

doi: 10.6046/zrzyyg.2022269

引用格式: 袁红, 易桂花, 张廷斌, 等. 基于遥感数据川西高原光伏开发适宜性研究[J]. 自然资源遥感, 2023, 35(4): 301–311.
(Yuan H, Yi G H, Zhang T B, et al. Suitability of photovoltaic development in the Western Sichuan Plateau based on remote sensing data[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(4): 301–311.)

基于遥感数据川西高原光伏开发适宜性研究

袁红¹, 易桂花², 张廷斌^{1,3}, 别小娟², 李景吉^{3,4}, 王国严², 徐永浩¹

(1. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059; 2. 成都理工大学旅游与城乡规划学院, 成都 610059;
3. 国家环境保护水土污染协同控制与联合修复重点实验室(成都理工大学),
成都 610059; 4. 成都理工大学生态环境学院, 成都 610059)

摘要: 随着我国光伏产业的快速发展, 盲目建设光伏电站问题日渐显现, 掌握区域光伏开发适宜性、发电潜力和减排效应对光伏产业健康发展具有重要意义。本研究基于遥感数据、气象数据和基础地理数据等构建光伏开发适宜性评价指标体系, 评估了川西高原光伏开发适宜性区域, 估算了光伏发电潜力和减排效应。结果表明, 光伏开发适宜性评估区域占川西高原总面积的 57.43%, 高适宜区面积约 $2.07 \times 10^4 \text{ km}^2$, 主要分布在川西高原西南和西北地区; 川西高原发电潜力巨大, 高适宜区全部开发情景下发电潜力为 17 197.97 亿 kWh, 相当于新型冠状病毒疫情发生前四川省 2019 年电力消费总量的 6.52 倍; 与传统火力发电相比, 高适宜区光伏发电每年潜在 CO_2 减排量为 12.45 亿 t, 约为我国 2019 年 CO_2 排放总量的 12.71%, 是四川省的 3.95 倍, 同时, 可减少大量煤炭、常规污染物和重金属的排放。研究结果为川西高原光伏电站选址和光伏产业的健康发展提供科学参考和指导建议。

关键词: 光伏发电; 减排效应; 适宜性; 层次分析法; 川西高原

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2023)04-0301-11

0 引言

联合国政府间气候变化专门委员会(intergovernmental panel on climate change, IPCC)发布的第六次评估报告第三工作组报告显示^[1], 1850 年以来二氧化碳(CO_2)累积净排放总量持续增加, 2010—2019 年全球温室气体(greenhouse gas, GHG)年均排放量达到人类历史最高水平。在现有计划的化石燃料基础设施服役期限内, 若不额外减排, 将无法完成全球温升控制在 1.5°C 以内的目标。抑制全球气候变化、减少 CO_2 排放刻不容缓。能源生产和消费相关活动会产生大量 CO_2 ^[2], 我国化石能源碳排放约占总排放量 80% 以上^[3], 是当前世界上最大的 CO_2 排放国^[4]。为应对 CO_2 增加导致气候变化和生态环境恶化的问题, 我国明确提出 2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和的目标^[5], 大力推动能源领域碳减排, 以加快构建现代能源体系^[2]。太阳能清洁无污染、取用不竭, 被认为是未来最具价值的能源

之一^[6]。

太阳能资源的评估是其开发利用的重要条件, 国内外学者对太阳能资源的时空分布特征、变化趋势和开发潜力等方面进行了大量研究^[7-10]; 太阳能资源的开发与利用主要包括光伏开发适宜性分析^[11-14]、光伏电站的选址研究^[15-16]和光伏发电潜力评估^[17-18]等方面。其中, 光伏开发适宜性分析是光伏电站建设的基础性工作^[13], 而光伏发电潜力评估有利于能源政策制定和光伏产业的健康发展^[18]。同时, 相关研究表明, 光伏发电有利于建设地区节能减排^[19-20]。2021 年 9 月底, 我国累计光伏装机容量为 2.78 亿 kW, 发电为 2 486 亿 kWh^[21]。然而, 在光伏产业迅速发展的同时, 盲目建设电站问题日渐显现, 如何选择合适的光伏电站厂址成为光伏开发的重要问题。

国外关于光伏开发适宜性的研究较多, 评价指标主要包括气象、地形、位置、植被和人文等方面^[11, 14, 22-23], 而国内研究多集中于气象、地形和位置等^[13, 20], 较少把植被、河流和保护区距离等作为评价指标。不同评价指标采用的数据有所不同, 遥

收稿日期: 2022-07-04; 修订日期: 2022-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目“气候变化与人类活动对若尔盖湿地景观格局影响的时空定量辨识”(编号: 41801099)资助。

第一作者: 袁红(2001-), 女, 硕士研究生, 主要从事资源与环境遥感研究。Email: yuanhong@stu.cdut.edu.cn。

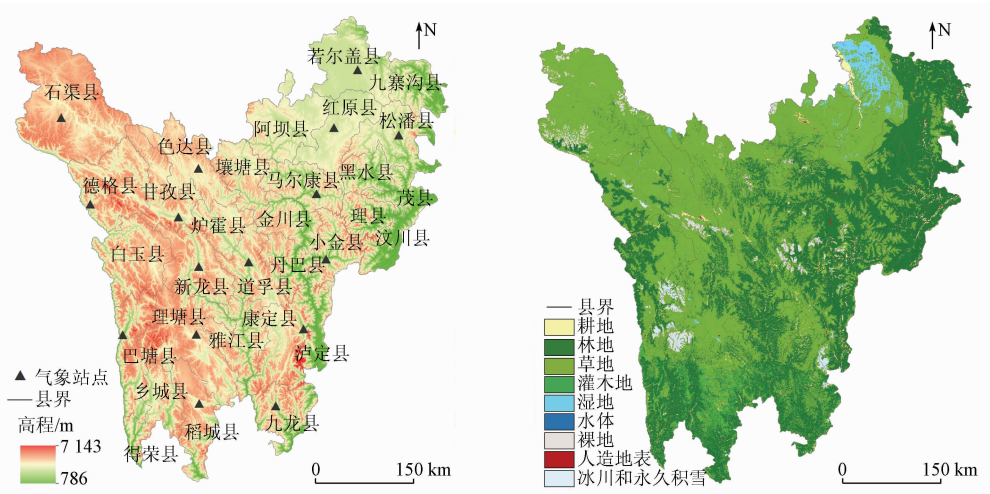
通信作者: 易桂花(1982-), 女, 博士, 教授, 主要从事环境遥感研究。Email: yigh@cdut.edu.cn。

