

全球陆地风能发电潜力的历史变化及未来预测

刘旺 邢晓帆 王戎[†]

复旦大学环境科学与工程系, 上海 200438; [†] 通信作者, E-mail: rongwang@fudan.edu.cn

摘要 根据全球陆地范围内的风速、风功率密度和温度等1981—2020年的历史数据, 通过建立空间回归模型, 预测2021—2100年不同减排情景下全球风能发电潜力和风功率密度的变化情况, 结果表明, 1981—2020年, 全球风能发电潜力和风功率密度呈现下降的趋势, 而全球温度呈现上升的趋势, 两者存在一定程度的相关性。简单线性回归模型结果显示, 各大洲的年均发电潜力与全球11个地区的平均温度有较好的相关性, 且大部分区域都呈现负相关关系。未来不同共享社会经济路径(SSPs)情景下, 全球总的年风能发电潜力会有较明显的差异。在温度上升最快的SSP5-8.5情景下, 21世纪末的发电潜力比2020年代下降3.3%; 在减排力度最高的情景SSP1-1.9下, 全球年发电潜力会随着温度的下降而回升, 有望在21世纪末回到21世纪初的发电潜力。与最优情景SSP1-1.9相比, 其他SSPs情景下, 大部分(61%)网格化的风功率密度表现出下降趋势, 且温度上升越快, 风功率密度值下降越多, 未来可实现风能发电的潜力越小。

关键词 可再生能源; 风功率密度; 风能发电潜力; 共享社会经济路径

Historical Trend and Future Projections of Global On-shore Wind Power Generation Potential

LIU Wang, XING Xiaofan, WANG Rong[†]

Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200438;
[†] Corresponding author, E-mail: rongwang@fudan.edu.cn

Abstract By constructing simple linear regression model in space, global wind power generation potential and wind power density during 2021–2100 are predicted based on the historical data in 1981–2020 including wind speed, wind power density and annual average surface temperature from 1981 to 2020. From 1981 to 2020, the global wind power generation potential and wind power density show a declining trend, whereas the global annual average surface temperature shows an increasing trend, and there is a certain degree of correlation between the two trends. The results of simple linear regression models show that the mean of yearly total continental power generation potential and the annual average surface temperature in 11 regions are well correlated, negatively in most regions. Under different shared socio-economic pathways (SSPs) in the future, there will be large differences in the global total annual average on-shore wind power generation potential. Under the SSP5-8.5 scenario with the fastest temperature rise, by the end of this century, global total on-shore wind power generation potential will be reduced by 3.3% relative to the level in 2020. By contrast, under the SSP1-1.9 scenario with the highest carbon emission reduction, global total on-shore wind power generation potential is likely returning to the level in 2020 as global annual average surface temperature falls in the second half of this century. Compared with the best scenario SSP1-1.9, the wind power density is decreasing on 61% of global lands under the other SSP scenarios. The faster the temperature is rising in a SSP scenario, the more the wind power density values will decline, and the less the potential of wind power generation will be achieved in the future.

Key words renewable energy; wind power density; wind power generation potential; shared socioeconomic pathways

近年来,全球变暖的速度逐渐加快,对自然系统和人类社会造成广泛的威胁,包括极端气候事件增加、海平面上升以及野生动物种群和栖息地改变^[1-2]。为了减缓全球变暖,全球能源系统必须从主要基于化石燃料的能源体系转型为以可再生能源为基础的高效能源体系^[3-4]。作为一种可再生的清洁能源,风能具有储量大、分布广的特点,非常适合大力发展^[5]。

对于风能发电,国内外目前已有一些相关的研究。Liu等^[6]基于中国2430个气象站2006—2015年的风速数据,分析对比不同时间风速和风功率密度的变化情况,证明了不同时空之间的风能差异。Yu等^[7]利用1979—2007年的风速数据,研究中国6个地区之间风能容量因子的月变化趋势及日变化趋势。Li等^[8]利用1979—2013年的风速数据,评估不同季节、不同离岸距离等条件下渤海和黄海海域风机轮毂高度处的风速以及风功率的差异。Sherman等^[9]利用1979—2015年的风速数据,证明中国年均风能容量因子以及风能发电潜力的历史变化呈现下降的趋势,同时发现该下降趋势与长期的全球变暖和全球平均地表温度变化有关。Waewsak等^[10]通过了解泰国湾不同高度风速的分布情况,评估曼谷附近海域和整个泰国海域在技术支持范围内所能达到的风能发电潜力。郑崇伟等^[11]利用欧洲中期天气预报中心的风速数据,研究巴基斯坦瓜达尔港风能资源1979—2012年的历史变化趋势。Miao等^[12]分析不同来源的风速和风功率密度数据,结果表明1980—2016年间北半球各地的风能资源均在不同程度上呈现下降的趋势。Sahu等^[13]对比了全球5个风电大国(中国、美国、德国、印度和西班牙)风能发电相关参数的差异。Lu等^[14]基于2004—2009年全球陆地风速数据所展现的全球陆地风动能潜力、每个国家的风能发电潜力和全球风能容量因子的分布情况,评估全球范围内的风能发电潜力。Archer等^[15]利用肯尼迪航天中心1998—2002年的全球风速数据,分析全球范围内不同地区80 m高度处的风速及风级。Bandoc等^[16]选取国际可再生能源机构3种不同高度的风速和风功率密度数据,从全球尺度评估风能资源的丰富度,得出北美中部、南美南部、欧洲北部和西北部、亚洲北部以及东南亚是全球5个风能资源最丰富地区的结论。Zhou等^[17]分析美国国家环境预报中心1980—2009年的风速数据,评估全球陆地单位土地面积的风能发电潜力,

也证实了风能发电对解决世界能源需求的重要性。Jung等^[18]利用2008—2010年全球陆地的风速数据,分析全球陆地100 m高度处的风速分布、风功率密度分布以及每个国家年均风能发电潜力的分布,表明大力发展风电对满足电力需求是必不可少的。

