

引用格式: 杨飞, 姚作芳, 邓春暖, 等. 1950–2021 年全球陆表风速及发电风能时空变化[J]. 资源科学, 2023, 45(11): 2276–2289.  
[Yang F, Yao Z F, Deng C N, et al. Spatiotemporal variations of global land surface wind speed and wind power energy density from 1950 to 2021[J]. Resources Science, 2023, 45(11): 2276–2289.] DOI: 10.18402/resci.2023.11.14

# 1950—2021 年全球陆表风速及发电风能时空变化

杨 飞<sup>1,3</sup>, 姚作芳<sup>2</sup>, 邓春暖<sup>3</sup>, 赵 越<sup>4</sup>, 杨赞先<sup>3</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 2. 广西大学海洋学院, 南宁 530004; 3. 云南师范大学地理学部, 昆明 650500; 4. 生态环境部环境工程评估中心, 北京 100012)

**摘要:**【目的】气候变暖直接影响着全球风速变化及风能资源利用效率, 通过分析历史风速变化, 准确掌握近些年全球陆表风速的变化规律是气候变化应对、资源高效利用、生态安全管理、社会可持续发展等重要内容。【方法】利用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的ERA5-Land的 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 网格再分析风速数据集, 采用最小二乘法、Theil-Sen斜率估算、Mann-Kendall趋势检验等方法, 研究1950—2021年近72年全球年、季节和月平均风速演变的时空特征和适宜风力发电区的风能密度变化。【结果】①1950—2021年间全球陆地表面平均风速整体上以 $0.020 \text{ m/(s} \cdot 10\text{a)}$ 的速率略微递增。②全球陆地表面风速变化区域差异显著, 其中非洲和南极洲大陆的平均风速变化最为明显。③全球陆表风速时间序列变化结果表明, 季节变化中以冬季变化趋势最显著, 平均为 $0.033 \text{ m/(s} \cdot 10\text{a)}$ ; 月平均风速变化较为明显的是12月、1月、6月; 全球陆表平均风速年际变化在通过95%显著性检验的区域中, 显著增加和显著降低的平均变化速率分别为 $0.073 \text{ m/(s} \cdot 10\text{a)}$ 和 $-0.066 \text{ m/(s} \cdot 10\text{a)}$ ; 在通过99%极显著性检验的区域中, 极显著增加和极显著降低的平均变化速率分别为 $0.080 \text{ m/(s} \cdot 10\text{a)}$ 和 $-0.071 \text{ m/(s} \cdot 10\text{a)}$ ; 南极洲的月平均风速变化速率和范围较大, 显著影响全球平均风速变化的评估。④全球发电风能密度略微增加, 平均增速为 $3.017 \text{ W/(m}^2 \cdot 10\text{a)}$ ; 全年中以1月和12月增加最快, 分别达 $7.086 \text{ W/(m}^2 \cdot 10\text{a)}$ 、 $6.660 \text{ W/(m}^2 \cdot 10\text{a)}$ 。七大洲中以南极洲和非洲风能密度增加变化最为显著, 分别为 $14.107 \text{ W/(m}^2 \cdot 10\text{a)}$ 、 $4.652 \text{ W/(m}^2 \cdot 10\text{a)}$ ; 亚洲是七大洲中的发电风能密度总体变化唯一呈现降低趋势的大洲; 其他四大洲发电风能密度变化相对较小。【结论】全球陆表风速和发电风能密度总体变化不显著, 但在非洲和南极洲等的部分区域、以及1月和12月等时期的增加趋势较为显著, 需要动态监测和精细分析各地区陆表风速、发电风能密度变化, 以准确支撑气候变化应对、资源生态保护和风能高效开发。

**关键词:** 风速; 发电风能密度; 变化速率; Mann-Kendall趋势检验; 多时空尺度

DOI: 10.18402/resci.2023.11.14

## 1 引言

全球气候变暖必然引起陆表风速变化, 并直接影响风力资源变化。通过深入研究风速和风能密度资源的长时间序列和多尺度变化特征, 有利于掌握全球陆地表面风速变化规律, 对于推动风能资源的高效开发、气候变化科学应对、生态系统安全管理、社会经济可持续发展等都具有重大意义<sup>[1-3]</sup>。

前期, 已有很多学者针对不同时间和空间范围

内的风速变化规律开展大量研究, 发现各地区风速时空变化差异显著。如郑崇伟等<sup>[4]</sup>利用来自NASA ESE(Earth Science Enterprise)的CCMP(Cross-Calibrated Multi-Platform)全球1988—2009年的地面风速数据分析发现, 全球大部分区域地面风速显著递增, 尤其以南极大陆的沿岸区域、格陵兰岛的临海区域增速最快, 且存在季节性差异。Jung等<sup>[5]</sup>基于12个全球环流模型模拟发现, 未来气候变化使得平

收稿日期: 2023-01-19; 修订日期: 2023-08-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(42171079); 中国工程院-UNESCO防灾减灾知识服务中心建设项目(CKCEST-2022-1-41); ANSO“一带一路”国际科学组织联盟资助项目(ANSO-CR-KP-2022-06)。

作者简介: 杨飞, 男, 山东枣庄人, 博士, 副研究员, 研究方向为遥感与地理信息系统、地学数据分析。Email: yangfei@igsrr.ac.cn

通讯作者: 杨赞先, 男, 云南昭通人, 硕士研究生, 研究方向为遥感地学数据分析。Email: 2223130037@ynnu.edu.cn

2023年11月

均风速在全球不同区域呈现出显著降低或显著增加的不同变化。Robert等<sup>[6]</sup>使用地面气象站的数据发现北半球大陆地区在1979—2008年期间风速数据的降幅为5%~15%;苗昊泽等<sup>[7]</sup>根据ERA-Interim、JRA-55、CFS和MERRA-2等4套再分析数据产品,发现北半球近地面风速在1980—2016年期间呈现了不同的下降趋势;Li等<sup>[8]</sup>模拟发现21世纪末北美洲高纬度地区和哈德逊湾周围冬季风速增加;Tian等<sup>[9]</sup>发现在过去40年中,包括北美、欧洲和亚洲在内的北半球大部分地区的地表风速都呈现下降趋势;Marcos<sup>[10]</sup>研究发现南半球和北半球之间的最大风速差异在夏季比在冬季更明显。近些年,气候变暖趋势愈加显著,已有研究大都分析风速在中短期(<40年)的年际变化,非常有必要进一步深入分析全球风速在更长时间序列、年-季-月不同时间尺度上的变化规律。

近地表风力可以提供大量的可再生清洁能源资源供应,正广泛地得到世界各国的认可和利用<sup>[11,12]</sup>,目前已有100多个国家在加强建设风能发电系统,中国成为世界上风电装机容量最大的国家<sup>[11]</sup>,美国近期也在加快墨西哥湾的风能基础设施建设<sup>[13]</sup>。风功率密度、平均风速的月变化和季节变化等关键因素直接影响风能的生产<sup>[14,15]</sup>,与此同时,这些因素也会对发电装置的使用产生影响,从而进一步影响风能的开发和利用效率<sup>[16,17]</sup>。为确保风力资源开发利用,也需及时对全球陆表发电风能密度时空变化进行持续研究。

本文利用欧洲中尺度气象预测中心(European Centre for Medium-range Weather Forecast, ECMWF)的长时间序列、高分辨率、高精度的ERA5-Land 10 m高度风速再分析数据产品,研究1950—2021年全球陆表风速年、季度和月的多时间尺度的变化规律、区域性差异,发电风能密度变化特征和洲际差异,可为全球和区域范围的风速变化引发的正负效应应对、风力资源潜能开发等提供科学依据。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

本文利用ERA5-Land 1950—2021年的风速数据进行分析。该数据集由ECMWF发布,与上一个

版本ERA5数据相比,以更高的分辨率( $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ )呈现对过去几十年气候的准确描述,通过物理定律将来自世界各地的观测结果与模型数据相结合,分别提供全球东向、北向的风速数据集。为了分析全球近地面风速的气候特征,利用Python、Matlab等合成处理东向、北向两个方向的10 m高度风速数据得到合成平均风速数据<sup>[18]</sup>,具体公式如下:

$$s = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1)$$

式中: $s$ 、 $u$ 、 $v$ 分别表示10 m高度的合成、东向、北向的平均风速。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 Theil-Sen Median 斜率估计和 Mann-Kendall 变化趋势检验

