

王明,成驰,孟丹,等.基于Beluco-CIWS指数的湖北省风光资源日变化互补特性分析[J].气象研究与应用,2024,45(1):28-34.  
WANG Ming, CHENG Chi, MENG Dan, et al. Complementary characteristics of diurnal variation of wind and solar resources in Hubei province based on Beluco-CIWS index[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2024, 45(1): 28-34.

## 基于Beluco-CIWS指数的湖北省风光资源日变化互补特性分析

王明<sup>1,2</sup>, 成驰<sup>1\*</sup>, 孟丹<sup>1</sup>, 陈正洪<sup>1</sup>, 王捷儒<sup>3</sup>

(1. 湖北省气象服务中心, 武汉 430205; 2. 中国气象局武汉暴雨研究所/暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430205;  
3. 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081)

**摘要:** 利用1991—2020年ERA5 100 m风速和地面太阳辐射及Beluco-CIWS互补指数,对湖北省风光资源要素日变化互补特性开展分析。结果表明:(1)湖北中东部互补性较强,西部互补性较差。海拔越高,互补性越弱,海拔越低,互补性越强。秋季互补性较强,冬季次之,夏季最弱。风速大的地区互补性强,风速小的地区互补性弱。(2)互补性强的区域风速呈现先减后增、白天风速小、夜间风速大的日变化特征,互补性弱的区域日变化特征相反,互补性强弱取决于风速强弱及日变化特征是否异常。

**关键词:** Beluco-CIWS互补指数;风光资源;互补特性;日变化

**中图分类号:** P42

**文献标识码:** A

**doi:** 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2024.1.06

能源是人类社会生产、经济发展的物质基础。随着化石燃料消耗的飞速增长,环境日益恶化,资源日渐匮乏<sup>[1-3]</sup>。大力开发风能太阳能等可再生能源既是我国达成“双碳”目标的重要途径,也是解决传统化石能源短缺和过度排放的必由之路。在利用风光资源发电过程中,受到季节更迭、地理位置和环境气候等多种因素的影响,导致风光资源在时间和空间上的变化趋势同步或相反<sup>[4]</sup>。风光资源不同时空尺度上的互补是国际上公认的破解新能源并网消纳难题的可行途径之一。因而,将两种能源扬长补短,相互配合利用,可以进一步弥补单独风力发电或太阳能发电的缺陷和不足,因地制宜实现最大的能源利用率。

截至2023年6月底,湖北省发电装机容量经过多年的快速增长,首次突破 $1 \times 10^8$  kW大关。其中,水电、风电、太阳能发电等清洁能源装机占比达到64.4%。风电、太阳能装机容量 $2.702 \times 10^8$  kW,占比

26.8%。随着装机规模不断增大,这两种资源的随机性、间歇性成为不容忽视的问题。风光资源的大规模并网对电网安全稳定运行造成冲击,使得调度压力越来越大<sup>[5-6]</sup>。伴随着风电大规模集中式的开发,电力调度部门普遍面临着较高弃风率的消纳困难<sup>[7]</sup>。

从大气环流特性和机理来看,风光资源在时空尺度上存在一定互补性。例如白天风速较小而地面太阳辐射较强,夜间风速较大而地面太阳辐射为零;冬春季节风速较大而地面太阳辐射较小,夏季风速较小而地面太阳辐射较强。如果能较好的考虑风光资源互补特性,进而开展风电、光伏的容量配比规划,以及发电功率的同步调度等,将有助于减缓不稳定电源的调度压力,提升电网调度安全<sup>[8]</sup>。

近年来,国内外学者围绕风光互补互开展一定的研究,在资源估算、容量优化配置、互补特性分析和调度运行方式等方面取得一定进展<sup>[9-11]</sup>。ZAPPA等利用ERA-I资料,以最大限度减少剩余需求为目

收稿日期: 2023-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(NSFC42175048)、国家重点研发计划(2018YFC1505600)、湖北省自然科学基金(2023AFB543)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J044)、湖北省自然科学基金(2022CFD017)

第一作者简介: 王明(1990-),男,高级工程师,博士,主要从事风能太阳能资源监测、评估和预测应用研究工作。E-mail: wangming@lasg.iap.ac.cn

