

DOI: 10.20103/j.stxb.202409192271

柴莎莎, 刘玉, 任艳敏, 唐林楠, 姚兰. 生态脆弱区建光伏基地生态敏感性评价及分区研究——以祁连县为例. 生态学报, 2025, 45(9): 4200-4212.
Chai S S, Liu Y, Ren Y M, Tang L N, Yao L. Ecological sensitivity evaluation and zoning of the proposed photovoltaic base in the ecologically fragile area: a case study of Qilian County. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(9): 4200-4212.

生态脆弱区建光伏基地生态敏感性评价及分区研究 ——以祁连县为例

柴莎莎^{1,2}, 刘 玉^{1,3,*}, 任艳敏^{1,3}, 唐林楠^{1,3}, 姚 兰^{1,3}

1 北京市农林科学院信息技术研究中心, 北京 100097

2 长安大学土地工程学院, 西安 710054

3 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097

摘要: 面向生态脆弱区光伏基地建设需求, 构建县域生态敏感性评价模型与分区方法, 有助于新能源产业发展和生态环境保护目标“双实现”。以青海省祁连县为例, 在分析光伏基地建设运营对周边生态环境影响的基础上, 从地形条件、土壤条件、气候条件和生态条件 4 个维度构建生态敏感性评价模型, 并基于 SOFM 网络模型进行生态敏感性分区。结果显示: (1) 在地形、土壤、气候和生态等综合作用下, 祁连县生态敏感性指数空间分异明显。总体上看, 地形条件指数呈现山区>平原的空间分布特征; 土壤条件指数总体以中高值及以上为主; 气候条件指数呈现“由西北向东南逐渐减弱”的分布特征; 生态条件指数总体以中低值及以下为主。在四者的综合作用下, 祁连县生态敏感性指数划分为 4 个等级, 总体呈现“自西向东减弱, 由中部向南北两边减弱”的空间分布特征。其中, 高度、中高、中低和低度敏感区分别占拟建光伏基地区域的 26.37%、31.09%、26.06% 和 16.48%。(2) 采用 SOFM 网络模型将祁连县拟建光伏基地区域分为 4 个区。其中, 祁西高寒荒漠草原生态敏感区应以生态保护和生态修复为主, 原则上禁止开展与生态保护无关的建设活动; 祁中黑河上游生态恢复区在确保生态系统结构和功能不受影响的前提下, 可以适度规划建设一定规模的光伏基地; 祁东高寒灌草能源-生态协调区可结合灌丛、草地等资源发展“光伏+”生态协调模式; 祁南大通河草甸能源-生态优良区是光伏基地的优先选址区域, 可依托区域土地资源和生态资源优势, 打造“光伏+”产业融合链条。研究结果清晰展示了祁连县拟建光伏基地的生态敏感性分布格局, 相关方法可为生态脆弱区其他县域拟建光伏基地的生态敏感性评价及分区提供参考。

关键词: 光伏基地; 生态敏感性; SOFM 网络模型; 生态脆弱区; 祁连县

Ecological sensitivity evaluation and zoning of the proposed photovoltaic base in the ecologically fragile area: a case study of Qilian County

CHAI Shasha^{1,2}, LIU Yu^{1,3,*}, REN Yanmin^{1,3}, TANG Linnan^{1,3}, YAO Lan^{1,3}

1 Information Technology Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China

2 School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China

3 National Engineering and Technology Research Center of Agricultural Informatization, Beijing 100097, China

Abstract: With the growing need for photovoltaic base development in ecologically fragile areas, the construction of county-level ecological sensitivity evaluation model and zoning method is conducive to the “double realization” of the development of renewable energy industry and the goal of ecological environmental protection. Taking Qilian County, Qinghai Province as a case study, this study assesses the impact of photovoltaic base construction on the surrounding ecosystem and develops an ecological sensitivity model based on four factors: terrain conditions, soil conditions, climate conditions, and ecology

基金项目: “十四五”国家重点研发计划(2022YFC3802805)

收稿日期: 2024-09-19; 网络出版日期: 2025-03-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuyu@nercita.org.cn

conditions. Ecological zoning is then performed using the Self-Organizing Feature Mapping (SOFM) network model. The results indicate that: (1) Ecological sensitivity in Qilian County exhibits clear spatial differentiation, driven by the combined effects of terrain, soil, climate, and ecology. The terrain index follows a pattern of mountains>plains, while the soil index is predominantly medium to high. The climate index decreases gradually from northwest to southeast, and the ecological index is mostly low to medium. Under the combined effect of the four factors, the ecological sensitivity index of Qilian County is classified into four levels, and the overall spatial distribution characteristics of “weakening from west to east, and from the center to the north and south.” Sensitive areas account for 26.37%, 31.09%, 26.06%, and 16.48% of the proposed photovoltaic area in high, medium, medium-low, and low sensitivity categories, respectively. (2) The SOFM network model is used to divide the proposed photovoltaic base area in Qilian County into four distinct zones. Among them, the western Qilian alpine desert ecologically sensitive area should prioritize ecological protection and restoration, in principle, construction activities unrelated to ecological protection should be prohibited. In the central Qilian upper Heihe River ecological restoration area, moderate photovoltaic development is permitted, provided the ecosystem’s structure and function remain intact. The eastern Qilian alpine shrub energy-ecology coordination area can be combined with shrubs, grasslands and other resources to develop a “photovoltaic +” ecological coordination model. The Southern Qilian Datong River meadow energy-ecology excellent area is a priority site selection area for photovoltaic bases, which can rely on the advantages of regional land resources and ecological resources to adopt a “photovoltaic +” industrial integration approach. The results of this study clearly show the ecological sensitivity distribution pattern of the proposed photovoltaic bases in Qilian County, and the relevant methods can provide a reference for the ecological sensitivity evaluation and zoning of the proposed photovoltaic bases in other counties in the ecologically fragile area.

Key Words: photovoltaic base; ecological sensitivity; the SOFM network model; ecologically fragile areas; Qilian county

能源产业是国民经济的基础产业和战略性新兴产业,发展新能源是实现碳中和、建设绿色宜居地球的关键^[1]。2015年,近200个国家签署了《巴黎协定》,期望在本世纪下半叶实现温室气体的净零排放。截至2021年4月,超过130个国家和地区提出了“零碳”或“碳中和”的气候目标^[2]。2024年8月,中共中央、国务院印发《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》,提出加快西北风电光伏、西南水电、海上风电、沿海核电等清洁能源基地建设……到2030年非化石能源消费比重提高到25%左右^[3]。中国西北生态脆弱区的太阳能资源禀赋较优,而丰富的土地资源可有效支撑太阳能资源的规模化开发,是我国最具光伏发电潜力的地区,但同时也是生态地位重要且矛盾独特的区域,目前正面临着人类活动加剧和气候变化的双重压力。光伏基地大范围对土地进行压占,局部改变地表形态和用地性质;其建设与运营将对区域小气候、动植物的生长和周边环境产生一定影响,一定程度上加剧了原本脆弱生态的“二次退化”,部分地区生态环境急速恶化。因此,对拟建光伏基地区域开展生态敏感性评价,提前规避生态高度敏感区以降低光伏基地建设运营的生态影响,有助于协调生态保护与土地利用之间的关系,助推生态脆弱区可持续发展。