上述研究通常只针对风能的区域性特征或全球历史变化趋势,很少涉及未来全球范围的风能发电潜力。本文考虑未来将通过大力发展清洁能源来减缓全球变暖这一需求,在分析全球陆地区域风能发电潜力及风功率密度历史数据的基础上,预测未来不同社会经济发展路径(shared socioeconomic pathways, SSPs)下各大洲的风能发电潜力,以期为风能发电的长期规划、全球碳减排政策的制定以及可再生能源的预测提供科学依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

全球表面温度数据来自美国独立气象监测组织“伯克利地球”^[19](<http://berkeleyearth.org/data/>),空间分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$,时间分辨率为月。全球地表风速以及风功率密度(零平面位移和地表粗糙度)数据来源于美国国家航空航天局(NASA)的地球观测数据^[20](<https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/>),空间分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.625^{\circ}$,时间分辨率为小时。上述历史数据的时间序列均为1981—2020年。未来全球表面温度数据为OSCAR模型对未来5种社会经济发展路径(SSPs)下的温度预测结果^[21]。

1.2 风能发电潜力的估算

风能发电指利用风能发电机将风的动能转化为电能^[20]。本文基于网格($0.5^{\circ}\times 0.625^{\circ}$)分辨率计算风能发电潜力 W (PWh/a),计算公式^[22-23]如下:

$$W = S \times \frac{P}{8D \times 8D} \times CF \times C_1 \times C_2 \times 24 \times 365 \times 10^{-12}, \quad (1)$$

式中, S 为可利用土地面积(m^2),根据网格大小计算; P 为风机额定功率,取值见表1; D 为风能发电风扇直径,取值见表1; C_1 为能量利用系数,取0.95(由于技术原因导致的能量损失)^[25]; C_2 为尾流效应系数,取0.90^[25];CF为容量因子,是风机实际功率与额定功率的比值^[26]。

风能发电机组实际输出功率与100 m高度处风速的关系见图1(a)。风速(V)根据原始数据中的地表风速外推获得,计算公式^[20]如下:

表 1 风机基本参数^[24]
Table 1 Fundamental parameters of wind turbine^[24]

型号	P/kW	切入风速 $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	额定风速 $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	切出风速 $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	D/m
GE 2.5MW-103	2500	3	12	25	103

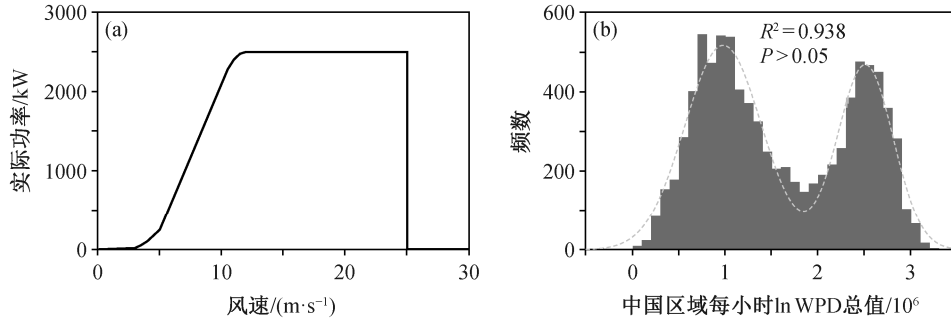


图 1 风能发电功率曲线^[24]和中国区域 lnWPD 的分布
Fig. 1 Wind power curves^[24] and the distribution of lnWPD in China

$$V = \frac{u^*}{k} \cdot \ln\left(\frac{h-d}{z_0}\right), \quad (2)$$

式中, u^* 为地表风速 (m/s) ; k 为卡门常数, 取 0.41^[27]; h 为风轮毂高度, 本研究中取 100 m^[23,28]; d 为零平面位移 (m) , z_0 为地表粗糙度 (m) 。

风功率密度(wind power density, WPD)指与风向垂直的单位面积中风所具有的功率 (W/m^2) , 与风速相关, 通常用来评估风能资源储量^[20]。距地面 100 m 高度处 WPD 的计算公式^[20]如下:

$$\text{WPD} = \rho \cdot V^3 / 2, \quad (3)$$

式中, ρ 为空气密度, 取 1.225 kg/m^3 ^[20], V 为 100 m 高度处的风速 (m/s) 。

本文将中国区域 2016 年数据的 lnWPD 值通过面积加权得到每小时的 lnWPD 总值。图 1(b)显示, lnWPD 呈双峰正态分布 $(P > 0.05, R^2 = 0.938)$ 。

1.3 相关性分析

为了获取影响风能发电潜力的因素, 本文拟使用皮尔逊相关系数分析 1981—2020 年之间全球平均地表温度和全球每个格点年 WPD 平均值或标准差之间的相关关系, 计算公式如下:

$$R_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \varepsilon_x)(Y_i - \varepsilon_y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \varepsilon_x)^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \varepsilon_y)^2}}, \quad (4)$$

式中, X 和 Y 为两个变量; R 为两个变量之间的皮尔逊相关系数; i 为数据个数, 本文中为 40 (1981—

2020 年); ε 为变量的均值。

1.4 风能发电潜力的预测

首先根据历史数据, 建立温度与风功率密度数据的回归方程, 然后结合未来不同 SSPs 情景下的温度, 实现对未来风功率密度的预测, 进一步估算未来的风速以及对应的发电潜力。

本文涉及的未来温度数据来源于 OSCAR 模型, 包括未来不同 SSPs 情景的全球年均表面温度和根据 OSCAR 模型中地区分类计算得出的不同 SSPs 情景的地区年均温度。对于 OSCAR 模型的地区分类, 本文使用 Houghton_2001 土地分类情景。该分类情景将全球陆地分为美国和加拿大、墨西哥及以南、欧洲西部和格陵兰岛、非洲北部和西亚、非洲南部、东欧和俄罗斯、中国和蒙古国、南亚和东南亚以及澳洲和日-韩-朝 9 个地区^[21], 将全球海洋和两极地区分别考虑为第 10 个和第 11 个地区。需要注意的是, 从 OSCAR 模型中获取的原始温度数据为相对于 1750 年的温度变化值。本文首先根据相邻两年的温度变化值之差, 得到该年份相对于前一年的温度变化值, 再结合前一年的温度绝对值, 得到该年份的温度绝对值, 用于回归模型的建立。本文选用可持续发展路径 SSP1-1.9、仅次于 SSP-1.9 的可持续发展路径 SSP2-4.5、区域竞争路径 SSP3-7.0 和以传统化石燃料为主的路径 SSP5-8.5 这 5 种未来 SSPs 情景, 最终得到未来不同情景下全球 11 个地区的年平均表面温度^[21]。

