

长时间序列鄂尔多斯市光伏电站的土地利用动态演变规律及情景模拟研究

郭祺钰¹, 李康宁¹, 陈云浩², 蒋金豹^{1*}

1. 中国矿业大学(北京)内蒙古研究院,鄂尔多斯 010300;

2. 北京师范大学 遥感科学国家重点实验室,北京 100875

摘要: 太阳能作为清洁能源,通过减少碳排放,助力实现碳达峰和碳中和目标。光伏电站利用太阳能光辐射发电,是清洁能源的一种重要形式,通过光电转换技术将太阳能转化为电能,实现低碳、无污染的发电过程。将光伏电站纳入土地利用分类有助于全面评估土地资源利用和生态环境影响。然而,现有研究缺少针对光伏电站的长时序土地利用演变研究,且没有基于不同的政策情景对光伏电站建设进行预测。本文基于2000年-2023年间的Landsat5数据和GF2数据对鄂尔多斯市的光伏电站进行目视解译生成土地利用类型图,并在全市范围内分析光伏电站的面积变化、类型转化及空间变化。此外,本文通过绘制高斯投影椭圆,通过投影椭圆的重心演变分析了2000年-2023年间每五年鄂尔多斯市光伏电站的时空变化特征。最终通过PLUS模型分析驱动因素并进行不同政策情景下鄂尔多斯市土地利用类型的未来预测。研究结果表明:2000年-2011年与2011年-2023年相比,鄂尔多斯市土地利用变化的区域空间格局基本一致,但区域变化呈现了新的特征,2011年开始有土地利用类型转变成光伏电站。此外本文基于PLUS模型分析进一步显示人口增长、地表温度、土壤热通量、政策及降水量是造成鄂尔多斯市土地利用变化的主要驱动因素,且对2030年三种政策情景下的土地利用类型进行预测,三种政策情景下鄂尔多斯市建筑、林地、水体、耕地、草地和光伏电站面积均呈现增加的趋势。预测2030年的各类土地利用类型面积与2023年相比,荒漠和沙地分别减少了173.57km²、1.91km²;其余土地利用类型面积均增加,其中光伏电站增加约2.46 km²。不同情景下对鄂尔多斯市土地利用类型进行预测为鄂尔多斯市土地规划、资源管理和环境保护提供科学依据。

关键词: 光伏电站,空间格局,时空变化,驱动因素,情景模拟

中图分类号: P2

引用格式: 郭祺钰,李康宁,陈云浩,蒋金豹.XXXX.长时间序列鄂尔多斯市光伏电站的土地利用动态演变规律及情景模拟研究.遥感学报,XX(XX):1-17

GUO Qiyu, LI Kangning, CHEN Yunhao, JIANG Jinbao. XXXX. Long-term Analysis of Land Use Dynamics and Scenario Simulation for Photovoltaic Power Stations in Ordos. National Remote Sensing Bulletin, DOI:10.11834/jrs.20244281]

1 引言

土地利用/覆盖(LULC)变化的研究在全球环境和社会经济领域扮演着至关重要的角色(Prud'homme等,2022)。LULC的变化不仅影响生态系统服务区域的空间分布(梁锦涛等,2023),还可能通过改变生态系统的模式和过程,进一步影响生态系统服务的潜在功能(Chen等,2023)。这些变化与人类活动密切相关(Tang等,2021),

例如城市扩展、采矿和过度放牧,这些因素对自然环境造成了不同程度的影响,进而加剧了全球气候变暖(海凯等,2022)。在鄂尔多斯市,光伏电站的建设为有效利用闲置土地资源提供了新的途径,因此,研究光伏电站对土地利用的影响,尤其是其空间分布和类型变化,对于理解该地区的土地利用演变具有重要意义。

光伏发电通过利用太阳能资源,为清洁能源的开发做出了贡献(姜侯等,2024)。这一进展不

收稿日期:XXXX-XX-XX;预印本:XXXX-XX-XX

基金项目:鄂尔多斯市重点研发计划(YF20232306)

第一作者简介:郭祺钰,研究方向为资源环境遥感。E-mail: gqygy666@163.com

通信作者简介:蒋金豹,研究方向为资源环境遥感。E-mail: jib@cumt.edu.cn

仅有助于节能减排，还支持了环境友好型社会的建设，与党的十八大以来提出的发展理念（王帮俊等，2022）相契合。中国在光伏发电领域的快速发展使其成为全球清洁能源发展的重要力量（屈准等，2024）。在鄂尔多斯市，广大的沙地和采煤沉陷区为光伏电站提供了良好的建设条件（郝巧梅，2014）。2022年底，鄂尔多斯市新能源投资显著增长（任会斌等，2023），为绿色低碳发展注入了新动能。然而，目前对鄂尔多斯光伏电站建设区域的土地利用变化及其驱动因素的研究较少，且对未来光伏电站建设的预测也不足。

土地利用预测模型是理解和预测土地利用变化的重要工具，通过分析历史数据和驱动力因素，模拟和预测未来的土地利用格局（Yu等，2023）。常见的土地利用预测模型有：CLUE模型（Conversion of Land Use and its Effects）、PLUS模型（Patch-generating Land Use Simulation）、CA模型（Cellular Automata）、SLEUTH模型和Dyna-CLUE模型等。其中，CLUE模型适合长时间序列的预测，能够动态模拟土地利用的变化。然而，其参数设置复杂，且对数据质量要求较高，可能影响模型的预测精度。CA模型则通过单元格规则进行模拟，适合处理大规模的空间数据，但模型的结果对规则设定高度依赖，容易导致偏差。SLEUTH模型主要用于城市扩展的预测，尽管在模拟城市化方面表现出色，但其对数据的需求非常高，模型的复杂性也限制了其广泛应用。Dyna-CLUE模型在CLUE的基础上增加了时间维度，使其能够动态调整和模拟更长时间内的土地变化，然而实施起来需要大量高质量的数据和精密的参数校准，难度较大。相比之下，PLUS模型更适合我们研究的背景，特别是在模拟鄂尔多斯地区未来土地利用变化时。PLUS模型专注于通过生成“补丁”来展现土地利用的空间格局，能够细致地反映出土地利用的复杂性和多样性。这一特性非常适合我们对鄂尔多斯复杂的土地利用变化进行细致模拟，尤其是涉及光伏电站布局的预测。此外，PLUS模型通过集成自然和社会经济因素，能够更真实地再现土地利用的动态变化。因此，在对比各种模型后，我们选择了PLUS模型，因其在空间表达和处理复杂情景模拟方面的能力，更加符合我们预测鄂尔多斯未来土地利用的需求。（卞子浩等，2017）。

我们的研究目标有两个：首先，通过分析2000至2023年间光伏电站的空间分布及其对土地类型转换的影响，全面了解光伏电站对当地土地利用的长期影响；其次，我们希望基于不同的政策情景，利用PLUS模型预测未来土地利用的变化趋势，从而为区域的可持续发展和能源政策规划提供科学依据。因此，本文通过目视解译勾画出历年鄂尔多斯市光伏电站并结合全球30米精细地表覆盖动态监测产品和ESRI全球土地利用/覆盖（LULC）数据制作了2000年-2023年的土地利用数据。通过土地利用动态度和转移矩阵分析鄂尔多斯市各类土地利用类型的面积变化以及类型转化，并基于高斯椭圆的中心变化分析了2000年-2023年间鄂尔多斯市光伏电站建设的时空变化特征。此外本文针对鄂尔多斯市光伏电站建设区域设置缓冲区，分析缓冲区范围内的时空变化情况以及其主要驱动因素。最终基于PLUS模型对鄂尔多斯土地利用进行驱动因素分析，并针对三种政策情景下的鄂尔多斯市土地利用情况进行预测，三种政策分别是A.未考虑有关光伏的政策影响；B.考虑了有关光伏的政策影响，但只成功实施了50%；C.考虑了有关光伏的政策影响，且全部实施。

2 研究区域、数据源与研究方法

2.1 研究区域

鄂尔多斯市位于内蒙古自治区的西南部，地理坐标为106°42'E至111°27'E，37°35'N至40°51'N，海拔在1400米至1700米之间。鄂尔多斯地处温带季风区的西缘，气候特点为年均温度在6-8°C之间，降水主要集中在7-9月，年均降水量约为150-500mm，是自治区乃至全国沙漠化和水土流失较为严重的地区之一（郝巧梅，2014）。除了植树造林改善沙漠化以外，自2010年开始鄂尔多斯市响应国家战略，建设光伏电站。荒漠、沙地和草地等区域通常不适合传统农业生产，土壤贫瘠、灌溉难度大，且自然条件限制了其农业利用价值。在这种背景下，光伏电站的建设不仅可以使这些闲置土地得到充分利用，还能将土地资源转变为经济效益。光伏电站通过安装太阳能电池板，将阳光转化为电能，这种利用方式对土地的要求相对较低，不需要大规模的土壤改良或水资源投入，从而避免了传统农业和工业开发对土地的高强度