感数据具有时间序列长、覆盖范围广和成本低等优势^[24],已有文献将其作为评价指标进行光伏开发相关研究^[11,13,20]。此外,光伏电站多建设在地形平坦的区域,忽视了发电潜力较高的山区和丘陵地带^[25],同时随着光伏电站装机规模不断增加,太阳能资源丰富、地形平坦和地理位置等优越的土地资源不断减少^[26]。《四川省“十四五”能源发展规划》^[27]强调重点推进三州一市光伏发电基地建设,“十四五”期间拟新增太阳能发电 1 000 万 KW 以上。鉴于此,本研究以川西高原为研究区,通过构建光伏开发适宜性评价指标体系,评估光伏开发适宜性区域,进而估算川西高原光伏发电潜力和减排效应。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

川西高原位于四川省西部,地理坐标范围为 N27°57′~34°11′,E97°21′~104°26′,区域面积约 $2.31 \times 10^5 \text{ km}^2$,包括甘孜藏族自治州和阿坝藏族羌族自治州的 31 个县。川西高原地处我国第一、二级阶梯过渡区,地形起伏较大,平均海拔约 3 980 m (图 1(a)),地势西北高、东南低。区内土地利用类型多样,包括耕地、林地和草地等 (图 1(b))。川西高原主要气候类型为寒温带气候,光照充足,气温较低,干湿季分明,降水较少。



(a) 研究区高程和气象站点分布

(b) 土地利用类型

图 1 研究区概况

Fig.1 General map of the study area

1.2 数据来源及处理

1) 遥感数据。整体水平辐照数据 (global horizontal irradiance, GHI) 来自 Global Solar Atlas 2.0 (<https://globalsolaratlas.info/>)。为多年平均数据,空间分辨率为 250 m,单位为 kWh/m^2 ,该数据由卫星遥感 (EUMETSAT 的 Meteosat 系列卫星和美国 NOAA 的 GOES 系列静止轨道气象卫星)、GIS 技术和一系列科学算法得到。NDVI (normalized difference vegetation index) 数据来源于 NASA (national aeronautics and space administration) (<https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>) 发布的 MODIS MOD13A1 产品,时间分辨率为 16 d,空间分辨率为 500 m,本研究使用 2000—2018 年的数据。30 m 空间分辨率全球地表覆盖数据 GlobeLand30 (<http://www.globallandcover.com>) 采用的分类影像为 30 m 多光谱影像,主要包括 Landsat, HJ-1 和 16 m 空间分辨率 GF-1。该数据分为耕地、湿地和草地等 10

个一级类型,耕地、湿地和人造地面等不适宜建设光伏电站,将数据重分类为限制区和非限制区 2 类,并剔除限制区。

2) 气象数据。川西高原周边 35 个气象站点 2000—2018 年的气温、日照时数和降水量逐日数据由中国气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn>) 提供。气温采用 Anusplin 法^[28],日照时数和降水量均采用 Kriging 插值法^[29-30]进行空间插值。

3) 基础地理要素数据。道路、居民点、河流和保护区数据来源于 1:100 万全国基础地理数据库 (全国地理信息资源目录服务系统, <https://www.webmap.cn>)。通过欧氏距离分析,获得不同基础地理要素图层。

4) 地形数据。DEM (digital elevation model) 数据来自地理空间数据云平台 (<https://www.gscloud.cn/>) 的 SRTM (shuttle Radar topography mission),空间分辨率为 90 m,利用 DEM 生成坡度、坡

向数据。川西高原海拔 5 000 m 以上的区域大多为永久性冰川覆盖区^[31],将 5 000 m 以上高程区域设置为限制区予以剔除。

5)社会经济数据。2019 年四川省电力消费来自四川省统计年鉴^[32]。

本研究所使用的数据(DEM, GHI 和 NDVI 等)均经过投影变换、裁剪、重采样等数据处理,地理参考为 WGS_1984_UTM_zone_47N,空间分辨率统一为 500 m × 500 m。

1.3 评价指标选取

光伏电站建设受到诸多因素影响,选取气象、地形、位置和植被作为一级指标,进一步将一级指标分为若干二级指标。气象指标包括太阳辐射、气温、日照时数和降水量 4 个二级指标。太阳辐射是评价光伏开发适宜性的重要指标,直接决定了光伏电站的发电量。日照时数会影响太阳能资源稳定度。气温和降水量间接影响太阳辐射,从而降低电站发电效率。地形分为坡度和坡向 2 个指标。坡度、坡向对太阳辐射和日照时数产生很大影响,川西高原位于北半球,南向和平面所获取的太阳辐射值较大,坡度和海拔高低则会影响建设成本和运维难度。居民点距离、河流距离、道路距离和保护区距离属于位置指标。距居民点距离越近,越靠近消费市场,可减少电

力运输成本和运输带来的电力损耗。光伏电站运行中,太阳能电池表面尘埃会降低光伏电站工作效率^[13],定期对光伏电站表面清洗耗水量较大,故河流距离越近越好。道路距离则影响光伏电站前期修建以及后期运营维护。作为我国西部重要的生态屏障,川西高原各类自然保护区 50 余处,是四川省重要的生态保护红线区^[33]和旅游开发胜地^[34],光伏电站建设应避开保护区位置。NDVI 为植被的二级指标,NDVI 大小表示研究区植被覆盖度情况。NDVI 值范围在[-1,1]之间,小于或等于 0,代表无植被覆盖;值越接近 1,植被覆盖度越高。光伏电站的建设宜选择植被覆盖度低的地区,以保护川西高原的生物多样性。

2 研究方法

2.1 层次分析法

层次分析法将研究问题划分为若干层次,每个层次再分解为多个指标,通过计算得出各层次指标权重,从而确定各指标的重要程度^[35]。若某层次有 n 个指标,根据 9 级标度法^[36]两两比较指标的重要程度,构建判断矩阵 P ,即:

$$P = (P_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ 1/P_{12} & 1 & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1/P_{1n} & 1/P_{2n} & \cdots & 1 \end{bmatrix}, \tag{1}$$

式中: P_{ij} 为第 i 个指标相对于第 j 个指标的重要性程度判断值; $P_{ji} = 1/P_{ij} (i, j = 1, 2, \cdots, n)$; n 为指标个数。若 $i = j$, $P_{ij} = P_{ji} = 1$ 。

采用特征值法求解最大特征根及特征向量,再对判断矩阵进行一致性检验,公式为:

$$CR = \frac{CI}{RI}, \tag{2}$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \tag{3}$$

式中: CR 为一致性比率; RI 为随机一致性指标(表 1); CI 为一致性指标; $\lambda_{\max}$ 为最大特征根。若 $CR < 0.1$,表示通过一致性检验,对特征向量归一化处理得到指标权重,否则需对判断矩阵进行修正。

表 1 随机一致性指标
Tab.1 Random consistency index

n	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41

本研究运用层次分析法对一、二级指标构建判断矩阵,最终得到各指标的权重(表 2)。

表 2 研究区光伏开发适宜性评价指标及其权重

Tab.2 Evaluation index and its weight of photovoltaic development suitability analysis in the study area

