

翟然, 胡圣堃, 梁犁丽, 等. 气候变化对我国水能、风能和太阳能资源影响评估研究进展[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(5): 1029-1040. ZHAI R, HU S K, LIANG L L, et al. Research progress on the impacts of climate change on water energy, wind energy and solar energy resources in China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(5): 1029-1040. (in Chinese)

气候变化对我国水能、风能和太阳能资源 影响评估研究进展

翟然¹, 胡圣堃², 梁犁丽¹, 陶福禄^{3,4}, 暮色依薇¹, 王焱成^{3,4}, 徐志¹, 李婉¹, 周泓^{3,4}

(1. 中国长江三峡集团有限公司, 北京 101199; 2. 中国能源建设股份有限公司, 北京 100022; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 4. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要:通过对相关文献的研究梳理, 归纳常用的水能、风能、太阳能资源评估指标及方法, 总结历史时期气候变化对我国水能、风能和太阳能资源的影响以及未来气候变化背景下我国水能、风能、太阳能资源的变化。水能、风能、太阳能资源的评估方法均可归纳为基于观测的评估方法、基于数值模式的评估方法、基于卫星遥感的评估方法及基于再分析资料的评估方法。在未来气候变化背景下, 现有研究大多认为未来我国水能资源将会增加, 风能及太阳能资源将会减少, 而且存在时空异质性, 气候变化将影响以水能、风能和太阳能为主的可再生能源的开发利用。为应对气候变化带来的不利影响, 未来应加强水能、风能和太阳能资源评估指标体系研究, 推动水能、风能、太阳能资源评估基础数据库及通用化资源评估软件系统建设, 统筹推进未来气候变化背景下水能、风能、太阳能资源评估及水能、风能、太阳能发电的中长期预报/预测研究。

关键词: 水能资源; 风能资源; 太阳能资源; 可再生能源; 资源评估; 气候变化; “双碳”目标

中图分类号: TV213; P962 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2024.0102

水能、风能和太阳能是可再生能源的重要组成部分。广义上, 水能资源包含水热能资源、水力资源、海洋能资源等; 狭义上, 水能资源指以水为载体, 存在于河流或湖泊中, 可以用水位差和水流量表征的能量资源。本文水能资源仅使用狭义的概念。水能资源分布广泛, 其开发利用技术成熟、成本低, 已在世界范围内得到了广泛的应用和发展^[1-2]。风能和太阳能资源同样蕴藏量丰富, 且分布广、无污染, 近年来迅速发展, 成为了可再生能源发展的重要方向之一^[3-5]。对于我国而言, 截至 2022 年底, 可再生能源发电累计装机容量达到 12.13 亿 kW, 占全部发电装机容量的 47.3%, 其中风电装机容量 3.65 亿 kW、太阳能发电装机容量 3.93 亿 kW、水电装机容量 4.13 亿 kW(含抽水蓄能装机容量 0.45 亿 kW); 2022 年, 我国可再生能源发电量达 2.7 万亿 kW·h, 其中水电发电量 1.35 万亿 kW·h、风电发电量

7 627 亿 kW·h、太阳能光伏发电量 4 273 亿 kW·h。因此, 水能、风能和太阳能等可再生能源的开发利用对我国能源绿色低碳转型、保障能源安全具有重要的意义。

以变暖为主要特征的全球气候变化是目前全球影响最深远的问题。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估报告表明, 未来气候变化和极端气候事件将进一步加剧。水能、风能、太阳能与降水、温度、风速、辐射等气候变量直接相关。目前, 气候变化对我国水能、风能和太阳能资源的影响总结及对比鲜有研究。本文归纳目前我国水能、风能和太阳能资源评估的常用指标及主要方法, 总结气候变化对我国水能、风能和太阳能资源的影响, 在此基础上提出气候变化背景下未来我国水能、风能和太阳能电力发展的重点科技攻关方向。

收稿日期: 2024-01-30 修回日期: 2024-08-07 网络出版时间: 2024-08-13

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240812.1411.002>

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司科研项目(项目编号: WWKY-2021-0357; 合同编号: 202103584); 国家自然科学基金项目(42201050)

作者简介: 翟然(1992—), 女, 河南开封人, 高级工程师, 博士, 主要从事气候变化影响评价研究。E-mail: zhai_ran@ctg.com.cn

通信作者: 胡圣堃(1993—), 男, 河南临颖人, 工程师, 主要从事可再生能源研究。E-mail: skhu1017@ceec.net.cn

1 水能、风能、太阳能资源评估指标研究进展

1.1 水能资源评估指标

水能资源与径流量有关,同时受地形因素、流域工程调节能力等因素影响。在工程技术领域,根据《水能资源调查评价导则》(SL 562—2011),水能资源评价指标主要包含理论蕴藏量、技术可开发量、经济可开发量及已正开发量,具体计算方法可参考文献 [6],其中:理论蕴藏量表征存在于河流或湖泊中的水能资源的量值;技术可开发量表征存在于河流或湖泊中,在当前技术水平条件下,通过修建水库和电站等工程设施,可开发利用的水能资源的量值;经济可开发量表征存在于河流或湖泊中,在当前技术水平条件下,通过修建水库和电站等工程措施,可开发利用且具有经济可开发价值的水能资源的量值;已正开发量表征已经和正在开发利用的水能资源的量值。此外,在科学研究领域,水力发电量、总水能潜力(gross hydropower potential)、已开发的水能潜力(developed hydropower potential)等也常用来评估水能资源^[7-8],上述水能资源评估指标的计算均离不开河流径流量,故河流径流量也是水能资源的重要评估指标^[9]。

1.2 风能资源评估指标

根据《风电场风能资源评估方法》(GB/T 18710—2002)《全国风能资源评价技术规定》(2004)以及相关研究^[10-12],常用风能资源的评估指标有平均风速、风向频率、风功率密度、有效小时数、测站湍流强度、风能资源储量(风能资源理论蕴藏量)和风能资源技术可开发量等。目前尚缺乏风能资源经济可开发量的相关规定^[13]。此外,还有一些指标也可用于风能资源的评估,如:可利用风机高度的风速数据与风电机组功率曲线,对于潜在风力发电量进行评估^[14];还可利用风功率密度、风能利用效率和风机叶轮直径,对于风电单机容量进行估计,结合可建风机数目,最终求得研究区内的风电装机容量^[15]。

1.3 太阳能资源评估指标

当前可利用的太阳能主要是太阳光直接到达地球的短波辐射,根据传播方式不同,可分为总辐射、直接辐射和散射辐射。依据《太阳能资源评估方法》(GB/T 37526—2019),可利用不同时间尺度的太阳辐射量对于太阳能资源丰富度、太阳能资源稳定性和太阳能资源直射比等指标进行计算以评估太阳

能资源。日照时数与太阳辐射量呈正相关关系,且可以直接从气象站点获取,也常常用来评估太阳能资源^[16]。但上述指标均基于太阳能资源的总量进行评估,实际开发利用太阳能资源时还需考虑技术开发的难易程度及经济价值,尽管有一些研究^[17-18]对于太阳能资源技术可开发量及经济可开发量进行了评估,但仍缺乏统一标准。