由于未来温度数据是基于 OSCAR 模型划分的 11 个区域计算的, 因此回归模型的自变量也选取基于 OSCAR 模型划分的 11 个土地分类下的历史平均温度^[19]。根据每一个格点对数化 WPD 年均值与 OSCAR 模型中 11 个地区年均温度 1981—2020 年历史数据建立的多元线性回归关系如下:

$$\overline{\ln(\text{WPD}_i)} = \sum_{j=1}^{j=11} \beta_j \cdot \bar{T}_j + \varphi_i, \quad (5)$$

式中, i 为本研究考虑的每一个格点; j 为 OSCAR 模型考虑的 9 个陆地地区以及海洋和两极地区, 共分为 11 类; $\overline{\ln(\text{WPD}_i)}$ 为对数化风功率密度的年均值; \bar{T}_j 为年均温度; β 为多元线性回归模型的斜率; φ 为多元线性回归模型的截距。

本文使用 matlab 软件实现原始数据的处理和分析、回归方程的建立和未来风能发电潜力的预测。

2 结果分析

2.1 1981—2020 年全球风能发电潜力和温度的变化

图 2(a) 显示, 全球陆地风能发电潜力的平均值是上下波动的, 1981—1990 年略微上升, 1991—2020 年有明显的下降趋势, 整体上是下降的, 下降速率约为 1.0 PWh/a。图 2(c) 显示, 发电潜力标准差的年际变化呈现与发电潜力平均值相似的变化趋势, 总体上也是下降的, 下降速率约为 0.6 PWh/a。

从图 2(b) 和 (d) 可以看出, 大部分区域(面积占 60.9%) 的 WPD 年平均值和标准差都是减少的, 仅南美、北美和非洲等地区的小部分区域是增加的。

为了研究风能发电组的容量因子(CF)是否会影响风能发电潜力的变化趋势, 本文定义一个指标 CF_{\max} , 即 1981—2020 年期间以月为单位计算得到的月均 CF 最大值。图 2(a) 和 (c) 显示, 根据 $CF_{\max} > 0.2$ 筛选后, 尽管格点发电潜力的平均值和标准差都有一定程度的增加(二者分别增加 4.1 和 3.9 PWh/a), 但整体上仍然保持下降趋势。图 2(b) 和 (d) 中用黑色圆点标示根据 $CF_{\max} > 0.2$ 筛选后 WPD 的空间分布, 可见大部分区域(面积占 64.1%) 的 WPD 年平均值或年标准差都是减少的, 仅南美、北美和非洲等地的小部分区域是增加的。

本文还分析了全球平均表面温度(global mean surface temperature, GMST) 的变化趋势。从图 2(e) 可以看出, 尽管 1981—2020 年期间平均表面温度有幅度为 0.5°~0.8° 的波动, 但总体上呈上升趋势。从

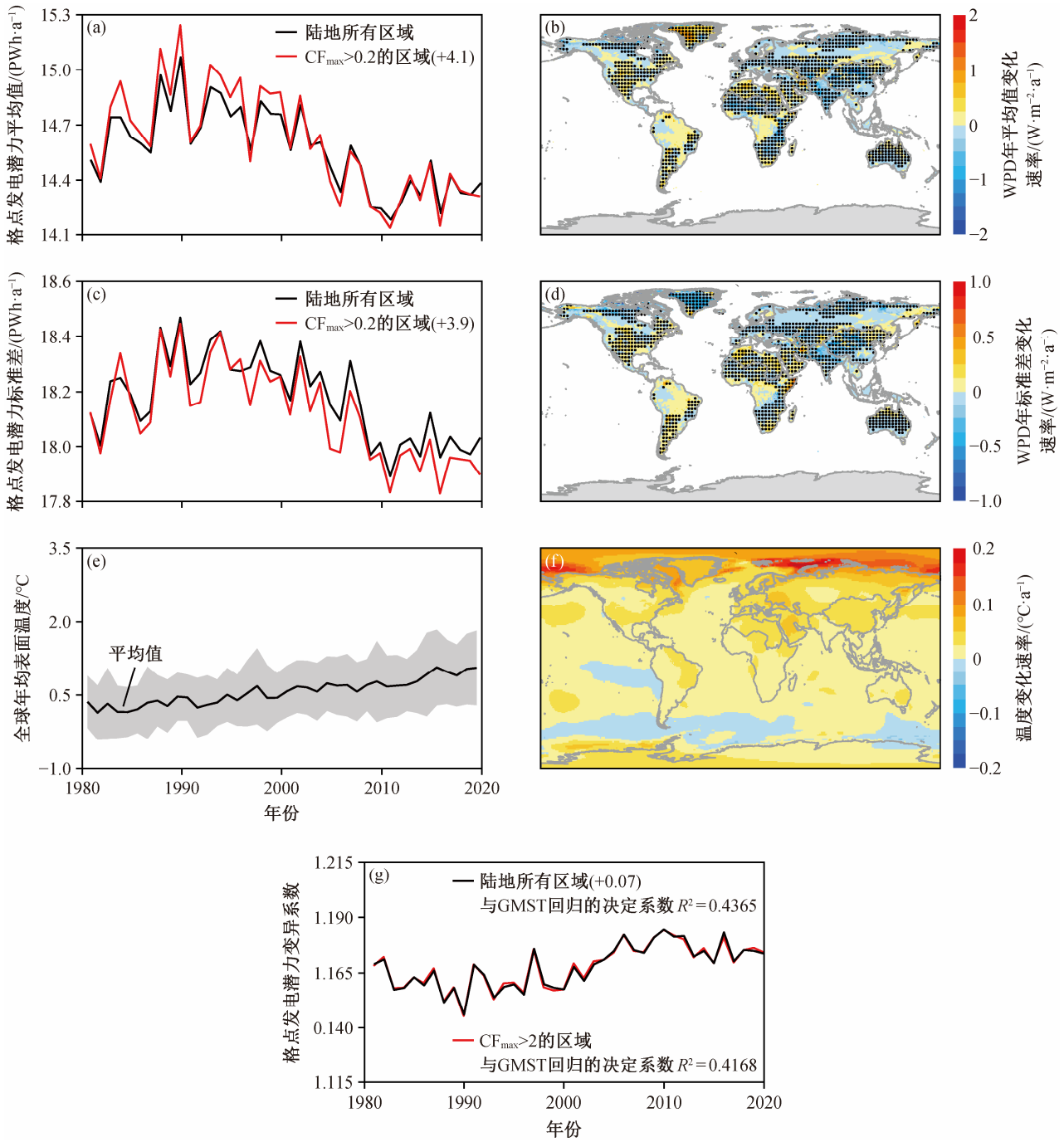
全球角度看, 过去的 40 年中, 每个 10 年期的温度增长速率分别为 0.0196, 0.0230, 0.0315 和 0.0464 °C/a, 说明随着时间的推移, 温度上升的速率在加快。从图 2(f) 可以看出, 几乎全球所有地区的年均温度变化率都为正值, 说明大部分地区的温度都上升了, 只有主要分布在海洋上的面积占 9.2% 的区域变化率为负值。虽然温度上升速率都为正值, 但不同区域的上升速率有所差异, 约 65% 的区域温度上升速率为 0~0.025 °C/a, 约 26% 的区域超过 0.025 °C/a, 约 1.3% 的区域甚至达到 0.1 °C/a。

