杨嘉繁,张瑞珈,曾维华,等.青藏高原大规模光伏发电系统建设生态适宜性分区[J].中国沙漠,2026,46(5):246-259.

青藏高原大规模光伏发电系统建设生态适宜性分区

杨嘉繁[1],张瑞珈[1],曾维华[1],李嘉琪[1],王立婷[1],彭怀午[2]
(1.北京师范大学 环境学院,北京 100875;2.中国电建集团西北勘测设计院有限公司,陕西 西安 710100)

摘要:青藏高原太阳能资源丰富,是中国大规模光伏开发的重要战略区域。但该地区具有重要的生态功能且生态环境脆弱,光伏开发与生态保护之间存在冲突。为确保二者协同发展,亟须通过生态适宜性分区引导光伏发电系统的有序布局。本研究构建了涵盖光伏资源禀赋、建设运维适宜性、生态系统功能重要性、生态环境敏感性和社会经济适宜性的五维评价指标体系,运用熵权法计算19个单指标权重,并采用空间叠置方法对青藏高原光伏发电系统建设进行生态适宜性分区及评价。结果表明:(1)优先建设区和适宜建设区面积约为青藏高原总面积的1/10,其中优先建设区面积为16.08万km²,主要集中于青海柴达木盆地和西藏中部;分省域来看,青海、西藏的优先建设区分别占该区域面积的12.5%和5.5%,四川、云南以禁止建设区为主,占比超80%。(2)青藏高原现有光伏项目对本研究划定的优先建设区利用不充分,且有3处与居民点缓冲区交叠,干扰当地居民生活。进一步引入风沙活动强度作为后置风险约束后发现,光伏适宜性有效范围内风沙风险总体较低,强-极强风沙风险区仅占0.75%,但在柴达木盆地及西北部局地极、高适宜区仍存在风沙约束型适宜区。建议近中期光伏开发应聚焦优先建设区。

关键词:青藏高原;光伏发电布局;生态适宜性分区;空间叠置分析
文章编号:1000-694X(2026)05-246-14 **DOI**:10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00130
中图分类号:TK51 **文献标志码**:A

0 引言

在持续增长的能源需求及使用化石燃料所产生的日益严峻的环境问题的推动下,发展可再生能源成为应对气候变化、优化能源结构的核心路径[1]。光伏发电作为一种技术成熟、应用广泛的清洁能源,凭借零碳排放、资源可再生等优势,在能源转型中占据战略地位[2]。

青藏高原作为“世界屋脊”和“亚洲水塔”,拥有得天独厚的太阳能资源禀赋。2022年西藏大部、青海中部及北部局部地区年水平面总辐照量超过1 750 kWh·m^{-2},为全国太阳能资源储量最丰富的区域,理论发电潜力占全国45.6%,是建设大型光伏基地的理想区域[3-4]。然而,青藏高原生态系统敏感而脆弱,光伏电站建设可能引发地区能量分布改变、地表及植被破坏、生态廊道阻断等风险[5-6]。此外,光伏电站的建设改变气流场,可能诱发严重的风蚀,造成建筑物倒塌和光伏电站的使用寿命缩短[7],同时,在干旱与半干旱区,大风作用下的输沙过程可能造成组件表面积沙与沙埋现象,并在阵列间形成“风沙隧道效应”,加剧局地风沙输移与运维负担[8-9],大规模开发建设光伏电站将不可避免地对青藏高原的生态环境产生影响。因此,在开发利用高原丰富的太阳能资源的同时,兼顾生态保护与资源开发的协同,成为青藏高原光伏发电系统建设高质量发展的核心命题,而科学的生态适宜性分区是解决这一命题的关键技术支撑。

国内外学者围绕光伏电站选址与适宜性评价开展了一系列研究。早期研究多聚焦微观项目选址,但考量的指标体系不够完善。近年来,针对可再生能源建设选址指标体系构建的研究愈加丰富。例如,Sánchez-Lozano等[10]在西班牙东南部光伏选

收稿日期:2026-03-06;**改回日期**:2026-07-18
资助项目:国家重点研发计划项目(2022YFB 4202101)
作者简介:杨嘉繁(2003—),男,江西南昌人,硕士研究生,研究方向为可再生能源发电系统选址。E-mail:202521180035@mail.bnu.edu.cn
通信作者:曾维华(E-mail:zengwh@bnu.edu.cn)

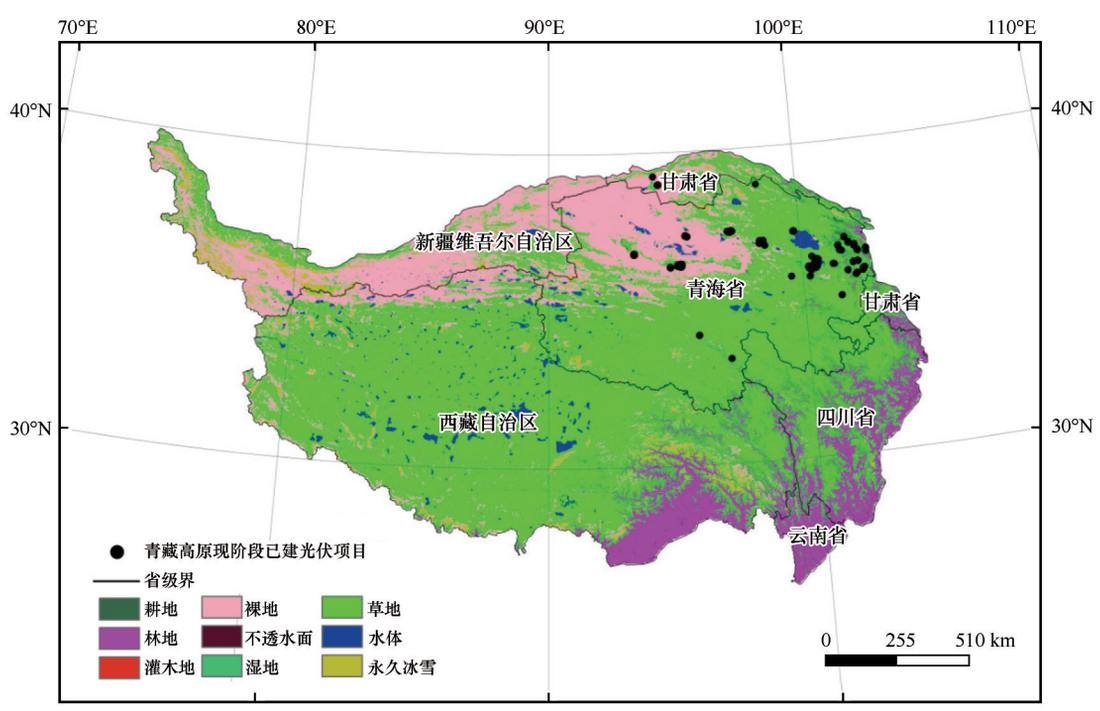
址中纳入牲畜通道以及鸟类特别保护区等指标，通过对比 TOPSIS 和 ELECTRE TRI 两种方法并结合 GIS 得到最佳区域；刘立程等[11]构建地形—气象—成本评价体系，刻画了京津冀地区光伏开发适宜性空间格局。但现有研究仍存在明显不足：一是从宏观视角出发的、面向区域规划的光伏发电系统建设生态适宜性分区研究较少，难以支撑大规模光伏发电系统建设的整体规划；二是针对光伏发电系统建设的生态适宜性评价指标大多侧重于开发建设与运行维护，缺少对资源承载力、生态系统功能重要性、生态环境敏感性等综合性生态环境指标的关注。

基于上述研究缺口，本研究以青藏高原为研究区，聚焦光伏发电系统建设的生态适宜性分区问题。通过构建适配高原特色的评价指标体系，整合光伏发电资源禀赋、建设运维适宜性、生态约束与社会经济适宜性，运用熵权法与空间叠置法开展综合分区，并考虑风沙活动强度对光伏发电系统建设运维带来的影响，明确不同区域的光伏开发适宜程度与管控方向。研究结果可为青藏高原光伏发电系统建设提供科学支撑，丰富高海拔地区可再生能源开发的生态适宜性评价理论与方法，对推动“双碳”目标实现与高原生态安全保障的协同发展具有重要现实意义与理论价值。