\*通讯作者: 成驰(1980-),男,高级工程师,主要从事风能、太阳能气象服务和科研开发工作。E-mail: chc8108@126.com

标,研究欧洲风能和光伏发电的容量组合和空间组合的优化方法<sup>[12]</sup>。CAO 等采用 NASA 再分析资料研究山东省区域内的风能太阳能时空互补性,提出三层递进分析框架,从分析得出各虚拟站点(即各网格中心点)最优时间互补尺度进而推广到分析出跨站点空间互补组合<sup>[13]</sup>。LI 等以美国俄克拉荷马州为例使用自主提出的风能与太阳辐射互补指数(CI-WS),即两条表征风能和太阳能资源的曲线之间总面积,用来比较不同地理位置的互补性<sup>[14]</sup>。王捷儒等利用吉林西部相邻风电场和光伏电站完整一年的实测资料,通过选取变异系数作为监测资源稳定性的衡量指标,分别考察两种资源在不同利用比例下叠加结果的稳定性,从日变化和月变化角度分析其互补特性<sup>[15]</sup>。

目前,针对整个省域空间范围的风光资源要素时空互补特性的较少,有部分研究分析互补供电发电系统、容量配比等。本文基于 ERA5 再分析资料 1991—2020 年的 100 m 风速和地面太阳辐射数据,以湖北省为例,探究全省风光资源要素日变化的时空互补特性,为湖北省风光资源的合理开发利用提供参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源

ERA5 资料是欧洲中期天气预报中心(ECMWF)利用先进的建模和数据同化系统,将大量历史观测数据结合到全球估算中,对 1979 年 1 月至今的全球气候进行的第五代大气再分析数据,提供许多大气、陆地表面和海洋状态参数的逐小时数据。ERA5 再分析资料包含风速和地面太阳辐射等要素,数据时间分辨率为 1 h,空间分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。相对于其它再分析资料,ERA5 提供 100 m 风场资料的输出,而这一高度正好是风机轮毂所在高度附近,是风电场最为关注的层次之一,且该高度层受下垫面的影响相对较小。因此,本文采用 ERA5 100 m 高度层风速作为研究风能资源要素日变化特性的风速资料。研究表明,ERA5 地面辐射和地面太阳辐射评估效果在不同时间尺度上均较好<sup>[16]</sup>,且在中国地区均有较好的适用性。为探究风光日变化互补特性,所有数据均选用小时值,时间选取范围为 1991—2020 年。

### 1.2 方法

为了探究湖北省风光互补特性,基于 BELUCO

等提出的无量化指数(Beluco 指数)<sup>[17]</sup>和 LI 等人提出的 CIWS 指数<sup>[14]</sup>,构建新的风能太阳能互补特性指数, Beluco-CIWS 指数。基于 Beluco 指数中的资源总量分量  $K_e$ 、Gilberto 改进后的波幅分量  $K_a$ ,并以 LI 提出的无量纲化互补指数 CIWS 作为时间相位差分量  $K_i$ ,相乘综合得到风光互补指数  $K$ ,称为 Beluco-CIWS 互补指数,以下简称  $K$  指数。其计算方法如下:

$$K = K_i K_e K_a \quad (1)$$

由公式(1)可知,该指数由 3 个分量决定,其中  $K_i$  代表相位差的分量,  $K_e$  代表总量(均值)差异的分量,  $K_a$  代表波幅差异的分量。

(1) 相位差分量  $K_i$  的计算。需要通过两次归一化,第一次是为了消除日均值差异,计算如下:

$$W_{m1} = \frac{W_i - \bar{W}}{\bar{W}}, \quad S_{m1} = \frac{S_i - \bar{S}}{\bar{S}} \quad (2)$$

第二次归一化的计算如下,目的是为了消除波幅差异:

$$W_{m2} = \frac{W_{m1}}{W_m}, \quad S_{m2} = \frac{S_{m1}}{S_m} \quad (3)$$

其中,  $W_m$ 、 $S_m$  分别为样本第一次正则化后绝对值的最大取值,即:

$$W_m = \max\{|w_{m1}|\}_{i=1, \dots, n}, \quad S_m = \max\{|s_{m1}|\}_{i=1, \dots, n} \quad (4)$$

最终得到风光两条曲线所围成的中间面积即风光互补指标的相位差分量  $K_i$ ,该分量排除资源总量、波幅的影响。

(2) 资源总量分量  $K_e$  的计算。公式如下:

$$K_e = 1 - \sqrt{\left(\frac{E_w - E_s}{E_w + E_s}\right)^2} \quad (5)$$

其中,  $E_w$ 、 $E_s$  分别是风能、太阳能的日均值,其含义与风光的日总量相通。量总量值越接近,  $K_e$  越接近于 1。差距越大,约接近 0。

