

文章编号: 2096-1618(2024)06-0727-06

1970–2015年云南近地面年平均风速时空变化特征

陶剑宁¹, 华维^{1,2,3}, 马文通⁴

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225; 2. 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 3. 四川省气象灾害预测预警工程实验室, 四川 成都 610225; 4. 哈电风能有限公司, 湖南 湘潭 411102)

摘要:为深入探究云南地区风资源分布情况,采用CN05高分辨率格点风速观测资料和ERA5大气再分析格点资料,并使用经验正交分解、小波分析和回归分析等统计分析方法对该地区1970–2015年近地面风速时空变化进行分析。结果表明,1970–2015年云南省气近地面年平均风速为2.17 m/s,并以横断山脉为界,呈现东高西低的反向分布特征。近46 a以来,云南近地面10 m风速总体呈现下降趋势,风速倾向率为 $-0.013 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,且同样存在东西部反向变化的特征。进一步分析发现,云南近地面10 m风速的下降主要与大于3 m/s风速减少有关。此外,对影响云南近地面风速年际变化特征的环流因子进行分析后发现,云南近地面风速年际变化与大西洋年代际振荡(AMO)呈现显著的负相关关系,即AMO处于冷位相时,云南近地面风速显著下降,而当AMO处于暖位相时,云南近地面风速则有所上升。

关键词:气象学; 云南地区; 近地面10 m风速; 时空特征

中图分类号: P425

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2024.06.012

0 引言

随着全球气温持续增暖,导致从区域到半球尺度,乃至全球范围内气候发生显著变化,并导致风速、降水和气温等诸多气象要素明显改变^[1]。风速作为大气环流的重要表现形式,其异常既可形成静风污染天气,也可诱发致灾性强风,并对工农业生产和公众生产生活造成严重影响。相较于高空风速,近地面风速的影响更明显,大气污染物扩散^[2]、沙尘天气^[3]、地面蒸发^[4]均与近地面风速的变化存在密切联系。与此同时,风能作为一种可再生能源,对其进行大规模开发是目前“双碳”目标下化石燃料的最佳替代能源^[5]。在风能资源的开发利用过程中,对近地面风速进行分析和评估以获得当地风能资源的可开发性等信尤为重。已有研究^[6]指出,近地面风速每下降1%~5%,可导致风能损失1.7%~8.6%。因此,开展近地面风速的时空变化特征分析十分必要。

不少学者对不同区域近地面风速的时空特征进行研究,取得了许多极具价值的研究成果。Deng等^[7]利用再分析资料和国际耦合模式比较计划模拟结果分析了过去几十年来全球近地面10 m风速的变化特征及

影响因子,并发现全球近地面10 m风速呈明显的南北半球非对称分布,具体表现为南半球和海洋表面风速增加,北半球和陆地风速降低。Li等^[8]利用ERA5再分析资料和气象台站资料分析了1979–2019年中国近地面10 m风速的时空变化特征及可能原因,发现中国近地面10 m风速呈显著下降趋势,尤其在1979–1996年下降最为明显。王楠等^[9]基于中国578个台站日平均风速资料分析了20世纪80年代以来中国近地面10 m风速和可利用风能资源量的长期变化趋势和突变特征。此外,一些学者还分别对中国东北^[10]、西北^[11]、华北^[12]和西南地区^[13]的近地面风速变化特征进行了分析。此外,也有分析指出中国近地面10 m风速还存在明显的季节差异^[14]。

近年来,随着中国陆地风能资源丰富区风能资源开发已接近尾声,加之风力发电机技术的快速发展,风电企业已陆续开展对风能资源中等丰富区乃至贫乏区的开发利用。云南地处中国西南,境内地形地貌和天气气候十分复杂。已有研究发现,云南风能资源相对贫乏,但仍具备一定开发价值^[14]。因此,为深入了解云南省风资源分布,有必要对该地区近地面10 m风速的时空变化特征进行分析。基于此,本文采用CN05高分辨率格点风速资料和ERA5大气再分析资料对1970–2015年云南近地面年平均风速的时空变化特征进行分析,以期期为合理开发云南风能资源提供一定参考。