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概况

本研究的研究区为青藏高原全域，涉及青海省、西藏自治区、四川省、云南省、甘肃省、新疆维吾尔自治区 6 个省（自治区），地理范围介于 26°00′—39°47′N、73°19′—104°47′E，总面积约 258 万 km²（图 1）。作为全球海拔最高、面积最大的高原，青藏高原平均海拔超过 4 000 m，地势呈现西北高、东南低的特征，地形以高原、山地为主，间有盆地、河谷等地貌类型，其中柴达木盆地、藏南谷地等区域地势相对平坦[12-13]，为光伏发电系统建设提供了潜在空间[4,14]。



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号 GS(2024)0650 号标准地图制作，底图边界无修改

图 1　青藏高原土地利用及现阶段已建设光伏项目分布

Fig.1　Land use and distribution of existing photovoltaic projects on the Qinghai-Xizang Plateau

该区域属典型的高原大陆性气候，受高海拔与大气环流共同影响，形成了气温低、温差大、降水时空不均、太阳辐射强的气候特征。与中国其他区域相比，青藏高原的光伏资源具有显著独特性：一是大气透明度高，云量少且云层薄，太阳辐射的衰减效应弱，直接辐射占比高，有利于光伏组件高效光

电转换;二是辐照时间长,年日照时间普遍在2 800~3 600 h,部分区域超过3 800 h,有效发电时长优势明显;三是资源空间分布相对集中,沿着冈底斯山脉—羌塘高原—柴达木盆地一线形成连续的优质光伏资源带[3,5,14]。这种资源禀赋使得青藏高原成为中国大型光伏发电系统建设的核心战略区域,理论开发潜力巨大。

需要注意的是,青藏高原是中国重要的生态安全屏障,生态系统具有极高的敏感性与脆弱性[15]。区域内冻土广布,冻融侵蚀、水土流失等生态环境问题突出,且分布有三江源、羌塘等多个国家级自然保护区[16-17]。同时,区域人口密度低、城镇分布零散,大部分区域为无人区或低密度牧区,农业活动主要集中在河谷地带,光伏建设与人类生产生活的直接冲突较小,但需重点规避生态敏感区与核心保护区域,实现资源开发与生态保护的协同[11,18]。

1.2 数据来源

本研究所使用的数据中,净初级生产力(NPP)数据、海拔数据、土地利用数据、人口空间分布数据、农业容量分布数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心,植被覆盖度数据(2001—2020年)、气温及降水量数据(1901—2023年,空间分辨率为0.1°网格)、相对湿度数据(均一化中国陆表气候观测格点数据集)、全球水平辐照(GHI)数据(TPMFD,1979—2023年)、风速数据(TPMFD,1979—2023年)来源于国家青藏高原科学数据中心,土壤理化性质数据来源于世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database,HWSD),路网数据(空间分辨率为1∶250 000)来源于Open Street Map网站,电网数据(空间分辨率为1∶250 000)来源于中国电建集团西北勘测设计研究院,居民点数据(空间分辨率为1∶250 000)来源于地理遥感生态网,自然保护区数据(空间分辨率为1∶250 000)来源于中国自然保护区标本资源共享平台。

2 研究方法

2.1 生态适宜性分区指标体系构建

光伏发电系统建设的生态适宜性分区需考虑多因素影响,可分为以下几方面[19-23]:(1)光伏发电资源禀赋;(2)“三线一单”、国土空间规划、生态功能分区;(3)大规模光伏发电系统的生态环境影响;(4)自然地理因素,地形、土地覆盖类型以及高辐射、大温变与强风侵恶劣气候条件等;(5)社会经济因素。基于以上因素构建光伏发电系统建设生态适宜性分区指标体系,分为排除性指标体系和评价性指标体系。排除性指标,也可称为限制性条件或限制性标准,用于识别和排除禁止光伏发电系统建设的区域;评价性指标,是指纳入光伏发电系统适宜性评价与分区的指标,对此类指标的量化和评价可指导适宜性等级和区域的划分。

2.1.1 排除性指标体系

本研究根据光伏发电系统及研究区域特点,结合数据的可获取性,通过文献调研总结得到6个光伏发电系统建设生态适宜性分区排除性指标,包括自然保护区(缓冲区范围2 000 m),居民点(缓冲区范围1 000 m),水域,城乡、工矿、居民用地,林地(有林地、疏林地),水田。

2.1.2 评价性指标体系

评价性指标体系由目标层、准则层与指标层构成:以区域光伏发电系统建设的生态适宜性为目标层,综合反映区域光伏发电系统开发建设用地选址适宜性整体状态;充分考虑影响区域光伏发电系统建设适宜性的主要因素,从光伏发电资源禀赋、建设运维适宜性、生态系统功能重要性、生态环境敏感性、社会经济适宜性5个维度设置准则层;在此基础上构建的指标层应包括区域光伏发电资源禀赋、发电系统的建设运维、生态环境与社会经济的各个因素[19-26]。其中将风沙活动强度作为建设运维适宜性指标之一,主要由于其对光伏发电系统建设与长期运维具有直接影响,而非对生态系统结构与功能的调节作用。在干旱与半干旱区,风沙过程可通过组件积沙、风蚀磨损及运维成本增加等方式影响光伏电站长期稳定运行,并具有持续性与累积性特征[7-8]。因此,将其纳入建设运维适宜性指标体系,能够更准确地刻画光伏发电系统在复杂干旱区环境下的工程适应性与运维风险。光伏发电系统建设生态适宜性分区评价性指标如表1所示。

2.2 生态适宜性分区单指标分级评价

2.2.1 光伏发电资源禀赋

光伏发电资源承载力即全球水平辐照(GHI)资源承载力。本研究将每个栅格的GHI资源承载力(RCC_{GHI})定义为基于日平均GHI、光伏组件效率、系统效率因子和全年发电时间的GHI最大可利用量,

表 1　光伏发电系统建设生态适宜性评价指标体系

Table 1　Ecological suitability evaluation index system for photovoltaic power generation system construction

目标层	准则层	序号	指标层
光伏发电系统建设的生态适宜性	光伏发电资源禀赋	1	光伏发电资源承载力
		2	光伏发电资源供给稳定度
	建设运维适宜性	3	土地利用
		4	高程
		5	路网密度
		6	电网密度
		7	距居民点距离
		8	坡度
		9	坡向
		10	风沙活动强度
	生态系统功能重要性	11	水源涵养功能重要性
		12	水土保持功能重要性
		13	防风固沙功能重要性
		14	生物多样性维护功能重要性
	生态环境敏感性	15	水土流失敏感性
		16	土地石漠化敏感性
		17	滑坡灾害敏感性
		18	冻融侵蚀敏感性
	社会经济适宜性	19	人口密度
		20	农业容量

注：风沙活动强度作为后置风险约束指标，不参与熵权法加权。

单位是 $kWh\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$。在不考虑遮挡与阴影的理想条件下，本研究使用青藏高原 2022 年的 GHI 数据计算某一栅格处的 GHI 承载力：

$$RCC_{\mathrm{GHI}}=\sum_{t=1}^{T}GHI_t\cdot\eta_{\mathrm{sys-PV}} \tag{1}$$

式中：RCC_{GHI} 表示在时间段 T 内的 GHI 资源承载力（$kWh\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$）；$GHI_t$ 表示时刻 t（每天）的水平面辐射值（$kWh\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$）；$T$ 在本研究中表示一年的时间尺度；$\eta_{\mathrm{sys-PV}}$ 表示光伏系统综合转换效率。

光伏发电资源供给稳定度即全球水平辐照（GHI）资源供给稳定度。本研究用青藏高原 2022 年的 GHI 波动差异来衡量光伏发电资源变异性，可用变异系数表示。变异性越小，供给稳定度越高，光伏发电系统的电量输出稳定性越高，能够尽可能削弱光伏资源供给波动性导致的光伏发电系统经济损失：

$$V_{GHI}=\frac{1}{\overline{GHI}}\sqrt{\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T}(GHI_i-\overline{GHI})^2} \tag{2}$$