(3) 波幅分量  $K_a$  的计算。其公式为:

$$K_a = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{(\delta_w - \delta_s)^2}{(1 - \delta_s)^2} \right] \left\{ 1 - \tanh[2^8 (\delta_w - \delta_s)] \right\} + \frac{1}{2} \left[ \frac{(1 - \delta_s)^2}{(1 - \delta_s)^2 + (\delta_w + \delta_s)^2} \right] \left\{ 1 + \tanh[2^8 (\delta_w - \delta_s)] \right\} \quad (6)$$

其中

$$\delta_w = 1 + w_m, \quad \delta_s = 1 + s_m \quad (7)$$

$W_m$ 、 $S_m$  为上述第二次归一化中的除数:  $W_m = \max\{|w_{m1}|\}_{i=1, \dots, n}$ ,  $S_m = \max\{|s_{m1}|\}_{i=1, \dots, n}$ 。两波幅值越接近,  $K_a$  越接近于 1。差距越大,越接近于 0。

为考虑实际意义,适当减少资源总量和波幅对最终互补指数的影响,现将  $K_e$  和  $K_a$  都进行如下公式

转化( $x$ 是原始的 $K_e$ 或 $K_a$ 值, $y$ 是转换后值),下式为调整函数:

$$y=0.179(e^{3.75(x-0.8)}-1)+0.8 \quad (8)$$

当原始资源或波幅分量趋近于0时,转换后分量趋近0.63,即 $K_e$ 和 $K_a$ 两分量至多叠加在总指标上的影响:63%×63%≈40%。通过这种调整使资源总量和波幅对互补指数的影响相对减少,而相位差对指数的影响最大。综合来讲, $K$ 值越大,互补特性越好; $K$ 值越小,互补特性越差。

## 2 结果与分析

本节首先分析湖北省风速、地面太阳辐射日变化特征,其次基于 $K$ 指数的空间分布,分别从年和季节的角度分析风光资源要素日变化在空间上的互补特性,最终根据选定的互补性强弱区域,探究互补性强弱差异造成的原因。

### 2.1 风光资源日变化特征

如图1(a)、2(b)所示,给出逐小时的100 m风速和地面太阳辐射的空间分布,湖北省100 m高度风速总体呈现中部风速高、东西部风速低,西部地区风速整体低于东部地区的分布特征。中部地区风速最高可达 $5.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,位于荆州南部地区;西部地区恩施、神农架和宜昌西北部风速较低。地面太阳辐射呈现北部辐射高、南部辐射低的分布特征,辐射

值最高区域在随州、襄阳北部和孝感西北部,小时辐射量超过 $0.56 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ,辐射值最低区域位于恩施南部,小时风速低于 $0.44 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

风速、地面太阳辐射的日变化时间序列可以看到(图2),湖北省风速呈现白天风速高(07—19时)、夜间(00—06时和20—23时)风速低的日变化特征,地面太阳辐射从07时开始增大,13时达到最大,其后开始减小,夜间辐射为0,呈现“单峰”特性。

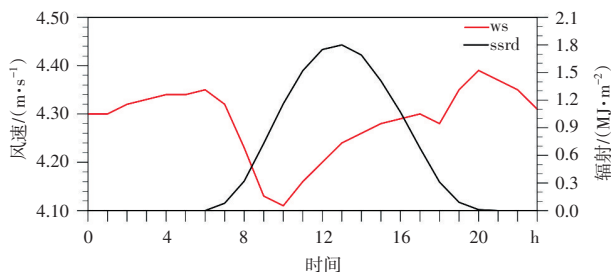


图2 100 m风速和地面太阳辐射的时间序列  
(红实线为风速,黑实线为辐射)

综合风速、地面太阳辐射的时空分布可以发现,在空间尺度上,湖北省中部平原南部地区风速相对较高、北部相对较低,而地面太阳辐射在北部地区相对较高、南部较低,在空间上有一定的互补性;东部地区风速相对较低,地面太阳辐射值对整个湖北省而言处于中等水平,一定程度上存在互补性;西部地区风速和地面太阳辐射整体均较低,鄂西北风速和地面太阳辐射都处于中等水平,在空间上互补性较差。在时间尺度上,湖北省白天风速低、地面太阳辐射较高,夜间风速高、地面太阳辐射为零,风光资源要素大体上具有相反的变化趋势,在时间尺度上有一定的互补性。可见,湖北省风光资源要素在时空尺度上均有一定的互补性。