收稿日期: 2023-05-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42275022); 第二次青藏高原综合科学考察研究资助项目(2019QZKK010203)

通信作者: 华维. huawei@cuit.edu.cn

1 资料和方法

1.1 资料

近地面逐日 10 m 风速资料来自吴佳等^[15]研发的 CN05.1 格点气候数据集,该资料由中国境内 2416 个气象台站近地面 10 m 风速观测资料经距平逼近插值法得到,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。大气环流再分析资料采用欧洲中期天气预报中心提供的 ERA5 逐日再分析资料,所用变量包括近地面气温和近地面气压,该资料水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。大气环流指数选取美国国家大气研究中心提供的北大西洋年代际振荡 (Atlantic multidecadal oscillation, AMO) 指数和太平洋年代际振荡 (Pacific decadal oscillation, PDO) 指数,以及国家气候中心提供的欧亚纬向环流 (Eurasian zonal circulation, EZC) 指数。

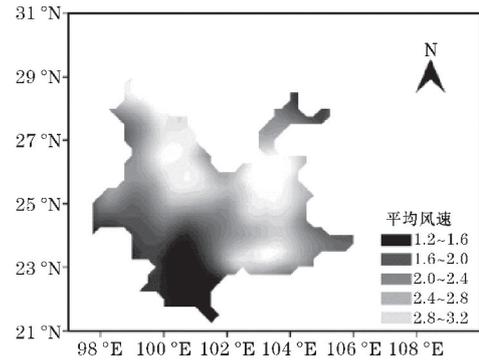
1.2 方法

采用经验正交函数分解 (empirical orthogonal function, EOF) 方法对 1970–2015 年云南省近地面年平均 10 m 风速的时空变化特征进行分析。采用小波分析方法分析云南近地面年平均 10 m 风速的周期特征。采用双参数威布尔拟合曲线分析云南近地面年平均 10 m 风速的概率分布特征。利用线性相关方法分析云南省年平均近地面 10 m 风速与大尺度大气环流指数之间的联系。

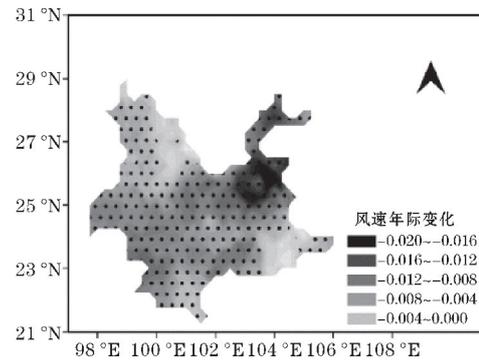
2 云南近地面风速时空变化特征

2.1 云南年平均近地面 10 m 风速的基本空间分布

图 1 为 1970–2015 年云南地区近地面年平均 10 m 风速的基本特征和线性趋势系数空间分布。由图 1(a) 可以发现,云南地区年平均近地面 10 m 风速为 2.17 m/s,其空间分布主要以苍山和哀牢山为界,以西地区近地面 10 m 风速相对较低,而分界线以东地区风速则相对较大,其中滇中和滇东地区是云南年平均地面 10 m 风速的大值中心。图 1(b) 为云南近地面年平均 10 m 风速的线性趋势空间分布图。由图 1 可知,近 46 a 以来,云南地区近地面年平均 10 m 风速整体处于较显著的下降趋势,尤其是年平均风速较大的地区,下降趋势更明显,该结果与 Wang 等^[16]的研究较相似。



(a) 风速空间分布



(b) 风速年际变化空间分布

图 1 云南年平均近地面 10 m 风速的空间分布和线性趋势系数空间分布 (打点区域代表通过 0.05 的显著性水平检验)

2.2 云南年平均近地面 10 m 风速的空间异常特征

为分析云南地区近地面 10 m 风场的空间异常特征,对近 46 a 近地面 10 m 风场进行 EOF 分解。表 1 为 EOF 分解的前 10 个模态方差贡献及累积方差贡献。由表 1 可知,前 3 个模态累积方差贡献为 92.5%,均通过 North 检验,尤其前两个模态累积方差贡献率达到 89.6%,能够较好地解释云南近地面年平均 10 m 风速的空间溢出特征。