目标层	一级指标	权重 W_k	二级指标	权重 W_{kl}
气象 A_1	0.55		太阳辐射 A_{11}	0.51
			气温 A_{12}	0.15
			日照时数 A_{13}	0.26
			降水量 A_{14}	0.08
光伏开发 A	地形 A_2	0.23	坡度 A_{21}	0.67
			坡向 A_{22}	0.33
位置 A_3	0.14		道路距离 A_{31}	0.28
			居民点距离 A_{32}	0.50
			保护区距离 A_{33}	0.15
			河流距离 A_{34}	0.07
植被 A_4	0.08		NDVI A_{41}	1.00

2.2 太阳能资源稳定度计算

按中华人民共和国气象行业标准(QX/T 89—2008)^[37],根据太阳总辐射量评估太阳能资源丰富程度(表 3)。以日照时数大于 6 h 天数的最大与最小值之比来评估太阳能资源稳定程度,比值越低,稳定程度越好(表 4),计算公式为^[38]:

$$K = \frac{\max(Day_1, Day_2, \dots, Day_{12})}{\min(Day_1, Day_2, \dots, Day_{12})}, \quad (4)$$

式中： K 为太阳能资源稳定度； $\max()$ 和 $\min()$ 表示最大和最小值的标准函数； $Day_1, Day_2, \dots, Day_{12}$ 分别为 1—12 月各月日照大于 6 h 的天数。

表 3 太阳能资源丰富程度分级

Tab. 3 Classification of solar energy resources richness

年总辐射量/(kWh·m ⁻²)	分级	分级编号
≥1 750	最丰富	I
[1 400, 1 750)	很丰富	II
[1 050, 1 400)	较丰富	III
<1 050	一般	IV

表 4 太阳能资源稳定程度分级

Tab. 4 Classification of solar energy resources stability

太阳能资源稳定度指标	稳定程度
<2	稳定
[2, 4]	较稳定
>4	不稳定

2.3 光伏开发适宜性计算

太阳辐射、日照时数和保护区距离为极大型指

$$SEGP = ASR \ SA \ AF \ PE \ (1 - LO) \ (1 - AP), \quad (6)$$

式中： $SEGP$ 为光伏发电潜力, kWh； ASR 为年平均太阳总辐射, kWh·m⁻²； SA 为适合光伏开发的占地面积, m²； AF 为面积因子, 表示区域内太阳能可利用比例, 本研究取值为 0.35； PE 为电池板的发电效率, 光伏板的种类会影响总能量的输出, 本研究采用多晶硅光伏板发电效率, 取值为 16.5%； LO 为损耗率, 本研究取值为 7.5%^[40]； AP 为弃光率, 本研究取值为 3% (<http://www.nea.gov.cn/>)。

2.5 CO₂减排潜力估算

本研究不考虑光伏电站生命周期其他阶段(光伏部件制造和建设等)的影响, 采用光伏发电潜力作为发电量估算 CO₂减排潜力^[41], 公式为:

$$C = SEGP \ EF, \quad (7)$$

式中： C 为 CO₂减排潜力； EF 为 CO₂排放因子, 川

标, 值越高, 则分级越高; 而极小型指标与其相反, 气温、降水量、坡度、道路距离、居民点距离、河流距离和 NDVI 属于极小型指标^[11-12, 39]; 坡向属于区间型指标, 表示落在某个区间内最好, 南向和平面分级最高, 北向分级最低。各二级指标分为 1~10 级, 极大和极小型指标采用等间隔距离法分级, 区间型指标根据坡度朝向进行分级^[13]。利用分级后的太阳辐射、日照时数和气温等二级指标图层与一、二级指标权重计算光伏开发适宜性指数^[11], 计算公式为:

$$S = \sum_{k=1}^r [W_k \sum_{l=1}^s (W_{kl} G_{kl})], \quad (5)$$

式中： S 为光伏开发适宜性指数； W_k 为第 k 个一级指标的权重 ($k=1, 2, \dots, r$)； r 为一级指标个数； W_{kl} 为第 k 个一级指标下第 l 个二级指标的权重 ($l=1, 2, \dots, s$)； s 为一级指标下二级指标个数； G_{kl} 为第 k 个一级指标下第 l 个分级后的二级指标。

2.4 光伏发电潜力估算

发电潜力评估是光伏电站建设前的重要环节, 计算公式为^[20]:

西高原属于华中区域电网, 故本研究取值为 0.724 2 tCO₂/MWh^[42-43]。

3 结果与分析

3.1 太阳能资源分析

川西高原各县年太阳总辐射多年平均值在 575.64~1 941.3 kWh/m²之间(图 2(a)), 年辐射值在 1 400 kWh/m² 以上的有乡城县、得荣县和理塘县等 25 个县, 其中乡城县年总辐射量最大 1 675 kWh/m²。川西高原太阳能资源丰富程度(图 2(b))大致呈现出西高东低的特点, 理塘县、巴塘县和稻城县等县为太阳能资源最丰富地区。资源很丰富地区分布范围较广, 包括川西高原西部、北部和南部大部分地区, 资源较丰富和不丰富地区主要分布在川西高原

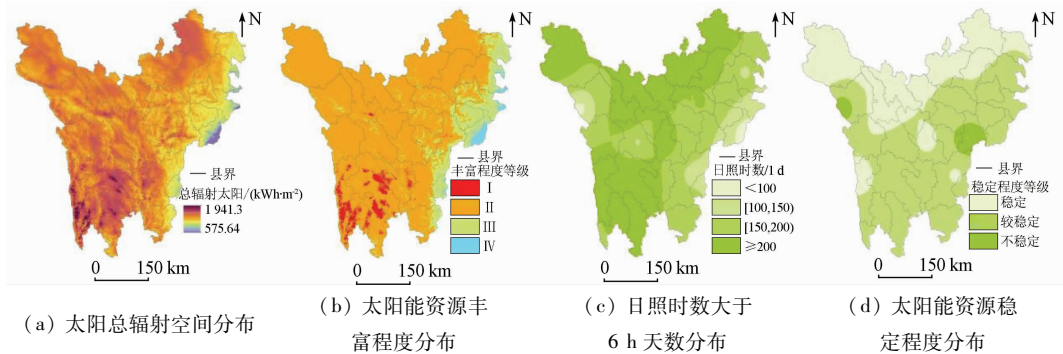


图 2 研究区太阳能资源分布

Fig. 2 Distribution of solar energy resources in the study area

东部。年内日照时数大于 6 h 的天数统计结果表明(图 2(c)),川西高原除德格县西部和汶川县东部以外,日照时数大于 6 h 的天数均在 100 d 以上,其中北部、西北部以及西南部地区大于 200 d。川西高原太阳能资源稳定程度分布中(图 2(d)),不稳定区域位于德格县西部和小金县东部,北部为稳定地区,其余地区为较稳定地区,分布范围最广。

