

碳中和目标下中国光伏发电潜力、空间格局与综合效益分析

曾嘉伟, 陈祉叶, 王怡静, 王戎*

复旦大学环境科学与工程系, 上海 200438

摘要 利用时空高分辨的综合数字地理信息, 预测了碳中和目标下 2021—2060 年光伏发电的时空分布特征, 分析了温度、遮阳、面板倾斜度对光伏发电量的影响, 并通过空间自相关方法研究了光伏产业发展的格局, 量化光伏发电的综合效益, 结果表明: (1) 优化到电厂级别后, 2060 年中国光伏年发电潜力可达到 9 PW·h。其中, 新疆和内蒙古发电潜力较高, 有望成为中国重要的光伏发电基地。(2) 光伏面板的间距、倾斜角度、外物遮挡和温度均会对光伏面板的发电效率产生影响, 在规划建设光伏电厂时要充分考虑实际地质地貌和气象要素, 合理布局光伏面板, 定期做好清洁维护工作, 以保持光伏电板良好的发电性能。(3) 2021—2060 年各省份集中式光伏发电的分布呈现一定的空间关联特征。西北地区是未来集中式光伏产业的核心区域, 可能表现出一定的集聚效应, 这种效应能有效提高西北地区光伏企业的生产效率和竞争能力, 增强光伏企业的创新水平, 并带动西北地区经济的协同增长。(4) 中国在 2060 年通过光伏发电每年可节约 1200 Mt 标准煤, 二氧化碳、大气颗粒物、二氧化硫和氮氧化物减排量分别约为 7076、0.18、0.66 和 0.95 Mt。其中, 西北地区和内蒙古是光伏发电综合效益最高的区域, 加速该地区光伏发电的发展、保证电力输送设施和储能设施的建设, 有助于加速中国的碳减排进程并尽早实现碳中和目标。

关键词 光伏发电; 发电效率; 空间格局; 收益评估

推进能源绿色低碳转型, 是实现中国“双碳”目标的重要手段^[1]。面对碳减排的需求, 能源转型和

低碳发展已成为潮流, 能源结构调整、摆脱化石燃料有助于减缓全球气候变暖和改善区域环境质

收稿日期: 2024-01-03; 修回日期: 2024-05-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF0802504); 国家自然科学基金项目(41877506)

作者简介: 曾嘉伟, 硕士研究生, 研究方向为太阳能与碳中和, 电子信箱: 22210740090@m.fudan.edu.cn; 王戎(通信作者), 教授, 研究方向为环境模型、气候变化、碳循环、空气污染、可再生能源、能源经济、地球系统, 电子信箱: rongwang@fudan.edu.cn

引用格式: 曾嘉伟, 陈祉叶, 王怡静, 等. 碳中和目标下中国光伏发电潜力、空间格局与综合效益分析[J]. 科技导报, 2024, 42(19): 34-46;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.02.00233

量^[2]。中国是世界上最大的能源生产国及消费国,为实现“双碳”目标,中国将优化能源结构作为环境治理的重要目标^[3]。可再生能源是中国能源体系的重要组成部分,开发可再生能源、提升非化石能源比例是推动能源绿色低碳转型的着力点^[4]。在可再生能源中,太阳能非常具有潜力,光伏发电可在大范围推广^[5-6]。中国太阳能资源丰富且分布广泛,年辐射总量达到 $1400 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上的区域约占国土面积的 70%^[7]。自 2013 年以来,中国已成为全球第一大光伏应用市场,并且中国在 2015—2023 年间的光伏新增装机量位居全球第 1^[1]。中国光伏发电技术成熟,已经建立了完整的产业链,大力开发太阳能是中国实现“双碳”目标的重要途径之一。

目前国内外已有一些关于太阳能发电技术能效、光伏产业空间格局以及发展路径预测的研究。提高光伏电板的发电效率是目前研究较多的方向,现有研究大多以实际光伏装置的参数和发电数据为切入点,通过实验室或者现场测试的方式,对比电板在不同情况下的发电效率,进而发现影响光伏电板发电效率的因素。例如, Kaldellis 等^[8]对希腊南部光伏系统的室外测量数据进行评估,发现光伏组件的电气效率和能量转换效率均取决于工作温度,但变化率主要取决于不同的气象条件、光伏电板材料和电板安装位置。Yang 等^[9]认为电导率决定了光伏电板的功率转换效率,并建立了功率转换效率和电导率之间的定量关系。Yang 等^[10]研究尘埃颗粒物沉积对光伏电板发电效率的影响,发现风速和颗粒物的粒径对发电效率有显著影响。

光伏产业的空间格局是较为少有的研究方向,此类研究能够从宏观的角度对光伏产业的竞争与发展进行分析,进而揭示产业冷热点与集聚效应,为光伏装机策略提供科学支撑。例如,陈枫楠等^[11]基于 2009 年中国的光伏数据和基尼系数,发现中国华北地区光伏电站的集聚程度最大,东北地区集聚程度最小。韩梦瑶等^[12]基于光伏装机量数据,分析发现在 2020 年,全国集中式光伏电站和分布式光伏电站呈现一定的空间关联特征,西北、华东和华中是集中式光伏装机的热点区域,华东和华中是分布式光伏装机的热点区域。

预测发展路径对中国清洁能源政策有重要意义,现有的研究一般均基于大量、多维度的数据构建数学模型,对研究的区域未来的装机量、发电量等数据进行预测,其结果能够为国家制定光伏产业发展路径提供科学支持。例如, Liu 等^[13]综合分析历史光伏装机量数据、社会用电总量、光伏发电量、光伏组件产量以及国内光伏产值等数据,并利用 CEEMD-ABC-LSSVM 模型对 2019—2035 年中国光伏装机容量的变化趋势进行预测,结果表明到 2035 年中国光伏装机量将达到 4000 GW。Liu 等^[14]收集国内生产总值、工业增加值、太阳能发电和消耗量等数据,结合 GRA-LSTM 模型对中国 2020—2035 年的光伏装机量进行预测,结果表明到 2035 年中国光伏装机量只能达到 2800 GW。

现有研究主要针对单一光伏发电系统的发电效率、光伏产业的历史空间格局,或针对基于历史数据构建的模型运行的结果进行分析,从运筹学角度分析温度、遮阳、面板倾斜度对光伏发电量影响的研究也相对缺乏。本研究基于高时空分辨率的数字地球智能网络模型^[15],分析碳中和目标下中国集中式光伏发电的时空分布特征及其影响因素,运用空间自相关方法分析中国光伏发电的空间分布特征,并量化光伏发电的综合效益。

1 数据与方法

1.1 地理空间数据

所用的中国土地覆盖类型数据源于美国中分辨率成像光谱仪的土地覆盖类型一类数据集 (MCD12Q1) (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v006>)^[16],其空间分辨率为 $0.005^\circ \times 0.005^\circ$ 。中国陆地生态保护区数据源于中国科学院资源环境科学与数据中心^[17],其空间分辨率为 $0.001^\circ \times 0.001^\circ$ 。中国地面坡度数据源于美国航空航天局 (NASA) 和美国国家测绘局 (NIMA) 联合发布航天飞机雷达地形测绘任务中的全球增强坡度数据集 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/srtmg11v003>)^[18],其空间分辨率为 $0.001^\circ \times 0.001^\circ$ 。中国小时太阳辐射数据和地表温度数据源于 NASA 发布的 GEOS-5 FP 数据集

