

张飞民,王澄海,谢国辉,等. 气候变化背景下未来全球陆地风、光资源的预估[J]. 干旱气象,2018,36(5):725-732, [ZHANG Feimin, WANG Chenghai, XIE Guohui, et al. Projection of Global Wind and Solar Energy over Land Under Different Climate Change Scenarios During 2020-2030[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(5):725-732], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-05-0725

气候变化背景下未来全球 陆地风、光资源的预估

张飞民¹,王澄海¹,谢国辉²,孔维政²

(1. 兰州大学大气科学学院,甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,
甘肃 兰州 730000;2. 国网能源院有限公司,北京 102209)

摘要:基于CMIP5计划的多模式集合平均结果,预估了未来不同气候变化情景下,2020—2030年全球陆地风能和太阳能资源的变化。结果表明,多模式集合平均结果对全球风能、太阳能资源的模拟具有较高的可信度。不同气候情景(RCPs)下,未来2020—2030年间全球陆地风能、太阳能资源的变化(相对于1986—2005年)具有明显的区域性差异,其中,美洲、非洲和澳洲的风资源有所增加,而欧洲风能资源丰富区则有所减小;亚洲(如中国西北和中亚地区)的风资源在RCP2.6情景下呈增加趋势,而在RCP4.5和RCP8.5情景下则呈现减小趋势。全球陆地太阳能资源在未来不同RCPs情景下均呈增加趋势,尤其在欧洲光能资源丰富区。全球陆地上的风能、太阳能资源存在明显的季节变化特征,且季节变率在不同地区差异较大。不同丰富区风能和太阳能资源的变化趋势及变化幅度在不同RCPs情景下有一定差异,表明风能和太阳能资源的未来变化对全球气候变化响应的复杂性。

关键词:风光资源;未来预估;气候变化情景;CMIP计划

文章编号:1006-7639(2018)05-0725-08 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-05-0725

中图分类号:P467

文献标志码:A

引言

近年来,作为清洁能源的重要组成部分,风能和太阳能的利用在全球得到了快速发展。全球风能委员会(GWEC)对全球未来风电市场的预估表明,未来全球对可再生能源的需求比例将逐渐提高,风电市场会稳步增长,尤其在亚洲、欧洲和北美地区。

近地层风速和地表太阳辐射作为再生能源的基本要素,存在显著的年代际变化和区域差异,近年来再生资源的评估与预估成为全球关注的热点之一^[1-10]。研究表明,南北半球热带及中纬度大部分地区的近地层风速呈减弱趋势,而高纬度地区则呈增强趋势^[11-12]。中国地区日平均风速大于 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的日数减少,风速整体呈减小趋势^[13],风能的变化与东亚季风环流和下垫面等因素密切相关^[14]。中国地表太阳辐射的年代际变化距平存在着“升-降”

相间的变化特征,总体也呈下降趋势^[15],这主要与低云量变化和人类活动有关^[16];而欧洲地区到达地表的太阳辐射则呈增加趋势,增幅约为5%^[17]。

伴随着全球气候变化,未来风能和太阳能资源的储量和分布也将发生相应的改变。研究认为,受全球变暖影响,未来北半球中纬度地区的平均风能将减小,而热带和南半球地区的平均风能将增大^[18];21世纪,中国10 m高度处的年平均风速在高排放(A2)、中等排放(A1B)和低排放(B1)情景下均呈减小趋势,且随着排放情景的增加,减小趋势越显著^[19];在A2排放情景下,21世纪风能资源的空间分布与20世纪后40 a基本相同,且年平均风速在21世纪前半叶存在减弱趋势,而后半叶则以增强趋势为主^[20];在中等排放(A1B)情景下,美国大部分地区的年平均风速呈现增加趋势,最大增量在 $0.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右^[21];在RCP4.5和RCP8.5排放情

收稿日期:2018-02-24;改回日期:2018-03-29

基金项目:国家电网科技项目“中远期可再生能源基地资源特性分析预测研究”(B3680116048700ZS000000)和兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(lzujbky-2017-71)共同资助

作者简介:张飞民(1987—),男,博士,讲师,主要从事数值天气预报研究。E-mail: zfm@lzu.edu.cn。

通信作者:王澄海,男,教授,主要从事风、光电功率的预测和评估研究。E-mail: wch@lzu.edu.cn。

景下,南非地区的风速增量不超过 6%^[22];在气候变化情景下,未来欧洲中北部(如波罗的海及其周边地区)风能资源将增加,而地中海沿岸及法国大部分地区的风能资源将减小,但年际变化不明显^[23-24]。全球气候变暖背景下,未来太阳能资源的预估结果表明,美国大陆季节尺度的太阳辐射将有 0%~20% 的减小趋势^[25];日本,暖季太阳辐射将会增加,冷季太阳辐射将会减小^[26];欧洲中部和南部的太阳辐射整体将增加 5%~10%,而欧洲北部和东部冬季太阳辐射将下降 5%~15%^[27];尼日利亚的太阳辐射将减小,尤其南部地区^[28]。