### 2.2 $K$ 指数空间分布

$K$ 指数不但能很好地刻画风光资源互补特性,还较好的融合风光资源稳定性和资源保供能力,更融合风光要素曲线变化趋势的相关性特性。图3给出湖北省1991—2020年 $K$ 指数年平均的空间分布。可以看到,鄂西北西部存在一个 $K$ 指数低值中心,普遍低于0.115,此外,鄂西南、鄂东南和鄂东北部分地区 $K$ 指数相对较小,在0.115~0.125之间,互补性较弱;鄂西西北部、鄂西北北部和中东部区域互补指数相对较大,整体均高于0.125,互补性较强。 $K$ 指数的空间分布较好的体现中东部地区风光资源要

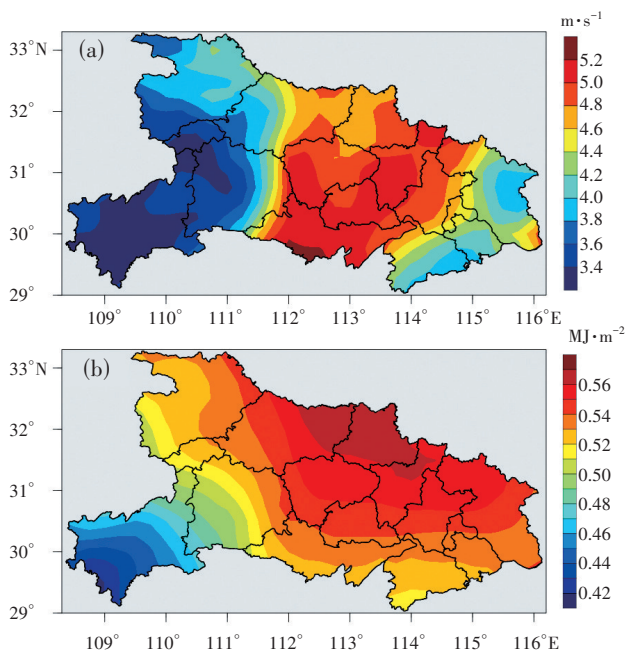


图1 100 m风速和地面太阳辐射的气候态  
(a)风速;(b)辐射



素互补性较强(北部部分区域除外),西部风光资源要素互补特性较弱。

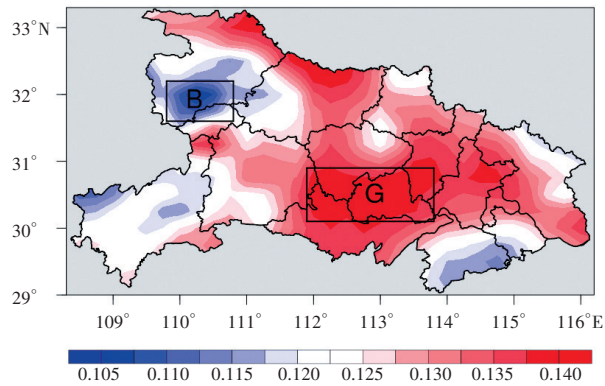


图3  $K$  指数的空间分布  
(B为低值区,G为高值区)

进一步基于 $K$ 指数探究各季节风光资源互补特性的差异性,图4给出 $K$ 指数在春、夏、秋、冬各季节的空间分布。春季,西部地区 $K$ 指数均较小,中东部较大,鄂西北部 $K$ 指数较大,鄂东北部和西北部、鄂东南南部 $K$ 值较小;夏季,西部地区分为两个小的 $K$ 指数低值区,鄂东北部和鄂西南南部 $K$ 指数略微增大,其它区域 $K$ 指数较大;秋季,西部地区、鄂东南和鄂东北 $K$ 指数均增大,低值区域范围减小,而大值区域均扩大,且数值明显增大;冬季,西部低值区整体扩大,中东部区域 $K$ 指数大值区范围减小但 $K$ 指数数值增大。