生态敏感性是指在同样的人类活动强度影响或外力作用下,出现区域生态环境问题的难易程度或概率大小^[4]。生态敏感性的研究可以追溯到20世纪60年代,美国学者麦克哈格(McHarg)在适宜性评价的基础上提出了生态敏感性分析模型^[5]。国内欧阳志云等最早提出生态敏感性概念,并开展了中国生态敏感性分区^[4]。作为生态敏感性评价研究体系的一个重要分支,面向具体建设活动的生态敏感性评价是量化区域生态环境承受能力的重要途径^[6],已取得了一定的研究成果,为建设项目的规划选址提供参考。在研究对象上,国内外重点围绕城市建设、农村居民点用地整理、废弃矿区复垦、公路建设等^[7-11]开展生态敏感性评价研究;在评价指标体系构建方面,侧重从地形条件、生态条件、环境问题等^[12-15]维度选取指标;在评价方法上,通常采用空间距离模型、框架模型、变权组合模型等^[13,16-19];在研究区域上,重点针对印度斯里兰卡、西里古里以及中国青海、新疆、陕西等^[7,20-23]生态环境较脆弱城市,也有针对东部沿海等经济发达城市^[24-25]。在生态

敏感性分区方面,二维关联判断矩阵、四象限模型、K 均值聚类、系统聚类法与自组织特征映射(Self-Organizing Feature Mapping,简称 SOFM)网络模型等^[26-29]方法较为常用。其中,SOFM 网络模型是一种自适应,自组织和自学习的无监督竞争神经网络方法,具有鲁棒性强、客观性与空间精度高等优点,可快速高效地实现生态敏感性属性特征与地理空间的聚类与可视化^[30]。综上发现,已有研究为拟建光伏基地的生态敏感性评价及分区提供了方法参考和技术借鉴。然而,县域是引领城乡绿色低碳发展的重要载体,同时也是发展光伏产业的重点地域。但是相关研究多集中在国家、省域、城市群等大中尺度,较少考虑县域空间内部生态敏感性的分布特点,相关技术及研究结果对生态脆弱区县域范围内生态敏感评价支撑不足;对拟建光伏基地区域开展生态敏感性评价比较少。据此,面向生态脆弱区光伏基地建设需求,构建县域生态敏感性评价模型与分区方法,以期为县域光伏基地选址提供技术支撑。

青海省祁连县是西北草原景观和荒漠景观的分界线,也是青藏高原和黄土高原的地理分界带,是高寒生态脆弱区和国家重点生态功能区的重叠区域。其地理位置特殊,土地资源丰富,具有丰富的太阳能资源,是青海省光伏基地建设重点区域。本文以青海省祁连县为例,从分析光伏基地建设运营对周边生态环境影响入手,从地形条件、土壤条件、气候条件、生态条件四个维度构建面向光伏基地建设的生态敏感性评价模型,并基于 SOFM 网络模型进行生态敏感性分区,以期助力生态脆弱区光伏产业发展和生态环境保护目标“双实现”。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

祁连县地处青海省海北藏族自治州的西北部,介于东经 $98^{\circ}05'35''$ — $101^{\circ}02'06''$ 、北纬 $37^{\circ}25'16''$ — $39^{\circ}05'18''$ 之间,位于国家级重点水源涵养生态功能区祁连山中段腹地。托勒山、托勒南山、黑河大峡谷省级森林公园和大通山均位于祁连县,工程建设面临较大的生态保护压力(图 1)。研究区土地总面积 13896.2 km^2 ,海拔 2227 — 5278 m ,平均海拔 3800 m 。土地利用类型以草地和林地为主,拥有草甸、针叶林、灌丛等丰富的植被类型丰富,其中草甸分布面积最广,可用于建设光伏基地的土地资源丰富。属大陆性高寒山区气候,年太阳辐射总量 989.8 — 1801.3 kWh/m^2 ,年太阳辐射总量处于很丰富带(1400 — 1750 kWh/m^2)的面积占县域总面积的 96.79% ;年日照时数 2625 — 3133 h ,光照资源充足。祁连县目前计划建设光伏基地总装机规模为 15.5 万 kW ,涉及央隆乡、野牛沟乡、默勒镇。同时,祁连县是黑河、托勒河、大通河“三河之源”,是河西走廊最重要的水源

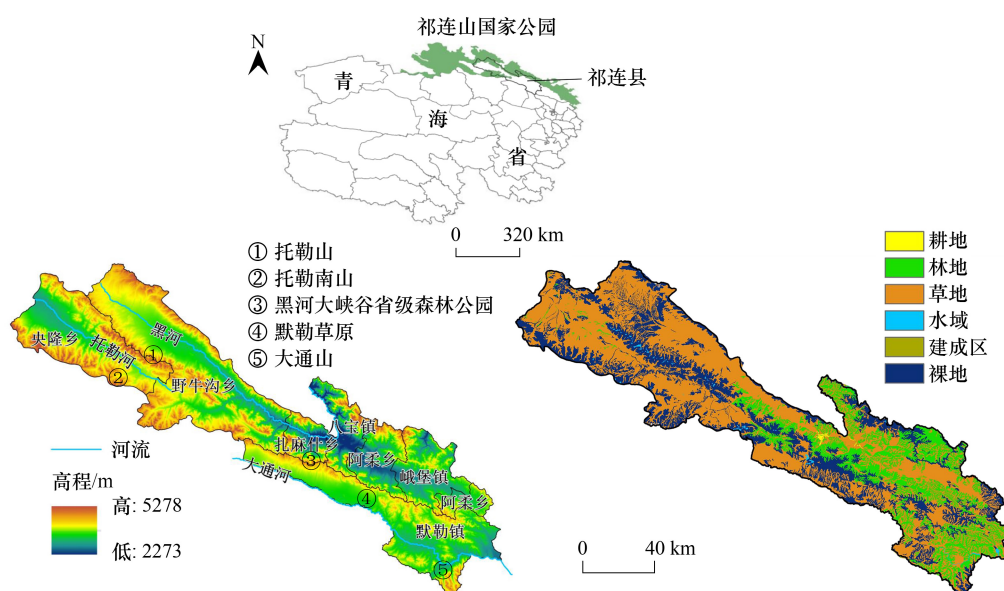


图 1 研究区概况

Fig.1 Location of the study area

地和生态屏障,是第六批国家生态文明建设示范区。因此,在布局光伏基地时,应充分考虑生态敏感性,尽可能避让生态极重要或者生态敏感性高的区域。

1.2 数据来源与处理

本研究使用的道路、水系和自然保护区边界数据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。土地利用类型、年太阳辐射总量、年日照时数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>),空间分辨率为 30 m。DEM 数据来源于 NASA 地球科学数据网,坡度数据由 DEM 数据经 ArcGIS 10.8 处理后获取,空间分辨率为 30 m。地貌类型来源于中国科学院资源与环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),空间分辨率为 1 km。土壤湿度、土壤有机碳含量来源于世界土壤数据库(<https://www.fao.org/>),土壤有机质含量由土壤有机碳含量经 Bemmelen 换算系数计算得来^[31],土壤保持能力由修正通用水土流失方程(RUSLE)计算^[32],空间分辨率为 1 km。年均气温与年均降水量数据是通过国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)中逐月平均气温数据集、逐月降水量数据集进行栅格计算后获取,空间分辨率为 1 km。冻土稳定类型(1 km)来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<http://www.ncdc.ac.cn>),空间分辨率为 1 km。温度植被干旱指数(TVDI)来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>),空间分辨率为 1 km。以上数据均经过投影变换、裁剪、重采样等处理,地理参考为 WGS_1984_UTM_zone_47N,以 250 m×250 m 网格为评价单元,共计 89602 个。