3.2 评价指标分级及分布规律

川西高原太阳辐射分级整体上表现为西部高于东部的空间分布特征(图 3(a)),西南部的理塘县、雅江县、稻城县、巴塘县一带和北部的石渠县、色达县、甘孜县、若尔盖县分级高。太阳辐射分级较低区主要分布在川西高原东部,包括泸定县、汶川县、茂县东南部、松潘县东部和九寨沟县。川西高原气温(图 3(b))和降水量(图 3(c))指标分级呈东南向西北逐渐增加的趋势。日照时数(图 3(d))总体分级较高,但分布不均匀。理塘县中部、稻城县北部、乡城县东北部、理塘县与雅江县交界处以及石渠县北部日照时数长,分级高。而川西高原东部和德格县西部等 10 个县域日照时数较短,属于低分级区,其中日照时数最短地区出现在汶川县东南部。坡度

(图 3(e))分级较高区域主要分布在川西高原东北部的红原县和若尔盖县一带的沼泽化高平原、石渠县和色达县丘状高原、巴塘县、白玉县和理塘县交界处的沙鲁里山丘状高原以及康定县西部丘状高原等地区,其余地区坡高谷深,分级较低。川西高原位于北半球,坡向指标分级(图 3(f))南方向和平面所对应的指标分级最大,北方向对应的分级最小。道路距离(图 3(g))、居民点距离(图 3(h))和河流距离分级(图 3(i))都较密集,差别较小。川西高原保护区较多,大部分地区离保护区位置近,分级较低(图 3(j))。NDVI 分级较高的区域(图 3(k))多分布在高海拔区域,包括石渠县东北部和西南部、德格县中部、甘孜县南部、新龙县与白玉县交界边缘、理塘县与巴塘县交界处、康定县南部、黑水县与红原县交界处、松潘县东部、九寨沟县南部以及小金县、理县和汶川县的交界地带。而分级较低区域多出现在海拔 3 000 m 以下的东部和南部地区,主要分布在泸定县东部、丹巴县东部、雅江县中部、九寨沟县东部、若尔盖县西南部以及大渡河、雅砻江和岷江流域。总体而言,各二级评价指标空间分布特征差异明显。

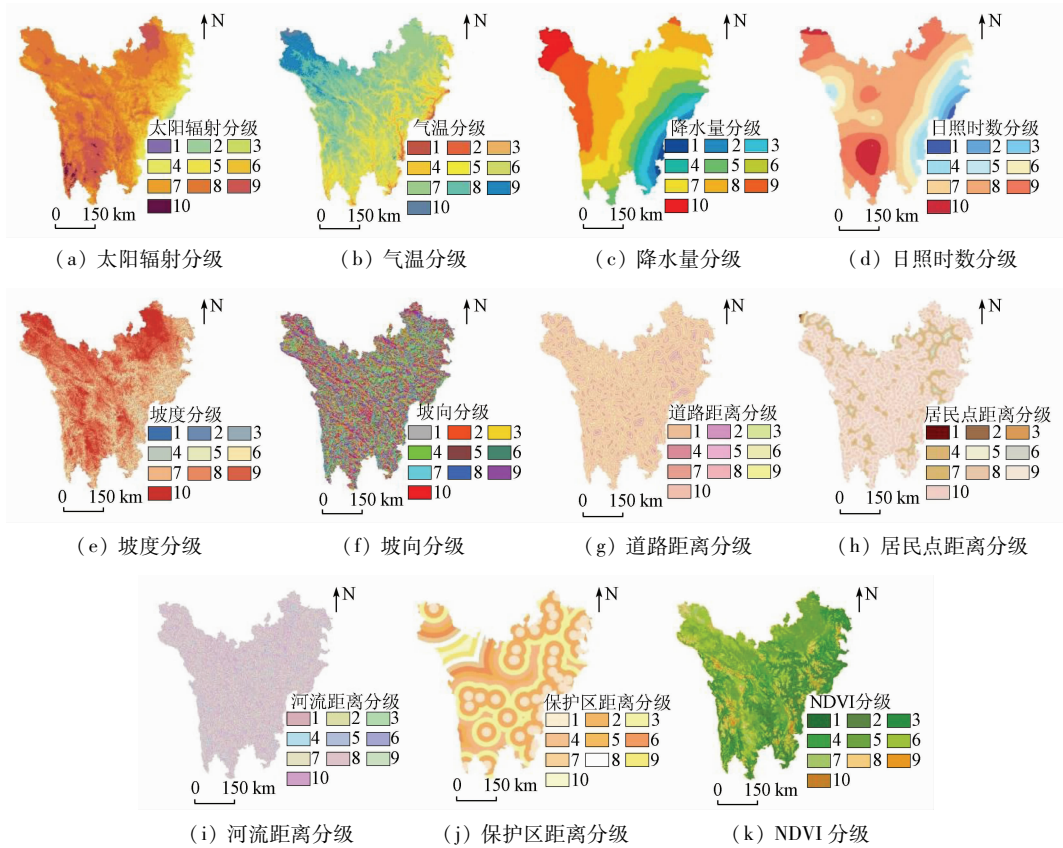


图 3 研究区光伏开发适宜性评价二级指标分级(图例数字代表分级序数)

Fig. 3 Classification of the secondary indicators of photovoltaic development suitability analysis in the study area

3.3 光伏开发适宜性分析

剔除限制区后,光伏开发适宜性评估区域占川

西高原总面积的 57.43%,光伏开发适宜性指数范围在(3.64,9.26)之间,主要表现为西高东低的空

间分布特征。依据等间隔距离法将该指数划分为低适宜(3.64,4.76]、较低适宜(4.76,5.89]、适宜(5.89,7.01]、较高适宜(7.01,8.13]和高适宜(8.13,9.26)5级(图4)。低适宜区面积约占研究区总面积的0.10%,较低适宜区面积约占研究区总面积的1.29%。低适宜区和较低适宜区分布相对较少,主要分布在川西高原东部边缘各县域;适宜区、较高适宜区面积占比分别为7.65%和39.43%,适宜区分布范围最广,在川西高原各县均有分布。较高适宜区面积占比最大,分布范围包括川西高原中部、西部、西北部和北部地区,其中,石渠县较高适宜区面积最大;高适宜区面积约 $2.07\times10^4\text{ km}^2$,面积占比为8.96%,主要分布在川西高原西南和西北地区,西南部包括理塘县、稻城县北部、雅江县西北部、乡城县和巴塘县部分地区,西北部为石渠县、色达县和甘孜县,东北部若尔盖县分布较多,其他县域也有少量分布。石渠县高适宜区面积最大,理塘县

次之(图5)。高程限制区涉及理塘县西部、巴塘县中部、泸定县和康定县交界处、石渠县西南部、德格县中部和甘孜县南部;土地覆盖限制区主要分布在川西高原东部、南部和西部部分县域。

