

王云正,王伊蒙,刘建国,等.巴丹吉林沙漠及周边地区光伏电站适宜性分区与生态建设建议[J].中国沙漠,2025,45(1):173-184.

# 巴丹吉林沙漠及周边地区光伏电站 适宜性分区与生态建设建议

王云正<sup>1</sup>,王伊蒙<sup>2,3</sup>,刘建国<sup>1</sup>,尚小伟<sup>1</sup>,李敏岚<sup>2,3</sup>,柳本立<sup>2</sup>

(1.中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司,陕西 西安 710075; 2.中国科学院西北生态环境资源研究院 干旱区生态安全与可持续发展重点实验室/敦煌戈壁荒漠生态与环境研究站,甘肃 兰州 730000; 3.中国科学院大学,北京 100049)

**摘要:**中国沙漠地区是光伏产业发展的重要区域,将光伏电站建设与生态环境恢复相结合是当前沙区经济产业发展的必然要求,在前期的选址规划即需要予以重视。较为全面地考虑环境要素,有助于有针对性地对沙漠区域开展分区规划,实施精准有效的生态建设工作。本文以巴丹吉林沙漠及周边地区为研究区,在传统光伏电站选址制约因素基础上,增加影响生态建设的环境限制因素,将该区域按照光伏电站建设适宜性划分为4个一级分区,并进一步根据地形、降水等要素划分8个亚区,提出了各亚区对应的生态建设对策。年降水量不足50 mm的地区生态建设以防风固沙效能为主,而年降水量为50~200 mm的地区可兼顾防风固沙效能以及生态恢复效能。戈壁地区建设时需注意对砾石地表的保护,沙漠地区则需注意风沙灾害防治。

**关键词:**太阳能光伏电站;生态建设模式;沙漠生态系统;适宜性选址

**文章编号:** 1000-694X(2025)01-173-12

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2024.00079

**中图分类号:** S214

**文献标志码:** A

## 0 引言

中国沙漠、戈壁面积约128万 $\text{km}^2$ ,占全国陆地总面积的13%<sup>[1]</sup>,如何开发其独特的光、热、水、土、气、生、风、景观等资源,是当前沙区产业发展的核心议题。充分利用沙漠地区光照时间长、辐射强度高、地广人稀等比较优势<sup>[2]</sup>,发展光伏产业,同时开展荒漠化防治工作,符合“多用光、少用水、新技术、高效益”方针,也是实现“双碳”目标的重要途径。科学合理地进行光伏电站选址是沙区光伏产业建设的前提和基础。

目前,光伏电站选址的规范方法,主要考虑光照资源条件、地貌特征、气象灾害风险等重要制约因素<sup>[3-7]</sup>,旨在更好实现发电效益,并未明确考虑生态环境建设或其他产业的发展问题,这在生态环境本底条件脆弱的沙漠地区可能难以适应。因此,为了更好地应对环境挑战、推动绿色发展,需要综合权衡多种制约因素,着重考虑生态建设影响因素,优化光伏电站选址方案<sup>[8-10]</sup>,并针对沙漠复杂地表特征、降水稀少等条件,提出生态建设对策,实现发

电和生态效益的最优。

本文以巴丹吉林沙漠及周边地区为研究区,将包含光伏电站选址制约因素和生态建设影响因素在内的13个约束条件作为选址评价因子,结合地理信息系统(Geographical Information System, GIS)技术,运用多准则决策技术(Multi-Criteria Decision-Making Techniques, MCDMs)中的层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)深入分析各项评价因子,综合权衡各因子权重,最终得到科学适用该区域的分区结果,并给出相应的生态建设建议。结果可为沙漠地区光伏电站的合理规划和生态恢复建设提供理论支持和实践指导。

## 1 方法与数据

### 1.1 研究区概况

研究区包括巴丹吉林沙漠及周围荒漠地区,总面积达 $12.28 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1),行政区域跨越内蒙古

收稿日期:2024-05-17; 改回日期:2024-08-29

资助项目:中国电力工程顾问集团西北电力设计院项目(HQ2023PTD003);中国科学院青年创新促进会优秀会员项目(Y202085)

作者简介:王云正(1984—),男,陕西神木人,高级工程师,主要从事环境保护及生态治理研究。E-mail: wangyunzheng@nwepdi.com

通信作者:柳本立(E-mail: liubenli@lzb.ac.cn)

自治区和甘肃省,涉及额济纳旗、阿拉善右旗、临泽县、金塔县、甘州区、民勤县、高台县等7个旗、县、区。土地利用类型以沙漠和戈壁为主,盐碱地次之,南部地区有部分草地、耕地和湿地。主要山脉有合黎山、北大山、黑山头和雅布赖山。研究区属典型的温带大陆性沙漠气候,气候极为干旱,降水稀少,多年平均降水量仅为30~120 mm,由东南向

西北递减,东南部为100 mm,西北部不足40 mm;多年平均蒸发量为253~1 210 mm,是降水量的40~80倍;年平均气温8℃,1月平均气温为-12℃,7月约为26℃。冬、春季风力强劲,全年盛行西北风和西风,平均风速超过 $3.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。区内植被稀疏,植被类型以耐旱灌木和半灌木为主,草本植物多分布在水资源较好的湖泊、河流周边等地。