式中：V_{GHI} 是一年内 GHI 资源的变异系数，即用于表示波动性/变异性；T 是一年内的总天数；$\overline{GHI}$ 表示 GHI 资源的年均值；GHI_i 表示第 i 天的日平均 GHI 资源。

利用自然断点法将光伏发电资源承载力及其供给稳定度分为 5 类[11,19]，并对应光伏发电系统建设的生态适宜性，由高到低依次为极适宜、高适宜、中适宜、低适宜和不适宜。自然断点法能够依据数据分布特征自动识别最优分类阈值，实现类内差异最小化和类间差异最大化，能够较好地反映评价指标的空间异质性特征，因此被广泛应用于环境适宜性评价研究中[27-28]。后续适宜性等级划分依据与此处相同。

2.2.2　光伏发电系统建设运维适宜性

基于现阶段光伏发电场建设行业标准《光伏发电站设计规范》（GB50797-2012）、《光伏发电工程施工组织设计规范》（GBT50795-2012），《关于支持光伏发电产业发展规范用地管理有关工作的通知》等相关政策，专家咨询建议以及相关分区研究，结合青藏高原的自然地理条件，本研究针对影响光伏发电系统建设、运维的各项指标设置分级评价标准，分为极适宜、高适宜、中适宜、低适宜、不适宜、禁止建设 6 个等级，分别赋予 5~0 的得分。其中，5 表示极适宜建设，该类区域海拔较低，坡度平缓，坡向为正南方向，距离道路和输电线路近，并且远离居民区，土地利用类型以适宜开发建设的沙地、戈壁、盐碱地等为主；1 表示不适宜建设，该类区域海拔极高，地势陡峭，坡向为正北方向，远离道路和输电线路，并且对居民区存在干扰，土地利用为灌木林、旱地等较不适合开发利用的类型；0 则表示禁止建设，如内陆水域、城市用地、自然保护区等是国家明确不可用于大规模光伏发电系统开发利用的区域，以及距离居民点等较近的区域，已有研究表明这些区域的开发利用会对人类生产生活造成土地侵占、噪声等干扰。

此外，鉴于青藏高原柴达木盆地等“沙戈荒”地带风沙活动强烈、对光伏组件磨损与基础设施安全构成威胁，本研究将风沙活动强度作为建设运维的重要约束因素，采用修正风蚀方程（Revised Wind Erosion Equation，RWEQ）中的气候因子（WF）定量表征风沙活动强度[29-30]。气候因子综合反映了在降

雨、温度、日照及雪盖等条件影响下风力对地表颗粒的搬运能力，物理意义明确，且已在内蒙古、青海等北方风蚀区得到广泛验证。

$$WF = W_f \cdot SW \cdot SD \tag{3}$$

$$W_f = \sum_{i=1}^{n}\left[u_{2,i}(u_{2,i} - u_t)^2 \cdot \frac{\rho_i}{g}\right], u_{2,i} > u_t \tag{4}$$

当$u_{2,i} \leqslant u_t$时，令$u_{2,i}(u_{2,i} - u_t)^2 = 0$。$WF$表示气候因子，单位为kg·m^{-1}；$u_{2,i}$表示第$i$日2 m高度风速，单位为m·s^{-1}；$u_t$表示起沙阈值风速，本文取5 m·s^{-1}；$\rho_i$表示第$i$日的空气密度，单位为kg·m^{-3}；$g$为重力加速度；$SW$为土壤湿度因子；$SD$为积雪覆盖因子；$n$表示全年的天数。

进一步，采用自然断点法将研究区风沙活动强度（以气候因子WF表征）依据《土壤侵蚀分类分级标准》（SL190-2007）划分为“极强”“强”“中”“弱”“微弱”5个等级，并对应转换为光伏发电系统建设的建设运维适宜性等级。风沙活动强度越大，光伏建设适宜性越低。各等级依次对应不适宜、低适宜、中适宜、高适宜、极适宜。

风沙风险亚区由光伏建设适宜性等级与风沙活动强度等级二维交叉划分得到。考虑到风沙风险对不同适宜性区域的约束意义不同，本研究首先将光伏建设适宜性等级归并为3类：适宜性4~5级（高适宜、极适宜）合称为高适宜区，适宜性3级（中适宜）称为中适宜区，适宜性1~2级（不适宜、低适宜）称为低适宜区。其次，将风沙活动强度等级归并为3类：微弱和弱等级合并为低风沙风险，中等级为中风沙风险，强和极强等级合并为高风沙风险。在此基础上，将光伏建设适宜性等级与风沙风险等级进行交叉归并，形成7类风沙风险亚区，划分规则如表2所示。需要说明的是，适宜性分区中的0值或禁止建设区不参与风沙风险亚区划分。

表2 风沙风险亚区划分规则

Table 2 Classification rules for wind and sand risk subregions

适宜性等级	风沙微弱—弱（低风险）	风沙中（中风险）	风沙强—极强（高风险）
高适宜（4~5级）	优先建设区	防沙措施型适宜区	风沙约束型适宜区
中适宜（3级）	一般建设协调区	一般建设协调区	控制建设区
低适宜（1~2级）	低适宜低—中风险区	低适宜低—中风险区	限制建设区

2.2.3 光伏发电系统生态系统功能重要性

本研究采用NPP定量指标评估方法，参照《生态保护红线划定指南》，选取生态系统水源涵养服务能力指数（WR）、水土保持服务能力指数S_{pro}、防风固沙服务能力指数S_{ws}、生物多样性维护服务能力指数S_{bio}等4个关键指数，评估各项功能的重要性程度。采用自然断点法将生态功能重要性指数依据重要程度按照极重要、比较重要、重要、一般重要、不重要进行等级划分，并对应转换为光伏发电系统建设的生态适宜性等级。生态系统功能重要性程度越高的区域，越不适宜进行光伏发电系统建设，因此各等级依次对应为不适宜、低适宜、中适宜、高适宜和极适宜。

水源涵养服务能力指数计算公式如下：

$$WR = NPP_{mean} \times F_{sic} \times F_{pre} \times (1 - F_{slo}) \tag{5}$$

式中：WR为生态系统水源涵养服务能力指数；NPP_{mean}为多年植被净初级生产力平均值；F_{sic}为土壤渗流因子；F_{pre}为多年平均降水量因子；F_{slo}为坡度因子。

水土保持服务能力指数计算公式如下：

$$S_{pro} = NPP_{mean} \times (1 - K) \times (1 - F_{slo}) \tag{6}$$

式中：S_{pro}为水土保持服务能力指数；NPP_{mean}为多年植被净初级生产力平均值；F_{slo}为坡度因子；K为土壤可蚀性因子。

防风固沙服务能力指数计算公式如下：

$$S_{ws} = NPP_{mean} \times K \times F_q \times D \tag{7}$$

$$F_q = \frac{1}{100}\sum_{i=1}^{12} u^3\left\{\frac{ETP_i - P_i}{ETP_i}\right\} \times d \tag{8}$$

$$ETP_i = 0.19\left(20 + T_i\right)^2 \times (1 - r_i) \tag{9}$$

$$u_2 = u_1(z_2/z_1)^{1/7} \tag{10}$$

$$D = 1/\cos(\theta) \tag{11}$$

式中：S_{ws}为防风固沙服务能力指数；NPP_{mean}为多年植被净初级生产力平均值；K为土壤可蚀性因子；F_q为多年平均气候侵蚀力；u为2 m高处的月平均风速；u_1、u_2分别表示在z_1、z_2高度处的风速；ETP_i为月潜在蒸发量因子（mm）；P_i为月降水量（mm）；d为当月天数；T_i为月平均气温；r_i为月平均相对湿度（%）；D为地表粗糙度因子；θ为坡度。

生物多样性维护服务能力指数计算公式如下：

$$S_{bio} = NPP_{mean} \times F_{pre} \times F_{tem} \times (1 - F_{alt}) \quad (12)$$

式中：S_{bio}为生物多样性维护服务能力指数；NPP_{mean}为多年植被净初级生产力平均值；F_{pre}为多年平均降水量；F_{tem}为多年平均气温；F_{alt}为海拔因子。