(https://portal.nccs.nasa.gov/cgi-lats4d/opendap.cgi?&path=GEOS-5/fp/0.25_deg/assim)^[19], 空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.625^\circ$, 时间范围为 2012—2018 年。2020 年中国各省化石燃料消耗量收集自《电力工业统计资料汇编》^[20]。根据能源消费数据、能源需求增长率和电气化程度, 预测了中国 2021—2060 年各省的电力消费量^[21-22]。大气污染物排放限值使用了《火电厂大气污染物排放标准》^[23]、《污染源源强核算技术指南 火电》^[24]以及《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020年)》提供的数据^[25]。

由于缺乏相关数据, 本研究数据收集范围及研究范围不包括中国台湾、香港和澳门地区。空间数据收集后统一调整分辨率至 $1/120^\circ \times 1/120^\circ$ 。

1.2 研究方法

1.2.1 光伏发电量

考虑到光伏发电受到装机容量、太阳辐射、遮阳和温度的影响, 各格点 ($0.0083^\circ \times 0.625^\circ$) 小时光伏发电量 (P) 的计算公式见式(1)^[15]:

$$P = C \times \frac{R_{\text{panel}}}{R} \times \gamma_{\text{shade}} \times \gamma_{\text{temp}} \times (1 - \gamma_{\text{loss}}) \quad (1)$$

式中, C 为光伏面板的装机容量, R_{panel} 为光伏面板接收到的太阳辐射量, R 为标准条件下光伏面板接收到的太阳辐射量 ($1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), γ_{shade} 为遮阳系数^[26], 即无阴影面积与光伏电板总面积的比值, γ_{temp} 为温度系数, γ_{loss} 为电力传输过程中的损耗, 取 19.44%。

根据气象和地貌因素筛选出适合安装光伏面板的空间位置, 可利用土地的筛选条件考虑以下方面: (1) 区域地面起伏程度小于整个区域的 5%; (2) 太阳辐射时间大于 $4.2 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$; (3) 地表温度高于 0°C 。在所有覆盖类型的土地中, 灌丛、热带稀树草原、雪地和沙漠均适宜建设光伏发电厂, 可用于安装光伏面板的土地占实际土地的 10%~15%。在筛选出光伏面板空间位置后, 计算光伏面板的单位面积装机容量和有效面积。光伏发电的装机容量 C 的计算公式见式(2)^[15]:

$$C = S \times Cstd = \frac{S_0}{\left(L \times \cos \omega + L \times \frac{\sin \omega \cos \phi}{\tan \beta} \right)} \times Cstd \quad (2)$$

式中, $Cstd$ 为光伏面板单位面积容量 ($161.9 \text{ W} \cdot$

m^{-2})^[27], S 为光伏电板的有效安装面积, S_0 为光伏电板的总面积, ω 为光伏电板倾斜程度, β 为太阳高度角, ϕ 为太阳方位角。

光伏面板接收到的太阳辐射量 R_{panel} 、遮阳系数 γ_{shade} 和温度系数 γ_{temp} 的计算公式见式(3)~式(5)^[15]:

$$R_{\text{panel}} = (\cot \beta \cos \phi \sin \omega + \cos \omega) R_h + \frac{(1 + \cos \omega)}{2} R_d + \frac{(1 - \cos \omega)}{2} R_s + R_t \rho_s \quad (3)$$

$$\gamma_{\text{shade}} = \frac{11}{12} - \text{sinarctan} \frac{\tan \beta}{\cos \phi} (\sin \omega \cot \beta \cos \phi - \frac{\sin \omega}{\tan \beta} \cos \phi) / \sin \left(\pi - \arctan \frac{\tan \beta}{\cos \phi} - \omega \right) \quad (4)$$

$$\gamma_{\text{temp}} = 1 + \sigma \left(T_{\text{atm}} + \frac{T_{\text{cell}} R_{\text{panel}} - 20 R_{\text{panel}}}{0.8} - 25 \right) \quad (5)$$

式中, R_h 为太阳直接辐射, R_d 为太阳散射辐射, R_s 为太阳水平面总辐射^[19], ρ_s 为地表反照率, 取 $0.2^{[26]}$, T_{atm} 为距地表 2 m 处的大气温度, T_{cell} 为电板标准运行温度, 取 44°C , σ 为温度系数, 取 $-0.41\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ^[26]。

1.2.2 电厂时空分布的优化

以县级为单位对光伏电站的空间分布及规模进行优化。首先, 根据各县电厂最大规模时装机容量最大的原则选择最优建厂策略, 进而基于可利用面积大于 60% 的原则确定电厂的最大规模。然后, 考虑到电厂组件、安装、电缆、变压器和土地成本, 基于电厂平准化度电成本最低原则优化电厂的最佳规模和空间分布。最后, 基于技术学习曲线, 根据总成本最低原则优化出光伏电站在 2021—2060 年期间的建设时间。

1.2.3 二氧化碳减排量的计算

光伏电站对二氧化碳排放的影响考虑了光伏发电替代化石燃料发电导致的碳减排、新建电厂对土地利用类型的改变导致的碳汇和土地碳密度的变化。新建的光伏电厂导致的二氧化碳减排量 $F_{\epsilon, \text{CO}_2}$ 的计算公式如式(6)所示^[15]:

$$F_{\epsilon, \text{CO}_2} = \theta_{\text{fossil}} \times \sum_{h=1}^{8760} \sum_{x=1}^{n_q} P_{x,h} - \sum_{x=1}^{n_q} \gamma_x S_x - \sum_{x=1}^{n_q} v_x S_x / 25 \quad (6)$$

式中, ϵ 为新建的光伏电厂, h 为小时数, x 为电厂内的格点, n_q 为光伏电站内可利用格点数目, $P_{x,h}$ 为光伏面板所在格点的小时发电量, γ_x 是陆地碳汇通

量, S_x 是光伏板占地面积, θ_{fossil} 为化石燃料的二氧化碳排放因子, 其中煤炭、石油和天然气分别为 0.84、0.72 和 0.46 kg CO₂·kW·h⁻¹, v_x 为光伏板所占土地的碳密度。

1.2.4 大气污染物减排计算

光伏发电替代化石燃料发电在减少二氧化碳排放的同时, 也会降低二氧化硫、氮氧化物及颗粒物的排放量。二氧化硫、氮氧化物及颗粒物减排量 ($F_{\epsilon,\gamma}$) 的计算公式如式(7)所示:

$$F_{\epsilon,\gamma} = \sum_{h=1}^{8760} \sum_{x=1}^{n_g} P_{x,h} \times \sigma_0 \times \beta_{\text{fossil}} \times \tau_{\text{fossil}} \times L_{\gamma} \quad (7)$$

式中, γ 为大气污染物分类(二氧化硫、氮氧化物和颗粒物), fossil 为化石燃料类型(包括煤炭、石油和天然气), σ_0 为度电热值转化系数(3.6×10³ kJ·kW·h⁻¹), β_{fossil} 为化石燃料度电转化系数, 其中煤炭、石油和天然气分别为 4.7829×10⁻⁸、2.3914×10⁻⁸ 和 2.8353×10⁻⁸ t·kJ^{-1[21]}, τ_{fossil} 为化石燃料燃烧的烟气排放量, 其中煤炭、石油和天然气分别为 11650、11100 和 32483 Nm³·t^{-1[28]}, L_{γ} 为二氧化硫、氮氧化物和颗粒物的排放限值^[23-25]。