图 2(g) 显示, 发电潜力变异系数有一定的上升趋势, 与平均表面温度有较好的相关性, 决定系数 R^2 可达 0.4 以上, 可见全球风能发电潜力变异系数的变化趋势与全球变暖趋势一致, 说明未来全球风能发电潜力可能受温度影响。发电潜力变异系数年际变化的宏观物理意义表现为风能发电潜力具有不确定性, 且这种不确定性随着全球风能发电潜力平均值的减少而增大。因此需要采取措施, 降低风能发电潜力不确定性带来的影响, 如可利用蓄电池储能等技术^[20]来增加风能发电的可靠性。

2.2 风功率密度与温度的相关性分析

图 2 显示, 历史风能发电潜力(风功率密度) 呈现与年均表面温度相反的变化趋势。为了厘清两者的关系, 本文以格点为单位, 对年均表面温度和 WPD 年均值和标准差分别进行 Pearson 相关性分析, 结果如图 3 所示。可以看出, 南美等地区的温度与风功率密度平均值和标准差正相关, 另外一些区域二者负相关。5.48% 的区域温度与 WPD 平均值的相关系数在 0.6~1.0 之间, 16.52% 的区域在 0.4~0.6 之间; 3.28% 的区域温度与 WPD 标准差的相关系数在 0.6~1.0 之间, 13.12% 的区域在 0.4~0.6 之间。12.4% 的区域温度与 WPD 平均值的相关性 P 值小于 0.001, 7.94% 的区域温度与 WPD 标准差的相关性 P 值小于 0.001。上述相关性分析结果表明, 温度与 WPD 平均值和 WPD 标准差均有一定的相关性, 且部分区域相关性较显著。相比而言, 在较大范围内温度与 WPD 平均值的相关系数 (>0.4) 及显著性水平 (<0.001) 更高。因此, 本文通过温度与发电潜力平均值的多元回归模型来说明二者之间的相关性。

本研究进一步计算全球六大洲(北美洲、南美洲、欧洲、亚洲、澳洲和非洲) 基于多元回归模型得到的风能发电潜力拟合值, 将其与历史风能发电潜力真实值进行对比(图 4), 多元拟合回归系数如



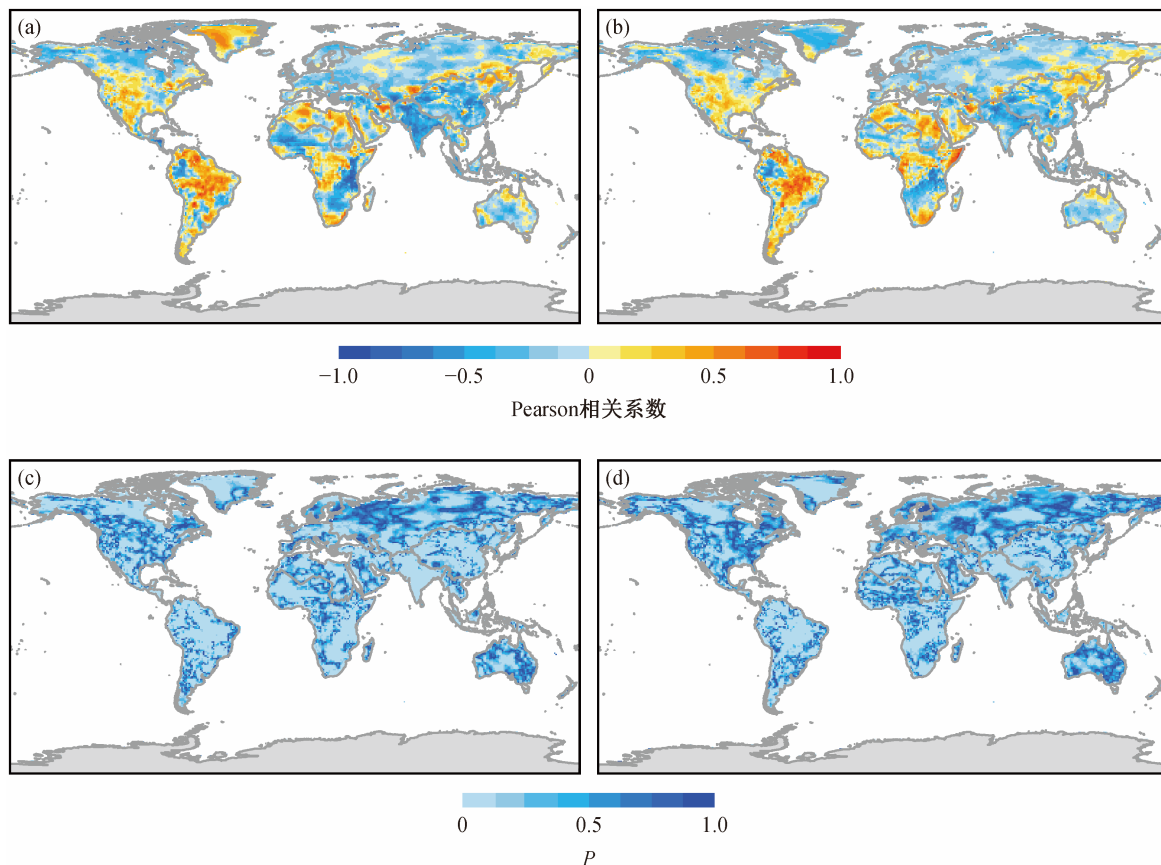
(a) 全球发电潜力平均值的年际变化; (b) 根据 $CF_{max} > 0.2$ 筛选后陆地上每个格点($0.5^\circ \times 0.625^\circ$) WPD 年平均值变化速率的空间分布; (c) 全球发电潜力标准差的年际变化; (d) 根据 $CF_{max} > 0.2$ 筛选后陆地上每个格点($0.5^\circ \times 0.625^\circ$) WPD 年标准差变化速率的空间分布; (e) 全球平均表面温度的年际变化; (f) 温度变化速率的空间分布; (g) 全球发电潜力变异系数的年际变化