综上所述,作为风、光资源的近地层风速和地表太阳辐射对未来气候变化响应显著,但存在较大的不确定性。未来风、光资源的变化涉及到全球再生资源的开发利用、企业发展、资源建设布局,提前预估气候变化背景下未来风能、太阳能资源的可能变化,对国民经济发展具有重大现实及科学意义。

本文试图利用国际耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5, Coupled Model Inter-comparison Project Phase 5)的模拟结果,预估 2020—2030 年期间全球陆地风、光要素的可能变化,并给出风、光资源的时空变化特征,为风、光资源开发利用的中、长远规划提供科学参考依据。

1 资料和方法

尽管气候模式存在较大的不确定性,但仍然是目前预估未来气候变化最为可靠和不可或缺的工

具。本文使用 CMIP5 中近地层气温、风速、向下短波辐射等逐月资料,对未来全球陆地风速和太阳辐射的变化进行分析研究。为保证模式统一,选取了历史试验(historical test)和未来不同典型排放浓度情景试验(RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5)中包括以上变量的 16 个气候模式。考虑到在相同排放情景下,不同气候模式的分辨率会对模拟结果产生差异,采用双线性插值方法将所有模式结果统一插值到 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的格点上。为便于比较,采用 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)第一工作组第五次评估报告(AR5, fifth assessment report)的定义,将 1986—2005 年作为当前气候参考时段。

关于全球气候模式对近地层风速和地表太阳辐射的模拟能力,目前的检验和评估分析尚少,这主要受限于模式对两要素模拟的较大不确定性。LOEW 等^[29]研究表明,在全球尺度上 CMIP 模式的评估结果很大程度上依赖于对模式资料的再分析,太阳辐射年代际变化的模拟也存在较大的误差和不确定性。本文在对比分析历史同期 CMIP 模拟结果对 CRU(climate research units, version 4.01)再分析资料中气温和降水的模拟能力基础上,选取了 8 个模式(表 1)进行等权重集合平均,预估未来不同气候情景(RPCs)下 2020—2030 年全球陆地风能、太阳能资源相对于历史参考时期的变化。需要指出的是,上述方法的合理性在气候变化预估领域已得到广泛认可,多模式集合平均的模拟能力较单一模式更可靠。

表 1 用于风、光资源预估的 CMIP5 模式基本信息

Tab. 1 Summary of CMIP5 models to estimate wind and solar powers in the future

模式名称	国家	分辨率	积分时段	
			历史试验	未来预估试验
CanESM2	加拿大	$2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$	1850—2005 年	2006—2100 年
MIROC5	日本	$2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$	1850—2012 年	2006—2100 年
NorESM1 - M	挪威	$2.5^{\circ} \times 1.875^{\circ}$	1850—2005 年	2006—2100 年
IPSL - CM5A - LR	法国	$3.75^{\circ} \times 1.875^{\circ}$	1850—2005 年	2006—2300 年
IPSL - CM5A - MR	法国	$2.5^{\circ} \times 1.25^{\circ}$	1850—2005 年	2006—2100 年
HadGEM2 - ES	英国	$1.875^{\circ} \times 1.25^{\circ}$	1859—2005 年	2006—2299 年
HadGEM2 - AO	韩国	$1.875^{\circ} \times 1.25^{\circ}$	1859—2005 年	2006—2299 年
MRI - CGCM3	日本	$1.125^{\circ} \times 1.125^{\circ}$	1850—2005 年	2006—2100 年

风能是空气运动的动能,是风力机叶片面积、风速3次方及空气密度的乘积。风力机叶片单位面积上的风能定义为:

$$W = \frac{1}{2}\rho v^3 \quad (1)$$

式中: W 为风力机叶片单位面积上的风能($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); ρ 为空气密度($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$); v 为风力机轮毂高度处的风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

上式表明,风能与空气密度和风速成正比,即空气密度和风速越大,风能越大。然而,空气密度具有空间差异性。为消除密度的空间差异而造成的风能偏差,根据气体状态方程,建立空气密度与海拔高度之间的关系来进行修正^[30]:

$$\rho_H = \rho_0 \left(1 - a \frac{H}{T_0}\right)^{4.26} \quad (2)$$

式中: ρ_H 为海拔高度 H 下的空气密度, ρ_0 为常温、标准大气压状态下的空气密度,取值 $1225 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ (海平面气温 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下空气的密度); H 为海拔高度(m); T_0 为绝对温度(K),取值为 273 K ; a 为大气垂直温度递减率,取值为 $0.0065 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

太阳能的大小主要取决于到达地面的太阳短波辐射通量密度(又称为辐照度, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)。一般来讲,到达地面的太阳辐照度越强,太阳能越丰富。

相对于历史参考期(1986—2005年),不同气候情景(RCPs)下2020—2030年全球陆地平均风能、太阳能的变化率(R_{RCPs})计算公式如下:

$$R_{\text{RCPs}} = \frac{M_{\text{RCPs}} - M_{\text{his}}}{M_{\text{his}}} \quad (3)$$