1.2.5 莫兰指数

为了量化光伏发电的空间分布特征, 拟使用全局和局部莫兰指数来分析 2020—2060 年集中式光伏累计装机量的空间分布。全局莫兰指数 (I) 可用于分析某省累计装机量在全国范围内与周边省份累计装机量的平均关联程度, 检验全国范围内省份间累计装机量的空间异同性^[29], 如式(8)所示:

$$I = n \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

式中, n 为省份个数, y_i, y_j 为第 i 和第 j 个省份的累计装机量, \bar{y} 为各省份累计装机量的均值, w_{ij} 为空间权重值。

全局莫兰指数 I 的范围为 -1~1, 全局莫兰指数大于 0 说明全国各省份累计装机量在空间上存在正相关性, 且值越大空间相关性越显著; 全局莫兰指数等于 0 表示各省份累计装机量无空间相关性; 全局莫兰指数小于 0 表示各省份累计装机量在空间上存在负相关性。

当数据量较大时, 局部区域变量的随机性可能导致局部不平稳现象, 因此在检测出全局自相关性后, 需要使用局部莫兰指数来进一步解释局部不平稳特征, 检验局部的空间异质性。局部莫兰指数 (I_i) 的计算如式(9)所示:

$$I_i = (y_i - \bar{y}) \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} (y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (9)$$

局部莫兰指数大于 0 表示 i 省与相邻省份的累计装机量相似, 小于 0 表示 i 省与相邻省份的累计装机量存在差异。区域型自相关(local indicators of spatial association, LISA)集聚图是一种可视化局部莫兰指数的方法, 可以展现出各个省份累计装机量与其相邻省份的关联。

2 结果与分析

2.1 中国光伏发电潜力分析

考虑全部土地可利用、筛选可利用面积和优化到电厂级别情景下的光伏发电潜力的空间分布。图 1(a) 显示全部土地均可利用情景下光伏发电量的空间分布, 可看出, 中国大部分区域发电潜力约为 40~360 MW·h·grid⁻¹·d⁻¹, 西南、华南和华中的发电潜力相对较大, 约为 200~400 MW·h·grid⁻¹·d⁻¹, 东北、华北北部以及西北北部的发电潜力较小, 约为 40~160 MW·h·grid⁻¹·d⁻¹。

结合图 1(d) 中不同情景下 2060 年各省的光伏发电量, 可以看出, 全部土地用于安装光伏面板后, 全国光伏年发电潜力高达 1090 PW·h, 其中西藏、新疆、内蒙古、青海、四川和云南的发电潜力相对较大, 分别为 198.20、165.10、98.17、99.78、64.72 和 56.62 PW·h·a⁻¹。

考虑气象和地貌因素筛选适合安装光伏面板的空间位置后, 可以得到考虑可利用面积情景下光伏发电潜力的空间分布(图 1(b)), 可以看出, 中国东北和西南的部分地区以及山东省有较多土地不适宜安装光伏面板, 而西南东部、华南和华北北部发电潜力相对较高, 约 20~50 MW·h·grid⁻¹·d⁻¹, 结合图 1(d) 可以发现在全部可利用面积安装光伏面板可使全国光伏年发电量达到 53.5 PW·h, 其中新

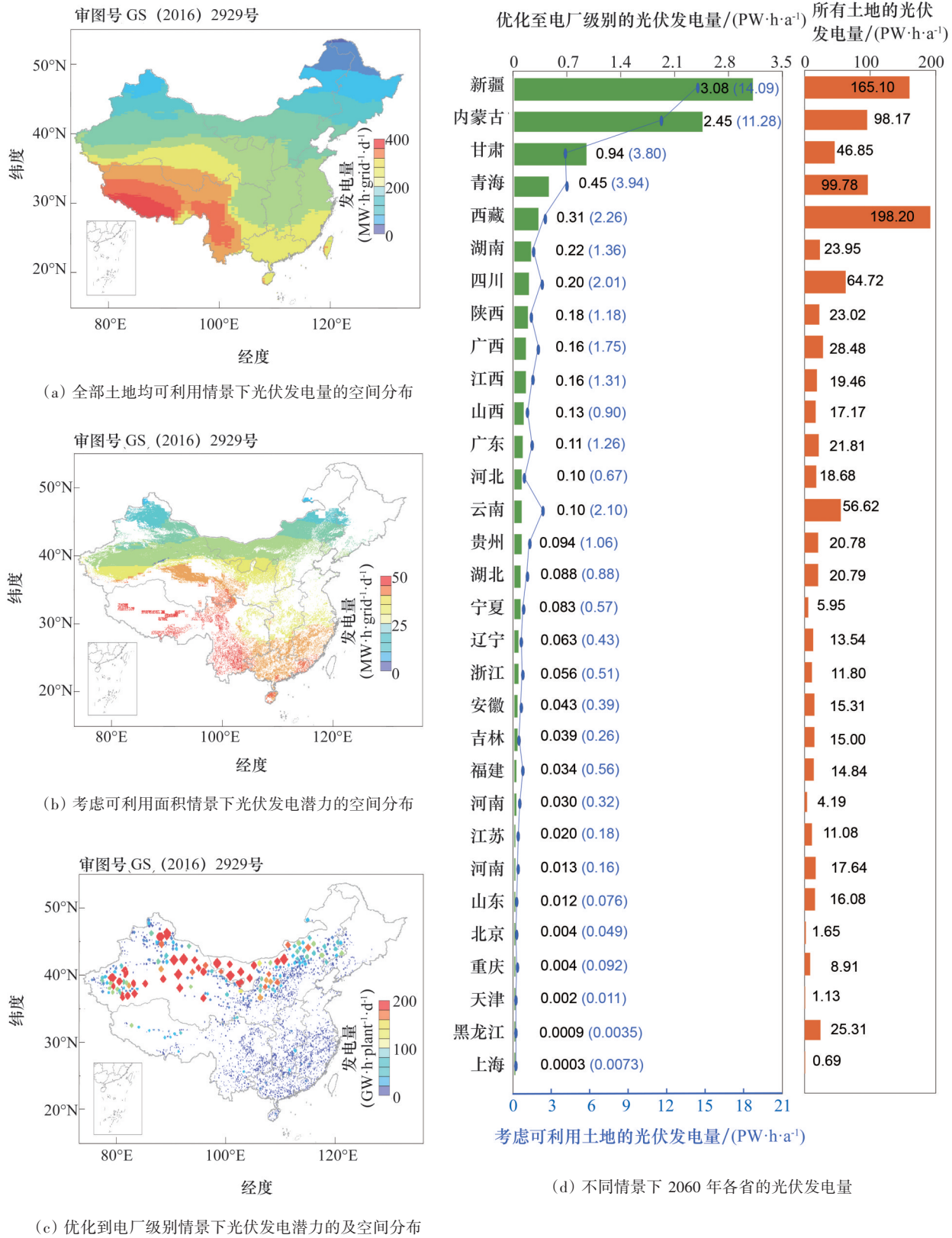


图1 中国光伏发电潜力的空间分布(地图以地理坐标系下矩形经纬度范围表示)

