测风高度和风机轮毂高度大部分仅为 70 m,虽然已知山区存在风速倒切变和等风层的情况<sup>[9]</sup>,但更高层的风能资源特性尚需进一步深入探索,为后期已运行十多年的山区风电场升级改造做好准备;(2)为适应风电开发从山区到平原湖区,甚至高空的发展趋势,需尽快摸清 150~300 m 高度乃至 300 m 以上到整个大气边界层的风能资源特征,以支持高空风电开发需求<sup>[21]</sup>;(3)利用湖北省丰富的水能资源特点,充分发挥水电调节能力,结合风能、太阳能资源开展抽水蓄能规划建设,深入研究水风光一体化基地互补特性,推动风光资源更加合理有效的利用。

#### 参考文献:

- [1] 国家发展改革委,国家能源局,财政部,等。“十四五”可再生能源发展规划 [EB/OL]. (2022-06-01) [2023-07-01]. [https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202206/t20220601\\_1326720.html](https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202206/t20220601_1326720.html). National Development and Reform Commission, National Energy Administration, The Ministry of Finance, et al. Renewable energy development plan of the "fourteenth five year plan" [EB/OL]. (2022-06-01) [2023-07-01]. [https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202206/t20220601\\_1326720.html](https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202206/t20220601_1326720.html).
- [2] Global Wind Energy Council. Global wind report 2023 [EB/OL]. (2023-03-27) [2023-07-01]. <https://gwec.net/global-windreport2023>.
- [3] 中国可再生能源学会风能专业委员会. 2022 年中国风电吊装容量统计简报 [J]. 风能, 2023(4): 40-56. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2023.04.009. Wind Energy Professional Committee of Chinese Renewable Energy Society. Statistical briefing of China's wind power hoisting capacity in 2022 [J]. Wind energy, 2023(4): 40-56. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2023.04.009.
- [4] 中华人民共和国国家发展和改革委员会,国家能源局. 关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案 [EB/OL]. (2022-05-30) [2023-07-02]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-05/30/content\\_5693013.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-05/30/content_5693013.htm). National Development and Reform Commission of the People's Republic of China, National Energy Administration. Implementation plan on promoting the high quality development of new energy in the new era [EB/OL]. (2022-05-30) [2023-07-02]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-05/30/content\\_5693013.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-05/30/content_5693013.htm).
- [5] 陈欣,宋丽莉,黄浩辉,等. 中国典型地区风能资源特性研究 [J]. 太阳能学报, 2011, 32(3): 331-337. DOI: 10.19912/j.0254-0096.2011.03.009. CHEN X, SONG L L, HUANG H H, et al. Study on characteristics of wind energy resources in two typical areas in China [J]. Acta energiae solaris sinica, 2011, 32(3): 331-337. DOI: 10.19912/j.0254-0096.2011.03.009.
- [6] 周青,李雁,裴翀,等. 基于风能资源专业观测网的风能资源评估 [J]. 气象科技, 2013, 41(6): 1153-1160. DOI: 10.3969/j.issn.1671-6345.2013.06.033. ZHOU Q, LI Y, PEI C, et al. Wind energy evaluation based on wind power resources professional observation network in China [J]. Meteorological science and technology, 2013, 41(6): 1153-1160. DOI: 10.3969/j.issn.1671-6345.2013.06.033.
- [7] 朱蓉,王阳,向洋,等. 中国风能资源气候特征和开发潜力研究 [J]. 太阳能学报, 2021, 42(6): 409-418. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2020-0130. ZHU R, WANG Y, XIANG Y, et al. Study on climate characteristics and development potential of wind energy resources in China [J]. Acta energiae solaris sinica, 2021, 42(6): 409-418. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2020-0130.
- [8] 吴琼,聂秋生,周荣卫,等. 江西省山地风场风能资源储量及特征分析 [J]. 自然资源学报, 2013, 28(9): 1605-1614. DOI: 10.11849/zrzyxb.2013.09.015. WU Q, NIE Q S, ZHOU R W, et al. Analysis of wind energy resources reserves and characteristics in mountain area of Jiangxi Province [J]. Journal of natural resources, 2013, 28(9): 1605-1614. DOI: 10.11849/zrzyxb.2013.09.015.
- [9] 许杨,杨宏青,陈正洪,等. 湖北省丘陵山区风能资源特征分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(7): 979-985. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201407007. XU Y, YANG H Q, CHEN Z H, et al. Feature analysis on wind energy resources of hills and mountains in Hubei Province [J]. Resources and environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(7): 979-985. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201407007.
- [10] 龚玺,朱蓉,李泽椿. 我国不同下垫面的近地层风切变指数研究 [J]. 气象, 2018, 44(9): 1160-1168. DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.09.004. GONG X, ZHU R, LI Z C. Study of near-surface wind shear