利用和破坏。通过将荒漠、沙地和草地转变为光伏电站用地,鄂尔多斯不仅可以提升土地的经济价值,还能有效减少生态破坏。传统的农业和工业开发往往伴随着大规模的土地开垦、植被清除和土壤侵蚀,导致生态系统的退化和环境问题。而光伏电站建设过程中的土壤扰动较小,建设完成后,土地可以保持其原有的生态特征,植被恢复速度较快,从而有助于保护生态环境和促进生态恢复。(郝巧梅, 2014)。此外,鄂尔多斯市长期以来依赖煤炭产业作为经济发展的主要驱动力,但随着煤炭资源逐渐枯竭、环境保护压力加大以及国家能源结构转型的要求,该地区正面临严峻挑战。煤炭资源的有限性和对环境的负面影响使得持续发展这一传统产业变得不可行。同时,国家和地方政府大力推动能源结构的转型,鼓励发展清洁能源和可再生能源,以应对全球气候变化和减少对化石燃料的依赖。光伏电站作为一种绿色、可再生的能源解决方案,具备了显著的市场潜力和技术优势,可以有效利用鄂尔多斯广阔的荒漠和沙地资源。这一转型不仅有助于提升土地的经济效益,还能推动经济结构的多样化,减少对单一资源的依赖,从而增强经济的稳定性和可持续性。此外,光伏产业的快速发展和成本降低,以及国家和地方政策的支持,为鄂尔多斯提供了巨大的发展机会。通过发展光伏电站,鄂尔多斯不仅能够实现经济效益与环境保护的双赢,还能在全球能源转型趋势中占据有利位置,为未来的经济增长奠定坚实基础(屈准等, 2024)。

2.2 数据源与数据处理

本文使用的 Landsat5 和高分二号 (GF2) 卫星影像鄂尔多斯市光伏电站目视解译工作。本文首先采用了 2015 年、2020 年和 2023 年的高分 2 号影像进行详细解译。基于这三年的高分分辨率影像解译结果,本文再回溯到 2011 年,使用 Landsat 影像进行目视解译,以确保 2011 年光伏电站空间分布正确性。为了进一步提高解译工作的稳定性和一致性,本文采用了多次解译和交叉验证的方法。对同一时间点的影像进行多次独立解译,由不同解译人员分别完成,然后对解译结果进行交叉验证。通过比较和分析不同解译人员的结果,可以发现并纠正潜在的误差,确保最终结果的一致性和准确性(许晓聪等, 2021)。Landsat5 卫星影像

时间分别是 2000 年、2005 年和 2011 年。2011 年以后的影像选取 GF2 星影像,时间分别是 2015 年、2020 年和 2023 年。为保证数据在时间上的一致性,各影像的成像时间均集中在 9 月和 10 月,同时控制影像云量在 5% 以下,以便于确保目视解译的准确性。

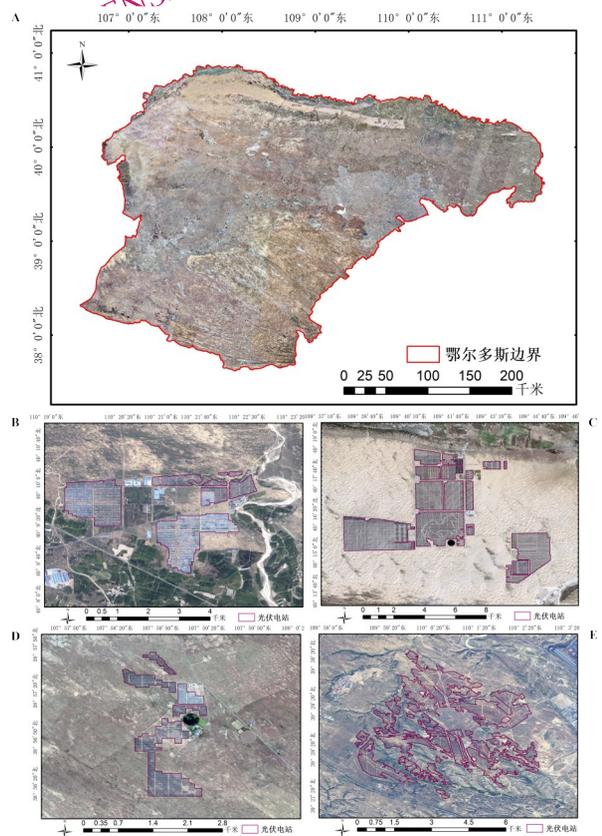


图1 A 鄂尔多斯市高分2号 RGB(红-绿-蓝)合成影像,B、C、D、E 分别为鄂尔多斯市光伏电站目视解译的典型区域
Fig. 1 A is a synthetic RGB (red-green-blue) image of Ordos from Gaofen 2. B, C, D, and E are typical areas of Ordos for visual interpretation of photovoltaic power stations.

本文的土地利用类型变化分析基于两种公开数据集,分别是 1985-2020 年的全球 30 米精细地表覆盖动态监测产品和 ESRI 全球土地利用/覆盖 (LULC) 数据,分辨率均为 30 米。全球 30 米精细地表覆盖动态监测产品是刘良云课题组利用了 1984-2020 年的所有 Landsat 卫星数据在 Google Earth Engine 云计算平台上进行了长时序的地表覆盖变化检测(Zhang 等, 2020)。ESRI 全球土地利用/覆盖 (LULC) 数据则是通过欧空局 10 米分辨率的哨兵-2 图像生成的,利用了深度学习人工智能土地分类模型生成全球地图(Karra 等, 2021)。最终本文结合经过目视解译得到的光伏电站 shp 数

据,形成了包括林地、耕地、草地、沙地、荒漠、建筑用地、水体、集中式光伏电站用地、分布式光伏电站用地等9类土地分类。

在 Google Earth Engine 平台上选取 MYD17A3 HGF 数据产品获取植被生产力 (GPP) 数据进行缓冲范围确定。本文选取了人口、GDP、政策、降雨、气温、地表向下短波辐射等因素 (Hazra 等, 2023), 作为可能影响鄂尔多斯市光伏电站建设区土地利用变化的驱动因素进行分析。所有的驱动因素数据均为栅格数据格式。

2.3 研究方法

2.3.1 时空演变研究方法

有研究表明在荒漠化地区广泛铺设光伏组件,有助于提升地表的粗糙度,减缓风速,并降低植被的水分蒸发。这种措施不仅为当地创造了一种有利于植物生长的环境,还发挥了防风固沙和绿化地区的作用 (王祯仪等, 2019)。本文基于光伏电站对周围 GPP 的影响通过 2000 年-2023 年间鄂尔多斯典型区域光伏电站 1km-10km 缓冲范围内 GPP 变化的情况,对缓冲范围进行确定。

为了探究鄂尔多斯市光伏电站缓冲区 2000 年-2023 年土地利用变化情况以及驱动力因素,本文计算了单一土地利用动态度 (LK) 和综合土地利用类型动态度 (LC)。

1) 单一土地利用类型动态度 (LK): 指的是在特定时间段内,研究区域内某一种土地利用类型的面积变化速率,主要关注单一土地利用类型的变化情况分析 (海凯等, 2022)。其表达式为:

$$LK = \frac{U_a - U_b}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

其中, U_a , U_b 分别为研究初期和末期的光伏电站面积, T 为研究时段。评估光伏电站变化的动态度旨在深入了解其在时间和空间上的发展趋势。LK 是正值时,表示该类型面积增加,反之则减小。通过对单一土地利用类型动态度的研究,可以帮助理解鄂尔多斯市光伏电站面积变化、光伏电站扩散或集聚的原因,并评估光伏电站变化对生态系统、社会经济等方面的影响 (刘保晓等, 2012)。

2) 综合土地利用类型动态度 (LC): 综合考虑研究区内多个土地利用类型变化的指标,以定

量方式反映多个土地利用类型的动态程度 (海凯等, 2022)。其表达式为:

$$LC = \frac{\sum_{a=1}^n \Delta LU_{a-b} U_a}{\sum_{a=1}^n \Delta LU_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

其中, U_a , U_b 分别为研究初和研究期末某土地利用类型的面积, T 为研究时间段; LU_a 为第 a 种土地利用类型在研究初期的面积; LU_{a-b} 为研究初期第 a 种土地利用类型转变为其他土地利用类型的面积总和的绝对值; n 为研究区域中土地利用类型个数。

为了直观呈现不同年份之间各种土地利用类型的转变程度,本文通过转移矩阵进行分析。转移矩阵通常用于表示不同土地利用类型在不同时期之间的变化情况 (朱金峰等, 2019)。通过分析转移矩阵,可以揭示土地利用类型之间的变化趋势和转移规律,为土地管理和规划提供重要的参考信息 (海凯等, 2022)。转移矩阵的具体表达模型为:

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} A_{11} & \dots & A_{1n} \\ \dots & \ddots & \dots \\ A_{n1} & \dots & A_{nn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中, A_{ij} 为研究期初第 i 种土地利用类型在研究期末转换成第 j 种土地利用类型的土地面积; i , j 分别表示研究期初和研究期末的地类; n 代表土地利用类型数。

2.3.4 驱动因素分析和情景模拟

本文采用内容分析法对光伏电站相关政策进行了量化研究。内容分析法是从政策文献的文字出发,通过人工或半人工的编码方式对文本内容进行系统分析 (Long 等, 2017)。本文通过对“光伏”、“太阳能”、“集中式”、“分布式”、“清洁能源”、“可再生能源”等关键词在北大法宝法律法规数据库、国务院、内蒙古自治区人民政府官网和鄂尔多斯市人民政府官网收集政策文本。最终查找整理出 2011 年至 2023 年期间自上至下各级政府有关政策文本共 155 篇。根据本文的需要,结合近几年我国环境政策工具实践的最新发展,依据郭高晶 (2019) 的研究,将有关光伏电站的政策分为命令控制型、市场激励型和公众参与型三

