

前 言

水能、风能、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。本书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、经济成本低，已在世界范围内得到了广泛的应用和发展。风能、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，成为可再生能源发展的重要方向。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，同比增长约 14.1%，占全部发电装机容量的 47.3%，其中，水电装机容量 4.13 亿 kW（含抽水蓄能装机容量 0.45 亿 kW）风电装机容量 3.65 亿 kW、太阳能发电装机容量 3.93 亿 kW、生物质发电装机 4132 万 kW。2022 年，我国可再生能源发电量达 2.7 万亿 kW·h 占全部发电量的 30.8%；其中水电发电量 1.35 万亿 kW·h，占全部发电量的 15.3%；风电发电量 7627 亿 kW·h，占全部发电量的 8.6%；太阳能光伏发电量 4273 亿 kW·h，占全部发电量的 4.8%；生物质发电量 1824 亿 kW·h，占全部发电量的 2.1%。因此，水能、风能、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之一。中国位于全球气候变化的敏感区和影响显著区，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。

在国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目“长江流域水资源量演变规律与中长期预测和评价规划方法研究”（项目批准号：U2040212）、国家自然科学基金青年科学基金项目“‘双碳’目标背景下气候与下垫面变化对长江上游径流及水能资源影响研究”（项目批准号：42201050）和中国长江三峡集团有限公司科研项目“基于水文气象要素指标的气候变化对我国水风光资源影响初步研究”（项目编号：WWKY-2021-0357）等项目的共同支持下，本书总结了气候变化对我国水能、风能、太阳能资源关键指标的影响，并在此基础上提出了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。

本书共分8章，第1章绪论，主要介绍本研究的科学意义、国内外研究现状，以及本研究的主要成果；第2章归纳目前我国水能、风能、太阳能资源评估的常用数据及指标；第3章提出一种CMIP6全球气候模式数据处理方法，用于将CMIP6全球气候模式数据进行降尺度及偏差校正；第4章对未来不同气候变化情景下我国的降水、温度的时空变化格局进行分析；第5章基于VIC分布式水文模型对未来我国及典型区域的水资源时空变化趋势进行分析，并对历史时期水资源的变化进行归因研究；第6章以风速为指标，研究气候变化对我国风资源时空变化格局的影响；第7章以地表下行短波辐射为指标，研究气候变化对我国太阳能资源时空变化格局的影响；第8章系统概括本书的主要研究结论，并提出了未来需要进一步研究的方向。

本书由中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院的翟然设计并统稿，全书由中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院的翟然、刘志武、徐志、梁犁丽，以及中国科学院地理科学与资源研究所的陶福禄等共同执笔，中国科学院地理科学与资源研究所的陈一、王焱成参与了部分章节的分析工作。笔者对所有为本书出版作出贡献的老师、同事、同学和朋友致以衷心的感谢。

研究气候变化对水风光资源的影响，对于支撑可再生能源的科学规划、稳定运行与风险防控具有重要意义，可为能源转型和“双碳”目标的实现提供关键气候适配依据。气候变化对水风光资源的影响研究涉及气候学、水文学以及可再生能源等多门学科，限于目前认知水平，该领域的一些关键科学问题仍是未来较长时期内需要重点研究的难点和热点。限于作者水平，书中难免存在不足和局限之处，敬请广大读者批评指正。

作 者
2025 年 11 月

| 目 录 |

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状和发展趋势	3
1.3 主要研究成果	13
第 2 章 水风光资源评估方法	15
2.1 水能资源评估方法	15
2.2 风能资源评估方法	28
2.3 太阳能资源评估方法	44
第 3 章 CMIP6 全球气候模式数据处理	54
3.1 数据来源	54
3.2 ISIMIP3b 方法	59
3.3 CMIP6 数据在我国的进一步降尺度及校正	60
3.4 精度检验	63
3.5 数据使用说明	65
第 4 章 未来不同情景下我国气候变化	66
4.1 计算方法	66
4.2 降水	68
4.3 温度	88
第 5 章 气候变化对我国水能资源影响	108
5.1 升温 1.5℃ 及 2.0℃ 情景下未来我国水能资源变化	108
5.2 升温 1.5℃ 及 2.0℃ 情景下未来长江流域水能资源变化	150
5.3 气候变化和人类活动对我国典型子流域径流变化的贡献	162
第 6 章 气候变化对我国风能资源影响	173
6.1 2020 年、2030 年及 2060 年我国风速分布	173
6.2 2011 ~ 2100 年我国风速年际变化趋势	180
6.3 2030 年及 2060 年我国风速变化	186