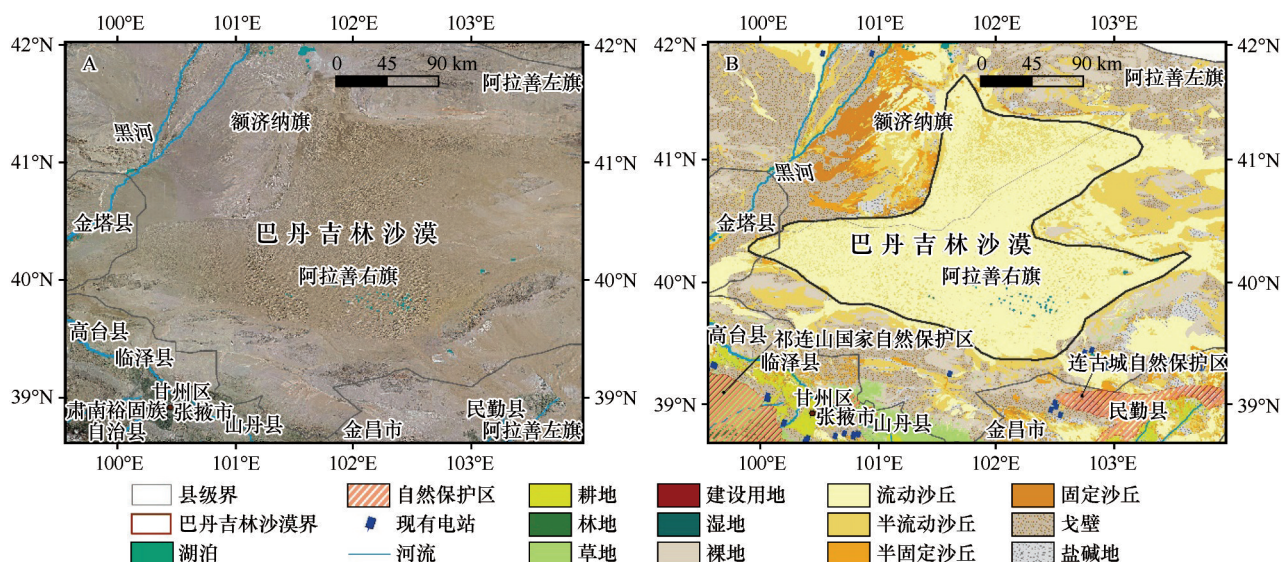


图1 巴丹吉林沙漠及周边地区卫星影像(A)和沙漠地貌图(B)(沙漠沙地分布数据来自国家冰川冻土沙漠科学数据中心 <http://www.ncdc.ac.cn/>)

Fig.1 Maps of the Badanjilin Desert, satellite map (A), geomorphological distribution (B). Desert distribution data from the National Cryosphere Desert Data Center (<http://www.ncdc.ac.cn/>)

## 1.2 光伏电站选址适宜性评价方法

### 1.2.1 选址评价因子

本研究结合文献研究及荒漠地区的地貌、气候环境等特征指标<sup>[3-8,11-21]</sup>,构建荒漠地区太阳能电站选址模型。指标主要包含选址影响因素和选址限制因素两类,选址影响因素以太阳辐射、地表影响、气候影响和生态建设作为主要评价标准,从中选择了13个约束条件,包括太阳水平总辐射量、日照时数、坡度、海拔、地形起伏度、风速、气温、湿度(由降水量和干燥度组成)、降尘量、土壤类型、土壤含水量和植被覆盖度(图2)。选址限制因素包含政策法规禁止用于开发建设的区域和植被覆盖度较高的区域。

### 1.2.2 基于GIS和AHP的选址方法

地理信息系统是空间分析处理的最有效工具,可以与多准则决策技术相结合,已成为制定太阳能战略和将大量光伏发电纳入灵活、高效和智能电网的有利工具<sup>[22]</sup>。这种组合方法尤其适用于解决光伏电站选址问题,能够有效处理地理位置适宜性评

估中的多维冲突,协调整合不同专家的判断,权衡和规避相关风险<sup>[23]</sup>。

在众多的MCDMs中,AHP以广泛的适用性而受关注<sup>[9]</sup>。该方法已在环境、交通、城市和区域规划、农业、旅游等诸多领域得到成功应用,尤其在可持续能源和可再生能源系统的决策问题中被普遍采用,得到国际社会的高度认可<sup>[23-24]</sup>。AHP通过构建层次化的决策结构模型,将复杂问题分解为多个相互关联的子问题,有助于实现对决策问题的系统分析和综合评估。此外,AHP能够灵活处理定性和定量相结合的数据,通过构建判断矩阵和计算权重向量,合理确定各层次元素的相对重要性,为解决复杂、非结构化和多属性的决策问题提供了有力工具<sup>[9]</sup>。

基于GIS和AHP的光伏电站选址方法具体实现步骤为<sup>[25-26]</sup>:①利用AHP确定影响光伏电站选址的关键因素及其相对权重;②在ArcGIS中对各因素数据图层进行标准化和重分类处理,生成反映相对贡献度和权重的数据图层;③将数据图层进行加权

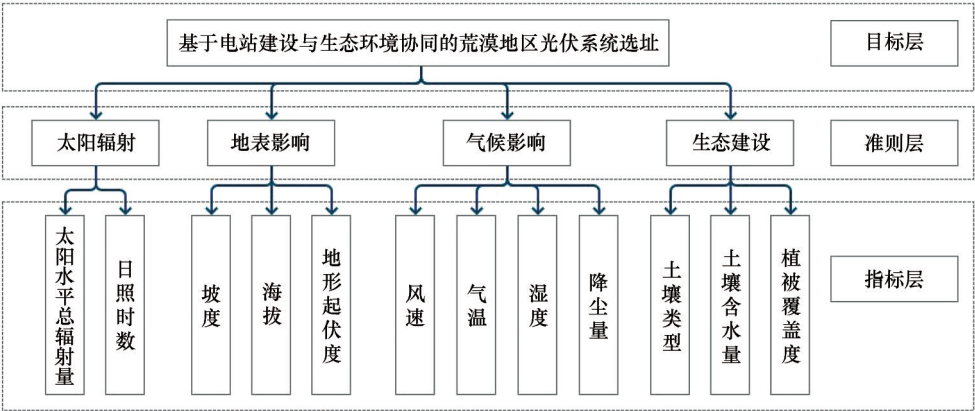


图2 大规模光伏电站选址适宜性评价模型

Fig.2 The suitability evaluation model for siting large-scale photovoltaic power plants

叠加分析,并剔除限制性区域,得到综合评价图层;  
④根据综合评价结果划分适宜性等级,确定最优选址方案。

层次分析法的评价过程可分为以下4个步骤<sup>[9,27-28]</sup>:①对问题涉及的因素进行分类,构造各因素相互联结的层次结构模型;②采用1~9标度法对各因素的相对重要性进行两两比较,构造成对比较判断矩阵 $A=[a_{ij}]$ ,每个标准 $a_{ij}$ 的重要性级别依据评价量表确定(表1);③通过判断矩阵计算各因素准则权重,并进行一致性检验,计算方法见式(1)和(2);④计算每个地理空间位置( $i$ )的总权重。将各层次的权重系数进行线性加权组合,得到评价对象

表1 层次分析法评价量表<sup>[28]</sup>  
Table 1 AHP evaluation scale<sup>[28]</sup>

$a_{ij}$ 量化值	定义
1	$i$ 和 $j$ 具有同等重要性
3	$i$ 相对于 $j$ 的重要性稍强
5	$i$ 相对于 $j$ 的重要性较强
7	$i$ 相对于 $j$ 强烈重要
9	$i$ 相对于 $j$ 极端重要
2, 4, 6, 8	中间值

表2 元素  $n$  对应的  $RI$  取值规则

Table 2  $RI$  value rules

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$RI$	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