表 1 EOF 前 10 个模态方差贡献及累积的贡献率 单位:%

序号	方差贡献率	累积方差贡献率
1	55.0	55.0
2	34.6	89.6
3	2.9	92.5
4	1.2	93.7
5	1.1	94.8
6	0.8	95.6
7	0.7	96.3
8	0.6	96.9
9	0.5	97.4
10	0.3	97.7

图 2 为云南近地面年平均 10 m 风场前两个模态空间分布。第一模态 (图 2a) 方差贡献率为 55%,是云南地区近地面年平均 10 m 风速的主要模态,其空间场

为较一致的正值分布,表明云南地区近地面年平均 10 m 风速具有较强的一致性变化特征,即近 46 a 以来近地面风速呈一致增强或减弱的风速趋势。此外,第一模态特征向量空间分布还存在自东向西递减的特征,其正值中心位于云南东北部,这表明该地区近地面年平均 10 m 风速变化相对其他地区更明显,而低值区则主要分布于云南西部和南部等地区。EOF 第二模态(图 2b)方差贡献率也达到了 34.6%,同样为云南地区近地面年平均 10 m 风速主要模态,其空间场主要表现出大致以横断山脉为界、东北—西南向反相变化的分布特征,这表明 1970-2015 年,云南东北部和西南部近地面年平均 10 m 风速的变化受不同的影响因子作用。

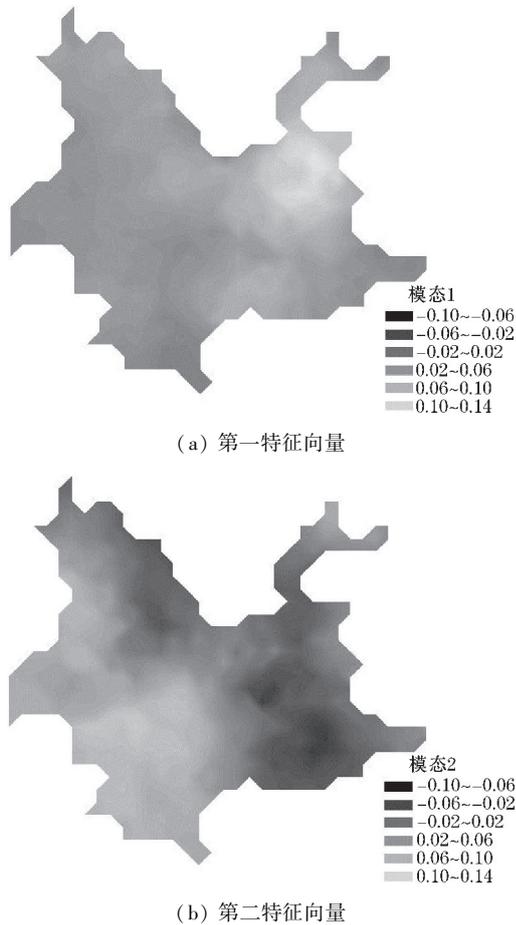


图 2 云南年平均近地面 10 m 风速的 EOF 第一和第二模态空间场分布

2.3 云南年平均近地面 10 m 风速的时间变化特征

图 3 为 1970-2015 年区域平均的云南近地面年平均 10 m 风速曲线。由图 3 可见,云南近地面年平均 10 m 风速既存在较为明显的年际变化特征,也存在较为显著的减弱趋势,其线性趋势达到 $-0.013 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,气候平均值为 2.17 m/s ,其中 20 世纪 70-80 年代地面风速呈波动减弱特征,自 20 世纪年代开始迅速减弱,进入 21 世纪后,地面风速总体趋