大类。利用公式(4)计算出2011-2023年鄂尔多斯市三类环境政策强度的年度数值,从而量化历年鄂尔多斯市光伏电站政策强度。

$$TEP_i = PEA_i * \sum_{j=1}^N PT_{ij} * P_{ij} \dots i \in [2011, 2023] \quad (4)$$

其中, i 表示年份, N 表示 i 年颁布的政策数目, j 表示 i 年颁布的第 j 项政策, PT_{ij} 表示第 j 项政策的各类政策工具频次。 P_{ij} 表示第 j 条政策的政策属性力度。 PEA_i 表示第 i 年环境目标责任制和考核评价制度的政策力度。则 TEP_i 就可以表示 i 年各类型环境政策强度。

本文通过PLUS模型分析鄂尔多斯市土地利用变化的驱动因素并针对三种政策情景进行未来预测(Liang等,2021)。具体来说:首先分析土地扩张策略,掌握土地扩张规则;其次,基于随机森林算法分析所选驱动因素的重要性及对未来土地利用类型变化的影响;最后,通过基于多类型随机斑块种子CARS模块的CA(the CA based on the multiple-type random patch seeds)进行未来预测。过程中,通过设置不同的模拟情景,预测土地利用变化,为政策制定提供科学的支持(Yu等,2023)。在预测的过程中,本文考虑了三种不同的政策情景情景,A.未考虑光伏的政策影响:在这个情景中,我们假设鄂尔多斯市没有进一步出台或实施促进光伏电站建设的政策。这个情景主要是为了模拟在光伏电站发展缺乏政策支持的情况下,土地利用的自然演变。情景B.考虑了有关光伏的政策影响,但只成功实施了50%:假设已经出台的光伏相关政策只部分实现,光伏电站的发展可能受到一些制约。这意味着虽然有政策支持,但政策实施的效果仅达到50%,部分光伏项目被推迟或未能按计划开展。该情景下,光伏电站的扩展速度介于情景A(无政策支持)和情景C(政策完全实施)之间。情景C.考虑了有关光伏的政策影响,且全部实施:这一情景假设光伏电站相关的政策得到了全面实施,并且政策效果达到了预期。该情景模拟的是政策支持力度最大、执行效果最佳的状态,光伏电站的扩展将会显著加速,较大面积的荒漠、沙地和草地将转变为光伏电站用地。

3 鄂尔多斯市光伏电站土地利用时空变化特征

3.1 土地利用空间分布总体特征

本文首先在鄂尔多斯市范围内通过人工目视解译勾画出2000-2023年的光伏电站。通过查询鄂尔多斯市光伏电站建设的相关政策文件,鄂尔多斯市2010年开始建设光伏电站。因此,本文勾画了2011年,2015年,2020年和2023年的光伏电站,并在全球30米精细地表覆盖动态监测产品和ESRI全球土地利用/覆盖(LULC)数据的基础上制作了2000年、2005年、2011年、2015年、2020年和2023年的土地利用类型图,具体可分为林地、耕地、草地、沙地、荒漠、建筑用地、水体、集中式光伏电站用地、分布式光伏电站用地等9类地类(图2),历年光伏电站目视解译结果如图3。

本文通过转移矩阵以及环形图量化2000年-2023年内不同土地利用类型之间的转换情况。从图4中可以看出,2000年鄂尔多斯市的主要土地利用类型为荒漠,面积占比高达43.3%。其次为沙地,面积占比为20.5%,草地和林地总面积占比仅占29.9%。过度放牧、不合理的土地利用和气候变化等问题导致鄂尔多斯荒漠化问题更加显著(王祯仪等,2019)。为了应对日益严峻的荒漠化问题,鄂尔多斯市政府实施了一系列的治理政策,如植树造林、禁牧和轮牧制度、改善水利设施、合理调配和使用水资源和采用生态补偿机制等。从环形图可以看出,2000年-2023年鄂尔多斯市荒漠化程度逐渐减弱,草地和林地面积逐渐增加。近年来在该市大力发展光伏电站(杜汇良,2022),这一变化使得部分原有的土地利用类型转变为光伏电站建设基地,从转移矩阵中可以看出,光伏电站主要由荒漠、沙地和草地转换而来。

考虑光伏电站建设的开始时间,本文计算鄂尔多斯市的LK分为2011年-2015年,2015年-2020年,2020年-2023年三个时间段,同时还分析了2011年-2023年的动态度变化(表1)。各个时间段内光伏电站的变化速度最快,其中主要是集中式光伏电站的面积增加。2011年-2015年,所有土地类型的变化速度相对较低,草地及集中式光伏电站变化相对最快;2015年-2020年林地、荒漠和集中式光伏电站变化速度明显增大,其中集

中式光伏电站变化最大；2020年-2023年分布式光伏电站的变化速度明显增大；2011年-2023年间变化最大的为集中式光伏电站、林地、草地和荒漠，

其中除荒漠面积减小之外，其他类型面积均呈增加趋势。

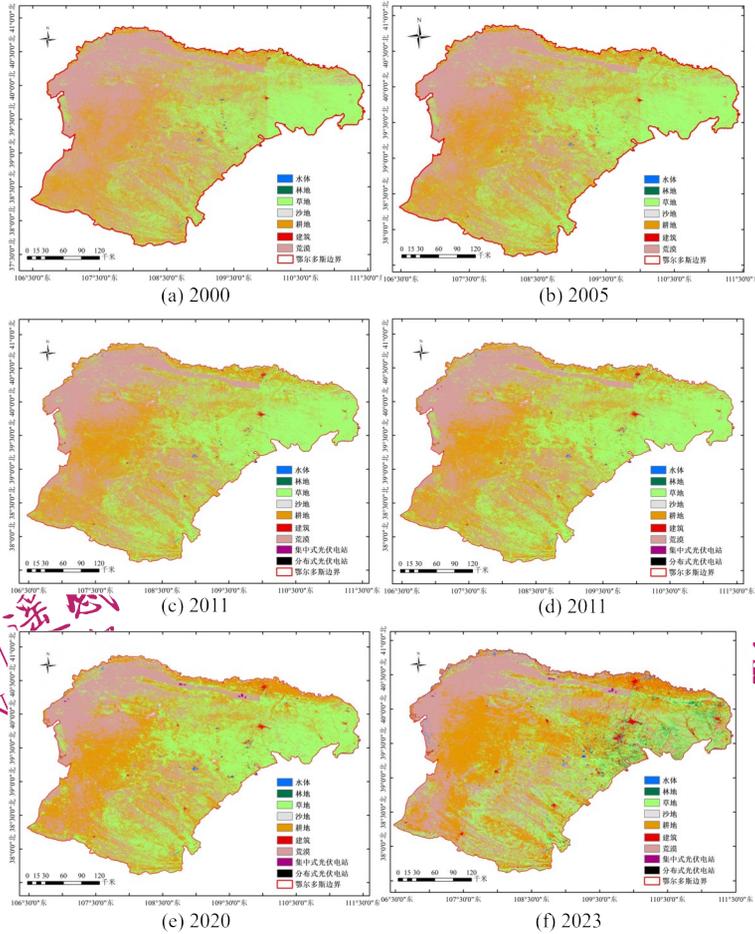


图2 2000-2023年的土地利用类型图。分为林地、耕地、草地、沙地、荒漠、建筑用地、水体、集中式光伏电站用地、分布式光伏电站用地

Fig. 2 The land use type map for the calendar year. Division into forest land, cropland, grassland, sand, desert, building land, water bodies, land for centralized photovoltaic power stations, land for distributed photovoltaic power stations

通过LC可对鄂尔多斯市土地利用类型变化进行综合描述。刘纪远等（2000）将土地利用动态特征划分为4种类型：0%-3%（极缓慢变化型）；4%-12%（慢速变化型）；13%-20%（快速变化型）；21%-24%（急剧变化型）。由表1可知，鄂尔多斯市在2011年-2015年间属于慢速变化型；2015年-2020年和2020年-2023年均属于急剧变化型；2011年-2023年总体上看鄂尔多斯市土地利用变化是非常剧烈的。

3.2 光伏电站面积变化特征分析

光伏电站主要分为集中式光伏电站和分布式光伏电站，鄂尔多斯市的集中式光伏电站多建设

于荒漠、戈壁、荒山等空旷地区，分布式光伏电站则主要建设于建筑物的采光面（Feng等，2024）。图5对光伏电站的面积及增长率进行定量分析。从图中可以看出，2011-2023年间光伏电站持续扩张，增长率也在不断增大。光伏电站的占地面积增长率呈现先快速上升，然后降低的变化趋势。但不同时间段的增长幅度不同，其中在2015-2020年的增长率最大。光伏电站的建设是一个逐渐累积的过程（Lambin等，n.d.），每个阶段都为下一个阶段的成功奠定了基础，整个过程是逐步积累和演进的。因此光伏电站的增长率及面积变化随着政策的实施和落地在不断增长。