1.2.3 一级区划分级

基于上述方法计算并通过一致性检验后,得到各指标因子的标准权重结果(表3)。使用ArcGIS软件将所有评价因子图层进行空间叠加分析,并对

的组合权重(公式3),并进行排序。

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

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

式中: $CI$ 为一致性指数,当 $CI=0$ 时,表示完全一致,随着 $CI$ 值的增加,判断矩阵的完全一致性也会下降; $CR$ 为一致性比率,当 $CR \leq 0.1$ 时,判断矩阵被认为具有足够的一致性; $\lambda_{\max}$ 是矩阵判断量表条目的成对比较的最大特征值; $n$ 为矩阵阶数; $RI$ 是随机一致性指数,不同数量 $n$ (元素个数)的 $RI$ 值见表2。

$$LSIG_i = A \times \sum_{j=1}^a (Cw_j \times Sw_{ij}) + B \times \sum_{j=1}^b (Cw_j \times Sw_{ij}) + C \times \sum_{j=1}^c (Cw_j \times Sw_{ij}) + D \times \sum_{j=1}^d (Cw_j \times Sw_{ij}) \tag{3}$$

式中: $LSIG_i$ 是地理空间位置 $i$ 的土地适宜性指数; $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 分别代表太阳辐射、地形、气候和生态条件4个类别的标准权重; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 分别代表4个类别的因子数; $Cw_j$ 是各类别中第 $j$ 个指标的标准权重; $Sw_{ij}$ 是表示地理空间位置 $i$ 所对应的第 $j$ 个指标的实际数值所对应的分级权重。

结果数据进行归一化处理。对归一化结果分析显示,大多数值分布在0.2~0.8,平均值为0.53(值域为0~1)。根据值的分布和均值,本研究以平均值0.53作为低适宜开发区分界,以0.1作为间隔将选址适



表 3 各指标标准权重	
Table 3 Standard weight of indicators	
影响因子	标准权重/%
太阳水平总辐射量	26
日照时数	17
坡度	6
海拔	6
地形起伏度	6
风速	3
气温(夏季平均)	10
降水量	2
干燥度	2
降尘量	6
土壤类型	5
土壤含水量	5
植被覆盖度	8

宜性划分为 4 个等级和 1 个限制开发区:高适宜开发区(>0.73)、较适宜开发区(0.63~0.73)、中等适宜开发区(0.53~0.63)、低适宜开发区(<0.53)、限制开发区。表 4 显示了适宜性分级评价标准。

表 4 适宜性分级评价标准					
Table 4 Appropriateness grading evaluation criteria					
适宜性评价	高适宜	较适宜	中等适宜	低适宜	限制
指数/%	>0.73	0.63~0.73	0.53~0.63	<0.53	—

### 1.2.4 二级区划分级

获得研究区光伏电站建设适宜性评价结果之后,结合与风沙防治和生态建设相关的主要地形、气候等影响因子,对各分区进行了详细的分析和评估,得到不同适宜性分区下的生态环境亚区。亚区划分有助于理解各区域的主要需求和挑战,也可为制定更精确的生态建设措施和产业发展模式提供依据。

降水量是决定荒漠地区植被生长、划分不同生态环境类型的关键因素。因此,本研究根据降水量将适宜性分级结果进一步划分为低降水区(降水量<50 mm)和一般降水区(降水量 50~200 mm)<sup>[29-30]</sup>。另外,对于降水变化不明显的 I 级分区,划分为沙漠和戈壁两种土地类型二级区。

表 5 展示了亚区的分级情况及对应指标,共包括 4 个适宜性分区和对应的 8 个亚区。其中,高适宜开发区(I 区)包括高适宜-戈壁区(I-1)和高适宜-

表5 亚区的分级情况及对应指标				
Table 5 Classification of subregions and corresponding indicators				
一级区划	二级区划	立地类型	太阳水平总辐射量 /(kWh·km <sup>-2</sup> )	降水量 /mm
高适宜 开发区(I)	亚区一 (I-1)	戈壁	1 750~1 850	<50
	亚区二 (I-2)	沙漠	1 750~1 850	<50
较适宜 开发区(II)	亚区一 (II-1)	沙漠	1 750~1 850	50~200
	亚区二 (II-2)	沙漠	1 750~1 850	<50
	亚区三 (II-3)	戈壁	1 450~1 750	50~200
	亚区四 (II-4)	戈壁	1 450~1 750	<50
中等适宜 开发区(III)	亚区一 (III-1)	戈壁	1 450~1 750	50~200
	亚区二 (III-2)	沙漠	1 450~1 750	<50
低适宜 开发区(IV)	—	—	—	—

沙漠区(I-2);较适宜开发区(II 区)包括 4 个亚级:较适宜-高辐射一般降水区(II-1)、较适宜-高辐射低降水区(II-2)、较适宜-中辐射一般降水区(II-3)和较适宜-中辐射低降水区(II-4);中等适宜开发区(III 区)包括中适宜-一般降水区(III-1)和中适宜-低降水区(III-2);最后为低适宜开发区(IV 区),开发的可能性较低,不再划分亚区。

### 1.3 数据来源

研究所使用的数据主要包括气象数据和遥感数据两大类。气象数据包含太阳水平总辐射量、日照时数、风速、气温、降水量、潜在蒸散发量和降尘量。其中,太阳辐射数据来自世界银行 2020 年发布的再分析数据(<https://solargis.com/>);日照时数来自国家地球系统科学中心(<http://www.geodata.cn/>),采用 1996—2015 年的月值资料;风速、气温、降水量、蒸散量数据来自国家地球系统科学中心(<http://www.geodata.cn/>),采用 2001—2020 年的月值资料;降尘量数据来自 FLEXPART dust aerosol L4 再分析数据集([https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/DUSTFL-EXPART\\_1/summa](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/DUSTFL-EXPART_1/summa))。各气象指标数据均转化为年平均值用于后续分析。

遥感数据包含坡度、海拔、土壤类型、土壤含水量、植被覆盖度、植被指数、荒漠类型、土地利用、保护区、国家公园、土地利用和居民区。其中,坡度、海拔来自国家地球系统科学数据中心(

geodata.cn/) 的 ASTER 全球 DEM 产品; 土壤类型来自世界土壤数据库 V1.2 (<https://www.fao.org/>); 土壤含水量来自 GLDAS-2.2 数据集 (<https://disc.gsfc.nasa.gov/>), 使用其中的土壤表层 (0~10 cm) 含水量数据, 时间跨度为 2001—2020 年; 植被覆盖度和植被指数数据来自国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdac.ac.cn/>); 沙漠沙地分布数据来自国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (<http://www.ncdc.ac.cn/>); 土地利用数据来自 Yang 等<sup>[31]</sup>; 保护区数据来自中国自然保护区标本资源共享平台 (<http://www.papc.cn/>), 包含自然保护区和生态保护区; 国家公园数据来自国家青藏高原/第三极环境数据中心 (<https://data.tpdac.ac.cn/>), 主要使用祁连山国家公园的矢量数据; 居民区数据则来自全国地理信息资源目录服务系统 (<https://www.webmap.cn/>) 中的 1:25 万全国基础地理数据库。