势变化并不明显,但仍存在较明显的年际波动。

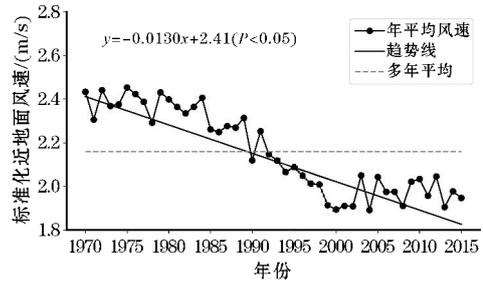
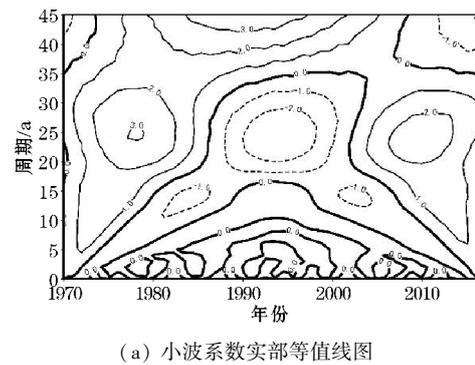
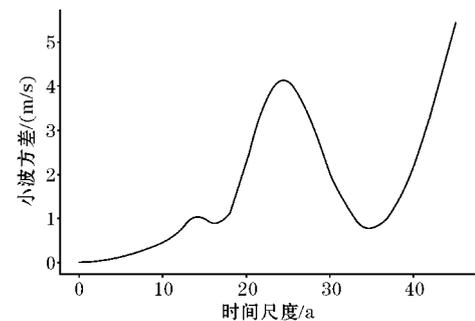


图 3 1970-2015 年区域平均的云南近地面年平均 10 m 风速曲线

图 4 为 1970-2015 年云南年平均近地面 10 m 风速小波分析结果。由图 4(a) 小波系数实部图可知,近 4 a 云南年平均近地面 10 m 风速在 8 ~ 16 a 和 16 ~ 32 a 的时间尺度上存在两个明显的周期。对于 8 ~ 16 a 的周期,地面风速的强、弱期交替出现,即 20 世纪 70 年代风速偏强,80 年代偏弱,80 年代末至 90 年代中期恢复增强,之后风速又呈偏弱趋势。在 16 ~ 32 a 的长周期中,20 世纪 70-80 年代中期风速偏强,20 世纪 90 年代至 21 世纪初期风速偏弱,之后风速呈偏强趋势。图 4(b) 为云南年平均近地面 10 m 风速小波方差图,可以发现,云南年平均近地面 10 m 风速存在两个明显的主周期,分别对应 12 a 和 24 a 的时间尺度,其中小波方程最大峰值对应 24 a 的时间尺度,表明该周期是云南年平均近地面 10 m 风速的第一主周期;12 a 对应小波方程第二峰值,是云南年平均近地面 10 m 风速变化的第二主周期。



(a) 小波系数实部等值线图



(b) 小波方差图

图 4 1970-2015 年云南年平均近地面 10 m 风速小波系数实部和小波方差图

2.4 云南年平均近地面 10 m 风速分布概率的年代际差异

近地面风速的变化由不同风速段的变化导致^[17]。因此,对不同风速段的风速进行研究有助于了解近地面风速变化的详细特征。进一步按不同年代将 1970-2015 年云南年平均近地面 10 m 风速时间序列分为 1970-1979、1980-1989、1990-1999、2000-2009 和 2010-2015 五部分,使用双参数威布尔分布函数对各年代不同风速段概率分布进行拟合(图 5)。由图 5 可以发现,各年代年平均近地面 10 m 风速在 1~3 m/s 出现概率最大,尤其以 1.5 m/s 左右风速出现概率最大,而 >3 m/s 的风速随着风速的增大,其出现概率不断减小。此外,由图 5 还可发现,自 1970 年以来, <3 m/s 的风速段出现概率不断增大,而 >3 m/s 的风速段出现概率则不断降低。因此,近几十年来云南年平均近地面 10 m 风速减弱主要由 >3 m/s 的风速不断减弱造成。

