

京津冀地区光伏开发空间适宜性及减排效益评估

刘立程¹, 孙中考¹, 吴 锋^{2,3}, 张雪靓¹, 张 倩¹

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所
中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 京津冀地区作为中国重要的能源消费基地, 近年在产业转型与发展中对清洁能源的需求不断增加。光伏发电是中国“十四五”期间加速能源结构转型, 早日实现碳中和目标的关键举措与重要抓手。本文以京津冀为研究区, 通过构建“地形—气象—成本”光伏开发适宜性综合评价指标体系, 计算了光伏开发适宜性指数, 刻画出京津冀地区2018年光伏开发适宜性的空间格局特征, 进而定量评估不同开发适宜性情景下光伏发电潜力与减排效益。研究表明: ①京津冀地区光伏开发适宜区占到区域总面积的22%, 一般适宜区面积最广, “燕山—太行山”一线是适宜区与不适宜区的主要分界线, 各类适宜区主要分布在承德、张家口和保定市3个市。②京津冀地区光伏发电发展潜力巨大, 开发非常适宜区和较适宜区的年发电潜力是2018年京津冀地区电力消耗的3倍。③光伏发电节能减排效果显著。在将非常适宜区和较适宜区全部开发情景下碳减排量为京津冀2018年排放量的47%。④土地利用限制、大型输电网络和储能系统是制约光伏发展的主要因素。总体来看, 虽然大规模光伏开发仍存在一定的限制条件与技术瓶颈, 但在全球气候变化加剧和社会经济发展进入“低碳脱碳”新常态的背景下, 京津冀地区的大规模光伏开发仍是助力区域早日实现碳中和目标、优化能源结构和提升人民福祉的重要途径。

关键词: 光伏; 适宜性; 发电潜力; 碳减排; 京津冀地区

DOI: 10.11821/dlxb202203012

1 引言

温室气体引起的全球气候变暖已成为全世界面临的重大环境问题, 严重危害到人类的生存环境和健康安全。建立以可再生能源(包括太阳能、风能、生物质能、海洋潮汐能等)为主体的可持续能源体系成为解决能源短缺与环境安全问题的重要途径^[1-2]。中国是当前世界上最大的CO₂排放国^[3], 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布了中国在2060年前年实现碳中和的决心。而中国要实现碳中和则要尽可能扩大清洁电力的使用。早日实现碳中和目标是区域经济社会转型发展与能源结构调整的内生动力与外在要求, 而太阳能资源具有分布广泛、就地可取、无需运输、对环境影响小等优势^[4-7], 以其无可比拟的低碳属性和便利开发为未来经济增长与不断增加的碳排放脱钩提供机会, 因此对区域光伏开发适宜性及减排效益进行评估对区域乃至全国“双碳”目标的达成具有

收稿日期: 2021-04-19; 修订日期: 2021-12-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(71774151, 51861125101); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA23070402)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.71774151, No.51861125101; Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences, No.XDA23070402]

作者简介: 刘立程(1994-), 男, 甘肃民勤人, 博士生, 研究方向为资源与环境政策评估。E-mail: liulicheng@cau.edu.cn

通讯作者: 张倩(1981-), 女, 山东兖州人, 副教授, 博士生导师, 研究方向为农业资源环境政策与管理。

E-mail: qian.zhang@cau.edu.cn

十分重要的意义。同时独具中国特色的光伏发电扶贫项目对中国减贫起到了积极正向的影响,可以显著提升贫困地区人民的生活水平并扩大就业^[8]。

对区域光伏开发适宜性评估是太阳能资源开发利用的前提和基础,国内外研究人员对此作了大量工作。国外诸多学者将地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 与多因子评价方法 (Multi-Criteria Evaluation, MCE) 相结合来分析不同区域太阳能开发的适宜性差异^[9]。诸如 Charabi 等^[10]应用 FLOWA 模块评估了阿曼进行大型光伏电站建设的区域适宜性,发现光伏蕴含着巨大的发电潜力; Lurwan 等^[11]基于 GIS 选取了同时满足多个自然环境与社会经济条件的栅格因子,确定了马来西亚大型智能光伏电站的最佳位置。同时大量研究从国家、区域及全球等不同尺度上评估了光伏发电的潜力。Hoogwijk 率先在全球范围内对太阳能发电的潜力进行了评估^[12]。近年对太阳能发电潜力的研究集中于西非、东南亚和欧盟等地区^[13-16]。其中相当部分的研究倾向于分析影响光伏发电潜力的个别技术因素,如土地适宜性分析和选址标准^[17-18];光伏板的倾斜角度和方向如何影响利用太阳辐射^[19-21]、温度对光伏发电的影响^[22]、不同遮阳条件下的性能模型^[23]以及太阳能电池板退化和性能比率的量化^[24]等。国内学者如袁小康等^[25]从太阳能资源估算、利用价值、稳定性和日最佳利用时段几个方面回顾了中国在太阳能资源评估方面的主要研究成果;肖建华等^[26]提出了影响选址的宏观因素和微观因素,但并没有提出一个可以定量计算的解决方案;赵明智^[27]确定了槽式太阳能热发电站选址的影响因素,利用层次分析法建立了槽式太阳能热发电厂选址的指标体系。

综上发现,目前鲜有在综合考虑地形、气象、成本等多种影响因素的基础上对区域光伏开发适宜性进行空间显性的评价并量化其未来不同开发强度下的发电潜力的研究。相较于以往研究,本文不仅在较精细的百米栅格尺度上对光伏开发适宜性进行了空间显性的评价,还对区域光伏发电潜力进行了估算,这将为后续光伏开发的选址工作提供有力支撑。其次,本文是在考虑到光伏在区域能源结构调整中的占比份额逐渐递增,设置了不同开发强度情景下光伏发电潜力的评估及其与区域用电量的对比,可为区域能源结构调整和光伏产业合理发展提供科学依据。最后,对标中国“双碳目标”在对光伏发电潜力进行估算之后,本文还对其节能减排效益进行了分析,评估了京津冀光伏发电对该区域乃至全国碳减排的贡献。

京津冀地区是中国经济规模最大、最具活力的区域之一,也是中国重要的区域能源消费中心^[28]。如何统筹该区域“经济发展、节能减排和民生福祉”的协同发展是亟待解决的问题。而大规模光伏开发恰是实现京津冀“生产—生态—生活”协调发展的重要工具与关键抓手。因此本文基于气象、灯光、地理矢量数据和社会经济统计数据等基础数据,构建“气象—地形—成本”多维评价指标体系,运用地理信息系统、空间主成分分析 (Spatial Principal Component Analysis, SPCA) 等空间模型与方法,对京津冀地区2018年光伏开发适宜性的空间差异进行评价。在此基础上,引入光伏发电潜力评价方法并结合实地调研,评估了不同开发强度下京津冀地区2018年的光伏发电潜力,进一步对标“碳达峰和碳中和”背景下分析该区域光伏开发的减排效果,以期为早日实现碳中和目标、优化调整区域能源结构和实现协调发展提供理论依据与科学支撑。

2 研究区概况

京津冀地处中国华北,北接辽宁、内蒙古,西邻山西,南交山东、河南,东傍渤海湾,区域面积为21.6万 km²,约占中国国土总面积的2.2%。京津冀地区西北为燕山—太行山山脉,东南为华北平原,地貌类型多样,山区与平原分别约占京津冀地区总面积的

