

“双碳”目标下中国风力发电的潜力预估、电力运输与能量储存的影响

陈祉叶, 曾嘉伟, 王怡静, 王戎*

复旦大学环境科学与工程系, 上海 200438

摘要 基于时空高分辨的综合数字地理信息, 分析了中国风能资源的时空分布及电力运输和能量储存对风力发电潜力的影响。结果表明: (1) 中国风力资源存在显著的地域差异, 华北和西南地区风力资源相对丰富, 合理的清洁资源开布局及基础配套设施建设可提高中国对风力资源的利用效率。(2) 以 $1/120^{\circ} \times 1/30^{\circ}$ 的空间网格为单位, 基于风能资源的时空分布和小时波动发电负荷, 统筹考虑电力运输和电力储存等基础设施的建设, 评估了中国风力发电的潜力。全国风力发电潜力在不同土地利用情景下有显著差异, 考虑全部土地可利用情景时, 风电潜力每年最高可达 $50 \text{ PW} \cdot \text{h}$, 在筛选可利用土地并优化电厂规模实现成本最低后, 风力发电潜力约为 $4 \text{ PW} \cdot \text{h}$ 。中国西部地区表现出较大的风力发电潜力, 而东部地区的发电潜力相对较低, 在不考虑电力运输与储存情景下, 部分地区的发电效率较低。因此, 未来的研究需要实现风力发电与电力运输、能源储存配套设施的统筹规划, 以确保经济利益最大化的同时实现减排目标。(3) 风力发电可显著降低二氧化碳排放, 考虑电力运输和能量储存后, 能够使风力发电可实现的 CO_2 减排量增加约 26%, 同时降低 84% 的 CO_2 减排边际成本, 其中西北地区 CO_2 减排量的增幅可达 2 倍以上, 减排成本降低 95% 以上。预计到 2060 年, 中国为了实现碳中和, 需要增加输电和储能的基础设施建设来实现能源平衡, 华北和西北地区将成为中国风力发电的主要地区。

关键词 风力发电; 电力运输; 能量储存; 碳减排; 减排成本

随着中国经济的高速增长, 对能源和电力的需求不断上升。2022 年全国用电量达到 $86371 \text{ TW} \cdot \text{h}$,

相较于 2015 年的 $56933 \text{ TW} \cdot \text{h}$ 增长了 50% 以上^[1]。中国主要依赖化石燃料发电, 导致化石燃料使用量

收稿日期: 2024-01-03; 修回日期: 2024-04-07

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: 陈祉叶, 硕士研究生, 研究方向为风能与碳中和, 电子信箱: 22210740032@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: 陈祉叶, 曾嘉伟, 王怡静, 等. “双碳”目标下中国风力发电的潜力预估、电力运输与能量储存的影响[J]. 科技导报, 2024, 42(19): 47-58; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.02.00234

迅猛增长,仅次于印度^[2]。然而,由于化石燃料不是可再生能源,因此依赖传统的能源生产方式难以满足未来的高能源需求,同时,使用传统的化石燃料发电厂会排放大量CO₂等温室气体,导致的温室效应将带来不利的环境影响。

为了降低CO₂排放、缓解气候变化并实现可持续发展,中国的电力系统脱碳势在必行^[3-4]。尽管中国是当前全球最大的温室气体排放国和能源消费国,但作为负责任的大国,中国承诺在2030年实现碳达峰,并在2060年实现碳中和,即达到“双碳”目标^[5]。近年来中国可再生能源,尤其是风能和太阳能的发展十分迅速,并且发展潜力巨大^[6-8]。2015年,中国风电装机容量达到131 GW^[1],占全球总装机容量的30%以上^[9-10]。2022年,中国风电装机容量增至365 GW,占全球总装机容量的40%以上^[11],中国在全球风电市场中的占比不断提高。2022年,中国的风力发电量达到了7626.7亿kW·h^[1],占中国总发电量的8.6%。由于风电在中国能源结构中占比不断提高,且中国风能资源丰富且发电潜力巨大,因此开展风力发电的研究对预测中国未来的能源供给有重要意义。

He等^[12]运用2001—2010年间中国200多个代表性测风站的每小时风速数据,以省份为单位预估了中国风能资源的储量,预测中国未来每年的风力发电潜力在2000~3500 TW·h。Feng等^[13]在1 km分辨率下开展研究发现,中国陆上风能的潜力约为2560~3500 TW·h。Yu等^[14]提出,中国的风电潜力约为每年11690 TW·h,显著高于之前预估的结果。然而,这些研究在风力发电的时空分布等方面存在一定的局限性,没有考虑综合气象和地貌等多因素对电厂级别风力发电潜力的影响。

电力运输与储存对于风电的应用也十分重要,一些研究探究了中国的风能资源的分布情况,发现中国的风能资源主要集中在西部和北方地区,而东部地区的风力资源相对较小,当前,规划中的风电基地主要位于中国西部和北方地区,例如,Luo等^[15]的研究表明,中国风能资源丰富的区域主要集中在内蒙古、西藏、黑龙江、吉林、辽宁以及东南沿海地区,而中部地区相对较为匮乏。Liu等^[16]也证实,中

国风速在东三省地区最大,东部沿海地区次之,南方地区相对较小。然而,这些风电基地与经济发达地区负荷中心相距较远,导致弃风问题日益严重。

为解决这一问题,特高压输电线路的建设被认为是一种有效的解决方法,可以将远距离的风电输送到负荷中心,提高电力利用效率^[17-19]。针对这一情况,一些研究提出了结合风电场和抽水蓄能水电站的新型输电模式,例如Su等^[20]的研究表明,通过特高压输电线路将西部和北部地区的风电远距离、大容量地输送至负荷中心,对中国实现大规模风电消纳具有重要意义,并提出了一种新型实用的风电场和抽水蓄能水电站相结合的输电模式。