2 结果与分析

2.1 光伏电站与生态建设适宜性选址一级分区

研究区总面积为 12.28 万 km<sup>2</sup>。其中, 高适宜开

发区(I区)占比 22%, 面积约为 2.7 万 km<sup>2</sup>; 较适宜开发区(II区)占比 55.7%, 面积约为 6.84 万 km<sup>2</sup>; 中等适宜开发区(III区)占比 16.3%, 面积约为 2 万 km<sup>2</sup>; 低适宜开发区(IV区)占比 1.2%, 面积约为 0.15 万 km<sup>2</sup>; 限制开发区(V区)占比 4.8%, 面积约为 0.6 万 km<sup>2</sup>(表 6)。

高适宜开发区(I区)主要分布在研究区西北和东部地区, 分布面积广阔, 行政区域主要包含内蒙古自治区阿拉善左旗、阿拉善右旗、额济纳旗和甘肃省民勤县(图 3)。这些地区太阳辐射资源丰富, 年均总辐射量 1 750~1 850 kWh·m<sup>-2</sup>以上, 全年日照时数超过 3 000 h, 为光伏发电提供了极为优越的自然条件。同时, 高适宜开发区基本位于戈壁地区, 地势相对平缓, 起伏度较低, 工程开发的复杂性、建设难度和成本低。

较适宜开发区(II区)分布在除西南部以外的大部分地区, 分布面积广阔, 行政区域主要包含内蒙古自治区阿拉善左旗、阿拉善右旗、额济纳旗, 甘肃酒泉金塔县, 张掖高台县、临泽县、甘州区、山丹县, 武威民勤县等。这里的光照资源比高适宜开发区稍低, 年均总辐射量为 1 400~1 850 kWh·m<sup>-2</sup>。尽管

表 6 一级分区中各区域面积  
Table 6 Size of areas in the first level of zone

研究区总面积 /万 km <sup>2</sup>	高适宜开发区 (I区)/万 km <sup>2</sup>	较适宜开发区 (II区)/万 km <sup>2</sup>	中等适宜开发区 (III区)/万 km <sup>2</sup>	低适宜开发区 (IV区)/万 km <sup>2</sup>	限制开发区 (V区)/万 km <sup>2</sup>
12.28	2.7	6.84	2	0.15	0.6

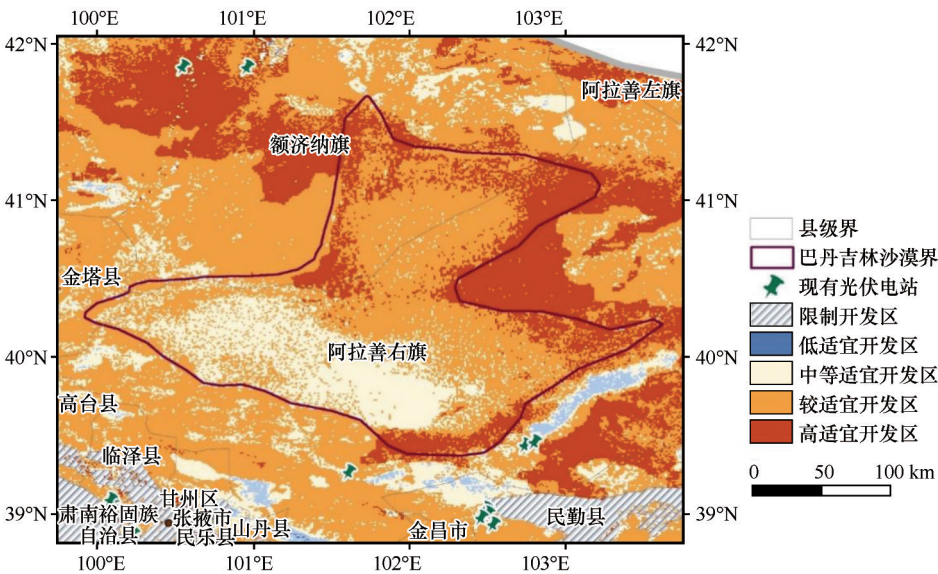


图 3 巴丹吉林地区光伏电站与生态建设适宜性选址一级分区  
Fig.3 Batangilin region photovoltaic power plant and ecological construction suitability of site selection of the first level of zoning map

太阳能资源稍有减少,但其他影响因素的适宜性基本与高适宜区相当,仍然具备较高的光伏电站建设潜力。

中等适宜开发区(Ⅲ区)主要分布在研究区西南部、南部边缘地区,行政区域主要包含内蒙古自治区阿拉善右旗、额济纳旗,甘肃酒泉金塔县,张掖高台县、临泽县、甘州区、山丹县等。这些区域的日照时长和太阳辐射相较于前两个分级有所降低,年均总辐射量 $1\,400\sim 1\,750\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ ,年日照时数超过 $3\,000\text{ h}$ 。然而,相对于Ⅰ区和Ⅱ区,这些地区的风速和降尘量相对较低,且距离城镇较近,交通条件良好,有利于电站的建设和运营,仍然具备较好的建

设条件。

低适宜开发区(Ⅳ区)主要为东南部的雅布赖山脉地区和西南部的祁连山脉地区,受山地地形影响及当前技术水平的制约,该区域暂不建议进行光伏电站的开发建设。

## 2.2 光伏电站与生态建设适宜性选址亚区分区

一级分区主要考虑光伏电场开发建设的主导因素,最大化发挥电站的发电功能,而二级亚区分区则是考虑生态建设的影响因素。亚区的分级结果如图4所示,共包括3个一级分区的8个亚区,亚区面积见表7。由于亚区将一级分区中碎片化区域进行整合处理,因此总面积与一级分区略有差异。