依据逐月的10 m高度合成风速分析年度、季节、逐月平均风速的空间分布,并进行最小二乘线性倾向估计、Theil-Sen Median 斜率(又称为Sen斜率)线性倾向估计和Mann-Kendall (MK)显著性检验,分析近地面风速的时空变化趋势特征。

本文采用Sen斜率线性倾向估计,分析全球陆表风速在1950—2021年的变化斜率,将斜率中值作为风速时间序列变化的总体趋势<sup>[19]</sup>。计算方法如下:

$$\beta = \text{Median} \left( \frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \quad j > i \quad (2)$$

式中: $\beta$ 表示10 m高度年平均风速计算得到的斜率;Median()代表取中值; $x_i$ 和 $x_j$ 分别表示第 $i$ 、 $j$ 年的风速数据值。若 $\beta > 0$ ,表明风速变化呈现增长趋势,反之为下降趋势。

Mann-Kendall 趋势检验是一种非参数检验方法,作为Sen斜率估算的补充,对长时间序列风速变化趋势进行显著性检验<sup>[20]</sup>。该方法计算效率高,对于测量误差和离群数据不敏感,适用于长时间序列数据的趋势分析<sup>[21]</sup>。其计算公式为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x) \quad (3)$$

式中: $S$ 表示地表10 m高度年平均风速的检验统计量; $\text{sgn}()$ 为符号函数,计算公式为:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (4)$$

使用统计量  $Z$  值进行检验,计算方法如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $Z$  表示  $S$  值的标准正态分布统计量。  $\text{Var}(S)$  的计算公式为:

$$\text{Var}(S) = \frac{n \cdot (n-1) \cdot (2n+5)}{18} \quad (6)$$

式中:  $\text{Var}(S)$  表示计算方差;  $n$  表示时间序列中的数据个数。采用双边趋势检验,在给定的显著性水平下,根据正态分布表中的临界值与  $|Z|$  的大小关系进行趋势显著性判断,当  $|Z|$  大于 1.65、1.96、2.58 时,表示分别通过了置信度为 90%、95%、99% 的显著性检验。即  $1.65 < Z < 1.96$  或  $-1.96 < Z < -1.65$  表示变化趋势为微显著增加或降低;  $1.96 < Z < 2.58$  或  $-2.58 < Z < -1.96$  表示变化趋势为显著增加或降低;  $Z > 2.58$  或  $Z < -2.58$  表示变化趋势为极显著增加或降低。

## 2.2.2 风能密度计算方法

风能密度可以表示垂直于气流的单位截面对应的风速功率,用于衡量风能资源储备量<sup>[22]</sup>。风能密度与风速的三次方成正比,因此风能资源储量计算多采用以下公式:

$$P = 0.5 \cdot \rho \cdot V^3 \quad (7)$$

式中:  $P$  表示风能密度(单位:  $\text{W/m}^2$ );  $V$  表示风速(单位:  $\text{m/s}$ );  $\rho$  表示平均空气密度(单位:  $\text{kg/m}^3$ )。当风速增加时,风能的产生量将会呈现更为显著的指数增长。

一般情况下,气象风速数据表示地表 10 m 高度上的风能资源分布,但目前风机的轮毂高度多数为地表 80 m (现存风机高度在地表 70 m~160 m 间的都有),因此我们选用一个改进公式来计算地表 80 m 高度的风速  $V_{80}$ ,它考虑了地表和边界层的变化<sup>[23]</sup>:

$$V_{80} = V_{10} \cdot \left(\frac{80}{10}\right)^\alpha \quad (8)$$

$$\alpha = 0.37 - 0.0881 \cdot \ln V_{10} \quad (9)$$

式中:  $V_{80}$  表示地表 80 m 高度上的发电风机轮毂高度上的风速,  $V_{10}$  表示地表 10 m 高度上的风速,  $\alpha$  表示幂次系数。

## 3 结果与分析

### 3.1 1950—2021 年全球年平均风速时序变化分析

根据 1950—2021 年的年平均风速数据,利用最小二乘法模拟年平均风速的变化趋势;为了降低年平均风速变化的随机性,进一步模拟其 5 年滑动平均的变化趋势,如图 1 所示。

由图 1 可看出,近 72 年全球年平均风速总体呈现增长趋势,线性拟合决定性系数  $R^2=0.584$  (通过 95% 可信度检验),线性变化趋势较为明显;拟合斜

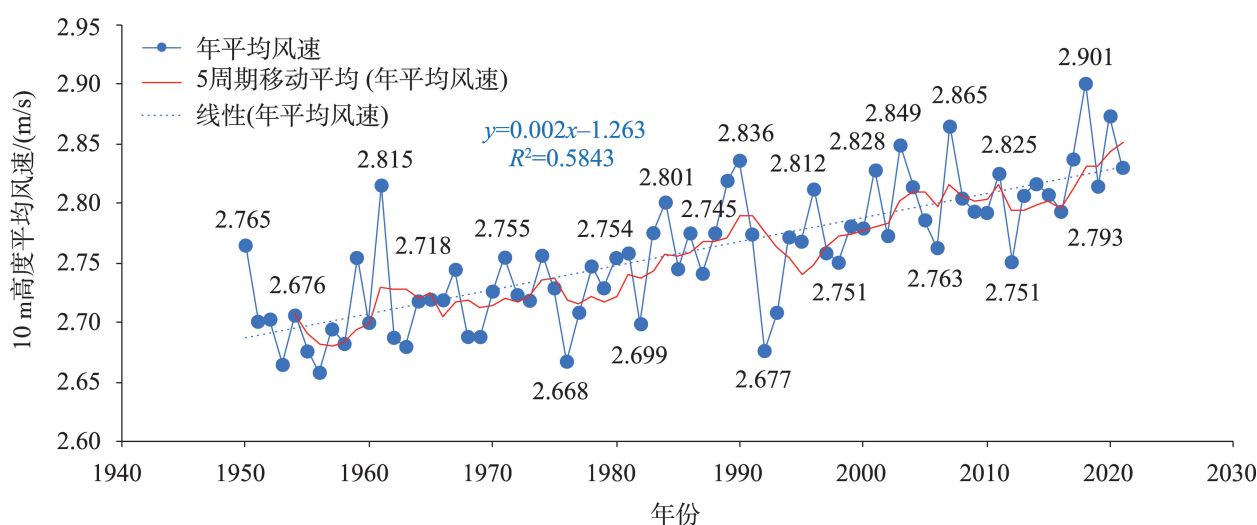


图1 1950—2021 年全球年平均风速变化趋势

Figure 1 Trends of global annual average wind speed variation, 1950–2021



2023年11月

率为0.002,平均风速变化速率为0.020 m/(s·10a)。风速变化还呈现出显著的年代际特征,平均风速在1976—1990年、1992—2006年、2011—2020年3个时期增加最快。

### 3.2 1950—2021年全球季节性平均风速时空分布特征

本文分别针对春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)、冬季(12月—翌年2月),采用最小二乘线性倾向估计分析1950—2021年平均风速的季节性时空变化特征。

由图2可看出,冬季和夏季全球风速总体上高于春季、秋季。南极大陆和格陵兰岛的风速一年四季都非常大,平均风速大多在5 m/s以上。除此之外,非洲撒哈拉沙漠中南部及其向森林过渡地带、索马里半岛地区、澳大利亚大陆的风速常年较高,平均风速大多在3~6 m/s甚至更高。亚洲大陆地区风速季节性变化较大,其中冬季风速显著高于其他季节,特别是在青藏高原西部、蒙古高原、西伯利亚北部地区风速较大;亚欧大陆中北部和中东部夏季

风速普遍较低,仅有印度经中亚南部至阿拉伯半岛一带风速相对较高。北美洲和南美洲季节性风速变化不显著,仅有巴西高原东部、美国西南部高原地区、南美洲最南端的风速在夏季相对较高。全球范围内的春季和秋季的风速的空间分布规律比较接近。

对比1950—2021年季节和逐月的全球平均风速的时间序列变化曲线可看出(图3),全球陆表平均风速的递增趋势以冬季最为强劲,达到0.033 m/(s·10a),强于年平均风速的变化趋势(0.020 m/(s·10a));夏季的递增趋势相对较为平缓,约为0.013 m/(s·10a)。全年各月中仅冬季12月、1月和秋季11月的风速变化速率超过0.030 m/(s·10a);其中以12月份变化最为显著,达到0.040 m/(s·10a),并通过0.05显著性水平检验;7月份的递增趋势弱于其他月份,约为0.010 m/(s·10a),未通过0.05显著性水平检验。只有冬季各月风速速率和春季3月风速速率的变化是显著的,其他季节及其月份风速速率的变化在统计学上不具有显著性。