48.2%和43.8% (图1)。2018年京津冀地区GDP和能源消费总量的占比均超过全国总量的1/10,且煤炭消费占京津冀能源消费总量的3/4。2018年京津冀地区累计光伏装机容量1402万kW,新增装机容量441万kW,《中华人民共和国国民经济和社会发展的第十四个五年规划和2035年远景目标纲要(草案)》(下称规划纲要草案)中明确提出在京津冀北部承德地区建立国家级清洁能源生产基地,该地区发展光伏产业的潜力巨大。

3 数据与研究方法

3.1 研究技术路线

本文首先剔除京津冀地区的耕地、城市建成区、自然保护区、水域等陆地集中式光伏不易建设的区域(约占京津冀面积67%),再通过构建“地形—气象—成本”的光伏开发适宜性评价指标体系对其余区域(约占京津冀总面积33%)进行光伏开发适宜性评价。进而,根据评价结果将这些区域划分为非常适宜区、较适宜区、一般适宜区、较不适宜区和不适宜区5类并获得其数量与空间分布状况。并据此,在综合考虑光伏板效率、损耗率等的基础上,估算京津冀在不同开发强度情景下的光伏发电潜力及其减排效益(图2)。

3.2 数据来源

本文所需的数据主要有以下6类,分别是气象数据、地形地貌数据、土地利用数据、夜间灯光数据、基础地理要素数据以及社会经济统计数据(表1)。①气象数据包括:年总太阳辐射数据和年日照时数数据,来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)的辐射和日照时数数据集;②地形地貌数据包括:数字高程模型(DEM)和地貌类型,DEM来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率90 m;地貌类型来源于中国科学院资源与环境科学数据

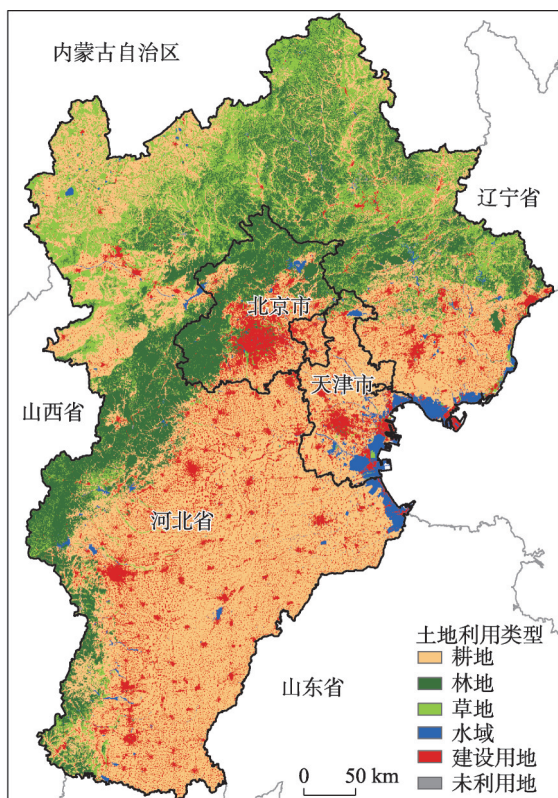


图1 2018年京津冀土地利用图

Fig. 1 Land use map of Beijing-Tianjin-Hebei region in 2018

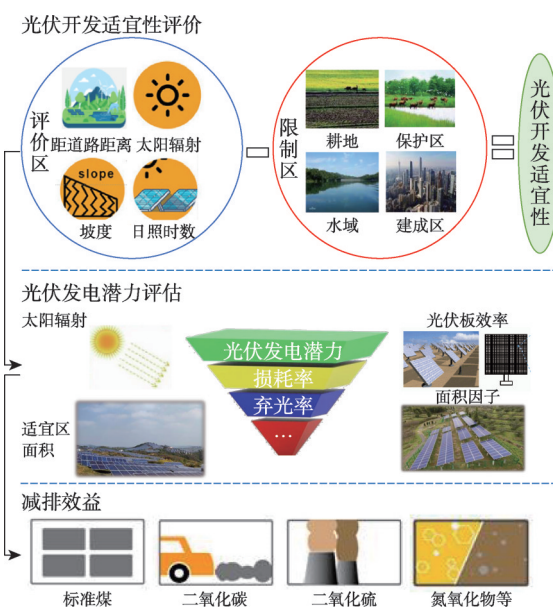


图2 光伏开发适宜性评价与效益评估分析框架

Fig. 2 The analysis framework of photovoltaic development suitability and benefit evaluation

表 1 评价指标数据及其预处理
Tab. 1 Evaluation indicators and data pre-processing

指标名称	处理方法	数据来源
年太阳总辐射	站点数据 Anusplin 插值为百米栅格数据	中国气象数据网
年日照时数	站点数据 Anusplin 插值为百米栅格数据	中国气象数据网
数字高程模型	拼接(Mosaic)后重采样(Resample)为百米栅格数据	地理空间数据云
坡度	采用坡度(Slope)工具计算得到百米栅格数据	根据 DEM 数据计算
土地利用类型	LUCC 100×100 m 栅格数据	中国科学院资源环境科学与数据中心
地貌类型	中国 1:100 万地貌类型重采样(Resample)为百米栅格数据	中国科学院资源环境科学与数据中心
距城镇距离	欧式距离(Euclidean distance)计算得到百米栅格数据	国家基础地理信息中心
距道路距离	欧式距离(Euclidean distance)计算得到百米栅格数据	国家基础地理信息中心

据中心 (<http://www.resdc.cn>) ; ③ 土地利用/覆被数据来源于中国科学院资源与环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>), 空间分辨率 100 m; ④ 夜间灯光数据来源于: 美国国家大气和海洋局官网的 VIIRS/DNB 数据 (<https://www.ngdc.noaa.gov>), 空间分辨率 500 m; ⑤ 基础地理要素数据包括: 中国省、市、县级行政边界和道路数据, 均来源于国家基础地理信息中心 (<http://www.ngcc.cn>) 的 1:100 万中国基础地理信息数据库; ⑥ 统计数据包括: 2018 年各省份累计光伏装机总量、新增装机容量、光伏发电量、用电量、弃光率等数据, 来源于国家可再生能源中心 (<https://www.ngdc.noaa.gov>)。在各项评价指标数据中, 年太阳总辐射和年日照时数采用气象学专用插值软件 Anusplin 插值为空间分辨率 100 m×100 m 的栅格; 数字高程模型下载自地理空间数据云平台, 原始数据空间分辨率 90 m×90 m; 坡度数据采用重采样之后的 DEM 数据计算得到; 土地利用类型数据采用空间分辨率为 100 m×100 m 的全国土地利用/覆被数据集; 距城镇距离和距道路距离均采用 Euclidean distance 工具计算得到; 地貌类型采用中国 1:100 万地貌类型数据 (1000 m×1000 m), 由于地貌类型数据是以类型值在空间上分布, 而非连续值, 因此重采样为 100 m 空间分辨率后对计算结果影响甚微。至此, 所有数据的时间节点均为 2018 年, 空间数据统一采用 Albers 投影, 所有数据的空间分辨率均统一为 100 m×100 m。