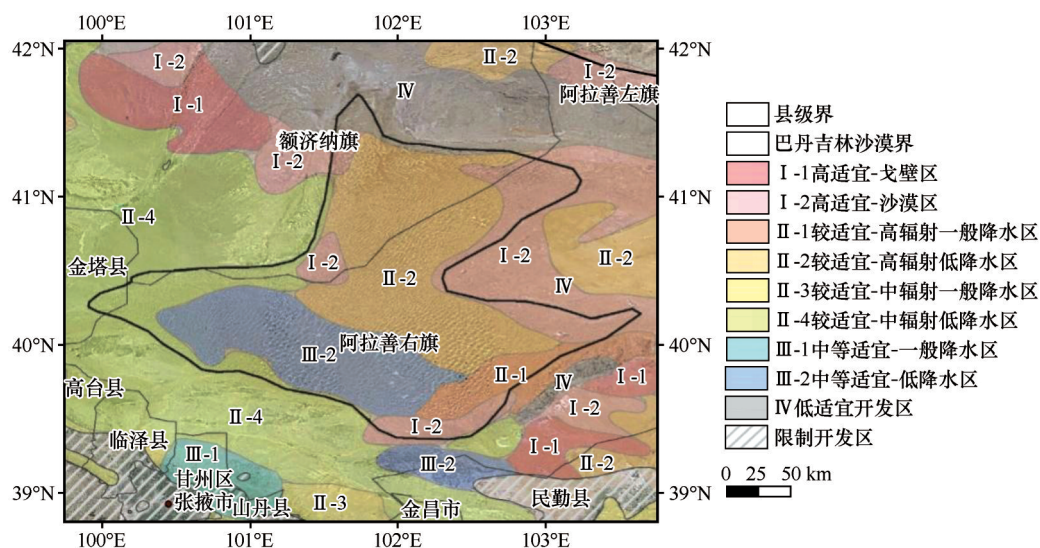


图4 巴丹吉林地区光伏电站与生态建设亚区适宜性分级

Fig.4 Grading of suitability of photovoltaic power plants and ecological construction subregion in Badanjirir region

### 2.2.1 高适宜开发区(Ⅰ区)亚区分区

高适宜开发区(Ⅰ区)整体气候干燥,降水量极低,大部分地区年降水量不足 $50\text{ mm}$ ,因此亚区分区的主要评估因子是地貌,分别是高适宜-戈壁区(Ⅰ-1)和高适宜-沙漠区(Ⅰ-2)。Ⅰ-1区地处内蒙古阿拉善左旗、额济纳旗和甘肃省武威市民勤县。土壤质地和植被覆盖度皆呈地域性差异,东南部沙漠地区以沙壤土、黏壤土和壤土为主,植被覆盖度 $5\%\sim 10\%$ ;而西北部黑河流域主要为壤土,大部分地区植被覆盖度低于 $5\%$ 。

Ⅰ-2区地理位置涉及内蒙古阿拉善右旗、额济纳旗。黑河流域和东部大部分地区土壤以壤土为主,而其他地区主要为砂土、沙壤土和黏壤土的混合,并且土壤含水量为 $0\sim 2\%$ ,整体较为干燥。东南

部大部分地区的植被覆盖度 $5\%\sim 10\%$ ,显示出一定的植被生长状况。然而,在西北部大部分地区,植被覆盖度低于 $5\%$ ,表明地区生态环境相对脆弱,需要更加重视植被恢复和生态保护工作。

### 2.2.2 较适宜开发区(Ⅱ区)亚区分区

较适宜开发区(Ⅱ区)亚区划分主导因子设置为影响电站发电效率和生态建设的太阳辐射量和降水量。其中,太阳辐射量的大小直接影响光伏电站的发电效率。根据年均太阳总辐射量的不同,将Ⅱ区划分为两个等级:①年均太阳总辐射量在 $1\,750\sim 1\,850\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ ,该区域太阳辐射条件较好,有利于光伏电站的高效运行;②年均太阳总辐射量在 $1\,450\sim 1\,750\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ ,虽然太阳辐射量稍逊于前者,但仍属于较适宜的范围。降水量因子根据植物



表 7 亚区分级结果

Table 7 Results of subregion classification

一级 分区	亚区 分级	面积 /万 km <sup>2</sup>	主导 因素	次要因素	地区特征	行政分布
高适宜 开发区 (I)	高 适 宜－戈 壁 区 (I-1)	0.75	戈壁或固定 沙漠	土壤质地：沙漠东南部为沙壤土、黏壤土、壤 土结合，沙漠西北部区域黑河流域为壤土  生长季植被覆盖度：东南部大部分 5%~10%， 西北部大部分<5%，黑河流域区域生长季植被 覆盖度>20%  年降尘量：整体降尘量高，28~59 g·m <sup>-2</sup>  土壤含水量：大部分地区土壤含水量为 2%~4%， 少部分地区（黑河流域外缘）为 0~2%	气温：5~12℃，西北部 地区平均气温略高，比 东南部约高 1~2℃ 降水量：大部分地区小 于 50 mm 风速：大部分地区 2~ 3 m·s <sup>-1</sup> 太阳辐射量：1 750~ 1 850 kWh·m <sup>-2</sup>  日照时数：>3 000 h	内蒙古：阿拉善 右旗、额济纳旗  甘肃省：武威市 民勤县
	高 适 宜－沙 漠 区 (I-2)	1.83	半固定或流 动沙漠	土壤质地：黑河流域和东部大部分地区为壤 土，其他地区为砂土、沙壤土、黏壤土相结合  生长季植被覆盖度：东南部大部分 5%~10%， 西北部大部分<5%  年降尘量：整体降尘量高，大部分地区 28~ 59 g·m <sup>-2</sup> ，高纬度地区（42° N）降尘量最高，超 过 59 g·m <sup>-2</sup>  土壤含水量：大部分地区为 0~2%，黑河流域、 沙漠东南部地区土壤含水量为 2%~4%		内蒙古阿拉善 右旗、额济纳旗
	较适宜 开发区 (II)	0.34	太阳辐射： 1 750~1 850 kWh·m <sup>-2</sup> ； 降水量：50~ 200 mm	生长季植被覆盖度：大部分地区 5%~15%  气温：5~10℃  年降尘量：整体降尘量高，28~59 g·m <sup>-2</sup>  风速：大部分地区 3~4 m·s <sup>-1</sup>  土壤质地：砂土和沙壤土相结合	日照时数：>3 000 h  夏季气温：15~25℃  土壤含水量：大部分地 区小于 2%	内蒙古：阿拉善 右旗
	较适宜 －高辐 射低降 水 区 (II-2)	2.04	太阳辐射： 1 750~1 850 kWh·m <sup>-2</sup> ； 降水量：<50 mm	生长季植被覆盖度：东南部大部分 5%~10%， 西北部大部分<5%  气温：5~12℃  年降尘量：整体降尘量高，大部分地区 28~59 g·m <sup>-2</sup> ，高纬度地区（42° N）降尘量最高，超过 59 g·m <sup>-2</sup>  风速：大部分地区年均风速 2~3 m·s <sup>-1</sup> ，沙漠西 南部风速稍高，为 3~4 m·s <sup>-1</sup>  土壤质地：大部分地区为砂质土，沙漠以东部 分地区为壤土  年降尘量：整体降尘量高，28~59 g·m <sup>-2</sup>		内蒙古：阿拉善 右旗、额济纳旗  甘肃省：武威市 民勤县
	较 适 宜－中 辐射一 般降水 区 (II- 3)	0.29	太阳辐射： 1 450~1 750 kWh·m <sup>-2</sup> ； 降水量：50~ 200 mm	生长季植被覆盖度：大部分 10%~20%  气温：5~10℃  风速：大部分地区为 2~3 m·s <sup>-1</sup> ，小部分地区稍 高，为 4~5 m·s <sup>-1</sup>  年降尘量：整体降尘量不高，大部分地区 14~ 28 g·m <sup>-2</sup>	日照时数：>3 000 h  夏季气温：15~25℃  地形地势：西南缘祁连 山脉附近起伏度稍高	内蒙古：阿拉善 右旗  甘肃省：张掖市 高台县、临泽县

