

DOI: 10.20103/j.stxb.202504070798

王雨晴, 杨洪波. 全球风光资源开发与生物多样性保护的潜在土地利用冲突. 生态学报, 2025, 45(24): 12098-12112.

Wang Y Q, Yang H B. Analysis of potential land use conflicts between global solar and wind resource development and biodiversity conservation. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(24): 12098-12112.

全球风光资源开发与生物多样性保护的潜在土地利用冲突

王雨晴^{1,2}, 杨洪波^{1,*}

1 中国科学院生态环境研究中心区域与城市生态安全国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 增加可再生能源的部署可有效降低碳排放并增强能源安全, 而扩大自然保护地等生态保护面积对遏制生态系统退化与生物多样性丧失、提升国家生态安全至关重要。然而, 可再生能源快速发展对土地资源需求的增加可能会加剧与生物多样性保护之间的潜在土地利用冲突。为明确两者之间的潜在土地利用冲突格局, 基于全球风光发电潜力与生物多样性保护优先区的空间重叠分析, 评估比较了两种不同生物多样性保护优先区识别情景下风光资源开发与生物多样性保护的潜在土地利用冲突差异。结果表明, 全球超过 15% 的风电光伏发电潜力位于前 30% 生物多样性保护优先区, 可再生能源开发与生物多样性保护之间的潜在土地利用冲突主要集中在全球的生物多样性热点地区与国家。基于不同生物多样性保护优先区识别情景下得到的风光资源开发与生物多样性保护潜在土地利用冲突格局存在较大差异。在基于全球生物多样性重要性程度识别的保护优先区情景下, 大洋洲的生物多样性保护与风光资源开发的潜在土地利用冲突较高, 且生物多样性热点国家普遍面临较为严重的土地利用冲突, 56 个国家超过 50% 的发电潜力位于保护优先区。而在根据各国境内生物多样性重要性设立各自生物多样性保护优先区的情景下, 欧洲的潜在土地利用冲突相较其它各大洲而言较高; 和全球优先区识别情景相比, 各国的土地利用潜在冲突程度整体有所下降。但如果按照此情景开发, 许多生物多样性热点国家境内生物多样性相对较低但在全球尺度生物多样性相对较高的地区将面临风电光伏开发带来的潜在威胁。这一结果强调了全球各国协作以实现生物多样性保护与清洁能源转型协同发展的重要作用, 为全球协调可再生能源开发与生物多样性保护的土地利用规划提供了重要科学依据。

关键词: 太阳能; 风能; 可再生能源; 生物多样性; 土地利用冲突

Analysis of potential land use conflicts between global solar and wind resource development and biodiversity conservation

WANG Yuqing^{1,2}, YANG Hongbo^{1,*}

1 State Key Laboratory of Regional and Urban Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Increasing the deployment of renewable energy effectively reduced carbon emissions and enhanced energy security. At the same time, expanding ecological protection areas—such as nature reserves—has proven crucial for curbing ecosystem degradation, mitigating biodiversity loss, and strengthening national ecological security. However, the sharp increase in land demand driven by the rapid development of renewable energy has exacerbated potential land use conflicts with biodiversity conservation. To clarify the spatial patterns of potential land use conflicts between renewable energy

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42471287)

收稿日期: 2025-04-07; 网络出版日期: 2025-09-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hbyang@rcees.ac.cn

development and biodiversity conservation, this study conducted a spatial overlap analysis between global wind and solar energy potential and biodiversity conservation priority areas. It then evaluated and compared the differences under two biodiversity conservation prioritization scenarios. The results showed that more than 15% of the global wind and solar energy potential overlapped with the top 30% of biodiversity conservation priority areas, and the potential land use conflicts between renewable energy development and biodiversity conservation were predominantly concentrated in countries and regions located within global biodiversity hotspots. There were notable differences in the spatial patterns of potential land use conflicts between wind and solar energy development and biodiversity conservation under different biodiversity conservation priority area identification scenarios. Under the scenario in which conservation priority areas were designated based on global biodiversity importance, Oceania exhibited a high level of potential land use conflict between renewable energy development and biodiversity conservation, and countries located in biodiversity hotspots generally faced more severe conflicts. In this scenario, more than 50% of the wind and solar energy potential in 56 countries overlapped with designated biodiversity conservation priority areas. In contrast, under the scenario in which conservation priority areas were identified within each country based on the relative importance of domestic biodiversity, Europe exhibited a higher level of potential land use conflict than other continents. However, the overall degree of potential conflict across most countries was lower compared to the global prioritization scenario. Nevertheless, if renewable energy development proceeds according to this national-prioritization conservation scenario, many biodiversity hotspot countries—with relatively low biodiversity within their national borders but high biodiversity significance on a global scale—may face significant threats from wind and solar energy expansion. These results emphasized the critical importance of international cooperation in achieving the coordinated advancements of biodiversity conservation and the global transition to clean energy, and provided an important scientific basis for global land use planning efforts aimed at balancing renewable energy development with biodiversity conservation.

Key Words: solar energy; wind energy; renewable energy; biodiversity; land use conflicts

人类活动引发的气候变化和生物多样性丧失是当今两大全球性环境危机^[1-2]。化石能源(如煤炭、石油和天然气)的利用会释放大量温室气体,是气候变化的主要驱动因素^[3]。为将全球气温上升控制在1.5℃以内,全球碳排放需在2030年前减少45%,并在2050年前实现净零排放^[4]。研究估计,从化石燃料向可再生能源的转型可使能源行业的二氧化碳排放量减少高达90%^[5]。因此,越来越多的国家将发展可再生能源视为淘汰化石燃料、降低碳排放的核心战略^[6]。在2023年12月举行的《联合国气候变化框架公约》第28次缔约方大会(COP28)上,各国全面达成减少所有化石燃料使用的历史性协议,110多个国家承诺到2030年将可再生能源产能增加两倍。预计到2050年,全球电力行业的可再生能源占比将从2017年的25%提升至85%^[5],这要求每年新增1000吉瓦的装机容量^[7]。其中,太阳能光伏与风力涡轮机技术的进步与成熟为实现大规模能源转型提供了核心支撑^[8]。过去十年,全球新增可再生能源装机容量的83.7%来自太阳能和风能^[7]。

尽管可再生能源的推广有助于应对气候变化,其开发过程(尤其是在生态敏感区域)也可能对生物多样性构成重大威胁^[9]。已有研究表明,风力发电场的建设会导致野生动物死亡、栖息地丧失和生态系统退化^[10]。例如,风力涡轮机对鸟类和蝙蝠构成直接威胁^[11],每兆瓦风机每年约造成2.3只鸟和7.7只蝙蝠死亡^[12-13]。太阳能电场同样对鸟类构成威胁,一些鸟类将光伏板误判为水面,在降落时碰撞发生伤亡^[10],仅美国的太阳能电场每年就造成约3.8万至13.8万只鸟类死亡^[14]。此外,相关基础设施的建设还可能引起栖息地丧失和破碎化,加剧生物多样性压力。例如,中国山西太岳山风电项目的开发使野生动物迁徙路线延长95km,迁徙走廊沿线的阻力增加148.63%,严重阻碍物种迁徙^[15]。

建立自然保护地等生态保护区域是生物多样性保护的核心举措,但目前全球仅约17%的陆地和8%的海洋受到有效保护^[16],远未满足生态系统稳定性与物种多样性维持的基本需求。在《生物多样性公约》第十五次缔约方大会上,各国达成《昆明—蒙特利尔全球生物多样性框架》,确立了到2030年实现至少30%的陆地、

内陆水域及海洋区域得到有效保护的目标^[17]。然而,现有可再生能源发展政策在土地利用规划中往往忽视生态保护需求,导致部分项目进入生物多样性保护的关键敏感区。Rehbein 等发现,全球已有 2206 个可再生能源设施位于保护区、生物多样性关键区(Key Biodiversity Areas, KBA)和全球荒野区域内^[9]。在可再生能源潜力高且生物多样性丰富的地区,潜在土地利用冲突尤为严峻。