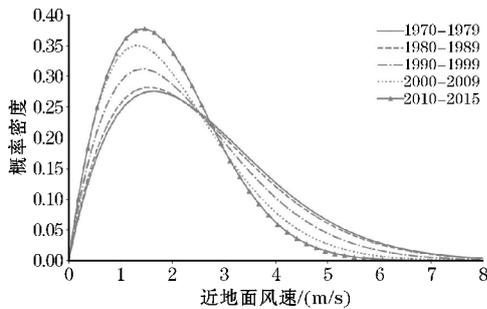


图 5 1970-2015 年云南年平均近地面 10 m 风速的威布尔拟合曲线

3 大气环流对云南年平均近地面 10 m 风速的影响

大气环流是导致近地面风速发展变化的重要因子

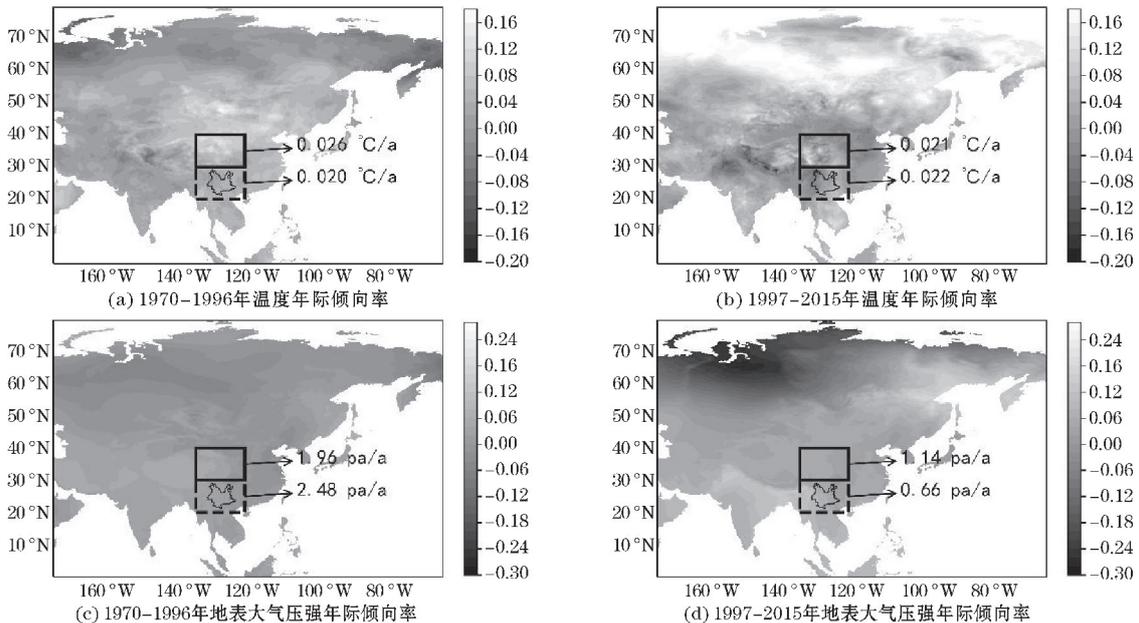


图 7 1970-1996 年和 1997-2015 年云南及以北地区地面温度和地面气压变化趋势

之一^[18]。表 2 为 AMO、PDO 和 EZC 与云南年平均地面 10 m 风速的相关系数。从表 2 可以发现,在环流指数中,AMO 与云南年平均近地面 10 m 风速呈显著的负相关关系,而 PDO 和 EZC 与地面风速的相关关系均未通过显著性水平检验。

表 2 不同环流指数与云南年平均近地面 10 m 风速相关系数

环流指数	AMO	PDO	EZC
相关系数	-0.73	0.14	-0.17

图 6 为 1970-2015 年 AMO 指数变化曲线,由图 6 可知,近几十年来 AMO 指数呈年代际增强趋势,其中 1970-1996 年以冷位相为主,1997-2016 年则以暖位相为主。这也表明,当 AMO 处于冷位相期间,云南近地面年平均 10 m 风速呈下降趋势较大,而当 AMO 处于暖位相时,近地面风速下降趋势则有所减缓。