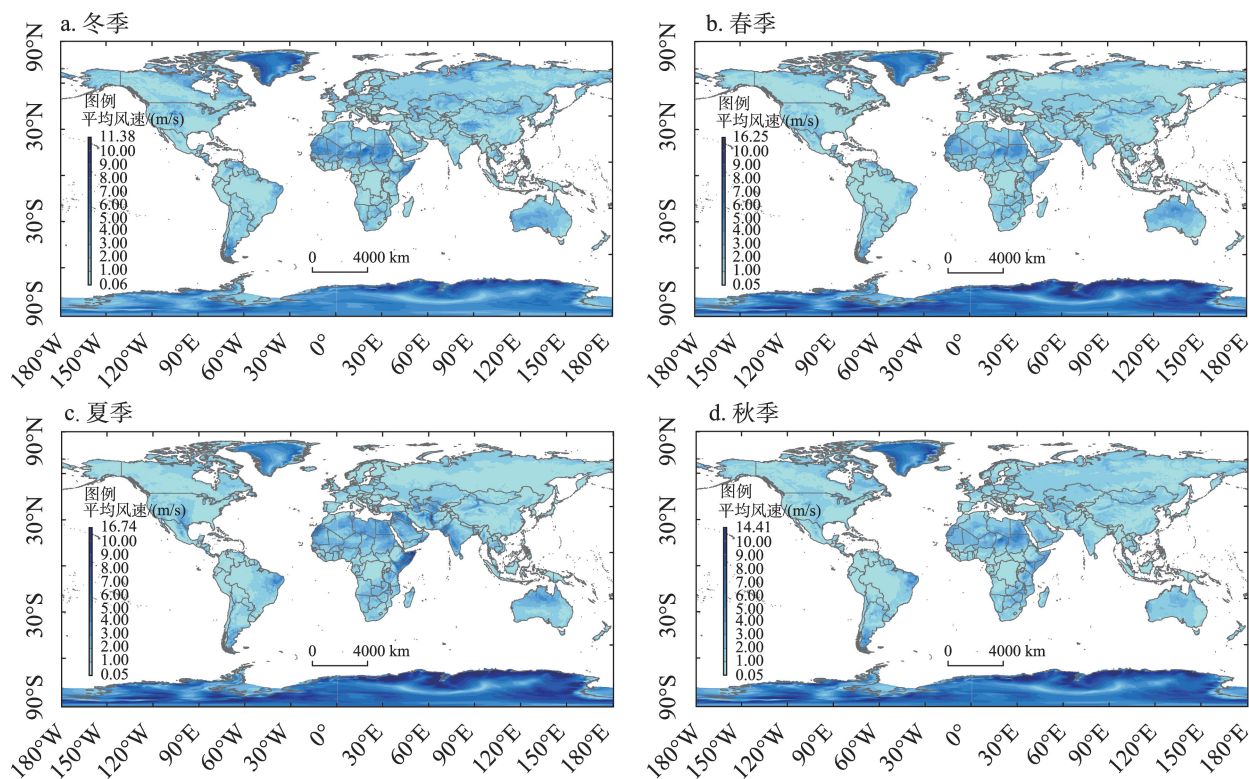


图2 1950—2021年全球陆表平均风速各季节空间分布

Figure 2 Spatial distribution of global mean wind speeds in four seasons, 1950-2021

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2016)1663号标准地图制作,底图边界无修改。



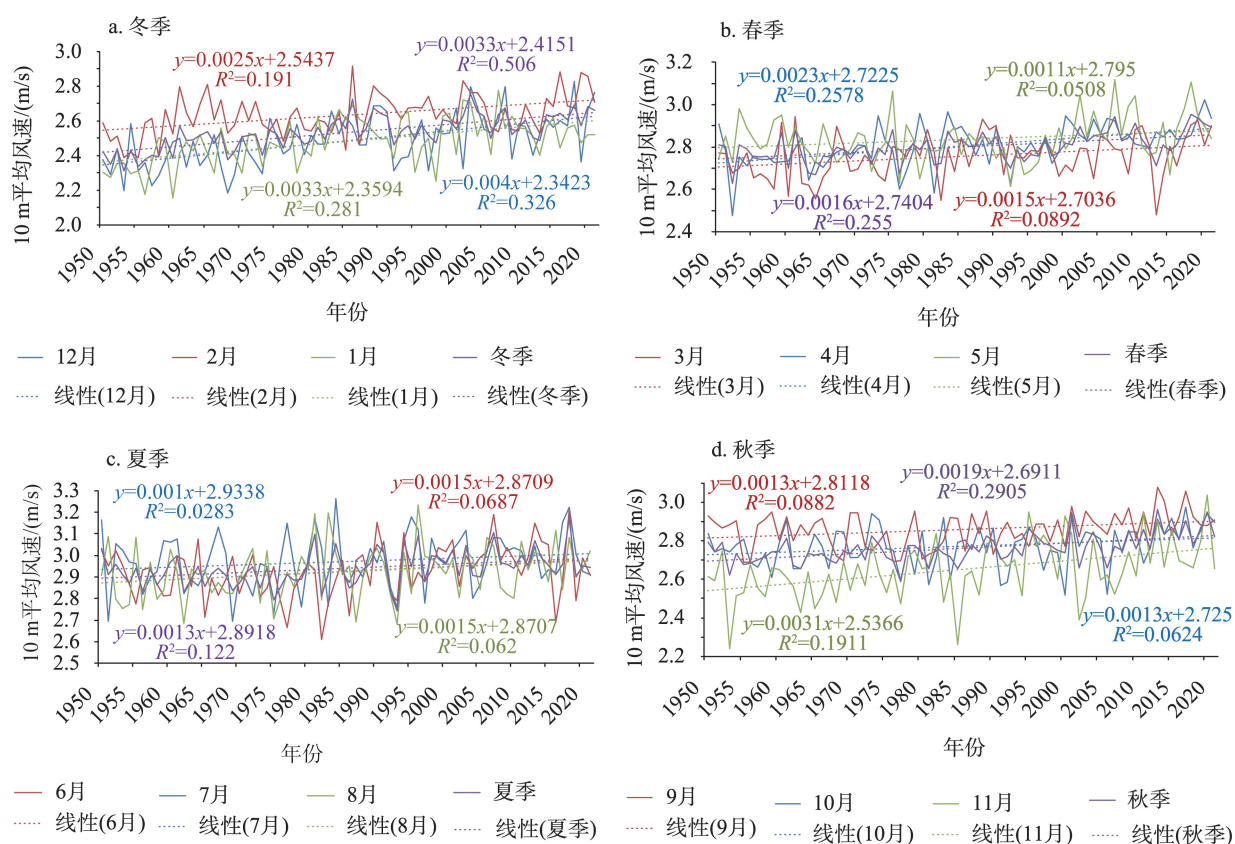


图3 1950—2020年全球季节-月平均风速变化曲线

Figure 3 Temporal variations of global seasonal and monthly average wind speed, 1950–2021

### 3.3 1950—2021年全球月平均风速时空分布特征

#### 3.3.1 全球月平均风速变化速率显著性分析

为进一步深入准确分析全球月平均风速时间序列和空间分布变化,利用Sen斜率估计方法计算1950—2021年全球逐月平均风速变化速率,并利用Mann-Kendall趋势检验方法分析逐月平均风速变化速率的显著性。图4展示了平均风速通过不同置信度检验的空间分布。

总体来看,全球风速降低区域面积远大于风速增加区域范围。非洲和南极洲大陆的平均风速变化速率显著性最高、分布范围最广,且显著和极显著性增加区域远高于显著和极显著减少区域,并都呈现出冬季月份的显著和极显著变化范围远高于其他月份的特征。其他各洲仅在部分地区或部分月份的风速变化显著性相对较明显,通过以下对比分析阐述全球各地区逐月平均风速变化的详细特征。