除此之外,随着可再生能源比例的增加,电力存储在可再生能源转型中的重要性也日益凸显,例如,Schill^[21]分析了电力存储和可再生能源转型的关系,发现随着可变可再生能源份额的不断增加,能量储存在可再生能源转型中将发挥越来越重要的作用。但对于可再生能源发电的消纳需要多少能量储存的问题,目前还缺乏具体省份之间的相关研究。以上研究对于风能资源分布和输电方案的分析提供了有益的信息,但综合考虑成本、电力运输和储存因素的高时空分辨率研究仍相对缺乏。

本研究在综合考虑风力发电总量的基础上,预测未来的风电发展布局,以电厂级别分析电力运输与能量储存对各省风力发电的使用效率、碳减排潜力以及减排成本的影响。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

所使用的土地覆盖类型数据采集自美国中分辨率成像光谱仪(MODIS)的土地覆盖类型一类数据集(MCD12Q1)(<https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v006>)^[22],空间分辨率为0.005°×0.005°。有关陆地生态保护区面积的数据取自中国科学院资源与环境科学数据中心^[23],空间分辨率为0.001°×0.001°。全国地面坡度数据来源于航天飞机雷达地形任务(SRTM)中的全球增强坡度数据集^[24],空间分辨率为0.001°×0.001°。全国地表风速的数据

来源于现代研究和应用回顾性分析第2版(MERRA-2)中的数据集^[25],空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.625^\circ$,时间分辨率为小时,时间序列涵盖了2012—2028年。零平面位移高度和地表粗糙度的数据来源于美国航天局(NASA)的戈达德地球观测系统模型第5版(GEOS-5)的前向处理(FP)数据库(<https://lp-daac.usgs.gov/products/srtmgl1v003>)^[26],空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.625^\circ$ 。

由于缺乏相关数据,本研究的空间范围不包括中国台湾、香港及澳门地区。

1.2 风速计算

基于文献提供的方法^[27],本研究选择的风机类型为GE 2.5 MW-103,额定功率为2.5 MW,切入风速为 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,额定风速为 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,切出速度为 $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风扇直径为103 m,风机轮毂高度为100 m。

风机轮毂高度100 m处的风速(V)计算方法^[28]见公式(1):

$$V = \frac{v_0}{k} \cdot \ln\left(\frac{h-d}{z_0}\right) \quad (1)$$

式中, v_0 为地表风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), k 为卡门常数,取0.41^[29], h 为风机轮毂高度,本文取100(m), d 为零平面位移(m)^[28], z_0 为地表粗糙度(m)^[30]。

1.3 风能发电潜力的计算

计算风机的实际功率与风速有关,其对应曲线如图1^[31]所示,当风速超过切入风速 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,风机开始运行,并且实际运行功率随着风速的增加呈线性比例增加,直到达到额定风速 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。当风速达到额定风速 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,风机的运行功率达到最大,即额定功率为2.5 MW。随着风速继续增加,

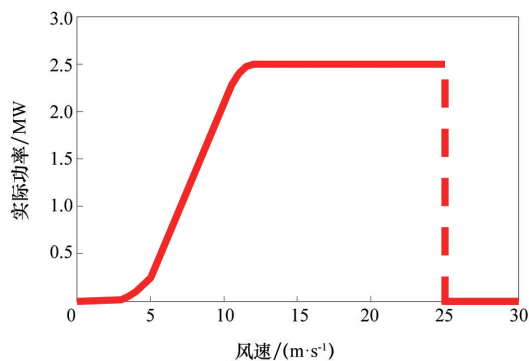


图1 风力发电功率曲线

实际运行功率保持不变,直到风速超过切出速度 $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,此时风机额定功率将降为0。

为了减少风机之间的相互干扰,风机之间的横向距离和纵向距离选择的均是8倍风扇直径^[32],风机安装密度(ρ_0)计算过程如公式(2)所示:

$$\rho_0 = \frac{P_{\text{real}}}{8D \cdot 8D} \quad (2)$$

式中, P_{real} 是风机的实际功率, D 是风扇直径(103 m)。

风机的容量因子(CF)是指风机实际功率和额定功率的比值^[33], P_{rating} 是风机的额定功率2.5 MW,容量因子的计算如公式(3)所示:

$$CF = \frac{P_{\text{real}}}{P_{\text{rating}}} \quad (3)$$

每小时发电量 $W_h(\text{kW}\cdot\text{h})$ 计算的过程如公式(4)所示:

$$W_h = S \cdot \rho_0 \cdot CF \cdot \mu \cdot \sigma \quad (4)$$

式中, S 为可利用土地面积(m^2),是根据网格大小计算所得。 ρ_0 是风机安装密度, CF 是风机的容量因子, μ 为能量利用系数,即因技术发展限制所导致的能量损失,本研究取0.95^[32], σ 为尾流效应系数,即各风扇之间相互影响所造成的能量损失,本研究取0.90^[34]。

1.4 风电场的优化

1.4.1 筛选可利用面积

将土地分为11类:森林、灌木丛、稀树草原、草地、湿地、农田、城市和建筑用地、自然植被混合区、冰雪、沙漠、水体。在考虑风力发电时,将灌木丛、稀树草原、草地、农田、自然植被混合区、沙漠区域之外的土地排除在外,同时,排除了坡度大于20%、容量因子小于20%、自然保护区或海拔超过3000 m的空间网格。

1.4.2 风力发电电厂级别的优化

以县级为单位,对风力发电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建厂策略,根据可利用面积大于60%的原则确定电厂的最大规模。然后,考虑电厂组件、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化原则优化电厂的建造规模和

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风力发电厂在2021—2060年期间的建设时间。

风力发电厂的总发电量计算如公式(5):

$$E_{\omega} = \sum_{h=1}^{8760} \left[\sum_{q=1}^7 \sum_{x=1}^{n_q} E_{x,h} (n_x) - \eta_{tra} \Theta_h - \eta_{store} \Lambda_h \right], x \in q \quad (5)$$

式中, ω 是新建电厂($\omega=1\sim 1066$), h 是小时数, x 是在 ω 之前建成的发电厂, $E_{x,h}$ 是一个县每小时的发电量, n_x 是工厂 x 中的安装风力涡轮机的格点数, η_{tra} 是传输过程中损失的电量比例, η_{store} 是存储过程中损失的电量比例, Θ_h 是每小时的传输电量, Λ_h 是每小时的存储电量。