从 $K$ 指数的季节变化来看,秋季 $K$ 指数整体较大,仅西部部分区域和鄂东南南部存在小值区,江汉平原 $K$ 指数整体较大,普遍高于0.14;冬春季西部

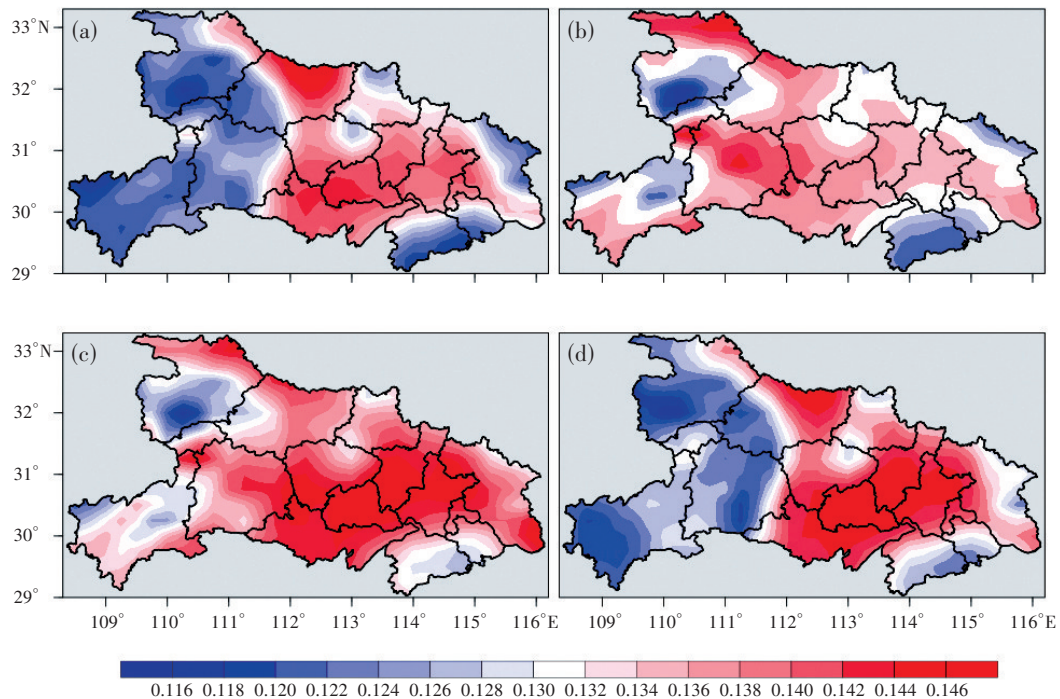


图4  $K$  指数季节平均的空间分布  
(a)春季;(b)夏季;(c)秋季;(d)冬季

$K$ 指数低值区较大,冬季江汉平原 $K$ 指数大于春季;夏季 $K$ 指数均不大。整体而言,秋季风光资源要素互补性较强,其次是冬季,春季江汉平原互补性强于夏季,夏季西部互补性强于春季。

### 2.3 互补强弱差异性分析

为探究风光资源要素互补性强弱差异区域的风速和地面太阳辐射的日变化特征,选取图3所示的鄂西北 $K$ 指数低值区(B)和江汉平原 $K$ 指数高值

区(G)。图5给出这两个区域年平均的风速和地面太阳辐射的日变化时间序列。互补性强的区域,风速先减后增,白天小、夜间大,与地面太阳辐射呈现相反的变化趋势,地面太阳辐射为零时风速较大;互补性弱的区域,风速先增后减、白天大、夜间小,与地面太阳辐射变化趋势相似,风速最大值出现在16时附近,地面太阳辐射最大值出现在13时附近,两者峰值存在约3 h的相位差。