疆、内蒙、甘肃和青海发电潜力较大,分别为 14.09、11.28、3.80 和 3.94 $\text{PW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$, 占全国总量的 61.89%, 而西藏、四川和云南由于地形地貌或地表温度等原因, 大部分土地不适宜安装光伏面板, 因此发电潜力与全部土地可利用情景相比降低较多, 降幅分别高达 98.86%、96.89% 及 96.29%。

图 1(c) 为在考虑可利用土地的基础上, 进一步考虑了特高压变电站位置、电力运输和平准化度电成本等影响因素, 优化得到的光伏电厂规模及空间分布。结果表明, 中国西北和华北的一些光伏发电厂发电规模可以达到 $100 \text{ GW}\cdot\text{h}\cdot\text{plant}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 以上, 华中、华南、西南和华东的部分区域也有集中式光伏发电厂, 但相比起西北地区 and 内蒙古, 单个发电厂的发电规模较低, 约为 $10 \text{ GW}\cdot\text{h}\cdot\text{plant}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 左右。结合图 1(d) 可以发现在优化到电厂级别后, 中国光伏发电潜力可达到 $9 \text{ PW}\cdot\text{h}$ 以上, 新疆和内蒙古发电潜力领先其他省份, 约占全国发电潜力的 60%, 因此可以认为未来新疆和内蒙古将是中国重要的集中式光伏发电基地。

考虑了光伏面板倾斜程度、遮阳和温度对光伏发电量的影响, 将中国划分为 7 个区域, 并假设 4 个情景来比较不同条件下各区域光伏电厂的小时发电曲线(图 2), 即考虑温度、光伏面板倾斜度和遮阳的影响(情景 1, 中心情景)、不考虑温度的影响(情景 2)、不考虑温度和遮阳的影响(情景 3), 及不考虑温度、光伏面板倾斜度和遮阳的影响(情景 4)。

结果表明, 西北地区光伏电厂的小时发电量最大, 小时电力负荷最大峰值可以达到 $2.14 \text{ TW}\cdot\text{h}$, 而东北地区的光伏发电峰值仅为 $0.0471 \text{ TW}\cdot\text{h}$ 。此外, 光伏发电的季节特征显著, 温度、光伏面板倾斜度和遮阳因素在不同季节对发电量的影响不同。由图 2(a) 可得, 在全国层面上, 考虑光伏面板倾斜度在四季均能提高发电厂的发电能力, 秋季冬季地表温度较低, 导致光伏电板的电能转换效率提高, 从而提高了光伏的发电能力, 但在夏季, 高温降低了光伏电板的电能转换效率, 因此降低了光伏的发电能力。遮阳和地表温度对光伏发电的影响类似, 但在春季和夏季对光伏发电的负面影响较大。

在中心情景下, 春季为全国光伏小时发电量最

高的季节, 峰值达到 $4.11 \text{ TW}\cdot\text{h}$; 若不考虑光伏面板倾斜程度、遮阳和温度对光伏发电量的影响, 则夏季的发电水平最高。由图 2(b)~(h) 可以看出, 光伏面板倾斜度会显著降低西南、华南、华中和华东的发电厂夏季发电潜力, 但在其他区域及其他季节对发电潜力有一定的促进作用。

地表温度会降低各地区发电厂春季和夏季的发电能力, 但能提高秋季和冬季的发电潜力。遮阳会降低发电厂的发电潜力, 且在各地区春季和夏季的影响程度会高于地表温度的影响。在中心情景下, 西北、西南、华北和东北的发电厂小时电力负荷水平最高的季节为春季, 峰值分别为 1.98、0.30、1.14、0.04 $\text{TW}\cdot\text{h}$, 华南、华中、华东的负荷水平最高的季节为秋季, 峰值分别为 0.15、0.14、0.14 $\text{TW}\cdot\text{h}$ 。为使光伏电板发电效率最大化, 各地区应选择在大阳光照充足、云层较少的地方建设光伏发电厂, 在运行过程中根据四季变化调整电板放置的角度、控制电板运作时的温度。

2.2 中国光伏装机的空间分布特征

基于碳中和目标, 考虑用电端电力负荷、特高压线路电力传输等因素, 根据平准化度电成本及技术学习曲线, 优化得到集中式光伏发电厂的时空分布。截至 2020 年, 全国集中式光伏累计装机量约为 174.7 GW , 光伏发电主要分布在华北地区。根据优化结果, 光伏累计装机量将在 2030 年后快速增长, 在 2030 年底, 即碳达峰目标时期, 累计装机量为 606.6 GW , 到 2060 年年底, 即碳中和目标时期, 累计装机量可以达到 11125.6 GW 。

使用空间自相关性分析方法, 对各省份从 2020—2060 年每 10 年集中式光伏累计装机量进行全局空间自相关分析, 得到各时间点的全局莫兰指数分别为 0.2696、0.0813、0.2094、0.2015 和 0.1289。从全局空间自相关分析结果看, 各省份在 2020—2060 年间每 10 年光伏累计装机量的全局莫兰指数均为正值, 表明中国不同时期集中式光伏电站布局在空间上呈集聚分布特征。