图 2 全球风能发电潜力和年均温度的历史趋势及其变化量的空间分布

Fig. 2 Historical trends and spatial distribution of global wind energy generation potential and average annual temperature

表 2 所示。从图 4 可以看出, 尽管回归计算未使历年发电潜力的拟合值与真实值一一对应, 但其得到的拟合值与真实值变化趋势几乎一致。亚洲地区风能发电潜力真实值与拟合值的相关性最强, R^2 值达

到 0.74, 其余依次为北美洲(0.52)、非洲(0.46)、欧洲(0.42)、南美洲(0.42)和澳洲(0.19)。从整体上看, 温度与风能发电潜力的相关性较强。澳洲这一相关性较小, 说明其风能发电潜力的变化可能不止被温



(a)和(b)分别为全球温度与 WPD 平均值及标准差的相关系数; (c)和(d)分别为全球温度与 WPD 平均值及标准差相关性的 P 值。灰色填充区为未考虑区域, 下同

图 3 全球温度与风功率密度平均值和标准差的相关性及 P 值

Fig. 3 Correlation and P value between global temperature and mean and standard deviation of wind power density

度的变化所解释, 未来应加强对澳洲地区风能发电潜力影响因素的研究。

2.3 风能发电潜力的预测

基于 1.4 节的温度数据, 获得 OSCAR 模型 5 种 SSPs 情景下的温度变化趋势(图 5(a))。可以看出, 对于中间路径 SSP2-4.5、区域竞争路径 SSP3-7.0 以及以传统化石燃料为主的路径 SSP5-8.5, 全球温度未来 80 年是持续上升的; 对于可持续发展路径 SSP1-1.9 和 SSP1-2.6, 全球温度未来 80 年呈现先上升后下降的趋势, 这两条路径的转折点分别是 2039 年和 2070 年, 转折点的温度分别是 1.56° 和 1.81° 。

基于格点年均 $\ln WPD$ 与温度的多元回归模型, 利用未来不同 SSPs 情景下 11 个地区的温度数据, 得到未来 5 种 SSPs 情景下全球风能发电潜力的变化趋势(图 5(b))。可以看出, 与温度呈现的趋势相反, SSP2-4.5, SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下未来 80 年的风能发电总潜力呈现持续下降的趋势, 且单位时

间内温度的下降幅度越大, 风能年发电总潜力的下降幅度也越大, 相较于本世纪 20 年代初的发电能力, 本世纪末年发电总潜力将分别下降 1.99%, 2.98% 和 3.27%。相反地, SSP1-1.9 和 SSP1-2.6 情景下的风能发电潜力呈现先下降后上升趋势, 两种情景下的风能发电潜力最小值分别为 704 和 701 PWh/a, 相较于两者本世纪 20 年代初的发电潜力 706.6 和 706.6 PWh/a, 下降的幅度分别为 0.36% 和 0.79%。对于 SSP1-1.9 情景, 2040 年之后, 全球年风能发电总潜力会随着温度的冷却而回升, 有望在本世纪末回到本世纪初的发电潜力; 在 SSP1-2.6 情景下, 2070 年之后, 全球年风能发电总潜力也会随着温度的冷却而回升, 但是, 如果想回到本世纪 20 年代初的发电潜力, 则需要更长的时间。