3.3 评价指标选取及其合理性验证

光伏电站建设的适宜性评价需要考虑多因素的影响, 可分为 3 方面: ① 地形因素包括高程、坡度、地貌类型等。随着海拔的升高, 建设施工和后期保养维护的难度和成本也随之增大, 当海拔增加至一定高度时, 不适合建设光伏电站。坡度影响着太阳辐射强度和日照时间, 进而影响太阳能资源的空间分布。平原和相对平坦的高原等地貌是光伏开发的理想场所, 陡峭的山地等则不适宜光伏建设。② 成本因素包括距最近城市距离、距最近道路距离; 光伏电站的施工建设, 离不开大型机械和设备的运输, 良好的交通条件是保障, 距主干道路的远近可衡量建设的成本和便利程度。离城镇越近, 越靠近消费市场, 电力传输线路的建设成本和电力长距离运输的损耗也越少, 光伏发电成本越低。③ 气象因素包括太阳总辐射和日照时数, 前者与光伏电站的发电量密切相关, 是影响光伏电站区域适宜性的重要指标, 后者影响光伏发电的稳定性, 日照时数变化会相应引起发电量变化。太阳总辐射越大, 日照时数越长, 说明其太阳能资源条件越好, 越有利于该地区光伏的开发利用。

为确保评价的科学性与准确性, 避免出现各指标信息重叠、高度相关的情况, 在进行光伏开发适宜性评价前需对指标进行多元共线性诊断。通常采用方差膨胀因子 (VIF) 和容忍度 (TOL) 来判断指标间的多元共线性程度。当 $VIF > 10$ (即 $TOL < 0.1$)

时,表明所选指标的多元共线性较为严重,不宜开展评价研究。通过创建1 km×1 km的网格覆盖整个研究区,共均匀生成214369个网格,利用网格提取8个指标和光伏开发适宜性指数(SPU)值,通过Stata软件进行共线性诊断(表2)发现各指标的方差膨胀因子均小于10,说明各指标间并无显著的相关关系。

3.4 研究方法

3.4.1 指标权重确定 由于各指标表征的含义不同,量纲亦不同,无法直接进行光伏开发适宜性的评价,因此必须对各评价指标进行标准化处理,以解决指标间无法直接比较的矛盾。本文选取的8个指标根据对光伏开发适宜性的影响可分为正向影响和逆向影响指标。正向影响指标代表指标值越大,其光伏开发适宜性越高;逆向指标则反之。其中,正向指标包括ASH、ASR、STY、GEO,逆向指标包括DFC、DEM、DFR、SLO(图3)。指标标准化则采用极差标准化的方法,其公式为^[29]:

正向: $S = \frac{I_i - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}$ (1)

逆向: $S = \frac{I_{\max} - I_i}{I_{\max} - I_{\min}}$ (2)

式中: S 表示第*i*指标的标准化值,其值域范围为0~1; I_i 为第*i*指标的实际值; I_{\max} 为第*i*指标的最大值; I_{\min} 为第*i*指标的最小值。

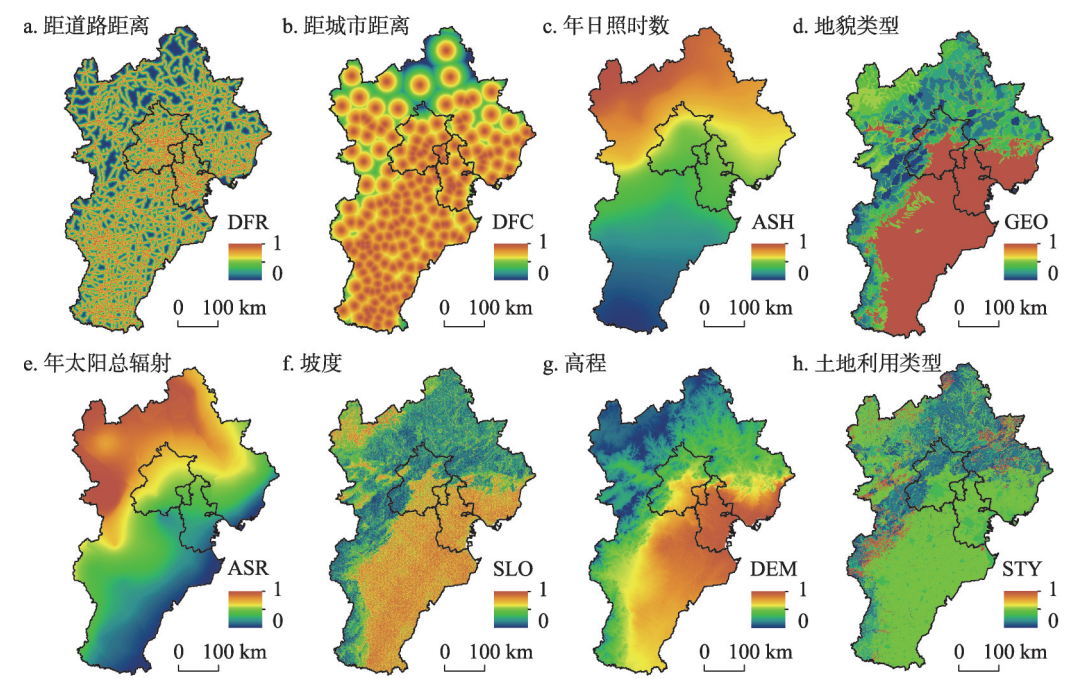


图3 光伏开发评价因子数据集

Fig. 3 Dataset of evaluation factor for photovoltaic development

表2 多重共线性检验结果
Tab. 2 Results of multicollinearity test

指标名称	方差膨胀因子(VIF)	容忍度(TOL)
年太阳总辐射(ASR)	3.93	0.25
数字高程模型(DEM)	3.54	0.28
年日照时数(ASH)	2.6	0.38
坡度(SLO)	1.88	0.53
距城镇距离(DFC)	1.74	0.57
土地利用类型(STY)	1.5	0.66
距道路距离(DFR)	1.42	0.70
地貌类型(GEO)	1.11	0.89

SPCA 通过对特征光谱空间坐标轴的旋转, 将相关的多变量空间数据转化为少数几个不相关的综合指标, 实现用较少的综合指标最大限度的保留原来较多变量所反映的信息^[29]。采用空间主成分分析法并不需要人为确定各个指标的权重, 可以避免因主观因素而造成最终结果的偏差。借助 ArcGIS 软件多元分析工具 (Principal Components), 可得到每个主成分所对应的空间载荷图和各主成分的累积贡献率。根据光伏开发适宜性指数计算公式 (式 (3)), 结合主成分载荷矩阵 (表 3), 计算 SPCA 分析得到的 8 主成分的方差贡献率, 得到各评价因子的权重 (表 4), 最后通过 ArcGIS 栅格计算器将各评价单元进行加权求和, 采用 ArcGIS 中自然断点法 (Natural breaks) 对结果进行重分类, 定义为不适宜、较不适宜、一般适宜、较适宜和非常适宜区 5 类。再将限制区图层与分类结果叠加, 得到光伏开发的适宜性分布。计算公式如下^[30]:

$$SPU=r_1X_1+r_2X_2+r_3X_3+\cdots+r_iX_i \quad (3)$$

式中: SPU 为光伏开发适宜性指数; r_i 为第 i 个指标的权重; X_i 为第 i 个归一化的指标。

表 3 主成分的特征值及其贡献率

Tab. 3 Characteristic values of principal components and their contribution rates

主成分	特征值	方差贡献率(%)	累计方差贡献率(%)
PC1	4.45	55.72	55.72
PC2	1.18	14.77	70.50
PC3	0.87	10.92	81.43
PC4	0.57	7.23	88.66
PC5	0.47	5.95	94.61
PC6	0.22	2.80	97.42
PC7	0.14	1.76	99.18
PC8	0.06	0.81	100