式中: M_{RCPs} 为未来不同气候情景下全球陆地年(季节)平均风能、太阳能; M_{his} 为历史参考期全球陆地年(季节)平均风能、太阳能。

2 多模式集合对全球近地层风速和太阳辐照度的模拟能力

图1是基于多模式集合平均的全球近地层风速和太阳辐照度分布。从图1(a)看出,全球近地层风能资源分布具有显著的区域差异,海洋上的风能资源整体高于陆地,海洋上风能丰富区主要集中在赤道以南靠近两极的广大地区,尤其是东半球区域,大部分海域风速在 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上;陆地上风能丰富区主要集中在北非、北美中部、中国西北部、中亚和澳大利亚等地区,低纬靠近赤道地区的风能资源相对较少。与美国国家航空航天局(NASA)发布的基于地面站观测资料的全球近地层风速^[31]相比,多模式集合平均结果较好地反映了全球实际近地层风速的大致分布状况,但模拟值偏小,这可能与近地层风速的模拟高度与观测高度不一致有关。

由图1(b)看出,全球太阳能资源主要集中在赤道附近南北回归线之间,太阳辐照度通常在 $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上,且以非洲北部撒哈拉地区最为丰富,非洲大陆东侧及南部、澳大利亚和中国西北地区也是太阳能资源丰富区。与NASA发布的全球地面气象站观测的太阳辐照度^[31]相比,多模式集合平均结果不仅有效反映了全球实际太阳辐射的大致分布状况,还对不同地区太阳辐射量值有较好的再现能力。

对比多模式集合平均结果与观测的全球近地层风速、太阳辐照度空间分布,多模式集合平均结果能够较好地再现全球风能、太阳能资源的分布和大小,具有较高的可信度。因此,本文利用多模式集合平均结果预估未来2020—2030年间风能、太阳能资源的可能变化趋势及其分布。

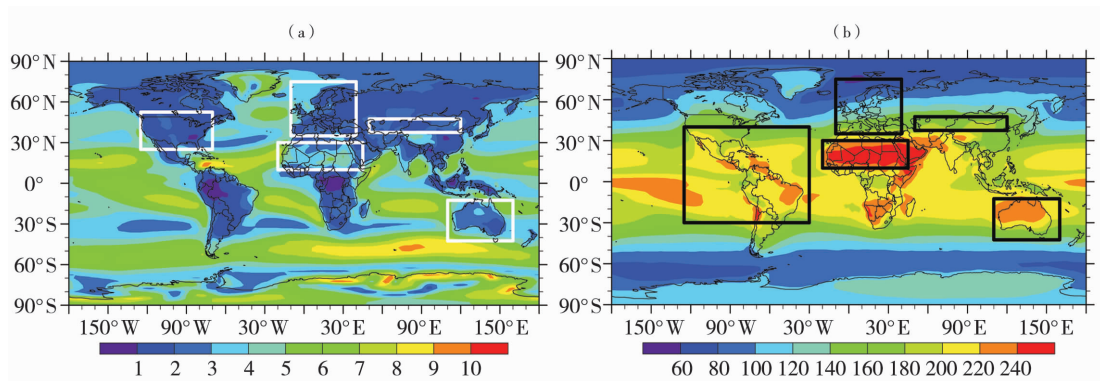


图1 多模式集合平均的全球近地层风速(a,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和地表太阳辐照度(b,单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)分布(方框内为高值区)

Fig. 1 Distribution of global near-surface wind speed (a, Unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and surface solar irradiance (b, Unit: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) based on simulated results of multi-model ensemble mean (Boxes for the areas with high values)

3 未来全球陆地近地层风功率密度和太阳辐照度的可能变化

图 2 是相对于参考期(1986—2005 年),不同气候情景下 2020—2030 年期间全球陆地近地层风能、太阳能资源的年变化率分布。可以看出,不同气候情景(RCPs)下,未来 2020—2030 年全球陆地风能资源变化具有明显的空间差异性。在 RCP2.6 和 RCP8.5 气候情景下,与 1986—2005 年期间相比,2020—2030 年大部分陆地风能资源表现为增加趋势,南极洲大陆、格陵兰岛、加拿大西部、俄罗斯等部分区域表现为减少趋势,风资源丰富区主要分布在东亚、东南亚、中国北部和东部、蒙古地区、中亚、美洲 30°S — 30°N 地区、澳大利亚东北

部、非洲撒哈拉沙漠以南地区。目前,中国东部、内蒙古、河西走廊、新疆等地区是中国风能资源最为丰富的地区,在过去 10 a 间,上述地区建立了大规模的风电基地;在 RCP2.6 和 RCP8.5 气候情景下,中国这些地区的未来风能资源依然很丰富。RCP4.5 情景下,2020—2030 年风能资源的变化分布特征与 RCP2.6、RCP8.5 气候情景下相似,但风能资源增加范围明显减少,且增加幅度相对较弱,其中欧洲大陆、南极洲大陆、中亚绝大部分区域表现出减小趋势。不同 RCPs 情景下,2020—2030 年陆地风能资源变化的空间差异性,可能与全球气候变暖背景下极地气候和全球海陆热力梯度的变化有关^[22],原因仍有待进一步深入分析。