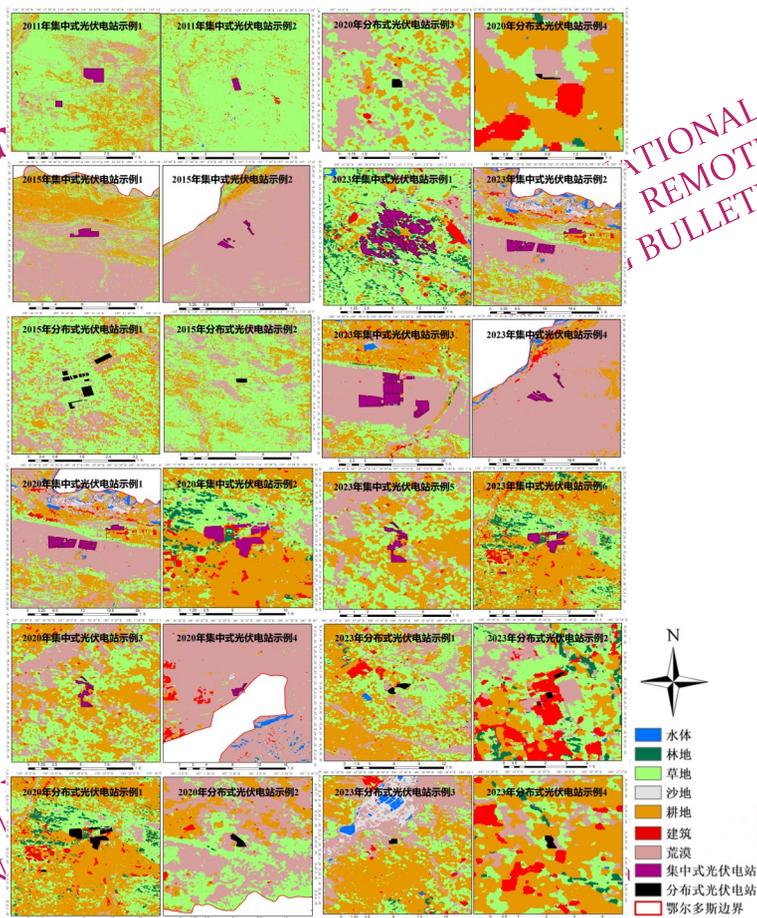


图3 2011年、2015年、2020年、2023年典型光伏电站建设区域目视解译结果。

Fig. 3 The results of visual interpretation of the typical construction areas of the photovoltaic power stations in 2011, 2015, 2020 and 2023

通过光伏电站对周围 GPP 的影响本文进一步确定鄂尔多斯市光伏电站的缓冲区范围。从图 6a 中可以看出, 随着光伏电站缓冲范围的增加, 2000 年-2023 年间的 GPP 平均值有着明显的变化。不同年份的 GPP 随着缓冲范围宽度的增加呈现对数函数变化。本文还比较了不同区域缓冲区宽度变化对 GPP 的影响结果总结规律。选择统一的悬崖点所在的缓冲范围宽度为最合适的宽度 (Li 等, 2019)。图中可以看出在缓冲区范围带宽为 5km 之前快速上升, 之后趋于平稳。最终本文依据 GPP 的变化确定了缓冲范围带宽的最合适数值 5km。

本文以 5km 作为缓冲范围制作了 2023 年四个典型区域的土地利用类型图, 从图 7 中可以看出, 光伏电站主要建设在荒漠、沙地和草地类型上。

3.3 光伏电站时空变化特征分析

本文通过高斯椭圆水平投影来进行鄂尔多斯

市光伏电站的空间变化分析。从时空分布上可以看出 (图 8), 2011 年-2023 年的高斯椭圆重心变化表示了鄂尔多斯市光伏电站的空间分布由西北部逐渐向东北部转移。椭圆面积逐渐增大说明鄂尔多斯市光伏电站建设范围逐年递增。椭圆的扁率逐渐下降, 表示光伏电站的分布范围越来越广, 因此分布的方向性逐渐下降。2011 年-2023 年间椭圆的短轴逐渐增大, 表示空间上光伏电站分布的离散程度增大, 分布范围越发广泛 (Quan 等, 2014)。

在鄂尔多斯市的四个典型区域内, 计算出的转移矩阵显示 (图 9) 光伏电站主要由荒漠、沙地和草地转化而来, 其中, 荒漠转化为光伏电站的情况最为显著, 是荒漠化治理策略之一。这种策略不仅有效生成可再生能源, 而且还能间接促进生态保护和土地恢复, 实现环境保护和能源开发的双重益处 (Ma 等, 2023)。

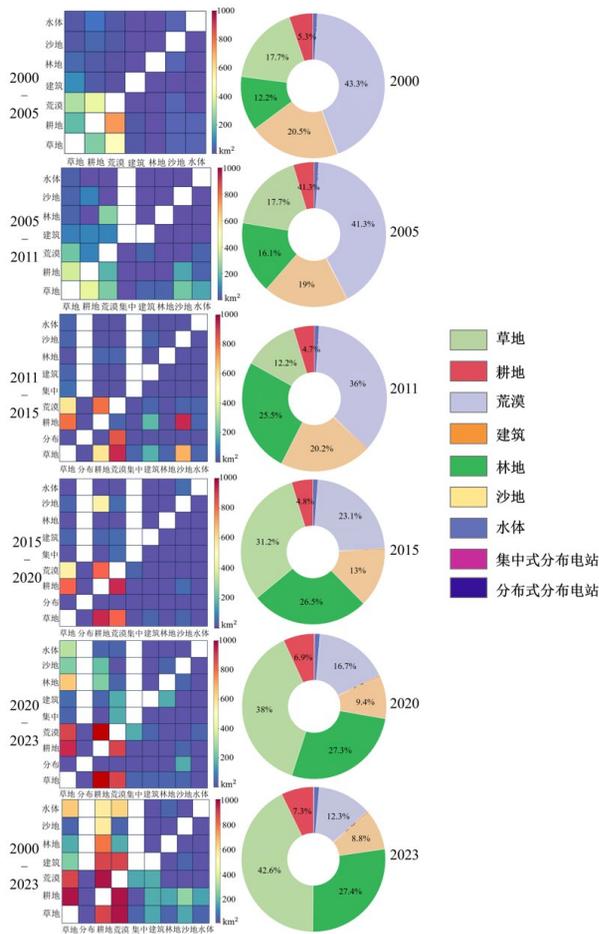


图4 2000年—2023年土地利用类型转移矩阵及环形图
Fig. 4 Land use type transfer matrix and rings from 2000–2023

表1 鄂尔多斯市不同时间段土地利用类型动态指数

Table 1 The dynamic attitude index of land use types in different time periods in Erdos

土地利用类型	不同时期的土地利用动态度%			
	2011– 2015	2015– 2020	2020– 2023	2011– 2023
水体	2.19	3.90	0.31	1.42
林地	0.75	20.50	15.11	30.56
草地	20.97	32.66	25.00	44.08
沙地	-7.16	-10.60	-6.53	-14.33
耕地	0.25	7.68	3.16	8.22
建筑	2.36	2.48	1.01	3.16
荒漠	-7.16	-20.67	-16.65	-45.07
集中式光伏电站	52.00	132.51	4.19	281.71
分布式光伏电站	/	0	31.25	/
综合动态度(%)	4.02	28.66	23.26	46.70

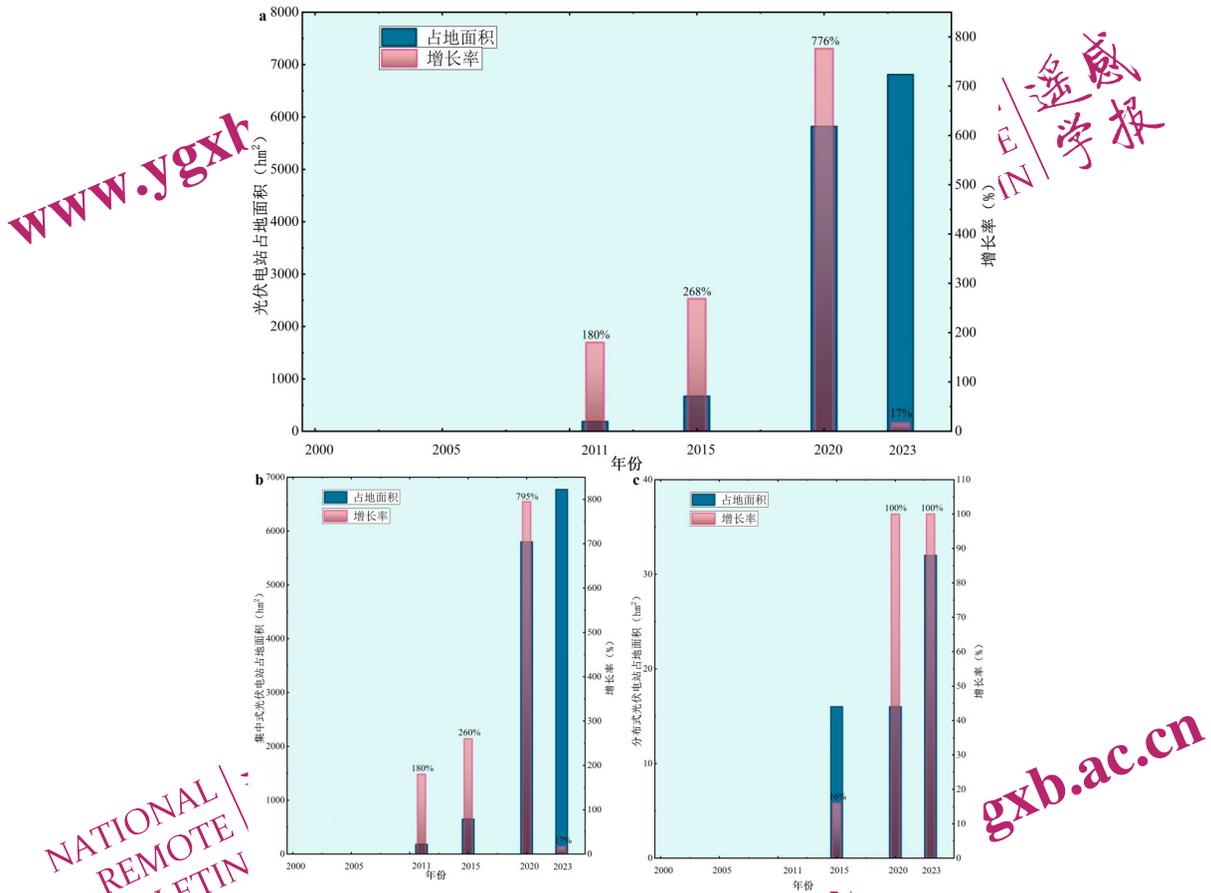


图5 (a)为鄂尔多斯市总体光伏电站历年面积变化及增长率柱状图;(b)为鄂尔多斯市集中式光伏电站历年面积变化及增长率柱状图;(c)为鄂尔多斯市分布式光伏电站历年面积变化及增长率柱状图