平准化度电成本(LCOE)的公式引用自Wang等^[27]提供的计算方法,计算过程如公式(6):

$$\min_{\omega, n_x, t_x, S_x} LCOE_{\omega} = \left[(V_{\omega} + C_{Trans}) \cdot \left[1 + R_y \cdot \sum_{\tau_p=1}^T \frac{1}{(1+r_d)^{\tau_p}} \right] + C_{storage} \cdot \sum_{y=1}^{L_g} \frac{1}{(1+r_d)^y} \right] \quad (6)$$

$$\left/ E_{\omega} \cdot \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+r_d)^t} \right.$$

式中, t_x 是建 x 电厂的时间, S_x 是建 x 电厂时的储能选项(有水力储能和电池储能), T 是电厂的平均寿命, r_d 是贴现率(5%)^[35], τ_p 是电厂 x 的实际运行年, y 是储能电站的实际运行年, L_g 是储能电站的寿命(水力储能为50年^[36],电池储能为15年^[37]), E_{ω} 是电厂 ω 的实际发电量, V_{ω} 是发电厂的总投资, C_{Trans} 是输电总成本, $C_{storage}$ 是存储的总成本, R_y 是运营和维护成本与投资成本的比率(3%^[38])。

1.5 电力传输与能量储存成本的计算

1.5.1 电力传输成本

考虑使用特高压线路进行区域间的电力传输,提高电力使用效率。基于国家可再生能源发展规划^[39]的特高压线路,电力传输成本 C_{Trans} 的计算如公式(7):

$$C_{Trans} = \sum_{l=1}^{77} \left[\alpha_{Lines} \cdot L \cdot \int \left(\frac{\max Q_h}{P_{Trans}} \right) + \alpha_{substation} \max Q_h \right] \quad (7)$$

其中, α_{Lines} 是线路的单位成本^[40], L 是输电线路的长度, Q_h 是线路运输的最大小时电量, P_{Trans} 是输电线

路的容量, $\alpha_{substation}$ 是DC线路或AC线路的变流器或变电站的单位成本^[40]。

1.5.2 能量储存成本

考虑使用抽水蓄能电站和化学锂电池作为2种可用的储能方式,并基于平准化度电成本最低原则选择寻求各风电场对应的最佳储能方案,并计算储能电站的容量及成本。考虑到化学锂电池在15年的使用寿命内可充放电6000次^[36],抽水蓄能电站在50年的使用寿命内每天可充放电1次^[37],储能成本($C_{storage}$)的计算公式如下:

$$C_{storage} = \alpha_{capacity} \cdot \sum_{q=1}^7 \sum_{x=1}^{n_q} P_{hm} + \alpha_{cha/dis} \cdot \frac{\sum_{h=1}^{8760} Q_{c,h}}{T} \quad (8)$$

$$+ \alpha_{operations} \cdot \sum_{h=1}^{8760} Q_{c,h} \cdot (1 + \varphi) \cdot \sum_{y=1}^{L_g} \frac{1}{(1+r)^y}$$

其中, $\alpha_{capacity}$ 是储能电站单位容量的成本(2020—2060年抽水蓄能的单位容量成本为每千瓦8276元;2020、2030、2040、2050和2060年化学电池储能的单位容量成本分别为每千瓦4104、2579、2255、1931和1614元)^[37,41], q 是区域, x 是电厂, n_q 是区域内电厂数量, P_{hm} 是存储系统的容量潜力(每小时最大存储电量), $\alpha_{cha/dis}$ 是存储系统充放电的单位成本(2020—2060年抽水蓄能为每千瓦时690元;2020、2030、2040、2050和2060年锂电池存储分别为每千瓦时2379、1366、1200、1028和855元)^[36-37], $Q_{c,h}$ 是每小时存储电量, T 为充放电次数(抽水蓄能和化学电池储能分别为365次和400次)^[36], $\alpha_{operations}$ 是充放电的单位运营成本(每千瓦时0.01035元)^[42], φ 为充放电后能量比(85%)^[38], r 是贴现率(每年5%)^[35]。

1.6 碳减排量的计算

假设新的风力发电厂产生的电力按燃料价格从高到低的顺序(即石油、天然气和煤炭)依次替换火力发电厂,以产生最高的经济收益。当新建风力发电厂时,通过替代化石燃料每年减少的 CO_2 排放量为:

$$F_{\omega} = \zeta_{Fossil} E_{\omega} - \sum_{q=1}^7 \sum_{x=1}^{n_q} (\delta \cdot S_x) - \frac{\sum_{x=1}^7 \sum_{x=1}^{n_q} (\psi \cdot S_x)}{25} \quad (9)$$

式中, E_{ω} 为电厂的总发电量, S_x 为安装风力涡轮机的像素点面积, ζ_{Fossil} 为化石燃料的 CO_2 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), δ是陆地碳汇通量, ψ为风力涡轮机所占土地的碳密度。

1.7 边际减排成本的计算

根据减少的二氧化碳排放量可以得到新建电厂 ω 的边际减排成本(MAC_ω)为:

$$MAC_{\omega} = \frac{LCOE_{\omega} \cdot E_{\omega} - LCOE_{\omega-1} \cdot E_{\omega-1} - Q \cdot (E_{\omega} - E_{\omega-1})}{(F_{\omega} - F_{\omega-1})} \quad (10)$$

式中, Q是煤炭、石油或天然气的价格。LCOE_ω为ω电厂的平准化度电成本, F_ω为ω电厂的减排量。

2 结果与分析

2.1 中国风能资源的空间分布

图2为中国2012—2018年100 m高度平均风速的空间分布,为了分析各省份风力发电水平的变化趋势,将中国划分为7个区域进行研究,并进一步分析了风速的小时波动和季节变化。由图2可以看出,中国的风资源分布存在地区差异,平均风速较高的地区主要分布在华北和西南地区,大部分省份的风速峰值为10 m·s⁻¹左右,各省份的风速变化的小时波动存在一定差异。