2 研究思路与方法

本研究运用综合评价法和 SOFM 网络模型开展面向拟建光伏基地的生态敏感性评价及分区研究,技术路线见图 2,具体思路是:(1)拟建光伏基地区域提取。基于国土空间用途管制和生态环境分区管控等政策约束,从研究区剔除耕地、城市建设区、自然保护区、水域等不适宜建设光伏基地的区域(约占祁连县总面积的 59.97%),得到拟建光伏基地区域(约占祁连县总面积 40.03%)。(2)拟建光伏基地的生态敏感性评价。从分

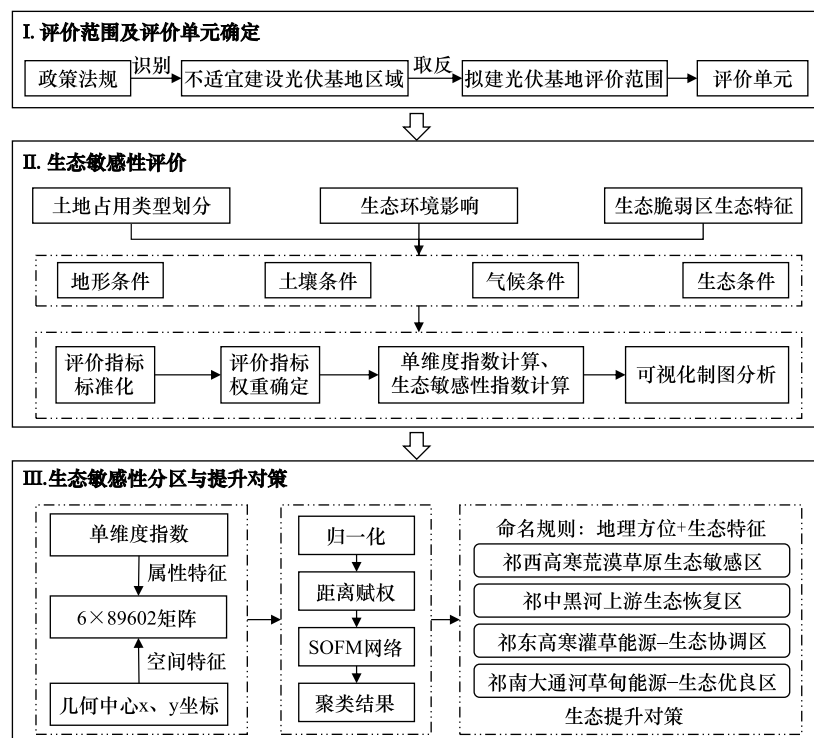


图2 技术路线

Fig.2 Technological roadmap

SOFM: 自组织特征映射

析光伏基地建设运营对生态环境的影响入手,考虑其影响和区域本底生态状况,从地形条件、土壤条件、气候条件和生态条件 4 个维度构建面向光伏基地建设的生态敏感性评价指标体系,经过标准化、赋权计算得出评价单元各维度指数以及生态敏感性指数,揭示生态敏感性的空间分布特征。(3) 拟建光伏基地的生态敏感性分区及提升策略。基于 SOFM 网络模型,综合考虑空间特征和属性特征进行生态敏感性分区,分析其空间特征并提出差异化生态保护与提升策略。

2.1 光伏基地建设运营对生态环境的影响

揭示光伏基地建设运营对自然生态系统的影响,准确评估面向光伏基地建设的生态敏感性,是开展生态友好型光伏基地选址规划的前提。按照土地占用的时限划分,光伏基地建设运营涉及的土地占用类型可分为永久用地、临时用地和光伏方阵用地三大类。其中,永久用地包括配套的变电站、生活服务设施、杆塔基础、道路用地等,这部分土地是光伏基地建设运营的载体,并且永久改变原地类的用途。临时用地包括施工作业场、施工器材堆放、施工机具停放场、扬水管道及导(排)水管道及办公和生活临时用房等,这些用地在工程建设中作为施工辅助设施用地,在光伏基地建成后应按照相关规定恢复到原地类或者复垦达到可供利用状态。光伏方阵用地包括局部硬化和保留原貌的土地,其占用时限没有明确的界定,一般以光伏面板的服务期(25 年)为一个周期。搭建光伏方阵占用的桩基用地和配套光伏方阵的道路需要硬化,其余大部分区域不改变地表形态和用地性质。光伏基地建设运营阶段不同土地占用类型的生态环境影响可归纳为表 1。

表 1 光伏基地建设运营的生态环境影响

Table 1 Ecological environmental impact of photovoltaic base construction and operation

周期阶段 Cycle phases	生态环境影响 Ecological and environmental impacts
建设安装 Construction and installation	永久用地建设过程中机械开挖、场地平整、设备安装等对表层植被清理、上层土壤层去除等,造成地表裸露,植被覆盖和固有的生物土壤结皮短期内遭到一定程度的破坏。而临时用地在建设过程产生的扬尘、废水、废气、生活垃圾、建筑废料等造成的生态破坏,随着工程结束相应的破坏不再产生。光伏方阵用地建设安装过程中,机械运作和施工人员不断踩踏,植被遭到损害以及部分动物被驱赶,但是次年植被即可自然恢复。
运营维护 Operation and maintenance	光伏方阵用地呈现片状分布改变了原有的空间布局,可能改变陆地动物的流通通道,光伏面板反光导致鸟类容易眩晕从而发生危险。由于光伏方阵的阻风固沙与遮荫增湿作用,降低了板下土壤的温度,为板下土壤提供了良好的水土保持条件。光伏方阵的倾斜安装方式还会改变雨水的自然流向,导致水分在方阵间距区积聚,光伏方阵下垫面不同区域土壤水分含量呈现明显的空间差异。与光伏基地周边相比,光伏方阵用地的土壤有机质、含水量、速效磷和速效钾含量明显增加,光伏面板以及植物的遮荫作用能有效的减少地表水分蒸发,提高了光伏方阵用地的蓄水保墒能力,有利于局部小气候的改善及站内植被恢复。

2.2 生态敏感性评价模型

2.2.1 评价指标体系构建

本文的生态敏感性评价是为了明确在光伏基地建设这一外力作用下,区域出现生态环境问题的难易程度或概率大小。参考国家、行业或地方标准以及相关文献^[17,19,33],结合生态学和地理学相关理论^[34]以及区域特殊性、代表性和可操作性等原则,考虑光伏基地建设运营生态影响相关的因子,从地形条件、土壤条件、气候条件和生态条件 4 个维度选取了 9 项指标构建拟建光伏基地的生态敏感性评价指标体系(表 2)。

地形条件包括坡度和地貌类型。其中,坡度反映地表某点的倾斜程度,坡度越小,表示开展建设活动的生态风险越低,生态敏感性就越低;地貌是生态系统的重要组成部分,不同的地貌类型的生态稳定性各异^[35],在平原和相对平坦的高原开展建设活动对生态环境影响较小,相应的生态敏感性较低。反之,光伏基地建设的生态敏感性越高。