同时, 2020—2030 年间的全局莫兰指数呈下降趋势, 表明期间部分省份新增装机量明显多于其他省份, 集中式光伏产业出现多元化发展特征。在

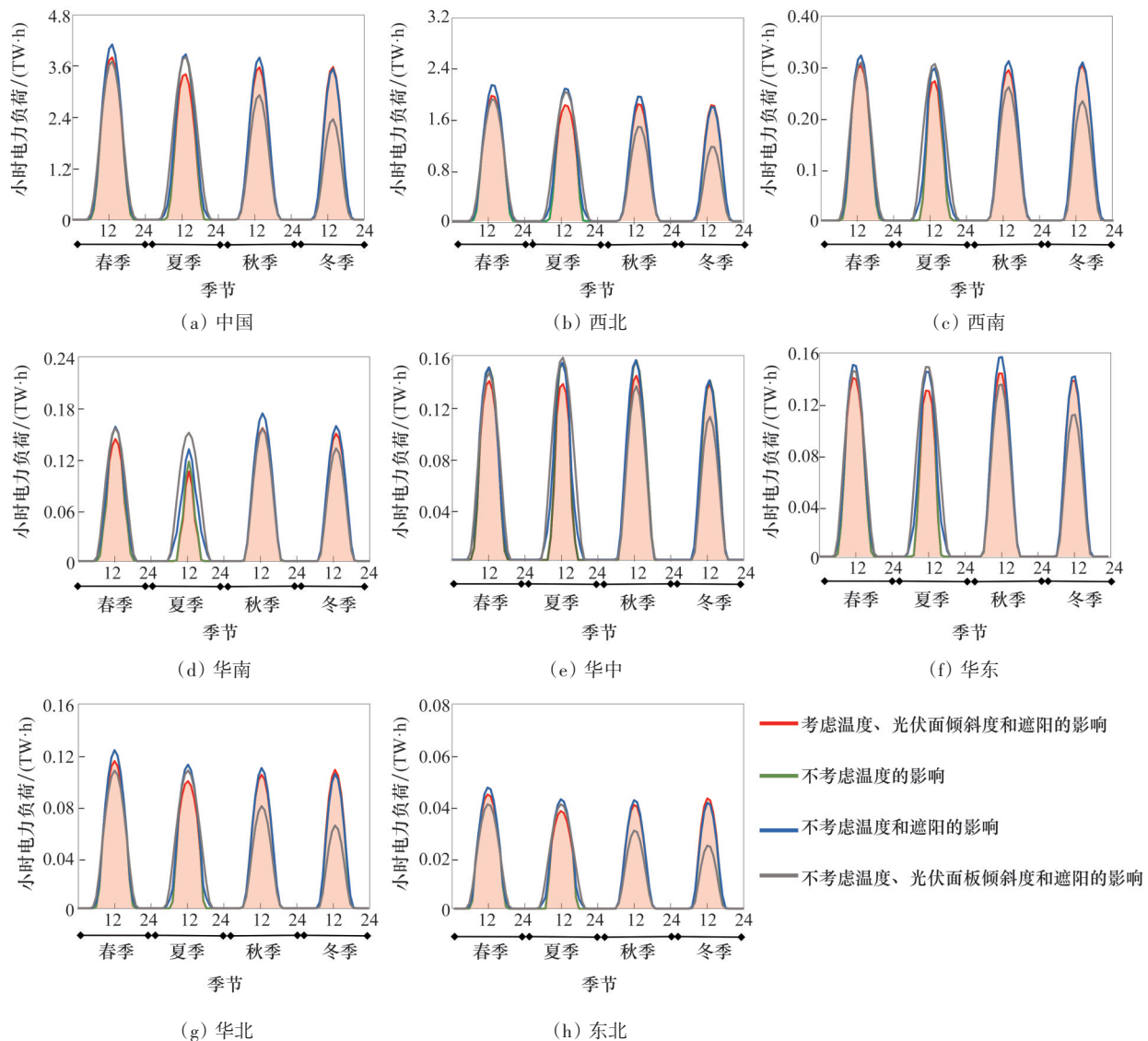


图2 各区域的光伏小时发电曲线

2030—2040年间,全局莫兰指数呈上升趋势,表明在经过2020—2030年产业布局调整后趋于稳定提升阶段。在2040—2060年间,全局莫兰指数呈波动趋势,但最低值仍高于2030年的全局莫兰指数,表明全国集中式光伏产业布局已基本形成稳定的空间区域集聚格局。

全局空间自相关性分析解释了研究区域内是否存在集聚,进一步的局部空间自相关性分析则展示了具体的空间位置及集聚的程度,LISA集聚图是局部空间自相关性分析的重要指标,可以表明不同地区或者单元的集聚特征,以及每个地区与其邻近或邻接地

区的关系^[30]。因此,本研究对中国各省份2020—2060年每10年的集中式光伏累计装机量进行了局部空间自相关性分析,得到LISA集聚图(图3)。

全国集中式光伏产业局部自相关性表现出4个特征区,分别是高-高集聚区、低-低集聚区、高-低集聚区和低-高集聚区。在高-高集聚区内,各省份集中式光伏产业集聚水平的相似性和依赖性均较强,区域核心省份产业集聚水平高且相近省份产业集聚水平也较高。

在2020年,高-高集聚区主要分布在西北、华中、华北和华东的部分地区;在2030—2060年间,

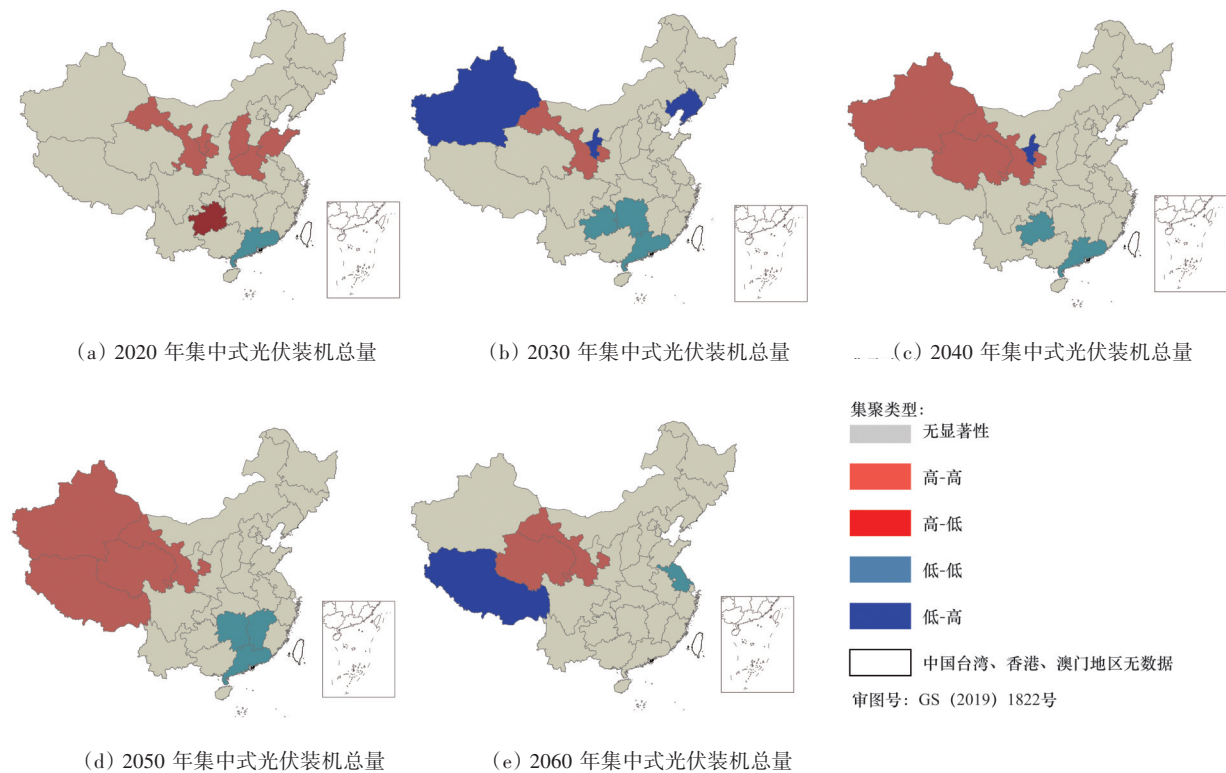


图3 中国2020—2060年集中式光伏累计装机量LISA集聚图

高-高集聚区主要位于西北地区,且地区内大部分省份连成片状。以上现象表明未来西北地区集中式光伏产业发展较为成熟,能够形成协同发展的区域优势区。在低-低集聚区内,各省份集聚水平差异较小,本省产业集聚水平较低,且相近省份产业集聚水平也较低。

在2020—2060年,低-低集聚区主要分布在华南、华东和西南的部分地区。在高-低集聚区内,各省份产业集聚水平差异较大,本省产业集聚水平高于相近省份产业集聚水平。在2020年,高-低集聚区仅位于云南,且在2030—2060年间,未出现高-低集聚区。以上现象表明云南与其附近省份集中式光伏产业分布差异在不断缩小,产业空间集聚趋势减弱。在低-高集聚区内,本省份产业集聚水平低于相近省份。2030年低-高集聚区有新疆、宁夏和辽宁3个省份,但到2050年,全国无低-高集聚区,表明西北地区 and 东北地区各自的产业分布