- exponents of different regions in China [J]. *Meteorological monthly*, 2018, 44(9): 1160-1168. DOI: [10.7519/j.issn.1000-0526.2018.09.004](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2018.09.004).
- [11] 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. DOI: [10.11849/zrzyxb.2015.09.012](https://doi.org/10.11849/zrzyxb.2015.09.012).
- GONG Q, WANG H Y, ZHU L, et al. Study on the near surface wind shear characteristics in Liaoning Province [J]. *Journal of natural resources*, 2015, 30(9): 1560-1569. DOI: [10.11849/zrzyxb.2015.09.012](https://doi.org/10.11849/zrzyxb.2015.09.012).
- [12] 崔杨, 陈正洪, 何英杰, 等. 湖北省近地层风切变特征 [J]. *气象科技*, 2021, 49(5): 785-793. DOI: [10.19517/j.1671-6345.20200547](https://doi.org/10.19517/j.1671-6345.20200547).
- CUI Y, CHEN Z H, HE Y J, et al. Characteristics of surface layer wind shear in Hubei Province [J]. *Meteorological science and technology*, 2021, 49(5): 785-793. DOI: [10.19517/j.1671-6345.20200547](https://doi.org/10.19517/j.1671-6345.20200547).
- [13] 李鸿秀, 朱瑞兆, 王蕊, 等. 不同地形风电场湍流强度日变化和年变化分析 [J]. *太阳能学报*, 2014, 35(11): 2327-2333. DOI: [10.3969/j.issn.0254-0096.2014.11.039](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0096.2014.11.039).
- LI H X, ZHU R Z, WANG R, et al. Wind turbulence intensity of daily and yearly variation analysis in different kinds of terrain [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2014, 35(11): 2327-2333. DOI: [10.3969/j.issn.0254-0096.2014.11.039](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0096.2014.11.039).
- [14] 夏馨, 余晔, 董龙翔, 等. 风电场建设前后近地面湍流强度变化特征 [J]. *高原气象*, 2022, 41(4): 1062-1073. DOI: [10.7522/j.issn.1000-0534.2021.00005](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0534.2021.00005).
- XIA X, YU Y, DONG L X, et al. Characteristics of near surface turbulence intensity before and after wind farm construction [J]. *Plateau meteorology*, 2022, 41(4): 1062-1073. DOI: [10.7522/j.issn.1000-0534.2021.00005](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0534.2021.00005).
- [15] 龙强, 王锋, 王畅, 等. 渤海湾北岸海陆风及湍流强度特征分析 [J]. *应用海洋学学报*, 2020, 39(3): 303-311. DOI: [10.3969/J.ISSN.2095-4972.2020.03.001](https://doi.org/10.3969/J.ISSN.2095-4972.2020.03.001).
- LONG Q, WANG F, WANG C, et al. Characteristics of sea-land breeze and turbulence intensity on the north shore of Bohai Bay [J]. *Journal of applied oceanography*, 2020, 39(3): 303-311. DOI: [10.3969/J.ISSN.2095-4972.2020.03.001](https://doi.org/10.3969/J.ISSN.2095-4972.2020.03.001).
- [16] 中国科学院自然区划工作委员会. 中国地貌区划 [M]. 北京: 科学出版社, 1959: 24-26.
- Natural Zoning Committee of Chinese Academy of Sciences. *Geomorphic regionalization in China* [M]. Beijing: Science Press, 1959: 24-26.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 风电场风能资源评估方法: GB/T 18710—2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. *Methodology of wind energy resource assessment for wind farm: GB/T 18710—2002* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
- [18] 陈鹤, 周顺武, 熊安元, 等. 河北省风能详查区风速日变化特征 [J]. *干旱气象*, 2011, 29(3): 343-349. DOI: [10.3969/j.issn.1006-7639.2011.03.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-7639.2011.03.012).
- CHEN H, ZHOU S W, XIONG A Y, et al. Analysis on diurnal variation of wind velocity in Hebei Province [J]. *Journal of arid meteorology*, 2011, 29(3): 343-349. DOI: [10.3969/j.issn.1006-7639.2011.03.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-7639.2011.03.012).
- [19] 龚伟俊, 李为相, 张广明. 基于威布尔分布的风速概率分布参数估计方法 [J]. *可再生能源*, 2011, 29(6): 20-23. DOI: [10.3969/j.issn.1671-5292.2011.06.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-5292.2011.06.005).
- GONG W J, LI W X, ZHANG G M. The estimation algorithm on the probabilistic distribution parameters of wind speed based on Weibull distribution [J]. *Renewable energy resources*, 2011, 29(6): 20-23. DOI: [10.3969/j.issn.1671-5292.2011.06.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-5292.2011.06.005).
- [20] 贺德馨. 风工程与工业空气动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- HE D X. *Wind engineering and industrial aerodynamics* [M]. Beijing: National defense industry press, 2006.
- [21] 蔡彦枫, 李晓宇. 面向空中风力发电系统的高空风场观测研究 [J/OL]. (2023-06-13) [2023-12-08]. <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.00.000>. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.00.000](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.00.000).
- CAI Y F, LI X Y. Comparison of wind-measurement instruments and observation campaign for airborne wind energy system [J/OL]. (2023-06-13) [2023-12-08]. <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.00.000>. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.00.000](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.00.000).

---

#### 作者简介:



许杨

许杨 (第一作者)

1981-, 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事风能太阳能资源开发及重大工程气候可行性论证研究工作 (e-mail) [702158412@qq.com](mailto:702158412@qq.com)。



陈正洪

陈正洪 (通信作者)

1964-, 男, 正研级高级工程师, 硕士, 主要从事应用气象、气候变化及防灾减灾研究工作 (e-mail) [chenzh64@126.com](mailto:chenzh64@126.com)。

申彦波

1978-, 男, 正研级高级工程师, 主要从事太阳能资源评估预报及气候变化方面研究工作 (e-mail) [shenyb@cma.gov.cn](mailto:shenyb@cma.gov.cn)。

孟丹

1989-, 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事风能太阳能资源开发与利用方面研究工作 (e-mail) [mdan11@126.com](mailto:mdan11@126.com)。

---

#### 项目简介:

**项目名称** 湖北省大气边界层风能资源特性分析及开发潜力评估 (2023Y08)

**承担单位** 湖北省气象服务中心

**项目概述** 项目围绕湖北省“双碳”目标下多元化风能太阳能开发利用的需求, 为充分挖掘利用我省各种地形下的风能资源, 深入分析我省近地层及大气边界层 300 m 以下高度风能资源特性, 重点开展我省多种层高的风能资源推算及风切变指数研究。

(编辑 孙舒)