第 7 章 未来不同情景下我国太阳能资源变化	194
7.1 2020 年、2030 年及 2060 年我国电网尺度太阳辐射格局	194
7.2 2011 ~ 2100 年我国辐射年际变化趋势	200
7.3 2030 年及 2060 年我国辐射变化	206
第 8 章 结论与展望	213
8.1 结论	213
8.2 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	218
参考文献	220

| 第 1 章 | 绪 论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

1.1.1.1 全球气候变化日趋显著

化石燃料燃烧导致大气中二氧化碳浓度不断增加，全球气候已经并将持续发生显著变化。2022 年 2 月 28 日，联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）发布第六次评估报告的第二工作组报告《气候变化 2022：影响、适应和脆弱性》，报告指出气候变化的负面影响比科学家不到十年前预估的要快得多。全球气候变化对人类未来发展产生巨大的挑战，对我国水风光资源影响显著。伴随着全球变暖，我国降水频率和强度发生改变，主要表现为极端降水事件发生频率增加；同时，出现风速减缓、辐射减弱等现象。中国气象局国家气候中心编著的《2022 年中国气候公报》提供的我国气候变化最新监测结果显示：2022 年我国气候状况总体偏差，暖干气候特征明显，旱涝灾害突出。2022 年全国平均气温为 10.51℃，较常年（1991 ~ 2020 年，下同）偏高 0.62℃，为 1951 年以来的历史次高；春、夏、秋三季气温均为历史同期最高，分别较常年同期偏高 1.2℃、1.1℃、0.9℃，冬季则较常年同期偏低 0.2℃。2022 年全国平均降水量 606.1mm，较常年偏少 5%，为 2012 年以来最少；降水阶段性变化明显，冬春季降水偏多，夏秋季偏少；华南、东北地区暴雨过程频繁，雨涝灾害重。从全年来看，2022 年我国登陆台风异常偏少，与 1982 年、1997 年、1998 年并列为 1949 年以来历史最少；登陆台风平均最大风速为 30.6m/s，较常年略偏弱。中国气象局风能太阳能中心发布的《2022 年中国风能太阳能资源年景公报》指出：2022 年全国风能资源为正常略偏小年景，10 米高度年平均风速较近 10 年（2012 ~ 2021 年）平均值偏小 0.82%。全国太阳能资源为偏大年景，年平均水平面总辐照量约 1563.4kW · h/m²，为近 30 年（1992 ~

2021 年) 最高值。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。近年来, 国家开展了一系列有关气候变化影响及适应性对策方向的研究, 如科学技术部 2016 年启动的国家重点研发计划“全球变化及应对”重点专项, 该专项的总体目标是“发挥优势, 突出重点, 整合资源, 在全球变化领域若干关键科学问题上取得一批原创性成果, 增强多学科交叉研究能力”, 提升我国全球变化研究的竞争力和国际地位, 为维护国家权益、实现可持续发展提供科学支撑。2020 年中国工程院《全球工程前沿 2020》报告中也将“气象与可持续发展”列为工程研究前沿之一。