表 4 主成分载荷矩阵

Tab. 4 Principal component load matrix

指标	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	权重(%)
DFR	0.49	0.15	0.78	-0.31	-0.10	-0.07	-0.01	0.01	11.36
DFC	0.65	0.30	0.25	0.63	0.08	-0.08	-0.03	-0.01	12.52
DEM	0.86	0.26	-0.02	-0.05	0.08	0.40	-0.02	0.02	12.05
SLO	0.82	0.46	-0.03	-0.05	0.25	-0.07	0.03	0.18	12.73
GEO	0.86	0.35	-0.01	-0.06	0.26	-0.04	0.10	-0.18	12.69
STY	0.57	0.63	0.01	0.15	-0.48	0.06	-0.05	-0.02	11.97
ASH	-0.76	0.43	0.27	0.06	0.28	0.09	-0.23	-0.03	13.44
ASR	-0.82	0.25	0.35	0.18	0.02	0.15	0.25	0.02	13.25

3.4.2 光伏发电潜力评估 为了评估不同适宜性条件下光伏发电潜力, 需将太阳能转换为总能量输出。总能量输出很大程度上依赖于使用的光伏板的种类, 包括单晶硅、多晶硅、非晶硅和薄膜多晶硅, 不同的光伏板的发电效率有所差异, 本文选取目前市场上应用最为广泛的多晶硅, 其转换率为 16.5%, 光伏发电潜力还受到单位面积的年太阳总辐射、适宜建设光伏电站的面积以及接受太阳辐射的面积因子 (0.35) 影响^[31-32]。同时发电潜力还要综合考虑弃光率 (AP), 沙尘造成的电量损失 (LO)。式 (4) 可用于估算年太阳能发电潜力:

$$SEGP=SA \times AF \times ASR \times PE \times (1-LO) \times (1-AP) \quad (4)$$

式中: $SEGP$ 为光伏发电潜力 (kWh); SA 为适宜发展光伏电站的面积 (km²); AF 为接受太阳辐射的面积因子; ASR 为单位面积的年太阳总辐射 (kWh·km⁻²·a⁻¹); PE 为太阳能电池板的发电效率; LO 为损耗率; AP 为弃光率。参数值及设定依据参见表 5。

4 结果与分析

4.1 光伏开发适宜性分析

剔除限制开发区域, 光伏开发适宜性评估区域(以下简称“评估区”)面积占京津冀地区总面积的32.78%(图4)。将评估区的适宜性评价结果依据自然断点法分别按0.38~0.59、0.59~0.65、0.65~0.70、0.70~0.77、0.77~0.92的范围定义为不适宜、较不适宜、一般适宜、较适宜和非常适宜区5类。适宜区总面积为4.82万km², 占评估区面积的67%, 其中非常适宜区、较适宜区和一般适宜区面积分别占到了评估区的9.6%、22.9%和34.5%, 不适宜区总面积约为2.44万km², 约占到评估区面积的33%。在非常适宜区的主要分布地市中, 张家口所占面积最多, 承德次之(图4); 较适宜区主要分布在保定、张家口和承德等市; 一般适宜区面积最大, 分布最广, 在11个地市中均有分布, 其中尤以承德市占比最大, 达到了39%(图4); 较不适宜区和不适宜区的面积比之其他几类适宜区相对较少, 少量分布在石家庄、邢台和承德等地市(图4)。

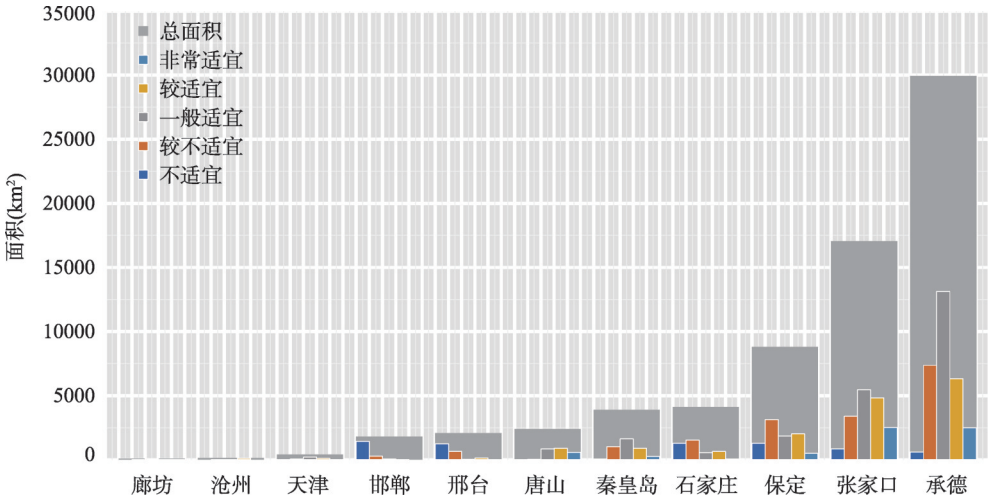
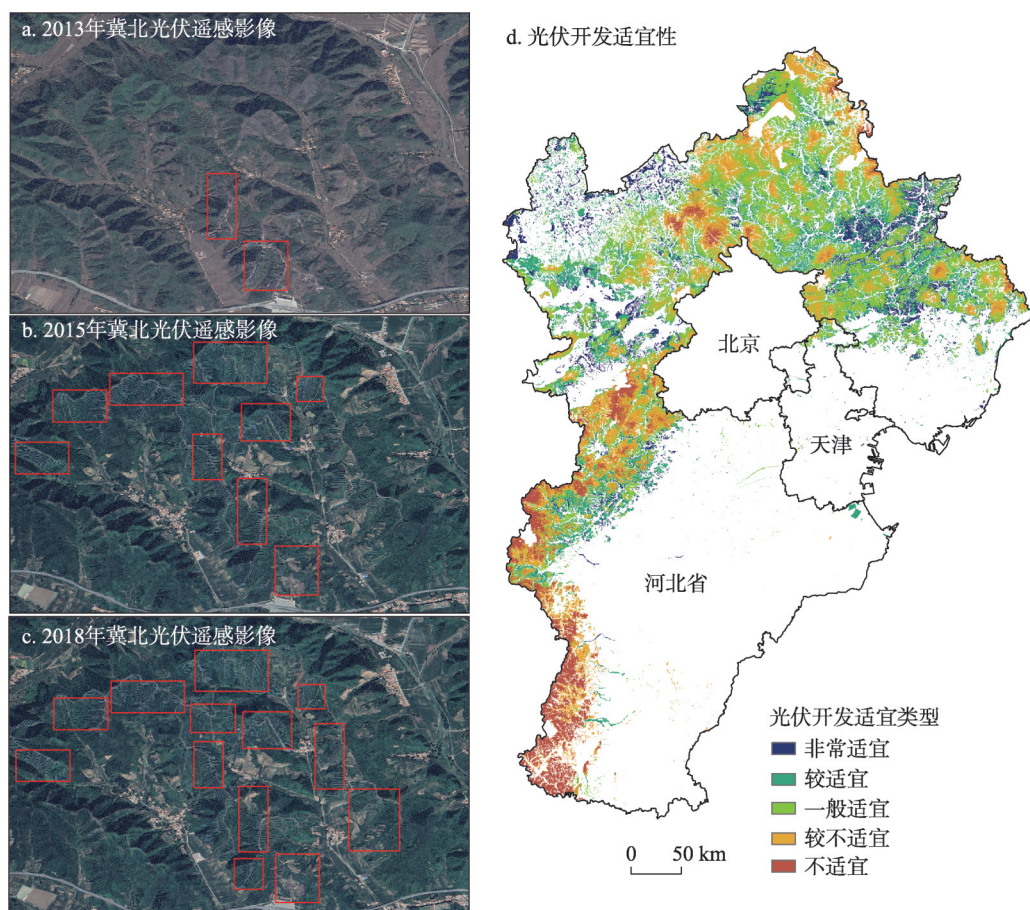