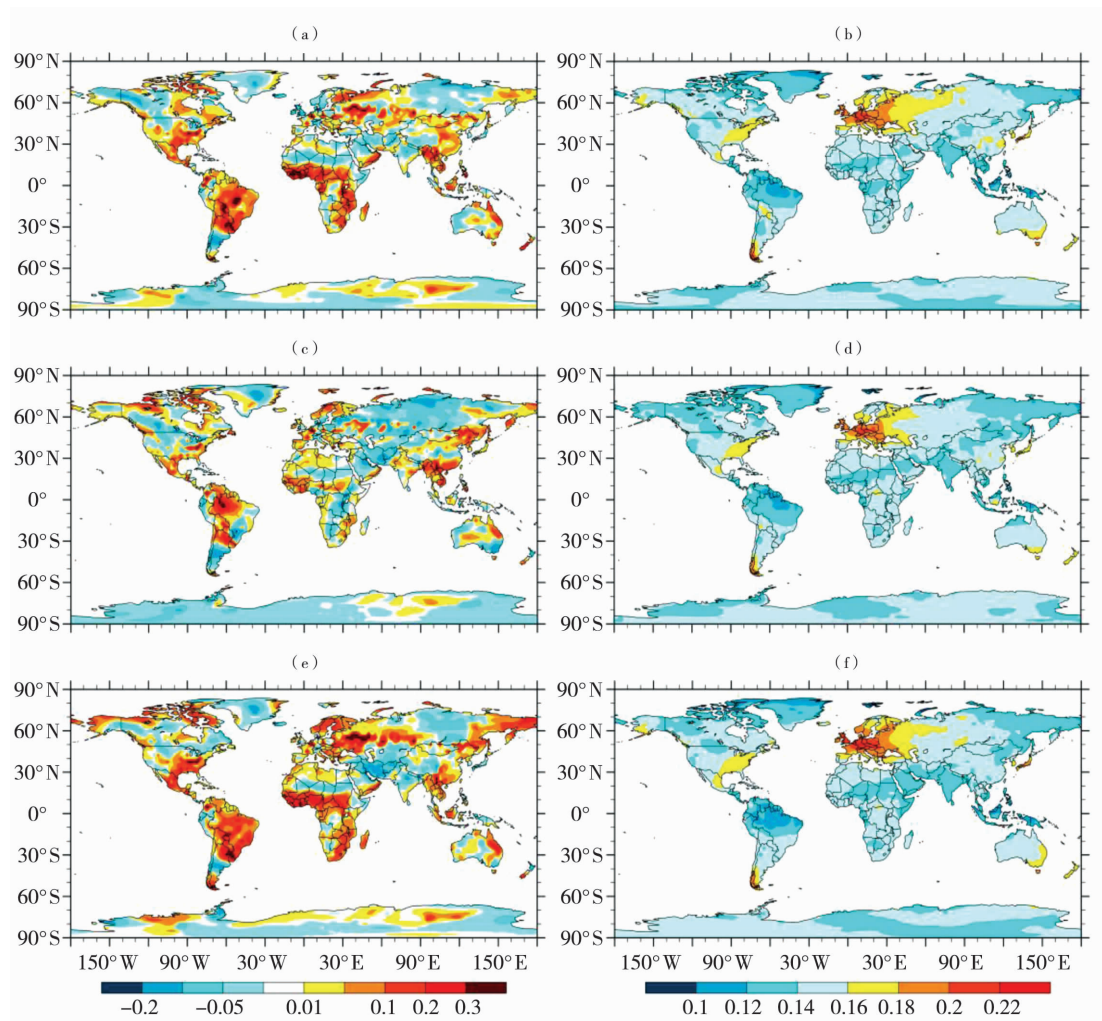


图 2 不同气候情景下 2020—2030 年全球陆地平均风能(a、c、e)和太阳能(b、d、f)的变化率(相对于 1986—2005,下同)

(a、b)RCP2.6, (c、d)RCP4.5, (e、f)RCP8.5

Fig. 2 The change rate of global annual mean wind energy (a, c, e) and solar energy (b, d, f) under different climate scenarios from 2020 to 2030 over land

(Compared with the period from 1986 to 2005, the same as below)

(a, b)RCP2.6, (c, d)RCP4.5, (e, f)RCP8.5

相对于参考期,不同 RCPs 情景下,2020—2030 年期间全球太阳能资源均呈现增加趋势,且在欧洲、美国东南部、南美西南部、澳大利亚东南部增加最为明显,这些地区太阳能资源的增加幅度在 RCP8.5 气候情景下最为明显,表明在高排放情景下,2020—2030 年间太阳能资源有较为明显的增加趋势。这可能与未来云量的减少有关,原因还需要进一步的研究。

综合 NASA 全球近地层风速和太阳辐射观测资料^[31]和多模式集合平均结果(图 1)可知,陆地上风能和太阳能丰富区主要集中在美洲、非洲撒哈拉地区、澳大利亚、欧洲、中国西北和中亚等地区。因此,本文针对上述 5 个地区,进一步探讨不同气候情景下全球区域尺度上风能、太阳能资源的年变化和季节变化特征。选取 1 月、4 月、7 月和 10 月分别代表冬季、春季、夏季和秋季。