土壤条件包括土壤湿度、土壤有机质含量和土壤保持能力。土壤湿度反映地上植被的水分供应情况,影响着土壤的稳定性和抗干旱能力。鲍平安等^[36]研究表明,相对充分的土壤湿度和光照资源有机结合之后,土壤内的植物繁殖体能够最大限度的萌发、出苗和成长。因此,土壤湿度越高,光伏基地建设后植被较容易恢复,相应的生态敏感性较低。参考前人研究^[37-38],土壤有机质不仅提供植物生长必需的养分,还促进有机物

分解和养分循环,土壤有机质的积累对植物多样性指数增加有着积极作用。因此,其含量越高,光伏基地建设后植被恢复越容易,相应的生态敏感性较低。土壤保持能力指土壤抵抗侵蚀、保持水分和养分的能力,其值越高,光伏基地建设后土壤恢复越容易,对应的生态敏感性越低。

表 2 面向光伏基地建设的生态敏感性评价指标体系
Table 2 Ecological sensitivity evaluation index system for photovoltaic base construction

目标层	准则层	指标层	单位	权重	指标属性
Destination layer	Criterion layer	Index layer	Unit	Weight	Indicator direction
生态敏感性评价 Ecological sensitivity evaluation	地形条件	坡度 *	(°)	0.1419	正向
		地貌类型 *	—	0.1390	正向
	土壤条件	土壤湿度	%	0.0820	负向
		土壤有机质含量	%	0.0350	负向
		土壤保持能力	—	0.1261	负向
		气候条件	年均温	℃	0.0514
	年均降水量		mm	0.1112	负向
	生态条件	冻土稳定类型 *	—	0.1504	正向
		温度植被干旱指数	—	0.1630	正向

* 表示属性指标,该类指标通过赋值实现标准化。指标属性中的正向表示指标值越大,生态敏感性越高;负向表示指标值越大,生态敏感性越低

气候条件包括年均气温和年均降水量。适宜的气温和充足的降水为生态系统提供了必要的能量和水分,是决定植被分布和生态服务功能的重要因素^[39]。在干旱、半干旱荒漠草原生态系统中,较低的气温可能不利于植被生长,而降水量较少的地区会导致植物群落的地上生物量和植物物种多样性降低,从而影响生态系统的稳定性^[40—41]。因此,年均气温和年均降水量值越低,建设光伏基地后生态恢复越困难,相应的生态敏感性越高。

生态条件包括冻土稳定类型和温度植被干旱指数(TVDI)。参考余文君等^[42]学者的研究,冻土是高寒生态脆弱区重要的组成部分,易受到气候变化的影响,对于指示生态敏感性至关重要,冻土状态越稳定,表示区域的生态敏感性越低。参考姜旭海等^[19]、杜灵通等^[43]学者的研究,选取 TVDI 表征区域的干旱状况。TVDI 指特定年内某一时期整个区域的相对干旱程度,它通过分析地表温度和植被指数的关系来评估地表植被的干旱程度^[44],TVDI 值越低,反映出植被越湿润,干旱状况越轻,生态敏感性越低。反之,生态敏感性越高。

2.2.2 生态敏感性指数计算与分级

(1) 数据型指标标准化。

为了消除数据型指标在单位和量纲上的差异,使数据具有可分析性和可比性,本文运用极差法对数据型指标进行标准化处理。具体而言,正向指标标准化计算公式为:

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \tag{1}$$

负向指标标准化计算公式为:

$$Y_{ij} = \frac{X_{\max} - X_{ij}}{X_{\max} - X_{\min}} \tag{2}$$

式中, Y_{ij} 为第*i*个评价单元第*j*项指标的标准化值; X_{ij} 为第*i*个评价单元第*j*项指标的原始数值; $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别为第*j*项指标的最大值和最小值。

(2) 属性指标标准化。

对于坡度、地貌类型、冻土稳定类型等描述性指标,参照 Likert scale,将标准化值分为 0.00、0.25、0.50、0.75、1.00 共 5 等(表 3),值越大表示生态敏感性越高。参考前人研究,坡度在 5°以内较适宜开展建设活动且生态恢复难度较低,而坡度在 30°以上开展建设活动的生态恢复难度较高。在西北生态脆弱地区,高山地貌

的海拔通常在 4000 m 以上,因坡度较大和冻土覆盖等,人类进行建设活动之后更容易引发生态问题,因此将高山地貌标准化赋值为 1.00;平原和台地海拔较低,地势较平坦,更有利于光伏基地建设后的生态系统恢复,因此其标准化值相对较小。不稳定型冻土更容易受到周围环境的影响,其退化风险较高,因此将其标准化赋值为 1.00;区域内的稳定型冻土相对不容易受到环境影响,其发生退化风险较低,因此其标准化值为 0.25。

表 3 属性指标标准化

Table 3 Standardization of attribute indicators

属性指标 Attribute index	指标量化标准 Index quantification standard				
	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
坡度 Slope/(°)	<5	5—10	10—20	20—30	>30
地貌类型 Geomorphic type	平原	台地	丘陵	中低山	高山
冻土稳定类型 Frozen soil stable type	非永久冻土、无冻土	稳定型	亚稳定型	过渡型	不稳定型

(3) 指标权重的确定。

CRITIC 赋权法是由 Diakoulaki 等^[45]提出的一种客观权重赋值法,该方法基于评价指标的对比强度和指标之间的冲突性来反映指标的信息量,对比强度和冲突性越大,则指标权重越高。该方法考虑了相关性权数和信息权数,具有一定优越性。指标权重的计算公式为:

$$W_j = \frac{\delta_j \sum_{k=1}^n (1 - \text{Corr}_{jk})}{\sum_{j=1}^n [\delta_j \sum_{k=1}^n (1 - \text{Corr}_{jk})]} \quad (3)$$

式中, W_j 为第 j 个指标的权重; Corr_{jk} 为第 j 个指标和第 k 个指标的相关系数; δ_j 为第 j 个指标的标准差; n 为指标总数。

(4) 生态敏感性指数计算

通过加权求和法计算生态敏感性指数,其计算公式为:

$$EI_i = \sum_{j=1}^n (Y_{ij} \times W_j) \quad (4)$$

式中, EI_i 为第 i 个评价单元的生态敏感性指数; Y_{ij} 为第 i 个评价单元第 j 项指标的标准化值; W_j 为第 j 个指标的权重; n 为指标总数。 EI_i 的取值范围为 $[0, 1]$, EI_i 值越大,表示生态敏感程度越高,区域出现生态问题的概率越大; EI_i 值越小,表示生态敏感程度越低,区域出现生态问题的概率越小。