2.2.4　光伏发电系统生态环境敏感性

本研究参照《生态功能区划暂行规程》，选取水土流失敏感性指数、石漠化敏感性指数、滑坡灾害敏感性指数、冻融侵蚀敏感性指数评估青藏高原生态环境敏感性。运用自然断点法将其按照敏感性程度划分为极敏感、比较敏感、敏感、一般敏感、不敏感5个等级，对应转换为光伏发电建设的适宜性等级，各等级依次对应不适宜、低适宜、中适宜、高适宜和极适宜。

水土流失敏感性指数计算公式如下：

$$SS_i = \sqrt[4]{R_i \times K_i \times LS_i \times C_i} \quad (13)$$

$$R_i = 0.053P_i^{1.655} \quad (14)$$

式中：i为空间单元；SS_i为水土流失敏感性指数；R_i为降雨侵蚀力因子；K_i为土壤可蚀性因子；LS_i为坡长坡度因子；C_i为地表植被覆盖因子；P_i为i空间单元年降雨量。

石漠化敏感性指数计算公式如下：

$$S_i = \sqrt[3]{G_i \times F_{slo\,i} \times C_i} \quad (15)$$

式中：S_i为i评估区域石漠化敏感性指数；G_i为碳酸岩出露面积百分比因子；$F_{slo\,i}$为坡度因子；C_i为地表植被覆盖因子。

滑坡灾害敏感性指数参照已有研究结果[31-33]，结合青藏高原特殊的自然地理条件，选择坡度、高程、距道路距离、距河流距离、土地利用类型以及降雨量6个评价因子，运用ArcGIS的“加权总和”功能计算得到。

冻融侵蚀敏感性指数参照已有研究结果[17]，选择气温年较差、年降水量、坡度、坡向和植被覆盖度5个因子，运用ArcGIS的“加权总和”功能计算得到。

2.2.5　光伏发电系统社会经济适宜性

本研究针对“人口密度”和“农业容量”指标采用自然断点法进行分级，从而反映不同区域在社会经济适应性上的差异。人口密度越高、农业容量越大的区域，建设的生态适宜性水平越低。各等级依次为“极适宜”“高适宜”“中适宜”“低适宜”“不适宜”。

2.3　基于多属性综合评价的生态适宜性空间叠置分区

本研究采用多属性综合评价方法展开青藏高原光伏发电系统生态适宜性分区。其中光伏发电系统建设生态适宜性评价的各指标权重运用熵权法计算，权重计算结果如表3所示，各序号所对应的指标与表1一致。

表3　光伏发电系统建设生态适宜性评价指标权重

Table 3　Weight of ecological suitability evaluation indicators for photovoltaic power generation system construction

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
权重	0.0427	0.0567	0.0822	0.0852	0.0589	0.0775	0.0534	0.0428	0.0664	—
序号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
权重	0.0376	0.0396	0.0548	0.0373	0.0524	0.0407	0.0445	0.0564	0.0353	0.0354

将光伏发电系统建设生态适宜性分区的19个单指标分级评价图层按照权重进行叠加，再将其与光伏发电系统的排除性指标图层叠加。其中，风沙活动强度在概念上属于建设运维适宜性的范畴，但在技术实现上，因WF具有明显偏态分布且属于约束性指标，本研究未将其与其他指标一同纳入熵权法加权叠加，而是作为后置的风险约束图层对适宜性分区结果进行二次筛查。

对叠加结果运用分位数法进行重分类，进一步采用专家经验法对分位点进行调整，依据调整后的分位点：20%、40%、70%、85%，依次划分为优先建设区、适宜建设区、控制建设区、限制建设区和禁止建设区（技术层面），将排除性指标区域划定为“禁止建设区（政策层面）”，最终得到光伏发电系统建设生态适宜性分区结果。

3　结果与分析

3.1　生态适宜性单指标分级评价结果

光伏发电资源禀赋方面（图2C），光伏发电资源承载力整体较高，呈现由西向东逐渐降低的空间格局，极适宜和高适宜区主要分布于青藏高原西南侧

喜马拉雅山脉和冈底斯山脉的高山峡谷地区。资源供给稳定度适宜性整体表现为由东北向西南逐渐提高，高适宜区主要分布于高原南部。综合资源承载力与供给稳定度，优先建设区域主要集中于青藏高原西南部。

建设运维适宜性方面（图2D），土地利用、高程、坡度及坡向等指标共同决定了柴达木盆地、羌塘高原、青南高原、河湟谷地及藏南部分河谷区域具有较好的建设条件；路网和电网条件较优区域主要分布于四川中西部、青海中部及西藏南部。禁止建设区主要围绕居民点分布，集中于西藏南部、青海东部、云南西北部和四川中西部。风沙活动强度具有明显空间分异特征，总体呈现西北高、东南低的格局[29-30]。高值区主要集中于柴达木盆地西部、北部