图 3 是不同 RCPs 气候情景下 2020—2030 年全球陆地风能、太阳能资源相对于参考期的年、季节平

均变化百分率。可以看出,未来不同气候情景下的全球陆地风能和太阳能资源存在显著的季节性差异,且对不同 RCPs 的响应差异较大。从图 3(a)中可知,相对于参考期(1986—2005 年),2020—2030 年期间全球陆地年平均风能资源在 RCP2.6 和 RCP8.5 气候情景下有所增加,且 RCP8.5 情景下较 RCP2.6 情景下增加更明显,而在 RCP4.5 情景下则减小,但不同季节变化趋势不尽相同。其中,冬季、夏季和秋季的陆地平均风能资源在不同 RCPs 下均呈现减少趋势(冬季 RCP2.6 情景除外),且冬季和夏季的风能资源在 RCP8.5 情景下减少最为明显,秋季的风能资源则在 RCP2.6 情景下减少最为明显;春季的风能资源变化趋势与全年的一致,在 RCP4.5 气候情景下略有减少,而在 RCP2.6 和 RCP8.5 情景下增加明显,且增加率高于全年平均。可见,在未来高、低排放情景下,2020—2030 年期间陆地风能资源除在春季明显增加外,其他季节总体上呈现减少趋势。

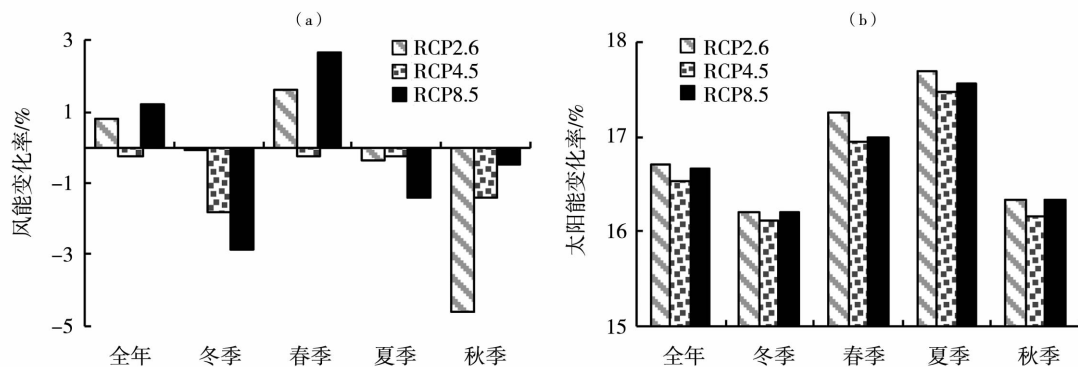


图 3 不同气候情景下 2020—2030 年全球陆地风能(a)、太阳能(b)资源的年平均和季节平均变化率

Fig. 3 Change rate of global annual and seasonal mean wind energy (a) and solar energy (b) under different climate scenarios over land from 2020 to 2030

从图 3(b)看出,相对于参考期,2020—2030 年全球陆地年平均和季节平均太阳能资源均有所增加,且在 RCP2.6 和 RCP8.5 情景下增加最为明显,其中夏季增幅最大。

综上所述,相对于参考期,2020—2030 年间全球陆地平均风能和太阳能资源的变化并未随着 RCP 排放浓度的增大而增大或减小,表明风能和太阳能资源的未来变化对气候变化的响应是非线性的。

表 2 统计了不同 RCPs 下,2020—2030 年上述 5 个丰富区风能和太阳能资源相对于参考期的年和季节平均变化率。可以看出,美洲、非洲和澳洲丰富区的年平均风能资源在不同气候情景下均呈增加趋

势,且非洲丰富区的增加趋势最为明显;欧洲丰富区的年平均风能资源在不同气候情景下均呈减小趋势;亚洲丰富区(中国西北和中亚地区,下同)的年平均风能资源变化相对较复杂,在 RCP2.6 情景下呈增加趋势,而在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下则呈现减小趋势。就不同季节而言,冬季,美洲和非洲丰富区的风能资源在不同气候变化情景下分别呈现一致的减小和增加趋势;亚洲丰富区的风能资源在 RCP2.6 情景下呈增加趋势,而在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下则呈减小趋势,且在 RCP4.5 情景下减小最为明显;澳洲和欧洲丰富区的风能资源在 RCP4.5 情景下有所减少,而在 RCP2.6 和 RCP8.5 情景下有所增加。春季,除非洲丰富区的风能资源在各气候

变化情景下呈现一致的增加趋势外,其他丰富区在不同气候变化情景下的变化趋势不尽相同。其中,亚洲丰富区的风能资源在 RCP2.6 情景下呈减小趋势,而在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下则呈增加趋势,这与冬季正相反。夏季,美洲、非洲和欧洲丰富区的风能资源在不同气候变化情景下均呈增加趋势,亚洲丰富区的风能资源在不同气候变化情景下均呈减小趋势,且在 RCP4.5 情景下减小最为明显,而澳洲丰富区的变化趋势不尽相同。秋季,美洲和澳洲丰富区的风能资源在不同气候变化情景下均呈增加趋势;亚洲丰富区的风能资源在 RCP2.6 和 RCP8.5 情景下呈增加趋势,而在 RCP4.5 情景下则呈减小趋势。