Fig. 5 (a) Historical area change and growth rate histogram of overall photovoltaic power stations in Erdos ; (b) Historical area change and growth rate histogram of centralized photovoltaic power stations in Erdos ; (c) Historical area change and growth rate histogram of distributed photovoltaic power stations in Erdos

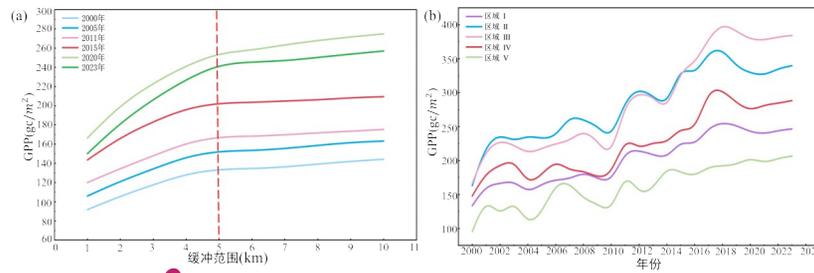


图6 (a)典型集中式光伏电站建设区①历年不同缓冲范围的GPP变化;(b)5个典型集中式光伏电站建设区缓冲范围5km内历年的GPP变化

Fig. 6 (a) GPP changes in different buffer ranges of typical centralized photovoltaic station construction zones ① over the years; (b) GPP changes within 5km of the buffer range of five typical centralized photovoltaic station construction zones over the years

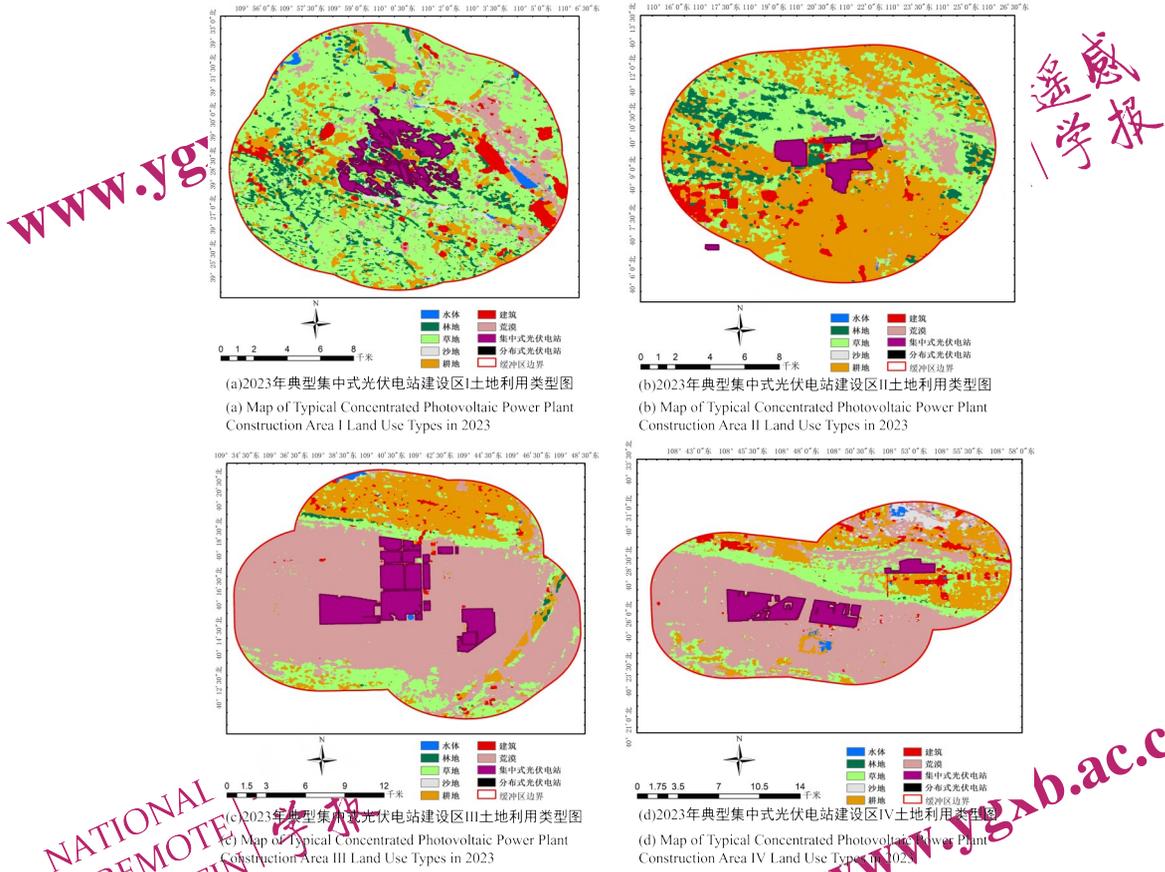


图7 四个典型光伏电站建设区5km缓冲范围内土地利用类型图

Fig. 7 Land use types within 5km buffer of four typical photovoltaic power station construction areas

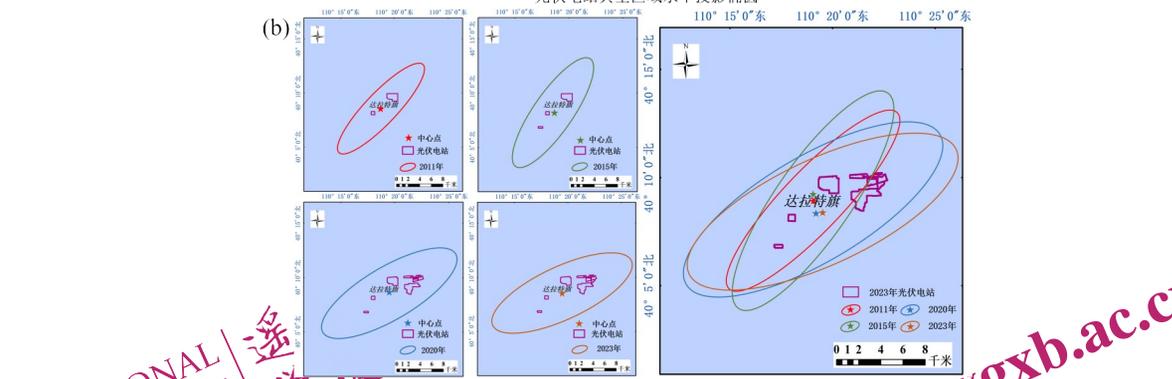
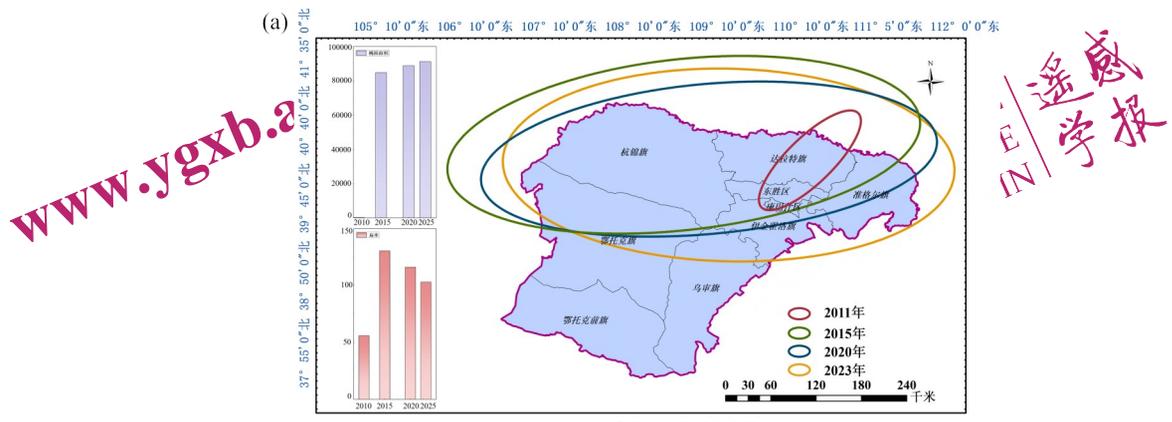
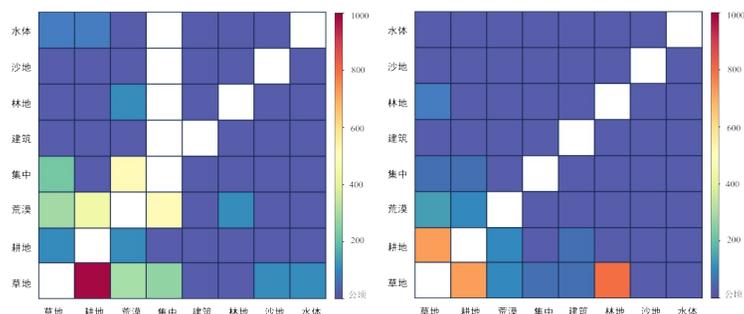
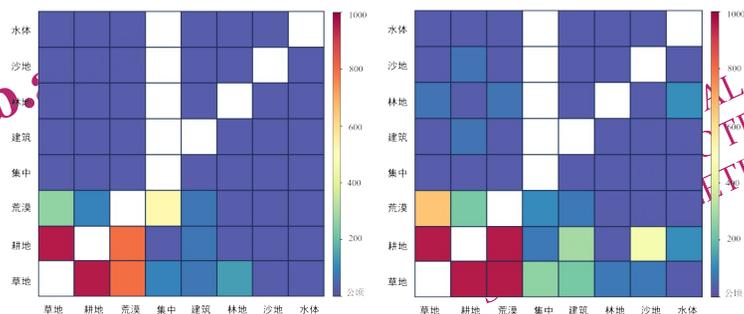