图4 京津冀各类光伏开发适宜区在不同地市的面积统计

Fig. 4 Area statistics of various suitable areas of photovoltaic development in different cities in Beijing-Tianjin-Hebei region

京津冀地区光伏开发适宜性呈现出由西北向东南递减的空间分布趋势, 各类适宜区及不适宜区主要分布在“燕山—太行山”一线西北侧, 集中了京津冀地区近90%的适宜区面积, 其范围横跨东北和华北两大区域, 汇集了华北地区绝大部分的山脉和丘陵, 其中燕山作为一条天然地理界线将适宜区和不适宜区分开, 其北侧以适宜区为主, 南侧以不适宜区为主(图5)。非常适宜区主要分布在冀北地区的承德市、张家口市, 同时在燕山南侧的京津地区也有零星分布(图5)。这些区域具有进行光伏开发的天然优势, 其用地类型以草地为主, 主要地貌类型为山地丘陵、山前冲积平原和少部分平原, 地形总体坡度在15°~25°之间, 年日照时数在2500 h以上, 年总太阳辐射在5800 MJ·m⁻²·a⁻¹之上, 这使光伏发电效率大大提高, 距离城市和主要道路距离适中则极大地降低了光伏电站在建设中的运输成本。



注：图a~c中的红框内为光伏区域。

图5 京津冀光伏开发适宜性

Fig. 5 Suitability of photovoltaic development in Beijing-Tianjin-Hebei region

较适宜区和一般适宜区空间分布较为广泛，呈集中与零散式分布并存的态势，集中分布于“燕山—太行山”一线的北侧，零散分布于其南侧。北侧区域进行光伏开发的优势较为明显，以荒草地为主的用地类型使得用地成本降低、用地手续简化，相对缓和的坡度则可以保证大规模集中式光伏的建设，较长的年日照时数（2200 h以上）和较强的年总太阳辐射（ $5500 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之上）则保障了发电量和发电效率减少了电站亏损风险，相对适中的距离城市和主要道路距离则可以部分降低材料与建设运输成本。不适宜区和较不适宜区主要分布在太行山西侧（图5），这些区域内虽然日照时数和太阳辐射条件较好，但主要地貌类型以陡峭的山地为主、海拔较高（2500 m以上）、地形起伏、坡度较大、不利于大规模光伏建设项目的开展，同时这些区域距离主要城市及道路较远，无形之中也会增加开发建设的成本。

4.2 光伏发电潜力与电力需求分析

通过对京津冀地区光伏发电潜力估算发现，京津冀地区光伏发电发展潜力巨大，年发电潜力约为 $1.857 \times 10^{12} \text{ kWh}$ ，相当于2018年京津冀地区全社会用电量的3.47倍，其中非常适宜区发电潜力 $5.348 \times 10^{11} \text{ kWh}$ 、较适宜区发电潜力 $1.322 \times 10^{12} \text{ kWh}$ （表6）。开发利用28.89%的光伏发电潜力，即可满足京津冀地区2018年的电力需求，若达到100%的开

发强度（非常适宜区与较适宜区全部开发），则可基本满足京津冀及其周边省份（山东、河南，山西）在2018年的电力消耗。同时需要注意的是，光电相较于水电、风电等清洁能源具有较高的能源密度（单位体积内包含的能量）（ $7.8\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ）^[34]，但相较于煤炭、石油等传统化石能源则低得多，这意味着光电的大规模开发也伴随着大量的土地占用。计算可得，若要达到京津冀地区能源结构中光伏发电占比50%以上，需要约3247 km²的土地。

研究发现光伏发电潜力分布存在较强的空间异质性。从区域层面看，京津冀西北部的年发电潜力最大，光伏发电潜力为1.67万亿kWh，合计占京津冀全部光伏发电潜力的90.9%。而京津冀东部东南地区的光伏发电潜力仅为0.18万亿kWh。从市级尺度看，京津冀13个地市中承德、张家口和保定3个城市的用电量仅占京津冀地区的21.32%，但光伏发电潜力占比高达83.62%。夜间灯光值和区域间电力需求具有显著的相关性^[35]，可以较好地反映区域间人类活动与工业发展状况，因此用夜间灯光值来表征不同区域间电力需求的差异。通过对光伏开发适宜性与夜间灯光进行双变量局部自相关分析发现，除不显著区域外，高潜力—低需求、低潜力—高需求和低潜力—低需求是3种主要的聚类类型（图6b），京津冀地区电力生产和消

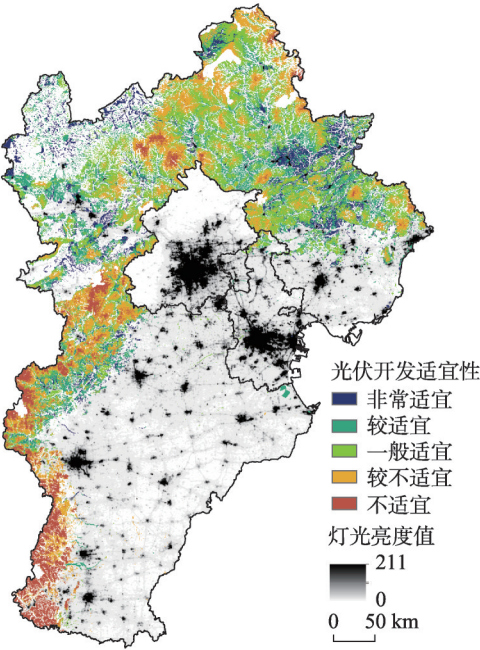
表6 京津冀不同光伏开发情景下的发电潜力

Tab. 6 Power generation potential under different photovoltaic development scenarios in Beijing-Tianjin-Hebei region

开发情景	情景释义	面积(km ²)	发电潜力(亿kWh)
S1	S1-Q1 非常适宜区开发 25%	1622.59	1337.09
	S1-Q2 非常适宜区开发 50%	3245.10	2674.17
	S1-Q3 非常适宜区开发 75%	4867.64	4011.26
	S1-Q4 非常适宜区开发 100%	6490.19	5348.34
S2	S2-Q1 较适宜区开发 25%	4011.38	3305.64
	S2-Q2 较适宜区开发 50%	8022.76	6611.28
	S2-Q3 较适宜区开发 75%	12034.13	9916.91
	S2-Q4 较适宜区开发 100%	16045.51	13222.55