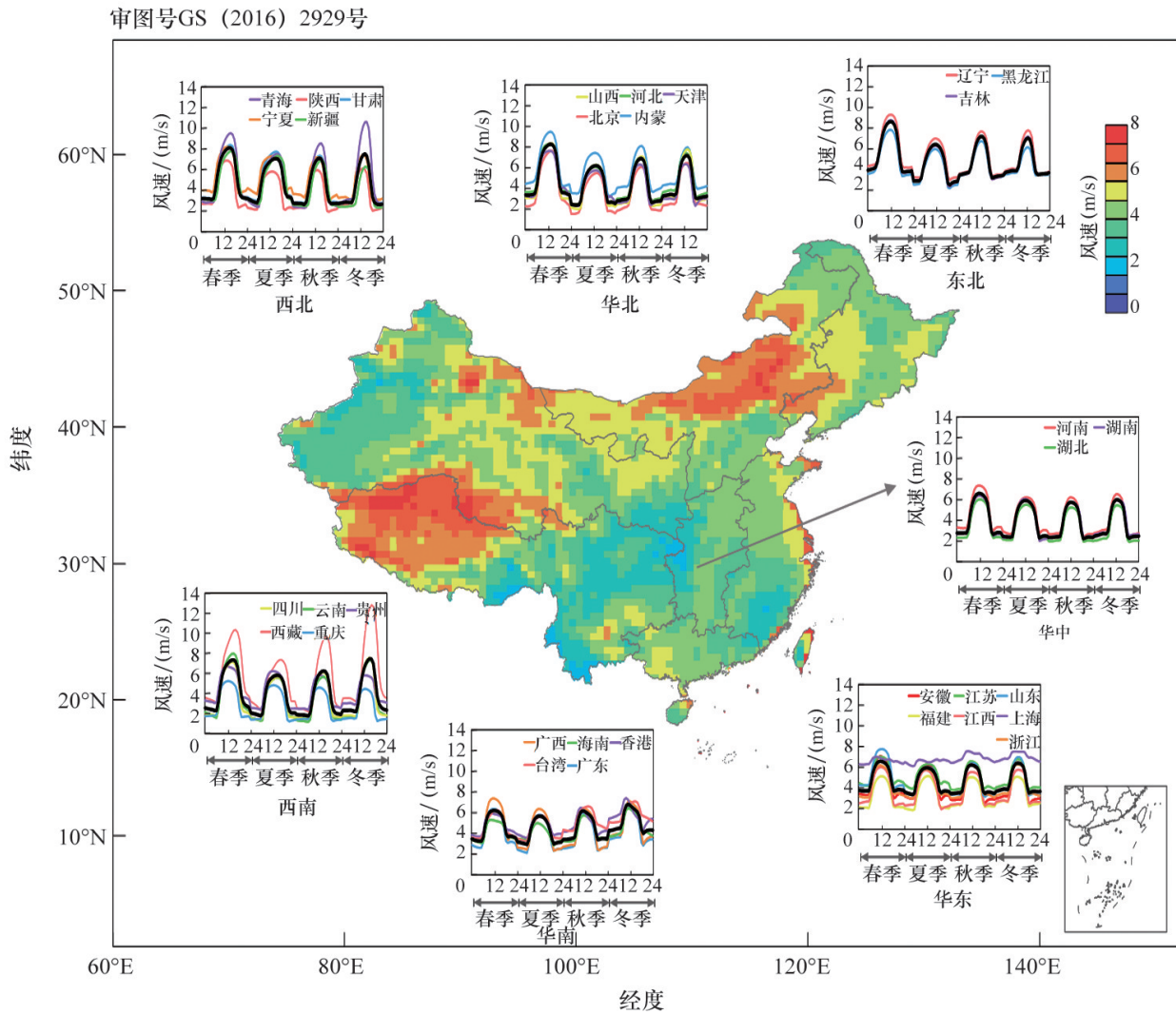


图2 全国100 m高度风速的空间分布

例如,上海的风速变化曲线相对较为稳定,受昼夜变化的影响较小,这是由于上海地处副热带沿海区,夏季以东南风为主,冬季以东北风为主。在西藏和青海地区,冬季风速的峰值会超过 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。因此,根据风速的小时波动和季节变化,预测中国未来风力发电的优势区域主要分布在西部和北部地区。

2.2 中国风力发电潜力的预测

为了进一步评估中国风力发电的潜力,本研究

以 $1/120^\circ \times 1/30^\circ$ 的空间网格为单位,基于中国 100 m 高度风速的空间分布和小时波动,在考虑全部空间网格可用于风力发电、筛选可用网格用于风力发电和优化到电厂级别的 3 个情景下,分别对风力发电潜力的时空分布特征进行了分析,得到的结果如图 3 所示。其中,图 3(a)~(c)分别为 3 个情景下风力发电潜力的空间分布,图 3(d)为 3 种情景下各区域的年发电量,图 3(e)为不考虑电力运输与储存