上述结果说明, 为使全球风能发电潜力维持在较高水平, 本文考虑的 5 种 SSPs 情景中, SSP1-1.9 路径是最优的。因此, 应尽快使用较为严格的可持

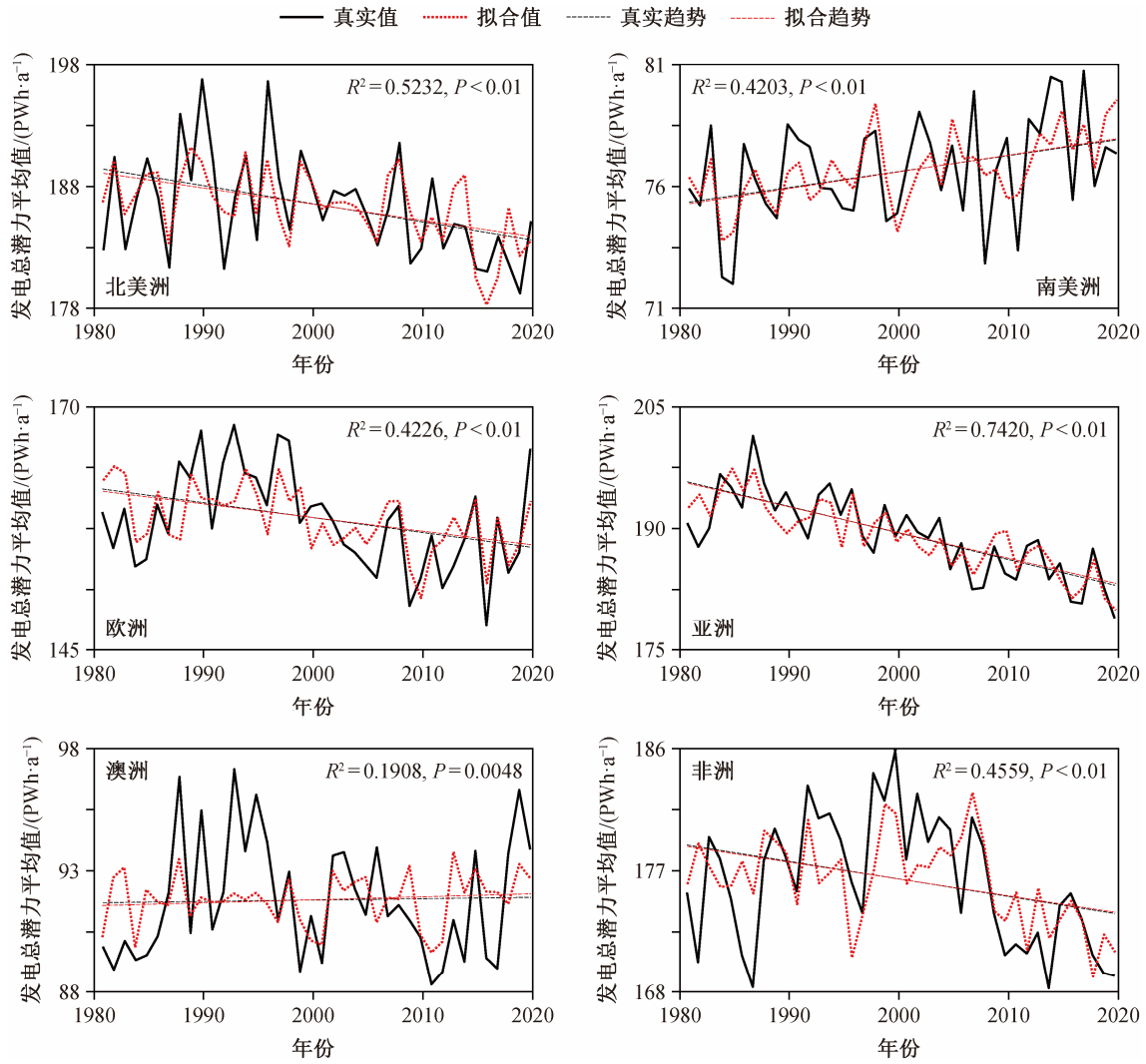


图 4 各大洲年发电总潜力平均值的历史变化趋势

Fig. 4 Historical trend of mean of yearly total continental power generation potential

表 2 各大洲风能发电潜力平均值与温度的回归关系系数

Table 2 Regression relationship coefficients of wind power generation and temperature for different continents

系数	北美洲	南美洲	欧洲	亚洲	澳洲	非洲
ζ_1	-1.790	1.072	1.593	-0.827	-1.017	1.770
ζ_2	-0.200	4.008	5.296	2.488	2.790	-8.486
ζ_3	2.507	-0.247	-2.402	-2.739	0.017	3.830
ζ_4	5.140	-0.113	0.164	3.142	-0.883	-5.993
ζ_5	-2.187	0.583	-5.113	-2.480	0.165	6.907
ζ_6	-0.598	-0.133	1.066	-2.422	0.491	1.719
ζ_7	1.374	0.934	5.774	-0.921	-0.164	4.778
ζ_8	-7.795	-4.320	-11.594	1.419	3.743	6.212
ζ_9	2.728	2.778	2.117	1.710	2.802	-0.465
ζ_{10}	1.078	0.040	-1.388	0.429	-0.339	-1.965
ζ_{11}	-17.786	-2.265	-4.659	-12.707	-7.775	-26.412
c	193.680	74.502	161.634	197.598	91.615	181.075

说明: $\zeta_1 \sim \zeta_{11}$ 分别为拟合方程中 11 个地区温度的系数, c 为拟合方程中的常数项。

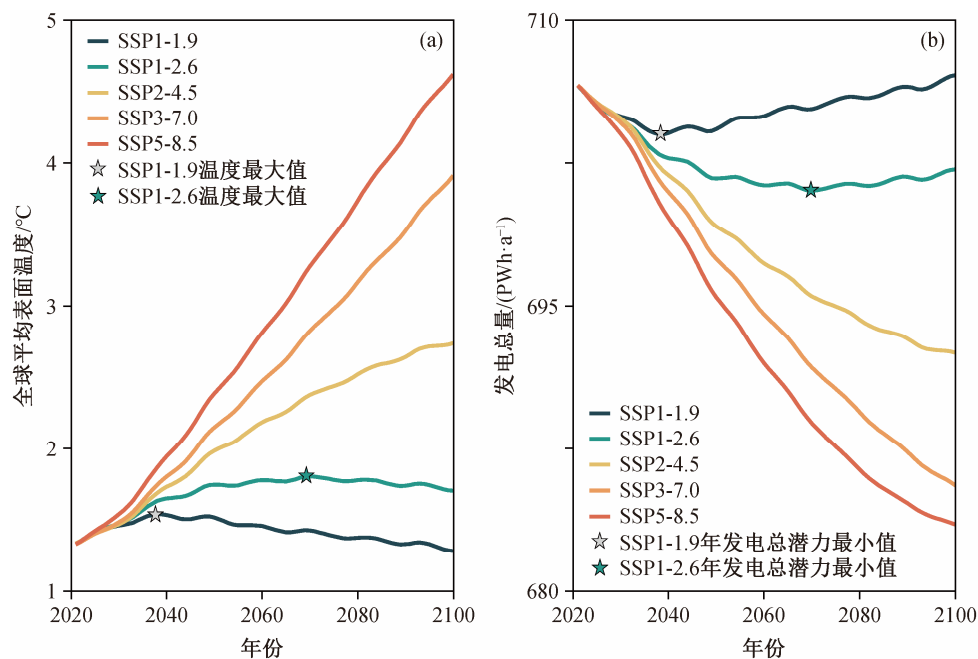


图 5 未来 5 种 SSPs 情景下全球平均表面温度和风能发电总潜力的变化趋势
Fig. 5 Future trend of GMST and global total wind power generation potential under five SSPs