2 水能、风能、太阳能资源评估方法研究进展

2.1 水能资源评估方法

水能资源评估的主要方法包括基于观测的评估方法、基于数值模式的评估方法、基于卫星遥感的评估方法及基于再分析资料的评估方法(见表 1)。基于观测的评估方法主要是基于径流实测数据进行分析,我国虽然分布着 3 400 余个国家级水文站点,但对于我国广阔的陆地面积来说还是太少。加上水文站点的分布主要集中在人口集中、经济发达的东部和中部地区,而较少分布在西部地区。这就导致在实际的水能资源评估中,在部分地区有可能会遇到缺少资料甚至没有资料的情况。基于数值模式的评估方法对于开展无资料地区水能资源评估具有重要作用^[47]。水文模型是常用的数值模拟手段有多种分类方法,可分为集总式概念性水文模型和基于物理机制的分布式水文模型。集总式概念性水文模型(如 Stanford 模型、HBV 模型、Sacramento 模型)所需数据较少,计算简便。其虽具有一定的物理基础,但都是经验性概述,且无法反映研究区的空间异质性。基于物理机制的分布式水文模型(如 VIC 模型: variable infiltration capacity; SWAT 模型: soil and water assessment tool)具有坚实的物理基础,便于在无实测水文资料的地区推广应用,且具有反映流域响应的空间分异特征等优点,但需使用大量时空数据驱动模型,计算量大^[28]。近年来,人工智能模型逐渐用于径流的模拟及径流序列重建^[29,48],这类方法所需数据较少、计算简便,但缺乏对于流域物理特征的描述。全球气候模式(global climate models, GCM)及区域气候模式(regional climate models, RCM)模拟预估数据可用于作为上述水文模型或人工智能模型的气象驱动数据,以评估未来气候变化背景下的径流变化。随着卫星遥感观测技术的日益发展及其相关产品在时空连续性方面的优势,基于卫星遥感的评估方法逐渐用于水能资源的评估^[49-50],常用卫星遥感产品

有 Landsat、MODIS 和哨兵卫星等^[32],可通过反演河流宽度、水深、流速等变量以及所建立的上述变量与实测径流之间的数学关系,对径流进行估算。然而这种方法不适用于无径流观测数据的地区,在无径流观测数据的地区,可通过耦合卫星反演的水力学要素来率定水文模型,进而获取连续的径流数据^[51]。再分析技术通过融合观测数据、数值模拟数据、卫星遥感数据等多源数据,以获得大尺度范围内、高时空分辨率的径流数据,进而可对于水能资源进行评估,有着时间序列长、空间分布广的特点,

可以在很大程度上弥补地面观测数据的不足,如 GloFAS-ERA5(global flood awareness system-ECMWF reanalysis 5)^[35]、GRUN^[36]、GRADES(global reach- level a priori discharge estimates for SWOT)^[32]、GRFR(global reach-level flood reanalysis)^[37],这些数据集在全球范围内被证明有很好的精度,但由于在数据生产及精度评估过程中缺乏我国大量的实测径流数据,对于我国的径流模拟精度还需要进一步评估。

表 1 水能、风能、太阳能资源主要评估方法

Tab. 1 Evaluation methods of water energy resources, wind energy resources and solar energy resources

| 方法 | 优点 | 缺点 | 代表性数据/模型 |
|--------------|---------------------------------------|--|--|
| 基于观测的评估方法 | 基于第一手实测资料,数据质量较好,计算误差较小 | 站点数量有限且分布不均,建设成本高,仅能获得指定高度层的风速数据 | 水文站数据;气象站数据;测风塔数据;海洋站数据;太阳辐射观测站数据 |
| 基于数值模式的评估方法 | 可对于无实测资料地区进行资源评估,适用于未来预测 | 数据存在不确定性 | 全球气候模式(CMIP5; CMIP6等) ^[19-20] ;区域气候模式(PRECIS; RegCM4等) ^[21-23] ;中尺度数值模式(WRF ^[24] ; MMS ^[25] ; WEST ^[26]);微尺度风资源评估数值模式(WAsP、Metodyn WT、WindSim) ^[27] ;水文模型(Stanford模型、HBV模型、VIC模型、SWAT模型等) ^[28] ;太阳能资源评估模型(基于GIS的数字高程模型) ^[17] ;人工智能模型 ^[29-30] |
| 基于卫星遥感的评估方法 | 覆盖面积广,提供了一种自上而下的、时空分辨率较高的观测资料,具有时空连续性 | 对云和气溶胶的处理还不够完善 ^[31] ,数据时间长度短,无法提供实时数据 | Landsat ^[32] ; MODIS ^[32] ; 哨兵卫星 ^[32] ; ERS-2 SAR ^[33] ; ENVISAT ASAR ^[33] ; RADARSAT-1 SAR ^[33] ; QuikSCAT ^[33] ; ASCAT ^[33] ; WindSAT ^[33] ; GMS5 ^[34] ; NOAA ^[34] ; 风云系列卫星资料 ^[34] |
| 基于再分析资料的评估方法 | 考虑因素全面,数据集多,易获取,成本低,时间尺度长,空间分布广 | 数据质量参差不齐,在局地的适用性需要进行评估 | GloFAS-ERA5 ^[35] ; GRUN ^[36] ; GRADES ^[32] ; GRFR ^[37] ; CMFD ^[38] ; NCEP/NCAR ^[39] ; JRA-55 ^[40] ; ERA40 ^[41] ; ERA-Interim ^[42] ; ERA5 ^[43] ; MERRA-2 ^[44] ; CLDAS ^[45] ; CFSR ^[46] |

2.2 风能资源评估方法

风能资源评估的主要方法也包括基于观测的评估方法、基于数值模式的评估方法、基于卫星遥感的评估方法及基于再分析资料的评估方法(见表1)。基于观测的评估方法主要是基于气象站或测风塔的历史观测数据进行风能资源评估。尽管该方法的观测数据质量较高,但也存在很大的局限性,主要表现在气象站和测风塔往往只能观测某一特定高度层的风速,进而对该高度层的风能资源进行推算,而可利用高度上的风能资源较难评估,而且站

点之间的距离使风能资源评估产生地域空间的离散性。另外,许多气象站位于地势平坦的城镇地区,往往只能反映周围地区的风能资源情况,难以反映山区的风能资源情况,所以对于某一区域范围内的风能资源无法准确评估,且规划、建设和维护专门的风力测量设备十分昂贵,如果通过测量发现该地区的风能潜力差,将造成不可逆转的损失。基于数值模式的评估方法克服了上述局限性^[52],通过数值模拟不仅可以获得任意高度和不同水平分辨率的风能资源储量及分布情况,还可以确定某一地区内