上述分析可见,全球 5 个主要丰富区的风能资源,除欧洲和亚洲外,未来不同气候情景下 2020—2030 年总体上均呈现增加趋势。此外,不同气候变化情景下,全球陆地的风能资源变化具有显著的季节性和区域性,表明不同季节、不同区域的风能资源对不同气候变化情景的响应不同。

从全球陆地 5 个主要丰富区 2020—2030 年太

阳能资源相对于参考期的年和季节平均变化率(表 2)看出,不同区域的太阳能资源在不同气候变化情景、不同季节均呈现增加趋势,即全球陆地各丰富区的太阳能资源在未来气候变化情景下始终呈现增加趋势。就年平均而言,2020—2030 年全球大陆丰富区的太阳能资源在不同气候变化情景下欧洲增加最为明显,其次为亚洲和澳洲,美洲和非洲太阳能资源的增加幅度相对较小。不同气候变化情景下,冬季,澳洲丰富区的太阳能资源增加最为明显,欧洲丰富区增加最少;春季,澳洲和欧洲的太阳能资源增加最为明显,其他地区增加相对较少;夏季和秋季,亚洲、澳洲和欧洲的太阳能资源增加最为明显,美洲和非洲的增加量相对较少。其中,亚洲丰富区各季节的太阳能资源在 RCP8.5 情景下增加幅度最为明显。可见,在不同气候变化情景下,2020—2030 年全球陆地太阳能资源的增加幅度也具有明显的区域性和季节性差异。需要指出的是,未来气候变化情景下,风能资源在不同季节的变化幅度明显强于太阳能资源,这与风速本身(时空尺度小)具有较强的瞬变性和波动性有关^[2]。

表 2 不同气候情景下,相对于参考期 2020—2030 年间全球陆地不同地区
风能和太阳能资源的年平均和季节平均的变化率

Tab. 2 Statistics of change rates of annual and seasonal mean wind energy and
solar energy under different scenarios in different terrestrial regions
from 2020 to 2030 compared with the period from 1986 to 2005

单位:%

丰富区	未来气候情景	风能					太阳能				
		冬季	春季	夏季	秋季	全年	冬季	春季	夏季	秋季	全年
美洲	RCP2.6	-10.8	0.99	17.79	3.02	3.02	15.97	16.28	15.62	16.40	16.08
	RCP4.5	-0.63	10.68	14.52	11.35	0.25	15.94	15.82	16.08	16.11	16.20
	RCP8.5	-5.93	-2.94	20.45	6.18	3.16	15.62	15.87	15.91	16.17	16.10
非洲	RCP2.6	0.87	5.43	3.17	1.2	3.33	16.68	16.61	16.92	15.84	16.85
	RCP4.5	0.58	8.01	3.21	-1.96	3.22	16.75	17.01	16.60	16.61	17.05
	RCP8.5	3.51	7.89	1.95	-1.89	3.32	16.71	16.68	16.53	15.56	16.67
亚洲	RCP2.6	0.43	-1.09	-1.11	3.52	0.63	16.10	17.00	18.34	17.17	17.54
	RCP4.5	-1.82	1.59	-5.00	-5.34	-0.98	15.20	16.39	18.08	16.35	17.20
	RCP8.5	-0.17	1.84	-0.28	4.36	-0.48	16.32	16.70	18.74	17.08	17.58
澳洲	RCP2.6	3.10	2.38	3.00	12.10	3.11	17.98	17.33	18.41	17.64	17.66
	RCP4.5	-6.96	1.12	-1.02	10.00	1.24	17.11	17.23	18.00	16.85	17.06
	RCP8.5	4.36	-9.14	5.80	6.98	2.08	17.10	18.04	18.19	17.54	17.22
欧洲	RCP2.6	4.33	-1.14	2.43	0.51	-0.29	15.88	17.74	18.23	17.04	18.00
	RCP4.5	-0.95	-1.22	2.39	-2.72	-1.86	15.47	17.24	17.83	16.15	17.46
	RCP8.5	0.55	1.89	3.22	-0.13	-0.03	15.97	17.35	17.95	16.68	17.82

4 结论与讨论

(1) 基于 CMIP5 计划的多模式集合平均结果能够较好地再现全球近地层风速和地表太阳短波辐射的分布状况,且对太阳辐射的模拟性能更好。表明多模式集合平均结果对全球范围内的风能、太阳能资源的模拟具有较高的可信度。

(2) 相对于参考期,不同 RCPs 情景下 2020—2030 年期间全球陆地风能、太阳能资源的变化具有明显的区域差异性。太阳能资源变化的区域差异性较小,各丰富区在不同 RCPs 下均呈增加趋势,且在高排放(RCP8.5)情景下的增加趋势最为明显;风能资源变化的区域差异性较大,且各丰富区在不同 RCPs 下的变化趋势差异也较大。