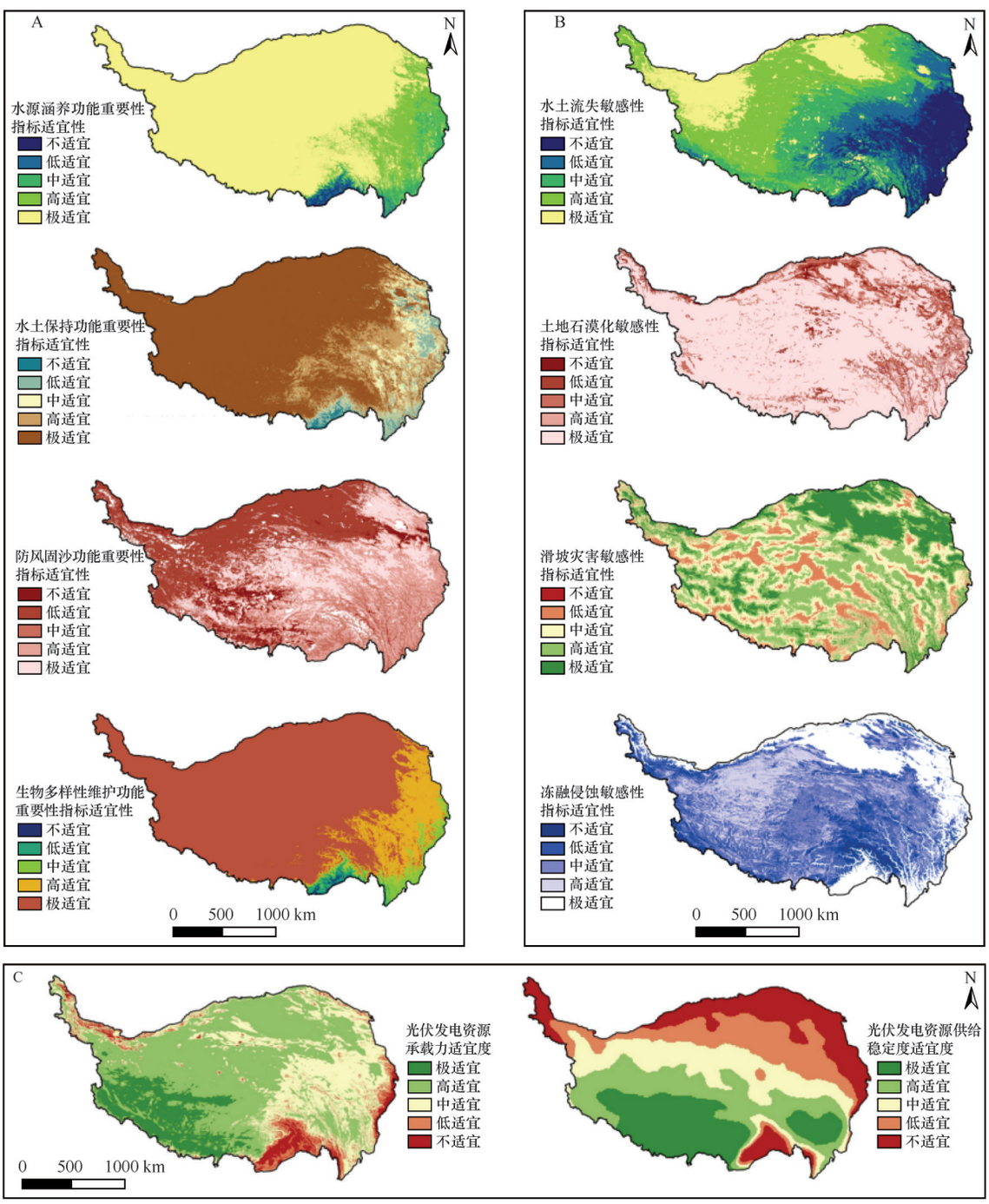


图2 （续图）

Fig.2 （continued）

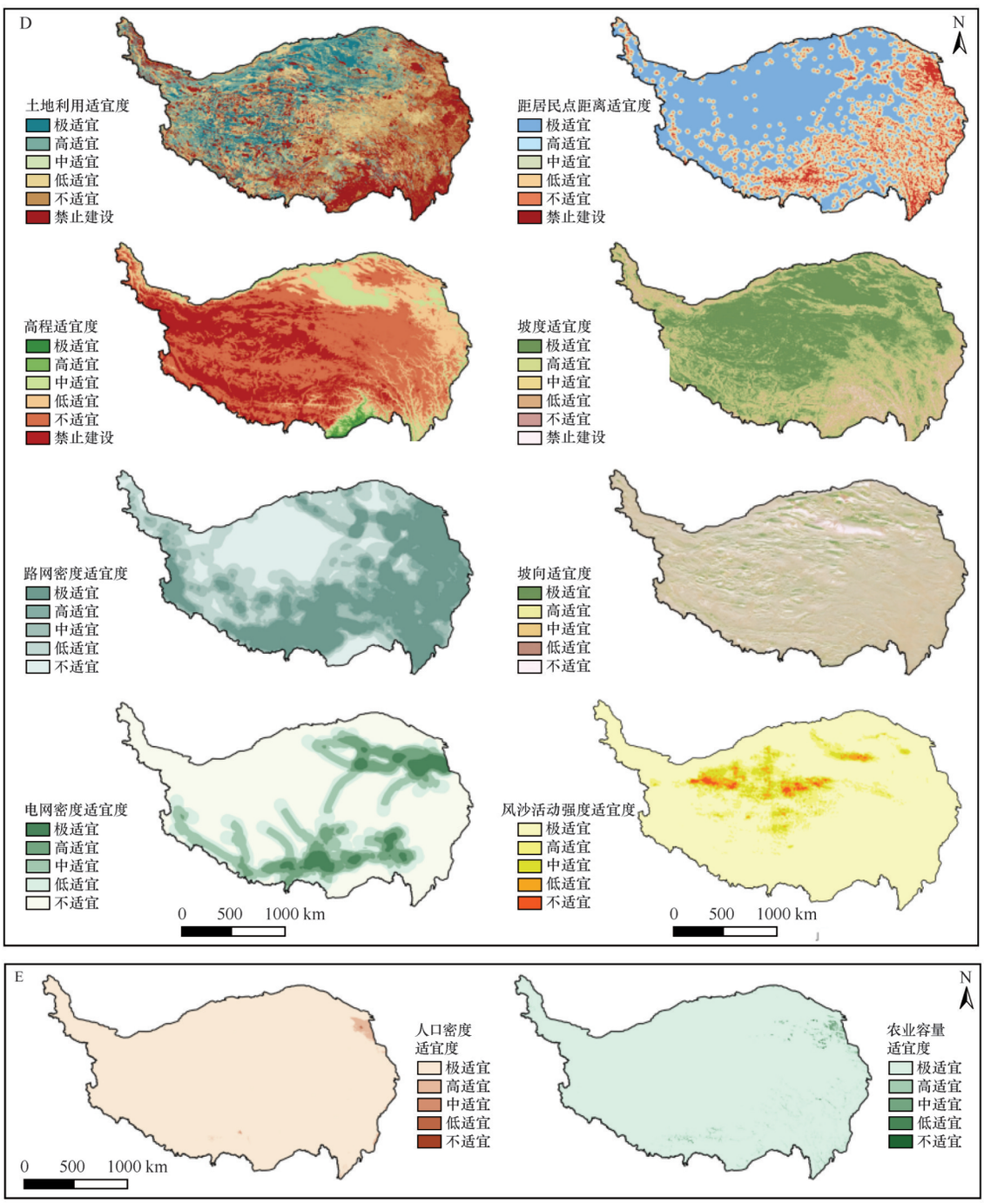


图2　光伏发电系统建设单指标分级结果

Fig.2　Single index grading results of photovoltaic power generation system construction

及青藏高原西北侧荒漠-戈壁地区，受干旱气候、裸露地表及强风作用影响，具备较强风蚀和起沙条件[7,34]。由西北向东南方向风沙活动逐渐减弱，三江源、藏东南及青藏高原东部区域以微弱和弱等级为主，对光伏建设约束较小。

生态系统功能重要性方面（图2A），水源涵养和水土保持功能高值区主要分布于东南部河流及高山坡地，多对应控制建设区或限制建设区；防风固沙功能高值区主要位于西北盆地和戈壁区域，与部分适宜建设区重叠；生物多样性维护功能高值区主要集中于自然保护区和重点保护区域，对应禁止建设区，其缓冲区域多为限制建设区。

生态环境敏感性方面（图2B），水土流失敏感区主要沿河谷坡地分布，多为限制建设区；土地石漠

化敏感区面积小，主要对应限制建设区和控制建设区；滑坡敏感区沿高原山脉分布，禁止建设区比例较高；冻融侵蚀敏感区主要位于高海拔冻土区，多为限制建设区。

社会经济适宜性方面（图 2E），人口密度低、农业容量小的河谷平原及无人区适宜性高，多为适宜建设区；人口密集或农业活动密集区域需设缓冲区，多为限制建设区，整体对选址约束相对较小，但对局部开发规划仍有参考意义[18]。

3.2 光伏发电系统建设生态适宜性分区

青藏高原光伏发电系统建设生态适宜性分区结果如图 3 所示。总体来看，各适宜性分区空间分异明显。优先建设区和适宜建设区面积相对较小，其中优先建设区面积为 16.08 万 km^2，主要分布于青藏高原东北部及西南部局部地区，以青海和西藏面积最大，分别为 8.72 万 km^2 和 6.56 万 km^2，柴达木盆地尤为突出；适宜建设区面积为 13.44 万 km^2，主要环绕优先建设区分布。控制建设区和限制建设区面积分别为 26.12 万 km^2 和 18.44 万 km^2，主要位于适宜建设区外围，在青海、西藏及新疆均有较大分布，其中新疆控制建设区和限制建设区面积分别达 4.02 万 km^2 和 4.10 万 km^2。技术层面禁止建设区面积为 22.18 万 km^2，主要分布于青藏高原北缘、东北缘及川藏高原东南部；政策层面禁止建设区面积达 164.72 万 km^2，主要包括自然保护区、水域、建设用地、林地和高覆盖度草地等，集中分布于高原中部、南部及东部边缘。总体上，优先建设区和适宜建设区合计约占青藏高原总面积的 1/10。

从省域尺度看，各省（自治区）生态适宜性分区差异显著。各省（自治区）政策层面禁止建设区面积均超过省域总面积的一半，其中西藏占比最高（73.9%），主要分布于羌塘高原自然保护区、冈底斯山脉及藏南林地区，控制建设区、适宜建设区和优先建设区分别占 8.7%、5.7% 和 5.5%。青海优先建设区主要集中于柴达木盆地，占省域面积 12.5%，适宜建设区和控制建设区分别占 6.8% 和 13.4%；技术禁建区和政策禁建区分别占 7.4% 和 50.4%。甘肃优先建设区和适宜建设区主要分布于北部与柴达木盆地接壤区域，占比分别为 4.4% 和 5.5%，其余区域以政策禁建区为主（55.6%），控制建设区、限制建设区和技术禁建区分别占 11.9%、11.3% 和 11.4%。新疆政策禁建区占 56.6%，技术禁建区、限制建设区和控制建设区分别占 12.9%、13.0% 和 12.7%，优先建设区和适宜建设区仅占 1.0% 和 3.7%。四川和云南则以禁止建设区为主，其中四川政策禁建区和技术禁建区分别占 55.1% 和 31.1%，限制建设区和控制建设区分别占 9.3% 和 4.0%；云南禁止建设区占 83.7%。