如缺乏有效规划,随着清洁能源发展对土地资源的需求快速增长,风电与光伏能源开发与生物多样性保护之间的矛盾将变得愈发突出。与传统化石能源相比,风电与光伏能源设施用地强度更大。风电场的平均土地利用强度为 $15000 \text{ hm}^2 (\text{TWh})^{-1} \text{ a}^{-1}$,而地面光伏系统为 $2100 \text{ hm}^2 (\text{TWh})^{-1} \text{ a}^{-1}$ ^[18],为实现每年新增 630 GW 太阳能和 390 GW 风电装机容量的目标^[19],全球预计需约 6280 万 hm^2 土地,相当于中非共和国的国土面积。但适宜开发的土地资源有限且日益稀缺^[20-21],进一步加剧了风光资源开发对生物多样性保护用地的侵占风险。

近年来,可再生能源开发与生态保护之间的冲突已受到广泛关注,已有一系列研究探讨了可再生能源设施与全球生物多样性重要保护区域之间的空间重叠关系,以此评估其对生物多样性构成的风险^[9,22-23]。然而,这些研究多聚焦于现状分析,缺乏对风电光伏能源开发扩张趋势下,未来潜在土地利用冲突格局的系统评估,难以为风电光伏能源开发的空间规划提供科学支撑以实现清洁能源目标与生物多样性保护目标的协同实现。同时,尽管全球范围内亟需协调扩展保护地网络^[24],但实际操作中各国多自主划定各自的生物多样性保护优先区。因此,在全球统一与国家自主两种生物多样性保护优先区识别策略下,明确不同情景中生物多样性保护与可再生能源开发之间的潜在土地利用冲突格局,对实现能源转型与生态保护协同发展具有重要的现实意义。本研究基于不同策略识别计算全球前 30% 生物多样性保护优先区(以下简称“保护优先区”)内的风光发电潜力,量化评估在不同尺度及保护情景下全球生物多样性保护与可再生能源之间的潜在土地利用冲突的空间分布格局,为各国协调能源发展与生态保护提供重要科学依据与政策建议。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本研究中使用的数据其年份、来源及分辨率如表 1 所示。

表 1 数据来源

Table 1 Data source

数据 Data	年份 Year	来源 Source	分辨率 Resolution	应用 Application
生物多样性重要性图层 Biodiversity importance layer	2021	https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01938	1km	识别全球保护优先区
全球 100 m 高度处的年平均风速 Global average annual wind speed at 100 m height	2023	https://globalwindatlas.info	1km	计算风力发电潜力
坡度 Slope	2000	https://www.gscloud.cn	30 m	潜力计算约束条件
SSP1-RCP2.6 情景下 2050 年土地利用 Land use under SSP1-RCP2.6 scenario in 2050	2050	https://doi.org/10.6084/m9.figshare.23542860.v1	1km	潜力计算约束条件
光伏输出功率 Photovoltaic power potential	2023	Solar resource map 2021 Solargis. https://solargis.com	1km	计算光伏发电潜力
自然保护区 Protected areas	2024	https://www.protectedplanet.net	矢量	潜力计算约束条件
到最近城市旅行时间 Travel time to the nearest city	2015	https://doi.org/10.1038/nature25181	1km	潜力计算约束条件
各国 2050 年能源需求 Energy demand of each country in 2050	2050	https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aaf6e0	/	刻画土地利用冲突程度

为统一数据的空间分辨率,将原始分辨率为 30 m 的坡度数据使用双线性插值法重采样至 1km。剔除点

状自然保护地数据,仅保留具有明确边界范围的面状保护地,以确保空间分析的准确性。

1.2 研究方法

本研究通过构建未来风电光伏发电技术潜力图层,分析全球生物多样性保护优先区域与可再生能源潜力之间的空间重叠关系,以评估生物多样性保护与风光资源开发之间的潜在土地利用冲突。

1.2.1 光伏发电潜力计算

参考已有研究^[25—26],基于单位光伏装机容量输出的光伏电量(PVOUT)和单位面积装机容量(CP),计算光伏发电技术潜力(单位:kWh/km²),计算公式如下:

$$TP = PVOUT \times CP \quad (1)$$

式中,TP表示光伏发电技术潜力,PVOUT表示单位光伏装机容量的年发电量,CP表示在约束条件下的单位面积装机容量。单位面积装机容量CP计算公式如下:

$$CP = P_0 \times S \times \eta_y \times \eta_{sf} \times \eta_\beta \times \eta_a \times PF \quad (2)$$

式中, $P_0=0.1619\text{kW/m}^2$,为单位面积光伏板的最大输出功率;S为像元面积(单位km²); η_y 为土地利用适宜性系数(表2); η_{sf} 为坡度适宜性系数(坡度大于5%时为0,其它为1); η_β 代表自然保护地系数(保护地内为0,保护地外为1); η_a 代表可达性系数(基于现有风光电场分布,结合Weiss等^[27]发布的全球城市旅行时间数据,设定最大可达时间阈值,可达时间小于阈值的区域系数为1,其它超出该阈值的过于偏远地区为0);PF为容量因子,表示每平方米土地的有效光伏面板面积,计算公式如下:

$$PF = \frac{1}{\cos\Sigma + \frac{\sin\Sigma}{\tan\beta_n} \times \cos\varphi_s} \quad (3)$$

式中, Σ 为光伏板最优倾角, β_n 为太阳高度角, φ_s 为太阳方位角。

表2 光伏发电的土地利用类型及适宜性系数

Table 2 Land use types and suitability coefficients for solar power generation

土地利用类型 Land use types	适宜性系数 Suitability coefficients
林地 Forest	0
密闭灌丛,多树热带草原 Closed shrubland, tree-dominated tropical grassland	0.05
草地,开阔灌丛,热带稀树草原 Grassland, open shrubland, tropical savanna	0.2
贫瘠或稀疏植被覆盖地 Barren or sparsely vegetated land	0.2
农田,耕地/自然植被镶嵌地 Agricultural land, cropland/natural vegetation mosaic	0.02
城市和建成区 Urban and built-up areas	0.05
水体,永久湿地,永久冰雪 Water bodies, permanent wetlands, permanent snow and ice	0

1.2.2 风力发电潜力计算

参考已有研究^[28],各约束条件下陆上风力发电技术潜力TP(单位:MWh/km²)计算公式如下:

$$TP = \mu \times \delta \times (1-L) \times (1-C) \times \eta_y \times \eta_{sf} \times \eta_\beta \times \eta_a \times E_T \quad (4)$$

式中, $\mu=97\%$,代表风力涡轮机的利用效率; $\delta=2/\text{km}^2$,代表风机安装密度; $L=18\%$,是风电场由于尾流效应、传输、内部和其他不可避免损失而造成的总损失率,代表风力系统总损耗; $C=15\%$,是由于风力的间歇性等因素导致未能整合到输电网络中的风力,即削减率; η_y 代表土地利用适宜性系数(表3); η_{sf} 代表坡度适宜性系数(大于20°为0,小于20°为1); η_β 代表自然保护地系数(保护地内为0,保护地外为1); η_a 代表可达性系数(基于现有风光电场分布,结合Weiss等^[27]发布的全球城市旅行时间数据,设定最大可达时间阈值,可达时间小于阈值的区域系数为1,其它超出该阈值的过于偏远地区为0); E_T (单位:MWh)为全年预期最大风力开发潜力量,计算公式如下:

$$E_T = T \times EWP \quad (5)$$

式中, T 为一年中总小时数, 即 8760 h, EWP(单位: MW) 为单位时间可开发的最大风力发电量, 计算公式如下:

$$\text{EWP} = \int_{v_{\text{cutin}}}^{v_{\text{cutout}}} P(v) \times f(v) dv \quad (6)$$

式中, v_{cutin} 和 v_{cutout} 分别为切入和切出风速, $P(v)$ 为风机功率曲线, 基于主要风力涡轮机制造商(包括 Siemens, Vestas, GE Renewable Energy, Enercon)生产的常用风力涡轮机的关键参数值范围^[28]。 $f(v)$ 为风速频率分布。风速频率分布按瑞利分布拟合, 计算公式如下:

$$f(v) = \frac{\pi}{2} \times \frac{v}{v_m^2} \times \exp \left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{v_m} \right)^2 \right) \quad (7)$$