注：S1 景下，S1-Q1 情景、S1-Q2 情景、S1-Q3 情景均已开发；S2 景下，S2-Q1 情景、S2-Q2 情景、S2-Q3 情景均已开发。

a. 光伏开发适宜性与夜间灯光叠加



b. 光伏开发适宜性与夜间灯光聚类

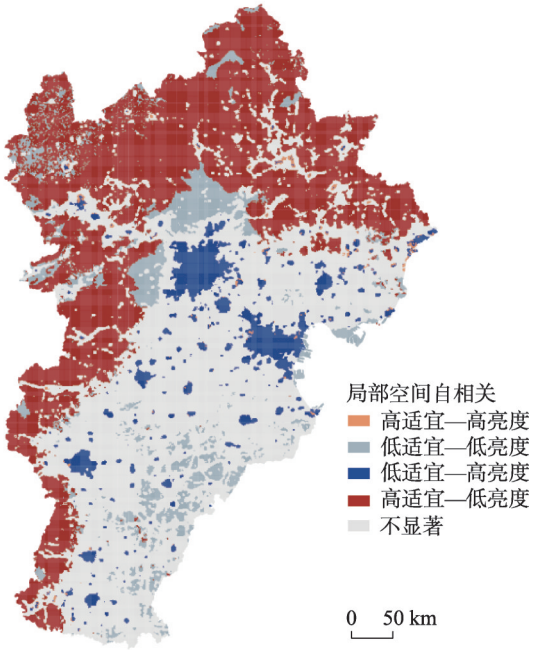


图6 京津冀光伏开发适宜性与夜间灯光数据叠加图

Fig. 6 Overlay map of photovoltaic development suitability and nighttime light data in Beijing-Tianjin-Hebei region

费需求之间存在着较为显著的空间错配问题。高潜力—低需求地区主要分布在冀北地区，低潜力—高需求地区则主要分布在各城市建成区，低潜力—低需求地区则分布在太行山区（图6b）。总体来看，京津冀区域间电力需求差异十分显著。京津唐地区工业产业集聚，电力需求旺盛（图6a），但大部分电力来源于火电厂，环境问题凸显，而冀北地区具有较强的光伏发电潜力。

4.3 不同开发强度下的减排效果

京津冀地区是中国大气污染物排放量和排放强度（单位国土面积排放量）最高的区域^[36-38]。光伏开发受到国家政策、市场调节、原材料供应等诸多因素的影响，是一个循序渐进的过程，短期内较难实现大规模的光伏开发。因此，本文考虑到光伏发电在区域能源结构中占比逐步上升，按照非常适宜区和较适宜区的开发比例，设置了8个不同开发强度情景。研究发现，在非常适宜区全部开发情景下（S1-Q4），京津冀地区年碳减排量约为5.33亿t，占京津冀当年碳排放量的50%，可节约近2.14亿t标准煤，少排放SO₂约0.16亿t、NO_x约0.08亿t、粉尘约1.45亿t；在较适宜区全部开发的情景下（S2-Q4），年碳减排量是S1-Q4情景下的2.5倍，相当于中国2018年碳排放总量的13%，同时相较于S1-Q4情景，可节约近2.5倍标准煤，少排放2.27倍的SO₂、NO_x以及粉尘；在非常适宜区和较适宜区全部开发的情景下（“S1-Q4”+“S2-Q4”），年碳减排量约为18.51亿t，是京津冀地区2018年碳排放的1.8倍，占全国2018年碳排放总量的五分之一，同时相较于S1-Q4情景，还可节约3.47倍的标准煤，少排放3.5倍的SO₂、NO_x和粉尘（表7）。

表7 不同光伏开发强度下的减排效果

Tab. 7 Emission reduction effect under different scenarios of photovoltaic development intensity

开发情景			减排物(万 t)				
			氮氧化物	二氧化硫	粉尘	标准煤	二氧化碳
S1	S1-Q1	非常适宜区开发 25%	200.56	401.12	3636.87	5348.34	13330.74
	S1-Q2	非常适宜区开发 50%	401.12	802.25	7273.74	10696.68	26661.47
	S1-Q3	非常适宜区开发 75%	601.68	1203.37	10910.61	16045.02	39992.21
	S1-Q4	非常适宜区开发 100%	802.25	1604.50	14547.48	21393.36	53322.95
S2	S2-Q1	较适宜区开发 25%	495.84	991.69	8991.33	13222.55	32957.21
	S2-Q2	较适宜区开发 50%	991.69	1983.38	17982.67	26445.1	65914.42
	S2-Q3	较适宜区开发 75%	1487.53	2975.07	26974.01	39667.66	98871.63
	S2-Q4	较适宜区开发 100%	1983.38	3966.76	35965.34	52890.21	131828.8

5 讨论与结论

5.1 讨论

科学、合理评估区域光伏开发适宜性及其发电潜力对实现能源结构转型与达成“双碳目标”至关重要。本文研究发现，京津冀地区适宜光伏开发的面积为22535.7 km²，年发电潜力为1.85×10¹² kWh，碳减排潜力为18.51亿t，而Qyabc等学者研究发现中国有3.79×10⁶ km²适宜用地可以开展光伏电站建设，年发电潜力为1.38×10¹⁴ kWh^[32]。对比分析得知，京津冀光伏开发适宜区面积占全域总面积的22%，发电潜力是2018年当地用电量的3.47倍，而全国光伏开发适宜区占国土总面积38%，发电潜力是全社会用电量的18.1倍，这表明光伏发电在京津冀与全国均具有很大的发展空间。规划纲要草案中计划新建的冀北清洁能源基地也说明京津冀地区存在大规模光伏开发的必要性，而本文则可为规划草案的落地、大型光伏电站的选址提供空间显性的数据支撑。值得注意的是，本文研

究发现光伏发电平均土地密度为 $0.012 \text{ m}^2 \cdot \text{kWh}^{-1}$,与联合国环境规划署(UNEP)公布的全球平均数据($0.01 \text{ m}^2 \cdot \text{kWh}^{-1}$)及全国尺度研究数据($0.027 \text{ m}^2 \cdot \text{kWh}^{-1}$)差异较小^[32],但仍高于煤炭、石油、天然气等传统化石能源的平均土地密度,意味着大规模光伏开发势必占用更多土地^[33]。根据国家能源局在《关于2021年风电、光伏发电开发建设有关事项的通知》中规划2025年京津冀地区光伏发电要占到其电源结构16.5%,需要约 674 km^2 的土地支撑其发展,这意味着仅需开发京津冀光伏开发非常适宜区中的10.4%即可实现京津冀2025年电源结构调整中的光伏发展目标,这也意味着未来京津冀区域的光伏发展仍有较大的潜力与空间。值得注意的是,本文当前所评估的为理想状态下的光伏开发适宜性,并没有考虑到在实际施工过程中的下垫面与气候状况,因而光伏工程实际施工时,还应该考虑京津冀地区不同岩性、降水量以及易发地质灾害对项目的影响。此外,大规模的光伏开发对生态环境也有一定程度的影响。相关研究表明,光伏开发建设过程中短期内虽会造成部分物种数量减少或丰度降低,但不会使这些物种在区域内绝对消失^[39-40]。同时,在光伏电站营运期间,人为扰动减少,且大型的光伏基础设施可以保护植被免受强烈太阳辐射和强风的影响,清洗太阳能光伏板的水可以为植物提高生长所需的水分,为耐荫性植物的生长创造条件^[41],显著提高该区域植被覆盖率,有利于改善脆弱的生态环境^[42]。此外,大面积覆盖的光伏电板会吸收太阳辐射并将其转换成电能,减少地表大量的太阳直接辐射,对局部小气候还具有降温增湿的作用^[43]。