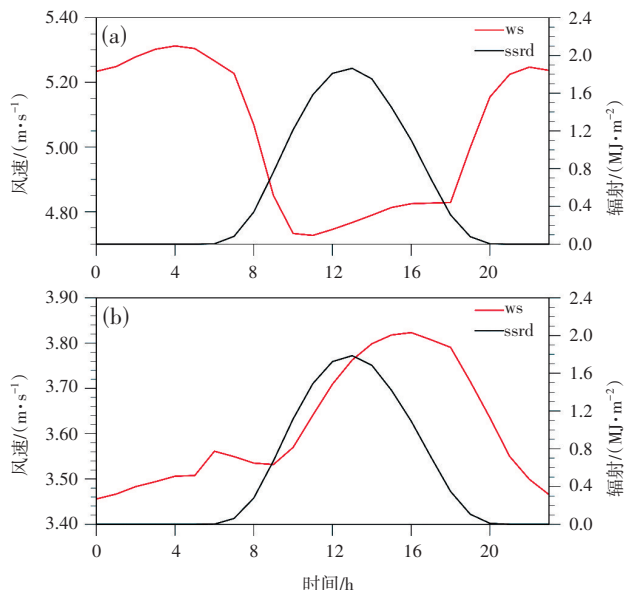


图5 区域年平均风光资源时间序列

(a)互补性强;(b)互补性弱

地面太阳辐射均呈现一致的“单峰”特征,但风速在不同季节的日变化特征差异较大。互补性强的区域,白天风速小、太阳辐射强,夜间风速大、地面太阳辐射弱,能较好的互补;数值上,春季平均风速最大,冬季次之,夏季最小。互补性弱的区域,各季节差异较大,春季风速00—09时基本保持不变,随后先增后减;夏季和秋季风速先增后减,冬季风速先减后增,各季节白天风速大、太阳辐射强,夜间风速大、太阳辐射弱,无法形成互补。互补性强的区域主要位于风速较大的区域,互补性弱的区域主要位于风速较小的区域,风光资源要素日变化互补性的强弱主要取决于风速大小及日变化是否符合白天风速小、夜间风速大的特征。

如表1所示,从互补性强弱区域风光年平均和季节平均的互补指数可以看出,互补性弱的区域 $K$ 指数年平均为0.112,春季最高为0.119,冬季0.115次之,夏季最低为0.101,秋季为0.111。 $K$ 指数能较好体现湖北省风光资源要素互补特性,互补性较强区域 $K$ 指数较高,大于0.14,而互补性较弱的区域 $K$ 指数越低。

表1 互补性强弱区域年平均和季节平均风光的 $K$ 指数

指标	$K$ 指数	
	互补性强(G)	互补性弱(B)
年平均	0.138	0.112
春季	0.141	0.119
夏季	0.135	0.101
秋季	0.137	0.111
冬季	0.142	0.115

### 3 结论与讨论

基于ERA5再分析资料和湖北省1991—2020年100 m高度风速和地面太阳辐射小时数据,通过 $K$ 指数探究湖北省风光资源要素日变化的互补特性,取得主要结论如下:

(1)湖北省风光资源要素在时空尺度上均有一定的互补性。湖北中东部互补特性较强,西部互补特性较差。随着海拔升高,互补特性减弱,海拔越低,互补特性越强。秋季互补特性较强,其次是冬季,夏季互补特性最弱,风能资源丰富的地区互补性强,风能资源贫乏的地区互补性较弱。在决定风光资源互补特性强弱的因素上,风能资源贡献要高于太阳能资源。

(2) $K$ 指数展示湖北省风光资源要素日变化的互补特性,即中东部地区风光资源要素互补性较强,西部风光资源要素互补特性较弱。秋季 $K$ 指数整体较大,冬春季西部 $K$ 指数低值区的范围较大,冬季江汉平原 $K$ 指数大于春季;夏季 $K$ 指数均不大。整体而言,秋季风光资源互补性较强,其次是冬季,春季江汉平原互补性强于夏季,夏季西部互补性强于春季。

(3)互补性强的区域风速主要呈现先减后增、白天风速小夜间风速大的日变化特征,互补性弱的区域主要呈现先增后减、白天风速大夜间风速小的日变化特征。此外,互补性强的区域整体风速要大于互补性弱的区域,即互补性强的区域主要位于风能资源较为丰富的区域,而互补性较弱的区域主要位于风能资源较为贫乏的区域。风光资源日变化互补性的强弱主要取决于风能资源强弱及日变化特征是否符合白天风速小、夜间风速大的日变化特征。

本文采用ERA5再分析资料从气候的角度分析湖北省风光资源要素日变化的互补特性,主要由于其资料时间跨度广,后续的研究需要利用不同来源的再分析资料以及观测数据对本文的结果进行验证。此外,本文主要从日变化的角度分析湖北省风光资源要素的互补性,而未考虑月、季、年尺度的风光资源要素的互补特征,因此,未来进一步针对不同时间尺度风光资源要素的互补特性开展研究工作。

#### 参考文献:

- [1] 杨尚骏. 风光互补发电系统控制策略与容量配置研究[D]. 安徽:安徽理工大学, 2023.
- [2] 李斌喜,何如,周绍毅,等. 玉林大容山地区风能资源分