2.3 生态敏感性分区技术方法

为了明晰拟建光伏基地的生态敏感性的空间差异,增强拟建区域的生态管理连片性,本文运用 SOFM 网络模型基于像元聚类结果划分生态敏感区。SOFM 网络模型由芬兰学者 Teuvo Kohonen 提出,是一种能够将高维数据映射到低维空间,同时保持数据的拓扑结构的无监督神经网络模型^[46]。SOFM 网络模型能够充分考虑地理空间和属性空间的影响,使得聚类结果保持空间上的连通性和相似性,被广泛应用于地理学的分区和分类研究中^[29,47—48]。本文在 Matlab R2023b 软件中调用 Deep Learning Toolbox 训练 SOFM 网络模型。首先,选取地形条件、土壤条件、气候条件、生态条件共 4 维样本向量作为属性空间维度,以每个评价单元几何中心的 x 、 y 坐标作为地理空间维度,共同构成 6×89602 的矩阵,并对各维度参数进行归一化处理,使其分布在 $[0, 1]$ 之间。其次,采用混合距离来评估分类对象在空间和属性上的邻近关系,根据相关文献^[49],把地理空间和属性空间的权值分别设定为 0.4 和 0.6。最后,经神经网络训练 200 次,聚类数目依次为 3—8,比较聚类结果直至获得较为理想的聚类效果,进而根据分区聚类类型特征与区域实际情况,基于地理区位和生态敏感性特征对分区进行命名。

3 结果分析

3.1 单维度指数分布特征

由图 3 可知,地形条件指数呈现山区>平原的空间分布特征。其中,高值区[0.216—0.281)在空间上呈现集聚分布特征,集中分布于八宝镇、扎麻什乡、阿柔乡和野牛沟乡等,境内祁连山耸立于县境西北,托勒山横贯县境中部,托勒南山、大通山横亘于县南,以地形起伏较大的高山地貌为主,坡度 20°以上。中高值区[0.148—0.216)分布在央隆乡、默勒镇、峨堡镇南部等,以高山地貌为主,坡度大多为 10—20°。中低值区[0.064—0.148)分布在央隆乡、野牛沟乡、默勒镇、峨堡镇和阿柔乡等,坡度为 10°以下,以中低山地貌为主。低值区[0.001—0.064)和中低值区分布区域相似,低值区的地形特征主要是坡度低于 5°的平原地貌。

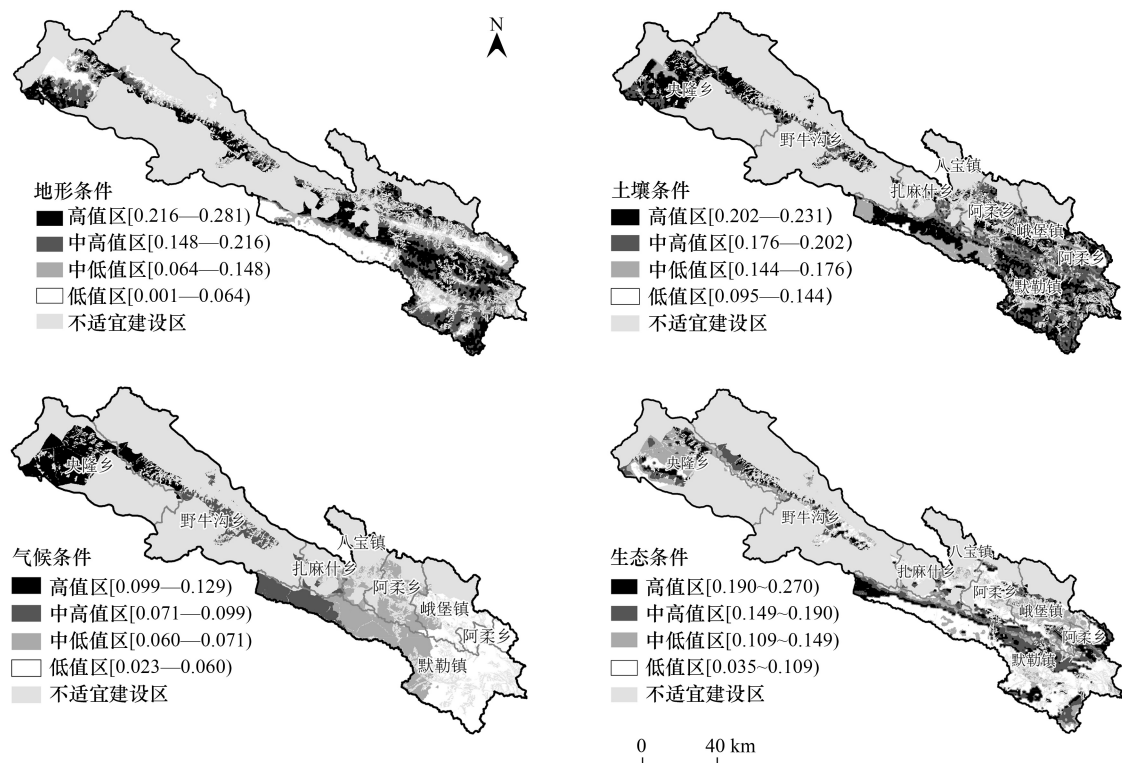


图 3 单维度指数空间分布

Fig.3 Spatial distribution of single-dimensional index

土壤条件指数呈现以高值和中高值为主的分布特征(图 3)。其中,高值区[0.202—0.231)呈现集聚与零星共存的分布特征,央隆乡、野牛沟乡和默勒镇西北部等分布较多,零星分布于阿柔乡、峨堡镇和默勒镇东部等。该类型区以无植被覆盖的裸地及原生土壤质地含沙量较高的草地为主,土壤有机质含量、土壤含水量和土壤保持能力均较低,土壤条件明显较差。中高值区[0.176—0.202)主要分布于野牛沟乡东南部、扎麻什乡、八宝镇、阿柔乡和默勒镇等,土壤保持能力适中,土壤含水量较低,有机质含量适中,土壤条件相对较差。中低值区[0.144—0.176)和低值区[0.095—0.144)集中分布在默勒镇,央隆乡、八宝镇、阿柔乡和峨堡镇亦有分布,以草地为主,土壤条件较好。

气候条件指数呈现“由西北向东南逐渐减弱”的分布特征(图 3)。其中,中高值以上单元集中分布在央隆乡、野牛沟乡,该区域降水量总体最低,气温受到海拔高度影响较明显,大多分布在海拔 3800 m 以上且气温较低,整体气候干燥少雨,气候条件相对较差。中低值以下单元集中位于扎麻什乡、八宝镇、阿柔乡、峨堡镇和默勒镇,该区域的降水量总体较高,大部分地区海拔在 3400 m 以下且气温适中,适宜植被生长与动物生存,气

候条件较好。

生态条件指数呈现以低值和中低值为主的空间特征(图3)。中高值以上单元主要分布在斜线轴一带,这些地区植被稀少,海拔较高且有冻土分布,大部分为亚稳定型和过渡型冻土,生态条件较敏感脆弱。中低值以下单元集聚分布在央隆乡、阿柔乡、默勒镇和峨堡镇等,气候适宜植被生长,无冻土分布,生态条件较优。

3.2 生态敏感性评价结果

根据综合评价法得到祁连县拟建光伏基地区域的生态敏感性评价指数,其中最大值为 0.869,最小值为 0.236,平均值为 0.558。应用自然断点法将评价结果划分为高度敏感区、中高敏感区、中低敏感区和低度敏感区。其中,高度敏感区、中高敏感区、中低敏感区和低度敏感区分别占拟建光伏基地区域的 26.37%、31.09%、26.06%和 16.48%。由图 4 可知,在地形条件、土壤条件、气候条件和生态条件的影响下,生态敏感性呈现明显的空间分异性,总体呈现“自西向东减弱,由中部向南北两边减弱”的空间分布特征。

