

# 延安市林草光伏互补建设空间适宜性及固碳减排效益研究

闵志强, 胡云云\*, 刘友林, 王 周, 陈志林, 李宏韬, 贾 茜

(旱区生态水文与灾害防治国家林业和草原局重点实验室, 国家林业和草原局 西北调查规划院, 陕西 西安 710048)

**摘 要:**以延安市林草光伏互补建设为对象,通过因子分析方法选取适宜性评价指标,从图斑尺度对规模化发展林草光伏互补的适宜空间进行研究分析和验证,并分别评估乔灌植被、灌草植被和乔灌草植被3种修复模式在不同开发强度下的固碳减排综合效益。结果表明,延安市适宜规模化发展林草光伏互补的土地面积40.86万 $\text{hm}^2$ ,占延安市总面积的11.04%,主要分布在 $36^{\circ}30'N$ 以北的7个区县;发展林草光伏互补对增加林草植被固碳、光伏发电减排 $\text{CO}_2$ 作用明显,其中灌草光伏互补模式的土地综合利用效率最高;经测算延安市林草光伏在30%的集中开发强度下,可实现5540.29万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 装机容量,吸收 $\text{CO}_2$ 171.19万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ,增加固碳量46.68万 $\text{t}$ ,减排 $\text{CO}_2$ 9587.84万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 。研究结果可为今后开展林草光伏互补规划设计、布局选址、碳汇碳减排交易等提供参考。

**关键词:**林草光伏互补;空间适宜性;固碳减排

中图分类号:S718.56

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)05-0057-10

## Suitability of Forest Grass PV Complementary Space and Carbon Fixation and Reduction Benefits in Yan'an

MIN Zhi-qiang, HU Yun-yun\*, LIU You-lin, WANG Zhou, Chen Zhi-lin, LI Hong-tao, JIA Xi

(Key Laboratory National Forestry and Grassland Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Northwest Surveying, Planning Institute of National Forestry and Grassland Administration, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

**Abstract:** This paper took the construction of forest and grass photovoltaic complementation in Yan'an City as the research object, selected the suitability evaluation index through factor analysis method, analyzed and verified the suitable space for large-scale development of forest and grass photovoltaic complementation from the spot scale, and evaluated the comprehensive benefits of carbon fixation and emission reduction under different development intensities according to the three restoration modes of tree and shrub vegetation, shrub and grass vegetation and tree and shrub vegetation. The results showed that the area of land suitable for large-scale development of forest and grass photovoltaic complementation in Yan'an City was 0.4086 million hectares, accounting for 11.04% of the land area of the city, mainly distributed in 7 districts and counties north of  $36^{\circ}30'$  north latitude. The development of forest and grass photovoltaic complementation had an obvious effect on increasing the carbon fixation of forest and grass vegetation and reducing carbon dioxide by photovoltaic power generation, among which the comprehensive land use efficiency of shrub and grass photovoltaic complementation mode was the highest. It was estimated that under 30% of the concentrated development intensity, Yan'an's forest and grass PV could achieve 55.4029 million  $\text{kW}\cdot\text{h}$  of installed capacity, which could absorb 1.7119 million  $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$  of carbon dioxide, increase 0.4668 million  $\text{t}$  of carbon sequestration, and reduce 95.8784 million  $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$  of carbon dioxide. The results of this study pro-

收稿日期:2023-01-29 修回日期:2023-04-11

基金项目:国家林业和草原局自主研发计划(LC-2-09);国家林业和草原局西北院科技创新项目(XBY-KJCX-2021-21)。

第一作者:闵志强,高级工程师。研究方向:森林资源监测、智慧林草方面的生产实践与理论。E-mail:281800246@qq.com

\*通信作者:胡云云,高级工程师。研究方向:森林资源监测、森林经营等方面的生产实践与理论。E-mail:huyy1985@126.com

vide reference for the future development of complementary planning and design of forest and grass photovoltaic, layout and location, carbon sink and carbon emission reduction transactions.

**Key words:** photovoltaic complementation of forest and grass; space suitability; carbon fixation and emission reduction

实现碳达峰、碳中和是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革,统筹新能源开发和生态保护关系,不断提升生态系统碳汇能力,加快新型能源体系建设,已经成为我国实现低碳转型、绿色发展的重要途径。光伏发电作为开发利用太阳能的重要方式,由于在光电转换过程中基本不产生碳排放,而逐渐成为新能源发展的重要选择。由于光伏阵列对其覆盖区域的植被具有减少光照和蒸发、清洗浇灌、防风固沙等互利作用,在我国盐碱化、沙漠化以及干旱地区不断发展出多种林草光伏互补模式,通过“板上发电、板下种植”等方式,实现了“碳减排”与“碳汇”的双重效益<sup>[1]</sup>。另外,集中式光伏发电适宜在具有规模、连片的土地上布设光伏阵列<sup>[2]</sup>,森林、草原作为我国陆地生态系统的主体,为林草光伏互补未来发展提供了广阔的空间。因此研究林草光伏互补适宜空间和潜力分析,并对其固碳减排效益进行综合评估,对探索新时期“双碳”战略背景下的林草生态保护修复与治理具有积极意义。

目前国内外关于林草光伏互补研究仍处于起步阶段,与“农光互补”“渔光互补”“沙光互补”等重点关注产出效益与环境影响所不同<sup>[3-5]</sup>,林草光伏互补研究主要集中在土地用途管制、生态环境影响、选址布局等方面。生态环境影响方面<sup>[6-12]</sup>,Dan等<sup>[6]</sup>研究分析了荒漠戈壁区、沙区、水域、矿区等不同区域光伏发展对环境的影响,结果显示光伏建设在荒漠治理、水环境稳定、矿区生态修复、植被固沙效应等方面发挥了不同程度的互补互利效益。在选址布局及效益评估方面,Lurwan等<sup>[13]</sup>基于GIS选取了反映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;Charabi等<sup>[14]</sup>利用ARCGIS10.7的模糊分类方法,对阿曼大型光伏发电场土地适宜性进行布局分析,划分了阿曼光伏建设的重点区域;刘立程等<sup>[15]</sup>采用主成分分析法确定适宜性指标权重,对京津冀地区光伏发展空间适宜性及减排效益进行量化分析;张乾等<sup>[16]</sup>利用层次分析法从宏观尺度对我国建设光伏电站的适宜性区域进行了分析。然而,以上研究主要关注光伏建设的适宜性及效益发挥,并未统筹考虑林草植被与光伏发电的空间适宜性及互补模式,更缺少光伏建设对林草固碳效益的量化评估,也未提出缓解林草生态保护与光伏建设用地矛盾的方法与措施。