式中, v_m 为年平均风速, v 代表风速。

表 3 风力发电的土地利用类型及适宜性系数

Table 3 Land use types and suitability coefficients for wind power generation

土地利用类型 Land use types	适宜性系数 Suitability coefficients	土地利用类型 Land use types	适宜性系数 Suitability coefficients
水田 Paddy fields	0	草地 Grassland	0.8
旱地 Dry land	0.7	水体 Water bodies	0
森林 Forest	0.1	永久冰雪 Permanent snow and ice	0
灌木 Shrubland	0.5	建设用地 Built-up land	0
稀疏林地 Sparse forest	0.65	沙漠、戈壁、盐碱地	1
其它林地 Other forests	0.7	Desert, Gobi, saline-alkali land	

1.2.3 可再生能源开发与生物多样性保护之间的土地利用冲突分析

本研究使用的生物多样性重要性数据源自 Cimatti 等^[29]的研究成果, 该数据通过系统整合多种已发布的全球生物多样性空间优先排序图, 识别出全球范围内的生物多样性保护重要性空间分布。基于生物多样性重要性栅格数据, 按像元值从大到小排序, 研究选取了前 30% 的陆地像元作为生物多样性保护优先区。这一阈值主要基于《生物多样性公约》成员国在第十五次缔约方大会上共同通过的《昆明—蒙特利尔全球生物多样性框架》中确立的全球“30×30”目标。该目标承诺到 2030 年确保至少 30% 的陆地、内陆水域及沿海和海洋区域得到有效保护^[17]。

研究结合发电潜力数据与生物多样性重要性数据, 创建双变量栅格图层, 以揭示风光资源开发与生物多样性保护之间潜在土地利用冲突的全球空间分布。研究进一步比较了两种不同生物多样性保护优先区识别策略下风光资源开发与生物多样性保护的潜在土地利用冲突差异: 一是基于全球生物多样性重要程度确定的保护优先区, 二是基于各国境内生物多样性重要程度分别确定各国的保护优先区(以下简称“全球保护情景”和“国家保护情景”)。在此两种情境下, 根据全球各大洲和国家边界, 统计各大洲及各国在保护优先区的发电潜力量及其占各区域范围内总潜力的比例, 从而在洲际和国家两个层面分析生物多样性保护与风光资源开发之间的潜在土地利用冲突格局。此外, 研究对比了各国 2050 年的能源需求量与在生物多样性保护约束条件下风光资源可开发潜力之间的大小关系, 以揭示各国在不同生物多样性保护优先情景下协同实现生物多样性保护和满足能源需求所面临的潜在挑战。各国的 2050 年能源需求数据源自 Baruch-Mordo 等^[30], 依据国际能源署(International Energy Agency)的 2050 年净零排放情景预测获得。

2 研究结果

2.1 全球风光资源发电潜力及与生物多样性潜在土地利用冲突的空间分布

全球光伏与风力发电潜力分布呈现显著的空间分异。光伏发电潜力较高的区域集中在太阳辐射强烈的

热带和亚热带地区,如撒哈拉沙漠、中东、澳大利亚内陆。北美、欧洲北部、俄罗斯等高纬度地区的光伏发电潜力较低。南北回归线附近的光伏发电平均潜力较大,并且随着纬度升高,潜力逐渐降低,从南北回归线向赤道方向,潜力也由于陆地面积和森林覆盖等约束呈现逐渐降低的趋势(图1)。与太阳能不同,风力发电潜力较高的区域主要集中在非洲北部、阿拉伯半岛、北美大平原、南美巴塔哥尼亚地区以及蒙古高原等地。在某些高纬度地区,风力发电潜力较高。而赤道附近的热带雨林地区和地形封闭的盆地地区(如亚马逊盆地、刚果盆地)风力潜力较低。按照潜力的纬度分布结果来看,风力发电潜力在北纬80度至南纬60度之间存在多个峰值,在南美洲巴塔哥尼亚地区出现最大值。从全球总量来看,光伏发电潜力(共计971475 TWh)整体要高于风力发电潜力(共计453792 TWh),总量约为其两倍(图1)。

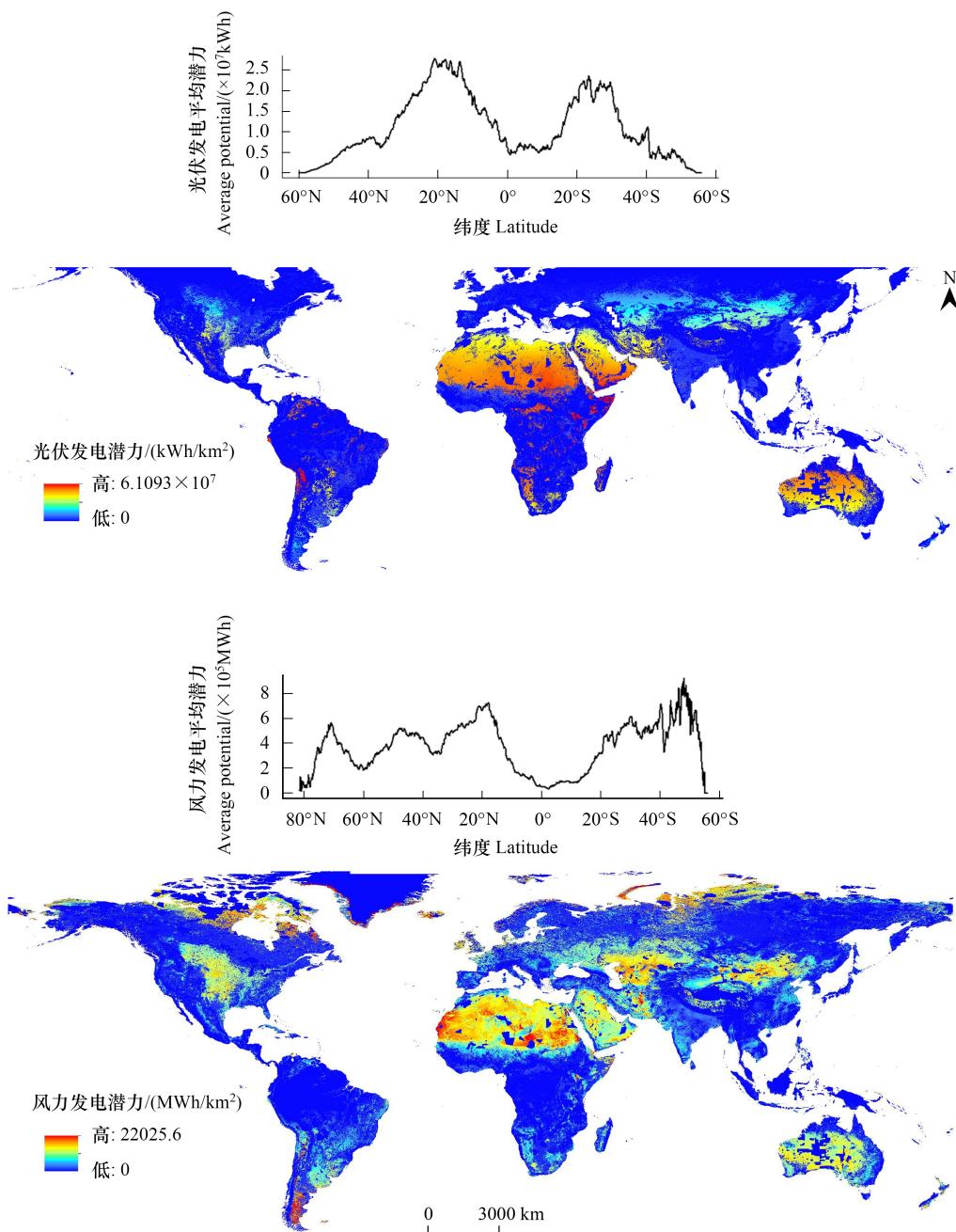


图1 全球光伏与风电技术发电潜力

Fig.1 The technical potential of global solar and wind energy

极端纬度区域由于缺少全球水平辐照度数据,潜力数据缺失

风光资源发电潜力较高的区域中,部分地区与生物多样性保护优先区域存在重叠,特别是在非洲撒哈拉以及澳大利亚中部等地区。撒哈拉沙漠、纳米比亚和澳大利亚等地区既有较高的光伏发电潜力,又拥有丰富的生物多样性,潜在土地利用冲突较大。光伏发电潜力较高但生物多样性较少的区域,例如中亚、南撒哈拉沙漠等区域,可再生能源开发与生物多样性保护之间的土地利用冲突相对较小,可以作为优先考虑的光伏开发区域(图2)。巴塔哥尼亚、撒哈拉沙漠以及澳大利亚等地区既有较高的风电潜力,又拥有丰富的生物多样性,面临着较大的土地利用冲突。风电潜力高而生物多样性较少的地方则集中在美国中部平原以及海岸沿线区域、撒哈拉沙漠边缘地区、中亚、蒙古国等地区,则可以作为优先考虑的风电开发区域(图2)。