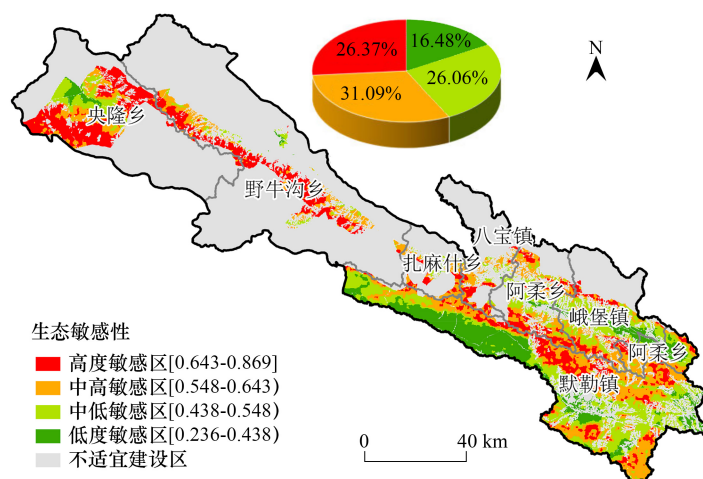


图 4 生态敏感性空间分布

Fig.4 Spatial distribution of ecological sensitivity

具体来看,(1)高度敏感区[0.643—0.869]集中分布在央隆乡、野牛沟乡等,邻近祁连山国家公园和青海省祁连山自然保护区,托勒山横贯于此,总体坡度较大,海拔较高且有亚稳定、过渡型冻土分布,大多是裸地,气候寒冷干燥,植被分布稀少,光伏基地建设的生态敏感性总体最高,是光伏基地选址优先避让的区域。(2)中高敏感区[0.548—0.643]集中分布在阿柔乡南部、峨堡镇南部、默勒镇北部等,处于黑河下游流域,邻近黑河大峡谷省级森林公园,受地形影响和土壤条件的影响,容易发生水土流失、土地退化等,光伏基地建设的生态敏感性较高,应尽量避免建设光伏基地。(3)中低敏感区[0.438—0.548]主要分布在央隆乡、阿柔乡、峨堡镇、默勒镇等,单元海拔较低,以平原和台地地貌为主,地势较平坦,土壤条件较好,大多是林地和草地,光伏基地建设的生态敏感性较低,是光伏基地选址建设的备选区域。(4)低度敏感区[0.236—0.438]集中分布在默勒镇西北部,央隆乡、峨堡镇、阿柔乡等亦有分布,单元地势平坦,集中连片,涵盖默勒草原、毗邻大通河流域。光伏基地建设的生态敏感性总体最低,是光伏基地选址建设优先考虑的区域。

3.3 生态敏感性分区与生态提升策略

比较 SOFM 网络模型不同聚类数目的结果,发现聚类数目为 4 时,各分区能保持完整性且分区之间的空间异质性较大,聚类数目达到 5 以上时,其分区结果表现出较大的破碎性。参考祁连县地形地貌、土地利用等,结合《青海省国土空间生态修复规划(2021—2035 年)》,根据区划的区域共轭性原则、综合性原则和主导因素原则,最终将祁连县拟建光伏基地区域的生态敏感性分为 4 个区域(图 5)。同时,为了合理反映各分区之间生态敏感性的特点,采用“地理方位+生态敏感性特征”的规则进行命名。

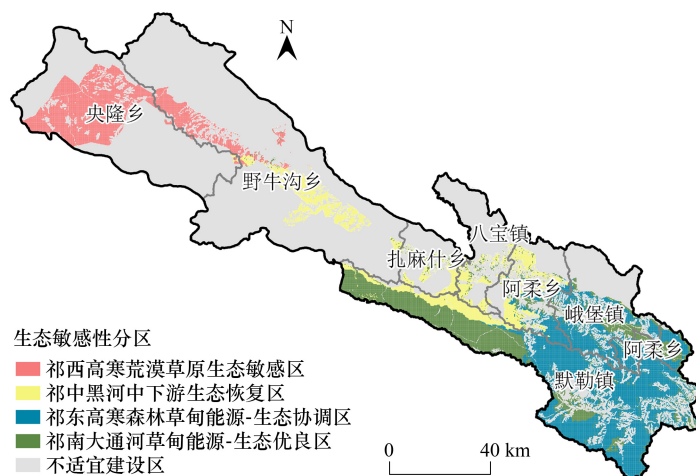


图5 生态敏感性分区

Fig.5 Ecological sensitivity zones

(1) 祁西高寒荒漠草原生态敏感区

该区位于祁连县西部,包括央隆乡和野牛沟乡西北部,面积为 1137.21 km²,约占拟建光伏区域的20.44%。土地利用类型主要是草地,其次为裸地,居民生活以畜牧业为主,放牧活动频繁,草地退化较为严重。总体上以高度生态敏感性为主,未来应以推动高寒生态系统自然恢复为导向,科学开展天然林草恢复、退化土地治理、矿山生态修复等人工辅助措施,促进区域野生动植物种群恢复和生物多样性保护,提升高寒荒漠草原生态系统结构完整性和功能稳定性。原则上禁止开展与生态保护相悖的建设活动,应尽量不建设或减少建设光伏基地。若需要建设,应实施严格的工程建设准入措施,控制建设项目的用地规模和利用强度;同时,建议科学利用矿区采煤沉陷区、采空区发展光伏产业,推动采煤沉陷区受损土地综合利用。

(2) 祁中黑河上游生态恢复区

该区位于祁连县中部,包括野牛沟乡东南部、扎麻什乡、八宝镇和阿柔乡部分区域,面积为 1039.83 km²,约占拟建光伏区域的 18.69%。其中,八宝镇是祁连县的经济中心。该区以中高度生态敏感性为主,属于黑河流域上游,祁连县的黄藏寺水利枢纽工程、宝瓶水电站、地盘子水电站均在此区附近。该区与人类活动联系密切,且经济建设活动对生态环境影响较大。未来应重点提升其水源涵养能力,以小流域为单元综合治理水土流失,开展多沙粗沙区为重点的水土保持工程。在确保生态系统结构和功能不受影响的前提下,可适度规划建设一定规模的光伏基地。同时,可研制匹配黑河上游水电发展的“水光互补”模式,以增强黑河流域上游的生态效益和经济效益。

(3) 祁东高寒灌草能源-生态协调区

该区位于祁连县东部,包括峨堡镇、阿柔乡部分区域和默勒镇大部分区域,面积为 2059.03 km²,约占拟建光伏区域的 37.02%。土地利用类型包括灌木林、草地和裸地,植被较丰富,其建设光伏基地的生态敏感性较低。除了部分海拔较高、坡度较大的高山区外,其他区域均适宜建设光伏基地。在适宜区域,可利用板下和板间的空间,结合灌丛和草地,发展立体化的“光伏+”生态协调模式。这种模式不仅能提高土地利用效率,还能发挥光伏基地对脆弱生态修复的积极作用,有效促进光伏产业与生态经济的协调发展。

(4) 祁南大通河草甸能源-生态优良区

该区位于祁连县南部,主要集中在默勒镇西北部,阿柔乡和峨堡镇部分区域亦有分布,是默勒草原所在区域,南接大通河,面积为 1326.58 km²,面积约占拟建光伏区域的 23.85%。土地利用类型主要是草地,地势平坦且连片性较强,建设光伏基地的生态敏感性最低,具有发展光伏产业的土地资源和生态资源优势,是光伏基地选址优先考虑的区域。未来可结合周边的水资源、牧草和畜牧业等产业资源合理规划建设一定规模的光伏