可进行风能资源开发的面积。风能资源评估常用的数值模拟方法包括微尺度模式、中尺度数值模式及耦合嵌套模式。常用的微尺度模式包括 WAsP(wind atlas analysis and application program)、WindSim 和 Meteodyn WT 等^[27], 中尺度数值模式包括 WRF(weather research and forecasting)^[24]、MM5(mesoscale model 5)^[25] 和 WEST(wind energy simulation toolkit)^[26] 等。多尺度嵌套模式能够有效解决单一尺度模式适用性不足的问题^[53]。此外, 对于未来气候变化影响下的风能资源变化, 常用全球气候模式和区域气候模式的模拟结果来进行评估。然而, 全球气候模式分辨率较粗, 常常忽略局地的细节变化, 尤其是在地形复杂地区^[54]。区域气候模式是提高未来气象数据分辨率的重要方法^[55]。近年来, 基于卫星遥感产品的评估方法也逐渐应用于风能资源评估领域, 常用的卫星遥感数据包括合成孔径雷达(如 ERS-2 SAR、ENVISAT ASAR、RADARSAT-1 SAR 等)、微波散射计及微波辐射计(如 QuikSCAT、ASCAT 及 WindSAT 等)^[33]。但单颗卫星一天至多过境两次, 时间间隔约为 12 h, 对于风况日变化较大的地区, 较难代表气候均态。此外, 基于再分析资料的评估方法也可用来对于风能资源进行评估。再分析资料是应用数据同化技术将卫星遥感、台站观测等多源资料与数值预报产品融合而来的具有时空连续性的历史天气数据^[56], 常用于风能资源评估的再分析资料包括中国高分辨率气象要素数据集(The China meteorological forcing dataset, CMFD)^[38]、NCEP/NCAR(national centers for environmental prediction/national center for atmospheric research)^[39]、ERA40(ECMWF reanalysis 40)^[41]、ERA-Interim(ECMWF reanalysis-interim)^[42]、ERA5(ECMWF reanalysis 5)^[43]、CFSR^[46] 等产品。再分析数据易获取、成本低, 但数据质量参差不齐, 在局地的适用性需要进行评估^[57]。

2.3 太阳能资源评估方法

太阳能资源评估的主要方法也可归纳为基于观测的评估方法、基于数值模式的评估方法、基于卫星遥感的评估方法及基于再分析资料的评估方法(表 1)。已有大量研究基于辐射站历史太阳辐射观测资料对国内外太阳能资源进行了评估^[58-59]。太阳辐射观测数据是用于太阳能资源评估最为直接和准确的数据, 但由于太阳辐射测量装置的安装和维护成本较高, 我国气象观测站中仅有部分站点具备

太阳辐射观测的能力^[60], 产出的实测数据无法满足太阳能资源评估的需要。因此, 评估者可基于统计反演获得到达地面的太阳辐射量, 即基于气候学原理, 利用线性回归和最小二乘法等统计学方法建立易获得的气象要素(如日照时数、云量、相对湿度等)与太阳辐射之间的关系模型, 依据上述模型可对无太阳辐射观测资料的站点进行太阳辐射量估算。太阳能资源评估常用的数值模拟方法有中尺度数值模式、全球气候模式、区域气候模式、人工智能方法、基于 GIS(geographic information system)的数字高程模型(digital elevation model, DEM)等。大部分中尺度数值模式均未考虑气溶胶的化学过程对太阳辐射造成的间接影响, 导致存在较大误差。近年来, 美国国家环境预报中心基于 WRF 模式开发了专门用于太阳能预报和资源评估的 WRF-Solar 模式^[61], 相比于传统的中尺度数值模式, 该模式对于云-气溶胶辐射之间的相互作用和次网格尺度云对短波辐射参数化方案的影响等进行了较大改进。人工智能方法不需要建立太阳辐射和气象数据之间具体的解析关系, 可通过对大量数据进行训练来完成对复杂非线性关系的处理, 其优点在于对非线性较强的时间序列, 如逐小时和逐日的太阳辐射的拟合效果较好, 缺点是所需的气象数据样本量大, 如果方案设计不合理还会存在过拟合现象, 人工神经网络为其中最常用的方法^[30]。基于 GIS 技术结合 DEM 计算太阳辐射, 通过分析地形因子对太阳散射辐射的影响, 充分考虑了地形影响, 对地形起伏较大地区的太阳总辐射计算效果较好, 但该方法忽略了气象要素^[17]。在未来气候变化背景下太阳能资源预估方面的研究较少。常用方法仍是基于全球气候模式或区域气候模式对于太阳辐射量的模拟结果, 对未来太阳能资源进行评估^[23,62]。基于卫星遥感产品的评估方法也可用于太阳能资源的评估^[31]。常用的卫星遥感数据包括 MODIS(moderate resolution imaging spectroradiometer)、GMS5(geostationary meteorological satellite-5)、NOAA、风云系列卫星资料等^[34], 主要包括了基于统计反演的卫星遥感法和基于物理反演的卫星遥感法。基于统计反演的卫星遥感法又主要包括两种思路: 第一种思路是建立卫星测量值与太阳辐射量之间的回归关系, 然后根据有实测太阳辐射观测值区域的卫星测量值与太阳辐射量的观测值确定回归系数, 之后依据卫星测量值对于区域的太阳辐射量进行估算; 第

二种思路是首先利用卫星遥感产品反演得到云对太阳辐射的影响因子,之后基于气候学原理对于到达地面的太阳辐射量进行计算。基于物理反演的卫星遥感法根据辐射传输理论计算地面太阳辐射量,通常做法是首先对于晴天条件下的太阳辐射进行计算,然后引入云的削弱因子对于全天空条件下的太阳辐射进行计算^[5]。在对于太阳能资源进行评估时,常用再分析资料包括 CLDAS(CMA land data assimilation system)^[45]、ERA5^[63]、MERRA-2(the modern-era retrospective analysis for research and applications, Version 2)^[64]、JRA55(Japanese 55-year reanalysis)^[65]等。再分析资料的分辨率往往较低,而太阳能资源的分布具有很强的区域性和局地性,如有研究表明再分析资料与我国太阳辐射站点观测资料相比,绝大部分存在高估现象,直接使用再分析资料进行太阳能资源的评估将带来较大误差,在使用前需要进行数据订正^[66]。

3 气候变化对我国水能、风能、太阳能资源影响研究进展

3.1 气候变化对我国水能资源的影响

由于降水和温度的时空异质性变化,气候变化对水能资源的影响复杂,目前大多数研究集中在评估气候变化引起的径流变化上。对于历史时期水能资源的变化,张建云等^[67]对 1956—2018 年我国江河径流演变及其变化特征进行了分析,结果表明,除长江大通站外,中国主要江河代表性水文站实测年径流量均呈现下降趋势,其中,黄河以南地区呈非显著性变化趋势,黄河以北地区呈显著性下降趋势。针对未来气候变化背景,Gu 等^[19]基于多个第五次国际耦合模式比较计划(coupled model intercomparison project phase 5, CMIP5)GCM 数据以及 4 个集总式概念性水文模型,预估了我国 151 个典型子流域 RCP8.5(representative concentration pathway 8.5)情景下的径流变化,结果表明:相对于 1961—2005 年,我国南部和中部的绝大多数子流域在 2011—2055 年径流量呈下降趋势,而在 2056—2100 年径流量略微上升;而对于我国东北部和西部高山地区,未来径流量总体呈现增加趋势。周嘉月等^[20]基于最新的 CMIP6 提出的结合经济社会发展的新型共享路径 SSP-RCP(shared-socioeconomic pathway-representative concentration pathway)下的 GCM 数据以及分布式水文模型 VIC 的研究表明,在 SSP2-4.5