根据我国新时期构建的自然资源监测体系要求,坚持以全国第三次土地调查(以下简称“国土三调”)成果为统一底版,对以往林草资源调查成果进行了对接融合,更新了林地和草地的范围,这给林草光伏互补发展的政策监管带来新变化。目前大部分研究成果未能统筹考虑光伏发展的适宜性分析与规划布局关系,例如在规划适建区域、分区布局建设模式等方面难以实现图斑尺度的成果应用<sup>[17-18]</sup>。以上这些问题逐渐成为林草光伏互补规模化建设的重点和难点。

本研究从林地和草地用途管制政策、林草光伏互补发展空间适宜性及固碳减排综合效益出发,以“国土三调”划定的林地和草地为范围,通过因子分析方法选取适宜性指标因子,对延安市规模化开展林草光伏互补的空间适宜性分析和验证,评估不同互补模式与开发强度下的固碳减排综合效益,总结出基于图斑尺度的林草光伏互补空间适宜性分析与效益评估方法,为今后开展林草光伏互补规划设计、布局选址、碳汇碳减排交易等提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

延安市位于陕西省北部,地处黄河中游,总面积3.7万km<sup>2</sup>,下辖13个县级行政区,地势西北高、东南低,平均海拔1200m左右,北部以黄土梁峁、沟壑为主,南部以黄土残塬沟壑为主。延安市光照资源良好,属于二类光伏资源区,年日照时数为2200~3000h,年有效发电数1250~1650h,年接收太阳辐射总量为5016~5852MJ·m<sup>-2</sup>。根据林草资源及生态状况统计<sup>[19]</sup>,截至2021年,延安市林地面积259.54万hm<sup>2</sup>,草地面积47.74万hm<sup>2</sup>,林草地总面积占全市土地面积的83.05%(图1)。延安市累计完成退耕还林71.83万hm<sup>2</sup>,截至2021年森林覆盖率提高到48.07%,林草综合植被覆盖度达到81.3%,林草生态修复效果及潜力巨大。另外延安市作为我国重要煤炭、石化能源基地,在推进能源绿色低碳转型,发展煤电新能源互补方面有着重要的发展优势。

### 1.2 数据与方法

1.2.1 技术路线 首先以“国土三调”与林草对接融合数据为基础,依据三区三线成果确定限制范围,

以图斑为单元筛选出延安市适宜和不适宜林草光伏互补的空间范围。其次从林草生态修复、气象类因子、林草植被状况、地形类因子方面选取适宜程度评价指标,采用主成分因子分析法获取各项因子权重;根据适宜性指数结果将适宜程度划分为非常适宜、较适宜、一般适宜、较不适宜、不适宜,并按照集中连片规模化开发来评价其空间分布特征。最后分别林草光伏互补主要模式,对其在不同开发强度下的规模与潜力进行测算,并对其林草植被固碳效益、光伏发电的碳减排效益等进行综合评估,为延安市林草光伏互补发展提供参考(图 2)。

1.2.2 数据来源与处理

1.2.2.1 数据来源 林地、草地利用数据来源于 2021 年国土三调与林草融合成果数据以及草原监测专题成果;林草植被指数,来源于 2021 年美国陆地卫星 LandSat8 遥感影像数据,空间分辨率 30 m;生态保护红线成果,来源于延安市 2021 年国土空间规划相关资料;林草生态功能数据,来源于 2018 年森林资源连续清查及 2021 年草原基况调查数据;气象数据,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>);地形地貌数据,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 30 m。

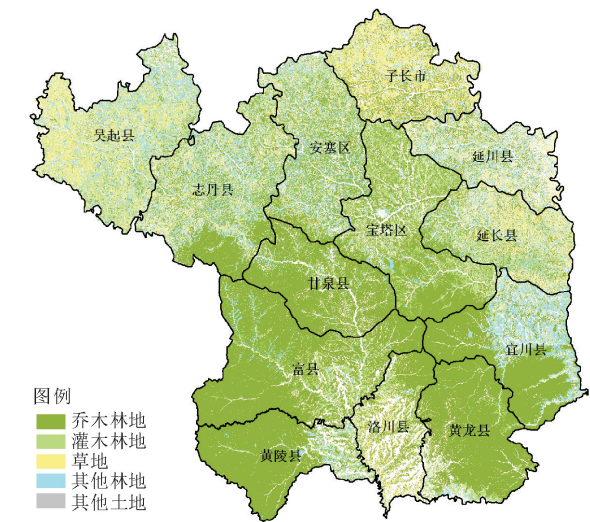


图 1 延安市林地草地利用现状分布  
Fig. 1 Distribution of current situation of forest and grass land use in Yan'an City

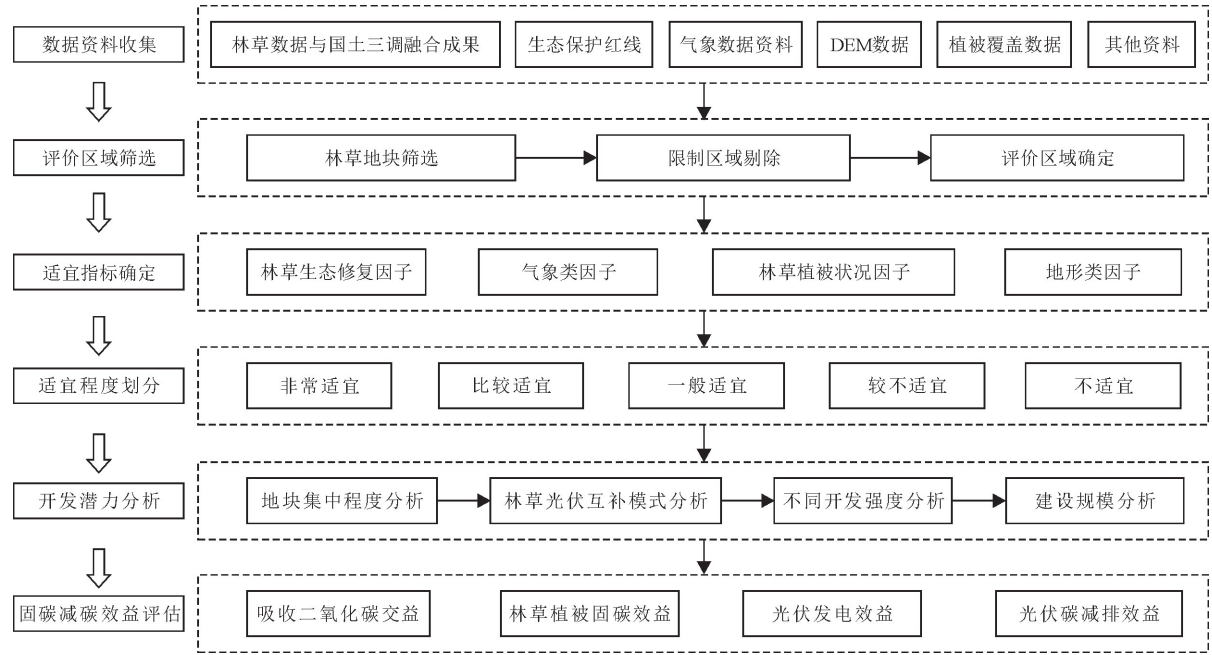


图 2 延安市林草光伏互补研究技术路线  
Fig. 2 Technical route of photovoltaic complementary research of forest and grass in Yan'an