进一步地分析,京津冀地区要大规模开发光伏,提高其在能源结构中的占比,机遇与挑战并存。首先,光伏发展适宜性评估结果显示京津冀区域光伏发展的适宜区较为集中地分布在冀北山区,克服地形困扰是光伏大规模开发建设必须考虑的议题。随着近年来中国光伏产业装备制造能力、施工建设水平及运维水平的大幅提升,为在资源条件复杂地区开展光伏建设提供了可能,诸如在冀北山区开发建设的三沟镇100 MW光伏发电项目是中国北方最大的山地光伏项目。其次,储能系统是保障光伏发电平稳运行的关键措施,也是当前光伏发展的主要制约因素^[44-46]。鉴于此规划纲要草案提出新建“冀北清洁能源基地(产储输一体)”以助力京津冀光伏发展,同时冀北电网除大力发展锂电池储能技术之外,也积极推动丰宁、抚宁、尚义抽水蓄能电站建设,规划到2025年抽水蓄能电站装机达到527万kWh。再次,受限于大型电力传输系统的缺乏,光电的大规模区域间输送还存在较大困难。因此在规划纲要草案中拟新建多条特高压输电线路(UHV),再结合京津冀地区已有的“四纵四横”电力输送网络,这使得光电的跨区域、远距离输送成为可能,将极大促进京津冀地区光伏产业发展。最后,光伏开发的生态影响也是光伏大规模发展的隐忧,越来越成为学者、决策者和大众关注的热点议题之一。综上,随着光电在京津冀能源结构体系和节能减排中扮演着越来越重要的角色,纵然其有诸多发展限制因素,但施工运维水平提升、储能技术普及、大型输电网络建设、光伏发展的生态影响的逐渐明晰,将破解光伏选址、储能和运输、生态影响等难题,助力京津冀地区光伏大规模开发。

5.2 结论

本文在中国致力实现碳中和背景下,选取地形、气象和成本等多维度指标,对京津冀地区光伏发电适宜性空间格局、发电潜力、节能减排效益进行了评估,为中国碳减排及区域能源结构调整提供了新思路,主要结论如下:

(1) 京津冀地区光伏开发适宜区占到区域总面积的1/5,其中一般适宜区是最主要的适宜区类型,同时各类适宜区呈现出较为明显的空间分异特征,“燕山—太行山”一线则是适宜区与不适宜区的主要分界线,承德、张家口和保定市是各类适宜区的主要分布区。

(2) 京津冀地区光伏发电发展潜力巨大, 年发电潜力相当于2018年京津冀地区电力总消耗的3.47倍, 此外该地区光伏发电还可依靠特高压输电网向周边辐射。

(3) 光伏发电节能减排效果显著。在非常适宜区和较适宜区全部开发的情景下, 年碳减排量是京津冀地区2018年碳排放的1.65倍, 占到全国排放的近1/5, 同时还可节约大量标准煤和减排大量 SO_2 、 NO_x 和粉尘。

(4) 大规模的光伏开发还存在一定的现实困难。其中土地利用限制、大型电力输送网络、储能系统是限制光伏大规模开发的主要因素。

参考文献(References)

- [1] Fthenakis V, Mason J E, Zweibel K. The technical, geographical, and economic feasibility for solar energy to supply the energy needs of the US. *Energy Policy*, 2009, 37(2): 387-399.
- [2] Wang Shaojian, Huang Yongyuan. Spatial spillover effect and driving forces of carbon emission intensity at city level in China. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(6): 1131-1148. [王少剑, 黄永源. 中国城市碳排放强度的空间溢出效应及驱动因素. *地理学报*, 2019, 74(6): 1131-1148.]
- [3] Xu B, Lin B Q. A quantile regression analysis of China's provincial CO_2 emissions: Where does the difference lie? *Energy Policy*, 2016, 98: 328-342.
- [4] Dickinson W C, Cheremisinoff P N. *Solar Energy Technology Handbook*. London: Butterworths, 1980.
- [5] Sen Z. Solar energy in progress and future research trends. *Progress in Energy & Combustion Science*, 2004, 30(4): 367-416.
- [6] Pan Jinghu, Zhang Yongnian. Spatiotemporal patterns of energy carbon footprint and decoupling effect in China. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(1): 206-222. [潘竟虎, 张永年. 中国能源碳足迹时空格局演化及脱钩效应. *地理学报*, 2021, 76(1): 206-222.]
- [7] Hertwich E G, Gibon T, Bouman E A, et al. Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. *PNAS*, 2014, 112(20): 6277-6282.
- [8] Huang Y, Huang B J, Song J L, et al. Social impact assessment of photovoltaic poverty alleviation program in China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 290: 125208. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125208.
- [9] Effat H A. Selection of potential sites for solar energy farms in ismailia governorate, Egypt using SRTM and multicriteria analysis. *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, 2013, 2(1): 205-220.
- [10] Charabi Y, Gastli A. PV site suitability analysis using GISbased spatial fuzzy multi-criteria evaluation. *Renewable Energy*, 2011, 36(9): 2554-2561.
- [11] Lurwan S M, Idrees M O, Ahmed G B, et al. GIS-Based optimal site selection for installation of large-scale smart grid-connected photovoltaic (PV) power plants in Selangor, Malaysia. *American Journal of Applied Sciences*, 2017, 14(1): 174-183.
- [12] De Vries B J M, Van Vuuren D P, Hoogwijk M M. Renewable energy sources: Their global potential for the first-half of the 21st century at a global level: An integrated approach. *Energy Policy*, 2007, 35(4): 2590-2610.
- [13] Yushchenko A, de Bono A, Chatenoux B, et al. GIS-based assessment of photovoltaic (PV) and concentrated solar power (CSP) generation potential in West Africa. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 81: 2088-2103.
- [14] Siala K, Stich J. Estimation of the PV potential in ASEAN with a high spatial and temporal resolution. *Renewable Energy*, 2016, 88: 445-456.
- [15] Castillo C P, Silva F B E, Lavalle C. An assessment of the regional potential for solar power generation in EU-28. *Energy Policy*, 2016, 88: 86-99.
- [16] Ermolenko B V, Ermolenko G V, Fetisova Y A, et al. Wind and solar PV technical potentials: Measurement methodology and assessments for Russia. *Energy*, 2017, 137: 1001-1012.
- [17] Noorollahi E, Fadai D, Shirazi M A, et al. Land suitability analysis for solar farms exploitation using GIS and fuzzy analytic hierarchy process (FAHP): A case study of Iran. *Energies*, 2016, 9(8): 643. DOI: 10.3390/en9080643.
- [18] Piyatadsananon P. Spatial factors consideration in site selection of ground-mounted PV power plants. *Energy Procedia*, 2016, 100: 78-85.
- [19] Hartner M, Ortner A, Hiesl A, et al. East to west: The optimal tilt angle and orientation of photovoltaic panels from an electricity system perspective. *Applied Energy*, 2015, 160: 94-107.
- [20] Kaddoura T O, Ramli M A M, Al-Turki Y A. On the estimation of the optimum tilt angle of PV panel in Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 65: 626-634.