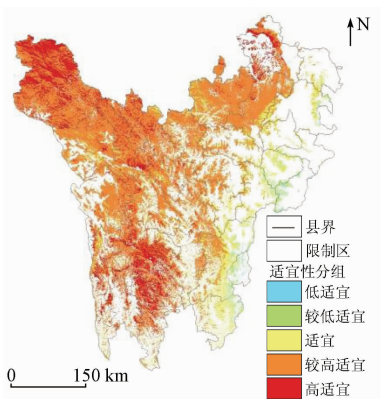


图4 研究区光伏开发适宜性分级

Fig.4 Classification of photovoltaic development suitability of the study area

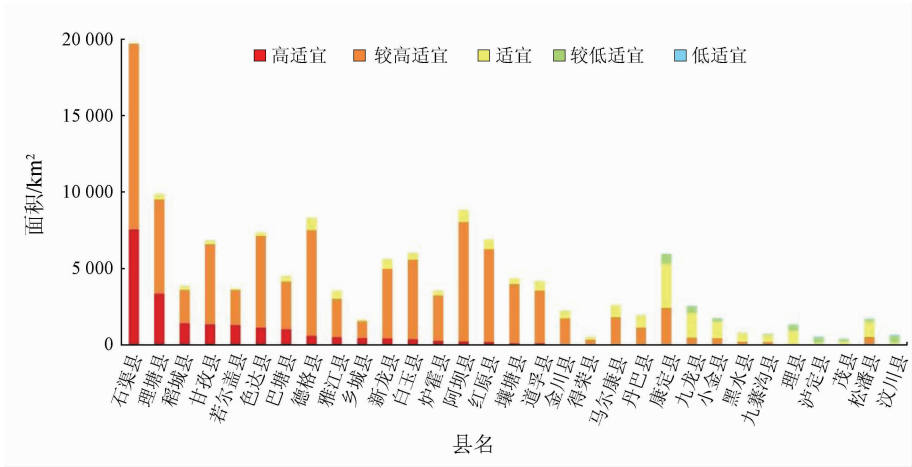


图5 研究区不同县域光伏开发适宜性分级面积

Fig.5 Photovoltaic development suitability classification area in different counties of the study area

高适宜区光伏开发优势明显,是最佳光伏电站建设场所,区内植被覆盖度较低,土地利用类型主要以草地为主,用地成本较低,年太阳总辐射在 $1\,300\text{ kWh/m}^2$ 以上,年日照时数高于 $1\,500\text{ h}$,保障了发电量和发电效率,坡度相对缓和,位于 $0\sim33.92^\circ$ 之间,有利于大规模集中式光伏电站建设,距居民点和道路距离适中有利于降低建设和运维成本,河流距离较近保证充足水源对光伏电站表面定期清洗,同时避开了保护区位置。较高适宜区和适宜区用地类型主要为草地,年太阳总辐射较强(869 kWh/m^2 以上),年日照时数较长($1\,000\text{ h}$),坡度较为平缓,距居民点、主要道路、河流以及保护区距离较为适中,光伏开发的优势较为明显。较低适宜区和低适宜区,年总太阳辐射和平均日照时数条件相对较差,坡度较陡,不适宜大规模光伏建设,距居民点和主要道路距离较远增加了光伏建设成本,河流距离较远、保护区距离

太近对光伏表面清洁以及研究区生态保护造成一定影响。

3.4 发电潜力和减排效应分析

川西高原光伏发电潜力整体上西部高于东部地区,高适宜区全部开发情景下发电潜力为 $17\,197.97$ 亿 kWh ,相当于新型冠状病毒疫情发生前四川省2019年电力消费总量的6.52倍,开发利用15.33%,即可满足2019年四川省的全年用电需求。县域层面(表5),石渠县发电潜力最大,达到 $6\,203.25$ 亿 kWh ,其次为理塘县,小金县发电潜力较小,为0.38亿 kWh 。九寨沟县、潘松县和黑水县等东部7个县不具有光伏发电潜力。新型冠状病毒疫情发生前,2019年我国 CO_2 排放总量为97.95亿 t ,四川省为3.15亿 t ^[44-47]。高适宜区全部开发情景下 CO_2 减排潜力为12.45亿 t (表6),约为我国2019年 CO_2 排放总量的12.71%,是四川省的3.95倍。传统火力

发电每发电 1 kWh,对应消耗标准煤 0.335 kg,同时排放二氧化硫(SO₂)0.03 kg、炭粉灰 0.272 kg、氮氧化物(NO_x)0.015 kg^[48]。川西高原高适宜区光伏资源 100% 开发利用情景下(表 7),可节约 5.76 亿 t 标准煤,减排炭粉灰 4.68 亿 t,SO₂0.52 亿 t 和 NO_x0.26 亿 t;参考卢霞^[48]对荒漠戈壁区光伏电站建设重金属减排效应的研究,川西高原高适宜区多晶硅电池板重金属 As,Cr,Pb,Hg,Ni,Cd 减排量分别约为 2 875.50 t,6 902.41 t,7 441.56 t,83.41 t,8 061.89 t 和 114.8 t(表 8)。

表 5 各县高适宜区光伏发电潜力
Tab.5 Photovoltaic power generation potential in high suitable areas in some counties (亿 kWh)

县名	发电潜力	县名	发电潜力
石渠县	6 203.25	炉霍县	230.61
理塘县	2 886.88	阿坝县	191.06
稻城县	1 218.30	红原县	166.31
甘孜县	1 114.34	壤塘县	107.74
若尔盖县	1 092.23	道孚县	103.93
色达县	943.05	金川县	24.48
巴塘县	884.99	得荣县	20.09
德格县	481.37	马尔康县	17.90
雅江县	431.86	丹巴县	16.96
乡城县	383.20	康定县	9.09
新龙县	362.06	九龙县	1.14
白玉县	306.76	小金县	0.38

表 6 高适宜区不同开发强度情景下发电潜力和 CO₂减排潜力

Tab.6 Potentials of power generation and CO₂ emission reduction under different development intensity scenarios in high suitable areas

开发比例/%	发电潜力/亿 kWh	CO ₂ /亿 t
100	17 197.97	12.45
75	12 898.48	9.34
50	8 598.99	6.23
25	4 299.49	3.11

表 7 高适宜区不同开发强度情景下煤炭与常规污染物减排潜力

Tab.7 Potentials of emission reduction of coal and conventional pollutants under different development intensity scenarios in high suitable area (亿 t)

开发比例/%	标准煤	炭粉灰	SO ₂	NO _x
100	5.76	4.68	0.52	0.26
75	4.32	3.51	0.39	0.19
50	2.88	2.34	0.26	0.13
25	1.44	1.17	0.13	0.06

表 8 高适宜区不同开发强度情景下重金属减排潜力
Tab.8 Potentials of heavy metal emission reduction under different development intensity scenarios in high suitable area (t)