1.2.2.2 数据处理 根据延安市国土三调成果数据,按照矢量图斑属性提取延安市林地草地利用现状数据,并对政策限制性范围(生态保护红线、基本农田红线等)进行剔除,获取评价区域的林地草地范围数据;对于年太阳总辐射和年日照时数,采用气象学专用软件 Anusplin 插值为栅格;林草生态修复潜力指标主要根据森林资源连续清查的森林生态功能指数以及草原基况调查数据计算生成;林草植被覆

盖类型根据 2021 年林草湿综合监测成果,按照乔木型、乔灌型、灌木型、灌草型、草本型进行提取;通过克里金插值法将优势树种、草种数据处理成喜阴、中性、喜阳栅格数据;植被指数通过 Google Earth Engine(GEE)遥感计算平台,提取 LandSat8 影像每个像元 NDVI 的年度最大值;利用 DEM 数据提取坡度值,并按照坡向值划分无坡向、阳坡、半阳坡、半阴坡、阴坡,并按照 1~5 对应进行赋值;利用



ARCGIS10.7 软件,对空间距离 150 m 内图斑进行聚合,并筛选、剔除面积  $1 \text{ hm}^2$  以下的图斑,获得适宜区域集中连片图斑。最后通过专题调研及野外验证方式对延安市其他相关资料进行收集。以上所有

空间数据坐标统一采用 CGCS2000 坐标系,高斯克吕格 3 度带投影,中央经线  $108^\circ$ ,其中栅格数据统一按照  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$  重采样(图 3)。

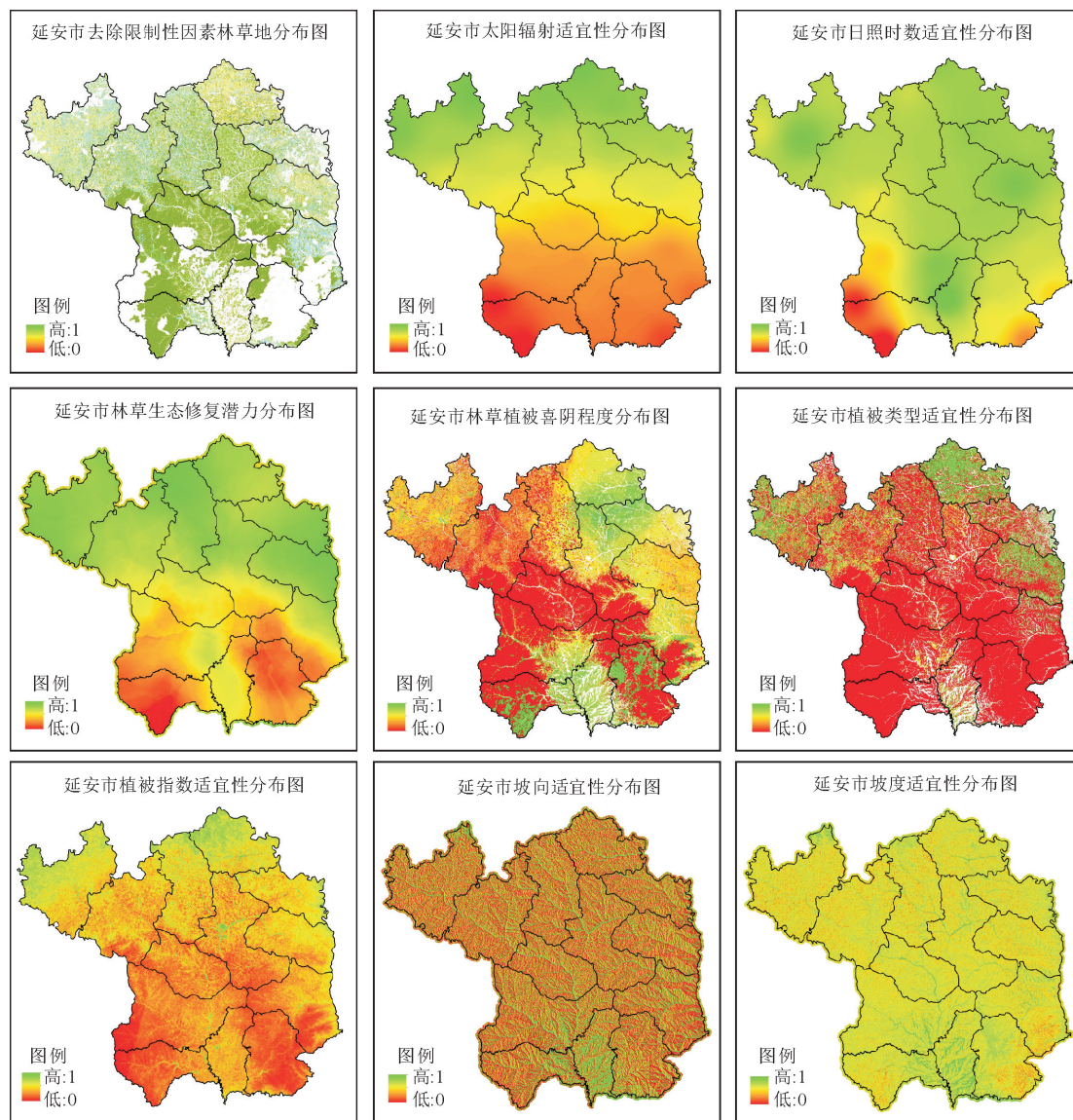


图 3 林草光伏互补评价指标适宜性分布

Fig. 3 Evaluation index data of forest and grass photovoltaic complementary suitability