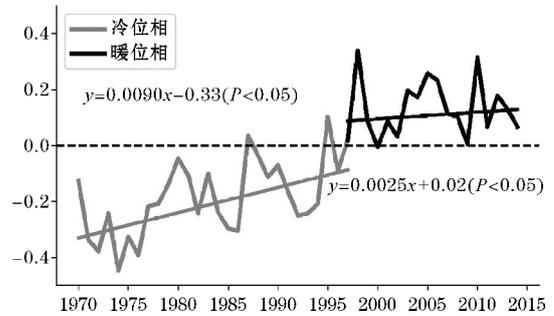


图 6 1970-2015 年 AMO 指数时间序列

水平气压梯度力是影响大气运动的关键因素和驱动力,而水平温度梯度则是导致水平气压梯度力变化的主要因素^[19]。为进一步理解 AMO 对云南近地面风速的影响过程,对比分析了 AMO 冷、暖位相时段云南及周边地区地面温度和地面气压变化趋势(图 7)。在

AMO冷位相期间,云南地区地表温度线性倾向率为 $0.20\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,而其北部地区地表温度线性倾向率达到 $0.26\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ (图7a)。由于纬向方向上形成的非均匀增暖可导致地面气压产生非均匀变化,因此将减小云南及其以北地区的近地面气压梯度(图7c),进而导致近地面风速减弱。对于AMO暖位相期间,云南及其以北地区近地面温度线性倾向率差异相对较小,对应的地面气压年际变化呈高纬强、低纬弱的特征,有利于增大南北方向上的气压梯度,从而减缓了云南地区近地面风速的减弱趋势。

4 结论

基于CN05.1高分辨率格点地面10 m风速资料和ERA5再分析资料,采用EOF、相关分析和小波分析等统计方法,对1970-2015年云南省近地面年平均10 m风速的时空变化特征进行分析,得到结论如下:

(1) 云南年平均近地面10 m风速的气候态空间分布主要表现为大致以苍山和哀牢山为界,以西地区地面风速相对较低,而以东地区地面风速相对较大的特征。近地面10 m风速的EOF第一模态以全区一致型变化为主,第二模态则表现出东、西部反向变化的趋势。近46 a来,云南近地面年平均10 m风速存在明显的年际变化和年代际减弱趋势,其线性倾向率达到 $-0.013\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$,且存在12 a和24 a的周期变化特征。

(2) 云南地区年平均近地面10 m风速在 $1\sim 3\text{ m/s}$ 内出现概率最大,尤其以 1.5 m/s 左右风速出现概率最大。近几十年来云南年平均近地面10 m风速减弱主要与 $>3\text{ m/s}$ 的风速出现概率不断降低有关,1970年以来, $<3\text{ m/s}$ 的风速出现概率不断增大,而大于 3 m/s 的风速出现概率则不断降低。

(3) 云南年平均近地面10 m风速与AMO之间存在显著的负相关关系。当AMO位于负位相期间,云南与以北地区的经向气压梯度不断减小,引起高、低纬间的风速不断减小,而AMO处于正位相时,云南与以北地区的气压梯度减小的趋势趋于减弱,有利于降低云南地区近地面风速的显著下降趋势。

致谢:感谢中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司科研项目(CD2D20221981)、成都信息工程大学科技创新能力提升计划项目(KYQN202202)对本文的资助

参考文献:

[1] 孔锋,孙劲,王鹏,等. 1961-2018年中国风速均值和极端值的时空演变特征[J]. 灾害学,2021,36(2):89-96.