续表 7

一级分区	亚区分级	面积/万 km <sup>2</sup>	主导因素	次要因素	地区特征	行政分布
土壤质地:壤土和黏壤土相结合						
土壤含水量:2%~4%						
较适宜-中辐射低降水区 (II-4)	较适宜-中辐射低降水区 (II-4)	3.42	太阳辐射: 1 450~1 750 kWh·m <sup>-2</sup> ; 降水量: <50 mm	生长季植被覆盖度: 西南部大部分 5%~10%, 西北部大部分<5% 气温: 5~12 ℃ 风速: 大部分地区 2~3 m·s <sup>-1</sup> 年降尘量: 整体降尘量中等, 分区位于沙漠西北、东南部地区为 28~59 g·m <sup>-2</sup> , 沙漠西南部地区为 14~28 g·m <sup>-2</sup>  土壤含水量: 大部分地区为 2%~4% 土壤质地: 地表为戈壁, 沙壤土、壤土和黏壤土相结合		内蒙古: 阿拉善右旗 甘肃省: 酒泉市金塔县、张掖市高台县、临泽县、武威市民勤县
中等适宜开发区 (III)	中等适宜-一般降水区 (III-1)	0.28	降水量: 50~200 mm	生长季植被覆盖度: 整体覆盖度较高, 大部分地区为 10%~20%, 部分区域>20% 气温: 5~10 ℃ 风速: 大部分地区为 2~3 m·s <sup>-1</sup> , 小部分地区稍高, 为 4~5 m·s <sup>-1</sup> 年降尘量: 整体降尘量较低, 为 14~28 g·m <sup>-2</sup> 土壤含水量: 为 2%~4% 土壤类型: 大部分为壤土, 小部分黏壤土和沙壤土相结合	太阳辐射量: 1 450~1 750 kWh·m <sup>-2</sup> 日照时数: >3 000 h 地形地势: 地形起伏度较高, 坡度较大	内蒙古: 阿拉善右旗 甘肃省: 张掖市甘州区、山丹县
	中等适宜-低降水区 (III-2)	1.00	降水量: <50 mm	生长季植被覆盖度: 0~15%, 东南部大部分 5%~10%, 西北部大部分<5% 气温: 大部分地区 10~12 ℃, 沙漠南部稍低, 为 5~10 ℃ 年降尘量: 整体降尘量中等, 沙漠南部地区为 28~59 g·m <sup>-2</sup> , 沙漠西南部地区为 14~28 g·m <sup>-2</sup> 土壤类型: 大部分为沙质土, 部分地区为沙壤土 土壤含水量: 大部分区域<2% 风速: 2~4 m·s <sup>-1</sup>		内蒙古: 阿拉善右旗 甘肃省: 武威市民勤县

生长需求划分为两个级别。①降水量 50~200 mm 的区域, 具备一定的水分条件, 能够支持荒漠植被的生长, 并有助于生态环境的逐步改善。②降水量小于 50 mm 的区域, 十分干燥, 需更加注重植被恢复和生态保护工作。最终 II 区共划分为 4 个亚区: 较适宜-高辐射一般降水区 (II-1)、较适宜-高辐射低降水区 (II-2)、较适宜-中辐射一般降水区 (II-3)、较适宜-中辐射低降水区。

II-1 区位于内蒙古阿拉善右旗, 降水量 50~200

mm, 大部分地区的年均风速为 3~4 m·s<sup>-1</sup>, 多年平均气温 5~10 ℃。由于该区域土壤含水量较低, 一般小于 2%, 对植被生长和生态恢复造成一定限制。因此, 在光伏电站建设和运营过程中, 需注重植被恢复和水资源合理利用, 以实现生态与经济的协调发展。

II-2 区主要在内蒙古阿拉善右旗、额济纳旗以及甘肃省武威市民勤县。该区域年均太阳总辐射量高达 1 750~1 850 kWh·m<sup>-2</sup>, 年日照时数超过 3 000 h, 显示出极其丰富的太阳能资源。然而, 多



年平均降水量小于 50 mm 的气候条件限制了自然植被的生长和生态系统的自我恢复能力。

II-3 区涉及内蒙古阿拉善右旗和甘肃省张掖市的高台县、临泽县等区域。尽管其年均太阳总辐射量为  $1\,400\sim 1\,750\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ , 比 II-2 区略低, 但年日照时数仍大于 3 000 h, 为光伏电站的建设提供了良好的光照条件。同时, 该区域的多年平均降水量 50~200 mm, 有利于植被的生长和生态的恢复。从地形地貌来看, 主要为戈壁地形, 地势相对平坦, 为光伏电站的建设提供了便利条件。在植被覆盖度方面, II-3 亚级在生长季的表现尤为突出, 大部分地区植被覆盖度 10%~20%。这不仅有助于改善区域的生态环境质量, 还显示出该区域在生态建设方面的巨大潜力。

II-4 区涉及内蒙古的阿拉善右旗, 以及甘肃省酒泉市金塔县, 张掖市高台县、临泽县, 武威市民勤县。多年平均降水量不足 50 mm, 相较于 II-3 区, II-4 区因缺水导致在生长季的植被覆盖度普遍较低, 生态环境脆弱。从地表特征来看, II-4 区主要为戈壁地形, 土壤质地复杂, 沙壤土、壤土和黏壤土相结合。这种土壤类型多样性的特点在一定程度上增加了生态恢复和土地管理的难度。

### 2.2.3 中等适宜开发区(III区)亚区分区

中等适宜开发区(III区)太阳能资源均为  $1\,450\sim 1\,750\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ , 所以在亚区划分中, 主导因子为降水量, 仍然以 50 mm 为界限划分为两个级别。

III-1 区为降水量 20~200 mm, 主要分布于内蒙古阿拉善右旗, 甘肃省张掖市甘州区、山丹县。土地类型主要为戈壁, 土壤质地以壤土为主, 部分区域为黏壤土和沙壤土相结合。土壤含水量为 2%~4%, 植被覆盖度较高, 生长季时大部分地区为 10%~20%, 部分区域甚至超过 20%。