由于选取的评价因子变量含义不一样,本研究采用归一化方式消除量纲带来的影响。选取的正向指标包括林草生态修复潜力(EFR)、太阳时数(ASH)、太阳总辐射(ASR)、植被喜阴程度(SD),逆向指标包括植被覆盖类型(VCT)、林草植被指数(NDVI)、坡度(SLOP)、坡向(ASP)。采用极差标准化方法进行归一化。

$$\text{正向 } S_i = \frac{I_i - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \quad (1)$$

$$\text{逆向 } S_i = \frac{I_{\max} - I_i}{I_{\max} - I_{\min}} \quad (2)$$

式中: $S_i$  表示第  $i$  指标的标准化值,值域范围为  $0 \sim$

$1$ ;  $I_i$  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。

1.2.3 指标因子选择与检验 基于延安市林草光伏互补专题调研结果综合分析,认为主要影响指标有 3 类:光照条件及林草生态修复潜力包括太阳总辐射、日照时数、林草生态修复潜力,前 2 项指标是光伏并网电站选址适宜性等级评价的重要参数(国家标准《光伏电站性能评估技术规范》GB/T 39854—2021),林草生态修复潜力主要指根据目前自然条件提升林草生态系统质量的未来发展空间;林草植被状况因子包括林草覆盖类型、植被指数、林草喜阴程度,其中林草覆盖类型主要代表在空间利



用上对光伏建设的影响。植被指数代表植被综合覆盖程度,该指标越大代表其植被覆盖状况越好,修建光伏设施可能对原有植被的扰动就越明显。林草喜阴程度则反映了光伏遮荫增湿对改善林草植被生长状况的有益程度;地形因子包括坡度和坡向,其中坡度越大光伏建设可能造成水土流失风险越高,且建设难度也会增加,而坡向则与光伏板吸收太阳辐射和有效日照时间有着密切关系。

为了避免各指标之间高度相关,信息发生重叠,在开展适宜性评价前需要对其进行多重共线性诊断。采用 SPSS16.0 软件中对所有指标因子及适宜性指数共线性诊断后发现,所有指标的容忍度( $T_{ol}$ ) $>0.1$ ,方差膨胀因子( $V_{IF}$ ) $<10$ ,表示选取的各项指标因子不存在共线性现象(表 1)。

表 1 林草光伏适宜性指标共线性诊断结果

Table 1 Results of collinearity diagnosis of photovoltaic suitability index of forest and grass

指标	容差	$V_{IF}$
生态修复潜力( $E_{FR}$ )	0.180	5.546
林草喜阴程度( $S_D$ )	0.904	1.106
林草覆盖类型( $V_{CT}$ )	0.710	1.408
植被指数( $N_{DVI}$ )	0.611	1.638
日照时数( $A_{SH}$ )	0.508	1.970
太阳辐射量( $A_{SR}$ )	0.221	4.531
坡向( $A_{SP}$ )	0.947	1.056
坡度( $S_{LOP}$ )	0.966	1.035

1.2.4 研究方法

1.2.4.1 指标权重确定 采用主成分因子分析确定评价指标的相对重要程度,避免因主观因素造成结果干扰。首先对剔除了限制因素后的 8 个指标因子转化为单元样本,并利用 SPSS16.0 软件进行 KMO 和巴特利检验,KMO 值为 0.77( $>0.6$ ),Bartlett 球形度检验( $P<0.05$ ),说明变量间的相关程度无太大差异,研究数据适合进行主成分因子分析。其次根据 SPSS16.0 软件主成分因子分析结果,获得特征值 $>1$ 的主成分,对其空间载荷图和各主成分的累积贡献率进行分析(表 2),发现 3 个主成分与分析项对应和解释关系良好,再根据各指标在主成分线性组合中的系数和累计贡献率,求得指标综合得分系数,最后通过归一化求得指标权重(表 3)。

1.2.4.2 适宜性指数计算及验证 根据各指标因子权重代入式(3),建立延安市林草光伏互补适宜性指数模型。通过 ArcGIS10.7 栅格计算器工具将各指标归一化后的空间数据进行加权求和计算适宜性指数,并采用 ArcGIS10.7 的自然断点法(natural breaks)对适宜性指数按照 5 类进行分类,分类范围

为:非常适宜(0.63~0.86)、较为适宜(0.54~0.63)、一般适宜(0.45~0.54)、较不适宜(0.35~0.45)、不适宜(0.11~0.35),产出适宜性指数的分类结果。适宜性指数计算公式如下。

$$S_{FP} = W_1 \times S_1 + W_2 \times S_2 + W_3 \times S_3 + \cdots + W_i \times S_i$$

(3)

式中: $S_{FP}$  为林草光互补开发适宜性指数; $W_i$  为第  $i$  个指标的权重; $S_i$  为第  $i$  个归一化的指标值。

表 2 主成分特征值及贡献率

Table 2 Principal component eigenvalue and contribution rate

成分	初始特征值			旋转载荷平方和		
	总计	方差百分比	累积(%)	总计	方差百分比	累积(%)
1	3.19	39.83	39.83	2.67	33.35	33.35
2	1.18	14.78	54.61	1.55	19.33	52.68
3	1.01	12.60	67.21	1.16	14.53	67.21

表 3 指标综合得分系数及权重

Table 3 Index comprehensive score coefficient and weight

指标	$P_{C1}$	$P_{C2}$	$P_{C3}$	综合得分系数	权重(%)
$E_{FR}$	0.51	0.18	0.04	0.31	14.44
$A_{SR}$	0.50	0.21	0.02	0.31	14.38
$A_{SH}$	0.45	0.04	0.03	0.24	11.11
$S_D$	0.00	0.66	0.10	0.21	9.82
$V_{CT}$	0.18	0.64	0.09	0.29	13.39
$N_{DVI}$	0.29	0.54	0.12	0.33	15.09
$S_{LOP}$	0.01	0.22	0.75	0.23	10.59
$A_{SP}$	0.03	0.23	0.74	0.24	11.17

采用现地调查核实方法对适宜性指数的计算结果进行精度验证,综合考虑区域植被类型、土地利用现状以及地形地貌等因素,在延安市 6 个区县选取了 9 个典型验证区域共 90 个调查样点(表 4、图 4),根据现场评价适宜或不适宜结果进行汇总。利用 SPSS16.0 交叉表工具进行统计分析,显示与模型评价适宜性结果一致的有 74 个,不一致的有 16 个,评价精度达到 82.2%,其中 Kappa 系数为 0.634,显著性检验  $P<0.05$ ,说明适宜性指数模型计算结果与现地验证样本情况具有较高一致性,可信度较高。

1.2.4.3 林草修复模式及固碳潜力测算 现场调研资料显示,目前延安市林草光伏互补的植被修复模式主要有 3 类,第一类是以乔灌植被修复为对象的“板间种植”修复模式,一般在光伏矩阵的板间按照乔灌行带栽植要求进行配置,光伏板间距一般要求在 6 m 以上,乔灌植被与光伏板的面积配置比例一般为 2:1,该模式的固碳效益较高,适合对原有乔灌植被退化修复或经济树种改培,但如果树种选择不当和后期管护缺失可能会出现植被生长遮挡光伏发电情况;第 2 类模式是以灌草植被为对象的“板