图8 (a) 2011年-2023年鄂尔多斯市光伏电站水平投影椭圆; (b) 典型区域2011年-2023年光伏电站水平投影椭圆
 Fig. 8 (a) Horizontal projection ellipse of photovoltaic stations in Erdos from 2011 to 2023; (b) Horizontal projection ellipse of photovoltaic stations in a typical region from 2011 to 2023



(a) 2020-2023年典型集中式光伏电站建设区I土地利用类型变化转移矩阵
 (b) Transfer matrix of land use type changes in typical centralised PV power plant construction area II from 2020 to 2023



(c) 2020-2023年典型集中式光伏电站建设区III土地利用类型变化转移矩阵
 (d) Transfer matrix of land use type changes in typical centralised PV power plant construction area IV from 2020 to 2023

图9 四个典型光伏电站建设区5km缓冲范围内土地利用类型转移矩阵

Fig. 9 Transfer matrix of land use types within 5km buffer of four typical photovoltaic power station construction areas

4 鄂尔多斯市光伏电站土地利用驱动因素分析及未来预测

4.1 光伏电站政策量化分析

鄂尔多斯市在政策方面给予太阳能发展以全面支持，为推动清洁能源产业的发展创造了有利条件（李玉波等，2023）。本文通过内容分析方法对鄂尔多斯市有关光伏电站建设的文本进行量化分析，结果如表2所示。各类政策工具的整体效力变化趋势基本一致，呈现逐年上升的趋势。三类政策工具中，命令控制型占比最大，其次为公众参与型，最后为市场激励型。政策总体变化在2020–2023年较为快速，可能是因为政策效力的提高会受到历史政策的累积效应影响。

表2 2011年–2023年三类政策的政策强度

Table 2 The policy intensity of the three types of policies in 2011–2023

年份	命令控制型	市场激励型	公众参与型
2011年	20.56	3.25	10.76
2015年	25.98	7.69	18.23
2020年	28.17	10.25	20.56
2023年	32.14	11.16	24.67

4.2 土地利用变化驱动因素分析

为了探究鄂尔多斯光伏电站建设区域土地利用变化的驱动因素，本文选择了12个关键驱动因素进行详细分析。这些因素包括自然因素和社会经济因素。其中，自然因素包括高程、坡度、年降水量、土壤温度、土壤湿度、土壤热通量、地表向下短波辐射以及风速；社会经济因素则包括GDP、人口以及政策。所有这些驱动因素的分析均基于2011年–2023年间的变化量，以确保研究结果能够真实反映这些因素对土地利用变化的影响。本文通过PLUS模型中随机森林进行分析，可以看到影响鄂尔多斯市土地利用变化的主要驱动因素为人口增长、地表温度、土壤热通量、政策及降水量。在自然因素方面，地表温度和土壤热通量是光伏电站建设考虑的重要指标。地表温度直接影响光伏板的发电效率和耐久性（Liu和Huo，2024），土壤热通量则影响地面的热环境从而影响光伏电站基础设施的稳定性和耐久性（田政卿等，2024）。合理的降水量还有助于维持光伏

电站周边植被的生长，有利于改善微气候，为光伏电站创造更好的运行环境（王祯等，2019）。在社会经济因素方面，人口增长影响土地利用规划和能源基础设施布局。因此，政府在制定土地使用政策和能源规划时，需要充分考虑人口增长因素，以确保能源供应的可持续性和土地资源的合理利用。此外，鄂尔多斯市政府在土地使用政策上为光伏电站建设提供了特别支持，优先将荒漠、沙地等低效利用地块分配给光伏项目，这不仅节约了耕地和生态敏感区，也显著降低了项目的土地成本（张弦等，2024）。

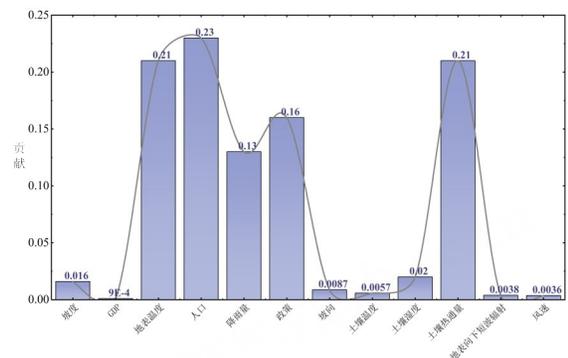


图10 各驱动因素对鄂尔多斯市土地利用变化的贡献程度
Fig. 10 Degree of contribution of each driver to land use change in Erdos

4.3 不同政策情景的土地利用趋势预测

本文基于前文制作的2000年–2023年的土地利用类型结果及12个驱动因素，应用PLUS模型，针对三种政策情景来预测鄂尔多斯市未来土地利用变化。为了训练和验证该模型，本文选取了2011年、2015年、2020年及2023年的土地利用数据作为关键的模型训练集。为了实现精准的模拟与预测，本文采用2011年的土地利用数据作为PLUS模型的初始状态（Liang等，2021）。通过迭代学习和参数调整，模型逐渐优化以适应鄂尔多斯市的土地利用动态变化。最终，本文利用PLUS模型预测2030年的三种政策情景下的土地利用情况，为鄂尔多斯市的土地规划、资源管理和环境保护提供科学依据。表3为2011年、2015年、2020年、2023年和2030年三种政策情境下鄂尔多斯市各土地利用类型栅格数。设置分辨率为200m，完成2030年土地利用数据预测（图11）。

三种政策情景下鄂尔多斯市的建筑、林地、水体、耕地、草地和光伏电站面积均呈现增加的

趋势。例如在政策情景C条件下鄂尔多斯市2030年建筑、林地、水体、耕地、草地和光伏电站面积分别为128.84km²、95.63km²、37.97km²、1881.73km²、1762.16km²、6.41km²。与2023年相比,荒漠和沙地分别减少了173.57km²、1.91km²;其余土地利用类型面积均增加,其中光伏电站增加约2.46 km²。

表3 2011年、2015年、2020年、2023年和2030年鄂尔多斯市各土地利用类型栅格数

Table 3 Number of rasters for each land use type in Ordos in 2011, 2015, 2020, 2023 and 2030

政策情景	年份	建筑	林地	水体	沙地	耕地	草地	荒漠	光伏电站
	2011	3343	289	2657	7779	376383	464499	395486	32
/	2015	8805	8851	2926	9392	375866	479096	362875	95
	2020	15989	15998	3772	8858	408856	468339	325307	838
	2023	29644	20977	8165	5936	440674	432626	308802	987
A	2030	30564	21854	9245	5569	485410	422561	271541	1065
B	2030	30129	22418	9664	5622	478431	413430	286753	1364
C	2030	32209	23407	9493	5258	470432	440541	265411	1602

NATIONAL
REMOTE
SENSING BULLETIN | 遥感学报

www.ygxb.ac.cn

www.ygxb.ac.cn

NATIONAL
REMOTE
SENSING BULLETIN | 遥感学报

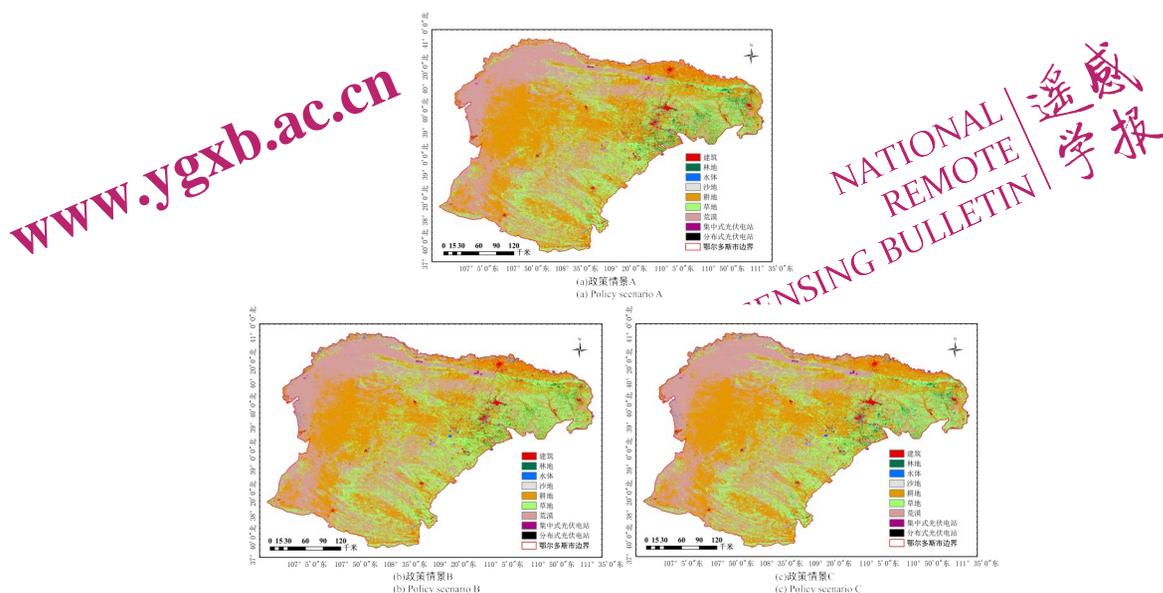


图 11 基于 PLUS 模型预测的三种政策情景下的 2030 年鄂尔多斯市土地利用类型图

Fig. 11 Map of land use types based on PLUS model projections for three policy scenarios for Erdos in 2030