III-2 区为降水量小于 50 mm 区域, 位于内蒙古阿拉善右旗和甘肃省武威市民勤县, 其地表特征和环境条件与 III-1 区存在显著差异。该区域大部分位于沙漠内部, 土壤质地以沙质土为主, 部分地区为沙壤土, 植被生长困难。由于降水量的不足, III-2 区的植被覆盖度相对较低, 整体覆盖度在 0~15%。东南部大部分地区植被覆盖度 5%~10%, 而西北部大部分地区的植被覆盖度更是低于 5%, 反映出该区域生态环境的脆弱性, 以及植被恢复工作

的艰巨性。

## 3 生态建设建议

### 3.1 高适宜开发区(I区)生态建设建议

在高适宜开发区(I区)亚区分区中, 年降水量均小于 50 mm, 是该区域生态环境恢复的主要限制因素。由于风沙活动较为强烈, 在生态建设方面应首先考虑防风固沙功能。受降水限制, 该地区不宜大面积恢复植被, 所以在选种时以耐旱草本植物为主, 通常以撒播种子方式进行种植<sup>[32]</sup>, 但要注意栽植密度, 确保在该地区土壤水分承载范围内。若靠近河流、湖泊等区域具有引流条件, 也可选择适当栽植灌木物种, 但在开发时还需注意对水源的节约和保护。由于两个亚区的地形条件不同, 因此建设时可考虑不同的措施配置。I-1 区为戈壁区, 在建设时要注意对戈壁地表的保护。I-2 区为沙漠区, 光伏电站易出现风蚀、风积现象, 生态建设实施前需要多种机械固沙措施的辅助, 如设置高立式沙障前沿阻沙带、半隐蔽式沙障防风固沙带等<sup>[33-34]</sup>, 并注意减少施工过程中对地表的强烈扰动。

### 3.2 较适宜开发区(II区)生态建设建议

较适宜开发区(II区)的亚区分区主导因素有太阳辐射和降水量, 其中降水量依然是生态建设的主要影响因素, 以 50 mm 为界。小于 50 mm 降水量的生态建设建议与高适宜开发区(I区)相同, 对于 50~200 mm 降水量的 II-1 和 II-3 的亚区, 沙生植物的基本生长条件可以得到满足, 故在生态建设时除考虑基本的防风固沙需求, 还可考虑生态提升和第一、第三产业经济建设<sup>[35]</sup>。在植物选种时要考虑植物的防风效能和经济效能, 如柠条、梭梭等既可防风固沙又可提供饲料或药用的植物类型<sup>[36-37]</sup>。若有其他水分来源则可考虑规模化种植。

### 3.3 中等适宜开发区(III区)生态建设建议

中等适宜开发区(III区)的亚区分区主导因素是年降水量, 其分级类别与较适宜区(II区)一致, 建设建议基本相似, 但由于分布地点差异, 所以建设时还需考虑以下几点。III-1 区分布于戈壁地区, 降水量较高, 靠近居民点, 选择时以具有防风效能和经济效能的植物为主<sup>[38]</sup>, 也可配合牧业发展。III-2 区

虽然年降水量不足 50 mm,但主要分布于巴丹吉林沙漠内,具有独特的沙山-湖泊景观资源,可考虑发展沙漠光伏+旅游业,所以此处光伏电站的设立形式要更加注重协调性和美学功能,植物选种也应当考虑其观赏效能。若发展沙漠种植业,植物选种需具备防风效能和经济效能,而电站建设时需注意留出植物种植空间。

## 4 结论

本研究对巴丹吉林沙漠及周边地区光伏电站与生态建设适宜性进行评估,根据地表类型、降水量等要素进行二级亚区划分,并给出更有针对性的生态建设和产业发展建议。

根据太阳辐射、地表类型、气候和土壤条件等主要因素,该区域共分为 4 个一级分区和 8 个亚区,其中高适宜开发区(I区)包括高适宜-戈壁区(I-1, 0.75 万 km<sup>2</sup>)和高适宜-沙漠区(I-2, 1.83 万 km<sup>2</sup>);较适宜开发区(II区)包括 4 个亚区:较适宜-高辐射一般降水区(II-1, 0.34 万 km<sup>2</sup>)、较适宜-高辐射低降水区(II-2, 2.04 万 km<sup>2</sup>)、较适宜-中辐射一般降水区(II-3, 0.29 万 km<sup>2</sup>)、较适宜-中辐射低降水区(II-4, 3.42 万 km<sup>2</sup>);中等适宜开发区(III区)包括中等适宜-一般降水区(III-1, 0.28 万 km<sup>2</sup>)和中等适宜-低降水区(III-2, 1.0 万 km<sup>2</sup>);最后为低适宜开发区(IV区),无亚区分区。

降水条件与后期生态建设效能侧重点密切相关。在降水量不足 50 mm 地区,生态建设应注重防风固沙功能,确保电站正常运营。降水量为 50~200 mm 的区域,可考虑生态农牧业、旅游业等其他产业发展,植被选种可多样化,但要满足耐旱条件,注意栽植密度。

## 参考文献:

- [1] 胥国盛,王翠萍,李锋,等.第六次全国荒漠化和沙化调查主要结果及分析[J].林业资源管理,2023(1):1-7.
- [2] Yang Y, Xia S.China must balance renewable energy sites[J]. Science,2022,378(6620):609-616.
- [3] Elkadeem M R, Younes A, Sharshir S W, et al.Sustainable siting and design optimization of hybrid renewable energy system: a geospatial multi-criteria analysis [J]. Applied Energy, 2021,295:117071.
- [4] Li X Y, Dong X Y, Chen S, et al.The promising future of developing large-scale PV solar farms in China: a three-stage framework for site selection [J]. Renewable Energy, 2024, 220: 119638.
- [5] Demir A, Dinçer A E, Yılmaz K.A novel method for the site selection of large-scale PV farms by using AHP and GIS: a case study in İzmir, Türkiye[J].Solar Energy, 2023, 259: 235-245.
- [6] Rekik S, El Alimi S.A Gis based MCDM modelling approach for evaluating large-scale solar PV installation in Tunisia [J]. Energy Reports, 2024, 11: 580-596.
- [7] Doorga J R S, Rughooputh S D D V, Boojhawon R.Multi-criteria GIS-based modelling technique for identifying potential solar farm sites: a case study in Mauritius[J].Renewable Energy, 2019, 133: 1201-1219.
- [8] Uyan M.GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapınar region, Konya/Turkey[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 28: 11-17.
- [9] Sindhu S, Nehra V, Luthra S.Investigation of feasibility study of solar farms deployment using hybrid AHP-TOPSIS analysis: case study of India[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 73: 496-511.
- [10] Sturchio M A, Knapp A K.Ecovoltaic principles for a more sustainable, ecologically informed solar energy future [J]. Nature Ecology & Evolution, 2023, 80: 1-15.
- [11] Charabi Y, Gastli A. PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation [J]. Renewable Energy, 2011, 36(9): 2554-2561.
- [12] Tahri M, Hakdaoui M, Maanan M.The evaluation of solar farm locations applying geographic information system and multi-criteria decision-making methods: case study in southern Morocco [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 51: 1354-1362.
- [13] Noorollahi E, Fadaei D, Akbarpour Shirazi M, et al.Land suitability analysis for solar farms exploitation using GIS and Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP): a case study of Iran [J].Energies, 2016, 9(8): 643.
- [14] Zoghi M, Houshang Ehsani A, 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.
- [15] Shorabeh S N, Firozjaei M K, Nematollahi O, et al. A risk-based multi-criteria spatial decision analysis for solar power plant site selection in different climates: a case study in Iran[J]. Renewable Energy, 2019, 143: 958-973.
- [16] Yousefi H, Hafeznia H, Yousefi-Sahzabi A.Spatial site selection for solar power plants using a GIS-based boolean-fuzzy logic model: a case study of Markazi Province, Iran [J]. Energies, 2018, 11(7): 1648.
- [17] Colak H E, Memisoglu T, Gercek Y.Optimal site selection for solar photovoltaic (PV) power plants using GIS and AHP: a case study of Malatya Province, Turkey[J].Renewable Energy, 2020, 149: 565-576.