基地,实现板上发电、板下种植、板间养殖等,形成“光伏+饲料”、“光伏+畜牧”等产业融合发展链条。

4 讨论

本文从梳理光伏基地建设运营对生态环境的影响入手,结合区域生态本底条件构建县域生态敏感性评价模型与分区方法,使得生态敏感性评价结果更具有针对性,为光伏基地选址避让生态敏感区提供了新的思路。在划分不适宜建设区时,考虑到国家层面和地方层面的政策约束,从研究区剔除了耕地、城市建设区、自然保护区、水域等不适宜建设光伏基地的区域,得到拟建光伏基地区域,以确保生态敏感性评价范围符合光伏基地建设的用地要求,这与刘立程等^[50]思路一致。青海省祁连县土地资源、太阳能资源丰富,是发展光伏产业的典型区域,承载着巨大的发展压力,也肩负着多重生态功能的重要使命,面临着诸多生态问题,降低光伏产业发展引发的生态风险尤其重要。因此,对祁连县拟建光伏基地的生态敏感性评价研究不仅具有本地意义,更能为其他生态脆弱区提供参考与借鉴。

需要注意的是,多源土地利用数据的分类和精度不一致,使用不同来源的土地利用数据提取拟建光伏基地区域的范围会有所差异。受数据获取限制,本研究使用的土地利用类型数据与实际可能有误差,在实际应用中需根据工程选址建设的要求选取基础数据。在选址工作中还需结合区域的辐射强度、日照时数等气象条件,道路运输、河流资源、人力维护等区位条件以及滑坡、泥石流等地质灾害等多种因素综合确定光伏基地建设的适宜位置。

5 结论

本研究以青海省祁连县为例,从地形条件、土壤条件、气候条件、生态条件四个维度开展县域尺度的生态敏感性评价,并借助 SOFM 网络划分生态敏感性分区。研究表明,祁连县生态敏感性指数空间分异明显,总体呈现“自西向东减弱,由中部向南北两边减弱”的空间分布特征。高度生态敏感区主要分布在央隆乡、野牛沟乡、阿柔乡南部、峨堡镇南部、默勒镇北部等;低度生态敏感区主要分布在默勒镇大部分地区和阿柔乡部分地区。生态敏感性类型区方面,祁西高寒荒漠草原生态敏感区应以生态保护和生态修复为主,原则上禁止开展与生态保护相悖的建设活动;祁中黑河上游生态恢复区在确保生态系统结构和功能不受影响的前提下,可适度规划建设一定规模的光伏基地;祁东高寒灌草能源-生态协调区可结合灌丛、草地等资源发展“光伏+”生态协调模式;祁南大通河草甸能源-生态优良区是光伏基地选址优先考虑的区域,可依托区域土地资源和生态资源优势,打造“光伏+”产业融合链条。

在布局光伏产业之前,应遵循自然生态规律,充分了解当地的生态状况,并进行科学地生态敏感性评价,避让生态高度敏感区域,为光伏基地选址提供支撑。在促进光伏产业与生态保护融合发展过程中,要坚持宜林则林、宜灌则灌、宜草则草、宜荒则荒的原则,既要保护生态环境,也要适度利用丰富的土地资源和太阳能资源发展光伏产业。在条件允许的情况下,可依托当地资源禀赋和新兴技术,打造“光伏+”生态修复模式,实现土地利用、生态治理和发电效益的“三赢”。总之,本研究为光伏基地选址避让高度生态敏感区提供了科学依据,有助于生态脆弱区光伏产业可持续发展。

参考文献 (References):

- [1] 邹才能, 陈艳鹏, 熊波, 刘翰林. 碳中和目标下中国新能源使命. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 48-58.
- [2] Zhao Y H, Su Q, Li B K, Zhang Y Y, Wang X J, Zhao H R, Guo S. Have those countries declaring “zero carbon” or “carbon neutral” climate goals achieved carbon emissions-economic growth decoupling? Journal of Cleaner Production, 2022, 363: 132450.
- [3] 中共中央国务院关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见. [2024-09-15]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/szyw/202408/t20240811_1083716.shtml.
- [4] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究. 生态学报, 2000, 20(1): 9-12.
- [5] McHarg I L. Design with nature. New York: Natural History Press, 1969. 149.