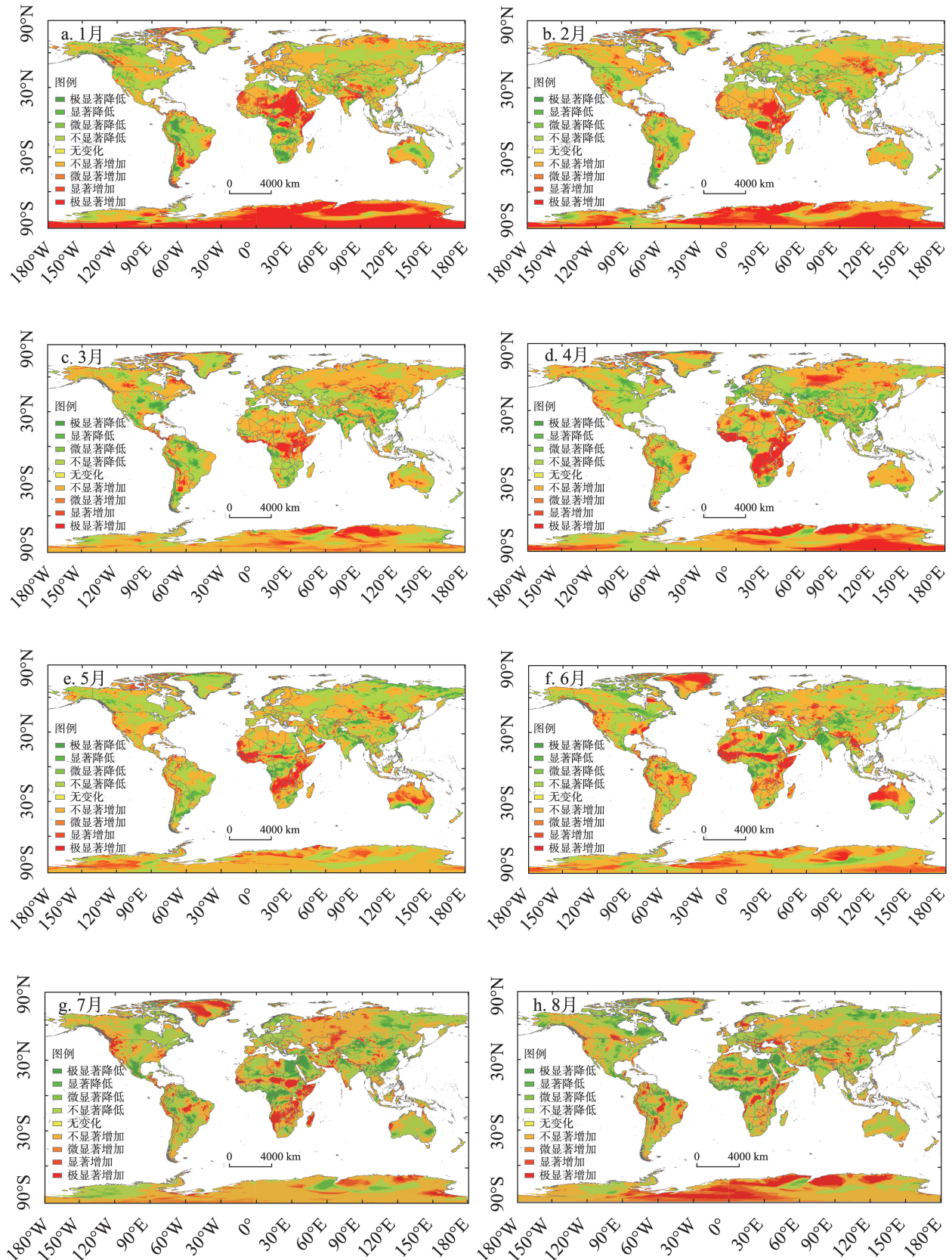
12月与1月,全球陆表平均风速变化趋势相近,

平均风速增加显著区域主要集中于南极洲和非洲中北部,其他区域平均风速呈略微降低的趋势。另外,青藏高原至印度一带、阿根廷中部的局部地区增加显著;极显著降低和显著降低的区域主要分散在非洲南部、南美洲亚马逊平原西部的局部区域。

2—3月,全球平均风速极显著增加和降低的区域面积显著减少,微显著增加和降低区域范围增加较多。非洲中部至埃塞俄比亚高原周边区域的平均风速极显著增加,蒙古高原东部区域显著增加;南美洲和北美洲大陆的局部区域平均风速极显著降低;全球其他区域风速变化不显著。

4月,全球陆表平均风速变化总体与3月相近,只有非洲平均风速极显著增加的区域明显南移至非洲中部和中南部地区、且面积增加较多;全球其他区域的增加或降低变化呈零散分布,南极大陆也仅有东部地区极显著增加,西西伯利亚中部风速显著增加;中国东部、中亚、西欧平原、加拿大东部平原地区风速显著降低,其他区域风速变化不显著。

2023年11月





续图4

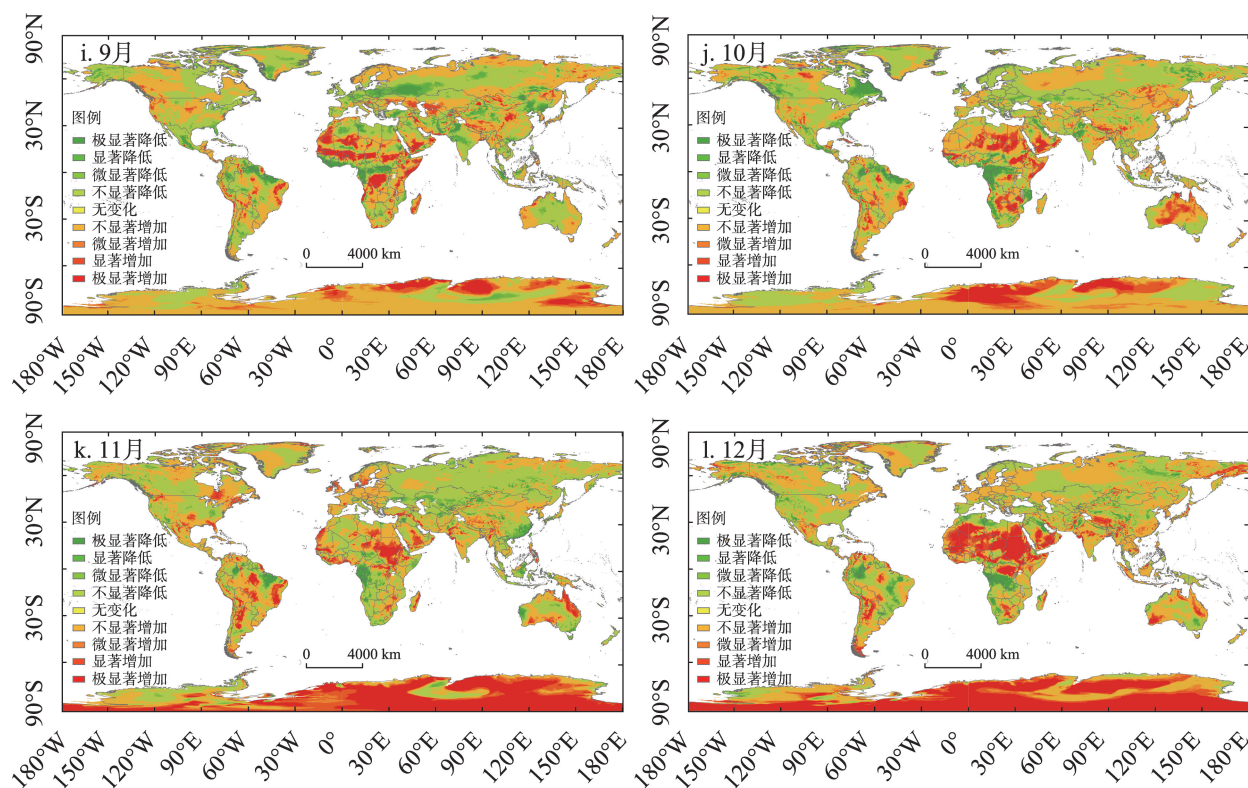


图4 1950—2021年全球平均风速变化速率MK检验趋势类别空间分布

Figure 4 Spatial distribution of MK test trend categories for global average wind speed variation slope, 1950-2021

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2016)1663号标准地图制作,底图边界无修改。

5—9月,全球范围内平均风速极显著增加和降低范围相稳定,但比较分散。其中,非洲风速变化相对显著,平均风速变化极显著增加区域分布于北非撒哈拉沙漠向中非森林过渡的植被稀疏带、埃塞俄比亚向西南至南非的高原带;5—6月澳大利亚大陆风速呈显著增加,6—7月格陵兰岛风速显著增加;5—9月,风速显著降低区域主要分布于沿中非、东北非、西亚、中亚至中国新疆一带,分布比较分散。8月全球平均风速变化相对最小。