- [2] McVicar T R, Roderick M L, Donohue R J, et al. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 416:182-205.
- [3] Gao T, Han J, Wang Y, et al. Impacts of climate abnormality on remarkable dust storm increase of the Hunshdak Sandy Lands in northern China during 2001-2008 [J]. *Meteorological Applications*, 2012, 19(3):265-278.
- [4] Rayner D P. Wind run changes: the dominant factor affecting pan evaporation trends in Australia [J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(14):3379-3394.
- [5] Zhang Z, Wang K, Chen D, et al. Increase in surface friction dominates the observed surface wind speed decline during 1973 - 2014 in the Northern Hemisphere lands [J]. *Journal of Climate*, 2019, 32(21):7421-7435.
- [6] Lyddon C E, Brown J M, Leonardi N, et al. Increased coastal wave hazard generated by differential wind and wave direction in hyper-tidal estuaries [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 220:131-141.
- [7] Deng H, Hua W, and Fan G. Evaluation and projection of near-surface wind speed over China based on CMIP6 models [J]. *Atmosphere*, 2021, 12(8):1062.
- [8] Li X, Pan Y, Jiang Y. The analysis of the spatio-temporal variations and mechanisms for the near-surface wind speed over China in the last 40 years [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2022, 148(3):1163-1180.
- [9] 王楠,游庆龙,刘菊菊. 1979-2014年中国地面风速的长期变化趋势[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(7):1531-1542.
- [10] 杨雪艳,田广元,常义. 近40年中国东北地区平均风速的气候变化特征分析[J]. *吉林气象*, 2009, 25(2):2-4.
- [11] 罗万琦,崔宁博,张青雯,等. 中国西北地区近50a气象因子时空变化特征与成因分析[J]. *中国农村水利水电*, 2018, 13(9):12-19.
- [12] 刘苏峡,邱建秀,莫兴国. 华北平原1951年至2006年风速变化特征分析[J]. *资源科学*, 2009, 31(9):1486-1492.
- [13] 周正斌,张艺丹,罗坤,等. 基于高分辨率再分析资料的西南地区风资源特征分析[J]. *成都*

- 信息工程大学学报,2023,38(1):75-82.
- [14] 张志斌,杨莹,张小平,等. 我国西南地区风速变化及其影响因素[J]. 生态学报,2014,34(2):471-481.
- [15] 吴佳,高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J]. 地球物理学报,2013,56(4):1102-1111.
- [16] Wang R, Liu B, Li H, et al. Variation of strong dust storm events in Northern China during 1978 - 2007[J]. Atmospheric Research,2017,183:166-172.
- [17] Zha J, Zhao D, Wu J. Terrestrial near-surface wind speed variations in China: Research progress and prospects[J]. Journal of Meteorological Research,2021,35:537-556.
- [18] Wang J, Yang B A O, Ljungqvist F C. The relationship between the Atlantic Multidecadal Oscillation and temperature variability in China during the last millennium [J]. Journal of Quaternary Science,2013,28(7):653-658.
- [19] Sterk H A M, Steeneveld G J, and Vihma T. Clear-sky stable boundary layers with low winds over snow-covered surfaces. Part 1: WRF model evaluation[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,2015,141(691):2165-2184.

Spatial and Temporal Characteristics of Near-Surface Annual Average Wind Speed Variation in Yunnan during 1970-2015

TAO Jianning¹, HUA Wei^{1,2,3}, MA Wentong⁴

(1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China; 3. Meteorological Disaster Prediction and Warning Engineering Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China; 4. Harbin Electric Wind Power Co., Ltd., Xiangtan 411102, China)

Abstract: This study investigates the wind resource distribution in Yunnan, China, using CN05 high-resolution grid point wind speed observations and ERA5 atmospheric reanalysis data. Statistical analysis methods, including empirical orthogonal decomposition, wavelet analysis, and regression analysis, are applied to analyze the temporal and spatial variation of near-surface wind speed in the region from 1970 to 2015. The aim is to comprehensively understand the distribution of wind resources in Yunnan and provide a reference for future wind energy development. The findings reveal that the average annual near-surface wind speed in Yunnan Province during 1970-2015 was 2.17 m/s, with a distinctive east-to-west variation along the boundary of the Hengduan Mountains. Over the past 46 years, there has been a decreasing trend in near-surface wind speed, with a rate of $-0.013 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, consistently showing an inverse variation from east to west. Further analysis indicates that the decline in near-surface wind speed is primarily associated with a decrease in wind speeds exceeding 3 m/s. Additionally, the study identifies a significant negative correlation between the interannual variability of near-surface wind speed in Yunnan and the Atlantic Ocean Interdecadal Oscillation (AMO). Specifically, during the cold phase of AMO, near-surface wind speed in Yunnan experiences a significant decrease, while during the warm phase, it increases.

Keywords: meteorology; Yunnan Province; near-surface wind speed; spatiotemporal characteristics