(3) 相对于参考期,不同气候情景下 2020—2030 年期间全球陆地不同区域的风能、太阳能资源变化还存在明显的季节性差异,风能资源的季节差异性强于太阳能资源。2020—2030 年风能和太阳能资源的变化并未随着排放浓度的增大而增大或减小,表明未来风能和太阳能资源对全球气候变化响应的复杂性和非线性。

需要说明的是,尽管气候系统模式在过去十余年里不断完善,模拟能力逐步提高,但模式依然存在较大的不确定性,同样反映在对近地层风速和地表太阳辐射的模拟方面^[32]。此外,气候模式在长时间的积分过程中存在着“气候漂移”现象,表现为独立于内部变率或外部强迫的虚假变化^[33-34]。有研究表明,全球气候模式结果与再分析资料的近地层风速在高海拔地区差异显著,特别是 30°N 以北地区,二者的相关系数较低^[35],其中全球气候模式对中国近地层风速的模拟偏小^[36]。

气候变化背景下风能和太阳能资源的变化机理较为复杂,大气环流、ENSO(El Niño - Southern Oscillation)、地形热动力作用、下垫面变化、人类活动影响等对全球陆地近地层风速的变化均有影响,但相应的机制解释依然存在较大的差异^[37-40]。因此,随着模式的不断完善和发展,未来风能、太阳能资源的预估结果可信度将更高。

参考文献:

[1] 王澄海,刘纯. 我国风电建设中风资源评估存在的问题和应对措施[J]. 中国电机工程学报,2011,31(增刊):242-245.
[2] ZHANG F M, WANG C H. The application of observation data assimilating in wind power prediction[C]// International Conference on Energy Research and Power Engineering (ERPE 2012), 2012: 137-139. DOI:10.1109/CARPI.2012.6356260.

[3] ZHANG F M, YANG Y, WANG C H. The effects of assimilating conventional and ATOVS data on forecasted near-surface wind with WRF-3DVAR[J]. Monthly Weather Review, 2015,143(1):153-164.
[4] WANG C H, JIN S L. Error features and their possible causes in simulated low-level winds by WRF at a wind farm[J]. Wind Energy, 2014,17(9):1315-1325.
[5] WANG C H, JIN S L, HU J, et al. Comparing different boundary layer schemes of WRF by simulation the low-level wind over complex terrain[C]//The 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce. The International Workshop on Environment Management and Energy Economic, 2011:8-10. DOI:10.1109/AIMSEC.2011.6009632.
[6] 张飞民,王澄海. 利用 WRF-3DVAR 同化常规观测资料对近地层风速预报的改进试验[J]. 高原气象,2014,33(3):675-685.
[7] 邢婷,郑有飞,朱勇,等. 云南风能资源及其开发利用研究进展[J]. 气象与环境科学,2013,36(4):55-61.
[8] 费焯,夏祥鳌. 1980—2009 年中国大陆中东部气溶胶-云-辐射变化及其关系[J]. 气象与环境科学,2016,39(2):1-9.
[9] 朱学玲,李红卫. 洛阳地区太阳能资源分析与评估[J]. 气象与环境科学,2015,38(1):67-72.
[10] 司福意. 焦作市太阳辐射资源分析评估[J]. 气象与环境科学,2013,36(2):87-91.
[11] VAUTARD R, CATHIAUX 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.
[12] 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.
[13] 江滢,罗勇,赵宗慈. 近 50 年中国风速变化及原因分析[C]//第 24 届中国气象学会年会论文集. 青岛:中国气象学会,2007.
[14] 张涛涛,延军平,李双双,等. 气候变化对晋西北地区风能资源的影响[J]. 干旱气象,2012,30(2):202-206.
[15] WANG C H, ZHANG Z F, TIAN W S. Factors affecting the surface radiation trends over China between 1960 and 2000[J]. Atmospheric Environment, 2011,45:2379-2385.
[16] 马金玉,罗勇,申彦波,等. 近 50 年中国太阳总辐射长期变化趋势[J]. 中国科学:地球科学,2012,42(10):1597-1608.
[17] TURNOCK S T, SPRACKLEN D V, CARSLAW K S, et al. Modelled and observed changes in aerosols and surface solar radiation over Europe between 1960 and 2009[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015,15(9):13457-13513.
[18] KARNAUSKAS K B, LUNDQUIST J K, ZHANG L. Southward shift of the global wind energy resource under high carbon dioxide emissions[J]. Nature Geoscience, 2018,11(1):38-43.
[19] 江滢,罗勇,赵宗慈. 全球气候模式对未来中国风速变化预估[J]. 大气科学,2010,34(2):323-336.
[20] 李艳,汤剑平,王元,等. 我国近地层风能资源气候变化之未来情景预测[J]. 太阳能学报,2011,32(3):338-345.
[21] LIU B, COSTAK B, XIE L, et al. Dynamical downscaling of climate change impacts on wind energy resources in the contiguous United States by using a limited-area model with scale-selective