- 析评估[J]. 气象研究与应用, 2014, 35(4): 53-66.
- [3] 程海花, 寇宇, 周琳, 等. 面向清洁能源消纳的流域型风光水多能互补基地协同优化调度模式与机制[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 61-70.
- [4] 闻昕, 孙圆亮, 谭乔凤, 等. 考虑预测不确定性的风-光-水多能互补系统调度风险和效益分析[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(3): 32-41.
- [5] 钟利华, 刘世学, 袁丽军, 等. 广西电网灾害性天气短信预警发布系统及应用[J]. 气象研究与应用, 2014, 35(3): 58-60, 74.
- [6] 张明, 杜裕, 洪国平. LSTM在宜昌短期电力负荷预测中的试验应用[J]. 气象研究与应用, 2019, 40(3): 72-77, 97.
- [7] 刘永前, 王函, 韩爽, 等. 考虑风光出力波动性的实时互补性评价方法[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3211-3218.
- [8] 朱燕梅, 陈仕军, 黄炜斌, 等. 风光水互补发电系统送出能力分析[J]. 水力发电, 2018, 44(12): 100-104.
- [9] KELLOGG W D, NEHRIR M H, VENKATARAMANAN G, et al. Generation unit sizing and cost analysis for stand-alone wind, photovoltaic, and hybrid wind/PV systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1998, 13(1): 70-75.
- [10] TGANI I, ABOUBOU A, AYAD M Y, et al. Optimal sizing design and energy management of stand-alone photovoltaic/wind generator systems[J]. Energy Procedia, 2014: 163-70.
- [11] 方琼玉, 谭佳勇, 丁美花, 等. 基于气候学方法的太阳能资源估算研究概述[J]. 气象研究与应用, 2023, 44(2): 87-91.
- [12] ZAPPA W, BROEK M V D. Analysing the potential of integrating wind and solar power in Europe using spatial optimisation under various scenarios [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018: 1192-1216.
- [13] CAO Y J, ZHANG Y, ZHANG H X, et al. Complementarity assessment of wind-solar energy sources in Shandong province based on NASA [J]. The Journal of Engineering, 2019: 4996-5000.
- [14] LI, W, STADLER, S, RAMAKUMAR, R. Modeling and assessment of wind and insolation resources with a focus on their complementary nature: A case study of Oklahoma. Annals of the Association of American Geographers, 2011, 717 - 729.
- [15] 王捷儒, 姚锦烽, 朴哲勇, 等. 吉林西部风能太阳能资源互补特性研究[J]. 高原气象, 2022, 41(4): 1086-1095.
- [16] 黄晴, 梁维亮, 黄荣. 风廓线雷达产品与ERA5再分析资料的对比分析[J]. 气象研究与应用, 2021, 42(4): 83-88.
- [17] BELUCO, A, SOUZA P K D, KRENZINGER A. A dimensionless index evaluating the time complementarity between solar and hydraulic energies, Renewable Energy, 2008: 2157-2165.

## Complementary characteristics of diurnal variation of wind and solar resources in Hubei province based on Beluco–CIWS index

WANG Ming<sup>1,2</sup>, CHENG Chi<sup>1\*</sup>, MENG Dan<sup>1</sup>, CHEN Zhenghong<sup>1</sup>, WANG Jieru<sup>3</sup>

(1. Hubei Meteorological Service Center, Wuhan 430205, China; 2. Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430205, China; 3. Public Meteorological Service Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Using the 100 m wind speed and surface solar radiation data of ERA5 from 1991 to 2020, the complementary characteristics of diurnal changes in wind and solar resource elements in Hubei Province were analyzed based on the Beluco–CIWS complementarity index. The results show that: (1) the central and eastern parts of Hubei province have more strong complementarity, while the western part has poor complementarity; the higher the altitude, the weaker the complementarity, and the lower the altitude, the stronger the complementarity; the complementarity is stronger in autumn, followed by winter, and the weakest in summer; areas with higher wind speeds have strong complementarity, while areas with low wind speeds have weak complementarity; (2) the wind speeds in areas with strong complementarity show the characteristics of diurnal changes of decreasing and then increasing, with small wind speeds during the day and large wind speeds at night, and the opposite is true for the region with weak complementarity; the strength of complementarity depends on the strength of the wind speed and whether the diurnal variation characteristics are abnormal or not.

**Keywords:** Beluco–CIWS complementarity index; wind and solar resources; complementary characteristics; diurnal variation