- [6] 张诗逸, 冯长春, 刘雪萍, 王福良, 谢旦杏. 基于生态敏感性分析的建设用地适宜性评价. 北京大学学报(自然科学版), 2015, 51(4): 631-638.
- [7] Mallick S K. Urban built-up area footprint (UBAF): a novel method of urban bio-capacity and ecological sensitivity assessment. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 440: 140846.
- [8] 汪什豪, 李全, 邓少华, 刘世伟. 基于生态敏感性和用地适宜性分析的农村居民点评价与优化——以海南省屯昌县为例. 中国农业资源与区划, 2017, 38(3): 27-35.
- [9] Shi Y, Fan X X, Ding X Y, Sun M Q. An assessment of ecological sensitivity and landscape pattern in abandoned mining land. *Sustainability*, 2024, 16(3): 1105.
- [10] 肖雅丹, 韦宝婧, 黄泽斌, 杨帆, 彭兴, 吴毅, 熊素文. 生态脆弱区公路选线优化及生态敏感性研究——以贵州省黔东南州玉屏至镇远公路为例. 广西师范大学学报(自然科学版), 2024, 42(3): 219-233.
- [11] 唐秀美, 刘玉, 任艳敏, 潘瑜春, 郝星耀. 高速公路沿线土地利用及生态系统服务价值变化研究. 中国农业大学学报, 2016, 21(2): 132-139.
- [12] Hong W Y, Guo R Z, Su M, Tang H, Chen L X, Hu W. Sensitivity evaluation and land-use control of urban ecological corridors: a case study of Shenzhen, China. *Land Use Policy*, 2017, 62: 316-325.
- [13] 黄心怡, 赵小敏, 郭熙, 江叶枫, 赖夏华. 基于生态系统服务功能和生态敏感性的自然生态空间管制分区研究. 生态学报, 2020, 40(3): 1065-1076.
- [14] 田野, 冯启源, 唐明方, 郑拴宁, 柳彩霞, 吴迪, 王丽娜. 基于生态系统评价的山水林田湖草生态保护与修复体系构建研究——以乌梁素海流域为例. 生态学报, 2019, 39(23): 8826-8836.
- [15] 赵正嫒, 张云龙, 李婷, 吕一河, 王聪, 伍星. 基于空间距离指数的青藏高原生态敏感性综合评价及时空演变分析. 生态学报, 2022, 42(18): 7403-7416.
- [16] 郭泽呈, 魏伟, 石培基, 周亮, 王旭峰, 李振亚, 庞素菲, 颜斌斌. 中国西北干旱区土地沙漠化敏感性时空格局. 地理学报, 2020, 75(9): 1948-1965.
- [17] 李帆, 贾夏, 赵永华, 奥勇, 韩磊, 刘钊, 丁诗雨. 基于 DPSIR 模型的黄土高原生态敏感性演变格局及驱动力分析. 农业工程学报, 2023, 39(9): 241-251.
- [18] 赵欢欢, 刘金成, 郭义军, 王海明, 龚正. 基于 DPSIRM 和 PLUS 模型的秦岭北麓生态敏感性评估. 农业工程学报, 2024, 40(13): 244-252.
- [19] 姜旭海, 韩玲, 白宗璠, 刘惠群. 内蒙古自治区沙漠化敏感性时空演变格局和趋势分析. 生态学报, 2023, 43(1): 364-378.
- [20] 丁振民, 姚顺波. 区域生态敏感性评估的理论框架与模型设计——以陕西省为例. 地理研究, 2019, 38(8): 2085-2098.
- [21] Withanage W K N C, Gunathilaka M D K L, Mishra P K, Wijesinghe W M D C, Tripathi S. Indexing habitat suitability and human-elephant conflicts using GIS-MCDA in a human-dominated landscape. *Geography and Sustainability*, 2023, 4(4): 343-355.
- [22] Guo Y L, Chen P Y, Zhu Y L, Zhang H. Study on comprehensive evaluation of human settlements quality in Qinghai Province, China. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110520.
- [23] 闫天亮, 王承武, 陈梦茜, 陈暄, 赵文静. 基于土地生态敏感性评价的生态产品价值分区实现研究——以阿勒泰市为例. 干旱区地理, 2024, 47(4): 612-621.
- [24] 牛晓楠, 倪欢, 陈国光, 张定源, 张景, 张洁, 吴佳瑜. 福建省生态保护重要性评价. 生态学报, 2022, 42(3): 1130-1141.
- [25] Liu X Y, Su Y, Li Z G, Zhang S. Constructing ecological security patterns based on ecosystem services trade-offs and ecological sensitivity: a case study of Shenzhen metropolitan area, China. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110626.
- [26] 武燕, 吴映梅, 李琛, 高彬嫫, 郑可君, 王梦娇. 基于风险-质量的高原湖泊流域生态分区构建——以滇池流域为例. 生态学报, 2024, 44(3): 1052-1066.
- [27] 梁华秋, 李松. 基于生态系统服务功能的汉江流域中下游生态分区演变特征及驱动能力研究. 水土保持通报, 2023, 43(4): 256-266.
- [28] 李超, 牛文浩, 黄怀玉, 姚顺波, 龚直文. 城市化背景下粤港澳大湾区生态风险时空演变及生态分区识别研究. 环境工程技术学报, 2024, 14(2): 562-573.
- [29] 邹易, 蒙古军, 吴英迪, 魏婵娟, 程浩然, 马宇翔. 基于自组织特征映射模型(SOFM)网络的中国自然资源生态安全区划. 生态学报, 2024, 44(1): 171-182.
- [30] Peng J, Hu X X, Qiu S J, Hu Y N, Meersmans J, Liu Y X. Multifunctional landscapes identification and associated development zoning in mountainous area. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 765-775.
- [31] 王绍强, 周成虎, 李克让, 朱松丽, 黄方红. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. 地理学报, 2000, 55(5): 533-544.
- [32] 高海东, 李占斌, 李鹏, 贾莲莲, 徐国策, 任宗萍, 庞国伟, 赵宾华. 基于土壤侵蚀控制度的黄土高原水土流失治理潜力研究. 地理学报, 2015, 70(9): 1503-1515.

- [33] 李振亚, 魏伟, 周亮, 刘春芳, 郭泽呈, 庞素菲, 张静. 中国陆地生态敏感性时空演变特征. 地理学报, 2022, 77(1): 150-163.
- [34] 梁甜, 贺清, 杨霏, 任晓红, 张荣飞, 文传浩. 成渝地区双城经济圈县域国土空间碳汇冲突识别及多情景模拟. 生态学报, 2025(1): 1-17.
- [35] 王白雪, 程维明, 宋珂钰, 李浩. 生态地貌学研究动态: 地貌学和生态系统生态学的交叉融合. 生态学报, 2022, 42(11): 4334-4348.
- [36] 鲍平安, 季波, 孙果, 张娜, 吴旭东, 何建龙, 王占军, 田英. 光伏电站建设对植物群落与土壤特征的影响. 草业学报, 2024, 33(12): 23-33.
- [37] 李新荣, 张景光, 刘立超, 陈怀顺, 石庆辉. 我国干旱沙漠地区人工植被与环境演变过程中植物多样性的研究. 植物生态学报, 2000, 24(3): 257-261.
- [38] 庞景豪, 梁燊, 刘亚斌, 李国荣, 朱海丽, 胡夏嵩, 史兴萍, 尚卿, 缪晓星, 王延秀. 恢复年限对高寒金属矿山排土场植物多样性和土壤化学特性的影响. 水土保持通报, 2023, 43(4): 110-120.
- [39] 杨新国, 刘春虹, 王磊, 陈林, 王兴, 曲文杰, 宋乃平. 荒漠草原生态恢复与重建: 人工植被推动下水分介导的系统响应、生态阈值与互馈作用. 生态学报, 2023, 43(1): 95-104.
- [40] 杜忠毓, 安慧, 王波, 王志林, 张雅柔, 吴秀芝, 李巧玲. 养分添加和降水变化对荒漠草原植物群落物种多样性和生物量的影响. 草地学报, 2020, 28(4): 1100-1110.
- [41] 朱湾湾, 王攀, 许艺馨, 李春环, 余海龙, 黄菊莹. 降水量变化与氮添加下荒漠草原土壤酶活性及其影响因素. 植物生态学报, 2021, 45(3): 309-320.
- [42] 余文君, 赵林, 李艳忠, 南卓铜, 赵拥华. 基于互补相关理论的青藏高原蒸散发时空变化及其影响因素. 生态学报, 2024, 44(12): 5024-5039.
- [43] 杜灵通, 候静, 胡悦, 王新云, 王磊. 基于遥感温度植被干旱指数的宁夏 2000—2010 年旱情变化特征. 农业工程学报, 2015, 31(14): 209-216.
- [44] 刘爱霞, 王长耀, 王静, 邵晓梅. 基于 MODIS 和 NOAA/AVHRR 的荒漠化遥感监测方法. 农业工程学报, 2007(10): 145-150.
- [45] Diakoulaki D, Mavrotas G, Papayannakis L. Determining objective weights in multiple criteria problems: the critic method. Computers & Operations Research, 1995, 22(7): 763-770.
- [46] Kohonen T. Self-organized formation of topologically correct feature maps. Biological Cybernetics, 1982, 43(1): 59-69.
- [47] 常耀文, 吴迪, 李欢, 刘霞, 王蕴鹏, 郭家瑜. 基于自组织映射神经网络的淮河流域生态系统服务簇时空变化特征. 生态学报, 2024, 44(11): 4544-4557.
- [48] 毛祺, 彭建, 刘焱序, 武文欢, 赵明月, 王仰麟. 耦合 SOFM 与 SVM 的生态功能分区方法——以鄂尔多斯市为例. 地理学报, 2019, 74(3): 460-474.
- [49] 任艳敏, 徐亚辉, 刘玉, 唐秀美, 王学东. 基于双重自组织模型的土地整治项目区时空配置研究. 北京大学学报: 自然科学版, 2017, 53(2): 360-368.
- [50] 刘立程, 孙中孝, 吴锋, 张雪靓, 张倩. 京津冀地区光伏开发空间适宜性及减排效益评估. 地理学报, 2022, 77(3): 665-678.