和 SSP5-8.5 情景下,我国年径流量在未来近期(2020—2049 年)和远期(2070—2099 年)都相对于历史时期(1985—2014 年)增加。Zhai 等^[68]基于 HAPPI(half a degree additional warming, prognosis and projected impacts)项目生产的经偏差校正的 GCM 数据驱动 VIC 水文模型,对于增温 1.5 °C(2106—2115 年)及 2.0 °C(2106—2115 年)情景下极端径流相对于基准时期(2006—2015 年)的变化进行了研究,结果表明对于我国绝大多数地区,极端低径流和极端高径流均呈增加趋势。Liu 等^[8]基于 CMIP5 数据,利用水文模型集合对未来我国的总水能潜力、已开发的水能潜力进行了评估,结果表明我国总水能潜力将在未来近期(2020—2050 年)、未来远期(2070—2099 年)相对于 1971—2000 年分别变化 -1.7%~2.0% 和 3.0%~6.0%,我国已开发的水能潜力将在未来近期(2020—2050 年)、未来远期(2070—2099 年)相对于 1971—2000 年分别变化 -2.2%~-5.4% 和 -1.3%~-4.0%,我国总水能潜力及已开发的水能潜力均存在显著的时空异质性。Qi 等^[69]基于 ISIMIP2b(inter-sectoral impact model intercomparison project 2b)项目提供的 GCM 数据及 WEB-DHM-SG 分布式水文模型,对未来我国总水能潜力进行了评估,结果表明在未来增温 1.5 °C、2.0 °C 和 4.5 °C 情景下,我国总水能潜力相对于基准时期(1986—2015 年)增幅分别为 51.8%、52.3% 和 68.4%,其中,夏季总水能潜力增幅大于其他季节,西南地区总水能潜力增幅大于其他地区。Qin 等^[7]基于水库优化调度模型和分布式水文模型 SWAT 预估得到三峡水库年平均发电量将在 2040—2065 年、2080—2099 年相对于 1986—2005 年分别增加 0.9%~2.3% 和 5.2%~8.1%。刘令军^[70]基于梯级水电站优化调度模型及神经网络径流预测模型模拟得到在 RCP4.5 及 RCP8.5 气候情景下,2021—2050 年、2051—2095 年金沙江中游梯级水电站发电量将相对于 1961—2012 年增加,在 RCP4.5 情景下增幅分别为 3.84% 和 11.48%,在 RCP8.5 情景下增幅分别为 4.91% 和 14.04%。综上,气候变化对我国水能资源的影响研究,较为集中地采用径流量、总水能潜力、已开发的水能潜力及水力发电量等评估指标。在历史时期,我国水能资源总体呈现下降的趋势。在未来时期,尽管已有研究所采用的研究指标、研究方法、气候模式及气候变化情景各异,未来我国水能资源总体呈现上升的趋势,但不同研究结果差

异较大,且存在显著的时空异质性,水能资源在不同地区、不同时期、不同季节变化存在差异。

3.2 气候变化对我国风能资源的影响

对于历史时期风能资源的变化,丁一汇等^[71]研究发现,过去几十年间中国地面风速在气候变暖背景下整体呈减弱趋势,减小速率为 $0.10\sim 0.22(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})/(10\text{ a})$,并存在明显的季节、区域和风速段差异。Zhang 等^[57]基于 NCEP/NCAR、JRA55、ERA-Interim 再分析数据及站点实测数据,发现 1958—2015 年期间我国近地面风速约下降 $0.109(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})/(10\text{ a})$,2000 年之后我国风速变化不明显。Zeng 等^[72]基于国际站点观测数据得到的研究结论与上述类似,并发现在 2000 年后,我国风速呈上升趋势。气温、气压梯度力、大气环流、土地利用/覆盖变化等因素均会造成风速的变化^[73]。未来气候变化背景下风能资源的响应研究在欧洲和美国较多,近些年来研究人员^[74-75]才逐渐开展了未来气候变化背景下我国的风能资源评估。随着温室气体排放量的增加,研究结果^[22,76-77]一致认为中国地面风能资源下降的趋势将更加显著。张佳等^[76]基于订正后的 CMIP6 多模式集合对未来我国风功率密度进行了预估,结果显示 21 世纪 30、60 年代以及 21 世纪末全国平均风功率密度在 SSP1-2.6 情景下较当代分别减少 $(0.52\pm 0.83)\text{ W}/\text{m}^2$ 、 $(1.01\pm 0.94)\text{ W}/\text{m}^2$ 和 $(0.98\pm 1.17)\text{ W}/\text{m}^2$,在 SSP5-8.5 情景下较当代分别减少 $(0.54\pm 1.52)\text{ W}/\text{m}^2$ 、 $(1.11\pm 1.45)\text{ W}/\text{m}^2$ 和 $(1.83\pm 1.17)\text{ W}/\text{m}^2$ 。这意味着随着全球变暖幅度的增加,我国风功率密度降低的趋势将更加显著。Guo 等^[22]基于区域气候模式 PRECIS(providing regional climates for impacts studies)对于我国近地面风速进行模拟,并对风功率密度进行了计算,结果表明 21 世纪我国大部分地区在 RCP4.5 及 RCP8.5 情景下近地面风速呈现下降趋势,但存在季节性差异,在冬季增加,在春、夏、秋季下降。此外,随着海上风电的发展,气候变化对海上风能资源影响评估逐渐成为研究热点。张双益等^[78]基于 CMIP6 多模式集合对于未来我国近海风能资源开展预估,结果表明在 SSP5-8.5 情景下,21 世纪中期 2041—2060 年相对于历史时期 1991—2010 年,南海中北部的风功率密度相对变化极值可达 8%、东海风功率密度相对变化极值可达 -12%。综上,气候变化对我国风能资源的影响研究,多采用风速、风功率密度作为评估指标。在历史时期,我国风能资源总体呈现下降

的趋势,但是 2000 年以后有一定上升。在未来时期,我国风能资源总体呈现下降趋势,与水能资源相同,存在显著的时空异质性。

3.3 气候变化对我国太阳能资源的影响

对于历史时期太阳能资源的变化,马金玉等^[59]利用 1961—2009 年的全国 57 个太阳总辐射观测站观测资料,分析地面太阳总辐射的变化特征,结果表明 1960 年以来我国地面总辐射整体呈现下降趋势,且时空异质性增强。Wang 等^[79]基于全国 105 个站点观测数据研究结果表明,我国地面太阳总辐射在 1961—1990 年期间呈现下降趋势,每 10 年约下降 $2.9\text{ W}/\text{m}^2$,之后保持平稳,这种年代际变化同样可被高质量的地球系统模式数据再现。日照、风速以及云量等均会对太阳辐射造成影响。在未来气候变化背景下,卿会^[21]基于区域气候模式 PRECIS 在 RCP8.5 排放情景下的数值模拟结果,分析了本世纪未来中长期的太阳辐射变化,结果表明,我国整体的太阳辐射在本世纪中叶将略有减少,到本世纪末太阳辐射将明显下降。Zhang 等^[23]基于区域气候模式 RegCM4(regional climate model version 4),研究发现未来我国的年平均光伏发电潜力将相对于参考期(1986—2005 年)减少,且极低光伏功率输出事件将大幅增加。Wu 等^[62]同样基于区域气候模式 RegCM4 对我国高(RCP8.5)、中(RCP4.5)、低(RCP2.6)3 个排放情景下的太阳能发电量进行了研究,结果表明,在 2020—2099 年我国平均季节性太阳能发电量均相对于 1986—2005 年呈减少趋势(在春季和冬季尤为显著),且随着排放情景的变高,年内、年际波动增加。综上,气候变化对我国太阳能资源的影响研究多采用太阳辐射量作为评估指标,但也有一些研究采用其他评估指标,如平均光伏发电潜力、太阳能发电量等,这些指标均与太阳辐射量密切相关。在历史时期,我国太阳能资源总体呈现下降的趋势。在未来时期,尽管已有研究采用不同的评估指标、评估方法、气候模式及气候情景,结果均提示我国太阳能资源总体将继续呈现下降趋势,且存在显著的时空异质性。