5 结论

本文详细分析了 2000 年-2023 年鄂尔多斯市整体及光伏电站建设范围内的土地利用时空变化特征，并基于 PLUS 模型对 2030 年不同政策情景下的土地利用情况进行预测。通过本研究，初步得出了以下创新性结论：

(1) 鄂尔多斯市在过去 5 个时期的土地利用变化过程中，主要表现出较为一致的去荒漠化治理趋势。本文首次揭示了政策情景对荒漠、沙地向林地、草地及耕地转化的影响程度差异，其中 2000 年-2011 年主要的土地利用转换模式为荒漠转林地和草地。2011 年后光伏电站的建设逐渐改变了这一格局，推动了部分土地向光伏电站建设基地转化。这为理解政策导向在区域土地利用转变中的关键作用提供了新的依据。

(2) 在光伏电站的时空变化方面，本文首次对鄂尔多斯市 2011 年-2023 年光伏电站 5km 缓冲区范围内的土地利用变化进行了详细分析，结果显示光伏电站的扩张速度在 2015 年-2020 年达到了顶峰，并且土地利用类型的转化由荒漠和沙地逐渐向草地过渡。同时，光伏电站的空间扩展呈现出从西北部向东北部的明显转移趋势。

(3) 通过对鄂尔多斯市光伏电站建设区域土地利用变化的驱动因素分析，本文首次明确了人口增长、地表温度、土壤热通量、政策和降水量

等多种因素之间复杂的相互作用机制。基于 PLUS 模型的预测结果，文本对 2030 年鄂尔多斯市土地利用的未来格局进行了创新性分析，首次对不同政策情景下的光伏电站扩张及其对区域土地利用的影响进行了量化。预测表明，无论在何种情景下，荒漠和沙地面积将继续减少，而林地、草地及建设用地，特别是光伏电站建设用地的面积将有所增加。

总体而言，本文在光伏电站建设对区域土地利用变化的驱动机制及未来土地利用情景预测方面作出了重要贡献，填补了鄂尔多斯市相关领域研究的空白，并为未来光伏发展与土地管理政策的制定提供了新的研究支持。

志 谢 作者感谢中国矿业大学（北京）内蒙古研究院、北京师范大学遥感科学国家重点实验室和匿名审稿人的支持，感谢他们帮助完善本稿件。

参考文献 (References)

- Bian Z H, Ma X X, Gong L C et al. Land Use Prediction Based on CLUE-S Model Under Different Non-spatial Simulation Methods: A Case Study of the Qinhuai River Watershed. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(2): 252-258 (卞子浩, 马小雪, 龚来存, 等. 不同非空间模拟方法下 CLUE-S 模型土地利用预测——以秦淮河流域为例[J]. *地理科学*, 2017, 37(2): 252-258 [DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2017.02.011])

- Chen, N, Xin, C, Zhang, B, Xin, S., Tang, D, Chen, H, Ma, X, 2023. Contribution of multi-objective land use optimization to carbon neutrality: A case study of Northwest China. *Ecological Indicators* 157, 111219. [DOI:10.1016/j.ecolind.2023.111219]
- Du H L. 2022. Practical Exploration of Ordos to Promote Green and Innovative Development of Energy Industry. *New Economics Digest*, 2022(04):50-54 (杜汇良. 鄂尔多斯推进能源产业绿色创新发展的实践探索. *新经济导刊*, 2022(04):50-54.)
- Feng, Q, Niu, B, Ren, Y, Su, S, Wang, J, Shi, H, Yang, J, Han, M, 2024. A 10-m national-scale map of ground-mounted photovoltaic power stations in China of 2020. *Sci Data* 11, 198. [DOI:10.1038/s41597-024-02994-x]
- Guo G J. 2020. A Study of the Impact of Local Government Environmental Policies on Regional Eco-efficiency. East China Normal University (郭高晶. 地方政府环境政策对区域生态效率的影响研究. 华东师范大学, 2020.)
- Hai K, Wang S Y, Tu P, Yang R X, Ma Y X, Liang J Z, Liu W H and Wu L L. 2022. Spatio-temporal patterns and driving forces of recent (1992—2015) land cover change in countries along the Belt and Road Initiative. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(6): 1220-1235 (海凯, 王思远, 涂平, 杨瑞霞, 马元旭, 梁娟珠, 刘卫华, 吴林霖. 2022. “一带一路”沿线国家 1992 年—2015 年土地覆盖变化的时空格局及其驱动力分析. *遥感学报*, 26(6): 1220-1235 [DOI:10.11834/jrs.20219201])
- Hao Q M. 2014. Study on the Current Situation and Development of Solar Energy Application in Erdos City. *Tech Entrepreneur*, 2014(03):151-152 (郝巧梅. 鄂尔多斯市太阳能应用现状与发展的研究. *科技创业家*, 2014(03):151-152.)
- Hazra, A, McNally, A, Slinksi, K, Arsenault, K.R, Shukla, S, Getirana, A, Jacob, J.P, Sarmiento, D.P, Peters-Lidard, C, Kumar, S.V., Koster, R.D., 2023. NASA's NMME-based S2S hydrologic forecast system for food insecurity early warning in southern Africa. *Journal of Hydrology* 617, 129005. [DOI:10.1016/j.jhydrol.2022.129005]
- Jiang Hou, Yao L, Bai Y, Zhou C H. XXXX. Assessment of rooftop photovoltaic power generation potentials using multi-source remote sensing data. *National Remote Sensing Bulletin*, XX(XX): 1-13 (姜侯, 姚凌, 柏永青, 周成虎. XXXX. 集成多源遥感数据的屋顶光伏发电潜力评估. *遥感学报*, XX(XX): 1-13 [DOI: 10.11834/jrs.20243440])
- Karra, K, Kontgis, C, Statman, Weil, Z, Mazzariello, J.C, Mathis, M, Brumby, S.P, 2021. Global land use / land cover with Sentinel 2 and deep learning, in: 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. Presented at the IGARSS 2021 - 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, Brussels, Belgium, pp. 4704 - 4707. [DOI:10.1109/IGARSS47720.2021.9553499]
- Lambin E.F, Baulies, X, Bockstael, N, Fischer, G, Krug, T, Leemans, R, Moran, E.F, Rindfuss, R.R, Sato, Y, Skole, D, LiB.L.T., VogelC., n. d. A core project of the International Geosphere-Biosphere Programme and the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change.
- Li, K, Chen, Y, Wang, M, Gong, A, 2019. Spatial-temporal variations of surface urban heat island intensity induced by different definitions of rural extents in China. *Science of The Total Environment* 669, 229 - 247. [DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.03.100]
- Li Y B. 2023. Ordos Presses "Fast-Forward Button" for Energy Transformation. *Workers Daily News*, 2023-11-15(004) (李玉波. 鄂尔多斯按下能源转型“快进键”. *工人日报*, 2023-11-15(004) [DOI: 10.28277/n.cnki.ngrb.2023.005532])
- Liang J T, Chen C, Sun W W, Yang G, Liu Z S and Zhang Z L. 2023. Spatio-temporal land use/cover change dynamics in Hangzhou Bay, China, using long-term Landsat time series and GEE platform. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(6): 1480-1495 (梁锦涛, 陈超, 孙伟伟, 杨刚, 刘志松, 张自力. 2023. 长时序 Landsat 和 GEE 云平台的杭州湾土地利用/覆被变化时空格局演变. *遥感学报*, 27(6): 1480-1495 [DOI: 10.11834/jrs.20232614])
- Liang, X, Guan, Q, Clarke K.C, Liu, S, Wang, B, Yao, Y, 2021. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China. *Computers, Environment and Urban Systems* 85, 101569. [DOI:10.1016/j.compenvurb.2020.101569]
- Liu B X, Huang Y H, Fu J Y. 2012. Analysis of Changes in Spatial and Temporal Land Use Patterns and Driving Forces in Tianjin Port Area. *Journal of Earth Information Science*, 14(02):270-278 (刘保晓, 黄耀欢, 付晶莹, 等. 天津港区土地利用时空格局变化与驱动力分析. *地球信息科学学报*, 2012, 14(02):270-278.)
- Liu, B, Huo, X, 2024. Prediction of Photovoltaic power generation and analyzing of carbon emission reduction capacity in China. *Renewable Energy* 222, 119967. [DOI:10.1016/j.renene.2024.119967]
- Liu J Y, dls.iogac.on, Bu H A S E. 2000. A Study on the Spatial and Temporal Characteristics of Modern Processes of Land-use Change in China -- Based on Satellite Remote Sensing Data (刘纪远, dls.iogac.on, 布和敖斯尔. 中国土地利用变化现代过程时空特征的研究——基于卫星遥感数据. *第四纪研究*, 2000(03): 229-239.)
- Long R, Cui W, Li Q, 2017. The Evolution and Effect Evaluation of Photovoltaic Industry Policy in China. *Sustainability* 9, 2147. [DOI:10.3390/su9122147]
- Ma, S, Liu, J, Zhang, P, Tu, X, Zhou, J, Liu, Y, Zheng, Y, 2023. Characterizing the Development of Photovoltaic Power Stations and Their Impacts on Vegetation Conditions, from Landsat Time Series during 1990 - 2022. *Remote Sensing* 15, 3401. [DOI:10.3390/rs15123101]
- Prudente, V.H.R, Skakun, S, Oldoni, L.V, A. M. Xaud, H, Xaud, M.R, Adami, M, Sanches, J.D, 2022. Multisensor approach to land use and land cover mapping in Brazilian Amazon. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 189, 95 - 109. [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2022.04.025]
- Qu Z, Yang S C, Xiao J H. 2024. Analysis of the Current Situation and Potential of Photovoltaic Power Station Construction in Northwest China under the Background of Double Carbon. *Arid Zone Resources and Environment*, 38(02):20-26 (屈准, 杨肃昌, 肖建华. 双碳背景下中国西北地区光伏电站建设现状与潜力分析. *干旱*