- [18] Rediske G, Siluk J C, Michels L, et al. Multi-criteria decision-making model for assessment of large photovoltaic farms in Brazil[J]. *Energy*, 2020, 197: 117–167.
- [19] Yılmaz K, Dinçer A E, Ayhan E N. Exploring flood and erosion risk indices for optimal solar PV site selection and assessing the influence of topographic resolution [J]. *Renewable Energy*, 2023, 216: 119056.
- [20] Rekik S, El Alimi S. Optimal wind-solar site selection using a GIS-AHP based approach: a case of Tunisia[J]. *Energy Conversion and Management*; X, 2023, 18: 100355.
- [21] Lv F, Tang H. Sustainable photovoltaic power generation spatial planning through ecosystem service valuation: a case study of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Renewable Energy*, 2024, 222: 119876.
- [22] Santoyo-Castelazo E, Azapagic A. Sustainability assessment of energy systems: integrating environmental, economic and social aspects [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 80: 119–138.
- [23] Sánchez-Lozano J M, Teruel-Solano J, Soto-Elvira P L, et al. Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: case study in south-eastern Spain [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 24: 544–556.
- [24] Mardani A, Jusoh A, Md Nor K, et al. Multiple criteria decision-making techniques and their applications: a review of the literature from 2000 to 2014 [J]. *Economic Research-Ekonomska Istrazivanja*, 2015, 28: 516–571.
- [25] 杨若婷, 牛清河, 屈建军, 等. 青海共和盆地固定支架式光伏阵列对阵内风场的影响[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(5): 114–121.
- [26] 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 [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 2088–2103.
- [27] Aly A, Jensen S S, Pedersen A B. Solar power potential of Tanzania: identifying CSP and PV hot spots through a GIS multicriteria decision making analysis [J]. *Renewable Energy*, 2017, 113: 159–175.
- [28] Saaty T L. A scaling method for priorities in hierarchical structures [J]. *Journal of Mathematical Psychology*, 1977, 15(3): 234–281.
- [29] 丁一汇, 王绍武, 郑景云, 等. 中国气候 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 307–308.
- [30] 倪健, 郭柯, 刘海江, 等. 中国西北干旱区生态区划[J]. *植物生态学报*, 2005(2): 175–184.
- [31] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. *Earth Syst Sci Data*, 2021, 13(8): 3907–3925.
- [32] 崔永琴, 冯起, 孙家欢, 等. 1. 西北地区光伏电站植被恢复模式研究综述[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(3): 200–203.
- [33] 屈建军, 凌裕泉, 俎瑞平, 等. 1. 半隐蔽格状沙障的综合防护效益观测研究[J]. *中国沙漠*, 2005, 25(3): 329–335.
- [34] 屈建军, 王涛, 牛清河, 等. 兰新高铁戈壁特大风区风沙灾害形成机理及防沙技术[J]. *中国科学: 地球科学*, 2023, 53(2): 277–286.
- [35] 肖建华, 司建华, 刘淳, 等. 沙漠能源生态圈概念、内涵及发展模式[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(5): 11–20.
- [36] 廖空太. 防风固沙林优化模式的树种选择及其配置[J]. *甘肃林业科技*, 1995(3): 15–21.
- [37] 常兆丰, 李易珺, 张剑挥, 等. 民勤荒漠区4种植物的防风固沙功能对比分析[J]. *草业科学*, 2012, 29(3): 358–363.
- [38] 张兵. 主要防风固沙植物及其应用价值[J]. *内蒙古林业调查设计*, 2012, 35(5): 62–65.



## Suitability zoning and ecological construction of photovoltaic power plants in Badain Jaran Desert and neighboring areas

Wang Yunzheng<sup>1</sup>, Wang Yimeng<sup>2,3</sup>, Liu Jianguo<sup>1</sup>, Shang Xiaowei<sup>1</sup>, Li Minlan<sup>2,3</sup>, Liu Benli<sup>2</sup>

(1. Northwest Electric Power Design Institute CO., LTD. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, China; 2. Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands / Dunhuang Gobi Desert Ecology and Environmental Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** China's desert area is critical for the current and future development of the photovoltaic sector. Combining the construction of photovoltaic power stations with ecological environment repair is an essential prerequisite for the development of the desert-based economy, which must be considered from the basic site selection planning stage. A more comprehensive consideration of environmental factors can help carry out targeted zoning planning for desert areas and implement precise and effective ecological construction work. This paper takes the Badain Jaran Desert and the surrounding desert area as the study area, and adds the environmental constraints affecting the later ecological construction on the basis of the original constraints on photovoltaic power plant siting. It divides the region into four first-level subdivisions according to the suitability for photovoltaic power station construction and further subdivides them into eight sub-zones based on elements such as topography and precipitation. It also puts forward the countermeasures for the ecological construction corresponding to each sub-zone. The ecological construction in areas with less than 50 mm of annual precipitation mainly focuses on the effectiveness of windbreaks and sand fixation, while areas with 50~200 mm of precipitation should have both windbreak and sand fixation as well as ecological restoration effectiveness. In the gobi region, attention should be paid to the protection of the gravel surface, and in the desert region, attention should be paid to the prevention and control of wind and sand hazards.

**Key words:** solar photovoltaic power station; ecological construction mode; desert ecosystem; adaptive location