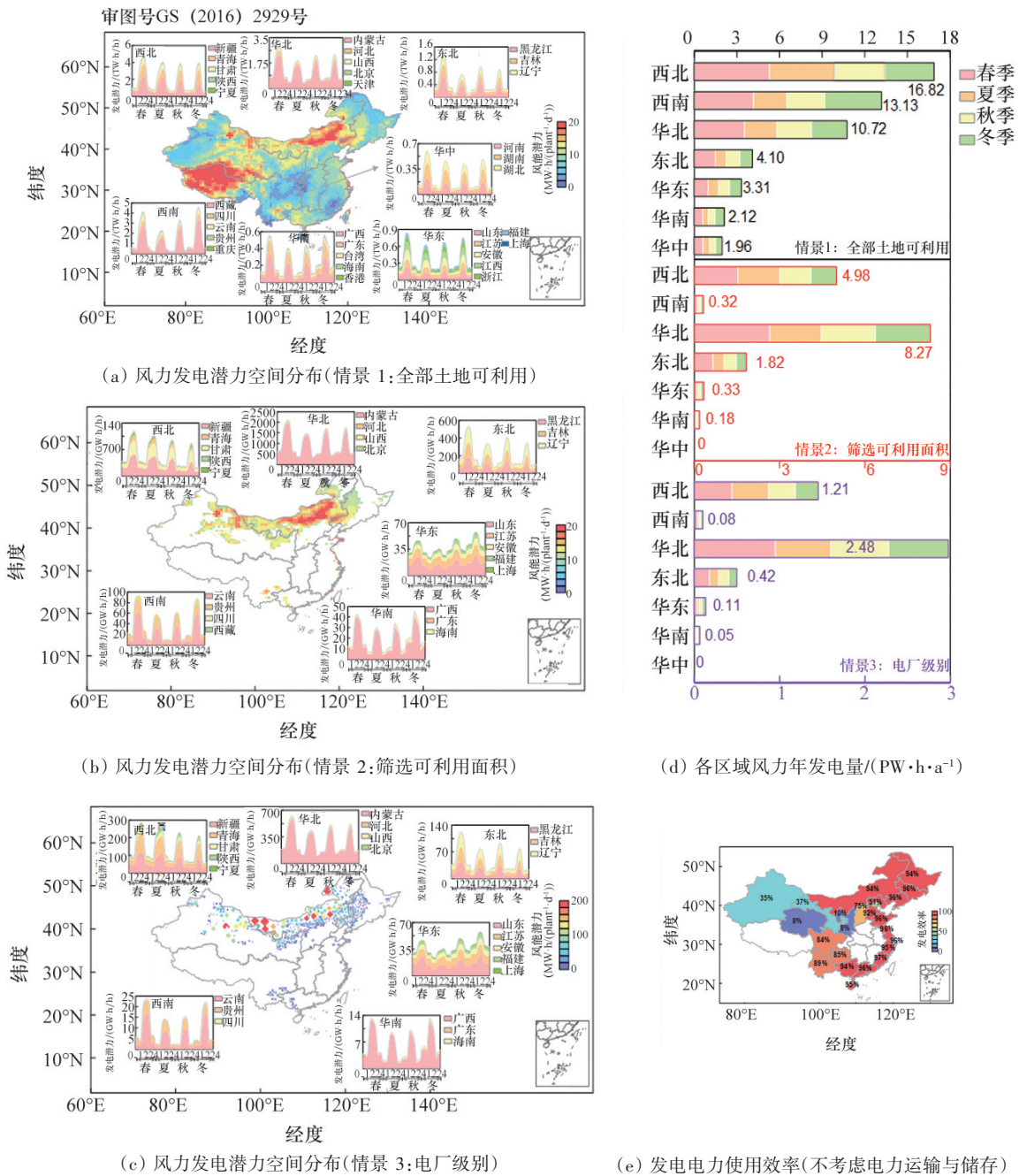


图3 中国风力发电的潜力

情景下各省份风力发电的使用效率。

在考虑全部空间网格可用于风力发电的情景下,全国总发电量为 $52.16 \text{ PW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$,西北、西南、华北地区的风力年发电量最高,分别为 16.82 、 13.13 、 $10.72 \text{ PW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$,占全国总发电量的 78% ,其中西藏的发电潜力最大,为 $9.55 \text{ PW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$ 。对比四季的发电情况,全国四季的发电量分别为 16.66 、 11.56 、 11.20 、 $12.73 \text{ PW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$,不同区域的发电量也是春季相对较高。在考虑筛选可用网格用于风力发电的情景下,全国总发电量为 $15.9 \text{ PW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$,比第一种情景减少了 $32.36 \text{ PW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$,表明筛选可用网格对风电发电潜力存在关键影响。

在第二种情景下,华北和西北地区的年发电量最高,分别为 8.27 和 $4.98 \text{ PW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$,其中内蒙古和新疆发电潜力最大,分别为 7.68 和 $2.54 \text{ PW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$ 。对比四季的发电情况,全国四季的发电量分别为 5.06 、 3.82 、 3.59 、 $3.41 \text{ PW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$,在第二种情景下不同区域的发电量也是春季相对较高。进一步优化到电厂级别后,全国风力年发电量为 $4.35 \text{ PW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$,华北和西北地区的年发电量最高,分别为 $2.48 \text{ PW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $1.21 \text{ PW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$,其中,内蒙古是发电潜力最高的省份,年发电量达到 $2.27 \text{ PW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

对比四季的发电情况,全国四季的发电量分别为 1.38 、 1.03 、 0.98 、 $0.95 \text{ PW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$ 。结合图3(d)可以得出,在筛选可用网格用于风力发电后,各地区发电量均有不同程度的降低,华中、西南和西北地区的发电量降幅最大,分别为 100% 、 97.6% 和 70.3% ,表明华中、西南和西北地区大部分土地不适合建设风力发电厂。

考虑到实际建厂的成本最低原则,在优化到电厂级别后,中国西部地区的风力发电潜力较大,而经济较发达的东部地区发电潜力较小。在不考虑电力运输时,全国平均发电效率为 75% ,但西北地区的发电效率较低,仅为 20% 左右,其中宁夏、陕西、青海等省份的发电效率低于 10% ,上述现象主要是由于宁夏、陕西、青海等省份缺乏足够的电力运输和储存设施支持,发电效率低下,无法充分利用本地区发出的电力,导致能源浪费严重。

进行电力运输与储存对于提高低发电效率地

区的电力利用率,实现可持续发展目标具有关键意义,因此评估了电力运输和能量储存对风力发电潜力及成本的影响。

2.3 电力运输和能量储存对风力发电潜力及成本的影响

风力发电可以替代化石燃料,减少 CO_2 排放量。而考虑电力运输与能量储存可以提高风力发电的使用效率,减少弃电比例,从而减排更多 CO_2 并降低风力发电的实际成本。为了评估电力运输和储存设施建设的影响,比较了考虑电力运输与能量储存前后2060年中国各省份风电减排潜力及成本,如图4所示。

图4(a)和图4(c)为考虑电力运输与能量储存前后各省的与风力发电相关的 CO_2 减排量。可以看出,考虑电力运输与能量储存将全国风力发电相关的 CO_2 减排量增加了 0.03 Gt ,增幅达到 26% ,其中西北地区风力发电相关的 CO_2 减排潜力显著升高,尤其是新疆的 CO_2 减排量从 0.16 Gt 增加到 0.43 Gt ,增幅达到 150% 以上。上述结果表明,在不考虑电力运输与能量储存时,西北地区生产的电力未被充分利用,原因可能是这些地区距离经济发达地区的负荷中心较远,风力发电生产的电力无法被充分消纳。