开发比例/%	As	Cr	Pb	Hg	Ni	Cd
100	2 875.50	6 902.41	7 441.56	83.41	8 061.89	114.8
75	2 156.63	5 176.81	5 581.17	62.56	6 046.42	86.1
50	1 437.75	3 451.20	3 720.78	41.71	4 030.95	57.4
25	718.88	1 725.60	1 860.39	20.85	2 015.47	28.7

4 讨论与结论

4.1 讨论

川西高原发电潜力巨大,预期节能减排效果显著。然而,光伏开发挑战与机遇并存。川西高原属于少数民族地区,人口少,电力供过于求,容易产生电力消纳问题。此外,川西地区电网及其配套设施薄弱,电力输送困难。《四川省“十四五”能源发展规划》^[27]提出“优化布局三州一市送出通道,实施 500 kV 输变电加强工程”的重要部署。规划实施有望促进川西能源基础设施建设,进而缓解东部电力紧张问题,促进川西地区融入东部地区经济发展。同时,光伏发电存在间歇性、波动性和发电不稳定的缺点。近年来,中央和各级地方政府颁布了一系列利好政策,包括建设抽水蓄能电站、优化电力调度机制等^[27]。将推动川西高原光伏产业快速发展,有望弥补光伏发电的不足。

受海拔地形因素影响,川西高原光伏电站建设难度较大。随着技术水平大幅提升,在地形复杂地区开展电站建设成为可能^[26],四川省甘孜州乡城县已于 2022 年 10 月建成投产全球第一个超高海拔光伏实证基地项目,预计年发电量约 7.74 亿 kWh^[49]。我国西部地区太阳能资源丰富,但自然环境较为恶劣,需通过科技创新不断提高技术水平,降低建设运营成本,将资源禀赋转变为发展优势。

已有研究表明,大规模建设光伏电站会对自然环境^[50]、生物多样性^[51]和气候^[52-53]等方面造成一定的影响,其影响存在于光伏电站不同生命阶段(建设、运行、报废)^[54]。翟波等^[51]认为草原地区光伏电站的建设会影响当地自然环境和植物群落特征;而王涛等^[55]认为光伏板的遮阴作用有利于耐荫性植物生长。光伏电站的布设也可以增加相对湿度、改变风向、降低风速和土壤温度等^[52]。川西高原生态环境脆弱,如何在破坏生态环境的情况下建设光伏电站?光伏电站建设对地表、植被和区域小气候会产生怎样的影响?其影响是正向还是负向?亟待解决。此外,居民态度、变电站距离、技术等其他因素在一定程度上也会影响光伏电站选址,在今后研究中,需拓展评价指标体系以确保分析结果更加客观合理。

4.2 结论

本研究围绕光伏开发适宜性、发电潜力和减排效应展开相关研究,主要结论如下:

1)川西高原光伏电站建设高适宜区面积约 2.07 × 10⁴ km²,主要分布在川西高原西南和西北地

区。石渠县高适宜区面积最大,理塘县次之。高适宜区年太阳总辐射值在 1 300 kWh/m²以上,年日照时数高于 1 500 h。

2) 川西高原发电潜力巨大,高适宜区全部开发情景下发电潜力为 17 197.97 亿 kWh,相当于新型冠状病毒疫情发生前四川省 2019 年电力消费总量的 6.52 倍,开发利用 15.33% 即可满足四川省 2019 年的全年用电需求。

3) 与传统火力发电相比,川西高原高适宜区光伏发电每年潜在 CO₂ 减排量为 12.45 亿 t,约为新型冠状病毒疫情发生前我国 2019 年 CO₂ 排放总量的 12.71%,是四川省的 3.95 倍。同时,可节约 5.76 亿 t 标准煤,减排炭粉灰 4.68 亿 t,SO₂ 0.52 亿 t,NO_x 0.26 亿 t,重金属 As,Cr,Pb,Hg,Ni,Cd 减排量分别为 2 875.50 t,6 902.41 t,7 441.56 t,83.41 t,8 061.89 t,114.8 t。

参考文献 (References):

[1] IPCC. Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the sixth assessment report of the IPCC[R]. New York: Cambridge University Press, 2022.

[2] 国家发改委,国家能源局. 关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见(发改能源[2022]206号)[EB/OL]. (2022-1-30)[2022-06-20]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202202/t20220210_1314511.html. National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Policies and measures to improve the mechanism for a green-oriented transition of energy [EB/OL]. (2022-1-30)[2022-06-20]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202202/t20220210_1314511.html.

[3] 杨俊峰,李博洋,霍婧,等. “十四五”中国光伏行业绿色低碳发展关键问题分析[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(12): 57-62.

Yang J F, Li B Y, Huo J, et al. Analysis on key issues of green and low-carbon development in Chinese photovoltaic industry during the 14th Five-Year plan period[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2021(12): 57-62.

[4] 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.

Hu A G. China's goal of achieving carbon peak by 2030 and its main approaches[J]. Journal of Beijing University of Technology (Social Sciences Edition), 2021, 21(3): 1-15.

[5] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[EB/OL]. (2020-09-22)[2020-06-20]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2020/content_5549875.htm.

Xi J P. Speech at the general debate of the 75th session of the United Nations General Assembly[EB/OL]. (2020-09-22)[2020-06-20]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2020/content_5549875.htm.

[6] 李柯,何凡能. 中国陆地太阳能资源开发潜力区域分析[J]. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1049-1054.

Li K, He F N. Analysis on mainland China's mainland's solar energy distribution and potential to utilize solar energy as an alternative energy source[J]. Progress in Geography, 2010, 29(9): 1049-1054.

[7] Stanhill G, Cohen S. Solar radiation changes in the United States during the twentieth century: Evidence from sunshine duration measurements[J]. Journal of Climate, 2005, 18(10): 1503-1512.

[8] Tang W J, Yang K, Qin J, et al. First effort for constructing a direct solar radiation data set in China for solar energy applications[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(3): 1724-1734.

[9] Feng Y, Zhang X L, Jia Y, et al. High-resolution assessment of solar radiation and energy potential in China[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 240: 114265.

[10] 刘淳,任立清,李学军,等. 1990—2019 年中国北方沙区太阳能资源评估[J]. 高原气象, 2021, 40(5): 1213-1223.

Liu C, Ren L Q, Li X J, et al. Evaluation to the solar energy resources in the sandy regions of northern China from 1990 to 2019[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(5): 1213-1223.

[11] Doljak D, Stanojević G. Evaluation of natural conditions for site selection of ground-mounted photovoltaic power plants in Serbia[J]. Energy, 2017, 127: 291-300.

[12] Merrouni A A, Elaloui F E, Ghennioui A, et al. A GIS-AHP combination for the sites assessment of large-scale CSP plants with dry and wet cooling systems. Case study: Eastern Morocco[J]. Solar Energy, 2018, 166: 2-12.