10—11月份,非洲中北部、中东部和澳大利亚北部、南美洲的局部区域的平均风速极显著增加;中非和亚马逊东北沿海的局部区域呈现显著或极显著降低。南极洲大陆地区,10月平均风速变化总体不显著,11月平均风速的显著和极显著变化区域开始快速增加。

### 3.3.2 全球月平均风速变化统计分析

根据MK趋势检验结果发现,全球风速变化通

过显著和极显著性检验的区域的总面积为5155.64万 $\text{km}^2$ 、占全球陆地面积比为34.62%,除南极洲以外的六大洲的风速变化总面积为4143万 $\text{km}^2$ 、占陆地面积比为30.7%,南极洲风速变化面积也达到1012.638万 $\text{km}^2$ 、占陆地面积比高达72.33%,由此可见,全球陆表风速总体变化分析受南极洲陆地风速变化影响显著。然而,南极洲大陆是目前人类活动极少的区域,风能资源也难以像其他六大洲一样可以有效开发利用。因此,本文分析了包含和不包含南极洲的两种情况下,全球陆表月平均风速变化(表1和表2),可为准确掌握全球和六大洲的风速和风能资源变化规律提供科学支撑。

如表1所示,全年12个月,全球陆地表面平均风速显著增加的区域对应的月平均风速变化速率在0.065~0.082  $\text{m}/(\text{s} \cdot 10\text{a})$ 之间,平均0.073  $\text{m}/(\text{s} \cdot 10\text{a})$ ;覆盖范围面积为1302.807万~3159.478万 $\text{km}^2$ ;其中1月、6月、12月份平均风速增加最为显著。各月



表 1 各月份通过 95%显著性检验的全球平均风速变化

Table 1 Global average wind speed variation passing the 95% significance test in each month

月份	全球陆表区域平均风速变化 速率		全球陆表区域面积/万 km <sup>2</sup>		全球陆表区域(不含南极洲大陆) 平均风速变化速率		全球陆表区域(不含南极洲 大陆)面积/万 km <sup>2</sup>	
	显著增加	显著降低	显著增加	显著降低	显著增加	显著降低	显著增加	显著降低
1 月	0.079	-0.065	2697.855	1242.668	0.066	-0.061	1665.432	1197.319
2 月	0.072	-0.076	2003.838	1092.706	0.061	-0.068	1241.558	972.647
3 月	0.067	-0.058	1497.522	1138.235	0.059	-0.056	1169.683	1038.335
4 月	0.068	-0.067	2439.164	1340.028	0.061	-0.055	1865.985	1265.514
5 月	0.075	-0.076	1596.756	1253.886	0.062	-0.065	1257.891	1217.443
6 月	0.082	-0.075	2437.394	1380.768	0.074	-0.065	2120.046	1251.046
7 月	0.073	-0.070	1892.861	1802.444	0.065	-0.058	1717.323	1710.726
8 月	0.068	-0.069	1302.807	1824.418	0.055	-0.052	840.246	1755.291
9 月	0.065	-0.065	1344.232	1682.705	0.053	-0.057	1241.371	1595.462
10 月	0.073	-0.056	1838.675	1426.978	0.063	-0.057	1163.285	1407.649
11 月	0.074	-0.057	2191.509	882.770	0.060	-0.050	1200.830	828.401
12 月	0.082	-0.056	3159.478	1043.275	0.068	-0.050	2367.970	993.188
平均	0.073	-0.066	2033.508	1342.573	0.062	-0.058	1487.635	1269.418

表 2 各月份通过 99%极显著性检验的全球平均风速变化

Table 2 Global average wind speed variation passing the 99% extreme significance test in each month

月份	全球陆表区域平均风速变化 速率		全球陆表区域面积 /万 km <sup>2</sup>		全球陆表区域(不含南极洲 大陆)平均风速变化速率		全球陆表区域(不含南极洲 大陆)面积/万 km <sup>2</sup>	
	极显著增加	极显著降低	极显著增加	极显著降低	极显著增加	极显著降低	极显著增加	极显著降低
1 月	0.085	-0.073	1708.630	647.238	0.072	-0.067	996.208	633.833
2 月	0.080	-0.086	1360.750	462.472	0.068	-0.074	700.542	413.416
3 月	0.078	-0.060	780.292	499.445	0.065	-0.059	579.327	464.347
4 月	0.074	-0.074	1403.880	502.307	0.050	-0.063	1074.985	473.792
5 月	0.080	-0.074	773.145	462.117	0.069	-0.076	667.279	458.600
6 月	0.094	-0.082	1371.275	636.865	0.086	-0.076	1171.990	626.305
7 月	0.082	-0.080	967.305	1038.263	0.074	-0.066	915.138	950.573
8 月	0.077	-0.081	798.733	874.543	0.061	-0.061	447.452	851.912
9 月	0.071	-0.069	926.488	746.882	0.056	-0.059	660.336	724.470
10 月	0.079	-0.055	893.817	792.938	0.069	-0.057	493.046	781.660
11 月	0.072	-0.060	1145.293	411.926	0.066	-0.055	533.508	391.794
12 月	0.089	-0.057	1680.347	469.759	0.075	-0.052	1168.559	452.318
总计	0.080	-0.071	1150.830	628.730	0.068	-0.063	784.031	601.918

全球陆地区域显著降低的月平均风速变化速率在-0.056~-0.076 m/(s·10a)之间,平均为-0.066 m/(s·10a);覆盖范围面积为 882.770 万~1824.418 万 km<sup>2</sup>;其中 2 月、5 月、6 月平均风速降低最为显著,7—8 月覆盖范围最广。

对于除南极洲外的六大洲统计结果显示,全年 12 个月,陆表显著增加的月平均风速变化速率在 0.053~0.074 m/(s·10a)之间,平均 0.062 m/(s·10a);覆盖范围面积为 840.246 万~2367.970 万 km<sup>2</sup>;其中 6 月、12 月、1 月份平均风速增加最为显著,6 月和 12

月覆盖范围最广;各月六大洲陆表显著降低的月平均风速变化速率在-0.05~-0.068 m/(s·10a)之间,平均-0.058 m/(s·10a);覆盖范围面积为 828.401 万~1755.291 万 km<sup>2</sup>;其中 2 月、5 月、6 月平均风速降低最为显著,在夏季 7—9 月覆盖范围最广。

表 2 分析了各月份全球通过 99%极显著性检验区域的平均风速变化。极显著增加的月平均风速变化速率在 0.071~0.094 m/(s·10a)之间,平均为 0.080 m/(s·10a);覆盖范围面积为 773.145 万~1708.63 万 km<sup>2</sup>;其中 1 月、6 月、12 月平均风速增加

最为显著、覆盖范围最广。全球陆地区域极显著降低的月平均风速变化速率在 $-0.055\sim-0.086\text{ m/(s}\cdot 10\text{a)}$ 之间,平均为 $-0.071\text{ m/(s}\cdot 10\text{a)}$ ;覆盖范围面积为 $411.926\text{ 万}\sim 1038.263\text{ 万 km}^2$ ;其中2月、6月、7月、8月平均风速降低最为显著,7—8月覆盖范围最广。

对于除南极洲外的六大洲统计结果显示,各月陆表极显著增加的月平均风速变化速率为 $0.050\sim 0.086\text{ m/(s}\cdot 10\text{a)}$ 之间,平均 $0.068\text{ m/(s}\cdot 10\text{a)}$ ;覆盖范围面积为 $447.452\text{ 万}\sim 1171.99\text{ 万 km}^2$ ;在1月、6月、12月平均风速增加最为显著、覆盖范围最广。各月六大洲陆表极显著降低的月平均风速变化速率为 $-0.055\sim-0.076\text{ m/(s}\cdot 10\text{a)}$ ,平均 $-0.063\text{ m/(s}\cdot 10\text{a)}$ ;覆盖范围面积为 $391.794\text{ 万}\sim 950.573\text{ 万 km}^2$ ;其中2月、5月、6月平均风速降低最为显著,在夏季7—9月覆盖范围最广。