4 气候变化背景下未来我国水能、风能、太阳能电力发展的重点科技攻关方向

“双碳”目标对于我国可再生能源的发展提出了更高的要求。在此背景下,开展气候变化背景下水能、风能、太阳能资源的评估可为行业规划、工

程设计及运营管理提供科学指导。然而,根据前文分析,目前缺乏统一规范、适应气候变化背景下的资源评估指标体系,缺乏高时空分辨率、多源融合数据的支持,精细化评估水平欠缺,缺乏对于未来不同气候变化情景下水能、风能、太阳能资源的全面准确评估,故未来建议如下方面开展科技攻关:

加强水能、风能、太阳能资源评估指标体系研究,形成统一规范、适应气候变化背景下的评估标准。首先,以水能、风能、太阳能为代表的可再生能源受气候变化影响显著,一旦决策失误,将造成巨大损失。目前气候变化对于水能、风能、太阳能资源影响的研究仅限于科研领域,在工程建设领域,应对气候变化风险意识不足,产学研用未有机融合,尚未形成统一规范、适应气候变化背景下的资源评估指标体系。所以,未来应改进工程建设领域现有资源评估方法,在规划建设电站时应将未来气候变化的影响考虑在内,采取积极措施适应气候变化带来的不利影响,提高应对气候变化的风险意识。其次,鉴于水能资源的评估指标主要包括理论蕴藏量、技术可开发量、经济可开发量,风能、太阳能资源也需要采用上述3个指标来分别进行评估。因此,未来应加强风能资源经济可开发量及太阳能资源经济可开发量、技术可开发量的研究或者开展更适合的评估指标的研究。再次,目前对水能、风能、太阳能资源的评估,主要关注的是评估指标的平均变化。然而,随着全球气候变化愈演愈烈,水能、风能、太阳能资源季节性分配发生变化,极端气候事件频发,均会对水能、风能、太阳能资源产生影响^[54,80],故未来应加强年内变化及极端变化指标的研究。此外,随着水风光(储)多能互补技术的发展,水风光资源互补特性也应形成规范的评估指标体系。

推动水能、风能、太阳能资源评估基础数据库及通用化资源评估软件系统建设,提升电力系统的数智化水平。我国水文气象站点分布不均,且在西北等水能、风能、太阳能资源丰富地区数量稀少。国际主流气候模式模拟数据及再分析数据往往没有依据我国实测气象站点进行偏差矫正,对于我国的适用性需要进一步评估。随着可再生能源的大力发展,未来应进一步加强地理信息技术、遥感技术在水能、风能、太阳能资源评估中的应用,开展多源数据融合技术研究,注重无资料地区水文气象数据的获取,生产长时间序列、高时空分辨率的水能、风能、太阳能资源评估基础数据库,推动国产化、通

用化水能、风能、太阳能资源评估软件系统建设,以适应我国可再生能源发展战略。

统筹推进未来气候变化背景下水能、风能、太阳能资源评估及水能、风能、太阳能发电的中长期预报/预测研究,提高资源评估及中长期预报/预测准确度。首先,水能、风能、太阳能资源具有显著的时空异质性,且年内、年际分布规律随着全球气候变化而变化,然而现有研究未能全面的对于气候变化影响下水能、风能、太阳能资源进行评估,提高我国未来水能、风能、太阳能资源评估准确性及全面性对于我国可再生能源开发利用和决策具有重要意义。其次,在全球气候变化背景下,极端气候事件多发重发,对水能、风能、太阳能发电影响不容小觑,且随着气象条件变化,风能、太阳能发电存在较大的波动性及随机性,故需加强水能、风能、太阳能发电的中长期预报/预测研究。风能、太阳能发电功率预测主要分为秒级/分钟级预测、超短期预测、短期预测及中长期预测,而水文预报根据预见期的不同,一般分为短期预报和中长期预报。目前对于短期以内的预报/预测准确度有保证,而对于中长期预报/预测精度亟须提高。中长期预报/预测可以帮助制定运维计划、调度计划以及电力市场交易决策,以应对未来气候变化,尤其是极端气候变化条件下发电的波动性,减少发电损失。

5 结论

水能资源主要评估指标包括理论蕴藏量、技术可开发量、经济可开发量、已正开发量、水力发电量、总水能潜力、已开发的水能潜力、径流量等。风能资源主要评估指标包括平均风速、风向频率、风功率密度、有效小时数、测站湍流强度、风能资源储量、风能资源技术可开发量等。太阳能资源主要评估指标包括太阳能资源丰富度、太阳能资源稳定度、太阳能资源直射比、太阳辐射量、日照时数等。水能、风能、太阳能资源评估方法不尽相同,总结来说:水能、风能、太阳能资源的评估方法均可归纳为基于观测的评估方法、基于数值模式的评估方法、基于卫星遥感的评估方法及基于再分析资料的评估方法,其中在对于未来水能、风能、太阳能资源进行评估时,主要采用全球气候模式及区域气候模式模拟预估数据直接进行资源评估或是驱动相应模型通过计算分析间接进行资源评估。水能、风能、太阳能等可再生能源受气候变化影响显著。现有

研究大多认为未来我国水能资源将会上升,风能及太阳能资源将下降,且存在时空异质性,这将对我国能源绿色转型带来不利影响。值得注意的是,气候变化对水能、风能、太阳能资源的影响不确定性较大。在对于历史时期气候变化影响评价时,人类活动、研究时段、数据来源、仪器设备以及评估指标等因素均会对研究结果造成不确定性影响;在对未来时期进行气候变化影响评价时,气候模式、气候变化情景、模型模拟方法、评估指标等因素也会对研究结果造成不确定性影响。未来应加强水能、风能、太阳能资源评估指标体系研究,形成统一规范、适应气候变化背景下的评估标准,推动可再生能源资源评估基础数据库及通用化资源评估软件系统建设,提升电力系统的数智化水平,统筹推进未来气候变化背景下水能、风能、太阳能资源评估及水能、风能、太阳能发电的中长期预报/预测研究,提高资源评估及中长期预报/预测准确度。

参考文献:

- [1] DOMINKOVIĆ D F, BAČEKOVIĆ I, PEDERSEN A S, et al. The future of transportation in sustainable energy systems: Opportunities and barriers in a clean energy transition[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82(2): 1823-1838. DOI: 10.1016/j.rser.2017.06.117.
- [2] 徐志, 马静, 贾金生, 等. 水能资源开发利用程度国际比较 [J]. *水利水电科技进展*, 2018, 38(1): 63-67. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2018.01.009.
- [3] 陈练. 气候变暖背景下中国风速(能)变化及其影响因子研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [4] 张瑾. 气候变暖背景下我国风能资源变化趋势分析研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [5] 丁紫玉, 方国华, 闻昕, 等. 考虑预报不确定性的水风光互补系统两阶段决策研究 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(4): 49-59. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.04.004.
- [6] 仇欣, 肖晋宇, 吴佳玮, 等. 全球水能资源评估模型与方法研究 [J]. *水力发电*, 2021, 47(5): 106-111. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2021.05.021.
- [7] QIN P C, XU H M, LIU M, et al. Climate change impacts on Three Gorges Reservoir impoundment and hydropower generation[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 580: 123922. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.123922.
- [8] LIU X C, TANG Q H, VOISIN N, et al. Projected impacts of climate change on hydropower potential in China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(8): 3343-3359. DOI: 10.5194/hess-20-3343-2016.
- [9] 吴玥葶, 郭利丹, 曾天山, 等. 渭公河径流多时间尺度变化特征研究 [J]. *中国农村水利水电*, 2021(10): 42-49. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2021.10.007.
- [10] 孙小龙, 苏志, 何如, 等. 富川地区风能资源分析 [J]. *气象研究与应用*, 2012, 33(3): 25-28. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8411.2012.03.005.
- [11] 丁杰, 吴国伟, 陈家庆, 等. 基于 CCMP 再分析风场资料的南海海洋风能资源评估研究 [J]. *海洋技术学报*, 2022, 41(5): 83-90. DOI: 10.3969/j.issn.1003-2029.2022.05.009.
- [12] GREENE S, MORRISSEY M, JOHNSON S E. Wind climatology, climate change, and wind Energy[J]. *Geography Compass*, 2010, 4(11), 1592-1605. DOI: 10.1111/j.1749-8198.2010.00396.x.
- [13] 兰忠成. 中国风能资源的地理分布及风电开发利用初步评价 [D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [14] 王凌霄, 鲁玺, 刘术艳, 等. 中国潜在风力发电量的年际变化 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(5): 837-847. DOI: 10.13209/j.0479-8023.2015.147.
- [15] 邓院昌, 余志, 刘沙. 基于尾流试验的风电场装机容量估算方法 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2010, 49(6): 53-57.
- [16] 甄自强, 王景才, 徐蛟, 等. 淮河上中游流域日照时数时空分布特征 [J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(6): 33-38. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.06.005.
- [17] 孙朋杰, 何飞, 陈正洪, 等. 考虑地形影响的太阳能资源精细化评估及技术可开发量计算 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(1): 10-18. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.1.02.
- [18] 谢国辉, 李娜娜, 汪晓露, 等. 光伏电站基地技术和经济可开发量评估的方法和模型 [J]. *电器与能效管理技术*, 2019(6): 42-47. DOI: 10.16628/j.cnki.2095-8188.2019.06.008.
- [19] GU L, CHEN J, YIN J B, et al. Responses of precipitation and runoff to climate warming and implications for future drought changes in China[J]. *Earth's Future*, 2020, 8(10): e2020EF001718. DOI: 10.1029/2020EF001718.
- [20] 周嘉月, 卢麾, 阳坤, 等. 基于 CMIP6 的中高温升情景对中国未来径流的预估 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2023, 53(3): 505-524. DOI: 10.1360/SSTe-2022-0065.

- [21] 卿会. 基于 PRECIS 区域气候模式的光伏发电预测研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2022. DOI: [10.27140/d.cnki.gbbu.2022.001381](https://doi.org/10.27140/d.cnki.gbbu.2022.001381).
- [22] GUO J H, HUANG G H, WANG X Q, et al. Projected changes in wind speed and its energy potential in China using a high-resolution regional climate model[J]. *Wind Energy*, 2020, 23(3): 471-485. DOI: [10.1002/we.2417](https://doi.org/10.1002/we.2417).
- [23] ZHANG J T, YOU Q L, ULLAH S. Changes in photovoltaic potential over China in a warmer future[J]. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(11): 114032. DOI: [10.1088/1748-9326/ac9e0b](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac9e0b).
- [24] LIU Y C, CHEN D Y, LI S W, et al. Discerning the spatial variations in offshore wind resources along the coast of China via dynamic downscaling[J]. *Energy*, 2018, 160: 582-596. DOI: [10.1016/j.energy.2018.06.205](https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.205).
- [25] YIM S H L, FUNG J C H, LAU A K H. Mesoscale simulation of year-to-year variation of wind power potential over Southern China[J]. *Energies*, 2009, 2: 340-361. DOI: [10.3390/en20200340](https://doi.org/10.3390/en20200340).
- [26] 张德. 风能资源数值模拟及其在中国风能资源评估中的应用研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2009. DOI: [10.7666/d.Y1653442](https://doi.org/10.7666/d.Y1653442).
- [27] 易侃, 张子良, 张皓, 等. 海上风能资源评估数值模拟技术现状及发展趋势 [J]. *分布式能源*, 2021, 6(1): 1-6. DOI: [10.16513/j.2096-2185.DE.2106004](https://doi.org/10.16513/j.2096-2185.DE.2106004).
- [28] 徐宗学. 水文模型: 回顾与展望 [J]. *北京师范大学学报 (自然科学版)*, 2010, 46(3): 278-289.
- [29] 徐嘉远, 邹磊, 夏军, 等. 基于时变增益模型与 LSTM 耦合的白河流域径流模拟 [J/OL]. *水资源保护*, 2023. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20230316.1547.008.html>.
- [30] YADAV A K, CHANDEL S S. Solar radiation prediction using Artificial Neural Network techniques: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 33: 772-781. DOI: [10.1016/j.rser.2013.08.055](https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.055).
- [31] 申彦波. 近 20 年卫星遥感资料在我国太阳能资源评估中的应用综述 [J]. *气象*, 2010, 36(9): 111-115. DOI: [10.7519/j.issn.1000-0526.2010.09.018](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2010.09.018).
- [32] LIN P R, FENG D M, GLEASON C J, et al. Inversion of river discharge from remotely sensed river widths: A critical assessment at three-thousand global river gauges[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 287: 113489. DOI: [10.1016/j.rse.2023.113489](https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113489).
- [33] 郭乔影. 基于星地多源数据的海上风能资源评估方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020. DOI: [10.27461/d.cnki.gzjdx.2020.001831](https://doi.org/10.27461/d.cnki.gzjdx.2020.001831).
- [34] 姚玉璧, 郑绍忠, 杨扬, 等. 中国太阳能资源评估及其利用效率研究进展与展望 [J]. *太阳能学报*, 2022, 43(10): 524-535. DOI: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0141](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0141).
- [35] HARRIGAN S, ZSOTER E, ALFIERI L, et al. GloFAS-ERA5 operational global river discharge reanalysis 1979-present[J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12(3): 2043-2060. DOI: [10.5194/essd-12-2043-2020](https://doi.org/10.5194/essd-12-2043-2020).
- [36] GHIGGI G, HUMPHREY V, SENEVIRATNE S I, et al. GRUN: An observation-based global gridded runoff dataset from 1902 to 2014[J]. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1655-1674. DOI: [10.5194/essd-11-1655-2019](https://doi.org/10.5194/essd-11-1655-2019).
- [37] YANG Y, PAN M, LIN P R, et al. Global Reach-level 3-Hourly River flood reanalysis (1980-2019)[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2021, 102(11): 2086-2105. DOI: [10.1175/BAMS-D-20-0057.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0057.1).
- [38] HE J, YANG K, TANG W J, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China[J]. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 25. DOI: [10.1038/s41597-020-0369-y](https://doi.org/10.1038/s41597-020-0369-y).
- [39] KALNAY E, KANAMITSU M, KISTLER R, et al. The NCEP/NCAR 40 reanalysis project[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(3): 437-471. DOI: [10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2).
- [40] KOBAYASHI C, IWASAKI T. Brewer-Dobson circulation diagnosed from JRA-55[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121: 1493-1510. DOI: [10.1002/2015JD023476](https://doi.org/10.1002/2015JD023476).
- [41] UPPALA S M, KALLBERG P W, SIMMONS A J, et al. The ERA-40 reanalysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2005, 131(612): 2961-3012. DOI: [10.1256/qj.04.176](https://doi.org/10.1256/qj.04.176).
- [42] DEE D P, UPPALA S M, SIMMONS A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, 137(656): 553-597. DOI: [10.1002/qj.828](https://doi.org/10.1002/qj.828).
- [43] HERSBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730): 1999-2049. DOI: [10.1002/qj.3803](https://doi.org/10.1002/qj.3803).