差异在缩小。在2060年,全国低-高集聚区仅位于西藏,在空间关系上西藏与西北地区省份更加邻接,因此可以看出西北地区产业集聚的趋势较为明显,西北各省份的产业水平高于西藏。

从建设时间上来看,现阶段集中式光伏装机热点区域主要集中在华中、华北和西北的部分地区,但到2030年,即碳达峰目标时期,集中式光伏装机热点区域主要集中在西北部分区域,到2060年,即碳中和目标时期,集中式光伏装机热点区域依然集中在西北地区。

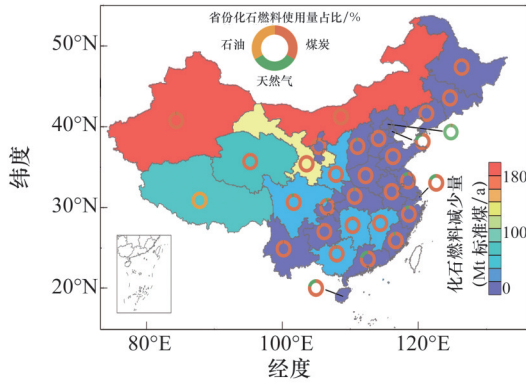
总体来看,中国集中式光伏产业的核心区域位于西北地区,区域内各省份产业集聚水平不断提高,产生地区竞争格局和集聚效应,进而提高西北地区光伏企业生产效率和竞争能力,增强光伏企业创新水平,带动西北地区经济协同增长。同时,其他地区的产业分布与西北地区将会出现较大差异,西北地区发展的规模将超过其他地区。

2.3 综合效益分析

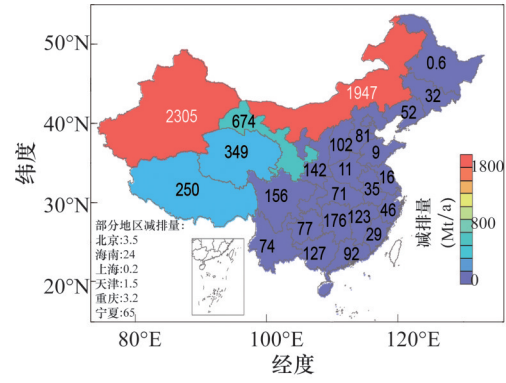
光伏发电作为可再生能源的重要组成部分,相比起传统的化石燃料发电,具有减少二氧化碳排放、节约化石燃料和减少大气污染物的优势。本研究从碳减排效益、化石燃料节约收益、大气污染物

减排和二氧化碳减排边际成本4个方面来考虑光伏发电的综合效益。

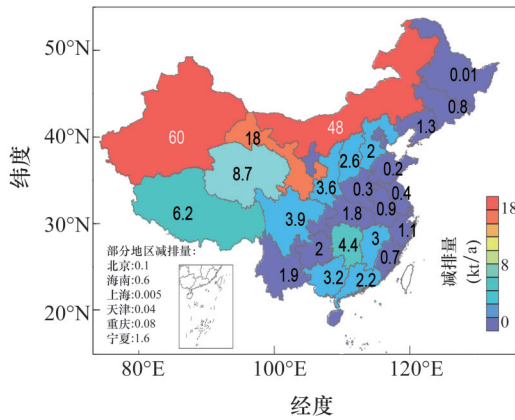
图4(a)展示了中国2060年光伏发电导致的化石燃料减少量,其中圆圈代表2020年各省化石燃料(煤炭、石油、天然气)消耗量占比。



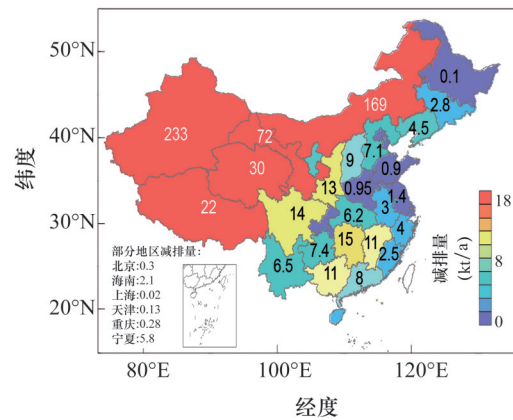
(a) 2060年化石燃料使用减少量空间分布



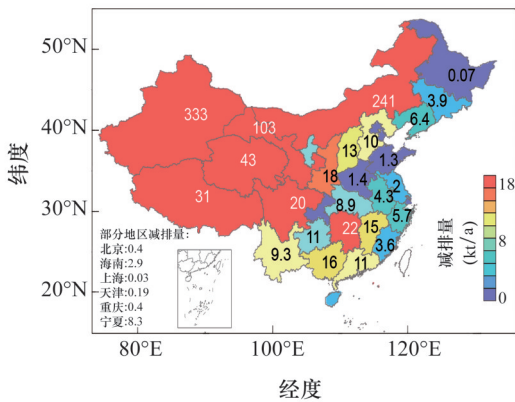
(b) 2060年二氧化碳年减排量空间分布



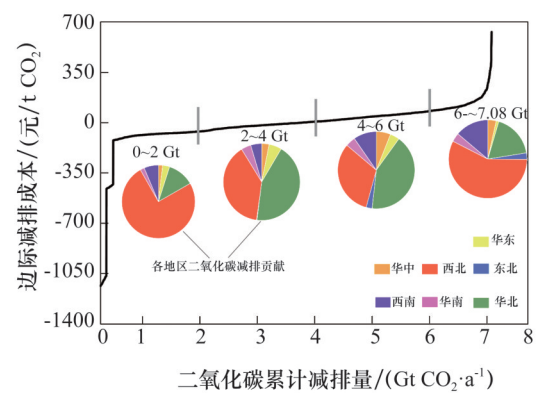
(c) 2060年颗粒物年减排量空间分布



(d) 2060年二氧化硫年减排量空间分布



(e) 2060年氮氧化物年减排量空间分布



(f) 二氧化碳边际减排成本曲线

图4 光伏发电的综合效益(地图以地理坐标系下矩形经纬度范围表示,审图号 GS(2016)2929号)

目前全国煤炭、天然气和石油发电量分别占火力发电总量的 94.58%、5.38% 和 0.04%，中国绝大多数省份都用煤炭作为火力发电的主要燃料，但北京目前以天然气为火力发电的主要燃料，西藏目前以石油作为火力发电的燃料。

光伏发电可替代化石燃料的使用，本研究结合煤炭、石油和天然气发电的能源转换效率(35%、38% 和 45%)^[5]，将发电量热值换算成标准煤节约量，发现到 2060 年，全国化石燃料使用年减少量将达到 1235 Mt 标准煤。

从空间分布上来看，新疆、内蒙古、甘肃、青海和西藏化石燃料减少量较高，分别为每年减少 385、352、109、63、45 Mt 标准煤，共占全国减少总量的 77%；上海、黑龙江、天津、重庆和北京化石燃料减少量较低，分别为每年减少 0.04、0.11、0.28、0.58 和 0.65 Mt 标准煤，仅占全国化石燃料节约总量的 0.13%。如单独考虑化石燃料减少量，中国西北地区、西藏和内蒙古是化石燃料节约效益最高的区域。