总体来看,各月份的全球陆表风速通过99%极

显著性检验区域的平均风速变化速率,均显著高于通过95%显著性检验区域的平均风速变化速率。

### 3.4 全球发电风能密度变化分析

风能密度与风速变化呈指数关系,风速变化直接影响风能密度,风能密度的时空变化规律与全球风速变化非常一致,因此从前文中风速的年际、季节、逐月的变化就可以看出全球风能时空变化,本文进一步分析适合于风能发电区域的风能密度变化。根据国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)标准化定义了一种称为“平均风速(Mean Wind Speed)”的风速等级划分方法,将风速划分为0~12级。在风能发电领域,一般认为风速等级在3~7级(对应风速范围是 $3.4\sim 17.1\text{ m/s}$ )之间比较适合进行风力发电<sup>[24]</sup>,因此本文统计分析该风速范围的发电风能密度变化,结果见表3。

表3 各月份全球和各大洲的发电风能密度变化分析  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot 10\text{a})$

Table 3 Wind power energy variation of global and continents in each month  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot 10\text{a})$

大洲		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	总计
亚洲	增加	5.595	4.134	3.169	5.918	4.958	3.620	5.731	3.217	3.124	0.503	3.390	5.311	4.056
	降低	-3.871	-3.759	-6.684	-5.283	-7.625	-10.235	-8.507	-8.286	-9.857	-0.521	-6.944	-3.115	-6.224
	平均	1.753	0.233	-2.236	-2.220	-2.837	-8.787	-2.868	-5.344	-7.736	-0.021	-2.848	2.955	-2.496
欧洲	增加	12.307	10.797	4.548	5.204	7.682	3.202	3.859	10.187	2.365	0.421	14.935	6.668	6.848
	降低	-4.469	-4.017	-4.011	-1.846	-5.993	-4.483	-4.599	-8.381	-12.951	-0.488	-0.927	-6.561	-4.894
	平均	9.951	6.995	-1.337	-1.846	-3.258	-0.640	-0.389	3.280	-8.320	-0.239	14.716	4.234	1.929
非洲	增加	11.373	8.442	5.239	6.005	8.518	10.290	7.241	4.472	6.354	1.477	6.502	11.791	7.309
	降低	-5.157	-1.811	-1.597	-2.020	-6.388	-6.654	-6.506	-4.693	-3.738	-0.443	-3.089	-2.271	-3.697
	平均	11.174	8.201	3.982	3.413	3.683	2.226	2.015	0.043	4.174	0.716	4.969	11.234	4.652
北美洲	增加	5.96	10.889	5.170	7.344	3.557	17.068	14.707	6.628	6.017	0.449	7.545	9.069	7.867
	降低	-9.448	-17.671	-7.244	-3.538	-7.182	-5.136	-5.234	-5.745	-8.361	-0.781	-6.489	-8.171	-7.083
	平均	-4.137	-2.723	-2.202	3.990	-5.662	15.169	11.571	0.336	-4.295	-0.331	0.814	0.685	1.101
南美洲	增加	12.073	6.440	2.773	5.304	6.582	4.949	3.587	4.745	4.029	0.462	8.886	10.776	5.884
	降低	-7.403	-11.589	-6.976	-3.111	-3.563	-3.718	-2.892	-1.975	-2.999	-0.412	-3.374	-2.174	-4.182
	平均	4.131	-5.944	-3.856	2.103	-0.609	2.569	1.487	2.507	1.842	0.059	5.696	8.382	1.531
大洋洲	增加	3.433	3.019	3.12	3.677	5.735	9.614	3.570	4.013	6.006	1.657	10.824	4.007	4.890
	降低	-3.080	-2.153	-3.065	-1.857	-2.487	-3.610	-1.439	-2.553	-5.424	-0.389	-13.387	-6.213	-3.805
	平均	2.285	1.168	0.408	2.992	5.401	9.532	-0.058	0.442	2.522	1.036	-9.192	0.233	1.397
南极洲	增加	21.003	19.200	13.753	22.549	15.025	18.821	15.440	23.060	16.548	2.556	24.950	20.547	17.788
	降低	-3.055	-7.195	-9.097	-11.164	-8.000	-9.506	-16.666	-14.343	-9.262	-1.246	-10.846	-6.748	-8.927
	平均	20.308	17.587	10.261	17.435	10.304	12.420	8.341	17.874	12.685	1.244	21.245	19.579	14.107
全球	增加	9.398	7.433	4.657	6.951	6.928	7.214	5.633	7.099	5.489	1.011	9.927	8.443	6.682
	降低	-3.862	-4.360	-4.490	-3.612	-4.865	-5.458	-5.801	-5.747	-6.319	-0.500	-5.510	-3.869	-4.533
	平均	7.086	4.034	1.032	3.125	1.812	2.474	1.218	2.686	0.738	0.399	4.941	6.660	3.017

2023年11月

总体来说,全球适合于发电的风能密度略微增加,平均增速为 $3.017 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{a})$ ;全年中以1月和12月增加最显著,分别达 $7.086$ 、 $6.660 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{a})$ 。

首先,南极洲大陆发电风能密度变化最为显著,平均增速高达 $14.107 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{a})$ ;一年中有6个月(11月、12月、1月、2月、4月、8月)的平均增速超过 $17.435 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{a})$ ;南极洲大陆在除10月以外的其他11个月里,发电风能密度增速也高达 $13.753 \sim 24.950 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{a})$ 。

其次,非洲发电风能密度变化也非常显著,平均增速达 $4.652 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{a})$ ;一年中以12月和1月增加最显著,分别达 $11.234$ 、 $11.174 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{a})$ 。发电风能增加区域的平均增速也达到 $7.309 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{a})$ 。

亚洲是七大洲中发电风能密度总体变化呈降低趋势的唯一大洲,平均降速达 $-2.496 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{a})$ ,其中6月、8月、9月三个月的降速最大,分别达 $-8.787$ 、 $-7.736$ 、 $-5.344 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{a})$ 。在风能密度降低区域,3—9月和11月的降速都更加显著,可达 $-5.283 \sim -10.235 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{a})$ 。

欧洲、北美洲、南美洲、大洋洲四大洲的发电风能密度总体变化呈现略微增加,平均增速为 $1.929$ 、 $1.101$ 、 $1.531$ 、 $1.397 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{a})$ 。其中,欧洲11月和1月增速最快,分别高达 $11.716$ 、 $9.951 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{a})$ ;南美洲在12月增加最快,增速为 $8.382 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{a})$ ;大洋洲在6月增速最快、11月降速最快,分别为 $9.532$ 、 $-9.192 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{a})$ ;而北美洲在6—7月份增速最快,分别高达 $15.169$ 、 $11.571 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{a})$ 。

## 4 讨论

本文分析了1950—2021年全球陆表风速的逐年、季节和逐月的变化规律以及发电风能密度变化。全球范围内风速变化因研究尺度、数据分辨率、时间范围而异。

(1)全球尺度上研究结果表现出一定差异,本文基于ERA5-Land的 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 分辨率网格风速数据计算的1950—2021年间全球范围内的陆表风速通过了显著性为95%的置信度检验,整体递增速度约 $0.020 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10\text{a})$ 。Fan等<sup>[25]</sup>利用六大洲1000多个观测站数据和多个再分析数据比较得出风速变化

范围为 $0.015 \sim 0.074 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10\text{a})$ 。Torralba<sup>[26]</sup>提出不同的再分析资料之间存在重大分歧,再分析资料中使用的观测数据的来源不同,存在一定的不确定性,同时数据同化系统中也存在一些误差,这些误差会对不同的再分析的质量产生影响<sup>[27]</sup>。

(2)区域尺度上研究发现,非洲风速变化非常显著,此前研究对非洲关注相对较少。在过去50年里,北美洲、欧洲、大洋洲和东亚的风速大多呈下降趋势,其平均值范围为 $-0.07 \sim -0.16 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10\text{a})$ <sup>[28-30]</sup>,有些地区如韩国<sup>[31]</sup>、沙特阿拉伯<sup>[32]</sup>在1990s风速呈现下降趋势逐渐稳定甚至略微增长趋势;除此之外还发现,南极洲大陆的平均风速变化速率显著性最高、且分布范围最广。因此在涉及全球或其他六大洲的人居环境变化、生态安全管理、资源开发利用等相关研究时,为避免高估风速变化速率,需要关注是否考虑南极洲大陆的影响。

(3)时间范围上的长期变化趋势也存在一定差异,本文研究发现风速变化呈现出显著的年代际特征,平均风速在1980—1990年、2011—2020年两个时期增加较快。前期有大量研究表明中国或局部区域的风速下降速度约为 $-0.06 \sim -0.37 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10\text{a})$ <sup>[33]</sup>,也有个别研究发现中国风速在2000年以后下降趋势逐渐稳定并略有增长<sup>[34]</sup>。对气象站点监测数据的分析,也发现不同时间阶段风速变化趋势存在差异。如韩国在1950s至1990s下降趋势逐渐变缓,在2003年后所有站点都呈现增长趋势、且内陆站点增速大于沿海站点<sup>[35]</sup>。