下种植”或“板下+板间种植”模式,其光伏阵列架设最低点距地面一般 $\geq 2.5$  m,灌草植被与光伏板面积比例一般为1:1,该模式土地利用效率高,可有效降低灌草植被及土壤的蒸散量;第3类是以其他林地对象的乔灌草修复模式,乔灌草植被与光伏板面积比例大约1.5:1,该模式主要以光伏基地外围锁边绿化、建设区周围生态修复为主,通过乔灌草相结合的植被修复,发挥固碳释氧、防风固沙、水土保持综合效益。依据《森林生态系统服务功能评估规范》(GB/T 38582—2020)的计算固碳潜力,根据

表4 典型验证区域的分布及特征

Table 4 Distribution and characteristics of typical verification areas

序号	区域名	经纬度	植被型	主要土地覆盖类型	样点数/个
1	安塞高桥镇	109°11'40"E, 36°38'59"N	草原植被	以草本覆盖为主,乔木、灌木零星分布	12
2	安塞砖窑湾	108°57'14"E, 36°42'53"N	灌草植被	以灌木覆盖为主,草本次之	7
3	志丹永宁镇	108°48'54"E, 36°29'21"N	灌草植被	以灌木覆盖为主,草本次之	10
4	志丹义正镇	108°24'28"E, 36°34'08"N	草原植被	以草本覆盖为主	10
5	黄龙界头庙	109°48'24"E, 35°26'24"N	乔木植被	以乔木覆盖为主	8
6	宜川秋林镇	110°11'37"E, 36°06'32"N	乔灌植被	以乔木覆盖为主,灌木覆盖次之	12
7	宜川秋林至交里	110°08'29"E, 36°11'56"N	灌木植被	以灌木覆盖为主	10
8	延长罗子山张家湾	110°25'17"E, 36°34'10"N	草原植被	以草本覆盖为主,灌木零星分布	9
9	延川乾坤湾	110°17'52"E, 36°40'15"N	灌草植被	以灌木覆盖为主,草本次之	10

1.2.4.4 光伏发电潜力及减排评估 光伏发电效率易受自然条件、设备选型等因素影响,本研究根据调研情况选取目前应用最为广泛的多晶硅,其转换率为16.5%。另外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影响,同时发电潜力还要综合考虑弃光率( $A_P$ ),沙尘造成的电量损失( $L_O$ )。发电量与煤耗和二氧化碳排放的折算标准,参照我国火电厂供电煤耗301.5 g 标准煤/kW·h 计算,单位火电发电量二氧化碳排放按828 g·kW<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup> 计算(数据来源《中国电力行业年度发展报告2022》)。年太阳能发电潜力公式如下。

$$S_{\text{EGP}} = S_A \times A_F \times A_{\text{SR}} \times P_E \times (1 - L_O) \times (1 - A_P) \quad (5)$$

式中: $S_{\text{GEP}}$  为光伏发电潜力(kW·h); $S_A$  为适宜发展光伏电站的面积(km<sup>2</sup>); $A_F$  为接受太阳辐射的面积因子系数,取0.35; $A_{\text{SR}}$  为单位面积的年太阳总辐射(kW·h·km<sup>-2</sup>),延安地区取平均值5 434 MJ·m<sup>-2</sup>;  $P_E$  为太阳能电池板的发电效率<sup>[15]</sup>;  $L_O$  为损耗率,取值7.5%<sup>[21]</sup>;  $A_P$  为弃光率,取全国平均值1.8%(数据来源 <http://www.nea.gov.cn/>, 国家可再生能源中心)。

## 2 结果与分析

### 2.1 林草光互补开发适宜性分析

根据林草光伏互补适宜性指数计算结果,延安

乔灌植被、灌草、乔灌草植被3种模式分类估算,实测净生产力参照宋富强等<sup>[20]</sup>在陕北地区的研究成果。林草植被固碳潜力公式如下。

$$C_{\text{SPV}} = 1.63 \times R_{\text{碳}} \times A \times B_{\text{年}} \times F \quad (4)$$

式中: $C_{\text{SPV}}$  为林草植被年固碳量( $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ ); $R_{\text{碳}}$  为CO<sub>2</sub> 中碳的含量,为27.27%; $A$  为林草生态系统面积(hm<sup>2</sup>); $B_{\text{年}}$  为实测净生产力,乔灌植被取8.484  $\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ ,灌草植被取4.935  $\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ ,乔灌草植被取6.709 5  $\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ , $F$  为森林生态系统修正系数,取值1.0。

市非常适宜区域为35.85 万 hm<sup>2</sup> (占16.49%),较为适宜区域为58.34 万 hm<sup>2</sup> (26.84%),一般适宜区域为52.71 万 hm<sup>2</sup> (占24.25%),较不适宜区域为47.8 万 hm<sup>2</sup> (占21.99%)、不适宜区域为22.66 万 hm<sup>2</sup> (占10.42%)。非常或较为适宜开展林草光伏互补建设的区域(以下简称“适宜区域”)主要集中在延安市36°30'N 以北区域(图5),包括吴起、志丹、安塞、子长、延川、延长、宝塔7个区县,该区域主要以低盖度、低高度的灌草植被覆盖为主,且光照资源较南部地区更丰富,依托光伏建设开展林草生态修复潜力更大。南部区域的甘泉、富县、黄陵、宜川、黄龙等区县主要分布在子午岭、黄龙山林区范围,该区域林草植被盖度高、生长质量好,光照资源相对较低,且与生态红线区域交错分布,开展林草光伏互补的优势相对不明显。

在延安市13个区县范围内,适宜区域总面积为94.19 万 hm<sup>2</sup>,适宜区域面积在10 万 hm<sup>2</sup> 以上的有吴起、子长、安塞、志丹、延长县;适宜区域面积在5~10 万 hm<sup>2</sup> 的有延川和宝塔区;适宜面积在5 万 hm<sup>2</sup> 以下的有宜川、洛川、富县、甘泉、黄龙、黄陵。综上,延安市西北和东北区域适宜开展林草光伏建设的空间较大,其中适宜区域占可用林草面积比例较高的有子长(99.16%)、延川(92.86%)、吴起(84.3%),这些区域应作为未来林草光伏互补建设的重点布局范围。



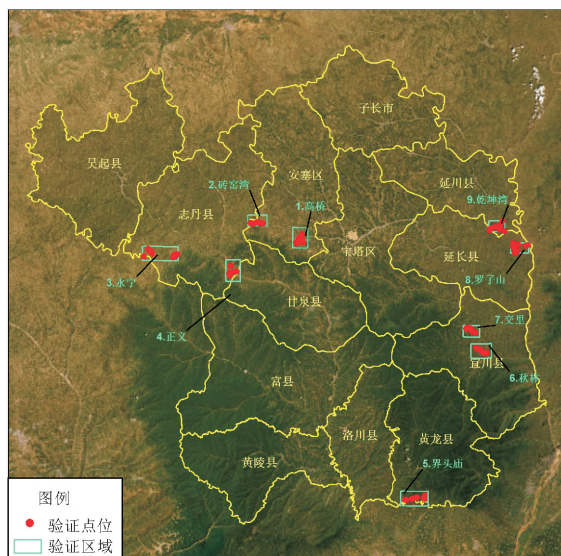


图4 延安市林草光伏适宜性验证区域分布

Fig. 4 Regional distribution map of forest and grass PV suitability verification in Yan'an City