续发展路径, 尽快实现全球范围碳达峰的目标。

下面分析不同情景下 2100 年 WPD 的全球空间分布以及与最优情景 SSP1-1.9 的差异。从图 6 可以看出, 2100 年不同情景下的 WPD 空间分布是类似的, 格林兰岛附近、非洲北部、澳大利亚和中国西部等区域的 WPD 值较高, 说明未来这些地区风能发电的潜力较大。与最优情景 SSP1-1.9 相比, SSP1-2.6 情景下大部分区域的 WPD 值有所下降, 其中降幅在 $0\sim 50\text{ W/m}^2$ 范围的区域占 61%; 对于 SSP 2-4.5 情景, WPD 值降幅在 $0\sim 50\text{ W/m}^2$ 范围的区域占 56%, 在 $50\sim 100\text{ W/m}^2$ 范围的区域占 5%; 对于 SSP3-7.0 情景, WPD 值降幅在 $0\sim 50\text{ W/m}^2$ 范围的区域占 47%, 降幅大于 100 W/m^2 的区域占 14%; 对于 SSP5-8.5 情景, WPD 值降幅在 $0\sim 50\text{ W/m}^2$ 范围的区域占 42%, 降幅大于 100 W/m^2 的区域占 19%。

总的来说, 相比于最优情景 SSP1-1.9, 其他 4 种情景下的全球大部分网格化 WPD 值都是下降的, 下降的区域占 61%。区别在于, SSPs 情景中的气候变暖越快(即 2100 年时全球温度越高), 则相比于最优情景 SSP1-1.9, 该情景下的 WPD 值下降越多, 未来可实现风能发电的潜力也越小。

3 结论

本文分析了全球风能发电潜力和风功率密度与

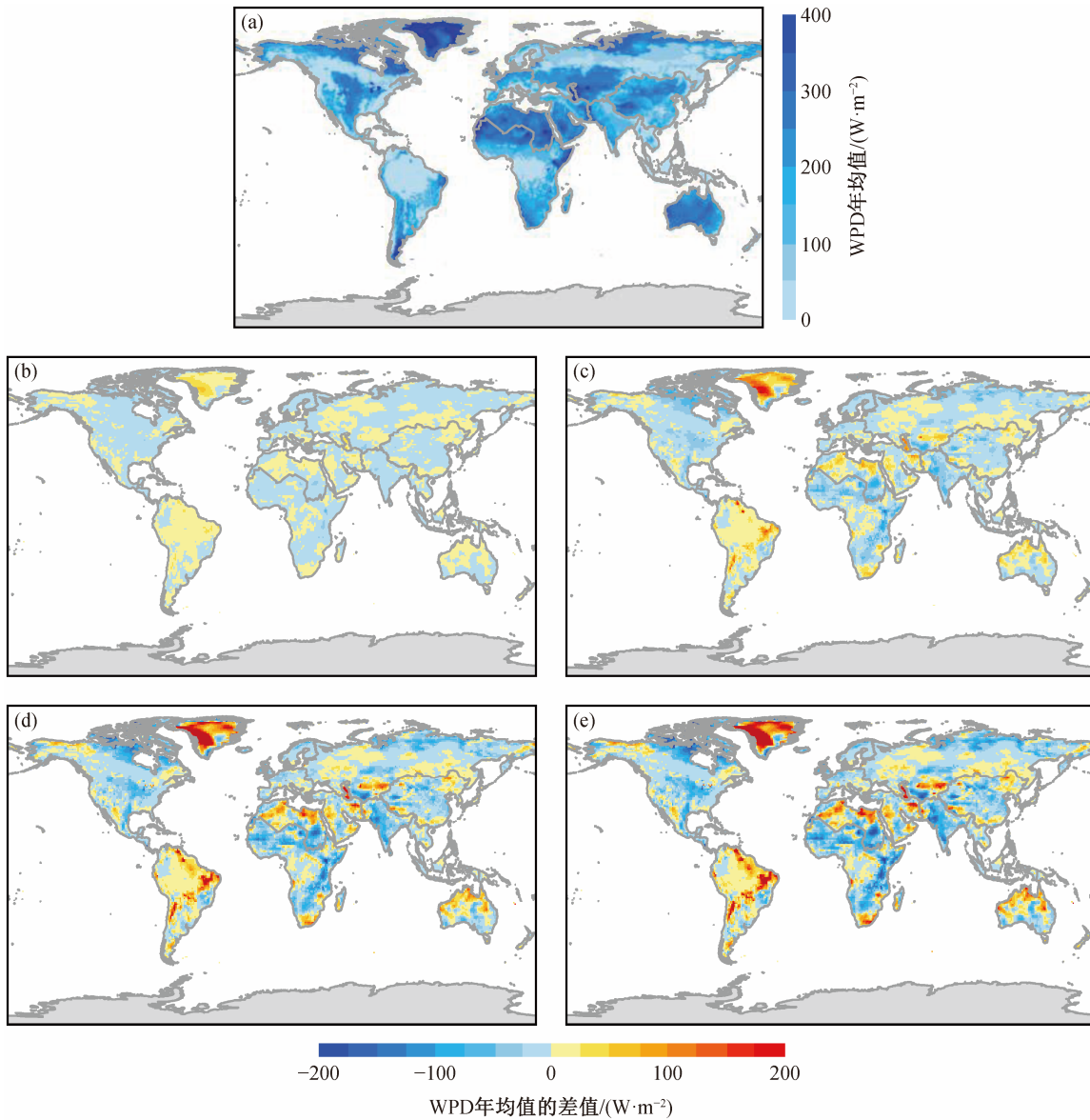
平均表面温度的关系, 通过建立多元线性回归模型, 对未来全球风能发电潜力进行预测, 得到以下主要结论。

1) 在过去的 40 年, 全球风能发电潜力的平均值和标准差都呈现速率逐渐变大的下降趋势。与之相反, 尽管各地区温度略有差异, 不同年份有一定的波动, 区域及全球平均表面温度呈现速率逐渐变大的上升趋势。对全球大部分区域来说, 年均风能发电潜力与温度负相关。