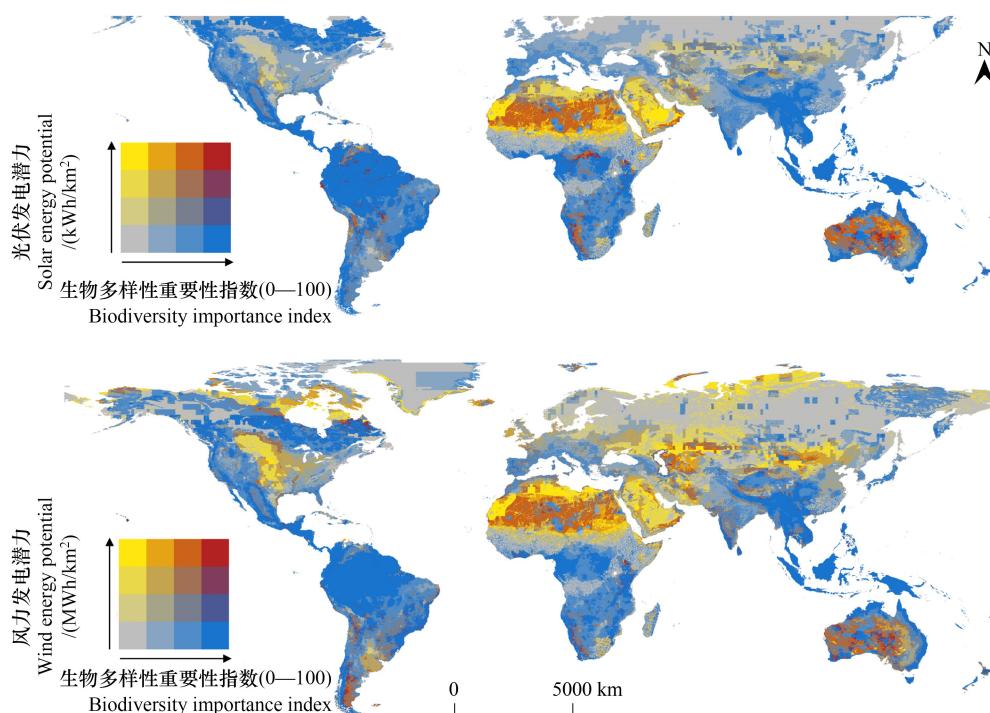


图2 风光资源开发与生物多样性保护的潜在冲突格局

Fig.2 Potential conflict patterns between solar and wind resource development and biodiversity conservation

2.2 全球生物多样性优先区识别情景下的风光资源开发与生物多样性保护的潜在土地利用冲突

在全球保护情景下,各大洲之间的可再生能源开发与生物多样性保护之间所面临的潜在土地利用冲突呈现出显著的空间异质性。全球范围内有15.5%的光伏发电潜力位于全球保护优先区,大洋洲和美洲的生物多样性保护与光伏发电之间潜在土地利用冲突较为突出,分别有36.3%和37.3%的光伏发电潜力位于全球保护优先区;欧洲面临的潜在冲突最小,仅有4.0%的光伏发电潜力位于全球保护优先区(图3)。与此同时,全球约16.6%的风电潜力位于全球生物多样性保护优先区,大洋洲和美洲的潜在冲突较为突出,分别有38.3%和26.4%的风电潜力位于保护优先区;欧洲面临的潜在冲突最小,仅有1.4%的风电潜力位于保护优先区(图3)。

从国家尺度来看,风光资源开发与全球生物多样性保护潜在土地利用冲突较大的国家主要集中在生物多样性热点区域,这些国家有较高比例的潜力位于保护优先区。一些生物多样性丰富,生态系统原真性保留较好的热带岛国,风电与光伏发电潜力与生物多样性重叠程度极高,例如,法属波利尼西亚、基里巴斯等国几乎全部的光伏发电潜力均位于保护优先区,老挝、印度尼西亚等国家则有超过80%的光伏潜力位于这些保护优先区;风电开发与全球生物多样性保护面临的潜在冲突分布与光伏相似,在东南亚以及南美洲等地的生物多样性热点国家,风电开发与生物多样性保护的潜在土地利用冲突较高,例如,印度尼西亚、老挝等国有90%以上的风电潜力位于保护优先区(图4)。

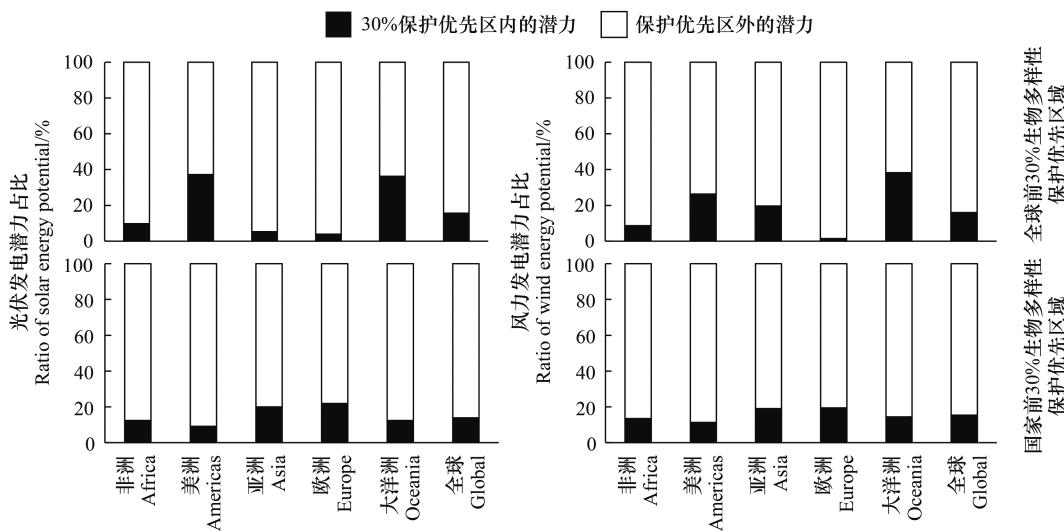


图3 各洲在前30%生物多样性保护优先区内的风电光伏发电潜力比例

Fig.3 The proportion of solar and wind energy potential in the top 30% of biodiversity priority areas in each continent

澳大利亚和巴西在保护优先区的光伏潜力总量较高,光伏开发与生物多样性保护之间的潜在土地利用冲突较大,而澳大利亚、沙特阿拉伯等国在保护优先区中的风电潜力总量较高,风电开发与生物多样性保护之间的潜在土地利用冲突较大(图5)。

通过对比各国2050年能源需求量以及风光发电潜力,研究发现,未来各国面临的潜在冲突较大,全球共有71个国家在剔除保护优先区内发电潜力后的剩余可利用光伏发电潜力小于其2050年的能源需求,63个国家的剩余可利用风电潜力小于其2050年的能源需求。俄罗斯、加拿大等高纬度地区国家以及印度尼西亚、泰国等生物多样性热点国家的可利用光伏开发潜力与能源需求之间差额缺口较大;而东南亚、西欧部分国家以及印度、中国等国可利用风电潜力与能源需求之间差额缺口较大(图6)。

2.3 国家生物多样性保护优先区各自识别情景下风光资源开发与生物多样性保护的潜在土地利用冲突

在国家识别各自保护优先区情景下,土地利用冲突在地理上呈现不同格局,各大洲之间的风光资源开发与生物多样性保护之间的潜在冲突差异与全球保护情景相比有所减小。全球范围内13.9%的光伏发电潜力位于保护优先区。在各大洲中,欧洲21.8%的光伏发电潜力位于保护优先区,光伏开发与生物多样性保护之间潜在土地利用冲突最大;美洲仅9%的光伏发电潜力位于保护优先区,潜在冲突最小。全球范围内共15.3%的风电潜力位于保护优先区。其中,亚洲和欧洲分别有19.0%和19.4%的风电潜力位于保护优先区,潜在冲突规模较大;而美洲仅有11.3%的风电潜力位于保护优先区,潜在冲突较小(图3)。