- [44] GELARO R, MCCARTY W, SUÁREZ M J, et al. The Modern-Era retrospective analysis for research and applications, Version 2(MERRA-2)[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(14): 5419-5454. DOI: [10.1175/JCLI-D-16-0758.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1).
- [45] 何飞, 陈正洪, 孙朋杰, 等. 基于 CLDAS 辐射产品降尺度的县域太阳能资源精细化评估 [J]. *气象与环境科学*, 2023, 46(6): 49-58. DOI: [10.16765/j.cnki.1673-7148.2023.06.007](https://doi.org/10.16765/j.cnki.1673-7148.2023.06.007).
- [46] SAHA S, MOORTHI S, PAN H L, et al. The NCEP climate forecast system reanalysis[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010, 91(8): 1015-1058. DOI: [10.1175/2010BAMS3001.1](https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1).
- [47] 杨大文, 王宇涵, 唐莉华, 等. 雅鲁藏布江上游径流变化及影响因素分析 [J]. *水力发电学报*, 2023, 42(3): 41-49. DOI: [10.11660/slfdx.20230304](https://doi.org/10.11660/slfdx.20230304).
- [48] 欧阳文字, 叶磊, 王梦云, 等. 深度学习水文预报研究进展综述 I: 常用模型与建模方法 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(4): 650-659. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0067](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0067).
- [49] 郭家力, 丁光旭, 杨旭, 等. 多源卫星降水产品在长江流域的时空精度对比 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(2): 230-242. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0025](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0025).
- [50] 顾晶晶, 冶运涛, 董甲平, 等. 滦河流域遥感反演降水产品高精度空间降尺度方法 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(5): 862-873. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0090](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0090).
- [51] SUN W C, FAN J, WANG G Q, et al. Calibrating a hydrological model in a regional river of the Qinghai-Tibet plateau using river water width determined from high spatial resolution satellite images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 214: 100-114. DOI: [10.1016/j.rse.2018.05.020](https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.05.020).
- [52] 杨明祥, 雷晓辉, 蒋云钟, 等. 基于数值模拟的南四湖风能资源初步评估 [J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(2): 182-188. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0057](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0057).
- [53] VEERS P, DYKES K, LANTZ E, et al. Grand challenges in the science of wind energy[J]. *Science*, 2019, 366(6464): eaau2029. DOI: [10.1126/science.aau2027](https://doi.org/10.1126/science.aau2027).
- [54] CRADDEN L, HARRISON G, CHICK J. Will climate change impact on wind power development in the UK?[J]. *Climatic Change*, 2012, 115(3-4): 837-852. DOI: [10.1007/s10584-012-0486-5](https://doi.org/10.1007/s10584-012-0486-5).
- [55] 陈卓. 基于区域气候模式的风资源评估与预报研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2021. DOI: [10.27140/d.cnki.ghbbu.2021.000742](https://doi.org/10.27140/d.cnki.ghbbu.2021.000742).
- [56] 杜梦蛟, 邓浩, 文仁强, 等. 大气再分析资料在中国近海的风资源特征和适用性分析 [J]. *气候与环境研究*, 2023, 28(5): 483-494. DOI: [10.3878/j.issn.1006-9585.2023.22050](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2023.22050).
- [57] ZHANG R H, ZHANG S Y, LUO J L, et al. Analysis of near-surface wind speed change in China during 1958-2015[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 137: 2785-2801. DOI: [10.1007/s00704-019-02769-0](https://doi.org/10.1007/s00704-019-02769-0).
- [58] 杨胜朋, 王可丽, 吕世华. 近 40 年来中国大陆总辐射的演变特征 [J]. *太阳能学报*, 2007, 28(3): 227-232. DOI: [10.3321/j.issn:0254-0096.2007.03.001](https://doi.org/10.3321/j.issn:0254-0096.2007.03.001).
- [59] 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. DOI: [10.1007/s11430-012-4419-y](https://doi.org/10.1007/s11430-012-4419-y).
- [60] 王科, 黄晶. 国内外太阳能资源评估方法研究现状及展望 [J]. *气候变化研究进展*, 2023, 19(2): 160-172. DOI: [10.12006/j.issn.1673-1719.2022.096](https://doi.org/10.12006/j.issn.1673-1719.2022.096).
- [61] JIMENEZ P A, HACKER J P, DUDHIA J, et al. WRF-solar: Description and clear-sky assessment of an augmented NWP model for solar power prediction[J]. *Bulletin of The American Meteorological Society*, 2016, 97(7): 1249-1264. DOI: [10.1175/BAMS-D-14-00279.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00279.1).
- [62] WU J, HAN Z Y, YAN Y P, et al. Future projection of solar energy over China based on multi-regional climate model simulations[J]. *Earth and Space Science*, 2022, 9(5): e2021EA002207. DOI: [10.1029/2021EA002207](https://doi.org/10.1029/2021EA002207).
- [63] 吴亚楠, 周庆伟, 武贺, 等. 中国近海太阳能资源特征分析及储量评估 [J]. *太阳能学报*, 2023, 44(12): 162-169. DOI: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-1293](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-1293).
- [64] 任国瑞. 中国广域范围风能和太阳能时空特性及互补性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [65] 王传辉, 申彦波, 姚锦烽, 等. 3 种再分析资料在太阳能资源评估中的适用性 [J]. *太阳能学报*, 2022, 43(8): 164-173. DOI: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2021-0039](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2021-0039).
- [66] 王雪洁, 施国萍, 周子钦, 等. 基于随机森林算法对 ERA5 太阳辐射产品的订正 [J]. *自然资源遥感*, 2022, 34(2): 105-111. DOI: [10.6046/zrzyyg.2021151](https://doi.org/10.6046/zrzyyg.2021151).
- [67] 张建云, 王国庆, 金君良, 等. 1956—2018 年中国江河径流演变及其变化特征 [J]. *水科学进展*, 2020, 31(2): 153-161. DOI: [10.14042/j.cnki.32.1309.2020.02.001](https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2020.02.001).