[13] 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[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(1): 119-127.

Zhang Q, Xin X Z, Zhang H L, et al. Suitability analysis of photovoltaic power plants in China using remote sensing data and multi criteria evaluation[J]. Journal of Geo-Information Science, 2018, 20(1): 119-127.

[14] Mensour O N, El Ghazzani B, Hlimi B, et al. A geographical information system-based multi-criteria method for the evaluation of solar farms locations: A case study in Souss-Massa area, southern Morocco[J]. Energy, 2019, 182: 900-919.

[15] Sánchez-Lozano J M, García-Cascales M S, Lamata M T. Comparative TOPSIS-ELECTRE TRI methods for optimal sites for photovoltaic solar farms. Case study in Spain[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 127: 387-398.

[16] Wang S H, Zhang L F, Fu D J, et al. Selecting photovoltaic generation sites in Tibet using remote sensing and geographic analysis[J]. Solar Energy, 2016, 133: 85-93.

[17] Sabo M L, Mariun N, Hizam H, et al. Spatial matching of large-scale grid-connected photovoltaic power generation with utility demand in Peninsular Malaysia[J]. Applied Energy, 2017, 191: 663-688.

[18] Qiu T Z, Wang L C, Lu Y B, et al. Potential assessment of photovoltaic power generation in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 154: 111900.

[19] Liu F, Lyu T. Assessment of geographical distribution of photovoltaic generation in China for a low carbon electricity transition[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 212: 655-665.

[20] 刘立程,孙中孝,吴 锋,等. 京津冀地区光伏开发空间适宜性及减排效益评估[J]. 地理学报,2022,77(3):665-678.
Liu L C, Sun Z X, Wu F, et al. Evaluation of suitability and emission reduction benefits of photovoltaic development in Beijing - Tianjin - Hebei region [J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77 (3):665-678.

[21] 国家能源局. 国家能源局2021年四季度网上新闻发布会文字实录[EB/OL]. (2021-11-08)[2022-06-20]. http://www.nea.gov.cn/2021-11/08/c_1310298464.htm.
National Energy Administration. Transcript of the online press conference of the National Energy Administration in the fourth quarter of 2021 [EB/OL]. (2021-11-08)[2021-06-20]. http://www.nea.gov.cn/2021-11/08/c_1310298464.htm.

[22] Zoghi M, Ehsani A H, Sadat M, et al. Optimization solar site selection by fuzzy logic model and weighted linear combination method in arid and semi-arid region: A case study Isfahan - IRAN [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 68:986-996.

[23] Potić I, Golić R, Joksimović T. Analysis of insolation potential of Knjaževac Municipality (Serbia) using multi-criteria approach [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 56:235-245.

[24] 陈 静,陈静波,孟 瑜,等. 尺度和密度约束下基于YOLOv3的风电塔架遥感检测方法[J]. 自然资源遥感,2021,33(3):54-62. doi:10.6046/zrzyyg.2020309.
Chen J, Chen J B, Meng Y, et al. Detection of wind turbine towers in remote sensing based on YOLOv3 model under scale and density constraints [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33 (3):54-62. doi:10.6046/zrzyyg.2020309.

[25] 郭 鹏,申彦波,陈 峰,等. 光伏发电潜力分析——以山西省为例[J]. 气象科技进展,2019,9(2):78-83.
Guo P, Shen Y B, Chen F, et al. The analysis of PV electricity generation potential: A case study in Shanxi [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2019, 9(2):78-83.

[26] 丁一凡. 山地光伏电站设计和运维若干关键问题研究[D]. 杭州:浙江大学,2021.
Ding Y F. Research on several key issues in the design and maintenance of mountainous photovoltaic farms [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.

[27] 四川省人民政府. 四川省“十四五”能源发展规划(川府发[2022]8号)[EB/OL]. (2022-03-03)[2022-06-20]. <https://www.sc.gov.cn/10462/zfwjts/2022/3/4/f09dbec42f7349589d042145437004a6.shtml>.
The People's Government of Sichuan Province. The 14th Five-Year plan for energy development in Sichuan Province [EB/OL]. (2022-03-03)[2022-06-20]. <https://www.sc.gov.cn/10462/zfwjts/2022/3/4/f09dbec42f7349589d042145437004a6.shtml>.

[28] 易桂花,张廷斌,何奕萱,等. 四种气温空间插值方法适用性分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2020,47(1):115-128.
Yi G H, Zhang T B, He Y X, et al. Applicability analysis of four spatial interpolation methods for air temperature [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition), 2020, 47(1):115-128.

[29] 于海敬,陈庭甫,张庆国,等. 基于空间插值技术的西藏日照时数时空变化特征及其影响因素[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2019,45(1):75-84.
Yu H J, Chen T F, Zhang Q G, et al. Temporal-spatial change characteristics of sunshine duration in Tibet based on spatial interpolation technique and its influence factors [J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2019, 45(1):75-84.

[30] 谢慧君,张廷斌,易桂花,等. 川西高原植被NDVI动态变化特征及对气候因子的响应[J]. 水土保持通报,2020,40(4):286-294,328.
Xie H J, Zhang T B, Yi G H, et al. Dynamic characteristics of NDVI values and its response to climatic factors in Western Sichuan Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40 (4):286-294,328.

[31] 荣 欣,易桂花,张廷斌,等. 2000—2015年川西高原植被EVI海拔梯度变化及其对气候变化的响应[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(12):3014-3028.
Rong X, Yi G H, Zhang T B, et al. Change of vegetation EVI with altitude gradient and its response to climate change in the Western Sichuan Plateau from 2000 to 2015 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(12):3014-3028.

[32] 四川省统计局,国家统计局四川调查总队. 四川统计年鉴(2020年)[M]. 北京:中国统计出版社,2020.
Sichuan Provincial Bureau of Statistics, The Sichuan survey general team of the national bureau of statistics. Sichuan statistical yearbook (2020) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.

[33] 裴志方. 川西高原植被覆盖度景观格局动态变化研究[D]. 成都:成都理工大学,2018.
Pei Z F. The dynamic change of landscape pattern of vegetation coverage in Western Sichuan Plateau [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.

[34] 张 良,张文秀. 川西高原区农村可持续发展评价[J]. 农村经济,2004,22(s1):48-51.
Zhang L, Zhang W X. Evaluation of rural sustainable development in Western Sichuan Plateau area [J]. Rural Economy, 2004, 22 (s1):48-51.

[35] 樊宁宁. 基于层次分析法的河北省城市宜居性评价[D]. 石家庄:河北经贸大学,2022.
Fan N N. Evaluation of urban livability in Hebei Province based on analytic hierarchy process [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Economics and Business, 2022.

[36] Saaty T L. Decision making with the analytic hierarchy process [J]. International Journal of Services Sciences, 2008, 1(1):83-98.