图4(b)和图4(d)比较了考虑电力运输和能量储存前后各省风力发电的边际减排成本。考虑电力运输与能量储存使全国平均减排成本降低了 519.84 元/t CO_2 ,降低比例为 84% ,表明电力运输和能量储存对降低风力发电成本的重要意义。同时,在考虑电力运输和能量储存后,少数省份的减排成本并没有降低,反而有轻微增加,如广西和云南,边际减排成本分别增加了 59.66 和 56.39 元/t CO_2 ,这可能是由目前电力运输和储存的成本较高导致。西北地区边际减排成本降低幅度较大,其中,陕西从 4496.02 元/t CO_2 降低到 152.24 元/t CO_2 ,降低比例达到 95% 以上,宁夏、青海、新疆和甘肃的降低比例分别达到 96% 、 96% 、 86% 和 80% 。上述结果表明考虑电力运输和能量储存对西北地区风力发电的经济收益影响较大,该地区风电资源丰富但负荷较小,需要建立灵活的电力运输和能量储存方案。

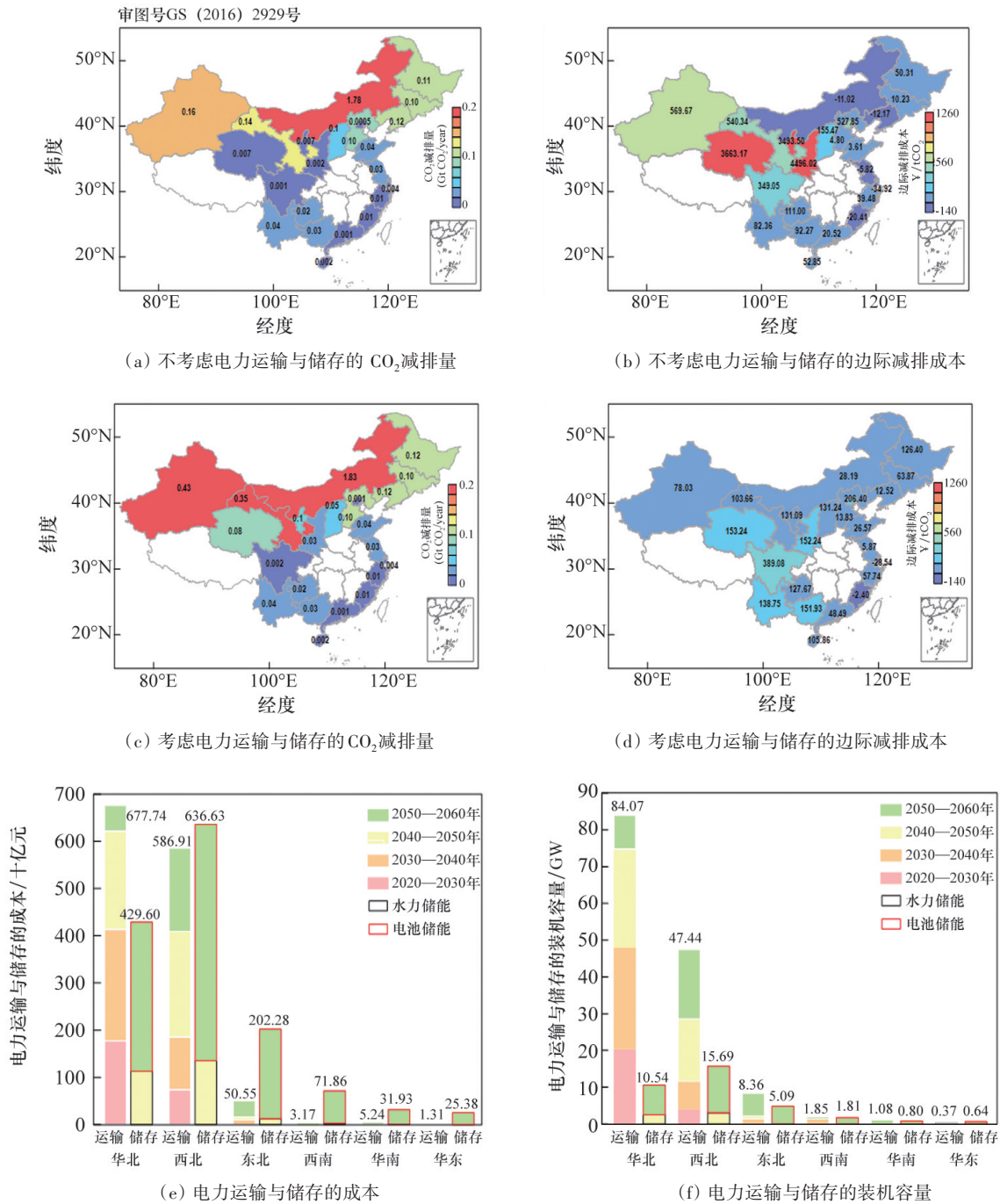


图4 考虑电力传输与能量储存对2060年中国风力发电潜力及成本的影响

图4(e)~(f)为考虑电力传输和能量储存时风电对应的电力传输和能量储存成本和装机容量。全国电力传输与能量储存的总成本预计为27227.8亿元,其中运输成本为13251亿元,储存成本为13976.8亿元。西北和华北地区所需的传输与储存成本最高,分别为12235.4亿元和11073.4亿元。预

计到2060年,全国装机总量为177.74 GW,其中,华北和西北地区装机容量最多,装机容量达到157.74 GW,占全国总量的88%,上述结果表明华北和西北地区的发电量将高于需电量,依赖电力传输与储存配套设施来调节能源平衡。

3 讨论

采用高时空分辨率的数字地球智能网络模型,能够更准确地捕捉风力资源的时空变化特征,从而提高了对风力发电潜力的预测精度。在考虑多省份间的发电效率差异、电力运输与能量储存等关键因素时,进行了充分地综合分析,这些因素在风力发电潜力评估中具有重要意义,但在现有文献中常常被忽视。