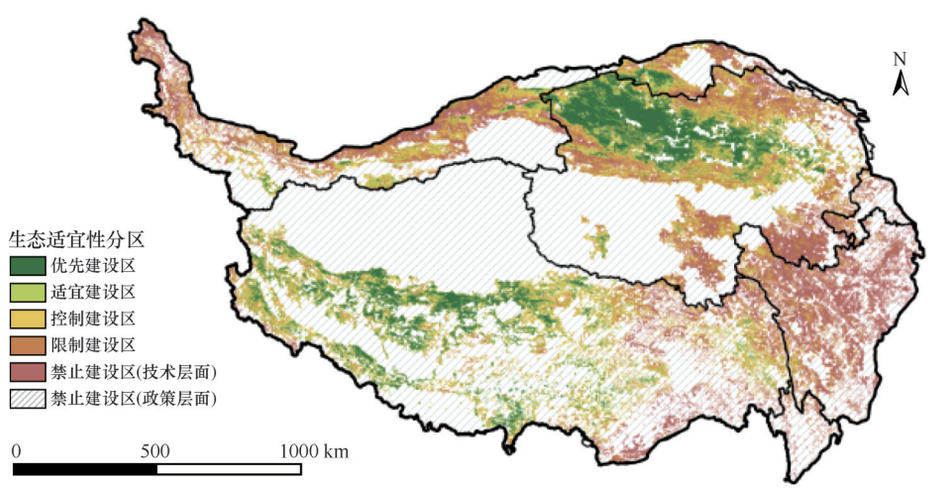


图 3 青藏高原光伏发电系统建设生态适宜性分区结果

Fig.3 Ecological suitability zoning results of photovoltaic power generation system construction on the Qinghai-Xizang Plateau

总体而言，青藏高原光伏建设生态适宜性具有显著地域差异。青海依托丰富的光伏资源、较优的地形条件及较高的生态环境承载能力，以优先建设区为主；西藏、新疆和甘肃受地形条件、生态环境敏感性及基础设施限制，以控制建设区、限制建设区和技术禁建区为主；四川和云南生态系统功能重要、生态环境敏感，大面积区域被划为禁止建设区，不适宜开展大规模光伏发电系统建设。

3.3　风沙活动强度与光伏建设适宜性综合分析

3.3.1　风沙活动强度指标的相互验证

为检验以气候因子（*WF*）表征风沙活动强度的合理性，本研究随机抽取 100 万个栅格像元，将 WF 与起沙风日数、传统风蚀气候因子（C 因子）进行空间相关性分析，结果显示 3 类指标两两之间均呈显著正相关（$P<0.001$）。其中，*WF* 与起沙风日数的 Pearson 相关系数高达 0.962，表明 *WF* 高值区与大风日数较多的区域高度对应；*WF* 与 C 因子的 Pearson 相关系数为 0.687，Spearman 相关系数为 0.824，说明 RWEQ 框架下的气候因子与传统风蚀气候因子在空间格局上具有良好一致性；起沙风日数与 C 因子亦显著相关。3 类指标相互印证，构成主指标（*WF*）—辅助指标（起沙风日数）—稳健性检验（C 因子）的完整证据链，支持以 *WF* 作为风沙活动强度主指标的合理性。

3.3.2　适宜性分区内风沙活动强度分布

在光伏建设适宜性分区的有效范围内（总面积 111.77 万 km^2），风沙活动强度以微弱和弱等级为主（图 4）。其中微弱等级面积 103.01 万 km^2，占 92.16%，弱等级面积 5.91 万 km^2，占 5.29%，二者合计达 97.45%，表明青藏高原光伏适宜区内绝大部分区域风沙活动强度较低。中等级面积 2.01 万 km^2，占 1.80%；强与极强等级面积分别为 7 758 km^2 和 612 km^2，合计 8 370 km^2，仅占 0.75%。将强与极强等级合并定义为风沙高风险区（即光伏建设需重点防沙区），其面积为 8 370 km^2，占适宜性有效范围的 0.75%。这一结果说明，从全域尺度看，风沙对青藏高原光伏开发的约束总体有限，但仍存在局部需重点管控的高风险区域。

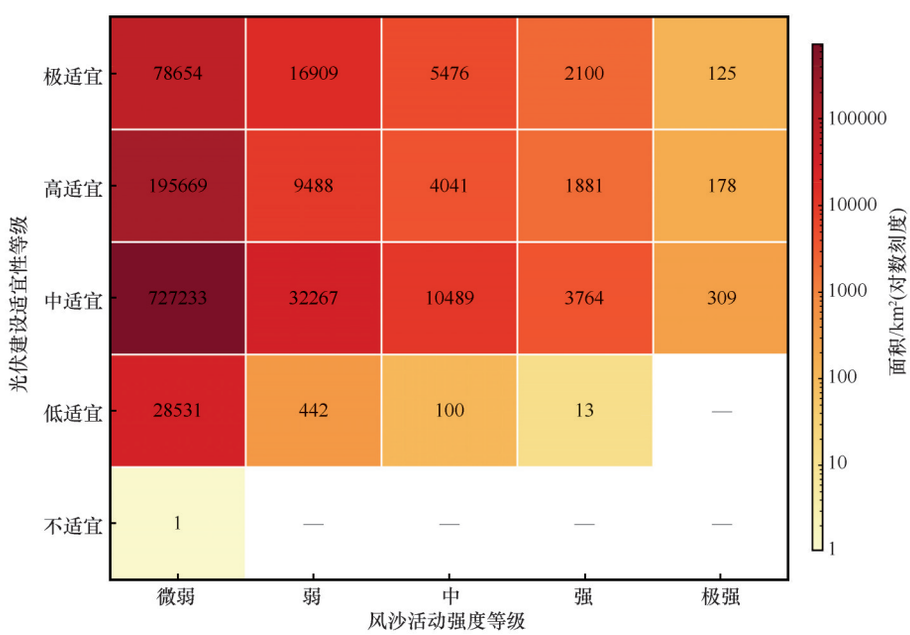


图 4　光伏建设适宜性等级与风沙活动强度等级交叉分布

Fig.4　Cross distribution of suitability level for photovoltaic construction and intensity level of wind and sand activity

3.3.3　适宜性等级与风沙活动强度等级交叉分析

高适宜区中微弱、弱等级面积分别为 19.57 万 km^2 和 9 488 km^2，极适宜区中微弱、弱等级面积分别为 7.87 万 km^2 和 1.69 万 km^2，四者合计 30.07 万 km^2，即高适宜且低风沙风险区域，占适宜性有效范围的 26.91%。这一区域兼具优越的建设适宜性与较低的风沙风险，是最适宜优先开发的区域。

与此同时，高适宜区内仍存在风沙活动强度较高的区域：高适宜—强、高适宜—极强、极适宜—强、极适宜—极强 4 类面积分别为 1 881、178、2 100、125 km^2，合计 4 284 km^2，占 0.38%。这部分区域虽具备较好的光伏建设适宜性，但风沙活动强烈，在建设与运维中应重点加强防风固沙工程、组件防磨损设计、基础防冲刷措施及运维期防沙管理。

3.3.4　风沙风险亚区划分

综合适宜性等级与风沙活动强度，本研究在适宜性有效范围内进一步划分出 7 类风沙风险亚区（图 5）。一般建设协调区面积最大，为 77.00 万 km^2，

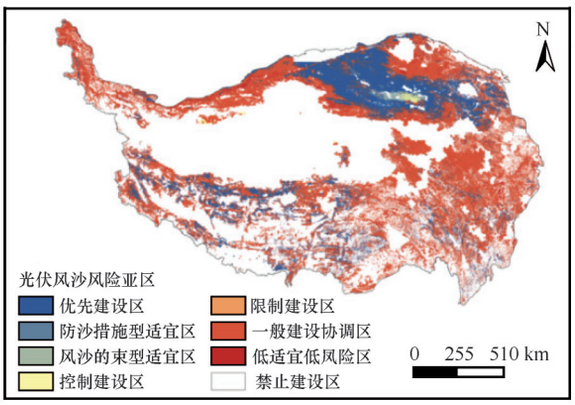


图 5 青藏高原光伏适宜区风沙风险亚区空间分布

Fig.5 Spatial distribution of wind and sand risk subregions in suitable photovoltaic areas on the Qinghai-Xizang Plateau