1.1.1.2 清洁能源发展受到重视

人类活动造成的温室气体排放是影响全球气候的主要原因, 而与能源消耗相关的温室气体排放在其中占有重要比例。最新的 IPCC 报告指出, 温室气体排放量的增加可能很快超过许多地区的承载能力。面对迅速而强烈的气候变化, 人类需要提出新的发展路径, 并及时有效地实施。过去十几年, 以水能、风能、太阳能为代表的清洁能源越来越受到重视。为应对气候变化带来的不利影响、减缓全球变暖趋势、实现《巴黎协定》的主要目标——将 21 世纪全球平均气温升幅控制在以工业化前水平为起点低于 2.0°C 以内, 并努力将气温升幅限制在工业化前水平以上 1.5°C 之内, 目前全球多个主要国家均提出了新的发展框架。2020 年 9 月, 习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上提出“中国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, 二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和”。2020 年 12 月, 习近平主席在气候雄心峰会上发表题为《继往开来, 开启全球应对气候变化新征程》的重要讲话, 强调“中国为达成应对气候变化《巴黎协定》作出重要贡献, 是落实《巴黎协定》的积极践行者。中方已经宣布将提高国家自主贡献力度, 我愿进一步宣布: 到 2030 年, 中国单位国内生产总值二氧化碳排放将比 2005 年下降 65% 以上, 非化石能源占一次能源消费比重将达到 25% 左右, 森林蓄积量将比 2005 年增加 60 亿立方米, 风电、太阳能发电总装机容量将达到 12 亿千瓦以上。”在此背景下, 清洁能源的开发利用正受到更加高度的重视。

1.1.1.3 气候变化对清洁能源影响显著

相对于传统化石能源, 以水能、风能、太阳能为代表的可再生能源具有极大的不稳定性。气候变化和极端气候将对水风光资源产生深刻影响, 进而直接影响清洁能源的发展及发电企业的效益。例如, 2014 年 1 月 2 日, 中国长江电力股份有限公司发布公告: 截至 2013 年 12 月 31 日, 由于长江上游来水较上年同期偏

枯 17.91%，公司总发电量约 986.87 亿 kW·h，较上年同期减少 14.0%。又如，根据美国咨询公司 ArcVera Renewables 的一项分析，由于地区和全球气候因素造成的低风速，印度 2020 年第二、第三季度的风力发电量明显低于长期平均生产预期，导致收入大幅减少。再如，根据中国天气网的统计数据，2016 年 12 月 20 日与 12 月某天气较良好日相比，北京等九地阴雨等天气导致空中云量明显增加，从而造成光伏发电量大幅下降，发电量降低幅度达 54.9%~95.2%。所以，气候变化是我国水风光资源时空影响研究的一个重要的前瞻性课题，对清洁能源规划和开发及气候变化风险应对研究具有重要意义。

1.1.2 需求分析及应用前景

已有研究表明，未来几十年气候变化将进一步加剧，将对我国的水风光资源造成强烈影响。然而，能源基础设施建设往往需要提前选址布局，投资巨大，前期投入高，一旦开始建设，就难以撤销，风电机组设计使用寿命一般在 20~25 年，光伏板的设计使用寿命在 25 年左右，而水电站的设计使用寿命更长。停建、缓建、改建的成本也很高，一旦决策失误，将造成巨大损失。这就需要在前期规划设计过程中充分考虑气候变化的影响，在运行管理过程中提高应对气候变化的风险意识。目前，为推进清洁能源发展，各国正积极开展水能、风能、太阳能的开发利用，而清洁能源的利用首先需对本国的资源特性进行分析。过去关于水风光资源评估的研究通常在区域尺度上进行，如某个流域的水能资源评估。然而，中国幅员辽阔，不同地区间自然环境与气候条件差异巨大，过去在国家尺度上对中国水风光资源评估的研究数量较少。至今仍缺乏针对如下方面的问题开展的系统性研究，包括：气候变化将对我国水风光资源带来何种影响？气候变化将给我国的清洁能源发展带来挑战还是机遇？未来哪些地区将受到气候变化的不利/有利影响？

1.2 国内外研究现状和发展趋势

1.2.1 水能、风能、太阳能资源评估指标研究进展

1.2.1.1 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、已正开发量，具体计算方法可参考仇欣等（2021）的研究，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、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、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, GHP）、已开发的水能潜力（developed hydropower potential）等也常用来评估水能资源（Qin et al., 2020; Liu et al., 2016），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（吴玥葶等，2021）。