相较于全球保护情景,在国家保护情景下,各国风光资源开发与生物多样性保护之间的潜在土地利用冲突程度整体有所下降,例如,全球生物多样性热点国家在此情景下位于国家保护优先区内的潜力占比远小于全球保护优先区。俄罗斯与新西兰光伏开发与生物多样性保护的潜在冲突程度相对较高,有36%和48%的光伏潜力位于保护优先区;新西兰、亚欧大陆中北部等地风电开发与生物多样性保护的潜在土地利用冲突较高,其中新西兰有53%的风力发电潜力位于保护优先区(图4)。从数量上来看,澳大利亚、非洲北部地区国家有较高的光伏发电潜力位于保护优先区,光伏开发与生物多样性保护之间的潜在冲突较大;而亚欧大陆北部中部、非洲北部等国以及澳大利亚在保护优先区的风力发电潜力较高,风电开发与生物多样性保护之间的潜在冲突较大(图5)。

在国家保护情景下,全球共66个国家在剔除国家生物多样性保护优先区内发电潜力后的剩余光伏发电潜力小于2050年能源需求,58个国家的剩余风电潜力小于2050年能源需求。俄罗斯、加拿大等高纬度地区

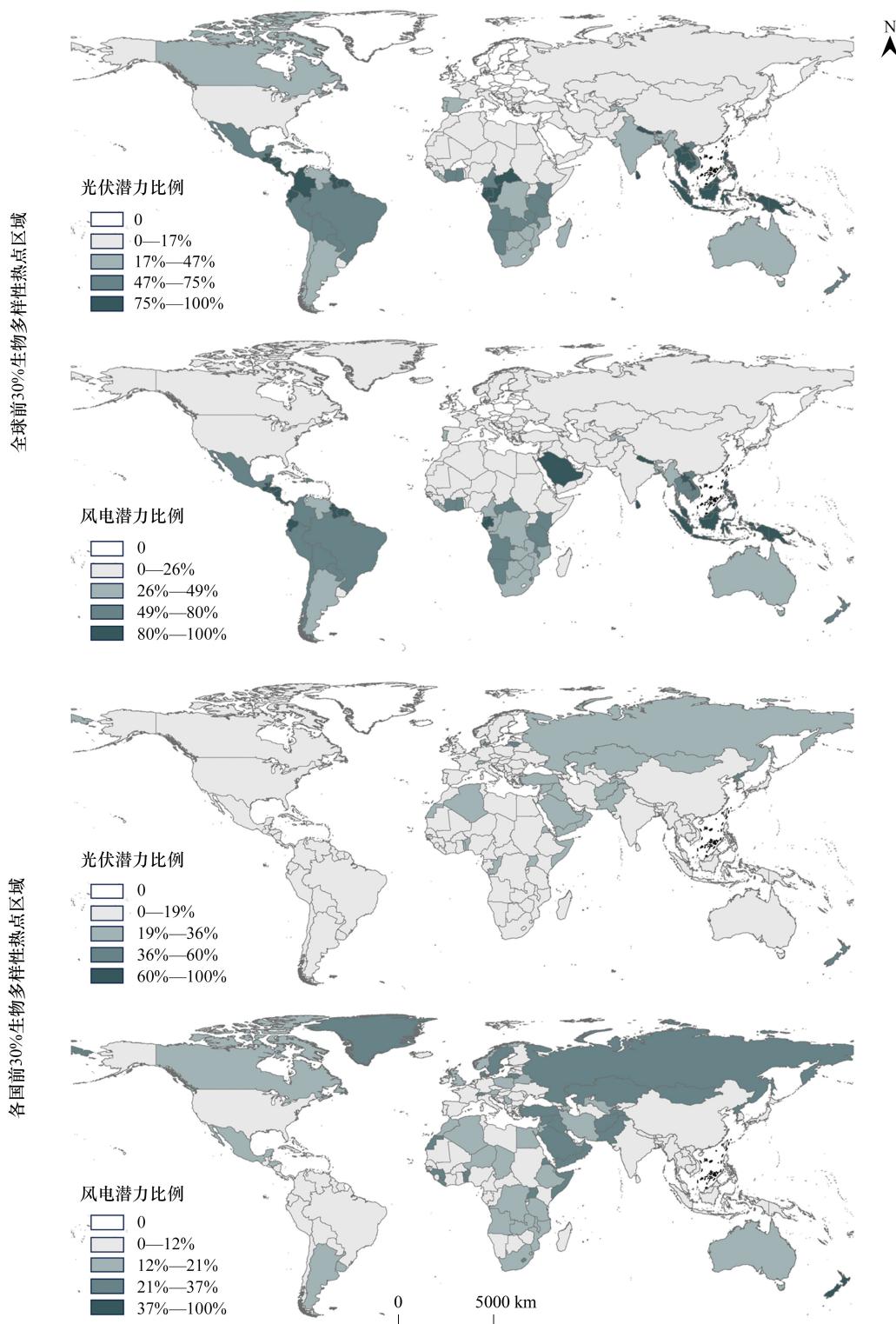


图4 两种保护情景下各国在前30%生物多样性保护优先区中的潜力占总潜力的比例

Fig.4 The proportion of energy potential in top 30% priority areas in each country under two protection scenarios

国家以及印度尼西亚、泰国等生物多样性热点国家的可利用光伏开发潜力与能源需求之间差额缺口较大,东南亚、西欧部分国家以及印度、中国等国可利用风电潜力与能源需求之间差额缺口较大(图6)。