占 68.89%，该类区域适宜性中等且风沙风险较低，是光伏开发的主体区域；优先建设区（高适宜—低风沙风险）面积 30.07 万 km^2，占 26.91%，为最适宜优先开发的区域；低适宜低风险区面积 2.91 万 km^2，占 2.60%；防沙措施型适宜区（高适宜—中风沙风险）面积 9 517 km^2，占 0.85%；风沙约束型适宜区（高适宜—高风沙风险）面积 4 284 km^2，占 0.38%；控制建设区（中适宜—高风沙风险）面积 4 073 km^2，占 0.36%；限制建设区（低适宜—高风沙风险）面积 13 km^2，占比不足 0.01%。

其中 3 类区域对光伏规划布局具有重要指示意义：一是优先建设区（30.07 万 km^2），资源与适宜性条件优越且风沙风险低，应作为青藏高原光伏基地优先布局的重点区域；二是风沙约束型适宜区（4 284 km^2），适宜性较好但风沙活动强烈，是宜建但需重点防沙的管控对象，在选址与工程设计中须配套完善的防风固沙措施；三是控制建设区与限制建设区，因风沙风险高、适宜性中等偏低，光伏开发应审慎布局或予以限制。

3.4 现阶段光伏电站与生态适宜性及风沙风险分区对比

3.4.1 现阶段光伏电站与生态适宜性分区对比

青藏高原现阶段的光伏电站主要集中分布在青海以及西藏南侧区域，如图 6 所示。其中区域 1 位于柴达木盆地，其中部与南部分布有多处光伏电站，大部分位于优先建设区范围内，但其东南侧有一处面积较大的光伏电站与居民点缓冲区重叠。区域 2 位于柴达木盆地东侧以及青海湖一带，该区域内的光伏电站大部分位于优先建设区和适宜建设区内。区域 3 位于河湟谷地，区域 4 位于西藏自治区南侧，这些区域居民点分布密集，因此许多光伏电站都与本研究设置的居民点缓冲区交叠。

由此可见，现阶段已建的光伏发电系统一定程度上对当地居民形成干扰且当前光伏发电项目对本研究划定的优先建设区利用程度不足。因此，在近中期的规划布局中，光伏发电项目的选址策略应高度聚焦于优先建设区，尽最大可能将项目布局在该区域范围之内。而适宜建设区等可作为当前青藏高原光伏发电资源开发的战略储备区，在优先建设区内的光伏发电系统建设接近饱和时，再有序开展对战略储备区的开发利用工作，以确保光伏资源开发利用的高效与长远发展。

3.4.2 现阶段光伏电站与风沙风险分区对比

从风沙风险匹配关系来看，现有光伏项目整体未表现出明显的高风沙暴露特征。现有项目范围内风沙活动强度以微弱等级为主，面积为 773 km^2，占 98.22%；弱等级面积为 14 km^2，占 1.78%；中、强和极强等级面积均为 0 km^2。风沙风险亚区叠加结果同样表明，在参与亚区划分的有效范围内，现有光伏项目都分布于优先建设区和一般建设协调区。其中，优先建设区面积为 446 km^2，占 84.31%；一般建设协调区面积为 83 km^2，占 15.69%。

从本文风沙活动强度等级和风沙风险亚区识别结果看，现有光伏项目整体沙埋风险相对较低。然而，柴达木盆地及其周边区域仍属于青藏高原风沙活动相对活跃的背景区，部分项目虽然未落入强–极强风沙高风险区，但邻近荒漠、戈壁和裸地分布区，可能受到局地沙尘沉积、组件表面磨蚀和运维清灰压力的影响。因此，未来光伏基地选址仍应在优先建设区内部进一步叠加风沙活动强度、起沙风日数和潜在沙源地信息，优先避让强风蚀通道及强–极强风沙风险区。

4 结论

青藏高原整体具备良好的光伏开发潜力，但生态适宜性空间分布不均。优先建设区和适宜建设区主要集中在青海柴达木盆地和西藏中部地区，这些区域地形相对平坦、太阳辐射资源丰富、生态环境敏感性相对较低，是未来光伏发电系统建设的重点区域。

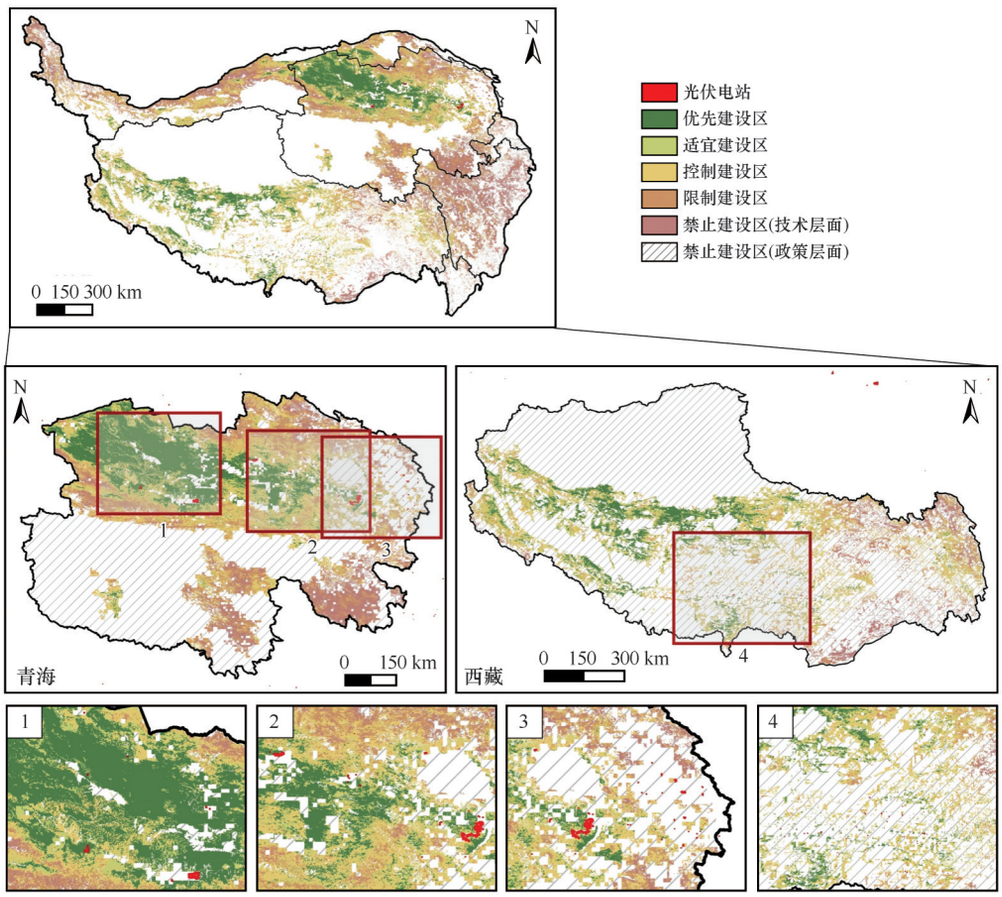


图 6　青藏高原光伏电站与光伏发电系统建设生态适宜性分区比对

Fig.6　Comparison of ecological suitability zoning for photovoltaic power station and photovoltaic power generation system construction on the Qinghai-Xizang Plateau

从省域尺度看，光伏发电系统建设生态适宜性分区呈现明显地域差异。青海省优先建设区分布最为集中，西藏自治区中部及部分河谷地区适宜建设条件较好；四川省和云南省受地形起伏大、生态系统功能重要性高及生态环境敏感性强等因素限制，大部分区域被划为禁止建设区。