- [68] ZHAI R, TAO F L, XU Z H. Spatial-temporal changes in runoff and terrestrial ecosystem water retention under 1.5 °C and 2 °C warming scenarios across China[J]. *Earth System Dynamics*, 2018, 9(2): 717-738. DOI: [10.5194/esd-9-717-2018](https://doi.org/10.5194/esd-9-717-2018).
- [69] QI W, FENG L, LIU J G, et al. Growing hydropower potential in China under 1.5 °C and 2.0 °C global warming and beyond[J]. *Environmental Research*, 2022, 17: 114049. DOI: [10.1088/1748-9326/ac9c72](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac9c72).
- [70] 刘令军. 气候变化条件下金沙江梯级水电站发电能力变化研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019. DOI: [10.26991/d.cnki.gdllu.2021.002849](https://doi.org/10.26991/d.cnki.gdllu.2021.002849).
- [71] 丁一汇, 李霄, 李巧萍. 气候变暖背景下中国地面风速变化研究进展 [J]. *应用气象学报*, 2020, 31(1): 1-12. DOI: [10.11898/1001-7313.20200101](https://doi.org/10.11898/1001-7313.20200101).
- [72] ZENG Z Z, ZIEGLER A D, SEARCHINGER T, et al. A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production[J]. *Nature Climate change*, 2019, 9(12): 979-985. DOI: [10.1038/s41558-019-0622-6](https://doi.org/10.1038/s41558-019-0622-6).
- [73] 廖花妹, 黄莉, 谢水石, 等. 近 60 年中国大陆风速变化特征及影响因素分析 [J]. *赣南师范大学学报*, 2023, 44(3): 95-102. DOI: [10.13698/j.cnki.cn36-1346/c.2023.03.016](https://doi.org/10.13698/j.cnki.cn36-1346/c.2023.03.016).
- [74] 江滢, 徐希燕, 刘汉武, 等. CMIP5 和 CMIP3 对未来中国近地层风速变化的预估 [J]. *气象与环境学报*, 2018, 34(6): 58-65. DOI: [10.3969/j.issn.1673-503X.2018.06.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-503X.2018.06.006).
- [75] XIONG Y J, XIN X G, KOU X X. Simulation and projection of near-surface wind speeds in China by BCC-CSM models[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2019, 33: 149-158. DOI: [10.1007/s13351-019-8043-z](https://doi.org/10.1007/s13351-019-8043-z).
- [76] 张佳, 乐旭, 田晨光, 等. 基于 CMIP6 多模式集合的未来中国风功率预估 [J]. *大气科学学报*, 2023, 46(3): 402-414. DOI: [10.13878/j.cnki.dqkxxb.20221017008](https://doi.org/10.13878/j.cnki.dqkxxb.20221017008).
- [77] SHERMAN P, SONG S, CHEN X, et al. Projected changes in wind power potential over China and India in high resolution climate models[J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(3): 034057. DOI: [10.1088/1748-9326/abe57c](https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe57c).
- [78] 张双益, 李熙晨. 气候变化背景下未来中国近海风能资源预估 [J]. *太阳能学报*, 2022, 43(1): 29-35. DOI: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2020-0089](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2020-0089).
- [79] WANG K C, MA Q, LI Z J, et al. Decadal variability of surface incident solar radiation over China: Observations, satellite retrievals, and reanalyses[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(13): 6500-6514. DOI: [10.1002/2015JD023420](https://doi.org/10.1002/2015JD023420).
- [80] PRYOR S C, BARTHELMIE R J. Assessing the vulnerability of wind energy to climate change and extreme events[J]. *Climatic Change*, 2013, 121(1): 79-91. DOI: [10.1007/s10584-013-0889-y](https://doi.org/10.1007/s10584-013-0889-y).

Research progress on the impacts of climate change on water energy, wind energy and solar energy resources in China

ZHAI Ran¹, HU Shengkun², LIANG Lili¹, TAO Fulu^{3,4}, Muse yiwei¹,
WANG Yicheng^{3,4}, XU Zhi¹, LI Wan¹, ZHOU Hong^{3,4}

(1. China Three Gorges Corporation, Beijing 101199, China; 2. China Energy Engineering Corporation Limited, Beijing 100022, China; 3. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Water, wind, and solar energy are essential components of clean energy. Water energy resources are widely distributed, with mature development and utilization technology and low economic cost, and they have been widely applied and developed around the world. Wind and solar energy resources also have the characteristics of abundant reserves, wide distribution, and no pollution. They have developed rapidly in recent years and become essential directions for the development of renewable energy. Global climate change is one of the problems that has huge influence on the world. Water, wind, and solar energy are directly related to climate variables such as precipitation, temperature, wind speed, and radiation. At present, few studies comprehensively summarize and compare the impacts of climate change on water energy resources, wind energy resources, and solar energy resources in China.

The commonly used indicators and evaluation methods for water, wind, and solar energy resources were

summarized. It also summarizes the impacts of climate change on these resources in the historical period and their changes under different climate change scenarios in the future across China were also summarized.

The main evaluation indicators of water energy resources include theoretical reserves, technical exploitability, economic exploitability, already developed and under development amount, hydropower generation, gross hydropower potential, developed hydropower potential and river runoff. The main evaluation indicators of wind energy resources include average wind speed, wind direction frequency, wind power density, effective hours, turbulence intensity, wind energy content, and technical exploitability. The main evaluation indicators of solar energy resources include abundance, stability, direct ratio, solar radiation, and sunshine duration. In summary, the evaluation of water energy resources, wind energy resources, and solar energy resources could adopt evaluation methods based on observation data, numerical model simulation results, satellite remote sensing products, and reanalysis data. Water energy, wind energy, and solar energy are significantly affected by climate change. In most of previous studies, the total amounts of water energy resources were projected to increase, and wind energy resources and solar energy resources were projected to decrease generally, with spatial-temporal heterogeneity, in the future. Climate change would affect the development and utilization of renewable energy, dominated by water, wind, and solar energy.

To cope with the adverse impacts of climate change, the following three frontier topics are suggested to be focused on in the future. First, research on the evaluation indicators of water, wind, and solar energy resources should be further conducted to form a unified evaluation standard under the changing climate. Second, the primary database of clean energy resources evaluation and the universal software used for resources evaluation should be constructed to improve the digital intelligence level of the power system. Third, the accurate and comprehensive evaluation of water energy resources, wind energy resources, and solar energy resources under the changing climate in the future and the medium and long-term forecasting of hydropower, wind power, and solar power generation should be further studied, which could improve the accuracy of resources evaluation and medium and long-term forecasting.

Key words: water energy resource; wind energy resource; solar energy resource; renewable energy; resources evaluation; climate change; "carbon peak and neutrality" target

.....

(上接第 986 页)

shutdown when the electricity price and lift head were relatively higher. Even if the unit was turned on, the speed was generally smaller, the amount of water was relatively less; However, when the electricity price and lift head were relatively lower, the unit was turned on, and the speed was generally larger, and the amount of water was relatively more. (3) The accuracy of the optimal objective values of two methods (improved PSO algorithm and dynamic programming method) was comparable. Under three different operating load scenarios, the unit cost of water-pumping of two methods were very close, and the absolute value of the deviation rate was not more than 0.1%.

It can be seen that the combination improvement strategy of particle swarm optimization proposed was feasible and effective, and the solution result was satisfactory. Therefore, the combined improved particle swarm optimization algorithm can be used as an effective method to solve the unit variable speed optimization model of pumping station.

Key words: PSO algorithm; combination improvement strategy; single unit; variable speed optimization; dynamic programming