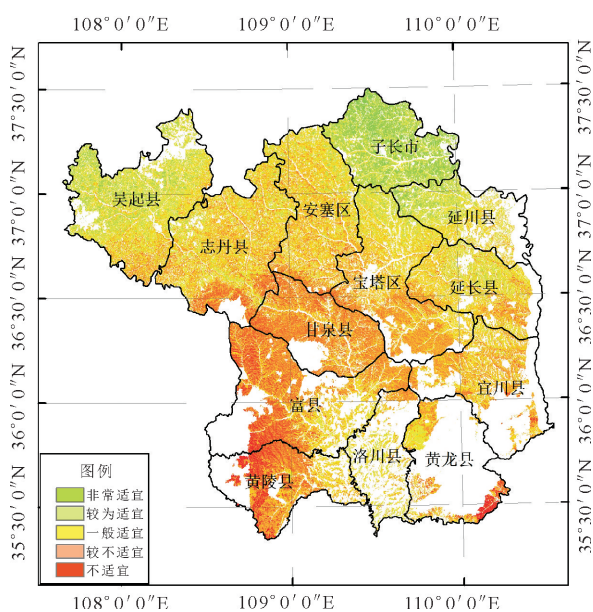


图5 延安市林草光伏适宜性空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of forest and grass PV suitability in Yan'an City

## 2.2 林草光互补开发潜力与效益评估

**2.2.1 规模化开发区域分析** 光伏开发需要集中连片的土地空间来集中配套变压器、逆变器和输电线路等,以降低单位建设成本。同时林草生态修复也需要集中连片空间以支持后续集约化经营管护,因此林草光伏互补建设需要考虑适宜区域内地块集中连片程度。在适宜区域内剔除零星分散地块后,适宜规模化开发的土地面积为 66.11 万  $\text{hm}^2$ ,占适宜区域总面积 70.21%,其中草地和其他林地面积共计 40.86 万  $\text{hm}^2$ ,占适宜规模化开发土地面积的 62.78%,可提供光伏开发的土地空间较大,且此 2

种土地利用类型的林草植被覆盖较低,生态修复迫切性较强,是开展林草光互补建设的首选对象。按照县域统计分析,吴起、子长、安塞 3 个区县适宜规模化开发的面积均在 10 万  $\text{hm}^2$  以上,延长、延川、志丹、宝塔 4 个区县适宜规模化开发的面积在 5 万~10 万  $\text{hm}^2$ ,其他区县面积均 <1 万  $\text{hm}^2$ 。因此延安市应优先考虑利用北部 7 个区县的草地和其他林地规模化发展林草光伏互补建设(图 6)。

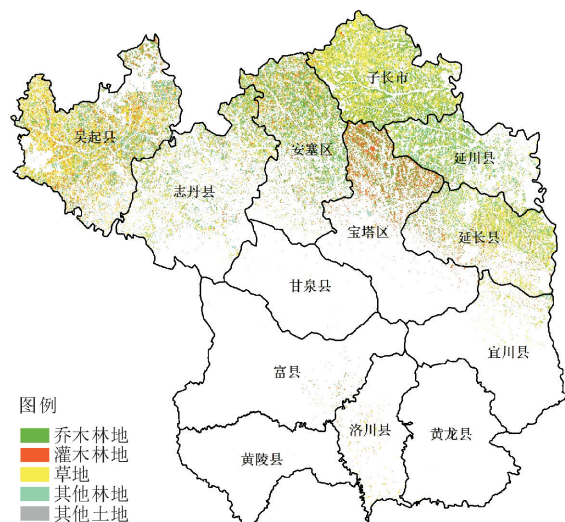


图6 延安市林草光伏互补集中连片适宜地块分布

Fig. 6 Distribution map of suitable plots in Yan'an for forest and grass photovoltaic complementary concentration

**2.2.2 不同植被修复模式开发潜力测算** 通过选取的 3 种植被修复模式进行建设规模的潜力分析测算,适宜规模化开发的土地面积为灌草修复与光伏互补模式>乔灌修复与光伏互补模式>乔灌草修复与光伏互补模式,且灌草修复与光伏互补模式可利用空间最大,采取板下种植与光伏发电的土地利用效率最高,可作为模式试点的优先选择。结合延安市相关规划指标数据,在不改变林地草地利用现状情况下,初步按照 5%、10%、30% 3 种开发强度评估其潜力,5%开发强度下,全市可提供 3.31 万  $\text{hm}^2$  土地;10%开发强度下可提供 6.62 万  $\text{hm}^2$  土地;30%开发强度下可提供 19.83 万  $\text{hm}^2$  土地,占延安市土地总面积的 5.36%(表 5)。

## 2.3 固碳减排效益评估

林草光伏互补的固碳效益主要体现在林草植被吸收  $\text{CO}_2$  与固碳作用方面,而减排主要体现在光伏清洁发电节约标准燃煤、减少  $\text{CO}_2$  排放作用方面。假设延安市采用林草光伏互补模式,在适宜规模化开发区域采取 30% 开发强度时,预计可吸收  $\text{CO}_2$  171.19 万  $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ ,增加固碳量 46.68 万  $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。如果按照综合效率系数 0.8,年平均日照时数按 2 600



h 计算,可满足 5 540.29 万 kW 的新增光伏装机容量,产生发电效益 1 152.38 亿 kW·h·a<sup>-1</sup>,相当于节约标准煤 3 474.46 万 t·a<sup>-1</sup>,减少 CO<sub>2</sub> 排放量 9 587.84 万 t·a<sup>-1</sup>(表 6)。

表 5 不同互补模式的开发潜力统计

Table 5 Statistical table of the development potential of different complementary models

序号	互补模式	适宜面积/ 万 hm <sup>2</sup>	开发强度 (%)	建设规模/ 万 hm <sup>2</sup>	林草修复规模/ 万 hm <sup>2</sup>	光伏建设规模/ 万 hm <sup>2</sup>
模式一	乔灌修复与光伏互补模式	19.08	5	0.96	0.64	0.32
			10	1.91	1.28	0.63
			30	5.72	3.83	1.89
模式二	灌草修复与光伏互补模式	32.66	5	1.64	1.64	1.64
			10	3.27	3.27	3.27
			30	9.80	9.80	9.80
模式三	乔灌草修复与光伏互补模式	14.37	5	0.72	0.60	0.48
			10	1.44	1.20	0.96
			30	4.31	3.60	2.87