- data assimilation[J]. *Advances in Meteorology*, 2014,2014:1 – 11.
- [22] HERBST L, RAUTENBACK H. Climate change impacts on South African wind energy resources[J]. *Africa Insight*, 2016,45:1 – 31.
- [23] CARVALHO D, ROCHA A, GOMEZ – GESTEIRA M, et al. Potential impacts of climate change on European wind energy resource under the CMIP5 future climate projections[J]. *Renewable Energy*, 2017,101:29 – 40.
- [24] NAJAC J, LAC C, TERRAY L. Impact of climate change on surface winds in France using a statistical – dynamical downscaling method with mesoscale modelling[J]. *International Journal of Climatology*, 2011,31:415 – 430.
- [25] PAN Z, CHRISTENSEN J H, ARRITT R W, et al. Evaluation of uncertainties in regional climate change simulations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001,106:17735 – 17751.
- [26] HIZUMI T, NISHIMORI M, YOKOZAWA M. Combined equations for estimating global solar radiation: projection of radiation field over Japan under global warming conditions by statistical downscaling[J]. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2008,64:9 – 23.
- [27] RUOSTENJA K, RAISANEN P. Seasonal changes in solar radiation and relative humidity in Europe in response to global warming[J]. *Journal of Climate*, 2013,26:2467 – 2481.
- [28] OHUNAKIN O S, ADARAMOLA M S, OYEWOLA O M, et al. The effect of climate change on solar radiation in Nigeria[J]. *Solar Energy*, 2015,116:272 – 286.
- [29] LOEW A, ANDERSON A, TRENTMANN J, et al. Assessing surface solar radiation fluxes in the CMIP ensembles[J]. *Journal of Climate*, 2016,29(20):7231 – 7246.
- [30] 白树华,卢继平. 西藏高原的气候环境对风力发电的影响分析[J]. *电力建设*,2006,27(11):37 – 40.
- [31] NEMA P, NEMA R K, RANGNEKAR S. A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV – solar: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009,13(8):2096 – 2103.
- [32] KNUTTI R, SEDLÁČEK J. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections[J]. *Nature Climate Change*, 2013,3(4):369 – 373.
- [33] DIRMEYER P A. Climate drift in a coupled land atmosphere model[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2009,2(1):89 – 102.
- [34] GUPTA A S, MUIR L C, BROWN J N, et al. Climate drift in the CMIP3 models[J]. *Journal of Climate*, 2012,25(13):4621 – 4640.
- [35] MCINNES K L, ERWIN T A, BATHOLS J M. Global climate model projected changes in 10 m wind speed and direction due to anthropogenic climate change[J]. *Atmospheric Science Letters*, 2011,12(4):325 – 333.
- [36] 江滢. 中国风和风能变化研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2009.
- [37] 李艳,王元,储惠芸,等. 中国陆域近地层风能资源的气候变异和下垫面人为改变的影响[J]. *科学通报*,2008,53(21):2646 – 2653.
- [38] 赵宗慈,罗勇,江滢. 全球大风在减少吗?[J]. *气候变化研究进展*,2011,7(2):149 – 151.
- [39] LI X, ZHONG S, BIAN X, et al. Climate and climate variability of the wind power resources in the Great Lakes region of the United States[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010,115:D18107. DOI:10.1029/2009JD013415.
- [40] BERG N, HALL A, CAPPS S B, et al. El Niño – Southern Oscillation impacts on winter winds over Southern California[J]. *Climate Dynamics*, 2013,40:109 – 121.

Projection of Global Wind and Solar Energy over Land Under Different Climate Change Scenarios During 2020 – 2030

ZHANG Feimin¹, WANG Chenghai¹, XIE Guohui², KONG Weizheng²

- (1. *College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Key Laboratory for Arid Climatic Change and Disaster Reduction of Gansu Province, Lanzhou 730000, China;*
2. *State Grid Energy Research Institute, CO., LTD., Beijing 102209, China*)

Abstract: The global wind and solar energy over land were projected by the ensemble mean results of multiple models in CMIP5 under different climate change scenarios and their change characteristics were analyzed during 2020 – 2030. The results show that the ensemble mean results of multiple models could well reproduce the distributions of global wind and solar energy, which indicated that the ensemble mean results of multiple models were reliable to simulate the wind and solar energy. Compared with the period from 1986 to 2005, the change of global wind and solar energy over land had obvious regional and seasonal characteristics under different climate change scenarios from 2020 to 2030, and their seasonal change rates were greatly different over different regions of land. Under different RCP scenarios, the wind energy increased during 2020 – 2030 in America, Africa and Australia, while it decreased in Europe compared with the period from 1986 to 2005. The wind energy increased under RCP2.6 scenario in Asia (Northwest China and Central Asia), while it decreased under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios during 2020 – 2030. The global solar energy over land increased under different RCP scenarios during 2020 – 2030, especially in Europe. The change tendency and change rate of wind and solar energy over different region in the future had some differences under different RCP scenarios, which indicated that the response of wind and solar energy to global climate change in the future was complex.

Key words: wind and solar energy; future projection; climate change scenario; CMIP project