1.2.1.2 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）、国家发展和改革委员会印发的《全国风能资源评价技术规定》（发改能源〔2004〕865号）以及相关研究，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）、风能资源技术可开发量等（孙小龙等，2012；丁杰等，2022；Greene et al., 2010）。目前尚缺乏风能资源经济可开发量的相关规定（兰忠成，2015）。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，对潜在风力发电量进行评估（王凌霄等，2016）；还可利用风功率密度、风能利用效率、风机叶轮直径，对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（邓院昌等，2010）。

1.2.1.3 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，对太阳能资源丰富度、太阳能资源稳定度、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（甄自强等，2017）。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（孙朋杰

等, 2024; 谢国辉等, 2019), 但仍缺乏统一标准。

1.2.2 水能、风能、太阳能资源评估方法研究进展

1.2.2.1 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 (表 1.1)。

表 1.1 水能、风能、太阳能资源主要评估方法

方法	优点	缺点	代表性数据/模型
基于观测的评估方法	基于第一手的实测资料, 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, 如 CMIP5、CMIP6 等 (Gu et al., 2020; 周嘉月等, 2023); 区域气候模式, 如 PRECIS、RegCM4 等 (卿会, 2022; Guo et al., 2020; Zhang et al., 2022); 中尺度数值模式, 如 WRF (Liu et al., 2018)、MM5 (Yim et al., 2009) 和 WEST (张德, 2009); 微尺度风资源评估数值模式, 如 WAsP、Metodyn WT、WindSim (易侃等, 2021); 水文模型, 如 SWM 模型、HBV 模型、VIC 模型、SWAT 模型等 (徐宗学, 2010); 太阳能资源评估模型, 如基于 GIS 的数字高程模型; 人工智能模型 (徐嘉远等, 2023; Yadav and Chandel, 2014)
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 (申彦波, 2010), 数据时间长度短, 无法提供实时数据	Landsat (Lin et al., 2023); MODIS (Lin et al., 2023); 哨兵卫星 (Lin et al., 2023); ERS-2 SAR (郭乔影, 2020); ENVISAT ASAR (郭乔影, 2020); RADARSAT-1 SAR (郭乔影, 2020); QuikSCAT (郭乔影, 2020); ASCAT (郭乔影, 2020); WindSAT (郭乔影, 2020); GMS-5 (姚玉璧等, 2022); NOAA (姚玉璧等, 2022); 风云系列卫星资料 (姚玉璧等, 2022)
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 (Harrigan et al., 2020); GRUN (Ghiggi et al., 2019); GRADES (Lin et al., 2023); GRFR (Yang et al., 2021); CMFD (He et al., 2020); NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996); JRA-55 (Kobayashi and Iwasaki, 2016); ERA40 (Uppala et al., 2005); ERA-Interim (Dee et al., 2011); ERA5 (Hersbach et al., 2020); MERRA-2 (Gelaro et al., 2017); CLDAS (何飞等, 2023); CFSR (Saha et al., 2010)

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 3400 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实测资料地区水能资源评估具有重要作用（杨大文等，2023）。水文模型是常用的数值模拟手段，其有多种分类方法，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 SWM (Stanford Watershed Model) 模型、HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) 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 (Variable Infiltration Capacity) 模型、SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型] 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（徐宗学，2010）。近年来，人工智能模型逐渐用于径流模拟及径流序列重建（徐嘉远等，2023；欧阳文宇等，2022），这类方法所需数据较少、计算简便，但缺乏对流域物理特征的描述。全球气候模式 (Global Climate Models, GCMs) 及区域气候模式 (Regional Climate Models, RCM) 模拟预估数据可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被用于水能资源的评估（郭家力等，2022；顾晶晶等，2021），常用卫星遥感产品有 Landsat、MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)、哨兵 (Sentinel) 系列卫星等（Lin et al., 2023），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（Sun et al., 2016）。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，可以极大弥补地面观测数据的不足，如 GloFAS-ERA5 (Global Flood Awareness System- ECMWF Reanalysis 5) (Harrigan et al., 2020)、GRUN (Global Runoff Reconstruction) (Ghiggi et al., 2019)、GRADES (Global Reach-level A Priori Discharge Estimates for SWOT) (Lin et al., 2023)、GRFR (Global Reach-level Flood Reanalysis) (Yang

et al., 2021), 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, 对我国的径流模拟精度还需要进一步评估。