表 6 林草光伏互补的固碳减排效益统计

Table 6 Statistics of carbon fixation and emission reduction benefits of forest and grass photovoltaic complementation

开发强度 (%)	建设规模/ 万 hm <sup>2</sup>	林草固碳效益		光伏发电及减排效益			
		固碳量/ (万 t·a <sup>-1</sup> )	吸收二氧化碳/ (万 t·a <sup>-1</sup> )	装机容量/ (万 kW·h)	发电量/ (亿 kW·h·a <sup>-1</sup> )	节约标准煤/ (万 t·a <sup>-1</sup> )	减排二氧化碳/ (万 t·a <sup>-1</sup> )
5	3.31	7.795	28.575	924.64	192.325	579.86	1 600.165
10	6.62	15.59	57.15	1 849.28	384.65	1 159.72	3 200.33
30	19.83	46.68	171.19	5 540.29	1 152.38	3 474.46	9 587.84

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

延安市适宜开展林草光伏互补建设的区域面积 94.19 万 hm<sup>2</sup>,占延安市土地总面积的 1/4,主要集中在 36°30'N 以北的 7 个区县。综合考虑开发规模化和难易程度,适宜区域内有 40.86 万 hm<sup>2</sup>,林地草地可作为林草光伏互补建设的优先发展区域,占延安市土地总面积的 11.04%,是未来支撑延安市林草光伏互补试点建设的关键区域。

选取 3 种典型林草光伏互补植被修复模式开展适宜性分析和开发潜力测算,按照开发适宜区域面积大小排序,灌草光伏互补模式>乔灌光伏互补模式>乔灌草光伏互补模式,其中灌草光伏互补模式的土地综合利用效率最高,是开展林草光伏互补建设的首选模式。此模式下按照 30%开发强度,延安市光伏建设规模达到 9.8 万 hm<sup>2</sup>。

林草光伏互补建设对增加林草植被固碳、光伏发电碳减排作用明显,经测算,延安市林草光伏在 30%的集中开发强度下,可完成 17.23 万 hm<sup>2</sup> 林草生态修复任务,实现 5 540.29 万 kW·h 装机容量,吸收 CO<sub>2</sub> 171.19 万 t·a<sup>-1</sup>,增加固碳量 46.68 万 t,减排 CO<sub>2</sub> 9 587.84 万 t·a<sup>-1</sup>,对延安市增加林草植被覆盖、发展新能源,实现碳中和、碳达峰具有积极

意义。

林草光伏互补建设易受林地、草地用途管制政策、生态环境承载力、可再生能源配额指标调控等因素影响,未来需加强在林草光伏互补发展规划、光伏生态补偿机制、林草光伏互补效益监测与影响评价等领域探索,突破规模化林草光伏互补建设的瓶颈。

#### 3.2 讨论

开展林草光伏互补的适宜性评估-规划布局-模式建设-效益监测的体系化建设,对延安市如期实现 2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和的战略目标具有积极意义。按照《延安市十四五林草生态建设规划》,到 2025 年延安市规划完成林草生态修复面积 48 万 hm<sup>2</sup>,其中营造林 23.33 万 hm<sup>2</sup>,人工种草 1 万 hm<sup>2</sup>,退化林修复等 17 万 hm<sup>2</sup>,建设任务主要集中在立地条件差、自然修复能力弱的区域,假如采用林草光伏互补生态修复模式,在适宜规模开发范围内按 30%强度开发,就可以完成延安市“十四五”林草生态修复任务的 41.4%,同时有效解决生态建设投资渠道单一的问题。另外,《延安市新能源“十四五”规划》中提出,到 2025 年新增光伏开发规模 1 000 万 kW,光伏发电量增加 208 亿 kW·h 目标,如果采用林草光伏互补模式,在适宜规模开发范围按 5.4%的强度开发,即实施约 3.58 万 hm<sup>2</sup> 建设规模,就可完全实现上述目标。延安市作为陕西省的

高碳排放区,目前碳排放强度达到了4.16 t/万元GDP<sup>[22]</sup>,按照《延安市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》,延安市到2025年煤电、新能源发电量达到490亿kW·h,碳强度下降18%,减排二氧化碳286.67万t,林草光伏互补模式是实现上述目标的重要途径。

研究得出,实施林草光伏互补的区域适宜性及开发程度易受自然条件、管制政策、互补模式和技术措施等多重因素影响,从土地利用空间、植被生长状况、综合效益发挥角度出发,按照自然规律客观分析其适宜性,统筹考虑相关行业政策的主观影响,同时还需配套后续的监测评估工作,科学量化生态效益和经济效益。虽然国家有关政策禁止使用有林地、疏林地等地类,但从客观考虑延安近年来亟待修复的人工退化林分角度,坚持生态优先,借助林草光伏互补建设开展生态修复探索是具有积极意义的。此外光伏开发建设时也可能因为施工对原有植被生长产生扰动影响,冲刷光伏板、埋设光伏柱可能增加水土流失风险,因此需要对其进行长期监测评价,客观量化各类效益和影响程度,确保林草光伏互补建设与生态修复正向同步发展,这对消除林草光伏发展的质疑很有必要。另外相较以往研究<sup>[23-24]</sup>,本研究未考虑地块上已规划实施的生态修复工程以及林权流转风险等因素影响,且固碳效益评估主要是林草植被地上部分固碳作用,尚未考虑地下土壤固碳作用。