图 4(b)~(e) 分别展示了光伏发电导致的 2060 年二氧化碳、颗粒物、二氧化硫和氮氧化物年减排量。可以看出，中国二氧化碳、颗粒物、二氧化硫和氮氧化物年减排量存在明显的空间分布差异，该现象主要与各省份集中式光伏装机量、地区小时电力负荷和各省份不同化石能源使用量等因素的差异有关。

新疆、内蒙古、青海和甘肃的年减排量显著多于其他省份，上海、黑龙江、天津、重庆和北京的减排量显著低于其他省份。全国二氧化碳、颗粒物、二氧化硫和氮氧化物年减排量分别为 7076、0.18、0.66 和 0.95 Mt，其中年减排量最高的省份为新疆，能够减排二氧化碳 2305 Mt、颗粒物 60 kt、二氧化硫 233 kt 和氮氧化物 333 kt，减排量最低的省份为上海。因此，仅考虑碳减排量和大气污染物减排量，西北地区和内蒙古是减排效益最高的区域。

图 4(f) 是二氧化碳边际减排成本曲线。可以看出，在本文设定的情景下，集中式光伏装机能够减排 7.08 Gt 二氧化碳，二氧化碳年减排量小于 2.94 Gt 时减排成本小于零，表明这部分光伏电厂发电成本小于火力发电成本，可为企业和地区带来

收益。在二氧化碳减排量小于 2 Gt 时，中国西北地区减排效益最好且贡献量最大；在二氧化碳减排量为 2~6 Gt 时，华北地区贡献量最大，西北地区次之；在二氧化碳减排量大于 6 Gt 时，西北地区贡献量最大，西南地区和华北地区次之。

在中心情景下，到 2060 年，中国每年能够减少的化石燃料使用量约为 1235 Mt 标准煤，减少的二氧化碳排放量为 7076 Mt·a⁻¹，减少的大气污染物(颗粒物、二氧化硫、氮氧化物)排放量为 180、663 和 948 kt·a⁻¹。综合考虑化石燃料节约量、二氧化碳和大气污染物减排量以及减排成本，西北地区和内蒙古是中国未来集中式光伏大规模部署后效益最高的区域。

3 讨论

基于高时空分辨率的数字地球智能网络系统，研究碳中和目标下中国集中式光伏发电的时空分布特征，发现在考虑特高压变电站位置、电力运输、电力储存、用电端电力负荷优化和技术学习对成本的影响后，2060 年中国的光伏发电潜力为 9 PW·h·a⁻¹。虽然中国太阳能资源丰富且分布广泛，但在实际利用时限制因素，如坡度、建成区土地占用和地貌等，会有较大的制约，因此需要构建一套合理的光伏发电站选址策略。

现有研究大多以实际光伏装置的参数和发电数据为切入点，通过实验室或者现场测试的方式，对比光伏面板在不同情况下的发电效率，如 Kaldellis 等^[8] 直接利用希腊南部的现有装置得到的测量数据进行评估，该研究直接受到客观因素，如所在地理位置的太阳辐射强度的影响，因此只能发现光伏面板在研究地区发电效率和变化率与影响因素间的关联，而无法得到普适性的结果。

本研究侧重以发电效益最大化为原则选择建造光伏电站的空间位置及规模，并对不同的研究区域的影响因素分别进行了具体分析。研究发现除了影响光伏电板自身发电效率的因素外，外物遮挡和地表温度因区域位置和季节变化而不同，均会对发电效率产生影响，并且光伏面板的倾斜度对光

光伏发电效率的影响也取决于所在区域位置,因此在规划建设光伏电站的时候要充分考虑实际的地质地貌和气象因素,避免光伏面板存在接受太阳辐射量不足的先天性缺陷。

光伏发电导致的碳减排是发展光伏产业的重要目的之一。研究预估光伏发电到2060年可替代传统化石能源1235 Mt标准煤,每年减少7076 Mt二氧化碳、0.18 Mt颗粒物、0.66 Mt二氧化硫和0.95 Mt氮氧化物。研究定义的综合效益证明了发展光伏产业不仅能够助力实现碳中和目标,还能够替代化石燃料并减少大气污染物排放,进一步通过具体的量化数据佐证了光伏发电带来的正向效益。

此外,大多数光伏产业空间自相关性研究,如陈枫楠等^[11]和韩梦瑶等^[12],均利用历史装机量数据对全国光伏装机的空间格局和冷热点进行分析,但没有构建光伏发展路径,无法预测未来的装机冷热点,给出具体的装机策略。本研究先构建光伏发展路径,再进行空间格局分析,构建的路径虽然在2030年装机量(606.6 GW)远小于Liu等^[14]构建路径的装机量(约1750 GW),但随后到2060年底,能够高达11125.6 GW。在得到光伏装机量预测数据后,通过空间自相关性分析,能够得到未来省级行政单位的光伏装机冷热点以及光伏产业集聚区,可以直接为国家级和省级的光伏布局提供科学支撑。

4 结论

利用高时空分辨的数字地球智能网络模型,分析了碳中和目标下电厂级别中国集中式光伏发电的时空分布特征及其影响因素,通过空间自相关分析方法预估了光伏产业发展的空间特征,并量化了中国未来光伏发电的综合效益,得到以下结论。

1) 中国光伏发电最大潜力约1090 PW·h·a⁻¹,在考虑可利用面积后,光伏发电潜力降低至53.5 PW·h·a⁻¹,根据平准化度电成本原则优化到电厂级别后,光伏发电潜力可达到9 PW·h·a⁻¹以上。新疆和内蒙古发电潜力领先中国的其他省份,将是未来重要的集中式光伏发电基地。

2) 光伏面板的间距、倾斜角度、外物遮挡和温

度均会对光伏面板的发电效率产生影响。地表温度在春季和夏季对光伏发电有负面影响,但在秋季和冬季有正面影响,遮阳对光伏发电只有负面影响,且在春季和夏季高于地表温度对发电的影响程度。光伏面板倾斜度对光伏发电的影响程度取决于所在区域位置。

3) 中国2020—2060年间光伏电站布局呈现一定的空间关联特征,在空间分布上呈现集聚特征。西北地区是未来集中式光伏产业的核心区域,区域内各省份产业集聚水平会不断提高,产生集聚效应,进而提高西北地区光伏企业生产效率和竞争能力,增强光伏企业创新水平,带动西北地区经济协同增长,为西部大开发赋予新内涵。

4) 在本文设定的中心情景下,中国光伏发电的综合效益较为显著,预估到2060年可替代1235 Mt标准煤,每年减少7076 Mt二氧化碳、0.18 Mt颗粒物、0.66 Mt二氧化硫和0.95 Mt氮氧化物的排放。西北地区和内蒙古是未来集中式光伏大规模部署后综合效益最高的区域。

碳中和目标的实现对西北地区的光伏产业而言既是责任也是机遇。西北地区和内蒙古最具有光伏发电潜力,需要加大上述省份的光伏投资开发力度,形成产业集聚效应,提高区域内光伏企业生产效率和竞争能力,增强光伏企业创新水平。高速发展的光伏产业将为区域带来新的经济增长动力,能够带动区域经济协同增长,为西部大开发赋予新内涵。

产业大规模的布局也需要考虑实际地质地貌和气象要素,合理布局光伏面板,定期做好清理工作,确保光伏电板保持良好的发电性能。在保证西北地区和内蒙古光伏投资建设以及电板高效发电后,需要加速上述地区的电力输送设施建设,助力其他省份清洁能源替代。这一举措将为中国的可持续发展道路注入新的推动力,加速中国的碳减排进程、实现碳中和目标。