[37] 中国气象局. QX/T 89—2008 太阳能资源评估方法[S]. 北京:气象出版社,2008.
China Meteorological Administration. QX/T 89—2008 Assessment method for solar energy resources [S]. Beijing: China Meteorological Press, 2008.

[38] 钟燕川,马振峰,徐金霞,等. 基于地形分布式模拟的四川省太阳能资源评估[J]. 西南大学学报(自然科学版),2018,40(7):115-121.
Zhong Y C, Ma Z F, Xu J X, et al. Assessment of solar energy resource in Sichuan based on distributed modeling on rugged terrains [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition),

2018,40(7):115–121.

[39] 肖建华,姚正毅,孙家欢. 并网太阳能光伏电站选址研究述评[J]. 中国沙漠,2011,31(6):1598–1605.

Xiao J H, Yao Z Y, Sun J H. Review on optimal site selection for grid-connected solar photovoltaic plants[J]. Journal of Desert Research,2011,31(6):1598–1605.

[40] Li X, Mauzerall D L, Bergin M H. Global reduction of solar power generation efficiency due to aerosols and panel soiling[J]. Nature Sustainability,2020,3(9):720–727.

[41] Wang Y, Zhou S, Huo H. Cost and CO₂ reductions of solar photovoltaic power generation in China: Perspectives for 2020[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2014,39:370–380.

[42] 中华人民共和国生态环境部. 2018 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子[S]. 2018.

Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. China's regional power grid baseline emission factor for 2018 emission reduction projects[S]. 2018.

[43] 国家发改委. CM-001-V02 可再生能源并网发电方法学(第二版)[S]. 2016.

National Development and Reform Commission. CM-001-V02 Methods of grid-connected power generation of renewable energy sources[S]. 2016.

[44] Guan Y R, Shan Y L, Huang Q, et al. Assessment to China's recent emission pattern shifts[J]. Earth's Future, 2021, 9(11): e2021EF002241.

[45] Shan Y L, Huang Q, Guan D B, et al. China CO₂ emission accounts 2016—2017[J]. Scientific Data,2020,7:54.

[46] Shan Y L, Guan D B, Zheng H R, et al. China CO₂ emission accounts 1997—2015[J]. Scientific Data,2018,5:170201.

[47] Shan Y L, Liu J H, Liu Z, et al. New provincial CO₂ emission inventories in China based on apparent energy consumption data and updated emission factors[J]. Applied Energy,2016,184:742–750.

[48] 卢霞. 荒漠戈壁区光伏电站建设的环境效应分析——以酒泉市东洞滩百万千瓦光伏示范基地为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.

Lu X. The environmental effect analysis of PV power plant construction in desert gobbi[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013.

[49] 国家电投. 全球首个超高海拔光伏实证项目启动[EB/OL]. (2021-12-15)[2022-06-20]. http://www.cpn.com.cn/news/xwtopb/202112/t20211215_1466340.html.

State Power Investment Corporation. The world's first ultra-high altitude photovoltaic demonstration project was launched[EB/OL]. (2021-12-15)[2022-06-20]. http://www.cpn.com.cn/news/xwtopb/202112/t20211215_1466340.html.

[50] Tsoutsos T, Frantzeskaki N, Gekas V. Environmental impacts from the solar energy technologies[J]. Energy Policy,2005,33(3):289–296.

[51] 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[J]. 生态学杂志,2018,37(8):2237–2243.

Zhai B, Gao Y, Dang X H, et al. Effects of photovoltaic panels on the characteristics and diversity of leymus chinensis community[J]. Chinese Journal of Ecology,2018,37(8):2237–2243.

[52] 殷代英,马鹿,屈建军,等. 大型光伏电站对共和盆地荒漠区微气候的影响[J]. 水土保持通报,2017,37(3):15–21.

Yin D Y, Ma L, Qu J J, et al. Effect of large photovoltaic power station on microclimate of desert region in Gonghe basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2017,37(3):15–21.

[53] Li S, Weigand J. The potential for climate impacts from widespread deployment of utility-scale solar energy installations: An environmental remote sensing perspective[J]. Journal of Remote Sensing and GIS,2017,6(1):190.

[54] Zhang J, Lyu F, Zhang L. Discussion on environment impact assessment in the lifecycle of PV systems[J]. Energy Procedia,2012,16:234–239.

[55] 王涛,王得祥,郭廷栋,等. 光伏电站建设对土壤和植被的影响[J]. 水土保持研究,2016,23(3):90–94.

Wang T, Wang D X, Guo T D, et al. The impact of photovoltaic power construction on soil and vegetation[J]. Research of Soil and Water Conservation,2016,23(3):90–94.

Suitability of photovoltaic development in the Western Sichuan Plateau based on remote sensing data

YUAN Hong¹, YI Guihua², ZHANG Tingbin^{1,3}, BIE Xiaojuan², LI Jingji^{3,4}, WANG Guoyan², XU Yonghao¹
(1. College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. College of Tourism and Urban-Rural Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. State Environmental Protection Key Laboratory of Synergetic Control and Joint Remediation for Soil and Water Pollution, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 4. College of Ecology and Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The rapid growth of China's photovoltaic (PV) industry is accompanied by unplanned construction of PV power plants. Ascertaining the regional PV development suitability, power generation potential, and emission reduction effects holds critical significance for the sound development of the PV industry. Based on remote sensing, meteorological, and fundamental geographic data, this study constructed an evaluation index system for PV development suitability. Using this system, it assessed the zones suitable for PV development in the Western

Sichuan Plateau and estimated the PV power generation potential and emission reduction effects. The results are as follows: ① The zones suitable for PV development account for 57.43% of the entire plateau, with highly suitable zones covering an area of approximately $2.07 \times 10^4 \text{ km}^2$, which are distributed primarily in the southwestern and northwestern portions of the plateau; ② The plateau exhibits significant power generation potential, reaching $17\,197.97 \times 10^8 \text{ KWh}$ in highly suitable zones under a full development scenario, which is equivalent to 6.52 – fold Sichuan Province’s total electricity consumption in 2019 before the COVID – 19 outbreak; ③ Contrasting with conventional thermal power generation, PV power generation in highly suitable zones can achieve annual CO₂ emission reduction of $12.45 \times 10^8 \text{ t}$, which is about 12.71% of China’s total CO₂ emissions in 2019 and 3.95 – fold Sichuan Province’s CO₂ emissions. Moreover, PV power generation can diminish the emissions of coal and conventional pollutants as well as heavy metals. The findings offer a scientific reference and guidance for selecting sites for PV power plants in the Western Sichuan Plateau and promoting the sustainable growth of the PV industry.

Keywords: photovoltaic power generation; emission reduction effect; suitability; analytic hierarchy process; Western Sichuan Plateau

(责任编辑: 陈 理)