## 参考文献:

- [1] 王穗子,刘帅,樊江文,等.碳交易市场现状及草地碳汇潜力研究[J].草业学报,2018,27(6):177-187.  
WANG S Z, LIU S, FAN J W, *et al.* Research on the current situation of carbon trading market and the potential of grassland carbon sinks[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(6): 177-187. (in Chinese)
- [2] 王鑫森,马志勇,周旺潇,等.光伏发电系统碳中和及其影响因素[J].资源科学,2022,44(8):1735-1744.  
WANG X M, MA Z Y, ZHOU W X, *et al.* Carbon neutralization in photovoltaic power generation system and influencing factors[J]. *Resources Science*, 2022, 44(8): 1735-1744. (in Chinese)
- [3] 郭晓雅,崔青汝,王文彬,等.水光互补发电关键技术与研究展望[J].水电与抽水蓄能,2022,8(5):48-53,81.  
GUO X Y, CUI Q R, WANG W B, *et al.* Key technologies and research prospects for hydro-photovoltaic hybrid system[J]. *Hydropower and Pumped Storage*, 2022, 8(5): 48-53, 81. (in Chinese)
- [4] 王祯仪,汪季,高永,等.光伏电站建设对沙区生态环境的影响[J].水土保持通报,2019,39(1):191-196.  
WANG Z Y, WANG J, GAO Y, *et al.* Impacts of photovoltaic power station construction on ecology environment in sandy area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(1): 191-196. (in Chinese)
- [5] 陈健,王玲俊.农光互补的研究综述及展望[J].江苏农业科学,2022,50(5):1-9.
- [6] DAN U, MARKÉTA K, ALEKSANDRA J, *et al.* Ecological effects of preferential vegetation composition developed on sites with photovoltaic power plants[J]. *Ecological Engineering*, 2021, 168(10): 106274.
- [7] HAAS J, KHALIGHI J, LA FUENTE A, *et al.* Floating photovoltaic plants: Ecological impacts versus hydropower operation flexibility[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 206(4): 112414.
- [8] LYTLE W, MEYER K T, TANIKELLA G N, *et al.* Conceptual design and rationale for a new agrivoltaics concept: pastured-raised rabbits and solar farming[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 282(1): 124476.
- [9] 卢霞.荒漠戈壁区光伏电站建设的环境效应分析[D].兰州:兰州大学,2013:17-22.
- [10] 王荣祥.露天采矿回填区光伏发电项目的水土流失综合治理方案[J].太阳能,2022(9):56-64.  
WANG R X. Comprehensive treatment plan of soil erosion for PV power generation project in open pit mining backfill area[J]. *Solar Energy*, 2022(9): 56-64. (in Chinese)
- [11] 王燕妮,于华明,于江华.水面光伏局地生态效应观测事实分析[J].太阳能学报,2022,43(9):38-44.  
WANG Y N, YU H M, YU J H. Observation of surface photovoltaic on local ecology[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2022, 43(9): 38-44. (in Chinese)
- [12] 崔永琴,冯起,孙家欢,等.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.  
CUI Y Q, FENG Q, SUN J H, *et al.* A review of revegetation patterns of photovoltaic plant in northwest China[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(3): 200-203. (in Chinese)
- [13] 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[J]. *American Journal of Applied Sciences*, 2017, 14(1): 174-183.
- [14] CHARABI Y, GASTLI A. PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation[J]. *Renewable Energy*, 2011, 36(9): 2554-2561.
- [15] 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. (in Chinese)
- [16] 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 multicriteria evaluation[J]. *Journal of Geo-Informa-*

- tion Science, 2018, 20(1): 119-127. (in Chinese)
- [17] 夏小童. “林光互补”: 库布其沙漠治理的探索[J]. 四川环境, 2022, 41(1): 175-179.
- XIA X T. “Complementary planting industry and photovoltaic power generation”: exploration on the control of Kubuqi Desert[J]. Sichuan Environment, 2022, 41(1): 175-179. (in Chinese)
- [18] 张毓. 中国两种典型农光互补系统的能源-环境-经济综合评估[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021, 12-13.
- [19] 国家林业和草原局. 2021 中国林草资源及生态状况. [M]. 北京: 中国林业出版社, 2021: 11-18.
- [20] 宋富强, 康慕谊, 陈雅如, 等. 陕北黄土高原植被净初级生产力的估算[J]. 生态学杂志, 2009, 28(11): 2311-2318.
- SONG F Q, KANG M Y, CHEN Y R, *et al.* Estimation of vegetation net primary productivity on north Shaanxi Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(11): 2311-2318. (in Chinese)
- [21] 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.
- [22] 张靖妮, 王慧丽. 基于市域尺度的陕西省碳排放空间特征分析[J]. 能源环境保护, 2022, 36(2): 96-103.
- ZHANG J N, WANG H L. Spatial characteristics of carbon emission in Shaanxi Province based on city scale[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(2): 96-103. (in Chinese)
- [23] 杨致远, 刘琪璟, 秦立厚, 等. 延安市退耕还林工程生态效益评价[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(1): 259-266.
- YANG Z Y, LIU Q J, QIN L H, *et al.* Ecological benefit assessment of the grain for green project in Yan'a[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(1): 259-266. (in Chinese)
- [24] 霍艾迪, 王国梁, 李倩, 等. 基于 MODIS 影像数据的陕北黄土高原植被区划研究[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(4): 32-36.
- HUO A D, WANG G L, LI Q, *et al.* Vegetation division of Loess Plateau in northern Shaanxi based on MODIS image data[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(4): 32-36. (in Chinese)

(上接第 33 页)

- [25] ASHTON I W, MILLER A E, BOWMAN W D, *et al.* Niche complementarity due to plasticity in resource use: plant partitioning of chemical N forms[J]. The Ecological Society of America, 2010, 91: 3252-3260.
- [26] SONG M H, ZHENG L L, SUNDING K N, *et al.* Plasticity in nitrogen form uptake and preference in response to long-term nitrogen fertilization[J]. Plant and Soil, 2015, 394: 215-224.
- [27] FOTELLI M N, RENNENBERG H, GEBLER A. Effects of drought on the competitive interference of an early successional species (*Rubus fruticosus*) on *Fagus sylvatica* L. seedlings: <sup>15</sup>N uptake and partitioning, responses of amino acids and other N compounds[J]. Plant Biology, 2002, 4: 311-320.
- [28] WANG L X, MACKO S A. Constrained preferences in nitrogen uptake across plant species and environments[J]. Plant, Cell and Environment, 2011, 34: 525-534.
- [29] TEMPLER P H, DAWSON T E. Nitrogen uptake by four tree species of the Catskill Mountains, New York; implications for forest N dynamics[J]. Plant and Soil, 2004, 262: 251-261.
- [30] NASHOLM T, KIELLAND K, GANETEG U. Uptake of organic nitrogen by plants[J]. New Phytologist, 2009, 182: 31-48.
- [31] 方运霆, 莫江明, GUNDERSEN P, 等. 森林土壤氮素转换及其对氮沉降的响应[J]. 生态学报, 2004, 24(7): 1523-1531.
- FANG Y T, MO J M, GUNDERSEN P, *et al.* Nitrogen transformations in forest soils and its responses to atmospheric nitrogen deposition: a review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(7): 1523-1531. (in Chinese)
- [32] 欧阳园丽. 不同年龄杉木人工林不同器官养分回收特征研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2021.
- [33] LI A, GUO D L, WANG Z, *et al.* Nitrogen and phosphorus allocation in leaves, twigs, and fine roots across 49 temperate, subtropical and tropical tree species: a hierarchical pattern[J]. Functional Ecology, 2010, 24(1): 224-232.
- [34] BASSIRIRAD H, CALDWELL M M. Temporal changes in root growth and <sup>15</sup>N uptake and water relations of two tussock grass species recovering from water stress[J]. Physiology Plantarum, 1992, 86: 525-531.