相较于已有研究,本研究以高时空分辨率统筹评估了电力运输和储能等基础设施建设对风力发电的影响。例如,Yu等^[4]的研究虽然也进行了中国风力发电潜力评估,但其时间分辨率较低,且未涵盖电力运输与能量储存等重要因素,因而可能导致结果的偏差。相反,我们的研究通过详细的时空分析,能够更准确地预测不同地区的风力发电潜力,并为相关政策制定提供更具针对性的建议。

此外,本研究还考虑了土地类型等因素,并通过优化电厂的规模和空间布局,有效地控制了电力成本。这种优化策略的应用,不仅能够降低风力发电的成本,还有助于提高其竞争力,推动可再生能源的发展。相反,Liu等^[43]的研究未考虑土地适宜性等因素,可能导致研究结果与本研究存在差异。

需要特别关注的是,本研究对于中国实现“双碳”目标具有重要意义。作为一种低碳清洁能源,风力发电能够有效减少温室气体排放,为实现碳中和目标提供了技术和政策支持。

未来的研究可以进一步完善模型,考虑更多因素的影响,例如气候变化、经济发展趋势等,以提高预测的准确性和可信度。同时,还可以结合实际情况,制定更具操作性的政策建议,推动风力发电的健康发展,促进能源结构的优化和升级。

4 结论

通过对中国风能发电潜力及电力运输与储存影响的分析,主要结论如下。

1) 本研究通过对中国2012—2018年100 m高

度平均风速的空间分布进行分析,发现中国的风能资源存在明显的区域差异,目前华北和西南地区的风力资源最为丰富。

2) 分析了中国风力发电的潜力,并在不同假设情景下进行了评估,尽管西北、华南和华北地区具有较高的风力发电潜力,但在实际建设中,华中、西南和西北地区的发电量受到限制,因为大部分土地不适合建设风力发电厂。在考虑全部空间网格可用于风力发电的情景下,全国风力发电的潜力为 $52 \text{ PW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$,在筛选可用网格用于风力发电的情景下,全国风力发电潜力降低至 $16 \text{ PW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$,在进一步优化到电厂级别的情景下,全国风力发电的潜力为 $4 \text{ PW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$,在综合考虑成本、电力运输和能量储存设施、经济成本等因素后,华北和西北是中国未来风力发电潜力最高的地区。

3) 考虑电力储存与运输基础设施建设可将风力发电实现的全国 CO_2 减排量增加26%,减排成本降低84%,西北是电力运输与储存效益最显著的地区,华北和西北是中国未来风力电力运输与储存需求最高的地区,运输与储存装机容量占全国总量的88%。然而,在少数省份,如广西和云南,减排成本并没有降低,这可能是由于目前电力运输和储存的成本较高所致。

本研究对中国风能资源进行了深入分析与评估,结果显示了中国不同地区的风力发电潜力及其受电力运输与能量储存影响的情况。对于“双碳”目标的实现,建议未来在中国西部地区加大风力发电项目的建设,同时优化电力运输和能量储存设施,以提高风电的利用效率。此外,未来的研究可以进一步探讨如何降低电力运输和能量储存的成本,以及如何提高风力发电的稳定性和可靠性,为实现可持续发展目标提供更多有益的参考。

参考文献(References)

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴: 2023[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023: 275-293.
- [2] 《世界能源统计年鉴》(72版)[R]. 英国: 能源研究所,

- 2023.
- [3] 联合国气候变化框架公约. 巴黎协定[EB/OL]. (2015-12-12)[2024-01-08]. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>.
- [4] Zeyringer M, Price J, Fais B, et al. Designing low-carbon power systems for Great Britain in 2050 that are robust to the spatiotemporal and inter-annual variability of weather [J]. *Nature Energy*, 2018, 3(5): 395-403.
- [5] 国家发展改革委关于完善风电上网电价政策的通知[EB/OL]. (2019-05-21)[2024-01-08]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201905/t20190524_962453.html?code=&state=123.
- [6] Zhou S, Wang Y, Zhou Y Y, et al. Roles of wind and solar energy in China's power sector: Implications of intermittency constraints[J]. *Applied Energy*, 2018, 213: 22-30.
- [7] Chen X Y, McElroy M B, Kang C Q. Integrated energy systems for higher wind penetration in China: Formulation, implementation and impacts[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017: 1.
- [8] Ding N, Duan J H, Xue S, et al. Overall review of peaking power in China: Status quo, barriers and solutions[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42: 503-516.
- [9] 全球风能理事会. 全球风电装机统计(2015)[EB/OL]. (2016-02-15)[2024-01-08]. <https://news.bjx.com.cn/html/20160215/707829.shtml>.
- [10] 中国电力. 2015及中长期我国电力工业展望[EB/OL]. (2016-01-06)[2024-01-08]. <http://www.chinapower.com.cn/informationzxbg/20160106/16252.html>.
- [11] 2022年全球风电装机容量增长、区域分布统计及23—26年发展趋势预测分析[EB/OL]. (2023-06-01)[2024-01-08]. <http://www.leadingir.com/datacenter/view/9134.html>.
- [12] He G, Kammen D M. Where, when and how much wind is available? A provincial-scale wind resource assessment for China[J]. *Energy Policy*, 2014, 74: 116-122.
- [13] Feng J X, Feng L Y, Wang J L, et al. Evaluation of the onshore wind energy potential in mainland China: Based on GIS modeling and EROI analysis[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 152: 104484.
- [14] Yu S W, Gui H Z, Yang J. China's provincial wind power potential assessment and its potential contributions to the "dual carbon" targets[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(5): 13094-13117.
- [15] Luo G L, Li Y L, Tang W J, et al. Wind curtailment of China's wind power operation: Evolution, causes and solutions[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 53: 1190-1201.
- [16] Liu F, Sun F B, Liu W B, et al. On wind speed pattern and energy potential in China[J]. *Applied Energy*, 2019, 236: 867-876.
- [17] Yuan T J, Ma T T, Sun Y Q, et al. Game-based generation scheduling optimization for power plants considering long-distance consumption of wind-solar-thermal hybrid systems[J]. *Energies*, 2017, 10(9): 1260.
- [18] 郭为民, 魏强, 唐耀华. 一种可在特高压或风电大量接入后减少旋转备用的新方法[C]//智能化电站技术发展研讨暨电站自动化2013年会论文集. 郑州: 国网河南省电力公司电力科学研究院, 2013: 9.
- [19] Qi Q R, Zhang C P. Study of some key issues related to large-scale wind power grid integration in China[C]//Proceedings of Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 1-4.
- [20] Su C G, Cheng C T, Wang P L, et al. Optimization model for long-distance integrated transmission of wind farms and pumped-storage hydropower plants[J]. *Applied Energy*, 2019, 242: 285-293.
- [21] Schill W. Electricity storage and the renewable energy transition[J]. *Joule*, 2020, 4(10): 2059-2064.
- [22] Land cover type yearly L3 global 500 m SIN grid[DS]. Survey U S G: 2014.
- [23] 中国生态功能保护区[DS]. 资源环境科学与数据中心: 2020.