现有光伏发电项目与本研究划定的优先建设区仍存在一定匹配提升空间，部分项目与居民点缓冲区或适宜性无效区存在重叠，后续需结合具体限制因子进一步核查。进一步叠加风沙风险结果显示，青海省现有光伏项目整体未与强–极强风沙高风险区重叠，主要分布于低风沙风险区，说明现有项目总体沙埋暴露风险较低，但未来扩建仍应严格避让居民点缓冲区、生态敏感区及局地高风沙风险区。

风沙活动强度作为光伏建设的重要后置风险约束，揭示了优先建设区内部仍存在差异化建设风险。青藏高原风沙活动强度总体呈西北高、东南低的格局，高值区主要集中于柴达木盆地及其周边荒漠戈壁区。虽然部分区域具有较好的资源禀赋和综合适宜性，但仍可能存在较强风沙活动和潜在强风蚀通道。因此，光伏基地选址不应仅依据资源条件和综合适宜性等级，还应结合风沙活动强度识别结果，规避强、极强风沙风险区；对于位于风沙约束型适宜区及其邻近区域的项目，应配套草方格固沙、砾石压覆、植被恢复、防风固沙带建设、组件防磨损设计和基础防冲刷等措施，以降低沙尘沉积、组件磨蚀、基础冲刷和运维成本增加等风险。

参考文献：

[1] International Energy Agency (IEA). World Energy Balance 2018: Overview[R]. Paris, France: IEA, 2017: 13.

[2] Aleixandre-Tudó J L, Castelló-Cogollos L, Aleixandre J L, et al. Renewable energies: worldwide trends in research, funding and international collaboration[J]. Renewable Energy, 2019,

139:268-278.
[3] 中国气象局.2022年中国风能太阳能资源年景公报[R].北京:中国气象局,2023.
[4] Tang W, Xu S, Zhou X, et al. Meeting China's electricity demand with renewable energy over Tibetan Plateau[J]. Science Bulletin, 2023, 68(1): 39-42.
[5] Kawajiri K, Oozeki T, Genchi Y. Effect of temperature on PV potential in the world[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(20): 9030-9035.
[6] 苑森朋,张振师,党廷辉,等.毛乌素沙地光伏电站3种植物措施生长发育状况及其生态功能比较[J].水土保持研究,2018,25(2):235-239.
[7] 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.
[8] Mani M, Pillai R. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: research status[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(9): 3124-3131.
[9] Scherba A, Sailor D J, Rosenstiel T N, et al. Modeling impacts of roof reflectivity, integrated photovoltaic panels and green roof systems on sensible heat flux into the urban environment [J]. Building and Environment, 2011, 46(12): 2542-2551.
[10] 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.
[11] 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.
[12] 曾永年,马海洲,李珍,等.西宁地区湟水阶地的形成与发育研究[J].地理科学,1995,15(3):253-258,298.
[13] 程玉卓,等.河湟谷地近20年耕地利用变化的土壤保持效应[J].中国水土保持科学,2023,21(1):55-63.
[14] 沈义.我国太阳能的空间分布及地区开发利用综合潜力评价[D].兰州:兰州大学,2014[2023-04-23].
[15] 朱万泽,范建容,王玉宽,等.长江上游生物多样性保护重要性评价:以县域为评价单元[J].生态学报,2009,29(5):2603-2611.
[16] 蔡崇法,丁树文,史志华,等.应用USLE模型与地理信息系统IDRISI预测小流域土壤侵蚀量的研究[J].水土保持学报,2000,14(2):19-24.
[17] 王莉雁,肖燚,江凌,等.青藏高原冻融侵蚀敏感性评价与分析[J].冰川冻土,2017,39(1):61-69.
[18] Tsoutsos T, Frantzeskaki N, Gekas V. Environmental impacts from the solar energy technologies[J]. Energy Policy, 2005, 33(3): 289-296.
[19] 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.
[20] 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.
[21] Maleki A, Pourfayaz F, Hafeznia H, et al. A novel framework for optimal photovoltaic size and location in remote areas using a hybrid method: a case study of eastern Iran[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 153: 129-143.
[22] Liu J, Xu F, Lin S. Site selection of photovoltaic power plants in a value chain based on grey cumulative prospect theory for sustainability: a case study in Northwest China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 148: 386-397.
[23] 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.
[24] 张晓萍,李锐,杨勤科.基于RS/GIS的生态脆弱区土地利用适宜性评价[J].中国水土保持科学,2004,2(4):30-36.
[25] 丁建中,陈逸,陈雯.基于生态-经济分析的泰州空间开发适宜性分区研究[J].地理科学,2008,28(6):842-848.
[26] 刘焱序,彭建.基于OWA的低丘缓坡建设开发适宜性评价:以云南大理白族自治州为例[J].生态学报,2014,34(12):3188-3197.
[27] Jenks G F. The data model concept in statistical mapping[J]. International Yearbook of Cartography, 1967, 7: 186-190.
[28] 汤国安,杨昕.ArcGIS地理信息系统空间分析实验教程[M].北京:科学出版社,2012.
[29] 巩国丽,刘纪远,邵全琴.基于RWEQ的20世纪90年代以来内蒙古锡林郭勒盟土壤风蚀研究[J].地理科学进展,2014,33(6):825-834.
[30] Fryrear D W, Bilbro J D, Saleh A, et al. RWEQ: improved wind erosion technology[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 55(2): 183-189.
[31] 杨志华,张永双,郭长宝,等.青藏高原东缘地质灾害影响因子敏感性分析[J].工程地质学报,2018,26(3):673-683.
[32] 贺鹏.基于GIS的西藏札达地区滑坡灾害危险性评价研究[D].北京:中国地质大学(北京),2013.
[33] 刘刚,燕云鹏,刘建宇.青藏高原西部地质灾害分布特征及背景分析[J].中国地质调查,2017,4(3):37-45.
[34] Goossens D, Van Kerschaever E. Aeolian dust deposition on photovoltaic solar cells: the effects of wind velocity and airborne dust concentration on cell performance[J]. Solar Energy, 1999, 66(4): 277-289.

Ecological suitability zoning for photovoltaic system construction on the Qinghai-Xizang Plateau

Yang Jiafan[1], Zhang Ruijia[1], Zeng Weihua[1], Li Jiaqi[1], Wang Liting[1], Peng Huaiwu[2]
(1. *School of Environment, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*; 2. *Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xian* 710100, *China*)

Abstract: The Qinghai-Xizang Plateau (QXP), endowed with abundant solar energy resources, is a strategic region for large-scale photovoltaic (PV) development in China. However, its critical ecological functions and fragile environment pose significant challenges to balancing renewable energy development with ecological conservation. Therefore, ecological suitability zoning is needed to guide the orderly deployment of PV systems and promote the coordinated development of energy utilization and ecological protection. In this study, an evaluation index system consisting of five dimensions—PV resource endowment, construction and operation suitability, ecosystem service importance, ecological environmental sensitivity, and socio-economic suitability—was established. The entropy weight method was applied to determine the weights of 19 evaluation indicators, and spatial overlay analysis was employed to perform ecological suitability zoning for PV system construction on the QXP. The results show that: (1) The priority and suitable construction zones account for approximately 10% of the total area of the QXP. Among them, the priority construction zones cover approximately 160 800 km^2 and are mainly distributed in the Qaidam Basin of Qinghai Province and central Xizang. At the provincial level, priority construction zones account for 12.5% and 5.5% of the total area of Qinghai and Xizang, respectively, while Sichuan and Yunnan are dominated by prohibited construction zones, accounting for more than 80% of their total areas. (2) Existing PV projects on the plateau do not fully utilize the priority construction zones identified in this study, and three projects overlap with residential buffer zones, thereby potentially affecting local residents' livelihoods. Based on these findings, it is suggested that PV development in the short to medium term should prioritize the designated priority construction zones. After incorporating wind-sand activity intensity as a post-evaluation risk constraint, the overall wind-sand risk within the ecologically suitable areas for PV was relatively low, with strong and extremely strong risk zones accounting for only 0.75% of the suitable area. Nevertheless, wind-sand-constrained suitable zones remain in some highly suitable regions, particularly in the Qaidam Basin and the northwestern part of the QXP.

Key words: Qinghai-Xizang Plateau; photovoltaic system deployment; ecological suitability zoning; spatial overlay analysis