研究还发现,各国在全球保护情景下优先区内的发电潜力与国家保护情景下优先区内的发电潜力呈显著

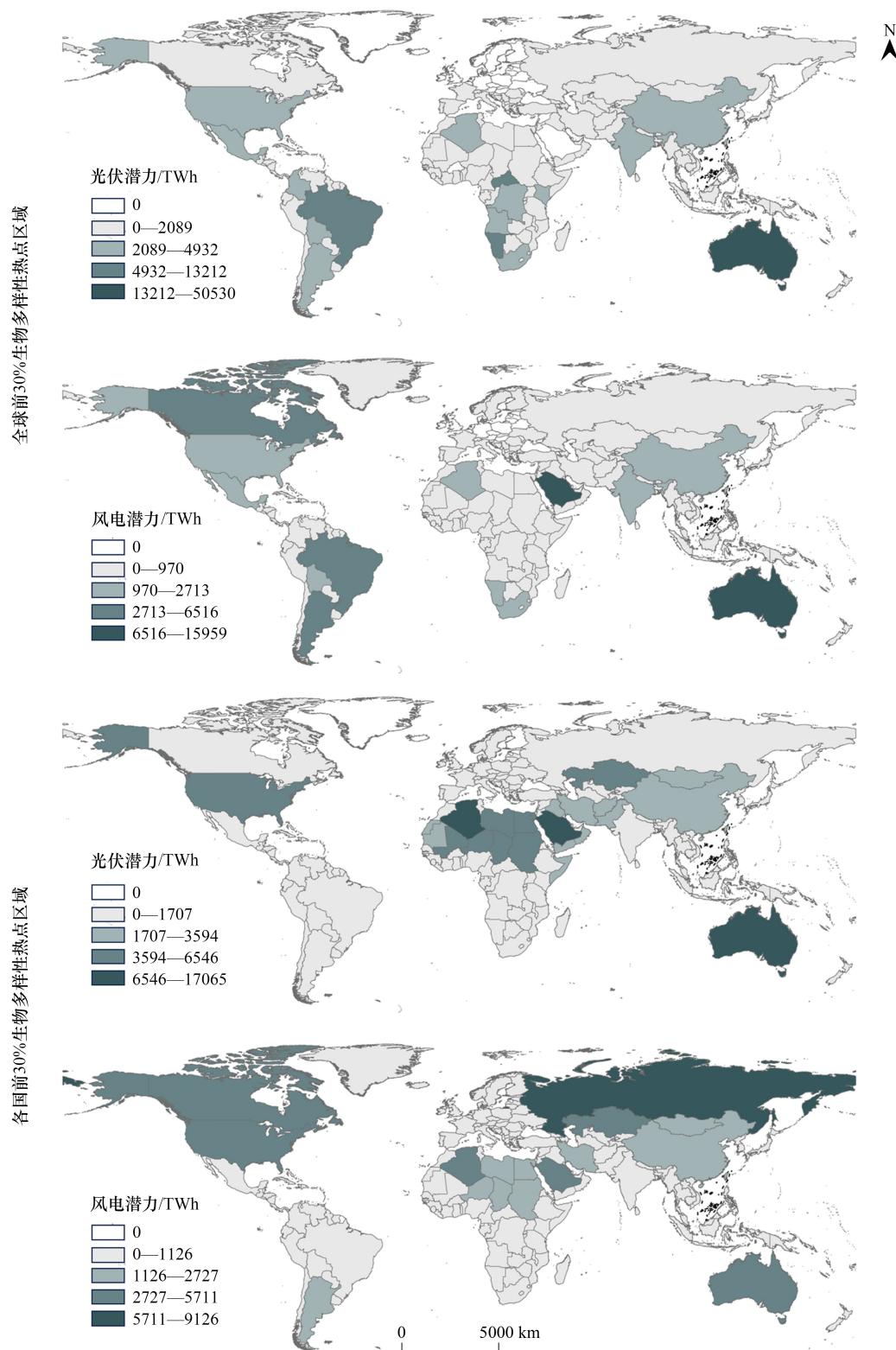


图 5 两种保护情景下各国在前 30% 生物多样性保护优先区中的发电潜力

Fig.5 The energy potential in top 30% priority areas in each country under two protection scenarios

正相关(风电; $R=0.58, P<2.2\times10^{-16}$;光伏; $R=0.52, P<2.5\times10^{-16}$)。另外,各国在全球保护情景下优先区内的光伏发电潜力比例与国家保护情景下优先区内的光伏发电潜力比例呈现显著正相关($R=0.17, P=0.008$),而

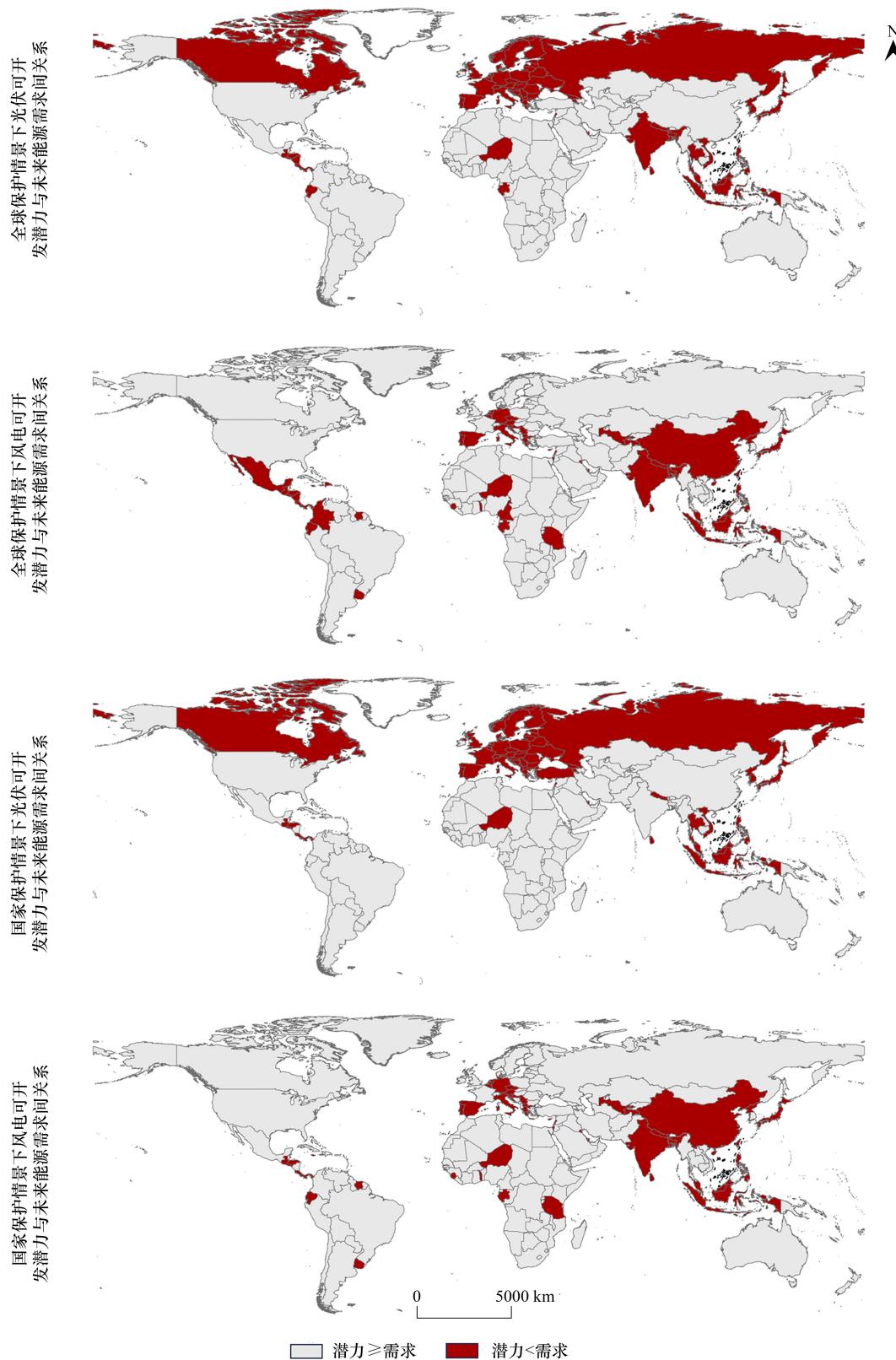


图 6 两种保护情景下各国风电和光伏发电潜力与 2050 年能源需求对比

Fig.6 Contrast of wind and solar energy potential and 2050 energy demand under two protection scenarios
红色表示发电潜力小于 2050 年能源需求, 灰色表示发电潜力大于或等于 2050 年需求