参考文献(References)

[1] 持续推进绿色低碳转型——“双碳”目标提出3年来取

- 得积极成效[EB/OL]. (2023-09-22)[2023-12-22]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202309/content_6905623.htm.
- [2] 何建坤. 中国能源革命与低碳发展的战略选择[J]. 武汉大学学报(哲学社会科学版), 2015, 68(1): 5-12.
- [3] 《新时代的中国能源发展》白皮书发布——我国提前实现碳排放强度下降目标[EB/OL]. (2020-12-22)[2023-12-22]. https://www.gov.cn/xinwen/2020-12/22/content_5572019.htm.
- [4] 庞昌伟. 中国能源革命的路径与前景[J]. 人民论坛, 2022(18): 84-87.
- [5] Pourasl H H, Barenji R V, Khojastehnezhad V M. Solar energy status in the world: A comprehensive review[J]. Energy Reports, 2023, 10: 3474-3493.
- [6] 胡云岩, 张瑞英, 王军. 中国太阳能光伏发电的发展现状及前景[J]. 河北科技大学学报, 2014, 35(1): 69-72.
- [7] 李耀华, 孔力. 发展太阳能和风能发电技术 加速推进我国能源转型[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 426-433.
- [8] Kaldellis J K, Kapsali M, Kavadias K A. Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations. Experience obtained from outdoor measurements in Greece[J]. Renewable Energy, 2014, 66: 612-624.
- [9] Yang L, Liu C S. Conductance is responsible for the power conversion efficiency of solar cell[J]. Energy, 2023, 278: 127976.
- [10] Yang H D, Wang H. Numerical simulation of the dust particles deposition on solar photovoltaic panels and its effect on power generation efficiency[J]. Renewable Energy, 2022, 201: 1111-1126.
- [11] 陈枫楠, 王礼茂. 中国太阳能光伏产业空间格局及影响因素分析[J]. 资源科学, 2012, 34(2): 287-294.
- [12] 韩梦瑶, 熊焦, 刘卫东. 中国光伏发电的时空分布、竞争格局及减排效益[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1338-1351.
- [13] Liu H, Zeng M, Pan T, et al. The green photovoltaic industry installed capacity forecast in China: Based on grey relation analysis, improved signal decomposition method, and artificial bee colony algorithm[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020: 9892480.
- [14] Liu B C, Song C Y, Wang Q S, et al. Forecasting of China's solar PV industry installed capacity and analyzing of employment effect: Based on GRA-BiLSTM model[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(3): 4557-4573.
- [15] Wang Y J, Wang R, Tanaka K, et al. Accelerating the energy transition towards photovoltaic and wind in China [J]. Nature, 2023, 619(7971): 761-767.
- [16] NASA Jet Propulsion Laboratory. MODIS/Terra+Aqua land cover type yearly L3 global 500 m SIN grid[DB/OL]. (2023-07-31) [2023-12-31]. <https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v006>.
- [17] 资源环境科学与数据中心. 中国生态功能保护区[EB/OL]. (2020-01-03) [2023-11-26]. <https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=137>.
- [18] NASA Jet Propulsion Laboratory. NASA shuttle radar topography mission global 1 arc second[DB/OL]. (2015-01-02) [2023-11-29]. <https://lpdaac.usgs.gov/products/srtmgl1v003>.
- [19] NASA Jet Propulsion Laboratory. Goddard earth observing system[EB/OL]. (2015-02-10) [2023-11-29]. https://portal.nccs.nasa.gov/cgi-lats4d/opaendap.cgi?&path=GEOS-5/fp/0.25_deg/assim.
- [20] 中国电力企业联合会. 电力工业统计资料汇编[M]. 北京: 中国电力企业联合会出版社, 2020.
- [21] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴: 2020 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [22] International Energy Agency. An energy sector roadmap to carbon neutrality in China[R]. Paris: IEA, 2021.
- [23] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 火电厂大气污染物排放标准: GB 13223—2011 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [24] 生态环境部. 污染源源强核算技术指南 火电: HJ 888—2018[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.
- [25] 国家发展和改革委员会, 国家生态环境部, 国家能源局. 煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020年)[R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2014.
- [26] Chen S, Lu X, Miao Y F, et al. The potential of photovoltaics to power The Belt and Road initiative[J]. Joule, 2019, 3(8): 1895-1912.
- [27] Masters G M. Renewable and efficient electric power systems[M]. America: John Wiley & Sons, 2004.
- [28] 赵镇魁. 燃料燃烧热值、所需空气量及烟气生成量的计算方法[J]. 砖瓦, 2019(3): 53-56.
- [29] 谭敏, 苏岱, 陈迎春. 卫生资源配置与农村人口贫困发生率关系的空间计量分析[J]. 中国卫生经济, 2020, 39(9): 60-64.
- [30] 张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 等. 基于GIS对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析[J]. 环境科学, 2022, 43(11): 5192-5204.

Capacity, spatial patterns and benefits assessment of photovoltaic power under carbon neutrality goal in China

ZENG Jiawei, CHEN Zhiye, WANG Yijing, WANG Rong*

Department of Environment Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200438, China

Abstract This paper predicts the spatiotemporal distribution of photovoltaic (PV) power generation during 2021—2060 under the target of carbon neutrality based on a high-resolution comprehensive digital geographic information. This paper analyses the impacts of temperature, shading and panel inclination on PV power generation, investigates the spatial pattern of PV industry by performing an autocorrelation analysis, and evaluates the integrated benefits of PV power. The main conclusions can be drawn as follows. 1) The maximal annual PV power generation in China is projected to reach $9 \text{ PW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$ by 2060, where Xinjiang and Inner Mongolia have the highest potential for PV power generation and are expected to be the most important regions for PV generation in China. 2) The spacing, inclination, shading and temperature of panels have significant impacts on the efficiency of PV power generation. Therefore, it is necessary to consider the actual geological and meteorological factors when making plans of building PV power plants. Improving the performance of PV power generation requires to optimize the layout of PV panels, perform sufficient cleaning, and conduct maintenance work regularly. 3) The spatial correlation in distribution of PV power generation is significant at province level from 2021 to 2060. Northwest China will be the hot-spot area of PV power generation with a potential effect of agglomeration, which could improve the efficiency and competitiveness of PV enterprises, enhance the innovation ability, and drive the coordinated economic growth. 4) Deploying PV power in China can save coal consumption by $1200 \text{ Mt}\cdot\text{a}^{-1}$, which is expected to effectively reduce emissions of carbon dioxide, particulate matters, sulfur dioxide and nitrogen oxides by 7076, 0.18, 0.66 and $0.95 \text{ Mt}\cdot\text{a}^{-1}$, respectively in 2060. The highest environmental benefits of PV power generation are identified in Northwest China and Inner Mongolia. As a conclusion, accelerating the deployment of PV power and securing construction of electricity transmission and energy storage facilities will speed up China's carbon emissions reduction to achieve the carbon neutrality goal as early as possible. These results provide a scientific basis for the development strategies of PV power in China.

Keywords photovoltaic power; electricity generation efficiency; spatial patterns; benefit assessment ●



(责任编辑 徐丽娇)