(4)数据的时间分辨率研究方面,本文分析发现,相较于长时间序列的年际变化、季节变化,月尺度平均风速分析展示较为详细变化,且对于发电风能资源的开发利用具有重要的参考价值。空间尺度差异也是客观存在的,风速变化分析和发电风能的开发也需要在区域或局部尺度上进行更精细研究,以准确把握风速变化和发电风能开发效率。

(5)风速数据产品精度仍需不断改善。本文采用的ERA-Land数据集采用了多种数据源,包括卫星、气象观测站、船舶、浮标等多种观测方式,也与其他数据集、观测数据等进行比较和校验,广泛应用于近地层风速变化趋势等研究中;Fan等<sup>[25]</sup>对比



发现ERA5、ERA Interim、MERRA-2等5个再分析数据中ERA5和观测数据变化趋势最为相近;Olau-son<sup>[36]</sup>研究发现ERA5数据对欧洲陆表风速数据的评估结果优于MERRA-2;殷宝玲<sup>[37]</sup>结合南极大陆气象站点数据和ERA5再分析资料,发现分辨率为31 km的ERA5再分析风速数据与实测数据具有较强的趋势一致性;刘鸿波等<sup>[38]</sup>利用第五代ERA5再分析数据发现了10 m和100 m高度的平均风速能够较好地呈现地表风速特征;也有其他研究发现第五代ERA5风速数据增强或减弱幅度依然显著低于台站观测数据,且趋势变化与观测结果仍有偏差<sup>[39]</sup>。随着ERA5再分析资料与更多源、更丰富观测数据融合,将会不断改善再分析数据质量。

(6)风速变化影响因素和影响机制都需要深入研究。气候变化和复杂地表都直接造成风速的复杂变化<sup>[8,33]</sup>,进而会影响风能密度、风力发电装置使用、风能开发效率<sup>[16]</sup>。因此,全球或区域范围的风能变化、预测模拟、开发利用效率等的准确把握,还需要多源现代技术准确监测、多模型组合应用、精准模型模拟等<sup>[39]</sup>,并且各个区域都需要深入的研究和详细的分析,以了解主要影响因素和影响机制。这样的分析和模拟将有助于更全面地探索不同尺度下风能密度变化以及发电风能资源开发程度。

另外,风速变化对全球或区域内的资源、生态、人居环境状况都会造成显著影响,McVicar等<sup>[40]</sup>研究表明风速下降主要会影响蒸发下降,进而影响水资源分布;风速增强造成对地表的侵蚀加强和生态质量下降<sup>[41]</sup>;风速下降也会造成大气污染物的浓度升高、居民温度感知和舒适度下降,进而影响人们的工作和生活<sup>[42]</sup>。由此可见,风速变化带来的系列关键问题也需要深入研究。

## 5 结论

本文利用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的ERA5-Land的 $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$ 网格再分析风速数据集,采用最小二乘法、Theil-Sen斜率估算、Mann-Kendall趋势检验等方法,分析1950—2021年全球年、季节、月的平均风速演变时空特征和适宜风力发电区的风能密度变化。主要结论如下:

(1)1950—2021年,全球陆表年平均风速变化

速率整体上呈略微递增趋势,平均增速为 $0.020\text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{a})$ 。一年四季中以冬季最为强劲,平均风速增速为 $0.033\text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{a})$ ,夏季的递增趋势较为平缓,约为 $0.013\text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{a})$ 。

(2)全球陆地表面风速和发电风能密度的变化趋势表现出较大的区域性差异,极显著增加区域范围普遍高于极显著降低区域,且相对集中,而极显著和显著降低区域空间分布相对分散。七大洲中,以南极洲大陆和非洲变化速率最大、最为集中,平均风速呈现极显著增加的趋势非常明显,其他大洲的显著变化区域分布比较分散。

(3)全球陆表的月平均风速总体以12月、1月、6月变化最明显。月平均风速的显著增加和显著降低区域(通过95%显著性检验)的月平均风速变化速率分别为 $0.073\text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{a})$ 和 $-0.066\text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{a})$ ;月平均风速显著增加区域覆盖范围面积约 $1302.807\text{ 万}\sim 3159.478\text{ 万 km}^2$ 、显著降低区域覆盖面积约 $882.770\text{ 万}\sim 1824.418\text{ 万 km}^2$ 。极显著增加和极显著降低区域(通过99%极显著性检验)的平均变化速率是 $0.080$ 、 $-0.071\text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{a})$ ;全球约有 $780.292\text{ 万}\sim 1708.63\text{ 万 km}^2$ 区域面积的月平均风速极显著增加,极显著降低覆盖范围面积约 $411.926\text{ 万}\sim 1038.263\text{ 万 km}^2$ 。

(4)全球发电风能密度略微增加,平均增速为 $3.017\text{ W}/(\text{m}^2\cdot 10\text{a})$ 。一年中以1月和12月增加最显著,平均增加 $7.086$ 、 $6.66\text{ W}/(\text{m}^2\cdot 10\text{a})$ 。七大洲中以南极洲和非洲发电风能密度增加最为显著,平均增加 $14.107$ 、 $4.652\text{ W}/(\text{m}^2\cdot 10\text{a})$ ;亚洲是七大洲中发电风能密度总体变化呈现降低趋势的唯一大洲;其他四个大洲发电风能密度变化相对较小。

## 参考文献(References):

- [1] Kling M M, Ackerly D D. Global wind patterns and the vulnerability of wind-dispersed species to climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2020, 10: 868–875.
- [2] Liu L B, He G, Wu M X, et al. Climate change impacts on planned supply-demand match in global wind and solar energy systems[J]. *Nature Energy*, 2023, 8(8): 870–880.
- [3] Yang F, Sun L G, Wang J L. Monthly variation and correlation analysis of global temperature and wind resources under climate