1.2.2.2 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 (表 1.1)。

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。尽管该方法基于质量较高的观测数据, 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, 其他风能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较差, 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 (杨明祥等, 2018), 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, 进一步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、Meteadyn WT 等 (易侃等, 2021), 中尺度数值模式包括 WRF (Weather Research and Forecasting) (Liu et al., 2018)、MM5 (Mesoscale Model 5) (Yim et al., 2009)、WEST (Wind Energy Simulation Toolkit) (张德, 2009) 等。多尺度耦合嵌套模式能够有效解决单一尺度模式适用性不足的问题 (Veers et al., 2019)。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 (Cradden et al., 2012)。区域气候模式是提高未来气象数据分辨率的重要方法 (陈卓, 2021)。

近年来, 基于卫星遥感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①合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 数据, 如 ERS-2 SAR、ENVISAT ASAR、RADARSAT-1 SAR 等; ②微波散射计数据; ③微波辐射计数据, 如 QuikSCAT、ASCAT 及 WindSAT 等 (郭乔影, 2020)。但单颗卫星一天至多过境两次, 时间间隔约为 12 小时, 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（杜梦蛟等，2023），常用于风能资源评估的再分析资料包括中国区域地面气象要素驱动数据集（The China Meteorological Forcing Data, CMFD）（He et al., 2020）、NCEP/NCAR（National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research）（Kalnay et al., 1996）、ERA40（ECMWF Reanalysis 40）（Uppala et al., 2005）、ERA-Interim（ECMWF Reanalysis-interim）（Dee et al., 2011）、ERA5（ECMWF Reanalysis 5）（Hersbach et al., 2020）、CFSR（Saha et al., 2010）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（Zhang et al., 2019）。

1.2.2.3 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 1.1）。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（杨胜朋等，2007；马金玉等，2012）。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，我国气象站中仅有部分站点具备太阳辐射观测的能力（王科和黄晶，2023），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、基于地理信息系统（Geographic Information System, GIS）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（Jimenez et al., 2016），相比于传统的中尺度数值模式，该模式对云-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（Yadav and Chandel, 2014）。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（孙朋杰等，2024）。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太阳辐射量的模拟结果，对未来太阳能资源进行评估（Zhang et al., 2022; Wu et al., 2022）。

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（申彦波，2010）。常用的卫星遥感数据包括 MODIS、GMS-5（Geostationary Meteorological Satellite-5）、NOAA、风云系列卫星资料等（姚玉璧等，2022），主要包括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主要包括两种思路，第一种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，然后基于气候学原理对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全天空条件下的太阳辐射进行计算（申彦波，2017）。

在对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）（何飞等，2023）、ERA5（吴亚楠等，2023）、MERRA-2（the Modern-era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2）（任国瑞，2020）、JRA-55（Japanese 55-year Reanalysis）（王传辉等，2022）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，如有研究表明与我国太阳辐射站点观测资料相比，绝大部分再分析资料存在高估现象，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（王雪洁等，2022）。

1.2.3 气候变化对我国水能、风能、太阳能资源影响研究进展

1.2.3.1 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(2020)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(2020)基于多个第五次国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5) GCMs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径流量在2011~2055年呈下降趋势,而在2056~2100年略微上升;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(2023)基于第六次国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6)提出的结合社会经济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模型的研究表明,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(2018)基于HAPPI(Half a degree Additional Warming, Prognosis and Projected Impacts)项目生产的经偏差校正的GCMs数据驱动VIC水文模型,对于增温1.5℃(2106~2115年)及2.0℃(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(2016)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%、3%~6%,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-5.4%~-2.2%、-4%~-1.3%,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(2022)基于ISIMIP 2b(Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project 2b)项目提供的GCMs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℃、2.0℃、4.5℃情景下,我国总水能潜力相对于基准时期(1986~2015年)的增幅分别为51.8%、52.3%、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(2020)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%、5.2%~8.1%。刘令军(2019)