- [21] Rowlands I H, Kemery B P, Beausoleil-Morrison I. Optimal solar-PV tilt angle and azimuth: An Ontario (Canada) case study. *Energy Policy*, 2011, 39(3): 1397-1409.
- [22] Kawajiri K, Oozeki T, Genchi Y. Effect of temperature on PV potential in the world. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(20): 9030-9035.
- [23] Ramli M A M, Twaha S, Ishaque K, et al. A review on maximum power point tracking for photovoltaic systems with and without shading conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 67: 144-159.
- [24] Sharma V, Chandel S S. Performance analysis of a 190 kWp grid interactive solar photovoltaic power plant in India. *Energy*, 2013, 55: 476-485.
- [25] Yuan Xiaokang, Gu Xiaoping, Wang Ji. Research progress of solar energy resources assessment in China. *Journal of Guizhou Meteorology*, 2011, 35(5): 1-4. [袁小康, 谷晓平, 王济. 中国太阳能资源评估研究进展. *贵州气象*, 2011, 35(5): 1-4.]
- [26] Xiao Jianhua, Yao Zhengyi, Sun Jiahuan. Review on optimal site selection for grid-connected solar photovoltaic plants. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(6): 1598-1605. [肖建华, 姚正毅, 孙家欢. 并网太阳能光伏电站选址研究述评. *中国沙漠*, 2011, 31(6): 1598-1605.]
- [27] Zhao Mingzhi. Study on methods of parabolic trough solar thermal power plant site selection [D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2009. [赵明智. 槽式太阳能热发电站微观选址的方法研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2009.]
- [28] Xu K P, Chi Y Y, Wang J J. Analysis of the spatial characteristics and driving forces determining ecosystem quality of the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 28(10): 12555-12565.
- [29] Guo Zecheng, Wei Wei, Pang Sufei, et al. Spatio-temporal evolution and motivation analysis of ecological vulnerability in arid inland river basin based on SPCA and remote sensing index: A case study on the Shiyang River Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(7): 2558-2572. [郭泽呈, 魏伟, 庞素菲, 等. 基于SPCA和遥感指数的干旱内陆河流域生态脆弱性时空演变及动因分析: 以石羊河流域为例. *生态学报*, 2019, 39(7): 2558-2572.]
- [30] Li Qingpu, Zhang Zhengdong, Wan Luwen, et al. Landscape pattern optimization in Ningjiang River Basin based on landscape ecological risk assessment. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(7): 1420-1437. [李青圃, 张正栋, 万露文, 等. 基于景观生态风险评价的宁江流域景观格局优化. *地理学报*, 2019, 74(7): 1420-1437.]
- [31] Zhang Qian, Xin Xiaozhou, Zhang Hailong, et al. Suitability analysis of photovoltaic power plants in China using remote sensing data and multi-criteria evaluation. *Journal of Geo-information Science*, 2018, 20(1): 119-127. [张乾, 辛晓洲, 张海龙, 等. 基于遥感数据和多因子评价的中国地区建设光伏电站的适宜性分析. *地球信息科学学报*, 2018, 20(1): 119-127.]
- [32] Yang Q, Huang T Y, Wang S G, et al. A GIS-based high spatial resolution assessment of large-scale PV generation potential in China. *Applied Energy*, 2019, 247: 254-269.
- [33] Li X, Mauzerall D L, Bergin M H. Global reduction of solar power generation efficiency due to aerosols and panel soiling. *Nature Sustainability*, 2020, 3(9): 720-727.
- [34] van Zalk J, Behrens P. The spatial extent of renewable and non-renewable power generation: A review and meta-analysis of power densities and their application in the U.S. *Energy Policy*, 2018, 123: 83-91.
- [35] Tripathy B R, Sajjad H, Elvidge C D, et al. Modeling of electric demand for sustainable energy and management in India using spatio-temporal DMSP-OLS night-time data. *Environmental Management*, 2018, 61(4): 615-623.
- [36] Zhou S, Tong Q, Pan X Z, et al. Research on low-carbon energy transformation of China necessary to achieve the Paris Agreement goals: A global perspective. *Energy Economics*, 2021(2): 105137. DOI: 10.1016/j.eneco.2021.105137.
- [37] Heath G A, Silverman T J, Kempe M, et al. Research and development priorities for silicon photovoltaic module recycling to support a circular economy. *Nature Energy*, 2020, 5(7): 502-510.
- [38] Department of Energy, National Bureau of Statistics. *China Energy Statistics Yearbook*, 2019. Beijing: China Statistics Press, 2020. [国家统计局能源司. *中国能源统计年鉴2019*. 北京: 中国统计出版社, 2020.]
- [39] Wang Z X, Fan W R. Economic and environmental impacts of photovoltaic power with the declining subsidy rate in China. *Environmental Impact Assessment Review*, 2021, 87(4): 106535. DOI: 10.1016/j.eiar.2020.106535.
- [40] Zhai Bo, Gao Yong, Dang Xiaohong, et al. Effects of photovoltaic panels on the characteristics and diversity of *Leymus chinensis* community. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(8): 2237-2243. [翟波, 高永, 党晓宏, 等. 光伏电板对羊草群落特征及多样性的影响. *生态学杂志*, 2018, 37(8): 2237-2243.]
- [41] Ravi S. Partner crop plants with solar facilities. *Nature*, 2015, 524(7564): 161.
- [42] Armstrong J H, Kulikowski A J, Philpott S M. Urban renewable energy and ecosystems: Integrating vegetation with ground-mounted solar arrays increases arthropod abundance of key functional groups. *Urban Ecosystems*, 2020, 24(3): 621-631.

- [43] Chiteka K, Arora R, Sridhara S N, et al. Optimizing wind barrier and photovoltaic array configuration in soiling mitigation. *Renewable Energy*, 2020, 163: 225-236.
- [44] Jaxa-Rozen M, Trutnevyte E. Sources of uncertainty in long-term global scenarios of solar photovoltaic technology. *Nature Climate Change*, 2021, 11(3): 266-273.
- [45] Sepulveda N A, Jenkins J D, Edington A, et al. The design space for long-duration energy storage in decarbonized power systems. *Nature Energy*, 2021, 6(5): 506. DOI: 10.1038/s41560-021-00796-8.
- [46] Arbabzadeh M, Sioshansi R, Johnson J X, et al. The role of energy storage in deep decarbonization of electricity production. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 3413. DOI: 10.1038/s41467-019-11161-5.

Evaluation of suitability and emission reduction benefits of photovoltaic development in Beijing-Tianjin-Hebei region

LIU Licheng¹, SUN Zhongxiao¹, WU Feng^{2,3}, ZHANG Xueliang¹, ZHANG Qian¹

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As a fundamental energy consumption base in China, the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region has experienced an increasing demand for clean energy in recent years. Photovoltaic power generation is a key for accelerating the transformation of energy infrastructure in China and achieving the goal of carbon neutrality during the 14th Five-Year Plan period (2021-2025). Taking the BTH region as a study area, we construct a comprehensive evaluation index system of "terrain-weather-cost" to calculate a photovoltaic development suitability index. We subsequently analyze the spatial pattern characteristics of photovoltaic development suitability in the study area in 2018 and quantitatively examine power generation potential and emission reduction effect under different scenarios of photovoltaic development suitability. Results indicate that: (1) The suitable areas for photovoltaic development account for 22% of the total area of this region, and the largest portion of this area is moderately suitable for photovoltaic development. The "Yanshan-Taihang mountains" line geographically divides the areas that are suitable and unsuitable for photovoltaic development, and a range of potential areas are distributed in prefecture-level cities of Chengde, Zhangjiakou and Baoding. (2) Photovoltaic power generation in the BTH region has great potential. Specifically, the annual power generation potential of the extremely and highly suitable areas is about three times more than the total power consumption in the same year of 2018. (3) The energy-saving and emission reduction effects of photovoltaic power generation are remarkable. If the extremely and highly suitable areas are used for photovoltaic development, there will be an approximate 47% reduction in carbon emissions across the whole region, according to the data of 2018. (4) Despite being restricted by limited land resources and the absence of an advanced transmission network or energy storage system, large-scale photovoltaic development is still a viable solution to energy supply issues. It still improves energy infrastructure, achieves the goal of carbon neutrality, and enhances the well-being of citizens in the context of global climate change and the new low-carbon economy.

Keywords: photovoltaics; suitability; power generation potential; carbon emission reduction; Beijing-Tianjin-Hebei region