- 区资源与环境,2024,38(02):20-26.[DOI:10.13448/j.cnki.jalre.2024.025]]
- Quan, J, Chen, Y, Zhan, W, Wang, J, You, G, Li, Wang, M, 2014. Multi-temporal trajectory of the urban heat island centroid in Beijing, China based on a Gaussian volume model. *Remote Sensing of Environment*, 149, 33–46. [DOI:10.1016/j.rse.2014.03.037]
- Ren H B, Zhu W Z. 2023. Erdos: Break out of the New Energy and New Materials Industry Development New Road. *Economic Reference News*,2023-07-04(006) (任会斌,朱文哲. 鄂尔多斯:闯出新能源新材料产业发展新路. *经济参考报*,2023-07-04(006). [DOI:10.28419/n.cnki.njjck.2023.002297])
- Tang, X, Woodcock, C.E, Olofsson, P, Hutyrá, L.R, 2021. Spatiotemporal assessment of land use/land cover change and associated carbon emissions and uptake in the Mekong River Basin. *Remote Sensing of Environment* 256, 112336. [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112336]
- Tian Z Q, Z Y, L X.2024. Impacts of Photovoltaic Power Station Construction on Terrestrial Ecosystems: Research Progress and Prospects. *Environmental Science*,45(01):239-247 (田政卿,张勇,刘向,等. 光伏电站建设对陆地生态环境的影响:研究进展与展望. *环境科学*, 2024, 45(01): 239-247. [DOI: 10.13227/j. hjkx. 202301152])
- Wang B J, Yu P.2022. Assessment of Policy Effectiveness and Efficacy in the Photovoltaic Industry—A Quantitative Analysis Based on China's 2010-2020 Policy Texts. *Soft Sciences*,36(08):9-16. (王帮俊,喻攀. 光伏产业政策效力和效果评估——基于中国2010-2020年政策文本的量化分析. *软科学*,2022,36(08):9-16.[DOI: 10.13956/j.ss.1001-8409.2022.08.02])
- Wang Z Y, Wang J, Gao Y.2019. Impact of photovoltaic power station construction on the ecological environment in sandy areas. *Soil and Water Conservation Bulletin*,39(01):191-196 (王祯仪,汪季,高永,等. 光伏电站建设对沙区生态环境的影响. *水土保持通报*, 2019,39(01):191-196.[DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.01.031])
- Xu X C, Li B J, Liu X P, Li X and Shi Q. 2021. Mapping annual global land cover changes at a 30 m resolution from 2000 to 2015. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(9) : 1896-1916 (许晓聪,李冰洁,刘小平,黎曷,石茜. 2021. 全球2000年—2015年30 m分辨率逐年土地覆盖制图. *遥感学报*, 25(9) : 1896-1916[DOI: 10.11834/jrs.20211261])
- Yu, Z, Zhao, M, Gao, Y, Wang, T, Zhao, Z, Wang, S, 2023. Multiscenario Simulation and Prediction of Land Use in HuaiBei City Based on CLUE-S and PLUS Models. *Applied Sciences* 13, 7142. [DOI:10.3390/app13127142]
- Zhang, X, Liu, L, Chen, X, Gao, Y, Xie, S, Mi, J, 2020. GLC_FCS30: Global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery. [DOI:10.5194/essd-2020-182]
- Zhang X, Wang M P, Shi W.2024. Scenario Aanalysis of Photovoltaic Power Pathways in the Ordos Region Under the Carbon Neutrality Goal. *Solar Energy*2024(04):20-28. (张弦,王明培,史伟. 碳中和目标下鄂尔多斯地区的光伏发电路径情景分析. *太阳能*,2024(04):20-28[DOI:10.19911/j.1003-0417.tyn2023042704])
- Zhu J F, Zhou Y, Wang S X, Wang L T, Liu W L, Li H T and Mei J J. 2019. Analysis of changes of Baiyangdian wetland from 1975 to 2018 based on remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 23(5): 971–986 (朱金峰,周艺,王世新,王丽涛,刘文亮,李海涛,梅建军. 2019. 1975年—2018年白洋淀湿地变化分析. *遥感学报*, 23(5): 971–986[DOI: 10.11834/jrs.20198379])

Long-term Analysis of Land Use Dynamics and Scenario Simulation for Photovoltaic Power Stations in Ordos

GUO Qiyu¹, LI Kangning¹, CHEN Yunhao², JIANG Jinbao^{1*}

1.Inner Mongolia Research Institute of China University of Mining and Technology-Beijing, Ordos 010300, China;

2.State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: “Objective” Photovoltaic power stations, which generate electricity using solar radiation, are an important form of clean energy. However, current research generally lacks in-depth investigation into the long-term land use evolution of photovoltaic power stations and has not systematically predicted photovoltaic construction under different policy scenarios. Therefore, it is of significant scientific importance to thoroughly explore the changes in area, type conversion, and spatial distribution characteristics of photovoltaic power stations in Ordos from 2000 to 2023, and on this basis, to predict future land use types under different policy scenarios. “Methodology” To achieve these objectives, this study utilized visual interpretation techniques on satellite imagery from Landsat 5 and GF2, covering the years 2000 to 2023. From these images, land use type maps were generated, which enabled us to track changes in land use over time. Specifically, we examined the spatiotemporal characteristics of photovoltaic power stations, conducting an analysis every five years to determine shifts in spatial patterns. This was done using Gaussian projection ellipses, a method that allowed us to capture the spatial distribution trends of these stations. In addition to this spatial analysis, we employed the PLUS (Patch-generating Land Use Simulation) model, which integrates both natural and socio-economic driving factors to predict future land use patterns under different policy conditions. Key driving factors included population growth, surface temperature, soil heat flux, precipitation, and changes in policy, which are critical elements in understanding the

evolution of photovoltaic stations over time and their future development. "Results" The findings of this study are multifaceted and provide valuable insights into the evolution of photovoltaic power stations in Ordos. (1) The overall spatial pattern of land use remained relatively consistent between 2000 and 2011, as well as between 2011 and 2023. However, a noticeable shift occurred starting in 2011, when certain land types, such as desert sand and grassland, began to be converted into photovoltaic power station sites. (2) From 2011 to 2023, there was a clear shift in the spatial distribution of these stations, with the main area of photovoltaic development moving from the northwest to the northeast of Ordos. Additionally, the types of land being used for these constructions evolved, with an increasing trend of converting grassland areas for photovoltaic station use. (3) The analysis using the PLUS model revealed that several key factors were driving these land use changes, including population growth, surface temperature, soil heat flux, precipitation, and, most notably, policy decisions. Policy, in particular, emerged as one of the strongest determinants in the development and expansion of photovoltaic stations in the region. (4) Projections for land use changes in 2030 under three different policy scenarios show that, regardless of the specific scenario, areas allocated to buildings, forests, water bodies, arable land, grassland, and photovoltaic power stations will likely continue to expand. These findings provide important insights into the future changes of photovoltaic power stations in Ordos. "Conclusion" This study sheds light on the spatial and temporal dynamics of photovoltaic power station development in Ordos, highlighting the complex interplay between population growth, environmental factors, and policy decisions in shaping land use changes. The results not only demonstrate how land use has evolved over the past two decades but also provide predictive insights into how it may continue to change by 2030 under different policy scenarios.

Key words: Photovoltaic power stations, spatial pattern, spatio-temporal variability, driving factors, scenario simulation

Supported by Supported by Key Research and Development Program of Ordos (YF20232306)

NATIONAL
REMOTE
SENSING BULLETIN | 遥感学报

www.ygxb.ac.cn

www.ygxb.ac.cn

NATIONAL
REMOTE
SENSING BULLETIN | 遥感学报