2023年11月

- change[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, DOI: 10.1016/j.enconman.2023.116992.
- [4] 郑崇伟, 李思祥, 王冠, 等. 1988—2009年全球地面风速变化趋势研究[J]. *气象与环境科学*, 2012, 35(S1): 7–9. [Zheng C W, Li S X, Wang G, et al. Change trend study on surface wind speed in global from 1988 to 2009[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2012, 35(S1): 7–9.]
- [5] Jung C, Schindler D. Changing wind speed distributions under future global climate[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, DOI: 10.1016/j.enconman.2019.111841.
- [6] Vautard R, Cattiaux J, Yiou P, et al. Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness[J]. *Nature geoscience*, 2010, 3(11): 756–761.
- [7] 苗昊泽. 多套再分析及CMIP6模式资料中的北半球地面风速和风功率密度的评估[D]. 成都: 成都信息工程大学, 2020. [Miaohao Z Y. Multiple Reanalyses and Evaluation of Northern Hemisphere Surface Wind Speed and Wind Power Density from CMIP6 Model Data[D]. Chengdu: Chengdu University of Information Technology, 2020]
- [8] Li X, Li Q P, Ding Y H, Wang M. Near-surface wind speed changes in eastern China during 1970–2019 winter and its possible causes[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2022, 13(2): 228–239.
- [9] Tian Q, Huang G, Hu K, et al. Observed and global climate model based changes in wind power potential over the Northern Hemisphere during 1979–2016[J]. *Energy*, 2019, 167: 1224–1235.
- [10] Marcos R, González-Reviriego N, Torralba V, et al. Characterization of the near surface wind speed distribution at global scale: Era-interim reanalysis and ecmwf seasonal forecasting system 4 [J]. *Climate Dynamics*, 2019, 52: 3307–3319.
- [11] IEA. World Energy Outlook 2022[R/OL]. (2022–10–27) [2023–01–19]. [https://www.oecd-ilibrary.org/energy/world-energy-outlook-2022\\_3a469970-en](https://www.oecd-ilibrary.org/energy/world-energy-outlook-2022_3a469970-en).
- [12] Pryor S C, Barthelmie R J. A global assessment of extreme wind speeds for wind energy applications[J]. *Nature Energy*, 2021, 6: 268–276.
- [13] FACT SHEET: Biden Administration Jumpstarts Offshore Wind Energy Projects to Create Jobs[R/OL]. (2021–03–29) [2023–01–19].
- [14] 江滢, 罗勇, 赵宗慈. 中国未来风功率变化预估[J]. *资源科学*, 2010, 32(4): 640–649. [Jiang Y, Luo Y, Zhao Z C. Projection of wind power density in China in the 21st century by climate models [J]. *Resource Science*, 2010, 32(4): 640–649.]
- [15] Benazzouz A, Mabchour H, Had K E, et al. Offshore wind energy resource in the Kingdom of Morocco: Assessment of the seasonal potential variability based on satellite data[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, DOI: 10.3390/jmse9010031.
- [16] Pryor S C, Barthelmie R J, Bukovsky M S, et al. Climate change impacts on wind power generation[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(12): 627–643.
- [17] Rosende C, Sauma E, Harrison G P. Effect of climate change on wind speed and its impact on optimal power system expansion planning: The case of Chile[J]. *Energy Economics*, 2019, 80: 434–451.
- [18] Jung C, Taubert D, Schindler D. The temporal variability of global wind energy long term trends and interannual variability[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 188: 462–472.
- [19] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. *Journal of the American statistical association*, 1968, 63 (324): 1379–1389.
- [20] Mann H B. Nonparametric tests against trend, *Econometrica*[J]. *Journal of The Econometric Society*, 1945, 13(3): 245–259.
- [21] 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. [Liu S X, Qiu J X, Mo X G. Wind velocity variation from 1951 to 2006 in the north China plain[J]. *Resources Science*, 2009, 31(9): 1486–1492.]
- [22] Yang Z H, Huang W N, Dong S, et al. Mixture bivariate distribution of wind speed and air density for wind energy assessment[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, DOI: 10.1016/j.enconman.2022.116540.
- [23] Tobin I, Vautard R, Balog I, et al. Assessing climate change impacts on European wind energy from ENSEMBLES high-resolution climate projections[J]. *Climatic Change*, 2014, 128(1): 99–112.
- [24] Zahedi R, Ghorbani M, Daneshgar S, et al. Potential measurement of Iran's western regional wind energy using GIS[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129883.
- [25] Fan W, Liu Y, Chappell A, et al. Evaluation of global reanalysis land surface wind speed trends to support wind energy development using in situ observations[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2021, 60(1): 33–50.
- [26] Torralba V, Doblas-Reyes F J, Gonzalez-Reviriego N. Uncertainty in recent near-surface wind speed trends: A global reanalysis intercomparison[J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12 (11): 114019.
- [27] Reichler T, Kim J. Uncertainties in the climate mean state of global observations, reanalyses, and the GFDL climate model[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D5).
- [28] Eduardo U, Cesar A, Encarna S, et al. Wind stilling ceased in the Iberian Peninsula since the 2000s[J]. *Atmospheric Research*, 2022, DOI: 10.1016/j.atmosres.2022.106153.
- [29] Evans P J, Kay M, Prasad A, et al. The resilience of Australian

- wind energy to climate change[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, DOI: 10.1088/1748-9326/aaa632.
- [30] Wohland J. Process-based climate change assessment for European winds using EURO-CORDEX and global models[J]. *Environmental Research Letters*, 2022, DOI: 10.1088/1748-9326/aca77f.
- [31] Ali S, Lee S M, Jang C M. Statistical analysis of wind characteristics using Weibull and Rayleigh distributions in Deokjeok-do Island - Incheon, South Korea[J]. *Renewable Energy*, 2018, 123: 652-663.
- [32] Azorin-Molina C, Rehman, S, Guijarro J A, et al. Recent trends in wind speed across Saudi Arabia, 1978-2013: A break in the stilling[J]. *International Journal of Climatology*, 2018, DOI:10.1002/joc.5423.
- [33] Wu J, Zha J, Zhao D, et al. Changes in terrestrial near-surface wind speed and their possible causes: An overview[J]. *Climate Dynamics*, 2018, 51: 5-6.
- [34] Zhang R, Zhang S, Luo J, et al. Analysis of near-surface wind speed change in China during 1958-2015[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 137(3): 2785-2801.
- [35] Kim J C, Paik K. Recent recovery of surface wind speed after decadal decrease: A focus on South Korea[J]. *Climate Dynamics*, 2015, 45(5): 1699-1712.
- [36] Olauson J. ERA5: The new champion of wind power modelling? [J]. *Renewable Energy*, 2018, 126: 322-331.
- [37] 殷宝玲. 近50年南极冰盖近地面风的变化及其原因[D]. 济南: 山东大学, 2020. [Yin B L. Variability in the Near-surface Winds over the Antarctic Ice Sheet During the Last 50 Years and Their Causes[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2020.]
- [38] 刘鸿波, 董理, 严若婧, 等. ERA5再分析资料对中国大陆区域近地层风速气候特征及变化趋势再现能力的评估[J]. *气候与环境研究*, 2021, 26(3): 299-311. [Liu H B, Dong L, Yan R J, et al. Evaluation of near-surface wind speed climatology and long-term trend over China's mainland region based on ERA5 reanalysis[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2021, 26(3): 299-311.]
- [39] Kim Y, Hur J. An ensemble forecasting model of wind power outputs based on improved statistical approaches[J]. *Energies*, 2020, DOI:10.3390/en13051071.
- [40] 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.
- [41] Yue Z C, Yuan X M, Cao L G, et al. Characteristics and variation law of wind-blown sand delivered to the Ningxia-Inner Mongolia reach of the Yellow River under a changing environment[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2022, 37(2): 188-201.
- [42] 周伟东, 梁萍. 风的气候变化对上海地区秋季空气质量的可能影响[J]. *资源科学*, 2013, 35(5): 1044-1050. [Zhou W D, Liang P. The possible effect of climate change on air quality during autumn in Shanghai[J]. *Resources Science*, 2013, 35(5): 1044-1050.]

## Spatiotemporal variations of global land surface wind speed and wind power energy density from 1950 to 2021

YANG Fei<sup>1,3</sup>, YAO Zuofang<sup>2</sup>, DENG Chunnuan<sup>3</sup>, ZHAO Yue<sup>4</sup>, YANG Zanzhan<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. School of Marine Sciences, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 4. Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China)

**Abstract:** [Objective] Climate change directly affects global wind speed changes and the efficiency of wind energy resource utilization. Analyzing wind speed historical changes is one of the important topics for climate change response, efficient resource utilization, ecological security management, and sustainable social development. [Methods] Using the ERA5-Land grid reanalysis wind speed dataset at the 0.1° resolution from the European Center for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) and methods such as least squares, Theil-Sen slope estimation, and MK trend test to study the annual, seasonal, and monthly average wind speed trends and the evolution of suitable



wind power areas over the past 72 years from 1950 to 2021 worldwide. **[Results]** (1) The global mean land surface wind speed increases slightly at an overall rate of  $0.020 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10\text{a})$  from 1950 to 2021. (2) The surface wind speed changes on a global scale exhibit significant spatial differences, especially remarkable in Africa and Antarctica in comparison with other continents. (3) As the seasonal changes, the land surface wind speed in winter season shows the significant changes, with a changing rate of  $0.033 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10\text{a})$ . As the months changes, December, January and June exhibit particularly noticeable variations of surface wind speed. The global mean land surface wind speed has a mean rate of change of  $0.073 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10\text{a})$  and  $-0.066 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10\text{a})$  for significant increases and decreases, respectively, in the regions passing the 95% significance test; and it has the mean rate of change of  $0.080 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10\text{a})$  and  $-0.071 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10\text{a})$  for extremely significant increases and decreases, respectively, for the region passing the 99% highly significant test. The monthly average wind speed change rate and range in Antarctica are relatively large, affecting significantly the global average wind speed change rate and area assessment. (4) The global wind power energy density has slightly increased, with an average growth rate of  $3.017 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{a})$ . The increase was most significant in January and December of the year, reaching  $7.086 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{a})$  and  $6.660 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{a})$ , respectively. Antarctica and Africa lead in increasing wind power density for electricity generation, at  $14.107 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{a})$  and  $4.652 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10\text{a})$  respectively. Asia stands out as the only continent with an overall decrease, while the remaining four continents show minor changes. **[Conclusion]** There were significant regional, seasonal, and monthly differences in global land surface wind speed changes. In order to accurately support climate change response, resources and ecological protection, and efficient development, dynamic monitoring and detailed analysis of changes in land surface wind speed and wind energy density in each region is still needed.

**Key words:** wind speed; wind power energy density; slope of change; Mann-Kendall test; multiple spatiotemporal scales