2) 由于不同 SSPs 情景下未来温度变化的差异, 到本世纪末, 全球总的年风能发电潜力将呈现较明显的差异。在温度上升最快的 SSP5-8.5 情景下, 本世纪末的发电潜力相比于本世纪初 20 年代可下降 3.27%, 主要是由于温度的升高越快, 风功率密度的减少越快, 导致风能发电潜力的减少也越快。

未来风能的发电潜力除受全球温度变化的影响外, 还会受技术发展等其他因素的影响。因此, 对于未来风能发电潜力的详细评估需要更加综合的模型去进行研究。此外, 未来研究的重点将是风能发电潜力的变化对减排的影响以及对全球变暖的反馈作用。

本文分析全球风能发电潜力在历史时期和未来不同 SSPs 情景下时空变化趋势的研究方法, 可推广到其他能源的时空变化以及未来预测研究中。



(a) 全球 WPD 年均值; (b) SSP1-2.6 与 SSP1-1.9 全球 WPD 年均值的差异; (c) SSP2-4.5 与 SSP1-1.9 全球 WPD 年均值的差异; (d) SSP3-7.0 与 SSP1-1.9 全球 WPD 年均值的差异; (e) SSP5-8.5 与 SSP1-1.9 全球 WPD 年均值的差异

图 6 5 种 SSPs 情景下 2100 年全球 WPD 年均值的分布及其与最优情景 SSP1-1.9 的差异

Fig. 6 Distribution and comparison with SSP1-1.9 of annual average of WPD in 2100 under five SSPs

参考文献

[1] Mora C, Spirandelli D, Franklin E C, et al. Broad threat to humanity from cumulative climate hazards intensified by greenhouse gas emissions. *Nature Climate Change*, 2018, 8(12): 1062–1071

[2] Li Longhui, Zhang Yue, Zhou Tianjun, et al. Mitigation of China’s carbon neutrality to global warming. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 5315

[3] Gielen D, Gorini R, Wagner N, et al. *Global energy*

transformation: a roadmap to 2050 [EB/OL]. International Renewable Energy Agency (IRENA), 2019. (2019–04–09) [2021–10–09]. <https://www.h2knowledgencentre.com/content/researchpaper1605>

[4] Rogelj J, Luderer G, Pietzcker R C, et al. Energy system transformations for limiting end-of-century warming to below 1.5°C. *Nature Climate Change*, 2015, 5(6): 519–527

[5] 曹政. 风电并网对电力系统调度运行影响的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2016

- [6] Liu Fa, Sun Fubao, Liu Wenbin, et al. On wind speed pattern and energy potential in China. *Applied Energy*, 2019, 236: 867–876
- [7] Yu Dayang, Liang Jun, Han Xueshan, et al. Profiling the regional wind power fluctuation in China. *Energy Policy*, 2010, 39(1): 299–306
- [8] Li Delei, Geyer B, Bisling P. A model-based climatology analysis of wind power resources at 100-m height over the Bohai Sea and the Yellow Sea. *Applied Energy*, 2016, 179: 575–589
- [9] Sherman P, Chen Xinyu, McElroy M B. Wind-generated Electricity in China: decreasing potential, inter-annual variability and association with changing climate. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 16294
- [10] Waewask J, Landry M, Gagnon Y. Offshore wind power potential of the Gulf of Thailand. *Renewable Energy*, 2015, 81: 609–626
- [11] 郑崇伟, 高悦, 陈璇. 巴基斯坦瓜达尔港风能资源的历史变化趋势及预测. *北京大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(4): 617–626
- [12] Miao Haozeyu, Dong Danhong, Huang Gang, et al. Evaluation of Northern Hemisphere surface wind speed and wind power density in multiple reanalysis datasets. *Energy*, 2020, 200: 117382
- [13] Sahu B K, Hiloidhari M, Baruah D C. Global trend in wind power with special focus on the top five wind power producing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 19: 348–359
- [14] Lu Xi, McElroy M B, Kiviluoma J. Global potential for wind-generated electricity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(27): 10933–10938
- [15] Archer C L, Caldeira K. Global assessment of high-altitude wind power. *Energies*, 2009, 2(2): 307–319
- [16] Bandoc G, Právālie R, Patriche C, et al. Spatial assessment of wind power potential at global scale: a geographical approach. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 200: 1065–1086
- [17] Zhou Yuyu, Luckow P, Smith S J, et al. Evaluation of global onshore wind energy potential and generation costs. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(14): 7857–7864
- [18] Jung C, Taubert D, Schindler D. The temporal variability of global wind energy — long-term trends and interannual variability. *Energy Conversion and Management*, 2019, 188: 462–472
- [19] Rohde R A, Hausfather Z. The Berkeley earth land/ocean temperature record. *Earth System Science Data Discussions*, 2020, 12: 3469–3479
- [20] Gao Yang, Ma Shaoxiu, Wang Tao, et al. Assessing the wind energy potential of China in considering its variability/intermittency. *Energy Conversion and Management*, 2020, 226: 113580
- [21] Xu S Q, Wang R, Gasser T, et al. Delayed use of bio-energy crops might threaten climate and food security. *Nature*, 2022, 609: 299–306
- [22] Masters G M. *Renewable and efficient electric power systems*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013
- [23] Lu T G, Sherman P, Chen X Y, et al. India’s potential for integrating solar and on-and offshore wind power into its energy system. *Nature Communications*, 2020, 11: 4750
- [24] Allen R C, Nie Y L, Avraamidou S, et al. Infrastructure planning and operational scheduling for power generating systems: an energy-water nexus approach. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2019, 47: 233–238
- [25] Erkkā R, Hannele H, Juha K, et al. Effects of turbine technology and land use on wind power resource potential. *Nature Energy*, 2018, 3(6): 494–500
- [26] Huang J L, Lu X, McElroy M B. Meteorologically defined limits to reduction in the variability of outputs from a coupled wind farm system in the Central US. *Renewable Energy*, 2014, 62: 331–340
- [27] 肯巴提·波拉提. 城市下垫面零平面位移和粗糙长度的计算[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015
- [28] Jacobson M Z, Delucchi M A, Cameron M A, et al. Low-cost solution to the grid reliability problem with 100% penetration of intermittent wind, water, and solar for all purposes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(49): 15060–15065