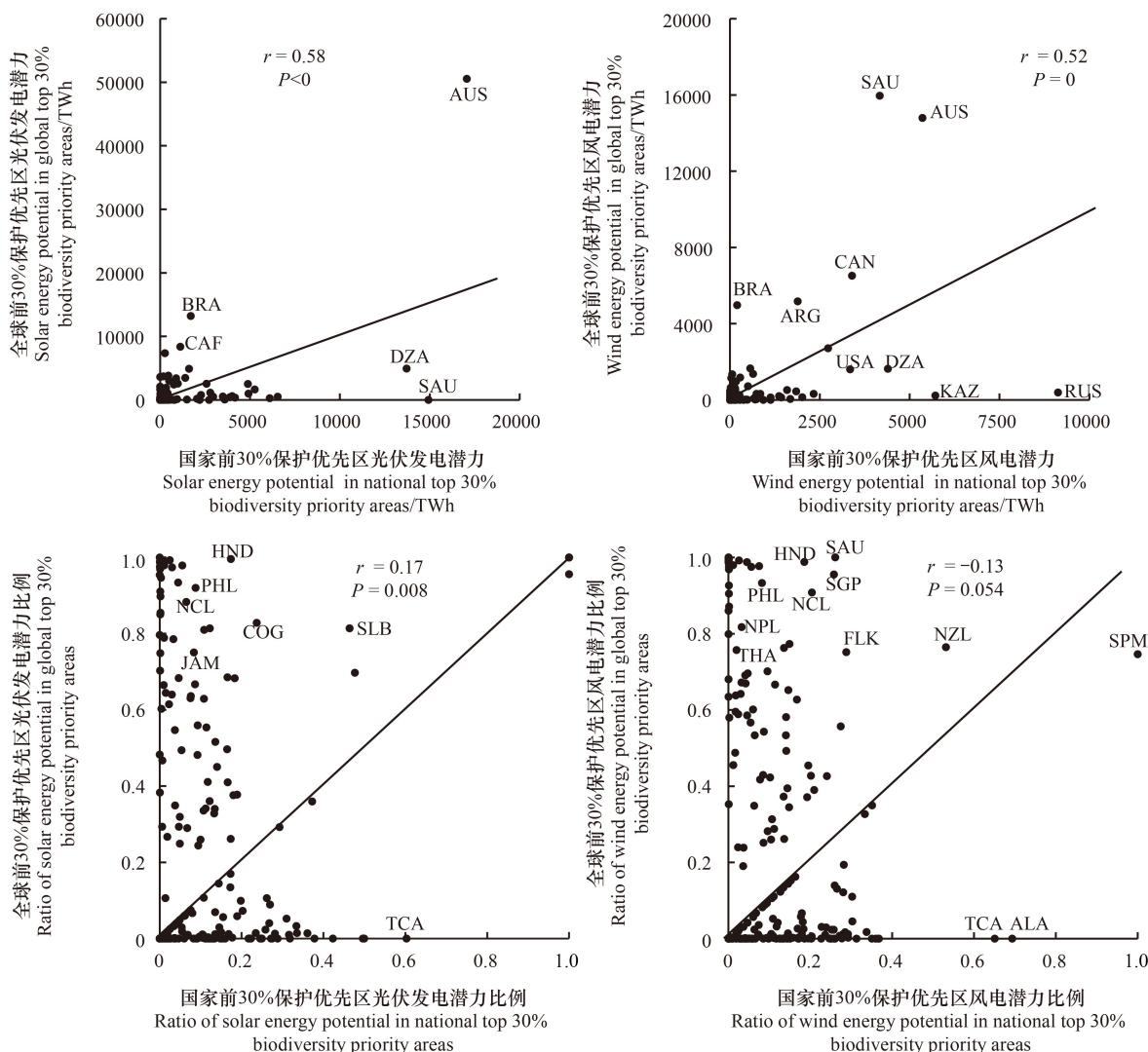


图7 不同保护情景下各国在前30%生物多样性优先保护区域中风光潜力及比例的关系

Fig.7 Relationship between the energy potential and proportion of each country in top 30% biodiversity priority conservation areas under different conservation scenarios

两种不同保护情景下潜力及比例相近的国家最接近实线,字母代表该国的ISO3标准代码

各国在全球保护优先区内的风电潜力比例与国家保护优先区的风电潜力比例呈现负相关关系($R = -0.13$, $P = 0.054$)。与全球保护情景相比,在国家保护情景下大多数国家在保护优先区的发电潜力比例更小,因而潜在土地利用冲突程度相应更小(图7)。

3 讨论

为实现联合国可持续发展目标中关于生物多样性保护与气候行动的双重目标,全球亟需扩大生物多样性保护用地和可再生能源开发规模。然而,这一进程可能加剧土地利用竞争,引发生物多样性保护与能源转型之间的潜在冲突^[31-32]。已有研究指出,若缺乏科学规划,可再生能源开发可能破坏栖息地并加剧物种灭绝风险^[23,33]。本研究发现,超过15%的风光潜力位于保护优先区,能源开发与生物多样性保护之间存在显著空间冲突。在不同保护优先区识别情景下的潜在土地利用冲突格局差异显著:全球保护情景下,美洲和大洋洲面临更高的冲突;而在国家保护情景下,欧洲的冲突水平相对较高。尽管在国家保护情景下各国潜在冲突程度

整体有所下降,但这可能会导致许多生物多样性热点国家境内生物多样性相对较低但在全球尺度生物多样性相对较高的地区面临风光资源开发的潜在威胁。

《昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架》强调在可持续发展进程中加强全球合作与责任共担,制定具有区域差异性的能源发展策略成为缓解土地利用冲突的关键途径。例如,非洲荒漠地区虽生物多样性价值较低,但太阳能资源丰富,适宜建设光伏电站^[34]。而东南亚等全球生物多样性核心区,则应优先采取“避让”策略。通过建立国际生态补偿机制、绿色能源认证体系等手段,引导开发项目转向生态敏感性较低区域。此外,强化区域协同机制同样至关重要。例如,欧盟推行《电网行动计划》,通过引入监管激励措施,推动成员国分摊跨境电网项目的生态与经济成本,为区域能源互联与生态责任共担提供制度保障^[35]。构建全球能源与环境信息共享平台,推动包括可再生能源开发、土地利用和生物多样性保护等关键领域的数据标准化,促进各国共享实时、高质量的环境监测数据;同时,制定统一的环境评估与管理标准,例如统一风光项目对生态系统影响的评估方法,有助于提升政策制定的科学性与协调性,减少跨国政策冲突,推动全球可持续能源转型。

土地利用规划在缓解可再生能源基础设施扩张带来的生态风险中发挥着关键作用^[36-37]。但许多发展中国家仍缺乏科学、系统的土地利用政策,导致生物多样性在工业化与能源开发双重压力下面临更大威胁^[38]。例如,有研究表明非洲和中东分别有38%和33%的可再生能源设施位于重要保护区内^[9]。尽管如此,目前能源项目开发中对生物多样性的系统性考量仍较为有限,相关决策常受到政治和经济因素的制约^[39-40]。因此,生态保护部门应积极参与土地利用规划,划定高生物多样性价值区域,强化环境与社会影响评估,并落实生态缓解措施^[41]。通过战略规划和经济激励措施,优先在生物多样性较低或已退化土地上部署能源设施,有助于降低生态影响^[42-44]。同时,推广分布式能源系统(如屋顶光伏),也有助于减少对自然土地的占用^[45]。例如,中国农村地区约64亿m²可用屋顶面积对应1467.47TWh的发电潜力,是2019年农村全年用电量的1.55倍^[46]。截至2024年底,分布式光伏发电累计装机容量达3.7亿kWh,占光伏总装机容量的41%,这不仅提升了清洁能源供给能力,也为能源安全保障和乡村振兴战略提供了有力支撑。

本研究基于风光潜力与优先保护区的空间重叠分析,为全球范围内能源开发与生态保护之间的土地利用冲突提供了宏观视角。但实际电站选址受多种因素影响,未来可在整合更多现实制约条件的基础上,进一步提升冲突格局识别的精准性与政策相关性。

4 结论

本研究基于全球风光潜力与生物多样性保护优先区的空间重叠关系,刻画了在不同保护情境下风光资源开发与生物多样性保护之间在洲际和国家尺度的潜在土地利用冲突格局。研究发现,超过15%的风光潜力位于保护优先区,不同保护情景下的冲突分布差异显著。国家保护情景下整体冲突水平有所降低,但在国家层面生物多样性重要性较低、全球尺度上重要性较高的区域,可能会面临能源开发的潜在威胁。这一结果强调了国家层面精细化管理与国际间协调合作在推动生物多样性保护与清洁能源转型协同发展的重要作用。

参考文献(References) :

- [1] Hennessy K, Lawrence J, Mackey B. IPCC Sixth Assessment Report (AR6) : Climate change 2022-impacts, adaptation and vulnerability: Regional factsheet australasia , 2022.
- [2] Barnosky A D, Matzke N, Tomiya S, Wogan G O U, Swartz B, Quental T B, Marshall C, McGuire J L, Lindsey E L, Maguire K C, Mersey B, Ferrer E A. Has the Earth's sixth mass extinction already arrived. *Nature*, 2011, 471(7336) : 51-57.
- [3] Zhang X P, Cheng X M. Energy consumption, carbon emissions, and economic growth in China. *Ecological Economics*, 2009, 68 (10) : 2706-2712.
- [4] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Paris Agreement // Report of the Conference of the Parties on its 21st session (Paris, 2015) (FCCC/CP/2015/10/Add.1). Bonn: UNFCCC, 2016. port of the Conference of the Parties on its 21st session (Paris, 2015). UNFCCC, 2015
- [5] Gielen D, Boshell F, Saygin D, Bazilian M D, Wagner N, Gorini R. The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy*