- [24] Shuttle radar topography mission (SRTM) [DS]. NASA N: 2015.
- [25] 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.
- [26] Global Modeling and Assimilation Office. GEOS atmospheric assimilation products[EB/OL]. (2022-07-11) [2024-01-08]. https://gmao.gsfc.nasa.gov/GMAO_products/NRT_products.
- [27] 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.
- [28] Jacobson M Z, Archer C L. Saturation wind power potential and its implications for wind energy[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(39): 15679–15684.
- [29] 肯巴提·波拉提. 城市下垫面零平面位移和粗糙长度的计算[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015.
- [30] Gao Y, Ma S X, Wang T, et al. Assessing the wind energy potential of China in considering its variability/intermittency[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 226: 113580.
- [31] Bauer L, Matysik S. Wind turbine specification[EB/OL]. (2024-01-08) [2024-01-08]. <https://en.wind-turbine-models.com/turbines>.
- [32] Masters G M. Renewable and efficient electric power systems[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.
- [33] Huang J L, Lu X, McElroy M B. Meteorologically defined limits to reduction in the variability of outputs from a coupled wind farm system in the Central US[J]. *Renewable Energy*, 2014, 62: 331–340.
- [34] Rinne E, Holttinen H, Kiviluoma J, et al. Effects of turbine technology and land use on wind power resource potential[J]. *Nature Energy*, 2018, 3: 494–500.
- [35] Duan H B, Zhou S, Jiang K J, et al. Assessing China's efforts to pursue the 1.5°C warming limit[J]. *Science*, 2021, 372(6540): 378–385.
- [36] Chen X Y, Liu Y X, Wang Q, et al. Pathway toward carbon-neutral electrical systems in China by mid-century with negative CO₂ abatement costs informed by high-resolution modeling[J]. *Joule*, 2021, 5(10): 2715–2741.
- [37] Cole W J, Frazier A W. Cost projections for utility-scale battery storage[EB/OL]. (2019-06-01) [2024-01-08]. <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73222>.
- [38] 中国能源转型与“十四五”电力规划研究[R]. 全球能源互联网发展合作组织, 2020.
- [39] 电力规划设计总院. 电网工程限额设计控制指标—2019年水平[M]. 北京: 中国电力出版社, 2020.
- [40] 电力规划设计总院.“十一五”期间投产电力工程项目造价情况[R]. 北京: 国家电监会, 2011.
- [41] Hiesl A, Ajanovic A, Haas R. On current and future economics of electricity storage[J]. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2020, 10(6): 1176–1192.
- [42] Zhang T, Emanuel A E, Orr J A. Distribution feeder upgrade deferral through use of energy storage systems[C]// *Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 1–5.
- [43] Liu L B, Wang Z, Wang Y, et al. Optimizing wind/solar combinations at finer scales to mitigate renewable energy variability in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 132: 110151.

Capacity of wind power generation and impacts of electricity transmission and energy storage on achieving "dual carbon" goal in China

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

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

Abstract This study employs high-resolution comprehensive digital geographic information to analyze the spatiotemporal differences of wind power resources and predict the impacts of electricity transmission and energy storage on the capacity of carbon emissions abatement by deploying wind power in China. The findings of this study include: 1) High capacities of wind power are identified over North China and Southwest China. The efficiency of wind power generation can be largely enhanced by improving the spatial layout of power installation and securing the development of electricity transmission and energy storage facilities. 2) The potential of wind power generation in China is predicted based on spatial and temporal distributions of wind power resources and hourly wind power generation loads at a spatial resolution of $1/120^\circ \times 1/30^\circ$ with consideration of infrastructure construction such as electricity transportation and energy storage. The national wind power generation potential varies significantly between scenarios with different assumptions on land use. The projected capacity of wind power generation may reach 50 PW·h per year by assuming that all land pixels can be used for power generation, whereas it will decrease to 4 PW·h per year if filtering pixels suitable for wind power generation and optimizing the size of power plants under cost minimization. Provinces in the west of China are predicted to be the hotspot areas of wind power generation while the potential of wind power generation is relatively lower. The efficiency of power generation will be largely reduced in the absence of electricity transportation and energy storage. Future studies should focus on improving planning and layout of wind power plants by coordinating the supporting facilities of electricity transportation and energy storage, which can increase the economic benefits when achieving the emission abatement targets. 3) Deploying wind power will significantly reduce carbon emissions in China. When the facilities of electricity transmission and energy storage are fully coordinated, the capacity of carbon emissions abatement by deploying wind power will be increased by 26%, accompanied with an 84% reduction in the average abatement costs. This paper provides a scientific foundation for deploying wind power at large scales in China. By 2060, a large amount of infrastructure for electricity transmission and energy storage will be needed to achieve energy balance under carbon neutrality in China, and then North China and Northwest China will be the primary areas of wind power generation.

Keywords wind power; electricity transmission; energy storage; carbon emissions abatement; emission abatement costs ●



(责任编辑 徐丽娇)