- Strategy Reviews, 2019, 24: 38-50.
- [6] Jackson A L R. Renewable energy *vs.* biodiversity: Policy conflicts and the future of nature conservation. *Global Environmental Change*, 2011, 21(4) : 1195-1208.
- [7] International Renewable Energy Agency (IRENA). *Renewable Capacity Statistics*. Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2024.
- [8] Dunnett S, Sorichetta A, Taylor G, Eigenbrod F. Harmonised global datasets of wind and solar farm locations and power. *Scientific Data*, 2020, 7: 130.
- [9] Rehbein J A, Watson J E M, Lane J L, Sonter L J, Venter O, Atkinson S C, Allan J R. Renewable energy development threatens many globally important biodiversity areas. *Global Change Biology*, 2020, 26(5) : 3040-3051.
- [10] Gibson L, Wilman E N, Laurance W F. How green is ‘green’ energy? *Trends in Ecology & Evolution*, 2017, 32(12) : 922-935.
- [11] Marques A T, Batalha H, Rodrigues S, Costa H, Pereira M J R, Fonseca C, Mascarenhas M, Bernardino J. Understanding bird collisions at wind farms: An updated review on the causes and possible mitigation strategies. *Biological Conservation*, 2014, 179: 40-52.
- [12] American Wind Wildlife Institute (AWWI). *Summary of Bird Fatality Monitoring Data Contained in AWWIC*. Washington, DC, 2020.
- [13] American Wind Wildlife Institute (AWWI). *Summary of Bat Fatality Monitoring Data Contained in AWWIC*. Washington, DC, 2020.
- [14] Walston L J, Rollins K E, LaGory K E, Smith K P, Meyers S A. A preliminary assessment of avian mortality at utility-scale solar energy facilities in the United States. *Renewable Energy*, 2016, 92: 405-414.
- [15] Guo X, Zhang X, Du S, Li C, Siu Y L, Rong Y, Yang H. The impact of onshore wind power projects on ecological corridors and landscape connectivity in Shanxi, China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 254: 120075.
- [16] United Nations Environment Programme (UNEP). *Protected planet report 2024*. Nairobi, Kenya, 2024.
- [17] IPBES. Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Zenodo, 2019.
- [18] Lovering J, Swain M, Blomqvist L, Hernandez R R. Land-use intensity of electricity production and tomorrow’s energy landscape. *PLoS One*, 2022, 17(7) : e0270155.
- [19] International Energy Agency (IEA). *Renewables 2022*. Paris, France, 2022.
- [20] Verburg P H, Mertz O, Erb K H, Haberl H, Wu W. Land system change and food security: Towards multi-scale land system solutions. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(5) : 494-502.
- [21] Wise M, Calvin K, Thomson A, Clarke L, Bond-Lamberty B, Sands R, Smith S J, Janetos A, Edmonds J. Implications of limiting CO₂ concentrations for land use and energy. *Science*, 2009, 324(5931) : 1183-1186.
- [22] Dunnett S, Holland R A, Taylor G, Eigenbrod F. Predicted wind and solar energy expansion has minimal overlap with multiple conservation priorities across global regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, 119(6) : e2104764119.
- [23] Santangeli A, Toivonen T, Pouzols F M, Pogson M, Hastings A, Smith P, Moilanen A. Global change synergies and trade-offs between renewable energy and biodiversity. *GCB Bioenergy*, 2016, 8(5) : 941-951.
- [24] Di Minin E, Toivonen T. Global protected area expansion: Creating more than paper parks. *Bioscience*, 2015, 65(7) : 637-638.
- [25] Chen S, Lu X, Miao Y, Deng Y, Nielsen C P, Elbot N, Wang Y, Logan K G, McElroy M B, Hao J. The potential of photovoltaics to power the belt and road initiative. *Joule*, 2019, 3(8) : 1895-1912.
- [26] Qiu T, Wang L, Lu Y, Zhang M, Qin W, Wang S, Wang L. Potential assessment of photovoltaic power generation in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 154: 111900.
- [27] Weiss D J, Nelson A, Gibson H S, Temperley W, Peedell S, Lieber A, Hancher M, Poyart E, Belchior S, Fullman N, Mappin B, Dalrymple U, Rozier J, Lucas T C D, Howes R E, Tusting L S, Kang S Y, Cameron E, Bisanzio D, Battle K E, Bhatt S, Gething P W. A global map of travel time to cities to assess inequalities in accessibility in 2015. *Nature*, 2018, 553(7688) : 333-336.
- [28] Gao Y, Ma S, Wang T, Wang T, Gong Y, Peng F, Tsunekawa A. Assessing the wind energy potential of China in considering its variability/intermittency. *Energy Conversion and Management*, 2020, 226: 113580.
- [29] Cimatti M, Brooks T M, Di Marco M. Identifying science-policy consensus regions of high biodiversity value and institutional recognition. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 32: e01938.
- [30] Baruch-Mordo S, Kiesecker J M, Kennedy C M, Oakleaf J R, Opperman J J. From Paris to practice: Sustainable implementation of renewable energy goals. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(2) : 024013.
- [31] Brock C, Roehrdanz P, Beringer T, Chaplin-Kramer R, Enquist B, Frazier A, Johnson J, Kennedy C, Kiesecker J, Larsen A, Loyola R, Marquet P, Neugarten R, Oakleaf J, Roopsind A, Schuster R, Williams D, Wu G, Zvoleff A, Hannah L. Balancing land use for conservation, agriculture, and renewable energy [Preprint]. *Nature Portfolio*, 2024.
- [32] Ortiz A, Negandhi D, Mysorekar S R, Nagaraju S K, Kiesecker J, Robinson C, Bhatia P, Khurana A, Wang J, Oviedo F, Ferres J L. An

- artificial intelligence dataset for solar energy locations in india. *Scientific Data*, 2022, 9: 497.
- [33] Nazir M S, Bilal M, Sohail H M, Liu B, Chen W, Iqbal H M N. Impacts of renewable energy atlas: Reaping the benefits of renewables and biodiversity threats. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(41) : 22113-22124.
- [34] Al-Dousari A, Al-Nassar W, Al-Hemoud A, Alsaleh A, Ramadan A, Al-Dousari N, Ahmed M. Solar and wind energy: Challenges and solutions in desert regions. *Energy*, 2019, 176: 184-194.
- [35] European Commission. Commission sets out actions to accelerate the roll-out of electricity grids. Brussels, 2023.
- [36] Shum R Y. A comparison of land-use requirements in solar-based decarbonization scenarios. *Energy Policy*, 2017, 109: 460-462.
- [37] Sonter L J, Ali S H, Watson J E M. Mining and biodiversity: Key issues and research needs in conservation science. *Proceedings Biological Sciences*, 2018, 285(1892) : 20181926.
- [38] Fritzsche, U., Berndes, G., Cowie, A. et al. Energy and land use-contribution to the UNCCD Global Land Outlook. *Land and Poverty Conference 2018: Land Governance in an Interconnected World*. Washington, D.C., USA, 2018-03-19—2018-03-23
- [39] Poggi F, Firmino A, Amado M. Planning renewable energy in rural areas: Impacts on occupation and land use. *Energy*, 2018, 155: 630-640.
- [40] Strantzali E, Aravossis K. Decision making in renewable energy investments: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 55: 885-898.
- [41] Arridge W N S, Bull J W, Addison P F E, Burgass M J, Gianuca D, Gorham T M, Jacob C, Shumway N, Sinclair S P, Watson J E M, Wilcox C, Milner-Gulland E J. A global mitigation hierarchy for nature conservation. *BioScience*, 2018, 68(5) : 336-347.
- [42] Hartmann H M, Grippo M A, Heath G A, Macknick J, Smith K P, Sullivan R G, Walston L J, Wescott K L. Understanding emerging impacts and requirements related to utility-scale solar development. ANL/EVS-16/9. Argonne, IL: Argonne National Laboratory, 2016.
- [43] Kiesecker J M, Evans J S, Fargione J, Doherty K, Foresman K R, Kunz T H, Naugle D, Nibbelink N P, Niemuth N D. Win-win for wind and wildlife: A vision to facilitate sustainable development. *PLoS One*, 2011, 6(4) : e17566.
- [44] Antweiler W. Cross-border trade in electricity. *Journal of International Economics*, 2016, 101: 42-51.
- [45] Moroni S, Antoniucci V, Bisello A. Energy sprawl, land taking and distributed generation: Towards a multi-layered density. *Energy Policy*, 2016, 98: 266-273.
- [46] 李小明, 赵瑜强, 章文杰, 韩锋, 李晓阁, 王宽. 中国农村地区建筑屋顶太阳能光伏发电资源评估和效益分析研究. *建设科技*, 2023(8) : 31-35.